Eng.J.CMU.[2022] 29 [1], 100-109

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การประเมินขนาดคละที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์หินคลุก

Evaluation of Suitable Gradation of Crushed Rock Geopolymer

อมรเทพ นามวงศ์ ตุลย์ นองเนือง* และ สรารัตน์ ขวัญใจ

Amonthep Namwong, Toon Nongnuang* and Sararat Kwunjai

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering

Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

E-mail: amonthep_n@cmu.ac.th, sararat_kw@cmu.ac.th, toon_n@cmu.ac.th*, Tel.: 091-857-0201

บทคัดย่อ

การศึกษาพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับงานชั้นทางถนน โดยงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับขนาดคละที่เหมาะสมสำหรับการทำ Geopolymer โดยวัสดุที่ใช้วัสดุหลักเป็นหินคลุก (Crushed Rock) ซึ่งจะหาขนาดคละที่ใช้ทั้งหมด 2 รูปแบบ แบบแรกจะใช้หินคลุกที่มีการกำหนดอัตราส่วนขนาดคละขึ้นมาเป็นขนาดคละในอุดมคติ (Ideal grading) ที่เป็นขนาดคละที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานชั้นทาง และแบบใช้หินคลุกที่หาได้จากโรงโม่หินที่คัดแยกขนาดของหินด้วยตะแกรงตามมาตรฐานมาผสมให้ได้ขนาดคละที่ใกล้เคียงกับ Ideal grading เรียกว่าขนาดคละใช้งานจริง (Used Working Grading) จากนั้นนำขนาดคละทั้งสองชนิดมากระตุ้นให้เกิดการเชื่อมประสานด้วยสารละลายด่าง คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยจะใช้อัตราส่วนสาระละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67 และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ ทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อสร้างเส้นแนวโน้มการบดอัด (Compaction Curve) ของทั้ง Ideal grading และ Used Working Grading เพื่อหาความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) และปริมาณสารละลายด่างที่เหมาะสม (Optimum Liquid Alkaline Activator Content, OLC) ของตัวอย่าง โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดจะผสมตัวอย่างที่ 100%MDD และ 95%MDD ทั้งด้านเปียกและด้านแห้ง จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) โดยใช้ตัวอย่างจากการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของถนนในประเทศไทยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กับตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้องอย่างเดียว โดยทดสอบอายุของตัวอย่างเท่ากับ 7 และ 28 วัน จากการศึกษาพบว่า การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ใช้การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานและแบบมาตรฐานที่ 100%MDD ที่อายุบ่มเท่ากับ 28 วัน แบบ Used Working Grading จะมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานและแบบมาตรฐานของ Ideal grading

คำสำคัญ: ขนาดคละในอุดมคติ; ขนาดคละใช้งานจริง; ปริมาณสารละลายด่างที่เหมาะสม; การทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

Received 10 April 2022
Revised 29 April 2022
Accepted 29 April 2022

ABSTRACT

A study of the compressive strength development in a geopolymer suitable for roadway applications. This study finds proper mixtures of crushed rock for geopolymer which use two mixed grading of crushed rocks sizes including: (1) use the ideal mixed size is called Ideal Grading for the road work with standard compressive strength was obtained by the most appropriate grading size, and (2) use mix of crushed rock is obtained from the stone mill, which is sorted by standard sieve sizes and mixed size that is close to the Ideal grading is called Used Working Grading. The two types of mixed sizes were used to activate with the alkaline solution, namely sodium hydroxide and sodium silicate. A sodium silicate to sodium hydroxide ratio of 0.67 and a sodium hydroxide concentration of 5 molar were used. To find a maximum dry density (MDD) and optimum liquid alkaline content (OLC), a standard compaction test and a modified compaction test were performed to obtain the compaction curve. Samples were prepared by mixing of crushed rock with alkaline liquid content in both dry and wet at 100% MDD and 95% MDD on compaction curve. The group of samples were stimulated by heat at 40ºC for 24 hours in oven in comparison with another group of samples that were cured at room temperature. After curing stage, both group of sample were left in ambient temperature to reach the curing time of 7 and 28 days before performing Unconfined Compression Test. The test results showed that compressive strengths of Used Working grading at 100%MOD for 28 days curing were higher than compressive strength of Ideal grading.

