



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

คุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์สำหรับก่อสร้างชั้นกันซึมในระบบฝังกลบ Properties of basalt quarry dust mixed with bentonite for landfill liner construction

ทวีศักดิ์ วังไพศาล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Thaveesak Vangpaisal¹

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190

E-mail: thaveesak.v@ubu.ac.th; Telephone: 0 4535 3310

วันที่รับบทความ 10 กุมภาพันธ์ 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 2 เมษายน 2563 ; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 21 พฤษภาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 8 มิถุนายน 2563

บทคัดย่อ

หินฝุ่นบะซอลต์เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการโม่หิน ในปัจจุบันยังมีการนำมาใช้ประโยชน์ไม่มากนัก บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุกันซึม และผลของความชื้นและพลังงานในการบดอัดที่ต่างกันต่อคุณสมบัติที่ใช้ในการก่อสร้างเป็นวัสดุกันซึมในระบบฝังกลบ การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างหินฝุ่นบะซอลต์จากโรงโม่หินในจังหวัดอุบลราชธานี จากการศึกษาพบว่า การผสมโซเดียมเบนโทไนต์เข้าไปในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จะทำให้หินฝุ่นบะซอลต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำกว่า 1×10^{-9} เมตรต่อวินาที และอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดเพื่อใช้เป็นวัสดุกันซึมได้ ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความชื้นในการบดอัดที่เพิ่มขึ้น และการหดตัวเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นในการบดอัดที่สูงขึ้น การบดอัดหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ด้วยความชื้นและพลังงานในการบดอัดต่างกันทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในการบดอัดกับหน่วยน้ำหนักแห้งที่อยู่ในรูปของขอบเขตคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างได้ โดยพบว่า การบดอัดหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ด้วยค่าความชื้นร้อยละ 12.0 - 15.5 และให้มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง 18.6 - 20.5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร จึงจะสามารถใช้เป็นชั้นกันซึมได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัยและไม่เกิดปัญหาการแตกร้าวของชั้นกันซึมจากการหดตัวของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์

คำสำคัญ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ชั้นกันซึม เบนโทไนต์ การบดอัด หินฝุ่นบะซอลต์

Abstract

Basalt quarry dust (BQD) is considered as waste material from basalt milling process. Currently, a large amount of BQD is left over and its use is limited. This paper aimed to study the properties of BQD mixed with bentonite (BQD-B) for using as liner material, and to determine the effect of different compaction energy and compaction moisture content on its properties for construction as landfill liner. The BQD used in this study was obtained from a basalt quarry in Ubon Ratchathani province. It was found that the addition of 1% of sodium-bentonite to the BQD resulted in the reduction of the hydraulic conductivity of the BQD to the level of 1×10^{-9} m/s, the required hydraulic conductivity for using as landfill liner material. Shear strength of the BQD-B tended to decrease as the compaction moisture content increased, while, the volumetric shrinkage increased as the compaction moisture content increased. The optimum compaction condition for the BQD-B can be obtained with the compaction moisture content of 12.0% - 15.5% and the dry unit weight of 18.6 - 20.5 kN/m³, in order to achieve the acceptable quality for using as liner material with safe bearing capacity and minimum shrinkage potential.

Keywords

basalt quarry dust; bentonite; compaction; hydraulic conductivity; landfill liner

1. บทนำ

ระบบฝังกลบขยะมูลฝอยหรือระบบเก็บกักกากของเสียจะต้องถูกออกแบบและก่อสร้างอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรม โดยมีชั้นกันซึม (Liners) ทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้มลพิษในรูปแบบต่างๆ ที่เกิดจากของเสียแพร่กระจายหรือรั่วซึมออกไปปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม ชั้นกันซึมจะต้องก่อสร้างจากวัสดุที่มีความสามารถในการให้น้ำไหลซึมผ่านได้ต่ำมาก ซึ่งแสดงได้ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ (Hydraulic Conductivity) การเลือกวัสดุในท้องถิ่นที่หาได้ง่ายและมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเหมาะสมตามข้อกำหนดทางสิ่งแวดล้อมมาใช้ในการก่อสร้างเป็นชั้นกันซึม จะประหยัดค่าก่อสร้างได้มาก วิธีหนึ่งที่สามารถทำได้คือ การปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่นนั้นให้มีความต่ำลงเพื่อใช้เป็นวัสดุกันซึม วิธีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินหรือวัสดุใดๆ ทำได้โดยการนำเบนโทไนต์มาเป็นวัสดุผสม เบนโทไนต์เป็นดินเหนียวชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ซึ่งเป็นแร่ดินในกลุ่มสมกไทต์ (Smectite) ที่มีคุณสมบัติในการพองตัวได้มาก เมื่อดูดซับน้ำและมีความยึดพิภักสูงที่สุดในกลุ่มของแร่ดินเหนียว จึงทำให้เบนโทไนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำที่ต่ำมากๆ ดินหรือวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูงเมื่อถูกผสมด้วยเบนโทไนต์แล้วจะทำให้ปริมาตรช่องว่างระหว่างเม็ดดินซึ่งเป็นเส้นทางการไหลของน้ำลดลง เนื่องจากเบนโทไนต์ที่ดูดซับน้ำจะพองตัวและเข้าไปอุดในช่องว่างในมวลดิน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของวัสดุนั้นลดลง

เบนโทไนต์ที่ใช้นิยมนำใช้ผสมเบนโทไนต์ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการพองตัวได้ดี และทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำ ปริมาณในการผสมเบนโทไนต์สำหรับปรับปรุงวัสดุแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ การผสมเบนโทไนต์เพื่อปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของวัสดุอื่น จะต้องใช้ปริมาณของเบนโทไนต์มากเพียงพอที่จะเข้าไปอุดตามช่องว่างภายในมวลของวัสดุนั้นๆ แต่ไม่ควรใช้ปริมาณของเบนโทไนต์ที่ผสมมากเกินไป เนื่องจากจะเป็นการสิ้นเปลืองและทำให้ทำงานได้ยากขึ้น วัสดุที่ถูกผสมจะมี

ความแข็งแรงต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และอาจมีปัญหาอื่นๆ ในการใช้งานได้

นักวิจัยจำนวนมากได้ทำการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพทรายเพื่อใช้เป็นวัสดุกันซึมโดยการผสมด้วยเบนโทไนต์ [1-3] โดยทั่วไปสามารถใช้อัตราส่วนเบนโทไนต์ต่อทรายประมาณไม่เกินร้อยละ 10 ก็สามารถทำให้ทรายมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้อยู่ในเกณฑ์ที่ใช้เป็นชั้นกันซึมได้ Doi and Imaizumi [4] พบว่าทรายที่ผสมด้วยเบนโทไนต์ในปริมาณร้อยละ 5 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำกว่า 1×10^{-9} เมตรต่อวินาที และ Ebina et al. [5] ได้ทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของทรายผสมเบนโทไนต์ชนิดต่างๆ ก็ได้ผลในทำนองเดียวกัน และยังพบว่าการเพิ่มปริมาณของเบนโทไนต์ที่ผสมเข้าไปมากขึ้น (ประมาณร้อยละ 11.5) ปริมาณเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีความสำคัญต่อการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของทราย จากการศึกษาของ ทวีศักดิ์ วังไพศาลและนท แสงเทียน [6] พบว่าสามารถทำการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของดินตะกอนทราย ซึ่งเป็นดินที่มีอยู่ทั่วไปในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ให้มีค่าลดลงอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้ใช้เป็นวัสดุกันซึมได้ด้วยการผสมโซเดียมเบนโทไนต์เข้าไปเพียง ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเท่านั้น

