

ธรณีวิทยาโครงสร้างของหินในสัณฐานกรanitหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

ภัสติกร สุวรรณจันทา

ธรณีวิทยา

2558

ธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์สิริกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

นางสาวภัสติกกร สุวรรณจันลา

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558

STRUCTURAL GEOLOGY OF HUA HIN GNEISSIC GRANITE, CHANGWAT PRACHUAP KHIRI KHAN

Miss Pastikorn Suwanjanla

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 2015

วันที่ส่ง

____/____/____

วันที่อนุมัติ

____/____/____

ลงชื่อ _____

(_____)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

หัวข้องานวิจัย:	ธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
ผู้ทำการวิจัย:	นางสาวภัศติกร สุวรรณจินลา
อาจารย์ที่ปรึกษา:	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิษณุพงศ์ กาญจนพยนต์
ภาควิชา:	ธรณีวิทยา
ปีการศึกษา:	2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะและวิวัฒนาการของธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน บริเวณเขาหินแกรนิตที่วางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ค่อนไปทางเหนือ-ใต้ ในพื้นที่อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับมหัศจรรย์และระดับจุลภาค พบว่าลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของหินโผล่ส่วนใหญ่มีการวางตัวของแนวริ้วขนาน (foliation) และโครงสร้างย่อยชนิดเส้น (lineation) อยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และแนวเหนือ-ใต้ นอกจากนี้ยังพบเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ที่แสดงลักษณะการเฉือนแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) และจากการศึกษาโดยแผ่นหินบางภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบโครงสร้างจุลภาคที่แสดงลักษณะการเฉือนแบบซ้ายเข้าในผลึกแร่ไปโอไทด์ และแสดงการเปลี่ยนลักษณะในผลึกแร่ควอตซ์และเฟลด์สปาร์ ซึ่งบ่งบอกถึงอุณหภูมิขณะเกิดการเปลี่ยนลักษณะประมาณ 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบกลุ่มแร่ที่บ่งบอกถึงการถูกแปรสภาพในชุดลักษณะการแปรสภาพแบบกรีนชีสต์ (greenschist facies) ถึงแบบแอมฟิโบลิต (amphibolite facies)

สำหรับวิวัฒนาการของธรณีวิทยาโครงสร้างนั้น ได้แบ่งการเปลี่ยนลักษณะออกเป็น 4 ช่วงที่อาจจะสัมพันธ์กับธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทยและสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ที่อยู่ทางตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่ศึกษา โดยเริ่มจากการเกิดหินแกรนิตที่เกิดในช่วงตอนปลายของยุคไทรแอสซิก จากนั้นเกิดการเฉือนแบบซ้ายเข้าและการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่ม (ductile deformation) ในทิศเกือบเหนือ-ใต้ ทำให้เกิดแนวริ้วขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น ซึ่งสัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่แผ่นเปลือกโลกพม่าตะวันตกชนกับแผ่นเปลือกโลกไซบิวมาสุที่เกิดในช่วงตอนปลายของยุคครีเทเชียส ต่อมาเมื่อแรงอัดเข้ามากระทำในทิศเกือบตะวันตก-ตะวันออกเฉียงใต้ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงแนวการวางตัวของแนวริ้วขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น ซึ่งสัมพันธ์กับเหตุการณ์แผ่นเปลือกโลกอินเดียชนกับแผ่นเปลือกโลกยูเรเชียในช่วงตอนต้นของสมัยอีโอซีน และสุดท้ายเกิดแรงดึงและเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ (brittle deformation) ทำให้เกิดรอยเลื่อนแนวระดับแบบขวาเข้า และมีการเลื่อนตัวของเขาในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งสัมพันธ์กับเหตุการณ์การเปลี่ยนทิศทางของแรงจากการชนของแผ่นเปลือกโลกอินเดียในสมัยโอลิโกซีน

คำสำคัญ: ธรณีวิทยาโครงสร้าง หินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์

Project title: STRUCTURAL GEOLOGY OF HUA HIN GNEISSIC GRANITE, CHANGWAT
PRACHUAP KHIRI KHAN

Researcher: Pastikorn Suwanjanla

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

Department: Geology

Academic Year: 2015

Abstact

The objectives of this research are to study structural style and structural evolution of Hua Hin gneissic granite at granite mountain which lies in NNW – SSE direction and located in Amphur Hua Hin, Changwat Prachuap Khiri Khan. Structural geology of this study is characterized with compiled data from 2 main scales: mesoscope and microscope. Based on mesoscopic evidences from field observation show NW – SE and N – S trending of foliation and lineation. Moreover, the feldspar grains in specimen show sinistral shear sense. Based on microscopic evidences from thin section also show sinistral shear sense from biotite grains. Other deformed minerals show microstructures and mineral assemblages that indicate the temperature between 300°C to 500°C and greenschist to amphibolite metamorphic facies respectively.

Structural evolution can divided to 4 stages that related to tectonic evolution of Thailand and sense of movement of Three Pagoda Fault that located in NW of the study area. First stage is granite intrusion related to Central Granite Belt in late Triassic age. Then, sinistral ductile deformation in the N – S direction and metamorphism caused foliation and lineation forming related to Western Burma and Sibumasu collision in late Cretaceous. Next, sinistral transpressional deformation in WSW – ENE direction was formed related to early India and Eurasia collision in early Eocene and the last stage is dextral transtensional deformation in N – S that is the result of India changing direction to E – W in Oligocene.

Keywords: Structural geology, Hua Hin gneissic granite, Three Pagoda Fault

กิตติกรรมประกาศ

ประการแรก ขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทางด้านงบประมาณและค่าใช้จ่ายในการศึกษาครั้งนี้ รวมไปถึงยานพาหนะ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานภาคสนาม

ประการที่สอง ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงแต่ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุพงศ์ กาญจนพยนต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยในครั้งนี้ อาจารย์ได้เสียสละเวลามาให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง ตลอดจนคำตักเตือน ทั้งในการออกภาคสนามและการทำงานในขั้นตอนต่างๆตลอดการทำงานวิจัย

ประการที่สาม ขอขอบคุณนายปรีดา ธิาเปียง นายนวกัทร กลมเกลียว และนางสาวภาชีนี โสโพธิ์ ที่ให้การช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนามรวมทั้งให้คำแนะนำและคำปรึกษาตลอดการทำงานวิจัย

ประการสุดท้าย ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่ให้กำเนิด ให้การเลี้ยงดู ให้การอบรมสั่งสอน ตลอดจนให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 พื้นที่ศึกษา	1
1.3 วัตถุประสงค์	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา	3
1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 ธรรมเนียมทั่วไป	3
1.8 ธรรมเนียมโครงสร้าง	5
1.9 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)	8
2.1 การศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น	9
2.2 การสำรวจและเก็บข้อมูลจากภาคสนาม	9
2.3 การศึกษาในห้องปฏิบัติการ	10
2.4 การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตีความผลการศึกษา	11
2.5 การอภิปรายและสรุปผลการศึกษา	11
2.6 การจัดทำรายงานและนำเสนอ	11
บทที่ 3 ผลการศึกษา (Results)	
3.1 ธรรมเนียม	12
3.2 ธรรมเนียมโครงสร้าง	12
3.2.1 ธรรมเนียมโครงสร้างระดับมัชฌิมภาค (mesoscopic scale)	12
จุดศึกษาที่ 1	14
จุดศึกษาที่ 2	15
จุดศึกษาที่ 3	16
จุดศึกษาที่ 4	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
จุดศึกษาที่ 5	18
3.2.2 ธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาค (microscopic scale)	19
กลไกการเปลี่ยนลักษณะ	19
ตัวบ่งชี้การเคลื่อนตัว	19
บทที่ 4 อภิปรายผลการศึกษา (Discussion)	24
4.1 ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง	24
4.2 วิวัฒนาการของลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง	32
4.3 ลักษณะธรณีแปรสัณฐาน	35
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา (Conclusion)	38
5.1 สรุปผลการศึกษา	38
5.2 ผลที่ได้รับ	39
5.3 ปัญหาและอุปสรรค	39
เอกสารอ้างอิง (References)	41
ภาคผนวก	

สารบัญรูปรภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 พื้นที่ศึกษา อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kawakami และคณะ ในปี ค.ศ. 2014	2
รูปที่ 1.2 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา	2
รูปที่ 1.3 แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดประจวบคีรีขันธ์	4
รูปที่ 1.4 แผนภาพแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแผ่นทวีปอินเดียที่เข้ามาชนแผ่นทวีปยูเรเชีย (Huchon, 1994 and Rhodes et al., 2005)	7
รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงลำดับการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 6 ขั้นตอน	8
รูปที่ 2.2 (A,B) การเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่งจากภาคสนาม (C) ตัวอย่างแผ่นหินบาง (D) ตัวอย่างตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า และ (E) ตัวอย่างแผนภาพกุหลาบ	11
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายดาวเทียม แสดงพื้นที่ศึกษาและจุดศึกษาทั้ง 5 จุดศึกษา (Google Earth, 2016)	13
รูปที่ 3.2 จุดศึกษาที่ 1 (A) ภาพหินโผล่ (B) ตัวอย่างหินแสดงการเฉือนแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) (C,D) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวการวางตัวร้าวขนาน (E) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น	14
รูปที่ 3.3 จุดศึกษาที่ 2 (A) ภาพหินโผล่ (B) ตัวอย่างหินแสดงการเฉือนแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) (C,D) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวการวางตัวร้าวขนาน (E) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น	15
รูปที่ 3.4 จุดศึกษาที่ 3 (A) ภาพหินโผล่ (B) ตัวอย่างหินแสดงเม็ดแร่ที่ขนาดเล็กกว่าจุดศึกษาอื่น (C,D) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวการวางตัวร้าวขนาน (E) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น	16
รูปที่ 3.5 จุดศึกษาที่ 4 (A) ภาพหินโผล่ (B) ตัวอย่างหินแสดงการเฉือนทั้งแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) และแบบขวาเข้า (dextral shear sense) (C,D) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวการวางตัวร้าวขนาน (E) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น	17
รูปที่ 3.6 จุดศึกษาที่ 5 (A) ภาพหินโผล่ (B) ตัวอย่างหินแสดงการเฉือนทั้งแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) และแบบขวาเข้า (dextral shear sense) (C,D) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวการวางตัวร้าวขนาน (E) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น	18
รูปที่ 3.7 (A,B) Taper twin ในแร่พลสจีโอเครส ที่พบในจุดศึกษาที่ 1 และ (C,D) Undulose extinction ในแร่ควอตซ์ ที่พบในจุดศึกษาที่ 5	20
รูปที่ 3.8 (A,B) Subgrain Rotation (SGR) ที่พบในจุดศึกษาที่ 1 และ (C,D) พบในจุดศึกษาที่ 3	21

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.9 ลักษณะ mineral fish/mica fish ของแร่ไบโอไทต์ ที่พบในจุดศึกษาที่ 3 (A,B) บอกทิศทางการเฉือนแบบขวาเข้า (dextral shear sense) และ (C,D) บอกทิศทางการเฉือนแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense)	22
รูปที่ 3.10 ลักษณะ strain shadow ชนิดที่บอกทิศการเฉือนไม่ได้ ที่พบในจุดศึกษาที่ 3	22
รูปที่ 3.11 ภาพ XPL และ PPL ของแร่ฮอร์นเบลนด์	23
รูปที่ 3.12 (A,B) ภาพ XPL และ PPL ของแร่การ์เน็ต และ (C,D) ภาพ XPL และ PPL ของแร่คลอไรต์ ที่พบในบางจุดศึกษา	23
รูปที่ 4.1 (A) ภาพถ่ายดาวเทียม แสดงพื้นที่ศึกษาและจุดศึกษาทั้ง 5 จุดศึกษา (Google Earth, 2016) (B) ภาพถ่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวร้าวขนาน และภาพถ่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้นของทั้ง 5 จุดศึกษา	24
รูปที่ 4.2 พื้นที่ศึกษาที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kawakami และคณะ ในปี 2014	26
รูปที่ 4.3 (A) การจำแนกลักษณะการเกิดผลึกใหม่พลวัตตามอุณหภูมิและอัตราความเครียด (B) แสดงวิวัฒนาการการเกิดผลึกใหม่พลวัต (Passchier and Trouw, 2005) (C) ลักษณะ Subgrain Rotation (SGR) ที่พบในจุดศึกษาที่ 3	27
รูปที่ 4.4 (A1) แสดงการจำแนกลักษณะของ mica fish (A2) แสดงวิวัฒนาการของการเกิด mica fish (B) ลักษณะ mica fish ที่พบในจุดศึกษาที่ 3	28
รูปที่ 4.5 (A) แสดงการจำแนกลักษณะของ strain shadow (B) ลักษณะ strain shadow ที่พบในจุดศึกษาที่ 3	28
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างหินไนส์ลิกแกรนิตที่พบในจุดศึกษาที่ 3	29
รูปที่ 4.7 แผนภาพจำแนกชุดลักษณะการแปรสภาพตามความดันและอุณหภูมิการเกิด (wikipedia.org)	30
รูปที่ 4.8 แร่การ์เน็ตที่พบในพื้นที่ศึกษา	30
รูปที่ 4.9 ตารางแสดงกลุ่มแร่ที่พบในชุดลักษณะการแปรสภาพต่างๆ จำแนกตามชนิดหินต้นกำเนิด (Vernon and Clarke, 2008)	31
รูปที่ 4.10 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างช่วงที่ 1 : การเกิดหินแกรนิต	32
รูปที่ 4.11 แผนที่แสดงการกระจายตัวของหินแกรนิต (กรมทรัพยากรธรณีวิทยา, 2551)	32
รูปที่ 4.12 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างช่วงที่ 2 : การเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่มและเฉือนแบบซ้ายเข้า ร่วมกับการแปรสภาพ	33
รูปที่ 4.13 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างช่วงที่ 3 : เกิดแรงอัดเข้ามาในทิศเกือบตะวันตก – ตะวันออก และเกิดร่วมกับการเฉือนแบบซ้ายเข้า	34
รูปที่ 4.14 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างช่วงที่ 4 : เกิดแรงดึงและมีการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ เกิดรอยเลื่อนปกติและรอยเลื่อนแนวระดับแบบขวาเข้า	34

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 ภาพวาดจำลองแสดงเหตุการณ์ธรณีแปรสัณฐานประเทศไทยที่เกิดในช่วงตอนปลายของยุคไทรแอสสิกถึงตอนต้นของยุคจูแรสสิก (Watkinson et al., 2011)	36
รูปที่ 4.16 ภาพวาดจำลองแสดงเหตุการณ์ธรณีแปรสัณฐานของแผ่นทวีปอินเดียและแผ่นทวีปยูเรเชีย (A) เกิดในช่วงตอนกลางของสมัยอีโอซีน ทำให้เกิดแรงอัดในทิศเกือบตะวันตก - ตะวันออก (B) ในสมัยโอลิโกซีน มีการเปลี่ยนทิศของแรงที่เกิดจากการชนของแผ่นทวีปอินเดีย เป็นทิศเกือบเหนือ - ใต้ (Huchon, 1994 and Rhodes et al., 2005)	36
รูปที่ 4.17 ภาพวาดจำลองแสดงทิศทางที่แรงเข้ามากระทำ โดย (A) มีแรงอัดเข้ามากระทำในทิศตะวันตก - ตะวันออก และมีการเฉือนเกิดร่วมด้วย สัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่เกิดในสมัยอีโอซีน และ (B) มีแรงอัดเข้ามากระทำในทิศเหนือ - ใต้ สัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่เกิดในสมัยโอลิโกซีน (Kanjanapayont et al., 2012)	36
รูปที่ 4.18 (A) พื้นที่ศึกษาที่มีรอยเลื่อนปกติและรอยเลื่อนแนวระดับแบบขวาเข้าตัดผ่าน โดยอาจเป็นส่วนหนึ่งของ riedel shear ที่ต่อมาจากรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ (B) แบบจำลองลักษณะของ riedel shear (wikipedia.org)	37
รูปที่ 5.1 สรุปรูปร่างการทางธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์ลิกแกรนิตหัวหิน ทั้ง 4 ช่วง	40

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

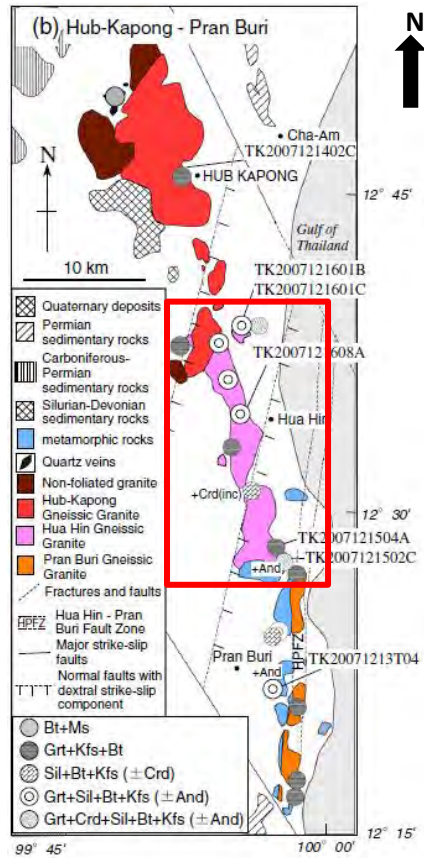
1.1 ที่มาและความสำคัญ (Background and Rationale)

หินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน บริเวณอำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มีแร่องค์ประกอบเป็นแร่คาร์เนต แร่มีสโคไวต์ และพบการเรียงตัวของแร่ซิลิมาไนต์และแร่ไบโอไทต์ นอกจากนี้ยังพบแร่ทัวร์มาลีน แร่คูมอน เทอไรต์ และแร่โมนาไซต์ เป็นแร่รอง จากชนิดของแร่องค์ประกอบที่พบบ่งบอกว่าหินแกรนิตในบริเวณนี้เป็นผลมาจากการแปรที่แสดงชุดลักษณะการแปรสภาพเป็นแบบแอมฟิโบลิต (*Kawakami et al., 2014*)

