

การปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุหินเวียนโดยใช้จีโอโพลิเมอร์ จากเถ้าชานอ้อย สำหรับชั้นพื้นทาง

Stabilization of Recycle Material by Geopolymer from Bagasse Ash for Base

ติณณภพ พูลทวี (Tinnaphop Pooltawee)^{1*} รัตมณี นันทสาร (Ratamanee Nuntasarn)**

(Received: March 8, 2022; Revised: June 7, 2022; Accepted: June 21, 2022)

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวัสดุมวลรวมในธรรมชาติที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นทางลดน้อยลง แต่ในทางกลับกันขยะจากการรีไซเคิลถนนกลับมีปริมาณมากขึ้นและเกิดปัญหาในการกำจัดวัสดุเหล่านี้ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำวัสดุชั้นพื้นทางเดิมประกอบด้วย วัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิล และ วัสดุหินคลุกรีไซเคิลจากชั้นพื้นทางของถนน ปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าชานอ้อย โดยเทียบกับมาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวง ทล.-ม.203/2556 การศึกษานี้จะทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการด้วย การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่า และการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังของวัสดุในอัตราส่วน RAP:RCR เท่ากับ 0:100 50:50 และ 100:0 ที่ปรับปรุงด้วยเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วน 5, 10, 15, 20 และ 25% ซึ่งกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมกับโซเดียมซิลิเกตไฮเดรต ที่อัตราส่วน 50:50 โดยมีความเข้มข้น 8, 10 และ 12 โมลาร์ และศึกษาการพัฒนาการกำลังของวัสดุที่ระยะเวลาการบ่ม 7 ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลง และเมื่อปริมาณเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และจากการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียวพบว่า กำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ

ABSTRACT

At present, the reduction of natural aggregates causes the high cost of pavement materials. However, the amount of road demolition is increasing, which is a cause of waste disposal. Therefore, this research has an idea to use recycled asphalt pavement and recycled crushed rock to improve the quality by geopolymer from bagasse ash as a pavement material according to the standard of cement-mixed rock pavement of the Department of Highways Lor. -M. 203/2013. This study investigated the modified compaction, unconfined compression, and workability tests. Three proportions of recycled asphalt concrete and recycled crushed stone, 0:100, 50:50, and 100:0, were studied. Moreover, the bagasse ash content in this study was varied from 5, 10, 15, 20, and 25%

¹Corresponding author: Tinnaphop@kkumail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

and catalyzed the reaction by using Sodium hydroxide mixed with sodium silicate hydrate at a ratio of 50:50. Three concentrations of Sodium hydroxide solutions were studied, which were 8, 10, and 12 molar. The samples were cured for seven days before testing. The compaction results showed that the maximum dry density decreased with an increase in bagasse ash. Nevertheless, the optimum alkaline liquid content increased with an increase in bagasse ash. The unconfined compressive strength significantly increased with NaOH concentration.

คำสำคัญ: วัสดุรีไซเคิล จีโอโพลิเมอร์ เถ้าขานอ้อย

Keywords: Recycle materials, Geopolymer, Bagasse ash

บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการซ่อมแซมและขยายเครือข่ายคมนาคมขนส่งทางถนนเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ส่วนใหญ่การออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) นั้นชั้นพื้นทาง (Base) จะนิยมใช้หินคลุก (Crushed Rock) ส่งผลให้วัสดุมวลรวมในธรรมชาติที่นำมาใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างชั้นพื้นทางและรองพื้นทางลดน้อยลง แต่ในทางกลับการชะล้างจากการรื้อถอนถนนกลับมีปริมาณมากขึ้นและเกิดปัญหาในการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งจากการก่อสร้างเหล่านี้ [1] ได้ทำการศึกษาการใช้วัสดุชั้นพื้นทางเดิมรีไซเคิล (Reclaimed Pavement Material, RPM) ผสมกับเถ้าลอย Class C สำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ผลการวิจัยพบว่าปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นค่าซีบีอาร์ (California Bearing Ratio, CBR) จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และค่า CBR และ ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, M_R) ของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยเถ้าลอยมีค่าสูงกว่าวัสดุที่ไม่ได้ปรับปรุง

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำวัสดุชั้นพื้นทางเดิม ได้แก่ วัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement, RAP) และวัสดุหินคลุกรีไซเคิลจากชั้นพื้นทางของถนน (Recycled Crush Rock, RCR) ปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ เพื่อลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและเป็นการพัฒนาถนนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [2] ได้ประเมินคุณสมบัติด้านกำลังของดินลูกรังที่ปรับปรุงความเสถียรด้วยการผสมแอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิล (RAP) และเถ้าขานอ้อย (BA) พบว่าการผสม RAP ช่วยลดความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และเพิ่มความหนาแน่นสูงสุดแห้ง (MDD) แต่เมื่อปริมาณเถ้าขานอ้อย (BA) มากกว่า 4% MDD จะมีค่าลดลง และค่า UCS และค่า CBR เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าขานอ้อย (BA)

โดยการศึกษาจะทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-RAY FLUORESCENCE (XRF) ส่วนการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมจะประกอบด้วย การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) และการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compression Test) เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับใช้มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวง ทล.-ม.203/2556 เป็นเกณฑ์ในการประเมิน [3] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของดินอ่อนด้วยเถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash, BA) กระตุ้นปฏิกิริยาด้วย NaOH และ Na_2SiO_3 ผลการวิจัยพบว่าค่ากำลังรับแรงอัด UCS สูงสุด เมื่อใช้ส่วนผสมเถ้าขานอ้อย 25 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ 12 โมลาร์

