

ระบบรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ
จังหวัดสระบุรี

นาย ธนพันธ์ ผาทอง

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557

FRACTURE SYSTEM OF THE KHAO KHAD FORMATION AT TAMBON NA PHRA LAN,
AMPHOE CHALOEM PHRA KIAT, CHANGWAT SARABURI

Mr.Thanaphan Phatong

A report submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of the Bachelor of Science in Geology
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Academic Year 2014

วันที่ส่ง

____/____/____

วันที่อนุมัติ

____/____/____

ลงชื่อ _____

(_____)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

หัวข้องานวิจัย: ระบบรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี

นิสิตผู้ทำการวิจัย: นายธนพันธ์ ผาทอง

ภาควิชา: ธรณีวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญพงศ์ กาญจนพยนต์

ปีการศึกษา: 2557

บทคัดย่อ

หมวดหินเขาขาดตั้งอยู่ในแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง ทางตอนกลางของประเทศไทย เป็นแนวของชั้นหินที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่วางตัวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งเป็นผลมาจากการชนกันของแผ่นเปลือกโลกไซบิวมาส์กับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนในยุคนิวแอสติก-จูแรสสิก การศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปทำการศึกษาลักษณะเฉพาะและวิวัฒนาการทางธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตกโดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยหินปูน ยุคเพอร์เมียน มีสภาพแวดล้อมแบบลานตะกอนคาร์บอนเนต จากการสำรวจภาคสนามและการวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคพบว่ามียอยแตกทั้งหมด 4 ระบบคือ รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง รอยแตกในแนวระดับ วางตัวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และรอยแตกในแนวตั้ง วางตัวในแนวเหนือ-ใต้และตะวันออกเฉียง-ตะวันตก โดยรอยแตกที่ขนานกับชั้นหินเกิดขึ้นเป็นลำดับแรก รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้งเกิดขึ้นเป็นลำดับที่สอง รอยแตกในแนวตั้งเกิดขึ้นเป็นลำดับที่สาม และรอยแตกในแนวระดับเกิดขึ้นเป็นลำดับที่สี่ และระบบรอยแตกทั้ง 4 ระบบมีทิศทางการวางตัวที่สัมพันธ์กับรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำและชั้นหินคดโค้ง จากลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตกและวิวัฒนาการโครงสร้างระบบรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรีคาดว่าน่าจะมีการเกิดแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวางในยุคนิวแอสติก-จูแรสสิกหรือการก่อเทือกเขาอินโดจีน

คำสำคัญ: ระบบรอยแตก, หมวดหินเขาขาด, แนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง

Project title: FRACTURE SYSTEM OF THE KHAO KHAD FORMATION AT TAMBON NA
PHRA LAN, AMPHOE CHALOEM PHRA KIAT, CHANGWAT SARABURI

Researcher: Mr.Thanaphan Phatong

Department: Geology

Advisor: Assistant Professor Pitsanupong Kanjanapayont, Dr.rer.nat

Academic Year: 2014

ABSTRACT

Khao Khad Formation is a part of Khao Khwang fold and thrust belt of central Thailand, which today structural trend approximately NW–SE by the collision of Sibumasu and Indochina terranes in Triassic-Jurassic. The study aims to find out the structural style and evolution of fracture system consists of Permian limestone in carbonate platform environment. Based on evidences in mesoscopic structure from field observation and microstructure of study area, fractures in the area consist of 4 systems: the NE-SW trending (1) Bed-parallel fracture, (2) Radial fracture, (3) Sub-horizontal fracture and the N-S, E-W trending (4) Vertical fracture and the orientation of fracture system relate to fold and thrust fault. Bed-parallel fracture occurs in the first place, second and third comes Radial fracture and Vertical fracture respectively, and the final is Sub-horizontal fracture. Structural style and evolution of fracture system of the Khao Khad Formation at Tambon Na Phra Lan, Amphoe Chaloem Phra Kiat, Changwat Saraburi relate to Khao Khwang fold and thrust belt or Indosinian orogeny in Triassic-Jurassic.

KEY WORDS: Fracture system, Khao Khad formation, Khao Khwang fold and thrust belt

กิตติกรรมประกาศ

ประการแรก ขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณและค่าใช้จ่ายในการศึกษาครั้งนี้ รวมไปถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการทำงานในห้องปฏิบัติการ

ประการที่สอง ขอขอบคุณอย่างสูงแก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุพงศ์ กาญจนพยนต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยครั้งนี้ อาจารย์ได้เสียสละเวลามาช่วยเหลือในการสำรวจภาคสนามและให้ความรู้และคำปรึกษาเรื่องของธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตกและวิวัฒนาการของรอยแตก รวมถึงคำแนะนำในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของหินในพื้นที่ศึกษา

นอกจากนี้ ขอขอบคุณนายพงศภัค ธิระเศรษฐ์, นางสาววิชาณี มณีโลกย์, นายธนเนตร มีรัตน์, นายวิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์, นายปรีดา ภาเบรียง, นายนวกภัทร กลมเกลียว และนางสาวภัสติกร สุวรรณจันลา ที่เป็นผู้ช่วยในการสำรวจภาคสนาม ช่วยเหลือทางด้านเก็บข้อมูลโครงสร้างและเก็บข้อมูลต่างๆจากภาคสนาม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญรูปภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 พื้นที่ศึกษา	2
1.3 นิยามปัญหา	3
1.4 วัตถุประสงค์	3
1.5 สมมติฐาน	3
1.6 ขอบเขตการศึกษา	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.8 ธรณีวิทยาทั่วไป	4
1.9 ธรณีวิทยาโครงสร้าง	5
1.10 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)	11
2.1 การศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น	11
2.2 การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม	13
2.3 การศึกษาในห้องปฏิบัติการ	15
2.4 การรวบรวมและตีความหมายข้อมูล	17
2.5 อภิปรายและสรุปผลการศึกษา	17
2.6 การนำเสนอข้อมูล	17
บทที่ 3 ผลการศึกษา (Result)	18
3.1 ธรณีวิทยา	18
3.2 ธรณีวิทยาโครงสร้าง	21
3.2.1 ระดับกลาง (Mesoscopic scale)	22
3.2.1.1 ข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน	23
3.2.1.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ	24
3.2.1.3 การเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบอ่อนนุ่ม	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 ระดับจุลภาค (Microscopic scale)	37
บทที่ 4 อภิปรายผลการศึกษา (Discussion)	40
4.1 ลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตก	40
4.1.1 โครงสร้างรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน	41
4.1.2 โครงสร้างรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง	42
4.1.3 โครงสร้างรอยแตกในแนวตั้ง	43
4.1.4 โครงสร้างรอยแตกในแนวระดับ	44
4.2 วิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตก	45
4.3 วิวัฒนาการธรณีแปรสัณฐาน	51
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา (Conclusion)	54
5.1 สรุปผลการศึกษา	54
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	55
5.3 ปัญหาและอุปสรรค	55
เอกสารอ้างอิง (References)	57

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนที่ภูมิประเทศแสดงพื้นที่ศึกษาบริเวณเหมืองเก่าบริเวณทางหลวงหมายเลข 3385 ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี	2
รูปที่ 1.2 ภาพถ่ายดาวเทียมปี 2014 แสดงพื้นที่ศึกษาบริเวณเหมืองเก่าบริเวณทางหลวงหมายเลข 3385 ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี	2
รูปที่ 1.3 แผนที่ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา(กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง) (Modified from Ueno and Charaontitirat, 2011)	5
รูปที่ 1.4 ภาพแสดงส่วนของแผ่นเปลือกโลกต่างๆ บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และทางใต้ของประเทศจีน (Metcalf, 2013)	8
รูปที่ 1.5 ธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย (Morley et al., 2013)	8
รูปที่ 1.6 การลำดับชั้นหินทั่วไปของพื้นที่ศึกษาและบริเวณของกลุ่มฟิวซิลินิตตามอายุต่างๆ (Fusuline assemblage zones) (Warren et al.,2014)	10
รูปที่ 1.7 ธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย (Warren et al.,2014)	10
รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงลำดับการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 6 ขั้นตอน ตามลำดับ	12
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของหินในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่างกัน เมื่อทำให้เกิดแรงเฉือนมากกว่ากำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ของหิน โดยหินแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างกัน (Hatcher, 1995)	13
รูปที่ 2.3 แสดงแนวการวางตัว (Strike) มุมเอียงเท (Dip angle) และทิศทางมุมเอียงเท (Dip direction) ของชั้นหิน (Plummer and Carlson, 2008)	14
รูปที่ 2.4 การบันทึกภาพหินโผล่เพื่อวิเคราะห์ระบบรอยแตก(ซ้าย) และลักษณะของรอยแตกที่พบจากภาพที่พบที่กได้โดยแสดงเป็นภาพร่างจากหินโผล่(ขวา)	14
รูปที่ 2.5 การเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Passchier and Trouw, 2005)	15
รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายมิติสแตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าใช้กำหนดตำแหน่งข้อมูลแนววางตัว, มุมเอียงเท และทิศทางมุมเอียงเท (ซ้าย) และตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งแนวการวางตัวชั้นหิน (ขวา)	16
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายดาวเทียมปี 2014 แสดงพื้นที่ศึกษา(กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง) บริเวณเหมืองเก่าบริเวณทาง หลวงหมายเลข 3385 ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี	18

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.2 หินปูนที่พบในพื้นที่ศึกษาโดยทั่วไปมีสีเทาถึงเทาดำ พบสายแร่กระจายตัวตามชั้นหินและรอยแตกพบเป็นสายแร่แคลไซต์ (Calcite vein)	19
รูปที่ 3.3 หินปูนไบโอแคลสติก(Bioclastic limestone) หรือแพคสโตน(Packstone) ถึงเกรนสโตน(Grainstone) ตามจากจำแนกของ Dunham(1962)	20
รูปที่ 3.4 ลักษณะของเนื้อหินแบบอ่อนนุ่มซึ่งแสดงให้เห็นเป็นชั้นหินคดโค้ง(รูป A) และลักษณะของเนื้อหินแบบแตกเปราะซึ่งแสดงให้เห็นเป็นรอยแตกและสายแร่แคลไซต์(รูป B)	20
รูปที่ 3.5 หน้าของหินแอนดีไซต์ที่แทรกตัดมาในหินปูน(รูป A) มีทิศทางการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก และบริเวณที่พบการเลื้อนตัวของผนังแอนดีไซต์ตามแนวการเลื้อนตัวของชั้นหิน(รูป B)	21
รูปที่ 3.6 แสดงพื้นที่ศึกษา A B และ C (Zone A B และ C) ของพื้นที่ศึกษา โดยใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏให้เห็นในระดับกลางในการแบ่งพื้นที่ศึกษา	22
รูปที่ 3.7 แสดงภาพรวมของหินโผล่ในพื้นที่ศึกษาที่มีความยาว 250 และภาพร่างหินโผล่ที่พบแสดงลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับกลาง	23
รูปที่ 3.8 การวางตัวของชั้นหินคดโค้งในบริเวณพื้นที่ศึกษาพบว่าแกนชั้นหินคดโค้งทั้งสองข้างมีการวางตัวในทิศทางเดียวกันคือมีค่าการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก และมีมูเอียงเทในทิศเหนือ-ใต้เป็นหลัก	24
รูปที่ 3.9 พื้นที่ศึกษา A (Zone: A) อยู่ทางบริเวณตอนใต้ของพื้นที่ศึกษาซึ่งมีความยาวประมาณ 150 เมตร	25
รูปที่ 3.10 ระบบรอยแตกในพื้นที่ศึกษา A, รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture)(สีแดง) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวตั้ง	25
รูปที่ 3.11 ระบบรอยแตกในพื้นที่ศึกษา A, รอยแตกในแนวระดับ (Vertical fracture) (สีน้ำเงิน) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับ	26
รูปที่ 3.12 การตัดกันของระบบรอยแตกที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา A 2 ระบบคือ รอยแตกในแนวระดับ (เส้นสีน้ำเงิน) ตัดกับรอยแตกในแนวตั้ง (เส้นสีแดง)	26
รูปที่ 3.13 รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) บริเวณพื้นที่ศึกษา A ที่พบเป็นลักษณะของผนังหินแอนดีไซต์ (Andesite dike) ที่มีการแทรกตัดผ่านชั้นหินในพื้นที่	27
รูปที่ 3.14 รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Hinge zone) ที่พบลักษณะของรอยแตกที่มีการแผ่ของรอยแตกเข้าการศูนย์กลางการคดโค้ง (Radial pattern)	27

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.15 ภาพรวมของพื้นที่ศึกษา B (Zone: B) วางตัวในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) เป็นบริเวณที่พบการคดโค้งของชั้นหินโดยส่วนใหญ่ ในบริเวณนี้จะแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อหินแบบอ่อนนุ่ม	28
รูปที่ 3.16 รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) ที่พบในพื้นที่ศึกษา (เส้นสีดำ) ที่มีการวางตัวขนานกับชั้นหิน (เส้นสีฟ้า) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับบริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป A), รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) ที่พบการคดโค้งตามการวางตัวของชั้นหินคดโค้ง (รูป B)	29
รูปที่ 3.17 รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) ที่พบในพื้นที่ศึกษา และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับบริเวณพื้นที่ศึกษา	30
รูปที่ 3.18 รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) ที่มีการคดโค้งที่พบในพื้นที่ศึกษา (เส้นสีดำ) ที่มีการวางตัวขนานกับชั้นหินคดโค้ง (เส้นสีฟ้า), รอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณเขตพบการคดโค้ง (Radial fracture) (เส้นสีแดง), รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) และการตัดกันของรอยแตกที่พบในพื้นที่ศึกษา ทั้ง 3 ระบบ	30
รูปที่ 3.19 ภาพรวมของพื้นที่ศึกษา C (Zone: C) วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ เป็นบริเวณที่พบรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ซึ่งแบบทั้งรอยแตกและผนังหินแอนดีไซต์ (Andesite dike) ที่แทรกตัดผ่านชั้นหินและชั้นหินคดโค้งในพื้นที่ศึกษา	31
รูปที่ 3.20 รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ซึ่งแบบทั้งรอยแตกและผนังหินแอนดีไซต์ ที่แทรกตัดผ่านชั้นหินและชั้นหินคดโค้งในพื้นที่ศึกษาและผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับบริเวณพื้นที่ศึกษา	32
รูปที่ 3.21 รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ซึ่งแบบทั้งรอยแตกและผนังหินแอนดีไซต์ ที่แทรกตัดผ่านชั้นหินและชั้นหินคดโค้งในพื้นที่ศึกษาและพบการเลื่อนตัวของผนังหินแอนดีไซต์ ตามการเลื่อนตัวของชั้นหิน	32
รูปที่ 3.22 ภาพรวมของพื้นที่ศึกษา A (Zone: A) พบเป็นหินปูนโดยชั้นหินมีค่าการวางตัวในแนวตะวันออกเฉียง-ตะวันตก และพบลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่เด่นชัดคือรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ	33
รูปที่ 3.23 การวางตัวของชั้นหินและระนาบของรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำในบริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป A) และภาพขยายจากรูป A (กรอบสีแดง) แสดงระนาบรอยเลื่อนและหินกรวดเหลี่ยมรอยเลื่อน (รูป B)	33

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.24 การไถลระหว่างชั้นหินคดโค้ง(Flexural-slip fold) (รูป A) และภาพขยายจาก กรอบสี่เหลี่ยมสีแดงรูป A พบรอยไถล(Slicken line) และระนาบรอยเลื่อน(Fault plane) รวมไปถึงเซทเตอร์มาร์ค (Chatter mark) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของ ระนาบรอยเลื่อนในแนวตะวันตกเฉียงใต้-ตะวันออกเฉียงเหนือ(SW-NE) (รูป B)	34
รูปที่ 3.25 รอยเลื่อนย้อนแบบก่ายทับ (Duplex thrust fault) แสดงลักษณะการเลื่อนตัว แบบรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ(Thrust fault) ต่ำ ที่มีระนาบรอยเลื่อนขนานด้านบน และด้านล่าง (floor thrust and roof thrust) โดยจะมีระนาบรอยเลื่อนย้อน ขนาดเล็กซ้อนเกยกันอยู่ในระหว่างกลาง	35
รูปที่ 3.26 รอยเลื่อนแบบเรียงตัวเป็นระยะๆ (En echelon faults) ที่แสดงการเลื่อนตัวแบบ รอยเลื่อนปกติ(Normal fault)(รูป A) และภาพขยายจากกรอบสี่เหลี่ยมสีแดงรูป A แสดงให้เห็นถึงการแทรกของสารแร่แคลไซต์ในรอยแตกที่แสดงทิศทางของแรง ดึงออกและทิศทางการเคลื่อนตัวของชั้นหินแสดงในทรงรีความเครียด (Strain ellipsoid) (รูป B)	35
รูปที่ 3.27 ภาพรวมแนวชั้นหินคดโค้งบริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป A), ผลการกำหนดตำแหน่งค่า การวางตัวของรอยแตกในแนวระดับบริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป B), บริเวณที่พบชั้นหิน คดโค้งที่มีมุมแคบโดยมีแกนชั้นหินคดโค้งกึ่งน้อยมีลักษณะแบบหน้าจั่ว (Chevron fold) (รูป C) และบริเวณที่พบชั้นหินคดโค้งที่มีมุมกว้างโดยมีแกนชั้นหินคดโค้งกึ่ง มาก(Gentle fold)(รูป D)	36
รูปที่ 3.28 หินปูนไบโอแคลสติก (Bioclastic limestone) หรือแพคสโตน (Packstone) ถึง เกรนสโตน(Grainstone) ตามจากจำแนกของ Dunham(1962) และพบรอยแตก เป็นสายแร่แคลไซต์	37
รูปที่ 3.29 ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์แสดงการตัดกันของสายแร่แคลไซต์ ของรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้งตัดผ่านรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน, รอยแตกในแนวตั้งตัดผ่านรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน	38
รูปที่ 3.30 ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์แสดงการตัดกันของสายแร่แคลไซต์ ของรอยแตกในแนวระดับตัดผ่านรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง, รอยแตกในแนวระดับ ตัดผ่านรอยแตกในแนวตั้ง	39

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 โครงสร้างรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) พบเป็นรอยแตกที่วางตัวขนานกับชั้นหินและพบว่าบางบริเวณมีการคดโค้งของรอยแตกตามการคดโค้งของชั้นหินคดโค้ง (รูป A-C) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแผนภาพกุหลาบบริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป D) โดยมีการวางตัวของรอยแตกในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้	41
รูปที่ 4.2 โครงสร้างรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) พบเป็นรอยแตกที่สัมพันธ์กับชั้นหินคดโค้งบริเวณเขตพับการคดโค้ง มีลักษณะของรอยแตกที่มีทิศทางการแผ่ของรอยแตกเข้าหาจุดศูนย์กลางการคดโค้ง พบว่าแกนชั้นหินคดโค้งมีการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก จากการกำหนดค่าการวางตัวของแกนชั้นหินคดโค้ง ในตาข่ายมิติสเตอร์อิกราฟิกันพื้นที่เท่า	42
รูปที่ 4.3 โครงสร้างรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) และผนังหินแอนดีไซต์ (Andesite dike) พบเป็นรอยแตกที่ตัดผ่านชั้นหินและชั้นหินคดโค้ง โดยมีทิศทางการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแผนภาพกุหลาบบริเวณพื้นที่ศึกษา C (Zone: C) (รูป A1-2) และรอยแตกที่มีทิศทางการวางตัวในแนวเหนือ-ใต้และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแผนภาพกุหลาบ บริเวณพื้นที่ศึกษา A (Zone: A) (รูป B1-3)	43
รูปที่ 4.4 โครงสร้างรอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) พบเป็นรอยแตกที่ทำมุมกับแนวระดับที่มีค่าเอียงเทน้อยมาก (รูป A-C) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแผนภาพกุหลาบบริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป D) โดยมีการวางตัวของรอยแตกในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้	44
รูปที่ 4.5 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างลำดับที่ 1: การเริ่มมีแรงบีบอัดมากกระทำ (Stage 1: Begin compression) ในทิศทางที่ขนานกับชั้นหินในแนวแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้เกิดแรงดึงออก(Tension) ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแรงบีบอัด ทำให้หินปูนเกิดรอยแตกขึ้นโดยเกิดการเปิดออกของรอยแตกโหมด 1 แบบเปิด (Mode 1: Opening fracture) เกิดเป็นรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน	45

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.6** รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) ที่พบในพื้นที่ศึกษา (เส้นสีดำ) 46
ที่มีการวางตัวขนานกับชั้นหิน (เส้นสีฟ้า) (รูป A) และการเปิดของรอยแตกแบบ
ใหม่ 1 แบบเปิด (กรอบสีแดง, รูป B)
- รูปที่ 4.7** แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างลำดับที่ 2: การเกิดชั้นหินคดโค้ง (Stage 2: Folding) 47
ในแนวแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้รอยแตกที่เกิดในช่วงลำดับ
ที่ 1 หรือรอยแตกที่ขนานกับชั้นหินเกิดการคดโค้งตามการคดโค้งของชั้นหินคดโค้ง
และนอกจากนี้ยังเกิดรอยแตกระบบที่ 2 คือรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง
(Radial fracture)
- รูปที่ 4.8** การตัดกันของรอยแตกในวิวัฒนาการโครงสร้างลำดับที่ 2 การตัดกันของรอยแตก 47
ในช่วงนี้ ตัดกับรอยแตกที่เกิดขึ้นในลำดับก่อนหน้า คือรอยแตกบริเวณเขตพับการ
คดโค้ง (Radial fracture) (เส้นสีแดง) ตัดรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel
fracture) และเกิดการคดโค้งตามชั้นหิน (เส้นสีดำ) บริเวณชั้นหินคดโค้ง
- รูปที่ 4.9** แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างลำดับที่ 3: การผ่อนคลายของการแปรสัณฐาน 48
(Stage 3: Tectonic relaxation) โดยระบบในช่วงนี้จะเป็นระบบแบบดึงออก
(Tension) เกิดการเลื่อนตัวแบบรอยเลื่อนปกติของ En echelon vein (รูป A)
และเกิดการแทรกตัดในแนวตั้งของหินภูเขาไฟตัดผ่านชั้นหินคดโค้งเกิดเป็น
ผนังหินแอนดีไซต์ และเกิดรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) (รูป B)
- รูปที่ 4.10** แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างลำดับที่ 4: การเกิดรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Stage 4: 49
Thrusting) เกิดการเลื่อนตัวของชั้นหินเกิดเป็นรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Thrust fault)
และ รอยเลื่อนย้อนแบบก่ายทับ (Duplex thrust fault) ในช่วงนี้เกิดรอยแตกในแนว
ระดับ (Sub-horizontal fracture) ขึ้น และพบว่ารอยแตกในแนวระดับตัดกับรอย
แตกที่เกิดขึ้นก่อนหน้า คือรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture),
รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) และรอยแตกในแนวตั้ง
(Vertical fracture)
- รูปที่ 4.11** การเลื่อนตัวของชั้นหินเกิดเป็นรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Thrust fault) การไถล 50
ระหว่างชั้นหินคดโค้ง (Flexural-slip fold) (รูป A) รอยเลื่อนย้อนแบบก่ายทับ
(Duplex thrust fault) (รูป B) ที่แสดงลักษณะของโครงสร้างรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ
เกิดขึ้น

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.12** รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) (4) และรอยแตกในแนวระดับ 50
ตัดกับรอยแตกที่เกิดขึ้นก่อนหน้า คือรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) (1), รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) (2) และ รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) (3)
- รูปที่ 4.13** ธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ซึ่งโครงสร้าง 52
รอยแตกและรอยเลื่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาน่าจะสัมพันธ์กับเหตุการณ์ในยุค ไทรแอสซิกตอนปลาย (Late Triassic) ถึงจูแรสซิกตอนต้น (Early Jurassic) (Morley et al., 2013)
- รูปที่ 4.14** ธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ซึ่งโครงสร้าง 53
รอยแตกและรอยเลื่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาน่าจะสัมพันธ์กับเหตุการณ์ในยุค ไทรแอสซิกตอนปลาย (Late Triassic) ถึงจูแรสซิกตอนต้น (Early Jurassic) (Warren et al., 2014)
- รูปที่ 5.1** สรุปรูปภาพรวมวิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตก (Structural 56
Evolution of fracture) ทั้ง 4 ชั้นตอนของบริเวณพื้นที่ศึกษา

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ที่มาและความสำคัญ (Original and Significant)

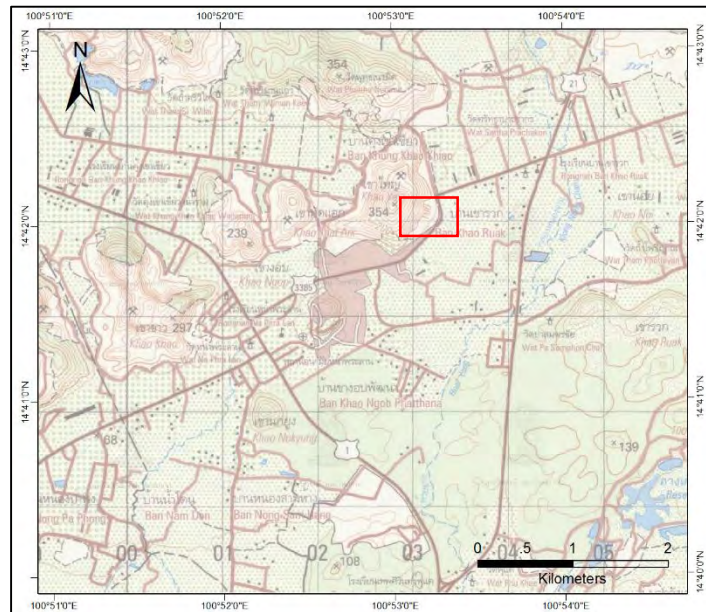
จากการชนกันของแผ่นเปลือกโลกไซบิวมาสูและแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนในช่วงยุคไทรแอสซิก หรือการก่อเทือกเขาอินโดจีนเนียน (Indosinian Orogeny) (Metcalf, 2013) ทำให้เกิดธรณีวิทยาโครงสร้างที่สำคัญในประเทศไทย ซึ่งหนึ่งในธรณีวิทยาโครงสร้างนั้นคือ แนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Fold and Thrust belt) จากเหตุการณ์ธรณีแปรสัณฐานนี้ (Sone and Metcalfe, 2008; Morley et al., 2013) โดยพื้นที่ศึกษาอยู่ในแนวชั้นหินคดโค้งและแนวรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง (Khao Khwang Fold and Thrust Belt) คือพื้นที่ที่พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหินปูนยุคเพอร์เมียน ในบริเวณลานสะสมตะกอนคาร์บอนเนต (Khao Khwang platform) (Morley et al., 2013) ซึ่งอยู่ทางบริเวณตอนกลางของประเทศไทย หรือทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของขอบแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (Morley et al., 2013) โดยมีแนวการวางตัวหลักของชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำของแนวชั้นหินคดโค้งและแนวรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวางในแนวตะวันออก – ตะวันตก (Arboit et al, 2014)

หินปูนยุคเพอร์เมียนและตะกอนเนื้อเม็ดที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิกาบริเวณตอนกลางและตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยบริเวณเทือกเขาเลย-เพชรบูรณ์ บริเวณจังหวัด ลพบุรี-สระบุรี-นครราชสีมาจัดอยู่ในกลุ่มหินสระบุรี (Bunopas, 1981) แบ่งออกเป็น 6 หมวดหินคือ หมวดหินภูเพ (Phu Phe Formation) หมวดหินเขาขวาง (Khao Khwang Formation) หมวดหินหนองโป่ง (Nong Pong Formation) หมวดหินปางอศอก (Pang Asok Formation) หมวดหินเขาขาด (Khao Khad Formation) และ หมวดหินซับบอน (Sap Bon Formation) โดยพื้นที่ศึกษาจัดอยู่ในหมวดหินเขาขาด กลุ่มหินสระบุรี (Hinthong, 1985)

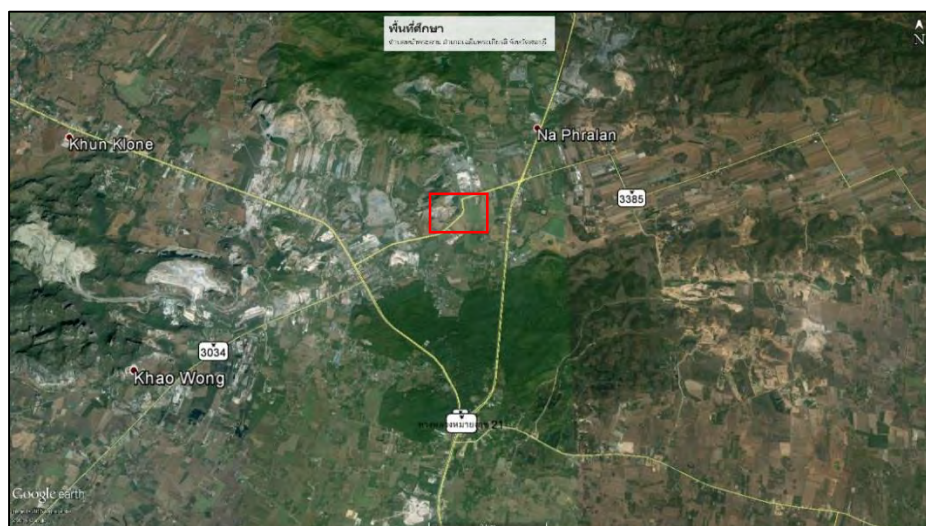
งานวิจัยครั้งนี้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์รอยแตกของหมวดหินเขาขาดในแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรีซึ่งบริเวณนี้พบแนวรอยแตกของชั้นหินและแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะของรอยแตกและประเภทของรอยแตกรวมถึงกลไกทางธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำในบริเวณเดียวกัน

1.2 พื้นที่ศึกษา (Location)

เหมืองเก่าบริเวณทางหลวงหมายเลข 3385 (รูปที่ 1.1) ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี บริเวณพื้นที่แนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนนูนมุดต่ำเขาขวาง หมวดหินเขาขาด พิกัด $14^{\circ}41'55.00''\text{N}$ $100^{\circ}53'3.00''\text{E}$ (รูปที่ 1.2) โดยพบหินเผล่ดวงตัวในแนวเหนือ-ใต้ มีความยาวประมาณ 250 เมตร



รูปที่ 1.1 แผนที่ภูมิประเทศแสดงพื้นที่ศึกษาบริเวณเหมืองเก่าบริเวณทางหลวงหมายเลข 3385 ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี



รูปที่ 1.2 ภาพถ่ายดาวเทียมปี 2014 แสดงพื้นที่ศึกษาบริเวณเหมืองเก่าบริเวณทางหลวงหมายเลข 3385 ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี

1.3 นิยามปัญหา (Problem defined)

ระบบรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรีมีลักษณะเป็นอย่างไร

1.4 วัตถุประสงค์ (Objective)

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะ และระบบของรอยแตกบริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี

1.5 สมมติฐาน (Hypothesis)

ระบบรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี มีลักษณะที่สัมพันธ์กับแนวชั้นหินคดโค้งและแนวรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง รวมไปถึงการชนกันของแผ่นเปลือกโลกไซบูมาสูและแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนที่มีความซับซ้อนและเกิดขึ้นในระยะเวลาที่แตกต่างกัน

1.6 ขอบเขตการศึกษา (Scope of work)

การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ระดับหลักคือ

1.6.1 ระดับกลาง (Mesoscopic scale) เป็นการเก็บข้อมูลภาคสนาม ได้แก่ การวางตัวของชั้นหิน (Attitude of Bedding) การวางตัวรอยแตก (Fracture) การบันทึกภาพเก็บเพื่อวิเคราะห์ระบบรอยแตก และนำข้อมูลกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า (Equal-area stereographic net) และแผนภาพกุหลาบ (Rose diagram) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะ

1.6.2 ระดับจุลภาพ (Microscopic scale) เป็นการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) จากแผ่นหินบางจากตัวอย่างในหินระบุตำแหน่ง (Oriented specimen)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ (Expected output)

ทราบลักษณะเฉพาะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตก รูปแบบการเปลี่ยนแปลงลักษณะ และกลไกของระบบรอยแตกที่พบบริเวณหมวดหินเขาขาดบริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี

1.8 ธรณีวิทยาทั่วไป (General geology)

ลักษณะภูมิประเทศทั่วไปของจังหวัดสระบุรีเป็นภูเขาสูงทางด้านเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือของจังหวัด แนวภูเขาทางด้านตะวันออกเฉียงเหนือเป็นส่วนหนึ่งของขอบที่ราบสูงโคราช ส่วนด้านตะวันตกและตะวันออกเฉียงของจังหวัดเป็นที่ราบ พื้นที่จังหวัดรองรับด้วยหินแข็งอายุตั้งแต่ 286 ล้านปีจนถึงตะกอนปัจจุบัน เป็นหินตะกอน หินแปร หินอัคนี และตะกอนร่วน Bunopas (1985) ได้เสนอว่าบริเวณพื้นที่ศึกษาจัดอยู่หินหมวดหินเขาขาด กลุ่มหินสระบุรี (รูปที่ 1.3)

หมวดหินเขาขาด (Khao Khad Formation) เป็นหมวดหินที่พบในพื้นที่ศึกษาจัดอยู่ในกลุ่มหินสระบุรี (Saraburi Group) หินหมวดนี้มีชั้นหินแบบฉบับที่บริเวณเขาขาด ช่วงเขาเขี้ยวตอนทางหลวงสายสระบุรี-หล่มสัก ต่อกับบริเวณเทือกเขาโปร่งปราบ เขาขาว เขาพิด เขาอึมด เขามะขามเฒ่า และเขายอดเขียง ลักษณะทั่วไปประกอบด้วยหินปูนสีขาว เทา เกิดเป็นชั้นบางๆ ถึงหนามาก และไม่เป็นชั้นก็มีบางแห่งลักษณะเนื้อดิน โดยมากมักมีชั้นหินเชิร์ตแทรกอยู่ทั่วไป และบางแห่งเป็นหินโดโลไมต์ บางที่มีหินดินดานเนื้อทราย หินทรายแป้ง หินทราย แทรกสลับอยู่บ้าง บางแห่งมีหินปูนเนื้อกรวดอยู่ด้วย และบางแห่งแปรสภาพไปเป็นหินอ่อน หินแคลคิซิลิเกต และหินฮอร์นเฟลด์ นอกจากนี้ยังพบว่ายังมีหินภูเขาไฟแทรกตัดเข้ามาในชั้นหินหมวดนี้เสมอๆ การแผ่กระจายตั้งแต่บริเวณเขตจังหวัดลพบุรี จังหวัดสระบุรี เข้ามาถึงเขตอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ซากดึกดำบรรพ์ที่พบส่วนใหญ่เป็นซาก fusulinids นอกนั้นเป็น brachiopods, gastropods, ammonites, cephalopods, corals, bryozoa, crinoids, และ algae เป็นต้น ซึ่งซาก fusulinids ส่วนใหญ่บ่งอายุราว Artinskian-Kungurian โดยเฉพาะที่พบที่บริเวณชั้นหินแบบฉบับ fusulinids ซึ่งศึกษาโดย Pitakpaivan (1965), Toriyama and Kanmera (1968) Toriyama et al. (1974) ส่วนมากยืนยันว่าอยู่ในช่วงปลายของเพอร์เมียนตอนล่าง ถึงช่วงต้นของเพอร์เมียนตอนกลาง ความหนาของชั้นหินที่ชั้นหินแบบฉบับวัดได้ 1,812 เมตร

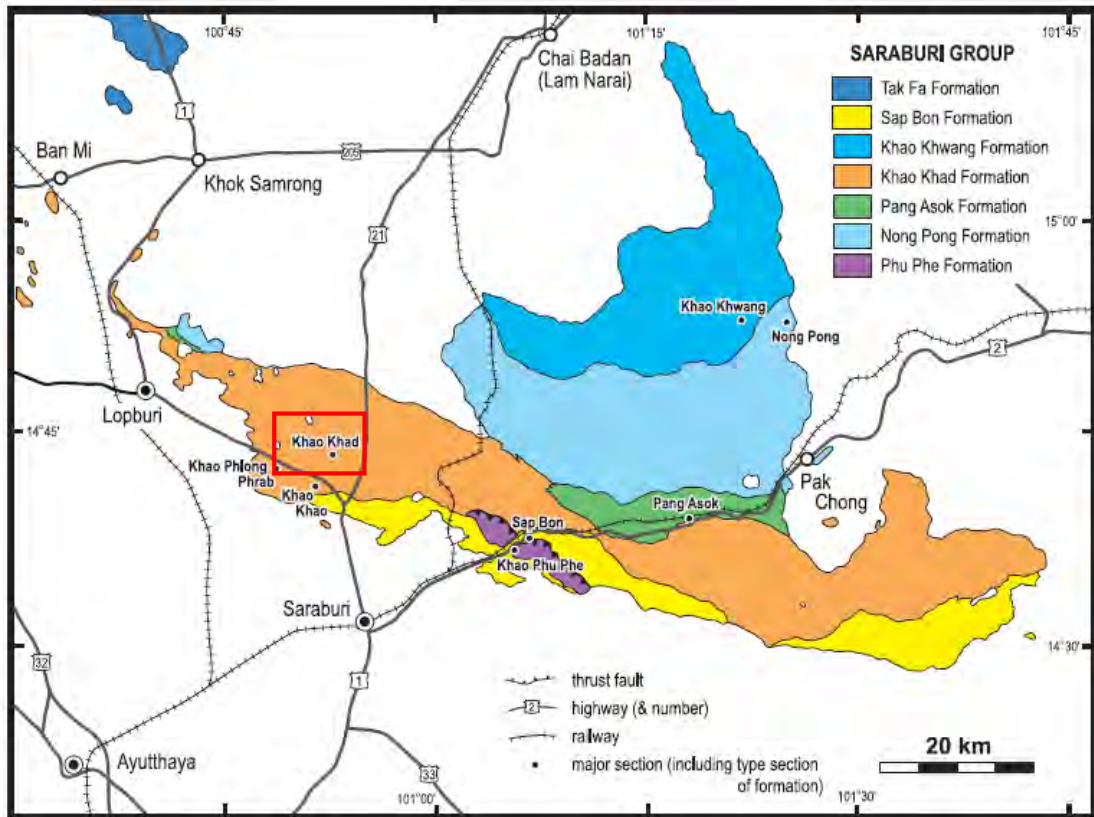
1.9 ธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural geology)

การวางตัวของชั้นหิน ชั้นหินปูนมีการวางตัวใน 2 ทิศทางหลัก คือ บริเวณด้านตะวันออกเฉียงเหนือของจังหวัดวางตัวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ และบริเวณตอนกลางของจังหวัดจะวางตัวในแนวเกือบตะวันออก-ตะวันตก

รอยคดโค้ง หินปูนของกลุ่มหินสระบุรีมีการคดโค้งรูปประทุนมากมาย ส่วนใหญ่จะมีแนวแกนอยู่ในทิศทางเกือบตะวันออก-ตะวันตก

รอยเลื่อน พบรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำบริเวณแนวสัมผัสระหว่างหมวดหินภูเขาทับกับหมวดหินชั้นตอน

รอยแตก พบรอยแตกใน 2 แนวหลัก คือ แนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ และ แนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้



รูปที่ 1.3 แผนที่ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง) (Modified from Ueno and Charoentitirat, 2011)

1.10 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

Hinthong (1985) ได้เสนอว่าบริเวณพื้นที่ศึกษาจัดอยู่หินหมวดหินเขาขาด กลุ่มหินสระบุรี ประกอบด้วยหินปูนสีขาว เทา เกิดเป็นชั้นบางๆ ถึงหนามาก และไม่เป็นชั้นก็มีบางแห่งลักษณะเนื้อดิน โดยมากมักมีชั้นหินเชิร์ตแทรกอยู่ทั่วไป และบางแห่งเป็นหินโคลไนด์ บางที่มีหินดินดานเนื้อทราย หินทรายแป้ง หินทราย แทรกสลับอยู่บ้าง บางแห่งมีหินปูนเนื้อกรวดอยู่ด้วย และบางแห่งแปรสภาพไปเป็นหินอ่อน หินแคลซ์ซิลิเกต และหินฮอร์นเฟลส์ นอกจากนั้นยังพบว่ายังมีหินภูเขาไฟแทรกตัดเข้ามาในชั้นหินหมวดนี้เสมอๆ

Sone และ Metcalfe (2008) ได้สรุปว่าในช่วงยุคคาร์บอนิฟอรัสตอนปลายจนถึงยุคเพอร์เมียนตอนต้น เกิดการมุดตัวบริเวณ Palaeo-Tethys oceanic floor จนกระทั่งยุคไทรแอสซิกตอนปลาย จึงเกิดการชนกันระหว่างแผ่นเปลือกโลกไซบิวมาสุกับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนและเกิดการปิดของ Palaeo-Tethys โดยส่งผลต่อการเกิดเทือกเขาอินโดไชนีเยน และได้เสนอว่าบริเวณสุโขทัย

(Sukhothai zone) ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของแผ่นจุลทวีปไซบิวมาสู แต่เป็นส่วนของระบบหมู่เกาะรูปโค้งยุคเพอร์เมียน (Permian island-arc system) ซึ่งพัฒนาบริเวณส่วนขอบด้านตะวันตกของแผ่นจุลทวีปอินโดจีน และเกิดปิดตัวเนื่องจากการชนกันของแผ่นจุลทวีปไซบิวมาสูกับแนวสุโขทัยซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นจุลทวีปอินโดจีนในช่วงไทรแอสสิกตอนกลาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแนวชั้นหินคดโค้งสุโขทัย (Sukhothai fold belt) สัมพันธ์กับการเกิดแนวชั้นหินคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์

Ueno and Charoentitirat (2011) ได้ศึกษาว่าหมวดหินเขาขาดประกอบด้วยหินปูนที่แสดงชั้นหินที่บางถึงหนามาก อาจพบ chert nodule และพบการแทรกสลับของ Argillite, dolomitic shale, siltstone, sandstone และ conglomerate มีการกระจายตัวในแนว WNW – ESE เป็นส่วนใหญ่ในบริเวณจังหวัดสระบุรี พบซากดึกดำบรรพ์ของ Fusulines, brachiopods, gastropods และ ammonoids มากในหมวดหินนี้ซึ่งจัดว่าเป็นหินปูนที่มีซากดึกดำบรรพ์มาก (Bioclastic limestone) เป็นตัวบ่งชี้ว่ามีของการสะสมตัวในบริเวณทะเลน้ำตื้นและมีสภาพแวดล้อมของการสะสมตะกอนบนหินปูนที่มีลักษณะเป็นลานบริเวณ Khao Khwang platform

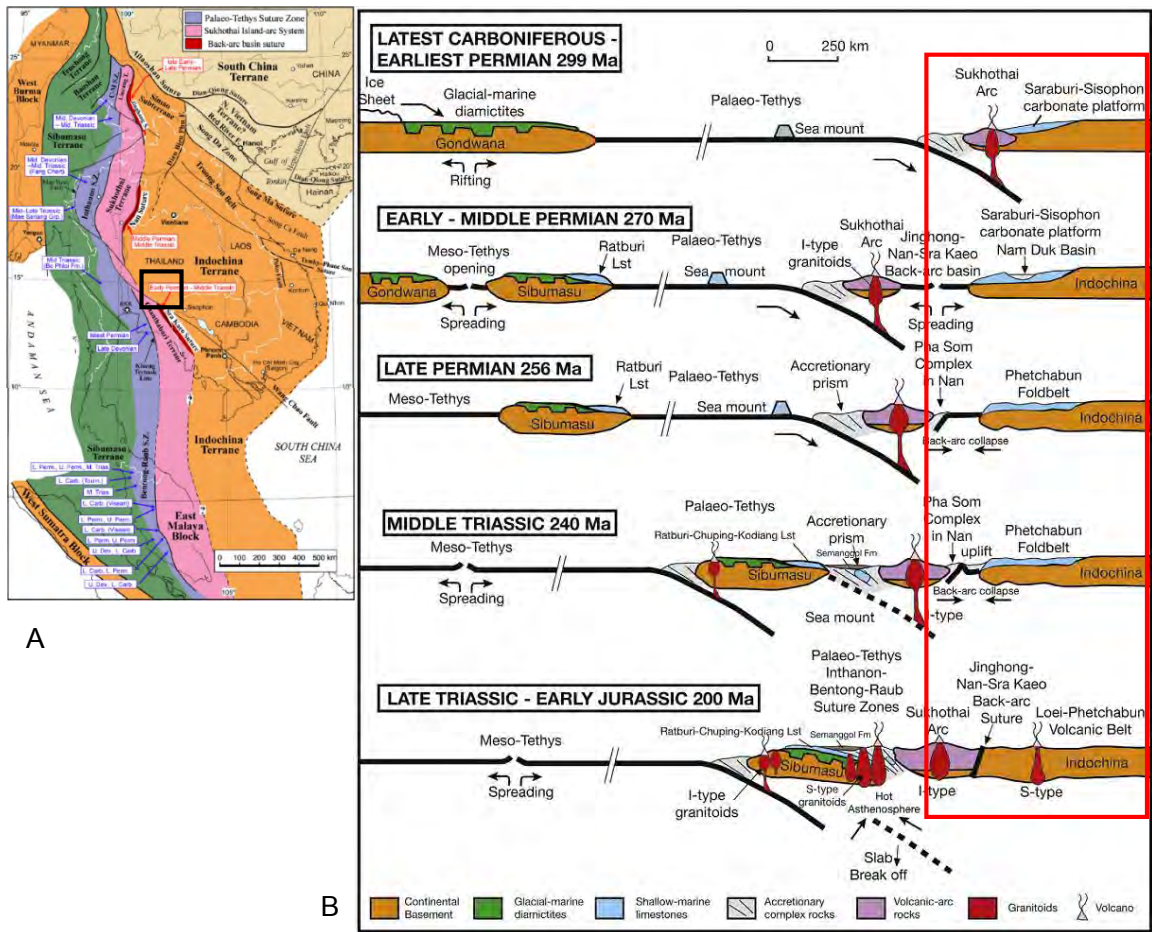
Metcalf (2013) แผ่นเปลือกโลกไซบิวมาสูและแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน เคยเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นกอนวานา (Gondwana) อยู่ทางตะวันตกเฉียงเหนือของแผ่นออสเตรเลีย (NW Australia) ในซีกโลกใต้ ตั้งแต่ช่วงยุคพรีแคมเบรียน (Precambrian) จนถึงช่วงมหายุคพาลีโอโซอิกตอนต้น (Early Paleozoic) (รูปที่ 1.4) จากนั้นในช่วงมหายุคพาลีโอโซอิกตอนกลางจนถึงยุคไทรแอสสิกตอนต้น แผ่นเปลือกโลกไซบิวมาสูและแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ค่อยๆเคลื่อนตัวออกจากแผ่นออสเตรเลีย ระหว่างยุคไซลูเวีย (Silurian) จนถึงยุคคาร์บอนิฟอรัสตอนต้น (Early Carboniferous) พร้อมๆกับการสร้างแอ่งสะสมตะกอนของตนเองเป็นครั้งแรกในช่วงยุคคาร์บอนิฟอรัสตอนต้น (Early Carboniferous) จนถึงยุคเพอร์เมียนตอนปลาย (Late Permian) แผ่นเปลือกโลกไซบิวมาสูเคลื่อนที่จากซีกโลกใต้บริเวณใกล้กับเส้นศูนย์สูตร (low Southern latitude) มาอยู่ในซีกโลกเหนือบริเวณใกล้กับเส้นศูนย์สูตร (low Northern latitude) และเริ่มเกิดการมุดตัวของพื้นทะเลโบราณ (Palaeo-Tethys oceanic floor) ลงไปได้แผ่นเปลือกโลกอินโดจีนจนกระทั่งยุคไทรแอสสิกตอนปลาย (Late Triassic) จึงเกิดการชนกันระหว่างแผ่นเปลือกโลกไซบิวมาสูกับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนก่อให้เกิดแนวชั้นหินคดโค้งและแนวรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ

Morley et al. (2013) ได้ศึกษาแนวชั้นหินคดโค้งและแนวรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง คือพื้นที่ที่พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหินปูนยุคเพอร์เมียน กลุ่มหินสระบุรี มีทิศทางการวางตัวหลักในแนวตะวันออก-ตะวันตกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอยู่ทางบริเวณตอนกลางของประเทศไทย และมีการวางตัวทางทิศใต้ของขอบแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน โดยการหมุนของพื้นที่ตามเข็มนาฬิกาเนื่องจาก

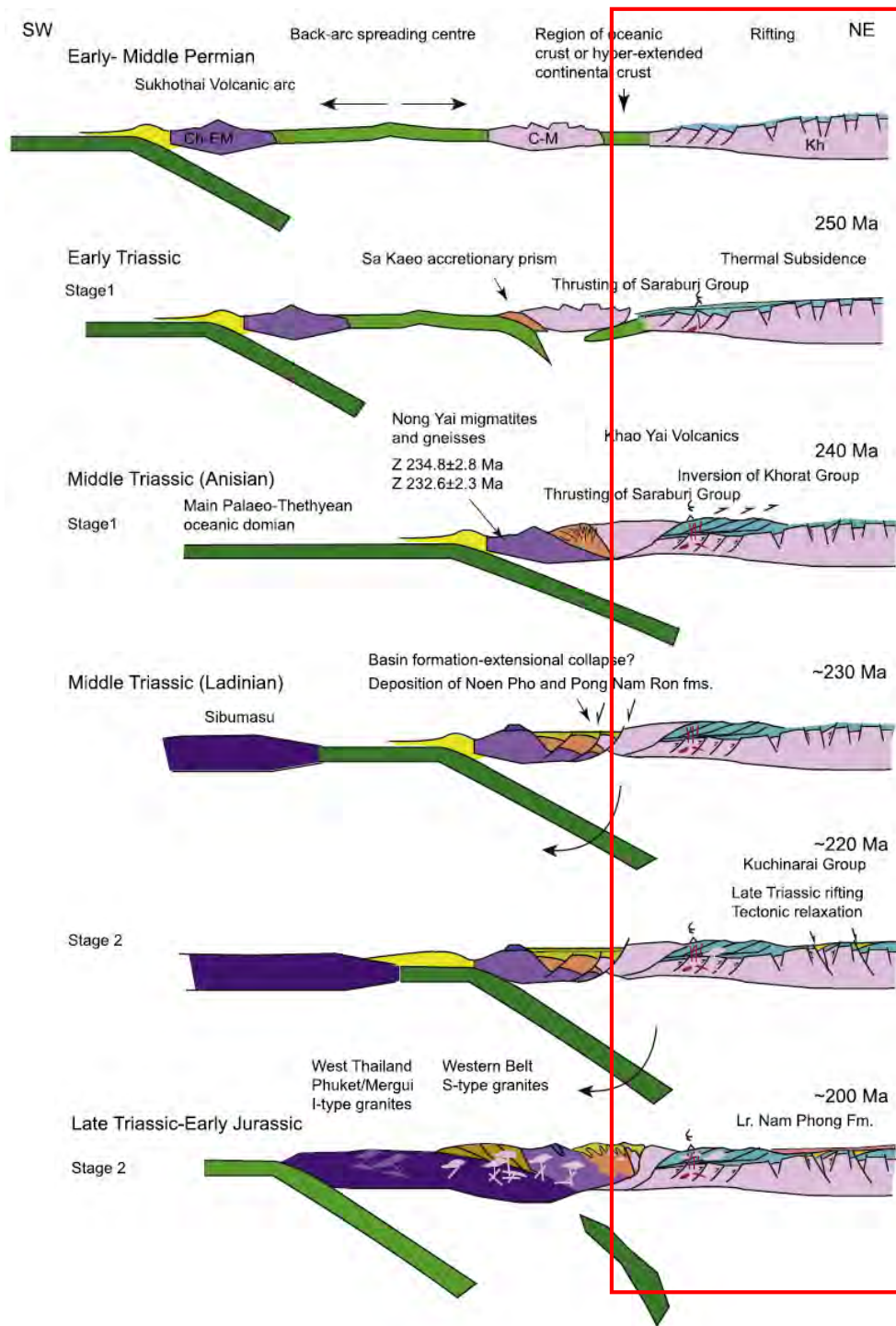
อิทธิพลของรอยเลื่อนแม่ปิงทำให้มีทิศทางการวางตัวหลักในแนวตะวันออก-ตะวันตก ซึ่งตรงข้ามกับงานวิจัยก่อนที่บริเวณพื้นที่นี้ควรจะพบลักษณะการวางตัวแบบเหนือ-ใต้ และเหตุการณ์ธรณีแปรสัณฐานของพื้นที่อยู่ในช่วงไทรแอสสิกตอนกลาง (Middle Triassic) และยังคงเคลื่อนตัวอยู่จนถึงช่วงไทรแอสสิกตอนปลาย-จูแรสสิกตอนต้น (Late Triassic-Early Jurassic) หรือการก่อเทือกเขาอินโดจีนเนียน (Indosinian orogeny) ทำให้หมวดหินภูเพ (Phu Phe Formation) ปิดทับหมวดหินเขาขาด (Khao Khad Formation) ซึ่งมีอายุอ่อนกว่าโดยอิทธิพลจากรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ นอกจากนี้ยังพบหินภูเขาไฟเขาใหญ่-สระบุรี และหินอัคนีบาดาลของหินแอนดีไซต์ในบริเวณพื้นที่ข้างเคียง (เป็นส่วนหนึ่งของแนวภูเขาไฟเลย-เพชรบูรณ์) ร่วมกับหลักฐานของหินแปร (หินอ่อน) ในบริเวณพื้นที่ และพบว่าเป็นผนังของหินภูเขาไฟแทรกตัดชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ ซึ่งบางบริเวณอาจพบการเคลื่อนตัวของผนังหินภูเขาไฟในช่วงนี้ (รูปที่ 1.5)

Arboit et al. (2014) ได้ศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวชั้นหินคดโค้งและแนวรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวางในระดับกลางพบว่าชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำในบริเวณเขาใหญ่ ซึ่งมีทิศทางการวางตัวหลักในแนวเหนือ-ใต้ และแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ เป็นส่วนใหญ่ โดยมีทิศทางของแรงมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้-ตะวันออกเฉียงเหนือ และได้เสนอว่าพื้นที่ศึกษาเขาใหญ่มีลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่มีอิทธิพลจากความแตกต่างของการลำดับชั้นหินโดยพบว่าบริเวณด้านหินพื้น (Foot wall) พบลักษณะของชั้นหินคดโค้งหน้าจั่ว (Chevron fold) ของรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำขนาดใหญ่ และพบชั้นหินคดโค้งขนาดใหญ่ทางด้านหินเพดาน (Hanging wall) มีลักษณะเป็นชั้นหินคดโค้งจากการตัดของรอยเลื่อน (Fault-bend fold) ชั้นหินคดโค้งปลายรอยเลื่อน (Fault-propagation fold) และทางตอนใต้ของเขาใหญ่พบการเปลี่ยนแปลงลักษณะที่แตกต่างกันไป

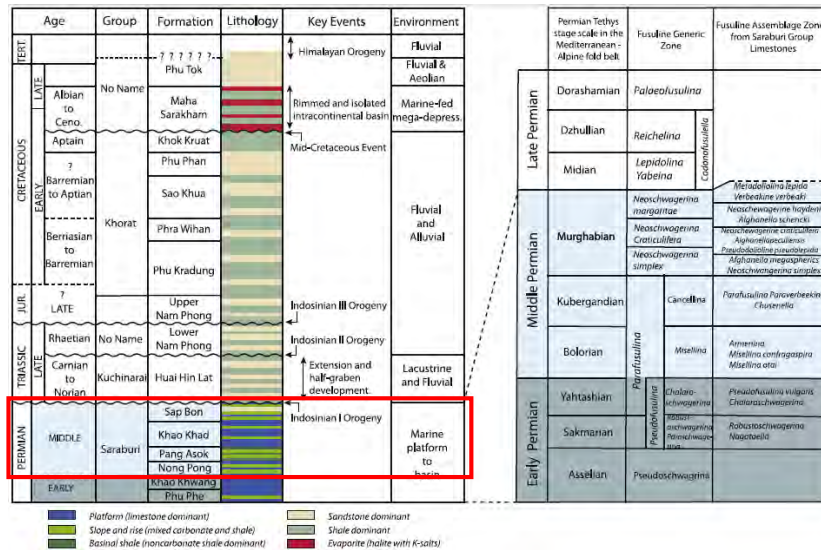
Warren et al (2014) พบว่าเกิดเหตุการณ์ทางธรณีแปรสัณฐานในช่วง Early-Middle Permian มีการตกสะสมตัวของคาร์บอนเนตบนลาดทวีปของแผ่นจุลทวีปอินโดจีนมา ต่อมาในช่วง Early Triassic เกิดการเคลื่อนตัวเข้าหากันของแผ่นจุลทวีปฉานไทย-อินโดจีนมาจึงทำให้เกิดการปิดตัวลงของ Back-arc basin แรงบีบอัดทำให้ Carbonate platform ถูกแปรสภาพเกิดรอยคดโค้งและรอยเลื่อน ซึ่งก็คือบริเวณรอยคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ (Loei – Phetchabun fold belt) (รูปที่ 1.6 – 1.7)



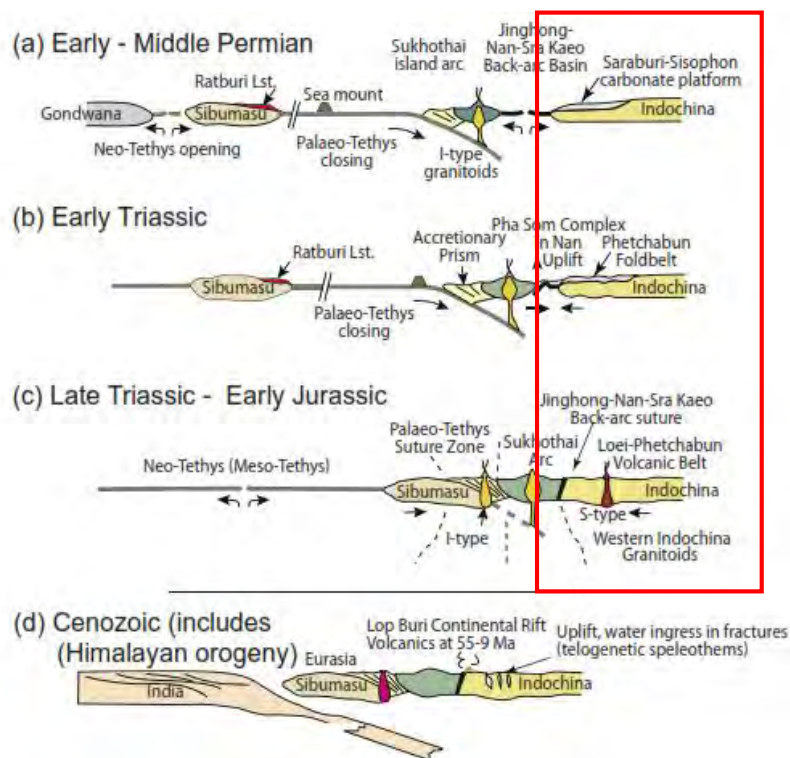
รูปที่ 1.4 ภาพแสดงส่วนของแผ่นเปลือกโลกต่างๆ บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และทางใต้ของประเทศจีน ประกอบด้วยแผ่นเปลือกโลกพม่าตะวันตก (West Borneo Block) และแผ่นเปลือกโลกสุมาตราตะวันตก (West Sumatra Block) (สีส้ม), แผ่นเปลือกโลกไซบุมาสู (สีเขียว), แนวอินทอนท์ (Inthanon Zone) (สีฟ้า), แนวสุโขทัย (Sukhothai zone) (สีชมพู) และแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (สีส้มอ่อน) (รูป A) และธรณีวิทยาแปรสัณฐานที่ทำให้เกิดแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง เนื่องจากการชนกันของแผ่นเปลือกโลกไซบุมาสูกับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (รูป B) (Metcalf, 2013)



รูปที่ 1.5 ธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ซึ่งโครงสร้างรอยแตกและรอยเลื่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาน่าจะสัมพันธ์กับเหตุการณ์ในยุคไทรแอสซิกตอนปลาย (Late Triassic) ถึงจูแรสซิกตอนต้น (Early Jurassic) (Morley et al., 2013)



รูปที่ 1.6 การลำดับชั้นหินทั่วไปของพื้นที่ศึกษาและบริเวณของกลุ่มฟิวซูลินิตตามอายุต่างๆ (Fusuline assemblage zones) (Warren et al., 2013)



รูปที่ 1.7 ธรณีแปรสัณฐานฐานของประเทศไทย บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ซึ่งโครงสร้างรอยแตกและรอยเลื่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาน่าจะสัมพันธ์กับเหตุการณ์ในยุคไทรแอสซิกตอนปลายถึงจูแรสสิกตอนต้น (Warren et al., 2014)

บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนได้แก่ การศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม การวิเคราะห์ข้อมูลจากภาคสนาม การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตีความผลการศึกษา และสรุปผลการศึกษา (รูปที่ 2.1)

2.1 การศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น

2.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

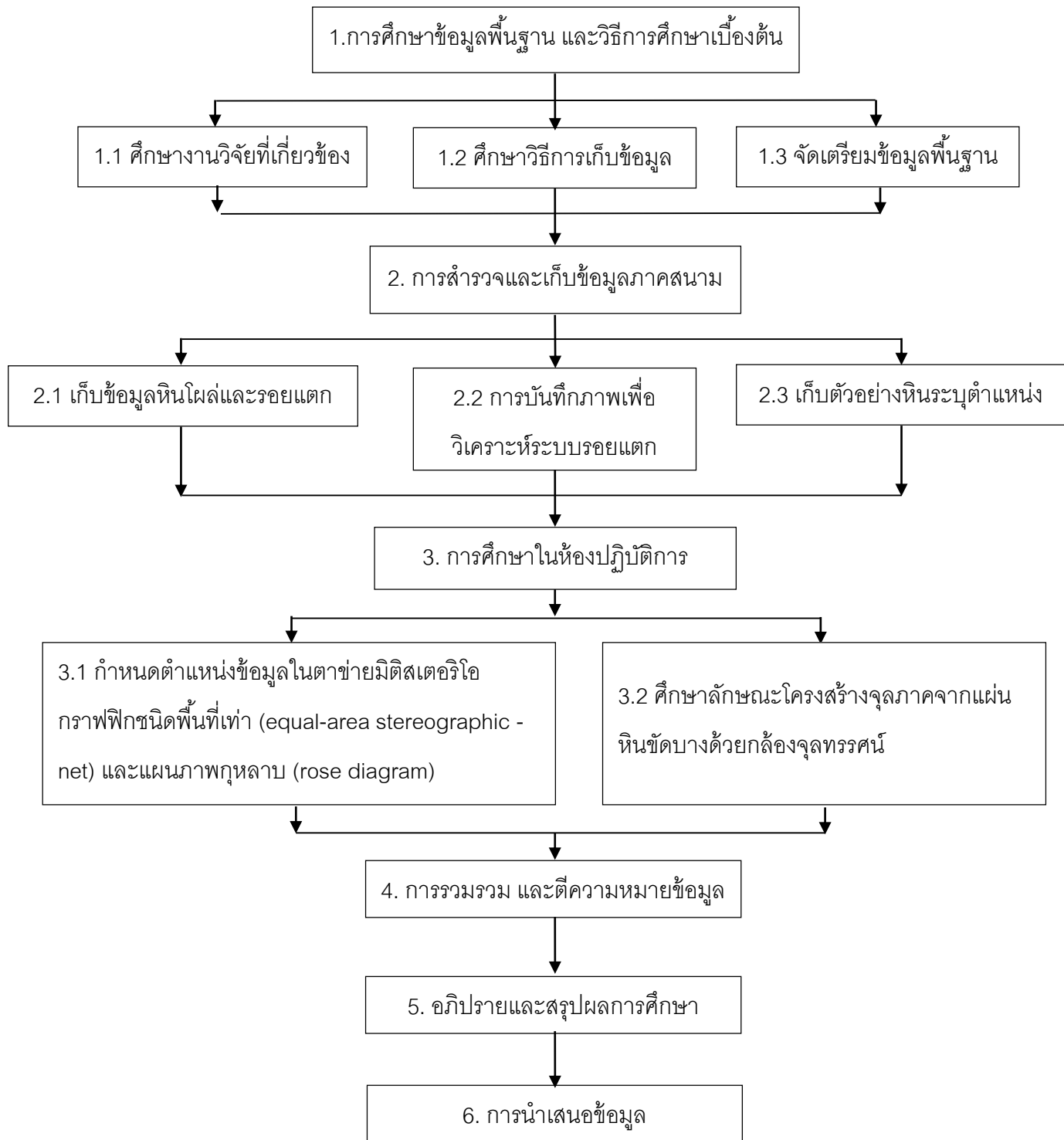
- ข้อมูลธรณีวิทยาทั่วไปในพื้นที่ศึกษา
- ข้อมูลการศึกษาธรณีโครงสร้างในพื้นที่หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- ข้อมูลลักษณะทางกายภาพ ค่าการวางตัวของธรณีโครงสร้างภายในหิน โผล่พื้นที่และตัวอย่างหินจากภาคสนาม
- ข้อมูลลักษณะทางกายภาพและธรณีวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Polarizing microscope)

2.1.2 ศึกษาวิธีการเก็บข้อมูลทางธรณีโครงสร้างจากการสำรวจภาคสนามและการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Polarizing microscope)

โครงสร้างในระดับจุลภาคจะทำการศึกษาในแผ่นหินขัดบาง จากตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง (Oriented specimen) ที่เก็บมาจากพื้นที่ศึกษาโดยจะนำมาศึกษาในเรื่องโครงสร้างระดับจุลภาคซิลิการรณภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Polarizing microscope) ทำให้สามารถรู้ถึงทิศทางของแรงที่ทำให้เกิดกลไกการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหินในพื้นที่

2.1.3 จัดเตรียมข้อมูลพื้นฐานเช่น แผนที่ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาแผนที่ภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา ภาพถ่ายดาวเทียม และแผนที่ทางหลวงเป็นต้น

- แผนที่ธรณีวิทยา
 - แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดสระบุรี มาตราส่วน 1:250,000 พ.ศ.2519 พิมพ์ครั้งที่ 1 ระวัง ND47-8 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย
 - แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดสระบุรี มาตราส่วน 1:250,000 พ.ศ.2550

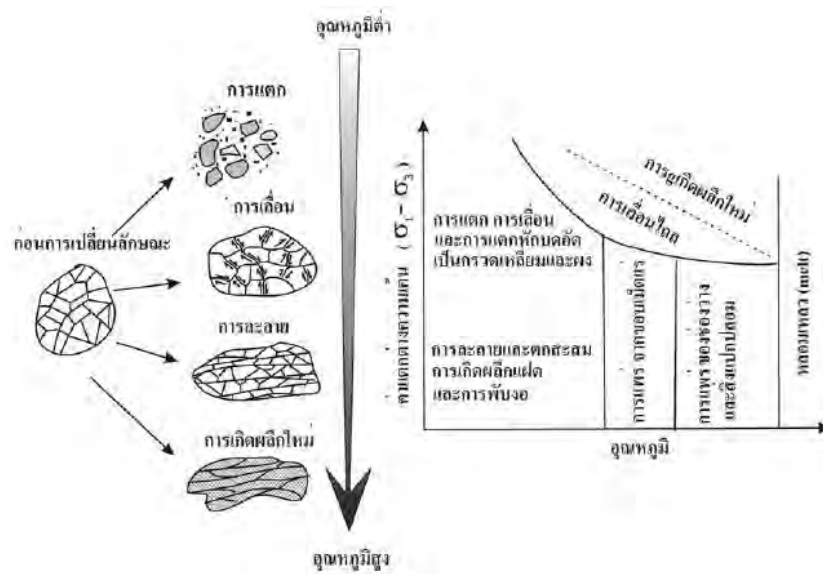


รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงลำดับการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 6 ขั้นตอน ตามลำดับ

- แผนที่ภูมิศาสตร์

- ลำดับชุด L7018 ราวาง 5138II มาตรฐาน 1:50,000 จังหวัดสระบุรี ประเทศไทย

ศึกษาข้อมูลธรณีวิทยาทั่วไปธรณีวิทยาโครงสร้าง ธรณีแปรสัณฐานในพื้นที่ศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสืบค้นได้จากหนังสือ วารสารงานวิจัย (journal) และเอกสารงานประชุม (proceeding) จากห้องสมุดภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและทางอินเทอร์เน็ต

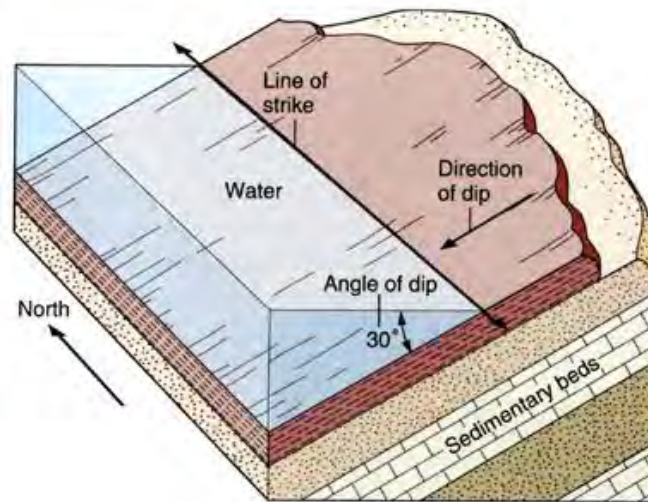


รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงการลักษณะของหินในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่างกัน เมื่อทำให้เกิดแรงเฉือนมากกว่ากำลังรับแรงเฉือน (shear strength) ของหิน โดยหินแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่างกัน (Hatcher, 1995)

2.2 การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม

2.2.1 เก็บข้อมูลหินไผ่และรอยแตกจากหินไผ่

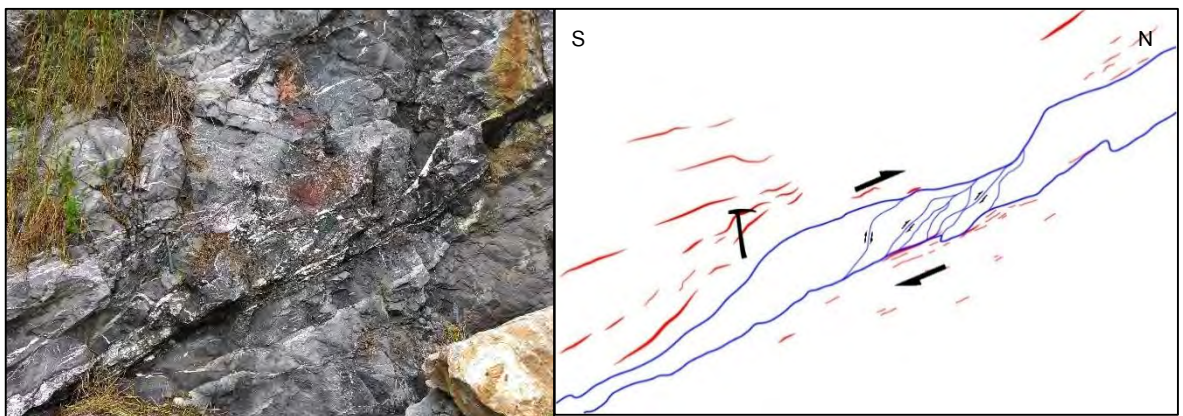
ทำการเก็บข้อมูลในภาคสนามโดยใช้เข็มทิศธรณีวิทยา ซึ่งค่าการวางตัวของธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต้องการวัด ประกอบด้วยค่าการวางตัวและเอียงเทของชั้นหิน (Attitude of bedding) โครงสร้างแนวเส้น (Lineation) รอยแตก(Fracture) แกนชั้นหินคดโค้ง (Fold axis) รอยเลื่อน (Fault) ลักษณะทางกายภาพของหินไผ่ และลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างบ่งชี้อื่นที่พบในภาคสนาม จากนั้นทำการบันทึกภาพเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงจากภาคสนาม



รูปที่ 2.3 แสดงแนวการวางตัว (Strike) บวกถึงแนวการสะสมตัวของชั้นหินกับทิศเหนือ มุมเอียงเท (Dip angle) คือมุมที่ชั้นหินทำมุมหินทำกับแนวระดับ และทิศทางมุมเอียงเท (Dip direction) คือทิศทางที่ชั้นหินลาดเอียง (Plummer and Carlson, 2008)

2.2.2 การบันทึกภาพเพื่อวิเคราะห์ระบบรอยแตก (Photomapping)

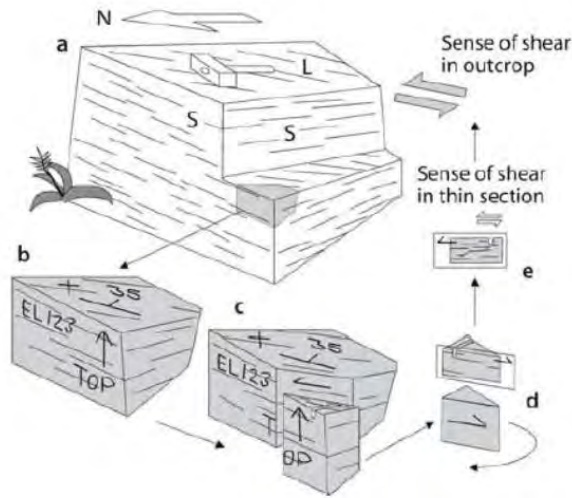
โดยทำการบันทึกภาพลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างโดยเฉพาะรอยแตก และลักษณะอื่นๆ เช่น การวางตัวและเอียงเทของชั้นหิน (Attitude of bedding) โครงสร้างแนวเส้น (Lineation) แกนชั้นหินคดโค้ง (Fold axis) รอยเลื่อน (Fault) เป็นต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์ระบบรอยแตก



รูปที่ 2.4 การบันทึกภาพหินเฝอเพื่อวิเคราะห์ระบบรอยแตก (ซ้าย) และลักษณะของรอยแตกที่พบจากภาพที่พบที่กได้โดยแสดงเป็นภาพร่างจากหินเฝอ (ขวา)

2.2.3 เก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง (Oriented specimen)

การเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่งนั้นจะเก็บโดยตัวอย่างมีขนาดไม่น้อยไปกว่า 15 ซม. X 15 ซม. X 15 ซม. เพื่อนำกลับมาวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค ซึ่งตัวอย่างหินที่นำกลับมาจะต้องบันทึกค่าระนาบการวางตัวอย่างน้อยหนึ่งระนาบลงบนตัวอย่างหิน (Oriented sample) (รูปที่ 2.5) เพื่อใช้เป็นระนาบอ้างอิง ทำให้ทราบถึงการวางตัวของระนาบการบิดเบี้ยวเดิมของหินในหินโผล่ที่เราเก็บมาจากการสำรวจภาคสนามเมื่อนำกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

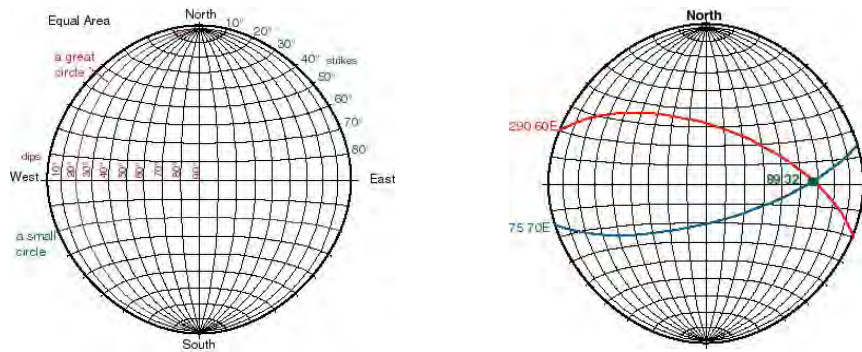


รูปที่ 2.5 การเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Passchier and Trouw, 2005)

2.3 การศึกษาในห้องปฏิบัติการ

2.3.1 กำหนดตำแหน่งข้อมูลในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า (equal-area stereographic -net) และแผนภาพกุหลาบ (rose diagram)

ข้อมูลสำหรับการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างของบริเวณพื้นที่ศึกษานั้นเป็นข้อมูลภาคสนามได้แก่ ค่าการวางตัวของชั้นหิน, มุมเอียงเทของชั้นหิน, รอยแตกและโครงสร้างอื่นๆที่พบในภาคสนาม เพื่อคุณลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง การเปลี่ยนแปลงและการแตกหักในการศึกษา ระดับกลาง (Mesoscopic scale) ที่ปรากฏของแต่ละจุดศึกษา แล้วนำมาวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างภาพรวมพื้นที่ศึกษา ข้อมูลข้างต้นสามารถนำไปกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกและแผนภาพกุหลาบเพื่อใช้วิเคราะห์ระบอบรอยแตกซึ่งจะนำมาใช้ตีความวิวัฒนาการของรอยแตก



รูปที่ 2.6 ตาข่ายมิติสเตอร์โกรฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าใช้กำหนดตำแหน่งข้อมูลแนววางตัว, มุมเอียงเท และทิศทางมุมเอียงเท (ซ้าย) และตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งแนวการวางตัวชั้นหิน (ขวา) (<http://maps.unomaha.edu/> Accessed April 27, 2015)

2.3.2 ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากแผ่นหินขัดบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์

การศึกษานี้เกี่ยวกับลักษณะเนื้อผิว (Texture) ของหินและแร่ ที่บ่งชี้ถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยา เช่นการยัดของเม็ดแร่ การแตกของแร่อย่างเป็นระบบ รวมถึงระดับและสภาวะการแปรสภาพของหินภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Polarizing microscope) ซึ่งในขั้นตอนการทำแผ่นหินบาง เพื่อให้เห็นลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ที่ชัดเจนและถูกต้องมากที่สุด มีลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

1) นำตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง (Orientated sample) มาพิจารณาแนวการวางตัวของริ้วขนาน (Foliation) โครงสร้างแนวเส้น (Lineation) จากนั้นกำหนดวางแนวตัดให้ตั้งฉากกับริ้วขนานและขนานกับแนวเส้นเพื่อดูลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่เกิดจากแนวความเค้นมากที่สุด (Maximum stress) ที่กระทำต่อหินในพื้นที่

2) พิจารณาแบ่งลักษณะเนื้อหิน เลือกบริเวณที่ต้องการโดยอาศัยลักษณะเนื้อหิน แนวรอยต่อระหว่างเนื้อหิน และลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง ตัดแผ่นหินให้ได้ขนาดเหมาะสมกับแผ่นกระจกใส โดยทำสัญลักษณ์ที่ใบบอกด้านบน-ล่าง (top-bottom) กำหนดไว้ด้วย

3) นำด้านล่าง (Bottom) ของแผ่นหินที่พร้อมติดสไลด์มาติดกับสไลด์ (ระวังอย่าติดสไลด์ที่ด้านบนของแผ่นหิน เพราะจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้)

4) ดำเนินการทำแผ่นหินขัดบางตามขั้นตอนปกติ

2.4 การรวบรวมและตีความหมายข้อมูล

รวบรวมข้อมูลจากภาคสนามที่รวมไปถึงข้อมูลจากการศึกษาจากห้องปฏิบัติการ ทั้งกำหนดตำแหน่งข้อมูลในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ และการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากแผ่นหินขัดบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ เพื่อวิเคราะห์ระบบรอยแตกและธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับกลางและระดับจุลภาค โดยวิเคราะห์ระบบรอยแตกและรูปแบบการเปลี่ยนแปลงลักษณะ (Deformation) ของรอยแตกในพื้นที่ศึกษา

2.5 อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

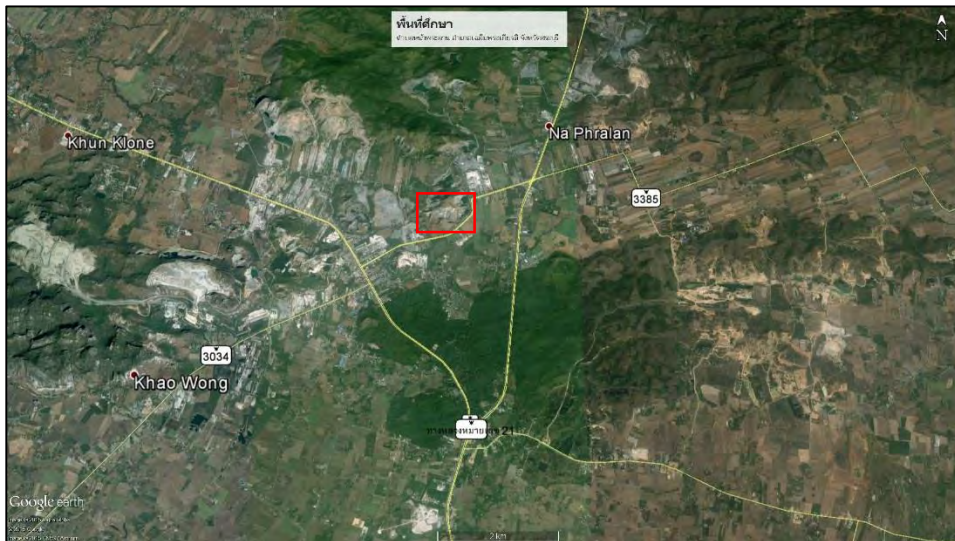
รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการศึกษา มาอภิปรายในเรื่องลักษณะธรณีวิทยา โครงสร้างของรอยแตก, วิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตก และวิวัฒนาการการแปรสัณฐานของพื้นที่ศึกษา โดยวิเคราะห์ร่วมกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้สนับสนุนข้อมูลผลการศึกษาที่มีความสอดคล้องกันและสรุปผลการศึกษาจากผลการศึกษาทั้งหมด

2.6 การนำเสนอข้อมูล

จัดทำรายงานเป็นรูปเล่มและนำเสนอในรูปแบบของการสัมมนา

บทที่ 3 ผลการศึกษา (Result)

เนื้อหาในบทนี้เป็นผลจากการสำรวจภาคสนาม (Field observation) โดยได้ทำการเก็บข้อมูลในภาคสนามสำหรับการศึกษาในระดับกลาง (Mesoscopic scale) ได้แก่การวางตัวของชั้นหิน การวางตัวของรอยแตกและข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่พบในภาคสนาม และการเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่งเพื่อศึกษาในระดับจุลภาค (Microscopic scale) โดยศึกษาแผ่นหินขัดบางภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายดาวเทียมปี 2014 แสดงพื้นที่ศึกษา(กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง) บริเวณเหมืองเก่า บริเวณทาง หลวงหมายเลข 3385 ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี

3.1 ธรณีวิทยา (Geology)

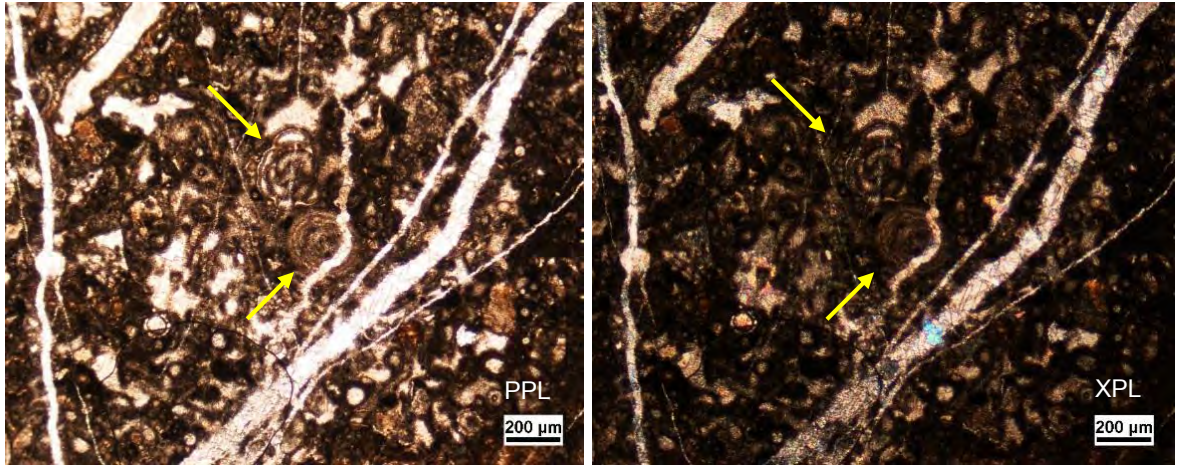
ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี จัดอยู่ในแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวางหมวดหินเขาขาด โดยพบเป็นหินปูนสีเทา เทาดำ เกิดเป็นชั้นบางๆ ถึงหนามาก และไม่เป็นชั้นก็มีบางแห่ง ลักษณะเนื้อดิน ซึ่งแสดงลักษณะของเนื้อหินแบบอ่อนนุ่มเช่นชั้นหินคดโค้ง และแบบแตกเปราะ เช่นรอยแตกและรอยเลื่อนอย่างชัดเจน โดยแนวการวางตัวส่วนใหญ่มีทิศทางหลักในแนว ตะวันออก-ตะวันตก จนถึงตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือนอกจากนั้นยังพบว่ามีหินภูเขาไฟแทรกตัดเข้ามาในบางบริเวณ

หินปูน (Limestone)

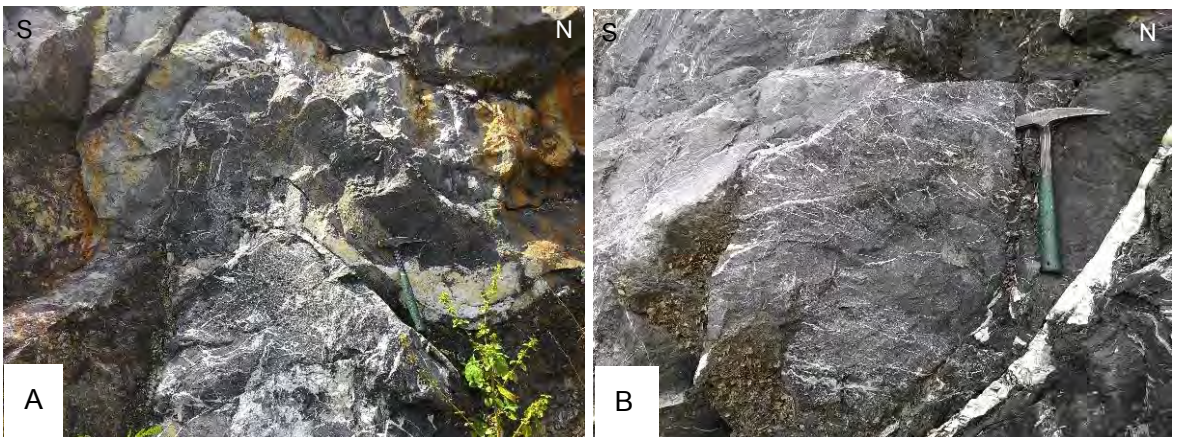
หินปูนที่พบในพื้นที่ศึกษาเป็นหินปูนประเภทหินปูนไบโอแคลสติก (Bioclastic limestone) หรือแพคสโตน (Packstone) ถึงเกรนสโตน (Grainstone) ตามจากจำแนกของ Dunham(1962) เนื่องจากเป็นหินปูนที่พบฟอสซิลเช่นฟอรามินิเฟอรา (Foraminifera) และฟิวซูลินิด (Fusulinid) (รูปที่ 3.3) ซึ่งพื้นที่ศึกษาจัดอยู่ในหมวดหินเขาขาด บริเวณจังหวัดสระบุรีจะพบว่าพื้นที่ศึกษาอยู่ในหมวดหินเขาขาด (Khao Khad Formation) (Hintong, 1985) โดยทั่วไปมีสีเทาถึงเทาดำ (รูปที่ 3.2) มีการวางตัวของชั้นหินในแนวตะวันออก-ตะวันตก จนถึงตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือโดยส่วนใหญ่ มีความหนาตั้งแต่ 0.1 เมตรจนถึง 2 เมตร และนอกจากนี้ยังพบลักษณะของเนื้อหินแบบอ่อนนิ่ม (Ductile deformation) เช่นชั้นหินคดโค้ง และการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ (Brittle deformation) เช่นรอยแตกและรอยเลื่อน ซึ่งพบสายแร่กระจายตัวตามชั้นหิน และรอยแตกพบเป็นสายแร่แคลไซต์ (Calcite vein) ในพื้นที่ศึกษาอย่างชัดเจน (รูปที่ 3.4) และยังพบการแทรกตัดจากหินภูเขาไฟผ่านหินปูนในพื้นที่ศึกษาโดยพบลักษณะเป็นผนังหิน (Dike) ของหินแอนดีไซต์ (Andesite)



รูปที่ 3.2 หินปูนที่พบในพื้นที่ศึกษาโดยทั่วไปมีสีเทาถึงเทาดำ พบสายแร่กระจายตัวตามชั้นหิน และรอยแตกพบเป็นสายแร่แคลไซต์ (Calcite vein)



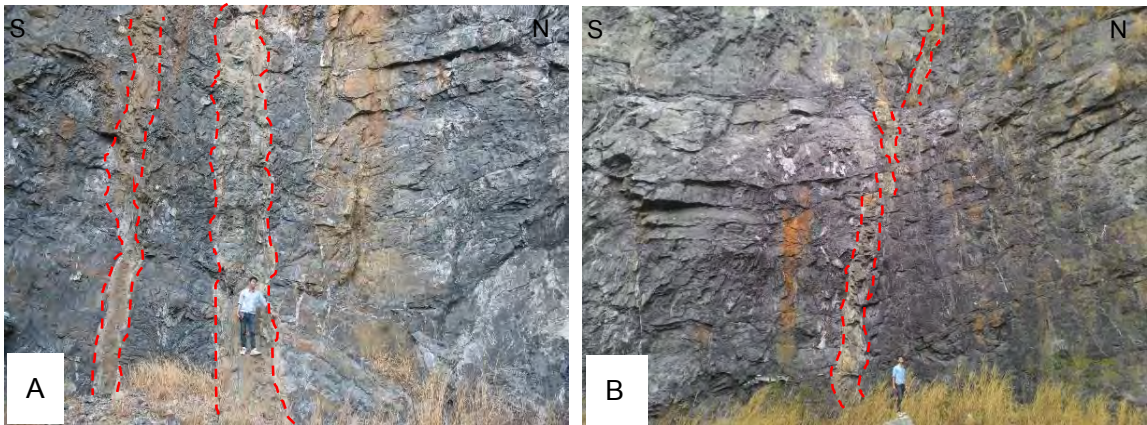
รูปที่ 3.3 หินปูนไบโอแคลสติก (Bioclastic limestone) หรือแพคสโตน (Packstone) ถึงเกรนสโตน (Grainstone) ตามจากจำแนกของ Dunham (1962) เนื่องจากเป็นหินปูนที่พบฟอสซิลเช่น ฟอรามินิเฟอรา (Foraminifera) และฟิวซูลินิด (Fusulinid) และพบสายแร่แคลไซต์แทรกตัดในเนื้อหิน



รูปที่ 3.4 ลักษณะของเนื้อหินแบบอ่อนนุ่มซึ่งแสดงให้เห็นเป็นชั้นหินคดโค้ง (รูป A) และลักษณะของเนื้อหินแบบแตกเปราะซึ่งแสดงให้เห็นเป็นรอยแตกและสายแร่แคลไซต์ (รูป B)

หินแอนดีไซต์ (Andesite)

หินแอนดีไซต์ที่พบในพื้นที่ศึกษามีลักษณะ มีสีสดเป็นสีเขียวเข้ม สีผิวเป็นสีน้ำตาลอมเหลือง โดยมีความหนาของผนังหินตั้งแต่ 0.5 เมตรจนถึง 2 เมตร เป็นผนังหินแอนดีไซต์ที่แทรกตัดเข้ามาภายหลังหินปูนและชั้นหินคดโค้งโดยมีทิศทางการวางตัวในแนวเหนือ-ใต้และในแนวตะวันออก-ตะวันตก และในบางบริเวณพบการเลื่อนตัวของผนังหิน ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ผนังของหินแอนดีไซต์ที่แทรกตัดเข้ามาในหินปูน (รูป A) มีทิศทางการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก และบริเวณที่พบการเลื่อนตัวของผนังแอนดีไซต์ตามแนวการเลื่อนตัวของชั้นหิน (รูป B)

3.2 ธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural geology)

การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรีชวาง แบ่งออกเป็น 2 ระดับคือ

3.2.1 ระดับกลาง (Mesoscopic scale) เป็นการเก็บข้อมูลภาคสนาม ได้แก่ การวางตัวของชั้นหิน การวางตัวรอยแตก การบันทึกภาพเก็บเพื่อวิเคราะห์ระบบรอยแตก และนำข้อมูลกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า และแผนภาพกุหลาบ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะ

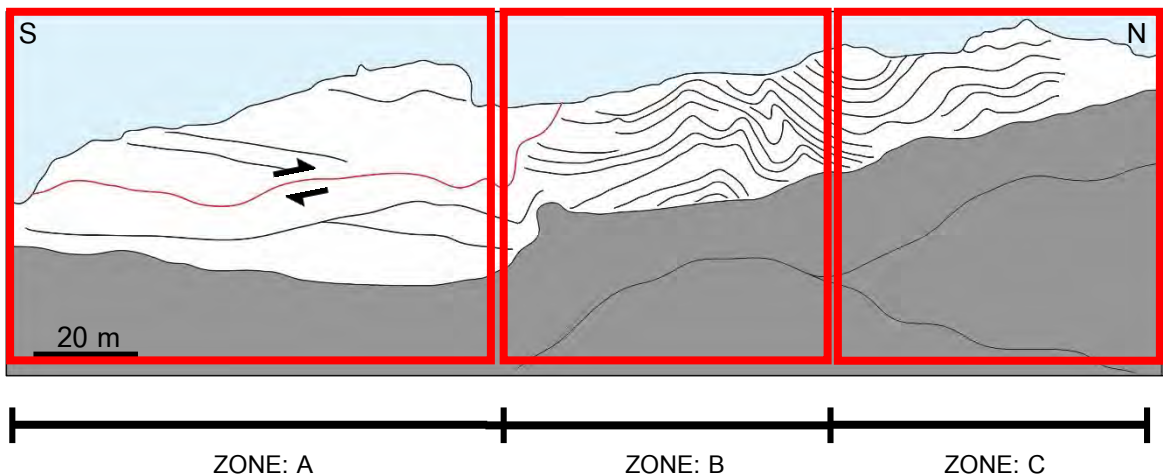
3.2.2 ระดับจุลภาค (Microscopic scale) เป็นการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาคจากแผ่นหินบางจากตัวอย่างในหินระบุตำแหน่ง ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

3.2.1 ธรณีวิทยาโครงสร้างระดับกลาง (Mesoscopic scale)

ในการสำรวจภาคสนามได้ทำการแบ่งพื้นที่ศึกษาจากหินโผล่ซึ่งมีความยาวโดยรวมประมาณ 250 เมตร (รูปที่ 3.6) วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ แบ่งออกเป็น 3 พื้นที่ศึกษาย่อย (รูปที่ 3.7) โดยใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏให้เห็นในระดับกลางในการแบ่งพื้นที่ศึกษาได้แก่

1. พื้นที่ศึกษา A (Zone: A)
2. พื้นที่ศึกษา B (Zone: B)
3. พื้นที่ศึกษา C (Zone: C)

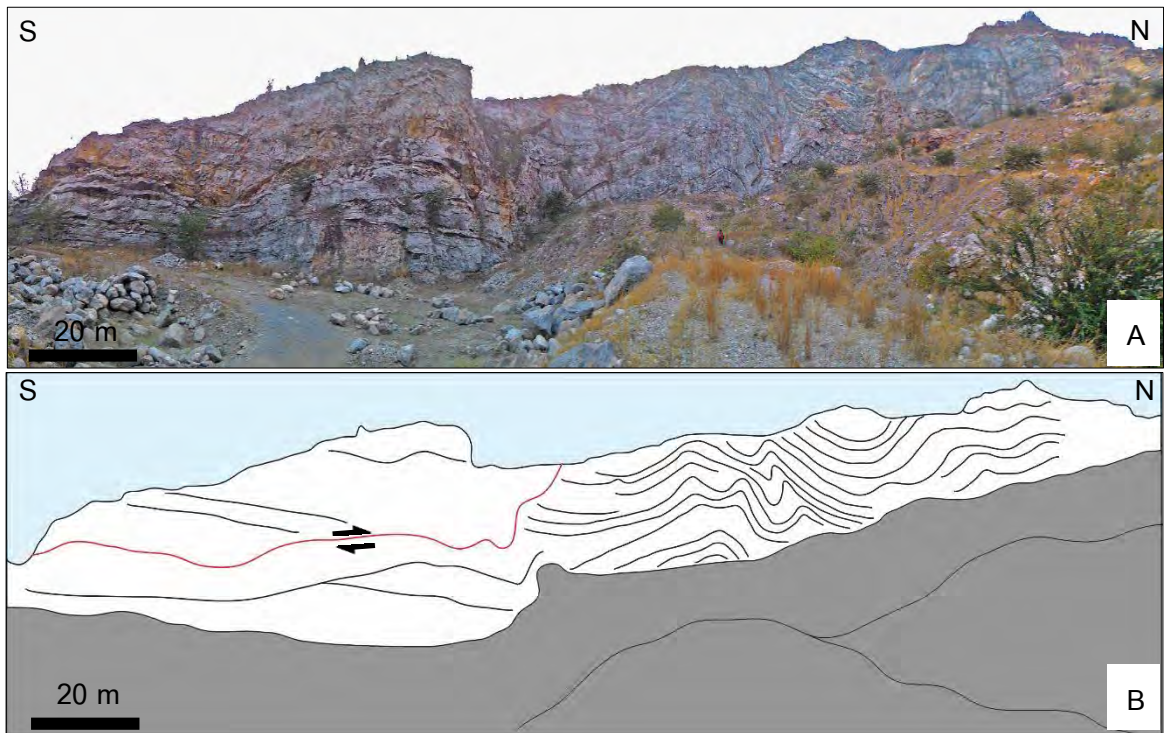
ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจภาคสนามได้แก่ แนวการวางตัวของรอยแตก ข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน และข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่พบจากภาคสนาม ซึ่งข้อมูลข้างต้นจะถูกนำไปกำหนดตำแหน่งในตาข่ายสเตอริโอกราฟฟิคชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุกูลาบเพื่อวิเคราะห์ลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง ซึ่งจะนำมาใช้ศึกษารอยแตกและตีความวิวัฒนาการทางธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี และทำการศึกษาในธรณีวิทยาโครงสร้างโดยละเอียดในพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ยังทำการเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง เพื่อใช้ในการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับจุลภาค



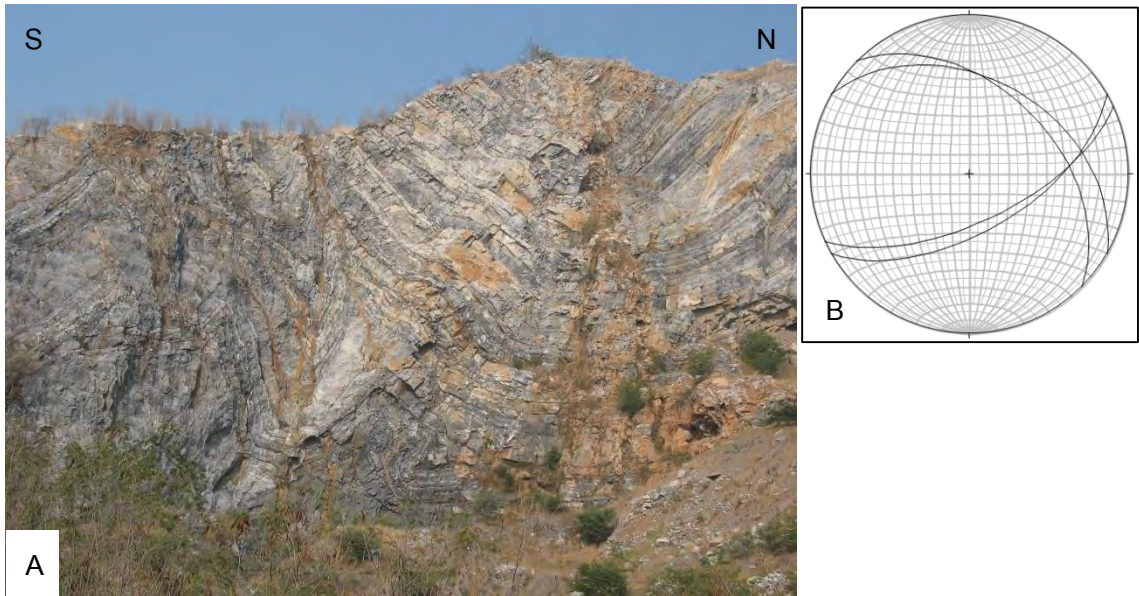
รูปที่ 3.6 แสดงพื้นที่ศึกษา A B และ C (Zone A B และ C) ของพื้นที่ศึกษา โดยใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏให้เห็นในระดับกลางในการแบ่งพื้นที่ศึกษา

3.2.1.1 ข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน (Attitude of bedding)

พื้นที่ศึกษาอยู่ในบริเวณที่เป็นชั้นหินคดโค้ง และรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ ซึ่งเป็นทั้งหินเพดานและหินพื้น พื้นที่ศึกษาซึ่งมีความยาวประมาณ 250 เมตร พบเป็นหินปูนที่มีความหนาของชั้นหินตั้งแต่ 0.50 เมตรถึง 1.50 เมตรและมีผนังหินภูเขาไฟแทรกตัดชั้นหิน โดยชั้นหินมีค่าการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก โดยส่วนใหญ่ และวัดค่าการวางตัวได้เป็น $80^{\circ}/55^{\circ}\text{S}$ ในบริเวณส่วนที่เป็นหินพื้น ที่แสดงการคดโค้งของชั้นหินเล็กน้อย และการวางตัวของชั้นหินคดโค้งในพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่พบว่าแขนชั้นหินคดโค้ง (Fold limb) ทั้งสองข้างมีการวางตัวในทิศทางเดียวกันคือมีค่าการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก แต่มีมุมเอียงของชั้นหินในทิศทางที่แตกต่างกันไปทิศเหนือและทิศใต้เป็นหลักโดยมีค่าการวางตัวเป็น $60^{\circ}/70^{\circ}\text{SE}$ และ $300^{\circ}/40^{\circ}\text{NE}$ ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพตัดขวางในแนวเหนือ-ใต้



รูปที่ 3.7 แสดงภาพรวมของหินโผล่ในพื้นที่ศึกษาที่มีความยาว 250 เมตร วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ และแสดงลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างระดับกลางเช่นชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ วางตัวอยู่ในแนว ตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (รูป A) และภาพร่างหินโผล่ที่พบแสดงลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับกลาง (รูป B)



รูปที่ 3.8 การวางตัวของชั้นหินคดโค้งในบริเวณพื้นที่ศึกษาพบว่าแขนชั้นหินคดโค้ง (Fold limb) ทั้งสองข้างมีการวางตัวในทิศทางเดียวกันคือมีค่าการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก แต่มีมุมเอียงของชั้นหินในทิศทางที่แตกต่างกันไปทิศเหนือและทิศใต้เป็นหลัก และการกำหนดค่าในตาข่ายมิติสเตอร์โวกราฟิกชนิดพื้นที่เท่า

3.2.1.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ (Brittle deformation)

1) โครงสร้างรอยแตก (Fracture)

จากการสำรวจระบบรอยแตกในพื้นที่ศึกษาในผิวดินพื้น ซึ่งชั้นหินทำมุมกับแนวระดับและรอยเลื่อน โดยพบลักษณะของรอยแตกในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด 4 ระบบคือ

1.1 รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture)

1.2 รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) มีการวางตัวในแนว

ตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ วัดค่าการวางตัวได้เป็น $75^{\circ}/11^{\circ}\text{SE}$

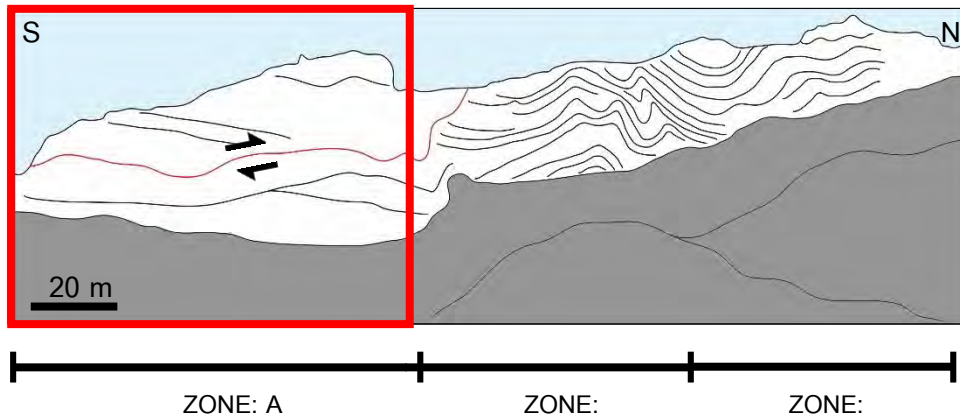
1.3 รอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture)

1.4 รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ และมีค่าการวางตัว

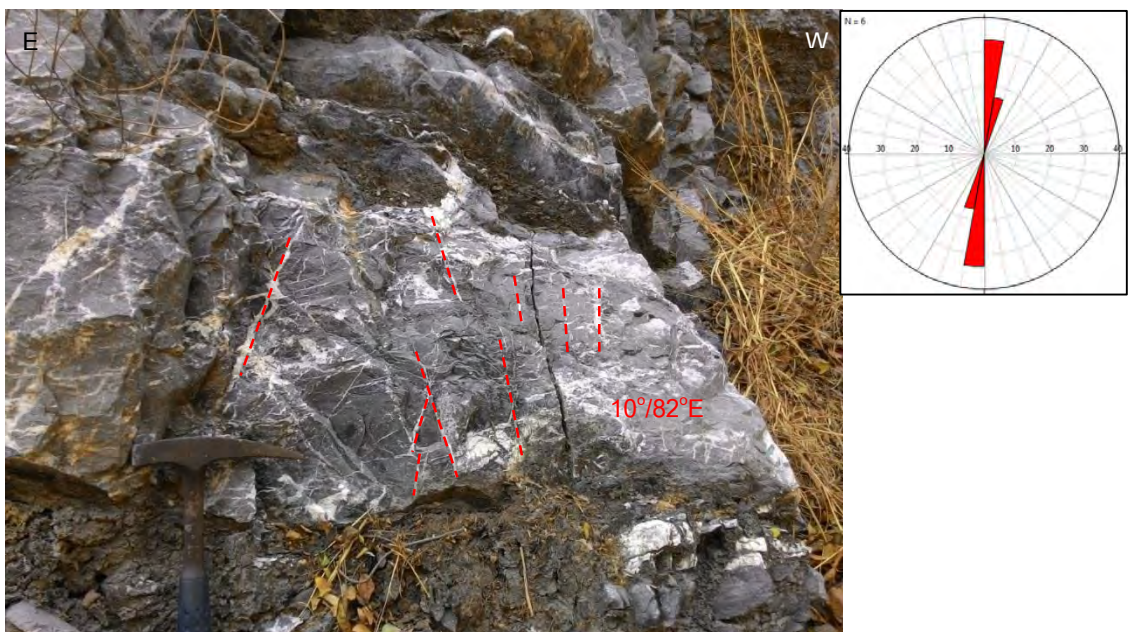
$10^{\circ}/82^{\circ}\text{E}$ และ $90^{\circ}/80^{\circ}\text{S}$

พื้นที่ศึกษา A (Zone: A)

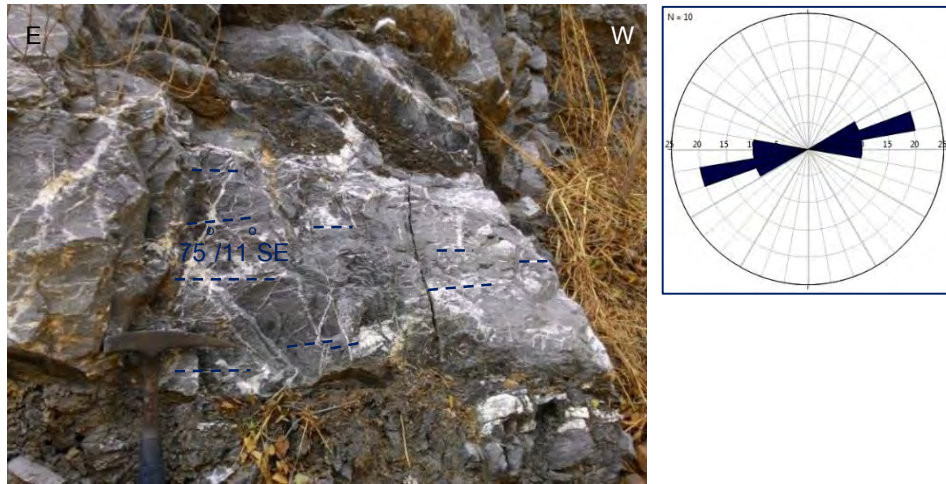
รอยแตกที่พบในพื้นที่มี 3 ระบบคือ รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) มีการวางตัวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ วัดค่าการวางตัวได้เป็น $75^{\circ}/11^{\circ}\text{SE}$, รอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณเขตพักการคดโค้ง (Radial fracture) และรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ และมีค่าการวางตัว $10^{\circ}/82^{\circ}\text{E}$



รูปที่ 3.9 พื้นที่ศึกษา A (Zone: A) อยู่ทางบริเวณตอนใต้ของพื้นที่ศึกษาซึ่งมีความยาวประมาณ 150 เมตร

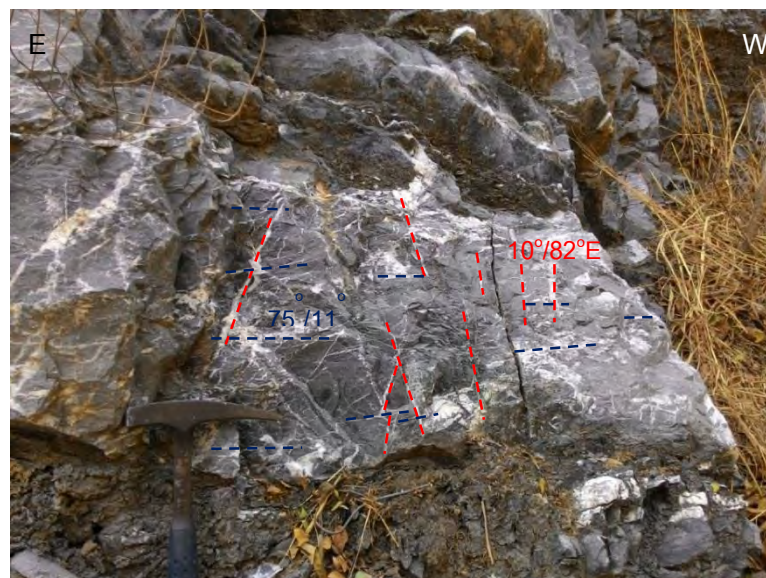


รูปที่ 3.10 ระบบรอยแตกในพื้นที่ศึกษา A, รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture)(สีแดง) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวตั้งบริเวณพื้นที่ศึกษา A



รูปที่ 3.11 ระบบรอยแตกในพื้นที่ศึกษา A, รอยแตกในแนวระดับ (Vertical fracture) (สีน้ำเงิน) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับบริเวณพื้นที่ศึกษา A

นอกจากนี้ยังพบการตัดกันของระบบรอยแตกที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา A 2 ระบบคือ รอยแตกในแนวระดับ ตัดกับรอยแตกในแนวตั้ง จากการศึกษพบว่าเกิดรอยแตกในแนวตั้งก่อนจากการเปิดของออกรอยแตกโหมด 1 แบบเปิด (Mode 1: Opening fracture) หลังจากนั้นพบว่ามีสายแร่แคลไซต์ (Calcite vein) เข้ามาตกผลึก ทำให้เนื้อหินมีลักษณะที่เหมือนกัน (Homogeneous) จึงถูกตัดโดยรอยแตกในแนวระดับที่เกิดขึ้นภายหลังเรียกความสัมพันธ์นี้ว่าการตัดกันของหิน (Cross-cutting relationship) ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การตัดกันของระบบรอยแตกที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา A 2 ระบบคือ รอยแตกในแนวระดับ (เส้นสีน้ำเงิน) ตัดกับรอยแตกในแนวตั้ง (เส้นสีแดง)

รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ที่มีลักษณะแบบผนังหินแอนดีไซต์ พบว่ามีการแทรกตัดของหินแอนดีไซต์ผ่านชั้นหินในแนวตั้ง โดยมีทิศทางการวางตัวสัมพันธ์กับทิศทางการตัวของรอยแตกขนาดเล็กที่พบในพื้นที่ศึกษา โดยสามารถวัดค่าการวางตัวของรอยแตกได้เป็น $10^{\circ}/82^{\circ}N$



รูปที่ 3.13 รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) บริเวณพื้นที่ศึกษา A ที่พบเป็นลักษณะของผนังหินแอนดีไซต์ที่มีการแทรกตัดผ่านชั้นหินในพื้นที่

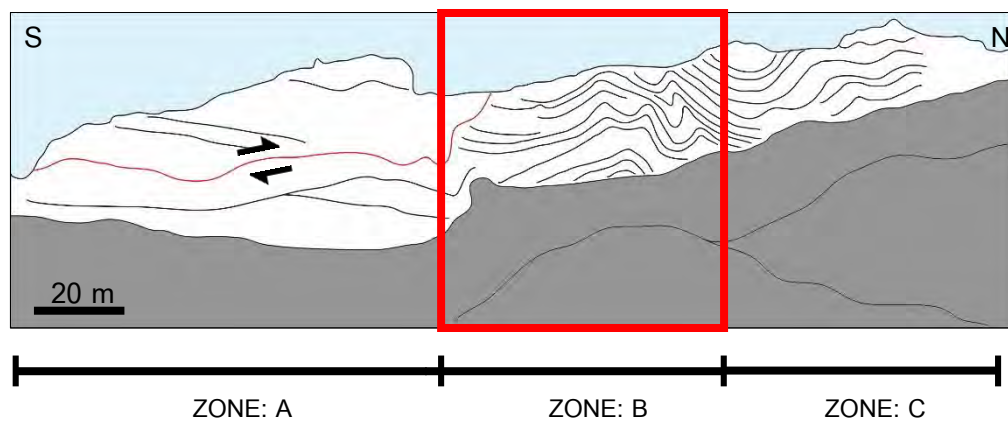
รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) พบเป็นรอยแตกที่สัมพันธ์กับชั้นหินคดโค้งบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Hinge zone) มีลักษณะของรอยแตกที่มีทิศทางการแผ่ของรอยแตกเข้าหาจุดศูนย์กลางการคดโค้ง (Radial pattern)



รูปที่ 3.14 รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Hinge zone) ที่พบลักษณะของรอยแตกที่มีการแผ่ของรอยแตกเข้าหาจุดศูนย์กลางการคดโค้ง (Radial pattern)

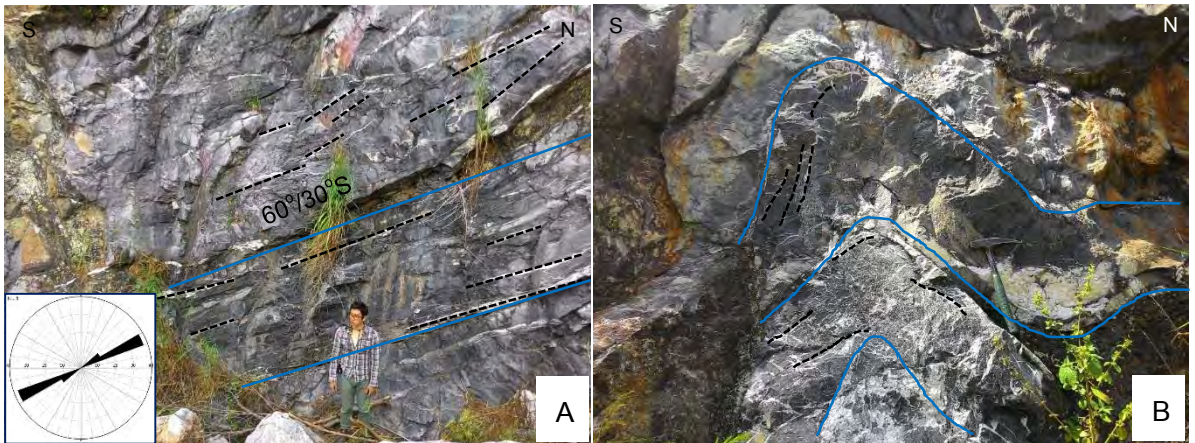
พื้นที่ศึกษา B (Zone: B)

จากการสำรวจระบบรอยแตกในพื้นที่ B พบว่ารอยแตกในพื้นที่นี้ส่วนใหญ่จะสัมพันธ์กับการเกิดชั้นคดโค้งในพื้นที่ย่อยโดยพบรอยแตก 3 ระบบคือ รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) ทั้งในแนวระดับและในบางบริเวณพบการคดโค้งของรอยแตกคดโค้งไปตามชั้นหิน, รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) มีการวางตัวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SE) วัดค่าการวางตัวได้เป็น $60^{\circ}/15^{\circ}\text{SE}$ และรอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) โดยพบว่าแกนชั้นหินคดโค้ง มีการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก มีค่าการวางตัวของแกนชั้นหินคดโค้ง ได้เป็น $60^{\circ}/70^{\circ}\text{SE}$ และ $300^{\circ}/40^{\circ}\text{NE}$



รูปที่ 3.15 ภาพรวมของพื้นที่ศึกษา B (Zone: B) วางตัวในแนวทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ เป็นบริเวณที่พบการคดโค้งของชั้นหินโดยส่วนใหญ่ในบริเวณนี้จะแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อหินแบบอ่อนนุ่ม

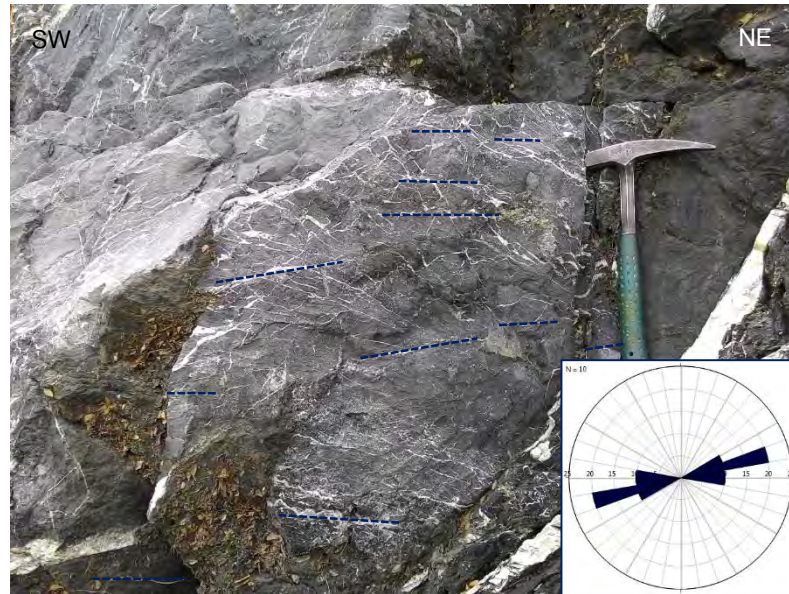
รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) พบว่ามีทิศทางการวางตัวในทิศทางเดียวกับการวางตัวของชั้นหิน โดยสามารถวัดค่าการวางตัวของรอยแตกได้เป็น $60^{\circ}/30^{\circ}\text{SE}$ และมีค่าการวางตัวแนวเดียวกันกับชั้นหิน และในบริเวณที่มีการคดโค้งของชั้นหิน พบว่ารอยแตกมีการคดโค้งตามการคดโค้งของชั้นหิน



รูปที่ 3.16 รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) ที่พบในพื้นที่ศึกษา (เส้นสีดำ) ที่มีการวางตัวขนานกับชั้นหิน (เส้นสีฟ้า) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับบริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป A), รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) ที่พบการคดโค้งตามการวางตัวของชั้นหินคดโค้ง (รูป B)

รอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) บริเวณเขตพับการคดโค้งเป็นบริเวณที่แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะได้ดี เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความแข็งแรงต่ำ (Weak zone) เมื่อถูกแรงบีบอัด จากการวัดค่าการวางตัวของส่วนข้างหรือแขนของชั้นหินคดโค้ง มีค่าการวางตัว $60^{\circ}/70^{\circ}\text{SE}$ และ $300^{\circ}/40^{\circ}\text{NE}$ และรอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) พบว่าเป็นรอยแตกที่ทำมุมกับแนวระดับที่มีค่าเอียงเทน้อยมาก ในพื้นที่ศึกษาพบว่าค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับมีค่า $60^{\circ}/15^{\circ}\text{SE}$

จากการศึกษาพบการตัดกันของรอยแตกในบริเวณพื้นที่ศึกษา B ทั้ง 3 ระบบคือ รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture), รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) และรอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) โดยพบว่ารอยแตกในแนวระดับเป็นรอยแตกที่ตัดรอยแตกที่ขนานกับชั้นหินและรอยแตกที่เกิดขึ้นในบริเวณเขตพับการคดโค้ง และพบว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นในบริเวณเขตพับการคดโค้งตัดรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน



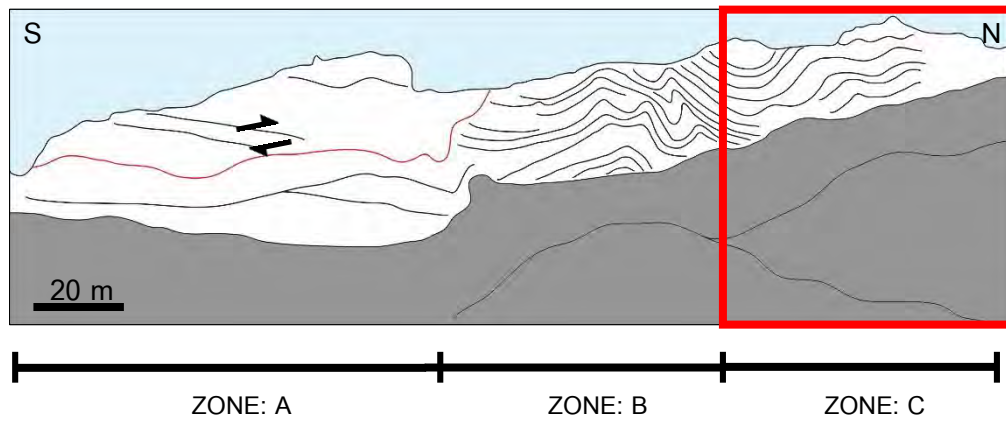
รูปที่ 3.17 รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) ที่พบในพื้นที่ศึกษา (เส้นสีน้ำเงิน) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับบริเวณพื้นที่ศึกษา



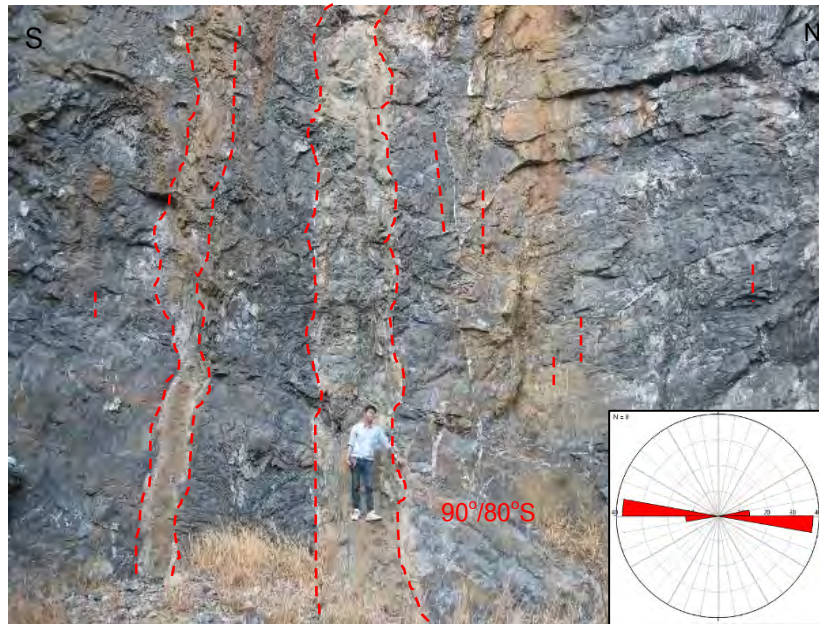
รูปที่ 3.18 รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) ที่มีการคดโค้งที่พบในพื้นที่ศึกษา (เส้นสีดำ) ที่มีการวางตัวขนานกับชั้นหินคดโค้ง (เส้นสีฟ้า), รอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) (เส้นสีแดง), รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) และการตัดกันของรอยแตกที่พบในพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 ระบบ

พื้นที่ศึกษา C (Zone: C)

จากการสำรวจระบบรอยแตกในพื้นที่ศึกษา C พบว่ารอยแตกในพื้นที่นี้ส่วนใหญ่เป็นระบบรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ซึ่งแบบทั้งรอยแตกและผนังหินแอนดีไซต์ มีขนาดตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.5 เมตร แทรกตัดผ่านชั้นหินและชั้นหินคดโค้งในพื้นที่ศึกษา โดยรอยแตกมีค่าการวางตัว $90^{\circ}/80^{\circ}\text{S}$ นอกจากนี้ยังพบการเลื่อนตัวของผนังหินแอนดีไซต์ตามการเลื่อนตัวของชั้นหินหรือการไถลระหว่างชั้นหินคดโค้ง (Flexural-slip fold)



รูปที่ 3.19 ภาพรวมของพื้นที่ศึกษา C (Zone: C) วางตัวในแนวเหนือ-ใต้เป็นบริเวณที่พบรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ซึ่งแบบทั้งรอยแตกและผนังหินแอนดีไซต์ที่แทรกตัดผ่านชั้นหินและชั้นหินคดโค้งในพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 3.20 รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ซึ่งแบบทั้งรอยแตกและผนังหินแอนดีไซต์ที่แทรกตัดผ่านชั้นหินและชั้นหินคดโค้งในพื้นที่ศึกษาและผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับบริเวณพื้นที่ศึกษา



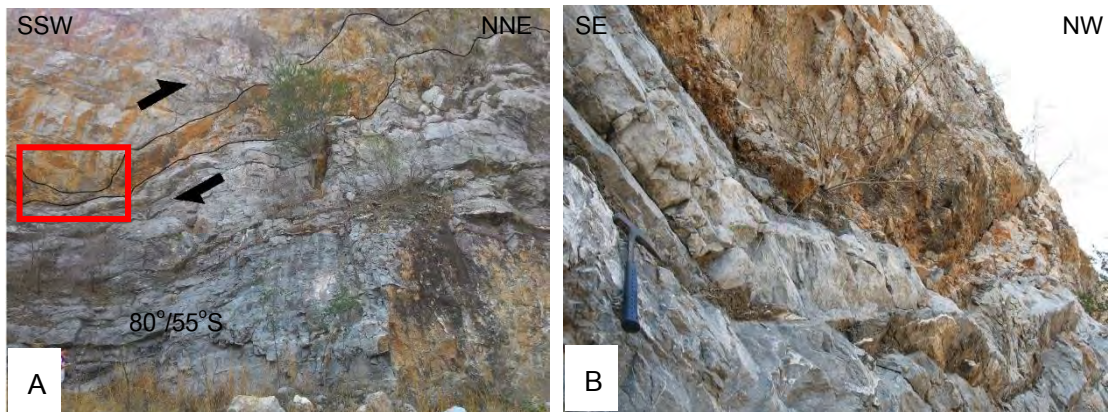
รูปที่ 3.21 รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ซึ่งแบบทั้งรอยแตกและผนังหินแอนดีไซต์ที่แทรกตัดผ่านชั้นหินและชั้นหินคดโค้งในพื้นที่ศึกษาและพบการเลื่อนตัวของผนังหินแอนดีไซต์ ตามการเลื่อนตัวของชั้นหิน

2) โครงสร้างรอยเลื่อน (Fault)

จากการสำรวจภาคสนามบริเวณพื้นที่ศึกษา A พบลักษณะของรอยเลื่อนย้อน โดยมีระนาบรอยเลื่อน (Fault plane) วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ นอกจากนี้ยังพบหลักฐานของเซทเตอร์มาร์ค (Chatter mark) รอยไถล (Slicken line) ซึ่งบอกลักษณะทิศทางการเคลื่อนไถลของระนาบรอยเลื่อน และหินกรวดเหลี่ยมรอยเลื่อน (Fault breccia)

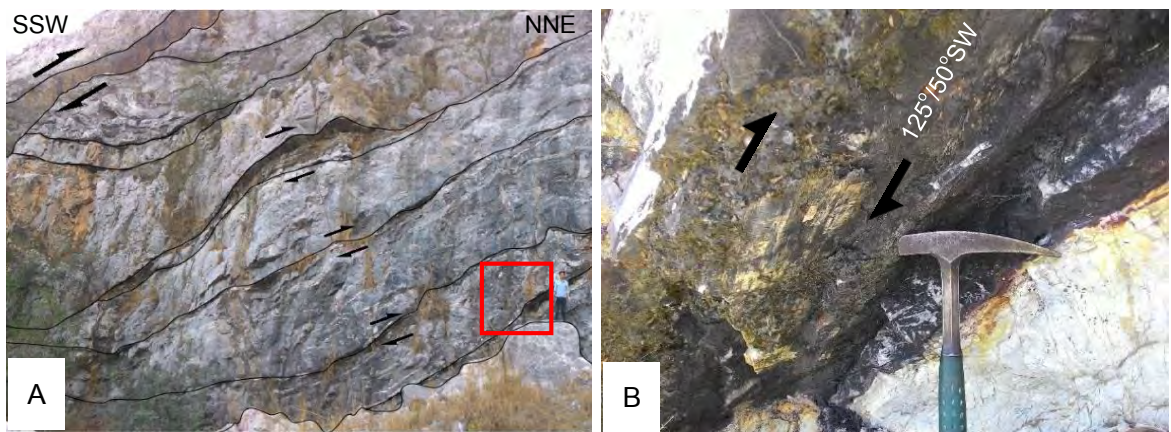


รูปที่ 3.22 ภาพรวมของพื้นที่ศึกษา A (Zone: A) พบเป็นหินปูนโดยชั้นหินมีค่าการวางตัวในแนวตะวันออกเฉียง-ตะวันตก และพบลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่เด่นชัดคือรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (เส้นประสีแดง)



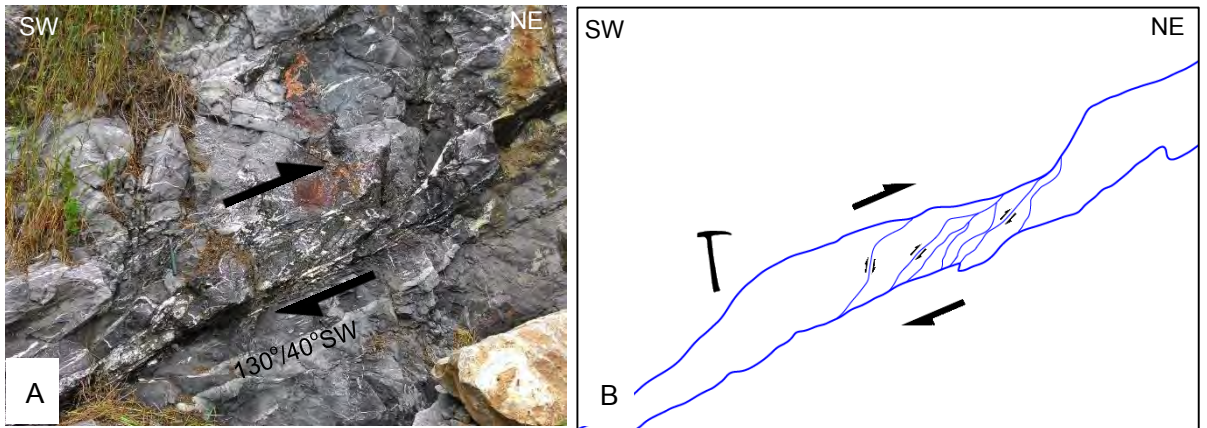
รูปที่ 3.23 การวางตัวของชั้นหินและระนาบของรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำในบริเวณพื้นที่ศึกษา A (รูป A) และภาพขยายจากรูป A (กรอบสีแดง) แสดงระนาบรอยเลื่อนและหินกรวดเหลี่ยมรอยเลื่อน (รูป B)

นอกจากนี้ยังพบการไถลระหว่างชั้นหินคดโค้ง (Flexural-slip fold) โดยพบรอยไถล (Slicken line) และระนาบรอยเลื่อน (Fault plane) รวมไปถึงเชตเตอร์มาร์ค (Chatter mark) บริเวณใกล้เคียงกับรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ ระหว่างชั้นหินคดโค้งวัดค่าการวางตัวของรอยเลื่อนได้ $125^{\circ}/50^{\circ}\text{SW}$ ซึ่งมีทิศทางที่สัมพันธ์กับระนาบรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำโดยพบว่ามีทิศทางการเลื่อนตัวมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งการไถลระหว่างชั้นหินคดโค้งเกิดได้ทั้งจากการแอ่นตัว (Bending) จากแรงอัดตั้งฉากกับชั้นหิน และการคดโค้งแบบโก่งตัว (Buckling) จากแรงอัดขนานกับชั้นหินและในพื้นที่ศึกษาพบการแทรกสลัของหินดินดานระหว่างรอยต่อของชั้นหิน



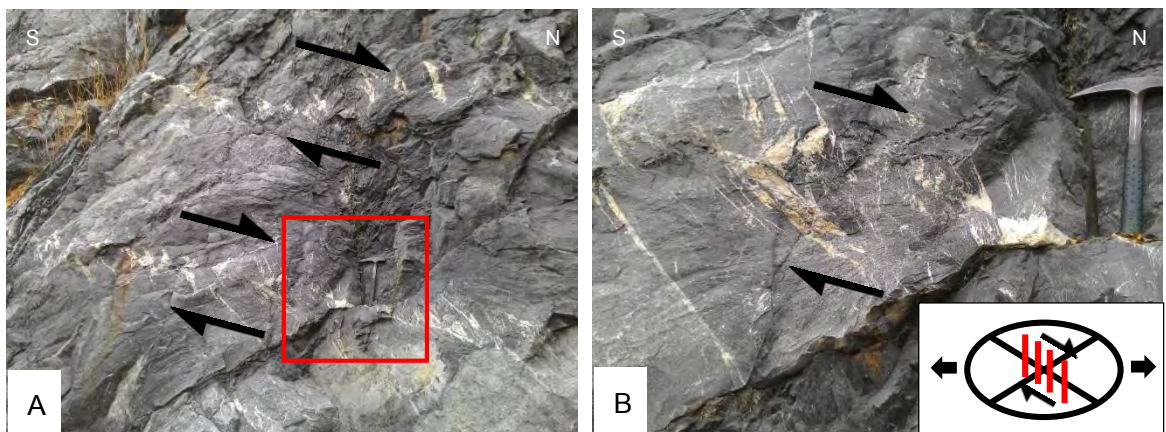
รูปที่ 3.24 การไถลระหว่างชั้นหินคดโค้ง (Flexural-slip fold) (รูป A) และภาพถ่ายจากกรอบสี่เหลี่ยมสีแดงรูป A พบรอยไถล (Slicken line) และระนาบรอยเลื่อน (Fault plane) รวมไปถึงเชตเตอร์มาร์ค(Chatter mark) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของระนาบรอยเลื่อนในแนวตะวันตกเฉียงใต้-ตะวันออกเฉียงเหนือ (รูป B)

รอยเลื่อนย้อนแบบก่ายทับ (Duplex thrust fault) แสดงลักษณะของโครงสร้างรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ ที่มีระนาบรอยเลื่อนขนานด้านบนและด้านล่าง (Floor thrust and roof thrust) โดยจะมีระนาบรอยเลื่อนย้อนขนาดเล็กซ้อนกันอยู่ในระหว่างกลาง ดังนั้นมวลหินภายใต้รอยเลื่อนเหล่านี้จึงถูกล้อมรอบด้วยระนาบรอยเลื่อน วัดค่าระนาบการเลื่อนตัวได้เป็น $130^{\circ}/40^{\circ}\text{SW}$ ซึ่งสัมพันธ์กับการไถลระหว่างชั้นหินคดโค้ง (Flexural-slip fold) และรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำในบริเวณพื้นที่ศึกษา A (Zone: A)



รูปที่ 3.25 รอยเลื่อนย้อนแบบก่ายทับ (Duplex thrust fault) แสดงลักษณะการเลื่อนตัวแบบรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ ที่มีระนาบรอยเลื่อนขนานด้านบนและด้านล่าง (floor thrust and roof thrust) โดยจะมีระนาบรอยเลื่อนย้อนขนาดเล็กซ้อนเกยกันอยู่ในระหว่างกลาง

รอยเลื่อนแบบเรียงตัวเป็นระยะๆ (En echelon faults) คือกลุ่มรอยเลื่อนที่มีระนาบรอยแตกขนานกับแนวระดับ โดยเรียงตัวกันเป็นระยะ ๆ เกิดเป็นแนวการเลื่อนแบบสั้น ๆ แสดงลักษณะของการเลื่อนตัวแบบรอยเลื่อนปกติ โดยการวางตัวของระนาบรอยเลื่อนมีค่า $200^{\circ}/35^{\circ}W$ และพบการแทรกของสารแร่แคลไซต์ในรอยแตกที่แสดงทิศทางของแรงดึงออกและทิศทางการเลื่อนตัวของชั้นหิน

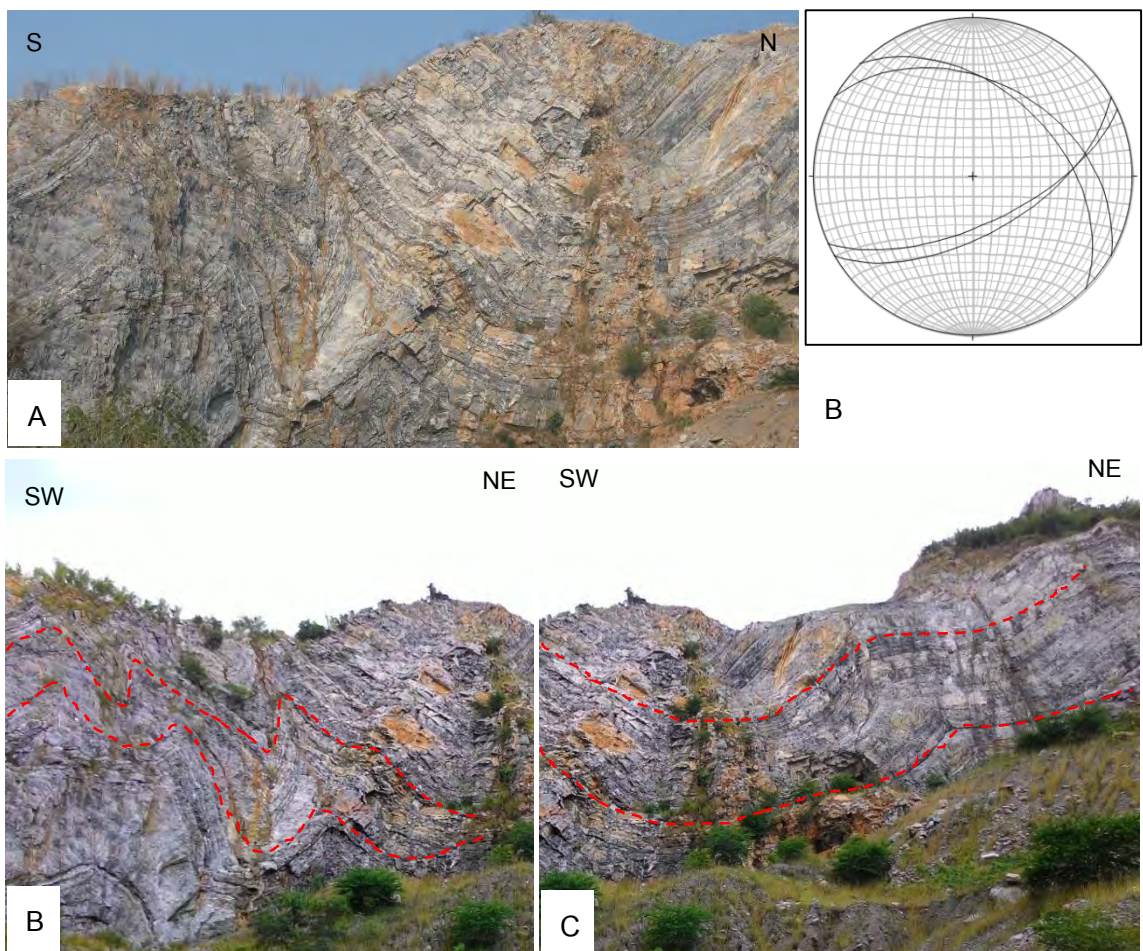


รูปที่ 3.26 รอยเลื่อนแบบเรียงตัวเป็นระยะๆ (En echelon faults) ที่แสดงการเลื่อนตัวแบบรอยเลื่อนปกติ (รูป A) และภาพถ่ายจากกรอบสี่เหลี่ยมสีแดงรูป A แสดงให้เห็นถึงการแทรกของสารแร่แคลไซต์ในรอยแตกที่แสดงทิศทางของแรงดึงออกและทิศทางการเลื่อนตัวของชั้นหินแสดงในทรงรีความเครียด (Strain ellipsoid) (รูป B)

3.2.1.3 การเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่ม (Ductile deformation)

ชั้นหินคดโค้ง (Fold)

ชั้นหินคดโค้งที่มีมุมแคบถึงมุมกว้าง (Chevron – gentle folds) โดยพบภาพตัดขวางของชั้นหินคดโค้ง (Fold profile) แสดงให้เห็นในแนวเหนือ-ใต้ แนวการวางตัวของชั้นหินคดโค้งวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตกเป็นหลักและวัดค่าการวางตัวส่วนข้างหรือแขนของชั้นหินคด ได้เป็น $60^{\circ}/70^{\circ}\text{SE}$ และ $300^{\circ}/40^{\circ}\text{NE}$ โดยมีแขนชั้นหินคดโค้งกวางน้อยและมีมุมแคบมีลักษณะแบบหน้าจั่ว (Chevron fold) จนถึงแขนชั้นหินคดโค้งกวางมาก (Gentle fold)

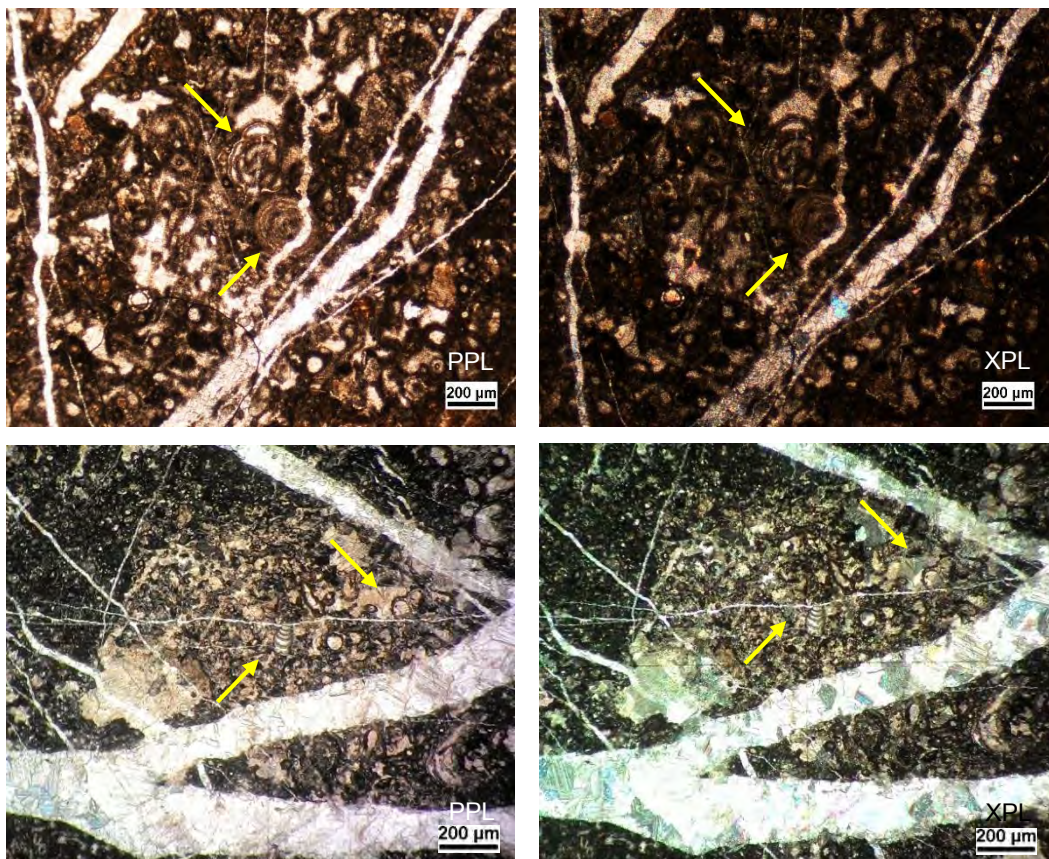


รูปที่ 3.27 ภาพรวมแนวชั้นหินคดโค้งบริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป A), ผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับบริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป B), บริเวณที่พบชั้นหินคดโค้งที่มีมุมแคบ โดยมีแขนชั้นหินคดโค้งกวางน้อยมีลักษณะแบบหน้าจั่ว (Chevron fold) (รูป C) และบริเวณที่พบชั้นหินคดโค้งที่มีมุมกว้าง โดยมีแขนชั้นหินคดโค้งกวางมาก (Gentle fold) (รูป D)

3.2.2 ธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาค (Microscopic scale)

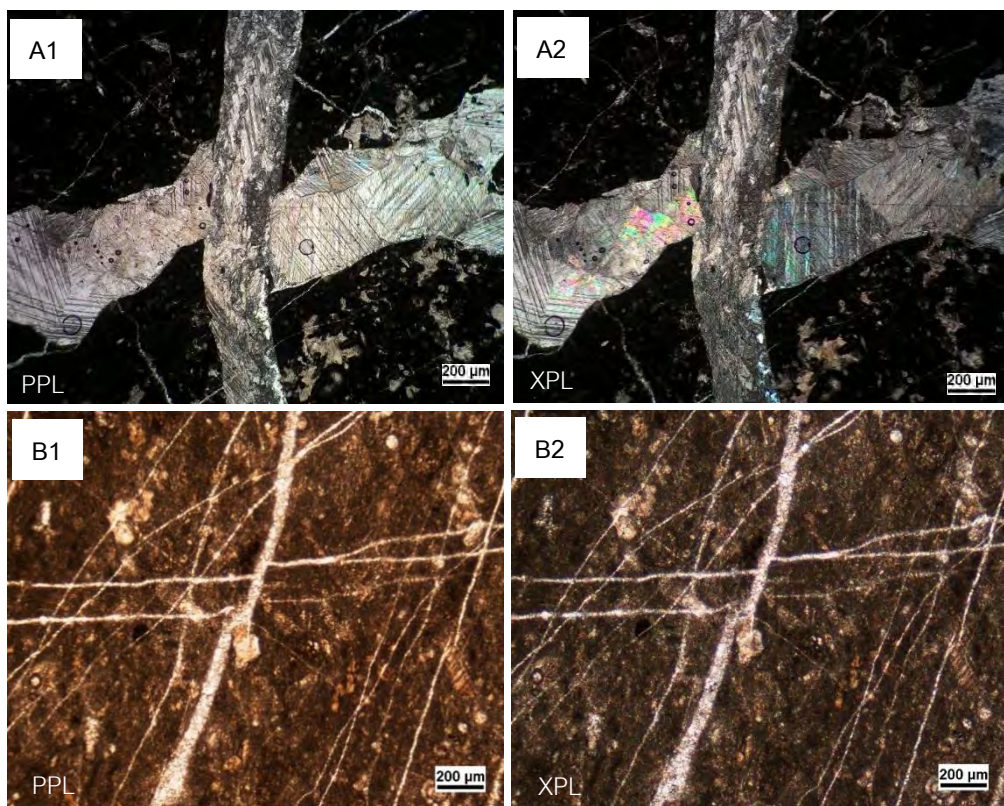
ธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาคในแผ่นหินขัดบางจากตัวอย่างหินระบุตำแหน่งที่เก็บมาจากพื้นที่ศึกษา โดยจะนำมาศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับจุลภาค รวมไปถึงการศึกษาซิลลาวรรณภาพใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ ทำให้ทราบถึงกลไกของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหินในพื้นที่ศึกษา ซึ่งการวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับจุลภาคนี้ยังสามารถนำไปใช้สนับสนุนการวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับกลางและวิวัฒนาการของการแปรสัณฐานในพื้นที่ศึกษา

ตัวอย่างหินระบุตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี ส่วนใหญ่เป็นหินปูนประเภทหินปูนไบโอแคลสติก (Bioclastic limestone) หรือแพคสโตน (Packstone) ถึงเกรนสโตน (Grainstone) ตามจากจำแนกของ Dunham (1962) เนื่องจากเป็นหินปูนที่พบฟอสซิลเช่นฟอรามินิเฟอร่า (Foraminifera) และฟิวซิลินิด (Fusulinid) และแสดงลักษณะรอยแตกในลักษณะของสายแร่แคลไซต์ (Calcite vein)



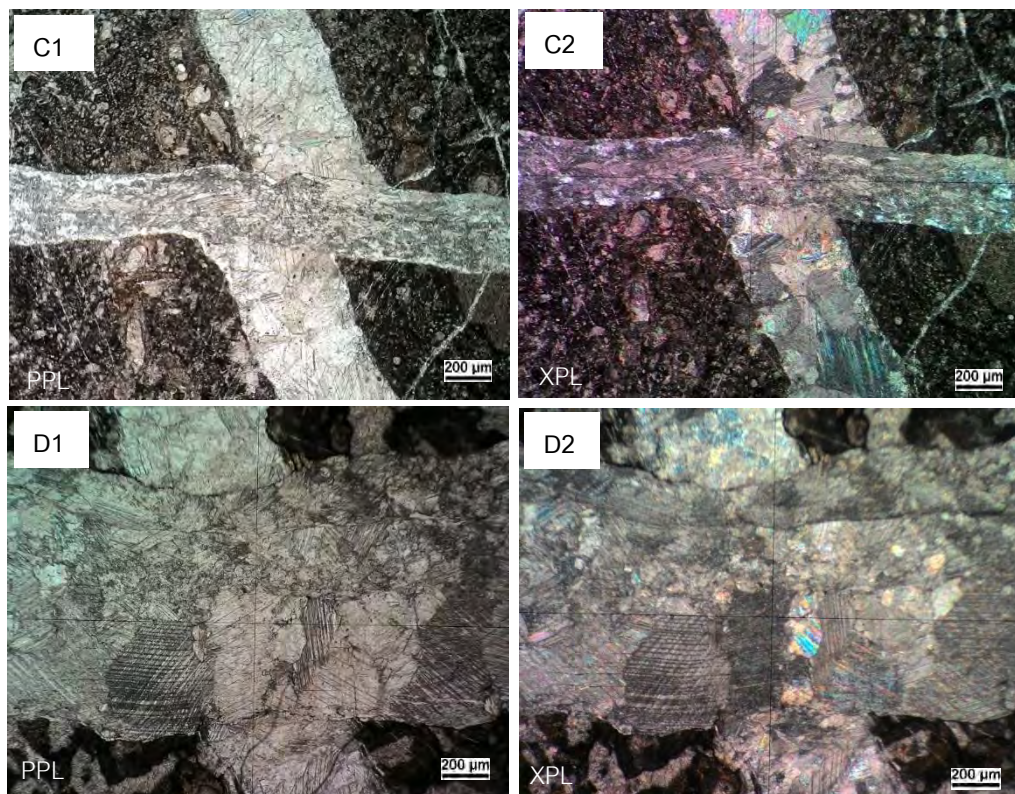
รูปที่ 3.28 หินปูนไบโอแคลสติก (Bioclastic limestone) หรือแพคสโตน (Packstone) ถึงเกรนสโตน (Grainstone) ตามจากจำแนกของ Dunham (1962) และพบรอยแตกเป็นสายแร่แคลไซต์

ธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาคที่พบในพื้นที่ศึกษาพบเป็นลักษณะของสายแร่ที่มีการตัดกันจากการศึกษาพบว่าเกิดรอยแตกที่เกิดก่อนจากการเปิดของอกรอยแตกโหมด 1 แบบเปิด (Mode 1: Opening fracture) หรือการแตกเปราะ (Brittle fracturing) หลังจากนั้นพบว่ามีสายแร่แคลไซต์เข้ามาตกผลึก ทำให้เนื้อหินมีลักษณะที่เหมือนกัน (Homogeneous) จึงถูกตัดโดยรอยแตกที่เกิดขึ้นภายหลังเรียกความสัมพันธ์นี้ว่าการตัดกันของหิน (Cross-cutting relationship) และสายแร่ที่มีการตัดกันแล้วเกิดการเลื่อนตัวออกเล็กน้อยเรียกว่ารอยแตกเฉือน (Shear fracture) ซึ่งหลักฐานนี้สามารถบอกได้ถึงอายุสัมพัทธ์ (Relative age) ซึ่งเป็นลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับจุลภาคที่สำคัญที่พบมากในพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 3.29 ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์แสดงการตัดกันของสายแร่แคลไซต์ของรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) ตัดผ่านรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) (รูป A1,PPL และ A2,XPL), รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ตัดผ่านรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) (รูป B1,PPL และ B2, XPL)

การตัดกันของสายแร่แคลไซต์ (Calcite vein) ของรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) ตัดผ่านรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) จากตัวอย่างหินระบุตำแหน่งในบริเวณพื้นที่ศึกษา B บริเวณตำแหน่งเขตพับการคดโค้ง, รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ตัดผ่านรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) จากตัวอย่างหินระบุตำแหน่งในบริเวณพื้นที่ศึกษา B บริเวณตำแหน่งเขตพับการคดโค้ง และรอยแตกในระดับ (Sub-horizontal fracture) ตัดผ่านรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) จากตัวอย่างหินระบุตำแหน่งในบริเวณพื้นที่ศึกษา B บริเวณตำแหน่งเขตพับการคดโค้ง และรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) จากตัวอย่างหินระบุตำแหน่งในบริเวณพื้นที่ศึกษา C บริเวณตำแหน่งชั้นหินที่ใกล้เคียงกับระนาบรอยเลื่อนในส่วนของหินพื้น



รูปที่ 3.30 ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์แสดงการตัดกันของสายแร่แคลไซต์ของรอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) ตัดผ่านรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Radial fracture) (รูป C1,PPL และ C2,XPL), รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) ตัดผ่านรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) (รูป D1,PPL และ D2, XPL)

บทที่ 4 อภิปรายผลการศึกษา (Discussion)

จากการศึกษาใน 2 ระดับได้แก่ ระดับกลาง (Mesoscopic scale) และระดับจุลภาค (Microscopic scale) ได้ผลการศึกษาจากภาคสนามและการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคมารวมและอภิปรายได้เป็นลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตก (Structural style of fracture) และวิวัฒนาการทางธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตก (Structural evolution of fracture) ของหมวดหินเขาขาดบริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี รวมถึงวิวัฒนาการธรณีแปรสัณฐาน (Tectonic evolution) บริเวณพื้นที่ศึกษา

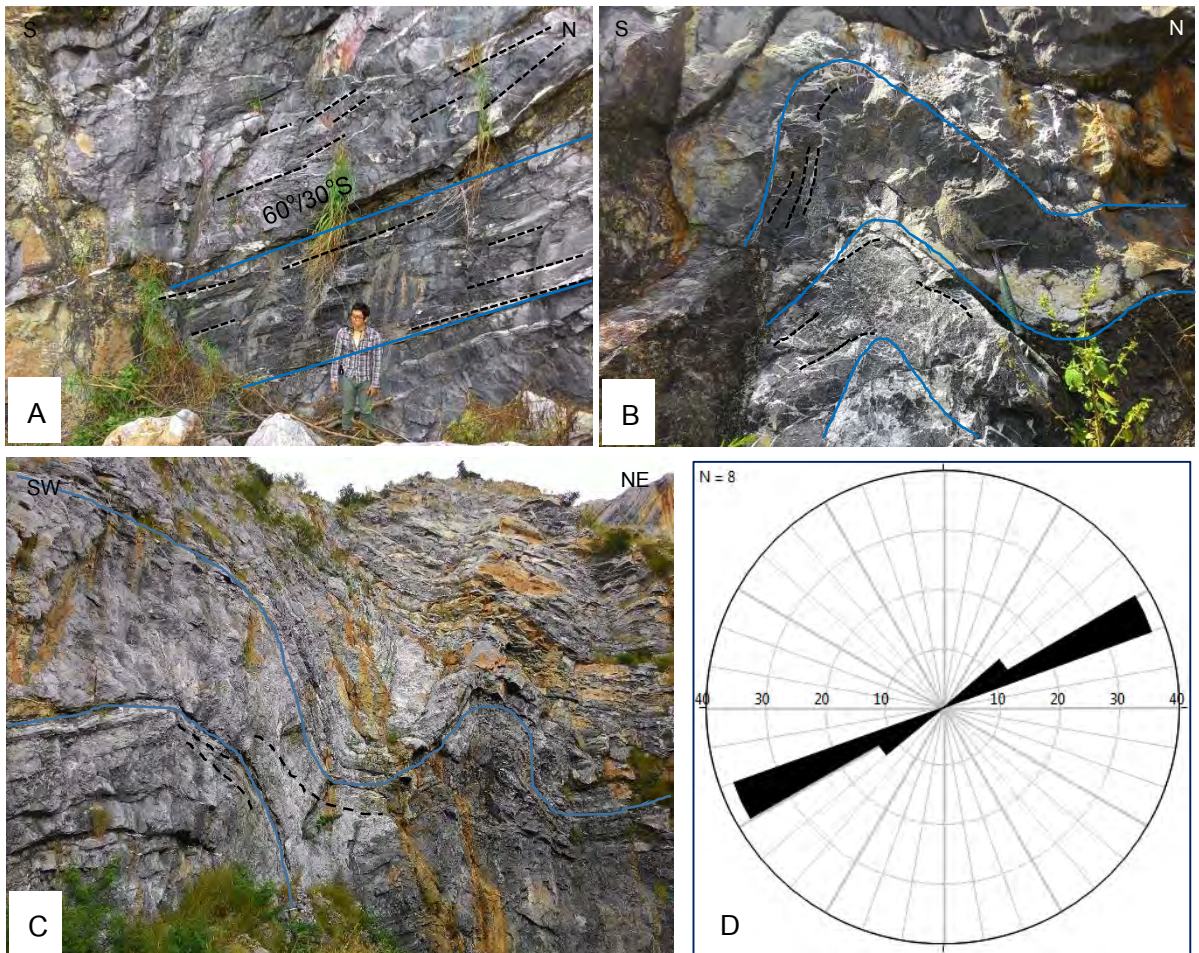
4.1 ลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตก (Structural style of fracture)

จากหลักฐานที่พบจากการสำรวจภาคสนามในพื้นที่ศึกษา ที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ (Brittle deformation) ได้เป็นรอยแตก 4 ระบบที่สามารถจำแนกอย่างเห็นได้ชัด แบ่งออกได้เป็น รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) โดยมีทิศทางการวางตัวหลักอยู่ในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) บริเวณเขตพับการคดโค้ง โดยมีแกนของชั้นหินคดโค้งวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก ทิศทางการวางตัวหลักของแกนชั้นหินคดโค้ง ในแนวตะวันออก-ตะวันตก รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) มีทิศทางการวางตัวหลักในแนวเหนือ-ใต้และแนวตะวันออก-ตะวันตก และรอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) มีทิศทางการวางตัวหลักอยู่ในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้

นอกจากนี้ยังพบรอยเลื่อนย้อนและพบการไถลระหว่างชั้นหินคดโค้ง โดยพบรอยเลื่อนที่พบมีลักษณะเป็นรอยเลื่อนที่มีการเลื่อนตัวตามแนวเฉียงเท (Dip-slip fault) พบเป็นรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ โดยมีระนาบรอยเลื่อนในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้

4.1.1 โครงสร้างรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture)

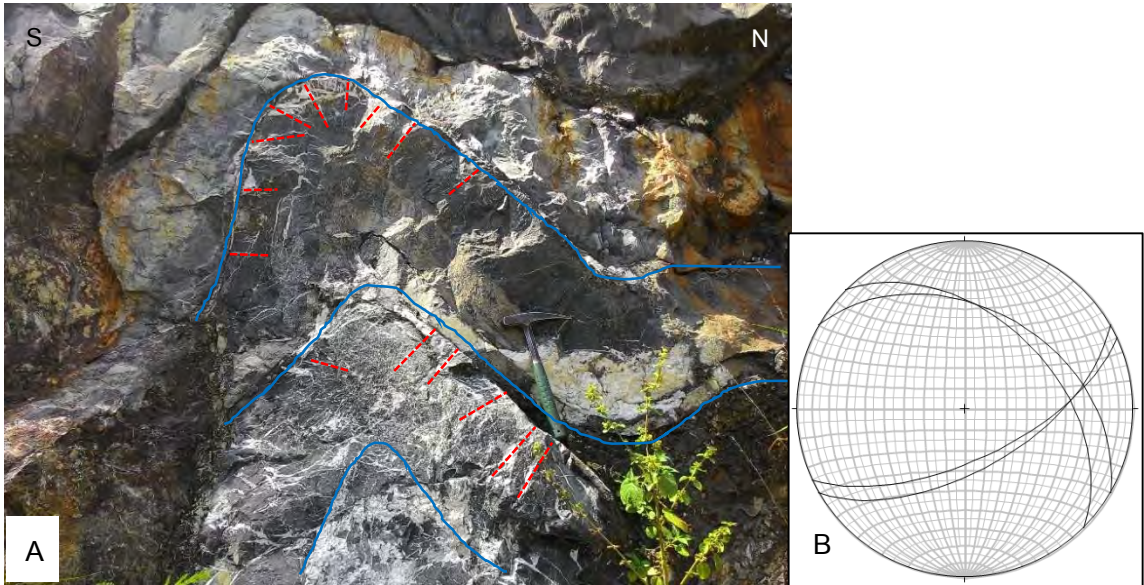
ความหนาแน่นกระจายตัวของรอยแตกที่ขนานกับชั้นหินในพื้นที่ศึกษาแสดงแนวรอยแตกที่โดดเด่นอย่างเห็นได้ชัดคือแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ พบเป็นรอยแตกที่วางตัวขนานกับชั้นหินและพบว่าบางบริเวณมีการคดโค้งของรอยแตกตามการคดโค้งของชั้นหินคดโค้ง



รูปที่ 4.1 โครงสร้างรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) พบเป็นรอยแตกที่วางตัวขนานกับชั้นหินและพบว่าบางบริเวณมีการคดโค้งของรอยแตกตามการคดโค้งของชั้นหินคดโค้ง (รูป A-C) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแผนภาพกุหลาบ บริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป D) โดยมีการวางตัวของรอยแตกในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้

4.1.2 โครงสร้างรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture)

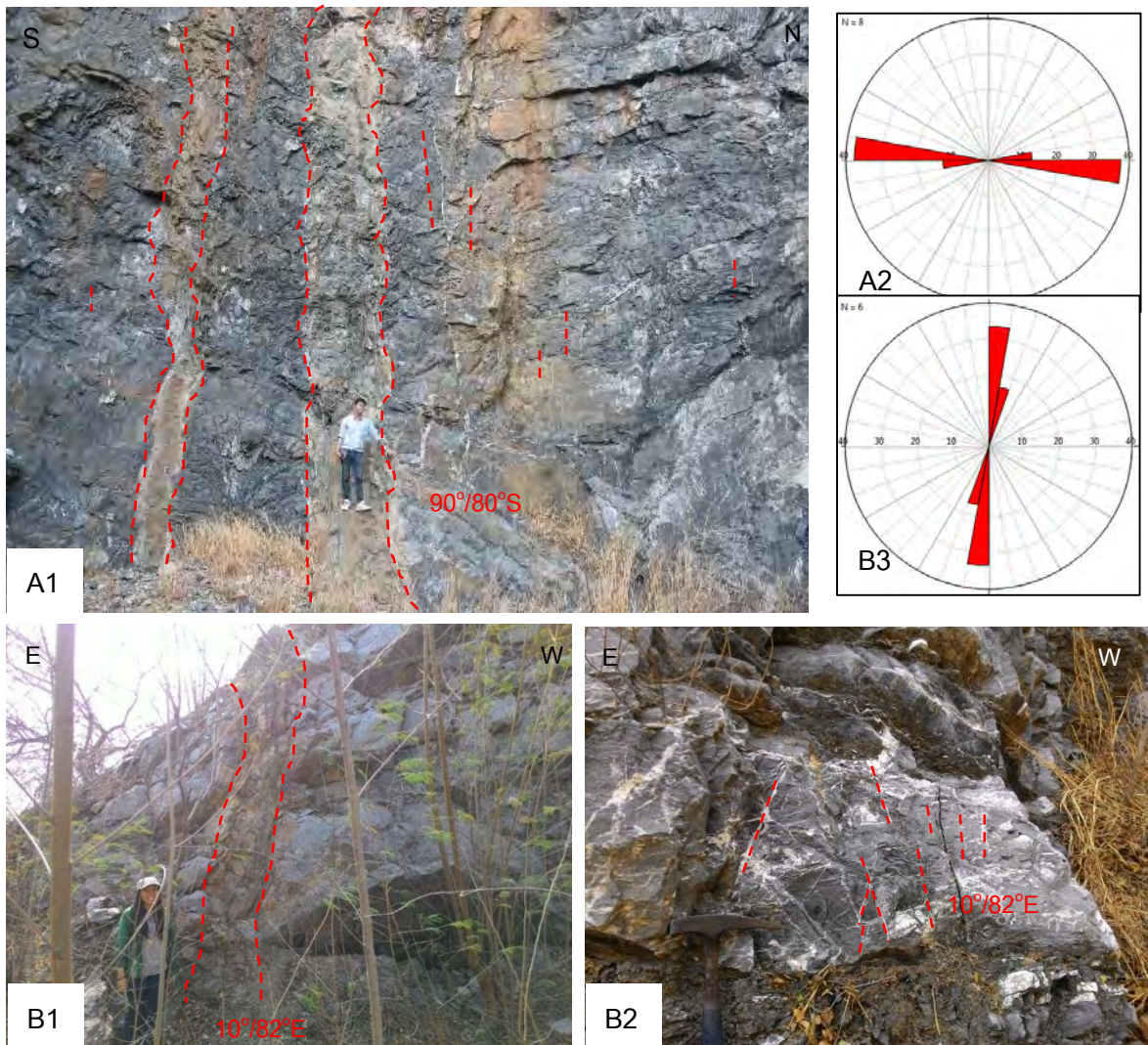
ความหนาแน่นกระจายตัวของรอยแตกที่ขนานกับชั้นหินในพื้นที่ศึกษาแสดงแนวรอยแตกที่สัมพันธ์กับการวางตัวของชั้นหินคดโค้ง มีทิศทางการวางตัวของรอยแตกสัมพันธ์กับแกนชั้นหินคดโค้งในแนวตะวันออก-ตะวันตก โดยความหนาแน่นกระจายตัวของรอยแตกที่ขนานกับชั้นหินที่โดดเด่นอย่างเห็นได้ชัดคือแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้



รูปที่ 4.2 โครงสร้างรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) พบเป็นรอยแตกที่สัมพันธ์กับชั้นหินคดโค้งบริเวณเขตพับการคดโค้ง มีลักษณะของรอยแตกที่มีทิศทางการแผ่ของรอยแตกเข้าหาจุดศูนย์กลางการคดโค้ง พบว่าแกนชั้นหินคดโค้ง มีการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก จากการกำหนดค่าการวางตัวของแกนชั้นหินคดโค้งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่า

4.1.3 โครงสร้างรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture)

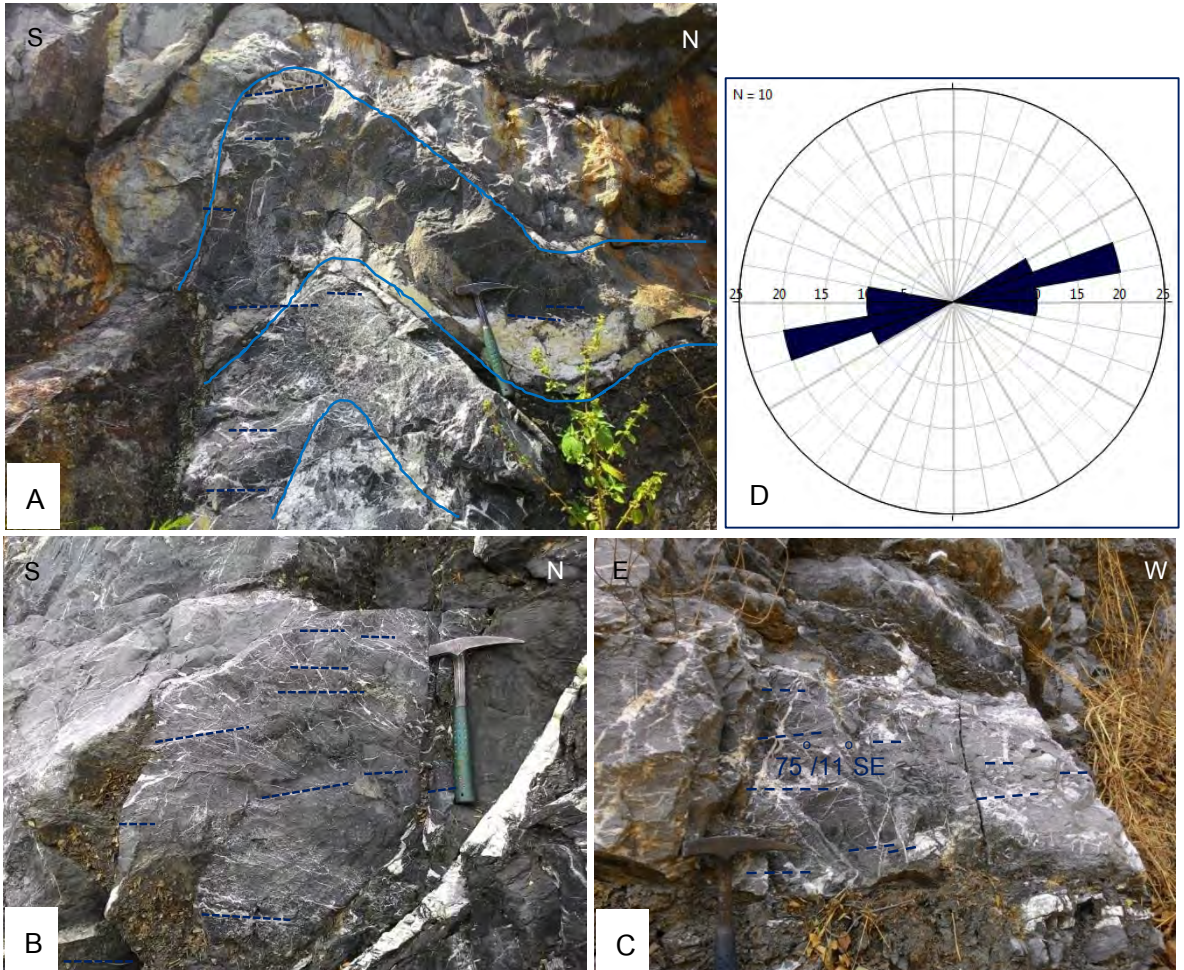
ความหนาแน่นกระจายตัวของรอยแตกในแนวตั้งและผนังหินแอนดีไซต์ในพื้นที่ศึกษา แสดงแนวรอยแตกที่โดดเด่นอย่างเห็นได้ชัดคือแนวเหนือ-ใต้ และแนวตะวันออก-ตะวันตก



รูปที่ 4.3 โครงสร้างรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) และผนังหินแอนดีไซต์ พบเป็นรอยแตกที่ตัดผ่านชั้นหินและชั้นหินคดโค้ง โดยมีทิศทางการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแผนภาพกู่หลาบ บริเวณพื้นที่ศึกษา C (Zone: C) (รูป A1-2) และรอยแตกที่มีทิศทางการวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแผนภาพกู่หลาบ บริเวณพื้นที่ศึกษา A (Zone: A) (รูป B1-3)

4.1.4 โครงสร้างรอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture)

ความหนาแน่นกระจายตัวของรอยแตกในแนวระดับพื้นที่ศึกษาแสดงแนวรอยแตกที่โดดเด่นอย่างเห็นได้ชัดคือแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้และสัมพันธ์กับการเกิด เกิดเป็นรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ และรอยเลื่อนย้อนแบบก่ายทับ



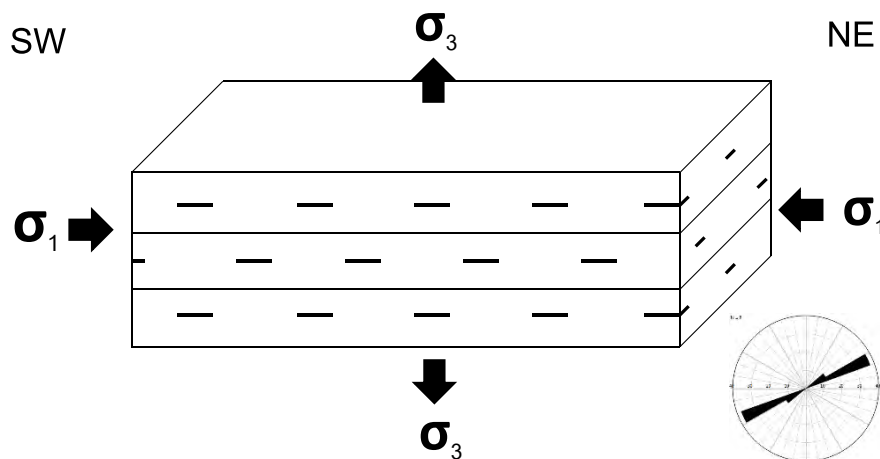
รูปที่ 4.4 โครงสร้างรอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) พบเป็นรอยแตกที่ทำมุมกับแนวระดับที่มีค่าเอียงเพียงเล็กน้อยมาก (รูป A-C) และผลการกำหนดตำแหน่งค่าการวางตัวของรอยแตกในแผนภาพกุหลาบ บริเวณพื้นที่ศึกษา (รูป D) โดยมีการวางตัวของรอยแตกในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้

4.2 วิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตก (Fracture evolution of fracture)

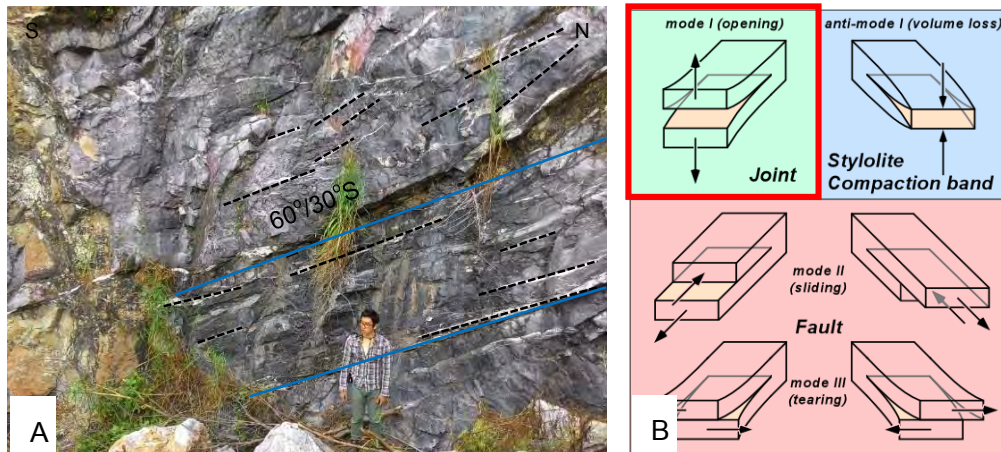
แบบจำลองของรูปแบบโครงสร้างของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี มี 4 ลำดับดังนี้

ลำดับที่ 1: การเริ่มมีแรงบีบอัดมากกระทำ (Stage 1: Begin compression)

หลังจากการสะสมตัวของตะกอนในพื้นที่ บริเวณเขตทะเลน้ำตื้น (Shallow marine) หรือ ลานสะสมตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate platform) เกิดเป็นหินปูนเป็นหินท้องที่ และมีแรงบีบอัด (Compression) มากกระทำขนานกับชั้นหินในพื้นที่ในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้เกิดแรงดึงออก (Tension) ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแรงบีบอัด ทำให้หินปูนเกิดรอยแตกขึ้นโดยเกิดการเปิดออกของรอยแตกโหมด 1 แบบเปิด (Mode 1: Opening fracture) เกิดเป็นรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) ที่มีทิศทางการวางตัวในแนวตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันออกเฉียงเหนือขึ้น



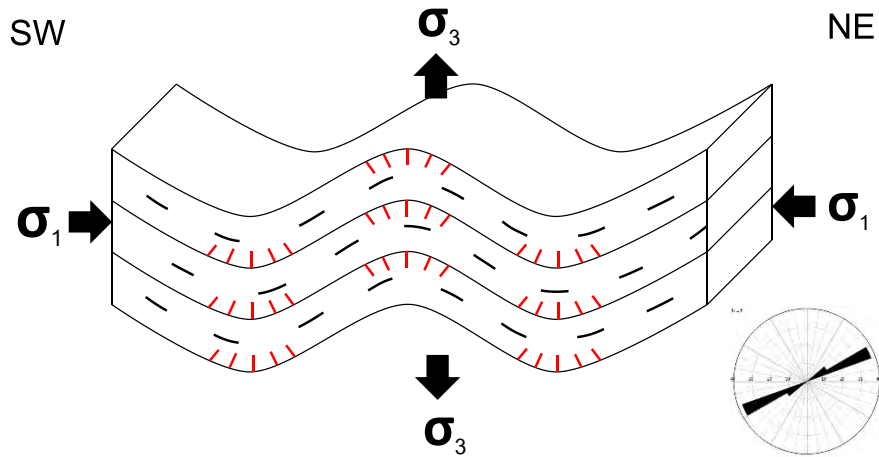
รูปที่ 4.5 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างลำดับที่ 1: การเริ่มมีแรงบีบอัดมากกระทำ (Stage 1: Begin compression) ในทิศทางที่ขนานกับชั้นหินในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้เกิดแรงดึงออก (Tension) ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแรงบีบอัด ทำให้หินปูนเกิดรอยแตกขึ้นโดยเกิดการเปิดออกของรอยแตกโหมด 1 แบบเปิด (Mode 1: Opening fracture) เกิดเป็นรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture)



รูปที่ 4.6 รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) ที่พบในพื้นที่ศึกษา (เส้นสีดำ) ที่มีการวางตัวขนานกับชั้นหิน (เส้นสีฟ้า) (รูป A) และการเปิดของรอยแตกแบบโหมด 1 แบบเปิดกรอบสีแดง, รูป B) (Available at: URL:<http://www.naturalfractures.com/1.htm>. Accessed May 3, 2015)

ลำดับที่ 2: การเกิดชั้นหินคดโค้ง (Stage 2: Folding)

หลังจากมีแรงมากระทำต่อชั้นหินอย่างต่อเนื่อง ทำให้ชั้นหินเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อหินแบบอ่อนนุ่ม (Ductile deformation) เกิดเป็นชั้นหินคดโค้งขึ้น และทำให้รอยแตกที่เกิดขึ้นในช่วงลำดับที่ 1 หรือรอยแตกที่ขนานกับชั้นหินเกิดการคดโค้งตามการคดโค้งของชั้นหินคดโค้ง และนอกจากนี้ยังเกิดรอยแตกระบบที่ 2 คือรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) พบเป็นรอยแตกที่สัมพันธ์กับชั้นหินคดโค้งบริเวณเขตพับการคดโค้ง มีลักษณะของรอยแตกที่มีทิศทางขวางแผ่ของรอยแตกเข้าหาจุดศูนย์กลางการคดโค้ง (Radial pattern) โดยมีทิศทางวางตัวของรอยแตกสัมพันธ์กับแกนชั้นหินคดโค้งในแนวตะวันออก-ตะวันตก พบว่ามีแรงมากระทำกับชั้นหินในแนวเหนือ-ใต้ รอยแตกที่เกิดขึ้นบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) บริเวณเขตพับการคดโค้งเป็นบริเวณที่แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะได้ดี เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความแข็งแรงต่ำเมื่อถูกแรงบีบอัดจึงเกิดรอยแตกขึ้น นอกจากนี้ยังพบการตัดกันของรอยแตกในช่วงนี้ ตัดกับรอยแตกที่เกิดขึ้นในลำดับก่อนหน้า คือรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) ตัดรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) บริเวณชั้นหินคดโค้ง



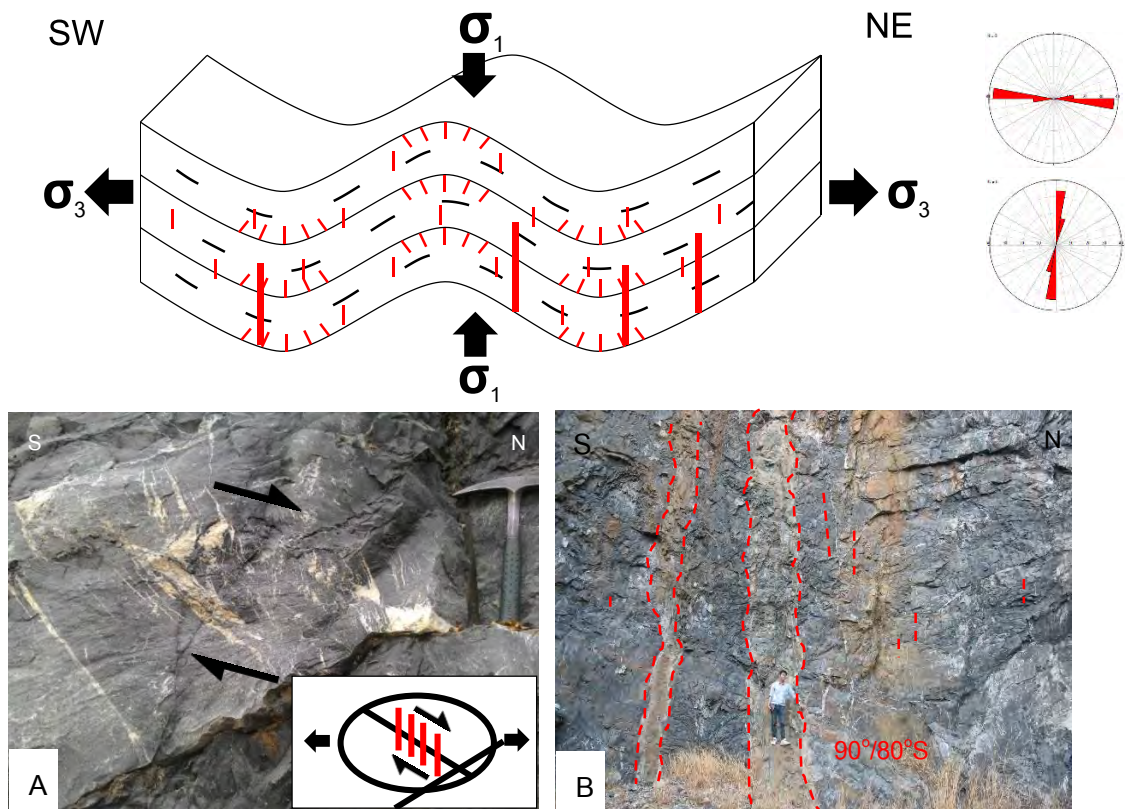
รูปที่ 4.7 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างลำดับที่ 2: การเกิดชั้นหินคดโค้ง (Stage 2: Folding) ในแนวแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้รอยแตกที่เกิดในช่วงลำดับที่ 1 หรือรอยแตกที่ขนานกับชั้นหินเกิดการคดโค้งตามการคดโค้งของชั้นหินคดโค้ง และนอกจากนี้ยังเกิดรอยแตกระบบที่ 2 คือรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture)



รูปที่ 4.8 การตัดกันของรอยแตกในวิวัฒนาการโครงสร้างลำดับที่ 2 การตัดกันของรอยแตกในช่วงนี้ ตัดกับรอยแตกที่เกิดขึ้นในลำดับก่อนหน้านี้นี้ คือรอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) (เส้นสีแดง) ตัดรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) และเกิดการคดโค้งตามชั้นหิน (เส้นสีดำ) บริเวณชั้นหินคดโค้ง

ลำดับที่ 3: การผ่อนคลายของการแปรสัณฐาน (Stage 3: Tectonic relaxation)

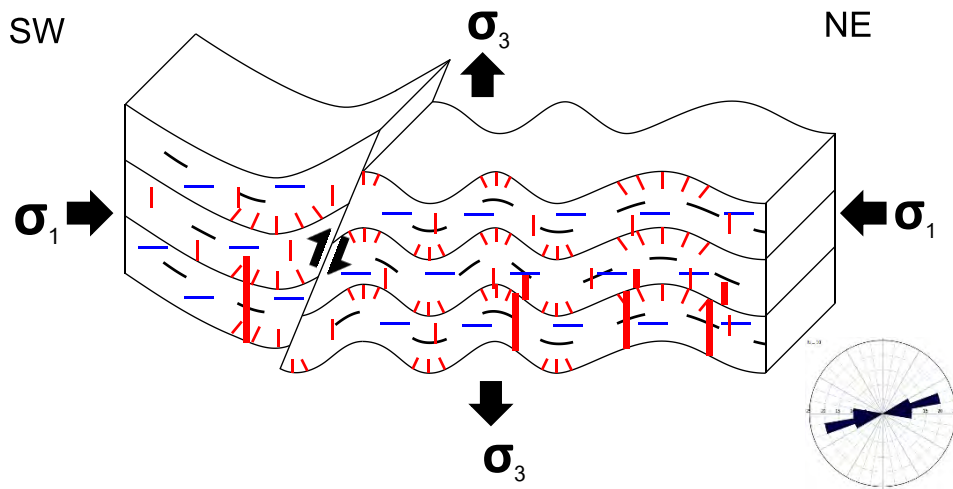
เมื่อมีแรงบีบอัดที่มากกระทำต่อพื้นที่ได้หยุดลง โดยระบบในช่วงนี้จะเป็นระบบแบบดึงออก (Tension) ในแนวเหนือ-ใต้ เกิดเป็นรอยเลื่อนแบบเรียงตัวเป็นระยะๆ (En echelon fault) เป็นแนวการเลื่อนแบบสั้น ๆ แสดงลักษณะของการเลื่อนตัวแบบรอยเลื่อนปกติ เกิดการแทรกตัดในแนวตั้งของหินภูเขาไฟตัดผ่านชั้นหินคดโค้งเกิดเป็นผนังหินแอนดีไซต์และเกิดรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) ขึ้นในช่วงนี้ ซึ่งรอยแตกที่เกิดขึ้นจะตัดผ่านรอยแตกที่เกิดขึ้นในลำดับก่อนหน้าคือ รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) และชั้นหินคดโค้ง โดยรอยแตกในแนวตั้งมีการวางตัวในแนวเหนือ-ใต้และแนวตะวันออก-ตะวันตก



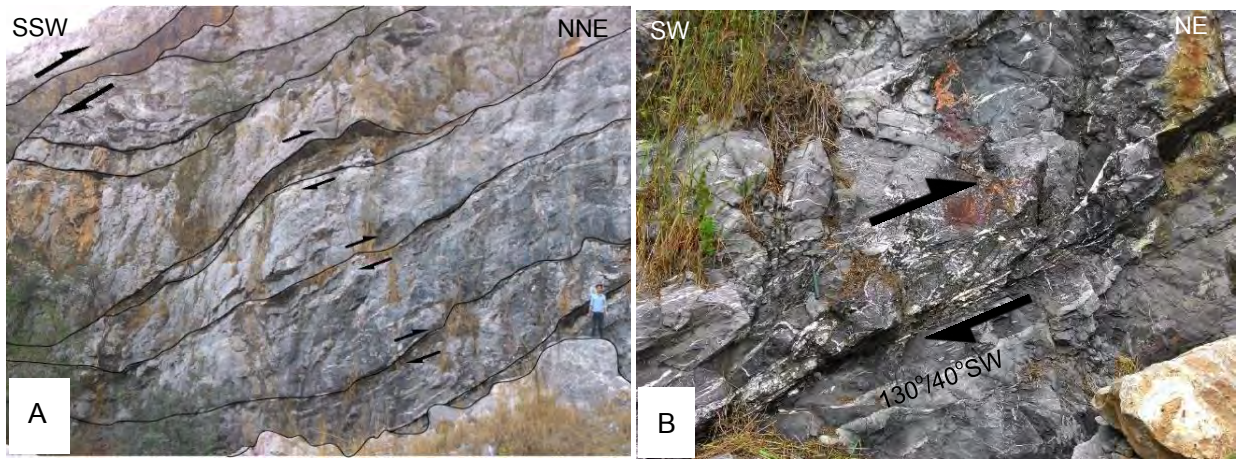
รูปที่ 4.9 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างลำดับที่ 3: การผ่อนคลายของการแปรสัณฐาน (Stage 3: Tectonic relaxation) โดยระบบในช่วงนี้จะเป็นระบบแบบดึงออก (Tension) เกิดการเลื่อนตัวแบบรอยเลื่อนปกติของ En echelon vein (รูป A) และเกิดการแทรกตัดในแนวตั้งของหินภูเขาไฟตัดผ่านชั้นหินคดโค้งเกิดเป็นผนังหินแอนดีไซต์และเกิดรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) (รูป B)

ลำดับที่ 4: การเกิดรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Stage 4: Thrusting)

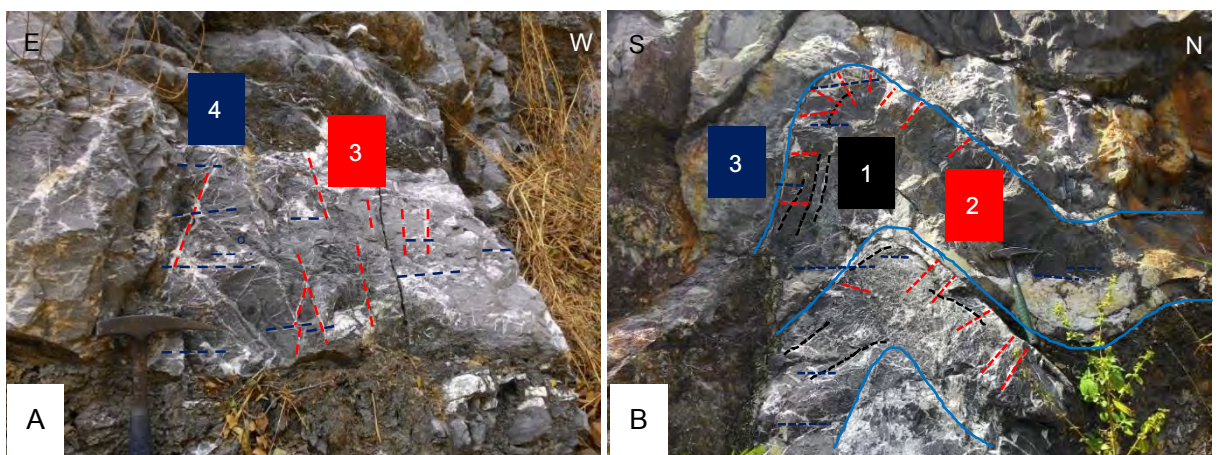
หลังจากเกิดการผ่นคลายของการแปรสัณฐานในพื้นที่ ได้เกิดแรงบีบอัด (Compression) มากกระทำต่อพื้นที่ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้อีกครั้งหนึ่ง และเมื่อชั้นหินไม่สามารถต้านต่อแรงบีบอัดที่มากกระทำได้ จึงเกิดการเลื่อนตัวของชั้นหินเกิดเป็นรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ รอยเลื่อนย้อนแบบก่ายทับ (Duplex thrust fault) และการโก่งระหว่างชั้นหินคดโค้ง (Flexural-slip fold) แสดงลักษณะของโครงสร้างรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเกิดขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกที่เกิดขึ้นคล้ายกับรอยแตกในลำดับที่ 1 คือรอยแตกที่มีแรงบีบอัด (Compression) มากกระทำขนานกับชั้นหิน ทำให้เกิดแรงดึงออก (Tension) ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแรงบีบอัด แต่ลักษณะของรอยแตกในช่วงนี้ที่แตกต่างช่วงนี้แรกคือ จะไม่ขนานไปกับชั้นหินเนื่องจากชั้นหินในพื้นที่ชั้นหินในพื้นที่เกิดการคดโค้งในลำดับก่อนหน้า จึงเกิดเป็นรอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) ขึ้น และพบว่ารอยแตกในแนวระดับตัดกับรอยแตกที่เกิดขึ้นก่อนหน้า คือรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture), รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) และรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture)



รูปที่ 4.10 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างลำดับที่ 4: การเกิดรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Stage 4: Thrusting) เกิดการเลื่อนตัวของชั้นหินเกิดเป็นรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ และรอยเลื่อนย้อนแบบก่ายทับ (Duplex thrust fault) ในช่วงนี้เกิดรอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) ขึ้น และพบว่ารอยแตกในแนวระดับตัดกับรอยแตกที่เกิดขึ้นก่อนหน้า คือรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture), รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) และรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture)



รูปที่ 4.11 การเคลื่อนตัวของชั้นหินเกิดเป็นรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Thrust fault) การไถลระหว่างชั้นหินคดโค้ง(Flexural-slip fold) (รูป A) รอยเลื่อนย้อนแบบก่ายทับ (Duplex thrust fault) (รูป B) ที่แสดงลักษณะของโครงสร้างรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเกิดขึ้น

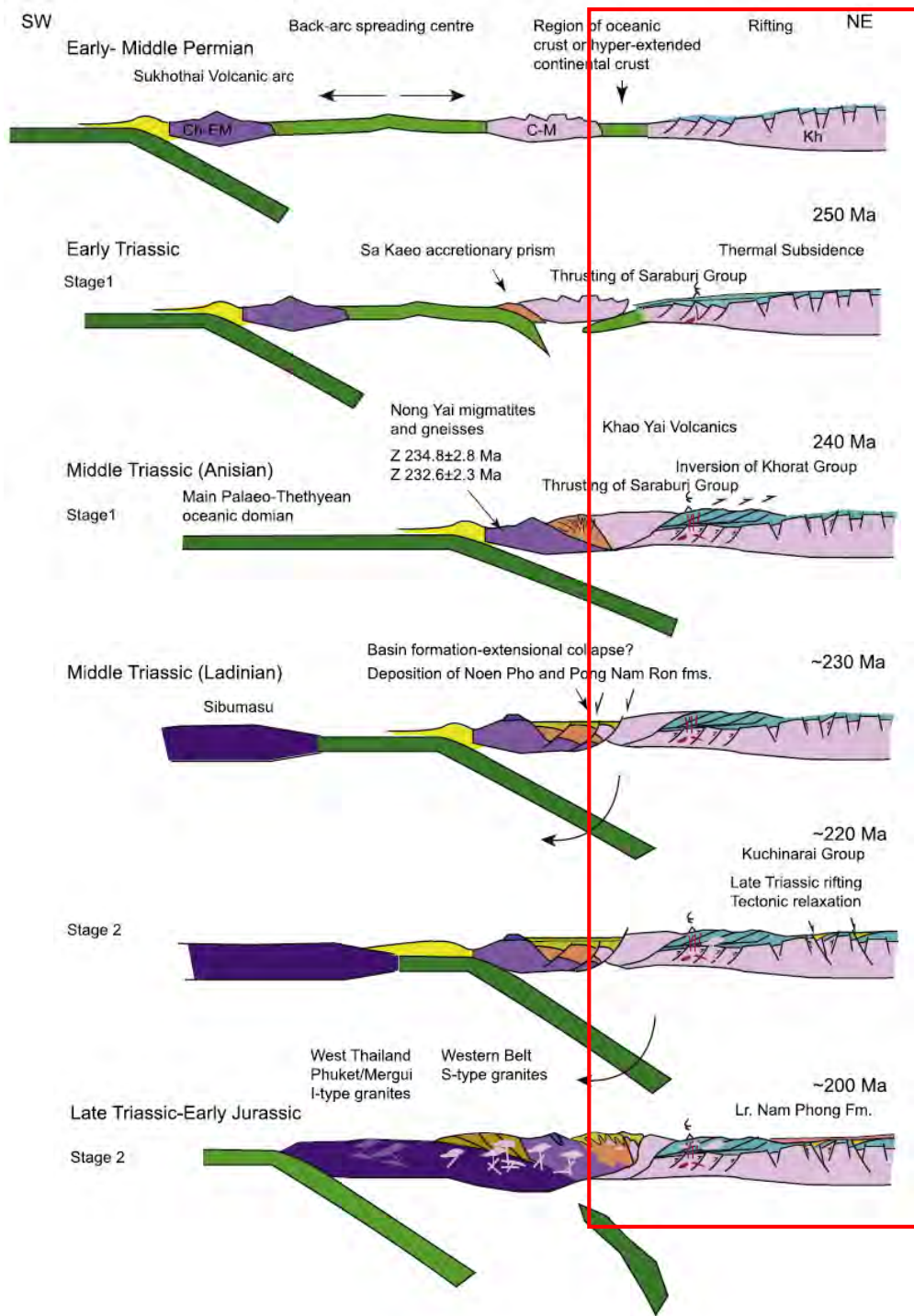


รูปที่ 4.12 รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) (4) และรอยแตกในแนวระดับตัดกับรอยแตกที่เกิดขึ้นก่อนหน้า คือรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) (1), รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) (2) และรอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) (3)

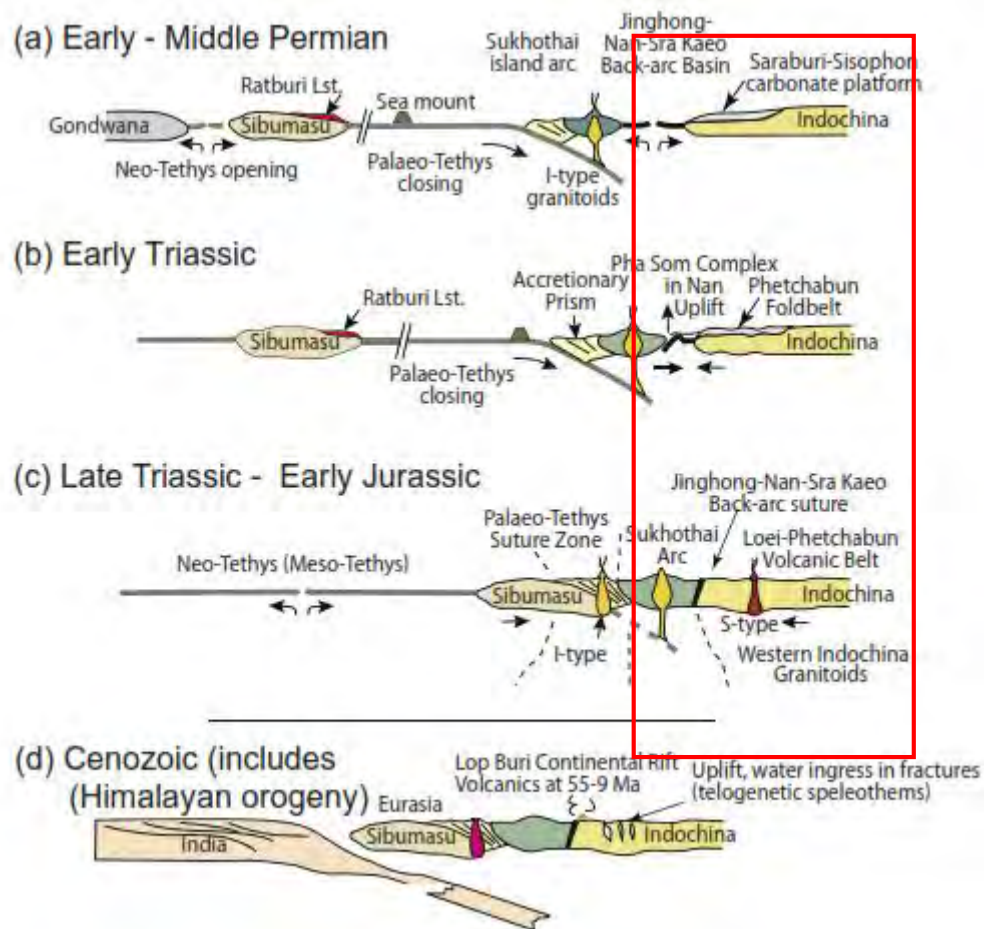
4.3 วิวัฒนาการธรณีแปรสัณฐาน (Tectonic evolution)

จากการสะสมตัวของตะกอนในพื้นที่ บริเวณเขตทะเลน้ำตื้น (Shallow marine) หรือลานสะสมตะกอนคาร์บอนेट บริเวณขอบแผ่นดินด้านตะวันตกของจุลทวีปอินโดไชน่า (Morley, 2013) และเกิดการชนกันกับแผ่นจุลทวีปไซบิวมาสูในช่วงไทรแอสสิกตอนกลาง (Middle Triassic) และยังคงเคลื่อนตัวอยู่จนถึงช่วงไทรแอสสิกตอนปลาย-จูแรสสิกตอนต้น (Late Triassic-Early Jurassic) หรือการก่อเทือกเขาอินโดไชนีเยน (Sone and Metcalfe, 2008) โดยแผ่นเปลือกโลกไซบิวมาสูและแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ค่อยๆเคลื่อนตัวออกจากแผ่นออสเตรเลีย ระหว่างยุคไซลูเรียน (Silurian) จนถึงยุคคาร์บอนิฟอรัสตอนต้น (Early Carboniferous) พร้อมๆกับการสร้างแอ่งสะสมตะกอน (Sedimentary basin) ของตนเองเป็นครั้งแรกในช่วงยุคคาร์บอนิฟอรัสตอนต้น (Early Carboniferous) จนถึงยุคเพอร์เมียนตอนปลาย (Late Permian) แผ่นเปลือกโลกไซบิวมาสูเคลื่อนที่จากซีกโลกใต้บริเวณใกล้กับเส้นศูนย์สูตร (Low Southern latitude) มาอยู่ในซีกโลกเหนือบริเวณใกล้กับเส้นศูนย์สูตร (Low Northern latitude) และเริ่มเกิดการมุดตัวของพื้นทะเลโบราณ (Palaeo-Tethys oceanic floor) ลงไปได้แผ่นเปลือกโลกอินโดจีนจนกระทั่งยุคไทรแอสสิกตอนปลาย (Late Triassic) จึงเกิดการชนกันระหว่างแผ่นเปลือกโลกไซบิวมาสูกับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ก่อให้เกิดแนวชั้นหินคดโค้งและแนวรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Metcalfe, 2013) โดยระหว่างการชนกันของแผ่นเปลือกโลกพบหินภูเขาไฟขนาดใหญ่-สระบุรี และหินอัคนีบาดาลของหินแอนดีไซต์ในบริเวณพื้นที่ข้างเคียง (เป็นส่วนหนึ่งของแนวภูเขาไฟเลย-เพชรบูรณ์) รวมกับหลักฐานของหินแปร (หินอ่อน) ในบริเวณพื้นที่ และพบว่าเป็นพนักของหินภูเขาแทรกตัดชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำในช่วงนี้ (Morley, 2013)

โดยช่วงแรกของการชนกันของแผ่นเปลือกโลกในแนวตะวันตกเฉียงใต้ - ตะวันออกเฉียงเหนือ ในระยะแรกทำให้เกิดแรงบีบอัด (Compression) มากกระทำขนานกับชั้นหินในพื้นที่ ทำให้เกิดระบบรอยแตกในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ โดยรอยแตกที่เกิดขึ้นอันดับแรกคือรอยแตกระบบที่ 1 และเกิดชั้นหินคดโค้งและเกิดระบบรอยแตกที่ 2 ขึ้น และเมื่อเกิดการแทรกตัดของหินภูเขาไฟ (Morley, 2013) ทำให้เกิดรอยแตกระบบที่ 3 เกิดขึ้น และเมื่อเกิดแรงบีบอัดมากกระทำทำให้หมวดหินภูเพ (Phu Phe Formation) ปิดทับหมวดหินเขาขาด (Khad Khad Formation) โดยอิทธิพลจากรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ ทำให้เกิดระบบรอยแตกระบบที่ 4 เป็นรอยแตกที่เกิดขึ้นเป็นระบบสุดท้ายจากแรงที่มากกระทำต่อพื้นที่



รูปที่ 4.13 ธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย (Morley et al., 2013) บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ซึ่งโครงสร้างรอยแตกและรอยเลื่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาน่าจะสัมพันธ์กับเหตุการณ์ในยุคไทรแอสซิกตอนปลาย (Late Triassic) ถึงจูแรสซิกตอนต้น (Early Jurassic)



รูปที่ 4.14 ธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย (Warren et al., 2014) บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ซึ่งโครงสร้างรอยแตกและรอยเลื่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาน่าจะสัมพันธ์กับเหตุการณ์ในยุคไทรแอสซิกตอนปลาย (Late Triassic) ถึงจูแรสซิกตอนต้น (Early Jurassic)

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา (Conclusion)

5.1 สรุปผลการศึกษา (Conclusion)

จากการนำผลการศึกษาที่ได้จากการสำรวจภาคสนามและการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคมารวบรวม วิเคราะห์ และอภิปรายในด้านลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตกและวิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

รอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี มีทั้งหมด 4 ระบบ ได้แก่ 1. รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) 2. รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) 3. รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) 4. รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) และรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Thrust fault) ที่มีระนาบรอยเลื่อนวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และชั้นหินคดโค้งวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก ซึ่งเป็นแนวโครงสร้างหลักของพื้นที่บริเวณนี้ ส่วนธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคนั้น พบลักษณะของการตัดกันของรอยแตก (Cross-cutting relationship) ทั้ง 4 ระบบจากการแตกเปราะ (Brittle fracturing) ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของรอยแตกแต่ละระบบ

วิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี มีทั้งหมด 4 ลำดับ(รูปที่ 5.1) ดังนี้ ลำดับแรก หลังจากการสะสมตัวของตะกอนคาร์บอนีตและเกิดแรงบีบอัด มากระทำขนานกับชั้นหินในพื้นที่ ทำให้เกิดระบบรอยแตกในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ โดยรอยแตกที่เกิดขึ้นอันดับแรกคือ รอยแตกระบบที่ 1 รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture), ลำดับที่สอง เกิดชั้นหินคดโค้งและเกิดระบบรอยแตกที่ 2 รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง (Radial fracture) ขึ้น, ลำดับที่สามเกิดการผ่นคลายของการแปรสัณฐาน ทำให้เกิดรอยแตกระบบที่ 3 รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fracture) และพนักหินและในลำดับสุดท้าย ลำดับที่สี่ เกิดแรงบีบอัดมากระทำ และอิทธิพลจากรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ ทำให้เกิดระบบรอยแตกระบบที่ 4 รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) เป็นรอยแตกที่เกิดขึ้นเป็นระบบสุดท้ายจากแรงที่มากกระทำต่อพื้นที่

ช่วงเวลาของการเกิดระบบรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี อาจเทียบเคียงได้กับการชนกันของแผ่นจุลทวีปไซปรัสและแผ่นจุลทวีปอินโดจีน ซึ่งเป็นช่วงประมาณยุคไทรแอสซิก (Triassic) ถึงจูแรสซิก (Jurassic) หรือการก่อเทือกเขาอินโดจีนเนียน (Indosinian orogeny) ในช่วงยุคไทรแอสซิกตอนปลาย (Late Triassic) และสัมพันธ์กับบริเวณแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง (Khao

Khwang fold and thrust belt) ซึ่งโครงสร้างมีแนวการวางตัวหลักในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (Morley, 2013)

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

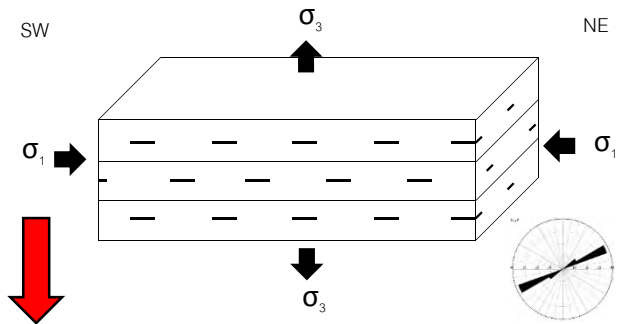
ลักษณะเฉพาะและแบบจำลองวิวัฒนาการทางธรณีวิทยาโครงสร้างของระบบรอยแตกของหมวดหินเขาขาด ส่วนหนึ่งของแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง (Khao Khwang fold and thrust belt) บริเวณตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี

5.3 ปัญหาและอุปสรรค

- 1) หินโผล่ในพื้นที่มีลักษณะที่กว้างและมีความสูงมาก รวมไปถึงในบางบริเวณมีต้นไม้ขึ้นหนาแน่น ทำให้ไม่สามารถทำการเก็บข้อมูลในบริเวณได้
- 2) หินตัวอย่างระบุตำแหน่งบางตัวอย่างไม่ได้ทำเครื่องหมายแสดงทิศทาง ทำให้ต้องสูญเสียข้อมูลบางส่วนไปและได้ข้อมูลที่ไม่ครบถ้วน
- 3) การเข้าถึงพื้นที่ในบางพื้นที่ไม่สามารถเข้าถึงได้เนื่องจากเป็นที่ส่วนบุคคลทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้จากหลายตำแหน่ง และบางบริเวณพบการรบกวนของหินโผล่มาก

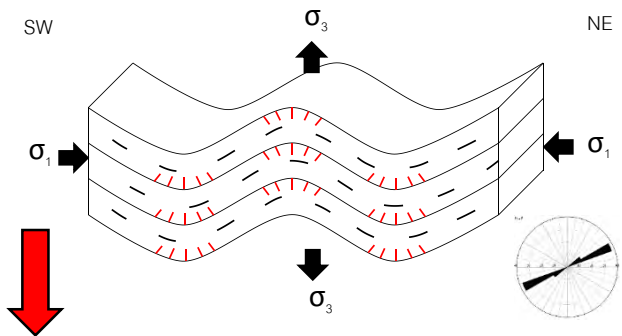
STAGE 1 Begin compression

- รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน
(Bed-parallel fracture)



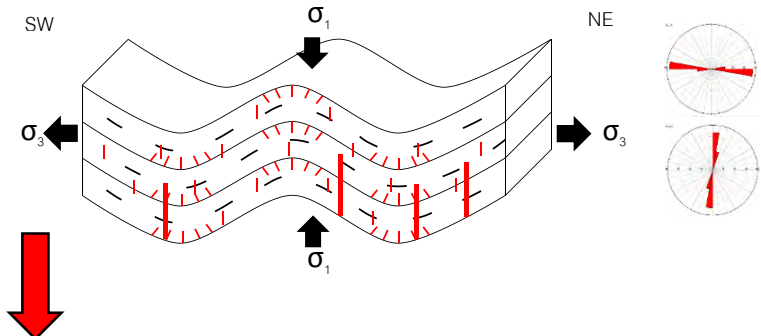
STAGE 2 Folding

- รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้ง
(Radial fracture)



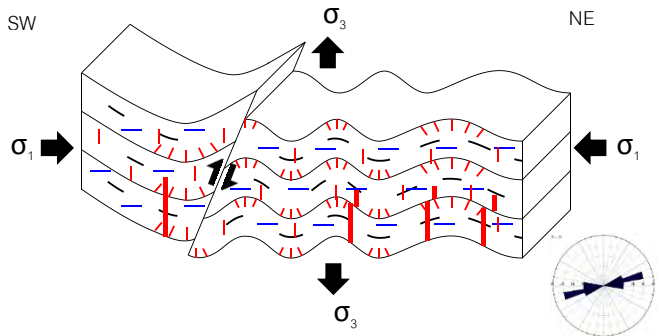
STAGE 3 Tectonic relaxation

- รอยแตกในแนวตั้ง
(Vertical fracture)



STAGE 4 Thrusting

- รอยแตกในแนวระดับ
(Sub-horizontal fracture)



รูปที่ 5.1 สรุปภาพรวมวิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตก (Structural evolution of fracture) ทั้ง 4 ขั้นตอนของบริเวณพื้นที่ศึกษา

เอกสารอ้างอิง (References)

- Arboit, F., Collins A.S., King R., Morley C.K., and Hansberry R., 2014, Structure of the Sibumasu – Indochina collision, central Thailand: A section through the Khao Khwang Fold and Thrust Belt, *Journal of Asian Earth Sciences*, (In Press)
- Bunopas, S., 1981, Paleogeographic history of western Thailand and adjacent parts of Southeast Asia- A plate tectonics interpretation: Victoria University of Wellington, unpublished Ph.D. thesis, 810 p.; reprinted 1982 as Geological Survey Paper no.5, Geological Survey Division, Department of Mineral Resources, Thailand.
- Dunham, R.J. (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: *Classification of Carbonate Rocks* (Ed. Ham, W.E.). Memoir 1, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, OK; 108–121.
- Hansberry, R., L., King, R., Collins, A., S., and Morley, C., K., 2014, Complex structure of an upper-shale detachment zone: Khao Khwang fold and thrust belt, Central Thailand, *Journal of Structural Geology*, 67, 140-153
- Harmon D. Maher Jr., Lab 5: Structural Analysis Using Stereonets [Online], Available from: <http://maps.unomaha.edu/maher/geol3300/lab/lab5.html> (Accessed April 27, 2015)
- Hatcher, R. D. 1995. *Structural geology: Principles, concepts, and problems*. 2nd Ed. New Jersey: Prentice Hall. 525p.
- Hinthong, C. 1985. Upper Paleozoic System, the Central Plain and Lower Phetchabun Ranges. Unpublished report, Geological Survey Division, Department of Mineral Resources, Bangkok.
- Lacazette, A., 2000-2001, Natural Fracture Types [Online], Available from: <http://www.naturalfractures.com/1.1.1.htm> (Accessed May 3, 2015)
- Metcalfe, I., 1988. Origin and assembly of South-East Asian continental terranes. *Geol. Soc. Lond. Special Publ.* 37 (1), 101–118.
- Metcalfe, I., 1991. Late Palaeozoic and Mesozoic palaeogeography of Southeast Asia: *Palaeogeography, Palaeoecology*, v. 87, p. 211-221.
- Metcalfe, I., 2002. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia. *Journal of Asian Earth Sciences* 20, p. 551–566.

- Metcalfe, I., 2011. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland. *Gondwana Research* 19, p. 3–21.
- Metcalfe, I., 2013, Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys, *Journal of Asian Earth Science*, 66, 1 – 33
- Morley, C.K., Ampaiwan, P., Thanudamrong, S., Kuenphan, N., and Warren, J., 2013, Development of the Khao Khwang Fold and Thrust Belt: Implications for the geodynamic setting of Thailand and Cambodia during the Indosinian Orogeny, *Journal of Asian Earth Science*, 62, 705 – 719
- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics*, 2nd edn. Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin.
- Pitakpaivan, K., 1965, Fusulinacean fossils from Thailand, Part 1: Fusulines of the Ratburi limestone of Thailand: Faculty of Sciences, Kyushi University, Memoir, Series D, *Geology*, v. 17, p. 1-69.
- Plumer, C., C., and Carlson, D., H., 2008. *Physical Geology* (12th ed), McGraw-Hill
- Ridd, M.F., Barber, A.J. and Crow, M.J., 2011. Introduction to the geology of Thailand. In: Ridd, M.F., Barber, A.J. and Crow, M.J. (eds) *The Geology of Thailand*. Geological Society, London, 117.
- Sone, M., Metcalfe, I., 2008. Parallel Tethyan sutures in Mainland Southeast Asia: new insights for Palaeo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny. *C.R. Geosci.* 340 (2), 166–179.
- Toriyama, R., Kanmera, K., Kaewbaidhoon, S., and Hongnusunthi, A., 1974, Biostratigraphic zonation of the Ratburi Limestone in the Khao Phlong Phrab area, Saraburi, Central Thailand: *Geology and Paleontology of Southeast Asia*, v. 14, p. 25-48.
- Toriyama, R., and Kanmera, K., 1968, Fusulinacean fossils from Thailand, Part 2, Two new Permian genera from Thailand: *Geology and Palaeontology of Southeast Asia*, v. 4, p. 29-44.

Ueno, K., Charoentirat, T., 2011. Carboniferous and Permian. In: Ridd, M.F., Barber, A.J., Crow, M.J. (Eds.), the Geology of Thailand. The Geological Society of London, pp. 71–136.

Warren, J., Morley, C., Charoentirat, T., Cartwright, I., Ampaiwan, P., Khositichaisri, P., Mirzaloo, M., Yingyuen, J., 2014, Structural and fluid evolution of Saraburi Group sedimentary carbonates, central Thailand: A tectonically driven fluid system.