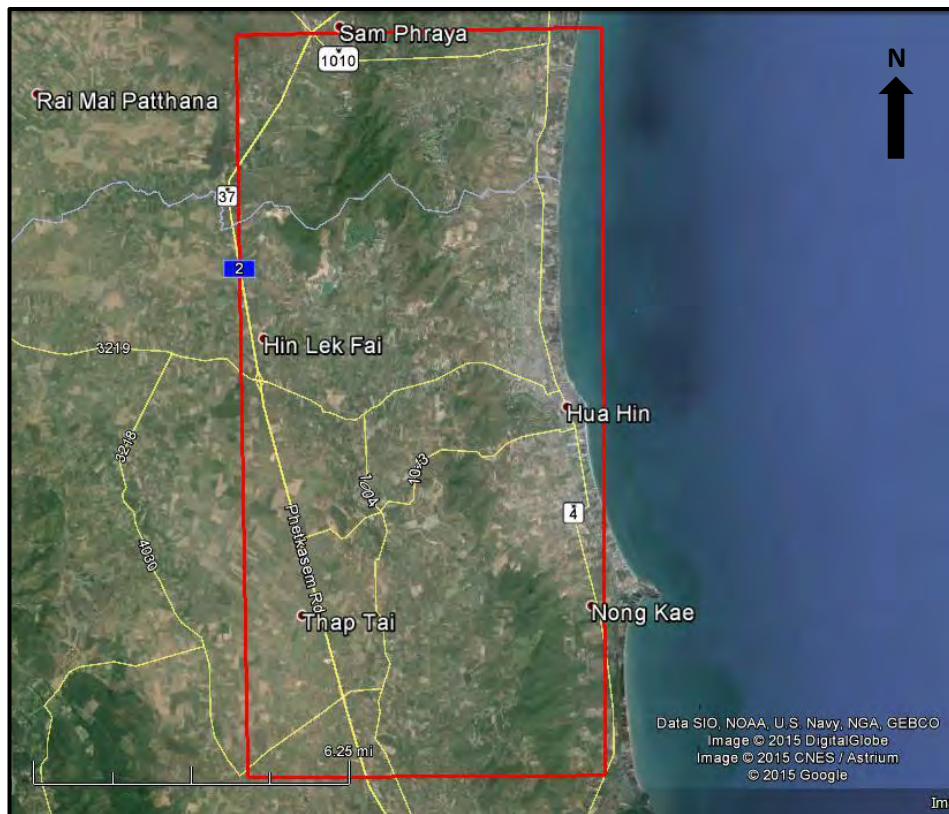
การวางตัวของแนวเขาหินไนส์สิกแกรนิตหัวหินที่อยู่ในพื้นที่ศึกษานั้น (รูปที่ 1.1 และ 1.2) มีทิศการวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ เกือบเหนือ – ใต้ สันนิษฐานว่าอาจเป็นบริเวณที่เป็นแนวรอยเลื่อนซึ่งต่อมาจากรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ หนึ่งในรอยเลื่อนมีพลังที่อยู่ทางภาคตะวันตกของประเทศไทย โดยมีการวางตัวในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ นอกจากนั้นในทางทิศใต้ของพื้นที่ศึกษายังพบรอยเลื่อนระนอง หนึ่งในรอยเลื่อนที่มีพลังเช่นกัน ซึ่งมีการวางตัวในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ – ตะวันตกเฉียงใต้ อยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทย ในพื้นที่จังหวัดระนอง ผ่านจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และต่อออกไปทั้งในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน จากรอยเลื่อนทั้งสองที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น มีการวางตัวของรอยเลื่อนในทิศตรงข้ามกัน และอาจมีแนวที่ลากต่อไปถึงอ่าวไทย จึงสันนิษฐานว่าอาจเกิดการตัดผ่านกันของทั้งสองรอยเลื่อน (*Watkinson et al., 2008*) ที่อาจจะเกิดขึ้นในบริเวณที่ใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษา ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาทางด้านธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์สิกแกรนิต ในระดับมัชฌิมภาค (mesoscopic scale) โดยศึกษา การเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ (brittle deformation) การเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบอ่อนนิ่ม (ductile deformation) และลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏในหินโผล่ และการศึกษาในระดับจุลภาค (microscopic scale) โดยศึกษา ลักษณะโครงสร้างจุลภาค (microstructure) และการเปลี่ยนแปลงลักษณะของแร่องค์ประกอบ รวมทั้งวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ และวิวัฒนาการของธรณีวิทยาโครงสร้างที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นประโยชน์ในการหาความสัมพันธ์ของรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์และรอยเลื่อนระนองที่อาจเกิดการตัดผ่านกันในบริเวณพื้นที่อ่าวไทย

1.2 พื้นที่ศึกษา (Study area)

พื้นที่ศึกษาอ้างอิงจากงานวิจัยของ Kawakami และคณะ ในปี ค.ศ. 2014 ที่ได้แบ่งพื้นที่ศึกษาตามลักษณะหินไนส์สิกแกรนิตที่ปรากฏในบริเวณที่แตกต่างกันออกเป็น 3 บริเวณ (รูปที่ 1.1) คือ ไนส์สิกแกรนิตหุบกระพง ไนส์สิกแกรนิตหัวหิน และไนส์สิกแกรนิตปราณบุรี โดยในการศึกษารั้งนี้จะศึกษาบริเวณที่เป็นหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน ซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณอำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำหรับลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษานั้นเป็นแนวเขาที่วางตัวในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ มีความยาวประมาณ 20 กิโลเมตร โดยมีพิกัดตั้งแต่ 12°41' N ถึง 12°27' N และ 99°51' E ถึง 99°58' E (รูปที่ 1.2) ซึ่งในการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามนั้น จะเลือกจุดศึกษาที่มีถนนตัดผ่านเขา เนื่องจากการเลือกพื้นที่ที่ตัดตั้งฉากกับแนวการวางตัวของเขา จะทำให้ข้อมูลที่เก็บได้นั้นมีค่าที่หลากหลาย และถูกต้องแม่นยำกว่าการศึกษาไปตามแนวยาวของเขา



รูปที่ 1.1 พื้นที่ศึกษาที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kawakami และคณะ ในปี ค.ศ. 2014 โดยแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ โนสติกแกรนิตหุบกะพง (พื้นที่สีแดง) โนสติกแกรนิตหัวหิน (พื้นที่สีชมพู) ซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ และโนสติกแกรนิตปราณบุรี (พื้นที่สีส้ม)



รูปที่ 1.2 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา ที่เป็นแนวเขาที่วางตัวในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ มีความยาวประมาณ 20 กิโลเมตร บริเวณอำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ (ภาพจาก Google Earth)

1.3 วัตถุประสงค์ (Objectives)

เพื่อศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง และวิวัฒนาการของลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์ลิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

1.4 ขอบเขตการศึกษา (Scope of work)

การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาทางด้านธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์ลิกแกรนิต แบ่งออกเป็น 2 ระดับคือ

1.4.1 ระดับมหัศจรรย์ภาค จากการสำรวจภาคสนาม โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ การเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบอ่อนนุ่ม และลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏในหินโผล่ การทำภาพวาดลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่พบ การกำหนดตำแหน่งข้อมูลในตาข่ายมิติสเตอร์ไอกราฟีกชนิดพื้นที่เท่า (equal – area stereographic net) และการทำแผนภาพกุหลาบ (rose diagram)

1.4.2 ระดับจุลภาค โดยศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค และการเปลี่ยนแปลงลักษณะของแร่องค์ประกอบ จากตัวอย่างแผ่นหินบาง (thin section) จากตัวอย่างในหินระบุตำแหน่ง (oriented specimen) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (polarized light microscope)

1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน (Work plan)

ระหว่างเดือนสิงหาคม 2558 – เมษายน 2559 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 9 เดือน

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Expected outputs)

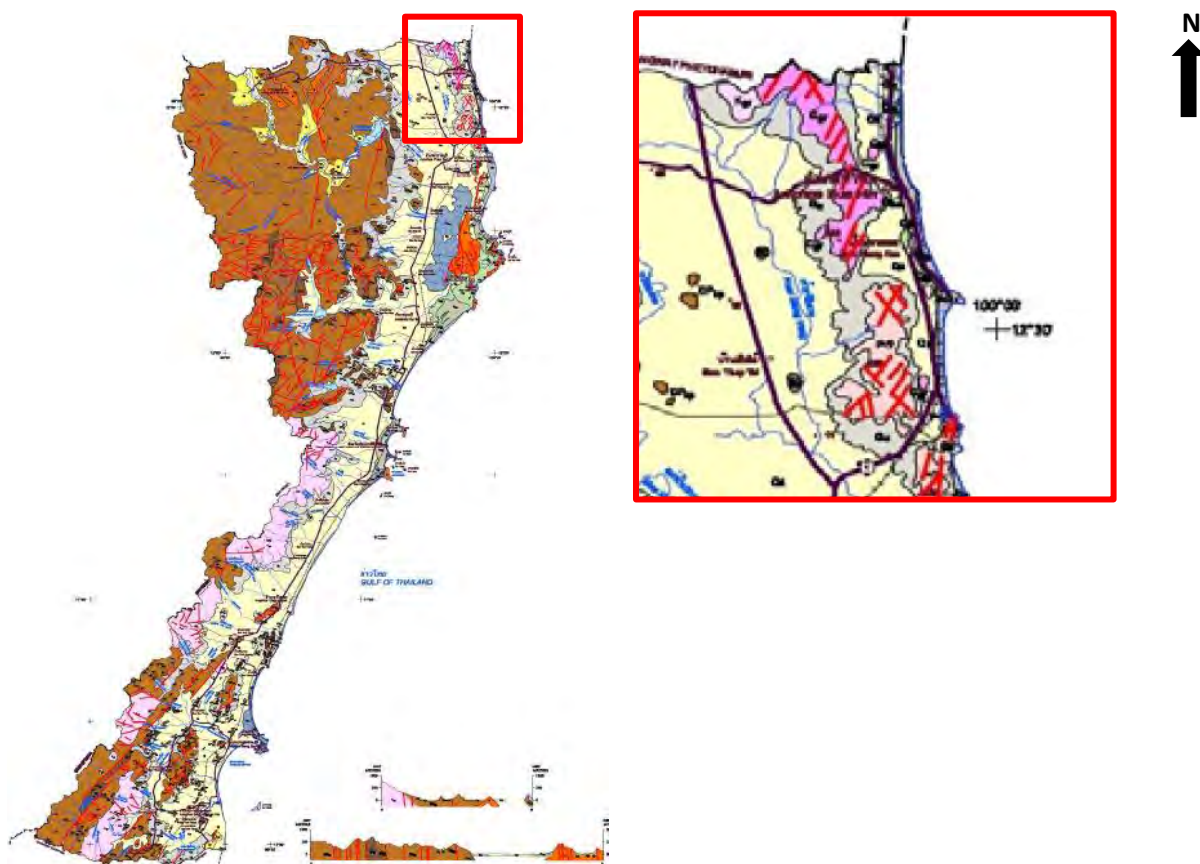
ทราบลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง และทราบวิวัฒนาการของลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์ลิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์



1.7 ธรณีวิทยาทั่วไป (General geology)

ลักษณะภูมิประเทศทั่วไปของจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เป็นพื้นที่ที่มีความลาดเอียงจากทิศตะวันตก ซึ่งเป็นเทือกเขาตะนาวศรี ที่กั้นระหว่างพรมแดนไทยกับพม่าลงสู่ด้านตะวันออกที่เป็นอ่าวไทย นอกจากนี้ยังมีเทือกเขาและภูเขากระจัดกระจายทั่วไป บริเวณเทือกเขาตะนาวศรีมีหินอัคนีชนิดหินแกรนิตเป็นหินฐานแกนกลาง ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ติดกับหินตะกอนยุคคาร์บอนิเฟอรัสถึงเพอร์เมียน ส่วนบริเวณเชิงขอบเทือกเขาทางด้านตะวันออกนั้นเป็นภูเขาเตี้ยและแนวภูเขาโดด ที่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยหินปูน นอกนั้นเป็นหินปูนเนื้อโดโลไมต์ หินเชิร์ต และหินโดโลไมต์ ส่วนบริเวณที่เป็นหุบเขา ที่ราบ และที่ลุ่ม เป็นตะกอนน้ำพา และตามบริเวณชายฝั่งมีการสะสมตัวของตะกอนยุคควอเทอร์นารี

พื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์รองรับด้วยหินแข็งอายุมากกว่า 570 ล้านปี จนถึงตะกอนปัจจุบัน โดยร้อยละ 40 รองรับด้วยหินแข็งจำพวกหินชั้นและหินแปร ร้อยละ 15 เป็นหินอัคนี และร้อยละ 45 เป็นตะกอนปัจจุบัน โดยการศึกษาครั้งนี้จะเน้นศึกษาเกี่ยวกับหินแปร คือหินไนส์ลิกแกรนิต ซึ่งกรมทรัพยากรธรณีวิทยาได้จัดให้เป็นหินอัคนี โดยได้แบ่งออกเป็น 2 ยุค คือ หินอัคนียุคคาร์บอนิเฟอรัส (รูปที่ 1.3 หน่วยหินสีม่วง) ที่ประกอบด้วยหินแกรนิตที่มีการเรียงตัวของเม็ดแร่ เนื้อปานกลางถึงหยาบ มีการเรียงตัวที่ค่อนข้างดีของผลึกแร่เฟลด์สปาร์ขนาดใหญ่ ซึ่งกระจายตัวอยู่เล็กน้อยทางตอนเหนือของจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ บริเวณบ้านหนองแก อำเภอกำแพงแสน มีอายุประมาณ 286 – 360 ล้านปี และหินอัคนียุคครีเทเชียส (รูปที่ 1.3 หน่วยหินสีชมพู) ที่ประกอบด้วยหินไรโอไรต์สีม่วง เนื้อดอกเฟลด์สปาร์ซึ่งเป็นเนื้อดอกที่แสดงลักษณะรูปผลึกกึ่งสมบูรณ์

ถึงสมบูรณ พบเล็กนอยบริเวณตอนใต้ของจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ต่อเนื่องไปถึงจังหวัดชุมพร และพบหินแกรนิตสีจาง เนื้อปานกลางถึงหยาบ ส่วนมากมีเนื้อสมำเสมอ และหินแอไฟลด์แกรนิต เนื้อขนาดละเอียดถึงปานกลาง ส่วนใหญ่มีการกระจายตัวทางขอบตะวันตกของจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ต่อเนื่องไปถึงพรมแดนไทย – พม่า และยังพบบริเวณทางตอนเหนือของจังหวัดต่อเนื่องถึงจังหวัดเพชรบุรี ซึ่งมีอายุประมาณ 66.4 – 140 ล้านปี (กรมทรัพยากรธรณีวิทยา, 2551)



	หินอัคนี (Igneous rocks)	ยุค (Period)	(Ma)
	หินแกรนิต สีจาง เนื้อปานกลางถึงหยาบ ส่วนมากเนื้อสมำเสมอ และหินแอไฟลด์แกรนิต เนื้อละเอียด ถึงเนื้อขนาดปานกลาง	ครีเทเชียส (Cretaceous)	66.4-140
	หินแกรนิตที่มีการเรียงตัวของเม็ดแร่ เนื้อปานกลางถึงหยาบ เป็นการเรียงตัวค่อนข้างดีของผลึกแร่เฟลด์สปาร์ขนาดใหญ่	คาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous)	286-360

รูปที่ 1.3 แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ แสดงพื้นที่ศึกษา (กรอบสีแดง) (กรมทรัพยากรธรณีวิทยา, 2551)

1.8 ธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural geology)

บริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์สามารถจัดแบ่งลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างโดยทั่วไป ได้ดังนี้

- 1) ชั้นหินคดโค้ง (folding) พบปรากฏอยู่ในหินตะกอน ยุคคาร์บอนิเฟอรัส – เพอร์เมียน ซึ่งมีทั้งการโค้งงอแบบประทุนคว่ำ (anticline) และประทุนหงาย (syncline) โดยส่วนใหญ่มีแกนคดโค้งอยู่ในแนวเหนือ – ใต้ และแนวตะวันออกเฉียงเหนือ – ตะวันตกเฉียงใต้
- 2) รอยเลื่อน (faults) พบมีทั้งรอยเลื่อนขนาดเล็ก ถึงขนาดใหญ่ วางตัวในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ – ตะวันตกเฉียงใต้ แนวตะวันออกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ และแนวเกือบเหนือ – ใต้ ซึ่งมีทั้งรอยเลื่อนปกติ (normal fault) และรอยเลื่อนแนวระดับ (strike – slip fault)

1.9 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

Rhodes et al. (2005) ศึกษาวิวัฒนาการของรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ในช่วงยุคเทอร์เชียรี พบว่าเขตรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ (Three Pagodas Fault Zone: TPFZ) ที่พัฒนาต่อมาจากการชนกันของแผ่นทวีปอินเดียและแผ่นทวีปยูเรเชีย โดยมีการเคลื่อนที่ของแผ่นทวีปอินเดียที่ค่อยๆ เปลี่ยนจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือไปทางทิศเหนือ และยังพบว่าเขตรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ เริ่มต้นจากการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่มร่วมกับเกิดการเฉือนแบบซ้ายเข้า ในสภาวะการเฉือนร่วมกับแรงอัด (transpression) ต่อมาเกิดการเปลี่ยนทิศของแรงตามเข็มนาฬิกา เป็นมุมมากกว่า 100° ซึ่งทำให้บริเวณรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ เปลี่ยนการเคลื่อนที่เป็นแบบขวาเข้า ในสภาวะการเฉือนร่วมกับแรงดึง (transtension) (รูปที่ 1.4) และยังเกิดร่วมกับการเปิดแอ่งเทอร์เชียรีอีกด้วย