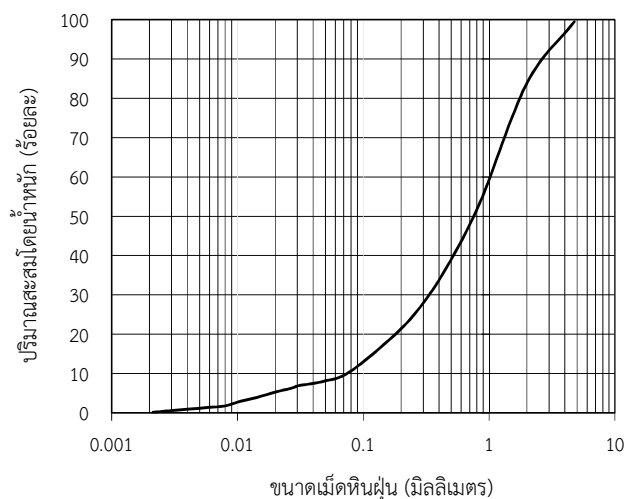
พื้นที่จังหวัดต่างๆ ในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่างมีโรงโม่หินหลายแห่ง เช่น จังหวัดบุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ และอุบลราชธานี ทำการผลิตหินบะซอลต์เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ในกระบวนการโม่หรือบดย่อยหินให้มีขนาดเล็กลงตามความต้องการใช้งานนั้น จะทำให้เกิดเศษหินขนาดเล็กและฝุ่นขึ้นด้วย เศษหินเล็กๆ และฝุ่นรวมถึงดินที่ปะปนอยู่จะเรียกว่า หินฝุ่น (Quarry Dust) เป็นเศษหินที่เหลือจากการคัดขนาดแล้วรวมกับฝุ่นที่เกิดขึ้นในระหว่างการโม่หินหรือดินที่ติดปนมากับหิน มีลักษณะเหมือนทรายปนกรวด โดยส่วนใหญ่แล้วจะถูกกองเป็นวัสดุเหลือทิ้งภายในพื้นที่โรงโม่หิน ปริมาณหินฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตจะมีปริมาณประมาณร้อยละ 20 ของหินที่ผลิตจำหน่ายได้ และจากข้อมูลการผลิตหินบะซอลต์เพื่ออุตสาหกรรมของประเทศไทย พบว่า

ในปี พ.ศ. 2561 มีปริมาณ 14.3 ล้านตัน [7] ดังนั้นจึงมีปริมาณของหินฝุ่นบะซอลต์เหลือทิ้งในแต่ละปีปริมาณมาก

การใช้ประโยชน์ของหินฝุ่นยังไม่มากนัก ได้มีความพยายามในการนำหินฝุ่นไปใช้ประโยชน์ เช่น การนำไปถมที่ การนำไปถมกลบหลุมบ่อในถนนบริเวณโรงโม่หิน หรือนำไปใช้แทนทรายในการผลิตคอนกรีต เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์ดังกล่าวมีปริมาณน้อยและยังมีมูลค่าต่ำ ได้มีการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการใช้ประโยชน์จากหินฝุ่นในหลายๆ กรณี เช่น (1) การหาแนวทางในการใช้หินฝุ่นเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์และเป็นวัสดุทดแทนทรายในการผสมคอนกรีต Laibao et al. [8] และ Uncik and Kmecova [9] พบว่า หินฝุ่น โดยเฉพาะส่วนที่เป็นฝุ่นละเอียด มีศักยภาพในการใช้งานเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อใช้ในงานคอนกรีต เนื่องจากมีส่วนประกอบของแร่ธาตุที่สามารถทำปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องได้ ภาณุพงศ์ จันญาไชย และคณะ [10] พบว่าการใช้หินฝุ่นเพื่อทดแทนปริมาณการใช้ทรายในการผสมคอนกรีต มีส่วนช่วยทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงขึ้น (2) ในงานด้านการทาง ได้มีการศึกษาคุณสมบัติของหินฝุ่นเพื่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับทดแทนทรายถมคันทาง [11] การใช้งานหินฝุ่นเพื่อการนี้มีความเป็นไปได้ แต่จำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณของส่วนที่เป็นเม็ดละเอียดให้เหมาะสมและไม่ควรใช้พลังงานในการบดอัดที่สูงเกินไป เนื่องจากเม็ดหินฝุ่นสามารถแตกหักเป็นเม็ดที่เล็กลงได้ นอกจากนั้น วิถีกร โพธิ์ศรีบั้ง และคณะ [12] ได้ศึกษาแนวทางในการพัฒนากำลังอัดของหินฝุ่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงมากขึ้น โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อทำให้หินฝุ่นมีค่ากำลังรับแรงที่สูงขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างพื้นทางได้ และ (3) งานด้านอื่นๆ ได้มีการใช้หินฝุ่นบะซอลต์ร่วมกับวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ในการผลิตเป็นกระเบื้องเซรามิก [13] และการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน จะใช้ในลักษณะที่เป็นฝุ่นละเอียดเรียกว่า ฝุ่นหินบะซอลต์ (Basalt Powder) ซึ่งจะมีเฉพาะผงละเอียดเท่านั้น จะมีปริมาณของอนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า ร้อยละ 90 [14] โดยอาจได้มาจากการร่อนคัดขนาดหรือจากถุงตกฝุ่นภายในโรงโม่หิน

ด้วยขนาดอนุภาคของหินฝุ่นบะซอลต์ที่มีขนาดตั้งแต่ 5 มิลลิเมตร จนถึงเม็ดละเอียดเป็นฝุ่นผงและมีดินเป็นส่วนผสม จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกันซึม เพื่อ

เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับก่อสร้างเป็นชั้นกันซึม บทความนี้จะนำเสนอผลการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ด้วยเบนโทไนต์เพื่อให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้น้ำต่ำลง โดยการหาอัตราส่วนการผสมเบนโทไนต์ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สำหรับใช้ในการก่อสร้างเป็นชั้นกันซึมได้ และการกำหนดขอบเขตคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการก่อสร้างเป็นชั้นกันซึมบดอัด โดยพิจารณาถึงผลของความชื้นและพลังงานที่ใช้ในการบดอัดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ค่ากำลังรับแรงเฉือน และการหดตัวของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์



รูปที่ 1 การกระจายขนาดอนุภาคของหินฝุ่นบะซอลต์ที่ใช้ในการศึกษา

2. วัสดุและวิธีการศึกษา

2.1 หินฝุ่นบะซอลต์และเบนโทไนต์

หินฝุ่นบะซอลต์ที่ใช้ในการศึกษานำมาจากโรงโม่หินในเขตอำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี ตัวอย่างหินฝุ่นมีลักษณะเป็นเม็ดหยาบปนกับเม็ดละเอียดไปจนถึงฝุ่นผง มีสีเทาถึงเทาเข้ม ผลการทดสอบการกระจายขนาดของอนุภาคหินฝุ่นบะซอลต์จากการร่อนผ่านตะแกรงและการทดสอบด้วยไฮโดรมิเตอร์ได้ผลการกระจายขนาดดังแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นว่าตัวอย่างหินฝุ่นมีขนาดอนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ร้อยละ 10 เมื่อจำแนกตามระบบ USCS จัดอยู่ในกลุ่ม SW-SM (ทรายปนกรวดที่มีขนาดละเอียดและทรายที่มีตะกอนปน) หรือจำแนกตามระบบ AASHTO ได้ว่าอยู่ในกลุ่ม A-1-b (หินกรวดและทราย) ผลการทดสอบพบว่าหินฝุ่นบะซอลต์ที่ใช้มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.78 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

เท่ากับ 2.5×10^{-7} เมตรต่อวินาที ซึ่งยังมีค่าสูงเกินกว่าที่จะนำไปใช้ก่อสร้างเป็นวัสดุกันซึมได้

เบนโทไนต์ที่ใช้ในการผสมกับหินฝุ่นบะซอลต์เป็นโซเดียมเบนโทไนต์ชนิดผงละเอียด ผลการทดสอบคุณสมบัติพบว่ามีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.49 มีค่าพิกัดเหลวและพิกัดพลาสติกเท่ากับ 463 และ 48 ตามลำดับ และมีค่าครรชนีการพองตัวเท่ากับ 35 มิลลิลิตรต่อ 2 กรัม

2.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

วิธีการเตรียมตัวอย่าง หินฝุ่นบะซอลต์จะถูกนำมาตากแดดให้แห้งและกำจัดสิ่งแปลกปลอมออกก่อน จากนั้นเทกองในกระบะและคลุกเคล้าให้คลุกกันอย่างทั่วถึงก่อนที่จะแบ่งบรรจุในถุงพลาสติกสำหรับใช้ในการทดสอบต่อไป ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าหินฝุ่นทุกๆ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน

การเตรียมตัวอย่างหินฝุ่นผสมกับเบนโทไนต์เพื่อทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ทำได้โดยการผสมหินฝุ่นกับเบนโทไนต์ด้วยอัตราส่วนผสมเบนโทไนต์เป็นร้อยละของน้ำหนักแห้งของหินฝุ่นตามที่กำหนด จากนั้นผสมน้ำที่ปราศจากไอออนลงไปเพื่อให้ได้ค่าความชื้นตามที่ต้องการ จากนั้นคลุกเคล้าให้เข้ากันก่อนที่จะนำไปบรรจุไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดมิดชิดเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อให้เบนโทไนต์ดูดซับความชื้นและเป็นการปรับสภาพให้หินฝุ่นมีความชื้นที่สม่ำเสมอ ก่อนถูกนำไปบดอัดเพื่อทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่อไป

การบดอัดตัวอย่างหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ด้วยระดับพลังงานแตกต่างกัน 3 ระดับ ประกอบด้วย การบดอัดแบบมาตรฐาน การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และการบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน มีรายละเอียด ดังนี้

(1) การบดอัดแบบมาตรฐานใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 698 [15] ทำการบดอัดดินในกระบอกบดอัดมาตรฐาน มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) มีปริมาตร 943.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร แบ่งการบดอัดออกเป็น 3 ชั้นเท่าๆ กัน โดยในแต่ละชั้นทำการบดอัดจำนวน 25 ครั้ง โดยใช้ค้อนมาตรฐานที่มีตมุน้ำหนักขนาด 2.5 กิโลกรัม และมีระยะตกกระทบ 305 มิลลิเมตร (12 นิ้ว)

(2) การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1557 [16] แบ่งการบดอัดออกเป็น 5 ชั้นเท่าๆ กัน ในแต่ละชั้นทำการบดอัดจำนวน 25 ครั้ง โดยใช้ค้อนมาตรฐานที่มีตมุน้ำหนักขนาด 4.54 กิโลกรัม และมีระยะตกกระทบ 457 มิลลิเมตร (18 นิ้ว)

(3) การบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน เป็นการทดสอบการบดอัดที่ใช้พลังงานในการบดอัดน้อยกว่ามาตรฐาน เป็นวิธีการทดสอบที่เสนอโดย Daniel and Benson [17] มีวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน ใช้อุปกรณ์ในการทดสอบชุดเดียวกัน แต่จะทำการบดอัดเพียงชั้นละจำนวน 15 ครั้งเท่านั้น

2.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของหินฝุ่นบะซอลต์ ใช้เครื่องมือทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้แบบผนังงรูปตามมาตรฐาน ASTM D 5856 [18] การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมกับเบนโทไนต์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ใช้เครื่องมือทดสอบแบบผนังงรูปตามมาตรฐาน ASTM D 5084 [19] โดยใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ที่ได้จากการบดอัดด้วยกระบอกบดอัดขนาดมาตรฐาน ใช้วิธีการทดสอบแบบแรงดันคงที่ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบอ่านค่าแรงดันได้ละเอียดถึงระดับ 1 กิโลปาสกาล และอ่านค่าปริมาตรได้ละเอียดถึง 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร การทดสอบใช้แรงดันดินด้านข้างที่ 550 กิโลปาสกาล แรงดันประสิทธิผลเฉลี่ย ไม่น้อยกว่า 35 กิโลปาสกาล และค่าความลาดชันชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient) สูงสุดไม่เกิน 30 ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของตัวอย่าง (B-value) มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 กำหนดให้มีทิศทางไหลของน้ำผ่านตัวอย่างจากด้านล่างขึ้นด้านบน ทำการทดสอบโดยใช้น้ำที่ปราศจากไอออน

2.4 การทดสอบการรับแรงเฉือนและการหดตัว

การทดสอบการรับแรงเฉือน ใช้การทดสอบหาค่าล้งด้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธีไร้แรงอัดด้านข้างตามมาตรฐาน ASTM D 2166 [20] ทดสอบโดยใช้อัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง 0.8 มิลลิเมตรต่อนาทิจึงเนื่องจากเนื้อหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่บดอัดแล้วจะไม่สามารถปรับแต่งให้มีขนาดก้อนตัวอย่างที่เล็กลงได้ เพราะหินฝุ่นที่มีเม็ดหยาบ

จะหลุดร่วงออกมาจากก้อนตัวอย่างทำให้ผิวของก้อนตัวอย่างไม่เรียบสม่ำเสมอและมีขนาดหน้าตัดไม่คงที่ จึงจำเป็นต้องตัดแปลงกระบอกบดอัดตัวอย่าง โดยการบดอัดตัวอย่างเพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือน ใช้กระบอกบดอัดตัดแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร สูงประมาณ 15 เซนติเมตร โดยตัวอย่างจะมีสัดส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงอยู่ในช่วง 2 ถึง 2.5 เท่า ทำการบดอัดตัวอย่างด้วยพลังงานที่เทียบเท่ากันกับกรณีที่ใช้กระบอกบดอัดแบบมาตรฐาน ตัวอย่างที่บดอัดแล้วสามารถนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนได้โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งขนาดของก้อนตัวอย่าง

การทดสอบการหดตัวของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์จะเป็นการวัดการหดตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากการสูญเสียความชื้น ในการบดอัดตัวอย่างสำหรับการทดสอบค่าการหดตัวของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ ทำการบดอัดด้วยกระบอกทดสอบแบบมาตรฐาน แล้วนำก้อนตัวอย่างออกจากกระบอกบดอัด และตั้งไว้ในห้องปฏิบัติการที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักและตรวจวัดขนาดของดินตัวอย่างทุกๆ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งก้อนตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่

3. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

ผลการศึกษาประกอบด้วย การหาอัตราส่วนผสมของเบนโทไนต์สำหรับการปรับปรุงหินฝุ่นบะซอลต์สำหรับเป็นวัสดุกันซึม และการกำหนดขอบเขตคุณสมบัติที่เหมาะสมของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์สำหรับการก่อสร้างเป็นชั้นดินกันซึมบดอัด

3.1 อัตราส่วนผสมเบนโทไนต์

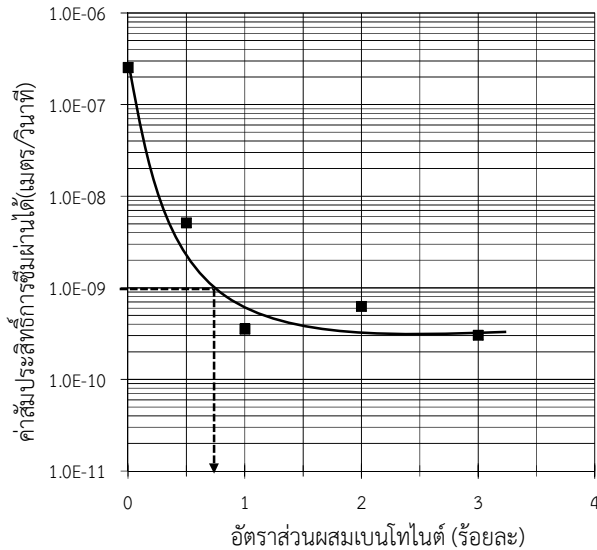
การหาอัตราส่วนผสมเบนโทไนต์ที่ทำให้หินฝุ่นบะซอลต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุกันซึมได้ (ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำกว่า 1×10^{-9} เมตรต่อวินาที) ทำได้โดยการเตรียมตัวอย่างหินฝุ่นบะซอลต์ที่มีอัตราส่วนผสมเบนโทไนต์ต่างๆ กัน ทำการบดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน โดยใช้ค่าความชื้นที่สูงกว่าค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content; OMC) ประมาณร้อยละ 2 แล้วทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้โดยเครื่องมือทดสอบแบบผนังยืดหยุ่น

