

การศึกษาพฤติกรรมการกองทับถมเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง: กรณีใช้แบบจำลองในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

A study of granular flow deposition: Experimental and DEM Numerical Model

พุทธิกร รัมมรัมย์^{1,*} อาทิตย์ เรืองยศ² กรกฎ นุสิทธิ์³ ธเนศ ทองเดชศรี⁴ และ สุริยาวัธ ปรอ้าย⁵

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

³ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

^{4,5} หน่วยวิจัย RS2GH คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; 66103398@up.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลและการทับถมของวัสดุเม็ดแห้ง โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการร่วมกับแบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete Element Method (DEM) ซึ่งเป็นเทคนิคเชิงตัวเลขที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เป็นวัสดุเม็ด วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยส่วนผสมของกรวดขนาดใหญ่และกรวดละเอียดที่มีขนาดแตกต่างกัน และอัตราส่วนผสมต่างกัน โดยตั้งค่าความลาดชันในการทดลองที่ 25 30 และ 35 องศา เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอัตราส่วนผสมวัสดุและความลาดชันต่อการกระจายตัวของวัสดุ รวมถึงความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM จากการศึกษาพบว่าความชันมีผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของวัสดุ โดยความชันที่สูงขึ้นทำให้วัสดุแผ่ขยายในพื้นที่กว้างขึ้น เนื่องจากพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคมีผลต่อการไหลและการแผ่กระจาย โดยวัสดุที่มีอนุภาคเล็กกว่ามีการกระจายตัวและแผ่ขยายได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ และแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สามารถทำนายพฤติกรรมการไหลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง โดยที่ค่าร้อยละความแตกต่างเฉลี่ย (Relative Error) เท่ากับ 12.35 และค่า R^2 ของพื้นที่การแผ่กระจายจากการทดลองในห้องปฏิบัติการกับแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เท่ากับ 0.9808 ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างวิศวกรรมเพื่อป้องกันและบรรเทาภัยจากดินโคลนถล่มหรือเศษวัสดุธรรมชาติไหลได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การทับถม, DEM, เม็ดแห้ง, dispersion, เศษวัสดุธรรมชาติไหล

Abstract

This article presents a preliminary study on the flow behavior and deposition of dry granular materials through laboratory experiments combined with numerical modeling using the Discrete Element Method (DEM), a computational technique used to simulate the behavior and movement of granular particles. The materials used in the experiments consisted of mixtures of coarse and fine gravel with varying sizes and mixing

ratios. The slope angles in the experiments were set at 25°, 30°, and 35°, in order to analyze the effects of material ratios and slope inclination on material distribution, as well as to evaluate the accuracy of the DEM numerical model. Studies have shown that the slope directly affects the dispersion of materials, with higher slopes causing materials to disperse over a larger area due to increased kinetic energy. Particle size also affects flow and dispersion, with materials with smaller particles tending to disperse more than materials with larger particles. The DEM numerical model was able to closely predict the actual flow behavior observed in the laboratory, with a relative error of 12.35% and an R^2 value of 0.9808 for the spreading area when compared with experimental data. The findings of this study can be applied to the design of engineering structures aimed at preventing and mitigating hazards from landslides or debris flows in a practical and effective manner.

Keywords: Disperse Behavior, DEM, Dry Granular Materials, Debris Flow

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ดินโคลนถล่มเป็นหนึ่งในภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งในพื้นที่ภูเขาและพื้นที่ลาดชัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐาน ชีวิตของประชาชน และระบบนิเวศ ในปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ การขยายของชุมชน และกิจกรรมของมนุษย์ที่ทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อดินโคลนถล่มสูงขึ้น ซึ่งความรุนแรงที่เกิดจากภัยพิบัติเหล่านี้สร้างความเสียหายจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น ในวันที่ 11 สิงหาคม 2567 เกิดเหตุน้ำป่าไหลหลากและดินโคลนถล่มที่บ้านแม่โกปี ตำบลแม่ยมน้อย อำเภอขุนยวม จังหวัดแม่ฮ่องสอน [1] เนื่องจากฝนตกหนักต่อเนื่องกว่า 3 วัน ปริมาณน้ำฝนสะสมพัดพาตะกอนดินและซากต้นไม้เข้าพื้นที่ชุมชน ทำให้บ้านเรือน

เสียหายถูกเศษซากทับถมจำนวนมาก หมู่บ้านถูกตัดขาดจากภายนอก มีรายงานผู้เสียชีวิต 1 ราย ชาวบ้านกว่า 400 คน ขาดอาหารและเครื่องดื่ม ความเสียหายจากเหตุการณ์เหล่านี้ไม่เพียงแต่กระทบต่อการดำรงชีวิตของประชาชน แต่ยังส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและความมั่นคงทางสังคม

ในปัจจุบันนักวิจัยพยายามศึกษาพฤติกรรมการไหลและการทับถมของดินโคลน เพื่อคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงและกำหนดมาตรการป้องกันที่เหมาะสม ดินโคลนถล่มหรือเศษวัสดุธรณีไหล (Debris flow) เป็นการเคลื่อนที่ของส่วนผสมระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งมีความซับซ้อนและยากต่อการศึกษา ทั้งในแง่ของการเตรียมตัวอย่างและการออกแบบวิธีทดลอง ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจึงนิยมใช้วัสดุเม็ดแห้งเป็นตัวแทนในการทดลอง โดยทั่วไป การศึกษาเหล่านี้มักดำเนินการผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการขนาดเล็ก [2-5] ซึ่งใช้ทรัพยากรน้อยและสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ง่ายกว่าการทดลองภาคสนาม [6-7] นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และคาดการณ์พฤติกรรมของดินโคลนในสถานการณ์ต่างๆ [8-9] โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาการทดลองจริง ซึ่งอาจมีข้อจำกัดด้านเวลาและงบประมาณ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองเชิงตัวเลขยังคงมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ความคลาดเคลื่อนจากสมมติฐานที่ใช้ และความแม่นยำของพารามิเตอร์ที่กำหนด ดังนั้น จึงต้องกำหนดค่าคุณสมบัติต่างๆ อย่างรอบคอบ และเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง เพื่อลดข้อผิดพลาดให้ได้มากที่สุด [10]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งในห้องปฏิบัติการ ร่วมกับการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธี Discrete Element Method (DEM) เพื่อวิเคราะห์กลไกการเคลื่อนที่และการทับถมของวัสดุเม็ดแห้ง รวมถึงตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ภายใต้สภาวะที่ไม่มีผลกระทบจากของเหลว แม้ว่าการไหลของวัสดุเม็ดแห้งจะไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของเศษวัสดุธรณีไหล (Debris flow) ได้ทั้งหมด แต่การศึกษานี้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการทำ ความเข้าใจ พฤติกรรมการไหลของวัสดุ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบมาตรการป้องกัน รวมถึงใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับพัฒนาแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากขึ้นในอนาคต โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ในการวิเคราะห์และพยากรณ์ภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของมวลวัสดุ

2. แนวคิดและทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Discrete Element Method (DEM)

Discrete Element Method (DEM) หรือ วิธีองค์ประกอบแบบไม่ต่อเนื่อง เป็นเทคนิคเชิงตัวเลขที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุที่ประกอบด้วยอนุภาค โดยพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคของวัสดุแต่ละตัว และระหว่างอนุภาควัสดุกับสิ่งแวดล้อม DEM ใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Newton's Laws of Motion) เพื่อคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบ โดยใช้สมการกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน [11-12] สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวพิกัดทั่วไปแสดงดังสมการที่ (1) โดยที่ m_i คือ มวลของอนุภาค i , α_i คือ ความเร่งของอนุภาค i , F_{ic} คือ แรงสัมผัสที่กระทำต่ออนุภาค i , F_{drag} คือ แรงหน่วงที่กระทำต่ออนุภาค i ,

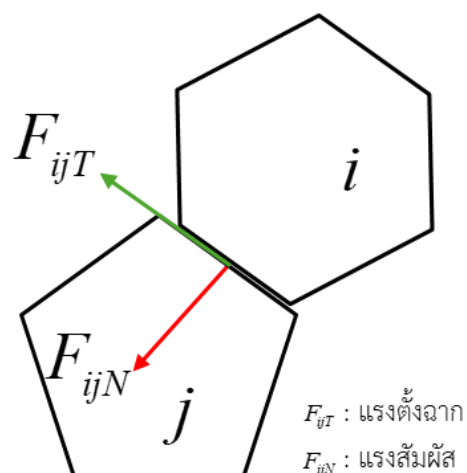
$F_{gravity}$ คือ แรงโน้มถ่วงที่กระทำบนอนุภาค สำหรับการเคลื่อนที่แบบหมุนแสดงดังสมการที่ (2) โดยที่ I_i คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาค i , α_i คือ ความเร่งเชิงมุมของอนุภาค i , $M_{contact}$ คือ แรงบิดสัมผัสที่กระทำกับอนุภาค i , M_{drag} คือ แรงบิดหน่วงที่กระทำกับอนุภาค i

$$m_i \times \ddot{a}_i = \vec{F}_{contact} + \vec{F}_{drag} + \vec{F}_{gravity} \quad (1)$$

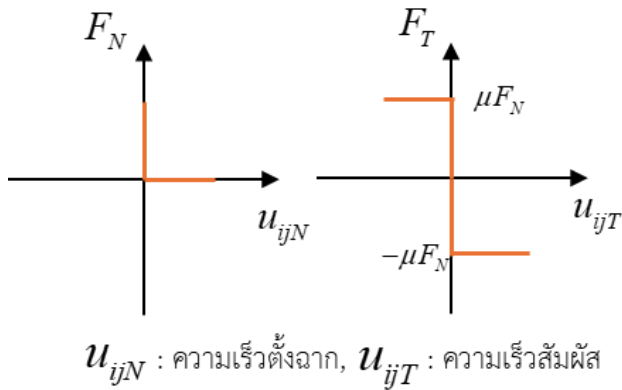
$$I_i \times \ddot{\alpha}_i = M_{contact} + M_{drag} \quad (2)$$

2.2 Contact Law

Non-Smooth Contact Dynamics (NSCD) เป็นวิธีหนึ่งในการจำลองการสัมผัสระหว่างวัตถุหรืออนุภาคที่เคลื่อนที่ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญใน Discrete Element Method (DEM) โดยมีสมมติฐานว่าอนุภาคเป็นวัสดุแข็งสมบูรณ์ ไม่เสียรูปและไม่เกิดการซ้อนทับในระหว่างการชน [13-15] รูปที่ 1 อธิบายแรงที่เกิดขึ้นของสองอนุภาคเมื่อชนกัน ในการใช้ NSCD มีสองกฎเงื่อนไขการสัมผัสหลักที่ต้องพิจารณาอยู่สองข้อคือ (รูปที่ 2) ข้อที่หนึ่งอนุภาคไม่สามารถแทรกหรือทะลุผ่านกันได้ ดังนั้น แรงตั้งฉากระหว่างอนุภาคจะเป็นศูนย์หากไม่มีแรงสัมผัส และข้อที่สองตามกฎของ Coulomb แรงสัมผัสจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและแรงตั้งฉากที่กระทำต่ออนุภาค โดยอนุภาคจะหยุดนิ่งเมื่อแรงสัมผัสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงตั้งฉากที่กระทำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอนุภาคจะเริ่มเคลื่อนที่เมื่อแรงสัมผัสมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงตั้งฉากที่กระทำกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในการสัมผัสระหว่างอนุภาครูปหลายเหลี่ยมสามมิติ ซึ่งสามารถเกิดได้สี่กรณี ได้แก่ กรณีที่หนึ่งการสัมผัสแบบจุดยอดกับหน้า กรณีที่สองการสัมผัสแบบขอบกับหน้า กรณีที่สามการสัมผัสแบบหน้ากับหน้า และกรณีที่สี่การสัมผัสแบบขอบกับขอบ [16]