Watkinson et al. (2008) ศึกษาการเคลื่อนที่ของรอยเลื่อนระนองและรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย ที่เป็นรอยเลื่อนที่มีแนวการวางตัวอยู่ในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ – ตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งถูกสันนิษฐานว่ามีการพบกันกับรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์และรอยเลื่อนแม่ปิงที่อยู่ทางเหนือของประเทศ ซึ่งวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ โดยรอยเลื่อนเหล่านี้เป็นผลจากการชนกันของแผ่นทวีปอินเดียและแผ่นทวีปยูเรเชีย จากการศึกษาของ Watkinson และคณะ พบว่าการเคลื่อนที่ของรอยเลื่อนระนองและรอยเลื่อนคลองมะรุ่ยนั้นมี 2 ช่วง คือ การเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่มที่เกิดร่วมกับการเฉือนแบบขวาเข้า และต่อมาเกิดการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ และมีการเลื่อนแบบซ้ายเข้า ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนลักษณะในหินแกรนิต และมีการดันตัวขึ้น (exhumed) ของหินรอยเลื่อนที่เกิดในช่วงแรก โดยช่วงเวลาที่เกิดนั้นอยู่ในช่วงอายุตอนปลายของยุคครีเทเชียสถึงพาลีโอซีน นอกจากนั้นยังมีการเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่ในสมัยอีโอซีน ซึ่งสรุปได้เป็น D_1 เกิดการเฉือนแบบขวาเข้าร่วมกับการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่มในเกรดต่ำ (low grade ductile dextral strike – slip shear) ซึ่งเกิดก่อนอายุ 87 ล้านปี ต่อมา D_2 เกิดการเฉือนแบบขวาเข้าร่วมกับการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่มเช่นกัน แต่เกิดในเกรดกลางถึงสูง (medium – high grade) เกิดในอายุหลังจาก 72 ล้านปีถึง 56 ล้านปี ต่อมา D_3 เกิดการเฉือนแบบซ้ายเข้าร่วมกับการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ (brittle sinistral strike – slip shear) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่เป็นแบบซ้ายเข้า เกิดอายุหลัง 52 ล้านปี และสุดท้าย D_4 เกิดการเฉือนแบบขวาเข้าร่วมกับการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ (brittle dextral strike – slip shear) ซึ่งเกิดอายุประมาณ 23 ล้านปี

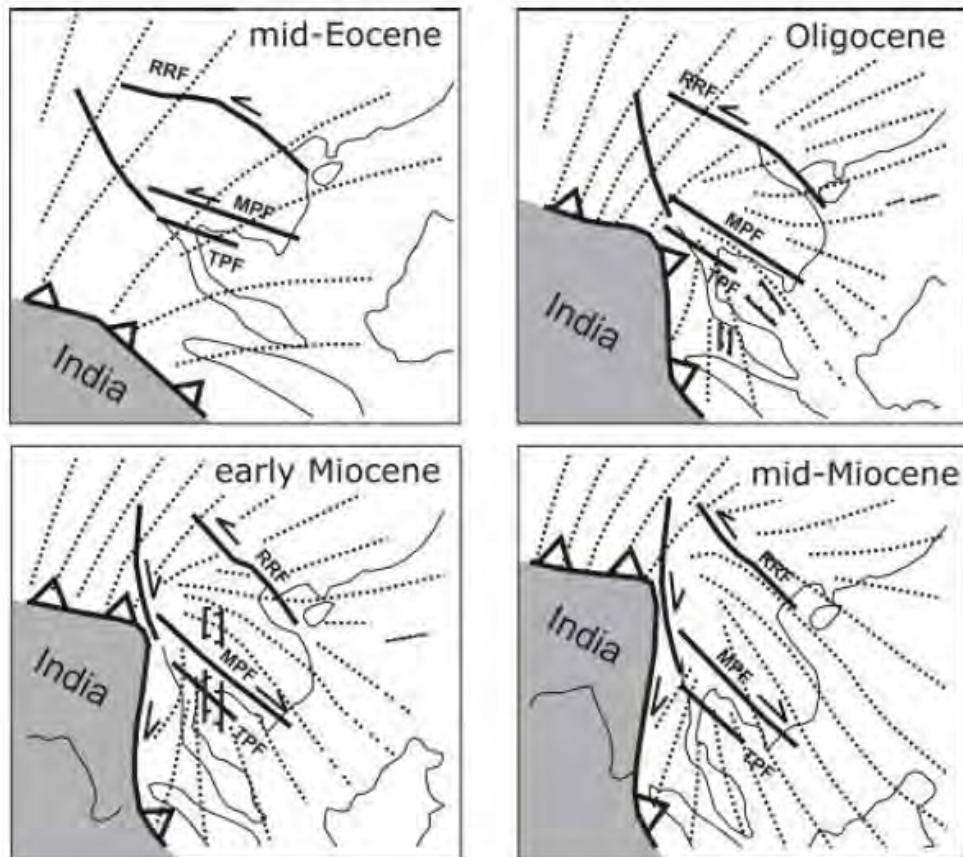
Watkinson et al. (2011) ศึกษาเวลาของการเกิดการเฉือนในแนวระดับของรอยเลื่อนระนองและรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย ในการศึกษาชั้นได้หาอายุจากวิธี $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ และ U – Pb SHRIMP และยังคงศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาค ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ในอายุช่วงตอนกลางของสมัยอีโอซีน (48 – 40 ล้านปี) เกิดการเฉือนแบบ

ขวาเข้าร่วมกับการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนุ่ม โดยเป็นเหตุการณ์ที่เกิดหลังจากที่มีการเฉือนแบบขวาเข้าในช่วงอายุครีเทเชียสตอนปลาย (81 ล้านปี) และในสมัยพาลีโอซีนตอนปลายถึงอีโอซีนตอนต้น (59 – 49 ล้านปี) โดยหินที่พบนั้นเป็นผลจากการเกิดการหลอมละลายบางส่วน (partial melting) ในช่วงอายุตอนปลายของยุคครีเทเชียส และเป็นหินแกรนิตที่เกิดในสมัยอีโอซีนตอนต้น นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่า การเฉือนแบบขวาเข้าที่เกิดในสมัยอีโอซีนตอนกลางนั้นเกิดในอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 300°C ถึง 500°C และเกิดในเวลาเดียวกับที่รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์และรอยเลื่อนแม่ปิงเกิดการเฉือนแบบซ้ายเข้า ซึ่งเป็นผลจากการชนกันของแผ่นทวีปอินเดียและแผ่นทวีปยูเรเชีย และสุดท้ายในสมัยอีโอซีนตอนปลาย (37 ล้านปี) มีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากขวาเข้าเป็นซ้ายเข้า เนื่องจากมีการเปลี่ยนทิศของแรงที่เข้ามากระทำซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแผ่นทวีปอินเดีย

Kanjanapayont et al. (2012) ศึกษาการเคลื่อนที่ของรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย พบว่าหินที่พบในบริเวณรอยเลื่อนนั้นมักจะเป็นหินจำพวกไมโลไนต์แกรนิต ออโทไนส์ เป็นต้น และจากโครงสร้างจุลภาคและกลุ่มแร่บ่งบอกถึงการแปรสภาพแบบแอมฟิโบลิต์ถึงกรีนชีตส์ จากการหาความสัมพันธ์กับธรณีแปรสัณฐานของประเทศนั้น พบว่ารอยเลื่อนคลองมะรุ่ยเริ่มต้นจากการเฉือนแบบขวาเข้า ซึ่งเกิดในช่วงอายุตอนปลายของยุคครีเทเชียส ที่แผ่นจุลทวีปพม่าตะวันตกชนกับแผ่นจุลทวีปไซบิวมา และต่อมาเกิดการเปลี่ยนลักษณะจากแบบอ่อนนุ่มไปเป็นแบบแตกเปราะ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการดันตัวขึ้นของหินเกิดเป็นโครงสร้างของรอยเลื่อนย้อน หรือเรียกว่า positive flower structure ที่เกิดในช่วงที่แผ่นทวีปอินเดียกำลังจะเริ่มชนแผ่นทวีปยูเรเชีย และสุดท้ายเกิดการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของรอยเลื่อน และเกิดเป็นรอยเลื่อนแบบปกติที่พบหินคาตาคลาไซต์เกิดร่วมด้วย

Nantasin et al. (2012) ศึกษาการเกิดของหินทับศิลา ที่เรียกว่าหินแปรซับซ้อนทับศิลา หรือ Thabsila metamorphic complex ที่เกิดบริเวณรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ โดยศึกษาจากลักษณะศิลาวรรณาที่พบและการกำหนดอายุทางธรณีวิทยา พบว่าหินฐานในบริเวณศึกษามีลักษณะแตกต่างกัน 4 แบบ ซึ่งทั้ง 4 แบบมีการแปรสภาพอยู่ในชุดลักษณะการแปรสภาพแบบแอมฟิโบลิต์ และจากการหาอายุของแร่เซอร์คอนด้วยวิธี LA-ICP-MS U-Pb และแร่ไบโอไทต์ด้วยวิธี Rb-Sr biotite isochron พบว่าอายุของการแปรสภาพอยู่ในช่วง 51 – 57 ล้านปี ซึ่งสัมพันธ์กับเหตุการณ์การชนกันของแผ่นทวีปอินเดียและแผ่นทวีปยูเรเชีย ต่อมาในสมัยโอลิโกซีนเกิดการเฉือนร่วมกับแรงดึงขึ้น และสุดท้ายมีการเย็นตัวของหินฐานที่อุณหภูมิ 350°C ถึง 300°C ซึ่งอยู่ในช่วงอายุ 32 – 36 ล้านปี

Kawakami et al. (2014) ศึกษาอายุของหินแกรนิตอยและหินแปรในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือและชายฝั่งทะเลของประเทศไทย โดยการหาอายุของเซอร์คอน ด้วยวิธี U-Pb zircon และ CHIME monazite โดยหนึ่งในพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้คือบริเวณหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน โดยได้อายุของหินแกรนิตในพื้นที่ศึกษาประมาณ 219 ± 2 ล้านปี และพบอายุการแปรสภาพไพศาลประมาณ 185 ± 2 ล้านปี และยังคงพบว่ามีแกรนิตที่ไม่แสดงแนวริ้วขนาน (non – foliated granite) เกิดขึ้นมาทำให้มีการแปรสภาพแบบสัมผัส ในช่วงอายุตอนปลายของยุคครีเทเชียส นอกจากอายุของหินที่ได้จากการศึกษาแล้ว งานวิจัยนี้ยังกล่าวถึงแร่องค์ประกอบที่พบในหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน ซึ่งประกอบไปด้วยแร่ไบโอไทต์ แร่ซิลิมาไนต์ แร่การ์เนต และยังคงพบที่เกิดในชุดลักษณะการแปรสภาพแบบแอมฟิโบลิต์ โดยหลังจากนั้นมีลักษณะของแร่มีสโคไวต์ที่วางตัวตัดแนวเดิม ทำให้สันนิษฐานว่ามีการเกิดการแปรสภาพย้อนกลับ (retrograde) ขึ้น

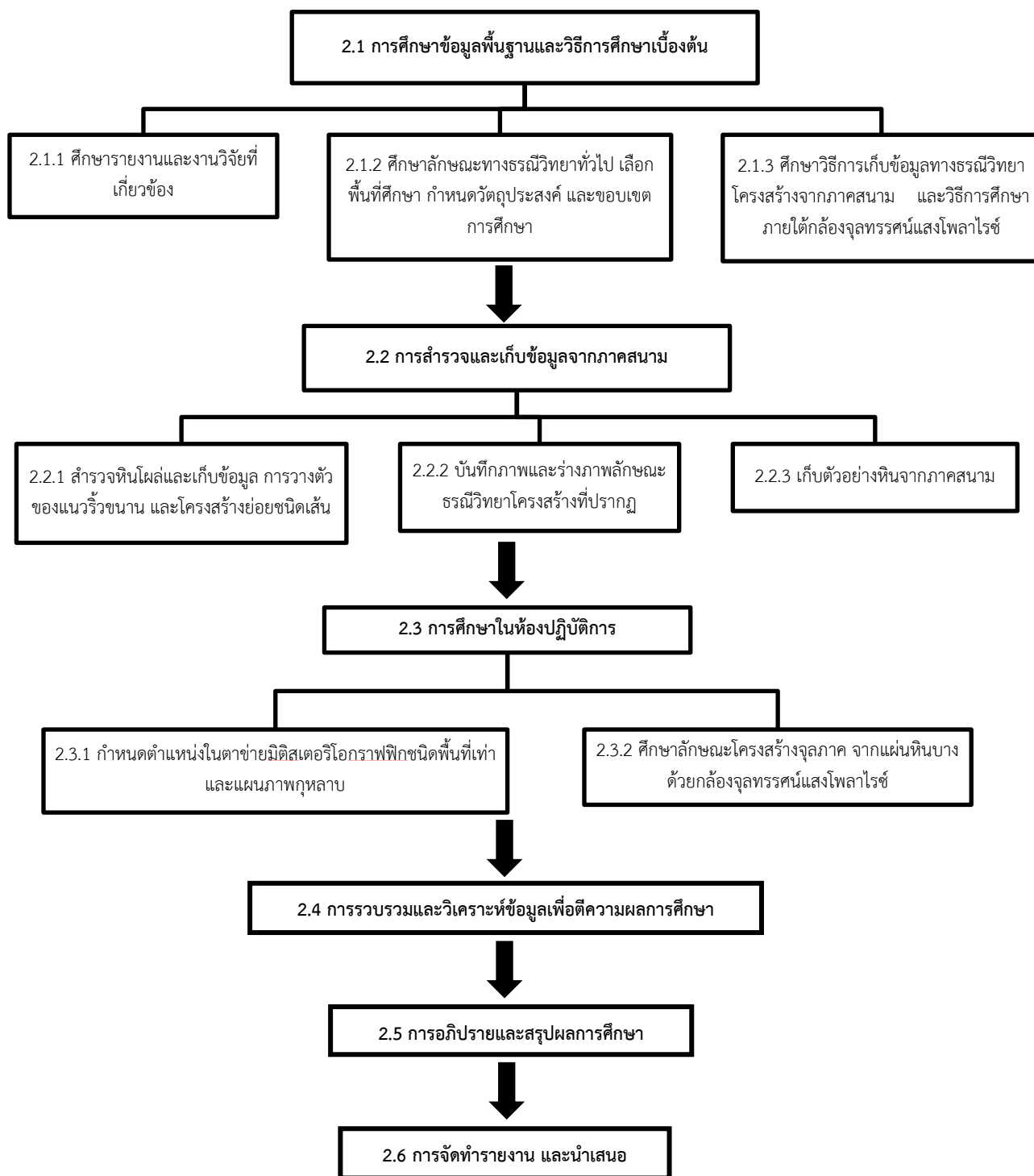


รูปที่ 1.4 แผนภาพแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแผ่นทวีปอินเดียที่เข้ามาชนแผ่นทวีปยูเรเชีย โดยเริ่มจากสมัยอีโอซีนตอนกลาง ที่แผ่นทวีปอินเดียเริ่มเคลื่อนที่เข้าใกล้แผ่นทวีปยูเรเชีย ซึ่งเกิดแรง (เส้นประ) ในทิศเกือบตะวันตก - ตะวันออก และเกิดรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ (TPF) และรอยเลื่อนแม่ปิง (MPF) ที่มีการเคลื่อนที่แบบซ้ายเข้า จากนั้นในสมัยโอลิโกซีนมีการเปลี่ยนทิศของแรงอยู่ในทิศเกือบเหนือ - ใต้ ต่อมาจนถึงสมัยไมโอซีนตอนต้นและตอนกลาง ที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่มาเป็นแบบขวาเข้า (Huchon, 1994 and Rhodes et al., 2005)

บทที่ 2

ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งระเบียบวิธีวิจัยออกเป็น 6 ขั้นตอน ได้แก่ การศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น การสำรวจและเก็บข้อมูลจากภาคสนาม การศึกษาในห้องปฏิบัติการ การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตีความผลการศึกษา การอภิปรายและสรุปผลการศึกษา และการจัดทำรายงานและนำเสนอ โดยมีรายละเอียดระเบียบวิธีวิจัยและแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (รูปที่ 2.1) ดังนี้



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงลำดับการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 6 ขั้นตอน ตามลำดับ

2.1 การศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น

2.1.1 การศึกษารายงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษารายงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับธรณีวิทยาโครงสร้าง กลไกการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ และการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบอ่อนนุ่ม รอยเลื่อนในประเทศไทย กลไกธรณีแปรสัณฐานในประเทศไทย โดยการสืบค้นจากหนังสือ วารสารงานวิจัย และเอกสารงานประชุมจากอาจารย์ที่ปรึกษา จากห้องสมุดภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทางอินเทอร์เน็ต

2.1.2 การศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาทั่วไป เลือกพื้นที่ศึกษา กำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษา

ศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาทั่วไปของพื้นที่ที่ได้จากคำแนะนำของอาจารย์ที่ปรึกษา เลือกพื้นที่ศึกษาบริเวณอำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าบริเวณนี้เป็นเขาหินไนส์ลิกแกรนิตที่วางตัวยาวในแนวเกือบเหนือ – ใต้ และอาจมีความสัมพันธ์กับรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ และรอยเลื่อนระนอง จึงเลือกที่จะศึกษาหินโผล่ตามจุดศึกษาตลอดแนวของเขาหินไนส์ลิกแกรนิตนี้ จากนั้นกำหนดวัตถุประสงค์ในการศึกษา และขอบเขตการศึกษา

2.1.3 การศึกษาวิธีการเก็บข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้างจากภาคสนาม และวิธีการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์

ศึกษาวิธีการเก็บข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้างจากภาคสนาม เช่นการเก็บข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน การวางตัวของแนวรอยแตก การวางตัวของริ้วขนาน และการวางตัวของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น การเก็บตัวอย่างหินจากภาคสนามและการเขียนข้อมูลการวางตัวกำกับ เพื่อไม่ให้สับสนในช่วงของการนำมาศึกษาและวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ รวมถึงเตรียมข้อมูลและอุปกรณ์เพื่อออกภาคสนามคือ แผนที่ธรณีวิทยามาตราส่วน 1:250,000 ของจังหวัดเพชรบุรี และจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ภาพถ่ายดาวเทียม และแผนที่ทางหลวง นอกจากนี้ยังศึกษาวิธีการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ ซึ่งต้องทำการศึกษาในแผ่นหินบาง จากตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง (oriented specimen) ที่เก็บมาจากพื้นที่ศึกษา