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของหินฝุ่นบะซอลต์ที่ผสมด้วยโซเดียมเบนโทไนต์ในปริมาณต่างๆ กันแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นว่าการผสมเบนโทไนต์โดยใช้อัตราส่วนผสมเป็นร้อยละของน้ำหนักแห้งของหินฝุ่นตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 3 จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของหินฝุ่นบะซอลต์ลดลงมากกว่า 1000 เท่า (จาก 10^{-7} เมตรต่อวินาที เป็นต่ำกว่า 10^{-10} เมตรต่อวินาที) เบนโทไนต์ที่ผสมจะเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างในระหว่างเม็ดหินฝุ่น และจะเกิดการพองตัวหลังจากดูดซับน้ำหรือความชื้น ทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดหินฝุ่นลดลงและลดเส้นทางในการไหลซึมผ่านของน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จึงลดลงตามปริมาณการผสมเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น

ทั้งนี้ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ (ดังรูปที่ 2) ที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ (1) ช่วงอัตราส่วนผสมโซเดียมเบนโทไนต์ต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 1) เป็นช่วงที่ปริมาณของเบนโทไนต์ที่เติมเข้าไป มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้อย่างชัดเจน สังเกตได้จากความชันของเส้นแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ที่ลดลงตามอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้น และ (2) ช่วงอัตราส่วนผสมโซเดียมเบนโทไนต์มากกว่าร้อยละ 1 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของหินฝุ่นบะซอลต์มีเพียงเล็กน้อย โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณโซเดียมเบนโทไนต์มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากเบนโทไนต์สามารถพองตัวอุดช่องว่างระหว่างเม็ดหินฝุ่นบะซอลต์ได้อย่างเพียงพอแล้ว

จะเห็นว่าที่อัตราส่วนผสมเบนโทไนต์ประมาณร้อยละ 0.7 จะทำให้หินฝุ่นมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ลดลงมาถึง 1×10^{-9} เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของวัสดุกันซึมตามที่กำหนดทั่วไป [22] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการจะควบคุมคุณภาพได้ง่ายกว่าการก่อสร้างในสถานที่จริง เช่น การคลุกเคล้าหินฝุ่นกับเบนโทไนต์อาจจะไม่ทั่วถึงกัน เป็นต้น อาจส่งผลให้ชั้นกันซึมมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดได้ ดังนั้น จึงควรใช้อัตราส่วนผสมเบนโทไนต์ประมาณร้อยละ 1 สำหรับการก่อสร้างใน เพื่อควบคุมคุณภาพของหินฝุ่นผสมด้วยเบนโทไนต์ให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำเพียงพอสำหรับก่อสร้างเป็นชั้นกันซึม อย่างไรก็ตามการผสมเบนโทไนต์ในอัตราส่วนที่

สูงมากเกินไปอาจไม่มีนัยสำคัญต่อการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ทำให้กำลังรับน้ำหนักลดลง และอาจมีผลต่อประสิทธิภาพของชั้นกันซึมในระยะยาวได้



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้กับอัตราส่วนผสมเบนโทไนต์ในหินฝุ่นบะซอลต์

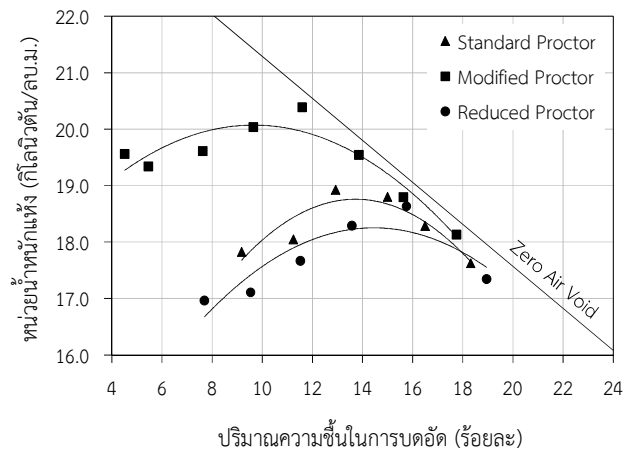
3.2 การทดสอบการบดอัดหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์

การทดสอบการบดอัดโดยใช้พลังงานที่แตกต่างกัน เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่ถูกบดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐาน แบบสูงกว่ามาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน การทดสอบการบดอัดดินทั่วไปจะเป็นการบดอัดโดยสามารถใช้ตัวอย่างดินเดิมได้ โดยทำการคลุกเคล้าดินตัวอย่างเดิมให้มีความชื้นสูงขึ้นแล้วทำการบดอัดใหม่ ส่วนการทดสอบการบดอัดหินฝุ่นผสมเบนโทไนต์ไม่สามารถทำการบดอัดซ้ำได้ เนื่องจากการบดอัดซ้ำอาจทำให้เม็ดหินแตกละเอียดมากขึ้น จะทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งที่ทดสอบได้มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง จึงจำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างหินฝุ่นแต่ละความชื้นไว้เพื่อทดสอบการบดอัด

ผลการทดสอบการบดอัดหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่มีอัตราส่วนผสมเบนโทไนต์ร้อยละ 1 โดยใช้ระดับพลังงานแตกต่างกันแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในการบดอัดกับหน่วยน้ำหนักแห้งดังรูปที่ 3 จะเห็นว่า การบดอัดหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ด้วยพลังงานที่สูงขึ้น จะมีหน่วย

น้ำหนักแห้งสูงขึ้น แต่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดจะมีค่าต่ำลง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในการบดอัดกับค่าหน่วยน้ำหนักแห้งจะถูกใช้สำหรับการกำหนดขอบเขตพื้นที่ของคุณสมบัติหินฝุ่นผสมเบนโทไนต์ตามตัวแปรต่างๆ เพื่อกำหนดเป็นขอบเขตคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเครื่องมือควบคุมการก่อสร้างชั้นกันซึมบดอัดต่อไป

ค่าความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของหินฝุ่นผสมเบนโทไนต์สำหรับพลังงานในการบดอัดระดับต่างๆ สรุปได้ในตารางที่ 1 ค่าความชื้นที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง ร้อยละ 10.0 ถึงร้อยละ 14.5 และค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์มีค่าระหว่าง 18.2 ถึง 20.1 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ข้อมูลดังกล่าวใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ การทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนและค่าการหดตัวต่อไป



รูปที่ 3 ผลการทดสอบการบดอัดในระดับพลังงานที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1 ค่าความชื้นที่เหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์

ระดับพลังงานในการบดอัด	ความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)	หน่วยน้ำหนักแห้ง (กิโลนิวตัน/ลบ.ม)
แบบมาตรฐาน	5.13	.188
แบบสูงกว่ามาตรฐาน	0.10	1.20
แบบต่ำกว่ามาตรฐาน	5.14	.182

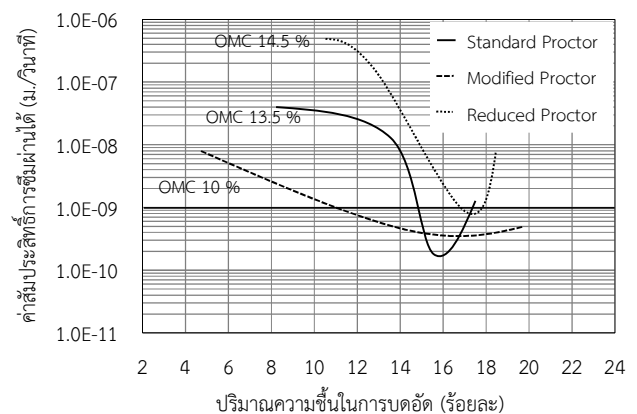
3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์

การบดอัดหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์โดยใช้ปริมาณความชื้นในการบดอัดที่แตกต่างกันและใช้ระดับพลังงานในการบดอัดแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ การบดอัดแบบมาตรฐาน บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน และบดอัดแบบต่ำกว่ามาตรฐาน จากนั้นนำตัวอย่างแต่ละก้อนไปทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่บดอัดด้วยพลังงานสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จะต่ำกว่าตัวอย่างที่บดอัดด้วยพลังงานต่ำ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้มีค่าลดลงเมื่อใช้ความชื้นในการบดอัดที่สูงขึ้น ตัวอย่างที่ถูกบดอัดด้วยความชื้นทางด้านเปียกของค่าความชื้นที่เหมาะสม จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำกว่าตัวอย่างที่ถูกบดอัดด้วยความชื้นทางด้านแห้งของค่าความชื้นที่เหมาะสม ที่สำคัญของพลังงานในการบดอัดต่อการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จะชัดเจนในกรณีที่บดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐานและแบบต่ำกว่ามาตรฐาน และที่ค่าความชื้นในการบดอัดสูงๆ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวอย่างที่บดอัดด้วยพลังงานแตกต่างกันจะมีความแตกต่างกันน้อย เนื่องจากที่ความชื้นในการบดอัดสูงๆ ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่บดอัดในแต่ละระดับพลังงานจะมีค่าใกล้เคียงกัน และในก้อนตัวอย่างจะมีปริมาณน้ำมากเพียงพอที่เบนโทไนต์จะดูดซับไว้ และมีการขยายตัวอุดตามช่องว่างระหว่างเม็ดหินฝุ่นได้อย่างเต็มที่ในทุกๆ ตัวอย่าง ทั้งนี้ จะเห็นว่าค่าความชื้นในการบดอัดที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์มีค่าต่ำกว่า 1×10^{-9} เมตรต่อวินาที อยู่ในช่วงความชื้นที่สูงกว่าค่าความชื้นที่เหมาะสมตั้งแต่ร้อยละ 1.5 ขึ้นไป

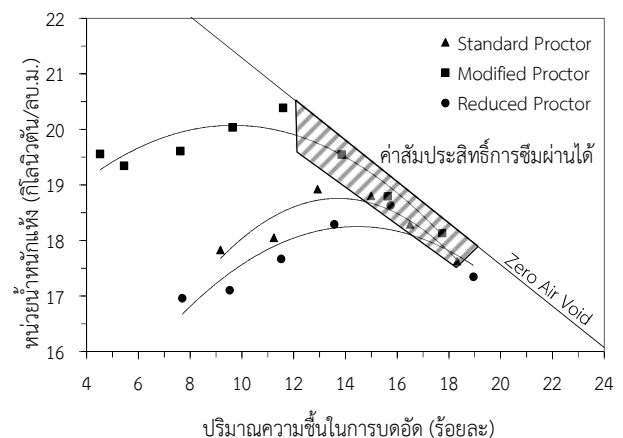
จากผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ สามารถกำหนดขอบเขตคุณสมบัติของวัสดุกันซึมบดอัดลงบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในการบดอัดกับหน่วยน้ำหนักแห้ง ให้ครอบคลุมจุดที่ตัวอย่างที่ทดสอบมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดเป็นวัสดุกันซึมได้คือ ต่ำกว่า 1×10^{-9} เมตรต่อวินาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5

อธิบายได้ว่า ช่วงขอบเขตคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จะอยู่ในช่วงความชื้นร้อยละ 12 - 19 และช่วงหน่วยน้ำหนักแห้ง

17.5 - 20.5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร จากขอบเขตที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการควบคุมการก่อสร้างชั้นกันซึมบดอัดได้ หากพิจารณาตามค่าความชื้นที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุกันซึม จะพบว่าที่พลังงานในการบดอัดสูงๆ จะมีช่วงค่าความชื้นที่ใช้ในการบดอัดที่กว้างกว่าการใช้พลังงานในการบดอัดต่ำ ดังนั้นหากต้องการช่วงความชื้นที่ใช้ในการบดอัดกว้างเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมความชื้นในการบดอัด ก็ควรใช้พลังงานในการบดอัดที่สูง



รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่บดอัดด้วยพลังงานต่างกัน



รูปที่ 5 ขอบเขตคุณสมบัติของชั้นกันซึมบดอัดที่พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

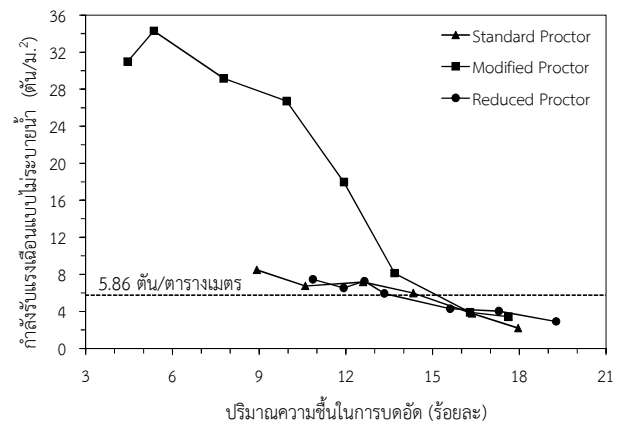
3.4 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนด์

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนด์ที่บดอัดด้วยความชื้นในการบดอัดต่างกันโดยใช้ระดับพลังงานแบบมาตรฐาน แบบสูงกว่ามาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน แสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนด์ที่บดอัดด้วยพลังงานระดับต่างๆ กัน มีแนวโน้มของความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่การใช้ความชื้นในการบดอัดที่สูงขึ้นจะทำให้หินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนด์มีค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลง ในขณะที่การใช้พลังงานในการบดอัดที่สูงขึ้นจะทำให้มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นมากขึ้น การบดอัดด้วยระดับพลังงานที่สูงกว่ามาตรฐานจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่าสูงขึ้นมากอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความชื้นในการบดอัดที่สูงกว่าร้อยละ 15 โดยประมาณ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างที่ทดสอบจะใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า ที่ความชื้นในการบดอัดสูงๆ ความแตกต่างของระดับพลังงานที่ใช้ในการบดอัดจะมีนัยสำคัญน้อยลงต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงเฉือน

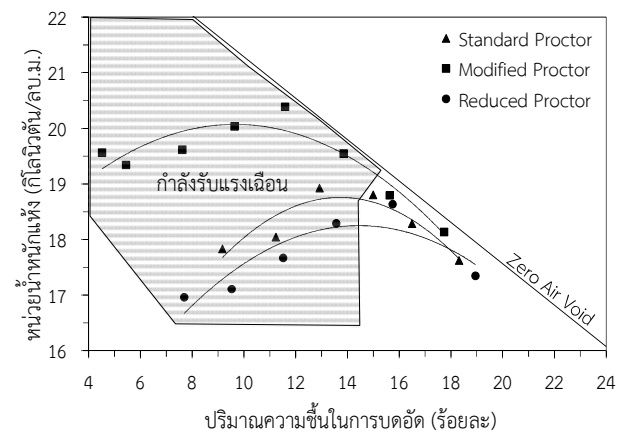
จากตัวอย่างที่ทดสอบ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนด์ซึ่งมีลักษณะเป็นกรวดปนดินเหนียวนั้น จะมีค่ากำลังลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้น เพราะน้ำจะเข้าไปเคลือบผิวของเม็ดหินฝุ่น ทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคลดลง และในขณะเดียวกันเบนโทไนด์ที่ดูดซับน้ำไว้มาก มีการพองตัวมาก จะเป็นสารหล่อลื่นระหว่างเม็ดหินฝุ่น ทำให้แรงเสียดทานภายในมวลดินลดลง ค่ากำลังรับแรงเฉือนจึงลดลง

หินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนด์ที่ใช้ในการบดอัดเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมต้องมีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่สูงพอ เพื่อรับน้ำหนักของรถบดอัดและน้ำหนักกดทับจากการจราจรในระหว่างก่อสร้างได้ รวมทั้งสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจากวัสดุอื่นๆ ที่อยู่ชั้นบนได้ Owies and Khera [23] แนะนำว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินบดอัดสำหรับเป็นชั้นกันซึมไม่ควรต่ำกว่า 5.86 ตันต่อตารางเมตร เพื่อให้สามารถทำการก่อสร้างได้สะดวก โดยสามารถรับน้ำหนักรถบดอัดหรือเครื่องจักรหนักได้ ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้เกณฑ์ดังกล่าวเป็นค่ารับแรงที่ต่ำที่สุดในการกำหนดขอบเขตคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นชั้นกันซึม

สามารถกำหนดขอบเขตของความชื้นในการบดอัดของตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ลงบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในการบดอัดกับหน่วยน้ำหนักแห้งได้ดังรูปที่ 7 จะได้ว่าในการบดอัดหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนด์ด้วยระดับพลังงานแบบมาตรฐาน แบบสูงกว่ามาตรฐาน และแบบต่ำกว่ามาตรฐาน จะต้องใช้ความชื้นในการบดอัดไม่เกินร้อยละ 14.5 ร้อยละ 15 และร้อยละ 14 ตามลำดับ จึงจะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนเพียงพอในการใช้งานเป็นวัสดุกันซึมบดอัด



รูปที่ 6 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนด์ที่บดอัดด้วยพลังงานแตกต่างกัน



รูปที่ 7 ขอบเขตคุณสมบัติของชั้นกันซึมบดอัดที่พิจารณาจากค่ากำลังรับแรงเฉือน

3.5 การหัตถ์ของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนด์

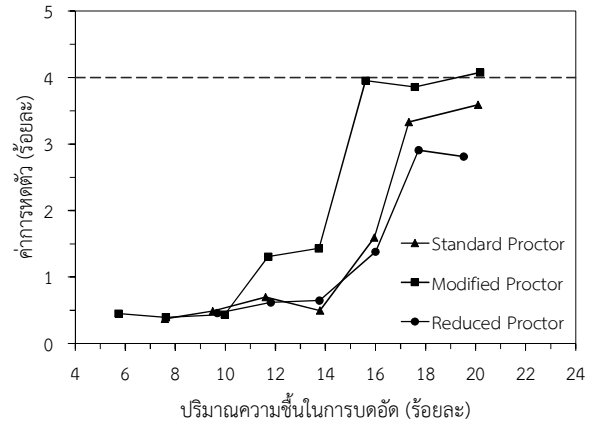
หินฝุ่นบะซอลต์ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยเบนโทไนด์เพื่อใช้เป็นวัสดุกันซึมมีโอกาสที่จะเกิดปัญหาจากการหดตัวได้ เนื่องจากเบนโทไนด์มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นและ

สามารถพองตัวได้มาก หากชั้นกันซึมเกิดการสูญเสียความชื้น จะทำให้เกิดการหดตัวของมวลหินฝุ่นผสมเบนท์ไนด์ได้ หากปริมาณการหดตัวสูงอาจทำให้เกิดรอยแตกร้าวในชั้นกันซึมปรากฏให้เห็นได้ เรียกว่า รอยแตกร้าวจากการสูญเสียความชื้น (Desiccation Cracks) ซึ่งปัญหาดังกล่าวทำให้ชั้นกันซึมบดอัดสูญเสียประสิทธิภาพในการทำงานได้ การศึกษาปริมาณการหดตัวแสดงในรูปของการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric Shrinkage) ซึ่งคำนวณได้จาก ปริมาตรของตัวอย่างที่ลดลง เนื่องจากการหดตัวจากการสูญเสียความชื้นหารด้วยปริมาตรของตัวอย่างเริ่มต้น

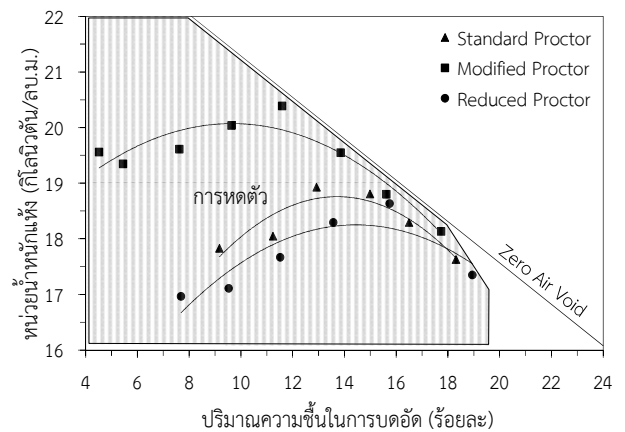
ผลการทดสอบค่าการหดตัวของตัวอย่างหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนท์ไนด์ที่ใช้พลังงานในการบดอัดทั้ง 3 ระดับพลังงานแสดงในรูปที่ 8 จะเห็นว่า การหดตัวแปรผันไปตามความชื้นที่ใช้ในการบดอัด โดยค่าการหดตัวจะมีค่าน้อยในช่วงความชื้นบดอัดที่ต่ำกว่าค่าความชื้นที่เหมาะสม แต่เมื่อความชื้นในการบดอัดสูงกว่าค่าความชื้นที่เหมาะสม ค่าการหดตัวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจากเบนท์ไนด์ที่ผสมอยู่ในตัวอย่างหินฝุ่นบะซอลต์ดูดซึมน้ำไว้มาก ส่งผลให้สามารถพองตัวได้สูง ดังนั้นเมื่อเกิดการสูญเสียความชื้นออกจากก้อนตัวอย่าง จึงทำให้เกิดการหดตัวสูงตามไปด้วย การหดตัวของตัวอย่างที่บดอัดด้วยพลังงานสูงกว่ามาตรฐานจะมีค่าสูงกว่ากรณีอื่นๆ เนื่องจากการบดอัดด้วยพลังงานสูงจะได้ตัวอย่างที่มีค่าหน่วยน้ำหนักสูง ซึ่งจะมีปริมาณของเบนท์ไนด์สูงกว่าก้อนตัวอย่างที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำกว่า โดยสามารถคำนวณได้ว่าสำหรับตัวอย่างที่มีค่าความชื้นในการบดอัดเท่ากัน ปริมาณของเบนท์ไนด์ในก้อนตัวอย่างที่บดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐานจะมากกว่า ปริมาณของเบนท์ไนด์ในก้อนตัวอย่างที่บดอัดด้วยพลังงานแบบมาตรฐานประมาณร้อยละ 3.4

จากสมมติฐานที่ว่าหากค่าการหดตัวมีค่าสูงเกินกว่าร้อยละ 4 จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นในชั้นกันซึมบดอัด [24] จากตัวอย่างที่ทดสอบจะมีเพียงตัวอย่างหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนท์ไนด์ที่บดอัดด้วยพลังงานแบบสูงกว่ามาตรฐานด้วยความชื้นในการบดอัดสูงกว่าร้อยละ 20 ตัวอย่างเดียวที่มีค่าการหดตัวสูงกว่าค่าที่กำหนด และจากการตรวจสอบก้อนตัวอย่างบดอัดที่ใช้ในการทดสอบค่าการหดตัว ไม่พบว่ามีรอยแตกร้าวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นเกิดขึ้นในตัวอย่างใดๆ ที่ทดสอบ ดังนั้น จึงสามารถกำหนดขอบเขตคุณสมบัติที่เหมาะสมของหินฝุ่นบะ

ซอลต์ผสมเบนท์ไนด์สำหรับเป็นวัสดุกันซึมตามอิทธิพลของค่าการหดตัวลงบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในการบดอัดกับหน่วยน้ำหนักแห้งได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 ค่าการหดตัวของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนท์ไนด์ที่บดอัดด้วยพลังงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 9 ขอบเขตคุณสมบัติของชั้นกันซึมบดอัดที่พิจารณาจากค่าการหดตัวของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนท์ไนด์

3.6 ขอบเขตคุณสมบัติที่เหมาะสมของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนท์ไนด์สำหรับก่อสร้างเป็นชั้นกันซึม

ความชื้นในการบดอัดและค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการกำหนดคุณลักษณะสำหรับควบคุมการบดอัดในการก่อสร้างชั้นกันซึมได้ โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและค่าความชื้นในการบดอัด ที่ใช้พลังงานในการบดอัดต่างๆ กัน เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้อยู่ในระดับที่ต้องการ รวมทั้งพิจารณาความสามารถรับน้ำหนักการบดอัดหรือน้ำหนักจาก

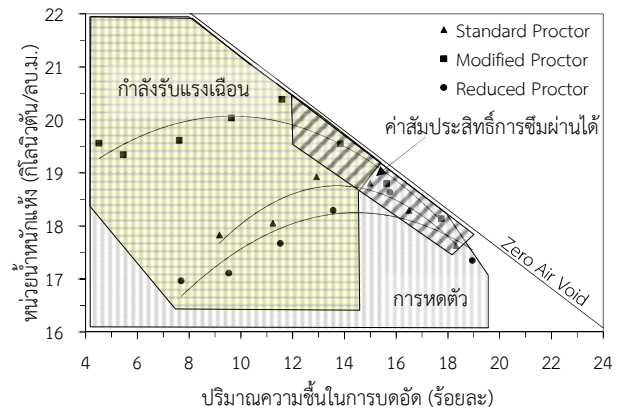
การจราจรได้ และโอกาสเกิดปัญหาเนื่องจากการหดตัว แตกร้าจากการสูญเสียความชื้นของชั้นกันซึม

จากการกำหนดคุณสมบัติสำหรับการก่อสร้างชั้นกันซึมบดอัด ให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำกว่า 1×10^{-9} เมตร/วินาที มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงกว่า 5.86 ตัน/ตารางเมตร และมีการหดตัวเชิงปริมาตรต่ำกว่าร้อยละ 4 และจากผลการทดสอบคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์บดอัดที่ความชื้นและระดับพลังงานต่างๆ กันดังแสดงเป็นขอบเขตที่เหมาะสมในรูปที่ 5 รูปที่ 7 และรูปที่ 9 สามารถกำหนดช่วงความชื้นในการบดอัดตามคุณสมบัติดังกล่าว ได้ดังตารางที่ 2 จะเห็นว่าค่าความชื้นที่ใช้ในการบดอัดให้หินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด จะมีช่วงที่จำกัด แต่ความชื้นที่ใช้ในการบดอัดเพื่อให้หินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์มีค่ากำลังรับแรงเฉือนตามและการหดตัวเชิงปริมาตรตามที่กำหนดจะมีช่วงที่กว้างกว่า

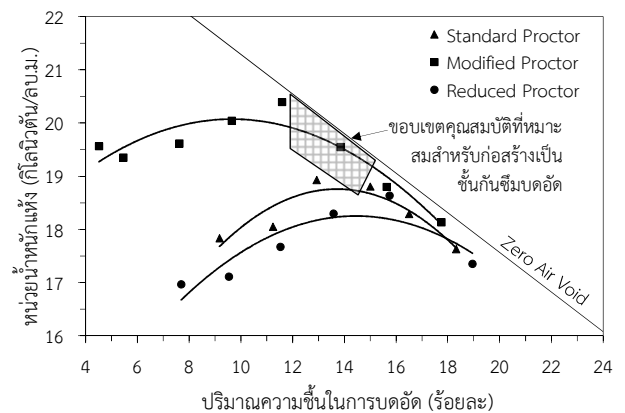
ตารางที่ 2 ค่าความชื้นในการบดอัดหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับก่อสร้างเป็นชั้นกันซึม

ระดับพลังงาน ในการบดอัด	ความชื้นในการบดอัด (ร้อยละ)		
	ค่าสัมประสิทธิ์ การซึมผ่านได้ ต่ำกว่า 1×10^{-9} เมตร/วินาที	ค่ากำลังรับ แรงเฉือนสูง กว่า 5.86 ตัน/ตร.ม.	การหดตัว เชิง ปริมาตร ต่ำกว่า ร้อยละ 4
แบบมาตรฐาน	5.17 - 15	น้อยกว่า 14.5	น้อยกว่า 20
แบบ สูง กว่า มาตรฐาน	19 - 5.11	น้อยกว่า 15.0	น้อยกว่า 19
แบบ ต่ำ กว่า มาตรฐาน	1 - 5.167.5	น้อยกว่า 14.0	น้อยกว่า 20

การหาขอบเขตคุณสมบัติที่เหมาะสมในการก่อสร้างทำได้โดยการซ้อนทับขอบเขตคุณสมบัติที่เหมาะสมทั้ง 3 ประการ ดังกล่าวลงบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในการบดอัดและค่าหน่วยน้ำหนักแห้งเดียวกันดังรูปที่ 10 จะได้ว่าขอบเขตพื้นที่ที่มีการซ้อนทับของคุณสมบัติทั้ง 3 ประการเป็นขอบเขตคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่แนะนำสำหรับการก่อสร้างเป็นชั้นกันซึมบดอัดดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 การซ้อนทับขอบเขตคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่มีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด



รูปที่ 11 ขอบเขตคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างชั้นกันซึมบดอัด

ขอบเขตคุณสมบัติที่เหมาะสมในการบดอัดสำหรับใช้ในการก่อสร้างชั้นกันซึม ที่พิจารณาถึง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ พลังงานที่ใช้ในการบดอัด ค่ากำลังรับแรงเฉือน และค่าการหดตัว ตามวิธีที่เสนอโดย Daniel and Wu [21] และ USEPA [22] เรียกว่า ขอบเขตที่ยอมรับได้ หรือ Acceptable Zone โดยมีค่าความชื้นในการบดอัดระหว่าง ร้อยละ 12 ถึงร้อยละ 15.5 และให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งระหว่าง 18.6 – 20.5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร การกำหนดขอบเขตที่ยอมรับได้ จะสามารถใช้เป็นเครื่องมืออย่างง่ายในการตรวจสอบและควบคุมการก่อสร้างในสนามได้ ช่วยให้การก่อสร้างชั้นกันซึมบดอัดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อมูลขอบเขตคุณสมบัติที่ยอมรับได้ของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่ได้จากการศึกษาทำให้ทราบช่วงของค่าความชื้นในการบดอัดที่สามารถใช้งานได้ ทำให้การควบคุมการก่อสร้างขึ้นกันซึมบดอัดในภาคสนามเป็นไปได้ง่ายขึ้นและมีความสะดวก เนื่องจากมีช่วงของความชื้นในการบดอัดที่กว้างขึ้นกว่างานบดอัดดินทั่วไป ขอบเขตคุณสมบัติที่ยอมรับได้ของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาสำหรับดินเหนียวบดอัด และดินชนิดอื่นๆ [6, 17, 25] แต่ค่าความชื้นในการบดอัดหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่ได้ จะมีช่วงที่แคบกว่าวัสดุอื่นๆ เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติพื้นฐานที่แตกต่างกัน

