



# โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

การวิเคราะห์ภูมิประเทศของภูเขาไฟมีพลังในเกาะชวา  
ประเทศอินโดนีเซีย

โดย

นางสาววิศรา โพธิ์สวัสดิ์  
เลขประจำตัวนิสิต 5932731623

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี  
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

การวิเคราะห์ภูมิประเทศของภูเขาไฟมีพลังในเกาะชวา

ประเทศอินโดนีเซีย

นางสาววิศรา โพธิ์สวัสดิ์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

TERRAIN ANALYSIS OF ACTIVE VOLCANOES IN JAVA ISLAND,  
INDONESIA

MISS WARISSARA PHOSAWAT

A project submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Bachelor of Science Program in Geology  
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University  
Academic Year 2019

หัวข้อโครงการ

การวิเคราะห์ภูมิประเทศของภูเขาไฟมีพลังในเกาะชวา ประเทศอินโดนีเซีย

โดย

นางสาววิศรา โพธิ์สวัสดิ์

สาขาวิชา

ธรณีวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ภัยหลบลี้

วันที่ส่ง.....

วันที่อนุมัติ.....

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ภัยหลบลี้)

วรศรา โพธิ์สวัสดิ์ : การวิเคราะห์ภูมิประเทศของภูเขาไฟมีพลังในเกาะชวา ประเทศอินโดนีเซีย

## TERRAIN ANALYSIS OF ACTIVE VOLCANOES IN JAVA ISLAND, INDONESIA

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ : รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ภัยหลบลี้, 46 หน้า

### บทคัดย่อ

ภูเขาไฟมีพลังยังคงปรากฏเป็นจำนวนมากในเกาะชวา ประเทศอินโดนีเซีย ส่วนมากเป็นภูเขาไฟสลับชั้นซึ่งก่อให้เกิดการปะทุที่รุนแรง เกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟและสร้างความเสียหายเป็นอย่างมาก ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ถึงลักษณะภูมิลักษณะของภูเขาไฟมีพลัง โดยอาศัยดัชนีทางธรณีสารสนเทศมาใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 6 ดัชนีได้แก่ ความลาดชัน ความโค้งทั่วไป ความราบของกันหุบเขาหลายชั้น ดัชนีความชุ่มชื้นภูมิประเทศ การสะสมการไหล และปัจจัยของความยาวลาดชันและความสูงชัน ซึ่งวิเคราะห์ในโปรแกรม System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) จากนั้นนำไปสร้างเป็นแผนที่ระดับความเปราะบางของเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ เพื่อดูความเปราะบางของพื้นที่บริเวณรอบภูเขาไฟ โดยแบ่งเป็นช่วงระดับความเปราะบางได้ทั้งหมด 5 ช่วง ซึ่งผลปรากฏว่าส่วนใหญ่พื้นที่ที่อยู่ในระดับความเปราะบางของเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟสูงและสูงมากเป็นพื้นที่ที่มีความลาดชันต่ำ มีลักษณะภูมิประเทศโค้งเว้าและโค้งนูน ค่าดัชนีความราบของกันหุบเขาหลายระดับมีค่าสูงมาก ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศมีค่าสูง การสะสมการไหลมีค่าสูง และปัจจัยของความลาดชันและความยาวของความลาดชันมีค่าสูง ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับภูมิประเทศจริงบนภาพถ่ายดาวเทียม ปรากฏว่าส่วนมากเป็นพื้นที่บริเวณที่ราบ ส่วนระดับความเปราะบางที่รองลงมาเป็นหุบเขา และพื้นที่ที่เป็นสันเขาจะมีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากน้อยที่สุด

# # 5932731623 : MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS : TERRAIN ANALYSIS OF ACTIVE VOLCANOES IN JAVA ISLAND, INDONESIA

ADVISOR : ASSOCIATE PROF. SANTI PAILOPLEE

## ABSTRACT

Many active volcanoes still appear in Java Island, Indonesia. Most of them are Stratovolcanoes which cause a severe eruption, debris flow and earth flow on the volcano that causing great damage. Consequently, the propose of this project is terrain analysis of active volcanoes by using six Geomorphometric indexes ; Slope, General Curvature, Multiresolution Valley Bottom Flatness (MRVBF), Topographic Wetness Index (TWI), Flow Accumulation (FCC) and Slope lenght and Steepness factor (LS-factor) in System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) program. Then created the debris and earth flow susceptibility map for view the susceptibility of the area around volcano. After divided the area into five ranges, founded that high and very high susceptibility is low slope. General curvature is convex and concave. Very high MRVBF, high TWI, high FCC and high LS-factor. And when compared the real landscape with satellite images, these ranges cover in flat area. Valley is the medium susceptibility and ridge is the low susceptibility.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ภัยหลบลี้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ที่คอยอำนวยความสะดวก ให้คำปรึกษา คอยชี้แนะแนวทาง รวมทั้งเป็นกำลังใจสำคัญในการทำให้โครงการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และอาจารย์อีกท่านคือ อาจารย์ ดร.สุเมธ พันธุ์วงศ์ราช ที่เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษาแก่ดิฉัน ซึ่งสามารถช่วยชี้แนะแนวทางในการทำโครงการวิจัยได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ประสาทประสิทธิวิชาความรู้ รวมทั้งประสบการณ์ต่าง ๆ และให้ความช่วยเหลือตลอดมา รวมถึงพี่บุคลากรทุกท่านที่ช่วยดูแลและคอยประสานงานต่าง ๆ ในภาควิชาธรณีวิทยา

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ที่คอยนัดแนะรวมตัวกันช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจในการทำโครงการวิจัยไปด้วยกัน รวมถึงรุ่นพี่และเพื่อนในรุ่นหลายๆ คน ที่คอยเป็นกำลังใจให้แก่กัน ไม่ให้รู้สึกท้อถอยในการทำงาน โดยเฉพาะนางสาวพัชริดา อุดมเวช ผู้ซึ่งเป็นแบบอย่างในการทำโครงการวิจัยหลายๆ อย่าง รวมทั้งช่วยเหลือและแนะนำวิธีแก้ปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง ที่คอยเข้าใจปัญหาในตัวของดิฉัน และคอยสนับสนุน คอยดูแลทุกอย่างไม่ให้ขาดตกบกพร่องในการทำงานและการเรียนทั้งเรื่องค่าใช้จ่ายและค่าใช้จ่ายต่างๆ คอยเป็นแรงผลักดันที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ดิฉันทำโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ประการสุดท้าย ขอขอบคุณสถานที่ต่างๆ ที่คอยเอื้อเฟื้อในการทำโครงการวิจัยแก่ดิฉัน ไม่ว่าจะเป็นตึกภาควิชาธรณีวิทยา, อาคารจามจุรี 9, สามย่านมิตรทาวน์, บ้านของนางสาวจิรณา พิทักษ์ธรรม ที่คอยเป็นสถานที่พักผ่อนและอำนวยความสะดวกมาตลอด และโดยเฉพาะอุทยาน 100 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยเป็นสถานที่พักผ่อนในทุุกยามที่รู้สึกอยากผ่อนคลาย เป็นที่พูดคุยรวมตัวสำหรับดิฉันและผองเพื่อนเพื่อแก้ปัญหาและเพื่อความรื่นรมย์สุนทรีย์

# สารบัญ

## (Content)

บทที่ 1 บทนำ (INTRODUCTION) -----	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ (Theme and Background)-----	1
1.2 วัตถุประสงค์ (Objective)-----	2
1.3 พื้นที่ศึกษา (Study Area)-----	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา (Scope Of Work) -----	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Expected Output)-----	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (THEORY AND LITERATURE REVIEW)-----	4
2.1 ทฤษฎี (Theory)-----	4
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)-----	11
บทที่ 3 วิธีการศึกษา (Methodology) -----	15
3.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง -----	16
3.2 จัดเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา-----	16
3.3 สร้างเกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่ที่มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ -----	16
3.4 วิเคราะห์ข้อมูล-----	18
3.4.1 แผนที่ดัชนีทางธรณีฐานของภูเขาไฟมีพลัง-----	18
3.4.2 แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ -----	26
บทที่ 4 ผลการศึกษา (Result)-----	27
4.1 เกณฑ์ค่าคะแนนที่ใช้ระบุถึงระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ ไฟ -----	27
4.2 แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ-----	27
บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผล (Discussion and conclusion)-----	35



5.1 เปรียบเทียบพื้นที่จริงที่เคยเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากกับแผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลาก -----	35
5.1.1 หุบเขา Curah Lengkong บนภูเขาไฟเซเมรุ-----	35
5.1.2 บริเวณทางด้านตะวันตก ตะวันตกเฉียงใต้และทางใต้ของภูเขาไฟเมราปี -----	36
5.2 เปรียบเทียบเส้นทางท่องเที่ยวขึ้นภูเขาไฟของแต่ละลูกกับแผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลาก-----	38
5.2.1 เส้นทางการเดินทางของภูเขาไฟโบรโม-----	39
5.2.2 เส้นทางการเดินทางของภูเขาไฟกาลุงกุง-----	40
5.2.3 เส้นทางการเดินทางของภูเขาไฟโอเจน-----	41
5.2.4 เส้นทางการเดินทางของภูเขาไฟเมราปี-----	42
5.2.5 เส้นทางการเดินทางของภูเขาไฟปาปันดาอัน -----	43
5.2.6 เส้นทางการเดินทางของภูเขาไฟเซเมรุ -----	44
5.3 สรุปผลการศึกษา -----	45
5.4 ข้อเสนอแนะ -----	45
เอกสารอ้างอิง (Reference)-----	46

## สารบัญรูปภาพ

### (Figure content)

รูปที่ 1	พื้นที่เกาะชวาซึ่งแสดงภูเขาไฟมีพลังที่ศึกษาจำนวน 6 ลูก	2
รูปที่ 2	แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลของเศษหินไหลหลาก	4
รูปที่ 3	แผนภาพลักษณะทางธรณีสัณฐานของเศษดินไหลหลาก	5
รูปที่ 4	แสดงการคำนวณหาความลาดชัน	5
รูปที่ 5	แสดงลักษณะความโค้งทั่วไป	6
รูปที่ 6	แสดงลักษณะความโค้งโพรไฟล์	7
รูปที่ 7	แสดงความเร็วการไหลของกระแสน้ำในความโค้งโพรไฟล์	7
รูปที่ 8	แสดงลักษณะความโค้งหน้าราบ	8
รูปที่ 9	แสดงลักษณะการไหลของน้ำของความโค้งหน้าราบ	8
รูปที่ 10	แสดงค่าของความราบของกันหุบเขาหลายระดับ	9
รูปที่ 11	แสดงการคำนวณของการสะสมการไหล	10
รูปที่ 12 (a)	แผนที่ความชันและองค์ประกอบในเมืองวางลงบนภาพนูนสีเทา (shaded relief) ในเขตเทศบาล Torre del Greco เส้นทางการไหลถูกวาดด้วยเส้นลูกศรบอกทิศทางสีน้ำเงิน ขนาดของวงกลมสีเหลืองหมายถึงจำนวนเหตุการณ์เศษหินภูเขาไฟถล่มที่บันทึกในถนน (b) แผนที่ความโค้งบนภาพนูนสีเทาของเทศบาล Torre del Greco พื้นที่รูปทรงกรวยร่างเป็นเส้นสีน้ำเงินเข้ม	12
รูปที่ 13	ค่าที่สูงขึ้น (แนวโน้มเป็นสีแดง) แสดงถึงการสะสมของการไหลมากขึ้นและพื้นที่ของการไหลที่เข้มข้นที่สามารถใช้ในการระบุช่องทางน้ำ	13
รูปที่ 14	ดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิภาค (TWI) จำนวนใน SAGA GIS ค่าที่สูงขึ้นของ TWI (แนวโน้มสีฟ้า) แสดงถึงการระบายน้ำและค่าที่ต่ำกว่า (แนวโน้มเป็นสีแดง) เป็นตัวแทนของยอดและสันเขา	13
รูปที่ 15	LS-factor (ความยาวความชันและปัจจัยความชัน) จำนวนในข้อมูลทางภูมิศาสตร์ของ SAGA ระบบ (GIS) ความไวต่อการสึกกร่อนต่ำแสดงด้วยสีเขียวและสูงด้วยสีน้ำตาล	14
รูปที่ 16	เส้นทางการไหลคำนวณโดยใช้ดัชนีทางธรณีสัณฐานสามดัชนี TWI, LS-Factor และ FCC ใน SAGA	14
รูปที่ 17	แผนผังขั้นตอนการศึกษาระเบียบวิธีวิจัย	15
รูปที่ 18	แผนที่ดัชนีความลาดชัน (Slope) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก	20
รูปที่ 19	แผนที่ดัชนีความโค้งทั่วไป (General Curvature) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก	21

รูปที่ 20 แผนที่ดัชนีความราบของก้นหุบเขาหลายระดับ (Multiresolution index of valley bottom flatness) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก----- 22

รูปที่ 21 แผนที่ดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศ (Topographic Wetness Index) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก -- 23

รูปที่ 22 แผนที่ดัชนีการสะสมการไหล (Flow Accumulation) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก----- 24

รูปที่ 23 แผนที่ดัชนีปัจจัยของความยาวลาดชันและความสูงชัน (Slope Length and Steepness Factor : LS-Factor) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก ----- 25

รูปที่ 24 (a) แผนที่ภาพอนุสีเทาของภูเขาไฟโบรโม (b) แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟโบรโม----- 28

รูปที่ 25 (a) แผนที่ภาพอนุสีเทาของภูเขาไฟกาลุงกุง (b) แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟกาลุงกุง----- 29

รูปที่ 26 (a) แผนที่ภาพอนุสีเทาของภูเขาไฟอิเจน (b) แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟอิเจน----- 31

รูปที่ 27 (a) แผนที่ภาพอนุสีเทาของภูเขาไฟเมราปี (b) แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟเมราปี ----- 32

รูปที่ 28 (a) แผนที่ภาพอนุสีเทาของภูเขาไฟปาปันดาอัน (b) แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟปาปันดาอัน ----- 33

รูปที่ 29 (a) แผนที่ภาพอนุสีเทาของภูเขาไฟเซเมรุ (b) แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟเซเมรุ ----- 34

รูปที่ 30 ขยายพื้นที่บริเวณทางตะวันออกเฉียงใต้ของภูเขาไฟเซเมรุและพื้นที่ที่ศึกษา (ถล่มสีขาว) ระยะพื้นที่ยาวประมาณ 3.2 กิโลเมตร (ภาพจาก Google Earth)----- 35

รูปที่ 31 แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟเซเมรุและพื้นที่ที่ศึกษา (ถล่มสีขาว)----- 36

รูปที่ 32 ภาพถ่ายดาวเทียม SPOT-5 แสดงโซนภัยพิบัติหินอัคนีตะกอนภูเขาไฟไหลหลากและตะกอนไหลหลากบริเวณภูเขาไฟเมอร์บาบูและเมราปี (Solikhin, Thouret et al. 2015)----- 37

รูปที่ 33 แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟเมราปี ----- 38

รูปที่ 34 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟโบรโมจาก Google Earth และเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีชมพู) บนภูเขาไฟโบรโม ----- 39

- รูปที่ 35 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟกาลุงกุงจาก Google Earth และเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่แสดงความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีชมพู) บนภูเขาไฟกาลุงกุง----- 40
- รูปที่ 36 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟโอเจนจาก Google Earth และเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่แสดงความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีชมพู) บนภูเขาไฟโอเจน----- 41
- รูปที่ 37 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟเมราปีจาก Google Earth และเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่แสดงความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีชมพู) บนภูเขาไฟเมราปี----- 42
- รูปที่ 38 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟปาปันดาอันจาก Google Earth และเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่แสดงความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีชมพู) บนภูเขาไฟปาปันดาอัน----- 43
- รูปที่ 39 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟเซเมรูจาก Google Earth และเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่แสดงความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีชมพู) บนภูเขาไฟเซเมรู----- 44

## สารบัญตาราง

## (Table content)

ตารางที่ 1 เกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่ที่มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ -----	17
ตารางที่ 2 แสดงเกณฑ์ค่าคะแนนของระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบน ภูเขาไฟในแต่ละช่วง -----	27

## สารบัญสมการ

## (Equation content)

สมการที่ 1 สมการความลาดชัน -----	5
สมการที่ 2 สมการดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิภาค -----	9
สมการที่ 3 สมการปัจจัยความยาวลาดชันและความสูงชัน -----	10

# บทที่ 1

## บทนำ

### (INTRODUCTION)

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ (Theme and Background)

ปัจจุบันภูเขาไฟมีพลังยังคงปรากฏอยู่มากในประเทศอินโดนีเซีย ภูเขาไฟมีรูปร่างที่สวยงาม จึงเป็นสถานที่ท่องเที่ยวที่นักท่องเที่ยวชื่นชอบ ซึ่งเกาะชวาเป็นหนึ่งในแหล่งท่องเที่ยวที่เป็นที่นิยมสำหรับคนไทยในปัจจุบัน โดยมีภูเขาไฟที่ยังคงมีพลังปรากฏอยู่ทั้งหมด 18 ลูก (P. Bani et al., 2013)

ภูเขาไฟบริเวณเกาะชวาส่วนมากเป็นภูเขาไฟสลับชั้น (Stratovolcano) เกิดขึ้นจากแผ่นธรณีมหาสมุทรที่หลอมละลายเป็นแมกมา แล้วยกตัวขึ้นดันเปลือกโลกขึ้นมาเป็นแนวภูเขาไฟรูปโค้ง (Volcanic arc) ซึ่งมีความลาดชันที่สูง เมื่อเกิดการปะทุจะมีความรุนแรงสูงและก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมาก เนื่องจากมีการปล่อยทั้งธารลาวาและกรวดถ้ำภูเขาไฟ (Pyroclastic rocks) ก่อให้เกิดเป็นเศษหินถล่ม (debris avalanches) หรือเรียกว่า แผ่นดินภูเขาไฟถล่ม (Volcano landslides) มีขนาดตั้งแต่ 1 กิโลเมตรไปจนถึงมากกว่า 100 กิโลเมตร ซึ่งความเร็วและโมเมนตัมที่สูงทำให้สามารถข้ามหุบเขาและไหลลงมาตามความลาดชันได้หลายร้อยกิโลเมตร (USGS, 2016) นอกจากนี้ เมื่อเกิดฝนตกหนักอาจทำให้เกิดตะกอนไหล (Lahars) (Cando-Jácome & Martínez-Graña, 2019) ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายตามมา ยกตัวอย่างเหตุการณ์บริเวณภูเขาไฟรินจานี (Rinjani) บนเกาะลอมบอก ประเทศอินโดนีเซีย เมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม 2561 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.4 แมกนิจูด ทำให้มีคนไทยจำนวน 200 คนที่กำลังปีนบนภูเขาไฟไม่สามารถลงมาได้ เนื่องจากมีเศษดินถล่มปิดกั้นทางเดินไว้ บางคนถูกเศษหินทับ ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและบ้านเมืองจำนวนมาก

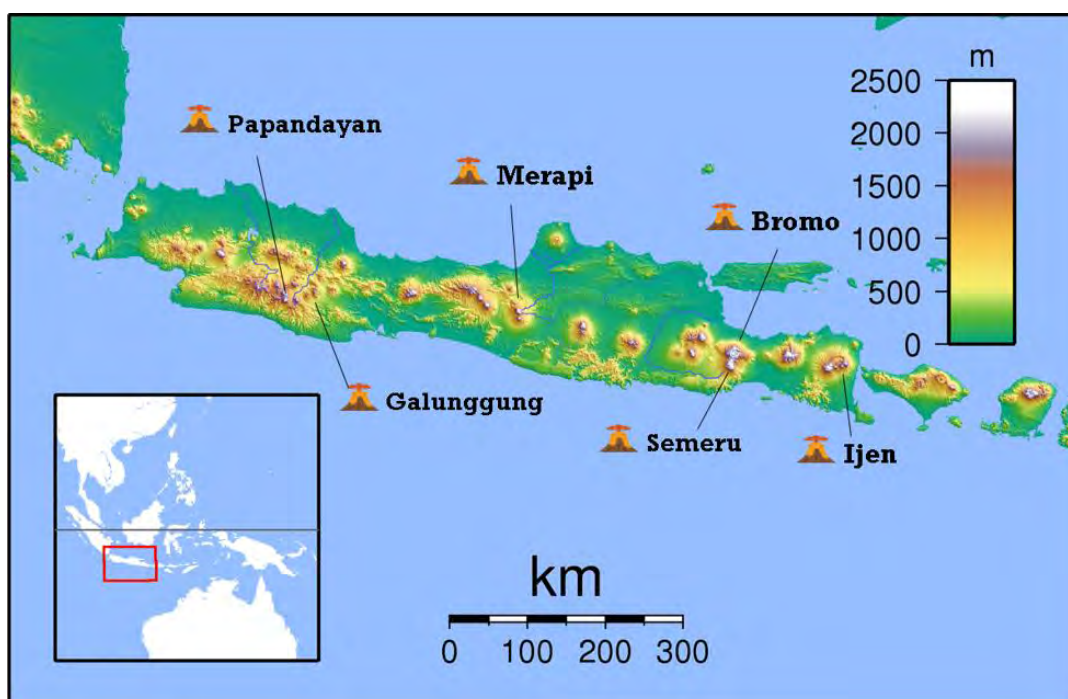
ในการศึกษาลักษณะภูมิประเทศของภูเขาไฟจึงมีความสำคัญในการวิเคราะห์ถึงภัยพิบัติที่อาจเกิดขึ้นจากภูเขาไฟ โดยอาศัยดัชนีทางธรณีสัณฐาน (Geomorphometric index) เช่น ความลาดชัน (Slope) ความโค้งตามความลาด (Profile Curvature) ดัชนีความชื้นของภูมิประเทศ (Topographic Wetness Index; TWI) (Cando-Jácome & Martínez-Graña, 2019) และอื่นๆ ซึ่งทำให้วิเคราะห์ถึงเส้นทางที่อาจก่อให้เกิดภัยพิบัติที่เกิดขึ้นจากภูเขาไฟมีพลังได้ และลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายขึ้นในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ (Objective)

- 1.2.1 ศึกษาภูมิลักษณะ (Landform) ของภูเขาไฟจากดัชนีทางธรณีสัณฐาน
- 1.2.2 วิเคราะห์ถึงความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ

## 1.3 พื้นที่ศึกษา (Study Area)

พื้นที่ศึกษาบริเวณเกาะชวา ประเทศอินโดนีเซีย ตั้งอยู่ละติจูดที่ 6 - 9 องศาใต้ และลองจิจูด 105 - 111 องศาตะวันออก มีเนื้อที่ทั้งหมด 128,297 ตารางกิโลเมตร โดยศึกษาภูเขาไฟมีพลังทั้งหมด 6 ลูก ได้แก่ ปาปันดายัน (Papandayan) กาลุงกุง (Galunggung) เมอราปี (Merapi) โบรโม (Bromo) เซมารู (Semeru) และอีเจน (Ijen)



รูปที่ 1 พื้นที่เกาะชวาซึ่งแสดงภูเขาไฟมีพลังที่ศึกษาจำนวน 6 ลูก



#### 1.4 ขอบเขตการศึกษา (Scope Of Work)

ศึกษามูลลักษณะของภูเขาไฟโดยใช้ดัชนีทางธรณีสัณฐาน(Geomorphometric index) อย่างน้อย 6 ดัชนี เช่น ความลาดชัน (Slope) ความโค้งทั่วไป (General Curvature) ความราบของก้นหุบเขาหลายชั้น (Multiresolution Valley Bottom Flatness; MRVBF) ดัชนีความชุ่มชื้นภูมิประเทศ (Topographic Wetness Index; TWI) ปัจจัยของความยาวลาดชันและความสูงชัน (Slope length and Steepness factor; LS-factor) การสะสมการไหล (Flow Accumulation; FCC)

#### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Expected Output)

แผนที่แสดงการกระจายตัวของดัชนีทางธรณีสัณฐาน(Geomorphometric index) ของแต่ละภูเขาไฟ เพื่อแสดงนัยสำคัญถึงความเปราะบางของภัยพิบัติที่อาจเกิดขึ้นจากภูเขาไฟได้

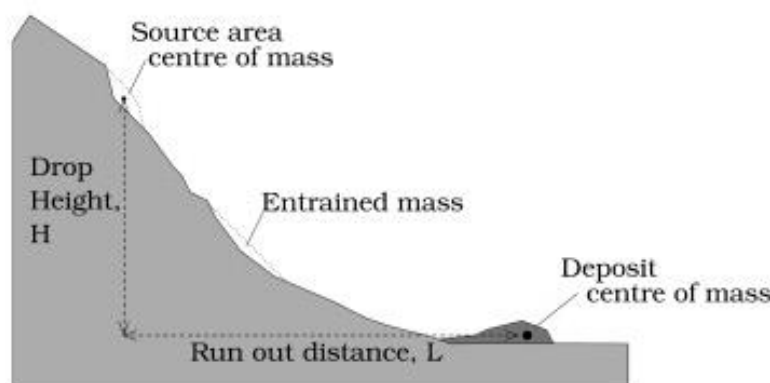
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### (THEORY AND LITERATURE REVIEW)

##### 2.1 ทฤษฎี (Theory)

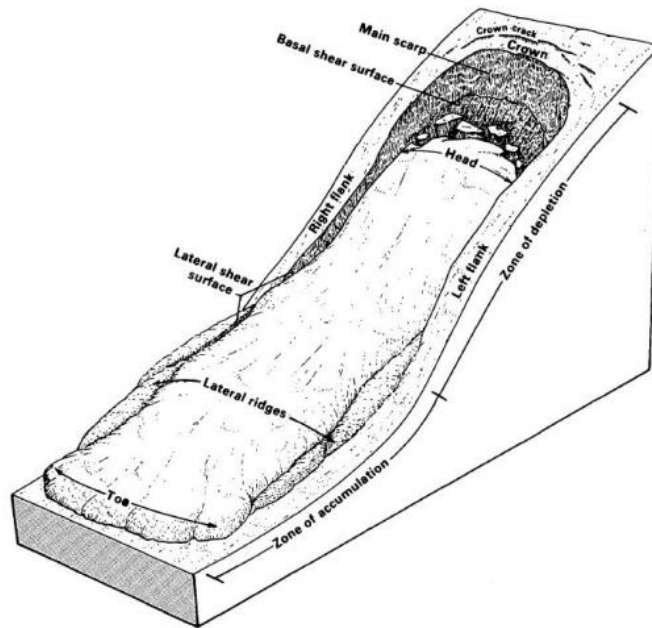
**เศษหินไหลหลาก (Debris flow)** เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดจากเศษหิน ดินและซากพืชไหลหลากไปตามความชันโดยมีน้ำปริมาณเล็กน้อยเป็นตัวหล่อลื่น เศษหินไหลหลากเป็นภัยพิบัติจำพวกเดียวกับภัยพิบัติดินถล่ม (landslide) แต่มีความอันตรายมากกว่า เนื่องจาก พื้นที่ประสบภัยจะครอบคลุมเป็นบริเวณกว้างมากกว่า (Pailoplee, 2020)



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงเส้นทางการไหลของเศษหินไหลหลาก

(Turnbull et al., 2014)

**เศษดินไหลหลาก (Earth flow)** เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติหนึ่งในประเภทของดินถล่มที่เกิดจากวัสดุจำพวกดินเหนียว (Clay-rich material) ทั้งดินและหินที่ผูกพันเมื่อมีความชื้นหรือปริมาณน้ำที่มากพอในการไหล จะเกิดไหลหลากไปตามบริเวณความชันมุมต่ำ หรือบริเวณพื้นผิวเนินเขาสูงชันที่มีความชันสูง (Sharpe, 1938) ซึ่งมีความเร็วในการไหลไม่มากแต่สามารถเกิดภัยพิบัติได้เป็นบริเวณกว้าง



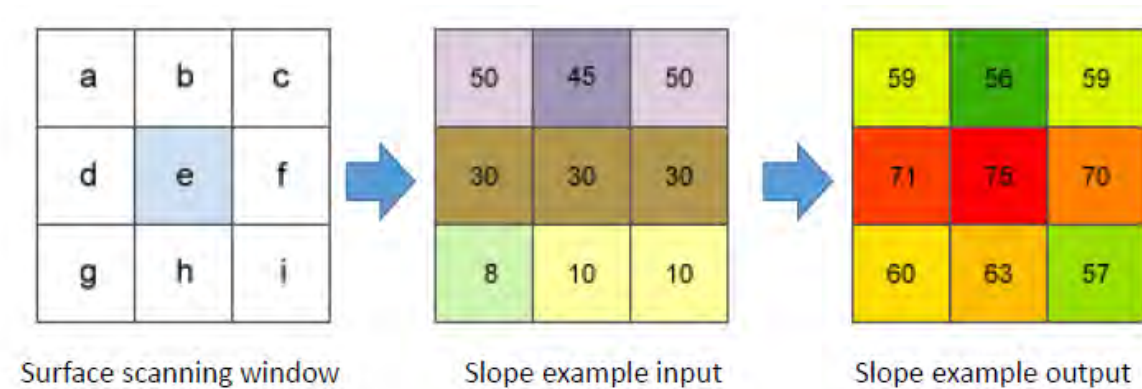
รูปที่ 3 แผนภาพลักษณะทางธรณีฐานของเศษดินไหลหลาก

(Keefer and Johnson, 1983)

**ความลาดชัน (Slope)** คือการคำนวณจากพื้นผิวแรสเตอร์หรือ TIN ซึ่งคำนวณเป็นอัตราสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงระหว่างตำแหน่งนั้นกับสภาพแวดล้อม ถ้าความลาดชันมีค่าสูงบ่งบอกว่าลักษณะภูมิประเทศจะมีความชันมาก ความลาดชันสามารถแสดงได้ในหน่วยองศาหรือเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยทั่วไปจะใช้อัลกอริทึมตาม สมการที่ 1 สมการความลาดชัน

$$\text{slope\_degrees} = \text{ATAN} (\sqrt{[\text{dz}/\text{dx}]^2 + [\text{dz}/\text{dy}]^2}) * 57.29578 \quad (1)$$

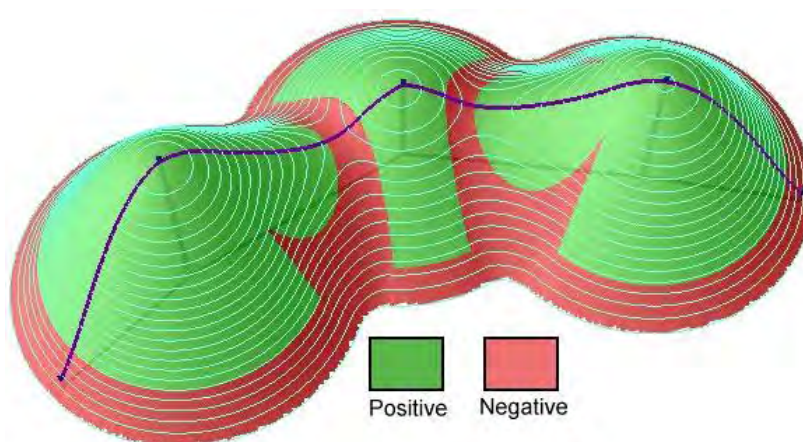
หมายเหตุ ค่า 57.29578 เป็นค่าที่ได้จากการตัดทอน 180/พิกเซล



รูปที่ 4 แสดงการคำนวณหาความลาดชัน

**ความโค้งทั่วไป (General Curvature)** หรือ เรียกอีกอย่างว่า ความโค้งทั้งหมด (Total Curvature) เป็นความโค้งที่วัดจากพื้นผิวของตัวเอง ไม่ได้เป็นความโค้งของเส้นที่เกิดจากส่วนทั้งหมดของพื้นผิวระนาบเหมือนกับความโค้งโพรไฟล์ (Profile curvature) ที่เส้นจะตัดผ่านระนาบแนวดิ่ง และความโค้งหน้าราบ (Plane curvature) ที่เส้นจะตัดผ่านในระนาบแนวนอน

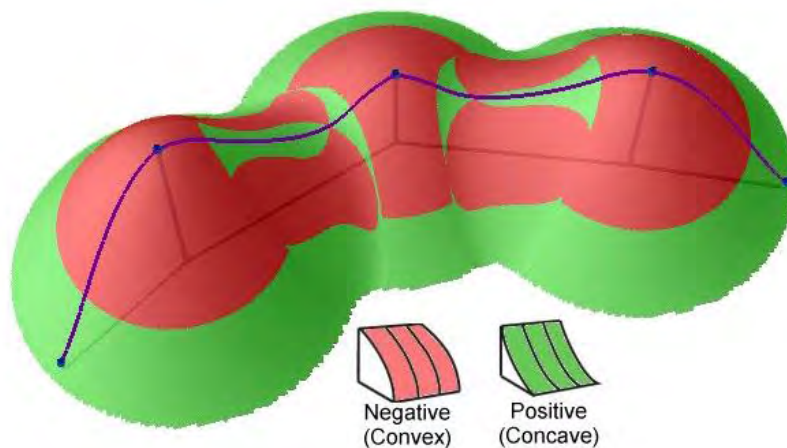
จากรูปที่ 5 บริเวณพื้นที่สีเขียวมีค่าความโค้งทั่วไปเป็นค่าบวก จะหมายถึงภูมิประเทศเป็นลักษณะโค้งนูน (Convex) บ่งบอกถึงจุดยอดของภูเขาได้ ส่วนในบริเวณสีแดงแสดงค่าเป็นลบ หมายถึงภูมิประเทศเป็นลักษณะโค้งเว้า (Concave) บ่งบอกถึงหุบเขาได้ และสุดท้ายถ้าค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึงลักษณะเป็นที่ราบ (Flat)



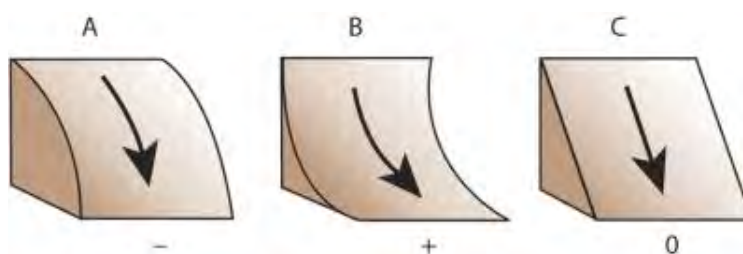
รูปที่ 5 แสดงลักษณะความโค้งทั่วไป

**ความโค้งโพรไฟล์ (Profile curvature)** คือ ความโค้งที่เกิดจากการตัดเส้นในระนาบแนวดิ่ง ในทิศทางของความชันที่ชันที่สุด สามารถบ่งบอกถึงความเร็วของการไหลของน้ำได้ ซึ่งมีอิทธิพลต่อกระบวนการกัดกร่อนและสะสมตัวของตะกอนได้

จากรูป 6 บริเวณพื้นที่สีแดง แสดงค่าเป็นลบ หมายถึงลักษณะภูมิประเทศแบบโค้งนูน (Convex) บ่งบอกถึงการชะลอการไหลของน้ำ ในบริเวณพื้นที่สีเขียว แสดงค่าเป็นบวก หมายถึงลักษณะภูมิประเทศแบบโค้งเว้า (Concave) บ่งบอกถึงการเร่งน้ำมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น และสุดท้ายถ้าค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึงลักษณะเป็นที่ราบ (Flat) หรือเส้นตรง



รูปที่ 6 แสดงลักษณะความโค้งโพรไฟล์

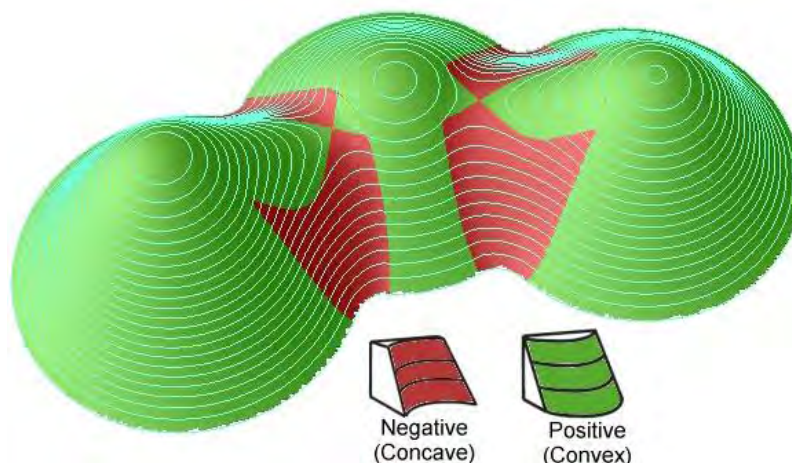


รูปที่ 7 แสดงความเร็วการไหลของกระแสในความโค้งโพรไฟล์

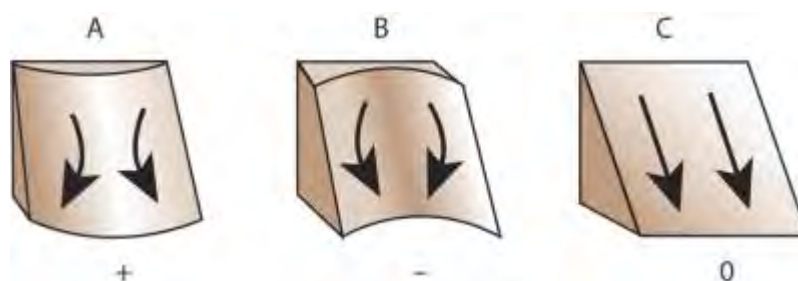
(<https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/understanding-curvature-rasters/>)

**ความโค้งหน้าราบ (Plan curvature)** คือ ความโค้งที่เกิดจากการตัดเส้นในระนาบแนวนอน ซึ่งจะตั้งฉากกับทิศทางความชันสูงสุด สามารถบ่งบอกได้ถึงแนวการไหลของน้ำในกระแสน้ำเข้า (Convergence flow) หรือกระแสน้ำออก (Divergence flow)

จากรูปที่ 8 บริเวณพื้นที่สีเขียวมีค่าความโค้งทั่วไปเป็นค่าบวก จะหมายถึงภูมิประเทศเป็นลักษณะโค้งนูน (Convex) บ่งบอกถึงแนวสันเขา และกระแสน้ำไหลลู่ออก ส่วนในบริเวณสีแดงแสดงค่าเป็นลบ หมายถึงภูมิประเทศเป็นลักษณะโค้งเว้า (Concave) บ่งบอกถึงหุบเขา และกระแสน้ำไหลลู่เข้า และสุดท้ายถ้าค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึงลักษณะเป็นที่ราบ (Flat) หรือเส้นตรง



รูปที่ 8 แสดงลักษณะความโค้งหน้าราบ



รูปที่ 9 แสดงลักษณะการไหลของน้ำของความโค้งหน้าราบ

(<https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/understanding-curvature-rasters/>)

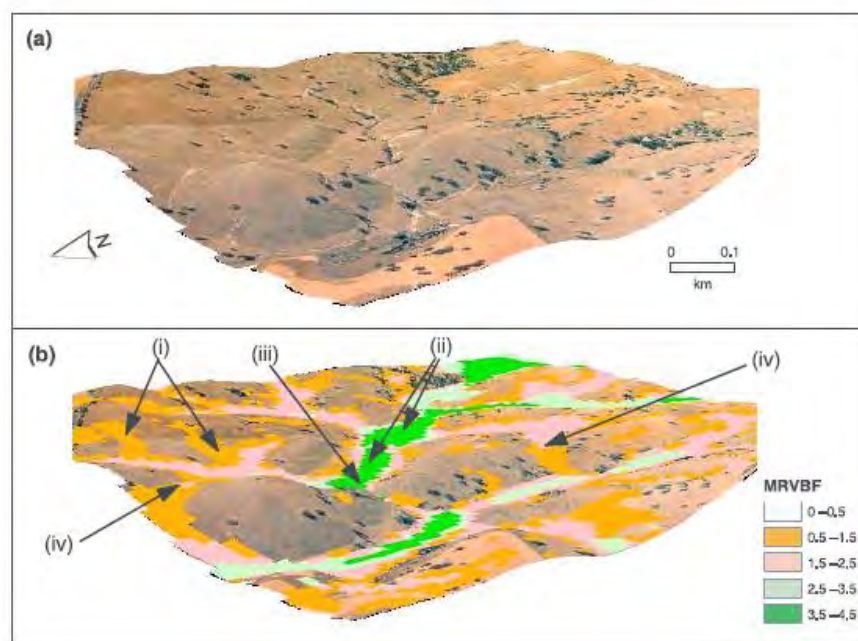
### ความราบของก้นหุบเขาหลายระดับ (Multiresolution index of valley bottom

**flatness :MRVBF)** คือ ดัชนีที่บอกถึงค่าการสะสมตัวของตะกอนในบริเวณพื้นที่ราบของก้นหุบเขา และสามารถใช้อำนาจความแตกต่างถึงบริเวณก้นหุบเขาของตะกอนที่บริเวณเนินเขาได้ ซึ่งตะกอนที่สะสมจะแสดงออกมาในรูปของที่ราบน้ำท่วมถึง (Floodplain) และตะกอนรูปพัด ลักษณะที่ชัดเจนของก้นหุบเขานั้นค่อนข้างแบนและต่ำเมื่อเทียบกับภูมิทัศน์โดยรอบทำให้สามารถระบุได้อย่างง่ายดายในภาคสนามหรือจากภาพถ่ายทางอากาศและแผนที่ความสูง

ความราบของก้นหุบเขาหลายระดับ สามารถแบ่งออกเป็นหลายค่าที่สอดคล้องกับความละเอียดของข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข (DEM) ที่แตกต่างกันและเกณฑ์ความชัน จากรูป 10 ถ้าค่าน้อยกว่า 0.5 ไม่ใช่พื้นที่ก้นของหุบเขา จะเป็นพวกสันเขา หรือที่ที่มีความชันสูง ค่าตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.5 เป็นก้นหุบเขาที่ชัน



ที่สุดและเล็กที่สุดสำหรับข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข 25 เมตร และพื้นราบเรียบและหุบเขาขนาดใหญ่จะถูกนำเสนอโดยค่าจาก 1.5 ถึง 2.5, 2.5 ถึง 3.5 และค่าที่มากกว่านั้น (Gallant and Dowling 2003)



รูปที่ 10 แสดงค่าของความราบของก้นหุบเขาหลายระดับ

(Gallant and Dowling 2003)

**ดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศ (Topographic Wetness Index : TWI)** คือ แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำบนพื้นผิวและกระแสน้ำใต้ผิวดินตามการไหลบ่าของภูมิประเทศ โดยที่ความอิ่มตัวและความเข้มข้นสูงของน้ำไหลบ่าสามารถทำหน้าที่เป็นเส้นทางการไหลเริ่มต้นไปยังกระบวนการที่ใหญ่เกินกว่าน้ำท่วมได้ (Marcelo Cando-Jácome and Antonio Martínez-Graña, 2019)

ซึ่งจะรวมผลการไหลจากพื้นที่การระบายและเป็นที่ยอมรับใช้ในการวัดปริมาณความชื้นในดินที่ควบคุมโดยภูมิประเทศในกระบวนการอุทกวิทยา ดังสมการที่ 2 สมการดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศ

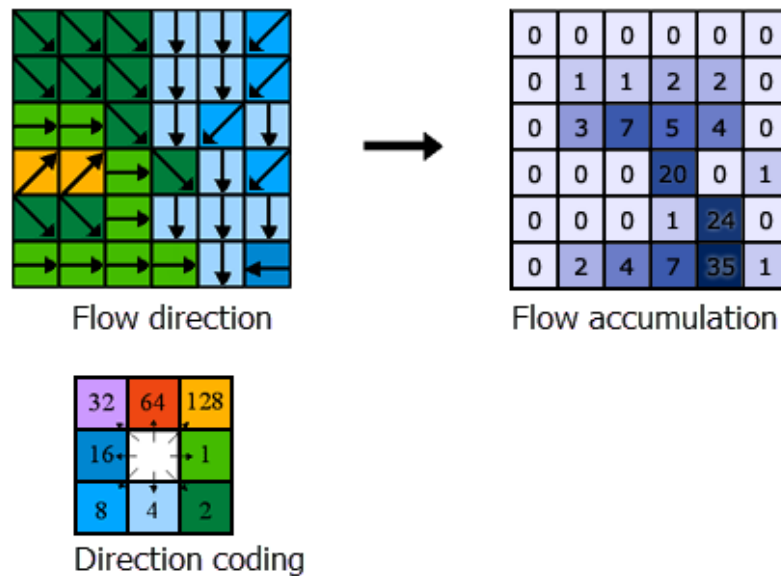
$$TWI = \ln \frac{a}{\tan B} \quad (2)$$

โดยที่ a คือ พื้นที่ท้องถื่นที่มีการระบายออกมา (พื้นที่ต้นน้ำ) สำหรับจุดคำนวณ

tan B คือ ทิศทางความชันของเซลล์ที่สนใจ

**การสะสมการไหล (Flow Accumulation; FCC)** คือ การคำนวณจากน้ำหนักระบายของเซลล์ทั้งหมดที่ไหลเข้าไปในแต่ละเซลล์ที่มีค่าต่ำลงในแรสเตอร์ส่งออก หากไม่มีการระบายน้ำหนักระบาย น้ำหนักจะถูกกำหนดเท่ากับ 1 ซึ่งถูกนำไปใช้แต่ละเซลล์และค่าของเซลล์ในแรสเตอร์ส่งออกคือจำนวนเซลล์ที่ไหลเข้าสู่แต่ละเซลล์

เซลล์ที่มีการไหลสะสมสูงเป็นบริเวณที่มีการไหลอย่างเข้มข้นและอาจใช้เพื่อระบุช่องทางของกระแสได้และเซลล์ที่มีการสะสมการไหลเป็น 0 แสดงว่าเป็นจุดสูงสุดในภูมิประเทศและอาจใช้เพื่อระบุสันเขาได้



รูปที่ 11 แสดงการคำนวณของการสะสมการไหล

### ปัจจัยของความยาวลาดชันและความสูงชัน (Slope Length and Steepness Factor :

*LS-Factor*) คือ การรวมกันของความลาดชันและความยาวของความลาดชัน ซึ่งมีประโยชน์ในการทำนายศักยภาพการสึกกร่อน จากสมการที่ 3 สมการปัจจัยความยาวลาดชันและความสูงชัน ค่าความยาวของความลาดชัน  $L$  คำนวณค่าผลกระทบของความยาวของความลาดชันต่อการสึกกร่อน และปัจจัยความสูงชัน  $S$  คำนวณผลกระทบของความลาดชันในการกัดเซาะ (Marcelo Cando-Jácome and Antonio Martínez-Graña, 2019)

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{100 \times (1.36 + 0.97 + 0.1385 \times S^2)} \quad (3)$$

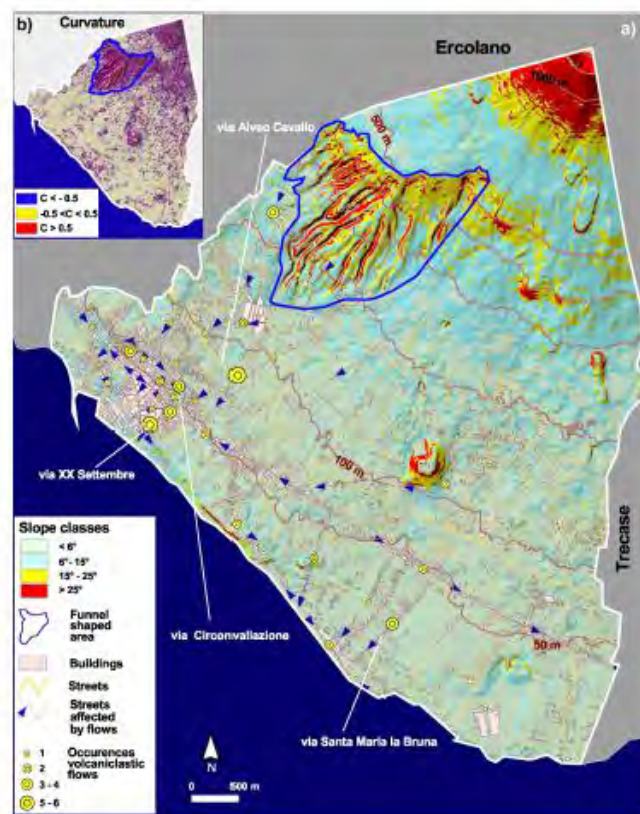
โดยที่  $L$  คือความยาวของความลาดชันเป็นเมตร และ  $S$  คือความสูงชันเป็น %



## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

Marina Bisson et al. (2018) จัดทำงานวิจัยประเมินความเสี่ยงภัยของเศษหินภูเขาไฟถล่ม (Volcanoclastic Flows) ในบริเวณพื้นที่ที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น โดยใช้ข้อมูลทางระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information System, GIS) ในบริเวณเขตเทศบาล ตอเร เดล เกรโก (Torre del Greco) ซึ่งอยู่ใกล้กับภูเขาไฟมีพลังซอมมา-เวซุเวียส (Somma-Vesuvius volcano) ในประเทศอิตาลี ซึ่งข้อมูลที่น่ามาใช้คือ ลักษณะทางธรณีสัณฐาน (Morphological) การวิเคราะห์ทางธรณีสัณฐาน (Geomorphometric analyses) ที่ได้จากแบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Elevation Model) ความละเอียดสูงมาก โดยใช้พารามิเตอร์ทางธรณีสัณฐานมาวิเคราะห์ ได้แก่ ความชัน (Slope) และความโค้ง (Curvature) เพราะพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถบ่งบอกถึงการกระตุ้นการไหลของเศษหินภูเขาไฟถล่มได้

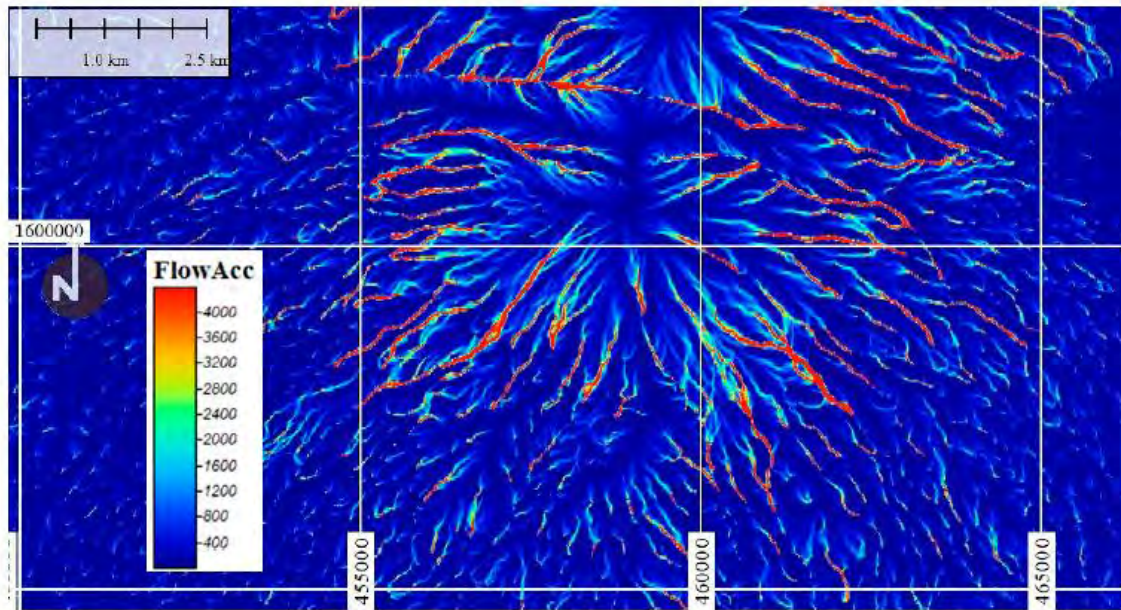
โดยเมื่อเกิดฝนตกหนัก ความลาดชันส่งผลอย่างมากต่อการเกิดแผ่นดินถล่ม เพราะความลาดชันเป็นตัวควบคุมความสมดุลระหว่างแรงที่ทำให้เกิดความเสถียรและแรงที่ไม่มั่นคง ส่วนความโค้งมีบทบาทสำคัญในการระบุว่าพื้นที่นี้เป็นพื้นที่ขอบกักเก็บน้ำและกักเก็บเศษหินเชิงเขาของภูเขาไฟ ซึ่งช่วยส่งเสริมความอึดตัวของดินและการเลื่อนตัว ส่งผลให้เกิดการรับรู้ว่าการสะสมจะสะสมตะกอนได้ดีในบริเวณที่ค่าความโค้งเชิงลบ (ลักษณะภูมิประเทศโค้งเว้า) มากกว่าบริเวณที่ค่าความโค้งเชิงบวก (ลักษณะภูมิประเทศโค้งนูน) ดังนั้นแผนที่ความชันและความโค้ง (รูปที่ 12) สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ถึงเส้นทางการไหลของเศษหินภูเขาไฟถล่มได้



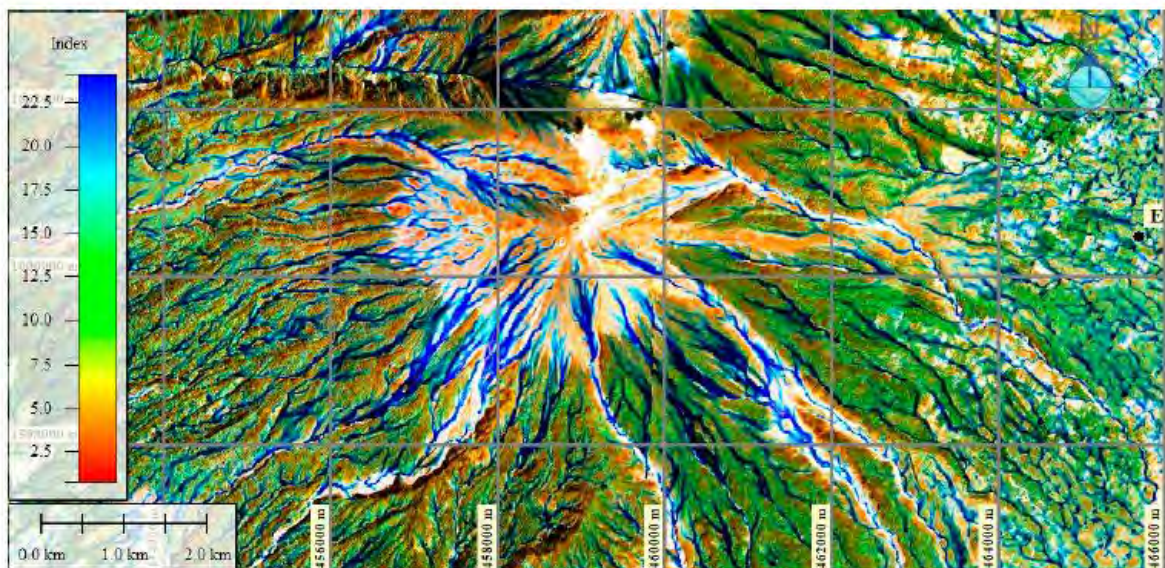
รูปที่ 12 (a) แผนที่ความชันและองค์ประกอบในเมืองวางลงบนภาพนูนสีเทา (*shaded relief*) ในเขตเทศบาล *Torre del Greco* เส้นทางของการไหลถุกวาดด้วยเส้นลูกศรบอกทิศทางสีน้ำเงิน ขนาดของวงกลมสีเหลือง หมายถึงจำนวนเหตุการณ์เศษหินภูเขาไฟถล่มที่บ้านตึกในถนน (b) แผนที่ความโค้งบนภาพนูนสีเทาของเทศบาล *Torre del Greco* พื้นที่รูปทรงกรวยร่างเป็นเส้นสีน้ำเงินเข้ม

**Marcelo Cando-Jácome and Antonio Martínez-Graña (2019)** เสนองานวิจัยเกี่ยวกับการทำแผนที่แสดงตะกอนไหล (Lahars) ที่เกิดจากการปะทุของภูเขาไฟฟูเอโก (Fuego volcano) ประเทศกัวเตมาลาโดยตรง ซึ่งเรียกว่าตะกอนไหลปฐมภูมิ (Primary lahars) เพราะเกิดจากการไหลของพวกเถ้าภูเขาไฟ และเศษหินภูเขาไฟที่ออกมาจากการปะทุภูเขาไฟโดยตรง นอกจากนี้ยังมี ตะกอนไหลทุติยภูมิ (Secondary lahars) ที่เกิดการไหลเนื่องจากฝนตกหนัก โดยงานวิจัยนี้ใช้การตรวจจับระยะไกลจากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel 1A และ 2A เพื่อค้นหาพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างความนูนบนพื้นที่ด้านข้างของภูเขาไฟ ซึ่งอาจเป็นบริเวณที่เป็นจุดกำเนิดของตะกอนไหลเหล่านี้ และกำหนดเส้นทางของตะกอนไหลจากพารามิเตอร์และดัชนีทางธรณีสารสนเทศด้วยระบบซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยาอัตโนมัติ (System for Automated Geoscientific Analysis, SAGA) พารามิเตอร์และดัชนีทางธรณีสารสนเทศที่ใช้ ได้แก่ การสะสมของการไหล (Flow accumulation, FCC), ดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศ (Topographic Wetness Index, TWI) และ ปัจจัยความยาวขนาดของความชัน (LS-Factor)

โดยการสะสมของการไหล (FCC) เป็นดัชนีทางธรณีสารสนเทศที่บ่งบอกถึงเซลล์ส่งออกที่แสดงผลออกมาจะเป็นบริเวณที่มีการไหลเวียนสูง มีการไหลที่เข้มข้นซึ่งสามารถใช้ในการระบุช่องทางน้ำได้ (รูปที่ 13) ดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศ (TWI) เป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่ของพื้นผิวและกระแสใต้ผิวดินตามการไหลป่าของภูมิประเทศ โดยที่ความอึดตัวและความเข้มข้นสูงของน้ำไหลป่าสามารถทำหน้าที่เป็นเส้นทางกรไหลเริ่มต้นไปยังกระบวนการที่ใหญ่ขึ้นกว่าน้ำท่วมได้ (รูปที่ 14) และสุดท้ายปัจจัยความยาวขนาดของความชัน (LS) คือการรวมกันของความลาดชันและความยาวของความลาดชัน มีประโยชน์ในการทำนายศักยภาพการสึกกร่อน โดยค่าความยาวของความชัน (L) จะคำนวณผลกระทบของความยาวของความชันต่อการสึกกร่อน และปัจจัยความชันของความชัน (S) จะคำนวณผลกระทบของความชันต่อการสึกกร่อน ค่าที่สูงขึ้นของสีน้ำตาลหมายถึงความไวที่มากขึ้นเพื่อการพังทลาย (รูปที่ 15)

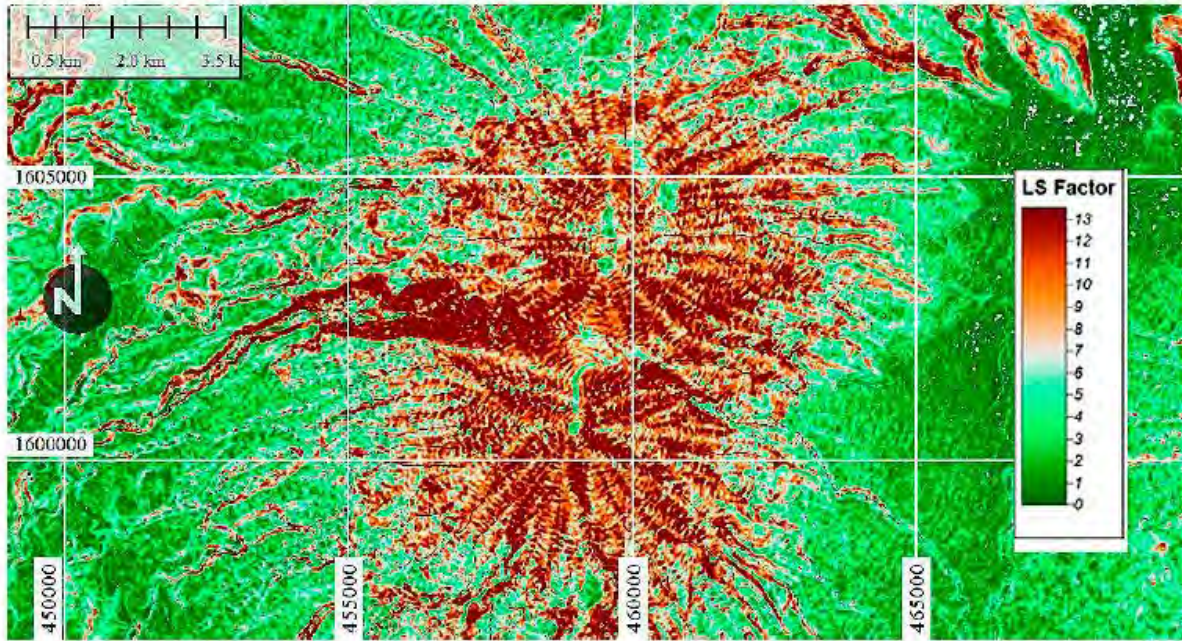


รูปที่ 13 ค่าที่สูงขึ้น (แนวโน้มน้ำเป็นสีแดง) แสดงถึงการสะสมของการไหลมากขึ้นและพื้นที่ของการไหลที่เข้มข้นที่สามารถใช้ในการระบุช่องทางน้ำ



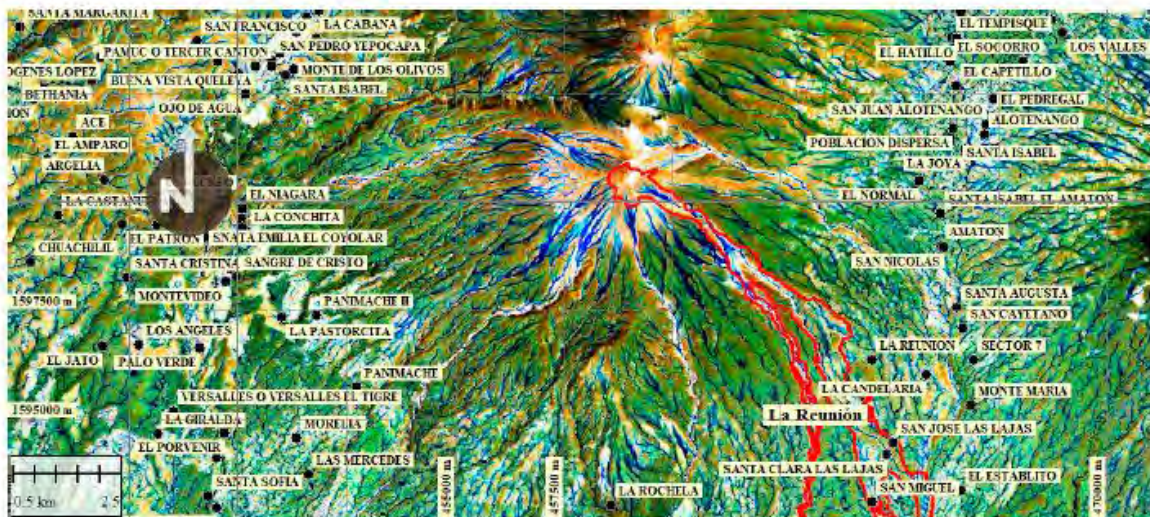
รูปที่ 14 ดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศ (TWI) คำนวณใน SAGA GIS ค่าที่สูงขึ้นของ TWI (แนวโน้มน้ำฟ้า) แสดงถึงการระบายน้ำและค่าที่ต่ำกว่า (แนวโน้มน้ำสีแดง) เป็นตัวแทนของยอดและสันเขา





รูปที่ 15 *LS-factor* (ความยาวความชันและปัจจัยความชัน) คำนวณในข้อมูลทางภูมิศาสตร์ของ *SAGA* ระบบ (GIS) ความไวต่อการสึกกร่อนต่ำแสดงด้วยสีเขียวและสูงด้วยสีน้ำตาล

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทั้งสามนี้ พบว่าพื้นที่ที่มีความไวต่อการสึกกร่อนมากขึ้น เนื่องจากมีความเข้มชันสูงสุดและการสะสมของการไหลของน้ำฝนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับตะกอนไหลปลูมภูมิและทุติยภูมิ (รูปที่ 16) พื้นที่สีน้ำเงินเหล่านี้ถูกพบว่าเป็นพื้นที่ประชากรที่ถูกทำลายโดยตะกอนไหล



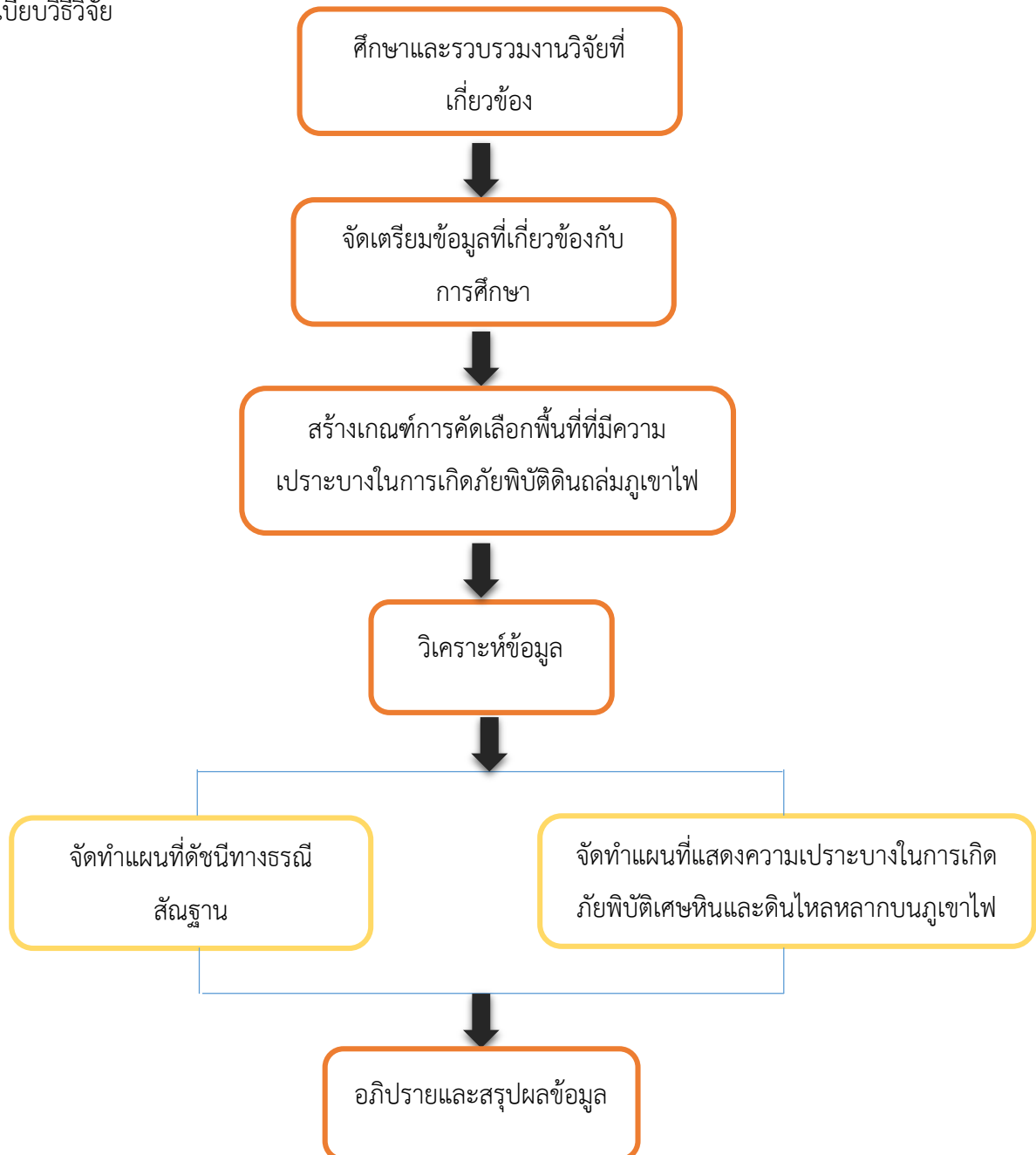
รูปที่ 16 เส้นทางการไหลคำนวณโดยใช้ดัชนีทางธรณีฐานสามดัชนี *TWI*, *LS-Factor* และ *FCC* ใน *SAGA*

## บทที่ 3

### วิธีการศึกษา

#### (Methodology)

การศึกษาระเบียบวิธีการวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังรูปที่ 17 แผนผังขั้นตอนการศึกษาระเบียบวิธีวิจัย



รูปที่ 17 แผนผังขั้นตอนการศึกษาระเบียบวิธีวิจัย

### 3.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยต่างๆ มาประกอบเป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการศึกษาพื้นที่ที่ศึกษา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ทำ

### 3.2 จัดเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

- ดาวน์โหลดข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลขแบบดิจิทัลของพื้นที่เกาะชวา ประเทศอินโดนีเซีย โดยมีค่าความละเอียด 90 เมตร

- คัดเลือกภูเขาไฟมีพลังจากประวัติการปะทุที่ไม่แน่นอน เนื่องจาก แสดงว่าบริเวณพื้นที่ภูเขาไฟยังคงมีตะกอนใหม่ที่ไม่แข็งตัวสะสมอยู่บริเวณนั้นมาก สามารถก่อให้เกิดภัยพิบัติดินถล่มได้ง่าย และทำการตัด (Crop) เฉพาะบริเวณพื้นที่ภูเขาไฟที่ศึกษา และแปลงไฟล์เป็น GeoTIFF เพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อในโปรแกรม SAGA

- คัดเลือกดัชนีทางธรณีสารสนเทศที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะภูมิลักษณะของภูเขาไฟมีพลัง

- เตรียมโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ โปรแกรม SAGA, โปรแกรม ArcMap 10.5, โปรแกรม Global Mapper 15 และ โปรแกรม Surfer 11

### 3.3 สร้างเกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่ที่มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ ดังตารางที่ 1

เกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่	ช่วงข้อมูล	คะแนน
1.ความลาดชัน	0°- 6°	1
	6°- 15°	2
	15°- 25°	3
	25°- 45°	4
	45°- 90°	5
2.ความโค้งทั่วไป	โค้งเว้า	5
	ที่ราบ	1
	โค้งนูน	3

เกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่	ช่วงข้อมูล	คะแนน
3.ความราบของกันหุบเขาหลายระดับ	1	1
	2	2
	3	3
	4	4
	5	5
4.ดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศ	1	1
	2	2
	3	3
	4	4
	5	5
5.การสะสมการไหล	1	1
	2	2
	3	3
	4	4
	5	5
6.ปัจจัยของความยาวลาดชันและความสูงชัน	1	1
	2	2
	3	3
	4	4
	5	5

ตารางที่ 1 เกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่ที่มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ

การคิดคะแนนของแต่ละเกณฑ์จะคิดจากค่าช่วงคะแนนที่มีผลต่อการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลาก โดยมีค่าคะแนนดังต่อไปนี้

5 = มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟสูงมาก

4 = มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟสูง

3 = มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟปานกลาง

2 = มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำ



1 = มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำมาก

### 3.4 วิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.4.1 แผนที่ดัชนีทางธรณีสัณฐานของภูเขาไฟมีพลัง

การศึกษาดัชนีทางธรณีสัณฐานของภูเขาไฟ เพื่อที่จะดูลักษณะทางภูมิลักษณะของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก ซึ่งนำมาวิเคราะห์หรือคาดประมาณเหตุการณ์ในอนาคตถึงพื้นที่เปราะบางที่จะก่อให้เกิดภัยพิบัติดินถล่มบนภูเขาไฟได้ โดยในการศึกษารั้งนี้จะศึกษาดัชนีทางธรณีสัณฐานทั้งหมด 6 ดัชนี ได้แก่ ความลาดชัน (Slope) ความโค้งทั่วไป (General Curvature) ความราบของก้นหุบเขาหลายระดับ (Multiresolution Valley Bottom Flatness; MRVBF) ดัชนีความชุ่มชื้นภูมิประเทศ (Topographic Wetness Index; TWI) ปัจจัยของความยาวลาดชันและความสูงชัน (Slope length and Steepness factor; LS-factor) และการสะสมการไหล (Flow Accumulation; FCC) โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จะได้รับการวิเคราะห์ในโปรแกรม System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)

**ความลาดชัน (Slope)** เป็นตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจาก ส่งผลอย่างมากต่อการเกิดแผ่นดินถล่ม เพราะความลาดชันเป็นตัวควบคุมความสมดุลระหว่างแรงที่ทำให้เกิดความเสถียรและแรงที่ไม่มั่นคง โดยพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงมักจะมีโอกาสในการเกิดดินถล่มได้มากกว่าพื้นที่ที่มีความลาดชันต่ำ สามารถแบ่งความลาดชันได้ทั้งหมด 5 ช่วง ได้แก่ 0°- 6°, 6°- 15°, 15°- 25°, 25°- 45°, 45°- 90° ดังแสดงในรูปที่ 18 โดยค่าความลาดชันที่ส่งผลต่อการกระตุ้นให้เกิดการไหลของเศษหินภูเขาไฟถล่ม (Volcanicclastic flow) จะมีค่ามากกว่า 15° (Bisson, Paolillo et al. 2018)

**ความโค้งทั่วไป (General Curvature)** เป็นตัวแปรที่มีบทบาทสำคัญในการระบุว่าพื้นที่นี้เป็นพื้นที่ชอบกักเก็บน้ำและกักเก็บเศษหินเชิงเขาของภูเขาไฟ ซึ่งช่วยส่งเสริมความอึดตัวของดินและการเคลื่อนตัว ส่งผลให้เกิดการรับรู้ว่าจะสะสมตะกอนได้ดีในบริเวณที่ค่าความโค้งเชิงลบ (ลักษณะภูมิประเทศเว้า) มากกว่าบริเวณที่ค่าความโค้งเชิงบวก (ลักษณะภูมิประเทศนูน) (Bisson, Paolillo et al. 2018) ส่วนพื้นที่บริเวณที่มีค่าความโค้งใกล้เคียงศูนย์ (ลักษณะภูมิประเทศเส้นตรงหรือพื้นที่ราบ) จะมีการกัดกร่อนน้อยกว่าบริเวณที่ค่าความโค้งเชิงบวก โดยความโค้งทั่วไปสามารถจำแนกพื้นที่ได้เป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ โค้งนูน (Convex) โค้งเว้า (Concave) และเส้นตรงหรือพื้นที่ราบ (Flat) ดังรูปที่ 19

#### ความราบของก้นหุบเขาหลายระดับ (Multiresolution Valley Bottom Flatness; MRVBF)

เป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงการสะสมตัวของตะกอนในบริเวณพื้นที่ราบของก้นหุบเขา และสามารถใช้อำนาจความแตกต่างถึงบริเวณกัดกร่อนของตะกอนที่บริเวณเนินเขาได้ ซึ่งตะกอนที่สะสมจะแสดงออกมาในรูปของพื้นที่ราบน้ำท่วมถึง (Floodplain) และตะกอนรูปพัด

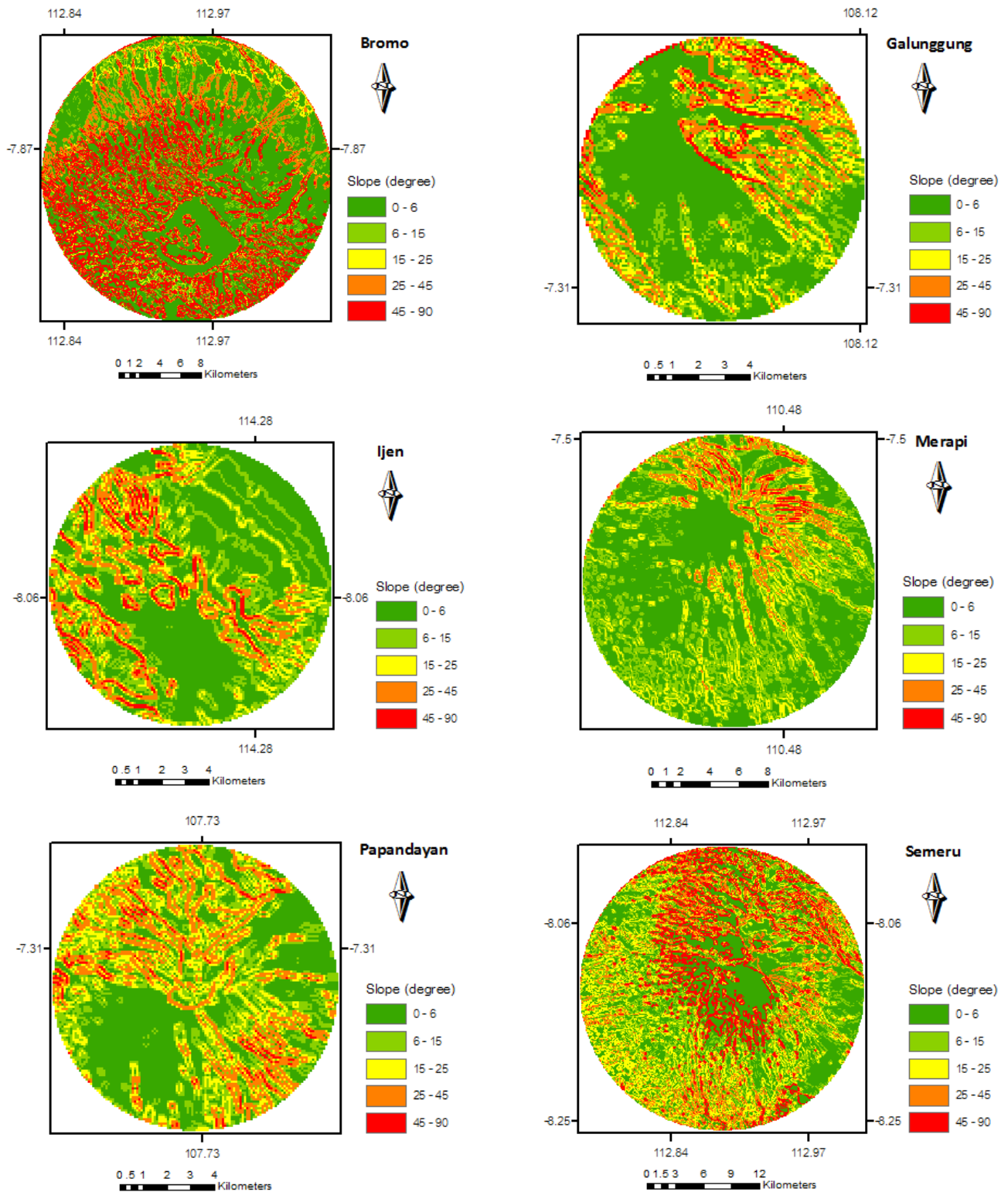


ความราบของกันหุบเขาหลายระดับ สามารถแบ่งค่าออกเป็นหลายช่วง ดังนี้ ถ้าค่าน้อยกว่า 0.5 ไม่ใช่พื้นที่กันของหุบเขา จะเป็นพวกสันเขา หรือที่ที่มีความชันสูง ค่าตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.5 เป็นกันหุบเขาที่ชันที่สุดและเล็กที่สุดสำหรับข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข 25 เมตร และพื้นราบเรียบและหุบเขาขนาดใหญ่จะถูกนำเสนอโดยค่าจาก 1.5 ถึง 2.5, 2.5 ถึง 3.5 และค่าที่มากกว่านั้น (Gallant and Dowling 2003) ดังรูปที่ 20 ซึ่งการเกิดเศษหินและดินไหลหลากนั้น ถ้ามีค่าความราบของกันหุบเขาหลายระดับสูง จะบ่งบอกถึงพื้นที่บริเวณนั้นมีการสะสมตัวของตะกอนหรือกระบวนการทางน้ำ ก่อให้เกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากได้สูงกว่าบริเวณอื่นๆ (Wang et al. 2015)

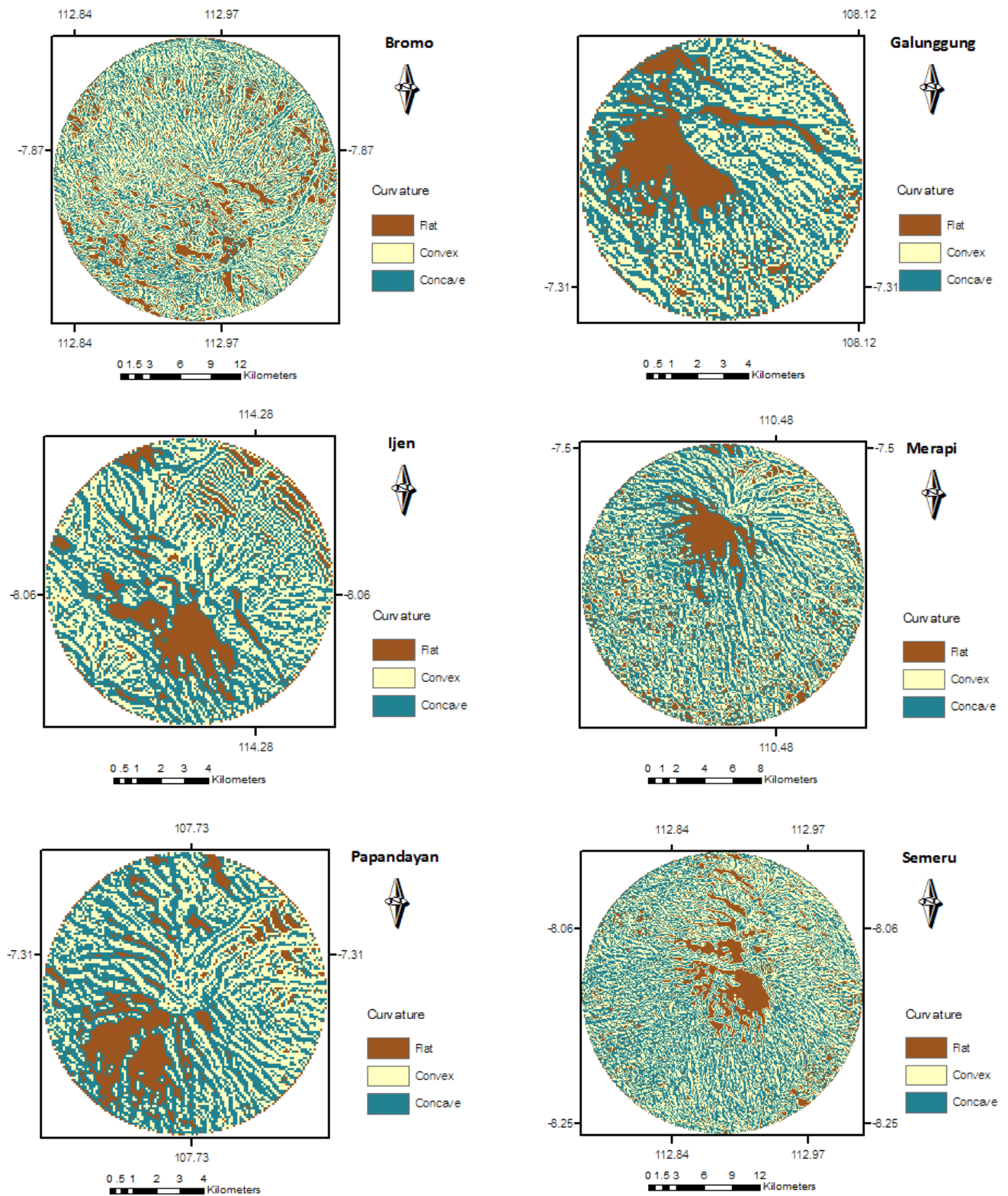
**ดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศ (Topographic Wetness Index : TWI)** เป็นดัชนีที่ใช้เป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำบนพื้นผิวและกระแสน้ำใต้ผิวดินตามการไหลบ่าของภูมิประเทศ บ่งบอกถึงความอิ่มตัวและปริมาณความชื้นในดิน ดังนั้น ถ้าค่าดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศสูง จะบ่งบอกว่าเป็นพื้นที่ระบายน้ำ (Cando-Jácome and Martínez-Graña 2019) และเป็นพื้นที่ที่มีอัตราความถี่ในการเกิดภัยพิบัติดินถล่มสูง (Rohan Kumar and R.Anbalagan 2013) แผนที่แสดงดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศได้ดังรูปที่ 21

**การสะสมการไหล (Flow Accumulation; FCC)** เป็นการคำนวณจากน้ำหนักสะสมของเซลล์ทั้งหมดที่ไหลเข้าไปในแต่ละเซลล์ที่มีค่าต่ำลงในแรสเตอร์ส่งออก เซลล์ที่มีการไหลสะสมสูงเป็นบริเวณที่มีการไหลอย่างเข้มข้นและอาจใช้เพื่อระบุช่องทางของกระแสได้ (Cando-Jácome and Martínez-Graña 2019) ดังนั้น บริเวณที่มีค่าการสะสมการไหลสูงจะเป็นบริเวณที่มีความแปรปรวนในการเกิดเศษหินและดินไหลหลากมาก ดังรูปที่ 22

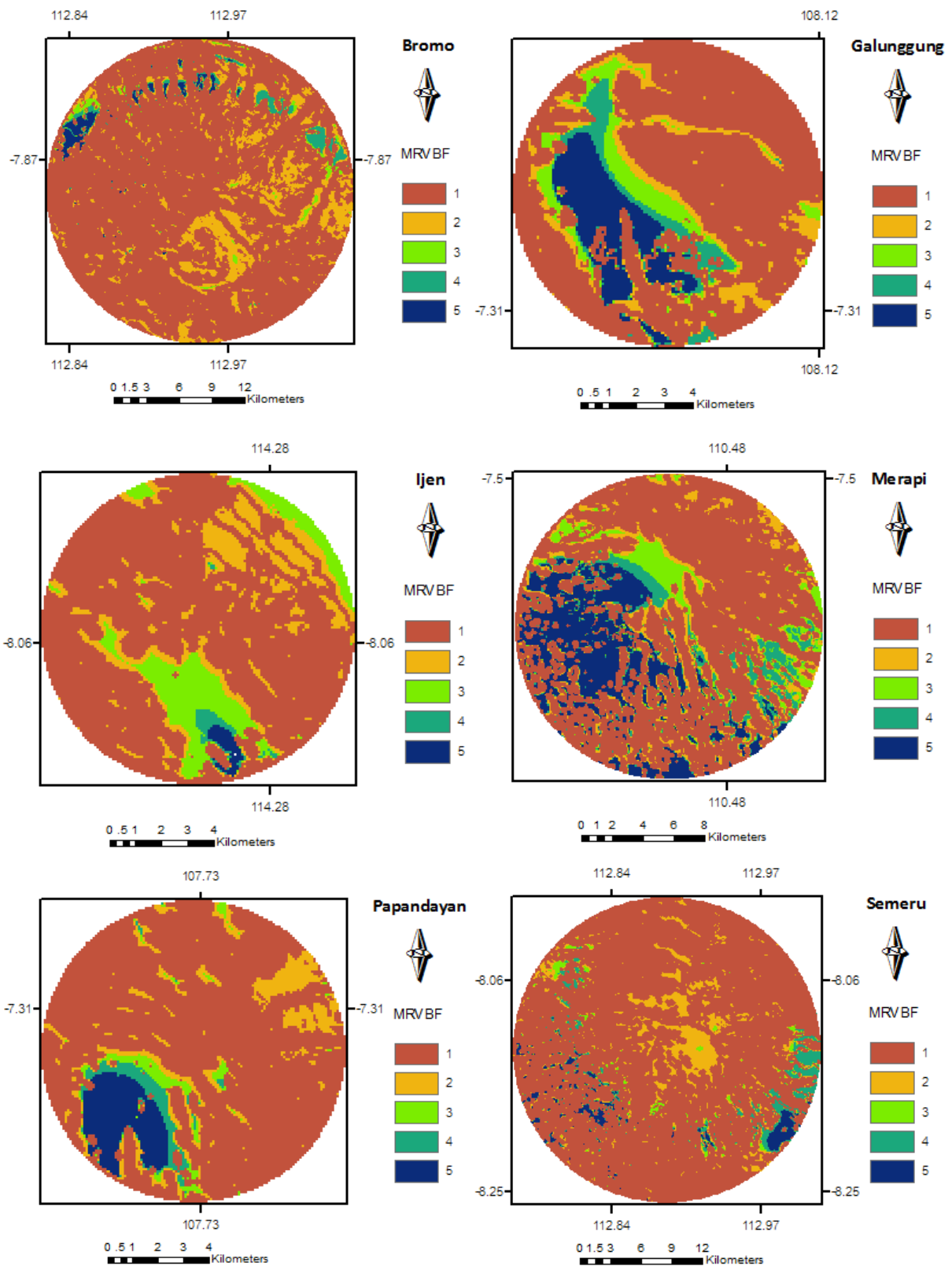
**ปัจจัยของความยาวลาดชันและความสูงชัน (Slope Length and Steepness Factor : LS-Factor)** เป็นค่าดัชนีที่เกิดจากการรวมกันของความลาดชันและความยาวของความลาดชัน ซึ่งมีประโยชน์ในการทำนายศักยภาพการสึกกร่อน บริเวณที่มีค่าปัจจัยของความลาดชันและความยาวของความลาดชันสูง บ่งบอกว่าจะมีความเสี่ยงของการเกิดการสึกกร่อนของบริเวณนั้นมาก ทำให้มีโอกาสเกิดเศษหินและดินไหลหลากมากนั่นเอง ดังรูปที่ 23



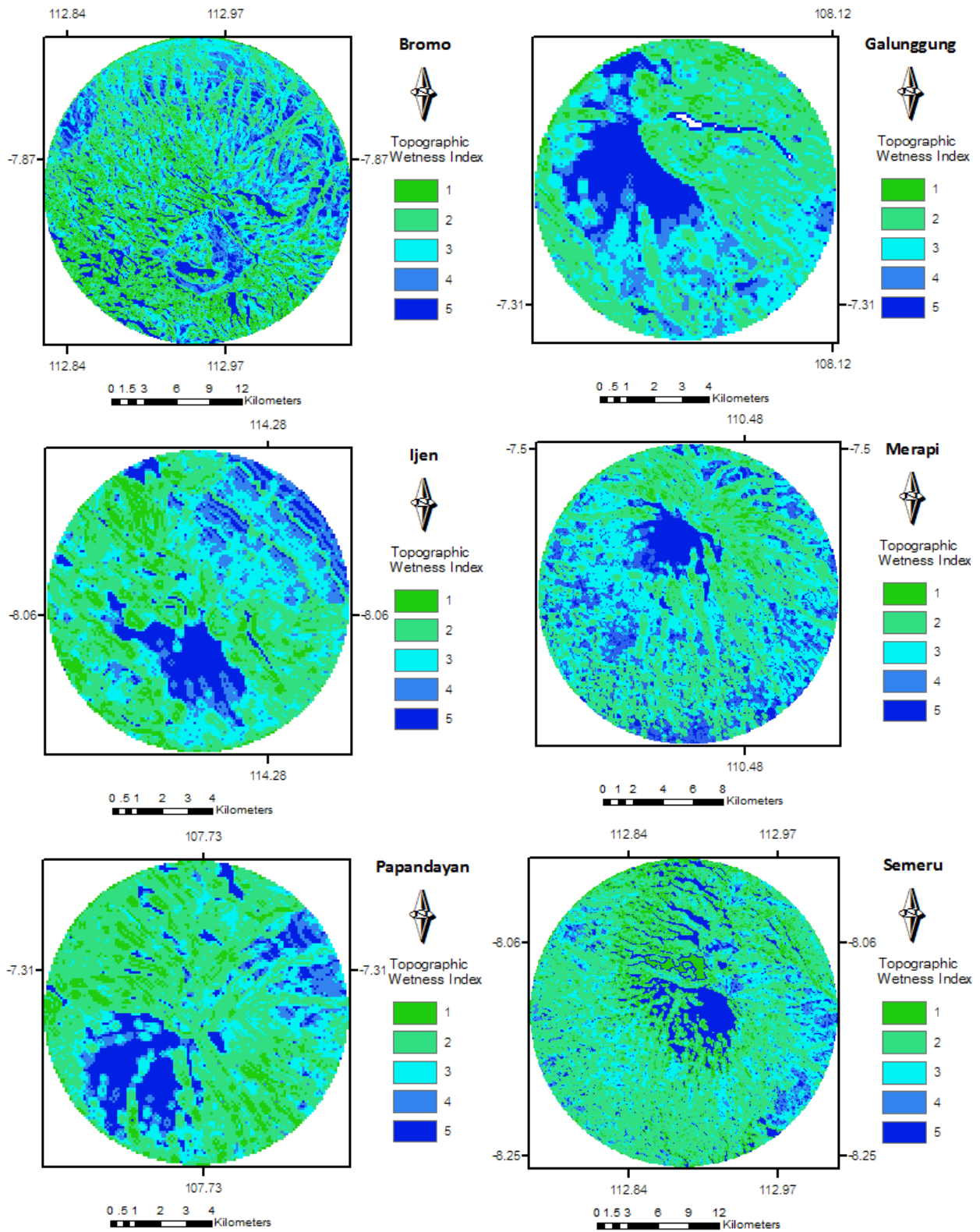
รูปที่ 18 แผนที่ดัชนีความลาดชัน (Slope) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก



รูปที่ 19 แผนที่ดัชนีความโค้งทั่วไป (General Curvature) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก

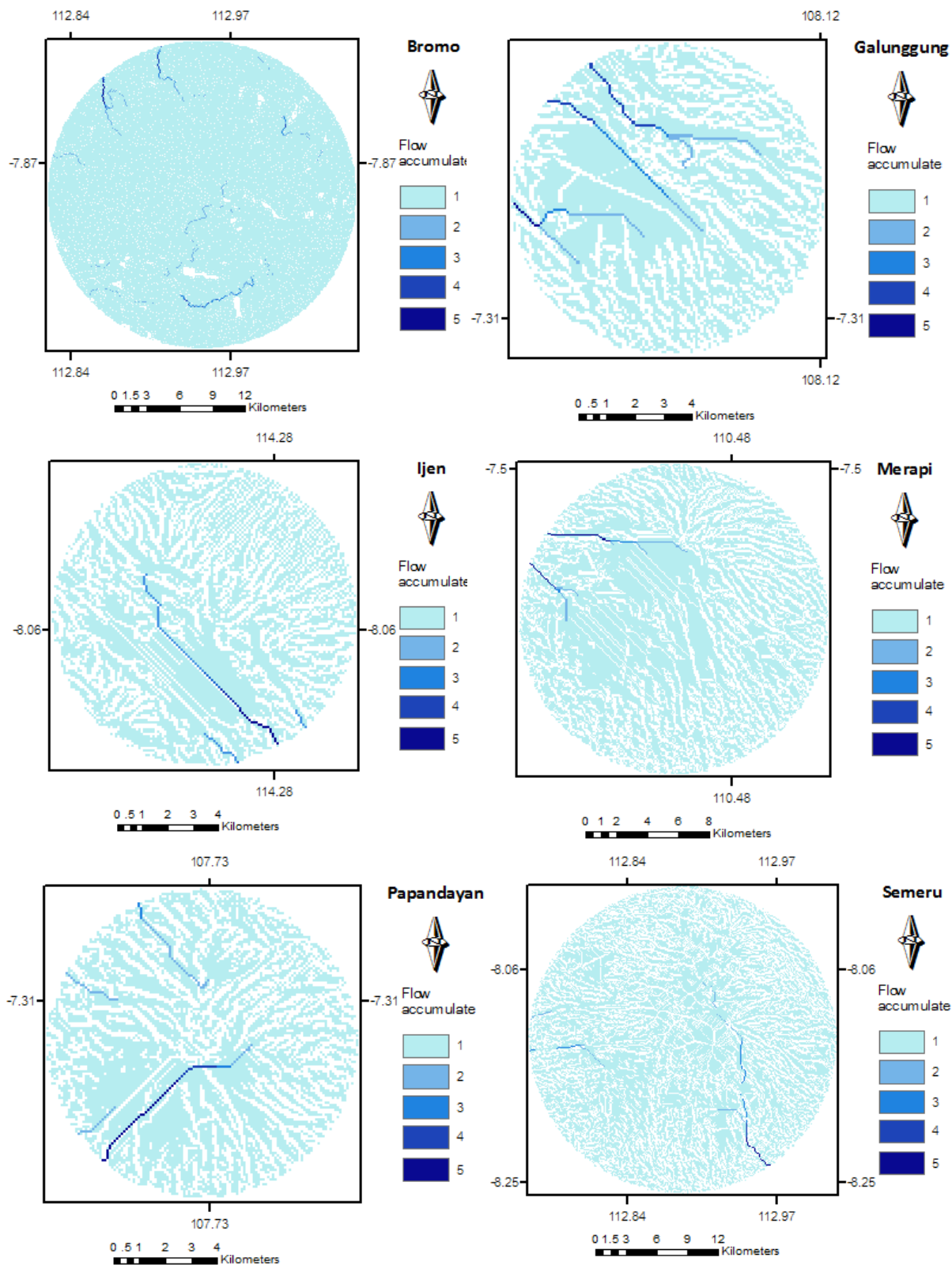


รูปที่ 20 แผนที่ดัชนีความราบของก้นหุบเขาหลายระดับ (Multiresolution index of valley bottom flatness) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก

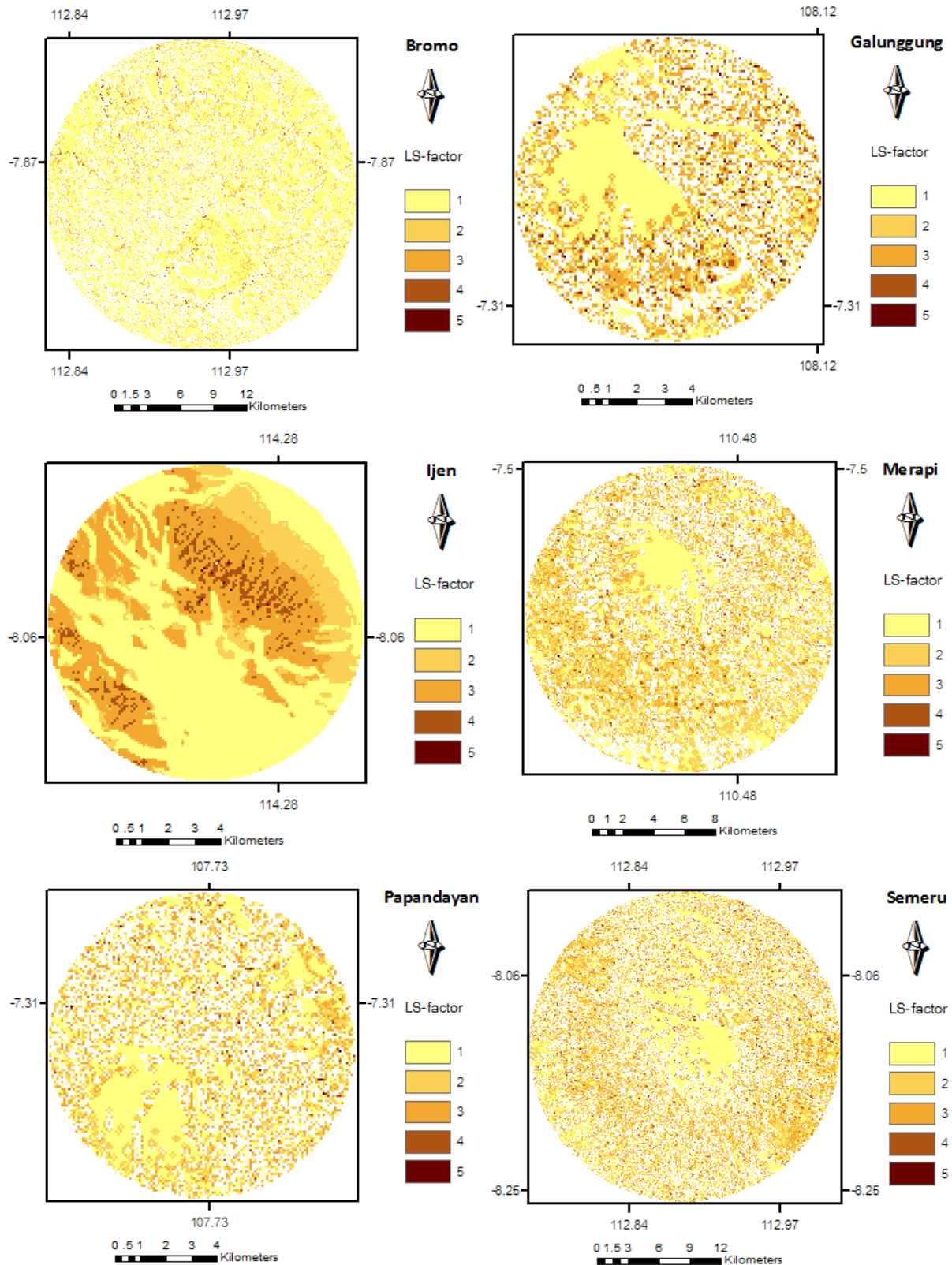


รูปที่ 21 แผนที่ดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศ (Topographic Wetness Index) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก





รูปที่ 22 แผนที่ดัชนีการสะสมการไหล (Flow Accumulation) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก



รูปที่ 23 แผนที่ดัชนีปัจจัยของความยาวลาดชันและความสูงชัน (Slope Length and Steepness Factor : LS-Factor) ของภูเขาไฟทั้ง 6 ลูก

### 3.4.2 แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ

เมื่อทำการคิดคะแนนจากเกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่ที่มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟแล้ว จึงนำเกณฑ์ทั้งหมดมารวมคะแนนในโปรแกรม ArcMap 10.5 เพื่อมาจำแนกว่าพื้นที่บริเวณใดมีความเปราะบางในระดับมากหรือน้อย เพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงการคาดการณ์ในอนาคตถึงการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟในแต่ละพื้นที่ได้

โดยในการจำแนกคะแนนจะจำแนกจากแผนที่แสดงโครงร่าง (Contour map) ในโปรแกรม Surfer 11 ซึ่งจะแบ่งความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟได้เป็น 5 ช่วง ได้แก่ ระดับต่ำมาก (Very low) ระดับต่ำ (Low) ระดับปานกลาง (Moderate) ระดับสูง (High) และระดับสูงมาก (Very high)



## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### (Result)

#### 4.1 เกณฑ์ค่าคะแนนที่ใช้ระบุถึงระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ

เมื่อได้ทำการแสดงผลข้อมูลการวิเคราะห์ของดัชนีทางธรณีสัญญาณของแต่ละภูเขาไฟ ดังรูปที่ 18-23 แล้ว จากนั้นจึงทำการรวมค่าคะแนนทั้งหมดจากการคิดเกณฑ์การคัดเลือกพื้นที่ที่มีความเปราะบางในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟในโปรแกรม ArcMap 10.5 ดังตารางที่ 1 คะแนนที่ได้มาจึงนำไปจำแนกเป็นระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติได้ ดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงเกณฑ์ค่าคะแนนของระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟในแต่ละช่วง

ระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ	ค่าคะแนน
ต่ำมาก	6 - 8
ต่ำ	9 - 11
ปานกลาง	12 - 14
สูง	15 - 17
สูงมาก	≥18

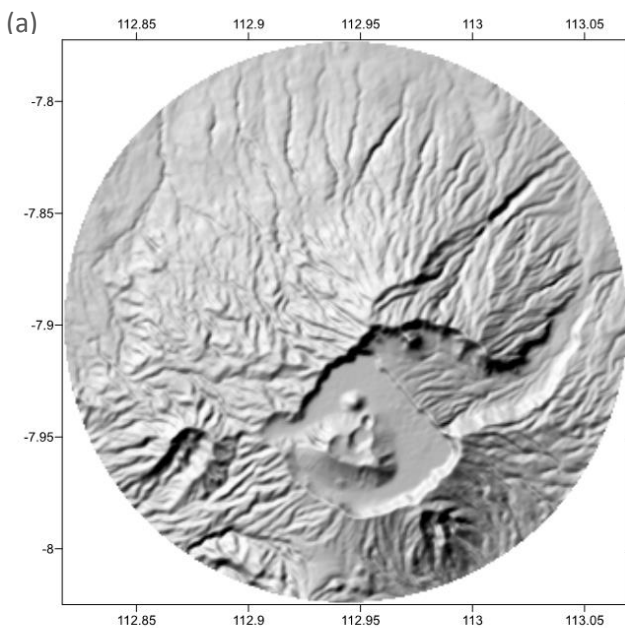
#### 4.2 แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟ

หลังจากคิดเกณฑ์ค่าคะแนนที่ใช้ระบุระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟในแต่ละช่วงแล้ว จึงนำมาจัดทำแผนที่แสดงโครงร่าง (Contour map) ในโปรแกรม Surfer 11 ของภูเขาไฟมีพลังทั้งหมด 6 ลูก เพื่อแสดงช่วงบริเวณที่มีระดับความเปราะบางแตกต่างกันไป

## ภูเขาไฟโบรโม (Bromo Volcano)

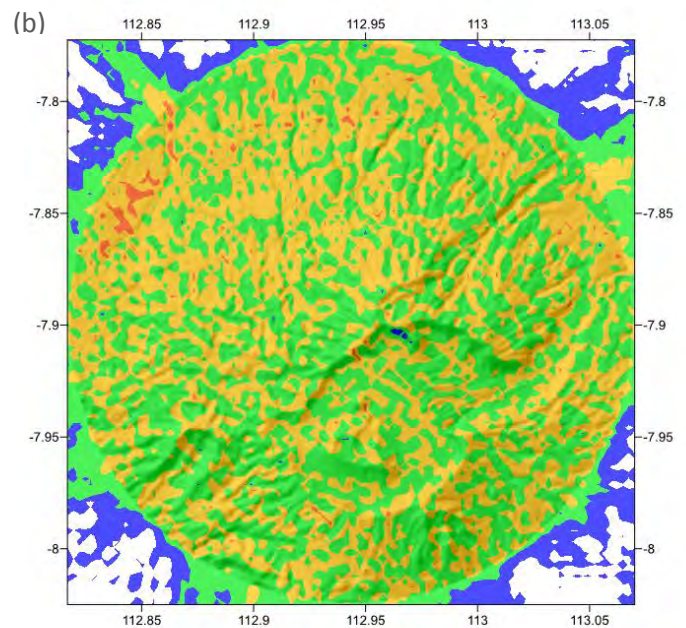
จากรูปที่ 24b จะเห็นว่าพื้นที่ที่มีระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำมาก (สีน้ำเงิน) คิดเป็นเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ต่อมาพื้นที่ที่มีระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำ (สีเขียวอ่อน) คิดเป็น 42 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ที่มีระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟปานกลาง (สีเหลือง) คิดเป็น 46 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับที่มีมากที่สุดของพื้นที่บริเวณภูเขาไฟโบรโมแห่งนี้ ต่อมาระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟสูงและสูงมาก (สีส้มและสีแดง) รวมกันคิดเป็นเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งจะอยู่ช่วงบริเวณทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของภูเขาไฟ ส่วนมากเป็นบริเวณที่มีค่าความลาดชันต่ำ ลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นโค้งนูนสลับกับโค้งเว้า ค่าดัชนีความราบของกันหุบเขาหลายระดับมีค่าสูงบ่งบอกว่าเป็นมีการสะสมของตะกอนมาก ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศมีค่าสูง การสะสมการไหลมีค่าสูง และปัจจัยของความลาดชันและความยาวของความลาดชันมีค่าสูงบ่งบอกว่าการกัดกร่อนของตะกอนมาก

Shaded relief DEM of Bromo Volcano



N  
5 kilometres

Debris & Earth Flow Susceptibility Map In Bromo Volcano

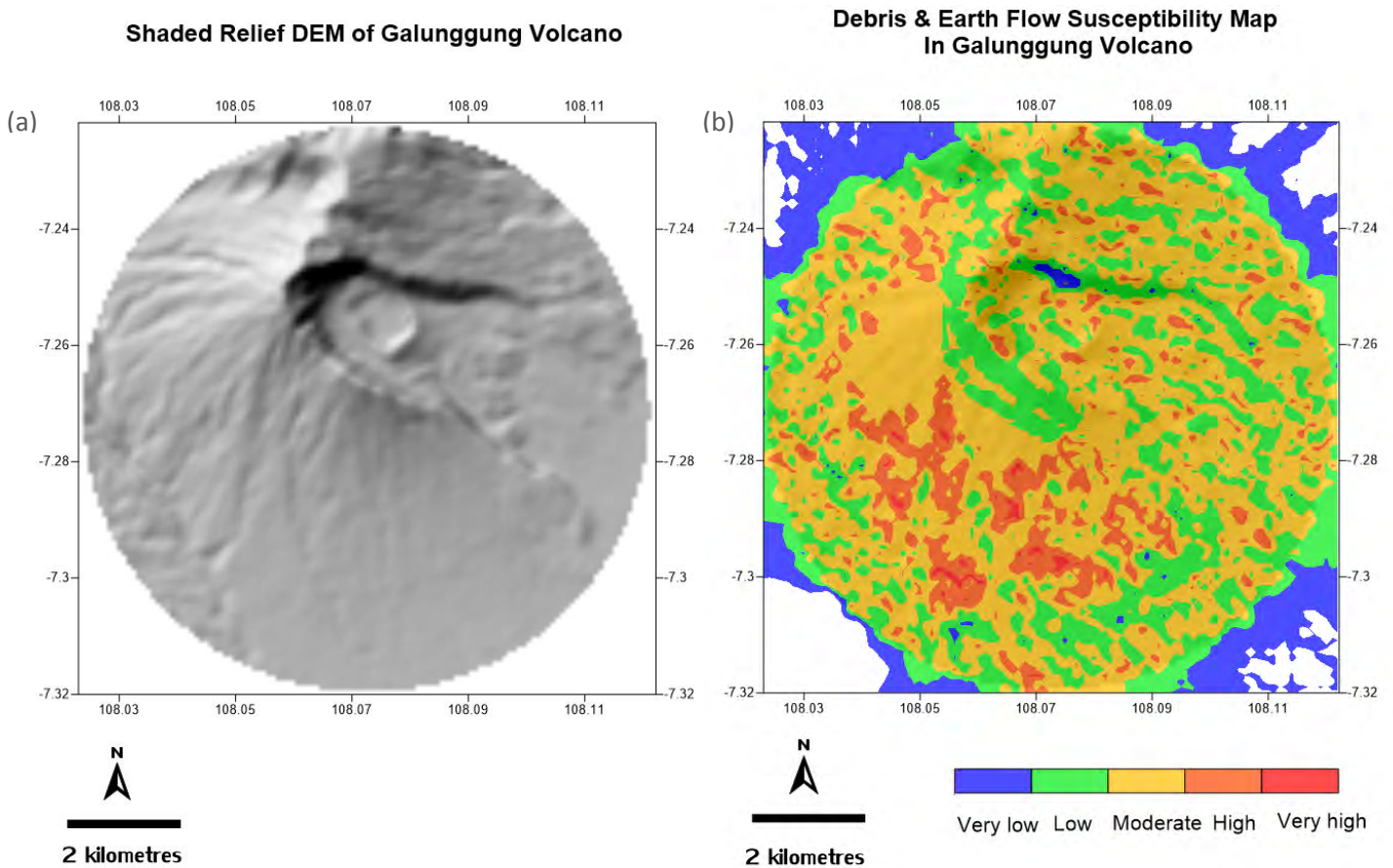


N  
5 kilometres  
Very low Low Moderate High Very high

รูปที่ 24 (a) แผนที่ภาพนูนสีเทาของภูเขาไฟโบรโม (b) แผนที่แสดงความเสี่ยงของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟโบรโม

## ภูเขาไฟกาลุงกุง (Galunggung Volcano)

จากรูปที่ 25b จะเห็นว่าพื้นที่ที่มีระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำมาก (สีน้ำเงิน) คิดเป็นเพียงประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมดซึ่งเป็นพื้นที่เล็กๆ ที่อยู่บนสันเขาของภูเขาไฟ ต่อมาพื้นที่ที่มีระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำ (สีเขียวอ่อน) คิดเป็น 24.5 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ที่มีระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟปานกลาง (สีเหลือง) คิดเป็น 46.5 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับที่มีมากที่สุดของพื้นที่บริเวณภูเขาไฟกาลุงกุงแห่งนี้ ต่อมาระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟสูง (สีส้ม) 22 เปอร์เซ็นต์ และสูงมาก (สีแดง) 4.7 เปอร์เซ็นต์ รวมกันคิดเป็นประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งพอคิดรวมแล้วถือว่าเป็นระดับที่มีพื้นที่มากเป็นอันดับสอง



รูปที่ 25 (a) แผนที่ภาพนูนสีเทาของภูเขาไฟกาลุงกุง (b) แผนที่แสดงความเสี่ยงของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟกาลุงกุง

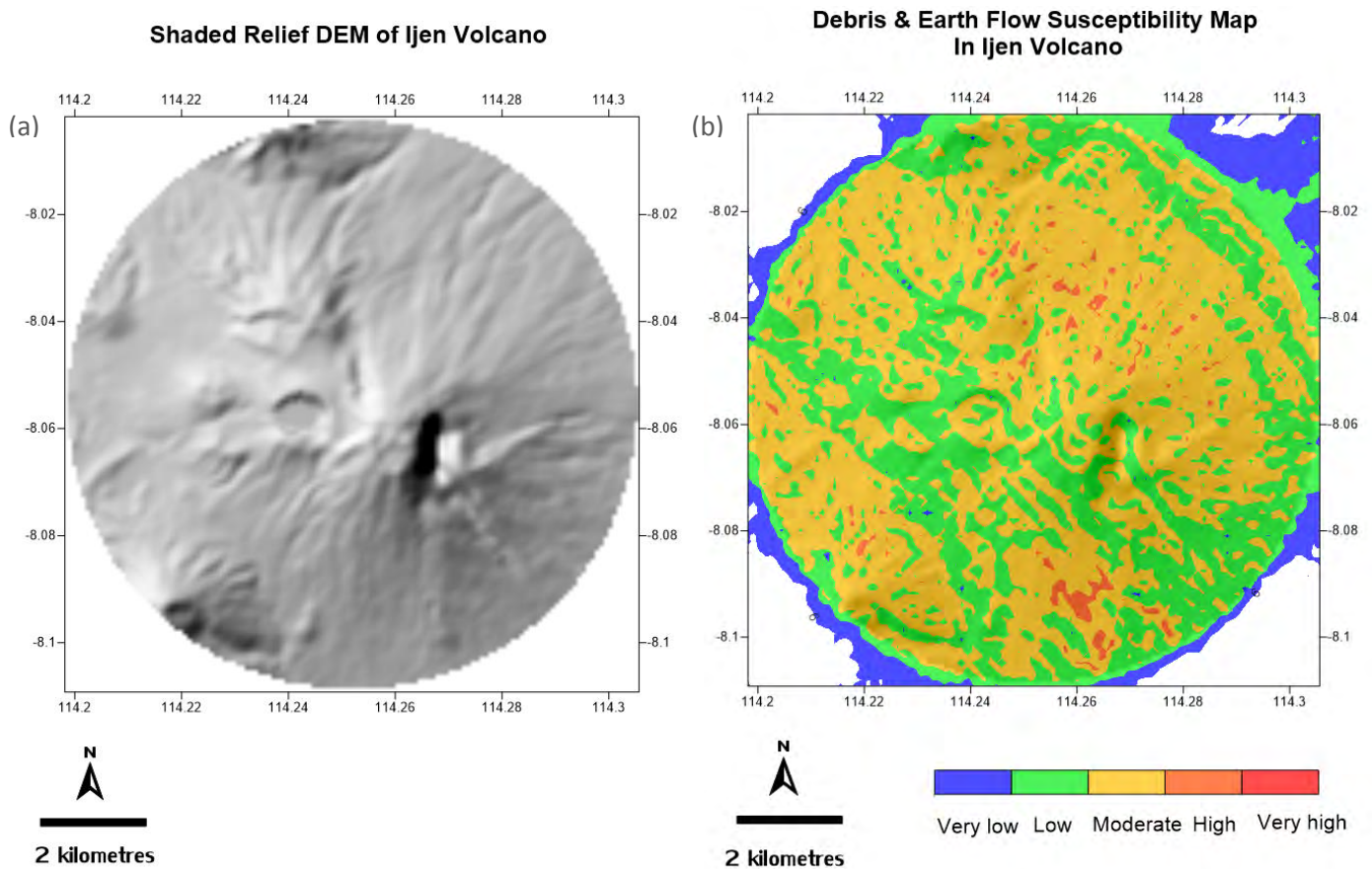
โดยทั้งสองระดับจะกระจายอยู่รอบทิศของภูเขาไฟ แต่จะมีบริเวณมากอยู่ช่วงบริเวณทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ถึงทางทิศใต้ของภูเขาไฟ เป็นบริเวณที่มีค่าความลาดชันต่ำ โดยพื้นที่ที่มีระดับความแปรปรวนสูงจะเป็นลักษณะภูมิประเทศแบบโค้งนูนและพื้นที่ที่มีระดับความแปรปรวนสูงมากจะเป็นลักษณะภูมิประเทศแบบโค้งเว้า ค่าดัชนีความราบของกันหุบเขาหลายระดับมีค่าสูงบ่งบอกว่าเป็นมีการสะสมของตะกอนมาก ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศมีค่าสูง การสะสมการไหลมีค่าสูงในทางทิศตะวันตก และปัจจัยของความลาดชันและความยาวของความลาดชันมีค่าปานกลางถึงสูงบ่งบอกว่ามี การกัดกร่อนของตะกอนอยู่พอสมควร

### ภูเขาไฟไอเจน (Ijen Volcano)

จากรูปที่ 26b จะเห็นว่าพื้นที่ที่มีระดับความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำมาก (สีน้ำเงิน) คิดเป็นเพียง 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ต่อมาพื้นที่ที่มีระดับความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำ (สีเขียวอ่อน) คิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ที่มีระดับความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟปานกลาง (สีเหลือง) คิดเป็น 55 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับที่มีมากที่สุดของพื้นที่บริเวณภูเขาไฟไอเจนแห่งนี้ ต่อมาระดับความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟสูงและสูงมาก (สีส้มและสีแดง) รวมกันคิดเป็นเพียง 12 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด (ระดับความแปรปรวนสูงมากมีพื้นที่เพียงไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด)

โดยระดับความแปรปรวนสูงและสูงมากจะอยู่ในช่วงบริเวณทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือและบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของภูเขาไฟ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าความลาดชันต่ำ ลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นโค้งนูน สลับกับโค้งเว้า ค่าดัชนีความราบของกันหุบเขาหลายระดับในช่วงตะวันออกเฉียงใต้มีค่าปานกลางถึงสูงบ่งบอกว่าเป็นมีการสะสมของตะกอนมาก แต่ในช่วงตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าต่ำ ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศมีค่าปานกลางถึงสูง ช่วงบริเวณทิศตะวันออกเฉียงใต้มีค่าการสะสมการไหลสูง และปัจจัยของความลาดชันและความยาวของความลาดชันมีค่าสูงในช่วงทิศตะวันออกเฉียงเหนือบ่งบอกว่ามี การกัดกร่อนของตะกอนมาก แต่มีค่าต่ำในช่วงทิศตะวันออกเฉียงใต้



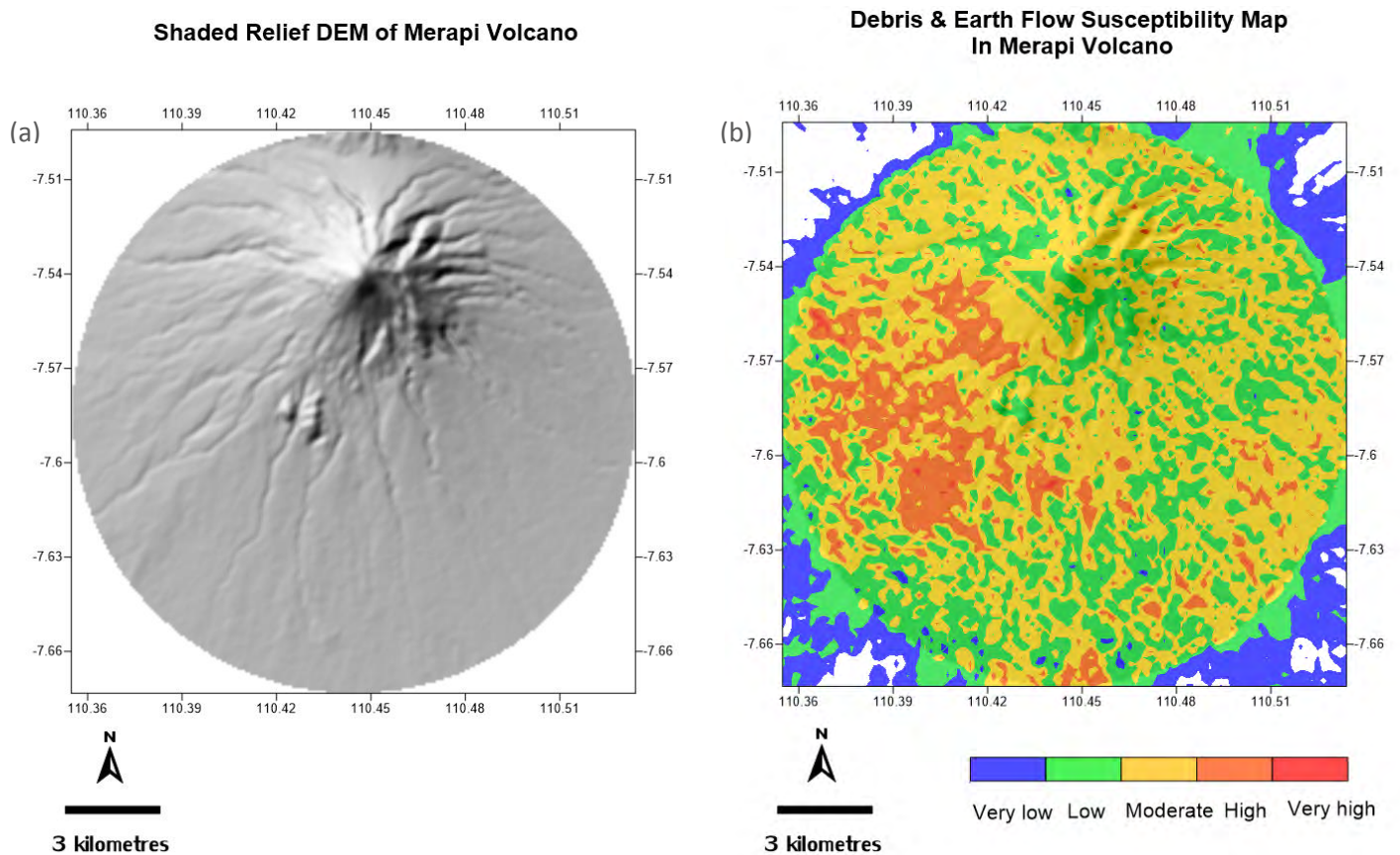


รูปที่ 26 (a) แผนที่ภาพนูนสีเทาของภูเขาไฟอิเจน (b) แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟอิเจน

### ภูเขาไฟเมราปี (Merapi Volcano)

จากรูปที่ 27b จะเห็นว่าพื้นที่ที่มีระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำมาก (สีน้ำเงิน) คิดเป็นเพียงประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ต่อมาพื้นที่ที่มีระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำ (สีเขียวอ่อน) คิดเป็น 27 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ที่มีระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟปานกลาง (สีเหลือง) คิดเป็น 44 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับที่มีมากที่สุดของพื้นที่บริเวณภูเขาไฟเมราปีแห่งนี้ ต่อมาระดับความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟสูง (สีส้ม) 22 เปอร์เซ็นต์ และสูงมาก (สีแดง) 5 เปอร์เซ็นต์ รวมกันคิดเป็นประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งคิดเป็นระดับความเปราะบางๆ ที่มีพื้นที่มากรองเป็นอันดับสองเท่าๆ กับระดับความเปราะบางต่ำ

ซึ่งทั้งสองระดับส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงบริเวณทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ถึงทิศใต้ของภูเขาไฟ ส่วนมากเป็นบริเวณที่มีค่าความลาดชันต่ำ โดยพื้นที่ที่มีระดับความเอระบางสูงจะเป็นลักษณะภูมิประเทศแบบโค้งนูนและพื้นที่ที่มีระดับความเอระบางสูงมากจะเป็นลักษณะภูมิประเทศแบบโค้งเว้า ค่าดัชนีความราบของกันหุบเขาหลายระดับมีค่าสูงมากบ่งบอกว่าเป็นการสะสมของตะกอนมาก ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศมีค่าสูง การสะสมการไหลมีค่าสูงในบริเวณทิศตะวันตกและตะวันตกเฉียงเหนือ และปัจจัยของความลาดชันและความยาวของความลาดชันส่วนมากมีค่าปานกลางบ่งบอกว่าการกัดกร่อนของตะกอนปานกลาง

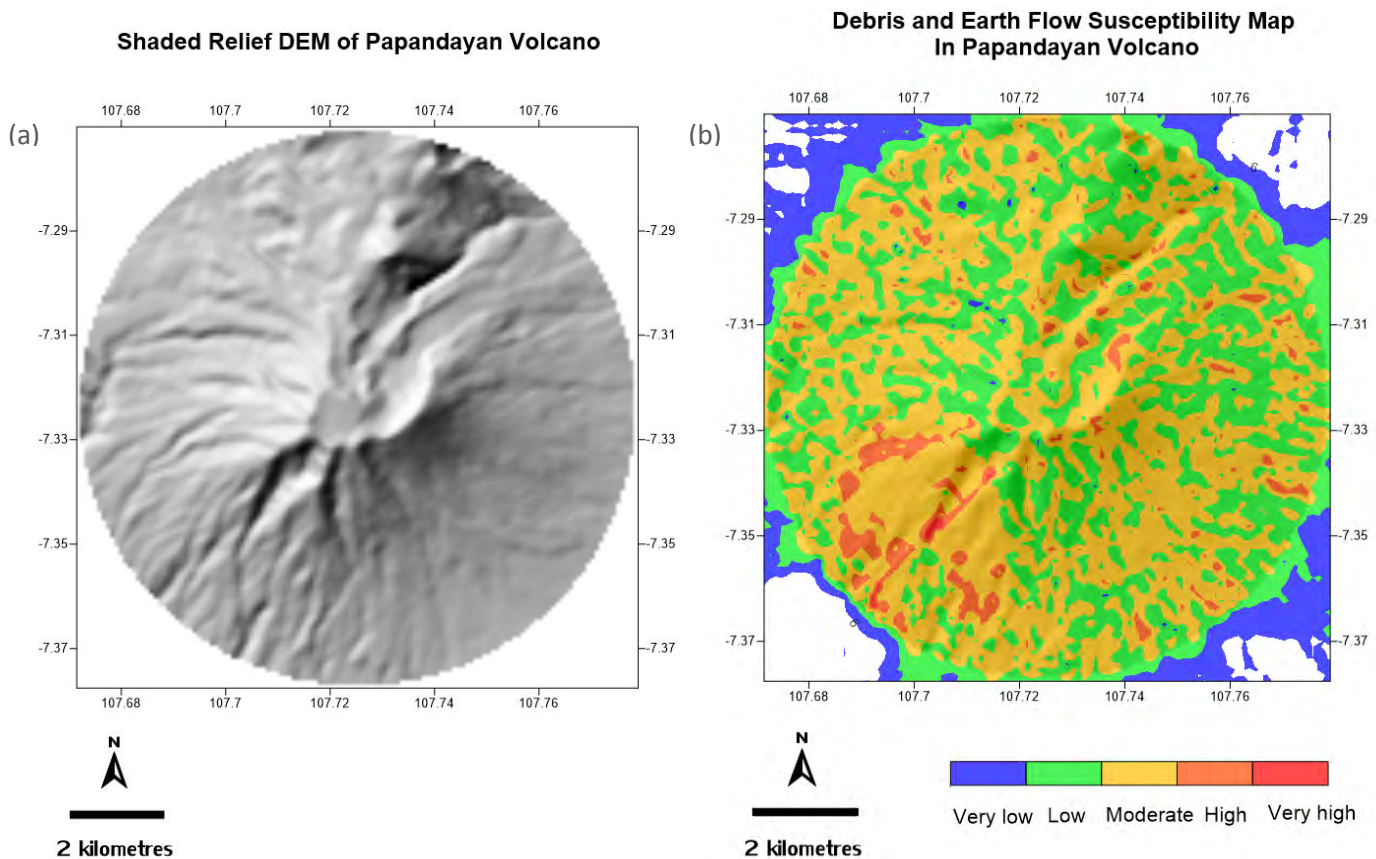


รูปที่ 27 (a) แผนที่ภาพนูนสีเทาของภูเขาไฟเมราปี (b) แผนที่แสดงความเอระบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟเมราปี

### ภูเขาไฟปาปันดาอัน (Papandayan Volcano)

จากรูปที่ 28b จะเห็นว่าพื้นที่ที่มีระดับความเอระบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำมาก (สีน้ำเงิน) คิดเป็นเพียง 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ต่อมาพื้นที่ที่มีระดับความเอระบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำ (สีเขียวอ่อน) คิดเป็น 33 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ที่มีระดับความเอระบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟปานกลาง (สี

เหลือ) คิดเป็น 47 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับที่มีมากที่สุดของพื้นที่บริเวณภูเขาไฟป่าปันดาอันแห่งนี้ ต่อมาระดับความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟสูงและสูงมาก (สีส้มและสีแดง) รวมกันคิดเป็นเพียง 17 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด (ระดับความแปรปรวนสูงมากมีพื้นที่เพียงไม่ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด) ซึ่งส่วนมากเป็นบริเวณที่มีค่าความลาดชันสูง แต่มีบางช่วงบริเวณทางทิศตะวันตกเฉียงใต้มีค่าความลาดชันต่ำ ลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นโค้งนูนสลับกับโค้งเว้า ค่าดัชนีความราบของก้นหุบเขาหลายระดับช่วงตะวันตกเฉียงใต้มีค่าสูงบ่งบอกว่าเป็นมีการสะสมของตะกอนมาก แต่ในช่วงบริเวณอื่นมีค่าต่ำ ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศมีค่าสูง ช่วงบริเวณทิศตะวันตกเฉียงใต้มีค่าการสะสมการไหลสูง และปัจจัยของความลาดชันและความยาวของความลาดชันส่วนมากมีค่าปานกลางบ่งบอกว่าการกัดกร่อนของตะกอนในระดับปานกลาง



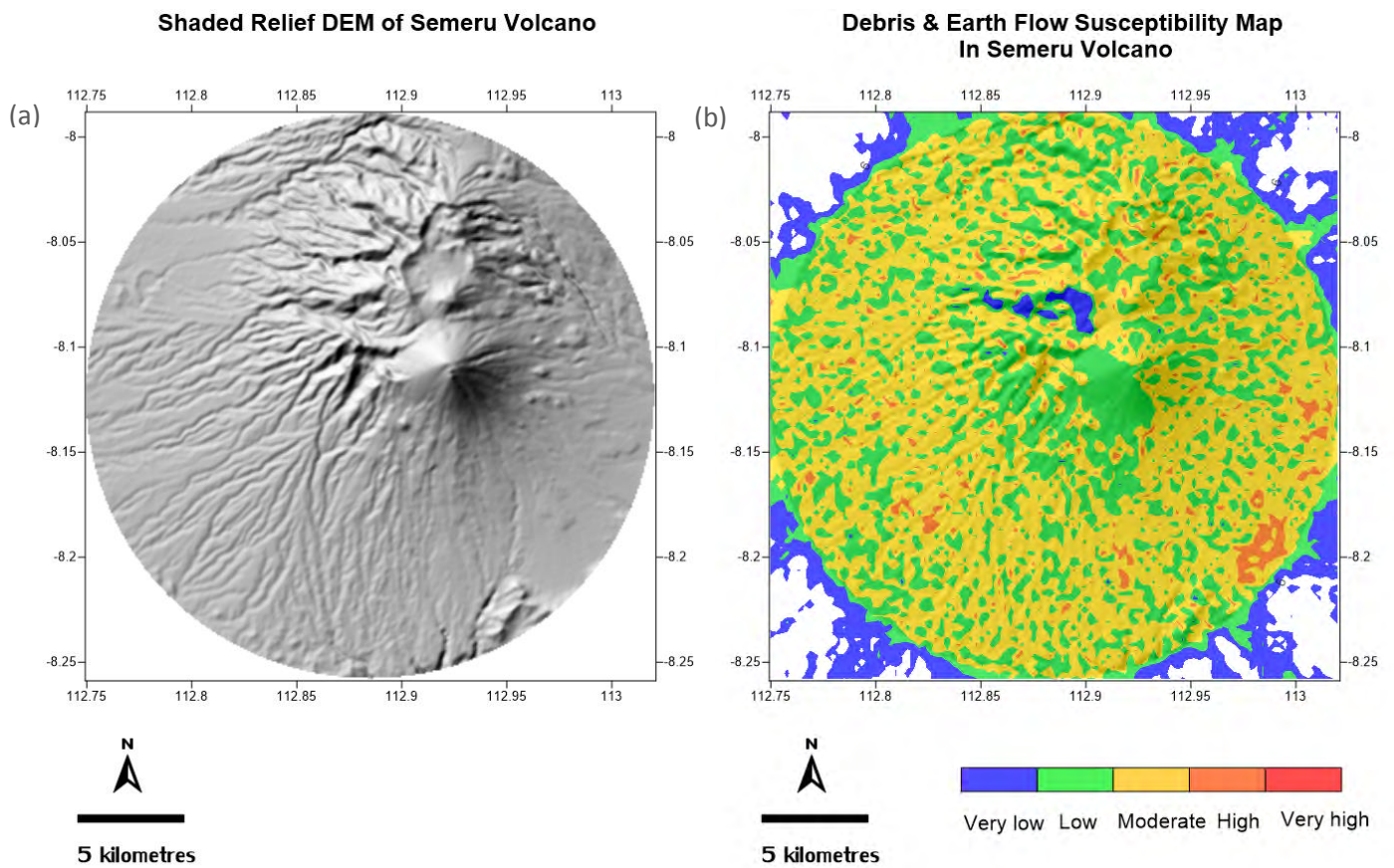
รูปที่ 28 (a) แผนที่ภาพนูนสีเทาของภูเขาไฟป่าปันดาอัน (b) แผนที่แสดงความเสี่ยงของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟป่าปันดาอัน

### ภูเขาไฟเซเมรุ (Semeru Volcano)

จากรูปที่ 29b จะเห็นว่าพื้นที่ที่มีระดับความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำมาก (สีน้ำเงิน) คิดเป็นเพียง 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ต่อมาพื้นที่ที่มีระดับความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟต่ำ (สีเขียวอ่อน) คิดเป็น 39 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่



ทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับที่มีมากที่สุดของพื้นที่บริเวณภูเขาไฟเซเมรุแห่งนี้ พื้นที่ที่มีระดับความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟปานกลาง (สีเหลือง) คิดเป็น 38.7 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ที่มีปริมาณใกล้เคียงกับระดับความแปรปรวนต่ำ ต่อมาระดับความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟสูงและสูงมาก (สีส้มและสีแดง) รวมกันคิดเป็นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด (ระดับความแปรปรวนสูงมากมีพื้นที่เพียงไม่ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าความลาดชันสูงในทิศเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือ แต่มีบางช่วงบริเวณทางทิศตะวันออกเฉียงใต้และตะวันตกเฉียงใต้มีค่าความลาดชันต่ำ ลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นโค้งนูนสลับกับโค้งเว้า ค่าดัชนีความราบของกันหุบเขาหลายระดับมีค่าสูงบ่งบอกว่าเป็นมีการสะสมของตะกอนมาก แต่ในช่วงบริเวณทิศเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าต่ำ ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศมีค่าสูง ช่วงบริเวณทิศตะวันตกและตะวันออกเฉียงใต้มีค่าการสะสมการไหลสูง และปัจจัยของความลาดชันและความยาวของความลาดชันส่วนมากมีค่าปานกลางบ่งบอกว่าการกัดกร่อนของตะกอนในระดับปานกลาง



รูปที่ 29 (a) แผนที่ภาพนูนสีเทาของภูเขาไฟเซเมรุ (b) แผนที่แสดงความเสี่ยงของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟเซเมรุ



## บทที่ 5

### อภิปรายและสรุปผล

#### (Discussion and conclusion)

#### 5.1 เปรียบเทียบพื้นที่จริงที่เคยเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากกับแผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลาก

เมื่อได้ทำการค้นหาพื้นที่ที่เคยเกิดภัยพิบัติทางภูเขาไฟ ไม่ว่าจะเป็นเศษหินไหลหลาก ดินไหลหลาก หรือว่าตะกอนไหล แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลาก พบว่าพื้นที่บริเวณนั้นมีระดับความเปราะของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากต่ำถึงปานกลาง แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

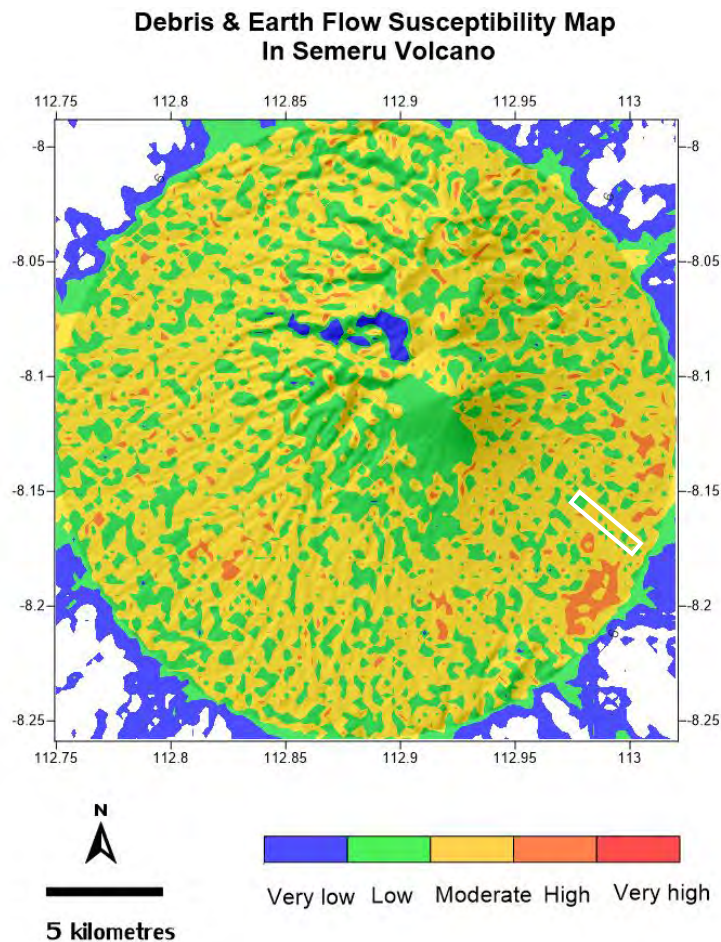
##### 5.1.1 หุบเขา Curah Lengkong บนภูเขาไฟเซเมรุ

จากการศึกษาของ Gomez, Lavigne และคณะ (2018) การระเบิดปะทุของภูเขาไฟเซเมรุ การไหลของลาวาและหินอัคนีตะกอนภูเขาไฟไหลหลาก (Pyroclastic flow) ในอดีต ทำให้เกิดการสะสมของวัสดุที่ก่อให้เกิดกระบวนการตะกอนไหล ซึ่งมักจะเกิดในช่วงฤดูฝนแล้วไหลลงมาสะสมตัวที่บริเวณด้านข้างของภูเขาไฟเซเมรุทางตะวันออกเฉียงใต้ ที่หุบเขา Curah Lengkong



รูปที่ 30 ขยายพื้นที่บริเวณทางตะวันออกเฉียงใต้ของภูเขาไฟเซเมรุและพื้นที่ที่ศึกษา (กล่องสีขาว) ระยะพื้นที่ยาวประมาณ 3.2 กิโลเมตร (ภาพจาก Google Earth)

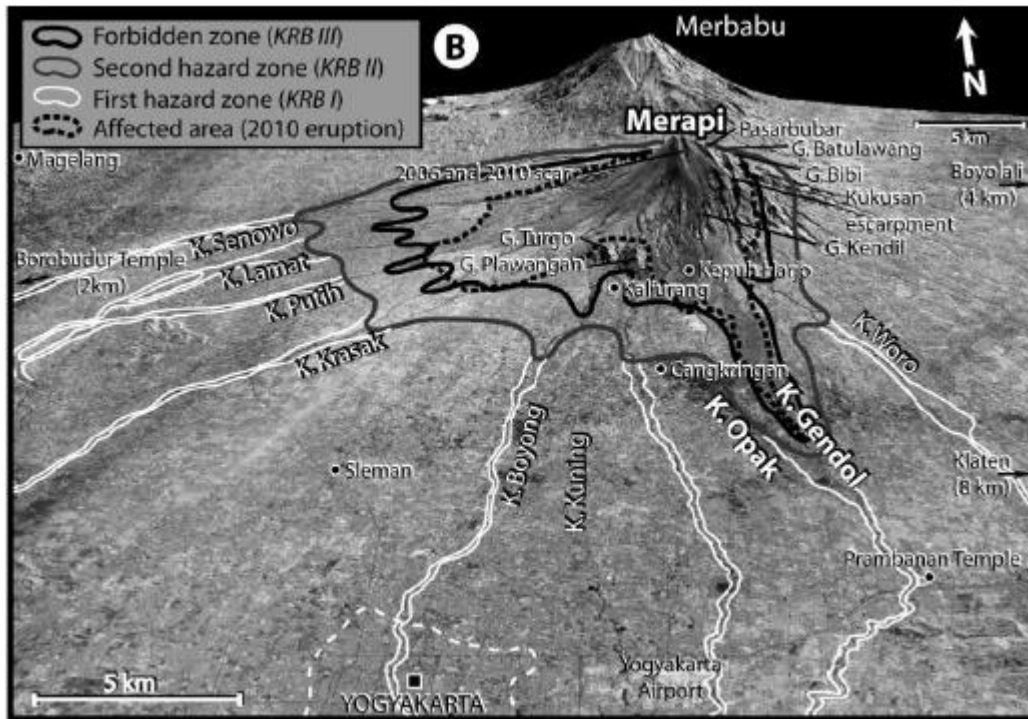
ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากแล้ว  
ปรากฏว่าบริเวณพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่เป็นบริเวณที่มีระดับความเปราะบางฯ ปานกลาง มีระดับต่ำแค่บาง  
ตำแหน่ง



รูปที่ 31 แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟเซเมรุและพื้นที่  
ที่ศึกษา (กล่องสีขาว)

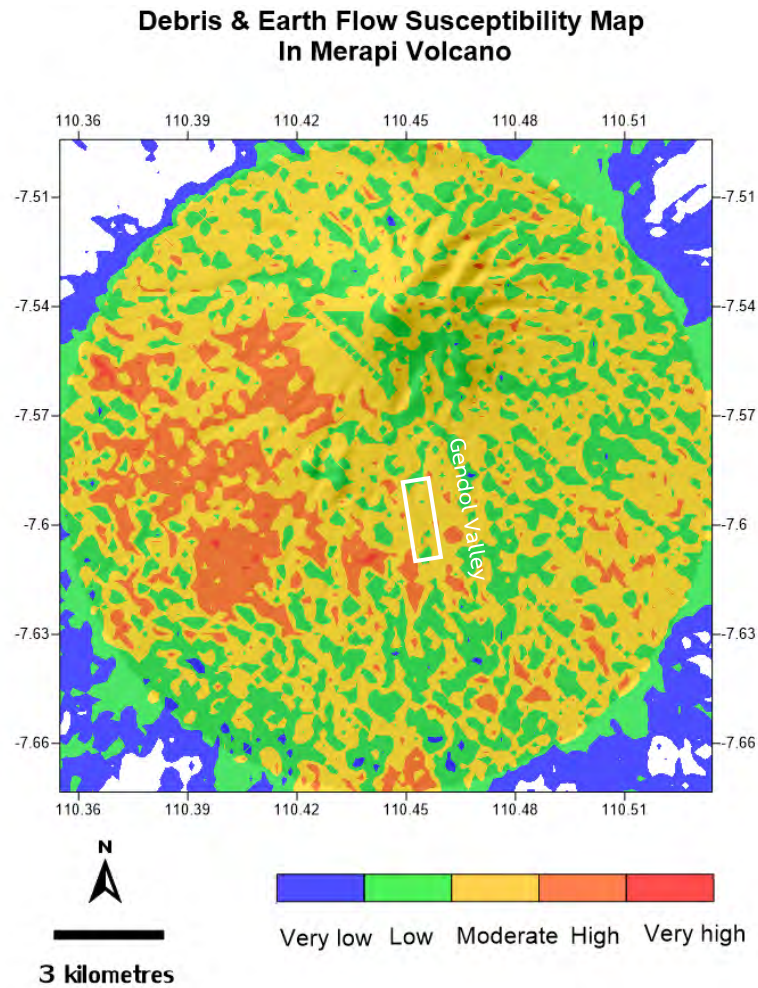
### 5.1.2 บริเวณทางด้านตะวันตก ตะวันตกเฉียงใต้และทางใต้ของภูเขาไฟเมราปี

จากการศึกษาของ Solikhin, Thouret และคณะ (2015) ได้ศึกษาผลกระทบและพฤติกรรมของการ  
สะสมตัวของหินอัคนีตะกอนภูเขาไฟไหลหลากและตะกอนไหลหลากจากการปะทุของภูเขาไฟเมราปีในปี  
2010 โดยศึกษาจากภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูง พบว่ามีปริมาณสะสมของตะกอนจำนวนมากที่ทำให้  
เกิดตะกอนไหลหลากในช่วงฤดูฝนที่บริเวณทางด้านตะวันตก ตะวันตกเฉียงใต้และทางใต้ของภูเขาไฟเมราปี  
ซึ่งตะกอนไหลลงตามทางน้ำ และมีการล้นตลิ่ง สร้างความเสียหายแก่หมู่บ้านบริเวณนั้นและหมู่บ้านใกล้เคียง  
กับทางน้ำเป็นอย่างมาก



รูปที่ 32 ภาพถ่ายดาวเทียม SPOT-5 แสดงโซนภัยพิบัติหินอัคนีตะกอนภูเขาไฟไหลหลากและตะกอนไหลหลากบริเวณภูเขาไฟเมอร์บาบูและเมราปี (Solikhin, Thouret et al. 2015)

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากแล้ว ปรากฏว่าบริเวณพื้นที่ทางด้านตะวันตกและตะวันตกเฉียงใต้ของภูเขาไฟเมราปี เป็นบริเวณที่มีระดับความเปราะบางฯ สูงสลับกับปานกลาง แต่บริเวณทางใต้ของภูเขาไฟตรงหุบเขาส่วนใหญ่จะมีระดับความเปราะบางฯ ปานกลาง ดังพื้นที่กล่องสีขาวในรูป 33 ที่เป็นหุบเขา Gendol



รูปที่ 33 แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากบนภูเขาไฟเมราปี

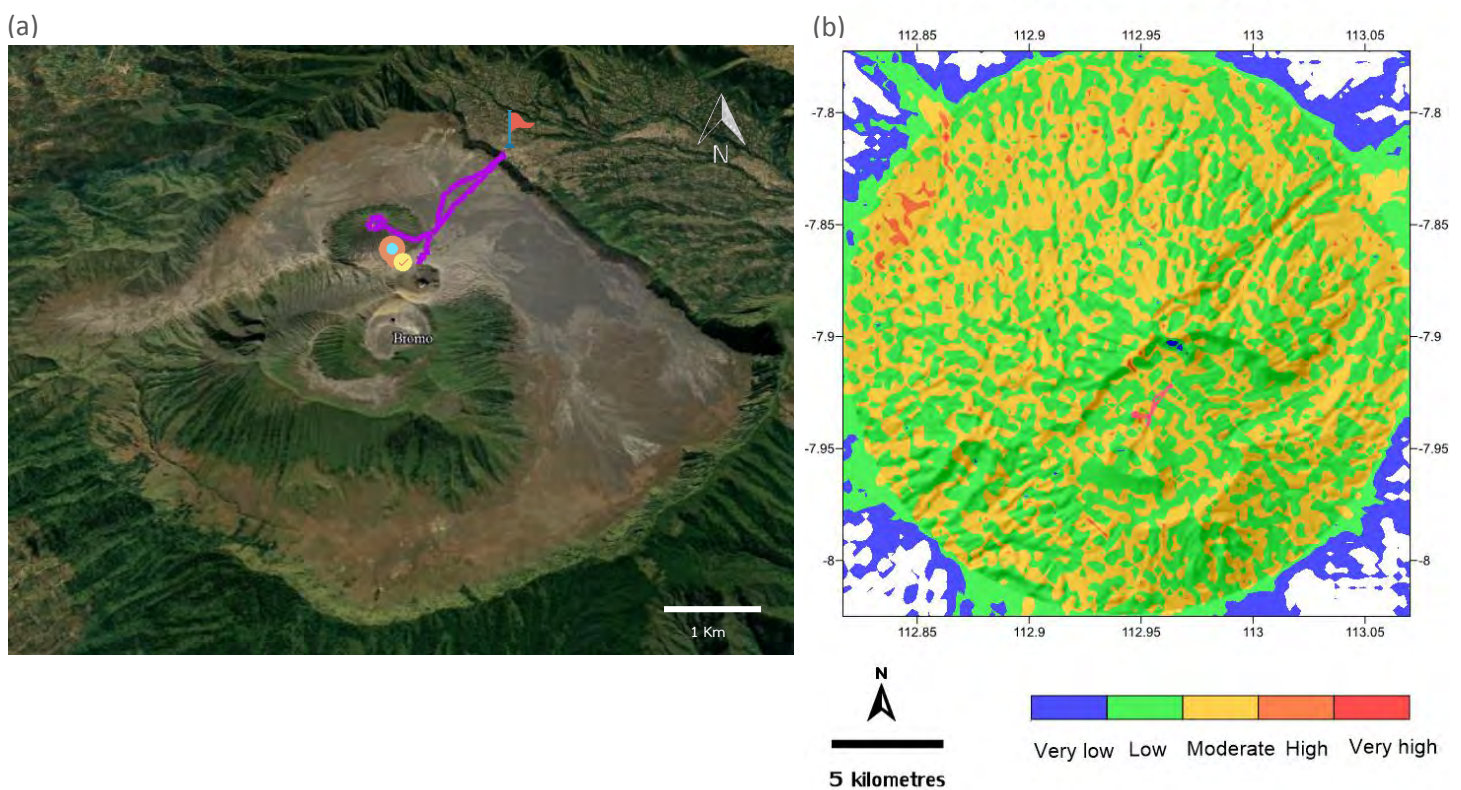
## 5.2 เปรียบเทียบเส้นทางท่องเที่ยวขึ้นภูเขาไฟของแต่ละลูกกับแผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลาก

ในการเดินทางท่องเที่ยวชมความงามของภูเขาไฟมีพลังบริเวณเกาะชวานั้น ในปัจจุบันจะมีเส้นทางที่ใช้เดินทางหรือปีนเขาเพื่อไปชมจุดชมวิวหรือปล่องภูเขาไฟของแต่ละลูก ดังนั้น การคำนึงถึงความปลอดภัยของเส้นทางการเดินทางเพื่อดูความเสี่ยงในการเกิดภัยพิบัติอันตรายของการเกิดเศษหินและดินไหลหลาก จึงได้นำเส้นทางการเดินทางมาเปรียบเทียบกับแผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลาก ได้ดังนี้



### 5.2.1 เส้นทาง การเดินทางของภูเขาไฟโบรโม

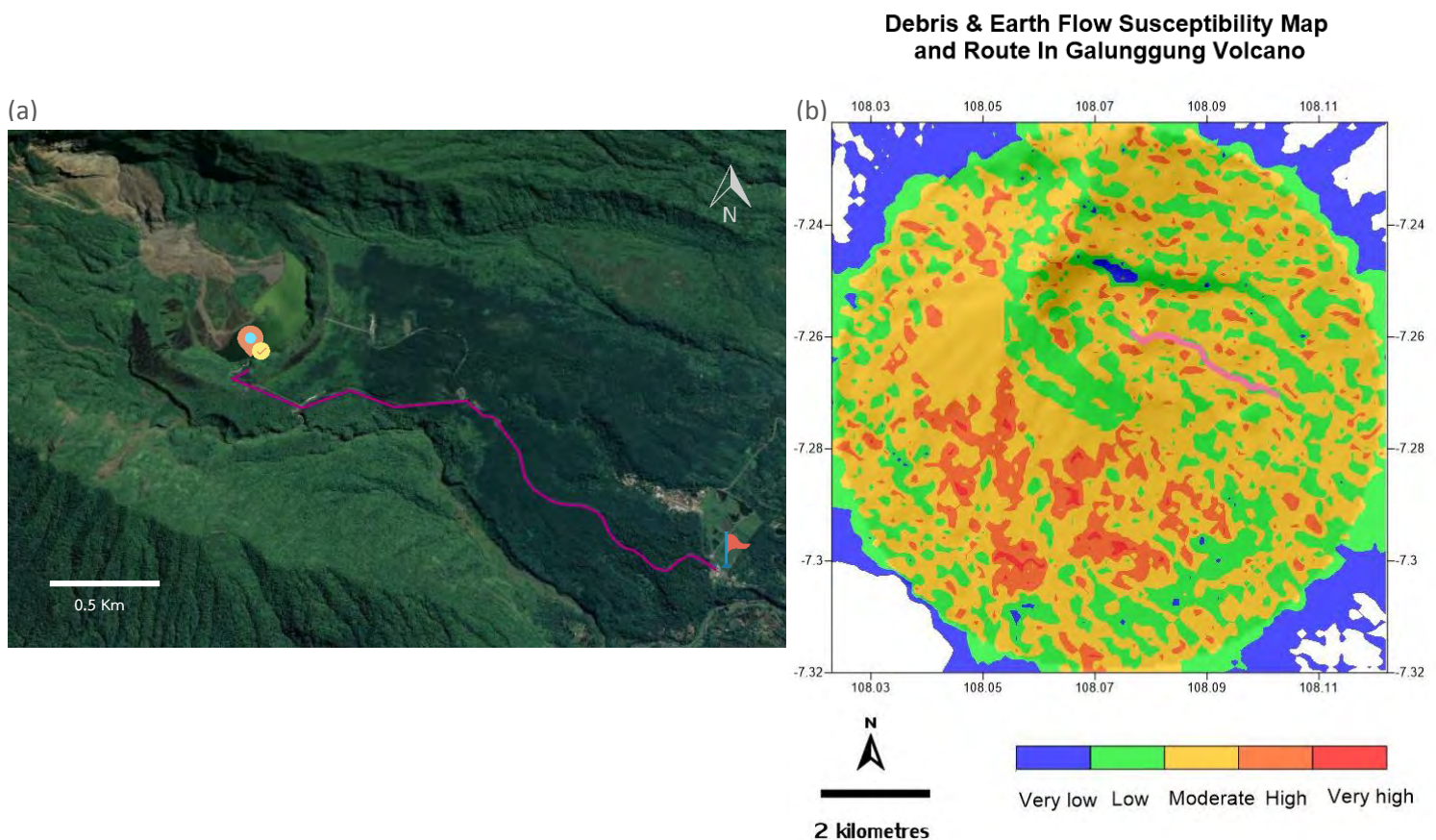
เส้นทาง การเดินทางไปยังภูเขาไฟโบรโมนี้ อ้างอิงมาจาก [www.alltrails.com](http://www.alltrails.com) มีระยะทางทั้งหมด 7.9 กิโลเมตร โดยจุดเริ่มต้นเริ่มจากที่พักแหวหมูบ้านเซโมโรลาวัง (Cemoro Lawang) จากรูป 34a จะเห็นว่า เส้นทาง (เส้นสีม่วง) แยกเป็นสองจุด จุดแรกเป็นเส้นทางไปยังภูเขาไฟบาต็อก (Batok) ซึ่งเป็นภูเขาไฟที่ดับแล้ว อยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของภูเขาไฟโบรโม และจุดที่สองเป็นเส้นทางไปยังปล่องภูเขาไฟโบรโม โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นทาง (เส้นสีเขียว) ในแผนที่ที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากในรูป 34b จะพบว่า ทั้งสองเส้นทางมีระดับความเปราะบางๆ ต่ำและปานกลาง ซึ่งถือว่าเป็นเส้นทางที่ปลอดภัยต่อนักเดินทางในระดับที่ใช้ได้



รูปที่ 34 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟโบรโมจาก *Google Earth* และเส้นทาง การเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่ แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทาง การเดินทาง (เส้นสีเขียว) บน ภูเขาไฟโบรโม

### 5.2.2 เส้นทางการเดินทางของภูเขาไฟกาลุงกุง

เส้นทางการเดินทางไปยังภูเขาไฟกาลุงกุงนี้ อ้างอิงมาจาก Google Map มีระยะทางทั้งหมด 3 กิโลเมตร โดยจุดเริ่มต้นเริ่มจากบริเวณทางเข้าสำหรับนักท่องเที่ยวที่มาเที่ยวภูเขาไฟกาลุงกุง จากรูป 35a จะเห็นว่าเส้นทาง (เส้นสีม่วง) มีความคดโค้ง และจุดหมายปลายทางเป็นทะเลสาบบนปล่องภูเขาไฟ โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นทาง (เส้นสีชมพู) ในแผนที่แสดงความเสี่ยงของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากในรูป 35b จะพบว่าตลอดทั้งเส้นทางมีระดับความเสี่ยงต่ำและปานกลาง ซึ่งถือว่าเป็นเส้นทางที่มีความปลอดภัยสำหรับนักท่องเที่ยว

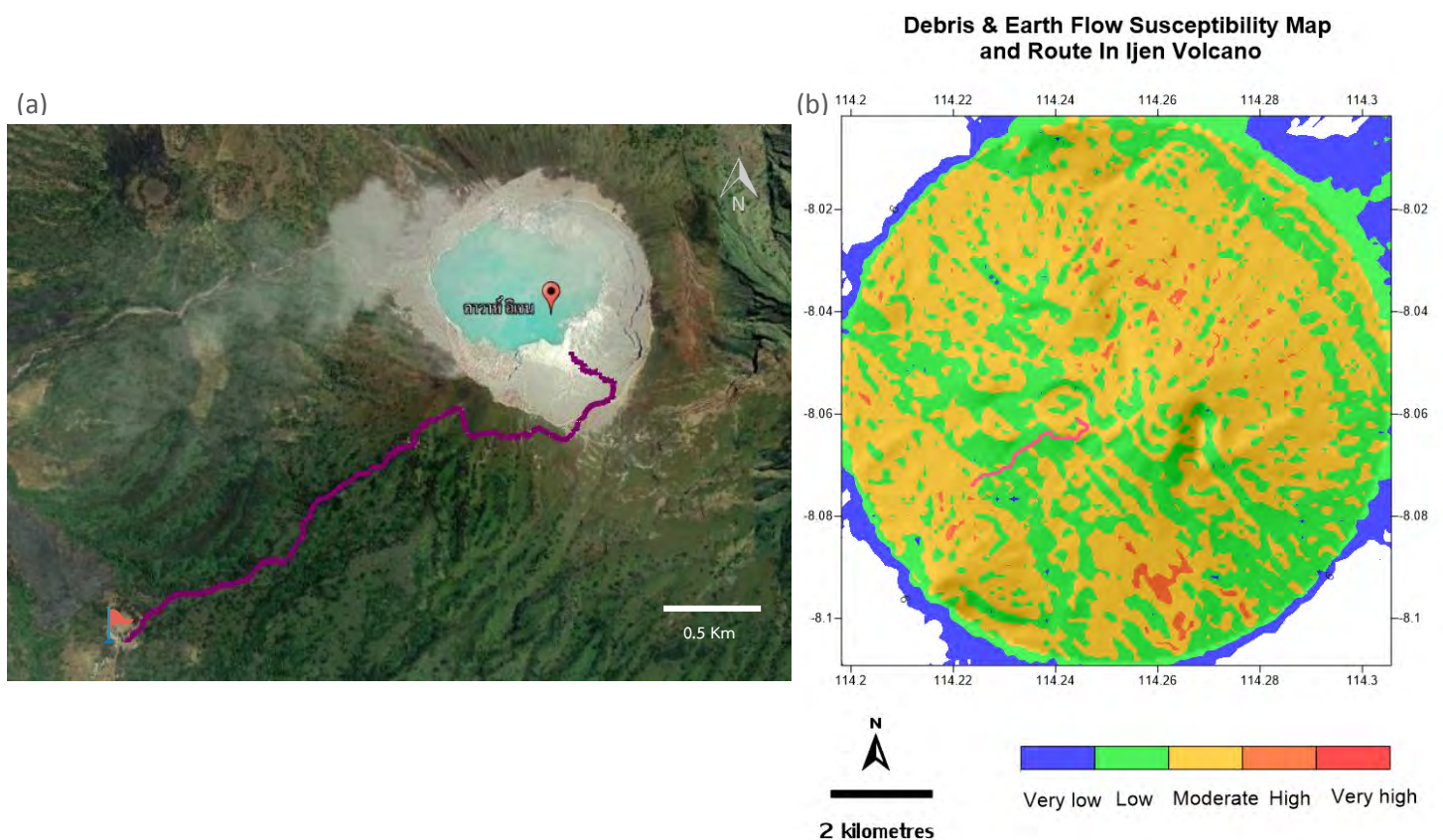


รูปที่ 35 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟกาลุงกุงจาก Google Earth และเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่แสดงความเสี่ยงของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีชมพู) บนภูเขาไฟกาลุงกุง



### 5.2.3 เส้นทางเดินทางของภูเขาไฟไอเจน

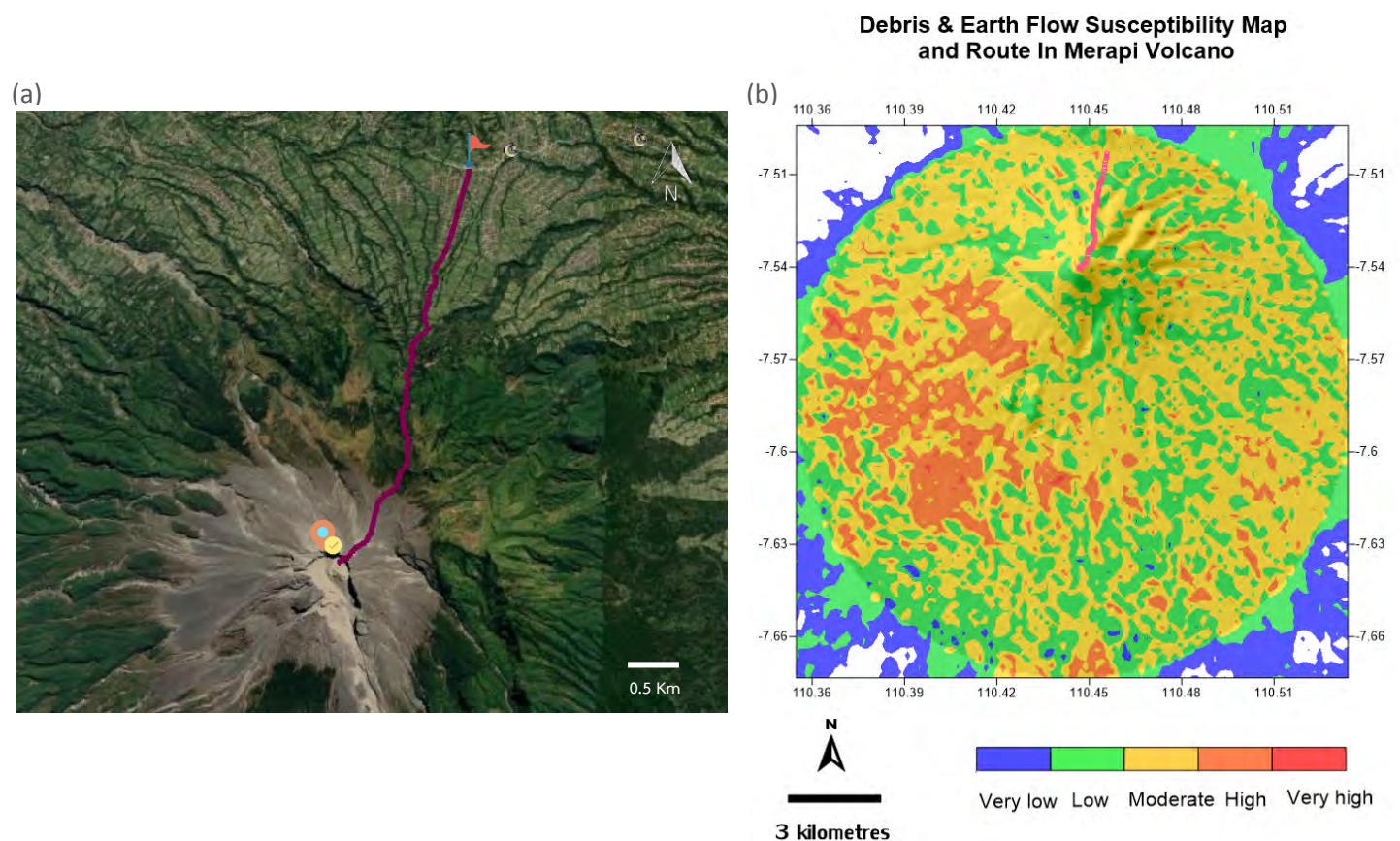
เส้นทางเดินทางไปยังภูเขาไฟไอเจนนี้ อ้างอิงมาจาก [www.alltrails.com](http://www.alltrails.com) มีระยะทางทั้งหมด 7.7 กิโลเมตร โดยจุดเริ่มต้นเริ่มจากบริเวณพื้นที่ตั้งแคมป์ Bumi Perkemahan Paltuding จากรูป 36a จะเห็นว่าเส้นทางเดินทาง (เส้นสีม่วง) มีความคดโค้ง ซึ่งจุดหมายปลายทางเป็นทะเลสาบกำมะถัน (Sulphur lake) บนปากปล่องภูเขาไฟไอเจน ซึ่งในตอนกลางคืนสามารถมองเห็นเปลวไฟสีน้ำเงิน (Blue flame) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของกำมะถันได้อีกด้วย โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นทาง (เส้นสีชมพู) ในแผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากในรูป 36b จะพบว่าตลอดทั้งเส้นทางมีระดับความเปราะบางๆ ต่ำแทบจะทั้งหมด ซึ่งถือว่าเป็นเส้นทางที่มีความปลอดภัยสำหรับนักเดินทางดีในระดับหนึ่ง



รูปที่ 36 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟไอเจนจาก *Google Earth* และเส้นทางเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทางเดินทาง (เส้นสีชมพู) บนภูเขาไฟไอเจน

### 5.2.4 เส้นทางการเดินทางของภูเขาไฟเมราปี

เส้นทางการเดินทางไปยังภูเขาไฟเมราปีนี้ อ้างอิงมาจาก [www.alltrails.com](http://www.alltrails.com) มีระยะทางทั้งหมด 9.8 กิโลเมตร จุดเริ่มต้นเริ่มจากบริเวณหมู่บ้านด้านล่างของภูเขา โดยส่วนใหญ่นักท่องเที่ยวมักจะเช่ารถจี๊ป (Jeep car) เพื่อใช้ในการเข้าถึงภูเขาไฟเมราปี เนื่องจากเส้นทางท่องเที่ยวบริเวณภูเขาไฟเต็มไปด้วยดินและหิน แต่จากรูป 37a เส้นทางการเดินทาง (เส้นสีม่วง) จะเป็นเส้นทางที่เหมาะสมกับการเดินทางเท้า โดยมีจุดหมายปลายทางเป็นบริเวณรอบๆ ปากปล่องภูเขาไฟ โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นทาง (เส้นสีเขียว) ในแผนที่ที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากในรูป 37b จะพบว่าเส้นทางมีระดับความเปราะบางๆ ต่ำสลับกับปานกลาง แสดงว่าเส้นทางการเดินทางนี้มีความปลอดภัยสำหรับนักเดินทางที่ดีในระดับหนึ่ง

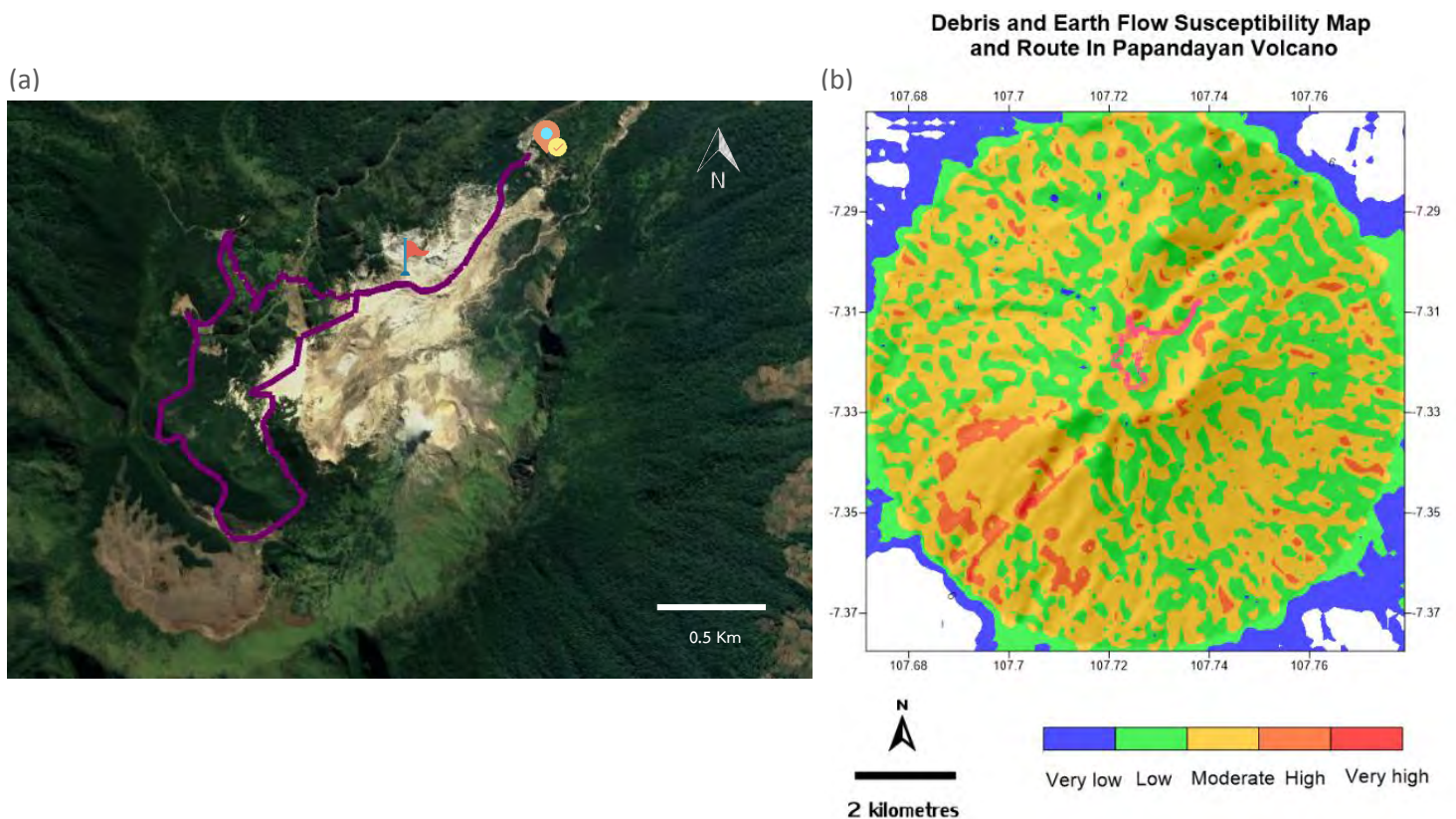


รูปที่ 37 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟเมราปีจาก *Google Earth* และเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่แสดงความเปราะบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทางการเดินทาง (เส้นสีเขียว) บนภูเขาไฟเมราปี



### 5.2.5 เส้นทางการเดินทางของภูเขาไฟปาปันดาอัน

เส้นทาง การเดินทางไปยังภูเขาไฟปาปันดาอันนี้ อ้างอิงมาจาก [www.alltrails.com](http://www.alltrails.com) มีระยะทางทั้งหมด 8.2 กิโลเมตร โดยจุดเริ่มต้นเริ่มจากบริเวณทางฐานด้านล่างของภูเขา จากรูป 38a เส้นทาง การเดินทาง (เส้นสีม่วง) จะเป็นเส้นทางปีนเขาทั้งหมด ซึ่งจุดท่องเที่ยวจะมีหลายจุด เมื่อเดินทางไปประมาณ 1.3 กิโลเมตร จะพบปากปล่องภูเขาไฟปาปันดาอันที่ยังมีควันคุกรุ่นอยู่ นอกจากนั้นเมื่อเดินขึ้นไปบนยอดสามารถตั้งแคมป์ได้หลายจุด โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นทาง (เส้นสีชมพู) ในแผนที่แสดงความเสี่ยงบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากในรูป 38b จะพบว่าเส้นทางมีระดับความเสี่ยงบางๆ ต่ำสลับกับปานกลาง แต่ช่วงเส้นทางสั้นๆ บริเวณใกล้กับปากปล่องภูเขาไฟมีระดับความเสี่ยงบางๆ สูง ดังนั้น นอกจากบริเวณใกล้กับปากปล่องภูเขาไฟที่นักท่องเที่ยวต้องระมัดระวัง เส้นทางอื่นๆ มีความปลอดภัยสำหรับนักท่องเที่ยวในระดับดีพอสมควร

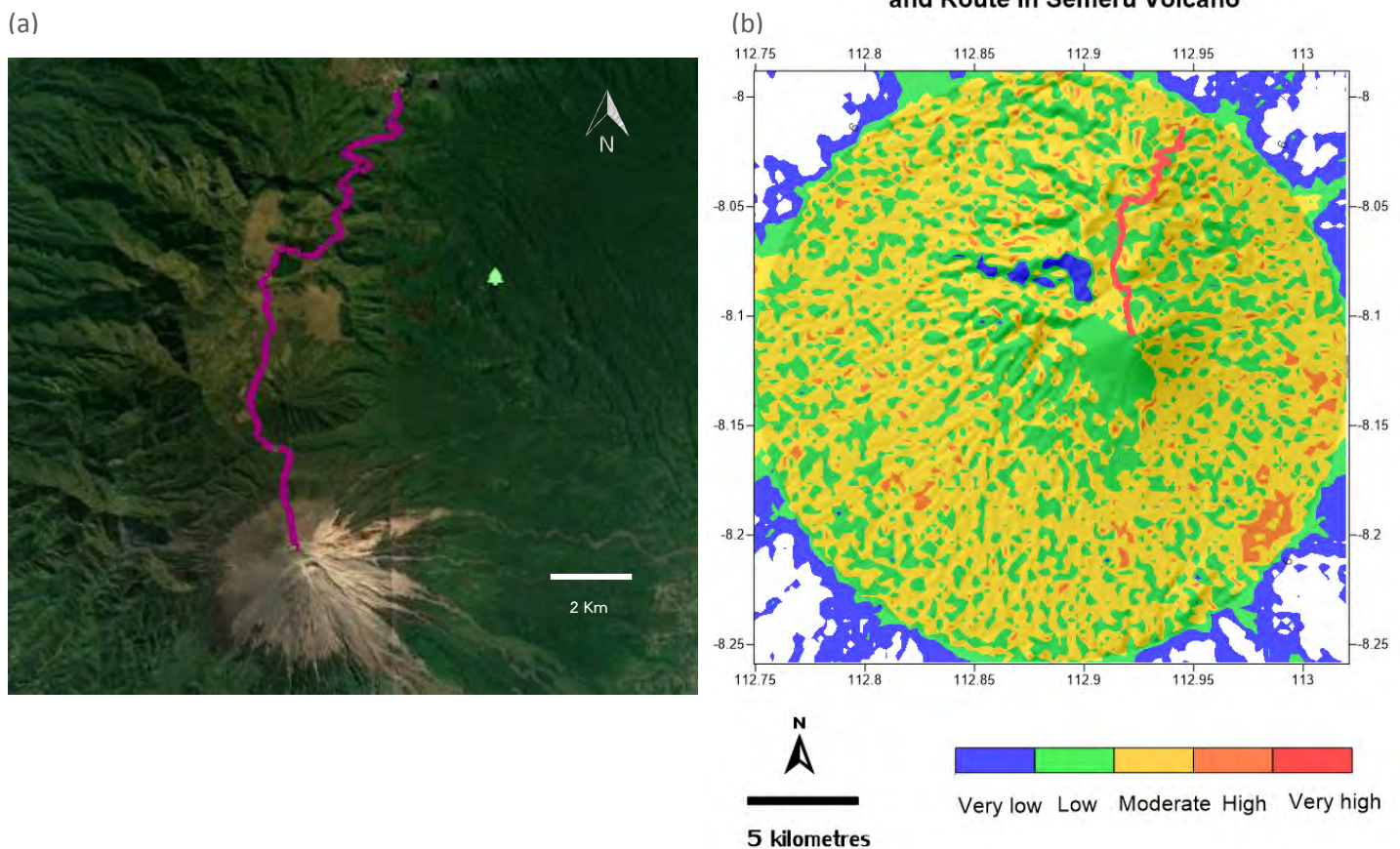


รูปที่ 38 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟปาปันดาอันจาก *Google Earth* และเส้นทาง การเดินทาง (เส้นสีม่วง) (b) แผนที่แสดงความเสี่ยงบางของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทาง การเดินทาง (เส้นสีชมพู) บนภูเขาไฟปาปันดาอัน

### 5.2.6 เส้นทาง การเดินทางของภูเขาไฟเซเมรุ

เส้นทาง การเดินทางไปยังภูเขาไฟเซเมรุนี้ อ้างอิงมาจาก [www.alltrails.com](http://www.alltrails.com) มีระยะทางทั้งหมด 31.4 กิโลเมตร จากรูป 39a เส้นทาง การเดินทาง (เส้นสีม่วง) มีจุดเริ่มต้นเริ่มจากหมู่บ้าน Ranu Pani เมื่อเดิน ถึงระยะทางที่ 10.5 กิโลเมตร จะเจอทะเลสาบ Ranu Kumbolo ระหว่างทางจะเป็นเส้นทางเดินที่คดเคี้ยว มาก จากนั้นจุดหมายปลายทางคือจุดยอดของภูเขาไฟเซเมรุที่มีความสูง 3,676 เมตรจากระดับน้ำทะเล ซึ่ง สามารถเห็นปล่องภูเขาไฟเซเมรุได้ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นทาง (เส้นสีเขียว) ในแผนที่ที่แสดงความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากในรูป 39b จะพบว่าเส้นทางมี ระดับความแปรปรวนต่ำ สลับกับปานกลาง จะมีเพียงเส้นทางสั้นๆ บริเวณใกล้กับทะเลสาบ Ranu Kumbolo ที่มีระดับความแปรปรวนสูง ดังนั้น เส้นทาง การเดินทางนี้มีความปลอดภัยสำหรับนักเดินทางใน ระดับพอใช้

**Debris & Earth Flow Susceptibility Map and Route In Semeru Volcano**



รูปที่ 39 (a) ภาพขยายของภูเขาไฟเซเมรุจาก *Google Earth* และเส้นทาง การเดินทาง (เส้นสีม่วง)  
 (b) แผนที่แสดงความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากและเส้นทาง การเดินทาง (เส้นสีเขียว) บนภูเขาไฟเซเมรุ

### 5.3 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาภูเขาไฟมีพลังทั้ง 6 ลูก พบว่าพื้นที่ที่มีระดับความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากสูงและสูงมาก ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ที่มีความลาดชันต่ำ มีลักษณะภูมิประเทศโค้งเว้าและโค้งนูน ค่าดัชนีความราบของกันหุบเขาหลายระดับมีค่าสูงมาก ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศมีค่าสูง การสะสมการไหลมีค่าสูง และปัจจัยของความลาดชันและความยาวของความลาดชันมีค่าสูง

นอกจากนี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสภาพพื้นที่จริงที่มีประวัติในการเกิดภัยพิบัติทางภูเขาไฟบนภาพถ่ายดาวเทียม ไม่ว่าจะเป็นเศษหินไหลหลาก ดินไหลหลาก หรือว่าตะกอนไหล พบว่าบริเวณที่เคยเกิดส่วนมากเป็นบริเวณหุบเขาที่มีความลาดชันสูง ลักษณะภูมิประเทศโค้งเว้า ค่าดัชนีความราบของกันหุบเขาหลายระดับมีค่าต่ำมาก ค่าดัชนีความชุ่มชื้นของภูมิประเทศมีค่าต่ำ การสะสมการไหลมีค่าต่ำมาก และปัจจัยของความลาดชันและความยาวของความลาดชันมีค่าสูง ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแผนที่แสดงความแปรปรวนของการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากพบว่าเป็นระดับปานกลาง

โดยสรุปแล้ว การศึกษาลักษณะทางธรณีสัณฐานของภูเขาไฟมีพลัง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโอกาสในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากพบว่า ส่วนมากบริเวณพื้นที่ที่เป็นที่ราบจะมีความแปรปรวนในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากมากที่สุด รองลงมาคือบริเวณหุบเขา และพื้นที่ที่เป็นสันเขาจะมีความแปรปรวนในการเกิดภัยพิบัติเศษหินและดินไหลหลากน้อยที่สุด

### 5.4 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาเกณฑ์คัดเลือกเพิ่มเติม โดยอาจเป็นการวิเคราะห์ในลักษณะทางภูมิประเทศอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเกิดภัยพิบัติได้ ยังมีเกณฑ์คัดเลือกมาก จะยังสามารถวิเคราะห์ถึงความแปรปรวนในการเกิดภัยพิบัติได้แม่นยำขึ้น ตัวอย่างเกณฑ์ที่เพิ่มเติมเช่น พารามิเตอร์ที่ดินปกคลุม (The land cover parameter) เพื่อจำแนกความแตกต่างของพื้นที่ว่าเป็นพื้นที่ที่ปกคลุมไปด้วยดิน พื้นที่ที่เป็นป่าไม้ หรือว่าพื้นที่ที่เป็นบ้านเรือน เพราะแต่ละพื้นที่จะกระตุ้นให้เกิดภัยพิบัติได้มากน้อยแตกต่างกัน (Bisson, Spinetti et al. 2014) หรือ ทิศทางของความชัน (Aspect) เป็นเกณฑ์ที่ใช้ดูทิศทางของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับความลาดชัน โดยแต่ละทิศจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ หรือการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งทำให้กระตุ้นการเกิดภัยพิบัติได้แตกต่างกัน (Ramesh and Anbazhagan, 2015)

## เอกสารอ้างอิง

### (Reference)

- Bisson, M., et al. (2018). "Volcanoclastic flow hazard assessment in highly populated areas: a GIS-based approach applied to Torre del Greco municipality (Somma-Vesuvius, Italy)." Geosciences Journal **22**(3): 501-522.
- Bisson, M., et al. (2014). "Volcaniclastic flow hazard zonation in the Sub-Apennine Vesuvian area using GIS and remote sensing." Geosphere **10**(6): 1419-1431.
- Cando-Jácome, M. and A. Martínez-Graña (2019). "Determination of Primary and Secondary Lahar Flow Paths of the Fuego Volcano (Guatemala) Using Geomorphometric Parameters." Remote Sensing **11**(6).
- Gallant, J. C. and T. I. Dowling (2003). "A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas." Water Resources Research **39**(12).
- Gomez, C., et al. (2018). "Insights into lahar deposition processes in the Curah Lengkong (Semeru Volcano, Indonesia) using photogrammetry-based geospatial analysis, near-surface geophysics and CFD modelling." Journal of Volcanology and Geothermal Research **353**: 102-113.
- M.T. Pareschi et al (2002). "Volcaniclastic debris flows in the Clanio Valley (Campania, Italy): insights for the assessment of hazard potential." Geomorphology **43**: 219– 231.
- Solikhin, A., et al. (2015). "Effects and Behavior of Pyroclastic and Lahar Deposits of the 2010 Merapi Eruption Based on High-resolution Optical Imagery." Procedia Earth and Planetary Science **12**: 1-10.
- Thouret, J.-C., et al. (2007). "Volcanic hazards at Mount Semeru, East Java (Indonesia), with emphasis on lahars." Bulletin of Volcanology **70**(2): 221-244.
- USGS. Landslides are common on tall, steep, and weak volcanic cones [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://volcanoes.usgs.gov/vhp/landslides.html> สืบค้น 29 ตุลาคม 2562.