2.2 การสำรวจและเก็บข้อมูลจากภาคสนาม

2.2.1 การสำรวจหินโผล่และเก็บข้อมูลการวางตัวของแนวริ้วขนาน และโครงสร้างย่อยชนิดเส้น

ศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างจากหินโผล่ และทำการเก็บข้อมูลในภาคสนาม โดยใช้เข็มทิศธรณีวิทยา ซึ่งค่าการวางตัวของโครงสร้างที่ทำการวัด ประกอบด้วยค่าการวางตัวและเอียงเทของแนวริ้วขนาน โครงสร้างย่อยชนิดเส้น นอกจากนี้ทำการบันทึกลักษณะทางกายภาพของหินโผล่ และลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างบ่งชี้อื่น ที่พบในภาคสนาม

2.2.2 การบันทึกภาพและร่างภาพลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏ

ทำการบันทึกภาพลักษณะของหินโผล่ และลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างต่างๆ เช่นการวางตัวและการเอียงเทของแนวริ้วขนาน โครงสร้างย่อยชนิดเส้น เป็นต้น

2.2.3 การเก็บตัวอย่างหินจากภาคสนาม

การเก็บตัวอย่างหินนั้น จะเก็บเป็นตัวอย่างหินที่ระบุตำแหน่ง ซึ่งมีขนาดไม่น้อยกว่า 15 ซม × 15 ซม × 15 ซม เพื่อนำกลับมาทำเป็นแผ่นหินบาง และสามารถนำไปวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคได้ โดยตัวอย่างหินที่นำกลับมา จะต้องบันทึกค่าระนาบการวางตัวอย่างน้อยหนึ่งระนาบลงบนตัวอย่างหิน (oriented sample) (รูปที่ 2.2 A และ B) เพื่อใช้เป็นระนาบอ้างอิง เมื่อนำกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

2.3 การศึกษาในห้องปฏิบัติการ

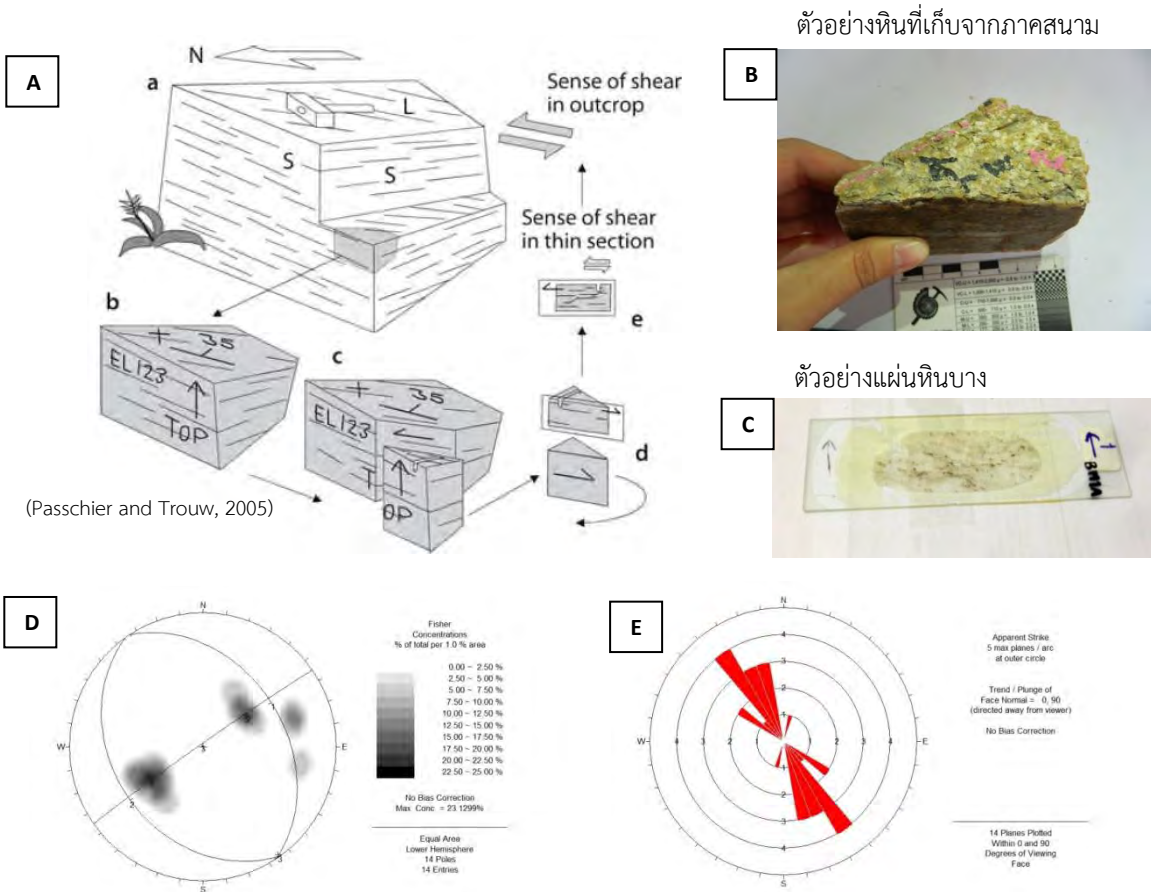
2.3.1 การกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า (equal – area stereographic net) และ แผนภาพกุหลาบ (rose diagram)

ข้อมูลสำหรับการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างในพื้นที่ศึกษานั้นเป็นข้อมูลจากภาคสนาม ได้แก่ การวางตัวและการเอียงเทของแนวริ้วขนาน โครงสร้างย่อยชนิดเส้น และโครงสร้างอื่นๆที่พบในภาคสนาม เพื่อคุณลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง การเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ และการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนิ่ม จากการศึกษาในระดับมหัศจรรย์ที่ปรากฏของแต่ละจุดศึกษา แล้วนำมาวิเคราะห์ภาพรวมของพื้นที่ศึกษา โดยข้อมูลข้างต้นสามารถนำไปกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิก (รูปที่ 2.2 D) และแผนภาพกุหลาบ (รูปที่ 2.2 E) เพื่อใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนลักษณะของหิน และนำมาใช้ตีความวิวัฒนาการของธรณีวิทยาโครงสร้าง

2.3.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค (microstructure) จากแผ่นหินบาง (รูปที่ 2.2 C) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะเนื้อผิว (texture) ของหินและแร่ ที่บ่งชี้ถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยา เช่น การยึดของเม็ดแร่ การแตกของแร่อย่างเป็นระบบ จากแผ่นหินบาง ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ โดยมีลำดับการเตรียมตัวอย่างดังนี้

- 1) นำตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง (oriented sample) มาพิจารณาแนวการวางตัวของริ้วขนาน และโครงสร้างย่อยชนิดเส้น จากนั้นกำหนดแนวตัดให้ตั้งฉากกับริ้วขนาน และขนานกับโครงสร้างย่อยชนิดเส้น เพื่อจะได้สามารถดูลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่เกิดจากแนวความเค้นมากที่สุด (maximum stress) ที่กระทำต่อหินในพื้นที่ศึกษา
- 2) พิจารณาแบ่งลักษณะเนื้อหิน เลือกบริเวณที่ต้องการศึกษา โดยอาศัยลักษณะเนื้อหิน แนวรอยต่อระหว่างเนื้อหิน และลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง จากนั้นทำการตัดแผ่นหินให้ได้ขนาดที่เหมาะสมกับแผ่นกระจกใส โดยทำสัญลักษณ์ที่ใช้บอกด้านบน – ล่าง (top - bottom) ที่สัมพันธ์กับการวางตัวของหินในภาคสนาม กำกับไว้ด้วย
- 3) นำส่วนด้านล่าง (bottom) ของแผ่นหินที่ได้รับการขัดบางและฝนให้เรียบ มาติดกับสไลด์
- 4) ดำเนินการทำแผ่นหินบางตามขั้นตอนปกติ



รูปที่ 2.2 (A,B) การเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่งจากภาคสนาม (C) ตัวอย่างแผ่นหินบาง (D) ตัวอย่างตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า และ (E) ตัวอย่างแผนภาพกุหลาบ

2.4 การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตีความผลการศึกษา

เพื่อตีความผลการศึกษา จึงต้องทำการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากภาคสนาม และจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ทั้งค่าการวางตัวของโครงสร้างทางธรณีวิทยาต่างๆ การกำหนดตำแหน่งข้อมูลในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ และการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคจากแผ่นหินบางด้วยกล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์ จากนั้นวิเคราะห์หากกลไกการเปลี่ยนแปลงลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง และวิวัฒนาการของธรณีวิทยาโครงสร้าง ในระดับมหัศจรรย์และระดับจุลภาค โดยวิเคราะห์การวางตัวของริ้วขนาน และโครงสร้างย่อยชนิดเส้น รวมถึงลักษณะเนื้อผิวของหินและแร่ ที่บ่งชี้ถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยา เช่น การยึดของเม็ดแร่ การแตกของแร่อย่างเป็นระบบ จากแผ่นหินบาง

2.5 การอภิปรายและสรุปผลการศึกษา

รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการศึกษา มาอภิปรายในเรื่องลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง และวิวัฒนาการของธรณีวิทยาโครงสร้างของพื้นที่ศึกษา โดยวิเคราะห์ร่วมกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาสนับสนุนข้อมูลผลการศึกษาที่มีความสอดคล้องกัน และจากนั้นทำการสรุปผลการศึกษาทั้งหมด

2.6 การจัดทำรายงานและนำเสนอ

จัดทำรายงานการศึกษาเป็นรูปเล่ม และนำเสนอการศึกษาในรูปแบบของการสัมมนา

บทที่ 3

ผลการศึกษา (Results)

เนื้อหาในบทนี้เป็นผลมาจากการสำรวจภาคสนามโดยการเก็บข้อมูลภาคสนามสำหรับการศึกษาในระดับมัธยมศึกษา ได้แก่ การวางตัวของแนวริวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น และการเก็บตัวอย่างหินระบุตำแหน่งเพื่อศึกษาในระดับจุลภาค โดยการศึกษาจากแผ่นหินบางภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ของหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ธรณีวิทยา (Geology)

พื้นที่ศึกษาเป็นลักษณะของเขาคหินแกรนิต ที่วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ ประกอบไปด้วยหินไนส์สิกแกรนิตที่มีสัดส่วนของแร่องค์ประกอบและขนาดผลึกที่แตกต่างกันออกไป โดยแร่องค์ประกอบนั้นจะประกอบไปด้วย แร่ควอตซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่ไบโอไทต์ แร่มีสโคไวต์ แร่การ์เนต แร่ฮอร์นเบลนด์ แร่คลอไรต์ และแร่อื่นๆเล็กน้อย ลักษณะหินแสดงเนื้อหินแบบอ่อนนุ่มเช่นแนวริวขนาน และโครงสร้างย่อยชนิดเส้น และแบบแตกเปราะเช่น รอยแตก และรอยเลื่อน เป็นต้น

3.2 ธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural geology)

การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ แบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ

3.2.1 ระดับมัธยมศึกษา เป็นการเก็บข้อมูลภาคสนาม ได้แก่ การวางตัวของแนวริวขนาน และโครงสร้างย่อยชนิดเส้น การบันทึกภาพเพื่อหินโพล์ และนำข้อมูลไปกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า และแผนภาพกุกุหลาบ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนลักษณะ

3.2.2 ระดับจุลภาค เป็นการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาคจากแผ่นหินบางที่ได้จากหินระบุตำแหน่งภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยจะศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่เป็นกลไกของการถูกเปลี่ยนลักษณะ (deformation mechanism) และสามารถเป็นตัวบ่งชี้การเคลื่อนตัว (kinematic indicators) อีกด้วย

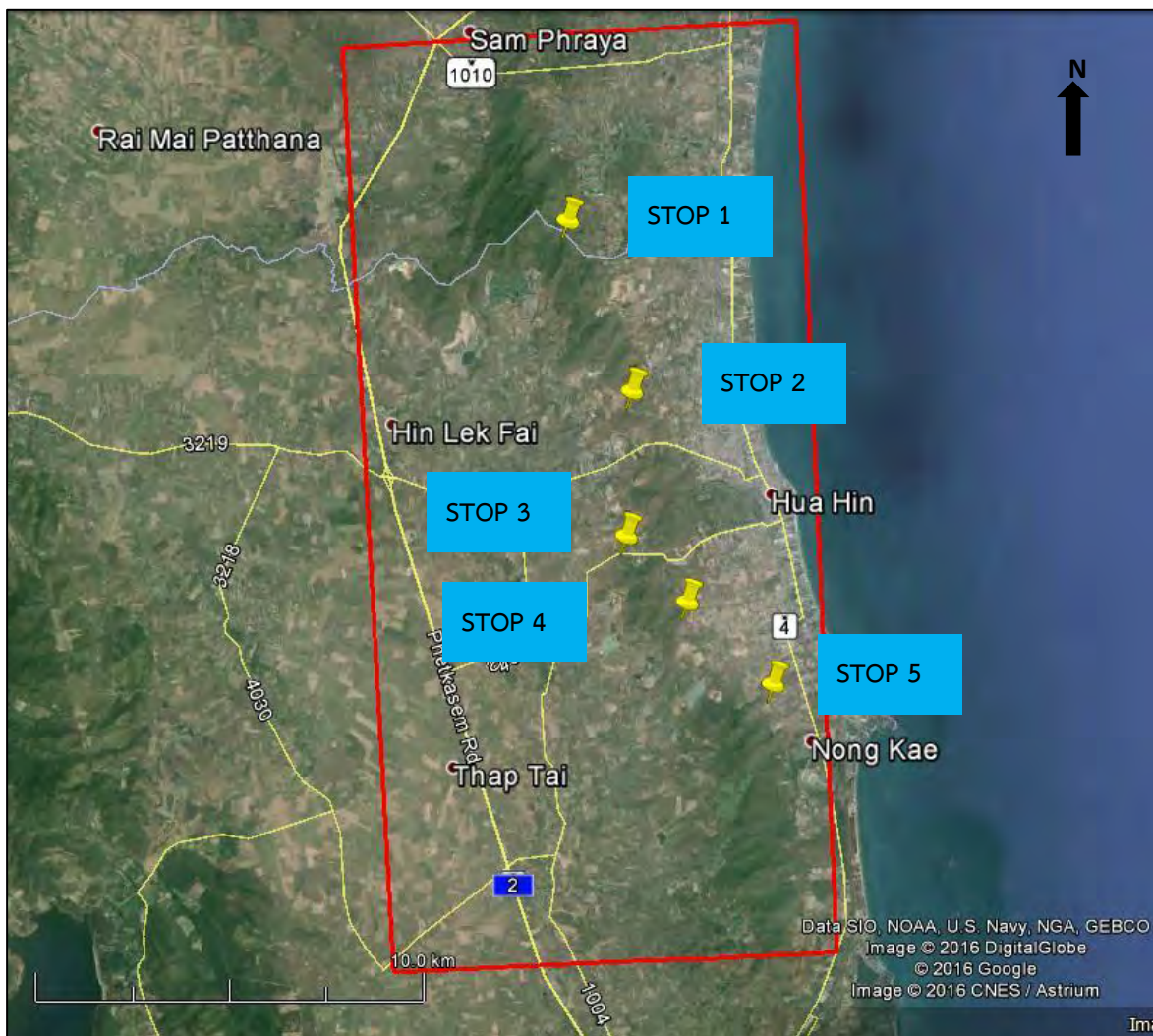
3.2.1 ธรณีวิทยาโครงสร้างระดับมัธยมศึกษา (mesoscopic scale)

ในการสำรวจภาคสนาม ได้ทำการแบ่งพื้นที่ศึกษาตามแนวเขาจากเหนือ – ใต้ เป็น 5 จุดศึกษา (รูปที่3.1) ได้แก่

1. จุดศึกษาที่ 1 (Stop 1)
2. จุดศึกษาที่ 2 (Stop 2)
3. จุดศึกษาที่ 3 (Stop 3)
4. จุดศึกษาที่ 4 (Stop 4)
5. จุดศึกษาที่ 5 (Stop 5)

โดยในแต่ละจุดศึกษานั้นจะเลือกบริเวณที่มีถนนตัดผ่าน เพื่อความสะดวกในการเข้าถึงพื้นที่ และเลือกจุดศึกษาที่กระจายตัวไปทั้งหมด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ทั่วถึงและสามารถเป็นตัวแทนของลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของ

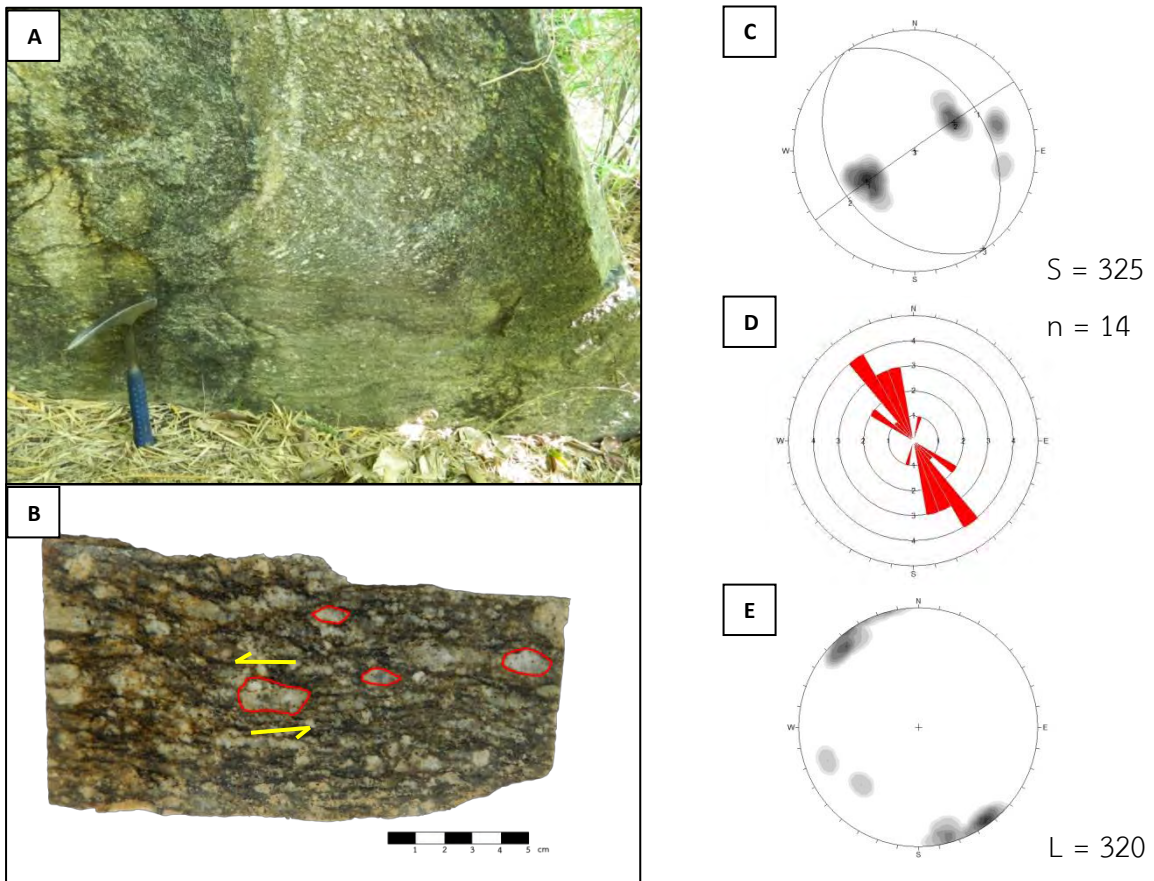
ทั้งเขาได้ และนอกจากการศึกษาจากหินโผล่แล้วยังศึกษาจากตัวอย่างหินระบุตำแหน่งที่เก็บจากภาคสนามก่อนที่ จะนำไปทำแผ่นหินบาง ซึ่งตัวอย่างหินจากในบางจุดศึกษานั้นสามารถมองเห็นเม็ดแร่ที่ชัดเจน และการเปลี่ยนแปลง ลักษณะที่เกิดขึ้นชัดเจน โดยรายละเอียดที่จะกล่าวถึงต่อจากนี้ จะเป็นลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างที่พบใน ภาคสนามในแต่ละจุดศึกษา ภาพหินโผล่ ตัวอย่างหิน และภาพถ่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของแนวริ้ว ขนนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น รวมถึงแผนภาพภูทาบของแนวริ้วขนานของแต่ละจุดศึกษา เพื่อรวบรวมข้อมูล และนำไปวิเคราะห์และอภิปรายผลการศึกษา นอกจากนั้นเพื่อเป็นหลักฐานในการตีความวิวัฒนาการของลักษณะ ทางธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายดาวเทียม แสดงพื้นที่ศึกษา (กรอบสีแดง) และจุดศึกษาทั้ง 5 จุดศึกษา (หมุดสีเหลือง) (Google Earth, 2016)

จุดศึกษาที่ 1

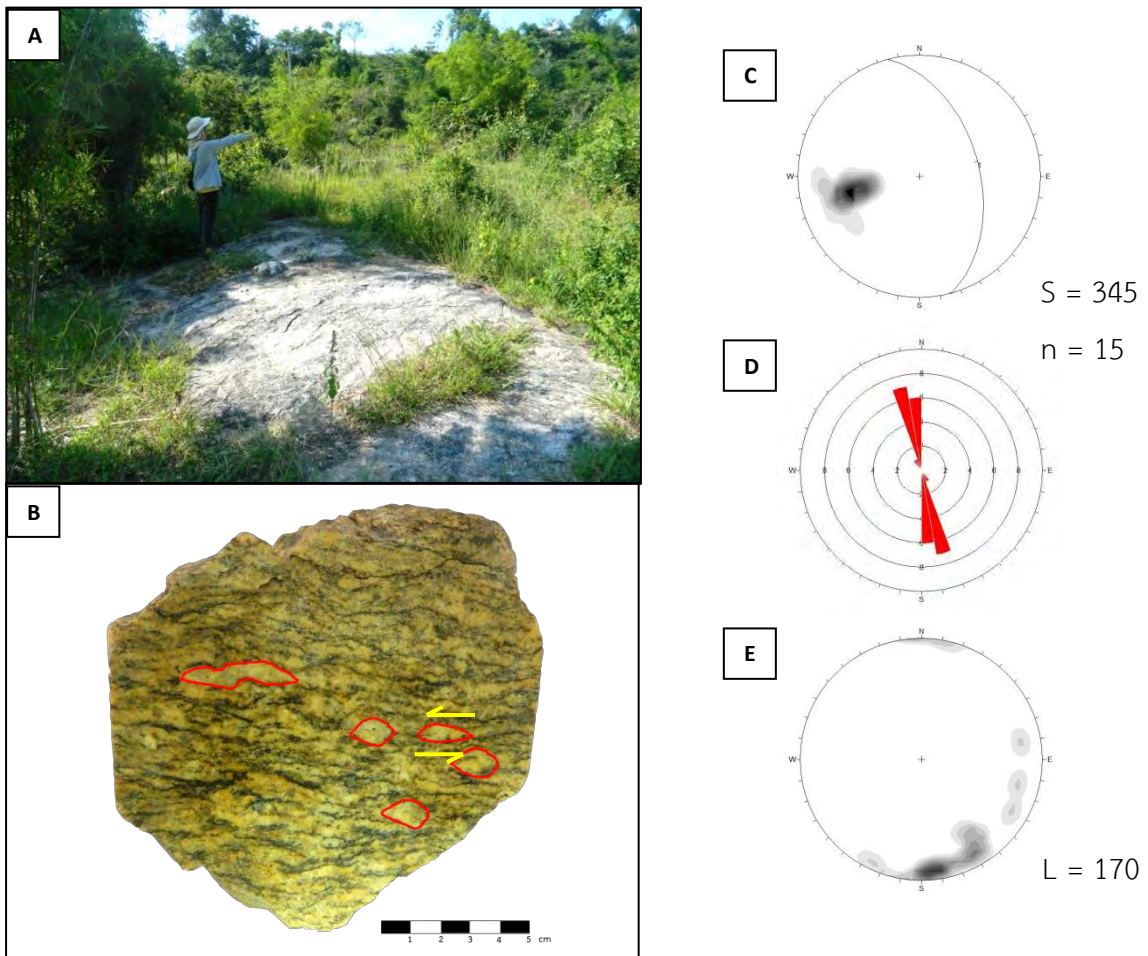
รูปที่ 3.2 A แสดงลักษณะหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 1 สำหรับลักษณะหินที่พบมองเห็นเม็ดแร่เฟลด์สปาร์และแร่ควอตซ์ ที่มีแร่ไปโอไทต์แสดงลักษณะเป็นเส้นยาววางตัวอยู่รอบๆเม็ดแร่ นอกจากนี้ยังพบแร่สีดำขนาดเล็กที่มีลักษณะคล้ายแร่ฮอร์นเบลนด์กระจายอยู่ทั่วไป แนวริวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นที่พบแสดงลักษณะไม่ชัดเจนมาก จากรูปที่ 3.2 B แสดงลักษณะเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ที่มีการเฉือนแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) และจากการนำค่าการวางตัวของแนวริวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นมากำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิตสเตอร์ไอกรรภาพิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ ในรูปที่ 3.2 C และ D จะเห็นว่าแนวการวางตัวของริวขนานนั้นอยู่ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ โดยมีมุมเอียงเทค่อนข้างชันและเอียงเทไปทั้งทางทิศตะวันตกและทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทำให้มองเห็นเป็นลักษณะชั้นหินคดโค้ง (fold) ของแนวริวขนานและจากรูปที่ 3.2 E แสดงแนวการวางตัวของโครงสร้างย่อยชนิดเส้นในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ เช่นเดียวกับแนวริวขนาน โดยมีมุมเอียงเท (plunge) ค่อนข้างต่ำ และส่วนใหญ่เอียงเทไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือและตะวันออกเฉียงใต้



รูปที่ 3.2 ในจุดศึกษาที่ 1 (A) ภาพหินโผล่ (ค้อนสูง 32.5 ซม.) (B) ตัวอย่างหินแสดงการเฉือนแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) (C,D) ตาข่ายมิตสเตอร์ไอกรรภาพิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวการวางตัวริวขนาน ตามลำดับ (E) ตาข่ายมิตสเตอร์ไอกรรภาพิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น

จุดศึกษาที่ 2

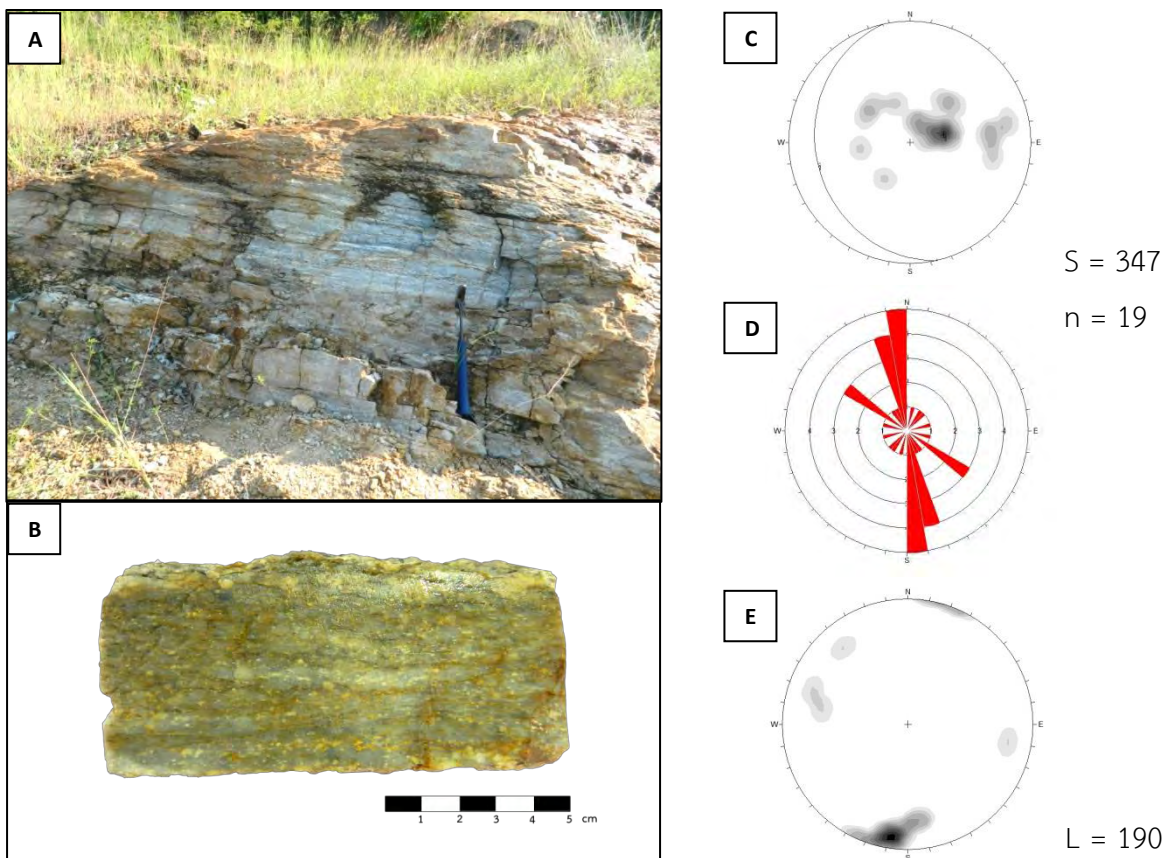
รูปที่ 3.3 A แสดงลักษณะหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 2 ซึ่งมีลักษณะหินค่อนข้างผุ พบเม็ดแร่เฟลด์สปาร์และแร่ควอตซ์ ที่มีแร่ไบโอไทต์แสดงลักษณะเป็นเส้นยาววางตัวอยู่รอบๆเม็ดแร่ ลักษณะแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นที่พบนั้นแสดงลักษณะชัดเจนกว่าจุดศึกษาที่ 1 จากรูปที่ 3.3 B แสดงลักษณะเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ที่มีการเนียนแบบซ้ายเข้า และจากการนำค่าการวางตัวของแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นมากำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิตสเตอร์ไอกรัฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ ในรูปที่ 3.3 C และ D แสดงแนวการวางตัวของร้าวขนานอยู่ในทิศเกือบเหนือ - ใต้ โดยมีมุมเอียงเทไปทางทิศตะวันออก และจากรูปที่ 3.3 E แสดงแนวการวางตัวของโครงสร้างย่อยชนิดเส้นในทิศเหนือ - ใต้ ซึ่งมีมุมเอียงเทค่อนข้างต่ำ และส่วนใหญ่เอียงเทไปทางทิศใต้



รูปที่ 3.3 ในจุดศึกษาที่ 2 (A) ภาพหินโผล่ (คนสูง 156 ซม.) (B) ตัวอย่างหินแสดงการเนียนแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) (C,D) ตาข่ายมิตสเตอร์ไอกรัฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวการวางตัวของร้าวขนานตามลำดับ (E) ตาข่ายมิตสเตอร์ไอกรัฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น

จุดศึกษาที่ 3

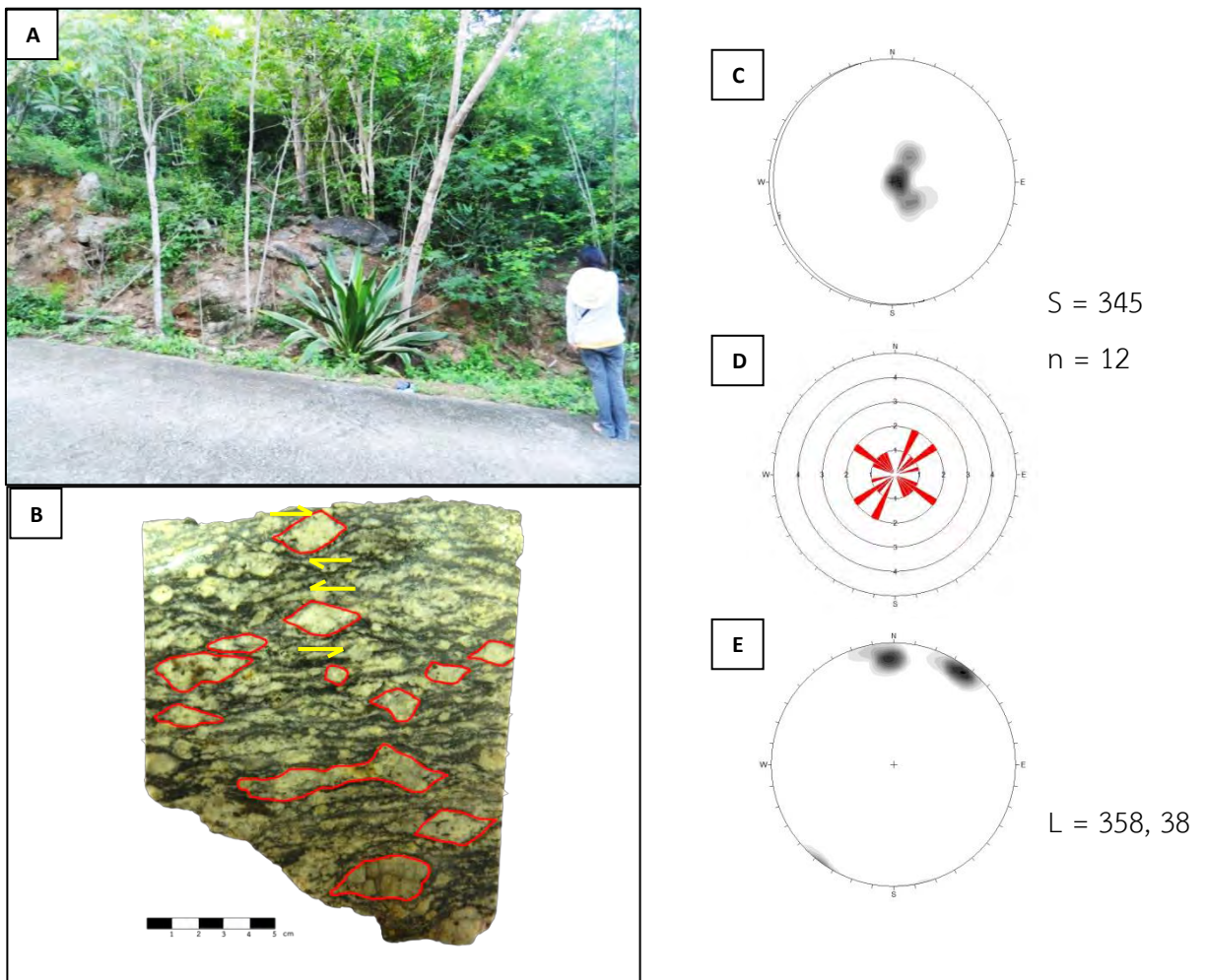
รูปที่ 3.4 A แสดงลักษณะหินโคลในจุดศึกษาที่ 3 ซึ่งมีลักษณะหินค่อนข้างผุ ในตัวอย่างหินพบเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ขนาดเล็กเรียงตัวกันเป็นแนว ในขณะที่แร่ควอตซ์นั้นเป็นสัดส่วนแร่ส่วนใหญ่ที่พบ ลักษณะแนวริ้วขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นที่พบไม่ชัดเจน ซึ่งเห็นเป็นเพียงแนวการเรียงตัวของแร่เฟลด์สปาร์ ในรูปที่ 3.4 B และจากการนำค่าการวางตัวของแนวริ้วขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นมากำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอร์ไอกรรภาพฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ ในรูปที่ 3.4 C และ D จะเห็นว่าแนวการวางตัวของริ้วขนานส่วนใหญ่อยู่ในทิศเกือบเหนือ – ใต้ และกระจายอยู่ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ และตะวันออกเฉียงเหนือ – ตะวันตกเฉียงใต้เล็กน้อย โดยมีมุมเอียงเทส่วนใหญ่ไปทางทิศตะวันตก และเอียงเทค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากหินผุ อาจเป็นสาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้พบค่าการวางตัวของแนวริ้วขนานที่ค่อนข้างกระจัดกระจาย และจากรูปที่ 3.4 E แสดงแนวการวางตัวของโครงสร้างย่อยชนิดเส้นในทิศเกือบเหนือ – ใต้ ซึ่งมีมุมเอียงเทค่อนข้างต่ำ และส่วนใหญ่เอียงเทไปทางทิศใต้