รูปที่ 1 อธิบายปฏิสัมพันธ์ของอนุภาค



รูปที่ 2 กฎความสัมพันธ์ของการสัมผัส

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

เนื่องจากความซับซ้อนของการไหลหลากของดินโคลนที่แรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคของแข็งและของเหลวเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมและแรงภายนอก และด้วยข้อจำกัดของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ไม่สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ของเหลวได้ ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกใช้วัสดุทดลองเป็นเม็ดแห้ง คือ กรวดแม่น้ำ เนื่องจากดินโคลนในธรรมชาติมีองค์ประกอบและขนาดอนุภาคที่แตกต่างตามลักษณะธรณีวิทยา [17,18] การศึกษาจึงเลือกใช้ส่วนผสมจากวัสดุเม็ดแห้งอนุภาคขนาดต่างกัน 2 ขนาด เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อการแผ่กระจายกรวดขนาดใหญ่เป็นตัวแทนของอนุภาคขนาดใหญ่ในธรรมชาติ ส่วนกรวดละเอียดเป็นตัวแทนของอนุภาคขนาดเล็กในธรรมชาติ อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษามี 2 ส่วนผสม 1.กรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และ 2.ใช้กรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในแต่ละการทดลองเท่ากับ 30 กิโลกรัม โดยความหนาแน่นของวัสดุเม็ดแห้งเท่ากับ 2,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

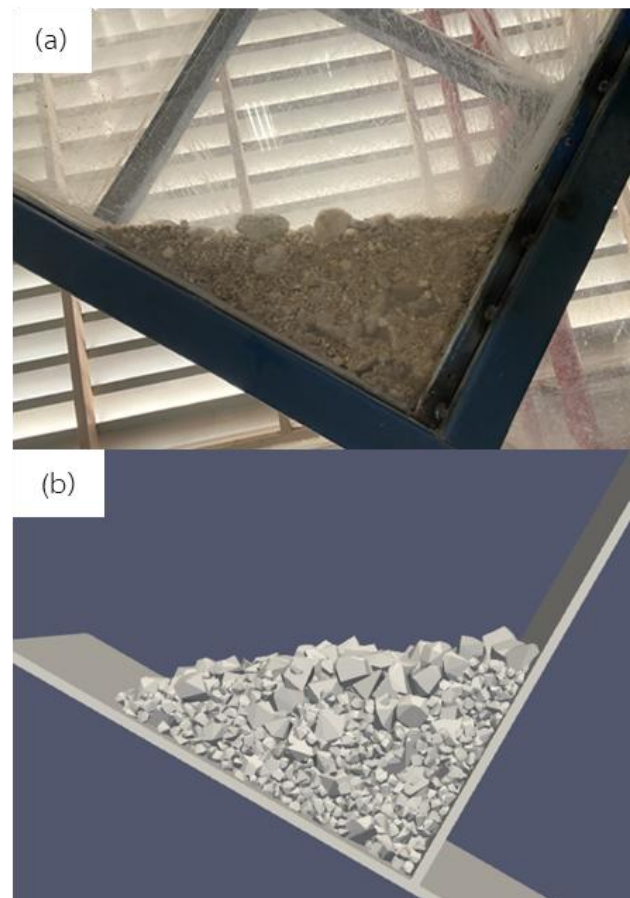
3.2 แบบจำลองทางกายภาพ

วัสดุเม็ดแห้งเป็นกรวดแม่น้ำพื้นผิวเรียบมัน กรวดขนาดใหญ่ใช้ขนาดที่ผ่านตะแกรง 1 นิ้วและตกค้างบนตะแกรง 3/4 นิ้ว ส่วนกรวดละเอียดใช้ขนาดผ่านตะแกรง 3/8 นิ้วและตกค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ในกระบวนการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการล้างวัสดุให้สะอาดเพื่อลดสิ่งปนเปื้อน จากนั้นนำไปอบให้แห้งก่อนทำการทดลอง รูปที่ 3 แสดงการเตรียมตัวอย่างวัสดุเม็ดแห้งก่อนปล่อยไหลของทางทดลองจะเป็นรางน้ำ กว้าง 40 ซม. สูง 55 ซม. และยาว 720 ซม. พื้นสร้างจากแผ่นเหล็กผิวเรียบ ผิวด้านข้างสร้างจากโครงเหล็กติดแผ่นอะคริลิกหนา 0.6 ซม. ด้านบนจะเป็นถังเก็บวัสดุ ทางด้านหน้าของรางทดลองจะติดตั้งไม้กระดาน ขนาด 240 x 360 ซม. ดังรูปที่ 4 ด้านข้างติดตั้งกล้องความเร็วสูงรุ่น Photron Fastcam Mini UX ที่อัตราเฟรมเรท 1000 เฟรมต่อวินาที เพื่อศึกษาความเร็วก่อนการแผ่ และติดตั้ง

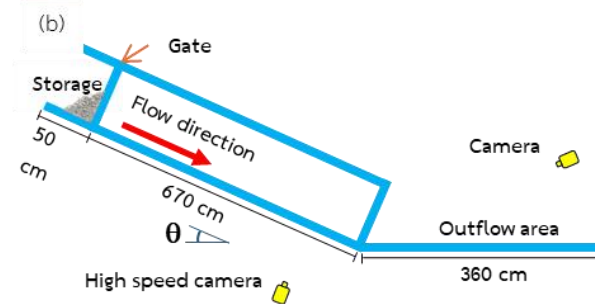
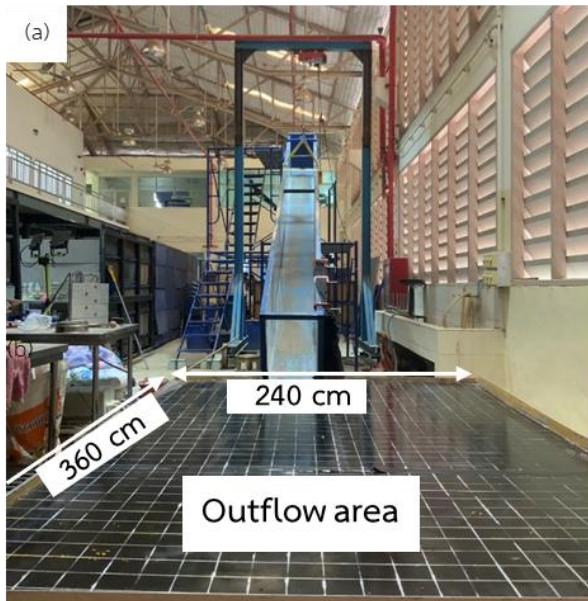
กล้อง Sony A7R ที่ด้านหน้าไม้กระดาน เพื่อดูการกระจายตัวของวัสดุ โดยความลาดชันการไหลถูกตั้งไว้ที่ (q) 25 30 และ 35 องศา

3.3 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

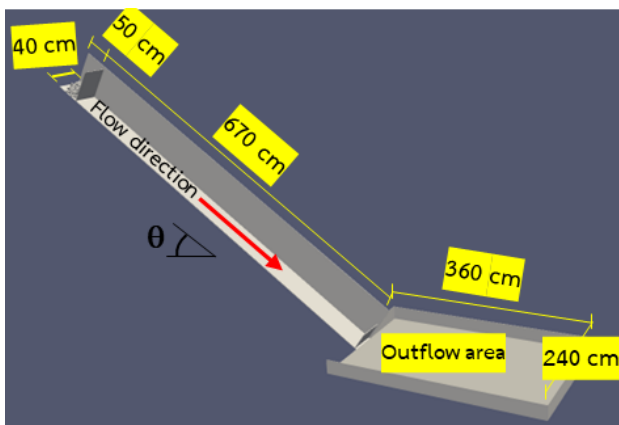
ในการศึกษาใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เพื่อสร้างแบบจำลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งและเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลกับการทดลองทางกายภาพ โดยการกำหนดตัวแปรของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ให้ใกล้เคียงกับแบบจำลองทางกายภาพมากที่สุด ในการสร้างวัสดุเม็ดแห้งจะเริ่มจากสร้างทรงกลมรัศมีตามที่กำหนดจากนั้นจะตัดทรงกลมเป็นรูปหลายเหลี่ยมได้แก่ 16, 20, 24, 28, 32 และ 36 ด้าน แต่ละด้านจะไม่เท่ากัน และเป็นแบบสุ่ม [19-20] กำหนดให้เม็ดแห้งมี 2 ขนาด จากกราฟการกระจายขนาดอนุภาค พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ร้อยละ 50 (D_{50}) ของอนุภาคเป็นดังนี้ กรวดขนาดใหญ่เท่ากับ 40.04 มม. และกรวดละเอียดเท่ากับ 10.22 มม. ดังนั้น จึงกำหนดอนุภาคขนาดใหญ่แบบจำลองเชิงตัวเลข (R_{max}) เท่ากับ 40 มม. และอนุภาคขนาดเล็ก (R_{min}) เท่ากับ 10 มม. โดยตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดพารามิเตอร์แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM อัตราส่วนผสมถูกกำหนดให้สอดคล้องกับการทดลองทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 2 ส่วนรูปที่ 5 เป็นภาพแสดงรายละเอียดของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM



รูปที่ 3 การเตรียมตัวอย่างวัสดุเม็ดแห้งก่อนปล่อยไหล



รูปที่ 4 แบบจำลองทางกายภาพของส่วนในห้องปฏิบัติการ (a) แบบจำลองทางกายภาพ (b) ผังการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง



รูปที่ 5 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

ตารางที่ 1 รายละเอียดพารามิเตอร์แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
เส้นผ่านศูนย์กลางของหินขนาดใหญ่, R_{max}	40	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางของหินขนาดเล็ก, R_{min}	10	mm
ความหนาแน่น	2,650	kg/m ³
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเม็ดแข็ง	0.8	
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นราง	0.35	
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นไม้	0.4	
น้ำหนักวัสดุทดลอง	30	kg

ตารางที่ 2 รายละเอียดอัตราส่วนผสมของวัสดุทดลองและเงื่อนไขของการศึกษา

ความลาดชันการไหล, q (องศา)	อัตราส่วนผสม กรวดขนาดใหญ่: กรวดละเอียด	รหัสการทดลอง
25	40:60	25_40-60
	50:50	25_50-50
30	40:60	30_40-60
	50:50	30_50-50
35	40:60	35_40-60
	50:50	35_50-50

4. ผลการศึกษา

4.1 ความเร็วของการไหลตรงปลายรางก่อนแผ่กระจาย

จากการศึกษาพบว่า ความเร็วของการไหลก่อนเข้าพื้นที่แผ่กระจายขึ้นอยู่กับความชันของการไหล [2-4,21] ที่ความชัน 25 องศา วัสดุไหลด้วยความเร็ว 3.73 เมตรต่อวินาที ที่ความชัน 30 องศา ความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 5.25 เมตรต่อวินาที และที่ความชัน 35 องศา ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 5.86 เมตรต่อวินาที ขณะที่แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ให้ค่าความเร็วที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง โดยที่ความชัน 25 องศา มีความเร็ว 3.95 เมตรต่อวินาที ความชัน 30 องศา ความเร็ว 5.42 เมตรต่อวินาที และที่ความชัน 35 องศา ความเร็วเท่ากับ 6.12 เมตรต่อวินาที ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 2.21 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง DEM สามารถทำนายแนวโน้มของพฤติกรรมการไหลได้ดี แม้จะมีค่าความเร็วสูงกว่าการทดลองทางกายภาพเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

4.2 พื้นที่และขนาดของการแผ่

รูปที่ 6 แสดงการเลือกพื้นที่การแผ่ของวัสดุทดลองเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์การกระจายตัว โดยใช้โค้ด Python ในการแสดงภาพ ตรวจสอบขอบเขตของพื้นที่แผ่ และคำนวณขนาดพื้นที่ในหน่วยพิกเซล ก่อนแปลงเป็นหน่วยตารางเซนติเมตร ผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 3 พบว่าความชันของการไหลมีผลกระทบโดยตรงต่อพื้นที่การแผ่ [4,21] ทั้งในการทดลอง

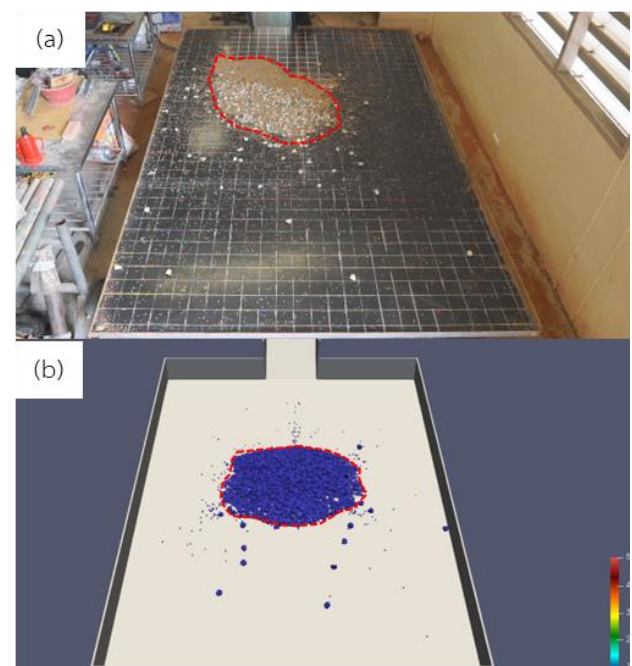
ทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM โดยการทดลองทางกายภาพ ที่ความชัน 35 องศาให้พื้นที่การทับถมมากที่สุด ที่ 13,140 ตร.ซม. ที่ ส่วนผสม 35_40-60_EXP รองลงมา คือ ส่วนผสม 35_50-50_EXP พื้นที่ การแผ่เท่ากับ 11,751.19 ตร.ซม. ที่ความชัน 30 องศา พื้นที่การแผ่เท่ากับ 9,618 และ 10,717 ตร.ซม. ส่วนผสม 25_50-50_EXP และ 25_40-60_EXP ตามลำดับ ที่ความชัน 25 องศา พื้นที่การแผ่กระจายน้อยที่สุด เท่ากับ 8,642 ตร.ซม. ที่ส่วนผสม 25_50-50_EXP เมื่อพิจารณาถึงการ เพิ่มขึ้นของความชันต่อการแผ่กระจายตัวของวัสดุ จากความชัน 25 องศา เป็น 30 องศา ได้ค่าเฉลี่ยดังนี้ ความสูงลดลงร้อยละ 3.43 ความกว้าง เพิ่มขึ้นร้อยละ 24.26 ความยาวเพิ่มขึ้นร้อยละ 45.74 และพื้นที่แผ่กระจาย เพิ่มขึ้นร้อยละ 16.13 ส่วนในกรณีเพิ่มความชันจาก 30 องศาเป็น 35 องศา ได้ค่าเฉลี่ยดังนี้ ความสูงลดลงร้อยละ 12.23 ความกว้างเพิ่มขึ้นร้อยละ 29.56 ความยาวเพิ่มขึ้นร้อยละ 22.37 และพื้นที่แผ่กระจายเพิ่มขึ้นร้อยละ 22.39 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความชันการไหลมีแนวโน้ม ส่งผลให้วัสดุเม็ดแห้งเกิดการแผ่กระจายตัวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในเชิงมิติของการสะสม (ความกว้างและความยาว) และพื้นที่ของการทับถม

อัตราส่วนของวัสดุส่งผลต่อพื้นที่การแผ่กระจายตัวของวัสดุเม็ดแห้ง โดยวัสดุที่มี กรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 และกรวดละเอียดร้อยละ 60 มี แนวโน้มพื้นที่แผ่กระจายมากกว่าส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 และ กรวดละเอียดร้อยละ 50 ในทุกระดับความชัน เนื่องจากขนาดเม็ดวัสดุที่ เล็กกว่าส่งผลให้เกิดการไหลต่อเนื่องมากขึ้น ขณะที่ส่วนผสมที่มีกรวดขนาดใหญ่ เพิ่มขึ้น (50-50) มีแนวโน้มสะสมตัวเป็นกองที่มีขนาดสูงกว่าส่วนผสม (40-60) [21]

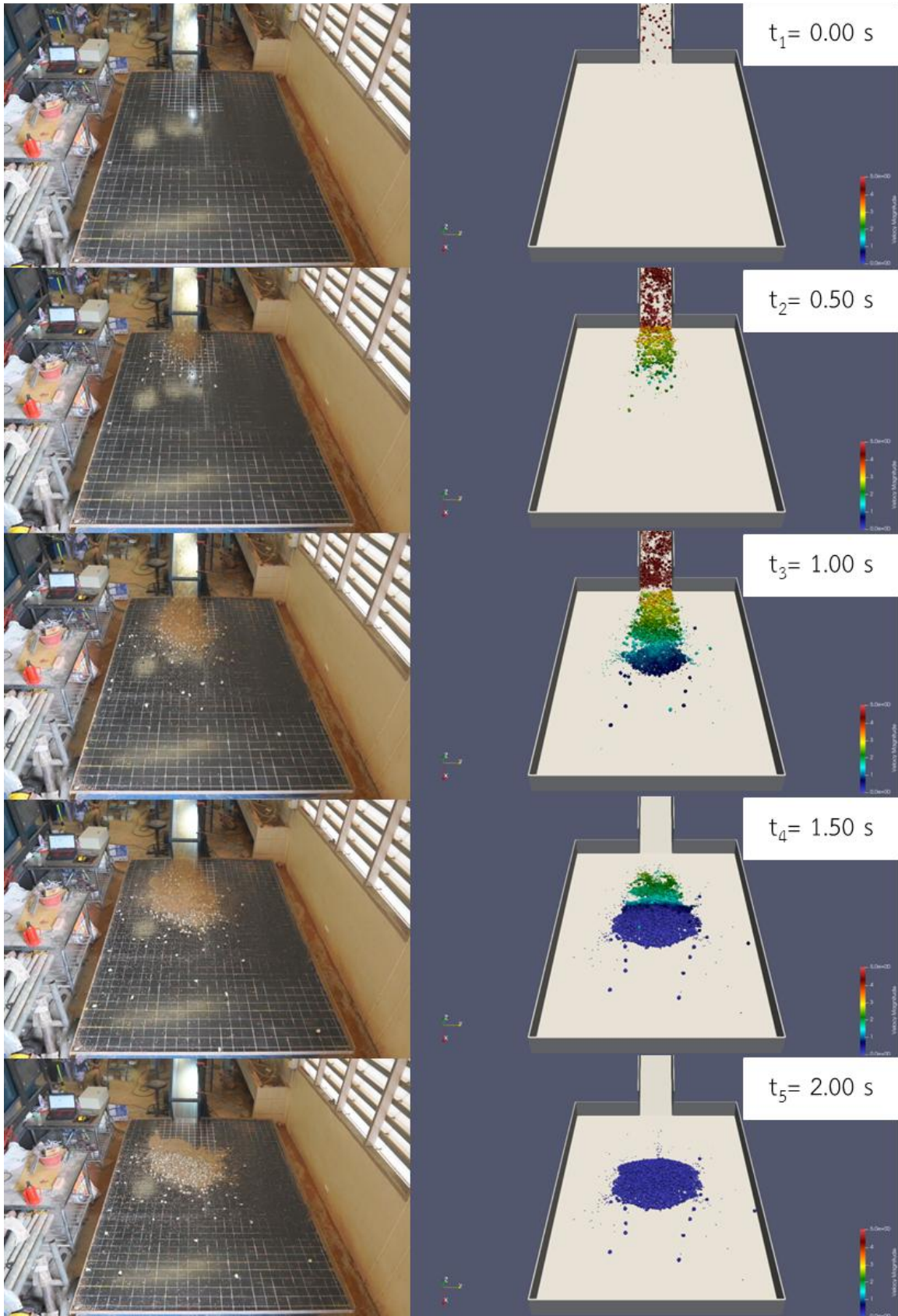
รูปที่ 7 แสดงการแผ่กระจายในช่วงเวลาต่างๆ ของการทดลองทางกายภาพ และแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ของส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ที่ความชันการไหล 30 องศา (30_40-60_EXP) ลักษณะการแผ่ของวัสดุทดลองขึ้นอยู่กับความชันและอัตรา ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ จากรูปที่ 8 ที่ความชันต่ำ (25 องศา) วัสดุจะสะสม อยู่ใกล้กับปลายรางทดลอง เนื่องจากพลังงานจลน์ต่ำส่งผลให้วัสดุไหลได้ไม่ ไกล จึงเกิดการสะสมตัวเป็นกองที่มีลักษณะเป็นแถบยาวมากกว่ากว้าง ที่ความชัน 30 องศา วัสดุสามารถไหลต่อไปได้ไกลขึ้น พลังงานจลน์ ที่เพิ่มขึ้นช่วยกระจายวัสดุออกไป ทำให้กองวัสดุมีรูปร่างที่สมดุลมากขึ้น โดย ความยาวและความกว้างใกล้เคียงกัน ที่ความชัน 35 องศา พลังงานจลน์ ของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้วัสดุแผ่ออกในระยะทางที่ไกล ที่สุด นอกจากนี้ แรงดันจากช่วงท้ายของการไหลยังมีบทบาทสำคัญต่อการ กระจายตัวของวัสดุ โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีแรงเสียดทานสูงกว่ามี แนวโน้มที่จะชะลอตัวและสะสมตัวอยู่ด้านหน้า ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็ก และมีแรงเสียดทานต่ำกว่าจะยังคงไหลไปด้านข้างมากกว่า ส่งผลให้กอง วัสดุที่ความชัน 35 องศา มีลักษณะกว้างกว่าความยาว ซึ่งเป็นลักษณะการ ไหลของอนุภาคที่มีพลังงานสูง [3-4,22-23]

4.3 เปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างการทดลองทางกายภาพกับ แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

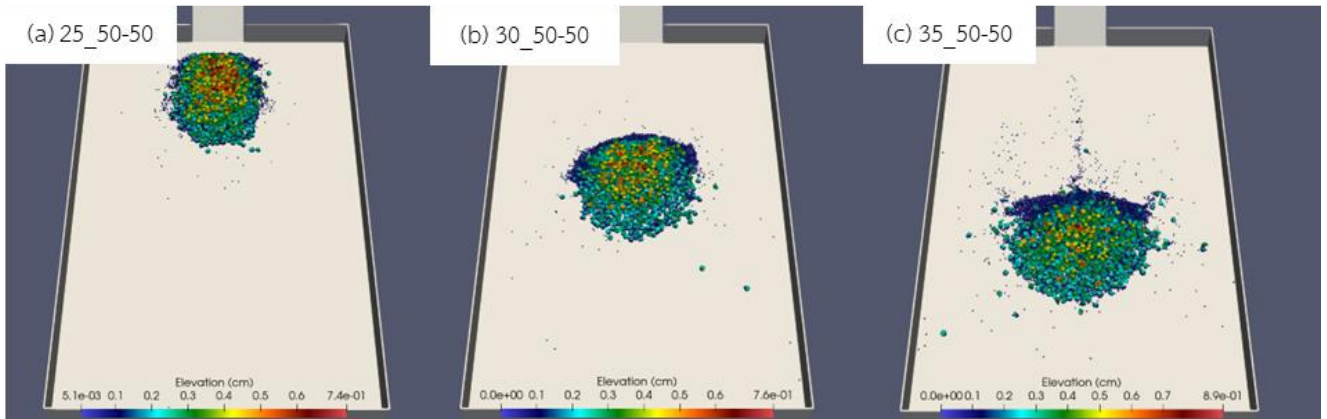
จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าพื้นที่การแผ่ที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีแนวโน้มไปในทางเดียวกับการทดลองทางกายภาพ ที่ความชัน เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนผสมที่มีกรวดละเอียดมากก็จะทำให้พื้นที่การแผ่ กระจายเพิ่มขึ้น ลักษณะการแผ่ของกองวัสดุในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีลักษณะเป็นไปตามการทดลองทางกายภาพ จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าใน แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM วัสดุจากมีลักษณะเป็นกองกว่า การกระจายตัว น้อยทำให้พื้นที่แผ่กระจายน้อยกว่าการทดลองทางกายภาพ รูปที่ 9 และ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การแผ่และขนาดการแผ่กระจายจาก การทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ซึ่งมีค่า R^2 (Coefficient of Determination) จากความสัมพันธ์ของพื้นที่การแผ่ เท่ากับ 0.9808 และค่า R^2 จากความสัมพันธ์ของขนาดการแผ่ เท่ากับ 0.9852 การที่ค่า R^2 ในทั้งสองกรณีใกล้เคียงกับ 1 ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลอง สามารถอธิบายแนวโน้มของข้อมูลการทดลองได้เป็นอย่างดี [24-25] นอกจากนี้การคำนวณค่าร้อยละความแตกต่างเฉลี่ย (Relative Error) เท่ากับ 12.35 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สามารถ ทำนายพื้นที่การแผ่กระจายของวัสดุได้แม่นยำและใกล้เคียงกับผลการ ทดลองทางกายภาพ [27] ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองนี้มีความ น่าเชื่อถือในการใช้ทำนายพฤติกรรมของวัสดุในสถานการณ์ต่างๆ



รูปที่ 6 พื้นที่การแผ่กระจายของวัสดุทดลองส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ที่ความชันการไหล 30 องศา (N30_40-60)
(a) การทดลองทางกายภาพ (b) แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM



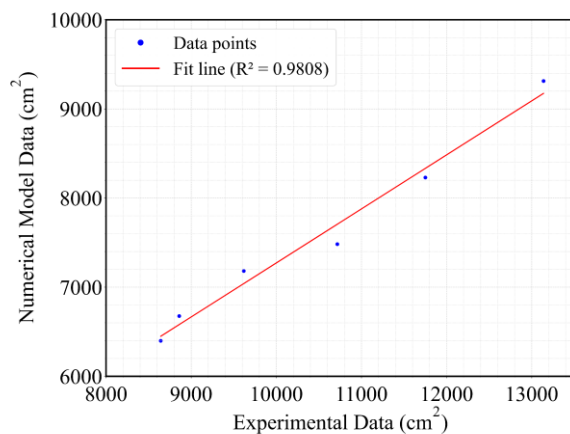
รูปที่ 7 ลักษณะการแผ่ของวัสดุเม็ดแห้งที่ช่วงเวลาต่างๆ จนหยุดนิ่ง ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ความชันการไหล 30 องศา (N30_40-60) ; ด้านซ้าย คือ การทดลองทางกายภาพ ด้านขวา คือ แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM



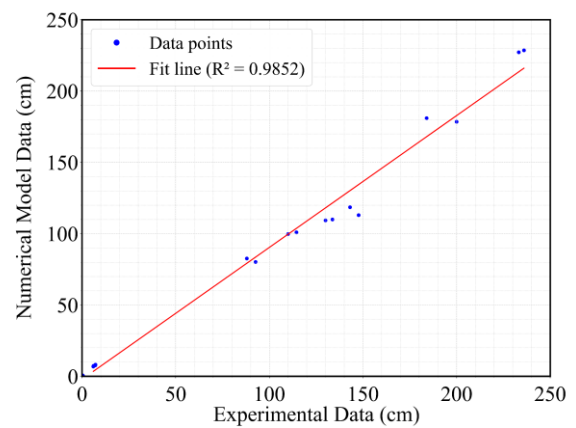
รูปที่ 8 ลักษณะการแผ่ของวัสดุเม็ดแข็งส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ที่ความชันการไหล 25 30 และ 35 องศา

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาขนาดการแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแข็งจากการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

ส่วนผสม	การทดลองทางกายภาพ (EXP)				แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (NUM)			
	ความสูง (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความยาว (ซม.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)	ความสูง (ซม.)	ความกว้าง (ซม.)	ความยาว (ซม.)	พื้นที่ (ตร.ซม.)
N25_40-60	7.12	92.67	130.21	8859.21	7.98	80.19	109.36	6776.57
N25_50-50	7.17	88.51	133.69	8642.53	8.16	82.63	110.94	6398.46
N30_40-60	6.76	114.47	200.12	10717.61	7.62	100.95	178.50	7483.26
N30_50-50	7.04	110.10	184.54	9618.16	7.64	99.74	180.99	7182.71
N35_40-60	5.98	147.21	236.62	13140.37	6.85	113.01	228.56	9313.59
N35_50-50	6.13	143.10	233.25	11751.19	7.36	118.56	227.25	8230.87



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของพื้นที่แผ่ระหว่างการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของขนาด ความกว้าง ความยาว และความสูง ของพื้นที่แผ่ระหว่างการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

5. บทสรุป

จากการศึกษาการไหลและพฤติกรรมการแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแห้งโดยใช้การทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สามารถสรุปได้ ดังนี้:

1. ความชันมีผลกระทบโดยตรงต่อการกระจายตัวและพื้นที่การแผ่ของวัสดุเม็ดแห้ง โดยเมื่อความชันเพิ่มขึ้น พื้นที่การแผ่ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากพลังงานจลน์ของวัสดุที่เพิ่มขึ้นทำให้วัสดุไหลได้ไกลขึ้นและกระจายตัวกว้างขึ้น อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่ได้เป็นแบบเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลที่ซับซ้อนและลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุเม็ดแห้งภายใต้เงื่อนไขต่างๆ
2. ขนาดอนุภาคของวัสดุมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการกระจายตัวและการแผ่ของวัสดุ โดยส่วนผสมที่มีวัสดุอนุภาคขนาดเล็กมากกว่า (กรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60) มีการกระจายตัวได้ดีและแผ่ขยายในพื้นที่กว้างกว่า เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่มีกรวดละเอียดในอัตราส่วนน้อยกว่า (กรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50) เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กส่งผลให้เกิดการไหลอย่างต่อเนื่องมากขึ้น
3. แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สามารถทำนายการไหลและพื้นที่การแผ่กระจายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองทางกายภาพ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการศึกษาการไหลของวัสดุเม็ดแห้งในอนาคตเพื่อช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการวัสดุเม็ดแห้งหรือการป้องกันดินโคลนถล่ม

การศึกษานี้ช่วยให้เข้าใจถึงผลกระทบของความชันและขนาดอนุภาคต่อการไหลและการแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแห้ง พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำนายการไหลของวัสดุเม็ดแห้งด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM รวมถึงข้อจำกัดที่อาจเกิดจากการตั้งค่าในแบบจำลองเชิงตัวเลข

6. ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มอัตราส่วนผสมของวัสดุทดลอง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกระทบของขนาดอนุภาคได้อย่างชัดเจนและครอบคลุมมากขึ้น
2. การใช้เครื่องสแกน 3 มิติในการเก็บข้อมูลการแผ่กระจายของวัสดุเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดและแม่นยำทุกพื้นที่ จะช่วยให้การวิเคราะห์ผลการแผ่และการกระจายตัวของวัสดุเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
3. ทำการทดลองทางตัวแปรและตั้งค่าตัวแปรในแบบจำลองเชิงตัวเลขอย่างละเอียด เพื่อให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการทดลองทางกายภาพมากที่สุด และลดความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเชิงตัวเลข

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ N25A670943 และมหาวิทยาลัยพะเยาที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย (FF5022/2567) ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องมือ และทรัพยากรที่จำเป็นต่อการดำเนินงาน รวมถึงแนวทางหลวงาน สำนักงานทางหลวงที่ 2 แพร่ กรมทางหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลเหตุการณ์ดินโคลนถล่มสำหรับการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ไทยพีบีเอส . (2564). น้ำป่าหลากซัดบ้านแม่โกปี ขุนยวม เสียชีวิต 1 คน. สืบค้นจาก.
<https://www.thaibps.or.th/news/content/343045>
- [2] Zhou, G. G. D., Song, C. E., Choi, C. E., Pasuto, A., Sun, Q. C., and Dai, F. (2017). Surge impact behavior of granular flows: Effects of water content. *Landslides*, 15, pp.695-709. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0908-6>
- [3] Gong, X.-L., Chen, X.-Q., Chen, J.-G., and Song, D.-R. (2023). Effects of material composition on deposition characteristics of runoff-generated debris flows. *Landslides*, 20, pp. 2603–2618.
- [4] de Haas, T., Braat, L., Leuven, J. R. F. W., Lokhorst, I. R. and Kleinhans, M. G. (2015). Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120. doi: 10.1002/2015JF003525
- [5] Brighenti, R., Spaggiari, L., Segalini, A., Savi, R., and Capparelli, G. (2021). Debris flow impact on a flexible barrier: laboratory flume experiments and force-based mechanical model validation. *Natural Hazards*, 106, pp. 735–756. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04489-5>.
- [6] Yune, C.-Y., Kim, B.-J., Jun, K.-J., Park, S.-D., Lee, S.-W., Kim, G.-H., Lee, C.-W., and Paik, J.-C. (2023). Real-scale experiment of debris flow in a natural gully: Key findings and lessons learned. *Landslides*, 20(9), pp. 2757–2774. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02134-3>.
- [7] Bugnion, L., McArdell, B. W., Bartelt, P., and Wendeler, C. (2012). Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. *Landslides*, 9(2), pp. 179–187. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0294-4>.
- [8] Dong, L., and Pu, J. (2024). Debris–slit interaction considering the particle behavior controls the barrier performance of slit structure retaining dry granular flows. *Journal of Hazardous Materials*, 83, 107. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.107>.
- [9] Thanawong, K., Reangyos, A., Thammaruk, P., Thungfonphum, T., and Pra-ai, S. (2024). A study of the

- impact force of dry granular flow down on an incline plane. *International Journal of GEOMATE*, 26(116), pp. 118–125. <https://doi.org/10.21660/2024.116.g13228>.
- [10] Li, X., Zhao, J., and Kwan, J. S. H. (2020). Assessing debris flow impact on flexible ring net barrier: A coupled CFD-DEM study. *Computers and Geotechnics*, 128, 103850. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103850>.
- [11] Dubois, F., Acary, V., and Jean, M. (2017). The legacy of Jean-Jacques Moreau in mechanics: The Contact Dynamics method: A nonsmooth story. *Comptes Rendus Mécanique*, 346, pp.247-262. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2017.12.010>.
- [12] Sinou, J.-J., Chiello, O., and Charroyer, L. (2019). Non-smooth Contact Dynamics approach for mechanical systems subjected to friction-induced vibration. *Lubricants*, 7(7), pp.59. <https://doi.org/10.3390/lubricants7070059>.
- [13] Orozco, L. F., Delenne, J.-Y., Somay, P. and Radjai, F. (2019). Discrete-element model for dynamic fracture of a single particle. *International Journal of Solids and Structures*, 166, pp. 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.01.033>.
- [14] Dubois, F., and Jean, M. (2006). The non-smooth contact dynamic method: Recent LMGC90 software developments and application. *Analysis and Simulation of Contact Problems*, 27, pp.375-378. <https://hal.science/hal-00580798v1>.
- [15] Dubois, F., and Mozul, R. (2013). LMGC90. CSMA 2013: 11e Colloque National en Calcul des Structures, 13-17 May 2013, France.
- [16] Sánchez, P., Renouf, M., Azéma, E. and Mozul, R. (2021). LMGC90: A Contact Dynamics open-source code for the simulation of granular asteroid with realistic regolith shapes. Application to the accretion process. *Powders & Grains*, Buenos Aires, Argentina, July 2021, pp. 14007. doi: 10.1051/epjconf/202124914007. HAL Id: hal-03259852.
- [17] Karunaratna, S., Goto, S., Bandaranayake, S., and Bandara, P. (2024). Identification of the complete particle size distribution of landslide debris by the combined method of scaled image analysis, line-grid analysis and laboratory sieve analysis. *Geoenvironmental Disasters* 11. <https://doi.org/10.1186/s40677-024-00270-z>.
- [18] Zhang, Q.-z., Pan, Q., Chen, Y., Luo, Z.-j., Shi, Z.-m., and Zhou, Y.-y. (2019). Characteristics of landslide-debris flow accumulation in mountainous areas. *Heliyon*, 5(9), e02463. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02463>.
- [19] Azéma, E., Descantes, Y., Roquet, N., Roux, J.-N. and Chevoir, F. (2012). Discrete simulation of dense flows of polyhedral grains down a rough inclined plane. *Physical Review E*, 86(3), pp. 1-14. doi:10.1103/PhysRevE.86.031303. HAL Id: hal-00737324.
- [20] Azéma, E., Radjai, F. and Saussine, G. (2009). Quasistatic rheology, force transmission and fabric properties of a packing of irregular polyhedral particles. *Mechanics of Materials*, 41(6), pp. 729-741. doi: 10.1016/j.mechmat.2009.01.021. HAL Id: hal-00276748.
- [21] Dai, Z., Wang, J. and Wei, L. (2024). Experimental and numerical investigation on the propagation and impact behavior of dry granular flows. *Environmental Earth Sciences*, 83, 239. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11542-0>.
- [22] Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245–296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>
- [23] Andreotti, B., Daerr, A. and Douady, S. (2002). Scaling laws in granular flows down a rough plane. *Physics of Fluids*, 14(3), pp. 1269-1281. doi: 10.1063/1.1416884.
- [24] Yoon, J., Lee, J., Kim, G., Ryu, S. and Park, J. (2022). Deep neural network-based structural health monitoring technique for real-time crack detection and localization using strain gauge sensors. *Scientific Reports*, 12, pp. 20204. doi: 10.1038/s41598-022-24269-4. PMCID: PMC9684428, PMID: 36418390.
- [25] Kuhn, M. and Johnson, K. (2013). Applied Predictive Modeling. *Springer New York Heidelberg Dordrecht London*, pp. 95-100. ISBN 978-1-4614-6848-6, ISBN 978-1-4614-6849-3 (eBook). DOI: 10.1007/978-1-4614-6849-3.
- [26] Taylor, J.R. (1997). *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements* (2nd ed.). University Science Books, Sausalito, CA.