

การวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลหลากและการทับถมของดินโคลนเมื่อไหลผ่าน
โครงสร้างป้องกันแบบแข็งและโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น: การศึกษา
โดยแบบจำลองกายภาพแบบย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ



อาทิตย์ เรืองยศ

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
พฤษภาคม 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การวิเคราะห์พฤติกรรมกรไหลหลากและการทับถมของดินโคลนเมื่อไหลผ่าน
โครงสร้างป้องกันแบบแข็งและโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น: การศึกษา
โดยแบบจำลองกายภาพแบบย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
พฤษภาคม 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

ANALYSIS OF DEBRIS FLOW BEHAVIOR AND DEPOSIT MORPHOLOGY ON RIGID
AND FLEXIBLE BARRIERS: LABORATORY SCALE PHYSICAL MODELING STUDY



A Thesis Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering
May 2025

Copyright 2025 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลหลากและการทับถมของดินโคลนเมื่อไหลผ่าน
โครงสร้างป้องกันแบบแข็งและโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น: การศึกษา
โดยแบบจำลองกายภาพแบบย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ

ของ อาทิตย์ เรืองยศ

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรกฏ นุสิทธิ์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวัธ ประอ้าย)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร. ขวัญสิรินภา ณะวงศ์)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธเนศ ทองเดชศรี)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

- เรื่อง:** การวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลหลากและการทับถมของดินโคลนเมื่อไหลผ่าน
โครงสร้างป้องกันแบบแข็งและโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น: การศึกษา
โดยแบบจำลองกายภาพแบบย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ
- ผู้วิจัย:** อาทิตย์ เรืองยศ, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2567
- อาจารย์ที่ปรึกษา:** รองศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวัธ ปรธาย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ขวัญสิรินภา ธนวงศ์
- คำสำคัญ:** ดินโคลนถล่ม, โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง, โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น, แบบจำลองกายภาพ, แรงกระแทก, Symbolic Regression

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากและการทับถมของดินโคลนเมื่อไหลผ่านโครงสร้างป้องกันแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ เพื่อสร้างความเข้าใจเชิงกลเกี่ยวกับพฤติกรรม การไหลของดินโคลนในสถานการณ์ต่าง ๆ การทดลองดำเนินการโดยควบคุมตัวแปรสำคัญ ได้แก่ องค์ประกอบของวัสดุ (กรวด ทราย ดินเหนียว) ปริมาณน้ำในส่วนผสม (โดยอิงตามค่าความเข้มข้นของแข็ง C_s) และมุมลาดชันของรางทดสอบ (25° , 30° และ 35°) โดยจำแนกการทดลองออกเป็นกรณีที่ไม่มีโครงสร้างป้องกัน โครงสร้างแบบแข็ง และโครงสร้างแบบ ยืดหยุ่น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการไหลของวัสดุมีลักษณะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วนวัสดุ ความชัน และปริมาณน้ำ โดยวัสดุแห้งมีแนวโน้มกองสะสมตัวมากขึ้น ขณะที่วัสดุแบบกึ่งของเหลวสามารถแผ่กระจายไปได้ ไกลกว่า การเกิดแรงกระแทกกับโครงสร้างป้องกันขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ที่สะสมระหว่างการไหล โดยโครงสร้างแบบแข็งรับ แรงกระแทกโดยตรง ขณะที่แบบยืดหยุ่นสามารถดูดซับและกระจายแรงได้บางส่วน นอกจากนี้ งานวิจัยยังใช้เทคนิค Symbolic Regression (SR) เพื่อพัฒนาสมการคาดการณ์แรงกระแทกจากข้อมูลการทดลอง โดยพิจารณาตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ความเร็ว ความสูงของการไหล และคุณสมบัติของวัสดุ สมการที่ได้มีความแม่นยำสูงและสามารถตีความได้ในเชิงฟิสิกส์ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการออกแบบโครงสร้างป้องกันดินโคลนในพื้นที่เสี่ยงภัย งานวิจัยนี้จึงสามารถตอบโจทย์เชิง วิศวกรรมในด้านความเข้าใจพฤติกรรมของการไหลหลากดินโคลน และเป็นแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างป้องกันที่มี ประสิทธิภาพในอนาคต ซึ่งสะท้อนถึงควมมีประสิทธิภาพของการผสมผสานระหว่างการทำจำลองทางกายภาพใน ห้องปฏิบัติการกับวิธีการวิเคราะห์เชิงข้อมูล เพื่อยกระดับกลยุทธ์การลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติให้แม่นยำและเหมาะสมกับ สภาพแวดล้อมจริงมากยิ่งขึ้น

Title: ANALYSIS OF DEBRIS FLOW BEHAVIOR AND DEPOSIT MORPHOLOGY ON RIGID AND FLEXIBLE BARRIERS: LABORATORY SCALE PHYSICAL MODELING STUDY

Author: Artid Reangyos, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2024

Advisor: Associate Professor Dr. Suriyayut Pra-ai Co-advisor Dr.Kwansirinapa Thanawong

Keywords: Debris flow, Rigid barrier, Flexible barrier, Physical modeling, Impact force, Symbolic Regression

ABSTRACT

This research investigates the behavior of debris flow and deposit morphology as it interacts with rigid and flexible barrier structures, using scaled physical modeling in a laboratory environment. The study aims to understand the mechanical behavior of debris flow under various flow conditions by controlling key variables such as material composition (gravel, sand, and clay), Solid concentration (C_s), and slope angle (25° , 30° , and 35°). The experiments are categorized into three conditions: without barriers, with rigid barriers, and with flexible barriers. Results show that debris flow behavior varies significantly depending on the material proportions, slope gradient, and water content. Dry mixtures tend to Pile up with shorter runouts, while semi-fluid mixtures display broader flow dispersions and longer travel distances. Impact forces generated upon collision with barrier structures are influenced by the kinetic energy developed during flow. Rigid barriers directly absorb the impact, resulting in concentrated force zones, whereas flexible barriers can deform and partially distribute the impact, reducing peak forces. Additionally, the study applies Symbolic Regression (SR) techniques to develop predictive equations for impact force based on experimental data. The SR model incorporates variables such as velocity, flow height, and material properties to derive interpretable equations that accurately represent the system's behavior. These equations can be used to support the design of protective structures by providing insight into the critical factors influencing impact forces during debris flows. The findings contribute to a deeper understanding of debris flow behavior, particularly coarse-grained debris flows, and offer a practical foundation for engineering applications in disaster-prone areas. This research underscores the effectiveness of combining laboratory-scale physical modeling with data-driven methods to improve hazard mitigation strategies.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จากการสนับสนุนการดำเนินการวิจัยจาก สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ปีงบประมาณ 2567 ผู้วิจัยขอกราบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ และข้าพเจ้ากราบขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่อำนวยความสะดวกในการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุริยาจุธ ประอ้าย ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสิทธิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ทองเดชศรี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำการแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ดร.บรรเทิง ยานะ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในด้านการใช้งานอุปกรณ์ทดสอบ รวมถึงการพัฒนาศักยภาพการแรงกระแทกโดยใช้กระบวนการ วิเคราะห์เชิงสัญลักษณ์ (Symbolic Regression) ซึ่งเป็นแนวทางที่ช่วยให้ข้าพเจ้าประมวผลในการทดลองในห้องปฏิบัติการเชิงทดลอง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และส่งผลให้สามารถพัฒนาผลลัพธ์ที่มีคุณค่าทางวิชาการ

ท้ายที่สุดนี้ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณจากใจอย่างสุดซึ้งต่อครอบครัวของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นพลังสำคัญที่คอยสนับสนุนอยู่เบื้องหลังมาโดยตลอด ทั้งในด้านกำลังใจ ความเข้าใจ และความเสียสละทั้งในช่วงเวลาที่ประสบความสำเร็จและในยามที่ประสบอุปสรรค โดยเฉพาะอย่างยิ่งบิดาและมารดาผู้เปรียบเสมือนร่มโพธิ์ร่มไทรทางใจที่หล่อหลอมข้าพเจ้าให้มีความมุ่งมั่น อดทน และไม่ย่อท้อต่อความยากลำบาก ซึ่งทำให้ข้าพเจ้าสามารถก้าวผ่านช่วงเวลาที่ทำนายในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ไปได้ด้วยดี

หากมีข้อผิดพลาดหรือความบกพร่องใด ๆ ที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ไม่ว่าจะเกิดจากความไม่รอบคอบหรือความคลาดเคลื่อนใด ๆ ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้ด้วยความเคารพ และขอถือโอกาสนี้เรียนว่า ข้าพเจ้ามีความมุ่งมั่นที่จะนำข้อคิดเห็นคำแนะนำ และคำติชมจากอาจารย์และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านไปใช้ในการพัฒนาตนเองและผลงานวิชาการในอนาคต เพื่อให้สามารถสร้างสรรค์ผลงานที่มีคุณภาพและเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคต

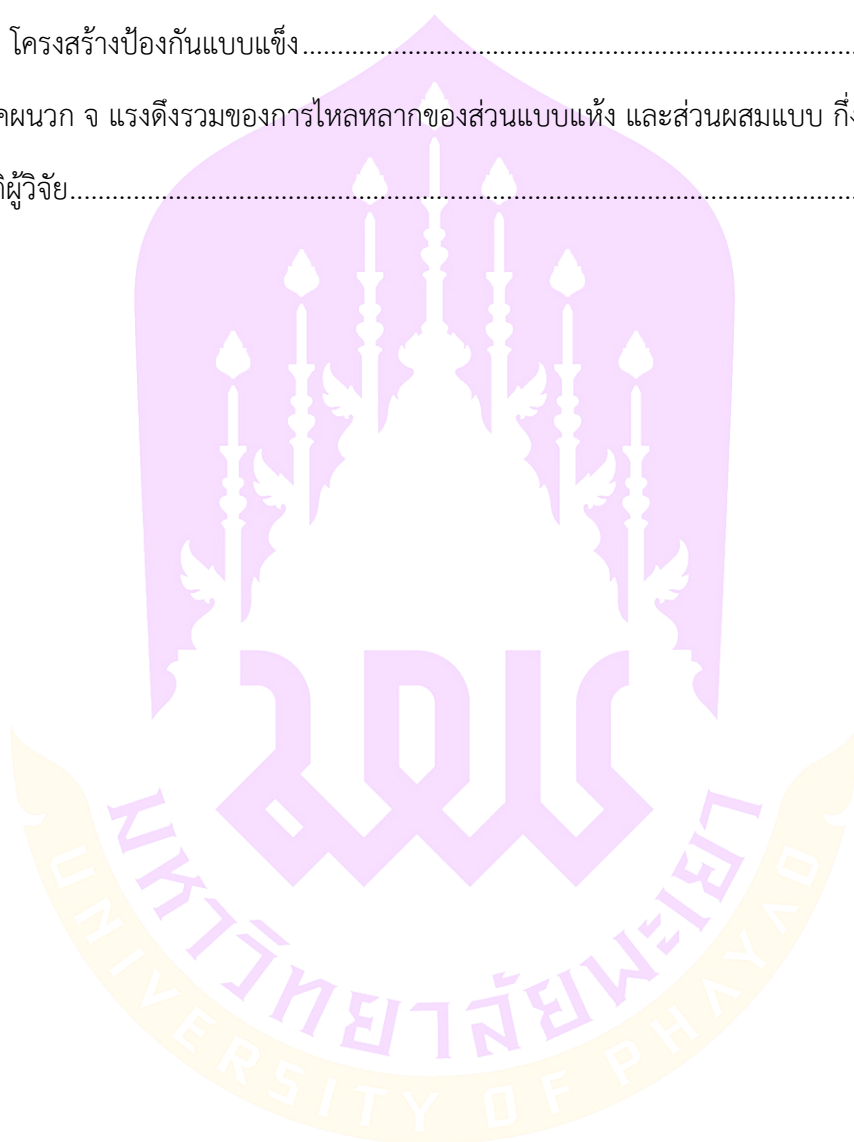
อาทิตย์ เรืองยศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
สมมุติฐานงานวิจัย	9
ขอบเขตการศึกษา	9
ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย.....	11
แผนดำเนินการวิจัย	11
ระยะเวลาดำเนินการวิจัย.....	11
สถานที่ที่ใช้ในการวิจัยและรวบรวมข้อมูล	12
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
ดินโคลนถล่มและการไหลหลากของดินโคลน.....	13
แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการไหลหลากของดินโคลน.....	15
พฤติกรรมการไหลหลากและการทับถมของดินโคลน	21
กลไกแรงกระแทกและการทับถมเนื่องจากการไหลหลากของดินโคลน.....	23
พฤติกรรมแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง	27

พฤติกรรมแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น	30
การพัฒนาสมการพยากรณ์แรงกระแทกด้วย Symbolic Regression (SR)	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	38
แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ	40
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	43
รายการทดลองแบบไม่มีโครงสร้างป้องกัน	44
รายการทดลองโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง	45
รายการทดลองโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น	46
การวิเคราะห์แรงกระแทก โดย Symbolic Regression (SR)	53
บทที่ 4 ผลการทดลอง	60
การแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแข็ง	60
การแผ่กระจายของส่วนผสมแบบกึ่งของเหลว	75
พฤติกรรมของแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง	87
พฤติกรรมของแรงกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น	105
การพยากรณ์แรงกระแทกของดินโคลน	119
บทที่ 5 บทสรุป	133
พฤติกรรมและคุณลักษณะพื้นฐานของการไหลหลากดินโคลน	134
พฤติกรรมของแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง	135
พฤติกรรมของการไหลหลากดินโคลนเมื่อมีโครงสร้างป้องกันแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น	137
การพยากรณ์แรงกระแทกของดินโคลน	139
ข้อเสนอแนะ	141
บรรณานุกรม	142
ภาคผนวก	148
ภาคผนวก ก การแผ่กระจาย และการทัณฑ์ของส่วนแบบแข็ง และส่วนผสมแบบ กึ่งของเหลว	149

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการหาความเร็วส่วนแบบแห้ง และส่วนผสมแบบกึ่งของเหลว	165
ภาคผนวก ค แรงกระแทกรวมของการไหลหลากของส่วนแบบแห้ง และส่วนผสมแบบ กึ่งของเหลว	166
ภาคผนวก ง ช่วงเวลาการไหลของของส่วนแบบแห้ง และส่วนผสมแบบกึ่งของเหลว เมื่อชนกับ โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง.....	172
ภาคผนวก จ แรงดึงรวมของการไหลหลากของส่วนแบบแห้ง และส่วนผสมแบบ กึ่งของเหลว ..	176
ประวัติผู้วิจัย.....	179



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย	11
ตาราง 2 ตัวอย่างของการศึกษาเกี่ยวกับการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการ.....	19
ตาราง 3 ความสัมพันธ์สำหรับการคำนวณแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างเนื่องจาก การไหล หลากของดินโคลน Tan, et al., 2019.....	26
ตาราง 4 ตารางสรุปค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ (Dynamic pressure coefficient) เพื่อใช้ใน การวิเคราะห์การไหลเมื่อกระทบกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง Poudyal, et al., 2019.....	27
ตาราง 5 รายการทดลองแรงการทับถม และการกระจายของวัสดุ ไม่มีโครงสร้างป้องกัน	50
ตาราง 6 รายการทดลองแรงกระแทกในแนวตั้งฉากตามความสูงของกองวัสดุด้วยโครงสร้าง ป้องกันแบบ แข็ง.....	51
ตาราง 7 รายการทดลองแรงดึงในแนวตั้งฉากตามความสูงของกองวัสดุโครงสร้างแบบยืดหยุ่น	53
ตาราง 8 ความเร็วและลักษณะของการไหลหลากของส่วนผสมต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ	79
ตาราง 9 ตัวชี้วัดทางสถิติของชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบ	127

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 ภาพเหตุการณ์ดินโคลนถล่มและการไหลหลากของดินโคลน อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน	2
ภาพ 2 ภาพเหตุการณ์น้ำท่วม ดินโคลนถล่มและเกิดการไหลหลากของดินโคลน อำเภอฮอด จังหวัดเชียงใหม่.....	3
ภาพ 3 ภาพเหตุการณ์ดินโคลนถล่มและเกิดการไหลหลากของดินโคลน อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน....	3
ภาพ 4 โครงสร้างเขื่อนกั้นทางไหลดินโคลนถล่ม.....	6
ภาพ 5 การใช้โครงสร้างแบบยืดหยุ่นในพื้นที่จริงเพื่อป้องกันความเสียหายจากหินถล่ม	6
ภาพ 6 ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล การสร้างสมการด้วย Symbolic Regression	8
ภาพ 7 ขอบเขตขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	10
ภาพ 8 ลักษณะทางกายภาพของการไหลหลากของดินโคลน (Pierson, et al., 1986)	14
ภาพ 9 (a) Hillslope Debris Flows, (b) Channelised Debris Flow	14
ภาพ 10 ลักษณะทางกายภาพของการไหลหลากของดินโคลนรวมถึงเศษซากต่าง ๆ	15
ภาพ 11 สถานที่ทำการทดลองบนภูเขา	17
ภาพ 12 ภาพการเคลื่อนตัวของดินถล่มระหว่างหนึ่งวินาทีถึงสี่วินาที วินาทีหลังจากไหล (a) 1.0 วินาที (b) 2.0 วินาที (c) 3.0 วินาที และ (d) 4.0 วินาที.....	17
ภาพ 13 (a) ไกลการไหลขัดขึ้นของดินโคลนเมื่อไหลมากระทบกับโครงสร้างแบบยืดหยุ่น (b) ไกลการกองสะสมของดินโคลนเมื่อไหลมากระทบกับโครงสร้างแบบยืดหยุ่น	18
ภาพ 14 (a) ภาพถ่าย: แสดงภาพถ่ายของรางน้ำทดลองจริงที่ใช้ในการทดสอบ (b) ภาพร่าง: แสดงภาพร่างหรือแผนภาพของรางน้ำทดลองเพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้างและการจัดวางของรางน้ำ..	22
ภาพ 15 การไหลหลากของดินโคลน (a) และ (b) การไหลบนพื้นทรายหลวม (c) และ (d) การไหล บนพื้นทรายแน่น (e) และ (f) การทดลองบนพื้นผิวแข็ง	22
ภาพ 16 กลไกการขัดขึ้นของน้ำเมื่อชนกับโครงสร้างแบบแข็ง (Rigid barrier) ในกรณีที่มี Froude number มากกว่าหนึ่ง (Supercritical flow).....	24
ภาพ 17 กลไกการกองสะสมเมื่อชนกับโครงสร้างแบบแข็ง (Rigid barrier) ในกรณีที่มี Froude number มากกว่าหนึ่ง (Supercritical flow).....	24
ภาพ 18 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ	28
ภาพ 19 (a) แสดงรูปแบบการติดตั้งไหลเซลล์ (b) แผ่นรับแรงกระแทก และ (c) แสดงการติดตั้ง แรงกระแทกที่ถูกวัด	28

ภาพ 20 แบบจำลองทางกายภาพ (a) มุมมองด้านบน (b) ด้านข้าง.....	29
ภาพ 21 เปรียบเทียบพลวัตของการไหลที่สังเกตและคำนวณ (a) $t = 0$ s (b) $t = 0.28$ s (c) $t = 0.48$ s (d) $t = 1.38$ s.....	30
ภาพ 22 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ	32
ภาพ 23 (a) แผนภาพโครงสร้างของสิ่งกีดขวางแบบยืดหยุ่นซึ่งสายเคเบิลถูกบิดงอในทิศทาง ตามยาว (b) มุมมองด้านบนของสายเคเบิลเดี่ยวภายใต้แรงที่เกิดจากการกระแทก ของการไหลของเศษหินดิน ทราย โดยมีปริมาณทางเรขาคณิตการกระจัด และปริมาณ สติตแรง (c) แผนภาพของหน้าตัดแนวตั้ง ของสิ่งกีดขวางซึ่งสายเคเบิลแนวนอน ถูกแทนด้วยวงกลมทึบ.....	32
ภาพ 24 แสดงฟังก์ชันตัวอย่างที่ถูกใช้เป็น Ground Truth หรือฟังก์ชันเป้าหมายในการศึกษา Symbolic Regression	35
ภาพ 25 การอธิบายสมการโดยใช้โครงสร้าง (Tree-based genetic programming).....	36
ภาพ 26 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่พยากรณ์โดยแบบจำลองและค่าที่วัดจากการทดลอง.....	37
ภาพ 27 การเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลระหว่างค่าที่พยากรณ์โดยแบบจำลองและค่าที่วัด จากการทดลอง.....	37
ภาพ 28 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	39
ภาพ 29 แบบจำลองทางกายภาพย่อยส่วนการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการสาขา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา.....	41
ภาพ 30 ไม้กระดานขนาด 240 x 480 เซนติเมตร.....	42
ภาพ 31 โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง	42
ภาพ 32 โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น.....	43
ภาพ 33 ผังของการติดตั้งกล้องบันทึกภาพการเคลื่อนไหวในการทดสอบด้วยแบบจำลองรางน้ำ	43
ภาพ 34 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยดินเหนียว ทราย และกรวด	47
ภาพ 35 ขนาดคละของวัสดุมวลหยาบและละเอียดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้.....	47
ภาพ 36 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมวลหยาบและพื้นผิว (a) กรวด_แผ่นพื้นไม้ (μ_{G-W}) (b) ทราย_พื้นแผ่นไม้ (μ_{S-W}).....	48
ภาพ 37 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมวลหยาบและพื้นผิว (a) กรวด_พื้นแผ่นเหล็ก (μ_{G-P}) (b) ทราย_พื้นแผ่นเหล็ก (μ_{S-P}).....	49
ภาพ 38 (a) การเตรียมตัวอย่างวัสดุเม็ดแห้ง (b) ขั้นตอนในการเตรียมปล่อยตัวอย่าง	49
ภาพ 39 การเตรียมตัวอย่างวัสดุเม็ดแห้งผสมน้ำ (b) ขั้นตอนในการเตรียมปล่อยตัวอย่าง	49
ภาพ 40 การอธิบายภาพสมการด้วย (Tree-based genetic programming).....	55
ภาพ 41 ขั้นตอนการตรวจสอบข้อมูล.....	55

ภาพ 42 ขั้นตอนการทำงานของ Genetic Programming (GP)	58
ภาพ 43 ขั้นตอนการสร้างสมการจาก Symbolic Regression	59
ภาพ 44 ตัวอย่างการไหลวัสดุเม็ดแห้ง (a) N25_g40_s60_c0_Cs100-0 (b) N30_g50_s50_c0_Cs100-0 และ(c) N35_g50_s50_c0_Cs100-0	61
ภาพ 45 ตัวอย่างของการหาความเร็วของการไหลวัสดุเม็ดแห้ง (วงกลมสีแดง) ณ ตำแหน่งใด ๆ จากการทดลอง N35_g50_s50_c0_Cs100-0.....	62
ภาพ 46 ความเร็วของการไหลวัสดุเม็ดแห้งที่ส่วนผสมแตกต่างกัน ณ ตำแหน่งระยะทางแตกต่างกัน (a) และ(b) N30_g40_s60_c0_Cs100-0 (c) และ (d) N30_g50_s50_c0_Cs100-0.....	63
ภาพ 47 ความเร็วของการไหลวัสดุเม็ดแห้งของการทดสอบ N35_g40_s60_c0_Cs100-0	63
ภาพ 48 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm) ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N25_g100_s0_c0_Cs100-0.....	65
ภาพ 49 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm) ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N25_g50_s50_c0_Cs100-0.....	65
ภาพ 50 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm) ณ เวลา ต่าง ๆ ของการทดลอง N25_g0_s100_c0_Cs100-0	66
ภาพ 51 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm) ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g100_s0_c0_Cs100-0.....	67
ภาพ 52 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm) ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g50_s50_c0_Cs100-0.....	67
ภาพ 53 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm) ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g0_s100_c0_Cs100-0.....	68
ภาพ 54 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm) ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N35_g100_s0_c0_Cs100-0.....	70
ภาพ 55 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm) ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N35_g50_s50_c0_Cs100-0.....	71
ภาพ 56 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm) ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N35_g0_s100_c0_Cs100-0.....	71
ภาพ 57 ลักษณะสัณฐานวิทยาของการทับถมหลังจากหยุดนิ่งของการทดลอง N30_g75_s25_c0_Cs100-0	72
ภาพ 58 ลักษณะสัณฐานวิทยาของการทับถมหลังจากหยุดนิ่งของการทดลอง N30_g75_s25_c0_Cs100-0	73

ภาพ 59 ผลการทดสอบการแผ่ และการทับถมของวัสดุเม็ดแห้งในแต่ละครั้ง	
N25_g50_s50_c0_Cs100-0	74
ภาพ 60 ผลการทดสอบการแผ่ และการทับถมของวัสดุเม็ดแห้งในแต่ละครั้ง N30_g40_s60_c0_Cs100-0	74
ภาพ 61 ผลการทดสอบการแผ่ และการทับถมของวัสดุเม็ดแห้งในแต่ละครั้ง N35_g40_s60_c0_Cs100-0	75
ภาพ 62 ตัวอย่างการไหลวัสดุเม็ดแห้งผสมกับน้ำ (a) N25_g30_s50_c20_Cs70-30	
(b) N30_g30_s50_c20_Cs70-30 25 และ N35_g30_s50_c20_Cs70-30	76
ภาพ 63 ความเร็วของการไหลวัสดุกิ่งของเหลวที่ช่วงระยะทางแตกต่างกัน	
N25_g40_s40_c20_Cs75-25	77
ภาพ 64 ความเร็วของการไหลวัสดุกิ่งของเหลวที่ช่วงระยะทางแตกต่างกัน (a) และ	
(b) N30_g30_s50_c20_Cs70-30 (b) และ(c) N35_g40_s40_c20_Cs70-30	78
ภาพ 65 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)	
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N25_g30_s50_c20_Cs70-30	81
ภาพ 66 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)	
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N25_g40_s40_c20_Cs70-30	82
ภาพ 67 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)	
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g30_s50_c20_Cs75-25	82
ภาพ 68 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)	
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g40_s40_c20_Cs75-25	83
ภาพ 69 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)	
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g40_s40_c20_Cs70-30	84
ภาพ 70 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)	
ณ เวลาต่าง ๆ	85
ภาพ 71 ลักษณะสัณฐานวิทยาของการทับถมหลังจากหยุดนิ่งของการทดลอง	
N35_g40_s40_c20_Cs70-30	85
ภาพ 72 ผลการทดสอบการแผ่และการทับถมของวัสดุเม็ดแบบกิ่งของเหลวในแต่ละครั้ง	
จากการทดลอง N25_g40_s40_c20_Cs70-30	86
ภาพ 73 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดลอง	
R25_g100_s0_c0_Cs100-0	89

ภาพ 74 การก้องขึ้นของวัสดุแบบแห้งบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดลอง	
(a)R35_g100_s0_c0_Cs100-0 (b) R35_g50_s50_c0_Cs100-0 และ (c)	
R35_g0_s100_c0_Cs100-0.....	90
ภาพ 75 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดลอง	
R35_g40_s40_c20_Cs70-30	92
ภาพ 76 การก้องขึ้นของวัสดุแบบแห้งบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดลอง	
(a)R35_g100_s0_c0_Cs100-0 (b) R35_g50_s50_c0_Cs100-0 และ (c)	
R35_g0_s100_c0_Cs100-0.....	93
ภาพ 77 ความสัมพันธ์แรงกระแทกและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$	96
ภาพ 78 ความสัมพันธ์แรงกระแทกและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 30^\circ$	99
ภาพ 79 ความสัมพันธ์แรงกระแทกและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 35^\circ$	101
ภาพ 80 ผลการทดสอบแรงกระแทกที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดสอบ	
แต่ละครั้ง ที่มุมลาดเอียง $\theta = 35^\circ$	102
ภาพ 81 ความสัมพันธ์แรงกระแทกรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$ 30° และ 35°	104
ภาพ 82 ผลของแรงกระแทกรวมสูงสุดจากมุมลาดเอียงต่าง ๆ	105
ภาพ 83 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจากการทดลอง	
F25_g50_s50_c0_Cs100-0.....	106
ภาพ 84 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจากการทดลอง	
F35_g50_s50_c0_Cs100-0.....	107
ภาพ 85 การกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจากการทดลอง F25_g50_s50_c0_Cs100-0	
.....	108
ภาพ 86 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจากการทดลอง	
F30_g30_s50_c20_Cs70-30.....	110
ภาพ 87 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจากการทดลอง	
F30_g40_s40_c20_Cs70-30.....	111
ภาพ 88 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจากการทดลอง	
F30_g30_s50_c20_Cs70-30 และ F35_g40_s40_c20_Cs70-30	112
ภาพ 89 ความสัมพันธ์แรงดิ่งย่อยและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$	115
ภาพ 90 ความสัมพันธ์แรงดิ่งย่อยและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 30^\circ$	116
ภาพ 91 ความสัมพันธ์แรงดิ่งย่อยและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 35^\circ$	117

ภาพ 92 ความสัมพันธ์ตั้งและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$ $\theta = 30^\circ$ และ $\theta = 35^\circ$	118
ภาพ 93 ความสัมพันธ์แรงตั้งและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$ 30° และ 35°	119
ภาพ 94 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ α และ Froude number (F_r)	122
ภาพ 95 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกจากการทดลอง และแรงกระแทกจากการพยากรณ์ โดยใช้สมการ $F = \alpha \rho v^2 h w$ (จุดวงกลม) คือ ส่วนผสมแบบแห้ง (จุดสี่เหลี่ยม) คือ ส่วนผสมแบบเปียก	122
ภาพ 96 โครงสร้างของสมการจาก Symbolic Regression	127
ภาพ 97 การเปรียบเทียบค่าพยากรณ์กับค่าจริง (Prediction vs. True Value Plot) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง	128
ภาพ 98 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกกับความเร็ว	130
ภาพ 99 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกกับความเร็วและค่าพยากรณ์	130
ภาพ 100 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกจากการทดลอง และแรงกระแทกจากการพยากรณ์ โดยใช้สมการ $F = (\mu_{mix} + \rho h)(\alpha + v) w$ จุดวงกลม คือ ส่วนผสมแบบแห้ง จุดสี่เหลี่ยม คือ ส่วนผสมแบบเปียก	131



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

บริเวณภาคเหนือของประเทศไทยซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศลาดชันหรือเป็นภูเขาสูง มักเกิดเหตุการณ์ดินโคลนถล่มและน้ำป่าไหลหลากอยู่บ่อยครั้งตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เหตุการณ์เหล่านี้เป็นภัยธรรมชาติที่ส่งผลกระทบต่อชีวิต และทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่อย่างรุนแรง อีกทั้งสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ซึ่งมีสาเหตุมาจากภาวะโลกร้อน (Global Warming) อันเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas หรือ GHG) ยิ่งเพิ่มความถี่และความรุนแรงของเหตุการณ์เหล่านี้ขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในช่วงฤดูฝนเกิดเหตุการณ์ภัยพิบัติสร้างความเสียหายทั้งต่อทรัพย์สิน และชีวิตผู้คนเป็นจำนวนมาก เช่น เหตุการณ์เมื่อวันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 ที่จังหวัดน่าน เกิดดินโคลนถล่มและไหลลงมาสร้างความเสียหายแก่บ้านเรือนจำนวน 6 หลัง และมีผู้เสียชีวิตทั้งหมด 8 ราย (คลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศแห่งชาติ, 2561, สื่อออนไลน์) ภาพ 1 อีกตัวอย่างหนึ่งคือเมื่อวันที่ 25 กันยายน พ.ศ. 2564 ที่เกิดฝนตกหนักอย่างต่อเนื่องในจังหวัดเชียงใหม่ ส่งผลให้เกิดน้ำป่าไหลหลากและน้ำท่วมขังถนนในพื้นที่อำเภอฮอด และอำเภอแม่สะเรียง อีกทั้งยังมีดินสไลด์ทำให้ต้นไม้และก้อนหินขนาดใหญ่ปิดเส้นทางถนนสายฮอด-แม่สะเรียง บริเวณก่อนถึงอุทยานแห่งชาติออบหลวง การสัญจรเป็นไปอย่างยากลำบาก เนื่องจากมีสิ่งกีดขวางถนน ทำให้ใช้ได้เพียงช่องทางเดินรถทางเดียวเท่านั้น นอกจากนี้ เมื่อวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2565 เกิดฝนตกหนักในพื้นที่อำเภอฮอด ทำให้น้ำป่าพัดดินโคลนทับเส้นทางหมายเลข 108 ระหว่างฮอดไปแม่สะเรียง บริเวณกิโลเมตรที่ 104-105 (สำนักข่าว Thai PBS, 2565, สื่อออนไลน์) ภาพ 2 เมื่อวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2566 จังหวัดน่านเผชิญกับฝนตกหนักต่อเนื่องจนเกิดดินสไลด์ปิดเส้นทาง และถนนทรุดตัวใน 3 เส้นทางสำคัญ ได้แก่ เส้นทางสายหลักลาย-บ่อเกลือ บริเวณบ้านห้วยโป่ง ตำบลบ่อเกลือใต้, เส้นทางบ่อเกลือ-สะปัน, และเส้นทางอำเภอบ่อเกลือ-อำเภอเฉลิมพระเกียรติ ส่งผลให้รถทุกประเภทไม่สามารถสัญจรได้ เบื้องต้นมีการอพยพชาวบ้านในพื้นที่เสี่ยงภัย จำนวน 9 ครัวเรือน ไปยังพื้นที่ปลอดภัย (หนังสือพิมพ์รายวัน เชียงใหม่นิวส์, 2566, สื่อออนไลน์) ภาพ 3 ความรุนแรงจากน้ำป่าไหลหลากและดินโคลนถล่มได้สร้างความเสียหายต่อชีวิต สิ่งปลูกสร้าง อาคาร บ้านเรือน และพื้นที่เกษตรกรรมอย่างมหาศาล ดังนั้น การมีโครงสร้างทางวิศวกรรม เช่น เขื่อนกันดินหรืออ่างเก็บน้ำ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถช่วยบรรเทาความรุนแรงของภัยธรรมชาติ และลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพัฒนา และออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสม เช่น เขื่อนกันดินหรืออ่างเก็บน้ำ มีบทบาทสำคัญในการบรรเทาความรุนแรงของภัยธรรมชาติ และเพื่อ

สนับสนุนการออกแบบที่มีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลน (Debris Flow) โดยเฉพาะในบริบทที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ลาดชัน



ภาพ 1 ภาพเหตุการณ์ดินโคลนถล่มและการไหลหลากของดินโคลน อำเภอปอเกือ จังหวัดน่าน

ที่มา: คลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศแห่งชาติ, 2561; สำนักข่าว MGR Online, 2651 สื่อออนไลน์



ภาพ 2 ภาพเหตุการณ์น้ำท่วม ดินโคลนถล่มและเกิดการไหลหลากของดินโคลน อำเภอฮอด จังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: สำนักข่าว Thai PBS, 2565, สื่อออนไลน์



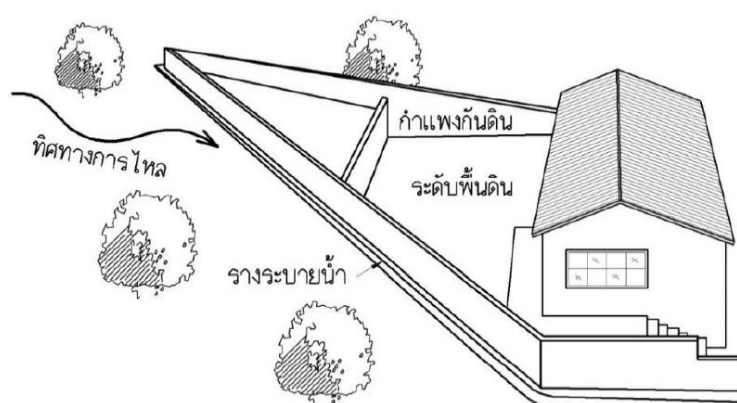
ภาพ 3 ภาพเหตุการณ์ดินโคลนถล่มและเกิดการไหลหลากของดินโคลน อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน

ที่มา: หนังสือพิมพ์รายวัน เชียงใหม่นิวส์, 2565, สื่อออนไลน์

จากปัญหาที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ ในประเทศไทย ได้มีการศึกษาแนวทางเพื่อป้องกัน และลดการสูญเสียจากภัยธรรมชาติ ยกตัวอย่างเช่น มาตรฐานการออกแบบ และการปฏิบัติ มยพ. 1919-2562 ซึ่งได้เสนอแนวทางเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอาคารจากการไหลหลากของดินโคลนถล่ม (Debris Flow) แนวทางเหล่านี้รวมถึงการจัดทำ แผนที่เสี่ยงภัย เพื่อแสดงพื้นที่เสี่ยงต่อดินถล่ม และพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการไหลของดินโคลน โดยมีจุดประสงค์เพื่อกำหนดพื้นที่ปลอดภัยสำหรับการก่อสร้าง อีกทั้งยังแนะนำการใช้โครงสร้างต่าง ๆ เพื่อกีดขวางทิศทางการไหลหลาก เพื่อลดแรงปะทะของดินโคลน เช่น การปลูกต้นไม้ การก่อสร้างคันดิน และ โครงสร้างเบี่ยงทิศทางการไหลของดินโคลน ภาพ 4 ในระดับนานาชาติ การป้องกันดินถล่มในหลายประเทศ เช่น จีน ฮองกง สวิตเซอร์แลนด์ และฝรั่งเศส ได้มีการนำโครงสร้างแบบยืดหยุ่นมาใช้ ภาพ 5 โครงสร้างเหล่านี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อลดแรงกระแทก และลดความเสียหายจากดินถล่ม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีในการจัดการภัยธรรมชาติที่ซับซ้อน ในส่วนของการศึกษาลักษณะการไหลหลากของดินโคลน (Debris Flow) ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากดินโคลนส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน โดยเฉพาะในพื้นที่ราบเชิงเขาและพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อภัยพิบัติ กรมทรัพยากรธรณี ได้ให้นิยามว่า Debris Flow คือ เหตุการณ์โคลนถล่ม ซึ่งเป็นกระบวนการที่ตะกอนขนาดต่าง ๆ เช่น ดิน หิน และซากต้นไม้ ไหลรวมกันตามทางน้ำเดิมหรือร่องเล็ก ๆ บนภูเขา ในขณะที่ Mud flow มีลักษณะการเกิดที่คล้ายคลึงกันแต่มีความแตกต่างในด้านขนาดตะกอน โดยตะกอนของ Mud Flow จะมีขนาดเล็กกว่า Debris Flow และมีน้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญ ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 60 Takahashi (2007) ได้จำแนก Debris Flow ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การไหลของเศษหินเม็ดหยาบ (Stony Debris Flow หรือ Coarse-grained debris flow) ซึ่งประกอบด้วยตะกอนขนาดใหญ่การไหลหลากของดินโคลน (Muddy Debris Flow หรือ Fine-grained Debris Flow) ซึ่งมีตะกอนขนาดเล็กและองค์ประกอบของน้ำมากกว่า การทดลองในธรณีวิศวกรรมวิทยา ได้แสดงให้เห็นว่า มาตรฐาน (Scale) มีบทบาทสำคัญ เนื่องจากส่งผลต่อปรากฏการณ์ทางกายภาพเกือบทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคตะกอน รวมถึงมวลหยาบ มวลละเอียด และน้ำ การคำนึงถึงมาตรฐานในการศึกษาเหล่านี้จึงมีความสำคัญต่อความเข้าใจในกระบวนการไหลหลากของดินโคลน และการออกแบบโครงสร้างป้องกันที่เหมาะสม

จากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าลักษณะ และพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนจะมีความยุ่งยาก และซับซ้อน โดยทั่วไปเป็นการผสมระหว่างวัสดุแบบแห้ง และแบบมีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะเป็นสถานะกึ่งของเหลว จากการศึกษาของ Gordon, et al. (2013) และ Gordon, et al. (2019) สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการทับถมของดินโคลนเพื่อใช้วิเคราะห์แรงกระแทกได้จากกลไกหลักที่ควบคุมพฤติกรรมการกระแทก ได้แก่ การกองขึ้น (Pile-up) การไหลซัดขึ้น (Run-up) ความเร็ว และความหนาแน่นของวัสดุผสม ในการศึกษาพฤติกรรมต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็งถูกพิจารณา

ตามสมมุติฐานของโครงสร้างป้องกันที่ไม่มีช่องเปิด และไม่มีการเสียรูป และมีรูปทรงคงที่ จึงสามารถวัดและวิเคราะห์แรงกระทำที่เกิดขึ้นเมื่อดินโคลนชนกับโครงสร้างแบบแข็งได้อย่างแม่นยำแต่ก็ควรมีการทำการทดลองซ้ำเพื่อเปรียบเทียบเพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูล โครงสร้างป้องกันควรพิจารณาเรื่องความหนา และความแข็งแรงของโครงสร้างป้องกัน เนื่องจากหากโครงสร้างมีการเสียรูป การวัดค่าแรงกระทำอาจมีความคลาดเคลื่อน พฤติกรรมแรงกระทำแบบยืดหยุ่นจะอยู่ในรูปแบบแรงดึง โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นเป็นโครงสร้างแบบเปิดซึ่งวัสดุบางส่วนสามารถไหลผ่าน และมีการเสียรูป โครงสร้างแบบยืดหยุ่นสามารถปรับตัวตามแรงกระทำ และการเคลื่อนที่ของดินโคลนได้ดี ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงในการพังทลาย เนื่องจากโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นมีการเสียรูป การทดลองควรทำซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เชื่อถือได้ และสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองได้อย่างแม่นยำ แรงกระทำที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น ความเร็ว ขนาดของอนุภาค และมุมเสียดทาน การศึกษาครั้งนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อเสนอรูปแบบการศึกษาที่ครอบคลุมเกี่ยวกับดินถล่มหรือหินถล่ม และการไหลหลากของดินโคลน โดยใช้แบบจำลองกายภาพ ที่มีความลาดชันต่างกัน รวมถึงการใช้วัสดุทดลองที่หลากหลาย เช่น ดินเหนียว ทราย กรวดและน้ำ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการไหลหลากและการทับถมของดินโคลน ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีโครงสร้างอีกทั้งยังมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงสร้างป้องกันสองประเภท ได้แก่ โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง (Rigid barrier) และแบบยืดหยุ่น (Flexible barrier) การใช้วัสดุที่หลากหลายในการทดลองช่วยให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุม และสามารถจำลองสภาวะการไหลที่แตกต่างกัน ซึ่งเปรียบเทียบโครงสร้างป้องกัน จะช่วยให้เข้าใจถึงข้อดี และข้อเสียของโครงสร้างแต่ละประเภทในการใช้งานจริง นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มทางเลือกให้กับนักออกแบบโครงสร้างในการเลือกใช้โครงสร้างป้องกันที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม และลักษณะของดินโคลนในแต่ละพื้นที่ แรงกระทำที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเร็ว ขนาดของอนุภาค และมุมเสียดทาน แม้จะมีการศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนในหลายประเทศ แต่ในบริบทของประเทศไทยยังมีงานวิจัยในด้านนี้ค่อนข้างน้อย



ภาพ 4 โครงสร้างเบี่ยงทิศทางการไหลดินโคลนถล่ม

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2562)



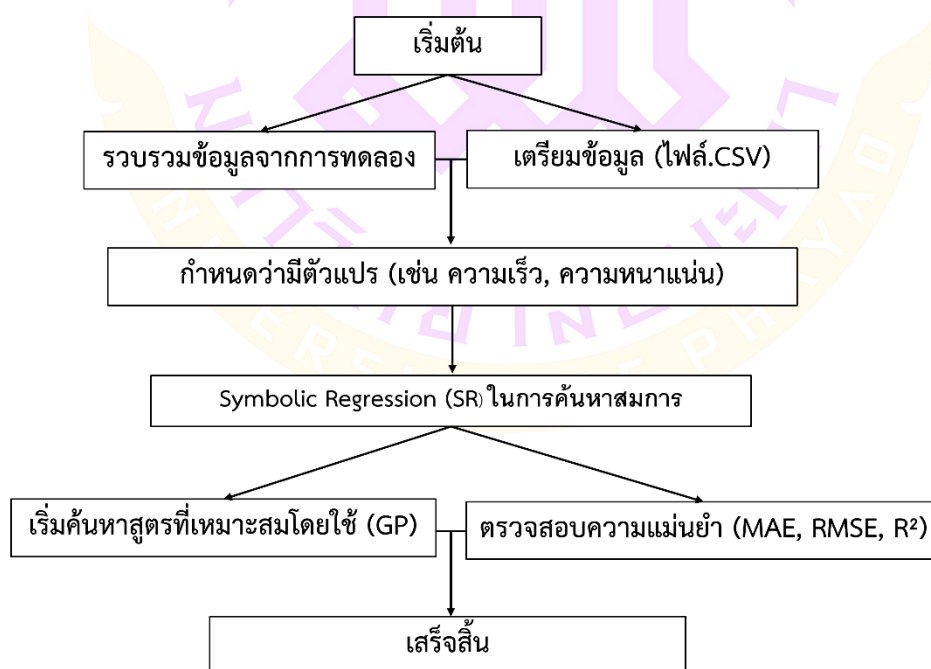
ภาพ 5 การใช้โครงสร้างแบบยัดหินในพื้นที่จริงเพื่อป้องกันความเสียหายจากหินถล่ม

ที่มา: คัดลอกจาก Li-Ru, et al., 1986

ในปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยี Symbolic Regression (SR) เป็นเครื่องมือสำคัญในการค้นหาสมการที่สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญ เช่น ความเร็วของการไหล ความหนาแน่นของวัสดุ และมุมลาดชัน เพื่อพัฒนาสมการที่ช่วยในการออกแบบโครงสร้างป้องกันที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับพื้นที่ SR เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เพื่อค้นหาสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดย SR ถือเป็นหนึ่งในเทคนิคของ Machine Learning (ML) ที่มีเป้าหมายเฉพาะในการค้นหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถตีความได้ง่าย ต่างจากเทคนิค

ML ทัวไปที่มุ่งเน้นการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ข้อมูล (Predictive Models) โดยไม่ต้องแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการ กระบวนการของ SR ใช้เทคนิคการค้นหา เช่น Genetic Programming (GP) หรือ Neural Network-based Symbolic Regression ในการสำรวจสมการที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยมีเป้าหมายเพื่อค้นหาสมการที่มีทั้งความแม่นยำสูง และสามารถตีความได้ง่าย ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ทำให้ SR เป็นที่นิยมในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ซับซ้อน ในบริบทของการศึกษาการไหลหลากของดินโคลน (Debris Flow) ซึ่งเป็นกระบวนการทางธรรมชาติที่ซับซ้อน และส่งผลกระทบรุนแรงในพื้นที่ลาดชัน การใช้ SR เพื่อค้นหาสมการที่อธิบายแรงกระแทกจึงมีความสำคัญยิ่ง การไหลหลากของดินโคลนได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายประการ เช่น ความเร็วของการไหลหลาก ความหนาแน่นของวัสดุผสม มุมลาดชัน และลักษณะของโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง การค้นหาสมการที่เหมาะสมช่วยให้นักวิจัยสามารถทำความเข้าใจพฤติกรรมของระบบได้อย่างละเอียดลึกซึ้ง อีกทั้งยังสามารถนำผลลัพธ์ดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างป้องกันที่มีประสิทธิภาพ เพื่อบรรเทาความเสียหายจากดินโคลนถล่มในพื้นที่เสี่ยงภัย SR จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการพัฒนาสมการที่ช่วยวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างป้องกันที่เหมาะสมกับพื้นที่เสี่ยงภัย เนื่องจาก SR มีความสามารถในการค้นหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ โดยไม่ต้องกำหนดรูปแบบสมการล่วงหน้า ซึ่งแตกต่างจากวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขอื่น ๆ เช่น Regression Analysis หรือ Neural Networks ที่อาจมีข้อจำกัดด้านความยืดหยุ่น นอกจากนี้ SR ยังช่วยให้ได้สมการที่สามารถตีความได้ง่าย ทำให้นำไปปรับปรุงการออกแบบโครงสร้างป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมในพื้นที่เสี่ยงภัยได้ดียิ่งขึ้น กระบวนการใช้งาน Symbolic Regression เริ่มต้นจากการรวบรวม และเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากการทดลอง เช่น แรงกระแทก ความเร็วในการไหลของดินโคลน ความหนาแน่นของวัสดุ และความสูงของการไหล ข้อมูลเหล่านี้จะถูกจัดระเบียบให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม เช่น ไฟล์ CSV เพื่อใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้เทคนิค Symbolic Regression เพื่อสร้างสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความลาดชัน และคุณสมบัติของวัสดุ โดย Symbolic Regression จะพิจารณาจากความสามารถในการประมวลผลข้อมูล ภาพ 6 และความยืดหยุ่นของไลบรารีใน Python เช่น Gplearn ซึ่งใช้ Genetic Programming (GP) Andrea (2020) เป็นกลไกหลักในการค้นหาสมการที่เหมาะสม ไลบรารีนี้มีจุดเด่นในการสร้างสมการที่ดีความง่าย และปรับแต่งได้ตามความต้องการของการทดลอง เมื่อเลือกเครื่องมือได้แล้ว จะกำหนดตัวแปร และฟังก์ชันพื้นฐานสำหรับการค้นหา ตัวแปรอิสระที่สำคัญในบริบทนี้ ได้แก่ ความเร็ว ความหนาแน่น ความสูง และสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ ขณะที่ฟังก์ชันพื้นฐานอาจประกอบด้วย การบวก ลบ คูณ หาร รวมถึงฟังก์ชันลอการิทึม และฟังก์ชันตรีโกณมิติ เมื่อดำเนินการรัน Symbolic Regression ด้วยข้อมูลที่เตรียมไว้ ระบบจะค้นหาสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร จากนั้นจะตรวจสอบความแม่นยำของสมการที่ได้โดยใช้ค่าความ

ผิดพลาด เช่น Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE) และ Coefficient of Determination (R^2) เพื่อประเมินว่าสมการที่ได้มีประสิทธิภาพเพียงพอหรือไม่ กระบวนการเหล่านี้ช่วยให้นักวิจัยสามารถระบุสมการที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายและคาดการณ์แรงกระแทกสูงสุดได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างป้องกันที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและเงื่อนไขของพื้นที่ที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติ การใช้ Symbolic Regression มีข้อดีหลายประการ เช่น ความยืดหยุ่นในการค้นหาสมการที่ไม่ต้องกำหนดรูปแบบล่วงหน้า ความสามารถในการตีความสมการที่ได้ และการนำไปใช้งานในงานวิจัยที่ซับซ้อน นอกจากนี้สมการที่ได้อาจช่วยให้นักวิจัยเข้าใจพฤติกรรมของระบบได้ดีขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรม เช่น การออกแบบโครงสร้างป้องกันที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม SR ก็มีข้อจำกัด เช่น การใช้ทรัพยากรคำนวณที่สูง และความซับซ้อนของสมการที่ได้ซึ่งอาจทำให้ยากต่อการตีความ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีข้อมูลจำนวนมากหรือมี Noise สูงในข้อมูล ข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้ Symbolic Regression อาจไม่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่ข้อมูลมีคุณภาพต่ำหรือปัญหาที่ต้องการการวิเคราะห์แบบเรียลไทม์ ในบริบทของการศึกษาการไหลหลากของดินโคลน การใช้ Symbolic Regression เพื่อค้นหาสมการที่อธิบายแรงกระแทกสูงสุดไม่เพียงช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ แต่ยังช่วยให้สามารถระบุปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อแรงกระแทก และออกแบบโครงสร้างป้องกันที่ตอบสนองต่อเงื่อนไขเฉพาะของพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพ 6 ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล การสร้างสมการด้วย Symbolic Regression

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรม และคุณลักษณะพื้นฐานของการไหลหลากรวมถึงการทับถมของดินโคลน โดยเน้นถึงความแตกต่างระหว่างลักษณะการไหลของดินโคลนในภาวะกึ่งของเหลว และแห้ง
2. เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลหลากรวมของดินโคลนเมื่อผ่านโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง และแบบยืดหยุ่นในสภาวะต่าง ๆ
3. เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการไหลหลากรวมของดินโคลน และการทับถมเมื่อมี และไม่มีกรชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง และโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น
4. เพื่อพัฒนาสมการเชิงสัญลักษณ์ (Symbolic Regression) ที่สามารถคาดการณ์แรงกระแทกจากการไหลหลากรวมของดินโคลน เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างป้องกันที่เหมาะสมในบริบทพื้นที่ต่าง ๆ

สมมุติฐานงานวิจัย

1. พฤติกรรมการไหลหลากรวมของดินโคลนของส่วนผสมแบบแห้ง และแบบเปียกจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่แบบแห้งจะเป็นการกองสะสม และแบบเหลวจะเป็นการไหลขีดขึ้นตามแนวโครงสร้าง ซึ่งอาจส่งผลให้แรงกระแทกและแรงดึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
2. การศึกษาพฤติกรรมของส่วนผสมแบบแห้ง และส่วนผสมแบบกึ่งของเหลวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบรรเทาภัยพิบัติจากการไหลหลากรวมของดินโคลน
3. การเปลี่ยนขององค์ประกอบของวัสดุ ส่งผลถึงลักษณะการเคลื่อนที่ รูปแบบการสะสมตัว และการกัดแยกของอนุภาคโดยตรง
4. สมการที่ได้จาก Symbolic Regression จะสามารถอธิบายและคาดการณ์แรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากการไหลหลากรวมของดินโคลนได้มีประสิทธิภาพโดยมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

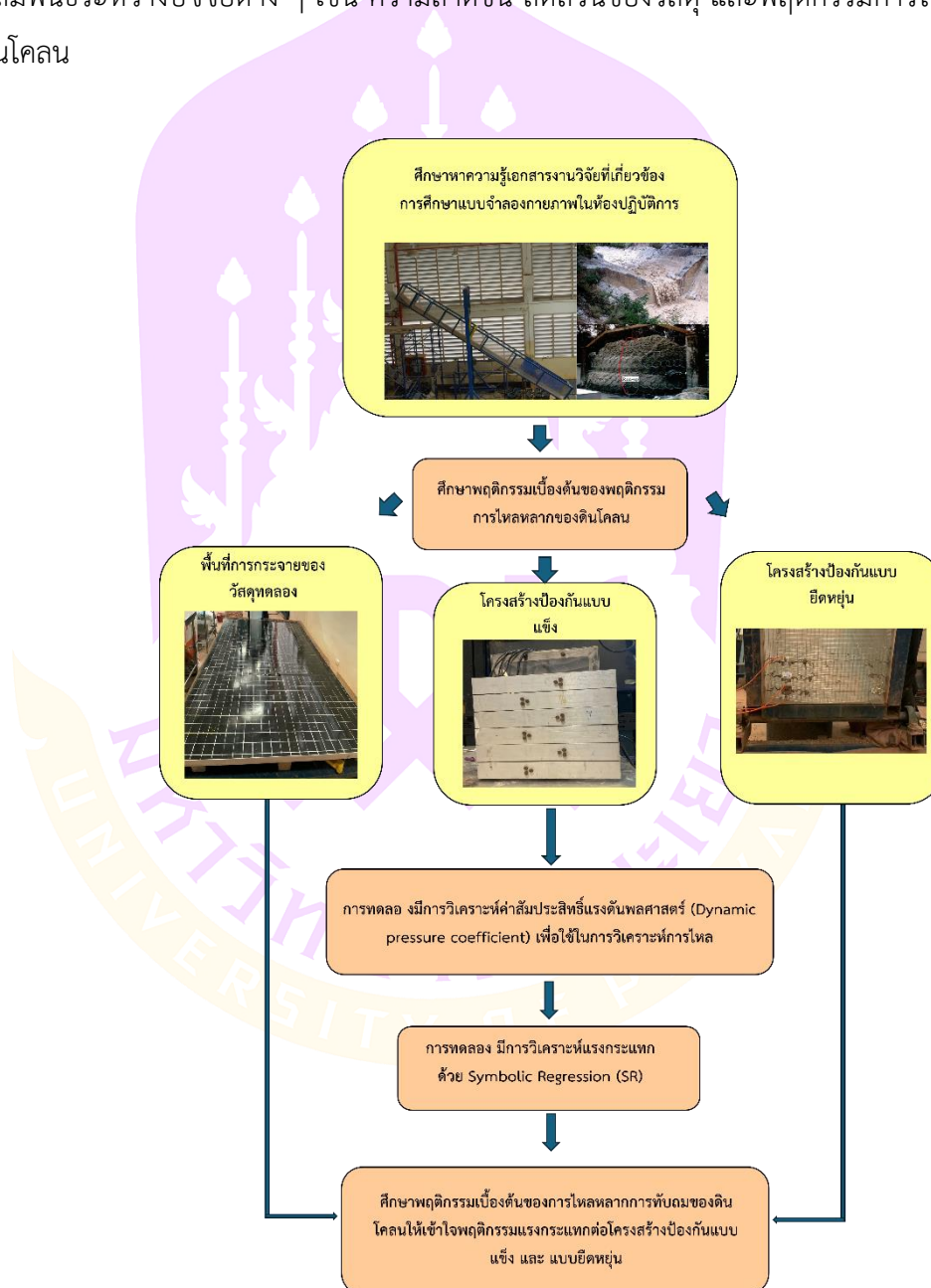
ขอบเขตการศึกษา

1. การทดลองกายภาพแบบย่อส่วนในให้ปฏิบัติการ โดยใช้รางน้ำขนาด กว้าง 40 cm สูง 55 cm ยาว 720 cm โดยพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหล เช่น ความเร็ว ความหนาแน่น สัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์
2. การทดลองการไหลในแบบจำลองกายภาพในห้องปฏิบัติการจะถูกตั้งค่าความลาดชันการไหล 25, 30 และ 35 องศา

3. วัสดุทดลอง ได้แก่ ดินเหนียว ทราย และกรวด ผสมในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อสร้างการไหลของดินโคลนในลักษณะต่างกัน

4. ใช้แผ่นไม้อัดผิวเรียบในการประเมินการไหลแผ่ และการทับถมของวัสดุ เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของการไหลและผลกระทบในวงกว้าง

5. การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองจะใช้ Symbolic Regression เพื่อสร้างสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความลาดชัน สัดส่วนของวัสดุ และพฤติกรรมไหลหลากของดินโคลน



ภาพ 7 ขอบเขตขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. เข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลแรงกระแทกเนื่องจากการไหลของวัสดุแห้งและวัสดุเหลวเมื่อกระทบกับโครงสร้างแบบแข็งและโครงสร้างแบบยืดหยุ่น
2. เข้าใจพฤติกรรมการไหลแบบแผ่หรือการทับถมของวัสดุในกรณีที่ไม่มีการป้องกัน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการประเมินความเสี่ยงในพื้นที่ที่ยังไม่มีการติดตั้งโครงสร้างป้องกัน
3. การทราบถึงพฤติกรรมการไหลหลากหลายและการทับถมของดินโคลนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการไหลผ่านโครงสร้างป้องกัน จะช่วยให้เราสามารถวางแผนและออกแบบโครงสร้างป้องกันที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันภัยพิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แผนดำเนินการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดทำอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
3. ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ
4. รวบรวมวิเคราะห์ผลการทดลอง และเผยแพร่ทางวิชาการ
5. วิจัยและสรุปผลการวิจัย
6. จัดทำวิทยานิพนธ์

ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

ตาราง 1 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัย	ระยะเวลา (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	✓	✓										
2. จัดทำอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	✓	✓	✓									
3. ทำการทดลองกายภาพในห้องปฏิบัติการ		✓	✓	✓	✓	✓						
4. รวบรวมวิเคราะห์ผลการทดลอง						✓	✓	✓	✓			
5. วิจัยและสรุปผลการวิจัย								✓	✓	✓	✓	✓
6. จัดทำวิทยานิพนธ์								✓	✓	✓	✓	✓

สถานที่ที่ใช้ในการวิจัยและรวบรวมข้อมูล

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา



บทที่ 2

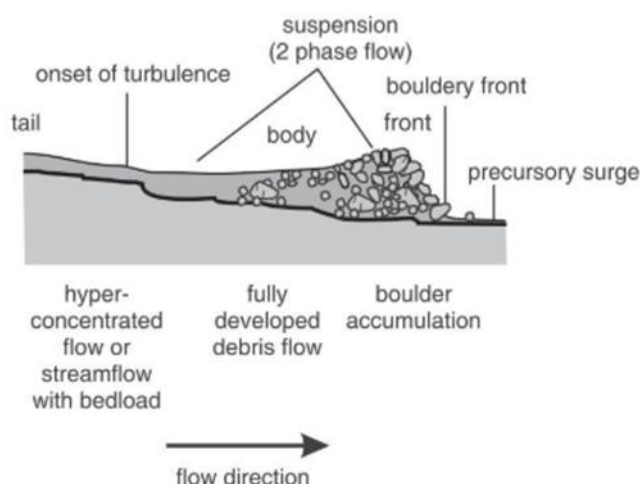
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดินโคลนถล่มและการไหลหลากของดินโคลน

การจำแนกประเภทของการไหลดังกล่าวขึ้นอยู่กับสัดส่วนของวัสดุแต่ละประเภท ของแข็ง หรือส่วนผสมระหว่างของแข็ง และของเหลว การเคลื่อนที่แบบจลนศาสตร์เป็นหลัก และขอบเขต ระหว่างการไหล ยกตัวอย่างเช่น ภาพ 8 การไหลที่มีความเข้มข้นสูง (Hyper-Concentrated Flow or Streamflow with Bedload) บริเวณที่อยู่ส่วนท้าย (Tail) ของการไหล โดยมีการไหลของน้ำที่มี วัสดุผสมอยู่เป็นจำนวนมาก แต่วัสดุเหล่านี้ยังไม่เข้าถึงสภาพการไหลเต็มที่ของการไหลหลากของ ดินโคลน การไหลหลากที่พัฒนาได้อย่างเต็มที่ (Fully Developed Debris Flow) บริเวณที่อยู่ใน ส่วนกลาง (Body) ของการไหล โดยมีการผสมของน้ำ และวัสดุอย่างสมบูรณ์ ประกอบด้วยวัสดุต่าง ๆ ที่มีขนาดเล็กถึงขนาดใหญ่ เช่น หิน ดิน ทราย ฯลฯ ส่วนหน้าของการไหลที่มีหินก้อนใหญ่ (Boulder Front) บริเวณที่อยู่ส่วนหน้าของการไหล ซึ่งมีการสะสมของหินก้อนใหญ่ (Boulders) เป็นหลักการ ไหลในส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัสดุขนาดใหญ่ที่ทำให้เกิดความหนาแน่นสูง การเคลื่อนที่ ล่วงหน้า (Precursory Surge) เป็นการไหลหลากจากวัสดุขนาดเล็กไปจนใหญ่ที่มีความหนาแน่น น้อยกว่าการไหลหลากของดินโคลน

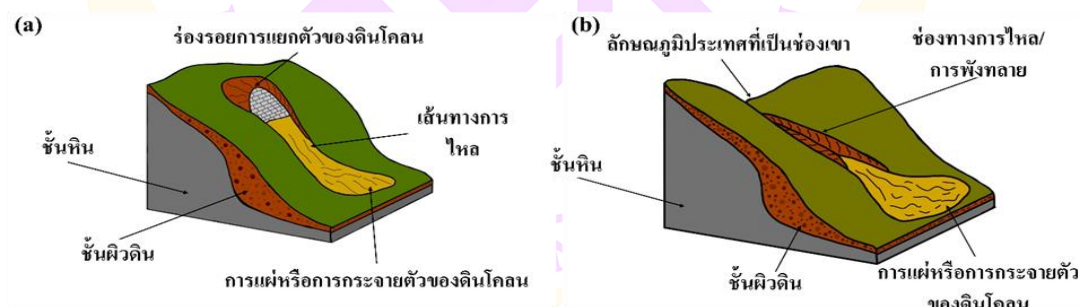
ดินถล่ม หรือ โคลนถล่ม (Landslide) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของดิน หิน โคลน หรือเศษซากต่าง ๆ ตามความลาดชันของพื้นที่ ภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก การไหลหลากของดินโคลน เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมักเกิดจากการซึมผ่านของน้ำ ใต้ดินในดินที่มีความชื้น หรือจากการไหลลงมาในช่องเขาที่มีอยู่ก่อนหน้านี้ การไหลของดินโคลน รวมถึงเศษซากมักเคลื่อนที่ลงเนินเขาตามช่องเขาที่มีอยู่ และมักมีความเสี่ยงในพื้นที่ที่มีประชากรอยู่ การไหลของดินโคลนรวมไปถึงเศษซากสามารถเคลื่อนที่ได้หลายกิโลเมตร ยกตัวอย่างเช่น ภาพ 9a Hillslope Debris Flows เป็นการไหลของดินโคลนรวมถึงเศษซากที่เกิดขึ้นบนเนินเขา ซึ่งมักเกิดจาก การซึมผ่านของน้ำใต้ดินในดินที่มีความชื้น การไหลของดินโคลนมักเคลื่อนที่ลงเนินเขาที่มีอยู่แล้ว และมักมีความเสี่ยงในพื้นที่ที่มีประชากรอยู่ การไหลของดินโคลนสามารถเคลื่อนที่ได้หลายกิโลเมตร จากที่พื้นที่สูงลงมายังพื้นที่ต่ำ Channelised Debris Flow ภาพ 9b การไหลประเภทนี้จะเป็นการไหล ตามลักษณะภูมิประเทศที่มีอยู่ เช่น ร่องเขา ร่องน้ำ การไหลหลากของดินโคลนมักมีความหนาแน่นที่สูง และสามารถพัดพาหินขนาดใหญ่ไหลลงตามความลาดชัน Witt, et al. (2005) ได้อธิบาย Debris Flows คือ การไหลหลากของดินโคลนรวมถึงเศษซาก เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ลงมาจากความ ลาดชันอย่างรวดเร็วของวัสดุที่ไม่เรียงตัว เหล่านี้อาจประกอบด้วยหินขนาดใหญ่ ดินเหนียวหรือเศษ

ท่อนไม้ ภาพ 10 โดยมีปริมาณน้ำที่แตกต่างกัน การไหลหลากของดินโคลนเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ แต่สาเหตุที่พบบ่อยที่สุด คือปริมาณน้ำฝนที่มากเกินไป ไม่ว่าจะเป็นจากฝนตกหนักหรือการละลายของหิมะอย่างรวดเร็ว หรือการรวมกันระหว่างฝนตกหนักและความชื้นในดินก่อนหน้านี้



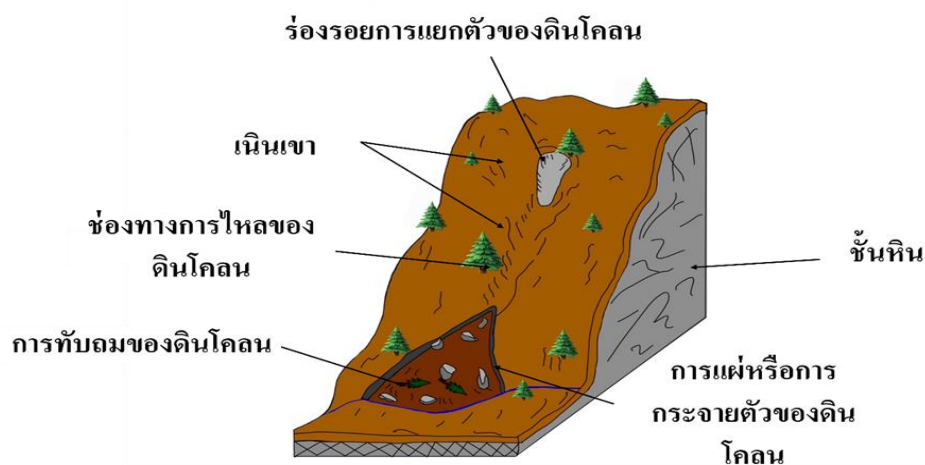
ภาพ 8 ลักษณะทางกายภาพของการไหลหลากของดินโคลน (Pierson, et al., 1986)

ที่มา: คัดลอกจาก Pierson, et al., 1986)



ภาพ 9 (a) Hillslope Debris Flows, (b) Channelised Debris Flow

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก Winter, et al., 2005



ภาพ 10 ลักษณะทางกายภาพของการไหลหลากของดินโคลนรวมถึงเศษซากต่าง ๆ

ที่มา: คัดลอกดัดแปลงจาก Witt, et al., 2005

แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการไหลหลากของดินโคลน

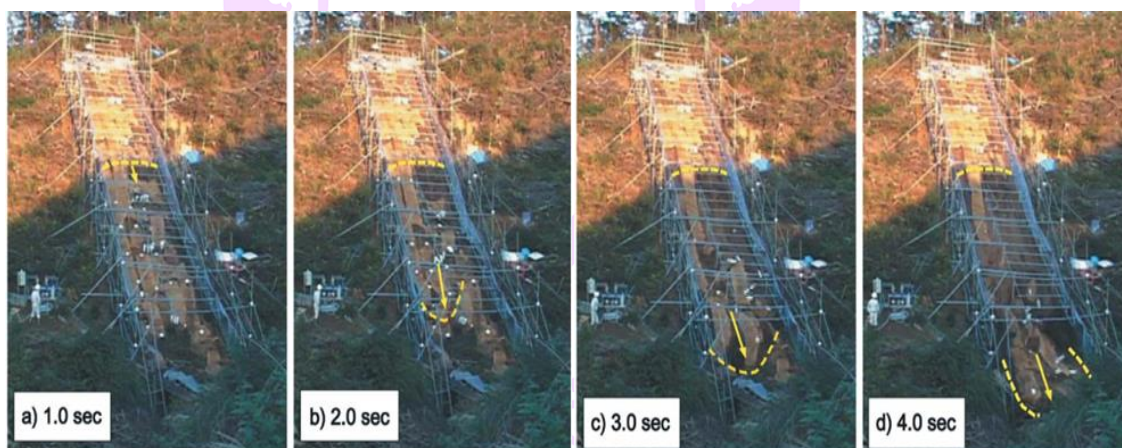
ในการทดลองทางธรณีสัณฐานวิทยา (Geomorphology) มาตรฐานมีบทบาทสำคัญเนื่องจากมีผลกับปรากฏการณ์เกือบทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคตะกอน มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด และน้ำ การไหลหลากของดินโคลนเป็นภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งในพื้นที่ภูเขาสูง การไหลเหล่านี้สามารถทำลายทรัพย์สินและชีวิตของมนุษย์ได้ พฤติกรรมการทำลายล้างของการไหลของดินโคลนเกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่จะพัดพาดินโคลนรวมไปถึงเศษซากต่าง ๆ Hirotaka, et al. (2004) การทดลองได้ทำบนพื้นที่ลาดชันธรรมชาติที่มีความยาว 30 m และกว้าง 5 m โดยลาดชันเฉลี่ยอยู่ที่ 33 องศา พื้นที่ทดลองถูกแยกออกจากสภาพแวดล้อมโดยรอบด้วยแผ่นเหล็กบางที่ขั้บลงดินลึกประมาณ 1 m เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของน้ำฝนที่แทรกซึมและตัดรากต้นไม้ที่เชื่อมต่อกันในดิน ภาพ 11 ในการจำลองฝนใช้เครื่องจำลองฝนที่มีหัวฉีด 24 หัว จัดเรียงอยู่เหนือพื้นดิน 2 m เพื่อสร้างฝนเทียมที่อัตรา 78 mm/h ภาพ 12 ภาพการเคลื่อนตัวของดินถล่มระหว่าง 1 ถึง 4 วินาทีหลังจากการไหล (a) 1.0 s (b) 2.0 s (c) 3.0 s และ (d) 4.0 s การทดลองนี้มีประโยชน์ในการทำความเข้าใจการเกิดดินถล่มและการพัฒนาแนวทางในการป้องกันและจัดการภัยพิบัติในอนาคต Hervé, et al. (2022) ได้ทำการทดลองแบบจำลองขนาดใหญ่ในการจำลองร่องน้ำทดลองยาว 28 m เพื่อศึกษาผลกระทบของการไหลหลากของดินโคลนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างแบบยืดหยุ่นที่ติดตั้งในร่องน้ำที่มีพื้นผิวสามารถสึกหรอได้ยาว 6 m มีการจำลองปริมาณของดินโคลนเริ่มต้น 2.5 และ 6 m³ ส่วนผสมในการทดลองประกอบด้วยกรวด 60 % หิน 61 % ดินเหนียว 3 % โดยคิดเป็น 70% ของของแข็ง

และน้ำ 30 % การทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งมีการติดตั้งโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น 2 จุด โดยจุดที่ 1 ติดตั้งห่างจากถังกักเก็บวัสดุ 3.4 m จุดที่ 2 ห่างจากถังกักเก็บ 12.5 m สรุปได้ว่า โครงสร้างแบบยืดหยุ่นในตำแหน่งที่ 1 สามารถลดการสีกหรือได้ถึง 70% และยังสามารถลดแรงกระแทกที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างแบบยืดหยุ่น จุดที่ 2 ลดแรงกระแทกได้ถึง 94% เมื่อเทียบกับการไม่ติดตั้งโครงสร้างแบบยืดหยุ่นที่จุดที่ 1 ภาพ 13 การทดลองในพื้นที่จริงให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมธรรมชาติมากกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งช่วยให้สามารถทดสอบ สังเกต ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติได้อย่างแม่นยำ และสามารถศึกษาการเริ่มต้นการเคลื่อนที่ของดินโคลน รวมถึงการหยุดเคลื่อนที่ของดินถล่มในสภาพแวดล้อมจริงได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญในการพัฒนามาตรการป้องกัน และลดความเสี่ยงการทดลองขนาดใหญ่สามารถเก็บข้อมูลที่หลากหลาย เช่น ความแรงของกระแสน้ำ การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม และพฤติกรรมของวัสดุ ทำให้การวิเคราะห์มีความละเอียด และเป็นประโยชน์ในการวิจัย ทำให้ได้ข้อมูลที่ละเอียด และเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์และวิจัย แต่อย่างไรก็ตาม การทดลองในสนามจริงมีข้อจำกัด และต้องใช้ทรัพยากรจำนวนมาก ทั้งในด้านบุคลากร อุปกรณ์ และเวลา ทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีความยากในการควบคุมสภาพแวดล้อม เนื่องจากมีปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น สภาพอากาศ การเปลี่ยนแปลงของดินและน้ำ การทดลองในสนามจริงอาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในพื้นที่ธรรมชาติที่มีความเปราะบาง การขุดเจาะและการใช้สารเคมีอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศ และมีข้อจำกัดในการทำซ้ำเนื่องจากความซับซ้อนของสภาพแวดล้อม และเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละครั้ง โดยรวมแล้วการทดลองขนาดใหญ่ในสนามมีความสำคัญในการทำ ความเข้าใจและศึกษาเหตุการณ์ทางธรรมชาติที่ซับซ้อน แต่ต้องคำนึงถึงข้อจำกัด และความท้าทายในการดำเนินการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือให้เกิดประโยชน์สูงสุด



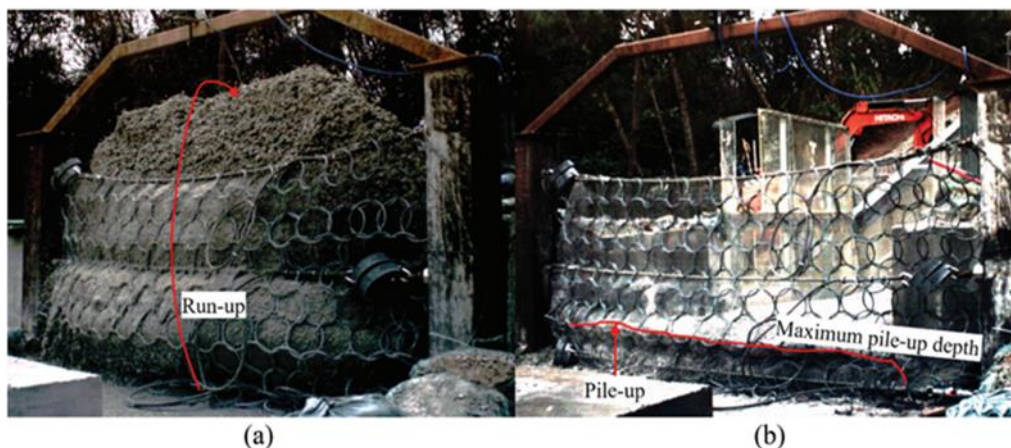
ภาพ 11 สถานที่ทำการทดลองบนภูเขา

ที่มา: คัดลอกดัดแปลงจาก Hirotaka, et al., 2004



ภาพ 12 ภาพการเคลื่อนตัวของดินถล่มระหว่างหนึ่งวินาทีถึงสี่วินาที วินาทีหลังจากไหล
(a) 1.0 วินาที (b) 2.0 วินาที (c) 3.0 วินาที และ (c) 4.0 วินาที

ที่มา: คัดลอกดัดแปลงจาก Hirotaka, et al., 2004



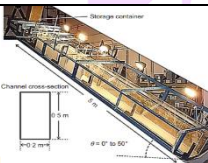
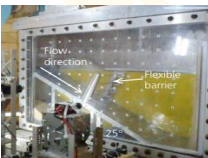
ภาพ 13 (a) ไกลการไหลซัดขึ้นของดินโคลนเมื่อไหลมากระทบกับโครงสร้างแบบยืดหยุ่น
(b) ไกลการกองสะสมของดินโคลนเมื่อไหลมากระทบกับโครงสร้างแบบยืดหยุ่น

ที่มา: คัดลอกดัดแปลงจาก Hervé, et al., 2022

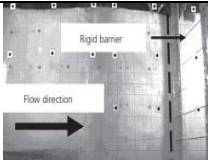
การไหลหลากของดินโคลนมักจะเพิ่มขนาดขึ้นโดยการพัดพาสิ่งต่าง ๆ เช่น ก้อนหินเศษไม้ ตามเส้นทางการไหล กระบวนการการไหลหลากอาจมีผลกระทบอย่างมากต่อการไหลของดินโคลน เนื่องจากปริมาณของการไหลของดินโคลนเพิ่มขึ้น เพื่อทำความเข้าใจ และสร้างแบบจำลองการวัด การเคลื่อนตัวการไหลของดิน การศึกษาเกี่ยวกับการไหลหลาก และการทับถมของดินโคลน หรือการไหลของวัสดุที่ประกอบด้วยของแข็ง และของเหลว เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่สิ่งแวดล้อมและทรัพย์สิน จึงมีการทดลองทางกายภาพมากมายเกี่ยวกับการไหลหลากของดินโคลน ยกตัวอย่างเช่น Choi, et al. (2015) ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้รางน้ำขนาดยาว 5 m กว้าง 0.2 m สูง 0.5 m ในการทดลองมีการติดตั้งเครื่องมือ Load cell เซ็นเซอร์ (Photoconductive sensor) เซ็นเซอร์เลเซอร์ (Laser sensor) และกล้องความเร็ว เพื่อบันทึกผลการทดลอง วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นทรายแห้ง และน้ำ จากผลการทดลองทรายแห้งจะมีการกองสะสมอยู่บริเวณด้านหน้าโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง น้ำมีการไหลซัดขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็วบริเวณด้านหน้าโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง การทดลองในห้องปฏิบัติการสามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน และสภาพแวดล้อมทางกายภาพอื่น ๆ ได้อย่างแม่นยำ ทำให้ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือ และสามารถทำซ้ำได้ การทดลองในห้องปฏิบัติการมักมีความปลอดภัยมากกว่าการทดลองในสนาม เนื่องจากสามารถควบคุมและจัดการความเสี่ยงได้ ทั้งนี้ยังมียุทธศาสตร์ความปลอดภัยและขั้นตอนปฏิบัติที่เข้มงวด การทดลองในห้องปฏิบัติการมักจะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า และใช้เวลาน้อยกว่าการทดลองในสนาม สามารถทำการทดลองซ้ำหลายครั้งภายใต้เงื่อนไขเดียวกันได้ง่าย ซึ่งช่วยในการยืนยันผลการทดลอง

และลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล แต่อย่างไรก็ตามการทดลองการศึกษาแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการนั้นยังมีข้อจำกัดมากมาย เช่น อาจไม่สามารถจำลองสภาพแวดล้อมจริงได้ทั้งหมด ทำให้ผลลัพธ์อาจไม่สะท้อนถึงสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติได้อย่างสมบูรณ์ ขนาดของตัวอย่างและพื้นที่ในการทดลองในห้องปฏิบัติการมักจะเล็กกว่าการทดลองในสนามจริง ทำให้ไม่สามารถสังเกตปรากฏการณ์ขนาดใหญ่หรือผลกระทบที่เกิดขึ้นในขนาดใหญ่ได้ แต่การทดลองในห้องปฏิบัติการยังพบได้อย่างแพร่หลาย การทดลองในห้องปฏิบัติการไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพียงในการเรียนแบบธรรมชาติ แต่เป็นการศึกษาให้เข้าใจถึงหลักการและกลไกของการไหลของดินโคลนในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ ซึ่งช่วยให้นักวิจัยสามารถนำผลการทดลองไปปรับใช้ในสถานการณ์จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ตาราง 2 ตัวอย่างของการศึกษาเกี่ยวกับการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการ

ผลงาน	ขนาดรางน้ำ (L x W x H) โครงสร้าง ป้องกัน	การติดตั้งเครื่องมือ	วัสดุที่ใช้	หมายเหตุ
Choi, et al. (2015)	 5x0.2x0.5 m แผ่นอะคริลิก แรงกระแทก	Load cell เซ็นเซอร์ (Photoconductive sensor) เซ็นเซอร์เลเซอร์ (Laser sensor) กล้องความเร็วสูง	ทรายแห้ง $D_{50} = 0.3$ - 06 mm น้ำ	ทรายและน้ำ มีพฤติกรรม ที่แตกต่างกัน เมื่อไหลชน โครงสร้าง ป้องกัน แบบแข็ง
Ng, et al. (2016)	 1.2x0.2x0.5 m แผ่นพลาสติก สายเคเบิล ไฟ LED	Load cell กล้องความเร็วสูง	ทรายแห้ง	โครงสร้าง แบบยืดหยุ่น ช่วยลด ผลกระทบจาก การไหลหลาก ของดินโคลน

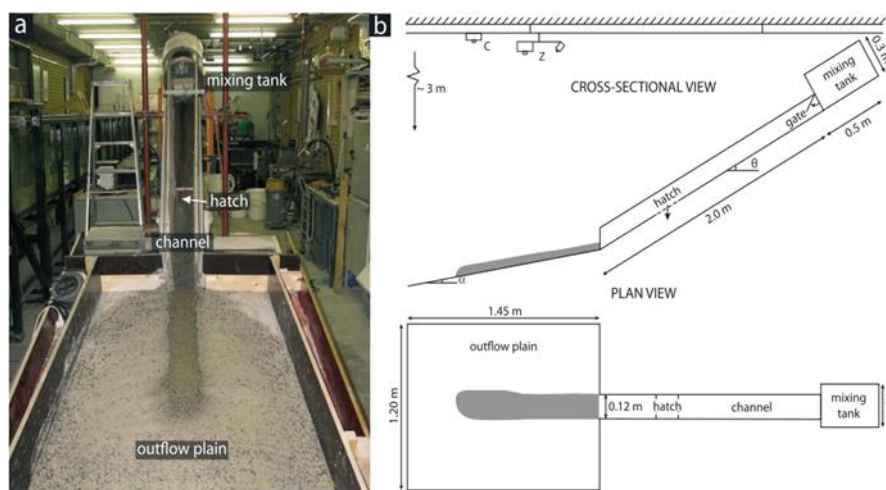
ตาราง 2 (ต่อ)

ผลงาน	ขนาดรางน้ำ (L x W x H) โครงสร้าง ป้องกัน	การติดตั้งเครื่องมือ	วัสดุที่ใช้	หมายเหตุ
Ng, et al. (2016)	 5x2x0.5 m แผ่นอลูมิเนียม แรงกระแทก	Load cell เซ็นเซอร์ (Photoconductive sensor) กล้องความเร็วสูง	ลูกแก้ว ทรายแห้ง	การทดลอง ชี้ให้เห็นว่า ควรพิจารณา ทั้ง Froude และ Savage numbers
Tan, et al. (2020)	 7x1.5x1.48 m ตาข่ายลวด เหล็ก	Load cell กล้องความเร็วสูง กล้องถ่ายภาพรูป	ดิน, ทราย, กรวด ขนาด ใหญ่ 20-50 mm	เมื่อการไหลมา ทับถมมากขึ้น แรงที่วัดได้ จะเพิ่มขึ้น
Brighenti, et al. (2021)	 6x3x1 m แผ่นพลาสติก สายเคเบิล ตาข่าย	Load cell กล้องถ่ายภาพรูป	กรวดแม่น้ำ D ₅₀ = 1.5- 3.0 cm	พฤติกรรมของ วัสดุเมื่อไหล ชนกับ โครงสร้างจะมี ลักษณะไหล เป็นระลอก คลื่น
Hervé, et al. (2023)	 28x2x2 m สายเคเบิล ตาข่าย พื้นแบบเรียบ พื้นสามารถกัก เซาะได้	Load cell กล้องถ่ายภาพรูป	ดินเหนียว, ทราย, กรวด, และน้ำ	โครงสร้างแบบ ยืดหยุ่นใน ตำแหน่งที่ 1 สามารถลด การสึกหรอได้ และยังช่วยลด แรงกระแทก ที่เกิดขึ้นในจุด ที่ 2

พฤติกรรมการไหลหลากและการทับถมของดินโคลน

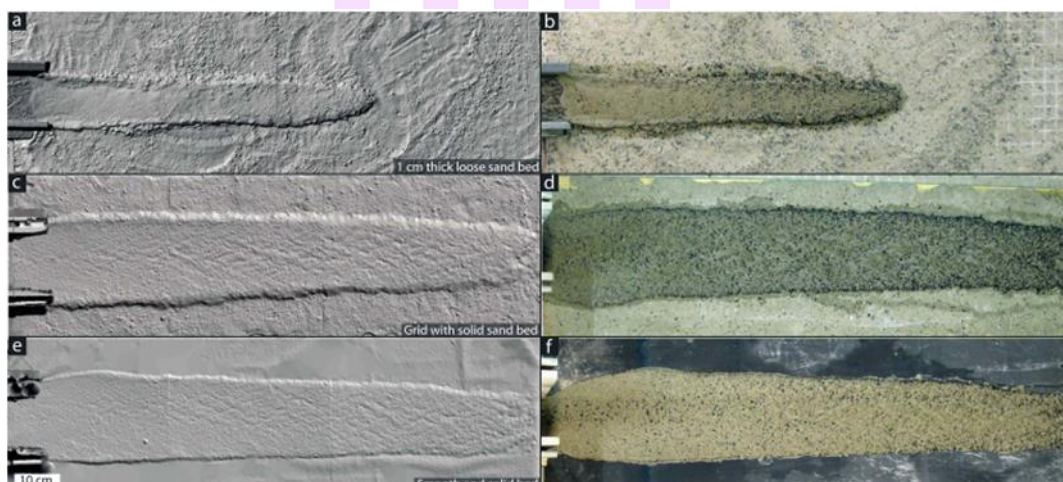
เมื่อเกิดภัยพิบัติประเภทดินถล่ม มักมีการไหลหลากของดินโคลนตามมาด้วย ซึ่งการไหลหลากของดินโคลนจัดเป็นภัยพิบัติที่รุนแรง และส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนที่อยู่บริเวณใกล้เคียง Haas, et al. (2015); Dongpo, et al. (2018); Gordon, et al. (2019); Meyrat, et al. (2022) ได้ทำการทดลองด้วยดินโคลนที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น กรวด ดินเหนียว และน้ำ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน และวัดผลต่าง ๆ เช่น ความเร็ว ความหนา ความกว้าง ความสูง และการแยกชั้นของดินโคลน การไหลหลากของดินโคลนเป็นปรากฏการณ์ที่พบบ่อยในพื้นที่ภูเขา มีทั้งความเร็ว ปริมาณ สามารถทำลายสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ได้ การคาดการณ์หรือการพยากรณ์ระยะทางที่ไหลหลากเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการป้องกันและ ลดความเสี่ยงจากการไหลหลากของดินโคลน องค์ประกอบของดินโคลนมีผลต่อความเร็ว ความหนืด และความหนาของการไหลยังส่งผลกระทบต่อระยะทางที่ไหลไปในหลาย ๆ การศึกษามักมองข้ามเนื่องจากความยากในการวัดและการควบคุม Haas, et al. (2015) ได้ศึกษาการไหลหลากของดินโคลนโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อการวิเคราะห์ผลขององค์ประกอบของดินโคลนต่อระยะทางที่ไหลไป กลไกการสะสม และรูปร่างของการสะสมในการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ดินโคลนที่มีองค์ประกอบ และสัดส่วนที่หลากหลายในการเตรียมตัวอย่างใช้วัสดุพื้นฐาน ได้แก่ ดินเหนียว ทรายละเอียด ทรายหยาบและกรวด ผสมกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำเป็นตัวเชื่อม (ภาพ 14) การทดลองใช้รางน้ำที่มีความยาว 2 m ความกว้าง 12 cm และความลาดชัน 30 องศาต่อพื้นที่ราบ พื้นผิวที่ใช้ในการไหลแผ่ เป็นพื้นผิวที่เลียนแบบธรรมชาติ และพื้นผิวแบบแข็ง ดินโคลนจะถูกผสม และปล่อยออกมาจากถังกักเก็บด้วยประตูที่เปิดด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ใช้กล้องถ่ายรูปและวิดีโอเพื่อบันทึกการเคลื่อนที่และรูปร่างของดินโคลน และใช้เครื่องสแกน 3 มิติเพื่อวัดความสูง ความกว้าง และความหนาของการกองสะสมของดินโคลน จากการทดลอง ภาพ 15a และ b การไหลบนพื้นทรายหยาบ ที่มีความหนาประมาณ 1 cm เกิดการสะสมเป็นรูปร่างยาว มีช่องทางที่ค่อนข้างแคบ ภาพ 15c และ d การไหลบนพื้นทรายแน่นที่ไม่สามารถถูกกัดเซาะและซึมได้ ทำให้การแยกขนาดอนุภาคมีน้อย ภาพ 15e และ f การทดลองบนพื้นผิวแข็ง มีพฤติกรรมคล้ายกับการไหลบนพื้นทรายแน่น สรุปได้ว่า พื้นผิวที่หยาบและเป็นรูพรุนทำให้การไหลเกิดการแยกขนาดอนุภาค พื้นผิวที่แข็ง และเรียบทำให้การไหลมีพื้นที่ในการกระจายมากขึ้น การศึกษาเหล่านี้จะช่วยให้เข้าใจถึงกลไกการไหล การสะสม และรูปร่างของการไหลหลากที่เกิดจากภัยพิบัติ และมีส่วนสำคัญในการเสริมสร้างความเข้าใจและความสามารถในการจัดการกับภัยพิบัติที่เกิดจากการไหลหลากของดินถล่ม ช่วยให้สามารถพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์และมาตรการป้องกันที่มีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อสถานการณ์จริงได้อย่างเหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากองค์ประกอบของภูมิประเทศที่หลากหลาย และมีความยุ่งยากซับซ้อนการทดลองในสนามหรือสถานที่จริงนั้นทำได้ยาก และใช้ต้นทุนที่สูง การทำการทดลองในห้องปฏิบัติการจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่นักวิจัยหลาย ๆ แห่งใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับ

การไหลหลากของดินโคลน แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องในการทำความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการกระจายและการทับถมของดินโคลน



ภาพ 14 (a) ภาพถ่าย: แสดงภาพถ่ายของรางน้ำทดลองจริงที่ใช้ในการทดสอบ (b) ภาพร่าง: แสดงภาพร่างหรือแผนภาพของรางน้ำทดลองเพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้างและการจัดวางของรางน้ำ

ที่มา: Haas, et al., 2015



ภาพ 15 การไหลหลากของดินโคลน (a) และ (b) การไหลบนพื้นทรายหลวม (c) และ (d) การไหลบนพื้นทรายแน่น (e) และ (f) การทดลองบนพื้นผิวแข็ง

ที่มา: Haas, et al., 2015

กลไกแรงกระแทกและการทับถมเนื่องจากการไหลหลากของดินโคลน

พฤติกรรมของการไหลหลากของดินโคลนจะมีความยุ่งยากและซับซ้อน โดยทั่วไปเป็นการผสมระหว่างวัสดุแบบแห้งและแบบมีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะเป็นสถานะกึ่งของเหลว สามารถวิเคราะห์แรงกระแทกที่เกิดขึ้นเมื่อมีโครงสร้างมาขวางกั้น โดยสามารถอาศัยความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกหลักที่ควบคุมพฤติกรรมของการกระแทก ได้แก่ การกองขึ้น (Pile-up) การไหลซัดขึ้น (Run-up) ความเร็วและความหนาแน่นของวัสดุ Choi, et al. (2015); Gordon, et al. (2013); Gordon, et al. (2019) พฤติกรรมการไหลจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความเร็วและแรงโน้มถ่วงของโลก โดยใช้สมการ Froude number (F_r)

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh \cos \theta}} \quad (2.1)$$

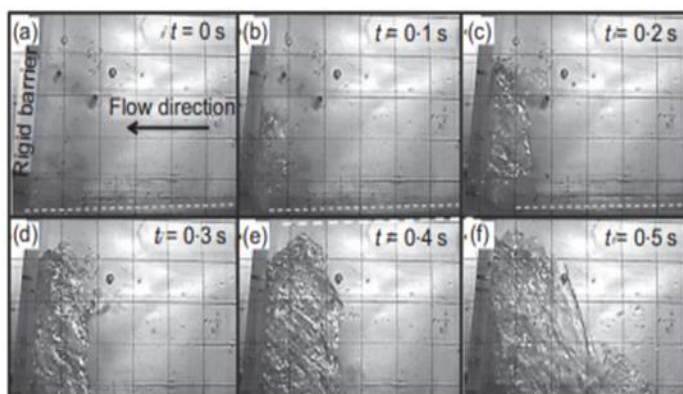
โดยที่ v คือ ความเร็ว (m/s) g คือ ค่าเร่งด้วยแรงโน้มถ่วง (9.81 m/s^2) h คือ ความหนาหรือความสูงของการไหล (m) และ θ คือ มุมเอียงของการทดสอบ (Degree) ค่าของ F_r สามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกในขณะสภาพการไหลในทางน้ำเปิด โดยที่

$F_r = 1$ หมายถึง สภาพการไหลในสภาวะวิกฤติ

$F_r < 1$ หมายถึง สภาพการไหลในสภาวะใต้วิกฤติ (Subcritical Flow) ความสูงของการไหลมากแต่ความเร็วต่ำ

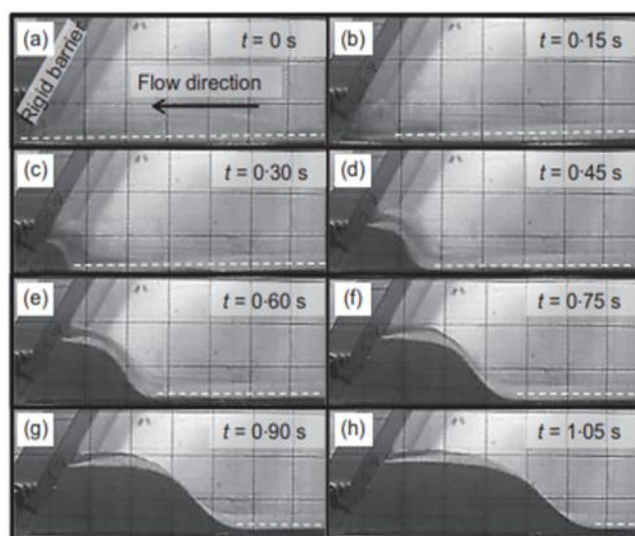
$F_r > 1$ หมายถึง สภาพการไหลในสภาวะเหนือวิกฤติ (Supercritical Flow) ความสูงของการไหลน้อยแต่ความเร็วมาก

ยกตัวอย่าง (ภาพ 16) เมื่อ $F_r > 1$ มีการไหลซัดขึ้น (Vertical jet) เมื่อชนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง และกองสะสมอยู่บริเวณด้านหน้าโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง Vertical jet Run-up mechanism (ภาพ 17) การไหลของทรายมีการกองสะสมอยู่บริเวณด้านหน้าของโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง Pile-up mechanism



ภาพ 16 กลไกการซัดขึ้นของน้ำเมื่อชนกับโครงสร้างแบบแข็ง (Rigid barrier) ในกรณีที่มี Froude number มากกว่าหนึ่ง (Supercritical flow)

ที่มา: คัดลอกจาก Choi, et al., 2015



ภาพ 17 กลไกการกองสะสมเมื่อชนกับโครงสร้างแบบแข็ง (Rigid barrier) ในกรณีที่มี Froude number มากกว่าหนึ่ง (Supercritical flow)

ที่มา: คัดลอกจาก Choi, et al., 2015

การไหลหลากของดินโคลนในธรรมชาติประกอบด้วยอนุภาคแข็งที่มีขนาดหลากหลาย และของเหลวที่มีความหนืดที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงลงไปตามช่องที่มีความลาดชัน มีปัจจัยหลายอย่าง ที่มีผลต่อคุณสมบัติเหลวของการไหลของเศษหิน รวมถึงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างของแข็ง และของเหลว การศึกษาพฤติกรรมกระแสน้ำ และการชนกันของอนุภาค เป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อทำความเข้าใจ (Gordon, et al. (2013) และ Cui, et al. (2015) ได้เสนอตัวเลขไม่มีหน่วยที่มีความหมายทางกายภาพชัดเจน ได้แก่ ตัวเลข Savage Number N_{Sav} สมการที่ใช้

$$N_{Sav} = \frac{\dot{\gamma}^2 D^2}{gh \tan \theta} \quad (2.2)$$

โดยที่ $\dot{\gamma}$ คือ อัตราการเฉื่อยสามารถประมาณได้ โดยการหารความเร็วการไหลด้วยความลึก การไหล D^2 คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตะกอนในการไหล ซึ่งสามารถใช้ขนาดอนุภาคกลางของการกระจายขนาดอนุภาคได้ g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational Acceleration) h คือ ความสูงของการไหล (Flow Height) $\tan \theta$ คือ มุมของการเสียดทานภายใน (Internal Friction Angle) กรณี N_{Sav} มากกว่า 0.1 เป็นการเสียดสีของอนุภาคมากกว่าการชนกัน ในส่วนของกรณี N_{Sav} น้อยกว่า 0.1 เป็นการชนกันของอนุภาคมากกว่าการเสียดสี ในทางปฏิบัติวิศวกรรมปัจจุบันมีการใช้สมการประมาณแรงกระแทกสูงสุด ดังสมการ

$$F_p = \alpha \rho v^2 h w \quad (2.3)$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ (Dynamic Pressure Coefficient); ρ คือ ความหนาแน่นเริ่มต้น (Bulk Density); v คือ ความเร็วของการไหล (Flow Velocity); h คือ ความลึกของการไหล (Flow Depth) และ w คือ ความกว้างของกำแพงกัน (Barrier Width) แรงกระแทกที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็งเนื่องจากการไหลของธรณีวิทยาเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างการไหลและโครงสร้างป้องกันแบบแข็งที่หลากหลายรูปแบบ สมการนี้ใช้ในการประมาณแรงกระแทกการไหลของวัสดุทางการทดลองทางธรณีวิทยาที่กระทบกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ค่า α มีผลอย่างมากกับการประมาณแรง และค่านี้ยังสามารถแตกต่างกันได้ถึง 0.4 ถึง 18 ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ส่วนผสมของวัสดุ สภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ และประเภทของโครงสร้าง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพื่อค้นหาค่า α ในสมการนี้ โดยการใช้การทดลองขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ในงานวิจัยต่าง ๆ อาทิ การทดลองของ Hungr, et al., (1984); Cui, et al. (2015), Li et, al. (2020) นอกจากนี้ยังมีการค้นหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า α และค่า Froude number (F_r) จากการวิเคราะห์ข้อมูลในสนาม ซึ่งได้รับการเสนอแนะโดย Cui, et al. (2015) โดยมีความสัมพันธ์เป็น

$$\alpha = 5.3 F_r^{-1.5} \quad (2.4)$$

ตาราง 3 ความสัมพันธ์สำหรับการคำนวณแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างเนื่องจาก
การไหลหลากของดินโคลน Tan, et al., 2019

ผลงาน	ความสัมพันธ์	ค่าสัมประสิทธิ์	หมายเหตุ
Armanini (1997)	$F = 0.5k\rho gh^2w$ $F = \alpha\rho v_0^2hw$	$k = 9$ $\alpha = 2$	สำหรับความสูงของการไหล h เท่ากับความสูงของฝายชะลอน้ำ สำหรับการไหลที่เบี่ยงเบนไปจาก ทิศทางของการกระแทก
Hubl, et al. (2009)	$F = 5\rho v_0^{0.8}(gh)^{0.6}hw$	N/A	สำหรับการไหลของดินโคลน แบบสมำเสมอ บนโครงสร้าง ป้องกันแบบแข็ง
Hungr, et al. (2012)	$F = \alpha\rho v^2hw$	$\alpha = 1.5$	แรงกระทำแบบสมำเสมอ บนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งที่ตั้ง ฉากกับการไหล
Kwan and Cheung (2012)	$F = 0.5k\rho gh^2w$ $F = \alpha\rho v^2hw$	$k = 1$ $\alpha = 2$	แรงดันสถิตจากการทับถมของ ดินโคลน แรงกระทำแบบสมำเสมอ ด้วยความเร็ว $0 < v < 12$ m/s บน โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น
Cui, et al. (2015)	$F = 5.3F_r^{-1.5}\rho v_0^2hw$	N/A	การไหลของดินโคลนในระดับ ห้องปฏิบัติการจนถึงระดับสนาม
Wendeler (2016)	$F = \alpha\rho v_0^2hw$	$\alpha = 0.7$ $\alpha = 2$	แรงกระทำ $\rho < 1900$ kg/m ³ แรงกระทำ $\rho > 1900$ kg/m ³
Ashwood and Hungr (2016)	$F = \alpha\rho v_0^2hw$ $F = 0.5k\rho gh^2w$	$\alpha = 2$ $\alpha = 1$	อัตราการไหลสูง (F_r ตั้งแต่ 4.7 – 11.5) อัตราการไหลต่ำ (F_r ตั้งแต่ 1.2 – 2.7)
Zhao, et al. (2018)	$F = 0.18F_r^{0.0052}\left(\frac{\rho}{\rho_{water}}\right)^{1.8142}\frac{N}{v_0^2}hw$	N/A	ความสัมพันธ์ที่ได้มาจาก การทดสอบในห้องปฏิบัติการ
Di Perna, et al. (2022)	$F_{peak} = 1.781Fr^{-0.515}\rho_m v_{1,0}^2h$ $F_{peak} = 1.432Fr^{-0.365}\rho_m v_{1,0}^2h + 0.5\rho_m gh^2$	N/A	กรณีวิเคราะห์ flow แห้ง หรือไม่อิ่มตัว กรณี flow อิ่มตัวด้วยน้ำ มี pore pressure สูง เช่นหลังฝนตก

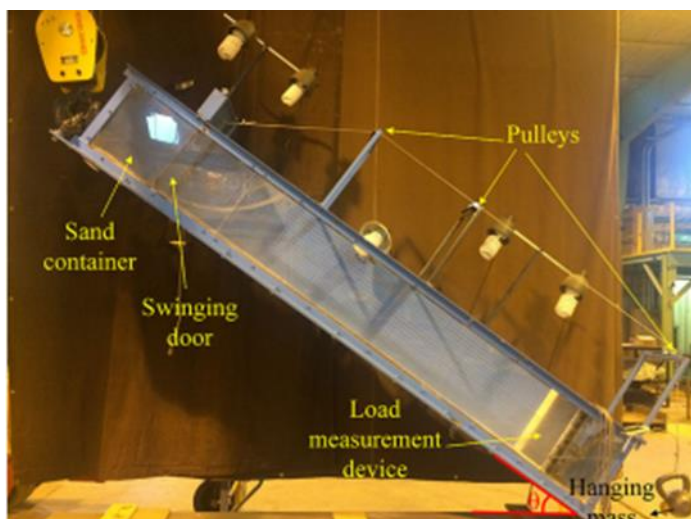
ตาราง 4 ตารางสรุปค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ (Dynamic pressure coefficient)
เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การไหลเมื่อกระทบกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง
Poudyal, et al., 2019

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์	ผลงาน
$\alpha = 3.0, 5.0$	Zhang (1993)
$\alpha = 1$	VanDine (1996)
$\alpha = 1.5, 5.5$	Hübl and Holzinger (2003)
$\alpha = 1.0$ สำหรับโครงสร้างทรงกลม	
$\alpha = 1.3$ สำหรับโครงสร้างสี่เหลี่ยม	MLR (2004)
$\alpha = 1.5$ สำหรับโครงสร้างสี่เหลี่ยม	
$\alpha = 1.0$	SWCB (2005)
$\alpha = 1.0$	NILIM (2007)
$\alpha = 1.5, 5.5$	Canelli, et al. (2012)
$\alpha = 2.5, 3.0$	Lo (2000); Kwan (2012)
$\alpha = 2.0$	Vagnon and Segalini (2016)

พฤติกรรมแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง

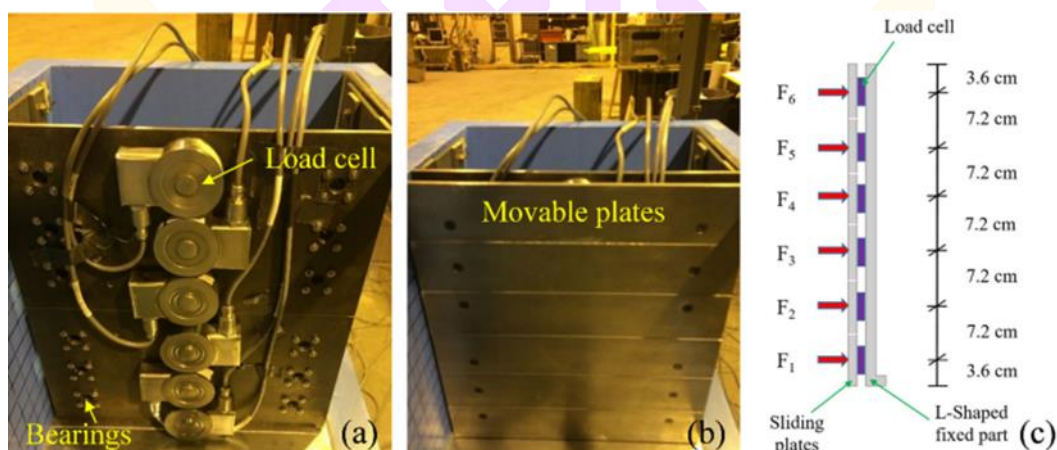
เพื่อลดความเสี่ยงการไหลหลากของดินโคลน การใช้โครงสร้างป้องกันแบบแข็งเพื่อมาขวางกั้นการไหลหลากของดินโคลน เป็นอีกทางเลือกที่นิยมนำมาใช้ ในการศึกษาพฤติกรรมต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็งถูกพิจารณาตามสมมุติฐานของโครงสร้างป้องกันที่ไม่มีช่องเปิด และไม่มี การเสีรูป และมีรูปทรงที่คงที่ จึงสามารถวัดและวิเคราะห์แรงกระแทกที่เกิดขึ้นเมื่อดินโคลนชนกับ โครงสร้างแบบแข็งได้อย่างแม่นยำ การนำวัสดุมาใช้จึงควรพิจารณาเรื่องของความหนา และความ แข็งแรง เนื่องจากถ้ามีเสีรูปของโครงสร้างป้องกันอาจทำให้ผลการทดลองมีค่าที่คลาดเคลื่อน และยังมีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็งแพร่หลายมากขึ้น (Amir, et al., 2018; Choi, et al., 2015) ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยใช้แบบจำลองกายภาพแบบย่อส่วนเพื่อศึกษา พฤติกรรมแรงกระแทก Amir, et al. (2018) ศึกษาโดยการติดตั้งโหลดเซลล์วัดแรงกระแทก โดยให้ทราย เป็นวัสดุทดลอง ภาพ 18 รางสี่เหลี่ยมมีความยาวความกว้างและความสูง 3.2, 0.35 และ 0.85 m ตามลำดับ ถังวัสดุอยู่ที่ปลายสุดของประตูปล่อยราง มีปริมาณเก็บสูงสุด 0.1 m³ ภาพ 19a แสดง รูปแบบการติดตั้งโหลดเซลล์ แผ่นรับแรงกระแทก ภาพ 19b และ ภาพ 19c แสดงการติดตั้งแรงกระแทก ที่ถูกวัด การทดลองสรุปได้ว่า แรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากการไหลของวัสดุที่ไหลลงบนพื้นลาดเรียบ

มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับมุมลาดเอียง และความหนาแน่นเริ่มต้นของวัสดุ แรงกระทำจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมลาดเอียงและระยะทางการไหลเพิ่มขึ้นวัสดุที่มีความหนาแน่นเริ่มต้นสูงกว่าจะสร้างแรงกระทำที่สูงกว่า เนื่องจากมีพลังงานศักย์มากกว่าในระยะทางการไหลเดียวกัน

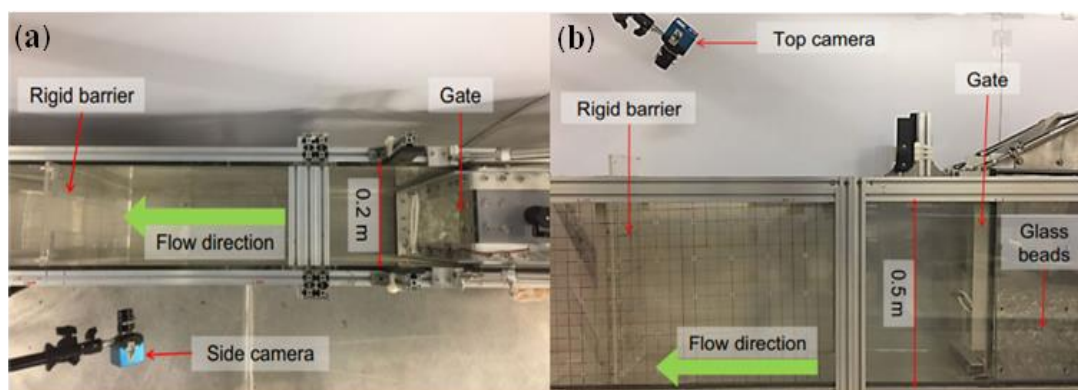


ภาพ 18 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ

ที่มา: คัดลอกจาก Amir, et al., 2018



ภาพ 19 (a) แสดงรูปแบบการติดตั้งโหลดเซลล์ (b) แผ่นรับแรงกระทำ และ (c) แสดงการติดตั้งแรงกระทำที่ถูกวัด

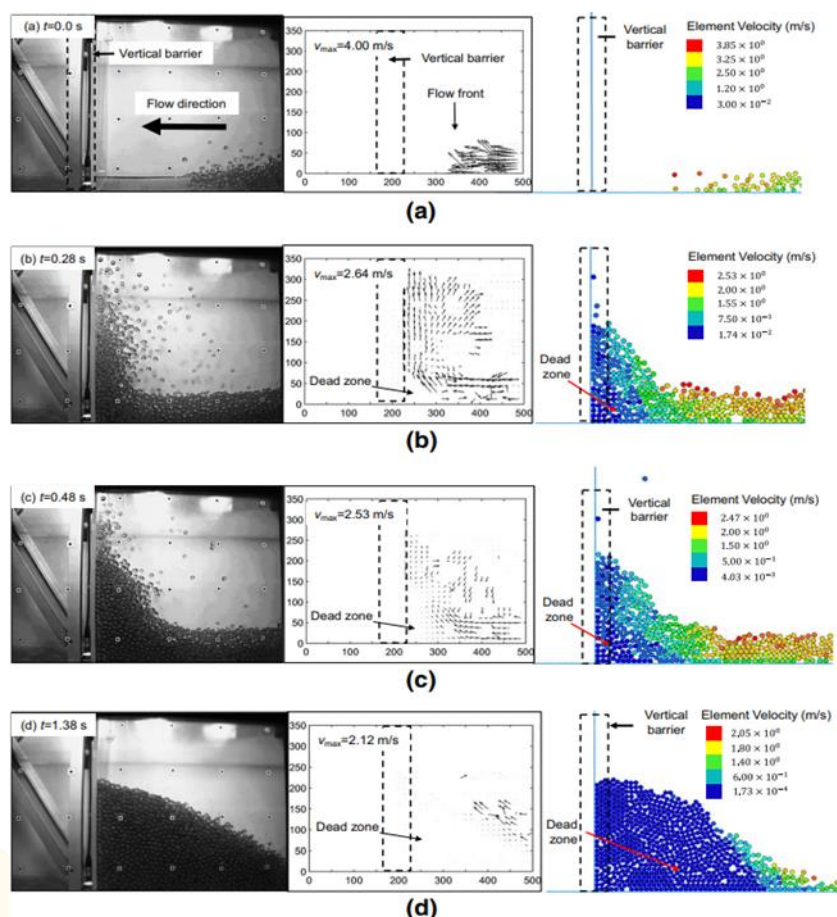


ภาพ 20 แบบจำลองทางกายภาพ (a) มุมมองด้านบน (b) ด้านข้าง

ที่มา: คัดลอกจาก Choi, et al., 2018

Choi, et al. (2018) ศึกษาพฤติกรรมการไหลในรางขนาด ยาว 6 m กว้าง 0.2 m สูง 0.5 m เพื่อศึกษาขนาดของอนุภาค ต่อการไหลของวัสดุเม็ดแข็งที่ชนกับโครงสร้างแบบแข็ง โดยใช้ลูกแก้ว ขนาด 3, 10, 23 และ 38 mm ภาพ 20 นอกจากการพิจารณาลักษณะทั่วไปของการไหล เช่น ความเร็วเฉลี่ยและความหนาแน่น ยังต้องพิจารณาถึงขนาดของอนุภาคด้วย ขนาดของอนุภาคมีผลต่อการกระแทกและความเค้นของเม็ดวัสดุที่เกิดขึ้น เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้เกิดการไหลที่รุนแรงและมีการกองสะสมอยู่บริเวณด้านหน้าของโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ภาพ 21(a) $t = 0.0$ s ลูกแก้วเริ่มไหลจากขวามาทางซ้ายและมีความเร็วสูงสุดประมาณ 4 m/s (b) $t = 0.28$ s ลูกแก้วชนกับโครงสร้างแบบแข็งและมีการกระเด็นขึ้นไปตามพื้นผิวแนวตั้งของโครงสร้างแบบแข็ง ความเร็วสูงสุดลดลงเหลือประมาณ 2.64 m/s (c) $t = 0.48$ s ลูกแก้วสะสมอยู่ที่ฐานของโครงสร้างแบบแข็งเป็นชั้น ๆ (dead zone) ซึ่งช่วยลดแรงกระแทกบนโครงสร้างแบบแข็งได้ ความเร็วสูงสุดประมาณ 2.53 m/s (d) $t = 1.38$ s ลูกแก้วหยุดไหล และเข้าสู่สถานะคงที่ ความเร็วสูงสุดประมาณ 2.12 m/s ขนาดของอนุภาคมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อแรงกระแทกที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง (Rigid Barrier) โดยที่อนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้เกิดแรงกระแทกที่สูงขึ้น ผลการทดลองนี้ได้รับการสนับสนุนจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางตัวเลข (Discrete Element Modeling, DEM) ซึ่งช่วยยืนยันว่าอนุภาคขนาดใหญ่สร้างแรงกระแทกที่มากกว่าการศึกษาเหล่านี้ช่วยเพิ่มความเข้าใจในเรื่องของพฤติกรรมการไหล และแรงกระแทกของวัสดุต่าง ๆ ที่ชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ซึ่งมีความสำคัญในการออกแบบ และจัดการโครงสร้างป้องกันเพื่อลดความเสี่ยงจากการไหลหลากของดินโคลนรวมถึง

วัสดุอื่น ๆ การเลือกใช้ขนาดรางและวัสดุที่เหมาะสมจะช่วยให้ผลการทดลองมีความแม่นยำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานออกแบบโครงสร้างป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพ 21 เปรียบเทียบพลวัตของการไหลที่สังเกตและคำนวณ (a) $t = 0$ s (b) $t = 0.28$ s (c) $t = 0.48$ s (d) $t = 1.38$ s

ที่มา: คัดลอกจาก Choi, et al., 2018

พฤติกรรมแรงกระแทกต่อโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น

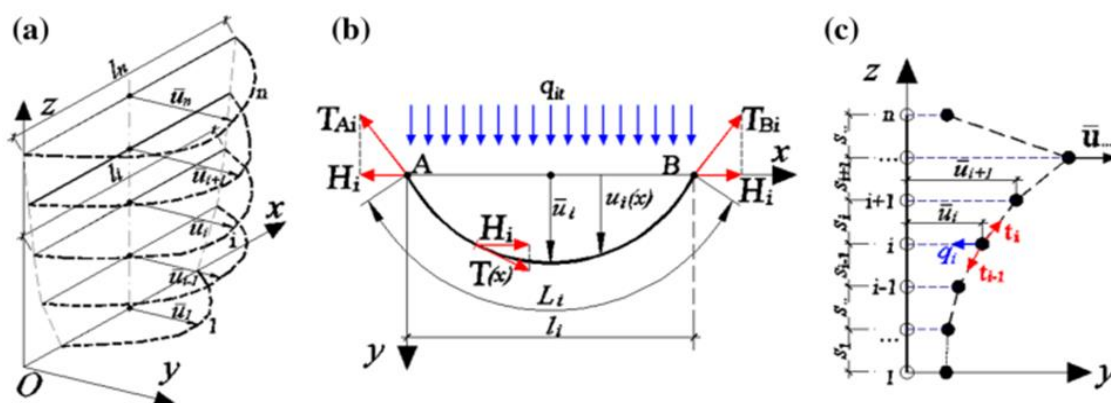
โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น มีการใช้งาน และศึกษากันอย่างแพร่หลายยกตัวอย่างเช่น Ng, et al. (2016); Song, et al. (2021); Brighenti, et al. (2021); Hervé, et al. (2023) โครงสร้างแบบยืดหยุ่นใช้ในการขวางกั้นการไหลหลากของดินโคลน และการถล่มของหิน พฤติกรรมแรงกระแทกแบบยืดหยุ่นจะอยู่ในรูปแบบแรงดึง โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นเป็นโครงสร้างแบบเปิดซึ่งวัสดุบางส่วนสามารถไหลผ่าน และมีการเสียรูป โครงสร้างแบบยืดหยุ่นสามารถปรับตัวตามแรงกระแทก

และการเคลื่อนที่ของดินโคลนได้ดี อีกทั้งช่วยลดความเสี่ยงในการพังทลาย แต่เนื่องจากการเสียรูปการวัดค่าต่าง ๆ เช่น แรงกระแทก และการกระจายแรง ควรมีการทำการทดลองซ้ำเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง และทำให้ไม่เหมาะสมกับสภาพการไหลหลากของดินโคลนที่มีความรุนแรงมากในการทดลองจึงต้องมีการทำการทดลองซ้ำเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง Brighenti, et al. (2021) ได้ศึกษาพฤติกรรมของการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการ โดยใช้โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นยกตัวอย่าง ภาพ 22 เพื่อเข้าใจถึงผลกระทบของการไหลหลากของดินโคลนต่อโครงสร้างแบบยืดหยุ่น โครงสร้างแบบยืดหยุ่นสามารถลดแรงผลกระทบของการไหลหลากของดินโคลนได้เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบแข็ง การศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาการเสียรูปของตาข่าย การติดตั้งโหนดเซลล์ในด้านใดด้านหนึ่งของสายเคเบิลจะช่วยให้สามารถวัดแรงดึงที่เกิดขึ้นได้ เพราะแรงดึงที่เกิดจากการกระแทกของดินโคลนกับสิ่งกีดขวางแบบยืดหยุ่นจะแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ระหว่างจุดยึดทั้งสองข้าง ดังนั้น สามารถประเมินแรงดึงที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลจากการกระแทกของดินโคลนกับสิ่งกีดขวางแบบยืดหยุ่น โดยใช้โหนดเซลล์ที่ติดตั้งในด้านใดด้านหนึ่งของสายเคเบิล เนื่องจากแรงดึงทั้งสองข้างของสายเคเบิลมีค่าเท่ากันในระบบที่สมดุลและสมมาตร แสดงดังภาพ 23a $\mathbf{o}$ คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของพิกัด $\vec{u}$ คือ การกระจัดในทิศทางต่าง ๆ ภาพ 23b การวิเคราะห์โครงสร้าง q_{it} คือ แรงกระจายที่กระทำในแนวตั้งตลอดความยาวของคาน T_{Ai} และ T_{Bi} คือ แรงดึงที่ปลายของคาน ภาพ 23c กราฟแสดงการกระจัดในแนวตั้ง $\vec{u}_t$ คือการกระจัดในช่วงเวลาต่าง ๆ t_i คือ แรงกระทำที่จุด i $\Delta \vec{u}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของการกระจัด การศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกใช้วัสดุและการออกแบบโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการไหลของเศษซากของดินโคลนแบบจำลองทางกลที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผน และออกแบบโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพ และปลอดภัย นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์รวมถึงการประเมินความเสี่ยงในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง



ภาพ 22 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ

ที่มา: คัดลอกจาก Brighenti, et al., 2021



ภาพ 23 (a) แผนภาพโครงสร้างของสิ่งกีดขวางแบบยืดหยุ่นซึ่งสายเคเบิลถูกบิดงอในทิศทางตามยาว (b) มุมมองด้านบนของสายเคเบิลเดี่ยวภายใต้แรงที่เกิดจากการกระแทกของการไหลของเศษหินดินทราย โดยมีปริมาณทางเรขาคณิตการกระจัด และปริมาณสถิติแรง (c) แผนภาพของหน้าตัดแนวตั้งของสิ่งกีดขวางซึ่งสายเคเบิลแนวนอนถูกแทนด้วยวงกลมทึบ

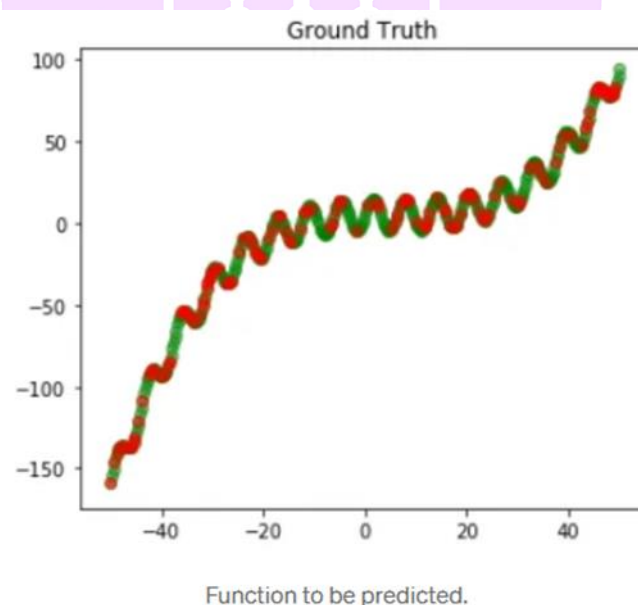
ที่มา: คัดลอกจาก Brighenti, et al., 2021

การพัฒนาสมการพยากรณ์แรงกระแทกด้วย Symbolic Regression (SR)

การวิเคราะห์ข้อมูล และปัญญาประดิษฐ์ (Machine Learning) ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ส่งผลให้เกิดวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่เข้าใจได้ง่าย หนึ่งในแนวทางสำคัญคือ การถดถอยเชิงสัญลักษณ์ (Symbolic Regression) ซึ่งเป็นกระบวนการเรียนรู้ที่เน้นการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากข้อมูล กระบวนการนี้มีข้อดีสำคัญ คือสามารถแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบที่มนุษย์สามารถเข้าใจได้ง่าย และมีประโยชน์อย่างมากในงานที่ต้องการความโปร่งใส เช่น การวิจัยทางวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการแพทย์ หนึ่งในเครื่องมือที่ใช้สำหรับการถดถอยเชิงสัญลักษณ์ในภาษา Python คือ GP learn ไลบรารีนี้ใช้หลักการของ Andrea (2020) การโปรแกรมเชิงพันธุกรรม (Genetic Programming) ในการค้นหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดจากชุดข้อมูล กระบวนการทำงานของ GP learn เริ่มจากการสร้างชุดสมการแบบสุ่ม และปรับปรุงสมการเหล่านั้น ผ่านกระบวนการทางพันธุกรรม เช่น การผสมสมการ (Crossover) และการเปลี่ยนแปลงบางส่วนของสมการ (Mutation) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยสมการที่ได้นั้นจะอยู่ในรูปที่สามารถอ่านและตีความได้ง่าย การถดถอยเชิงสัญลักษณ์เป็นเทคนิคที่ใช้ค้นหาสูตรทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามได้อย่างแม่นยำ โดยไม่ต้องกำหนดรูปแบบของสมการล่วงหน้า ซึ่งแตกต่างจากการถดถอยทั่วไปที่ต้องกำหนดรูปแบบของสมการไว้ก่อนแล้ว จึงคำนวณค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด GP learn มีส่วนเชื่อมต่อที่ทำงานร่วมกับไลบรารี ที่ทำงานร่วมกับไลบรารี Scikit-learn ได้อย่างราบรื่น ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและบูรณาการเข้ากับเครื่องมืออื่น ๆ นอกจากนี้ GP learn ยังสามารถใช้สร้างโมเดลสำหรับงานต่าง ๆ ได้ เช่น การพยากรณ์หรือการสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์ (Symbolic Regressor) การจัดกลุ่มประเภทข้อมูล (Symbolic Classifier) การแปลงข้อมูลเพื่อสร้างคุณลักษณะใหม่ (Symbolic Transformer) กระบวนการทำงานของ GP learn เริ่มต้นด้วยการสร้างชุดสมการทางคณิตศาสตร์แบบสุ่ม ซึ่งประกอบด้วยตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ ฟังก์ชันพื้นฐาน ค่าคงที่ และตัวแปร ประเมินความเหมาะสมของสมการแต่ละชุดด้วย ฟังก์ชันวัดความเหมาะสม (Fitness Function) ซึ่งคำนึงถึงทั้งความแม่นยำและความซับซ้อนของสมการ เลือกสมการที่เหมาะสมที่สุด และดำเนินการปรับปรุงด้วยกระบวนการทางพันธุกรรม เช่น การผสมสมการ (Crossover) และการเปลี่ยนแปลงบางส่วนของสมการ (Mutation) ทำซ้ำกระบวนการนี้จนกว่าจะถึงเงื่อนไขที่กำหนด เช่น จำนวนรอบที่กำหนดไว้ล่วงหน้าหรือระดับความแม่นยำที่ต้องการ ข้อดีของ GP learn สามารถค้นพบความสัมพันธ์ในข้อมูลที่ซับซ้อนหรือไม่เป็นเชิงเส้น สมการที่สร้างขึ้นสามารถตีความได้ง่าย ช่วยให้ผู้ใช้งานเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ได้ชัดเจน มีส่วนเชื่อมต่อที่ทำงานร่วมกับไลบรารีที่ใช้งานง่ายและรองรับการทำงานร่วมกับเครื่องมืออื่น ๆ อย่างไรก็ตาม การถดถอยเชิงสัญลักษณ์มีความซับซ้อนสูงและต้องการทรัพยากรในการคำนวณมาก ดังนั้นการใช้งานกับชุดข้อมูลขนาดใหญ่หรือปัญหาที่ยู่งยากอาจใช้เวลานาน นอกจากนี้ การเลือกตัวดำเนินการและ

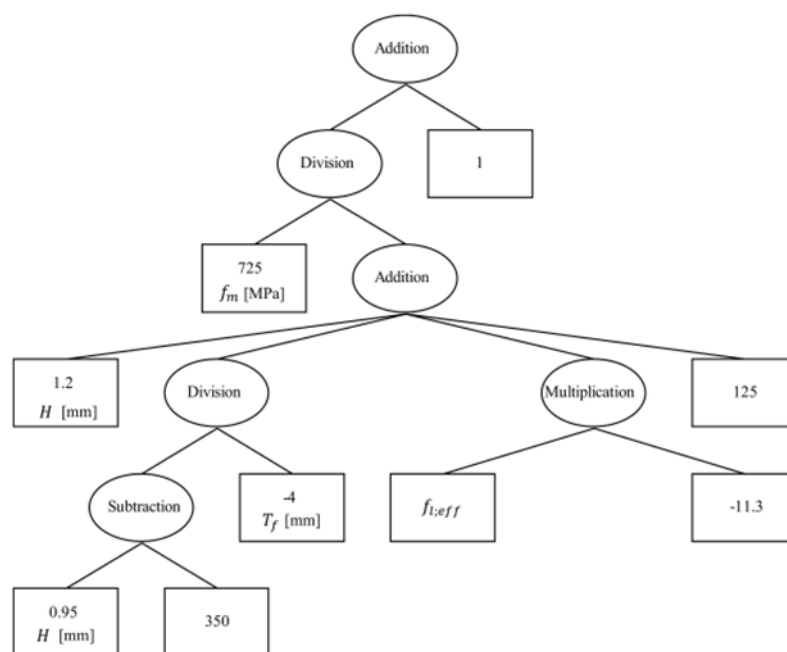
ฟังก์ชันที่เหมาะสมก็เป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดล GP learn เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพในการค้นพบความสัมพันธ์เชิงวิเคราะห์ในข้อมูลผ่านการถดถอยเชิงสัญลักษณ์ ด้วยความสามารถในการสร้างโมเดลที่สามารถตีความได้ และใช้งานง่าย ทำให้เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับนักวิจัยและนักพัฒนาในหลายสาขา Andrea (2020); La Cava, et al. (2021); Casper (2023); Make & Chawla (2024) ได้สำรวจความก้าวหน้าล่าสุดใน Symbolic Regression และการนำไปใช้งานในหลากหลายสาขา โดยเน้นความสำคัญของความสามารถในการตีความโมเดลที่พัฒนาขึ้น ภาพ 24 แสดงฟังก์ชันตัวอย่างที่ถูกใช้เป็น Ground Truth หรือฟังก์ชันเป้าหมายในการศึกษา Symbolic Regression Analytics (2020) เพื่อใช้เปรียบเทียบความสามารถของโมเดลในการเรียนรู้ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ข้อมูลที่ปรากฏในภาพประกอบด้วยจุดสีเขียว ซึ่งแทนค่าจริงของฟังก์ชัน และจุดสีแดงซึ่งอาจแสดงถึงค่าจากข้อมูลที่ใช้ในการฝึกโมเดลหรือค่าที่ได้จากการทดลองเทียบเคียง จากลักษณะของกราฟจะเห็นได้ว่า ฟังก์ชันมีลักษณะไม่เชิงเส้น และมีความซับซ้อนสูง ประกอบด้วยแนวโน้มของฟังก์ชันที่มีความโค้งในระดับโพลิโนเมียล และมีคลื่นลักษณะไซน์ซ้อนอยู่ ซึ่งสะท้อนถึงความท้าทายของ Symbolic Regression ในการสร้างสมการที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของข้อมูลดังกล่าวได้อย่างถูกต้องและกระชับ การใช้ฟังก์ชันที่ซับซ้อนเช่นนี้เป็นแนวทางที่นิยมในงานวิจัยด้าน Symbolic Regression เนื่องจากช่วยให้สามารถประเมินศักยภาพของอัลกอริธึมในการเรียนรู้รูปแบบข้อมูลที่ไม่สามารถจับได้ด้วยโมเดลเชิงเส้นทั่วไป ทั้งนี้การทดลองดังกล่าว ช่วยเน้นย้ำถึงข้อได้เปรียบของ Symbolic Regression ที่สามารถสร้างสมการในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่าย พร้อมทั้งยังสามารถตีความและนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงวิศวกรรมหรือวิทยาศาสตร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษากว่า SR ช่วยให้การค้นพบโมเดลในเชิงวิทยาศาสตร์ง่าย และชัดเจนขึ้นอย่างไร ตัวอย่างเช่นในฟิสิกส์และเคมี SR สามารถสร้างสมการที่สะท้อนปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนได้ด้วยความถูกต้อง และความโปร่งใส การศึกษานี้ยังได้ทบทวนเทคนิคต่าง ๆ เช่น Genetic Programming และวิธีที่ผสมผสานกับ Deep Learning เพื่อลดข้อจำกัดด้านการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังมีการสำรวจตัวอย่างการใช้งานจริงในวิทยาศาสตร์ เช่น การจำลองปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ และการวิเคราะห์ข้อมูลทางการแพทย์ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า SR เป็นเครื่องมือสำคัญในการสร้างโมเดลที่สามารถตีความได้ในงานที่ต้องการความเข้าใจเชิงลึก งานวิจัยของ Alotaibi & Islam (2023) มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ Symbolic Regression ในการพยากรณ์ความแข็งแรงของเสาอิฐที่เสริมด้วย Fiber Reinforced Polymer (FRP) ซึ่งเป็นวิธีการเสริมกำลังที่ได้รับความนิยมในงานวิศวกรรมโยธาสำหรับโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพหรือเกิดความเสียหาย วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการพัฒนสมการที่สามารถพยากรณ์ค่าความแข็งแรงของเสาอิฐที่ถูกเสริมด้วย FRP ได้อย่างแม่นยำ และง่ายต่อการใช้งานในทางปฏิบัติ โดยเน้นการใช้ Symbolic Regression ซึ่งมีความสามารถในการสร้างสมการที่โปร่งใส และสามารถตีความได้ง่าย

วิธีการทดลอง รวบรวมข้อมูลผลการทดลอง จำนวน 198 ชุด ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ โดยการเขียนสมการแบบต้นไม้ (Tree-based Genetic Programming) มักถูกนำมาใช้ในปัญหาการถดถอย (Regression) โดยทั่วไป และในภาพ 25 ได้แสดงวิธีการหาคำตอบของ Symbolic Regression แบบง่ายในรูปแบบของ ต้นไม้แสดงนิพจน์เชิงสัญลักษณ์ (Symbolic Expression Tree) การทำ Symbolic Regression โดยใช้ Genetic programming นั้นเหมาะสมกับปัญหาการถดถอยด้วยสองเหตุผลหลัก โครงสร้างของสมการยังไม่เป็นที่รู้แน่ชัด ล่วงหน้าไม่มีรูปแบบตายตัว ผลลัพธ์ของแบบจำลองเป็นสมการเชิงคณิตศาสตร์ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่าย เช่น ในโปรแกรมคำนวณแบบสกรู (Screw-calculation programs) ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเสาอิฐ เช่น ประเภทของ FRP และความหนาแน่นของวัสดุ



ภาพ 24 แสดงฟังก์ชันตัวอย่างที่ถูกใช้เป็น Ground Truth หรือฟังก์ชันเป้าหมายในการศึกษา Symbolic Regression

ที่มา: คัดลอกจาก Analytics, 2020

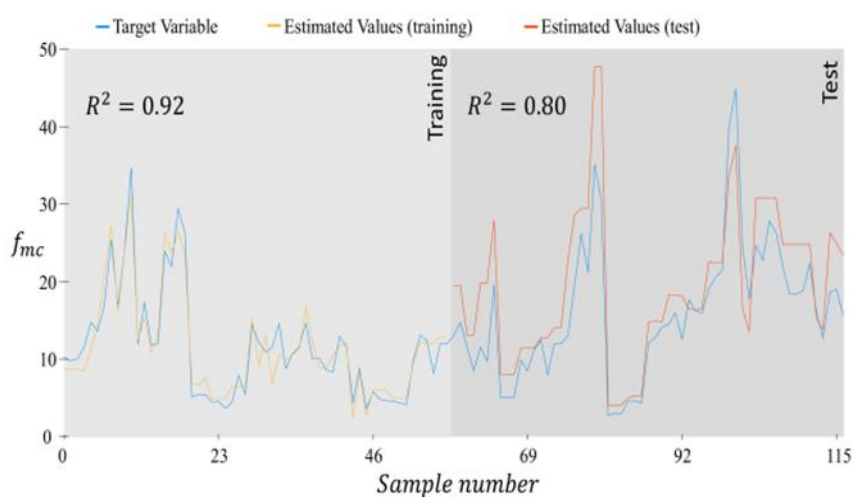


ภาพ 25 การอธิบายสมการโดยใช้โครงสร้าง (Tree-based genetic programming)

ที่มา: คัดลอกจาก Alotaibi, 2023

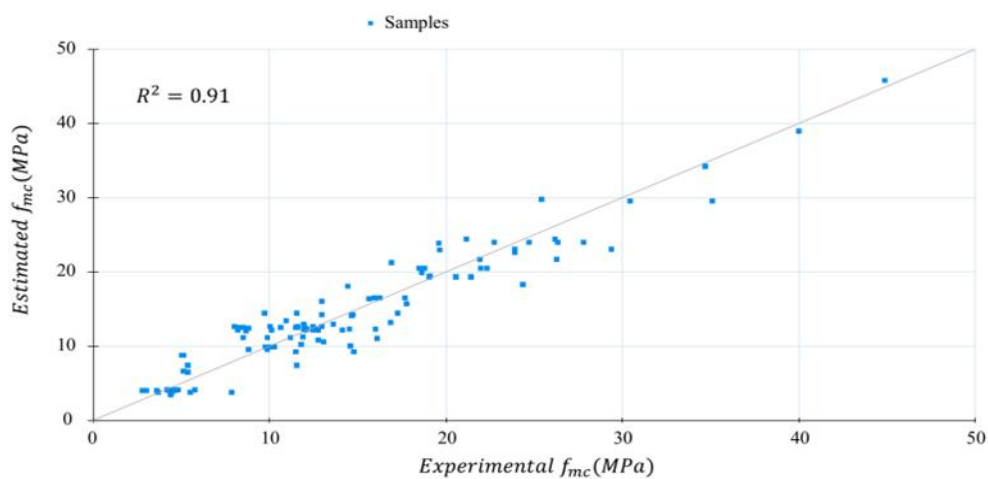
การพัฒนาโมเดลโดยใช้ Genetic Programming ในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่เชื่อมโยงตัวแปรต่าง ๆ กับค่าความแข็งแรงของเสาอิฐที่วัดได้จากการทดลอง และทำการเปรียบเทียบสมการที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ค่าความแม่นยำ (R^2) เป็นเกณฑ์การประเมิน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นมีค่า ภาพ 26 แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของการพยากรณ์ของโมเดลแบบ Black-box ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ Symbolic Black-box Model ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์กำลังรับแรงอัดของ FRP-confined masonry ได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมโครงสร้างเพื่อการออกแบบ และเสริมกำลังโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาพ 27 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่พยากรณ์โดยแบบจำลองและค่าที่วัดจากการทดลองถูกแสดงในรูปแบบกราฟ ซึ่งค่าทั้งสองมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน แสดงถึงความสามารถของ Symbolic Regression ในการพยากรณ์ค่าความแข็งแรงได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ การที่ค่า $R^2 = 0.91$ บ่งบอกว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรผันของข้อมูลได้ถึง 91% ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแม่นยำ สมการใหม่สามารถพยากรณ์ค่าความแข็งแรงของเสาอิฐได้อย่างมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการใช้งาน นอกจากนี้โมเดลยังมีความยืดหยุ่น และสามารถปรับใช้กับเงื่อนไขต่าง ๆ ได้หลากหลาย งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้ Symbolic Regression ในการพัฒนาสมการที่แม่นยำและสามารถนำไปใช้ได้จริง

ในงานวิศวกรรมโยธา โดยการใช้ Genetic Programming ช่วยให้สมการที่พัฒนาขึ้นมีความโปร่งใส่
 ง่ายต่อการตีความ และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในงานเสริมกำลังโครงสร้างอื่น ๆ ในอนาคต



ภาพ 26 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่พยากรณ์โดยแบบจำลองและค่าที่วัดจากการทดลอง

ที่มา: Alotaibi, 2023



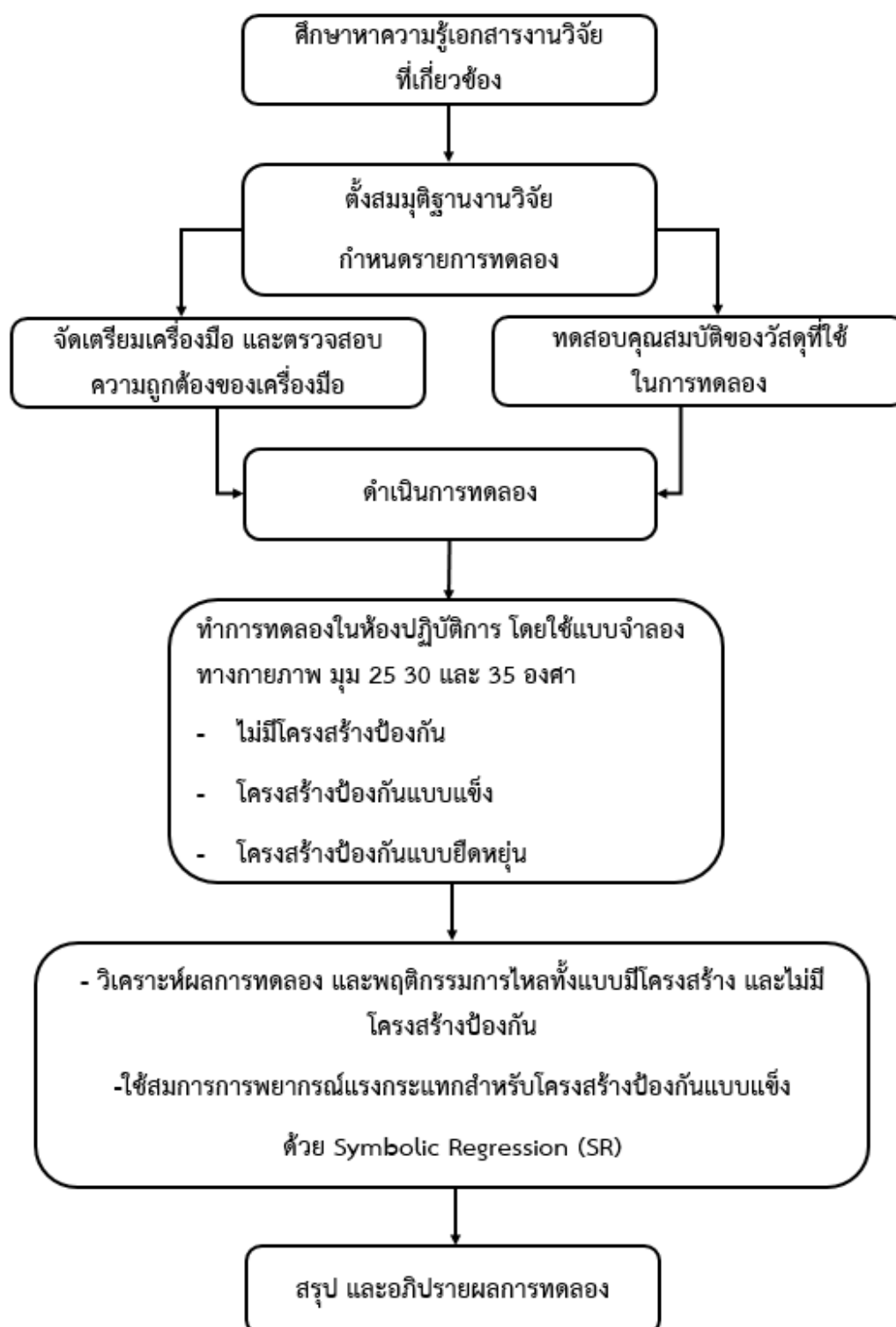
ภาพ 27 การเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลระหว่างค่าที่พยากรณ์โดยแบบจำลองและค่าที่วัดจากการทดลอง

ที่มา: Alotaibi, 2023

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

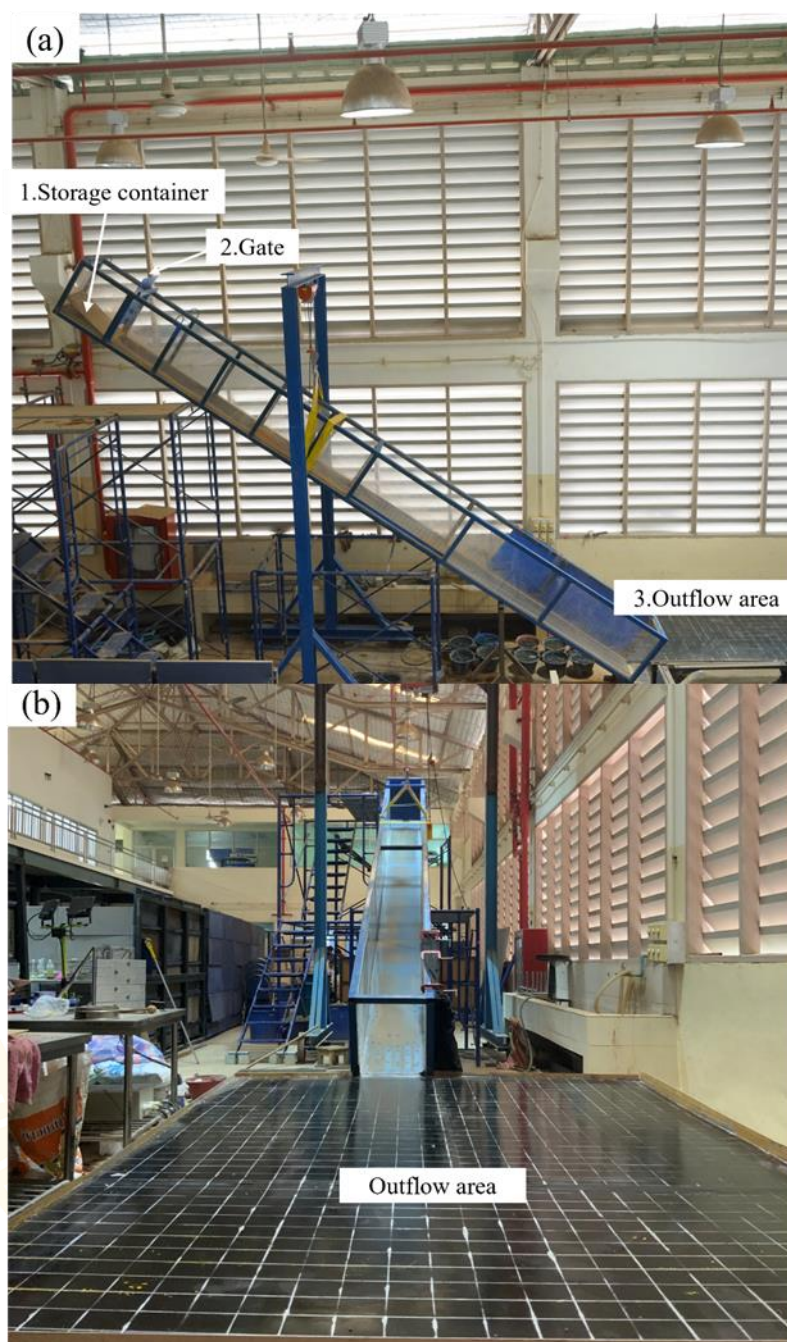
การศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลน พบว่าลักษณะ และพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนนั้นมีความยุ่งยาก และซับซ้อน เนื่องจากการผสมระหว่างวัสดุแบบแห้ง และแบบมีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งทำให้ดินโคลนอยู่ในสถานะกึ่งของเหลว การศึกษานี้เน้นการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้รางน้ำเป็นแบบจำลองทางกายภาพที่ถูกลดส่วน ซึ่งวิธีการนี้ช่วยให้สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าการทดสอบด้วยรางน้ำจะเป็นเพียงการจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ แต่ลักษณะทางกายภาพจากการทดสอบดังกล่าวสามารถทำให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมและกลไกการไหลหลากของดินโคลนได้อย่างดี การทดลองนี้จะให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับกลไกแรงกระทำที่เกิดจากการไหลของดินโคลนกระทบกับสิ่งกีดขวางรูปแบบต่าง ๆ เช่น การศึกษาโดย Choi, et al. (2013); Choi, et al. (2015); Faug, Thierry (2015); Haas, et al. (2015); Choi, et al. (2018); Song, et al. (2018); Hervé, et al. (2021); Gong, et al. (2023) การตั้งค่าความลาดชันของรางน้ำที่ใช้ในการทดลองถูกกำหนดให้มีมุม 25, 30 และ 35 องศา เพื่อศึกษาผลกระทบของความลาดชันที่แตกต่างกันของการไหล และการทับถมของดินโคลน ความลาดชันที่เลือกใช้นี้สามารถจำลองสภาวะการไหลในธรรมชาติที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบโครงสร้างป้องกันในสถานการณ์จริง การเลือกใช้มุมลาดชันที่ต่างกันยังช่วยให้สามารถทดสอบสภาวะที่หลากหลาย และศึกษาพฤติกรรมการไหลของดินโคลนได้อย่างครอบคลุม (ภาพ 28) เป็นแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย เริ่มจากศึกษาข้อมูลเบื้องต้น ตั้งสมมุติฐานและกำหนดกรอบการทดลอง จัดเตรียมเครื่องมือ ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ ดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้รางจำลองที่มีมุม 25, 30 และ 35 องศา เปรียบเทียบผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง ซึ่งทั้งหมดนี้ช่วยให้การวิจัยมีความละเอียด และครอบคลุมมากขึ้น



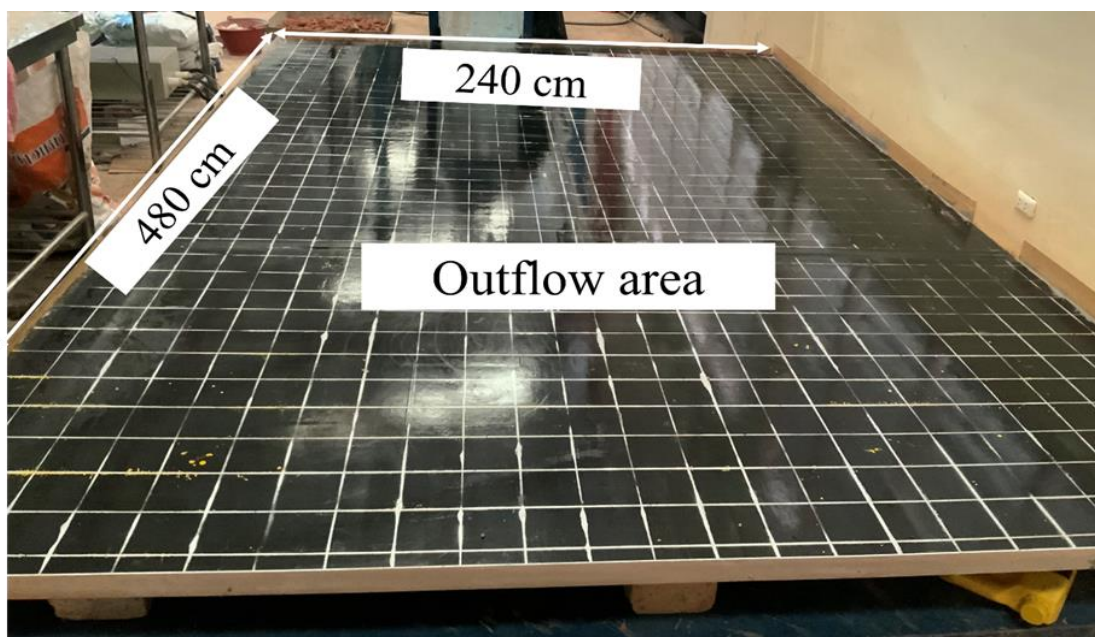
ภาพ 28 แผนการดำเนินงานวิจัย

แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ

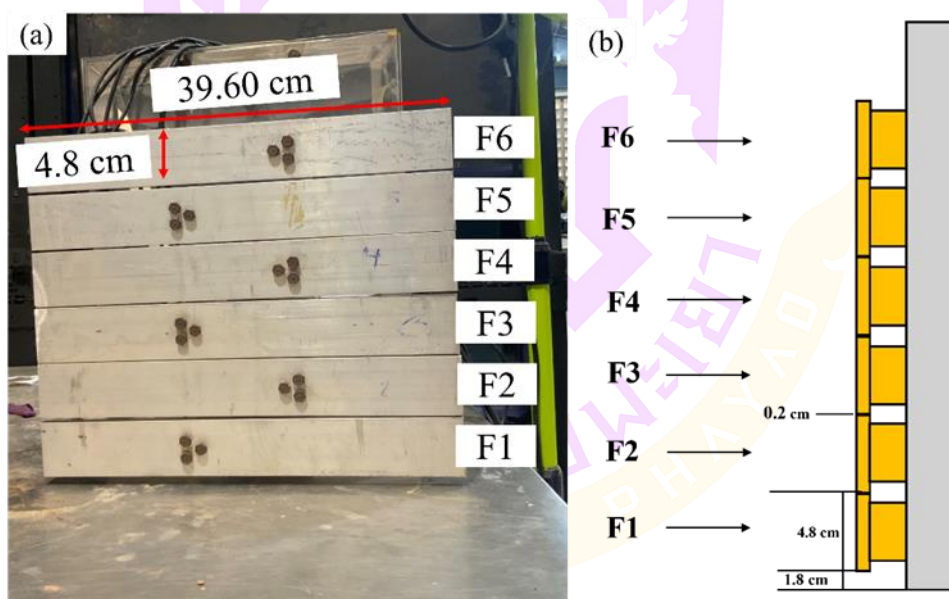
แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา การทดลองในห้องปฏิบัติการ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการศึกษา พฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลน รางน้ำที่ถูกใช้เป็นเส้นทางไหลของวัสดุ มีขนาดความกว้าง 40 cm ความสูง 55 cm และความยาว 720 cm ผนังด้านข้างทำด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 0.6 cm พื้นรางเป็นแผ่นเหล็กแบบผิวเรียบ ภาพ 29 ข้อดีของการศึกษาด้วยแบบจำลองรางน้ำ คือ สามารถที่จะปรับเปลี่ยนความเอียงของรางน้ำได้จนถึง 35 องศา ด้านท้ายของรางน้ำจะมีแผ่นไม้ผิวเรียบ 240 x 480 cm ไว้รองรับการไหลทับถมของวัสดุ ภาพ 30 ในการทดลองนี้ โครงสร้างป้องกันที่ใช้ในการศึกษา แบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง (Rigid Barrier) ภาพ 31 และโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น (Flexible Barrier) ภาพ 32 การเลือกใช้โครงสร้างทั้งสองประเภทนี้มีเหตุผลที่สำคัญหลายประการ โดยโครงสร้างป้องกันแบบแข็งถูกออกแบบให้ไม่มีช่องเปิดและไม่มีการเสียรูป มีรูปทรงที่คงที่ ทำให้สามารถวัดและวิเคราะห์แรงกระแทกที่เกิดขึ้นเมื่อดินโคลนชนกับโครงสร้างแบบแข็งได้อย่างแม่นยำ การศึกษาพฤติกรรมการกระแทกของดินโคลนเมื่อชนกับโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและไม่เสียรูปนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมแรงกระแทกได้ดี ในทางกลับกัน โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นเป็นโครงสร้างแบบเปิดซึ่งวัสดุบางส่วนสามารถไหลผ่าน และมีการเสียรูป โครงสร้างแบบยืดหยุ่นสามารถปรับตัวตามแรงกระแทก และการเคลื่อนที่ของดินโคลนได้ดี ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงในการพังทลาย การวัดแรงดึงในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลจะช่วยให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมการยืดหยุ่นของโครงสร้างเมื่อโดนกระแทก อย่างไรก็ตามการทดลองจึงควรทำซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เชื่อถือได้และสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองได้อย่างแม่นยำ ภาพ 33 ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากครั้งนี้โครงสร้างป้องกันแบบแข็งจะติดตั้งห่างจากประตูปล่อยวัสดุ 608 cm เนื่องจากโครงสร้างที่จะต้องใช้ยึดกับ Load cell ระยะที่ร่นขึ้นนี้มีระยะประมาณ 58 cm โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง จะถูกติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งปลายราง ห่างจากประตูปล่อยวัสดุ 666 cm กล้องความเร็วสูงรุ่น Photron Fastcam Mini UX ที่มีอัตราเฟรม 2000 fps จะถูกติดตั้งเพื่อเก็บภาพเคลื่อนไหวด้านข้างของราง ในขณะที่ด้านหน้าจะติดตั้งกล้อง Sony A7R MARK 2 และ GoPro Hero9 เพื่อเก็บภาพการเคลื่อนไหวบริเวณด้านของหน้ารางรวมถึงการแผ่กระจาย



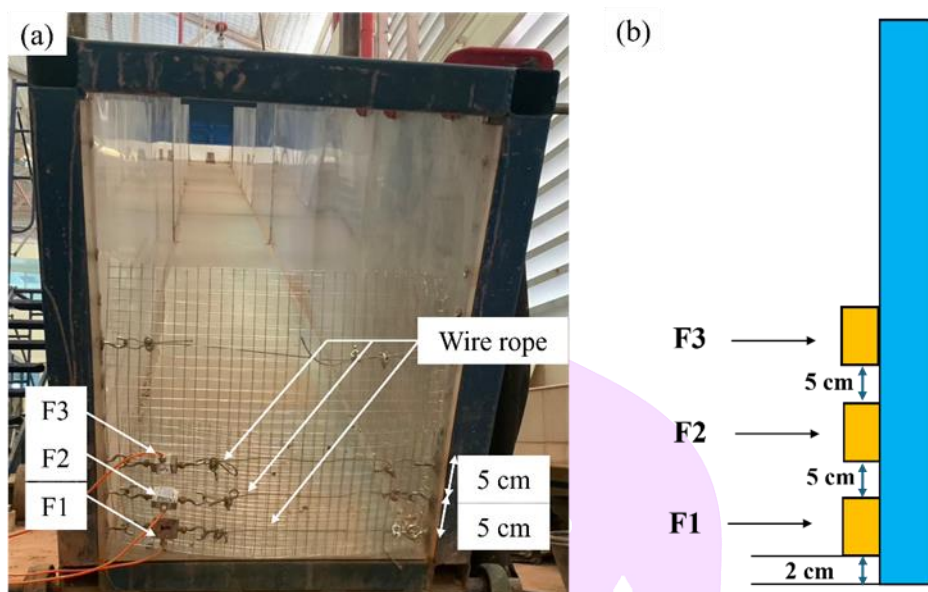
ภาพ 29 แบบจำลองทางกายภาพย่อยส่วนการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการสาขา
วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา



ภาพ 30 ไม้กระดานขนาด 240 x 480 เซนติเมตร



ภาพ 31 โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง



ภาพ 32 โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น



ภาพ 33 ผังของการติดตั้งกล้องบันทึกภาพการเคลื่อนไหวในการทดสอบด้วยแบบจำลองรางน้ำ

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

กรมทรัพยากรธรณีได้ให้คำนิยามว่า Debris Flow คือโคลนถล่มหรือเหตุการณ์ที่ตะกอนดิน หิน และซากต้นไม้ ไหลลงมาปะปนกัน มักเกิดขึ้นตามทางน้ำเดิมหรือร่องเล็ก ๆ บนภูเขา ส่วน Mud flow มีลักษณะคล้ายกับ Debris Flow แต่ตะกอนมีขนาดเล็กกว่าและมีน้ำเป็นส่วนประกอบสูงถึงร้อยละ 60 Takahashi (2007) ได้จำแนก Debris Flow ออกเป็นสองประเภท ได้แก่ การไหลของเศษหินเม็ดหยาบ (Stony Debris Flow) และการไหลหลากของดินโคลน (Muddy Debris Flow) Witt, et al. (2005)

อธิบายว่า การไหลหลากของดินโคลน และเศษซากเป็นกระบวนการที่วัสดุที่ไม่เรียงตัว เช่น หินใหญ่ ดินเหนียว หรือเศษท่อนไม้ เคลื่อนที่ลงมาตามความลาดชันอย่างโดยปกติการไหลหลากของดินโคลน จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 60 แต่การกำหนดปริมาณน้ำสำหรับการไหลหลากของดินโคลน อาจทำได้ยุ่งยากเนื่องจากมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดยใช้แบบจำลอง ย่อส่วน เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมของการไหลหลากของดินโคลนซึ่งมีคุณลักษณะเป็นแบบการไหลของ เศษหินเม็ดหยาบ ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการนำปริมาณสัดส่วนของแข็งในส่วนผสม (Solid Concentration, Cs) ระหว่างของแข็งและของเหลวมาศึกษา วัสดุที่ใช้ในการทดสอบมีสามประเภท ได้แก่ กรวดแม่น้ำ ทราย และดินเหนียว กรวดแม่น้ำมีพื้นผิวเรียบและมน โดยขนาดของกรวดที่ใช้ จะผ่านตะแกรงขนาด 1 in และตกค้างที่ตะแกรงขนาด 3/4 in ส่วนทรายจะผ่านตะแกรงขนาด 3/8 in และตกค้างที่ตะแกรงเบอร์ 4 วัสดุทั้งกรวดแม่น้ำและทรายต้องล้างให้สะอาดเพื่อลดฝุ่นและสิ่ง แปรกลปลอม จากนั้นจึงอบให้แห้ง สำหรับดินเหนียวจะนำไปอบแห้ง ทบให้ละเอียด และร่อนผ่าน ตะแกรงเบอร์ 8 ขนาดของวัสดุดินเหนียวที่ใช้มีขนาดตั้งแต่ 0.075–2.00 mm ทรายมีขนาด 0.075–4.75 mm และกรวดมีขนาด 19–37.55 mm ข้อมูลนี้แสดงถึงความหลากหลายของขนาดวัสดุที่ใช้ใน การทดสอบ ซึ่งปรากฏใน ภาพ 34 และ ภาพ 35 การศึกษานี้มุ่งเน้นทำความเข้าใจพฤติกรรม การไหลหลากของดินโคลนโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพที่ซับซ้อนและคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อ การไหลหลาก และการทับถมของดินโคลน

รายการทดลองแบบไม่มีโครงสร้างป้องกัน

การทดลองแบบไม่มีโครงสร้างป้องกันมีความสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาพฤติกรรมการไหล หลากของดินโคลน การทดลองนี้ช่วยให้เราสามารถเข้าใจลักษณะและกลไกการไหลของดินโคลนได้ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการออกแบบโครงสร้างป้องกันที่มีประสิทธิภาพ ในการทดลองแบบไม่มีโครงสร้างป้องกัน ใช้แผ่นไม้ผิวเรียบขนาด 240 x 480 cm เพื่อรองรับการไหลทับถมของวัสดุ แผ่นไม้นี้จะช่วยให้การวัดปริมาณและลักษณะของดินโคลนที่ไหลทับถมมีความแม่นยำ และง่ายต่อ การวิเคราะห์ การใช้แผ่นไม้ผิวเรียบยังช่วยให้สามารถวัดปริมาณการไหลของดินโคลนได้อย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งยังช่วยให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองกับการทดลองที่มีโครงสร้างป้องกัน ซึ่งเป็นข้อมูลที่ มีประโยชน์ในการประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้างป้องกันต่าง ๆ การทดลองนี้ยังช่วยให้เห็น ภาพรวมของพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนในสถานะที่ไม่มีการควบคุม ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญ ในการพัฒนาวิธีการป้องกันและลดผลกระทบจากการไหลหลากของดินโคลนในอนาคต รายการทดลอง แบบทับถมแบบอิสระไม่มีโครงสร้างขวางกั้น ตาราง 5 แสดงรายละเอียดรหัสการทดลอง $N[h]_g[a]_s[b]_c[d]_{Cs}[e] - [f]$ โดยที่ N คือ การทดลองแบบทับถม โดยติดตั้งสิ่งกีดขวางแบบแข็ง h คือ มุมของความลาดชันการไหล ได้แก่ 25, 30 และ 35 องศา g, s และ c คือ ประเภทของวัสดุ

ได้แก่ กรวดแม่น้ำ ทราย และ ดิน ตามลำดับ a, b และ d คือ ร้อยละส่วนผสม ได้แก่ ร้อยละของกรวดแม่น้ำ ทราย และดิน ตามลำดับ Cs คือ ปริมาณสัดส่วนของแข็งในส่วนผสม (Solid concentration, Cs) ระหว่างของแข็งและของเหลว e คือ ร้อยละส่วนผสมรวมของกรวด ทราย และดิน ต่อ น้ำ และ f คือ ร้อยละส่วนผสมของน้ำ ยกตัวอย่างเช่น N25_g40_s0_c20_Cs70-30 คือ การทดลองแรงกระทำที่ความลาดชันการไหล 25 องศา ในอัตราส่วนผสมประกอบด้วยประเภทวัสดุกรวดแม่น้ำร้อยละ 40 ทรายร้อยละ 40 และดินร้อยละ 20 โดยวัสดุผสมรวมของเม็ดแห้งได้แก่ กรวดแม่น้ำ ทราย และ ดิน คิดเป็นร้อยละ 70 ของน้ำหนัก 30 กิโลกรัม และส่วนผสมน้ำร้อยละ 30 ของน้ำหนัก 30

รายการทดลองโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง

การใช้โครงสร้างป้องกันแบบแข็งในการศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนมีความสำคัญและพิจารณาให้เป็นโครงสร้างปิด (Close Form) การวัดแรงกระทำอย่างแม่นยำ การกระจายแรง และการศึกษาในสภาพที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง โครงสร้างแบบแข็งมีความแข็งแรงและทนทาน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการรับมือกับแรงกระทำจากการไหลของดินโคลน วัสดุที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างป้องกันแบบแข็งมักจะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เช่น อะลูมิเนียม การใช้วัสดุเหล่านี้ ช่วยให้โครงสร้างสามารถรับแรงกระทำที่รุนแรงได้โดยไม่เกิดการเสียหาย การใช้โครงสร้างแบบแข็งจึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสียหายของโครงสร้างในสถานการณ์จริง นอกจากนี้ การวัดแรงกระทำที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยการติดตั้ง Load Cell ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงกระทำ โดยในการศึกษานี้ ได้มีการติดตั้ง Load Cell บนโครงสร้างแบบแข็งแต่ละตัว ซึ่งสามารถรับแรงได้สูงสุด 1000 N Load Cell จะยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.60 cm จำนวน 6 แผ่นเรียงตัวกันในแนวดิ่ง และแต่ละแผ่นจะถูกกำหนดให้มีพื้นที่ในการรับแรง 4.8×39.6 cm ทั้งนี้ ระยะห่างของช่องว่างระหว่าง Load Cell จะกำหนดไว้ที่ประมาณ 2 mm โครงสร้างแบบแข็งไม่เกิดการยืดหยุ่นหรือการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงกระทำ จึงทำให้ข้อมูลที่ได้จาก Load Cell มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ โครงสร้างแบบแข็งยังช่วยในการกระจายแรงกระทำอย่างสม่ำเสมอไปยัง Load Cell แต่ละตัว เนื่องจากแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้ในการติดตั้ง Load Cell มีความแข็งแรงและสามารถกระจายแรงไปยังพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การวัดแรงกระทำในแต่ละจุดมีความสม่ำเสมอ การใช้โครงสร้างแบบแข็งในการศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนยังช่วยให้การทดลองมีความสมจริงมากขึ้น เนื่องจากในสถานการณ์จริง โครงสร้างป้องกันต่าง ๆ มักจะมีลักษณะแข็งแรง และทนทาน ดังนั้น การใช้โครงสร้างแบบแข็งในการทดลองจึงช่วยให้ผลการศึกษามีความใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบโครงสร้างป้องกันในสถานการณ์จริงรายการทดลองโครงสร้างแบบแข็ง ตาราง 6

รายละเอียดรหัสการทดลอง R[h]_g[a]_s[b]_c[d]_Cs[e]-[f] โดยที่ R คือ การทดลองแรงกระแทก โดยติดตั้งสิ่งกีดขวางแบบแข็ง h คือ มุมของความลาดชันการไหล ได้แก่ 25, 30 และ 35 องศา g, s และ c คือ ประเภทของวัสดุ ได้แก่ กรวดแม่น้ำ ทราย และ ดิน ตามลำดับ a, b และ d คือ ร้อยละ ส่วนผสม ได้แก่ ร้อยละของกรวดแม่น้ำ ทราย และดิน ตามลำดับ Cs คือ ปริมาณสัดส่วนของแข็ง ในส่วนผสม (Solid Concentration, Cs) ระหว่างของแข็งและของเหลว e คือ ร้อยละส่วนผสมรวม ของกรวด ทราย และดิน ต่อน้ำ และ f คือ ร้อยละส่วนผสมของน้ำ ยกตัวอย่างเช่น R25_g30_s50_c20_Cs75-25 คือ การทดลองแรงกระแทกที่ความลาดชันการไหล 25 องศา ในอัตราส่วนผสมประกอบด้วยประเภทวัสดุ กรวดแม่น้ำร้อยละ 30 ทรายร้อยละ 50 และดินร้อยละ 20 โดยวัสดุผสมรวมของเม็ดแข็ง ได้แก่ กรวดแม่น้ำ ทราย และ ดิน คิดเป็นร้อยละ 75 ของน้ำหนัก 30 กิโลกรัม และส่วนผสมน้ำร้อยละ 25 ของน้ำหนัก 30 แสดงการกระจายตัวของวัสดุที่ใช้ทดลอง ในการศึกษาในครั้งนี้

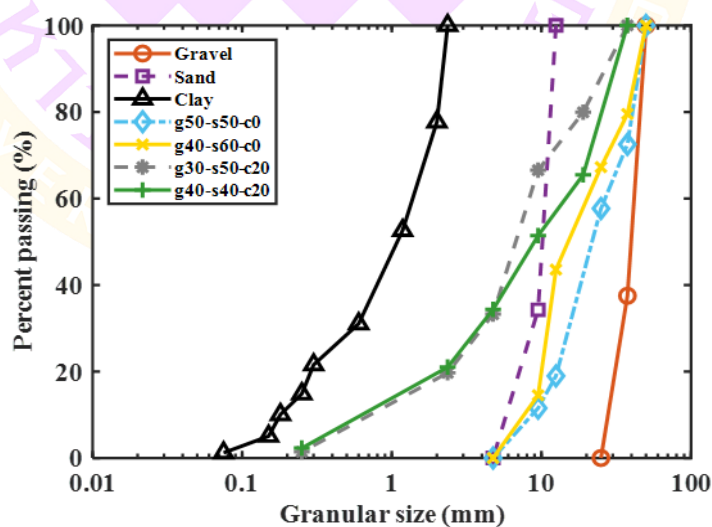
รายการทดลองโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น

การใช้โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นหรือตาข่ายในการศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของ ดินโคลนมีความสำคัญอย่างยิ่งในหลายประการ ทั้งในด้านการกระจายแรง การลดแรงกระแทก และ การคำนึงถึงความเป็นไปได้ในสถานการณ์จริง โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นหรือตาข่าย (Net) มีความสามารถในการกระจายแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากการไหลของดินโคลนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างแบบยืดหยุ่นมักจะมีคุณสมบัติในการดูดซับแรงกระแทก และกระจายแรงไปยังบริเวณต่างๆ ของโครงสร้าง ทำให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นถูกลดทอนลง การใช้ โครงสร้างแบบนี้จึงช่วยลดความเสี่ยงต่อการเสียหายของโครงสร้าง และบริเวณที่ป้องกันได้เป็นอย่างดี การติดตั้ง Load Cell ขนาด 500 N เพื่อวัดแรงดึงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างแบบยืดหยุ่น จะยึดติดตรง ปลายรางน้ำด้วยลวดสลิง โดยที่ระยะห่างของลวดสลิงแต่ละเส้นในแนวดิ่งจะถูกกำหนดไว้ที่ระยะ 5 cm การใช้ Load Cell นี้ช่วยให้การวัดแรงดึงที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของโครงสร้างมีความแม่นยำ การออกแบบนี้ยังช่วยให้การกระจายแรงดึงในแนวดิ่งมีความสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญใน การประเมินประสิทธิภาพของโครงสร้างแบบยืดหยุ่น การใช้โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นหรือตาข่ายยัง มีประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากในสภาวะที่คล้ายคลึงกับสถานการณ์จริง ในสถานการณ์จริง โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นมักถูกนำมาใช้ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิด ดินโคลนไหลหลาก เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดซับแรงกระแทก และลดความเสียหายที่ เกิดขึ้น การใช้โครงสร้างแบบนี้ในการทดลองจึงช่วยให้ผลการศึกษามีความสมจริงและสามารถ นำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างป้องกันในสถานการณ์จริงได้ รายการทดลองโครงสร้างแบบ ยืดหยุ่น ตาราง 7 รายละเอียดรหัสการทดลอง F[h]_g[a]_s[b]_c[d]_Cs[e] - [f] โดยที่ F คือ

การทดลองแรงดึง โดยติดตั้งสิ่งกีดขวางแบบแข็ง h คือ มุมของความลาดชันการไหล ได้แก่ 25, 30 และ 35 องศา g, s และ c คือ ประเภทของวัสดุ ได้แก่ กรวดแม่น้ำ ทราย และ ดิน ตามลำดับ a, b และ d คือ ร้อยละส่วนผสม ได้แก่ ร้อยละของกรวดแม่น้ำ ทราย และดิน ตามลำดับ C_s คือ ปริมาณสัดส่วนของแข็งในส่วนผสม (Solid Concentration, C_s , C_s) ระหว่างของแข็งและของเหลว e คือ ร้อยละส่วนผสมรวมของกรวด ทราย และดิน ต่อ น้ำ และ f คือ ร้อยละส่วนผสมของน้ำ ยกตัวอย่างเช่น F25_g30_s50_c20_ C_s 70-30 คือ การทดลองแรงกระแทกที่ความลาดชันการไหล 25 องศา ในอัตราส่วนผสมประกอบด้วยประเภทวัสดุ กรวดแม่น้ำร้อยละ 30 ทรายร้อยละ 50 และดินร้อยละ 20 โดยวัสดุผสมรวมของเม็ดแห้ง ได้แก่ กรวดแม่น้ำ ทราย และ ดิน คิดเป็นร้อยละ 70 ของน้ำหนัก 30 กิโลกรัม และส่วนผสมน้ำร้อยละ 30 ของน้ำหนัก 30



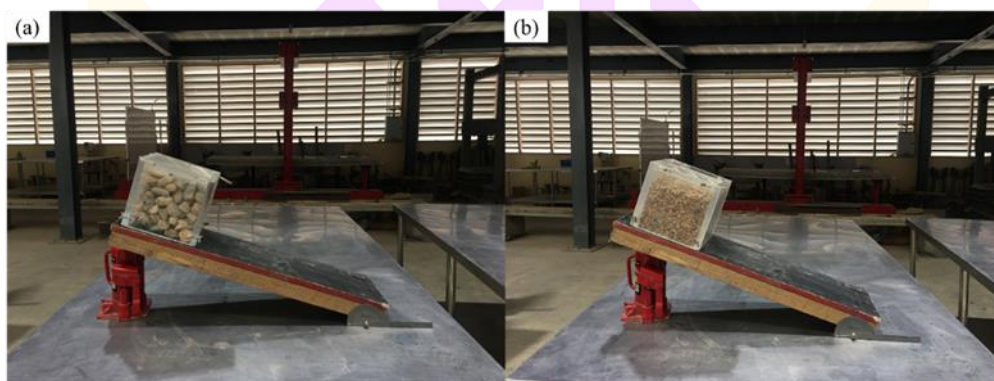
ภาพ 34 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยดินเหนียว ทราย และกรวด



ภาพ 35 ขนาดคละของวัสดุมวลหยาบและละเอียดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

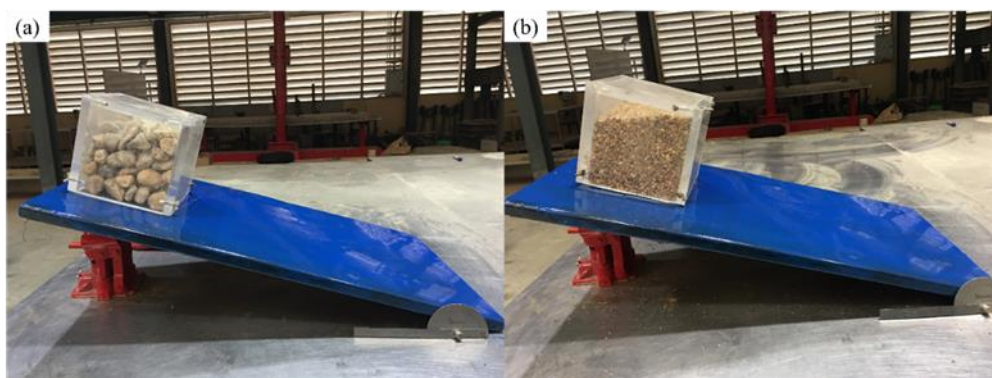
ในการวิเคราะห์พฤติกรรมแรงกระแทกที่เกิดขึ้น การศึกษาในครั้งนี้ใช้ตัวเลขไม่มีหน่วย Froude number (F_r) เพื่ออธิบายสภาวะการไหลหลากของดินโคลนที่เกิดขึ้น และใช้ตัวเลขไม่มีหน่วย Savage Number (N_{sav}) เพื่ออธิบายการเสียดสีและการชนกันของอนุภาคที่เกิดขึ้น และมีการนำผลการทดลองแรงกระแทกที่ได้มาเปรียบเทียบกับสมการประมาณแรงกระแทกในสมการที่ (3) สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างวัสดุกับพื้นผิว μ ถือได้ว่าเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการไหลของวัสดุเม็ดแข็ง ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ วัสดุมวลหยาบซึ่งประกอบไปด้วยกรวดแม่น้ำ และทราย จะถูกนำทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างพื้นรางซึ่งเป็นแผ่นเหล็กผิวเรียบ ภาพ 35 และแผ่นไม้กระดาน ภาพ 36 สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างกรวด และพื้นไม้ (μ_{G-w}) และ ทราย และพื้นไม้ (μ_{S-w}) อยู่ในช่วง 0.39-0.45 ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของกรวดและทราย ในขณะที่สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานของกรวด และพื้นแผ่นเหล็ก (μ_{G-p}) ทรายและพื้นแผ่นเหล็ก (μ_{S-p}) อยู่ในช่วง 0.38-0.41 ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของกรวดและทราย

การศึกษาในครั้งนี้ การเตรียมตัวอย่างอย่างง่ายจะถูกเตรียมตามสัดส่วนต่าง ๆ ทั้งแบบแห้งและแบบกึ่งของเหลวที่กำหนดไว้ โดยน้ำหนักรวมทั้งหมดเท่ากับ 30 กิโลกรัม เมื่อส่วนผสมทั้งหมดเทลงในรางเพื่อเตรียมการทดสอบ ในการทดลองมีการจัดขนาดความยาวและความสูงให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกันทั้งส่วนผสมแห้ง และส่วนผสมแบบกึ่งของเหลว โดยความสูงของมีค่าประมาณ 18-23 cm ความยาวมีค่าประมาณ 24-25 cm โดยที่ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) จะมีค่าเท่ากับ 2,286 kg/m³ และ 2,525 kg/m³ สำหรับตัวอย่างแบบแห้งและแบบผสมน้ำตามลำดับ ภาพ 37 และ ภาพ 38



ภาพ 36 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมวลหยาบและพื้นผิว

(a) กรวด_แผ่นพื้นไม้ (μ_{G-w}) (b) ทราย_พื้นแผ่นไม้ (μ_{S-w})

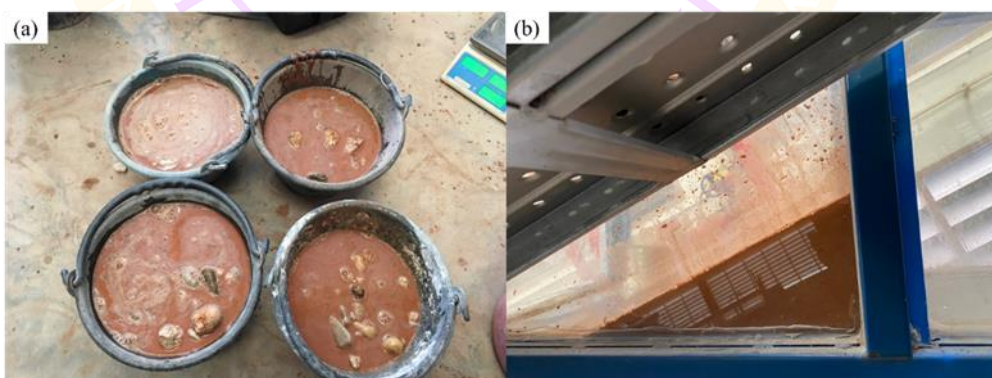


ภาพ 37 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมวลหยาบและพื้นผิว

(a) กรวด_พื้นแผ่นเหล็ก (μ_{G-P}) (b) ทราย_พื้นแผ่นเหล็ก (μ_{S-P})



ภาพ 38 (a) การเตรียมตัวอย่างวัสดุเม็ดแห้ง (b) ขั้นตอนในการเตรียมปล่อยตัวอย่าง



ภาพ 39 การเตรียมตัวอย่างวัสดุเม็ดแห้งผสมน้ำ (b) ขั้นตอนในการเตรียมปล่อยตัวอย่าง

ตาราง 5 รายการทดลองแรงการทับถม และการกระจายของวัสดุ ไม่มีโครงสร้างป้องกัน

มุม (θ)	อัตราส่วนแห้ง % กรวด:ทราย:ดิน	อัตราส่วนรวม % อัตราส่วนแห้ง:น้ำ	รหัสการทดลองแรงกระแทก
25	100:0:0	100:0	N25_100_s0_c0_Cs100-0
	75:25:0	100:0	N25_75_s25_c0_Cs100-0
	60:40:0	100:0	N25_60_s40_c0_Cs100-0
	50:50:0	100:0	N25_g50_s50_c0_Cs100-0
	40:60:0	100:0	N25_g40_s60_c0_Cs100-0
	25:75:0	100:0	N25_g25_s75_c0_Cs100-0
	0:100:0	100:0	N25_0_s100_c0_Cs100-0
	30:50:20	70:30	N25_g30_s50_c20_Cs70-30
	30:50:20	75:25	N25_g30_s50_c20_Cs75-25
	40:40:20	70:30	N25_g40_s40_c20_Cs70-30
	40:40:20	75:25	N25_g40_s40_c20_Cs75-25
	100:0:0	100:0	N30_100_s0_c0_Cs100-0
	75:25:0	100:0	N30_75_s25_c0_Cs100-0
	60:40:0	100:0	N30_60_s40_c0_Cs100-0
30	50:50:0	100:0	N30_g50_s50_c0_Cs100-0
	40:60:0	100:0	N30_g40_s60_c0_Cs100-0
	25:75:0	100:0	N30_g25_s75_c0_Cs100-0
	0:100:0	100:0	N30_0_s100_c0_Cs100-0
	30:50:20	70:30	N30_g30_s50_c20_Cs70-30
	30:50:20	75:25	N30_g30_s50_c20_Cs75-25
	40:40:20	70:30	N30_g40_s40_c20_Cs70-30
	40:40:20	75:25	N30_g40_s40_c20_Cs75-25

ตาราง 5 (ต่อ)

มุม (θ)	อัตราส่วนแห้ง % กรวด:ทราย:ดิน	อัตราส่วนรวม % อัตราส่วนแห้ง:น้ำ	รหัสการทดลองแรงกระแทก
35	100:0:0	100:0	N35_100_s0_c0_Cs100-0
	75:25:0	100:0	N35_75_s25_c0_Cs100-0
	60:40:0	100:0	N35_60_s40_c0_Cs100-0
	50:50:0	100:0	N35_g50_s50_c0_Cs100-0
	40:60:0	100:0	N35_g40_s60_c0_Cs100-0
	25:75:0	100:0	N35_g25_s75_c0_Cs100-0
	0:100:0	100:0	N35_0_s100_c0_Cs100-0
	30:50:20	70:30	N35_g30_s50_c20_Cs70-30
	30:50:20	75:25	N35_g30_s50_c20_Cs75-25
	40:40:20	70:30	N35_g40_s40_c20_Cs70-30
	40:40:20	75:25	N35_g40_s40_c20_Cs75-25

ตาราง 6 รายการทดลองแรงกระแทกในแนวตั้งจากตามความสูงของกองวัสดุด้วยโครงสร้าง
ป้องกันแบบแข็ง

มุม (θ)	อัตราส่วนแห้ง % กรวด:ทราย:ดิน	อัตราส่วนรวม % อัตราส่วนแห้ง:น้ำ	รหัสการทดลองแรงกระแทก
25	100:0:0	100:0	R25_100_s0_c0_Cs100-0
	75:25:0	100:0	R25_75_s25_c0_Cs100-0
	60:40:0	100:0	R25_60_s40_c0_Cs100-0
	50:50:0	100:0	R25_g50_s50_c0_Cs100-0
	40:60:0	100:0	R25_g40_s60_c0_Cs100-0
	25:75:0	100:0	R25_g25_s75_c0_Cs100-0
	0:100:0	100:0	R25_0_s100_c0_Cs100-0
	30:50:20	70:30	R25_g30_s50_c20_Cs70-30
	30:50:20	75:25	R25_g30_s50_c20_Cs75-25
	40:40:20	70:30	R25_g40_s40_c20_Cs70-30
	40:40:20	75:25	R25_g40_s40_c20_Cs75-25

ตาราง 6 (ต่อ)

มุม (θ)	อัตราส่วนแห้ง % กรวด:ทราย:ดิน	อัตราส่วนรวม % อัตราส่วนแห้ง:น้ำ	รหัสการทดลองแรงกระแทก
30	100:0:0	100:0	R30_100_s0_c0_Cs100-0
	75:25:0	100:0	R30_75_s25_c0_Cs100-0
	60:40:0	100:0	R30_60_s40_c0_Cs100-0
	50:50:0	100:0	R30_g50_s50_c0_Cs100-0
	40:60:0	100:0	R30_g40_s60_c0_Cs100-0
	25:75:0	100:0	R30_g25_s75_c0_Cs100-0
	0:100:0	100:0	R30_0_s100_c0_Cs100-0
	30:50:20	70:30	R30_g30_s50_c20_Cs70-30
	30:50:20	75:25	R30_g30_s50_c20_Cs75-25
	40:40:20	70:30	R30_g40_s40_c20_Cs70-30
	40:40:20	75:25	R30_g40_s40_c20_Cs75-25
	100:0:0	100:0	R35_100_s0_c0_Cs100-0
	75:25:0	100:0	R35_75_s25_c0_Cs100-0
	60:40:0	100:0	R35_60_s40_c0_Cs100-0
35	50:50:0	100:0	R35_g50_s50_c0_Cs100-0
	40:60:0	100:0	R35_g40_s60_c0_Cs100-0
	25:75:0	100:0	R35_g25_s75_c0_Cs100-0
	0:100:0	100:0	R35_0_s100_c0_Cs100-0
	30:50:20	70:30	R35_g30_s50_c20_Cs70-30
	30:50:20	75:25	R35_g30_s50_c20_Cs75-25
	40:40:20	70:30	R35_g40_s40_c20_Cs70-30
	40:40:20	75:25	R35_g40_s40_c20_Cs75-25

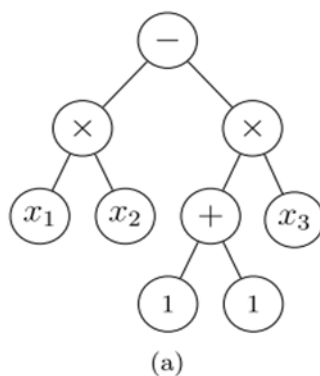
ตาราง 7 รายการทดลองแรงดึงในแนวตั้งฉากตามความสูงของวัสดุโครงสร้างแบบยัดหยุ่น

มุม (θ)	อัตราส่วนแท่ง % กรวด:ทราย:ดิน	อัตราส่วนรวม % อัตราส่วนแท่ง:น้ำ	รหัสการทดลองแรงกระทำ
25	50:50:0	100:0	N25_g50_s50_c0_Cs100-0
	40:60:0	100:0	N25_g40_s60_c0_Cs100-0
	30:50:20	70:30	N25_g30_s50_c20_Cs70-30
	30:50:20	75:25	N25_g30_s50_c20_Cs75-25
	40:40:20	70:30	N25_g40_s40_c20_Cs70-30
	40:40:20	75:25	N25_g40_s40_c20_Cs75-25
30	50:50:0	100:0	F30_g50_s50_c0_Cs100-0
	40:60:0	100:0	F30_g40_s60_c0_Cs100-0
	30:50:20	70:30	F30_g30_s50_c20_Cs70-30
	30:50:20	75:25	F30_g30_s50_c20_Cs75-25
	40:40:20	70:30	F30_g40_s40_c20_Cs70-30
	40:40:20	75:25	F30_g40_s40_c20_Cs75-25
35	50:50:0	100:0	F35_g50_s50_c0_Cs100-0
	40:60:0	100:0	F35_g40_s60_c0_Cs100-0
	30:50:20	70:30	F35_g30_s50_c20_Cs70-30
	30:50:20	75:25	F35_g30_s50_c20_Cs75-25
	40:40:20	70:30	F35_g40_s40_c20_Cs70-30
	40:40:20	75:25	F35_g40_s40_c20_Cs75-25

การวิเคราะห์แรงกระทำ โดย Symbolic Regression (SR)

การสร้างสมการเชิงสัญลักษณ์ (Symbolic Regression) ที่สามารถใช้ในการประมาณแรงกระทำ (F) ได้ โดยแรงกระทำในที่นี้หมายถึงแรงกระทำจากการไหลหลากของดินโคลน ซึ่งวัดได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ แรงกระทำดังกล่าวมีความสำคัญในบริบทของการเรียนรู้พฤติกรรมและการไหลหลากของดินโคลนเพื่อป้องกันภัยธรรมชาติ และการออกแบบโครงสร้างที่สามารถต้านทานผลกระทบจากไหลของดินโคลน เช่น กำแพงป้องกันดินถล่ม หรือระบบควบคุมการไหลของวัสดุในพื้นที่เสี่ยงภัย ในการศึกษาเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนแต่สำคัญอย่างยิ่งในบริบทของการป้องกัน

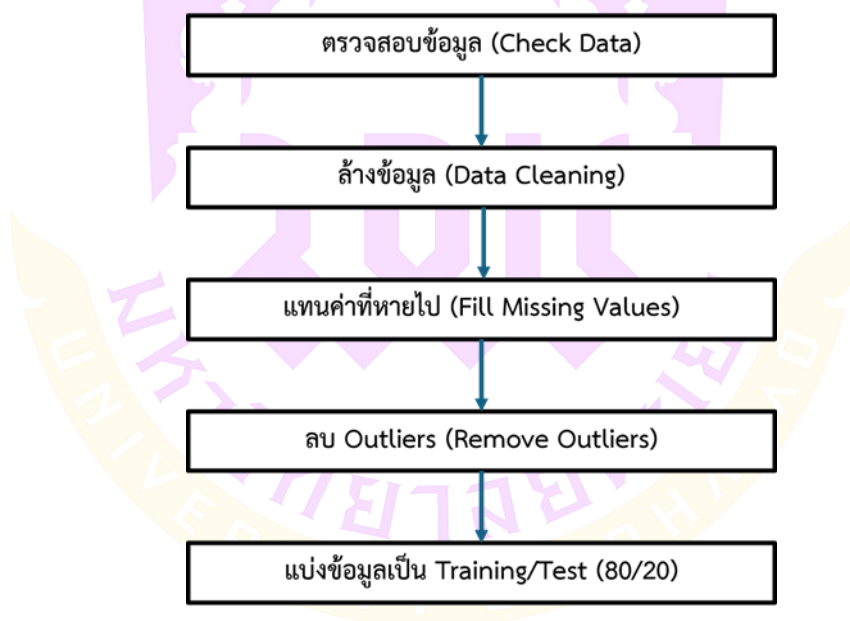
ภัยธรรมชาติ โดยเฉพาะการทำความเข้าใจพฤติกรรมเบื้องต้นของปรากฏการณ์ดินโคลนไหลหลาก แม้ว่าการศึกษาในครั้งนี้จะยังไม่ถึงขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างเพื่อการป้องกันจริง แต่เน้นไปที่การพัฒนาแบบจำลองที่สามารถสะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้อย่างชัดเจนและแม่นยำ การพัฒนาสมการเชิงสัญลักษณ์ในงานนี้จึงมุ่งเน้นการสร้างแบบจำลองที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และแรงกระทำได้อย่างชัดเจน ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ การกำหนดตัวแปรอิสระ และตัวแปรเป้าหมาย โดยตัวแปรอิสระที่ถูกพิจารณา ได้แก่ ความเร็วของการไหล (Flow Velocity) (v) (m/s) ความลึกของการไหล (Flow Depth) (h) ความหนาแน่นเริ่มต้น (Bulk Density) (ρ) (kg/m^3) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (α) ความกว้างของกำแพงกั้น (Barrier Width) (w) และ ค่าความหนืด (Viscosity) (μ_{mix}) ในขณะที่ตัวแปรเป้าหมาย คือ แรงกระทำ (F) ซึ่งถูกนำมาใช้เพื่อประมาณแรงกระทำ การเลือกตัวแปรเหล่านี้มีพื้นฐานจากการศึกษาในเชิงฟิสิกส์ และกลศาสตร์ของดินโคลน เพื่อให้แน่ใจว่าตัวแปรดังกล่าวสะท้อนถึงปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อแรงกระทำได้อย่างครบถ้วน เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์นี้ ได้มีการใช้กระบวนการ Symbolic Regression ซึ่งเป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นจาก Genetic Programming เป็นกลไกหลักในการค้นหาสมการที่เหมาะสม โลบารินีมีจุดเด่นในการสร้างสมการที่ตีความง่าย ยกตัวอย่างเช่นการอธิบายภาพสมการด้วย (Tree-Based Genetic Programming) ภาพ 40 และปรับแต่งได้ตามความต้องการของการทดลอง เพื่อค้นหาสมการที่เหมาะสมที่สุด โดยกระบวนการทั้งหมดเริ่มต้นจากการจัดเตรียมข้อมูล การพัฒนาสมการ ไปจนถึงการประเมินผลสมการที่ได้ Andrea (2020), La Cava, et al., (2021) Make & Chawla (2024) ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นผลลัพธ์จากทั้งทฤษฎี และการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยมีการเก็บรวบรวมตัวแปรต่าง ๆ อย่างครบถ้วน ข้อมูลทั้งหมดถูกจัดเก็บในรูปแบบไฟล์ CSV เพื่อความสะดวกในการนำมาใช้งานในโปรแกรม Python ก่อนการนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ การเตรียมข้อมูลและการแบ่งชุดข้อมูล ภาพ 41 ข้อมูลถูกตรวจสอบความสมบูรณ์ (Data Cleaning) เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีข้อมูลสูญหาย (Missing Data) หรือค่าผิดปกติ (Outliers) ที่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของสมการ กระบวนการนี้รวมถึงการแทนค่าข้อมูลสูญหายด้วยค่าเฉลี่ยหรือค่ากลาง และการลบ Outliers โดยใช้เกณฑ์เชิงสถิติ เช่น การคำนวณ Z-score และ IQR ข้อมูลที่ผ่านการตรวจสอบแล้วจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสมการ (Training Data) และชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบสมการ (Testing Data) โดยใช้อัตราส่วน 80:20 ซึ่งหมายถึง 80% ของข้อมูลทั้งหมดถูกใช้สำหรับการฝึก และอีก 20% ที่เหลือสำหรับการทดสอบ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิด Overfitting การแบ่งข้อมูลดังกล่าวใช้วิธี Hold_Out Cross Validation ซึ่งเหมาะสมสำหรับชุดข้อมูลที่มีขนาดเล็ก เช่นในงานวิจัยนี้ กระบวนการพัฒนาสมการเชิงสัญลักษณ์ในงานวิจัยนี้ใช้



-	×	x_1	x_2	×	+	1	1	x_3
---	---	-------	-------	---	---	---	---	-------

ภาพ 40 การอธิบายภาพสมการด้วย (Tree-based genetic programming)

ที่มา: คัดลอกจาก Make & Chawla, 2024



ภาพ 41 ขั้นตอนการตรวจสอบข้อมูล

กระบวนการพัฒนาสมการเชิงสัญลักษณ์ในงานวิจัยนี้ใช้ กระบวนการ Symbolic Regression ด้วย Genetic Programming (GP) โดยเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาความสัมพันธ์เชิงสัญลักษณ์ระหว่างตัวแปร ซึ่งเหมาะสมกับข้อมูลที่มีลักษณะไม่เชิงเส้น (Nonlinear Data) กระบวนการของ GP เริ่มต้นจากการสุ่มสร้างสมการเริ่มต้น (ภาพ 42) และ (ภาพ 43) (Initial Population) ที่มีขนาด 1000 สมการ แต่ละสมการถูกสร้างขึ้นจากฟังก์ชันพื้นฐาน ได้แก่ การบวก การลบ การคูณ และการยกกำลัง โดยโครงสร้างของสมการในแต่ละตัวอย่างถูกสุ่มขึ้นอย่างอิสระ เมื่อได้สมการเริ่มต้นแล้ว สมการแต่ละตัวจะถูกประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness) กระบวนการ GP จะดำเนินการคัดเลือกสมการที่มีค่าความเหมาะสมสูงสุดผ่านวิธีการ Tournament Selection และดำเนินการผสมสมการเพื่อพัฒนา (Crossover) กระบวนการผสมพันธุ์ (Mutation) ในอัลกอริทึม Genetic Programming (GP) เป็นขั้นตอนที่สมการที่มีค่าความเหมาะสม (Fitness) สูงสุดในแต่ละรุ่น (Generation) ถูกคัดเลือกเพื่อทำการผสมพันธุ์ สมการทั้งสองที่ถูกคัดเลือกจะถูกรวมกันผ่านกระบวนการ Crossover เพื่อสร้างสมการใหม่ที่มีลักษณะทางคณิตศาสตร์ที่รวมเอาลักษณะที่ดีของทั้งสองสมการต้นแบบ การที่นำสมการมารวมกันนี้ช่วยเพิ่มความสามารถหาสมการที่ดีกว่าการกลายพันธุ์ (Mutation) การสุ่มเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบางส่วน of สมการเพื่อเพิ่มความหลากหลายสมการ (Population) และช่วยลดความเสี่ยงค่าความเหมาะสม (Local Optima) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปแบบการเปลี่ยนเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์ (เช่น บวกเป็นลบ) หรือค่าคงที่ในสมการ กระบวนการนี้ดำเนินต่อเนื่องจนกว่าจะได้สมการที่มีค่าความเหมาะสมสูงสุดตามเกณฑ์ที่กำหนด เมื่อได้สมการที่เหมาะสมที่สุดจาก GA สมการดังกล่าวจะถูกนำไปทดสอบด้วยชุด Testing Data โดยประเมินความสามารถในการคาดการณ์เพิ่มเติมผ่านตัวชี้วัด ได้แก่ Coefficient of Determination (R^2) ค่า R^2 นั้น ใช้ประเมินว่าสมการที่ได้สามารถอธิบายแนวโน้มของข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่เลือกได้ดีเพียงใด ซึ่งค่ายิ่งเข้าใกล้ 1 หมายถึง สมการสามารถอธิบายข้อมูลได้ดีนอกเหนือจากตัวชี้วัดทั้งสองข้างต้นแล้ว ยังมีตัวชี้วัดอื่น ๆ ที่สามารถใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของสมการได้ ได้แก่ Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) และ Absolute Relative Error (ARE) ซึ่งแต่ละตัวมีบทบาทในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของสมการที่แตกต่างกันไปค่า Root Mean Squared Error (RMSE) เป็นตัวชี้วัดที่มีลักษณะคล้ายกับค่า MSE แต่มีความแตกต่างตรงที่ค่า RMSE เป็นรากที่สองของค่า MSE ทำให้ค่าที่ได้มีหน่วยเดียวกับข้อมูลต้นฉบับ ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบกับค่าจริงได้โดยตรง ค่า RMSE ที่ต่ำแสดงให้เห็นว่าสมการสามารถพยากรณ์ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงได้มากขึ้น และยังช่วยให้เห็นภาพของความคลาดเคลื่อนที่อาจมีการกระจายตัวอยู่ในข้อมูลได้ดีกว่า MSE เพราะค่า RMSE ไม่ถูกขยายโดยการยกกำลังสองเหมือนกับ MSE ถัดมาเป็น Mean Absolute Error (MAE) ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่พยากรณ์ได้กับค่าจริง โดยใช้ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์แทนการยกกำลังสองของค่าคลาดเคลื่อน ซึ่งช่วยให้สามารถตีความได้

ง่ายขึ้น ค่า MAE ที่ต่ำหมายความว่าสมการสามารถพยากรณ์ค่าได้ใกล้เคียงกับค่าจริงโดยเฉลี่ย และเหมาะสำหรับการประเมินข้อผิดพลาดโดยรวมของแบบจำลอง ในขณะที่ Absolute Relative Error (ARE) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้เปรียบเทียบข้อผิดพลาดในเชิงเปอร์เซ็นต์ โดยคำนวณจากสัดส่วนของค่าคลาดเคลื่อนต่อค่าจริง ซึ่งช่วยให้เห็นว่าความผิดพลาดของสมการมีมากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับค่าจริงของข้อมูล ในกรณีที่ค่าจริงมีช่วงกว้างหรือมีค่าที่แตกต่างกันมาก ค่า ARE จะช่วยให้สามารถเข้าใจความถูกต้องของสมการได้ดียิ่งขึ้น เพราะมันคำนวณในเชิงสัมพัทธ์แทนที่จะเป็นค่าความผิดพลาดแบบสัมบูรณ์ โดยสรุปตัวชี้วัดแต่ละตัวมีจุดเด่นที่ต่างกัน ค่า MSE และ RMSE จะช่วยบอกถึงขนาดของข้อผิดพลาดโดยรวม โดย RMSE จะมีความชัดเจนมากขึ้นในการเปรียบเทียบกับค่าจริง ค่า MAE จะช่วยให้เข้าใจข้อผิดพลาดเฉลี่ยในลักษณะที่ไม่ถูกขยายโดยการยกกำลังสอง ส่วนค่า ARE จะช่วยให้เห็นข้อผิดพลาดในเชิงเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าจริง ทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของสมการได้จากหลายมิติ และสุดท้าย ค่า R^2 จะช่วยให้เห็นว่าสมการสามารถอธิบายแนวโน้มของข้อมูลได้ดีเพียงใด ดังนั้นในการคัดเลือกสมการที่ดีที่สุด การพิจารณาค่า RMSE, MAE และ ARE ร่วมกันจะช่วยให้ได้ภาพรวมของข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในขณะที่ค่า R^2 จะช่วยบ่งบอกว่าสมการสามารถอธิบายข้อมูลได้ดีแค่ไหน การเลือกสมการที่มีค่า RMSE, MAE และ ARE ต่ำที่สุด ในขณะที่มีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากที่สุด จะเป็นแนวทางที่ช่วยให้มั่นใจว่าสมการที่ได้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการพยากรณ์ค่าที่ต้องการ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.1)$$

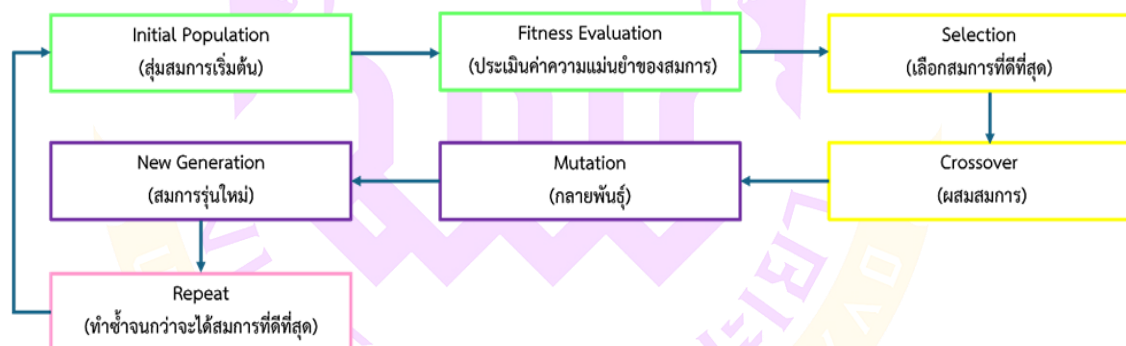
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3.3)$$

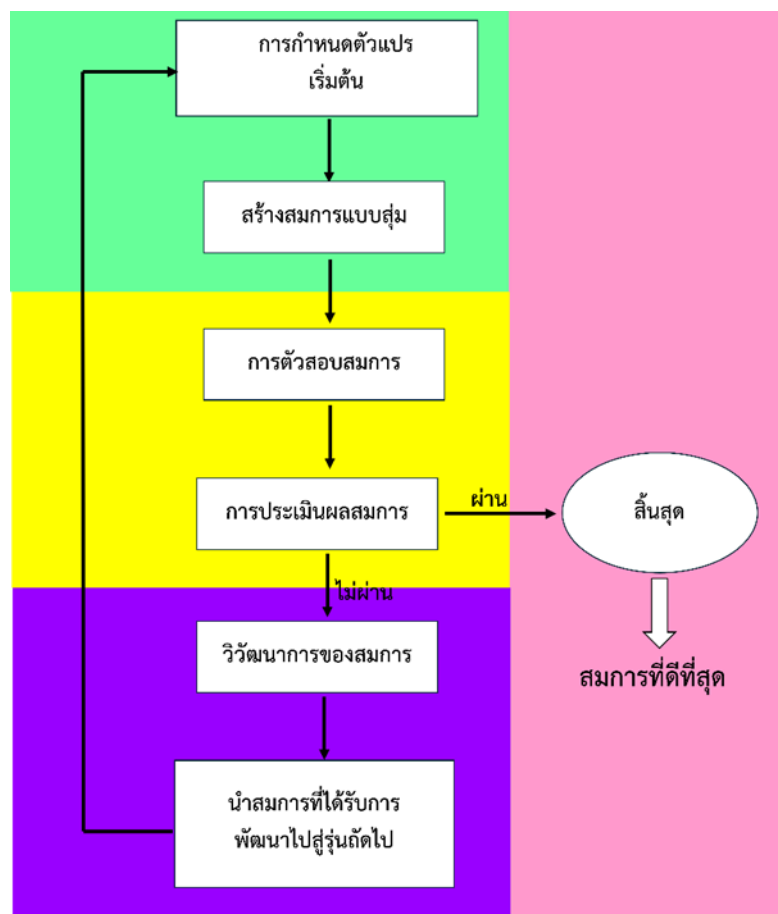
$$ARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ y_i คือ ค่าจริงของข้อมูล $\hat{y}_i$ คือ ค่าที่โมเดลพยากรณ์ $\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริง และ n คือ จำนวนข้อมูล การนำเสนอผลในลักษณะนี้ช่วยให้เข้าใจถึงความแม่นยำของสมการ และความสามารถในการคาดการณ์ในบริบทต่าง ๆ การเลือกใช้ Genetic Programming (GP) ในงานวิจัยนี้มีเหตุผลสำคัญคือ GP สามารถจัดการกับความสัมพันธ์เชิงสัญลักษณ์ที่ซับซ้อนได้ดี โดยไม่ต้องกำหนดรูปแบบสมการล่วงหน้า อีกทั้งยังให้ความสำคัญกับการนำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟ เช่น กราฟเปรียบเทียบค่าพยากรณ์กับค่าจริง (Prediction vs. True Value Plot) กราฟนี้ มีองค์ประกอบสำคัญอยู่หลายส่วน ส่วนแรกคือ เส้นค่าจริง (True Values) ซึ่งแสดงค่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริงจากข้อมูลต้นฉบับ โดยมักถูกวาดเป็นเส้นประหรือลักษณะที่แตกต่างเพื่อให้สังเกตได้ง่าย ส่วนที่สองคือ

เส้นค่าพยากรณ์ของโมเดล (Predicted Values) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากสมการหรือแบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์ข้อมูล นอกจากนี้ ในกราฟยังมีการแบ่งข้อมูลออกเป็น ชุดข้อมูลฝึกสอน (Training Data) และชุดข้อมูลทดสอบ (Test Data) เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของโมเดลได้ทั้งบนข้อมูลที่ใช้ฝึกและข้อมูลใหม่ที่โมเดลไม่เคยเห็นมาก่อน การวิเคราะห์กราฟนี้สามารถช่วยให้เราเข้าใจพฤติกรรมของโมเดลได้ดียิ่งขึ้น หากค่าพยากรณ์มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าจริงมาก นั่นแสดงว่าโมเดลสามารถจับแนวโน้มของข้อมูลได้ดีและมีความแม่นยำสูง ในทางกลับกัน หากค่าพยากรณ์กระจายตัวมากเมื่อเทียบกับค่าจริง หรือมีข้อผิดพลาดที่สูงในบางช่วงของข้อมูล อาจบ่งชี้ว่าโมเดลยังมีข้อบกพร่อง เช่น อาจเกิดปัญหา Overfitting ซึ่งหมายถึงการที่โมเดลสามารถพยากรณ์ได้ดีบนข้อมูลฝึกสอน แต่กลับทำงานได้ไม่ดีบนข้อมูลทดสอบ หรือปัญหา Underfitting ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อโมเดลไม่สามารถจับความสัมพันธ์ที่แท้จริงของข้อมูลได้ ทำให้ค่าพยากรณ์ผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญกราฟ และการกระจายตัว (Scatter Plot) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริง และค่าที่คาดการณ์เพื่อประเมินความสอดคล้องของข้อมูล และช่วยให้มองเห็นความสอดคล้องและแนวโน้มของข้อมูลได้ชัดเจน สมการที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทต่าง ๆ อย่างเหมาะสม เช่น การออกแบบโครงสร้างหรือการพัฒนากระบวนการควบคุมการไหลของดินโคลน



ภาพ 42 ขั้นตอนการทำงานของ Genetic Programming (GP)



ภาพ 43 ขั้นตอนการสร้างสมการจาก Symbolic Regression

บทที่ 4

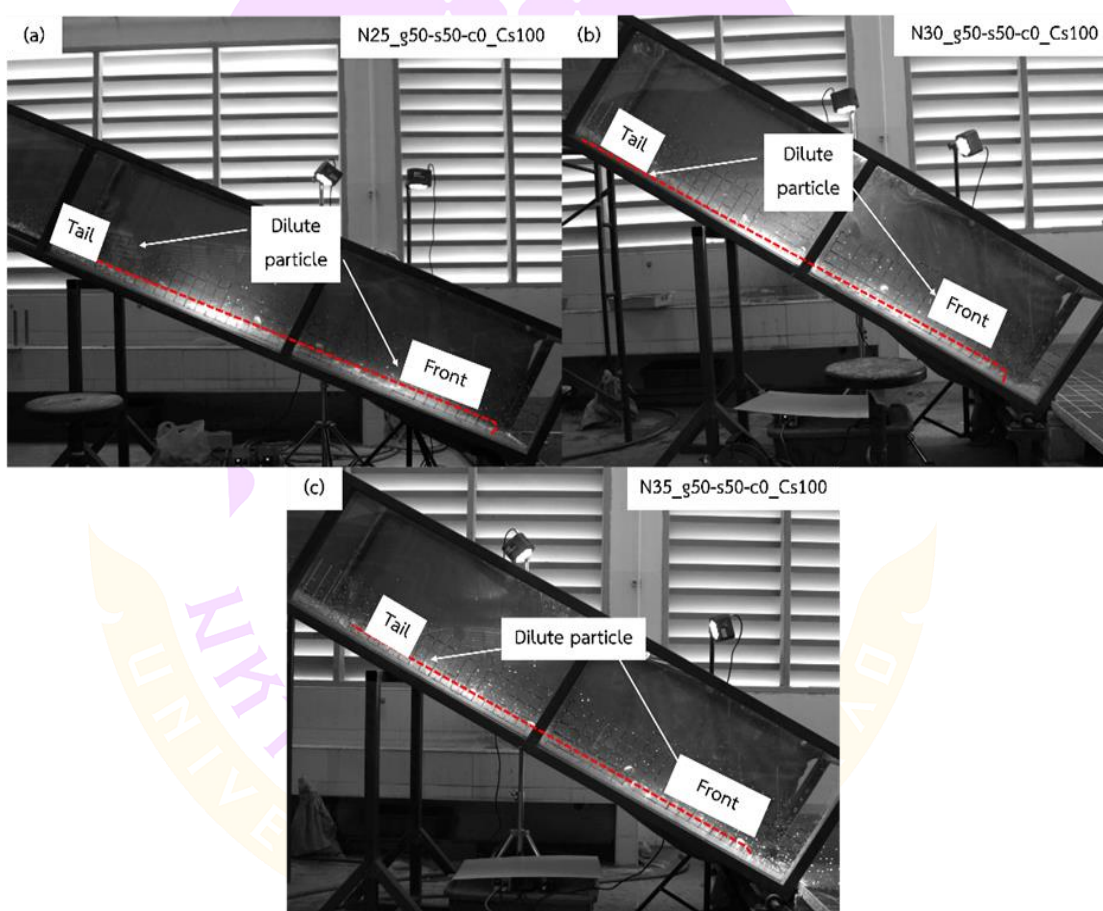
ผลการทดลอง

การแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแข็ง

ในขั้นตอนแรกของการศึกษามีการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแข็งโดยพิจารณาองค์ประกอบหลักที่มีผลต่อการไหล เช่น ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ (Flow Behavior) รูปแบบการสะสมตัว (Deposition morphology) และการคัดแยกขนาดอนุภาค (Particle segregation) โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นกรวดและทราย (Stony Debris Flow หรือ Coarse Grained Debris Flow) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการไหลที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ผสมอยู่ การทดลองนี้ดำเนินการโดยปล่อยวัสดุเม็ดแข็งให้ไหลลงมาตามรางลาดเอียงที่มีมุม $\theta = 25^\circ, 30^\circ$ และ 35° ซึ่งถูกระบุเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของการไหล โดยมีส่วนผสมของวัสดุรวมกัน 30 kg ประกอบด้วยกรวด (g) และทราย (s) ในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก โดยไม่มีดินเหนียว และน้ำ (Cs100-0)

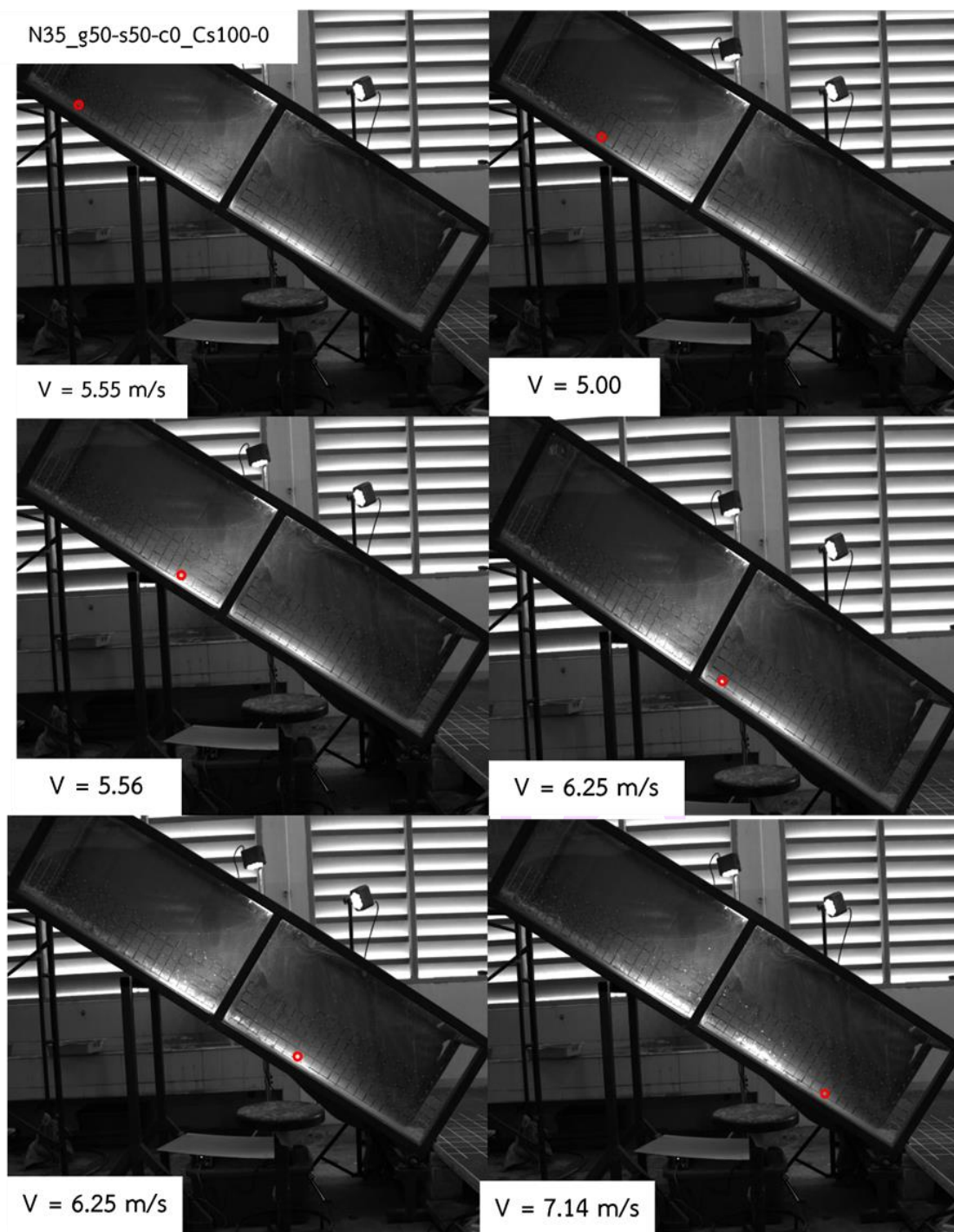
ลักษณะของการไหล และการคัดแยกขนาดอนุภาคเมื่อวัสดุไหลลงมาตามรางจะเกิดปรากฏการณ์การคัดแยกอนุภาคอย่างเห็นได้ชัด โดยเม็ดกรวดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะสะสมตัวอยู่บริเวณด้านหน้าและใจกลางของการไหล ในขณะที่ทรายที่มีขนาดเล็กกว่าจะอยู่ที่ชั้นล่างของการไหล ในกรณีที่อัตราส่วนของกรวดและทรายเท่ากัน (g50_s50) พบว่า มีแนวโน้มที่กรวดจะกระจุกตัวกระจายไปยังบริเวณด้านหน้าของการไหลมากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้ใน ภาพ 44 นอกจากนี้ในกรณีที่ปริมาณทรายมากกว่ากรวด (g40-s60) จะพบว่า อนุภาคของทรายบางส่วนกระเด็นออกจากกลุ่มการไหล (Dilute Particles) ซึ่งสามารถมองเห็นเป็นจุดสีขาวที่แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคแยกออกจากกลุ่มหลักของการไหลการวัดความยาว และความสูงของการไหลเมื่อวัดความยาวของการไหล (L) พบว่ามีค่าประมาณ 2.10-2.40 m โดยที่ มุมลาดเอียงต่ำ $\theta = 25^\circ$ ในการศึกษาความยาวที่วัดได้จะมีมากกว่ามุมลาดเอียงที่ชันกว่าเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแข็งอนุภาคของกรวด และทรายจะไหลเรียงกันลงมาทำให้ความสูงที่วัดได้จะเป็นความสูงที่วัดจากของกรวดที่เรียงตัวบริเวณด้านหน้าของการไหลโดยที่มุมลาดชัน $\theta = 25^\circ$ จะมีค่าความสูง $h = 0.035$ m น้อยกว่ามุมลาดเอียงของราง ที่ชันกว่า $h = 0.04-0.055$ สำหรับมุม $\theta = 30^\circ$ และ $\theta = 35^\circ$ การเพิ่มขึ้นของความสูงนี้เกิดจากการไหลของวัสดุที่หนาแน่นขึ้น และการสะสมตัวของอนุภาคกรวดที่อยู่ด้านหน้าของการไหลอัตราส่วนรูปร่างของการไหล ค่าที่ใช้บ่งบอกลักษณะของการไหล คือ อัตราส่วนรูปร่างของการไหล (Flow Shape ε) ซึ่งคำนวณจาก: $\varepsilon = h / L$ ค่าของ ε ที่ได้จากการทดลองนี้อยู่ระหว่าง 0.0125-0.032 โดยความหมาย ดังนี้ ε สูง หมายถึง การไหลที่มีลักษณะ สั้นและหนา ซึ่งวัสดุจะสะสมตัวเร็วขึ้น มีแรงกระแทกสูงที่ด้านหน้าของการไหล ε ต่ำ หมายถึง การไหลที่มีลักษณะยาวและบาง Ishikawa, et al.

(2010); Ashwood & Hungr (2016) ซึ่งวัสดุสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่า ลักษณะนี้มีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างป้องกัน เช่น กำแพงกันดินถล่มหรือระบบระบายน้ำในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิด Debris Flow โดยค่าที่สูงกว่าอาจต้องมีการเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างป้องกัน เนื่องจากแรงกระแทกที่มากขึ้นจากข้อมูลข้างต้น จะเห็นได้ว่าการศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งมีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัสดุ รวมถึงสภาพแวดล้อมของการไหล ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์และออกแบบระบบป้องกันภัยพิบัติที่เกี่ยวข้องกับการไหลของดินโคลนและเศษหินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

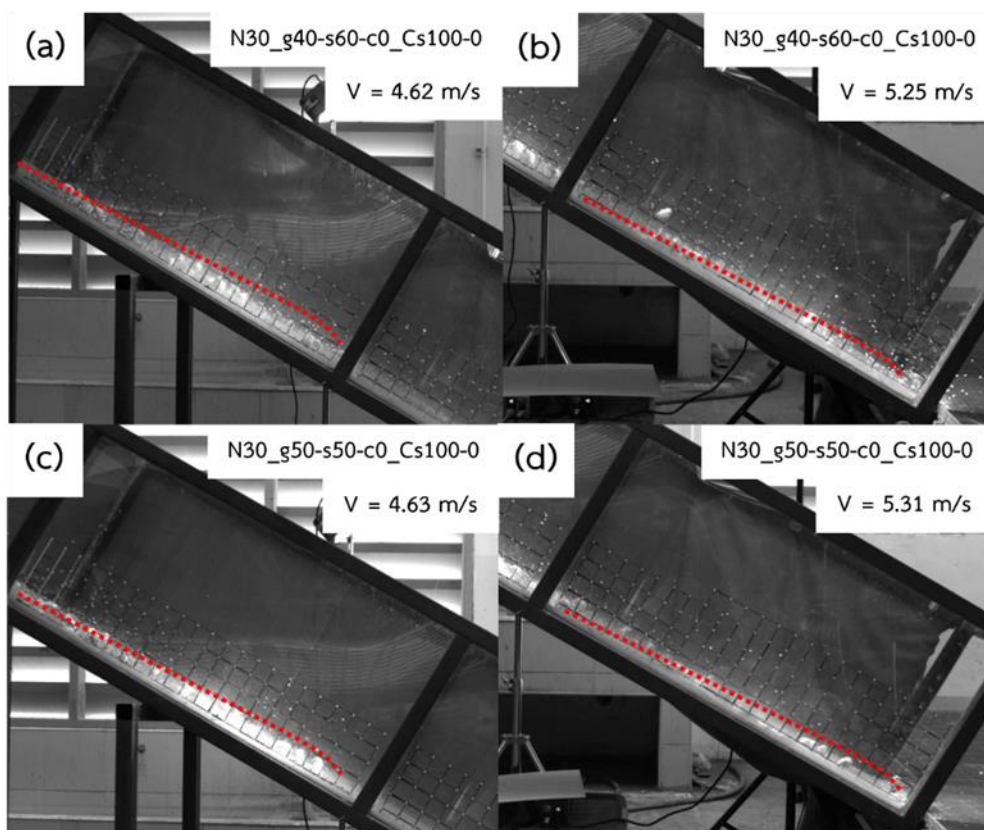


ภาพ 44 ตัวอย่างการไหลวัสดุเม็ดแห้ง (a) N25_g40_s60_c0_Cs100-0

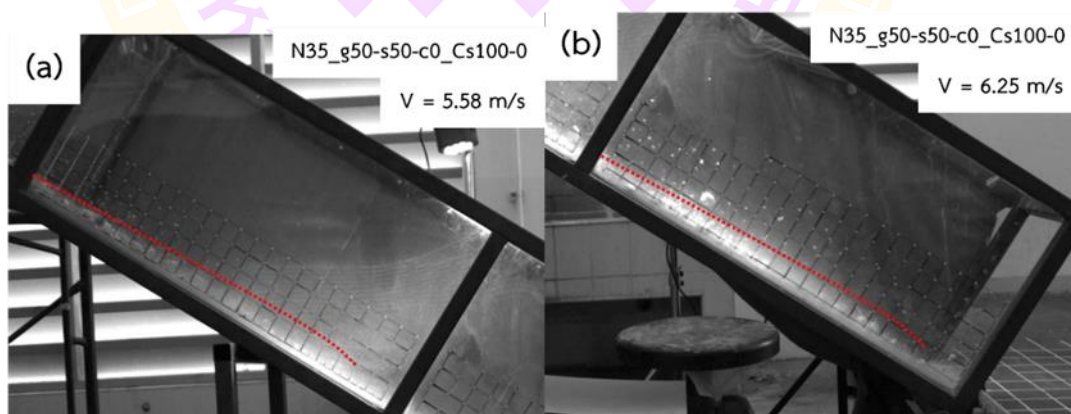
(b) N30_g50_s50_c0_Cs100-0 และ(c) N35_g50_s50_c0_Cs100-0



ภาพ 45 ตัวอย่างของการหาความเร็วของการไหลวัสดุเม็ดแห้ง (วงกลมสีแดง) ณ ตำแหน่งใด ๆ
จากการทดลอง N35_g50_s50_c0_Cs100-0

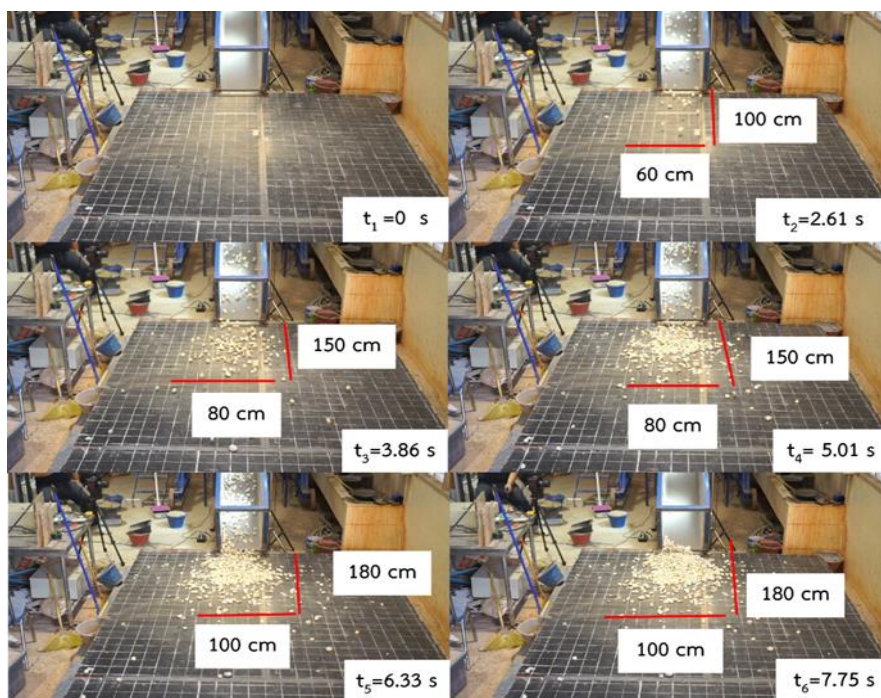


ภาพ 46 ความเร็วของการไหลวัสดุเม็ดแห้งที่ส่วนผสมแตกต่างกัน ณ ตำแหน่งระยะทางแตกต่างกัน (a) และ (b) N30_g40_s60_c0-Cs100-0 (c) และ (d) N30_g50_s50_c0-Cs100-0

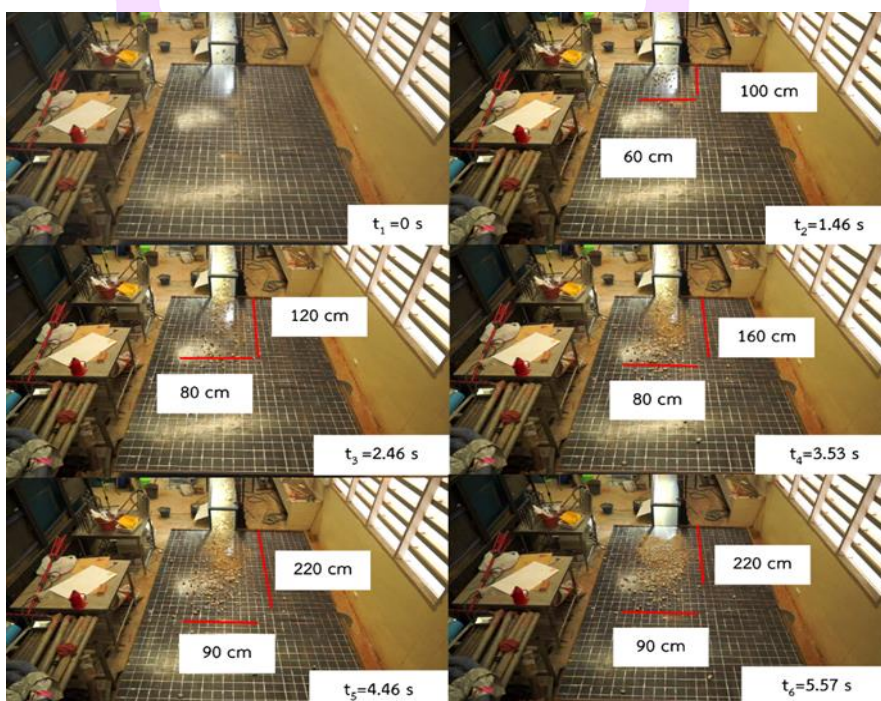


ภาพ 47 ความเร็วของการไหลวัสดุเม็ดแห้งของการทดสอบ N35_g40_s60_c0-Cs100-0

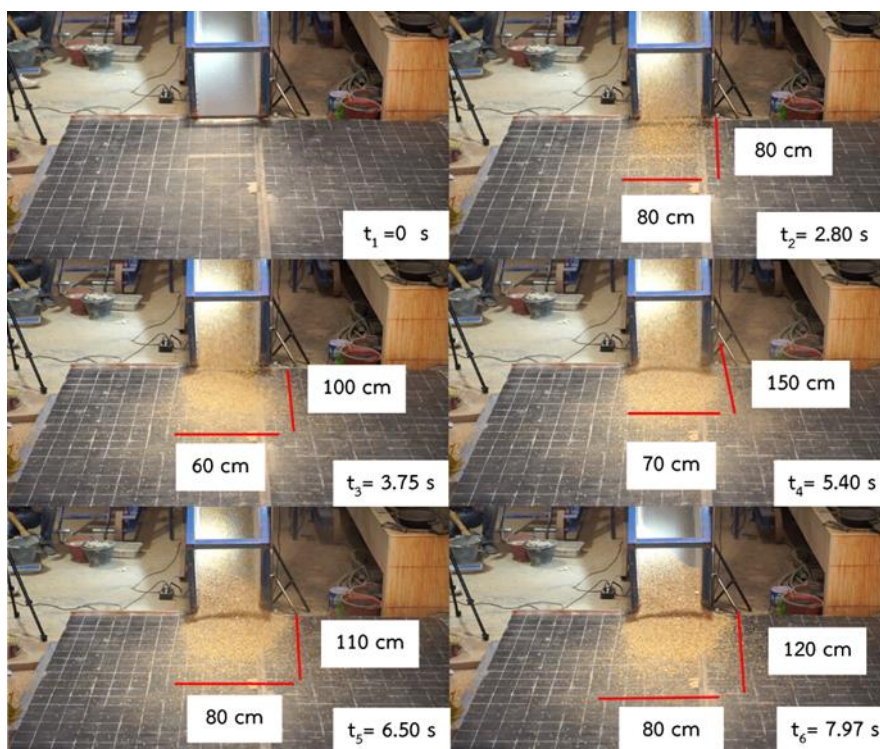
ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการอธิบายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการแผ่และการทับถมของวัสดุทดลองในมุมลาดเอียง 25° 30° และ 35° องศา โดยพิจารณาส่วนผสมของวัสดุที่ประกอบด้วย กรวด (g) และทราย (s) ในสัดส่วนที่ต่างกัน และไม่มีส่วนผสมของดินเหนียว (c) และน้ำ (Cs₁₀₀) โดยบันทึกลักษณะของการแผ่และทับถมเมื่อวัสดุไหลผ่านปลายรางลงบนแผ่นไม้ที่วางในแนวราบจากการสังเกตลักษณะของการแผ่และทับถมในแต่ละการทดลองยกตัวอย่างเช่น $\theta = 25^\circ$ ในกรณีที่มีกรวดล้วน (N25_g100_s0_c0_Cs100-0) ภาพ 48 เริ่มต้นสังเกตที่เวลา $t_1 = 0$ s เมื่อส่วนผสมไหลเคลื่อนผ่านปลายรางจะเกิดลักษณะแผ่กระจายบนแผ่นไม้ที่วางในแนวระนาบ จะมีการกระจายตัวของอนุภาคกรวดที่บริเวณด้านหน้าของการแผ่ค่อนข้างชัดเจน และรูปทรงของการแผ่มีลักษณะเป็นกระจุก มีขนาด กว้าง x ยาว (100 cm x 180 cm) และมีแนวโน้มที่อนุภาคของกรวดด้านหน้าจะหยุดนิ่งก่อน ขณะที่อนุภาคด้านหลังยังคงไหลตามมาทับถมจนเกิดการรวมตัวเป็นกองวัสดุจนหยุดนิ่ง $t_6 = 7.75$ s สำหรับกรณีที่มีสัดส่วนกรวด และทราย อย่างละ 50% กรณี (N25_g50_s50_c0_Cs100-0) ภาพ 49 จะสังเกตเห็นลักษณะการไหลที่มีลักษณะกระจัดกระจาย โดยอนุภาคกรวดที่อยู่บริเวณด้านหน้าของการแผ่ยังคงมีการกระจายตัวในลักษณะที่คล้ายกับกรณีแรก แต่มีระยะทางในการแผ่ที่ยาวกว่าเล็กน้อย (90 cm x 200 cm) นอกจากนี้หลังจากที่อนุภาคกรวดเริ่มหยุดนิ่งลงแล้ว ยังคงมีอนุภาคทรายที่ไหลต่อเนื่องลงมาเพิ่มเติมและสะสมบริเวณด้านล่างและท้ายของพื้นที่การแผ่ ส่วนในกรณีที่เป็นส่วนผสมทรายล้วน (N25_g0_s100_c0_Cs100-0) ภาพ 50 ลักษณะการแผ่ที่สังเกตได้จะเป็นลักษณะของการทับถมในพื้นที่ที่แคบ โดยมีระยะการแผ่สั้นที่สุด (80 cm x 120 cm) อนุภาคทรายที่ละเอียดมีแนวโน้มที่จะยึดเกาะกันทำให้เกิดลักษณะการทับถมที่ค่อนข้างหนาแน่นบริเวณกลางและด้านท้ายของพื้นที่การแผ่ นอกจากนี้ยังพบว่าการไหลมีลักษณะช้าลงอย่างชัดเจน จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของกรวดและทรายส่งผลอย่างชัดเจนต่อรูปแบบลักษณะของการแผ่และการทับถมของวัสดุ โดยกรณีที่มีกรวดล้วน (N25_g100_s0_c0_Cs100-0) และทรายล้วน (N25_g0_s100_c0_Cs100-0) แสดงให้เห็นความแตกต่างของการแผ่และการทับถมที่เด่นชัด ทั้งในแง่พื้นที่กระจายตัวและความเร็วในการไหล ขณะที่ส่วนผสมระหว่างกรวด และทรายในอัตราส่วนที่สมดุล (N25_g50_s50_c0_Cs100-0) มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ผสมผสานระหว่างคุณสมบัติทั้งสองวัสดุทำให้การแผ่ และทับถมมีลักษณะที่กว้างยาวและมีความต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้เกิดรูปแบบที่เป็นวงรียาวและมีลักษณะคล้ายรูปพัด (Alluvial Fan) ที่มีความชัดเจนในแง่ของการกระจายตัวและการทับถมของวัสดุลักษณะการแผ่ของวัสดุจากบริเวณด้านหน้าจนถึงด้านท้าย จะพบว่ามีอนุภาคกรวดวางตัวในลักษณะกระจายตัวอยู่เหนือชั้นทรายที่อยู่ด้านล่าง ขณะที่บริเวณส่วนท้ายของการแผ่จะมีลักษณะเป็นชั้นของอนุภาคทรายเป็นส่วนใหญ่ และมักอยู่ในบริเวณใกล้กับปลายรางหรือบริเวณทางออกของวัสดุทดลอง



ภาพ 48 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N25_g100_s0_c0_Cs100-0

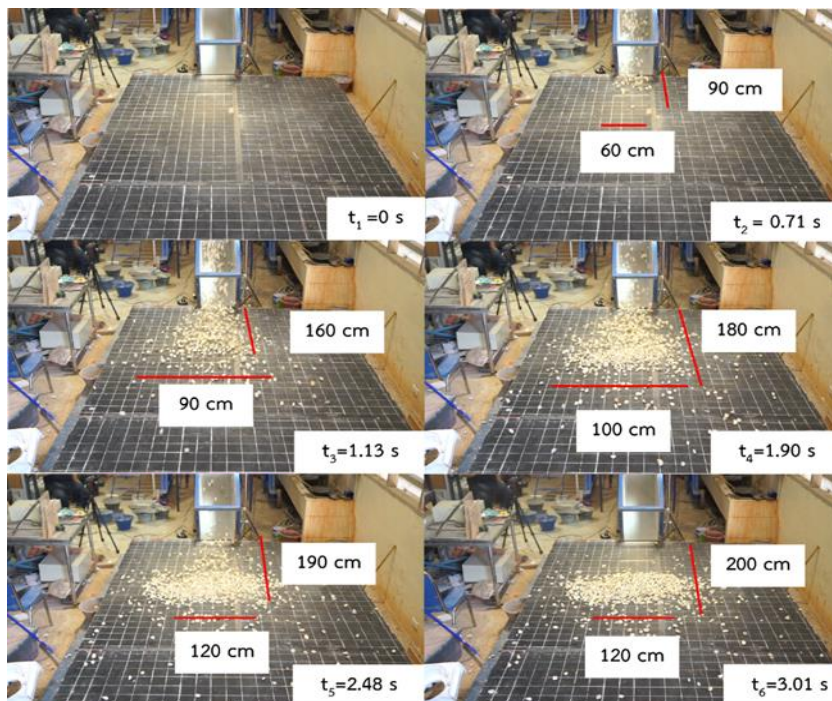


ภาพ 49 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N25_g50_s50_c0_Cs100-0

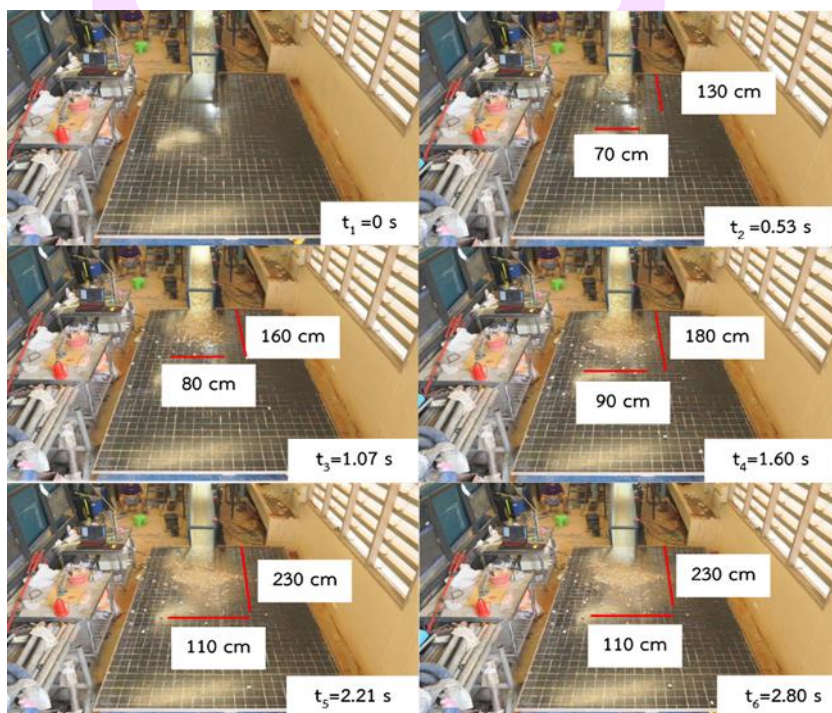


ภาพ 50 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลา ต่าง ๆ ของการทดลอง N25_g0_s100_c0_Cs100-0

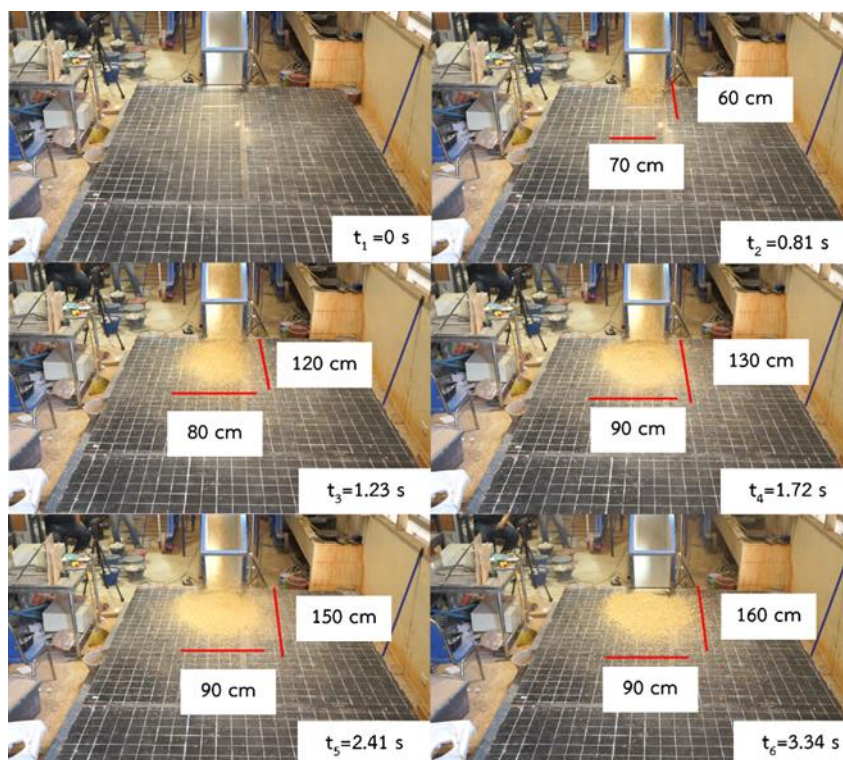
เมื่อเพิ่มมุมลาดเอียงของรางเป็น $\theta = 30^\circ$ โดยสังเกตการแผ่และการทับถมของวัสดุที่มีส่วนผสมแตกต่างกันสำหรับมุมลาดเอียง 30° กรณีที่มีกรวดล้น ภาพ 51 N30_g100_s0_c0_Cs100-0 เมื่อส่วนผสมเริ่มไหลจากรางที่เวลา $t_1 = 0$ s จะเกิดการแผ่กระจายออกเป็นบริเวณกว้างบนแผ่นไม้ที่วางในแนวราบ สังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าอนุภาคกรวดมีการกระจายตัวในบริเวณส่วนหน้าของพื้นที่แผ่ก่อน จากนั้นจะเริ่มหยุดนิ่งและเกิดการทับถมบริเวณส่วนกลางและส่วนท้ายอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งวัสดุหยุดนิ่งอย่างสมบูรณ์ที่เวลา $t_6 = 3.01$ s กรณีส่วนผสมกรวดและทรายอย่างละ 50% ภาพ 52 N30_g50_s50_c0_Cs100-0 วัสดุมีลักษณะการไหลและแผ่กระจายอย่างต่อเนื่องมากขึ้น พบว่าอนุภาคทรายแทรกตัวในช่องว่างของกรวดส่งผลให้พื้นที่การแผ่เพิ่มขึ้น และการทับถมมีลักษณะเรียบสม่ำเสมอว่าเมื่อเทียบกับกรณีกรวดล้น ขณะที่กรณีทรายล้น ภาพ 53 N30_g0_s100_c0_Cs100-0 พบว่า พื้นที่การแผ่ลดลงอนุภาคทรายมีการเกาะกลุ่มกันเป็นกระจุก มีลักษณะการแผ่ที่หนาแน่นและเคลื่อนที่ช้ากว่ากรณีอื่นอย่างเห็นได้ชัด



ภาพ 51 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g100_s0_c0_Cs100-0



ภาพ 52 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g50_s50_c0_Cs100-0

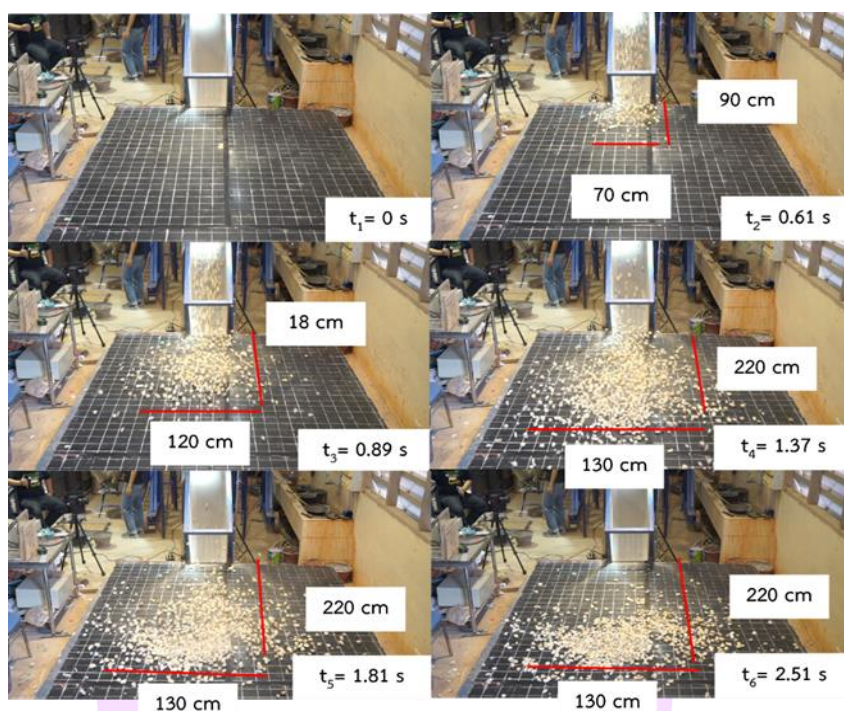


ภาพ 53 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g0_s100_c0_Cs100-0

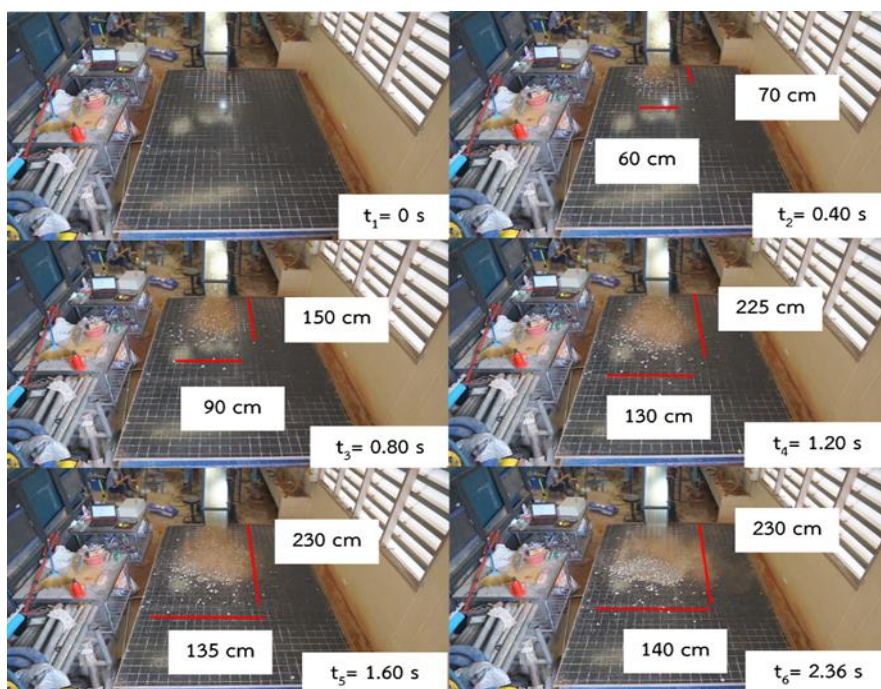
เมื่อเปรียบเทียบกับมุมลาดเอียงที่เพิ่มขึ้นเป็น 35° กรณีวัสดุที่เป็นกรวดล้วน ภาพ 54 N35_g100_s0_c0_Cs100-0 พบว่า พื้นที่การแผ่กว้างขึ้นอย่างชัดเจน โดยอนุภาครวดเคลื่อนที่เร็วและกระจายตัวไปได้ไกลกว่าเดิม ส่งผลให้การทับถมมีลักษณะที่กว้างขึ้น ในส่วนของกรณีผสมกรวดและทราย อย่างละ 50% ภาพ 55 N35_g50_s50_c0_Cs100-0 พบว่า พื้นที่แผ่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยอนุภาครวดเคลื่อนที่ไปไกลและเวลาการไหลเร็วขึ้น ทรายที่ไหลตามมาสามารถแทรกตัวและกระจายตัวในลักษณะเป็นพัด (Alluvial Fan) อย่างชัดเจน ทำให้รูปแบบการแผ่กว้าง และยาวกว่าที่มุม 35° ขณะที่กรณีส่วนผสมทรายล้วน ภาพ 56 N35_g0_s100_c0_Cs100-0 พบว่า การแผ่และทับถมของวัสดุเพิ่มขึ้น และมีลักษณะการกระจายตัวในรูปแบบพัดที่ชัดเจนยิ่งขึ้น พื้นที่การแผ่มีการขยายตัวออกไปทางด้านข้างมากขึ้น และมีลักษณะบางกว่าเมื่อเทียบกับมุม 30° แต่ยังคงมีลักษณะการทับถมของทรายที่หนาแน่นบริเวณตรงกลางและท้ายของพื้นที่แผ่เช่นเดิม จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของมุมลาดเอียงจาก 30° เป็น 35° มีผลอย่างชัดเจนต่อรูปแบบของการแผ่และการทับถมของวัสดุ โดยทำให้การแผ่มีพื้นที่กว้างขึ้นระยะเวลาการไหลลดลง และส่งผลต่อการทับถมให้มีลักษณะการกระจายตัวที่ชัดเจนขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในทุกกรณีเริ่มเคลื่อนผ่านปลายราง พบว่า

อนุภาครวดมีการกระจายตัวมากขึ้นจากเดิมที่มุม 25° และเคลื่อนที่ลงบนแผ่นไม้ที่วางในแนวราบด้วยความเร็วที่สูงขึ้น เนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่มากขึ้น ทำให้แรงขับเคลื่อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะการแผ่ขยายออกไปมากขึ้น โดยสามารถวัดขนาดพื้นที่การแผ่ได้เท่ากับ $120 \text{ cm} \times 220 \text{ cm}$ ซึ่งกว้างและยาวกว่าที่มุม 25° นอกจากนี้ยังพบว่า อนุภาครวดด้านหน้าหยุดนิ่งก่อน ขณะที่อนุภาคที่อยู่ด้านหลังยังคงไหลเข้ามาทับถมต่อไปจนก่อตัวเป็นกองวัสดุ ซึ่งใช้เวลาหยุดนิ่งที่ $t_6 = 6.8 \text{ s}$ โดยรวมแล้วการแผ่ของวัสดุมีลักษณะกว้างขึ้นและไหลได้เร็วขึ้น กรณีที่มีสัดส่วนรวดและทรายอย่างละ 50 % N30_g50_s50_c0_Cs100-0 เมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของรวด และทรายเท่ากันพบว่า การแผ่ของวัสดุเกิดขึ้นในลักษณะที่มีการกระจายตัวมากขึ้น โดยอนุภาครวดยังคงมีการกระจายตัวที่บริเวณด้านหน้าของการแผ่คล้ายกับกรณีแรก แต่มีระยะการแผ่ที่ยาวขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อย โดยมีขนาดพื้นที่การแผ่ ($110 \text{ cm} \times 230 \text{ cm}$) อนุภาคทรายที่ละเอียดมีแนวโน้มไหลต่อไปหลังจากที่กรวดหยุดนิ่ง ทำให้เกิดลักษณะการสะสมตัวบริเวณกลางและด้านท้ายของพื้นที่การแผ่เป็นลักษณะคล้ายพัดน้ำพา และใช้เวลาหยุดนิ่งที่ $t_6 = 2.80 \text{ s}$ ซึ่งเร็วขึ้นกว่าเดิม กรณีที่เป็นส่วนผสมทรายล้วน N30_g0_s100_c0_Cs100-0 ในมุม 30° พบว่า มีลักษณะของการทับถมที่แคบกว่าแบบผสมรวด และระยะทางของการแผ่ยาวขึ้นจากเดิม ($90 \text{ cm} \times 160 \text{ cm}$) ทรายมีแนวโน้มที่จะไหลไปไกลกว่ากรวด และใช้เวลาน้อยลงในการเคลื่อนที่ทั้งหมด โดยใช้เวลาหยุดนิ่งที่ $t_6 = 3.43 \text{ s}$ น้อยกว่ากรณีอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนาแน่นของกองวัสดุบริเวณท้ายการแผ่ลดลงเมื่อเทียบกับมุม 25° เนื่องจากทรายที่ละเอียดถูกแรงให้เคลื่อนที่ได้ไกลขึ้น กรณีมุมลาดเอียง 35° กรณี N35_g100_s0_c0_Cs100-0 ที่มุม 35° พบว่ากรวดมีการเคลื่อนที่ลงสู่พื้นด้วยความเร็วสูงขึ้น และกระจายตัวได้ไกลกว่ามุม 25° และ 30° โดยพื้นที่การแผ่ขยายไปอยู่ที่ ($130 \text{ cm} \times 220 \text{ cm}$) นอกจากนี้ยังพบว่า กรวดด้านหน้าหยุดนิ่งก่อน ขณะที่วัสดุด้านหลังยังคงไหลมาต่อเนื่องจนเกิดเป็นกองวัสดุที่ยาวกว่าเดิม โดยใช้เวลาหยุดนิ่งที่ $t_6 = 2.51 \text{ s}$ เร็วขึ้นจากมุม 30° กรณีที่มีสัดส่วนรวดและทราย N35_g50_s50_c0_Cs100-0 ในกรณีของวัสดุที่มีกรวดและทรายผสมกัน พบว่า การกระจายตัวมีลักษณะเป็นวงรียาวและมีลักษณะของการแผ่เป็นพัดน้ำพาที่กว้างมากขึ้น โดยขนาดของพื้นที่การแผ่ขยายออกไปที่ ($140 \text{ cm} \times 230 \text{ cm}$) และใช้เวลาหยุดนิ่งที่ $t_6 = 2.36 \text{ s}$ การแยกตัวของวัสดุระหว่างกรวดและทรายเริ่มเห็นได้ชัดขึ้น โดยอนุภาครวดจะกระจายตัวอยู่ด้านหน้าของการแผ่ ขณะที่อนุภาคทรายยังคงไหลต่อไปด้านท้าย กรณีที่เป็นส่วนผสมทรายล้วน N35_g0_s100_c0_Cs100-0 ที่มุม 35° พบว่า ทรายล้วนมีพฤติกรรมไหลที่รวดเร็วมากขึ้น และสามารถกระจายตัวออกไปได้มากที่สุด โดยพื้นที่ของการแผ่เพิ่มขึ้นเป็น $130 \text{ cm} \times 190 \text{ cm}$ ซึ่งกว้างขึ้นเมื่อเทียบกับมุม 30° พบว่า อนุภาคทรายที่ละเอียดจะเคลื่อนที่ไปด้านหน้า การเพิ่มมุมลาดเอียงของรางส่งผลให้วัสดุมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น ระยะทางของการแผ่ขยายเพิ่มขึ้น ลักษณะของกองวัสดุ

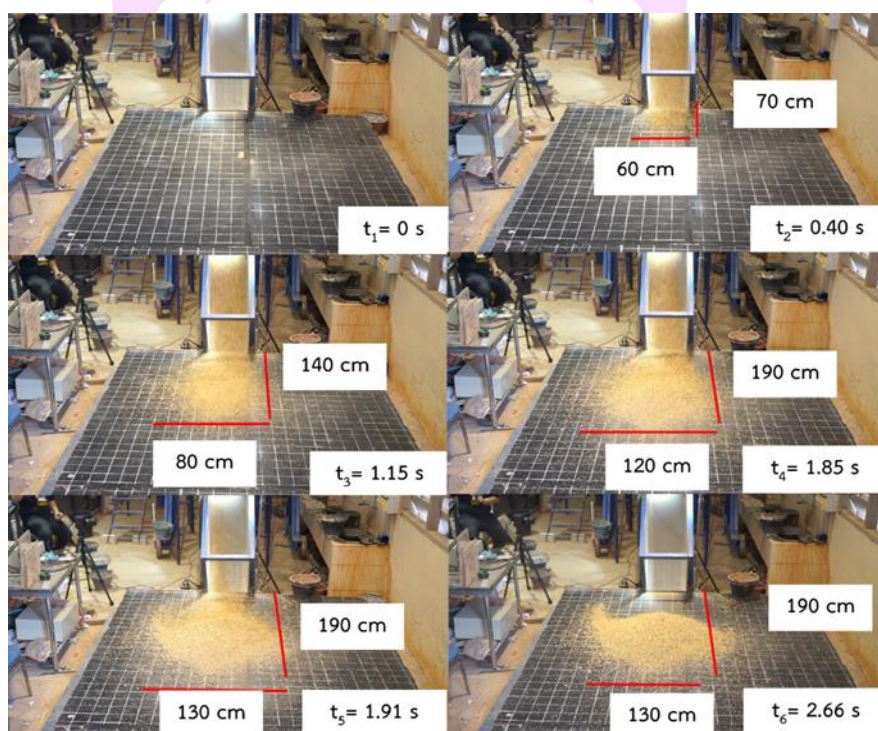
เปลี่ยนจากการทับถมในพื้นที่จำกัดไปเป็นการกระจายตัวที่กว้างขึ้น ทั้งนี้ผลของมุมลาดชันที่เพิ่มขึ้น มีอิทธิพลต่อรูปแบบของการไหลและการแผ่กระจายของวัสดุอย่างชัดเจน



ภาพ 54 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N35_g100_s0_c0_Cs100-0

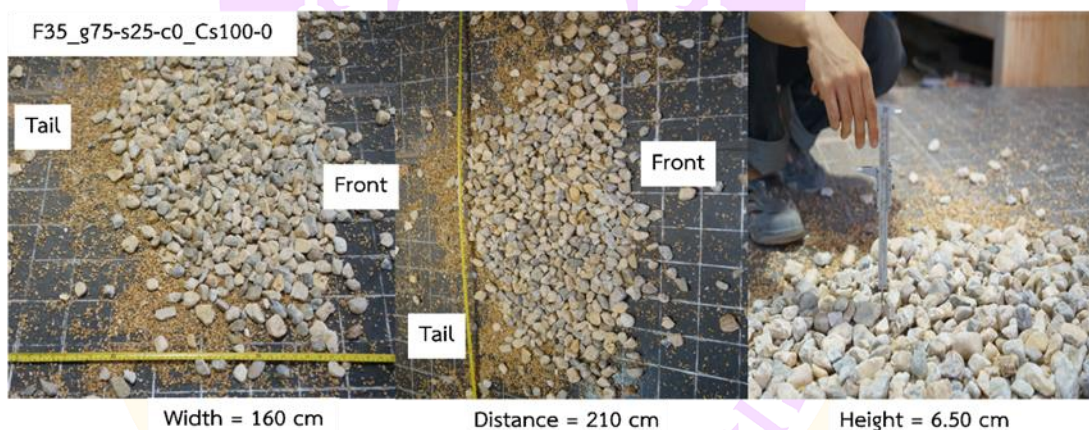


ภาพ 55 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N35_g50_s50_c0_Cs100-0



ภาพ 56 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N35_g0_s100_c0_Cs100-0

ภาพ 57 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของการทับถมวัสดุจากการทดลอง N30_g75_s25_c0_Cs100-0 ซึ่งสิ่งที่สังเกตเห็นอย่างชัดเจนคือ การจัดเรียงตัวของอนุภาคในลักษณะเป็นชั้น โดยชั้นบนสุดจะเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (กรวด) ตามด้วยชั้นของทรายที่ปรากฏชัดบริเวณด้านหน้าและตรงกลาง ส่วนบริเวณท้ายจะมีชั้นทรายที่มีอนุภาคขนาดเล็กเรียงตัวอย่างชัดเจนโดยรวมแล้ว ลักษณะการแผ่กระจายของวัสดุเม็ดแห้งจะมีรูปร่างคล้ายพัด นอกจากนี้ ลักษณะการทับถมที่มีกรวดเรียงอยู่ด้านบน และทรายชั้นล่างยังปรากฏเช่นเดียวกันในกรณีที่เพิ่มมุมลาดเอียงของรางน้ำเป็น $\theta = 30^\circ$ และ $\theta = 35^\circ$ ยกตัวอย่างเช่น $\theta = 30^\circ$ ภาพ 58 ซึ่งจะเห็นได้ว่าบริเวณปลายพื้นที่ทับถมจะก่อตัวเป็นชั้นทรายอย่างชัดเจน ขณะที่บริเวณด้านหน้าและด้านข้างจะพบการกระจายตัวของกรวดแม่น้ำขนาดใหญ่ และการกระจายตัวนี้จะมีวงกว้างมากขึ้นเมื่อเพิ่มมุมลาดเอียง ส่งผลให้ระยะทางในการแผ่กระจายและการทับถมของวัสดุเพิ่มขึ้นตามลำดับ ในขณะเดียวกัน หากพิจารณาระยะเวลาที่วัสดุเริ่มไหลออกจากปลายรางน้ำไปแผ่นบนพื้นระนาบ พบว่า เมื่อมุมลาดเอียงของรางน้ำเพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการแผ่กระจายจนวัสดุหยุดนิ่งจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจน



ภาพ 57 ลักษณะสัณฐานวิทยาของการทับถมหลังจากหยุดนิ่งของการทดลอง
N30_g75_s25_c0_Cs100-0



ภาพ 58 ลักษณะสัณฐานวิทยาของการทับถมหลังจากหยุดนิ่งของการทดลอง
N30_g75_s25_c0_Cs100-0

ในการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการนั้น จำเป็นต้องมีการกำหนดสมมติฐานและเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้การทดลองสามารถดำเนินการได้สะดวกและง่ายต่อการควบคุม ซึ่งข้อดีของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คือ สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด และสามารถทำซ้ำการทดลองเดิมได้หลายครั้ง อย่างไรก็ตามในการทดสอบทุกระดับ และทุกสเกลย่อมมีโอกาสที่จะเกิดข้อผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนขึ้นได้เสมอจากผลการทดลองดังแสดงในภาพ 59-ภาพ 61 ซึ่งเป็นตัวอย่างของการทดสอบการไหลผ่านและการทับถมที่มุมลาดเอียงของรางน้ำ $\theta = 25^\circ$ $\theta = 30^\circ$ และ $\theta = 35^\circ$ ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าถึงแม้ว่าเงื่อนไขเริ่มต้นของการทดสอบทุกครั้งจะถูกกำหนดให้เหมือนกันแล้วก็ตาม แต่ผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละครั้งยังคงปรากฏความแตกต่างกันอยู่บ้าง ซึ่งความแตกต่างหรือความคลาดเคลื่อนดังกล่าว อาจมีสาเหตุมาจากความผิดพลาดของผู้ทำการทดลอง หรือปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ภายในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลการทดลองแต่ละครั้งมาเปรียบเทียบกัน จะพบว่า ความแตกต่างที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นในแง่ของความเร็วในการไหลผ่านหรือขนาดของพื้นที่ที่เกิดการกองทับถม ล้วนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถยืนยันได้ถึงความสม่ำเสมอและต่อเนื่องของการทดลองนี้ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองทั้งสามมุมลาดเอียงมาเปรียบเทียบกันแล้ว พบว่า ความสูงของกองวัสดุที่ทับถมจะมีค่า ลดลง เมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันพื้นที่ในการแผ่กระจายของวัสดุจะมีค่า เพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของมุมลาดเอียง



N25_g50-s50-c0_Cs100-0	Test1	Test2	Test3
Width (cm)	84	130	100
Distance (cm)	150	195	180
Height (cm)	7.70	7.20	7.61
Deposit area (cm ²)	6,500	7,000	6,000

ภาพ 59 ผลการทดสอบการแผ่ และการทับถมของวัสดุเม็ดแห้งในแต่ละครั้ง
N25_g50_s50_c0_Cs100-0



N30_g40-s60-c0_Cs100-0	Test1	Test2	Test3
Width (cm)	92	130	120
Distance (cm)	176	210	220
Height (cm)	6.20	6.90	6.51
Deposit area (cm ²)	11,200	13,500	12,000

ภาพ 60 ผลการทดสอบการแผ่ และการทับถมของวัสดุเม็ดแห้งในแต่ละครั้ง
N30_g40_s60_c0_Cs100-0



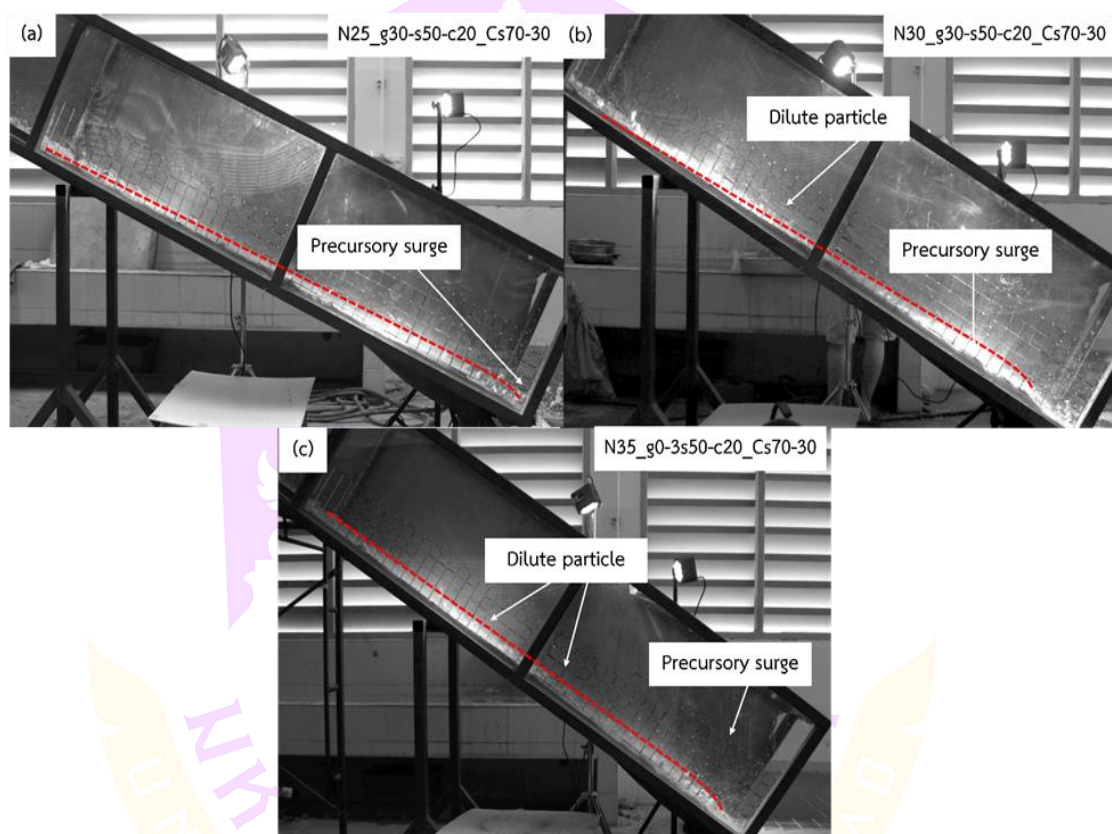
N35_g40-s60-c0_Cs100-0	Test1	Test2	Test3
Width (cm)	120	150	170
Distance (cm)	180	230	300
Height (cm)	5.20	5.33	5.90
Deposit area (cm ²)	12,000	15,000	14,000

ภาพ 61 ผลการทดสอบการแผ่ และการทับถมของวัสดุเม็ดแห้งในแต่ละครั้ง
N35_g40_s60_c0_Cs100-0

การแผ่กระจายของส่วนผสมแบบกึ่งของเหลว

โดยทั่วไปการเคลื่อนที่ของเศษหินเม็ดหยาบ (Stony Debris Flow หรือ Coarse-Grained Debris Flow) มักแสดงพฤติกรรมเป็นระลอกคลื่น (Surge) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการที่อนุภาคขนาดใหญ่ เช่น ก้อนหินหรือกรวด มักรวมตัวกันอย่างหนาแน่นบริเวณด้านหน้าของการไหล ขณะที่อนุภาคขนาดเล็ก เช่น ทรายและดินเหนียว จะกระจายตัวตามมาอยู่ด้านหลัง ลักษณะนี้สะท้อนให้เห็นถึงการแยกตัวของอนุภาคตามขนาดและความหนาแน่น ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการไหล ได้แก่ สัดส่วนของวัสดุมวลหยาบต่อมวลละเอียด ($g:s$) และปริมาณของแข็งในส่วนผสมโดยน้ำหนัก (Solid Concentration, C_s) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปริมาณน้ำที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม การไหล จากการทดสอบที่มุมลาดเอียง ภาพ 62 25° 30° และ 35° พบว่า การเปลี่ยนแปลงของมุมลาดเอียงมีผลต่อการกระจายตัวของวัสดุและระยะของการไหลที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาการทดสอบที่มุมลาดเอียง 25° (N25_g30_s50_c20_Cs75-25) จะพบว่า อนุภาคกรวดมักกระจุกตัวอยู่บริเวณด้านหน้า ขณะที่น้ำและดินเหนียวมีแนวโน้มที่จะไหลนำมาก่อน ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ (Precursory Surge) หรือการไหลนำของน้ำโคลนก่อนระลอกหลักจะตามมา ในกรณีนี้การไหลยังคงมีความต่อเนื่อง และวัสดุในส่วนท้ายของระลอกคลื่นยังคงกระจายตัวค่อนข้างหนาแน่น เมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้นเป็น 30° (_g30_s50_c20_Cs70-30) และ 35° (_g30_s50_c20_Cs70-30) พบว่าความยาวของการไหลลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเกิดจากการที่วัสดุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นทำให้การสะสมตัวของเศษวัสดุในช่วงท้ายของการไหลลดลง นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นการลอยตัวของอนุภาคกรวด (Dilute Particle) และการแยกตัวของวัสดุออกจากระลอกคลื่นหลักชัดเจนขึ้นที่มุมลาดเอียงสูง การไหล

มีแนวโน้มการจัดกระจายมากขึ้น และอาจเกิดการแยกชั้นระหว่างวัสดุขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก ซึ่งแตกต่างจากกรณีของมุมลาดเอียงต่ำที่วัสดุยังคงกระจุกตัวอยู่ในแนวการไหล ผลการสังเกตแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนวัสดุ และมุมลาดเอียงมีผลกระทบโดยตรงต่อพฤติกรรมของการไหล ไม่เพียงแต่ในแง่ของความยาวของการไหล แต่ยังรวมถึงรูปแบบการสะสมตัวของวัสดุในช่วงท้าย และการแยกชั้นของอนุภาคในกระบวนการไหลอีกด้วย

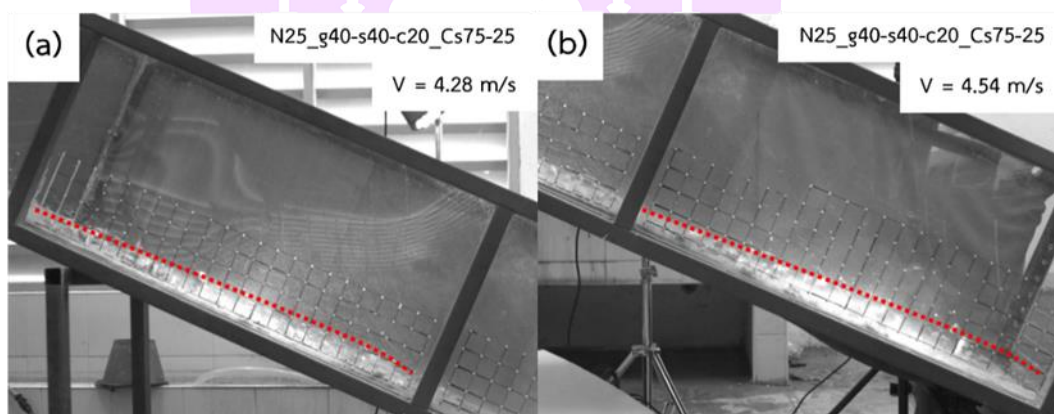


ภาพ 62 ตัวอย่างการไหลวัสดุเม็ดแห้งผสมกับน้ำ (a) N25_g30_s50_c20_Cs70-30

(b) N30_g30_s50_c20_Cs70-30 25 และ N35_g30_s50_c20_Cs70-30

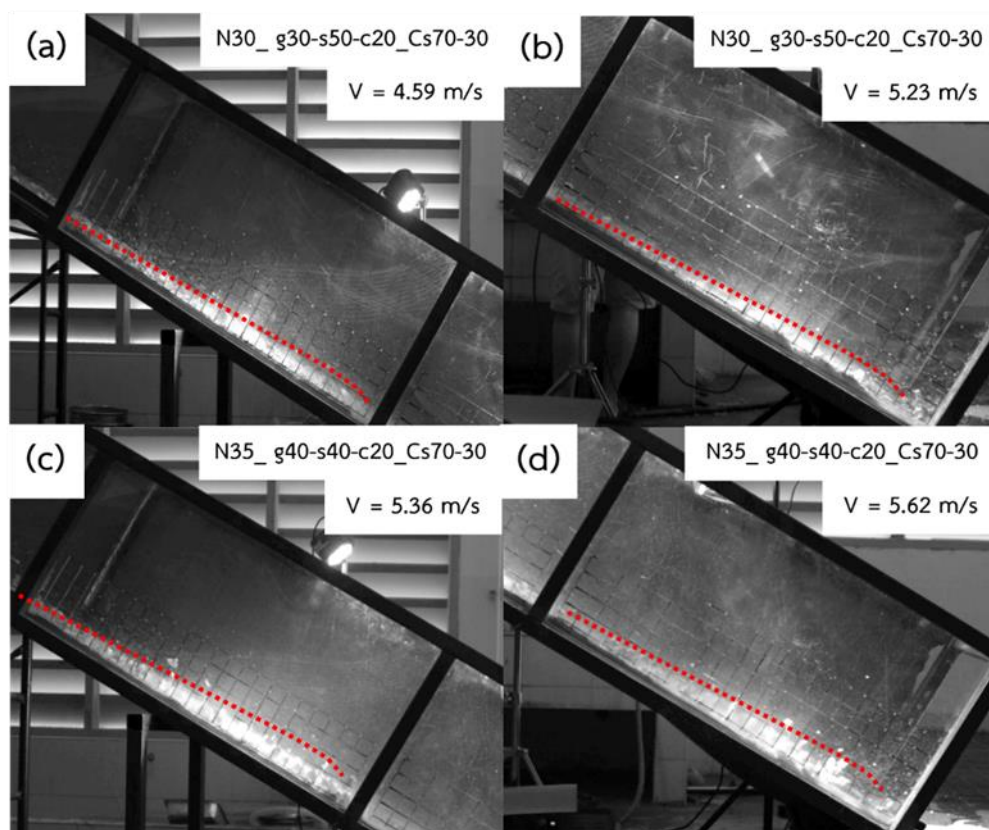
การแผ่กระจายของส่วนผสมแบบกึ่งของเหลวค่าความเร็วที่นำเสนอเป็นค่าความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้ในช่วง 2 m สุดท้ายก่อนถึงปลายรางเช่นเดียวกับการแผ่กระจายของวัสดุแบบแห้ง ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมโดยรวมของการไหลมากกว่าค่าความเร็วในแต่ละจุด ผลจากการวิเคราะห์ พบว่าองค์ประกอบของวัสดุ และมุมลาดเอียงมีผลต่อความเร็วของการเคลื่อนที่จากการทดสอบที่มุมลาดเอียง 25° (N25_g40_s40_c20_Cs75-25) ภาพ 63 ซึ่งมีสัดส่วนของกรวดน้อยกว่าทราย (g30_s50) และปริมาณน้ำในส่วนผสมร้อยละ 25 พบว่า อนุภาครวดและทรายมักกระจายตัวอยู่ด้านบน ขณะที่

โคลนอยู่ด้านล่างการแยกชั้นของวัสดุสะท้อนให้เห็นถึงผลของน้ำที่ช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ส่งผลให้อนุภาคเม็ดหยาบสามารถเคลื่อนที่ไปตามแนวลาดได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้มีค่าต่ำกว่ากรณีที่มีมุมลาดเอียงสูงขึ้น เมื่อเพิ่มมุมลาดเอียงเป็น ภาพ 63 และภาพ 64 30° (N35_g30_s50_c20_Cs70-30) และ 35° (N35_g40_s40_c20_Cs70-30) ปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 พบว่า พฤติกรรมของการไหลเปลี่ยนแปลงไป โดยอนุภาคกรวดเริ่มเรียงตัวบนชั้นทราย และมีการกระดอนอยู่ด้านบนของระลอกคลื่น ส่งผลให้ความสูงของระลอกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ค่าความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้ในช่วง 2 m สุดท้ายก่อนถึงปลายรางเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับมุมลาดเอียง 25° จากการพิจารณาค่าความเร็วในช่วง 1 m สุดท้ายของการไหล พบว่าอัตราการเพิ่มความเร็วยิ่งสูงขึ้นเมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความชันของรางส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของการไหล และควรพิจารณาปัจจัยนี้เมื่อต้องออกแบบระบบควบคุมหรือป้องกันการไหลของวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ



ภาพ 63 ความเร็วของการไหลวัสดุทิ้งของเหลวที่ช่วงระยะทางแตกต่างกัน

N25_g40_s40_c20_Cs75-25



ภาพ 64 ความเร็วของการไหลวัสดุกิ่งของเหลวที่ช่วงระยะทางแตกต่างกัน (a) และ (b) N30_g30_s50_c20_Cs70-30 (b) และ(c) N35_g40_s40_c20_Cs70-30

จากการตรวจวัดค่าความเร็วขณะที่วัสดุไหลผ่านราง พบว่าการไหลของวัสดุแบบแห้ง มีค่าความเร็วสูงกว่าวัสดุแบบกิ่งของเหลว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการมีของเหลวเป็นองค์ประกอบส่งผลให้แรงต้านทานภายในระบบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณสัดส่วนของวัสดุเม็ดหยาบต่อวัสดุเม็ดละเอียดมีผลโดยตรงต่อความเร็วของการไหล โดยพบว่า ความเร็วของการไหลมีความสัมพันธ์กับขนาดและสัดส่วนของกรวด ในกรณีที่สัดส่วนของกรวดและทรายมีค่าเท่ากัน (g40-s40) ความเร็วของการไหลสูงกว่ากรณีที่มีทรายมากกว่า (g30-s50) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากลักษณะการจัดเรียงตัวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสัดส่วนของกรวดเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วที่วัดได้จากการไหลของวัสดุยังสามารถอธิบายได้ในเชิงตัวเลข Froude Number (F_r) ตาราง 8 ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ประเมินพลศาสตร์ของการไหล ในการศึกษา ค่าของ (F_r) มีค่าตั้งแต่ 1-13 ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถอธิบายลักษณะพลวัตของการไหลในระบบทางธรณีฟิสิกส์ $0.1 < F_r < 10$ อาจจำเป็นต้องพิจารณาแนวทางในการบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาคุณลักษณะของระบบการไหลที่เกิดขึ้นทั้งในวัสดุแบบแห้งและวัสดุแบบกิ่งของเหลว Choi, et al. (2015); Gordon et al., (2019) ตัวเลขไร้มิติที่เรียกว่า Savage Number

(N_{sav}) ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินอิทธิพลของความเค้นเฉื่อย และแรงเสียดทานของอนุภาคภายในระบบ ในการศึกษาครั้งนี้ ค่า N_{sav} ที่วัดได้มีค่ามากกว่า 0.1 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า แรงเฉื่อยของอนุภาคมีผลต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุที่กำลังเคลื่อนที่ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของการไหลและการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมของวัสดุระหว่างการเคลื่อนที่ แม้ว่าความสูงของการไหลที่วัดได้ในแต่ละกรณีจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อพิจารณาความยาวของการไหล พบว่าในกรณีของวัสดุแบบแห้ง การไหลมีลักษณะเป็นการเคลื่อนที่ที่ต่อเนื่องจากจุดเริ่มต้นจนถึงปลายราง ในขณะที่วัสดุแบบกึ่งของเหลวมีลักษณะเป็นระลอกคลื่น ทำให้สามารถแยกโครงสร้างของการไหลออกเป็นช่วงหัว ลำตัว และท้ายการไหลได้อย่างชัดเจน ลักษณะนี้อาจมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจพฤติกรรมของการไหลในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ และอาจช่วยให้สามารถพัฒนาแนวทางสำหรับการบริหารจัดการหรือป้องกันการไหลของวัสดุในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อกระบวนการไหลของเศษซากที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Choi, et al., 2015; Gordon, et al., 2013; Gordon, et al., 2019)

ตาราง 8 ความเร็วและลักษณะของการไหลหลากของส่วนผสมต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ

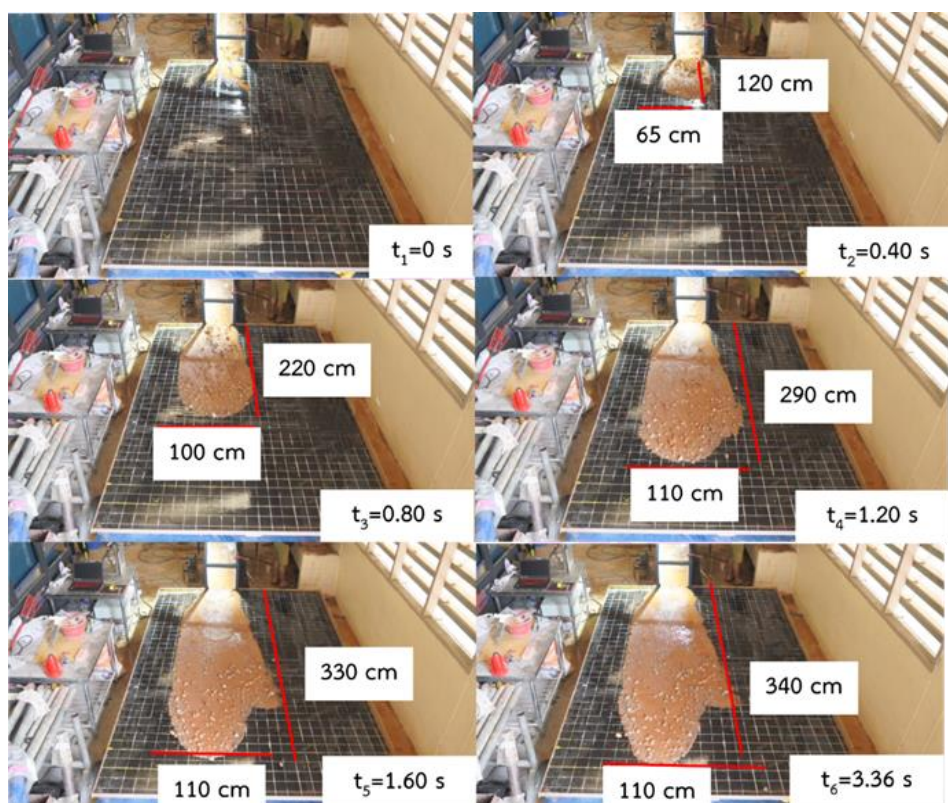
การทดลอง	Average flow Velocity (v) (m/s)	Average flow Depth (h) (m)	Shear rate (v/h)	Froude Number (F_r)	Savage Number (N_{sav})
N25_g100_s0_c0_Cs100-0	3.20	0.03	136.12	7.91	2.68
N25_g75_s25_c0_Cs100-0	3.80	0.03	146.03	8.48	5.02
N25_g60_s40_c0_Cs100-0	3.78	0.03	144.05	8.37	2.77
N25_g50_s50_c0_Cs100-0	3.77	0.030	140.39	8.15	2.76
N25_g40_s60_c0_Cs100-0	3.71	0.030	139.39	8.10	4.89
N25_g25_s75_c0_Cs100-0	3.15	0.020	202.41	9.60	3.51
N25_g0_s100_c0_Cs100-0	3.04	0.02	173.39	8.41	2.09
N25_g30_s50_c20_Cs70-30	3.49	0.035	115.19	7.39	3.43
N25_g30_s50_c20_Cs75-25	3.62	0.035	118.62	7.61	2.06
N25_g40_s40_c20_Cs70-30	3.55	0.035	116.90	7.50	1.98
N25_g40_s40_c20_Cs75-25	3.39	0.035	114.04	7.32	3.30
N30_g100_s0_c0_Cs100-0	5.46	0.035	167.41	10.75	6.66
N30_g75_s25_c0_Cs100-0	5.43	0.035	155.14	10.24	4.86
N30_g60_s40_c0_Cs100-0	5.33	0.035	143.60	9.48	6.21
N30_g50_s50_c0_Cs100-0	5.23	0.035	166.33	10.98	3.34
N30_g40_s60_c0_Cs100-0	5.19	0.035	165.19	10.90	3.29
N30_g25_s75_c0_Cs100-0	5.10	0.03	163.13	9.97	9.24

ตาราง 8 (ต่อ)

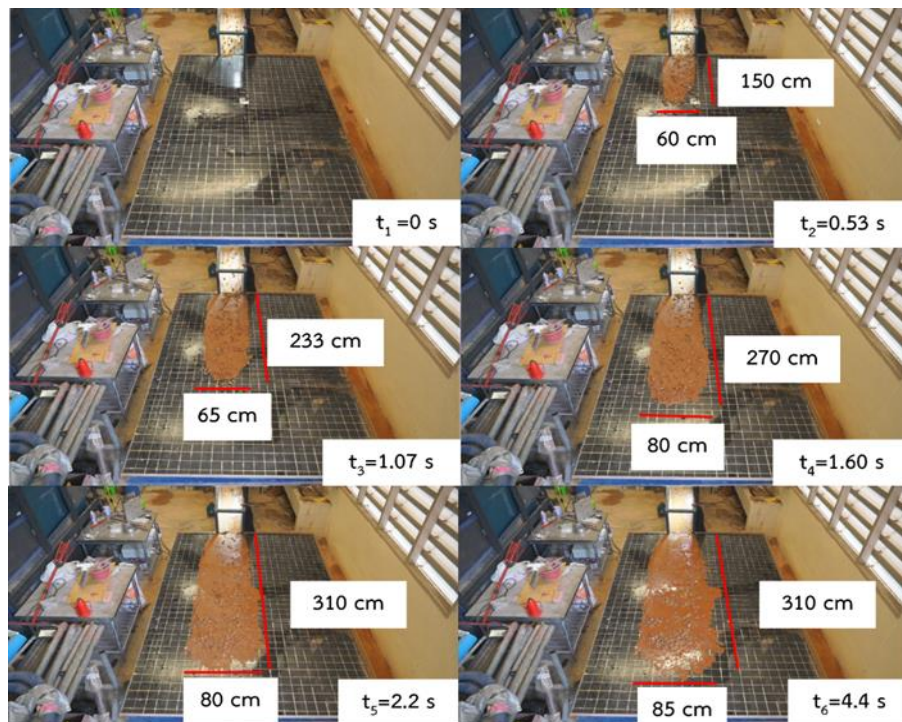
การทดลอง	Average flow Velocity (v) (m/s)	Average flow Depth (h) (m)	Shear rate (v/h)	Froude Number (F_r)	Savage Number (N_{sav})
N30_g0_s100_c0_Cs100-0	4.84	0.015	252.78	10.92	19.65
N30_g30_s50_c20_Cs70-30	5.18	0.04	143.29	10.11	0.98
N30_g30_s50_c20_Cs75-25	5.23	0.04	144.04	10.16	4.01
N30_g40_s40_c20_Cs70-30	5.29	0.04	144.79	10.22	2.29
N30_g40_s40_c20_Cs75-25	5.11	0.04	141.79	10.00	2.14
N35_g100_s0_c0_Cs100-0	6.10	0.042	154.80	11.19	4.81
N35_g75_s25_c0_Cs100-0	6.03	0.042	153.13	11.07	4.70
N35_g60_s40_c0_Cs100-0	5.96	0.042	151.90	10.98	3.39
N35_g50_s50_c0_Cs100-0	5.90	0.042	154.32	11.16	4.41
N35_g40_s60_c0_Cs100-0	5.82	0.042	152.42	11.02	2.39
N35_g25_s75_c0_Cs100-0	5.31	0.04	132.79	9.37	2.31
N35_g0_s100_c0_Cs100-0	4.88	0.026	192.69	10.96	12.19
N35_g30_s50_c20_Cs70-30	5.76	0.042	149.80	10.83	1.27
N35_g30_s50_c20_Cs75-25	5.8	0.042	150.75	10.90	0.82
N35_g40_s40_c20_Cs70-30	5.88	0.042	153.13	11.07	4.38
N35_g40_s40_c20_Cs75-25	5.7	0.042	147.18	10.64	2.30

พฤติกรรมของการแผ่กระจายและการกองทับถมของวัสดุที่มีองค์ประกอบของกรวด ทราย ดินเหนียว และน้ำ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปริมาณน้ำและสัดส่วนวัสดุต่อการไหล โดยเฉพาะในกรณีที่มีมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำเปลี่ยนแปลง ทำให้พฤติกรรมของวัสดุเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ มุมลาดเอียง 25° ตามที่แสดงในภาพ 65 และภาพ 66 ซึ่งเป็นกรณีของ N25_g30_s50_c20_Cs70-30 และ N25_g40_s40_c20_Cs70-30 พบว่า การแผ่ของวัสดุมีระยะทางที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสัดส่วนของกรวดและทราย กรณีที่มีทรายมากกว่า พบว่า การกระจายออกด้านข้าง มีแนวโน้มเด่นชัดขึ้น แต่ระยะทางของการกองทับถมในแนวยาวมีค่าน้อยกว่ากรณีที่มีกรวดและทรายในสัดส่วนเท่ากัน ในขณะที่ใน N25_g40_s40_c20_Cs70-30 พบว่า ระยะทางของการไหลแผ่เพิ่มขึ้น โดยที่โครงสร้างของการกองทับถมยังคงรูปทรงที่ชัดเจนกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแรงเฉื่อยของกรวดที่ช่วยรักษาโครงสร้างของการไหล เมื่อพิจารณาการทดลองที่ มุมลาดเอียงเพิ่มขึ้นเป็น 30° ตามที่แสดงในภาพ 67 และภาพ 68 ซึ่งเป็นกรณีของ N30_g30_s50_c20_Cs75-25 และ N30_g40_s40_c20_Cs75-25 พบว่าการไหลของวัสดุเกิดขึ้นรวดเร็วขึ้น เนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีผล

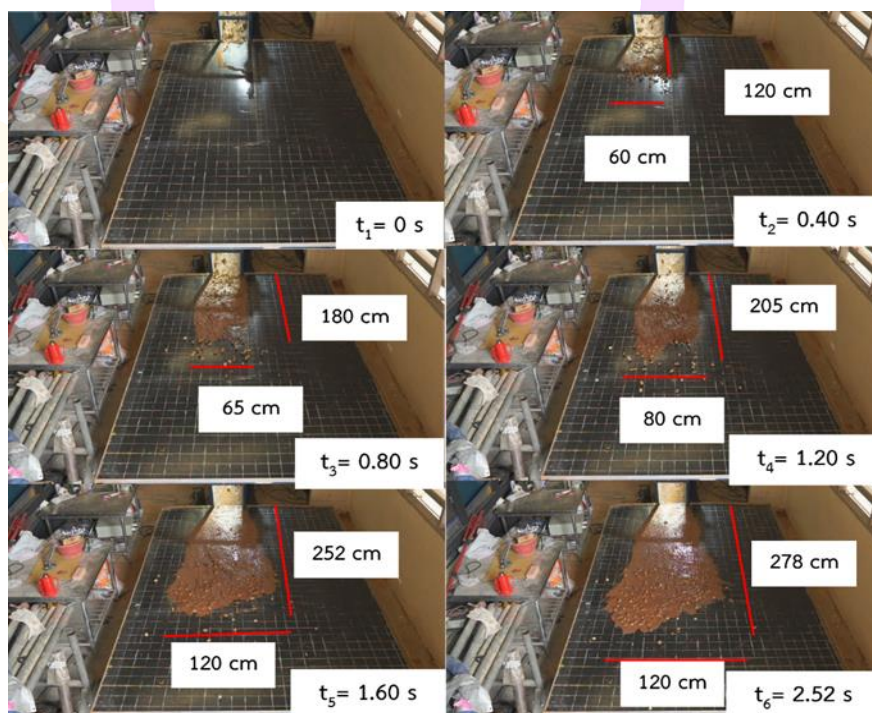
ต่อการเร่งความเร็วของวัสดุ ส่งผลให้ระยะการแผ่และการกองทับถมในแนวยาวมีค่ามากกว่ากรณีที่มุมลาดเอียง 25°



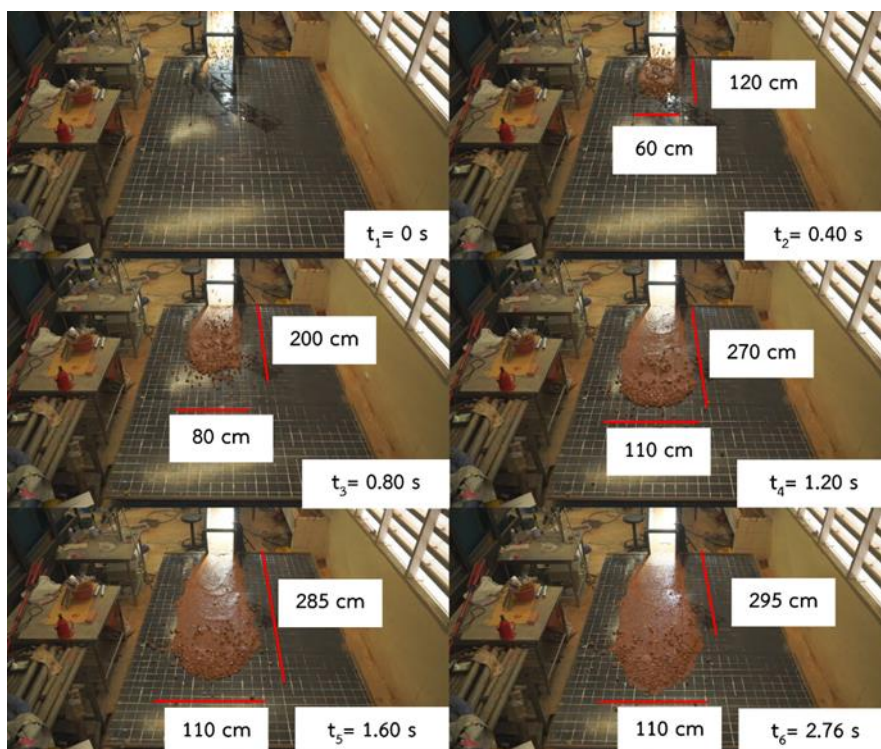
ภาพ 65 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N25_g30_s50_c20_Cs70-30



ภาพ 66 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N25_g40_s40_c20_Cs70-30



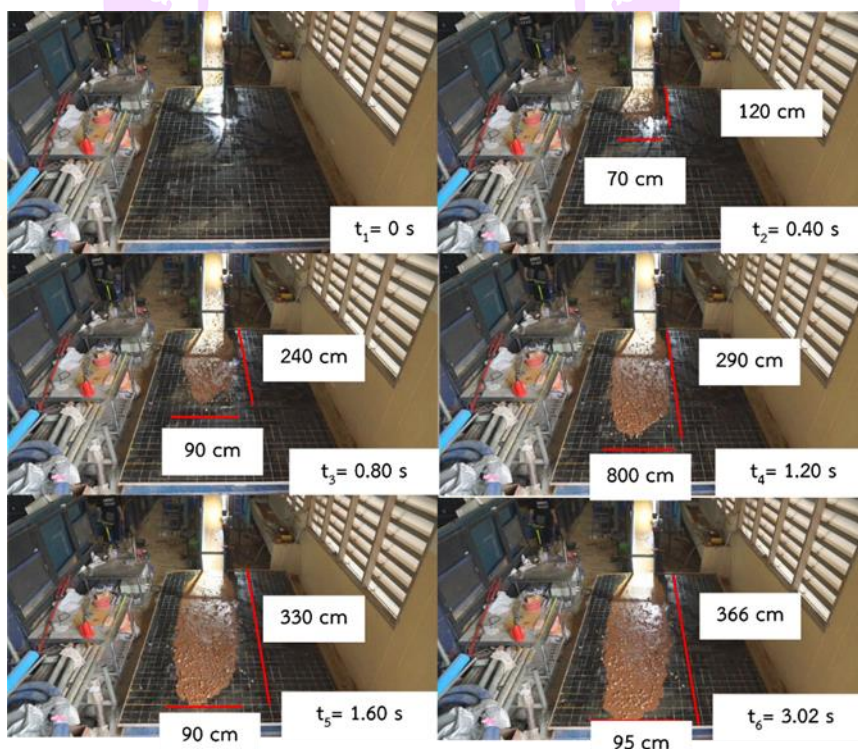
ภาพ 67 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g30_s50_c20_Cs75-25



ภาพ 68 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g40_s40_c20_Cs75-25

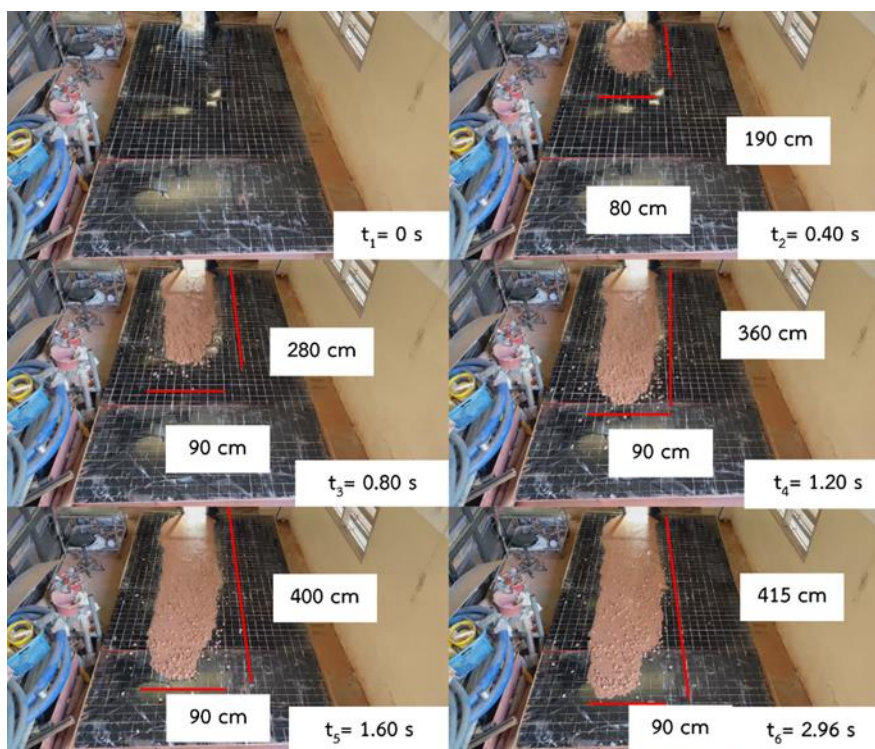
การทดลองยังแสดงให้เห็นว่ากรณีที่มีสัดส่วนทรายมากกว่า ระยะทางของการไหลจะลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกรณีที่กรวด และทรายมีสัดส่วนเท่ากัน จากภาพ 69 และ ภาพ 70 ซึ่งเป็นกรณีของ N30_g40_s40_c20_Cs70-30 และ N35_g40_s40_c20_Cs70-30 พบว่า การเพิ่มมุมลาดเอียงขึ้นจาก 30° เป็น 35° ส่งผลให้การไหลของวัสดุเกิดขึ้นเร็วขึ้นและสามารถแผ่กระจายออกไปไกลขึ้นกว่ากรณีก่อนหน้านี้ นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณน้ำในกรณีของ Cs70-30 ส่งผลให้วัสดุสามารถไหลออกไปได้ไกลกว่ากรณีที่มีน้ำในปริมาณน้อยกว่า เช่น Cs75-25 เนื่องจากแรงเสียดทานภายในที่ลดลงช่วยให้วัสดุสามารถไหลได้อย่างต่อเนื่องก่อนจะเข้าสู่การกองทับถมลักษณะของการกองทับถมที่พบในกรณีของส่วนผสม N35_g40_s40_c20_Cs70-30 ในภาพ 71 แสดงให้เห็นถึงผลของน้ำที่มีต่อการกระจายตัวของวัสดุอย่างชัดเจน โดยพบว่า การแผ่ขยายของวัสดุสามารถเกิดขึ้นได้มากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มีน้ำในปริมาณน้อยกว่า และวัสดุที่มีกรวดมากกว่าจะมีแนวโน้มสามารถไหลได้ไกลกว่ากรณีที่มีทรายมากกว่า รูปแบบของการกองทับถมแสดงให้เห็นว่าอนุภาคกรวดมักจะวางตัวบริเวณด้านหน้าและลำตัวของการไหล ขณะที่ชั้นของทรายและน้ำโคลนมักจะสะสมอยู่บริเวณด้านหลังของการไหล ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของวัสดุที่มีองค์ประกอบของดินเหนียวและน้ำ

โดยสรุป พบว่า องค์ประกอบของวัสดุ ปริมาณน้ำ และมุมลาดเอียงของราง เป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมพฤติกรรมของการไหลและการกองทับถมของวัสดุผสม โดยเฉพาะในกรณีที่มีน้ำมีปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้วัสดุสามารถไหลออกไปได้ไกลกว่าและสามารถแผ่กระจายออกได้มากขึ้น ในขณะที่วัสดุที่มีกรวดมากกว่าจะมีแนวโน้มสามารถคงโครงสร้างของการไหลได้ดีกว่ากรณีที่มีทรายมากกว่า ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่สามารถนำไปใช้ในการศึกษาการไหลของเศษซากในสภาพแวดล้อมจริงต่อไป นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของวัสดุ เช่น การเพิ่มสัดส่วนกรวด ไม่เพียงแต่ส่งผลต่อระยะทางของการไหลเท่านั้น แต่ยังมีผลต่อเสถียรภาพของโครงสร้างการไหลในระหว่างการเคลื่อนที่อีกด้วย วัสดุที่มีกรวดมากจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมากกว่า ช่วยให้มวลวัสดุคงรูปร่างได้ดีและไหลเป็นก้อนอย่างต่อเนื่อง ขณะที่วัสดุที่มีทรายมากกว่าจะมีแนวโน้มแยกชั้นได้ง่ายและไหลแบบกระจายตัวมากกว่า ส่งผลให้เกิดลักษณะการทับถมที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การมีน้ำในปริมาณสูงยังช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและพื้นผิวราง ทำให้วัสดุไหลได้รวดเร็วและครอบคลุมพื้นที่กว้างขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของการไหลของเศษซากในสภาพธรรมชาติ โดยข้อมูลเชิงลึกเหล่านี้สามารถนำไปสนับสนุนการวางแผนออกแบบโครงสร้างป้องกันหรือการประเมินความเสี่ยงในพื้นที่ลาดเชิงเขาได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

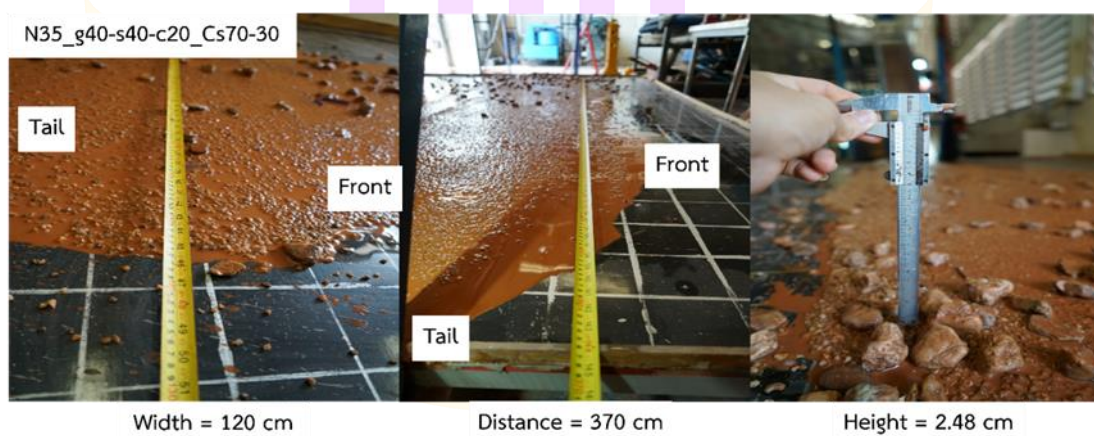


ภาพ 69 ลักษณะของการแผ่และการทับถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)

ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลอง N30_g40_s40_c20_Cs70-30



ภาพ 70 ลักษณะของการแผ่และการทั้บถม (ตัวอักษรระยะกว้าง x ยาว หน่วยเป็น cm)
ณ เวลาต่าง ๆ



ภาพ 71 ลักษณะสัณฐานวิทยาของการทั้บถมหลังจากหยุดนิ่งของการทดลอง
N35_g40_s40_c20_Cs70-30

เช่นเดียวกับการทดลองการไหลและการกองทับถมของวัสดุเม็ดแบบแห้ง การทดสอบซ้ำในแต่ละครั้งช่วยให้สามารถประเมินความสม่ำเสมอและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ได้ดีขึ้น รูปแบบของการไหลและการกองทับถมที่ได้จากการทดลอง N25_g40_s40_c20-Cs70-30 ภาพ 72 แสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะมีความแตกต่างบางประการในการกระจายตัวของวัสดุ โดยเฉพาะในส่วนของระยะทางในการแผ่ แต่โดยรวมแล้วลักษณะของการทับถมยังคงมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน ความแตกต่างของระยะการแผ่ที่พบจากการทดลองแต่ละครั้งอยู่ในช่วงที่สามารถสังเกตได้ โดยเฉพาะผลที่เกิดจากลักษณะการปล่อยวัสดุและการกระจายตัวขององค์ประกอบภายในส่วนผสม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการไหลของวัสดุประเภทนี้มักจะได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบของส่วนผสม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการไหลและการกองทับถมของวัสดุภายใต้เงื่อนไขเดียวกันยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ผลที่ได้จากการทดสอบซ้ำนี้ช่วยสนับสนุนความน่าเชื่อถือของการทดลอง โดยถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างบางส่วนในด้านของระยะทางในการแผ่ แต่ลักษณะโดยรวมของการไหลและการกองทับถมยังคงมีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นที่ยืนยันว่าการไหลของวัสดุในสภาวะที่กำหนดสามารถทำซ้ำได้ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหล และการพัฒนาแบบจำลองการไหลของเศษซากในสภาพแวดล้อมจริง



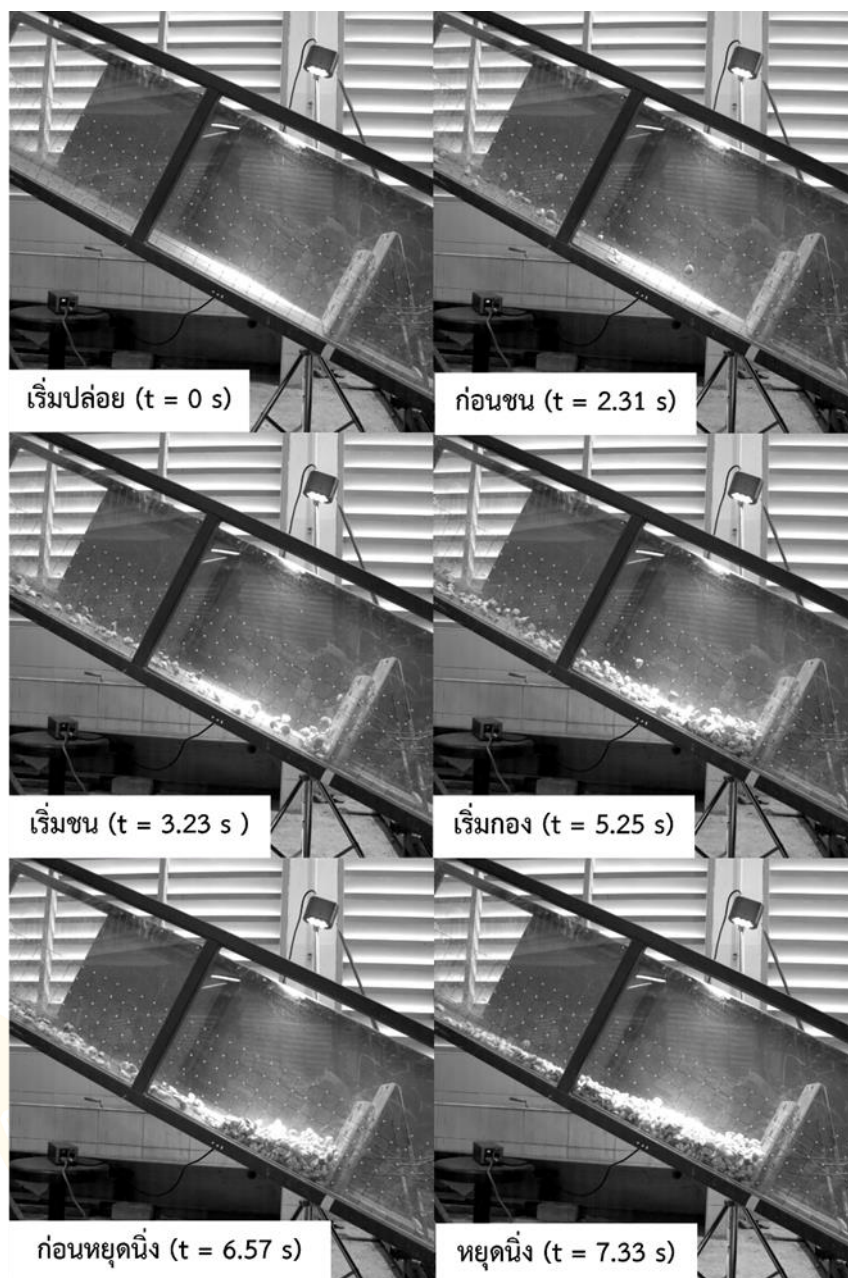
N25_g40-s20-c20_Cs70-30	Test1	Test2	Test3
Width (cm)	90	120	110
Distance (cm)	315	290	260
Height (cm)	1.82	1.90	1.75
Deposit area (cm ²)	21,600	23,000	22,000

ภาพ 72 ผลการทดสอบการแผ่และการทับถมของวัสดุเม็ดแบบกึ่งของเหลวในแต่ละครั้ง
จากการทดลอง N25_g40_s40_c20-Cs70-30

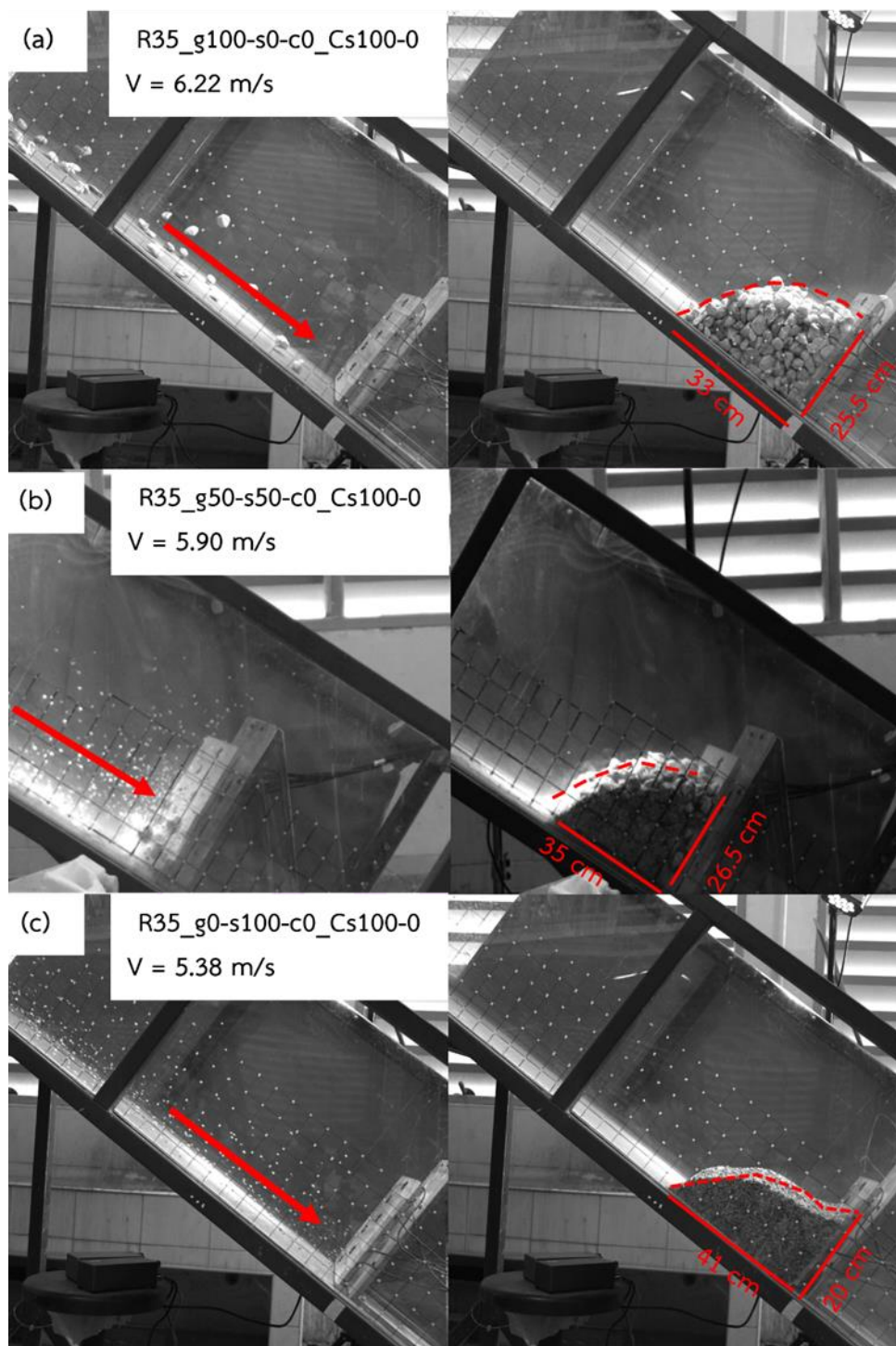
พฤติกรรมของแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง

การศึกษาพฤติกรรมของแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็งแสดงให้เห็นว่า กลไกสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการกระแทก ได้แก่ การกองขึ้น (Pile-up) และการไหลขัดขึ้น (Run-up) ซึ่งได้รับการวิเคราะห์ Choi, et al., 2015 และ Iverson, et al., 2016 ปัจจุบันการระบุลักษณะของการกองขึ้น และการไหลขัดขึ้นมักอาศัยการสังเกตทางกายภาพเป็นหลัก พฤติกรรมของการไหลกระแทก และการสะสมตัวของวัสดุแบบแข็ง การกองขึ้น และการไหลขัด ซึ่งได้รับอิทธิพลจากองค์ประกอบของวัสดุ และมุมลาดเอียงของรางไหล $t = 0$ s ที่แสดงบนรูปจะเป็นเวลาที่นับตั้งแต่การปล่อยส่วนผสมจากประตูกัน (Gate) เมื่อวัสดุไหลกระแทกกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็งพลังงานจลน์ของอนุภาคด้านหน้าจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งหยุดนิ่ง และเริ่มสะสมตัวบริเวณฐานของโครงสร้างป้องกันแบบแข็งเกิดเป็นโซนหยุดนิ่ง (Dead Zone) หลังจากนั้นอนุภาคที่เคลื่อนที่ตามมา จะสะสมตัวเป็นชั้น ๆ อย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งกองวัสดุมีความเสถียร และความสูงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ปัจจัยหลักที่มีผลต่อพฤติกรรมการกองขึ้นของวัสดุประกอบด้วยองค์ประกอบของวัสดุ มุมลาดเอียงของรางไหล และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค วัสดุที่มีสัดส่วนของกรวดสูงมักมีแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการกองขึ้นที่สูงกว่าและมีโครงสร้างที่มั่นคง ทางกลับกันวัสดุที่มีสัดส่วนของทรายสูงจะมีแรงเสียดทานต่ำกว่า ทำให้วัสดุไหลผ่านกันได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้กองวัสดุมีลักษณะแบนราบมากขึ้น นอกจากนี้มุมลาดเอียงของรางไหลมีผลโดยตรงต่อกระบวนการกองขึ้นของวัสดุ ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่มีมุมลาดเอียงต่ำ $\theta = 25^\circ$ พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งสามารถสังเกตได้จากการทดลอง R25_g100_s0_c0-Cs100-0 แสดงดังภาพ 73 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ที่เวลา $t = 0$ s เริ่มต้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุไหลด้วยอัตราที่ช้า $t = 3.23$ s ส่งผลให้กองวัสดุที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุไหลกระแทกโครงสร้างป้องกันแบบแข็งมีลักษณะที่ยาว และความชันไม่สูงมากจนหยุดนิ่ง $t = 7.33$ s เนื่องจากค่าแรงเสียดทานภายในที่สูง (Friction = 0.41) ส่งผลให้วัสดุเกิดแรงยึดเหนี่ยวภายในมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถกองขึ้นเป็นกองที่สูงได้ พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง การเปลี่ยนแปลงของลักษณะการกองขึ้นของวัสดุเมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้นเมื่อมุมลาดเอียงของรางไหลเพิ่มขึ้น $\theta = 30^\circ$ และ $\theta = 35^\circ$ พบว่า ลักษณะของการกองขึ้นของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยทั่วไปความสูงของกองวัสดุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความยาวของฐานกองวัสดุลดลง อย่างไรก็ตาม ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัสดุภายในส่วนผสม โดยเฉพาะอัตราส่วนของกรวดและทราย ในกรณีที่วัสดุเป็นส่วนผสมของกรวดและทราย จะพบว่าความสูงของกองวัสดุมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่ามุมลาดเอียงจะเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามเมื่อวัสดุเป็นทรายทั้งหมด (g0_s100_c0) ความแตกต่างของความสูงจะชัดเจนมากขึ้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงบทบาทขององค์ประกอบวัสดุที่มีต่อพฤติกรรมการกองขึ้นของวัสดุหลังการกระแทก ตัวอย่างเช่น ใน

กรณีที่มีมุมลาดเอียง $\theta = 35^\circ$ ภาพ 74 การกองขึ้นของวัสดุแบบแห้งบนบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดลอง (a) R35_g100_s0_c0_Cs100-0 (b) R35_g50_s50_c0_Cs100-0 และ (c) R35_g0_s100_c0_Cs100-0 พบว่าวัสดุที่ประกอบด้วยกรวด 100% มีความสูงของกองวัสดุประมาณ 25.5 cm และมีความยาวฐาน 33 cm วัสดุที่มีอัตราส่วนกรวด 50% และทราย 50% (g50-s50-c0) มีความสูงของกองวัสดุใกล้เคียงกันที่ 26.5 cm แต่ความยาวของฐานเพิ่มขึ้นเป็น 35 cm ในกรณีที่วัสดุเป็นทรายทั้งหมด (g0-s100-c0) ความสูงของกองวัสดุลดลงอย่างชัดเจน และมีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของการกระจายตัวของวัสดุที่เกิดจากการไหลของทราย การเพิ่มขึ้นของมุมลาดเอียงส่งผลให้ความสูงของกองวัสดุเพิ่มขึ้น ในขณะที่ฐานของกองวัสดุมีแนวโน้มแคบลง นอกจากนี้วัสดุที่มีอัตราส่วนของกรวดและทรายผสมกันมักมีความสูงของกองวัสดุที่ใกล้เคียงกัน แต่หากวัสดุเป็นทรายทั้งหมดความแตกต่างของความสูงจะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงบทบาทสำคัญขององค์ประกอบวัสดุที่มีต่อพฤติกรรมการกองขึ้นของวัสดุหลังการไหลและกระแทกกับโครงสร้างป้องกัน

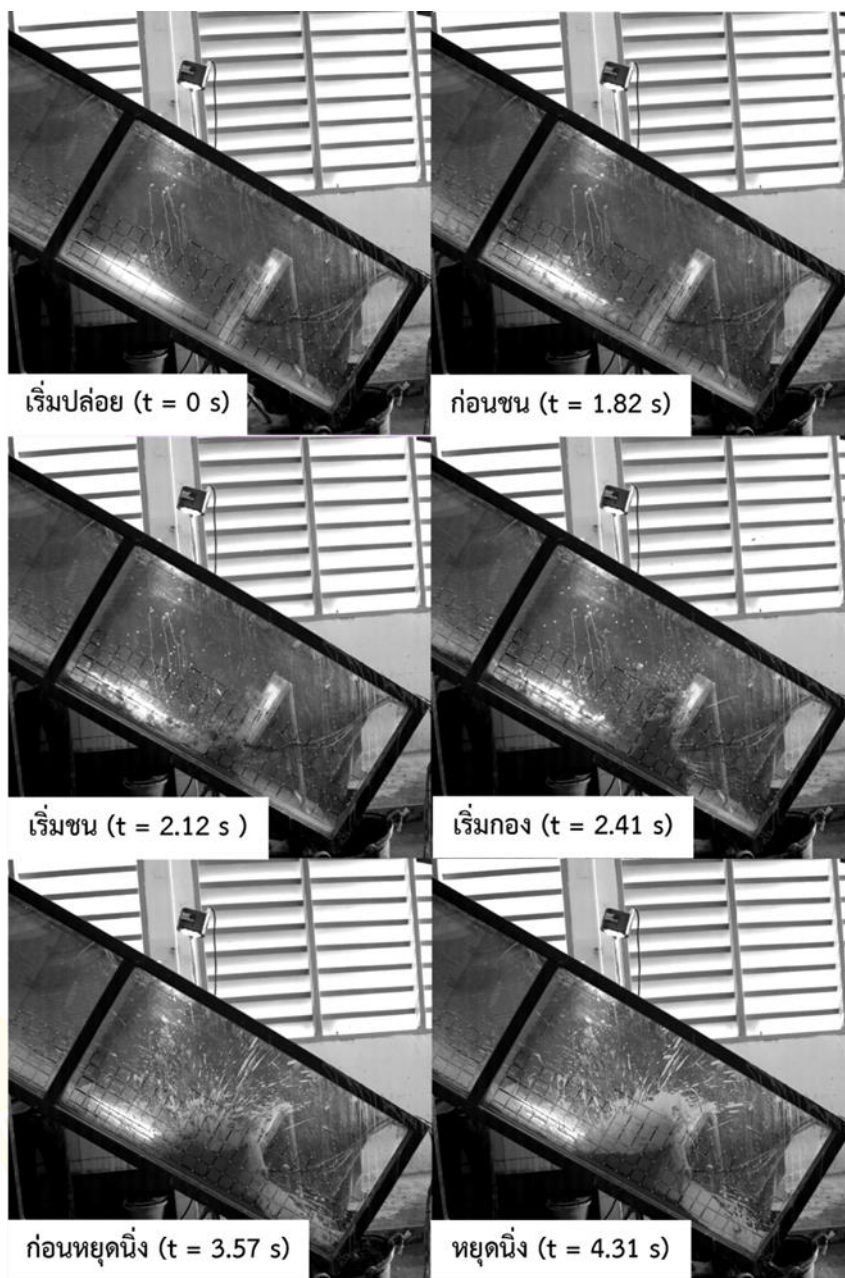


ภาพ 73 พฤติกรรมของการไหล และการกระทบบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดลอง
R25_g100_s0_c0_Cs100-0

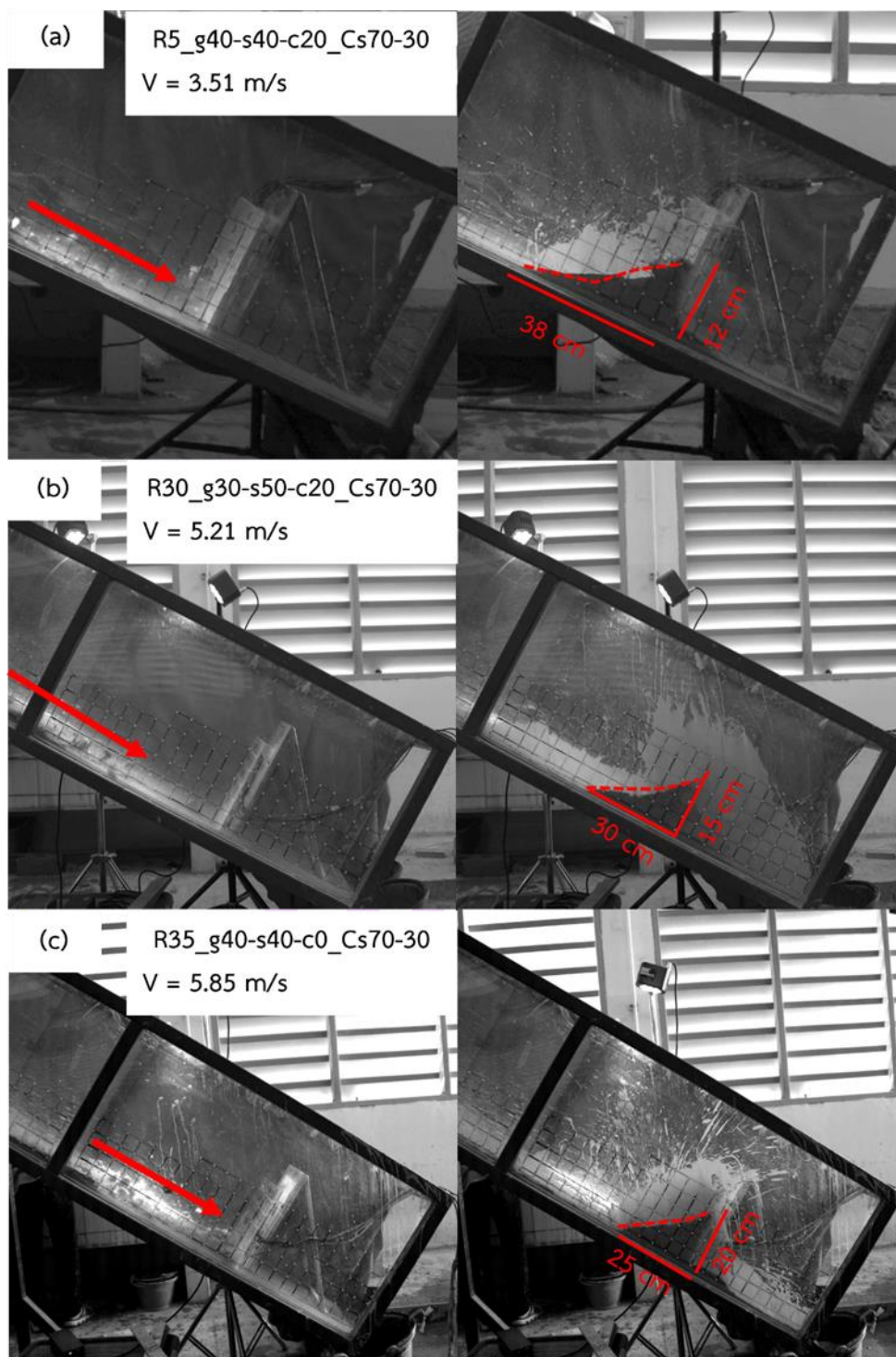


ภาพ 74 การกองขึ้นของวัสดุแบบแห้งบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดลอง
(a)R35_g100_s0_c0_Cs100-0 (b) R35_g50_s50_c0_Cs100-_0 และ (c)
R35_g0_s100_c0_Cs100-0

การศึกษาพฤติกรรมของแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็งในกรณีที่มีน้ำเข้ามาผสมและการเกิด Run-up เมื่อวัสดุที่ประกอบด้วยกรวด ทราย และดินเหนียวถูกผสมกับน้ำ พฤติกรรมการไหลจะเปลี่ยนไปจากการไหลแบบแห้ง (Granular Flow) เป็นการไหลแบบกึ่งของเหลว (Debris Flow) น้ำ ทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคส่งผลให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย และไหลขึ้นเมื่อวัสดุพุ่งชนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งทำให้เกิดการกระแทก และการสะสมของวัสดุ ในขณะที่โคลนซึ่งมีคุณสมบัติกึ่งของเหลวสามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้แตกต่างจากวัสดุแห้ง Run-up เกิดขึ้นเมื่อวัสดุไหลกระแทกกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็งบางส่วนไหลซัดขึ้นไปตามแนวลาด ในกรณีที่มีน้ำผสมการไหลซัดขึ้นจะมีลักษณะที่ซับซ้อนขึ้น โดยอนุภาคขนาดใหญ่มักหยุดนิ่งบริเวณฐานของโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง ในขณะที่โคลนสามารถเคลื่อนที่ขึ้นไปต่อก่อนจะสูญเสียพลังงานและไหลย้อนกลับลงมา หากมุมลาดเอียงของรางไหลเพิ่มขึ้นอัตราการไหลข้ามโครงสร้างป้องกันแบบแข็งของวัสดุที่มีน้ำปะปนก็จะสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อสัดส่วนของน้ำเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่นการทดลอง R35_g40_s40_c20_Cs70-30 ภาพ 75 ส่วนผสม Cs70-30 ซึ่งมีแนวโน้มเกิด Run-up มากกว่าส่วนผสมที่มีน้ำน้อยกว่า มุมลาดเอียงของรางไหล (θ) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรม Run-up โดยที่มุมลาดเอียงต่ำ $\theta = 25^\circ$ ทำให้วัสดุไหลซัดขึ้นไปได้เพียงบางส่วนก่อนจะไหลย้อนกลับลงมา ในขณะที่มุมลาดเอียงสูงขึ้น $\theta = 30^\circ$ และ 35° ทำให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่ขึ้นไปได้ไกลขึ้น และอาจไหลข้ามโครงสร้างป้องกันแบบแข็งได้ในบางกรณี ภาพ 76 นอกจากนี้การมีช่องว่าง 1.0 mm ระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมที่ติดกับ Load Cell ทำให้โคลนสามารถเล็ดลอดผ่านไปได้ ส่งผลต่อค่าการวัดแรงที่เกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีน้ำ วัสดุแห้งจะถูกควบคุมโดยแรงเสียดทานภายใน อนุภาคที่พุ่งชนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจะสะสมตัวเป็นกองสูงแต่ไหลซัดขึ้นไปได้น้อยเมื่อมีน้ำ น้ำจะช่วยลดแรงเสียดทาน ส่งผลให้วัสดุสามารถไหลซัดขึ้นไปสูงขึ้น และอาจไหลข้ามโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง นอกจากนี้วัสดุที่มีน้ำผสมมักกองตัวสูงขึ้นบริเวณด้านหน้าโครงสร้างป้องกันแบบแข็งมากกว่าวัสดุแห้ง เนื่องจากน้ำช่วยให้อนุภาคเคลื่อนตัวเข้าเต็มเต็มช่องว่างได้ดีขึ้น การศึกษาพฤติกรรม Run-up ในกรณีที่มีน้ำเข้ามาผสมช่วยให้เข้าใจถึงอิทธิพลของน้ำต่อการไหลกระแทก ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบโครงสร้างป้องกัน โดยเฉพาะในพื้นที่เสี่ยงต่อดินถล่ม น้ำป่าไหลหลาก และกระแสโคลนไหล ข้อมูลจากการทดลองสามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาแนวทางลดผลกระทบจากภัยพิบัติทางธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพ 75 พฤติกรรมของการไหม และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดลอง
R35_g40_s40_c20_Cs70-30

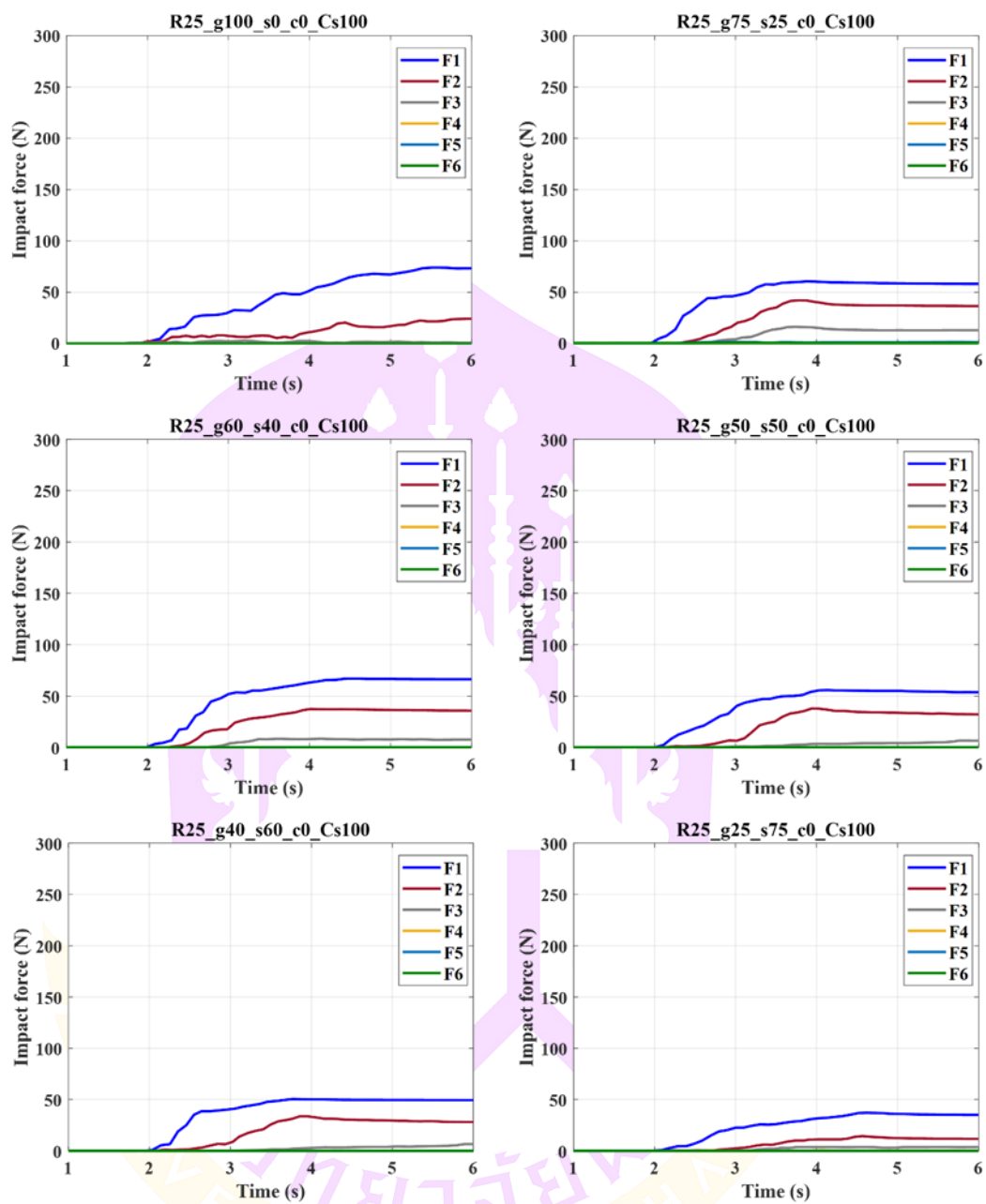


ภาพ 76 การกองขึ้นของวัสดุแบบแห้งบนบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดลอง
(a)R35_g100_s0_c0_Cs100-0 (b) R35_g50_s50_c0_Cs100-0 และ (c)
R35_g0_s100_c0_Cs100-0

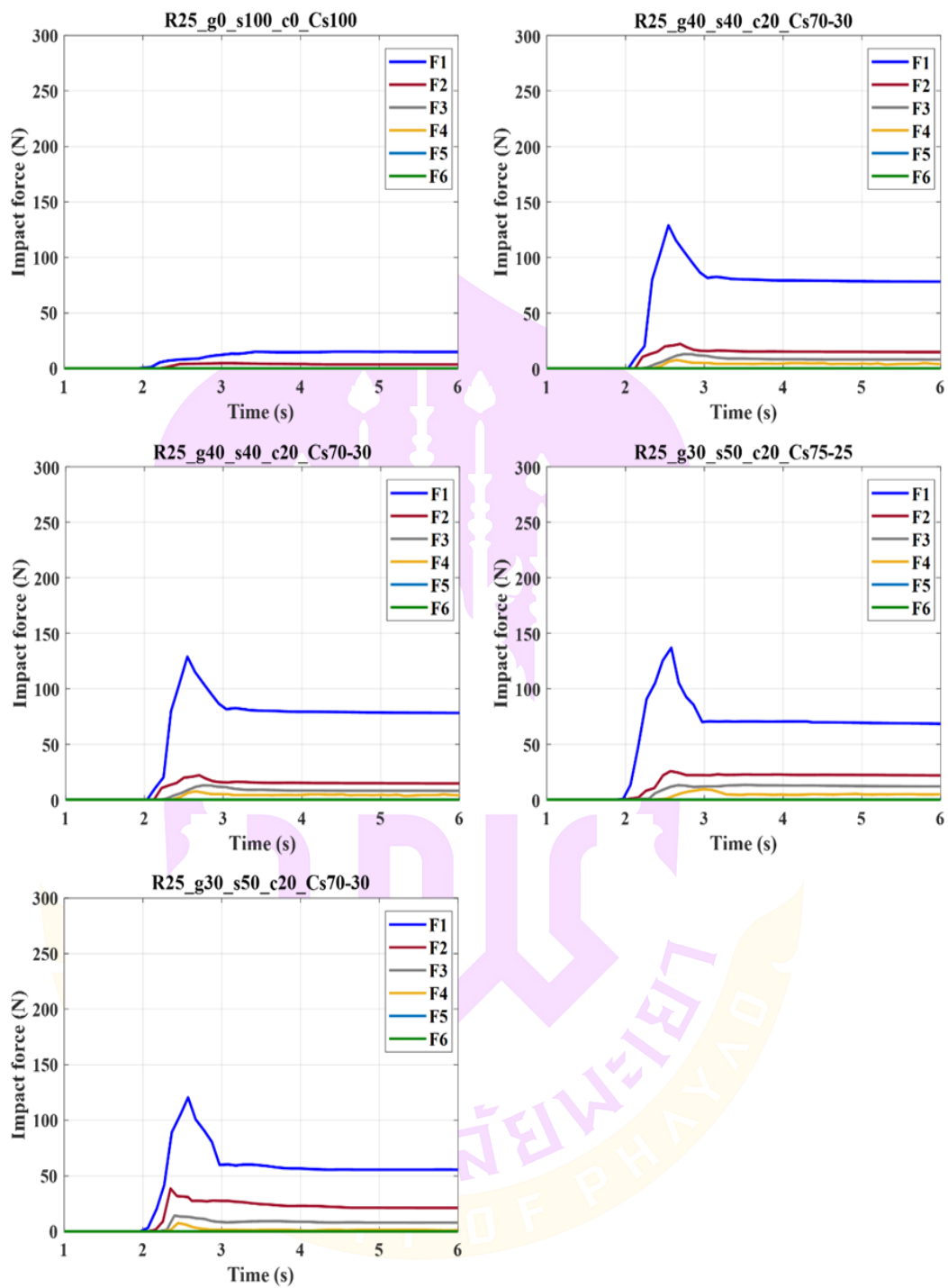
การวัดแรงกระแทกจากการที่วัสดุไหลชนกับ โครงสร้างป้องกันแบบแข็ง นั้นจะทำได้โดยใช้เซนเซอร์วัดแรง (Load Cell) ที่ติดตั้งตามแนวตั้งของโครงสร้าง โดยค่าที่ได้จะเป็นแรง F1-F6 ซึ่งแสดงถึงแรงกระแทกในตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้าง โดย F1 จะเป็นแรงที่วัดได้จากตำแหน่งด้านล่างสุดของโครงสร้าง และตามลำดับจะมี F2 ถึง F6 ขึ้นไปตามความสูงของโครงสร้าง ภาพ 77-79 ความสัมพันธ์แรงกระแทกและเวลา ที่มุมลาดเอียงต่าง ๆ ซึ่งได้แรงกระแทกที่แตกต่างกันตามมุมลาดเอียงที่ 25° 30° และ 35° จากผลการทดลอง พบว่า แรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบจะมีค่ามากกว่าวัสดุที่แห้ง โดยแรงกระแทกที่วัดได้ที่ F1 ซึ่งเป็นจุดที่ต่ำสุดกับโครงสร้างแรงจะสูงขึ้นเมื่อวัสดุมีน้ำผสมอยู่ โดยเฉพาะที่มุมลาดเอียงที่ 35° พบว่า แรงกระแทกจะสูงขึ้นอย่างชัดเจนแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำในวัสดุส่งผลต่อการไหล และแรงกระแทกที่เกิดขึ้น ในทางกลับกันวัสดุแห้งที่ไม่ผสมกับน้ำจะให้ค่าแรงกระแทกที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการผสมวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปเมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้น (จาก 25° เป็น 30° และ 35°) แรงกระแทกที่เกิดขึ้นจะสูงขึ้นเช่นกัน โดยค่าแรงที่วัดได้ที่ F1 ของส่วนผสมแบบแห้งอยู่ในช่วง 15-60 N สำหรับมุมลาด 25° 25-90 N สำหรับมุมลาด 30° และ 56-95 N สำหรับมุมลาด 35° และค่าแรงที่วัดได้ที่ F1 ของส่วนผสมแบบกึ่งของเหลวอยู่ในช่วง 120-137 N สำหรับมุมลาด 25° 155-185 N สำหรับมุมลาด 30° และ 210-242 N สำหรับมุมลาด 35° ซึ่งการเพิ่มมุมลาดเอียงทำให้วัสดุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงกระแทกมากขึ้นเมื่อชนกับโครงสร้าง ถึงแม้ว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการจะสามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความชื้น อุณหภูมิ หรือปริมาณการไหลของวัสดุได้ แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนที่สามารถเกิดขึ้นได้ตามปกติ โดยเฉพาะในกรณีของการทดสอบวัสดุแบบแห้ง R35_g40_s60_c0_Cs100-0 ค่าแรงกระแทกที่ได้จาก F1 ในการทดลองแต่ละครั้งมีช่วง 85-90 N ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ทั้งหมด เช่น ความแตกต่างเล็กน้อยในขนาดของอนุภาควัสดุ หรือการวัดที่มีความไม่แม่นยำของเครื่องมือ ในกรณีของการทดสอบแบบเปียก R35_g40_s40_c20_Cs75-25 ค่าแรงกระแทกสูงสุดที่ได้จาก F1 จะมีช่วง 235-245 N ซึ่งค่าแรงกระแทกสูงสุดนี้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของแรงกระแทกเนื่องจากการมีน้ำในวัสดุ ซึ่งน้ำทำให้วัสดุไหลด้วยความเร็วที่สูงขึ้นและทำให้แรงกระแทกในตำแหน่งต่าง ๆ สูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาผลรวมของแรงย่อยที่วัดได้จาก F1 ถึง F6 จึงเห็นความแตกต่างชัดเจนระหว่างการทดสอบในวัสดุแบบแห้งและแบบเปียกการทดลองในกรณีต่าง ๆ เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า แม้ว่าจะมีการควบคุมปัจจัยในการทดลองอย่างใกล้ชิด แต่ผลการทดลองยังคงมีความแตกต่างตามแต่ละกรณี ซึ่งเป็นผลจากลักษณะเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดและสภาพการทดลองที่ใช้

เมื่อทำการทดลองโดยผสมวัสดุที่เป็นของแข็งกับน้ำ พบว่าแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมีแนวโน้มสูงกว่าวัสดุที่แห้ง แต่ค่าที่ได้จะยังคงอยู่ในช่วงที่ไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละมุมลาดเอียง อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า มุมลาดเอียงเป็นปัจจัยสำคัญที่

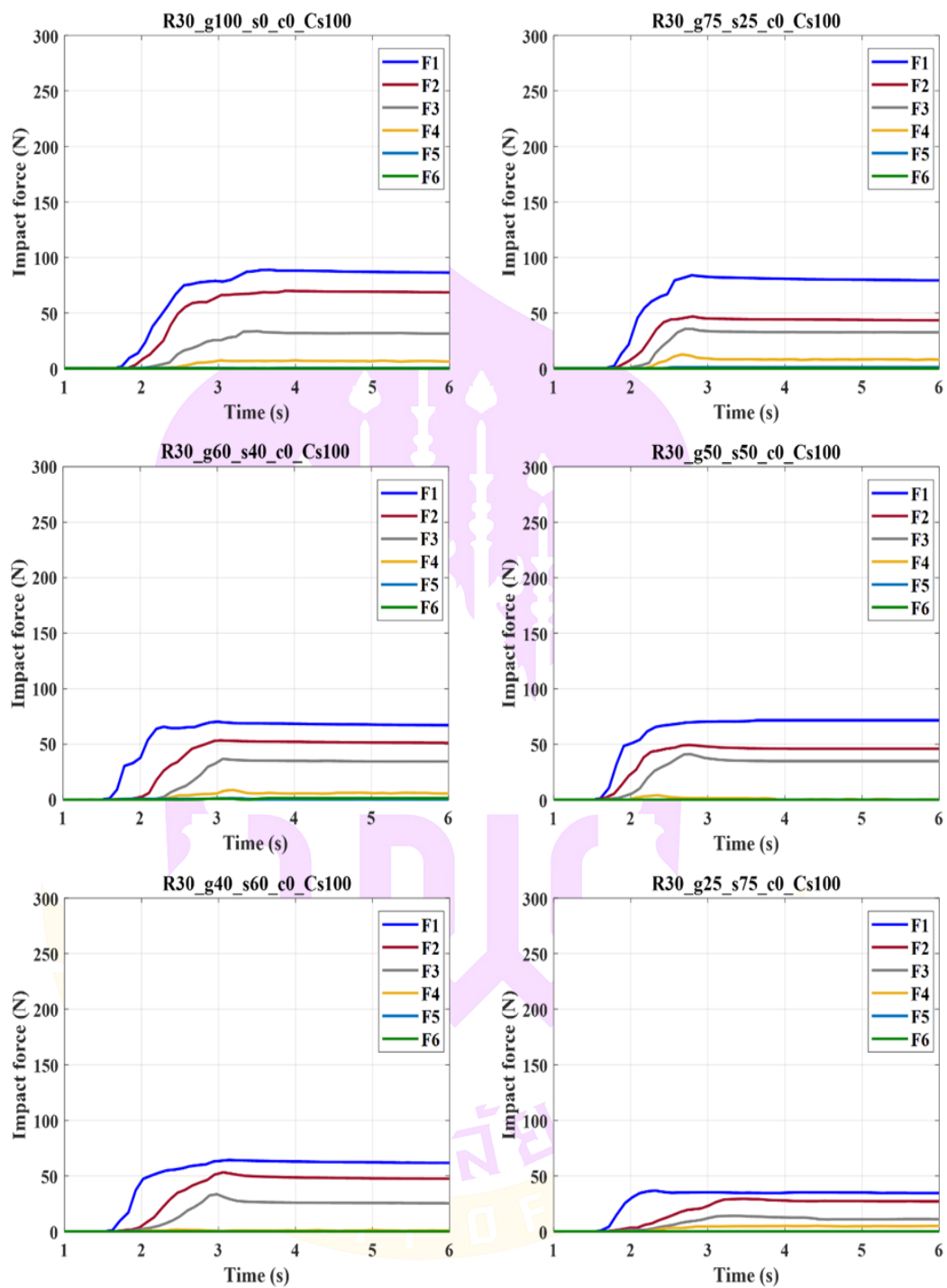
ส่งผลต่อค่าแรงกระแทกโดยตรง กล่าวคือเมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้นวัสดุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ส่งผลให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากผลกระทบของมุมลาดเอียงแล้ว การทดลองยังให้ความสำคัญกับการตรวจสอบความสม่ำเสมอของผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ ภาพ 80 ผลการทดสอบแรงกระแทกที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดสอบแต่ละครั้งที่มุมลาดเอียง $\theta = 35^\circ$ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีความผิดพลาดที่เกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น ความผิดพลาดของผู้ทำการทดลอง หรือข้อผิดพลาดจากเครื่องมือที่ใช้วัดค่า ในทางปฏิบัติแม้จะสามารถควบคุมเงื่อนไขแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณของวัสดุที่ไหลได้ แต่ก็ยังคงมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งอาจทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการทดสอบวัสดุแห้งที่ R35_g100_s0_c0_Cs100-0 พบว่าแรงกระแทกสูงสุดที่วัดได้จาก F1 อยู่ในช่วง 95-115 N ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละครั้งของการทดลอง แสดงให้เห็นว่าแม้จะเป็นวัสดุแบบเดียวกันและใช้เงื่อนไขเดียวกัน แต่ค่าที่วัดได้อาจมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากปัจจัยแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ทั้งหมด ในทางกลับกัน เมื่อทำการทดลองในสภาวะที่มีน้ำผสมอยู่ในวัสดุ เช่น กรณีของ R35_g30_s50_c20_Cs70-30 ค่าแรงกระแทกสูงสุดที่วัดได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า F1 อยู่ในช่วง 225-245 N ซึ่งสูงกว่ากรณีวัสดุแห้งอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึง ผลกระทบของน้ำที่ช่วยเพิ่มความเร็วของวัสดุที่ไหลลงมาตามมุมลาด ทำให้แรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำทำให้วัสดุมีลักษณะคล้ายของเหลวมากขึ้น อนุภาคของวัสดุจึงสามารถเคลื่อนที่ไปตามพื้นผิวลาดเอียงได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็วขึ้น นำไปสู่แรงกระแทกที่มากขึ้นเมื่อวัสดุพุ่งชนโครงสร้าง นอกจากนี้ ปรากฏการณ์นี้ยังสามารถอธิบายได้จากการที่น้ำช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของวัสดุ ทำให้วัสดุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น และเมื่อวัสดุมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้แรงที่กระทำต่อโครงสร้างสูงขึ้นตามไปด้วย ความแตกต่างของแรงกระแทกระหว่างการทดลองในสภาวะแห้งและสภาวะที่มีน้ำ จึงสามารถอธิบายได้ว่า น้ำมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่วัสดุมีมุมลาดเอียงสูงขึ้น นอกจากนี้ ผลการทดลองยังสะท้อนให้เห็นว่าการควบคุมปัจจัยที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลองเป็นสิ่งสำคัญแม้จะมีการควบคุมปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ แต่ยังคงอาจมีปัจจัยที่ไม่ได้ถูกควบคุมอย่างสมบูรณ์ เช่น การกระจายตัวของอนุภาควัสดุที่อาจมีความไม่สม่ำเสมอ หรือผลกระทบจากคุณสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยในการทดลองแต่ละครั้ง ดังนั้น การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลลัพธ์จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้เพื่อให้สามารถสรุปผลได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากที่สุด



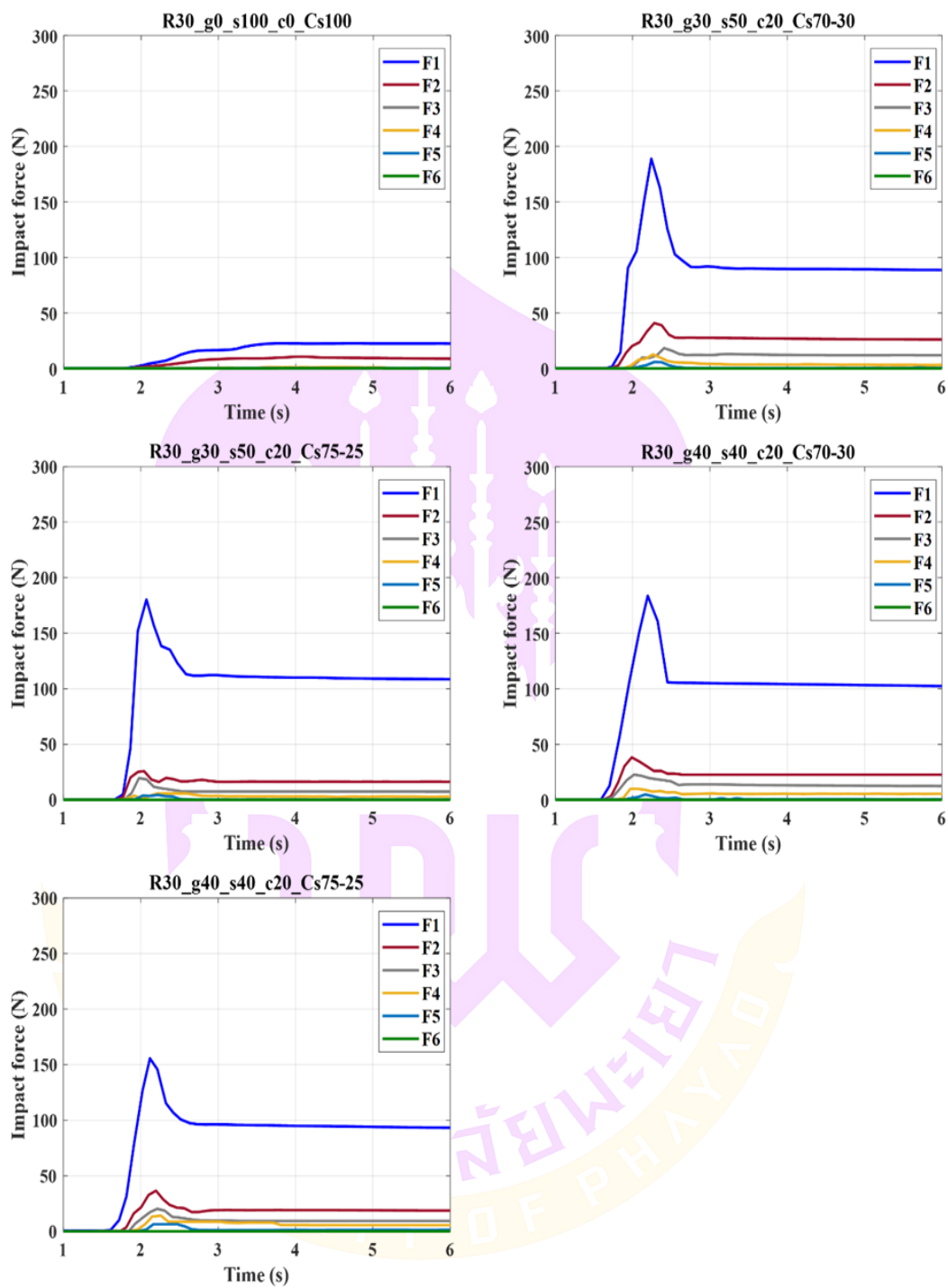
ภาพ 77 ความสัมพันธ์แรงกระแทกและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$



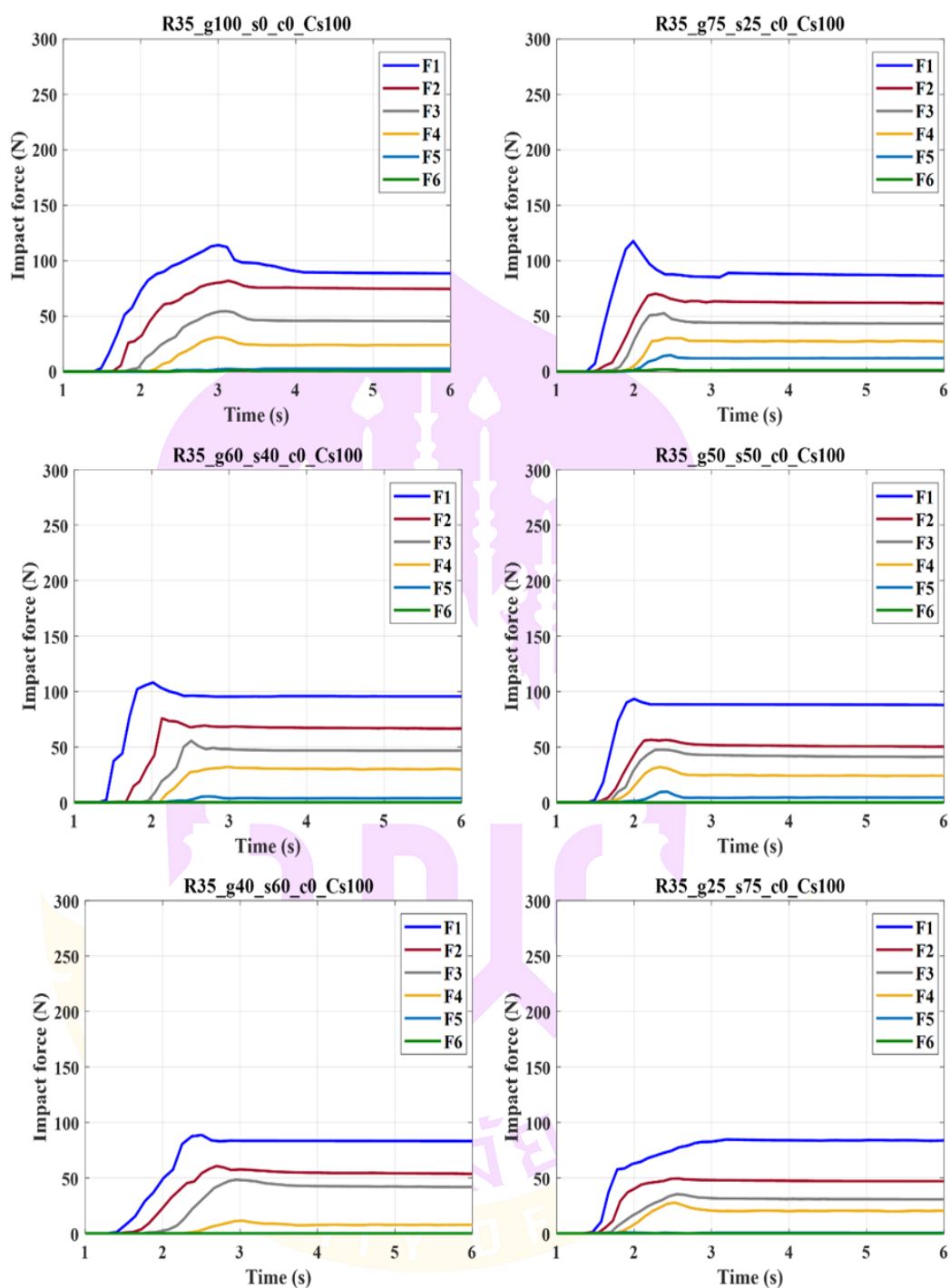
ภาพ 77 (ต่อ) ความสัมพันธ์แรงกระแทกและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$



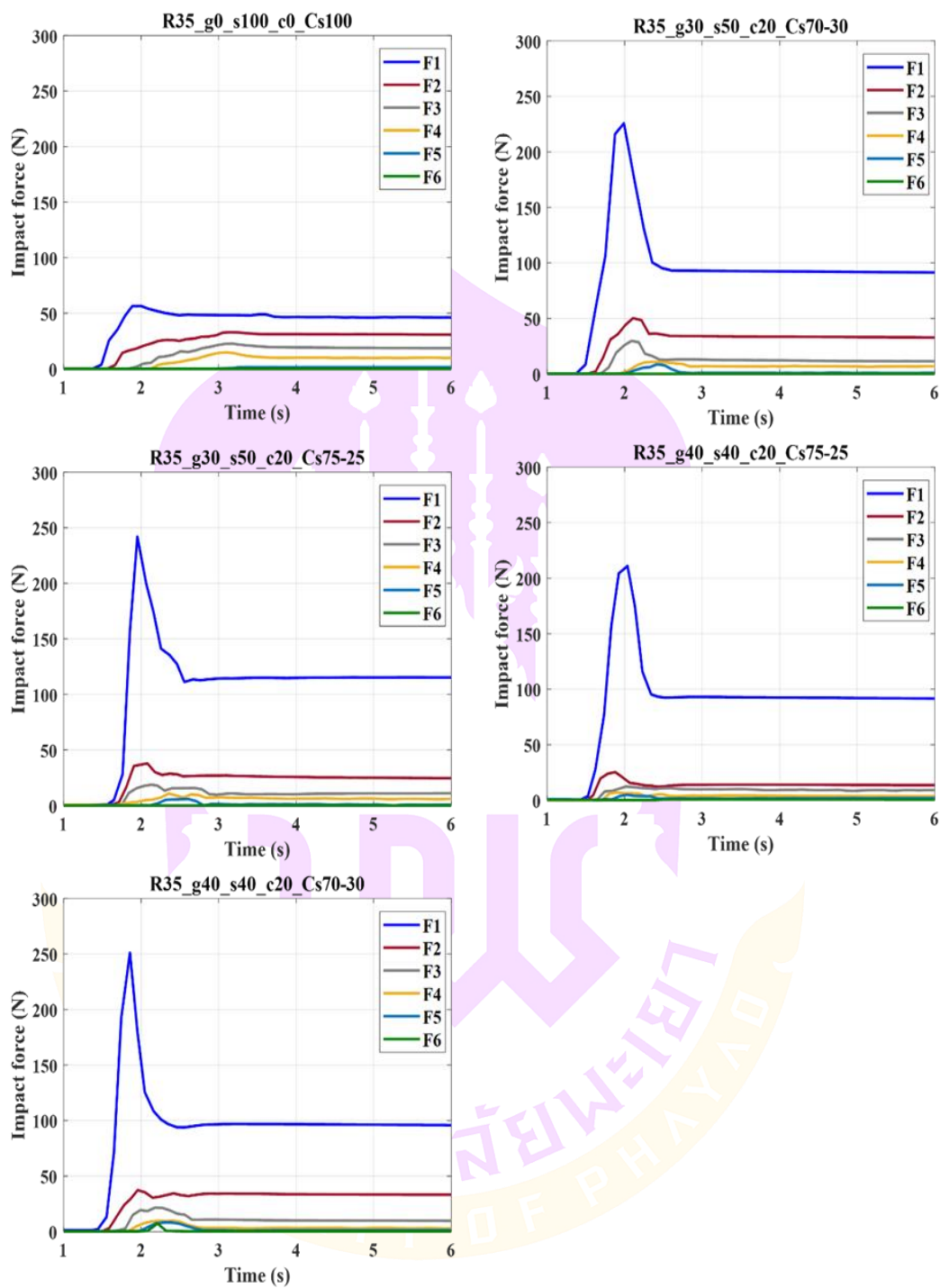
ภาพ 77 (ต่อ) ความสัมพันธ์แรงกระแทกและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$



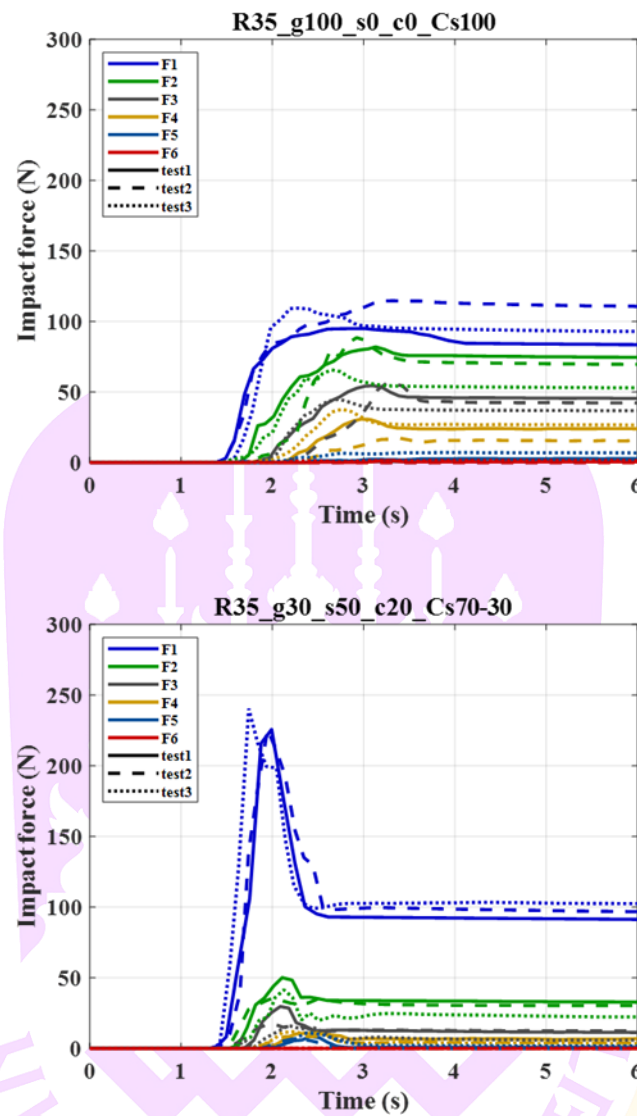
ภาพ 78 ความสัมพันธ์แรงกระแทกและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 30^\circ$



ภาพ 78 (ต่อ) ความสัมพันธ์แรงกระแทกและเวลา ที่มุมลาดเอียง = 30°



ภาพ 79 ความสัมพันธ์แรงกระแทกและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 35^\circ$



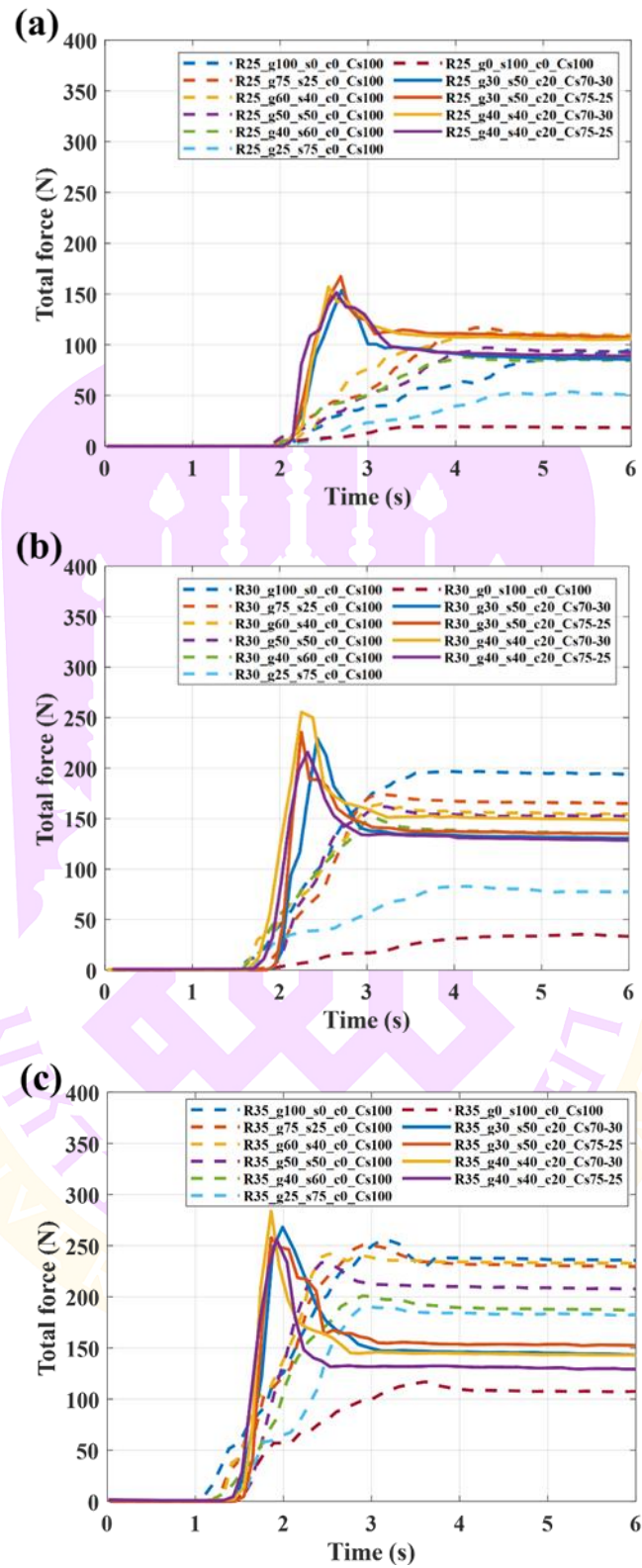
ภาพ 80 ผลการทดสอบแรงกระแทกที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็งจากการทดสอบ
แต่ละครั้ง ที่มุมลาด เอียง $\theta = 35^\circ$

เมื่อทำการทดลองโดยผสมวัสดุที่เป็นของแข็งกับน้ำ พบว่าแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบมีแนวโน้มสูงกว่าวัสดุที่แห้ง และค่านี้ยังขึ้นอยู่กับมุมลาดเอียงของพื้นผิวด้วย กล่าวคือ เมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้น วัสดุจะเคลื่อนที่เร็วขึ้น ส่งผลให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาผลรวมของแรงย่อยที่วัดได้จาก F1-F6 ดังแสดงในความสัมพันธ์ของ

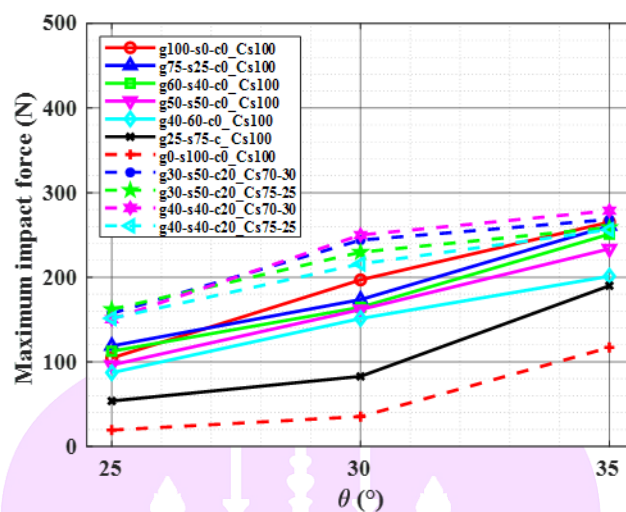
$$F = \sum_{i=1}^6 F_i \quad (4.1)$$

โดยที่ F คือ ปริมาณแรงรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง และ F_i คือ ปริมาณแรงย่อยที่ถูกวัดโดยโพลดเซลล์แต่ละตัว ได้แก่ $F1, F2, F3, F4, F5, F6$

จากการทดลอง พบว่า มุมลาดเอียง และประเภทของส่วนผสมทั้งแบบแห้ง และกึ่งของเหลว มีผลต่อแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้น ภาพ 81 และภาพ 82 โดยเริ่มจากการพิจารณาส่วนผสมแบบแห้ง (Cs100) ที่มุมลาดเอียง 25° ค่าแรงกระแทกสูงสุดของส่วนผสมแบบแห้งจะลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของวัสดุ เช่น R25_g100_s0_c0_Cs100 ซึ่งมีแต่กรวด แต่เนื่องด้วยความลาดชันไม่มากนัก แรงเสียดทานจึงมีผลต่อแรงที่เกิดขึ้น ทำให้แรงกระแทกสูงสุดที่ 104.53 N มีค่าน้อยกว่า แต่เมื่อเพิ่มทรายในส่วนผสม เช่น R25_g75_s25_c0_Cs100 ค่าแรงกระแทกสูงขึ้นเป็น 118.76 N อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มทรายจน R25_g50_s50_c0_Cs100 และ R25_g40_s60_c0_Cs100 ค่าแรงกระแทกลดลงเหลือ 96.227 N และ 87.206 N ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในส่วนผสมแบบแห้ง การเพิ่มปริมาณทรายมากจะลดแรงกระแทกที่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากความชันไม่มากแรงเสียดทานจึงมีผลกระทบต่อแรงกระแทก เมื่อเพิ่มมุมลาดเอียงเป็น 30° ค่าแรงกระแทกสูงสุดในส่วนผสมแบบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดย R30_g100_s0_c0_Cs100 มีค่าแรงกระแทกสูงสุดที่ 196.88 N และ R30_g75_s25_c0_Cs100 มีแรงกระแทกลดลงเล็กน้อยที่ 173.54 N ในกรณีนี้ การลดปริมาณกรวดและเพิ่มทรายกลับทำให้ค่าแรงกระแทกที่วัดได้ลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการที่ทรายช่วยลดการรวมตัวของวัสดุ ส่งผลให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นลดลง ส่วนในมุมลาดเอียง 35° ค่าแรงกระแทกสูงสุดเพิ่มขึ้นอีก โดย R35_g100_s0_c0_Cs100 มีค่าแรงกระแทกสูงสุดถึง 253.4 N แต่ลดลงเหลือ 242.23 N และ 233.55 N เมื่อปรับสัดส่วนเป็น R35_g75_s25_c0_Cs100 และ R35_g50_s50_c0_Cs100 ตามลำดับ สำหรับส่วนผสมแบบเปียก (Cs70-30 และ Cs75-25) มีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยที่มุมลาดเอียง 25° ส่วนผสม R25_g30_s50_c20_Cs70-30 และ R25_g30_s50_c20_Cs75-25 มีค่าแรงกระแทกสูงสุดที่ 157.24 N และ 162.01 N ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในมุมนี้ส่วนผสมที่มีสัดส่วนน้ำน้อยกว่า (Cs75-25) ให้ค่าแรงกระแทกสูงกว่า ในขณะที่เมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้นเป็น 30° และ 35° ค่าแรงกระแทกสูงสุดในส่วนผสมที่มีน้ำมากกว่า (Cs70-30) เช่น R30_g40_s40_c20_Cs70-30 และ R35_g40_s40_c20_Cs70-30 ให้ค่าแรงกระแทกสูงสุดที่ 249.97 N และ 278.69 N ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าส่วนผสมที่มีน้ำในสัดส่วนน้อยกว่า (Cs75-25) อย่างชัดเจน ส่วนผสมแบบแห้งมีค่าแรงกระแทกที่แปรผันตามสัดส่วนวัสดุ โดยกรวดมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มค่าแรงกระแทก ส่วนในส่วนผสมแบบเปียก น้ำมีบทบาทสำคัญที่แตกต่างกันไปตามมุมลาดเอียง กล่าวคือ ในมุมลาดเอียงต่ำ (25°) การลดสัดส่วนน้ำทำให้ค่าแรงกระแทกสูงขึ้น แต่ในมุมลาดเอียงสูง (30° และ 35°) น้ำในสัดส่วนที่มากกว่า (Cs70-30) จะช่วยลดแรงเสียดทานและเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ส่งผลให้ค่าแรงกระแทกสูงสุดเพิ่มขึ้น ดังนั้น การศึกษาผลกระทบของสัดส่วนของน้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบวัสดุเพื่อใช้ในการควบคุมแรงกระแทกในสถานการณ์จริง



ภาพ 81 ความสัมพันธ์แรงกระแทกรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$ 30° และ 35°

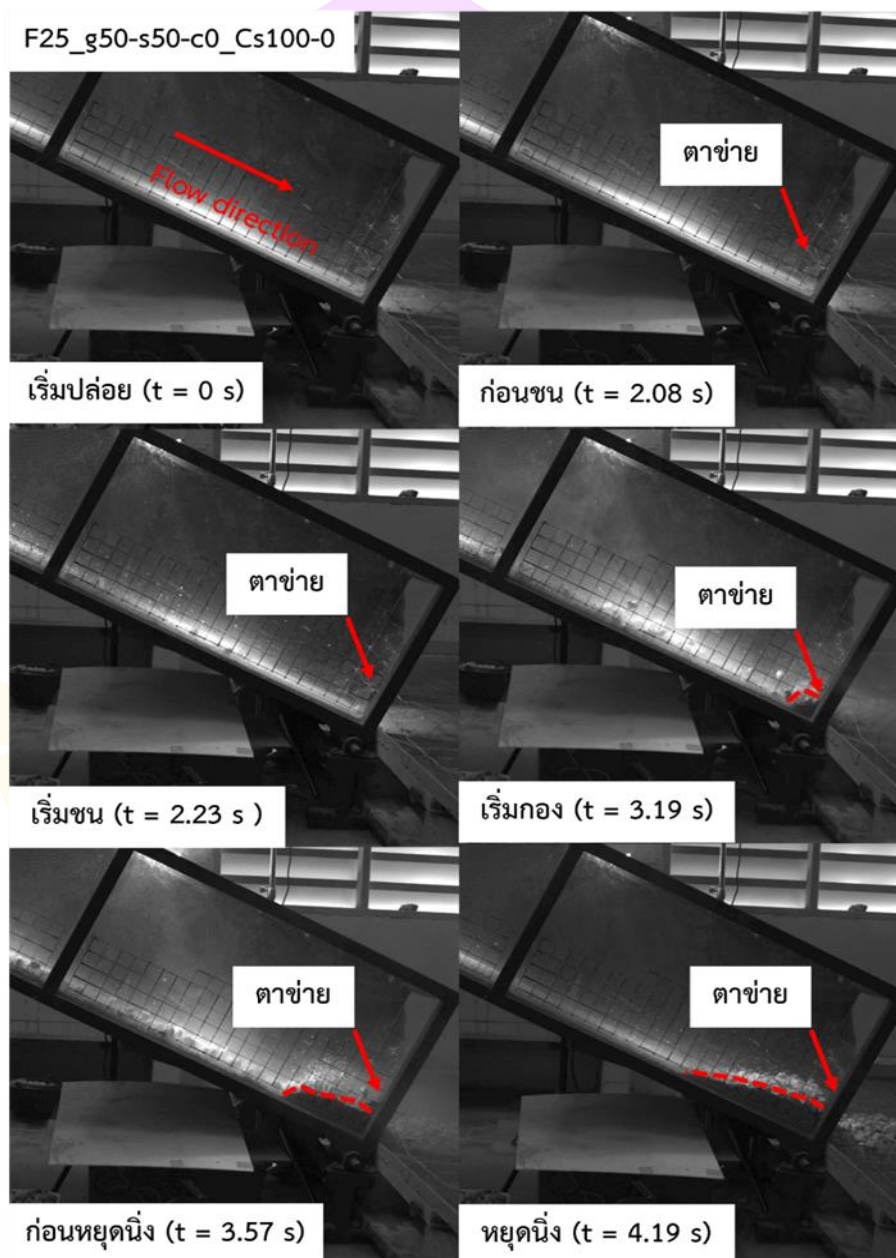


ภาพ 82 ผลของแรงกระแทกรวมสูงสุดจากมุมลาดเอียงต่าง ๆ

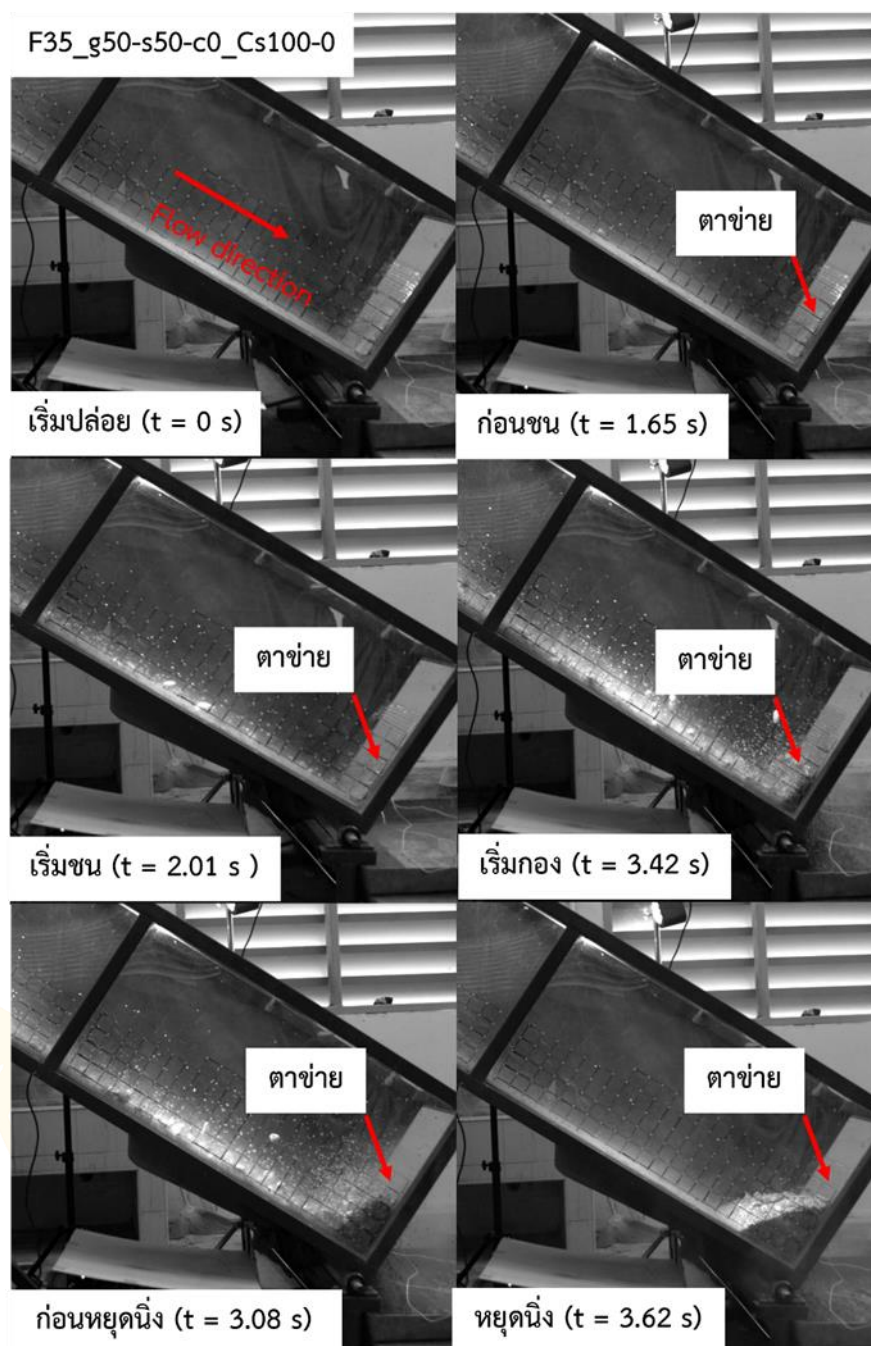
พฤติกรรมของแรงกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น

พฤติกรรมของแรงกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกับโครงสร้างแบบแข็ง โดยอาศัยแนวคิดของการกองสะสม (Pile up) และการไหลชัดขึ้น (Run-up) โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นมักออกแบบให้เป็นตาข่ายที่มีช่องเปิดเพื่อให้วัสดุบางส่วนสามารถไหลผ่านไปได้ เมื่อวัสดุชนกับโครงสร้าง แรงดิ่งที่เกิดขึ้นสามารถตรวจวัดได้โดยใช้ Load cell ที่ติดตั้งบนลวดสลิง จากการศึกษากิจกรรมของแรงกระแทกบนโครงสร้างแบบแข็ง พบว่า ความสูงของวัสดุที่กองสะสมจะอยู่ในช่วง 5-25 cm และ Load cell สามารถวัดค่าได้เฉพาะสามจุดล่างสุด (F1-F3) ดังนั้น ในการทดลองเกี่ยวกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นครั้งนี้ จึงมีการติดตั้ง Load Cell สามตำแหน่งที่ระดับความสูง 5 cm (F1), 10 cm (F2) และ 15 cm (F3) จากพื้นราง เพื่อเก็บข้อมูลแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากลวดสลิง จากการทดลองในเงื่อนไขต่าง ๆ ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$ $\theta = 30^\circ$ และ $\theta = 35^\circ$ ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น มุม 25° และ 35° ภาพ 83 และภาพ 84 แสดงตัวอย่างการไหลแบบแห้งและการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น เมื่อวัสดุแบบแห้งไหลมาถึงและชนกับตาข่าย สามารถสังเกตเห็นการกองสะสม ของวัสดุได้เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างแบบแข็ง จากผลการทดลองพบว่าความสูงของการกองขึ้นมีความสัมพันธ์กับมุมลาดเอียงของราง อย่างไรก็ตาม ในระหว่างที่วัสดุกำลังกองขึ้น อนุภาคบางส่วน โดยเฉพาะทราย อาจสามารถไหลทะลุตาข่ายไปได้ อีกทั้งลวดสลิงที่ใช้วัดแรงกระแทกมีระยะห่างจากพื้นราง ทำให้กรดและทรายบางส่วนสามารถไหลผ่านช่องว่างด้านล่างไปได้ เพื่อประเมินปริมาณวัสดุที่สามารถไหลผ่านโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น อนุภาคที่เล็ดลอดผ่านตาข่ายถูกเก็บรวบรวม และชั่งน้ำหนัก ผลการวัดระบุว่าวัสดุแบบแห้งที่ไหลผ่าน

ไปได้มีน้ำหนักรวมประมาณ 5-8 kg และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมวลลาดเอียงของรางเพิ่มขึ้น ภาพ 85 แสดงให้เห็นลักษณะของวัสดุที่กองสะสมอยู่หลังจากหยุดนิ่ง โดยพบว่าอนุภาคของกรวดซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ามักอยู่ด้านบนของชั้นทราย และความลาดชันของกองวัสดุที่เกิดขึ้นหน้าตาข่าย ทั้งนี้ การไหลของวัสดุที่เล็กที่ลอดผ่านช่องว่างใต้ตาข่ายมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปแบบการกองของวัสดุที่อยู่ด้านหน้าโครงสร้าง



ภาพ 83 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจากการทดลอง F25_g50_s50_c0_Cs100-0



ภาพ 84 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจากการทดลอง F35_g50_s50_c0_Cs100-0

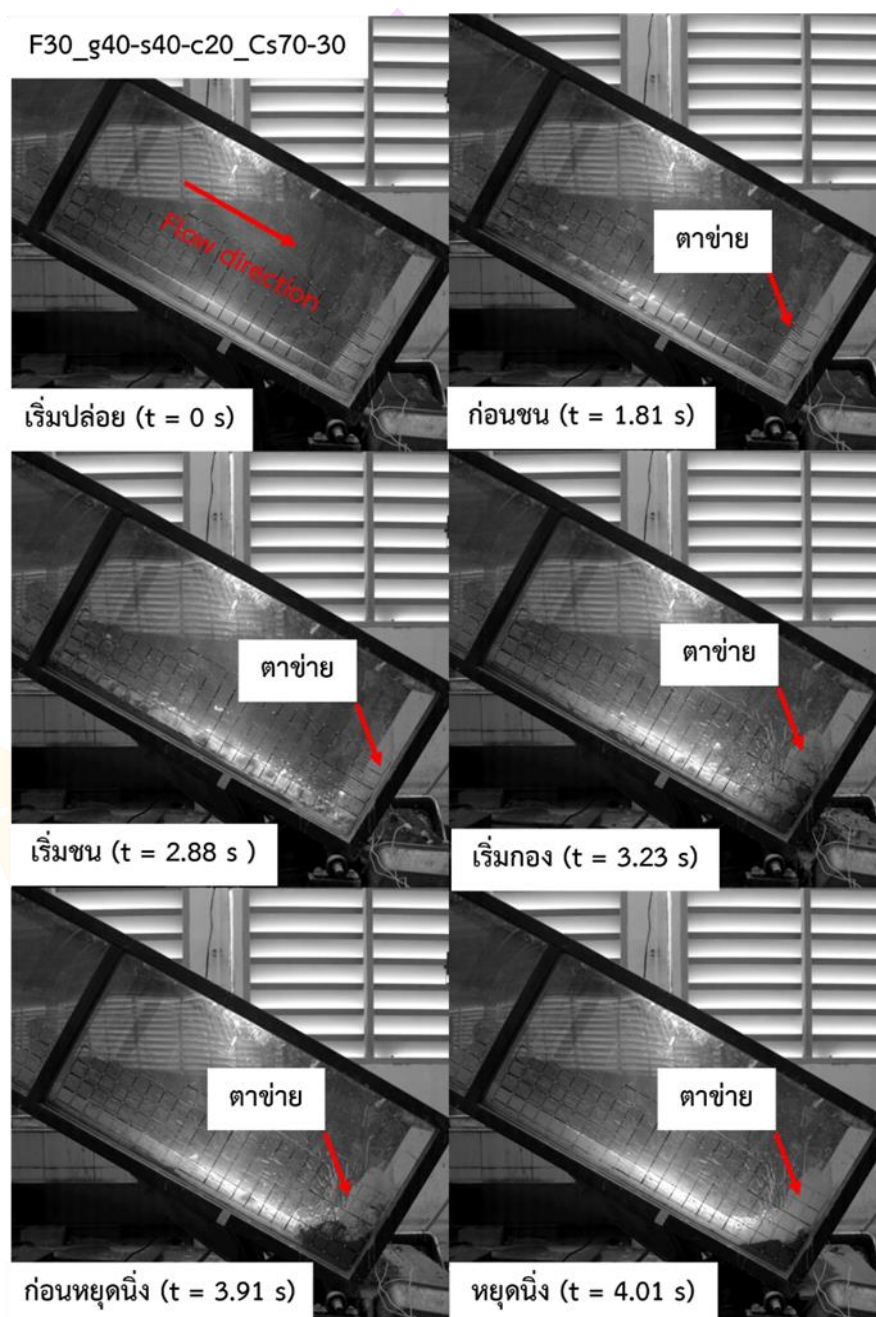


ภาพ 85 การกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจากการทดลอง
F25_g50_s50_c0_Cs100-0

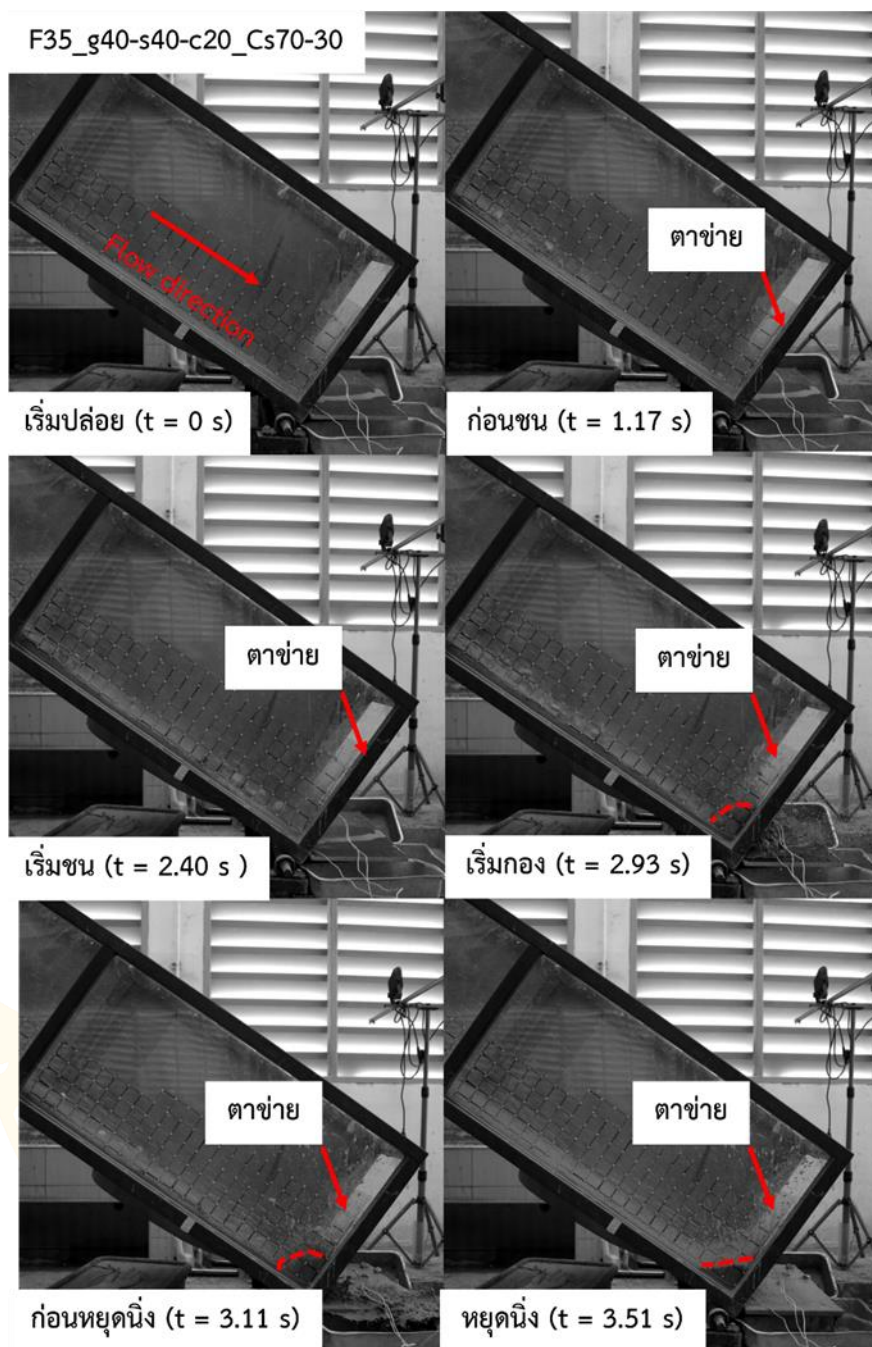
กลไกของการไหลขัดขึ้นไม่สามารถสังเกตได้ชัดเจน เนื่องจากตาข่ายมีช่องเปิดที่เอื้อให้วัสดุประเภทกิ่งของเหลว เช่น ดินเหนียว และน้ำไหลทะลุผ่านไปได้ วัสดุเหล่านี้มีความหนืดและแทรกซึมสูง จึงไม่สามารถสะสมอยู่ด้านหน้าตาข่ายทำให้การตรวจสอบด้วยสายตาทำได้ยาก เมื่อวัสดุเคลื่อนที่ลงมาตามพื้นลาดและชนกับตาข่าย จะเกิดแรงกระแทกที่ส่งผลต่อการสะสมตัวของวัสดุ ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค และลักษณะของตาข่าย วัสดุที่มีอนุภาคใหญ่ เช่น ทรายและกรวด ไม่สามารถไหลผ่านช่องเปิดของตาข่ายได้ง่าย จึงสะสมตัวอยู่ด้านหน้า ขณะที่วัสดุที่มีอนุภาคเล็กและมีช่องเหลวเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ดินเหนียวและน้ำ จะไหลผ่านช่องว่างไปได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณการสะสมด้านหน้าตาข่ายลดลง นอกจากคุณสมบัติของวัสดุแล้วมุมลาดเอียงของพื้นผิวที่วัสดุไหลลงมา ยังมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ด้วยยกตัวอย่างเช่น ภาพ 86 และภาพ 87 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่และแรงกระแทกของส่วนผสมบนตาข่ายจากการทดลองที่มุมลาดเอียง ในการทดลองที่มุมลาดเอียง $\theta = 30^\circ$ (F30_g40_s40_c20_Cs70-30) พบว่า ที่ความเร็ว 5.28 m/s ส่วนผสมของวัสดุยังสามารถสะสมตัวอยู่ด้านหน้าตาข่ายได้ในระดับหนึ่ง และยังสามารถสังเกตกลไกการไหลขัดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มมุมลาดเอียงเป็น $\theta = 35^\circ$ (F35_g30_s50_c20_Cs70-30) ความเร็วเพิ่มขึ้น 5.82 m/s ของวัสดุที่เคลื่อนที่ลงมาก่อนชนกับตาข่ายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นรุนแรงขึ้น ส่งผลให้ดินโคลนที่เคลือบอยู่บนอนุภาคทรายถูกพัดพาผ่านตาข่ายไปพร้อมกัน ทำให้ปริมาณวัสดุที่สะสมด้านหน้าตาข่ายลดลง พฤติกรรมนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มมุมลาดเอียงทำแรงของวัสดุเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นกับตาข่ายมีความรุนแรงมากขึ้น วัสดุที่มีขนาดเล็กและมีความสามารถในการไหลซึมสูงจะถูกพัดพาไปได้ง่ายกว่าวัสดุที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ปริมาณวัสดุที่กองอยู่ด้านหน้าตาข่ายลดลง เมื่อวัสดุหยุดเคลื่อนที่จะเกิดการกองสะสมของวัสดุในบริเวณด้านหน้าตาข่าย โดยองค์ประกอบของวัสดุที่เหลืออยู่ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุและขนาดของช่องเปิดของตาข่าย วัสดุที่มีขนาดใหญ่ เช่น กรวดและทราย จะไม่สามารถลอดผ่านช่องเปิดของตาข่ายได้ ภาพ 88 ทำให้เกิดการสะสมตัวอยู่ด้านหน้าโครงสร้าง อย่างไรก็ตามวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กมาก เช่น ดินเหนียวและน้ำ จะสามารถไหลทะลุผ่านช่องเปิดของตาข่ายไปเกือบทั้งหมด ทำให้บริเวณด้านหน้าตาข่ายเหลือเพียงวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น กรวดและทราย ในบางกรณี อนุภาคทรายและกรวดขนาดเล็กอาจสามารถลอดผ่านช่องว่างด้านล่างของตาข่ายได้บางส่วน

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า พฤติกรรมของวัสดุเม็ดแห้งและน้ำที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นมีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ องค์ประกอบของวัสดุ ขนาดอนุภาค ความสามารถในการไหลผ่านช่องเปิดของตาข่าย และมุมลาดเอียงของพื้นผิวที่วัสดุไหลลงมา วัสดุที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ เช่น กรวดและทราย จะสะสมตัวอยู่ด้านหน้าตาข่าย ในขณะที่วัสดุที่เป็นช่องเหลวหรือมีขนาดเล็ก เช่น ดินเหนียวและน้ำ จะไหลทะลุผ่านตาข่ายไป การเพิ่มมุมลาดเอียงส่งผลให้ความเร็วและแรงกระแทกของวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ปริมาณวัสดุที่สะสมด้านหน้าตาข่ายลดลง

การศึกษาพฤติกรรมของการไหลและแรงกระทำของวัสดุมีความสำคัญในการออกแบบโครงสร้างป้องกันที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอาจต้องพิจารณาปรับขนาดของช่องเปิดของตาข่าย หรือเพิ่มกลไกในการกักเก็บวัสดุบางประเภท เพื่อให้สามารถลดการทะลุผ่านของวัสดุที่ต้องการ และเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดเซาะหรือความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของวัสดุ



ภาพ 86 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจากการทดลอง F30_g30_s50_c20_Cs70-30



ภาพ 87 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจาก
การทดลอง F30_g40_s40_c20_Cs70-30

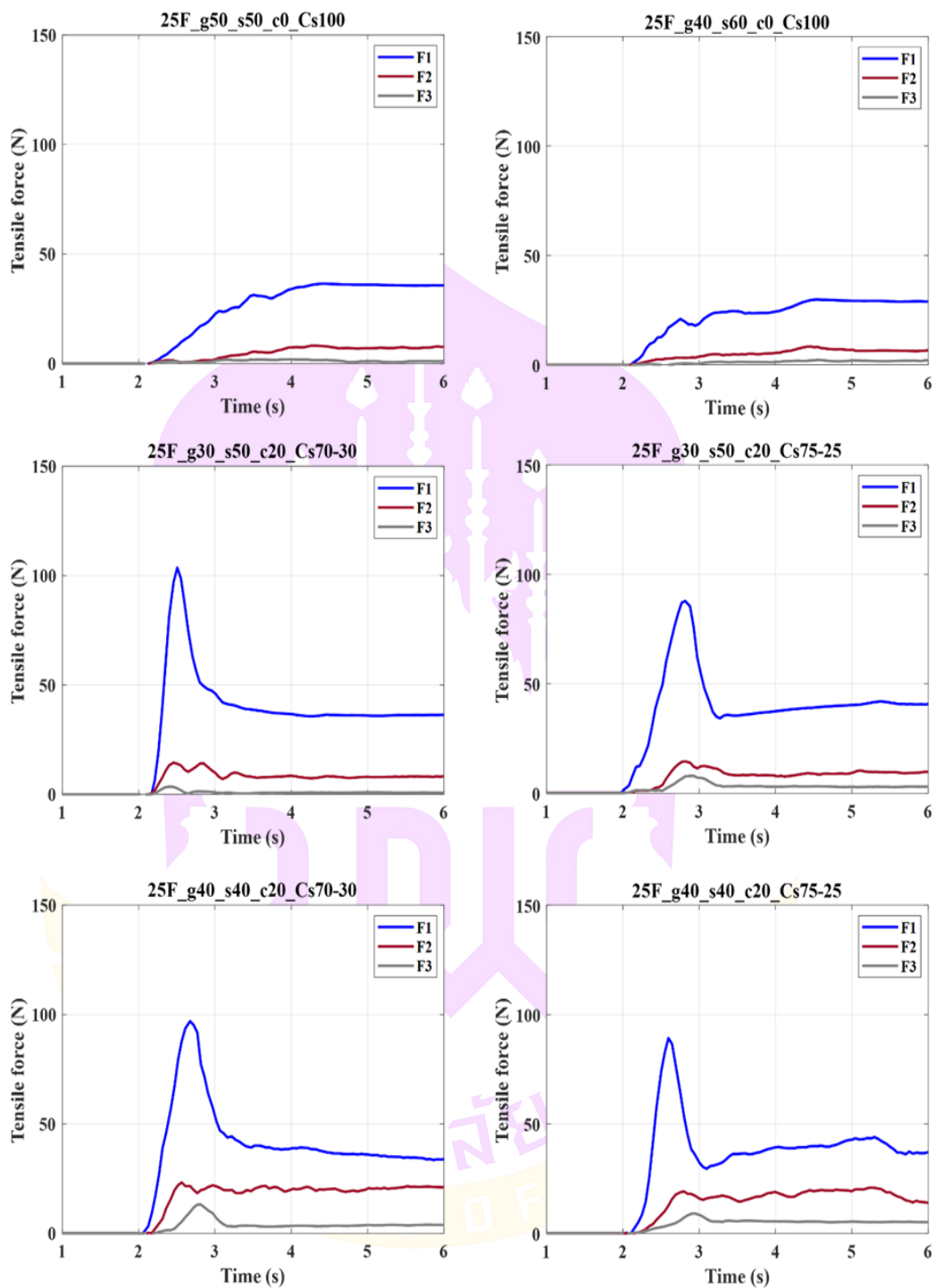


ภาพ 88 พฤติกรรมของการไหล และการกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นจาก
การทดลอง F30_g30_s50_c20_Cs70-30 และ F35_g40_s40_c20_Cs70-30

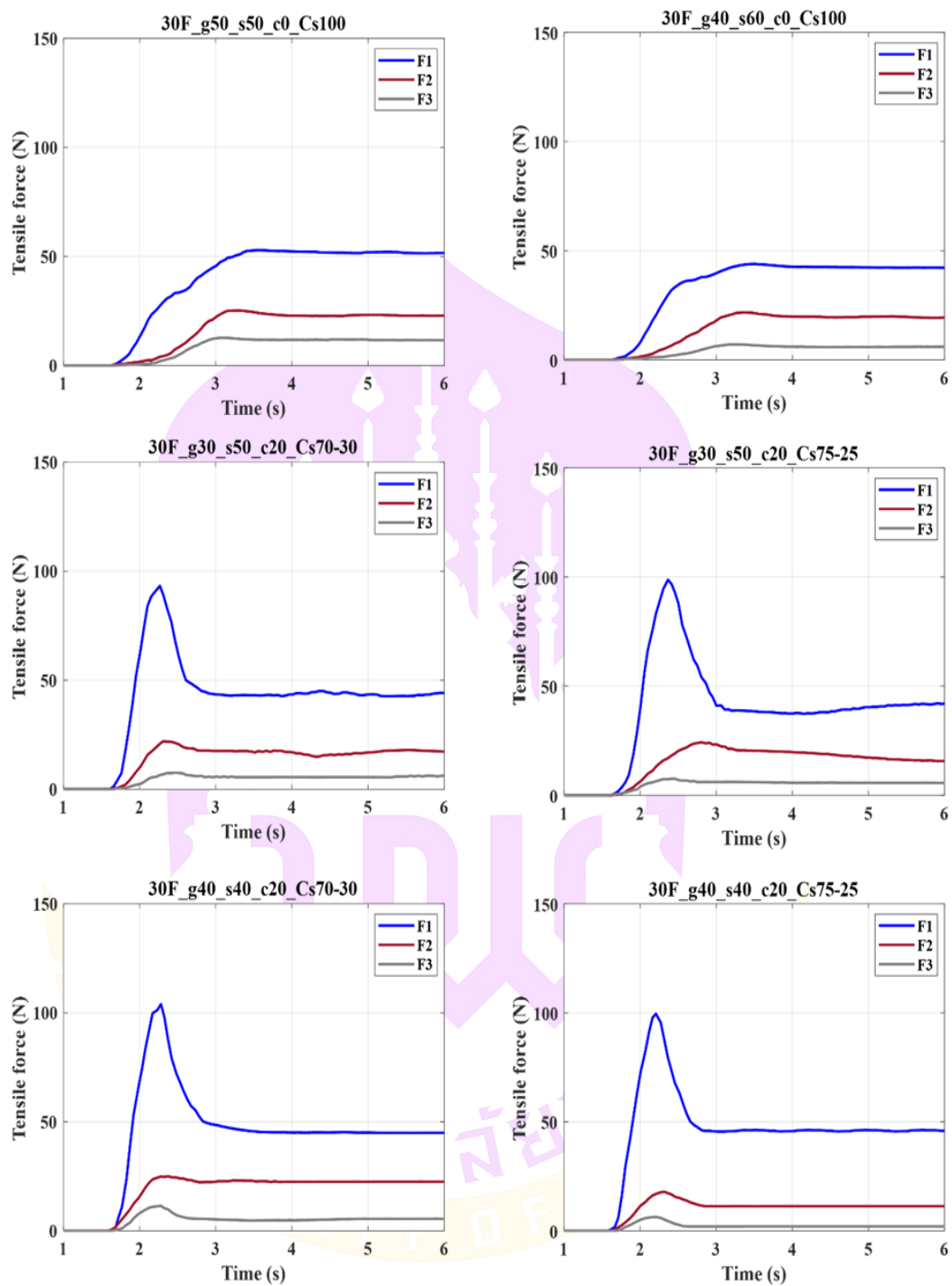
เมื่อตรวจสอบแรงกระแทกที่เกิดขึ้นบนตาข่ายจากการทดลองเกี่ยวกับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างตาข่ายแบบยืดหยุ่น พบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงในตำแหน่งต่าง ๆ มุมลาดเอียงของรางที่แตกต่างกัน ซึ่งมีค่า 25° 30° และ 35° รวมถึงลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ภาพ 89-91 วัสดุแบบแห้ง และสภาพที่มีการผสมน้ำวัสดุกิ่งของเหลว เมื่อทำการตรวจวัดแรงดึงในตำแหน่งต่าง ๆ ผ่าน Load cell ณ จุด F1 F2 และ F3 พบว่า ค่าแรงดึงมีแนวโน้มลดลงตามลำดับความสูงของตำแหน่งติดตั้ง Load cell โดยตำแหน่ง F1 ซึ่งอยู่ใกล้จุดกระแทกมากที่สุด จะมีค่าแรงดึงสูงที่สุด ส่วนตำแหน่ง F2 และ F3 ที่อยู่ไกลออกไปตามลำดับ พบว่าค่าแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในกรณีที่วัสดุอยู่ในสภาพกิ่งของเหลว สำหรับวัสดุกิ่งของเหลว (Cs70-30) พบว่าแรงดึงที่ตำแหน่ง F1 จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกก่อนที่จะลดลงและเข้าสู่สภาวะคงที่ ลักษณะพฤติกรรมนี้สามารถสังเกตได้ชัดเจนในกรณีที่มุมลาดเอียงของรางอยู่ที่ 25° และ 30° อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มมุมลาดเอียงเป็น 35° ค่าแรงดึงสูงสุดที่ตำแหน่ง F1 ยังคงมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แม้ว่าสัดส่วนของกรวดและทรายในวัสดุจะมีความแตกต่างกัน โดยค่าแรงดึงจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดแล้วค่อย ๆ ลดลงและเข้าสู่สภาวะคงที่ แรงดึงที่ตำแหน่ง F2 และ F3 มีค่าน้อยกว่าตำแหน่ง F1 อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกรณีส่วนผสมกิ่งของเหลว เนื่องจากของเหลวในวัสดุสามารถไหลผ่านช่องเปิดของโครงสร้างตาข่ายได้โดยตรง ทำให้แรงดึงที่ตำแหน่ง F2 และ F3 ไม่สะสมมากนัก ในขณะที่วัสดุแห้งซึ่งมีอนุภาคของกรวดและทรายสะสมอยู่ที่ด้านหน้าตาข่าย ส่งผลให้เกิดแรงดึงที่ตำแหน่ง F2 และ F3 มากกว่าวัสดุเปียกอย่างเห็นได้ชัด

ผลจากการเพิ่มมุมลาดเอียงของรางเป็น 35° แสดงให้เห็นว่าส่วนต่างระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดและค่าแรงดึงคงค้างของส่วนผสมกิ่งของเหลวมีค่ามากกว่าวัสดุแห้งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การพิจารณาความแตกต่างของแรงดึงระหว่างตำแหน่ง F1 และ F2 ยังพบว่า มุมลาดเอียงที่ 25° และ 30° ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าแรงดึงในแต่ละตำแหน่งมากกว่ามุมลาดเอียงที่ 35° ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างตาข่ายเกิดการเสียรูปมากขึ้นบริเวณตำแหน่ง F1 เมื่อวัสดุไหลเข้ากระแทกด้วยความรุนแรง ส่งผลให้ค่าแรงดึงที่ตำแหน่ง F2 และ F3 ลดลงตามลำดับ ในกรณีที่วัสดุอยู่ในสภาพกิ่งของเหลว ส่วนของเหลวสามารถไหลผ่านตาข่ายได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าแรงดึงคงค้างลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับแรงดึงสูงสุด นอกจากนี้ ค่าแรงดึงมีแนวโน้มลดลงและเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป โดยพบว่าค่าแรงดึงคงค้างของส่วนผสมกิ่งของเหลวมีค่าต่ำกว่าวัสดุแห้ง จากผลการทดลองแรงดึงรวมสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างตาข่ายเป็นผลลัพธ์ที่สะท้อนถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุเมื่อไหลผ่านโครงสร้างตาข่าย ภายใต้เงื่อนไขของส่วนผสมวัสดุทั้งในลักษณะแห้งและกิ่งของเหลว รวมถึงความลาดเอียงของรางที่ใช้ทดสอบ (ภาพ 92) โดยจากผลการทดลองสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงดึงสูงสุดได้ ดังนี้ ลักษณะวัสดุและส่วนผสมที่ส่งผลต่อแรงดึงสูงสุดในกรณีวัสดุแห้ง (Cs100) พบว่า ส่วนผสมที่มีสัดส่วนของกรวดน้อยกว่าทราย เช่น g40_s60_c0 ให้ค่าแรงดึงรวมต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ เนื่องจากวัสดุละเอียด เช่น ทราย สามารถเคลื่อนตัว

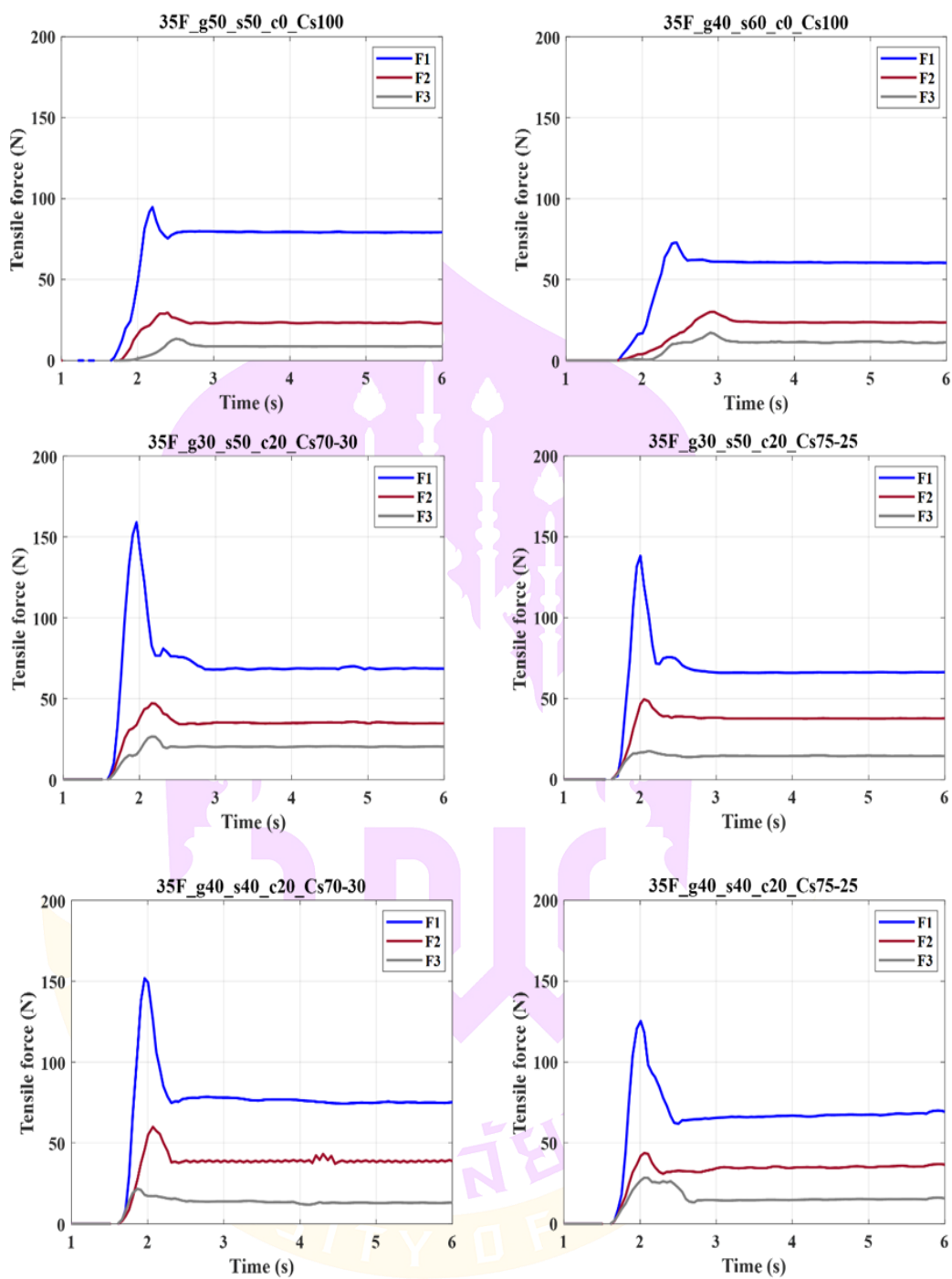
และสะสมในโครงสร้างตาข่ายได้ดีกว่าวัสดุหยาบอย่างกรวด ทำให้แรงดึงในตำแหน่งต่าง ๆ ของตาข่ายลดลง นอกจากนี้วัสดุแห่งนี้ยังไม่มีองค์ประกอบของน้ำที่จะช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาควัสดุ ส่งผลให้แรงดึงสูงสุดมีแรงที่ต่ำกว่าส่วนผสมแบบกึ่งของเหลว ในกรณีส่วนผสมแบบกึ่งของเหลว (Cs70-30 และ Cs75-25) ซึ่งมีน้ำ และดินเหนียวเป็นองค์ประกอบสำคัญ ทำให้ค่าแรงดึงรวมสูงสุดในทุกระดับความลาดเอียงมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากดินเหนียวทำหน้าที่เป็นสารยึดเหนี่ยวที่ช่วยเพิ่มความหนืด และการเกาะตัวของวัสดุภายในราง ส่งผลให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นบนตาข่ายมีความรุนแรงมากขึ้น และแรงดึงที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยสำหรับอัตราส่วนของวัสดุหยาบ (กรวด) และวัสดุละเอียด (ทราย) ส่วนผสมที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน เช่น g40_s40_c20 ให้ค่าแรงดึงรวมสูงสุดในทุกกรณี เนื่องจากส่วนผสมลักษณะนี้สามารถกระจายแรงกระแทกและแรงดึงได้อย่างเหมาะสม โดยวัสดุหยาบจะช่วยเพิ่มแรงเสียดทานขณะที่วัสดุละเอียดและดินเหนียวจะช่วยเพิ่มความหนืดของส่วนผสม ผลกระทบของน้ำต่อแรงดึงสูงสุดในกรณีกึ่งของเหลวน้ำมีบทบาทสำคัญในการกำหนดแรงดึงสูงสุด โดยสัดส่วนน้ำในส่วนผสมที่ต่างกัน เช่น Cs70-30 และ Cs75-25 ส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญส่วนผสม Cs70-30 ซึ่งมีน้ำ 30% แสดงค่าแรงดึงสูงสุดที่สูงกว่า Cs75-25 เนื่องจากปริมาณน้ำที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความหนืด และการเกาะตัวของวัสดุทำให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นบนตาข่ายมีความรุนแรงมากขึ้น ขณะที่ในกรณี Cs75-25 ซึ่งมีน้ำมากกว่า 30% วัสดุจะสูญเสียความหนืดและแรงยึดเหนี่ยวบางส่วน ส่งผลให้แรงดึงสูงสุดลดลง ผลกระทบของความลาดเอียงต่อแรงดึงสูงสุด ความลาดเอียงของรางที่ใช้ทดสอบมีบทบาทสำคัญต่อแรงกระแทกและแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น ภาพ 93 โดยเมื่อความลาดเอียงเพิ่มขึ้นจาก 25° เป็น 35° แรงดึงรวมสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกกรณี โดยเฉพาะในกรณีวัสดุเปียก เช่น Cs70-30 และ Cs75-25 ที่มีดินเหนียว (c20) เนื่องจากความลาดเอียงที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความเร็วและแรงโน้มถ่วงของวัสดุที่ไหลผ่านราง ทำให้แรงกระแทกและแรงดึงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างตาข่ายมีความรุนแรงมากขึ้น ในมุมลาดเอียง 35° ค่าแรงดึงรวมสูงสุดเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าเมื่อเทียบกับมุมลาดเอียง 25° โดยในกรณีวัสดุเปียก ส่วนผสม g40_s40_c20 ใน Cs70-30 ให้ค่าแรงดึงรวมสูงสุดที่ 221.51 N ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในการทดลอง เนื่องจากโครงสร้างตาข่ายต้องรับแรงกระแทกจากวัสดุที่มีความหนืดและน้ำหนักมากที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง แรงดึงรวมสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างตาข่ายขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ ได้แก่ ลักษณะวัสดุส่วนผสมของวัสดุ สัดส่วนน้ำ และความลาดเอียงของราง โดยส่วนผสมเปียกที่มีดินเหนียวและความลาดเอียงที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้แรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่วัสดุแห้งและส่วนผสมที่มีกรวดน้อยกว่าทรายให้ค่าแรงดึงรวมต่ำที่สุด นอกจากนี้โครงสร้างตาข่ายที่สามารถระบายน้ำและวัสดุขนาดเล็กได้อย่างเหมาะสม มีบทบาทสำคัญในการลดแรงดึงสะสมในตำแหน่งอื่น ๆ ของโครงสร้าง



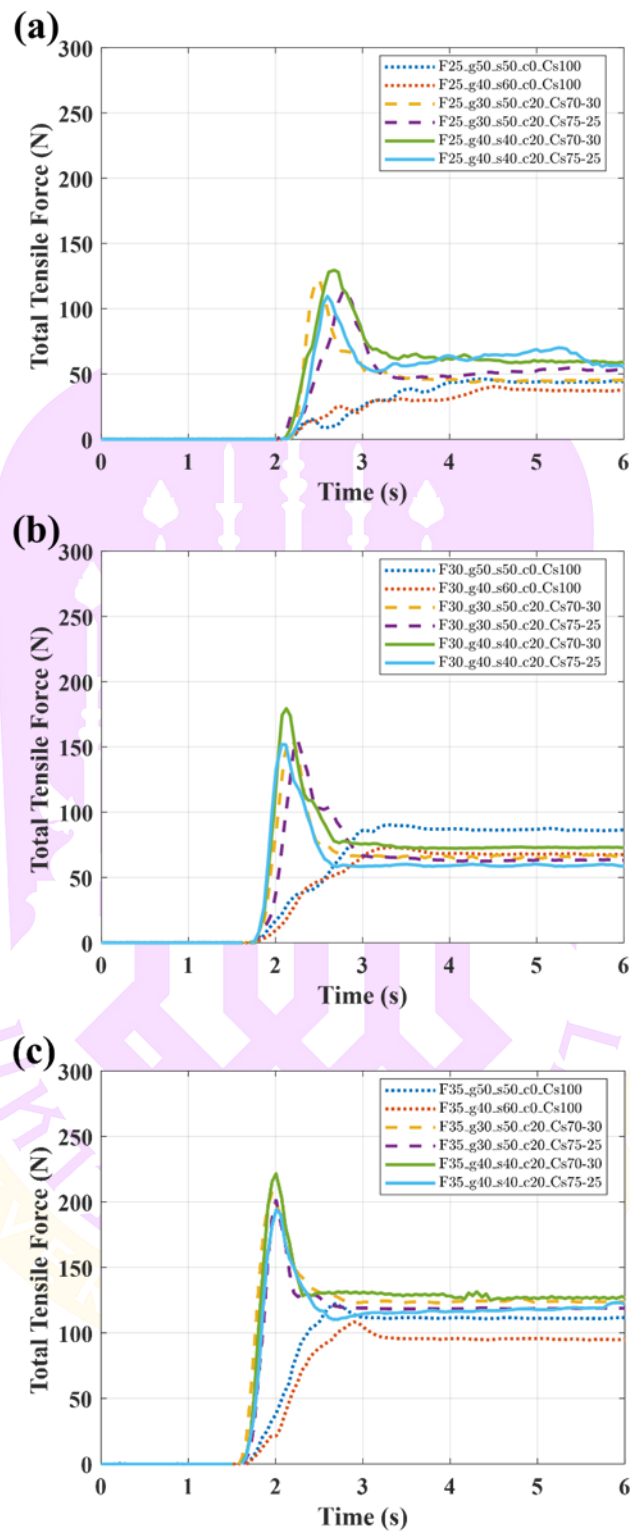
ภาพ 89 ความสัมพันธ์แรงดึงย่อยและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$



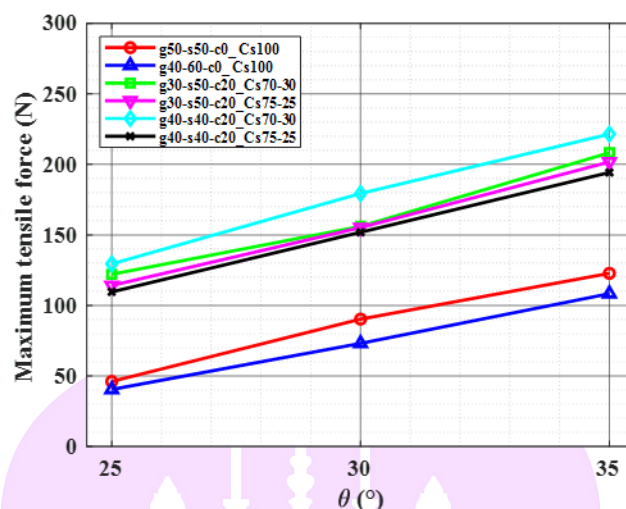
ภาพ 90 ความสัมพันธ์แรงดึงย่อยและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 30^\circ$



ภาพ 91 ความสัมพันธ์แรงดึงย่อยและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 35^\circ$



ภาพ 92 ความสัมพันธ์ถึงและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$ $\theta = 30^\circ$ และ $\theta = 35^\circ$



ภาพ 93 ความสัมพันธ์แรงดึงและเวลา ที่มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ 30^\circ$ และ 35°

การพยากรณ์แรงกระแทกของดินโคลน

1. การพยากรณ์แรงกระแทกจากสมการจากทฤษฎีคำนวณแรง

ตาราง 3 ได้นำเสนอความสัมพันธ์สำหรับการคำนวณแรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างเนื่องจากการไหลหลากของดินโคลน โดย Zhao, et al. (2018) ได้ทำการศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการโดยการจำลองการไหลของโคลนถล่มในรางทดลอง (Flume) และวัดแรงกระแทกที่เกิดขึ้นเมื่อโคลนพุ่งชนกับแผงรับแรง (Impact Plate) ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันของความเร็ว ความหนาแน่น ความลึก และอัตราส่วนของช่องแข็งในของไหล จากนั้นจึงนำข้อมูลแรงกระแทกที่ได้มาวิเคราะห์ในเชิงพลศาสตร์ของไหล โดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensional Analysis) และการปรับเทียบค่าทางสถิติ (Regression Analysis) เพื่อสร้างสมการทำนายแรงกระแทกที่อยู่ในรูปของสมการไร้มิติ (Dimensionless Form) โดยสมการประกอบด้วย

$$F = 0.18F_r^{0.0052} \left(\frac{\rho}{\rho_{water}} \right)^{1.8142} v_0^2 h w \quad (4.1)$$

โดยสมการประกอบด้วย Froude Number (F_r) ρ คือ ความหนาแน่นวัสดุ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ v คือ ความเร็วของการไหล h (m) คือ ความลึกของการไหล และ w คือ ความกว้างของกำแพงกัน เมื่อนำสมการที่พัฒนาขึ้นไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงพบว่า สมการสามารถทำนายค่าแรงกระแทกได้อย่างแม่นยำ โดยจากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ค่าที่คำนวณได้มีความสัมพันธ์ที่ดีมากกับค่าที่วัดได้จริง โดยมีค่า $R^2 = 0.91$ ซึ่งสะท้อนว่าสมการสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึงกว่า 90% และมีแนวโน้มของ

ความคลาดเคลื่อน ที่ต่ำ Di Perna, et al. (2022) นำเสนอสมการพยากรณ์แรงกระแทกโดยใช้แนวทางแบบผสมผสานระหว่างการจำลองเชิงตัวเลขและการสอบเทียบกับข้อมูลจริง โดยใช้วิธี Material Point Method (MPM) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความสามารถในการจำลองพฤติกรรมของมวลวัสดุที่ไหล เช่น debris flow ได้อย่างสมจริง โดยสามารถวิเคราะห์แรงกระแทกที่เกิดขึ้นเมื่อมวลดินโคลนพุ่งชนโครงสร้างป้องกัน

$$F_{peak} = 1.781Fr^{-0.515} \rho_m v_{1,0}^2 h \quad (4.2)$$

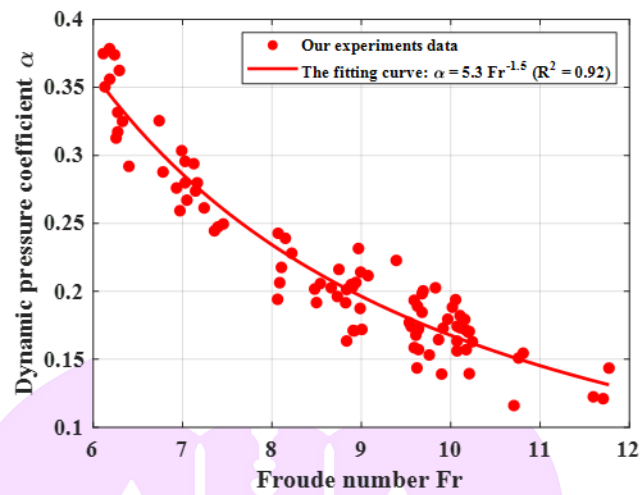
$$F_{peak} = 1.432Fr^{-0.365} \rho_m v_{1,0}^2 h + 0.5 \rho_m g h^2 \quad (4.3)$$

โดยสมการจะประกอบด้วย Froude Number (F_r) ρ_m ความหนาแน่น v ความเร็วของการไหล h ความลึกของการไหล และ g แรงโน้มถ่วง เพื่อประเมินความแม่นยำของสมการที่นำเสนอได้นำผลลัพธ์จากสมการไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากเหตุการณ์จริง จำนวน 139 กรณีในพื้นที่ Jiangjia Ravine ประเทศจีน ซึ่งเป็นสถานที่ที่มีการเก็บข้อมูลแรงกระแทกจริงจากโครงสร้างรับแรงโดยตรง ผลการเปรียบเทียบพบว่าสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถประมาณแรงกระแทกได้ใกล้เคียงกับค่าจริงโดยมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 10% ซึ่งแสดงถึงความสอดคล้องของสมการกับพฤติกรรมของ Debris Flow ในสถานการณ์จริง ทั้งนี้แม้สมการที่นำเสนอในทั้งสองงานจะมีความแม่นยำสูงเมื่อใช้ภายใต้เงื่อนไขของการศึกษาเดิม แต่เนื่องจากสมการดังกล่าวถูกพัฒนาจากข้อมูลการทดลองหรือการจำลองที่มีลักษณะเฉพาะ หรือรูปแบบการไหลที่ควบคุมไว้ในการทดลอง จึงทำให้พารามิเตอร์บางค่าที่ใช้ในสมการ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ที่สัมพันธ์กับ F_r ต้องพิจารณาจากข้อมูลในการทดลองเท่านั้น ในงานวิจัยนี้มีลักษณะของส่วนผสม และสภาพการไหลที่แตกต่างออกไปจากการศึกษาดังกล่าวรวมถึงเงื่อนไขขอบเขตอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของโคลนถล่ม ดังนั้นจึงไม่สามารถนำสมการจากงานวิจัยทั้งสองมาใช้ในการทดลองได้โดยตรงโดยไม่ทำการสอบเทียบหรือปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับบริบทของงานวิจัยนี้ได้โดยตรง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ α กับจำนวน F_r ในรูปของสมการ $\alpha = 5.3Fr^{-1.5}$ โดยค่าดังกล่าวแสดงพฤติกรรมแบบแปรผกผันเชิงกำลัง (Power-law Inverse Relationship) ซึ่งสะท้อนว่าเมื่ออัตราเร็วของการไหลเพิ่มขึ้น (F_r มากขึ้น) ค่าความดันที่เกิดจากแรงกระแทกจะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งช่วยให้การพยากรณ์แรงกระแทกมีความแม่นยำและยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้นสำหรับสถานการณ์ที่แตกต่างกันในทางวิศวกรรม Cui, et al. (2015) ภาพ 94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ α และ Froude Number (F_r) พบว่าจุดข้อมูล (จุดสีแดง) แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับเส้นโค้ง (เส้นสีแดง) ตามสมการดังกล่าว โดยเฉพาะในช่วงค่าประมาณ 1–12 ซึ่งเป็นช่วงที่สอดคล้องกับการไหลแบบเหนือวิกฤต (Supercritical Flow) อันเป็นลักษณะที่พบได้ทั่วไปในโคลนถล่มที่มีความเร็วสูง ค่าสัมประสิทธิ์ มีพฤติกรรมแปรผกผันแบบกำลังกับจำนวนฟรูด กล่าวคือเมื่อ F_r เพิ่มขึ้น แรงดันพลศาสตร์ต่อหน่วยพื้นที่มีแนวโน้มลดลง แม้ว่าพลังงานจลน์ของของไหล

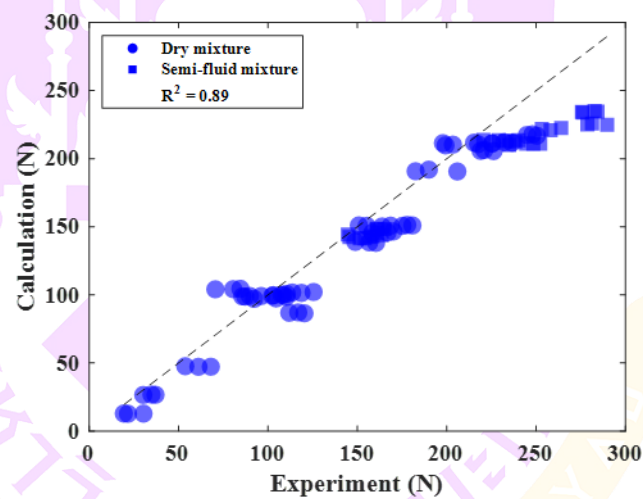
จะเพิ่มขึ้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการไหลจากหนืดไปสู่การไหลแบบเฉื่อยแรง ซึ่งทำให้การกระจายแรงกระแทกมีลักษณะกว้างขึ้นและไม่เกิดแรงกระจุกตัวเฉพาะจุด โดยมีค่า $R^2 = 0.92$ ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการอธิบายแนวโน้มของข้อมูลที่ได้จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับข้อมูลในสภาวะต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้สมการนี้ในการวิเคราะห์ช่วยลดข้อจำกัดของ การกำหนดค่า α แบบตายตัวในแบบจำลองทั่วไป โดยสามารถปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับลักษณะการไหลผ่านตัวแปร F_r ได้อย่างยืดหยุ่น ซึ่งมีความสำคัญต่อการประเมินแรงกระแทกจากโคลนถล่ม สะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์สำคัญระหว่างพฤติกรรมของการไหลและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง จากความสัมพันธ์ที่กล่าวถึงเมื่อนำมาคำนวณแรงกระแทกเทียบกับค่าจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ พบว่า ค่าที่พยากรณ์ได้มีแนวโน้มกระจายตัวไปตามเส้นแนวโน้มเชิงเส้นได้ดี โดยมีค่า $R^2 = 0.89$ ภาพ 95 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกระแทกที่ได้จาก การทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณ สามารถสังเกตพฤติกรรมของข้อมูลในแต่ละช่วงของแรงกระแทกได้อย่างชัดเจน (วงกลม) ซึ่งแทนส่วนผสมแบบแห้ง (สีเหลี่ยม) ซึ่งแทนส่วนผสมแบบกึ่งของเหลวโดยในช่วงแรงกระแทกต่ำกว่า 100 N จุดข้อมูลส่วนใหญ่มีการเกาะกลุ่มใกล้เคียงกับเส้นแนวโน้มเชิงเส้น ซึ่งแสดงว่าสมการสามารถพยากรณ์แรงกระแทกในช่วงนี้ได้ด้วยความแม่นยำความคลาดเคลื่อนมีน้อย และจุดข้อมูลแสดงความสม่ำเสมอระหว่างค่าทดลองและค่าคำนวณเมื่อแรงกระแทกอยู่ในช่วงประมาณ 100–200 N จุดข้อมูลเริ่มมีการกระจายตัวออกจากเส้นแนวโน้มมากขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะในกลุ่มของส่วนผสมแบบกึ่งของเหลวที่เริ่มแสดงความแปรปรวนของค่าที่มากขึ้นอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลเมื่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น และลักษณะของไหลเริ่มมีพลวัตซับซ้อนมากกว่าสภาวะนิ่ง สำหรับช่วงแรงกระแทกที่สูงกว่า 200 N ขึ้นไป จุดข้อมูลจำนวนมาก โดยเฉพาะในกลุ่มของส่วนผสมแบบกึ่งของเหลว (สีเหลี่ยม) มีแนวโน้มกระจายตัวออกจากเส้นแนวโน้มอย่างชัดเจนมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่าที่พยากรณ์ได้จากสมการมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าค่าทดลองในบางกรณี ซึ่งอาจเป็นผลมาจากพฤติกรรมการไหลที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็ว เช่น การเกิดแรงเฉือนสูง ความเร่งในการชน หรือแรงเสียดทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งนี้สมการที่ใช้ในการพยากรณ์อาจยังไม่สามารถสะท้อนผลกระทบจากปัจจัยทางพลศาสตร์เหล่านี้ได้อย่างเพียงพอ เมื่อพิจารณาลักษณะของจุดข้อมูลตามรูปแบบของส่วนผสม พบว่า จุดข้อมูลที่เป็น (วงกลม) มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่า และเกาะกลุ่มใกล้เส้นแนวโน้มตลอดทุกช่วงของแรงกระแทก แสดงถึงความเสถียรในการพยากรณ์ ในทางตรงกันข้ามจุดข้อมูลที่เป็น (สีเหลี่ยม) กลับแสดงการกระจายตัวที่มากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงแรงกระแทกสูง สะท้อนถึงผลกระทบจากปริมาณน้ำในดินโคลนที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลและความแม่นยำของแบบจำลองอย่างชัดเจน

ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเสนอสมการที่ใช้ในการพยากรณ์แรงกระแทกด้วยวิธี Symbolic Regression (SR)



ภาพ 94 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ α และ Froude number (F_r)



ภาพ 95 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกจากการทดลอง และแรงกระแทกจากการพยากรณ์
โดยใช้สมการ $F = \alpha \rho v^2 h w$ (จุดวงกลม) คือ ส่วนผสมแบบแห้ง (จุดสี่เหลี่ยม)
คือ ส่วนผสมแบบเปียก

2. การพยากรณ์แรงกระแทกของดินโคลนโดยใช้ Symbolic Regression

Symbolic Regression (SR) เป็นเทคนิคที่มีศักยภาพในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์จากข้อมูลดิบ โดยไม่ต้องกำหนดโครงสร้างของสมการล่วงหน้า ความสามารถนี้ทำให้ SR แตกต่างจากวิธีการพยากรณ์แบบดั้งเดิม เช่น การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) หรือแบบจำลองพหุนาม (Polynomial Regression) ซึ่งต้องมีการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ต้น ในทางกลับกัน SR สามารถค้นหาสมการที่เหมาะสมจากข้อมูลโดยอัตโนมัติ ทำให้เป็นทางเลือกที่ดีในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบที่มีความซับซ้อน อย่างไรก็ตาม SR เป็นส่วนหนึ่งของ Machine Learning (ML) แม้ว่าคุณสมบัตินี้จะเป็นจุดแข็งหลักของ SR แต่มันก็มาพร้อมกับข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาเมื่อเลือกใช้งาน ข้อดีที่สำคัญของ Symbolic Regression คือ ความสามารถในการให้สมการที่สามารถตีความได้ (Interpretable Models) ซึ่งเป็นสิ่งที่ขาดหายไปในเทคนิค Machine Learning อื่น ๆ เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) ถึงแม้ว่าโมเดลแบบ Neural Networks จะสามารถพยากรณ์ค่าที่แม่นยำสูงมาก แต่ผลลัพธ์ที่ได้มักจะอยู่ในรูปของพารามิเตอร์น้ำหนักหรือนับล้านค่า ซึ่งวิธีการนี้เหมาะกับการใช้กับชุดข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ ในทางกลับกัน SR ให้สมการที่มีโครงสร้างชัดเจน และสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างตรงไปตรงมา ยกตัวอย่างเช่นในการศึกษานี้การพยากรณ์แรงกระแทกของดินโคลน SR สามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เช่น ความหนืด ความหนาแน่น และความเร็วของการไหลในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ ทำให้ SR เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับความต้องการความเข้าใจเชิงกลไกของระบบ ไม่ใช่เพียงแค่ผลลัพธ์ที่ให้ค่าพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพเท่านั้น นอกจากนี้ Symbolic Regression ยังช่วยให้สามารถค้นพบความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรโดยไม่ต้องตั้งสมมติฐานล่วงหน้า ซึ่งแตกต่างจากวิธีการถดถอยเชิงเส้นที่ต้องสมมติว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง หรือแม้แต่การใช้ Polynomial Regression ซึ่งแม้ว่าจะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ แต่ก็ยังต้องกำหนดลำดับของพหุนามที่ใช้ล่วงหน้า SR ทำงานโดยอาศัยกระบวนการทาง Genetic Programming ในการสร้างสมการโดยอัตโนมัติ ซึ่งช่วยให้สามารถระบุความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรหลายตัวได้ อีกหนึ่งข้อดีที่สำคัญของ SR คือ ความสามารถในการลดปัญหาการเกิด Overfitting เป็นปัญหาที่พบบ่อยในแบบจำลอง Machine Learning ที่มีความซับซ้อนสูง โมเดลที่ซับซ้อนเกินไป อาจสามารถพยากรณ์ค่าได้แม่นยำมากในชุดข้อมูลฝึก (Training Data) แต่เมื่อนำไปใช้กับข้อมูลใหม่ กลับให้ผลลัพธ์ที่ไม่น่าเชื่อถือ เนื่องจาก SR ใช้หลักการของ Genetic Programming ในการเลือกสมการที่เหมาะสม จึงสามารถควบคุมระดับความซับซ้อนของสมการได้ ส่งผลให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ดีทั้งในข้อมูลเดิมและข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน ทำให้มั่นใจได้ว่าผลลัพธ์จาก SR จะสามารถนำไปใช้ในสถานการณ์จริงได้โดยไม่เกิดข้อผิดพลาดมากนัก อย่างไรก็ตามแม้ว่าคุณสมบัติข้างต้นจะทำให้ Symbolic Regression เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ

แต่ก็มีข้อจำกัดที่สำคัญหลายประการ ข้อจำกัดแรกที่ต้องพิจารณาคือการใช้ทรัพยากรคำนวณสูง และระยะเวลาการคำนวณที่ยาวนาน เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคพยากรณ์อื่น ๆ กระบวนการค้นหาสมการของ SR ใช้วิธีการวิวัฒนาการเชิงพันธุกรรมของสมการ (Genetic Evolution) ซึ่งต้องมีการสร้างสมการหลายพันชุด ก่อนที่จะได้สมการที่เหมาะสมที่สุด วิธีการนี้ทำให้ต้องใช้พลังการประมวลผลสูง และอาจต้องใช้เวลาหลายชั่วโมงหรือหลายวัน ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของข้อมูล และจำนวนตัวแปรที่นำมาใช้ ซึ่งแตกต่างจากวิธีการอย่าง Linear Regression ที่สามารถคำนวณผลลัพธ์ได้ในเวลาเพียงไม่กี่วินาที อีกข้อจำกัดหนึ่งของ Symbolic Regression คือ ความซับซ้อนของสมการที่ได้อาจสูงเกินไป แม้ว่า SR จะสามารถค้นหาสมการที่เหมาะสมกับข้อมูลได้ แต่มักพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีจำนวนพจน์ (Terms) จำนวนมากทำให้สมการมีความซับซ้อนเกินกว่าที่จะนำไปใช้งานจริงได้โดยตรง บางครั้งสมการที่ได้อาจมีการใช้ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ขั้นสูงที่ยากต่อการตีความ เช่น การรวมกันของฟังก์ชันลอการิทึม หรือเอกซ์โพเนนเชียลในรูปแบบที่ไม่คุ้นเคย ในกรณีเช่นนี้ จำเป็นต้องมีการตั้งค่าข้อจำกัดในการค้นหาสมการ หรือใช้วิธี Regularization เพื่อลดความซับซ้อนของสมการที่ได้ Symbolic Regression เป็นเทคนิคที่มีข้อได้เปรียบที่สำคัญในด้านความสามารถในการค้นหาสมการที่เหมาะสมโดยไม่ต้องกำหนดรูปแบบสมการล่วงหน้า และให้ผลลัพธ์ที่สามารถตีความได้ง่าย ทำให้เหมาะสำหรับการศึกษาในเชิงวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ อย่างไรก็ตาม SR ก็มีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณา เช่น การใช้ทรัพยากรการคำนวณสูง ความซับซ้อนของสมการที่ได้ และความไวต่อข้อมูลที่มี Noise การนำ SR ไปใช้จึงต้องมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์อย่างเหมาะสม และอาจต้องใช้ร่วมกับวิธีอื่น ๆ เช่น การทำ Preprocessing ข้อมูล หรือการใช้ Hybrid Models ที่รวม SR เข้ากับ Machine Learning อื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดข้อจำกัดของ SR ในการใช้งานจริง การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อสร้างแบบจำลองเชิงสัญลักษณ์ (Symbolic Regression) สำหรับใช้พยากรณ์แรงกระแทกที่เกิดจากการไหลหลากของดินโคลน โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับค่าจริงที่วัดได้จากการทดลอง รวมถึงการเปรียบเทียบกับสมการที่มีอยู่แล้วในทางทฤษฎี เพื่อประเมินความแม่นยำของโมเดลจากการเลือกใช้เทคนิค Symbolic Regression ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการค้นหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อแรงกระแทกจากการไหลหลากของดินโคลน โดยวิธีการนี้มีลักษณะเฉพาะที่สามารถสร้างสมการใหม่จากข้อมูลที่มีอยู่ได้อย่างอิสระ โดยไม่จำเป็นต้องระบุรูปแบบสมการล่วงหน้า เทคนิคนี้อาศัยหลักการของ Genetic Programming ในการค้นหารูปแบบของสมการที่ดีที่สุดผ่านกระบวนการสร้างสมการด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์พื้นฐาน เช่น การบวก ลบ คูณ หาร หรือการยกกำลัง โดยกระบวนการนี้จะทดลองและประเมินผลสมการที่หลากหลายจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง จากนั้นจึงคัดเลือกสมการที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด เพื่อให้ได้สมการที่สามารถพยากรณ์แรงกระแทกได้

อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างป้องกันดินโคลนต่อไป

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Symbolic Regression พบว่าสมการที่ได้มีโครงสร้างที่แตกต่างจากสมการพื้นฐานที่เคยใช้อยู่เดิม โดยจาก ภาพ 96 แสดงโครงสร้างของสมการที่ค้นพบจากกระบวนการ Symbolic Regression จะเห็นได้ว่าสมการนี้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ จากภาพสามารถเห็นโครงสร้างของสมการที่แบ่งได้เป็นสองส่วนหลัก คือ ส่วนแรกเป็นการรวมกันของตัวแปรค่าความหนืดของส่วนผสม (μ_{mix}) ความหนาแน่นของการไหล (ρ) และความลึกของการไหล (h) โดยถูกรวมอยู่ด้วยกันในรูปแบบของ ($\mu_{mix} + \rho h$) ซึ่งโครงสร้างในลักษณะนี้สะท้อนถึงลักษณะพฤติกรรมทางกายภาพที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ของความหนืด ความหนาแน่น และความลึกของดินโคลนขณะเกิดการไหล เนื่องจากค่าความหนืดจะมีบทบาทสำคัญในการต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคในดินโคลนขณะที่กำลังไหล ในขณะที่ความหนาแน่นและความลึกของการไหลก็แสดงถึงมวลและความสูงของวัสดุที่มีผลต่อแรงกระทำโดยตรง ดังนั้นการรวมตัวแปรสามตัวนี้ ในรูปแบบดังกล่าวสะท้อนถึงพฤติกรรมทางกายภาพที่เกิดขึ้นจริงในการทดลองได้อย่างเหมาะสม ส่วนที่สองของสมการแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานพลศาสตร์ (α) และความเร็วของการไหล (v) ถูกรวมกันในรูปแบบ ($\alpha + v$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากการไหลของดินโคลนไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานพลศาสตร์ที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วของการไหลด้วย กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานพลศาสตร์นี้ไม่ได้เป็นเพียงค่าคงที่ แต่มีลักษณะเป็นพลวัตที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหลของดินโคลนด้วย ในส่วนสุดท้ายของสมการนั้น ผลลัพธ์จากสองกลุ่มของตัวแปรข้างต้น ถูกลำมาคูณร่วมกับความกว้างของกำแพงป้องกัน (w) ซึ่งหมายถึงพื้นที่ที่ของไหลชนกระแทกกับโครงสร้างการคูณกันระหว่างผลลัพธ์ทั้งสองชุดกับความกว้างของกำแพงแสดงถึงพื้นที่สัมผัสที่ของไหลมากระทบ ทำให้สมการนี้สามารถสะท้อนลักษณะทางกายภาพของแรงกระทำที่เกิดจากการไหลหลากของดินโคลนได้เป็นอย่างดี จากการพิจารณาโครงสร้างของสมการที่ Symbolic Regression สร้างขึ้นนั้น จะเห็นได้ชัดเจนว่าการนำตัวแปรค่าความหนืดมาพิจารณาร่วมกับตัวแปรพื้นฐานเดิมทำให้สมการมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของการไหลของดินโคลน และสามารถอธิบายพฤติกรรมแรงกระทำที่เกิดขึ้นในการทดลองได้ดังสมการ

$$F = (\mu_{mix} + \rho h)(\alpha + v)w \quad (4.4)$$

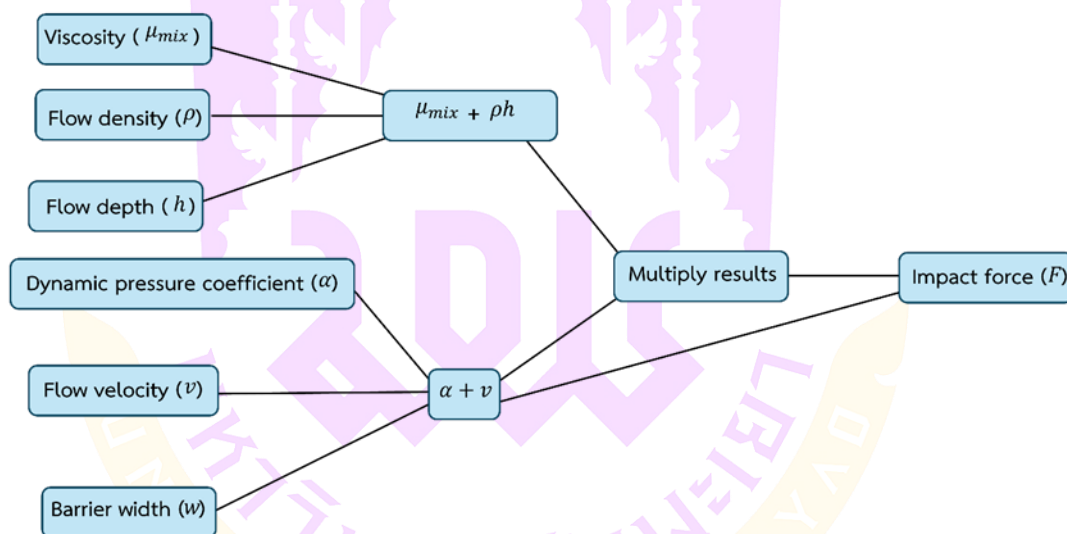
การพัฒนาแบบจำลองเชิงสัญลักษณ์ Symbolic Regression (SR) เพื่อใช้พยากรณ์แรงกระทำที่เกิดจากการไหลหลากของดินโคลนนั้น ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก โดยส่วนแรกเรียกว่า Training Set (80%) ใช้สำหรับให้โมเดลเรียนรู้และสร้างสมการพยากรณ์ ส่วนที่สองเรียกว่า Testing Set (20%) Andrea (2020); La Cava, et al. (2021); Make

& Chawla (2024) ภาพ 97 การเปรียบเทียบค่าพยากรณ์กับค่าจริง (Prediction vs. True Value Plot) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง ซึ่งใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของสมการที่ถูกสร้างขึ้นมา เหตุผลสำคัญที่ต้องแบ่งข้อมูลเป็นสองส่วนก็เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของสมการได้อย่างเป็นกลาง กล่าวคือการนำชุดข้อมูลที่ใช้ในการสร้างสมการ Training set มาใช้ประเมินสมการด้วยนั้นอาจเกิดความเอนเอียง และทำให้การประเมินประสิทธิภาพไม่สะท้อนถึงความสามารถในการนำไปใช้จริงในข้อมูลใหม่ ดังนั้น จึงต้องแยกชุดข้อมูลที่เรียกว่า Testing Set ซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน มาใช้เพื่อทดสอบว่าสมการที่สร้างขึ้นนั้นสามารถพยากรณ์ค่าแรงกระแทกได้แม่นยำจริงหรือไม่ ในกระบวนการสร้างสมการโดยใช้ Symbolic Regression อัลกอริทึมจะทำการค้นหารูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดยใช้หลักการทาง Genetic Programming (GP) ซึ่งจะทดลองผสมรูปแบบสมการหลากหลายรูปแบบโดยอัตโนมัติผ่านการสุ่มและการกลายพันธุ์ของสมการ ในการคัดเลือกสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์แรงกระแทกจากดินโคลนไหลหลาก ได้ใช้ตัวชี้วัดทางสถิติที่สำคัญ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient of Determination, R^2) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Error, RMSE) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error, MAE) และ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (Absolute Relative Error, ARE) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองพยากรณ์ จาก ตาราง 8 ค่า R^2 สำหรับชุดข้อมูลฝึกสอนอยู่ที่ 0.91 ซึ่งบ่งชี้ว่าสมการที่ได้รับสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 91% ส่วนค่า R^2 สำหรับชุดข้อมูลทดสอบมีค่า 0.82 ซึ่งแสดงว่าสมการยังคงสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลใหม่ได้ในระดับที่ดีจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละเส้น แม้ว่าค่าดังกล่าวจะลดลงเล็กน้อยจากชุดฝึกสอน แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ และไม่แสดงสัญญาณของ Overfitting อย่างมีนัยสำคัญ ค่าความคลาดเคลื่อนของสมการพิจารณาจากค่า RMSE และ MAE โดยค่า RMSE ของชุดข้อมูลชุดฝึกอยู่ที่ 23.24 N และลดลงเป็น 18.66 N ในชุดข้อมูลทดสอบ ค่าที่ลดลงนี้สะท้อนว่าสมการสามารถพยากรณ์ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงได้ดียิ่งขึ้นเมื่อใช้กับข้อมูลใหม่ ขณะที่ค่า MAE ของชุดฝึกและชุดทดสอบมีค่า 19.12 N และ 16.19 N ตามลำดับ บ่งชี้ว่าค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของสมการมีแนวโน้มลดลงในการทดสอบกับข้อมูลที่ไม่เคยใช้ในการฝึกสอน ค่าความผิดพลาดเชิงสัมพัทธ์ ARE ในชุดข้อมูลอยู่ที่ 18.21% และลดลงเป็น 10.77% ในชุดข้อมูลทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการสามารถพยากรณ์ค่าได้แม่นยำยิ่งขึ้นเมื่อใช้กับข้อมูลใหม่ การลดลงของค่า ARE ชี้ให้เห็นว่า สมการมีความสามารถในการพยากรณ์ที่ดีขึ้นในเชิงเปรียบเทียบกับค่าจริงของข้อมูล จากผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัดใน ตาราง 9 สามารถสรุปได้ว่าสมการที่ได้รับมีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปใช้กับข้อมูลใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบค่าพยากรณ์กับค่าจริง

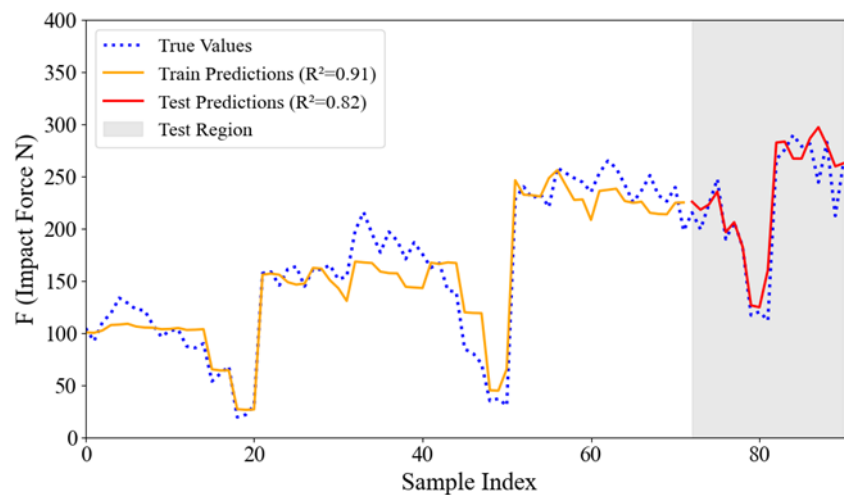
แสดงให้เห็นว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถสะท้อนแนวโน้มของข้อมูลได้อย่างแม่นยำทั้งนี้ ค่า R^2 ที่สูง และค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ ยืนยันว่าแบบจำลอง Symbolic Regression ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและประเมินแรงกระแทกจากดินโคลนไหลหลากในสถานการณ์จริงได้อย่างเหมาะสม

ตาราง 9 ตัวชี้วัดทางสถิติของชุดข้อมูลฝึกสอนและทดสอบ

Indicators	Training Data	Test Data
R^2	0.91	0.82
RMSE	23.24 N	18.66 N
MAE	19.12 N	16.19 N
ARE	18.21 %	10.77 %



ภาพ 96 โครงสร้างของสมการจาก Symbolic Regression

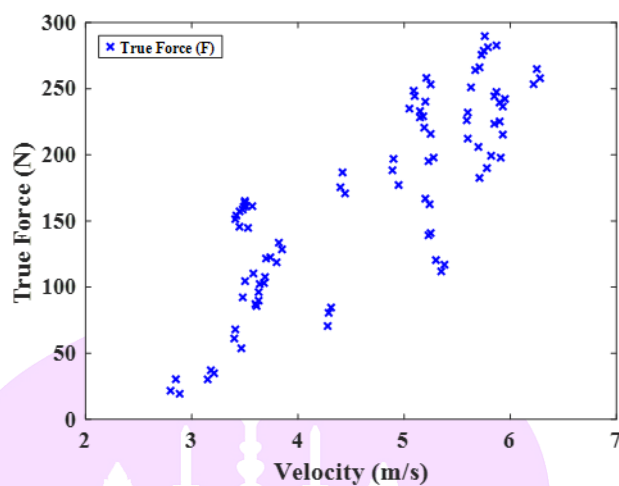


ภาพ 97 การเปรียบเทียบค่าพยากรณ์กับค่าจริง (Prediction vs. True Value Plot)

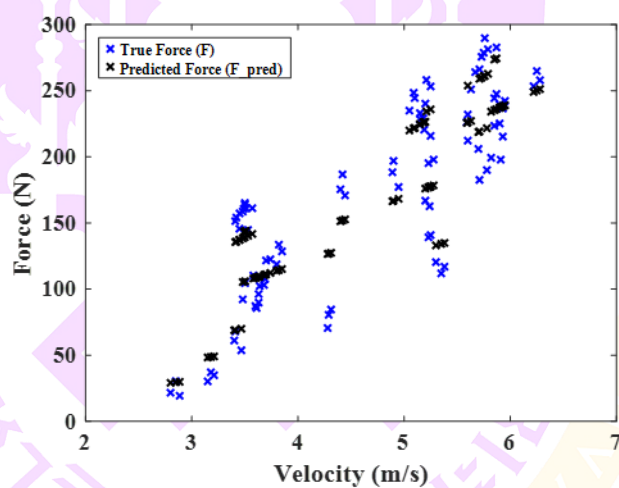
เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกกับความเร็ว ภาพ 98 จากการทดลองสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า แรงกระแทกที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักการพื้นฐานของพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ กล่าวคือเมื่อวัตถุมีความเร็วเพิ่มขึ้น อนุภาคของดินโคลนจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้นส่งผลให้แรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ ในช่วงความเร็วต่ำ (ประมาณ 3-4 m/s) ค่าของแรงกระแทกมีการกระจายตัวค่อนข้างสูง อาจเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การแปรปรวนในส่วนผสมหรือคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับ 5-6.5 m/s พบว่า ค่าแรงกระแทกมีการกระจายตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการที่การไหลมีพฤติกรรมที่มีเสถียรภาพมากขึ้นในช่วงที่มีความเร็วสูงขึ้น นอกจากนี้เพื่อประเมินความสามารถของสมการที่ได้จาก Symbolic Regression ในการพยากรณ์แรงกระแทก จึงได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงจากการทดลองและค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเชิงสัญลักษณ์ ซึ่งวัตถุประสงค์ คือ ต้องการแสดงค่าการกระจายของชุดข้อมูล โดยไม่เน้นการวิเคราะห์แนวโน้มหรือความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชัน ภาพ 99 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกกับความเร็วและค่าพยากรณ์ พบว่า ค่าพยากรณ์ที่ได้จาก Symbolic Regression (จุดสีดำ) มีการกระจายตัวอยู่ใกล้เคียงกับค่าจริงจากการทดลอง (จุดสีน้ำเงิน) เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ความเร็วมีค่าสูงกว่า 4.5 m/s เป็นต้นไป โมเดลสามารถพยากรณ์ค่าแรงกระแทกได้อย่างแม่นยำและสามารถจับแนวโน้มของข้อมูลได้เป็นอย่างดี แม้ว่าในช่วงที่ความเร็วต่ำประมาณ 3-4 m/s จะมีความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าพยากรณ์อยู่บ้าง แต่โดยรวมแล้วสมการที่ได้จาก Symbolic

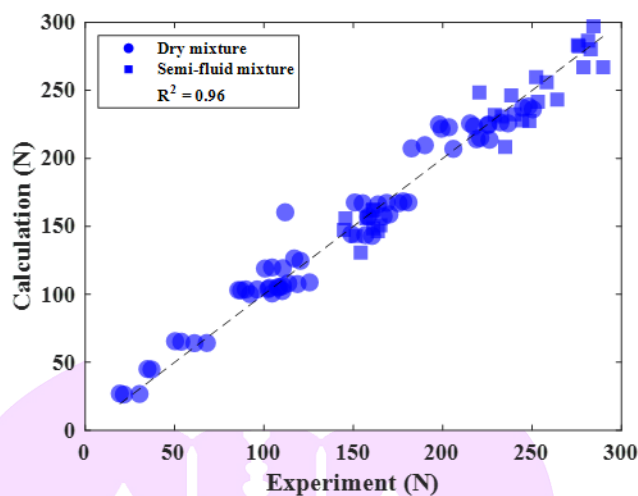
Regression ยังคงสามารถแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแรงกระแทกที่เกิดจากการไหลของดินโคลนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการเปรียบเทียบดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงสัญลักษณ์ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการอธิบายความสัมพันธ์เชิงพลวัตระหว่างแรงกระแทก และตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเร็ว ความลึกของการไหล ค่าความหนืด และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งถือได้ว่า Symbolic Regression เป็นวิธีการที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับการสร้างสมการเชิงสัมพันธ์ ที่สามารถนำไปใช้พยากรณ์แรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากการไหลหลากของดินโคลนในสภาวะต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาพ 100 ความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ได้จาก Symbolic Regression แสดงให้เห็นว่า ค่าพยากรณ์มีการกระจายตัวใกล้กับค่าจริงมากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงแรงกระแทกสูง ค่า R^2 ที่ เพิ่มขึ้นเป็น 0.96 แสดงให้เห็นว่า สมการ SR สามารถพิจารณาตัวแปรเพิ่มเติมที่มีผลต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้น ทำให้แนวโน้มของค่าพยากรณ์มีความแม่นยำมากขึ้นกว่าสมการพื้นฐาน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูล พบว่า จุดข้อมูลของส่วนผสมแบบกึ่งของเหลวและแบบแห้งมีแนวโน้มอยู่ใกล้เส้นแนวโน้มมากขึ้นเมื่อใช้สมการจาก SR ซึ่งบ่งชี้ว่า สมการสามารถจับพฤติกรรมที่แตกต่างกันของวัสดุทั้งสองประเภทได้ดีขึ้น แม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จาก SR จะมีความแม่นยำสูงขึ้น แต่ยังคงพบว่ามีบางช่วงของข้อมูลที่ค่าพยากรณ์กระจายตัวออกจากค่าจริงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นของดินโคลนในช่วงที่มีพฤติกรรมซับซ้อน อย่างไรก็ตามเมื่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ค่าแรงกระแทกที่พยากรณ์ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าสมการที่ได้สามารถอธิบายพฤติกรรมของแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการเปรียบเทียบทั้งสองสมการ แสดงให้เห็นว่าสมการที่พัฒนาด้วย Symbolic Regression สามารถปรับปรุงความแม่นยำในการพยากรณ์แรงกระแทกได้ดีกว่าสมการพื้นฐาน โดยเฉพาะการเพิ่มตัวแปรค่าความหนืดเข้ามาพิจารณาทำให้สามารถสะท้อนพฤติกรรมของดินโคลนได้สมจริงขึ้น การพัฒนาแบบจำลองโดยการพิจารณาตัวแปรเพิ่มเติมที่มีผลต่อพฤติกรรมของดินโคลนสามารถช่วยให้การพยากรณ์มีความแม่นยำมากขึ้น และสะท้อนพฤติกรรมของการไหลในสภาพแวดล้อมจริงได้ดียิ่งขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองเพิ่มเติมและเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบโครงสร้างป้องกันแรงกระแทกจากดินโคลนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพ 98 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเร็ว



ภาพ 99 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเร็วและค่าพยากรณ์



ภาพ 100 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกจากการทดลอง และแรงกระแทกจากการพยากรณ์

โดยใช้สมการ $F = (\mu_{mix} + \rho h)(\alpha + v)w$ จุดวงกลม คือ ส่วนผสมแบบแห้ง
จุดสี่เหลี่ยม คือ ส่วนผสมแบบเปียก

จากการศึกษานี้พบว่า การใช้ Symbolic Regression (SR) ในการพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์แรงกระแทกของดินโคลนไหลหลาก สามารถช่วยให้การพยากรณ์มีความแม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมีการเพิ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าความหนืดของส่วนผสม (μ_{mix}) ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของดินโคลนในขณะเกิดการไหล ผลการวิเคราะห์จากกราฟแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาด้วย SR ให้ค่า R^2 สูงขึ้นจาก 0.89 เป็น 0.91 ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของแบบจำลองในการอธิบายแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากการไหลหลากของดินโคลน ข้อค้นพบที่สำคัญจากงานวิจัยนี้คือ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไม่ได้เป็นเพียงการเปรียบเทียบว่าสมการเดิมมีข้อผิดพลาดหรือด้อยกว่า แต่เป็นการปรับปรุงและต่อยอดแบบจำลองเดิมให้มีความแม่นยำมากขึ้น การเพิ่มตัวแปรที่สะท้อนพฤติกรรมจริงของดินโคลนช่วยให้แบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของแรงกระแทกในช่วงความเร็วและสถานะการไหลที่แตกต่างกันได้ดีขึ้น

แนวทางการนำไปปรับใช้ และพัฒนาแบบจำลองสำหรับเงื่อนไขอื่น ๆ การใช้ Symbolic Regression สามารถนำไปใช้กับการพยากรณ์แรงกระแทกของดินโคลนในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น พื้นที่ที่มีองค์ประกอบของดินหรือค่าความหนืดที่ต่างกัน รวมถึงการเปรียบเทียบพฤติกรรมของดินโคลนในสภาพของไหลต่าง ๆ ประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงสร้างป้องกันข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบโครงสร้างป้องกันแรงกระแทกที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยพิจารณาผลของค่าความหนืดและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลของดินโคลน เพิ่มตัวแปรอื่นในการวิเคราะห์ แม้ว่าการเพิ่มค่าความหนืด (μ_{mix}) จะช่วยให้แบบจำลองแม่นยำขึ้น แต่ยังมีปัจจัยอื่นที่อาจส่งผล

เช่น ขนาดอนุภาคของดินโคลน อัตราส่วนของน้ำในของไหล หรือความหยาบของพื้นผิวที่ไหลผ่าน ซึ่งอาจเป็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอีก ตรวจสอบความเสถียรของแบบจำลองในข้อมูลชุดใหม่ การทดสอบแบบจำลองกับข้อมูลที่แตกต่างจากชุดการทดลองเดิมจะช่วยให้มั่นใจว่าแบบจำลองสามารถใช้งานได้อย่างทั่วไป ไม่ได้อิงอยู่กับข้อมูลชุดใดชุดหนึ่งมากเกินไปโดยสรุปงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ Symbolic Regression สามารถช่วยให้การพยากรณ์แรงกระแทกของดินโคลนมีความแม่นยำมากขึ้นโดยการพิจารณาตัวแปรเพิ่มเติมที่มีผลต่อพฤติกรรมของดินโคลน ซึ่งเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสำหรับการนำไปใช้กับงานวิจัยและการออกแบบโครงสร้างป้องกันที่เกี่ยวข้องกับการไหลของวัสดุที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและซับซ้อน



บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการศึกษาการไหลหลากของดินโคลนผ่านการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการไหล ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีโครงสร้างป้องกัน รวมถึงศึกษาผลกระทบของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นเมื่อการไหลหลากของดินโคลนชนกับแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น การศึกษานี้ช่วยให้สามารถทำความเข้าใจพฤติกรรมของดินโคลนในสถานะที่สามารถควบคุมได้ แม้ว่าจะเป็นการทดลองจำลอง แต่ผลลัพธ์ที่ได้รับสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างป้องกันที่มีประสิทธิภาพสำหรับสภาพแวดล้อมจริง โดยทั่วไปการไหลหลากของดินโคลนเป็นปรากฏการณ์ที่มีความซับซ้อน เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของวัสดุที่เป็นส่วนผสมระหว่างของแข็ง เช่น กรวด หิน และดินเหนียว ร่วมกับของเหลว ในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้พฤติกรรมของการไหลเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบเหล่านี้ การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบสำคัญ ได้แก่ องค์ประกอบของวัสดุ ความลาดเอียงของราง และปริมาณน้ำในส่วนผสม ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการไหลหลาก รวมถึงใช้ตัวเลขไร้มิติ Froude Number และ Savage Number เป็นเกณฑ์ในการออกแบบการทดลอง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมของการไหล นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ใช้ Symbolic Regression (SR) เป็นเครื่องมือในการพัฒนาสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์แรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากการไหลหลากของดินโคลน โดยสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินแรงกระแทกที่อาจเกิดขึ้นและสนับสนุนการออกแบบโครงสร้างป้องกันให้เหมาะสมกับลักษณะของพื้นที่เสี่ยงภัย แบบจำลองย่อยส่วนของรางน้ำในห้องปฏิบัติการถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินโคลนที่มีลักษณะเป็น การไหลของเศษหินเม็ดหยาบ (Stony debris flow หรือ Coarse-grained debris flow) โดยใช้วัสดุที่ประกอบด้วย กรวดแม่น้ำ ทราย และดินเหนียว ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน การทดลองนี้พิจารณาผลกระทบของ องค์ประกอบของวัสดุ ความลาดเอียงของราง และปริมาณน้ำ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการไหลหลาก ตลอดจนศึกษาผลกระทบของแรงกระแทกที่เกิดขึ้นเมื่อลำธารดินโคลนชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น การวิเคราะห์ผลการทดลองอ้างอิงจาก ลักษณะการไหล (Flow Behavior) รูปแบบการแผ่กระจาย (Deposition Morphology) แรงกระแทก (Impact Force) และแรงดึง (Tensile Force) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการไหลหลากและแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากการชนกับโครงสร้างป้องกัน เนื่องจากปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับการไหลหลากของดินโคลนเป็นตัวแปรที่ควบคุมได้ยากและอาจได้รับอิทธิพลจากปัจจัยภายนอกหลายประการ ในการศึกษา ปริมาณของแข็งในส่วนผสม

(Solid Concentration, Cs) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างของแข็งและของเหลวในวัสดุ ได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อนวัตกรรมท่อไหลและแรงกระแทกที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการศึกษได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของดินโคลนที่สามารถนำไปใช้ในงานวิศวกรรมป้องกันภัยพิบัติในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

พฤติกรรมและคุณลักษณะพื้นฐานของการไหลหลากดินโคลน

จากผลการทดลองพบว่าการไหลของวัสดุเม็ดแข็งมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับอัตราส่วนของกรวดและทราย รวมถึงมุมลาดเอียงของรางทดสอบ โดยวัสดุที่ประกอบด้วยกรวดและทรายในสัดส่วนที่ต่างกัน มีลักษณะการคัดแยกขนาดของอนุภาคอย่างชัดเจน โดยพบว่า อนุภาคขนาดใหญ่ (กรวด) มีแนวโน้มสะสมอยู่บริเวณด้านหน้าของการไหล ขณะที่อนุภาคขนาดเล็ก (ทราย) มักจะอยู่บริเวณด้านล่างของการไหล ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ishikawa, et al. (2010) และ Ashwood & Hungr (2016) ที่ระบุว่ากระบวนการคัดแยกอนุภาคในการไหลของวัสดุเม็ดแข็งนั้น เกิดขึ้นจากความแตกต่างของแรงเฉื่อยและแรงเสียดทานภายในวัสดุ มุมลาดเอียงของรางทดสอบมีผลโดยตรงต่อระยะทางของการไหลและอัตราการสะสมตัวของวัสดุ โดยที่มุมลาดเอียงต่ำกว่า (25°) ส่งผลให้ระยะการไหลยาวกว่า ขณะที่มุมลาดเอียงสูงขึ้น (30°) และ 35°) ทำให้การไหลสะสมตัวเร็วขึ้น และระยะทางของการไหลลดลง พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้โดยแรงโน้มถ่วงที่ส่งผลต่อการเร่งความเร็วของอนุภาคในช่วงต้นของการไหลแต่ในขณะเดียวกันก็นำไปสู่การสะสมตัวของวัสดุที่เร็วขึ้นด้วย อัตราส่วนรูปร่างของการไหล (Flow Shape Ratio) ที่ถูกคำนวณจากผลการทดลองอยู่ในช่วง 0.0125-0.032 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการไหลที่มีค่าต่ำกว่าเกิดการกระจายตัวไปได้ไกลกว่า ในขณะที่ค่าที่สูงกว่า หมายถึงการสะสมตัวที่เร็วขึ้นและก่อให้เกิดแรงกระแทกสูงบริเวณด้านหน้าของการไหล ข้อมูลนี้เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการออกแบบโครงสร้างป้องกันภัยพิบัติ เช่น กำแพงป้องกันดินถล่ม หรือโครงสร้างชะลอการไหลของดินโคลน ในกรณีที่วัสดุมีน้ำเป็นองค์ประกอบ การไหลมีพฤติกรรมที่แตกต่างออกไปจากวัสดุเม็ดแข็ง โดยพบว่า ปริมาณน้ำมีผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของวัสดุและรูปแบบของการไหล การทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำจาก 25% (Cs75-25) เป็น 30% (Cs70-30) การแผ่กระจายของวัสดุสามารถเกิดขึ้นได้มากขึ้น เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคลดลง ทำให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลขึ้น ปรากฏการณ์ Precursory Surge หรือการไหลนำของน้ำโคลนก่อนระลอกหลักของเศษวัสดุเกิดขึ้นในกรณีที่ปริมาณน้ำสูง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าของไหลในส่วนผสมสามารถเคลื่อนที่แยกจากวัสดุเม็ดหยาบได้

มุมลาดเอียงที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความเร็วเฉลี่ยของวัสดุแบบกึ่งของเหลวเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่มากขึ้นทำให้วัสดุเคลื่อนที่เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม ความเร็วที่เพิ่มขึ้นยังทำให้วัสดุมีแนวโน้มกระจายตัวมากขึ้นและอาจเกิดการแยกชั้นระหว่างวัสดุขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยที่วัสดุขนาดใหญ่ เช่น กรวด มักจะอยู่ด้านหน้าของการไหล ขณะที่ชั้นของทรายและดินเหนียวสะสมอยู่บริเวณด้านหลังของการไหล พฤติกรรมนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์การเกิดดินถล่มหรือการไหลหลากของดินโคลน ในธรรมชาติซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบโครงสร้างป้องกันที่มีประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์ค่าตัวเลข Froude Number (F_r) และ Savage Number (N_{sav}) พบว่า ค่า F_r ที่สูงกว่า 10 แสดงถึงการไหลที่มีพลังงานสูง และมีแนวโน้มกระจายตัวไปได้ไกล ขณะที่ค่า N_{sav} ที่สูงกว่า 0.1 บ่งชี้ว่าแรงเฉื่อยของอนุภาคมีผลต่อแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของการไหล การวิเคราะห์ตัวเลขไร้มิติเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการประเมินความรุนแรงของการไหลในพื้นที่เสี่ยงภัยพิบัติทางธรณีวิทยา ผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปพัฒนาแบบจำลองทางวิศวกรรม สำหรับการจำลองพฤติกรรมของการไหลในสภาพแวดล้อมจริง และเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบโครงสร้างป้องกันภัยที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต การนำผลการทดลองไปเชื่อมโยงกับตัวแปรไร้มิติ ทำให้สามารถใช้ประเมินพฤติกรรมการไหลในพื้นที่จริงได้โดยไม่ขึ้นกับขนาดของแบบจำลอง นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ผลการวิเคราะห์เพื่อกำหนดลักษณะของโครงสร้างป้องกันที่เหมาะสมกับประเภทของการไหล เช่น การออกแบบโครงสร้างแนวยาวสำหรับการไหลที่กระจายตัว หรือการเสริมโครงสร้างด้านแรงกระแทกในบริเวณที่การสะสมตัวเกิดขึ้นรวดเร็ว การวิเคราะห์ Flow Shape Ratio, Froude และ Savage Number ยังสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ตำแหน่งการติดตั้งโครงสร้างป้องกัน ความสูงของผนัง และรูปแบบของการรองรับแรงกระแทก ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบมีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นในสภาพแวดล้อมจริง

พฤติกรรมของแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง

การออกแบบชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการที่สามารถควบคุมปัจจัยสำคัญได้อย่างเป็นระบบ ทำให้สามารถจำแนกกลไกของแรงกระแทกได้อย่างชัดเจนผ่านพฤติกรรม Pile-up และ Run-up อีกทั้งยังมีการเปรียบเทียบพฤติกรรมของวัสดุในหลายสถานะ ทั้งแบบแห้งและกึ่งของเหลว ซึ่งช่วยให้เข้าใจผลของน้ำและแรงเสียดทานต่อการเกิดแรงกระแทกอย่างลึกซึ้ง นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิค Symbolic Regression เพื่อพัฒนาสมการพยากรณ์แรงกระแทกจากข้อมูลที่ได้ ทำให้งานวิจัยนี้สามารถเชื่อมโยงระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สามารถตีความได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการออกแบบโครงสร้างป้องกันในพื้นที่เสี่ยงภัยอย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างป้องกันให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

โดยเฉพาะในพื้นที่เสี่ยงต่อดินถล่มและกระแสนโคลนไหล การออกแบบโครงสร้างป้องกันควรคำนึงถึงองค์ประกอบของวัสดุ ปริมาณน้ำ และมุมลาดเอียงของรางไหล เพื่อให้สามารถรองรับแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของขนาดอนุภาคและคุณสมบัติของวัสดุอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อแรงกระแทกและพฤติกรรมของวัสดุในการชนกับโครงสร้าง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากขึ้นสำหรับการออกแบบโครงสร้างป้องกันในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย พฤติกรรมของแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัสดุ มุมลาดเอียงของรางไหลและปริมาณน้ำที่ผสมในวัสดุ โดยพบว่า แรงกระแทกเกิดขึ้นจากสองกลไกหลักได้แก่ การกองขึ้น และการไหลขัดขึ้น ซึ่งมีผลต่อการสะสมตัวของวัสดุหลังจากชนกับโครงสร้างป้องกัน ในกรณีของวัสดุแห้ง วัสดุที่มีสัดส่วนของกรวดสูงสามารถกองตัวได้มั่นคงและมีความสูงมากขึ้นเนื่องจากมีแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมากกว่า ในขณะที่วัสดุที่มีสัดส่วนของทรายสูงจะเกิดกองวัสดุที่มีลักษณะแบนราบมากกว่าเนื่องจากแรงเสียดทานต่ำ มุมลาดเอียงของรางไหลเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของวัสดุ เมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ของวัสดุที่ไหลลงมาก็เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงกระแทกมีค่ามากขึ้น และกองวัสดุที่เกิดขึ้นมีความสูงเพิ่มขึ้นแต่ฐานกองแคบลง ในกรณีของวัสดุแบบแห้ง (Cs100) พบว่ามีลักษณะการกองตัวที่มั่นคงกว่าเมื่อตกกระทบกับโครงสร้างป้องกัน และเกิดการสะสมตัวด้านหน้าโครงสร้างได้มากกว่าวัสดุกิ่งของเหลว ซึ่งสะท้อนถึงแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคที่สูงกว่า ส่งผลให้วัสดุแห้งสามารถต้านแรงกระแทกและหยุดตัวได้รวดเร็วกว่า นอกจากนี้ วัสดุแห้งที่มีกรวดในอัตราส่วนสูง ยังสร้างกองวัสดุที่มีความสูงมากกว่ากลุ่มทราย โดยเฉพาะที่มุมลาดเอียงต่ำ (25°) กลไกการสะสมตัวแบบ Pile-up จึงแสดงออกได้อย่างเด่นชัดในกลุ่มวัสดุแห้ง ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบแนวป้องกันหน้าโครงสร้างให้สามารถรับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่วัสดุน้ำผสม พฤติกรรมของการไหลเปลี่ยนจากการไหลแบบแห้งไปเป็นการไหลแบบกึ่งของเหลว ซึ่งส่งผลให้วัสดุสามารถไหลไปได้ไกลขึ้นและเกิดแรงกระแทกที่สูงขึ้นเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกัน น้ำยังช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ทำให้วัสดุสามารถไหลขัดขึ้นไปตามแนวลาดของโครงสร้างได้มากกว่าวัสดุแห้ง ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของโครงสร้างป้องกัน ผลกระทบของมุมลาดเอียงต่อแรงกระแทก มุมลาดเอียงของรางไหลเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดระดับของแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกัน จากการทดลอง พบว่า เมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ของวัสดุที่ไหลลงมาก็เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงกระแทกมีค่ามากขึ้น โดยวัสดุแห้งที่ไหลลงมาที่มุมลาดเอียงต่ำมีแรงกระแทกที่น้อยกว่า ในขณะที่วัสดุที่ไหลลงมาที่มุมลาดเอียงสูงมีแรงกระแทกมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเปลี่ยนแปลงของแรงกระแทกนี้สามารถอธิบายได้จากการที่วัสดุมีอัตราเร่งที่สูงขึ้นเมื่อลาดเอียงเพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วของการชนกับโครงสร้างสูงขึ้น และนำไปสู่แรงกระแทกที่มากขึ้น จากการวัดค่าจากโพลีเซลล์พบว่า ส่วนผสมแบบแห้งที่มุมลาดเอียง 25° มีค่าแรงกระแทกต่ำสุด ขณะที่ส่วนผสมแบบแห้งที่มุมลาดเอียง 35° มีค่าแรงกระแทกสูงขึ้น

ตามลำดับ ในกรณีของวัสดุที่มีน้ำผสม ค่าของแรงกระแทกที่วัดได้สูงกว่าวัสดุแห้งในทุกมุมลาดเอียง ซึ่งเป็นผลจากการที่น้ำช่วยลดแรงเสียดทานและเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับวัสดุที่ไหลลงมา น้ำเป็นปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมของแรงกระแทกและการสะสมตัวของวัสดุที่ชนกับโครงสร้างป้องกัน โดยพบว่ากรณีที่มีน้ำผสมในวัสดุช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค ส่งผลให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่ได้รวดเร็วขึ้นและไปได้ไกลขึ้น ซึ่งทำให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นสูงขึ้นเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกัน จากการทดลองพบว่า วัสดุที่มีน้ำในสัดส่วนที่มากกว่า เช่น Cs70-30 มีแรงกระแทกที่สูงกว่าส่วนผสมที่มีน้ำในสัดส่วนน้อยกว่า เช่น Cs75-25 โดยเฉพาะในกรณีที่มุมลาดเอียงสูง ในขณะเดียวกัน น้ำยังมีผลต่อพฤติกรรมการกบตัวของวัสดุ โดยวัสดุที่มีน้ำผสมจะสามารถไหลเข้าเต็มเต็มช่องว่างได้ดีขึ้น ส่งผลให้วัสดุสามารถสะสมตัวเป็นกองสูงขึ้นบริเวณด้านหน้าโครงสร้างป้องกันมากกว่าวัสดุแห้ง อย่างไรก็ตาม หากปริมาณน้ำมีมากเกินไป อาจทำให้วัสดุสูญเสียเสถียรภาพในการกบตัวและเกิดการกระจายตัวแทน

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า องค์ประกอบของวัสดุ มุมลาดเอียงของรางไหล และปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง มุมลาดเอียงที่สูงขึ้นทำให้แรงกระแทกเพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุมีพลังงานจลน์มากขึ้นก่อนชนกับโครงสร้าง น้ำเป็นปัจจัยที่ช่วยลดแรงเสียดทานและเพิ่มพลังงานจลน์ของวัสดุ ทำให้แรงกระแทกสูงขึ้นเมื่อชนกับโครงสร้างป้องกัน ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างป้องกันให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่เสี่ยงต่อดินถล่มและการไหลหลากของดินโคลน การออกแบบโครงสร้างป้องกันควรคำนึงถึงองค์ประกอบของวัสดุ ปริมาณน้ำ และมุมลาดเอียง เพื่อให้สามารถรองรับแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของขนาดอนุภาคและคุณสมบัติของวัสดุอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อแรงกระแทกและพฤติกรรมของวัสดุในการชนกับโครงสร้าง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากขึ้นสำหรับการออกแบบโครงสร้างป้องกันในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างป้องกันให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

พฤติกรรมของการไหลหลากดินโคลนเมื่อมีโครงสร้างป้องกันแบบแข็งและแบบยืดหยุ่น

จากการทดลองพบว่ามุมลาดเอียงของรางส่งผลโดยตรงต่อความเร็วและแรงกระแทกของวัสดุที่ชนกับตาข่าย เมื่อมุมลาดเอียงเพิ่มขึ้นจาก 25° เป็น 35° วัสดุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น ส่งผลให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงมากขึ้น วัสดุขนาดเล็กและวัสดุที่มีองค์ประกอบของน้ำสูงสามารถทะลุผ่านตาข่ายได้มากขึ้น ทำให้การสะสมตัวด้านหน้าตาข่ายลดลง วัสดุแห้ง (Cs100) มีแนวโน้มสะสมตัวด้านหน้าตาข่ายมากกว่าวัสดุทั้งของเหลว (Cs70-30 และ Cs75-25) เนื่องจากวัสดุ

กึ่งของเหลวสามารถไหลทะลุผ่านตาข่ายได้ง่ายกว่า โดยเฉพาะส่วนที่เป็นดินเหนียว และน้ำ องค์ประกอบของวัสดุมีผลต่อแรงดึงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น พบว่าส่วนผสมที่มีปริมาณกรวดต่ำและทรายสูง (g40-s60-c0) ให้ค่าแรงดึงรวมต่ำที่สุด เนื่องจากวัสดุละเอียด เช่น ทราย สามารถไหลผ่านตาข่ายได้ง่ายกว่าวัสดุหยาบอย่างกรวด ในทางกลับกัน ส่วนผสมที่มีองค์ประกอบของกรวด ทราย และดินเหนียวในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่น g40-s40-c20 ให้ค่าแรงดึงสูงสุด เนื่องจากวัสดุสามารถกระจายแรงกระแทกได้ดีขึ้น และมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นระหว่างอนุภาค อัตราส่วนน้ำในวัสดุกึ่งของเหลวมีผลโดยตรงต่อแรงดึงที่เกิดขึ้น โดยส่วนผสม Cs70-30 (น้ำ 30%) ให้ค่าแรงดึงสูงสุดมากกว่าส่วนผสม Cs75-25 (น้ำ 25%) เนื่องจากปริมาณน้ำที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความเหนียวของวัสดุ ทำให้วัสดุสามารถเกาะตัวกันได้ดีขึ้น และสร้างแรงกระแทกที่สูงขึ้นเมื่อตกกระทบกับตาข่าย อย่างไรก็ตาม หากปริมาณน้ำสูงเกินไป จะทำให้แรงดึงลดลง เนื่องจากวัสดุสูญเสียความเหนียวและความสามารถในการเกาะตัว ส่งผลให้วัสดุทะลุผ่านตาข่ายได้ง่ายขึ้น ตำแหน่งของ Load Cell มีผลต่อแรงดึงที่วัดได้ โดยตำแหน่ง F1 ซึ่งอยู่ใกล้จุดกระแทกมากที่สุดให้ค่าแรงดึงสูงสุด ในขณะที่ตำแหน่ง F2 และ F3 ที่อยู่ไกลออกไปตามลำดับ พบว่า ค่าแรงดึงลดลง กรณีวัสดุเปียก พบว่า ค่าแรงดึงที่ตำแหน่ง F1 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกก่อนจะลดลงและเข้าสู่สภาวะคงที่ ในขณะที่มุมลาดเอียงสูงขึ้น ค่าแรงดึงสูงสุดที่ตำแหน่ง F1 และส่วนต่างระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดกับค่าแรงดึงคงที่ค่ามากกว่าวัสดุแห้งอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาพฤติกรรมของแรงกระแทกบนโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น สามารถสรุปได้ว่า แรงกระแทกของวัสดุที่ชนกับโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของวัสดุ ขนาดอนุภาค ปริมาณน้ำ และมุมลาดเอียงของราง โดยมุมลาดเอียงที่สูงขึ้น (จาก 25° เป็น 35°) ส่งผลให้แรงกระแทก และแรงดึงที่วัดได้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่วัสดุมีองค์ประกอบของดินเหนียวและน้ำ ส่วนผสมของวัสดุที่มีองค์ประกอบของกรวด 40%, ทราย 40%, และดินเหนียว 20% (g40_s40_c20) ให้ค่าแรงดึงสูงสุด เนื่องจากสามารถกระจายแรงกระแทกได้ดี และมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นระหว่างอนุภาค อัตราส่วนน้ำในวัสดุกึ่งของเหลวมีผลโดยตรงต่อแรงดึงที่เกิดขึ้น โดยส่วนผสม Cs70-30 (น้ำ 30%) ให้ค่าแรงดึงสูงสุดมากกว่าส่วนผสม Cs75-25 (น้ำ 25%) เนื่องจากปริมาณน้ำที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความเหนียวของวัสดุ ค่าแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามมุมลาดเอียงของราง โดยพบว่า ที่มุมลาดเอียง 35° ส่วนผสม g40_s40_c20 ใน Cs70-30 ให้ค่าแรงดึงสูงสุดที่ 221.51 N โครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นที่สามารถลดการทะลุผ่านของวัสดุขนาดเล็กและของเหลวได้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันแรงกระแทก ลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้าง ผลการศึกษารังนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยพิจารณาปรับขนาดของช่องเปิดของตาข่าย หรือเพิ่มกลไกในการกักเก็บวัสดุบางประเภท เพื่อลดการทะลุผ่านของวัสดุและเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดเซาะหรือความเสียหายที่เกิดขึ้นจาก

การไหลของวัสดุในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์พฤติกรรมแรงกระแทกในบริบทของโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่น มีการออกแบบระบบทดลองที่สามารถแยกวิเคราะห์แรงกระแทกในระดับพื้นที่ต่าง ๆ ของตาข่าย (F1–F3) และเชื่อมโยงกับพฤติกรรมไหลของวัสดุในหลายสภาวะ ได้แก่ วัสดุแข็งและวัสดุกึ่งของเหลว การใช้ส่วนผสมวัสดุที่หลากหลาย รวมถึงการเปลี่ยนแปลงมุมลาดเอียงทำให้งานวิจัยสามารถชี้ชัดปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของตาข่ายป้องกัน และสามารถให้คำแนะนำด้านวิศวกรรมได้อย่างเป็นรูปธรรม นอกจากนี้ ผลการศึกษายังสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบโครงสร้างป้องกันแบบยืดหยุ่นที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะการปรับขนาดช่องเปิดของตาข่าย การเลือกวัสดุต้านแรงดึง และการกำหนดตำแหน่งการรับแรงเพื่อรองรับแรงกระแทกอย่างเหมาะสมในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ทั้งในพื้นที่เสี่ยงภัยภูเขา ดินถล่ม และการไหลหลากของดินโคลนอย่างแม่นยำ

การพยากรณ์แรงกระแทกของดินโคลน

การพยากรณ์แรงกระแทกจากการไหลของดินโคลนสามารถทำได้ทั้งจากสมการทางทฤษฎีที่พัฒนาจากการทดลองและการจำลอง และจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากข้อมูลโดยตรง เช่น Symbolic Regression (SR) ซึ่งเป็นเทคนิค Machine Learning ที่มีจุดเด่นในเรื่องการค้นหาสมการเชิงคณิตศาสตร์โดยไม่ต้องกำหนดรูปแบบไว้ล่วงหน้า ในส่วนของ สมการทฤษฎี มีการอ้างอิงจากงานของ Zhao, et al. (2018) ที่สร้างสมการพยากรณ์แรงกระแทกจากการทดลองในรางจำลอง และ Di Perna, et al. (2022) ที่ใช้การจำลองเชิงตัวเลขร่วมกับข้อมูลภาคสนาม โดยทั้งสองสมการสามารถพยากรณ์แรงกระแทกได้แม่นยำในเงื่อนไขเฉพาะของแต่ละการศึกษา แต่ไม่สามารถนำมาใช้กับข้อมูลใหม่หรือลักษณะการไหลที่แตกต่างได้โดยตรง เพราะพารามิเตอร์ในสมการยังขึ้นอยู่กับข้อมูลต้นทางที่ใช้พัฒนา เช่น ค่าสัมประสิทธิ์เฉพาะบางค่า เพื่อให้การพยากรณ์มีความยืดหยุ่นและประยุกต์ใช้ได้หลากหลายยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สมการในรูปแบบเชิงประจักษ์จาก Cui, et al. (2015) ที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันพลศาสตร์ (α) กับจำนวนฟรูด (F_r) ตามสมการ $\alpha = 5.3Fr^{-1.5}$ ซึ่งแสดงพฤติกรรมแบบแปรผกผันเชิงกำลัง (Power-Law) กล่าวคือ เมื่ออัตราเร็วของการไหลเพิ่มขึ้น ค่าความดันที่เกิดจากแรงกระแทกจะมีแนวโน้มลดลง ผลจากการเปรียบเทียบกับค่าจริงในห้องทดลองพบว่า ค่าที่พยากรณ์ได้จากสมการนี้สอดคล้องกับค่าจริงได้ดี โดยเฉพาะในช่วงแรงกระแทกต่ำกว่า 200 N ค่า R^2 อยู่ที่ 0.89 แสดงถึงแนวโน้มของสมการที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของดินโคลนในช่วงดังกล่าวได้แม่นยำ แต่ในช่วงแรงกระแทกสูงกว่นี้ โดยเฉพาะในกลุ่มของวัสดุกึ่งของเหลว สมการเริ่มแสดงค่าคลาดเคลื่อนสูงขึ้น อาจเกิดจากปัจจัยพลศาสตร์ที่ซับซ้อน เช่น การเกิดแรงเฉือนสูง หรือแรงเสียดทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสมการพื้นฐานยังไม่สามารถสะท้อน

ผลกระทบเหล่านี้ได้ชัดเจน จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการพัฒนาแบบจำลองอีกชุดโดยใช้เทคนิค Symbolic Regression (SR) เพื่อสร้างสมการใหม่จากข้อมูลจริงโดยตรง โดยไม่อิงกับรูปแบบสมการเดิมที่กำหนดไว้ล่วงหน้า SR ทำงานโดยอาศัยหลักการของ Genetic Programming (GP) ซึ่งจะสร้างสมการโดยการผสมผสานฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์พื้นฐาน เช่น บวก ลบ คูณ หาร และยกกำลัง จากนั้นทำการคัดเลือกสมการที่ดีที่สุดจากข้อมูลฝึก (Training Data) ที่แบ่งไว้ 80% และทดสอบกับข้อมูลที่เหลืออีก 20% (Testing Data) ผลที่ได้จากการใช้ SR แสดงให้เห็นว่า สมการที่สร้างขึ้นสามารถรวมปัจจัยหลายตัวที่ส่งผลต่อแรงกระแทก เช่น ค่าความหนืด ความหนาแน่น ความลึกของการไหล ความเร็ว และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานพลศาสตร์ ซึ่งในอดีตมักไม่ได้ถูกรวมอยู่ในสมการเดียวกัน โครงสร้างของสมการ SR สะท้อนพฤติกรรมทางกายภาพของการไหลของดินโคลนได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะเมื่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น สมการสามารถติดตามแนวโน้มของค่าจริงได้ใกล้เคียงจากผลการประเมิน พบว่าค่า $R^2 = 0.91$ สำหรับ Training Data และ 0.82 สำหรับ Testing Data ค่าความคลาดเคลื่อน เช่น RMSE, MAE และ ARE มีแนวโน้มลดลงเมื่อทดสอบกับข้อมูลใหม่ ไม่พบสัญญาณของ Overfitting อย่างมีนัยสำคัญ การเปรียบเทียบระหว่างสมการ SR กับสมการพื้นฐานพบว่า SR มีความแม่นยำสูงกว่า โดยเฉพาะในช่วงแรงกระแทกสูงกว่า 100 N โมเดลจาก SR ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงได้ดีกว่าอย่างชัดเจน แต่ในช่วงแรงกระแทกต่ำ (ต่ำกว่า 100 N) สมการยังมีการกระจายตัวของค่าพยากรณ์ออกจากค่าจริงบ้าง อาจเกิดจากปัจจัยบางอย่าง เช่น ขนาดอนุภาคของดิน อัตราส่วนของน้ำ หรือแรงต้านทานในระบบที่ยังไม่ถูกพิจารณาในสมการ ผลจากแรงกระแทกกับความเร็วของการไหลก็สอดคล้องกับแนวคิดด้านพลังงานจลน์ กล่าวคือเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้นตาม แต่ในช่วงความเร็วต่ำ (ประมาณ 3–4 m/s) พบว่า ค่าของแรงกระแทกมีความกระจายตัวสูง ซึ่งอาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของวัสดุหรือพฤติกรรมการไหลที่ยังไม่เสถียร ในขณะที่ช่วงความเร็วสูงขึ้น (> 4.5 m/s) ค่าพยากรณ์ของ SR เริ่มเสถียรและใกล้เคียงค่าจริงมากขึ้น

โดยรวมแล้ว Symbolic Regression เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการพยากรณ์แรงกระแทกจากการไหลของดินโคลน โดยเฉพาะในกรณีที่ตัวแปรมีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น แบบจำลองที่ได้จาก SR สามารถใช้กับข้อมูลใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังเปิดโอกาสให้สามารถปรับปรุงต่อได้ในอนาคต เช่น การเพิ่มตัวแปรใหม่ การปรับค่าพารามิเตอร์ หรือการรวมกับเทคนิคอื่นในกลุ่ม Machine Learning เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความครอบคลุมของโมเดลให้มากยิ่งขึ้น Symbolic Regression สามารถพยากรณ์แรงกระแทกที่เกิดจากการไหลของดินโคลนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าที่พยากรณ์ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วของของไหล อย่างไรก็ตามมีบางช่วงของค่าพยากรณ์ที่ยังมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง โดยเฉพาะในช่วงแรงกระแทกต่ำ ซึ่งอาจต้องปรับปรุงโดยเพิ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของของไหลเพิ่มเติม Symbolic Regression เป็นแนวทางที่มีศักยภาพสำหรับการพยากรณ์แรงกระแทกจากการไหลของดินโคลน โมเดลที่ได้สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ดี

แต่ยังสามารถปรับปรุงเพิ่มเติมโดยการเพิ่มตัวแปรใหม่ หรือใช้เทคนิค Machine Learning อื่น ๆ ร่วมด้วย การนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปใช้กับสถานการณ์จริงจะช่วยยืนยันความแม่นยำ และเพิ่มประสิทธิภาพของการพยากรณ์ในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของดินโคลน และแรงกระแทกที่กระทำต่อโครงสร้างป้องกัน สามารถเสนอแนะแนวทางสำหรับการวิจัยและการประยุกต์ใช้งานในอนาคตได้ดังนี้

การศึกษาตัวแปรเพิ่มเติมแม้ว่างานวิจัยนี้จะครอบคลุมปัจจัยสำคัญ เช่น องค์ประกอบของวัสดุ ความลาดเอียง และปริมาณน้ำในส่วนผสม แต่ยังมีปัจจัยอื่นที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เช่น ขนาดอนุภาคของวัสดุโดยละเอียด ความหนาของชั้นวัสดุ ระยะเวลาของการไหล และสภาพอากาศจำลอง เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของการไหลได้อย่างครอบคลุมยิ่งขึ้น การเพิ่มความหลากหลายของวัสดุ และสภาพแวดล้อม ควรทำการทดลองกับวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่พบได้จริงในธรรมชาติ และทดลองในสภาพแวดล้อมที่แตกต่าง เช่น พื้นผิวที่มีความหยาบต่างกัน หรือมีสิ่งกีดขวางอื่น ๆ เพื่อให้ผลการศึกษาใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากขึ้น การพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขควบคู่กับการทดลอง การใช้แบบจำลองทางตัวเลข (เช่น DEM หรือ CFD) ร่วมกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ จะช่วยเพิ่มความเข้าใจเชิงกลไก และสามารถใช้ทดสอบสถานการณ์ที่มีความเสี่ยงสูงโดยไม่ต้องทำการทดลองจริง การปรับปรุงแบบจำลอง Symbolic Regression (SR) แม้แบบจำลองที่พัฒนาด้วย SR จะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำในหลายกรณี แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในช่วงแรงกระแทกต่ำ ดังนั้นควรศึกษาการเพิ่มตัวแปรใหม่ หรือใช้เทคนิค Machine Learning อื่น ๆ เช่น Neural Network หรือ Ensemble Learning เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การประยุกต์ใช้งานจริงกับโครงสร้างป้องกัน ควรนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในงานออกแบบจริง เช่น การกำหนดขนาดหรือรูปแบบของโครงสร้างป้องกันที่เหมาะสมกับพื้นที่ลาดเชิงเขา หรือเส้นทางที่มีความเสี่ยงต่อการไหลของดินโคลน เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น

บรรณานุกรม

- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2562). **มาตรฐานประกอบการปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับอาคาร การขุดดินและการถมดินในพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่ม (Landslide) และบริเวณลาดเชิงเขา.** สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. ISBN978_974_458_644_5
- บันทึกเหตุการณ์ดินโคลนถล่ม อ.บ่อเกลือ จ.น่าน วันที่ 28 ก.ค สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 11 สิงหาคม 2566. ได้จาก https://tiwrm.hii.or.th/current/2018/landslideNan/nan_jul2018.html.
- เชียงใหม่ฝนตกหนัก 3 อำเภอ น้ำหลาก ดินถล่ม สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 11 สิงหาคม 2566. ได้จาก <https://www.thaipbs.or.th/news/content/320047>
- ฝนถล่มหนัก จ.น่าน เกิดดินสไลด์ปิดทับเส้นทางสาย 1256 หน้า ดอยภูคา สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2566. ได้จาก <https://www.nationtv.tv/news/region/378925859>
- กรมทางหลวงรายงานสถานการณ์ดินสไลด์บนทางหลวง จ.น่านและ จ.ตากผ่านไม่ได้ 4 แห่ง สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2566. ได้จาก <https://www.thailandplus.tv/archives/727157>
- สรุปเหตุ น้ำท่วม ดินสไลด์ ใน 2 จังหวัด สัญจรไม่ได้ 7 แห่ง สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2566. ได้จาก <https://www.thaipbs.or.th/news/content/330429>
- น้ำฝน คำพิลั้ง, มัลลิกา นิลล้อม, & ศรัณย์ แก้วเมืองมูล. (2563). การประเมินพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดดินถล่มชนิด Debris Flow พื้นที่ตำบลแม่พูน อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์. ฉบับที่ สทข.1 1/2563.
- Albaba, A. (2015). Discrete element modeling of the impact of granular debris flows on rigid and flexible structures. PhD Thesis, Université Grenoble Alpes.
- Albaba, A., Schwanz, M., Wendeler, C., Loup, B., & Dorren, L. (2018). Elasto_plastic_adhesive DEM model for simulating hillslope debris flows: Cross comparison with field experiments. Natural Hazards and Earth System Sciences, 18(3), 765_780.
- Albaba, A., Schwarz, M., Wendeler, C., Loup, B., & Dorren, L. (2019). Elasto_plastic_adhesive DEM model for simulating hillslope debris flows: Cross comparison with field experiments. Natural Hazards and Earth System Sciences, 19(10), 2339–2358.

- Alotaibi, K. S., & Islam, A. B. M. S. (2023). Symbolic regression model for predicting compression strength of prismatic masonry columns confined by FRP. *Buildings*, 13(509).
- Alotaibi, K. S., & Islam, A. B. M. S. (2023). Symbolic regression model for predicting compression strength of prismatic masonry columns confined by FRP. *Buildings*, 13(509).
- Armanini, A. (1997). On the dynamic impact of debris flows. In *Recent Developments on Debris Flows* (pp. 33–52). Springer, Berlin.
- Armanini, A., Rossi, G., & Larcher, M. (2020). Dynamic impact of water and sediments surge against a rigid wall. *Journal of Hydraulic Research*, 58(2), 314–325.
- Armanini, A., Rossi, G., & Larcher, M. (2020). Dynamic impact of water and sediments surge against a rigid wall. *Journal of Hydraulic Research*, 58(2), 314–325.
- Aryal, K. (2006). Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- Azéma, E., Radjai, F., Peyroux, R., Dubois, F., & Saussine, G. (2006). Vibrational dynamics of confined granular materials. *Physical Review E*, 74(3), 031304.
- Brighenti, R., Spaggiari, L., Segalini, A., Savi, R., & 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002435](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002435)
- Calvetti, F., Crosta, G., & Tatarella, M. (2000). Numerical simulation of dry granular flows: From the reproduction of small_scale experiments to the prediction of rock avalanches. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 34(1), 21–38.
- Calvetti, F., Crosta, G., & Tatarella, M. (2000). Numerical simulation of dry granular flows: From the reproduction of small_scale experiments to the prediction of rock avalanches. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 34(1), 21–38.
- Choi, C. E. et al. (2013). Downstream Frontal Velocity Reduction Resulting from Baffles. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*.

- Cui, P., Zeng, C., & Lei, Y. (2015). Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12), 1644–1655.
- Cui, Y., Choi, C. E., Liu, L. H. D., & Ng, C. W. W. (2018). Effects of particle size of mono-disperse granular flows impacting a rigid barrier. *Natural Hazards*, 91, 1179–1201.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47–65.
- Castiglioni, A. (n.d.). Python symbolic regression with gplearn: How to discover analytical relationships in your data. *Analytics Vidhya*. Retrieved from https://medium.com/analytics_vidhya/python_symbolic_regression_with_gplearn_cbc24dbbc271
- De Haas, T., Braat, L., Leuven, J. R. F. W., Lokhorst, I. R., & 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.
- De França, F. O., Virgolin, M., Kommenda, M., Majumder, M. S., Cranmer, M., Espada, G., Fonseca, A., et al. (2024). SRBench++: Principled benchmarking of symbolic regression with domain_expert interpretation. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*.
- Fondelli, T., Andreini, A., & Facchini, B. (2015). Numerical analysis of the impact of operating conditions on the performance of a micro gas turbine combustor. *Energy Procedia*, 82, 309–315.
- Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R., & Scheidl, C. (2009). Debris flow impact estimation. In *Proceedings of the 11th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering* (pp. 1–5). Ohrid, Macedonia.
- Jiang, R., Fei, W., & Zhou, H. (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, 2213–2233.
- Jiang, Y. J., & Zhao, Y. (2015). Experimental investigation of dry granular flow impact via both normal and tangential force measurements. *Géotechnique Letters*, 5(1), 33–38.

- Kwan, J. S. H., & Cheung, R. W. M. (2012). Experimental study of debris flow interaction with flexible barriers. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).
- Huo, M., Zhou, J. _W., Yang, X. _G., & 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.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245–296.
- Kwan, J. S. H., & Cheung, R. W. M. (2012). Experimental study of debris flow interaction with flexible barriers. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).
- Kwan, J.S.H., & Cheung, R.W.M. (2012). Suggestion on design approaches for flexible debris resisting barriers. Discussion note DN1/2012. Hong Kong, SAR China: Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The HKSAR Government.
- Makke, N., & Chawla, S. (2024). Interpretable scientific discovery with symbolic regression: A review. *Artificial Intelligence Review*, 57(2).
- Makke, N., & Chawla, S. (2024). Interpretable scientific discovery with symbolic regression: a review. *Artificial Intelligence Review*, 57(2), Article 2. https://doi.org/10.1007/s10462_023_10622_0
- Ng, C. W. W., Choi, C. E., Liu, L. H. D., Wang, Y., Song, D., & 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.
- Ng, C. W. W., Choi, C. E., Liu, L. H. D., Wang, Y., Song, D., & Yang, N. (2017). Influence of particle size on the mechanism of dry granular Run-up on a rigid barrier. *Géotechnique Letters*, 7, 79–89.
- Poudyal, S., et al. (2020). Review of the mechanisms of debris_flow impact against barriers. HAL Id: hal_02923131.
- Song, D., Choi, C. E., Ng, C. W. W., Zhou, G. G. D., Kwan, J. S. H., Sze, H. Y., & Zheng, Y. (2019). Load_attenuation mechanisms of flexible barrier subjected to bouldery debris flow impact. *Landslides*, 16(12), 2321–2334.
- Song, D., Choi, C. E., Ng, C. W. W., & Zhou, G. G. D. (2018). Geophysical flows impacting a flexible barrier: Effects of Solid _fluid interaction. *Landslides*, 15(1), 99–110.

- Song, D., Ng, C. W. W., Choi, C. E., Zhou, G. G. D., Kwan, J. S. H., & Koo, R. C. H. (2017). Influence of debris flow Solid fraction on rigid barrier impact. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(8), 1170–1183.
- Song, D., Zhou, G. G. D., Chen, X. Q., & Li, J. (2021). General equations for landslide_debris impact and their application to debris_flow flexible barrier. *Engineering Geology*, 288, 106154.
- Takahashi, T. (2007). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Taylor & Francis Group.
- Thanawong, K., Reangyos, A., Thammaruk, P., Thungfonphum, T., & 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.
- Vagnon, F., & Segalini, A. (2016). Debris flow impact estimation on a rigid barrier. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(7), 1691–1704.
- Vicari, H., Ng, C. W. W., Nordal, S., Thakur, V., De Silva, W. A. R. K., Liu, H., & Choi, C. E. (2021). The effects of upstream flexible barrier on the debris flow entrainment and impact dynamics on a terminal barrier. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(12), 1847–1859.
- Wendeler, C. (2016). Interaction of debris flows with flexible ring net barriers. *Geomorphology*, 253, 126–137.
- Wendeler, C., Volkwein, A., McArdell, B. W., & Bartelt, P. (2018). Load model for designing flexible steel barriers for debris flow mitigation. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(4), 540–556.
- Wendeler, C., Volkwein, A., McArdell, B. W., & Bartelt, P. (2018). Load model for designing flexible steel barriers for debris flow mitigation. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(4), 540–556.
- Wilstrup, C. (n.d.). Symbolic regression: A simple and friendly introduction. Retrieved from https://medium.com/@wilstrup/symbolic_regression_a_simple_and_friendly_introduction_16bcadbe870a
- Winter, M. G. (2020). Debris flows. In D. P. Giles & J. S. Griffiths (Eds.), *Geological Hazards in the UK: Their Occurrence, Monitoring and Mitigation* (pp. 163–185). Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 29.

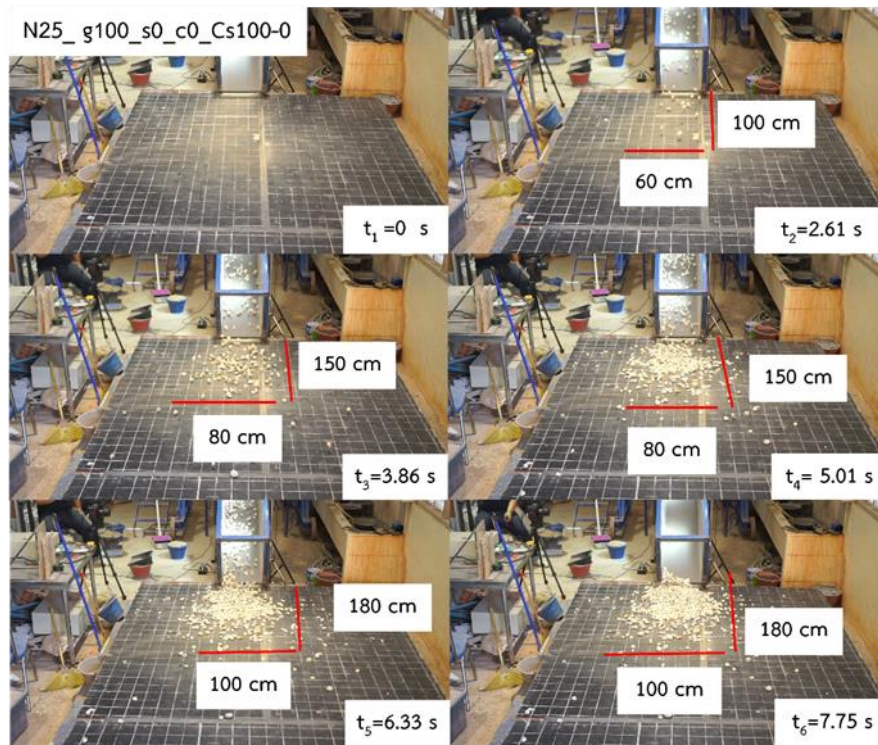
- Witt, A. C. (2005). Using a GIS (Geographic Information System) to model slope instability and debris flow hazards in French Broad River watershed, North Carolina. [Master's thesis, North Carolina State University].
- Yune, C._Y., Kim, B._J., Jun, K._J., Park, S._D., Lee, S._W., Kim, G._H., Lee, C._W., & Paik, J._C. (2023). Real_scale experiment of debris flow in a natural gully: Key findings and lessons learned. *Landslides*, 20(9), 2757–2774.
- Zhao, H., Yao, L., You, Y., Wang, B., & Zhang, C. (2018). Experimental study of the debris flow slurry impact and distribution. *Shock and Vibration*, 2018, 5460362.
- Zhou, G. G. D., Li, S., Song, D., Choi, C. E., & Chen, X. (2019). Depositional mechanisms and morphology of debris flow: Physical modelling. *Landslides*, 16(2), 315–332.
- Zhou, G. G. D., Song, C. E., Choi, C. E., Pasuto, A., Sun, Q. C., & Dai, F. (2017). Surge impact behavior of granular flows: Effects of water content. **Landslides*,



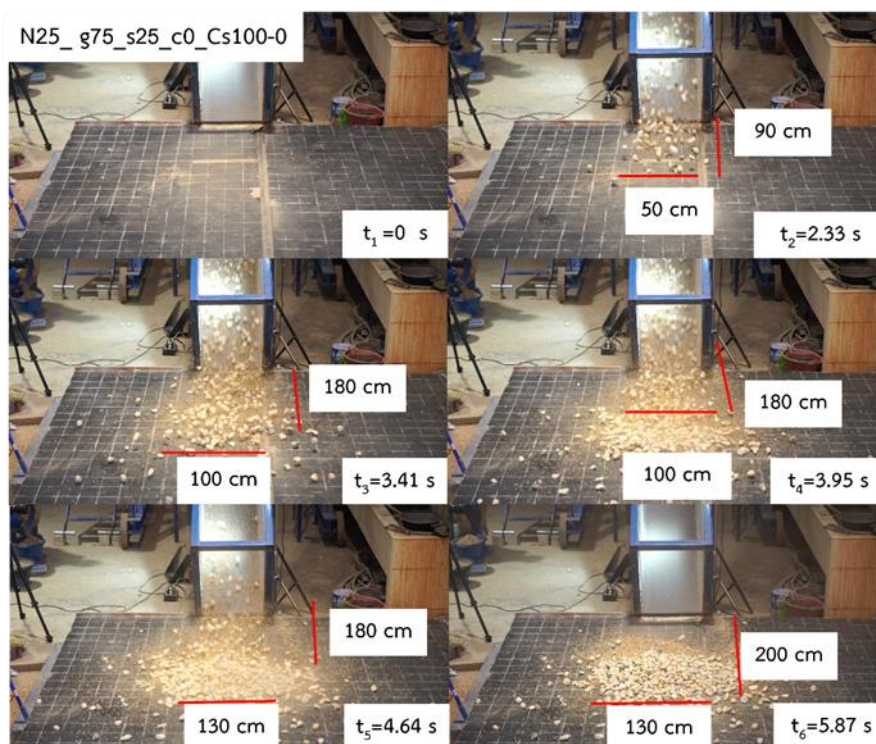


ภาคผนวก

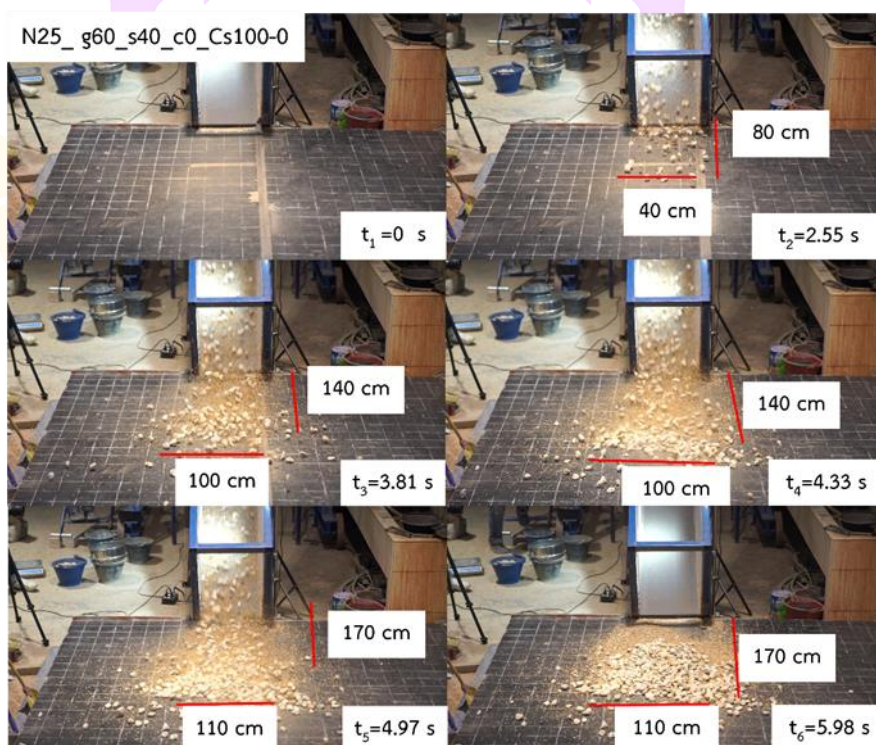
ภาคผนวก ก การแผ่กระจาย และการทับถมของส่วนแบบแห้ง และส่วนผสมแบบ
กึ่งของเหลว



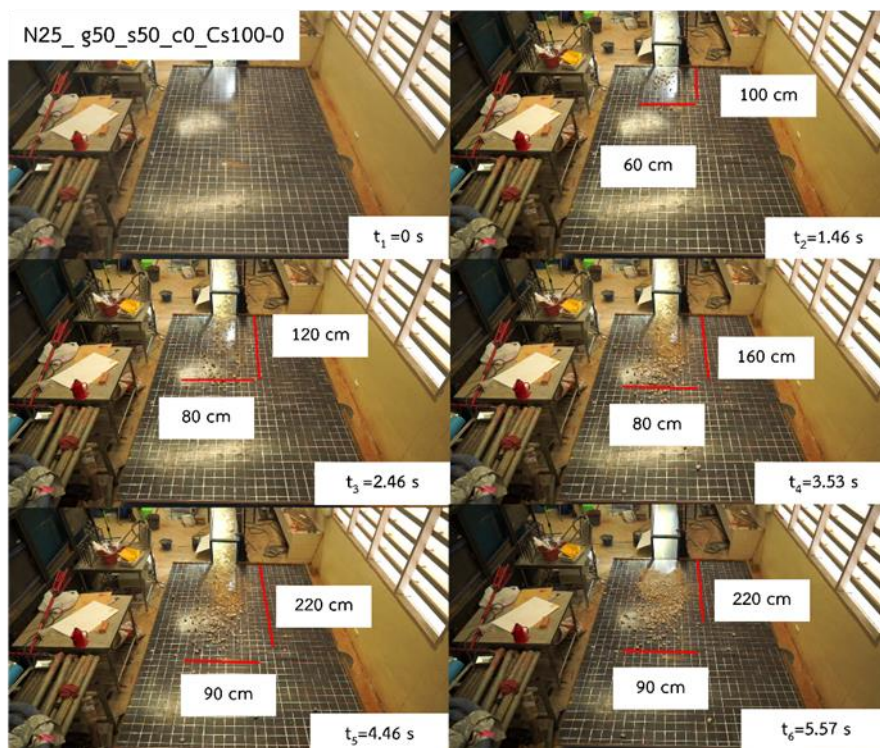
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g100_s0_c0_Cs100-0



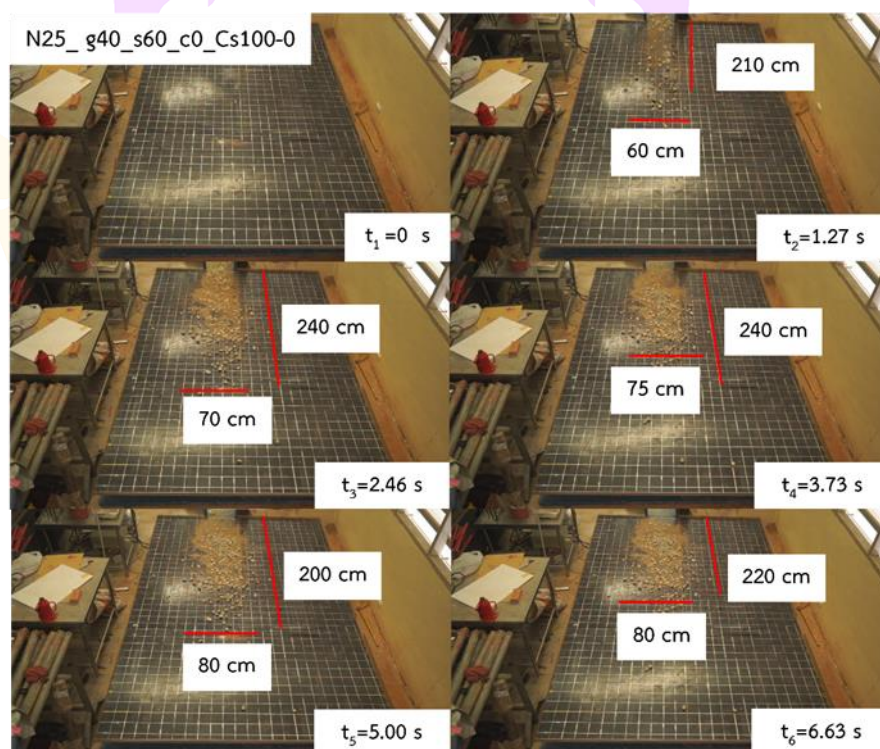
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g75_s25_c0_Cs100-0



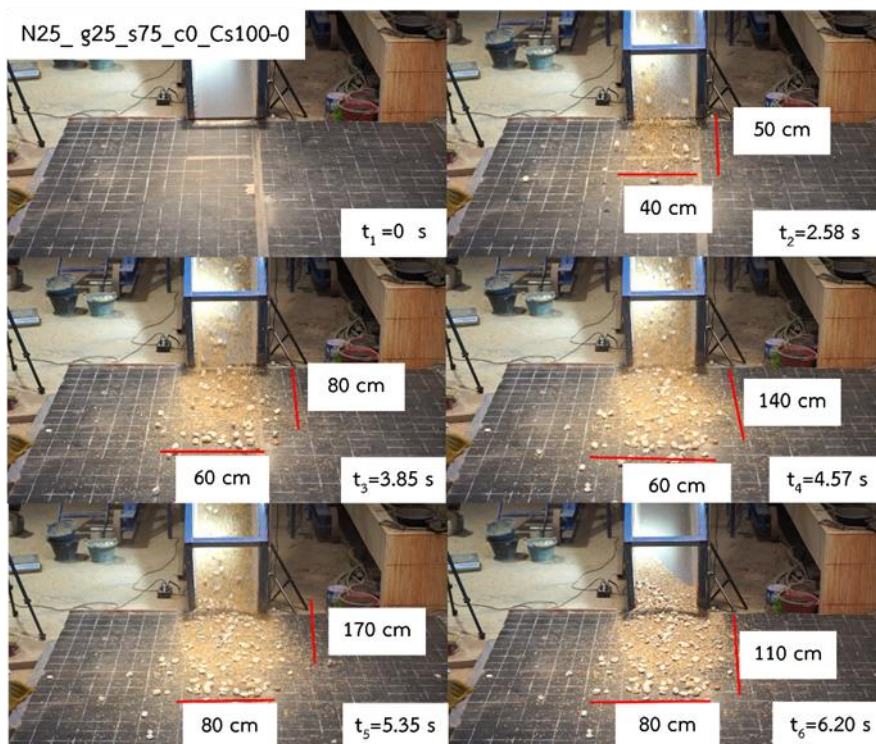
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g60_s40_c0_Cs100-0



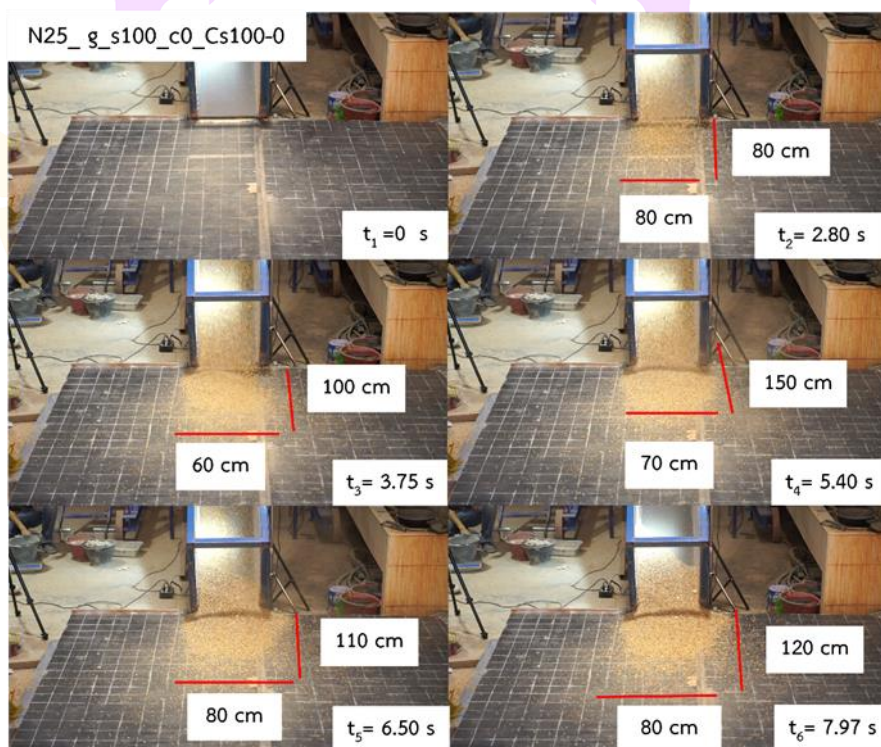
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g50_s50_c0_Cs100-0



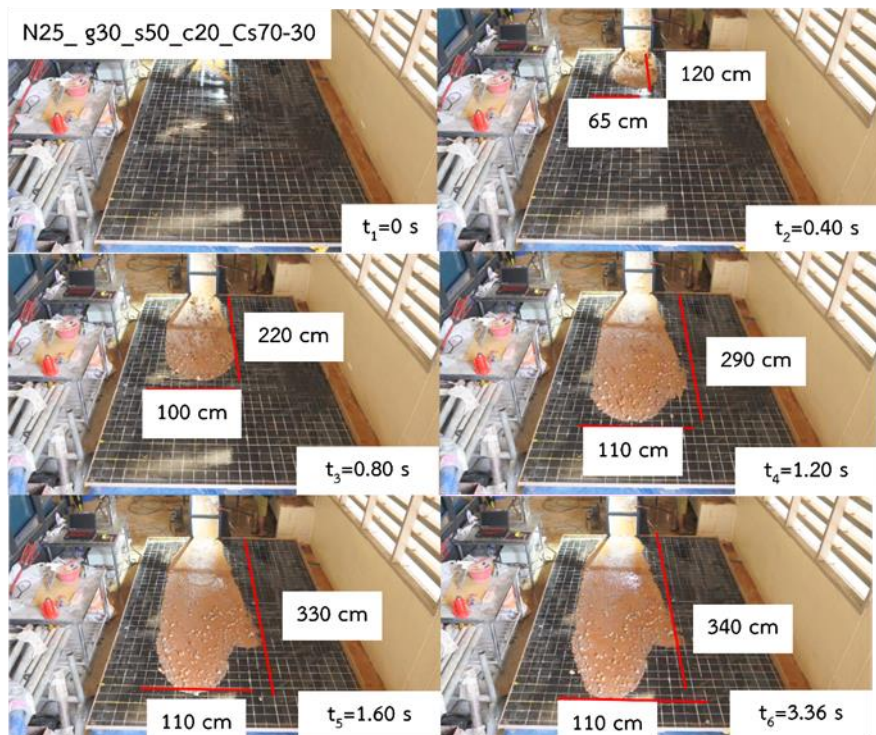
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g40_s60_c0_Cs100-0



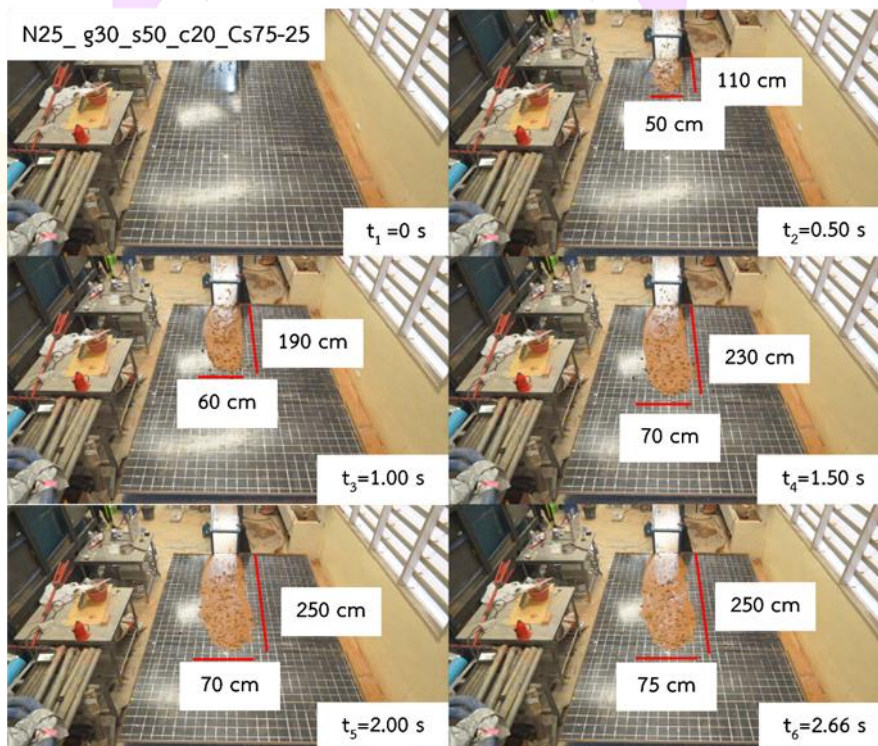
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g25_s75_c0_Cs100-0



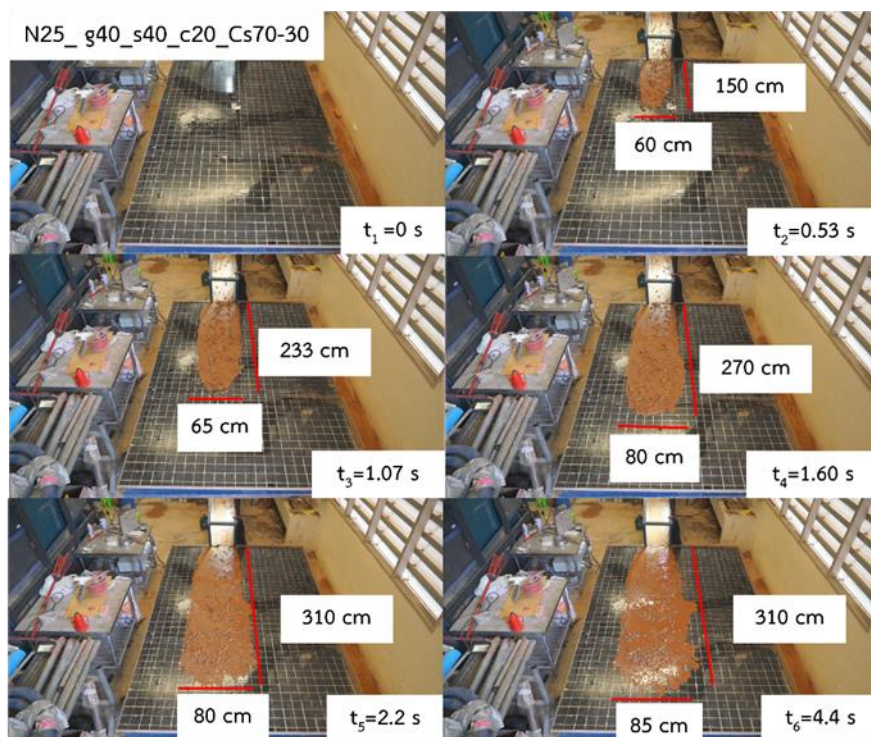
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g0_s100_c0_Cs100-0



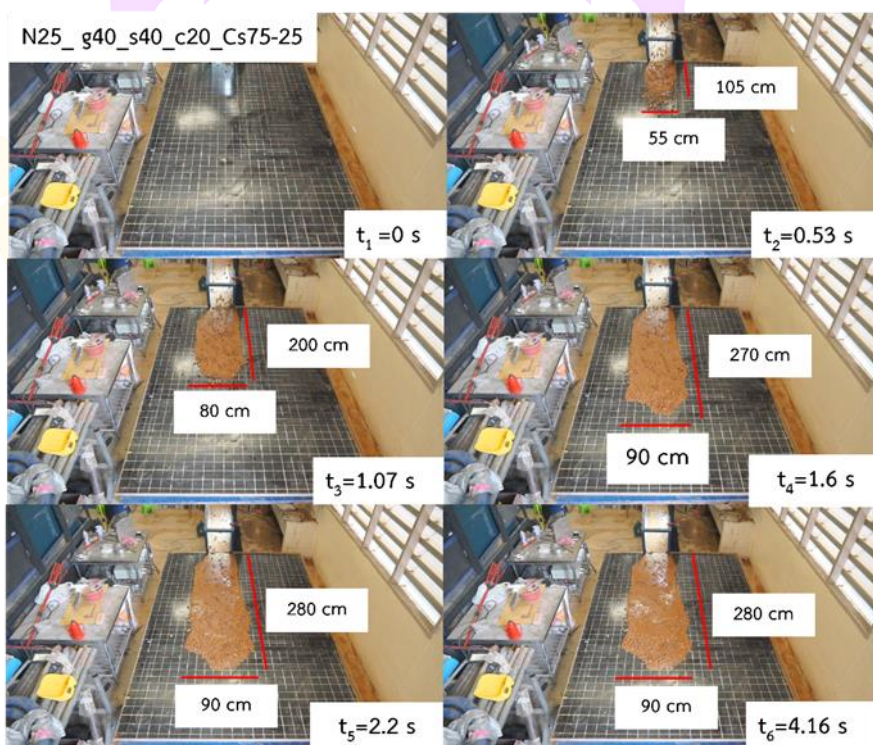
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g30_s50_c20_Cs70-30



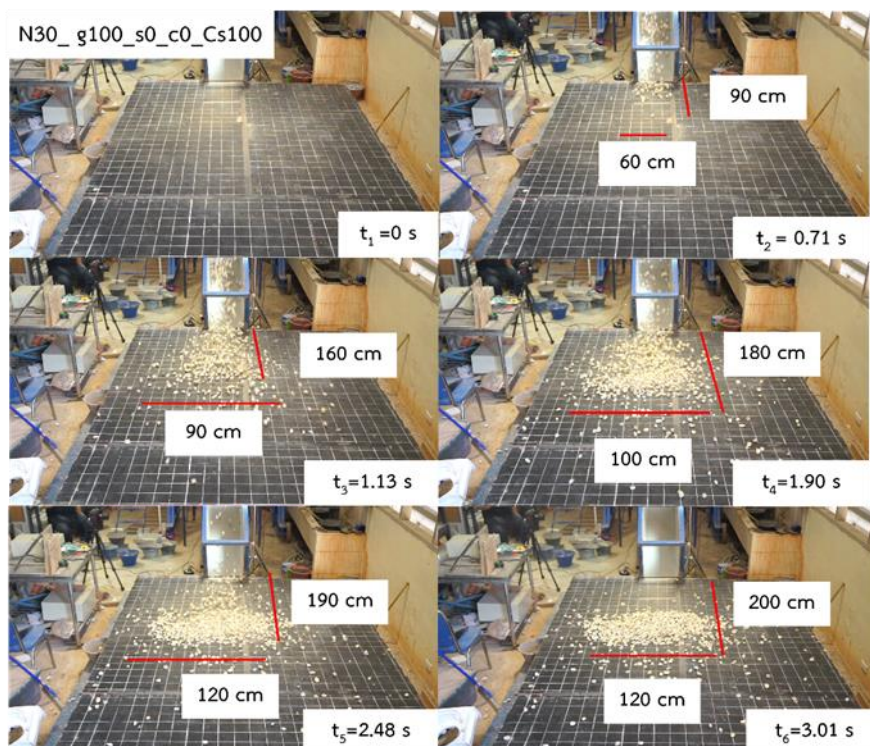
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g30_s50_c20_Cs75-25



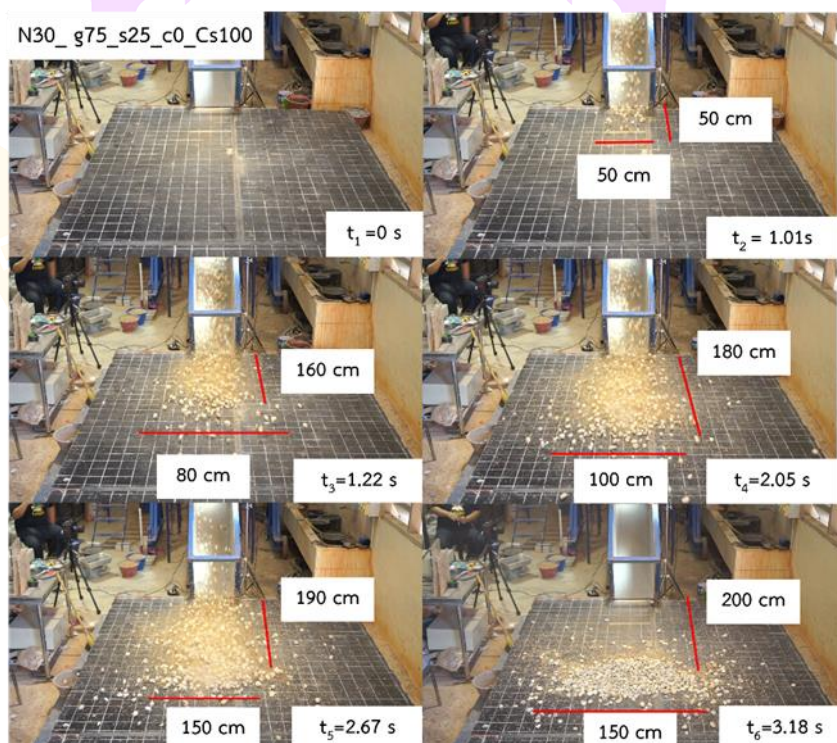
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g40_s40_c20_Cs70-30



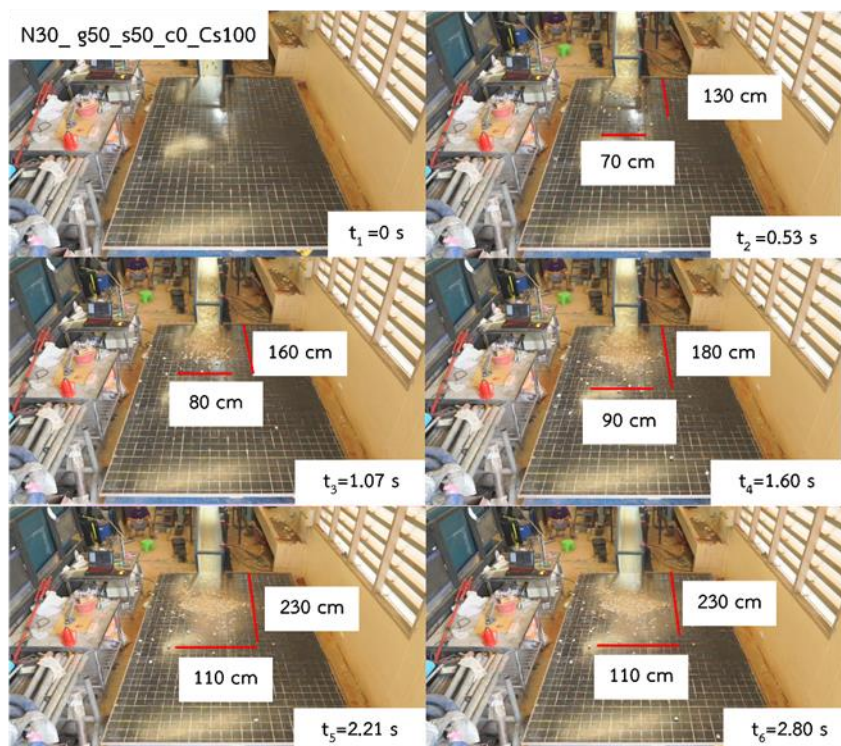
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N25_g40_s40_c20_Cs75-25



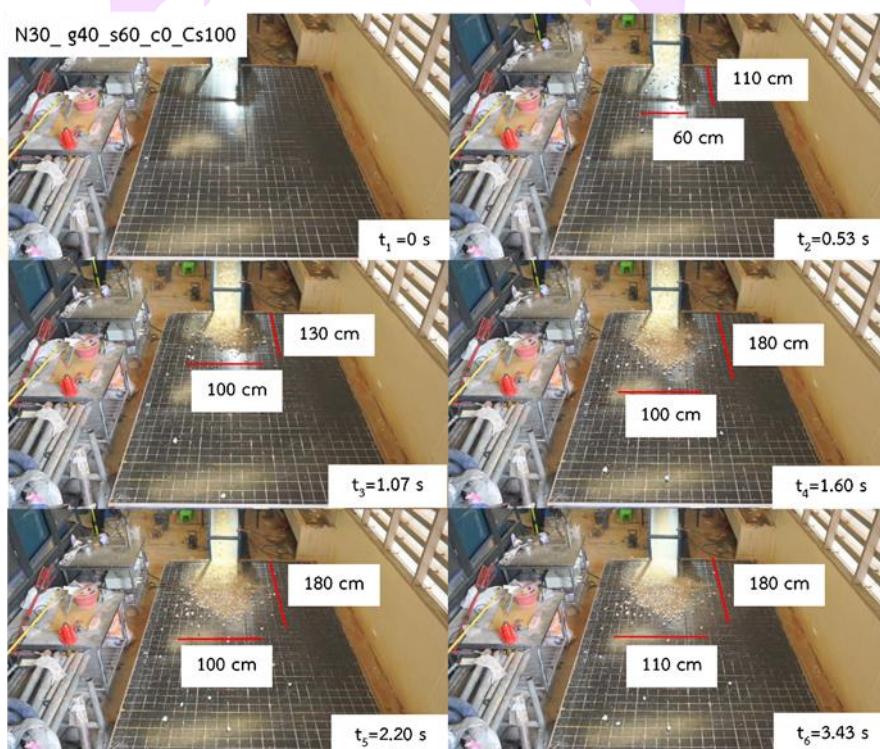
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N30_g100_s0_c0_Cs100-0



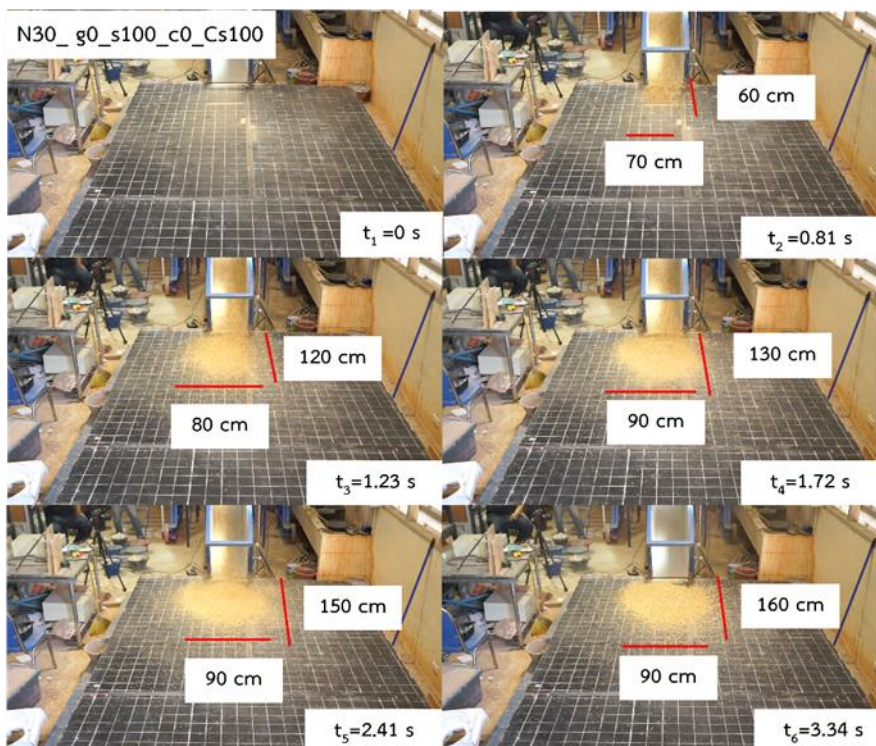
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N30_g75_s25_c0_Cs100-0



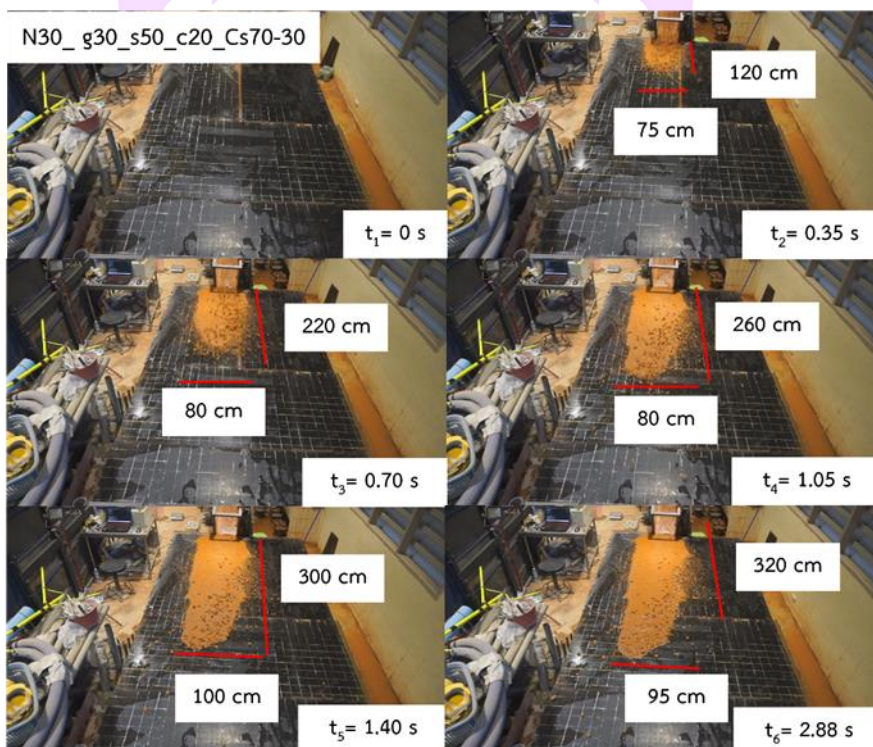
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N30_g50_s50_c0_Cs100-0



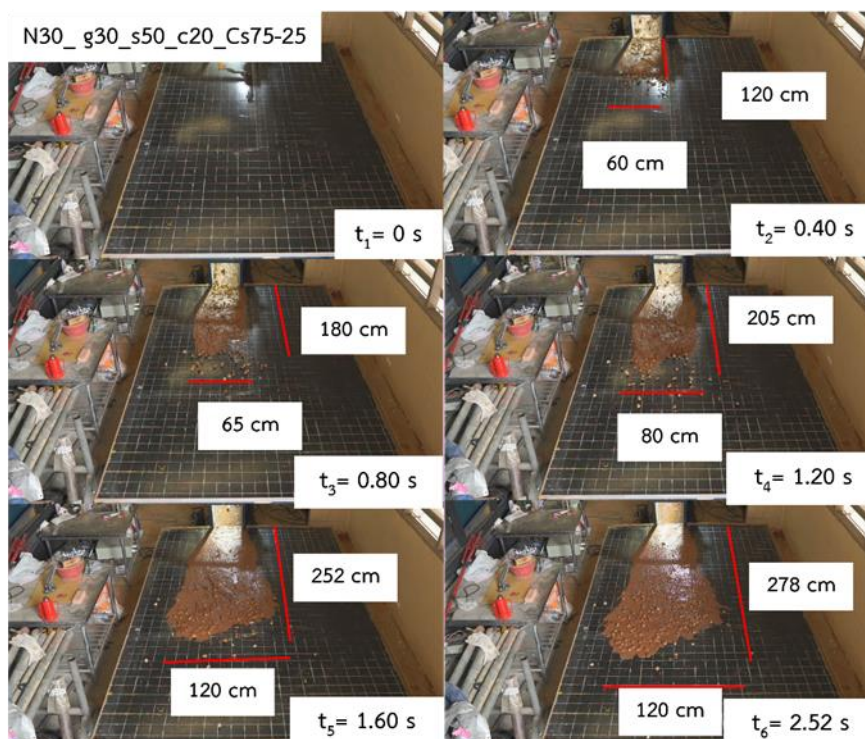
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N30_g40_s60_c0_Cs100-0



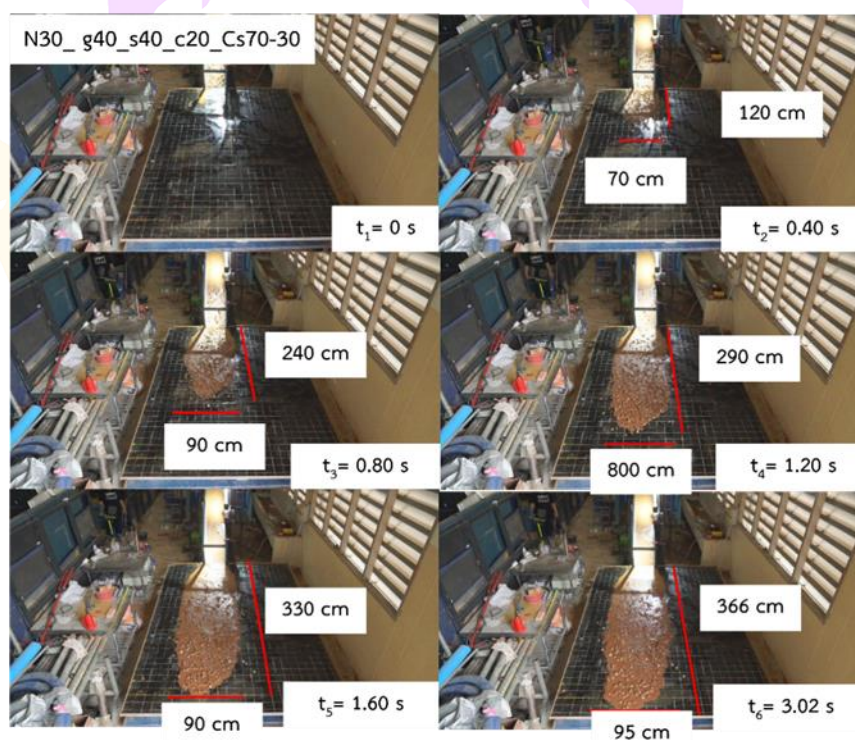
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N30_g25_s75_c0_Cs100-0



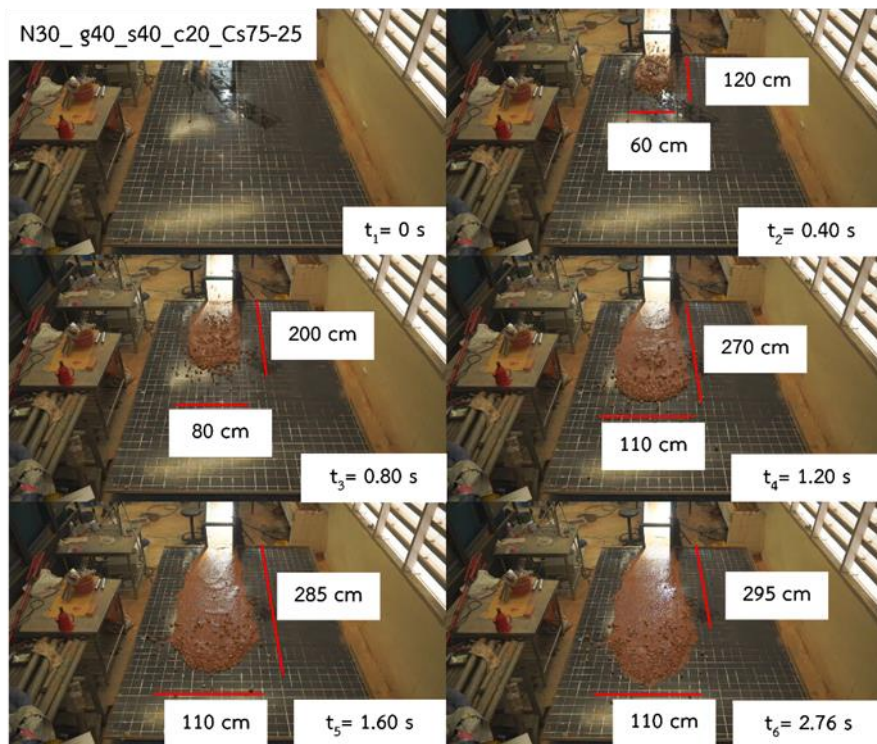
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N30_g30_s50_c20_Cs70-30



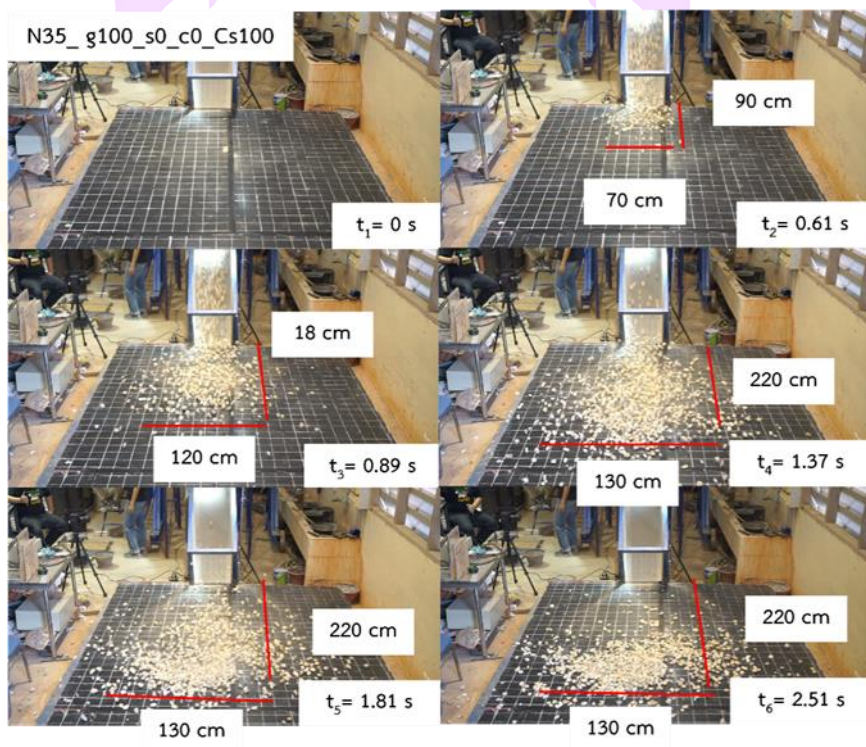
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N30_g30_s50_c20_Cs75-25



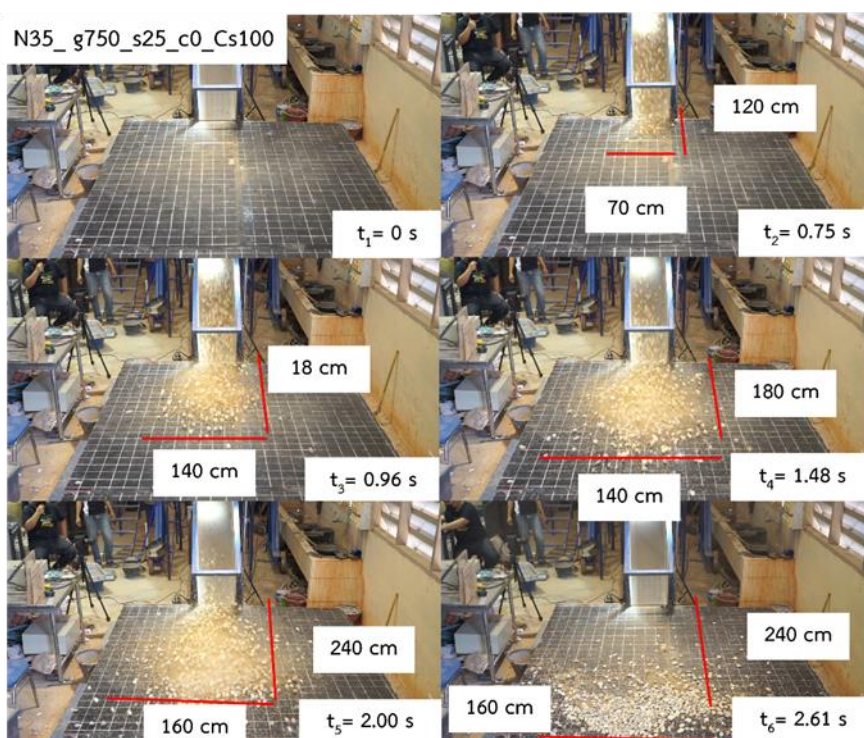
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N30_g40_s40_c20_Cs70-30



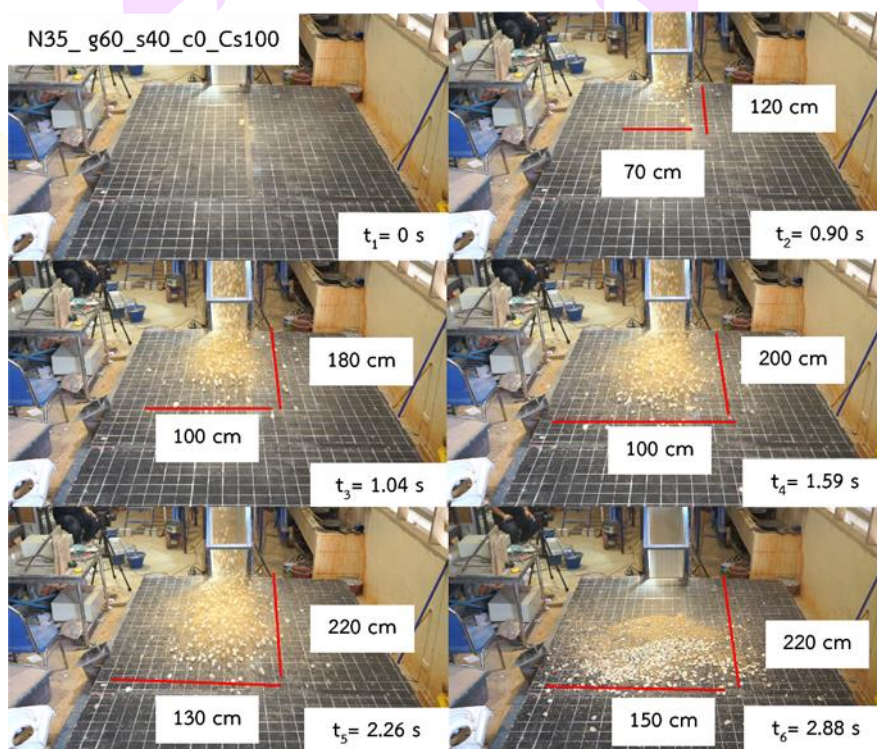
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N30_g40_s40_c20_Cs75-25



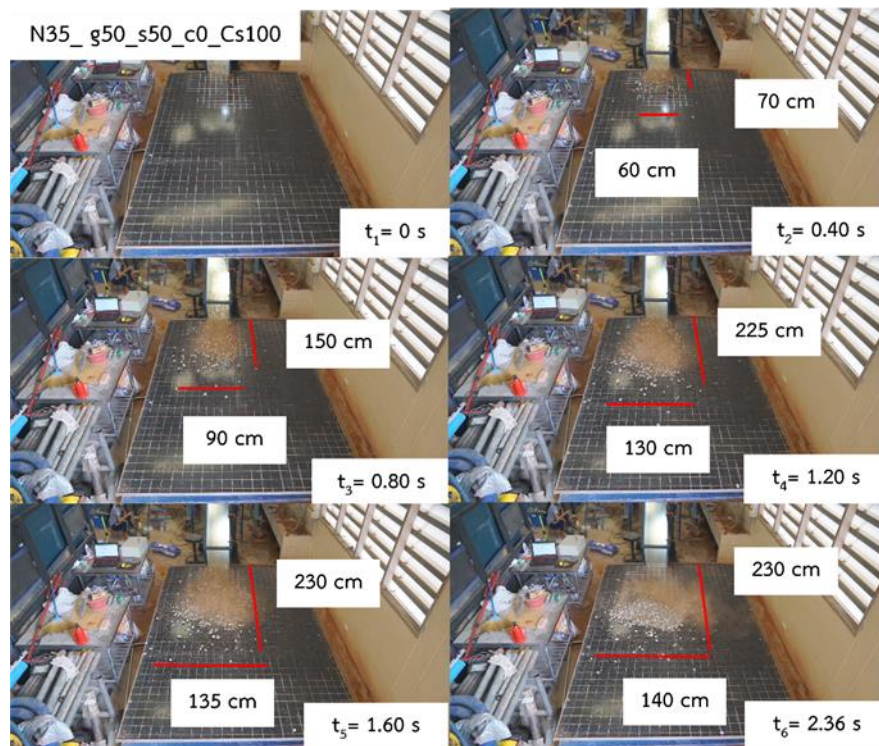
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N35_g100_s0_c0_Cs100-0



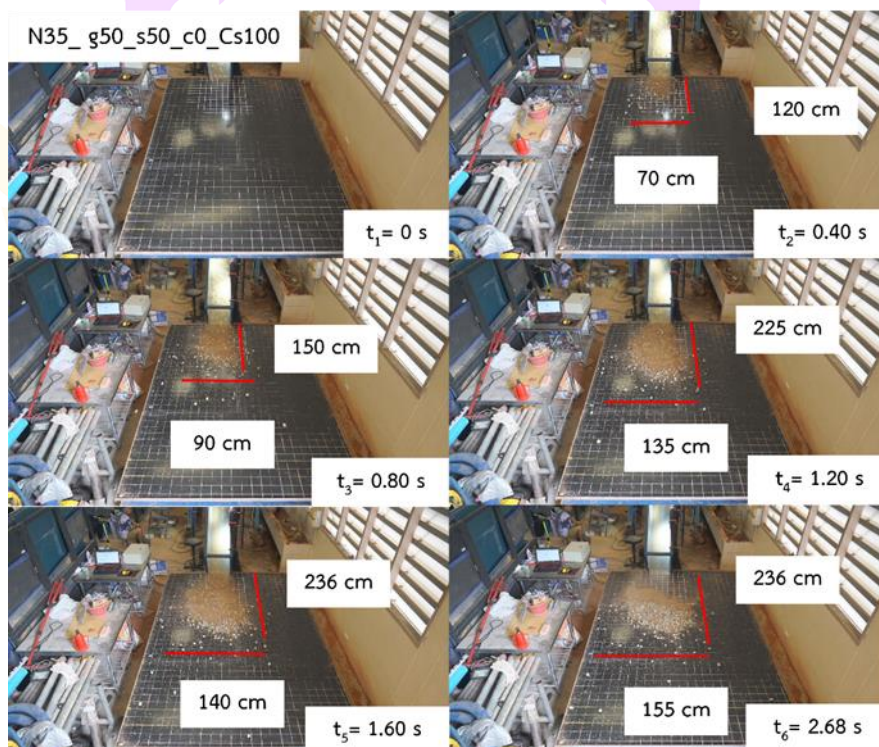
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N35_g750_s25_c0_Cs100-0



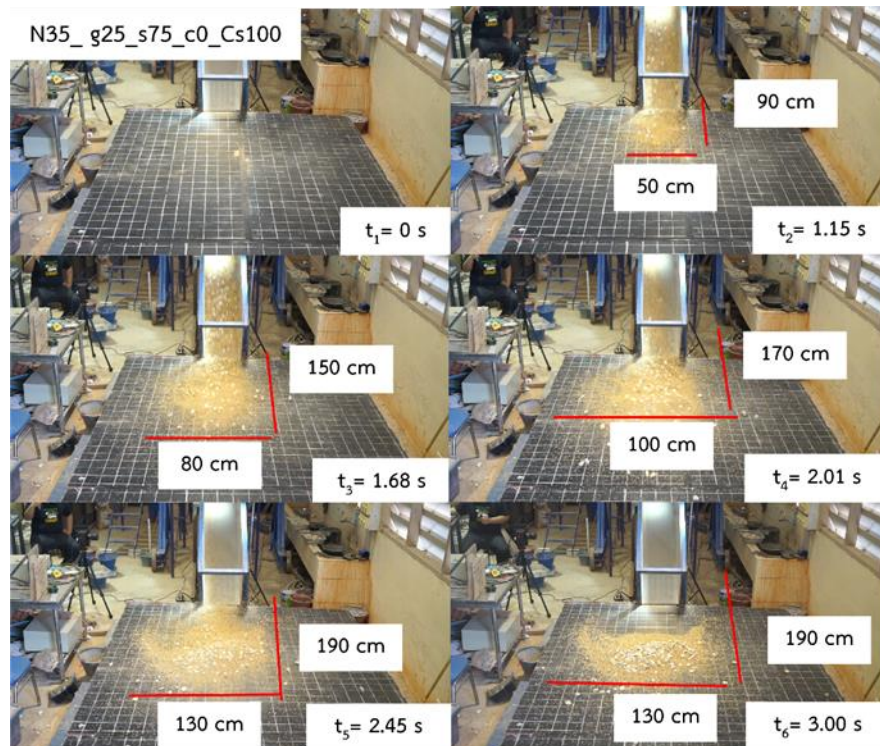
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N35_g60_s40_c0_Cs100-0



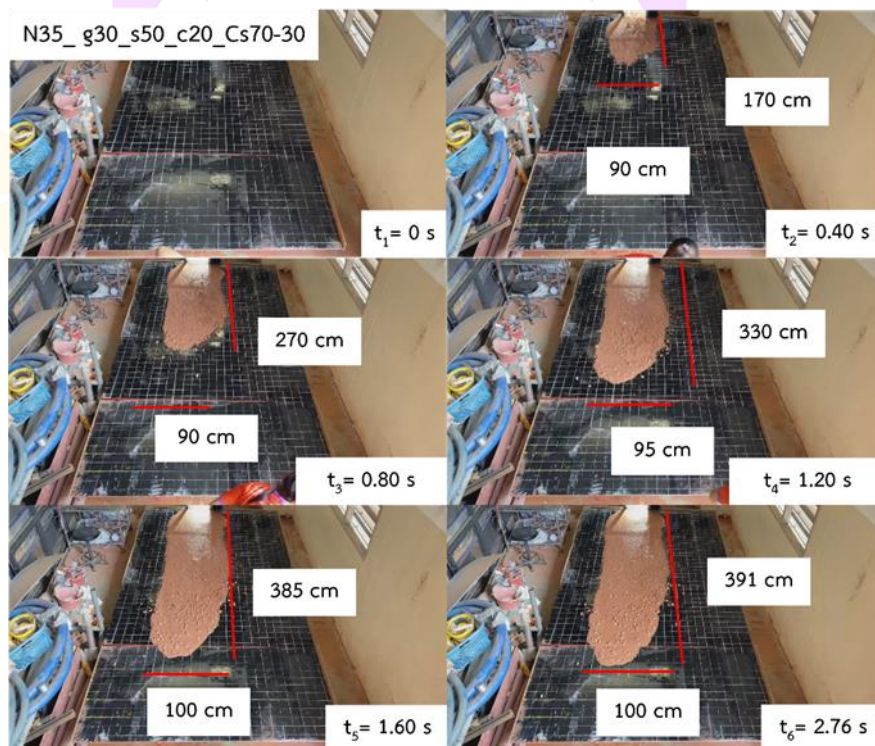
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N35_g50_s50_c0_Cs100-0



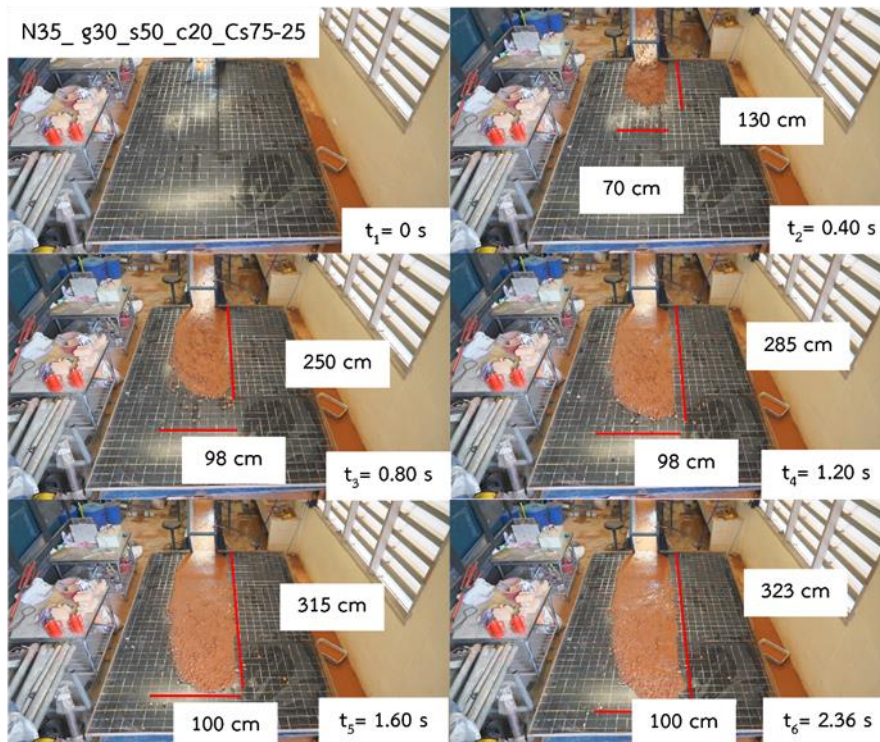
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N35_g50_s50_c0_Cs100-0



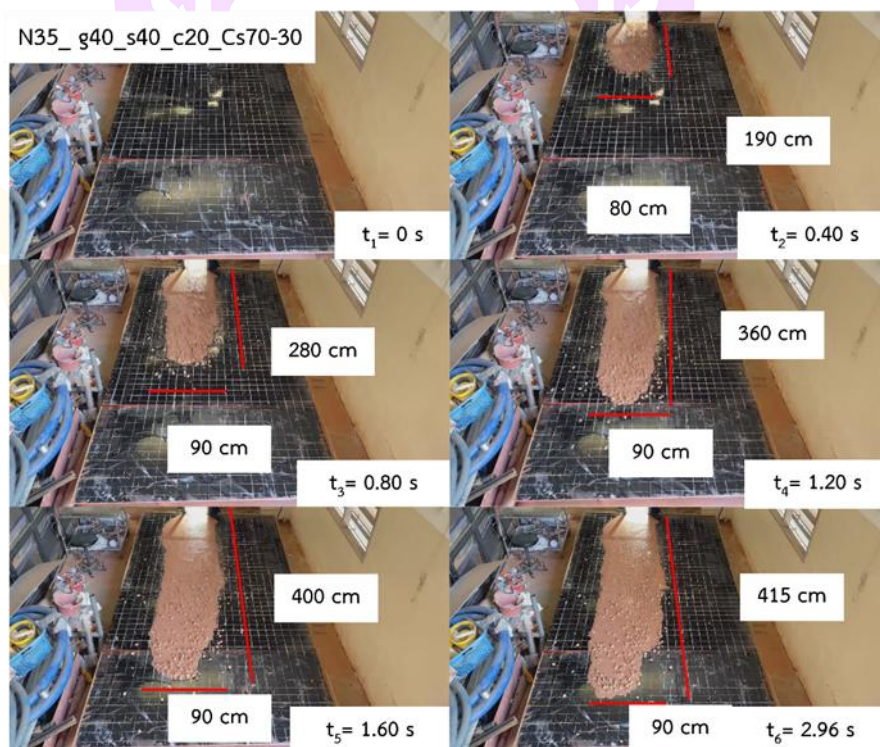
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N35_g25_s75_c0_Cs100-0



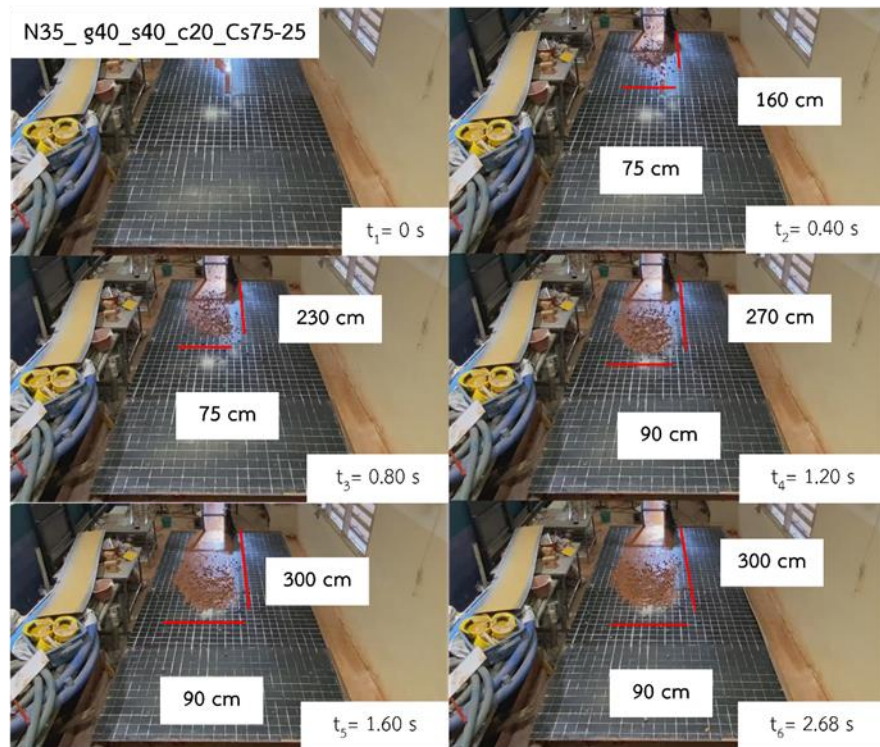
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N35_g30_s50_c20_Cs70-30



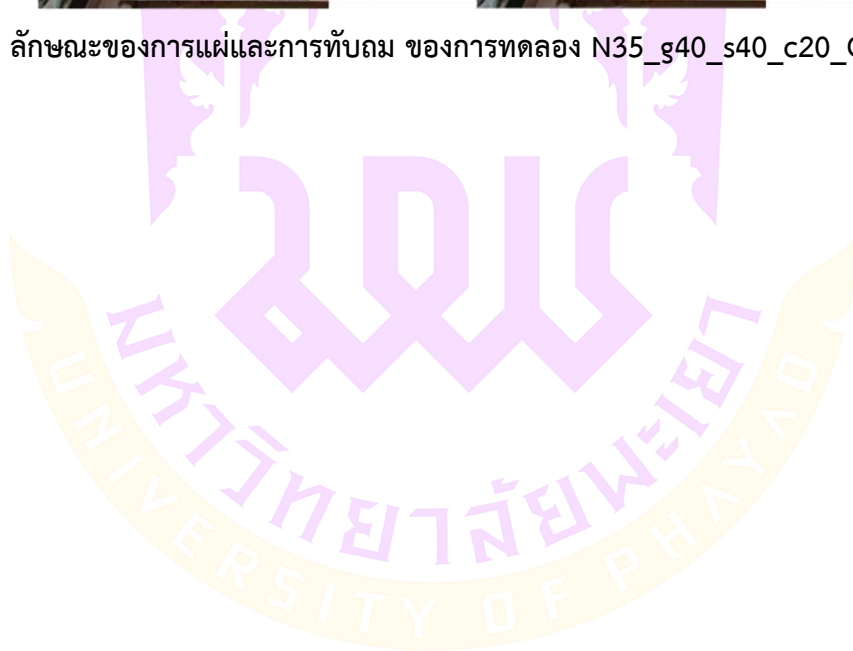
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N35_g30_s50_c20_Cs75-25



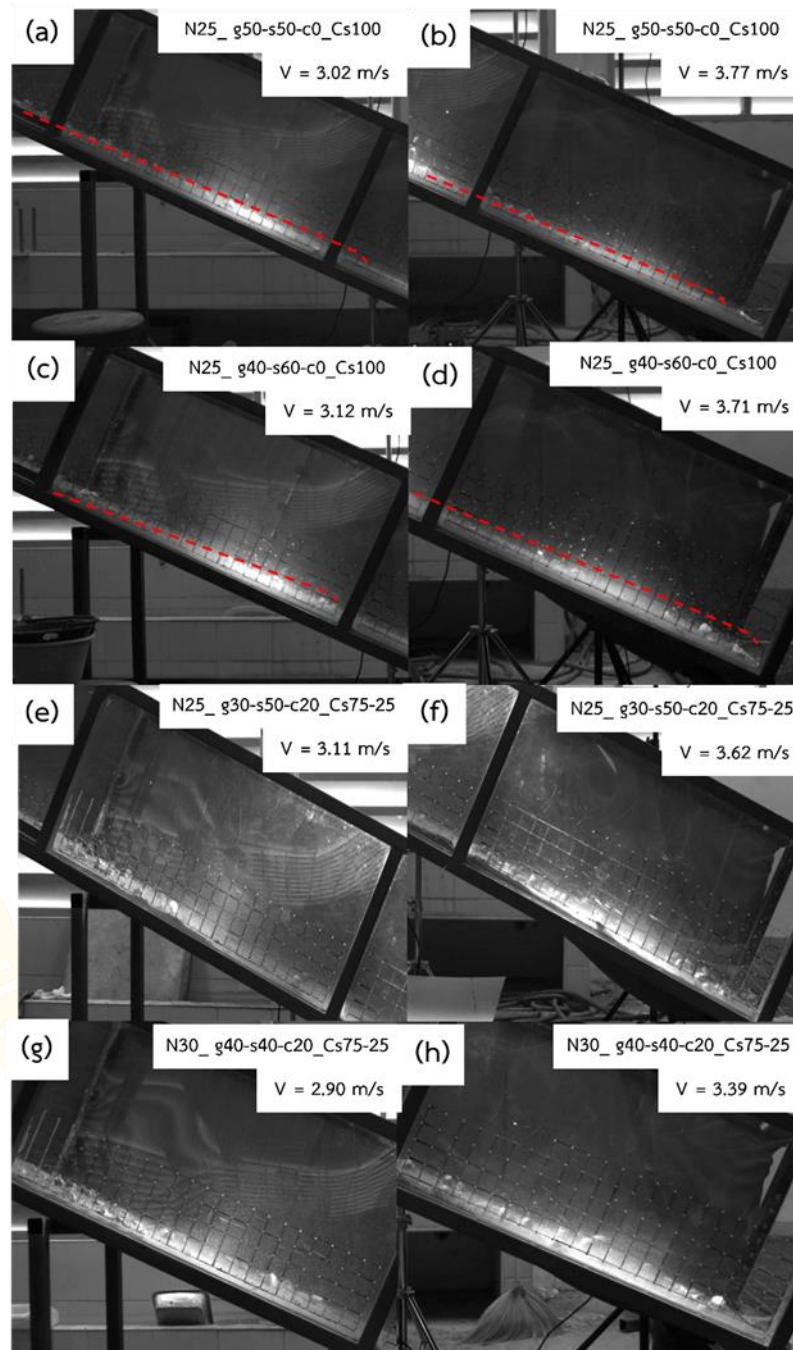
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N35_g40_s40_c20_Cs70-30



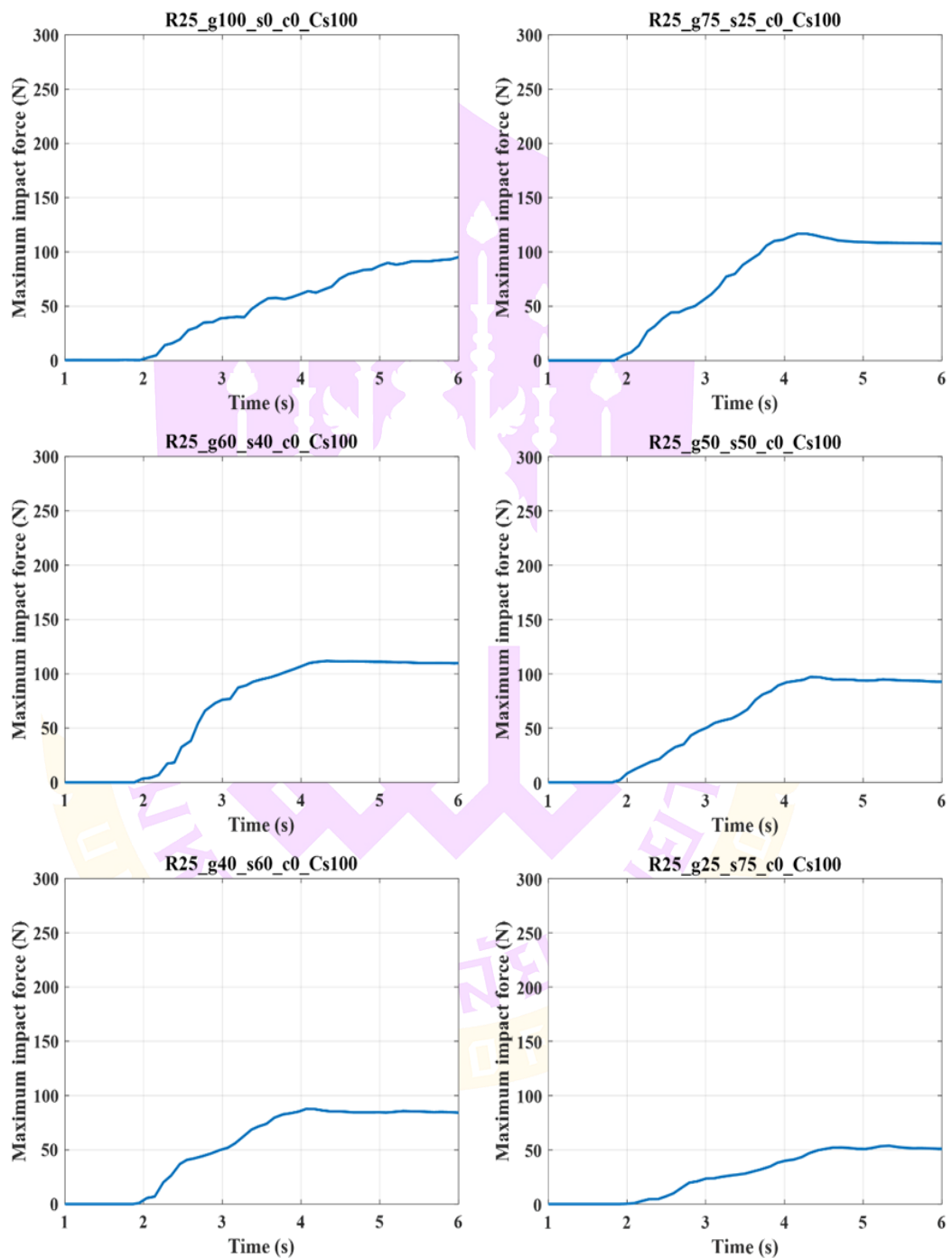
ลักษณะของการแผ่และการทับถม ของการทดลอง N35_g40_s40_c20_Cs70-30



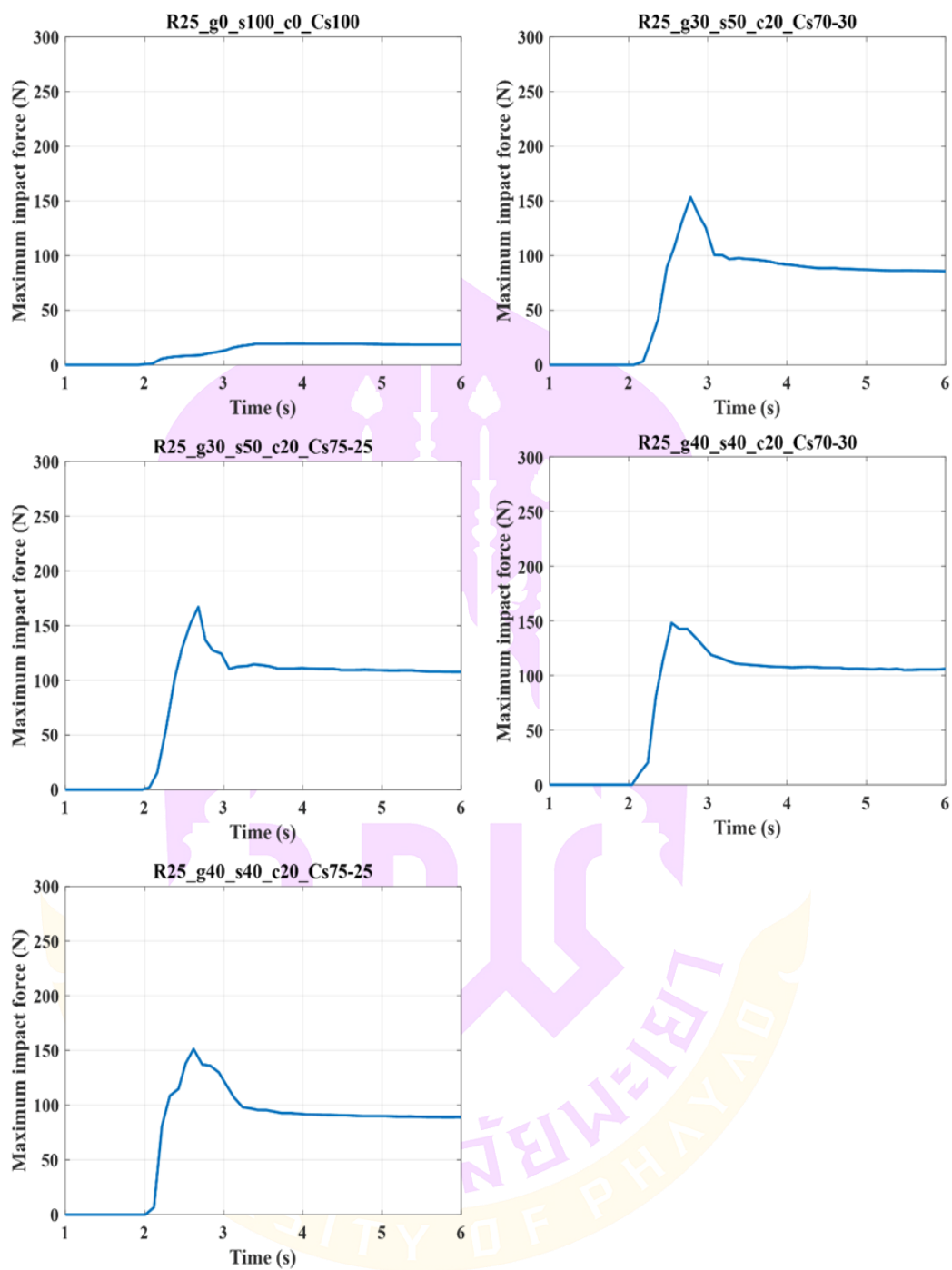
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการหาความเร็วส่วนแบบแห้ง และส่วนผสมแบบกึ่งของเหลว



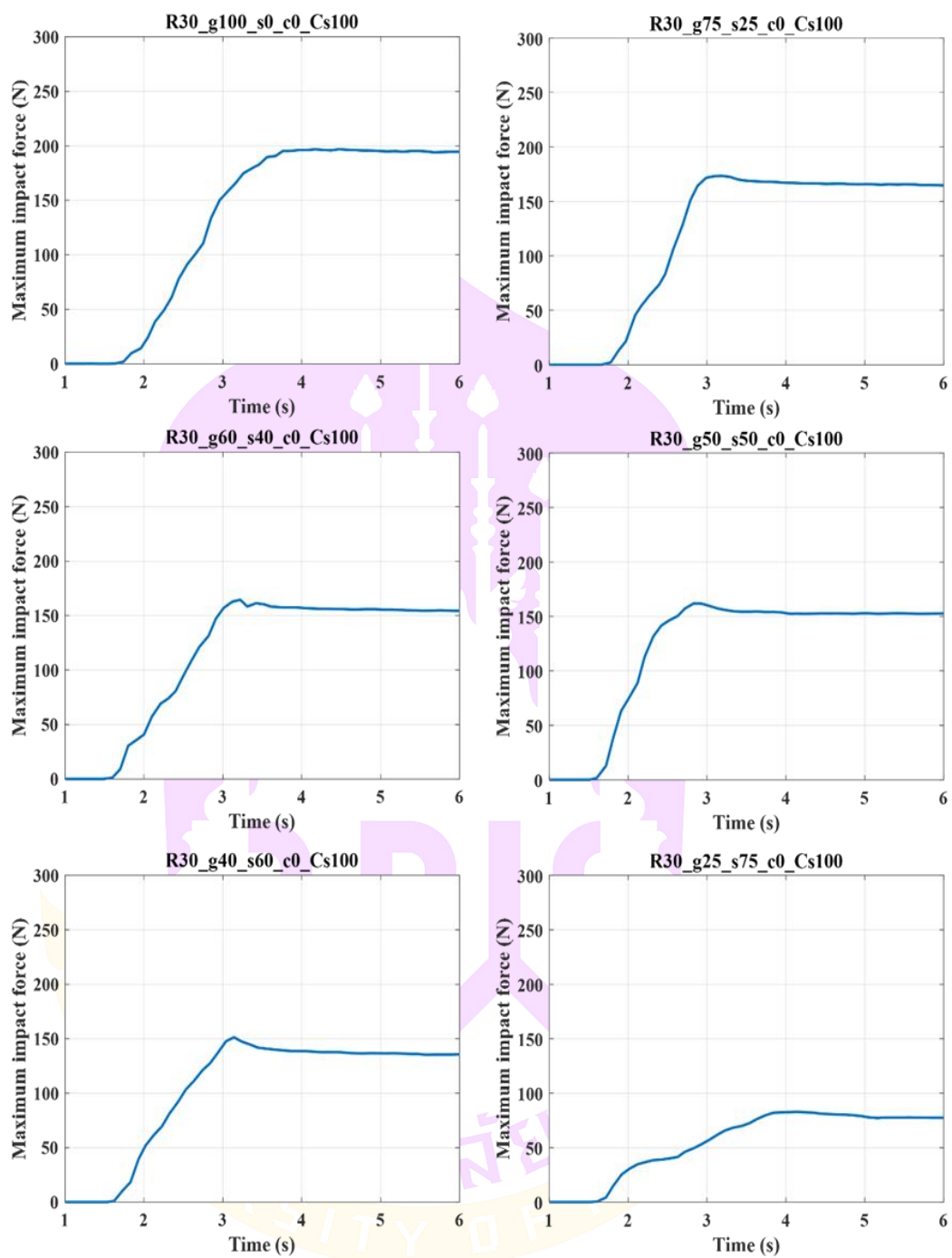
ภาคผนวก ค แรงกระแทกรวมของการไหลหลากของส่วนแบบแห้ง และส่วนผสมแบบ
กึ่งของเหลว



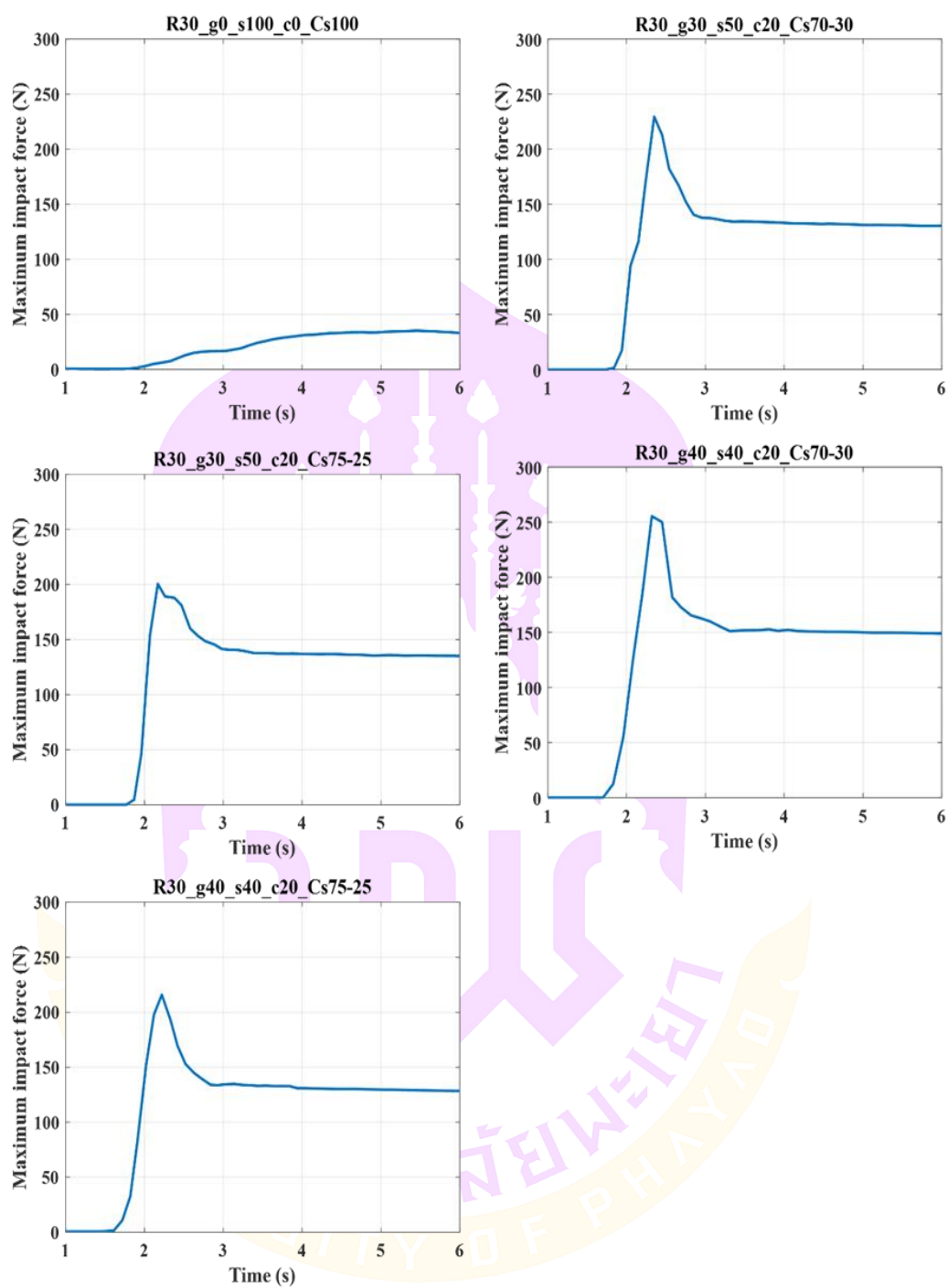
ความสัมพันธ์แรงกระแทกรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$



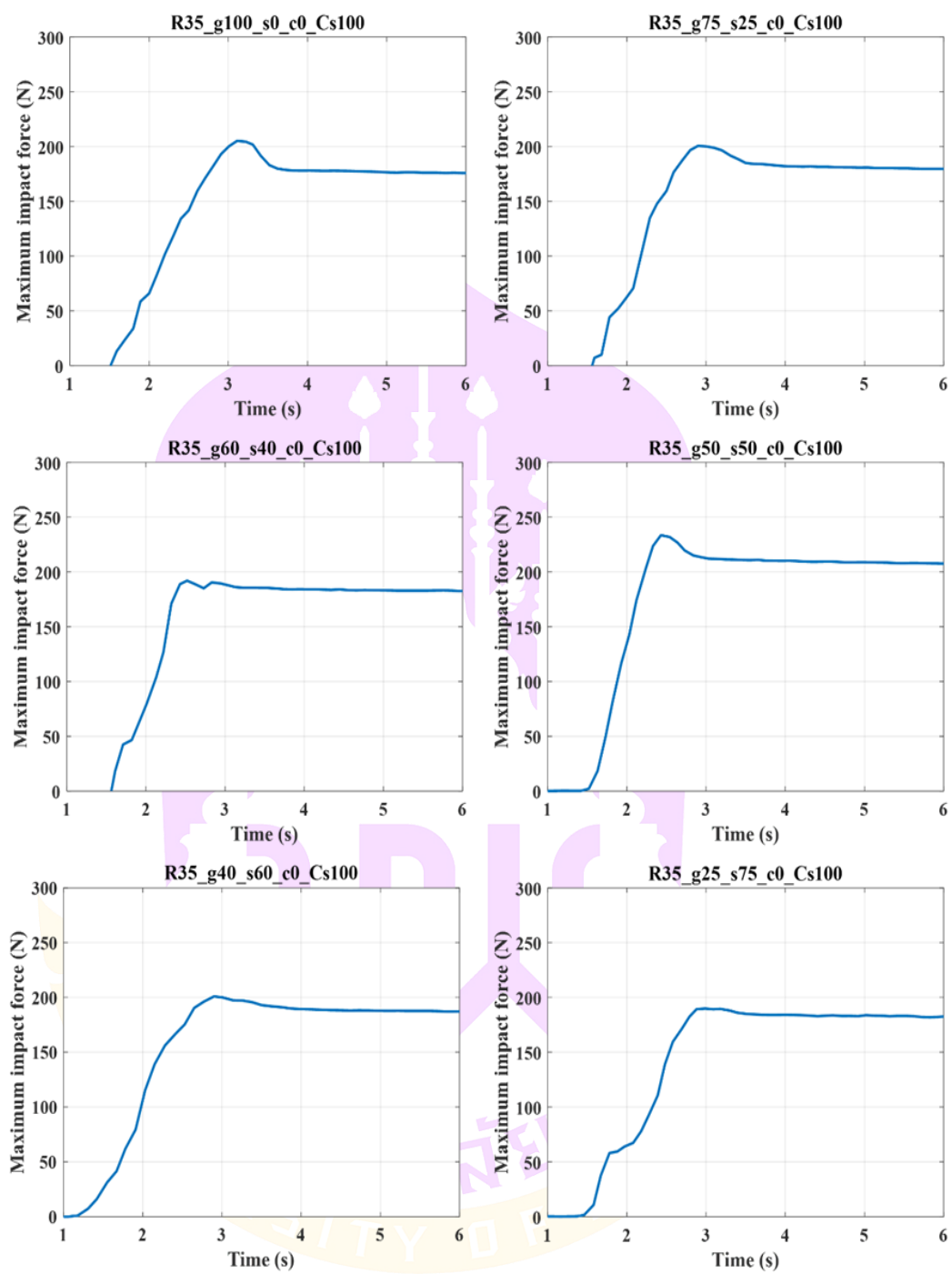
ความสัมพันธ์แรงกระแทกรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$



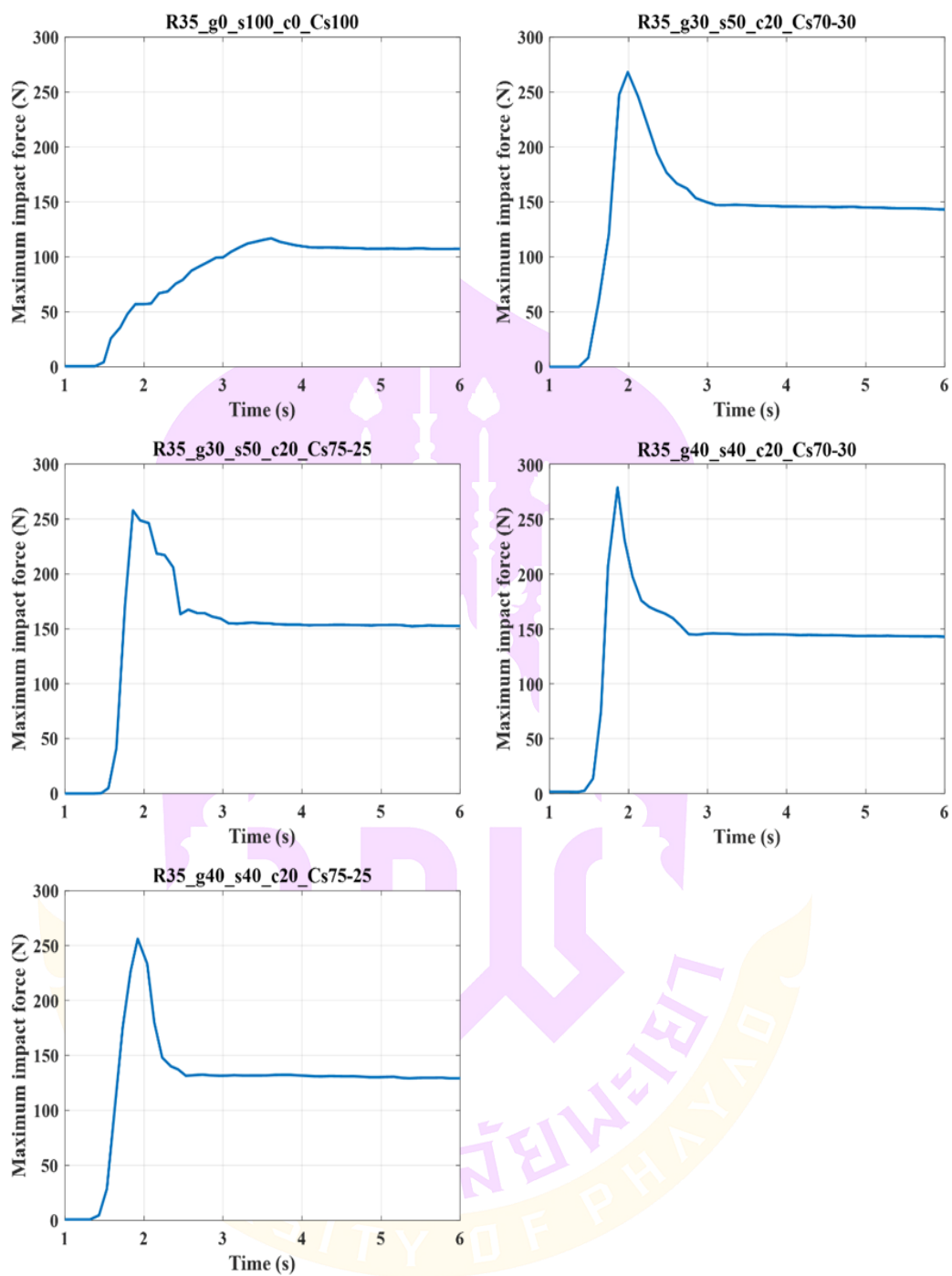
ความสัมพันธ์แรงกระแทกรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 30^\circ$



ความสัมพันธ์แรงกระแทกรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 30^\circ$

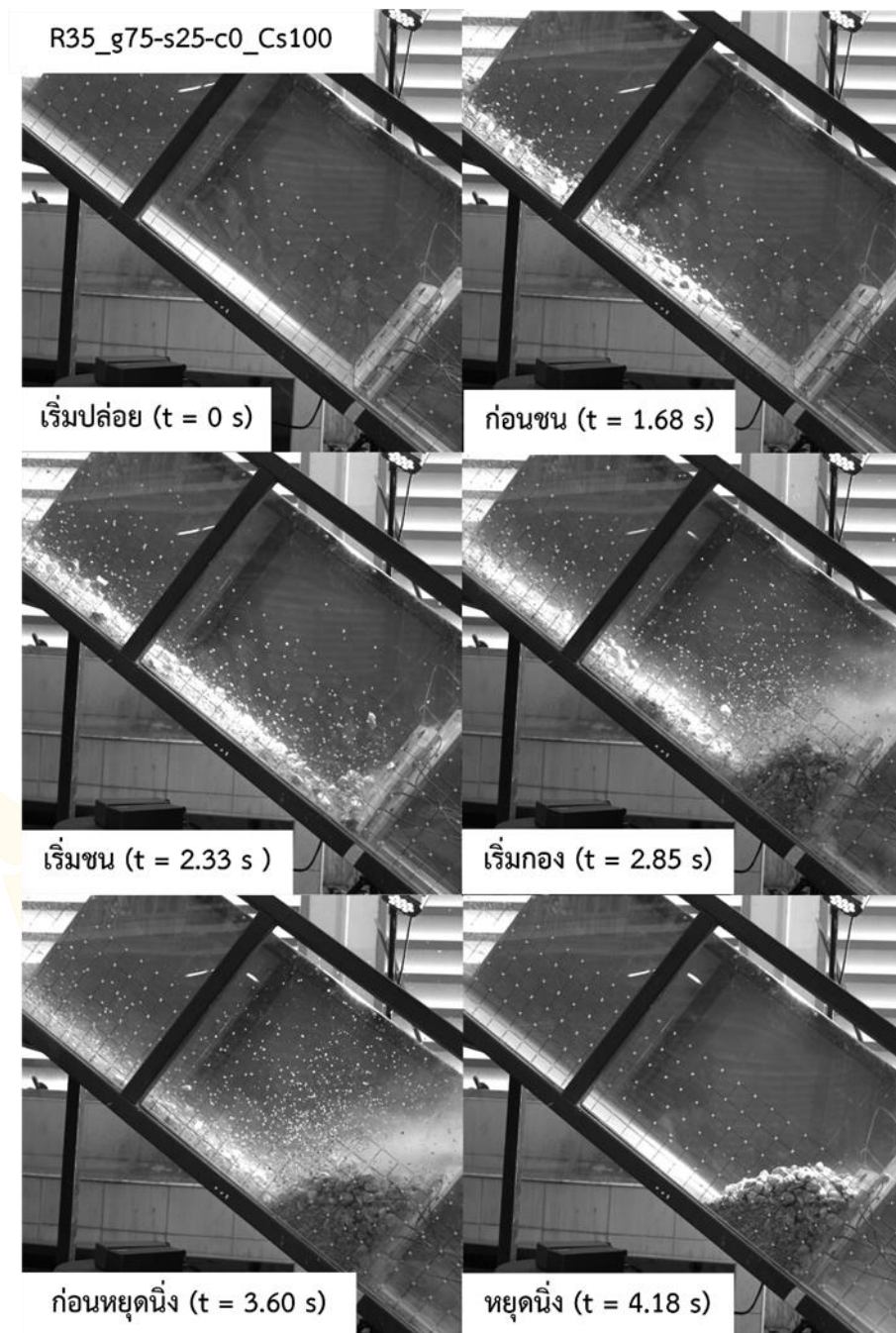


ความสัมพันธ์แรงกระแทกรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 30^\circ$

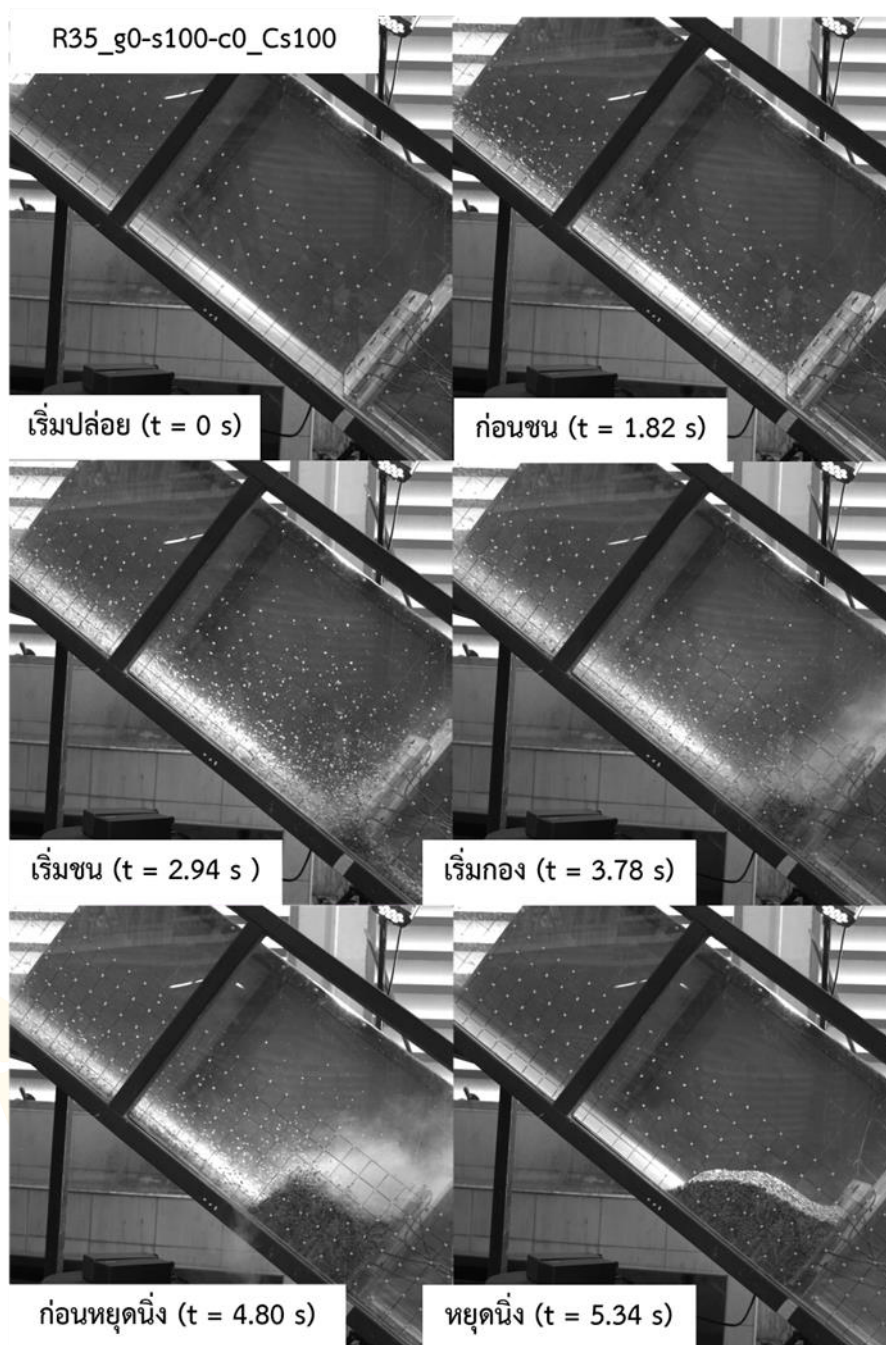


ความสัมพันธ์แรงกระแทกรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 30^\circ$

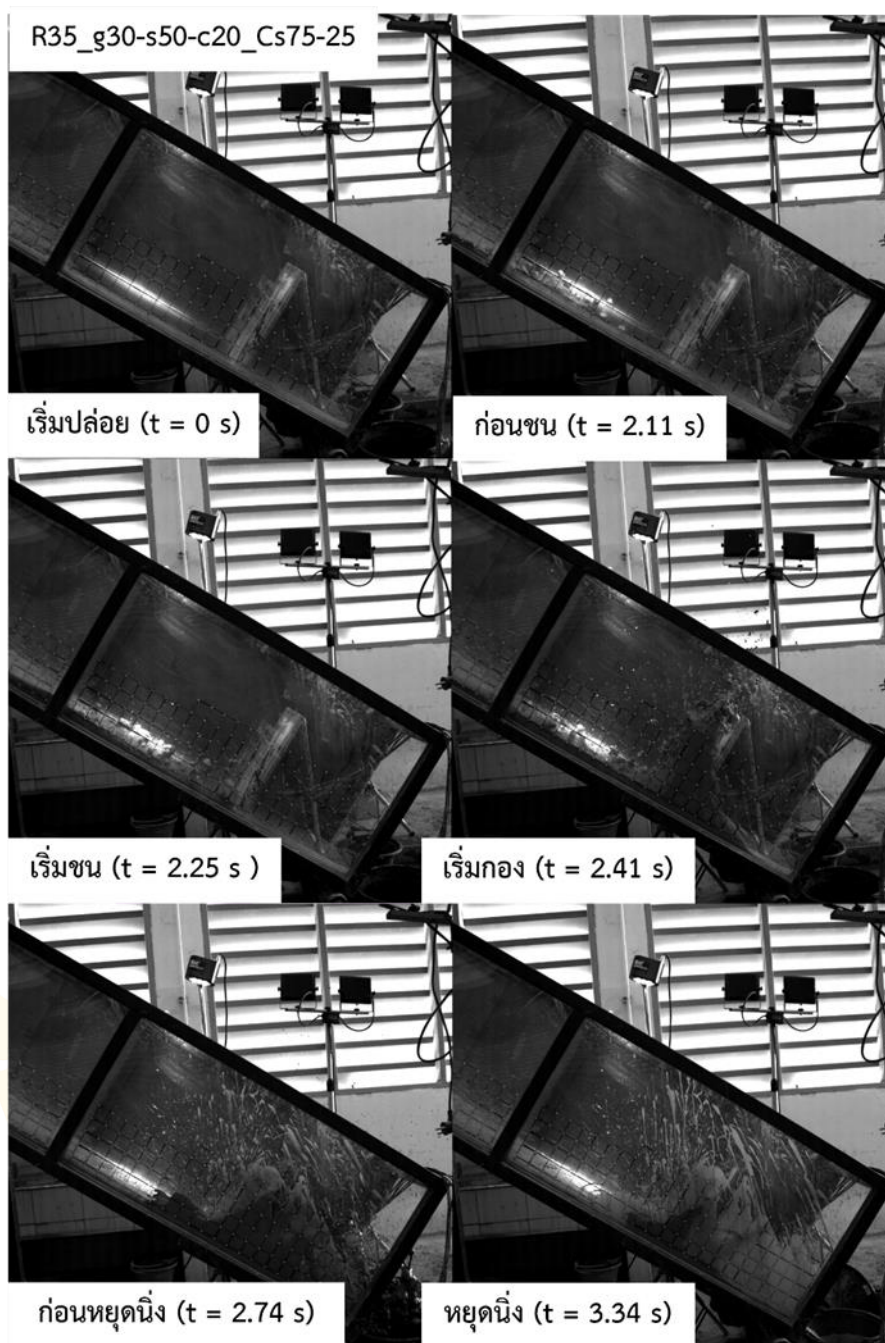
ภาพผนวก ง ช่วงเวลาการไหลของของส่วนแบบแห้ง และส่วนผสมแบบกึ่งของเหลว
เมื่อชนกับโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง



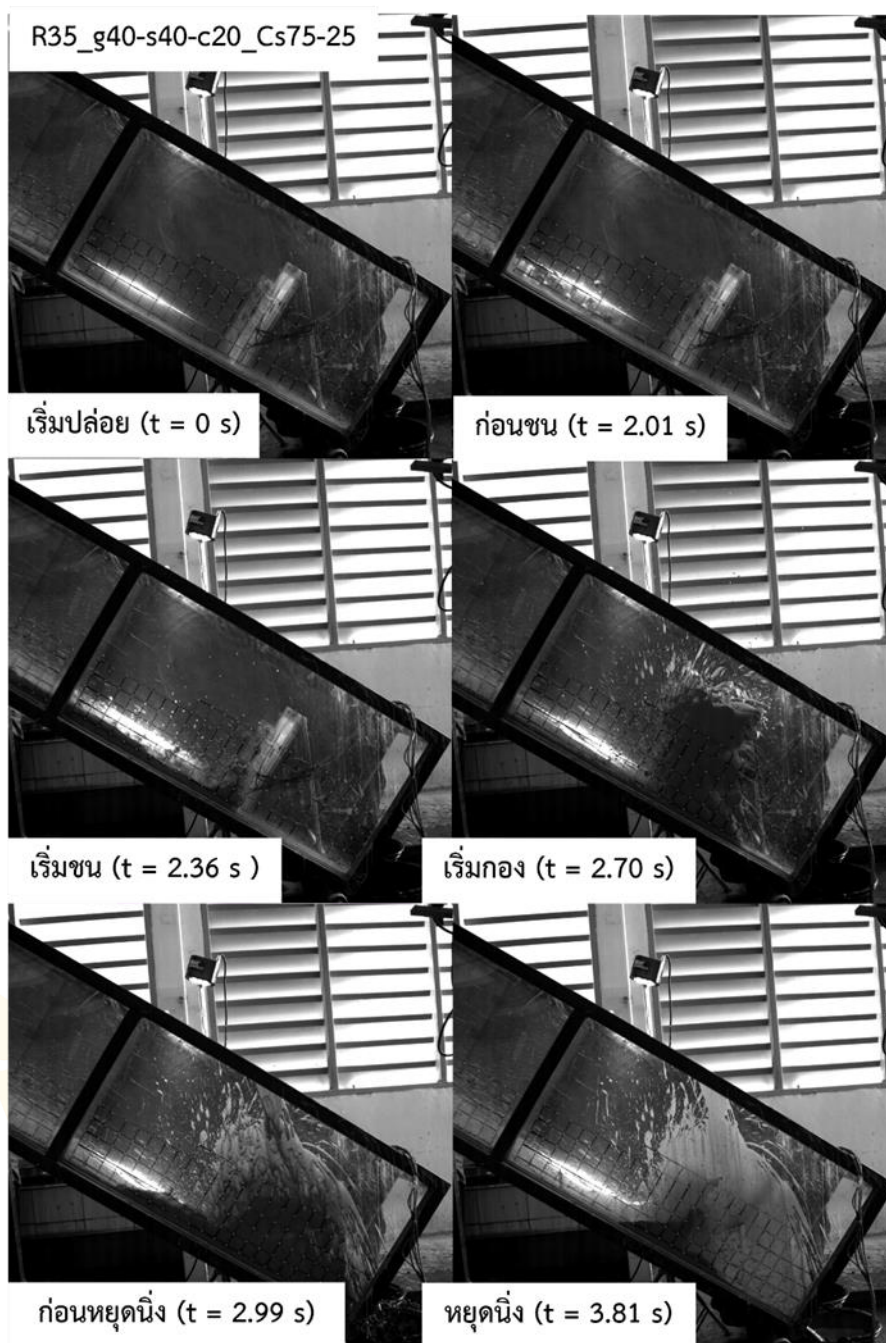
ช่วงเวลาการไหลของของส่วนผสม R35_g75_s25_c0_Cs100-0



ช่วงเวลาการไหลของของส่วนผสม R35_g0_s100_c0_Cs100-0

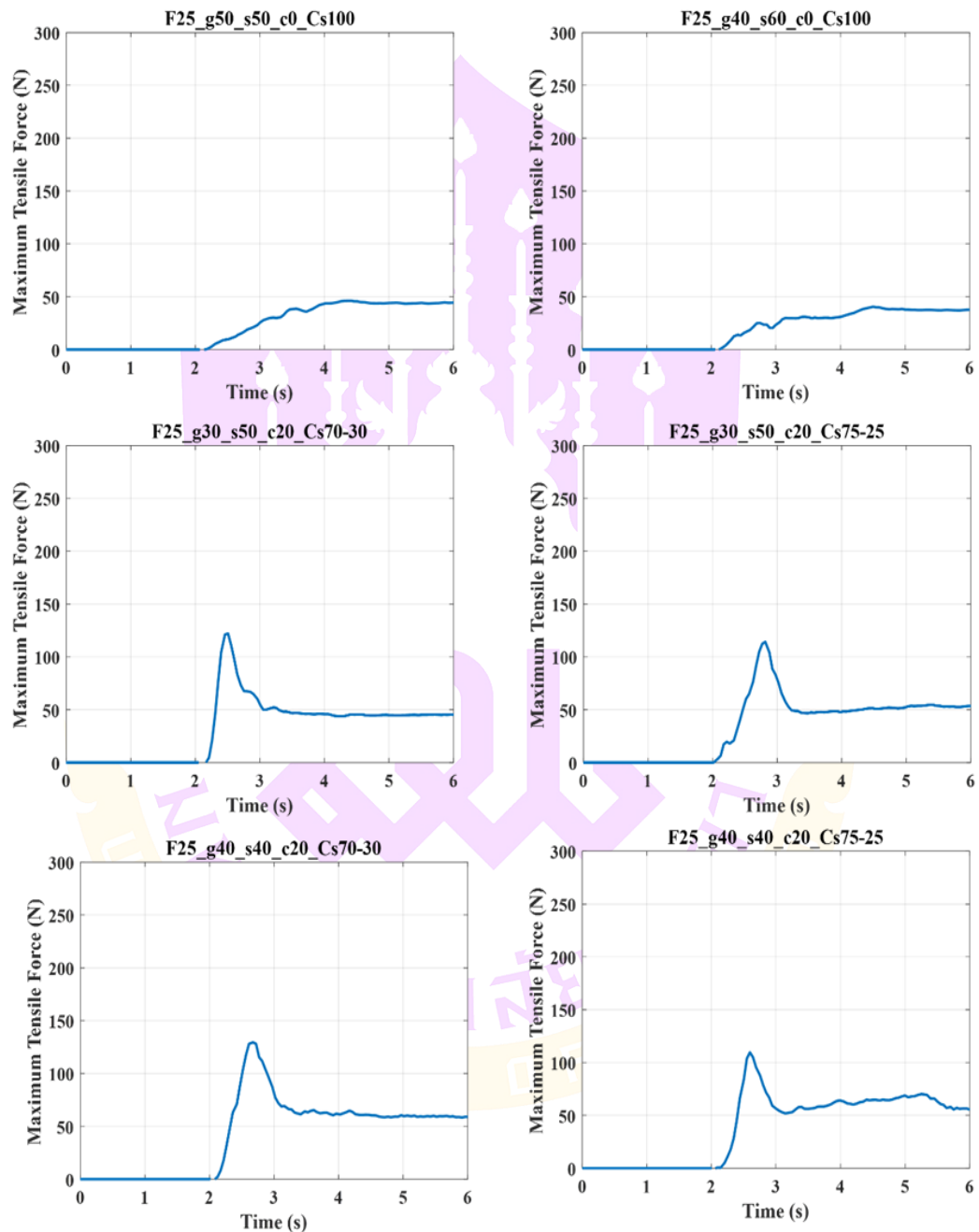


ช่วงเวลาการไหลของของส่วนผสม R35_g30_s50_c20_Cs75-25

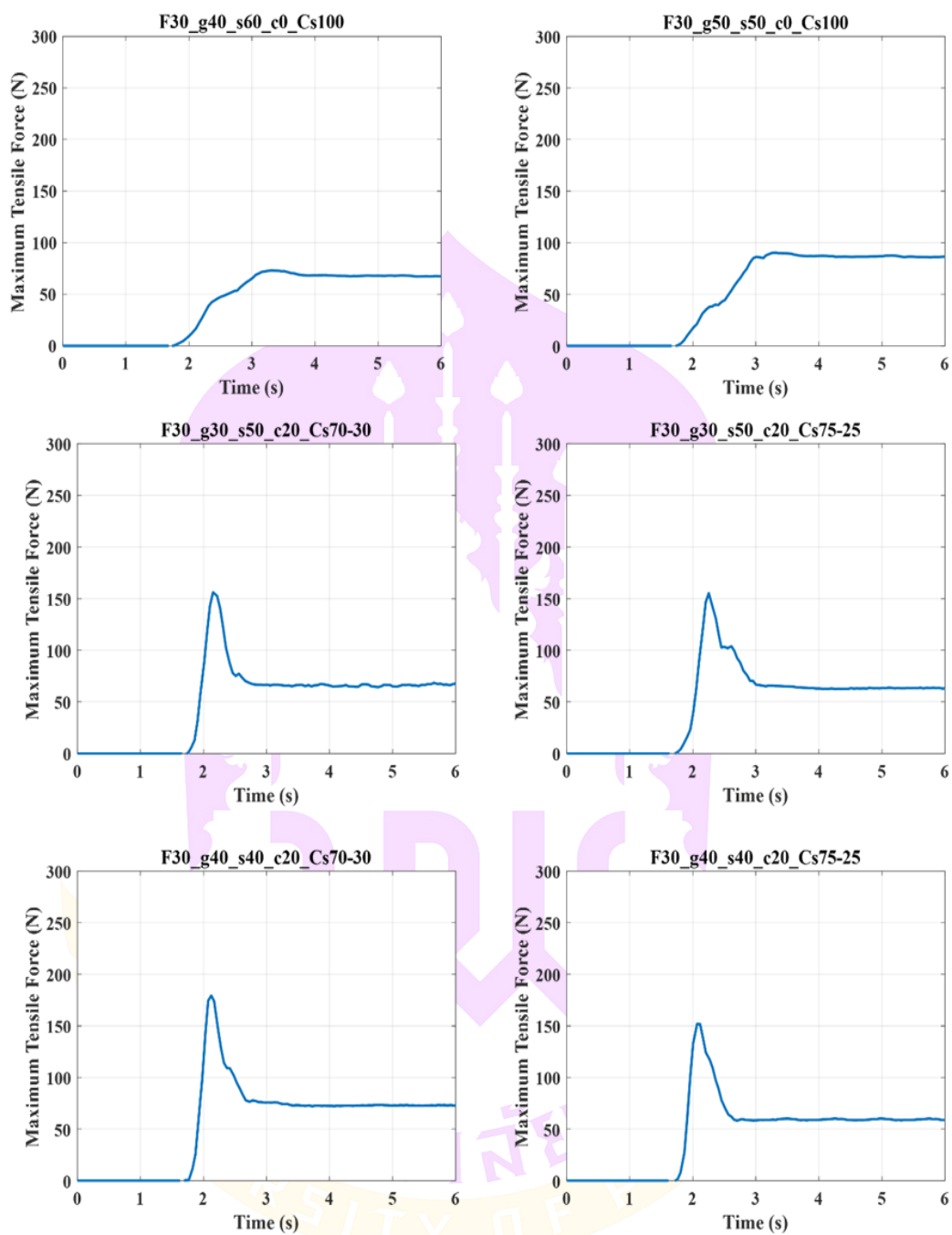


ช่วงเวลาการไหม้ของของส่วนผสม R35_g40_s40_c20_Cs75-25

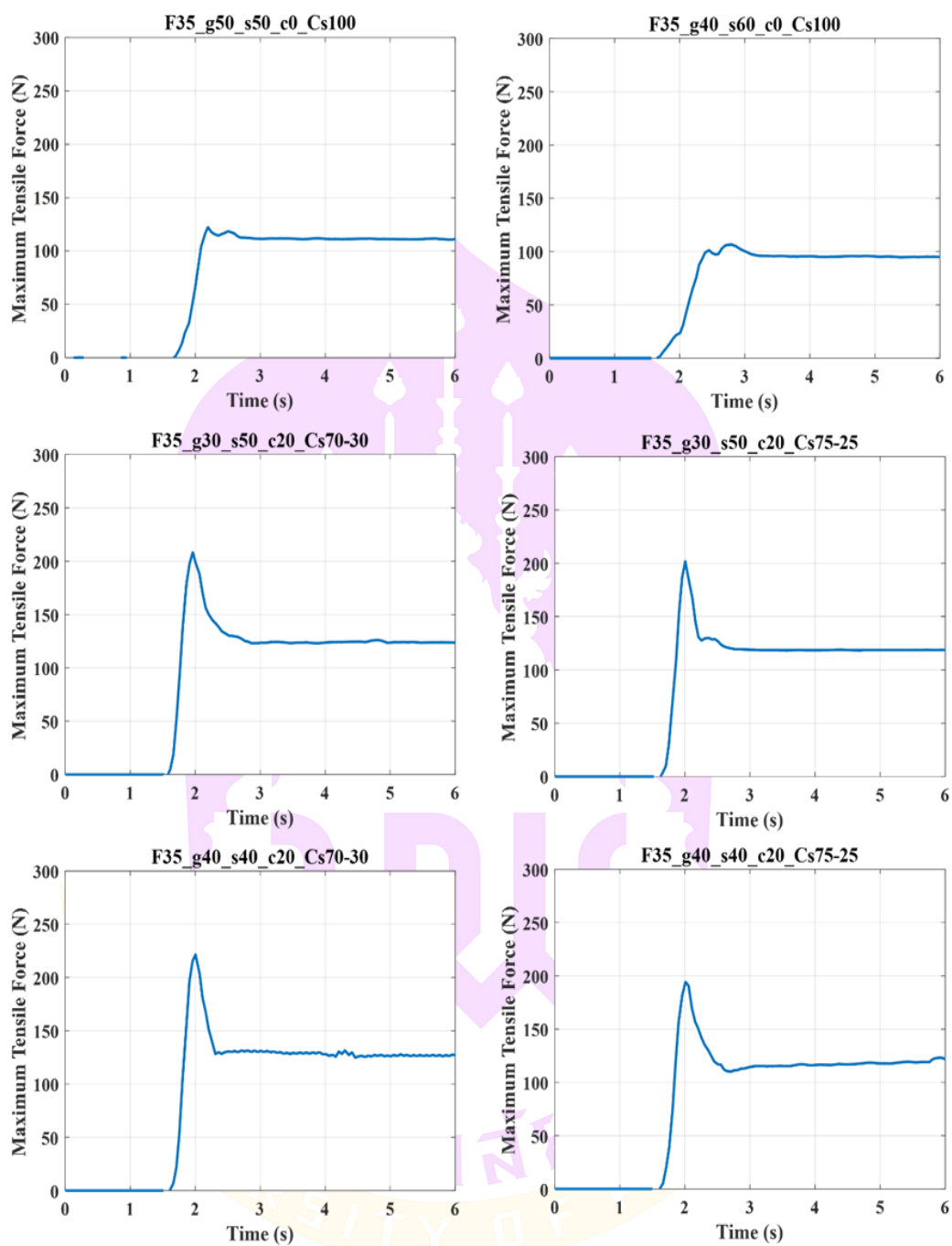
ภาคผนวก จ แรงดึงรวมของการไหลหลากของส่วนแบบแห้ง และส่วนผสมแบบ
กึ่งของเหลว



ความสัมพันธ์แรงดึงรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 25^\circ$



ความสัมพันธ์แรงดึงรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 30^\circ$



ความสัมพันธ์แรงดึงรวมและเวลา ณ มุมลาดเอียง $\theta = 35^\circ$

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	อาทิตย์ เรืองยศ
วัน เดือน ปี เกิด	1 สิงหาคม 2542
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2565 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	66 หมู่ที่ 4 ตำบลแม่ต๋อน อำเภออมก๋อย จังหวัดเชียงใหม่ 50310
ผลงานตีพิมพ์	อาทิตย์ เรืองยศ, พุทธิกร ธัมมรักษ์, ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์ และสุริยาอุธ ประอ้าย (ผู้บรรยาย). (29-31 พฤษภาคม 2567). อิทธิพลของขนาด อนุภาคที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างป้องกันแบบแข็ง: กรณีการศึกษา ในห้องปฏิบัติการ. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 29 (GTE38 หน้า 1-8). เชียงใหม่: ศูนย์ประชุมนานาชาติ ดิเอ็มเพลส.
รางวัลที่ได้รับ	-