รูปที่ 3.4 ในจุดศึกษาที่ 3 (A) ภาพหินโคล (ค้อนสูง 32.5 ซม.) (B) ตัวอย่างหินแสดงเม็ดแร่ที่ขนาดเล็กกว่าจุดศึกษาอื่น (C,D) ตาข่ายมิติสเตอร์ไอกรรภาพฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวการวางตัวริ้วขนาน ตามลำดับ (E) ตาข่ายมิติสเตอร์ไอกรรภาพฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น

จุดศึกษาที่ 4

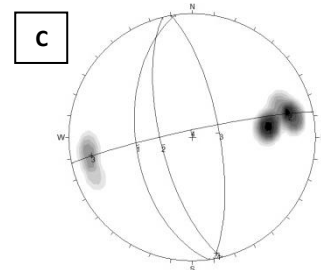
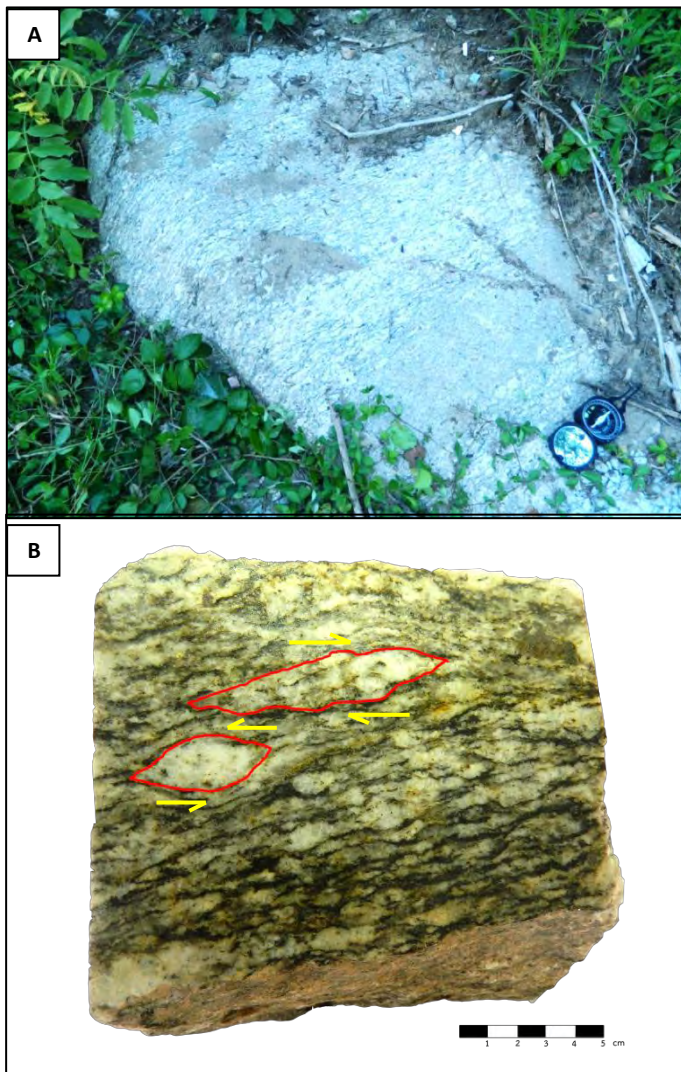
รูปที่ 3.5 A แสดงลักษณะหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 4 สำหรับลักษณะหินมองเห็นเม็ดแร่เฟลด์สปาร์และแร่ควอตซ์ ที่มีแร่ไบโอไทต์แสดงลักษณะเป็นเส้นยาววางตัวอยู่รอบๆเม็ดแร่ มองเห็นเป็นแถบแร่สีขาว - ดำ ซึ่งเป็นแนวร้าวขนานค่อนข้างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบแร่สีดำขนาดเล็กที่มีลักษณะคล้ายแร่ฮอร์นเบลนด์กระจายอยู่ทั่วไป จากรูปที่ 3.5 B แสดงลักษณะเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ที่ส่วนใหญ่มีการเอียงแบบซ้ายเข้า และจากการนำค่าการวางตัวของแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นมากำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ ในรูปที่ 3.5 C และ D จะเห็นว่าแนวการวางตัวของร้าวขนานนั้นค่อนข้างจะจัดกระจายอยู่ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ และทิศตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้ โดยมีมุมเอียงเทต่ำเกือบแนวระดับและส่วนใหญ่เอียงเทไปทางทิศตะวันตก และจากรูปที่ 3.5 E แสดงแนวการวางตัวของโครงสร้างย่อยชนิดเส้นในทิศเหนือ - ใต้ และทิศตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้ โดยมีมุมเอียงเทค่อนข้างต่ำ และส่วนใหญ่เอียงเทไปทางทิศเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือ



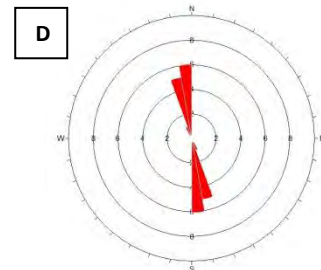
รูปที่ 3.5 ในจุดศึกษาที่ 4 (A) ภาพหินโผล่ (คนสูง 156 ซม.) (B) ตัวอย่างหินแสดงการเอียงทั้งแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) และแบบขวาเข้า (dextral shear sense) (C,D) ตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวการวางตัวของร้าวขนาน ตามลำดับ (E) ตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น

จุดศึกษาที่ 5

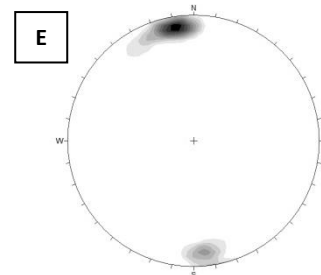
รูปที่ 3.6 A แสดงลักษณะหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 5 สำหรับลักษณะหินมองเห็นเม็ดแร่เฟลด์สปาร์และแร่ควอตซ์ ที่มีแร่ไบโอไทต์แสดงลักษณะเป็นเส้นยาววางตัวอยู่รอบๆเม็ดแร่ มองเห็นเป็นแถบแร่สีขาว - ดำ ซึ่งเป็นแนวร้าวขนานค่อนข้างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบแร่สีดำขนาดเล็กที่มีลักษณะคล้ายแร่ฮอร์นเบลนด์กระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งคาดว่าอาจจะเป็นแร่ฮอร์นเบลนด์ จากรูปที่ 3.6 B แสดงลักษณะเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ที่มีการเฉือนทั้งแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) และแบบขวาเข้า (dextral shear sense) และจากการนำค่าการวางตัวของแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นมากำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ ในรูปที่ 3.6 C และ D จะเห็นว่าแนวการวางตัวของร้าวขนานนั้นอยู่ในทิศเกือบเหนือ - ใต้ โดยมีมุมเอียงเทค่อนข้างชันและเอียงเทไปทั้งทางทิศตะวันตกและทิศตะวันออก ทำให้มองเห็นเป็นลักษณะชั้นหินคดโค้งของแนวร้าวขนาน และจากรูปที่ 3.6 E แสดงแนวการวางตัวของโครงสร้างย่อยชนิดเส้นในทิศเกือบเหนือ - ใต้ โดยมีมุมเอียงเทค่อนข้างต่ำ และส่วนใหญ่เอียงเทไปทางทิศเหนือ



$S = 346, 350$



$n = 12$



$L = 350$

รูปที่ 3.6 ในจุดศึกษาที่ 5 (A) ภาพหินโผล่ (เข็มทิศสูง 30 ซม.) (B) ตัวอย่างหินแสดงการเฉือนทั้งแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) และแบบขวาเข้า (dextral shear sense) (C,D) ตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวการวางตัวของร้าวขนาน ตามลำดับ (E) ตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น

3.2.2 ธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาค (microscopic scale)

ธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคนั้นจะศึกษาในแผ่นหินบางที่ได้จากตัวอย่างหินระบุตำแหน่ง โดยจะนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาค และยังรวมไปถึงการศึกษาสัณฐานวิทยา ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ ทำให้ทราบถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงลักษณะ และตัวบ่งชี้การเคลื่อนตัวของหินในพื้นที่ศึกษา ซึ่งการวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับจุลภาคนี้นี้ยังสามารถนำไปใช้สนับสนุนการวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับมหัพภาค และวิวัฒนาการของการแปรสัณฐานในพื้นที่ศึกษา

ตัวอย่างหินระบุตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาของหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ทั้งหมดเป็นหินไนส์สิกแกรนิต ซึ่งมีสัดส่วนของแร่องค์ประกอบ และขนาดเม็ดแร่หรือผลึกแร่ที่ต่างกันออกไปในแต่ละจุดศึกษา โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่พบ มีรายละเอียดดังนี้

0.25

กลไกการเปลี่ยนแปลงลักษณะ (Deformation mechanism)

Taper twin

ลักษณะของแถบมืดสว่างที่เกิดในแร่แคลสซิโอเครส ซึ่งโดยทั่วไปจะเรียกว่า ผลึกแฝด (twinning) แต่ในผลึกแฝดที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะนั้นจะมีการเสียรูปผลึก (dislocation) ทำให้เกิดแถบมืดสว่างที่มีลักษณะตีบลง และมีสัดส่วนไม่เท่ากัน (รูปที่ 3.7 A และ B) โดยมักพบลักษณะนี้ในแร่แคลสซิโอเครสที่พบในทุกจุดศึกษา

Undulose extinction

ลักษณะการมืดสว่างหรือสีของผลึกที่ไม่สม่ำเสมอ มักพบในแร่ควอตซ์ เกิดจากการเสียรูปผลึก ซึ่งส่วนใหญ่ของแร่ควอตซ์ที่พบในจุดศึกษาทั้ง 5 จุดศึกษา มักจะแสดงลักษณะนี้ (รูปที่ 3.7 C และ D)

Subgrain Rotation (SGR)

เป็นลักษณะของการเกิดผลึกใหม่ ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื่องจากมีแรงเข้ามากระทำ ซึ่งจะเกิดเป็นผลึกเล็กๆที่เกิดในผลึกใหญ่ และแสดงลักษณะการหมุนของผลึกทำให้เกิดเป็นขอบสีดำ มักเกิดในแร่ควอตซ์ พบในจุดศึกษาที่ 1 และ 3 (รูปที่ 3.8)

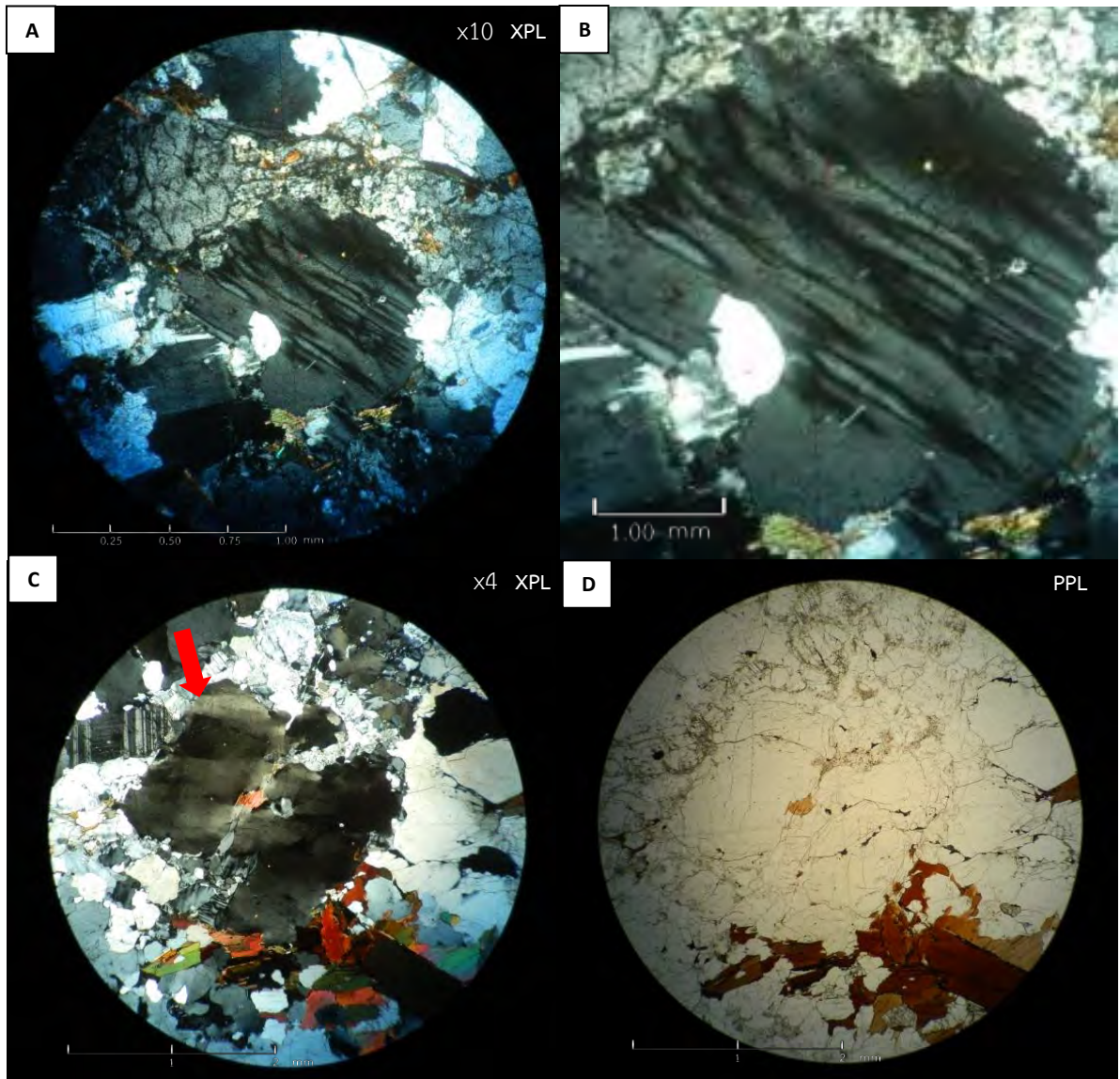
ตัวบ่งชี้การเคลื่อนตัว (Kinematic indicators)

Mineral fish/ mica fish

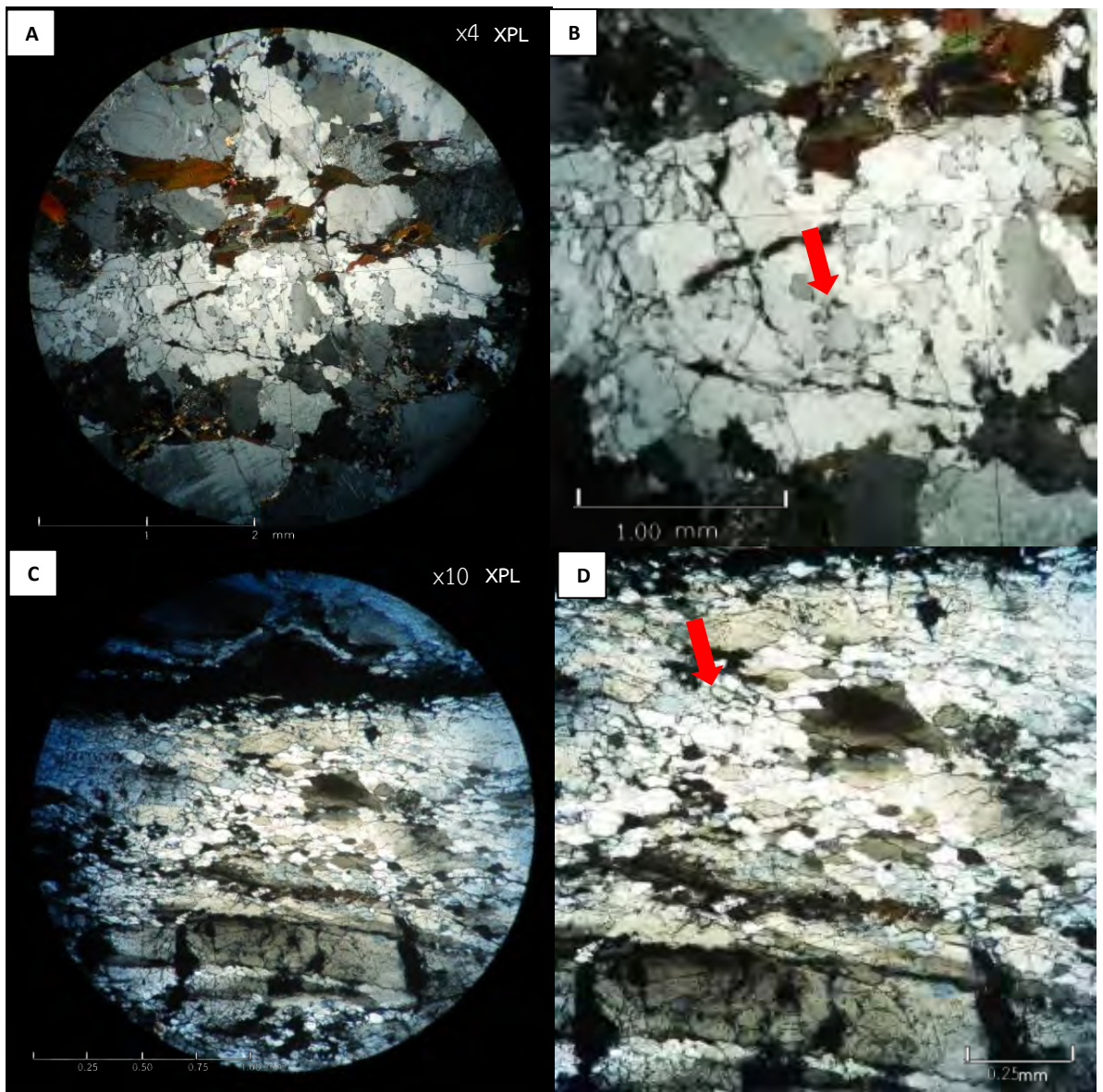
เป็นลักษณะของผลึกที่มีการเอียงเนื่องจากมีแรงเข้ามากระทำ โดยมักจะเกิดกับแร่จำพวกไมก้า เนื่องจากเป็นแร่แผ่นทำให้แสดงลักษณะการยึดของแร่ได้ชัดเจนกว่าแร่อื่นๆ จึงสามารถบอกทิศทางการเอียงได้ ซึ่งพบลักษณะนี้ในจุดศึกษาที่ 3 (รูปที่ 3.9)