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างวัสดุหินเวียนจากแอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิล และวัสดุหินคลุกรีไซเคิล ปรับปรุงคุณภาพด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อย สำหรับใช้เป็นชั้นพื้นทาง ของโครงสร้างถนนแบบยืดหยุ่น

ขอบเขตของการศึกษา

1) วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ประกอบด้วย แอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิล, วัสดุหินคลุกรีไซเคิลจากชั้นพื้นทางของถนน และเถ้าขานอ้อยที่เหลือทิ้งจากการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาล

2) อัตราส่วนผสมในการศึกษา อัตราส่วนผสมของมวลรวมแอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิลกับวัสดุหินคลุกรีไซเคิลเท่ากับ 100:0, 50:50, และ 0:100 โดยมีปริมาณส่วนผสมของเถ้าขานอ้อย อยู่ที่ 0% 5% 10% 15% และ 20% และสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline Activator) ประกอบด้วยส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3$) ที่ 50:50 และความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 8, 10 และ 12 โมลาร์

3) การทดสอบและวิเคราะห์ผล การหาขนาดผลของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาตามมาตรฐานการหมนเวียนวัสดุชั้นทางของกรมทางหลวง และการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ใช้มาตรฐานพื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ของกรมทางหลวง ทล.ม.203/2556 เป็นเกณฑ์ในการประเมิน โดยศึกษาการพัฒนาการที่ระยะเวลากบ่ม 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) และศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยการทดสอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-RAY FLUORESCENCE

วิธีการดำเนินวิจัย

การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ขั้นตอนการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐานกรมทางหลวง การทดลองที่ ทล.ท. 108/2517

1) จัดเตรียมตัวอย่างวัสดุหินเวียน ที่อัตราส่วนผสมของมวลรวมแอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิลกับวัสดุหินคลุกรีไซเคิล RAP:RCR เท่ากับ 100:0, 50:50 และ 0:100, ปริมาณเถ้าขานอ้อยที่ 0% 5% 10% 15% และ 20% และสารละลายอัลคาไลน์ $\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3$ ที่ 50:50 ความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 8, 10 และ 12 โมลาร์ ที่ความหนาแน่น -3%OLC, OLC และ +3%OLC ตามอัตราส่วนผสมที่เตรียมไว้

2) นำตัวอย่างที่เตรียมไว้เข้าเครื่องผสม โดยนำเถ้าขานอ้อยใส่แล้วเติมสารละลาย NaOH คลุกเคล้ากัน 5 นาที เสร็จแล้วจึงนำวัสดุหินเวียนใส่ คลุกเคล้ากันอีก 3 นาที สุดท้ายเติมสารละลาย Na_2SiO_3 แล้วคลุกเคล้าอีก 2 นาที

3) นำตัวอย่างที่ผสมเสร็จแล้วออกจากเครื่องผสม แบ่งตัวอย่างลงในแบบซึ่งมีปลอกสวมเรียบร้อยแล้ว โดยประมาณให้วัสดุแต่ละชั้น เมื่อบดทับแล้วมีความสูงประมาณ 1 ใน 5 ของแบบ

4) ทำการบดทับโดยค้อน จำนวน 56 ครั้ง

5) ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่ทำการบดทับแล้วเป็นชั้นๆ จำนวน 5 ชั้น

6) ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดแต่งหน้าให้เรียบเท่ากับระดับตอนบนของแบบ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

7) ในขณะเดียวกับที่ทำการบดทับตัวอย่างในแบบ ให้นำวัสดุใส่กระป๋องเพื่อนำไปทดลองหาปริมาณน้ำในวัสดุด้วย

การทดสอบตามมาตรฐานการหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว

ขั้นทดสอบตามมาตรฐานการหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว ตามมาตรฐานกรมทางหลวง การทดลองที่ ทล.-ท. 105/2515

1) จัดเตรียมตัวอย่างวัสดุหินเวียน ที่อัตราส่วนผสมของมวลรวมแอสฟัลท์คอนกรีตริโซเคลกับวัสดุหินคลุกริโซเคล RAP:RCR เท่ากับ 100:0, 50:50 และ 0:100, ปริมาณเถ้าขานอ้อยที่ 0% 5% 10% 15% และ 20% และ สารละลายอัลคาไลน์ NaOH : Na_2SiO_3 ที่ 50:50 ความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 8, 10 และ 12 โมลาร์ ที่ความหนาแน่น -3%OLC, OLC และ +3%OLC ตามอัตราส่วนผสมที่เตรียมไว้

2) นำตัวอย่างที่เตรียมไว้เข้าเครื่องผสม โดยนำเถ้าขานอ้อยใส่แล้วเติมสารละลาย NaOH คลุกเคล้า กัน 5 นาที เสร็จแล้วจึงนำวัสดุหินเวียนใส่ คลุกเคล้ากันอีก 3 นาที สุดท้ายเติมสารละลาย Na_2SiO_3 แล้วคลุกเคล้าอีก 2 นาที

3) นำตัวอย่างที่ผสมเสร็จแล้ว มาบดอัดลงในโมลด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร โดยแบ่งตัวอย่างเป็น 2 ชั้น และบ่มตัวอย่าง 7 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่บ่มครบ 7 วันแล้ว ไปทดสอบด้วยวิธีอัดแกนเดียว

