การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือทดสอบความซึมน้ำของดินสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Design and Development of Soil Permeability Testing Apparatus for Use in Laboratory of the Department of Civil Engineering, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

[1*]พินิศ รัตนปรมากุล, [2#]วาริส บัวขาว

[1, 2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

[1*] Pinit Ruttanaporamakul, [2#] Waris Buakhaw

[1, 2]Civil Engineering Department Division of Education Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

[*]pinitrutt@gmail.com, [#] waris.kmutt@gmail.com

Received : March, 17 2020

Revised : April, 12 2021

Accepted : April, 18 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบการซึมน้ำของดิน (Soil Permeability Test) สำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองการศึกษาโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โดยแบ่งระเบียบวิธีวิจัยออกเป็นขั้นตอนการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อรวบรวมเป็นข้อมูลพื้นฐาน การออกแบบและผลิตชุดเครื่องมือทดสอบการซึมน้ำของดินแบบความดันแปรเปลี่ยน (Falling Head Test) ด้วยวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก ทำการทดสอบค่าการซึมน้ำของตัวอย่างดินด้วยชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น พร้อมทั้งส่งตัวอย่างดินไปทดสอบที่ห้องปฏิบัติการของเอกชนที่มีมาตรฐานในระดับสากลเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในขั้นตอนการอภิปรายและสรุปผล หลังจากการทดสอบและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นแล้ว พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินที่หาได้จากชุดเครื่องมือทดสอบมีค่าสอดคล้องกับช่วงค่าทั่วไปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดินชนิดต่าง ๆ และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีความแปรปรวนค่อนข้างต่ำ มีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของเอกชน ประมาณร้อยละ 12 – 14 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ชุดเครื่องมือทดสอบการซึมน้ำของดินที่พัฒนาขึ้นนี้ให้ผลการทดสอบกับดินประเภทดินทรายละเอียดผสมซิลท์ และดินทรายหยาบ ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อีกทั้งยังมีต้นทุนการผลิตต่ำ จึงเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ฯ เพื่อประโยชน์ในการศึกษา และ พัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต รวมถึงสามารถนำไปใช้งานในหน่วยงานกรมช่างโยธาทหารอากาศ ซึ่งจะเป็นการประหยัดงบประมาณและเป็นประโยชน์กับทางราชการต่อไป

คำสำคัญ: การซึมน้ำของดิน, สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน, ปฐพีกลศาสตร์

Abstract

This research studied to design and develop the apparatus of soil permeability test for use in soil mechanics laboratory in civil engineering department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy. The research methodology involves stages of collecting the related information, designing and manufacturing the equipment set of soil permeability test with available and inexpensive materials. The soil permeability test was then performed on soil samples with the developed equipment. The obtained results were compared with the soil sample that was tested by a standardized outsourcing laboratory, and then the step of discussion and conclusion were performed. After testing and solving some defect, it was found that the coefficients of permeability of soil samples obtained from the developed equipment are corresponding with the typical values as previously proposed. Moreover, the variance of the results obtained from the test were relatively small and the discrepancy between the results and the value obtained from the test performed by outsourcing laboratory is approximately 12 - 14%. Therefore, it can be concluded that the developed soil permeability testing apparatus provides acceptable test results and also, its production costs is relatively low. The developed equipment is thus suitable for use in soil mechanics laboratory in civil engineering department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy for the benefit of future education and development to get more efficient. Moreover, the equipment can be applied to be used in Civil Engineering Department, Royal Thai Air Force, which will save the budget and give the benefit to Thai government in the future.