Strain shadow

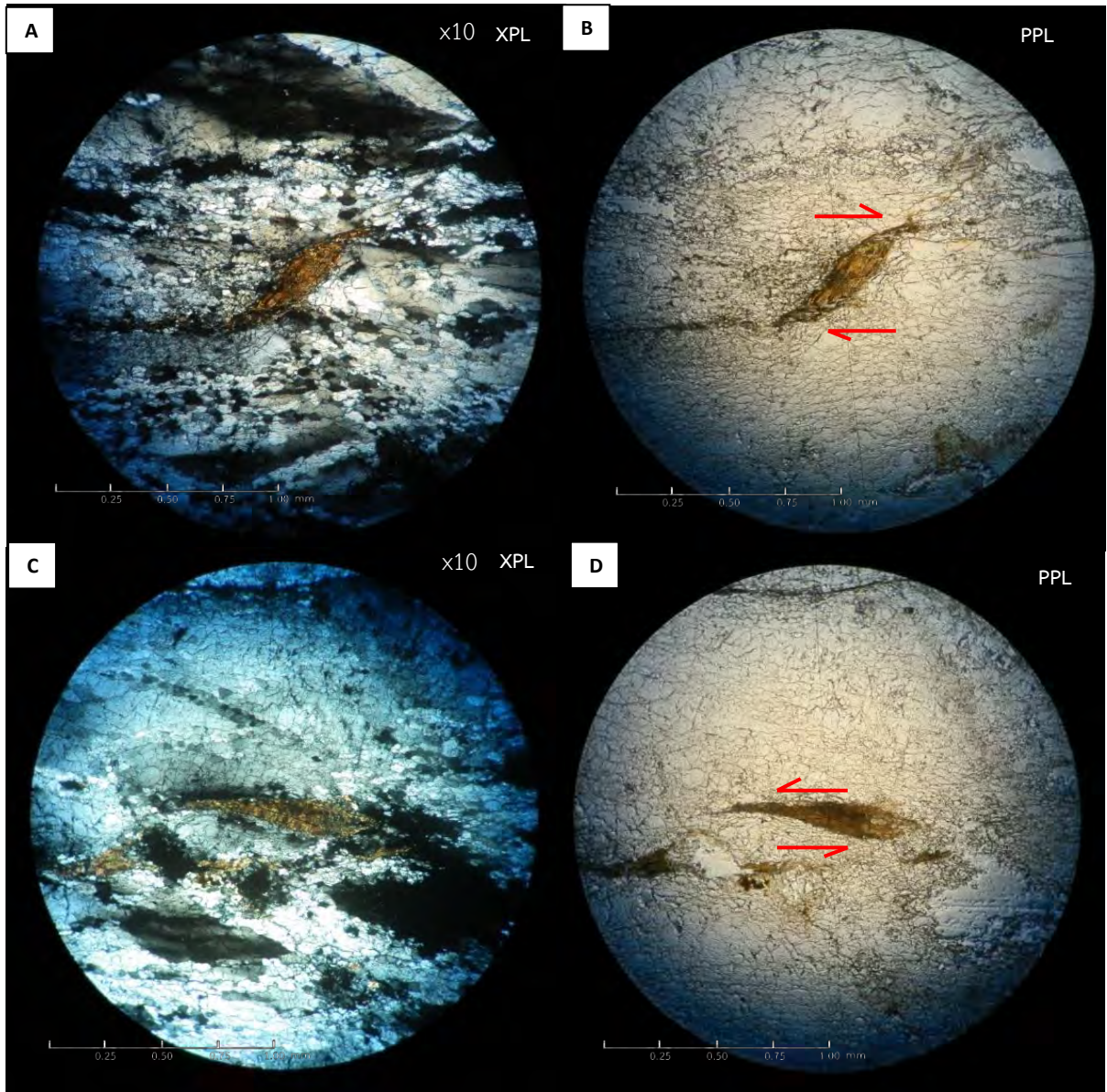
เป็นลักษณะของการยึดของแร่เนื่องจากมีแรงเข้ามากระทำหรือมีการเอียงเกิดขึ้น โดยมักจะประกอบไปด้วย 2 แร่ คือแร่ที่อยู่ตรงกลางซึ่งไม่ถูกยึด เรียกว่า พอร์ไฟโลคลาสต์ (porphyroclast) ส่วนใหญ่มักจะเป็นแร่เฟลด์สปาร์ และแร่ที่ถูกยึดเป็นเส้นซึ่งจะแสดงเป็นเงา (shadow) อยู่รอบๆพอร์ไฟโลคลาสต์ ส่วนใหญ่มักเป็นแร่ไมก้า โดยลักษณะของ strain shadow นั้นมีทั้งชนิดที่บอกทิศทางการเอียงได้ และชนิดที่บอกไม่ได้ ซึ่งพบในจุดศึกษาที่ 3 (รูปที่ 3.10)



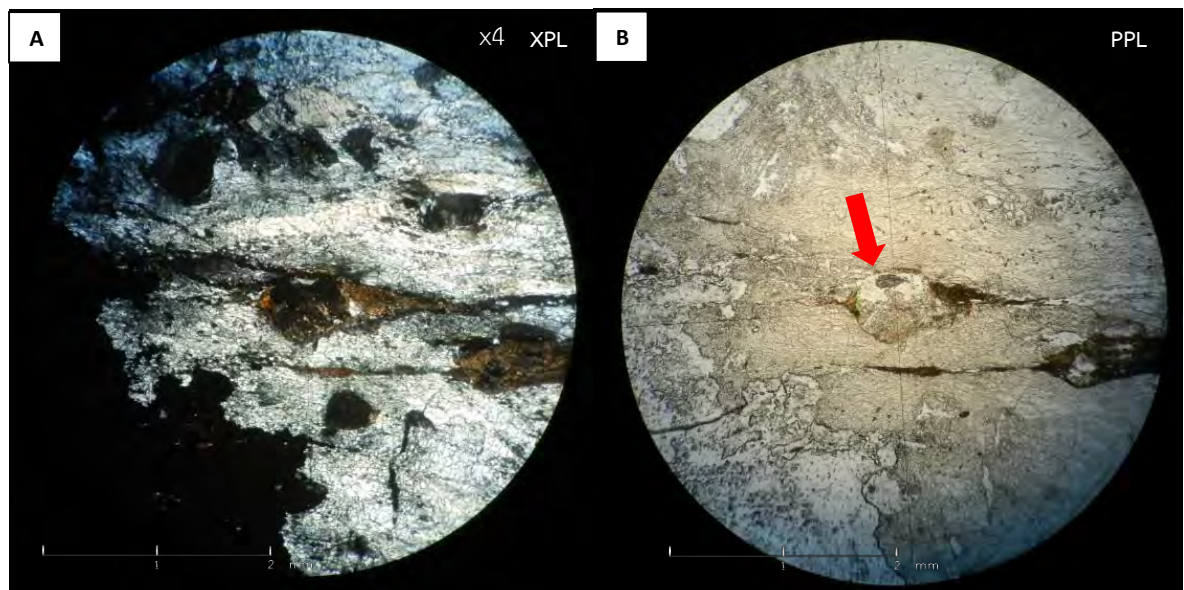
รูปที่ 3.7 (A,B) Taper twin หรือผลึกแฝดที่แถบมืดสว่างมีการตีบลง ในแร่แพลสจิโอเครส ที่พบในจุดศึกษาที่ 1 และ (C,D) Undulose extinction ในแร่ควอตซ์ ที่พบในจุดศึกษาที่ 5



รูปที่ 3.8 (A,B) Subgrain Rotation (SGR) ในแร่ควอตซ์ที่พบในจุดศึกษาที่ 1 และ (C,D) พบในจุดศึกษาที่ 3 ลูกศรสีแดงชี้ผลึกที่มีการหมุน เกิดเป็นขอบสีดำ

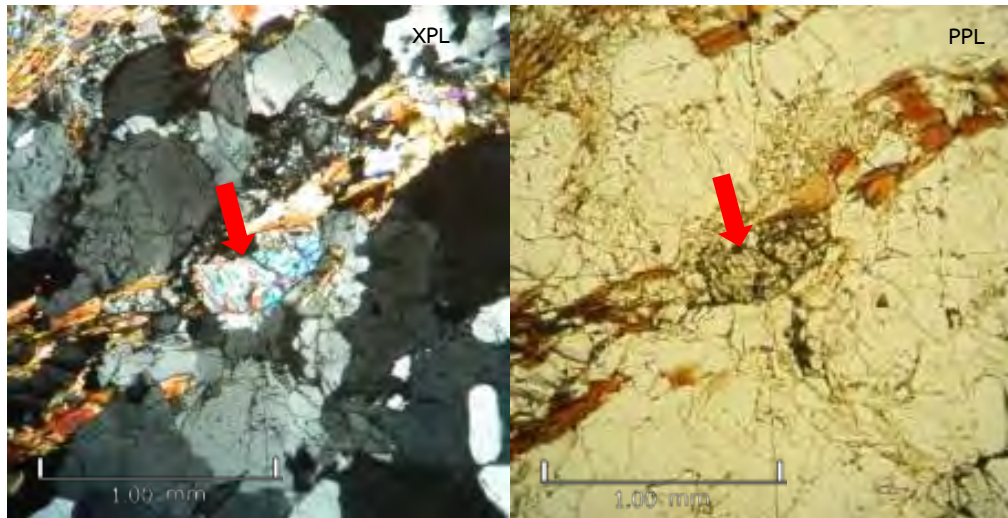


รูปที่ 3.9 ลักษณะ mineral fish/ mica fish ของแร่ไบโอไทต์ ที่พบในจุดศึกษาที่ 3 (A,B) บอทิศทางการเฉือนแบบขวาเข้า (dextral shear sense) และ (C,D) บอทิศทางการเฉือนแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense)

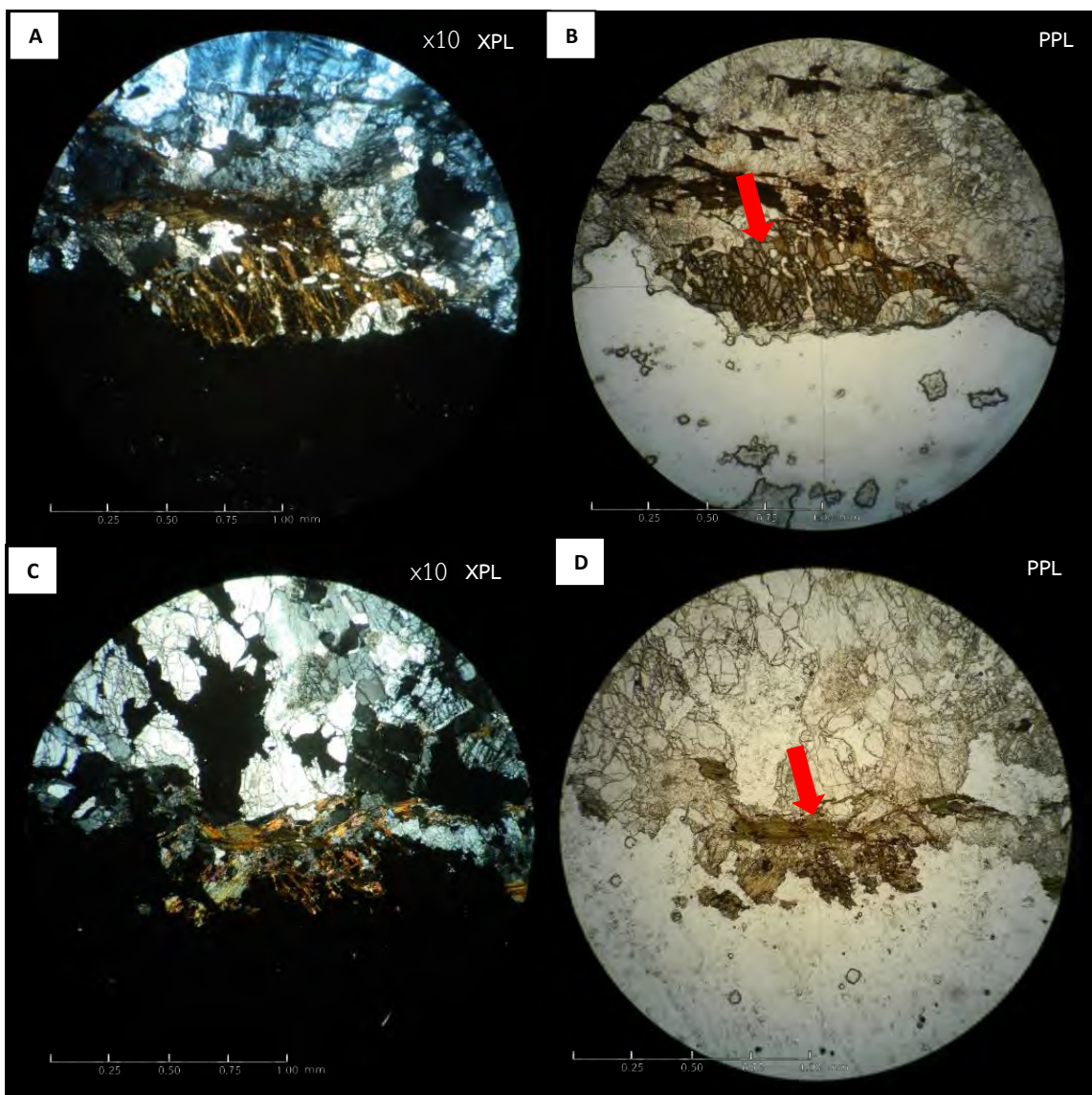


รูปที่ 3.10 ลักษณะ strain shadow ชนิดที่บอทิศการเฉือนไม่ได้ ที่พบในจุดศึกษาที่ 3 โดยมีแร่โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ เป็นแร่กลมที่ไม่ถูกยึดอยู่ตรงกลางซึ่งล้อมรอบด้วยแร่ไบโอไทต์ที่ถูกยึดเป็นเส้น แสดงลักษณะเป็นเงา (shadow)

นอกจากลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่พบในแผ่นหินบางของแต่ละจุดศึกษาแล้ว ยังพบแร่ที่นอกเหนือจากแร่องค์ประกอบหลักที่เป็นแร่โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ แร่แพลสจีโอเครส แร่ควอตซ์ และแร่ไบโอไทต์แล้ว แร่การ์เนต แร่ฮอร์นเบลนด์ และแร่คลอไรต์ยังถูกพบในบางจุดศึกษาอีกด้วย (รูปที่ 3.11 และ 3.12)



รูปที่ 3.11 ภาพ XPL และ PPL ของแร่ฮอร์นเบลนด์ (ลูกศรีสีแดง) ที่พบในบางจุดศึกษา



รูปที่ 3.12 (A,B) ภาพ XPL และ PPL ของแร่การ์เนต (ลูกศรีสีแดง) และ (C,D) ภาพ XPL และ PPL ของแร่คลอไรต์ (ลูกศรีแดง) ที่พบในบางจุดศึกษา

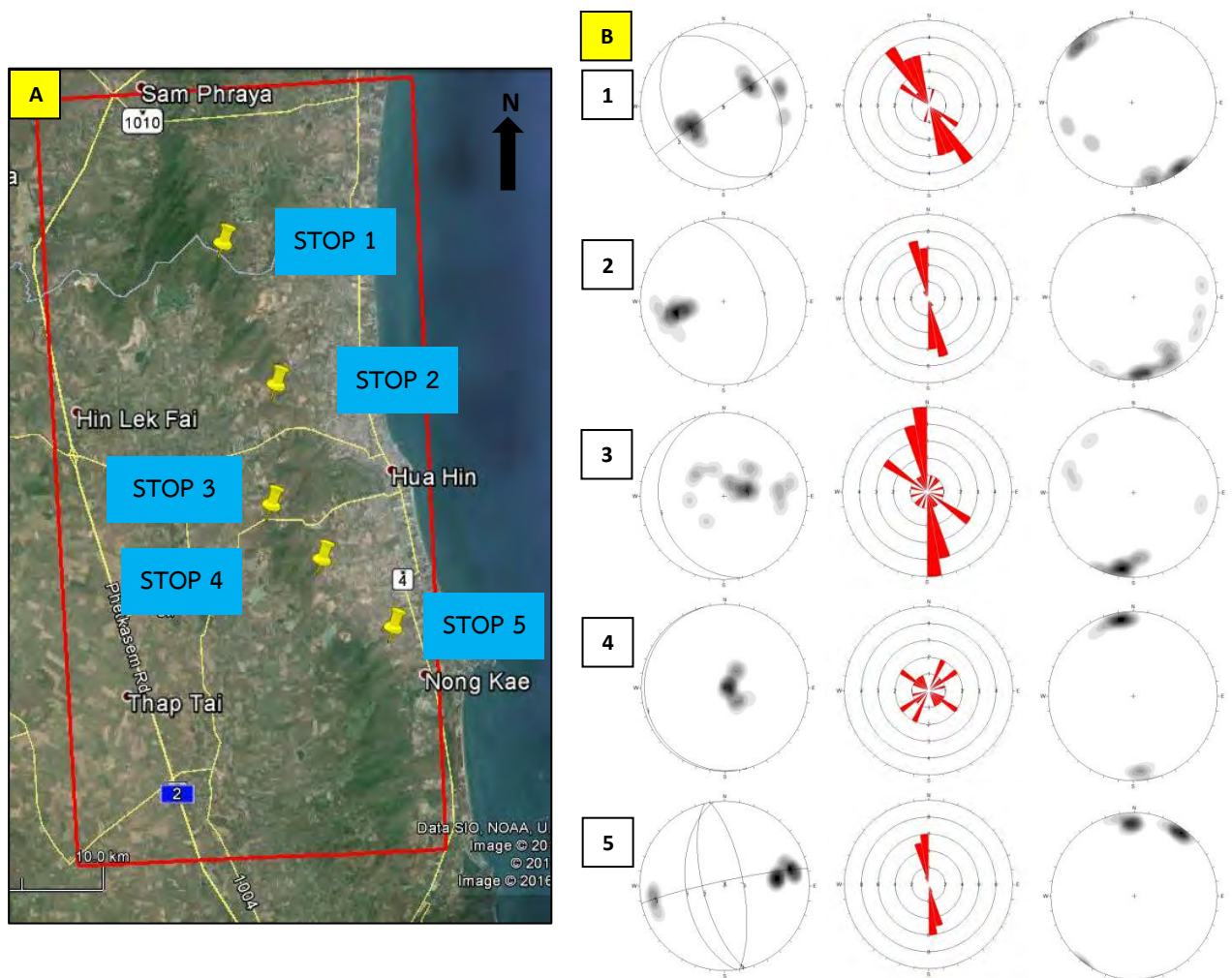
บทที่ 4

อภิปรายผลการศึกษา (Discussion)