ผลการวิจัย

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

1) (ตารางที่ 1) (ภาพที่ 1) ผลการทดสอบขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า วัสดุริโซเคลทั้งสองชนิดได้แก่แอสฟัลท์คอนกรีตริโซเคลและหินคลุกริโซเคลมีขนาดเม็ดคละกัณฑ์ (Well Graded) เนื่องจากมีค่า C_u มากกว่า 4 และมีค่า C_c ระหว่าง 1 ถึง 3 และผลจากค่าความสึกกร่อนของวัสดุพบว่าวัสดุหินคลุกริโซเคลมีค่าความสึกกร่อนมากกว่าวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตริโซเคล ซึ่งค่าความสึกกร่อนนี้ผ่านตามมาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ เนื่องจากมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 40 ในส่วนของค่าถ่วงจำเพาะพบว่าวัสดุหินคลุกริโซเคลมีค่าถ่วงจำเพาะใกล้เคียงวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตริโซเคล และค่าพิกต์เหลวพบว่าวัสดุหินคลุกริโซเคลมีค่าพิกต์เหลวมากกว่าวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตริโซเคล

2) (ตารางที่ 2) จากผลการทดสอบ XRF พบว่า วัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตริโซเคล มีปริมาณ Al_2O_3 และ SiO_2 ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา Polymerization น้อยที่สุด จากวัสดุตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา Polymerization ได้แก่ วัสดุหินคลุกริโซเคล เนื่องจากปริมาณ Al_2O_3 และ SiO_2 มากที่สุด ส่วนเถ้าขานอ้อยมีปริมาณของ SiO_2 สูง เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาในการสังเคราะห์วัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

1) (ภาพที่ 2) ผลการทดสอบของตัวอย่าง 100%RCR ผสมด้วยเถ้าขานอ้อยและสารละลายอัลคาไลน์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ พบว่าปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสม มีค่าเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของเถ้าขานอ้อย แต่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดผกผันกับเปอร์เซ็นต์ของเถ้าขานอ้อย กล่าวคือความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์เถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น

(ตารางที่ 3) ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณสารละลายที่เหมาะสมของแต่ละส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด มีค่ามากที่สุดเมื่อปริมาณเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ คือมีค่าเท่ากับ 2.20 กรัม/ซม.³ และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อปริมาณเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ คือมีค่าเท่ากับ 1.91 กรัม/ซม.³

(ภาพที่ 3) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าขานอ้อยกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดพบว่าที่ปริมาณเถ้า 0 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน และหลังจากปริมาณเถ้า 5 เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าลดลงเป็นกราฟเส้นตรง โดยมีสมการเส้นตรง $y = 0.0156x + 2.2323$ และค่า $R^2 = 0.9557$ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าขานอ้อยกับปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสมพบว่าปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง โดยมีสมการเส้นตรง $y = 0.5843x + 6.3027$ และค่า $R^2 = 0.9941$

(ภาพที่ 4) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaOH กับปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสมและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaOH กับความหนาแน่นแห้งสูงสุด แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของ NaOH ไม่ได้มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสม ดังนั้นในตัวอย่างถัดไปจึงได้ทำการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ความเข้มข้นเดียว ซึ่งเลือกทดสอบที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10 โมลาร์ ซึ่งเป็นค่ากลางระหว่าง 8 และ 12 โมลาร์

(ภาพที่ 5) ผลการทดสอบที่ปริมาณส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยเดียวกัน มวลรวมที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดคือ 100%RCR รองลงมาคือ 50%RAP+50%RCR และ 100%RAP ตามลำดับดังนั้นความหนาแน่นที่เลือกใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวที่จะใช้คือ ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและที่ $\pm 3\%$ OLC เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมในการทดสอบ และปริมาณสารละลายไม่มากเกินไปจนทำให้ตัวอย่างเหลวเกินไป ไม่สามารถทดสอบได้

2) (ตารางที่ 4) ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของตัวอย่างที่ ผสมด้วยเถ้าขานอ้อยและสารละลายอัลคาไลน์

จากผลการทดสอบการบดอัดของ 100%RCR พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ไม่มีผลต่อความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสม ดังนั้น ในการทดสอบการบดอัดของส่วนที่ผสมเหลือจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 10 โมลาร์ โดยแสดงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสมของแต่ละตัวอย่าง พบว่า ที่ตัวอย่าง 50%RAP+50%RCR มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.12 กรัม/ซม.³ และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสม เท่ากับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณเถ้า 0 เปอร์เซ็นต์ ที่ตัวอย่าง 100%RAP มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.054 กรัม/ซม.³ และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสม เท่ากับ 8.763% ที่ปริมาณเถ้า 0 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ในการทดสอบได้ทำการทดสอบที่ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสม ได้ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุแต่ละอัตราส่วนผสมประกอบด้วย 100%RCR, 100%RAP และ 50%RCR+50%RAP ปรับปรุงด้วยเถ้าขานอ้อยที่ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของ NaOH 8, 10 และ 12 โมลาร์ ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

1) (ภาพที่ 6) (ภาพที่ 7) (ภาพที่ 8) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุหินคลุกกรีไซเคิล ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อย พบว่าตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเถ้า 5 เปอร์เซ็นต์ถูกบดอัดให้ มีค่า OLC เท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 2.19 กรัม/ซม.³ ตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเถ้า 10 เปอร์เซ็นต์ถูกบดอัดให้ มีค่า OLC เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 2.09 กรัม/ซม.³ และตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเถ้า 15 เปอร์เซ็นต์ ถูกบดอัดให้ มีค่า OLC เท่ากับ 16.5 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ

1.917 กรัม/ชม.³ พบว่ากำลังรับแรงอัด มีเพียงอัตราส่วนผสมเดียวที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ คือ ที่ปริมาณเถ้าขานอ้อย 5 เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ -3% OLC สำหรับสารละลายความเข้มข้น 8 โมลาร์ โดยอัตราส่วนผสมอื่นๆผ่านเกณฑ์ทั้งหมด และในส่วนอิทธิพลความเข้มข้นของ NaOH ที่ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์เดียวกัน พบว่า กำลังรับแรงอัด จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด กับอิทธิพลความเข้มข้นของ NaOH และปริมาณสารละลายด่างที่กล่าวมานี้สอดคล้องกันทุกปริมาณเถ้า

2) (ภาพที่ 9) (ภาพที่ 10) (ภาพที่ 11) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตริไซเคิล ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อย พบว่าตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเถ้า 5 เปอร์เซ็นต์ถูกบดอัดให้ มีค่า OLC เท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 2.19 กรัม/ชม.³ ตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเถ้า 10 เปอร์เซ็นต์ถูกบดอัดให้ มีค่า OLC เท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 1.97 กรัม/ชม.³ และตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเถ้า 15 เปอร์เซ็นต์ ถูกบดอัดให้ มีค่า OLC เท่ากับ 16.5 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 1.917 กรัม/ชม.³ พบว่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุ ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเกือบทั้งหมด ยกเว้นที่ปริมาณเถ้า 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่ OLC ส่วนที่ความเข้มข้นของ NaOH ที่ 10 และ 12 โมลาร์ ผ่านเกณฑ์ทั้งหมด และ ในส่วนอิทธิพลความเข้มข้นของ NaOH ที่ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์เดียวกัน พบว่า กำลังรับแรงอัด จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH อย่างมีนัยสำคัญ

3) (ภาพที่ 12) (ภาพที่ 13) (ภาพที่ 14)) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของวัสดุหินคลุกริไซเคิลและวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตริไซเคิล ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อย พบว่าที่ปริมาณเถ้า 5 เปอร์เซ็นต์ถูกบดอัดให้ มีค่า OLC เท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 2.19 กรัม/ชม.³ ตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเถ้า 10 เปอร์เซ็นต์ถูกบดอัดให้ มีค่า OLC เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 2.09 กรัม/ชม.³ และตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเถ้า 15 เปอร์เซ็นต์ถูกบดอัดให้ มีค่า OLC เท่ากับ 16.5 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 1.917 กรัม/ชม.³ พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารละลายอัลคาไลน์และความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิจัย

การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลง และเมื่อปริมาณเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaOH กับปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสมและความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ NaOH กับความหนาแน่นแห้งสูงสุด พบว่าความเข้มข้นของ NaOH ไม่ได้มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสม

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

1) จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ของวัสดุหินคลุกริไซเคิล ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อย พบว่ากำลังรับแรงอัด มีเพียงอัตราส่วนผสมเดียวที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ คือ ที่ปริมาณเถ้าขานอ้อย 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ -3% OLC สำหรับสารละลายความเข้มข้น 8 โมลาร์ โดยอัตรา

ส่วนผสมอื่นๆผ่านเกณฑ์ทั้งหมด และ ในส่วนอิทธิพลความเข้มข้นของ NaOH ที่ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์เดียวกัน พบว่ากำลังรับแรงอัด (UCS) จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง UCS กับอิทธิพลความเข้มข้นของ NaOH และปริมาณสารละลายดังที่กล่าวมานี้สอดคล้องกันทุกปริมาณเข้าชาน้อย

2) จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ของวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิล ที่ปรับปรุงด้วยจีโอโพลิเมอร์ จากเข้าชาน้อย พบว่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเกือบทั้งหมด ยกเว้นที่ ปริมาณเข้า 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่ OLC ส่วนที่ความเข้มข้นของ NaOH ที่ 10 และ 12 โมลาร์ ผ่าน เกณฑ์ทั้งหมด และ ในส่วนอิทธิพลความเข้มข้นของ NaOH ที่ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์เดียวกัน พบว่า กำลังรับแรงอัด จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH อย่างมีนัยสำคัญ

3) จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว ของวัสดุหินคลุกรีไซเคิลและวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุง ด้วยจีโอโพลิเมอร์จากเข้าชาน้อย พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารละลายอัลคาไลน์และความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้น

[4] Salome et al. ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อคุณสมบัติ ของจีโพลิเมอร์จากเข้าชาน้อยพบว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH มีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงอัด โดยเมื่อความเข้มข้นของ NaOH สูงขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น และจากการศึกษาครั้งนี้พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณ สารละลายอัลคาไลน์และความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบทั้งหมด ได้ทำการเลือกตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุด คือ ตัวอย่าง 50%RAP+50%RCR ที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ ที่ OLC และปริมาณเข้าชาน้อยเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่า UCS เท่ากับ 2531.37 kPa ซึ่งผ่านมาตรฐานกรมทางหลวง อีกทั้งยังใช้สารละลายความเข้มข้นน้อย ทำให้ลดต้นทุนในการก่อสร้างได้

กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้เขียนขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ขอบคุณทีมงานเพื่อนๆ พี่ ๆ ขอบคุณครอบครัวที่สนับสนุนตลอดจนสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับทุนอุดหนุนที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Li L, Benson CH, Edil TB, Hatipoglu B, Tastan O. Evaluation of recycled asphalt pavement material stabilized with fly ash. Soil and Material Inputs for Mechanistic-Empirical Pavement Design (pp. 1-10). 2007.
2. Ochepo J. Stabilization of laterite soil using reclaimed asphalt pavement and sugarcane bagasse ash for pavement construction. Journal of Engineering Research, 4(2), 1-13. 2014.
3. Magar JR, Acharya IP. Soft Soil Stabilization with Alkali Activated Sugarcane Bagasse Ash. International Journal of Civil and Structural Engineering Research, 6(2), 65-73. 2019.
4. Saloma, Hanafiah, Pratiwi KI. Effect NaOH Concentration on Bagasse Ash Based Geopolymerization. In MATEC Web of Conferences (Vol. 78, p. 01025). EDP Sciences. 2016.

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

วัสดุ	เปอร์เซ็นต์ผ่าน		ค่า C _u	ค่า C _c	Percentage of Wear (%)	Specific Gravity	Absorption (%)
	ตะแกรง						
	เบอร์ 4 (%)	เบอร์ 200 (%)					
วัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิล	65.8	0.7	14.81	2.37	21.07	2.45	0.82
วัสดุหินคลุกกรีไซเคิล	51.6	0.5	17.43	2.27	29.39	2.48	2.29

(มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ กรมทางหลวง มาตรฐานที่ ทล.-ม. 203/2556)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี (XRF)

Element	Average Mass Concentration (Mass%)		
	Recycle Crush Rock	Bagasse Ash	Recycle Asphalt Pavement
CO ₂	8.51	n/a	62.29
Al ₂ O ₃	14.48	2.46	1.07
SiO ₂	73.91	88.65	4.09
CaO	0.06	1.42	30.67

ตารางที่ 3 ตารางวิเคราะห์ผล Modified Compaction Test (ที่ปริมาณน้ำต่างๆ) ของตัวอย่าง 100%RCR

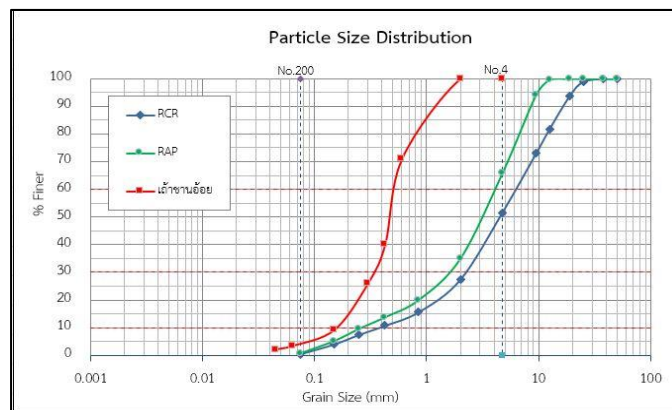
Sample	ความเข้มข้นของสารละลาย	ปริมาณน้ำ (%)	Maximum Dry	Optimum Alkaline
	NaOH		Density (g/cu.cm)	Liquid Content (%)
RCR	8	0	2.20	6.06
RCR5BA8M		5	2.17	10.00
RCR10BA8M		10	2.09	12.00
RCR15BA8M		15	1.99	15.00
RCR20BA8M		20	1.91	18.00
RCR	10	0	2.20	6.06
RCR5BA10M		5	2.18	9.00
RCR10BA10M		10	2.09	12.00
RCR15BA10M		15	2.00	15.00
RCR20BA10M		20	1.92	18.00
RCR	12	0	2.20	6.06
RCR5BA12M		5	2.19	10.00
RCR10BA12M		10	2.10	12.00
RCR15BA12M		15	2.00	15.00
RCR20BA12M		20	1.90	18.00

*หมายเหตุ RCR คือวัสดุหินคลุกกรีไซเคิลจากชั้นพื้นทางของถนน, BA คือเถ้าขาน้อย

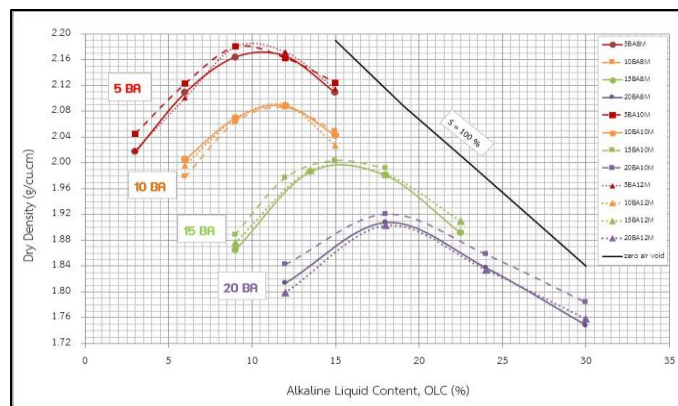
ตารางที่ 4 ตารางวิเคราะห์ผล Modified Compaction Test (ที่ปริมาณเถ้าต่างๆ)

Sample	ความเข้มข้นของ สารละลาย NaOH	ปริมาณเถ้า (%)	Maximum Dry Density (g/cu.cm)	Optimum Alkaline Content (%)
RAP		0	2.054	8.763
RAP5BA10M		5	2.052	12.000
RAP10BA10M	10	10	1.974	15.000
RAP15BA10M		15	1.917	16.500
RAP20BA10M		20	1.869	18.000
RAPRCR		0	2.12	7.5
RAPRCR5BA10M		5	2.11	10.50
RAPRCR10BA10M	10	10	2.02	13.50
RAPRCR15BA10M		15	1.98	15.00
RAPRCR20BA10M		20	1.93	18.00