Keywords: soil permeability, permeability coefficient, soil mechanics

1. บทนำ

มวลดินเป็นวัสดุที่มีช่องว่างต่อเนื่องในระหว่างเม็ดดิน ซึ่งทำให้น้ำสามารถไหลซึมผ่านได้เมื่อมีความแตกต่างของความดันน้ำระหว่างจุดหรือตำแหน่งในมวลดิน โดยดินที่อยู่ในสภาพหลวมจะมีช่องว่างอยู่มากทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูง (Pervious soils) ได้แก่ ดินจำพวก กรวด และทราย ส่วนดินที่น้ำซึมผ่านได้ยากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำ (Impervious soils) ได้แก่ ดินเหนียว ดินตะกอนทราย เป็นต้น

ค่าความซึมน้ำของดิน เป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในงานด้านวิศวกรรมโยธา เช่น งานก่อสร้างเขื่อนและถนน จำเป็นจะต้องเลือกใช้ดินที่มีความสามารถในการซึมผ่านต่ำ เพื่อป้องกันการสูญเสียปริมาณน้ำในเขื่อน และลดปริมาณน้ำที่จะเข้าไปกัดเซาะ นำพามวลดินออกไป จนเกิดเป็นโพรงภายในโครงสร้างเขื่อนดิน ทำให้ดินสูญเสียความมั่นคงและเป็นสาเหตุของการวิบัติ [1] หรือ งานก่อสร้างกำแพงกันดิน ควรใช้ดินที่มีความสามารถในการซึมผ่านสูงเป็นดินถมหลังกำแพง เพื่อให้น้ำสามารถระบายออกได้อย่างรวดเร็ว เป็นต้น [2]

การทดสอบดินเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) นั้น แบ่งเป็นการทดสอบในสนาม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ด้วยเหตุนี้ รายวิชาปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ จึงกำหนดให้มีการฝึกปฏิบัติทดสอบความซึมน้ำของดินในห้องปฏิบัติการ โดยมีการทดสอบ 2 วิธี คือ การทดสอบแบบความดันคงที่ (Constant Head Test) ซึ่งเหมาะสำหรับ

ทดสอบกับดินเม็ดหยาบและการทดสอบแบบความดันแปรเปลี่ยน (Variable Head or Falling Head Test) สำหรับทดสอบกับดินเม็ดละเอียด [3]

ในปัจจุบันชุดเครื่องมือทดสอบค่าความซึมน้ำของดินในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช อยู่สภาพชำรุดเสียหาย ไม่สามารถใช้งานได้ อีกทั้งกระบวนการในการจัดหาใหม่ทดแทนใช้เวลานานและงบประมาณค่อนข้างสูง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบความซึมน้ำของดิน ที่มีประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับได้ และใช้งบประมาณในการผลิตไม่สูงมาก สำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในรายวิชาปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ และการทำวิจัยในอนาคต

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 การทดสอบความซึมน้ำของดิน ด้วยวิธีความดันแปรเปลี่ยน ตามมาตรฐาน ASTM D5084 และ D5856

2.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย และมีราคาไม่สูงมาก

2.3 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ เป็นตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample) บดอัดแบบมาตรฐานด้วยค้อนขนาด 5.5 ปอนด์ ระยะยก 12 นิ้ว บดอัดจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง

3. สมมติฐานการวิจัย

ชุดเครื่องมือทดสอบค่าความซึมน้ำของดิน เป็นอุปกรณ์การทดลองที่สามารถผลิตได้โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่าย และมีราคาไม่สูงมากนัก เช่น ท่อ PVC และแผ่นอะครีลิคใส ประกอบขึ้นเป็นเซลล์บรรจุตัวอย่างดินและฝาประกบ พร้อมติดตั้งยางกันน้ำซึม และวาล์วข้อต่อ โดยผลการทดสอบตัวอย่างดินอาจมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากเครื่องมือในห้องปฏิบัติการเอกชนเล็กน้อย เนื่องจากในชุดเครื่องมือทดสอบมาตรฐานนั้นจะมีวาล์วไล่อากาศซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความแม่นยำของผลการทดสอบ อย่างไรก็ตาม ชุดเครื่องมือที่ผลิตขึ้นจะสามารถให้ผลการทดสอบดินอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่องมือในห้องปฏิบัติการเอกชน จึงเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ฯ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนและการทำวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องต่อไป

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปกติแล้วในมวลดินจะประกอบด้วยส่วนของเม็ดดิน น้ำ และอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ซึ่งช่องว่างนี้จะมีขนาดและความต่อเนื่องแตกต่างกันในดินแต่ละประเภท อันจะส่งผลต่อความสามารถในการซึมน้ำของดิน คือ ในดินเม็ดหยาบ เช่น กรวดและทราย จะมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินขนาดใหญ่และต่อเนื่อง ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย ในขณะที่ดินตะกอนทราย (Silty sand) และดินเหนียว ซึ่งเป็นดินเม็ดละเอียดจะมีช่องว่างขนาดเล็ก ทำให้น้ำซึมผ่านได้ยากและใช้เวลานานกว่า ซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความซึมน้ำของดิน ประกอบด้วย

4.1 การไหลของน้ำในดินและกฎของดาร์ซี่

การไหลของน้ำผ่านช่องว่างในดินเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) อนุภาคของน้ำมีการเคลื่อนที่ต่อเนื่องด้วยความเร็วต่ำ จากการศึกษาของดาร์ซี่ (Henry Darcy, 1856) [4] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลของน้ำในดินกับค่าความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$v = k\,i \qquad (1)$$

เมื่อ v = ความเร็วของการไหล (เซนติเมตร/วินาที)

k = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตร/วินาที)

i = ความชันทางชลศาสตร์

และ ปริมาณการไหลของน้ำในระยะเวลาหนึ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = Av \quad (2)$$

หรือ $$Q = k\,i\,A \quad (3)$$

เมื่อ Q = ปริมาณการไหลในหนึ่งหน่วยเวลา (ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที)

A = พื้นที่หน้าตัดของการไหล (ตารางเซนติเมตร)

4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในดินแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันตามปัจจัย คือ ขนาดและรูปร่างของเม็ดดิน อัตราส่วนช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ความหนืดของของเหลว และความอิ่มตัวด้วยน้ำของมวลดิน ตารางที่ 1 แสดงช่วงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในดินชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน [5]

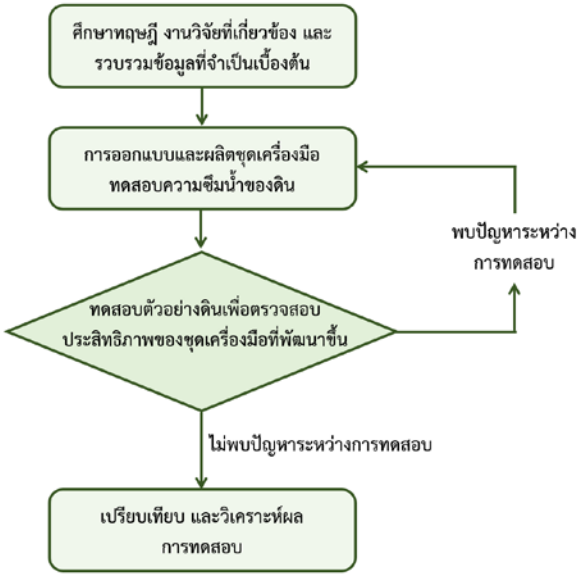
ชนิดของดิน	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k, เซนติเมตร/วินาที)
กรวดสะอาด	$1 - 10^{2}$
ทรายหยาบ	$10^{-3} – 1$
ทรายละเอียด และ ดินตะกอนทราย	$10^{-5} – 10^{-3}$
ดินตะกอน และดินตะกอนผสมดินเหนียว	$10^{-6} – 10^{-5}$
ดินเหนียว	$10^{-9} – 10^{-6}$

ปิติ อังสุโวทัย (2525) ทำการทดสอบความซึมน้ำของดินตะกอนทรายผสมปูนขาว ด้วยวิธีความดันแปรเปลี่ยน พบว่า การเติมปูนขาว ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ลงในดินตะกอนทราย จะทำให้เม็ดดินมีการเรียงตัวกันแบบเกาะกลุ่ม (ไม่เป็นระเบียบ) มากที่สุด ซึ่งมีผลทำให้ค่าความซึมน้ำของดินมีค่าเพิ่มขึ้นสูง [6]

อติเทพ ศรีคงศรี (2556) เสนอแนวทางการพัฒนาเครื่องมือทดสอบเสถียรภาพต่อการกัดเซาะภายในโครงสร้างมวลดิน โดยดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM D2434 และ D5101 ใช้วัสดุอะคริลิกทำกระบอกบรรจุตัวอย่างดินทดสอบประกอบเข้ากับแผงควบคุมและชุดหลอดแก้ววัดหัวความดันน้ำ [7]

5. การดำเนินการวิจัย

กระบวนการวิจัย เพื่อพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบความซึมน้ำของดินนี้ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ 1) รวบรวมข้อมูลเบื้องต้น 2) การออกแบบและผลิตชุดเครื่องมือทดสอบความซึมน้ำของดิน 3) การสอบตัวอย่างดินเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น และ 4) การวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการใช้ชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ฯ โดยมีกรอบงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบงานวิจัย

5.1 การออกแบบชุดเครื่องทดสอบความซึมน้ำของดิน

เครื่องทดสอบความซึมน้ำของดินแบบความดันแปรเปลี่ยน มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ เซลล์สำหรับบรรจุตัวอย่างทดสอบ และแผงชุดหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำพร้อมสเกล

ในการออกแบบและผลิตเซลล์บรรจุตัวอย่างทดสอบ ใช้วัสดุ คือ ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 13.5 มิลลิเมตร ตัดเป็น 2 ส่วน ยาว 12 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร นำไปกลึงเพื่อให้สามารถครอบติดกันได้ ในส่วนของฐานและฝาประกบ ใช้แผ่นอะครีลิคใส หนา 16 มิลลิเมตร เซาะร่องตามแนวเส้นรอบวงท่อ PVC ลึก 4 มิลลิเมตร ติดตั้งวาล์ว และสวมยางกันน้ำซึม (โอริง) บริเวณรอยต่อของอุปกรณ์ เมื่อประกอบเรียบร้อยจะได้เซลล์บรรจุตัวอย่างทดสอบมีลักษณะตามรูปที่ 2 โดยในการวิจัยนี้ ได้ผลิตชุดเครื่องมือทดสอบที่ประกอบด้วยเซลล์บรรจุตัวอย่างทดสอบ ทั้งหมดจำนวน 3 เซลล์

(ก) (ข)

รูปที่ 2 เซลล์บรรจุตัวอย่างทดสอบ (ก) ฐานและฝาประกบพร้อมวาล์วน้ำเข้าและน้ำออก
(ข) เซลล์บรรจุตัวอย่างที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว

ในขั้นตอนการออกแบบและผลิตแผงชุดหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำ ใช้หลอดอะคริลิคใสมีพื้นที่หน้าตัด 5 ตารางเซนติเมตร ยาว 1 เมตร ติดตั้งพร้อมแถบวัดระยะบนแผ่นพลาสติกสีขาวขุ่น นำไปประกอบกับระบบวาล์วและถังน้ำล้น ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 3 ชุดหลอดควบคุมระดับความสูงของน้ำ

5.2 การทดสอบตัวอย่างดิน

ในขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างดิน ใช้ตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์ และดินทรายหยาบ แบ่งตัวอย่างดินบางส่วนส่งทดสอบที่ห้องปฏิบัติการของเอกชน เพื่อเปรียบเทียบผลกับค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น รายละเอียดจำนวนตัวอย่างดินดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างดิน	จำนวน	ส่งทดสอบห้องปฏิบัติการเอกชน
ทรายละเอียดผสมซิลท์	9 ตัวอย่าง	ส่งทดสอบ
ทรายหยาบ	9 ตัวอย่าง	ไม่ส่งทดสอบ

กระบวนการเตรียมตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์ ใช้ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ บดอัดใหม่ด้วยปริมาณความชื้น (%OMC) เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ บดอัดแบบมาตรฐานด้วยค้อนขนาด 5.5 ปอนด์ ระยะยก 12 นิ้ว จำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง ส่วนตัวอย่างดินทรายหยาบใช้การบรรจุดินเป็นชั้นละไม่เกิน 1.5 เซนติเมตร แล้วกระทุ้งด้วยเหล็กหรือเคาะด้วยค้อนยาง และปรับผิวหน้าให้เรียบ แล้วจึงนำไปทดสอบค่าความซึมน้ำของดิน โดยแบ่งทดสอบด้วยชุดเครื่องมือ 3 ชุด ชุดละ 3 ตัวอย่างต่อตัวอย่างดินแต่ละประเภท

6. ผลการวิจัย

6.1 ผลการทดสอบความซึมน้ำของตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์จากห้องปฏิบัติการของเอกชน ด้วยการทดสอบแบบความดันแปรเปลี่ยนได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เท่ากับ 2.47×10^{-4} เซนติเมตรต่อวินาที

6.2 ผลการทดสอบความซึมน้ำของตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์ ที่ได้จากการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลทดสอบตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์

ชุดทดสอบ	**สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน** ($\times 10^{-4}$ ซม./วินาที)			
	ตัวอย่างที่ 1	**ตัวอย่างที่ 2**	**ตัวอย่างที่ 3**	**เฉลี่ย**
1	2.12	2.16	2.15	2.14
2	2.18	2.15	2.17	2.16
3	2.13	2.14	2.11	2.13

6.3 ผลการทดสอบความซึมน้ำของตัวอย่างดินทรายหยาบ ที่ได้จากการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลทดสอบตัวอย่างดินทรายหยาบ

ชุดทดสอบ	**สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน** ($\times 10^{-3}$ ซม./วินาที)			
	ตัวอย่างที่ 1	**ตัวอย่างที่ 2**	**ตัวอย่างที่ 3**	**เฉลี่ย**
1	1.6	1.56	1.58	1.58
2	1.58	1.55	1.57	1.56
3	1.57	1.52	1.56	1.55

7. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

7.1 จากผลการทดสอบความซึมน้ำของตัวอย่างดินทรายละเอียดผสมซิลท์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นมีค่าประมาณ 2.15×10^{-4} เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 1 และมีความแตกต่างจากผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการเอกชนเล็กน้อย ประมาณ 12 – 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่แตกต่างนี้อาจเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น ความชำนาญของผู้ทดสอบ สภาพตัวอย่างดินหรือสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันระหว่างการทดสอบ และ มาตรฐานของเครื่องมือ ในส่วนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวอย่างดินทรายหยาบที่ได้จากการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้น มีค่า ประมาณ 1.57×10^{-3} เซนติเมตรต่อวินาที สอดคล้องกับค่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 1 เช่นเดียวกัน

7.2 เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลผลการทดสอบตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิด พบว่า มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.02 เท่ากันทั้ง 2 ชุดข้อมูล แสดงว่าผลการทดสอบที่ได้จากชุดเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นมีการกระจายตัวน้อย ผลการทดสอบแต่ละครั้งมีความสม่ำเสมอ ไม่แตกต่างกันมาก

7.3 ต้นทุนที่ใช้ในการออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมือทดสอบนี้ รวมทั้งสิ้น 15,000 บาท ซึ่งต่ำกว่าราคาเครื่องมือจากการสอบถามบริษัทตัวแทนจำหน่าย ที่มีราคาสูงถึง 150,000 บาท

ดังนั้น เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าในเรื่องงบประมาณ ระยะเวลาในการจัดหา และความแม่นยำของผลการทดสอบ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ชุดเครื่องมือทดสอบค่าความซึมน้ำของดินที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมีความเหมาะสม สามารถประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเรียนการสอนและการทำวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องในอนาคต รวมถึงสามารถนำไปพัฒนาร่วมกับกรมช่างโยธาทหารอากาศ เพื่อนำไปใช้ในงานออกแบบฐานรากขนาดเล็กของกองทัพอากาศต่อไป

8. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัย สามารถนำไปใช้สร้างชุดเครื่องมือทดสอบการซึมผ่านน้ำของดินที่มีต้นทุนการผลิตต่ำแต่ให้ผลลัพธ์อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ เพื่อใช้ในการศึกษาและงานวิจัย ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการผลิตควรตรวจสอบการรั่วซึมของเครื่องมืออย่างละเอียด เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้ นอกจากนี้ ยังสามารถติดตั้งอุปกรณ์วาล์วไล่อากาศ และอุปกรณ์ควบคุมแรงดันน้ำกับชุดเครื่องมือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ในสภาพความดันเฉพาะที่ต้องการได้ และอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความถูกต้องแม่นยำของผลการทดสอบ คือประสบการณ์ของผู้ทดสอบ จึงควรส่งผู้ปฏิบัติการทดสอบเข้าฝึกงานกับห้องปฏิบัติการเอกชนหรือสถาบันชั้นนำ เพื่อเพิ่มทักษะความชำนาญในการทดสอบ

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยความอนุเคราะห์ของข้าราชการ เจ้าหน้าที่ กรมช่างโยธาทหารอากาศ ที่ได้อำนวยความสะดวกในการเข้าพื้นที่ก่อสร้างภายในกองทัพอากาศ เพื่อเก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงขอขอบคุณนายประหยัด ทองคำ สำหรับคำแนะนำในการผลิตและประกอบชุดเครื่องมือทดสอบ และท้ายที่สุด ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ในการสนับสนุนเงินทุนและสถานที่ รวมถึงเครื่องมือทดลองในการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ทางคณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

10. เอกสารอ้างอิง

[1] สุวัฒน์ พาหุสุวัณโณ, สุภฤษณ์ เหรียญบุบผา, คมสิทธิ์ สุทธิรักษ์. (2550). การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือทดสอบความซึมน้ำของดินในสนามสำหรับการก่อสร้างอาคารชลประทาน. ส่วนวิจัยและพัฒนาด้านวิศวกรรม สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน. สืบค้น15 สิงหาคม 2563, จากhttp://research.rid.go.th/rde4/doc/doc03.pdf.

[2] สยาม แกมขุนทด, พานิช วุฒิพฤกษ์, สันชัย อินทพิชัย และ พิทยา แจ่มสว่าง. (2558). “ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดคละแตกต่างกัน” กรุงเทพฯ: *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 25(1), ม.ค. – เม.ย. 2558: 11 – 19.

[3] วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่. “หน่วยที่ 11 การทดลองความซึมน้ำของดิน (Soil Permeability Test)” เอกสารประกอบการสอนรายวิชาปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์, สืบค้น 14 สิงหาคม2563, จาก http://krumanit.cmtc.ac.th/main/images/stories/11.pdf.

[4] Das, B. M. (2010). **Principles of Geotechnical Engineering**: 7th edition. USA: Cengage Learning.

[5] ก้องเกียรติ บุณฑริก และฌาธร ลอยจิ๋ว. (2545). เครื่องมือทดสอบการไหลซึมของน้ำผ่านดินแบบระดับน้ำแปรเปลี่ยน. (ปริญญานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ).

[6] ปิติ อังสุโวทัย. (2525). “ความซึมผ่านได้ของดินผสมปูนขาว” ขอนแก่น: วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 9(3), ก.ค. – ก.ย. 2525.

[7] อติเทพ ศรีคงศรี (2556). “เสถียรภาพต่อการกัดเซาะภายในโครงสร้างมวลดิน: หัวข้อแนะนำให้เพิ่มในตำราวิชาปฐพีกลศาสตร์” กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ปีที่ 3(2), ก.ค. – ธ.ค. 2556.

[8] ASTM D2434 - 68 (reapproved 2006). Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA.

[9] ASTM D5856-15. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA.