การป้องกันการกัดเซาะพื้นที่ลาดเอียงในกรณีฝนตกหนักมากด้วยแผ่นยางรีไซเคิล

วิจิตร อิทธิวงศ์กุล[1*] วิทยกุล สิทธิสาร[2] ศิวโรฒม์ ศิริลักษณ์[3]

[1*,2,3]*คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, เชียงใหม่, ประเทศไทย*

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : wijit_i@rmutl.ac.th

รับต้นฉบับ : 19 มิถุนายน 2567; รับบทความฉบับแก้ไข : 21 กันยายน 2567; ตอบรับบทความ : 11 ตุลาคม 2567
เผยแพร่ออนไลน์ : 27 มิถุนายน 2568

บทคัดย่อ

การกัดเซาะดินเป็นปัญหาต่อระบบนิเวศและมีค่าใช้จ่ายในการจัดการ โดยมีปัจจัยหลักคือ ปริมาณน้ำฝนต่อหน่วยเวลา งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่มาใช้งานแทนวัสดุสังเคราะห์ด้านงานดิน โดยเลือกใช้ยางสายพานที่ผ่านการใช้งานแล้วและไม่มีมูลค่า ซึ่งมีภาระค่าใช้จ่ายในการจัดการเพื่อกำจัด มาใช้แทนวัสดุสังเคราะห์สำหรับงานป้องกันการกัดเซาะภายใต้สภาวะฝนตกหนักมาก ปริมาณ 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยจำลองการทดลองแบบเอียง ผลการทดลองจาก 8 เงื่อนไขการศึกษาที่แตกต่างกันในด้าน มุมเอียง ความหนาแน่นของดิน และการนำแผ่นยางมาใช้ในการปกป้อง พบว่า การใช้ยางสายพานสามารถป้องกันการกัดเซาะดินจากฝนตกได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการไม่ใช้ยางสายพาน นอกจากนี้ยังพบว่าความลาดชันมีผลต่อปริมาณดินที่ถูกกัดเซาะ เมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ดินถูกกัดเซาะมากขึ้นตาม แต่เมื่อความลาดชันถึง 45 องศา การใช้ยางสายพานมีประสิทธิภาพการป้องกันการกัดเซาะดินใกล้เคียงกับไม่ใช้ยางสายพาน ปัจจัยการเพิ่มความหนาแน่นของดินจะช่วยให้ดินเกิดการกัดเซาะน้อยลง และเมื่อใช้ยางสายพานร่วมจะช่วยให้ลดการกัดเซาะได้ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ด้วยประสิทธิผลนี้สามารถประยุกต์ใช้ในพื้นที่กองทิ้งดิน คันดิน และผนังบ่อเหมืองได้

คำสำคัญ **:** เหมืองแร่ การป้องกันการกัดเซาะ ปริมาณน้ำฝนต่อหน่วยเวลา การกัดเซาะดิน วัสดุเหลือทิ้ง

Heavy Rainfall-induced Slope Erosion Prevention by Recycled Rubber Textile

Wijit Itthiwongkul[1*] Wittayakul Sittisarn[2] Siwarote Siriluck[3]

[1*,2,3]*Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: wijit_i@rmutl.ac.th

Received: 19 June 2024 Revised: 21 September 2024; Accepted: 11 October 2024
Published online: 27 June 2025

Abstract

Soil erosion is a significant problem for ecosystems and management costs. The main factor affecting the amount of soil eroded is rainfall intensity. This study investigated waste materials from the mining industry as alternatives to geosynthetic materials in soil applications. The rubber that had been used, which is otherwise valueless and costly to handle for disposal, was selected as a geosynthetic material for erosion prevention under very heavy rainfall conditions, with a rainfall intensity of 120 mm/hr. The study conducted a tilted bed slope experiment to compare eight different conditions, including slope angle, soil density, and the use of rubber. The results showed that the use of rubber can effectively protect soil erosion, by up to 60%, compared to conditions without rubber under very heavy rainfall. It was found that the slope angle influences the amount of soil eroded; as the slope angle increases, the soil erosion also increases. Notably, at a slope of 45°, the effectiveness of rubber exhibited a similar result in preventing erosion as without rubber. It is worth noting that increasing soil density leads to a decrease in soil erosion. This is more clearly demonstrated in terms of combined rubber, resulting in up to a 35% reduction in soil erosion. Future studies on recycling rubber could focus on waste dumping areas, earthworks and mine pit walls.

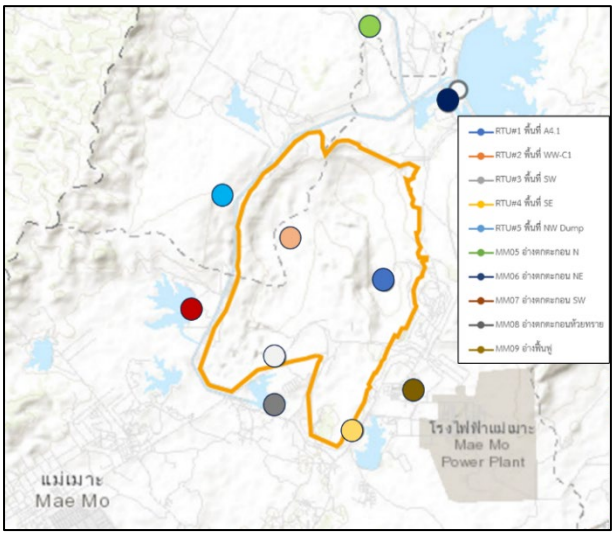
***Keywords*:** Mining, Preventing erosion, Rainfall intensity, Soil erosion, Waste materials

1) บทนำ

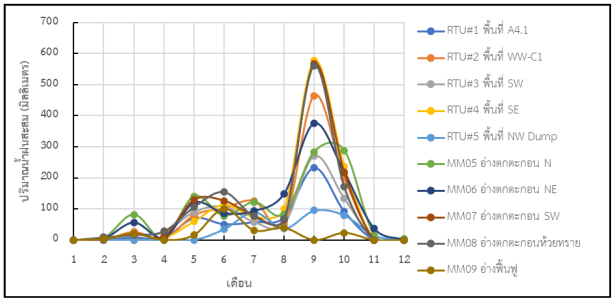
การกัดเซาะหน้าดินด้วยน้ำฝนถือว่าเป็นปัญหาต่อระบบนิเวศสิ่งแวดล้อมและงานวิศวกรรมในพื้นที่ที่มีความลาดชันได้แก่ งานฟื้นฟูเหมือง งานไหลทาง งานปรับทัศนียภาพ งานเขื่อน เป็นต้น ปริมาณหน้าดินที่ถูกกัดเซาะนอกเหนือจากปริมาณน้ำฝนยังมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความลาดเอียง ความขรุขระของผิวดิน การระบายน้ำ การไหลของน้ำใต้ดิน และการเพาะปลูก [1]–[4] บริเวณที่มีการกัดเซาะหน้าดินส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและลักษณะภูมิประเทศ การป้องกันมักจะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ปริมาณดินที่ถูกกัดเซาะและพัดพาไปทำให้บริเวณนั้นต้องมีดินมาทดแทน นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายอื่น ๆ เช่น ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง การสิ้นเปลืองน้ำมัน และค่าดำเนินการ เป็นต้น

ในช่วงฤดูฝนถือว่าเป็นช่วงที่มีฝนตกมากกว่าฤดูอื่น ทำให้มีปริมาณน้ำฝนสูงจนเกิดการกัดเซาะหน้าดิน และทำให้ตะกอนดินถูกพัดพาด้วยน้ำฝนไปยังบริเวณอื่น งานวิจัยนี้ทำการเลือกตัวอย่างพื้นที่ทำการศึกษากองมูลดินทิ้งและปริมาณน้ำฝนจากข้อมูลย้อนหลัง 5 ปี ในพื้นที่บ่อเหมืองของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (รูปที่ 1) ตามตำแหน่งจุดวัดปริมาณน้ำฝนในรูปที่ 2 โดยมีปริมาณน้ำฝนสูงสุดในช่วงฤดูฝนดังรายละเอียดปี พ.ศ. 2566 ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3 ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนสะสมสูงสุดตลอดทั้งปีประมาณ 1,400 มิลลิเมตรต่อปี และมีปริมาณน้ำฝนสูงสุด 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง [5] หากดูข้อมูลรอบปีการเกิดซ้ำย้อนหลัง 500 ปี พบว่าปริมาณน้ำฝนในพื้นที่จังหวัดลำปาง บริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่บ่อเหมืองอยู่ที่ 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงดังรายละเอียดแสดงในรูปที่ 4 [6] ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนจัดอยู่ในระดับฝนตกหนักมาก [7], [8]

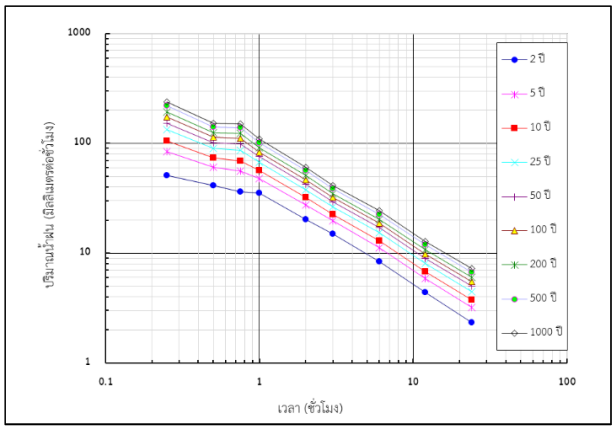
รูปที่ 1 : ตำแหน่งเหมืองแม่เมาะที่ทำการศึกษาข้อมูลปริมาณน้ำฝน



รูปที่ 2 : ตำแหน่งจุดวัดประมาณน้ำฝน [5]



รูปที่ 3 : ปริมาณน้ำฝนสะสมในพื้นที่บ่อเหมืองแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยในแต่ละเดือนของปี พ.ศ. 2566 [5]



รูปที่ 4 : กราฟแสดงปริมาณน้ำฝนกับเวลาในรอบปีการเกิดซ้ำ [6]

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติอันดับ 1 ของโลกที่มีคุณภาพและมาตรฐานสูง [9] และมีการใช้ยางธรรมชาติในการผลิตสายพานลำเลียง เมื่อสายพานลำเลียงหมดอายุการใช้งานกลายเป็นขยะเหลือทิ้งที่ไม่เกิดประโยชน์

จากความสำคัญดังกล่าว จึงเกิดแนวคิดในการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีต้นทุนต่ำในการดำเนินการและสามารถประยุกต์ใช้ได้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ได้ โดยการสร้างแบบจำลองเสมือนพื้นที่จริง และศึกษายางสายพานสำหรับป้องกันการกัดเซาะดินจากน้ำฝน

2) ทบทวนวรรณกรรม

ในปัจจุบันมีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการป้องกันการกัดเซาะดินเป็นอย่างมากโดยให้ความสนใจกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ปัจจัยจากดิน ปริมาณน้ำฝน และความลาดชัน แต่อย่างไรก็ตาม นักวิจัยได้พยายามใช้วัสดุต่าง ๆ เพื่อช่วยป้องกันการกัดเซาะดิน งานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

Zhao and Yin [1] ได้ทำการศึกษาเส้นใยสังเคราะห์แบบตาข่ายเปรียบเทียบกับการปล่อยดินไปตามธรรมชาติด้วยการทดสอบความลาดชันต่อการกัดเซาะหน้าดินภายใต้สภาวะฝนตก พบว่าการใช้เส้นใยสังเคราะห์แบบตาข่ายรังผึ้งมีส่วนช่วยให้การกัดเซาะหน้าดินน้อยลง และความดันจากน้ำฝนที่ซึมไหลผ่านเส้นใยสังเคราะห์ลดลง ทำให้เสถียรภาพของดินเพิ่มขึ้น Song *et al.* [10] ทดลองเพื่อช่วยให้พืชมีการเจริญเติบโตในความลาดชัน จากการทดลองพบว่าการใช้เส้นใยสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างแบบตาข่ายรังผึ้งและใส่ฟางข้าวผสมด้วยจะช่วยให้ลดการเคลื่อนตัวของดินและยังคงสภาพดีกว่าแบบธรรมชาติที่ไม่เสริมวัสดุ โดยเฉพาะดินที่เกิดแบบธรรมชาติไม่เสริมวัสดุ เมื่อฝนตกดินจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวระหว่างส่วนบนและส่วนล่างทำให้เกิดรอยแตกอย่างเห็นได้ชัดบริเวณส่วนบน นอกจากนี้นักวิจัยอื่น ๆ ยังมีการใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical analysis) จำลองและศึกษาปัจจัยที่มีลักษณะซับซ้อน โดยใช้โปรแกรมประเภท วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการผลต่างสืบเนื่อง เช่น โปรแกรม Ansys โปรแกรม ABAQUS และโปรแกรม FLAC เป็นต้น โปรแกรมช่วยในการจำลองการใช้วัสดุเส้นใยสังเคราะห์แบบตาข่ายรังผึ้งพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงผลพารามิเตอร์ อาทิ ระยะเวลาฝนตก (rain duration) การเคลื่อนตัวของดิน (displacement) ความเค้นภายในดิน (stress) การพิบัติ (failure) ค่าความปลอดภัย (factor of safety) แรงกดทับจากปัจจัยภายนอก (loading) [1], [11]–[13] หลังจากฝนตกปริมาณความชื้นในดินจะมีการเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่ดินมีการอิ่มตัว (saturation) ด้วยแรงดันน้ำนี้ทำให้ลดค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดินจึงทำให้เกิดการกัดเซาะและพัดพาตะกอนไปตามน้ำ โดยส่วนที่สูงกว่าจะเกิดการกัดเซาะของเม็ดดินและไหลไปตามความลาดชัน เม็ดดินที่มีการพัดพามาจะทำให้เกิดการทับถมบริเวณส่วนล่างของแบบจำลอง [14], [15] ตะกอนเหล่านี้ในสภาพจริงจะถูกพัดพาไปตามแม่น้ำและทับถมกันโดยส่วนใหญ่ที่อ่างเก็บน้ำ ตะกอนนี้สร้างปัญหาต่อระบบนิเวศ อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการจัดการ Panagos *et al.* [16] ได้ประเมินค่าใช้ในการจ่ายจัดการที่เกี่ยวข้องดินที่ถูกกัดเซาะโดยเก็บตัวอย่างจากตะกอนดินในอ่างเก็บน้ำ พบว่าค่าใช้จ่ายประมาณ 700 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ในประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศในทวีปยุโรป

ในปัจจุบันการใช้วัสดุในงานดิน (geosynthetic materials) เป็นที่นิยมมากขึ้นในงานแก้ไขปัญหาดินกันเซาะ วัสดุประเภทวัสดุเส้นใยสังเคราะห์แบบตาข่ายรังผึ้ง (geocell) เป็นวัสดุพอลิเมอร์แบบ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene) หรือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene) มีหลายขนาดและมีคุณสมบัติป้องกันการกัดเซาะได้ดี นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงในการรับแรงกดและแรงดึงสูง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ ทำให้เสถียรภาพและความปลอดภัยเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับดินที่ไม่ได้ใช้วัสดุเส้นใยสังเคราะห์ [17]

รูปที่ 5 แสดงวัสดุคลุมดินแบบเส้นใยสังเคราะห์มีลักษณะต้านทานการไหลของน้ำตามแนวความลาดชัน วัสดุคลุมดินแบบตาข่ายรังผึ้งมีจำหน่ายทั่วไป โดยมีหลายขนาดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการใช้งาน โดยทั่วไปมีความกว้าง 25–35 เซนติเมตร ยาว 20–28 เซนติเมตร สูง 5–20 เซนติเมตร ความหนาประมาณ 1.2 มิลลิเมตร และความหนาแน่นโดยประมาณ 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [18]–[20]

รูปที่ 5 : วัสดุสังเคราะห์แบบตาข่ายรังผึ้งจากโครงการซ่อมแซมคันดินอ่างเก็บน้ำตาดชมพู จังหวัดเชียงใหม่

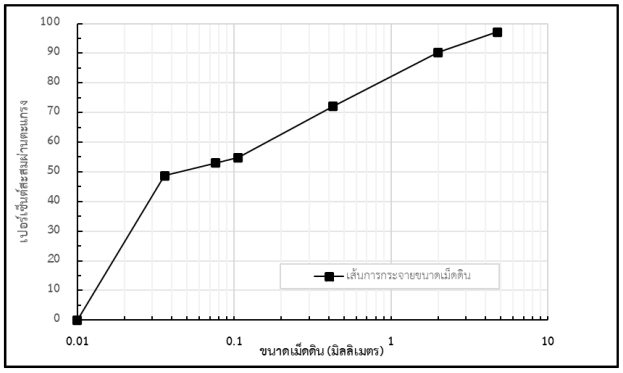
วัสดุสังเคราะห์แบบตาข่ายรังผึ้งใช้ได้ผลดีและมีประสิทธิภาพในการป้องกันในเรื่องของการกัดเซาะดินเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทั่วไป เช่น หินเรียงยาแนว (stone pitching) วัสดุคลุมดิน (mulch mat) และกำแพงกันดิน (crib walls) วิธีเหล่านี้มีการดำเนินงานที่ยุ่งยากและมีประสิทธิภาพป้องกันการกัดเซาะดินต่ำ [21]

นักวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณการกัดเซาะจากการวัดปริมาตรหรือชั่งน้ำหนักดินแห้ง เนื่องจากเม็ดดินมีขนาดเล็ก ด้วยการทดลองการกัดเซาะในห้องปฏิบัติการ ส่วนใหญ่จะทำการทดลองแบบความเครียดระนาบ 2 มิติ (plane strain) [22], [23] และแบบเอียง (tilted bed slope) [2], [24]–[26]

3) วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) ตัวอย่างและแผนการทดลอง

3.1.1) ดิน สำหรับการทดลองนี้เป็นเปลือกดินที่เหมืองถ่านหินแม่เมาะ ประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุและมีการกระจายขนาดเม็ดดินดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 6 ขนาดเม็ดดินใหญ่สุด 5 มิลลิเมตร สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_U) และสัมประสิทธิ์ความโค้ง (C_C) เท่ากับ 13 และ 0.2 ตามลำดับ ดินมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 [27] จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของดินในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี XRF (X-Ray Fluorescence) พบว่าดินประกอบด้วย 3 ธาตุหลัก ได้แก่ ซิลิกอน อะลูมิเนียม และเหล็ก มีปริมาณธาตุ 27.4 7.9 และ 5.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรายละเอียดในตารางที่ 1



รูปที่ 6 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สะสมผ่านตะแกรงกับขนาดเม็ดดิน

ตารางที่ 1 : ผลวิเคราะห์ดินด้วย XRF (X-Ray Fluorescence)

ลำดับ	สารประกอบ	ธาตุหลัก	ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์)
1	SiO_2	ซิลิกอน	27.4
2	Al_2O_3	อะลูมิเนียม	7.9
3	Fe_2O_3	เหล็ก	5.6
4	MgO	แมกนีเซียม	3.9

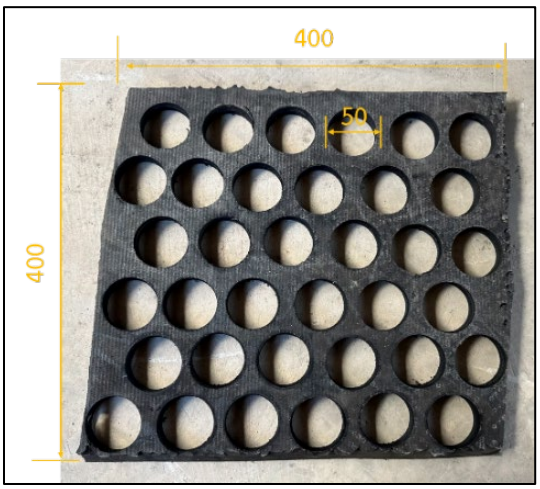
3.1.2) สายพาน ใช้วัสดุสายพานที่หมดอายุจากการใช้งานลำเลียงแร่ในเหมืองเป็นตัวเลือกในการทำการศึกษาสำหรับการป้องกันการกัดเซาะหน้าดิน โดยออกแบบสายพานในรูปแบบตาข่ายรังผึ้งเป็นรูปแบบที่ป้องกันการกัดเซาะของดินได้ดี ซึ่งมีส่วนช่วยกระจายแรงและมีส่วนลดน้ำหนักแผ่นยางต่อพื้นที่ ขนาดแผ่นยางสายพานที่ใช้ในการทดลองความกว้าง 400 มิลลิเมตร ความยาว 400 มิลลิเมตร และความหนา 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7 ความหนาแน่นเดิม 1.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และถูกลดความหนาแน่นลงเหลือ 0.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยการเจาะรูใกล้เคียงกับกระถางต้นไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร การลดน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่จะทำให้ขนย้ายสะดวก ง่ายต่อการบริหารจัดการ และระบายน้ำได้ดีขึ้น ทำให้ต้นไม้มีการเจริญเติบโตได้ดี

3.1.3) แผนการทดลอง การทดลองการกัดเซาะหน้าดินโดยใช้และไม่ใช้ยางสายพานในสภาวะฝนตกจะแบ่งออกเป็น 8 ตัวอย่างการทดลอง ภายใต้เงื่อนไขปริมาณน้ำฝน 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ที่ความลาดชันและความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 2

3.2) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

โมเดลการทดลองประกอบด้วยกล่องทดลองที่สร้างด้วยแผ่นไม้ 4 ด้าน และแผ่นอะคริลิคที่มีลักษณะใสไว้สำหรับสังเกตุการระหว่างการทดลอง กล่องทดลองมีขนาดกว้าง 40 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยมีช่องระบายน้ำด้านบนพร้อมต่อท่อความยาว 150 เซนติเมตร สำหรับเก็บตัวอย่างดินที่ได้จากการกัดเซาะของหน้าดิน ส่วนระบบฝนเทียมด้วยการติดสปริงเกอร์แบบฝอยมีระยะห่างของแต่ละตำแหน่งประมาณ 13 เซนติเมตร สูงจากดิน 250 เซนติเมตร ซึ่งมีปั๊มน้ำติดระบบควบคุมและปรับระดับปริมาณน้ำฝน 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงตลอดระยะเวลาทำการทดลอง การทดสอบการกัดเซาะของหน้าดินด้วยการจำลองแบบเอียง (tilted bed slope) จากการปรับ

องศาความลาดชันของดินด้วยการใช้อุปกรณ์ระบบไฮดรอลิกเพิ่มตามระยะความสูง [28] ดังแสดงในรูปที่ 8

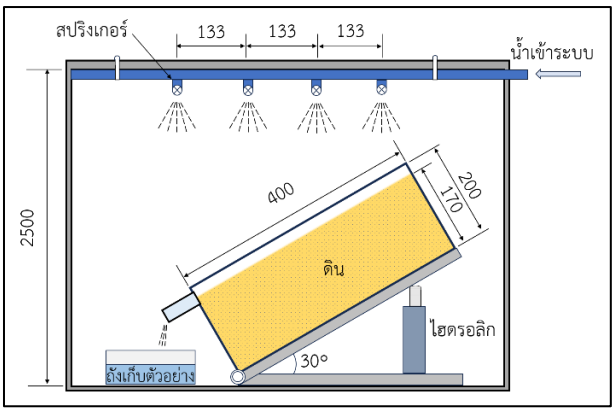


รูปที่ 7 : การออกแบบยางสายพานในรูปแบบตาข่ายรังผึ้ง (หน่วยมิลลิเมตร)

ตารางที่ 2 : แผนการทดลอง

การทดลอง	ความลาดชัน (องศา)	ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)	เงื่อนไข*
1	15	17	ใช้
2	15	17	ไม่ใช้
3	30	15	ใช้
4	30	15	ไม่ใช้
5	30	17	ใช้
6	30	17	ไม่ใช้
7	45	17	ใช้
8	45	17	ไม่ใช้

**หมายเหตุ: ใช้ หมายถึง ใช้ยางสายพานในการทดลอง และ ไม่ใช้ หมายถึง ไม่ใช้ยางสายพานในการทดลอง*



รูปที่ 8 : เครื่องมือการทดลอง (หน่วยมิลลิเมตร)

3.3) วิธีทดลองและการเก็บข้อมูล

วิธีการทดลองเริ่มจากการเตรียมกล่องโมเดลที่ออกแบบมีช่องเปิดออกด้านบน ส่วนช่องว่างของแต่ละด้านถูกปิดด้วยซิลิโคนกันน้ำเพื่อป้องกันน้ำไหลออกจากกล่อง จากนั้นนำตัวอย่างดินและผสมน้ำให้เข้ากัน แล้วเทตัวอย่างดินที่ผสมเสร็จในกล่องทดลอง โดยแบ่งเป็นชั้นละ 5 เซนติเมตร แล้วทำการอัดให้ได้ความหนาแน่นตามที่กำหนดด้วยการควบคุมความหนาแน่นจากความสัมพันธ์มวลและปริมาตรด้วยการใช้สมการ (1) และ (2) [29] ทำการติดตั้งระบบไฮดรอลิกและปรับระยะขึ้นลงในแนวดิ่งตามองศาความลาดชัน จากนั้นเปิดระบบฝนเทียมและทำการทดลองจนครบ 1 ชั่วโมง

ในส่วนของการเก็บข้อมูลดินที่ถูกกัดเซาะจะถูกเก็บไว้ในถังเพื่อรอการตกตะกอนดิน หลังจากนั้นทำการอบดินในตู้อบเพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักดินที่ถูกกัดเซาะของแต่ละการทดลอง

$$D_d = \left(\frac{D_w}{w+100}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$\%_w = \left(\frac{M_w - M_d}{M_d}\right) \times 100 \quad (2)$$

คำอธิบายสมการ

D_d คือ ความหนาแน่นแห้ง (กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)

D_w คือ ความหนาแน่นเปียก (กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)

$\%_w$ คือ ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

M_w คือ น้ำหนักมวลเปียก (กิโลกรัม)

M_d คือ น้ำหนักมวลแห้ง (กิโลกรัม)

3.4) การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลการกัดเซาะหน้าดินที่มีปริมาณน้ำฝน 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาฝนตก 1 ชั่วโมง การวิเคราะห์ข้อมูลจะทำการเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณการกัดเซาะต่อพื้นที่ฝนตกมีดังนี้

(1) เปรียบเทียบปริมาณการกัดเซาะจากการใช้กับไม่ใช้ยางสายพาน

(2) ความลาดชัน 15 30 และ 45 องศา ที่ส่งผลต่อปริมาณการกัดเซาะหน้าดิน

(3) ความหนาแน่นดินแห้ง 15 และ 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตรต่อปริมาณการกัดเซาะหน้าดิน

4) ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1) ปัจจัยวัสดุ

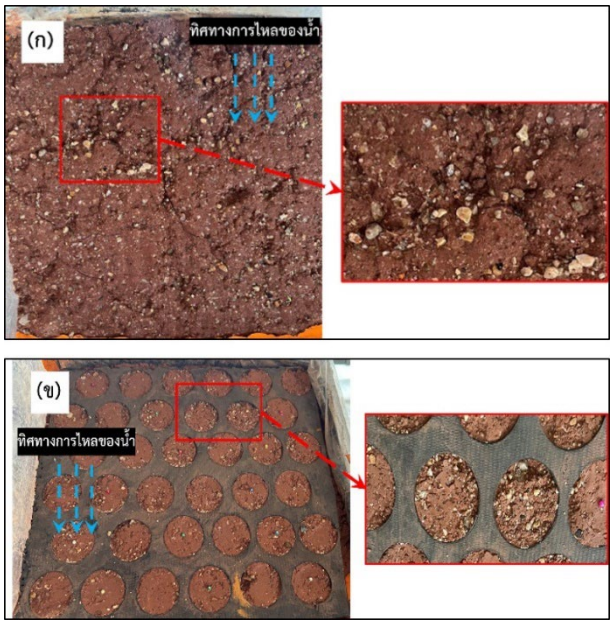
จากผลการทดลองพบว่าน้ำหนักดินถูกกัดเซาะแบบปล่อยให้ไปตามธรรมชาติกับใช้วัสดุยางสายพานปิดหน้าดินเพื่อป้องกันการกัดเซาะผิวดินจากน้ำฝนส่งผลต่อปริมาณน้ำหนักดินถูกกัดเซาะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน อัตราส่วนน้ำหนักดินถูกกัดเซาะระหว่างไม่ใช้กับใช้ยางสายพานป้องกันอยู่ในช่วง 60 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความลาดชัน 15 ถึง 45 องศา โดยพบว่าที่ความลาดชันน้อยการใช้ยางสายพานจะมีประสิทธิภาพในการป้องกันได้ดีกว่าไม่ใช้ยางสายพานแต่อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วนน้ำหนักดินที่ถูกกัดเซาะจะเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ความลาดชันมากกว่า 45 องศาจะมีแนวโน้มแบบใช้ยางสายพานมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับไม่ใช้ยางสายพานดังรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 : อัตราส่วนน้ำหนักดินถูกกัดเซาะแบบไม่ใช้ยางสายพานกับใช้ยางสายพาน

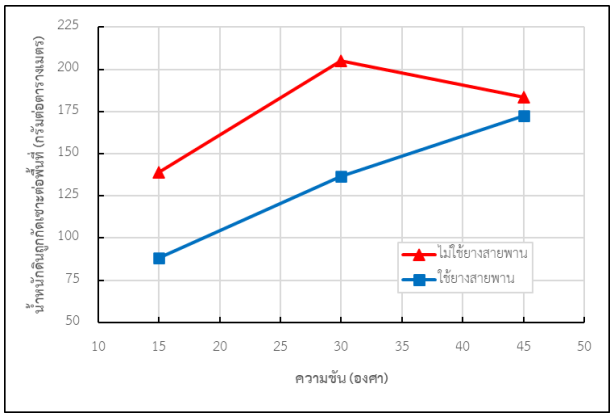
ความลาดชัน (องศา)	น้ำหนักดินถูกกัดเซาะ (กรัมต่อตารางเมตร)		อัตราส่วนไม่ใช้ต่อใช้ยางสายพาน (เปอร์เซ็นต์)
	ไม่ใช้	ใช้	
15	139	88	60
30	205	136	50
45	183	173	10

หมายเหตุ: ความหนาแน่นดินแห้ง 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร

รูปที่ 9 (ก) เป็นการทดสอบตัวอย่างที่ 5 ของการกัดเซาะแบบไม่ใช้ยางสายพานที่ความลาดชัน 30 องศา เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าผิวดินมีการกัดเซาะเป็นร่องลึก จะเห็นได้ชัดเจนในส่วนบนของแบบจำลอง ในส่วนของ รูปที่ 9 (ข) เป็นการทดสอบตัวอย่างที่ 6 ของการใช้ยางสายพานป้องกันการกัดเซาะ พบว่าสภาพของการกัดเซาะมีร่องที่ตื้นกว่าแบบไม่ใช้ยางสายพาน และในส่วนบนของวงกลมเกิดการกัดเซาะที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนล่างของวงกลม แบบจำลองทั้งสองมีลักษณะการกัดเซาะเหมือนกันเริ่มจากอนุภาคเม็ดดินจะเริ่มหลุดแล้วไหลไปตามกระแสน้ำจากที่สูงไปที่ต่ำ แต่เนื่องด้วยแผ่นยางช่วยลดแรงต้านของน้ำ ทำให้การกัดเซาะจะน้อยกว่าไม่ได้ใช้แผ่นยางป้องกัน



รูปที่ 9 : สภาพผิวดินถูกกัดเซาะ (ก) ไม่ใช้ยางสายพาน (ข) ใช้ยางสายพาน



รูปที่ 10 : กราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณดินถูกกัดเซาะกับความลาดชันที่ไม่ใช้ยางสายพานและใช้ยางสายพาน

4.2) ปัจจัยความลาดชันหน้าดิน

รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณน้ำหนักดินที่ถูกกัดเซาะกับความลาดชันหน้าดินแบบไม่ใช้และใช้ยางสายพานพบว่าที่ระดับความลาดชันที่น้อยจะมีปริมาณการกัดเซาะของหน้าดินน้อยกว่าที่ระดับความลาดชันมากและปริมาณการกัดเซาะของหน้าดินจะเพิ่มขึ้นตามความลาดชันที่เพิ่มขึ้นทั้งไม่ใช้และใช้ยางสายพาน

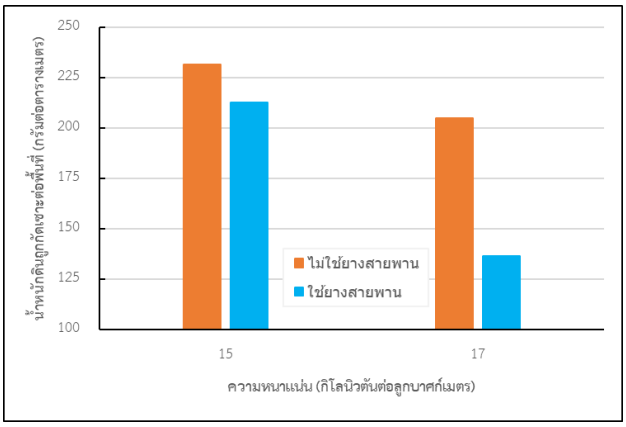
ปริมาณน้ำหนักดินถูกกัดเซาะแบบไม่ใช้และใช้ยางสายพานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะคงที่เมื่อความลาดชันน้อยกว่า 30 องศาแต่อย่างไรก็ตามเมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้นเลยจากมุมเสียดทานภายในของดินจะเห็นได้ว่าที่ ความลาดชัน 45 องศา การกัด

เซาะของดินระหว่างไม่ใช้กับใช้ยางสายพานป้องกันมีผลลัพธ์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จะเห็นได้ว่าการใช้ยางสายพานป้องกันการกัดเซาะหน้าดินจะมีประสิทธิภาพได้ดีเมื่อระดับความลาดชันน้อยกว่า 45 องศา อัตราการการกัดเซาะจากปัจจัยความลาดชันสามารถอธิบายได้จากการตกกระทบของน้ำฝนกับอนุภาคเม็ดดิน ที่ระดับความลาดชันน้อยการเคลื่อนตัวของอนุภาคเม็ดดินจะถูกจำกัดด้วยอนุภาคข้างเคียง ส่วนแรงดันน้ำที่เคลือบบนผิวอนุภาคดินจะมีค่าน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเม็ดดิน จึงทำให้มีแนวโน้มที่น้ำมีโอกาสซึมลงในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้และลงไปตามชั้นดินแบบช้า ๆ ส่งผลให้ปริมาณการกัดเซาะจะน้อยกว่า แต่หากเพิ่มความลาดชันจนถึงจุดวิกฤต อนุภาคเม็ดดินจะสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและถูกแทนที่ด้วยแรงดันจากน้ำอนุภาคดินนี้จะถูกกัดเซาะออกไป ส่วนอนุภาคชั้นลึกลงมาเริ่มกระบวนการการกัดเซาะใหม่ [30]

4.3) ปัจจัยความหนาแน่นของดิน

จากผลการทดลองการกัดเซาะดินที่ความลาดเท่ากับ 30 องศา มีปริมาณน้ำหนักดินถูกกัดเซาะต่อพื้นที่ค่อนข้างสูงและใช้เป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบความหนาแน่นของดินกับปริมาณดินถูกกัดเซาะดังแสดงในรูปที่ 11 ความลาดชันหน้าดิน 30 องศา ความหนาแน่น 15 กับ 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ของการทดลองแบบไม่ใช้กับใช้สายพาน พบว่าปัจจัยความหนาแน่นดินจะส่งผลต่อปริมาณน้ำหนักดินถูกกัดเซาะด้วยน้ำฝนอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยภาพรวมจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณน้ำหนักดินถูกกัดเซาะน้อยลง ความหนาแน่นดินที่ 15 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร แบบธรรมชาติจะมีการกัดเซาะหน้าดินสูงกว่าแบบใช้สายพาน แต่เมื่อเพิ่มความหนาแน่นเป็น 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร จะพบว่าไม่ใช้และใช้สายพานมีการเปลี่ยนแปลงการกัดเซาะลดลงจากเดิมอยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การเพิ่มความหนาแน่นของดินจะเป็นการลดช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดินลง ส่งผลให้ช่องว่างนี้ถูกแทนที่ด้วยอนุภาคเม็ดดิน ดังนั้นความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอัตราการซึมและการแทนที่ของน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะมีโอกาสน้อยลงจึงส่งผลให้การกัดเซาะดินน้อยลงตาม ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดลองจากการเพิ่มความหนาแน่น 15 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้ดินถูกกัดเซาะน้อยลง



รูปที่ 11 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณดินถูกกัดเซาะกับความหนาแน่นที่ใช้ในการทดสอบ

5) สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการใช้แผ่นยางรีไซเคิลที่ผ่านการใช้งานในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ซึ่งไม่มีมูลค่าและใช้ประโยชน์ในกระบวนการอื่น ๆ จึงได้มีการจำลองการทดลองใช้งานแทนวัสดุสังเคราะห์งานดินให้เสมือนกับสภาพกับการใช้งานจริงในป้องกันการกัดเซาะหน้าดินด้วยเงื่อนไขฝนตกระดับสูงสุด จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

การกัดเซาะหน้าดินภายใต้สภาวะฝนตกหนักมากพบว่าการประยุกต์ใช้ยางสายพานมาใช้งานจะช่วยลดปริมาณดินถูกกัดเซาะได้ดี ส่งผลให้ลดการกัดเซาะได้ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยลักษณะร่องของการกัดเซาะจะตื้นกว่าไม่ใช้ยางสายพาน แผ่นยางมีส่วนช่วยลดความเร็วของน้ำ

ส่วนปัจจัยความลาดชันของหน้าดินมีส่วนให้เกิดการกัดเซาะที่แตกต่างกัน โดยระดับความลาดชันที่น้อยจะส่งผลต่อการกัดเซาะที่น้อยกว่าความลาดชันที่มาก มุมของการกระทบของน้ำฝนและอนุภาคเม็ดดินมีส่วนช่วยให้อนุภาคดินเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวและเกิดการกัดเซาะ ที่ความลาดชันต่ำน้ำมีโอกาสซึมเข้าไปในอนุภาคดินจากชั้นบนลงชั้นล่างแบบช้า ๆ จึงส่งผลให้การกัดเซาะดินน้อย แต่ถ้าความลาดชันเพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิกฤตจะส่งผลให้น้ำมีการซึมลงไปในช่วงว่างของอนุภาคเม็ดดินจากชั้นบนลงชั้นล่างได้น้อยลง เมื่อนุภาคดินชั้นบนถูกการกัดเซาะ ชั้นดินถัดไปก็เกิดกระบวนเริ่มต้นใหม่ในการซึมของน้ำเข้าไปในอนุภาคเม็ดดิน จากการทดลองพบว่าความลาดชันที่ระดับ 45 องศาจะเป็นช่วงจำกัดของประสิทธิภาพการป้องกันของยางสายพาน

ความหนาแน่นดินเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการกัดเซาะจากการลดช่องว่างระหว่างเม็ดดินทำให้น้ำฝนมีโอกาสซึมเข้าไปใน

เนื้อดินน้อยลง ซึ่งดินที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการกัดเซาะหน้าดินน้อยลง การเพิ่มความหนาแน่นดิน 13 เปอร์เซ็นต์ จาก 15 เป็น 17 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ส่งผลให้ปริมาณดินถูกกัดเซาะลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้ามีการใช้ยางสายพานร่วมจะสามารถลดการกัดเซาะหน้าดินได้ถึง 35 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการการใช้ยางสายพานสามารถป้องกันการกัดเซาะดินจากน้ำฝนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถนำเอาไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่กองทิ้งดิน คันดิน และผนังบ่อเหมืองได้ในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือและสถานที่ห้องปฏิบัติการทดลองจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

REFERENCES

[1] F. Zhao and Y. Yin, “Research on the stability of the geocell protected bank slope under rainfall,” *J. Phys.: Conf. Ser.,* vol. 1168, 2019, Art. no. 022052.

[2] S. Bahddou, W. Otten, W. R. Whalley, H.-C. Shin, M. El Gharous, and R. J. Rickson, “Changes in soil surface properties under simulated rainfall and the effect of surface roughness on runoff, infiltration and soil loss,” *Geoderma,* vol. 431, Mar. 2023, Art. no. 116341.

[3] A. A. Dofee and F. Goshu, “Soil erosion impacts on crop productivity and its implications on food security in Kechabira District, Southern Ethiopia,” *Agricultural Biol. Res.,* vol. 40, no. 6, pp. 1–11, 2024, doi:10.21203/rs.3.rs-3588343/v1.

[4] W. Hou, J. Gao, and S. Wu, “Quantitative analysis of the influencing factors and their interactions in runoff generation in a karst basin of southwestern China,” *Water,* vol. 12, no. 10, Oct. 2020, Art. no. 2898.

[5] EGAT, “Mae Moh EGAT Telemetry System: Rainfall Data,” (in Thai), 2024. [Online]. Available: https://watertele.egat.co.th/maemoh/

[6] Upper Northern Region Irrigation Hydrology Center. “Rainfall intensity of upper northern region river basin.” (in Thai), HYDRO-1.net. https://www.hydro-1.net (accessed May 16, 2024).

[7] Ang Thong Provincial Agriculture and Cooperatives Office. “Rainfall intensity classification.” (in Thai), OPSMOAC.go.th. https://www.opsmoac.go.th/angthong-local_wisdom-preview-441591791908 (accessed May 16, 2024).

[8] Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation. “Rainfall frequency analysis.” (in Thai), ROYALRAIN.go.th. https://www.royalrain.go.th/royalrain/ShowDetail.aspx?DetailId=10384 (accessed May 10, 2024).

[9] Department of International Trade Promotion. “Rubber.” (in Thai), DITP.go.th. https://www.ditp.go.th (accessed Jun. 14, 2024).

[10] G. Song *et al.,* “The use of geocell as soil stabilization and soil erosion countermeasures,” *Geomatics, Natural Hazards Risk,* vol. 12, no. 1, pp. 2155–2169, 2021.

[11] N. A. Bhange and T. K. Rao, “Slope stability analysis of geocell supported embankment,” *Int. J. Civil Eng. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 1049–1057, Apr. 2018.

[12] G. Y. Wang, J. P. Zhang, and J. W. Zhao, “Numerical analysis of geocell protective slope stability,” *Appl. Mech. Mater.,* vol. 353, pp. 635–639, 2013.

[13] I. Mehdipour, M. Ghazavi, and R. Ziaie Moayed, “Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect,” *Geotextiles Geomembranes,* vol. 37, pp. 23–34, Apr. 2013.

[14] Z. Arbanas *et al.,* “Impact of gravity retaining wall on the stability of a sandy slope in small-scale physical model,” in *Proc. 5th Regional Symp. Landslides in Adriatic-Ballan Region*, Mar. 2022, pp. 193–200.

[15] W. Tan, Q. Huang, and X. Chen, “Physical model test on the interface of loess fill slope,” *Land,* vol. 11, no. 8, Aug. 2022, Art. no. 1372.

[16] P. Panagos *et al.*, “Understanding the cost of soil erosion: An assessment of the sediment removal costs from the reservoirs of the European Union,” *J. Cleaner Prod.,* vol. 434, Jan. 2024, Art. no. 140183.

[17] S. G. Thallak, S. Saride, and S. K. Dash, “Performance of surface footing on geocell-reinforced soft clay beds,” *Geotech. Geolog. Eng.,* vol. 25, pp. 509–524, May 2007.

[18] Keymay. “Geocell.” KEYMAY.com. https://www.keymay.com/geocell-1 (accessed May 16, 2024).

[19] Greeninspired. “Enviro Grid™ (Soil stabilization system-Geo cell).” (in Thai), GREENINSPIRED.co.th. https://www.greeninspired.co.th/products/geocell (accessed May 16, 2024).

[20] KSB. "Geocell." (in Thai), KSBPRODUCT.co.th. https://www.ksbproduct.co.th (accessed May 16, 2024).

[21] A. Verma, S. Suman, and S. K. Sharma, "Use of geocells for controlling soil erosion at slopes and its comparison with other methods of slope protection," in *Proc. All India Seminar Adv. Eng. and Technol. Sustain. Develop.*, Pantnagar, India, Jun. 2015, pp. 411–416.

[22] Z. Zhang, L. Qin, G. Ye, W. Wang, and J. Zhang, "Physical modeling and intelligent prediction for instability of high backfill slope moisturized under the influence of rainfall disasters," *Appl. Sci.,* vol. 13, no. 7, Mar. 2023, Art. no. 4218.

[23] A. Vijay and A. R. Sudha, "Effect of use of geocell and rice straw in slope stability," *Int. J. Adv. Res. Sci., Commun. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 242–250, Jul. 2022, doi: 10.48175/IJARSCT-5674.

[24] X. Song *et al.,* "Erosion control treatment using geocell and wheat straw for slope protection," *Adv. Civil Eng.,* vol. 2021, no. 1, Apr. 2021, Art. no. 553221.

[25] D.-y. Wang, J.-l. Hu, J. Wang, and Q.-j. Zun, "Experimental study on anti-eroding effect of slope protected by degradable geocell," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.,* vol. 634, no. 1, 2021, Art. no. 012026.

[26] M. D. Ricks, W. T. Wilson, W. C. Zech, X. Fang, and W. N. Donald, "Evaluation of hydromulches as an erosion control measure using laboratory-scale experiments," *Water,* vol. 12, no. 2, Feb. 2020, Art. no. 515.

[27] *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM D854-14, May 2014. [Online]. Available: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/astm/2d902b8f-b0e5-48db-96e0-2d14f9e355bf/astm-d854-14?srsltid=AfmBOopaFZ5nl-QGjDGCdyGJrzAkmHU1LU1t_PZHYHdfRnm99NQ7cT7y

[28] *Standard Test Method for Determination of Erosion Control Products (ECP) Performance in Protecting Slopes from Sequential Rainfall-Induced Erosion Using a Tilted Bed Slope*, ASTM D8297/D8297M-22, Nov 2023. [Online]. Available: https://store.astm.org/d8297_d8297m-22.html

[29] *Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soils Using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.) Drop*, T 99-21, 2018. [Online]. Available: https://wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/m46-01/t99.pdf

[30] G. Larionov *et al.,* "Effect of impact angle on the erosion rate of coherent granular soil, with a chernozemic soil as an example," *Eurasian Soil Sci.,* vol. 51, pp. 251–254, 2018.