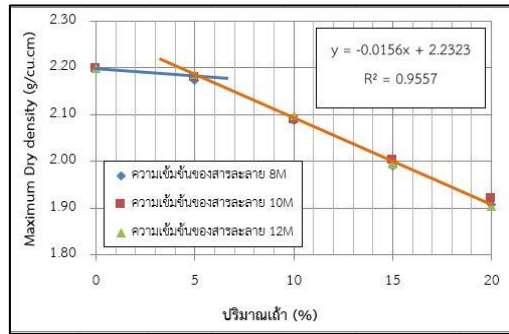
*หมายเหตุ RAP คือวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตรีไซเคิล, RCR คือวัสดุหินคลุกกรีไซเคิลจากชั้นพื้นทางของถนน และ BA คือเถ้า
ขาน้อย



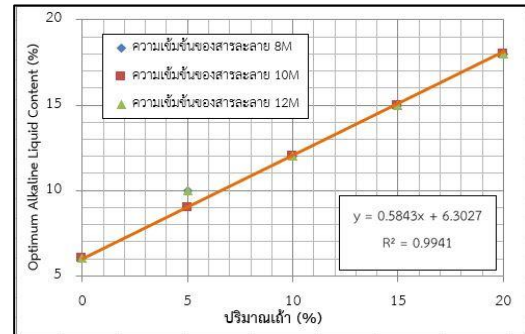
ภาพที่ 1 ผลการทดสอบขนาดคละ (Sieve Analysis)



ภาพที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณสารละลายอัลคาไลน์
ของตัวอย่าง 100%RCR

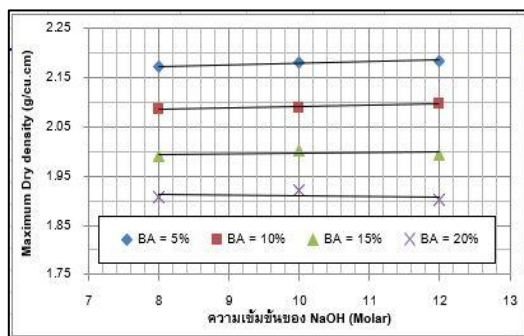


(a.)

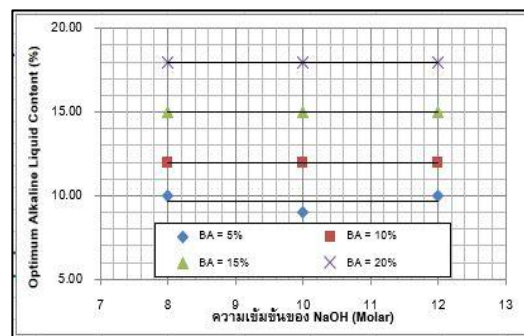


(b.)

ภาพที่ 3 (a.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าชานอ้อยกับความหนาแน่นแห้งสูงสุดของตัวอย่าง 100%RCR
(b.) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าชานอ้อยกับปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสมของตัวอย่าง 100%RCR

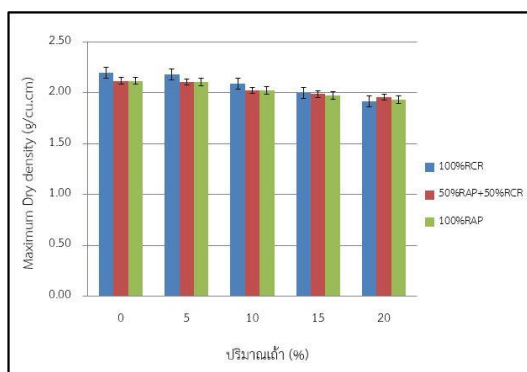


(a.)

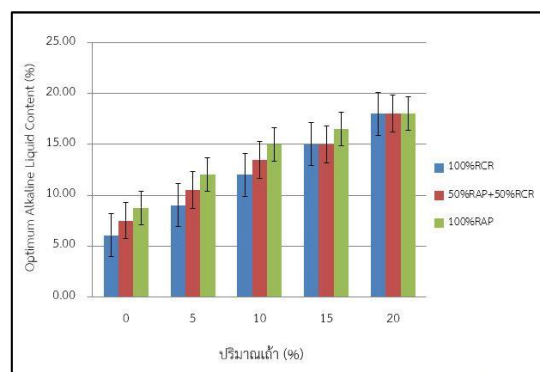


(b.)

ภาพที่ 4 (a.) ผลการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของตัวอย่าง 100%RCR ที่ความเข้มข้นของ NaOH 8, 10 และ 12 โมลาร์
(b.) ผลการเปรียบเทียบปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ของตัวอย่าง 100%RCR ที่ความเข้มข้นของ NaOH 8, 10 และ 12 โมลาร์

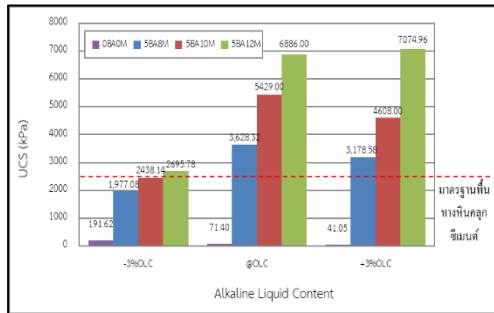


(a.)

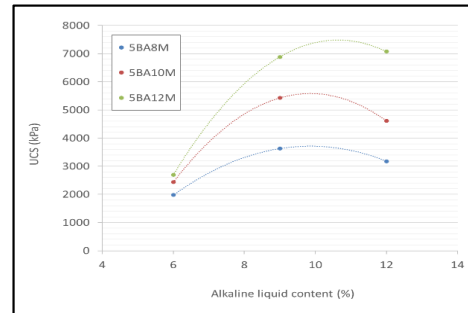


(b.)

ภาพที่ 5 (a.) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าชานอ้อยและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด
(b.) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าชานอ้อยและสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสม

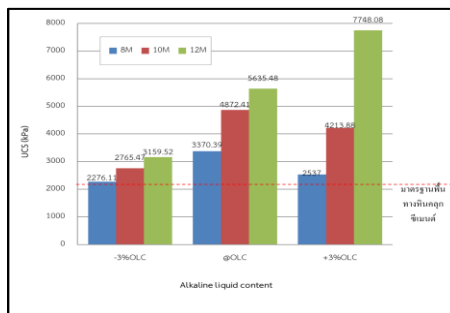


(a.)

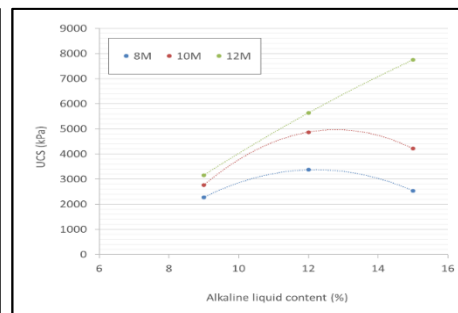


(b.)

ภาพที่ 6 (a.) แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน
(b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ของอัตราส่วนผสม RCR ผสมเถ้าขาน้อย 5% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

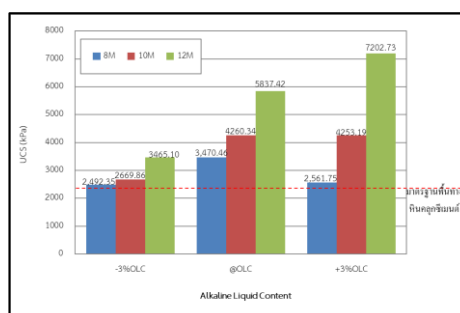


(a.)

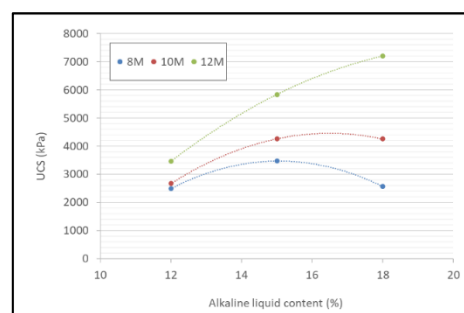


(b.)

ภาพที่ 7 (a.) แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน
(b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ของอัตราส่วนผสม RCR ผสมเถ้าขาน้อย 10% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

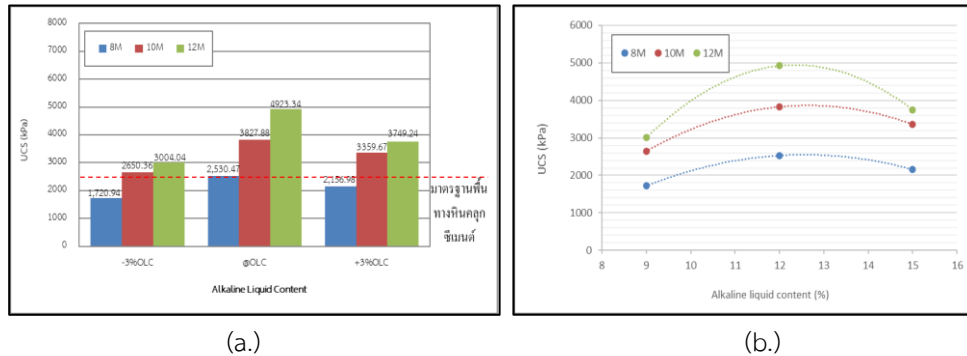


(a.)

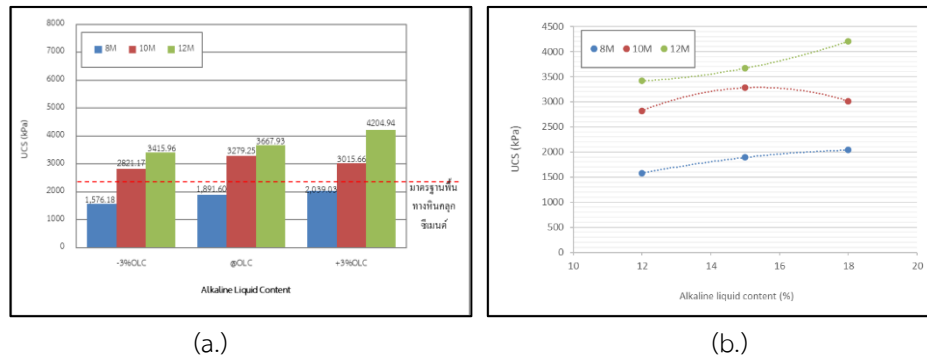


(b.)

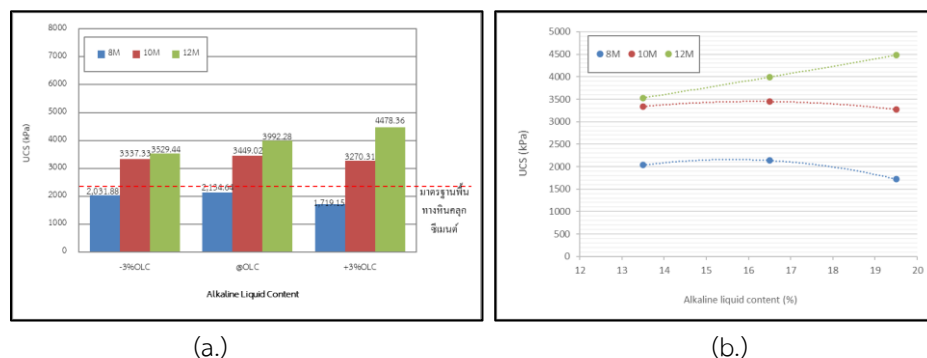
ภาพที่ 8 (a.) แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน
(b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ของอัตราส่วนผสม RCR ผสมเถ้าขาน้อย 15% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



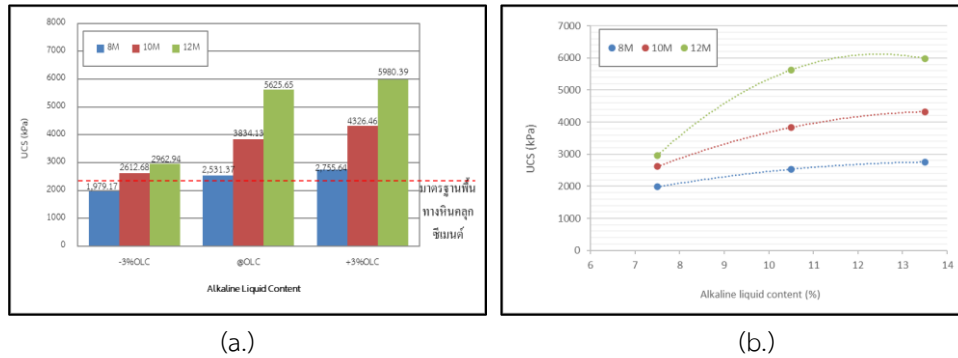
ภาพที่ 9 (a.) แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน
(b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ของอัตราส่วนผสม RAP ผสมเถ้าขานอ้อย 5% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



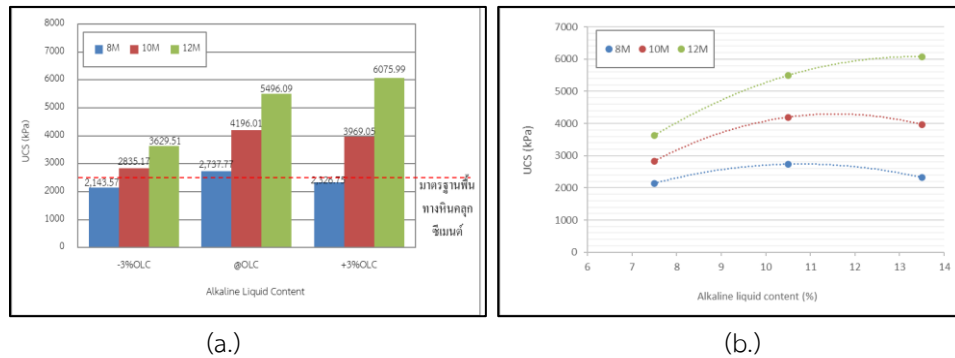
ภาพที่ 10 (a.) แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน
(b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ของอัตราส่วนผสม RAP ผสมเถ้าขานอ้อย 10% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



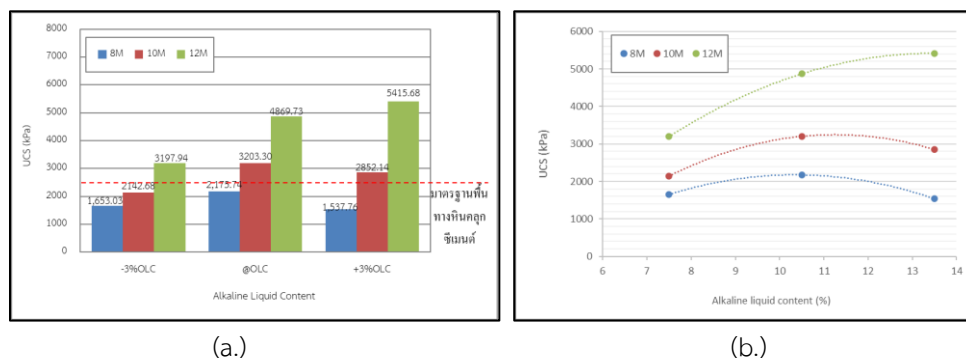
ภาพที่ 11 (a.) แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน
(b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ของอัตราส่วนผสม RAP ผสมเถ้าขานอ้อย 15% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 12 (a.) แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน
(b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ของอัตราส่วนผสม RCR+RAP ผสมเถ้าขาน้อย 5% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 13 (a.) แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน
(b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ของอัตราส่วนผสม RCR+RAP ผสมเถ้าขาน้อย 10% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 14 (a.) แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ที่มาตรฐานพื้นทางหินคลุกซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน
(b.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง UCS และปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ ของอัตราส่วนผสม RCR+RAP ผสมเถ้าขาน้อย 15% ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน