

การศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของวัสดุเม็ดแห้งและเศษท่อนไม้  
เมื่อผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด: การประยุกต์ใช้เพื่อบรรเทาภัยพิบัติ  
ดินถล่มและการไหลหลากของดินโคลน



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มีนาคม 2566  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของวัสดุเม็ดแห้งและเศษท่อนไม้  
เมื่อผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด: การประยุกต์ใช้เพื่อบรรเทาภัยพิบัติ  
ดินถล่มและการไหลหลากของดินโคลน



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มีนาคม 2566  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

A STUDY OF DRY GRANULAR AND DRIFTWOOD FLOW BEHAVIOR ON OPEN CHECK DAM:  
APPLICATION TO LANDSLIDES AND DEBRIS FLOW MITIGATION



THOSSAPON THUNGFONPHUM

A Thesis Submitted to University of Phayao  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering  
March 2023

Copyright 2023 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของวัสดุเม็ดแห้งและเศษท่อนไม้  
เมื่อผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด: การประยุกต์ใช้เพื่อบรรเทาภัยพิบัติ  
ดินถล่มและการไหลหลากของดินโคลน

ของ ทศพล ทุ่งฝนภูมิ

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรกฎ นุสิทธิ์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวัช ปรอ้าย)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร. ขวัญสิรินภา ณะวงศ์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรเทพ แซ่ล่อง)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

- เรื่อง:** การศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของวัสดุเม็ดแห้งและเศษท่อนไม้  
เมื่อผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด: การประยุกต์ใช้เพื่อบรรเทาภัยพิบัติ  
ดินถล่มและการไหลหลากของดินโคลน
- ผู้วิจัย:** ทศพล ทุ่งฝนภูมิ, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2565
- อาจารย์ที่ปรึกษา:** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุริยาอูธ ประอ้าย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ขวัญสิรินภา ธนะวงศ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรเทพ แซ่ล่อง
- คำสำคัญ:** เม็ดแห้ง, เศษท่อนไม้, ฝายชะลอน้ำแบบเปิด, แบบจำลองทางกายภาพ, แบบจำลองเชิง  
ตัวเลข

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของวัสดุเม็ดแห้งและเศษท่อนไม้  
เมื่อผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด การศึกษาดำเนินการเป็นสองส่วน ส่วนแรก การทดลองแบบจำลองทางกายภาพ  
ในห้องปฏิบัติการโดยใช้เม็ดแห้งผสมและไม่ผสมเศษท่อนไม้ และส่วนที่สอง การศึกษาการไหลของเม็ดแห้งด้วย  
แบบจำลองทั้งทางกายภาพและเชิงตัวเลข ดำเนินการศึกษารูปแบบฝายชะลอน้ำแบบเปิดสองรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบ  
ตัววีและรูปแบบตัวอัลฟา ซึ่งมีมุมภายใน 80, 90 และ 100 องศา เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการดักจับและการดูด  
ซับแรงของฝายชะลอน้ำแบบเปิด การทดลองดำเนินการ ณ ความลาดชันการไหล 25 30 และ 35 องศา และรวม  
แรงกระแทกจากการไหลของวัสดุ ในการตรวจสอบแรงกระแทกหลังจากที่วัสดุไหลผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด  
ด้านหน้า ได้ทำการทดลองติดตั้งฝายช่องปิดด้านหลัง ผลการวิจัยพบว่า ฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปตัวอัลฟาที่มีมุม  
ภายใน 100 องศา มีประสิทธิภาพการดักจับและการดูดซับสูงสุด ทั้งแบบจำลองเชิงตัวเลขและทางกายภาพแสดงให้เห็น  
เห็นว่า ฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปตัวอัลฟา มีประสิทธิภาพการดักจับและการดูดซับแรงได้ดีกว่าฝายชะลอน้ำแบบเปิด  
รูปตัววี การเพิ่มมุมภายในของฝายชะลอน้ำแบบเปิดทำให้ประสิทธิภาพของฝายชะลอน้ำแบบเปิดดีขึ้น

**Title:** A STUDY OF DRY GRANULAR AND DRIFTWOOD FLOW BEHAVIOR ON OPEN CHECK DAM: APPLICATION TO LANDSLIDES AND DEBRIS FLOW MITIGATION

**Author:** Thossapon Thungfonphum, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2022

**Advisor:** Assistant Professor Dr. Suriyayut Pra-ai Co-advisor Dr.Kwansirinapa Thanawong Assistant Professor Dr.Worathep Sae-Long

**Keywords:** Dry granular, Driftwood, Open check dam, Physical model, Numerical model

#### ABSTRACT

This thesis presents a study of the behavior of dry granular and driftwood flows on open check dams. The study was conducted in two parts: first, a physical experiment in the laboratory using dry granules with and without driftwood; and second, a study of dry granules using both physical and numerical modeling. Two open check dam patterns, V-shaped and Alpha-shaped, with internal angles of 80, 90, and 100 degrees, were studied to investigate their trapping efficiency and impact force reduction. The experiments were conducted on flume slopes of 25, 30, and 35 degrees, and included impact forces from material flow. To investigate the impact force after material flows through an open check dam in front, an experimental setup with a solid back check dam was used. The results show that Alpha-shaped open check dam with a 100-degree internal angle had the highest trapping and impact force reduction efficiency. Both the numerical and physical models showed that the Alpha-shaped open check dam had better trapping and impact force reduction efficiency than the V-shaped open check dam. Increasing the internal angle of open check dam was found to increase the efficiency of open check dams.



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากการสนับสนุนการดำเนินการวิจัยจาก สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ปีงบประมาณ 2563 ผู้วิจัยขอกราบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ และขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่อำนวยความสะดวกในการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริยาวัช ปรอ้าย ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยนเรศวร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ขวัญสิรินภา ณะวงศ์, ดร.ปาลีณี สุमितสุวรรณค์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรเทพ แซ่ล่อง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำการแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร.บันเทิง ยานะ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทินันท์ ศรีรัตยาวงศ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยพะเยา ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ทดสอบและการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง ตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม และดร.ทีปชลิต ปินอารี แห่งศูนย์วิศวกรรมโยธาและฐานรากระบบรางชั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนสิ่งอำนวยความสะดวก รวมถึงความช่วยเหลือในเรื่องการใช้อุปกรณ์เชิงตัวเลข

ขอขอบคุณ สถานทูตฝรั่งเศส และโครงการ PHC SIAM Programme โดย Campus France และ Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), Université de Montpellier ประเทศฝรั่งเศส ที่ได้เปิดโอกาสให้ผู้วิจัยได้เปิดมุมมองในการทำวิจัยในระดับนานาชาติ รวมถึงขอขอบคุณ Prof.Emillien Azéma, Dr.Mathieu Renouf, Dr.Frédéric Dubois และ Dr.Rémy Mozul ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และการใช้ Supercomputer สำหรับแบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete Element Method โดยโปรแกรม LMG90 ในระหว่างที่ฝึกงาน ณ ประเทศฝรั่งเศส รวมถึงทีมงานวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ในระดับปริญญาตรี ที่ช่วยดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณอาจารย์เยาวภา มูลเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือในยามยากลำบาก สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณครอบครัวอย่างสุดซึ้งซึ่งมีอาจหาสิ่งใดเทียบ สำหรับการให้กำลังใจและความเอาใจใส่เสมอมา

ทศพล ทุ่งฝนภูมิ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	8
สมมติฐานของการวิจัย.....	8
ขอบเขตของการวิจัย .....	8
ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย.....	9
บทสรุป .....	9
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	10
ฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิด.....	10
แรงกระแทกเนื่องจากการไหลหลากของดินโคลน.....	14
การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการ.....	17
แบบจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ Discrete element method (DEM) .....	19
Contact dynamics method (CD).....	22
บทสรุป.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29

แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ.....	29
ฝ่ายช่องปิด.....	33
ฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิด.....	33
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	36
แบบจำลองเชิงตัวเลข.....	37
การทดลองในห้องปฏิบัติการ.....	41
โปรแกรม LMGC90.....	43
บทสรุป.....	49
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	51
การทดลองการไหลของเม็ดแห้งผสมและไม่ผสมเศษท่อนไม้ในห้องปฏิบัติการ.....	52
การทดลองในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	67
บทที่ 5 บทสรุป.....	82
สรุปผลการศึกษา.....	82
อภิปรายผลการศึกษา.....	83
ข้อเสนอแนะ.....	84
บรรณานุกรม.....	85
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก แรงกระแทกย่อยของการทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้..	94
ภาคผนวก ข แรงกระแทกย่อยของการทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้..	97
ภาคผนวก ค แรงกระแทกย่อยเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งในแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	100
ภาคผนวก ง ภาพที่ถ่ายจากกล้องบันทึกภาพของการไหลวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้..	103
ภาคผนวก จ ภาพที่ถ่ายจากกล้องบันทึกภาพของการไหลวัสดุเม็ดแห้ง.....	112

ภาคผนวก ฉ ภาพเหตุการณ์ของการไหลวัสดุเม็ดแห้งในแบบจำลองทางกายภาพ และ  
 แบบจำลองเชิงตัวเลข ..... 119

ประวัติผู้วิจัย ..... 126



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 คุณสมบัติของวัสดุกรวดแม่น้ำ.....	37
ตาราง 2 คุณสมบัติวัสดุเศษท่อนไม้.....	37
ตาราง 3 รายละเอียดพารามิเตอร์แบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	39
ตาราง 4 รายการทดสอบการไหลของวัสดุเฉพาะเม็ดแห้งและเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้.....	42



## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 ดินถล่มปิดทับเส้นทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 11 ถนนอุตรดิตถ์-พิษณุโลก .....	2
ภาพ 2 ภัยพิบัติการพัดพาเนื่องจากน้ำป่าไหลหลาก จ.ลำพูน เมื่อวันที่ 28 ก.ค. 2563 .....	2
ภาพ 3 ก้อนหินขนาดใหญ่ไหลมากับกระแสน้ำ จ.พะเยา เมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2555 .....	3
ภาพ 4 สันฐานวิทยาของการไหลของเศษซาก .....	4
ภาพ 5 ขั้นตอนการไหลหลากของดินโคลน .....	6
ภาพ 6 ขอบเขตการศึกษา .....	7
ภาพ 7 ฝายชะลอน้ำตามแนวพระราชดำริ .....	10
ภาพ 8 แบบแผนการควบคุมตะกอนระยะยาว .....	12
ภาพ 9 นิยามพารามิเตอร์สำหรับสมการกัก-ปล่อยน้ำ .....	13
ภาพ 10 การประยุกต์ใช้ฝายชะลอน้ำแบบเปิดเสาะเข้มในการดักเศษไม้ .....	14
ภาพ 11 แผนผังของการไหลแบบเม็ดกระทบกับสิ่งกีดขวาง .....	15
ภาพ 12 รูปแบบการทดลองการไหลของเม็ดแห้งเพื่อศึกษาแรงกระทบต่อสิ่งกีดขวาง .....	18
ภาพ 13 อุปกรณ์วัดแรงกระทบ .....	18
ภาพ 14 มุมมองจากต้นน้ำสำหรับรูปแบบฝายช่องเปิด .....	19
ภาพ 15 การเปรียบเทียบผลของการไหลของอนุภาคที่จับเป็นกลุ่มก้อนให้ใกล้เคียง .....	20
ภาพ 16 แผนที่สีของเครือข่ายแรงตั้งฉาก: อนุภาควงกลมและอนุภาคหลายเหลี่ยม .....	21
ภาพ 17 แบบจำลองเชิงตัวเลขในการไหลของอนุภาคทรงกลมขนาดต่าง ๆ .....	21
ภาพ 18 ประเภทของการสัมผัสระหว่างอนุภาครูปหลายเหลี่ยม .....	22
ภาพ 19 ความสัมพันธ์ของการสัมผัส .....	24
ภาพ 20 การทำงานของสมการ Contact dynamics (CD) .....	25
ภาพ 21 ขั้นตอนการทำงานทั่วไปของวิธี Contact dynamics (CD) .....	26

ภาพ 22 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ .....	30
ภาพ 23 รายละเอียดของแบบจำลองทางกายภาพ.....	31
ภาพ 24 การเตรียมตัวอย่างวัสดุก่อนทดลอง .....	31
ภาพ 25 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
ภาพ 26 ฝ่ายช่องเปิดสำหรับวัดแรงกระแทก.....	34
ภาพ 27 ฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดที่ใช้ทดสอบ.....	35
ภาพ 28 แผนภูมิการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวดแม่น้ำ.....	36
ภาพ 29 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	37
ภาพ 30 แผนภูมิการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดในแบบจำลอง.....	38
ภาพ 31 ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear).....	39
ภาพ 32 การเตรียมตัวอย่างเม็ดแห้งก่อนการทดลอง.....	40
ภาพ 33 การตั้งค่าแบบจำลอง .....	41
ภาพ 34 วัสดุเม็ดแห้ง .....	43
ภาพ 35 รูปแบบการเตรียมตัวอย่างเม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลข .....	44
ภาพ 36 รูปแบบการสร้างฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดในแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	45
ภาพ 37 พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดผ่านฝ่ายรูปแบบเสาเข็ม.....	46
ภาพ 38 พฤติกรรมแรงกระแทกจากการไหลของวัสดุเม็ด.....	47
ภาพ 39 แผนผังการคำนวณของ LMGC90 .....	49
ภาพ 40 แรงกระแทกย่อยกับเวลาที่ถูกวัดโดยฝ่ายช่องเปิด.....	53
ภาพ 41 ผลรวมแรงกระแทกกับเวลา .....	54
ภาพ 42 ปริมาณแรงกระแทกสูงสุดกับความลาดชันการไหล.....	55
ภาพ 43 ผลรวมแรงกระแทกกับเวลาจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้.....	57
ภาพ 44 ผลรวมแรงกระแทกกับเวลาจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้ .....	58
ภาพ 45 อัตราส่วนการดูดซับแรงของฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดของการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง.....	59

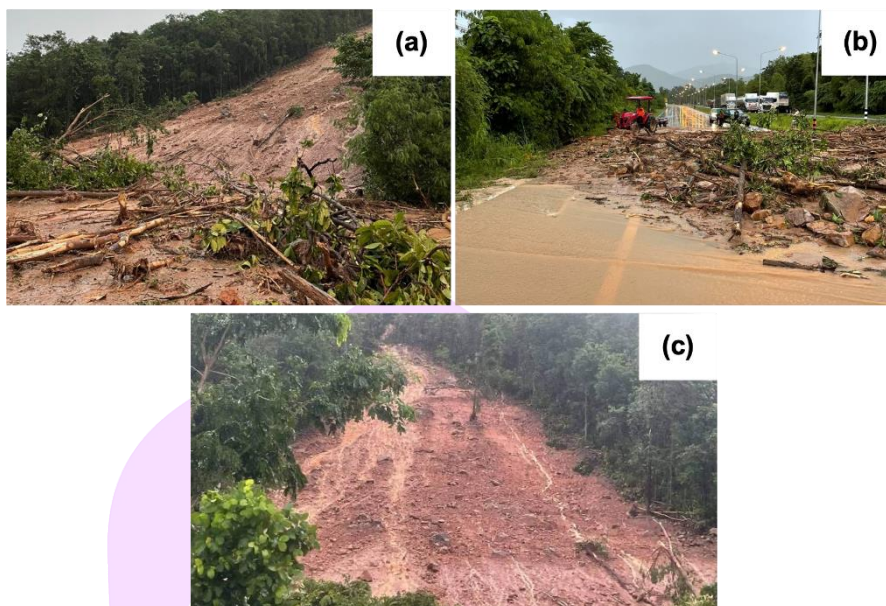
ภาพ 46	ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการดูดซับแรงตามความลาดชันการไหลต่าง ๆ.....	60
ภาพ 47	การดักจับเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ของฝายชะลอน้ำแบบเปิด .....	61
ภาพ 48	การดักจับเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้ของฝายชะลอน้ำแบบเปิด .....	61
ภาพ 49	ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดของการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง.....	63
ภาพ 50	ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิด .....	64
ภาพ 51	ภาพที่ถ่ายจากกล้องบันทึกภาพการไหลของเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้.....	65
ภาพ 52	ภาพที่ถ่ายจากกล้องบันทึกภาพการไหลของเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้.....	66
ภาพ 53	แรงกระแทกแบบพลวัตกับเวลาในแบบจำลองเชิงตัวเลข .....	68
ภาพ 54	แรงกระแทกย่อยกับเวลาที่ถูกวัดโดยฝายช่องปิด.....	70
ภาพ 55	ผลต่างของแรงกระแทกย่อยกับเวลาที่ถูกวัดโดยฝายช่องปิด .....	71
ภาพ 56	ผลรวมแรงกระแทกกับเวลาจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง .....	74
ภาพ 57	อัตราส่วนการดูดซับแรงของฝายชะลอน้ำแบบเปิด .....	75
ภาพ 58	อัตราส่วนการดูดซับแรงตามความลาดชันการไหลต่าง ๆ .....	75
ภาพ 59	การดูดซับแรงของฝายชะลอน้ำแบบเปิดแบบจำลองทางกายภาพ ( $R_{EXP}$ ).....	76
ภาพ 60	ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิด.....	77
ภาพ 61	ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดแบบจำลองทางกายภาพ.....	78
ภาพ 62	การดักจับเม็ดแห้งของฝายชะลอน้ำแบบเปิดของการทดลอง A100-H_35.....	78
ภาพ 63	การดักจับเม็ดแห้งของฝายชะลอน้ำแบบเปิดของการทดลอง V100-H_35.....	79
ภาพ 64	ภาพที่ถ่ายจากกล้องความเร็วสูงของการไหลของเม็ดแห้งในแบบจำลอง.....	80
ภาพ 65	ภาพที่ถ่ายจากกล้องความเร็วสูงของการไหลของเม็ดแห้งในแบบจำลอง .....	81

## บทที่ 1

### บทนำ

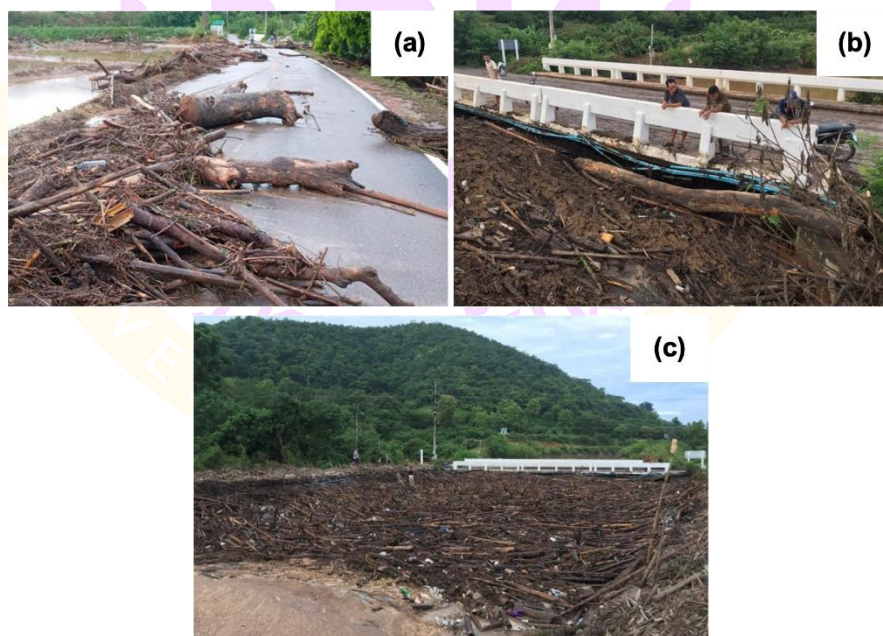
#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันในช่วงฤดูฝนมักเกิดปัญหาการไหลหลากของดินโคลน และน้ำป่าไหลหลากตามบริเวณที่ลาดเชิงเขา ซึ่งเกิดขึ้นทุกปีในภาคเหนือของประเทศไทย ยกตัวอย่าง วันที่ 2 ตุลาคม 2565 บริเวณหลักกิโลเมตรที่ 285-286 ต.นายาง อ.พิชัย จ.อุตรดิตถ์ เกิดฝนตกหนักและมีปริมาณน้ำสะสมอยู่บริเวณเชิงเขา เป็นเหตุให้เกิดดินถล่มไหลหลากปิดทับเส้นทางจราจร (ภาพ 1) หากย้อนเหตุการณ์ดินถล่มในภาคเหนือจะพบว่าอีกหลายแห่งในภาคเหนือพบกับปัญหาการไหลหลากของดินโคลน ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดดินถล่มนั้น คือ สภาพอากาศของพื้นที่นั้นมีผลอย่างมาก โดยเฉพาะพื้นที่ที่ไม่มีฝนตกชุก ภูมิประเทศที่เป็นภูเขาสูงชัน และสภาพพื้นที่ที่ไม่มีพืชปกคลุมดินหรือเป็นเขาหัวโล้น รวมถึงการเกิดแผ่นดินไหว ด้วยเหตุนี้การป้องกันดินถล่มไม่สามารถป้องกันได้ทั้งหมด อีกทั้งเหตุการณ์น้ำป่าไหลหลากในช่วงฤดูฝน ยกตัวอย่างเช่น ห้วยแม่ขนาด ม.3 บ้านปาง ต.ทากาศ อ.แม่ทา จ.ลำพูน วันที่ 28 กรกฎาคม 2563 (ผู้จัดการออนไลน์, 2563, [สื่อออนไลน์](#)) กระแสน้ำป่าพัดกิ่งไม้ ท่อนไม้ ปิดกั้นทางเดินน้ำบริเวณสะพานคอนกรีต กินพื้นที่กว้างประมาณ 15 เมตร ยาว 60 เมตร มีน้ำไหลข้ามถนนลาดยาง และมีดินโคลนไหลปิดทับถนนทางสัญจร นอกจากนี้ยังกัดเซาะไหล่ทาง ยาวประมาณ 250 เมตร (ภาพ 2) สาเหตุบางส่วนเกิดจากการลักลอบตัดไม้ในพื้นที่ตอนเหนือของลำห้วย ทำให้เวลาฝนตกไม่มีต้นไม้คอยซับน้ำ จึงเกิดน้ำป่าไหลลงเขาอย่างรวดเร็วพร้อมกับเศษไม้จำนวนมาก (สยามรัฐ, 2565, [สื่อออนไลน์](#); สวพ.FM91, 2565, [สื่อออนไลน์](#); ผู้จัดการออนไลน์, 2565, [สื่อออนไลน์](#)) นอกจากนี้กระแสน้ำจะพัดพาเศษท่อนไม้ กระแสน้ำยังสามารถนำพาก้อนหินขนาดใหญ่ เมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2555 บ้านทุ่งต้นศรี ต.ห้วยลาน อ.ดอกคำใต้ จ.พะเยา (ภาพ 3) เกิดเหตุการณ์ก้อนหินขนาดใหญ่ไหลมากับกระแสน้ำหลังฝนตกหนักติดต่อกันหลายวัน โดยกระแสน้ำได้พัดพาเอาเศษดิน ก้อนหิน และทราย ขนาดใหญ่สุดประมาณ 1 เมตร ไหลกระจัดกระจายเป็นพื้นที่ยาวกว่า 50-80 เมตร ส่วนกระแสน้ำไหลลงจากยอดดอยถึงพื้นที่เกษตรกรรมเป็นบริเวณกว้าง (ผู้จัดการออนไลน์, 2554, [สื่อออนไลน์](#)) จากปัญหาทั้งหมดที่ผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างมา เป็นปัญหาที่เกิดจากการไหลหลากของดินโคลนหรือเศษซาก ผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาปัญหาดังกล่าว เพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการป้องกันภัยพิบัติการไหลหลากของดินโคลน



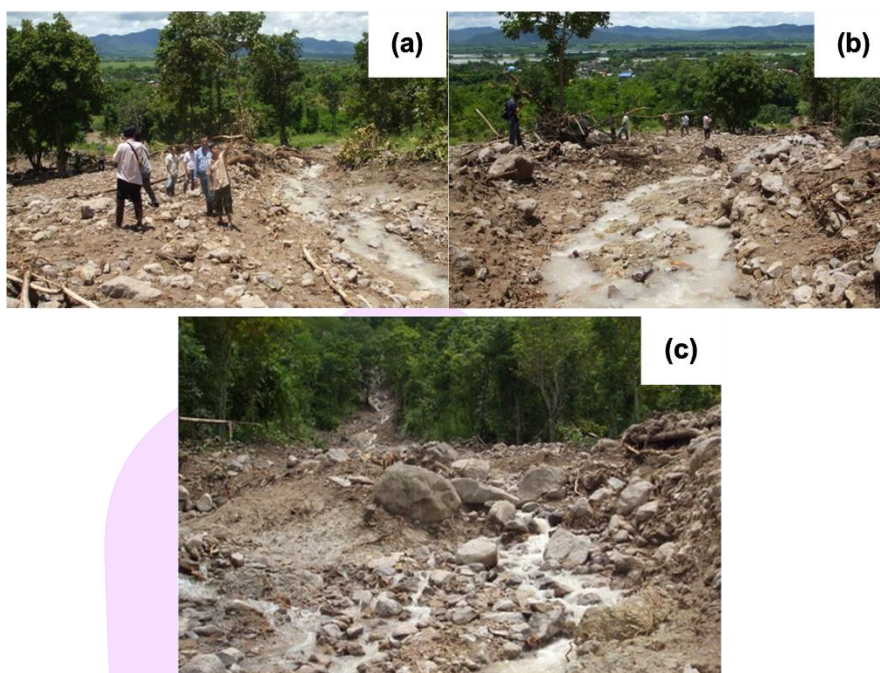
ภาพ 1 ดินถล่มปิดทับเส้นทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 11 ถนนอุตรดิตถ์-พิษณุโลก  
เมื่อวันที่ 2 ตุลาคม 2565

ที่มา: สยามรัฐ, 2565, สื่อออนไลน์



ภาพ 2 ภัยพิบัติการพัดพาเนื่องจากน้ำป่าไหลหลาก จ.ลำพูน เมื่อวันที่ 28 ก.ค. 2563

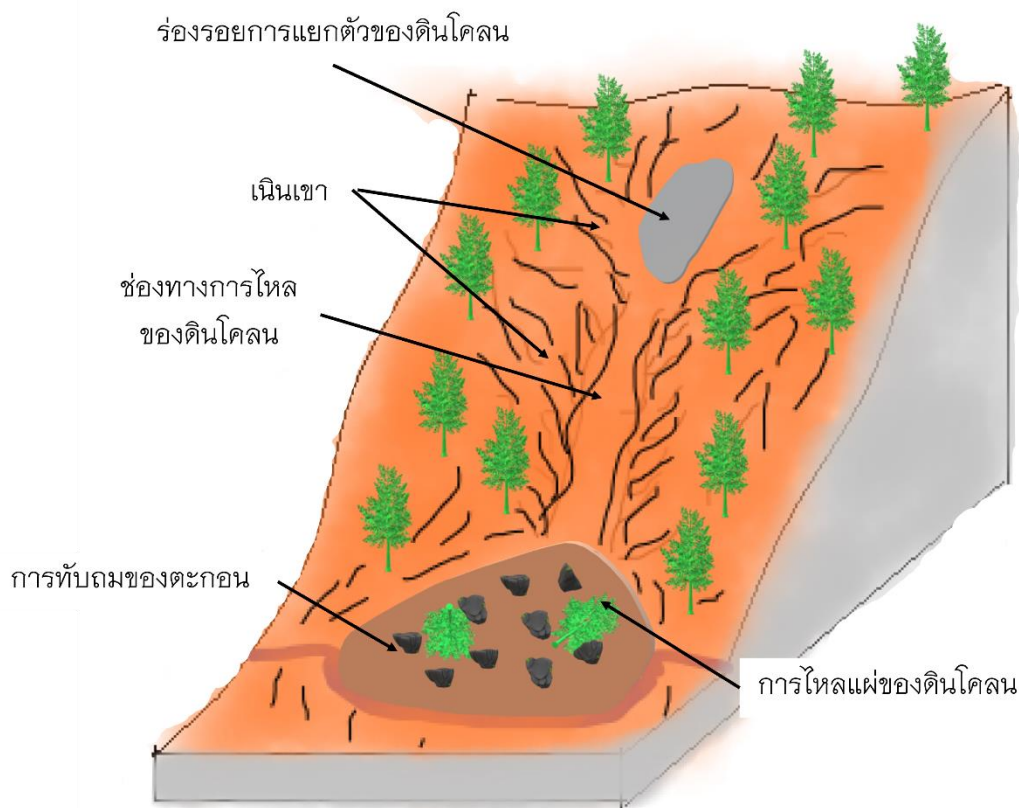
ที่มา: ผู้จัดการออนไลน์, 2563, สื่อออนไลน์



ภาพ 3 ก้อนหินขนาดใหญ่ไหลมากับกระแสน้ำ จ.พะเยา เมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2554

ที่มา: ผู้จัดการออนไลน์, 2554, สื่อบริการออนไลน์

Witt (2005) ได้นิยามการไหลหลากของดินโคลนหรือเศษซาก (Debris flow) คือ ปรากฏการณ์ทางธรณีวิทยาที่มวลดินและหินที่แตกแยกออกจากกลุ่มไหลลงมาตามไหล่เขาหรือร่องน้ำ การไหลจะเกิดขึ้นในที่ลุ่มหรือบนทางลาดชัน ซึ่งจะเกิดการประสานของการไหลแต่ละเส้นทางเป็นช่องทางหลักช่องเดียว ทำให้ปริมาณน้ำและมวลวัสดุโดยรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากระหว่างเส้นทางการไหลกลุ่มวัสดุดินโคลนจะนำพาวัสดุที่อยู่ระหว่างทาง เช่น เศษท่อนไม้ ตะกอนขนาดต่าง ๆ เป็นต้น (ภาพ 4) การไหลหลากของดินโคลนสามารถเดินทางได้หลายกิโลเมตร และหยุดลงเมื่อถึงพื้นที่ที่มีความลาดชันต่ำหรือพื้นที่ที่มีแรงเสียดทานสูง การไหลหลากของดินโคลนเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ สาเหตุหลักที่พบได้บ่อยที่สุด คือ ความชื้นในดินมีปริมาณมาก ทั้งจากปริมาณน้ำฝนที่ตกหนักและความชื้นในดินก่อนหน้า ภูมิประเทศยังมีอิทธิพลต่อการเกิด การไหลหลากของดินโคลน โดยพื้นที่เชิงเขาจะนำพาวัสดุที่อยู่ระหว่างเส้นทางมาด้วยและก่อตัวเป็นดินโคลนหนาบนพื้นที่หุบเขาหรือพื้นที่ลุ่ม การไหลหลากของดินโคลนในพื้นที่ป่าอาจมีเศษไม้จำนวนมาก เช่น ท่อนซุง เศษกิ่งไม้ เนื่องจากมวลวัสดุเหล่านี้มีมากและเคลื่อนที่ได้



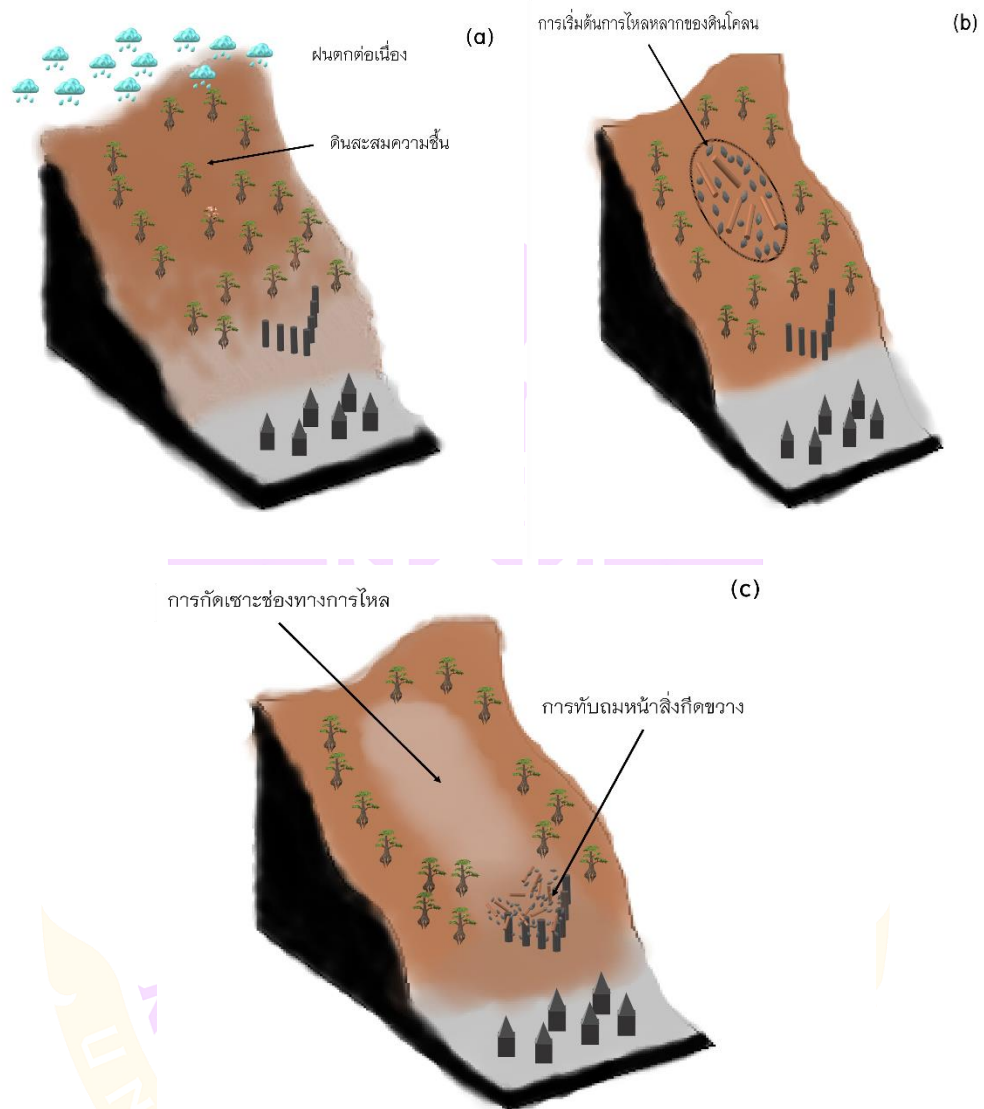
ภาพ 4 สันฐานวิทยาของการไหลของเศษซาก

ที่มา: Witt, 2005

จากปัญหาการไหลหลากของดินโคลนที่กล่าวมา ในประเทศไทยมีการออกแบบและศึกษาลักษณะโครงสร้างป้องกันการไหลหลากของน้ำ ยกตัวอย่าง ฝายชะลอน้ำ (Check dam) ตามโครงการพระราชดำริ (กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2559) ฝายชะลอน้ำคือ สิ่งก่อสร้างขวางหรือกั้นทางเดินของลำน้ำ ซึ่งยังไม่ได้มีการศึกษาการป้องกันการไหลหลากของดินโคลนแบบจริงจังในประเทศไทย โดยจุดประสงค์หลักของฝายชะลอน้ำที่ผ่านมา คือ ชะลอการไหลของน้ำและดักจับตะกอน เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ที่อยู่อาศัยบริเวณดังกล่าวในด้านเกษตรกรรม แต่ลักษณะการไหลหลากของดินโคลนนั้นแตกต่างจาก การไหลของน้ำผสมตะกอน เพราะคุณสมบัติพื้นฐานของดินโคลนจะแตกต่างกันไปตามวัสดุที่ถูกผสม ทำให้เป็นเรื่องซับซ้อนในการวิเคราะห์ความเสียหายจากการไหลหลากของดินโคลนเมื่อไหลกระทบพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนเมื่อผ่านฝายชะลอน้ำ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการลด

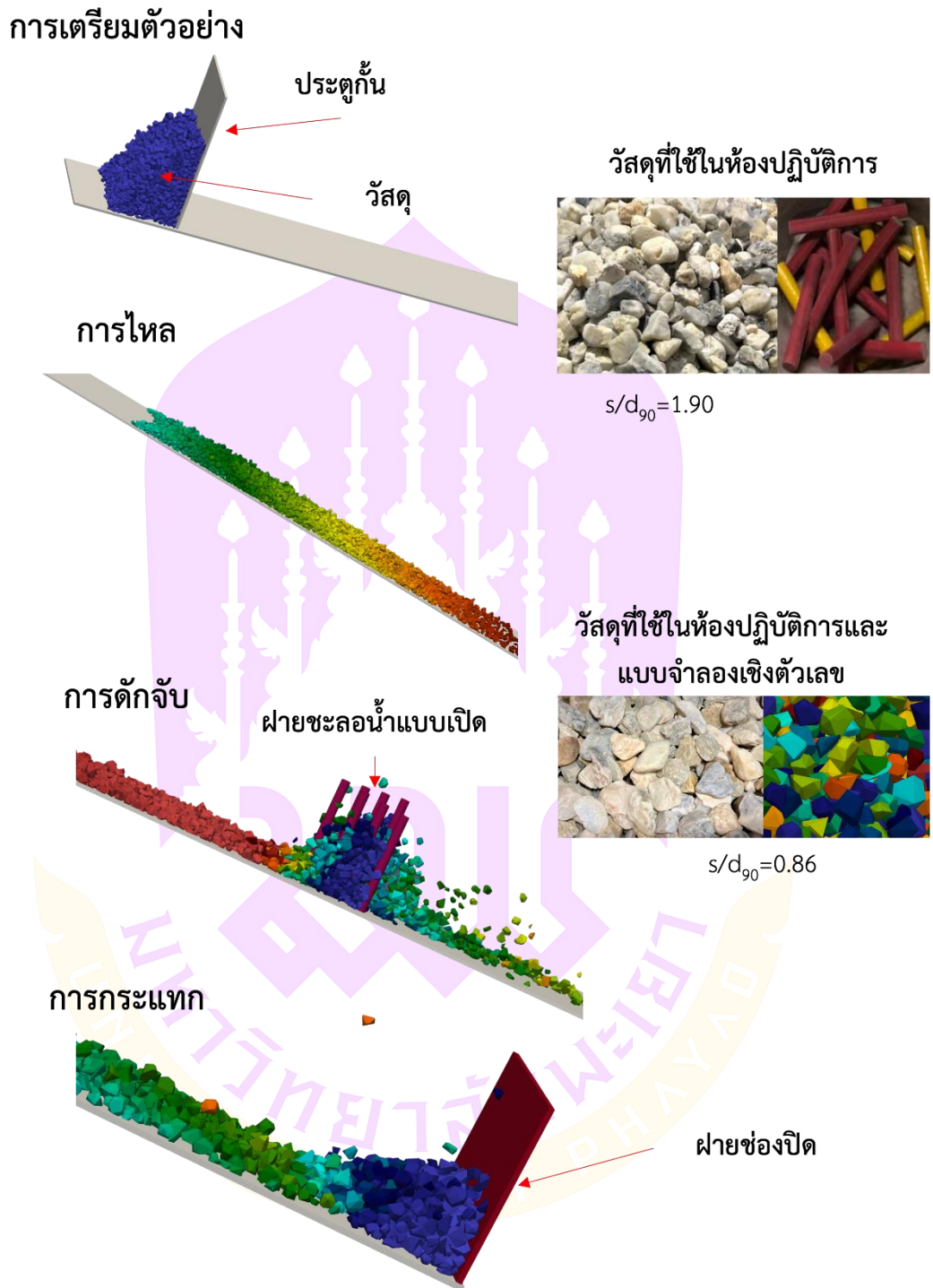
ผลกระทบในแง่ของแรงกระแทกและประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำเมื่อมีวัสดุไหลผ่าน

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด และเพื่อประเมินประสิทธิภาพของฝายรูปแบบต่าง ๆ ในการบรรเทาภัย แต่การไหลหลากของดินโคลนเป็นเรื่องที่ซับซ้อน เนื่องด้วยหลายตัวแปรที่เกี่ยวข้องจากวัสดุต่าง ๆ ที่ถูกผสม ทำให้ยากต่อการทดลองและควบคุมตัวแปรเหล่านั้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้วัสดุตัวแทน ได้แก่ วัสดุเม็ดแห้งและเศษท่อนไม้ เพื่อให้สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ง่าย และสามารถประเมินฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน และจากข้อจำกัดในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในปัจจุบัน ยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ของแข็งผสมของเหลวรวมถึงวัสดุทรงกระบอก ภาพ 5 แสดงรูปแบบขั้นตอนในการเกิดการไหลหลากของดินโคลน จาก (a) ดินมีความชื้นสูงเนื่องจากฝนตก และปริมาณความชื้นที่มีก่อนหน้านี้ (b) ดินสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวจึงเกิดการไหลของดินโคลนเนื่องจากความลาดชันตามเชิงเขา (c) ดินโคลนไหลกระทบกับสิ่งกีดขวางและทับถมหน้าสิ่งกีดขวาง (Li, 2018d) ซึ่งผู้วิจัยใช้เป็นแนวคิดในการศึกษาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางแบบช่องเปิดหรือฝายชะลอน้ำแบบเปิด เพื่อใช้บรรเทาภัยจากการไหลหลากของดินโคลน ภาพ 6 แสดงขอบเขตการศึกษา การทดลองเริ่มต้นจากการไหลของวัสดุที่ถูกกักอยู่ด้านหลังประตู จากนั้นทำการเปิดประตูให้วัสดุไหลลงมาตามรางผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด จนท้ายที่สุดกระทบกับฝายช่องเปิด แล้วจึงหยุดนิ่ง โดยที่  $s$  คือ ช่องว่างของฝายชะลอน้ำแบบเปิด,  $d_{90}$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแห้งที่ 90% ในการศึกษาแบ่งรูปแบบการทดลองเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้และวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้ผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิดในห้องปฏิบัติการ และส่วนที่สองเป็นการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete element method (DEM) วิเคราะห์สอเทียบกับการทดลองการไหลของเม็ดแห้งผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด เพื่อสนับสนุนข้อสรุปของผลการศึกษาและหาแนวทางในการทำนายโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม LMG90 ซึ่งจะช่วยอธิบายพฤติกรรมทางกายภาพการไหลหลากของวัสดุเม็ดแห้งเพื่อหาความสัมพันธ์การดูดซับแรงกระแทกและประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิด



ภาพ 5 ขั้นตอนการไหลหลากของดินโคลน

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Li, 2018a



ภาพ 6 ขอบเขตการศึกษา

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพของฝายชะลอน้ำแบบเปิดในการดักจับและการดูดซับแรงกระแทกเมื่อวัสดุไหลเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้และไม่ผสมเศษท่อนไม้ไหลผ่าน
2. เปรียบเทียบพฤติกรรมของการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้และไม่ผสมเศษท่อนไม้ ในแง่เรื่องแรงกระแทก
3. นำเสนอแบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete element method (DEM) แบบ 3 มิติ เปรียบเทียบแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการเพื่ออธิบายพฤติกรรมเชิงกลของการไหลของเม็ดแห้งเมื่อผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด

### สมมติฐานของการวิจัย

1. ฝายชะลอน้ำแบบเปิดสามารถดักจับและดูดซับแรงกระแทกเมื่อมีวัสดุไหลผ่าน
2. แรงกระแทกเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้มากกว่าการไหลวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้
3. ฝายชะลอน้ำแบบเปิดสามารถดูดซับแรงและดักจับการไหลวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ได้มากกว่าวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้
4. แบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของเม็ดแห้งเพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพของฝายชะลอน้ำแบบเปิดโดยมีความใกล้เคียงกับแบบจำลองทางกายภาพ

### ขอบเขตของการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ คือ กรวดแม่น้ำ และเศษท่อนไม้ โดยกรวดแม่น้ำมีอัตราส่วนช่องว่างของฝายชะลอน้ำแบบเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวดแม่น้ำที่ 90% เท่ากับ 1.90 และ 0.86
2. เศษท่อนไม้ได้จากไม้รูปทรงกระบอกสำเร็จรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm และความยาว 10, 15 cm
3. ทดสอบฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปแบบเสาเข็มทรงกระบอก 2 รูปแบบ คือ รูปตัววี และรูปตัวอัลฟา โดยมีมุมภายใน 80, 90 และ 100 องศา
4. ทดสอบแรงกระแทกเฉพาะแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลโดยถูกวัดด้วยฝายช่องปิดที่ติดตั้งไหลดเซลล์
5. ทดสอบการไหลในรางน้ำถูกตั้งค่าความลาดชันการไหล 25 30 35 องศา

6. แบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete element method (DEM) แบบสามมิติจำลองเม็ดแห้งผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด โดยมีอัตราส่วนช่องว่างของฝายต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแห้งที่ 90% เท่ากับ 0.86

### ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

1. ประสิทธิภาพในการดักจับและการดูดซับแรงเมื่อวัสดุเม็ดแห้งและเศษท่อนไม้ไหลผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปแบบต่าง ๆ
2. เข้าใจพฤติกรรมการไหลวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้และไม่ผสมเศษท่อนไม้เมื่อไหลผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด
3. สามารถนำเสนอแบบจำลองเชิงตัวเลข Discrete element method แบบ 3 มิติในการอธิบายพฤติกรรมเชิงกลของการไหลวัสดุเม็ดแห้งเมื่อไหลผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด

### บทสรุป

ส่วนแรกนำเสนอความเป็นมาของปัญหาการไหลหลากของดินโคลน ส่วนที่สองอธิบายถึงนิยามการไหลหลากของดินโคลนและสาเหตุการเกิด ส่วนที่สามอธิบายถึงการประยุกต์ใช้ฝายชะลอน้ำแบบเปิดในการป้องกันภัยพิบัติการไหลหลากของดินโคลน ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษาครั้งนี้ ส่วนสุดท้ายอธิบายถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการศึกษาพื้นฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิดในบพนี้ครอบคลุมเฉพาะวิทยานิพนธ์เล่มนี้เท่านั้น

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ฝายชะลอน้ำแบบเปิด

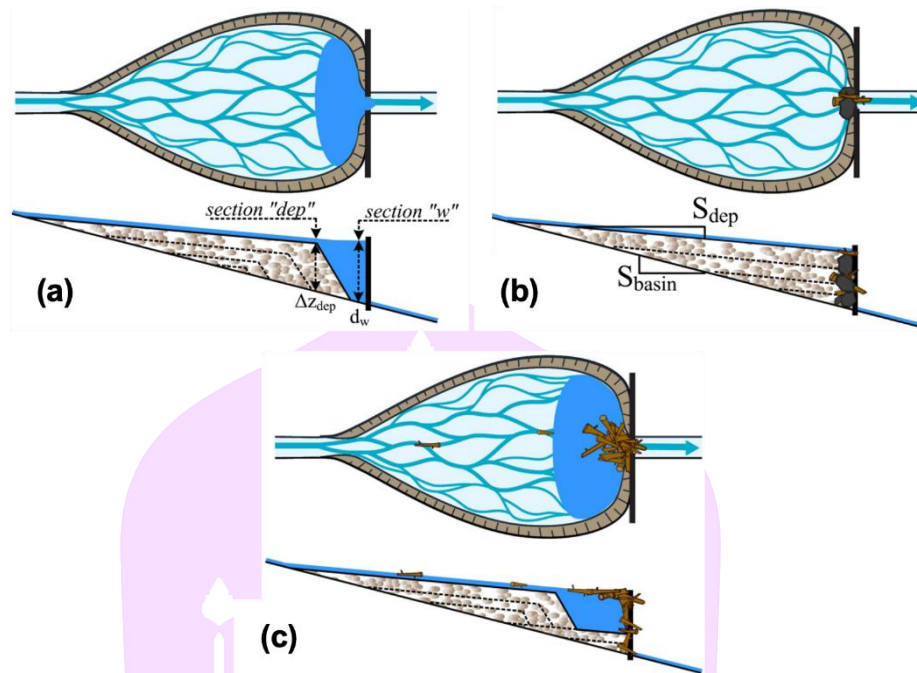
ฝายชะลอน้ำตามแนวพระราชดำริ (กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2559) คือ สิ่งก่อสร้างที่ปิดขวางทางน้ำไหล เพื่อหนูนน้ำที่ไหลมาให้มีระดับสูงขึ้น และช่วยดักตะกอนที่ไหลมากับน้ำ ภาพ 7 แสดงฝายชะลอน้ำพองเพียงตามแนวพระราชดำริ ซึ่งมีทั้งฝายชะลอน้ำแบบชั่วคราว แบบกึ่งถาวร และแบบถาวร การประยุกต์ใช้แต่ละประเภทจะขึ้นอยู่กับลักษณะความลาดเอียงของภูมิประเทศ การเลือกตำแหน่งที่ตั้งของฝายจะมีหลักเกณฑ์และองค์ประกอบหลาย ๆ ด้าน ในการพิจารณา เช่น ลักษณะของทางน้ำไหล ความลาดชันของทางน้ำ ระดับน้ำในลำน้ำ เป็นต้น ฝายมักจะถูกก่อสร้างกันด้วยลำธารขนาดเล็ก หรือพื้นที่ที่มีความลาดชันสูง หากช่วงที่น้ำไหลแรงก็สามารถชะลอการไหลของน้ำและกักเก็บตะกอนไม่ให้ไหลลงไปบริเวณลุ่มน้ำตอนล่าง ในกรณีที่มีการไหลของน้ำหรือเศษซากที่รุนแรง ฝายชะลอน้ำยังสามารถชะลอการไหลดังกล่าวให้ช้าลง และกักเก็บตะกอนหรืออนุภาคขนาดใหญ่ที่เป็นอันตรายต่อบริเวณลุ่มน้ำตอนล่าง ลักษณะการควบคุมของฝายนั้นพิจารณาจากลักษณะของฝายและขนาดของอนุภาคที่มาพร้อมกับน้ำ ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานสำหรับการออกแบบโครงสร้างเพื่อใช้บรรเทาภัยพิบัติดินโคลนถล่มและการไหลหลากของดินโคลน เนื่องจากความซับซ้อนในการวิเคราะห์ทั้งตัวฝายและตัววัสดุที่ไหลผ่าน



ภาพ 7 ฝายชะลอน้ำตามแนวพระราชดำริ

ที่มา: กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2559

การจัดการภัยพิบัติระบุว่า การไหลหลากของดินโคลนนอกเหนือจากการไหลของตะกอนหรืออนุภาคขนาดใหญ่แล้วปัญหาน้ำป่าไหลหลากที่เกิดขึ้นในทางไหลของน้ำที่ลาดชันนั้นเกี่ยวข้องกับเศษไม้ที่อยู่ระหว่างทาง ซึ่งการออกแบบฝายชะลอน้ำแบบเปิดเพื่อจัดการเศษไม้ที่ไหลหลากถือเป็นประเด็นสำคัญ จากการศึกษาที่ผ่านมาโครงสร้างสำหรับการดักจับอนุภาคขนาดใหญ่สามารถเรียกได้หลายรูปแบบ เช่น ฝายดักตะกอน ฝายชะลอน้ำแบบเปิดเสาะเข็ม เขื่อน SABO เป็นต้น ซึ่งเป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพในการบรรเทาภัยจากการไหลหลากของดินโคลน (Silva, et al., 2016; Bavarian Environment Agency, 2017; Piton, et al., 2019; Piton, et al., 2020) โดยทั่วไปพื้นที่ด้านเหนือน้ำของฝายชะลอน้ำแบบปิดมีแนวโน้มที่จะเต็มไปด้วยตะกอนมากกว่าฝายชะลอน้ำแบบเปิด เนื่องจากตะกอนไม่สามารถไหลผ่านไปได้ อาจเป็นผลเสียต่อระบบนิเวศ (Takahiro, et al., 2013; Shima, et al., 2016; Horiguchi, et al., 2021) โดยฝายชะลอน้ำแบบเปิดสามารถควบคุมตะกอนขนาดใหญ่หรือขนาดที่เป็นอันตรายตามที่ถูกรอกแบบไว้และตะกอนขนาดเล็กสามารถไหลผ่านไปได้ นอกจากการศึกษาเกี่ยวกับตะกอนแล้ว ที่ผ่านมามีการศึกษาฝายชะลอน้ำแบบเปิดในการดักจับเศษท่อนไม้ที่ไหลมากับน้ำ และเศษท่อนไม้ผสมอนุภาคทรงกลม (Schwindt, et al., 2016; Piton, et al., 2020; Rossi and Armanini, 2020; Horiguchi, et al., 2021; Lambert, et al., 2023; Piton, et al., 2023) โดยที่ฝายชะลอน้ำแบบเปิดเป็นโครงสร้างที่ไม่ปิดกั้นทางเดินของน้ำและตะกอนขนาดเล็ก ดังนั้นฝายชะลอน้ำแบบเปิดจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ลักษณะการควบคุมของฝายชะลอน้ำแบบเปิดนั้นพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของวัสดุและขนาดของการเปลี่ยนแปลงของดินที่ไหลมาพร้อมกับน้ำ เช่น ความหนาแน่นของวัสดุ และความหนาของชั้นดินสูงสุด ในการออกแบบทั่วไปมักจะพิจารณาอยู่ 2 วิธีคือ แบบชลศาสตร์ และแบบเชิงกล แสดงดังภาพ 8 โดยที่ (a) คือการควบคุมแบบชลศาสตร์ แสดงให้เห็นกรณีความเค้นเฉือนยุบตัวในน้ำนิ่ง (b) คือ ตะกอนที่ถูกควบคุมด้วยแบบเชิงกล โดยก้อนหินและเศษท่อนไม้ที่ลอยมาเบียดกัน ซึ่งนำไปสู่การอุดตันช่องเปิดของฝายชะลอน้ำ และ (c) คือ ตะกอนที่ถูกควบคุมแบบผสม โดยเศษท่อนไม้ที่ลอยมาขวางแบบเชิงกลทำให้เกิดบริเวณน้ำนิ่ง และทำให้เกิดการตกตะกอนที่ถูกควบคุมแบบชลศาสตร์ (Piton and Recking, 2016a; Piton and Recking, 2016b; Okamoto, et al., 2019)

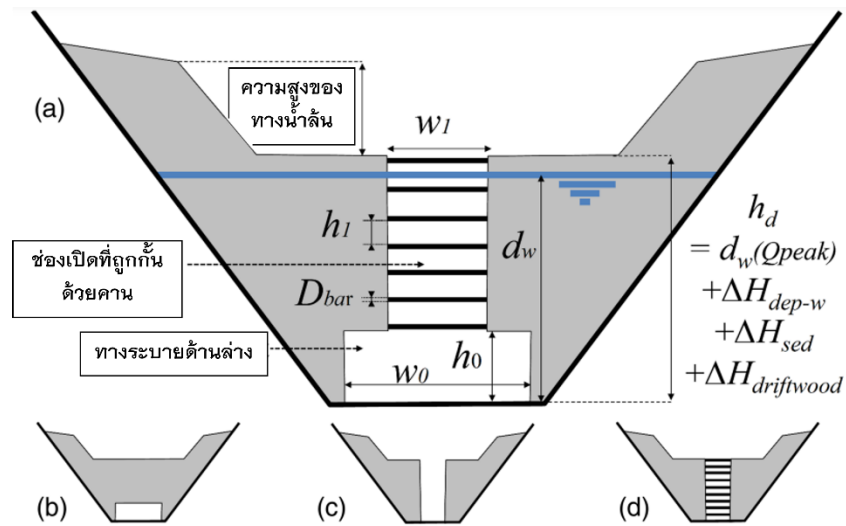


ภาพ 8 แบบแผนการควบคุมตะกอนระยะยาว

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก Piton and Recking, 2016b

โครงสร้างที่ควบคุมด้วยหลักการทางชลศาสตร์ แสดงดังภาพ 9 โดยที่ (a) คือ ฝ่ายแบบแยกด้วยคานแวนนอนและช่องเปิดทางออกด้านข้าง (b) คือ ฝ่ายแบบร่องน้ำด้านล่าง (c) คือ ฝ่ายแบบแยก และ (d) คือ ฝ่ายแบบร่องพร้อมคานแวนนอน (Piton and Recking, 2016a) ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงต่ออัตราการระบายน้ำจากการชะลด้วยตะกอนที่ถูกดักจับด้วยฝายชะลอน้ำแบบเปิด ผลกระทบดังกล่าวสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการการไหลผ่านของน้ำ ในกรณีสภาวะการไหลผิวน้ำแบบอิสระ สามารถใช้สมการ 1 และ 2 กรณี ( $d_w < h_0$ ) โดยที่  $d_w$  คือ ความสูงของระดับน้ำจากกันฝาย  $h_0$  และ  $w_0$  คือ ความสูงและความกว้างของช่องเปิด  $g$  คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก  $h_w$  คือ ระดับน้ำเหนือช่องเปิด  $\mu_0$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของช่องเปิดด้านล่าง  $\mu$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ซึ่งขึ้นอยู่กับคานแวนรอบที่กันช่องเปิดด้านบน และ  $Q$  คือ อัตราการไหลของน้ำ ในกรณีของการไหลเนื่องจากแรงดันจะเกิดขึ้นที่จุดสูงสุดของร่องลึก สมการ 3 กรณี ( $d_w > h_0$ ) จะถูกใช้เพื่อคำนวณอัตราการไหล ค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำและอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด มีความสัมพันธ์กันอย่างมากระหว่างสภาวะการไหลทั้งสอง ซึ่งในการออกแบบฝายชะลอน้ำแบบเปิดต้องประเมินความน่าจะเป็นของการอุดตัน ประสิทธิภาพ

การดักจับ และปริมาตรความจุในการดักเศษไม้ที่ลอยมาหน้าตัวฝาย (Piton and Recking, 2016b; Chan, et al., 2020)



ภาพ 9 นิยามพารามิเตอร์สำหรับสมการกัก-ปล่อยน้ำ

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก Piton and Recking, 2016a

กรณี  $d_w < h_0$  ในกรณีของการไหลผิวน้ำแบบอิสระ

$$Q = \mu w_0 \frac{2}{3} \sqrt{2g} d_w^3 / 2 \quad (1)$$

$$\text{และ } Q = w_0 \left( \frac{2}{3} \right)^{1.5} \sqrt{g} d_w^3 \quad (2)$$

กรณี  $d_w > h_0$  ในกรณีของการไหลเนื่องจากแรงดันจะเกิดขึ้นที่จุดสูงสุดของร่องลึก

$$Q = \mu_0 w_0 \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left( d_w^3 / 2 - (d_w - h_0)^3 / 2 \right) \quad (3)$$

ภาพ 10 แสดงการประยุกต์ใช้ฝายชะลอน้ำแบบเปิดเส้าเข็มถูกนำมาใช้สำหรับการดักจับเศษท่อนไม้และตะกอนขนาดใหญ่ โดยข้อดีของรูปแบบฝายชะลอน้ำแบบเปิดเส้าเข็ม คือ ช่องว่างที่เหมาะสมในการดักจับตะกอนขนาดใหญ่ที่ส่งผลเสียต่อพื้นที่ลุ่มแม่น้ำ ซึ่งฝายดังกล่าวจะไม่ปิดกั้นทางเดินน้ำ (Bavarian Environment Agency, 2017; Carlados, et al., 2022) แต่อย่างไรก็ตามหลังจากใช้งานเป็นระยะเวลานานแล้วพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปฝายสามารถดักจับเศษซากได้ดียิ่งขึ้น จนอาจทำให้ปิดกั้นทางเดินของน้ำ แต่ฝายยังคงแข็งแรงด้วยลักษณะทางกายภาพของตัวฝาย (Moriyama, et al., 2014; Moriyama, et al., 2016)



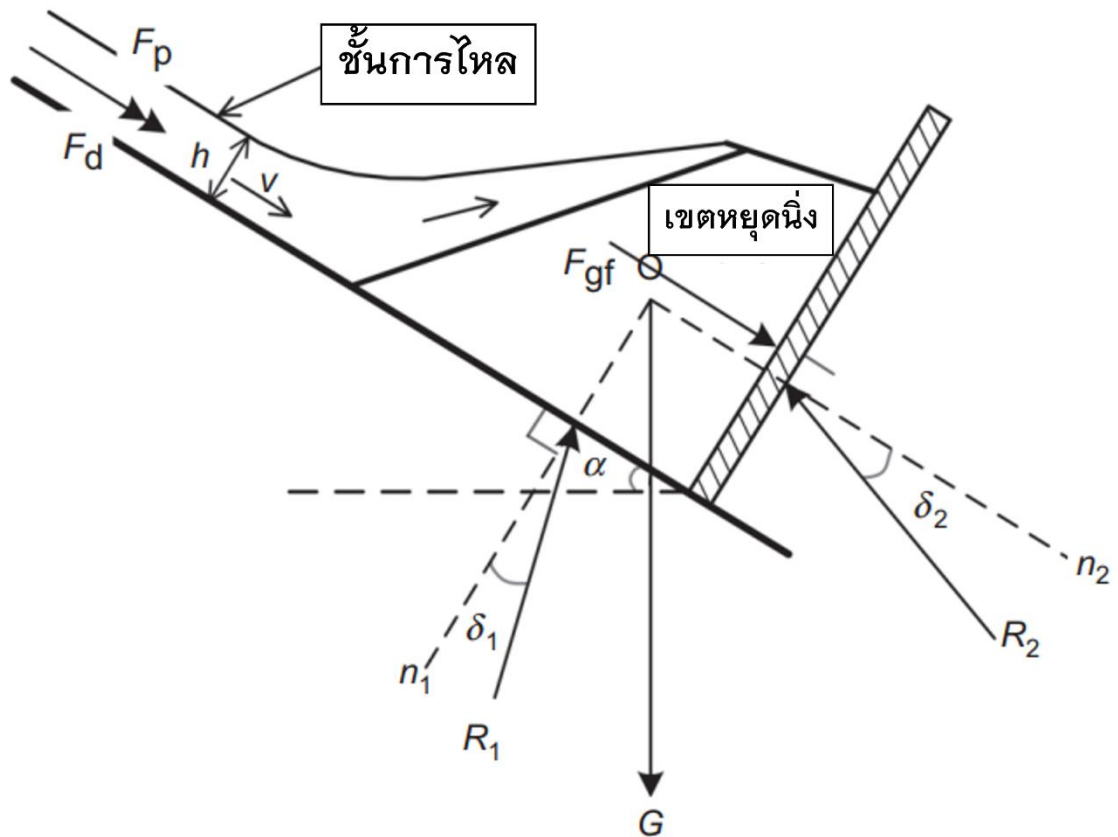
ภาพ 10 การประยุกต์ใช้ฝายชะลอน้ำแบบเปิดเสาเข็มในการตัดเศษไม้

ที่มา: Bavarian Environment Agency, 2017

### แรงกระแทกเนื่องจากการไหลหลากของดินโคลน

เมื่อดินโคลนไหลกระทบกับสิ่งกีดขวางส่งผลให้เกิดแรงกระแทก ซึ่งเป็นการถ่ายโอนพลังงานจากดินโคลนสู่สิ่งกีดขวาง โดยแปรผันตรงตามระยะทางและความเร็วของการไหลที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นการสะสมพลังงานและการนำพาเศษซากที่อยู่ระหว่างทางผ่านของเส้นทาง การไหลหลากของดินโคลน ทำให้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นยากต่อการคาดการณ์ การเสียรูปของกลุ่มดินโคลนและสิ่งกีดขวางจะดูดซับแรงบางส่วนระหว่างการกระแทก พลังงานจะกระจายออกไปในรูปของความร้อนและการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง การมีน้ำและตะกอนขนาดเล็กทำให้เพิ่มการกระจายพลังงานดังกล่าวทำให้เกิดการลดแรงกระแทก เมื่อพิจารณาความเร็วการไหลและขนาดมวลของดินโคลนที่เท่ากัน (Viccione and Ferlisi, 2015; Ahmadipur and Qiu, 2018; Li and Zhao, 2018b; Armanini, et al., 2019; Nucci, et al., 2019) จากการศึกษที่ผ่านมาเกี่ยวกับภัยพิบัติการไหลหลากของดินโคลนมักสร้างความเสียหายต่อการคาดการณ์ไว้มาก ภาพ 11 แสดงกรณีแรงที่เกิดจากการไหลหลากของดินโคลน ซึ่งแรงที่กระทำต่อสิ่งกีดขวางประกอบด้วย: แรงลาก ( $F_d$ ) ขึ้นอยู่กับปริมาณของกองวัสดุที่หยุดนิ่งและความลึกของชั้นดิน รวมถึงแรงที่กระทำต่อสิ่งกีดขวาง แรงดันดินด้านข้าง ( $F_p$ ) เกิดจากชั้นดินที่ก่อดำหนังกำแพง

กันดินและแรง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทาน ( $F_{gf}$ ) ในขณะที่กองดินที่หยุดนิ่ง (Jiang and Towhata, 2013; Jiang and Zhao, 2015) แรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นแสดงในสมการ 4



ภาพ 11 แผนผังของการไหลแบบเม็ดกระทบกับสิ่งกีดขวาง

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Jiang and Zhao, 2015

$$F = F_d + F_p + F_{gf} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d h + \frac{1}{2} k_p \rho g h^2 \cos(\alpha) + G \frac{\sin(\alpha - \delta_1)}{\cos(\delta_1 + \delta_2)} \cos(\delta_2) \quad (4)$$

โดยที่

$$C_d = a F r^{-n} = a \left( \frac{v}{(gh)^{1/2}} \right)^{-n},$$

$$k_p = \frac{\cos(\alpha) + (\cos^2(\alpha) - \cos^2(\phi))^{1/2}}{\cos(\alpha) - (\cos^2(\alpha) - \cos^2(\phi))^{1/2}}$$

เมื่อ

$\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{kN/m}^3$ )

$v$  คือ ความเร็วการไหล ( $\text{m/s}$ )

$h$  คือ ความหนาของชั้นการไหล ( $\text{m}$ )

$C_d$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลากเชิงประจักษ์ที่ได้จากการทดลอง

$k_p$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง

$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $\text{m/s}^2$ )

$G$  คือ น้ำหนักของเขตหยุดนิ่ง ( $\text{N/m}$ )

$a$  และ  $n$  คือ ค่าคงที่เชิงประจักษ์ ( $a = 10.8$ ,  $n = 1.3$ )

$Fr$  คือ Froude number

$\alpha$  คือ ความลาดชันการไหล

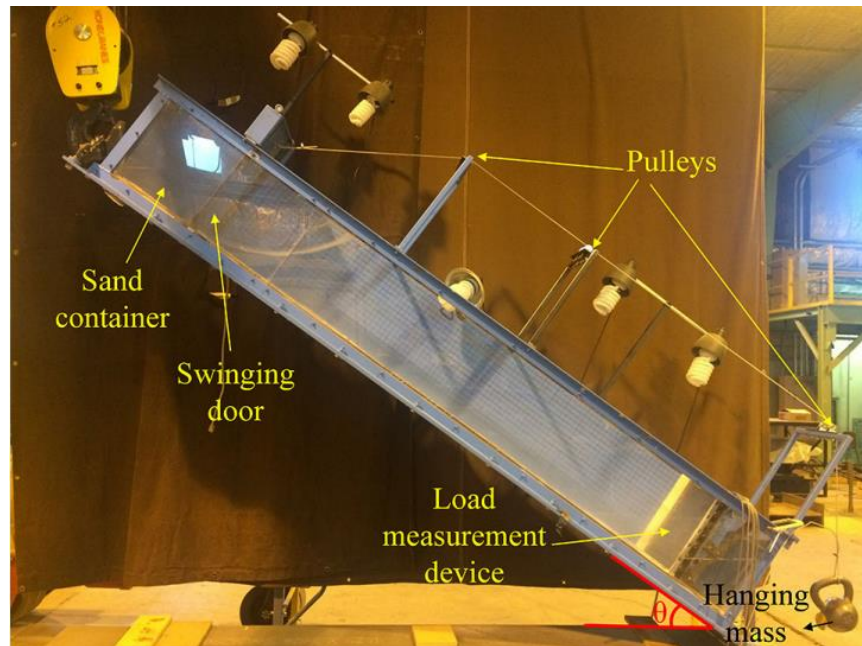
$\delta_1$  และ  $\delta_2$  คือ มุมแรงเสียดทานของฐานและกำแพงกันดิน ตามลำดับ (องศา)

$\phi$  คือ มุมแรงเสียดทานภายในแบบพลวัต (องศา)

$F$  หมายถึง แรงรวมทั้งหมดเนื่องจากการไหลของเศษซากที่มากกระทำบนสิ่งกีดขวาง ( $\text{N/m}$ )  $F_d$  หมายถึง แรงต้านหรือเรียกว่าแรงหน่วงเป็นแรงที่ต้านการเคลื่อนที่ ซึ่งวัตถุต้องเอาชนะแรงนี้ให้ได้ถึงจะเกิดการเคลื่อนที่ ( $\text{N/m}$ )  $F_p$  หมายถึง แรงเนื่องจากแรงดันดินด้านข้าง ( $\text{N/m}$ ) โดยแรงนี้มี 2 ประเภท คือ แรงดันดินด้านข้างเมื่อดินเคลื่อนตัวดันสิ่งกีดขวาง และแรงดันดินด้านข้างเมื่อดินหน้าสิ่งกีดขวางต้านการเคลื่อนตัวของดิน และสุดท้าย  $F_{gf}$  เป็นแรงที่ถูกสร้างจากการหยุดนิ่งของดินที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ( $\text{N/m}$ ) ซึ่งแรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อสิ่งกีดขวางสามารถแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ แรงปกติและแรงสัมผัส (Jiang and Zhao, 2015) แรงปกติหรือแรงตั้งฉาก (Normal force) เป็นแรงตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัส เมื่อแรงภายนอกกระทำผ่านวัตถุ แรงชนิดนี้ไม่ขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่ถูกกระทำหรือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เพราะเป็นการวัดแนวตั้งฉากจากพื้นผิวที่ได้จากการกระจายเวกเตอร์จากแรงกิริยาแล้ว ดังนั้นแรงปกติมีค่าเท่ากับแรงที่มากกระทำในทิศตั้งฉาก ในทางตรงกันข้ามแรงสัมผัส (Tangential force) คือ แรงที่มีทิศทางตามระนาบพื้นผิวของวัตถุที่ถูกกระทำ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเวกเตอร์ของแรงกิริยาหรือกล่าวอีกอย่าง คือ แรงเสียดทาน ดังนั้นแรงชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับแรงปกติและพื้นผิวสัมผัส ในการไหลหลากของวัสดุเม็ดเมื่อเวลาผ่านไปแรงสัมผัสเปลี่ยนทิศทางสาเหตุเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ทั้งนี้ทิศทางของแรงสัมผัสขึ้นอยู่กับมุมพื้นผิวของสิ่งกีดขวางกับทิศทางของแรงกิริยา (Iverson, et al., 2016; Hao, et al., 2018a; Li, et al., 2020; Kong, et al., 2021a; Li, et al., 2021; Kong, et al., 2022)

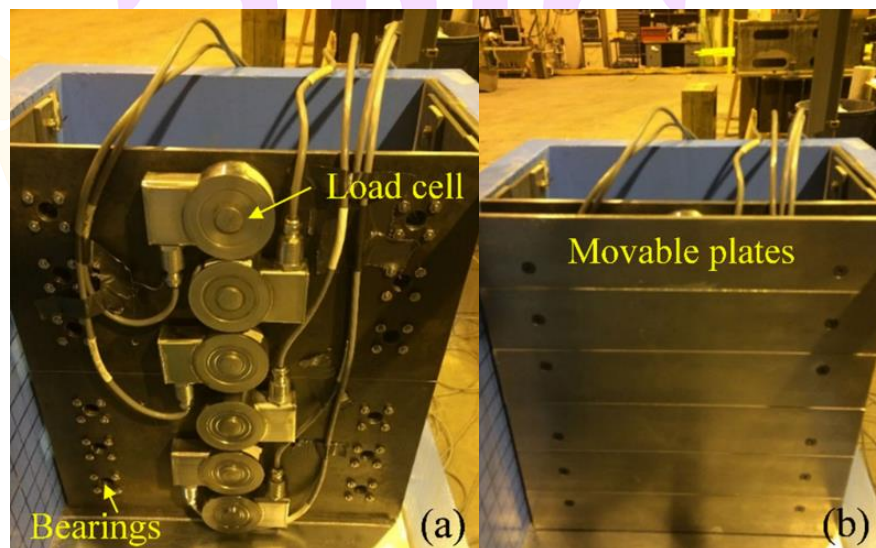
## การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลน โดยใช้การทดลองแบบย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้วัสดุตัวแทน เช่น หินกรวด หทราย และเศษท่อนไม้ เป็นต้น การทดลองการไหลในรางน้ำกระทบกับสิ่งกีดขวาง (Canelli, et al., 2012; Jiang and Towhata, 2013; Jiang and Zhao, 2015; Hashimoto, et al., 2016; Ahmadipur and Qiu, 2018; Rossi and Armanini, 2020) ภาพ 12 แสดงตัวอย่างรูปแบบการทดลองเพื่อศึกษาแรงกระแทกเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ด ภาพ 13 แสดงรูปแบบการใช้ไหลดเซลล์สำหรับวัดแรงกระแทกในทิศทางตั้งฉาก โดย (a) แสดงไหลดเซลล์ และ (b) แสดงแผ่นรับแรงกระแทก (Ahmadipur and Qiu, 2018) นอกจากการศึกษาพฤติกรรมของแรงกระแทกแล้ว การดักจับและการควบคุมตะกอนเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ต้องทำการศึกษาในการทดลองโดยใช้ฝายที่มีช่องเปิด เพื่อบ่งชี้ความสัมพันธ์เชิงตัวแปร และประสิทธิภาพของรูปแบบฝายชะลอน้ำแบบเปิด (Haruyuki, et al., 2016; Hashimoto, et al., 2016; Shima, et al., 2016; Hao, et al., 2018b; Schwindt, et al., 2018) การศึกษาการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดพบว่า ฝายรูปแบบแนวตรงสามารถดักจับได้ดีกว่าฝายรูปแบบตัววี ดังแสดงในภาพ 14 (a) ฝายรูปแบบแนวตรง และ (b) ฝายรูปแบบตัววี อัตราส่วนความกว้างของช่องเปิดของฝายต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ด และความชันทางชลศาสตร์เป็นตัวกำหนดปริมาณการดักจับ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะการประยุกต์ใช้ตามความต้องการดักจับตะกอนขนาดต่าง ๆ ที่กำหนด การศึกษาที่ผ่านมาใช้ขนาด  $d_{95}$   $d_{90}$  และ  $d_{50}$  กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดเมื่อมีขนาดอื่นเล็กกว่านี้ 95% 90% และ 50% ตามลำดับ (Silva, et al., 2015a; Hashimoto, et al., 2016; Shima, et al., 2016; Silva, et al., 2016; Hao, et al., 2018b; Armanini, et al., 2019; Jiang, et al., 2020) ในการทดลองประสิทธิภาพการดักจับของฝายนี้มีตัวแปรสำคัญที่ต้องกำหนดได้แก่ ความหนาแน่นของวัสดุ ความลาดชันของการไหล และมุมด้านหน้าของฝาย (Jiang and Towhata, 2013; Jiang and Zhao, 2015; Zhao, et al., 2018) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุและประสิทธิภาพของฝายชะลอน้ำแบบเปิด เพื่อตรวจสอบปริมาณการดักจับตะกอนที่ติดอยู่หน้าฝาย จำเป็นต้องเก็บข้อมูลโดยวัดความสูงสะสมของตะกอนหน้าฝายและซึ่งน้ำหนักระลอกที่หยุดและ/หรือผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด (Silva, et al., 2015b; Haruyuki, et al., 2016; Shima, et al., 2016; Xie, et al., 2017; Hao, et al., 2018b)



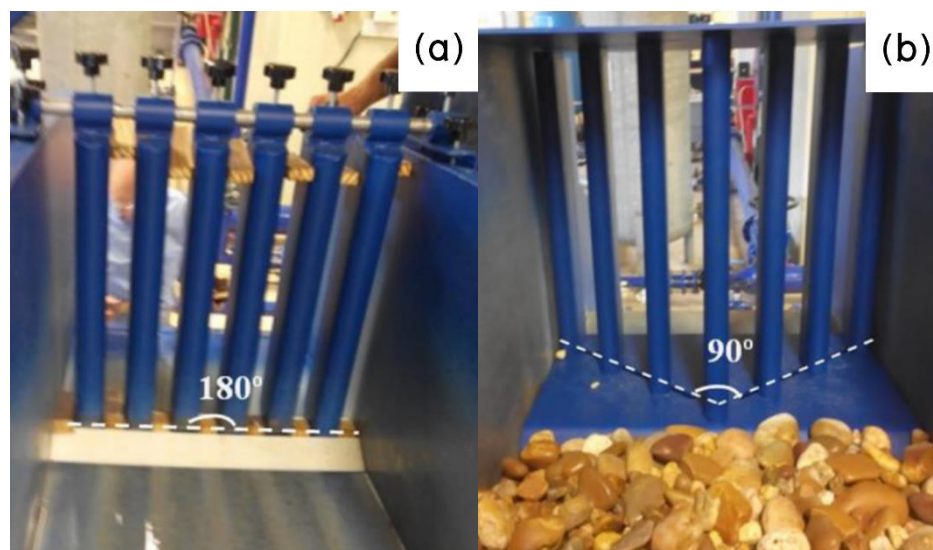
ภาพ 12 รูปแบบการทดลองการไหลของเม็ดแห้งเพื่อศึกษาแรงกระทำต่อสิ่งกีดขวาง

ที่มา: Ahmadipur and Qiu, 2018



ภาพ 13 อุปกรณ์วัดแรงกระทำ

ที่มา: Ahmadipur and Qiu, 2018



ภาพ 14 มุมมองจากต้นน้ำสำหรับรูปแบบฝายช่องเปิด

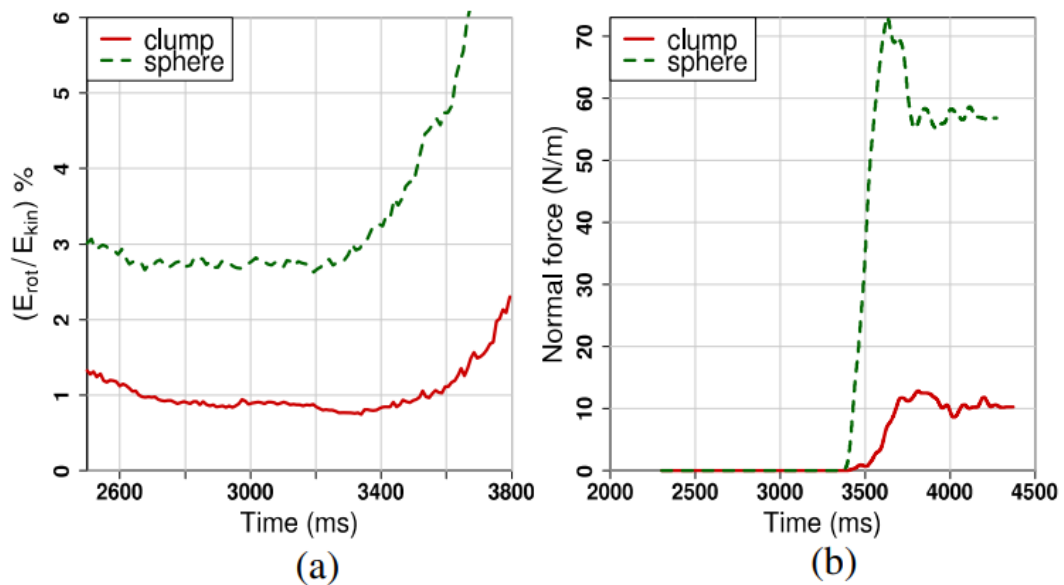
ที่มา: Silva, et al., 2016

#### แบบจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ Discrete element method (DEM)

การใช้ Discrete element method (DEM) เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยสามารถจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลักษณะการไหลแบบไม่ต่อเนื่องและไม่เป็นเนื้อเดียวกันนำไปสู่พฤติกรรมเชิงกลที่ซับซ้อน ซึ่งอาจเป็นเรื่องยากสำหรับแบบจำลองเชิงตัวเลข (Azéma, et al., 2009; Donzé, et al., 2009; Azéma, et al., 2012; Sánchez, et al., 2021; Wang, et al., 2021) อย่างไรก็ตาม DEM พบข้อจำกัด เมื่อต้องพิจารณาในวัสดุเม็ดขนาดใหญ่และการแตกหักจำนวนมากในรูปแบบ 3 มิติ เมื่อเกิดกระบวนการแยกส่วนและการจำลองวัสดุที่มีพื้นผิวขรุขระ โดยในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองเม็ดที่ไม่แยกส่วนและผิวเรียบ เพื่อทำนายพฤติกรรมไหลของวัสดุเม็ดแห้งโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพ โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการ

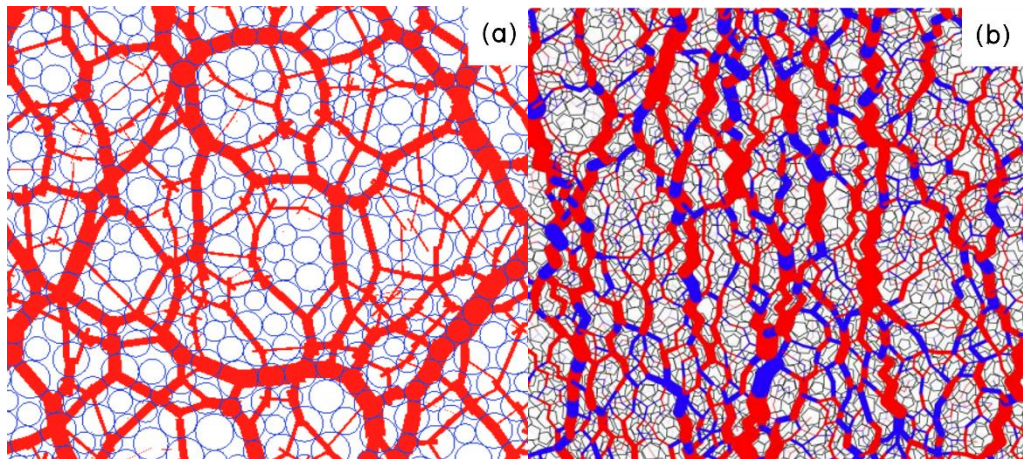
ที่ผ่านมามีการใช้ DEM ศึกษาคุณลักษณะการไหลของเม็ดแห้งกระทบกับสิ่งกีดขวางแบบแข็งและผ่านสิ่งกีดขวางแบบยืดหยุ่น โดยศึกษาคุณลักษณะการไหล ปริมาณแรงกระแทกและการดักจับ เป็นต้น ซึ่งเป็นการศึกษาการไหลในราง ลักษณะพื้นผิวของรางมีลักษณะเรียบโดยทั่วไปแล้วลักษณะการไหลของวัสดุที่บดจนหน้าสิ่งกีดขวางจะมีลักษณะกองขึ้นและเกิดคลื่นกระแทกตามแนวความสูงของสิ่งกีดขวาง (Albaba, et al., 2017; Albaba, et al., 2018; Cui, et al.,

2018; Albaba, et al., 2019; Jiang, et al., 2020; Kong, et al., 2021b; Tan, et al., 2021) โดยการศึกษาที่ผ่านมาใช้ลักษณะเม็ดแห้งแบบทรงกลมเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ผลลัพธ์อัตราส่วนพลังงานการหมุนต่อพลังงานจลน์และแรงกระแทกสูงกว่าค่าปกติ ภาพ 15 แสดงผลจากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ลักษณะเม็ดแบบทรงกลม (Sphere) และการรวมกันของอนุภาคให้มีรูปทรงคล้ายวัสดุเม็ดกรวด (Clump) ภาพ 15 (a) แสดงอัตราส่วนพลังงานการหมุนต่อพลังงานจลน์ทั้งหมด และภาพ 15 (b) แสดงแรงตึงน้ำหนักหลังเกิดขวาง ถือเป็นอีกข้อจำกัดที่ต้องทำการพัฒนารูปแบบการจำลอง (Albaba, et al., 2015; Yu, et al., 2021) การใช้วัสดุเม็ดที่มีลักษณะรูปทรงหลายด้านนั้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้น (Wang, et al., 2021) ซึ่งลักษณะเม็ดที่รูปทรงหลายด้านจะมีการส่งถ่ายแรงที่มีลักษณะเส้นหยักตามพื้นผิวของเม็ด ดังแสดงในภาพ 16 จะแตกต่างจากทรงกลมที่มีการส่งถ่ายแรงจากจุดศูนย์กลางของอนุภาคหนึ่งไปยังอนุภาคหนึ่ง (Azéma, et al., 2007; Azéma, et al., 2009; Li, et al., 2020) DEM ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาการไหลของวัสดุเม็ดผ่านโครงสร้างที่มีลักษณะช่องเปิด ภาพ 17 แสดงรูปแบบการจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ DEM ในการศึกษาวัสดุเม็ดทรงกลมเคลื่อนที่ผ่านฝายแบบร่อง (Leonardi, et al., 2019; Horiguchi, et al., 2021; Liu, et al., 2021; Zhang, et al., 2021; Kong, et al., 2022)



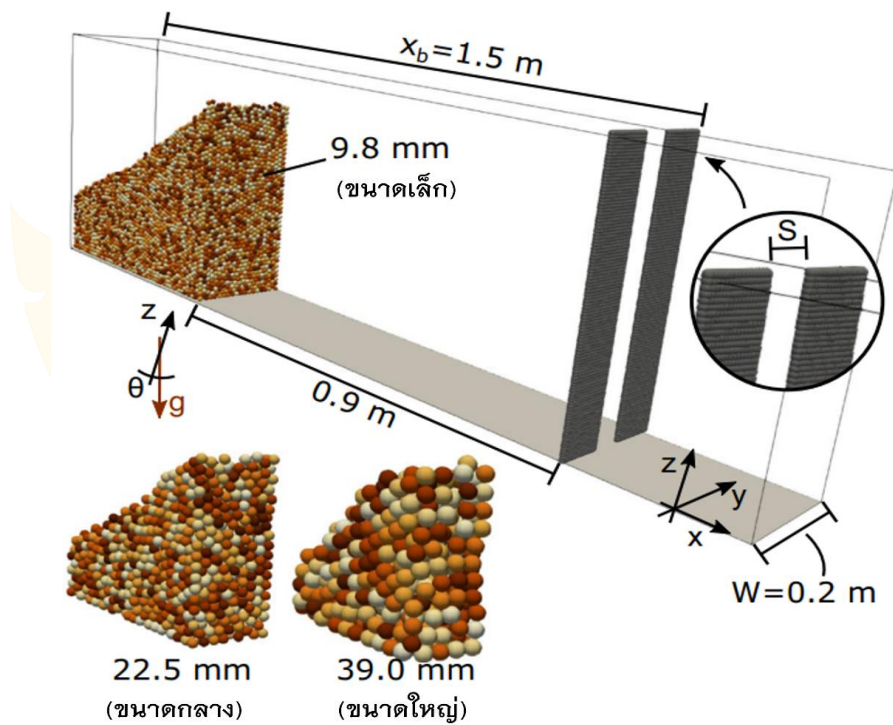
ภาพ 15 การเปรียบเทียบผลของการไหลของอนุภาคที่จับเป็นกลุ่มก้อนให้ใกล้เคียงความเป็นจริงและอนุภาคทรงกลม

ที่มา: Albaba, et al., 2015



ภาพ 16 แผนที่สีของเครือข่ายแรงดึงจาก: อนุภาควงกลมและอนุภาคหลายเหลี่ยม

ที่มา: Azéma, et al., 2007



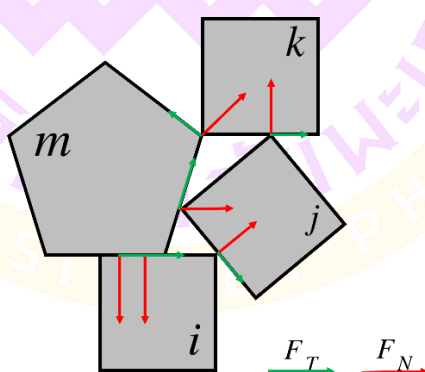
ภาพ 17 แบบจำลองเชิงตัวเลขในการไหลของอนุภาคทรงกลมขนาดต่าง ๆ

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Leonadi, et al., 2019

### Contact dynamics method (CD)

วิธี Contact dynamics (CD) เป็นอีกวิธีการแขนงหนึ่งใน Discrete element method (DEM) ที่สามารถรวมจำนวนค่าอิสระ (Degrees of freedom, DOF) ในการหมุน การสัมผัส และรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ถือว่ามีความก้าวหน้าและถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตลอดเวลาในการประมวลผลและอัลกอริทึมเชิงตัวเลขที่มีความซับซ้อน แต่ถึงกระนั้นวิธีที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย คือ Molecular dynamics (MD) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ Signorini อธิบายถึงการสัมผัสจากผลของแรงตั้งฉากระหว่างอนุภาค เนื่องจากเงื่อนไขในการคำนวณไม่ยุ่งยากเหมือน CD ในการศึกษานี้จะกล่าวถึงวิธี CD ที่ใช้ในโปรแกรม LMG90 จำลองเม็ดลักษณะที่มีรูปทรงหลายด้านแบบสุ่ม (Random) เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการวัดแม่น้ำในห้องปฏิบัติการ

จากภาพ 18 พิจารณาการสัมผัสระหว่างอนุภาครูปหลายเหลี่ยมสามารถเกิดการสัมผัสได้สามกรณี: (1) การสัมผัสด้านข้าง-ด้านข้าง ระหว่างอนุภาค  $m$  และ  $i$  ในกรณีนี้จะเกิดการสัมผัสแบบคู่ (Double contact) ซึ่งแรงตั้งฉากสามารถคำนวณได้เป็นสองครั้งของการสัมผัสแบบอื่น (2) การสัมผัสจุดยอด-จุดยอด ระหว่างอนุภาค  $m$  และ  $k$  ในกรณีการสัมผัสนี้เกิดขึ้นได้ยากที่สุด และเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ และ (3) การสัมผัสด้านข้าง-จุดยอด การสัมผัสนี้ คือ การสัมผัสอย่างง่าย มีโอกาสที่อนุภาคจะสัมผัสในลักษณะนี้มากที่สุด (Binaree, 2021) การสัมผัสทั้งสามกรณี จะเกิดแรงสองชนิด ได้แก่ แรงสัมผัสและตั้งฉาก หลังจากการชนกันของอนุภาคจะมีการคำนวณความเร็วหลังการชนและพลังงานที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสของอนุภาค



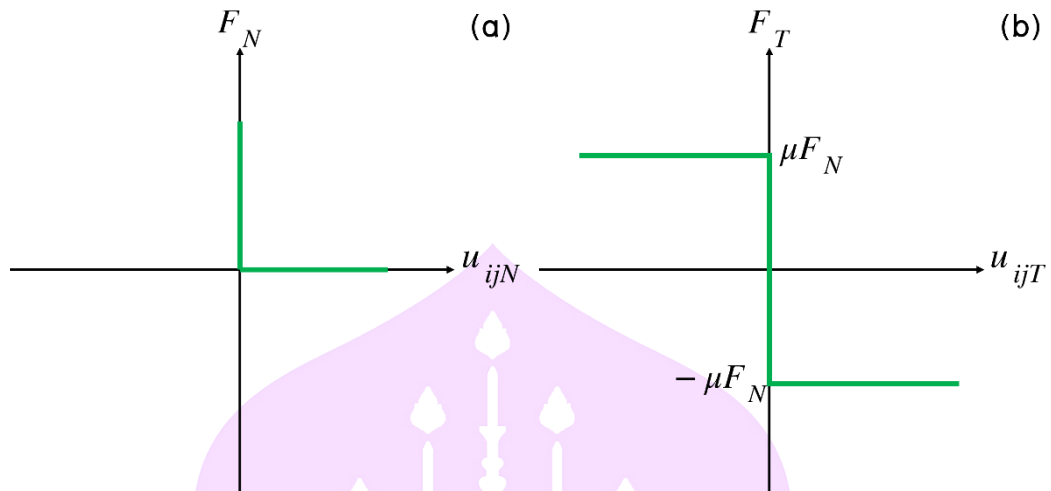
ภาพ 18 ประเภทของการสัมผัสระหว่างอนุภาครูปหลายเหลี่ยม

หมายเหตุ: ลูกศรสีเขียว คือ แรงสัมผัส ( $F_T$ ), ลูกศรสีแดง คือ แรงตั้งฉาก ( $F_N$ )

ข้อจำกัดในการจำลองเชิงตัวเลขของการศึกษานี้ คือ เม็ดจะไม่แตกหักและไม่เกิดขึ้น การแยกชิ้นส่วน ซึ่งอนุภาคถือว่ามีความแข็งอย่างสมบูรณ์ วิธี CD ถูกอธิบายไว้สองเงื่อนไข เงื่อนไขแรก การสัมผัสระหว่างสองอนุภาคไม่สามารถทะลุผ่านกันได้ กล่าวคือ แรงตั้งฉาก จะเป็นศูนย์หากไม่มีการสัมผัสกัน ( $F_N=0 \Rightarrow No\ contact$ ) ภาพ 19 (a) แสดงความสัมพันธ์ของ Signorini สามารถสรุปได้ว่า เมื่อแรงตั้งฉากมากกว่าศูนย์อนุภาคจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ ( $F_N>0 \Rightarrow u_{ijN}=0$ ) ในทางตรงกันข้าม เมื่อแรงตั้งฉากบนอนุภาคเท่ากับศูนย์ทำให้อนุภาค เคลื่อนที่ ( $F_N=0 \Rightarrow u_{ijN}>0$ ) และเงื่อนไขที่สอง การสัมผัสจะเป็นไปตามกฎของ Coulomb ซึ่ง ระบุว่าแรงสัมผัสมีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ( $\mu$ ) คูณกับแรงตั้งฉาก ( $F_T = \pm \mu F_N$ ) ดังภาพ 19(b) โดยที่แรงสัมผัส ( $F_T$ ) สามารถมีค่าบวกหรือลบก็ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของแรง จากเงื่อนไขที่กล่าวมาความสัมพันธ์ความเร็วและแรง จากภาพ 19 เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ เมื่ออนุภาคเกิดการสัมผัส จากภาพ 19(b) แผนภูมิของ Coulomb อนุภาคจะหยุดนิ่ง เมื่อแรงสัมผัส อยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงตั้งฉากที่กระทำคุณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ( $u_{ijT}=0 \Rightarrow -\mu F_N \leq F_T \leq \mu F_N$ ) ในทางตรงกันข้าม อนุภาคจะเคลื่อนที่เมื่อแรงสัมผัสเท่ากับ แรงตั้งฉากที่กระทำคุณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ( $u_{ijT} \neq 0 \Rightarrow F_T = \pm \mu F_N$ ) ถ้าหาก ความเร็วสัมผัสไม่เป็นศูนย์และน้อยกว่าค่าที่ถูกกำหนดในสมการการสัมผัส (ภาพ 19) วิธี CD จะขึ้นอยู่กับ การแก้ปัญหาของสมการการเคลื่อนที่ดังสมการ 5 และ 6 (Jean and Moreau, 1992; Jean, 1999; Donzé, et al., 2009) การคำนวณซ้ำแต่ละครั้งจะเป็นตัวกำหนดแรงสัมผัสและ ความเร็วของอนุภาค (Radjai and Vincent, 2009; Andreotti, et al., 2013; Sánchez, et al., 2021) การตรวจสอบการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมและการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอนุภาค ถูกควบคุมโดยสมการ 6 ในช่วงเวลาที่กำหนดแรงทั้งหมดจากการสัมผัสและการหมุนของอนุภาค ที่เป็นไปได้จะถูกนำมาพิจารณาร่วมกัน เพื่อกำหนดความเร็วและแรงของการสัมผัสในช่วงเวลา ถัดไป ซึ่งแรงและความเร็วจะถูกใช้เพื่ออัปเดตตำแหน่งของอนุภาค

$$u_i^{t+1} = u_i^t + \frac{dt}{m} \left[ \sum_{j \neq i} F_{ij}^t + F_i^{ext} \right] \quad (5)$$

$$u_i^{t+1} = u_i^t + \frac{dt}{m} \left[ \sum_{k \neq i} F_{ik}^{t+1/2} + F_i^{ext} \right] \quad (6)$$



ภาพ 19 ความสัมพันธ์ของการสัมผัส

หมายเหตุ:  $u_{ijN}$  คือ ความเร็วตั้งฉาก,  $u_{ijT}$  คือ ความเร็วสัมผัส

โดยที่  $k$  คือ ดัชนีของอนุภาคที่สัมผัสกับอนุภาค  $i$  ความแตกต่างหลังจากสมการ 5 ที่ถูกใช้ในวิธี MD กล่าวคือ แรงสัมผัสก่อนหน้าไม่แสดงเวลา  $t$  แต่จะแสดงเวลา  $t + 1/2$  คือ การพิจารณาระหว่างการชนของอนุภาคไปอีกครึ่งหนึ่งของเวลาการทำซ้ำ  $F_i^{ext}$  คือ แรงภายนอกที่เวลา  $t$  บนอนุภาค  $i$  (โดยทั่วไป คือ แรงโน้มถ่วง ในกรณีไม่คิดแรงต้านเนื่องจากอากาศ)  $F_{ij}$  คือ แรงสัมผัสที่กระทำโดยอนุภาค  $j$  บน  $i$ ,  $u_i$  คือ ความเร็วของอนุภาค และ  $m$  คือ มวลของอนุภาค เมื่อพิจารณาถึงส่วนประกอบแบบแข็งอาจใช้สมการที่เหมาะสม สมการ 7 และ 8 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคแข็งที่อยู่ภายใต้สมการของนิวตัน-ออยเลอร์ (Donzé, et al., 2009; Andreotti, et al., 2013)

$$M\dot{v} = P(t) + r \quad (7)$$

$$I\dot{\omega} = \omega \wedge I\omega + M_{P(t)} + M_r \quad (8)$$

เมื่อ  $P(t)$  คือ แรงภายนอก,  $r$  คือ แรงสัมผัส,  $M$  และ  $I$  คือ เมทริกซ์มวลและความเฉื่อย ตามลำดับ  $M_{P(t)}$  และ  $M_r$  คือ โมเมนต์เนื่องจากแรงภายนอกและแรงสัมผัส ตามลำดับ สำหรับส่วนประกอบ 2 มิติหรือ 3 มิติที่มีเรขาคณิตเท่ากันในทุกทิศทาง (Geometric isotropy)  $\omega \wedge I\omega$  จะเท่ากับศูนย์ โดยที่  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม วิธี CD ใน LMGC90 สมการการหมุนของอนุภาค แสดงในสมการ 9 และ 10 ซึ่งต้องแก้ไขในระบบดิฟเฟอเรนเชียลเพื่ออธิบายการชน

เมื่อ  $\dot{q}$  คือ ความเร็วของอนุภาค โดยที่  $t+$  และ  $t-$  คือ ช่วงเวลาที่ต้องการอัปเดตสถานการณ์ และช่วงเวลาเริ่มต้น ตามลำดับ

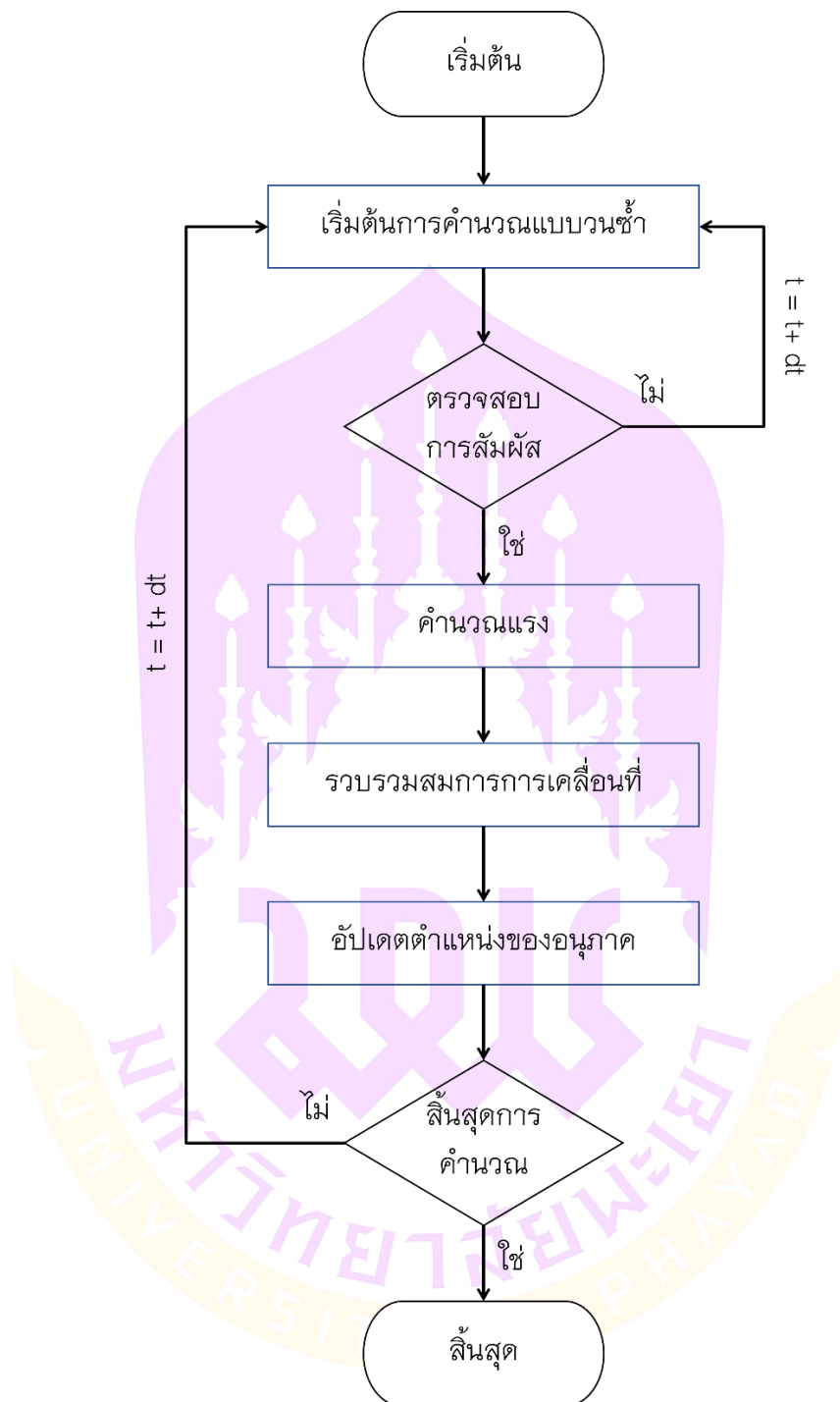
$$\mathbb{M}(\dot{q}_{i+1} - \dot{q}_i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (\mathbb{F}(q, \dot{q}, s) + \mathbb{P}(s)) ds + p_{i+1} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{M}(\dot{q}_{i+1} - \dot{q}_i) &= p_{free} + p_{i+1} \\ q_{i+1} &= q_i + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \dot{q} ds \end{aligned} \quad (10)$$

เมื่อ  $q$  คือ การกำหนดเวกเตอร์ DOF  $\dot{q}$  คือ ความเร็วทั่วไป  $s$  คือ เวกเตอร์ในแนวสัมผัส (ถูกใช้ใน 3 มิติ) ในขณะที่  $p_{free}$  คือ การปริพันธ์ของแรงในช่วงเวลาหนึ่งและแสดงถึงค่าของแรงที่กระทำทั้งหมดในช่วงเวลาที่ต้องการคำนวณ โดยความสัมพันธ์ของการทำงานของสมการที่กล่าวมา สามารถแสดงได้ดังภาพ 20 ซึ่งสมการการหมุนของอนุภาคจะทำงานร่วมกันระหว่างสมการแรงและความเร็วการหมุนแล้วถูกส่งต่อไปคำนวณความเร็วสัมผัส ( $U$ )  $H$  คือ เมทริกซ์ของสมการความเร็ว  $P$  คือ เมทริกซ์แรง ภาพ 21 แสดงการทำงานของวิธี CD กล่าวคือระหว่างสมการที่กล่าวมาจากภาพ 20 จะถูกใช้คำนวณตามช่วงเวลาที่ของเวลา ซึ่งจะเริ่มจากตรวจสอบเงื่อนไขการคำนวณวนซ้ำแล้วตรวจสอบการสัมผัสระหว่างอนุภาค เมื่อมีการสัมผัสกันจะคำนวณแรงตามสมการในเมทริกซ์  $P$  หลังจากคำนวณแรงเสร็จแล้วจะรวบรวมสมการเคลื่อนที่และอัปเดตตำแหน่งของอนุภาค เพื่อใช้คำนวณรอบถัดไป โดยที่  $t = t + dt$  เมื่อ  $t$  คือ เวลา ณ ปัจจุบันที่คำนวณ  $dt$  คือ ช่วงเวลาที่ถัดไปในอนาคตที่ต้องคำนวณ (Binaree, 2021)



ภาพ 20 การทำงานของสมการ Contact dynamics (CD)



ภาพ 21 ขั้นตอนการทำงานทั่วไปของวิธี Contact dynamics (CD)

ที่มา: คัดลอกและดัดแปลงจาก: Binaree, 2021

## บทสรุป

โดยทั่วไปฝายชะลอน้ำทำหน้าที่หนึ่นน้ำให้สูงขึ้นเป็นลักษณะการระบายแบบน้ำล้น ส่วนฝายชะลอน้ำแบบเปิด คือ โครงสร้างที่มีช่องเปิดสำหรับการระบายน้ำและดักจับตะกอนที่ลอยมากับน้ำ สามารถอธิบายได้สองแบบ คือ แบบชลศาสตร์และแบบเชิงกล ลักษณะการอธิบายแบบชลศาสตร์เป็นการอธิบายการไหลของน้ำ แต่เมื่อน้ำพัดพาเศษวัสดุต่าง ๆ ไหลผ่านหรือถูกดักจับโดยฝายชะลอน้ำแบบเปิดจะถูกอธิบายแบบเชิงกล ฝายชะลอน้ำแบบเปิดมีอัตราการระบายน้ำที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับปริมาณของเศษวัสดุที่สะสมอยู่หน้าฝายตามช่วงเวลา

เมื่อเศษวัสดุที่ไหลมากับน้ำกระทบกับสิ่งกีดขวาง ลักษณะของแรงกระทบขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะรูปทรงของวัสดุ ความหนาแน่นของวัสดุ และขนาดอนุภาค เป็นต้น ปริมาณแรงกระทบจะแตกต่างกันไปตามช่วงเวลาการไหลของวัสดุ สามารถจำแนกแรงได้ 3 ตัวแปร คือ 1) แรงลากจากการเคลื่อนที่ 2) แรงดันดินด้านข้าง และ 3) แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง และแรงระหว่างผิวสัมผัส ทั้ง 3 ตัวแปร สามารถสรุปแรงที่กระทบต่อสิ่งกีดขวางได้สองประเภท คือ แรงต้งฉากและแรงสัมผัส

เนื่องจากพฤติกรรมการไหลหลากของดินโคลนมีความซับซ้อนอย่างมากจึงเกิดการแตกแขนงรูปแบบการศึกษาการไหลของวัสดุในห้องปฏิบัติการ เช่น การใช้วัสดุเม็ดแห้ง การใช้ทราย และการใช้วัสดุผสม เป็นต้น ซึ่งการศึกษาแรงกระทบเนื่องจากการไหลหลากของดินโคลนในห้องปฏิบัติการสามารถวัดได้จากไหลดเซลส์ บางงานวิจัยทำการศึกษาพฤติกรรม การไหลของวัสดุผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด ลักษณะการศึกษามักมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการดักจับ และปริมาณแรงที่เกิดขึ้นหน้าฝายชะลอน้ำแบบเปิด การกำหนดการดักจับของฝายนั้นส่วนใหญ่ใช้อัตราส่วน  $s/d_{95}$  ทั้งนี้จากอัตราส่วนดังกล่าวแล้ว การดักจับของฝายยังขึ้นอยู่กับรูปแบบและชนิดของฝาย

การศึกษาการไหลหลากของดินโคลนโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข ด้วยลักษณะการไหลของวัสดุเป็นแบบแยกและไม่ต่อเนื่องจึงนิยมใช้ DEM ในการศึกษาและส่วนมากใช้อุณหภูมิทรงกลมจากรูปทรงวัสดุในธรรมชาติมีรูปทรงแบบหลายด้านและผิวขรุขระ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขแบบทรงกลมได้รับการปรับแก้ส่วนต่างของผลการทดลอง เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของวัสดุเม็ด เพื่อให้อธิบายพฤติกรรมของการไหลได้ แบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถวิเคราะห์การกองของวัสดุหน้าสิ่งกีดขวางได้อย่างละเอียด ซึ่งเป็นจุดเด่นของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ต่างจากการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ยังมีข้อจำกัดดังกล่าว อย่างไรก็ตามแบบจำลองเชิงตัวเลขมีข้อเสียหลัก ๆ คือ การคำนวณแต่ละครั้งใช้เวลานาน จำเป็นต้องอาศัยการใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง

วิธี CD สามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมของอนุภาครูปทรงต่าง ๆ ได้ ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากวิธี MD อย่างไรก็ตามระยะเวลาการคำนวณของ CD นั้นใช้เวลาเยอะกว่า MD อยู่มาก ในกรณีลักษณะอนุภาคถูกสร้างให้มีรูปทรงหลายด้าน ในการศึกษานี้พยายามใช้วิธี CD ในการจำลองการไหลของอนุภาครูปทรงหลายด้านให้ใกล้เคียงกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่วิธี CD ยังพบข้อจำกัดในการจำลองลักษณะเม็ดที่มีพื้นผิวขรุขระและการแตกแยกของวัสดุเม็ดด้วยลักษณะพื้นผิวเรียบอาจทำให้แรงกระแทกสูงกว่าแบบจำลองทางกายภาพ เนื่องจากการเกิดการสัมผัสแบบคู่ (Double contact) ทำให้การส่งถ่ายแรงมากกว่าการสัมผัสแบบปกติ



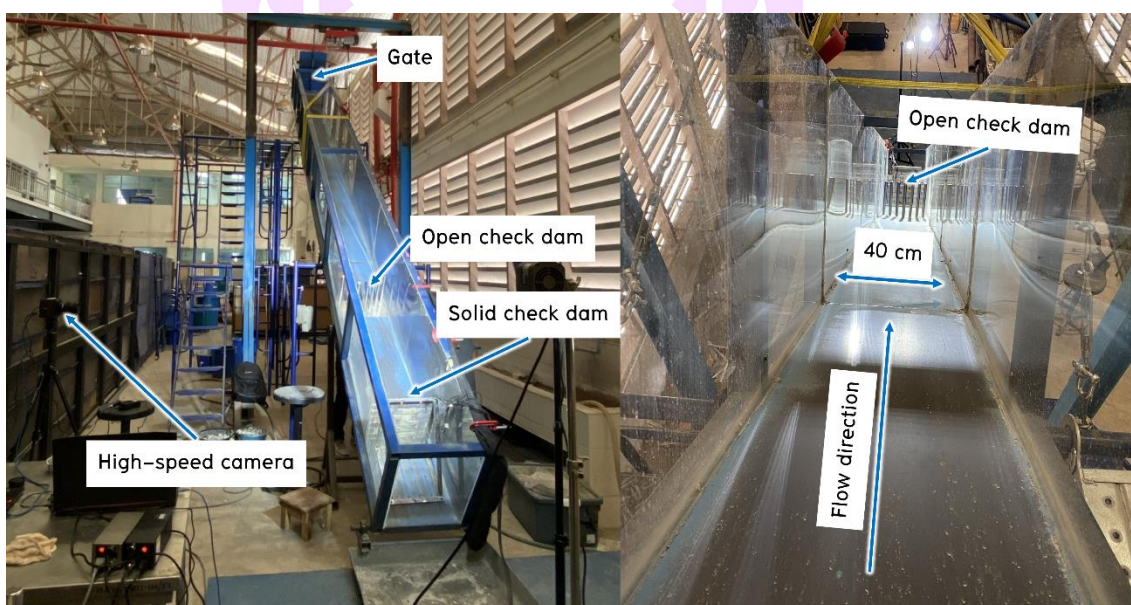
### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

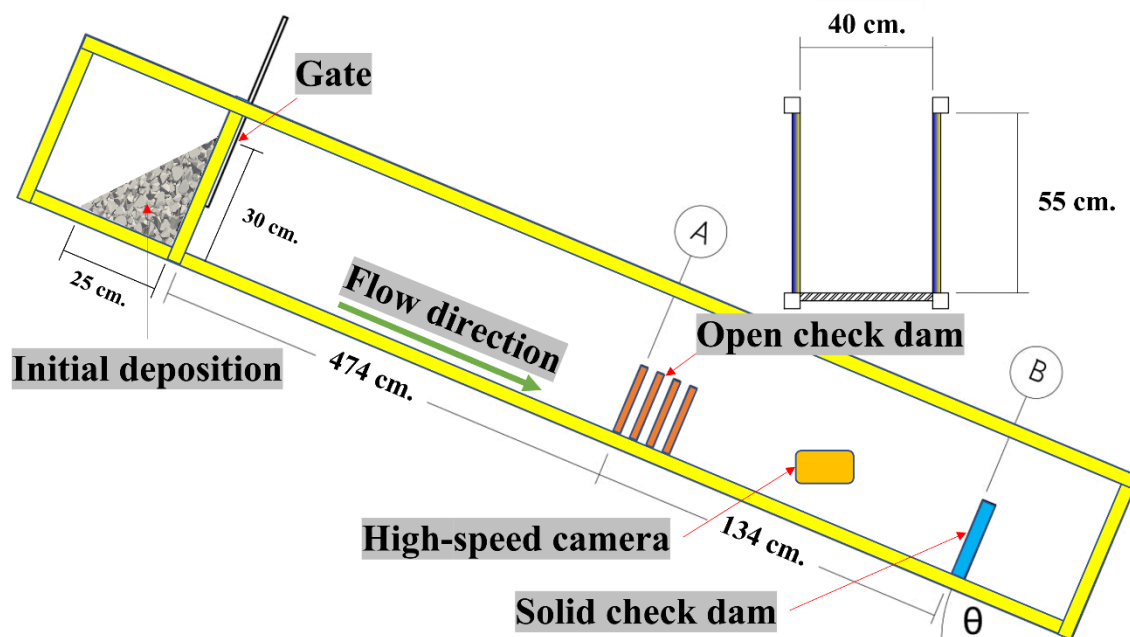
##### แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากหลายของดินโคลน โดยทั่วไปการไหลหลากหลายของดินโคลนเป็นการไหลของวัสดุที่มีทั้งของแข็งและของเหลว ซึ่งเป็นข้อจำกัดและความยุ่งยากในการศึกษาดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วัสดุเม็ดแห้งและเศษท่อนไม้เป็นวัสดุตัวแทนในการศึกษาพฤติกรรมเบื้องต้น เพื่อให้สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Jiang and Towhata, 2013; Jiang and Zhao, 2015; Hashimoto, et al., 2016; Xie, et al., 2017) แบบจำลองทางกายภาพถูกพัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ ณ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา โดยใช้รางน้ำเป็นเส้นทางการไหลของวัสดุ ขนาดความกว้าง 40 cm ความสูง 55 cm และความยาว 720 cm ผนังด้านข้างถูกทำด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 0.6 cm พื้นรางเป็นแผ่นเหล็กแบบผิวเรียบในการศึกษานี้รางน้ำจะถูกตั้งค่าความลาดชันการไหล ( $\theta$ ) 25 30 และ 35 องศา ภาพ 22 และ 23 แสดงแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาการไหลของวัสดุโดยเปิดประตูกั้นเพื่อให้วัสดุไหลลงมาตามรางผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิดที่ถูกติดตั้งไว้ โดยมีระยะทางการไหล 4.74 m วัสดุที่ตกค้างหน้าฝายชะลอน้ำแบบเปิดจะถูกวัดปริมาตร (ตำแหน่ง A) และวัสดุที่ไหลผ่านฝาย จะถูกตรวจสอบแรงกระแทกที่เกิดขึ้นโดยฝายช่องปิด (ตำแหน่ง B) ระยะทางจากหน้าฝายชะลอน้ำแบบเปิดถึงหน้าฝายช่องปิดเป็นระยะทาง 1.34 m คิดเป็น 28.27% ของระยะทางการไหลของกองวัสดุถึงฝายชะลอน้ำแบบเปิด (NG, et al., 2018) ในการทดลองแต่ละครั้งจะถูกจับภาพด้วยกล้องด้านข้างและด้านบน การเตรียมตัวอย่างแสดงดังภาพ 24(a) กรวดแม่น้ำผสมเศษท่อนไม้ และภาพ 24(b) กรวดแม่น้ำ โดยเตรียมวัสดุรูปทรงสามเหลี่ยม สูง 30 cm กว้าง 25 cm และลึก 40 cm ซึ่งความหนาของกองวัสดุเริ่มต้นในการไหลนั้นมีผลต่อแรงกระแทก (Jiang and Zhao, 2015; Ahmadipur and Qiu, 2018) จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการเตรียมตัวอย่างเป็นลักษณะทรงสี่เหลี่ยมและทรงสามเหลี่ยม ในการศึกษานี้เลือกใช้วิธีเตรียมตัวอย่างแบบทรงสามเหลี่ยมเนื่องจากความยุ่งยากในห้องปฏิบัติการและข้อจำกัดเงื่อนไขเบื้องต้นของแบบจำลองเชิงตัวเลข (Albaba, et al., 2015; Cui, et al., 2018; Albaba, et al., 2019; Leonardi, et al., 2019) จากภาพ 25 แสดงแผนการดำเนินงานวิจัย รูปแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการถูกแบ่งเป็นสองส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนแรก การทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้และวัสดุเม็ดแห้งที่ไม่ผสมเศษท่อนไม้ และส่วนที่สอง การทดลองโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบ

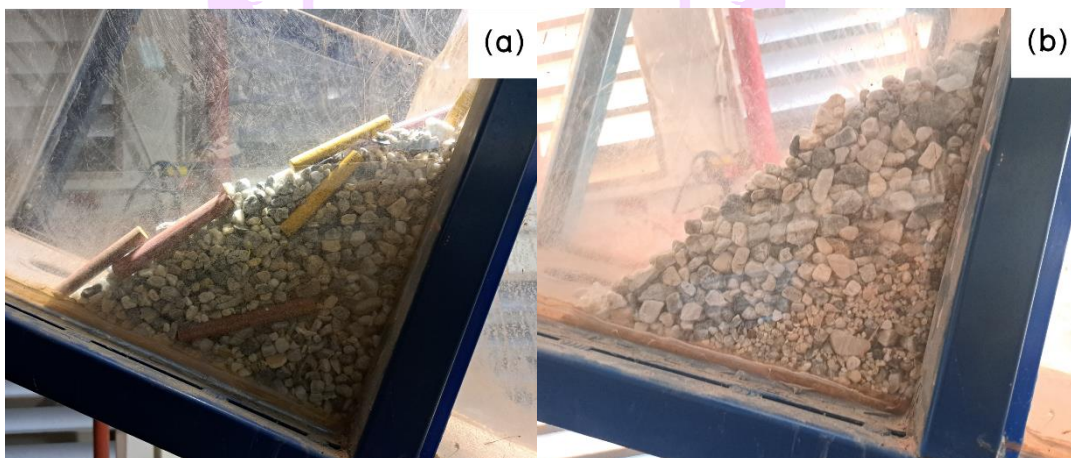
พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งรูปทรงหลายด้าน โดยรูปแบบการทดลองทั้งสองนี้ใช้เม็ดแห้งต่างขนาดเนื่องจากข้อจำกัดของแบบจำลองเชิงตัวเลขในการจำลองเม็ดแห้งที่มีจำนวนมากเกินไป ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณที่นาน (Wang, et al., 2021) อัตราส่วนช่องว่างของฝายชะลอน้ำแบบเปิด (s) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดแห้ง 90% ( $d_{90}$ ) เท่ากับ 1.90 ทำให้จำนวนเม็ดแห้งที่ถูกใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลขอยู่ในช่วง 18,000–24,000 อนุภาค ข้อจำกัดอีกอย่าง คือการสุมขนาดด้านของเม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลขทำให้ควบคุมจำนวนเม็ดได้ยากและเกิดความไม่แน่นอนของเงื่อนไขเริ่มต้น ดังนั้นในแบบจำลองเชิงตัวเลขจึงถูกกำหนดอัตราส่วนช่องว่างของฝายชะลอน้ำแบบเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดแห้ง 90% เท่ากับ 0.86 จากการศึกษาของ Silva และคณะ (2016) สามารถสรุปได้ว่าช่วง  $s/d_{90}$  เท่ากับ 0.86–1.10 จะทำให้ปริมาณการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดสามารถดักจับวัสดุได้ 75–90% เมื่อความชันทางชลศาสตร์ 10–20% จากสมมุติฐานที่คาดการณ์ไว้เบื้องต้นในด้านการดักจับเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพให้เห็นความแตกต่างของปริมาณการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดแต่ละรูปแบบ



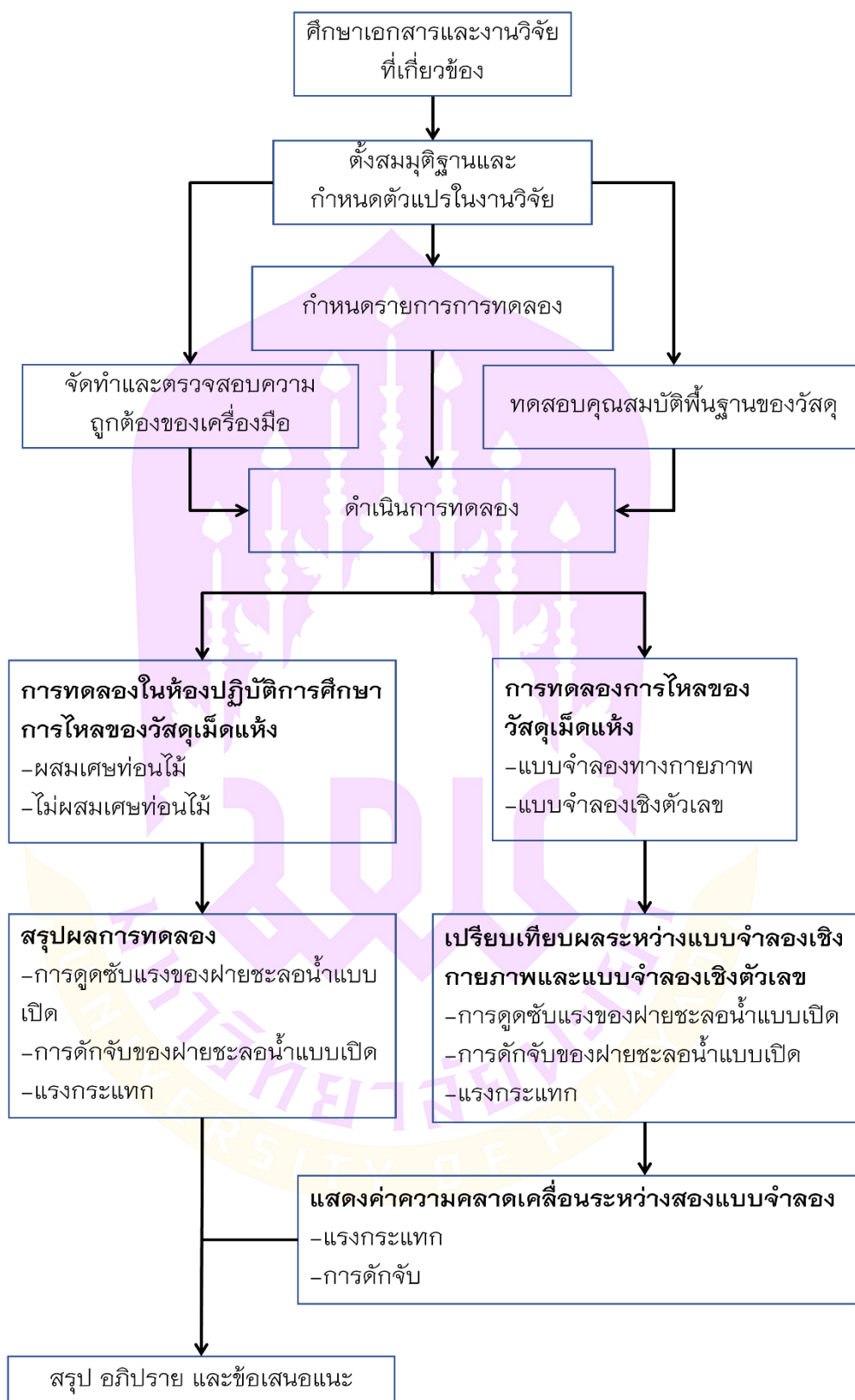
ภาพ 22 แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา



ภาพ 23 รายละเอียดของแบบจำลองทางกายภาพ



ภาพ 24 การเตรียมตัวอย่างวัสดุก่อนทดลอง



ภาพ 25 วิธีการดำเนินงานวิจัย

### ฝายช่องปิด

รูปแบบของฝายช่องปิดถูกออกแบบสำหรับวัดแรงกระแทกในแนวตั้งฉากตามความสูงของกองวัสดุ โดยติดตั้งโพลีเซลล์ 6 ตัว แสดงดังภาพ 26(a) ภาพถ่ายฝายช่องปิดวัดแรงกระแทกจากแผ่นอลูมิเนียม ภาพ 26(b) แสดงรายละเอียดและรูปแบบการวัดแรงกระแทกแบบตั้งฉาก ปริมาณแรงกระแทกทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการ 11 ลักษณะการวัดแรงกระแทกจะถูกเก็บข้อมูล เมื่อวัสดุไหลผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิดแล้วกระทบกับฝายช่องปิดตามตำแหน่งความสูงของแผ่นรับแรงกระแทก ในการศึกษาจะวัดแรงกระแทกจากการไหลของวัสดุถูกใช้เพื่อประเมินการดูดซับแรงของฝายชะลอน้ำแบบเปิดและพฤติกรรมแรงกระแทกจากการไหลหลากของวัสดุ ณ ความลาดชันการไหลต่าง ๆ จากสมการ 12 แสดงอัตราส่วนการดูดซับแรงของฝายชะลอน้ำแบบเปิดต่อปริมาณแรงกระแทกจากการไหลหลากของวัสดุ

$$F = \sum_{i=1}^6 F_i \quad (11)$$

$$R = \frac{F_H^{i=1} - F_d}{F_H} \quad (12)$$

โดยที่

$F$  คือ ปริมาณแรงกระแทกทั้งหมดที่ถูกวัดโดยฝายช่องปิด (N)

$F_i$  คือ ปริมาณแรงย่อยที่ถูกวัดโดยโพลีเซลล์แต่ละตัว ได้แก่

$F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$  (N)

$R$  คือ อัตราส่วนการดูดซับแรงของฝายชะลอน้ำแบบเปิด

$F_H$  คือ แรงกระแทกสูงสุดของการทดลองที่ปราศจากฝายชะลอน้ำแบบเปิด (N)

$F_d$  คือ แรงกระแทกสูงสุดของการทดลองที่ติดตั้งฝายชะลอน้ำแบบเปิดแต่ละรูปแบบ (N)

### ฝายชะลอน้ำแบบเปิด

รูปแบบของฝายชะลอน้ำแบบเปิดถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญในการดักจับและการดูดซับแรงกระแทก เมื่อพิจารณารูปแบบที่เป็นมิตรและไม่ทำลายระบบนิเวศวิทยามากเกินไปในการศึกษาดังนี้ มี 2 รูปแบบ 1) แบบรูปตัววี และ 2) แบบรูปตัวอัลฟา ภาพ 27(a) แสดงฝายมีลักษณะเป็นเสาเข็มทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm สูง 27 cm และช่องเปิด (s) 3 cm ภาพ 27(b) แสดงฝายรูปแบบตัววี และ ภาพ 27(c) แสดงฝายรูปแบบตัวอัลฟา เมื่อพิจารณาจากทิศทางการไหลของวัสดุรูปแบบของฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปตัววีและตัวอัลฟา องศาของการจัดรูปแบบได้แยกย่อยพิจารณาอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ มุมภายใน ( $\beta$ ) 80 90 และ 100 องศา เพื่อให้เกิดความเข้าใจคุณลักษณะของการดักจับและการดูดซับแรงของฝายชะลอน้ำ

แบบเปิดได้ดียิ่งขึ้น โดยอัตราส่วนประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดสามารถคำนวณได้จากสมการ 13

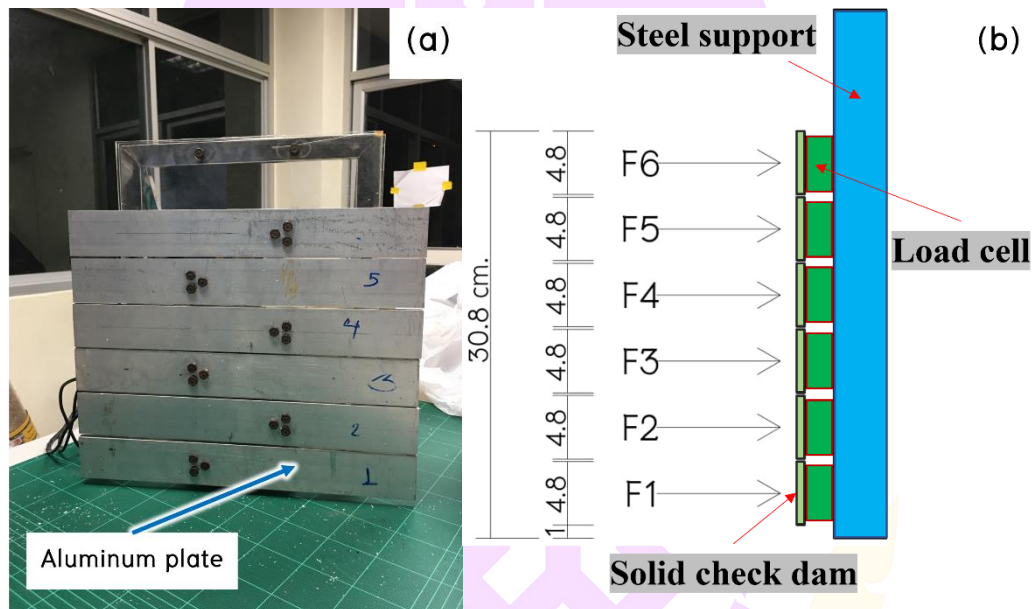
$$E = \frac{V_e - V_s}{V_e} \quad (13)$$

โดยที่

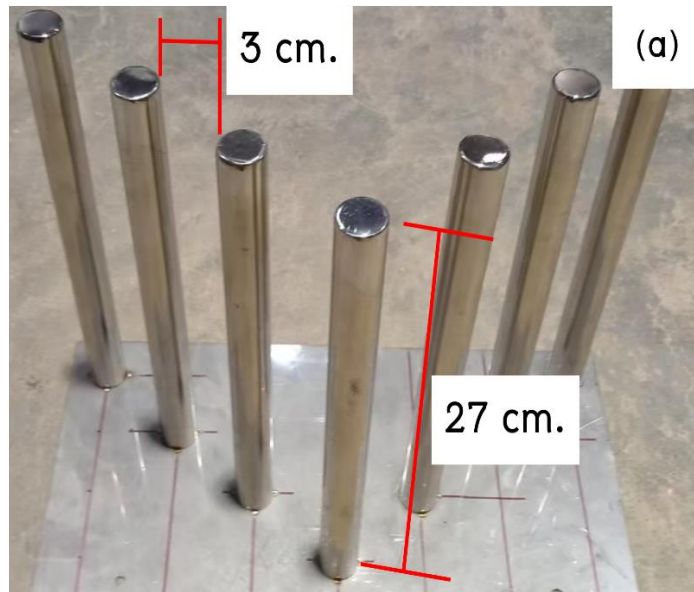
$E$  คือ ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิด

$V_e$  คือ ปริมาตรของวัสดุทั้งหมด ( $m^3$ )

$V_s$  คือ ปริมาตรของวัสดุที่ไหลผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด ( $m^3$ )



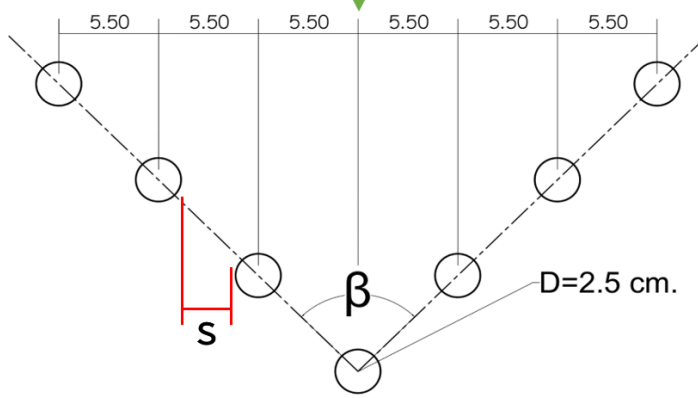
ภาพ 26 ฝายช่องปิดสำหรับวัดแรงกระแทก



V-shape pattern

Flow direction

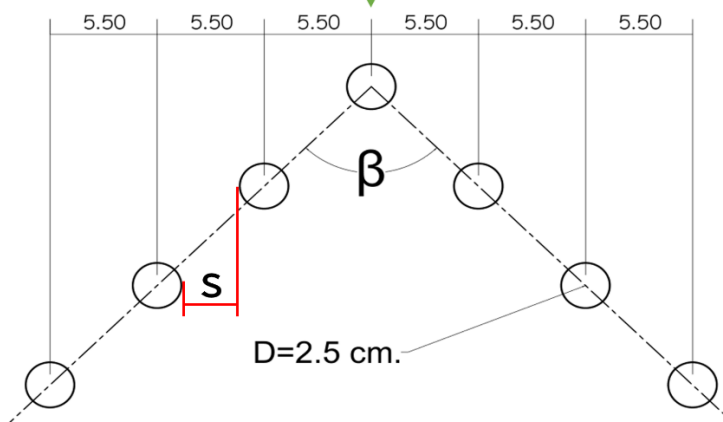
(b)



Alpha-shape pattern

Flow direction

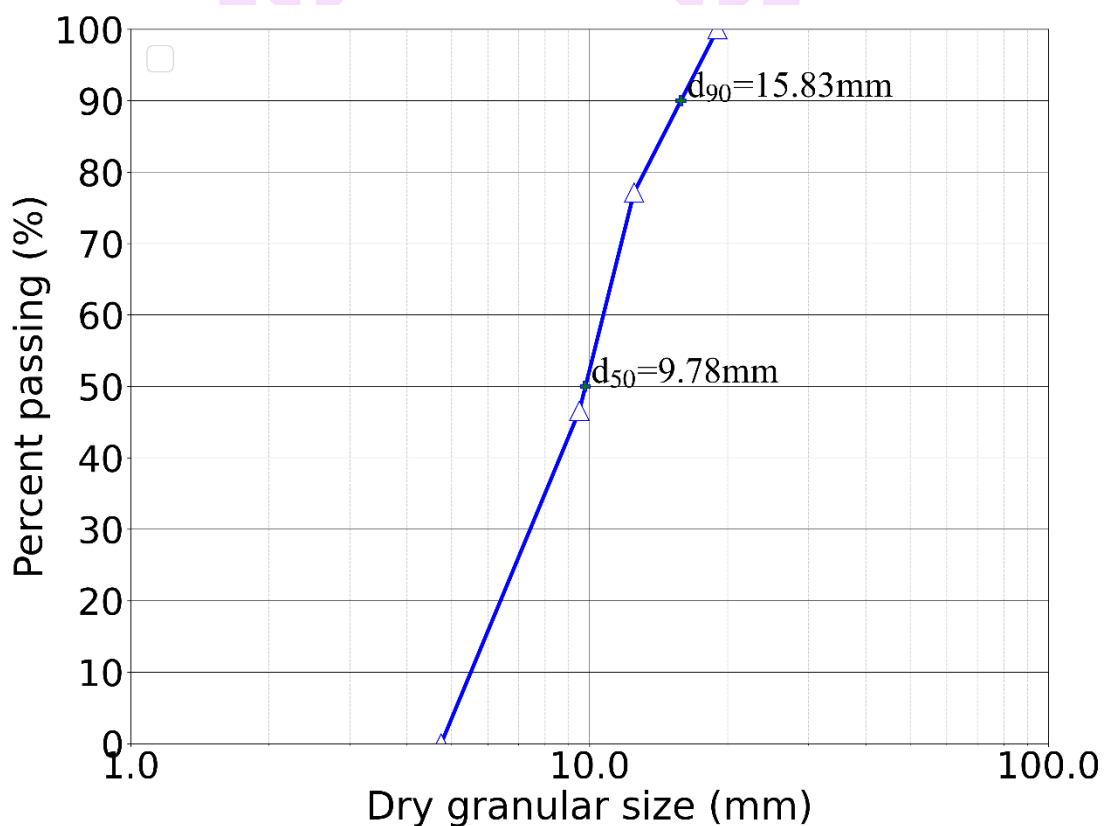
(c)



ภาพ 27 ฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดที่ใช้ทดสอบ

### วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้แทนวัสดุเม็ดแห้ง คือ กรวดแม่น้ำแบบแห้ง รูปทรงหลายด้านและพื้นผิวขรุขระ การเตรียมวัสดุโดยการล้างกรวดเพื่อลดฝุ่นที่เกิดขึ้น ปริมาณกรวดที่ใช้ คือ 30 kg เส้นผ่านศูนย์กลางของกรวดแม่น้ำผ่านตะแกรง 3/4 นิ้ว, 1/2 นิ้ว 3/8 นิ้ว และตกค้างตะแกรงเบอร์ 4 ภาพ 28 แสดงการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวดแม่น้ำ ซึ่งอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิดของฟายและขนาดเม็ดแห้งที่ 90% ( $s/d_{90}$ ) เท่ากับ 1.90 เมื่อ  $d_{90}$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดที่มีขนาดอื่นเล็กกว่านี้ 90% โดยรูปแบบของวัสดุที่ใช้สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการมี 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) แบบเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ และ 2) แบบเม็ดแห้ง แสดงดังภาพ 29(a) กรวดแม่น้ำ และ (b) เศษท่อนไม้ สำหรับการทดลองที่ผสมเศษท่อนไม้กับกรวดแม่น้ำจะใช้ส่วนผสมระหว่างเศษท่อนไม้และกรวดแม่น้ำในอัตราส่วน 1:60 โดยน้ำหนัก เศษท่อนไม้มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm ความยาว 10 และ 15 cm ตาราง 1 และ 2 แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุกรวดแม่น้ำและเศษท่อนไม้ตามลำดับ



ภาพ 28 แผนภูมิการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวดแม่น้ำ



ภาพ 29 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตาราง 1 คุณสมบัติของวัสดุกรวดแม่น้ำ

กรวดแม่น้ำ	ขนาดเล็ก	ขนาดกลาง	ขนาดใหญ่
เส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุเม็ดแห้ง (cm)	0.50	1.19	1.90
ปริมาณ (%)	46.58	30.56	22.87
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )		2,650	
ความหนาแน่นรวม (kg/m <sup>3</sup> )		1,582	

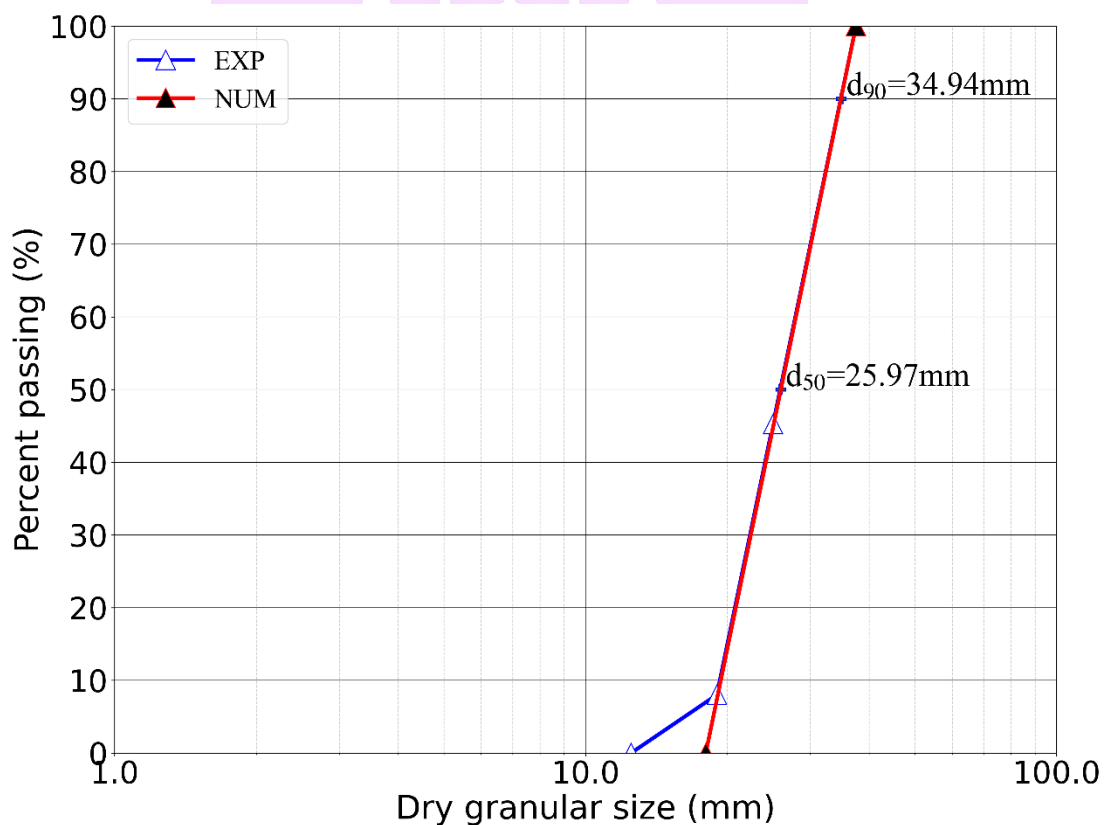
ตาราง 2 คุณสมบัติวัสดุเศษท่อนไม้

วัสดุ	ความยาว (cm)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (cm)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
เศษท่อนไม้	10 และ 15	1.50	620

### แบบจำลองเชิงตัวเลข

การศึกษานี้ยังมีจุดประสงค์ในการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการไหลหลากของวัสดุเม็ด โดยกำหนดวัสดุเม็ดแห้งที่ใช้ในการทดลองให้ใกล้เคียงกับตัวแปรในแบบจำลองเชิงตัวเลขมากที่สุด ภาพ 30 แสดงการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแห้งที่ผ่านตะแกรง 1½ นิ้ว 1 นิ้ว ¾ นิ้ว และค้ำตะแกรง ½ นิ้ว ซึ่งอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องว่างของฝายและขนาดเม็ดแห้งที่ 90% ( $s/d_{90}$ ) เท่ากับ 0.86 ปริมาณที่ใช้ทั้งหมด 30 kg จำนวนเม็ดแห้ง 3,080 อนุภาค โดยแบบจำลองเชิงตัวเลขถูกตั้งค่าการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแห้งแบบสม่ำเสมอ (Uniform) ตาราง 3 แสดงรายละเอียดพารามิเตอร์ระหว่างแบบจำลองทางกายภาพ (EXP) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (NUM) โดยความหนาแน่นของเม็ดแห้งและ

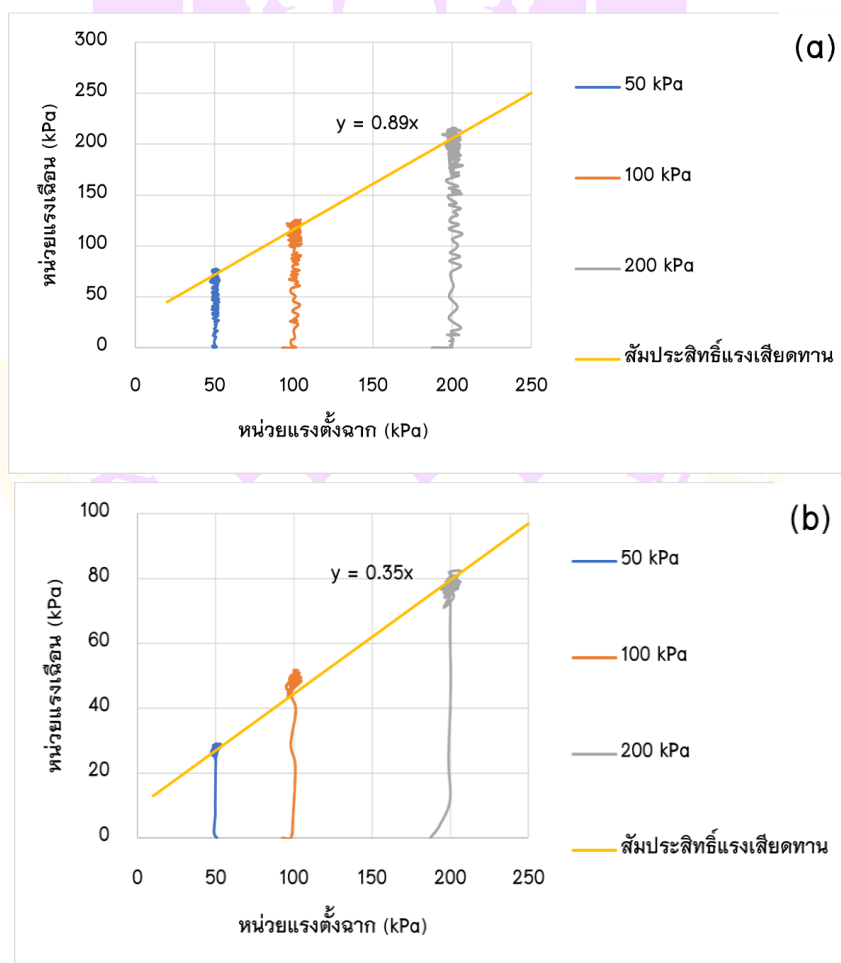
แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสถูกทดสอบในห้องปฏิบัติการ จากภาพ 31 แสดงผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเม็ดแห้งระหว่างเม็ดแห้ง (a) และพื้นราบ (b) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในแบบจำลองเชิงตัวเลข ภาพ 32 แสดงการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ก้อนวัสดุถูกเตรียมให้เป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสูง 30 cm กว้าง 25 cm และลึก 40 cm ภาพ 33 แสดงการตั้งค่าแบบจำลอง: (a) แบบจำลองทางกายภาพ และ (b) แบบจำลองเชิงตัวเลข ในการทดลองถูกบันทึกภาพเหตุการณ์ด้านข้างด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง Photron FASTCAM MINI UX 1,000 FPS เพื่อบันทึกภาพพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง รายการทดลองแสดงดังตาราง 4



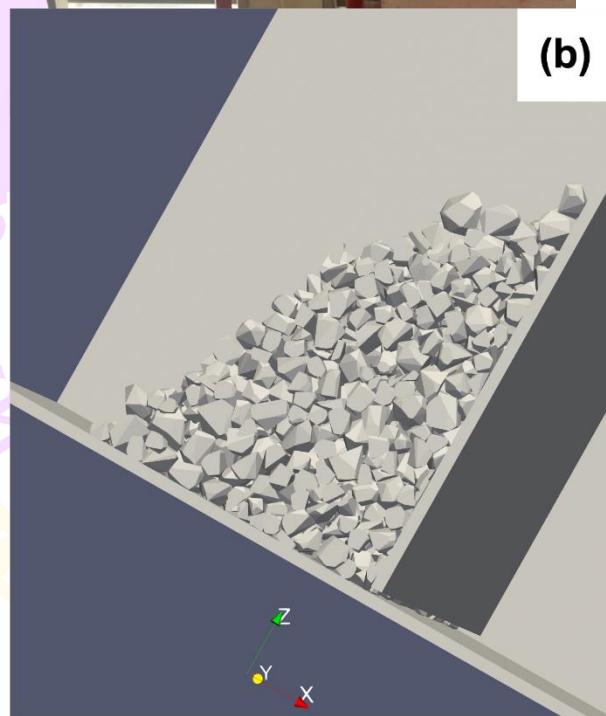
ภาพ 30 แผนภูมิการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดในแบบจำลองทางกายภาพ (EXP) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (NUM)

ตาราง 3 รายละเอียดพารามิเตอร์แบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข

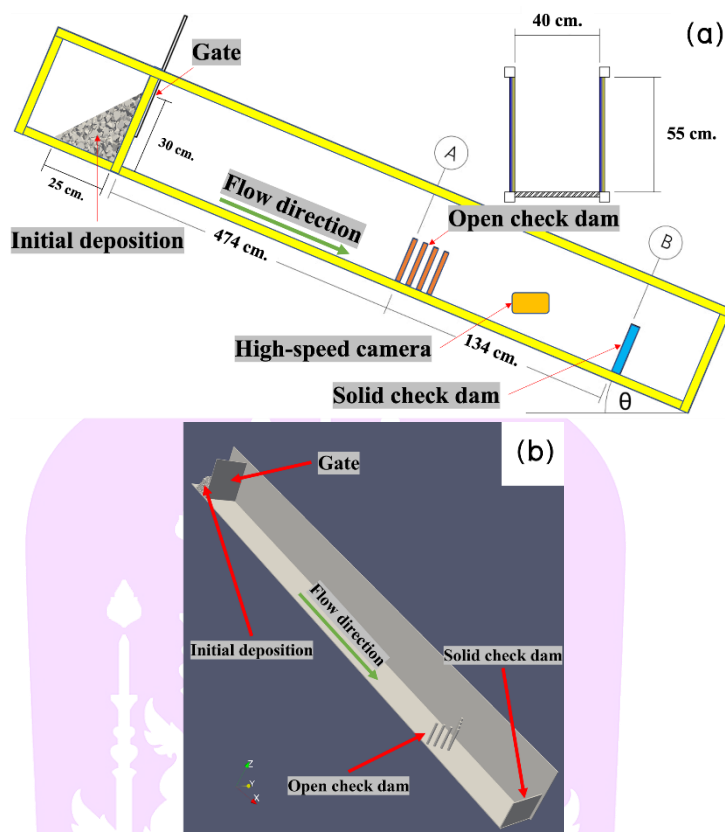
รายการ	ปริมาณ		หน่วย
	EXP	NUM	
ความหนาแน่น	2,650		kg/m <sup>3</sup>
เส้นผ่านศูนย์กลางร้อยละ 90, d <sub>90</sub>	34.94		mm
เส้นผ่านศูนย์กลางร้อยละ 50, d <sub>50</sub>	25.97		mm
เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด, d <sub>max</sub>	37.50		mm
เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุด, d <sub>min</sub>	12.50	18.00	mm
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเม็ดแห้ง	0.89		
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นราบ	0.35		



ภาพ 31 ผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear)



ภาพ 32 การเตรียมตัวอย่างเม็ดแข็งก่อนการทดลอง



ภาพ 33 การตั้งค่าแบบจำลอง

### การทดลองในห้องปฏิบัติการ

แผนการทดลองตั้งอยู่บนสมมติฐาน คือ การควบคุมและการดักจับตะกอนจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของฝายชะลอน้ำแบบเปิด ซึ่งจากการกำหนดอัตราส่วนผลสมของกรวดแม่น้ำ ในการทดลอง กำหนดให้ความลาดชันการไหลต่างกัน ดังตาราง 4 รายละเอียดการทดลอง [a][b]-[H][d] โดยที่ a คือ รูปแบบฝายชะลอน้ำแบบเปิด: โดยที่ V คือ ฝายรูปตัววี และ A คือ ฝายรูปตัวอัลฟา b คือ มุมภายในของฝาย ได้แก่ 80 90 และ 100 องศา H คือ ฝายช่องปิด และ d คือ ความลาดชันการไหล ได้แก่ 25 30 และ 35 องศา ยกตัวอย่างเช่น A80-H\_30 คือ การทดสอบฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปตัวอัลฟาที่มีมุมภายใน 80 องศา โดยมีฝายช่องปิดติดตั้งด้านหลัง และการทดสอบมีความลาดชันการไหล 30 องศา การทดลองกรณีไม่ได้ติดตั้งฝายชะลอน้ำแบบเปิด โดยติดตั้งเฉพาะฝายช่องปิดติดตั้ง ได้แก่ H\_25, H\_30 และ H\_35 เมื่อความลาดชันการไหล 25 30 และ 35 ตามลำดับ จากรูปแบบการทดสอบทั้งหมดจะแบ่งเป็นสองส่วนหลัก ๆ โดยส่วนแรก คือ การทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้และไม้ผสมเศษท่อนไม้ อัตราส่วน  $s/d_{90} = 1.90$  ปริมาณที่ใช้: เม็ดแห้ง 30 kg และเศษท่อนไม้ 0.5 kg พิจารณาอัตราส่วน

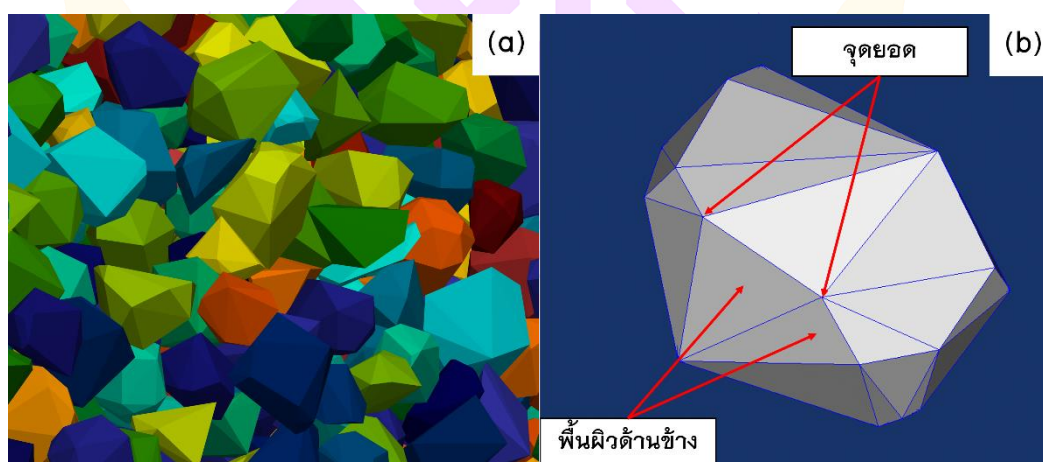
เศษท่อนไม้และเม็ดแห้ง 1:60 ส่วนที่สอง คือ การทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง อัตราส่วน  $s/d_{90} = 0.86$  ในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข ปริมาณที่ใช้ เม็ดแห้ง 30 kg ซึ่งรูปแบบการติดตั้งฝายชะลอน้ำแบบเปิด ฝายช่องปิด และความลาดชันการไหล ทั้งสองส่วนเป็นไปตามตาราง 4 ข้อจำกัดแบบจำลองเชิงตัวเลขไม่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับ การทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง อัตราส่วน  $s/d_{90} = 1.90$  และเศษท่อนไม้ เนื่องจากขั้นตอน การจัดเรียงในแบบจำลองเชิงตัวเลขเกิดความยุ่งยากและใช้เวลาในการคำนวณมากเกินไป การนำเศษท่อนไม้มาผสมยังเป็นข้อจำกัดการบรรจุของกลุ่มวัสดุในการสร้างแบบจำลอง ดังนั้น จึงปรับเปลี่ยนรูปแบบการทดลองโดยใช้เม็ดแห้ง อัตราส่วน  $s/d_{90} = 0.86$  เท่านั้น ในแบบจำลองเชิงตัวเลข

ตาราง 4 รายการทดสอบการไหลของวัสดุเฉพาะเม็ดแห้งและเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้

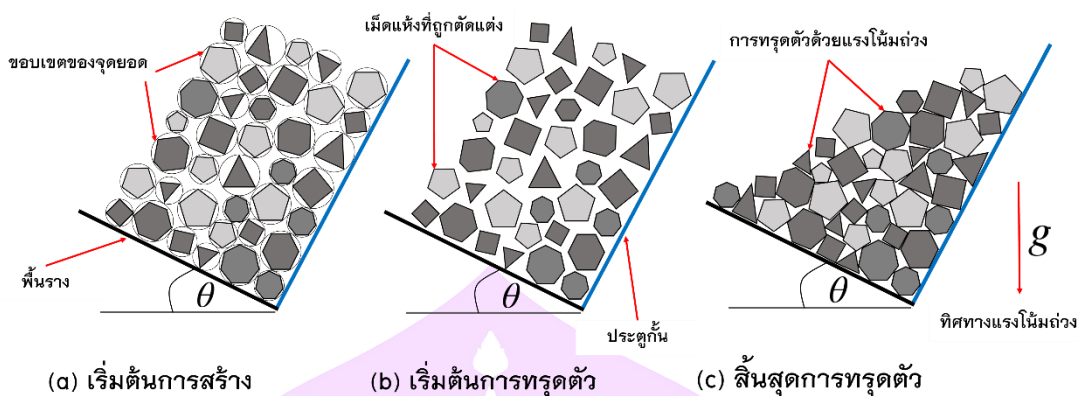
ความลาดชันการไหล, $\theta$ (องศา)	รูปแบบฝายชะลอน้ำ	มุมภายในของฝาย, $\beta$ (องศา)	รหัส การทดสอบ	
25	ฝายช่องปิด	-	H_25	
		แบบเปิดรูปตัววี	80	V80-H_25
			90	V90-H_25
	100		V100-H_25	
	แบบเปิดรูปตัวอัลฟา	80	A80-H_25	
		90	A90-H_25	
		100	A100-H_25	
	30	ฝายช่องปิด	-	H_30
			แบบเปิดรูปตัววี	80
90				V90-H_30
100		V100-H_30		
แบบเปิดรูปตัวอัลฟา		80	A80-H_30	
		90	A90-H_30	
		100	A100-H_30	
35		ฝายช่องปิด	-	H_35
			แบบเปิดรูปตัววี	80
	90			V90-H_35
	100	V100-H_35		
	แบบเปิดรูปตัวอัลฟา	80	A80-H_35	
		90	A90-H_35	
		100	A100-H_35	

## โปรแกรม LMGC90

แบบจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษานี้ใช้โปรแกรม LMGC90 ซึ่งเป็นโปรแกรมเกี่ยวกับ Discrete element method (DEM) LMGC90 สามารถจำลองอนุภาคที่มีรูปทรงหลายด้าน ด้วยวิธี Contact dynamics (CD) ในแบบจำลองเชิงตัวเลข LMGC90 จะสร้างเม็ดที่มีรูปทรงหลายด้าน โดยแต่ละด้านจะไม่เท่ากันและเป็นแบบสุ่มเท่ากับ 16 24 และ 32 ด้าน สำหรับจำนวนจุดยอด 10 14 และ 18 ตามลำดับ ตามลักษณะที่ใกล้เคียงกับกรวด (Azéma, et al., 2009; Azéma, et al., 2012) ภาพ 34 แสดงลักษณะวัสดุเม็ดที่ถูกใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลข: (a) วัสดุเม็ด และ (b) ลักษณะด้านข้างและจุดยอดของวัสดุเม็ด ซึ่งลักษณะพื้นผิวเม็ดหนึ่งใน LMGC90 มีลักษณะผิวเรียบและไม่เกิดการแตกหักระหว่างการชน ถือเป็นเงื่อนไขแตกต่างจากแบบจำลองทางกายภาพ เนื่องจากในการไหลจากสถานการณ์จริงวัสดุเม็ดมีพื้นผิวขรุขระและเกิดการแตกหักระหว่างการชน ภาพ 35 แสดงขั้นตอนการสร้างเม็ดหนึ่งใน LMGC90 ในขอบเขตกล่องสี่เหลี่ยม (Box3D): (a) สร้างเม็ดทรงกลมโดยมีรัศมีเล็กสุด-ใหญ่สุดตามที่กำหนด (b) จากนั้นจะสุ่มจำนวนจุดยอดตามจำนวนด้านของเม็ดแล้วจึงทำการตัดแต่งพร้อมกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้คำนวณในวิธี CD (Binaree, 2021; Sánchez, et al., 2021) ซึ่งในการตัดแต่งเม็ดหนึ่งจะเกิดช่องว่างระหว่างขอบเขตของเม็ด (c) จากนั้นจะมีการหลุดตัวเกิดขึ้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วง โดยเวลาที่ใช้ในการหลุดตัว คือ 2 นาที จนเม็ดหนึ่งชิดติดกันและหยุดการเคลื่อนที่โดยสมบูรณ์แล้วจึงทำการลบประตูกันเพื่อให้เม็ดหนึ่งไหลจากสภาวะหยุดนิ่ง

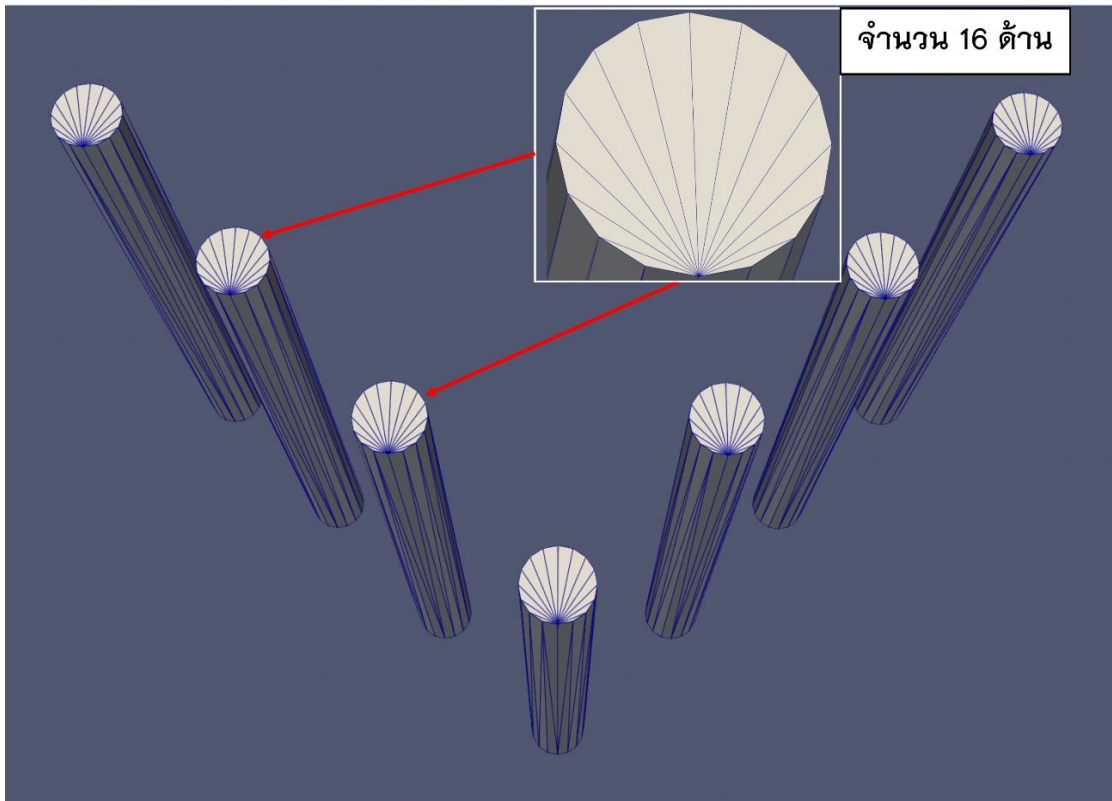


ภาพ 34 วัสดุเม็ดหนึ่ง



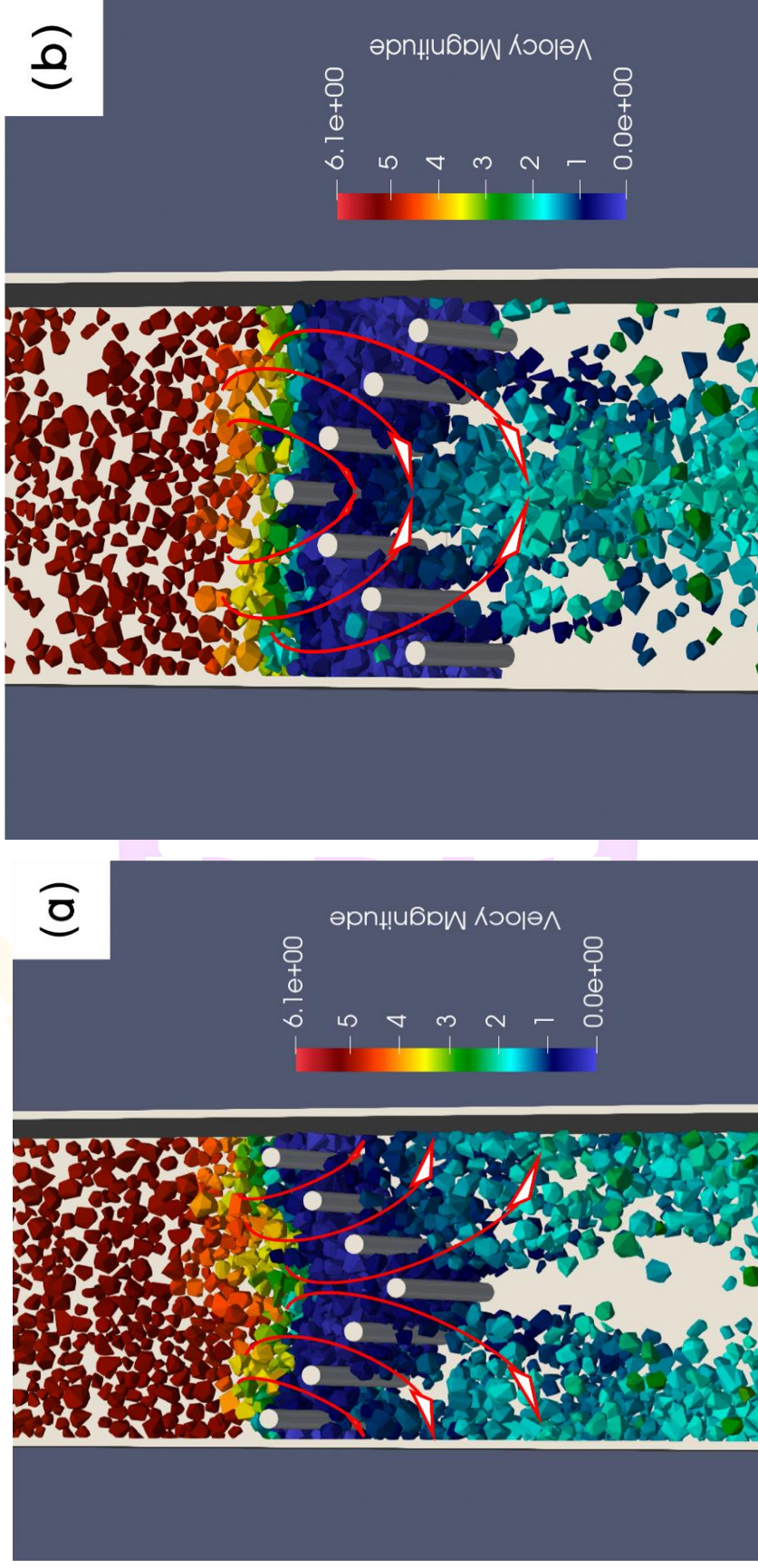
ภาพ 35 รูปแบบการเตรียมตัวอย่างเม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลข

ฝายชะลอน้ำแบบเปิดที่ถูกสร้างโดย LMGC90 จากวิธี CD ไม่สามารถจำลองการสัมผัสระหว่างอนุภาครูปทรงหลายด้าน (Polyhedron) กับรูปทรงกระบอก (Cylinder) ในการศึกษาครั้งนี้ จึงใช้วิธีสร้างรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) จำนวน 16 ด้าน แต่ละด้านจะมีขนาดเท่ากัน (Regular) แล้วดึงออกเป็นแท่งทรงกระบอก (Extrude) ตามความสูงของฝายชะลอน้ำแบบเปิดในห้องปฏิบัติการ แสดงดังภาพ 36 โดยที่แรงสัมผัสและแรงตั้งฉากจะเป็นไปตามภาพ 18 กล่าวคือ เมื่อเม็ดแห้งสัมผัสกับฝายชะลอน้ำแบบเปิดจะเป็นไปตามเงื่อนไขระหว่างการสัมผัสของอนุภาครูปทรงหลายด้าน เมื่อเม็ดแห้งไหลผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิดแสดงดังภาพ 37(a) แสดงลักษณะการไหลผ่านฝายรูปแบบตัววี และภาพ 37(b) แสดงลักษณะการไหลผ่านฝายรูปแบบตัวอัลฟา จากลักษณะเฉียดสีของเม็ดแห้งแสดงความเร็วที่แตกต่างกันในการไหล ซึ่งสามารถอธิบายทิศทางการไหลเมื่อผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด จะเห็นได้ว่าจากสมมุติฐานการสร้างฝายโดยใช้รูปทรงหลายด้านใน LMGC90 สอดคล้องกับการศึกษาของ Piton and Recking (2016a; 2016b)



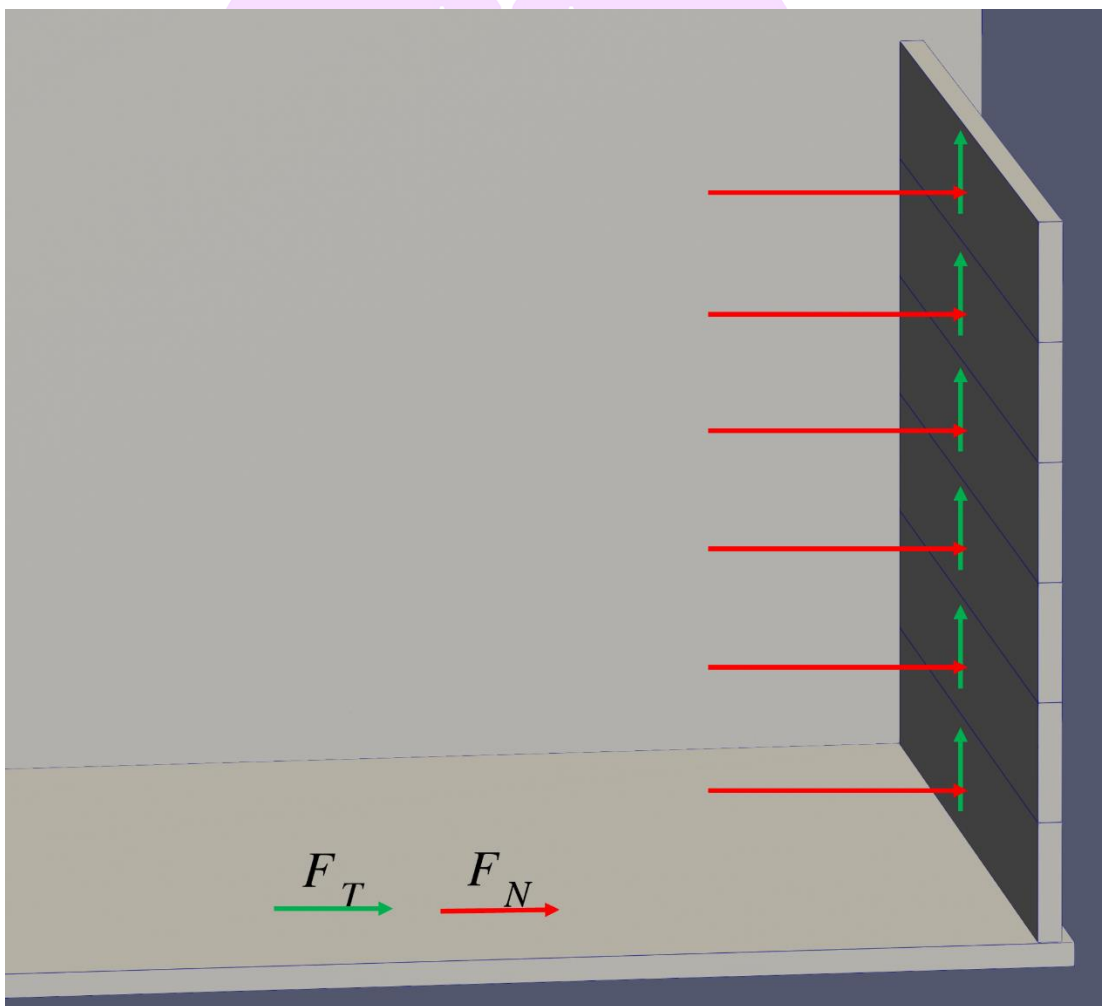
ภาพ 36 รูปแบบการสร้างฝายชะลอน้ำแบบเปิดในแบบจำลองเชิงตัวเลข





ภาพ 37 พฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดผ่านฝายรูปแบบเสาเข็ม

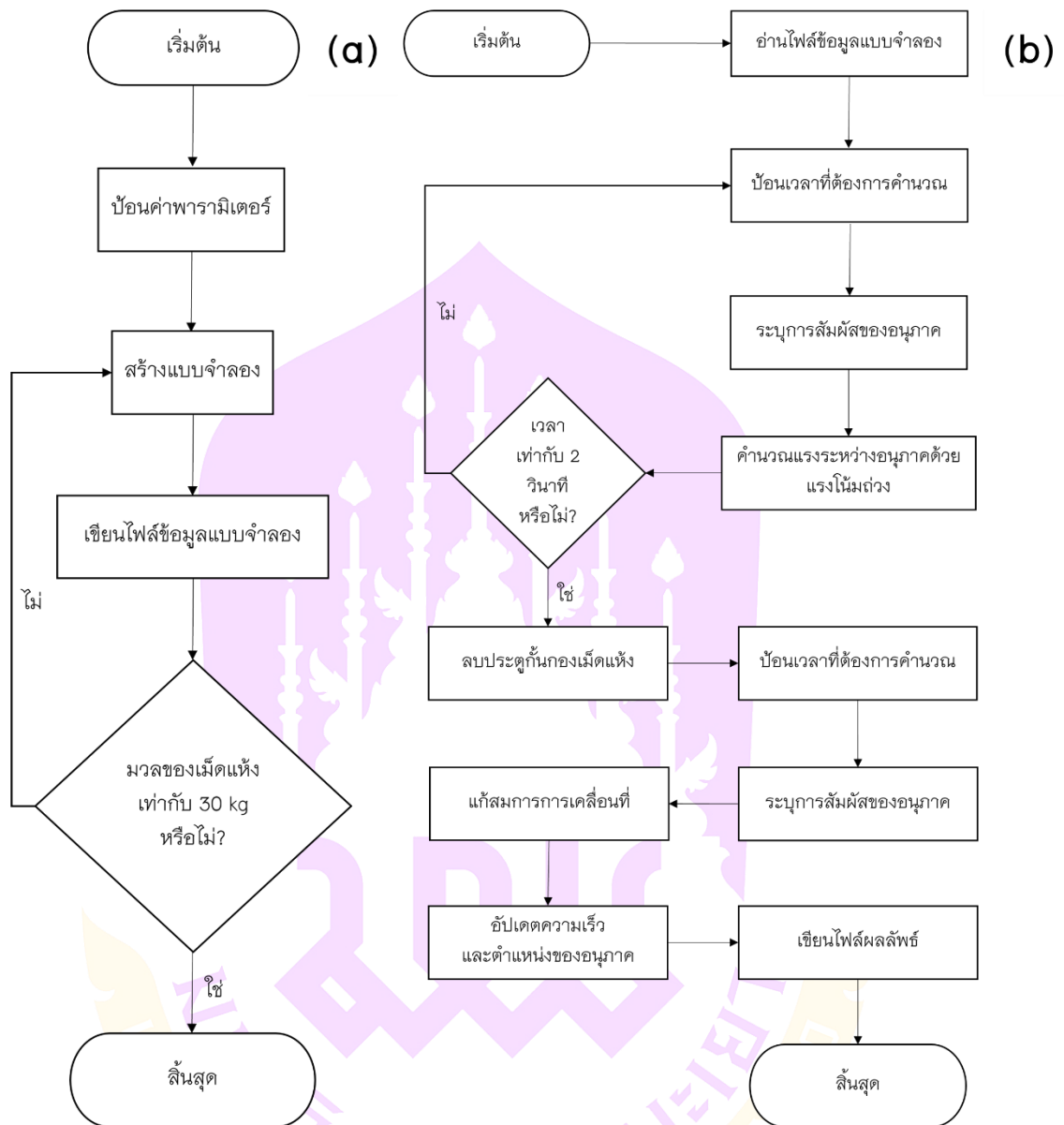
ฝายช่องปิดที่ถูกสร้างโดย LMGC90 มีลักษณะแยกเป็นส่วนตามการรับแรงของไหลเซลล์ในห้องปฏิบัติการ มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียบ (rigidPlan) โดยแผ่นรับแรงในแบบจำลองเชิงตัวเลขจะไม่มี การเสียรูปเนื่องจากการกระแทก (rigidBody) ปริมาณแรงที่แสดงเป็นปริมาณแรงทั้งหมดของเม็ดแห่งที่กระทำบนแผ่นรับแรงของฝายช่องปิด ซึ่งสามารถแสดงปริมาณแรงสัมผัสและแรงตั้งฉากดังแสดงในภาพ 38 ทิศทางแรงสัมผัส ( $F_T$ ) และแรงตั้งฉาก ( $F_N$ ) อย่างไรก็ตามในแบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถแสดงผลลัพธ์ได้หลายตัวแปร แต่ในการศึกษานี้ จะแสดงผลเฉพาะแรงตั้งฉากเพื่อใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพ



ภาพ 38 พฤติกรรมแรงกระแทกจากการไหลของวัสดุเม็ด

ภาพ 39 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานและการคำนวณของ LMGC90 โดยจะแยกเป็นสองส่วนหลัก ๆ ภาพ 39(a) แสดงส่วนแรก โดยขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและกำหนดเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการคำนวณ โดยจะเริ่มจากการป้อนค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของวัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง เมื่อเริ่มกระบวนการสร้างเม็ดแห้งจนครบตามจำนวนที่กำหนดแล้ว จึงสร้างฝายชะลอน้ำแบบเปิด รางน้ำ ฝายช่องปิด และประตูกัน ตามลำดับ จนโปรแกรมสร้างทุกองค์ประกอบจึงจะเริ่มเขียนไฟล์ข้อมูล เพื่อใช้คำนวณมวลของเม็ดแห้ง เนื่องจากการสร้างขนาดรูปทรงหลายด้านแบบสุ่ม จึงยากต่อการกำหนดมวลเริ่มต้น เมื่อมวลของเม็ดแห้งไม่เท่ากับ 30 kg ที่กำหนดจะสร้างใหม่จนกว่าจะได้มวล 30 kg จึงจะหยุดกระบวนการ ภาพ 39(b) แสดงส่วนที่สอง โดยขั้นตอนการคำนวณที่ได้จากรับค่าตัวแปรและเงื่อนไขเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข จากนั้นโปรแกรมจะป้อนความถี่เวลาในการคำนวณ และจำนวนชุดข้อมูลที่ต้องการ จากนั้นจะคำนวณการตกอิสระของเม็ดแห้งที่ถูกปิดกั้นด้วยประตูเป็นเวลา 2 วินาที สมการความเร็ว เวลา แรง และพลังงานจลน์จะถูกคำนวณจนแน่ใจว่าเม็ดแห้งไม่มีการเคลื่อนที่ แล้วลบประตูกันออก หลังจากขั้นตอนนี้โปรแกรมจะกำหนดความถี่การคำนวณอีกครั้ง เมื่อเม็ดแห้งไหลลงตามพื้นรางโดยปราศจากแรงภายนอกกระทำ (ยกเว้นแรงโน้มถ่วง) โปรแกรมจะคำนวณแรงระหว่างการสัมผัสและคำนวณสมการการหมุนของเม็ดแห้ง เพื่อใช้อัปเดตความเร็วและตำแหน่งของเม็ดแห้ง เมื่อการคำนวณสิ้นสุด โปรแกรมจะเขียนผลลัพธ์แล้วสิ้นสุดการทำงาน





ภาพ 39 แผนผังการคำนวณของ LMG90

### บทสรุป

บทนี้อธิบายถึงการศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด โดยทดสอบการไหลในรางน้ำ ขนาดมิติของอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการได้จากการทบทวนวรรณกรรมในส่วนที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในการศึกษานี้มุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพของฝายชะลอน้ำแบบเปิดและพฤติกรรมแรงกระแทกจากการไหลของวัสดุแต่ละรูปแบบ วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เม็ดแห้งและเศษท่อนไม้

เม็ดแห้งที่ใช้ในการศึกษานี้มีสองขนาด ได้แก่  $d_{90} = 15.83 \text{ mm}$  และ  $34.94 \text{ mm}$  สำหรับการทดลองเปรียบเทียบการผสมเศษท่อนไม้ และเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลขตามลำดับ การเตรียมตัวอย่างก่อนปล่อยจะเตรียมเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมทุกรายการการทดลอง อย่างไรก็ตามการทดลองมีโอกาสผิดพลาดได้หลายปัจจัย ดังนั้นการทดสอบแต่ละรายการเป็นค่าเฉลี่ยจากการเลือกผลที่ใกล้เคียงกัน 3 ตัวอย่าง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่เชื่อถือได้

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความหนาแน่นจำเพาะ ความหนาแน่นรวม สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ขนาดคละ เป็นต้น การทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนหลังการชนของวัสดุเม็ดยังเป็นข้อจำกัดในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ซึ่งค่าตัวแปรนี้จำเป็นต้องป้อนในแบบจำลองเชิงตัวเลขในการคำนวณความเร็วหลังการชน การศึกษานี้แก้ปัญหาโดยใช้รูปแบบการคำนวณในแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ไม่ต้องป้อนค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว

แบบจำลองเชิงตัวเลขยังพบข้อจำกัดในการจำลองวัสดุเม็ดและโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก อย่างไรก็ตามผู้วิจัยใช้วิธีสร้างรูปหลายเหลี่ยมแบบสองมิติ แล้วดึงให้สูงขึ้นในแนวตั้งฉากเป็นแท่งสามมิติ ลักษณะพื้นผิวของเสาเข็มในแบบจำลองเชิงตัวเลขไม่ได้โค้งตามลักษณะเสาเข็มในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นลักษณะรูปทรง 16 ด้าน ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบการไหลผ่านของวัสดุเม็ด เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมเบื้องต้นกับการศึกษาที่ผ่านมา แบบจำลองเชิงตัวเลข สามารถแสดงผลการศึกษาได้หลายตัวแปร แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงผลที่ใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพ และผลที่เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดเท่านั้น

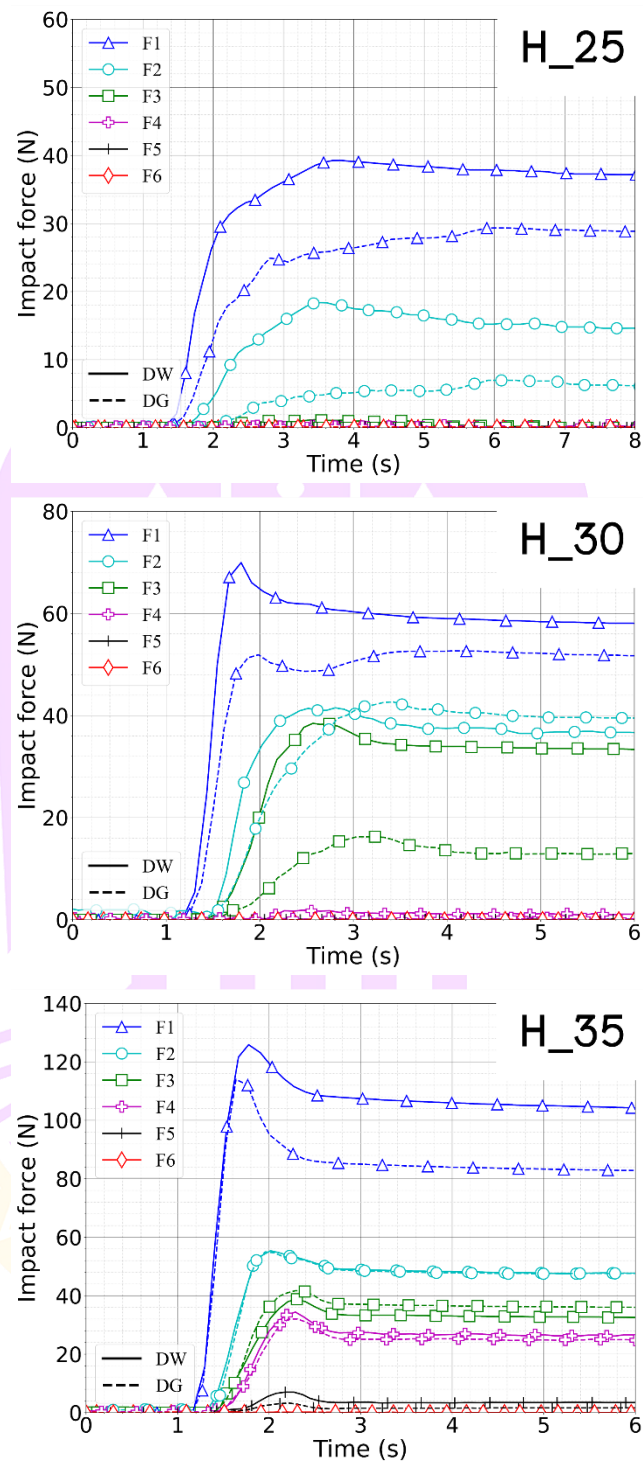
## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

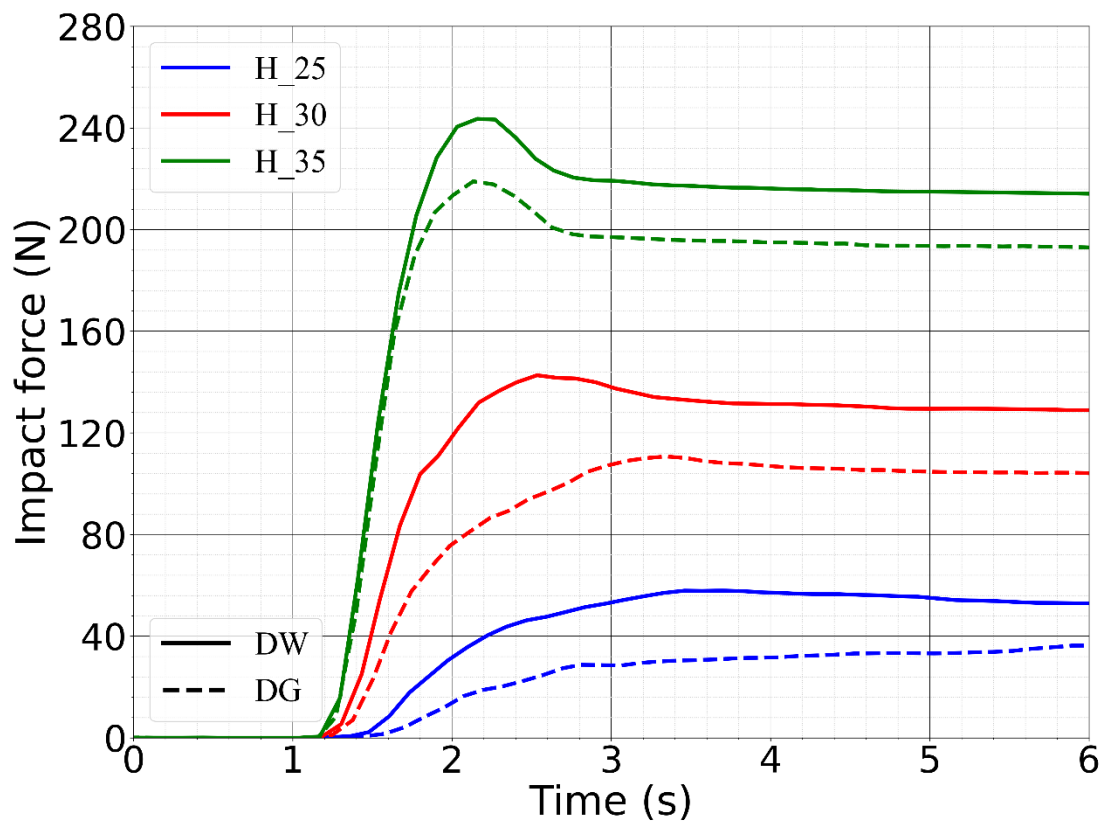
จากการทดลองเฉพาะแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการจะถูกแยกเป็นสองส่วน คือ 1) การทดลองการไหลของเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ และ 2) การทดลองเฉพาะการไหลของเม็ดแห้ง ( $s/d_{90} = 1.90$ ) เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการไหลของวัสดุเมื่อผ่านชะลอน้ำแบบเปิดเชิงปริมาณในด้าน การดักจับและปริมาณแรงกระแทกที่ถูกวัดโดยฝ่ายช่องปิด ซึ่งแรงกระแทกที่แสดงของการทดลองฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดแต่ละรูปแบบ สามารถพิจารณาการดูดซับแรงของฝ่ายรูปแบบนั้น เพื่อวิเคราะห์อัตราส่วนการดูดซับแรงเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมและไม้ผสมเศษท่อนไม้และวิเคราะห์การดูดซับแรงตามรูปแบบฝ่าย ซึ่งรูปแบบฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดถูกใช้ 6 รูปแบบ ดังตาราง 4 และการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพในแง่ของคุณลักษณะการไหลของวัสดุ ถูกแสดงโดยภาพเหตุการณ์จากกล้องถ่ายภาพโดยวิเคราะห์คุณลักษณะการไหลของวัสดุเมื่อผ่านฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดรูปแบบต่าง ๆ ในส่วนแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ ที่ถูกเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้กรวดแม่น้ำและเม็ดแห้งรูปทรงหลายด้าน สำหรับแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข ตามลำดับ ( $s/d_{90} = 0.86$ ) โดยสมมุติฐานถูกกำหนดให้ใกล้เคียงกันมากที่สุดระหว่างแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข ผลการศึกษาที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ ปริมาณแรงกระแทกที่ถูกวัดโดยฝ่ายช่องปิด ประสิทธิภาพการดักจับและการดูดซับแรงของฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิด การทดลองในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองเชิงตัวเลขแต่ละรายการการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยจากผลการทดลอง 3 ตัวอย่างที่ใกล้เคียงกัน เพื่อหาค่าเฉลี่ยของผลการทดลองแต่ละรายการและเพื่อตรวจสอบความถูกต้องจากผลการทดลอง ดังนั้นในบทนี้มีบางส่วนแสดงค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ในส่วนแบบจำลองเชิงตัวเลข ปริมาณแรงกระแทกแบบพลวัตจากการไหลของวัสดุมีความผันผวนสูง ดังนั้นการแสดงผลค่าแบบเส้นจำเป็นต้องใช้ตัวกรองข้อมูล (Filter) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการศึกษากับแบบจำลองทางกายภาพได้ชัดเจน และเพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข

### การทดลองการไหลของเม็ดแห้งผสมและไม่ผสมเศษท่อนไม้ในห้องปฏิบัติการ

จากการทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมและไม่ผสมเศษท่อนไม้ในรางน้ำ โดยขนาดเม็ดแห้ง  $d_{90} = 15.83 \text{ mm}$  ผลการตรวจสอบวัดแรงกระแทกตามหมายเลขของไหลด์เซลล์ F1 ถึง F6 ดังแสดงในภาพ 26 และมีการตรวจสอบปริมาณการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปแบบต่าง ๆ ผลการทดลองที่ได้แสดงเป็นแผนภูมิ และภาพถ่ายในห้องปฏิบัติการ ภาพ 40 แสดงปริมาณแรงกระแทก เนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ (DW) และไม่ผสมเศษท่อนไม้ (DG) ไหลกระแทกกับฝายช่องปิด: H\_25 H\_30 และ H\_35 เมื่อความลาดชันการไหล 25 30 และ 35 องศา ตามลำดับ ปริมาณแรงกระแทกสูงสุดถูกวัดด้วยไหลด์เซลล์หมายเลข 1 (F1) ซึ่งปริมาณจะลดลงตามความสูงของฝายช่องปิด เมื่อความลาดชันการไหล 30 หรือ 35 องศา แรงกระแทกจากการไหลของวัสดุ DW และ DG มีลักษณะสูงชันในช่วงหนึ่ง และเมื่อเวลาผ่านไปแรงกระแทกจะลดลงจนคงที่ พิจารณาการทดลอง โดยที่ปริมาณแรงกระแทกทั้งหมด สามารถคำนวณดังสมการ 11 ภาพ 41 แสดงปริมาณผลรวมแรงกระแทก จะเห็นได้ว่าปริมาณแรงกระแทกทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลาดชันที่มากขึ้นและการไหลของวัสดุ DW มากกว่า DG ทุกความลาดชันการไหล ภาพ 42 แสดงความสัมพันธ์ของความชันเชิงเส้นของปริมาณรวมกระแทกสูงสุด เมื่อวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้อัตราส่วน 1:60 โดยน้ำหนักทำให้แรงกระแทกสูงสุดเพิ่มขึ้น 1.65% เนื่องจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น 1.67% เศษท่อนไม้ทำให้กระแสการไหลของกลุ่มวัสดุของสูงมากกว่าการไหลเฉพาะเม็ดแห้ง และกระแทกกับสิ่งกีดขวางในเวลาใกล้เคียงกันมากกว่าการไหลเฉพาะเม็ดแห้ง ซึ่งเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้แรงกระแทกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เศษท่อนไม้ยังเป็นตัวส่งถ่ายแรงกระแทกของวัสดุเม็ดแห้งต่อสิ่งกีดขวาง จากผลรวมของแรงกระแทกสูงสุด (ภาพ 42) เมื่อไม่ได้ติดตั้งฝายชะลอน้ำแบบเปิดในการทดลองจะถูกใช้เป็นผลอ้างอิงในการคำนวณอัตราส่วนการดูดซับแรงตามสมการ 12 ของฝายชะลอน้ำแบบเปิดเมื่อวัสดุไหลผ่าน โดยพิจารณาได้จากผลรวมของแรงสูงสุดเมื่อวัสดุไหลผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิดแต่ละรูปแบบ ซึ่งถูกอธิบายในย่อหน้าถัดไป

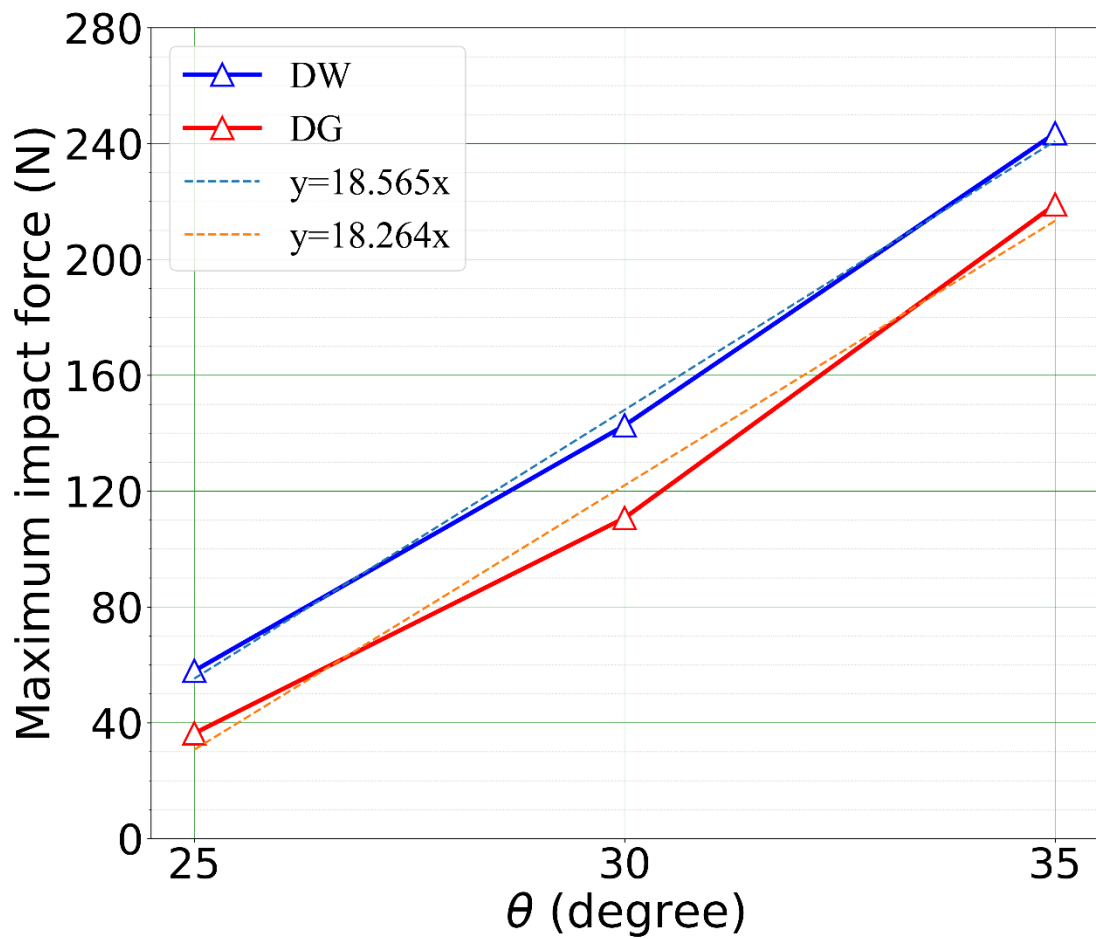


ภาพ 40 แรงกระแทกย่อยกับเวลาที่ถูกวัดโดยฝ่ายช่องปิด



ภาพ 41 ผลรวมแรงกระแทกกับเวลา



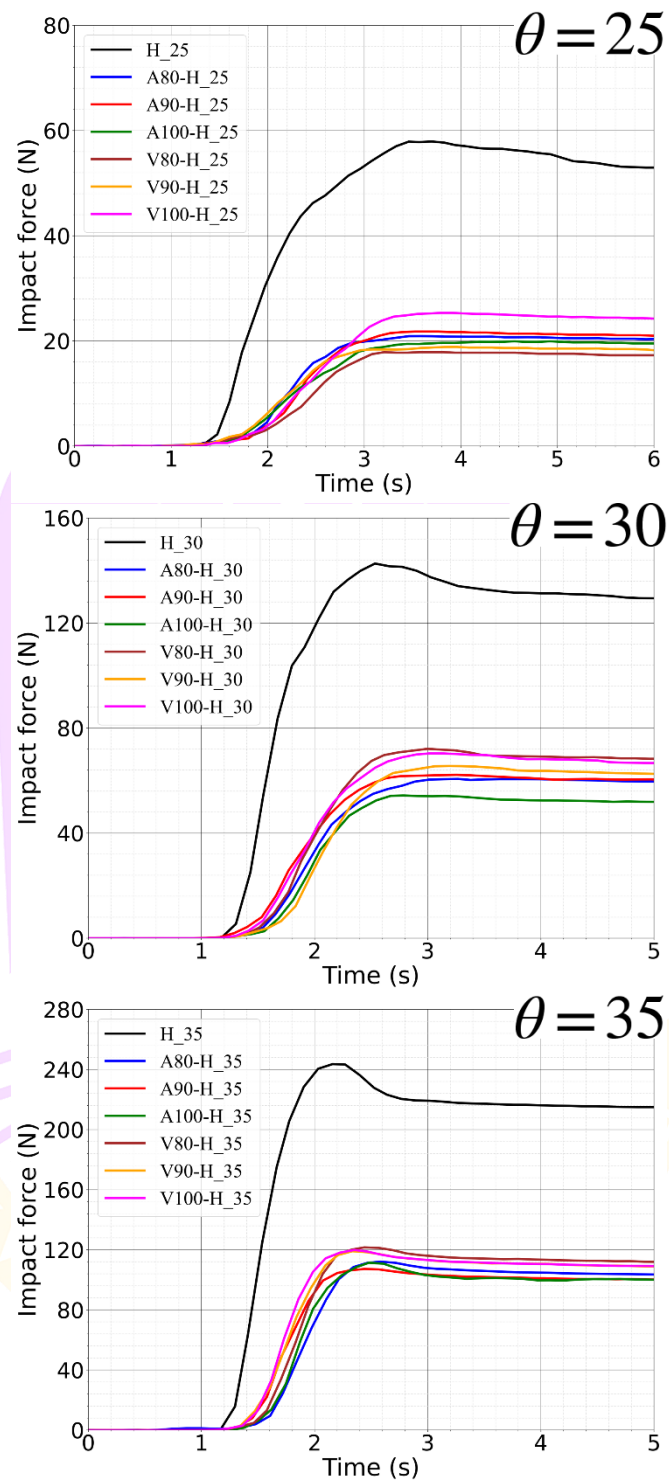


ภาพ 42 ปริมาณแรงกระแทกสูงสุดกับความลาดชันการไหล

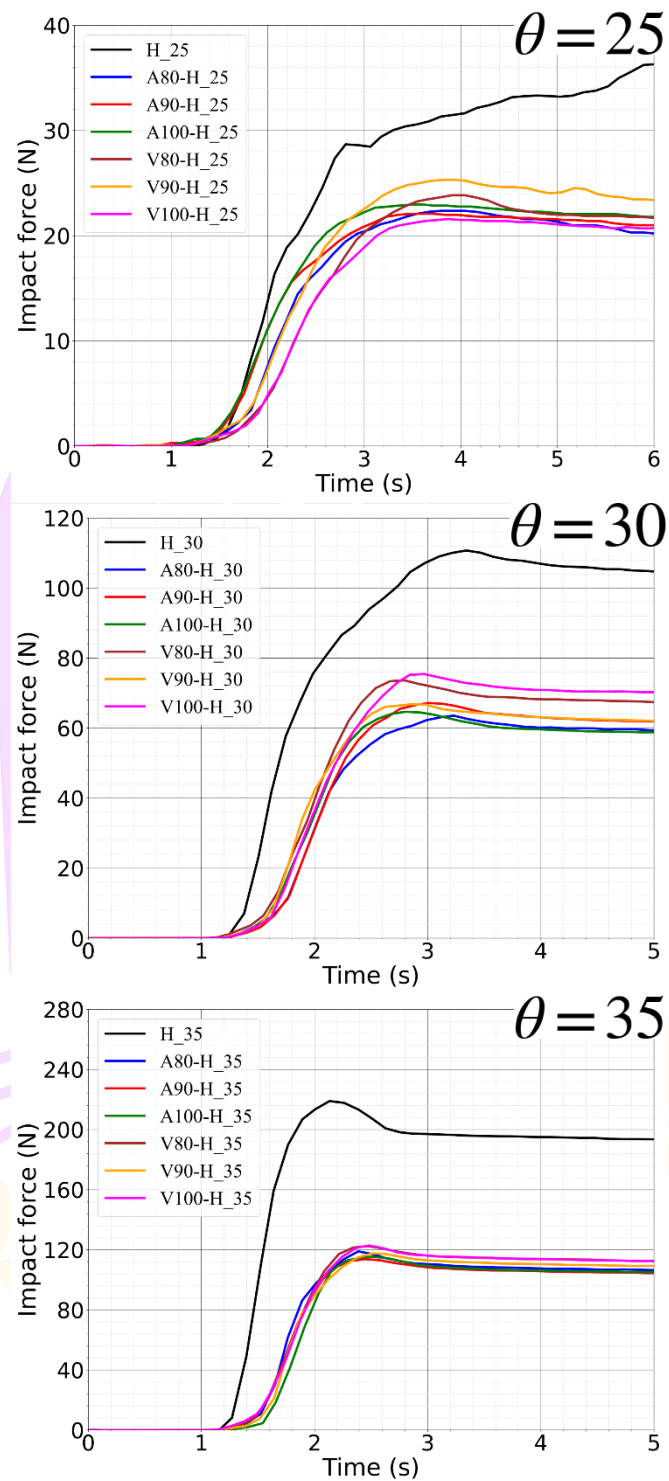
พิจารณาผลรวมแรงกระแทกจากภาพ 43 และ 44 ของการทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้และไม้ผสมเศษท่อนไม้ ตามลำดับ โดยสมการ 11 แสดงให้เห็นว่าการทดลองเมื่อมีฝ่ายชะลอน้ำรูปแบบต่าง ๆ ติดตั้งทำให้แรงกระแทกลดลงอย่างชัดเจนสังเกตได้จากเส้นสีดำของการทดลอง H\_25 H\_30 และ H\_35 สำหรับความลาดชันการไหล 25 30 และ 35 องศา ตามลำดับ จากการทดสอบการไหลเมื่อไม่มีฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิด และเส้นสีอื่น ๆ ในแผนภูมิ จะเห็นได้ว่าผลรวมของแรงกระแทกลดลงแตกต่างกันไปตามลักษณะของฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิด ซึ่งปริมาณแรงสูงสุดของการทดลองแต่ละรูปแบบตามตาราง 4 ณ ความลาดชันการไหลเดียวกัน จากสมการ 12 อัตราส่วนการดูดซับแรงถูกแสดงดังภาพ 45 สำหรับการทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ (DW\_25 DW\_30 DW\_35) และเม็ดแห้งไม้ผสมเศษท่อนไม้ (DG\_25 DG\_30 DG\_35) เมื่อความลาดชันการไหล 25 30 และ 35 องศา ตามลำดับ จากการทดลองแต่ละรายการถูกเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Test1 Test2 Test3) จากภาพ

แสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนการดูดซับ (Average) จะเห็นได้ว่า ฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดสามารถดูดซับแรงเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ได้มากกว่าจากการไหลวัสดุเม็ดแห้งไม้ผสมเศษท่อนไม้ โดยปริมาณการดูดซับแรงของฝ่ายถูกเฉลี่ยเมื่อความลาดชันการไหลและวัสดุการทดลองเดียวกัน (เส้นประ) แสดงดังภาพ 46 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนการดูดซับแรงของฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดลดลง เมื่อความลาดชันการไหลเพิ่มขึ้นเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ ( $R_{DW}$ ) มีค่า 52.70–63.98% ในทางตรงกันข้าม อัตราส่วนการดูดซับแรงของฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งไม้ผสมเศษท่อนไม้ ( $R_{DG}$ ) โดยมีค่า 37.98–46.08% เมื่อพิจารณาการอัตราส่วนการดูดซับจากการทดลอง DW และ DG พบว่า ช่วงความแตกต่างระหว่างการดูดซับแรงของฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดลดลงตามความลาดชันการไหลที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเศษท่อนไม้เป็นตัวแปรที่ทำให้การดูดซับแรงของฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดลดลงตามความลาดชันการไหลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มเมื่อความลาดชันการไหลมากกว่า 35 องศา การดูดซับแรงของฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดอาจดูดซับแรงจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ได้น้อยกว่าวัสดุเม็ดแห้งไม้ผสมเศษท่อนไม้

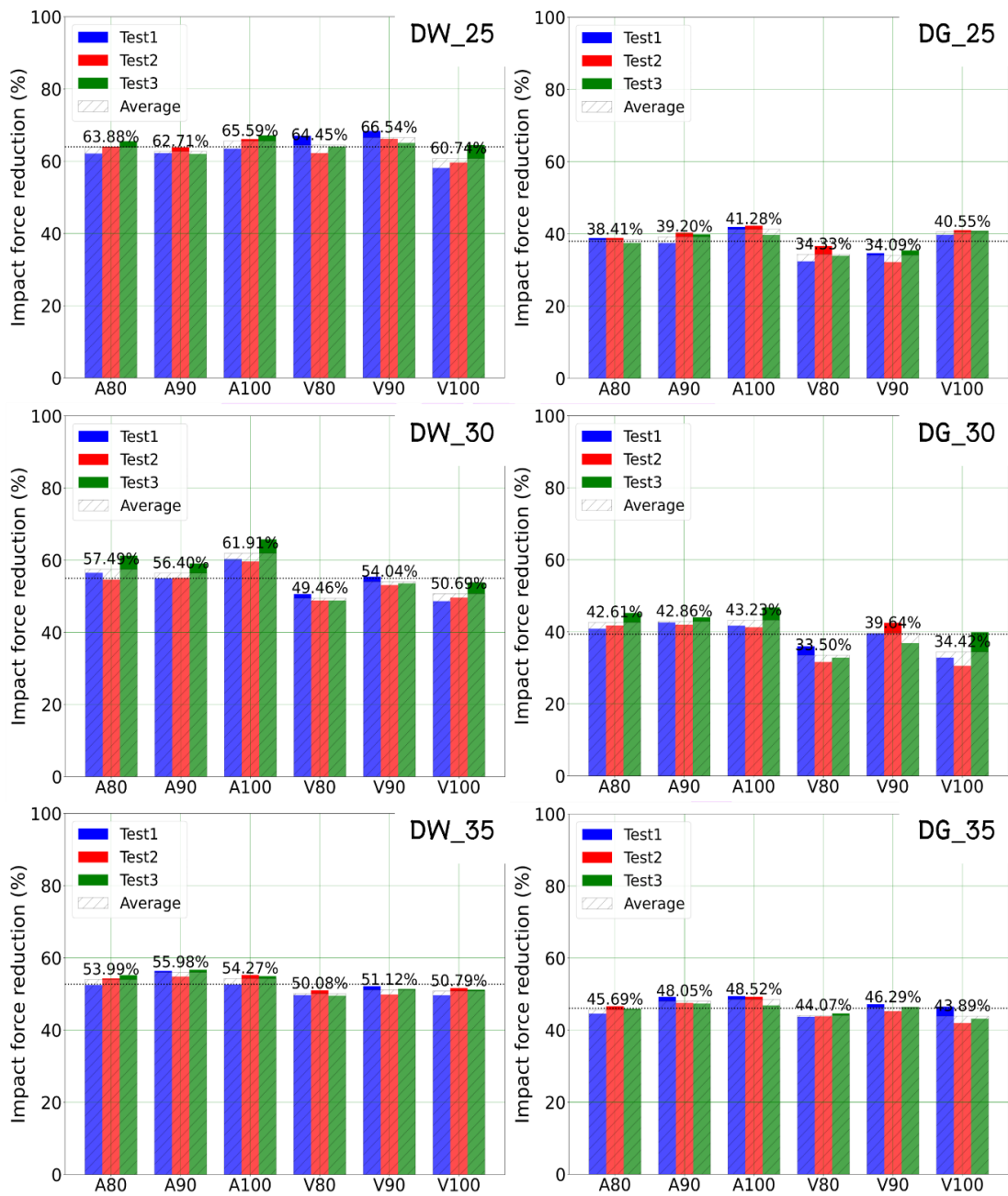




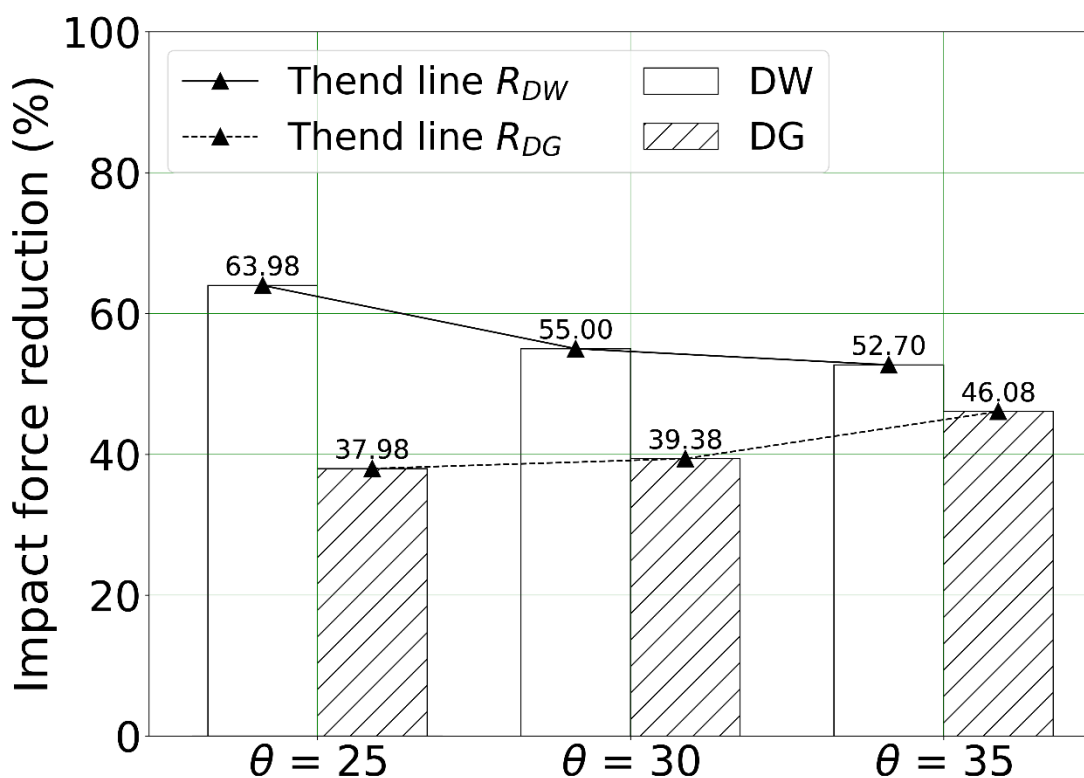
ภาพ 43 ผลรวมแรงกระแทกกับเวลาจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้



ภาพ 44 ผลรวมแรงกระแทกกับเวลาจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้

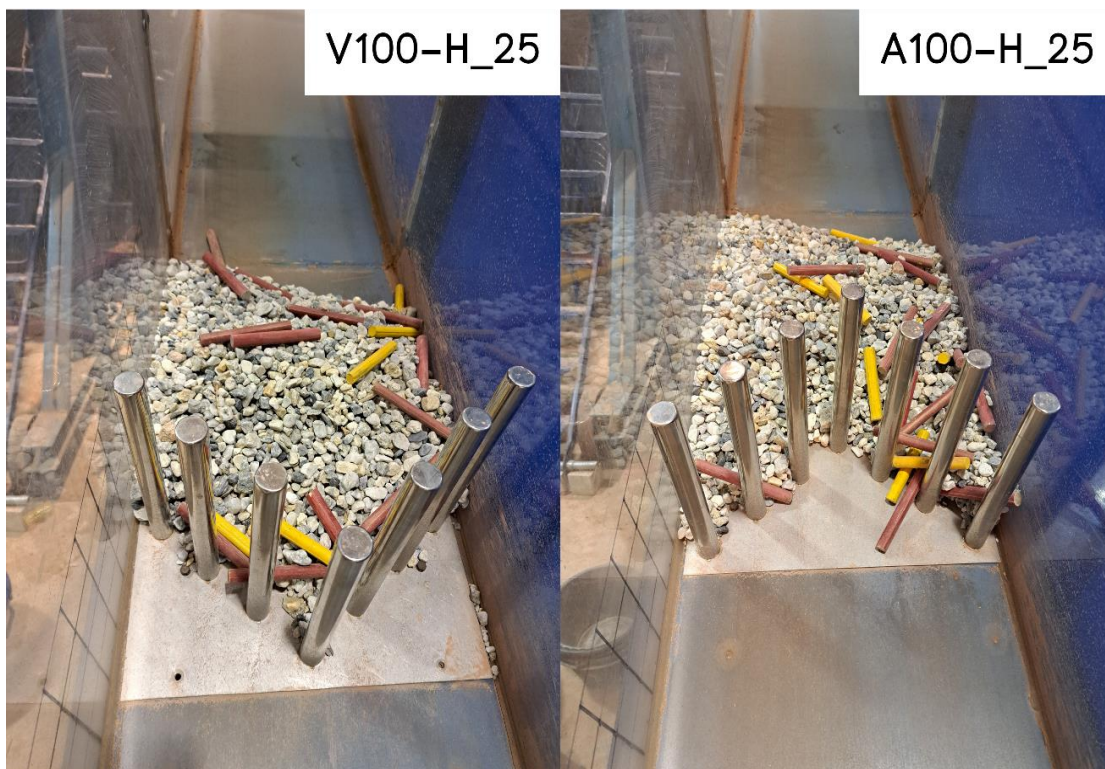


ภาพ 45 อัตราส่วนการดูดซับแรงของฝ่ายชะลอน้ำแบบเปิดของการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

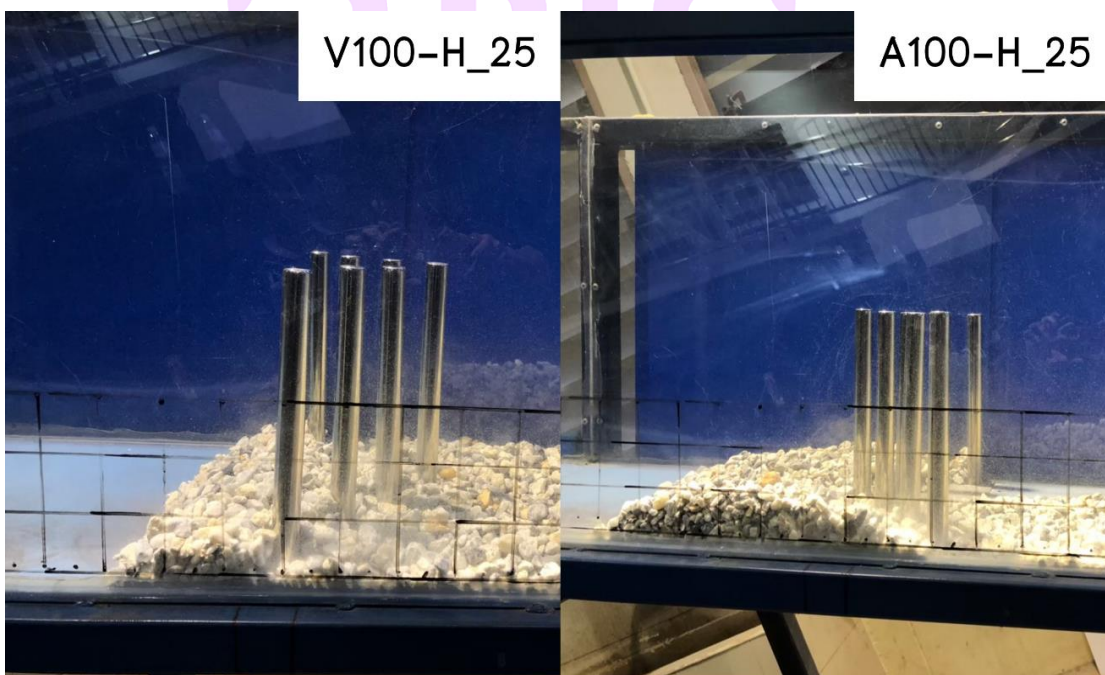


ภาพ 46 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการดูดซับแรงตามความลาดชันการไหลต่าง ๆ

ลักษณะการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดแตกต่างกันไปตามรูปแบบฝายและวัสดุที่ไหลผ่าน จากภาพ 47 แสดงการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปตัววี (V100-H\_25) และรูปตัวอัลฟา (A100-H\_25) ณ ความลาดชันการไหล 25 องศา ในการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ จะเห็นได้ว่า เศษท่อนไม้เป็นตัวปิดกั้นการไหลผ่านของวัสดุเม็ดแห้งทำให้วัสดุเม็ดแห้งถูกดักจับโดยทันที ซึ่งแตกต่างจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้ จากภาพ 48 จะเห็นได้ว่า วัสดุเม็ดแห้งเมื่อไหลผ่านฝายแล้วจะไม่หยุดทันที เมื่อเวลาผ่านไปเม็ดแห้งบางส่วนจะหลุดจากการดักจับของฝายแล้วไหลลงมาตามความชันของพื้นราง ปริมาณวัสดุที่ถูกดักจับด้วยฝายชะลอน้ำแบบเปิดถูกใช้คำนวณประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดตามสมการ 13 โดยพิจารณาตามปริมาตรของวัสดุ

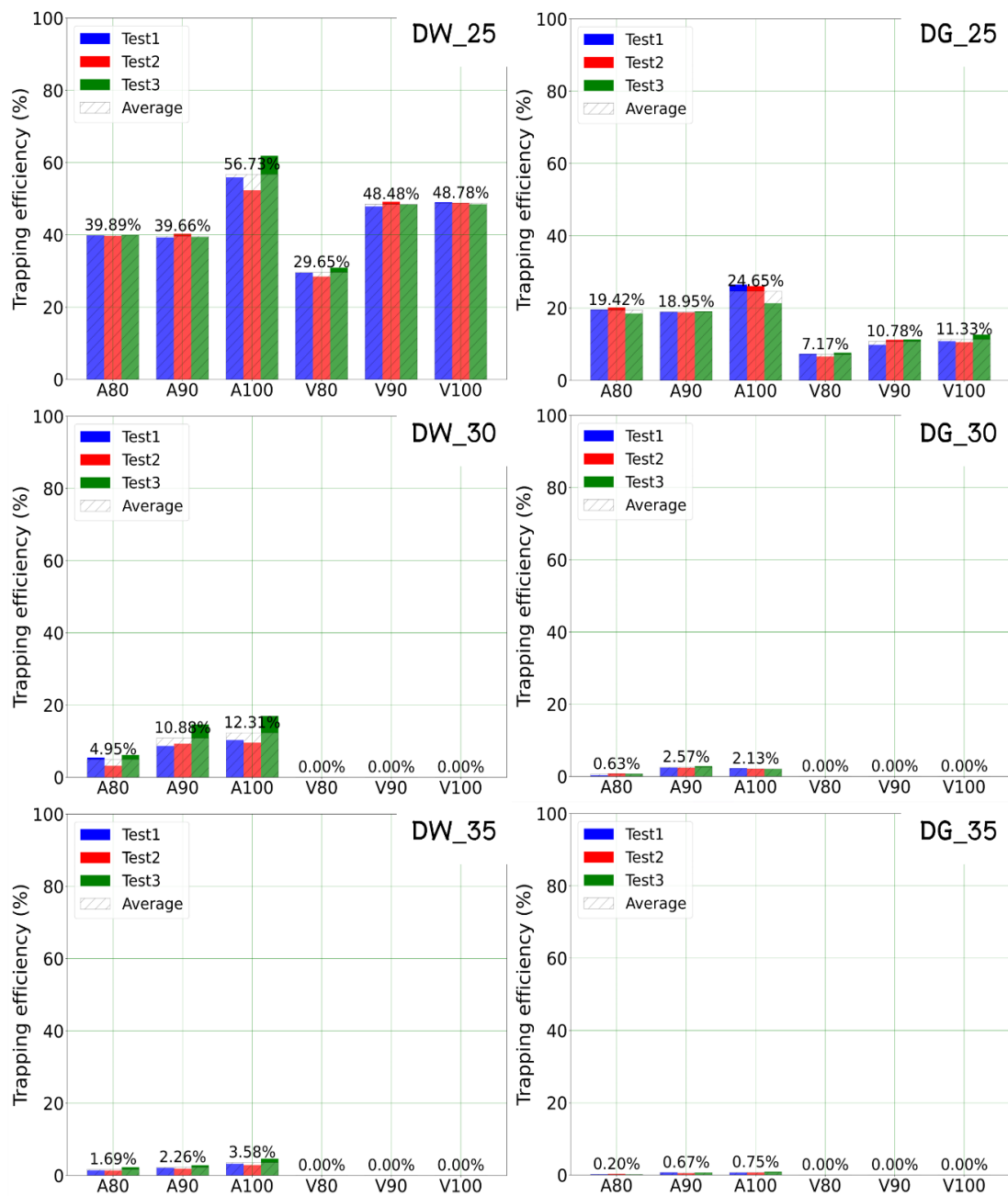


ภาพ 47 การดักจับเม็ดแข็งผสมเศษท่อนไม้ของฝายชะลอน้ำแบบเปิด

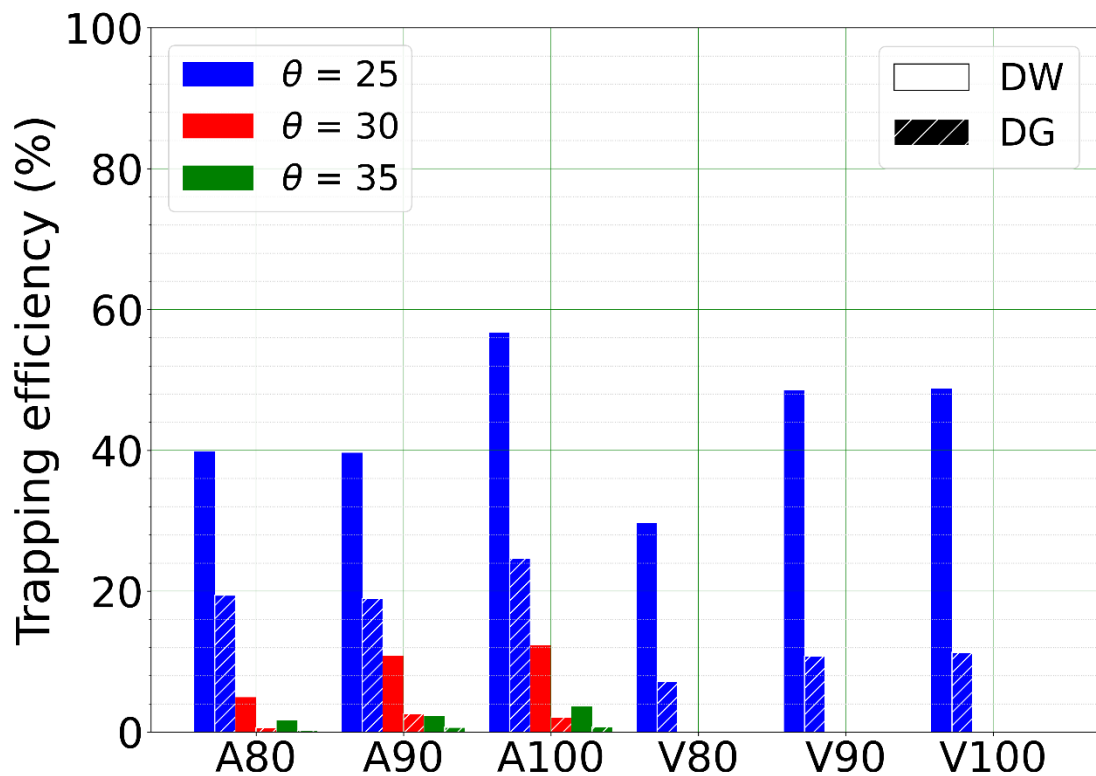


ภาพ 48 การดักจับเม็ดแข็งไม่ผสมเศษท่อนไม้ของฝายชะลอน้ำแบบเปิด

จากภาพ 49 แสดงประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปแบบต่าง ๆ ตามสมการ 13 จากการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง (Test1 Test2 Test3) จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดแต่ละรูปแบบสามารถดักจับวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ (DW) ได้ดีกว่าวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้ (DG) และลดลงตามความลาดชันการไหลที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณประสิทธิภาพการดักจับจากภาพ 49 ถูกเฉลี่ยเมื่อเป็นฝายรูปแบบและมุมภายในเดียวกัน และถูกสรุปในภาพ 50 จากประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิด พบว่า ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปแบบ A80 และ A90 มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการดักจับวัสดุเม็ดแห้งผสมและไม่ผสมเศษท่อนไม้ (DW และ DG) ณ ความลาดชันการไหล 25 องศา จากการเฉลี่ยกันเมื่อความลาดชันการไหล 25 องศา พบว่า ฝายรูปแบบตัวอัลฟา และตัววี มีประสิทธิภาพดักจับที่ใกล้เคียงกัน ในการดักจับวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ แต่ในกรณีการดักจับวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้ ฝายรูปตัวอัลฟามีประสิทธิภาพการดักจับมากกว่าฝายรูปตัววี โดยฝาย A100 มีประสิทธิภาพการดักจับมากที่สุดในการดักจับวัสดุ ทั้ง 2 ตัวอย่าง ในทางตรงกันข้าม เมื่อความลาดชันการไหล 30 และ 35 องศา ฝายตัววีทั้งหมด (V80 V90 V100) ไม่สามารถดักจับวัสดุทั้ง 2 ตัวอย่างนี้ แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วน  $s/d_{90} = 1.90$  ไม่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ฝายรูปตัววีในกรณีความลาดชันการไหลมากกว่า 25 องศา จากลักษณะเฉพาะของตัวฝายรูปตัวอัลฟาที่ดักจับวัสดุ เนื่องจากช่องว่างตามแนวเสาเข็มในแนวทแยงด้านหน้าฝายจะช่วยควบคุมและดักจับวัสดุได้ค่อนข้างดี โดยการเบี่ยงเส้นทางไหลจากศูนย์กลางของวัสดุเข้าสู่มุมแหลมด้านข้างของตัวฝาย ซึ่งต่างจากฝายรูปแบบตัววี กล่าวคือ ฝายรูปตัววีจะเบี่ยงเส้นทางจากขอบของกระแสการไหลให้เข้าสู่จุดศูนย์กลางของฝายทำให้กระแสการไหลมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นและเมื่อการไหลมีความรุนแรงทำให้วัสดุไหลผ่านฝายได้ง่ายกว่าฝายรูปตัวอัลฟา



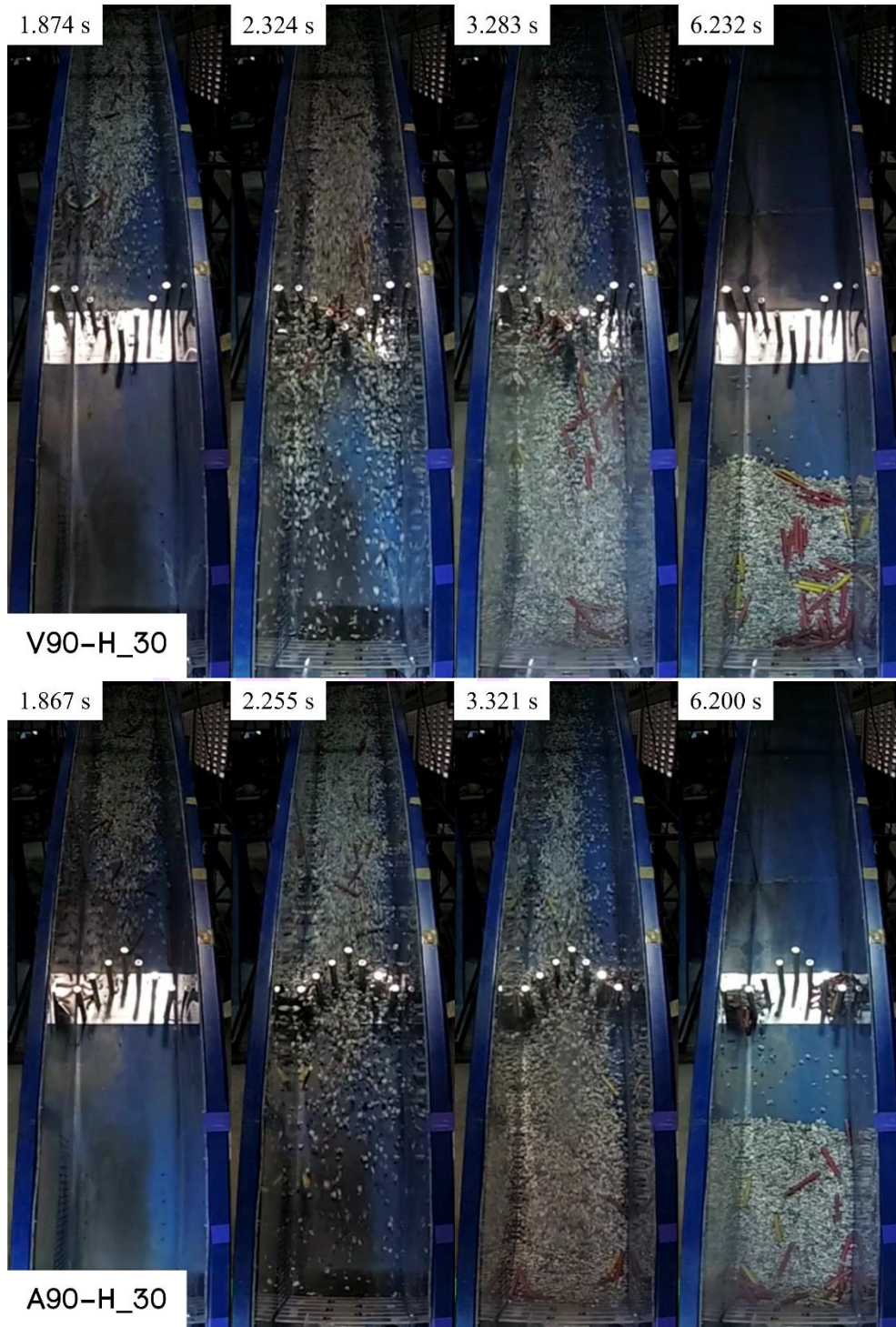
ภาพ 49 ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดของการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



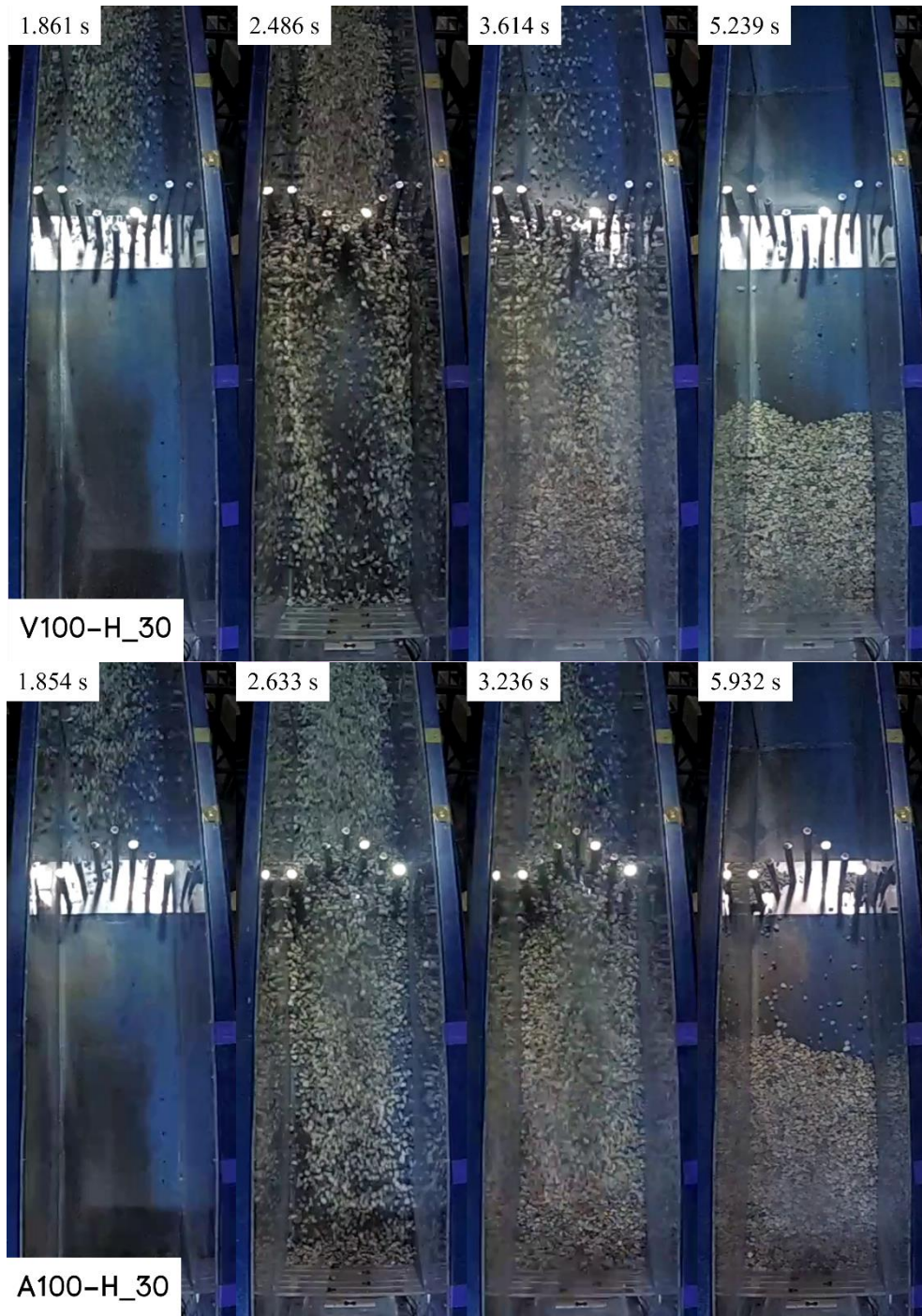
ภาพ 50 ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการดักจับของฝ้ายชะลอน้ำแบบเปิด

ภาพ 51 แสดงพฤติกรรมการไหลผ่านฝ้ายชะลอน้ำแบบเปิดของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ จะเห็นได้ว่า ลักษณะการไหลผ่านฝ้ายของวัสดุขึ้นอยู่กับแนวการไหลของเศษท่อนไม้ เมื่อเศษท่อนไม้ไหลแนวขวางกับตัวฝ้ายจะถูกดักจับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเศษท่อนไม้ไหลกระทบกับฝ้ายรูปตัววี เม็ดแห้งที่ไหลผสมด้วยเป็นตัวหลักและเปลี่ยนแนวการไหลของเศษท่อนไม้ให้ไหลผ่านฝ้ายไปได้ และเมื่อเศษท่อนไม้ไหลกระทบกับฝ้ายรูปตัวอัลฟา พบว่า ลักษณะทแยงการวางตัวของเสาเข็มทำให้เศษท่อนไม้ไหลตามแนวและถูกดักจับที่มุมแหลมของตัวฝ้าย จากภาพ 52 แสดงลักษณะการไหลของเม็ดแห้งผ่านฝ้ายชะลอน้ำแบบเปิด ซึ่งจากกระแสการไหลมีลักษณะเปลี่ยนเส้นทางเมื่อไหลผ่านฝ้ายรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยฝ้ายรูปแบบตัววีเมื่อเม็ดแห้งไหลผ่าน เส้นทางไหลจะถูกแยกออกด้วยศูนย์กลางของฝ้ายและหลังจากผ่านฝ้ายรูปตัววีบริเวณตรงกลางของเส้นทางไหลจะมีเม็ดแห้งปริมาณน้อยกว่า ในทางตรงกันข้าม ฝ้ายรูปตัวอัลฟาเมื่อเม็ดแห้งกระทบตัวฝ้ายจะเบี่ยงเม็ดแห้งออกทางด้านข้างอย่างรวดเร็วแล้วหลังจากผ่านฝ้าย กระแสการไหลจะถูกเบี่ยงเข้าสู่ศูนย์กลางของเส้นทางไหล สังเกตได้จากปริมาณ

เม็ดแห้งที่หนาแน่น จากการจับภาพของกล้องถ่ายภาพรูปร่างแบน ซึ่งเม็ดแห้งบางส่วนถูกดักจับ  
ด้านข้างของฝายรูปตัวอัลฟา



ภาพ 51 ภาพที่ถ่ายจากกล้องบันทึกภาพการไหลของเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้

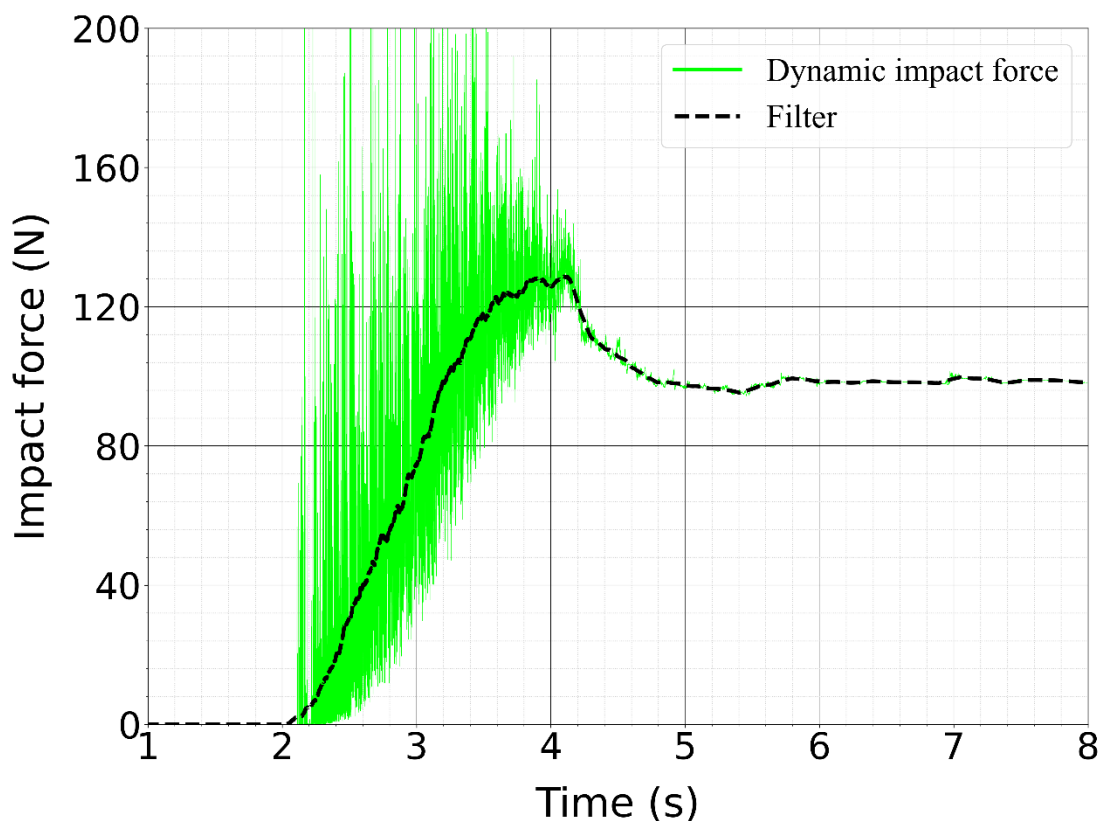


ภาพ 52 ภาพที่ถ่ายจากกล้องบันทึกภาพการไหลของเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้

### การทดลองในห้องปฏิบัติการและแบบจำลองเชิงตัวเลข

ปัจจุบันมีการศึกษาโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขมาใช้วิเคราะห์ เนื่องจากต้นทุนไม่สูงเท่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในการศึกษาที่ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับ การทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อสนับสนุนผลการทดลองและแสดงแนวทางในการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษาปัญหาการไหลหลากหลายของดินโคลน การกำหนดสมมุติฐานต่าง ๆ ระหว่างแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข จะใช้สมมุติฐานเดียวกันและพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ รูปแบบการทดลองจะต้องสามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากภาพ 30 แสดงการกระจายขนาดของเม็ดแข็งที่ใช้ ( $d_{90} = 34.94 \text{ mm}$ ) จุดมุ่งหมายของการศึกษานี้เพื่อหาแนวทางการทำนายพฤติกรรมโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข ผลการเปรียบเทียบได้แก่ แรงกระแทก ปริมาณการดักจับ และพฤติกรรมการไหล รวมไปถึงลักษณะการกองกอนหยุดนิ่งหน้าสิ่งกีดขวางที่สามารถเปรียบเทียบในเชิงคุณภาพจากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงและภาพเหตุการณ์ในแบบจำลองเชิงตัวเลข

จากภาพ 53 แสดงแรงกระแทกจากแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งได้จากสมการแรงกระแทกแบบพลวัต โดยผลของแรงจากการเคลื่อนที่และความเร็วเชิงมุมของอนุภาคทำให้เกิดพลังงานจลน์จากการคำนวณในแบบจำลองเชิงตัวเลข ปริมาณแรงดังกล่าวมีลักษณะขึ้น-ลงตามคลื่นกระแทกของวัสดุเม็ด โดยแอมพลิจูดมีค่ามากขึ้นในช่วงที่เม็ดแข็งจำนวนมากกระแทกกับสิ่งกีดขวาง สังเกตในช่วงเวลา 2-4 วินาที ดังนั้นในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางกายภาพ จำเป็นต้องใช้ตัวกรอง (Filter) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้เด่นชัดและสามารถสรุปได้

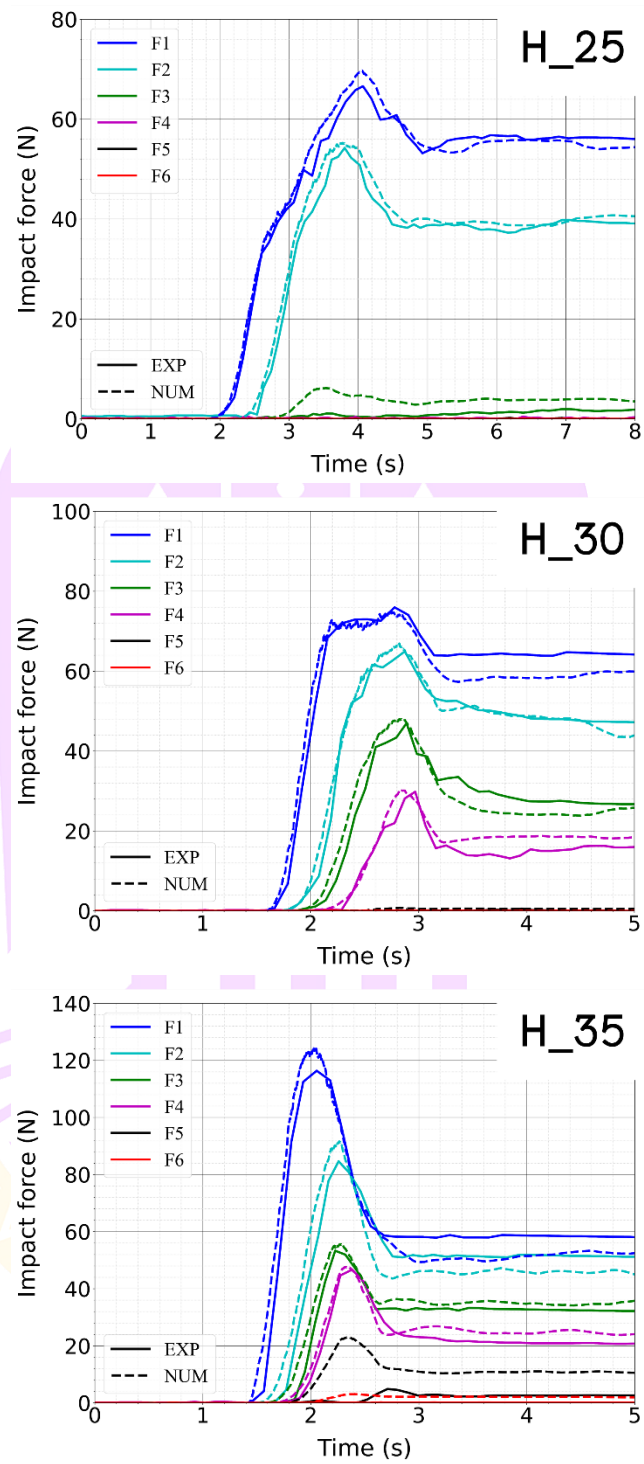


ภาพ 53 แรงกระแทกแบบพลวัตกับเวลาในแบบจำลองเชิงตัวเลข

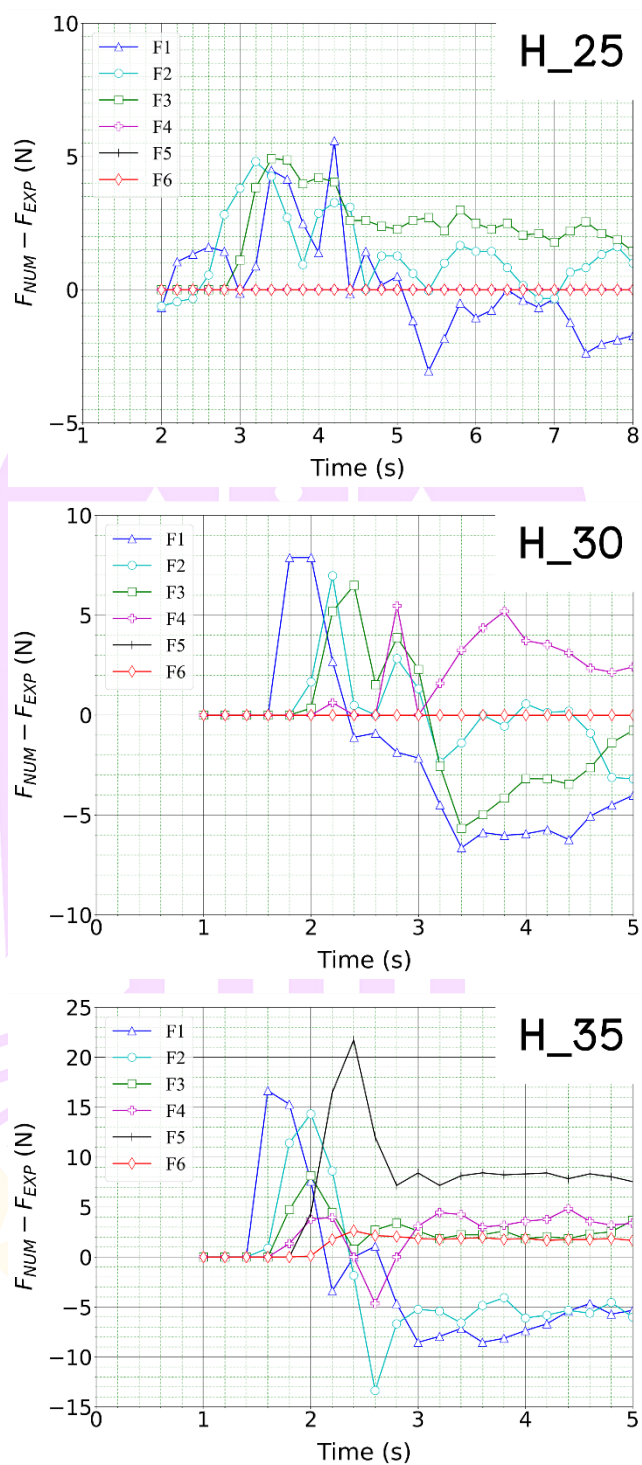
จากภาพ 54 แสดงปริมาณแรงกระแทกย่อย (F1 ถึง F6) ระหว่างแบบจำลองทางกายภาพ (EXP) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (NUM) จะเห็นได้ว่าผลการทดลองที่ได้มีความใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณแรงกระแทกสูงสุดจากแบบจำลองเชิงตัวเลขมีมากกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากลักษณะผิวเม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลขมีลักษณะผิวเรียบ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการส่งถ่ายแรงได้ดีกว่าในช่วงเวลาที่เม็ดแห้งเกิดการชนกัน จากปริมาณแรงกระแทกย่อยสามารถแสดงความแตกต่าง ดังภาพ 55 โดยผลต่างระหว่างแรงที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและแบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งปริมาณบวกในภาพแสดงถึงแรงจากแบบจำลองเชิงตัวเลข ( $F_{NUM}$ ) มากกว่าแบบจำลองทางกายภาพ ( $F_{EXP}$ ) จากการทดลอง H\_25 และ H\_30 ช่วงความแตกต่างของแรงเกิดขึ้นที่ F1 มีค่ามากที่สุด ส่วน H\_35 ปริมาณแรง F5 จากแบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางกายภาพทุกช่วงเวลาที่เกิดการกระแทก เนื่องจากเม็ดแห้งที่กองหน้าฝ่ายช่องปิดในแบบจำลองทางกายภาพ มีความสูงถึง F4 ซึ่งในแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยลักษณะเม็ดแห้งแบบผิวเรียบทำให้การกองหน้าสิ่งกีดขวางสามารถกองได้สูงกว่าเม็ดที่มีผิวขรุขระ สามารถสรุปได้ว่า แรงจากแบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางกายภาพ

ช่วงเริ่มกระแทกจนถึงแรงสูงสุด ซึ่งหลังจากนั้นแรงกระแทกจากแบบจำลองทางกายภาพมีค่ามากกว่า กล่าวคือ เมื่อเม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลขหยุดการเคลื่อนที่ แรงที่ได้จากสมการที่ใช้คำนวณแรงในโปรแกรมเป็นสมการโมเมนตัมเชิงพลังงาน เมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ได้ของวัสดุ แรงกระแทกที่เกิดขึ้นจึงลดลงมาก จากสมการ 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่าสาเหตุที่แบบจำลองเชิงตัวเลข มีปริมาณแรงสูงสุดที่มากกว่าแบบจำลองทางกายภาพ เนื่องจากความเร็วของการชน แต่เมื่อเม็ดแห้งหยุดการเคลื่อนที่ปริมาณแรงจึงน้อยกว่าการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพราะขาดตัวแปรความเร็วในการคำนวณแรงของในส่วนของเม็ดในสมการ 8 ส่งผลต่อปริมาณแรงกระแทกเช่นกันในแง่ของการส่งถ่ายแรงระหว่างเม็ด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อความลาดชันการไหลที่เพิ่มขึ้น ทำให้ส่วนต่างของแรงกระแทกเพิ่มขึ้นไปด้วย โดยแรงจากแบบจำลอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปแบบจำลองเชิงตัวเลขแสดงปริมาณแรงเมื่อเม็ดแห้งหยุดนิ่ง มีปริมาณที่น้อยกว่าแบบจำลองทางกายภาพ จากปริมาณแรงกระแทกย่อยถูกรวมด้วยสมการ 11 เพื่อประเมินการดูดซับแรงของฝ้ายชะลอน้ำแบบเปิดจากสมการ 12 โดยถูกอธิบายในย่อหน้าถัดไป



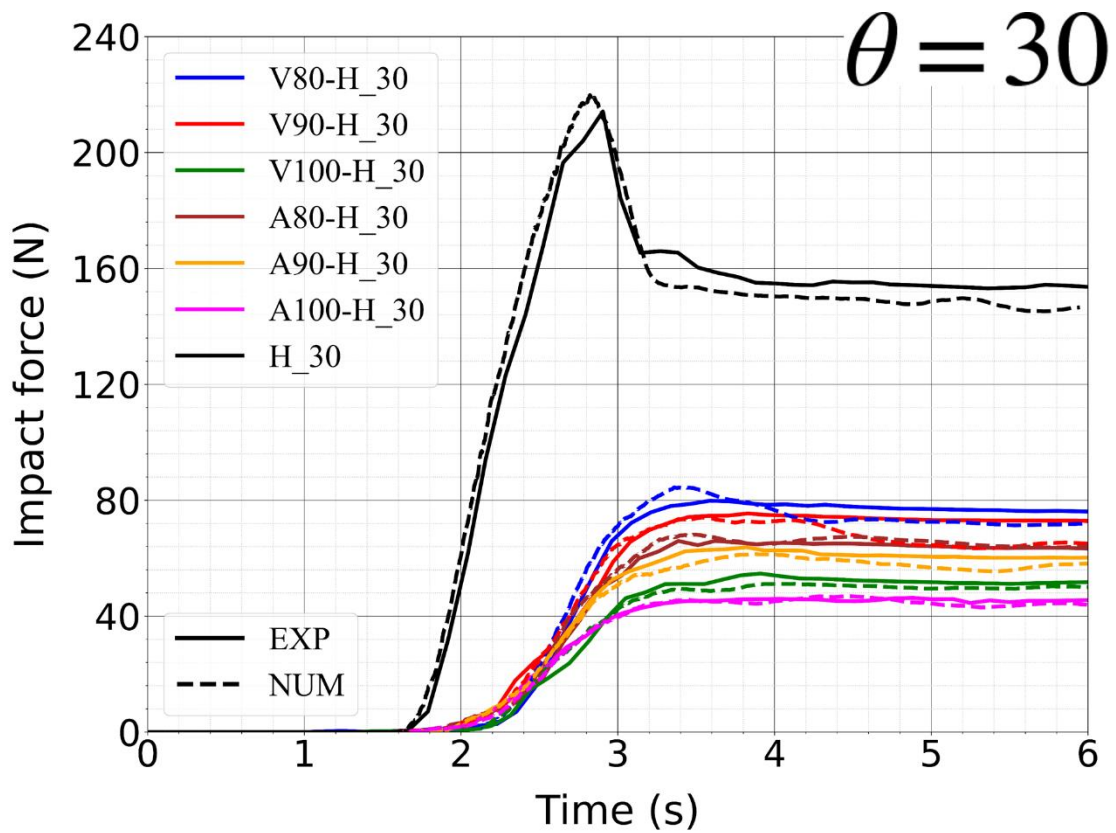
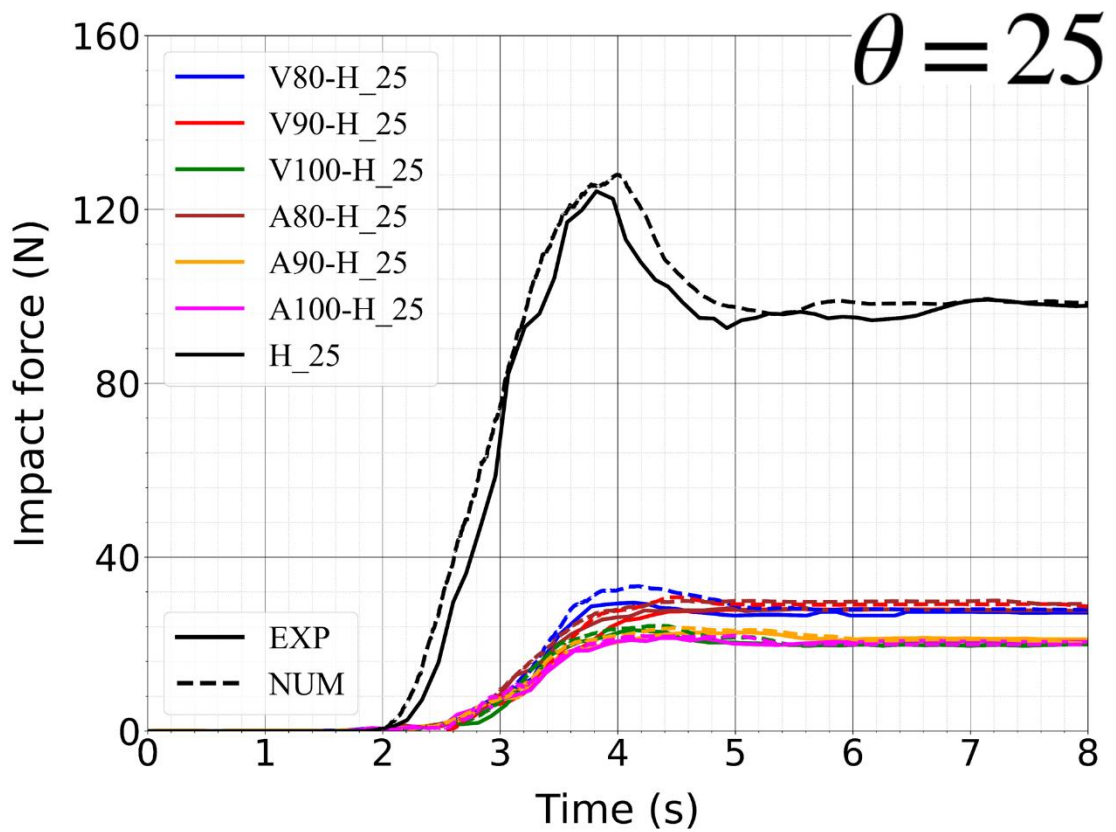


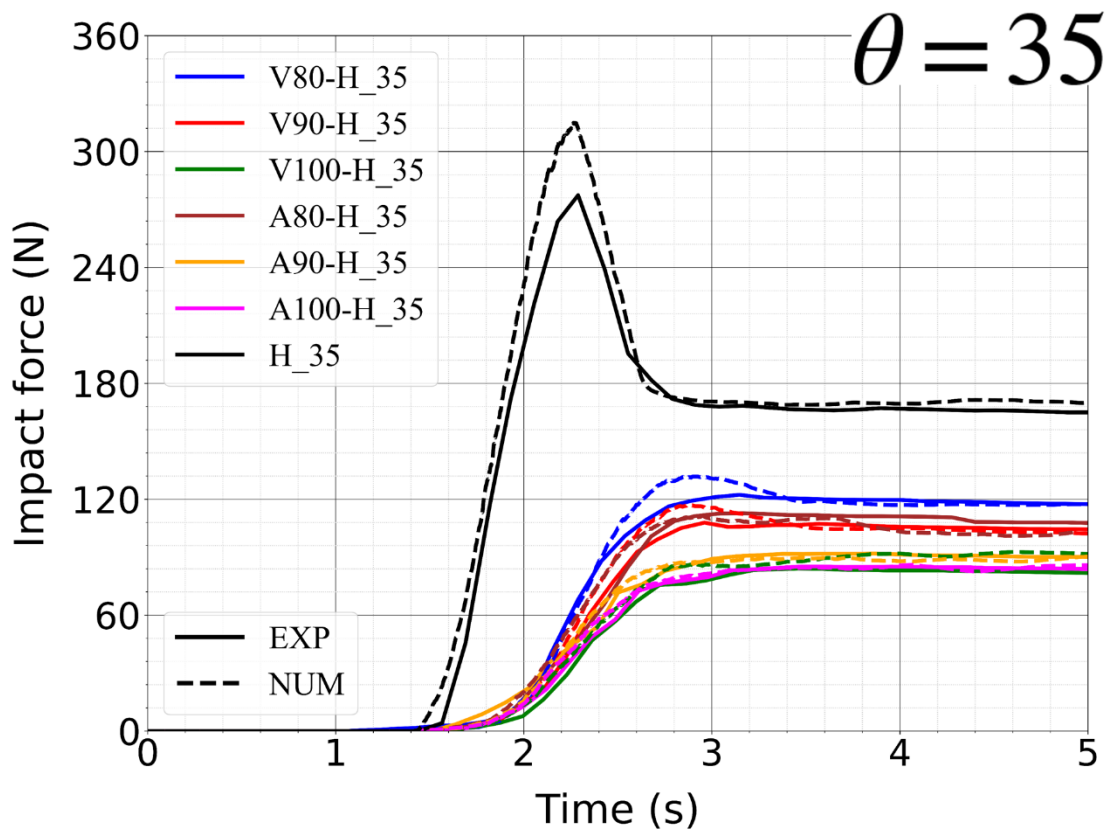
ภาพ 54 แรงกระแทกย่อยกับเวลาที่ถูกวัดโดยฝ่ายช่องปิด



ภาพ 55 ผลต่างของแรงกระทำเทียบกับเวลาที่ถูกวัดโดยฝ่ายช่องปิด

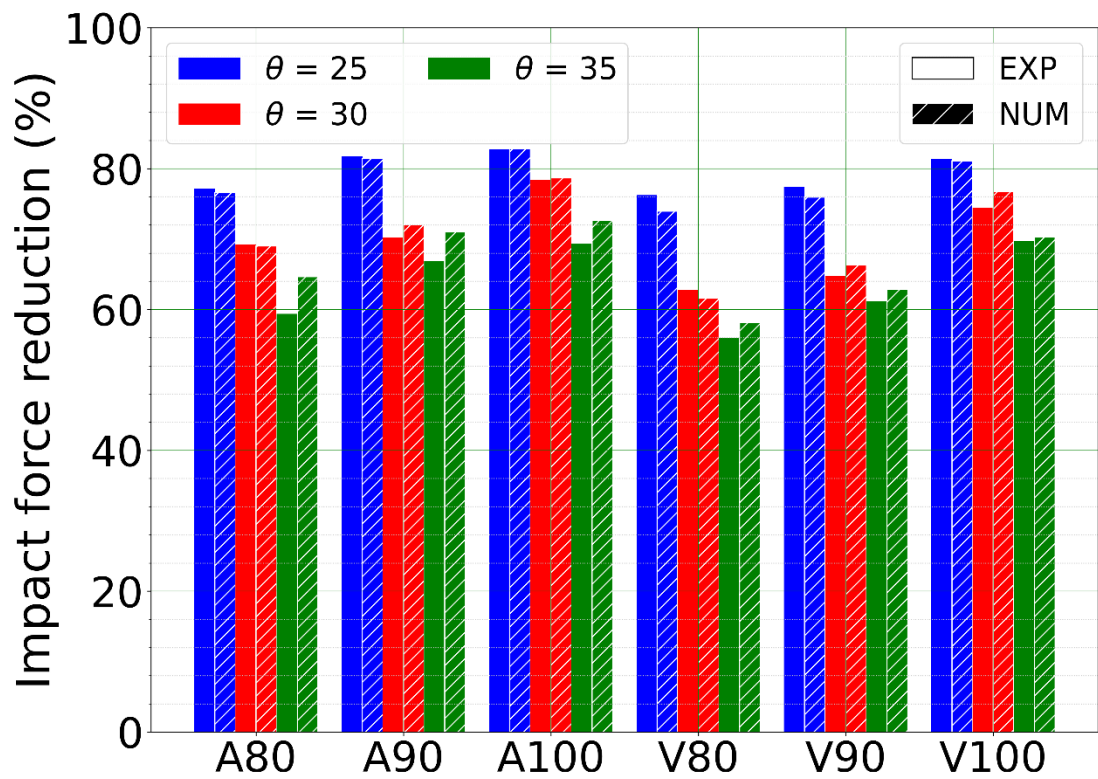
จากภาพ 56 แสดงผลรวมแรงกระแทกกับเวลาตามสมการ 11 จะเห็นได้ว่า ปริมาณแรงกระแทกรวมจากแบบจำลองทางกายภาพ (EXP) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (NUM) มีความใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากการทดลองที่ถูกใช้อ้างอิง (H\_25 H\_30 H\_35) ปริมาณแรงกระแทกสูงสุดจากแบบจำลองเชิงตัวเลขมากกว่าแบบจำลองทางกายภาพ โดยถูกอธิบายไว้ในย่อหน้าที่แล้ว จากปริมาณแรงกระแทกสูงสุดที่ถูกใช้คำนวณการดูดซับแรงตามสมการ 12 แสดงในภาพ 57 โดยการดูดซับแรงของฟลายชะลอน้ำแบบเปิดจากแบบจำลองทางกายภาพ (EXP) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (NUM) แสดงให้เห็นว่า การดูดซับแรงของฟลายชะลอน้ำแบบเปิดมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมภายในของฟลายที่เพิ่มขึ้นและฟลายรูปแบบตัวอัลฟาสามารถดูดซับแรงได้ดี ฟลายรูปแบบตัวบี จะเห็นได้ชัดเมื่อความลาดชันการไหลที่ 30 และ 35 องศา จากภาพ 58 แสดงค่าเฉลี่ยการดูดซับแรงของฟลายชะลอน้ำแบบเปิดตามความลาดชันการไหลต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าการดูดซับแรงของฟลายชะลอน้ำแบบเปิดจากแบบจำลองทางกายภาพ (EXP) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (NUM) แนวโน้มไปทางเดียวกัน กล่าวคือ มีค่าลดลงตามความลาดชันการไหลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณความแตกต่างจากแบบจำลองทางกายภาพ ( $R_{EXP}$ ) และแบบจำลองเชิงตัวเลข ( $R_{NUM}$ ) สามารถสรุปได้ดังภาพ 59 จะเห็นได้ว่า ค่าการดูดซับแรงของฟลายชะลอน้ำแบบเปิดจากแบบจำลองทางกายภาพ และแบบจำลองเชิงตัวเลข มีความใกล้เคียงกัน เมื่อความลาดชันการไหล 35 องศา ค่าการดูดซับแรงจากแบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่ามากกว่าแบบจำลองทางกายภาพเล็กน้อย ส่วนความลาดชันการไหล 30 องศา ค่าการดูดซับแรงจากแบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองทางกายภาพเล็กน้อย และความลาดชันการไหล 25 องศา ค่าการดูดซับแรงทั้งสองแบบจำลองมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า เมื่อความลาดชันการไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลขและแบบจำลองทางกายภาพมากขึ้นไปด้วย



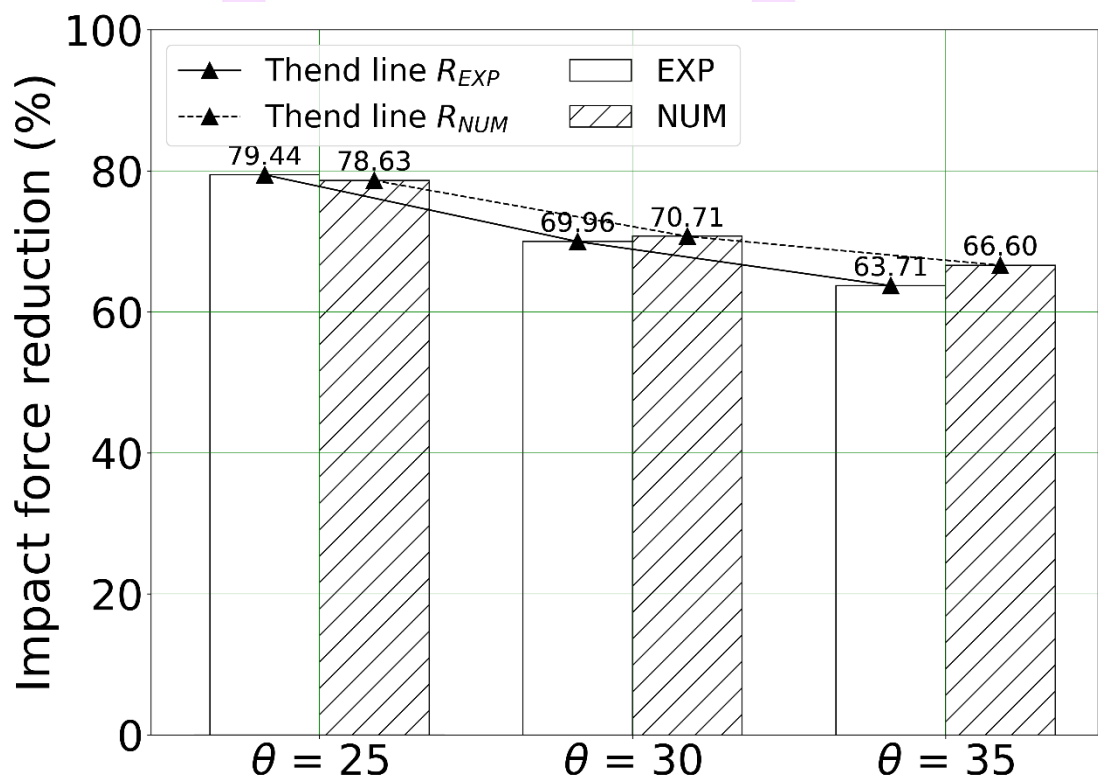


ภาพ 56 ผลรวมแรงกระทำกับเวลาจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง

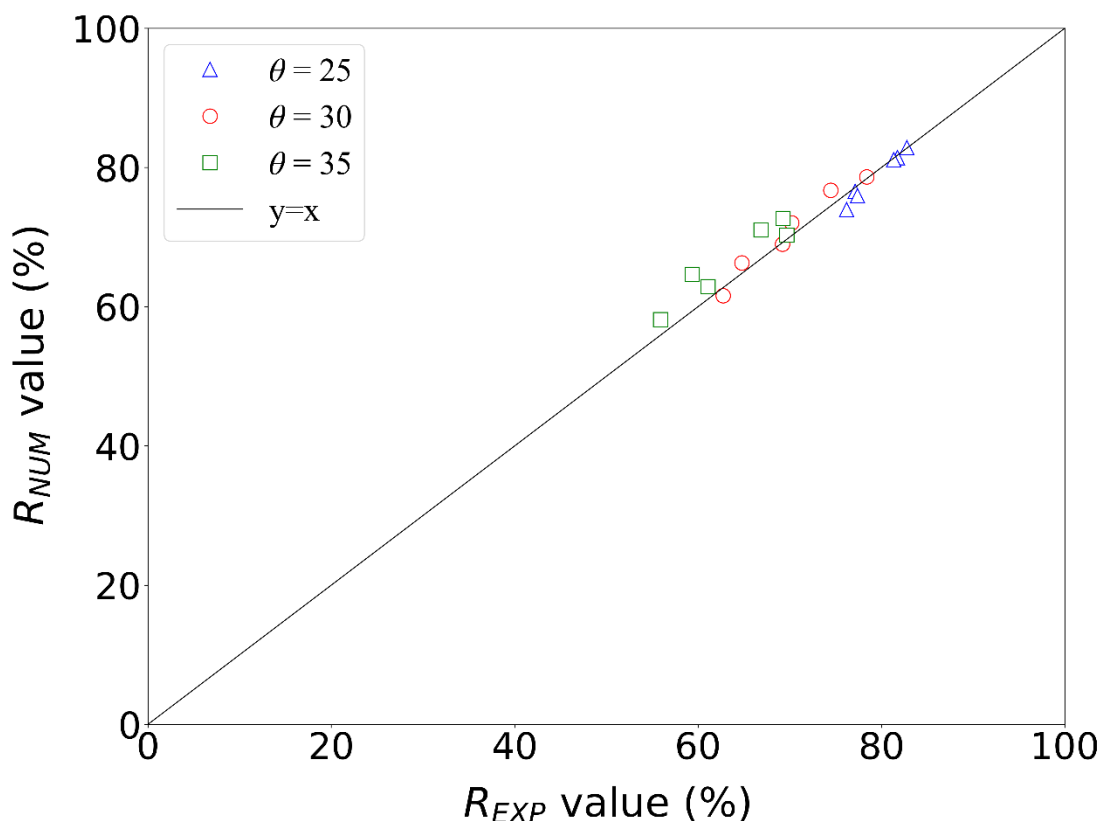




ภาพ 57 อัตราส่วนการดูดซับแรงของฝายชะลอน้ำแบบเปิด

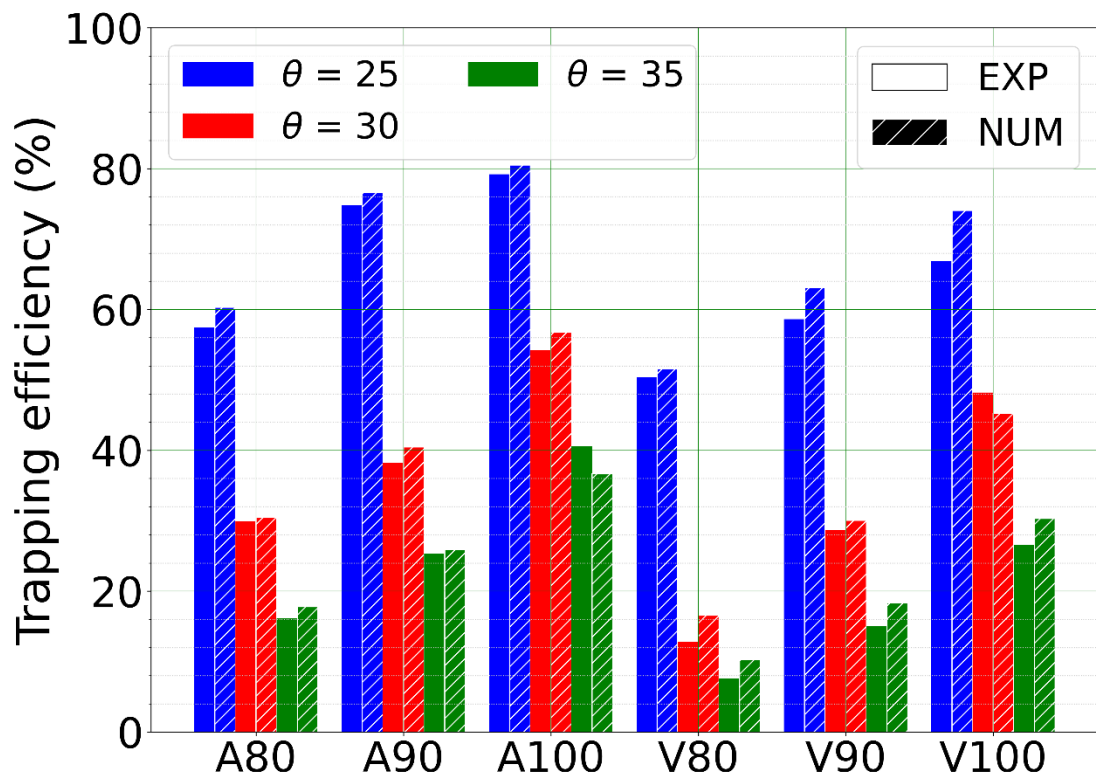


ภาพ 58 อัตราส่วนการดูดซับแรงตามความลาดชันการไหลต่าง ๆ



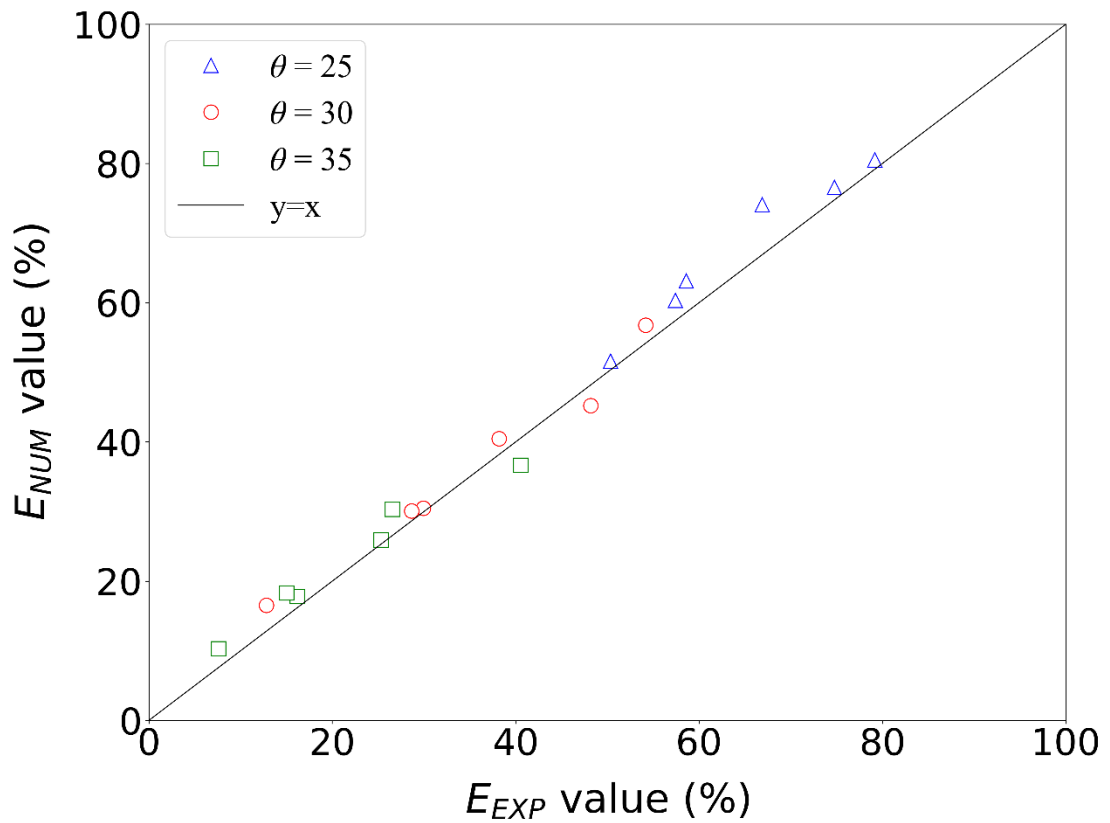
ภาพ 59 การดูดซับแรงของฝายชะลอน้ำแบบเปิดแบบจำลองทางกายภาพ ( $R_{EXP}$ ) และแบบจำลองเชิงตัวเลข ( $R_{NUM}$ )

ภาพ 60 แสดงประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิด จะเห็นได้ว่าฝายรูปแบบตัวอัลฟาสามารถดักจับได้ดีกว่าฝายรูปแบบตัววีและเมื่อมุมภายในของฝายเพิ่มขึ้นทำให้ฝายรูปแบบนั้น ๆ สามารถดักจับได้มากขึ้น จากภาพ 61 แสดงปริมาณประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดจากแบบจำลองทางกายภาพ ( $E_{EXP}$ ) และแบบจำลองเชิงตัวเลข ( $E_{NUM}$ ) เมื่อรูปแบบการทดลองเดียวกัน แบบจำลองเชิงตัวเลขแสดงปริมาณการดักจับที่มากกว่าแบบจำลองทางกายภาพอยู่เล็กน้อย ยกเว้นการทดลองความลาดชันการไหล 30 องศา ฝาย V100 และความลาดชันการไหล 35 องศา ฝาย A100 ที่ผลการจำลองเชิงตัวเลขมีค่าน้อยกว่าผลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ จากการกระจายตามเชิงเส้น  $y = x$  แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองเชิงตัวเลข สามารถอธิบายประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาพ 62 และ 63 แสดงลักษณะการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดจากแบบจำลองทางกายภาพ (EXP) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (NUM) แสดงให้เห็นถึงลักษณะและรูปแบบการดักจับที่ใกล้เคียงกัน

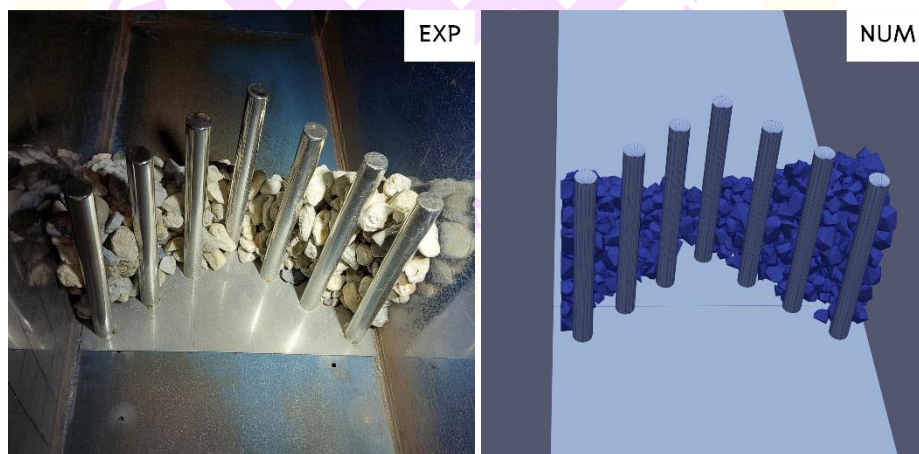


ภาพ 60 ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิด

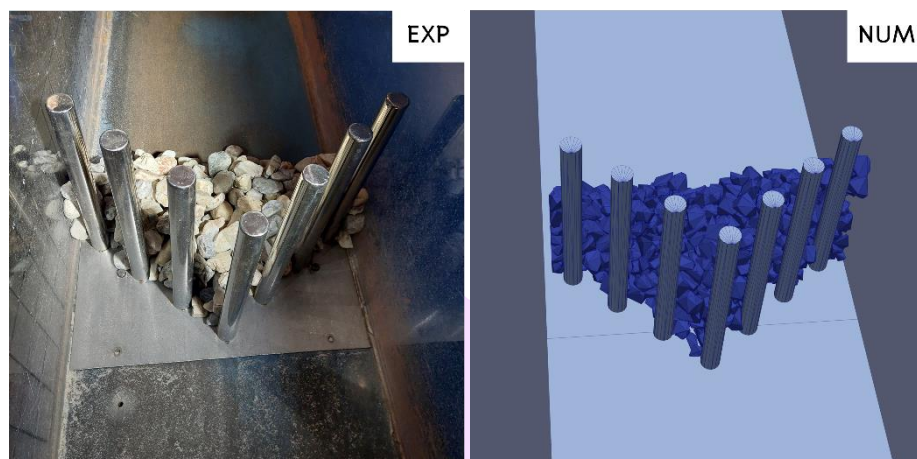




ภาพ 61 ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดแบบจำลองทางกายภาพ ( $E_{EXP}$ ) และแบบจำลองเชิงตัวเลข ( $E_{NUM}$ )



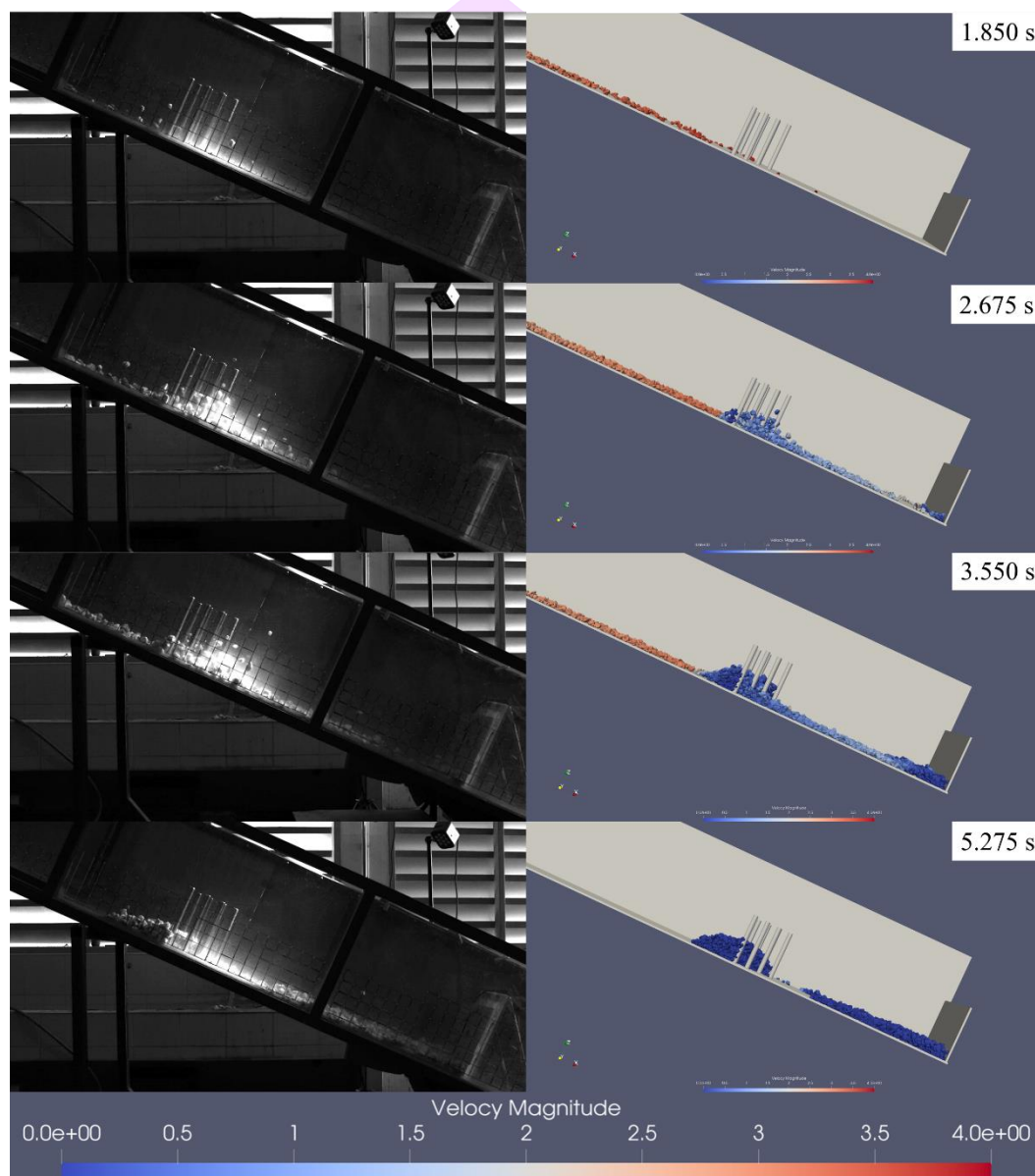
ภาพ 62 การดักจับเม็ดแข็งแห่งของฝายชะลอน้ำแบบเปิดของการทดลอง A100-H\_35



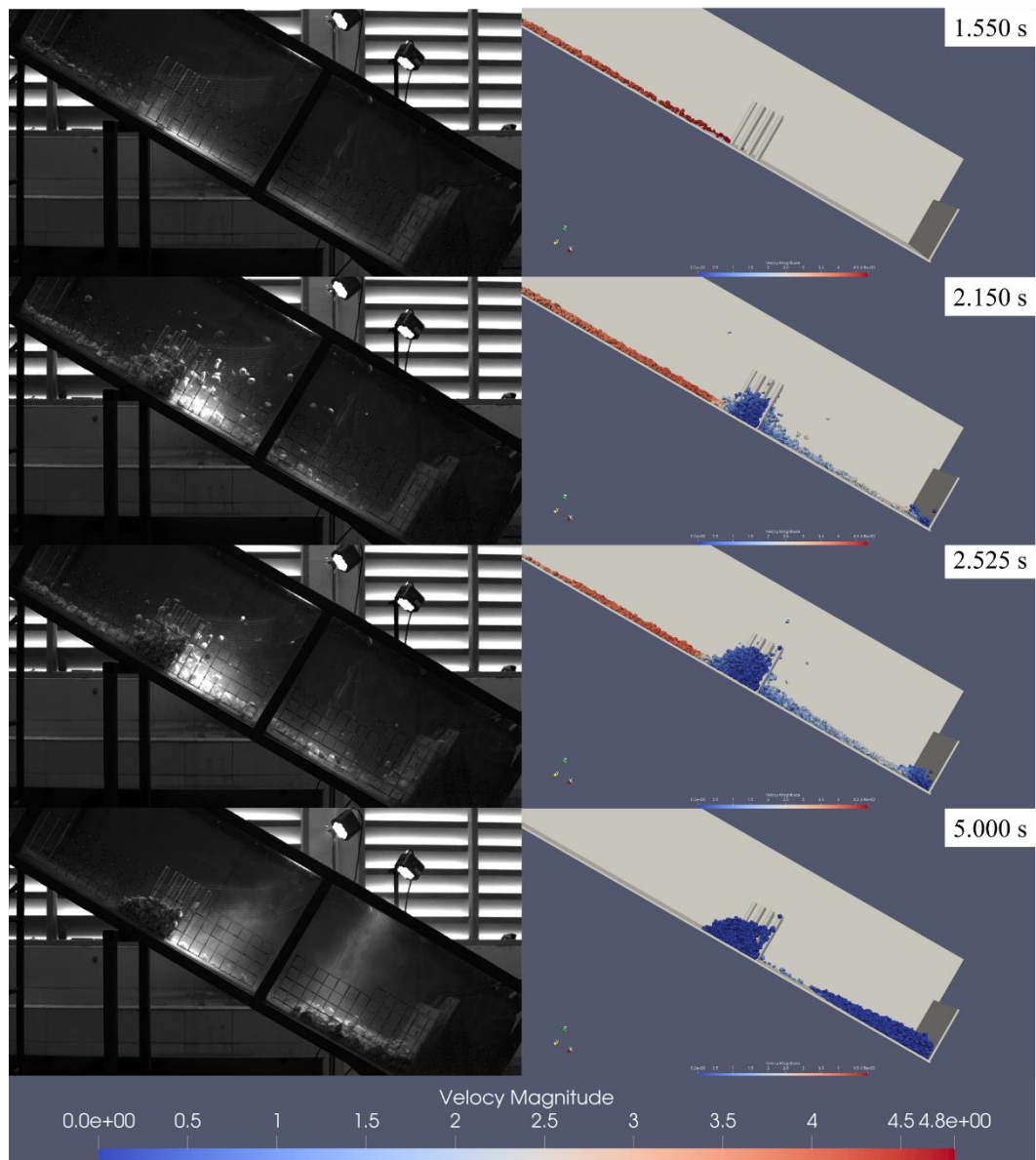
ภาพ 63 การดักจับเม็ดแห้งของฝายชะลอน้ำแบบเปิดของการทดลอง V100-H\_35

ลักษณะการไหลของเม็ดแห้งในห้องปฏิบัติการที่ถูกถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง แสดงให้เห็นว่า เมื่อเม็ดแห้งกระทบกับสิ่งกีดขวางจะกระเด็นมากกว่าแบบจำลองเชิงตัวเลข เนื่องจากในแบบจำลองเชิงตัวเลขค่าสัมประสิทธิ์การกระเด็นไม่ได้ถูกนำมาคำนวณ การหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเด็นยังเป็นเรื่องที่ยากในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต้องทำการพัฒนาศึกษา ต่อในงานอนาคต โดยสัมประสิทธิ์การกระเด็นเป็นค่าใช้คำนวณความเร็วหลังการชน ณ เวลานั้น ในทิศทางการสะท้อนกลับ ค่าสัมประสิทธิ์นี้ถูกกำหนดเป็นศูนย์ในแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิดมีปริมาณที่มากกว่าแบบจำลองทางกายภาพ อยู่เล็กน้อย จากภาพ 64 และ 65 เม็ดแห้งไหลผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิดเกิดการทับถมขึ้น โดยที่ความเร็วของเม็ดแห้งลดลงอย่างมาก เนื่องจากฝายชะลอน้ำแบบเปิดสามารถลดความเร็วการไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ความเร็วเฉลี่ยสูงสุด คือ 2.5 m/s, 3.5 m/s และ 4/5 m/s เมื่อความลาดชันการไหลที่ 25, 30 และ 35 องศา ตามลำดับ จากการไหลของเม็ดแห้งผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิดพบว่าการลดความสูงของกระแสการไหลของเม็ดแห้งหน้าฝายช่องปิดทำให้การไหลราบเรียบขึ้น ส่งผลให้แรงกระแทกมีความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้งคี่ต่างจากกรณีไม่มีฝายชะลอน้ำแบบเปิดที่ความสัมพันธ์แรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ลักษณะเป็นยอดแหลม นอกจากนี้แบบจำลองเชิงตัวเลขยังสามารถแสดงความเร็วแต่ละเม็ดบ่งบอกขนาดการกองหน้าฝายช่องปิดให้แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการทับถมของเม็ดแห้ง แต่การวิเคราะห์นี้อยู่นอกเหนือจากการศึกษาจากแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นสามารถวิเคราะห์ได้หลายจุดประสงค์ และให้ผลที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองทางกายภาพ โดยจุดเด่นในการศึกษานี้คือ เม็ดแห้งในแบบจำลองเชิงตัวเลขมีรูปร่างนอกเหนือจากทรงกลม ถูกสร้างให้

ใกล้เคียงกับกรวดแม่น้ำ ทำให้แบบจำลองทั้งสองใกล้เคียงกันโดยไม่ต้องทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์หรือผลการทดลอง อย่างไรก็ตามการใช้เม็ดแห้งที่มีรูปทรงหลายด้านแบบสุ่มต้องใช้เวลาคำนวณนานกว่าเม็ดแห้งแบบทรงกลมอย่างมาก ดังนั้นความสามารถคอมพิวเตอร์ยังถือเป็นข้อจำกัดและต้องการการพัฒนาอยู่เสมอ



ภาพ 64 ภาพที่ถ่ายจากกล้องความเร็วสูงของการไหลของเม็ดแห้งในแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขในช่วงเวลาเดียวกันของการทดลอง: V80-H\_25



ภาพ 65 ภาพที่ถ่ายจากกล้องความเร็วสูงของการไหลของเม็ดแห้งในแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขในช่วงเวลาเดียวกันของการทดลอง: A90-H\_30

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลหลากของวัสดุเม็ดแห้งและเศษท่อนไม้ เมื่อผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งถูกแบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ การทดลองการไหลของวัสดุเม็ดผสมและไม่ผสมเศษท่อนไม้ผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด และการทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลข มีผลสรุปดังนี้

1. ประสิทธิภาพการดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิด A80 และ A90 มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการดักจับวัสดุเม็ดแห้งผสมและไม่ผสมเศษท่อนไม้ ( $s/d_{90} = 1.90$ ) ณ ความลาดชันการไหล 25 องศา และเมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของฝายรูปแบบตัวอัลฟาและตัววีมีประสิทธิภาพดักจับที่ใกล้เคียงกัน โดยฝาย A100 มีประสิทธิภาพการดักจับมากที่สุด สำหรับการทดลองความลาดชันการไหล 25 30 และ 35 องศา ในทางตรงกันข้าม เมื่อความลาดชันการไหล 30 และ 35 องศา ฝายตัววีทั้งหมดไม่สามารถดักจับวัสดุทั้ง 2 ตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วน  $s/d_{90} = 1.90$  ไม่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ฝายรูปตัววีในกรณีความลาดชันการไหล 30 องศาขึ้นไป

2. การดูดซับแรงกระแทกของฝายชะลอน้ำแบบเปิดเมื่อวัสดุเม็ดแห้งผสมและไม่ผสมเศษท่อนไม้ไหลผ่าน ( $s/d_{90} = 1.90$ ) มีค่าตั้งแต่ 37.98–63.98% ซึ่งแนวโน้มการดูดซับแรงของฝายชะลอน้ำแบบเปิดจากการไหลของวัสดุทั้ง 2 ตัวอย่างแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ไหลผ่านทำให้ฝายดูดซับแรงน้อยลงเมื่อความลาดชันการไหลเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้ไหลผ่านทำให้ฝายดูดซับแรงเพิ่มขึ้นตามความลาดชันการไหล อย่างไรก็ตามฝายชะลอน้ำแบบเปิดสามารถดูดซับแรงจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ได้มากกว่าวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้ ในช่วงความลาดชันการไหล 25–35 องศา

3. การเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้ ( $s/d_{90} = 1.90$ ) เกิดแรงกระแทกสูงสุด ณ ความลาดชันการไหล 25–35 องศา มากกว่าการไหลของวัสดุเม็ดแห้งที่ไม่ผสมเศษท่อนไม้ 1.65% จากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น 1.67% เศษท่อนไม้ทำให้กระแสการไหลของกลุ่มวัสดุของสูงมากกว่าการไหลเฉพาะเม็ดแห้งเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้แรงกระแทกเพิ่มขึ้น

4. ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข มีแนวโน้มไปทางเดียวกัน คือ ฝายชะลอน้ำแบบเปิดรูปตัวอัลฟา มีประสิทธิภาพการดักจับ

และการดูดซับแรงที่มากกว่าฝายชะลอน้ำแบบรูปตัววี การเพิ่มมุมภายในของฝายทำให้ประสิทธิภาพของฝายเพิ่มขึ้น จากการพิจารณาความแตกต่างของผลการศึกษาทั้งสองแบบจำลองพบว่า แบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถอธิบายประสิทธิภาพของฝายและคุณลักษณะเชิงกลของการไหลของเม็ดแห้ง ( $s/d_{90} = 0.86$ ) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาข้อมูลเชิงปริมาณจากผลการดูดซับและประสิทธิภาพดักจับของฝายชะลอน้ำแบบเปิด และข้อมูลเชิงคุณภาพจากภาพถ่ายพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดแห้ง

### อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการศึกษาของ Hao (2018b) โดยใช้วัสดุเม็ดหินผสมดินโคลนที่มีอัตราส่วน  $s/d_{90}$  เท่ากับ 0.86 ถึง 1.90 พบว่า การดักจับมีปริมาณมากกว่าในการศึกษานี้ เนื่องจากวัสดุมีความหนืดจากการผสมดินโคลน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพการดักจับของสิ่งกีดขวางมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของวัสดุที่ไหลผ่าน และอัตราส่วน  $s/d_{90}$  เป็นตัวกำหนดการดักจับของสิ่งกีดขวาง ซึ่งในการศึกษานี้มีแนวโน้มประสิทธิภาพการดักจับตามอัตราส่วน  $s/d_{90}$  ก่อนหน้าซึ่งไปทางเดียวกัน

พฤติกรรมการไหลของวัสดุผ่านชะลอน้ำแบบเปิดทั้งในแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข สอดคล้องกับการศึกษาของ Piton และ Recking (2016a; 2016b) โดยลักษณะการไหลของวัสดุเม็ดผ่านฝายรูปตัวอัลฟามีลักษณะถูกเบี่ยงเข้าสู่ศูนย์กลางของเส้นทางการไหล และเมื่อผ่านฝายรูปตัววีมีลักษณะถูกเบี่ยงออกจากศูนย์กลางของเส้นทางการไหล

การเพิ่มมุมภายในของฝายทำให้ฝายมีประสิทธิภาพการดักจับที่มากขึ้น พิจารณาจากอัตราส่วน  $s/d_{90} = 0.86$  กล่าวคือ การเพิ่มมุมภายในของฝายชะลอน้ำแบบเปิด ทำให้ช่องว่างแนวทแยงลดลง ตามการศึกษาของ Silva, et al. (2016) พบว่า ฝายรูปแนวตรงสามารถดักจับได้มากกว่าฝายรูปตัววี ซึ่งฝายแนวตรงมีช่องว่างแนวทแยงที่น้อยกว่าฝายรูปตัววี ทั้งนี้เมื่อความชันทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับของฝายลดลง โดยสอดคล้องในการศึกษานี้ในการพิจารณาตามความลาดชันการไหล

จากปริมาณแรงกระแทกของแบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่าแรงกระแทกและการสั่นของคลื่นกระแทกที่มากกว่าแบบจำลองทางกายภาพในช่วงเม็ดแห้งกระทบกับสิ่งกีดขวางจนถึงแรงสูงสุด ซึ่งลักษณะเม็ดที่เป็นผิวเรียบแต่ละด้านในแบบจำลองเชิงตัวเลข ส่งผลให้การส่งถ่ายแรงจากการสัมผัสมีค่ามากกว่าเม็ดที่มีลักษณะขรุขระในแบบจำลองทางกายภาพ จากการศึกษาของ Azéma, et al. (2007); Albaba, et al. (2015); Binaree (2021) พบว่า ด้วยเม็ดที่มีผิวแรงและลักษณะรูปทรงหลายด้านทำให้การส่งถ่ายแรงมากกว่าวัสดุที่เป็นทรงกลมและวัสดุที่มีผิว

ขรุขระ ซึ่งสามารถอธิบายสาเหตุความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลขเป็นอย่างดี

### ข้อเสนอแนะ

การทดลองพฤติกรรมการไหลของวัสดุเมื่อผสมเศษท่อนไม้พบว่า ปริมาณการดักจับของฟลายชเลสน้ำแบบเปิด มีความแตกต่างกันในการทดลองแต่ละครั้ง ซึ่งจึงจำเป็นอย่างยิ่งในการทดสอบซ้ำ สาเหตุของการผันผวนของข้อมูลการดักจับของฟลายเกิดจากลักษณะการไหลของเศษท่อนไม้ กล่าวคือ เมื่อเศษท่อนไม้วางตัวตามแนวยาวของทิศทางการไหลทำให้เศษท่อนไม้ไหลผ่านไปได้ง่ายและไม่ปิดกั้นทางผ่านของวัสดุอื่น ในทางตรงกันข้าม เมื่อเศษท่อนไม้วางตัวตามขวางของทิศทางการไหลทำให้เศษท่อนไม้ปิดกั้นทางผ่านของวัสดุอื่นได้ง่ายตามลักษณะของฟลาย

ลักษณะพื้นผิวของวัสดุเม็ดที่แตกต่างกันระหว่างแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข ทำให้การส่งถ่ายแรงระหว่างเม็ดมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้เม็ดที่มีลักษณะแบบผิวขรุขระแล้วในแบบจำลองเชิงตัวเลข แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้คอมพิวเตอร์คำนวณ ซึ่งที่ผ่านมาเม็ดพื้นผิวแบบขรุขระในแบบจำลองเชิงตัวเลขเกิดจากการสร้างเม็ดทรงกลมด้วยวิธี Molecular dynamics (MD) แล้วรวมเม็ดทรงกลมเหล่านั้นหลาย ๆ เม็ดเข้าด้วยกัน (Clump) ทำให้ตัวแปรในการคำนวณมีปริมาณมาก ซึ่งยากต่อการจำลองเชิงตัวเลข ถือว่าเป็นข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคตที่ใช้วิธี Contact dynamics (CD) ในการสร้างพื้นผิวแบบขรุขระโดยใช้จุดยอดของวัสดุ เพื่อใช้อธิบายวัสดุเม็ดทั่วไปที่มีอยู่ตามธรรมชาติ

การจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ Discrete element method (DEM) จำลองวัสดุเม็ดที่มีรูปทรงหลายด้านถือว่าการพัฒนาแนวทางการจำลองให้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงมากขึ้น แต่ข้อจำกัดของ LMG90 ยังมีข้อจำกัดในการอธิบายวัสดุที่เป็นข้อเหลว สำหรับงานในอนาคตควรพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขอธิบายพฤติกรรมเม็ดแห้งและของเหลว ซึ่งจะเป็นการอธิบายพฤติกรรมของดินโคลนในสภาพใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง รวมถึงการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการอธิบายการไหลหลากของวัสดุรูปทรงกระบอกที่จะใช้เป็นตัวแทนของเศษท่อนไม้

## บรรณานุกรม

- กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2559). **คู่มือการกำหนดรูปแบบก่อสร้าง  
ซ่อมปรับปรุงบำรุงรักษา และเพิ่มประสิทธิภาพ ฝ่ายชะลอน้ำพอเพียงตามแนว  
พระราชดำริ**. กรุงเทพฯ: กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ผู้จัดการออนไลน์. (2554). **ตะลึง! กองหินไหลถล่มตกคำใต้ โชคดีต้นไม้เป็นกำแพงกั้น  
ไร่คนเจ็บ**. สืบค้นเมื่อ 25 ธันวาคม 2564, จาก  
<https://mgronline.com/local/detail/9540000105474>.
- ผู้จัดการออนไลน์. (2563). **น้ำป่าทะลักลงดอยขุนตาล พัดเศษไม้กองมหึมาขวาง  
เต็มห้วยลำพูน**. สืบค้นเมื่อ 25 ธันวาคม 2564,  
จาก <https://mgronline.com/local/detail/9630000077270>.
- ผู้จัดการออนไลน์. (2565). **ทล.11 ป่วนแต่เช้า! ฝนตกไม่หยุดดินสไลด์ปิดถนนอุตรดิตถ์-  
พิษณุโลก รถทั้งขาขึ้นขาล่องต้องใช้ทางเบี่ยง**. สืบค้นเมื่อ 25 มิถุนายน 2565,  
จาก <https://mgronline.com/local/detail/9650000094409>.
- สยามรัฐ. (2565). **ฝนถล่มไม่หยุด! ดินภูเขาสไลด์ปิดทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 11**.  
สืบค้นเมื่อ 25 มิถุนายน 2565, จาก <https://siamrath.co.th/n/387505>.
- สวพ.FM91. (2565). **ด่วน! ดินสไลด์ปิดทับเส้นทาง ทางหลวงหมายเลข 11 (พิษณุโลก-  
อุตรดิตถ์) กม.286**. สืบค้นเมื่อ 25 มิถุนายน 2565, จาก  
<https://today.line.me/th/v2/article/eLGYk8l>.
- Ahmadipur, A. and Qiu, T. (2018). Impact force to a rigid obstruction from a granular  
mass sliding down a smooth incline. **Acta Geotechnica** (2018), 13, 1433–1450
- Albaba, A., Lambert, S. and Faug, T. (2018). Dry granular avalanche impact force on  
a rigid wall: Analytic shock solution versus discrete element simulations. **Physical  
Review E**, 97,052903.
- Albaba, A., Lambert, S., Kneib, F., Chareyre, B. and Nicot, F. (2017). DEM modeling  
of a flexible barrier impacted by a dry granular flow. **Rock Mechanics and Rock  
Engineering**, 50(11), 3029–3048.

- Albaba, A., Lambert, S., Nicot, F. and Chareyre, B. (2015). Modeling the impact of granular flow against an obstacle. **Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows**, 95–105
- Albaba, A., Schwarz, M., Wendeler, C. Loup, B. and Dorren, L. (2019). Numerical modeling using an elastoplastic–adhesive discrete element code for simulating hillslope debris flows and calibration against field experiments. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 19(11), 2339–2358.
- Andreotti, B., Forterre, Y. and Pouliquen, O. (2013). Granular media. New York: Cambridge University Press.
- Armanini, A., Rossi, G. and Larcher, M. (2019). Dynamic impact of a water and sediments surge against a rigid wall. **Journal of Hydraulic Research**, 58(2), 314–325.
- Azéma, E., Descantes, Y., Roquet, N., Roux, J. N. and Chevoir, F. (2012). Discrete simulation of dense flows of polyhedral grains down a rough inclined plane. **Physical Review E**, 86, 031303.
- Azéma, E., Radjai, F. and Saussine, G. (2009). Quasistatic rheology, force transmission and fabric properties of a packing of irregular polyhedral particles. **Mechanics of Materials**, 41(6), 729–741.
- Azéma, E., Radjai, F., Peyroux, R. and Saussine, G. (2007). Force transmission in a packing of pentagonal particles. **Physical Review E**, 76, 011301.
- Bavarian Environment Agency. (2017). **Sediment and woody debris transport–countermeasures.**
- Binaree, T. (2021). **Effects of particle angularity on micro–macro mechanical behaviors and segregation in 2D granular material.** Thesis (Ph.D.), Mechanical Engineering, Chiang Mai University.
- Canelli, L., Ferrero, A. M., Migliazza, M. and Segalini, A. (2012). Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers–experimental tests and impact analysis. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 12(5), 1693–1699.

- Carladous, S., Piton, G., Kuss, D., Charvet, G., Paulhe, R., Morel, M, et al. (2022). French experience with open check dams: Inventory and lessons learnt through adaptive management. **Check Dam Construction for Sustainable Watershed Management and Planning**, 1, 247–266.
- Chan, H. C., Yang, H. K., Lin, P. W. and Lee, J. T. (2020). Discharge formula for flows over open-check dams. **Flow Measurement and Instrumentation**, 72, 101690.
- Cui Y., Choi C. E., Liu, L. H. D. and Ng, C. W. W. (2018). Effects of particle size of mono-disperse granular flows impacting a rigid barrier. **Nat Hazards** (2018), 91, 1179–1201.
- Donzé, F. V., Richefeu, V. and Magnier, S. A. (2009). Advances in discrete element method applied to soil, rock and concrete mechanics. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, 8.
- Hao, M., Zhou, J. W., Yang, X. G. and Zhou, H. W. (2018a). Dynamical evolution properties of debris flows controlled by different mesh-sized flexible net barriers. **Arabian Journal of Geosciences**, 11(16), 465.
- Hao, S., Yong, Y. and Jin-feng, L. (2018b). Experimental study on characteristics of trapping and regulating sediment with an open-type check dam in debris flow hazard mitigation. **Journal of Mountain Science**, 15(9), 2001–2012.
- Hashimoto, H., Hashimura, K. Nagano, H. and Maricar, F. (2016). Experimental investigation into flow behavior of wood-sediment-water mixture at a grid type of open check dam. **International Journal of Erosion Control Engineering**, 9(4), 188–193.
- Horiguchi, H., Piton, G., Munir, M. B. and Mano, V. (2021). Driftwood and hybrid debris barrier interactions: process of trapping and prevention of releases during overtopping. **14th INTERPRAEVENT Congress: Natural hazards in a changing world**, 206–215.
- Iverson, R. M., George, D. L. and Logan, M. (2016). Debris flow runup on vertical barriers and adverse slopes. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 121(12), 2333–2357.

- Jean, M. (1999). The non-smooth contact dynamics method. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 177(3-4), 235-257.
- Jean, M. and Moreau, J. J. (1992). Unilaterality and dry friction in the dynamics of rigid body collections. In **1st Contact Mechanics International Symposium** (pp. 31-48). Switzerland: Lausanne.
- Jiang, R., Fei, W. P., Zhou, H. W., Huo, M., Zhou, J. W., Wang, J. M. and Wu, J. J. (2020). Experimental and numerical study on the load and deformation mechanism of a flexible net barrier under debris flow impact. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 79(5), 2213-2233.
- Jiang, Y-J. and Towhata, I. (2013). Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining wall. **Rock Mech Rock Eng**, 46, 713-729.
- Jiang, Y-J. and Zhao, Y. (2015). Experimental investigation of dry granular flow impact via both normal and tangential force measurements. **Géotechnique Letters**, 5(1), 33-38.
- Kong, Y., Guan, M., Li, X., Zhao, J. and Yan, H. (2022). How flexible, slit and rigid barriers mitigate two-phase geophysical mass flows: A numerical appraisal. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 127(6), e2021JF006587
- Kong, Y., Li, X. and Zhao, J. (2021a). Quantifying the transition of impact mechanisms of geophysical flows against flexible barrier. **Engineering Geology**, 289, 106188.
- Kong, Y., Zhao, J. and Li, X. (2021b). Hydrodynamic dead zone in multiphase geophysical flows impacting a rigid obstacle. **Powder Technology**, 386, 335-349.
- Lambert, S., Bourrier, F., Ceron-Mayer, A.R., Dugelas, L., Dudois, F. and Piton, G. (2023). Small-scale modeling of flexible barriers. I: Mechanical similitude of the structure. **Journal of Hydraulic Engineering**, 149(3), 04022043.
- Leonardi, A., Goodwin, G. R. and Pirulli, M. (2019). The force exerted by granular flows on slit dams. **Acta Geotechnica**, 14, 1949-1963.

- Li, X. (2018a). **Computational modelling of debris flows and their interaction with resisting barriers based on a coupled CFD–DEM approach**. Thesis (Ph.D.) Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology
- Li, X. and Zhao, J. (2018b). A unified CFD–DEM approach for modeling of debris flow impacts on flexible barriers. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 42(14), 1643–1670
- Li, X., Sovilla, B., Jiang, C. and Gaume, J. (2020). The mechanical origin of snow avalanche dynamics and flow regime transitions. **The Cryosphere**, 14(10), 3381–3398.
- Li, X., Zhao, J. and Soga, K. (2021). A new physically based impact model for debris flow. **Géotechnique**, 7(8), 674–685.
- Liu, C., Yu, Z. and Zhao, S. (2021). A coupled SPH–DEM–FEM model for fluid–particle–structure interaction and a case study of Wenjia gully debris flow impact estimation. **Landslides**, 18(7), 2403–2425.
- Moriyama, H., Kokuryo, H., Yamaguchi, M., Inoue, R., Ishikawa, N. and Shima, J. (2014). Debris flow capture investigation of steel open–type sabo dams around Mt. **Aso JAPAN. INTERPRAEVENT 2014 IN NARA.**
- Moriyama, H., Kokuryo, H., Yamaguchi, M., Inoue, R., Ishikawa, N. and Shima, J. (2016). Prevention and mitigation of debris flow hazards by using steel open–type sabo dams. **International Journal of Erosion Control Engineering**, 9(3), 135–144.
- NG, C. W. W., Choi, C. E., Koo, R. C. H., Goodwin, G. R., Song, D. and Kwan, J. S. H. (2018). Dry granular flow interaction with dual–barrier systems. **Géotechnique**, 68(5), 386–399.
- Nucci, E., Armanini, A. and Larcher, M. (2019). Drag forces in statistically stationary and homogeneous submerged granular flows. **Physical Review E**, 99(4), 042904.
- Okamoto, T., Takebayashi, H., Sanjou, M., Suzuki, R. and Toda, K. (2019). Log jam formation at bridges and the effect on floodplain flow: A flume experiment. **Journal of Flood Risk Management**, 13(1), e12562.

- Piton, G. and Recking, A. (2016a). Design of sediment traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and deposition processes. **Journal of Hydraulic Engineering**, 142(2), 04015045.
- Piton, G. and Recking, A. (2016b). Design of sediment traps with open check dams. II: woody debris. **Journal of Hydraulic Engineering**, 142(2), 04015046.
- Piton, G., Ceron-Mayer, A. R. and Lambert, S. (2023). Small-scale modeling of flexible barriers. II: Interactions with large wood. **Journal of Hydraulic Engineering**, 149(3), 04022044.
- Piton, G., Horiguchi, T., Marchal, L. and Lambert, S. (2020). Open check dams and large wood: head losses and release conditions. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 20(12), 3293–3314.
- Piton, G., Mano, V., Richard, D., Evin, G., Laigle, D., Tacnet, J.M., et al. (2019). Design of a debris retention basin enabling sediment continuity for small events: the Combe de Lancey case study (France). **International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation**, 7, 1019–1026.
- Radjai, F. and Vincent, R. (2009). Contact dynamics as a non-smooth discrete element method. **Mechanics of Materials**, 41, 715–728.
- Rossi, G. and Armanini, A. (2020). Experimental analysis of open check dams and protection bars against debris flows and driftwood. **Environmental Fluid Mechanics**, 20(3), 559–578.
- Sánchez, P., Renouf, M., Azéma, E., Mozul, R. and Dubois, F. (2021). A contact dynamics code implementation for the simulation of asteroid evolution and regolith in the asteroid environment. **Icarus**, 15, 114441.
- Schwindt, S., Franca, M. J., Reffo, A. and Schleiss, A. J. (2018). Sediment traps with guiding channel and hybrid check dams improve controlled sediment retention. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 18(2), 647–668.
- Schwindt, S., Piton, G., Recking, A. and Schleiss, A. (2016). Study of the effects of a distanced retention basin combined with open check dam. In **13<sup>th</sup> Congress INTERPRAEVENT 2016**.

- Shima, J., Moriyama, H., Kokuryo, H., Ishikawa, N. and Mizuyama, T. (2016). Prevention and mitigation of debris flow hazards by using steel open-type sabo dams. **International Journal of Erosion Control Engineering**, 9(3), 135–144.
- Silva, M., Costa, S. and Cardoso, A. H. (2015a). Effect of plan layout on the sediment control efficiency of Slit-check dams for stony type debris flows mitigation. **WIT Transactions on Ecology and The Environment**, 197, 259–270.
- Silva, M., Costa, S. and Cardoso, A. H. (2015b). Slit-check dams for stony type debris flows mitigation. Experimental Study to Evaluate Sediment Control Efficiency. In **Dam World Conference** Lisbon, Portugal, 21–24 April 2015.
- Silva, M., Costa, S., Canelas, R. B., Pinheiro, A. N. and Cardoso, A. H. (2016). Experimental and Numerical study of slit-check dams. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, 11, 107–118.
- Takahiro, I., Shigeo, H., Takahisa, M. and Kazuhiko, K. (2013). Hydraulic model tests for evaluating sediment control function with a grid-type Sabo dam in mountainous torrents. **International Journal of Sediment Research**, 28(4), 511–522.
- Tan, D. Y., Feng, W. Q., Yin, J. H., Zhu, Z. H. and Qin, J. Q. (2021). Numerical study of retention efficiency of a flexible barrier in mitigating granular flow comparing with large-scale physical modeling test data. **Acta Geotechnica**, 16(2), 433–448.
- Viccione, G., Ferlisi, E. and Marra, E. (2015). A numerical investigation of the interaction between debris flows and defense barriers. **Advances in Environmental and Geological Science and Engineering**, 38, 332–342.
- Wang, S., Zhang, Q. and Ji, S. (2021). GPU-based parallel algorithm for super-quadric discrete element method and its applications for non-spherical granular flows. **Advance in Engineering Software**, 151, 102931.
- 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. University Librariad, Marine, Earth and Atmospheric Sciences.

- Xie, Xp., Wei, Fq., Yang, Hj. and Xie, T. (2017). Experimental study on large wood filtration performance by herringbone water–sediment separation structure. **Journal of Mountain Science**, 14(2), 269–281.
- Yu, J., Jia, C., Xu, W., Zhang, Q. and Wu, C. (2021) Granular discrete element simulation of the evolution characteristics of the shear band in soil–rock mixture based on particle rotation analysis. **Environmental Earth Sciences**, 80(6), 213.
- Zhang, B., Huang, Y. and Liu, J. (2021). Micro–mechanism and efficiency of baffle structure in deceleration of granular flows. **Acta Geotechnica**, 16(11), 3667–3688.
- Zhao, H., Yao, L., You, Y., Wang, B. and Zhang, C. (2018). Experimental study of the debris flow slurry impact and distribution. **Shock and Vibration**, 2018, 5460362.

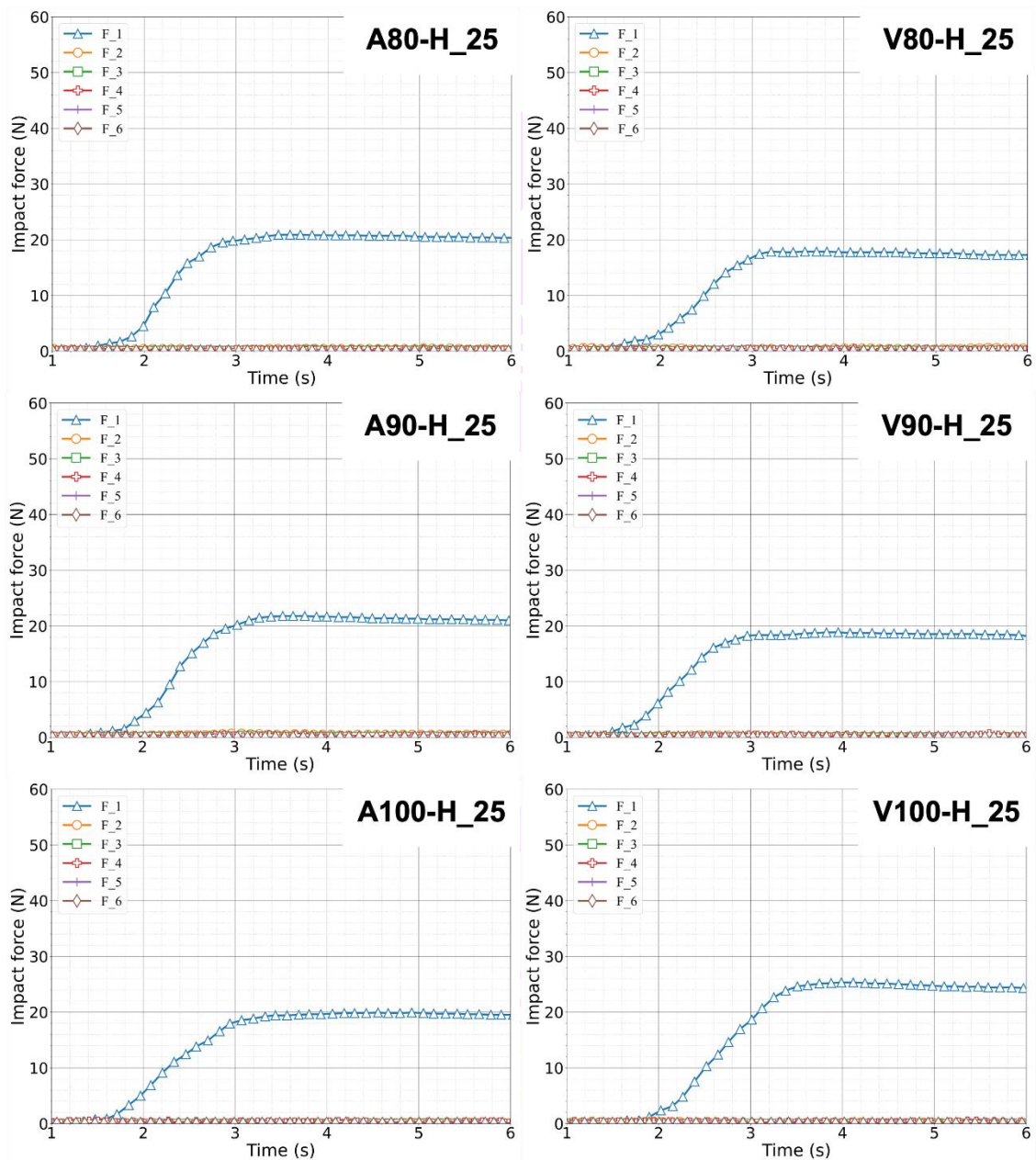


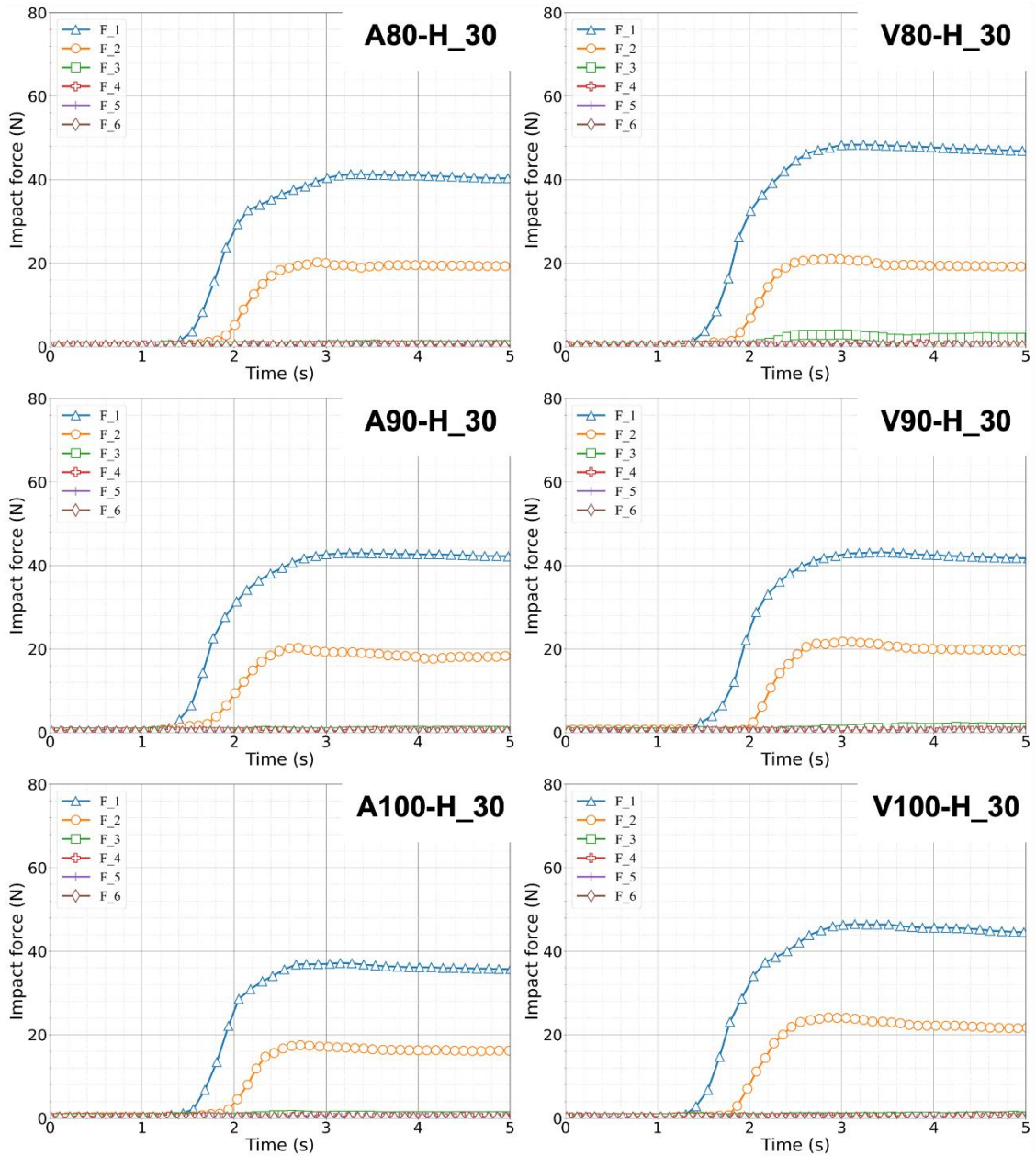


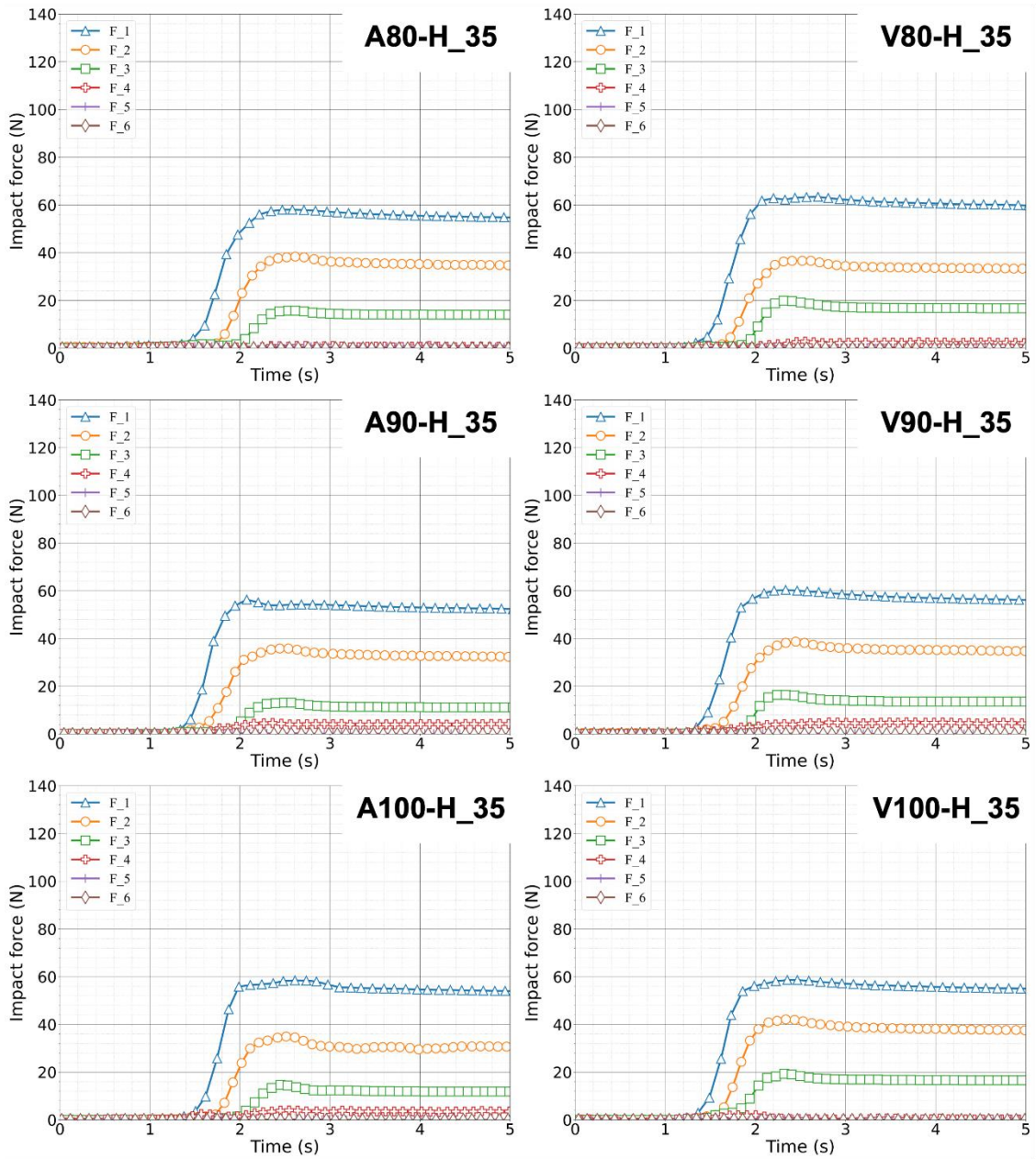
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก แรงกระแทกย่อยของการทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้

( $s/d_{90} = 1.90$ )

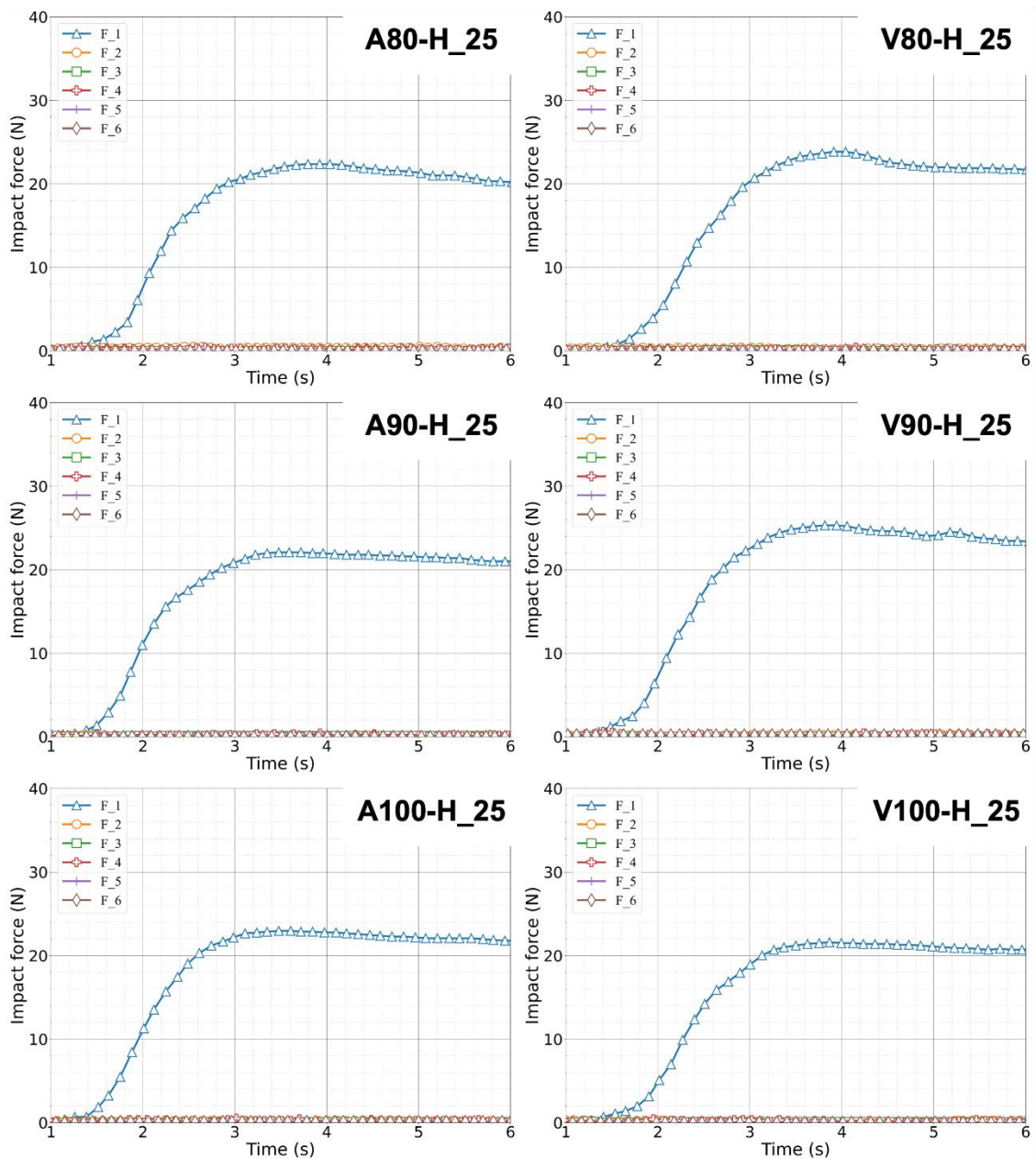


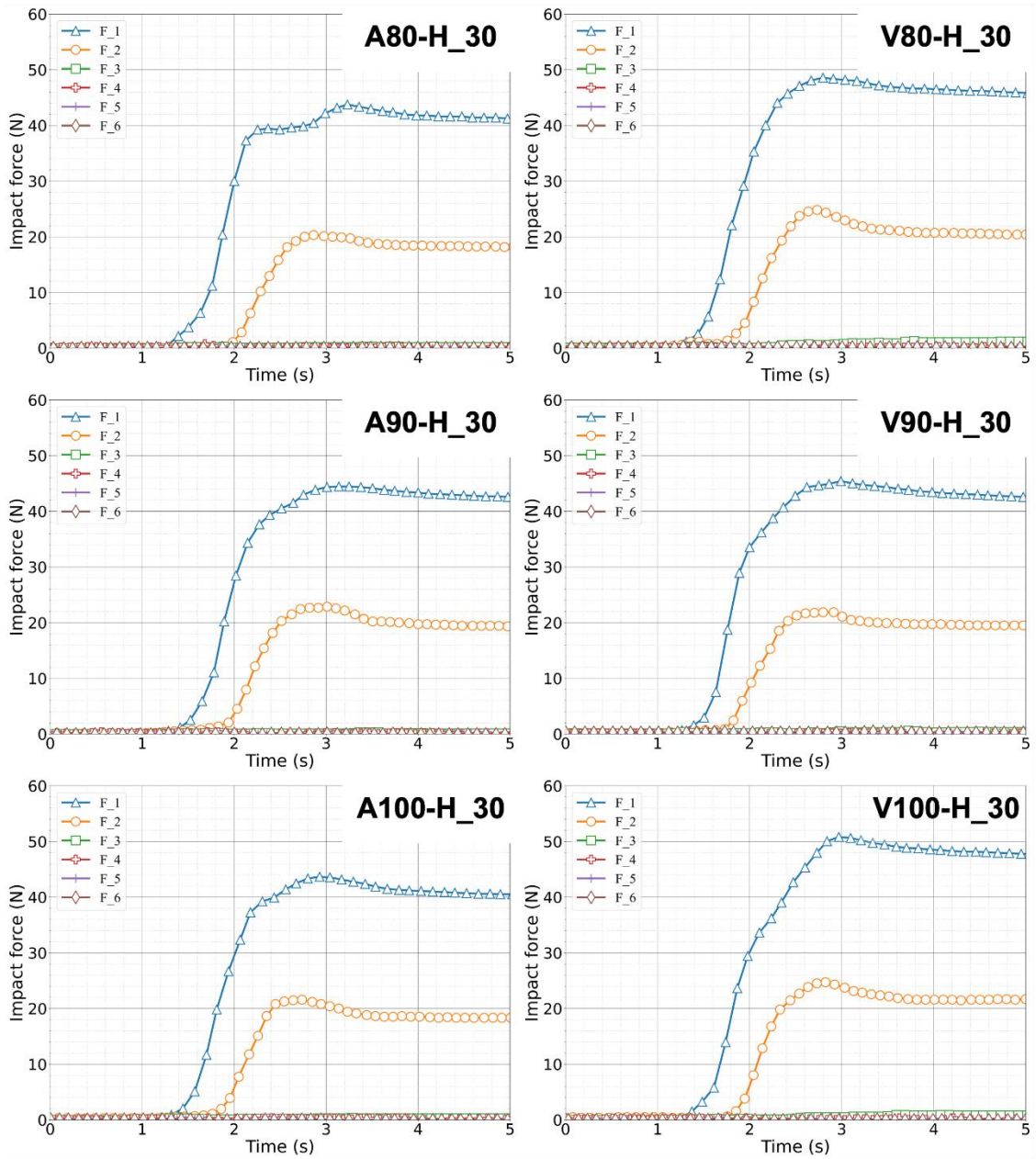


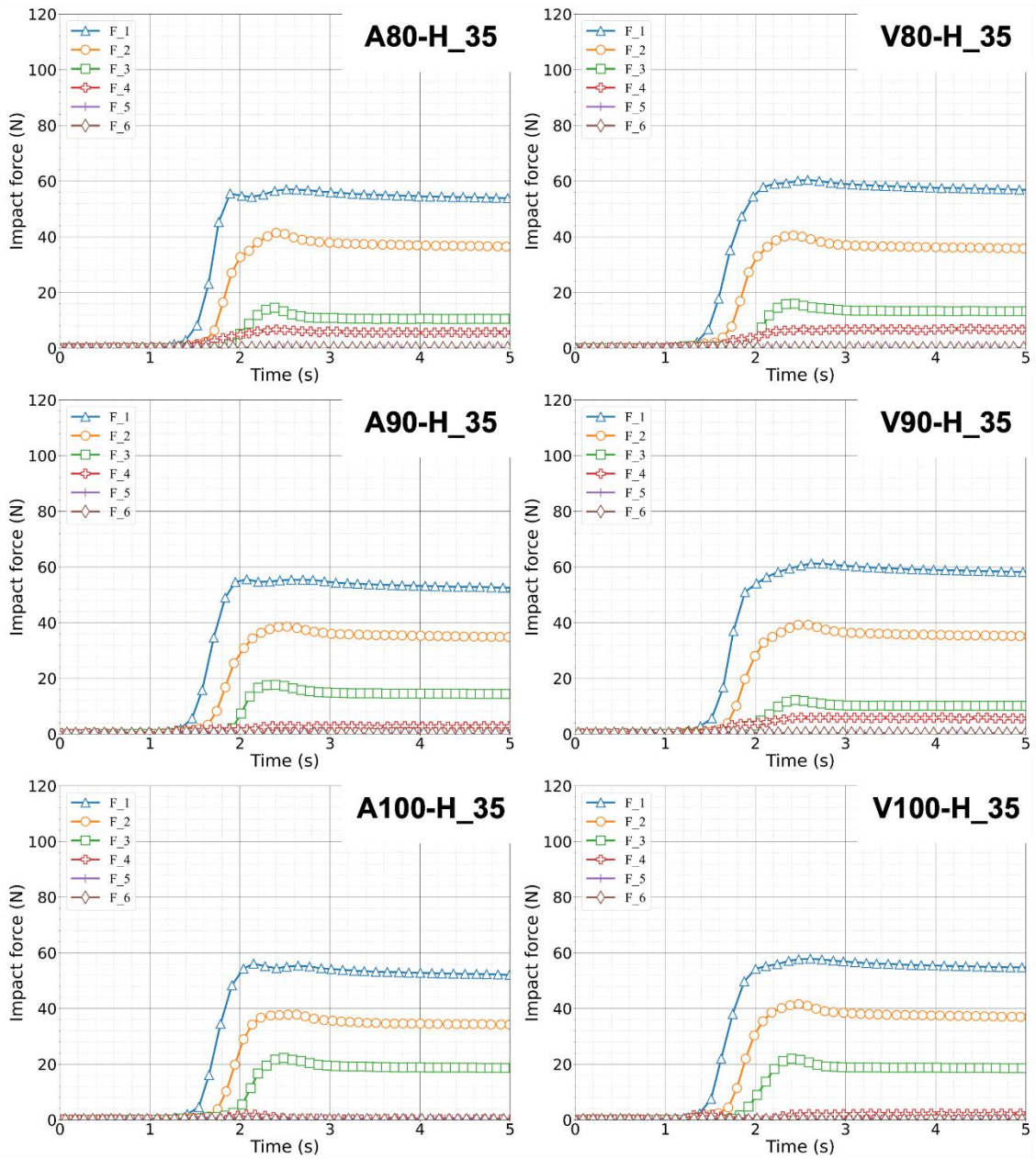


ภาคผนวก ข แรงกระแทกย่อยของการทดลองการไหลของวัสดุเม็ดแห้งไม่ผสมเศษท่อนไม้

( $s/d_{90} = 1.90$ )

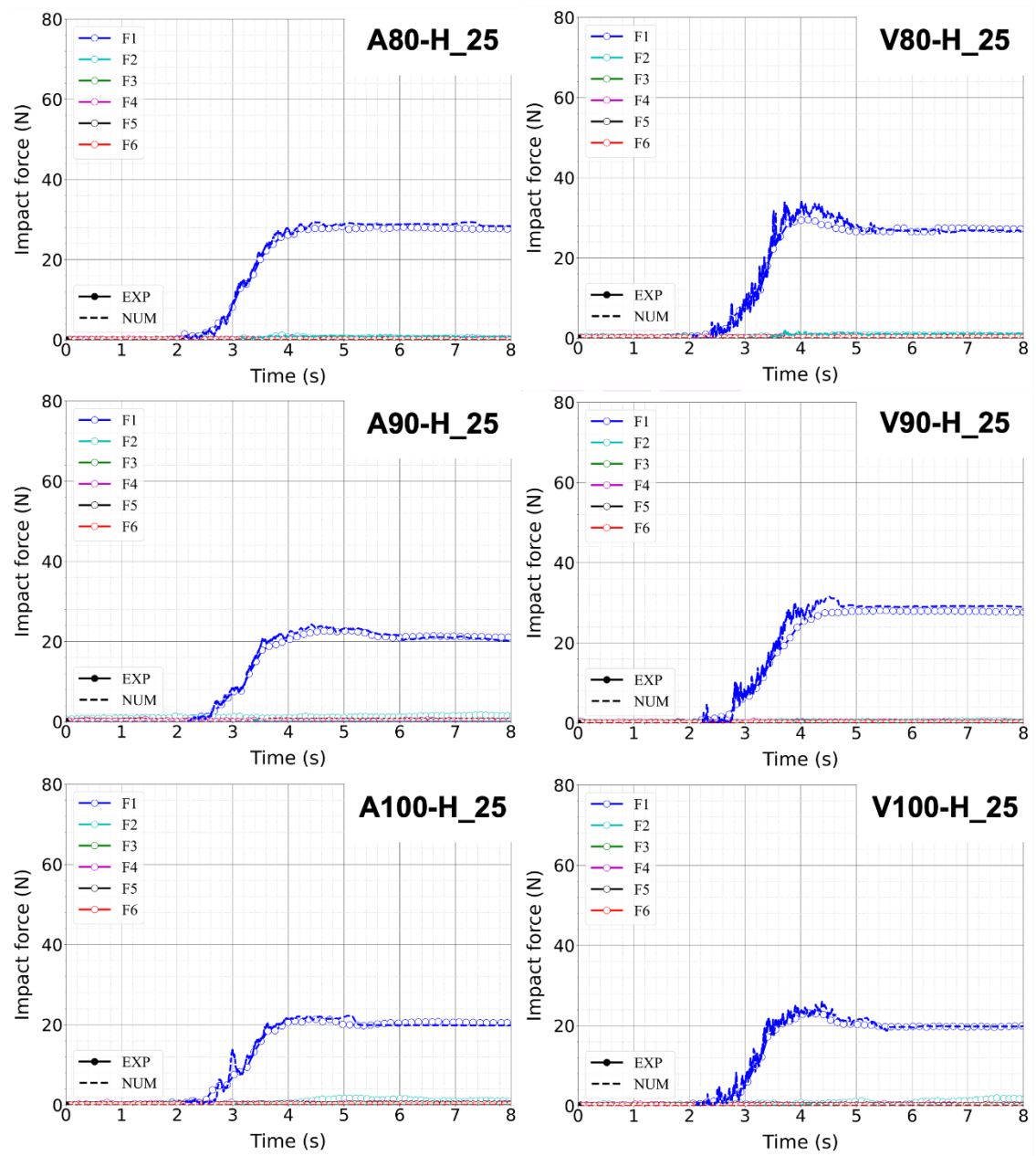


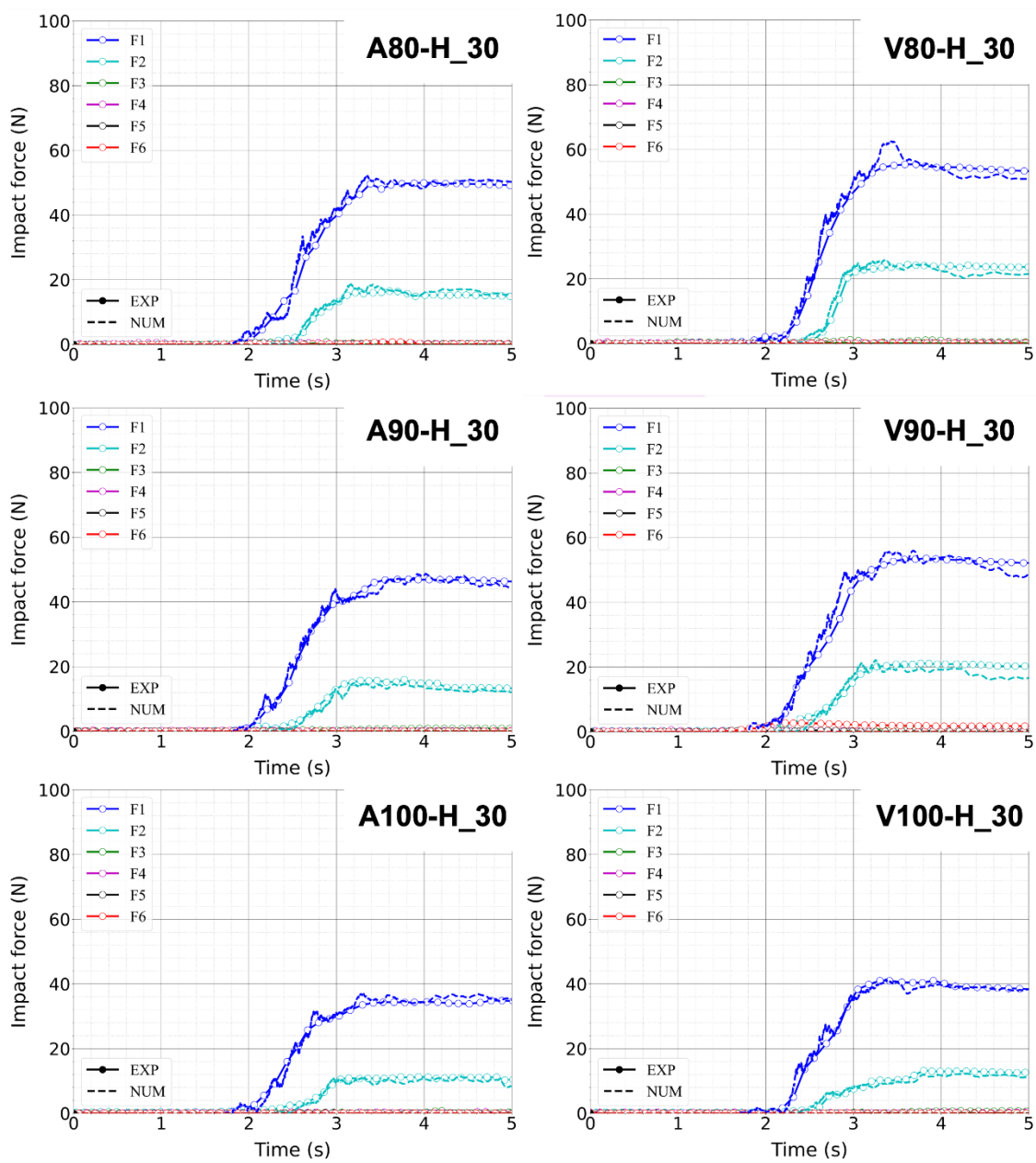


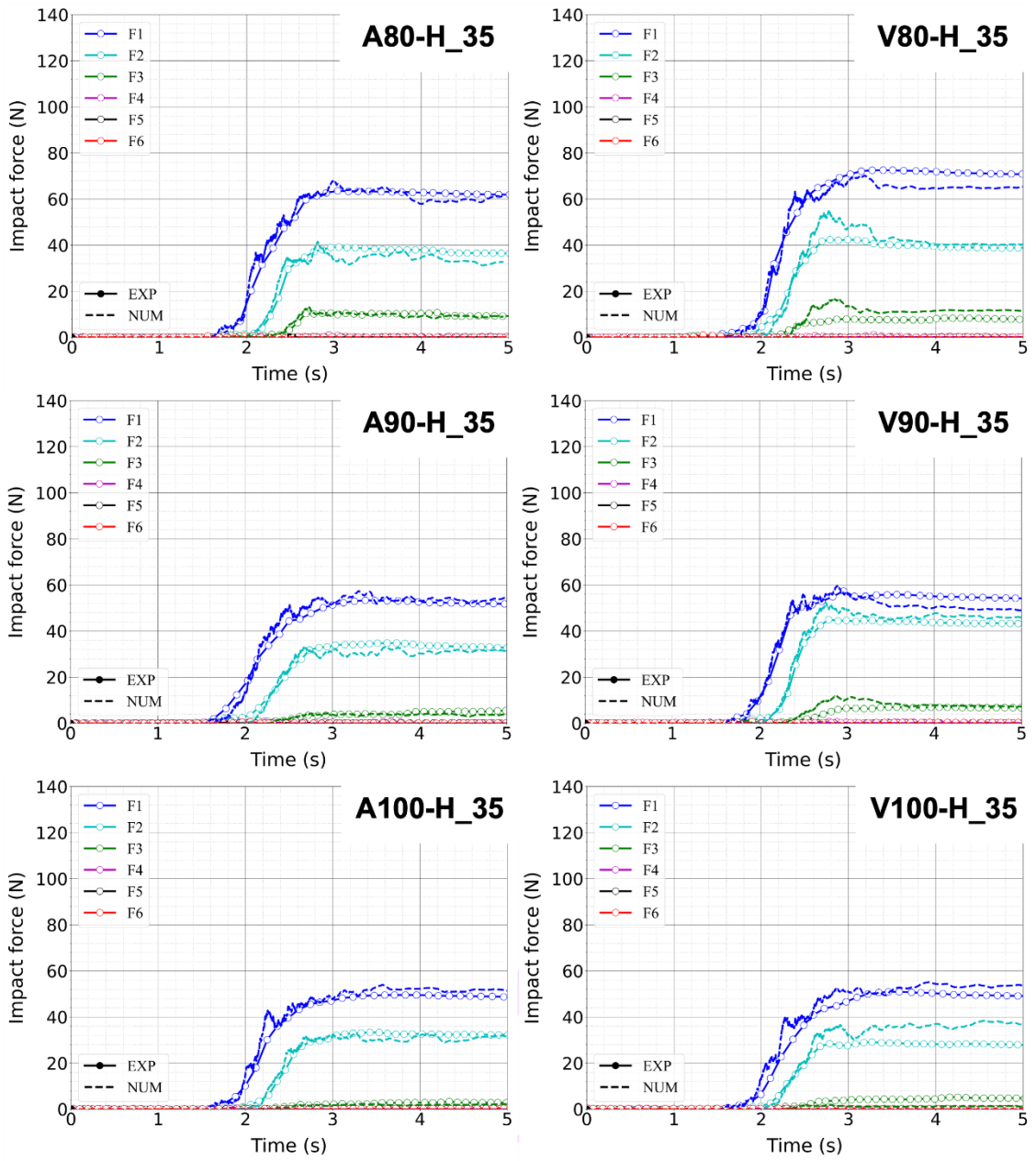


ภาคผนวก ค แรงกระแทกย่อยเนื่องจากการไหลของวัสดุเม็ดแห้งในแบบจำลอง  
ทางกายภาพและแบบจำลองเชิงตัวเลข

( $s/d_{90} = 0.86$ )

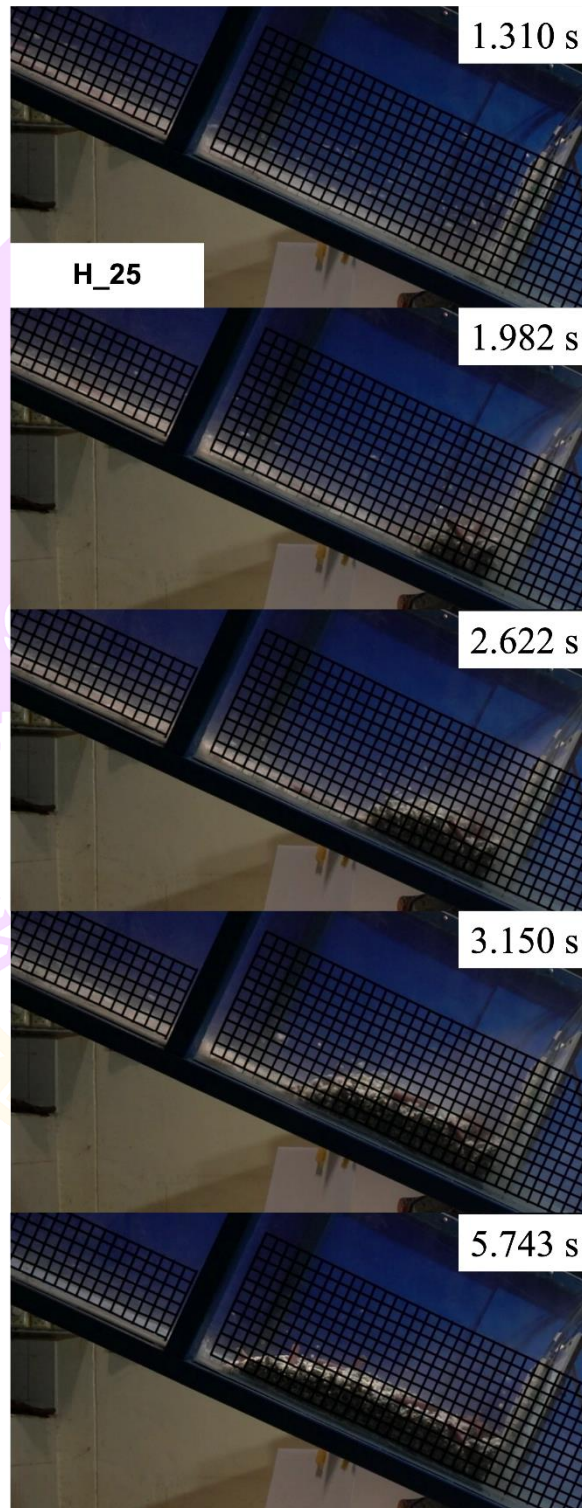


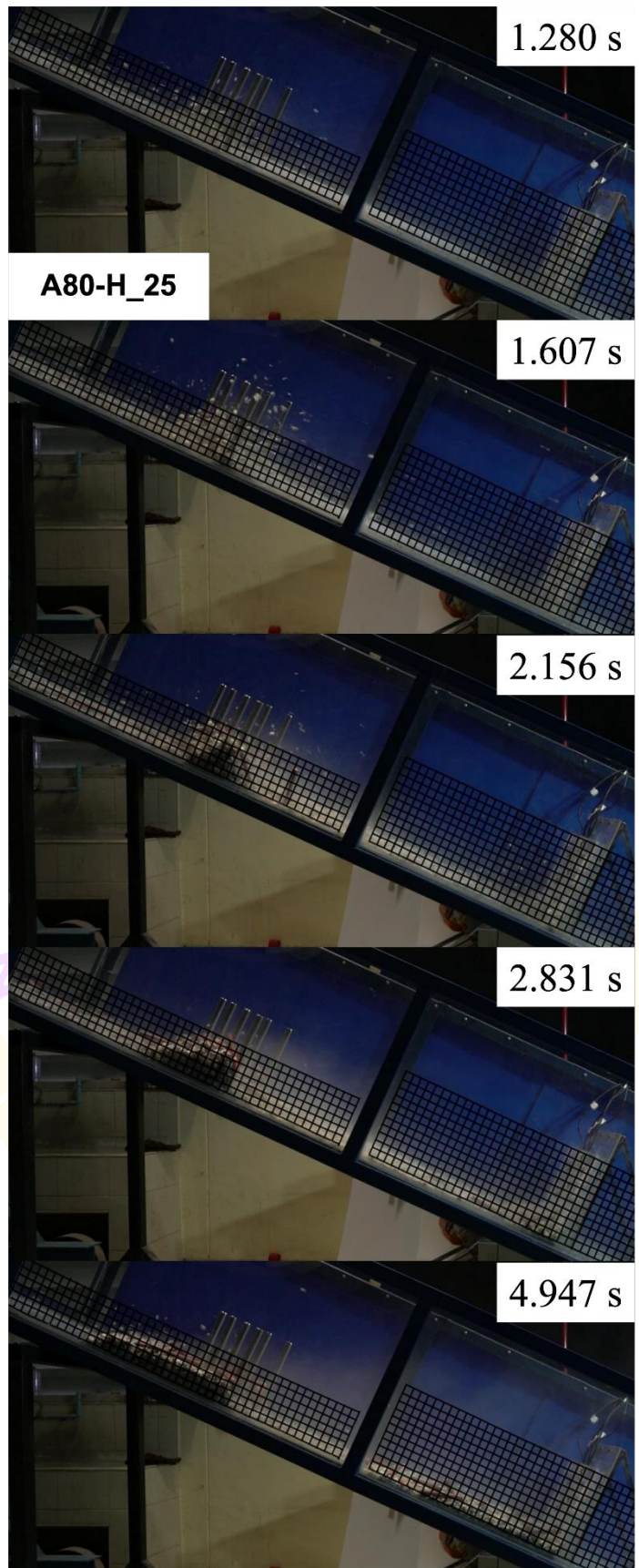




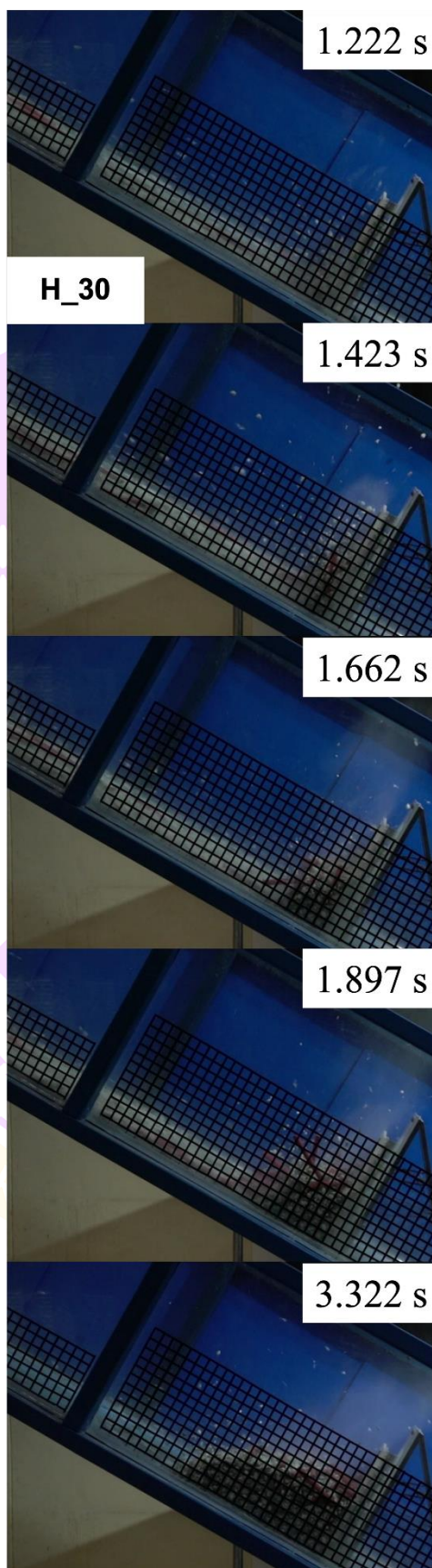
ภาคผนวก ง ภาพที่ถ่ายจากกล้องบันทึกภาพของการไหลวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้

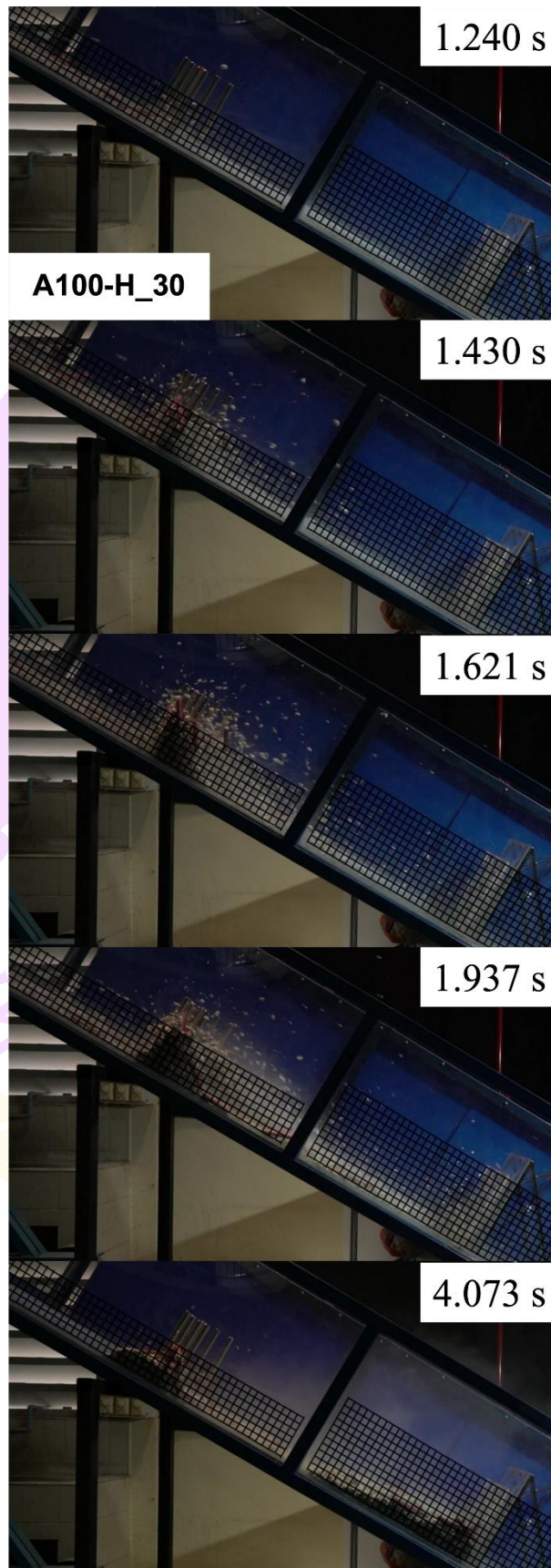
( $s/d_{90} = 1.90$ )



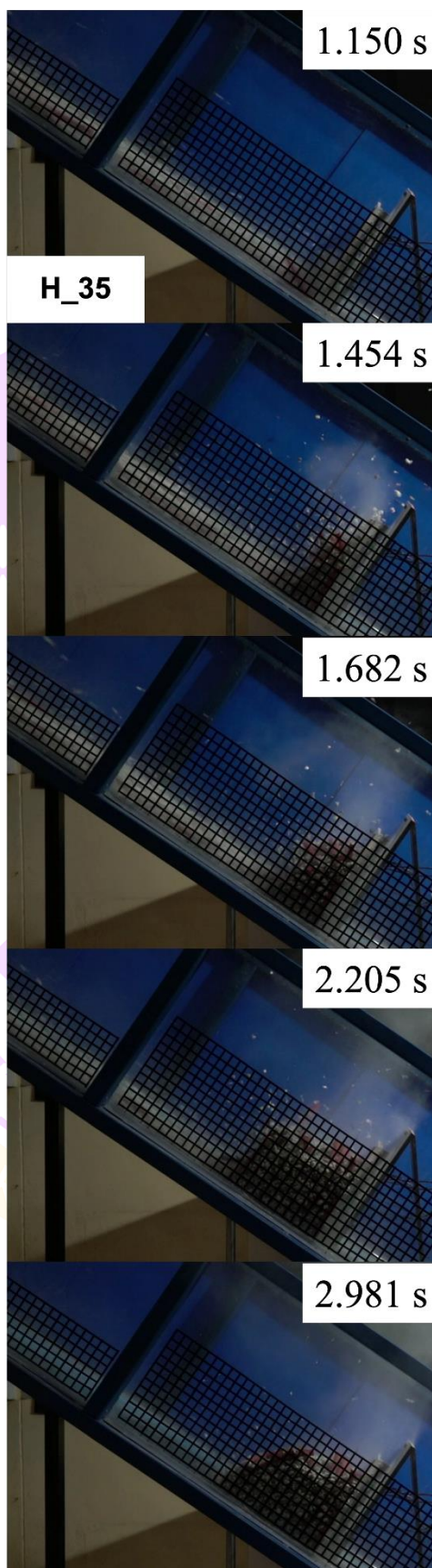


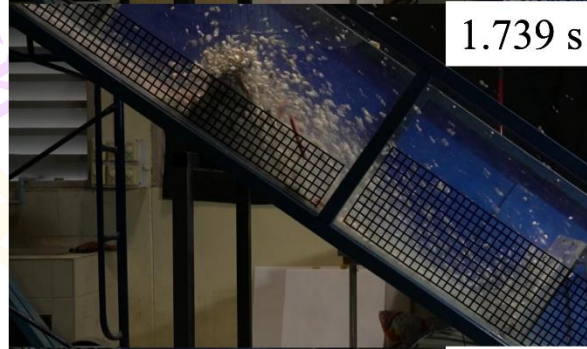
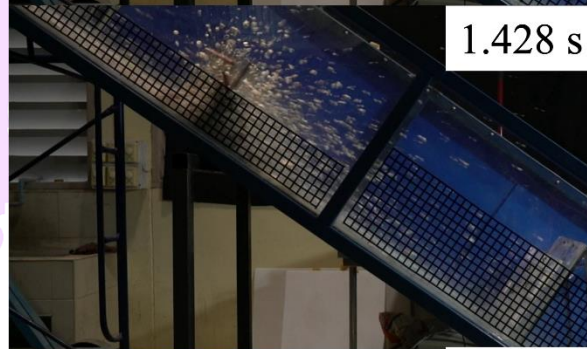
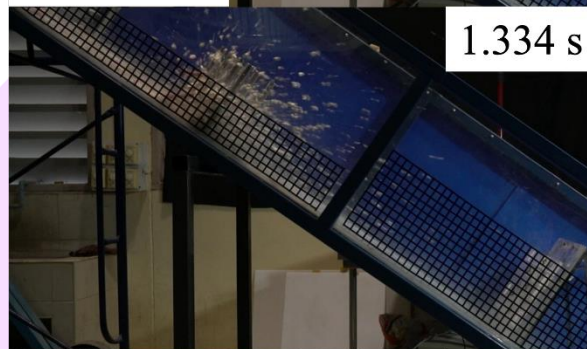
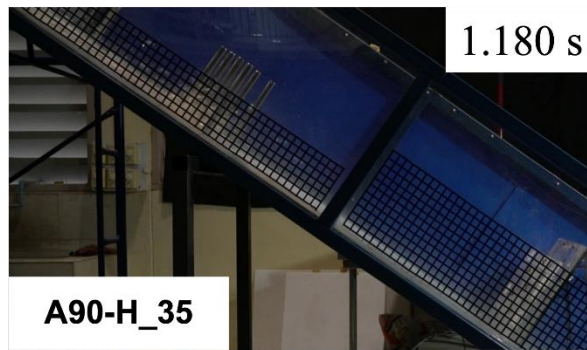


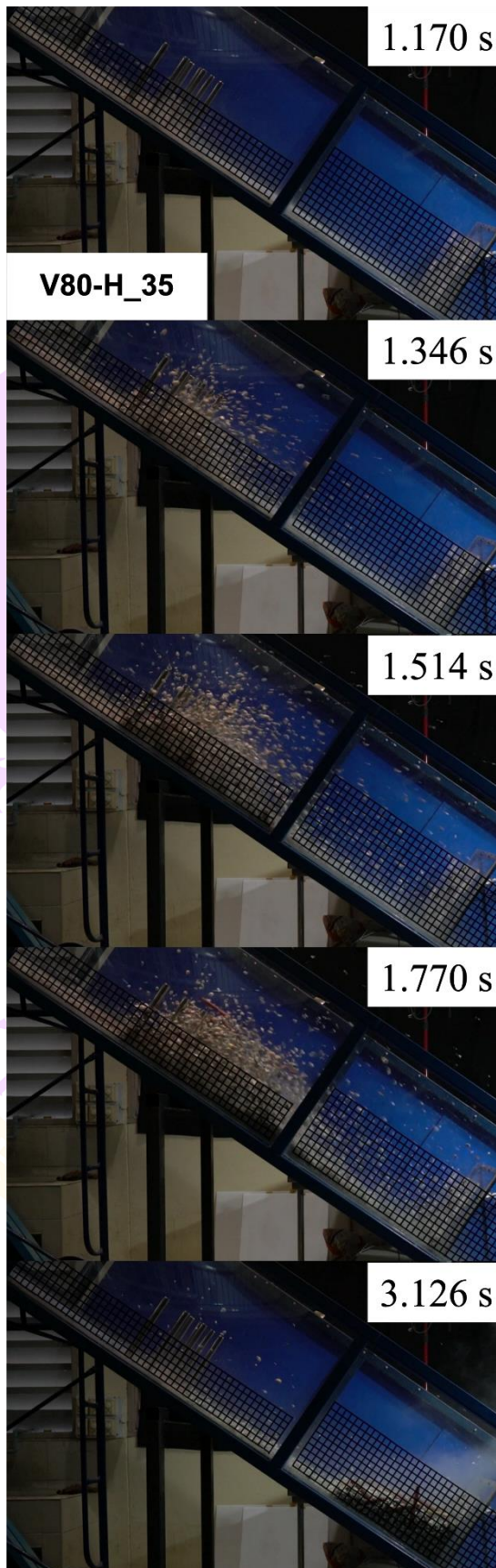






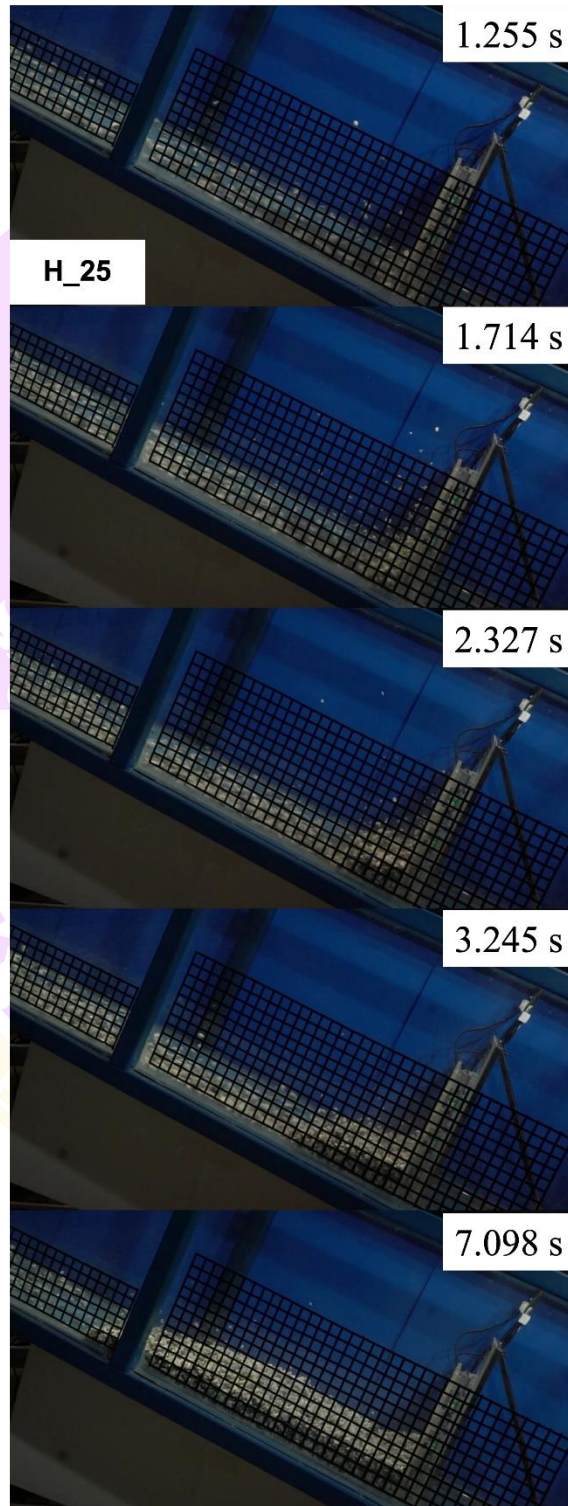


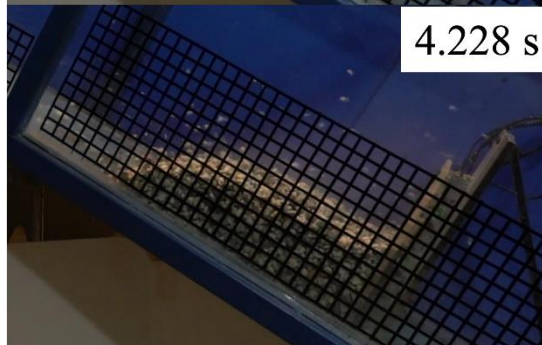
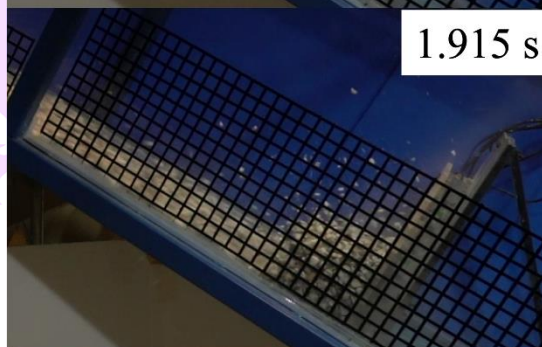
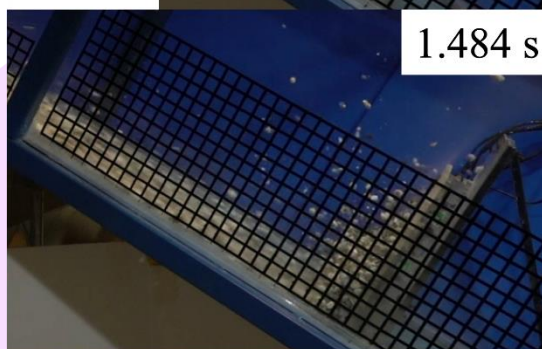
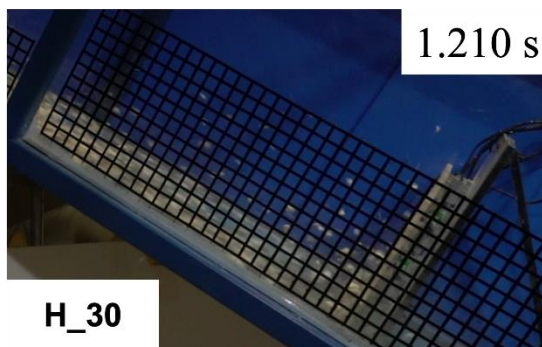


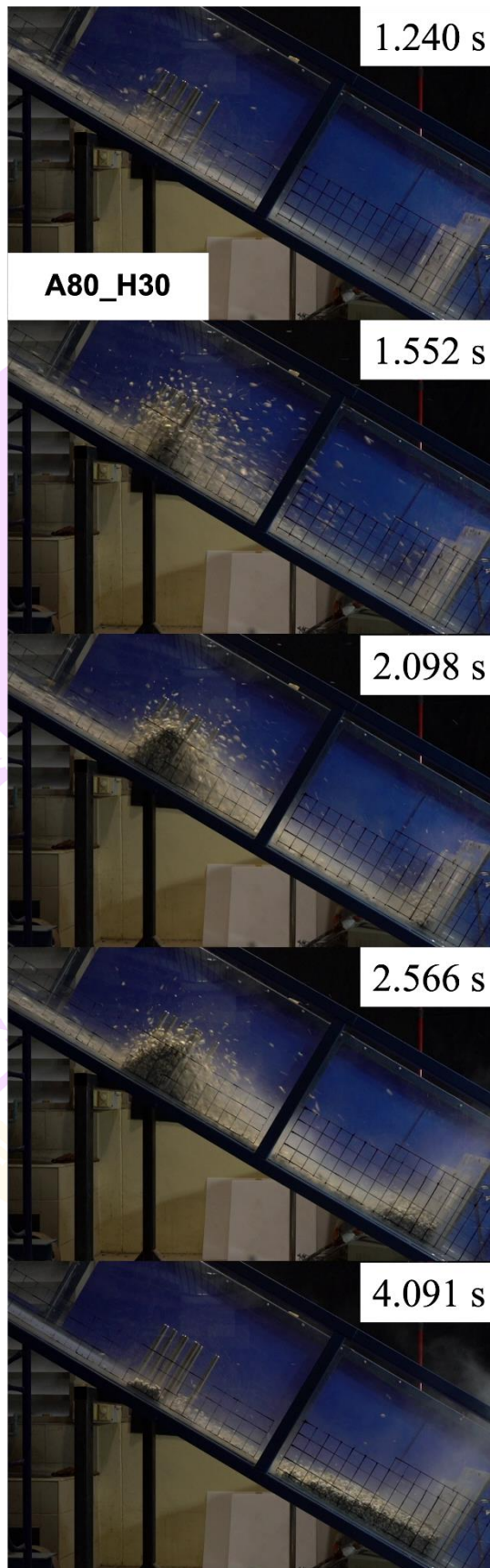


ภาคผนวก จ ภาพที่ถ่ายจากกล้องบันทึกภาพของการไหลวัสดุเม็ดแห้ง

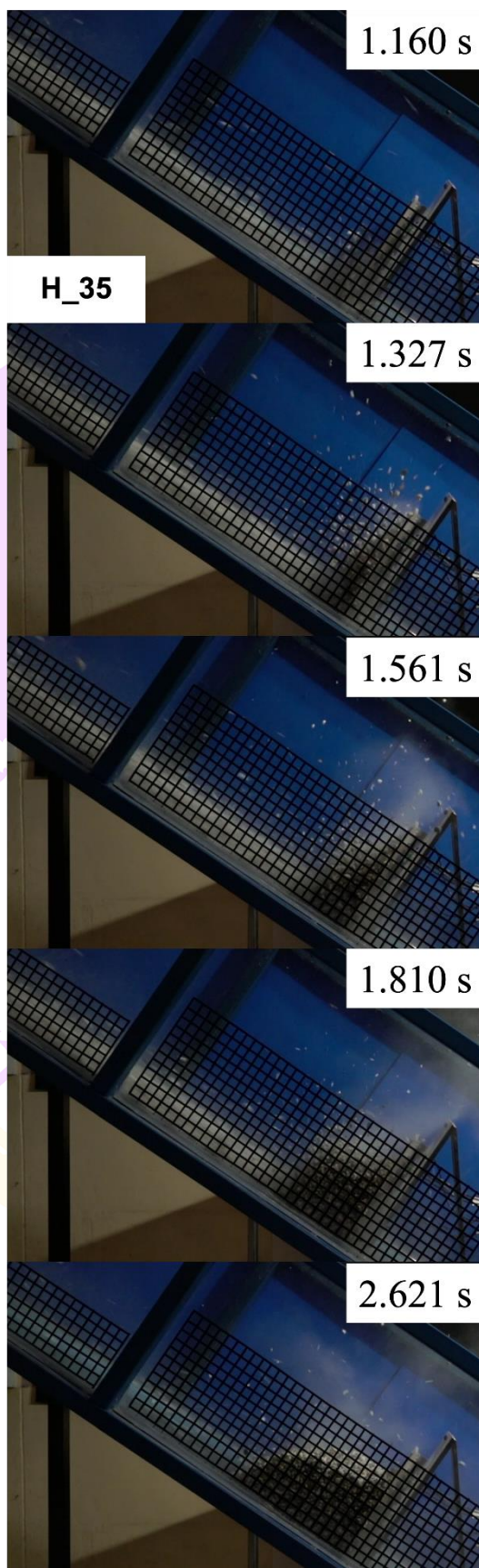
( $s/d_{90} = 1.90$ )

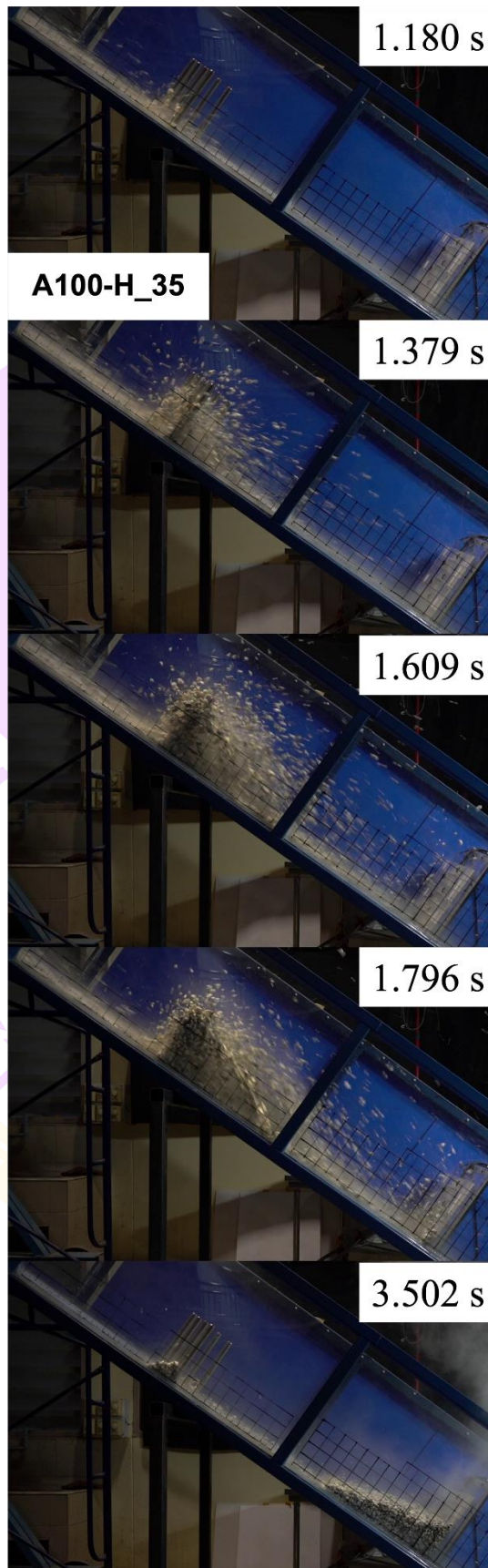








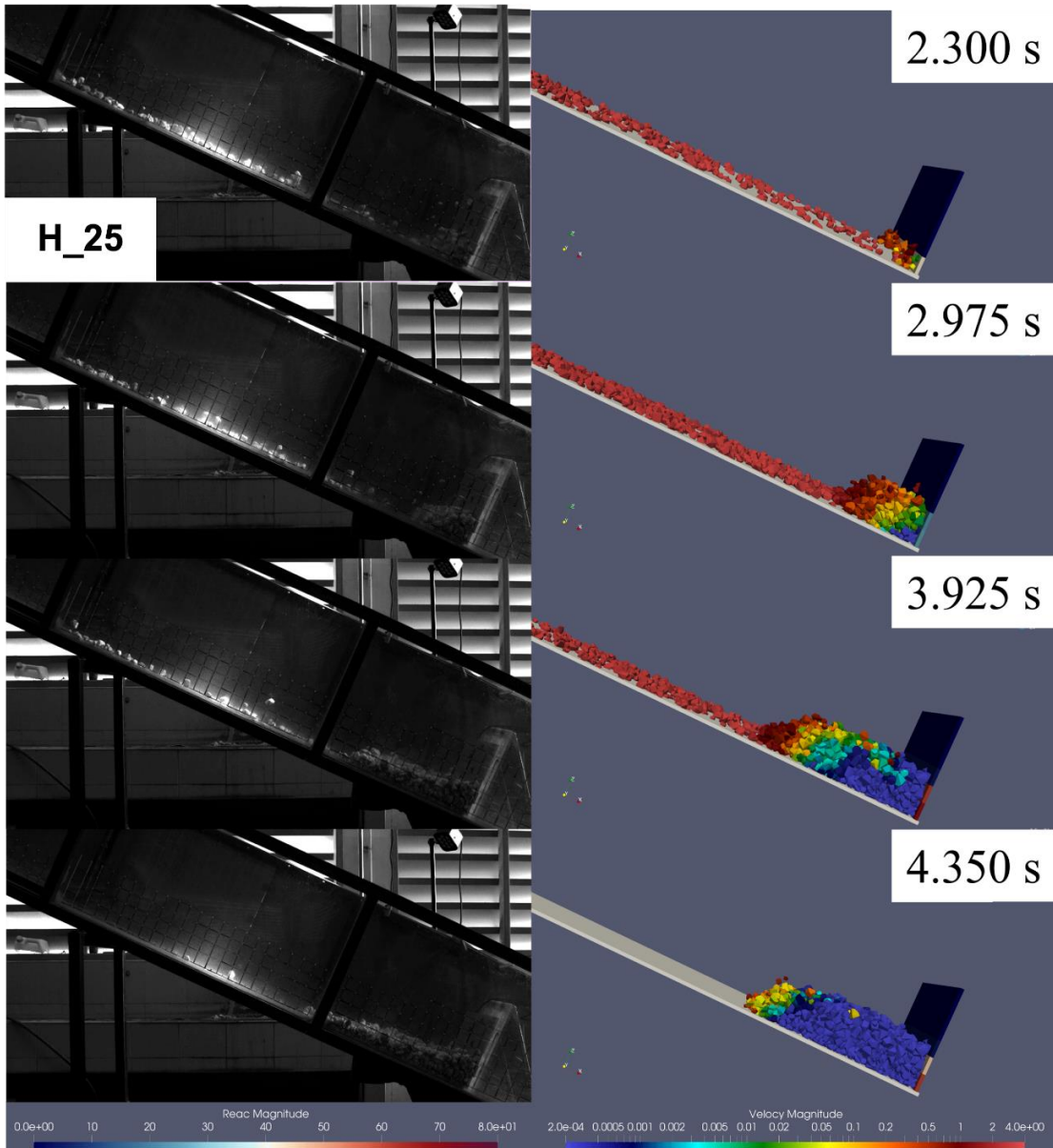


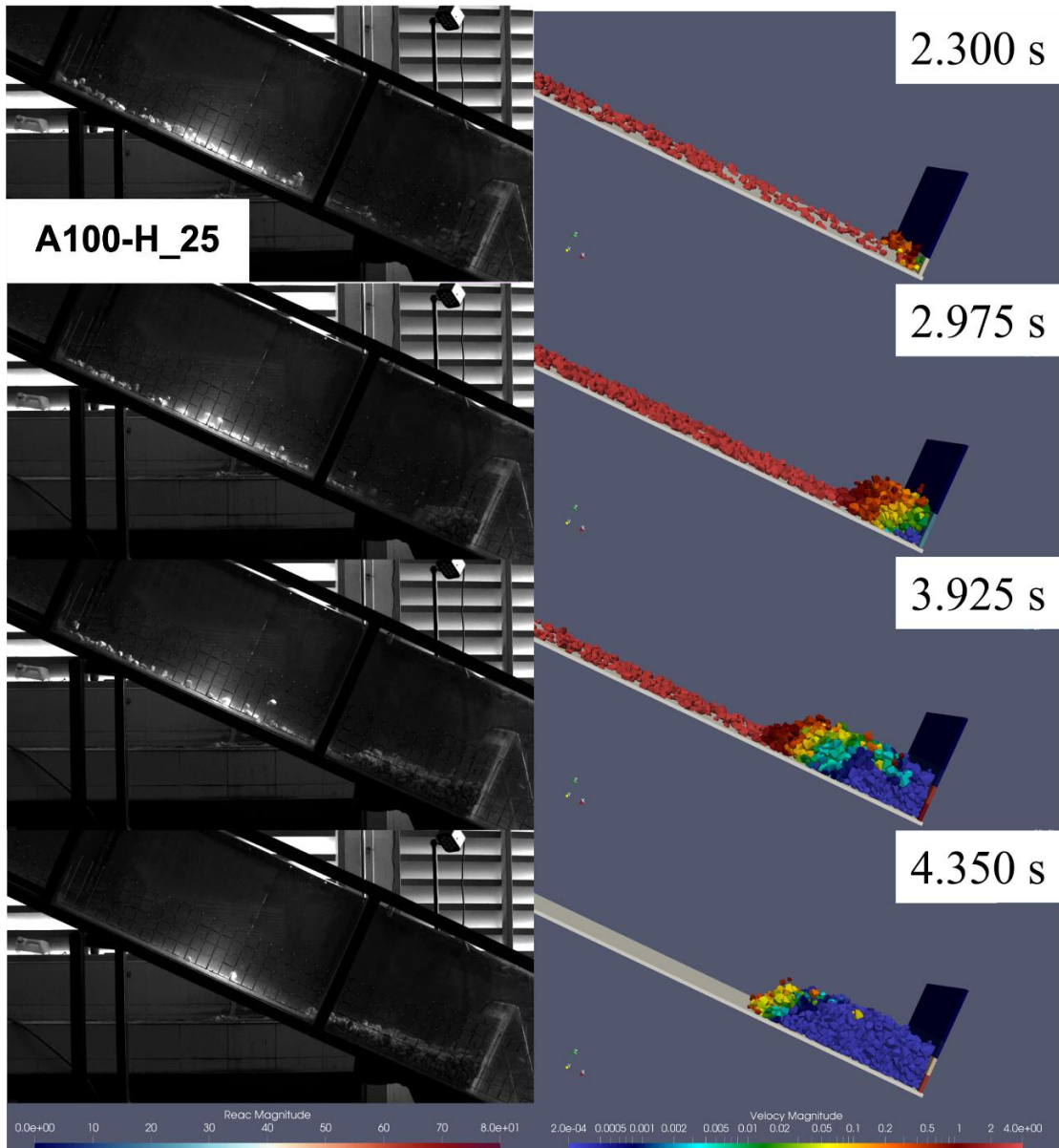


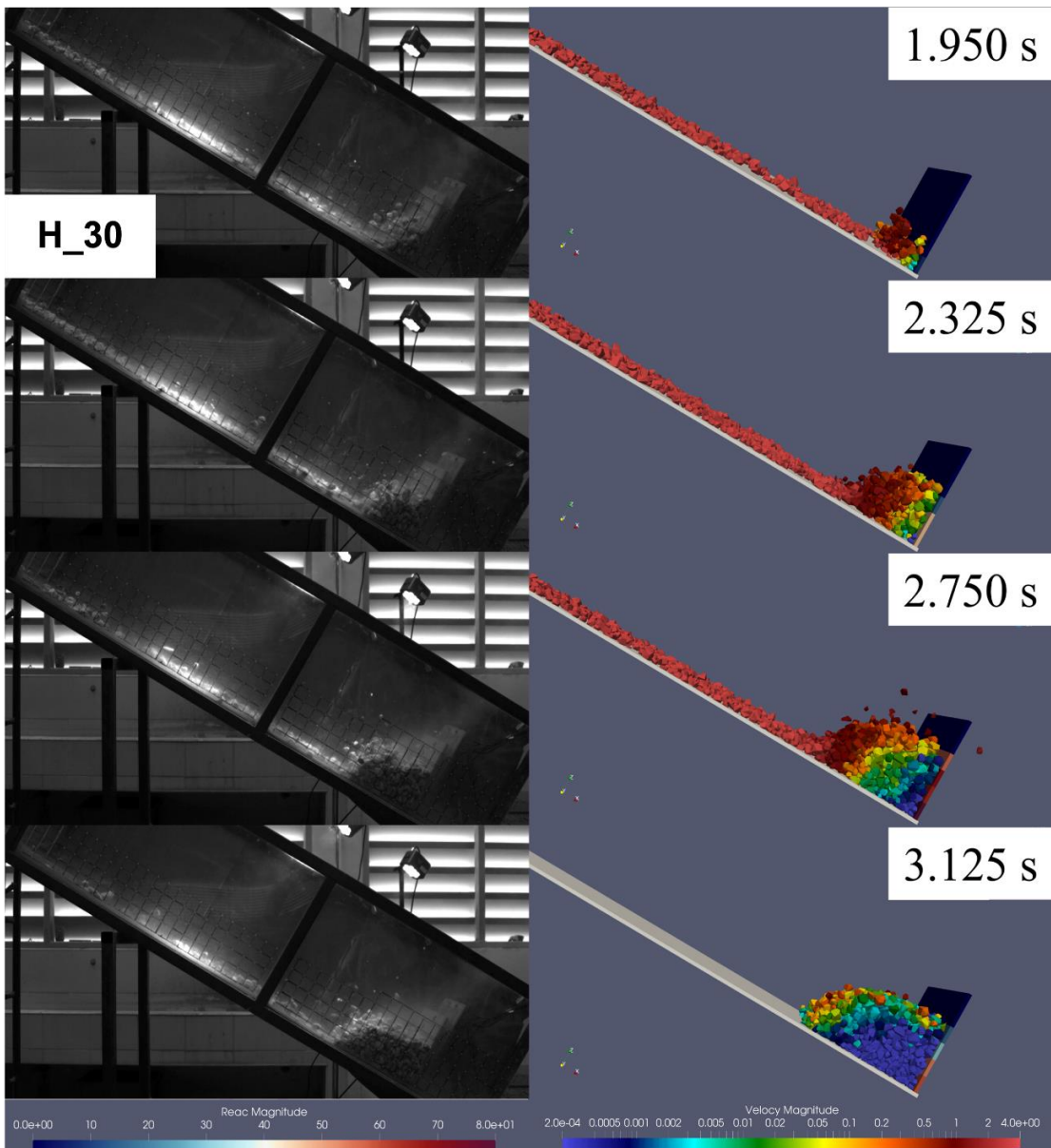


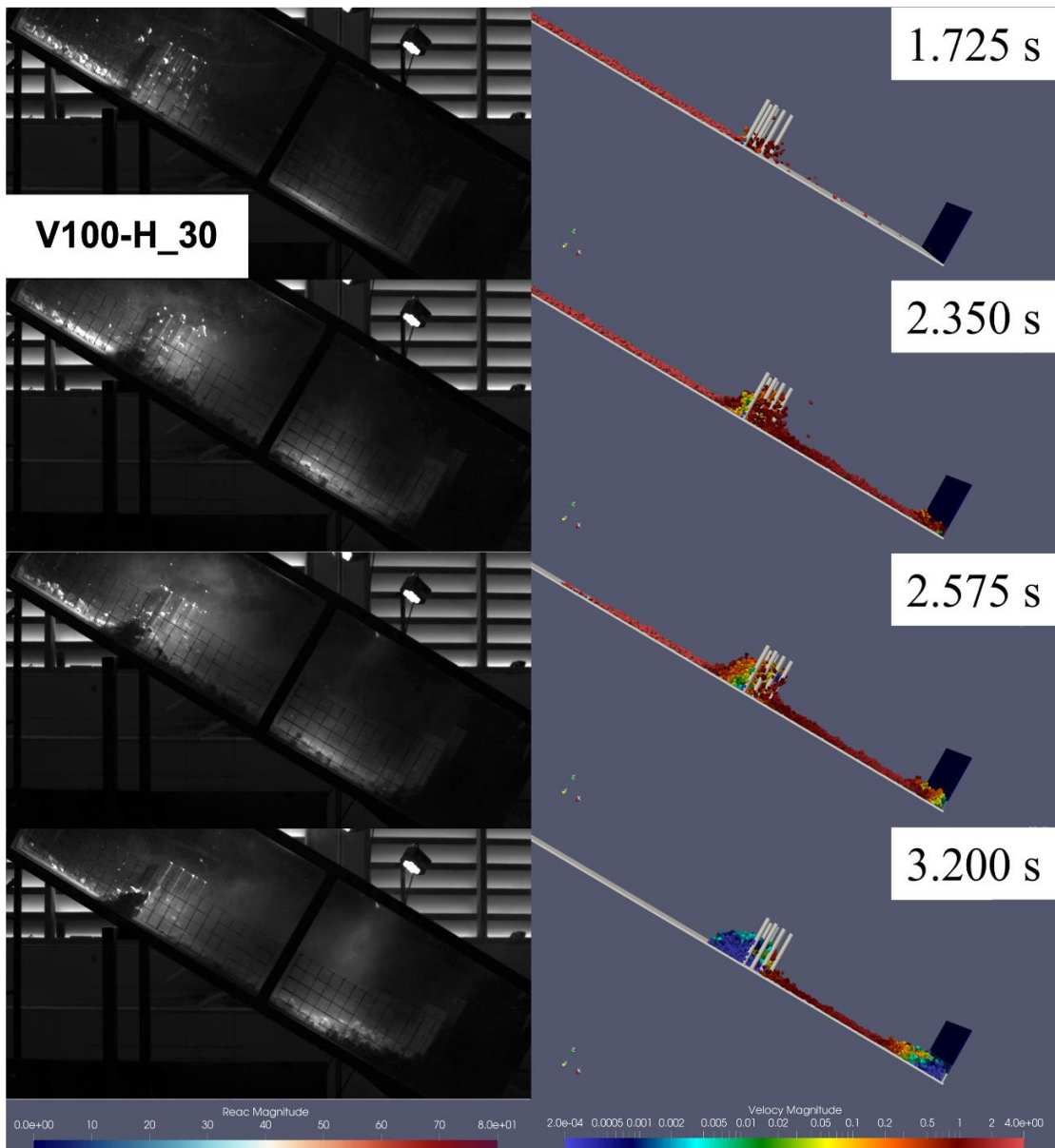
ภาคผนวก ฉ ภาพเหตุการณ์ของการไหลวัสดุเม็ดแห้งในแบบจำลองทางกายภาพ  
และแบบจำลองเชิงตัวเลข

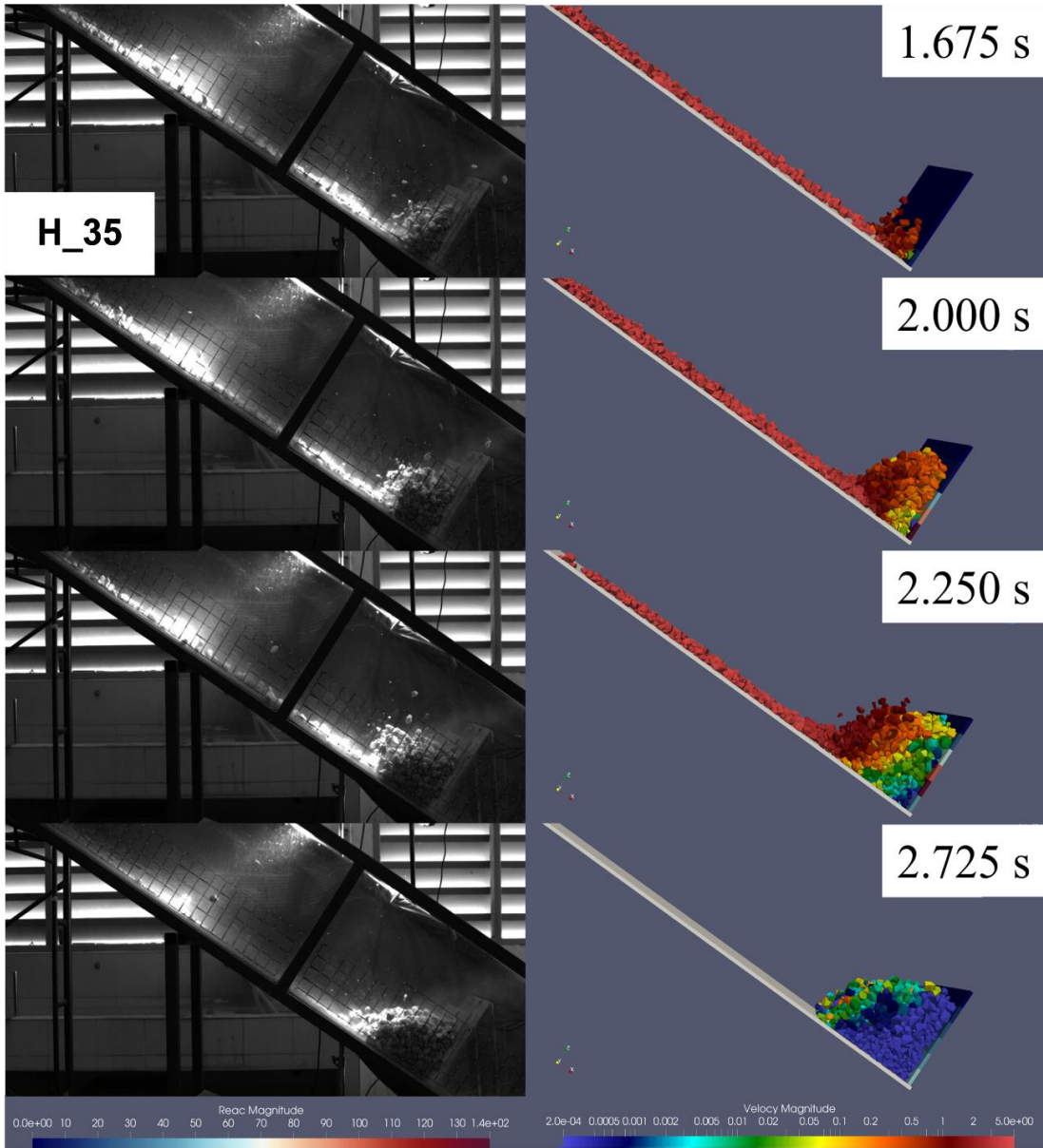
( $s/d_{90} = 0.86$ )

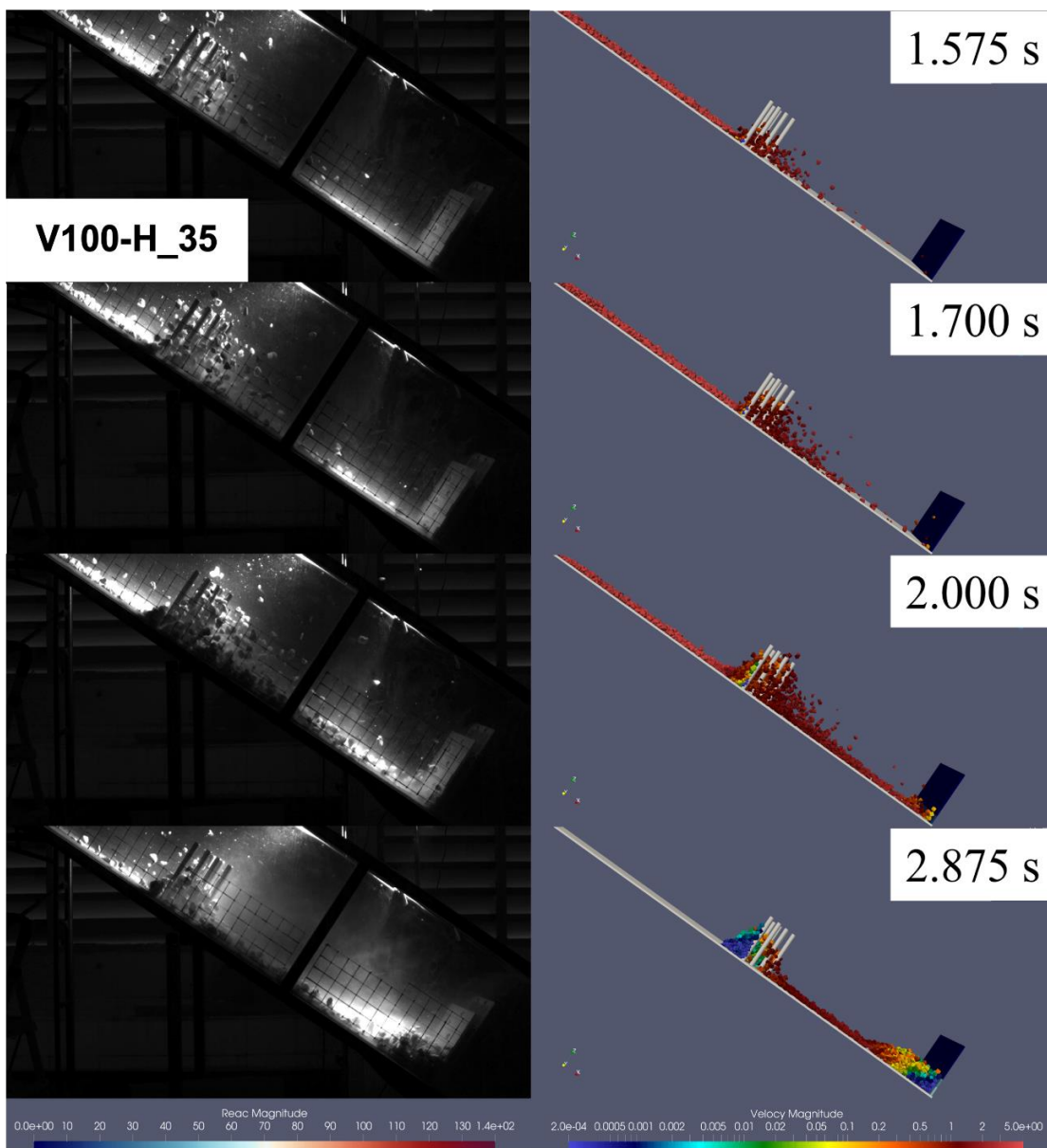


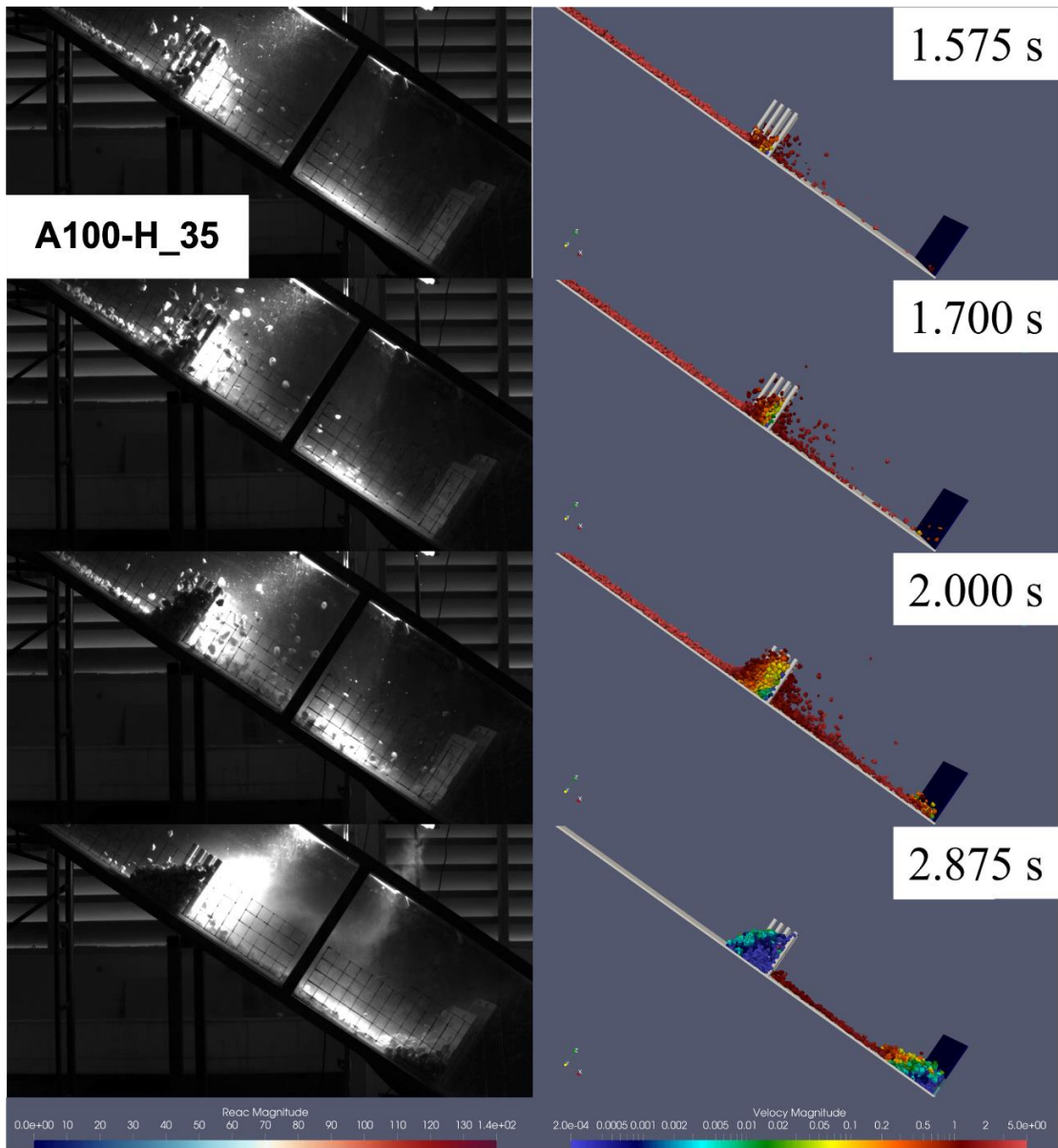












## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายทศพล ทุ่งฝนภูมิ
วัน เดือน ปี เกิด	30 สิงหาคม 2540
สถานที่เกิด	อุดรธานี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2563 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	300 ม.1 ต.ทุ่งฝน อ.ทุ่งฝน จ.อุดรธานี 41310
ผลงานตีพิมพ์	ทศพล ทุ่งฝนภูมิ และคณะ. (2564). การทดลองผลกระทบของเม็ดแห้งที่ไหลผ่านฝายชะลอน้ำแบบเปิด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งชาติ, 8, 124-132. ทศพล ทุ่งฝนภูมิ และคณะ. (2565). พฤติกรรมการดักจับและควบคุมของวัสดุเม็ดแห้งผสมเศษท่อนไม้เมื่อไหลผ่านฝายช่องเปิด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, 27, GTE50 ทศพล ทุ่งฝนภูมิ และคณะ. (2565). การจำลองพฤติกรรมการไหลของเม็ดแห้งและคุณสมบัติฝายช่องเปิด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, 27, GTE30
รางวัลที่ได้รับ	-