Keywords: Ideal grading; Used Working Grading; Optimum Liquid Alkaline Activator Content; Unconfined Compression Test

1. บทนำ

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ถือเป็นวัสดุสำคัญสำหรับงานก่อสร้างทางวิศวกรรมโยธาในปัจจุบัน ใช้เป็นวัสดุประสานในคอนกรีต และยังมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานวิจัยทางด้านวัสดุต่าง ๆ โดยส่วนผสมหลักที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์นั้นก็คือ หินปูน และ ดินเหนียว ที่ได้มาจากการระเบิดหินในการทำเหมือง จากนั้นจึงนำวัสดุที่ได้ไปเข้ากระบวนการผลิต โดยการนำไปบดและไปเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตที่เรียกว่าปูนเม็ด ต่อจากนั้นก็นำปูนเม็ดไปปรับปรุงคุณภาพจนได้เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ใช้กันทั่วไปในการก่อสร้างออกมา แต่อย่างไรก็ตาม จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นจะเห็นได้ชัดว่ามีการรบกวนต่อสิ่งแวดล้อมและธรรมชาติอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นการทำลายระบบนิเวศน์จากการระเบิดเหมือง การใช้พลังงานที่สูงในการผลิต และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เข้าสู่ชั้นบรรยากาศของโลกในปริมาณที่เท่ากับการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เกิด สภาวะโลกร้อน (Global Warming) ที่เป็นปัญหาหลักของโลกในปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้การพัฒนาวัสดุทางเลือกอย่าง Geopolymer จึงมีส่วนสำคัญอย่างมากที่จะเข้ามาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่านั่นเอง

แต่เนื่องจากปัจจุบันการก่อสร้างชั้นทาง (Road Structure) ใช้ดินเป็นวัสดุหลัก ซึ่งดินต้องมีกำลังรับน้ำหนักให้ได้ตามมาตรฐานที่ระบุไว้ แต่ปัจจุบันปริมาณดินที่ได้มาตรฐานลดลงเรื่อย ๆ ส่งผลให้ขาดแคลนดินมาตรฐาน และต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่งดินจากที่ห่างไกล การปรับปรุงคุณภาพดินจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยทั่วไปแล้วจะใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในการปรับปรุง แต่จากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ต้องใช้วิธีการอื่นในการ

ปรับปรุงคุณภาพของดิน ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาการศึกษา Geopolymer [1], [2] กำลังเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ประกอบด้วยงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุชนิดนี้ที่สามารถนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์ในพัฒนากำลังของวัสดุได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกวัสดุที่ใช้ในงานทางมาทำการศึกษา ซึ่งได้แก่ หินคลุก (Crushed Rock) ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่มี ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) มาผสมกับสารละลายด่างในการทำปฏิกิริยา Geopolymerization เกิดการแข็งตัวเป็นวัสดุอสัณฐานที่มีความแข็งแรงสูง [3]-[5] โดยทั่วไปแล้วการผลิต Geopolymer จะนิยมใช้เถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน [6], [7] แต่อย่างไรก็ตามหินคลุกเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการก่อสร้างงานทางและงานถนนในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและราคาถูก ด้วยเหตุผลนี้จึงมีความเหมาะสมนี่จะนำมาพัฒนาร่วมกับ Geopolymer เพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุหินคลุกให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากยิ่งขึ้นให้เทียบเท่าหรือมากกว่าการปรับปรุงคุณภาพของโดยใช้ปูนซีเมนต์ [8]-[10] เพื่อประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมโยธา และยังลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคตอีกด้วย

แต่อย่างไรก็ตาม การจะนำหินคลุกมาประยุกต์ใช้กับ Geopolymer เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีนั้น การหาสัดส่วนของขนาดคละที่เหมาะสมของหินคลุกมีผลสำคัญอย่างยิ่ง โดยขนาดคละที่ดีจะส่งผลต่อกำลังของวัสดุ และการทำปฏิกิริยา Geopolymerization ขนาดคละขนาดเล็กจะทำให้เกิดปฏิกิริยา Geopolymerization ได้ดีขึ้น [11] แต่กลับกันการมีขนาดคละขนาดใหญ่ขึ้นก็จะส่งผลดีต่อกำลังของวัสดุเช่นกัน การหาขนาดคละที่เหมาะสมสำหรับการทำจีโอโพลิเมอร์หินคลุกจึงมีความจำเป็น เพื่อพัฒนาวัสดุในงานวิศวกรรมโยธาต่อไป แต่ถึงอย่างไรก็ตามการระบุเจาะจงขนาดคละของหินคลุกแม้จะทำได้ในระดับห้องปฏิบัติการ แต่ในการก่อสร้างจริงนั้นเป็นไปได้ยาก งานวิจัยชิ้นนี้จึงศึกษาการเปรียบเทียบการใช้ขนาดคละที่เหมาะกับจีโอโพลิเมอร์หินคลุก เปรียบเทียบกับขนาดคละของหินคลุกที่มีขายตามท้องตลาดที่นำมาผสมให้ได้ใกล้เคียงกับขนาดที่เหมาะสมดังกล่าว ในด้านกำลังรับแรงอัดของวัสดุของขนาดคละทั้งสองแบบ

2. วัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุ

วัสดุหลัก คือ หินคลุกมาตรฐาน มทช.203-2557 จากบริษัท เชียงใหม่ ที.ดี. จำกัด

สารกระตุ้นที่เป็นด่าง (Liquid Alkaline Activators, L) ที่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตนี้มีองค์ประกอบของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 16.3 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 34.2 และน้ำร้อยละ 49.5 โดยน้ำหนัก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5 โมลาร์ โดยอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมซิลิเกต (SS /SH) เท่ากับ 0.67 : 1 (SS/SH = 0.67)

รูปที่ 1 รูปหินคลุก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต

2.2 การทดสอบ

2.2.1 การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)

ทำการทดสอบการบดอัดด้วยวิธีการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) [12] ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท มทช.(ท) 501.1-2545 และวิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) [13]

ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท มทช.(ท) 501.2-2545 ใช้แบบ (Mold) โลหะกระบอกทรงกลมกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มม. (4 นิ้ว) และหินคลุกที่ร่อนผ่าน

ตะแกรงขนาด 19 มม. (3/4 นิ้ว) ตามวิธี Proctor โดยพลังงานที่ใช้ในการบดอัดกำหนดด้วยน้ำหนักตุ้ม 2.5 กก. (5.5 ปอนด์) ระยะปล่อยตุ้มกระทบสูง 305 มม. (12 นิ้ว) สำหรับการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐาน และตุ้มหนัก 4.54 กก. (10 ปอนด์) ระยะปล่อยตกกระทบสูง 457 มม. (18 นิ้ว) สำหรับการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน

การทดสอบการบดอัดนี้ ใช้เพื่อหาความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content OMC) ที่ให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, MDD) ในงานวิจัยนี้จะทำการผสมหินคลุกจีโอโพลิเมอร์ โดยใช้หินคลุกผสมกับสารกระตุ้นที่เป็นด่างแทนการใช้น้ำ จะทำให้ได้ปริมาณสารกระตุ้นที่เป็นด่างที่เหมาะสม (Optimum Liquid Alkaline Activator Content, OLC) นำตัวอย่างหินคลุกและสารกระตุ้นที่เป็นด่างที่เตรียมไว้คลุกผสมให้เข้ากัน

จากนั้นใส่หินคลุกที่ผสมแล้วลงในแบบ โดยการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐานจะใส่ชั้นละ 1/3 ของความสูงของแบบ ทำการบดอัด 3 ชั้น ยกตุ้มสูง 305 มม. (12 นิ้ว) จำนวนชั้นละ 25 ครั้ง ส่วนการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานจะใส่ชั้นละ 1/5 ของความสูงของแบบ ทำการบดอัด 5 ชั้น ยกตุ้มสูง 457 มม. (18 นิ้ว) จำนวนชั้นละ 25 ครั้ง

เมื่อบดอัดเสร็จใช้เหล็กปาดดินปาดแต่งหน้าให้เรียบแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก หลังจากชั่งน้ำหนักแล้วให้แกะดินออกจากแบบ เก็บตัวอย่างดินจากตำแหน่งตรงกลางของตัวอย่างไปทำการอบให้แห้งเพื่อหาความชื้น

ทำการทดสอบทั้งในส่วนหินคลุกที่ผสมกับสารกระตุ้นที่เป็นด่างและหินคลุกที่ผสมกับน้ำ ทั้งการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อทำการเปรียบเทียบ

เมื่อได้เส้นโค้งการบดอัด จะได้ค่าความแน่นแห้งสูงสุด (MDD) ณ ตำแหน่งปริมาณสารกระตุ้นที่เป็นด่างที่เหมาะสม (OLC) เพื่อนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการเตรียมตัวอย่าง เพื่อนำไปทดสอบ Unconfined Compressive Test ต่อไป

2.2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการบดอัด (Grading preparation for compaction test)

1) ขนาดคละอุดมคติ Ideal grading

เป็นขนาดคละอุดมคติ เป็นขนาดคละที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนากำลังของ Geopolymer ในหินคลุก [1] หินคลุกโดยทั่วไปที่ผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 200 มีปริมาณน้อย จึงนำไปผ่านเครื่องบดย่อยหิน ดังรูปที่ 2

การบดหินคลุก จะนำหินคลุกขนาดที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว (0.375 มม.) ใส่เครื่องบดย่อยหยาบจนได้หินคลุกที่มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำหินคลุกขนาดเล็กลงที่ได้ใส่ในเครื่องบดย่อยละเอียดประมาณ 15 นาที เพื่อให้ได้หินคลุกที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มม.) ตามที่ต้องการ

ทำการผสมหินคลุกขนาดต่าง ๆ ตามร้อยละที่ค้างตามตะแกรงของ Ideal grading เพื่อให้ได้ขนาดคละอุดมคติตามที่ต้องการ และจากนั้นทำการแบ่งสี่เพื่อให้ได้หินคลุกที่มีขนาดสัดส่วนคละใกล้เคียงกันทุกตัวอย่าง และนำขนาดคละที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชม. เพื่อกำจัดความชื้น

2) ขนาดคละใช้งานจริง Working grading

เป็นขนาดคละที่ใช้หินที่มีทั่วไปในโรงโม่หินมาผสมเพื่อให้ได้ขนาดคละใกล้เคียงกับ ideal grading จะนำหินคลุกขนาด 3/8” หินฝุ่น และผงหินจากโรงโม่หิน นำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C ระยะเวลา 24 ชม. หลังจากนั้นนำไปใส่ในเครื่องแยกขนาดคละ เพื่อหาขนาดคละของหินคลุก จากนั้นผสมหินคลุกขนาดต่าง ๆ ในเครื่องโม่ ผสมหินให้เข้ากันและนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C อีกรอบ ระยะเวลา 24 ชม. เมื่อครบเวลาจึงนำออกจากเตาอบ รอให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิลดลง หลังจากนั้นผสมและแบ่งสัดส่วนขนาดคละให้เหมาะสม (แบ่งสี่) เพื่อให้ได้หินคลุกที่มีขนาดสัดส่วนขนาดคละใกล้เคียงกันทุกตัวอย่าง

รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างหินคลุก

การเตรียมสารกระตุ้นที่เป็นด่าง โดยเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ซึ่งใช้ปริมาณน้ำหนัก 200 กรัม ผสมกับน้ำ 1000 กรัม ปล่อยให้เย็น

หลังจากนั้นผสมโซเดียมซิลิเกต โดยใช้ส่วนผสมระหว่างโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำการผสมในอัตราส่วน 0.67 : 1 (SS/SH = 0.67) เมื่อผสมเสร็จเก็บสารละลายไว้ในขวดปิดฝาให้สนิท ตามรูปที่ 3

รูปที่ 3 การเตรียมสารละลาย

2.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบแกนเดียว (Unconfined Compression Test, UCS)

การทดสอบเพื่อหาค่าแรงอัดแกนเดียว หาค่าแรงอัดสูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ ใช้วิธีตาม มทช.(ท) 303-2545 [14] อัตราการอัดของเครื่อง 1.2 มม./นาที Dial Gauge ใช้วัดความละเอียดได้ 0.01 มม. หรือ 0.001 นิ้ว ตัวอย่างที่ถอดจากแบบกระบอกทรงกลมจะทำการห่อด้วยพลาสติก แบ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่บ่มร้อน (บ่มอุณหภูมิห้อง) และตัวอย่างที่บ่มร้อน ตัวอย่างที่บ่มร้อนจะนำไปกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในเตาอบ เพื่อจำลองสภาพความร้อนของถนนในประเทศไทย จากนั้นนำมาบ่มต่อ ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วันและ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ

1) การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมปริมาณสารกระตุ้นที่เป็นด่างตามเส้นโค้งการบดอัดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (100%MDD) และที่ความหนาแน่น 95% ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดของเส้นโค้งการบดอัด ทั้งด้านแห้งและด้านเปียก (95%MDD) ทั้งการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) และแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) ทำการบดอัดดินตามวิธีการทดสอบการบดอัด เสร็จแล้วทำการห่อหุ้มแบบด้วยพลาสติกตามรูปที่ 4 แล้วนำตัวอย่างชุดที่ 1 ไปกระตุ้นด้วยความร้อน 40°C ในเตาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำออกมาไว้ที่อุณหภูมิให้ครบ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างชุดที่ 2 เป็นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการบ่มร้อน โดยบ่ม ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ

รูปที่ 4 การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับทดสอบ UCS

2) การทดสอบ

ดันตัวอย่างหินคลุกจีโอโพลิเมอร์ออกจากแบบด้วยเครื่องดันตัวอย่าง ดังรูปที่ 5 (ซ้าย) วัดขนาดและชั่งน้ำหนักตัวอย่าง นำตัวอย่างหินคลุกจีโอโพลิเมอร์เข้าเครื่องกด รูปที่ 5 (ขวา) บันทึกข้อมูลของแรงกระทำในระยะยุบทุก ๆ 2.5 มิลลิเมตร จนกระทั่งตัวอย่างที่ทดสอบไม่สามารถรับน้ำหนักได้อีก แล้วบันทึกค่าไปอีกเล็กน้อยเพื่อดูลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง

รูปที่ 5 การทดสอบ UCS test

3. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การออกแบบขนาดคละของวัสดุ ผลการทดสอบการบดอัด และผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

3.1 การออกแบบขนาดคละ

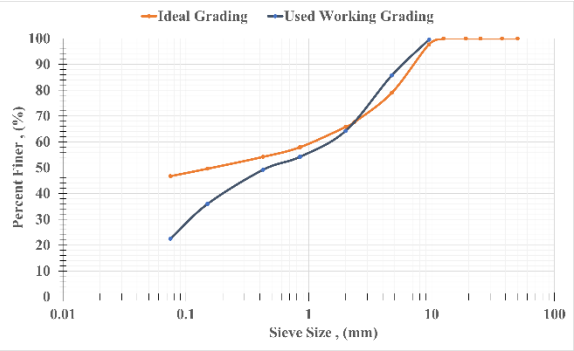
เป็นการออกแบบขนาดคละของหินคลุกแบบ Used working Grading โดยใช้หินคลุกขนาดทั่วไปแต่ละขนาดที่ขายตามท้องตลาดผสมกันเพื่อให้ได้ขนาดคละโดยรวมใกล้เคียงกับ Ideal grading ซึ่งเป็นขนาดคละที่ตั้งสมมติฐานไว้ว่าจะทำปฏิกิริยากับ Geopolymer ได้ดีที่สุด หินคลุกที่ใช้ได้รับมาจากบริษัท เชียงใหม่ ที.ดี. จำกัด โดยผสมหินคลุก

ตามอัตราส่วน **หินฝุ่น** : **หิน3/8”**: **ผงฝุ่น** ด้วยอัตราส่วน **40%** : **20%** : **40%** ตามลำดับ โดยผลของขนาดคละที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงอัตราส่วนขนาดคละในอุดมคติ (Ideal grading) และขนาดคละใช้งานจริง (Used working grading)

ตะแกรง ASTM No.	ขนาดช่องเปิดแผ่นตะแกรง (D) (มม.)	Percent Finer (%)	
		Ideal grading	Used working grading
2 in.	50.00	100	100
1 1/2 in.	37.50	100	100
1 in.	25.00	100	100
3/4 in.	19.00	100	100
1/2 in.	12.50	100	100
3/8 in.	9.50	97.68	99.6
4 in.	4.75	79.01	85.74
8	2.36	68	-
10	2.00	65.77	64.25
20	0.85	57.95	54.21
40	0.425	54.19	49.19
100	0.15	49.61	35.94
200	0.075	46.72	22.49
pan	-	0.00	0.00

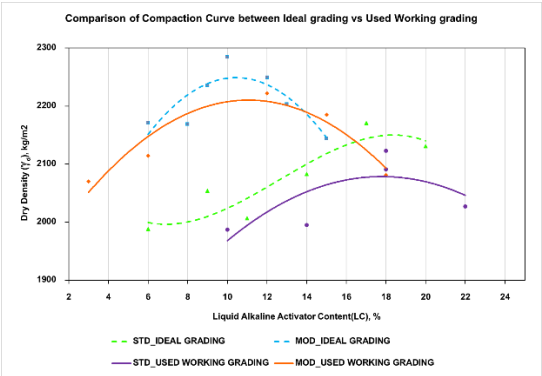
พบว่าขนาดคละของทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกันตามจุดประสงค์ของการทดลอง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลการทดสอบหาขนาดคละของหินคลุก

3.2 ผลการทดสอบการบดอัด

ผลการทดสอบการบดอัดของจีโอโพลิเมอร์หินคลุกทั้งแบบ Ideal grading และ Used working grading โดยแบ่งการทดสอบเป็นการทดสอบแบบมาตรฐานและแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยใช้ความเข้มข้นของสารกระตุ้นที่เป็นด่างคงที่ 5 โมลาร์ อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (SS/SH) เท่ากับ 0.67 ได้ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เส้นแนวโน้มการบดอัดโดยใช้สารละลายด่างของ Ideal grading และ Used Working grading

เมื่อทำการบดอัดหินคลุกจีโอโพลิเมอร์ของ Ideal grading และ Used Working Grading ที่ร้อยละของความหนาแน่นแห้งสูงสุด (100%MDD) และร้อยละของความหนาแน่นแห้ง 95 ทั้งด้านแห้งและด้านเปียกของเส้นโค้งการบดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐาน (STD) และสูงกว่ามาตรฐาน (MOD) ผลที่ได้แสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการบดอัดของ Ideal Grading และ Used Working Grading

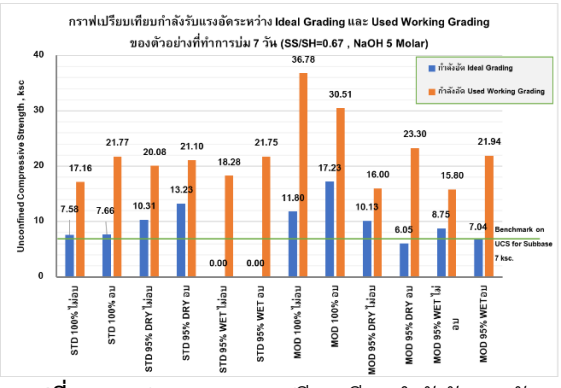
Ideal Grading		
รูปแบบการบดอัด	ความหนาแน่นแห้ง (kg/m^3)	ปริมาณสารกระตุ้นที่เป็นด่างที่เหมาะสม, OLC (%)
100%MDD, MOD	2,260	10.5
95%MDD(Dry), MOD	2,147	5.5
95%MDD(Wet), MOD	2,147	14.8
100%MDD, STD	2.150	18.5
95%MDD(Dry), STD	2,042	11.0
95%MDD(Wet), STD	-	-

ตารางที่ 2 (ต่อ) ตารางแสดงผลการบดอัดของ Ideal Grading และ Used Working Grading

Used Working Grading		
รูปแบบการบดอัด	ความหนาแน่นแห้ง (kg/m^3)	ปริมาณสารกระตุ้นที่เป็นด่างที่เหมาะสม, OLC (%)
100%MDD, MOD	2,210	11.0
95%MDD(Dry), MOD	2,100	4.4
95%MDD(Wet), MOD	2,100	17.8
100%MDD, STD	2,116	19.0
95%MDD(Dry), STD	2,010	14.6
95%MDD(Wet), STD	2,010	22.3

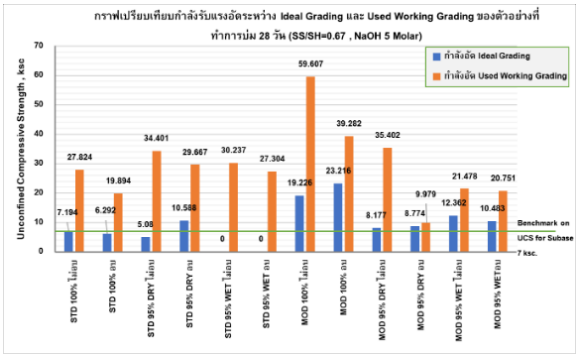
3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว

ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์หินคลุกด้วยขนาดคละ Ideal grading และ Used working grading โดยที่ตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจากเตาอบ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และตัวอย่างที่บ่ม ณ อุณหภูมิห้อง ด้วยวิธี Standard Compaction ที่ 100%MDD, 95%MDD ด้านแห้งและด้านเปียก และวิธี Modified Compaction ที่ 100%MDD, 95%MDD ด้านแห้งและด้านเปียก ที่อายุการบ่ม 7 วันและ 28 วัน



รูปที่ 8 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดระหว่าง Ideal grading และ Used working grading ของตัวอย่างที่ทำการบ่ม 7 วัน

ผลการทดสอบกำลังแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์หินคลุกทั้งสองขนาดคละที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงผลการทดสอบและเปรียบเทียบดังตารางที่ 3 และรูปที่ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดระหว่าง Ideal Grading และ Used Working Grading ของตัวอย่างที่ทำการบ่ม 28 วัน

และสำหรับผลการทดสอบกำลังแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์หินคลุก ทั้งสองขนาดคละที่อายุบ่ม 28 วัน แสดงผลการทดสอบและเปรียบเทียบดัง ตารางที่ 3 และรูปที่ 9 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดระหว่าง Ideal Grading และ Used Working Grading ของตัวอย่างที่ทำการบ่ม 7 วัน และผลของการอบตัวอย่างที่ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ของตัวอย่าง 7 วัน

ประเภทตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (ksc)			
	อายุ 7 วัน		อายุ 28 วัน	
	Ideal Grading	Used Working Grading	Ideal Grading	Used Working Grading
STD 100% ไม่อบ	7.58	17.16	7.19	27.82
STD 100% อบ	7.66	21.77	6.29	19.89
STD 95% DRY ไม่อบ	10.31	20.08	5.08	34.40
STD 95% DRY อบ	13.23	21.10	10.59	29.67
STD 95% WET ไม่อบ	-	18.28	-	30.24
STD 95% WET อบ	-	21.75	-	27.30

ตารางที่ 3 (ต่อ) การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดระหว่าง Ideal Grading และ Used Working Grading ของตัวอย่างที่ทำการบ่ม 7 วัน และผลของการอบตัวอย่างที่ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ของตัวอย่าง 7 วัน

ประเภทตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (ksc)			
	อายุ 7 วัน		อายุ 28 วัน	
	Ideal Grading	Used Working Grading	Ideal Grading	Used Working Grading
MOD 100% ไม่อบ	11.80	***36.78***	19.23	***59.61***
MOD 100% อบ	17.23	30.51	23.22	39.28
MOD 95% DRY ไม่อบ	10.13	16.00	8.18	35.40
MOD 95% DRY อบ	6.05	23.30	8.77	***9.98***
MOD 95% WET ไม่อบ	8.75	***15.80***	12.36	21.48
MOD 95% WET อบ	7.04	21.94	10.48	20.75

4. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการบดอัด ผลการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์หินคลุก โดยออกแบบขนาดคละที่เหมาะสมจากการผสมหินคลุกตามท้องตลาดให้ได้ขนาดคละใกล้เคียงตาม Ideal grading ซึ่งเป็นขนาดคละสมมติที่ทำปฏิกิริยาได้ดีในการเกิดจีโอโพลิเมอร์

จากผลการทดสอบพบว่า การผสมขนาดคละของหินคลุกจากท้องตลาดให้ใกล้เคียงกับขนาดคละอุดมคติสามารถทำได้จริง โดยผลการทดสอบการบดอัดพบว่าขนาดคละอุดมคติให้ความหนาแน่นแห้งที่มากกว่าขนาดคละใช้งานจริง เนื่องจากขนาดคละอุดมคติมีปริมาณของอนุภาคขนาดเล็กมากกว่าจึงทำให้ความหนาแน่นที่ได้มีค่ามากกว่านั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณ OLC ที่เกิดขึ้น ทั้งการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐานของขนาดคละทั้งสองแบบมีค่าไม่ต่างกัน มากไปกว่านั้น จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวพบว่า ขนาดคละใช้งานจริง ให้กำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าขนาดคละอุดมคติในทุกประเภทตัวอย่างทั้งการบ่มแบบ 7 วัน และ 28 วัน ถึงแม้ว่าการบ่มที่ 7 วัน การอบกระตุ้นด้วยความร้อนจะให้กำลังอัดที่มากกว่าการไม่อบ แต่เมื่อตัวอย่างพัฒนากำลังไปที่ 28 วัน พบว่ากำลังอัดที่ได้มีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการอบ

จากผลการวิจัยชิ้นนี้ พบว่าการใช้หินคลุกขนาดตามตามท้องตลาดมาผสมในการทำจีโอโพลิเมอร์หินคลุกสามารถทำได้จริงและให้กำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าการใช้ขนาดคละอุดมคติ ซึ่งหมายถึงการอำนวยความสะดวกในการก่อสร้างในหน้างานจริง รวมไปถึงผลของการกระตุ้นด้วยความร้อนที่ 40 องศาเซลเซียส สามารถให้กำลังที่สูงกว่าการไม่กระตุ้นที่อายุตัวอย่าง ณ 7 วัน แต่เมื่ออายุตัวอย่างถึง 28 วัน กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนให้กำลังที่มากกว่าตัวอย่างที่ผ่านการกระตุ้น

โดยผลการทดสอบสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ ดังนี้

a. ขนาดคละที่ใช้งานจริง (Used Working Grading) ที่มีการผสมตามอัตราส่วนของ **หินฝุ่น : หิน3/8" : ผงฝุ่น** ด้วยอัตราส่วน **40% : 20% : 40%** ตามลำดับ ให้ความหนาแน่นน้อยกว่าขนาดคละอุดมคติ (Ideal Grading) ในสภาวะการบดอัดที่เหมือนกัน ซึ่งขนาดคละที่ได้จากการการผสมหินตามอัตราส่วนจะมีเม็ดดินขนาดเล็กที่น้อยกว่าขนาดคละตาม Ideal grading
b. ผลของการกระตุ้นด้วยความร้อน กำลังรับแรงอัดของ Used Working Grading ที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจากเตาอบ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กับตัวอย่างที่บ่ม ณ อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจะให้พัฒนากำลังรับแรงอัดได้เร็วกว่าตัวอย่างที่บ่ม ณ อุณหภูมิห้อง ในตัวอย่างอายุที่มีอายุการบ่ม 7 วัน แต่ในตัวอย่างอายุการบ่ม 28 วัน การกระตุ้นด้วยความร้อนไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังแรงอัดของตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างที่บ่ม ณ อุณหภูมิห้องให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อน
c. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวของขนาดคละใช้งานจริง (Used Working Grading) ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดมากกว่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานสำหรับชั้น

รองพื้นทาง (Subbase) ที่กำหนดกำลังขั้นต่ำไว้ที่ 7 ksc. (บ่มตัวอย่าง 7 วัน) โดยค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและต่ำสุดของตัวอย่างที่มีอายุการบ่ม 7 วัน ได้แก่ MOD 100%MDD ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน ได้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 36.78 ksc. และ MOD 95%MDD Wet ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน ได้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 15.80 ksc. ตามลำดับ และในกรณีของตัวอย่างที่บ่ม 28 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและต่ำสุด ได้แก่ MOD 100%MDD ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน ได้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 59.61 ksc. และ MOD 95%MDD Dry ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน ได้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 9.98 ksc.

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและแนะนำเรื่องต่าง ๆ ในการวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนร่วมทำการวิจัยทุกคนที่มีความตั้งใจและความมุ่งมั่น และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ครูช่าง และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ อีกทั้งช่วยอำนวยความสะดวกและสนับสนุนงานวิจัย ทั้งวัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือในการปฏิบัติงาน รวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ เป็นอย่างดียิ่ง

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Jitsangiam, T. Suwan, S. Kwunjai, U. Rattanasak, and P. Chindaprasirt, “Development of alkali activated crushed rock for environmentally sustainable roadway rehabilitation,” International Journal of Pavement Engineering, 2021.

[2] J. Davidovits, “ Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials,” Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 37, pp. 1633–1656, Aug. 1991.

[3] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, and B. V. Rangan, “ BRIEF REVIEW OF DEVELOPMENT OF GEOPOLYMER CONCRETE,” 2003.

[4] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer," Cement and Concrete Composites, vol. 29, no. 3, pp. 224-229, 2007.

[5] J. Davidovits, L. Buzzi, P. Rocher, D. Gimeno, C. Marini, and S. Tocco, "Geopolymeric cement based on low cost geologic materials. Results from the european research project geocistem," in Proceedings of the 2nd International Conference on Geopolymer, 1999, vol. 99, pp. 83-96.

[6] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, “จีโอโพลิเมอร์ : วัสดุประสานสีเขียว,” วัสดุปูนซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์ผสม, หน้า 83–94, 2557.

[7] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วัสดุจีโอโพลิเมอร์. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2560.

[8] ปริญญา จินดาประเสริฐ, เถ้าลอยในงานคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.

[9] สมิตร ส่งพิริยะกิจ, มาณัติ ภมะราภา, และ อุบลรักษณ์ รัตนศักดิ์, “วัสดุจีโอโพลิเมอร์,” พัฒนาเทคนิคศึกษา, ปีที่ 20, ฉบับที่ 65, หน้า 11–15, 2551.

[10] วสันต์ ปั้นสงข์, บารเมศ วรรธนะภูติ, กฤฎณะ เพ็ญสมบูรณ์, และ จิรโรจน์ ศุกลรัตน์, “คุณสมบัติด้านความคงทนและความแข็งแรงของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์,” วิศวกรรมสาร มก., ปีที่ 23, ฉบับที่ 74, หน้า 75–86, 2553.

[11] American Society for and Materials, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete (ASTM; C618-01)," ASTM International, 2015.

[12] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา, "วิธีการทดสอบความแน่นแบบมาตรฐาน (STANDARD COMPACTION TEST)," กรมทางหลวงชนบท, มทช. (ท) 501.1-2545.

[13] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา, "วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (MODIFIED COMPACTION TEST)," กรมทางหลวงชนบท, มทช.(ท) 501.2-2545.

[14] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา, "วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าแรงอัดแกนเดียว (UNCONFINED COMPRESSION TEST)," กรมทางหลวงชนบท., มทช. (ท) 303-2545.