ระบบรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี

นายพงศภัค   ถิรเศรษฐ์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

Fracture System of the Khao Khad Formation at Khao Wong, Changwat Saraburi

Mr. Pongsapak Tiraset

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

for the Degree of the Bachelor Program in Geology,

Department of Geology, Faculty of Science,

Chulalongkorn University, Academic Year 2014

วันที่ส่ง

______/______/______

วันที่อนุมัติ

______/______/______

ลงชื่อ______________________________

(__________________________________)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน

หัวข้อ (ภาษาไทย) ระบบรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี

ชื่อ-สกุล นายพงศภัค ถิรเศรษฐ์

รหัสนิสิต 543 27231 23

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุพงศ์ กาญจนพยนต์

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

เขาวงตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของจังหวัดสระบุรี มีความยาวประมาณ 6 กิโลเมตร ลักษณะทางธรณีวิทยาของเขาวงซึ่งอยู่ในหมวดหินเขาขาดประกอบไปด้วยหินปูนสีขาวเทาเนื้อดินในยุคเพอร์เมียน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิวัฒนาการทางธรณีวิทยาโครงสร้างของพื้นที่ และระบบรอยแตกที่สัมพันธ์กับธรณีวิทยาโครงสร้าง

จากการสำรวจภาคสนามและการวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคพบว่ามีรอยแตกทั้งหมด 3 ระบบคือ รอยแตกที่ขนานกับชั้นหินเกิดขึ้นเป็นลำดับแรก รอยแตกบริเวณเขตพับการคดโค้งเป็นลำดับที่สอง และรอยแตกในแนวระดับเป็นลำดับสุดท้าย ซึ่งระบบรอยแตกทั้ง 3 ระบบมีความสัมพันธ์กับวิวัฒนาการทางธรณีวิทยาโครงสร้างของพื้นที่ โดยธรณีวิทยาโครงสร้างวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้เป็นหลัก ซึ่งเป็นผลมาจากการชนกันของแผ่นจุลทวีปฉานไทยและแผ่นจุลทวีปอินโดไชน่าในช่วงยุคไทรแอสซิกตอนปลาย

จากลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของพื้นที่ และระบบรอยแตกที่สัมพันธ์กับธรณีวิทยาโครงสร้างของหมวดหินเขาขาด บริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี พบว่ามีความสัมพันธ์กับการเกิดแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวางในยุคไทรแอสสิกตอนปลายหรือการเกิดเทือกเขาอินโดไชเนียน

คำสำคัญ: ระบบรอยแตก, หมวดหินเขาขาด, แนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง, แนวชั้นหินคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์

Title	Fracture System of the Khao Khad Formation at Khao Wong, Changwat Saraburi
Present by	Mr. Pongsapak Tiraset
ID	543 27231 23
Advisor	Assistant Professor Pitsanupong Kanjanapayont, Dr.rer.nat.
Academic year	2014

Abstract

Khao Wong is located along the Northwestern side of Changwat Saraburi. The mountain range is about 6 kilometers in distance. Geology of this area consists of Permain limestone of the Khao Khad formation. The objectives of this study focus is to find out the structural evolution and fracture systems that related to structural geology of this area.

Based on evidences in mesoscopic structure from field observation and microstructure of study area, fractures in the study area consist of 3 systems that are (1)Bed-parallel fracture which occurs first, then follow-up by (2)Radial fracture & Fold-axis perpendicular fracture and (3)Sub-horizontal fracture respectively, which all those fracture systems is related to the structural evolution of study area. Main structures are oriented in NW-SE trending which developed as a consequence of Sibumasu-Indochina terrane Collision in Late Triassic.

From all structural elements, structural evolution and fracture system that related to structural geology, Khao Wong, Changwat Saraburi is related to Khao Khwang fold and thrust belt or Indosinian orogeny during Late Triassic.

Keywords: Fracture system, Khao Khad formation, Khao Khwang fold and thrust belt, Loei-Petchabun Fold Belt

กิตติกรรมประกาศ

ประการแรกขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนทางด้านงบประมาณและค่าใช้จ่ายในการศึกษาครั้งนี้รวมไปถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการทำงานในห้องปฏิบัติการ

ประการที่สองขอขอบคุณอย่างสูงแก่ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิษณุพงศ์ กาญจนพยนต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยในครั้งนี้ อาจารย์ได้เสียสละเวลามาช่วยเหลือในการสำรวจภาคสนามและให้ความรู้ และคำปรึกษาในการอภิปรายเรื่องของธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตกและวิวัฒนาการโครงสร้างของแนวรอยแตก รวมถึงคำอธิบายในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของหินในพื้นที่ศึกษานี้

นอกจากนี้ ขอขอบคุณนายธนพันธ์ ผาทอง, นางสาววิชาณี มณีโลกย์, นายธนเนตร มีรัตน์, นายวิศรุต เตชะสุวรรณวงศ์, นายปรีดา ถาเปียง, นางสาวภัสติกร สุวรรณจันลา, นายนวภัทร กลมเกลียว ที่เป็นผู้ช่วยในการสำรวจภาคสนาม โดยช่วยเหลือด้านการเก็บข้อมูลโครงสร้าง และวัดค่าข้อมูลต่างๆ และขอขอบคุณนางสาวดุจกมล วงสุวพิศญ์, นายญาณวิทย์ ศรสูงเนิน, นางสาวศิริรัตน์ ทรัพย์สกุล ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการทำงานวิจัยในครั้งนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูปภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 พื้นที่ศึกษา	1
1.3 วัตถุประสงค์	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.7 ธรณีวิทยาทั่วไป	3
1.8 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย	
2.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น	7
2.1.1 ศึกษารายงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1.2 ศึกษาวิธีการเก็บข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้าง	7
2.1.3 จัดเตรียมข้อมูลพื้นฐาน	7
2.2 สำรวจภาคสนาม	8
2.2.1 ศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง	8
2.2.2 เก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง	8
2.3 ศึกษาในห้องปฏิบัติการ	9
2.3.1 กำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ	9
2.3.2 ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค	9

หน้า
2.4 รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตีความผลการศึกษา 10
2.4.1 ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างระดับกลาง 10
2.4.2 ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาค 10
2.5 อภิปรายสรุปผลการศึกษา นำเสนอในรูปแบบสัมมนาและจัดทำรูปเล่มรายงาน 10

บทที่ 3 **ผลการศึกษา** (Result)
3.1 ธรณีวิทยา 11
3.2 ธรณีวิทยาโครงสร้าง 13
3.2.1. ระดับกลาง 13
3.2.2. ระดับจุลภาค 23

บทที่ 4 **อภิปรายผลการศึกษา** (Discussion)
4.1 ลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตก 26
4.1.1 รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) 27
4.1.2 รอยแตกที่เกิดบริเวณเขตการคดโค้ง (Radial fracture & Fold-axis perpendicular fracture) 28
4.1.3 รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) 30
4.1.4 โครงสร้างระนาบรอยเลื่อน (Fault plane) 31
4.2 วิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตก 31
4.2.1 การบีบอัด (Compression) 32
4.2.2 การเลื่อนย้อน (Thrusting) 34
4.2.3 การบีบอัด (Compression) 35
4.3 วิวัฒนาการการแปรสัณฐาน (Tectonic evolution) 36

บทที่ 5 **สรุปผลการศึกษา**(Conclusion) 38

เอกสารอ้างอิง 40

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่1.1 A) แสดงพื้นที่ศึกษาบริเวณเขาวง ตำบลเขาวง จังหวัดสระบุรี จากแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 B) แสดงภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่ศึกษาบริเวณเขาวง ตำบลเขาวง จังหวัดสระบุรีจาก Google Earth 1

รูปที่1.2 ภาพแสดงแผนที่ธรณีวิทยาของกลุ่มหินสระบุรี บริเวณจังหวัดสระบุรี (ดัดแปลงจาก from Ueno and Charaoentitirat , 2012) 3

รูปที่1.3 แผนที่แสดงธรณีวิทยาโครงสร้างและธรณีวิทยาของกลุ่มหินสระบุรี บริเวณจังหวัดสระบุรี (Morley et al, 2013) 4

รูปที่1.4 A) แผนที่แสดงที่ตั้งของจังหวัดสระบุรีซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษา ซึ่งตั้งอยู่บนแผ่นจุลทวีปอินโดไชน่า (Ueno and Charoentitirat, 2011) B) ภาพแสดงธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย (Warren et al, 2014) บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ในช่วง Early-Middle Permian มีการตกสะสมตัวของคาร์บอเนตบนลาดทวีปของแผ่นจุลทวีปอินโดไชน่า ต่อมาในช่วง Early Triassic เกิดการเคลื่อนตัวเข้าหากันของแผ่นจุลทวีปฉานไทย-อินโดนไชน่าจึงทำให้เกิดการปิดตัวลงของ Back-arc basin แรงบีบอัดทำให้ Carbonate platform ถูกแปรสภาพ เกิดรอยคดโค้งและรอยเลื่อน ซึ่งก็คือบริเวณรอยคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ (Loei – Phetchabun fold belt) 5

รูปที่2.1 แผนผังแสดงลำดับการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 6 ขั้นตอน 6

รูปที่2.2 ภาพแสดงการเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่งเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Passchier and Trouw, 2005) 8

รูปที่2.3 ภาพแสดงตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ ตามลำดับ 9

รูปที่3.1 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ซึ่งเป็นพื้นที่ทำเหมือง 11

รูปที่3.2 A)ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา ซึ่งชั้นหินด้านล่างเป็นหินปูนสีเทาขาว มีซากดึกดำบรรพ์บ่งบอกอายุเพอร์เมียนตอนกลาง ส่วนชั้นหินด้านบนเป็นหินปูนสีเทาดำ มีซากดึกดำบรรพ์บ่างบอกอายุเพอร์เมียนตอนล่าง B)ลำดับชั้นหินและซากฟิวซูลินิดที่ใช้บ่งบอกอายุ (Ueno และ Charoentitirat, 2011) 12

รูปที่3.3 แสดงภาพตัดขวางของพื้นที่ศึกษาโดยแบ่งพื้นที่ตามโครงสร้างที่พบออกเป็น Zone A และZone B 13

รูปที่3.4 พื้นที่ศึกษา A1 14

รูปที่3.5 ภาพแสดงลักษณะโดยรวมของพื้นที่ศึกษา A1 14

รูปที่3.6 A)รอยแตก 2 ระบบตัดกัน B)การตัดกันของรอยแตก 2 ระบบ โดยรอยแตกที่มีอายุอ่อนกว่าตัดเข้ามาทำให้เกิดรอยแตกเฉือน (Shear fracture) C)โครงสร้างแบบ en-echelon tension gashes ที่มีแร่เข้ามาเติม เกิดเป็นโครงสร้างgash vein 15

รูปที่3.7 A)รอยแตกที่แตกเป็นรูปแบบแผ่ออกรอบศูนย์กลาง(Radial pattern) B)รอยแตกที่ตั้งฉากกับกับแกนชั้นหินคดโค้ง (Fold axis-perpendicular fracture) 16

รูปที่3.8 A)รอยคดโค้งนอนทับ (Recumbent fold) B)รอยแตกที่แตกเป็นรูปแบบแผ่ออกรอบศูนย์กลาง(Radial pattern) 16

รูปที่3.9 A) หลักฐานซึ่งบ่งบอกทิศทางการเลื่อนของรอยเลื่อน ได้แก่โครงสร้างแสดงทิศทางการเลื่อน(Chatter mark) และ รอยไถล (Slickenside) B) รอยเลื่อนย้อนแบบซ้ายเข้า Oblique slip (Reverse sinistral fault) 17

รูปที่3.10 พื้นที่ศึกษา A2 18

รูปที่3.11 ภาพแสดงลักษณะโดยรวมของพื้นที่ศึกษา A2 18

รูปที่3.12 A)รอยแตกที่พบหน้าหินโผล่ B)การแปลข้อมูลจากรูปภาพ ประกอบด้วยรอยแตก 2 ระบบตัดกัน(สีแดงกับสีเขียว) และโครงสร้าง gash vein ที่ตัดกัน 2 แนว(สีทอง) 19

รูปที่3.13 ทรงรีความเครียด (Strain ellipsoid) ซึ่งสัมพันธ์กับแรงบีบอัดที่เข้ามากระทำ(σ_1) อธิบายการเกิดโครงสร้าง en-echelon tension gashes 2 แนวที่ตัดกันเป็นรูปกากบาท 20

รูปที่3.14 พื้นที่ศึกษา B1 21

รูปที่3.15 ภาพแสดงลักษณะโดยรวมของพื้นที่ศึกษา B1 21

รูปที่3.16 รอยแตก 2 ระบบตัดกัน (สีแดงกับสีเขียว) 22

รูปที่3.17 โครงสร้าง gash vein(สีทอง) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์กับแรงบีบอัด และทรงรีความเครียด (Strain ellipsoid) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับแรงบีบอัดที่เข้ามากระทำ(σ_1) 22

รูปที่3.18 ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์บริเวณจุดศึกษาที่มีการวางตัวของชั้นหิน ในแนวตั้ง(Vertical bedding)(ริ้วขนานคือการวางตัวของชั้นหิน) มีการตัดกันของรอยแตกในแนวระดับ(Sub-horizontal fracture)(สีเขียว) ตัดผ่านรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture)(สีแดง) (ซ้ายPPL และ ขวาXPL) 23

รูปที่3.19 เขตเงาความเค้น(Strain shadow) ซึ่งตัวอย่างหินระบุตำแหน่งเก็บมาจากบริเวณที่ชั้นหินมีการวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) จากโครงสร้างจุลภาคจึงบอกได้ว่ามีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในทิศทางซ้าย-ขวา (ซ้ายPPL และ ขวาXPL) 24

รูปที่3.20 ภาพแสดงชนิดของตัวบ่งชี้ทิศทางของแรงบีบอัด (stress sense indicators) คือเขตเงาความเค้น(Strain shadow) จากภาพแสดงแรงบีบอัดบนล่างของโครงสร้างระดับจุลภาคในแผ่นหินบาง (Robin, 1979) 24

รูปที่3.21 โครงสร้างแนวฟันในหิน(Stylolite) ซึ่งตัวอย่างหินระบุตำแหน่งเก็บมาจากบริเวณที่ชั้นหินมีการวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) จากโครงสร้างจุลภาคจึงบอกได้ว่ามีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในทิศทางซ้าย-ขวา (ซ้ายPPL และ ขวาXPL) 25

รูปที่4.1 A)รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) (ชั้นหินวางตัวในแนวตั้ง) B)แผนภาพกุหลาบ(Rose diagram) แสดงการวางตัวของรอยแตกซึ่งวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (WNW-ESE) 27

รูปที่4.2 A)แนวรอยตั้งฉากกับแกนหินคดโค้ง (Fold-axis perpendicular fracture)(สีน้ำเงินเข้ม) และแกนหินคดโค้ง(Fold axis)(เส้นประสีแดง) B)แผนภาพกุหลาบ(Rose diagram) แสดงการวางตัวของรอยแตกซึ่งวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงใต้-ตะวันออกเฉียงเหนือ (SW-NE) C)การกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่า (equal-area stereographic net) แสดงการวางตัวของแกนหินคดโค้ง(Fold axis) ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือ(SE-NW) 28

รูปที่4.3 รอยแตกกระจายตัวบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Hinge zone) พบเป็นรอยแตกรอบบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Radial fracture) 29

รูปที่4.4 A)รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) เป็นแนวรอยแตกที่อยู่ในแนวระดับและมีมุมเอียงเทต่ำ B)แผนภาพกุหลาบ(Rose diagram) แสดงการวางตัวของรอยแตกซึ่งวางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้(N-S) 30

รูปที่4.5 A)แรงบีบอัดเข้ามากระทำในแนวตะวันออก-ตะวันตก(E-W) จึงทำให้รอยแตกมีการเปิดออกในแนวตั้งฉากกับแรงดึงออก B)รอยแตกรูปแบบที่1 แบบเปิดออก(Mode I opening)(กรอบสีแดง)(Available at: URL:http://www.naturalfractures.com/1.htm. Accessed May 3, 2015) C)รอยแตกที่เกิดขนานกับชั้นหิน เกิดการคดโค้งขนานไปตามชั้นหิน 32

รูปที่4.5 D) หินตัวอย่างที่แสดงรอยแตกระบบที่ 1 ในพื้นที่ศึกษา 33

รูปที่4.6 A)มีการดันตัว(Thrusting)ขึ้นมาจากทางตะวันตกเฉียงใต้(SW Thrusting) ทำให้มีหินบางบริเวณถูกเปลี่ยนลักษณะอย่างรุนแรง(Highly deformed area) B)และC) หินตัวอย่างที่แสดงรอยแตกระบบที่ 2 34

รูปที่4.7 A)แรงบีบอัดยังคงเข้ามากระทำในแนวตะวันออก-ตะวันตก(E-W) จึงทำให้รอยแตกมีการเปิดออกในแนวตั้งฉากกับแรงดึงออก B)และC) หินตัวอย่างที่แสดงรอยแตกระบบที่ 3 35

รูปที่4.8 ภาพแสดงธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย(Warren et al, 2014) บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ซึ่งโครงสร้างรอยแตกและรอยเลื่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาน่าจะสัมพันธ์กับเหตุการณ์ในยุคไทรแอสซิกตอนปลาย(Late Triassic) 37

รูปที่5.1 สรุปภาพรวมวิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตก (Structural evolution of fracture) ทั้ง 3 ขั้นตอนของบริเวณพื้นที่ศึกษาเขาวง จังหวัดสระบุรี 39

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

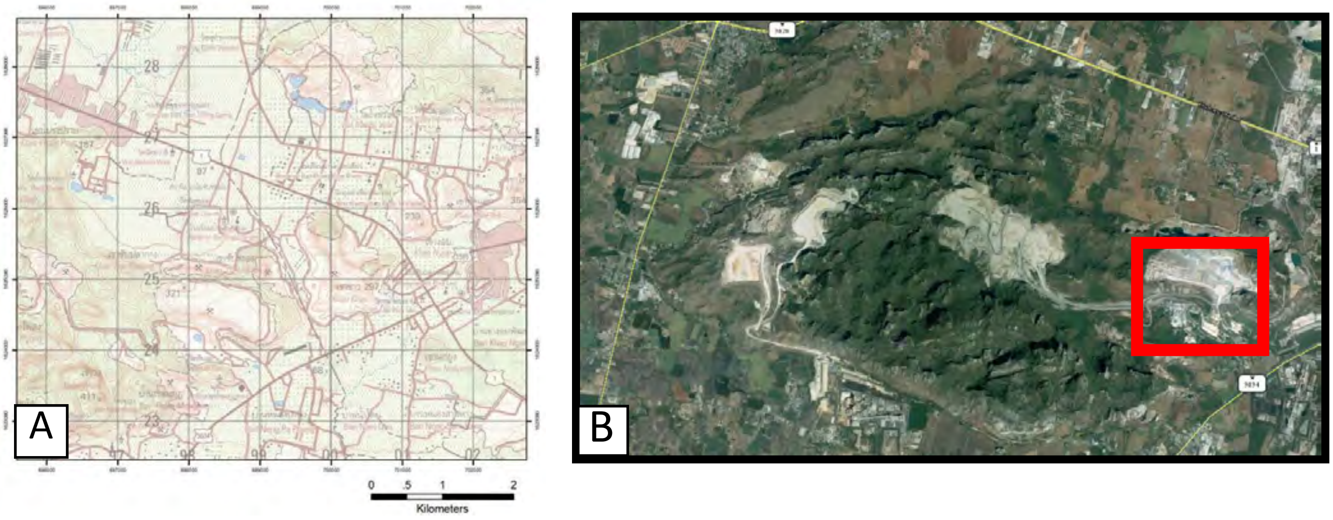
1.1 ที่มาและความสำคัญ

หมวดหินเขาขาดซึ่งวางตัวอยู่ในอายุเพอร์เมียน (Ueno and Charoentitirat,2011) การศึกษาการวิวัฒนาการทางด้านธรณีวิทยาโครงสร้างของกลุ่มหินสระบุรี (Warren et al, 2014) พบว่าเกิดเหตุการณ์ทางธรณีแปรสัณฐาน คือ ช่วงเวลาในช่วง Permo-Triassic ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการปิดของ Paleothethys ทำให้เกิดการชนกันของแผ่นฉานไทยกับอินโดไชน่า ทำให้เกิดเทือกเขาขึ้น (Indosinian I Orogeny) ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือ แนวคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ (Loei-Phetchabun Fold belt) โดยบริเวณพื้นที่ศึกษาจังหวัดสระบุรีได้ถูกกำหนดไว้เป็นบริเวณ Khao Kwang fold and thrust belt (Morley et al, 2013) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของหินปูนในยุคเพอร์เมียน โดยมีโครงสร้างหลักวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้(NW-SE)

การศึกษาในอดีตเกี่ยวข้องกับซากดึกดำบรรพ์ อายุ และธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับภูมิภาค (Regional scale) ดังนั้นการศึกษานี้เป็นการศึกษารายละเอียดของธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับท้องถิ่น (Local scale)

1.2 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในบริเวณเขาวง ตำบลเขาวง จังหวัดสระบุรีซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแนวหินคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ (Loei - Phetchabun fold belt) ประกอบด้วยหมวดหินเขาขาด(รูปที่1.1A และรูปที่1.1B)



รูปที่1.1 A) แสดงพื้นที่ศึกษาบริเวณเขาวง ตำบลเขาวง จังหวัดสระบุรี จากแผนที่มาตราส่วน 1:50,000
B) แสดงภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่ศึกษาบริเวณเขาวง ตำบลเขาวง จังหวัดสระบุรีจาก Google Earth

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาแนวรอยแตก ความสัมพันธ์และวิวัฒนาการของแนวรอยแตกที่สัมพันธ์กับโครงสร้างอื่นๆ ในบริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี

1.4 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาแบ่งออกเป็ น 2 ระดับหลักคือ

1.4.1 ระดับกลาง(mesoscopic scale) เก็บข้อมูลภาคสนาม ได้แก่การวางตัวของชั้นหิน (attitude of bedding) และข้อมูลแนวแตก (joint) จัดทำภาพตัดขวาง (cross section) และนำข้อมูลกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า (equal-area stereographic net) และแผนภาพกุหลาบ (rose diagram) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนลักษณะ (deformation)

1.4.2 ระดับจุลภาค (microscopic scale) ศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาค(microstructure) จากแผ่นหินขัดบาง (thin section) จากตัวอย่างในหินระบุตำแหน่ง (oriented specimen)

1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน

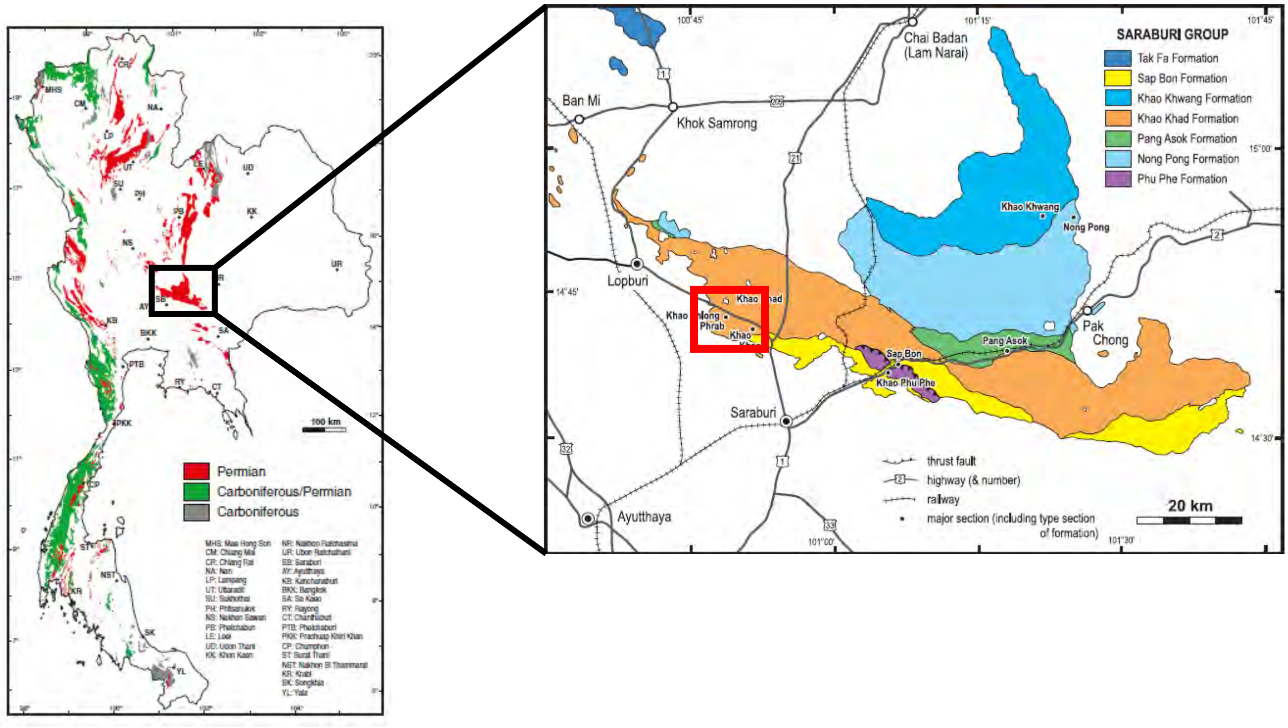
ระหว่างเดือน สิงหาคม 2557 – พฤษภาคม2558 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 10 เดือน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบข้อมูลแนวรอยแตก ความสัมพันธ์และวิวัฒนาการของแนวรอยแตกที่สัมพันธ์กับโครงสร้างอื่นๆ ในบริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี

1.7 ธรณีวิทยาทั่วไป

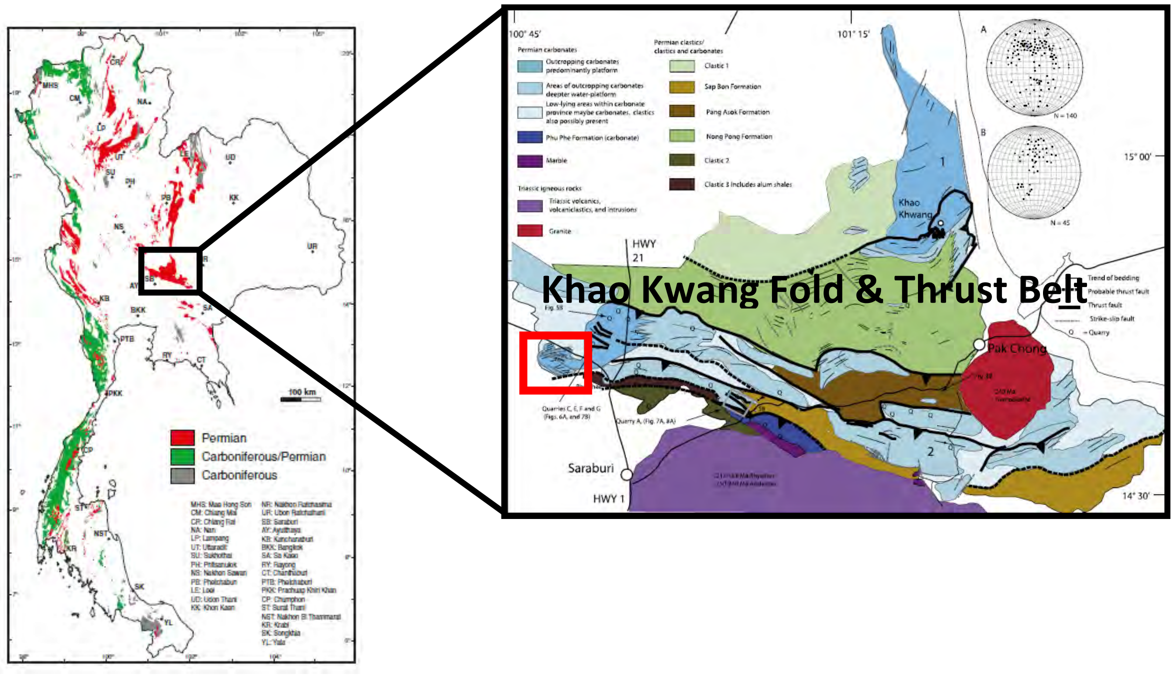
หมวดหินเขาขาด(Khao Khad Formation) (Hintong,1985) มีลักษณะทั่วไปประกอบด้วยหินปูนสีขาว เทา เกิดเป็นชั้นบางๆ ถึงหนามาก และไม่เป็นชั้นก็มีบางแห่งลักษณะเป็นเนื้อดินโดยมากมักมีชั้นเชิร์ตแทรกอยู่ทั่วไปและบางแห่งเป็นหินโดโลไมต์ บางที่มีหินดินดานเนื้อทราย หินทรายแป้ง หินทรายแทรกสลับอยู่บ้าง บางแห่งมีหินปูนเนื้อกรวดอยู่ด้วยและบางแห่งแปรสภาพไปเป็นหินอ่อน หินแคลค์ซิลิเกตและหินฮอร์นเฟลส์ นอกจากนั้นยังพบว่ามีหินภูเขาไฟแทรกตัดเข้ามาในชั้นหินหมวดนี้เสมอๆ การแผ่กระจายตั้งแต่บริเวณเขตจังหวัดลพบุรี จังหวัดสระบุรี เข้ามาถึงเขตอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ซากดึกดำบรรพ์ที่พบส่วนใหญ่เป็นซาก fusulinids นอกนั้นเป็น brachiopods, gastropods, ammonites, cephalopods, corals, bryozoa, crinoids และ algae เป็นต้น ซึ่งซาก fusulinids ส่วนใหญ่บ่งอายุราว Artinskian-Kungurian โดยเฉพาะที่พบที่บริเวณหินแบบฉบับ fusulinids ซึ่งศึกษาโดย Pitakpaivan (1965), Toriyama and Kanmera (1968), Toriyama et al. (1974) ส่วนมากยืนยันว่าอยู่ในช่วงปลายของเพอร์เมียนตอนล่าง ถึงช่วงต้นของเพอร์เมียนตอนกลาง (Late lower Permian – Early middle Permian) ความหนาของชั้นหินที่ชั้นหินแบบฉบับวัดได้ 1,812 เมตร(รูปที่1.2)



รูปที่1.2 ภาพแสดงแผนที่ธรณีวิทยาของกลุ่มหินสระบุรี บริเวณจังหวัดสระบุรี (ดัดแปลงจาก from Ueno and Charaoentitirat , 2012)

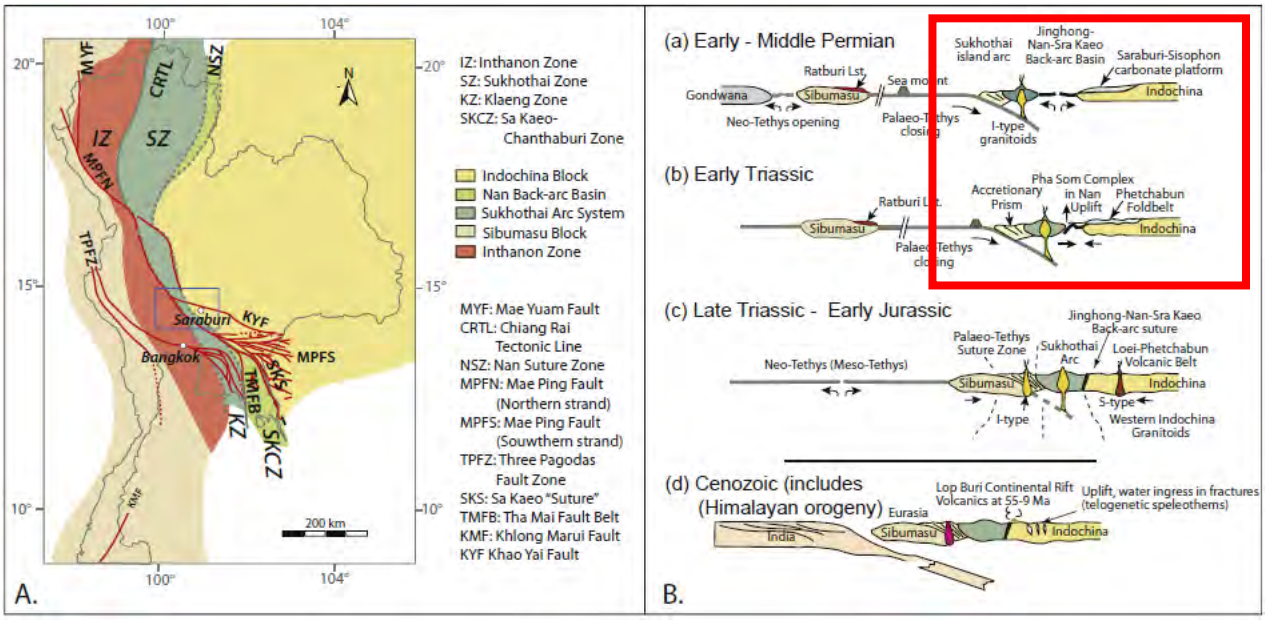
1.8 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของ Morley บริเวณพื้นที่ศึกษาจังหวัดสระบุรีได้ถูกจัดให้เป็นบริเวณ Khao Kwang fold and thrust belt (Morley et al, 2013) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของหินปูนในยุคเพอร์เมียน โดยมีโครงสร้างหลักวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (รูปที่1.3)



รูปที่1.3 แผนที่แสดงธรณีวิทยาโครงสร้างและธรณีวิทยาของกลุ่มหินสระบุรี บริเวณจังหวัดสระบุรี (Morley et al, 2013)

การศึกษาการวิวัฒนาการทางด้านธรณีวิทยาโครงสร้างของกลุ่มหินสระบุรี (Warren et al, 2014) พบว่าเกิดเหตุการณ์ทางธรณีแปรสัณฐาน คือ ช่วงเวลาในยุคเพอร์เมียน-ไทรแอสซิก (Permo-Triassic) จนถึงยุคไทรแอสซิกตอนปลาย(Late Triassic) ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการปิดของ Paleothethys ทำให้เกิดการชนกันของแผ่นฉานไทยกับอินโดไชน่า ทำให้เกิดเทือกเขาขึ้น (Indosinian Orogeny) ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือแนวคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ (Loei-Phetchabun Fold belt) (รูปที่1.4A และรูปที่1.4B)



รูปที่1.4 A) แผนที่แสดงที่ตั้งของจังหวัดสระบุรีซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษา ซึ่งตั้งอยู่บนแผ่นจุลทวีปอินโดไชน่า (Ueno and Charoentitirat, 2011) B) ภาพแสดงธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย (Warren et al, 2014) บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ในช่วง Early-Middle Permian มีการตกสะสมตัวของคาร์บอเนตบนลาดทวีปของแผ่นจุลทวีปอินโดไชน่า ต่อมาในช่วง Early Triassic เกิดการเคลื่อนตัวเข้าหากันของแผ่นจุลทวีปฉานไทย-อินโดนไชน่าจึงทำให้เกิดการปิดตัวลงของ Back-arc basin แรงบีบอัดทำให้ Carbonate platform ถูกแปรสภาพเกิดรอยคดโค้งและรอยเลื่อน ซึ่งก็คือบริเวณรอยคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ (Loei – Phetchabun fold belt)

บทที่2

รูปที่2.1 แผนผังแสดงลำดับการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 6 ขั้นตอน

2.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น

2.1.1 ศึกษารายงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลที่ต้องใช้ในการศึกษา

- ข้อมูลธรณีวิทยาทั่วไปในพื้นที่ศึกษา
- ข้อมูลการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างในพื้นที่หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- ข้อมูลลักษณะทางกายภาพและค่าการวางตัวของธรณีวิทยาโครงสร้างภายในหินโผล่ในพื้นที่
- ตัวอย่างหินจากภาคสนาม
- ข้อมูลลักษณะทางกายภาพและธรณีวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (polarizing microscope)
- ข้อมูลธรณีวิทยาทั่วไปในพื้นที่ศึกษา ข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารภค้นคว้าได้จากวาร สานงานวิจัย (journal), เอกสารงานประชุมวิชาการ (proceeding) ต่างๆ ในห้องสมุดภควิชา ธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หรือสืบค้นทางอินเตอร์เน็ต

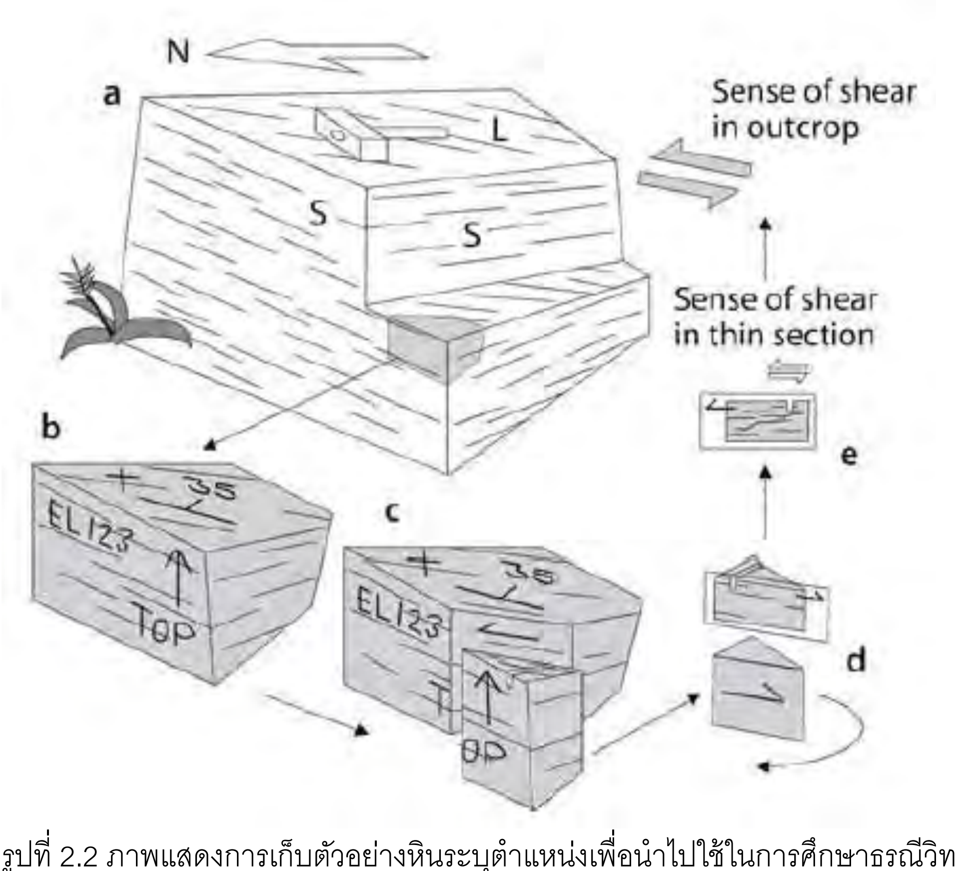
2.1.2 ศึกษาวิธีเก็บข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้างจากการสำรวจภาคสนาม และการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Polarizing microscope) โครงสร้างในระดับจุลภาคจะทำการศึกษาในแผ่นหินขัด
บาง (Thin section) จากตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง (Oriented specimen) ที่เก็บมาจากพื้นที่ ศึกษาโดยจะนำมาศึกษาในเรื่องโครงสร้างระดับจุลภาค ศิลาวรรณาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Polarizing microscope) ทำให้สามารถรู้ถึงทิศทางของแรง กลไกการเปลี่ยนลักษณะของหินในพื้นที่

2.1.3 จัดเตรียมข้อมูลพื้นฐานเช่น แผนที่ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา จากกรมทรัพยากรธรณีและแผนที่ภูมิศาสตร์ (Topographic map และภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่ศึกษา (Satellite image)
โดยแผนที่ดังกล่าวสามารถสืบค้นได้จากห้องสมุดแผนที่ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรมทรัพยากรธรณี (แผนที่ธรณีวิทยา), กรมแผนที่ทหาร (แผนที่ภูมิศาสตร์) และทางอินเตอร์เน็ต(ภาพถ่ายดาวเทียม)

2.2 สำรวจภาคสนาม

2.2.1 ศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างจากหินโผล่และเก็บข้อมูลพื้นที่ทำาการเก็บข้อมูลในภาคสนามโดยใช้เข็มทิศธรณีวิทยา ซึ่งค่าการวางตัวของโครงสร้างที่ต้องการวัดประกอบด้วย ค่าการวางตัวและเอียงเทของชั้นหิน (Attitude of bedding), โครงสร้างแนวเส้ น (Lineation), แกนชั้นหินคดโค้ง (Fold axis), รอยเลื่อน (Fault) ลักษณะทางกายภาพของ หินโผล่ และลักษณะโครงสร้างบ่งชี้อื่นๆที่พบในภาคสนามจากนั้นทำการถ่ายรูปเก็บไว้เป็นหลักฐานเพื่อนำมานำเสนอต่อไป

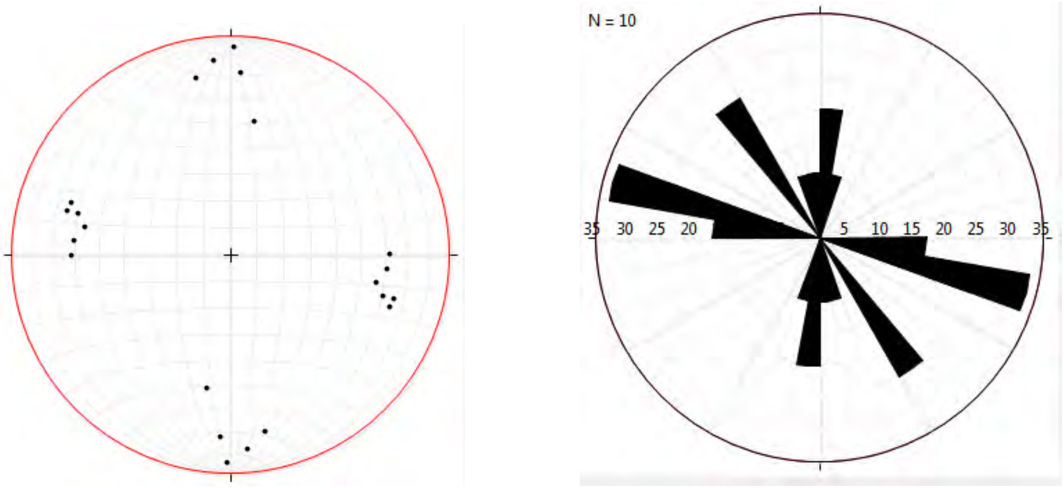
2.2.2 เก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง (Oriented specimen) การเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่งนั้นจะเก็บโดยตัวอย่างมีขนาดไม่น้อยไปกว่า 15 ซม. x 15 ซม. x 15 ซม. เพื่อนำกลับมาวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค ซึ่งตัวอย่างหินที่นำกลับมา จะต้องบันทึกค่าระนาบการวางตัวอย่างน้อยหนึ่งระนาบลงบนตัวอย่างหิน (Oriented sample) (รูปที่ 2.2) เพื่อใช้เป็นระนาบอ้างอิงทำให้ทราบถึงการวางตัวของระนาบ การบิดเบี้ยวเดิมของหินในหินโผล่ที่เราเก็บมาจากการสำรวจภาคสนามเมื่อเรานำกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงการเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่งเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Passchier and Trouw, 2005)

2.3 ศึกษาในห้องปฏิบัติการ

2.3.1 กำหนดตำแหน่งลงในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่า และแผนภาพกุหลาบ (รูปที่ 2.3) โดยข้อมูลสำหรับการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างในพื้นที่ศึกษานั้นเป็นข้อมูลในภาคสนาม ได้แก่การวางตัวของชั้นหิน โครงสร้างแนวเส้น แกนชั้นหินคดโค้ง และรอยเลื่อน หรือโครงสร้างอื่นๆที่พบ เพื่อดูลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง การเปลี่ยนแปลงลักษณะในระดับกลาง (Mesoscopic scale) ที่ปรากฏของแต่ละจุดศึกษาแล้วนำมาวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างภาพรวมของพื้นที่ศึกษาบริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี จากนั้นทำการถ่ายรูปลักษณะหินโผล่และธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏชัดเจน โดยข้อมูลข้างต้นสามารถนำไปกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่า และแผนภาพกุหลาบเพื่อใช้วิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างซึ่งจะนำมาใช้ตีความถึงวิวัฒนาการโครงสร้างของพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ ตามลำดับ

2.3.2 ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) จากแผ่นหินขัดบาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Polarizing microscope) การศึกษานี้เกี่ยวกับลักษณะเนื้อผิว (Texture) ของหินและแร่ ที่บ่งชี้ถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยาเช่นการยืดของเม็ดแร่ การแตกของแร่ อย่างเป็นระบบ ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (Polarizing microscope) ซึ่งในขั้นตอนการทำแผ่นหินบาง (Thin section) เพื่อให้แสดงลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ที่ชัดเจนและถูกต้องมากที่สุด

มีลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

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

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

3) นำด้านล่าง (Bottom) ของแผ่นหินที่พร้อมติดสไลด์มาติดกับสไลด์ (ระวังอย่าติดสไลด์ที่ด้านบนของแผ่นหิน เพราะจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้)

4) ดำเนินการทำแผ่นหินขัดบางตามขั้นตอนปกติ

2.4 รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

เพื่อตีความผลการศึกษา รวบรวมข้อมูลที่ได้จากภาคสนาม, จากการกำหนดตำแหน่งลงในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่า แผนภาพกุหลาบ และจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค เพื่อวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างทั้งในระดับกลาง และระดับจุลภาค โดยวิเคราะห์รูปแบบการเปลี่ยนลักษณะ (deformation) ทิศทางของแรง (sense of stress) โครงสร้างแนวเส้น และแนวรอยเลื่อนของหินในพื้นที่ศึกษาทั้งหมดเป็นต้น

2.5 อภิปรายและสรุปผลการศึกษา นำเสนอในรูปแบบสัมมนา และจัดทำรูปเล่มรายงาน

รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการศึกษา มาอภิปรายในเรื่องรูปแบบของโครงสร้าง (Structural style) และวิวัฒนาการของโครงสร้าง (Structural evolution) ของพื้นที่ศึกษา โดยวิเคราะห์ร่วมกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้สนับสนุนข้อมูลผลการศึกษาที่มีความสอดคล้องกันและสรุปผลการศึกษาจากผลลัพธ์ ทั้งหมดนำเสนอในรูปแบบสัมมนาและจัดทำรูปเล่มรายงาน

บทที่ 3

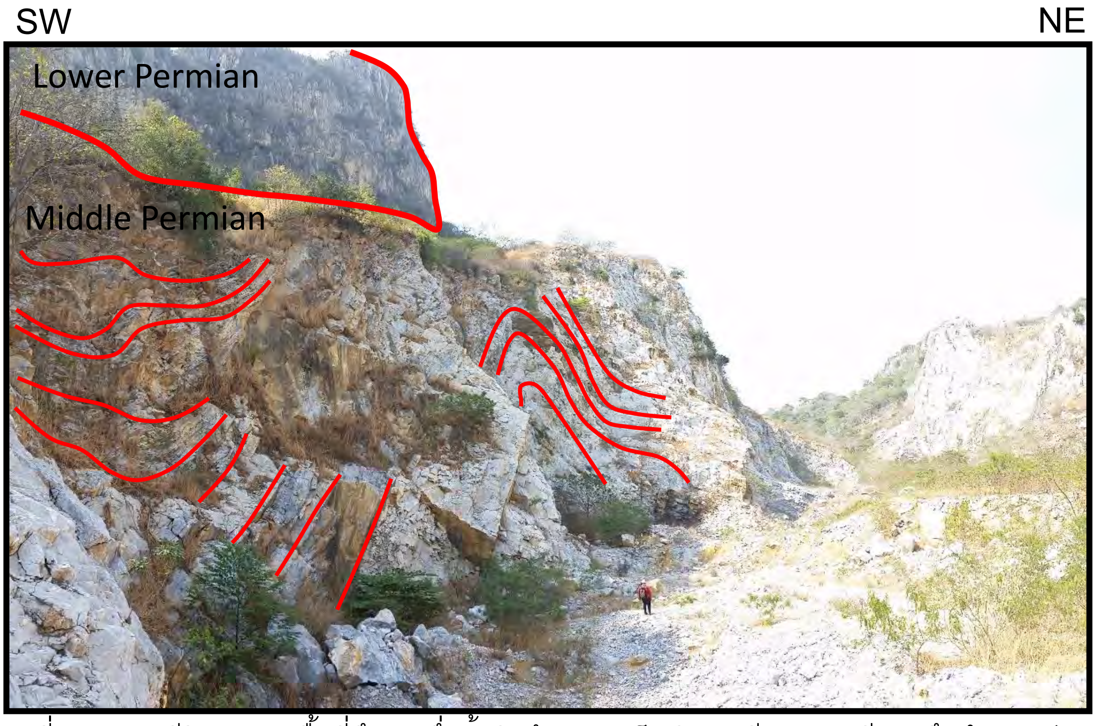
ผลการศึกษา (Result)

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการแสดงผลลัพธ์ทั้งหมดจากการศึกษาระดับกลาง (Mesoscopic scale) โดยการออกภาคสนาม และจากการศึกษาระดับจุลภาค (Microscopic scale) โดยการศึกษาภายใต้แผ่นหินขัดบาง (Thin section) ของบริเวณพื้นที่ศึกษาเขาวง ตำบลเขาวง จังหวัดสระบุรี(รูปที่3.1) โดยมีรายละเอียดดังนี้

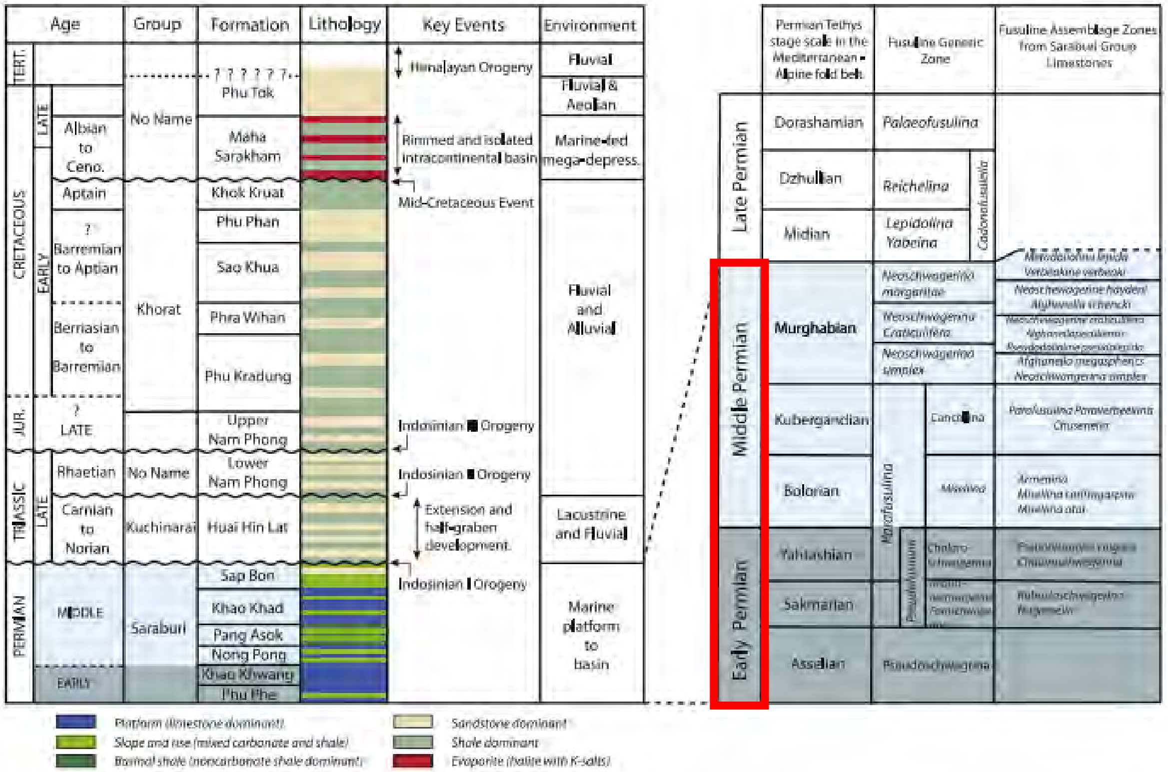
รูปที่3.1 ภาพถ่ายดาวเทียมบริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นพื้นที่ทำเหมือง

3.1 ธรณีวิทยา

ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาบริเวณเขาวง ตำบลเขาวง จังหวัดสระบุรี พบเป็นหินปูนสีขาว เทา เกิดเป็นชั้นบางๆ ถึงหนามาก และไม่เป็นชั้นก็มีบางแห่งลักษณะเป็นเนื้อดิน(รูปที่3.2) ซึ่งเมื่อเทียบเคียงกับแผนที่ธรณีวิทยาบริเวณจังหวัดสระบุรีจะพบว่าพื้นที่ศึกษาอยู่ในหมวดหินเขาขาด(Khao Khad Formation) (Hintong,1985) ซากดึกดำบรรพ์ที่พบส่วนใหญ่เป็นซาก fusulinids ชั้นหินด้านล่างพบซาก Neoschwagerina ซึ่งเป็น Fusulinids ที่บ่งบอกอายุเพอร์เมียนตอนกลาง(Middle Permian) และ ชั้นหินด้านบนพบซากPseudoschwagerina ซึ่งเป็น Fusulinids ที่บ่งบอกอายุเพอร์เมียนตอนล่าง (Lower Permian) โดยชั้นหินทั้งสองมีรอยต่อต่อกันโดยรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ (Thrust fault) (รูปที่3.3)



รูปที่3.2 A)ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา ซึ่งชั้นหินด้านล่างเป็นหินปูนสีเทาขาว มีซากดึกดำบรรพ์บ่งบอกอายุเพอร์เมียนตอนกลาง ส่วนชั้นหินด้านบนเป็นหินปูนสีเทาดำ มีซากดึกดำบรรพ์บ่างบอกอายุเพอร์เมียนตอนล่าง



รูปที่3.2 B)ลำดับชั้นหินและซากฟิวซูลินิดที่ใช้บ่งบอกอายุ (Ueno และ Charoentitirat, 2011)

3.2 ธรณีวิทยาโครงสร้าง

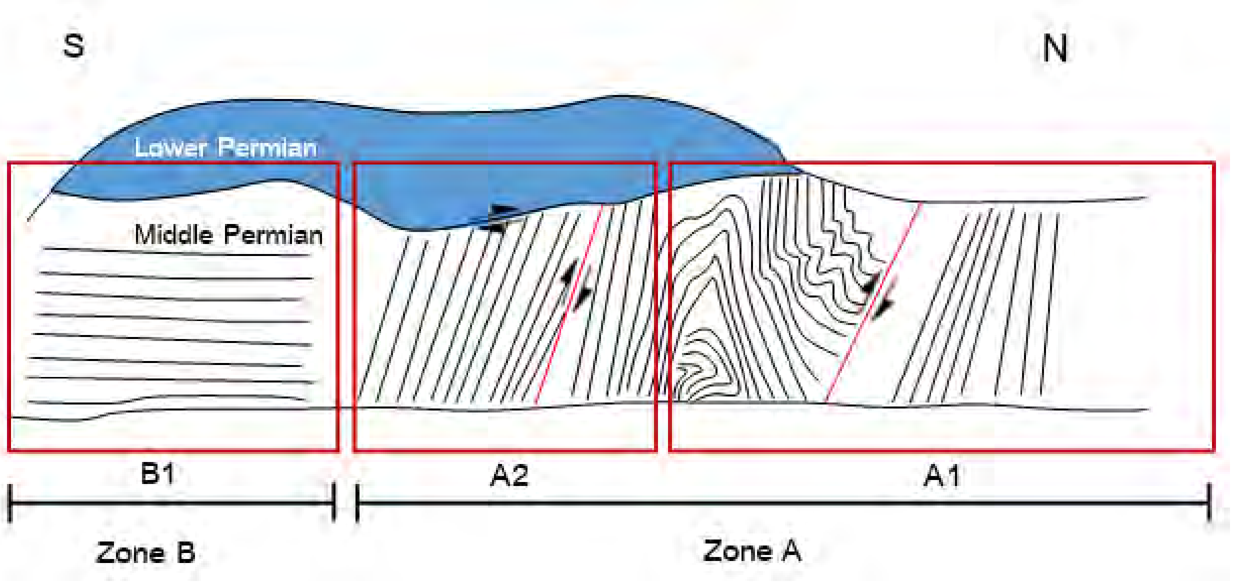
การวิเคราะห์ระบบรอยแตกของหมวดหินเขาขาด บริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี แบ่งออกได้เป็น 2 ระดับ ได้แก่

3.2.1. ระดับกลาง (Mesoscopic scale) จากการสำรวจภาคสนาม

3.2.2. ระดับจุลภาค (Microscopic scale) จากการศึกษาแผ่นหินขัดบางจากหินตัวอย่างระบุตำแหน่ง เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคจากข้อมูลโครงสร้างต่างๆ สามารถวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาพแบบแตกเปราะ (Brittle deformation)

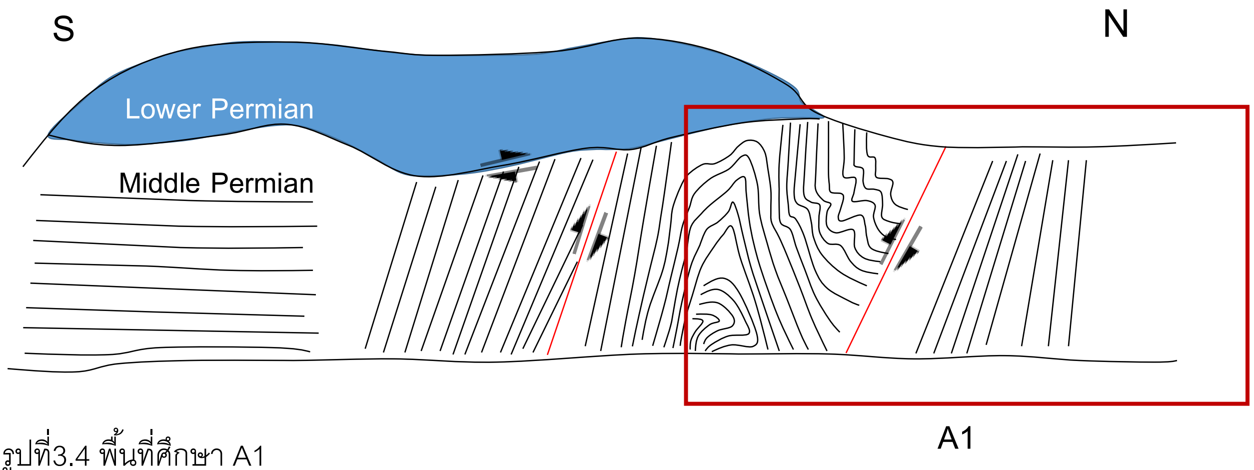
3.2.1 ระดับกลาง (Mesoscopic scale)

จากการสำรวจภาคสนามได้ทำการเก็บข้อมูลในภาคสนามและแบ่งข้อมูลตามโครงสร้างที่พบออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ บริเวณแรกคือ บริเวณ A (ZONE A) โดย บริเวณ A ได้แบ่งเป็นพื้นที่ย่อยๆอีก 2 พื้นที่ ได้แก่บริเวณ A1 และ A2 บริเวณที่สองคือ บริเวณ B (ZONE B) ได้แก่ บริเวณ B1 (รูป3.3)



รูปที่ 3.3 แสดงภาพตัดขวางของพื้นที่ศึกษาโดยแบ่งพื้นที่ตามโครงสร้างที่พบออกเป็นZone A และZone B

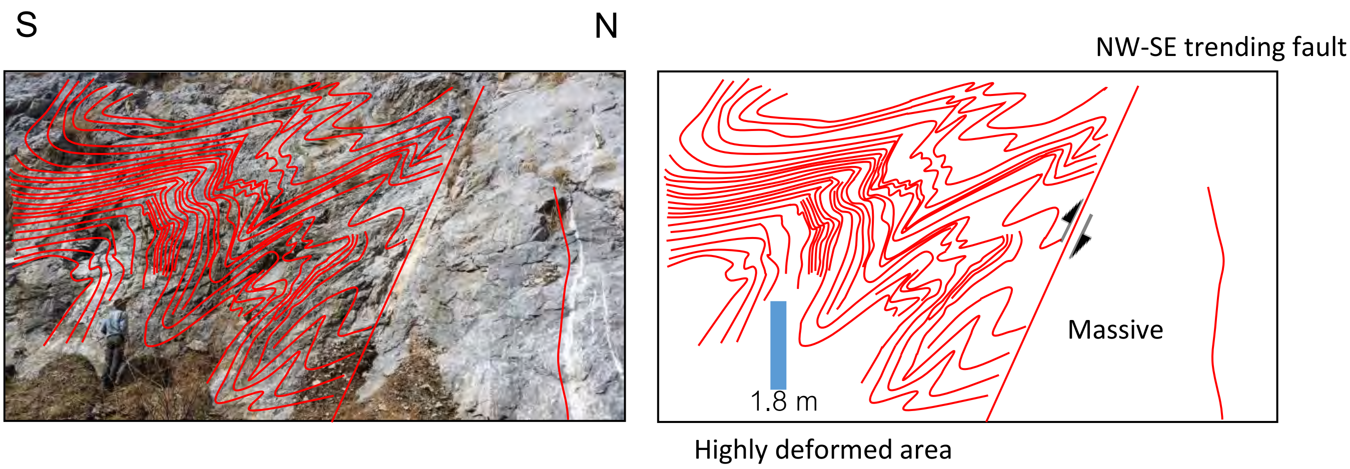
<u>พื้นที่ศึกษา A1</u> (รูปที่3.4)



รูปที่3.4 พื้นที่ศึกษา A1

- **ข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน** (Attitude of bedding)

ฝั่งหินเพดาน (Hanging wall) จะพบเป็นหินปูนเนื้อดินชั้นบางที่ถูกเปลี่ยนลักษณะอย่างรุนแรง (Highly deform area) ทำให้พบเป็นชั้นหินคดโค้งเล็กๆมากมาย โดยมีแกนชั้นหินคดโค้ง (Fold axis) วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) ส่วนฝั่งหินพื้น (Foot wall) จะพบเป็นหินปูนเนื้อแน่น (Massive limestone) และเมื่อขึ้นไปทางเหนือ (ฝั่งขวาของพื้นที่ศึกษา) จะพบเป็นหินปูนที่มีมุมเอียงเทสูงจนเกือบวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) โดยมีรอยเลื่อนย้อน (Reverse fault) วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (รูปที่3.5)

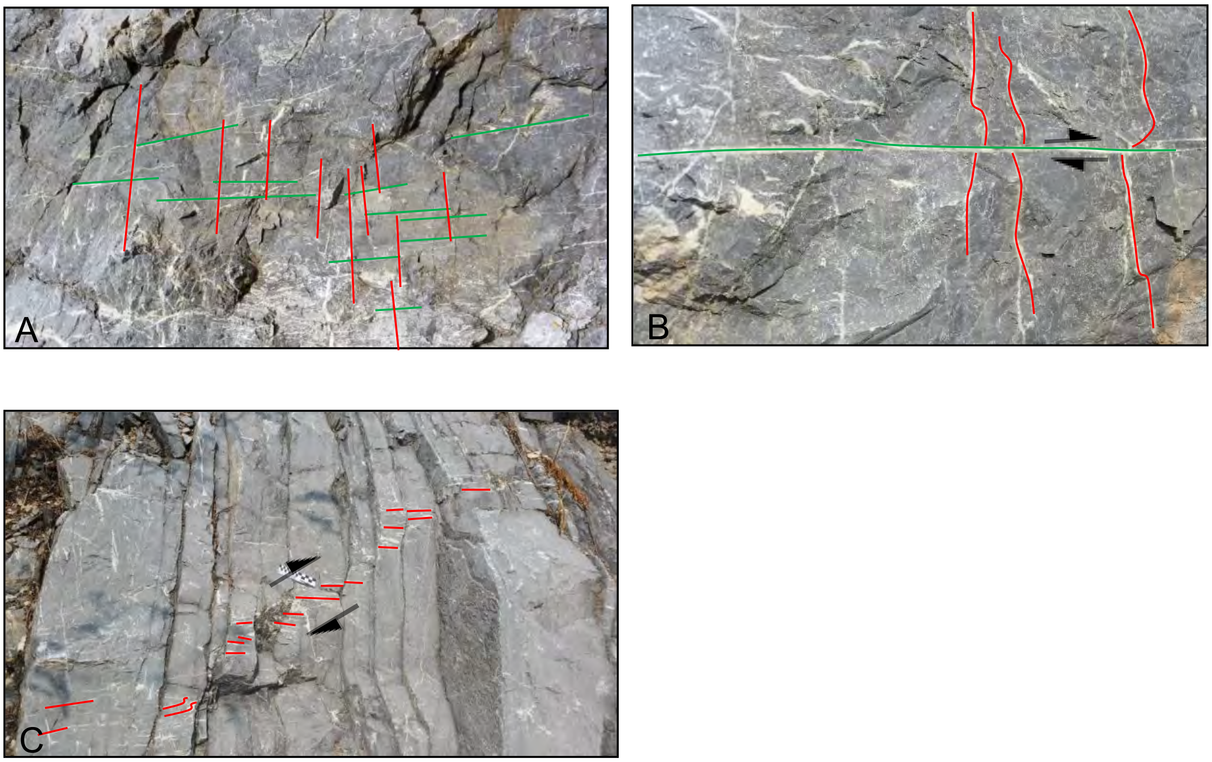


รูปที่3.5 ภาพแสดงลักษณะโดยรวมของพื้นที่ศึกษา A1

- **การเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ** (Brittle deformation)

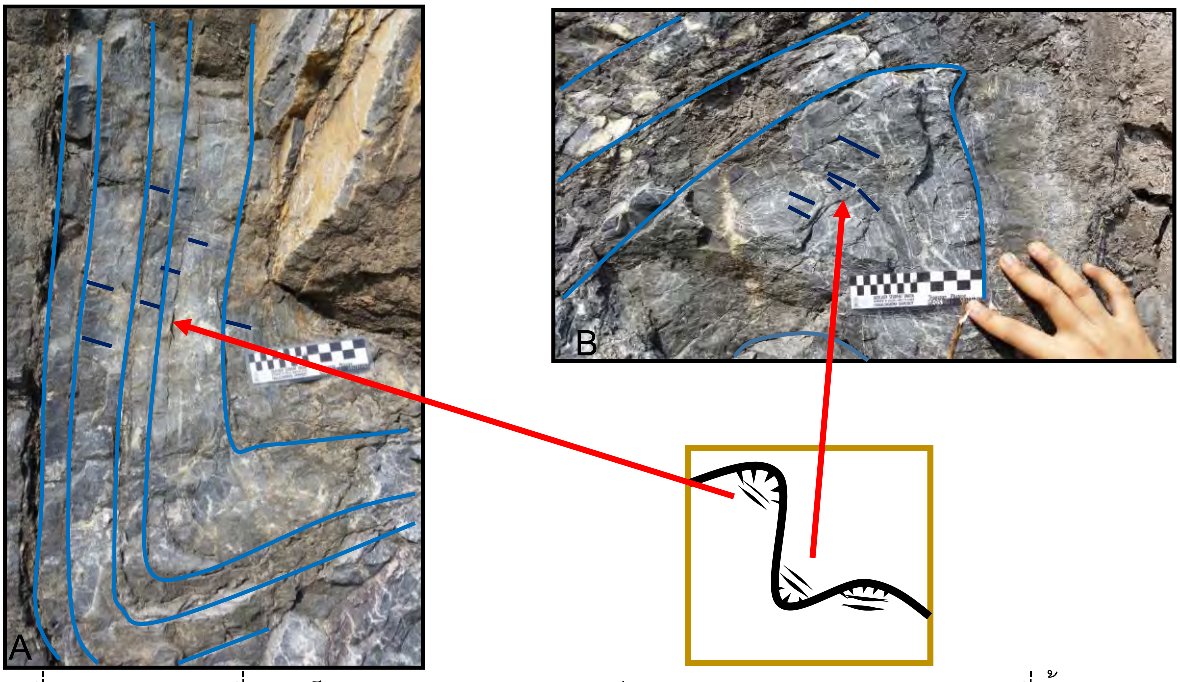
1) โครงสร้างรอยแตก (Fracture)

จากการสำรวจระบบรอยแตกในพื้นที่ A1 ในฝั่งหินพื้น(Foot wall) ซึ่งชั้นหินมีการวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) พบการตัดกันของรอยแตก 2 ระบบ(รูปที่3.6A) โดยระบบที่1 คือรอยแตกที่วางตัวขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) (สีแดง) ตัดกับระบบที่2 คือรอยแตกที่วางตัวในแนวระดับกับชั้นหิน (Sub-horizontal fracture) (สีเขียว) และจากการตัดกันของรอยแตก 2 ระบบ โดยรอยแตกที่มีอายุอ่อนกว่าตัดเข้ามาทำให้เกิดการเลื่อนของรอยแตกที่มีอายุแก่กว่าเกิดเป็นรอยแตกเฉือน(Shear fracture) (รูปที่3.6B) นอกจากนั้นยังพบ พบโครงสร้างแบบ en-echelon tension gashes ที่มีแร่เข้ามาเติม เกิดเป็นโครงสร้าง gash vein(รูปที่3.6C)



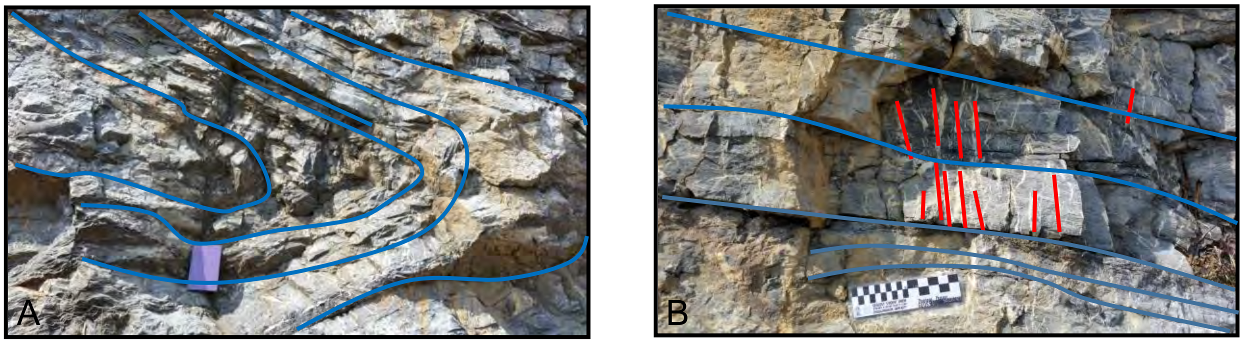
รูปที่ 3.6 A)รอยแตก 2 ระบบตัดกัน B)การตัดกันของรอยแตก 2 ระบบ โดยรอยแตกที่มีอายุอ่อนกว่าตัดเข้ามาทำให้เกิดรอยแตกเฉือน (Shear fracture) C)โครงสร้างแบบ en-echelon tension gashes ที่มีแร่เข้ามาเติม เกิดเป็นโครงสร้างgash vein

ส่วนในฝั่งหินเพดาน(Hanging wall) ซึ่งเป็นหินปูนชั้นบางที่ถูกเปลี่ยนลักษณะอย่างรุนแรง (Highly deform area) จึงทำให้พบรอยแตกที่สัมพันธ์กับบริเวณรอยพับ (Hinge zone) ทั้งรอยแตกที่แตกเป็นรูปแบบแผ่ออกรอบศูนย์กลาง(Radial pattern)(รูป3.7A) และรอยแตกที่ตั้งฉากกับกับแกนชั้นหินคดโค้ง (Fold axis-perpendicular fracture) (รูป3.7B)



รูปที่ 3.7 A)รอยแตกที่แตกเป็นรูปแบบแผ่ออกรอบศูนย์กลาง(Radial pattern) B)รอยแตกที่ตั้งฉากกับกับแกนชั้นหินคดโค้ง (Fold axis-perpendicular fracture)

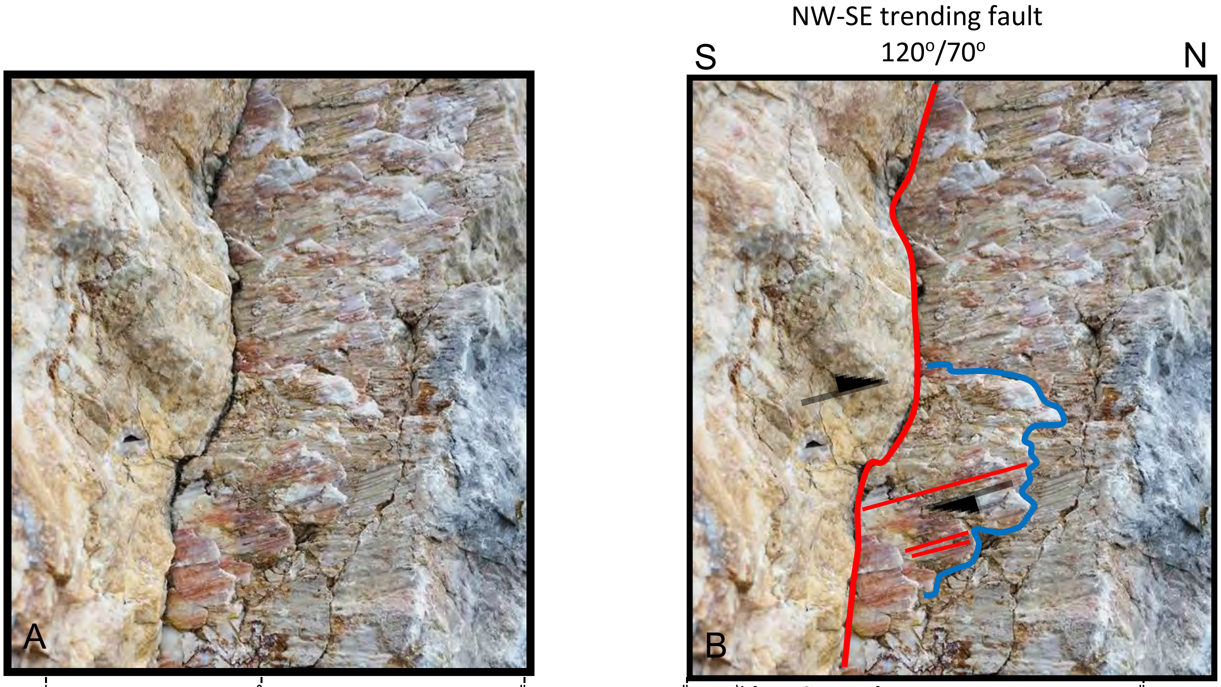
รอยคดโค้งนอนทับ (Recumbent fold)(รูปที่3.8A)แสดงถึงการถูกเปลี่ยนลักษณะอย่างรุนแรงของพื้นที่ และรอยแตกที่แตกเป็นรูปแบบแผ่ออกรอบศูนย์กลาง(Radial pattern) (รูปที่3.8B)



รูปที่ 3.8 A)รอยคดโค้งนอนทับ (Recumbent fold) B)รอยแตกที่แตกเป็นรูปแบบแผ่ออกรอบศูนย์กลาง (Radial pattern)

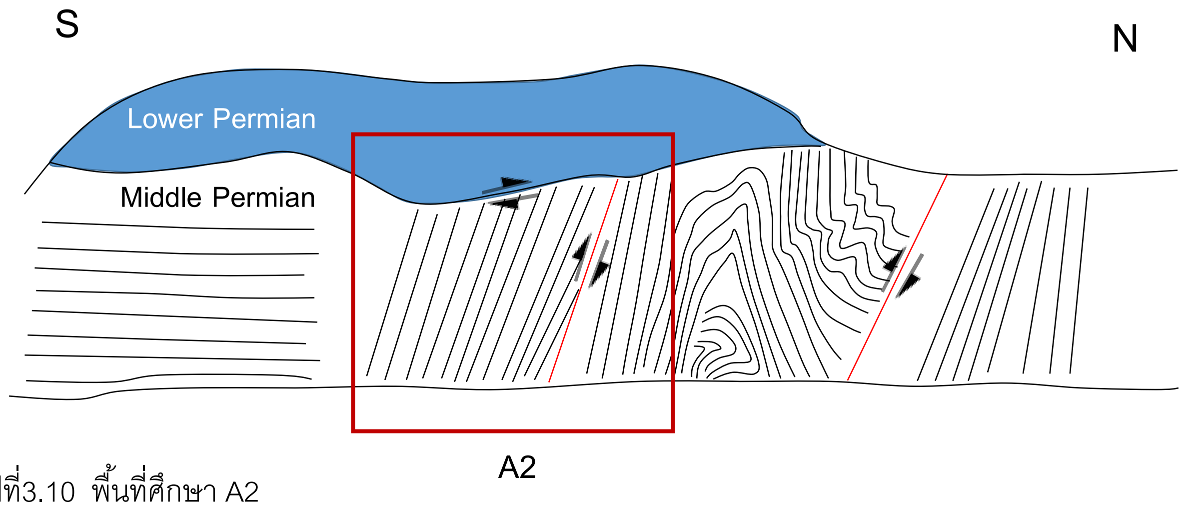
2) โครงสร้างรอยเลื่อน (Fault)

จากการสำรวจพบรอยเลื่อนย้อน (Revers fault) โดยระนาบรอยเลื่อน (Fault plane) วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) 120°/70° (รูปที่3.9A)นอกจากนี้ยังพบหลักฐานของโครงสร้างแสดงทิศทางการเลื่อน(Chatter mark) และ รอยไถล (Slickenside) ซึ่งบอกถึงทิศทางการเลื่อนไถลของระนาบรอยเลื่อน จากข้อมูลทำให้สรุปได้ว่ารอยเลื่อนนี้เป็นรอยเลื่อนเฉียง (Oblique fault) โดยเป็นรอยเลื่อนย้อนแบบซ้ายเข้า (Reverse sinistral fault) (รูปที่3.9B)



รูปที่ 3.9 A) หลักฐานซึ่งบ่งบอกทิศทางการเลื่อนของรอยเลื่อน ได้แก่โครงสร้างแสดงทิศทางการเลื่อน (Chatter mark) และ รอยไถล (Slickenside) B) รอยเลื่อนย้อนแบบซ้ายเข้า Oblique slip (Reverse sinistral fault)

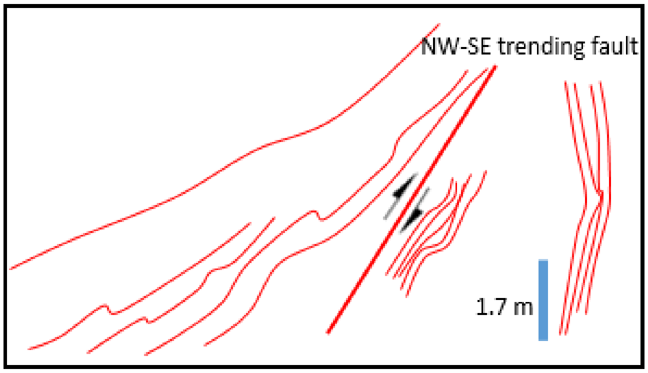
<u>พื้นที่ศึกษา A2</u> (รูปที่3.10)



รูปที่3.10 พื้นที่ศึกษา A2

- **ข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน** (Attitude of bedding)

ทั้งฝั่งหินพื้น (Foot wall) และฝั่งหินเพดาน (Hanging wall) พบเป็นหินปูนชั้นหนา (Thick-bed limestone) และพบหินปูนบางส่วนเป็นหินปูนแบบเนื้อแน่น (Massive limestone) โดยมีมุมเอียงเทสูงจนเกือบวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) และมีรอยเลื่อนย้อน (Reverse fault) วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (รูปที่3.11)

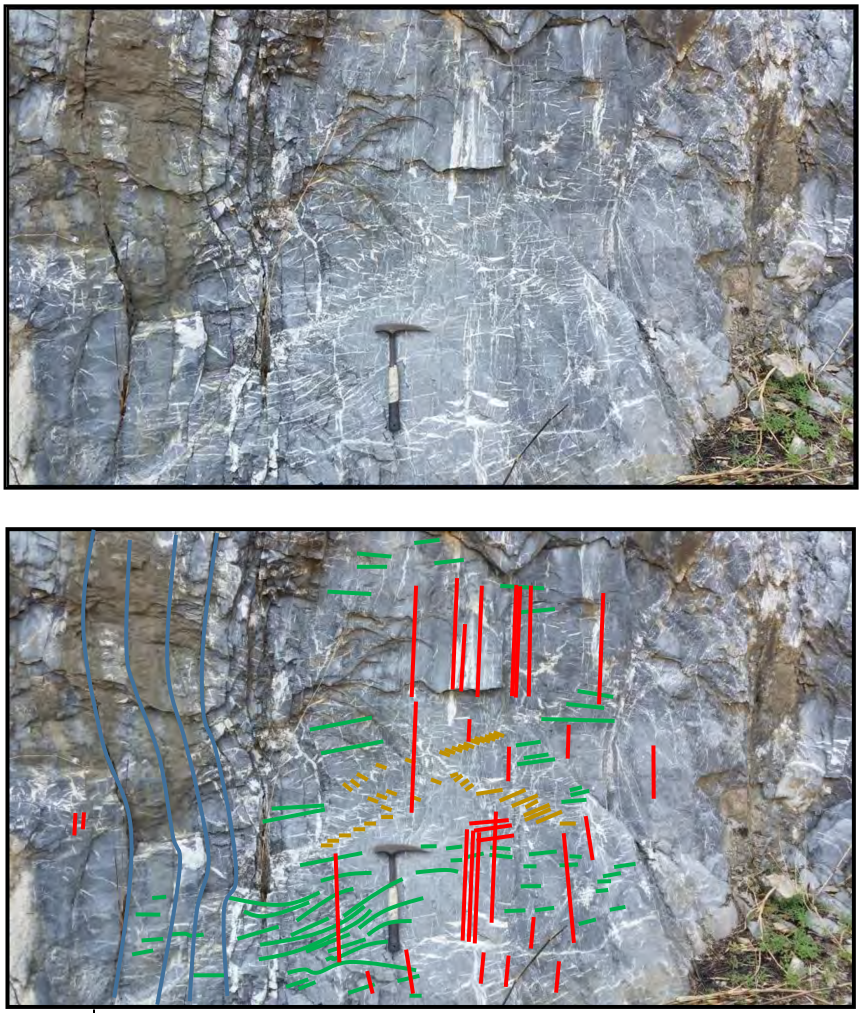


รูปที่3.11 ภาพแสดงลักษณะโดยรวมของพื้นที่ศึกษา A2

- **การเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ** (Brittle deformation)

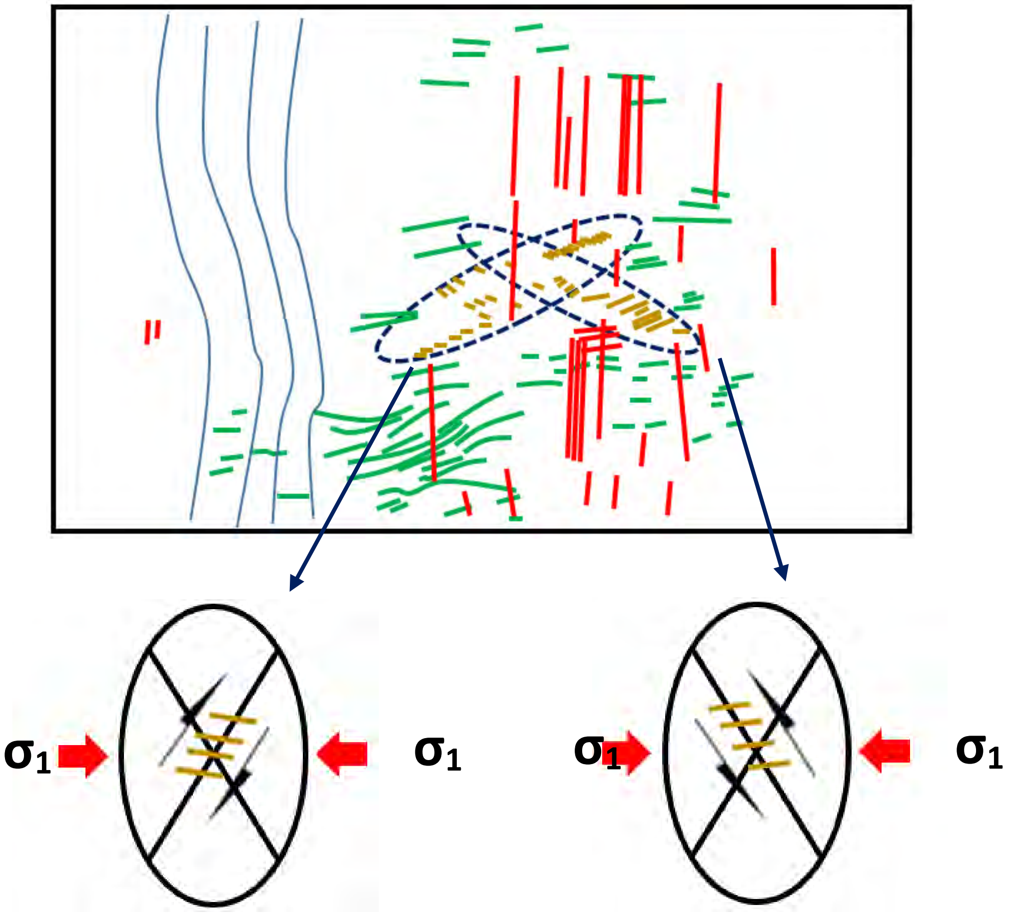
1) โครงสร้างรอยแตก (Fracture)

จากการสำรวจระบบรอยแตกในพื้นที่ A2 ซึ่งชั้นหินมีการวางตัวในแนวตั้ง(Vertical bedding) ยังคงพบการตัดกันของรอยแตก 2 ระบบกระจายตัวต่อเนื่องมา โดยระบบที่1 คือรอยแตกที่วางตัวขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) (สีแดง) ตัดกับระบบที่2 คือรอยแตกที่วางตัวในแนวระดับกับชั้นหิน (Sub-horizontal fracture) (สีเขียว) นอกจากนั้นยังพบ พบโครงสร้างแบบ en-echelon tension gashes ที่ตัดกัน 2 แนวเป็นรูปกากบาท(สีทอง) ที่มีแร่เข้ามาเติม เกิดเป็นโครงสร้างgash vein 2 แนว (รูปที่3.12A และรูปที่3.12B)



รูปที่ 3.12 A)รอยแตกที่พบหน้าหินโผล่ B)การแปลข้อมูลจากรูปภาพ ประกอบด้วยรอยแตก 2 ระบบตัดกัน (สีแดงกับสีเขียว) และโครงสร้าง gash vein ที่ตัดกัน 2 แนว(สีทอง)

การแปลความหมายของโครงสร้างแบบ en-echelon tension gashes ที่ตัดกัน 2 แนวเป็นรูปกากบาท(สีทอง) ที่มีแร่เข้ามาเติม เกิดเป็นโครงสร้าง gash vein 2 แนว ซึ่งสัมพันธ์กับแรงบีบอัดที่เข้ามากระทำ (รูปที่3.13)

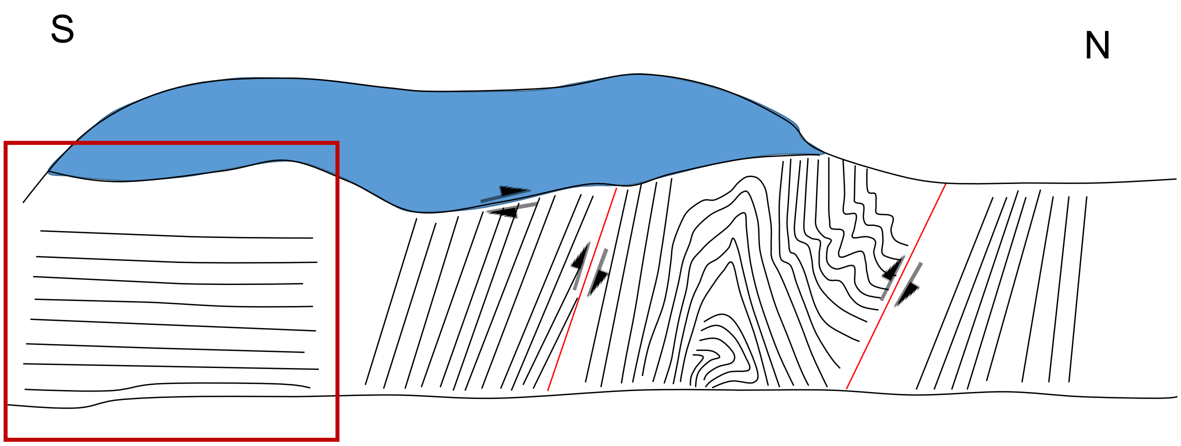


รูปที่ 3.13 ทรงรีความเครียด (Strain ellipsoid) ซึ่งสัมพันธ์กับแรงบีบอัดที่เข้ามากระทำ(σ_1) อธิบายการเกิดโครงสร้าง en-echelon tension gashes 2 แนวที่ตัดกันเป็นรูปกากบาท

2) **โครงสร้างรอยเลื่อน** (Fault)

จากการสำรวจพบรอยเลื่อนย้อน (Revers fault) โดยระนาบรอยเลื่อน (Fault plane) วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) 113°/75°

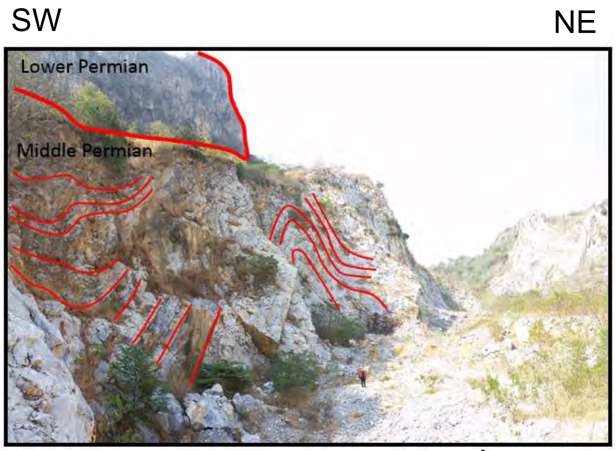
พื้นที่ศึกษา B1 (รูปที่3.14)



รูปที่3.14 พื้นที่ศึกษา B1

- **ข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน** (Attitude of bedding)

พื้นที่ศึกษาสามารถเห็นรอยต่อของชั้นหินในยุคเพอร์เมียนตอนกลาง (Middle Permian) กับเพอร์เมียนตอนล่าง (Lower Permian) อย่างชัดเจน ซึ่งชั้นหินด้านล่างเป็นหินปูนสีเทาขาว มีซากดึกดำบรรพ์บ่งบอกอายุเพอร์เมียนตอนกลาง ส่วนชั้นหินด้านบนเป็นหินปูนสีเทาดำ มีซากดึกดำบรรพ์บ่งบอกอายุเพอร์เมียนตอนล่าง การวางตัวของหินบริเวณนี้ยังคงต่อเนื่องมาจากพื้นที่ A2 โดยวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) (ที่เห็นแตกต่างจากบริเวณข้างเคียงเนื่องจากถูกตัดคนละแนว) (รูปที่3.15)

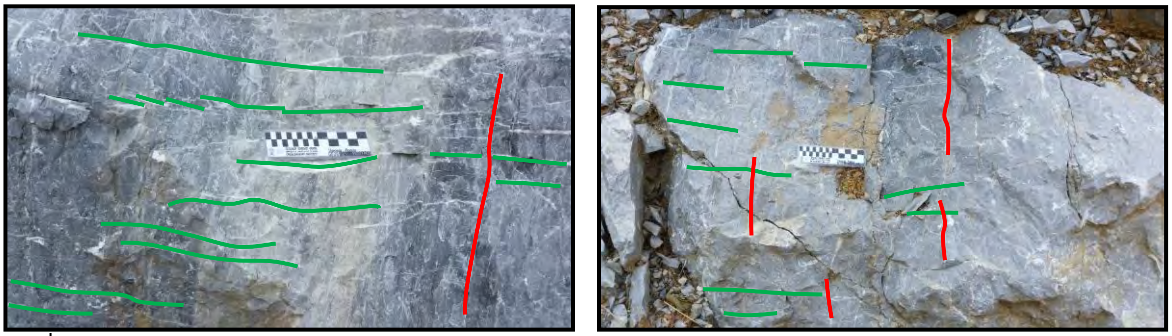


รูปที่**3.15** ภาพแสดงลักษณะโดยรวมของพื้นที่ศึกษา B1

● การเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ (Brittle deformation)

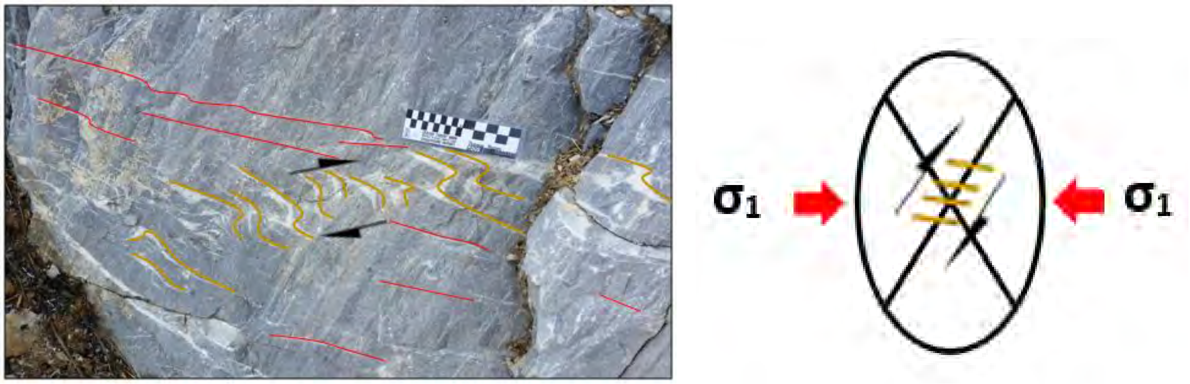
1) โครงสร้างรอยแตก (Fracture)

จากการสำรวจระบบรอยแตกในพื้นที่ B1 ซึ่งชั้นหินมีการวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) ยังคงพบการตัดกันของรอยแตก 2 ระบบ(รูปที่3.16)กระจายตัวต่อเนื่องมาถึงพื้นที่นี้ โดยระบบที่1 คือรอยแตกที่วางตัวขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) (สีแดง) ตัดกับระบบที่2 คือรอยแตกที่วางตัวในแนวระดับกับชั้นหิน (Sub-horizontal fracture) (สีเขียว) นอกจากนั้นยังพบ พบโครงสร้างแบบ en-echelon tension gashes ที่มีแร่เข้ามาเติม เกิดเป็นโครงสร้าง gash vein



รูปที่3.16 รอยแตก 2 ระบบตัดกัน (สีแดงกับสีเขียว)

โครงสร้างแบบ en-echelon tension gashes (สีทอง) ที่มีแร่เข้ามาเติม เกิดเป็นโครงสร้าง gash vein ซึ่งสัมพันธ์กับแรงบีบอัดที่เข้ามากระทำ (รูปที่3.17)

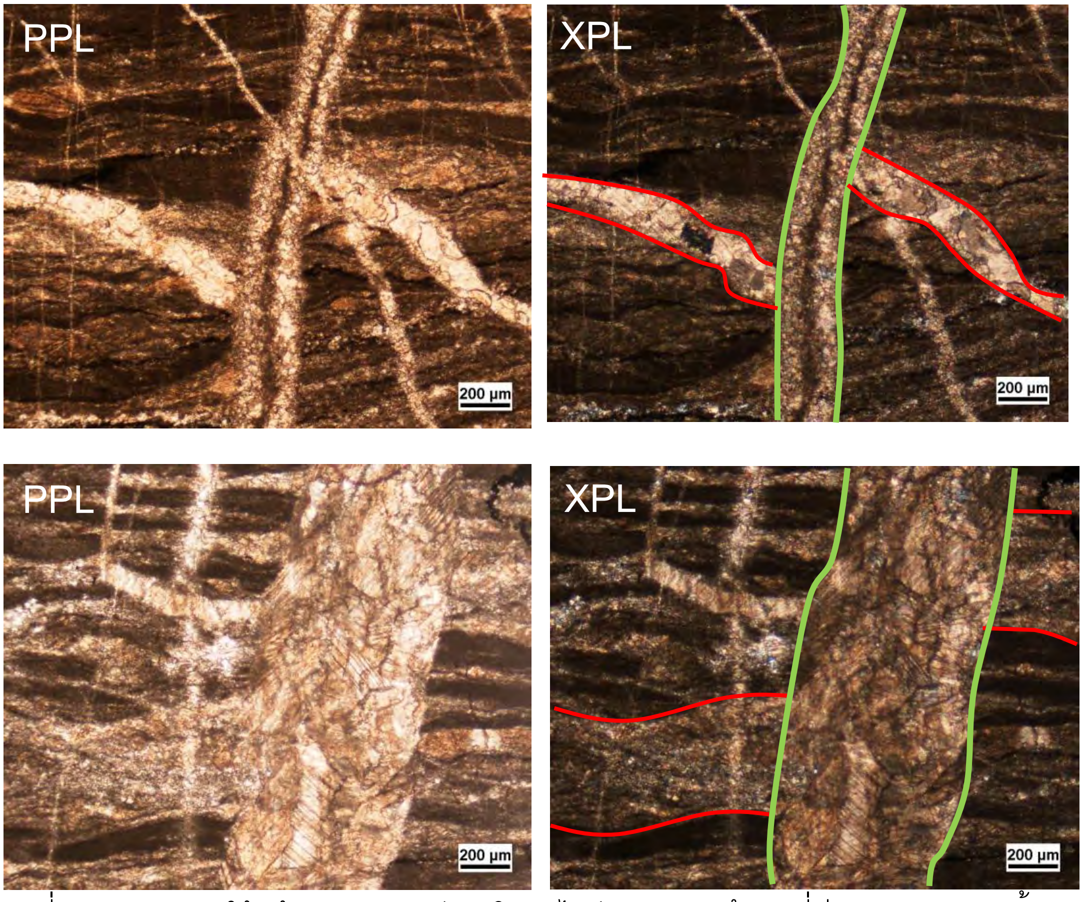


รูปที่3.17 โครงสร้าง gash vein(สีทอง) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์กับแรงบีบอัด และทรงรีความเครียด (Strain ellipsoid) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับแรงบีบอัดที่เข้ามากระทำ(σ_1)

3.2.2 **ระดับจุลภาค** (Microscopic scale)

ธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาคในแผ่นหินขัดบางจากตัวอย่างหินระบุตำแหน่งที่เก็บมาจากพื้นที่ศึกษา โดยจะนำมาศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับจุลภาค รวมไปถึงการศึกษาศิลาวรรณา ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ ทำให้ทราบถึงกลไกของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหินในพื้นที่ศึกษา

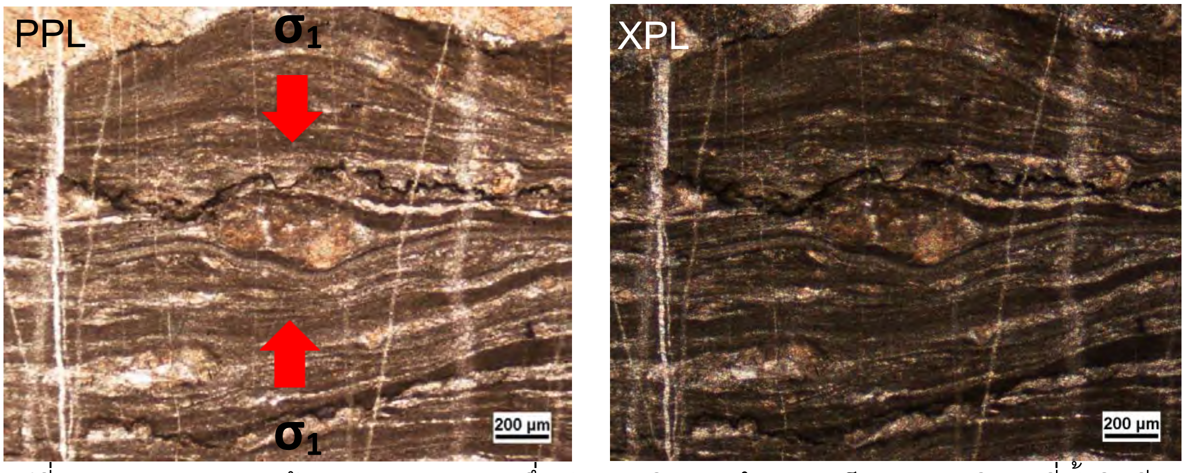
ตัวอย่างหินระบุตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาบริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี ส่วนใหญ่เป็นหินปูนเนื้อดิน (Argillaceous limestone) โดยธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาคที่พบในพื้นที่ศึกษาพบเป็นลักษณะของสายแร่ที่มีการตัดกันแล้วเกิดการเลื่อนตัวออกเล็กน้อย(รูปที่3.18) ซึ่งก็คือรอยแตกเฉือน(Shear fracture) ซึ่งหลักฐานนี้สามารถบอกได้ถึงอายุสัมพัทธ์(Relative age) โดยสายแร่ที่ถูกตัดแล้วเลื่อนตัวออกจะมีอายุแก่กว่า อีกหลักฐานหนึ่งคือความเป็นเนื้อเดียวกัน(Homoginity) ของเนื้อแร่ โดยสายแร่ที่มีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกันจะมีอายุอ่อนกว่า



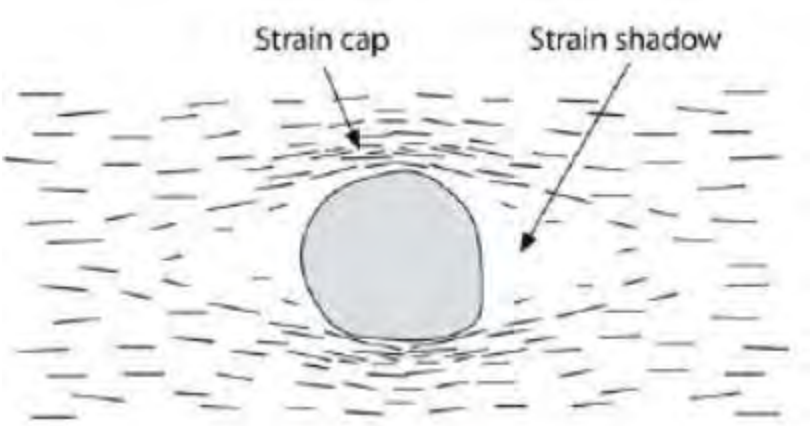
รูปที่3.18 ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์บริเวณจุดศึกษาที่มีการวางตัวของชั้นหินในแนวตั้ง (Vertical bedding)(ริ้วขนานคือการวางตัวของชั้นหิน) มีการตัดกันของรอยแตกในแนวระดับ(Sub-horizontal fracture)(สีเขียว) ตัดผ่านรอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน(Bed-parallel fracture)(สีแดง) (ซ้ายPPL และ ขวาXPL)

ธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาคที่พบในพื้นที่ศึกษาพบเป็นลักษณะของแร่แคลไซต์ที่ถูกแรงบีบอัดเข้ามากระทำ ทำให้มีลักษณะเป็นวงรี และเห็นริ้วขนานของชั้นหินที่แสดงชนิดของตัวบ่งชี้ทิศทางของแรงบีบอัด(Stress sense indicators) เกิดเป็นเขตเงาความเค้น(Strain shadow) (รูปที่3.19)

ซึ่งตัวอย่างหินระบุตำแหน่งเก็บมาจากบริเวณที่ชั้นหินมีการวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) จากโครงสร้างจุลภาคจึงบอกได้ว่ามีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในทิศทางซ้าย-ขวา



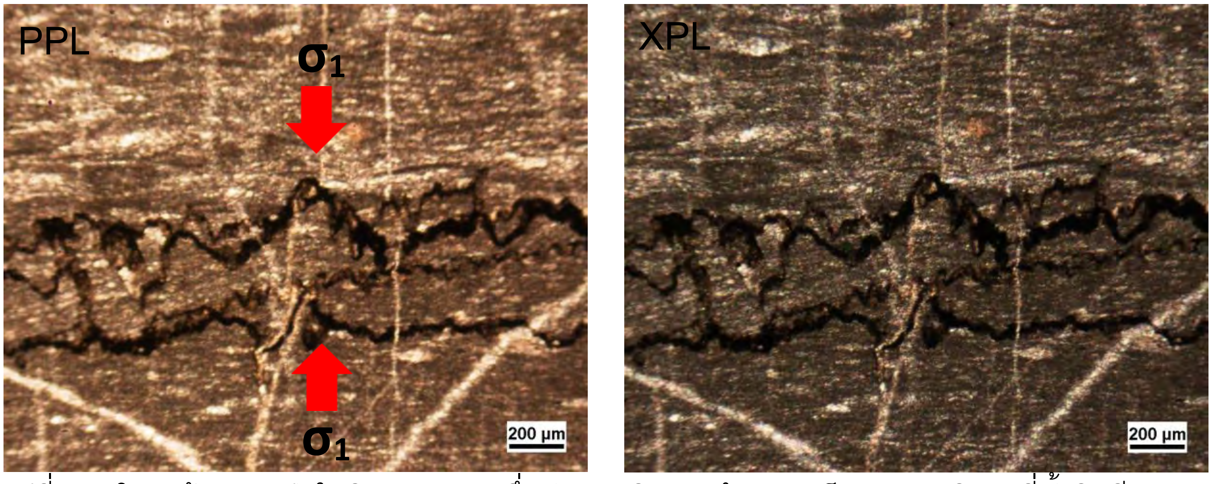
รูปที่3.19 เขตเงาความเค้น(Strain shadow) ซึ่งตัวอย่างหินระบุตำแหน่งเก็บมาจากบริเวณที่ชั้นหินมีการวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) จากโครงสร้างจุลภาคจึงบอกได้ว่ามีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในทิศทางซ้าย-ขวา (ซ้ายPPL และ ขวาXPL)



รูปที่3.20 ภาพแสดงชนิดของตัวบ่งชี้ทิศทางของแรงบีบอัด (stress sense indicators) คือเขตเงาความเค้น(Strain shadow) จากภาพแสดงแรงบีบอัดบนล่างของโครงสร้างระดับจุลภาคในแผ่นหินบาง (Robin, 1979)

ธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาคต่อมาที่พบในพื้นที่ศึกษาพบเป็นลักษณะผิวแบบฟันเลื่อย (Serrated surfaces) ภายในหิน ซึ่งเกิดจากการที่แร่ถูกแยกตัวออกไปโดยกระบวนการ Pressure dissolution ซึ่งเป็นกระบวนการที่หินทั้งหมดถูกลดปริมาตรจากแรงบีบอัด แร่ที่ไม่สามารถละลายได้ก็เหลือคงค้างและจะแยกตัวออกมาให้เห็นเป็นโครงสร้างแนวฟันในหิน (Stylolite) (รูปที่3.21)

ซึ่งตัวอย่างหินระบุตำแหน่งเก็บมาจากบริเวณที่ชั้นหินมีการวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) จากโครงสร้างจุลภาคจึงบอกได้ว่ามีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในทิศทางซ้าย-ขวา



รูปที่3.21 โครงสร้างแนวฟันในหิน(Stylolite) ซึ่งตัวอย่างหินระบุตำแหน่งเก็บมาจากบริเวณที่ชั้นหินมีการวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) จากโครงสร้างจุลภาคจึงบอกได้ว่ามีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในทิศทางซ้าย-ขวา (ซ้ายPPL และ ขวาXPL)

บทที่ 4

อภิปรายผลการศึกษา(Discussion)

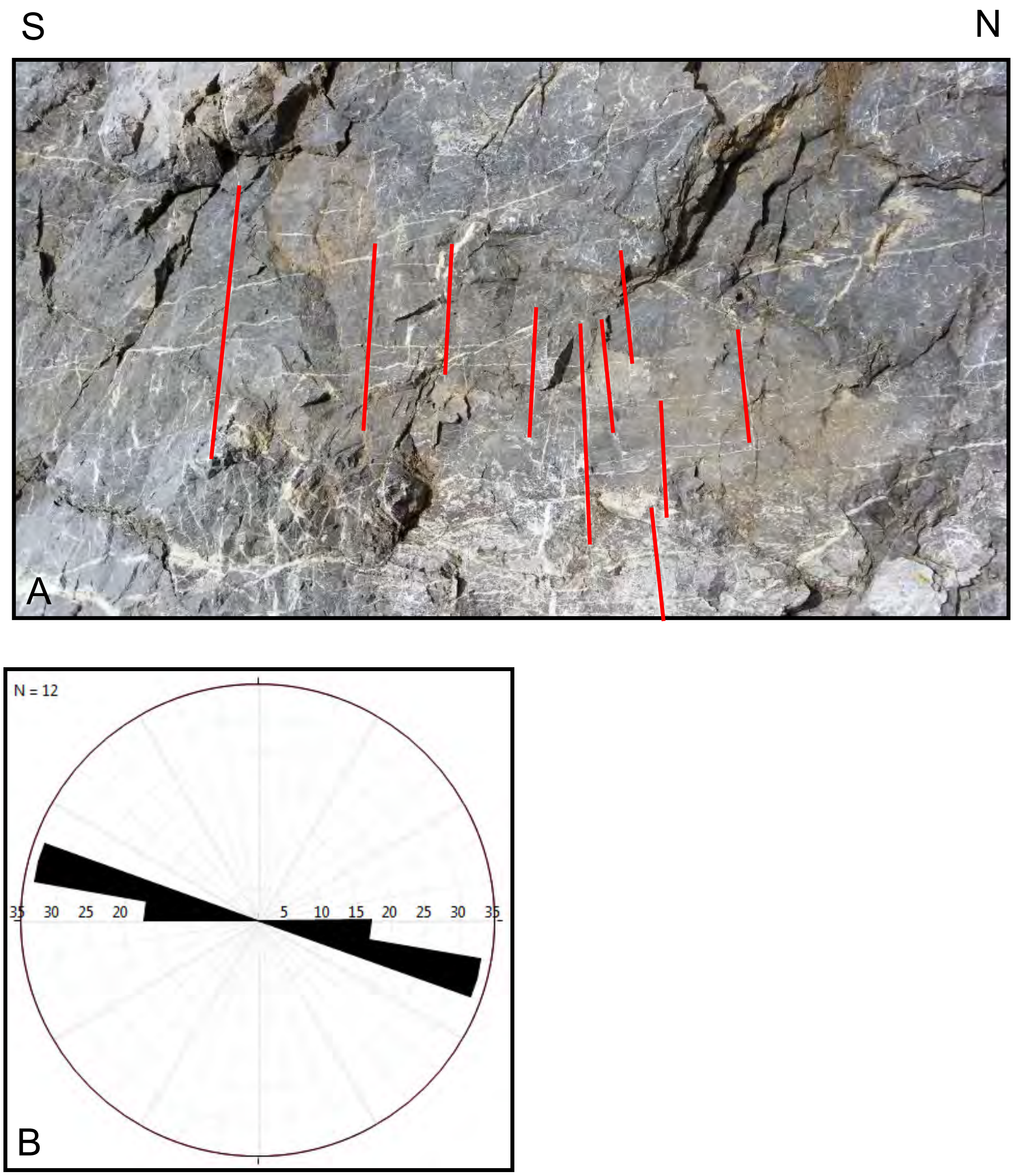
การศึกษาใน 2 ระดับ ได้แก่ ระดับกลางและระดับจุลภาค ได้ผลออกมาจากการสำรวจภาคสนามและการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคมารวบรวมและอภิปรายได้เป็นลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตก (Structural style of fracture) และวิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตก (Structural evolution of fracture) ของเขาวง รวมถึงวิวัฒนาการธรณีแปรสัณฐาน (Tectonic evolution) บริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรี

4.1 ลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตก (Structural style of fracture)

จากการสำรวจทั่วทั้งบริเวณพื้นที่ศึกษา A1 A2 และ B1 หลักฐานที่พบในพื้นที่ศึกษาที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ(Brittle deformation) ได้แก่ รอยแตกที่เห็นได้ชัด แบ่งเป็นทั้งหมด 3 ระบบ และรอยเลื่อน โดยแผนภาพกุหลาบ(Rose diagram) แสดงทิศทางการวางตัวของรอยแตกแต่ละระบบ

4.1.1 **รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน** (Bed-parallel fracture)

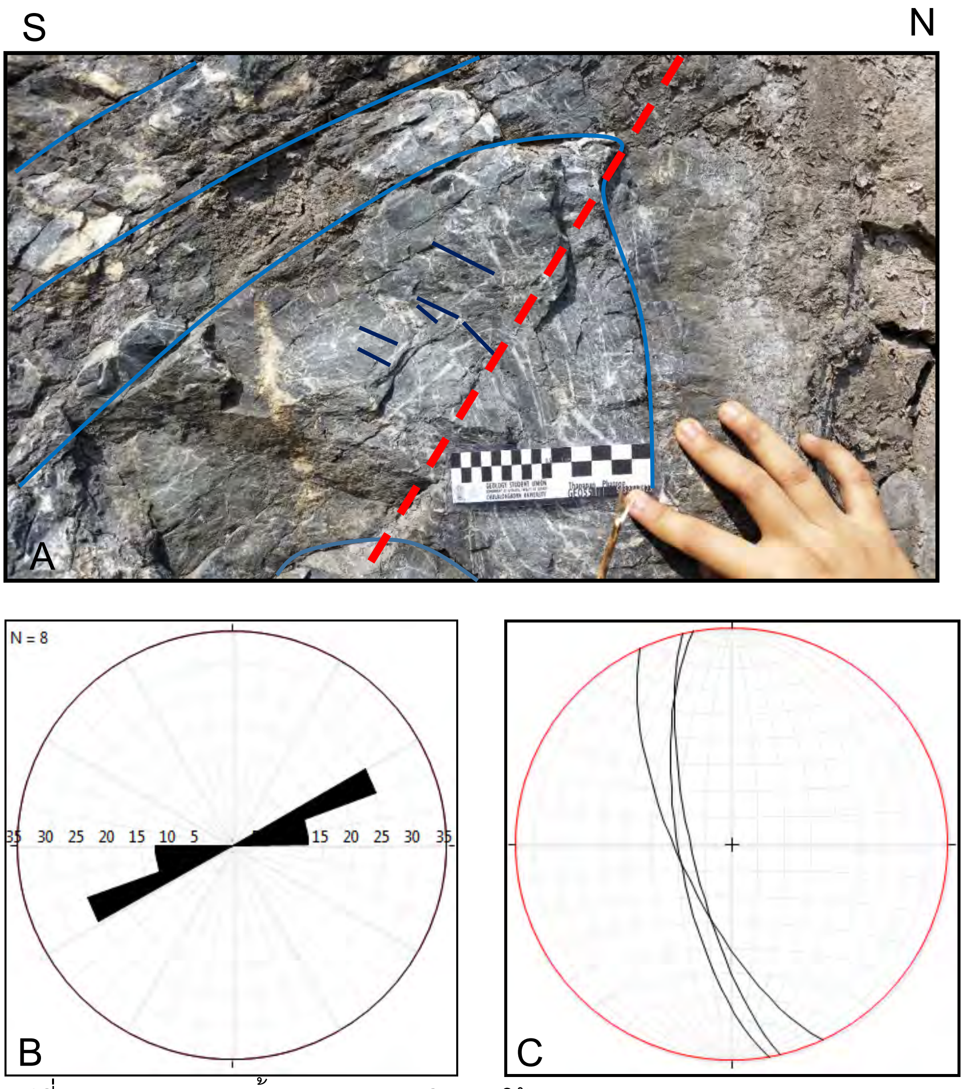
แนวรอยแตกจะคดโค้งและมีแนวการวางตัวขนานไปกับแนวการวางตัวของชั้นหิน ซึ่งส่วนใหญ่จะพบแนวรอยแตกวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้(WNW-ESE) เนื่องจากชั้นหินในพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้(WNW-ESE) และวางตัวในแนวตั้ง (Vertical bedding) (รูปที่4.1A)



รูปที่4.1 A)รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) (ชั้นหินวางตัวในแนวตั้ง) B)แผนภาพกุหลาบ(Rose diagram) แสดงการวางตัวของรอยแตกซึ่งวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (WNW-ESE)

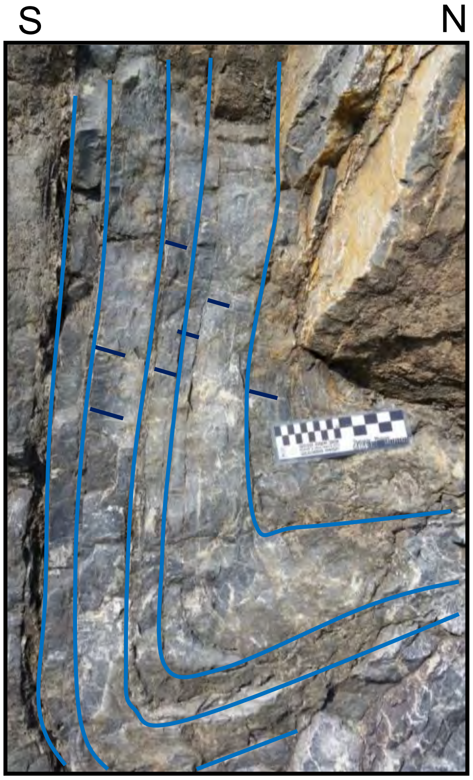
4.1.2 **รอยแตกที่เกิดบริเวณเขตพับการคดโค้ง** (Radial fracture & Fold-axis perpendicular fracture)

แนวรอยแตกระบบนี้จะวางตัวตั้งฉากกับแกนหินคดโค้ง(Fold-axis perpendicular fracture) ซึ่งการวางตัวของแนวรอยแตกระบบนี้จะเปลี่ยนไปตามแนวแกนหินคดโค้ง(Fold axis) ซึ่งแนวแกนหินคดโค้ง(Fold axis) ในพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่มีการวางตัวในแนว ตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือ(SE-NW) จึงพบรอยแตกระบบนี้วางตัวอยู่อยู่ในแนวตะวันตกเฉียงใต้-ตะวันออกเฉียงเหนือ(SW-NE) (รูปที่4.2A)



รูปที่ 4.2 A)แนวรอยตั้งฉากกับแกนหินคดโค้ง (Fold-axis perpendicular fracture)(สีน้ำเงินเข้ม) และแกนหินคดโค้ง(Fold axis)(เส้นประสีแดง) B)แผนภาพกุหลาบ(Rose diagram) แสดงการวางตัวของรอยแตกซึ่งวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงใต้-ตะวันออกเฉียงเหนือ(SW-NE) C)การกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่า (equal-area stereographic net) แสดงการวางตัวของแกนหินคดโค้ง(Fold axis) ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือ(SE-NW)

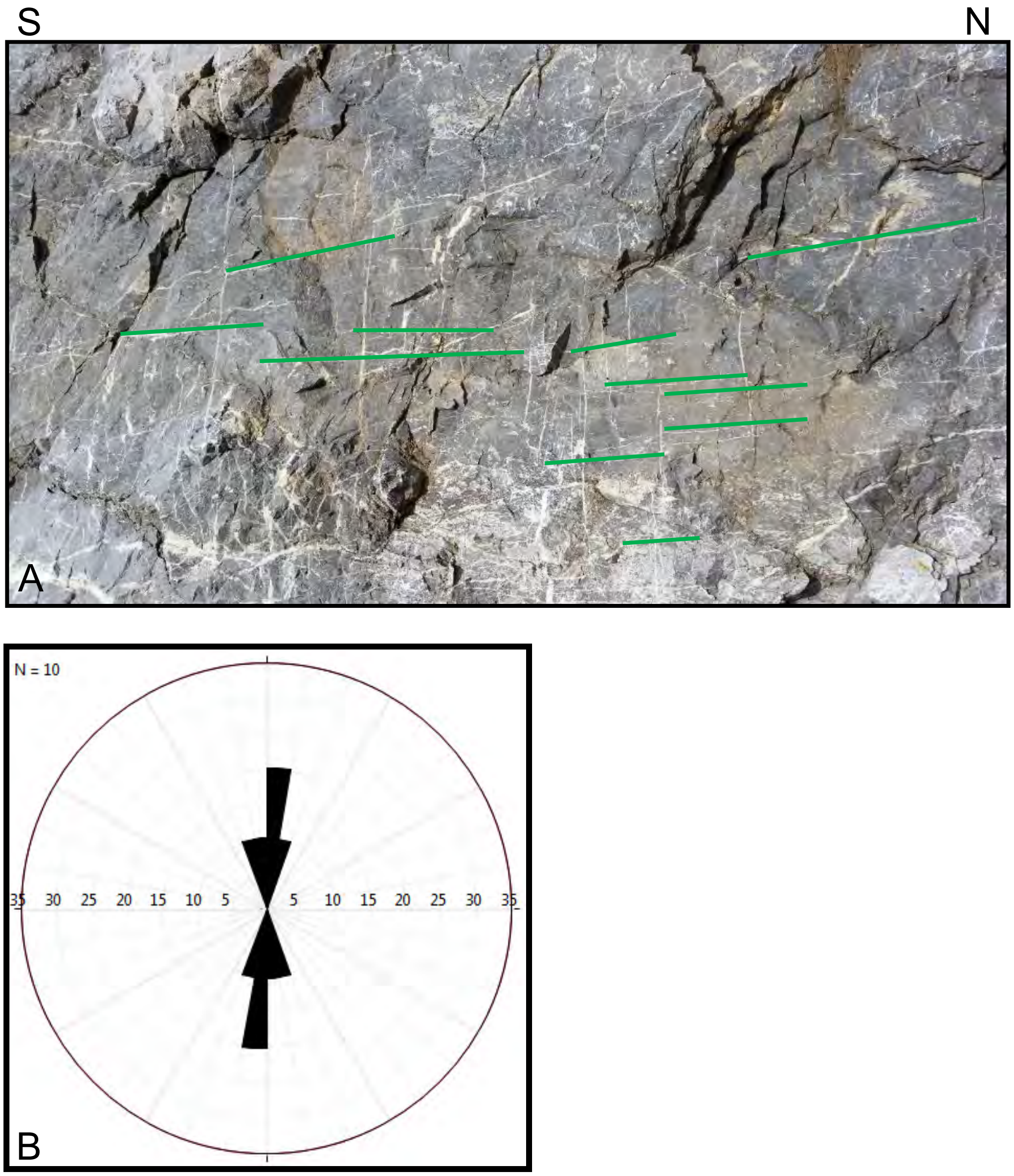
แนวรอยแตกระบบนี้จะกระจายตัวบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Hinge zone) พบเป็นรอยแตกรอบบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Radial fracture) ซึ่งการวางตัวของแนวรอยแตกระบบนี้จะเปลี่ยนไปตามเขตพับการคดโค้ง(Hinge zone) (รูปที่4.3)



รูปที่4.3 รอยแตกกระจายตัวบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Hinge zone) พบเป็นรอยแตกรอบบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Radial fracture)

4.1.3 **รอยแตกในแนวระดับ** (Sub-horizontal fracture)

แนวรอยแตกจะอยู่ในแนวระดับและมีมุมเอียงเทต่ำ จากหลักฐานในปัจจุบัน พบว่ารอยแตกระบบนี้แทรกตัดรอยแตกระบบอื่น และคาดว่าเป็นระบบรอยแตกที่มีอายุอ่อนที่สุดในพื้นที่ศึกษา ซึ่งส่วนใหญ่จะพบแนวรอยแตกวางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้(N-S) (รูปที่4.4A)



รูปที่4.4 A)รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) เป็นแนวรอยแตกที่อยู่ในแนวระดับและมีมุมเอียงเทต่ำ B)แผนภาพกุหลาบ(Rose diagram) แสดงการวางตัวของรอยแตกซึ่งวางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้(N-S)

4.1.4 **โครงสร้างระนาบรอยเลื่อน** (Fault plane)

รอยเลื่อนย้อน (Revers fault) มีระนาบรอยเลื่อน (Fault plane) วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) 120°/70° โดยพบหลักฐานของโครงสร้างแสดงทิศทางการเลื่อน (Chatter mark) และรอยไถล (Slickenside) ซึ่งบอกถึงทิศทางการเลื่อนไถลของระนาบรอยเลื่อน จึงสรุปได้ว่ารอยเลื่อนในพื้นที่เป็นรอยเลื่อนเฉียง (Oblique fault) โดยเป็นรอยเลื่อนย้อนแบบซ้ายเข้า (Reverse sinistral fault)

ในแผ่นหินขัดบาง ธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคที่พบเป็นการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ (Brittle deformation) โดยหลักฐานที่พบ เป็นลักษณะของสายแร่ที่มีการตัดกันแล้วเกิดการเลื่อนตัวออกเล็กน้อย ซึ่งก็คือรอยแตกเฉือน(Shear fracture) ซึ่งหลักฐานนี้สามารถบอกได้ถึงอายุสัมพัทธ์(Relative age) โดยสายแร่ที่ถูกตัดแล้วเลื่อนตัวออกจะมีอายุแก่กว่า อีกหลักฐานหนึ่งคือความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homoginity) ของเนื้อแร่ โดยสายแร่ที่มีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกันจะมีอายุอ่อนกว่า

อีกหลักฐานหนึ่งที่พบคือโครงสร้างเขตเงาความเค้น(Strain shadow) ที่บอกได้ว่ามีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในทิศทางซ้าย-ขวา และโครงสร้างแนวฟันในหิน(Stylolite) ที่บอกได้ว่ามีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในทิศทางซ้าย-ขวาเช่นกัน

4.2 **วิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตก** (Structural evolution of fracture)

แบบจำลองรูปแบบวิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของเขาเขาวง จังหวัดสระบุรี(รูป 4.5-4.7) มี 3 ลำดับดังนี้

4.2.1 การบีบอัด (Compression)

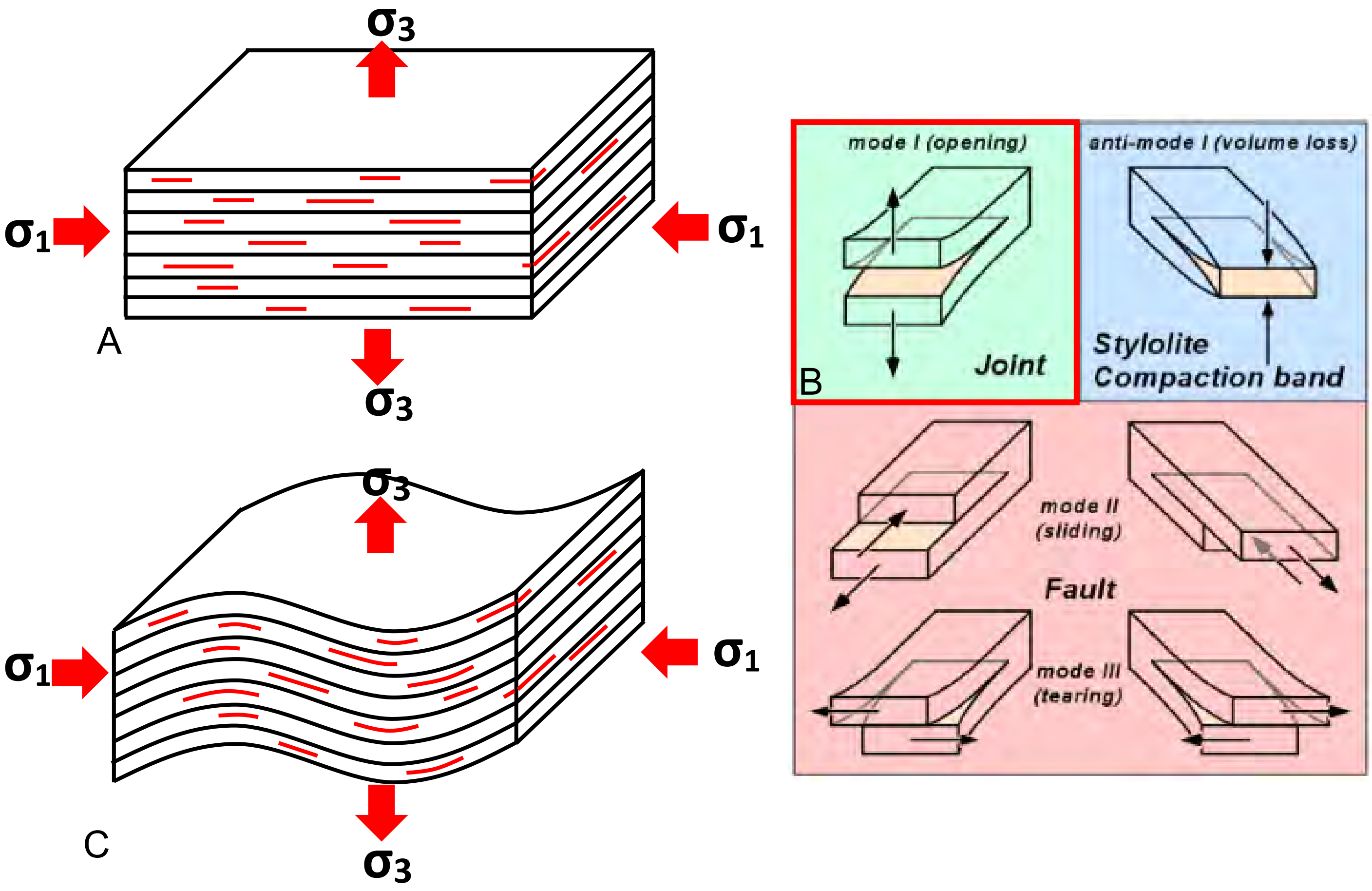
4.2.2 การเลื่อนย้อน (Thrusting)

4.2.3 การบีบอัด (Compression)

4.2.1 **การบีบอัด** (Stage 1: Compression)

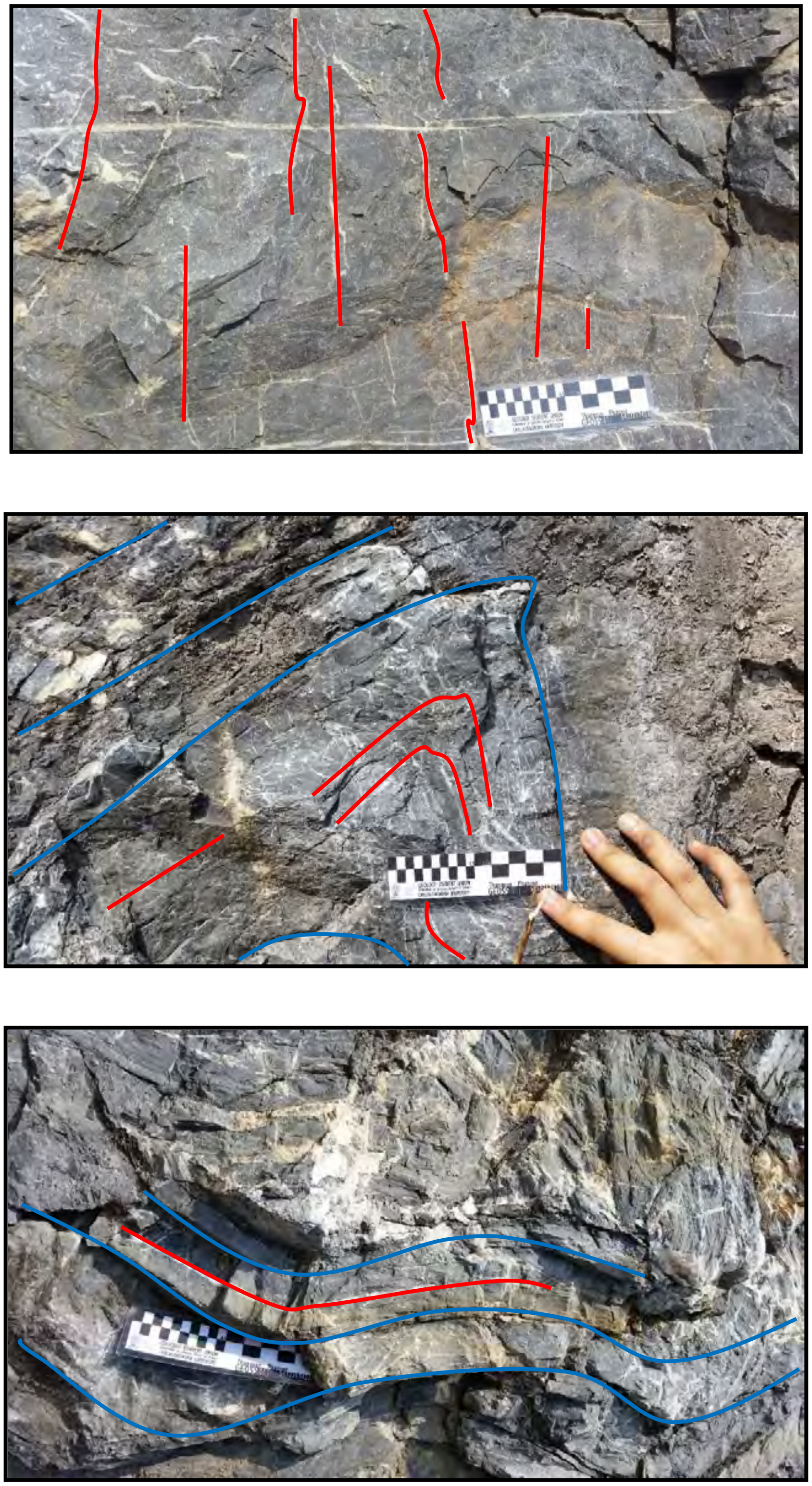
ตะกอนคาร์บอเนตมีการสะสมตัวในแนวระดับ และผ่านกระบวนการกลายเป็นหิน(Diagenesis) จากนั้นมีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในแนวตะวันออก-ตะวันตก(E-W) จึงทำให้รอยแตกมีการเปิดออกในแนวตั้งฉากกับแรงดึงออก(รูปที่4.5A) ตามหลักรูปแบบของการเกิดรอยแตก (Mode of fracture) สอดคล้องกับการเกิดรอยแตกรูปแบบที่ 1 ซึ่งเป็นรอยแตกแบบเปิดออก(Mode I opening)(รูปที่4.5B) จากนั้นแรงบีบอัดที่ยังคงเข้ามากระทำในทิศทางเดิม ทำให้ชั้นหินเกิดการคดโค้ง(Folding) ทำให้รอยแตกที่เคยเกิดขนานกับชั้นหิน เกิดการคดโค้งไปตามชั้นหิน(รูปที่4.5C) และภาพแสดงหินตัวอย่างที่แสดงรอยแตกระบบที่ 1(รูปที่4.5D)

เกิดเป็นรอยแตกระบบที่ 1 รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture)



รูปที่4.5 A)แรงบีบอัดเข้ามากระทำในแนวตะวันออก-ตะวันตก(E-W) จึงทำให้รอยแตกมีการเปิดออกในแนวตั้งฉากกับแรงดึงออก B)รอยแตกรูปแบบที่1 แบบเปิดออก(Mode I opening)(กรอบสีแดง)(Available at: URL:http://www.naturalfractures.com/1.htm. Accessed May 3, 2015) C)รอยแตกที่เกิดขนานกับชั้นหิน เกิดการคดโค้งขนานไปตามชั้นหิน

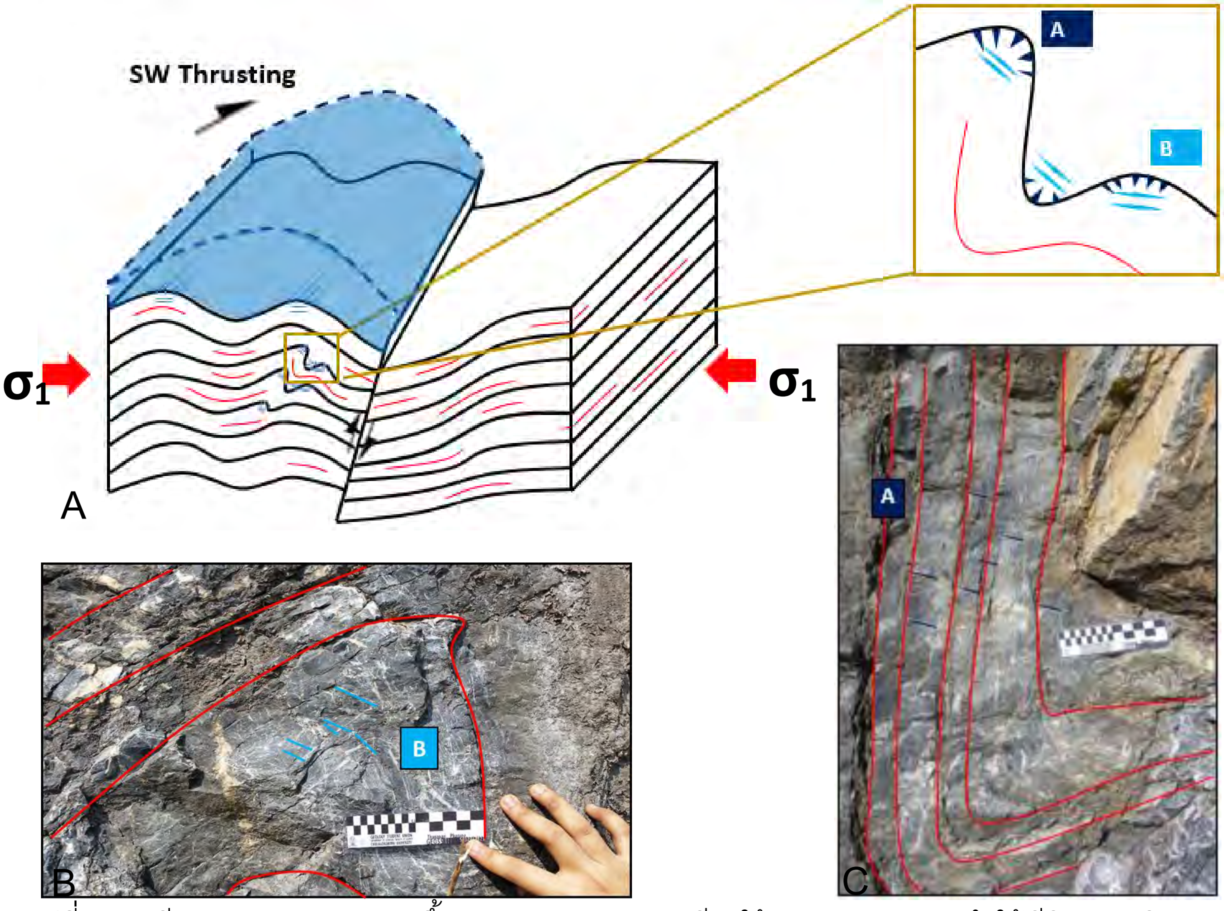
รูปที่4.5 D) หินตัวอย่างที่แสดงรอยแตกระบบที่ 1 ในพื้นที่ศึกษา



รูปที่4.5 D) หินตัวอย่างที่แสดงรอยแตกระบบที่ 1 ในพื้นที่ศึกษา

4.2.2 **การเลื่อนย้อน** (Stage 2: Thrusting)

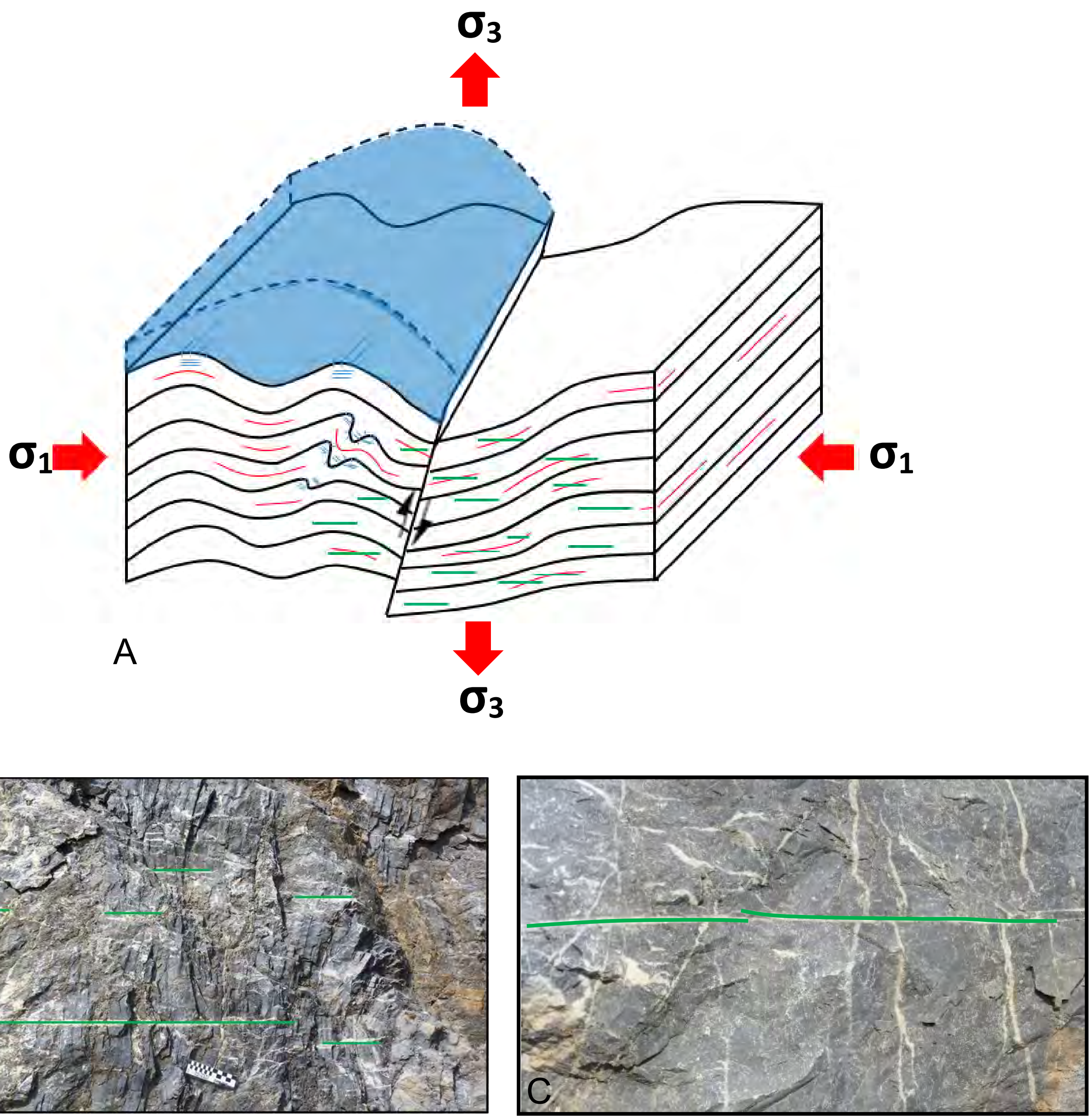
ในขณะที่แรงบีบอัดยังคงเข้ามากระทำในทิศทางเดิม ทำให้เกิดการแปรสภาพของชั้นหิน เกิดชั้นหินคดโค้ง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่ม(Ductile deformation)และในขั้นตอนที่ 2 นี้ เกิดขึ้นเมื่อชั้นหินอายุเพอร์เมียนตอนล่าง(Lower Permian) มีการดันตัว(Thrusting)ขึ้นมาบนชั้นหินอายุเพอร์เมียนตอนกลาง(Middle Permian) จากทางตะวันตกเฉียงใต้(SW Thrusting)เมื่อชั้นหินทนต่อแรงกระทำไม่ไหว ทำให้เกิดการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ(Brittle deformation) เกิดเป็นรอยเลื่อนย้อน(Reverse fault) ในพื้นที่และเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน(Inhomoginity)ของเนื้อหิน ทำให้มีหินบางบริเวณถูกเปลี่ยนลักษณะอย่างรุนแรง(Highly deformed area)กว่าบางบริเวณ ทำให้เห็นเป็นลักษณะของชั้นหินม้วนซ้อนทับ(Convolute bedding)หรือ ชั้นหินคดโค้งไม่ต่อเนื่อง(Disharmonic fold) และเมื่อทำการศึกษาบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Hinge zone) จะพบเป็นรอยแตกที่สัมพันธ์กับบริเวณเขตพับการคดโค้ง **เกิดเป็นรอยแตกระบบที่ 2 รอยแตกที่เกิดบริเวณเขตการคดโค้ง** (Radial fracture & Fold-axis perpendicular fracture) (รูปที่4.6A, 4.6B และ 4.6C)



รูปที่4.6 A)มีการดันตัว(Thrusting)ขึ้นมาจากทางตะวันตกเฉียงใต้(SW Thrusting) ทำให้มีหินบางบริเวณถูกเปลี่ยนลักษณะอย่างรุนแรง(Highly deformed area) B)และC) หินตัวอย่างที่แสดงรอยแตกระบบที่ 2

4.2.3 **การบีบอัด** (Stage 3: Compression)

แรงบีบอัดยังคงเข้ามากระทำในทิศทางเดิม ทำให้รอยแตกมีการเปิดออกในแนวตั้งฉากกับแรงดึงออกตามหลักรูปแบบของการเกิดรอยแตก(Mode of fracture) สอดคล้องกับการเกิดรอยแตกรูปแบบที่ 1 ซึ่งเป็นรอยแตกแบบเปิดออก(Mode I opening) **เกิดเป็นรอยแตกระบบที่ 3รอยแตกในแนวระดับ** (Sub-horizontal fracture) (รูปที่4.7A, 4.7B และ 4.7C)

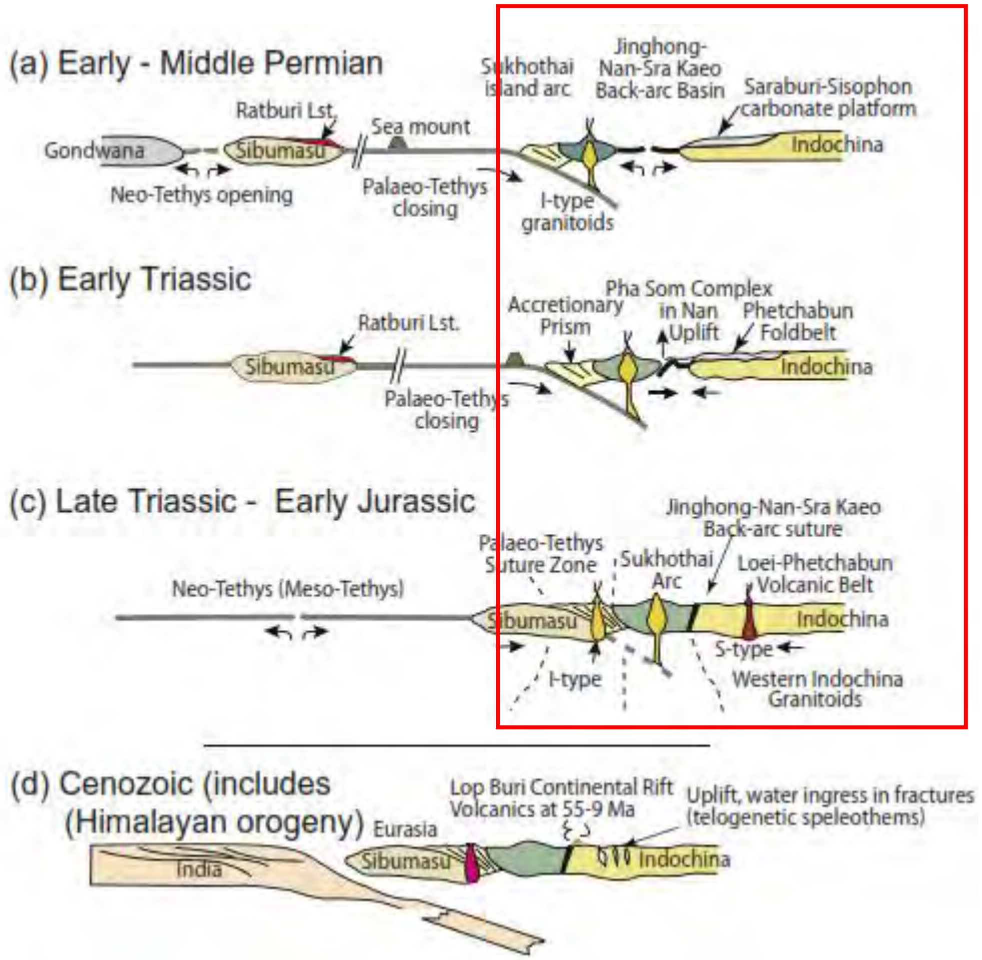


รูปที่4.7 A)แรงบีบอัดยังคงเข้ามากระทำในแนวตะวันออก-ตะวันตก(E-W) จึงทำให้รอยแตกมีการเปิดออกในแนวตั้งฉากกับแรงดึงออก B)และC) หินตัวอย่างที่แสดงรอยแตกระบบที่ 3

4.3 **วิวัฒนาการการแปรสัณฐาน** (Tectonic evolution)

ในช่วงยุคเพอร์เมียนตอนต้นถึงเพอร์เมียนตอนกลาง(Early-Middle Permian) มีการตกสะสมตัวของตะกอนคาร์บอเนตบนลาดทวีป(Continental shelf) ของแผ่นจุลทวีปอินโดไชน่า ต่อมาในช่วงยุคไทรแอสซิกตอนต้น(Early Triassic) เกิดการเคลื่อนตัวเข้าหากันของแผ่นจุลทวีปฉานไทยกับอินโดนไชน่า โดยมีการมุดตัวของพื้นทะเลโบราณ(Palaeo-Tethys oceanic floor) ลงไปใต้แผ่นจุลทวีปอินโดไชน่า จึงทำให้เกิดการปิดตัวลงของ แอ่งหลังแนวภูเขาไฟ(Back-arc basin) จนกระทั่งช่วงยุคไทรแอสซิกตอนปลาย(Late Triassic) จึงเกิดการชนกันระหว่างแผ่นจุลทวีปฉานไทยกับแผ่นจุลทวีปอินโดไชน่า(Warren et al, 2014) แรงบีบอัดจากการชนกันนี้ทำให้ลานหินคาร์บอเนต(Carbonate platform) จากนั้นชั้นหินถูกเปลี่ยนลักษณะ เกิดเป็นชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อน ซึ่งพื้นที่นี้ก็เป็นส่วนหนึ่งของบริเวณแนวชั้นหินคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ (Loei -Phetchabun fold belt) (รูปที่4.8)

แนวชั้นหินคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์(Loei-Phetchabun fold belt) ถือได้ว่าเป็นกลุ่มแนวชั้นหินคดโค้งหลักของประเทศไทย และบริเวณพื้นที่ศึกษาจังหวัดสระบุรีได้ถูกจัดให้เป็นบริเวณแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง(Khao Kwang fold and thrust belt) (Morley et al, 2013) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแนวชั้นหินคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์(Loei-Phetchabun fold belt) โดยแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง(Khao Kwang fold and thrust belt) เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของหินปูนในยุคเพอร์เมียน โดยมีโครงสร้างหลักวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้(NW-SE) จึงพบลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างหลักของพื้นที่วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้(NW-SE) ทั้งแนวการวางตัวของรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ(Thrust fault) รอยเลื่อนย้อน(Reverse fault) และระนาบแกนชั้นหินคดโค้ง(Axial plane) ของชั้นหินคดโค้ง(Fold) ซึ่งรอยแตกระบบต่างๆ ก็เกิดสัมพันธ์กับโครงสร้างเหล่านี้



รูปที่4.8 ภาพแสดงธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทย(Warren et al, 2014) บริเวณกรอบสีแดงคือพื้นที่ศึกษา ซึ่งโครงสร้างรอยแตกและรอยเลื่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาน่าจะสัมพันธ์กับเหตุการณ์ในยุคไทรแอสซิกตอนปลาย(Late Triassic)

บทที่ 5

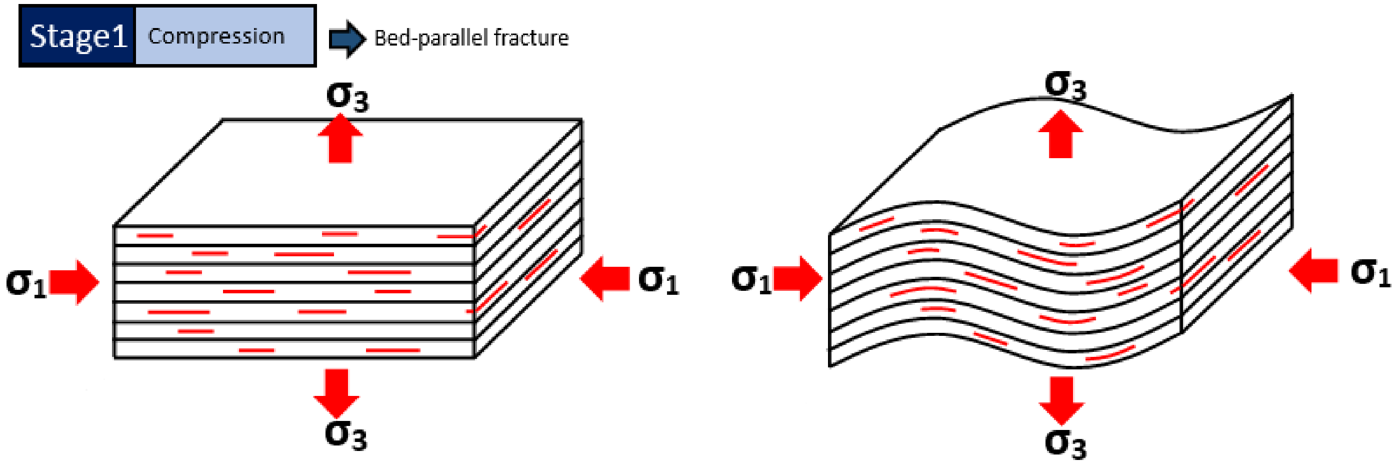
สรุปผลการศึกษา(Conclusion)

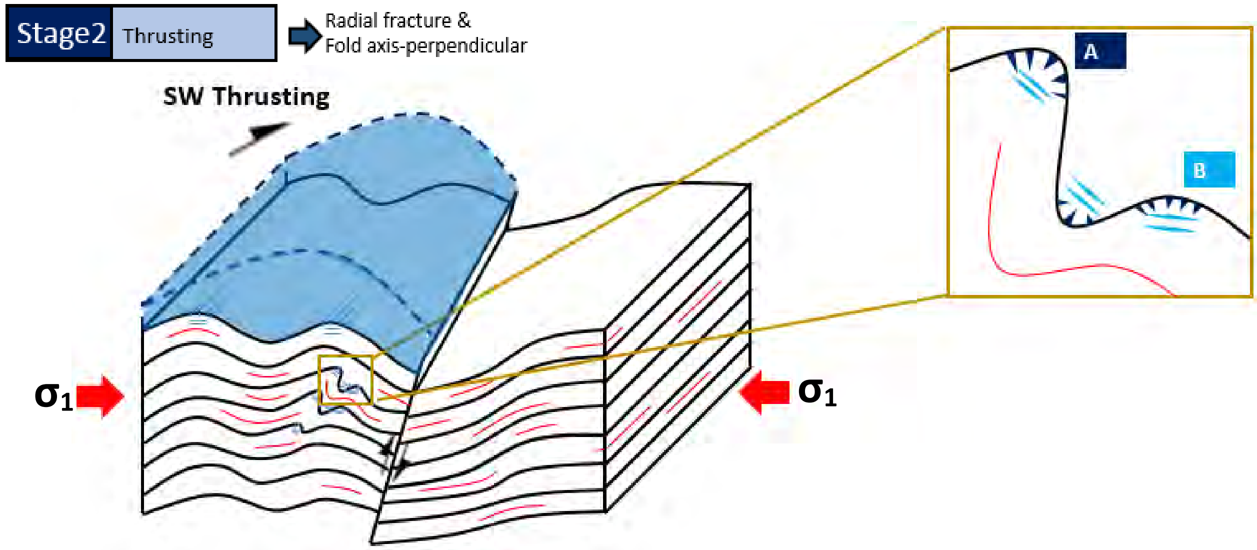
จากการนำผลการศึกษาที่ได้จากการสำรวจภาคสนามและการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคมารวบรวม วิเคราะห์ และอภิปรายในด้านลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตกและวิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตกของเขาวง จังหวัดสระบุรี สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

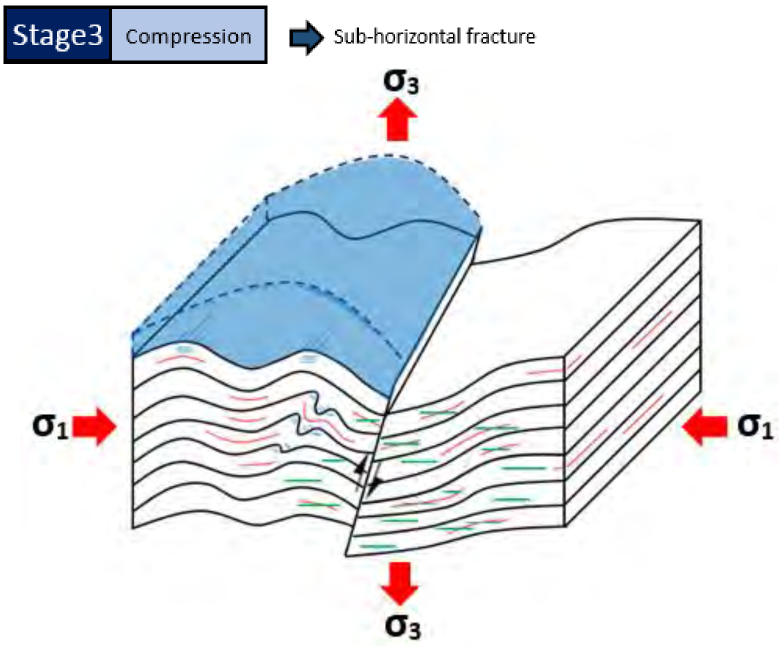
ระบบรอยแตกของเขาวง จังหวัดสระบุรี มีทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ 1.รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) 2.รอยแตกที่เกิดบริเวณเขตการคดโค้ง (Radial fracture & Fold-axis perpendicular fracture) 3.รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) พบรอยเลื่อนย้อน(Reverse fault) และรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ(Thrust fault) ที่มีระนาบรอยเลื่อนวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) ซึ่งเป็นแนวโครงสร้างหลักของพื้นที่บริเวณนี้ ส่วนธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคนั้น พบลักษณะของโครงสร้างเขตเงาความเค้น(Strain shadow) ที่บอกได้ว่ามีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในทิศทางซ้าย-ขวา และโครงสร้างแนวฟันในหิน(Stylolite) ที่บอกได้ว่ามีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในทิศทางซ้าย-ขวาเช่นกัน วิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตกของเขาวง จังหวัดสระบุรีแบ่งออกเป็น 3 ลำดับ(รูปที่5.1) ดังนี้ **ลำดับแรก** ตะกอนคาร์บอเนตมีการสะสมตัวในแนวระดับและผ่านกระบวนการกลายเป็นหิน(Diagenesis) จากนั้นมีแรงบีบอัดเข้ามากระทำในแนวตะวันออก-ตะวันตก (E-W) จึงทำให้รอยแตกมีการเปิดออกในแนวตั้งฉากกับแรงดึงออก จากนั้นแรงบีบอัดที่ยังคงเข้ามากระทำในทิศทางเดิม ทำให้ชั้นหินเกิดการคดโค้ง ทำให้รอยแตกคดโค้งไปตามชั้นหิน เกิดเป็นรอยแตกระบบที่ 1 รอยแตกที่ขนานกับชั้นหิน (Bed-parallel fracture) **ลำดับที่สอง** มีการดันตัว(Thrusting) ของชั้นหินอายุเพอร์เมียนตอนล่าง ขึ้นมาบนชั้นหินอายุเพอร์เมียนตอนกลาง เกิดรอยเลื่อนย้อน(Reverse fault) และทำให้ชั้นหินบางบริเวณถูกเปลี่ยนลักษณะอย่างรุนแรง(Highly deformed area) ซึ่งจะพบเป็นรอยแตกที่สัมพันธ์กับบริเวณเขตพับการคดโค้ง(Hinge zone) เกิดเป็นรอยแตกระบบที่ 2 รอยแตกที่เกิดบริเวณเขตการคดโค้ง (Radial fracture & Fold-axis perpendicular fracture) **ลำดับที่สาม** แรงบีบอัดยังคงเข้ามากระทำในทิศทางเดิม ทำให้รอยแตกมีการเปิดออกในแนวตั้งฉากกับแรงดึงออก เกิดเป็นรอยแตกระบบที่ 3รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture)

ช่วงเวลาของการเกิดชั้นหินคดโค้งและรอยแตกของพื้นที่ศึกษาบริเวณเขาวง จังหวัดสระบุรีเทียบเคียงได้กับช่วงที่เกิดการชนกันระหว่างแผ่นจุลทวีปฉานไทยกับแผ่นจุลทวีปอินโดไชน่า ในช่วงยุคไทรแอสซิกตอนปลาย (Late Triassic) และสัมพันธ์กับบริเวณแนวชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำเขาขวาง(Khao Khwang fold and thrust belt) ซึ่งโครงสร้างมีแนวการวางตัวหลักในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE)

สรุปภาพรวมวิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตกบริเวณพื้นที่ศึกษาเขาวง จังหวัดสระบุรี







รูปที่5.1 สรุปภาพรวมวิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของแนวรอยแตก (Structural evolution of fracture) ทั้ง 3 ขั้นตอนของบริเวณพื้นที่ศึกษาเขาวง จังหวัดสระบุรี

เอกสารอ้างอิง

Bunopas, S., 1981, Paleogeographic history of western Thailand and adjacent parts of Southeast Asia : a plate tectonics interpretation : Victoria University of Willington, unpublished Ph.D. thesis, 810 p.; reprinted 1982 as Geologocal Survey Paper no.5, Geological Survey Division, Department of Mineral Resources, Thailand.

Hinthong, C., 1985. Upper Paleozoic System, the Central Plain and Lower Phetchabun Ranges.Unpublished report, Geological Survey Division, Department of Mineral Resources, Bangkok.

Morley, C.K., Ampaiwan, P., Thanudamrong, S., Keunphan, N., Warren, J., 2013, Development of Khao Khwang Fold and Thrust Belt: Implications for the geodynamic setting of Thailand and Cambodia during the Indosinian Orogeny.

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, Menoir, Series D, Geology, v. 17,p. 1-69.

Robin, 1979, Theory of metamorphic segregation and related processes. Geochim cosmochim Acta 43:1587-1600

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.

Toriyama, R, Kanmera, K., Kaewbaidhoon, S., and Hongnusonthi, 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.

Ueno, K., Charoentitirat, 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., Charoentitirat, T., Cartwright, I., Ampaiwan, P., Khositchaisri, P., Mirzaloo, M., Yingyuen, J., 2014, Structural and fluid evolution of Saraburi Group sedimentary carbonates, central Thailand: A tectonically driven fluid system.

Natural Fracture Types.; c2013. [Accessed May 3, 2015]. Available: http://www.naturalfractures.com/1.1.1.htm.