ผลการศึกษาสามารถประยุกต์ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์สำหรับการก่อสร้างเป็นวัสดุกันซึม อย่างไรก็ตาม คุณภาพในการใช้งานของชั้นกันซึมจะขึ้นอยู่กับวิธีการก่อสร้างที่ดีเป็นสำคัญ โดยจะต้องมีการควบคุมการก่อสร้างที่ดี ตั้งแต่การกำหนดส่วนผสมที่เหมาะสม การผสมวัสดุให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง การควบคุมความชื้นในการบดอัดให้เหมาะสม การเชื่อมประสานเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างชั้นของวัสดุที่บดอัดแต่ละชั้นเพื่อป้องกันการเกิดเส้นทางการไหลซึมลัดทาง การป้องกันการสูญเสียความชื้นหลังจากบดอัดแล้วเสร็จ รายละเอียดเหล่านี้ต้องได้รับการตรวจสอบจากผู้มีประสบการณ์ในการก่อสร้างชั้นกันซึมบดอัด และจะต้องมีการรับประกันคุณภาพในการก่อสร้างด้วย นอกจากนี้ ควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในระยะยาวด้วย เนื่องจากวัสดุที่ใช้มีเบนโทไนต์เป็นส่วนผสมที่สำคัญ จึงควรให้ความสำคัญในเรื่องของการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Effect) เนื่องจากปัญหาที่อาจพบได้ในการใช้งานจริงคือการสัมผัสระหว่างชั้นกันซึมกับน้ำชะขยะมูลฝอย หรือแม้กระทั่งแร่ธาตุต่างๆ ที่ละลายน้ำอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินตามธรรมชาติ อาจมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นกันซึมในระยะยาวได้ โดยต้องทำการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ในการใช้เป็นชั้นกันซึมในสภาวะดังกล่าวด้วย

4. สรุป

การศึกษาคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งให้สามารถใช้ประโยชน์เป็นวัสดุกันซึมได้ โดยการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ให้มีค่าต่ำลงด้วยการผสมด้วยโซเดียมเบนโทไนต์ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หินฝุ่นบะซอลต์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำลงอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดเพื่อใช้เป็นวัสดุกันซึมได้ การศึกษาปัจจัยเพื่อกำหนดขอบเขตคุณสมบัติที่เหมาะสมของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์สำหรับใช้ในการก่อสร้างเป็นชั้นกันซึมบดอัด โดยกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำกว่า 1×10^{-9} เมตรต่อวินาที มีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงกว่า 5.86 ตัน/ตารางเมตร และมีการหดตัวเชิงปริมาตรต่ำกว่าร้อยละ 4 พบว่า ต้องทำการบดอัดหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์ที่ค่าความชื้นร้อยละ 12.0 - 15.5 และให้มีค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง 18.6 - 20.5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร จึงจะสามารถใช้เป็นชั้นกันซึมได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัยและไม่เกิดปัญหาการแตกร้าวจากการหดตัว โดยสามารถกำหนดเป็นช่วงขอบเขตคุณสมบัติของหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์สำหรับใช้ในการควบคุมการก่อสร้างชั้นดินกันซึมบดอัดได้

ทั้งนี้ ในการใช้งานหินฝุ่นบะซอลต์ผสมเบนโทไนต์เป็นวัสดุกันซึมจะต้องพิจารณาถึงการควบคุมปัจจัยในระหว่างการก่อสร้างและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่อาจเกิดขึ้นในสภาพการใช้งานจริงด้วย

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของผลการศึกษาจากโครงการวิจัยที่ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประจำปีงบประมาณ 2559 ขอขอบคุณ โรงโม่หินน้ำเย็นศิลาทอง จังหวัดอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างหินฝุ่นบะซอลต์สำหรับการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chapuis RM. Full-scale hydraulic performance of soil- bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*. 2002; 39: 417-439.

- [2] Iizuka M, Imaizumi S, Toryuu A, Doi Y. Critical ratio of bentonite addition into sandy soil to make a impermeable compacted soil liner. In: *9th Int. Waste Management and Landfill Symposium*. Sardinia, Italy; 2003.
- [3] Stern RT, Shackelford CD. Permeation of sand-processed clay mixtures with calcium chloride solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. 1998; 124(3): 231-241.
- [4] Doi Y, Imaizumi S. Evaluation of permeability of compacted pit sand mixed with bentonite using flexible-wall permeameter. In: *2nd Asian-Pacific Landfill Symposium*. Seoul, Korea; 2002. p. 240-246.
- [5] Ebina T, Minja RJA, Nagase T, Onodera Y, Chatterjee A. Correlation of hydraulic conductivity of clay-sand compacted specimens with clay properties. *Applied Clay Science*. 2004; 26(1-4): 3-12.
- [6] ทวีศักดิ์ วังไพศาล, นพ แสงเทียน. การปรับปรุงดินทรายปนทรายแข็งสำหรับเป็นวัสดุกันซึมในระบบเก็บกักของเสีย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 2554; 13 (4): 1-13.
- [7] กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. กระทรวงอุตสาหกรรม. ข้อมูลการผลิตแร่ของประเทศ <http://www7.dpim.go.th/stat/production.php?product=%25&pdcode=009&pdyear1=2018&pdyear2=2018> [เข้าถึงเมื่อ 12 พฤษภาคม 2563]
- [8] Laibao L, Yunsheng Z, Wenhua Z, Zhiyong L, Lihua Z. Investigating the influence of basalt as mineral admixture on hydration and microstructure formation mechanism of cement. *Construction and Building Materials*. 2013; 48:440-434
- [9] Uncik S, Kmecova V. The effect of basalt powder on the properties of cement composites. *Procedia Engineering*. 2013; 65: 51-56.
- [10] ภาณุพงศ์ จันถาไชย, รัฐพล สมณา, จีรศักดิ์ สุพรมวัน. กำลังอัดประลัยและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย. ใน: *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, สงขลา; 2559. หน้า 728-732.
- [11] อิทธิพล แก้วบัวดี, เทิดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช, อัครพัฒน์ สว่างสุรีย์. การประยุกต์ใช้หินฝุ่นสำหรับงานถมคันทางตามมาตรฐานทรายถมคันทางที่ ทล.-ม. 103/2532. ใน: *การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบ ประจำปีงบประมาณ 2554*. สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง; 2554.
- [12] ฐิติกรณ์ โพธิ์ศรีบึง, สมบูรณ์ กนกนภาพกุล, ชยกฤต เพชรช่วย, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์, ณัฐพงศ์ มกระธัช, วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา. การพัฒนากำลังอัดของหินฝุ่นที่ปรับปรุงด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย. ใน: *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, สงขลา; 2559. หน้า.1171-1167
- [13] ดนุพล ตันนโยภาส, วรณรัตน์ แก้วสมบูรณ์, สุชาติ จันทรมณีย์. คุณลักษณะกระเบื้องเซรามิกผลิตจากหินฝุ่นบะซอลต์ผสมร่วมกับเถ้าเถ้าปาล์มน้ำมัน. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*. 2553; 159-149 : (3)12
- [14] Supkow D. *Rock Dust and the Environment* (www.stardustersociety.org). 2002. Available from:<http://www.lifespirt.org/RDE1.html> [Accessed 1st April 2014].
- [15] ASTM D698. *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*, ASTM International. West Conshohocken: PA; 2012.
- [16] ASTM D1557. *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*, ASTM International. West Conshohocken: PA; 2012.
- [17] Daniel DE, Benson CH. Water content-density

criteria for compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 1990; 116(12): 1811-1830.

- [18] ASTM D5856. *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter*, ASTM International. West Conshohocken: PA; 2012.
- [19] ASTM D5084. *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*, ASTM International, West Conshohocken: PA; 2012.
- [20] ASTM D2166. *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*, ASTM International, West Conshohocken: PA; 2012.
- [21] Daniel DE, Wu YK. Compacted clay liners and covers for arid sites. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 1993; 119(2): 223-237.
- [22] USEPA. *Technical Manual: Solid Waste Disposal Facility Criteria*; EPA/530-R-93-017; Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington, D.C. 1993.
- [23] Oweis IS, Khera RP. *Geotechnology of Waste Management*, PWS Publishing; 1998.
- [24] Tay YY, Stewart DI, Cousens TW. Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners. *Engineering Geology*. 2001; - 263 :(4-1)60 .274
- [25] Kabir MH, Taha MR. Assessment of physical properties of a granite residual soil as an isolation barrier. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. EJGE. 2004; 9B. Available from: <http://www.ejge.com/2004/JourTOC9B.htm> [Accessed 25th January 2020].