แบบจำลองเชิงตัวเลขของคุณลักษณะของการไหลหลากของเศษวัสดุธรณีไหล และการบรรเทาภัยด้วยโครงสร้างป้องกัน

พุทธิกร ธัมมรักษ์

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ตุลาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

มหาวิทยาลัยพะเยา
UNIVERSITY OF PHAYAO

แบบจำลองเชิงตัวเลขของคุณลักษณะของการไหลหลากของเศษวัสดุธรณีไหล และการบรรเทาภัยด้วยโครงสร้างป้องกัน

พุทธิกร ธัมมรักษ์

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ตุลาคม 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

NUMERICAL MODELING OF DEBRIS FLOWS CHARACTERIZATION AND MITIGATION USING PROTECTIVE STRUCTURES

PHUTTIGON DHAMMARAK

A Thesis Submitted to University of Phayao

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering

October 2025

Copyright 2025 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

แบบจำลองเชิงตัวเลขของคุณลักษณะของการไหลหลากของเศษวัสดุธรณีไหล และการบรรเทาภัยด้วยโครงสร้างป้องกัน

ของ พุทธิกร ธัมมรักษ์

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พรเกษม จงประดิษฐ์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวุธ ประอ้าย)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ ทองเดชศรี)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา

(รองศาสตราจารย์ ดร. วรเทพ แซ่ล่อง)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

เรื่อง: แบบจำลองเชิงตัวเลขของคุณลักษณะของการไหลหลากของเศษวัสดุธรณีไหล และการบรรเทาภัยด้วยโครงสร้างป้องกัน

ผู้วิจัย: พุทธิกร ธัมมรักษ์, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2568

อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวุธ ประอ้าย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ทองเดชศรี

คำสำคัญ: เศษวัสดุธรณีไหล, แบบจำลองเชิงตัวเลข, โครงสร้างป้องกัน, DEM, การไหลของวัสดุ, การทับถม

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการรุกล้าพื้นที่ป่าไม้จากการขยายตัวของชุมชน ส่งผลให้อัตราการเกิดภัยดินโคลนถล่ม เศษวัสดุธรณีไหล และน้ำป่าไหลหลาก มีความถี่และความรุนแรงเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ภัยพิบัติเหล่านี้ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน ระบบคมนาคม และสาธารณูปโภคอย่างกว้างขวาง องค์ความรู้ในการป้องกันและบรรเทาผลกระทบยังมีอย่างจำกัด เนื่องจากพฤติกรรมการไหลของเศษวัสดุธรณีไหลมีความซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของเศษวัสดุธรณีไหล (debris flow) และแนวทางบรรเทาผลกระทบด้วยโครงสร้างป้องกัน โดยพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขที่จำแนก พฤติกรรมวัสดุเม็ดแห้ง (solid phase) ด้วยวิธี Discrete Element Method (DEM) และพฤติกรรมของของไหล (fluid phase) ด้วยวิธี Computational Fluid Dynamics (CFD) การจำลองวัสดุเม็ดแห้งด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ผ่านโปรแกรม LMGC90 ดำเนินการในรางทดลองที่มีความชัน 25, 30 และ 35 องศา ภายใต้เงื่อนไข 3 รูปแบบ ได้แก่ ไม่มีโครงสร้างป้องกัน โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง และโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ผลการศึกษาจะมีการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองทางกายภาพ ซึ่งพบว่าแบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาค แรงกระแทก และการสะสมของวัสดุได้ใกล้เคียงกับการทดลอง โดยมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าร้อยละ 10 ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองในระดับที่น่าพอใจ สำหรับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นแบบจำลองเชิง ตัวเลข DEM แสดงให้เห็นว่าสามารถดูดซับพลังงานและลดแรงกระแทกจากวัสดุเม็ดแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยโครงสร้างมีการเปลี่ยนรูปสอดคล้องกับแรงกระทำจากการไหล ส่วนการใช้เทคนิค Particle Tracking Velocimetry (PTV) ในการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค ในกรณีการทดลองทางกายภาพ ช่วยวัดความเร็ว ทิศทาง และพฤติกรรมของอนุภาคได้อย่างละเอียด สนับสนุนผลจากแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ได้อย่างมีนัยสำคัญ แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD สำหรับศึกษาพฤติกรรมของของไหล พบว่าแรงกระแทกสูงสุดเกิดขึ้นทันทีเมื่อ ของไหลปะทะโครงสร้าง ก่อนลดลงตามคลื่นย้อนกลับ ความชันของรางมีผลต่อพลังงานจลน์และความรุนแรงของแรงกระแทก โดยแบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมการไหล การปะทะ การสะท้อน และความปั่นป่วนได้อย่างชัดเจน จากผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นกรอบแนวทาง ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเศษวัสดุธรณีไหล (debris flow) ในเชิงกลศาสตร์ และสนับสนุนการออกแบบโครงสร้างป้องกัน กำแพงดักตะกอน ให้มี ประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

Title: NUMERICAL MODELING OF DEBRIS FLOWS CHARACTERIZATION AND MITIGATION USING PROTECTIVE STRUCTURES

Author: Phuttigon Dhammarak, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2025

Advisor: Associate Professor Dr. Suriyayut Pra-ai Co-advisor Assistant Professor Dr.Thanet Thongdetsri

Keywords: debris flow, numerical modeling, protective structures, discrete element method (DEM), material flow, deposition

ABSTRACT

Nowadays, climate change and forest encroachment from community expansion have led to more frequent and intense natural disasters like landslides, debris flows, and flash floods. These events often cause serious damage to people, property, transportation routes, and infrastructure. Knowledge regarding the prevention and mitigation of impacts remains limited, partly due to the complex nature of debris flow behavior.

This research aims to study how debris flows move and how protective structures can help reduce their impact. A numerical model was developed to simulate the solid phase using the Discrete Element Method (DEM), and the fluid parts using Computational Fluid Dynamics (CFD).

In the study, dry granular materials were modeled using DEM with the LMGC90 program. The tests were carried out in flumes set at slopes of 25°, 30°, and 35°, under three conditions: no protection, rigid protection, and flexible protection. When compared with physical experiments, the simulation results showed good accuracy in terms of particle movement, impact force, and how materials pile up — with less than 10% error on average.

The DEM numerical model also showed that flexible protective structures could absorb energy and reduce the impact force effectively, as the structure deformed according to the flow force. In addition, Particle Tracking Velocimetry (PTV) was used in the physical tests to track how particles moved. It helped measure speed, direction, and movement clearly, which supported the DEM results. The CFD numerical model used for fluid behavior showed that the strongest impact happened right when the flow hit the structure, and then gradually decreased due to backflow. The steeper the slope, the more kinetic energy and stronger the impact. The model could also show flow patterns, collisions, reflections, and turbulence.

These findings help improve our understanding of how debris flows behave and can support better design of protective structures and sediment traps.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ คือ ผลลัพธ์ของความพยายาม การเรียนรู้ และช่วงเวลาที่ข้าพเจ้าเติบโตขึ้นทั้งในฐานะนิสิตและในฐานะตัวของตัวเอง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุริยาวุธ ประอ้าย เป็นอย่างสูง ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาตลอดการทำวิจัย รวมถึงสนับสนุนทรัพยากรที่ใช้ในการศึกษา และขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประธานสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ธเนศ ทองเดชศรี กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.วรเทพ แซ่ล่อง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาพะเยา ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะและคำแนะนำอันทรงคุณค่าทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบคุณมหาวิทยาลัยพะเยา ที่สนับสนุนทุนการศึกษาตลอดหลักสูตรปริญญาบัณฑิต ตลอดจนมิตรสหายและทีมวิจัย ที่คอยหล่อหลอมและสร้างแรงบันดาลใจให้ข้าพเจ้า มิตรภาพและความทรงจำที่ดีเหล่านี้ จะเป็นสิ่งที่ข้าพเจ้าจดจำและนำไปใช้เป็นแรงผลักดันต่อไป

ขอขอบคุณฝ่ายภารกิจการวิจัยและนวัตกรรมของประเทศด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ภท.) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับการสนับสนุนงบประมาณทุนอุดหนุนการวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาที่ได้จัดสรรพื้นที่ในการติดตั้งแบบจำลองทางกายภาพสำหรับห้องปฏิบัติการ และ Prof.Emilien Azema และ Dr.Mathieu Renouf แห่งห้องปฏิบัติการ Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), Université de Montpellier ประเทศฝรั่งเศส และทศพล ทุ่งฝนภูมิ ที่ได้ให้คำแนะนำและการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete element Method

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชายทั้งสอง และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ทุ่มเทแรงกาย แรงใจอย่างไม่ลดละ เพื่อสร้างรากฐานชีวิตที่มั่นคงและโอกาสที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ความเสียสละ ความอดทน และความรักของท่าน เป็นแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้าก้าวผ่านอุปสรรคทุกขั้น ผ่านความเหน็ดเหนื่อยและความยากลำบากในการศึกษา จนสามารถมาถึงจุดนี้

พุทธิกร ธัมมรักษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 6

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 7

1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย 9

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ 9

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 10

2.1 ดินถล่มและการไหลหลากของดินโคลน 10

2.2 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการไหลหลากของดินโคลน 12

2.3 พฤติกรรมการไหลหลาก การทับถม และกลไกแรงกระแทก 23

2.4 พฤติกรรมแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง 26

2.5 พฤติกรรมแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น 29

2.6 Particle Tracking Velocimetry (PTV) 32

2.7 แบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete element method (DEM) 35

2.8 แบบจำลองเชิงตัวเลข Computational Fluid Dynamics (CFD) 42

2.9 บทสรุป 46
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 48
3.1 แบบจำลองทางกายภาพ 48
โครงสร้างป้องกันแบบแข็งและโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น 51
3.2 Particle Tracking Velocimetry (PTV) 52
3.3 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 54
โครงสร้างป้องกันแบบแข็งและแบบยืดหยุ่นของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 54
ขั้นตอนการดำเนินการของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM โปรแกรม LMGC90 56
3.4 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา 58
3.5 แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (Computational Fluid Dynamics) 62
การตั้งค่าแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD 63
3.4 บทสรุป 68
บทที่ 4 ผลการศึกษา 70
4.1 พฤติกรรมการกระจายตัวและการทับถมของวัสดุเม็ดแห้ง 70
แบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 70
เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ 77
4.2 พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง 84
แบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 84
เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ 91
4.3 พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น 101
แบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 101
เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ 107
4.4 พฤติกรรมการไหลของวัสดุของเหลวต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง 112
เปรียบเทียบพฤติการไหลระหว่างวัสดุของเหลวกับวัสดุเม็ดแห้ง 115

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 117
5.1 สรุปผลการศึกษา 117
5.2 อภิปรายผลการศึกษา 118
พฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 118
อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อแรงกระแทก 119
การเปรียบเทียบวัสดุเม็ดทรงหลายเหลี่ยมกับทรงกลม 120
พฤติกรรมของวัสดุของเหลวในแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD 123
การใช้เทคนิค PTV เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคในการทดลองทางกายภาพ 124
การประยุกต์ใช้กับกรณีเศษวัสดุธรณีไหล Debris Flow 124
5.3 ข้อเสนอแนะ 125
บรรณานุกรม 127
ภาคผนวก 135
ภาคผนวก ก การแผ่กระจายและการทับถมของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ. 136
ภาคผนวก ข การแผ่กระจายและการทับถมของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพที่ช่วงเวลาต่าง ๆ 139
ภาคผนวก ค พฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ 142
ภาคผนวก ง พฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เทียบกับการทดลองทางกายภาพ 145
ภาคผนวก จ ขนาดการกองทับถมหน้าโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เทียบกับการทดลองทางกายภาพ 151
ภาคผนวก ฉ แรงกระแทกการทดลองซ้ำ แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 152
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างพฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นที่ช่วงเวลาต่าง ๆ 153

ภาคผนวก ช ตัวอย่างพฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นที่ช่วงเวลาต่าง ๆ แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เทียบกับการทดลองทางกายภาพ..... 158
ภาคผนวก ซ ขนาดการกองทับถมหน้าโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เทียบกับการทดลองทางกายภาพ..... 162
ภาคผนวก ฌ การเคลื่อนที่ของวัสดุของเหลว แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ที่ต่างเวลาต่าง ๆ 164
ภาคผนวก ญ ความเร็วของวัสดุของไหล แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ที่ต่างเวลาต่าง ๆ..... 167
ภาคผนวก ฎ ผลการทดลองส่วนผสมเพิ่มเติม แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ความชัน 30 องศา. 170
ภาคผนวก ฏ ผลการจำลองอนุภาคทรงกลม แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM..... 174
ประวัติผู้วิจัย..... 180

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ 9

ตาราง 2 ตัวอย่างของการศึกษาการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการ 22

ตาราง 3 ตารางสรุปค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ ที่ใช้ในการประมาณค่าแรงกระแทกสูงสุดของการไหลเมื่อกระทบกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง 26

ตาราง 4 รายละเอียดพารามิเตอร์แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 61

ตาราง 5 รายละเอียดอัตราส่วนผสมของวัสดุและเงื่อนไขของการศึกษา 61

ตาราง 6 รายละเอียดรหัสการทดลองแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD 66

ตาราง 7 คุณสมบัติของน้ำและอากาศที่ใช้ในแบบจำลอง CFD 66

ตาราง 9 ผลการศึกษาขนาดการแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแห้ง 73

ตาราง 10 แรงกระทำสูงสุดที่เกิดบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ส่วนผสมที่ต่างกัน 91

ตาราง 11 แรงกระทำสูงสุดที่เกิดบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง แบบจำลองและการทดลอง 91

ตาราง 12 แรงกระทำสูงสุดในแต่ละการทดลอง โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น 109

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 เหตุการณ์ดินถล่มและมวลดินไหลหลากบนทางหลวงหมายเลข 1081 บ่อเกลือ-เฉลิมพระเกียรติ เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม 2561 ช่วง กม.90+700 ถึง 91+000 (a)-(f) สภาพภูมิประเทศหลังจากเกิดเหตุการณ์ (g)-(h) ขั้นตอนการรื้อขนย้ายเศษหินย่อยและดินโคลน..... 2

ภาพ 2 เหตุการณ์ดินโคลนถล่มปิดทับเส้นทางหลงหมายเลข 1081 บ่อเกลือ–เฉลิมพระเกียรติจังหวัดน่าน ช่วง กม.: 97+225 ถึง กม.: 97+275 เมื่อวันที่ 2 และ 12 สิงหาคม พ.ศ. 2567 (a-f) ลักษณะทางกายภาพของดินโคลน..... 3

ภาพ 3 วัสดุเม็ดที่ถูกใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (a) การกำหนดเหลี่ยมมุมของอนุภาค (b) อนุภาคในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM..... 6

ภาพ 4 ขอบเขตการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 8

ภาพ 5 ลักษณะทางกายภาพของการไหลหลากของดินโคลนหรือเศษวัสดุธรณีไหล 11

ภาพ 6 การเกิดดินโคลนถล่ม (a) การไหลของดินโคลนบนเนินเขา (b) การไหลของดินโคลนตามช่องเขา 11

ภาพ 7 การศึกษาพฤติกรรมของแรงกระแทกจากการไหลของโคลนต่อสิ่งกีดขวางในพื้นที่จริง (a) ตำแหน่งและอุปกรณ์ในการทดลองภาคสนาม (b) วัสดุทดลอง (c) การไหลของดินโคลนกระทบสิ่งกีดขวาง..... 13

ภาพ 8 ถังเก็บวัสดุ (a) ด้านข้าง (b) ด้านหน้า (c) แผ่น geotextile หน้าถังเก็บวัสดุ..... 14

ภาพ 9 สิ่งกีดขวางหลังการทดลอง (1-10) การกัดเซาะและลักษณะสิ่งกีดขวางในแต่ละตำแหน่ง 15

ภาพ 10 ภูมิประเทศและตำแหน่งสิ่งกีดขวางในช่องทางการไหล 16

ภาพ 11 รางและตำแหน่งอุปกรณ์ทดลอง; (a) รางทดลอง (b) ตำแหน่งอุปกรณ์ (c) กำแพงอลูมิเนียมกับตัววัดแรง..... 18

ภาพ 12 การไหลของวัสดุกรณีผสมน้ำ 20% 19

ภาพ 13 การตั้งค่าและอุปกรณ์ทดลอง..... 20

ภาพ 14 รูปแบบการสะสมของวัสดุ (a)แบบไม่ไหลผ่าน (b)แบบไหลผ่าน (c) แบบทับถมย้อนกลับ . 21

ภาพ 15 ผลกระทบจากความโค้งของคลื่น การกระจายแรงดันไปตามสิ่งกีดขวางแนวตั้งของ ส่วนผสมน้ำและตะกอน (a) ระบบพิกัดภายใน (b) ความโค้งของการไหลของคลื่น 27

ภาพ 16 ลักษณะโหลดเซลล์วัดแงกระแทก (a) ด้านหลัง (b) ด้านหน้า (c) ด้านข้าง 28

ภาพ 17 แรงกระแทกที่วัดได้ในช่วงเวลาต่าง ๆ ภายใต้ความลาดชันที่แตกต่างกัน 28

ภาพ 18 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ (a) ด้านหน้า (b) ลักษณะรางทดลอง (c) ด้านข้าง 29

ภาพ 19 แผนภาพแรงดึงของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น (a) ภาพ 3 มิติแสดงการเสียรูป (b) มุมมองด้านบนของสายเคเบิลเดี่ยวเมื่อมีแรงกระทำจากการไหล (c) แผนภาพหน้าตัดแนวตั้งของโครงสร้างป้องกัน 30

ภาพ 20 แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD-DEM (a) การตั้งค่ารางทดลอง (b) กำแพงตาข่ายวงแหวนแบบยืดหยุ่น 31

ภาพ 21 (a) ภาพการจำลอง DEM แสดงการออกแรงแบบค่อยเป็นค่อยไปบนตัวกระจาย พลังงานในสายเคเบิล (b) การตอบสนองระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของตัวกระจายพลังงานในสายเคเบิล 31

ภาพ 22 ความสัมพันธ์ของแรงในสายเคเบิลและเวลา 32

ภาพ 23 การใช้ PTV วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาค 33

ภาพ 24 การใช้ PIV วิเคราะห์การเคลื่อนที่วัสดุดินโคลน (a) การทดลอง (b) PIV แสดงการเคลื่อนที่ 34

ภาพ 25 การใช้ PIV วิเคราะห์การเคลื่อนที่วัสดุเม็ดแห้งเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข (a) การไหลของอนุภาพแก้ว (b)เทคนิค PIV ติดตามการเคลื่อนที่ (c) แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 34

ภาพ 26 ลักษณะของการชนกันของอนุภาคสำหรับแต่ละวิธี (a) Molecular dynamics (MD) (b) Contact dynamics (CD) 36

ภาพ 27 การสัมผัสของอนุภาคตามกฎของ Signorini 37

ภาพ 28 เงื่อนไขกฎการสัมผัสของวิธี Contact Dynamics 38

ภาพ 29 ประเภทของการสัมผัสระหว่างอนุภาครูปหลายเหลี่ยม (a) จุดยอด-หน้า (b) ขอบ-หน้า(c) หน้า-หน้า (d) ขอบ-ขอบ 38

ภาพ 30 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 3 มิติ โดยโปรแกรม LMGC90 40

ภาพ 31 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 3 มิติ 41
ภาพ 32 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 3 มิติ (a) รางทดลอง (b) โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น. 41
ภาพ 33 แบบจำลอง Volume of Fluid (VOF Method) 44
ภาพ 34 แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD 2 มิติ 45
ภาพ 35 แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD 2 มิติ 45
ภาพ 36 วิธีการดำเนินงานวิจัย 49
ภาพ 37 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ (a) ด้านข้าง (b) ด้านหน้า 50
ภาพ 38 ผังการติดตั้งอุปกรณ์ของแบบจำลองทางกายภาพ 51
ภาพ 39 โครงสร้างป้องกันแบบจำลองทางกายภาพ (a) โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง (b) โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น 52
ภาพ 40 ผังการทำงานของโค้ด PTV เขียนด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ (Python) 53
ภาพ 41 การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการใช้เทคนิค PTV 53
ภาพ 42 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM โดยโปรแกรม LMGC90 54
ภาพ 43 รายละเอียดโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 56
ภาพ 44 รายละเอียดโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 56
ภาพ 45 แผนผังขั้นตอนการทำงานและการคำนวณของ LMGC90 57
ภาพ 46 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุทดลองและพื้นผิว (a) พื้นแผ่นเหล็ก (μ_P) (b) พื้นไม้ (μ_W) 58
ภาพ 47 รูปแบบการสร้างเม็ดแห้งและการเตรียมตัวอย่างเม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ... 60
ภาพ 48 การเตรียมตัวอย่างเม็ดแห้งก่อนการทดลอง 60
ภาพ 49 แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (a) รายละเอียดร่องทางการไหล (b) รายละเอียดจุดวัดแรงกระแทก 63
ภาพ 50 การกำหนด Mesh แบบจำลอง CFD 64
ภาพ 51 รายละเอียดการตั้งค่าแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD 65
ภาพ 52 การกำหนดเตรียมตัวอย่างแบบจำลอง CFD 65

ภาพ 53 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตของพื้นผิวรางและโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง 67

ภาพ 54 วิธีการคำนวณหาคำตอบ 68

ภาพ 55 การเคลื่อนที่ของอนุภาคบนรางทดลอง ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 (N30_50-50) 71

ภาพ 56 การแผ่กระจายในช่วงเวลาต่าง ๆ ของส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชันการไหล (a) 25 องศา (b) 30 องศา และ (c) 35 องศา 74

ภาพ 57 การแผ่กระจายในช่วงเวลาต่าง ๆ ของส่วนผสมที่ต่างกัน ความชันการไหล 30 องศา (a)N30_40-60 (b)N30_50-50 76

ภาพ 58 การกองทับถมของวัสดุเม็ดแห้ง ส่วนผสมต่าง ๆ (a) N25_40-60 (b) N25_50-50 (c) N30_40-60 (d) N30_50-50 (e) N35_40-60 (f) N35_50-50 77

ภาพ 59 ความเร็วของการไหลบริเวณปลายรางก่อนถึงพื้นที่แผ่กระจายของอนุภาค (a) การทดลองทางกายภาพ (b) แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 79

ภาพ 60 ลักษณะของอนุภาคจริง (EXP) และอนุภาคในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (NUM) 79

ภาพ 61 แผนภาพดัชนีรูปร่างของอนุภาคจริง (EXP) และในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (NUM) 79

ภาพ 62 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละช่วงเวลา ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ที่ความชัน 30 องศา (N30_40-60) การทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 81

ภาพ 63 แผนภูมิเปรียบเทียบพื้นที่แผ่กระจายของการทดลองกับแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 82

ภาพ 64 แผนภูมิเปรียบเทียบขนาดความสูง ความกว้าง และความยาวของการแผ่กระจายระหว่างการทดลอง (EXP) กับแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (NUM) 82

ภาพ 65 ความสัมพันธ์ของพื้นที่แผ่กระจายระหว่างการทดลองทางกายภาพและแบบจำลอง เชิงตัวเลข DEM 83

ภาพ 66 ความสัมพันธ์ของขนาด ความกว้าง ความยาว และความสูง ของพื้นที่แผ่ระหว่างการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 83

ภาพ 67 พฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ (a) R25_50-50 (b) R35_50-50 85

ภาพ 68 การกองด้านหน้าโครงสร้างป้องกันแบบแข็งของวัสดุเม็ดแห้ง 86

ภาพ 69 การใช้ตัวกรองข้อมูลกรองแรงกระแทกแบบพลวัต..... 87

ภาพ 70 แรงย่อยที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง จากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ 88

ภาพ 71 แรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง จากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง 89

ภาพ 72 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง (R35_100-0) 94

ภาพ 73 เปรียบเทียบแรงย่อยที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง 97

ภาพ 74 เปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง 98

ภาพ 75 ผลต่างระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ ของค่าแรงย่อยที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันในแต่ละช่วงเวลา 99

ภาพ 76 ผลต่างระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ ของค่าแรงรวมที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันในแต่ละช่วงเวลา 100

ภาพ 77 การไหลของวัสดุเม็ดแห้งชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 30 องศา (F30_50-50)..... 102

ภาพ 78 การเคลื่อนที่ของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นเมื่อวัสดุชน (a) มุมมองด้านหน้า (b) มุมมองด้านบน รายการทดลอง F30_50-50..... 103

ภาพ 79 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นก่อนและหลังการไหล (a) ก่อนการทดลอง (b) หลังการทดลอง รายการทดลอง F30_50-50 104

ภาพ 80 แรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น จากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ 105

ภาพ 81 แรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น จากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ 106

ภาพ 82 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง เมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ส่วนผสมของกรวดขนาดใหญ่ ร้อยละ 40 และกรวดละเอียด ร้อยละ 60 ความชัน 25 องศา (F25_40-60)..... 108

ภาพ 83 แรงย่อยที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ 110

ภาพ 84 แรงกระทำรวมที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ 111

ภาพ 85 การเคลื่อนที่ของวัสดุของเหลวที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (a) ความชันการไหล 25 องศา (b) ความชัน 35 องศา 113

ภาพ 86 แรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกับแบบแข็ง แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (a) แรงย่อย (b) แรงกระทำทั้งหมด 114

ภาพ 87 แรงกระแทกสูงสุดรายการทดลองเพิ่มเติมที่ความชัน 30 องศา 120

ภาพ 88 การเตรียมตัวอย่าง (a) อนุภาคทรงหลายเหลี่ยม (b) อนุภาคทรงกลม 121

ภาพ 89 แรงกระแทกของอนุภาครูปทรงหลายเหลี่ยมเทียบกับอนุภาคทรงกลม 121

ภาพ 90 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่รูปทรงต่างกัน (a) อนุภาครูปทรงหลายเหลี่ยม (b) อนุภาคทรงกลม ส่วนผสมอนุภาคขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่ออนุภาคขนาดเล็กร้อยละ 60 122

ภาพ 91 ลักษณะของอนุภาค (a) ทรงหลายเหลี่ยม (b) อนุภาคทรงกลม 123

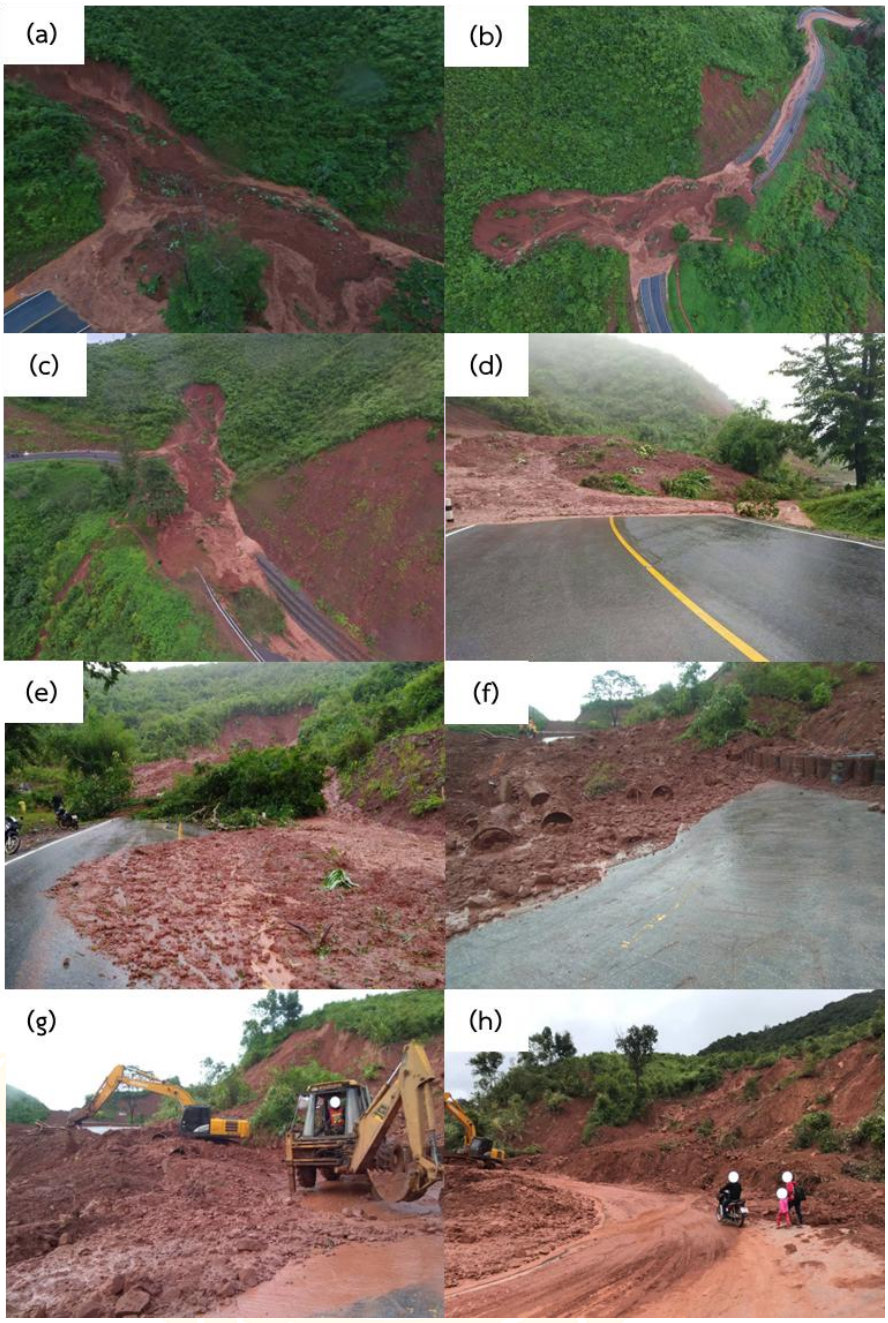
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบัน การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศโลกส่งผลให้อัตราการเกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น ดินถล่ม น้ำป่าไหลหลาก และน้ำท่วมฉับพลัน มีความถี่และความรุนแรงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งการขยายตัวของชุมชนที่รุกล้ำเข้าไปในพื้นที่ป่าไม้ ได้เร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวมีความอ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มมากยิ่งขึ้น ภัยธรรมชาติเหล่านี้ได้สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่อย่างต่อเนื่อง รวมถึงก่อให้เกิดผลกระทบต่อการเกษตร ระบบคมนาคม และโครงสร้างพื้นฐานด้านสาธารณูปโภคอื่น ๆ แม้ว่าไม่สามารถยับยั้งการเกิดภัยพิบัติได้โดยตรง แต่สามารถบรรเทาความรุนแรงและลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้ ผ่านการวางมาตรการป้องกันที่เหมาะสม การพัฒนาระบบเตือนภัย รวมถึงการจัดการพื้นที่อย่างยั่งยืน

จากรายงานในประเทศไทยเหตุการณ์แผ่นดินถล่มที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนส่วนใหญ่จะเกิดจากแผ่นดินถล่มชนิดการไหลหลากของเศษดินโคลนหรือเศษวัสดุธรณีไหล (debris flow) อันเนื่องมาจากเหตุการณ์ฝนตกหนักอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ภาคเหนือที่มีสภาพภูมิประเทศเป็นภูเขาสูงและมีการเปลี่ยนเปลี่ยงสภาพการใช้พื้นที่อย่างรวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่น เหตุการณ์ดินถล่มและมวลดินไหลหลากบนทางหลวงหมายเลข 1081 บ่อเกลือ-เฉลิมพระเกียรติ เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม 2561 ช่วง กม.90+700 ถึง 91+000 ช่วงระหว่างบ้านห้วยขาบ-บ้านบ่อหยวก ต.บ่อเกลือเหนือ จ.น่าน ทำให้เกิดการทับถมของดินโคลนปิดทับและขวางกั้นการสัญจรบนทางหลวงดังกล่าว ส่งผลทำให้ไม่สามารถที่จะใช้เส้นทางนี้ในการเดินทาง รวมถึงการเข้าไปดำเนินการช่วยเหลือของภาคส่วนต่าง ๆ เพื่อบรรเทาความเดือดร้อนของประชาชน ดังแสดงในภาพที่ 1 (a)-(f) สภาพภูมิประเทศหลังจากเกิดเหตุการณ์การไหลของเศษหินเม็ดหยาบ (stony debris flow หรือ coarse-grained debris flow) ทำให้เกิดการปิดทับและขวางกั้นการสัญจรไปมาของประชาชน (g)-(h) ขั้นตอนการรื้อขนย้ายเศษหินย่อยและดินโคลนบนทางหลวงหมายเลข 1081 ตอนอำเภอบ่อเกลือ–อำเภอเฉลิมพระเกียรติ ส่วนตัวอย่างภาพที่ 2 จากเหตุการณ์ที่ฝนตกหนักอย่างต่อเนื่องในช่วงปลายเดือนสิงหาคม ปี 2567 ทำให้เกิดดินถล่มในเขตภูเขาสูง ซึ่งสามารถพบเจอได้ตามแนวเส้นทางทางหลวงหมายเลข 1081 ช่วงที่เชื่อมระหว่างอำเภอบ่อเกลือกับอำเภอเฉลิมพระเกียรติ จ.น่าน



ภาพ 1 เหตุการณ์ดินถล่มและมวลดินไหลหลากบนทางหลวงหมายเลข 1081 บ่อเกลือ-เฉลิมพระเกียรติ เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม 2561 ช่วง กม.90+700 ถึง 91+000 (a)-(f) สภาพภูมิประเทศหลังจากเกิดเหตุการณ์ (g)-(h) ขั้นตอนการรื้อขนย้ายเศษหินย่อยและดินโคลน

ที่มา: หมวดทางหลวงบ่อเกลือ แขวงทางหลวงน่านที่ 2, 2561, สื่อออนไลน์

ภาพ 2 เหตุการณ์ดินโคลนถล่มปิดทับเส้นทางหลงหมายเลข 1081 บ่อเกลือ–เฉลิมพระเกียรติ จังหวัดน่าน ช่วง กม.: 97+225 ถึง กม.: 97+275 เมื่อวันที่ 2 และ 12 สิงหาคม พ.ศ. 2567 (a-f) ลักษณะทางกายภาพของดินโคลน

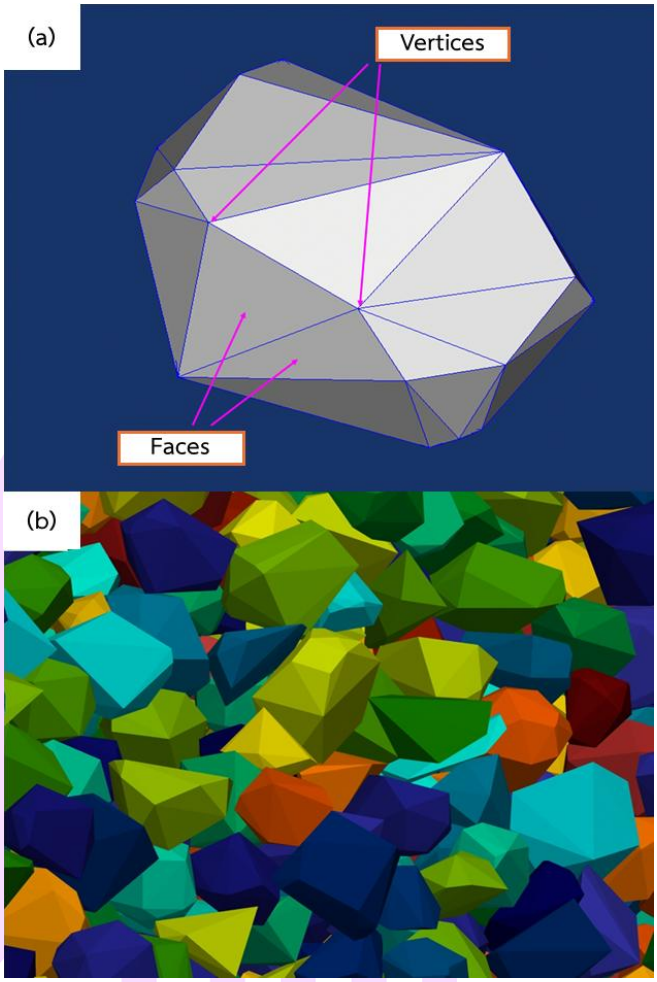
ที่มา: เชียงใหม่นิวส์, 2567, สื่อออนไลน์

ตามมาตรฐานการป้องกันการพังทลายสำหรับลาดเชิงเขา (มยผ. 1919-62) โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง (2562) ได้ให้คำนิยามของ debris flow คือ โคลนถล่ม หรือเหตุการณ์ที่ดินถล่มลงมารวมกับเศษซากมวลพิบัติ โดยมีน้ำในปริมาณมากแล้วไหลลงสู่ที่ต่ำด้วยความเร็วสูงและมีพลังในการพัดพาต้นไม้และหินตามลงมาด้วย ในขณะที่สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี ได้ให้คำนิยามของ debris flow คือ ตะกอนที่ไหลลงมามีหลายขนาดปะปนกันทั้งตะกอนดิน หินและซากต้นไม้และมักเกิดขึ้นตามทางน้ำเดิมที่มีอยู่แล้วหรือบนร่องเล็ก ๆ บนลาดเขา ส่วน mud flow มีกระบวนการเกิดเช่นเดียวกับ debris flow แต่มีความแตกต่างที่ขนาดของตะกอน แบบ mud flow จะมีขนาดเล็กกว่า debris flow และมีน้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ อีกทั้ง Takahashi (2007) ได้จำแนก debris flow ออกเป็น 2 ประเภทคือ การไหลของเศษหินเม็ดหยาบ (stony debris flow หรือ coarse-grained debris flow) และการไหลของดินโคลน (muddy debris flow หรือ fine-grained debris flow)

การลงทุนในการก่อสร้างโครงสร้างเพื่อบรรเทาความรุนแรงที่จะเกิดขึ้นนั้น ต้องใช้ทรัพยากรและงบประมาณที่สูง วิธีที่นิยมใช้คือ โครงสร้างที่ลดความเร็วของการไหล เช่น เขื่อนดักตะกอน (check dam) สะพานลอยโคลนถล่ม (weir duct) โครงสร้างป้องกันแบบแข็งหรือแบบยืดหยุ่น (rigid or flexible barrier) โดยรูปแบบของโครงสร้างและมาตรการนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีวิทยาของแต่ละพื้นที่และพฤติกรรมของการไหลหลาก debris flow หรือเศษวัสดุธรณีไหล เป็นการไหลที่มีความซับซ้อน เนื่องจากเป็นส่วนผสมระหว่างของแข็งและของเหลว มีส่วนผสมที่แตกต่างกัน จึงยากต่อการเข้าใจพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของมวลวัสดุ ที่ผ่านมานักวิจัยได้พยายามศึกษาพฤติกรรมการไหลของเศษวัสดุธรณีไหล ไม่ว่าจะเป็นการทดลองในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งสามารถจำลองความชันและปัจจัยแวดล้อมได้เสมือนจริง แต่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรที่ใช้ และการทำซ้ำเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง อีกรูปแบบหนึ่งคือการศึกษาผ่านแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ โดยสามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้และสามารถศึกษาตัวแปรที่สมใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ละรูปแบบจะมีข้อดีและจำกัดที่แต่ต่างกันขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ศึกษา นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อลดข้อจำกัดในการศึกษา และวิเคราะห์เชิงลึกถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุอย่างละเอียด อย่างไรก็ตาม แบบจำลองเชิงตัวเลขยังมีข้อจำกัดด้านสมมติฐานบางอย่าง จึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลองทางกายภาพเพื่อให้ได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือ โดยแบบจำลองเชิงตัวเลขที่นิยมใช้คือ แบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete Element Method (DEM) การอธิบายการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดแห้ง สามารถอธิบายการเคลื่อนที่และการสัมผัสระหว่างอนุภาคได้อย่างละเอียด โดยใช้กฎการเคลื่อนที่และกลศาสตร์การสัมผัสของนิวตัน (Cundall และHart, 1979; Ting, Meachum และRowell, 1995) DEM สามารถให้ข้อมูลเชิงลึกโดยละเอียดเกี่ยวกับพฤติกรรมที่ซับซ้อนของการไหล รวมถึงกลไกการทับถม ลักษณะการไหล และปฏิกิริยาต่อสิ่งกีดขวาง

(Iverson, 1997; Leonardi และคณะ, 2014; McDougall และHungr, 2005; Yang และคณะ, 2017; Zhou และคณะ, 2016) จากการศึกษาที่ผ่านมา แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลน รวมถึงกลไกการทับถม และผลกระทบต่อสิ่งกีดขวางแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น ด้วยการให้ข้อมูลโดยละเอียดเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างอนุภาคและสิ่งกีดขวาง โดยข้อจำกัดของการศึกษาที่ผ่านมานั้น มักใช้อนุภาคเป็นทรงกลม ซึ่งไม่อาจอธิบายพฤติกรรมของวัสดุในธรรมชาติได้สมจริง ในการศึกษานี้ใช้อนุภาคที่เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมซึ่งจะมีความใกล้เคียงกับวัสดุจริงมากกว่า ในปัจจุบันถึงแม้จะมีมาตรฐานประกอบการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับอาคาร การขุดดินและการถมดินในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มและบริเวณลาดเชิงเขา โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง (2562) และมีการศึกษาไปบ้างแล้ว ทำให้เกิดความเข้าใจและเตรียมการได้ในระดับหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตาม องค์ความรู้เกี่ยวกับลักษณะการไหลของดินโคลนยังคงมีอย่างจำกัด โดยเฉพาะในกรณีที่มีโครงสร้างป้องกัน ซึ่งเป็นประเด็นที่ซับซ้อน เนื่องจากพฤติกรรมเชิงกลของการไหลเหล่านี้มีความยุ่งยากและแปรผันตามปัจจัยหลายประการ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการเคลื่อนตัวและพฤติกรรมของวัสดุเพื่อให้สามารถใช้มาตรการป้องกันได้อย่างเหมาะสม

การศึกษานี้นำเสนอการวิเคราะห์ดินถล่มและการไหลของวัสดุโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข เนื่องจาก debris flow หรือเศษวัสดุธรณีไหล มีลักษณะเป็นวัสดุกึ่งของเหลว และแบบจำลองเชิงตัวเลขยังมีข้อจำกัดในการอธิบายพฤติกรรมของวัสดุหลายสถานะพร้อมกัน ดังนั้นจึงแยกการศึกษาออกเป็นสองส่วน เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น ส่วนแรก ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ในการอธิบายการไหลของวัสดุเม็ดแห้งที่มีรูปทรงหลายเหลี่ยม ซึ่งสร้างด้วยวิธี Contact Dynamics (CD) (ภาพที่ 3) โดยมุ่งเน้นการศึกษาการไหลของวัสดุเม็ดหยาบ (coarse-grained debris flow) และตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลองทางกายภาพ ส่วนที่สอง ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (Computational Fluid Dynamics) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของวัสดุที่อยู่ในสถานะของเหลวเมื่อไหลมากระทบกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง แม้ว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขจะไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของวัสดุหลายเฟส (กึ่งของเหลว) ได้พร้อมกัน แต่การแยกการศึกษาช่วยให้เข้าใจความแตกต่างของลักษณะการไหลของวัสดุแต่ละประเภทได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ผลการศึกษาจะช่วยเป็นข้อมูลสำคัญในการคาดการณ์แนวโน้มการเกิดภัยพิบัติจากการไหลหลากของดินโคลน รวมถึงการออกแบบมาตรการป้องกันในรูปแบบต่าง ๆ อันจะสนับสนุนการปฏิบัติงานภาคสนามของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น



ภาพ 3 วัสดุเม็ดที่ถูกใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (a) การกำหนดเหลี่ยมมุมของอนุภาค (b) อนุภาคในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งเน้นการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สำหรับอธิบายพฤติกรรมของการไหลวัสดุเม็ด (solid phase) ในขณะที่การไหลของของเหลว (fluid phase) จะพิจารณาโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เพื่อจำลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งรูปทรงหลายเหลี่ยม ในรางน้ำ เพื่ออธิบายพฤติกรรมการไหล การทับถม และประเมินแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันและตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลการทดลอง

2. ศึกษาพฤติกรรมของ โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น และวิเคราะห์พฤติกรรมโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

3.วัดความเร็วของการไหล ด้วยเทคนิค Particle Tracking Velocimetry (PTV) เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคในการทดลองทางกายภาพ

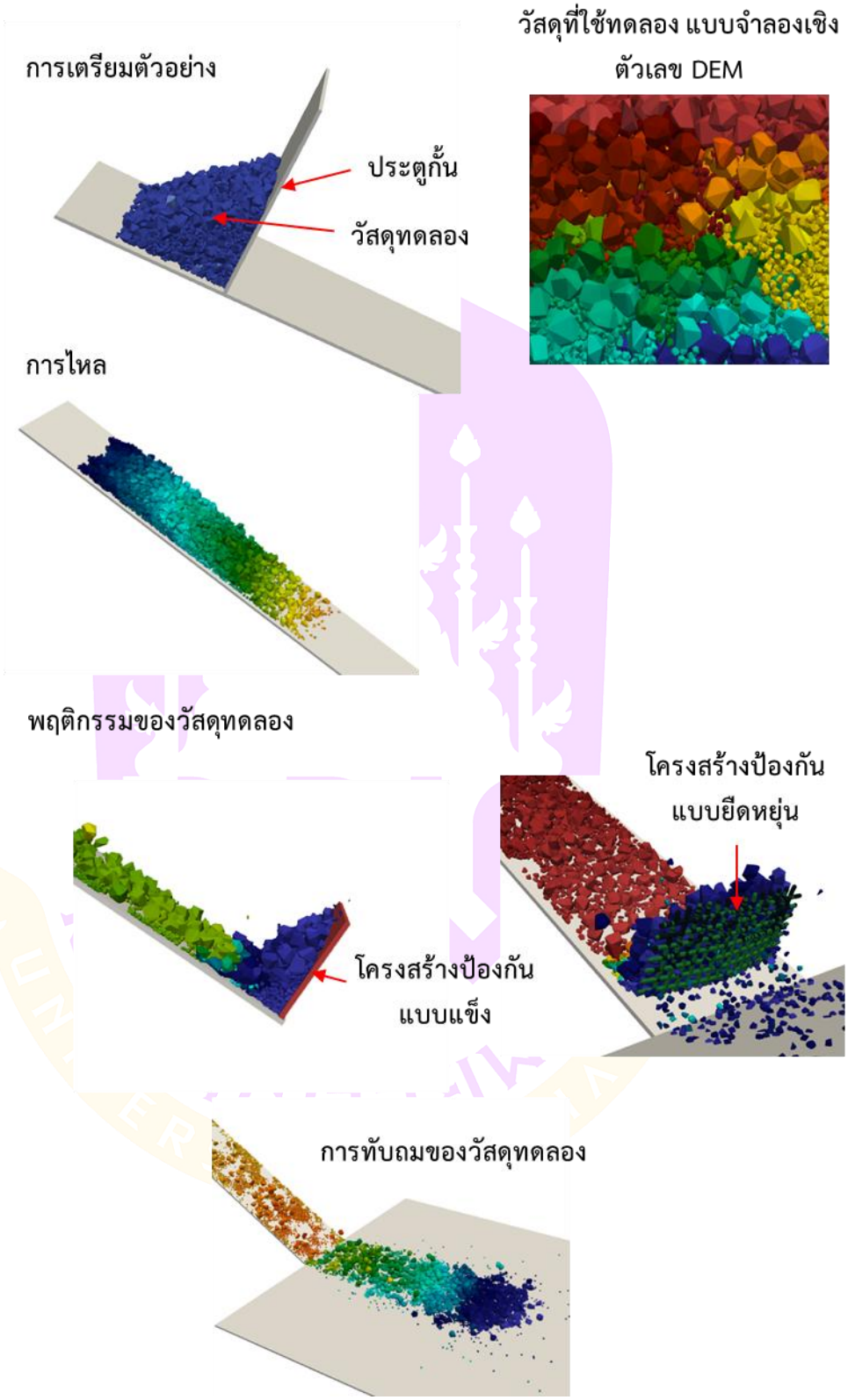
4. ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของของเหลวและแรงกระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สร้างโดยโปรแกรม LMGC90 เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการไหลวัสดุเม็ดแห้งรูปทรงหลายเหลี่ยม ผลการศึกษาจะปรับเทียบและตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลการทดลองวัสดุเม็ดแห้งกรวดและกรวดละเอียด ขนาดรางทดลองยาว 720 cm กว้าง 40 cm สูง 55 cm ความชันของรางตั้งที่ 25 30 และ 35 องศา ส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษามีสองอัตราส่วนผสม 1. อัตราส่วนกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 2.อัตราส่วนกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีการศึกษา 3 รูปแบบคือ 1. ไม่มีโครงสร้างป้องกัน 2. มีโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง และ 3. มีโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ดังแสดงในภาพที่ 4

2. การจำลองการไหลของวัสดุของเหลว ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD โดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 2D

3. การใช้เทคนิค Particle Tracking Velocimetry (PTV) เพื่อวิเคราะห์การไหลของวัสดุเม็ดในกรณีการทดลองทางกายภาพ โดยเน้นการศึกษากรณีที่วัสดุเม็ดไหลกระทบกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลข



ภาพ 4 ขอบเขตการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

1.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตาราง 1 แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2567						พ.ศ. 2568		
	ม.ค. - ก.พ.	มี.ค. - เม.ย.	พ.ค. - มิ.ย.	ก.ค. - ส.ค.	ก.ย. - ต.ค.	พ.ย. - ธ.ค.	ม.ค. - ก.พ.	มี.ค. - เม.ย.	พ.ค. - มิ.ย.
1. รวบรวมข้อมูลและทบทวนวรรณกรรม									
2. ศึกษาวิธีสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข									
3. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขและตรวจสอบความถูกต้อง									
4. ทำการจำลองการไหล									
5. เปรียบเทียบผลการจำลอง									
6. วิเคราะห์ เปรียบเทียบและสรุปผล									
7. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์									

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. เสริมสร้างความเข้าใจเชิงลึก เกี่ยวกับกลไกการไหล การทับถมและแรงกระแทกของวัสดุต่อโครงสร้างป้องกัน ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของดินถล่มและการไหลหลากของดินโคลน

2. สร้างองค์ความรู้ใหม่และยกระดับความยั่งยืน ทั้งในเชิงวิชาการและการประยุกต์ใช้จริงในการจัดการภัยพิบัติ

3. สนับสนุนการออกแบบมาตรการป้องกัน ที่เหมาะสมกับลักษณะพื้นที่และสภาพภูมิประเทศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบรรเทาผลกระทบจากภัยพิบัติ

4. เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขในอนาคต เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ยังอยู่ในขั้นพัฒนา ผลลัพธ์ที่ได้จะช่วยชี้ข้อจำกัด จุดแข็ง และแนวทางปรับปรุง เพื่อให้แบบจำลองมีความแม่นยำ ครอบคลุม และสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของวัสดุ

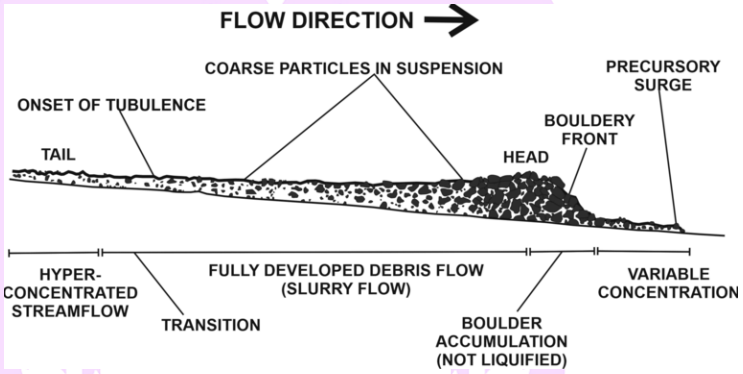
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินถล่มและการไหลหลากของดินโคลน

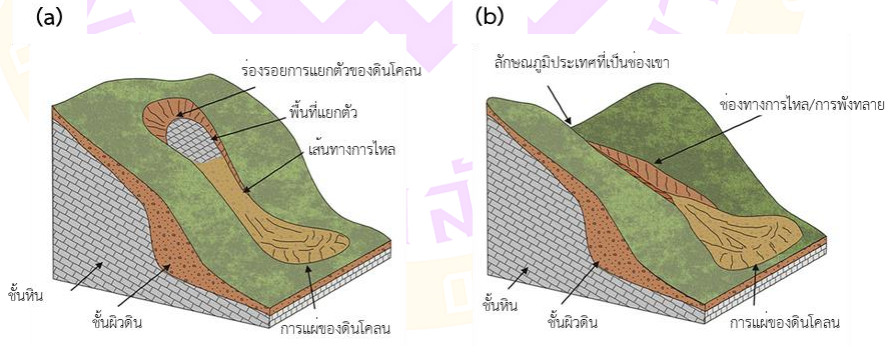
ดินโคลนถล่มหรือดินถล่ม เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของดิน หิน และตะกอนบนพื้นที่ลาดชัน มีสาเหตุหลักมาจากปริมาณน้ำในดินที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงดันน้ำใต้ดินสูงขึ้น (pore water pressure) แรงดันน้ำในดินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงเฉือน (shear strength) ของมวลดินลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมเสถียรภาพของพื้นที่ลาดชัน เมื่อแรงเฉือนลดลงจนไม่สามารถต้านทานแรงโน้มถ่วงและแรงขับเคลื่อนอื่น ๆ ได้ ดินจะเริ่มเคลื่อนตัวเป็นปรากฏการณ์ดินโคลนถล่ม ในขณะมวลดินเคลื่อนที่ได้นำพาวัสดุเศษซากโดยรอบ (debris flows) ไหลตามพื้นเอียงส่งผลให้การไหลมีพลังทำลายมหาศาล ก่อความรุนแรงต่อสิ่งปลูกสร้างและทรัพย์สินในพื้นที่การไหล ที่ผ่านมีนักวิจัยพยายามศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับสาเหตุและกลไกการเกิดดินโคลนถล่มรวมถึงศึกษาพฤติกรรมการไหลเพื่อเป็นข้อมูลในการบรรเทาผลกระทบจากเหตุการณ์เหล่านี้ Witt (2005) ได้นิยามความหมายของดินโคลนหรือเศษซาก (debris flows) คือ การแยกตัวของมวลดินและหินที่แตกตัวออกจากกลุ่มไหลลงมาตามไหล่เขา การไหลเกิดขึ้นในที่ลุ่มหรือบนทางลาดชัน ซึ่งจะเกิดการรวมตัวของวัสดุในเส้นทางการไหลทำให้ปริมาณมวลวัสดุโดยรวมเพิ่มขึ้น การไหลของดินโคลนสามารถเดินทางได้หลายกิโลเมตร จะหยุดก็ต่อเมื่อถึงพื้นที่ที่มีความลาดชันต่ำหรือพื้นที่ที่มีแรงเสียดทานสูง Takahashi (2007) ได้นิยามความหมายของ debris flows ว่าเป็นการไหลของตะกอนผสมของเหลวที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับของไหลโดยจะไหลอย่างต่อเนื่องตามแรงโน้มถ่วง ตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะสะสมอยู่บริเวณด้านหน้าของการไหล ส่วนตะกอนขนาดเล็กจะไหลกระจัดกระจายในส่วนหลัง และยังจำแนก debris flow ออกเป็น 2 ประเภทคือ การไหลของเศษหินเม็ดหยาบ (stony debris flow หรือ coarse-grained debris flow) และการไหลของดินโคลน (muddy debris flow หรือ fine-grained debris flow) ในขณะที่หน่วยงานรัฐ กรมโยธาธิการและผังเมือง (2562) ได้นิยามความหมายของ debris flow ตามประกาศมาตรฐานการป้องกันการพังทลายสำหรับลาดเชิงเขา มยผ. 1915-62 ว่า debris flow หมายถึง เหตุการณ์ที่ดินถล่มลงมารวมกับเศษซากมวลพิบัติ โดยมีน้ำในปริมาณมาก แล้วไหลลงสู่ที่ต่ำด้วยความเร็วสูงและมีพลังในการพัดพาต้นไม้และหิน กรวด กรวดละเอียดตามลงมาด้วย ส่วนสำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี ได้ให้คำนิยามของ debris flow คือตะกอนที่ไหลลงมามีหลายขนาดปะปนกันทั้งตะกอนดิน หินและซากต้นไม้ และมักเกิดขึ้นตามทางน้ำเดิมที่มีอยู่แล้วหรือบนร่องเล็ก ๆ บนลาดเขา ส่วน mud flow มี

กระบวนการเกิดเช่นเดียวกับ debris flow แต่มีความแตกต่างที่ขนาดของตะกอนแบบ mud flow จะมีขนาดเล็กกว่า debris flow และมีน้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ (อาจสูงถึงร้อยละ 60) จากนิยามสรุปได้ว่า debris flows (ดินโคลน, เศษวัสดุธรณีไหล, การไหลของเศษซาก) หมายถึง เหตุการณ์ที่ดินสูญเสียเสถียรภาพจากสภาวะคงที่ ไหลลงตามแรงโน้มถ่วงจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ โดยจะพัดพาวัสดุในช่องทางการไหลไม่ว่าจะเป็นหิน ต้นไม้ และเศษซากอื่น ๆ ส่งผลให้การไหลมีปริมาณเพิ่มขึ้นและมีส่วนผสมที่หลากหลาย การไหลสามารถเคลื่อนที่ได้ไกลขึ้นอยู่กับความลาดชั้นและธรณีวิทยาของพื้นที่ โดยลักษณะทางกายภาพแสดงดังภาพที่ 5 การไหลของดินถล่มสามารถเกิดได้ทั้งเนินเขาและช่องเขา ดังภาพที่ 6



ภาพ 5 ลักษณะทางกายภาพของการไหลหลากของดินโคลนหรือเศษวัสดุธรณีไหล

ที่มา: คัดลอกจาก Pierson และคณะ, 1986



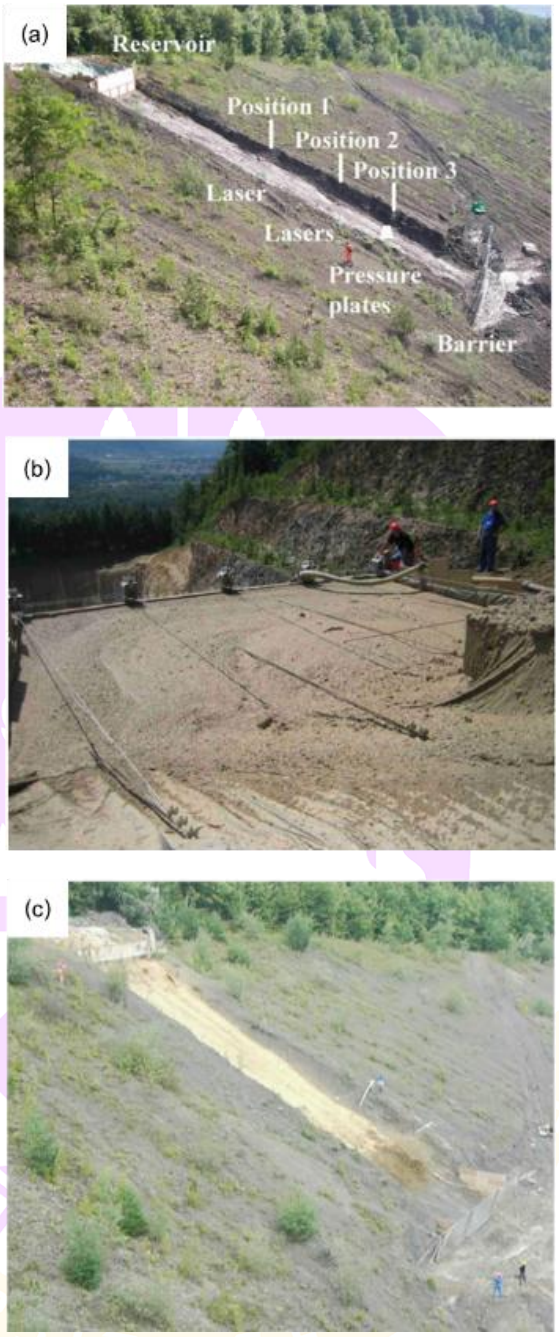
ภาพ 6 การเกิดดินโคลนถล่ม (a) การไหลของดินโคลนบนเนินเขา (b) การไหลของดินโคลนตามช่องเขา

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลง จาก Winter, 2020

2.2 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการไหลหลากของดินโคลน

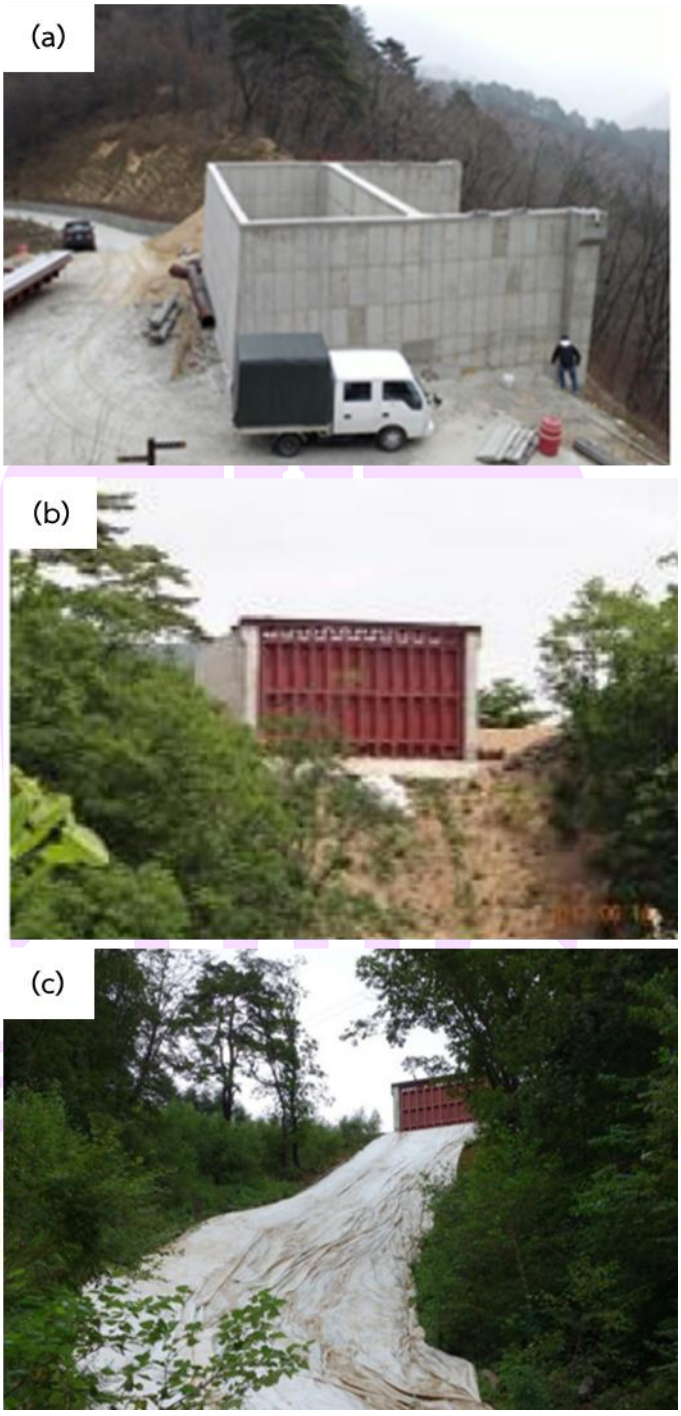
แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการไหลหลากของดินโคลน เป็นวิธีที่นิยมในการศึกษาทำความเข้าใจพฤติกรรมของการไหลของเศษดิน หิน และตะกอนในสถานการณ์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริง โดยวิธีนี้มีข้อดีที่สามารถอธิบายข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนอย่างการไหลหลากของดินโคลนได้ ภาพที่ 7 แสดงการศึกษาพฤติกรรมของแรงกระแทกจากการไหลของโคลนต่อสิ่งกีดขวางในพื้นที่จริง (Bugnion และคณะ, 2012) ช่องทางทดลองยาว 41 เมตร กว้าง 8 เมตร และความลาดชันเฉลี่ย 30 องศา ใช้ปริมาตรโคลน 50 ลูกบาศก์เมตร วัสดุโคลนผสมจากดิน หิน และน้ำ ติดตั้งแผ่นวัดแรงกระแทกระยะห่างจากจุดปล่อย 30 เมตร จากการทดลองพบว่าแรงกระแทกมีความสัมพันธ์กับความเร็วของกระแสการไหล (front velocity) และมีค่าตั้งแต่ 15 ถึง 200 kPa ซึ่งสูงกว่าแรงดันสถิตหลายเท่า นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์แรงกระแทก (impact coefficient) ถูกพบว่าอยู่ในช่วง 0.4–0.8 และมีความสัมพันธ์กับความเร็วของกระแสการไหล

Yune และคณะ (2023) (ภาพที่ 8-10) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเศษซากโดยวิเคราะห์แรงกระแทก การกัดเซาะ และการเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศ โดยทำการทดลองในพื้นที่จริง ที่ประเทศเกาหลีใต้ ใช้พื้นที่ลุ่มน้ำขนาด 0.28 ตารางกิโลเมตร ยาว 824 เมตร และกว้าง 4.6 ถึง 13.7 เมตร โดยมีลักษณะเป็นช่องเขารูปตัววี (V) ภาพที่ 10 แสดงลักษณะภูมิประเทศและตำแหน่งสิ่งกีดขวางในช่องทางการไหล ความชันเฉลี่ยในพื้นที่เริ่มต้น 39 องศา และลดลงเหลือ 8 องศา ในพื้นที่ท้ายการไหล พื้นเป็นชั้นดินผุกร่อนและหินขนาดต่าง ๆ ลึก 1 ถึง 2 เมตร ในช่วง 110 เมตรแรกปูด้วยแผ่น geotextile เพื่อป้องกันการกัดเซาะ และมีการติดตั้ง กำแพงลวดบรรจุหิน (gabions) บางส่วนในช่องทางการไหล เพื่อป้องกันการกัดเซาะ จากการศึกษาสรุปได้ว่า แรงจากการไหลขึ้นอยู่กับความลึกของการไหลยิ่งความลึกมาก แรงของการไหลยิ่งมีค่ามาก ความเร็วของการไหลขึ้นอยู่ความลาดชั้นของการไหล ยิ่งความชันมากความเร็วยิ่งมีค่ามาก การกัดเซาะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของการไหล โดยพื้นที่ที่มีความเร็วสูงที่สุด การกัดเซาะลึกสุดถึง 1.7 เมตร การติดตั้งกำแพงลวดบรรจุหิน ช่วยลดการกัดเซาะในพื้นที่ติดตั้งได้ถึง 48 % แต่ไม่มีผลต่อการลดพลังงานหรือความเร็วของการไหลโดยรวม



ภาพ 7 การศึกษาพฤติกรรมของแรงกระแทกจากการไหลของโคลนต่อสิ่งกีดขวางในพื้นที่จริง (a) ตำแหน่งและอุปกรณ์ในการทดลองภาคสนาม (b) วัสดุทดลอง (c) การไหลของดินโคลนกระทบสิ่งกีดขวาง

ที่มา: Bugnion และคณะ, 2012

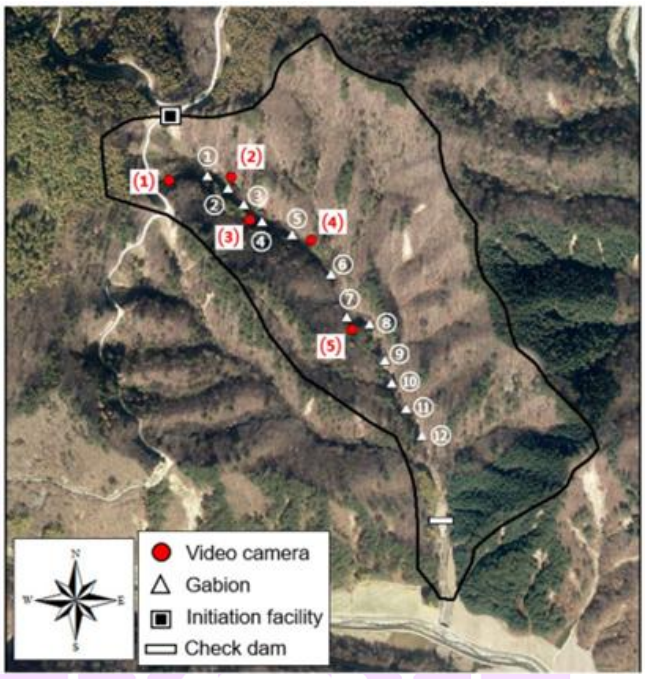


ภาพ 8 ถังเก็บวัสดุ (a) ด้านข้าง (b) ด้านหน้า (c) แผ่น geotextile หน้าถังเก็บวัสดุ

ที่มา: Yune และคณะ, 2023

ภาพ 9 สิ่งกีดขวางหลังการทดลอง (1-10) การกัดเซาะและลักษณะสิ่งกีดขวางในแต่ละตำแหน่ง

ที่มา: Yune และคณะ, 2023



ภาพ 10 ภูมิประเทศและตำแหน่งสิ่งกีดขวางในช่องทางการไหล

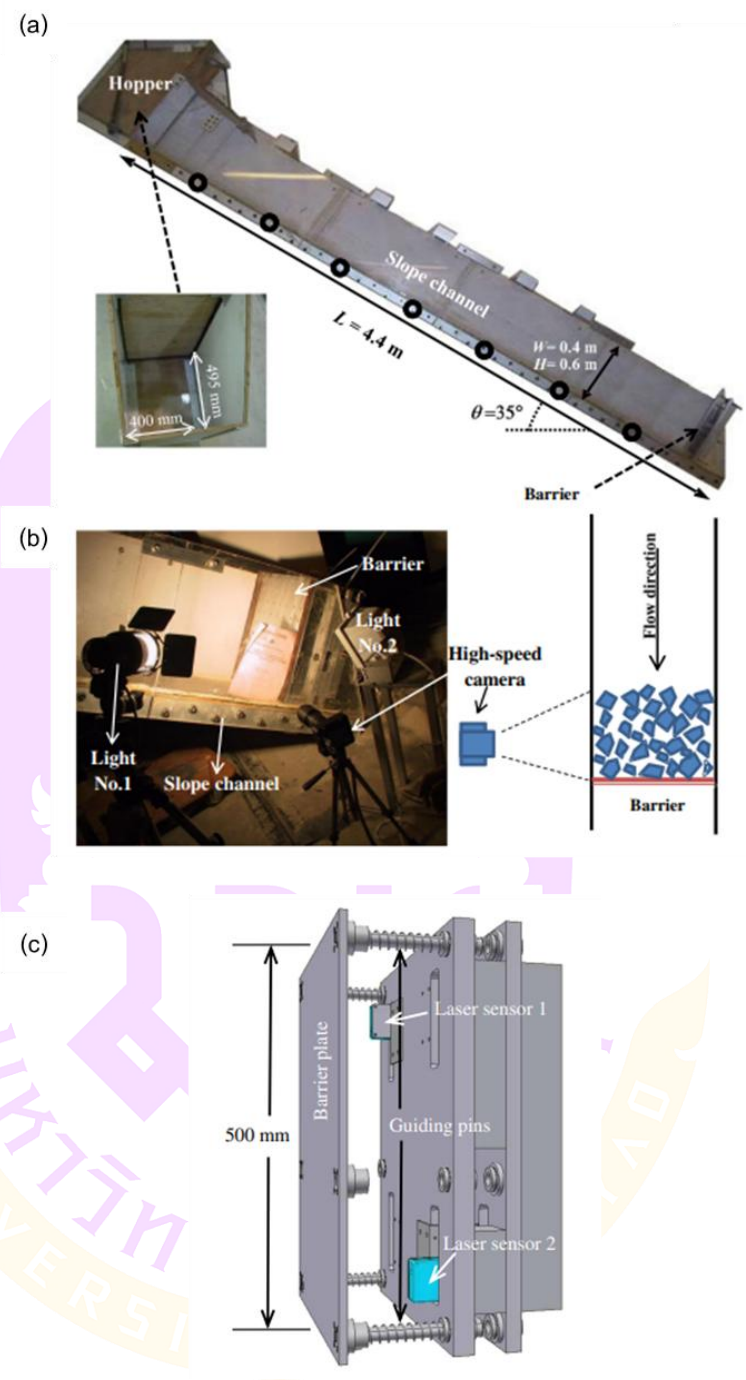
ที่มา: Yune และคณะ, 2023

การทดลองในสถานที่จริงนั้นสามารถให้ข้อมูลที่แม่นยำและใกล้เคียงกับสถานการณ์ในธรรมชาติมากกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเป็นการทดลองในสภาพแวดล้อมจริง รวมถึงลักษณะทางธรณีวิทยา ความชื้นในดิน รูปทรงภูมิประเทศ และอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการไหลของดินโคลน มีความใกล้เคียงกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม การดำเนินการทดลองในสถานที่จริงนั้นต้องใช้ทรัพยากรจำนวนมาก ทั้งในด้านของเวลา งบประมาณ และบุคลากร อีกทั้งยังต้องพิจารณาถึงความเสี่ยงด้านความปลอดภัยและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในการทำซ้ำเนื่องจากความซับซ้อนของสภาพแวดล้อม และเงื่อนไขต่าง ๆ ที่อาจเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละครั้ง

การทดลองในห้องปฏิบัติการโดยแบบจำลองย่อส่วน เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับนักวิจัยเพื่อเลี่ยงข้อจำกัดในการทดลองในพื้นที่จริง การทดลองในห้องปฏิบัติการนั้นสามารถควบคุมเงื่อนไขต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ ไม่ว่าจะเป็นส่วนผสม ความชันการไหล ซึ่งทำให้นักวิจัยสามารถทำการทดลองภายในเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดได้ ยกตัวอย่างการศึกษาของ Zhou และคณะ (2017) ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้รางลาดเอียงยาว 4.4 เมตร กว้าง 0.4 เมตร และสูง 0.6 เมตร ที่มีความชัน

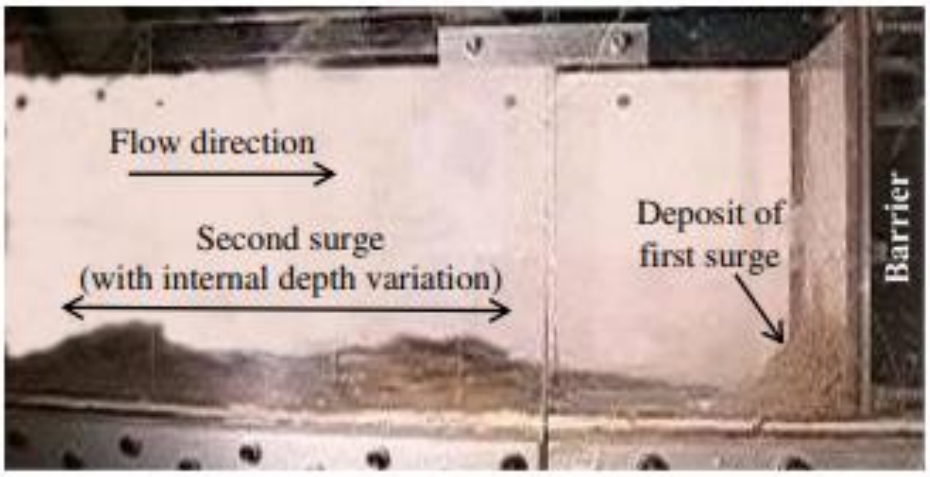
คงที่ 35 องศา ติดตั้งกำแพงอลูมิเนียมที่ปลายรางเพื่อวัดแรงกระแทกของการไหล ภาพ 11 แสดงลักษณะรางและตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง การทดลองมุ่งเน้นการศึกษาผลของปริมาณน้ำที่ 0%, 10%, 20%, และ 30% ต่อพฤติกรรมการกระแทกของการไหล (granular flows) โดยใช้วัสดุทดลองเป็นดินแกรนิตที่ผุพังและทรายที่มีการผสมตามสัดส่วนที่กำหนดแล้วปล่อยไหลในรางทดลอง ผลการศึกษาพบว่าในกรณีที่วัสดุไม่มีน้ำหรือมีน้ำเพียง 10% จะเกิดการสะสมตัวแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive accumulation) โดยไม่มีแรงกระแทกแบบพุ่งสูง (impulse) อนุภาคหยาบจะสะสมที่พื้นผิวขณะที่อนุภาคละเอียดจมลงในโซนตาย (dead zone) สำหรับปริมาณน้ำที่ 20% และ 30% การชนเกิดขึ้นในลักษณะการไหลเป็นช่วง ๆ (discrete surges) (ภาพ 12) ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของมวลวัสดุเปียก ส่งผลให้แรงกระแทกต่อกำแพงสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากแรงดูดภายใน (matric suction) ที่เพิ่มแรงเฉือนภายในวัสดุและลดความสามารถในการเคลื่อนที่ แต่กระตุ้นให้เกิดแรงกระแทกแบบพุ่งสูงในระยะเวลาสั้น ๆ

ด้วยข้อจำกัดด้านความสมจริงของการไหลหลากในธรรมชาติ แม้ว่าการควบคุมเงื่อนไขการทดลองจะช่วยให้สามารถศึกษาในสถานการณ์ที่เฉพาะเจาะจงได้ แต่ยังไม่สามารถจำลองสภาพแวดล้อมในธรรมชาติได้อย่างสมบูรณ์ เช่น รูปทรงภูมิประเทศ ความชื้นในดิน หรือปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่มีผลต่อการไหลของดินโคลน ซึ่งในบางกรณีอาจทำให้ผลการทดลองที่ได้ไม่สามารถสะท้อนสถานการณ์จริงในธรรมชาติได้ครบถ้วน



ภาพ 11 รางและตำแหน่งอุปกรณ์ทดลอง; (a) รางทดลอง (b) ตำแหน่งอุปกรณ์ (c) กำแพงอลูมิเนียมกับตัววัดแรง

ที่มา: Zhou และคณะ, 2017

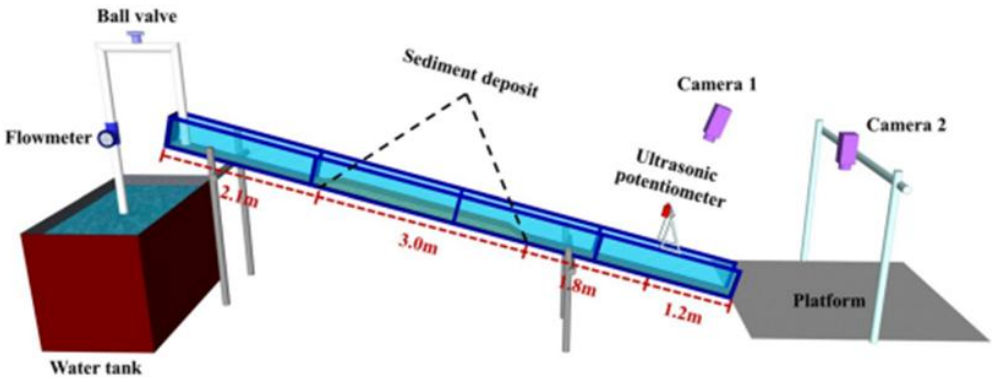


ภาพ 12 การไหลของวัสดุกรณีผสมน้ำ 20%

ที่มา: Zhou และคณะ, 2017

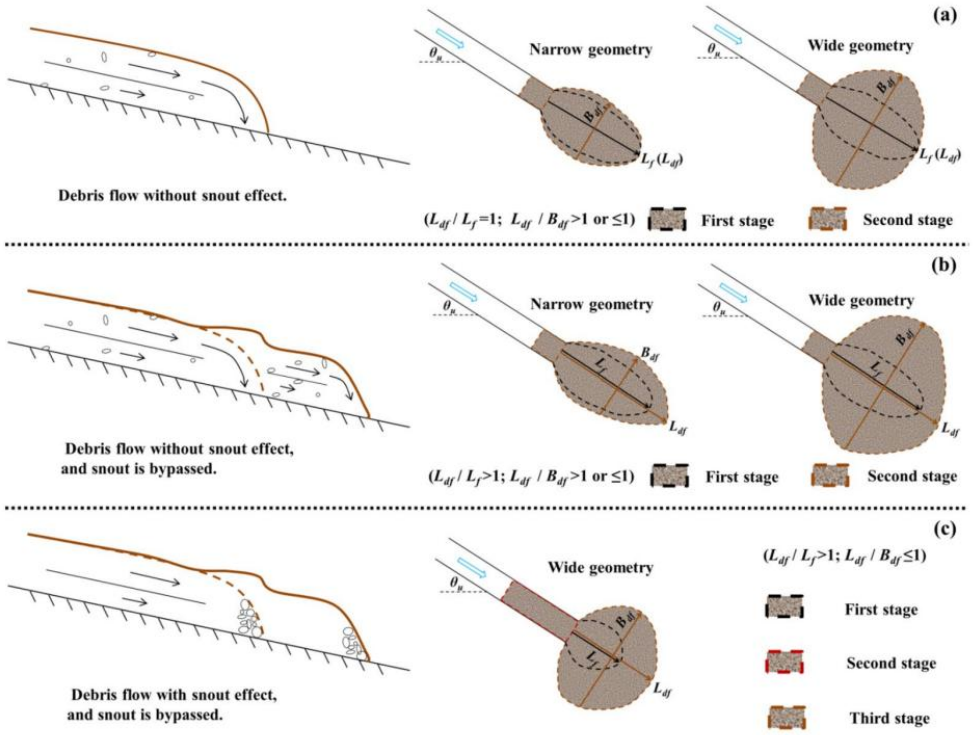
การพยายามลดข้อจำกัดด้านความสมจริงของแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการดำเนินการโดยการทดลองในห้องปฏิบัติการเชิงตัวแปร ซึ่งช่วยให้สามารถศึกษาความเชื่อมโยงระหว่างตัวแปรต่าง ๆ และทำความเข้าใจลักษณะการไหลในสถานการณ์ที่เฉพาะเจาะจงมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถทำการทดลองซ้ำได้หลายครั้งในสภาวะที่เหมือนกันทุกครั้ง การออกแบบการทดลองในลักษณะนี้มักจะช่วยให้ผลการทดลองเป็นไปตามที่คาดหวัง โดยสามารถควบคุมปัจจัยเริ่มต้นต่าง ๆ เช่น ส่วนผสมของวัสดุ ความเร็วในการไหล และลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการทดลองได้อย่างแม่นยำ ยกตัวอย่าง Gong และคณะ (2023) ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบวัสดุต่อพฤติกรรมการไหลและการสะสมตัวของดินถล่มที่เกิดจากการไหลของน้ำ ภาพ 13 แสดงผังของตำแหน่งและอุปกรณ์ในการทดลอง โดยใช้รางน้ำจำลองยาว 8.1 เมตร กว้าง 0.3 เมตร และสูง 0.35 เมตร ความลาดชันสามารถปรับได้ในช่วง 15 ถึง 21 องศา เพื่อเลียนแบบสภาพการไหลในธรรมชาติ ทำการทดลองโดยจัดเรียงวัสดุประกอบด้วยกรวด (2–20 มม.), ทราย (0.075–2 มม.) และอนุภาคขนาดเล็ก (<0.075 มม.) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ในรางทดลอง จากนั้นจ่ายน้ำในปริมาณ 8 , 11 และ 13.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เพื่อกระตุ้นให้เกิดการไหลของวัสดุ จากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบของวัสดุส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลและการสะสมตัวของดินถล่ม โดยพบว่าในการทดลองสามารถจำแนกรูปแบบการสะสมตัวของดินถล่มได้ 3 ประเภท ได้แก่ รูปแบบที่ไม่ถูกแยก (non-bypassed), รูปแบบที่ถูกลัดผ่าน (bypassed) และรูปแบบที่มีการสะสมตัวกลับ (back-siltation) ภาพ 14 แสดงการรูปแบบการสะสมของเศษซาก ภาพ 14(a) การสะสมแบบไม่ไหล

ผ่าน (non-bypassed pattern) เมื่อวัสดุไหลมาถึงพื้นที่สะสมแล้วหยุด ไม่ไหลผ่านไปต่อตะกอนที่สะสมจะกองอยู่ในพื้นที่นั้นทั้งหมด รูปร่างอาจเป็นแบบแคบ (narrow) ตะกอนสะสมตัวเรียวยาวตามร่องน้ำแคบ หรือแบบกว้าง (wide) ตะกอนแผ่กระจายออกไปบริเวณกว้าง เช่น บริเวณที่ราบเชิงเขา ภาพ 14(b) การสะสมแบบไหลผ่าน (bypassed pattern) วัสดุไหลผ่านไปบางส่วนและสะสมตะกอนเฉพาะบางจุด ซึ่งรูปร่างก็อาจเป็นแบบแคบหรือกว้างได้เช่นกัน ภาพ 14(c) การสะสมแบบทับถมย้อนกลับ (back-siltation pattern) ที่เกิดการสะสมย้อนกลับเนื่องจากการไหลถูกชะลอหรือกีดขวาง ทำให้ตะกอนกองทับถมในพื้นที่กว้างเท่านั้น โดยแต่ละรูปแบบมีลักษณะการไหลและการสะสมตัวที่แตกต่างกันไปตามความเข้มข้นของวัสดุและปัจจัยอื่น ๆ เช่น ปริมาณกรวด ทราย และอนุภาคขนาดเล็ก การเพิ่มปริมาณกรวดทำให้แรงปะทะระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดินถล่มมีการสะสมตัวเป็นกองที่มีความสูงมากขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณอนุภาคขนาดเล็กช่วยเพิ่มแรงหนืดและทำให้ดินถล่มเคลื่อนที่ได้ไกลขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณน้ำและความลาดชันของรางน้ำยังช่วยเพิ่มระยะทางการไหลของดินถล่มและขยายพื้นที่สะสมตัว จะเห็นได้ว่าการลดความซับซ้อนของการทดลองในบางกรณีจึงช่วยให้สามารถแยกพิจารณาผลกระทบจากตัวแปรสำคัญ ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อการไหลของดินโคลนได้ดียิ่งขึ้น



ภาพ 13 การตั้งค่าและอุปกรณ์ทดลอง

ที่มา: Gong และคณะ, 2023

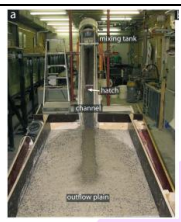
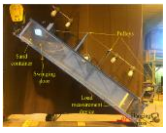


ภาพ 14 รูปแบบการสะสมของวัสดุ (a)แบบไม่ไหลผ่าน (b)แบบไหลผ่าน (c) แบบทับถมย้อนกลับ

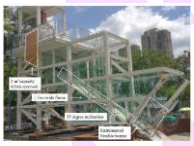
ที่มา: Gong และคณะ, 2023

การทดลองในห้องปฏิบัติการแบบย่อส่วน แม้จะมีข้อจำกัดในการจำลองสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ แต่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหลักการและกลไกของการไหลของดินโคลนภายใต้เงื่อนไขที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งช่วยให้สามารถเข้าใจถึงการทำงานของกลไกการไหลในสภาวะต่าง ๆ และนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาหรือพัฒนาแนวทางการจัดการในสถานการณ์จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ตาราง 2 แสดงตัวอย่างของการศึกษาการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการ โดยวัสดุและโครงสร้างป้องกันที่ใช้แตกต่างกันออกไป

ตาราง 2 ตัวอย่างของการศึกษาการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการ

ผลงาน	ลักษณะราง	ขนาดรางน้ำ (ยาว*กว้าง*สูง) m	การติดตั้งเครื่องมือ	วัสดุที่ใช้ทดลอง	หมายเหตุ
de Haas และคณะ (2015)		2x0.4x0.12	กล้องถ่ายภาพ, เครื่องสแกน 3 มิติ , MATLAB	กรวด ทราย ดิน เหนียว น้ำ	ส่วนผสมมีผลต่อรูปแบบการสะสมของดินโคลน
Ng และคณะ (2017)		5x0.2x0.5	เซนเซอร์วัดแสง, YT44MGV, กล้องความเร็วสูง, PIV	ลูกแก้วขนาดต่าง ๆ (3, 10, 23 และ 30 มม.), ทราย ขนาด 015 และ 0.6 มม.	ขนาดอนุภาคมีผลต่อกลไกการ Run-up, ควรใช้ค่า Froude number และ Savage number ประเมิน Run-up เพื่อความแม่นยำ
Zhao และคณะ (2018)		4x0.3x0.4	เซ็นเซอร์ชนิด piezoelectric, กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง	โคลนจากพื้นที่จริง ขนาดอนุภาคใหญ่สุด 20 มม.	แรงกระแทกมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ โดยแรงกระแทกจะสูงสุดที่กึ่งกลางและลดลงไปที่ขอบด้านข้าง
Huo และคณะ (2018)		6x0.5x0.5	กล้องความเร็วสูง NX4-S1 , ซอฟต์แวร์ Image-Pro Plus (IPP),	ส่วนผสมของกรวด ทราย และตะกอนละเอียด	ขนาดตาข่ายมีผลต่อการแยกตัวและการดูดซับพลังงาน ตาข่ายขนาดเล็กซับพลังงานได้ดีกว่า
Ahmadipur Qiu (2018)		3.2x0.42x0.4	กล้องความเร็วสูง, โหลดเซลล์ (OMEGA LC401)	ทราย D50 = 0.25 mm	ความชันเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วและแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ระยะทางการไหล ยิ่งไกลยิ่งเพิ่มแรงกระแทก

ตาราง 2 (ต่อ)

ผลงาน	ลักษณะราง	ขนาดรางน้ำ (ยาว*กว้าง*สูง) m	การติดตั้งเครื่องมือ	วัสดุที่ใช้ทดลอง	หมายเหตุ
Song และคณะ (2019)		1x0.23x0.5	เครื่องหมุนเหวี่ยงทางธรณีเทคนิค โหลดเซลล์ , เซ็นเซอร์เลเซอร์ (Laser Sensors), กล้องความเร็วสูง	ลูกแก้วขนาดต่าง ๆ (3, 10, 22 และ 39 มม.), ทรายขนาด 0.6 มม.	รั้วกั้นแบบยืดหยุ่นสามารถลดแรงกระแทกจากก้อนหินได้ , แนะนำค่าสัมประสิทธิ์แรงดันไดนามิก α = 2.0
Jiang และคณะ, 2019		6x0.5x0.5	โหลดเซลล์ (Load cells), กล้องความเร็วสูง, ซอฟต์แวร์ IPP (Image-Pro Plus) , ซอฟต์แวร์ PFC3D	ส่วนผสมกรวดขนาดอนุภาคใหญ่สุด 50 มม.	แรงจากการไหลกระจายไปตามสายเคเบิล, การเสียรูปช่วยลดแรงกระทำ, ตาข่ายสามารถกักเก็บวัสดุได้ดี
Tan และคณะ (2020)		7x1.5x1.5	อุปกรณ์วัดแรงดึง, กล้องความเร็วสูง, HSVISION	ส่วนผสมของดินแกรนิตผุพังและหินก้อน	เมื่อรั้วกั้นถูกดินถล่มอุดตันมากแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้น

2.3 พฤติกรรมการไหลหลาก การทับถม และกลไกแรงกระแทก

การไหลหลากของดินโคลนมีลักษณะซับซ้อนและยุ่งยากในการวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นการผสมผสานระหว่างวัสดุแบบแห้ง เช่น ดินและหิน กับน้ำ ซึ่งทำให้เกิดสภาพกึ่งของเหลวที่มีพฤติกรรมเฉพาะตัว ปริมาณน้ำ ความลาดชัน และคุณสมบัติของดินหรือหิน เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดลักษณะการไหลหลากและการทับถมของดินโคลน น้ำมีผลต่อความข้นเหลวของดินโคลน โดยปริมาณน้ำที่มากขึ้นช่วยเพิ่มระยะทางและความเร็วของการไหลหลาก ขณะที่พื้นที่ที่มีความลาดชันสูงจะเพิ่มพลังงานศักย์ให้กับดินโคลน ทำให้เกิดการไหลหลากที่รุนแรงขึ้น ส่วนลักษณะทางกายภาพของดินหรือหิน เช่น ขนาดอนุภาคและความสามารถในการจับตัว จะส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลและการสะสมตัวในแต่ละพื้นที่ (de Haas และคณะ, 2015; Gong และคณะ, 2023)

การวิเคราะห์ลักษณะการไหลเหล่านี้ นักวิจัยได้พยายามนำสมการทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์มาใช้เพื่อทำความเข้าใจกลไกของการไหลหลาก ไม่ว่าจะเป็นตัวเลข Froude (froude number, F_r) ซึ่งใช้ในการอธิบายพลศาสตร์ของการไหลในทางน้ำเปิด เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยและแรงโน้มถ่วงของโลก ดังสมการ

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh\cos\theta}} \quad (1)$$

โดยที่ v คือความเร็วของการไหล (m/s), g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 m/s^2), h คือความหนาหรือความสูงของการไหล (m) และ θ มุมลาดเอียงของการไหล (องศา) ค่าของ F_r สามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงสภาพการไหลในทางน้ำเปิด โดยที่

$F_r = 1$ หมายถึงสภาพการไหลเป็นแบบวิกฤติ

$F_r < 1$ หมายถึงสภาพการไหลเป็นแบบช้ากว่าวิกฤติ (subcritical flow) ความสูงของการไหลมากแต่ความเร็วน้อย

$F_r > 1$ หมายถึงสภาพการไหลเป็นแบบเหนือกว่าวิกฤติ (supercritical flow) ความสูงของการไหลน้อยแต่ความเร็วมาก

Hübl และคณะ (2009) ได้ข้อสรุปว่าการไหลของดินโคลนตามธรรมชาติมีค่า F_r ไม่เกิน 7.5 ส่วน Kwan Cheung (2012) พบว่าการไหลของดินโคลนในฮ่องกงสามารถจำแนกได้โดยใช้ค่า F_r ประมาณ 3 เนื่องจากมีฝนตกชุกและภูมิประเทศทางธรรมชาติที่สูงชัน ค่า F_r ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการใช้ควบคุมกลไกการกระแทกในลักษณะการไหลแบบทางน้ำเปิด (Armanini, Larcher และOdorizzi, 2011; Vagnon และSegalini, 2016)

สำหรับการระบุลักษณะของระบบการไหลในวัสดุเม็ดแห้ง ซึ่งจลนศาสตร์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับการชนกันของอนุภาค ได้มีการพัฒนาตัวเลขไร้มิติที่เรียกว่า Savage Number (N_{Sav}) โดยตัวเลขนี้จะใช้วิเคราะห์ความเค้นเฉือน ประสิทธิภาพของการสัมผัสระหว่างอนุภาค และความเค้นเฉื่อยในสภาวะที่วัสดุอยู่ในสภาพการไหลแบบอิ่มตัว

$$N_{Sav} = \frac{\dot{\gamma}^2 D^2}{gh\tan\theta} \quad (2)$$

โดยที่ $\dot{\gamma}$ คือ อัตราเฉือน (shear rate) สามารถประมาณได้จากการหารความเร็วการไหลด้วยความลึกการไหล D คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตะกอนในการไหล ซึ่งสามารถใช้ขนาดอนุภาคกลางของการกระจายขนาดอนุภาคได้ g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง (gravitational acceleration) h คือความสูงของการไหล (flow height) $\tan\theta$ คือ มุมของการเสียดทานภายใน (internal friction angle) ในกรณี N_{Sav} มากกว่า 0.1 ความเค้นเฉื่อย (inertial stress) จะมีผลอย่างมากต่อการไหล ทำให้พฤติกรรมของวัสดุส่วนใหญ่ถูกกำหนดโดยการชนกันของอนุภาคมากกว่าการสัมผัสแบบเสียดทาน ในทางกลับกัน หาก N_{Sav} น้อยกว่า 0.1 การชนกันของอนุภาคจะมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย การไหลจะถูกกำหนดโดยแรงเสียดทานที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างอนุภาคมากกว่า (Savage และ Hutter, 1989; Song และคณะ, 2017) ซึ่งค่า N_{Sav} ช่วยให้สามารถจำแนกและเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งที่มีการไหลในระบบต่าง ๆ โดยเน้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉื่อยและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค

แรงกระแทกจากการไหลหลากของดินโคลนต่อโครงสร้างป้องกันเป็นตัวบ่งชี้ระดับความรุนแรงของภัยพิบัติและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น ในทางปฏิบัติการคาดการณ์แรงกระแทกสูงสุดสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$F_p = \alpha \rho v^2 h w \quad (3)$$

โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ (dynamic pressure coefficient); ρ ความหนาแน่นของการ ไหล (flow density); v ความเร็วของการไหล (flow velocity); h คือความลึกของการไหล (flow depth); w คือความกว้างของกำแพงกั้น (barrier width) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปัจจัยที่ยากต่อการควบคุมและความไม่แน่นอนของการไหลหลาก ทำให้ค่าของ α มีความผันแปรในช่วง 0.4–18 (Cui, Zeng และLei, 2015; Song และคณะ, 2017) ได้นำเสนอความสัมพันธ์ของค่า α โดยพิจารณาจากค่า Froude number จากการวิเคราะห์ข้อมูลในสนาม ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\alpha = 5.3 F_r^{-1.5} \quad (4)$$

โดยทั่วไปการเลือกใช้ค่า α มักใช้ประสบการณ์และการตัดสินใจของผู้ปฏิบัติงานแต่ละคน ซึ่งยังขาดหลักเกณฑ์ที่แน่ชัดและไม่สามารถปรับใช้ได้กับการไหลของธรณีฟิสิกส์ทุกประเภท ดังนั้นนักวิจัยหลายท่านจึงได้นำเสนอความสัมพันธ์ใหม่ในการประมาณค่า α โดยพิจารณาจากกลไกลการการกองขึ้น (pile-up) และ การไหลซัดขึ้น (run-up) ซึ่งเป็นพฤติกรรมสำคัญของการไหลหลาก จากการศึกษาของ Poudyal และคณะ (2019) ได้รวบรวมการทดลองที่เกี่ยวข้องและสรุปค่า α ไว้ในตารางที่ 3

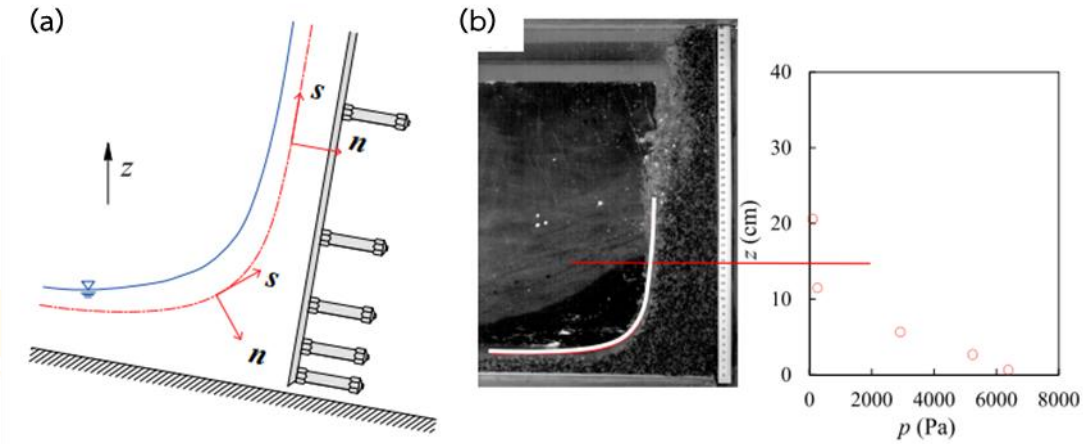
ตาราง 3 ตารางสรุปค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ ที่ใช้ในการประมาณค่าแรงกระแทกสูงสุดของการไหลเมื่อกระทบกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์	ผลงาน
α = 3.0, 5.0	Zhang (1993)
α = 1.0	VanDine (1996)
α = 1.5, 5.5	Hübl และ Holzinger (2003), Canelli และคณะ (2012)
α = 1.0 สำหรับโครงสร้างทรงกลม	
α = 1.3 สำหรับโครงสร้างสี่เหลี่ยม	MLR (2004)
α = 1.5 สำหรับโครงสร้าง	
α = 1.0	SWCB (2005)
α = 1.0	NILIM (2007)
α = 2.5, 3.0	Lo (2000), Kwan (2012)
α = 2	Vagnon และ Segalini (2016)

2.4 พฤติกรรมแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง

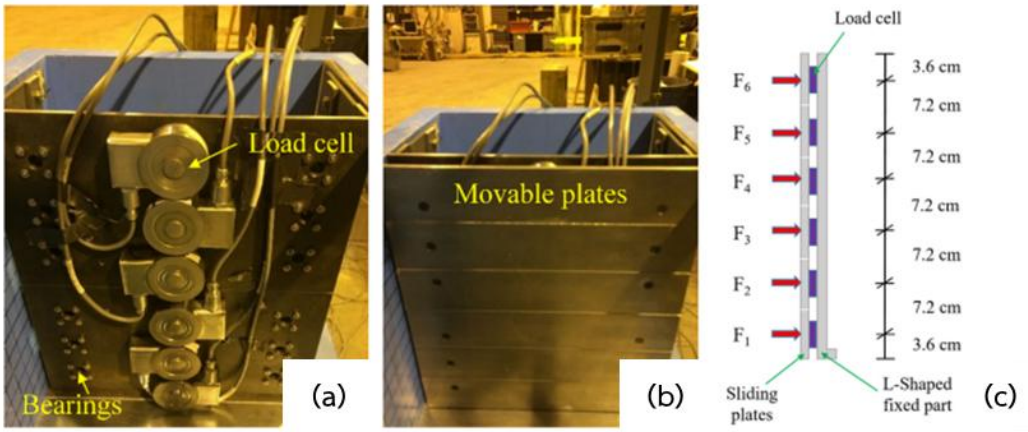
พฤติกรรมแรงกระแทกเกี่ยวข้องกับกลไกของการไหล โดยมีปัจจัยหลักคือ การกองขึ้น (pile-up) ซึ่งเป็นการสะสมของดินโคลนในบริเวณที่แรงเฉื่อยลดลง และการไหลขึ้น (run-up) ที่เกิดจากพลังงานจลน์สูง ทำให้วัสดุไหลขึ้นไปตามสิ่งกีดขวาง นอกจากนี้ ความเร็วของการไหลยังส่งผลโดยตรงต่อแรงกระแทกที่เกิดขึ้น ในขณะเดียวกัน ความหนาแน่นของวัสดุผสมก็มีผลการเพิ่มแรงเฉื่อย ซึ่งส่งผลให้แรงกระแทกมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่และคุณสมบัติของวัสดุ พฤติกรรมแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็งถูกพิจารณาตามสมมุติฐานของสิ่งกีดขวางที่ไม่มีช่องเปิดและการเสียรูป จากการศึกษาของ Armanini, Rossi และLarcher (2020) ภาพ 15 แสดงเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัสดุ เมื่อวัสดุเคลื่อนที่ตามความสูงของพื้นผิวสิ่งกีดขวาง แสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์สัมผัส (s) จะทำมุมน้อยลงจนขนานกับพื้นผิวสิ่งกีดขวาง ในทางกลับกัน เวกเตอร์ตั้งฉาก (n) จะทำมุมมากขึ้นจนกระทั่ง 90 องศากับความพื้นผิวสิ่งกีดขวาง ในขณะที่ลักษณะของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในทิศทางตั้งฉากจะสวนทางกับเวกเตอร์การเคลื่อนที่ ภาพ 15(b) แสดงให้เห็นว่าแรงกระแทกกับสิ่งกีด

ขวางลดลงตามความสูงที่เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาของ Ahmadipur Qiu (2018) ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของแรงกระแทกจากการไหลของเม็ดทรายบนพื้นลาดเอียง โดยใช้รางทดลองที่มีขนาด ยาว 3.2 เมตร กว้าง 0.43 เมตร และลึก 0.4 เมตร ซึ่งสามารถปรับความลาดชันได้สูงสุดถึง 60 องศา ภาพ 16 แสดงรายละเอียดของรางทดลอง พร้อมทั้งอุปกรณ์วัดแรงกระแทกที่ติดตั้งไว้บริเวณจุดชนของวัสดุกับสิ่งกีดขวาง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความลาดชันมีผลโดยตรงต่อแรงกระแทกที่เกิดขึ้น กล่าวคือ เมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้น แรงกระแทกก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความเร็วในการไหลของมวลเม็ดทรายมีค่าสูงขึ้นตามแรงโน้มถ่วงที่มากขึ้นบนพื้นลาดชัน นอกจากนี้ยังพบว่า แรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจะลดลงตามความสูงของโครงสร้าง เนื่องจากพลังงานกระแทกจะถูกถ่ายโอนไปยังตำแหน่งที่ต่ำกว่า โดยแรงกระแทกสูงสุดเกิดขึ้นที่ โหลดเซลล์ตัวที่ 1 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งต่ำที่สุดของโครงสร้างป้องกัน ภาพ 17 แสดงแรงกระแทกที่วัดได้ในช่วงเวลาต่าง ๆ ภายใต้ความลาดชันที่แตกต่างกัน



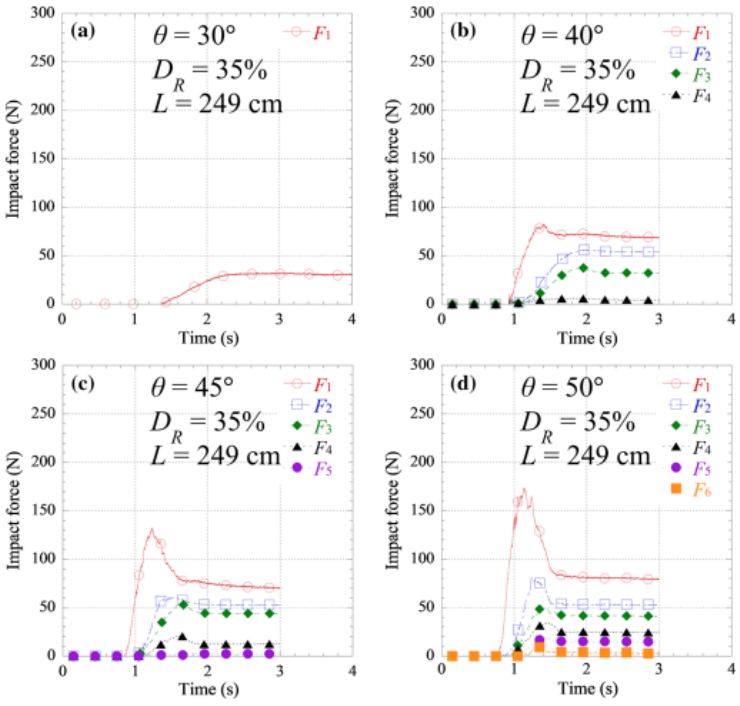
ภาพ 15 ผลกระทบจากความโค้งของคลื่น การกระจายแรงดันไปตามสิ่งกีดขวางแนวตั้งของส่วนผสมน้ำและตะกอน (a) ระบบพิกัดภายใน (b) ความโค้งของการไหลของคลื่น

ที่มา: Armanini และคณะ, 2020



ภาพ 16 ลักษณะโหลดเซลล์วัดแงกระแทก (a) ด้านหลัง (b) ด้านหน้า (c) ด้านข้าง

ที่มา: Ahmadipur Qiu (2018)

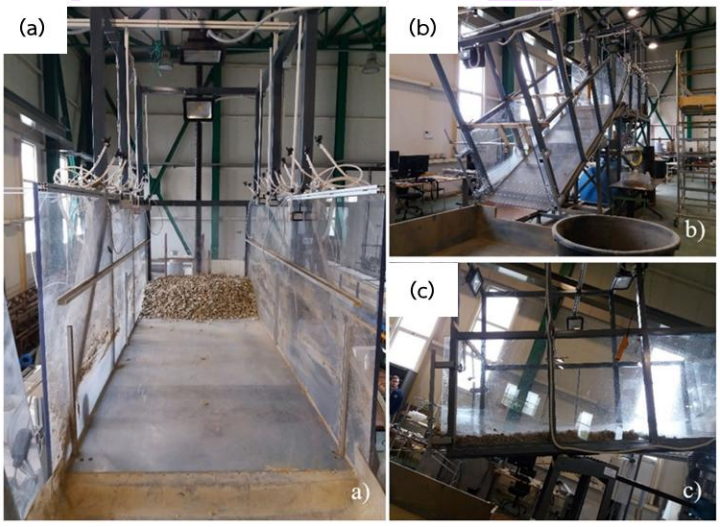


ภาพ 17 แรงกระแทกที่วัดได้ในช่วงเวลาต่าง ๆ ภายใต้ความลาดชันที่แตกต่างกัน

ที่มา: Ahmadipur Qiu (2018)

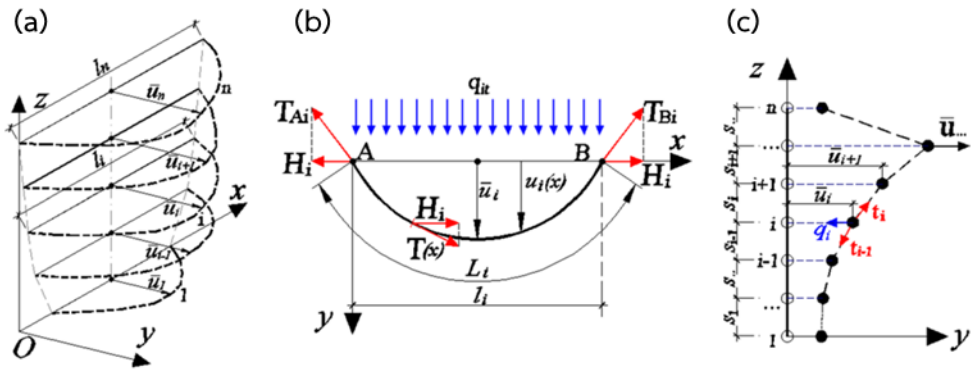
2.5 พฤติกรรมแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น

โดยทั่วไปโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นเป็นสิ่งกีดขวางที่สามารถปรับตัวตามแรงกระทำได้และมีช่องเปิดให้วัสดุบางส่วนสามารถไหลผ่านไปได้ พฤติกรรมแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจะอยู่ในรูปแบบแรงดึง อธิบายได้จากกลไกการกระทำของแรงที่มีผลต่อวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น เมื่อวัสดุกระทบกับโครงสร้างที่ยืดหยุ่น แรงกระแทกจะถูกกระจายและเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการยืดหยุ่นของโครงสร้างนั้น ๆ โดยโครงสร้างที่ยืดหยุ่นสามารถดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกได้มากกว่าโครงสร้างแบบแข็ง ภาพ 18 แสดงการติดตั้งแบบจำลองสำหรับการศึกษาผลกระทบจากการไหลหลากของดินโคลนต่อสิ่งกีดขวางแบบยืดหยุ่น โดยพิจารณาแรงดึงจากสายเคเบิลที่ร้อยผ่านตาข่าย ภาพ 19 แสดงรูปแบบแรงของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นที่เกิดขึ้น โดยที่ O คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของพิกัด $\vec{u}$ คือ การกระจัดในทิศทางต่าง ๆ q_{it} คือ แรงกระจายที่กระทำในแนวตั้งฉากตลอดความยาวของสายเคเบิล T_{Ai} และ T_{Bi} คือ แรงดึงที่ปลายของสายเคเบิล $\vec{u}_t$ คือ การกระจัดในช่วงเวลาต่าง ๆ t_i คือ แรงกระทำที่จุด i $\Delta\vec{u}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของการกระจัด จะเห็นว่าแรงดึงทั้งสองข้างมีค่าเท่ากัน ดังนั้นสามารถประเมินแรงดึงที่เกิดขึ้นได้ด้วยการติดตั้งโหลดเซลล์ทางด้านใดด้านหนึ่งของสายเคเบิลได้



ภาพ 18 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ (a) ด้านหน้า (b) ลักษณะรางทดลอง (c) ด้านข้าง

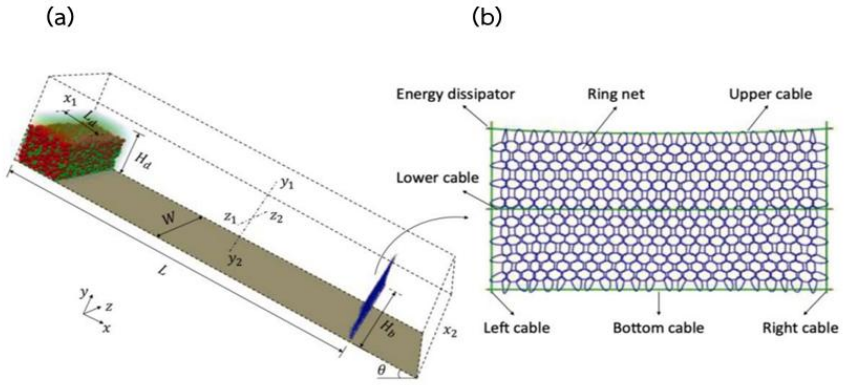
ที่มา: Brighenti และคณะ (2021)



ภาพ 19 แผนภาพแรงดึงของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น (a) ภาพ 3 มิติแสดงการเสียรูป (b) มุมมองด้านบนของสายเคเบิลเดี่ยวเมื่อมีแรงกระทำจากการไหล (c) แผนภาพหน้าตัดแนวตั้งของโครงสร้างป้องกัน

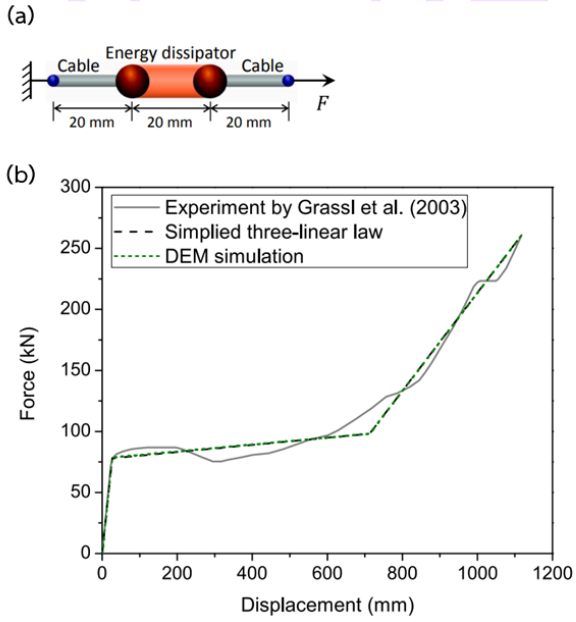
ที่มา: Brighenti และคณะ (2021)

จากการศึกษาของ (Li, Zhao และKwan, 2020) ใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขแบบ CFD-DEM (Coupled Computational Fluid Dynamics and Discrete Element Method) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการไหลของเศษซาก (debris flow) ต่อกำแพงตาข่ายวงแหวนแบบยืดหยุ่น (flexible ring net barrier) ภาพ 20 แสดงลักษณะแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD-DEM จากภาพ 21 แสดงให้เห็นว่าลักษณะการเสียรูปของสายเคเบิลแบ่งออกเป็นสามช่วงหลัก ช่วงแรกเมื่อเกิดแรงกระแทกทันที สายเคเบิลจะเสียรูปอย่างกระทันหัน ทำให้แรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงที่สอง เป็นการเสียรูปที่อยู่ในการเคลื่อนที่ของสายเคเบิลในแบบจำลอง ทำให้แรงดึงที่เกิดขึ้นมีความชันลดลงเมื่อเทียบกับช่วงแรก ในขณะที่ช่วงที่สาม เมื่อการเสียรูปเกินขีดจำกัดที่สายเคเบิลสามารถเคลื่อนที่ได้ แรงดึงจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดึงในสายเคเบิลต่อเวลา ภาพ 22 จะเห็นว่าพฤติกรรมของแรงดึงจะมีค่าสูงสุดในสายเคเบิลที่อยู่ล่างสุดและลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการทดลองทางกายภาพและการโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองได้



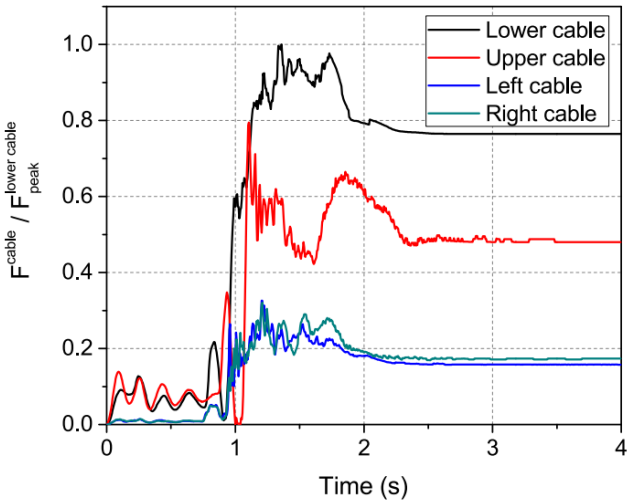
ภาพ 20 แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD-DEM (a) การตั้งค่ารางทดลอง (b) กำแพงตาข่ายวงแหวนแบบยืดหยุ่น

ที่มา: Li และคณะ, 2020



ภาพ 21 (a) ภาพการจำลอง DEM แสดงการออกแรงแบบค่อยเป็นค่อยไปบนตัวกระจาย พลังงานในสายเคเบิล (b) การตอบสนองระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของตัวกระจายพลังงานในสายเคเบิล

ที่มา: Li และคณะ, 2020



ภาพ 22 ความสัมพันธ์ของแรงในสายเคเบิลและเวลา

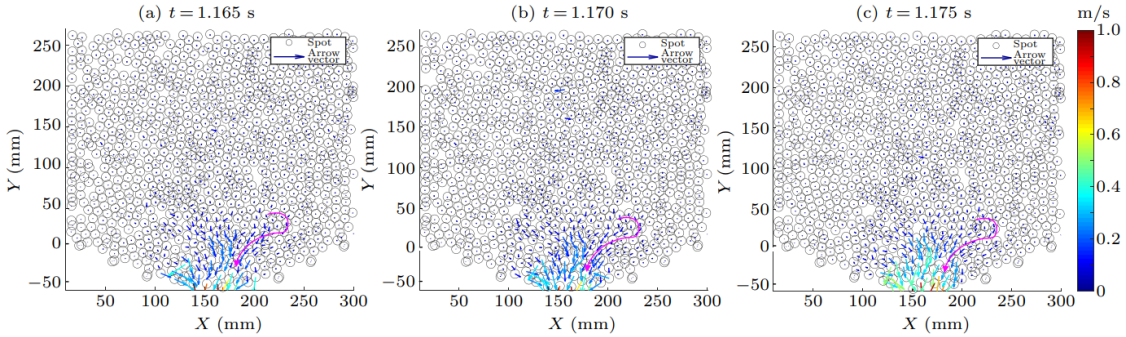
ที่มา: Li และคณะ, 2020

2.6 Particle Tracking Velocimetry (PTV)

Particle Tracking Velocimetry (PTV) เป็นเทคนิคที่สามารถวัดความเร็วของของไหลหรืออนุภาคโดยไม่ต้องสัมผัสหรือแทรกอุปกรณ์ใด ๆ เข้าไปในระบบของไหลนั้นโดยตรง โดยอาศัยหลักการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละจุดแยกกันไปตามเวลา โดยพิจารณาตำแหน่ง ความเร็ว และทิศทางของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรในแต่ละช่วงเวลา (Lagrangian approach) ซึ่งแตกต่างจาก Particle Image Velocimetry (PIV) ที่เน้นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคในเชิงพื้นที่ (Eulerian approach) โดยในกระบวนการของ PTV จะบันทึกภาพลำดับของอนุภาคที่เคลื่อนที่ จากนั้นใช้วิธีประมวลผลภาพเพื่อติดตามตำแหน่งของอนุภาคในแต่ละช่วงเวลา ทำให้สามารถคำนวณความเร็วได้จากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอนุภาคระหว่างช่วงเวลา ขณะที่ PIV ใช้วิธีเปรียบเทียบลักษณะความเข้มแสงในกลุ่มอนุภาคระหว่างสองภาพ เพื่อหาค่าการเคลื่อนที่เฉลี่ยในพื้นที่ที่กำหนดของภาพ ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดความเร็วของการไหลที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูง และสามารถให้ข้อมูลความเร็วในเชิงพื้นที่ได้ครอบคลุมมากกว่า อย่างไรก็ตาม PTV มีข้อได้เปรียบในด้านความแม่นยำของการติดตามตำแหน่งของอนุภาคแต่ละอนุภาค ทำให้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในระดับจุลภาคหรือในระบบที่มีความซับซ้อนทางเรขาคณิต ข้อจำกัดของ PTV คือประสิทธิภาพในการติดตามอนุภาคจำนวนมากในภาพเดียว ซึ่งอาจเกิดปัญหา track ambiguity หรือความสับสนในการจับคู่ตำแหน่งหากมีอนุภาคมากเกินไป ปัจจุบัน ทั้ง PIV และ PTV ต่างก็มีบทบาท

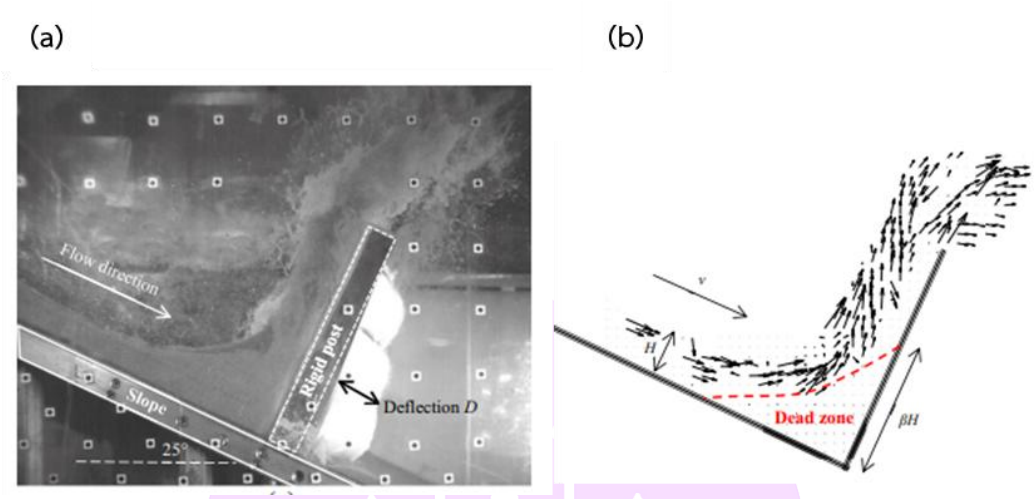
สำคัญในงานวิจัยด้านพลศาสตร์ของไหล โดยการเลือกใช้อย่างเหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของการทดลอง ระดับความละเอียดที่ต้องการ และลักษณะของการไหลในระบบที่ศึกษา

PTV มักถูกเลือกใช้ในกรณีที่ต้องการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคเฉพาะเจาะจง หรือในลักษณะการไหลที่ไม่สม่ำเสมอ เช่น การไหลของวัสดุเม็ดแห้ง การไหลในท่อขนาดเล็ก หรือการไหลในระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อน Wang และคณะ (2020) (ภาพ 23) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค PTV เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดแห้งภายในไซโล โดยพัฒนาวิธีการติดตามอนุภาคให้มีความแม่นยำมากขึ้นในสภาวะการไหลที่หนาแน่นและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ Gollin et al. (2017) ยังได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ PTV และ PIV ในการวิเคราะห์การไหลของอนุภาคแห้ง พบว่า PTV ให้ข้อมูลเชิงเส้นทางที่ละเอียดและสะท้อนความผันผวนของความเร็วได้ดีกว่า PIV ข้อมูลจาก PTV ยังสามารถนำไปใช้ตรวจสอบหรือปรับเทียบร่วมกับแบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการจำลองการไหล



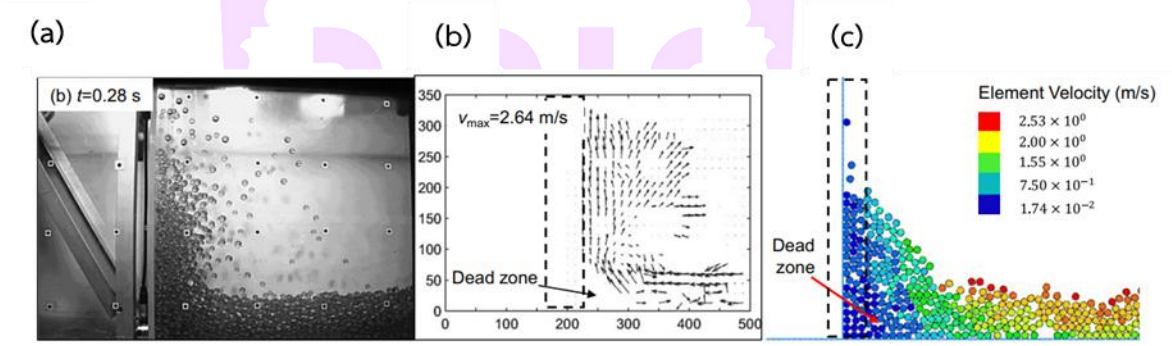
ภาพ 23 การใช้ PTV วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาค

ที่มา: Wang และคณะ, 2020



ภาพ 24 การใช้ PIV วิเคราะห์การเคลื่อนที่วัสดุดินโคลน (a) การทดลอง (b) PIV แสดงการเคลื่อนที่

ที่มา: Song และคณะ, 2021



ภาพ 25 การใช้ PIV วิเคราะห์การเคลื่อนที่วัสดุเม็ดแห้งเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข (a) การไหลของอนุภาพแก้ว (b)เทคนิค PIV ติดตามการเคลื่อนที่ (c) แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

ที่มา: Cui และคณะ, 2018

2.7 แบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete element method (DEM)

Discrete Element Method (DEM) หรือ วิธีองค์ประกอบแบบไม่ต่อเนื่อง เป็นเทคนิคเชิงตัวเลขที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ประกอบด้วยอนุภาคหรือผง โดยหลักการของ DEM คือการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละตัวในระบบ เพื่อคำนวณตำแหน่ง ความเร็ว แรงกระทำ การสัมผัส การชนกัน การหมุน และการโคจรของอนุภาคต่าง ๆ ภายในระบบในแต่ละช่วงเวลา ในกระบวนการคำนวณจะพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาควัสดุแต่ละตัว และระหว่างอนุภาควัสดุกับสิ่งแวดล้อม เช่น พื้นผิว หรืออนุภาคอื่น ๆ ที่อยู่ในระบบ การคำนวณใน DEM ใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Newton's Laws of Motion) เพื่อคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยพิจารณาแรงที่กระทำต่ออนุภาค การเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถเกิดขึ้นได้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเลื่อนไถลหรือการหมุนกลิ้ง เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่และชนกันกับวัสดุอื่น

การประยุกต์ใช้ DEM ในการจำลองการไหลหลากของดินโคลนช่วยอธิบายการเคลื่อนที่และการสัมผัสระหว่างอนุภาคแต่ละตัว โดยอาศัยกฎการเคลื่อนที่และกลศาสตร์การสัมผัสตามหลักของนิวตัน ในการคำนวณจะพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลของอนุภาค เช่น ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่น รวมถึงแรงระหว่างอนุภาค เช่น แรงเสียดทานและการยึดเกาะ (Cundall และHart, 1979; Ting, Meachum และRowell, 1995) ด้วยการพิจารณาลักษณะเฉพาะของอนุภาคแต่ละตัว DEM จึงสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนที่ซับซ้อน รวมถึงกลไกการทับถม ลักษณะการไหล และปฏิกิริยาต่อสิ่งกีดขวาง (Iverson, 1997; McDougall และHungr, 2005; Zhou และคณะ, 2016) โดยการคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกควบคุมโดยสมการของนิวตัน-ออยเลอร์ สมการพื้นฐานที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือ

$$\begin{cases} \mathrm{M}\,\ddot{q} = F^{ext} + R \\ \mathrm{J}\,\dot{\omega} + \omega + \mathrm{J}\,\omega = M^{ext} + M \end{cases} \tag{5}$$

โดยที่

$\ddot{q}$: ความเร่งเชิงเส้นของจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาค

ω : เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมของอนุภาค

M : เมทริกซ์มวลของอนุภาค (mass matrix)

$\mathbf{J}$: เมทริกซ์โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia tensor) ในกรอบเฉื่อยของวัตถุ

F^{ext} : แรงภายนอก เช่น แรงโน้มถ่วง, แรงภายนอกจากอุปกรณ์

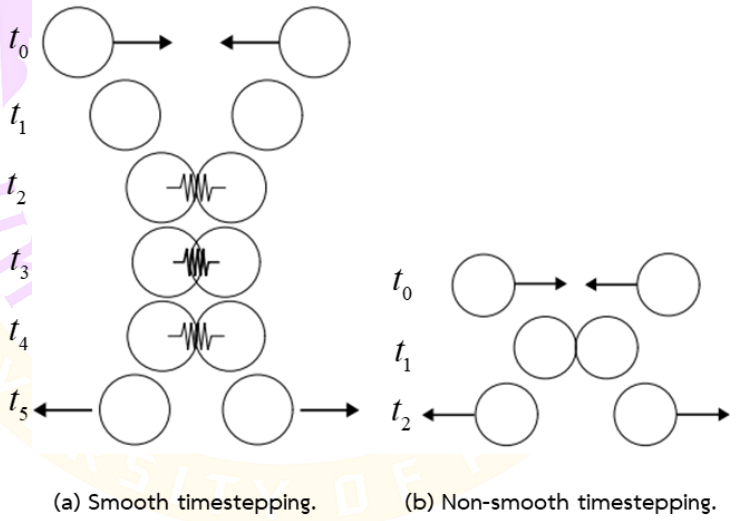
M^{ext} : โมเมนต์จากแรงภายนอก

R : แรงปฏิกิริยาสัมผัสจากอนุภาคอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง

M : โมเมนต์จากแรงสัมผัส (เช่น แรงเสียดทาน, การชน)

ซึ่งเกี่ยวข้องกับอนุพันธ์ลำดับที่สองของตัวแปรการกำหนดค่า $\ddot{q}$, และ ω ความเร็วในการหมุนของวัตถุในทิศทางเชิงมุม F^{ext} และ M^{ext} คือแรงภายนอกและโมเมนต์ผลลัพธ์ (เช่น แรงโน้มถ่วง) และ R คือแรงปฏิกิริยาสัมผัสที่กระทำโดยอนุภาคใกล้เคียง $\mathbf{M}$ และ $\mathbf{J}$ แสดงถึงเมทริกซ์ของมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยตามลำดับ ดังนั้น ความเร็วของอนุภาคคือผลรวมของความเร็วจากจุดศูนย์ถ่วง และเวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมที่แสดงในกรอบเฉื่อยหลักที่ยึดติดกับอนุภาค

วิธี Contact Dynamics (CD) หรือที่รู้จักกันในชื่อ "Non-smooth Contact Dynamics (NSCD)" เป็นอีกหนึ่งวิธีในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ที่สามารถรวมจำนวนค่าอิสระ (degrees of freedom, DOF) ในการหมุน การสัมผัส และการจัดการกับรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ ซึ่งวิธีนี้จะช่วยจำลองพฤติกรรมการสัมผัสและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระบบที่มีลักษณะเชิงซ้อน โดยพิจารณาทั้งการหมุนและการสัมผัสระหว่างอนุภาค รวมถึงระหว่างอนุภาคกับวัตถุภายนอก นอกจากวิธี CD ในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ยังมีวิธีพลศาสตร์โมเลกุล (Molecular Dynamics, MD) ซึ่งเป็นที่นิยมในการจำลองอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เช่น โมเลกุล หรือวัสดุที่มีความอ่อนตัวมากกว่า โดย MD ใช้แบบจำลอง Soft-Sphere Model (อนุภาคสามารถเสียรูปได้เล็กน้อย) ซึ่งต่างจาก CD ที่ใช้แบบจำลอง Rigid Body Model (อนุภาคไม่เสียรูป) ดังแสดงในภาพที่ 26

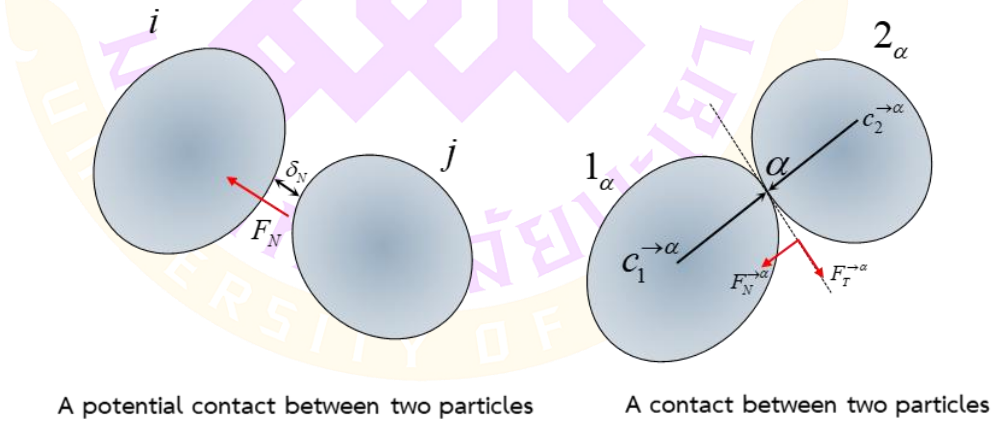


ภาพ 26 ลักษณะของการชนกันของอนุภาคสำหรับแต่ละวิธี (a) Molecular dynamics (MD) (b) Contact dynamics (CD)

วิธี CD จะเป็นการพิจารณาผลกระทบของระยะห่างและเวลาในความสัมพันธ์ของการสัมผัส (Contact law) หลักการสำคัญของวิธีการนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสองส่วน ได้แก่ กฎการสัมผัสที่แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงสัมผัสและความเร็ว และการเคลื่อนที่แบบไม่ราบรื่น (Non-smooth motion) ซึ่งรวมถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ไม่คงที่ ควบคู่ไปกับการเคลื่อนที่แบบราบเรียบที่มีแรงสถิตคงที่ สำหรับกฎการสัมผัสระหว่างอนุภาค i กับ j (Contact law) อธิบายภายใต้สองเงื่อนไขหลัก คือ 1.ตามกฎของ Signorini เงื่อนไขการสัมผัสระบุว่าอนุภาคไม่สามารถทะลุผ่านกันได้ หากไม่มีการสัมผัสกันแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากจะเป็นศูนย์ ($F_N = 0$) (ภาพที่ 27a) ในกรณีที่มีสัมผัสแบบคงที่จะมีแรงตั้งฉากเกิดขึ้น ($F_N > 0$) ในขณะที่ความเร็วสัมพัทธ์ในแนวตั้งฉากจะเป็นศูนย์ ($u_{ijN} = 0$) ส่วนกรณีที่อนุภาคเริ่มแยกออกจากกัน (สัมผัสแบบแยก) แม้ยังอยู่ในระยะสัมผัส แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากจะกลับไปเป็นศูนย์ ($F_N = 0$) ในขณะเกิดความเร็วสัมพัทธ์ในแนวตั้งฉาก ($u_{ijN} > 0$) (ภาพที่ 27b) ความสัมพันธ์เงื่อนไขตาม Signorini สามารถเขียนได้ดังนี้

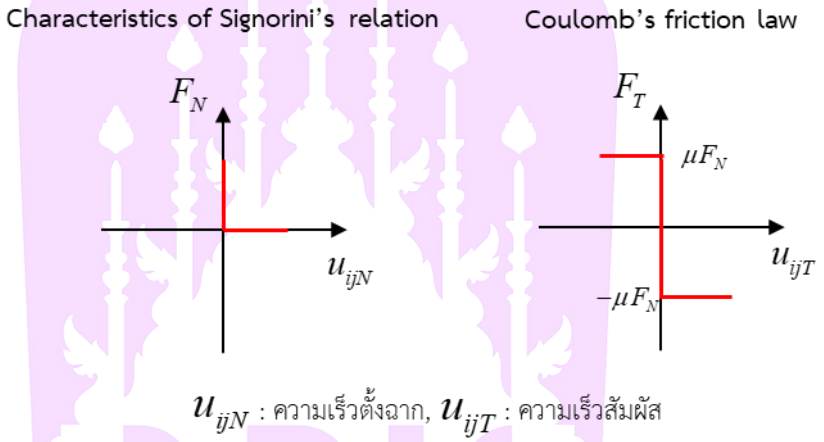
$$\begin{cases} \delta_N > 0 \Rightarrow F_N = 0 \\ \delta_N = 0 \wedge \begin{cases} u_N > 0 \Rightarrow F_N = 0 \\ u_N = 0 \Rightarrow F_N \geq 0 \end{cases} \end{cases}$$

โดยที่ δ_N คือ ระยะห่างของอนุภาค

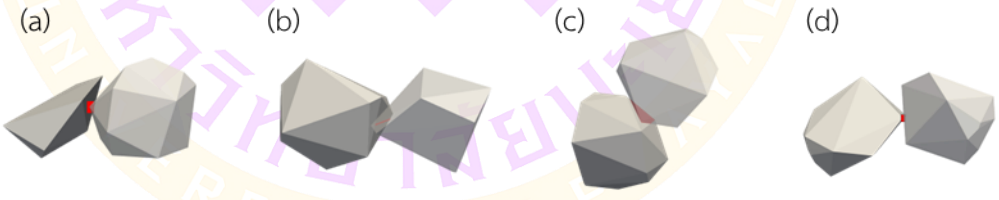


ภาพ 27 การสัมผัสของอนุภาคตามกฎของ Signorini

2.เงื่อนไขแรงสัมผัสตามกฎของ Coulomb แรงสัมผัส (F_T) ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ) และแรงตั้งฉาก (F_N) จะได้ความความสัมพันธ์ ดังนี้ $F_T = \pm \mu F_N$ (เครื่องหมายบวกหรือลบขึ้นอยู่กับทิศทางแรง) อนุภาคจะหยุดนิ่ง เมื่อแรงสัมผัสอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงตั้งฉากที่กระทำคูณกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ($u_{ijT} = 0 \Rightarrow -\mu F_N \le F_T \le \mu F_N$) ในทางกลับกันอนุภาคจะเคลื่อนที่ เมื่อแรงสัมผัสเท่ากับแรงตั้งฉากที่กระทำคูณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ($u_{ijT} \neq 0 \Rightarrow F_T = \pm \mu F_N$) แสดงดังภาพ 28 อธิบายเงื่อนไขกฎการสัมผัสของวิธี Contact Dynamics ส่วนภาพ 29 แสดงตัวอย่างการสัมผัสของรูปทรงหลายเหลี่ยมสามมิติ



ภาพ 28 เงื่อนไขกฎการสัมผัสของวิธี Contact Dynamics



ภาพ 29 ประเภทของการสัมผัสระหว่างอนุภาครูปหลายเหลี่ยม (a) จุดยอด-หน้า (b) ขอบ-หน้า (c) หน้า-หน้า (d) ขอบ-ขอบ

หมายเหตุ: สีแดงคือจุดสัมผัส

สำหรับการเคลื่อนที่แบบไม่ราบรื่น (nonsmooth dynamics) หมายถึงพฤติกรรมของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วแบบฉับพลัน หรือมีจุดเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต่อเนื่องในเชิงเวลา ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของระบบที่มีการชนและแรงเสียดทานในวัสดุที่เป็นเม็ด โดยระบบนี้ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์แบบปกติที่ใช้กับการเคลื่อนที่แบบราบรื่น (smooth motion) สมการที่ 5 ต้องใช้สมการที่มีรูปแบบไม่ต่อเนื่อง (non-smooth equations of motion) โดยอธิบายความไม่ต่อเนื่องของความเร็วและแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง สำหรับอนุภาคที่มีมวล (m) โมเมนต์ความเฉื่อย (I) พิกัดของจุดศูนย์ถ่วง ($\vec{r}$) ความเร็ว ($\dot{\vec{U}}$) พิกัดเชิงมุม (θ) และความเร็วเชิงมุม (ω) สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามาถแสดงดังสมการ

$$\begin{cases} m\dot{U} = F^{ext} + \vec{F} \\ I\dot{\omega} = M^{ext} + M \end{cases} \tag{6}$$

โดยที่ $\vec{F} = \sum_{\alpha} \vec{f}^{\alpha}$ และ $M = \sum_{\alpha} \vec{c}^{\alpha} \times \vec{f}^{\alpha}$ ส่วน $\vec{c}^{\alpha}$ คือเวกเตอร์ที่ระหว่างจุดศูนย์ถ่วงของอนุภาคและจุดสัมผัส (α) และ M^{ext} คือโมเมนต์ของแรงภายนอก

สมการพลศาสตร์สามารถเขียนในรูปแบบเมทริกซ์สำหรับชุดอนุภาค N_P โดย $i \in [1, N_P]$ แรงและโมเมนต์แรง F_x^i, F_y^i, M^i ที่กระทำต่ออนุภาค i ถูกจัดเรียงในรูปของเวกเตอร์ F ในทำนองเดียวกัน แรงรวมภายนอกที่กระทำต่ออนุภาค $F_x^{ext}, F_y^{ext}, M^{ext}$ และองค์ประกอบความเร็วอนุภาค U_x^i, U_y^i, ω^i จะถูกแทนด้วยเวกเตอร์คอลัมน์ F^{ext} และ U ตามลำดับ ในขณะที่ M จะแสดงถึงมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาคในรูปของเมทริกซ์แนวทแยง $3N_P \times 3N_P$ สมการพลศาสตร์รวมของอนุภาคเขียนได้ดังนี้

$$M(U^+ - U^-) = \delta t(F + F^{ext}) \tag{7}$$

พลศาสตร์ของอนุภาคและกฎการสัมผัสจะถูกเชื่อมด้วยสมการการถ่ายโอนความเร็วการสัมผัส โดยที่ความเร็วการสัมผัส (u) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเวกเตอร์ความเร็วของอนุภาค (U) โดยที่ G คือเมทริกซ์ที่มีข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตของอนุภาคที่มีการสัมผัสกัน ซึ่งสามารถเขียนในรูปของ

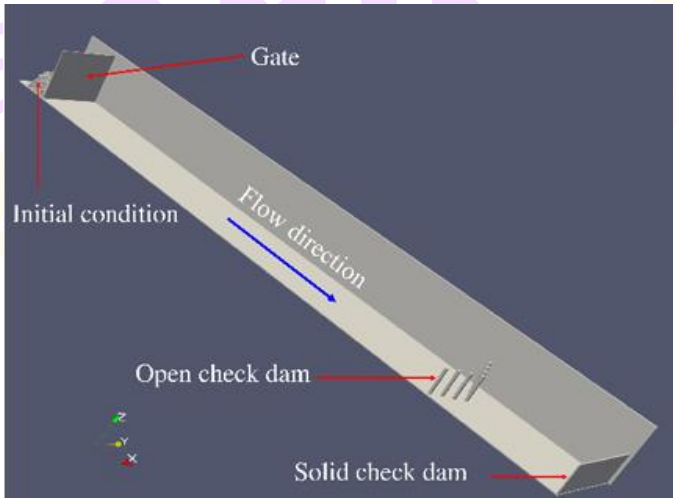
$$u = GU \tag{8}$$

ส่วนความสัมพันธ์ของแรงอนุภาคและแรงสัมผัสเขียนได้ดังนี้

$$F = Hf \tag{9}$$

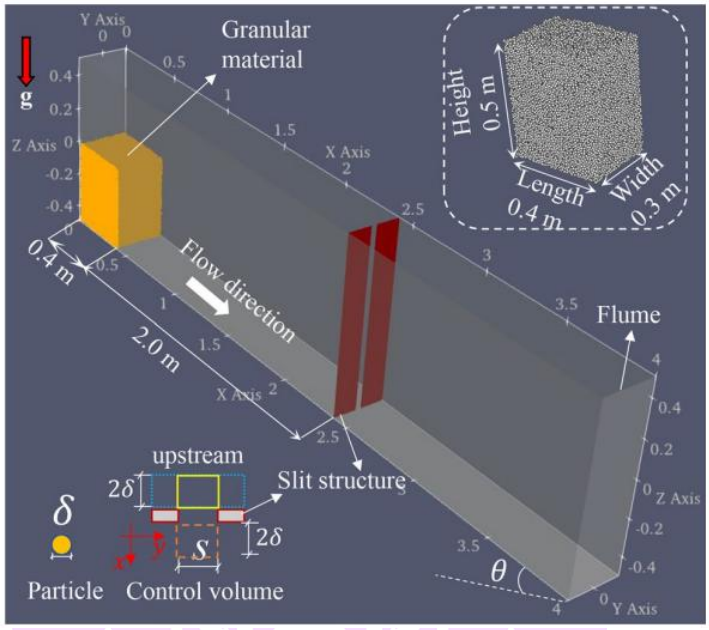
โดยที่ $H = G^T$, f : เวกเตอร์ของแรงสัมผัสทั้งหมดที่จุดสัมผัส (normal และ tangential), H : ทรานสโพสของเมทริกซ์ G , F : แรงรวมที่กระทำต่ออนุภาค (จากการสัมผัสทั้งหมด) แรงสัมผัสที่เกิดขึ้น ณ จุดสัมผัสจะถูกแจกจ่ายกลับไปยังอนุภาคที่เกี่ยวข้องผ่านเมทริกซ์ ซึ่ง H เป็น transposed geometry

DEM เป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมในการตรวจสอบพฤติกรรมการกระแทกของการไหลหลากของดินโคลนต่อโครงสร้างป้องกันเนื่องจากวิธีนี้สามารถจำลองปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างอนุภาคและโครงสร้างป้องกัน เพื่อให้เข้าใจปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงกระแทก เช่น รูปร่างและลักษณะของโครงสร้างป้องกัน คุณสมบัติการไหลของดินโคลน ภาพ 30 และ 31 แสดงการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ในการศึกษาการไหลของวัสดุเม็ดแห้งต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง นอกจากการใช้แบบจำลอง DEM จำลองโครงสร้างป้องกันแบบแข็งแล้ว ยังมีการใช้สร้างโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น เป็นการเพิ่มทางเลือกแทนสิ่งกีดขวางแบบแข็งสำหรับการลดแรงจากการไหลหลาก ของดินโคลนมากขึ้น เนื่องจากความสามารถในการดูดซับและการกระจายพลังงานกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Kwan และCheung, 2012; Wendeler และคณะ, 2018; Zhao และคณะ, 2018) ภาพ 32 การศึกษาโดยการใช้ DEM จำลองการไหลหลากของดินโคลนผ่านโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น (Li, Zhao และ Kwan, 2020)



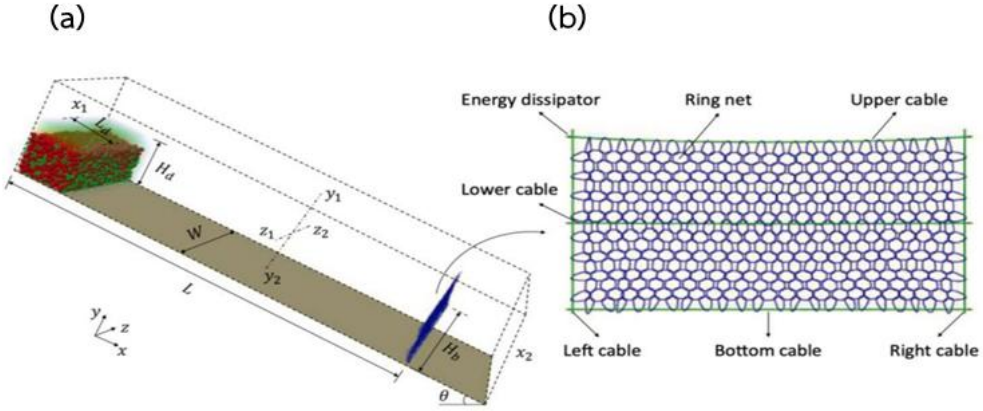
ภาพ 30 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 3 มิติ โดยโปรแกรม LMGC90

ที่มา: Thanawong และคณะ, 2024



ภาพ 31 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 3 มิติ

ที่มา: Dong และ Pu, 2024



ภาพ 32 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM 3 มิติ (a) รางทดลอง (b) โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น

ที่มา: Li และคณะ, 2020

2.8 แบบจำลองเชิงตัวเลข Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) หรือ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นวิธีการจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของของไหล (fluid) และการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ผ่านการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (Partial Differential Equations) ที่ควบคุมการไหลของของไหลและกระบวนการที่เกี่ยวข้อง โดยใช้หลักการทางฟิสิกส์และคณิตศาสตร์พื้นฐาน หลักการสำคัญของ CFD มีดังนี้ 1. การอนุรักษ์มวล (conservation of mass) คือการไหลของของไหลต้องเป็นไปตามสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{10}$$

โดยที่

ρ คือความหนาแน่นของของไหล

$\vec{u}$ คือเวกเตอร์ความเร็วของของไหล

∇ คือการกระจายออก (divergence operator)

t คือเวลา

2. การอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum) คือหลักการที่กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในของไหลเกิดจากแรงต่าง ๆ ที่กระทำกับของไหล เช่น ความดัน แรงหนืด และแรงจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ เช่น แรงโน้มถ่วง หรือแรงจากการกระทำภายนอกอื่น ๆ สมการที่ใช้ในการอธิบายการอนุรักษ์โมเมนตัมในของไหลคือสมการนาวี-สโต๊คส์ (Navier-Stokes Equations) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในของไหลที่ขึ้นอยู่กับแรงภายนอกและการไหลภายในของไหล สมการนาวี-สโต๊คส์สามารถเขียนได้ในรูปแบบทั่วไปดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = \frac{\nabla p}{\rho} + v\nabla^2 u + f_b \tag{11}$$

โดยที่:

u คือความเร็วของของไหล

t คือเวลา

ρ คือความหนาแน่นของของไหล

p คือความดัน

v คือค่าหนืด

f คือแรงภายนอก เช่น แรงโน้มถ่วง

3. การอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) คือ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานในระบบของไหลถูกถ่ายโอนและเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง เช่น จากพลังงานจลน์ (kinetic energy) เป็นพลังงานความร้อน (thermal energy) หรือจากพลังงานที่เกิดจากแรงภายนอก (external work) สมการพลังงานสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho e_{tot})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e_{tot} v) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau : \nabla v + S_E \qquad (12)$$

โดยที่:

ρ คือความหนาแน่นของของไหล

e_{tot} คือพลังงานภายในของไหลต่อหน่วยมวล (internal energy), $e_{tot} = h_{tot} - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$

h_{tot} คือเอนทาลปีรวม

λ คือการนำความร้อน (thermal conductivity)

T คืออุณหภูมิ

$\nabla \cdot (u \cdot \tau)$ คืองานจากความเค้นหนืด (viscous work)

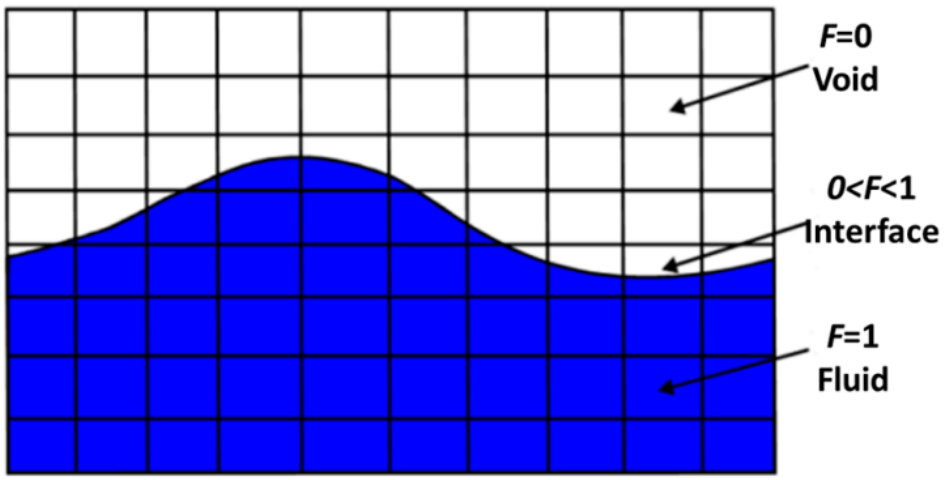
S_E คือแหล่งพลังงานภายนอก เช่น การทำความร้อนหรือปฏิกิริยาเคมี

$\tau : \nabla v$ คืองานที่เกิดจากความเค้นหนืด

การนำ CFD (Computational Fluid Dynamics) มาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำได้รับความนิยม เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่สามารถจำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของน้ำในระบบที่ซับซ้อนได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ และลดข้อจำกัดของการทดลองทางกายภาพที่ใช้ทรัพยากรจำนวนมาก เช่น การศึกษาการไหลในท่อขนาดใหญ่ การไหลในแม่น้ำ หรือแม้กระทั่งการจำลองสภาวะแวดล้อมที่มีการไหลหลายสภาวะ (multiphase flow) ซึ่งพบได้ในกรณีที่มีการไหลของน้ำร่วมกับของแข็งหรือก๊าซ (Azmi; และคณะ, 2023; Fondelli, Andreini และ Facchini, 2015; Hien และ Chien, 2021)

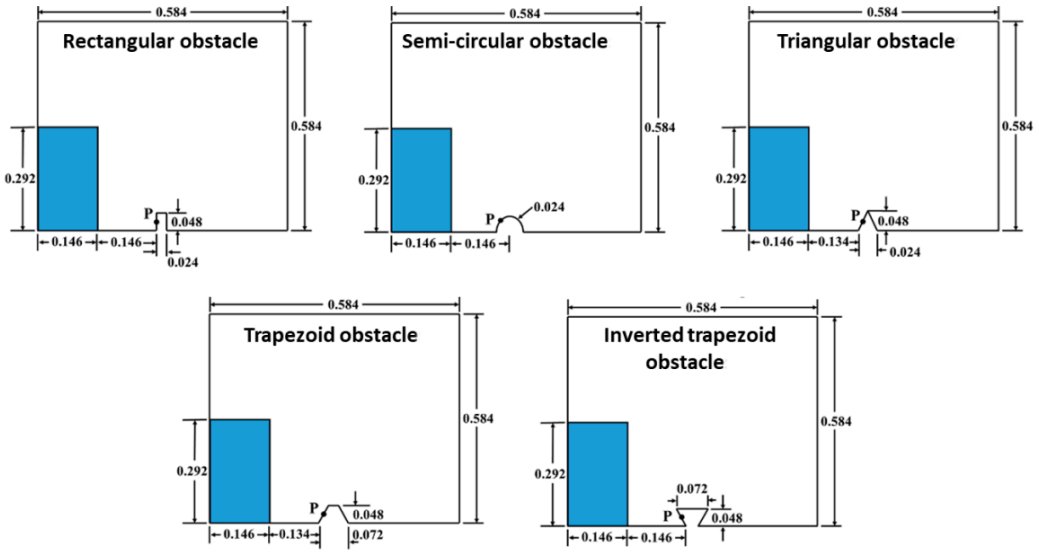
แบบจำลอง Volume of Fluid (VOF Method) เป็นหนึ่งในวิธีการหนึ่งในแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการติดตามและจับภาพการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าของของไหลที่ไม่สามารถผสมกันได้ (immiscible phases) โดยเฉพาะในการวิเคราะห์การไหลแบบสองสภาวะ (two-phase flow) หลักการของแบบจำลอง VOF คือการใช้ตัวแปร Volume Fraction (F_i) เพื่อบ่งชี้ถึงการกระจายตัวของสภาวะในแต่ละองค์ประกอบย่อยของตาข่ายการคำนวณ (computational cell, mesh) (ภาพ 33) โดย F_i มีความหมายดังนี้ $F_i = 0$ หมายถึง องค์ประกอบย่อยนั้นไม่มีสภาวะ i เลย $F_i = 1$ หมายถึง องค์ประกอบย่อยนั้นเต็มไปด้วยสภาวะ i ทั้งหมด และ $0 < F_i < 1$ หมายถึง องค์ประกอบย่อยนั้นอยู่ในตำแหน่งของผิวหน้าระหว่างสอง

สภาวะซึ่งมีการผสมกันของสภาวะ i และสภาวะอื่น การใช้ VOF Method มีบทบาทสำคัญในการติดตามผิวหน้าของของไหลที่ซับซ้อน เช่น การชนกันของคลื่นน้ำกับสิ่งกีดขวาง การไหลของน้ำในท่อเปิดที่สัมผัสกับอากาศ หรือการจำลองฟองอากาศในของไหล ทำให้แบบจำลองนี้เป็นเครื่องมือที่เหมาะสำหรับการศึกษาการไหลที่มีลักษณะซับซ้อนและการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าอย่างรุนแรง ภาพ 34 แสดงตัวอย่างการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำล้นเขื่อนที่ชนกับสิ่งกีดขวางรูปแบบต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลอง VOF ซึ่งสามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงของผิวของน้ำได้อย่างแม่นยำ จากผลการศึกษาพบว่า รูปร่างของสิ่งกีดขวางส่งผลต่อความเร็ว ความดัน และลักษณะการไหลของน้ำอย่างชัดเจน โดยเฉพาะสิ่งกีดขวางที่มีรูปร่างโค้ง ซึ่งมีแนวโน้มที่จะลดพลังงานการไหลได้ดีกว่ารูปร่างอื่น ๆ (ภาพ 35)



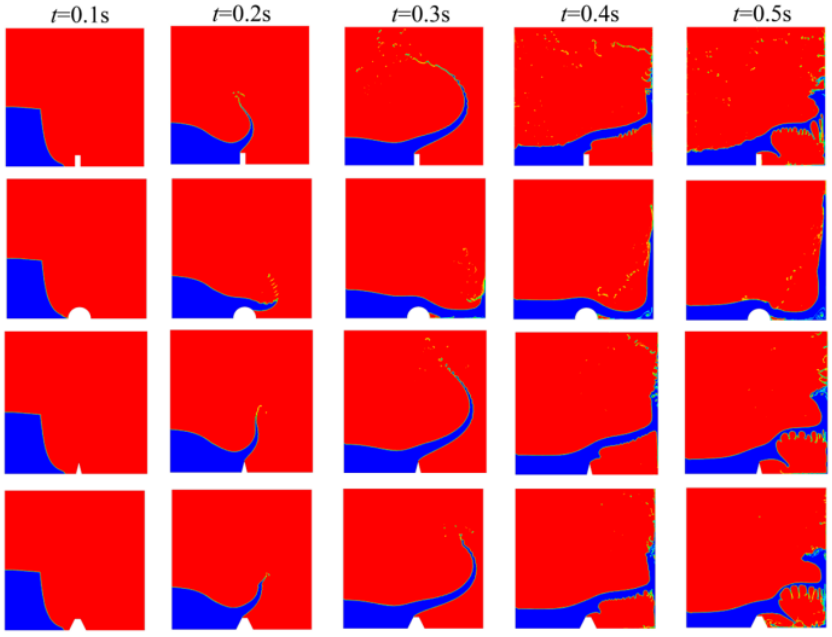
ภาพ 33 แบบจำลอง Volume of Fluid (VOF Method)

ที่มา: Jiang และคณะ, 2020



ภาพ 34 แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD 2 มิติ

ที่มา: Jiang และคณะ, 2020



ภาพ 35 แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD 2 มิติ

ที่มา: Jiang และคณะ, 2020

แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD สามารถช่วยให้นักวิจัยและวิศวกรเข้าใจพฤติกรรมการไหลของน้ำในลักษณะต่าง ๆ ได้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นการกระจายความเร็วและความดัน การเกิดการหมุนเวียน (turbulence) การเปลี่ยนแปลงของทิศทางการไหลการเกิดการแยกชั้นของการไหล (flow separation) ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงการออกแบบระบบต่าง ๆ ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ระบบการระบายน้ำ ท่อส่งน้ำ และสิ่งกีดขวางในแม่น้ำ (Blagojević และคณะ, 2024; Rajaa และ Kamel, 2020; Siva Parvathi และNeelofer, 2024) จะเห็นได้ว่าการนำแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD มาใช้ในการวิเคราะห์การไหลสามารถช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของของไหลในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.9 บทสรุป

ดินโคลนถล่มหรือดินถล่มเกิดจากการเคลื่อนตัวของดิน หิน และตะกอนบนพื้นที่ลาดชัน โดยมีสาเหตุหลักมาจากการเพิ่มขึ้นของน้ำในดินที่ทำให้แรงดันน้ำใต้ดินสูงขึ้น ส่งผลให้แรงเฉือนของมวลดินลดลง เมื่อแรงเฉือนไม่สามารถต้านทานแรงขับเคลื่อนได้ มวลดินจึงเคลื่อนตัวเป็นดินโคลนถล่มซึ่งจะนำพาวัสดุเศษซากไหลตามพื้นลาดมาด้วย ทำให้ความรุนแรงของการไหลเพิ่มขึ้น ความรุนแรงของการไหลขึ้นอยู่กับความลาดชัน และส่วนผสมของดินโคลน

การศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนสามารถทำได้ทั้งการทดลองในพื้นที่จริงและในห้องปฏิบัติการ การทดลองในพื้นที่จริงสามารถให้ข้อมูลที่มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมธรรมชาติ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของเวลา ความปลอดภัย และทรัพยากรในการดำเนินการ ในขณะที่การใช้แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการสามารถลดข้อจำกัดดังกล่าวได้ โดยสามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ดี เช่น ความลาดชัน ปริมาณน้ำ และประเภทของวัสดุทดลอง แม้ว่าแบบจำลองทางกายภาพจะมีข้อจำกัดในด้านความสมจริง เช่น ความสามารถในการจำลองปัจจัยแวดล้อมที่ซับซ้อนในธรรมชาติ แต่ก็ยังสามารถใช้ศึกษาเฉพาะตัวแปรที่สนใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถใช้แทนการทดลองในพื้นที่จริงและใช้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของดินโคลนได้ในหลายกรณี

พฤติกรรมของแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้าง โดยโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจะมีลักษณะที่ไม่สามารถเคลื่อนตัวหรือเสียรูปได้จากแรงกระทำ ซึ่งทำให้การดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกหรือการกระจายพลังงานภายในโครงสร้างทำได้ในปริมาณที่น้อย ในขณะที่โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจะมีการเคลื่อนตัวหรือยืดขยายได้ภายใต้แรงกระทำ ซึ่งทำให้โครงสร้างนี้สามารถดูดซับและกระจายพลังงานจากการกระแทกไปทั่วทั้งโครงสร้างได้ดีกว่า สำหรับทั้งโครงสร้างแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น แรงที่กระทำจะมีความสูงที่สุดในตำแหน่งต่ำสุดของโครงสร้างป้องกัน เนื่องจากเป็นจุดที่ได้รับแรงกระแทกโดยตรง

การศึกษาพฤติกรรมการไหลโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลน โดยเฉพาะในการศึกษา กลไกผลกระแทกจากการทับถม และ ผลกระทบต่อสิ่งกีดขวางทั้งแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น DEM สามารถจำลองการเคลื่อนที่และปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคของดินโคลนได้อย่างละเอียด ซึ่งช่วยให้สามารถเข้าใจและคาดการณ์พฤติกรรมการไหลได้ดียิ่งขึ้น

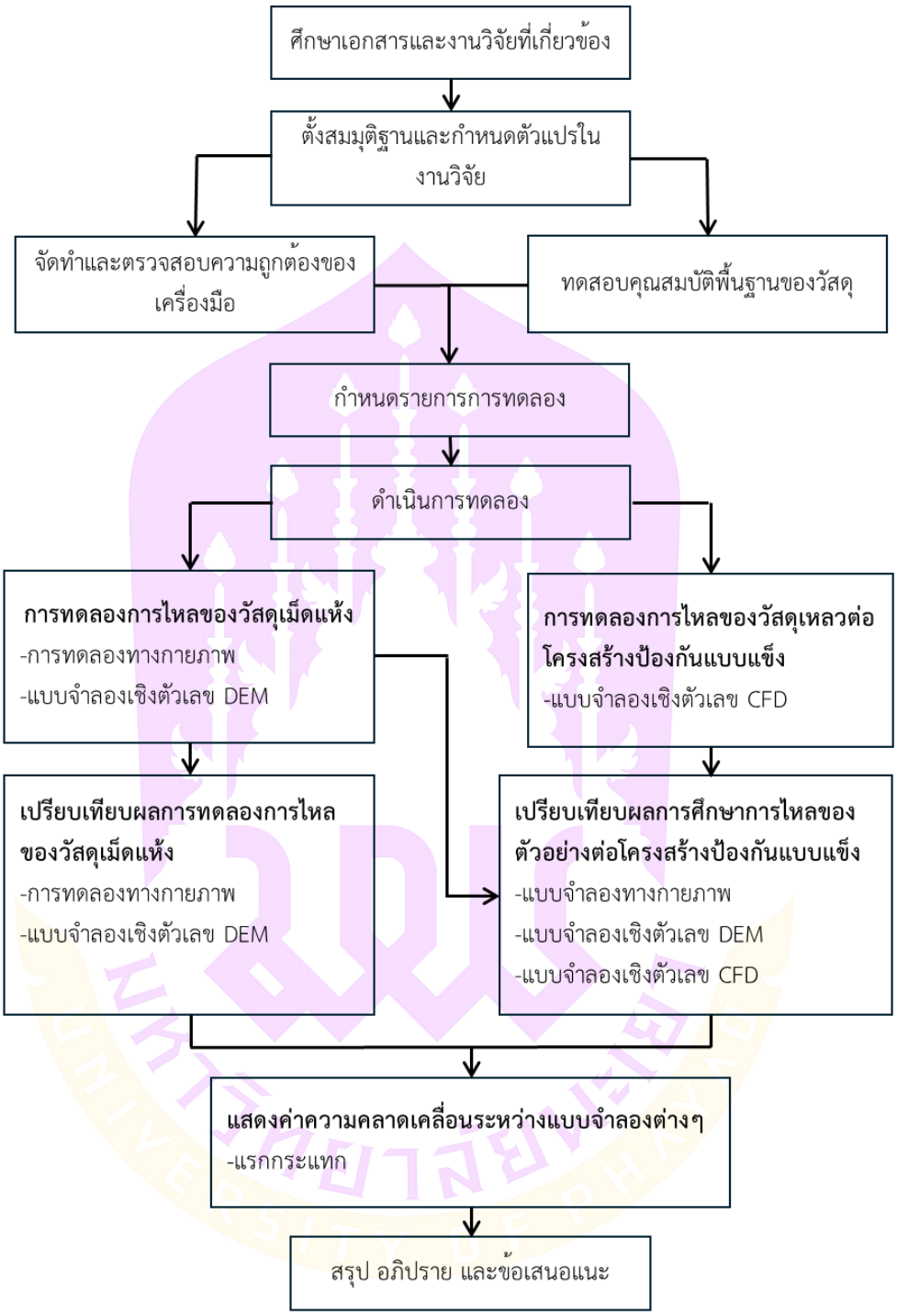
บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลน ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างของแข็งและของเหลว มีความซับซ้อนในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล เนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคของแข็งและของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมและแรงภายนอก โดยทั่วไป งานวิจัยมักใช้แบบจำลองกายภาพในห้องปฏิบัติการเพื่อสังเกตพฤติกรรมการไหลในสภาพที่ควบคุมได้ และแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อสอบเทียบความถูกต้องระหว่างแบบจำลอง (Song และคณะ, 2019; Tan และคณะ, 2020; Vicari และคณะ, 2021) อย่างไรก็ตามแบบจำลองเชิงตัวเลขยังมีข้อจำกัดในการจำลองวัสดุผสมลักษณะนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการศึกษาวัสดุของแข็งโดยใช้เม็ดแห้งเป็นวัสดุทดลอง ใช้แบบจำลองกายภาพในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (Discrete Element Method) เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง และส่วนที่สองเป็นการศึกษาวัสดุของเหลวโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (Computational Fluid Dynamics) สร้างแบบจำลองการไหลของวัสดุเหลวไหลกระทบโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง การทดลองทั้งสองส่วนช่วยให้สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งและวัสดุเหลวได้อย่างเป็นระบบ ดังภาพ 36 แสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินงานในงานวิจัย

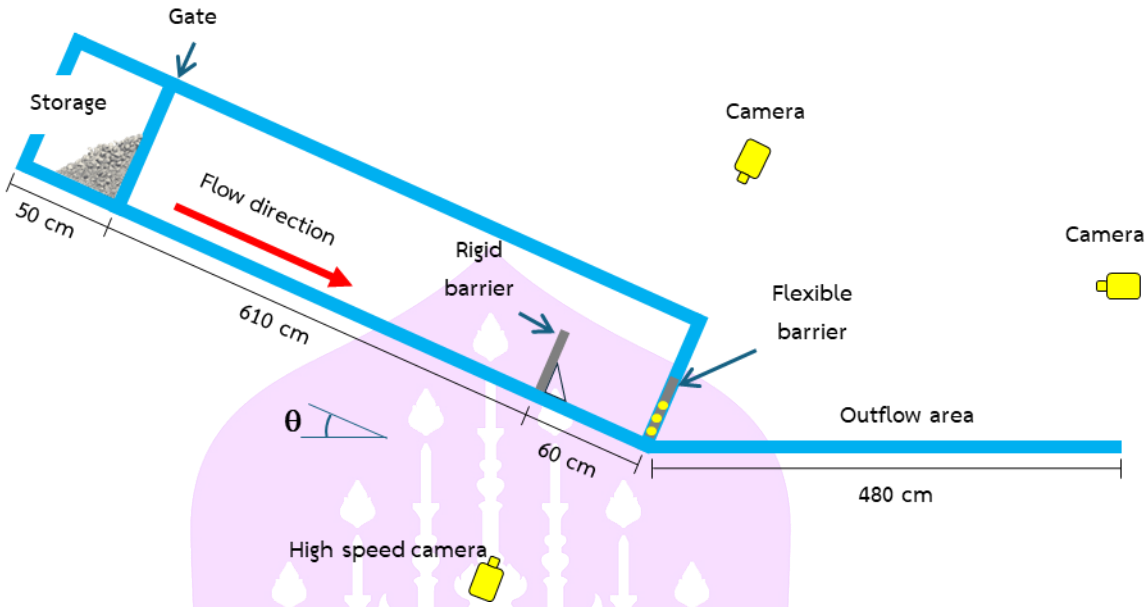
3.1 แบบจำลองทางกายภาพ

แบบจำลองทางกายภาพเป็นรางน้ำขนาด กว้าง 40 cm ความสูง 55 cm และความยาว 720 cm พื้นสร้างจากแผ่นเหล็กผิวเรียบ ผนังด้านข้างสร้างจากโครงเหล็กติดแผ่นอะคลิลิคหนา 0.6 cm ด้านบนจะเป็นถังเก็บวัสดุทดสอบ ส่วนปลายรางด้านล่างจะติดตั้งโครงสร้างป้องกัน ดังภาพที่ 37 แสดงรายละเอียดแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ ระยะทางการไหลของวัสดุจากถังเก็บถึงโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง เท่ากับ 610 cm ระยะระหว่างโครงสร้างแบบแข็งกับแบบยืดหยุ่น 60 cm ทางด้านหน้าของรางทดลองจะติดตั้งไม้กระดาน ขนาด 240 x 480 cm เพื่อศึกษาการกองของวัสดุทดลองในกรณีที่ไม่มีโครงสร้างป้องกัน ภาพ 37 และ 38 แสดงรายละเอียดและตำแหน่งอุปกรณ์ของแบบจำลองทางกายภาพ ในการทดลองแต่ละครั้งจะมีกล้องความเร็วสูงรุ่น Photron Fastcam Mini UX ที่อัตราเฟรม 1000 fps จับภาพเคลื่อนไหวด้านข้าง เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเร็วโดยการใช้เทคนิค PTV ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวัดความเร็วของอนุภาคในวัสดุทดลอง ติดตั้งกล้อง Sony A7R ด้านบนของรางทดลอง และติดตั้งกล้อง GoPro Hero11 ที่ด้านหน้าไม้กระดาน ความลาดชันการไหลถูกตั้งไว้ที่ (θ) 25 30 และ 35 องศา



ภาพ 36 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ภาพ 37 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ (a) ด้านข้าง (b) ด้านหน้า



ภาพ 38 ผังการติดตั้งอุปกรณ์ของแบบจำลองทางกายภาพ

โครงสร้างป้องกันแบบแข็งและโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น

โครงสร้างป้องกันแบบแข็งถูกออกแบบมาให้มีวัสดุที่แข็งแรงไม่เสียหายหรือเคลื่อนที่จากแรงกระแทก ประกอบจากแผ่นอลูมิเนียม 6 แผ่น กว้าง 39.6 cm สูง 30.8 cm ตัววัดแรงถูกติดตั้งหลังแผ่นอลูมิเนียม ดังแสดงในภาพ 39(a) การวัดแรงกระแทกถูกออกแบบมาสำหรับวัดแรงกระแทกในแนวตั้งฉากกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็งเท่านั้น เนื่องจากการศึกษานี้พิจารณาเฉพาะแรงในแนวตั้งฉาก (F_N) จะไม่พิจารณาแรงสัมผัส (F_T) โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ปริมาณแรงกระแทกทั้งหมดหาได้จากการรวมแรงกระแทกที่วัดจากแผ่นอลูมิเนียม 6 ตัว ดังสมการ

$$F = \sum_{i=1}^{6} F_i \tag{13}$$

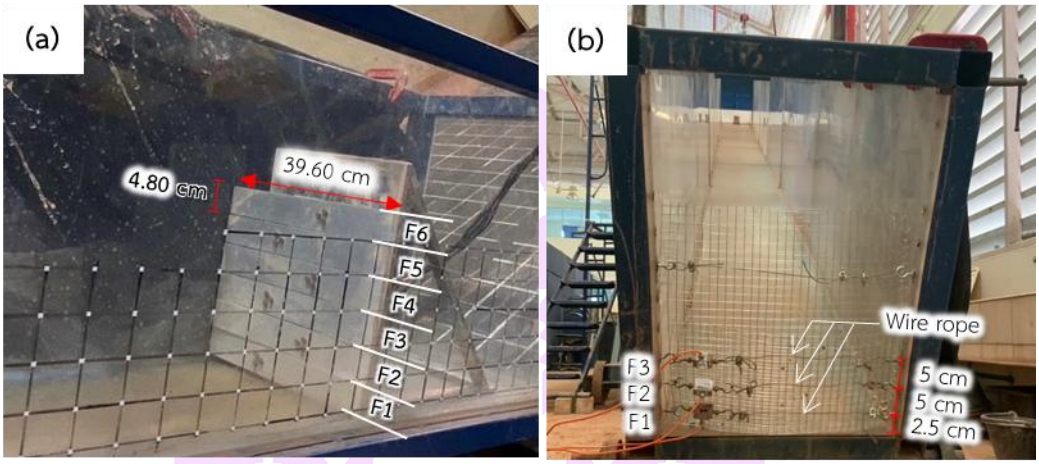
โดยที่

F คือ ปริมาณแรงกระแทกทั้งหมด (N)

F_i คือ ปริมาณแรงย่อยที่ถูกวัดโดยโหลดเซลล์แต่ละตัว ได้แก่ $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$ (N)

โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นได้รับการออกแบบมาให้สามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีแรงกระทำและมีช่องว่างให้วัสดุบางส่วนสามารถไหลผ่านได้ ซึ่งเป็นกลไกในการลดทอนแรงของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น (Brighenti และคณะ, 2021) ภาพ 39(b) แสดงลักษณะโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นและการติดตั้งตัววัดแรง การทดลองนี้ใช้ลวดตะแกรงเหล็กขนาด 0.2 cm ช่องตะแกรงมีขนาด 1.2 x 1.2 cm ความกว้างโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น 39.6 cm ร้อยด้วยเส้นลวดสลิง 3 เส้น ยึดติด

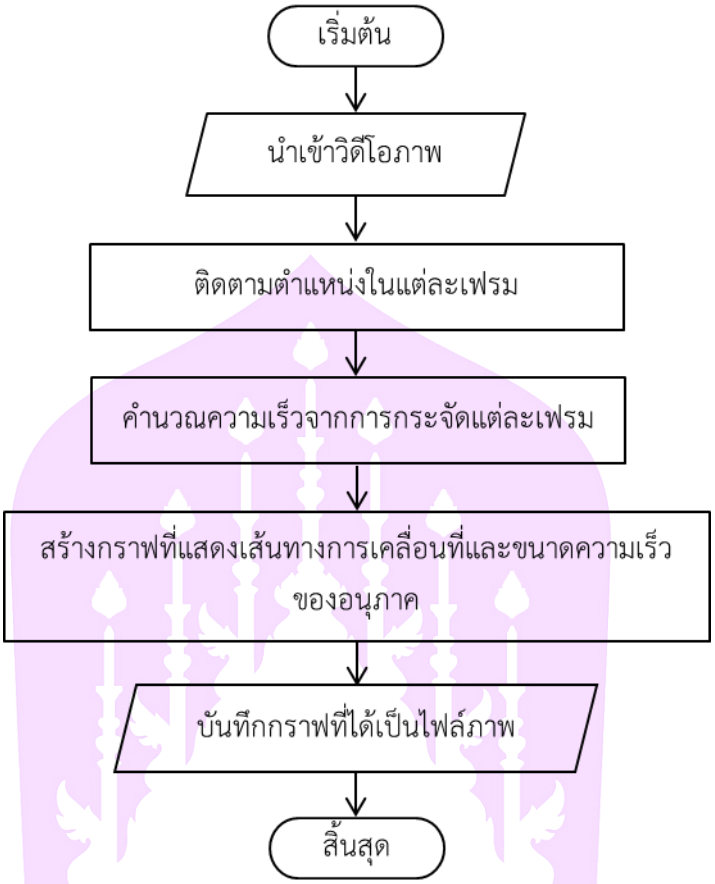
ลวดสลิงกับผนังด้านข้าง ติดตั้งสูงจากพื้นราง 2 cm ตัววัดแรง 3 ตัว ถูกติดตั้งที่ขอบด้านซ้ายของรางทดลอง อีกด้านของตัววัดแรงติดกับเส้นลวดสลิง เพื่อใช้ในการวัดแรงดึงจากการไหลของวัสดุทดลองมาชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น



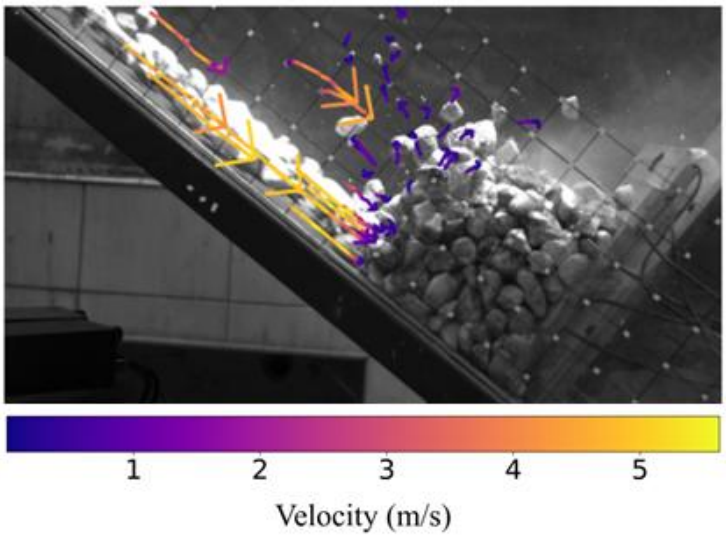
ภาพ 39 โครงสร้างป้องกันแบบจำลองทางกายภาพ (a) โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง (b) โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น

3.2 Particle Tracking Velocimetry (PTV)

ในการศึกษานี้จะใช้เทคนิค PTV เพื่อแสดงการเคลื่อนที่ของการไหล ภาพ 40 แสดงผังกระบวนการทำงานของระบบโดยใช้โค้ดภาษาคอมพิวเตอร์ (Python) ซึ่งเริ่มต้นจากการนำเข้าวิดีโอที่บันทึกการไหลของอนุภาคด้วยกล้องความเร็วสูง จากนั้นจะค้นหาอนุภาคแล้วติดตามตำแหน่งในแต่ละเฟรมไปจนจบวิดีโอ จากนั้นจะนำตำแหน่งของอนุภาคมาคำนวณความเร็วในแต่ละเฟรม ผลลัพธ์จะถูกแสดงให้เส้นถึงเส้นทางเคลื่อนที่ของอนุภาคและความเร็วของอนุภาคที่ตำแหน่งนั้น ๆ ดังภาพ 41 จะแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพื้นที่ต่าง ๆ ตามข้อมูลที่คำนวณได้ ซึ่งจะช่วยในการวิเคราะห์การไหลของอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ



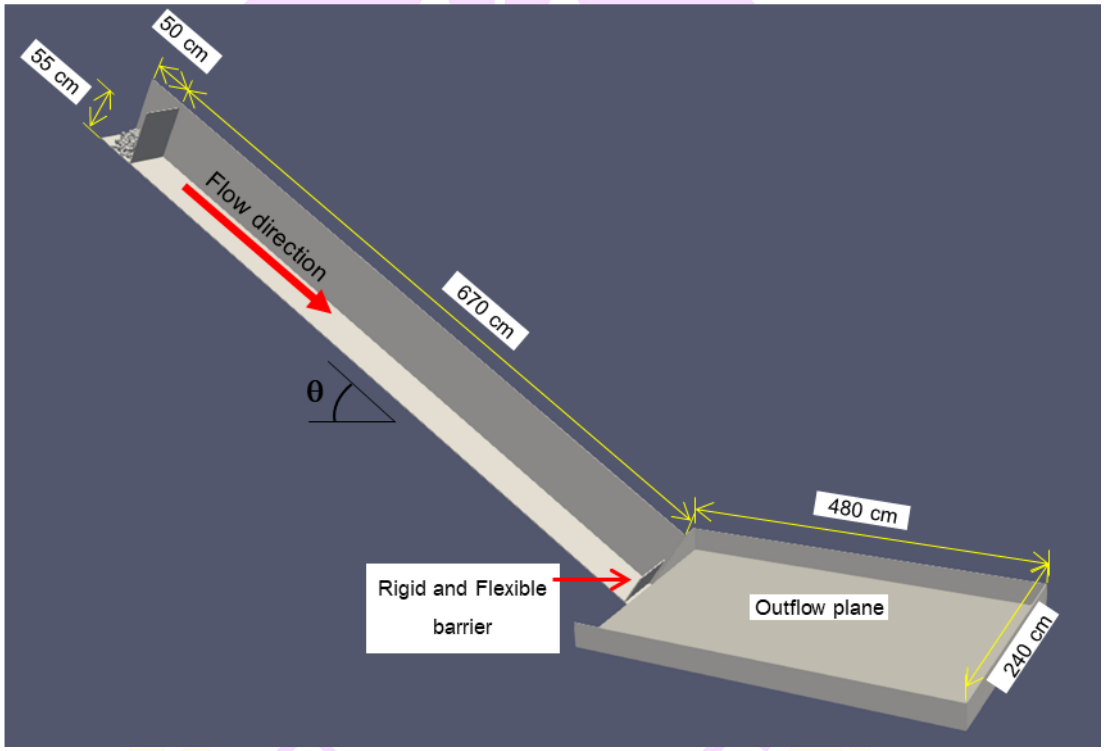
ภาพ 40 ผังการทำงานของโค้ด PTV เขียนด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ (Python)



ภาพ 41 การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการใช้เทคนิค PTV

3.3 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

ในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เพื่อสร้างแบบจำลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง และเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการกำหนดตัวแปรของทั้งสองแบบจำลองให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด ภาพ 42 แสดงรายละเอียดของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ที่สร้างด้วยโปรแกรม LMGC90 ในการคำนวณวิเคราะห์การไหล LMGC90 มีคุณสมบัติเด่นตรงที่สามารถสร้างอนุภาคที่มีรูปทรงหลายเหลี่ยม ด้วยวิธี Contact dynamics (CD) ช่วยให้สามารถจำลองแรงกระทำระหว่างอนุภาคกับอนุภาค และแรงระหว่างอนุภาคกับพื้นผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ



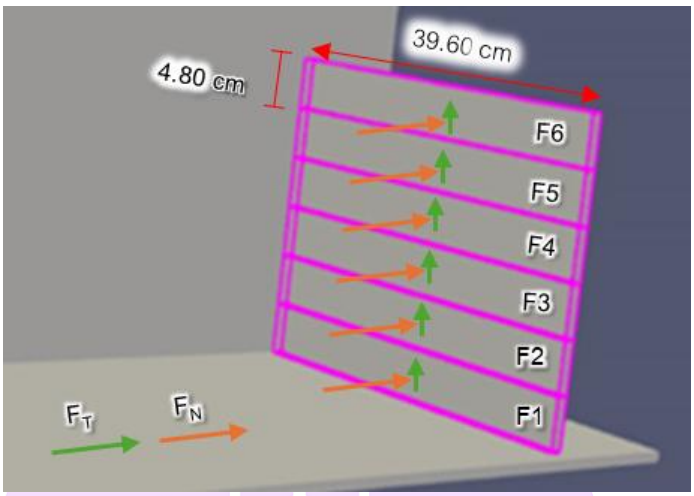
ภาพ 42 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM โดยโปรแกรม LMGC90

โครงสร้างป้องกันแบบแข็งและแบบยืดหยุ่นของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

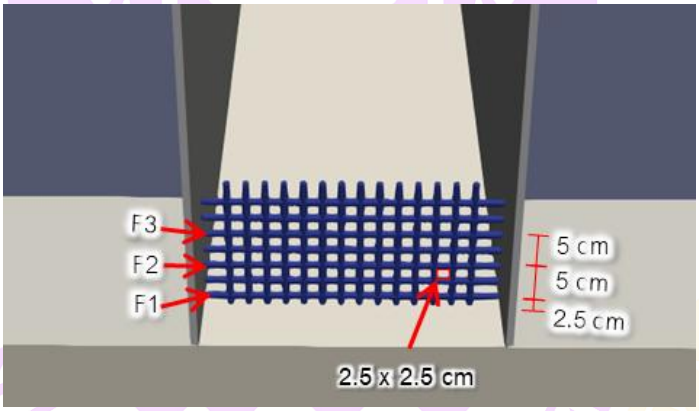
โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง มีลักษณะเป็นไปตามในแบบจำลองทางกายภาพ มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผิวเรียบ (rigid Plan) จะไม่มีการเสียรูปเนื่องจากแรงกระแทก (rigidBody) ในแบบจำลองเชิงตัวเลขมีความพิเศษตรงที่สามารถแสดงแรงสัมผัส (F_T) และแรงตั้งฉาก (F_N) กับโครงสร้างป้องกันแข็งได้ ภาพ 43 แสดงรายละเอียดโครงสร้างป้องกันแบบแข็งของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM และพฤติกรรมแรงกระแทกจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้

พิจารณาเฉพาะแรงในแนวตั้งฉากกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็งเท่านั้น เพื่อสอดคล้องกันกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ส่วนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นมีลักษณะเป็นตาข่าย เนื่องจากข้อจำกัดในการสร้างองค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นเส้น ของโปรแกรม LMGC90 จึงได้จำลองเม็ดทรงกลมเรียงต่อกันเป็นตาข่าย ใช้หลักการทับซ้อนกันของอนุภาคและกำหมดกฎการสัมผัสแบบเส้นลวดยืดหยุ่น (ELASTIC_WIRE) โดยหลักการของ ELASTIC_WIRE ใน LMGC90 อิงอยู่บนแนวคิดของการจำลองการตอบสนองแบบเส้นลวดที่ยืดหยุ่น โดยเน้นไปที่พฤติกรรมการยืดหดของการเชื่อมต่อหรือการสัมผัสระหว่างอนุภาคหรือองค์ประกอบในแบบจำลอง โดยแนวคิดหลักคือการนำแรงต้านการยืดหด (elastic resistance) มาใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่เมื่อมีแรงกระทำระหว่างองค์ประกอบ ซึ่งช่วยให้โครงสร้างสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและคืนกลับสู่สภาพเดิมหลังจากแรงหายไป จากการทดลองและพัฒนาโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นพบว่า ด้วยข้อกำจัดของวิธีสร้างจึงไม่สามารถกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นตาขายเล็กได้เหมือนการทดลองทางกายภาพ เนื่องจากการสร้างอนุภาคขนาด 2 mm เรียงต่อกันนั้น ต้องใช้อนุภาคจำนวนมาก ทำให้ใช้เวลานานในการคำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลข ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นตาข่ายเท่ากับ 2 cm ขนาดช่องรอด 2.5 x 2.5 cm ความกว้าง 39.6 cm ตำแหน่งการวัดแรงจะแสดงดังภาพ 44 ถึงแม้ว่าขนาดและช่องของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นระหว่างการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขจะไม่เท่ากัน แต่ในการศึกษานี้ต้องการแสดงพฤติกรรมของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ด้วยโปรแกรม LMGC90 ดังนั้นจะพิจารณารูปแบบแรงที่เกิดขึ้นกับการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเป็นหลัก ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ขึ้นอยู่กับค่าความแข็งของวัสดุที่นำมาสร้างโครงสร้างดังกล่าว โดยค่าความแข็ง (stiffness) เป็นตัวกำหนดระดับของการเปลี่ยนรูปภายใต้แรงกระทำ ในการศึกษานี้ต้องการสร้างโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นมาอธิบายพฤติกรรมของการไหลมากระทบกับโครงสร้างป้องกัน ดังนี้ผู้วิจัยจึงสร้างโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นโดยใช้อนุภาคทรงกลมมาเรียงต่อกันเป็นตาข่าย โดยใช้กฎการสัมผัสแบบ ELASTIC_WIRE และกำหนดค่าความแข็งของของวัสดุ (stiffness) เท่ากับ 500 นิวตันต่อเมตร



ภาพ 43 รายละเอียดโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM



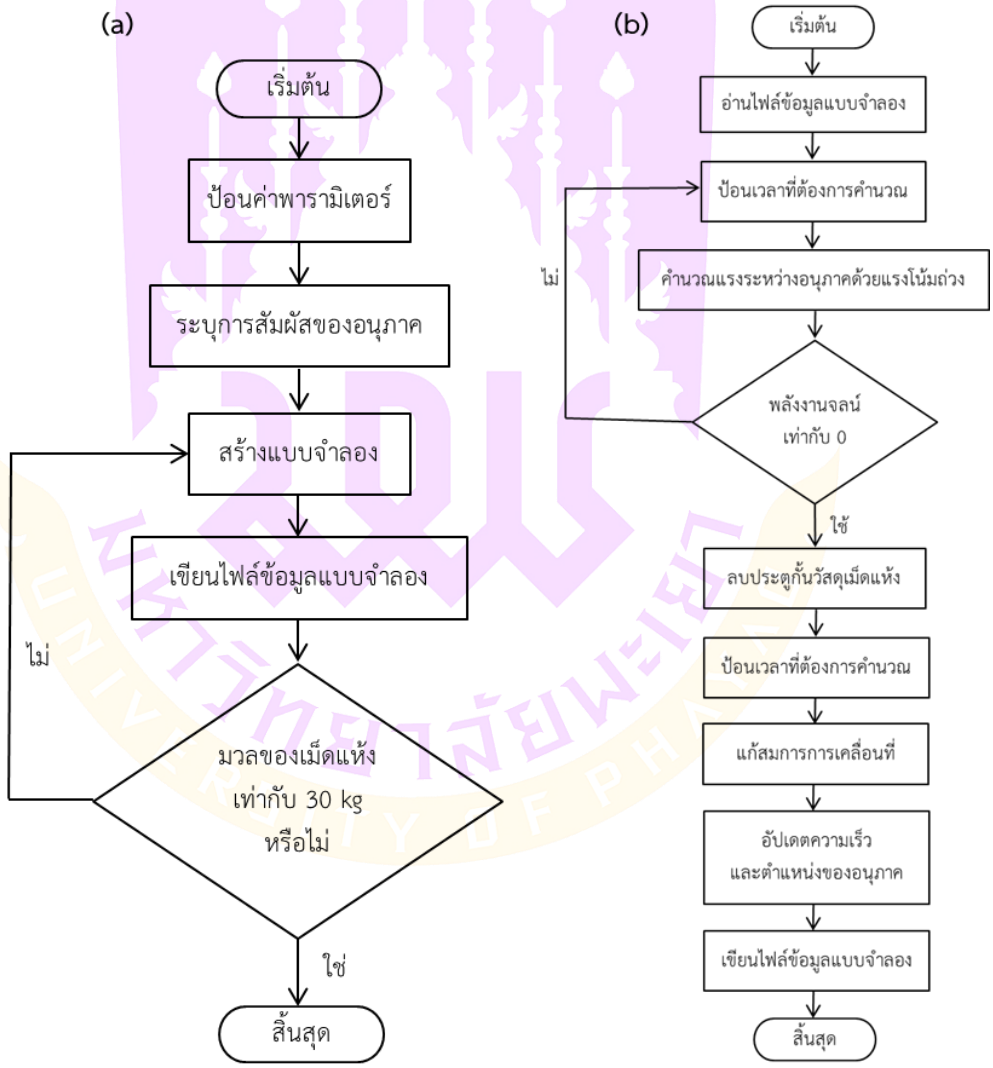
ภาพ 44 รายละเอียดโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

ขั้นตอนการดำเนินการของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM โปรแกรม LMGC90

ภาพ 45 แผนผังขั้นตอนการทำงานและการคำนวณของ LMGC90 โดยจะแยกเป็นสองส่วน ภาพ 45(a) ส่วนแรกเป็นขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและกำหนดเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการคำนวณ โดยจะเริ่มจากการป้อนค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของวัสดุในการทดลอง เมื่อเริ่มกระบวกการสร้างเม็ดแห้งจนครบตามจำนวนที่กำหนดแล้ว จึงสร้างร่องทางการไหล โครงสร้างป้องกัน และประตูกั้น ตามลำดับ เมื่อโปรแกรมสร้างครบทุกองค์ประกอบจึงจะเริ่มเขียนไฟล์ข้อมูล เพื่อใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่

ของเม็ดแห้ง เนื่องจากเป็นการสร้างขนาดรูปทรงหลายด้านแบบสุ่ม จึงยากต่อการกำหนดมวลเริ่มต้น เมื่อมวลของเม็ดแห้งไม่เท่ากับ 30 kg ที่กำหนดจะสร้างใหม่จนกว่าจะได้มวล 30 kg

ภาพ 45(b) ส่วนที่สองเป็นขั้นตอนการคำนวณการเคลื่อนที่โดยจะอ่านข้อมูลจากตัวแปรต่างๆ จากส่วนแรก จากนั้นตัวแปรควบคุมความถี่ในการคำนวณในส่วนแรกจะถูกกำหนด แล้วจึงจะเริ่มคำนวณในส่วนของการทรุดตัว สมการที่เกี่ยวข้องจะถูกคำนวณจากตำแหน่งที่สร้างจนหยุดนิ่งในถังเก็บวัสดุทดลอง จึงจะปิดประตูกั้นปล่อยให้วัสดุเม็ดแห้งไหลลงอย่างอิสระ มีแรงภายนอกกระทำเพียงแรงโน้มถ่วงเท่านั้น โปรแกรมจะคำนวณการไหลโดนใช้สมการที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้อัปเดตความเร็วและตำแหน่งของวัสดุทดลอง เมื่อเม็ดแห้งไหลจนหยุดนิ่งและครบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว โปรแกรมจะเขียนข้อมูลผลการทดลองแล้วจึงจะสิ้นสุดการทำงาน

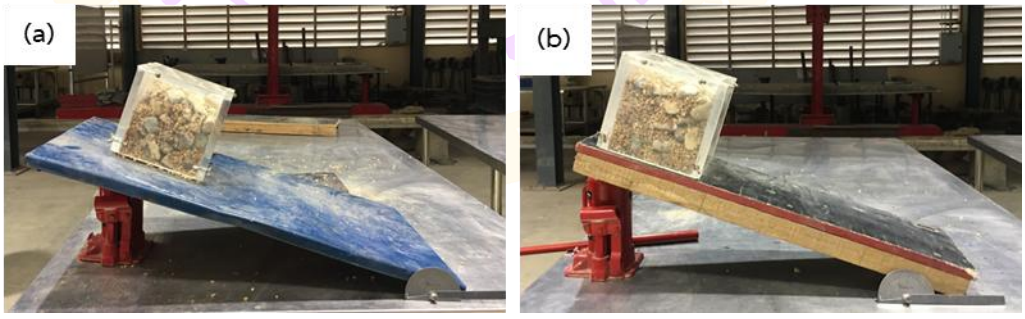


ภาพ 45 แผนผังขั้นตอนการทำงานและการคำนวณของ LMGC90

3.4 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้เลือกใช้วัสดุเม็ดแห้งแทนดินโคลน เนื่องจากสามารถควบคุมคุณสมบัติและการกระจายตัวของอนุภาคได้ง่ายกว่า อีกทั้งยังเหมาะสมต่อการทดสอบพฤติกรรมการไหลภายใต้สภาวะที่ควบคุมได้ง่าย ดินโคลนมีองค์ประกอบและขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันตามลักษณะธรณีวิทยา ซึ่งทำให้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและพฤติกรรมการไหลได้ยาก ในการศึกษานี้ จึงเลือกใช้ส่วนผสมอนุภาคขนาดต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ กรวดแม่น้ำพื้นผิวเรียบมน ขนาดผ่านตะแกรง 1 นิ้วและตกค้างบนตะแกรง 3/4 นิ้ว เพื่อแทนอนุภาคขนาดใหญ่ และกรวดละเอียด ขนาดผ่านตะแกรง 3/8 นิ้วและตกค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 แทนอนุภาคขนาดเล็ก อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษามี 2 ส่วนผสม ส่วนผสมแรกใช้กรวดแม่น้ำร้อยละ 50 ผสมกับกรวดละเอียดร้อยละ 50 และส่วนผสมที่สองใช้กรวดแม่น้ำร้อยละ 40 ผสมกับกรวดละเอียดร้อยละ 60 น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในแต่ละการทดลองคือ 30 กิโลกรัม โดยความหนาแน่นของวัสดุเม็ดแห้งเท่ากับ 2,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในกระบวนการเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการล้างวัสดุให้สะอาดเพื่อลดสิ่งปนเปื้อน จากนั้นนำไปอบให้แห้งก่อนทำการทดลอง

ค่ามุมเสียดทาน (δ) หรือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุกับพื้นผิว (μ_P) เป็นปัจจัยที่กำหนดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุและพื้นผิว ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความสามารถของวัสดุในการเคลื่อนที่หรือหยุดนิ่ง ในการจำลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งใน LMGC90 ค่าเหล่านี้จะกำหนดรูปแบบการไหลและการกระจายตัวของวัสดุในระบบจำลอง จึงได้ทำการทดลองโดยอ้างอิงจากการศึกษาการไหลของวัสดุเม็ดแห้งไหลตามพื้นเอียง (Savage และHutter, 1989; Vukelic และคณะ, 2020) ภาพ 46 แสดงตัวอย่างการทดลองหาค่ามุมเสียดทานระหว่างวัสดุทดลองกับพื้นรางและพื้นไม้ จากการทดสอบพบว่า สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานของส่วนผสมกับพื้นราง (μ_P) เท่ากับ 0.39 ในขณะที่ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานของพื้นไม้ (μ_W) เท่ากับ 0.40

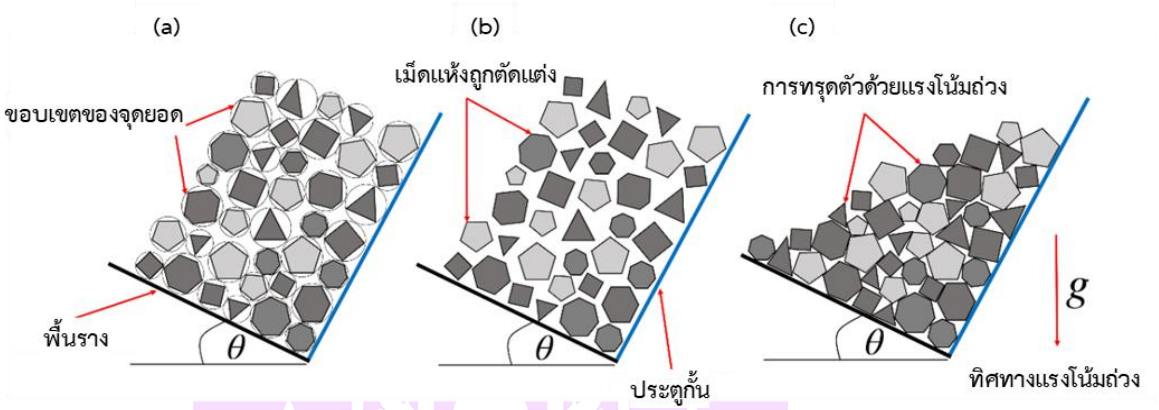


ภาพ 46 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุทดลองและพื้นผิว (a) พื้นแผ่นเหล็ก (μ_P) (b) พื้นไม้ (μ_W)

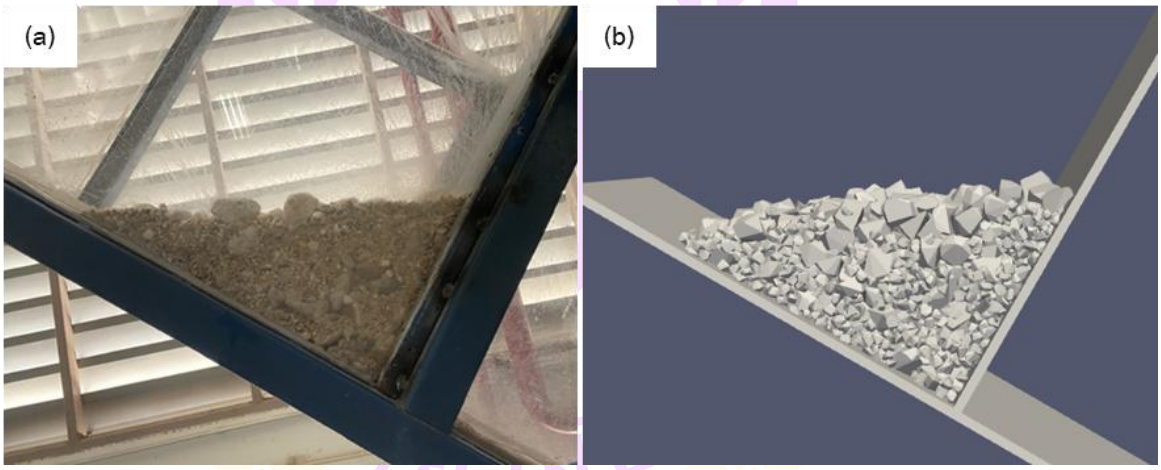
ส่วนเม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เป็นรูปทรงหลายด้าน (polyhedral) ผิวเรียบและไม่เกิดการแตกระหว่างชน สร้างเม็ดแห้งในโปรแกรม LMGC90 ด้วยวิธี CD (contact dynamics) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้คำนวณการชนและปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคที่มีรูปทรงซับซ้อนหลายด้าน โดยวิธีนี้เน้นการจำลองการสัมผัสโดยตรงระหว่างพื้นผิวของอนุภาค ทำให้สามารถคำนวณแรงและการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการชนระหว่างอนุภาคได้อย่างแม่นยำ รูปทรงหลายด้านที่สร้างนั้นจะเป็นแบบสุ่มแต่ละด้านจะไม่เท่ากันเท่ากับ 16 24 และ 32 ด้าน จำนวนจุดยอด 10 14 และ 18 ตามลำดับตามลักษณะกรวดและกรวดละเอียด (Azéma, และSaussine, 2009) เพื่อจำลองลักษณะอนุภาคในแบบจำลองเชิงตัวเลขให้ใกล้เคียงกับการทดลองทางกายภาย ใช้คำสั่ง granulo_TwoSizesVolume สำหรับการสร้างอนุภาคที่มีสองขนาดแตกต่างกัน ขนาดใหญ่แทนกรวด ขนาดเล็กแทนกรวดละเอียด อย่างไรก็ตาม เนื่องจากขนาดที่สร้างขึ้นในแต่ละกลุ่มมีขนาดค่อนข้างเท่ากัน ต่างจากอนุภาคทางกายภาพที่มีการกระจายขนาดหลากหลาย จึงกำหนดให้ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางที่ร้อยละ 50 (D_{50}) ของขนาดอนุภาคเป็นเกณฑ์ โดยกำหนดขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ (D_{max}) เท่ากับ 40 mm และอนุภาคขนาดเล็ก (D_{min}) เท่ากับ 10 mm ทั้งนี้ ส่วนผสมของอนุภาคในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ถูกกำหนดให้สอดคล้องกับการทดลองทางกายภาพ ส่วนผสมอนุภาคขนาดใหญ่ร้อยละ 50 กับอนุภาคขนาดเล็กร้อยละ 50 และส่วนผสมอนุภาคขนาดใหญ่ร้อยละ 40 กับอนุภาคขนาดเล็กร้อยละ 60 ตาราง 4 ตารางแสดงตัวแปและพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM อัตราส่วนผสมของวัสดุและเงื่อนไขของการศึกษาแสดงในตาราง 5 ความหมายของรหัสการทดลองเป็นดังนี้ ยกตัวอย่าง F35_40-60 อักษรตัวแรก F หมายถึงรูปแบบการทดลองเป็นโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น โดยที่รูปแบบการทดลองมี 3 รูปแบบ คือ 1. การไหลของวัสดุโดยไม่มีโครงสร้างป้องกัน กำหนดรหัสเป็น N (none) 2. การไหลของวัสดุชนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง กำหนดรหัสเป็น R (rigid) และ 3. การไหลของวัสดุชนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นกำหนดรหัสเป็น F (flexible) ตัวเลข 35 หมายถึงมุมความลาดชันการไหลที่ 35 องศา และเลข 40-60 หมายถึง อัตราส่วนผสมกรวดแม่น้ำร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60

กระบวนการสร้างเม็ดแห้งใน LMGC90 ใช้พื้นที่ในกล่องสามมิติ (Box3D) โดยมีขั้นตอนดังนี้ (ภาพ 47a) เริ่มต้นด้วยการสร้างเม็ดทรงกลมที่มีรัศมีตามที่กำหนด (D_{max}, D_{min}) (ภาพ 47b) ทำการสุ่มจุดยอดตามจำนวนด้านของเม็ด จากนั้นแปลงทรงกลมให้เป็นรูปหลายเหลี่ยม โดยการตัดที่ขอบจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ด (Binaree, 2021; Sánchez และคณะ, 2021) (ภาพ 47c) ในขั้นตอนถัดไป เม็ดแห้งจะตกลงตามแรงโน้มถ่วงภายในพื้นที่เก็บตัวอย่าง โดยใช้เวลาทรุดตัว 3 วินาที จนกระทั่งเม็ดแห้งชิดกันและหยุดการเคลื่อนที่ จากนั้นจึงทำการลบประตูกั้นเพื่อให้เม็ดแห้งเริ่มเคลื่อนที่จากสถานะคงที่ ในการศึกษานี้ใช้การพังทลายของเขื่อนในอุดมคติ การเตรียมตัวอย่างในการศึกษานี้จะเตรียมในลักษณะทรงสามเหลี่ยม ขนาดกว้าง 35 cm สูง 26 cm และลึก 40 cm ดัง

ภาพ 48 ที่เลือกเตรียมตัวอย่างในรูปทรงสามเหลี่ยมนั้น เนื่องจากในขั้นตอนสร้างเม็ดและปล่อยตกตามแรงโน้มถ่วงของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM วัสดุจะจัดเรียงตัวอยู่ในลักษณะเป็นทรงสามเหลี่ยม (ภาพที่ 47c)



ภาพ 47 รูปแบบการสร้างเม็ดแห้งและการเตรียมตัวอย่างเม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM



ภาพ 48 การเตรียมตัวอย่างเม็ดแห้งก่อนการทดลอง

ตาราง 4 **รายละเอียดพารามิเตอร์แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM**

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
เส้นผ่านศูนย์กลางของหินขนาดใหญ่, D_{max}	40	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางของหินขนาดเล็ก, D_{min}	10	mm
ความหนาแน่นของอนุภาค	2,650	kg/m^3
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเม็ดแห้ง	0.89	
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นราง	0.39	
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นไม้	0.40	
สัมประสิทธิ์การคืนตัว,e	0	
น้ำหนักวัสดุทดสอบ	30	kg

ตาราง 5 **รายละเอียดอัตราส่วนผสมของวัสดุและเงื่อนไขของการศึกษา**

ความลาดชันการไหล, θ (องศา)	โครงสร้างป้องกัน	อัตราส่วนผสม กรวดแม่น้ำ: กรวดละเอียด	รหัสการทดลอง
25	แบบแข็ง	50 : 50	R25_50-50
	แบบแข็ง	40 : 60	R25_40-60
	แบบยืดหยุ่น	50 : 50	F25_50-50
	แบบยืดหยุ่น	40 : 60	F25_40-60
	ไม่มีโครงสร้าง	50 : 50	N25_50-50
	ไม่มีโครงสร้าง	40 : 60	N25_40-60
30	แบบแข็ง	50 : 50	R30_50-50
	แบบแข็ง	40 : 60	R30_40-60
	แบบยืดหยุ่น	50 : 50	F30_50-50
	แบบยืดหยุ่น	40 : 60	F30_40-60
	ไม่มีโครงสร้าง	50 : 50	N30_50-50
	ไม่มีโครงสร้าง	40 : 60	N30_40-60

ตาราง 5 (ต่อ)

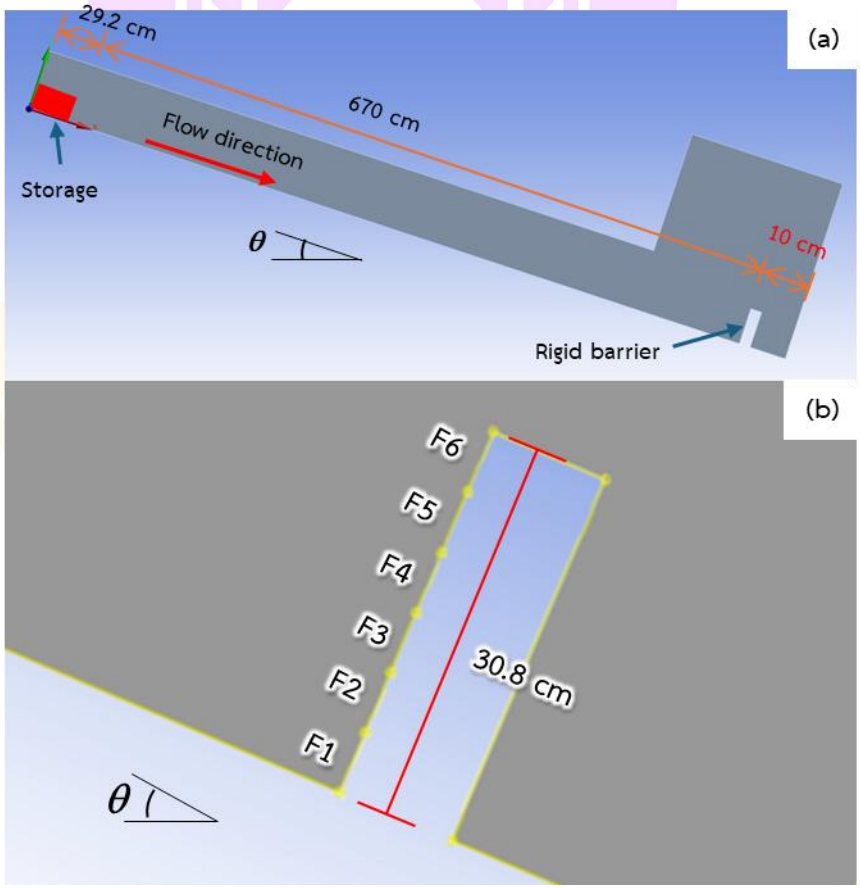
ความลาดชันการไหล, θ (องศา)	โครงสร้างป้องกัน	อัตราส่วนผสม กรวดแม่น้ำ: กรวดละเอียด	รหัสการทดลอง
35	แบบแข็ง	50 : 50	R35_50-50
	แบบแข็ง	40 : 60	R35_40-60
	แบบยืดหยุ่น	50 : 50	F35_50-50
	แบบยืดหยุ่น	40 : 60	F35_40-60
	ไม่มีโครงสร้าง	50 : 50	N35_50-50
	ไม่มีโครงสร้าง	40 : 60	N35_40-60

3.5 แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (Computational Fluid Dynamics)

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการจำลองการไหลของวัสดุที่มีลักษณะเป็นของเหลวโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข Computational Fluid Dynamics (CFD) เนื่องจากของเหลวในส่วนผสมดินโคลนมีพฤติกรรมและคุณสมบัติที่ซับซ้อน อันได้แก่ ความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงเฉือน (non-newtonian fluid) และการรวมตัวกันของอนุภาคแขวนลอย (particle aggregation) ซึ่งส่งผลต่อการไหลและแรงกระทำในลักษณะที่ไม่สมดุล (Koh และSchwarz, 2006) นอกจากนี้ คุณสมบัติที่หลากหลายของดินโคลน เช่น ความหนาแน่นที่ไม่คงที่ เนื่องจากมีอนุภาคของแข็งผสมอยู่ในปริมาณมาก และพฤติกรรมการไหลที่ไม่สามารถใช้สมมติฐานแบบของไหลเชิงเส้น (linear fluid) ได้ ในการจำลองของเหลวที่มีคุณสมบัติพิเศษและพฤติกรรมดังกล่าว จึงต้องอาศัยสมการที่ซับซ้อน ทำให้การจำลองการไหลด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ต้องใช้ข้อมูลที่มีรายละเอียดสูง การตั้งค่าขอบเขตที่เกี่ยวข้อง และการเลือกเงื่อนไขเริ่มต้น เพื่อให้ผลการจำลองสะท้อนพฤติกรรมของระบบในความเป็นจริงได้อย่างถูกต้อง ส่งผลให้การวิเคราะห์ลักษณะการไหลมีข้อจำกัดและใช้ระยะเวลาในการประมวลผลนาน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้น้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สามารถระบุได้ เช่น ความหนืดและความหนาแน่นที่คงที่ รวมถึงพฤติกรรมการไหลที่สอดคล้องกับของไหลเชิงเส้น (newtonian fluid) มาใช้เป็นตัวอย่างทดลอง เพื่อลดความซับซ้อนในการตั้งค่าแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD

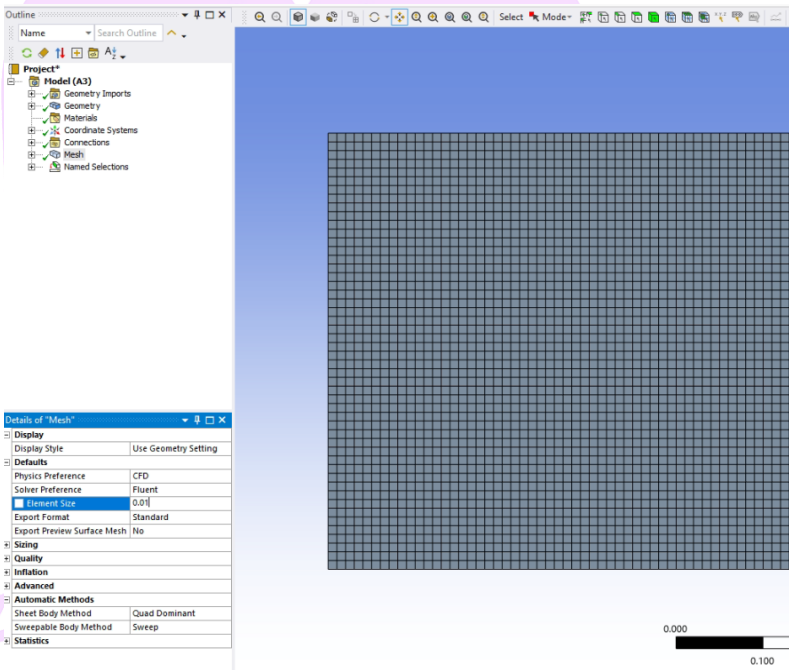
การตั้งค่าแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD

ในการศึกษาการไหลในร่องทางการไหลที่มีโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ใช้ โปรแกรม ANSYS Fluent 2D เพื่อจำลองการไหลแบบ multiphase (volume of fluid, VOF) โดยทำการจำลองการไหลในร่องทางเปิด (open channel flow) ที่มีสองสภาวะ ได้แก่ น้ำและอากาศ เพื่อศึกษาผลกระทบของการไหลต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง เนื่องจากจะนำผลการศึกษาไปเปรียบเทียบกับการทดลองกับการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลย DEM ได้จึงกำหนดให้ระยะทางการไหลและตำแหน่งของโครงสร้างป้องกันแบบแข็งที่เท่ากัน ส่วนความสูงเนื่องจากเมื่อวัสดุเหลวชนสิ่งกีดขวางจากเกิดการสะท้อนขึ้นด้านบน จึงต้องเพิ่มขนาดความสูงเพื่อจะเห็นพฤติกรรมดังกล่าว ภาพที่ 49 แสดงรายละเอียดของร่องทางการไหลของแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ยาว 709.2 cm ระยะการไหลของตัวอย่างถึงโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง 670 cm โครงสร้างป้องกันแบบแข็งสูง 30.8 cm แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD มุมความลาดชันการไหลถูกตั้งไว้ที่ (θ) 25 30 และ 35 องศา



ภาพ 49 แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (a) รายละเอียดร่องทางการไหล (b) รายละเอียดจุดวัดแรงกระแทก

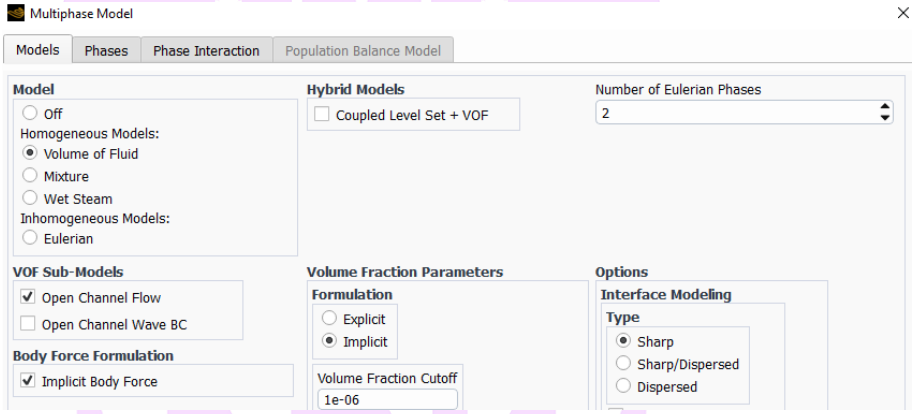
การสร้างตาข่าย (mesh) ในโปรแกรม ANSYS Fluent เป็นขั้นตอนสำคัญที่ใช้ในการแบ่งพื้นที่ของการจำลอง (computational domain) ให้เป็นเซลล์หรือโหนดเล็ก ๆ เพื่อให้สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ได้ละเอียดและแม่นยำ การเลือกชนิดของ mesh และการตั้งค่าความละเอียดของ mesh เป็นสิ่งที่มีผลโดยตรงต่อความถูกต้องและประสิทธิภาพในการคำนวณในโปรแกรม CFD โดยจะตั้งค่าขนาดและรูปแบบ Mesh ให้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 1x1 cm เท่ากันตลอดแบบจำลอง (ภาพ 50) การกำหนดขนาดของ Mesh ให้เท่ากันนั้นจะทำให้การคำนวณที่เสถียรและมีประสิทธิภาพ



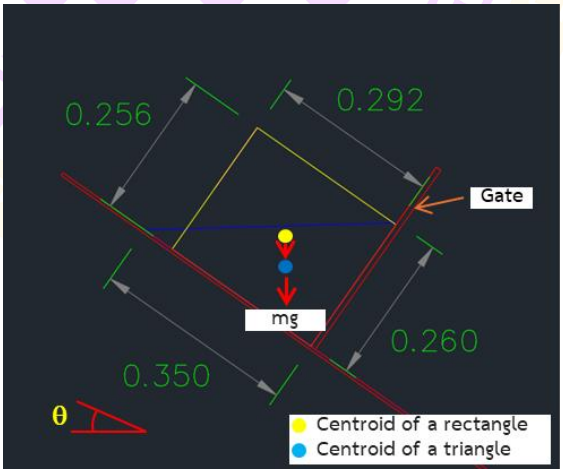
ภาพ 50 การกำหนด Mesh แบบจำลอง CFD

ในขั้นตอนการตั้งค่าแบบจำลอง CFD ใช้ แบบจำลองการไหลแบบหลายสภาวะ (Multiphase, VOF Model) ซึ่งเป็นการจำลองการไหลของของเหลวหลายชนิดที่มีการแยกระหว่างสถานะต่าง ๆ ที่ไม่สามารถผสมกันได้ โดยจะกำหนดเป็นน้ำและอากาศ ใช้เทคนิค Volume of Fluid (VOF) เพื่อคำนวณและติดตามการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งขอบเขตระหว่างสถานะต่าง ๆ ของของเหลว กำหนดการไหลเป็นการไหลในช่องเปิด (open channel flow) ดังภาพ 51 แสดงการตั้งค่าแบบจำลองการไหลหลายสภาวะ คุณสมบัติของน้ำและอากาศที่ใช้ในแบบจำลอง แสดงในตารางที่ 7 ส่วนสัมประสิทธิ์แรงตึงผิวเท่ากับ 0.072 ในการเตรียมตัวอย่างเนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองทำให้

ไม่สามารถจัดเรียงในรูปสามเหลี่ยมเหมือนการทดลองทางกายภาพได้ จึงได้กำหนดให้จัดในรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดหาได้จาก น้ำหนักเท่ากับผลคูณของหน่วยน้ำหนักกับปริมาตร ($W = \gamma_w v$) เมื่อน้ำหนักตัวอย่าง 30 kg หน่วยน้ำหนักของน้ำ (γ_w) เท่ากับ 988.2 kg/m^3 ปริมาตรจะเท่ากับพื้นที่คูณกับความลึก (d= 40 cm) เมื่อแก้สมการหาพื้นที่จะได้เท่ากับ 0.07513 cm^2 เนื่องจากลักษณะตัวอย่างก่อนปล่อยไหลไม่เท่ากัน (สี่เหลี่ยมกับสามเหลี่ยม) จึงให้ทั้งสองตัวอย่างมีจุดศูนย์กลางในแนวตั้งเดียวกัน ดังภาพที่ 52 ดังนั้นจะได้ขนาดของตัวอย่างในแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD กว้าง 29.2 cm สูง 25.6 cm ตาราง 6 แสดงความหมายของรหัสการทดลองในแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD จะมีทั้งหมด 3 การทดลอง คือที่ความชัดการไหล 25 30 และ 35 องศา



ภาพ 51 รายละเอียดการตั้งค่าแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD



ภาพ 52 การกำหนดเตรียมตัวอย่างแบบจำลอง CFD

ตาราง 6 รายละเอียดรหัสการทดลองแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD

ความลาดชันการไหล, θ(องศา)	รหัสการทดลอง	ความหมาย
25	CFD_25	แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ที่ความลาดชัน 25 องศา
30	CFD_30	แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ที่ความลาดชัน 30 องศา
35	CFD_35	แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ที่ความลาดชัน 35 องศา

ตาราง 7 คุณสมบัติของน้ำและอากาศที่ใช้ในแบบจำลอง CFD

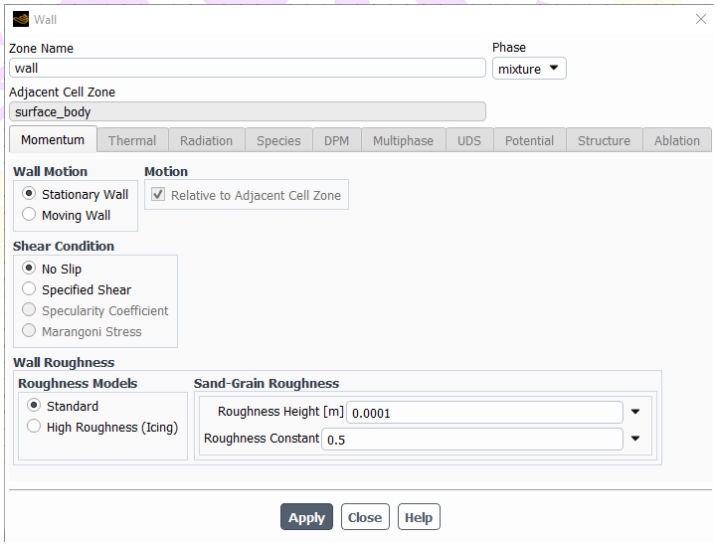
Property	Unit	Water	Air
ความหนาแน่น (Density)	kg/m^3	998.2	1.225
ความหนืด (Viscosity)	kg/m·s	0.001003	1.79E-05
ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (Cp, Specific Heat)	J/kg·K	4182	1006.43
ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)	W/(m·K)	0.6	0.0242
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)	kg/kmol	18.0152	28.966
เอนโทรปีของสถานะมาตรฐาน (Standard State Entropy)	J/(kgmol)	-2.86E+08	-
อุณหภูมิอ้างอิง (Reference Temperature)	K	298	298.15
พารามิเตอร์พลังงานของ Lennard-Jones (L-J Energy Parameter)	K	100	78.6
จุดเดือด (Boiling Point)	K	373	-
Volatile Fraction	%	100	-
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของส่วนผสมสองชนิด (Binary Diffusivity)	m^2/s	Film-averaged	-
ความดันไออิ่มตัว (Saturation Vapor Pressure)	Pa	Piecewise-linear	-

ตารางที่ 7 (ต่อ)

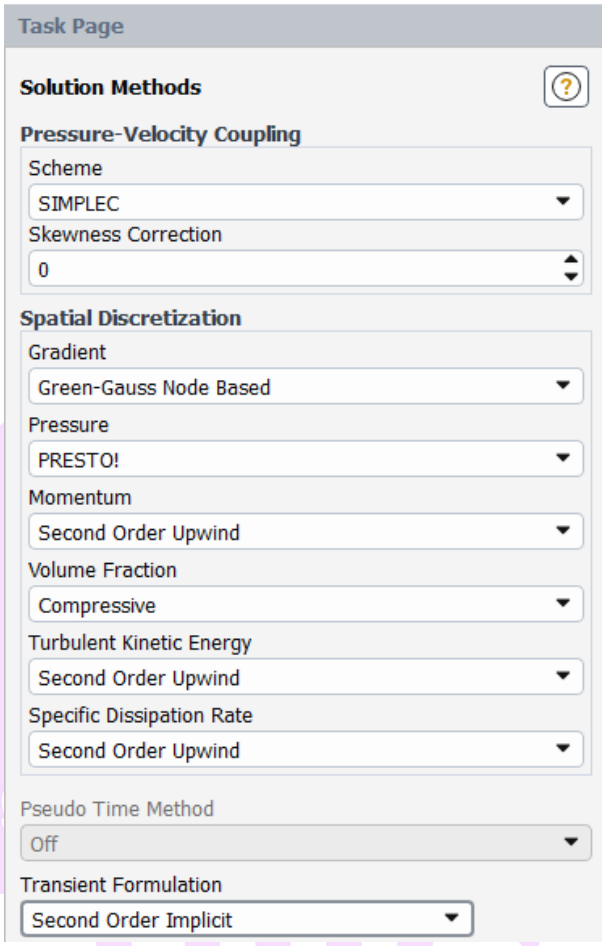
Property	Unit	Water	Air
แรงตึงผิวของหยดของเหลว (Droplet Surface Tension)	N/m	0.0719404	-
อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)	K	-	132.3
ความดันวิกฤต (Critical Pressure)	Pa	-	3758000

ในการตั้งค่าขอบเขตแบบจำลองเชิงตัวเลข (boundary conditions) เนื่องจากแบบจำลองเป็นการไหลในรางจากการเตรียมตัวอย่าง จึงไม่มีน้ำไหลเข้ามาในระบบ (inlet) สำหรับจุดไหลออก (outlet) เนื่องจากเป็นการไหลในช่องเปิดจึงกำหนดให้ความดันสามารถไหลออกได้ (pressure outlet) ในการกำหนดคุณสมบัติพื้นรางและผิวโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง (wall boundary) กำหนดเป็นแบบผิวไม่ลื่น (no-slip condition) ความหยาบพื้นผิวเท่ากับ 0.1 mm ดังภาพ 53 แสดงการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตของพื้นผิวรางและโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง

ในการหาคำตอบใช้วิธี PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) สำหรับการจำลองการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจาก PISO มีประสิทธิภาพสูงในการจัดการกับความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลความเร็วและแรงดันภายในช่วงเวลาที่สั้น ส่วนวิธีแก้สมการเพิ่มเติมอื่น ๆ แสดงในภาพ 54 ภาพแสดงวิธีการคำนวณหาคำตอบ



ภาพ 53 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตของพื้นผิวรางและโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง



ภาพ 54 วิธีการคำนวณหาคำตอบ

3.4 บทสรุป

บทนี้อธิบายถึงการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของเม็ดแห้งและวัสดุเหลวเมื่อกระทบโครงสร้างป้องกัน โดยทำการศึกษาผ่านแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข ทั้งหมด 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการแบบย่อยส่วน ใช้อธิบายการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (Discrete Element Method) โดยโปรแกรม LMGC90 ใช้อธิบายการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง และแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (Computational Fluid Dynamics) โดยโปรแกรม ANSYS Fluent 2D ใช้อธิบายการไหลของน้ำ ขนาดแบบจำลองและพารามิเตอร์ได้จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เม็ดแห้งที่ใช้ในการศึกษานี้มีสองขนาด เนื่องด้วยข้อกำจัดในการสร้างเม็ดให้มีขนาดคละกระจายดังการทดลองทางกายภาพของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดที่ D_{50} จะได้ขนาดกรวดแม่น้ำ, D_{max} = 40 mm และ กรวดละเอียด, D_{min} = 10 mm การเตรียมตัวอย่างจะ

เตรียมวัสดุทดสอบในถังเก็บวัสดุ รอจนเม็ดแห้งหยุดนิ่งจึงจะเปิดประตูปล่อยเม็ดแห้งไหล คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุทดลองได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นจำเพาะ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ขนาดคละ เป็นต้น

แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ยังมีข้อจำกัดในการสร้างตาข่ายให้มีขนาดเทียบเท่ากับการทดลองทางกายภาพ เนื่องจากต้องใช้เวลาและทรัพยากรในการคำนวณที่สูงมาก ดังนั้น ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ขนาดเส้นตาข่ายมีขนาดใหญ่กว่าการทดลองทางกายภาพ โดยพิจารณาแรงกระแทกเป็นปัจจัยหลัก ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวไม่มีผลกระทบต่อผลการศึกษามากนัก

เนื่องจากข้อจำกัดในด้านทรัพยากรและเวลาจึงเลือกใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD เป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ โดยไม่ต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณที่สูงหรือเวลานานเกินไป ผู้วิจัยได้เปลี่ยนการจัดเตรียมตัวอย่างในแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทนรูปสามเหลี่ยมเพื่อแก้ข้อจำกัดในการแบ่งพื้นที่วัสดุ

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในบทนี้เป็นผลจากการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของวัสดุเม็ดแห้งและวัสดุของเหลว ซึ่งใช้วิธีการที่หลากหลายทั้งการทดลองทางกายภาพ แบบจำลองเชิงตัว DEM แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD และการใช้เทคนิค PTV ซึ่งมีความซับซ้อนในเชิงวิธีการและข้อมูลที่ได้จากการศึกษา ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เรียบเรียงหัวข้อผลการศึกษาในลำดับต่าง ๆ เพื่อให้เห็นภาพรวมของผลการศึกษาอย่างชัดเจน ดังนี้

4.1 พฤติกรรมการกระจายตัวของวัสดุเม็ดแห้ง กล่าวถึงการกระจายตัวและการทับถมของวัสดุเม็ดแห้ง จากการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM พร้อมกับเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

4.2 พฤติกรรมของการไหลของวัสดุเม็ดแห้งต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง กล่าวถึงพฤติกรรมการไหลและแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกับแบบแข็ง จากการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM และเปรียบเทียบผลการศึกษาเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง รวมถึงการใช้เทนคนิค PTV เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค

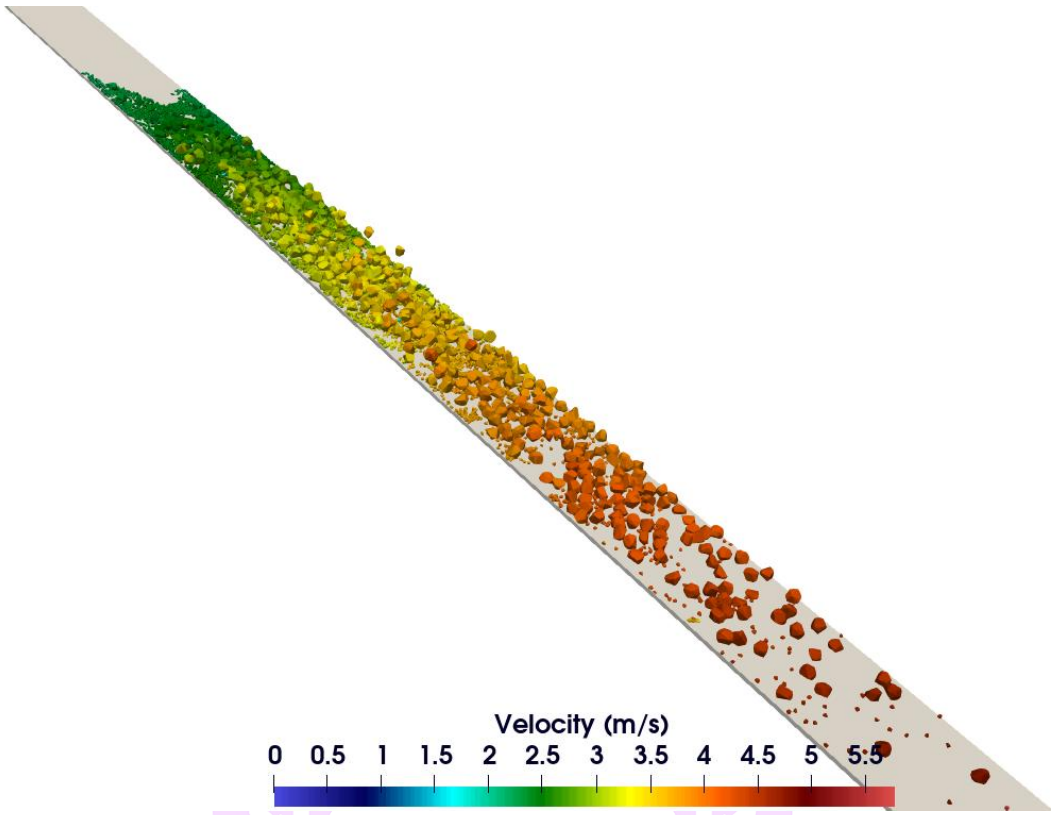
4.3 พฤติกรรมของการไหลของวัสดุเม็ดแห้งต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น อธิบายพฤติกรรมการไหลและแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น พร้อมกับอธิบายพฤติกรรมของส่วนประกอบของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น จากแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM รวมถึงการเปรียบเทียบผลการศึกษากับการทดลองทางกายภาพ

4.4 พฤติกรรมการไหลของของเหลวด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD กล่าวถึงพฤติกรรมการไหลของของเหลวต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง และเปรียบเทียบแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับการทดลองทางกายภาพ และแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

4.1 พฤติกรรมการกระจายตัวและการทับถมของวัสดุเม็ดแห้ง

แบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

จากการทดลองเมื่อเปิดประตูกั้น วัสดุเม็ดแห้งจะไหลลงตามรางในลักษณะต่อเนื่อง โดยสังเกตได้ว่าอนุภาคบริเวณด้านหน้าของกลุ่มวัสดุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าอนุภาคด้านหลัง ส่งผลให้เกิดการแยกขนาดของอนุภาคอย่างชัดเจน อนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มสะสมตัวอยู่บริเวณด้านหน้าและตรงกลางของการไหล ขณะที่อนุภาคขนาดเล็ก (กรวดละเอียด) แทรกตัวระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และสะสมตัวบริเวณด้านล่างของการไหลไปจนถึงบริเวณท้ายการไหล ดังภาพ 55



ภาพ 55 การเคลื่อนที่ของอนุภาคบนรางทดลอง ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 (N30_50-50)

ความเร็วของการไหลบริเวณปลายรางก่อนถึงพื้นที่แผ่กระจาย พบว่าที่ความชัน 25 องศา วัสดุเม็ดแห้งไหลด้วยความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 3.95 เมตรต่อวินาที เมื่อเพิ่มความชันเป็น 30 องศา ความเร็วของการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 5.42 เมตรต่อวินาที และที่ความชัน 35 องศา ความเร็วสูงสุดที่วัดได้เท่ากับ 6.12 เมตรต่อวินาที จะเห็นว่าความชันที่เพิ่มขึ้นมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของความเร็วของวัสดุเม็ดแห้ง ก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงการกระจายตัวในพื้นที่แผ่กระจาย

พฤติกรรมการแผ่กระจายและการสะสมตัวของวัสดุเม็ดแห้งได้รับอิทธิพลจากความชันของพื้นลาดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความเร็วและพลังงานของการไหลเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ภาพ 56 แสดงการแผ่กระจายในช่วงเวลาต่าง ๆ ของส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ของความชันการไหล 25 องศา 30 องศา และ 35 องศา เพื่อง่ายต่อการสังเกตจึงได้กำหนดเวลาเริ่มต้นของการแผ่กระจายตัว (t_1) เท่ากับ 0 วินาที ที่ความชัน 25 องศา ภาพ 56(a) ระยะเวลาตั้งแต่วัสดุไหลเข้าสู่พื้นที่แผ่กระจายจนถึงหยุดนิ่งอยู่ที่ 2.55 วินาที วัสดุเม็ดแห้งที่ไหลลงมาจากรางจะสะสมตัวอยู่ใกล้กับปลายราง เนื่องจากพลังงานจลน์ที่มีค่าน้อยทำให้วัสดุหยุดตัวเร็ว อนุภาคขนาดใหญ่จะ

ทับถมตัวอยู่ในบริเวณด้านหน้าและตรงกลางของการไหล ส่วนอนุภาคขนาดเล็กจะไหลตามช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่โดยแทรกตัวไปด้านล่างของการไหลและมีบางส่วนกระจายรอบกองวัสดุ กองวัสดุมีลักษณะที่ไม่สมดุล โดยมีความยาวมากกว่าความกว้างของการแผ่กระจาย โดยขนาดการแผ่กระจายมีค่าดังนี้ ความยาวเท่ากับ 133.69 ซม. ความกว้างเท่ากับ 88.51 ซม. ความสูงเท่ากับ 7.17 ซม. และพื้นที่การแผ่กระจายเท่ากับ 8,642.53 ตร.ซม.

ที่ความชัน 30 องศา ภาพ 56(b) การเพิ่มความชันทำให้พลังงานจลน์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาตั้งแต่วัสดุไหลเข้าสู่พื้นที่แผ่กระจายจนถึงหยุดนิ่งลดลงเป็น 2 วินาที และวัสดุสามารถไหลต่อไปได้ไกลกว่าเดิม การกระจายตัวของวัสดุมีลักษณะที่สมดุลมากขึ้น ทั้งในด้านความยาวและความกว้างที่ใกล้เคียงกัน โดยอนุภาคขนาดใหญ่ยังคงสะสมตัวอยู่ในบริเวณด้านหน้า ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะกระจายตัวออกไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ ขนาดการแผ่กระจายของวัสดุมีค่าดังนี้ ความยาวเท่ากับ 184.54 ซม. ความกว้างเท่ากับ 110.10 ซม. ความสูงเท่ากับ 7.04 ซม. และพื้นที่การแผ่กระจายเท่ากับ 9,618.16 ตร.ซม.

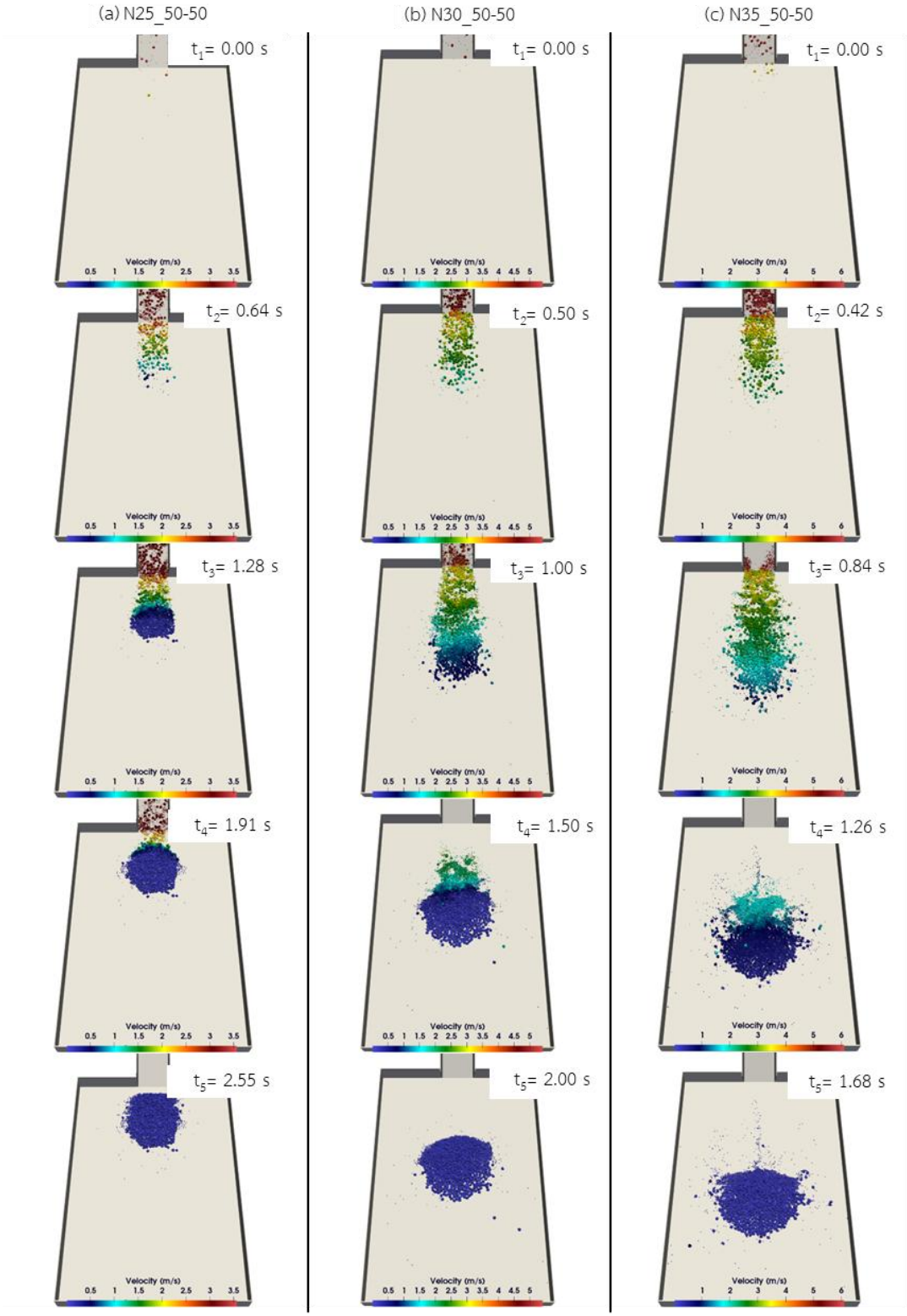
ส่วนที่ความชันการไหล 35 องศา ภาพ 56(c) การเพิ่มความชันอีกครั้งทำให้พลังงานจลน์ของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ระยะเวลาตั้งแต่วัสดุไหลเข้าสู่พื้นที่แผ่กระจายจนถึงหยุดนิ่งลดลงเป็น 1.68 วินาที วัสดุแผ่ออกในระยะทางที่ไกลที่สุดและมีลักษณะการแผ่กระจายตัวที่กว้างขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ แรงดันจากวัสดุส่วนท้ายของการไหลยังมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการแผ่กระจายของวัสดุ โดยเมื่อวัสดุส่วนหน้าหยุดนิ่ง วัสดุที่ไหลตามมาด้านหลังยังคงมีแรงเฉื่อยต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดแรงผลักดันต่อวัสดุที่หยุดนิ่งอยู่ด้านหน้า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุส่วนหน้าไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปข้างหน้าได้อีก ประกอบกับน้ำหนักสะสมของกองวัสดุในบริเวณดังกล่าว แรงผลักดังกล่าวจึงถูกถ่ายเทออกไปทางด้านข้างแทน ส่งผลให้รูปแบบการแผ่กระจายของวัสดุมีลักษณะกว้างขึ้นในแนวราบ ส่งผลให้กองวัสดุที่ความชัน 35 องศา มีลักษณะความกว้างมีค่ามากกว่าความยาว ซึ่งเป็นลักษณะของการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง (granular flow) ที่มีพลังงานสูง โดยขนาดการแผ่กระจายมีค่าดังนี้ ความยาวเท่ากับ 233.25 ซม. ความกว้างเท่ากับ 143.10 ซม. ความสูงเท่ากับ 6.13 ซม. และพื้นที่การแผ่กระจายเท่ากับ 11,751.19 ตร.ซม.

ผลการศึกษาส่วนผสมอื่น ๆ แสดงดังตาราง 8 เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดจากการเพิ่มความชัน พบว่า จากความชัน 25 องศา เพิ่มเป็น 30 องศา ระยะเวลาตั้งแต่วัสดุไหลเข้าสู่พื้นที่แผ่กระจายจนถึงหยุดนิ่งลดไป 0.55 วินาที จาก 2.55 เป็น 2.00 วินาที ขนาดการแผ่กระจายของวัสดุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยความยาวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 45.74 ความกว้างเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 24.26 ขณะที่ความสูงเฉลี่ยลดลงร้อยละ 3.43 ส่งผลให้พื้นที่แผ่กระจายรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.13 เมื่อเพิ่มความชันจาก 30 องศา เป็น 35 องศา พบว่าระยะเวลาในการไหลของวัสดุลดลงไปอีก 0.32 วินาที จาก 2.00 เป็น 1.68 วินาที ความยาวเฉลี่ยของกองวัสดุยังคงเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 22.37 ความ

กว้างเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 29.56 ขณะที่ความสูงลดลงมากขึ้นเป็นร้อยละ 12.23 ส่งผลให้พื้นที่การแผ่กระจายรวมเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 22.39 แสดงเห็นว่าการเพิ่มความชันของการไหลส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแห้ง ไม่ว่าจะเป็นในด้านระยะเวลาในการเคลื่อนที่ ความยาว ความกว้าง และความสูงของกองวัสดุ สะท้อนให้เห็นถึงพลังงานจลน์ที่มากขึ้นซึ่งช่วยให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่และกระจายได้ไกลขึ้นในระยะเวลาที่น้อยลง ในขณะเดียวกัน ความสูงของกองวัสดุมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า วัสดุมีแนวโน้มกระจายตัวในแนวราบมากกว่าการสะสมตัวในแนวตั้งเมื่อความชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นที่กระจายตัวเพิ่มขึ้นตามลำดับ

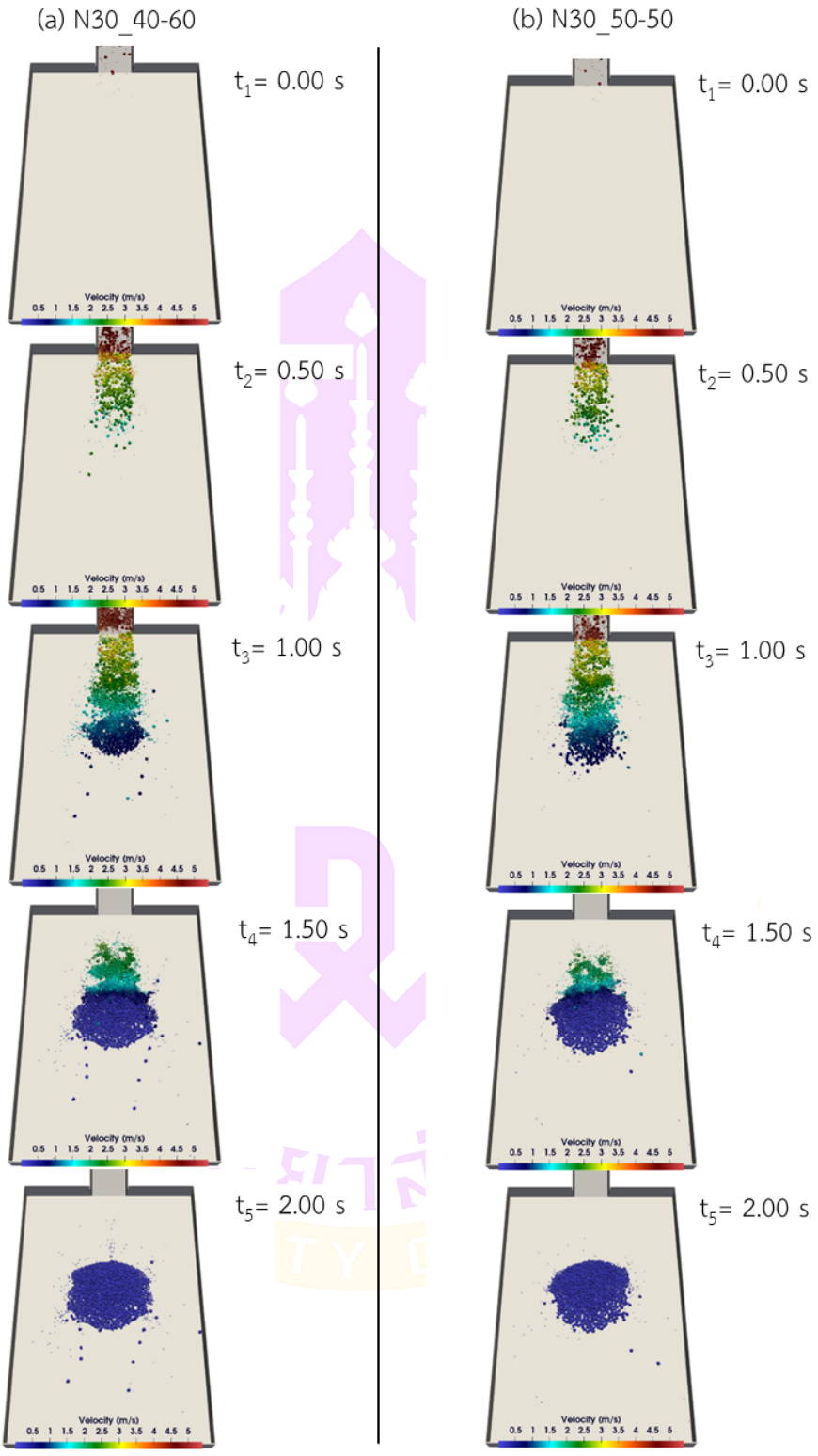
ตาราง 8 ผลการศึกษาขนาดการแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแห้ง

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

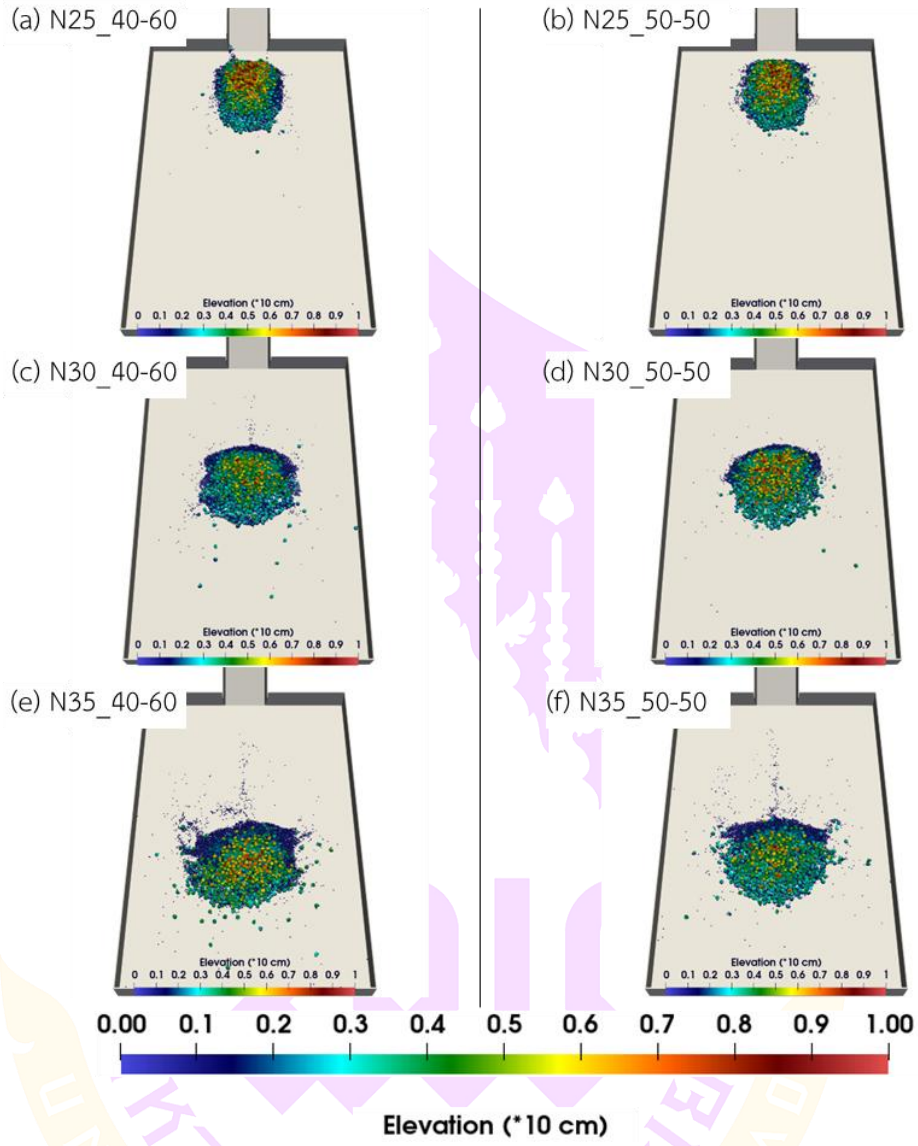


ภาพ 56 การแผ่กระจายในช่วงเวลาต่าง ๆ ของส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชันการไหล (a) 25 องศา (b) 30 องศา และ (c) 35 องศา

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อการแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแห้ง จากการผลการศึกษาตามตาราง 8 ที่ความชัน 25 องศา มีความแตกต่างน้อย โดยค่าร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยที่คิดจากขนาดของการแผ่กระจายระหว่างส่วนผสมทั้งสองเท่ากับ 2.45 ในขณะความชัน 30 และ 35 องศา ค่าร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.71 และ 11.82 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมของอิทธิพลจากขนาดอนุภาคต่อการแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแห้ง พบว่าการเพิ่มสัดส่วนอนุภาคขนาดเล็กช่วยให้วัสดุกระจายตัวได้ดีขึ้น จากภาพที่ 63 และ 64 แสดงแผนภูมิขนาดการแผ่กระจายของวัสดุสังเกตได้ชัดว่าที่ความชัน 30 และ 35 องศา มีความแตกต่างกันมากกว่าที่ความชัน 25 องศา เนื่องจากความชันที่สูงทำให้วัสดุมีพลังงานศักย์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเร่งของการไหลมากขึ้น เมื่อวัสดุประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กในสัดส่วนที่มาก จะสามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ดี ลดแรงเสียดทานภายในกองวัสดุ และสามารถเคลื่อนที่แบบกระจายตัวออกด้านข้างได้อย่างต่อเนื่องและราบรื่นมากขึ้น ในทางกลับกัน ส่วนผสมที่มีสัดส่วนของอนุภาคขนาดใหญ่สูงจะมีแนวโน้มก่อให้เกิดแรงต้านจากการชนกันระหว่างอนุภาคมากกว่า ทำให้การกระจายตัวช้า และเกิดการรวมตัวเป็นกองมากกว่า แสดงให้เห็นว่าอนุภาคขนาดเล็กมีบทบาทสำคัญในการกำหนดรูปแบบและขอบเขตของการแผ่กระจาย ทั้งยังสะท้อนปรากฏการณ์การคัดแยกขนาด (size segregation) ที่พบได้บ่อยในการไหลของวัสดุเม็ดแห้งในธรรมชาติ ภาพ 57 แสดงการแผ่กระจายในช่วงเวลาต่าง ๆ ของส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 และส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ของความชันการไหล 30 องศา ภาพ 58 แสดงลักษณะการกองทับถมของส่วนผสมต่าง ๆ



ภาพ 57 การแผ่กระจายในช่วงเวลาต่าง ๆ ของส่วนผสมที่ต่างกัน ความชันการไหล 30 องศา (a)N30_40-60 (b)N30_50-50



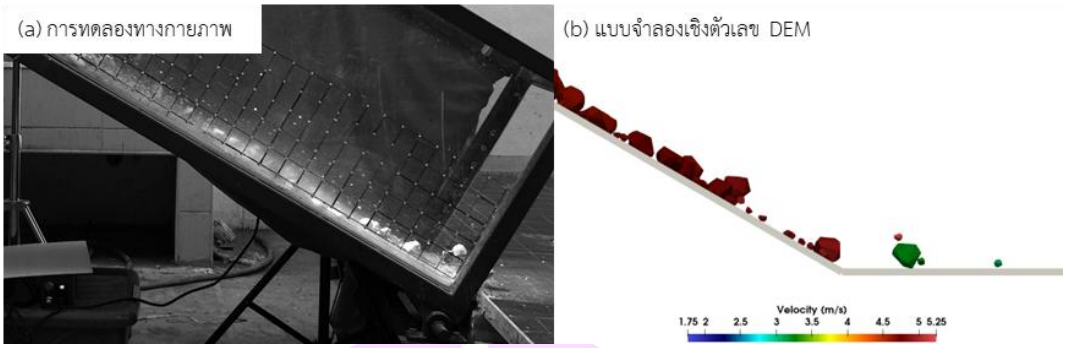
ภาพ 58 การกองทับถมของวัสดุเม็ดแห้ง ส่วนผสมต่าง ๆ (a) N25_40-60 (b) N25_50-50 (c) N30_40-60 (d) N30_50-50 (e) N35_40-60 (f) N35_50-50

เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ

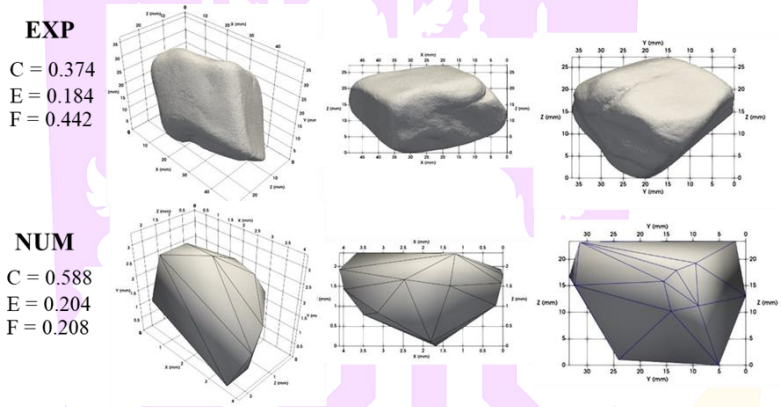
การเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความแม่นยำและประสิทธิภาพของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวและการทับถมของวัสดุเม็ดแห้ง ตาราง 8 แสดงผลการศึกษาขนาดการแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแห้งจากแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM และการทดลองทางกายภาพ

เมื่อพิจารณาความเร็วของการไหลบริเวณปลายรางก่อนถึงพื้นที่แผ่กระจาย ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการอธิบายการเคลื่อนที่ของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ในการเก็บข้อมูลความเร็วของอนุภาค แสดงดังภาพ 59(a) ในส่วนของการทดลองทางกายภาพเก็บข้อมูลโดยการบันทึกภาพเคลื่อนไหวด้วยกล้องความเร็วสูง จากนั้นนำมาวิเคราะห์ความเร็วด้วยการวัดระยะทางในการเคลื่อนที่กับจำนวนเฟรมภาพ (เวลา) แสดงดังภาพ 59(b) ภาพถ่ายจากกล้องความเร็วสูง จากผลการศึกษาได้ความเร็วของการไหลบริเวณปลายรางก่อนถึงพื้นที่แผ่กระจาย มีค่าดังนี้ กรณีแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ที่ความชัน 25 องศา ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 3.95 เมตรต่อวินาที ที่ความชันเป็น 30 องศา ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 5.42 เมตรต่อวินาที และที่ความชัน 35 องศา ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 6.12 เมตรต่อวินาที กรณีการทดลองทางกายภาพ ที่ความชัน 25 องศา ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 3.73 เมตรต่อวินาที ที่ความชันเป็น 30 องศา ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 5.25 เมตรต่อวินาที และที่ความชัน 35 องศา ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 5.86 เมตรต่อวินาที จะได้ค่าร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยจากทั้งสามความชันระหว่างแบบจำลองเชิงตัว DEM กับการทดลองทางกายภาพเท่ากับ 2.21 และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9984 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สามารถทำนายแนวโน้มของพฤติกรรมการไหลได้ดี แม้จะมีค่าความเร็วสูงกว่าการทดลองทางกายภาพเล็กน้อย

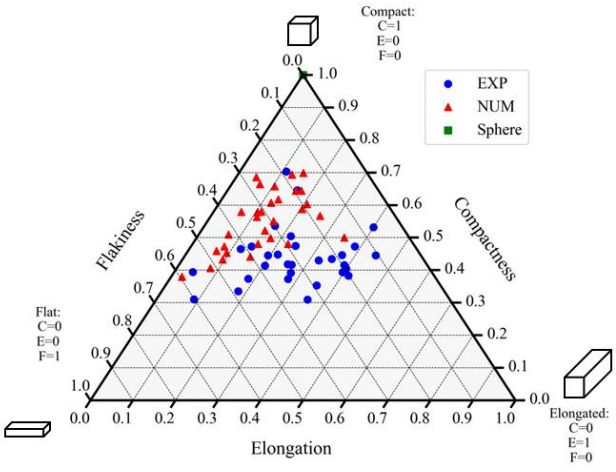
ภาพที่ 60 แสดงลักษณะทางกายภาพของอนุภาคจริง (EXP) และอนุภาคในแบบจำลองเชิงตัวเลข (NUM) จะเห็นว่าอนุภาคจริงมีความโค้งมนมากกว่า ในขณะที่อนุภาคแบบจำลองมีพื้นผิวเรียบและแบนกว่า สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างเชิงรูปร่างได้จากแผนภาพสามแกน (ternary plot) ของดัชนีรูปร่างอนุภาค (ภาพ 61) จากแผนภาพสามแกน จะเห็นว่าอนุภาคในแบบจำลองเชิงตัวเลข (NUM) ส่วนใหญ่มีค่าดัชนีความมน (compactness) สูงและค่าดัชนีความแบน (flakiness) มากกว่าอนุภาคจริง (EXP) ในขณะที่อนุภาคจริงมีแนวโน้มที่จะมีค่าดัชนีความยาว (elongation) สูงกว่า ทำให้อนุภาคจริงมีความโค้งมนและความไม่สมมาตรมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคทรงกลม (สีเขียว) อนุภาคหลายเหลี่ยมในแบบจำลองนี้มีความใกล้เคียงกับอนุภาคจริงมากกว่า การศึกษาที่ผ่านๆ มา ที่ใช้อนุภาคทรงกลมเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีพื้นผิวเรียบและสมมาตร จึงไม่สามารถสะท้อนรูปร่างของอนุภาคจริงได้อย่างเหมาะสม การเลือกใช้อนุภาคหลายเหลี่ยมช่วยให้แบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลของอนุภาคได้สมจริงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มจำนวนจุดยอดบนผิวทรงกลมในขั้นตอนการสร้างอนุภาคแบบจำลอง จะช่วยให้พื้นผิวมีรายละเอียดมากขึ้น สามารถเลียนแบบความโค้งมนและความยาวของอนุภาคจริงได้ดียิ่งขึ้น



ภาพ 59 ความเร็วของการไหลบริเวณปลายรางก่อนถึงพื้นที่แผ่กระจายของอนุภาค (a) การทดลองทางกายภาพ (b) แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

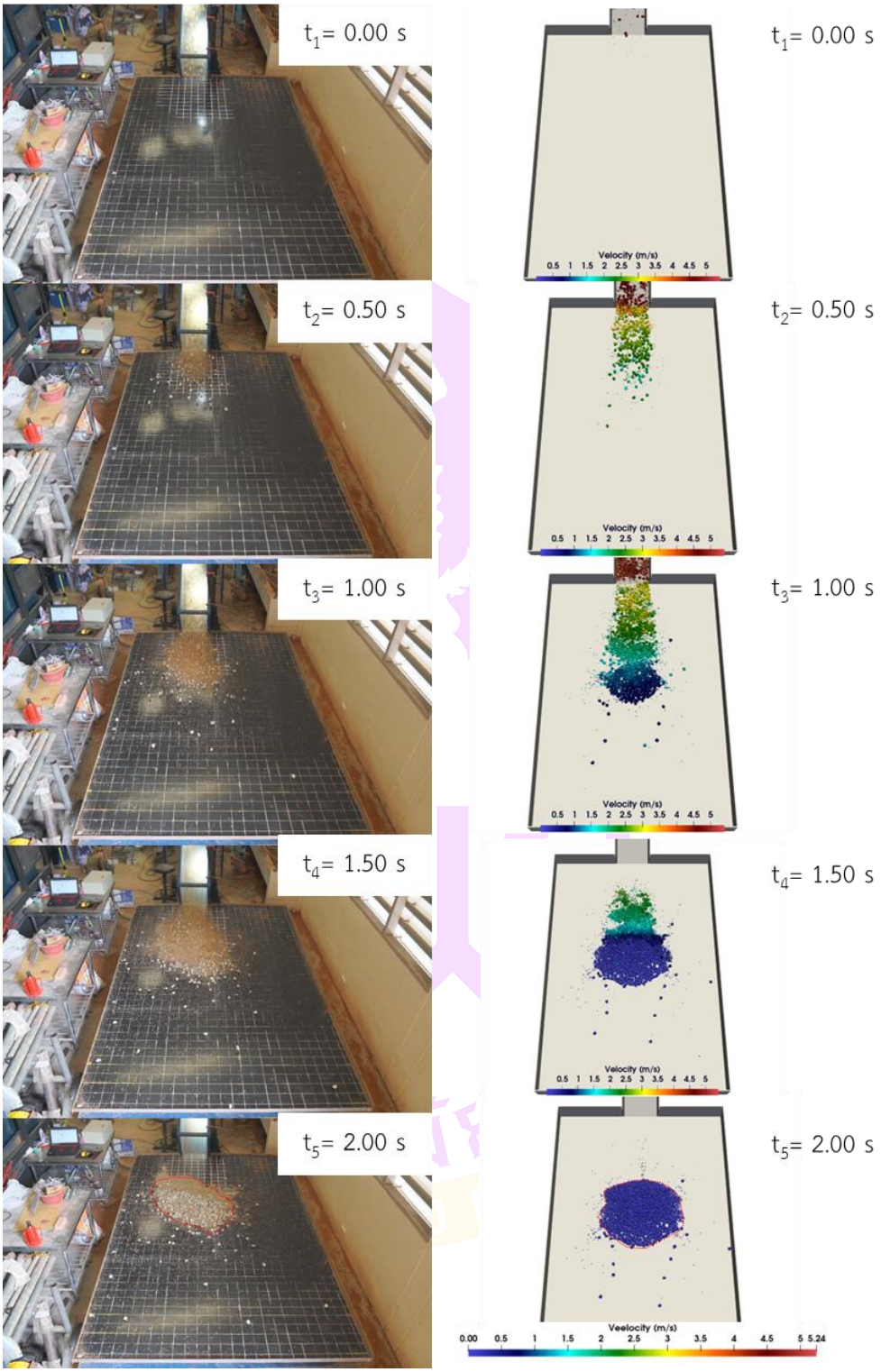


ภาพ 60 ลักษณะของอนุภาคจริง (EXP) และอนุภาคในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (NUM)

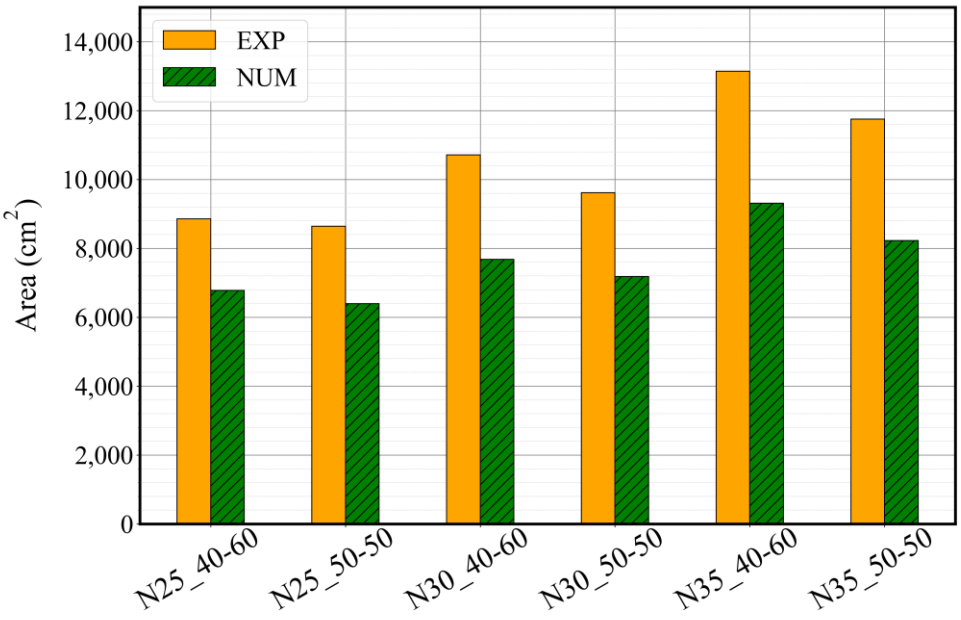


ภาพ 61 แผนภาพดัชนีรูปร่างของอนุภาคจริง (EXP) และในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (NUM)

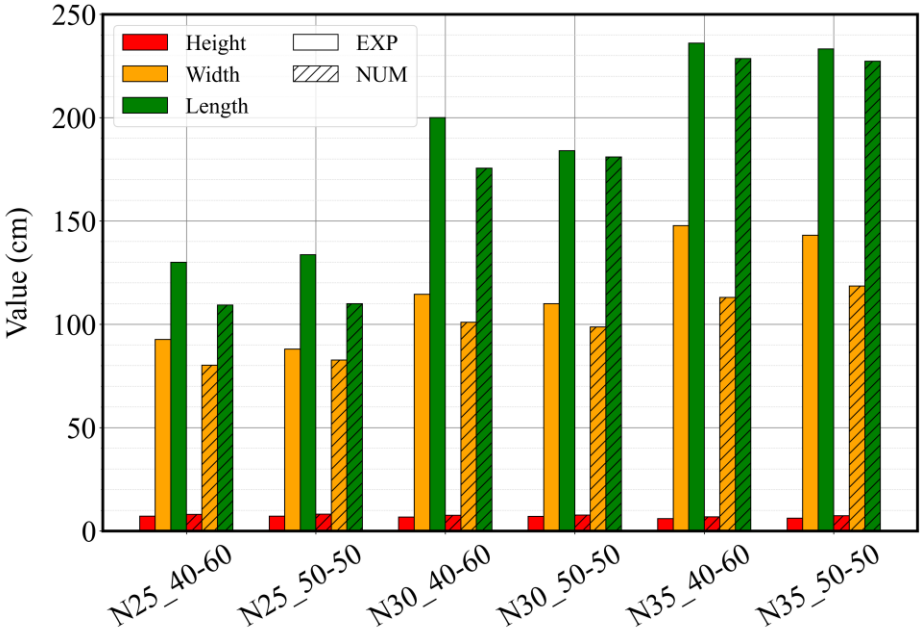
พฤติกรรมการแผ่กระจายและการสะสมตัวของวัสดุเม็ดแห้งระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ ภาพ 62 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละช่วงเวลา ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ที่ความชัน 30 องศา (N30_40-60) ระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ จะเห็นว่า แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละเวลาได้ใกล้เคียงกับการทดลองทางกายภาพ แต่การทดลองทางกายภาพมีการกระจายตัวของกรวดละเอียดมากกว่าซึ่งต่างกับแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ที่มีความเป็นกองกว่า จึงทำให้พื้นที่แผ่กระจายของการทดลองทางกายภาพมีค่ามากกว่า ในขณะที่ความสูงของกองวัสดุในแบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่าสูงกว่า นอกจากนี้ผลจากการเปลี่ยนความชันและอิทธิพลของขนาดอนุภาคจากแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ก็มีแนวโน้มไปตามการทดลองทางกายภาพที่ส่วนผสมที่มีกรวดละเอียดมากขนาดการแผ่กระจายตัวก็จะมีค่ามากขึ้น สังเกตได้จากแผนภูมิขนาดการแผ่กระจายตัวของวัสดุ (ภาพที่ 63 และ 64) ผลการศึกษาอย่างละเอียดแสดงดังในตาราง 8 โดยมีค่าร้อยละความแตกต่างเฉลี่ย (relative error) เท่ากับ 12.35 ส่วนภาพ 65 และ 66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การแผ่และขนาดการแผ่กระจายจากการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เมื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับเส้นหนึ่งต่อหนึ่ง (1:1 line) พบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มต่ำกว่าค่าจากการทดลอง โดยเฉพาะที่ความชันเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ สาเหตุเกิดจากข้อจำกัดในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ที่ไม่สามารถสะท้อนกระบวนการจริงได้ทั้งหมด หรือการไม่รวมปัจจัยทางกายภาพบางอย่าง ซึ่งส่งผลให้ผลการจำลองอยู่ต่ำกว่าเส้นอ้างอิงหนึ่งต่อหนึ่ง ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ยังคงยืนยันว่า แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สามารถทำนายพื้นที่และขนาดการแผ่กระจายของวัสดุได้ใกล้เคียงและสอดคล้องกับผลการทดลองทางกายภาพในเชิงแนวโน้ม



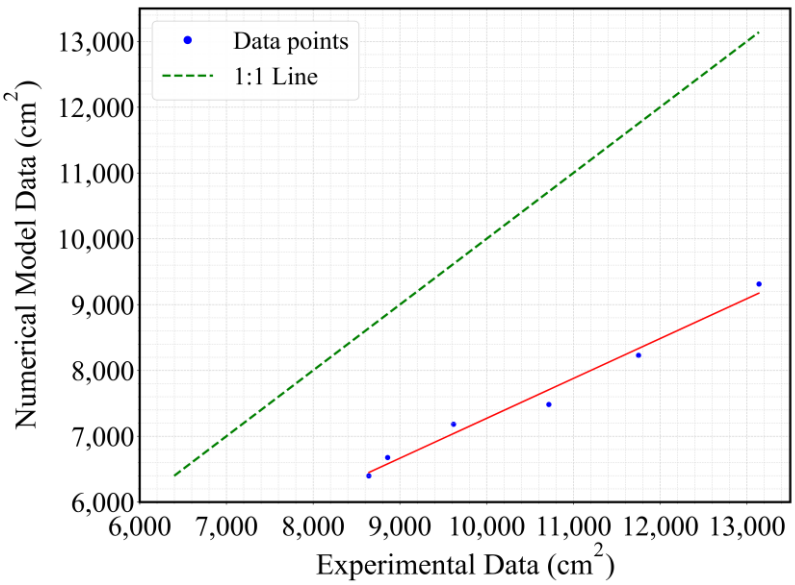
ภาพ 62 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละช่วงเวลา ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ที่ความชัน 30 องศา (N30_40-60) การทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM



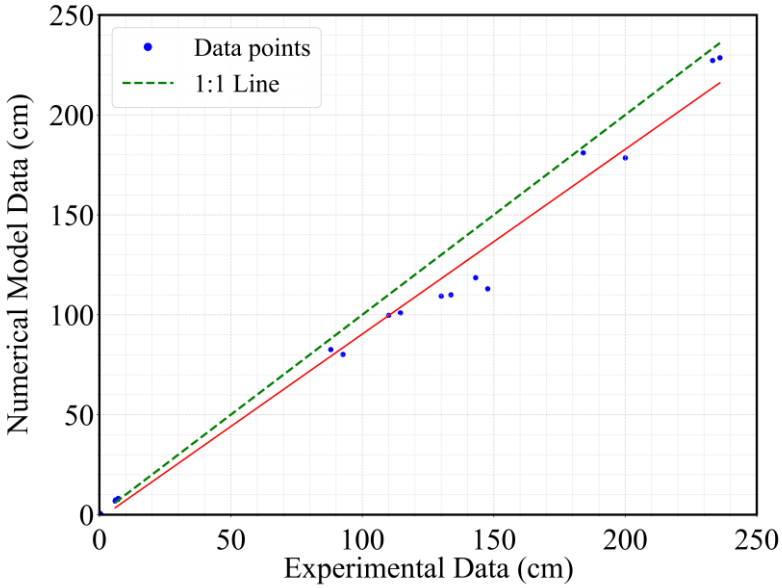
ภาพ 63 แผนภูมิเปรียบเทียบพื้นที่แผ่กระจายของการทดลองกับแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM



ภาพ 64 แผนภูมิเปรียบเทียบขนาดความสูง ความกว้าง และความยาวของการแผ่กระจาย ระหว่างการทดลอง (EXP) กับแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (NUM)



ภาพ 65 ความสัมพันธ์ของพื้นที่แผ่กระจายระหว่างการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM



ภาพ 66 ความสัมพันธ์ของขนาด ความกว้าง ความยาว และความสูง ของพื้นที่แผ่ระหว่างการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

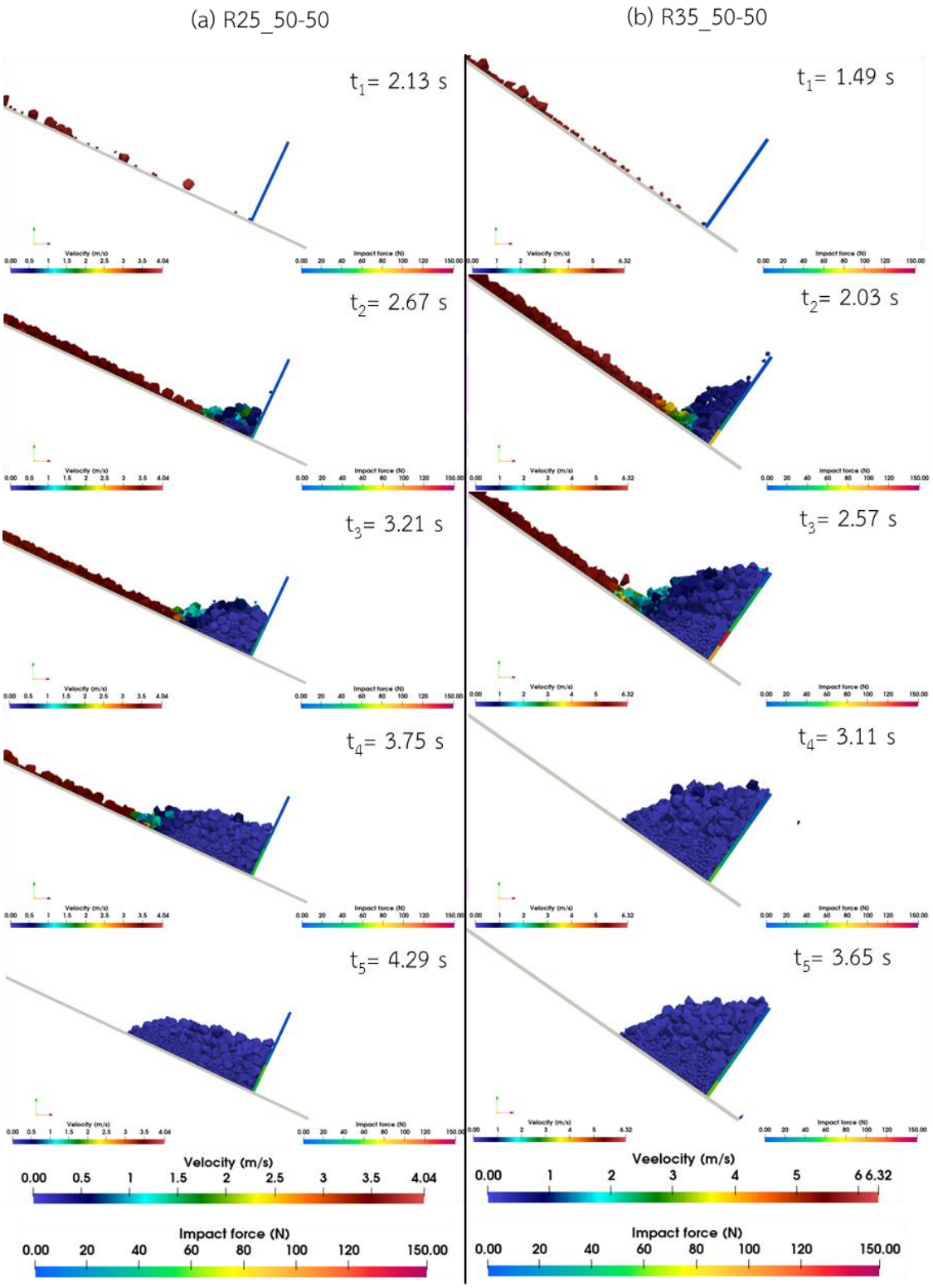
4.2 พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง

ในหัวข้อนี้จะอธิบายผลการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อเกิดการไหลและปะทะกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการไหล การกระจายตัวของอนุภาค และแรงกระทำต่อโครงสร้างในสถานการณ์ต่าง ๆ การศึกษานี้มุ่งเน้นเพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของพารามิเตอร์สำคัญ เช่น ความลาดชันของทางไหล และอิทธิพลของขนาดอนุภาค ซึ่งมีผลต่อความรุนแรงของการปะทะและรูปแบบการทับถมบริเวณโครงสร้าง

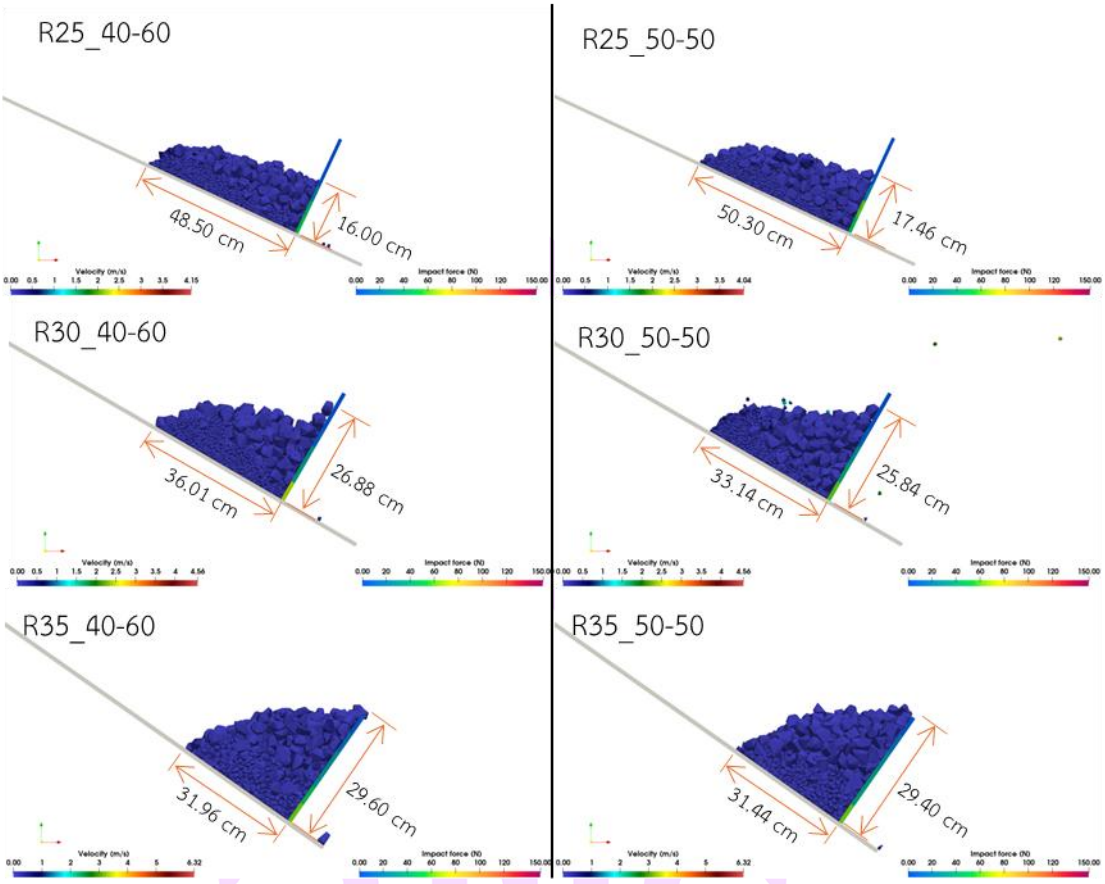
แบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

การพิจารณาถึงพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัสดุต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็งนั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการปะทะ ไม่ว่าจะเป็นความลาดชันของทางไหล ชนิดของวัสดุ และการกระจายขนาดของอนุภาค จากการศึกษาพบว่า ความเร็วของวัสดุก่อนชนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งเป็นดังนี้ ที่ความชัน 25 องศา ความเร็วก่อนชนเท่ากับ 3.75 เมตรต่อวินาที ที่ความชัน 30 องศา ความเร็วก่อนชนเท่ากับ 5.42 เมตรต่อวินาที และที่ความชัน 35 องศา ความเร็วก่อนชนเท่ากับ 6.01 เมตรต่อวินาที จะเห็นว่าความเร็วในแค่ละความชันนั้นต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งจะส่งผลต่อแรงกระทำต่อโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ

พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง แสดงดังภาพ 67 ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 25 องศา (R25_50-50) และ 35 องศา (R35_50-50) ช่วงก่อนชนอนุภาคที่อยู่ด้านหน้าของกลุ่มวัสดุส่วนมากเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ และมีอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่บ้าง เมื่อเกิดการชนอนุภาคจะเปลี่ยนความเร็วกระทันหัน บางส่วนของอนุภาคเกิดการสะท้อนกลับไปในทิศทางตรงกันข้ามกับการไหล ขณะที่บางส่วนมีทิศทางเคลื่อนที่ขึ้นตามแนวสูงของโครงสร้าง อันเป็นผลจากพลังงานจลน์ที่ยังตกค้างอยู่ในระบบ อนุภาคที่ไหลตามมาจากด้านหลังจะชนกับอนุภาคส่วนหน้าที่สะท้อนกลับหรือหยุดนิ่งบริเวณฐานของโครงสร้าง ส่งผลให้เกิดบริเวณที่อนุภาคสะสมตัวและไม่มีการเคลื่อนที่อย่างชัดเจน ซึ่งเรียกว่าโซนหยุดนิ่ง (dead zone) จากนั้น อนุภาคที่ตามมาจะค่อย ๆ ไหลซ้อนขึ้นบนโซนหยุดนิ่งดังกล่าว ก่อให้เกิดพฤติกรรมการกองขั้น (pile-up) ของวัสดุเม็ดแห้งบริเวณด้านหน้าของโครงสร้าง ขนาดของการกองขึ้นอยู่กับความชันการไหลและขนาดอนุภาค ความชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อพลังงานจนล์ของระบบทำให้อนุภาคไหลขึ้นโซนหยุดนิ่งได้ง่ายกว่า ขนาดการกองจึงมีแนวโน้มสูงกว่า ในขณะเดียวกันก็จะมีขนาดสั้นกว่า สำหรับผลของขนาดอนุภาคต่อขนาดการกองของวัสดุ พบว่า ในความชันเดียวกันขนาดการกองของทั้งสองส่วนผสมมีความแตกต่างกันน้อยมาก



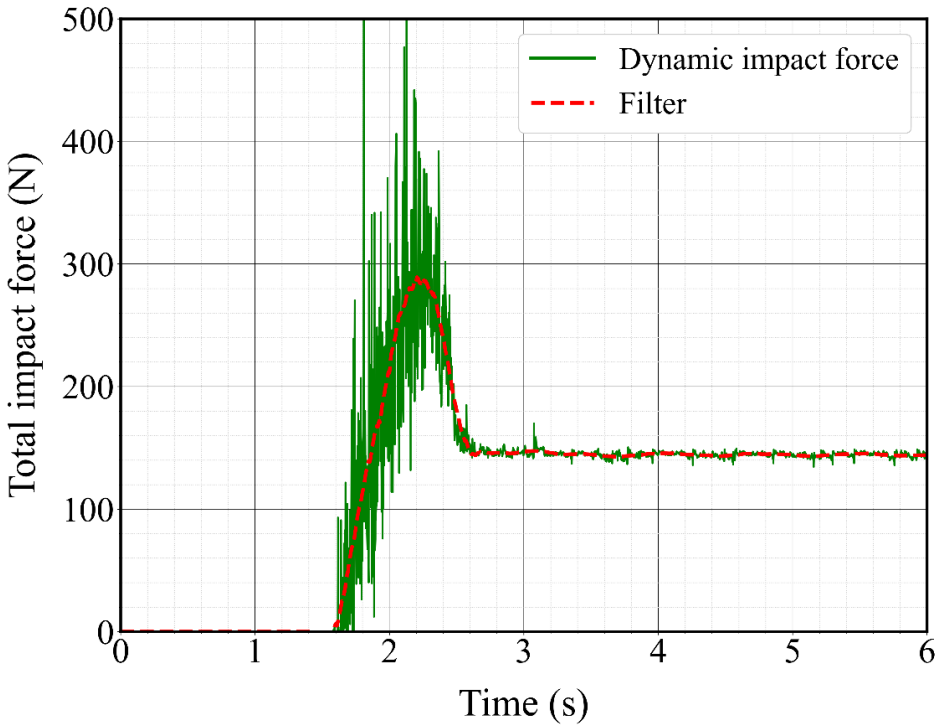
ภาพ 67 พฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ (a) R25_50-50 (b) R35_50-50



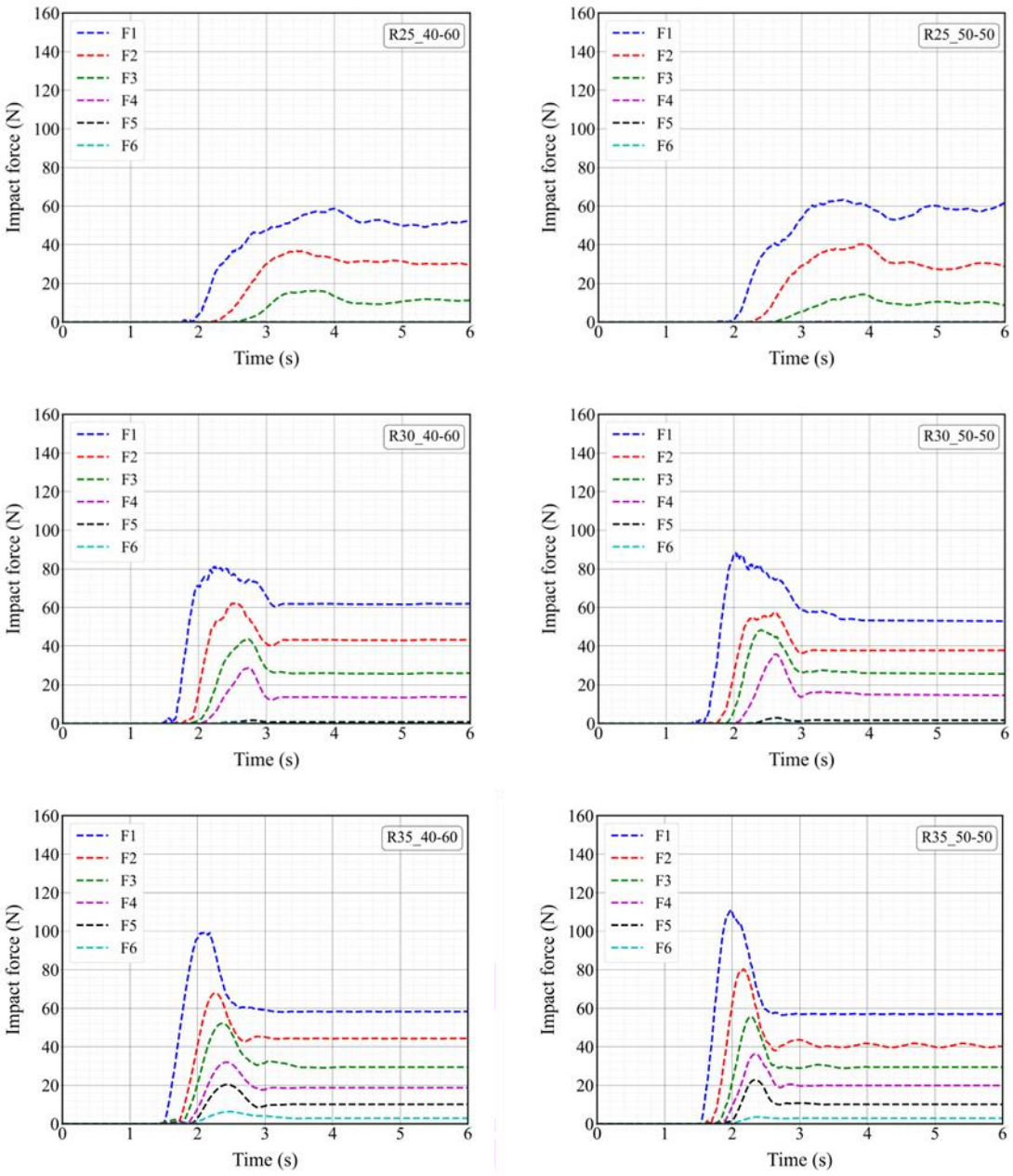
ภาพ 68 การกองด้านหน้าโครงสร้างป้องกันแบบแข็งของวัสดุเม็ดแห้ง

แรงกระทำที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งนั้นมีความแปรผันตามลักษณะของการชน องค์ประกอบของวัสดุ และสภาพแวดล้อมทางกายภาพของทางไหล แรงหลักที่ตรวจวัดได้คือ แรงกระแทก (impact force) เป็นแรงตั้งฉากกับโครงสร้างป้องกัน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างฉับพลันเมื่ออนุภาคพุ่งชนกับผิวโครงสร้าง แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ใช้ช่วงเวลาจำลอง (time step) ที่มีขนาดเล็ก (0.001 วินาที) เพื่อให้สามารถติดตามพฤติกรรมของการเคลื่อนที่และการชนกันของอนุภาคได้อย่างละเอียด แรงที่วัดได้จากโครงสร้างป้องกันมีลักษณะเป็นแรงกระแทกแบบ พลวัต ซึ่งมีแอมพลิจูดสูงในช่วงเวลาที่อนุภาคปะทะกับโครงสร้าง (ประมาณ 1.5–3 วินาที) ลักษณะของข้อมูลแรงดังกล่าวส่งผลให้การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบกับผลการทดลองทางกายภาพทำได้ยาก เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีการประยุกต์ใช้ตัวกรองข้อมูล (filter) ในการลดความแปรปรวนของแรง โดยรายละเอียดของผลลัพธ์หลังการกรองข้อมูลแสดงไว้ในภาพที่ 69 โดยมีค่ามากที่สุดในช่วงแรกของการปะทะ อันเป็นผลจากพลังงานจลน์ของอนุภาคที่ไหล

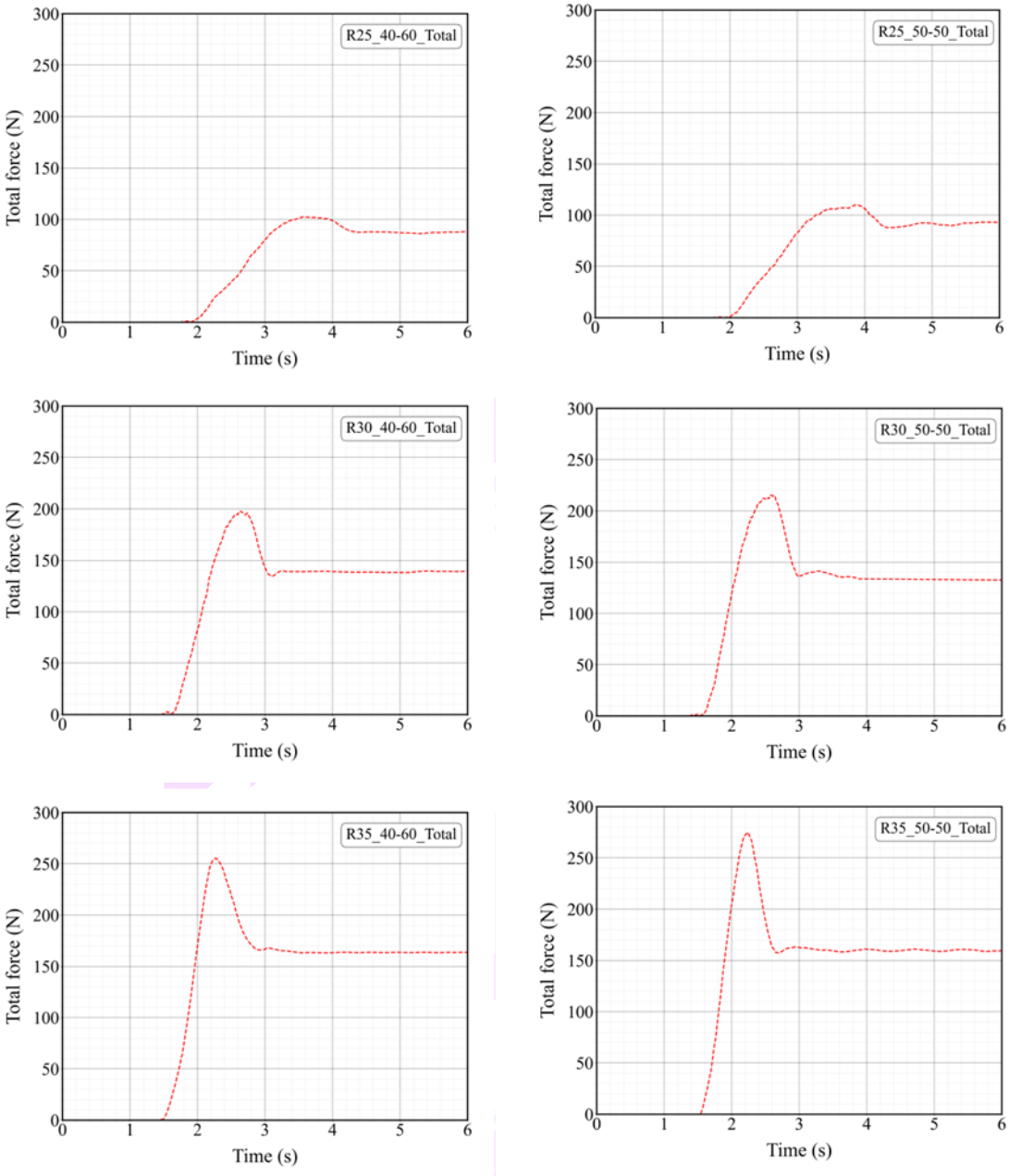
มาด้วยความเร็วสูง แรงดังกล่าวจะแปรผันตามความชันของการไหล โดยเมื่อความชันเพิ่มขึ้นความเร็วของอนุภาคก็เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงปะทะสูงขึ้นตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อวัสดุเริ่มหยุดนิ่ง แรงกระทำจะลดลงและเข้าสู่ภาวะคงที่ ซึ่งเรียกว่า แรงคงค้าง (residual force) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการกองของวัสดุเม็ดแห้ง แรงนี้เกิดจากน้ำหนักสะสมของอนุภาคที่ทับถมกันอยู่ในโซนหยุดนิ่ง ภาพที่ 70 แสดงแรงย่อยที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ภาพที่ 71 แสดงแรงทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง



ภาพ 69 การใช้ตัวกรองข้อมูลกรองแรงกระแทกแบบพลวัต



ภาพ 70 แรงย่อยที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง จากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



ภาพ 71 แรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง จากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง

ในการศึกษานี้ แรงย่อยหมายถึง แรงที่วัดจากโหลดเซลล์ 6 ตัว ที่ตำแหน่งต่างกัน F1 อยู่ด้านล่างและเรียงตามความสูงของโครงสร้างป้องกัน ส่วนแรงรวม (total force) หมายถึง ผลรวมของแรงจากวัสดุเม็ดแห้งที่กระทำต่อโครงสร้างทั้งหมด จากผลการทดลองที่ความชัน 25 องศา สำหรับทั้งสองส่วนผสม พบว่า แรงเริ่มต้นจะปรากฏขึ้นหลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 2 วินาที โดยลักษณะของแรงจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด และจากนั้นจะเข้าสู่ภาวะคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลง

เพียงเล็กน้อย แรงที่ตรวจพบได้อย่างมีนัยสำคัญมีเพียงในโหลดเซลล์ F1 ถึง F3 เท่านั้น ที่ขณะที่ที่ความชัน 30 องศา แรงเริ่มปรากฏเร็วขึ้นที่เวลาประมาณ 1.6 วินาที และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าความชันก่อนหน้า หลังจากถึงจุดสูงสุด แรงจะค่อย ๆ ลดลงและเข้าสู่แรงคงค้างที่เวลาประมาณ 3 วินาที แรงที่เกิดขึ้นมีถึงโหลดเซลล์ F5 สำหรับความชัน 35 องศา ซึ่งเป็นค่าความชันสูงสุดในการศึกษานี้ พบว่าแรงกระทำเกิดขึ้นเร็วที่สุด ที่เวลาประมาณ 1.4 วินาที โดยแรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและถึงค่าสูงสุดในเวลาอันสั้น จากนั้นลดลงสู่แรงคงค้างอย่างรวดเร็วภายในเวลา 2.7 วินาที และแรงสามารถตรวจวัดได้จากโหลดเซลล์ทั้ง 6 ตัว แสดงถึงการกระจายแรงที่สูงขึ้นตามความชันที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาแรงกระทำสูงสุดของวัสดุจากภาพ 71 พบว่า ที่ความชัน 25 องศา ส่วนผสมทั้งสองมีค่าแรงกระทำต่างกัน 8.07 นิวตัน โดยส่วนผสมที่มีกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 (R25_50-50) ให้แรงสูงสุด 116.01 นิวตัน ขณะที่ส่วนผสมที่มีกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 (R25_40-60) ให้แรงสูงสุด 107.93 นิวตัน ที่ความชัน 30 องศา ความแตกต่างของแรงกระทำเริ่มชัดเจนมากขึ้น โดยมีค่าต่างกัน 10.62 นิวตัน โดยส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 (R30_50-50) ให้แรงสูงสุด 215.62 นิวตัน ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 (R30_40-60) ให้แรง 205.00 นิวตัน สำหรับความชัน 35 องศา พบว่า แรงกระทำระหว่างส่วนผสมทั้งสองแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยมีความต่างอยู่ที่ 19.65 นิวตัน โดยส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 (R35_50-50) ให้แรงสูงสุด 274.93 นิวตัน ขณะที่ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 (R35_40-60) ให้แรงสูงสุด 255.28 นิวตัน จะเห็นว่า แรงกระทำที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างอย่างชัดเจนในแต่ละค่าความชัน โดยความชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อสัดส่วนของกรวดขนาดใหญ่ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น แรงที่กระทำต่อโครงสร้างก็มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แรงกระทำสูงสุดแสดงดังตาราง 10

ตาราง 9 **แรงกระทำสูงสุดที่เกิดบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ส่วนผสมที่ต่างกัน**

ความชันการไหล, θ (องศา)	ส่วนผสมวัสดุ กรวดขนาดใหญ่-กรวดละเอียด		ความแตกต่าง (N)
	40-60	50-50	
25	107.94	116.01	6.96
30	205.08	215.62	4.89
35	255.28	274.93	7.15

ตาราง 10 **แรงกระทำสูงสุดที่เกิดบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง แบบจำลองและการทดลอง**

ส่วนผสม	การทดลองทางกายภาพ (EXP) (N)	แบบจำลองเชิงตัวเลข (DEM) (N)	ร้อยละความแตกต่าง (%)
R25_40-60	103.44	107.94	4.17
R25_50-50	99.75	116.01	14.01
R30_40-60	152.32	205.08	25.73
R30_50-50	173.26	215.62	19.64
R35_40-60	225.12	255.28	11.81
R35_50-50	244.65	274.93	11.02
	ค่าเฉลี่ย		14.40

เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ

เพื่อประเมินความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ที่ใช้ในการศึกษานี้ จึงได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง จากการจำลองเชิงตัวเลขกับการทดลองทางกายภาพภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ทั้งในด้านความชันของพื้นผิวการไหลและสัดส่วนของวัสดุผสม โดยพิจารณาจากพฤติกรรมของแรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ตำแหน่งที่แรงกระทำ และค่าแรงกระทำสูงสุด เพื่อวิเคราะห์ความใกล้เคียงของผลลัพธ์จากทั้งสองวิธี

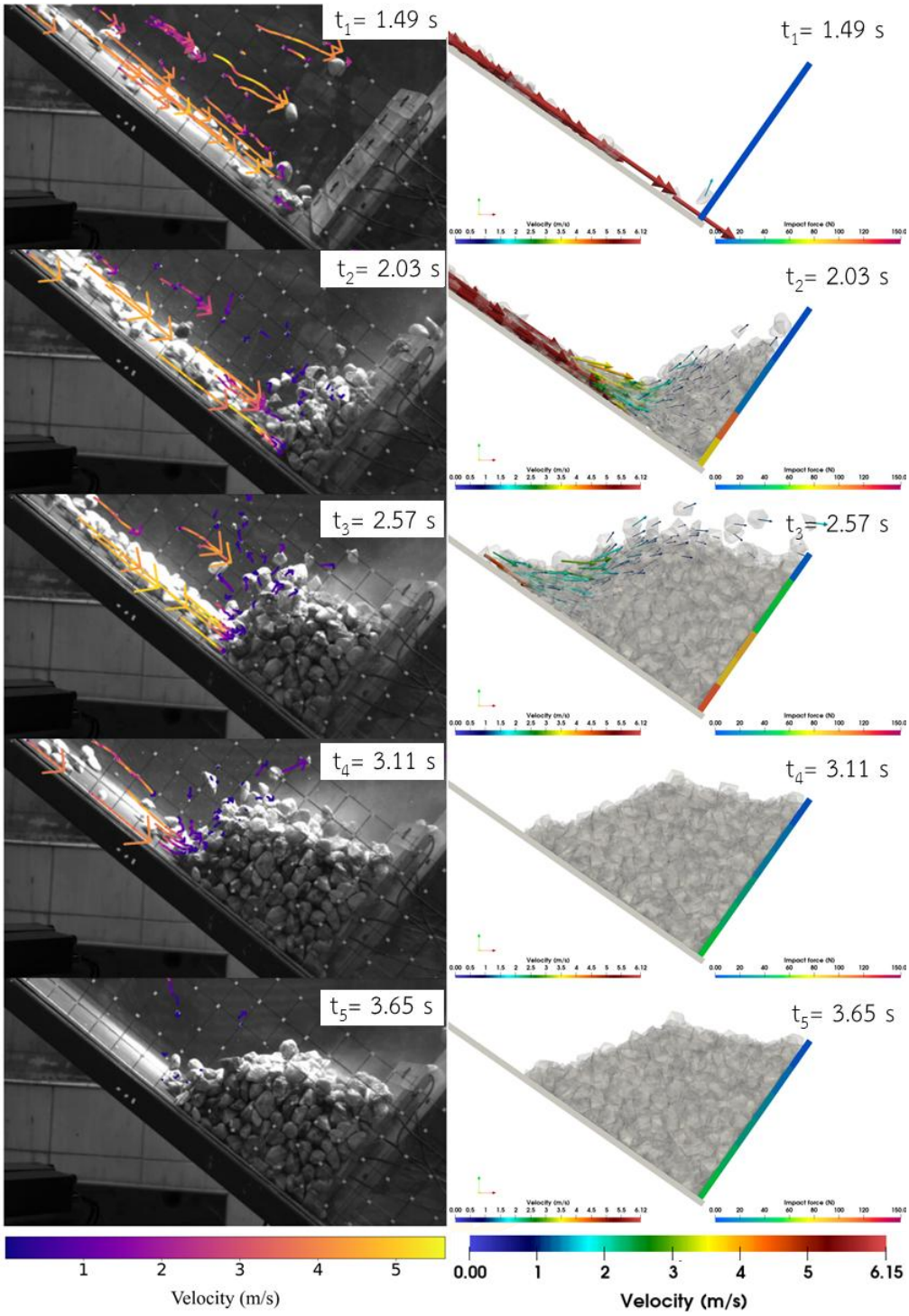
จากการเปรียบเทียบความเร็วของวัสดุก่อนชนโครงสร้างป้องกันระหว่างการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM พบว่า ความเร็วของวัสดุเพิ่มขึ้นตามความชันเช่นเดียวกันในทั้งสองกรณี โดยแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีความเร็วที่สูงกว่าการทดลองทางกายภาพเล็กน้อยใน

ทุกระดับความชัน ซึ่งเป็นผลมาจากระยะทางให้วัสดุไหลที่ไม่เท่ากันระหว่างการทดลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ที่ต่างกัน 60 ซม. เนื่องจากข้อจำกัดในการติดตั้งโครงสร้างป้องกันแบบแข็งของการทดลองทางกาย และอาจเกิดจากการที่แบบจำลองไม่สามารถพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น แรงต้านทานอากาศหรือความสูญเสียที่เกิดขึ้นในโลกจริงได้อย่างสมบูรณ์ ในการทดลองทางกายภาพ ความเร็วก่อนชนที่ความชัน 25 องศา 30 องศา และ 35 องศา คือ 3.62 5.22 และ 5.86 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในขณะที่ในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีค่าความเร็วก่อนชนที่ 3.75 5.42 และ 6.10 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้จะมีความแตกต่างทางปริมาณเล็กน้อย แต่ทั้งสองวิธีการยังคงแสดงผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันในแง่ของแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเร็วตามความชัน

การอธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข (DEM) กับการทดลองทางกายภาพ ในส่วนของการทดลองทางกายภาพอาศัยการใช้เทคนิค PTV (Particle Tracking Velocimetry) มาติดตามการเคลื่อนที่เพื่อแสดงเส้นทางและความเร็วของอนุภาคในการไหล เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัสดุในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด ทั้งในเชิงตำแหน่ง ความเร็ว และทิศทางของอนุภาคแต่ละจุด อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุผสมที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยกรวดละเอียดและกรวดขนาดใหญ่ ซึ่งกรวดละเอียดมีขนาดเล็กและมีความคมชัดต่ำ ไม่สามารถติดตามได้ในภาพถ่าย จึงเลือกใช้เฉพาะกรวดขนาดใหญ่ที่เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ เพื่อความแม่นยำของข้อมูล แม้ว่าจะเป็นการติดตามเฉพาะอนุภาคขนาดใหญ่ แต่จากผลการทดลองพบว่า เส้นทางการไหลและรูปแบบการสะสมของกรวดขนาดใหญ่สะท้อนพฤติกรรมโดยรวมของวัสดุได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ประกอบกับข้อมูลเชิงปริมาณอื่น ๆ เช่น แรงกระทำหรือการแผ่กระจายของวัสดุ เพื่อประเมินผลของโครงสร้างป้องกันต่อการไหลของวัสดุเม็ดแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัสดุแสดงดังภาพ 72 เป็นการทดลองที่ความชันการไหล 35 องศา จะเห็นว่าการทดลองทางกายภาพอนุภาคมีพฤติกรรมการกระดอนระหว่างการไหล ในขณะที่แบบจำลองเชิงตัวเลขไม่แสดงลักษณะการกระดอนดังกล่าว ที่เวลา 1.49 วินาที อนุภาคไหลมาถึงโครงสร้างป้องกัน เมื่อเกินการชนกรณีการทดลองทางกายภาพอนุภาคมีการสะท้อนกลับมากกว่ากรณีแบบจำลองเชิงตัวเลข ในช่วงเวลา 2.03 วินาที เริ่มสังเกตเห็นกลไกการกองขึ้นของวัสดุจากสองกรณี วินาทีที่ 2.57 จะสังเกตเห็นส่วนที่เคลื่อนที่และส่วนที่หยุดนิ่งของอนุภาคได้ชันเจน และเห้นกลไกลการไหลขึ้นกองวัสดุที่หยุดนิ่ง ที่เวลา 3.11 วินาที แบบจำลองเชิงตัวเลขอนุภาคหยุดนิ่งแล้วแต่ในการทดลองทางภาพกายยังมีอนุภาคส่วนท้ายการไหล จากภาพรวมของทั้งสองกรณี พบว่า อนุภาคในการทดลองทางกายภาพมีลักษณะการกระดอนและกระจายตัวมากกว่า ขณะที่แบบจำลองเชิงตัวเลขแสดงพฤติกรรมของอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและระหว่างอนุภาคกับพื้นผิวในแบบจำลองที่

แตกต่างจากการทดลองจริง นอกจากนี้ แบบจำลองยังแสดงให้เห็นว่า อนุภาคหยุดนิ่งเร็วกว่ากรณีทดลอง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากข้อจำกัดในการกำหนดพารามิเตอร์หรือปัจจัยบางประการที่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลองจริง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละช่วงเวลา พบว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถอธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองทางกายภาพ

เพื่อตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในการใช้เทคนิค PTV (Particle Tracking Velocimetry) อธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง การทดลองทางกายภาพจึงถูกดำเนินการร่วมกับการวิเคราะห์ภาพถ่ายในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อดึงข้อมูลตำแหน่ง ความเร็ว และทิศทางของอนุภาคแต่ละจุด เทคนิค PTV ช่วยให้สามารถสังเกตกลไกการไหลได้อย่างละเอียด ทั้งในช่วงต้นของการไหล การปะทะกับโครงสร้าง และการสะสมตัวบริเวณฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถแสดงพฤติกรรมเฉพาะ เช่น การสะท้อนกลับ การแยกชั้น และการหมุนของอนุภาคหลังชนได้อย่างชัดเจน จากภาพ 72 หนึ่งลูกศรแสดงการเคลื่อนที่ของหนึ่งอนุภาคภายในช่วงเวลา 0.03 วินาที และสีของลูกศรแสดงความเร็วในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของพฤติกรรมการไหลในรายละเอียดระดับอนุภาค แม้ว่าเทคนิค PTV จะมีข้อจำกัดในด้านความคมชัดของอนุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้มีแนวโน้มกระจายตัวสูงและเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งส่งผลให้การติดตามตำแหน่งและทิศทางผ่านการวิเคราะห์ภาพเกิดความคลาดเคลื่อน อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้อนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นร่วมกับการปรับตั้งค่าของระบบกล้องและแสงสว่างอย่างเหมาะสม สามารถลดข้อจำกัดดังกล่าวลงได้ในระดับหนึ่ง เทคนิค PTV ยังคงเป็นเครื่องมือที่ให้ข้อมูลเชิงกลไกที่แม่นยำ และมีศักยภาพในการอธิบายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นพื้นฐานสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้างป้องกันในงานวิศวกรรมธรณีอย่างเป็นระบบ

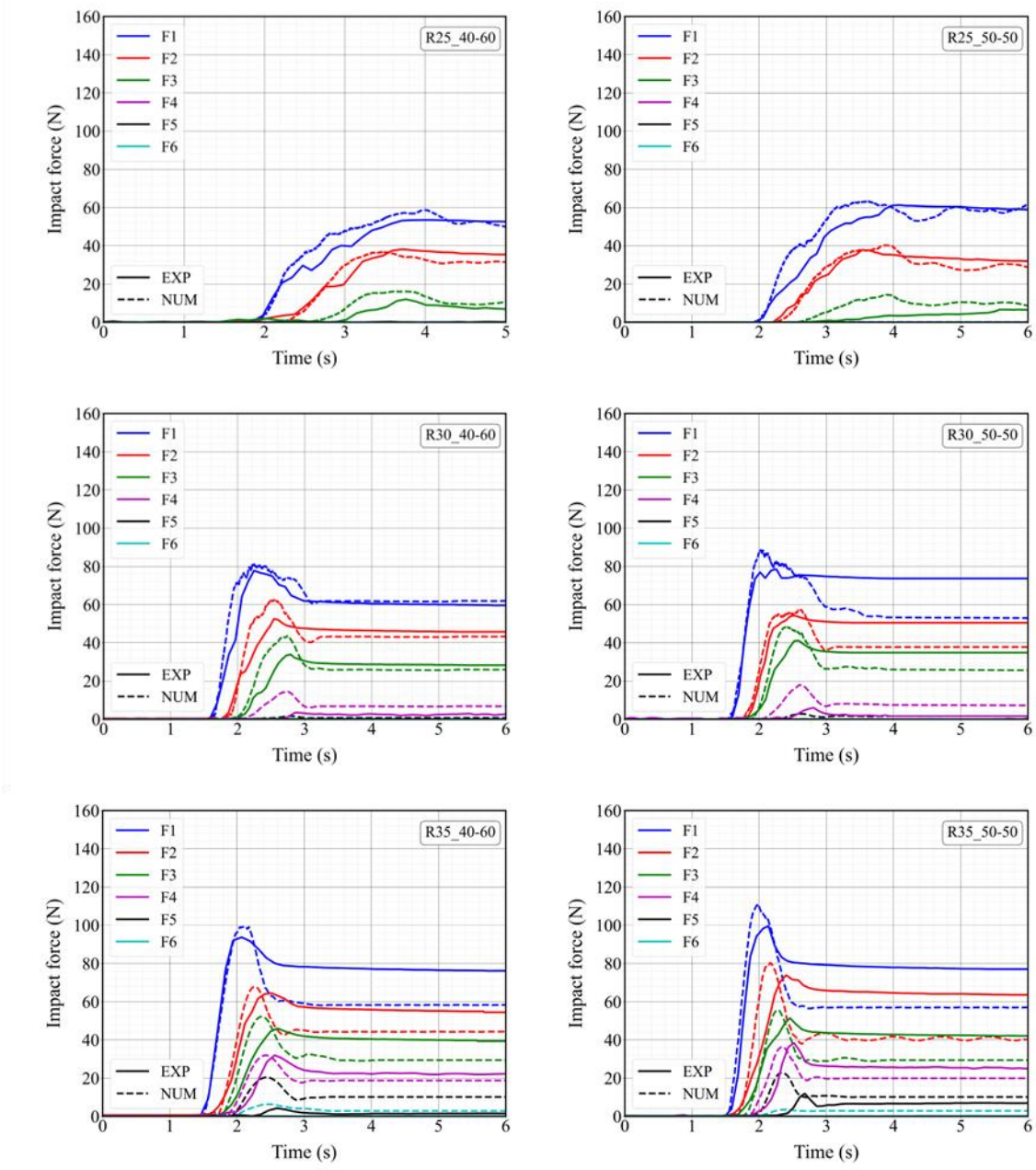


ภาพ 72 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง (R35_100-0)

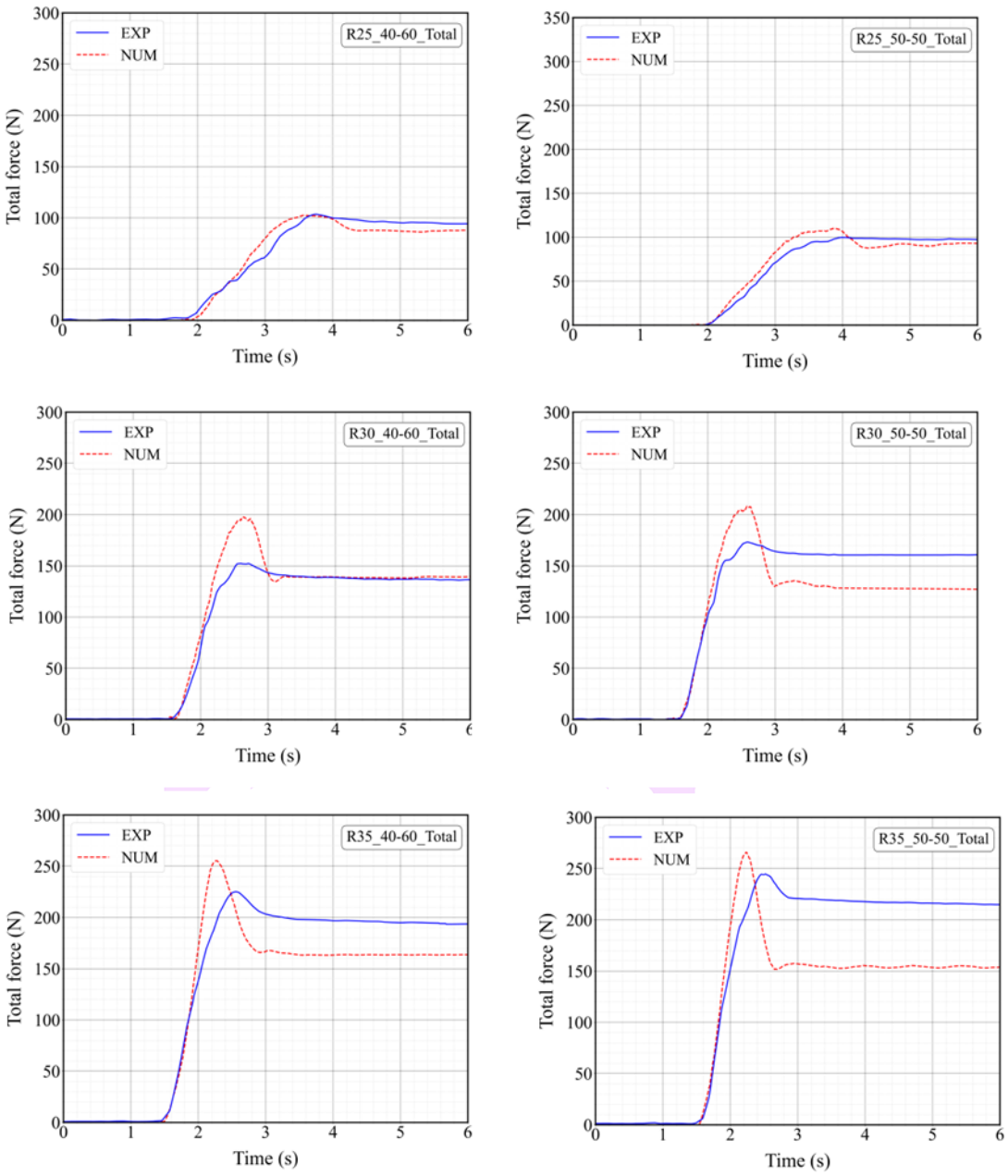
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแรงกระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็งระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM และการทดลองทางกายภาพ ภาพ 73 แสดงแรงย่อยที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ เส้นทึบจะเป็นแรงกระทำของการทดลองทางกายภาพ (EXP) ส่วนเส้นประเป็นแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (NUM) จะเห็นว่าแรงกระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง มีความใกล้เคียงกันลักษณะแนวโน้มของกราฟเหมือนกัน ที่ความชัน 25 องศา ลักษณะแรงที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด เนื่องจากเป็นการชนที่ความซับซ้อนน้อยที่สุดเป็นลักษณะค่อย ๆ ไหลมาชน ส่วนที่ความชัน 30 ผลจากการเปลี่ยนความชันทำให้การชนเริ่มซับซ้อนขึ้นทำให้มีโอกาสคลาดเคลื่อนสูง แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีแรงกระทำมากกว่า และมีแรงกระทำถึงตัวโหลดเซลล์ตัวที่ 4 สำหรับความชัน 35 องศา จะเห็นความคลาดเคลื่อนได้ชัดเจนที่สุด แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีลักษณะแรงที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการทดลองทางกายภาพ และมีแรงกระทำถึงโหลดเซลล์ตัวที่ 6 ในขณะที่การทดลองทางกายภาพมีแรงกระทำถึงโหลดเซลล์ตัวที่ 5 จากภาพ 74 แสดงแรงรวมที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความชัน 25 องศา แรงกระทำสูงสุดมีค่าร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยทั้งสองส่วนผสมเท่ากับ 9.09 ที่ความชัน 30 แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 205.08 นิวตัน (R30_40-60_NUM) และ 215.62 นิวตัน (R30_50-50_NUM) ในขณะที่การทดลองทางกายภาพมีแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 152.32 นิวตัน (R30_40-60_EXP) และ 173.26 นิวตัน (R30_40-60_EXP) จะเห็นว่า แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีแรงกระทำที่จุดสูงสุดมากกว่า และเมื่อวัสดุหยุดนิ่งแรงคงค้างมีค่าน้อยกว่าการทดลองทางกายภาพ สำหรับความชัน 35 องศา เห็นความแตกต่างของแรงกระทำสูงสุดกับแรงคงค้างได้อย่างชัดเจน แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีแรงกระทำสูงสุดมากกว่าทั้งสองส่วนผสม แต่มีแรงคงค้างเมื่อวัสดุหยุดนิ่งน้อยกว่า แรงกระทำสูงสุดที่มากกว่าในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีสาเหตุมาจากลักษณะของการคำนวณที่สามารถตอบสนองต่อเหตุการณ์การชนได้อย่างรวดเร็วและละเอียด เนื่องจากแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM แบ่งวัตถุออกเป็นอนุภาคย่อยแต่ละตัวที่สามารถตรวจสอบแรงปฏิสัมพันธ์ได้แบบรายอนุภาค ส่งผลให้การจำลองแรงในช่วงที่เกิดการชนสามารถบันทึกแรงกระแทกได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ทำให้แรงสูงสุดที่ปรากฏในแบบจำลองมีค่าสูงกว่าการทดลองทางกายภาพ อย่างไรก็ตามแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เป็นองค์ประกอบแบบไม่เสียรูป ซึ่งต่างกับสภาพความเป็นจริงของการชนที่รุนแรง เช่น การบุบตัวของโครงสร้างป้องกัน หรือการเปลี่ยนรูปถาวรของอนุภาค จึงทำให้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ไม่สามารถสะสมพลังงานภายในวัสดุได้เหมือนจริง ส่งผลให้หลังจากการชนแรงคงค้างในแบบจำลองเชิงตัวเลขจะลดลงอย่างรวดเร็ว อีกทั้งแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กำหนดให้แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมีค่าคงที่และจำกัด ซึ่งต่างจากสถานการณ์จริงที่พื้นผิววัสดุอาจมีความขรุขระหรือการเปลี่ยนแปลงสภาพระหว่างการชน เช่น การสะสมฝุ่นหรือการเกาะติดกันของอนุภาค ทำให้ในการทดลองจริงแรงคงค้างยังสามารถปรากฏอยู่

แม้ว่าวัสดุจะหยุดนิ่งแล้ว ในขณะที่ใน DEM เมื่ออนุภาคหยุดเคลื่อนที่ แรงที่เคยกระทำก็จะลดลง ส่งผลให้ค่าแรงคงค้างในแบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากการทดลองทางกายภาพ นอกจากนี้ เวลาในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ถูกแบ่งย่อยเป็นช่วงเวลาเล็กมาก (time steps) ทำให้สามารถบันทึกแรงเปลี่ยนแปลงเฉียบพลันได้ทันที ซึ่งต่างจากอุปกรณ์วัดแรงในการทดลองทางกายภาพที่มีการตอบสนองต่อแรงกระทำในช่วงเวลาที่จำกัด ส่งผลให้ค่าแรงสูงสุดในแบบจำลองสูงกว่าค่าที่วัดได้จริง ดังนั้น ความแตกต่างของค่าแรงกระทำระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ จึงสามารถอธิบายได้จากทั้งข้อจำกัดของการตั้งสมมติฐานในแบบจำลอง และคุณสมบัติของวัสดุในโลกจริงที่ซับซ้อนและมีองค์ประกอบด้านกลศาสตร์หลายมิติ

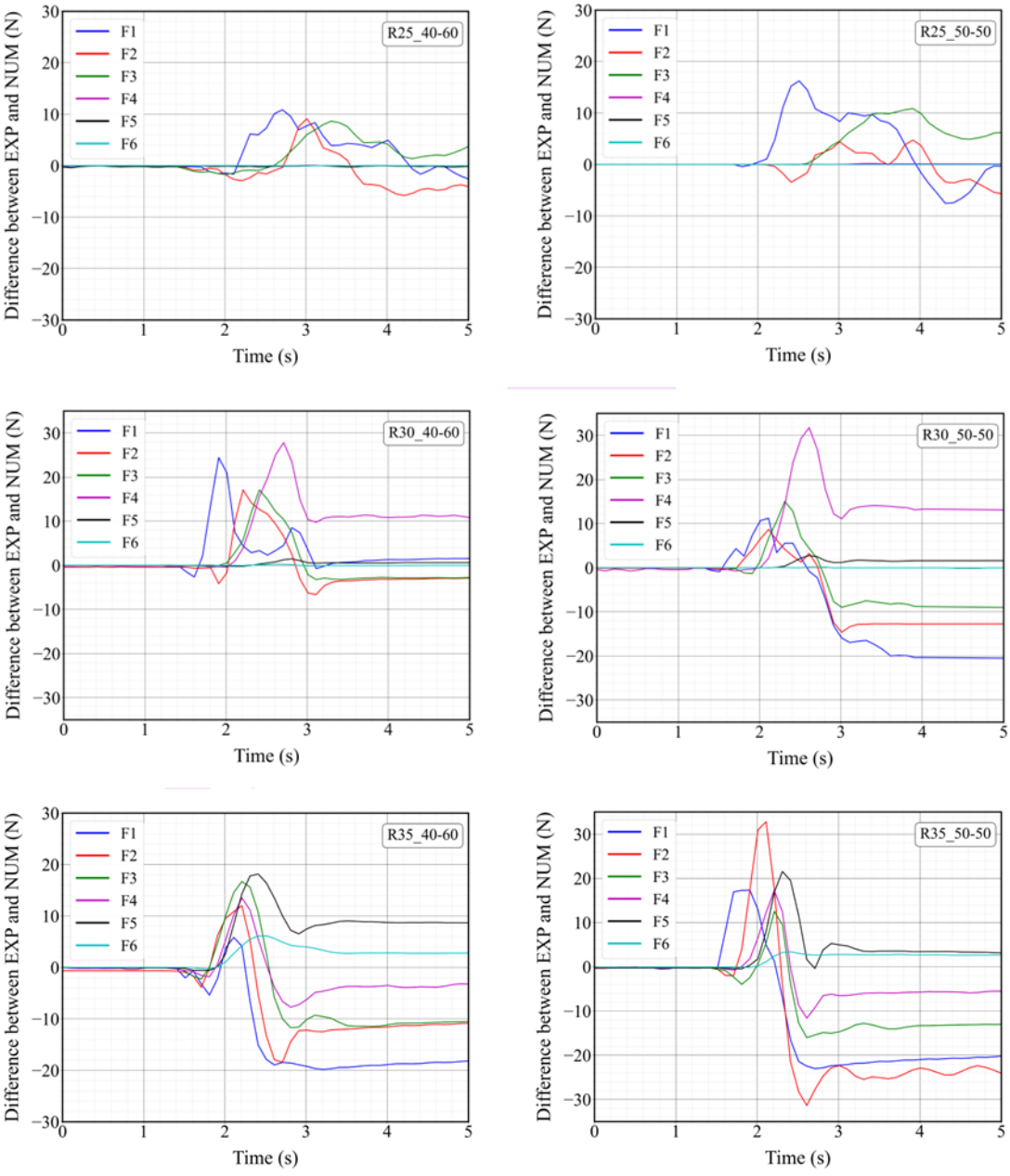
ภาพที่ 75 แสดงผลต่างของค่าแรงย่อยที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันในแต่ละช่วงเวลา ขณะที่ภาพที่ 76 แสดงผลต่างของค่าแรงรวม โดยผลต่างนี้ได้จากการหาค่าระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลขกับการทดลองทางกายภาพ (NUM - EXP) ซึ่งค่าจะเป็นบวกเมื่อแรงจากแบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่ามากกว่า และเป็นลบเมื่อมีค่าน้อยกว่า จากกราฟสามารถสังเกตได้ว่า ช่วงเวลาที่มีความแตกต่างของแรงกระทำมากที่สุดคือ ช่วงที่วัสดุเริ่มชนกับโครงสร้างจนถึงช่วงที่วัสดุหยุดนิ่ง (ประมาณ 1.5–3 วินาที) หลังจากนั้นกราฟจะแสดงค่าที่คงที่มากขึ้น เนื่องจากเป็นผลต่างที่เกิดจากแรงคงค้างซึ่งมีความเสถียรกว่าช่วงที่เกิดการปะทะโดยตรง โดยมีค่าร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยของแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 14.40



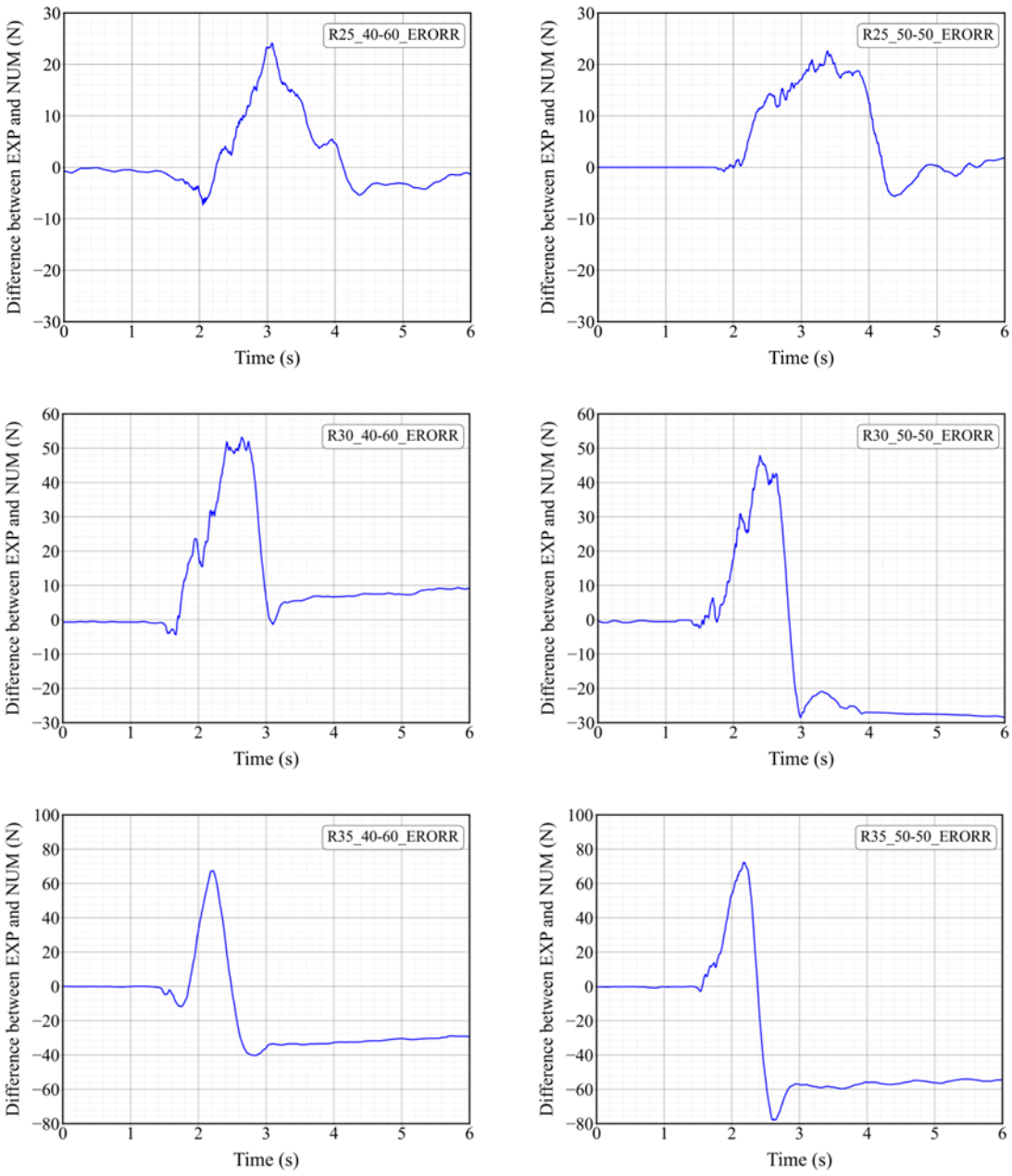
ภาพ 73 เปรียบเทียบแรงย่อยที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง



ภาพ 74 เปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง



ภาพ 75 ผลต่างระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ ของค่าแรงย่อยที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันในแต่ละช่วงเวลา



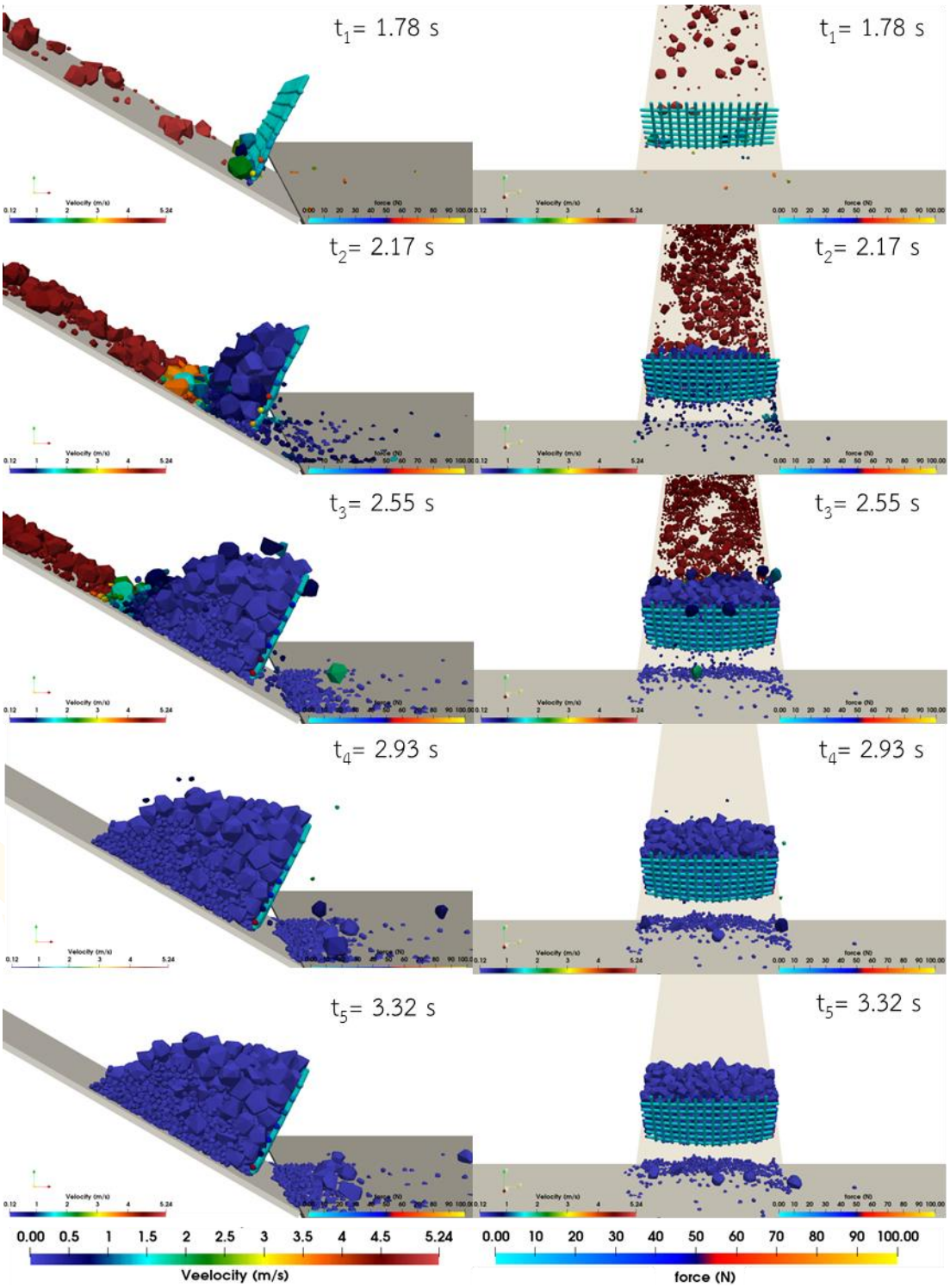
ภาพ 76 ผลต่างระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ ของค่าแรงรวมที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันในแต่ละช่วงเวลา

4.3 พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น

วัตถุประสงค์ในส่วนนี้เพื่อให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM และเปรียบเทียบแรงกระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นกับการทดลองทางกายภาพ

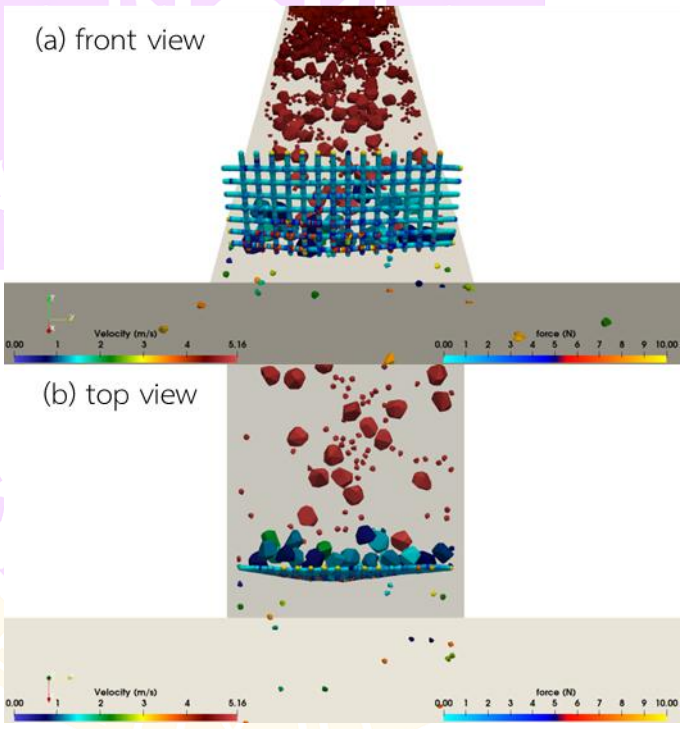
แบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อกระทบกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นแสดงให้เห็นถึงลักษณะการถ่ายโอนแรงที่แตกต่างจากกรณีของโครงสร้างแบบแข็งอย่างมีนัยสำคัญ โดยโครงสร้างแบบยืดหยุ่นสามารถดูดซับพลังงานจากการกระแทกได้มากกว่า ผ่านการเปลี่ยนรูปชั่วคราวและการสั่นขององค์ประกอบในระบบ ซึ่งช่วยลดค่าความเร่งสูงสุดและแรงกระแทกที่วัสดุกระทำต่อโครงสร้างได้อย่างชัดเจน ภาพ 77 แสดงการไหลของวัสดุเม็ดแห้งชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 30 องศา วัสดุจะเริ่มชนโครงสร้างป้องกันที่วินาที 1.78 ที่โหลดเซลล์ตัวที่ 1 จะเห็นว่ามีแรงกระทำ (สีน้ำเงิน) นั้นคือ แรงจากน้ำหนักของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ในกราฟแรงกระทำ จะลบแรงจากน้ำหนักของโครงสร้างออก ในการสังเกตแรงที่กระทำกับโครงสร้างป้องกัน (รูปด้านขวา) แรงจะแสดงที่ตำแหน่งชิ้นส่วนขอบด้านซ้าย ด้านขวา และด้านบน เนื่องจาก แรงที่กระทำจะถูกถ่ายโอนไปยังตำแหน่งที่ถูกยึด ที่แถบสีแสดงแรงเป็น 0 ชิ้นส่วนที่เป็นสีฟ้า เพราะแรงถูกถ่ายไปแล้ว เมื่อวัสดุไหลชนโครงสร้างป้องกัน วินาทีที่ 2.17 อนุภาคขนาดเล็กจะไหลรอดช่องของโครงสร้างป้องกัน ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่จะชนและไหลขึ้นโครงสร้างป้องกัน การสะท้อนกลับของอนุภาคมีน้อยกว่าโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่ไหลดเซลล์ตัวที่ 1 เป็นสีแดง แสดงถึงแรงดึงที่เกิดขึ้น ที่ 2.55 วินาที วัสดุไหลขึ้นไปจนร้นโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น จึงมีวัสดุบางส่วนไหลข้ามโครงสร้างป้องกัน ที่ตำแหน่งโหลดเซลล์วัดแรง ตัวที่ 1 (F1) เป็นสีเหลือง ตัวที่ 2 (F2) เป็นสีแดง และตัวที่ 3 (F3) เป็นสีน้ำเงิน แสดงถึงแรงที่ต่างกันระหว่างโหลดเซลล์แต่ละตัว ที่ 2.93 วินาที เมื่อวัสดุไหลกองถึงความสูงกองสูงสุด วัสดุจากท้ายการไหลจะไหลมาเพิ่มขนาดการกองให้ยาวขึ้น วัสดุจะหยุดนิ่งที่ 3.32 วินาที จะสังเกตว่า แรงกระทำคงค้างจากการกองวัสดุจะกระทำมากที่สุดด้านล่างโครงสร้างป้องกันและน้อยลงตามความสูง และตำแหน่งตรงกลางกองวัสดุ (สังเกตจากชิ้นส่วนขอบด้านบนสุด)

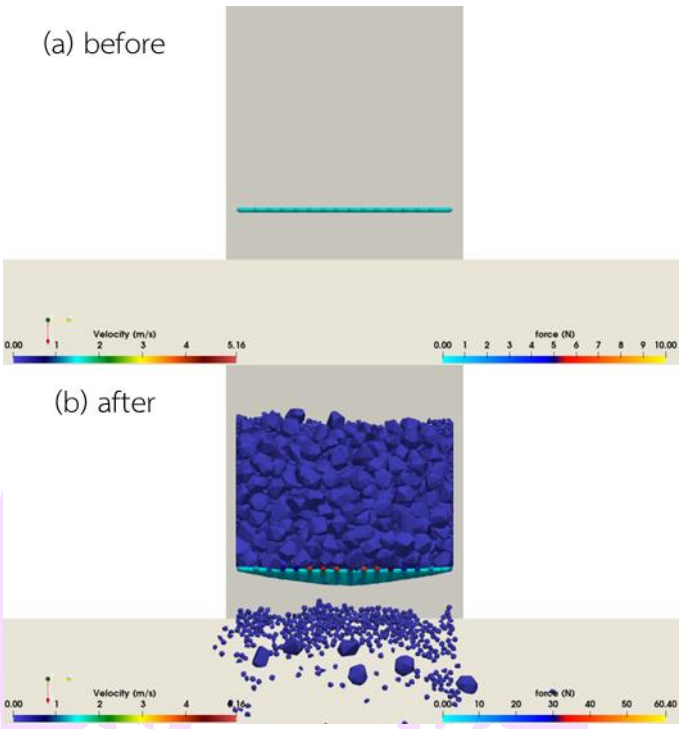


ภาพ 77 การไหลของวัสดุเม็ดแห้งชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 30 องศา (F30_50-50)

ภาพที่ 78 แสดงกลไกการเคลื่อนที่ของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นซึ่งทำหน้าที่ลดแรงกระทำจากวัสดุที่ไหลมากระทบ เมื่อวัสดุชนกับโครงสร้างป้องกัน จุดที่เกิดการกระแทกจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแรงกระทำ ทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนรูปบางส่วน จากนั้นเส้นตาข่ายที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างจะเกิดแรงดึงภายในเพื่อพยายามรักษารูปร่างเดิมของระบบ ชิ้นส่วนของตาข่ายแต่ละจุดจะถ่ายแรงไปยังชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกัน ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายแรงต่อเนื่องไปตามแนวของโครงสร้าง เมื่อแรงดังกล่าวถ่ายไปถึงชิ้นส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (จุดยึดกับฐานหรือเสา) ชิ้นส่วนนั้นจะทำหน้าที่ต้านการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่รับแรงดึงสูงสุด และแสดงค่าของแรงที่โครงสร้างป้องกันต้องรับในที่สุด ภาพ 79 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นก่อนและหลังการทดลอง จะเห็นว่า ตรงกลางส่วนล่างของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจะเปลี่ยนรูปหรือยืดตัวที่สุด เนื่องจากเป็นจุดที่แรงคงค้างกระทำมากที่สุด



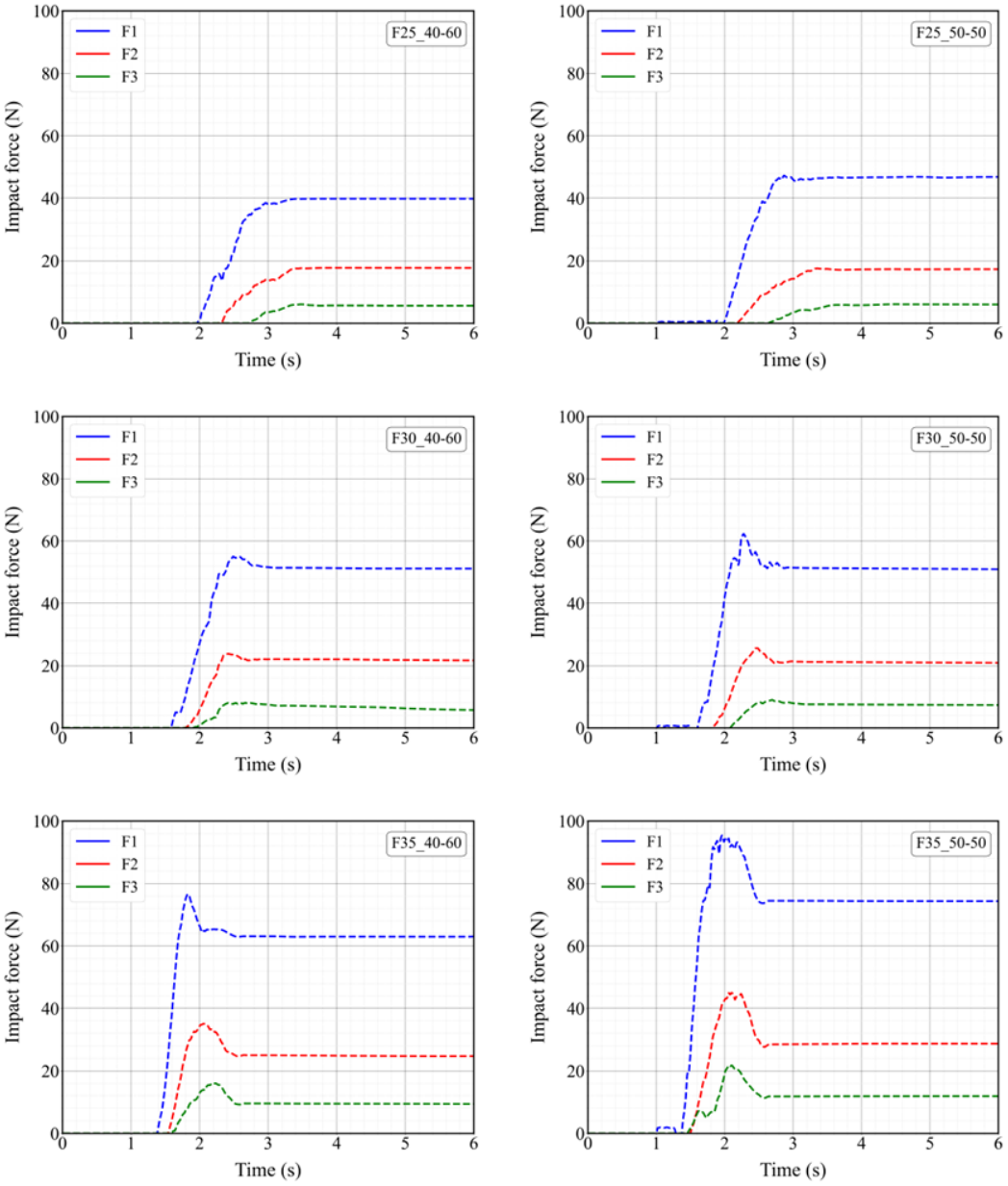
ภาพ 78 การเคลื่อนที่ของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นเมื่อวัสดุชน (a) มุมมองด้านหน้า (b) มุมมองด้านบน รายการทดลอง F30_50-50



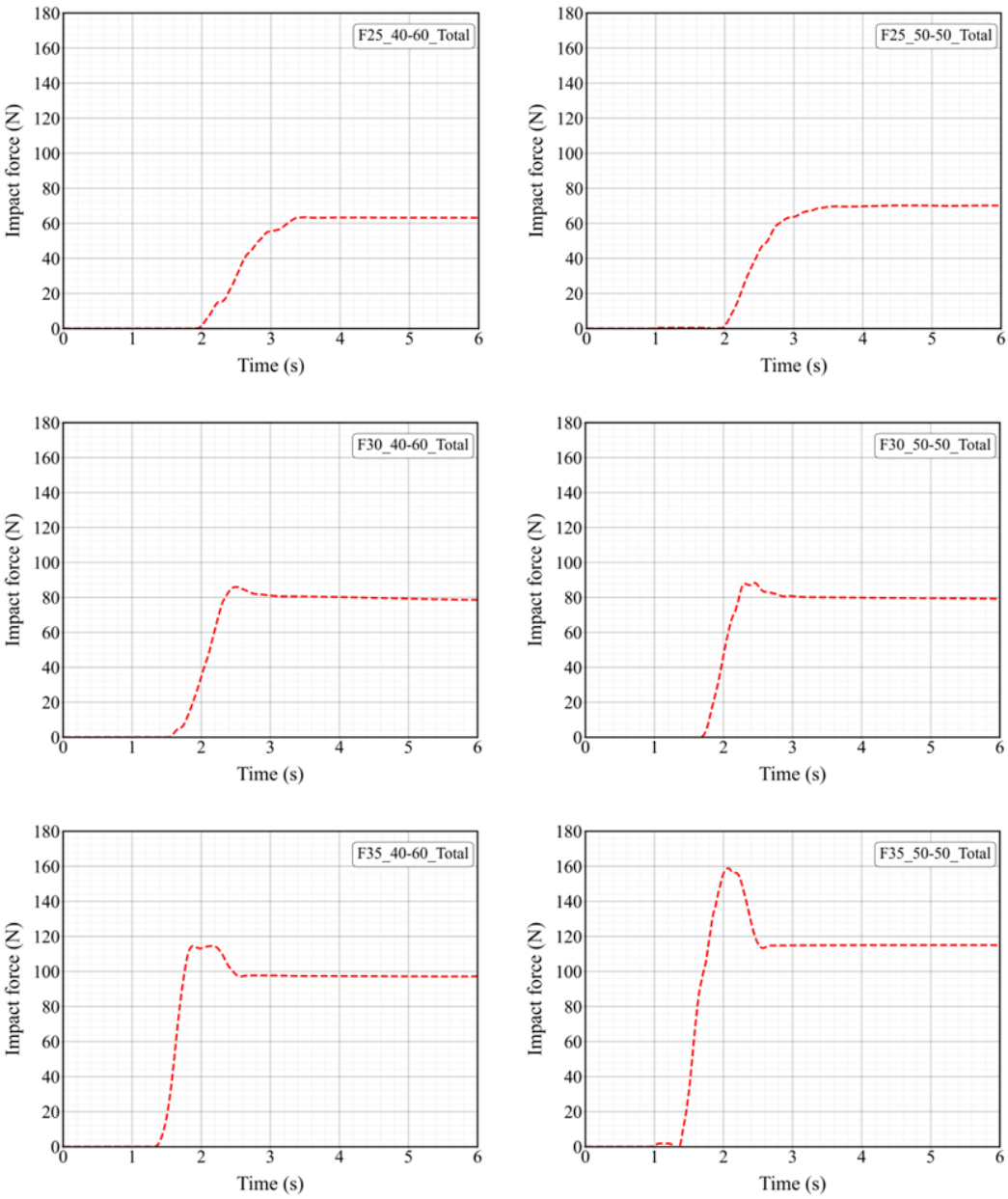
ภาพ 79 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นก่อนและหลังการไหล (a) ก่อนการทดลอง (b) หลังการทดลอง รายการทดลอง F30_50-50

แรงกระทำของวัสดุต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น แสดงดังภาพ 80 และ 81 โดยพิจารณาผลกระทบในแต่ละค่าความชันที่แตกต่างกัน ที่ความชัน 25 องศา ความเร็วของการไหลและพลังงานของวัสดุยังไม่มากนัก ส่งผลให้ลักษณะแรงที่เกิดขึ้นเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป แรงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องก่อนที่จะถึงค่าสูงสุด จากนั้นแรงมีแนวโน้มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อความชันเพิ่มเป็น 30 องศา ความเร็วของการไหลก่อนชนโครงสร้างป้องกันเพิ่มขึ้นร้อยละ 29.81 ส่งผลให้พลังงานจากการไหลเพิ่มมากขึ้น อัตราเพิ่มขึ้นของแรงมีมากขึ้น ลักษณะแรงมีช่วงที่เพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดแล้วลดลงเล็กน้อยก่อนจะคงที่ โดยที่แรงกระทำเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 25.77 ส่วนที่ความชัน 35 องศา ซึ่งเป็นความชันมากที่สุดในการศึกษานี้ พลังงานและความเร็วของการไหลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยความเร็วของการไหลก่อนชนโครงสร้างป้องกันเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.53 จากความชัน 30 องศา ส่งผลให้พลังงานจลน์รวมสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แรงกระทำจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุด จากนั้นลดลงเข้าสู่ระดับคงที่ในรูปของแรงคงค้าง โดยแรงกระทำเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 33.04 จากความชัน 30 องศา ความแตกต่างของลักษณะแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับความชัน สะท้อนให้เห็นว่า ความชันมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง และการตอบสนองของโครงสร้างป้องกัน

แบบยืดหยุ่น ทั้งในด้านความเร็ว การกระจายแรง และแรงคงค้าง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดอนุภาค พบว่า วัสดุที่มีสัดส่วนอนุภาคขนาดใหญ่จำนวนมาก มีแนวโน้มก่อให้เกิดแรงกระทำต่อโครงสร้างมากกว่า ในทุกระดับความชัน เนื่องจากมวลที่มากขึ้นของอนุภาคเหล่านี้ ส่งผลให้พลังงานจลน์ของระบบเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการชน



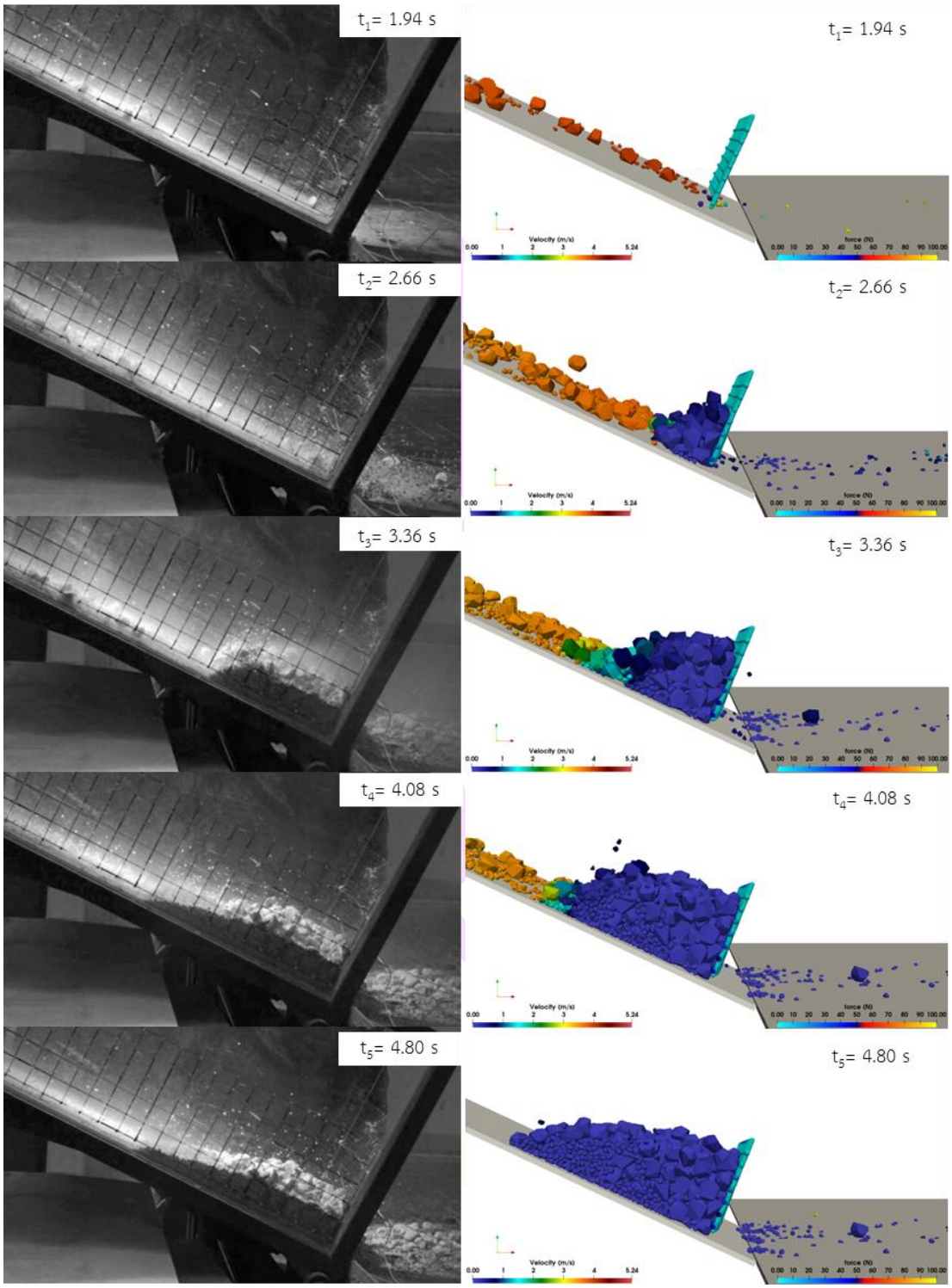
ภาพ 80 แรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น จากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



ภาพ 81 แรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น จากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ

เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ

ภาพที่ 82 แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดแห้ง เมื่อไหลมาชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ส่วนผสมของกรวดขนาดใหญ่ ร้อยละ 40 และกรวดละเอียด ร้อยละ 60 ที่ความชัน 25 องศา (F25_40-60) ในการจำลองเชิงตัวเลข DEM พบว่า วัสดุเริ่มชนกับโครงสร้างที่เวลา 1.94 วินาที อนุภาคขนาดเล็กซึ่งไหลมาก่อนสามารถทะลุผ่านช่องว่างของโครงสร้างได้ ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่จะกระแทกกับโครงสร้างและเริ่มสะสมที่ฐาน สำหรับการทดลองทางกายภาพ ซึ่งใช้ลวดสลิงร้อยผ่านตาข่ายเหล็ก พบว่ามีช่องว่างระหว่างพื้นรางกับโครงสร้างป้องกัน ส่งผลให้วัสดุบางส่วนสามารถไหลผ่านช่องนี้ได้ ลักษณะการกองของวัสดุในทั้งสองกรณีมีความคล้ายคลึงกัน อนุภาคที่ไหลมาก่อนจะหยุดนิ่งที่ฐาน และอนุภาคที่ตามมาจะไหลขึ้นทับกันจนเกิดเป็นกองของวัสดุที่มีความสูงเพิ่มขึ้น แล้วค่อย ๆ ขยายออกด้านยาวจนวัสดุหยุดนิ่ง อนุภาคขนาดใหญ่มีแนวโน้มสะสมตัวอยู่ด้านบนของกองวัสดุ ขณะที่อนุภาคขนาดเล็กแทรกตัวอยู่ด้านล่างและส่วนท้ายของกองวัสดุ การแยกขนาดอนุภาคระหว่างการไหลสามารถสังเกตได้ชัดเจนในกรณีการทดลองทางกายภาพ ซึ่งเป็นผลจากแรงเฉื่อยและแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สามารถจำลองแนวโน้มการแยกชั้นของอนุภาคได้ แต่ความละเอียดของการแยกชั้นอาจไม่ชัดเจนเท่ากับที่สังเกตได้จากการทดลองจริง เนื่องจาก ข้อจำกัดด้านความละเอียดของพารามิเตอร์และปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมในการทดลองทางกายภาพ โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบจำกัดการเคลื่อนที่ในบางจุด ส่งผลให้การเปลี่ยนรูปของโครงสร้างมีขอบเขตจำกัด ขณะที่โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นในการทดลองทางกายภาพสามารถเปลี่ยนรูปได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการดูดซับแรงกระแทกและเปลี่ยนทิศทางของวัสดุที่กระทบได้ดีกว่า ส่งผลต่อรูปแบบการสะสมของวัสดุบริเวณฐานโครงสร้างและการทะลุผ่านของอนุภาค

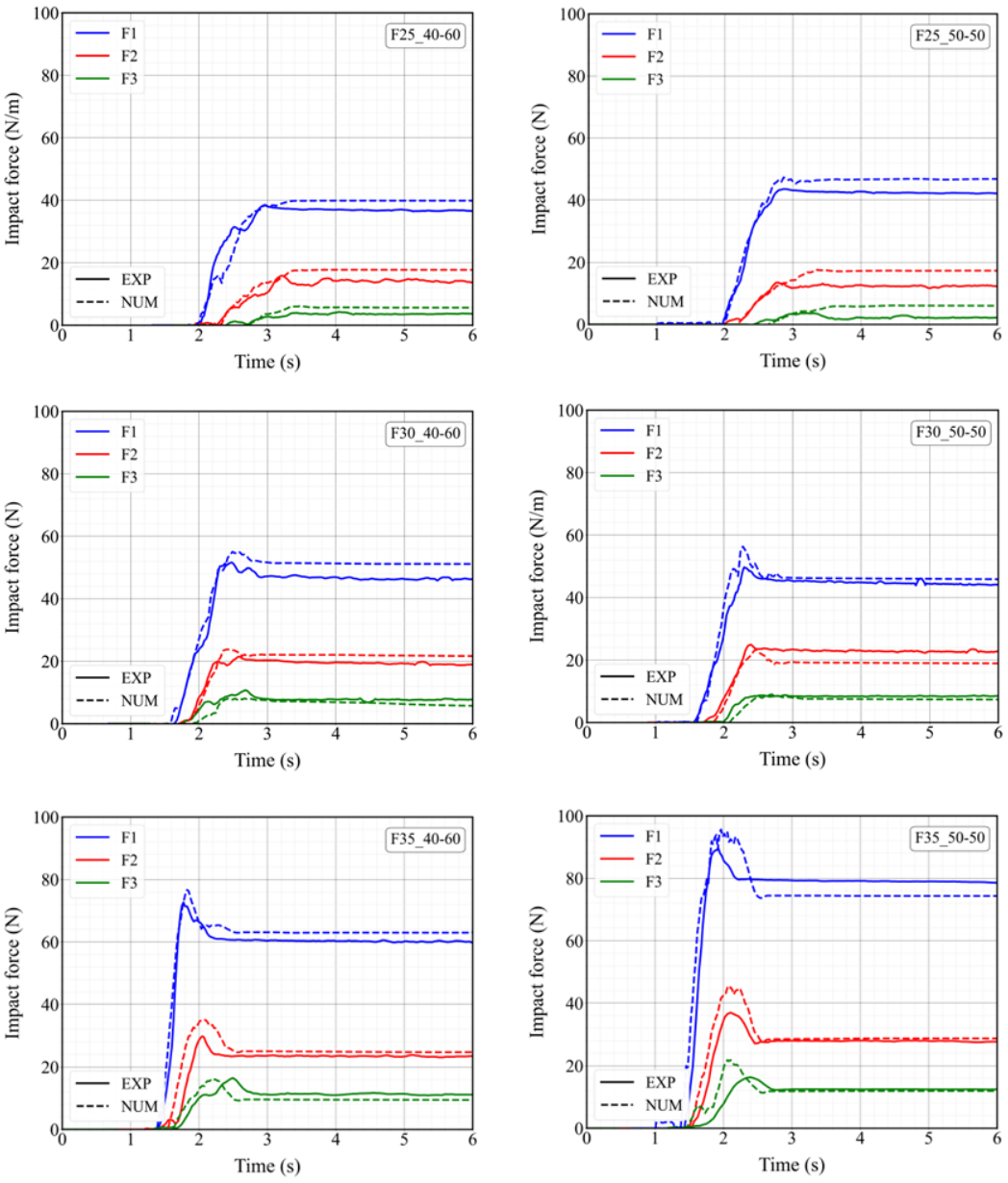


ภาพ 82 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง เมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น ส่วนผสมของกรวดขนาดใหญ่ ร้อยละ 40 และกรวดละเอียด ร้อยละ 60 ความชัน 25 องศา (F25_40-60)

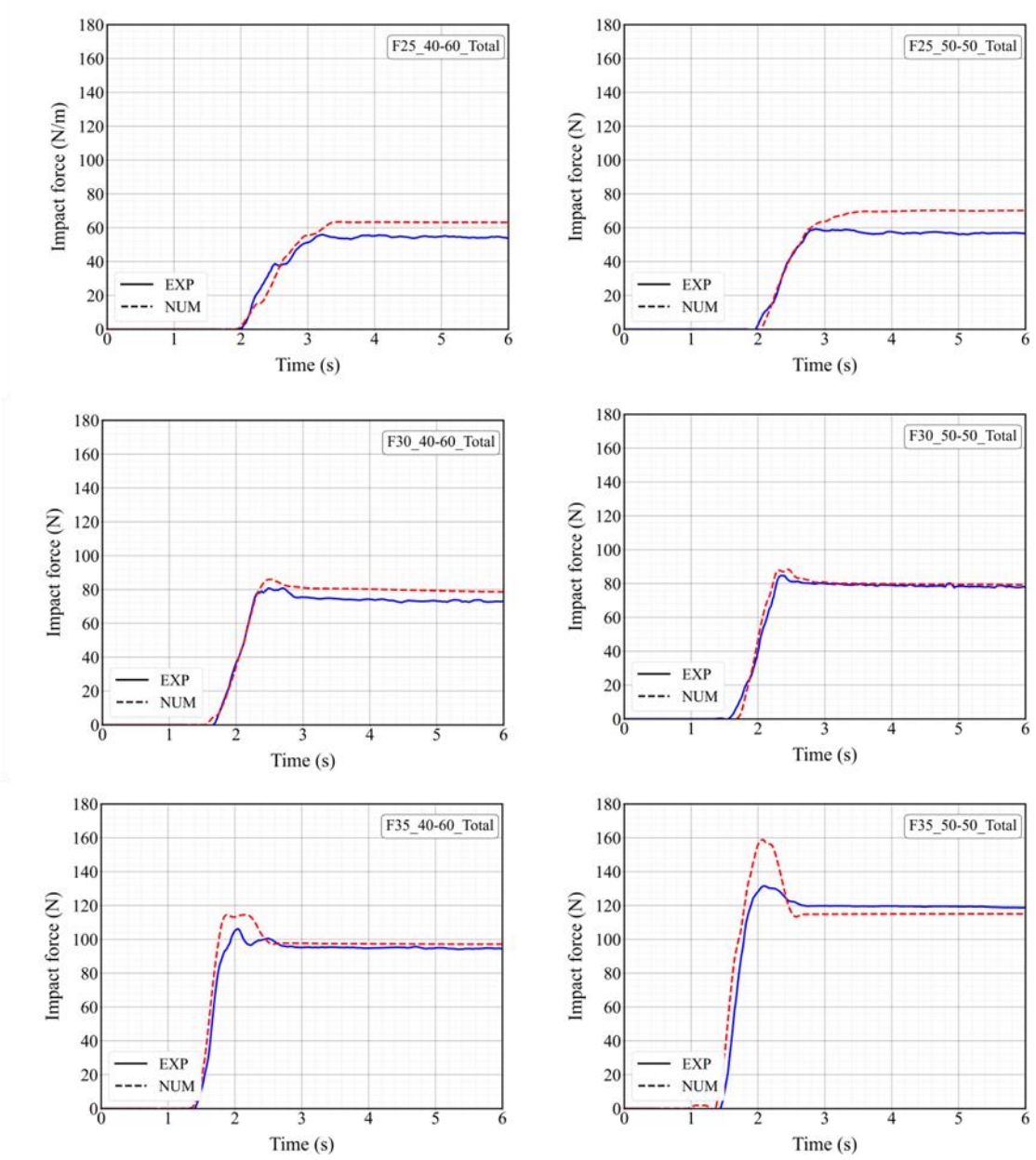
ภาพ 83 และ 84 แสดงการเปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นในรูปแบบแรงย่อยและแรงรวม ระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM และการทดลองทางกายภาพ จะเห็นว่า รูปแบบของแรงมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ทั้งในช่วงที่เกิดแรงสูงสุดและแรงคงค้างจากกองวัสดุ อย่างไรก็ตาม แรงที่กระทำกับโครงสร้างป้องกันกรณีแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีค่ามากกว่าในทุกความชันและทุกส่วนผสม จากกราฟแรงย่อยกระทำกับโครงสร้างป้องกัน ส่วนต่างของแรงที่วัดจากโหลดเซลล์ 1 ต่างกับ ค่าที่วัดได้จากตัวที่ 2 และ 3 มาก เนื่องจาก โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นสามารถเคลื่อนที่และกระจายแรงได้ดี พลังงานส่วนใหญ่ถูกสลายไปที่โหลดเซลล์ตัวที่หนึ่ง แรงจากการไหลที่ส่งไปถึงโหลดเซลล์ตัวที่สองกับสามจึงมีน้อย โดยที่แรงกระทำกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นในแต่ละการศึกษาแสดงดังตาราง 11 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพเท่ากับ 10.94 และค่า R^2 เท่ากับ 0.9673 แสดงถึงความสอดคล้องของผลการจำลองกับการทดลอง

ตาราง 11 แรงกระทำสูงสุดในแต่ละการทดลอง โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น

รายการทดลอง	การทดลองทางกายภาพ (EXP) (N)	แบบจำลองเชิงตัวเลข (DEM) (N)	ร้อยละความแตกต่าง (%)
25_40-60	55.94	63.48	11.87
25_50-50	59.22	70.20	15.64
30_40-60	80.82	86.27	6.31
30_50-50	84.73	89.74	5.57
35_40-60	106.14	115.20	7.87
35_50-50	131.52	161.16	18.39
เฉลี่ย			10.94



ภาพ 83 แรงย่อยที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ

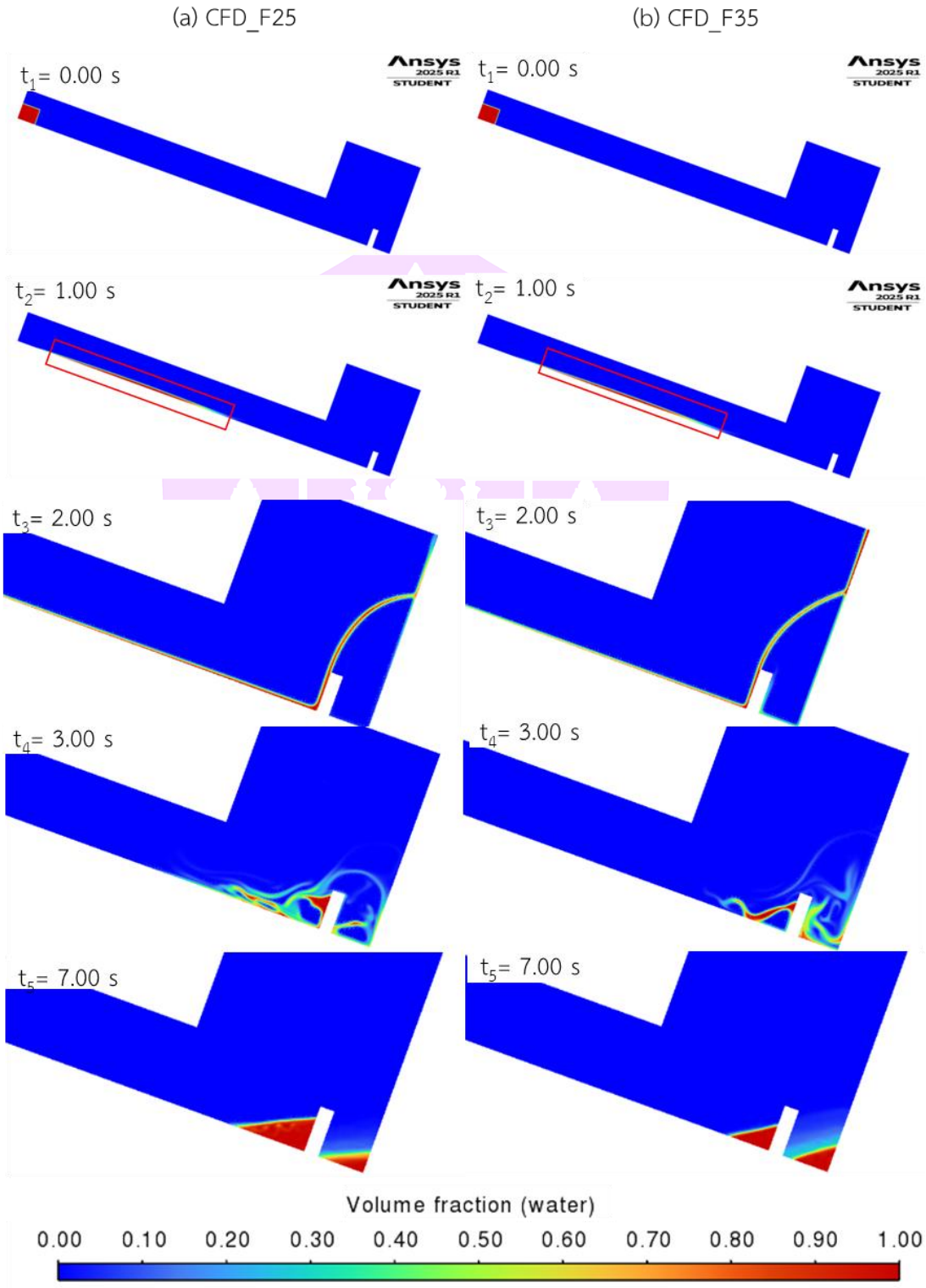


ภาพ 84 แรงกระทำรวมที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพ

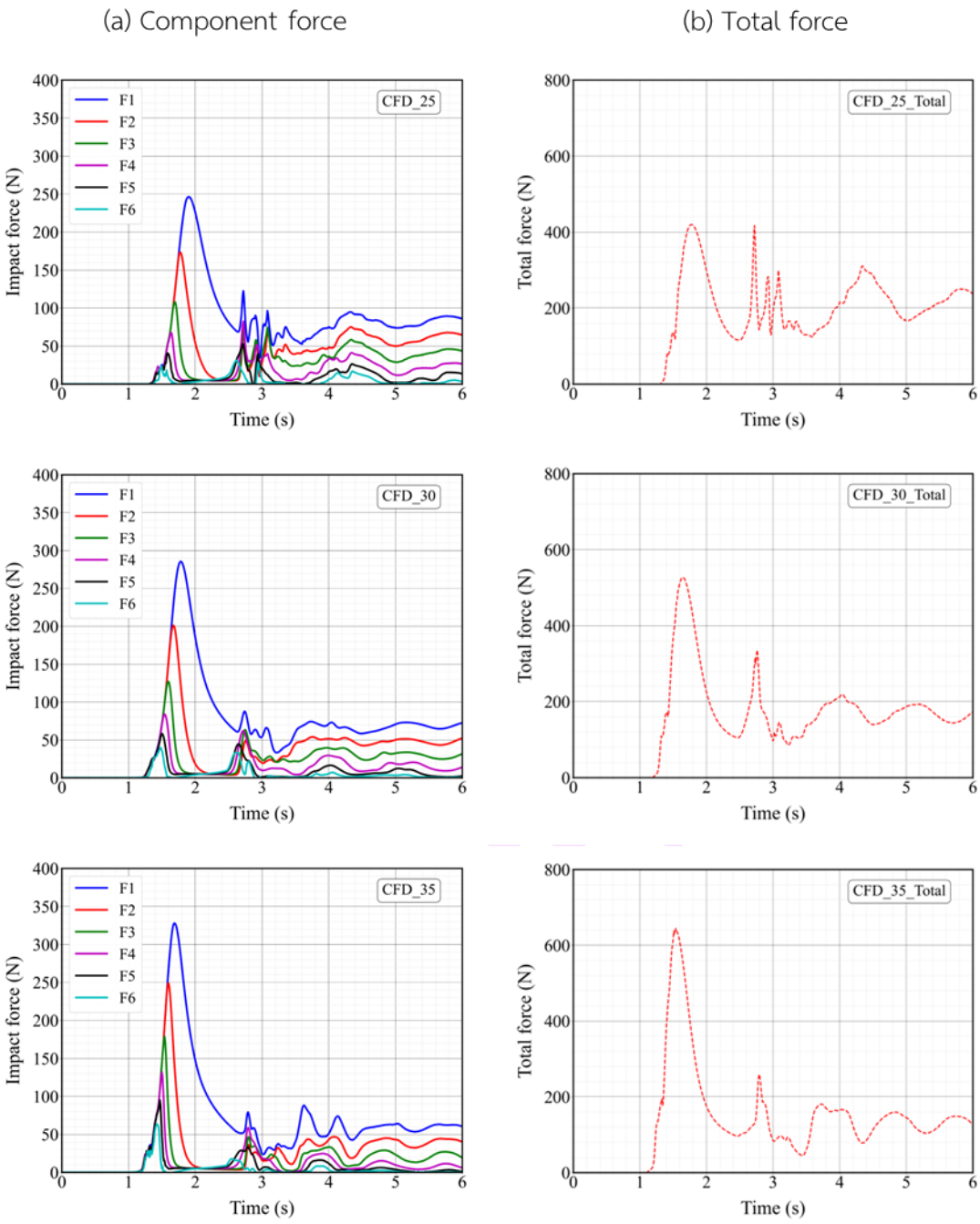
4.4 พฤติกรรมการไหลของวัสดุของเหลวต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง

ในการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเชิงพลศาสตร์ของไหล 2 มิติ (Computational Fluid Dynamics: CFD) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของวัสดุของเหลวเมื่อไหลมาชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง โดยทำการจำลองในสภาพเรขาคณิตและเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับการทดลองทางกายภาพ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ในแง่ของรูปแบบการไหล การกระจายความเร็ว แรงที่กระทำต่อโครงสร้าง และตำแหน่งที่เกิดแรงกระแทกสูงสุด

พฤติกรรมการไหลของวัสดุของเหลวจากต้นทางลงมาตามแนวลาดแสดงให้เห็นว่า ความเร็วของการไหลจะเพิ่มขึ้นตามแรงโน้มถ่วงโดยมีค่าดังนี้ 5.26 6.24 และ 7.65 เมตรต่อวินาที ที่ความชัน 25 30 และ 35 องศา ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์ เมื่อวัสดุของเหลวเคลื่อนที่ชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง จะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์และความดันไปยังโครงสร้างอย่างเฉียบพลัน ทำให้เกิดแรงกระแทกสูงสุดบริเวณจุดปะทะแรก จากนั้นวัสดุจะไหลย้อนขึ้นในแนวดิ่งในลักษณะของการไหลแบบซัดขั้น (run-up) จนถึงจุดที่พลังงานจลน์หมดลงและถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ทั้งหมด หลังจากถึงจุดสูงสุด วัสดุจะไหลกลับลงมาและปะทะโครงสร้างอีกครั้ง เกิดเป็นแรงกระทำรอบใหม่ในลักษณะคลื่น โดยมีการสั่นของแรง (force oscillation) ที่ค่อย ๆ ลดความถี่และแอมพลิจูดลงเมื่อเวลาผ่านไป จากการสูญเสียพลังงานผ่านแรงหนืดและแรงต้าน จนเข้าสู่ภาวะสมดุล วัสดุของเหลวจึงหยุดนิ่งบริเวณฐานของโครงสร้าง ภาพที่ 85 แสดงการเคลื่อนที่ของวัสดุของเหลวที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของความชันการไหล 25 และ 35 องศา เมื่อพิจารณาผลของความชันที่แตกต่างกันต่อพฤติกรรมการไหลของวัสดุ พบว่า เมื่อความชันเพิ่มขึ้น พลังงานของการไหลทั้งพลังงานจลน์และศักย์จะเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้วัสดุของเหลวสามารถไหลย้อนขึ้นบนโครงสร้างได้สูงมากขึ้น บางส่วนสามารถไหลข้ามโครงสร้างได้ และทำให้เกิดแรงกระแทกสูงที่บริเวณผิวปะทะแรก แรงที่กระทำบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD แสดงดังภาพที่ 86 โดยพบว่า แรงกระแทกสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความชันของการไหล เนื่องจาก พลังงานจลน์ของวัสดุเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกัน แรงที่เกิดจากการไหลย้อนกลับ (run-up) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความชันเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ที่ความชันต่ำ วัสดุส่วนมากไม่สามารถไหลข้ามโครงสร้างได้ จึงสะสมบริเวณด้านหน้าส่งผลให้เกิดการไหลย้อนกลับในปริมาณมาก และแรงกระทำช่วงหลังการปะทะมีค่าสูงกว่า ในทางกลับกัน ที่ความชันสูง วัสดุส่วนใหญ่สามารถไหลข้ามโครงสร้างไปได้ ทำให้ปริมาตรของการไหลย้อนกลับและแรงกระทำน้อยลง อีกทั้งยังเกิดความปั่นป่วนของการไหลน้อยลงด้วย



ภาพ 85 การเคลื่อนที่ของวัสดุของเหลวที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (a) ความชันการไหล 25 องศา (b) ความชัน 35 องศา



ภาพ 86 แรงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกับแบบแข็ง แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (a) แรงย่อย (b) แรงกระทำทั้งหมด

เปรียบเทียบพฤติการไหลระหว่างวัสดุของเหลวกับวัสดุเม็ดแห้ง

วัสดุของเหลวและวัสดุเม็ดแห้งเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งในแง่ของกลไกการเคลื่อนที่ แรงที่เกี่ยวข้อง และผลกระทบต่อโครงสร้างป้องกัน ในการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD สำหรับวัสดุของเหลว และแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM สำหรับวัสดุเม็ดแห้ง เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลเมื่อวัสดุเคลื่อนที่ลงมาตามความลาดชันและปะทะกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า วัสดุของเหลวมีพฤติกรรมการไหลแบบต่อเนื่อง (continuous flow) ซึ่งมีการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอมากกว่า และสามารถเกิดการไหลซัดขึ้นโครงสร้างได้ (run-up) โดยเฉพาะในกรณีที่มีความชันสูง เนื่องจาก พลังงานจลน์และแรงดันสะสม ในขณะที่วัสดุเม็ดแห้งมีลักษณะการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete flow) เกิดการชน การสะท้อน และการสะสมของอนุภาคที่ฐานโครงสร้าง ซึ่งแรงที่กระทำจะกระจุกตัวและแปรผันตามตำแหน่งของการชนและการสะสมของอนุภาค

แรงกระแทกสูงสุดที่กระทำกับโครงสร้างในกรณีวัสดุของเหลวมักเกิดขึ้นทันทีเมื่อวัสดุปะทะกับโครงสร้าง และลดลงตามการสลายพลังงานเป็นระลอกคลื่น ในขณะที่วัสดุเม็ดแห้งจะมีแรงกระแทกที่แปรผันมากกว่า และจะมีค่าสูงสุดในช่วงที่อนุภาคปะทะกับโครงสร้างป้องกันผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นแรงจะลดลงมาเป็นแรงคงค้างมีขนาดแรงขึ้นอยู่กับขนาดของการกองทับถม ซึ่งส่งผลให้แรงที่วัดได้จากโหลดเซลล์แสดงค่าที่แตกต่างกันระหว่างสองกรณีอย่างชัดเจน

จากการเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของวัสดุของเหลวและวัสดุเม็ดแห้ง สามารถสรุปได้ว่าวัสดุทั้งสองมีพฤติกรรมเชิงกลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในรูปแบบการถ่ายเทพลังงานและลักษณะการตอบสนองต่อโครงสร้างป้องกัน โดยวัสดุของเหลว แสดงพฤติกรรมการถ่ายเทพลังงานอย่างเฉียบพลันและรวดเร็ว อันเป็นผลมาจากลักษณะความต่อเนื่องและความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้อย่างอิสระ ขณะที่วัสดุเม็ดแห้ง ซึ่งเป็นระบบไม่ต่อเนื่อง (discrete system) แสดงพฤติกรรมแบบแปรผันที่ขึ้นอยู่กับการชนระหว่างอนุภาค การจัดเรียงตัวและแรงเสียดทานภายใน ซึ่งส่งผลต่อแรงกระทำอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การไหลของวัสดุของเหลวมักจะเกิดลักษณะของการไหลซัดขึ้น (run-up) และ การสลายพลังงานเป็นระลอกคลื่น ในขณะที่วัสดุเม็ดแห้งจะมีการสะสมตัวและก่อตัวเป็นกองวัสดุบริเวณฐานของโครงสร้างอย่างชัดเจน

พฤติกรรมเหล่านี้สะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างเชิงกลที่สำคัญระหว่างวัสดุของเหลวกับวัสดุเม็ดแห้ง ซึ่งมีนัยสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจและวิเคราะห์ พฤติกรรมของการไหลของเศษวัสดุธรณีไหล (debris flow) เนื่องจาก debris flow เป็นการไหลของวัสดุที่มีลักษณะเป็น ระบบสองเฟสประกอบด้วยของแข็ง เช่น เศษหิน ดิน และทราย ผสมอยู่ในของเหลว ทำให้พฤติกรรมการไหลมีลักษณะกึ่งของเหลวกึ่งของแข็ง ดังนั้น การเปรียบเทียบระหว่างพฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้ง (แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM) และวัสดุของเหลว (แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD) จึงสามารถนำมาใช้เป็น

กรอบอ้างอิงในการทำความเข้าใจพฤติกรรมเฉพาะของ debris flow ได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือ ในบางช่วงของการไหล debris flow อาจแสดงพฤติกรรมแบบไหลเป็นระลอกคลื่นคล้ายของเหลว ในขณะที่บางช่วงอาจมีการก่อตัวเป็นกองและสะสมตัวเช่นเดียวกับวัสดุเม็ดแห้ง ความเข้าใจในพฤติกรรมการไหลที่ซับซ้อนจะช่วยส่งเสริมการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขที่สามารถจำลองพฤติกรรมของ debris flow ได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นข้อมูลสำคัญในการพิจารณาออกแบบโครงสร้างป้องกัน เช่น กำแพงดักตะกอน หรือรางระบายน้ำ ให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของการไหลในแต่ละพื้นที่ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันและลดความเสียหายจากภัยพิบัติที่เกิดจากการไหลของเศษวัสดุได้อย่างเป็นระบบ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้นำเสนอแนวทางการศึกษาการไหลของเศษวัสดุธรณีไหล โดยใช้การทดลองทางกายภาพ แบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete Element Method (DEM) และแบบจำลองเชิงตัวเลข Computational Fluid Dynamics (CFD) ประกอบกับการใช้เทคนิค Particle Tracking Velocimetry (PTV) โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาการไหลในสภาวะแห้ง และสภาวะที่เป็นของเหลว มีวัสดุประสงค์ของการศึกษาคือ

1. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM (Discrete Element Method) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งไหลกระทบโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง พฤติกรรมการกองทับถม และตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลการทดลองทางกายภาพ

2. สร้างแบบจำลองส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น (flexible barrier) ได้โดยใช้แบบจำลองแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เพื่ออธิบายพฤติกรรมกรรมและตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลการทดลองทางกายภาพ

3. การวัดความเร็วและการเคลื่อนที่ของการไหลของวัสดุเม็ดแห้งด้วยวิธี Particle Tracking Velocimetry (PTV)

4. การสร้างแบบจำลองการไหลของของไหลด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD (Computational Fluid Dynamics) เพื่ออธิบายการไหลของวัสดุของเหลวกระทบกับโครงสร้างป้องกันแบบแบบแข็ง

จากการศึกษาได้ข้อสรุปดังนี้

1. การสร้างแบบจำลอง DEM สำหรับวัสดุเม็ดแห้งที่ปะทะกับโครงสร้างแบบแข็ง จากการพัฒนาและปรับเทียบแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธี Discrete Element Method (DEM) เพื่อจำลองพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งในรางน้ำ พบว่า แบบจำลองสามารถจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองทางกายภาพ โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ของอนุภาค แรงกระแทกกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง การสะสมตัวบริเวณฐาน และการทับถมของวัสดุ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าร้อยละ 10 แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ใน

การอธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุเม็ดแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดของอนุภาคมีบทบาทสำคัญในกลไกการเคลื่อนที่ของวัสดุ การวิเคราะห์เชิงจุลภาคยังแสดงให้เห็นพฤติกรรมการเรียงตัว การหมุน และการสะท้อนของอนุภาคในระหว่างการปะทะได้อย่างละเอียด

2. การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นโดยแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM จากการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น (flexible barrier) พบว่า องค์ประกอบสำคัญของโครงสร้าง ยืดหยุ่นตามการกระแทกของวัสดุเม็ดแห้งได้ดี สามารถดูดซับพลังงานและลดแรงกระแทกจากวัสดุที่ไหลลงมาอย่างมีประสิทธิภาพ พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างสอดคล้องกับแรงกระทำจากการไหล ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประเมินแรงกระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นได้ใกล้เคียงกับการทดลองทางกายภาพ

3. การวัดความเร็วของการไหลด้วยเทคนิค PTV (Particle Tracking Velocimetry) ผลการทดลองทางกายภาพร่วมกับการใช้เทคนิค PTV ในการวัดความเร็วของวัสดุเม็ดแห้ง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการติดตามเส้นทางการไหล ทิศทาง และความเร็วของอนุภาคแต่ละจุดได้อย่างละเอียด โดยเฉพาะในช่วงก่อนการปะทะและกลไกการสะสมบริเวณฐานโครงสร้าง เทคนิคนี้ช่วยตรวจสอบกลไกการแยกชั้น การสะท้อน และการหมุนของอนุภาคได้อย่างชัดเจน แม้จะมีข้อจำกัดในด้านการติดตามอนุภาคขนาดเล็ก แต่ภาพรวมยังให้ข้อมูลที่มีความแม่นยำและสนับสนุนผลการจำลองจากแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ได้เป็นอย่างดี

4. การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD สำหรับวัสดุของเหลวที่กระทบโครงสร้างแบบแข็ง พบว่า แรงกระแทกสูงสุดที่กระทำกับโครงสร้างมักเกิดขึ้นทันทีเมื่อวัสดุปะทะกับโครงสร้าง และลดลงอย่างต่อเนื่องในรูปแบบของระลอกคลื่น ความชันที่สูงทำให้พลังงานจลน์ของของเหลวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงปะทะเพิ่มขึ้นตาม ในขณะที่แรงกระทำจากการไหลย้อนกลับลดลงเมื่อความชันเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ปริมาณวัสดุที่ข้ามโครงสร้างป้องกันต่างกัน แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD สามารถแสดงพฤติกรรมการไหลต่อเนื่องของของเหลว การไหลซัดขึ้นโครงสร้าง และความปั่นป่วนภายหลังการปะทะได้ชัดเจน ซึ่งมีประโยชน์ในการประเมินพฤติกรรมไหลในระบบที่เป็นเฟสเดียว (single-phase)

5.2 อภิปรายผลการศึกษา

พฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM แสดงให้เห็นว่า การไหลของวัสดุเม็ดแห้งมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง (discrete flow) ซึ่งแต่ละอนุภาคเคลื่อนที่โดยอิงกับแรงระหว่างอนุภาค ได้แก่ แรงกระแทก แรงเสียดทาน และแรงปฏิสัมพันธ์ระยะใกล้ (contact forces) โดยพฤติกรรมการชน การสะสม และการไหลย้อนกลับสามารถจำลองได้อย่างละเอียด โดยเฉพาะในช่วงที่วัสดุปะทะกับโครงสร้างป้องกัน

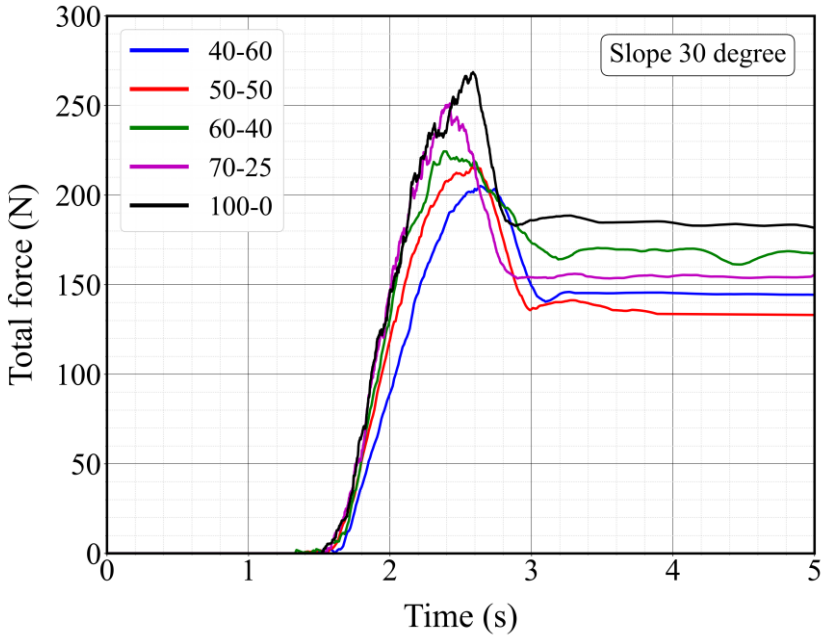
ซึ่งสังเกตเห็นแรงกระแทกสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อความชันเพิ่มขึ้น อันเป็นผลจากพลังงานจลน์ที่สูงขึ้นในระบบ (Gao และคณะ, 2025; Zhou และคณะ, 2017) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ (Song และคณะ, 2018) ที่ศึกษาแรงกระแทกของกรวดในรางน้ำ พบว่า ค่าแรงกระแทกสูงสุดและแรงคงค้างมีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยเฉพาะในช่วงเวลาหลังการปะทะที่มีการสะสมตัวของอนุภาคบริเวณฐานโครงสร้าง ทั้งนี้ ผลจากการทดลองซ้ำในกรณีแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ของการศึกษานี้ยังให้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำ (~2.53) แม้ว่าการจัดเรียงตัวของอนุภาคจะเป็นแบบสุ่ม ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองมีความเสถียร และสามารถนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมทางกลของวัสดุเม็ดแห้งได้ กราฟเปรียบเทียบแสดงดังภาคผนวก ฉ

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งที่ไหลกระทบโครงสร้างแบบแข็งกับแบบยืดหยุ่น พบว่าโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นสามารถดูดซับพลังงานและกระจายแรงได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยแรงกระแทกสูงสุดที่วัสดุกระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นมักต่ำกว่าแบบแข็ง เนื่องจากโครงสร้างสามารถเปลี่ยนรูปและยืดหยุ่นตามแรงกระทำ ลักษณะนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ (Li, Zhao และKwan, 2020; Ng และคณะ, 2021) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น เช่น rockfall net หรือ debris barrier สามารถลดแรงกระแทกได้มากกว่าร้อยละ 40–60 เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบแข็งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัสดุที่ปะทะมีลักษณะเป็นอนุภาคเม็ดแห้งที่เกิดการชนแบบไม่ต่อเนื่อง นอกจากนี้ แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ยังแสดงให้เห็นรูปแบบของการกระจายแรงผ่านโครงสร้างตาข่ายที่เปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางของการไหล ซึ่งช่วยให้สามารถออกแบบจุดยึด (anchor points) และโครงสร้างรองรับให้สอดคล้องกับแรงกระทำจริงมากขึ้น ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพในการประเมินประสิทธิภาพเชิงกลของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น และช่วยลดความไม่แน่นอนในการออกแบบเชิงวิศวกรรมได้อย่างมีนัยสำคัญ

อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อแรงกระแทก

การศึกษานี้ ได้กำหนดขอบเขตการศึกษาโดยใช้สองอัตราส่วนผสม คือ 40-60 และ 50-50 (ร้อยละกรวดขนาดใหญ่ต่อร้อยละกรวดละเอียด) แต่เพื่อสามารถเห็นถึงข้อแตกต่างของอิทธิพลของขนาดอนุภาคได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงได้จำลองส่วนผสมเพิ่มเติมอีกสามส่วนผสม คือ 60-40 75-25 และ 100-0 ที่ความชันการไหล 30 องศา แรงกระแทกของรายการทดลองเพิ่มเติมแสดงดังภาพ 87 จากภาพส่วนผสมที่มีกรวดขนาดใหญ่มากก็จะให้แรงกระแทกมากและลดลงตามลำดับสัดส่วนผสม เนื่องจาก อนุภาคขนาดใหญ่มีพลังงานจลน์สูงกว่าอนุภาคขนาดเล็ก แม้ว่าน้ำหนักรวมของวัสดุจะเท่ากัน (Wei, Wang และDai, 2024) ทำให้แรงกระแทกสูงขึ้นเมื่ออนุภาคชนกับโครงสร้าง ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคใหญ่ ลดการชนกันโดยตรงและทำให้การไหลต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้แรงกระแทกลดลง Huang, Bi และZhang (2022) กล่าวว่า อนุภาคขนาด

เล็กจะให้แรงต่อเนื่องสม่ำเสมอมีบทบาทน้อยต่อแรงกระแทกส่วนอนุภาคขนาดใหญ่จะให้แรงกระแทกสูงเป็นครั้งรูปแบบพลวัต ลักษณะกองของวัสดุและแรงย่อยของรายการทดลองเพิ่มเติมแสดงดังภาคผนวก ฎ



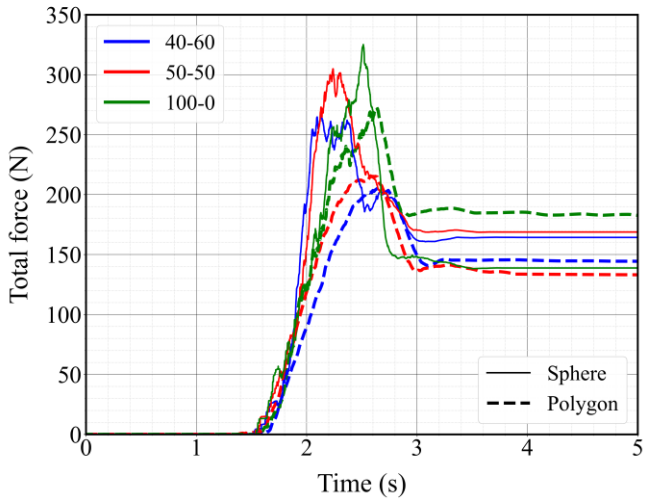
ภาพ 87 แรงกระแทกสูงสุดรายการทดลองเพิ่มเติมที่ความชัน 30 องศา

การเปรียบเทียบวัสดุเม็ดทรงหลายเหลี่ยมกับทรงกลม

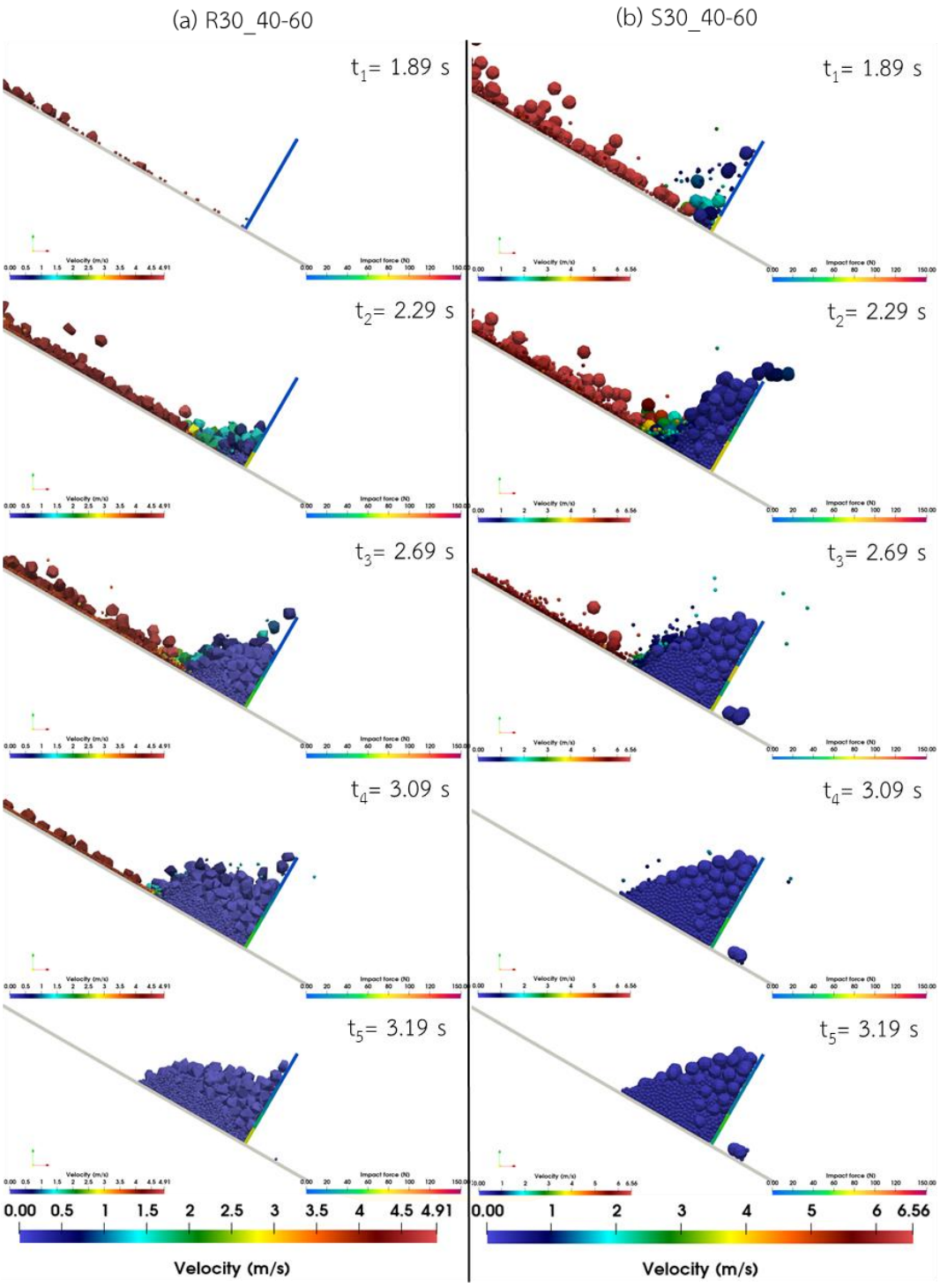
ขอบเขตการศึกษาหลักของวิทยานิพนธ์เล่มนี้มุ่งเน้นการจำลองการไหลของวัสดุเม็ดที่มีลักษณะเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้ทำการจำลองเพิ่มเติมในกรณีวัสดุเม็ดทรงกลมที่มีขนาดเท่ากัน (Dmax = 40 mm, Dmin = 10 mm) เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบประกอบการอภิปรายผล ภาพที่ 88 แสดงการเตรียมตัวอย่าง จากผลการจำลองพบว่า พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดทรงกลมแตกต่างจากทรงหลายเหลี่ยมอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ วัสดุเม็ดทรงกลมมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากกว่าและเคลื่อนที่ได้รวดเร็วกว่า เนื่องจาก แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสต่ำกว่า ความเรียบของผิวทรงกลมทำให้เกิดการกลิ้ง (rolling) ได้ง่าย ส่งผลให้ความต้านทานการเคลื่อนที่โดยรวมลดลง ในขณะที่วัสดุเม็ดทรงหลายเหลี่ยมมีเหลี่ยมมุมที่ก่อให้เกิดการสอดประสาน (interlocking) ระหว่างอนุภาคมากกว่า ทำให้ความเร็วเฉลี่ยในการไหลต่ำกว่า (ภาพที่ 90) นอกจากนี้ แม้จะกำหนดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน แต่อนุภาคทรงกลมมีปริมาตรและมวลมากกว่าทรงหลายเหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากัน ส่งผลให้แรงกระทำสุทธิจากการชนและการกระแทกของวัสดุทรงกลมมีค่ามากกว่าอย่างชัดเจนในทุกส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองเพิ่มเติม (ภาพ 89) ซึ่งบ่งชี้ว่า

การประมาณวัสดุเม็ดให้เป็นทรงกลมในการวิเคราะห์อาจก่อให้เกิดการประเมินค่าแรงกระทำต่อโครงสร้างสูงเกินจริง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีลักษณะหลายเหลี่ยมในธรรมชาติ ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่ารูปทรงของวัสดุเม็ดมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหลและแรงกระทำที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างป้องกันอย่าง ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Dhanai Bhattacharya (2023) ที่ชี้ว่าทรงหลายเหลี่ยมให้ค่าความหนืดและความต้านทานการไหลสูงกว่าทรงกลม แรงกระแทกกระแตกจึงมีน้อยกว่า ภาพที่ 91 แสดงลักษณะของอนุภาคทั้งที่เป็นทรงหลายเหลี่ยมและอนุภาคทรงกลม เป็นการนำอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm น้ำหนัก 60 kg ใส่ในกล่องขนาด 40x40 cm จะเห็นว่าอนุภาคที่มีรูปทรงหลายเหลี่ยมจะมีจำนวนและปริมาตรโดยรวมมากกว่าอนุภาคที่เป็นทรงกลม แม้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน แสดงว่าแต่ละอนุภาคของทรงกลมจะมีมวลมากกว่า ทำให้โมเมนตัม แรงเฉื่อย และพลังงานสะสมมากกว่า แรงกระทำจากอนุภาคจึงมากกว่าอนุภาคทรงหลายเหลี่ยม ส่วนการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมและการเปรียบเทียบแสดงในภาคผนวก ฏ

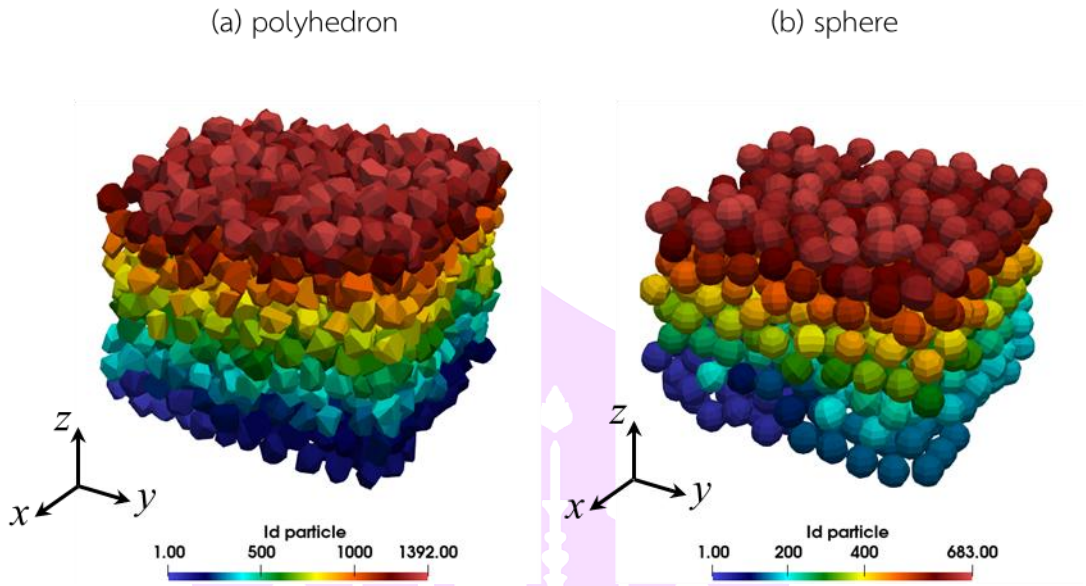
ภาพ 88 การเตรียมตัวอย่าง (a) อนุภาคทรงหลายเหลี่ยม (b) อนุภาคทรงกลม



ภาพ 89 แรงกระแทกของอนุภาครูปทรงหลายเหลี่ยมเทียบกับอนุภาคทรงกลม



ภาพ 90 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่รูปทรงต่างกัน (a) อนุภาครูปทรงหลายเหลี่ยม (b) อนุภาคทรงกลม ส่วนผสมอนุภาคขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่ออนุภาคขนาดเล็กร้อยละ 60



ภาพ 91 ลักษณะของอนุภาค (a) ทรงหลายเหลี่ยม (b) อนุภาคทรงกลม

พฤติกรรมของวัสดุของเหลวในแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD

แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD พบว่า การไหลของวัสดุของเหลวมีลักษณะเป็นระบบต่อเนื่อง (continuous flow) ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว ความดัน และแรงกระทำต่อโครงสร้างได้อย่างละเอียด โดยเฉพาะพฤติกรรมในช่วงที่วัสดุปะทะกับโครงสร้าง พบว่า แรงกระแทกสูงสุด (peak impact force) มักเกิดขึ้นทันทีเมื่อของเหลวสัมผัสกับโครงสร้าง จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงตามการสลายพลังงานในรูปของแรงดันสะท้อนและการไหลย้อนกลับ (run-up) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการไหลของของเหลวที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องและไร้แรงต้านภายในระยะสั้น (Fang และคณะ, 2022) นอกจากนี้ ยังพบว่าความชันของรางน้ำส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของวัสดุของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มค่าความชัน แรงกระแทกสูงสุดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลังงานจลน์ของวัสดุเพิ่มขึ้นจากความเร่งของแรงโน้มถ่วง ขณะที่แรงในช่วงการไหลย้อนกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่อความชันเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการศึกษาของ Mao และคณะ (2023) และ Blagojević และคณะ (2024) ที่ระบุว่า ในระบบของเหลวที่มีความเร็วสูง วัสดุจำนวนมากสามารถผ่านโครงสร้างไปได้ ส่งผลให้ปริมาตรของการไหลย้อนกลับมีค่าลดลง รูปแบบของแรงกระทำที่เกิดจากวัสดุของเหลวยังแสดงลักษณะของแรงในลักษณะ “ระลอกคลื่น” (pressure wave) ซึ่งมักเกิดจากการกระแทกและการสะท้อนกลับของของเหลวภายหลังการปะทะ ซึ่งลักษณะนี้ไม่พบในวัสดุเม็ดแห้ง จึงแสดงให้เห็นถึงข้อแตกต่างที่สำคัญของกลไกแรงในวัสดุของเหลวเมื่อเทียบกับวัสดุเม็ดแห้ง (Luo และคณะ, 2024)

การใช้เทคนิค PTV เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคในการทดลองทางกายภาพ

การวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งจากการทดลองทางกายภาพ จำเป็นต้องอาศัยเทคนิคที่สามารถจับการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละเม็ดได้อย่างแม่นยำ Particle Tracking Velocimetry (PTV) เป็นเทคนิคที่พัฒนามาจาก Particle Image Velocimetry (PIV) โดยมีความสามารถในการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละเม็ดในลักษณะเฉพาะรายอนุภาคจากชุดวิดีโอภาพต่อเนื่อง แทนการวิเคราะห์ความเร็วเฉลี่ยของกลุ่มอนุภาคในแต่ละช่วงเวลาแบบที่ใช้ใน PIV แม้ว่า PIV จะเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมแพร่หลายในการวัดความเร็วของการไหล โดยเฉพาะในของเหลว (Adrian และWesterweel, 2011) แต่ในกรณีของวัสดุเม็ดแห้งที่มีพฤติกรรมแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) และมีขนาดอนุภาคแตกต่างกันมาก การใช้ PTV มีข้อได้เปรียบในแง่ของความละเอียด เนื่องจาก สามารถติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคเฉพาะตัว และแสดงพฤติกรรม เช่น การสะท้อน การหมุน และการกระจายตัวได้อย่างแม่นยำ (Guan และคณะ, 2024) จากผลการทดลองและพัฒนาพบว่า เทคนิค PTV สามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้ชัดเจน โดยเฉพาะพฤติกรรมในช่วงต้นของการไหล การปะทะกับโครงสร้าง และการสะสมตัวบริเวณฐานของโครงสร้าง ลูกศรแสดงทิศทางและความยาวของการเคลื่อนที่ในแต่ละเฟรมช่วยให้สามารถวิเคราะห์กลไกการไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังสามารถแสดงพฤติกรรมเฉพาะ เช่น การแยกชั้น การกระจายตัวแบบปั่นป่วน และแรงเฉือนภายในกลุ่มวัสดุได้ แม้เทคนิค PTV จะมีข้อจำกัดด้านความคมชัดของภาพในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็กหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง แต่สามารถปรับปรุงได้โดยการเลือกใช้กล้องที่มีความเร็วสูง (high-speed camera) และการเพิ่มแสงสว่างให้เพียงพอ การประยุกต์ใช้ PTV ในการทดลองวัสดุเม็ดแห้งจึงมีศักยภาพสูงในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของอนุภาคอย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการเปรียบเทียบและปรับเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การประยุกต์ใช้กับกรณีเศษวัสดุธรณีไหล Debris Flow

จากผลการศึกษาทั้งในกรณีวัสดุเม็ดแห้งด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM และวัสดุของเหลวด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข CFD พบว่า วัสดุทั้งสองประเภทมีพฤติกรรมการไหลและแรงกระทำต่อโครงสร้างที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยวัสดุของเหลวแสดงแรงกระแทกสูงสุดทันทีเมื่อปะทะกับโครงสร้างและลดลงตามการสลายพลังงาน ขณะที่วัสดุเม็ดแห้งมักมีแรงกระแทกสูงสุดล่าช้ากว่า และเกิดแรงคงค้างตามลักษณะการสะสมของอนุภาคที่ฐานโครงสร้าง การเปรียบเทียบนี้จึงให้ข้อมูลเชิงกลที่สามารถนำไปใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลของ debris flow ซึ่งเป็นการไหลของวัสดุแบบหลายเฟส (multiphase) ที่ผสมระหว่างวัสดุของแข็งและของเหลว Debris flow แสดงพฤติกรรมแบบไหลต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องสลับกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัสดุ เช่น ปริมาณน้ำ ความ

หนาแน่นของอนุภาค และความชันของพื้นที่ (Iverson, 1997) ในช่วงเริ่มต้นของการไหลอาจมีลักษณะเป็นของเหลวที่ไหลเร็วและกระแทกแรง ขณะที่ในช่วงปลายอาจเกิดการสะสมตัวของอนุภาคและแรงคงค้างคล้ายพฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้ง การวิเคราะห์แยกส่วน DEM และ CFD ตามที่ใช้ในการศึกษานี้ จึงช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมที่หลากหลายของ debris flow ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การใช้เทคนิค PTV ในการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการทดลอง ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลใน debris flow ได้ การใช้ PTV ซึ่งติดตามอนุภาครายตัวจากวิดีโอทำให้สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและทิศทางของอนุภาคได้อย่างละเอียด และเหมาะกับกรณีที่ต้องการวิเคราะห์การหมุน การชน และการกระจายของวัสดุในระดับจุลภาค

จากผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นกรอบแนวทางในการวิเคราะห์พฤติกรรมของ debris flow ในเชิงกลศาสตร์ และสนับสนุนการออกแบบโครงสร้างป้องกัน กำแพงดักตะกอนหรือรางระบายน้ำ ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยสามารถเลือกใช้วัสดุและรูปแบบโครงสร้างที่เหมาะสมกับลักษณะของ debris flow ในแต่ละพื้นที่ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของ Zhang และคณะ (2022) ที่เสนอว่าความเข้าใจลักษณะการชนของเศษวัสดุธรณีไหล มีบทบาทสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างป้องกันที่ตอบสนองต่อพฤติกรรมการไหลอย่างเหมาะสม

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งได้ดำเนินการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งและวัสดุของเหลว รวมถึงการประเมินแรงกระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM และ CFD ร่วมกับการทดลองทางกายภาพและเทคนิคการติดตามอนุภาค PTV สามารถเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาการวิจัยในอนาคตได้ดังต่อไปนี้

1. ความละเอียดและความถูกต้องของพารามิเตอร์ในแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM มีความไวต่อค่าพารามิเตอร์ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient) โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus) หากค่าพารามิเตอร์ไม่แม่นยำหรือไม่สอดคล้องกับวัสดุจริง จะทำให้ผลการจำลองเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมจริง ดังนั้นควรมีการวัดค่าทางฟิสิกส์ของวัสดุจากการทดลองโดยตรง และทำการวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) เพื่อประเมินผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้

2. แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD แบบ 3 มิติ และเงื่อนไขขอบเขต การศึกษานี้ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD แบบ 2 มิติ ซึ่งช่วยลดเวลาในการคำนวณ แต่มีข้อจำกัดในการสะท้อนพฤติกรรมการไหลของของเหลวในเชิงพื้นที่ สำหรับการศึกษาต่อไปควรใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD แบบ 3 มิติ เพื่อให้สามารถจับพฤติกรรมการกระจายของแรงในแนวขวาง และการเกิดความปั่นป่วน (vortices) ที่อาจ

ส่งผลต่อแรงกระทำได้แม่นยำยิ่งขึ้น รวมถึงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ที่สอดคล้องกับสถานการณ์จริงจะช่วยให้การศึกษามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

3. ขั้นตอนและเครื่องมือที่สนับสนุนการวิเคราะห์ PTV แม้เทคนิคนี้จะให้ผลการติดตามอนุภาคได้ละเอียดกว่าวิธี PIV โดยเฉพาะในกรณีอนุภาคเคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่อง แต่การติดตามอนุภาคจำนวนมากในช่วงเวลานานยังมีข้อจำกัดด้านความละเอียดของกล้องและแสงสว่าง ควรพิจารณาในการจัดแสงในเหมาะสมร่วมกับเครื่องหมายติดตามเฉพาะอนุภาค รวมถึงซอฟต์แวร์แบบอัตโนมัติที่สามารถตรวจจับและจับตำแหน่งอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. การพัฒนาแบบจำลองสองสภาวะ (Coupled DEM–CFD) เศษวัสดุธรณีไหล (debris flow) มีลักษณะเป็นกึ่งของเหลว การแยกแบบจำลองโดย DEM และ CFD ยังมีข้อจำกัดในอธิบายปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุสองสภาวะได้อย่างครบถ้วน ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองสองสภาวะ จึงเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาการศึกษาในอนาคต ซึ่งจะช่วยให้สามารถจำลองการถ่ายเทพลังงานระดับแรง และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของมวลวัสดุได้แม่นยำมากขึ้น

บรรณานุกรม

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2562). *มาตรฐานประกอบการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับอาคาร การขุดดินและการถมดินในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม (Landslide) และบริเวณลาดเชิงเขา*. สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. สืบค้นเมื่อ 30 สิงหาคม 2566.

เชียงใหม่นิวส์. (2567). *ดินสไลด์ปิดถนน ดินทรุดเส้นทางบ่อเกลือไปเฉลิมพระเกียรติผ่านไม่ได้*. Retrieved from เชียงใหม่นิวส์ website: https://www.chiangmainews.co.th/social/3392650

หมวดทางหลวงบ่อเกลือแขวงทางหลวงน่านที่ 2. (2567). *ดินสไลด์ปิดทางหลวงสายบ่อเกลือ–เฉลิมพระเกียรติ กม.16+800*. สืบค้นเมื่อ 23 สิงหาคม 2567, จาก https://www.facebook.com/nanprovince/posts/pfbid0hs9gJJAfLuWsB7pRxGvt6ymvc4waoXsmK6gZ5ouk3n8Qtd3ny84EhkAtoqwTKuqCl?rdid=PEzeKNQWnNiH09OV

Ahmadipur, A. and Qiu, T. (2018). Impact force to a rigid obstruction from a granular mass sliding down a smooth incline. *Acta Geotechnica*, *13*(6), 1433–1450. doi:https://doi.org/10.1007/s11440-018-0727-5.

Adrian, R. J. and Westerweel, J. (2011). *Particle image velocimetry.* Cambridge University Press.

Armanini, A., Larcher, M. and Odorizzi, M. (2011). Dynamic impact of a debris flow front against a vertical wall. *International Journal of Geomechanics, 11*(3), B-113. doi:https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-113.

Armanini, A., Rossi, G. and Larcher, M. (2020). Dynamic impact of a water and sediments surge against a rigid wall. *Journal of Hydraulic Research*, *58*(2), 314-325. doi:https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1579113.

Azéma, É., , R., F., and Saussine, G. (2009). Quasistatic rheology, force transmission and fabric properties of a packing of irregular polyhedral particles. *Mechanics of Materials, 41*(6), 729–741. doi:10.1016/j.mechmat.2009.01.021.

Azmi;, N. A. I. N. M., Amir;, M. A. H., Sukor;, A. S. and Idris, N. A. (2023). Numerical modelling of two dimensional dam break with heavy flow using Ansys software. *Multidisciplinary Applied Research and Innovation*, *4*(2), 1-9. doi:10.30880/mari.2023.04.02.001.

Binaree, T. (2021). *Effects of particle angularity on micro-macro mechanical behaviors and segregation in 2D granular material*. [Ph.D. thesis, Chiang Mai University].

Blagojević, M., Hočevar, M., Bizjan, B., Drešar, P., Kolbl Repinc, S. and Rak, G. (2024). Flow Regimes of Fluidized Bed with Fine Particles: Influence of Particle Diameter and Velocity. *Water*, 16, 1757. doi:10.3390/w16121757.

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. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *106*(12), 735–756. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002435.

Bugnion, L., McArdell, B. W., Bartelt, P. and Wendeler, C. (2012). Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. *Landslides, 9*(2), 179–187. doi:10.1007/s10346-011-0294-4.

Cui, P., Zeng, C. and Lei, Y. (2015). Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, *40*(12), 1644–1655. doi:10.1002/esp.3744.

Cundall, P. A. and Hart, R. D. (1979). *The Development of Constitutive Laws for Soil Using the Distinct Element Method* (W. Wittke Ed.). Aachen, Germany: Routledge.

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*(9), 1949–1972. doi:10.1002/2015JF003525.

Dhanai, P. and Bhattacharya, D. (2023). *Particle morphological effects on the behaviour of dry granular flow against rigid obstacles.* in Proceedings of the VIII International Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2023)

Dong, L. and Pu, J. (2024). Debris–slit interaction considering the particle behavior controls the barrier performance of slit structure retaining dry granular flows. *Environmental Earth Sciences*, 83, 107. doi:10.1007/s12665-023-11323-1.

Fang, J., Wang, L., Hong, Y. and Zhao, J. (2022). Influence of solid–fluid interaction on impact dynamics against rigid barrier: CFD–DEM modelling. *Géotechnique*, *72*(5), 391–406. doi:10.1680/jgeot.19.P.160.

Fondelli, T., Andreini, A. and Facchini, B. (2015). Numerical simulation of dam-break problem using an adaptive meshing approach. *Energy Procedia*, 82, 309–315. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.038.

Gao, P., Yan, B., Xing, A., Huang, K. and Zhan, W. (2025). Exploring impact dynamics of dry granular flow against rigid barrier using numerical and depth-average analyses. *Powder Technology*, 453, 120624. doi:10.1016/j.powtec.2025.120624.

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, 2603–2618. doi:10.1007/s10346-023-02129-0.

Guan, K., Li, Y., Wang, C., Zhao, X. and Han, Y. (2024). Cluster-based particle tracking velocimetry algorithm combining the quasi parallel correction in granular motions reconstruction. *Granular Matter*, 26, 81. doi:10.1007/s10035-024-01368-z.

Hien, L. T. T. and Chien, N. V. (2021). Investigate Impact Force of Dam-Break Flow against Structures by Both 2D and 3D Numerical Simulations. *Water*, *13*(3), 344. doi:10.3390/w13030344.

Huang, Y., Bi, Y. and Zhang, B. (2022). Quantifying the impact load of rapid dry granular flows exerted on rigid slit structures using centrifuge experiments and DEM simulation. *Computers and Geotechnics*, 152, 105059. doi:10.1016/j.compgeo.2022.105059.

Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R., & and Scheidl, C. (2009). *Debris flow impact estimation*. in International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering.

Huo, M., Zhou, J.-W., Yang, X.-G. and Zhou, H.-W. (2018). Dynamical evolution properties of debris flows controlled by different mesh-sized flexible net barriers. *Arabian Journal of Geosciences*, *11*(18), Article 502. doi:10.1007/s12517-018-3822-1.

Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, *35*(3), 245–296. doi:10.1029/97RG00426.

Jiang, R. Fei, W.-p. Zhou, H.-w. Huo, M. Zhou, J.-w. Wang, J.-m. et al.. (2020). Experimental and numerical study on the load and deformation mechanism of a flexible net barrier under debris flow impact. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *79*(5), 2213–2233. doi:10.1007/s10064-019-01692-y.

Koh, P. T. L. and Schwarz, M. P. (2006). CFD modelling of bubble–particle attachments in flotation cells. *Minerals Engineering*, *19*(6-8), 619–626. doi:10.1016/j.mineng.2005.09.008.

Kwan, J. S. H. and Cheung, R. W. M. (2012). Suggestion on design approaches for flexible debris resisting barriers (Discussion note DN1/2012). Retrieved from Hong Kong, SAR China.

Leonardi, A., Wittel, F. K., Mendoza, M. and Herrmann, H. J. (2014). Coupled DEM-LBM method for the free-surface simulation of heterogeneous suspensions. *Computational Particle Mechanics*, *1*(1), 3-13. doi:10.1007/s40571-014-0001-z.

Li, X., Zhao, J. and Kwan, J. S. (2020). Assessing debris flow impact on flexible ring net barrier: A coupled CFD-DEM study. *Computers and Geotechnics*, 128, 103850.

Luo, H., Zhang, L., He, J. and Zhou, J. (2024). Performance of debris flow barriers: an energy perspective. *Acta Geotechnica*, 20, 987–1000.

Mao, W., Wang, Y.-H., Yang, P., Huang, Y. and Zheng, H. (2023). Dynamics of granular debris flows against slit dams based on the CFD–DEM method: Effect of grain size distribution and ambient environments. *Acta Geotechnica*, 5811–5838. doi:10.1007/s11440-023-01944-y.

McDougall, S. and Hungr, O. (2005). Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, *42*(6), 1437–1448. doi:10.1139/T05-064.

Ng, C. W. W., Choi, C. E., Liu, H. and Poudyal, S. (2021). Design recommendations for single and dual debris flow barriers with and without basal clearance (C. Margottini, Canuti, P., & Sassa, K. (Eds.) Ed.): Springer.

Ng, C. W. W., Choi, C. E., Liu, L. H. D., Wang, Y., Song, D. and Yang, N. (2017). Influence of particle size on the mechanism of dry granular run-up on a rigid barrier. *Géotechnique Letters, 7*(2), 79-89. doi:10.1680/jgele.16.00159.

Poudyal, S. Choi, C. Song, D. Zhou, G. G. D. Yune, C. Y. Leonardi, A. et al.. (2019). Review of the mechanisms of debris-flow impact against barriers. in International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (1027–1033). Golden, United States https://hal.science/hal-02923131

Rajaa, A. I. and Kamel, A. H. (2020). Performance study of Fluent-2D and Flow-3D platforms in the CFD modeling of a flow pattern over ogee spillway. *Anbar Journal of Engineering Science (AJES), 11*(2), 221–230. doi:10.37649/aengs.2020.171262.

Sánchez, P., Renouf, M., Azéma, E., Mozul, R. and Dubois, F. (2021). A contact dynamics code implementation for the simulation of asteroid evolution and regolith in the asteroid environment. *Icarus*, 15, 114441.

Savage, S. B. and Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of Fluid Mechanics,* 199, 177–215. doi:10.1017/S0022112089000340.

Siva Parvathi, I. and Neelofer, A. (2024). *CFD analysis of flow over ogee spillway with varying upstream face slope*. in International Conference on Materials Innovation and Sustainable Infrastructure (012024). Bhimavaram, India.

Song, D., Choi, C. E., Ng, C. W. W. and Zhou, G. G. D. (2018). Geophysical flows impacting a flexible barrier: Effects of solid-fluid interaction. *Landslide**s**, 15*(1), 99-110. doi:10.1007/s10346-017-0882-z.

Song, D. Choi, C. E. Ng, C. W. W. Zhou, G. G. D. Kwan, J. S. H. Sze, H. Y. et al.. (2019). Load-attenuation mechanisms of flexible barrier subjected to bouldery debris flow impact. *Landslides*, 16, 2321–2334. doi:10.1007/s10346-019-01243-2.

Song, D., Ng, C. W. W., Choi, C. E. and Zhou, G. G. D. (2017). Influence of debris flow solid fraction on rigid barrier impact. *Canadian Geotechnical Journal*, *54*(10), 1421–1434. doi:10.1139/cgj-2016-0502.

Takahashi, T. (2007). Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. Taylor & Francis Group.

Tan, D. Y., Yin, J. H., Qin, J. Q., Zhu, Z.-H. andFeng , W.-Q. (2020). Experimental study on impact and deposition behaviours of multiple surges of channelized debris flow on a flexible barrier. *Landslides*, 17, 1577–1589. doi:10.1007/s10346-020-01378-7.

Thanawong, K., Reangyos, A., Dhammarak, 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), 118–125. doi:10.21660/2024.116.g13228.

Ting, J. M., Meachum, L. and Rowell, J. D. (1995). Effect of particle shape on the strength and deformation mechanisms of ellipse-shaped granular assemblages. *Engineering Computations*, 12, 99–108.

Vagnon, F. and Segalini, A. (2016). Debris flow impact estimation on a rigid barrier. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *16*(7), 1691–1704. doi:10.5194/nhess-16-1691-2016.

Vicari, H. Ng, C. W. W. Nordal, S. Thakur, V. De Silva, W. A. R. K. Liu, H. et al.. (2021). The effects of upstream flexible barrier on the debris flow entrainment and impact dynamics on a terminal barrier. *Canadian Geotechnical Journal*. doi:10.1139/cgj-2021-0119.

Vukelic, D. Todorovic, P. Simunovic, K. Miljojkovic, J. Simunovic, G. Budak, I. et al. (2020). A novel method for determination of kinetic friction coefficient using inclined plane. *Tehnički Vjesnik*, 27(5), 1435–1442. doi:10.17559/TV-20201101051835.

Wang, X., Li, Y., Zhang, J. and Chen, L. (2020). Improved particle tracking velocimetry technique for dense granular flow measurement in silos. *Chinese Physics B*, *29*(1), 014207. doi:10.1088/1674-1056/29/1/014207.

Wei, L., Wang, J. and Dai, Z. (2024). Granular flow impact on shed tunnels and the buffering effect of cushion layers. *Applied Sciences*, *14*(8), 3409. doi:10.3390/app14083409.

Wendeler, C., Volkwein, A., McArdell, B. W. and Bartelt, P. (2018). Load model for designing flexible steel barriers for debris flow mitigation. *Canadian Geotechnical Journal*. doi:10.1139/cgj-2016-0157.

Witt, A. C. (2005). *Using a GIS (Geographic Information System) to model slope instability and debris flow hazards in French Broad River watershed*. Master's Thesis, University of North Carolina

Yang, X., Li, M., Na, J. and Liu, K. (2017). Gully boundary extraction based on multidirectional hill-shading from high-resolution DEMs. *Transactions in GIS*, *21*(6), 1204–1216. doi:10.1111/tgis.12226.

Yune, C.-Y. Kim, B.-J. Jun, K.-J. Park, S.-D. Lee, S.-W. Kim, G.-H. et al. (2023). Real-scale experiment of debris flow in a natural gulley: Key findings and lessons learned. *Landslides*, *20*(9), 2757–2774. doi:10.1007/s10346-023-02134-3.

Zhang, S., Cui, P., Chen, X. and Yu, B. (2022). Impact behavior of debris flow against rigid and flexible barriers based on numerical simulations. *Landslides*, *19*(1), 89-105. doi:10.1007/s10346-021-01787-2.

Zhao, H., Yao, L., You, Y., Wang, B. and Zhang, C. (2018). Experimental study of the debris flow slurry impact and distribution. *Shock and Vibration*, *2018*(1). doi:10.1155/2018/5460362.

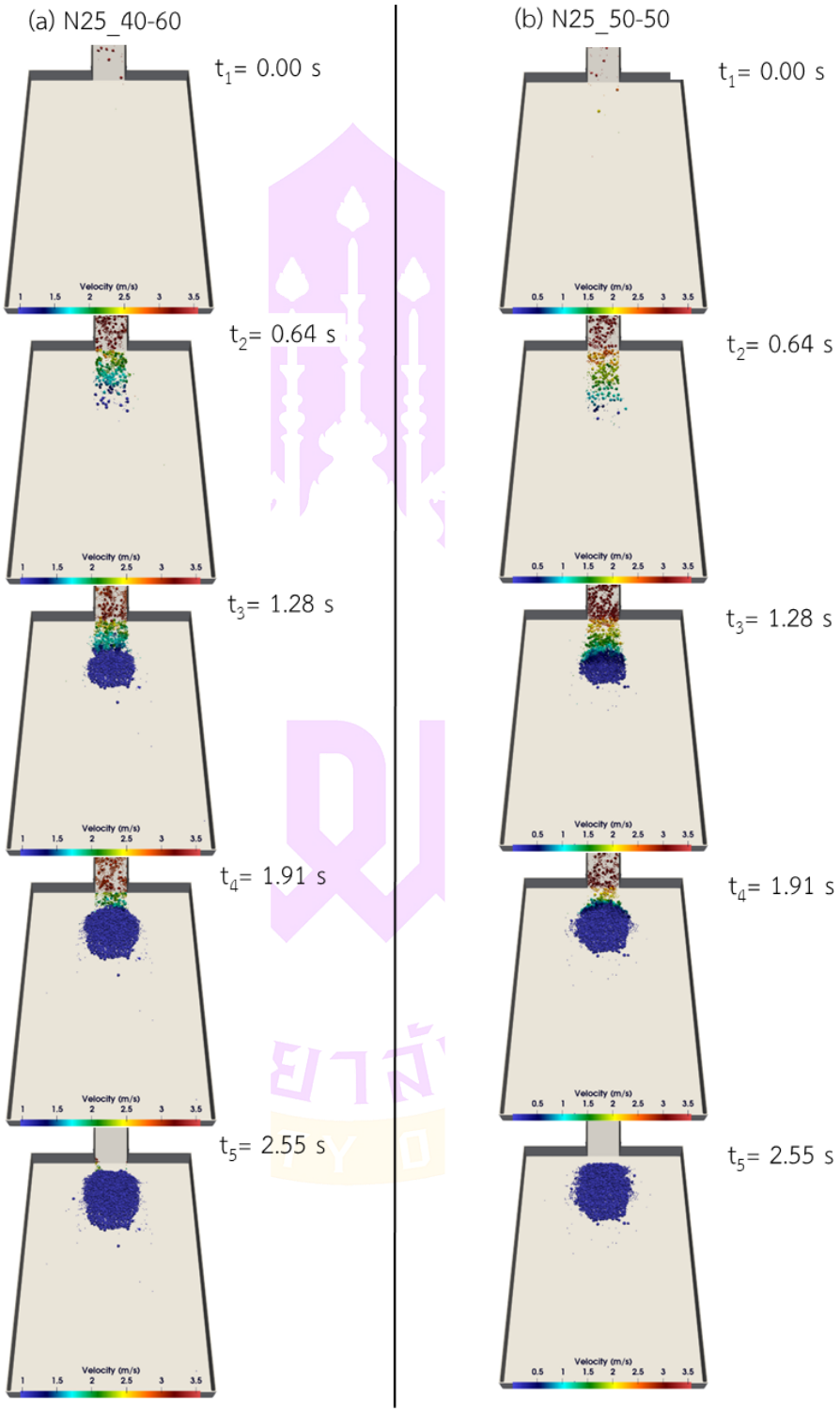
Zhou, G. G. D., Song, C. E., Choi, C. E., Pasuto, A., Sun, Q. C. and Dai, F. (2017). Surge impact behavior of granular flows: Effects of water content. *Landslides*, 15, 695-709. doi:10.1007/s10346-017-0908-6.

Zhou, W., Yang, L., Ma, G., Chang, X., Lai, Z. and Xu, K. (2016). DEM analysis of the size effects on the behavior of crushable granular materials. *Granular Matter*, *18*(64). doi:10.1007/s10035-016-0656-7.

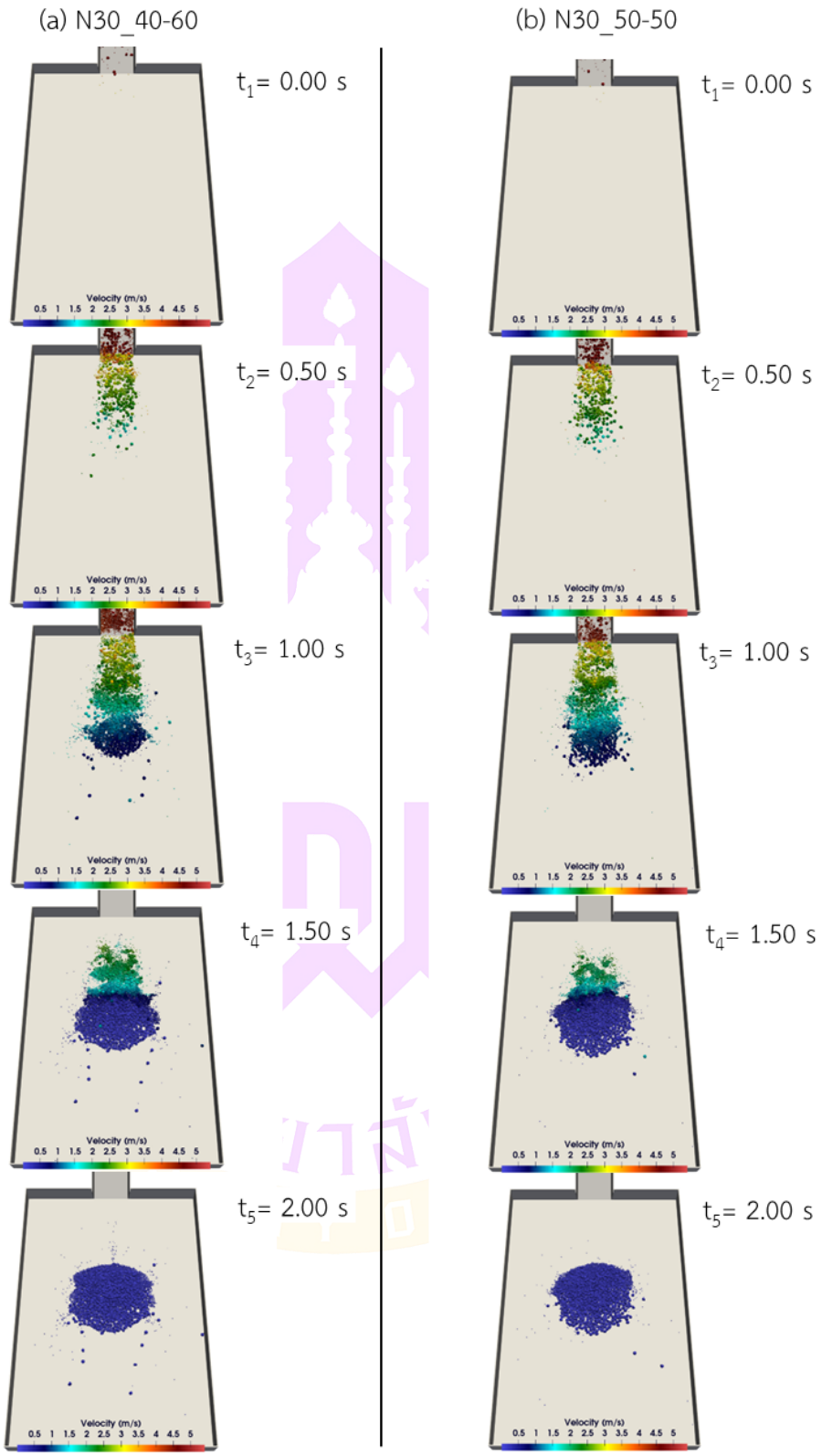
มหาวิทยาลัยพะเยา
UNIVERSITY OF PHAYAO

ภาคผนวก

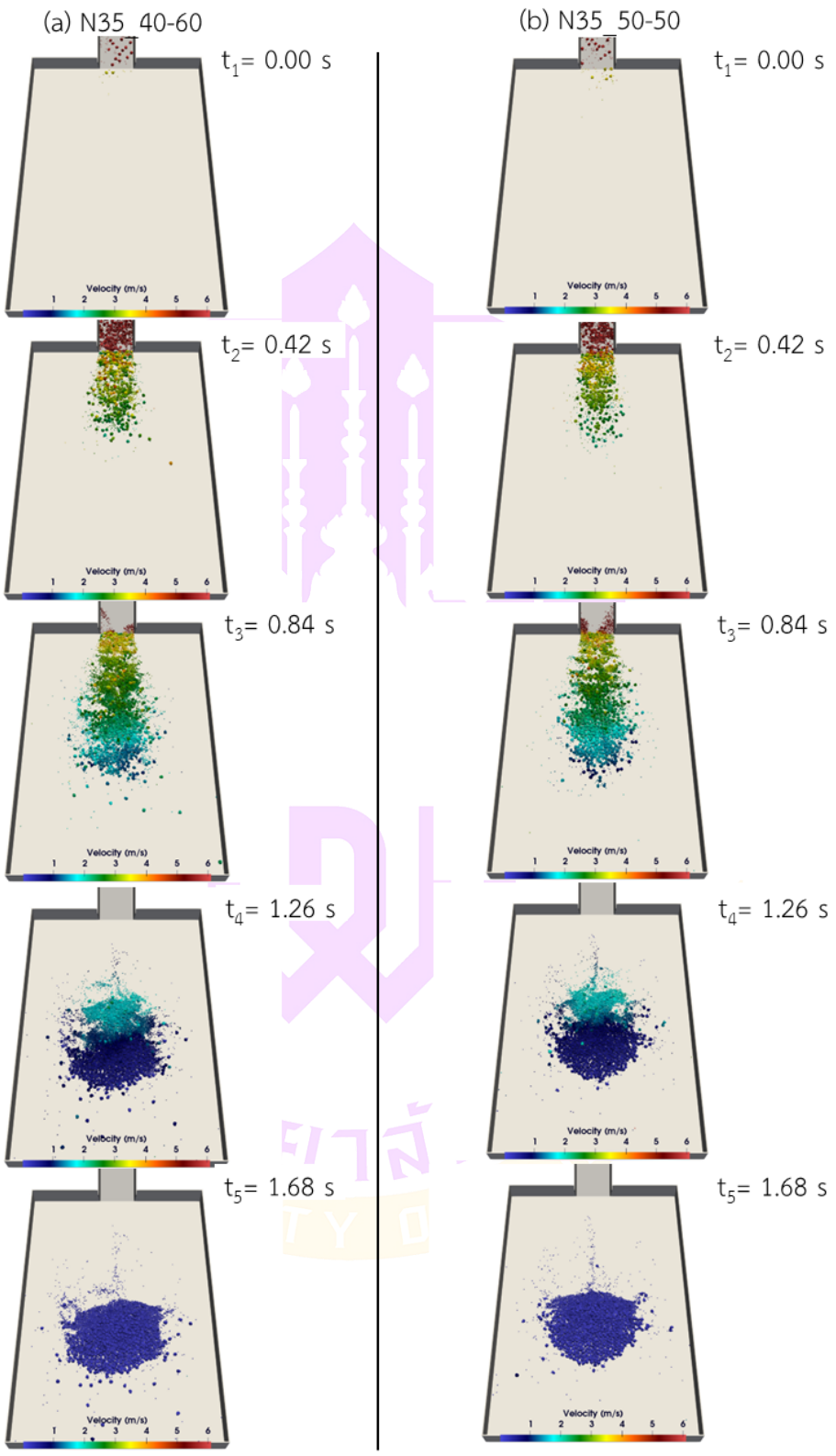
ภาคผนวก ก การแผ่กระจายและการทับถมของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



ความชัดการไหล 25 องศา (a) N25_40-60 (b) N25_50-50

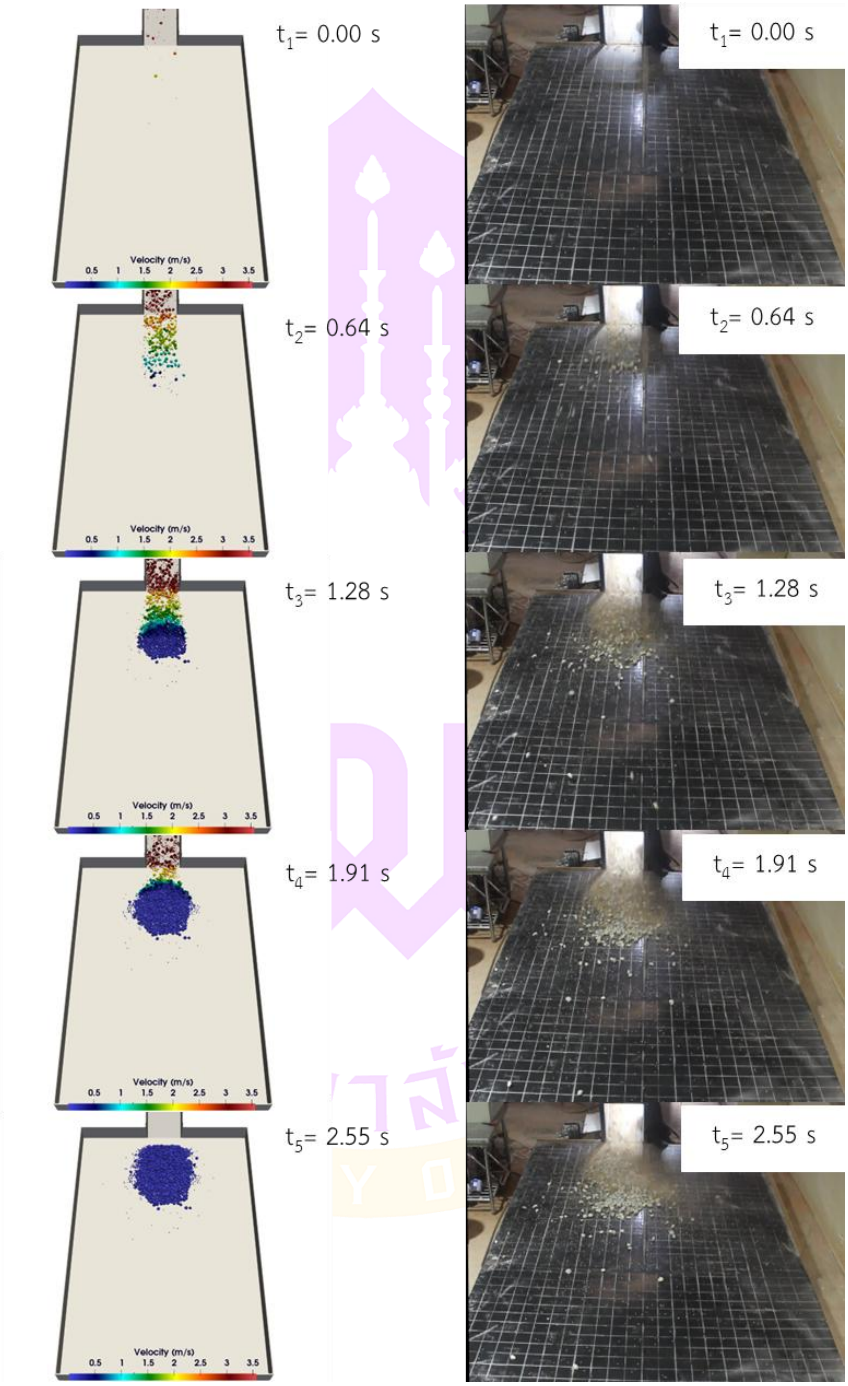


ความชัดการไหล 30 องศา (a) N30_40-60 (b) N30_50-50

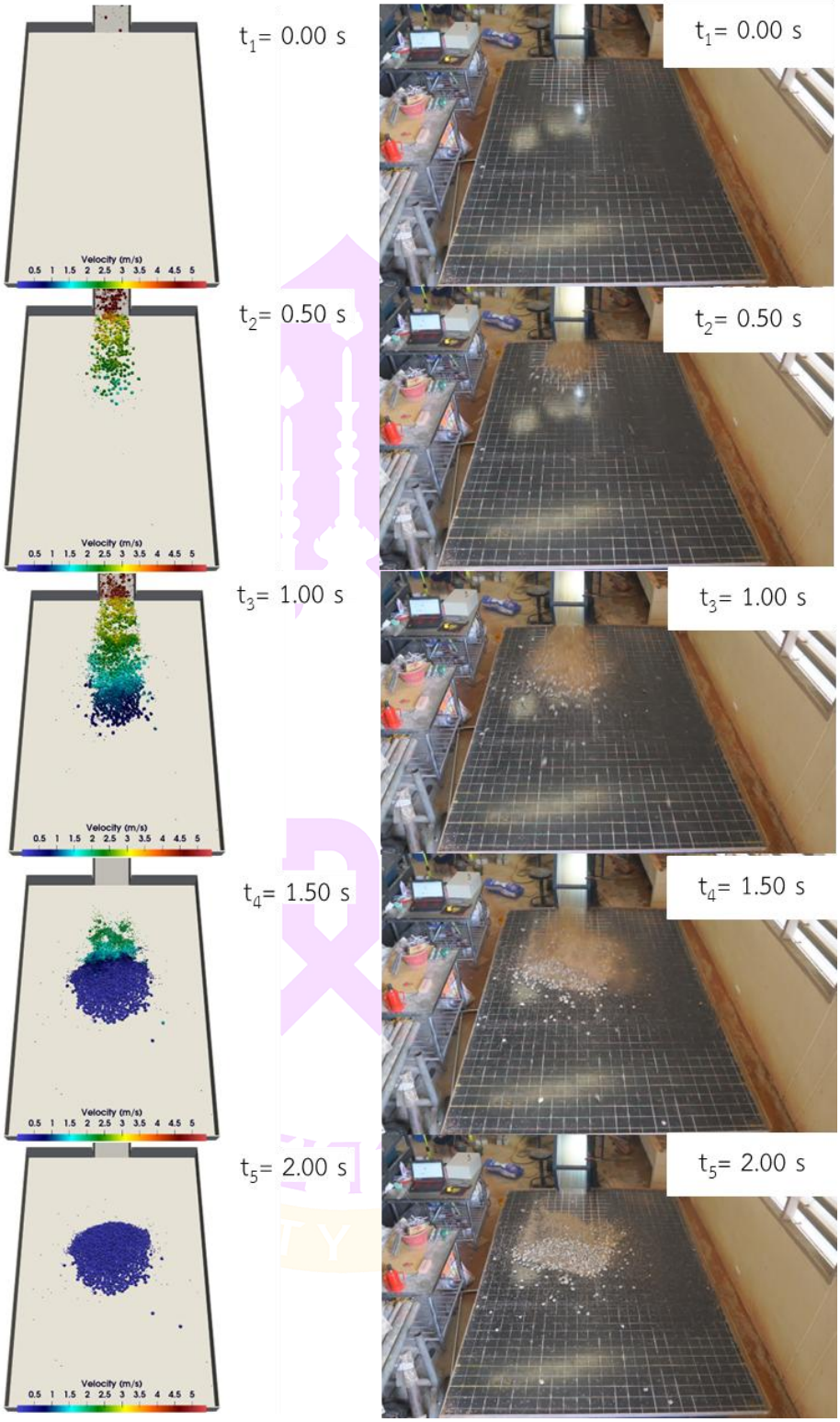


ความชัดการไหล 35 องศา (a) N35_40-60 (b) N35_50-50

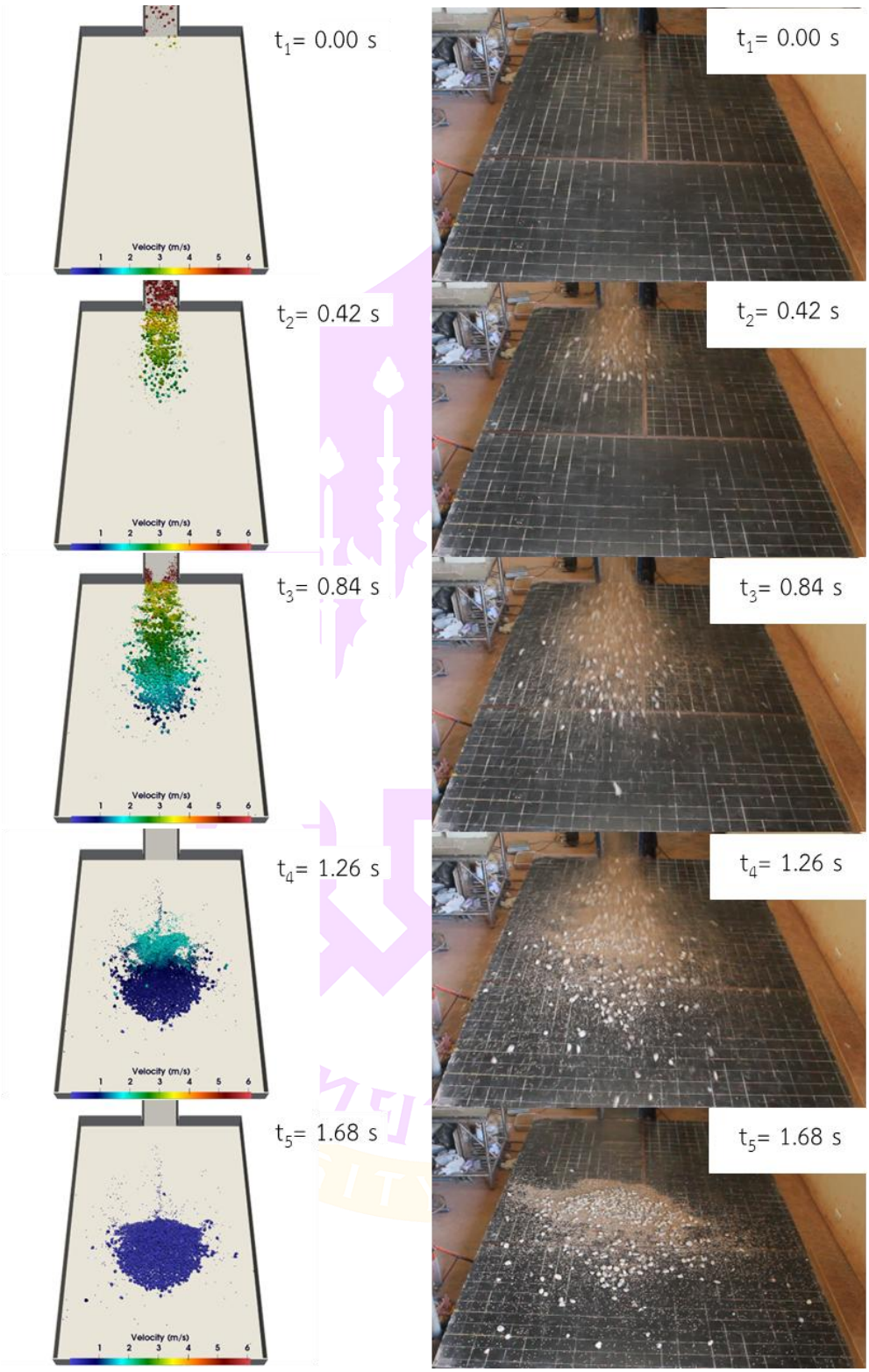
ภาคผนวก ข การแผ่กระจายและการทับถมของแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM กับการทดลองทางกายภาพที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 25 องศา (N25_50-50)

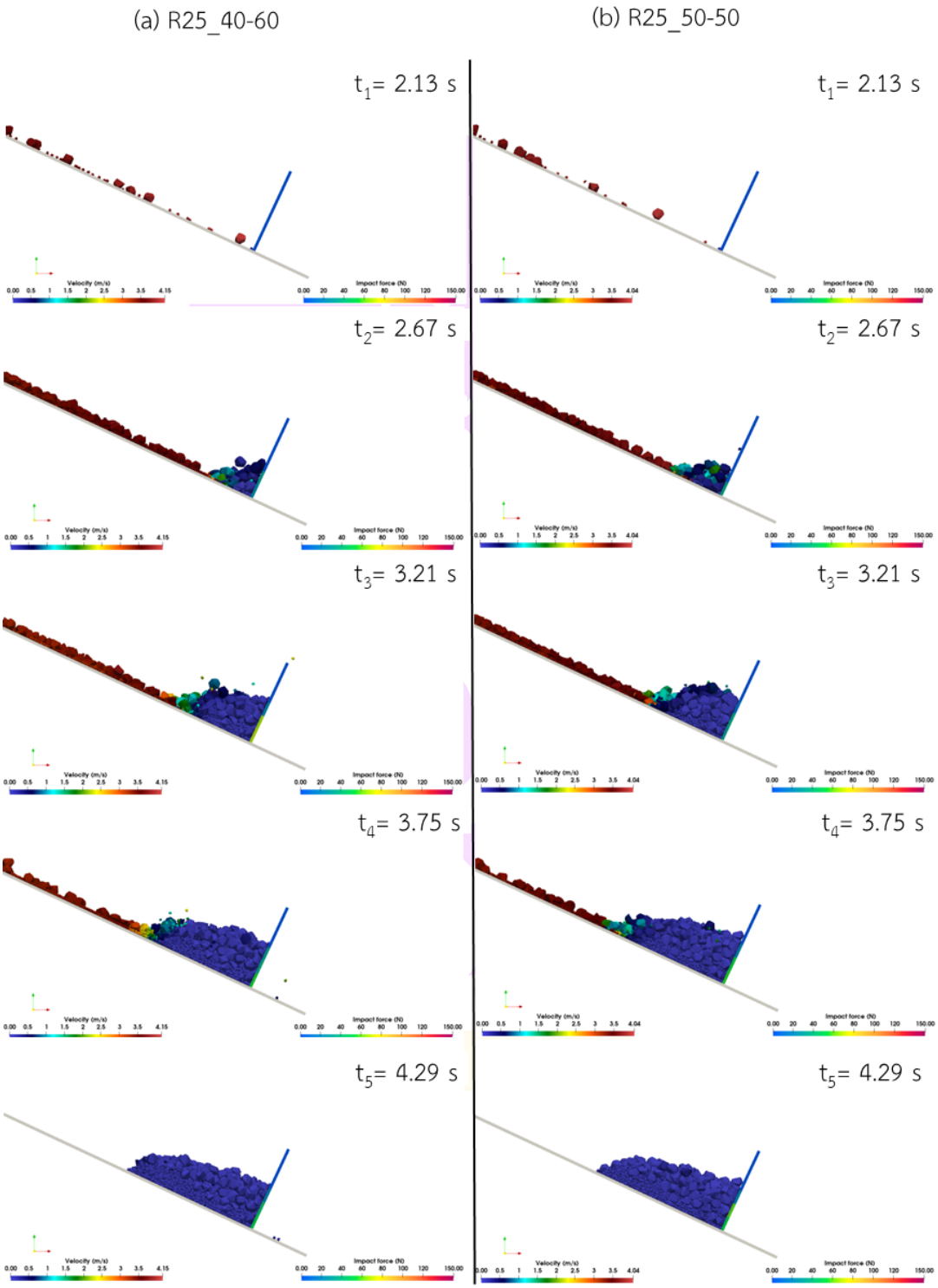


ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 30 องศา (N30_50-50)

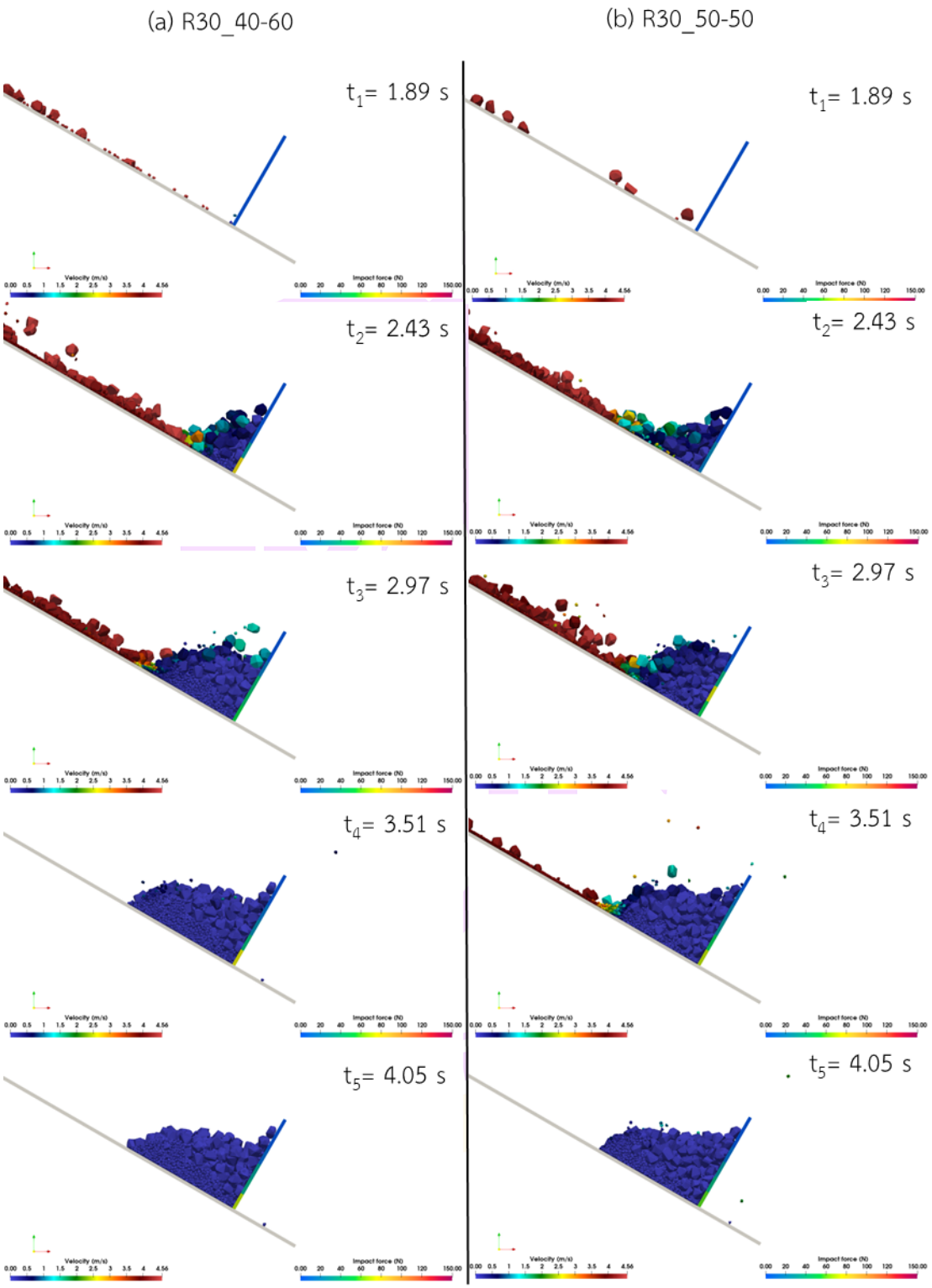


ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 35 องศา (N35_50-50)

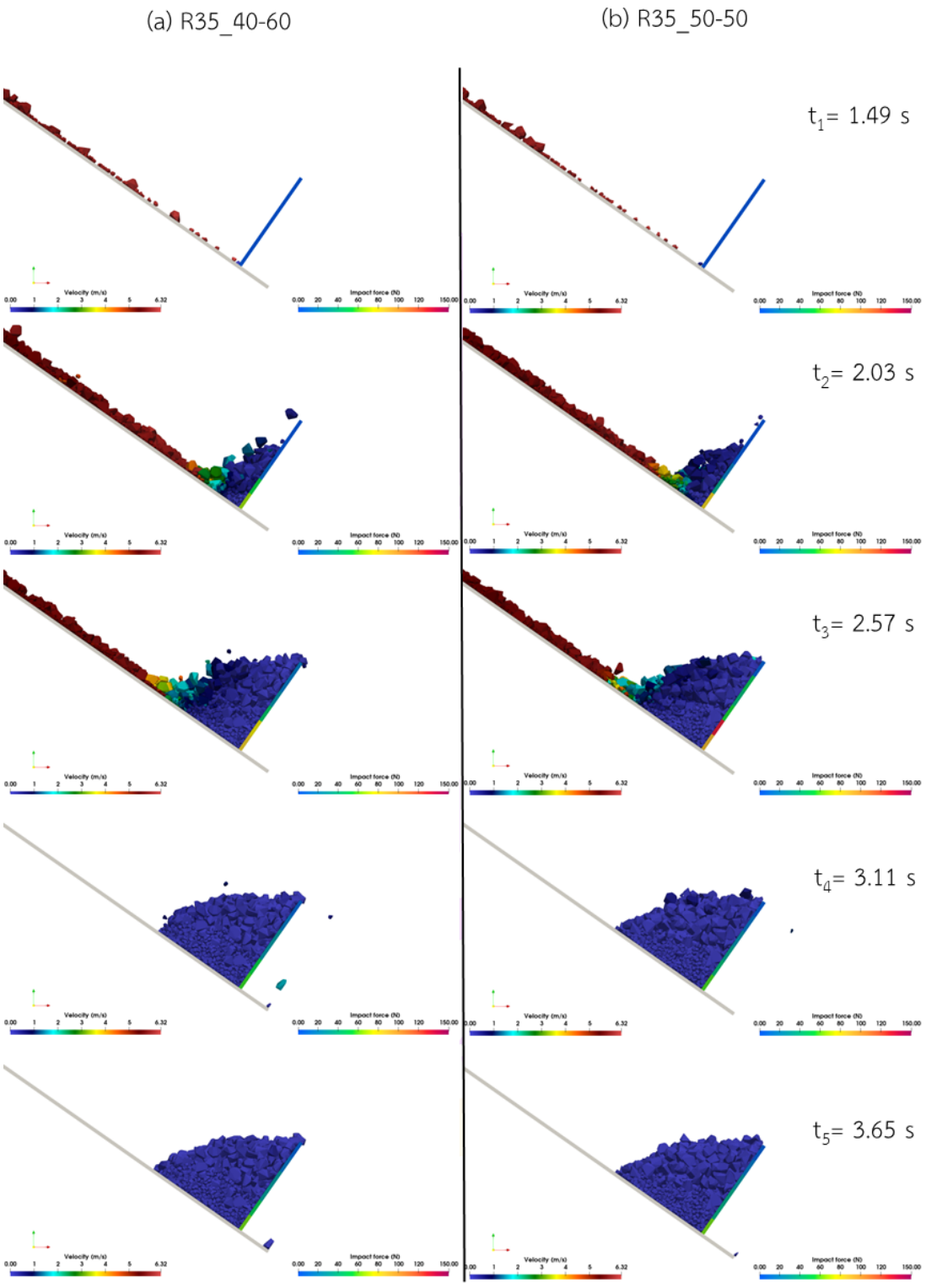
ภาคผนวก ค พฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



ความชัน 25 องศา (a) R25_40-60 (b) R25_50-50

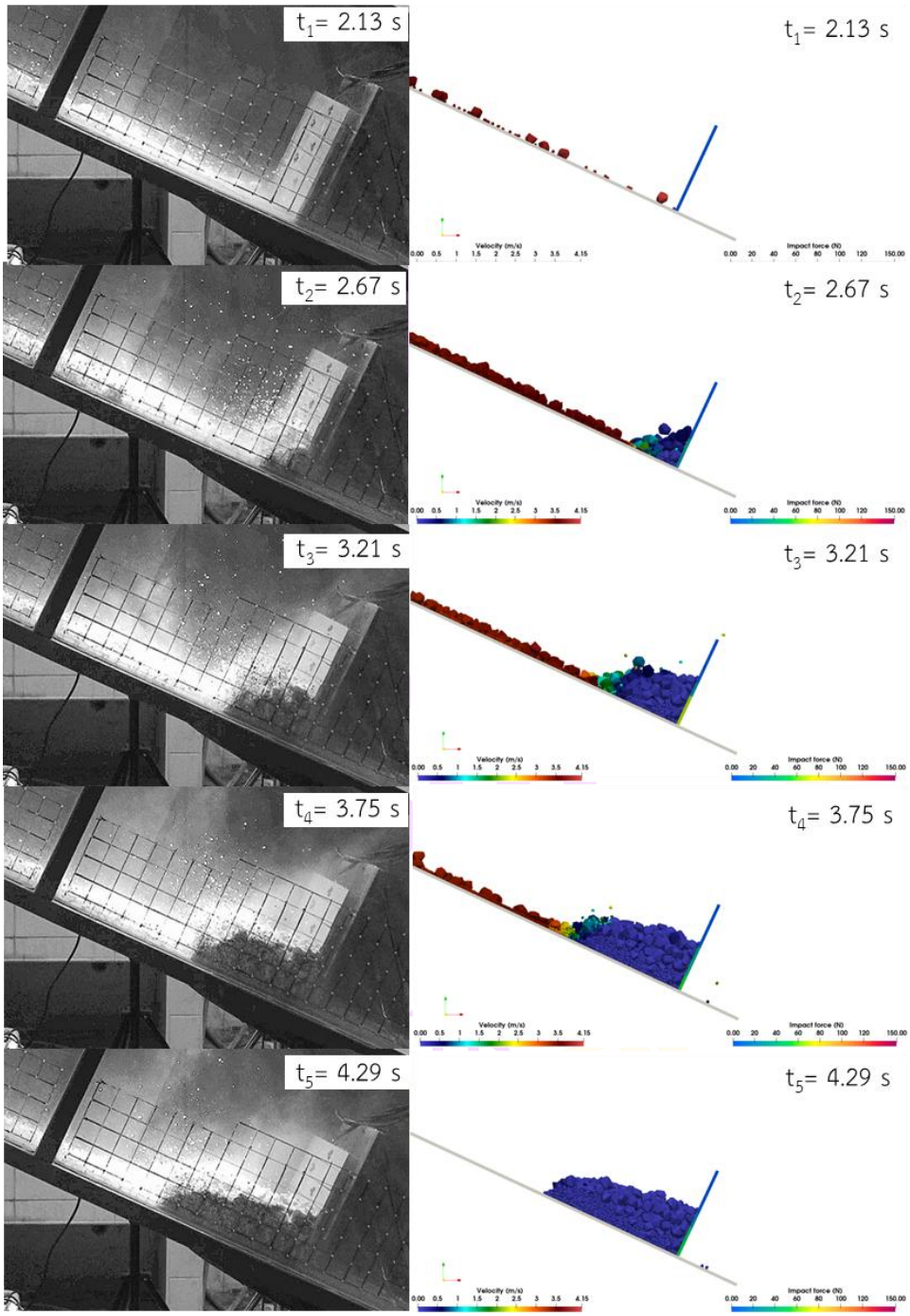


ความชัด 30 องศา (a) R30_40-60 (b) R30_50-50

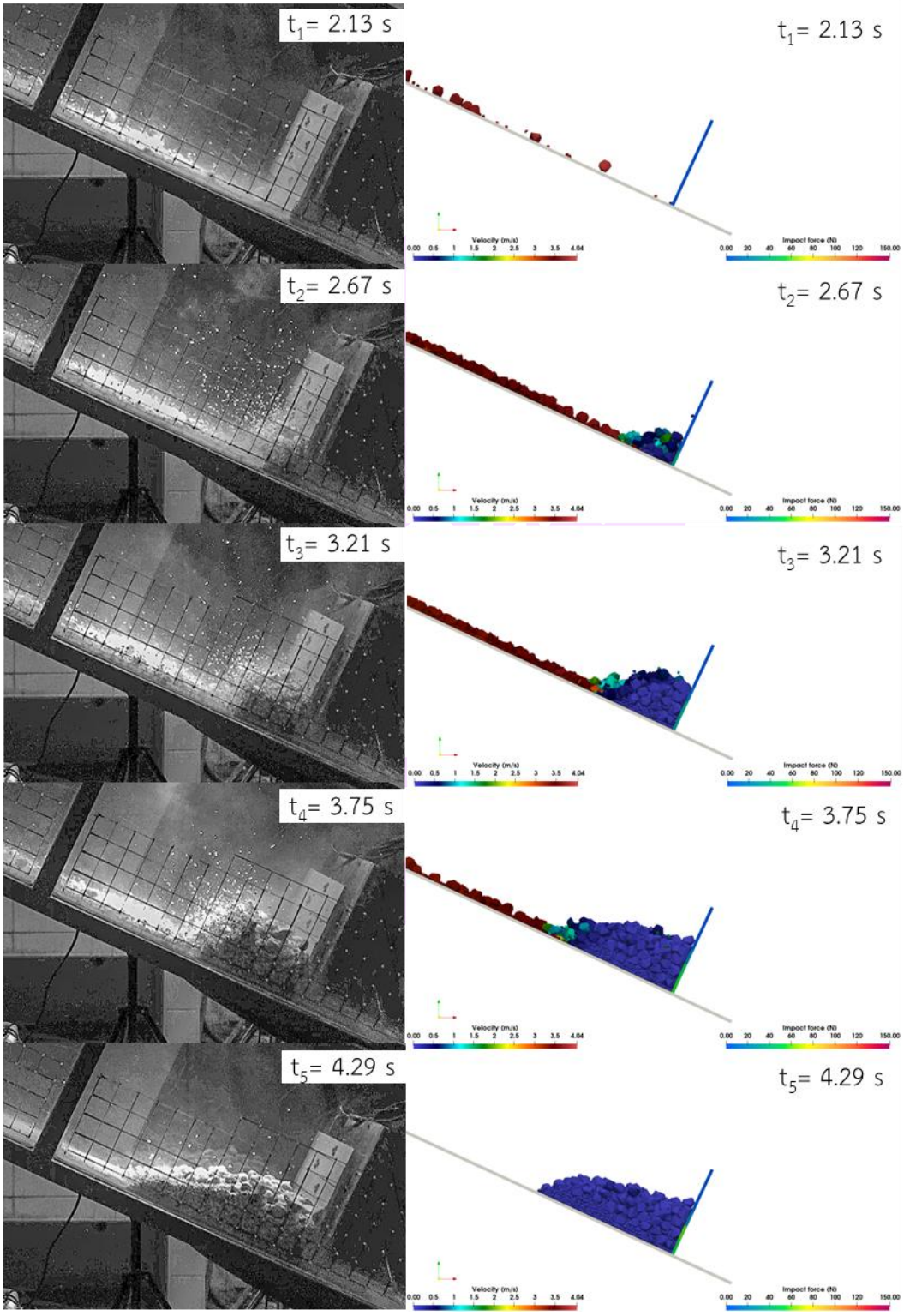


ความชัน 35 องศา (a) R35_40-60 (b) R35_50-50

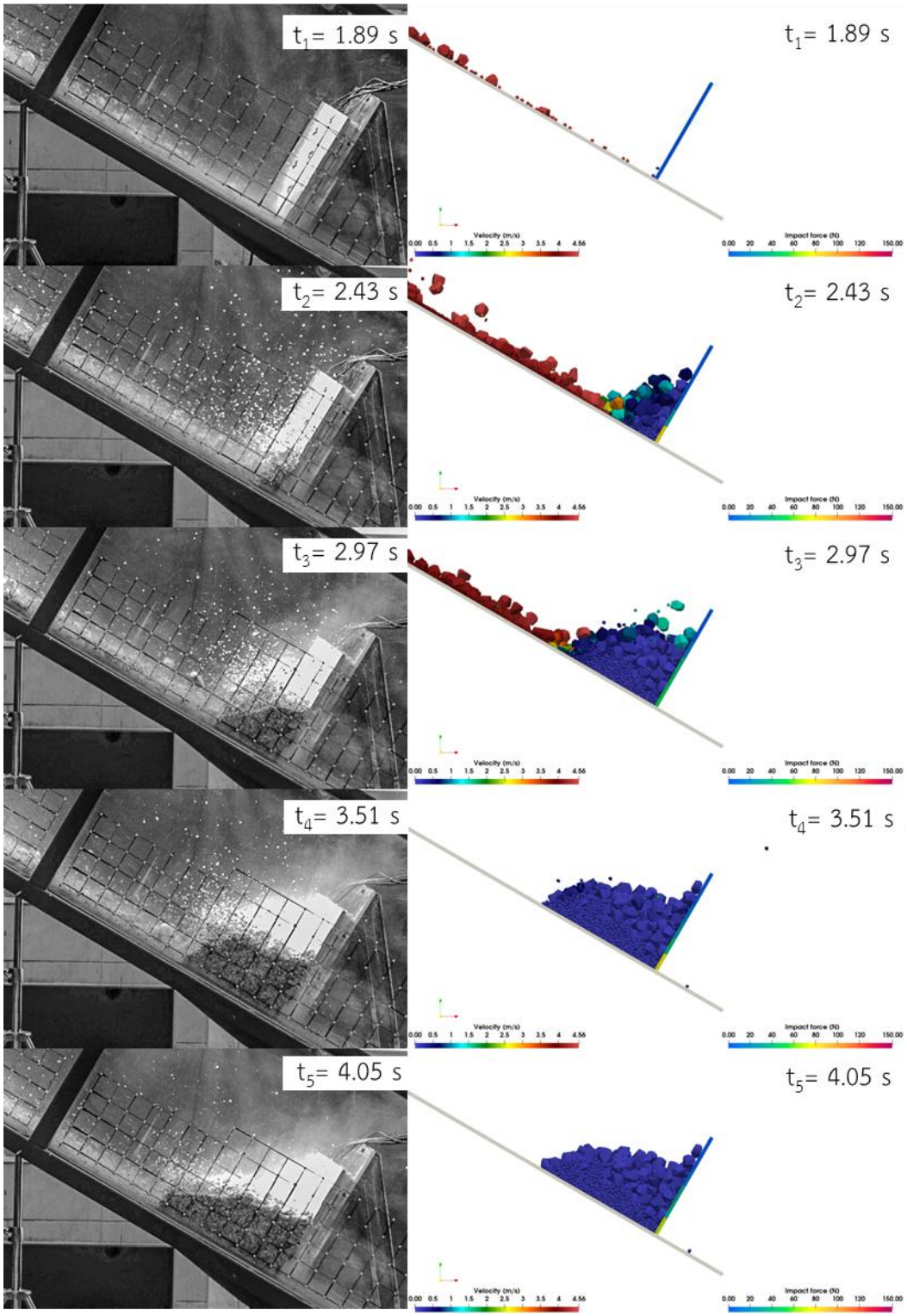
ภาคผนวก ง พฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เทียบกับการทดลองทางกายภาพ



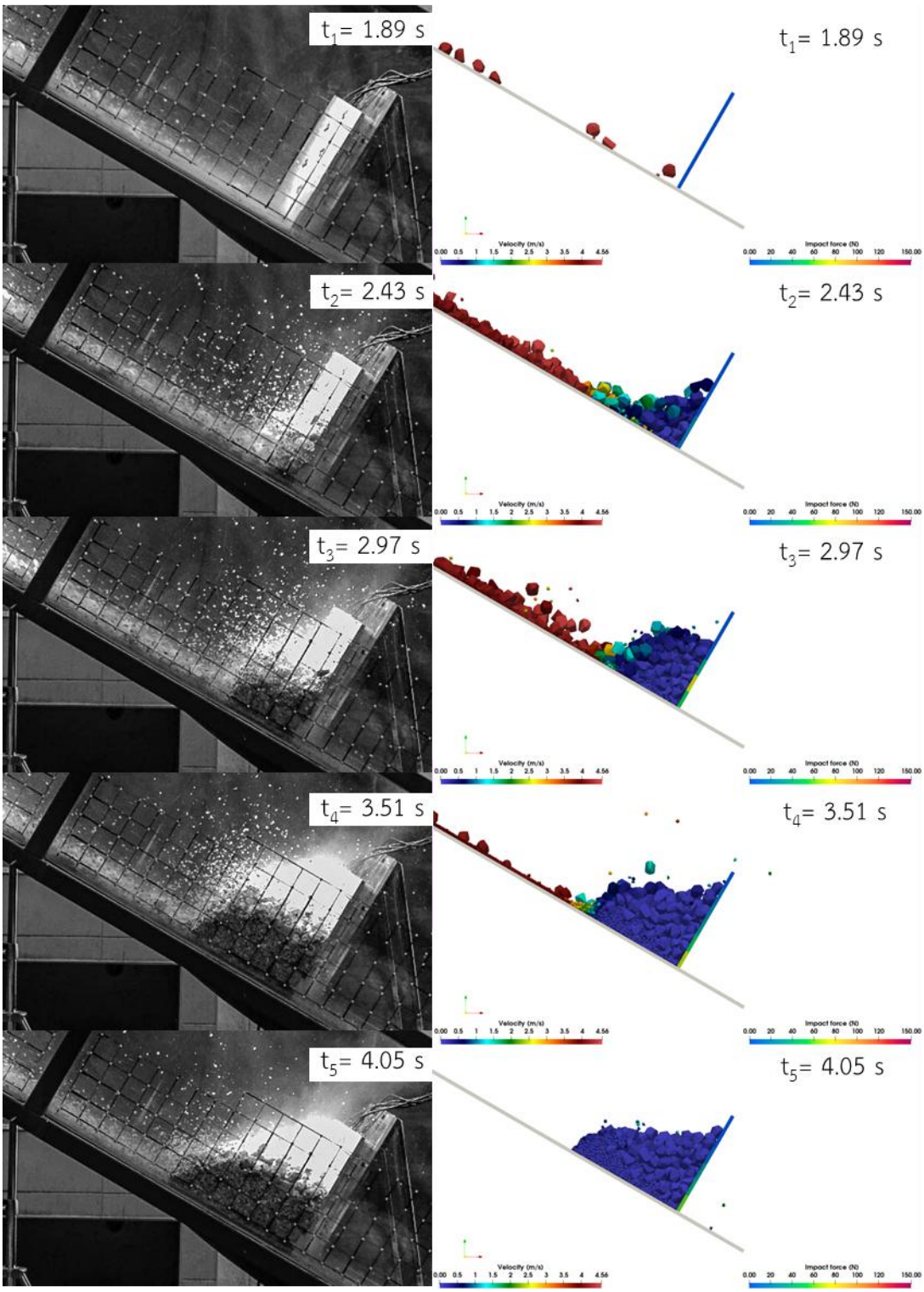
ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ความชัน 25 องศา (R25_40-60)



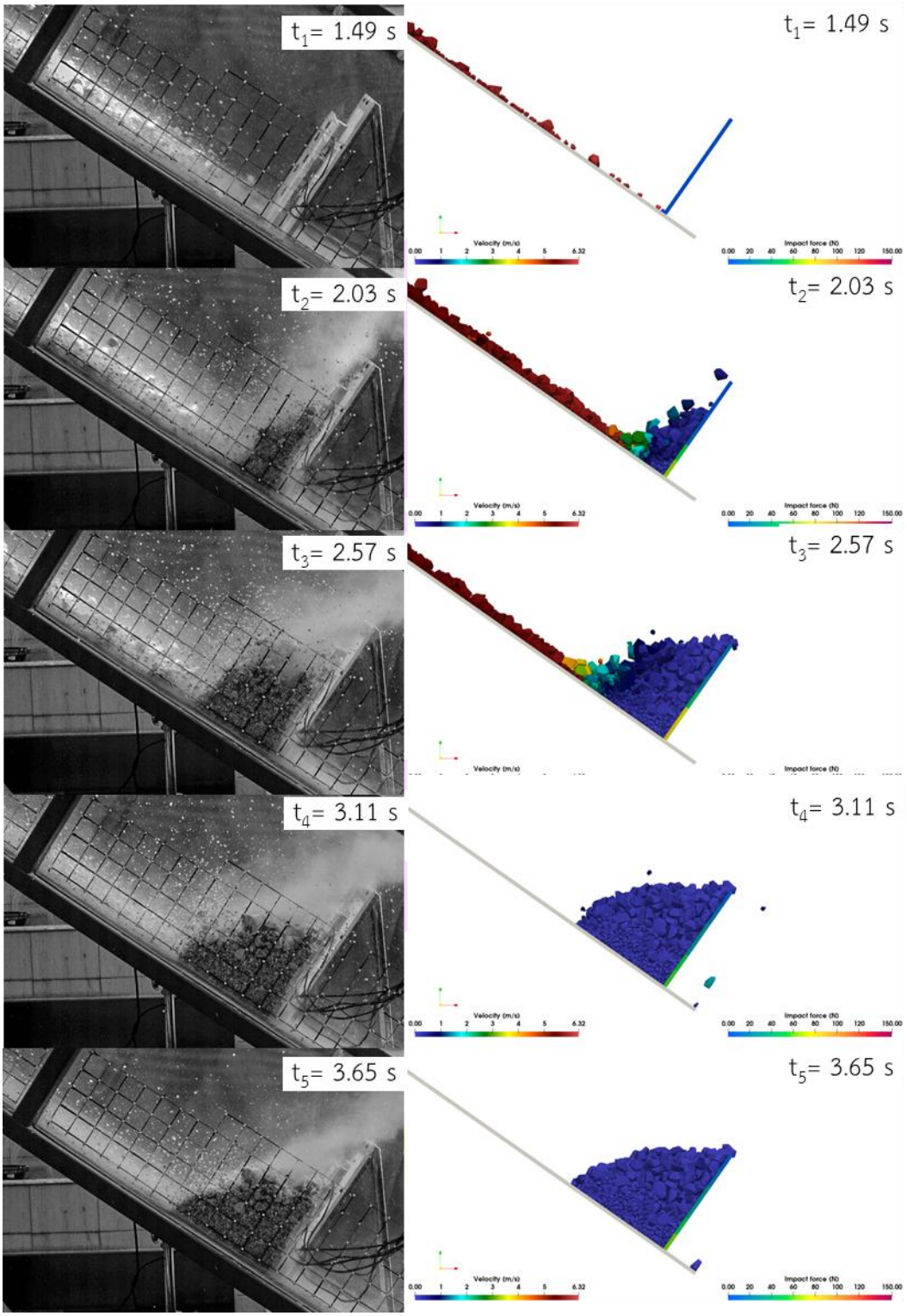
ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 25 องศา (R25_50-50)



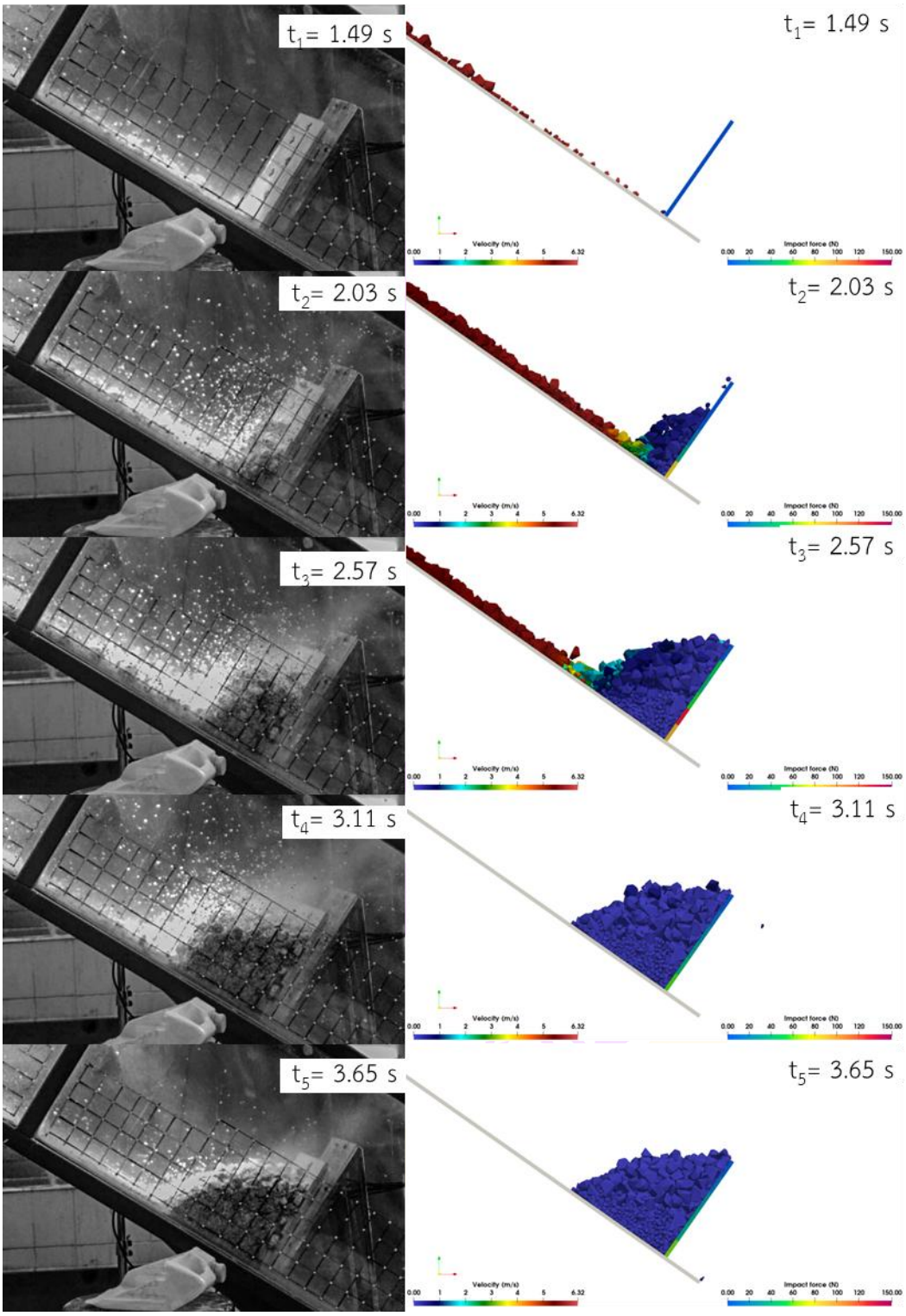
ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ความชัน 30 องศา (R30_40-60)



ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 30 องศา (R30_50-50)

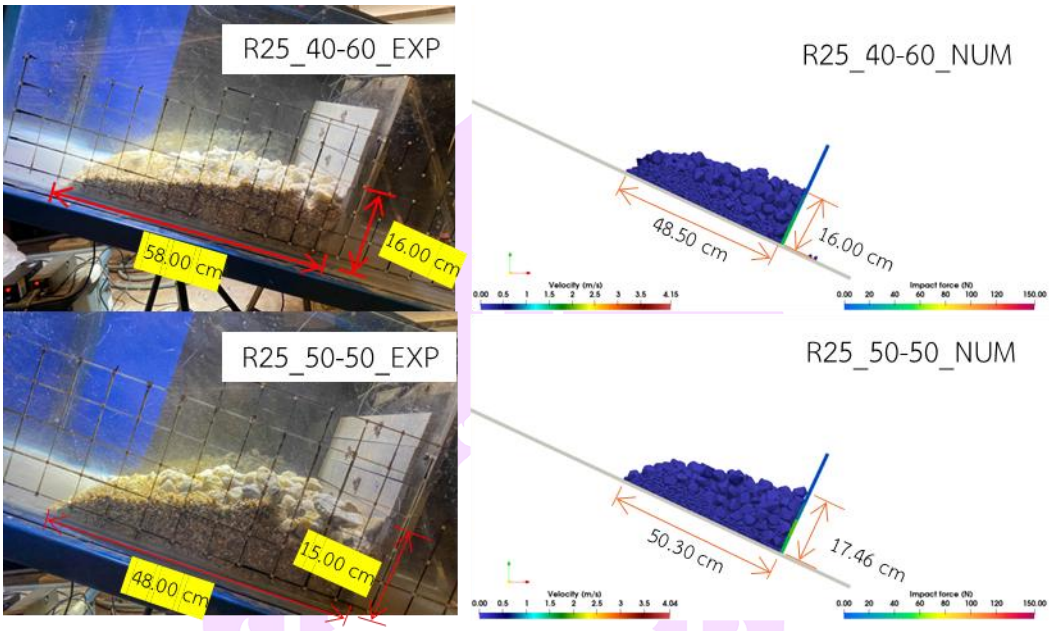


ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ความชัน 35 องศา (R35_40-60)

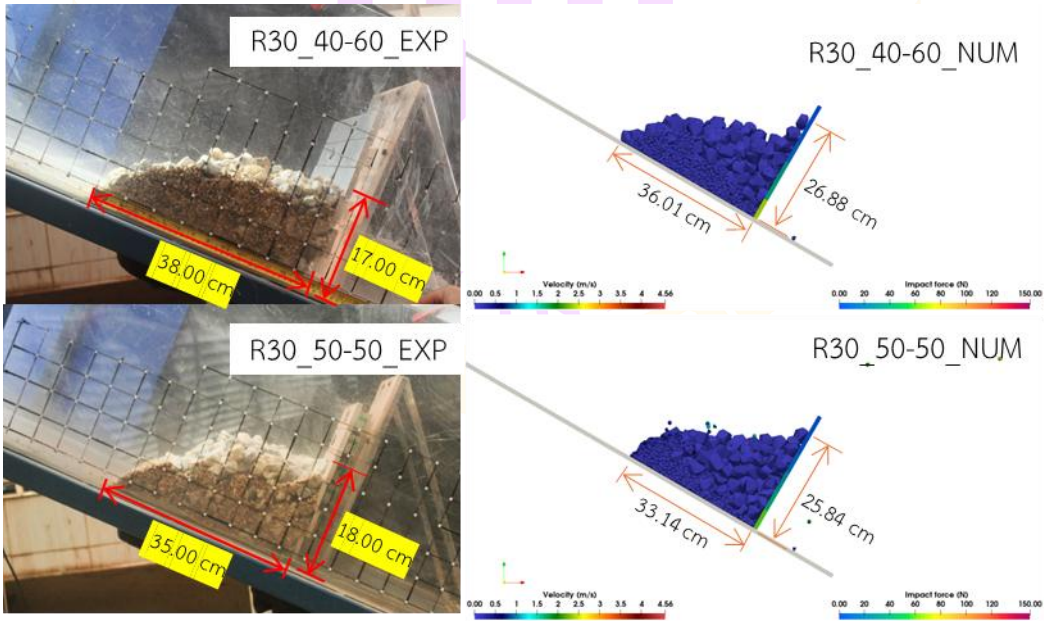


ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 35 องศา (R35_50-50)

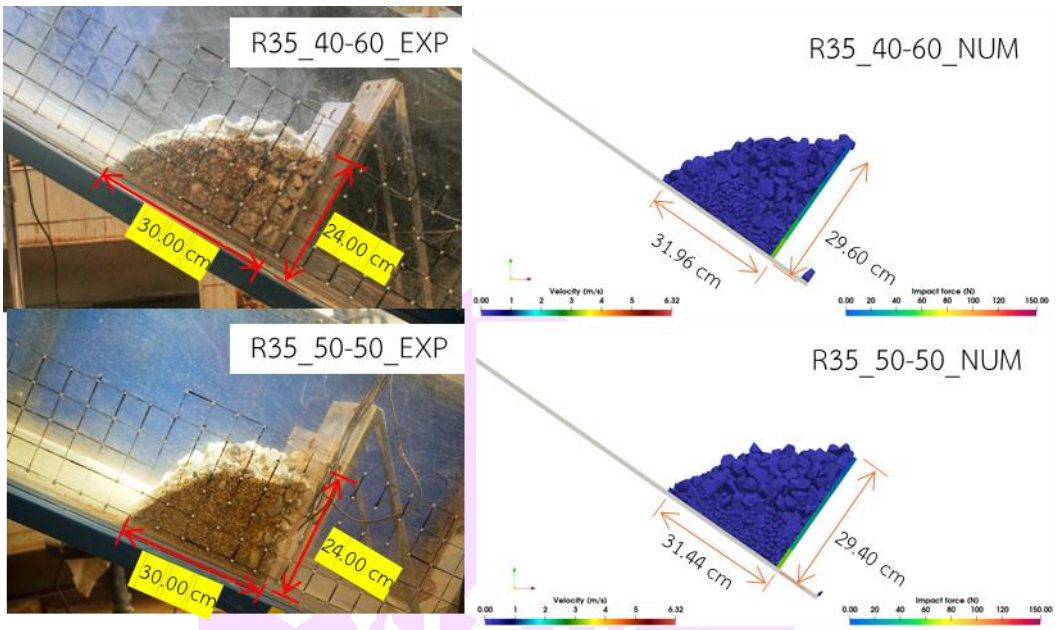
ภาคผนวก จ ขนาดการกองทับถมหน้าโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เทียบกับการทดลองทางกายภาพ



ความชัน 25 องศา

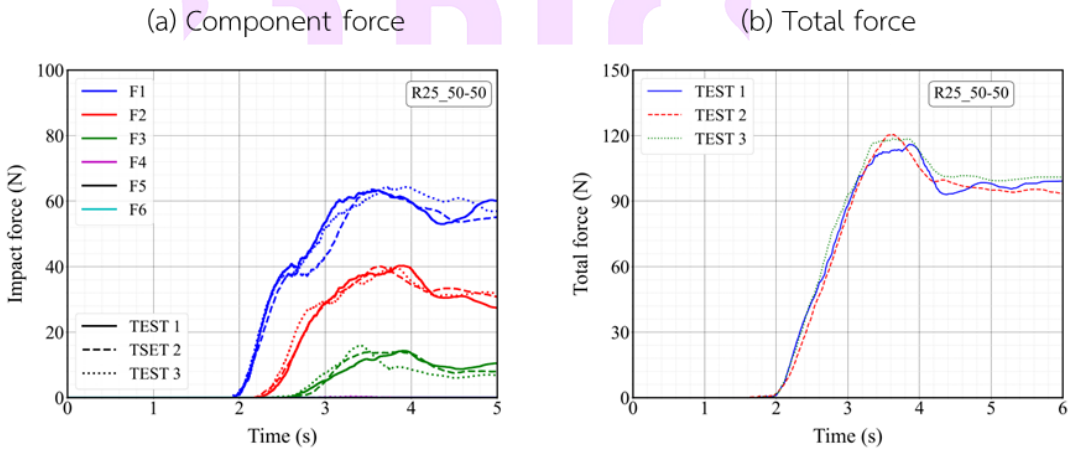


ความชัน 30 องศา



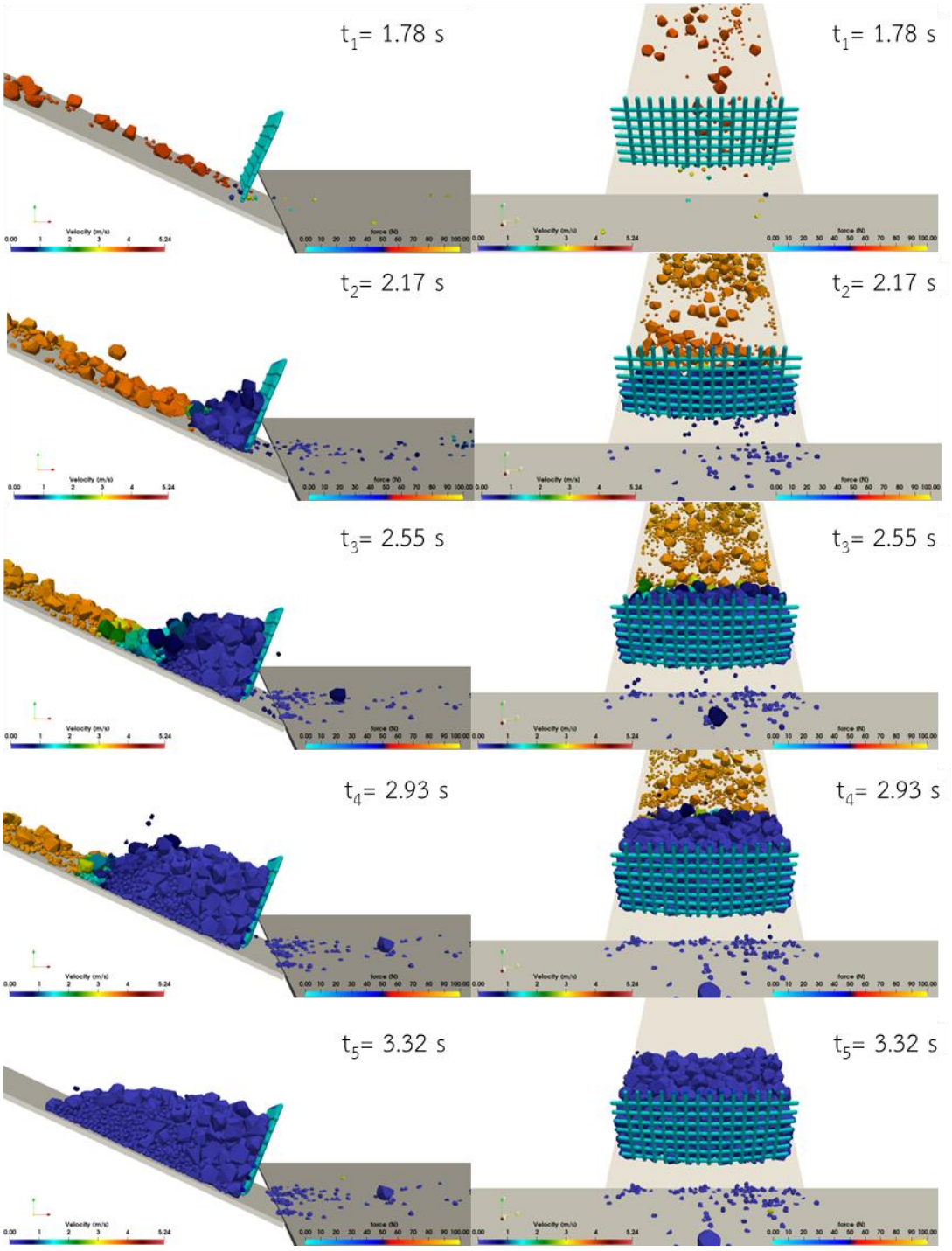
ความชัน 35 องศา

ภาคผนวก ฉ แรงกระแทกการทดลองซ้ำ แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

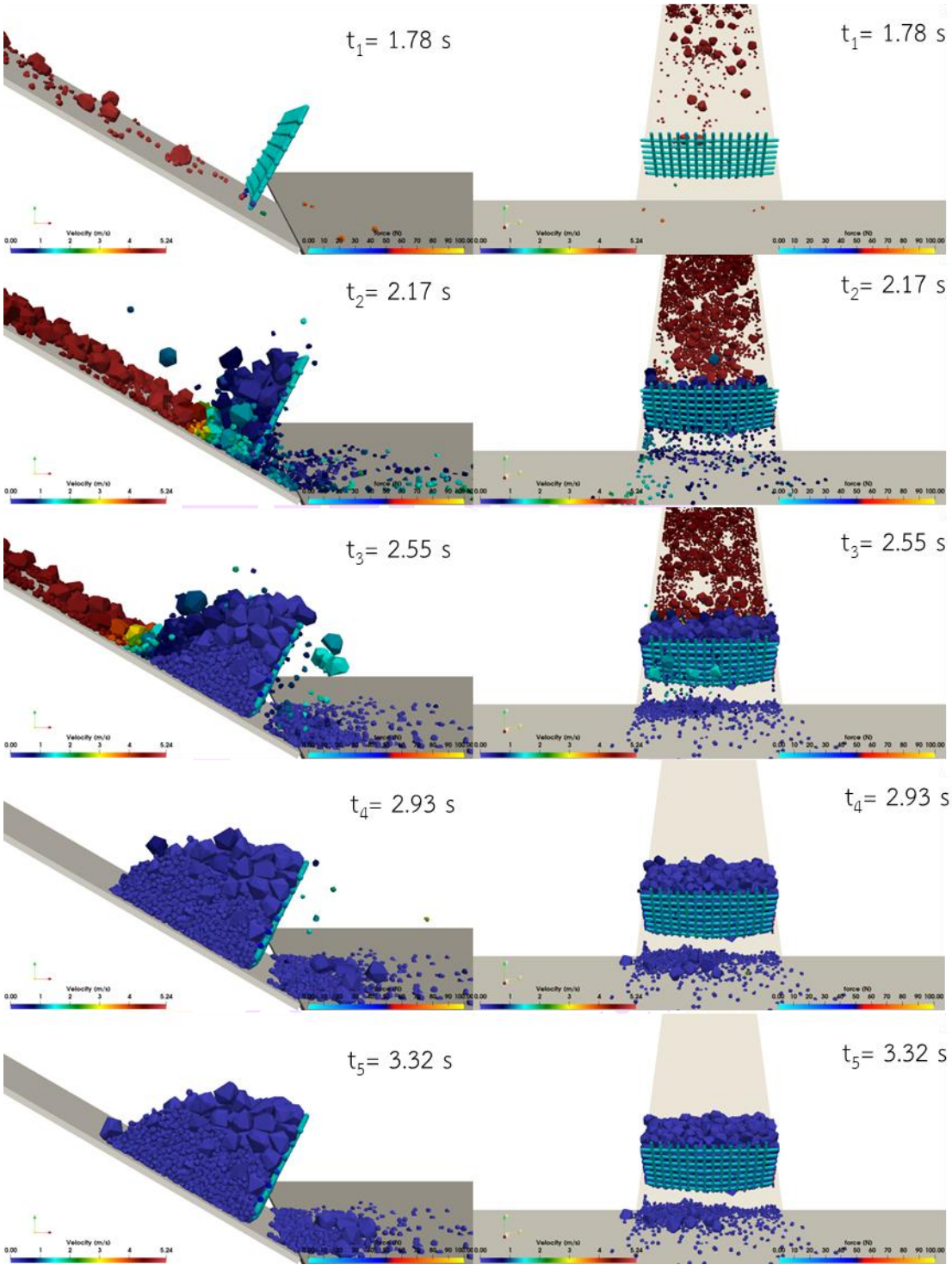


ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 25 องศา (R25_60-50)

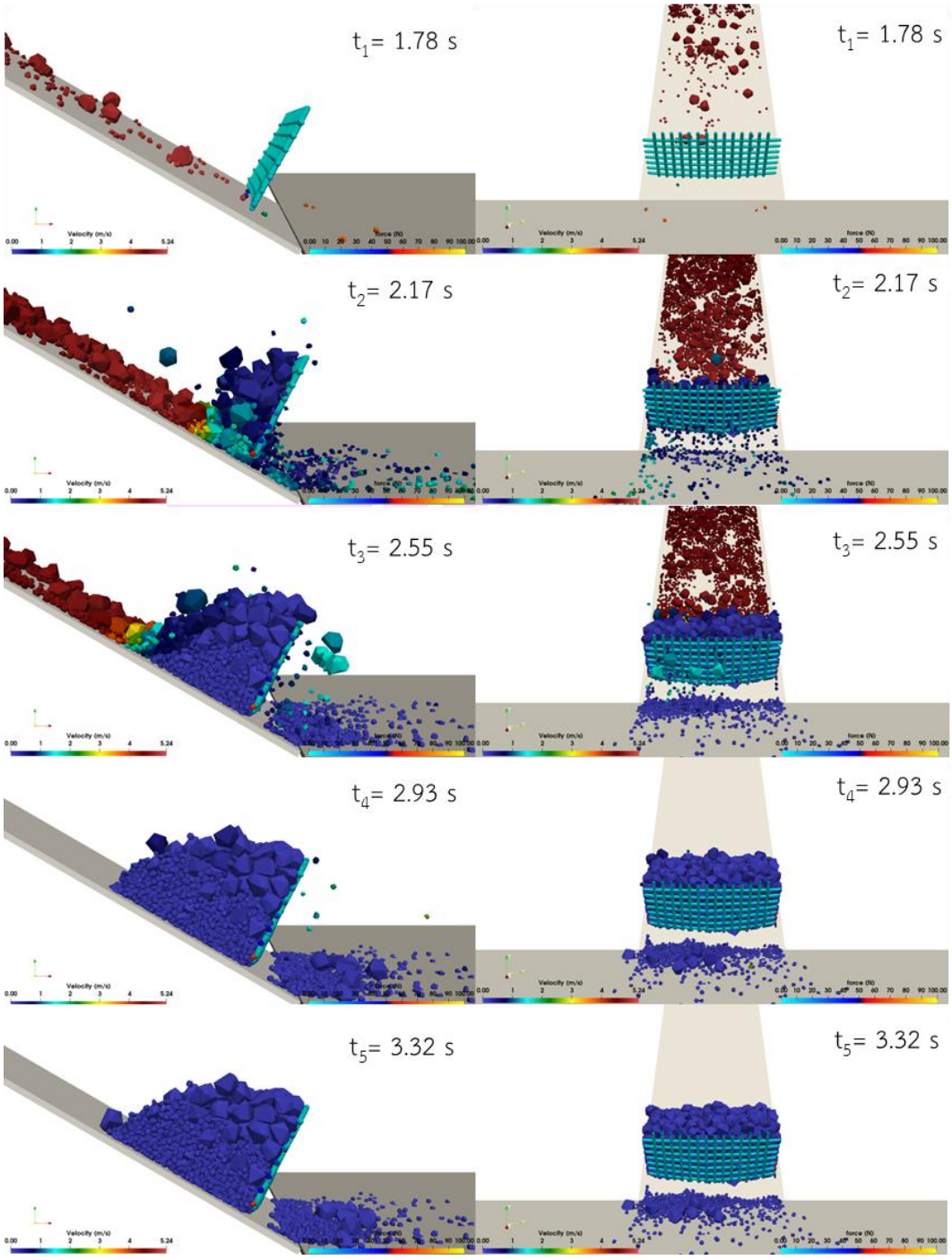
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างพฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



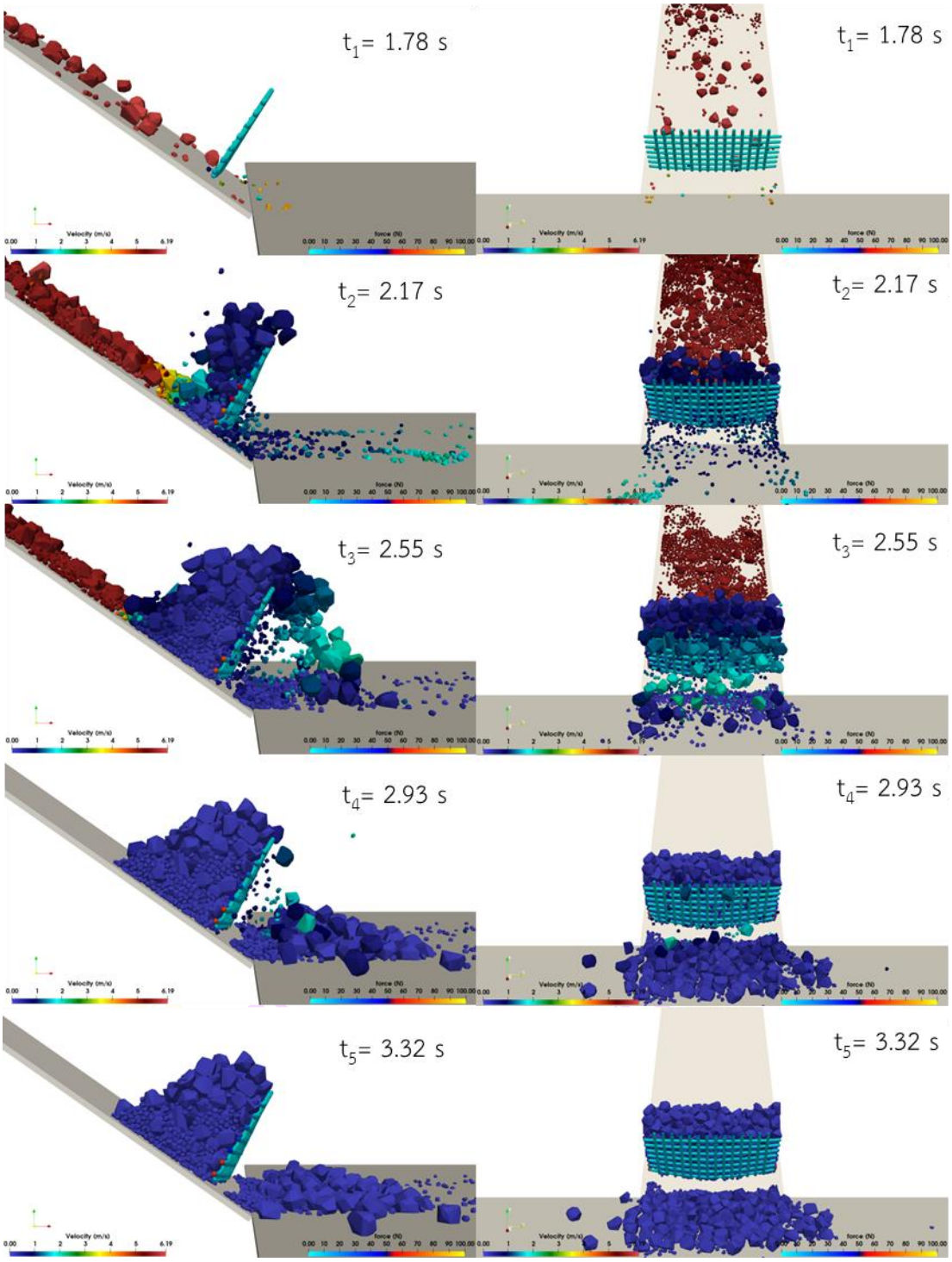
ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 25 องศา (F25_50-50)



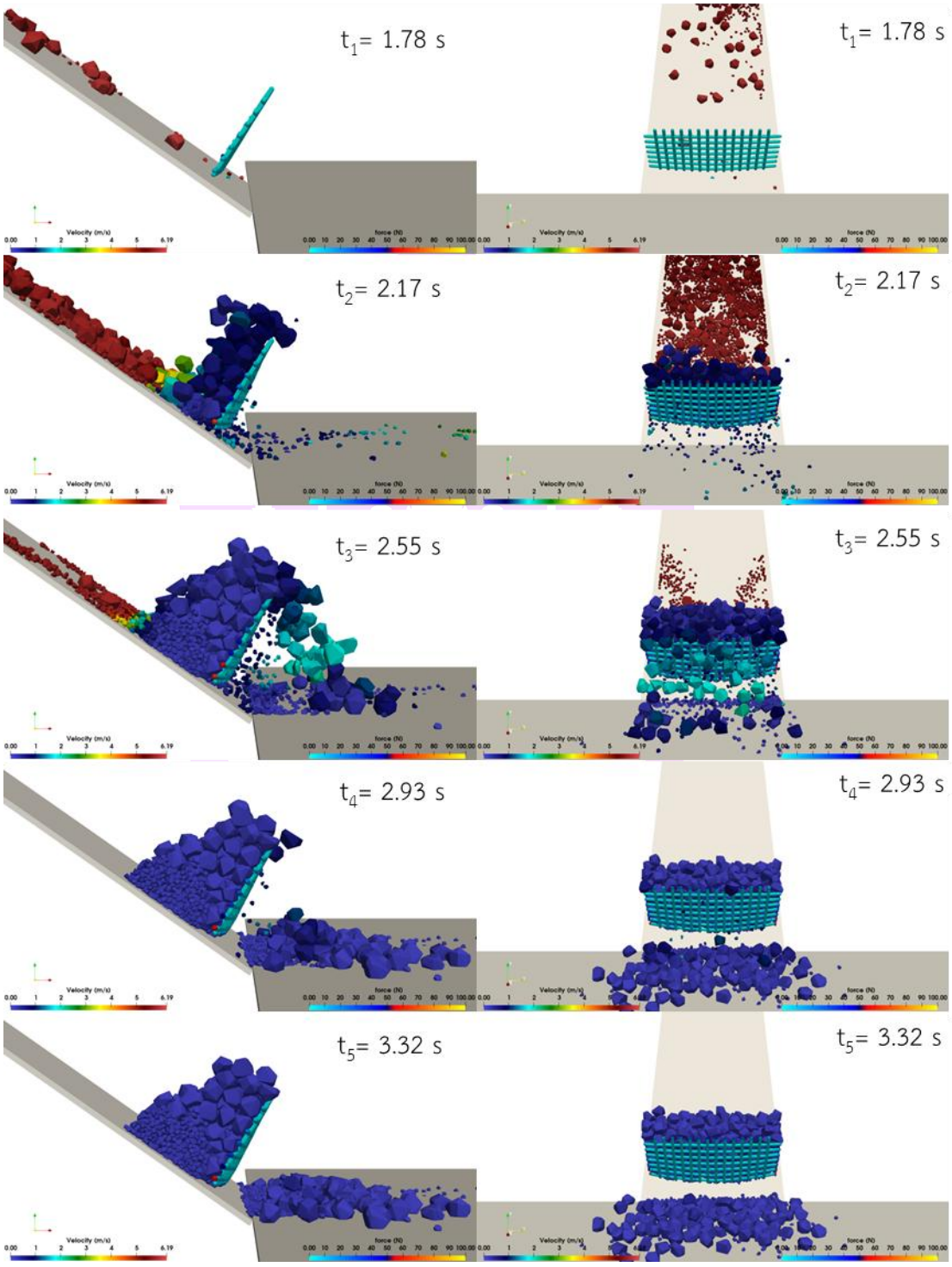
ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ความชัน 30 องศา (F30_40-60)



ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 30 องศา (F30_50-50)

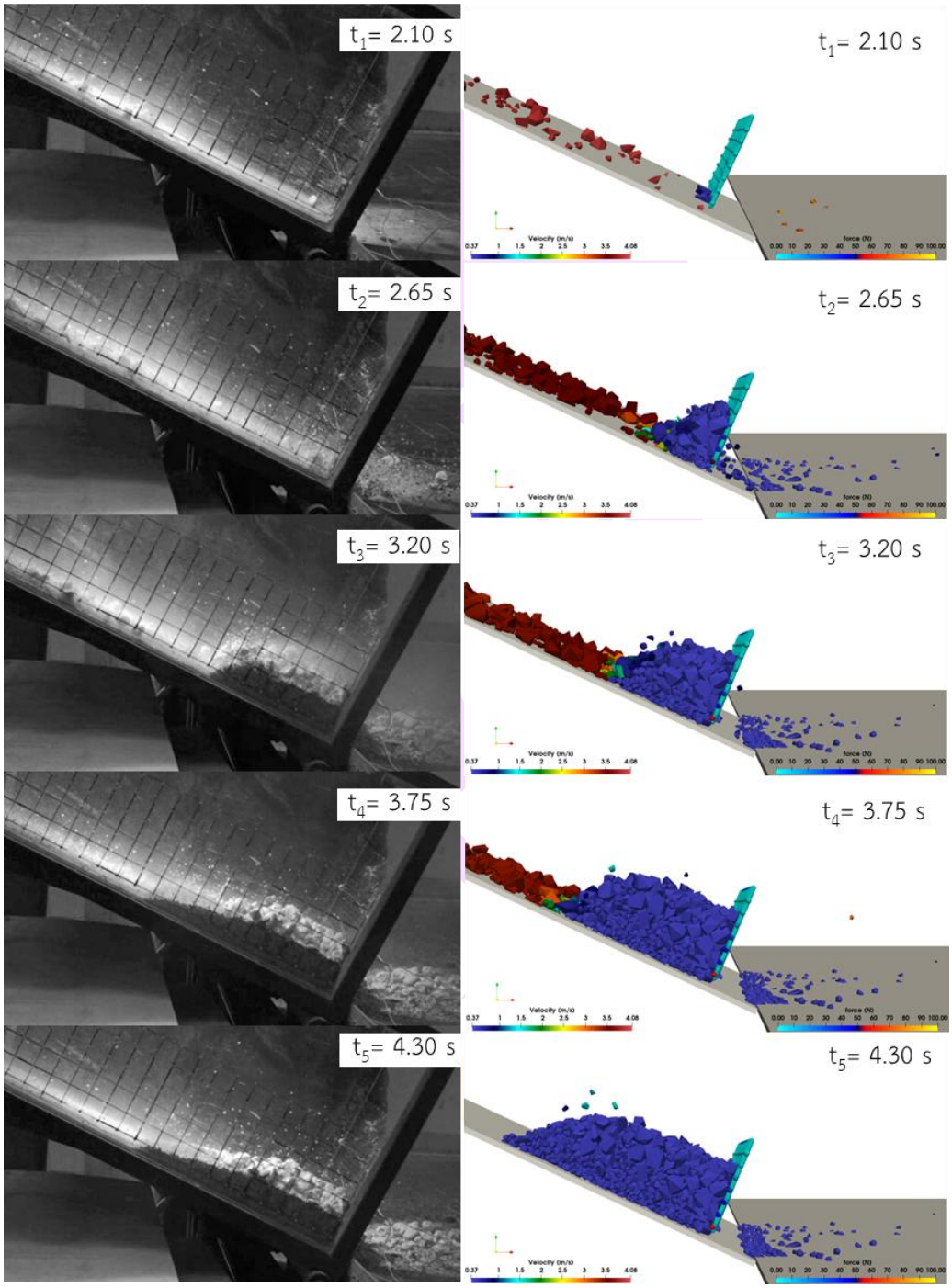


ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ความชัน 35 องศา (F35_40-60)

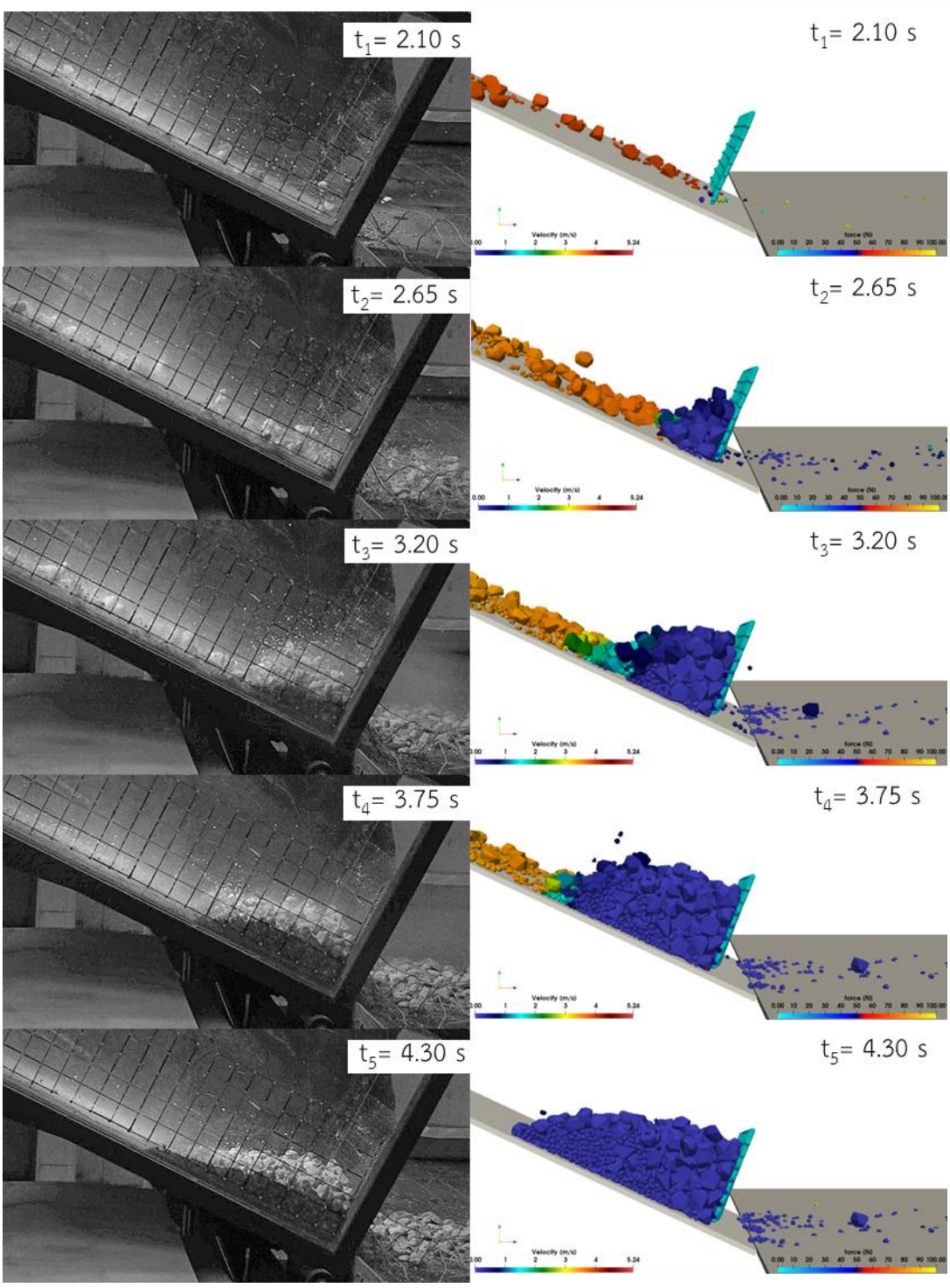


ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 35 องศา (F35_50-50)

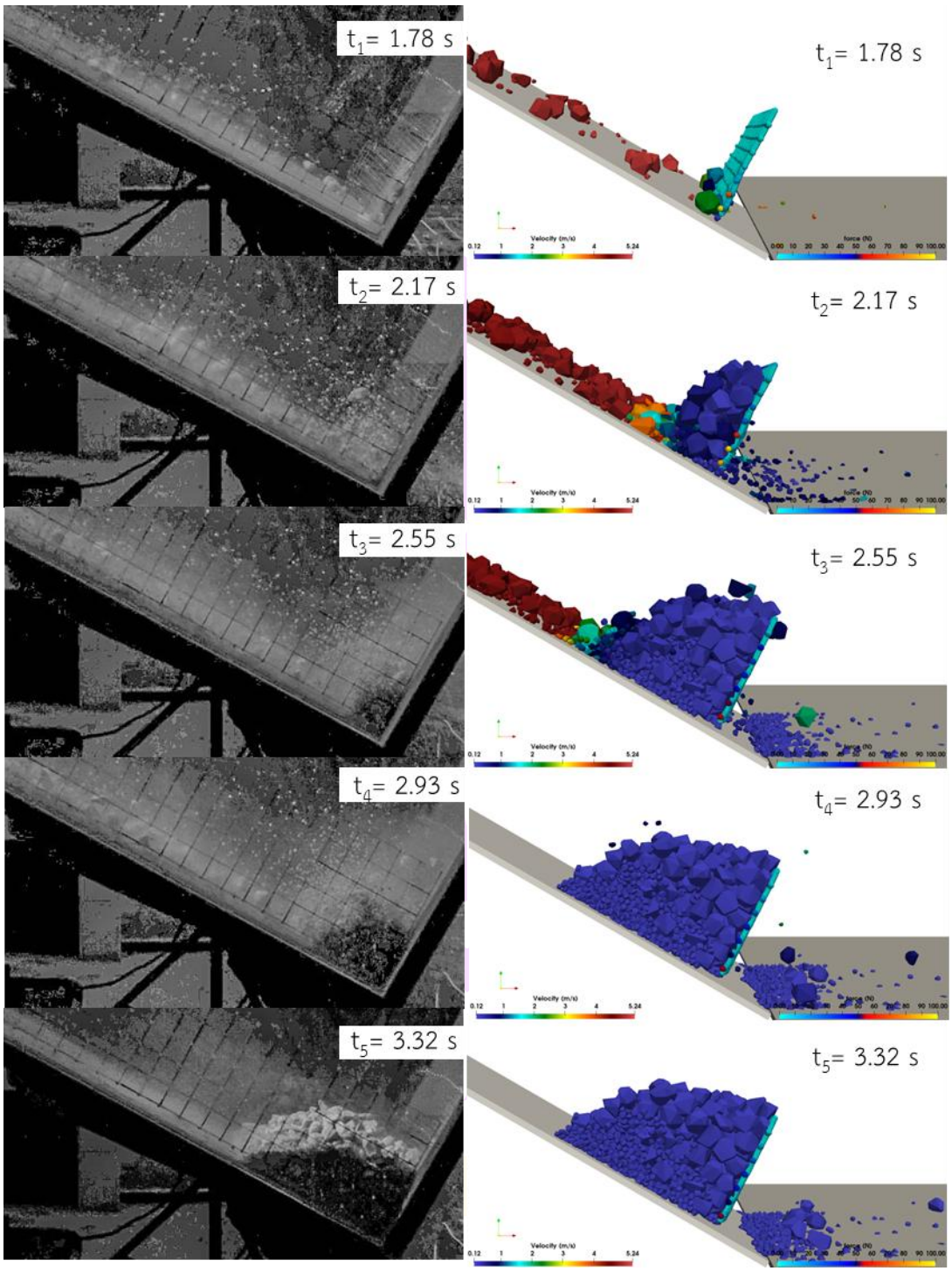
ภาคผนวก ช ตัวอย่างพฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นที่ช่วงเวลาต่าง ๆ แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เทียบกับการทดลองทางกายภาพ



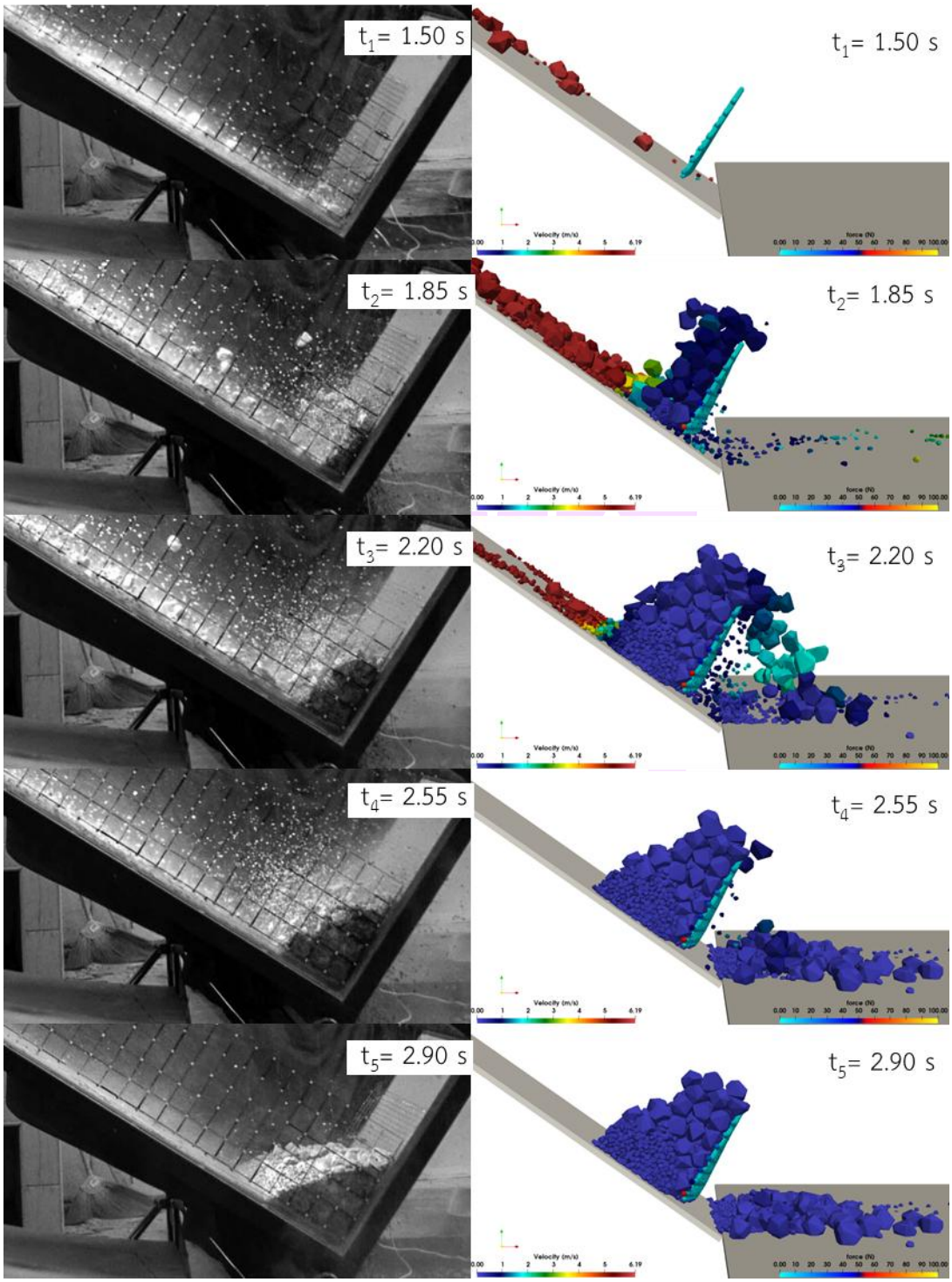
ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 ความชัน 25 องศา (F25_40-60)



ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 25 องศา (F25_50-50)

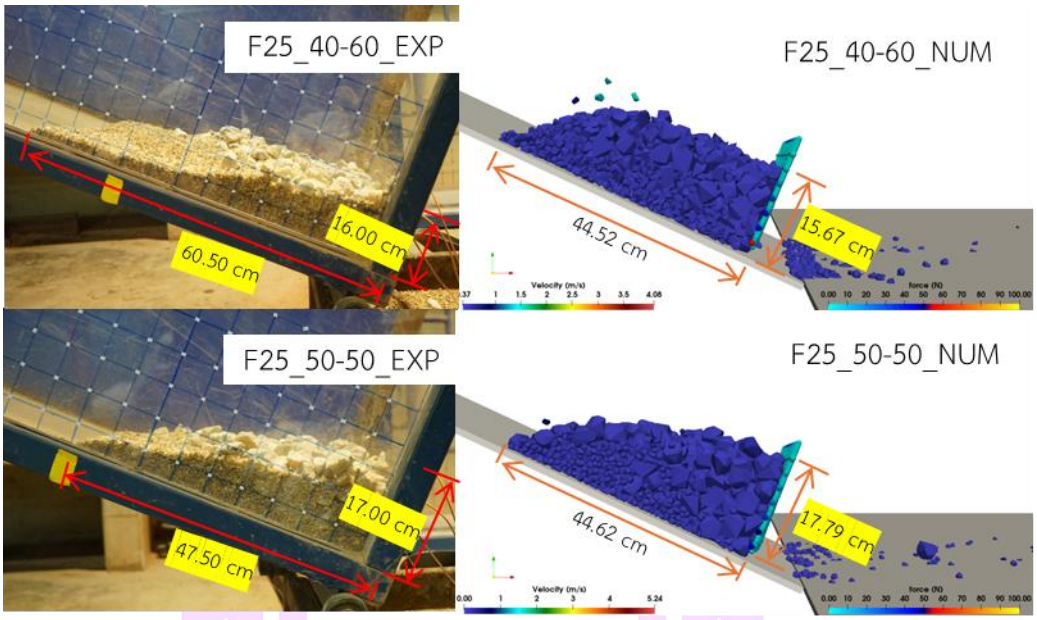


ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 30 องศา (F30_50-50)

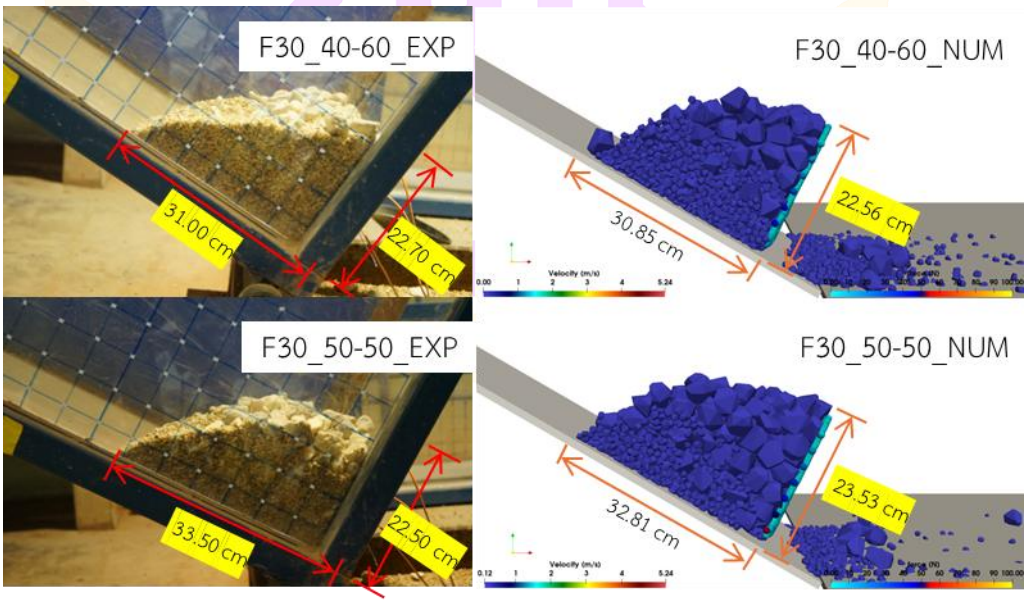


ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 ความชัน 35 องศา (F35_50-50)

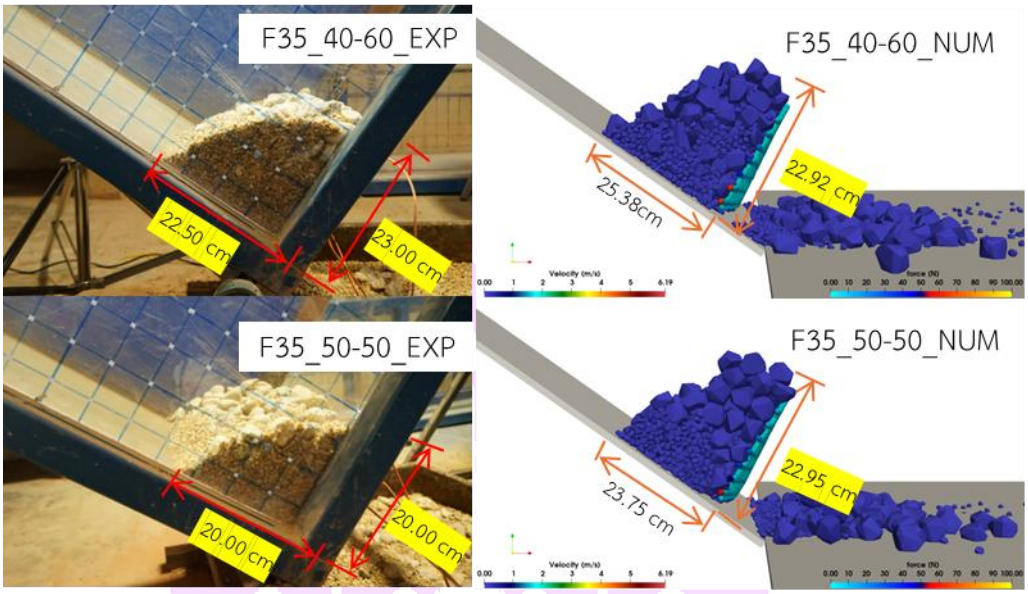
ภาคผนวก ซ ขนาดการกองทับถมหน้าโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM เทียบกับการทดลองทางกายภาพ



ความชัน 25 องศา

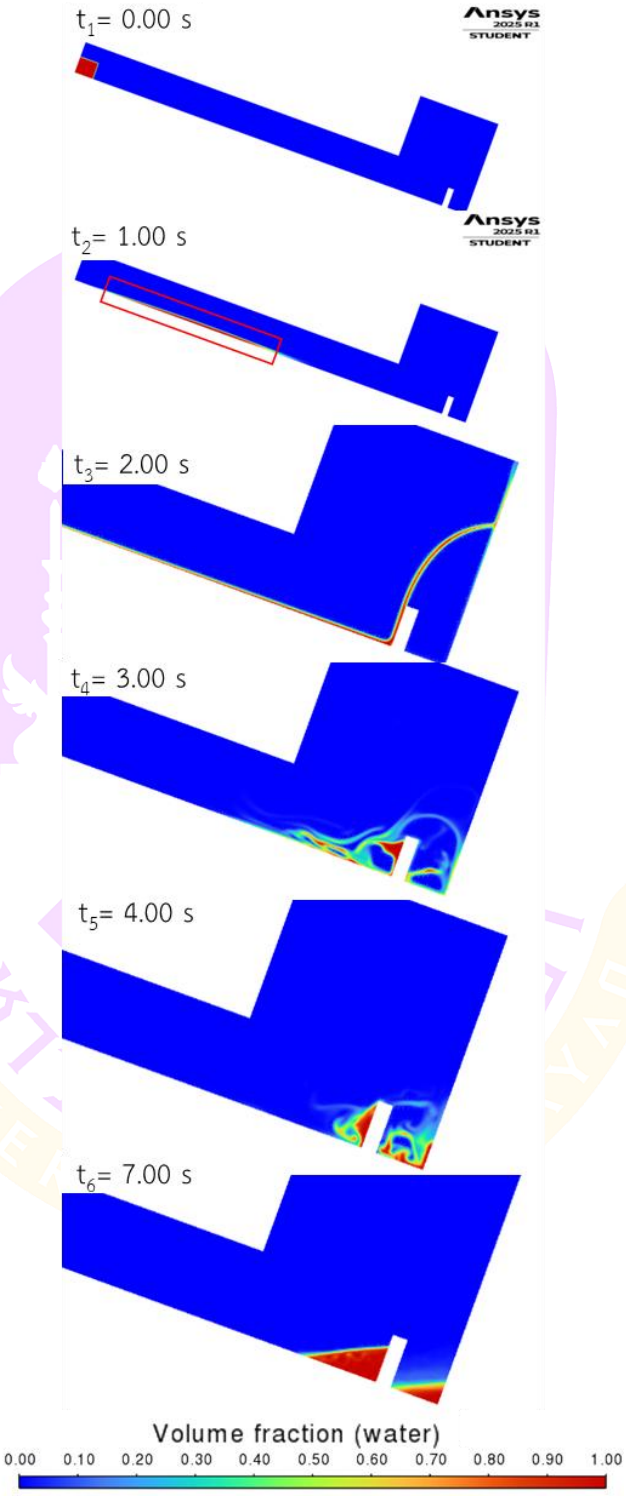


ความชัน 30 องศา

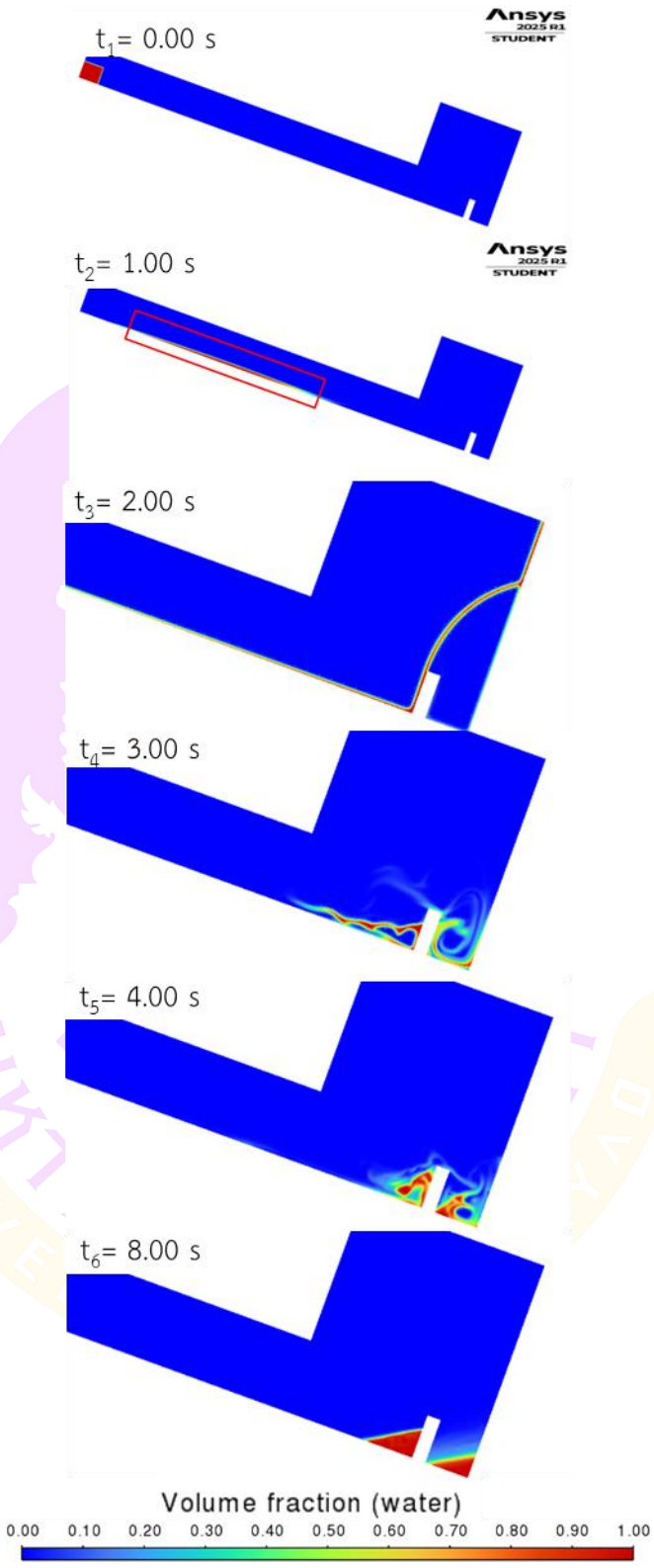


ความชัน 35 องศา

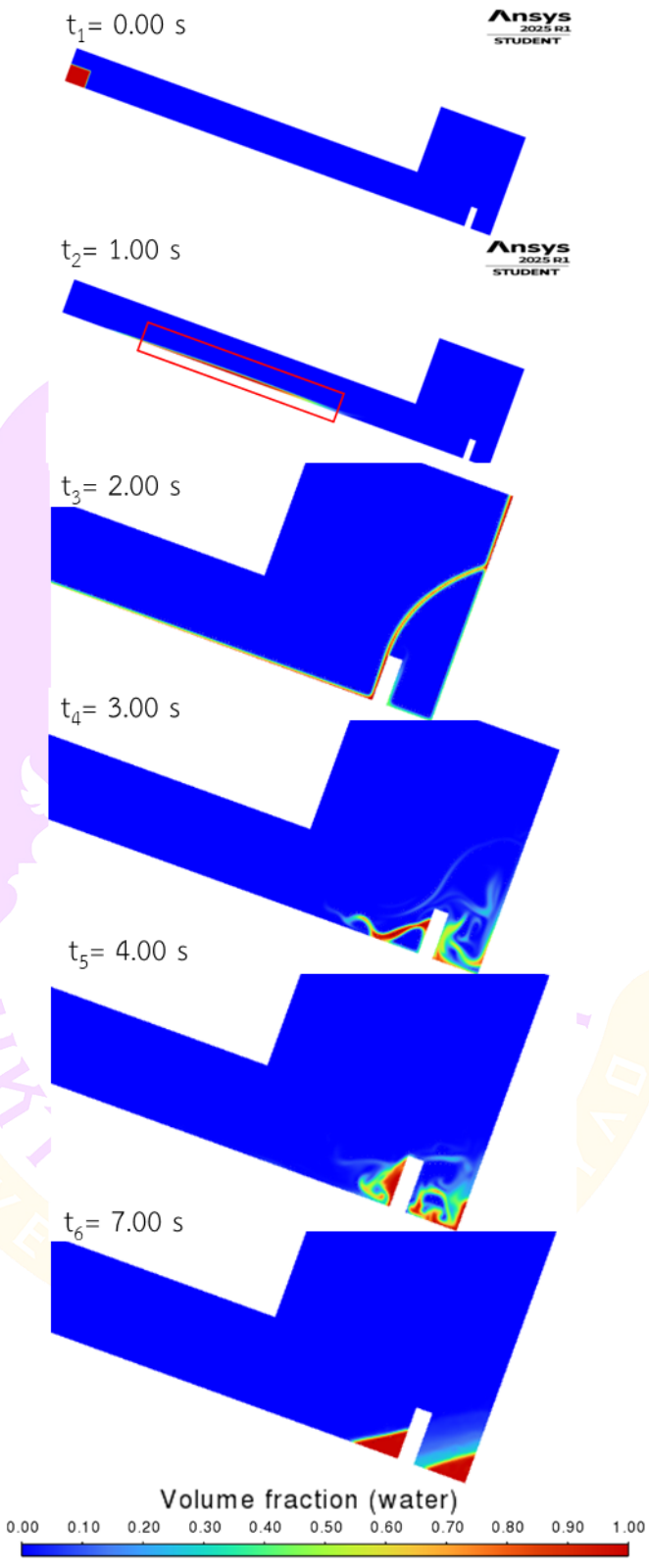
ภาคผนวก ณ การเคลื่อนที่ของวัสดุของเหลว แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ที่ต่างเวลาต่าง ๆ



ความชัน 25 องศา (CFD_25)

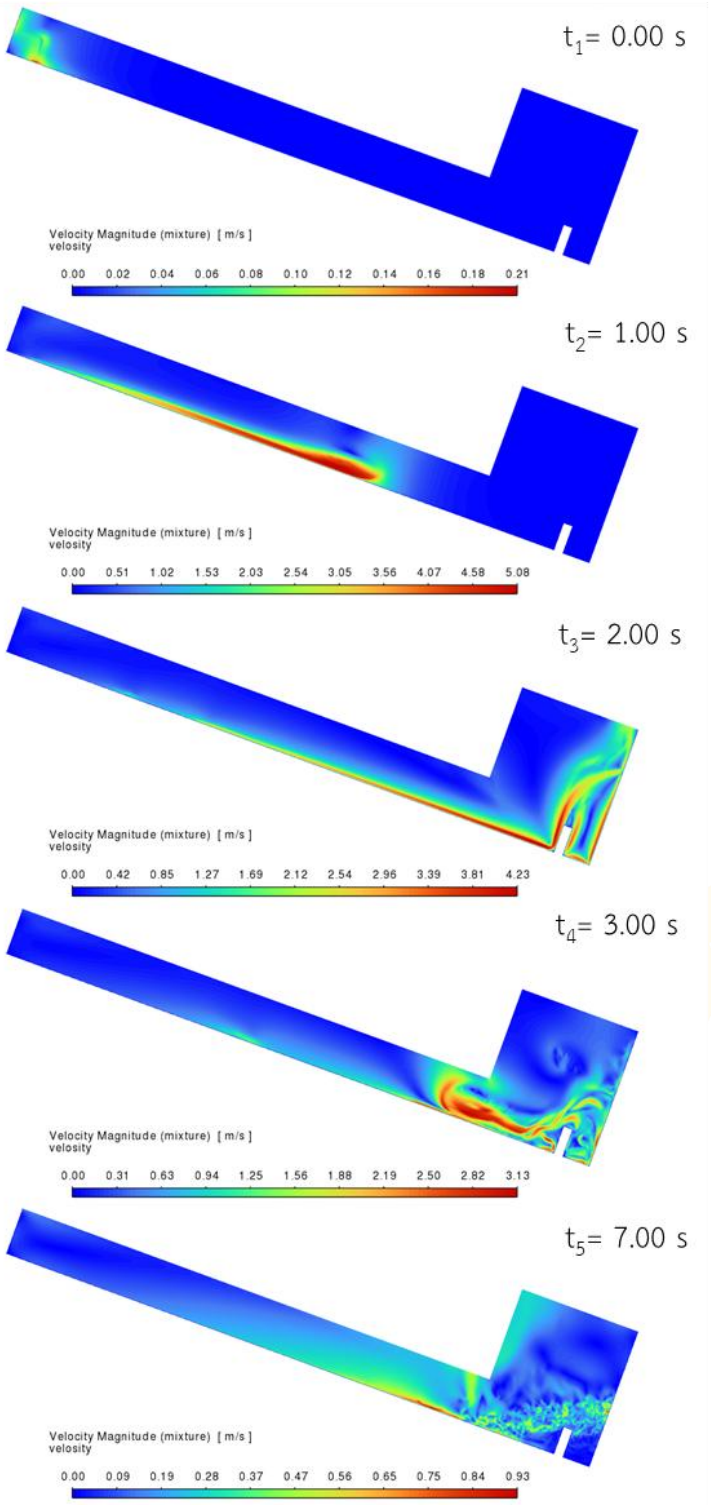


ความชัน 30 องศา (CFD_30)

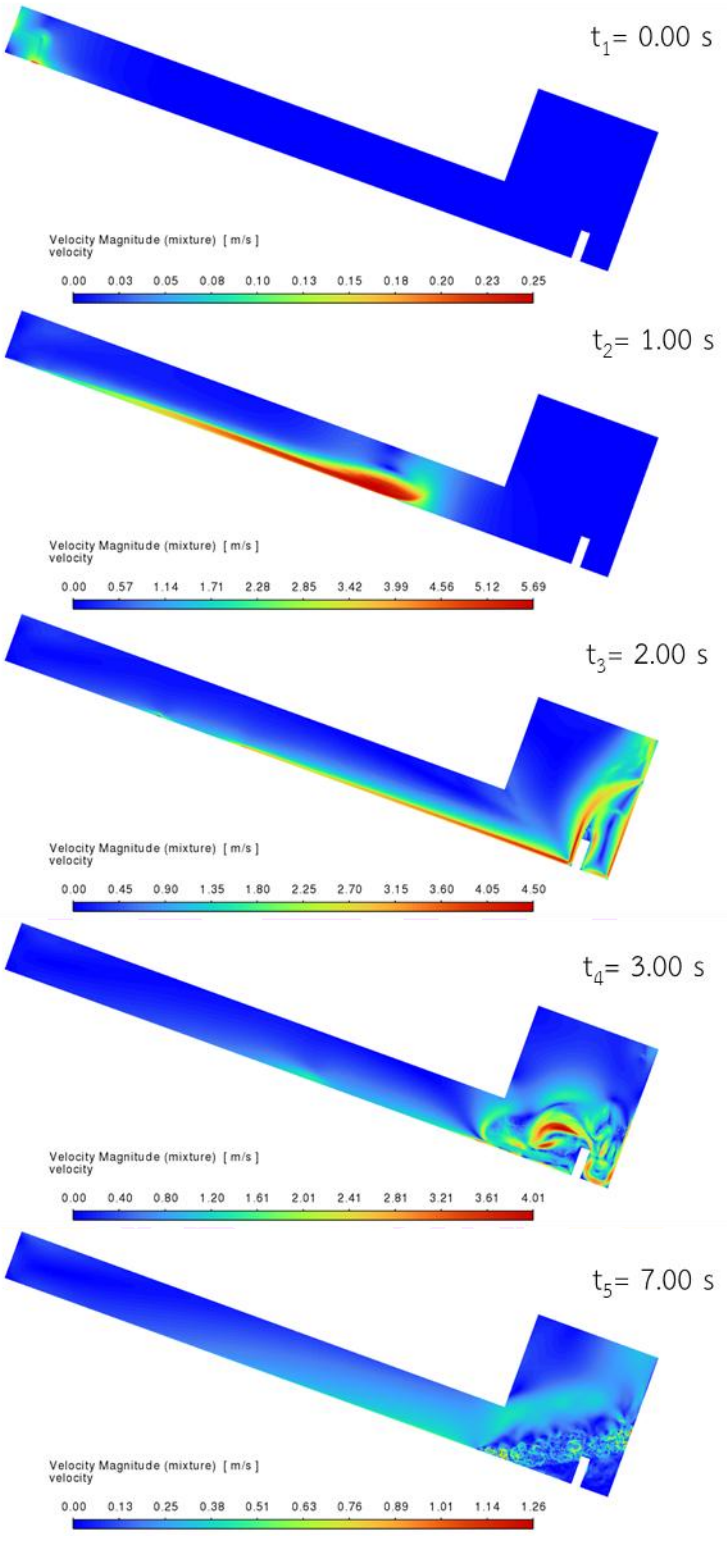


ความชัน 35 องศา (CFD_35)

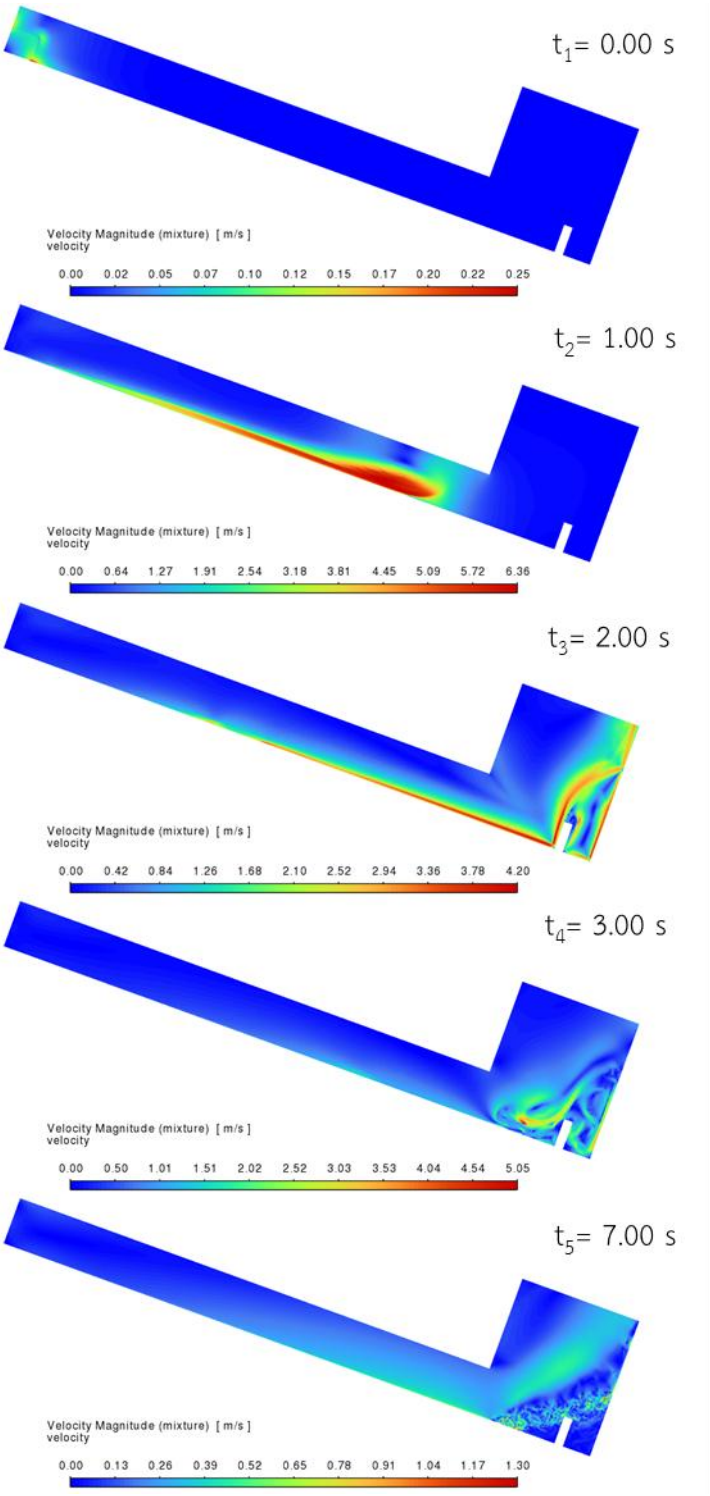
ภาคผนวก ญ ความเร็วของวัสดุของไหล แบบจำลองเชิงตัวเลข CFD ที่ต่างเวลาต่าง ๆ



ความชัน 25 องศา (CFD_25)

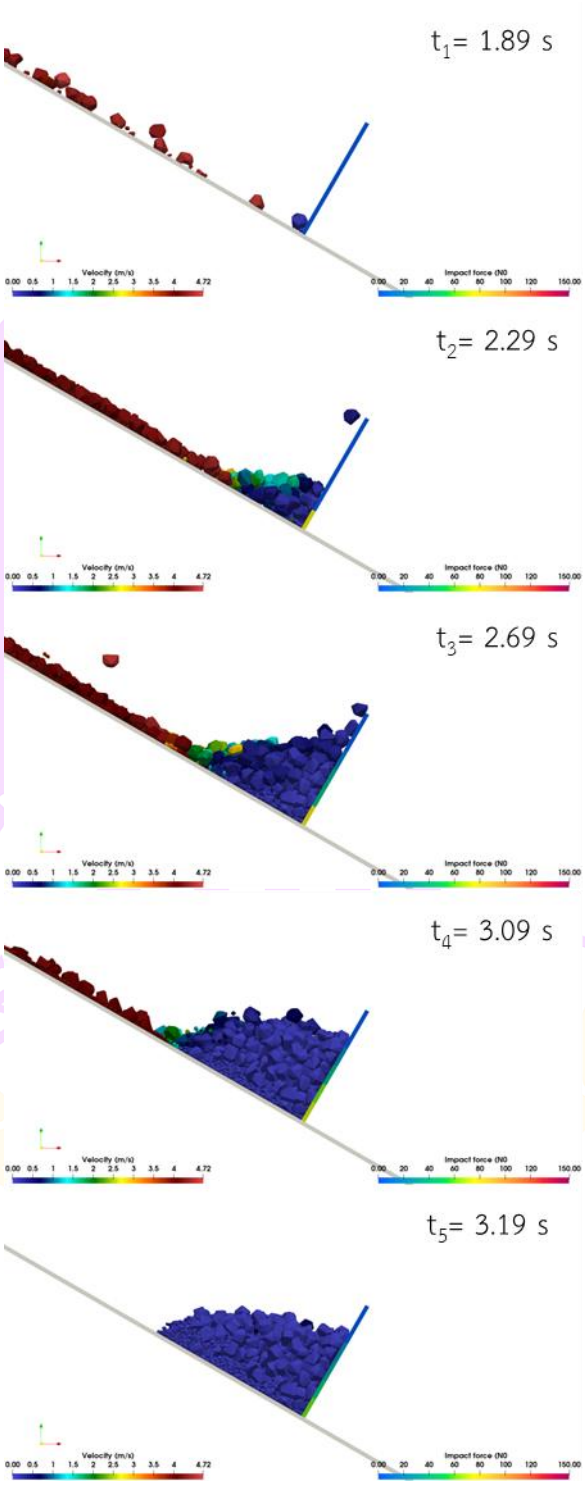


ความชัน 30 องศา (CFD_30)

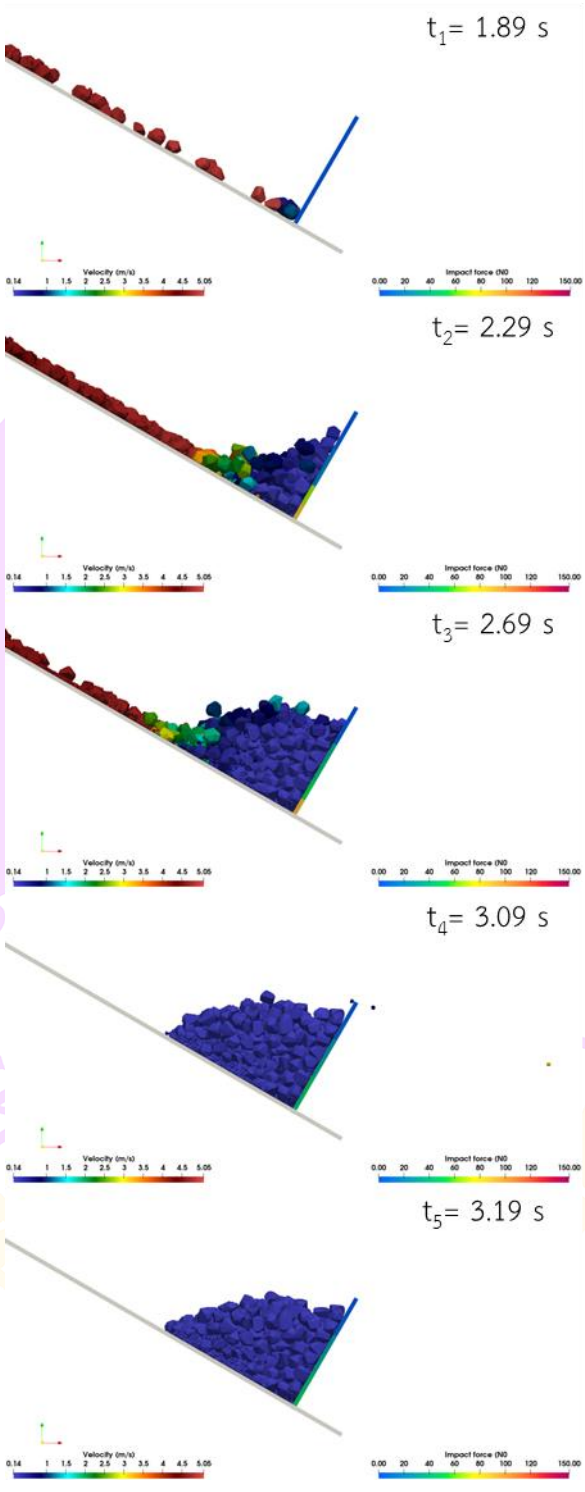


ความชัน 35 องศา (CFD_35)

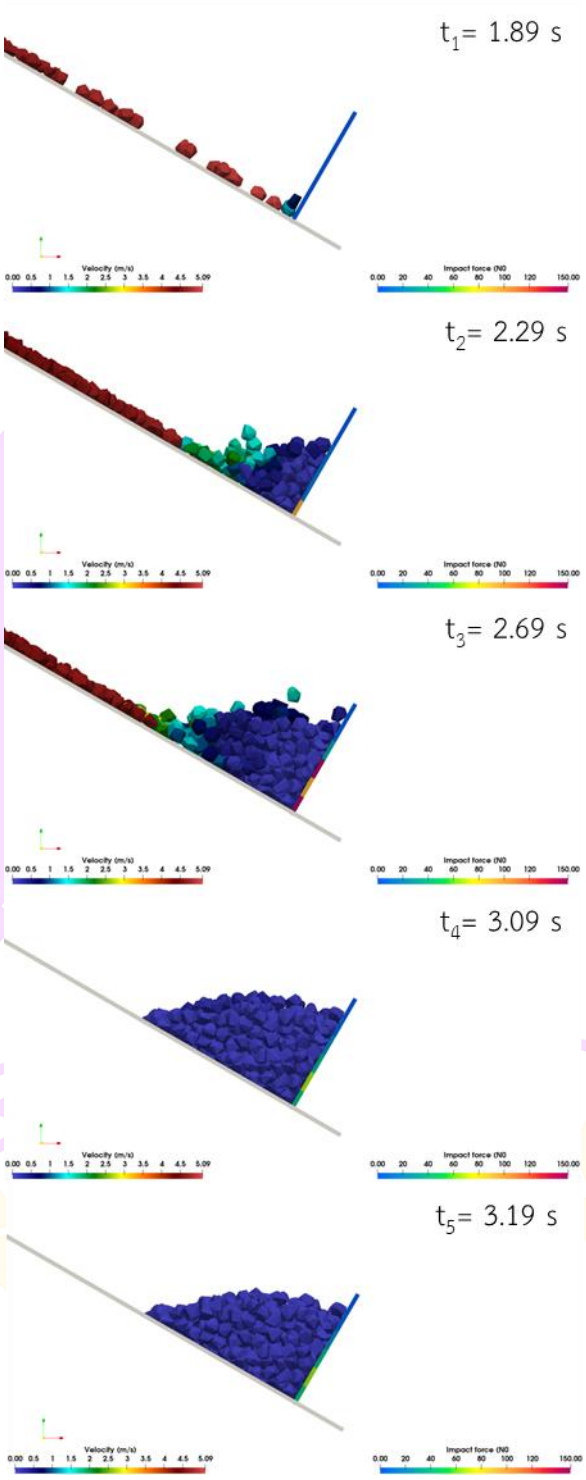
ภาคผนวก ฎ ผลการทดลองส่วนผสมเพิ่มเติม แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM ความชัน 30 องศา



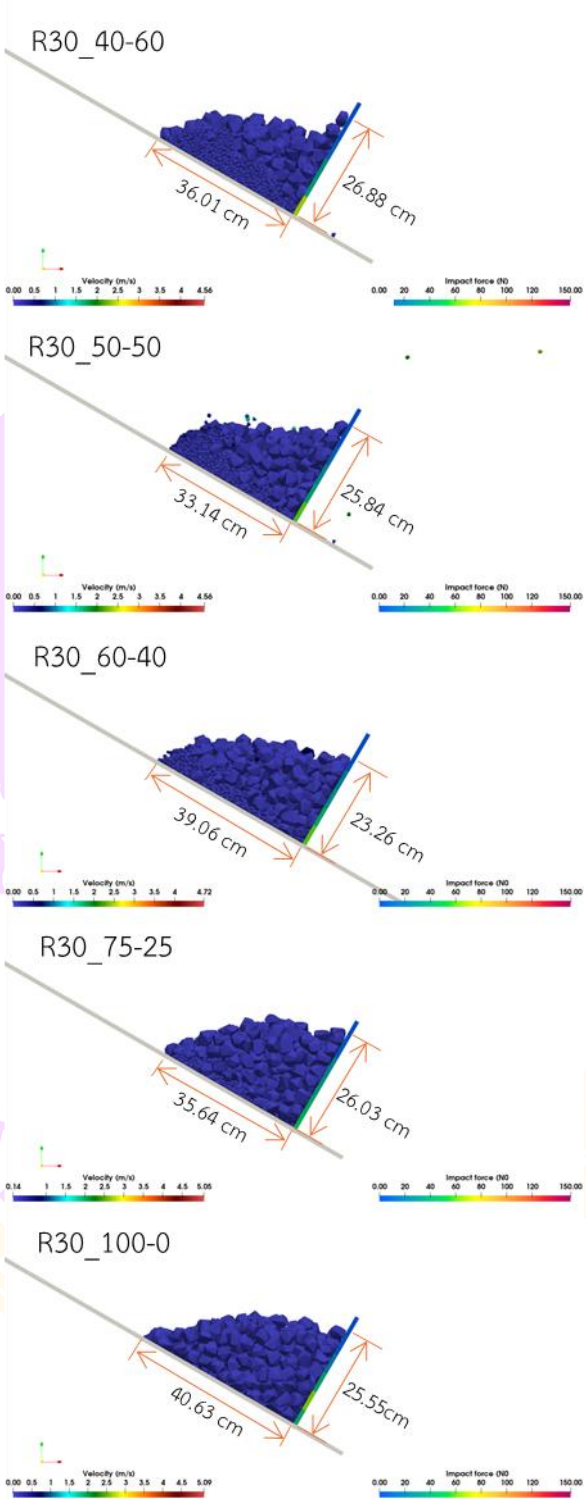
ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ ร้อยละ 60 ต่อกรวดละเอียด ร้อยละ 40 (R30_60-40)



ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ ร้อยละ 75 ต่อกรวดละเอียด ร้อยละ 25 (R30_75-25)

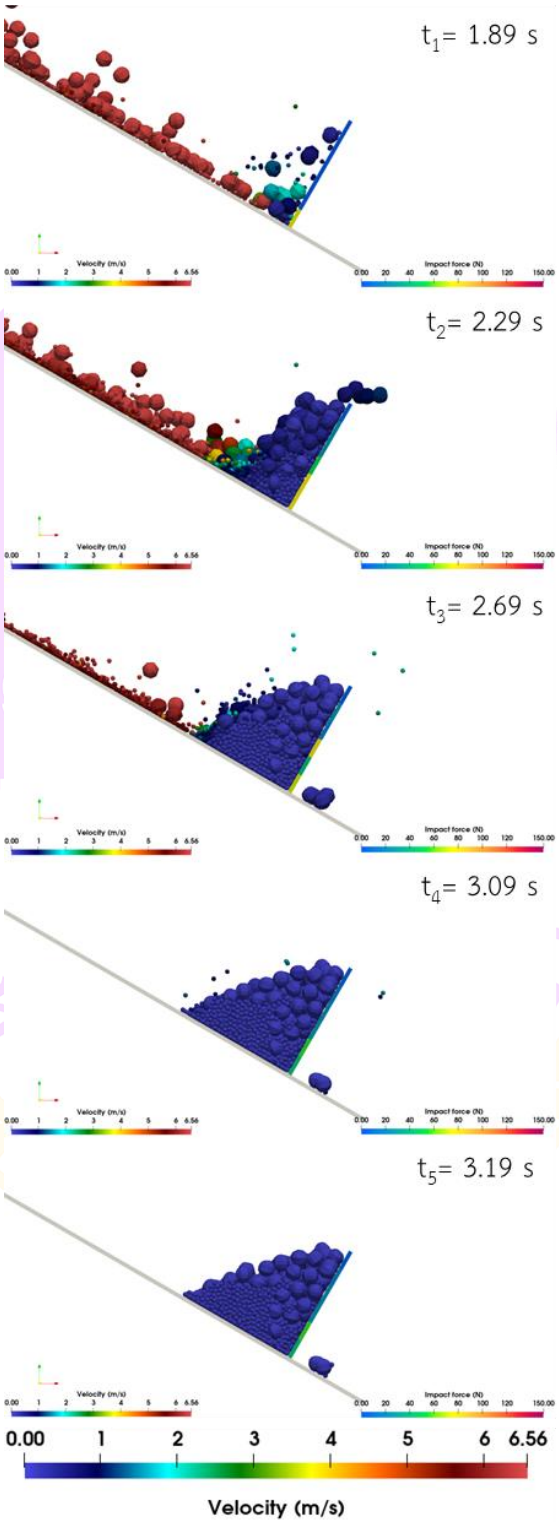


ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ ร้อยละ 100 ต่อกรวดละเอียด ร้อยละ 0 (R30_100-0)

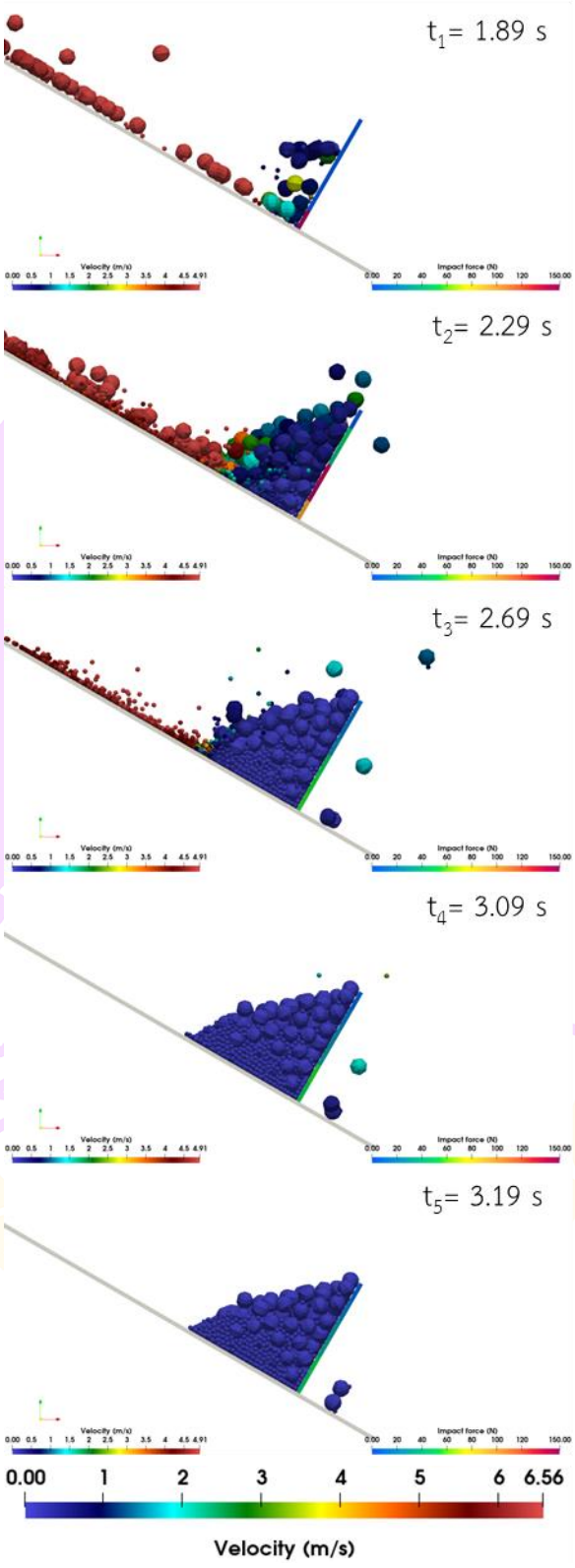


ขนาดการกองของวัสดุแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

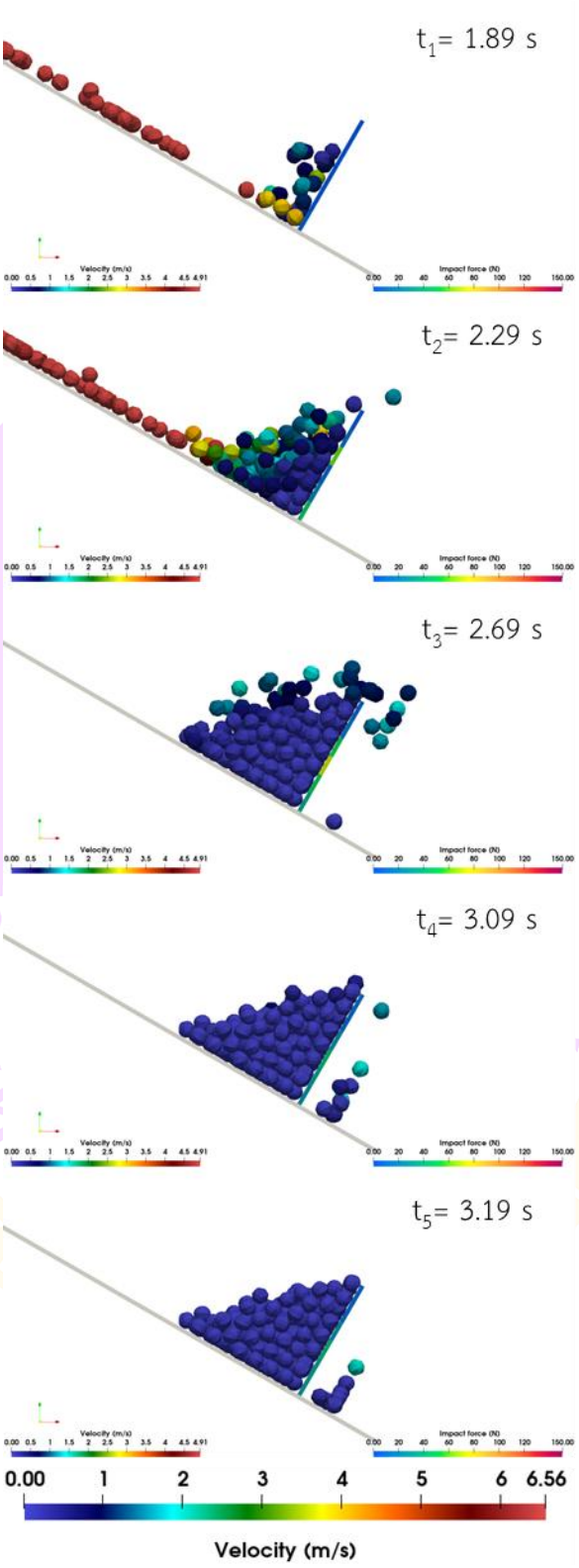
ภาคผนวก ฏ ผลการจำลองอนุภาคทรงกลม แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM



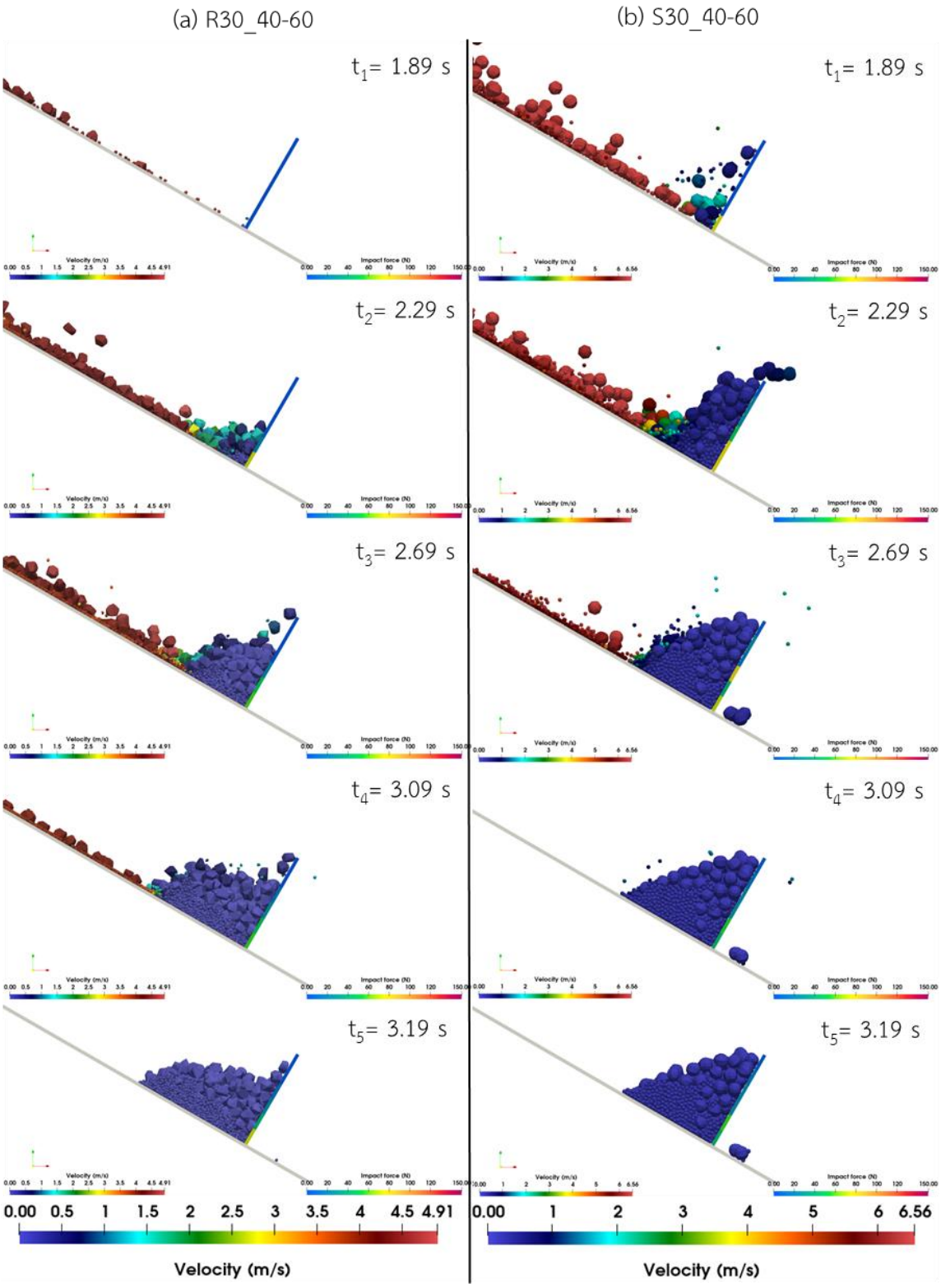
อนุภาคทรงกลม ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 40 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 60 (S30_40-60)



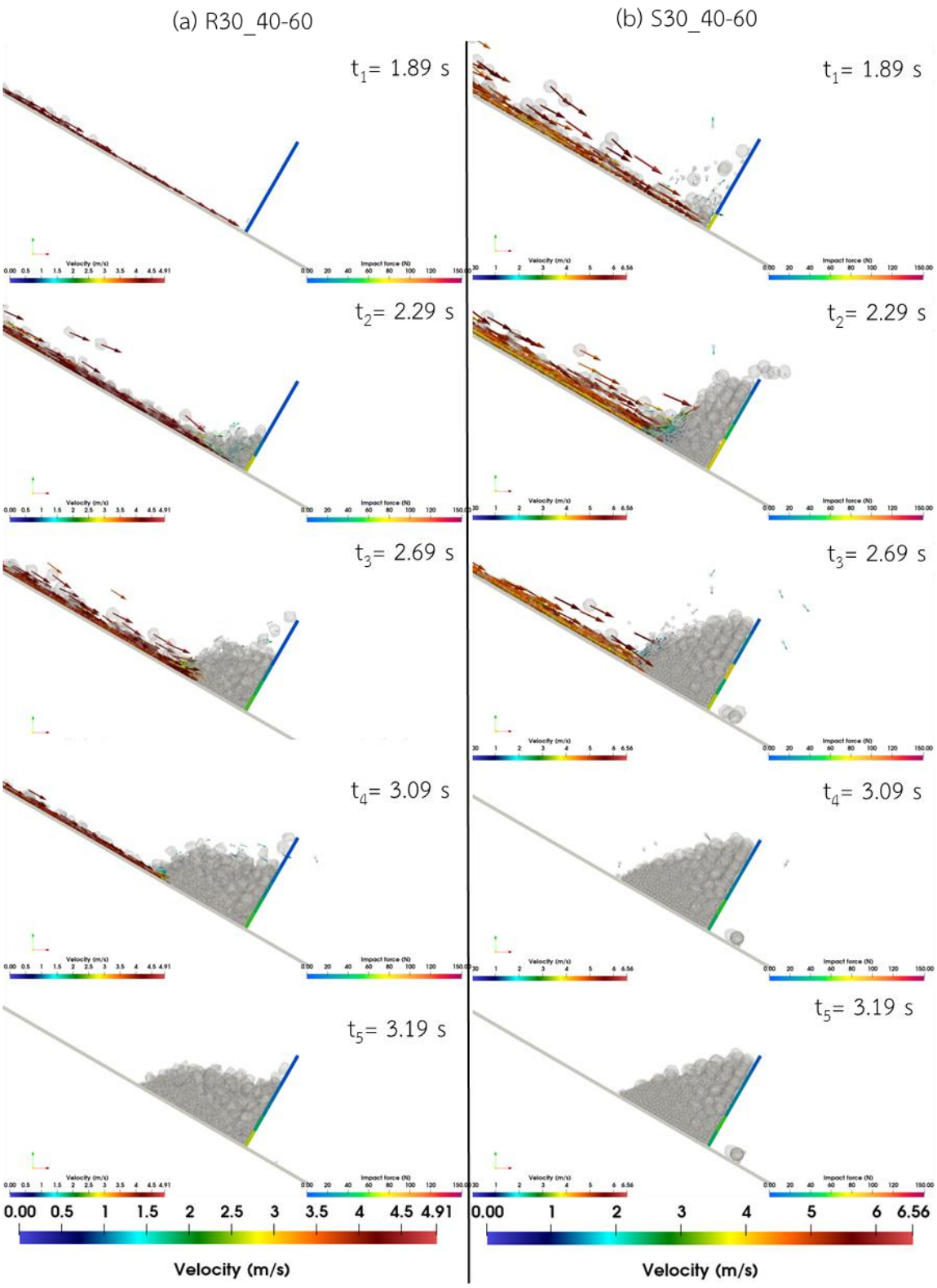
อนุภาคทรงกลม ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 50 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 50 (S30_50-50)



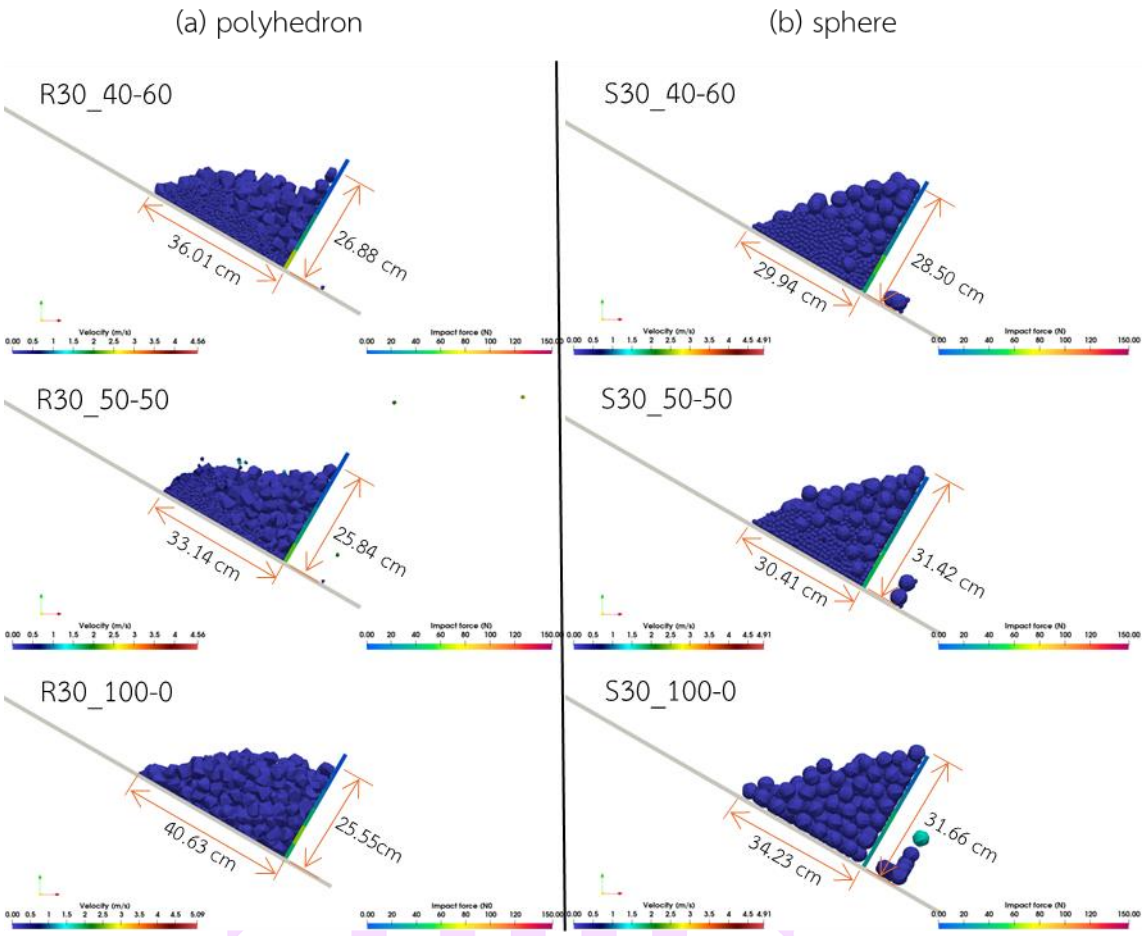
อนุภาคทรงกลม ส่วนผสมกรวดขนาดใหญ่ร้อยละ 100 ต่อกรวดละเอียดร้อยละ 0 (S30_100-0)



พฤติกรรมการไหลของอนุภาคทรงหลายเหลี่ยมกับอนุภาคทรงกลม (a) R30_40-60 (b) S30_40-60



เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงหลายเหลี่ยมกับอนุภาคทรงกลม (a) R30_40-60 (b) S30_40-60



ขนาดการกองของอนุภาคทรงหลายเหลี่ยมกับทรงกลม แบบจำลองเชิงตัวเลข DEM

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	พุทธิกร ธัมมรักษ์
วัน เดือน ปี เกิด	11 มีนาคม 2543
สถานที่เกิด	เพชรบูรณ์
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2565 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา,พะเยา.
ที่อยู่ปัจจุบัน	21 ม.9 ต.เข็กน้อย อ.เขาค้อ จ.เพชรบูรณ์ 67280
ผลงานตีพิมพ์	พุทธิกร ธัมมรักษ์, อาทิตย์ เรืองยศ, กรกฎ นุสิทธิ์, ธเนศ ทองเดชศรี, และ สุริยาวุธ ประอ้าย. (2568). การศึกษาพฤติกรรมการกองทับถมเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง: กรณีใช้แบบจำลองในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองเชิงตัวเลข DEM. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30 (หน้า GTE49:1–9). ประจวบคีรีขันธ์: ศูนย์ประชุมนานาชาติจุฬาภรณ์. พุทธิกร ธัมมรักษ์, ฤทธิพงษ์ บุฝานัน, ปภาวิน กลิ่นจันทร์, สกุลทิพย์ ลิ้มสมบูรณ์, ปรางณภัทร พิทักษ์, ณัฐวุฒิ มณีจันสุข, ธเนศ ทองเดชศรี และ สุริยาวุธ ประอ้าย. (2568). การศึกษาอิทธิพลของรูปร่างวัสดุเม็ดบนกลไกการพัดพาของการไหลจากเศษวัสดุธรณีไหล: การศึกษาเบื้องต้นจากแบบจำลองทางกายภาพ ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 30 (หน้า GTE50:1–7). ประจวบคีรีขันธ์: ศูนย์ประชุมนานาชาติจุฬาภรณ์. Thanawong, K., Reangyos, A., Dhammarak, 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), 118–125. doi:10.21660/2024.116.g13228. อาทิตย์เรืองยศ, พุทธิกร ธัมมรักษ์, ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์และสุริยาวุธ ประอ้าย. (29-31 พฤษภาคม 2567). อิทธิพลของขนาด อนุภาคที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง: กรณีการศึกษา ในห้องปฏิบัติการ. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 29 (GTE38 หน้า 1-8). เชียงใหม่: ศูนย์ประชุมนานาชาติ ดิเอ็มเพลส.