นิพนธ์ต้นฉบับ

การประมาณน้ำไหลบ่าและของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสมที่ไม่ถูกรบกวนจากดินถล่มและที่มีการทดแทนตามธรรมชาติ

Estimation of Surface Runoff and Total Suspended Solids of Mixed Fruit Tree-based Agroforestry System As A Result of Landslides and Under Natural Succession

จรัณธร บุญญานุภาพ[1*]
กัญจน์ชญา เม้าสิ้ว[2]
ปฑมกร มูลทะสิทธิ์[1]
พรสวรรค์ ทุมมันตา[1]

Jaruntorn Boonyanuphap[1*]
Kanchaya Maosew[2]
Pathamakorn Moolthasit[1]
Pornsawan Tummanta[1]

[1]คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000
Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok 65000, THAILAND
[2]มูลนิธิสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย ปากเกร็ด นนทบุรี 11120
Thailand Environment Institute Foundation (TEI), Pakkred, Nonthaburi 11120, THAILAND
*Corresponding Author, E-mail: charuntornb@nu.ac.th

รับต้นฉบับ 31 กรกฎาคม 2562 **รับแก้ไข** 18 ธันวาคม 2562 **รับลงพิมพ์** 24 ธันวาคม 2562

ABSTRACT

Landslides can cause frequent ecological impacts on upstream watersheds. Areas damaged by landslides accelerate the erosion process, making it more severe, which is also a main cause of soil loss induced by increasing the total suspended solids during each event. This study aimed to estimate the soil loss caused by erosion during both normal condition and 10-year landslide condition in a mixed fruit tree-based agroforestry in Maepoon sub-district, Lablae district, Uttaradit province by analyzing the correlation between rainfall and surface runoff in each rainfall event. The rainfall amounts of a single rain event were collected during the rainy season from January 2016 to October 2016. The study indicated that the amounts of surface runoff were significantly different when compared between fruit tree-based agroforestry and landslide-damaged area with an average of 1.25 mm and 2.37 mm, respectively. Soil loss was higher in landslide-damaged area compared to the mixed fruit tree-based agroforestry with a rate of 65.25 kg rai^{-1} year^{-1} or 0.408 ton ha^{-1} year^{-1}. This study provides a better understanding of landslide-induced hydrological change in the upstream watersheds, which can be essential for decision making in finding the guidelines for soil erosion and sediment control in the future.

Keywords: Soil loss, Erosion, Surface runoff, Landslide, Agroforestry system

บทคัดย่อ

ดินถล่มสามารถส่งผลกระทบเชิงนิเวศอย่างต่อเนื่องต่อพื้นที่ต้นน้ำ พื้นที่เสียหายจากดินถล่มเร่งให้เกิดกระบวนการกร่อนของดินให้รุนแรงยิ่งขึ้น และเป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียดินจากการเพิ่มปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่อยู่ในน้ำไหลบ่าหน้าดินระหว่างฝนตกแต่ละเหตุการณ์ การศึกษาครั้งนี้ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณน้ำไหลบ่าและปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในสวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรทั้งภายใต้สถานการณ์ปกติที่ไม่เกิดดินถล่มและภายใต้กระบวนการทดแทนตามธรรมชาติภายหลังจากเกิดดินถล่มมาแล้ว 10 ปี พร้อมทั้งประมาณการสูญเสียหน้าดินที่เกิดจากการกร่อนของดิน บริเวณพื้นที่ต้นน้ำของตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยที่กำหนดจำนวนแปลงทดลอง 3 แปลงสำหรับสวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรแต่ละสถานการณ์ โดยดำเนินการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนแต่ละเหตุการณ์และปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน ระหว่างเดือนมกราคม 2559 ถึงเดือนตุลาคม 2559 พบว่า ปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินของสวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรและพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.25 และ 2.37 มิลลิเมตร ของปริมาณน้ำฝนทั้งหมด ตามลำดับ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่มมีมากกว่าพื้นที่สวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตร 65.25 กิโลกรัม/ไร่/ปี หรือ 0.408 ตัน/เฮกตาร์/ปี ผลจากการศึกษานี้ทำให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงทางอุทกวิทยาของพื้นที่แหล่งต้นน้ำอันเนื่องมาจากดินถล่ม ซึ่งเป็นข้อมูลที่จำเป็นต่อการตัดสินใจค้นหาแนวทางการควบคุมการกร่อนของดินและลดปริมาณการสูญเสียหน้าดินในอนาคต

คำสำคัญ: การสูญเสียดิน การกร่อน น้ำไหลบ่าหน้าดิน ดินถล่ม ระบบวนเกษตร

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงภูมิทัศน์อันเนื่องมาจากกิจกรรมของมนุษย์ รวมถึงกระบวนการทางธรรมชาติอาจส่งผลต่อการตอบสนองทางอุทกวิทยา (hydrologic response) และกระบวนการทางนิเวศวิทยา (ecological process) ตั้งแต่พื้นที่ขนาดเล็กเพียงบริเวณเดียวจนขยายทั่วทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำ (Wigmosta *et al*., 2009) เส้นลำน้ำในบริเวณตำแหน่งทางไหลออกของพื้นที่ลุ่มน้ำ (watershed outlets) ได้ถูกเชื่อมต่อกันเข้ากับพื้นที่ลุ่มน้ำตอนล่างที่อยู่ติดกัน (downstream watershed) หากเกิดภาวะรบกวนระบบนิเวศที่เชื่อมต่อกันดังกล่าว จะส่งผลอย่างมากต่อสมบัติและหน้าที่ของระบบนิเวศแห่งนั้น (Vannote *et al*., 1980) การเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศจากสิ่งรบกวน เช่น การตัดหรือเคลื่อนย้ายพรรณพืชที่ปกคลุมดินออกจากพื้นที่ การบดอัดดินให้แน่น หรือการเกิดดินถล่ม ซึ่งเป็นธรณีพิบัติภัย (geological hazard) ทางธรรมชาติอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยา พบเห็นได้ทั่วไปในบริเวณภูมิประเทศที่มีสภาพเป็นภูเขาสูง โดยเฉพาะพื้นที่ลาดเขาที่มีความชันสูง ดินถล่มสามารถก่อให้เกิดผลกระทบอย่างรุนแรงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน ซึ่งส่งผลให้เกิดการทับถมและการสะสมของตะกอนที่เพิ่มมากขึ้นในลำน้ำต่างๆ (Crim *et al*., 2011) เหตุการณ์ดินถล่มบริเวณพื้นที่แหล่งต้นน้ำของตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ในปี 2549 ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นสวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตร (mixed fruit tree-based agroforestry) โดยได้รับความเสียหายจากเหตุการณ์ดินถล่มประมาณ 4,992 ไร่ หรือร้อยละ 6.1 ของพื้นที่ตำบลแม่พูล อีกทั้งพื้นที่ดังกล่าวยังเป็นแหล่งเกษตรเศรษฐกิจที่สำคัญที่สุดแห่งหนึ่งของจังหวัดอุตรดิตถ์ (Boonyanuphap, 2013) บริเวณแหล่งต้นน้ำดังกล่าวเป็นแหล่งบริการทางนิเวศที่มีความสำคัญต่อชุมชนท้องถิ่นตำบลแม่พูล ทั้งด้านเศรษฐกิจและสังคมที่มีลักษณะเป็นสังคมเกษตรกรรมแบบกึ่งเมืองกึ่งชนบท มีการผสมผสานกันระหว่างความเป็นเมืองที่หลายครัวเรือนเริ่มเปลี่ยนไปเป็นครอบครัวเดี่ยวและประกอบอาชีพ

ค้าขายหรือทำธุรกิจ เกษตรกรบางกลุ่มเน้นการใช้สารเคมีและเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ขณะที่กลุ่มเกษตรกรบางส่วนยังคงมีวิถีชีวิตที่เรียบง่าย ทำการเกษตรที่ใกล้ชิดและพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติจากแหล่งต้นน้ำ (Boonyanuphap and Thonglem, 2011)

เหตุการณ์ดินถล่มในปี 2549 ได้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของสังคมพืชและองค์ประกอบของชนิดพรรณพืช (Boonyanuphap *et al.*, 2019a) ความอุดมสมบูรณ์ของหน้าดิน รวมทั้งทำให้ระบบนิเวศแหล่งต้นน้ำในเขตตำบลแม่พูลสูญเสียบทบาทหน้าที่ของการบริการเชิงนิเวศด้านอื่นที่มีต่อชุมชนท้องถิ่นอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เช่น การสูญเสียชนิดพรรณไม้เศรษฐกิจในท้องถิ่นที่มีคุณค่าทางนิเวศ การสูญเสียวงจรของธาตุหลักในดินที่จำเป็นต่อการควบคุมความสมดุลของระบบธรรมชาติ การลดลงของศักยภาพในการกักเก็บน้ำในดินและการกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศแหล่งต้นน้ำ เป็นต้น (Maosew and Boonyanuphap, 2017; Wongmun *et al*., 2017; Maosew *et al*., 2019a; Maosew *et al*., 2019b; Wongmun *et al*., 2019a; Wongmun *et al*., 2019b) นอกจากนี้ การเปิดหน้าดินของพื้นที่ดินถล่มบริเวณแหล่งต้นน้ำ ถือได้ว่าเป็นผลกระทบเชิงนิเวศที่สำคัญภายหลังจากเหตุการณ์ดินถล่มดังกล่าว โดยเป็นการเร่งกระบวนการชะล้างพังทลายให้รุนแรงยิ่งขึ้นและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดปัญหาคุณภาพน้ำและการทับถมของตะกอนดินในลำน้ำและแหล่งน้ำผิวดิน ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินและเกิดเป็นสันดอน ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อทุนของทรัพยากรน้ำที่มีอยู่เดิมภายในพื้นที่ลุ่มน้ำของตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์

การกร่อนของดิน (soil erosion) เป็นกระบวนการที่เกิดจากการที่มีแรง (เช่น น้ำ หรือ ลม) มากระทำให้วัตถุ ธาตุ หรือสารเกิดการแตกออกจากกัน แล้วเกิดการเคลื่อนย้ายของอนุภาคดิน สาร หรือวัตถุธาตุไปตกตะกอนทับถมอีกแห่งหนึ่ง (Tangtham, 2002) ทั้งนี้ การสูญเสียดินจากกระบวนการกร่อนเป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solids) ที่อยู่ในน้ำไหลบ่าหน้าดิน (surface runoff) ระหว่างฝนตกแต่ละเหตุการณ์ (Chow *et al*., 2011) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดไม่เพียงส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพน้ำ ยังทำให้เกิดปัญหาต่อถิ่นอาศัยของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและทัศนียภาพของแหล่งน้ำ นอกจากนี้ ของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในน้ำยังเป็นตัวกลางในการสะสม เคลื่อนย้าย และกักเก็บมลพิษต่างๆ ซึ่งรวมถึงสารอาหารและโลหะหนักด้วยเช่นกัน (U.S. EPA, 1999) Boonyanuphap *et al*. (2016) กล่าวว่า จากการสำรวจพื้นที่แหล่งต้นน้ำในเขตตำบลแม่พูลภายหลังจากเหตุการณ์ดินถล่มครั้งรุนแรงในปี 2549 ระหว่างปี 2550–2556 พบพื้นที่สวนไม้ผลผสมและพื้นที่ป่าธรรมชาติหลายแห่งเกิดดินถล่มระดับตื้นที่ไม่รุนแรงมากซ้ำในบริเวณเดิมและเกิดดินถล่มในพื้นที่แห่งใหม่ (shallow and secondary landslides) ตามมาอย่างต่อเนื่อง เหตุการณ์ดังกล่าวเป็นการเร่งให้เกิดกระบวนการกร่อนของหน้าดินและส่งผลให้เกิดการสูญเสียดินที่รุนแรงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังไม่พบรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำไหลบ่า และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระบบนิเวศที่ถูกรบกวนจากภัยพิบัติดินถล่มในประเทศไทย ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้ได้ประมาณปริมาณน้ำไหลบ่าและปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในสวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรบริเวณแหล่งต้นน้ำของตำบลแม่พูล ภายใต้สถานการณ์ปกติและกระบวนการทดแทนตามธรรมชาติภายหลังจากเกิดดินถล่มมาแล้ว 10 ปี พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำไหลบ่า (rainfall-runoff modeling) ซึ่งแบบจำลองความสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้เข้าใจกระบวนการทางอุทกวิทยาและระบบอุทกวิทยาของระบบนิเวศที่ถูกรบกวนจากภัยพิบัติได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบนิเวศตามสภาพดั้งเดิม โดยเฉพาะบริเวณแหล่งต้นน้ำที่มีสภาพภูมิประเทศสูงชัน ซึ่งมีข้อจำกัดในการติดตั้งเครื่องตรวจวัดข้อมูลทางอุทกวิทยาได้ทั่วทั้งพื้นที่ (ungagged catchment) ผลการศึกษาครั้งนี้ยังเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้ประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงทางอุทกวิทยาในอนาคต (future

hydrological change) อันเนื่องมาจากภัยพิบัติดินถล่ม นอกจากนี้ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถใช้แบบจำลอง rainfall-runoff relationship จากการวิจัยครั้งนี้เป็นข้อมูลสำคัญในการค้นหาแนวทางการควบคุมการสูญเสียหน้าดินที่เกิดจากการกร่อนของดิน และการทับถมของตะกอนดิน (soil erosion and sediment control) เช่น การใช้เทคโนโลยีชีววิศวกรรมปฐพีด้วยหญ้าแฝก (vetiver-based soil bio-engineering technology) หรือการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินด้วยการปลูกพืช (vegetative slope stabilization) เพื่อลดปริมาณน้ำไหลบ่าและลดการสูญเสียดินในพื้นที่แหล่งต้นน้ำของตำบลแม่พูลต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การกำหนดพื้นที่ศึกษาและลักษณะของแปลงทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่พร่อง-แม่พูล ตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ ตั้งอยู่ที่ละติจูด 17°39′10″ ถึง 17°48′40″ เหนือ และลองจิจูด 99°57′10″ ถึง 100°02′10″ ตะวันออก มีเนื้อที่ประมาณ 116 ตารางกิโลเมตร ความสูงของพื้นที่ระหว่าง 80-765 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง ความลาดชันของพื้นที่โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 40-75 องศา สภาพภูมิอากาศร้อนชื้นแถบมรสุม (tropical monsoon climate: Am) ปริมาณน้ำฝนรายปีเฉลี่ย 1,641.24 มิลลิเมตร อุณหภูมิรายปีเฉลี่ย 27.4 องศาเซลเซียส อัตราการระเหยเท่ากับ 1,601 มิลลิเมตรต่อปี และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศโดยเฉลี่ยร้อยละ 73 (ข้อมูลโดยเฉลี่ยปี 2535 ถึง 2559) (Wongmun *et al*., 2019b)

แปลงศึกษาน้ำไหลบ่าและปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดถูกติดตั้งในบริเวณเขาม่อนน้ำชำของพื้นที่หมู่ที่ 7 บ้านผามูบ ตำบลแม่พูล ซึ่งบริเวณดังกล่าวเคยเป็นพื้นที่สวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรที่เกิดดินถล่มในเดือนพฤษภาคม ปี 2549 โดยได้กำหนดแปลงศึกษาน้ำไหลบ่าและปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดออกเป็น 2 สถานการณ์ ได้แก่ 1) สวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรภายใต้สถานการณ์ปกติที่ไม่เกิดดินถล่มในปี 2549 และ 2) สวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรภายหลังจากเกิดดินถล่มมาแล้ว 10 ปี ทั้งนี้ สวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรที่เคยเกิดดินถล่มอยู่ภายใต้สภาวะการทดแทนแบบทุติยภูมิ (secondary succession หรือ allogenic succession) ที่เคยมีสภาพของสังคมพืชของระบบนิเวศแต่ละประเภทขึ้นปกคลุมอยู่แต่ถูกทำลายจากเหตุการณ์ดินถล่มในปี 2549 โดยปัจจุบันอยู่ในขั้นของการเปลี่ยนแปลงทางนิเวศวิทยาระยะที่เป็นสังคมในระหว่างการทดแทนที่มีพืชมีท่อลำเลียง โดยเฉพาะไม้ยืนต้นเบิกนำชนิดโตเร็วในท้องถิ่น (local fast-growing pioneer trees species) เช่น ตองแตบ (*Macaranga denticulata*) ข้าวสารหลวง (*Maesa ramentacea* A. DC.) มะเดื่อปล้องหิน (*Ficus semicordata* Buch.-Ham. ex Sm.) และ เต้าหลวง (*Macaranga gigantea* (Rchb. f. & Zoll.) Müll. Arg.) เป็นต้น ขึ้นเบิกนำปกคลุมพื้นที่ภายหลังจากเหตุการณ์ดินถล่มเป็นระยะเวลา 10 ปี (Boonyanuphap *et al*., 2016; Maosew and Boonyanuphap, 2017)

แปลงศึกษาน้ำไหลบ่าและปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดถูกสร้างขึ้นจำนวน 3 แปลงทดลองสำหรับสวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรแต่ละสถานการณ์ การกำหนดขนาดและรูปร่างแปลงทดลองพิจารณาตามหลักการของ Chankaew (1996) ซึ่งได้กล่าวว่า การสร้างแปลงทดลองเพื่อเก็บตะกอนดินโดยทั่วไปใช้ขนาดของแปลงทดลองในช่วงประมาณ 2x10 ถึง 4x10 เมตร ซึ่งไม่ควรใช้แปลงที่มีขนาดเล็กกว่าหรือใหญ่กว่านี้ เนื่องจากการศึกษาที่มีขนาดแปลงทดลองที่ใหญ่จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากความไม่สม่ำเสมอของลักษณะพื้นที่ได้มากขึ้น อีกทั้งถ้ามีขนาดแปลงทดลองที่เล็กจะทำให้ได้ตัวอย่างที่ไม่เหมาะสมเกินไป อย่างไรก็ตาม แปลงทดลองทั้ง 2 สถานการณ์มีขนาดที่แตกต่างกัน เนื่องจากแปลงศึกษาของสวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรมีระยะปลูกไม้ผลเศรษฐกิจหลากหลายชนิดที่ไม่สม่ำเสมอกันในแต่ละพื้นที่ โดยไม้ผลเศรษฐกิจหลักที่ปลูกได้แก่ ทุเรียน (*Durio zibethinus* Murray.) และลองกอง (*Lansium*

domesticum Corr.) ขณะที่บริเวณที่เกิดดินถล่มส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นริ้วตามแนวยาวและพื้นที่ดินถล่มมีความกว้างของแนวดินถล่มน้อยกว่า 40 เมตร ประกอบกับบริเวณที่เกิดดินถล่มแต่ละแห่งมีความรุนแรงแตกต่างกัน จึงส่งผลให้ระดับความลาดชัน (slope degree) และความโค้งของผิวหน้าภูมิประเทศ (plan curvature) มีลักษณะไม่สม่ำเสมอกันทั่วทั้งพื้นที่ ซึ่งทำให้เป็นข้อจำกัดของการออกแบบขนาดความกว้างของแปลงศึกษา ดังนั้นจากบริบทของสภาพจริงในพื้นที่ศึกษา ผู้วิจัยได้กำหนดขนาดแปลงศึกษาของระบบนิเวศไม้สวนผสมแบบวนเกษตรในสถานการณ์ปกติมีขนาด 16x4 เมตร และ 12x4 เมตร ขณะที่แปลงศึกษาของพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่มมีขนาด 6x4 เมตร (Table 1) อย่างไรก็ตาม Tangtham (1984) ได้กล่าวว่า ความลาดชัน ความยาวแนวลาดเท และรูปร่างของความลาดเท เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการชะล้างพังทลายของดิน เมื่อความลาดเทมากขึ้นอัตราการชะล้างพังทลายของดินจะมีมากขึ้น เนื่องจากความลาดชันมักทำให้น้ำไหลบ่าหน้าดินเกิดได้มาก แต่เมื่อฝนตกแผ่วเบาจนน้ำไหลบ่าหน้าดินมีอัตราคงที่จะมีอิทธิพลมากถ้าฝนตกในช่วงระยะเวลาสั้นๆ แต่รุนแรง ซึ่งการที่น้ำไหลบ่าหน้าดินอย่างรวดเร็วนั้นเป็นเพราะขณะที่ฝนตกดินกักเก็บน้ำได้น้อย ซึ่งทำให้เกิดการชะล้างพังทลายของดินได้อย่างรวดเร็วเช่นกันโดยจะพัดพาดินไหลลงสู่ที่ต่ำได้มาก

Table 1 General characteristics, structure of plots, and soil loss assessment.

Plots code	Ecosystem	Average slope (degree)	Aspect	Plot size (m^2)	No. of dominant tree (DBH>4.5 cm)				
					D.zib	L.dom	M.den	M.ram	F.sem
FN01	FN	27	N22	64	1	2	-	-	-
FN02	FN	22.33	N21	48	2	1	-	-	-
FN03	FN	34.66	N21	48	1	2	-	-	-
FS01	FS	32.33	N7	24	-	-	1	3	-
FS02	FS	24	N7	24	-	-	3	1	1
FS03	FS	34.66	N7	24	-	-	2	1	1

Remarks: FN: Study plot of mixed fruit tree-based agroforestry, FS: Study plot of mixed fruit tree-based agroforestry under landslide conditions; D.zib : *Durio zibethinus* Murray.; L.dom : *Lansium domesticum* Corr.; M.den : *Macaranga denticulata*; M.ram : *Maesa ramentacea* A. DC.; F.sem : *Ficus semicordata* Buch.-Ham. ex Sm.

การเก็บรวบรวมข้อมูล

เก็บรวบรวมปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ระหว่างฤดูฝนของปี 2559 เป็นเวลา 10 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนตุลาคม 2559

1. ปริมาณน้ำฝนทั้งหมด (gross rainfall: GR) ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน Tipping Bucket Rain Collector (Code 3665R) พร้อมกับเสาติดตั้งเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน (POLE0001) สูงจากพื้นดินประมาณ 1.20 เมตร โดยติดตั้งในที่โล่งใกล้กับแปลงทดลอง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการบดบังจากเรือนยอดไม้ โดยรอบปากของเครื่อง จะต้องทำมุมกับเรือนยอดไม้โดยรอบไม่เกิน 45 องศา จากนั้นเชื่อมต่อการส่งสัญญาณข้อมูลปริมาณน้ำฝนไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (data logger) รุ่น WatchDog 1400 Weather station (3685WD1) ทั้งนี้ ข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นทั้งข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสม (accumulated rainfall event) และข้อมูลปริมาณน้ำฝนของแต่ละ

เหตุการณ์ฝนตก (individual rainfall event data) ซึ่งขึ้นอยู่กับชุดข้อมูลปริมาณน้ำฝนผ่านชั้นเรือนยอดและปริมาณน้ำไหลตามลำต้นที่เก็บได้จริงในภาคสนามของเหตุการณ์ฝนตกแต่ละครั้ง

2. การวัดปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน (runoff, Rf) จากแปลงศึกษาปริมาณน้ำไหลบ่า โดยที่ด้านล่างของแปลงศึกษาติดตั้งท่อ polyvinyl chloride (PVC) ขนาด 3 นิ้ว เข้ากับรางรับน้ำไหลบ่า เพื่อรวบรวมน้ำไหลบ่าเข้าสู่ถังรองรับน้ำขนาด 100 ลิตร จากนั้นบันทึกข้อมูลปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน และเก็บตัวอย่างของสารละลาย (น้ำไหลบ่าและตะกอนดินที่แขวนลอย) ภายหลังเหตุการณ์ฝนตกระดับรายวัน

3. คำนวณหาปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำไหลบ่า (suspend solids: SS) ของฝนตกแต่ละเหตุการณ์ระดับรายวัน โดยนำตัวอย่างของน้ำไหลบ่ากรองผ่านแผ่นกรองใยแก้ว (glass-fiber filter) เบอร์ 3 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร นำตะกอนเปียกที่ได้จากการกรองไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103–105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักของตะกอนแห้งแล้วนำค่ามาเทียบเป็นน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ (Keawpromta, 2003)

4. คำนวณหาปริมาณตะกอนหนัก (settleable solids: Set.S) ซึ่งเป็นของแข็งที่ค้างอยู่ในรางรับน้ำไหลบ่าในแต่ละเหตุการณ์ฝนตกระดับรายวัน โดยการเก็บรวบรวมตะกอนหนักในแต่ละแปลงศึกษา ในช่วงต้นฤดูฝนและปลายฤดูฝน รวมเป็น 2 ครั้ง ตลอดระยะเวลาของการศึกษา จากนั้นนำตะกอนหนักมาดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 3

5. การประมาณปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solid: TSS) คือ ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำไหลบ่าจากการกร่อน ซึ่งคำนวณจากผลรวมของปริมาณของแข็งแขวนลอยในสารละลาย (SS) กับปริมาณตะกอนหนัก (Set.S) จากนั้นคำนวณน้ำหนักของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อเนื้อที่ (หน่วยเป็นตัน/ไร่) สำหรับสวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรแต่ละสถานการณ์

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินด้วยการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics (IBM Corp, 2016)

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน

1. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำไหลบ่าของแต่ละเหตุการณ์ที่ฝนตก โดยการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย ดังแสดงในสมการ (1) ซึ่งกำหนดให้ปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินเป็นตัวแปรตามและปริมาณน้ำฝนเป็นตัวแปรอิสระ พร้อมทั้งคำนวณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (standard error of estimate: SEE)

$$Runoff = a + (b\ Gross\ Rainfall) \quad \ldots\ldots (1)$$

โดยที่

Runoff = ปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินในแต่ละเหตุการณ์ที่ฝนตก (มิลลิเมตร)

Gross Rainfall = ปริมาณน้ำฝนแต่ละเหตุการณ์ (มิลลิเมตร)

a = ค่าคงที่ (constant) เป็นค่าที่ตัดกับแกน Y (Y-intercept)

b = ความชัน (slope) ของเส้นตรง หรือสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ของตัวแปร Rainfall

2. คำนวณหาปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินรายปีจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันตลอดปี 2559 (ข้อมูลจากเครือข่ายเฝ้าระวังแจ้งเตือนภัยดินถล่ม ตำบลแม่พูล) โดยใช้สมการ (1) หาค่าปริมาณน้ำไหลบ่าของแต่ละเหตุการณ์ที่ฝนตกรายวันของปี 2559 จากนั้นคำนวณปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินทั้งหมดที่เกิดขึ้นในรอบปี 2559

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินและปริมาณของแข็งแขวนลอย

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินและปริมาณของแข็งแขวนลอยสำหรับสถานการณ์ปกติและสถานการณ์ที่เคยเกิดดินถล่ม ด้วยการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันโดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics (IBM Corp, 2016)

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินต่อปริมาณของแข็งแขวนลอย

1. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินต่อปริมาณของแข็งแขวนลอย ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ดังสมการ (2) โดยใช้ข้อมูลน้ำไหลบ่าหน้าดินและปริมาณของแข็งแขวนลอยในแต่ละเหตุการณ์ที่ได้ทำการเก็บข้อมูลภาคสนาม การศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยเป็นตัวแปรตาม และปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินเป็นตัวแปรอิสระ

$$SS = a + (b\ Runoff) \quad \text{.....(2)}$$

โดยที่

SS = ปริมาณของแข็งแขวนลอยในแต่ละเหตุการณ์ที่น้ำไหลบ่าหน้าดิน (กรัม)

Runoff = น้ำไหลบ่าหน้าดินแต่ละเหตุการณ์ (มิลลิเมตร)

a = ค่าจุดตัดแกน Y (Y-intercept)

b = ค่าความชัน (slope) ของเส้นตรง หรือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ

2. คำนวณหาปริมาณของแข็งแขวนลอยรายปี จากน้ำไหลบ่าหน้าดินของแต่ละเหตุการณ์รายปี โดยใช้สมการ (2) หาค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยของแต่ละเหตุการณ์ที่น้ำไหลบ่าหน้าดินรายวันของปี 2559 จากนั้นคำนวณปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้นในรอบปี 2559

ศึกษาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สูญเสียทั้งหมด

1. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยในสารละลาย ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนและปริมาณของแข็งแขวนลอยในแต่ละเหตุการณ์ ดังสมการ (3) กำหนดให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยเป็นตัวแปรตามและปริมาณน้ำฝนเป็นตัวแปรอิสระ

$$SS = a + (b\ Gross\ Rainfall) \quad \text{.....(3)}$$

โดยที่

SS = ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำไหลบ่าของแต่ละเหตุการณ์ที่ฝนตก (กรัม)

Gross Rainfall = ปริมาณน้ำฝนแต่ละเหตุการณ์ (มิลลิเมตร)

a = ค่าจุดตัดแกน Y (Y-intercept)

b = ค่าความชัน (slope) ของเส้นตรง หรือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ของตัวแปรอิสระ

2. คำนวณหาของแข็งแขวนลอยรายปี จากปริมาณน้ำฝนรายวันตลอดปี โดยใช้สมการ (3) หาค่าปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินของแต่ละเหตุการณ์ที่ฝนตกรายวันของปี 2559 จากนั้นคำนวณปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้นในรอบปี 2559

3. การหาปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด คำนวณโดยใช้สูตร

$$TSS = SS + Set.S$$

โดยที่ :

TSS (total suspended solid) คือ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (กิโลกรัม/ไร่/ปี)

SS (suspend solids) คือ ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำไหลบ่า (กิโลกรัม/ไร่/ปี)

Set.S (settleable solids) คือ ปริมาณตะกอนหนัก (กิโลกรัม/ไร่/ปี)

ผลและวิจารณ์ผล

ปริมาณน้ำฝนทั้งหมด (gross rainfall) ในการศึกษาน้ำส่วนเหนือพื้นดิน

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนทั้งหมดและน้ำไหลบ่าหน้าดินของระบบนิเวศสวนไม้ผล

ผสมแบบวนเกษตรภายใต้สถานการณ์ปกติและพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่ม ได้ใช้ข้อมูลการเก็บน้ำในส่วนเหนือพื้นดินที่เป็นลักษณะเหตุการณ์ของฝนตกรายวัน (daily rainfall event) จำนวน 47 เหตุการณ์ ขณะที่การเก็บข้อมูลน้ำในส่วนเหนือพื้นดินที่เป็นลักษณะเหตุการณ์ของฝนตกสะสมหลายวัน (accumulative rainfall event) มีจำนวน 23 เหตุการณ์ รวมทั้งหมด 70 เหตุการณ์ ซึ่งอยู่ระหว่างวันที่ 14 พฤศจิกายน 2558 ถึง วันที่ 12 พฤศจิกายน 2559 (Figure 1) เหตุการณ์ฝนตกรายวันและฝนตกสะสมทั้ง 70 เหตุการณ์ มีปริมาณน้ำฝนทั้งหมดรวม 2,048.70 มิลลิเมตร

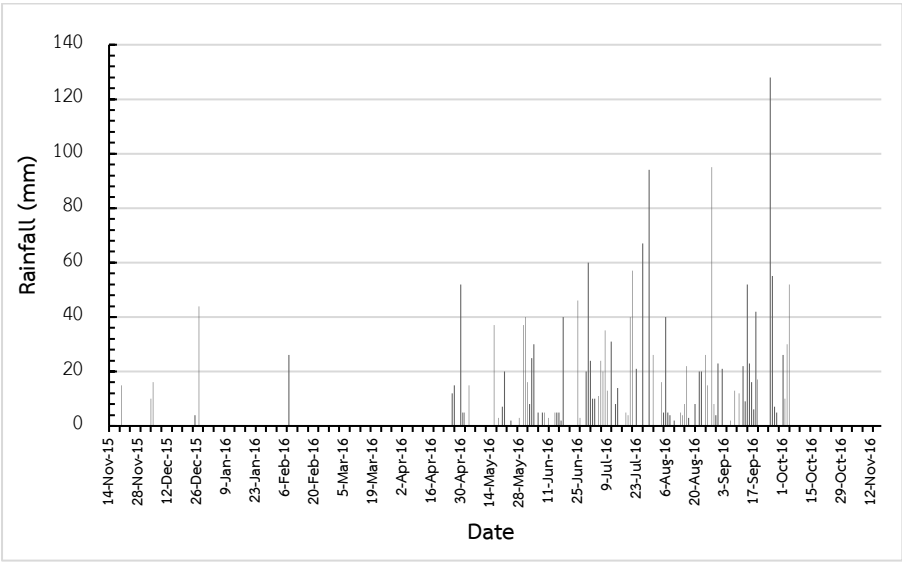

Figure 1 Rainfall data for 47 daily rainfall events, during a period between November 2015 and November 2016.

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน

จำนวนการเก็บข้อมูลน้ำไหลบ่าของแต่ละแปลงศึกษาขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของการติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำไหลบ่า โดยแต่ละแปลงติดตั้งอุปกรณ์เสร็จไม่พร้อมกัน การศึกษาครั้งนี้ได้เก็บรวบรวมข้อมูลน้ำไหลบ่าหน้าดิน จำนวน 53-62 ครั้ง จากทั้งหมด 70 เหตุการณ์ของทั้งเหตุการณ์ฝนตกรายวันและเหตุการณ์ฝนตกสะสมหลายวัน ค่าเฉลี่ยของน้ำไหลบ่าหน้าดินของแปลงศึกษาในสถานการณ์ปกติและพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่ม อยู่ในช่วงร้อยละ 0.05-0.19 และร้อยละ 0.05-0.41 ของปริมาณน้ำฝนทั้งหมด ตามลำดับ ทั้งนี้ น้ำไหลบ่าหน้าดินมีความสัมพันธ์เชิงเส้นทางบวกอย่างสูงกับปริมาณน้ำฝนที่ตกในแต่ละเหตุการณ์ ทั้งในพื้นที่สวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรสถานการณ์ปกติ ($0.883 \le r \le 0.945$; $p \le 0.01$) และพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่ม ($0.821 \le r \le 0.901$; $p \le 0.01$) ดังแสดงใน Table 2 ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินภายในรอบปี 2559 ของแปลงศึกษาในสถานการณ์ปกติเท่ากับ 7.99 มิลลิเมตร (S.D. 2.48) ขณะที่แปลงศึกษาที่เคยเกิดดินถล่มมีปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินเฉลี่ย 22.01 (S.D. 7.83)

Table 2 Runoff characteristics related to rainfall amount in the mixed fruit tree-based agroforestry and mix fruit tree-based agroforestry under landslide condition.

Plots code	Number of runoff data collected	Total rainfall (mm)	Total runoff (mm)	Pearson correlation (r)	Mean of percent runoff of rainfall (%)	S.D. of percent runoff of rainfall (%)
FN01RF	59	1,692.660	8.750	0.883**	0.12	0.26
FN02RF	58	1,726.260	16.279	0.945**	0.19	0.51
FN03RF	62	1,738.390	5.2132	0.934**	0.05	0.12
FS01RF	53	1,488.440	5.6965	0.901**	0.05	0.12
FS02RF	60	1,624.790	31.030	0.821**	0.41	0.78
FS03RF	58	1,356.690	13.807	0.822**	0.16	0.31

Remarks: FN: Study plot of runoff of mixed fruit tree-based agroforestry, FS: Study plot of runoff of mixed fruit tree-based agroforestry under landslide condition; **Correlation is significant at the 0.01 level

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินในพื้นที่ทำการศึกษาสำหรับสถานการณ์ปกติและสถานการณ์ที่เคยเกิดดินถล่ม ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินในแต่ละเหตุการณ์ของฝนตกรายวัน (daily rainfall event) จำนวน 47 เหตุการณ์ ระหว่างวันที่ 14 พฤศจิกายน 2558 ถึง วันที่ 12 พฤศจิกายน 2559 จากผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression analysis) พบว่า ปริมาณน้ำฝนส่งผลต่อปริมาณไหลบ่าหน้าดินของระบบนิเวศทั้งสองประเภทอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจหรือสัมประสิทธิ์การทำนาย (coefficient of determination: R^2) ระหว่าง 0.672 และ 0.894 ทั้งนี้ ปริมาณน้ำฝนมีแนวโน้มที่มีอิทธิพลทางบวกต่อปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินของแปลงศึกษาที่ไม่เกิดดินถล่ม ($0.780 \leq R^2 \leq 0.894$) สูงกว่าแปลงศึกษาที่เคยเกิดดินถล่มเล็กน้อย ($0.672 \leq R^2 \leq 0.815$) อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินยังได้รับอิทธิพลหรือเป็นผลจากตัวแปรตัวอื่นที่ไม่ใช่ปริมาณน้ำฝนที่ตกในแต่ละเหตุการณ์ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (slope, β) โดยค่า slope เป็นค่าที่แสดงประมาณการเปลี่ยนแปลงของน้ำไหลบ่าหน้าดิน เมื่อปริมาณน้ำฝนทั้งหมดเปลี่ยนไป พบว่า ค่า slope ของแปลงศึกษาทั้งหมด 6 แปลง มีค่าเป็นบวกทั้งหมด โดยปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณน้ำฝนในแต่ละเหตุการณ์ ดังแสดงใน Figure 2

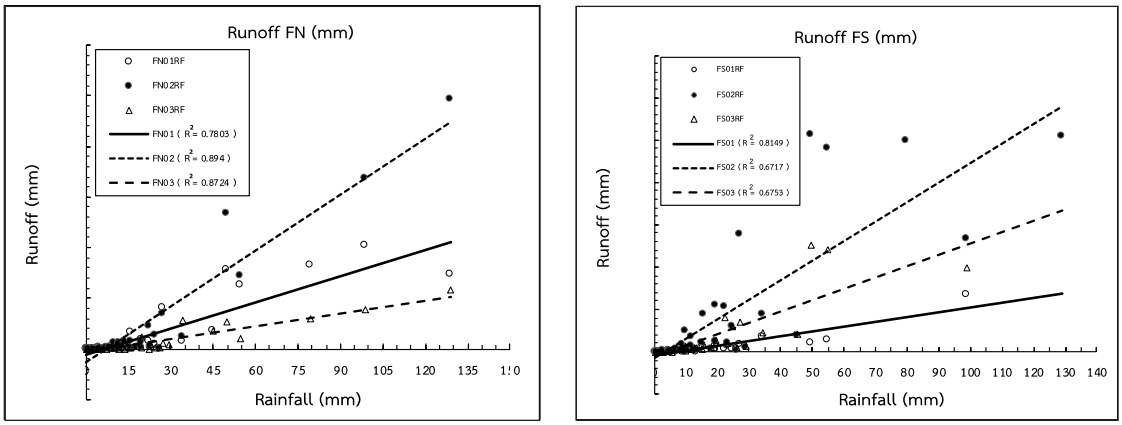

Figure 2 Relationship between rainfall and runoff in the mixed fruit tree-based agroforestry (FN) and mixed fruit tree-based agroforestry under landslide conditions (FS) calculated at plot scale.

Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินกับปริมาณน้ำฝนในแต่ละเหตุการณ์ที่ฝนตกของแปลงศึกษาในสถานการณ์ปกติและแปลงศึกษาที่เคยเกิดดินถล่ม (N=3) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.879 และ 0.790 ตามลำดับ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ ค่า slope ของสมการถดถอยของแปลงศึกษาที่ไม่เกิดดินถล่มมีค่าน้อยกว่าแปลงศึกษาที่เกิดดินถล่ม โดยมีค่า slope เท่ากับ 0.0097 (ซึ่งหมายถึงปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินของแปลงศึกษาที่ไม่เกิดดินถล่มจะเปลี่ยนแปลงไป 0.0097 มิลลิเมตร ของทุกๆ ครั้งที่ปริมาณน้ำฝนเปลี่ยนไป 1 มิลลิเมตร) นอกจากนี้เมื่อคำนวณกลับเพื่อหาค่าเทรสโฮลด์ (threshold) ของน้ำไหลบ่าหน้าดิน หรือ เป็นค่าปริมาณน้ำฝนต่ำสุดที่เริ่มทำให้เกิดน้ำไหลบ่าหน้าดินของแปลงศึกษาที่ไม่เกิดดินถล่ม พบว่า มีค่า 7.5773 มิลลิเมตร ขณะที่ค่าเทรสโฮลด์ของแปลงศึกษาที่เกิดดินถล่มมีค่า 6.838 มิลลิเมตร สำหรับค่าคงที่ (intercept) หรือ จุดตัดแกนตั้ง (Y-intercept) ของสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนกับปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินแสดงค่าติดลบ ซึ่งสอดคล้องกับค่าเทรสโฮลด์ของน้ำฝนผ่านเรือนยอดของปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินทั้งในแปลงศึกษาที่ไม่เกิดดินถล่มและแปลงที่เกิดดินถล่ม ทั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายที่ใช้อธิบายอิทธิพลของปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณไหลบ่าหน้าดินของแต่ละเหตุการณ์ที่ฝนตกแสดงใน Table 3

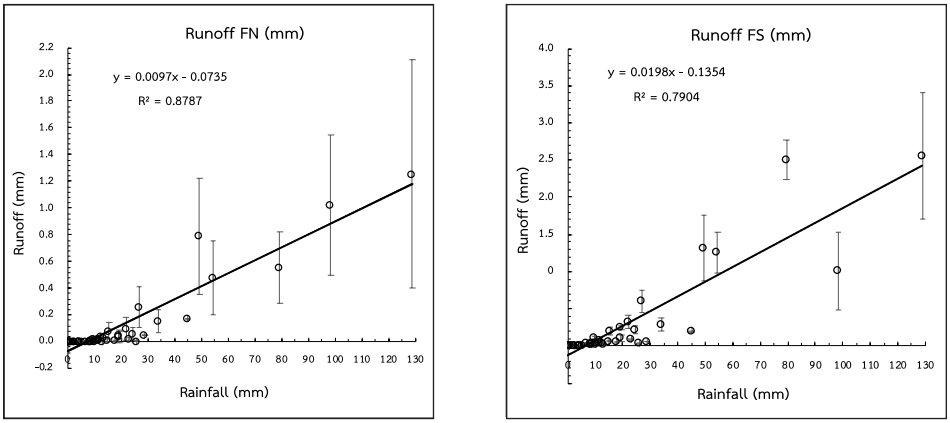

Figure 3 Relationship between rainfall and average value of runoff in the mixed fruit tree-based agroforestry (FN; N=3) and mixed fruit tree-based agroforestry under landslide conditions (FS; N=3) calculated for each ecosystem type.

Table 3 Regression coefficients used to estimate the amount of runoff in the mixed fruit tree-based agroforestry system.

Landslide condition	Intercept	Slope	Adjusted R square	Standard error of estimate	F	d.f.	p-value
FN	-0.0735	0.0097	0.876	0.095	326.63	46	<0.001
FS	-0.1354	0.0198	0.785	0.280	147.11	40	<0.001

Remarks: FN: Study plot of runoff of mixed fruit tree–based agroforestry, FS: Study plot of runoff of mixed fruit tree-based agroforestry under landslide conditions

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินและปริมาณของแข็งแขวนลอย

จากการเก็บข้อมูลปริมาณของแข็งแขวนลอยจากเหตุการณ์น้ำไหลบ่าหน้าดินจำนวน 5-10 ครั้ง ผลการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณของแข็งแขวนลอยของแปลงศึกษาในสถานการณ์ปกติและพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่ม อยู่ในช่วงร้อยละ 1.718-4.126 และร้อยละ 1.573-6.199 ของปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดิน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ในพื้นที่ที่ไม่เคยเกิดดินถล่มมีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่มากับน้ำไหลบ่าหน้าดินในปริมาณที่ต่ำกว่าพื้นที่ที่เคยเกิดดินถล่ม ดังแสดงรายละเอียดใน Table 4

Table 4 The characteristics of runoff as a function of suspended solid in mixed fruit tree-based agroforestry and mixed fruit tree-based agroforestry under landslide conditions.

Plots code	Number of suspended solid (SS) data collected	Total runoff (mm)	Total suspended solid (g)	Pearson correlation (r)	Mean of percent (SS) (%)	S.D. of percent (SS) (%)
FN01RF	5	0.613	5.1543	0.942**	1.718	2.085
FN02RF	9	0.861	11.314	0.995**	2.514	3.854
FN03RF	10	0.888	15.20	0.882**	4.126	7.362
FS01RF	10	0.791	6.2913	0.991**	1.573	1.948
FS02RF	10	2.475	34.093	0.960**	6.199	9.867
FS03RF	10	1.807	27.016	0.963**	4.912	7.6299

Remarks : FN: Study plot of mix fruit tree-based agroforestry, FS: Study plot of mix fruit tree-based agroforestry under landslide conditions; **Correlation is significant at a 0.01 significance level

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินต่อปริมาณของแข็งแขวนลอย

ในกรณีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินและปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า แปลงศึกษา FN02 แสดงค่า R^2 สูงที่สุด (R^2 = 0.9755) ขณะที่แปลง FS03 มีค่า R^2 ต่ำสุด (R^2 = 0.5343) แสดงให้เห็นว่า ในแต่ละเหตุการณ์ที่เกิดการสูญเสียตะกอนแขวนลอยจากน้ำไหลบ่าหน้าดินนั้น ยังได้รับอิทธิพลหรือเป็นผลจากตัวแปรตัวอื่นที่ไม่ใช่ปริมาณน้ำไหลบ่าในแต่ละเหตุการณ์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (slope) ของแปลงศึกษาทั้งหมด 6 แปลง มีค่าเป็นบวกทั้งหมด โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินในแต่ละเหตุการณ์ของพื้นที่ทำการศึกษาสวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตร ในสถานการณ์ปกติและสถานการณ์ที่เคยเกิดดินถล่ม (Figure 4) ปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินของแปลงศึกษาในสถานการณ์ปกติมีแนวโน้มต่ำกว่าแปลงศึกษาที่เคยเกิดดินถล่ม จึงส่งผลให้มีปริมาณของแข็งแขวนลอยน้อยกว่าแปลงศึกษาสถานการณ์ที่เกิดดินถล่ม ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณของแข็งแขวนลอยกับค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำไหลบ่าในแต่ละเหตุการณ์ที่ฝนตกของแปลงศึกษาในสถานการณ์ปกติ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.3698 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินมีอิทธิต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยไม่สูงมากนัก ขณะที่แปลงศึกษาที่เคยเกิดดินถล่มค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8503 ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ ค่าเฉลี่ยของปริมาณของแข็งแขวนลอยของแปลงศึกษาในสถานการณ์ปกติมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง ซึ่งจากการสังเกตระหว่างเก็บข้อมูลในภาคสนาม พบว่าการกำจัดวัชพืชและพืชปกคลุมดินด้วยการใช้เครื่องตัดหญ้าของเกษตรกรเจ้าของสวน ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนดิน เมื่อเปรียบเทียบกับแปลงศึกษาที่ยังไม่ได้กำจัดวัชพืช (Figure 5) สำหรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายที่ใช้อธิบายอิทธิพลของปริมาณไหลบ่าหน้าดินที่มีต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยแสดงใน Table 5

Table 5 Regression coefficients used to estimates the amount of total suspended solid for the mixed fruit tree-based agroforestry system.

Landslide condition	Intercept	Slope	Adjusted R square	Standard error of estimate	F	d.f.	p-value
FN	0.7335	16.877	0.291	2.177	326.63	9	0.062
FS	-1.1334	9.0886	0.831	0.737	45.35	9	<0.001

Remarks : FN: Study plot of runoff of mixed fruit tree-based agroforestry, FS: Study plot of runoff of mixed fruit tree–based agroforestry under landslide conditions

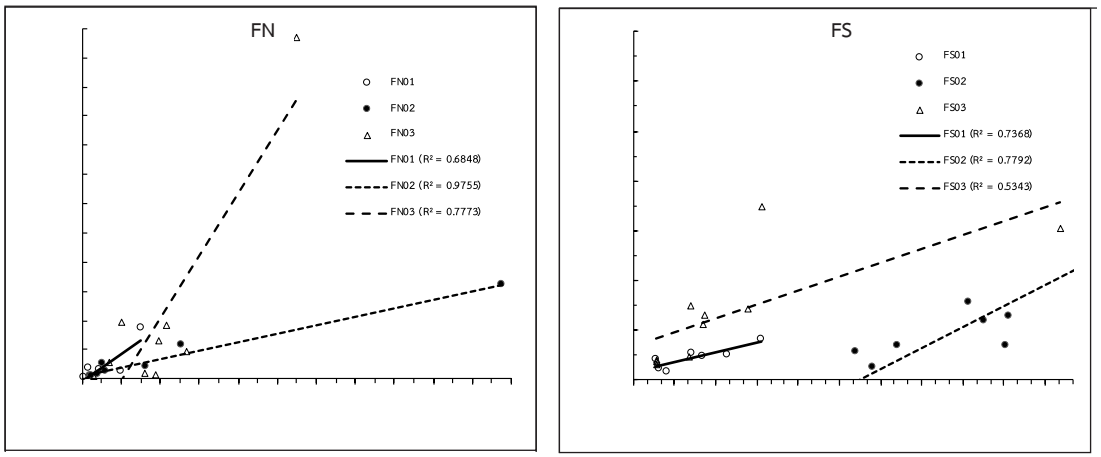

Figure 4 Relationship between runoff and suspended solid in the mixed fruit tree-based agroforestry (FN) and mixed fruit tree-based agroforestry under landslide conditions (FS) calculated at plot scale.

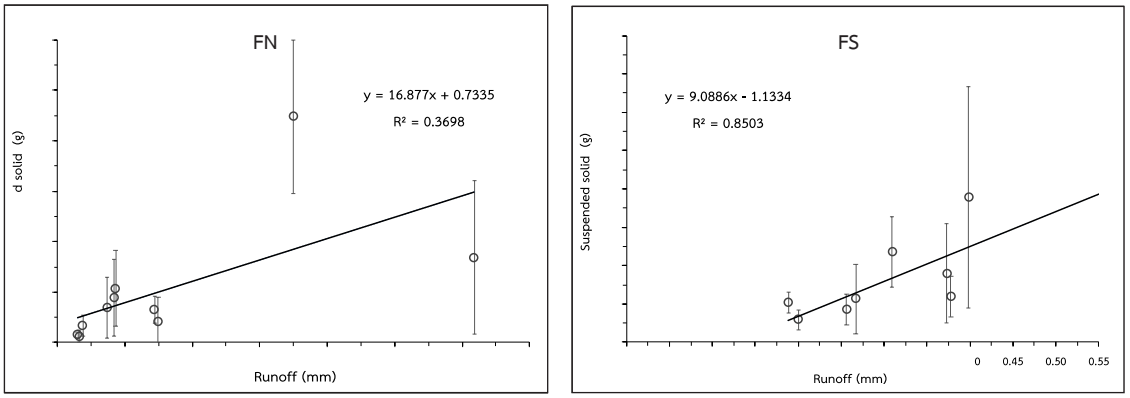

Figure 5 Relationship between the average values of runoff and suspended solid in the mixed fruit tree-based agroforestry (FN) and mixed fruit tree-based agroforestry under landslide conditions (FS) calculated for each ecosystem type.

เปรียบเทียบปริมาณของแข็งแขวนลอยระหว่างระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสมและพื้นที่เคยเกิดดินถล่ม

จากการศึกษาการประเมินการสูญเสียดิน พบว่า แปลงศึกษา FS03 มีปริมาณการสูญเสียดินมีค่าสูงสุด เท่ากับ 171.64 กิโลกรัม/ไร่/ปี รองลงมาได้แก่ แปลงศึกษา FS02 มีปริมาณการสูญเสียดิน 136.29 กิโลกรัม/ไร่/ปี (0.85 ตัน/เฮกตาร์/ปี) ขณะที่แปลงศึกษา FN02 มีปริมาณการสูญเสียดินต่ำสุด เท่ากับ 42.52 กิโลกรัม/ไร่/ปี (0.27 ตัน/เฮกตาร์/ปี) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแข็งแขวนลอยภายในรอบปี 2559 พบว่า แปลงศึกษาที่เคยเกิดดินถล่มมีแนวโน้มของการการสูญเสียดินมากกว่าแปลงศึกษาที่ไม่เกิดดินถล่ม โดยพื้นที่เคยเกิดดินถล่มมีค่าเฉลี่ยของปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สูญเสียไปจากพื้นที่ 119.99 กิโลกรัม/ไร่/ปี (0.75 ตัน/เฮกตาร์/ปี) ขณะที่แปลงศึกษาที่ไม่เกิดดินถล่มมีค่าเฉลี่ยของปริมาณของแข็งแขวนลอย 54.74 กิโลกรัม/ไร่/ปี (0.34 ตัน/เฮกตาร์/ปี) แสดงดัง Table 5 อย่างไรก็ตาม

การสูญเสียดินของระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสมทั้งในสถานการณ์ปกติและที่เคยเกิดดินถล่มมาแล้วประมาณ 10 ปี อยู่ในระดับน้อยมาก (ระดับ 0-2 ตัน/ไร่/ปี) ตามเกณฑ์การจำแนกชั้นความรุนแรงของการสูญเสียดินของกรมพัฒนาที่ดิน (Land Development Department, 2000) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเรือนยอด (canopy structure) ในพื้นที่เคยเกิดดินถล่มดังกล่าว มีสภาพการปกคลุมของเรือนยอดชั้นบนสุดค่อนข้างชิดกัน (relatively closed canopies) แต่มีลักษณะไม่หนาแน่นทึบ ไม้ยืนต้นขนาดใหญ่มีความหนาแน่นประมาณ 73.6 ต้น/ไร่ ซึ่งแตกต่างจากสวนวนเกษตรที่ไม่เกิดดินถล่ม ที่มีการตัดฟันต้นไม้ป่าขนาดใหญ่ออกเพื่อปลูกไม้ผลเศรษฐกิจที่มีระยะปลูกแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดช่องว่างหรือมีพื้นที่เปิดภายในสวนวนเกษตร (Boonyanuphap *et al*., 2018)

Table 5 The amount of soil loss in the mixed fruit tree-based agroforestry and mixed fruit tree-based agroforestry under landslide conditions during the rainy season of year 2016.

Plots code	Plot size (m^2)	Runoff (mm)	Runoff (Cu.m)	Runoff (Cu.m/ Rai/Year)	SS (kg)	Settleable solids (kg)	Total suspended solid (kg/Rai/Year)	Total suspended solid (kg/Rai/Year)	
								Mean	S.D.
FN01	64	8.750	14.000	350.00	0.4597	2.096	63.90	54.74^{ns}	11.01
FN02	48	16.279	26.046	868.20	0.3503	0.925	42.52		
FN03	48	5.260	8.416	280.53	0.2948	1.439	57.81		
FS01	24	5.715	9.145	609.67	0.1396	0.641	52.05	119.99^{ns}	61.44
FS02	24	32.392	51.827	3,455.13	0.1883	1.856	136.29		
FS03	24	15.602	24.962	1,664.13	0.5907	1.984	171.64		

Remarks : Suspended solid: SS; ns: not significant indicated by p=0.074 derived from independent t-test

สรุป

ภัยพิบัติดินถล่มเป็นปัจจัยขับเคลื่อนที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางอุทกวิทยา (hydrological change) ของระบบนิเวศวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสมบริเวณแหล่งต้นน้ำของพื้นที่ตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ การสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝน-น้ำไหลบ่า-ของแข็งแขวนลอย (rainfall-runoff–suspend solids modeling) ทำให้สามารถคาดการณ์อิทธิพลของปริมาณน้ำฝนที่มีต่อปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินและปริมาณของแข็งแขวนลอย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการกร่อนของดินในพื้นที่ศึกษา ปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินและการสูญเสียดินอันเนื่องมาจากปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สูญเสียไปทั้งหมดในรอบปี 2559 ของระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสมที่เคยเกิดดินถล่มมาแล้ว 10 ปี มีมากกว่าระบบนิเวศเดียวกันที่ไม่เกิดดินถล่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากปริมาณน้ำฝนแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินด้วยเช่นกัน ขณะที่ปริมาณของแข็งแขวนลอยยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่นนอกจากปริมาณน้ำไหลบ่าหน้าดินเพียงอย่างเดียว เช่น สภาพภูมิประเทศ การปกคลุมเรือนยอดไม้ใหญ่ ความหนาแน่นของพืชพื้นล่างหรือสิ่งปกคลุมดิน และการปฏิบัติทางการเกษตรที่แตกต่างกันของเจ้าของที่ดิน ความเข้าใจต่อพลวัตของกระบวนการทางอุทกวิทยาอันเนื่องมาจากดินถล่ม ทำให้ได้ข้อมูลสำคัญเพื่อใช้ในการประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งนำไปสู่การตัดสินใจค้นหาแนวทางการควบคุมการกร่อนของดินเพื่อลดปริมาณการ

สูญเสียหน้าดินและการทับถมของตะกอนดินระยะยาวในพื้นที่ได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติดินถล่ม

คำนิยม

คณะวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวรที่สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณเกษตรกรเจ้าของสวนในการอนุญาตให้ติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลปริมาณน้ำฝนและแปลงศึกษาน้ำไหลบ่าหน้าดินในพื้นที่สวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตรตลอดระยะเวลาการดำเนินโครงการวิจัย

REFERENCES

Boonyanuphap, J. 2013. Cost-benefit analysis of vetiver system-based rehabilitation measures for landslide-damaged mountainous agricultural lands in the lower Northern Thailand. **Natural Hazards** 69(1): 599-629.

_____ and P. Thonglem. 2011. **Land Evaluation and Land Readjustment Guideline for Zoning of Agro-economic and Protected Areas in Steep Mountainous Upstream Area**. Final Research Report. Thai Health Promotion Foundation, Bangkok. (in Thai)

_____, P. Thonglem and L. Raksanok. 2016. **Economic Valuation of Slope Stabilization Methods for Landslide Prevention in Maepoon Sub-district: Its Implication on Payment for Ecosystem Services**. Research Report. The Chai Pattana Foundation, Bangkok. (in Thai)

_____, W. Punsak and O. Teetawasak. 2018. **Water Balance Assessment in Upstream Ecosystems and Guideline for Public Participatory Water Resources Management under Climate Change and Landslide**. Research Report. Biodiversity-based Economy Development Office (Public Organization), Bangkok. (in Thai)

_____, K. Maosew, A. Wongmun and P. Moolthasit. 2019. Rainfall crown interception and partitioning in mixed fruit tree–based agroforestry system in the landslide area. **Thai Journal of Forestry** 38(2): 56-70. (in Thai)

Chankaew, K. 1996. **Principles of Watershed Management**. Department of Conservation, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

Chow, M.F., Z. Yusop and M. Mohamed. 2011. Quality and first flush analysis of stormwater runoff from a tropical commercial catchment. **Water Science and Technology** 63(6): 1211-1216.

Crim, J.F., J.E. Schoonover, K.W.J. Williard, J.W. Groninger, J.J. Zaczek and C.M. Ruffner. 2011. Evaluation of erosion and sedimentation associated with tracked vehicle training, pp. 375-388. *In* **Proceedings of the 17th Central Hardwood Forest Conference**. 5-7 April 2010. Lexington, KY; Gen. Tech. Rep. NRS-P-78. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station.

IBM Corp. 2016. **IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24.0**. IBM Corp., Armonk, New York.

Keawpromta, S. 2003. **Preliminary Study on Soil and Water Losses from Different Land Uses within Small Watershed at Huai Raeng – Klong Peed Amphoe Borai and Amphoe Muang Trat**

Province. M.S. Thesis, Kasetsart University. (in Thai)

Land Development Department. 2000. **Soil Erosion in Thailand.** First Press Limited Partnership, Bangkok. (in Thai)

Maosew, K. and J. Boonyanuphap. 2017. Economic loss in plant diversity of mixed fruit tree-based agroforestry system caused by landslide in Lablae district, Uttaradit province. **Khon Kaen Agricultural Journal** 45(4): 633-644. (in Thai)

_____, A. Wongmun and J. Boonyanuphap. 2019a. Change in economic value of forest ecosystem services caused by landslide in the upstream region of the lower northern Thailand. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 41(2): 421-435.

_____, K. Thanacharoenchanaphas and J. Boonyanuphap. 2019b. Valuation of carbon stock in undisturbed natural forest and mixed fruit tree-based agroforestry system by landslide and under natural succession. **Thai Journal of Forestry** 38(1): 81-95.

Tangtham, N. 1984. **Control of Soil Erosion**. Department of Conservation, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

_____. 2002. **Mathematical Models of Soil Erosion and Sediment Pollution in Watershed**. Department of Conservation, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

United States Environmental Protection Agency [U.S. EPA]. 1999. **Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices**. EPA-821-R-99-012. Washinton, D.C.

Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell and C.E. Cushing. 1980. The river continuum concept. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences** 37(1): 130-137.

Wigmosta, M.S., L.J. Lane, J.D. Tagestad and A.M. Coleman. 2009. Hydrologic and erosion models to assess land use and management practices affecting soil erosion. **Journal of Hydrologic Engineering** 14(1): 27-41.

Wongmun, A., K. Maosew and J. Boonyanuphap. 2017. Value of soil ecosystem services in the upstream regions impacted by landslide in Maephoon sub-district, Lablae district, Uttaradit province. **Thai Journal of Forestry** 36(1): 99-112. (in Thai)

_____, K. Maosew and J. Boonyanuphap. 2019a. The available water capacity in landslide area. **Khon Kean Agricultural Journal** 47(2): 211-224. (in Thai)

_____, S. Chuenchooklin, S. Choosumrong and J. Boonyanuphap. 2019b. Assessment of soil water content in landslide-damaged upstream ecosystems using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. **Thai Journal of Forestry** 38(1): 96-111. (in Thai)