จากการศึกษาใน 2 ระดับได้แก่ ระดับภูมิภาคและระดับจุลภาค ได้ผลการศึกษาจากภาคสนามและแผนที่ทาง และนำมารวบรวมและอภิปรายผลการศึกษาได้เป็น ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural style) และวิวัฒนาการของลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural evolution) ของหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ รวมถึงลักษณะธรณีแปรสัณฐาน (Tectonic setting) ที่อาจจะเกี่ยวข้องหรือสัมพันธ์กับพื้นที่ศึกษา

4.1 ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural style)

จากหลักฐานที่พบจากการสำรวจภาคสนามในพื้นที่ศึกษา ที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนุ่ม เกิดเป็นแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นนั้นมีแนวการวางตัวส่วนใหญ่อยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ – ตะวันออกเฉียงใต้ และแนวเหนือ – ใต้ โดยมีลักษณะของมุมเอียงของแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ (รูปที่ 4.1) มีรายละเอียดดังนี้

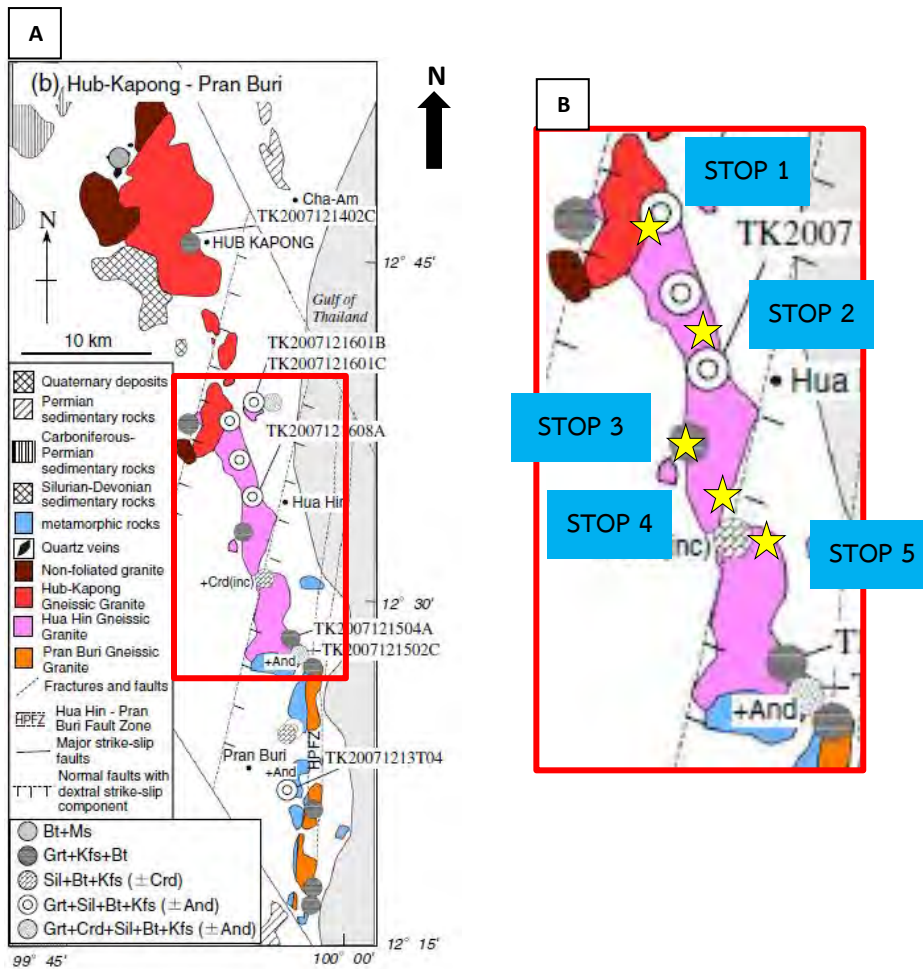


รูปที่ 4.1 (A) ภาพถ่ายดาวเทียม แสดงพื้นที่ศึกษา (กรอบสีแดง) และจุดศึกษาทั้ง 5 จุดศึกษา (หมุดสีเหลือง) (Google Earth, 2016) (B) ตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบของแนวร้าวขนาน และตาข่ายมิติสเตอร์โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น ตามลำดับจากซ้ายไปขวา ของทั้ง 5 จุดศึกษา

รูปที่ 4.1 B แสดงการวางตัวของแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น จะเห็นว่าในแต่ละจุดศึกษานั้นมีการวางตัวที่ต่างกัน โดยแนวส่วนใหญ่จะวางตัวในทิศเหนือ - ใต้ และบางส่วนวางตัวในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ ในขณะที่มีส่วนน้อยที่วางตัวในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งพบในจุดศึกษาที่ 3 และ 4 นอกจากนั้นบางจุดศึกษายังพบแนวร้าวขนานที่มีการเอียงเทค่อนข้างชันและเอียงเทไปสองทิศทาง ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างชั้นหินคดโค้ง คือจุดศึกษาที่ 1 และ 5 ในขณะที่บางจุดศึกษามีมุมเอียงเทที่ค่อนข้างจะอยู่ในแนวระดับ คือจุดศึกษาที่ 3 และ 4 และเมื่อพิจารณาการวางตัวของโครงสร้างย่อยชนิดเส้น ส่วนใหญ่นั้นมีการวางตัวอยู่ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ และทิศเหนือ - ใต้ แต่มีเพียงจุดศึกษาที่ 5 ที่มีการวางตัวในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้ เมื่อนำมาวิเคราะห์แล้วจะพบว่า แนวการวางตัวของโครงสร้างที่พบในแต่ละจุดศึกษานั้นค่อนข้างจะสัมพันธ์กับแนวเขาของบริเวณนั้น และสำหรับแนวการวางตัวที่พบกระจายตัวเป็นส่วนน้อยในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้ อาจสามารถสรุปได้ 2 กรณี คือ บริเวณที่พบดังกล่าวเป็นบริเวณที่หินผุ จึงทำให้ค่าการวางตัวของโครงสร้างมีความคลาดเคลื่อนไป และในอีกกรณีหนึ่งคือ บริเวณดังกล่าวอาจได้รับแรงเข้ามากระทำอีกครั้ง จึงทำให้พบแนวการวางตัวใหม่ที่แตกต่างจากแนวเดิม โดยที่แรงที่เข้ามากระทำนั้นอาจจะกระทำในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน จึงทำให้ไม่พบในจุดศึกษาอื่น โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.2 ของ Kawakami และคณะในปี 2014 จะเห็นว่าที่บริเวณจุดศึกษาที่ 3 4 และ 5 เกิดรอยเลื่อนปกติที่เกิดร่วมกับรอยเลื่อนแนวระดับแบบขวาเข้าตัดผ่านในบริเวณนี้ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้ (เส้นประที่ตัดผ่านระหว่างจุดศึกษาที่ 4 และ 5 ในรูปที่ 4.2 B) ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้พบแนวการวางตัวของแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้

เมื่อพิจารณาจากตัวอย่างหินระบุตำแหน่งที่เก็บมาจากภาคสนาม (ในบทที่ 3) จะพบว่าในจุดศึกษาที่ 4 และ 5 มีเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ที่บอกการเฉือนทั้งแบบซ้ายเข้าและขวาเข้า (รูปที่ 3.5 B และ 3.6 B) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการที่ได้รับแรงเข้ามากระทำในสองทิศทาง นอกจากนั้นบริเวณจุดศึกษาที่ 4 และ 5 ยังอยู่ใกล้กับบริเวณที่เรียกว่า เขตรอยเลื่อนหัวหิน - ปราณบุรี หรือ Hua Hin - Pran Buri Fault Zone (HPFZ) ที่ถูกสันนิษฐานว่าเป็นรอยต่อมาจากรอยเลื่อนระนองซึ่งวางตัวอยู่ทางทิศใต้ของพื้นที่ศึกษา (Kawakami et al., 2014) โดยรอยเลื่อนระนองนี้มีการเคลื่อนที่แบบขวาเข้า ก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นซ้ายเข้าในช่วงโอลิโกซีน (Watkinson et al., 2008) ซึ่งจะเห็นว่าการเฉือนแบบขวาเข้าที่พบในจุดศึกษาที่ 4 และ 5 นั้น อาจจะสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของรอยเลื่อนระนองนี้ที่เกิดขึ้นก่อนช่วงโอลิโกซีน แต่กระนั้นเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ส่วนใหญ่ที่พบในหินมีการเฉือนแบบซ้ายเข้ามากกว่า ข้อสันนิษฐานนี้จึงมีความเป็นไปได้บ้างน้อยลง และการเฉือนแบบขวาเข้าของเม็ดแร่ที่พบเพียงเล็กน้อยนั้น อาจเป็นเพียงการที่เม็ดแร่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันและทำให้เกิดเป็นลักษณะการเฉือนในทิศทางตรงข้ามกันได้

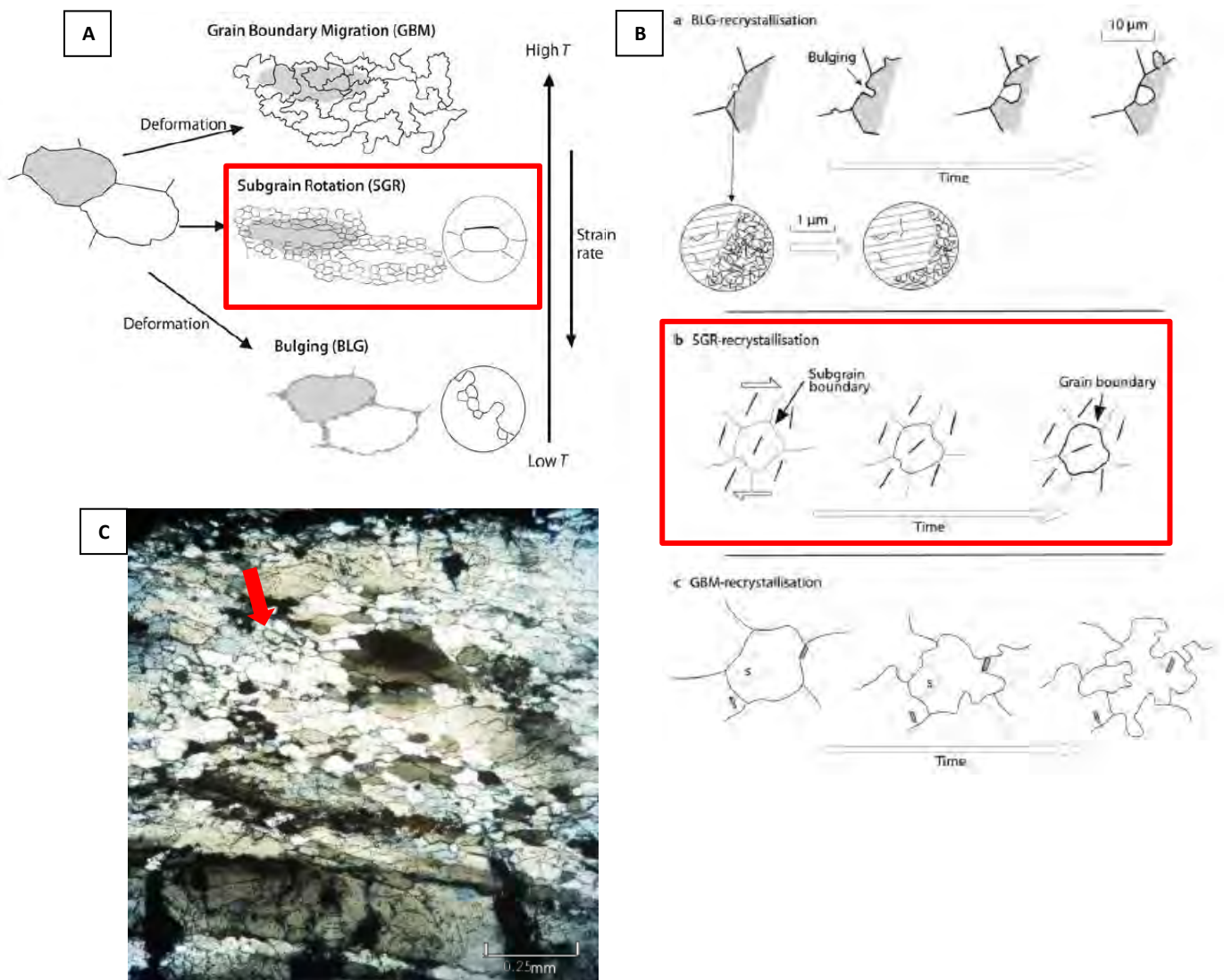
สรุปได้ว่า จากการพบแนวการวางตัวของโครงสร้างที่ไม่เหมือนกันในแต่ละจุดศึกษานั้น อาจเกิดจากแรงที่เข้ามากระทำในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน และการพบแนวการวางตัวของร้าวขนานที่มีสองทิศทางที่ตรงข้ามกันนั้นอาจมีสาเหตุมาจากการได้รับแรงจากสองทิศทาง ซึ่งสามารถตีความได้ว่าบริเวณพื้นที่ศึกษาอาจได้รับแรงที่เข้ามากระทำมากกว่าหนึ่งแรง โดยในครั้งแรกอาจเป็นแรงที่ทำให้เกิดแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น และหลังจากนั้นมีแรงเข้ามากระทำอีกครั้งซึ่งในแต่ละบริเวณได้รับแรงที่ไม่เท่ากัน ทำให้การวางตัวของโครงสร้างมีการบิดเบี้ยวไปจากเดิม และอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ลักษณะของเขามีการบิดเบี้ยวเช่นกัน



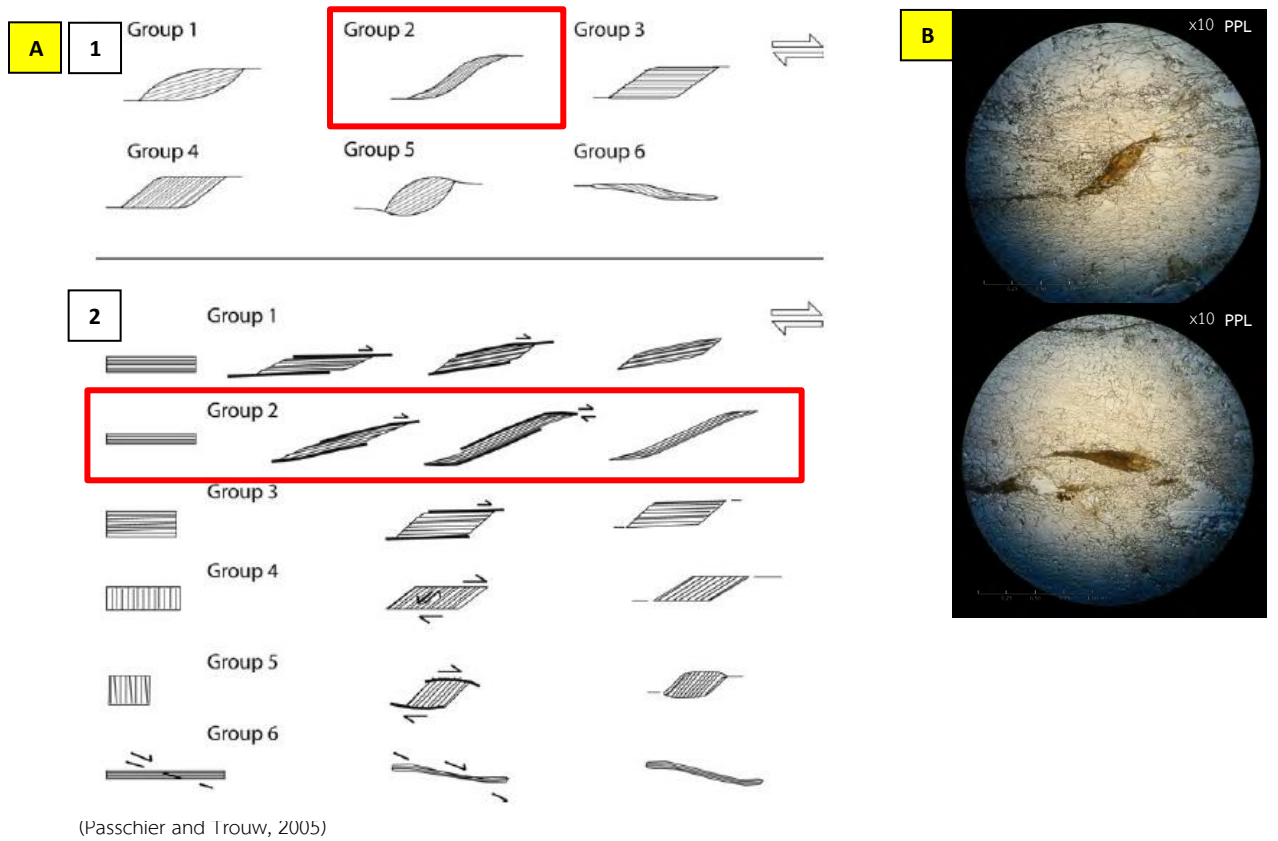
รูปที่ 4.2 (A) พื้นที่ศึกษาที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kawakami และคณะ ในปี 2014 โดยในทางทิศใต้ของพื้นที่ศึกษาอยู่ใกล้กับ Hua Hin – Pran Buri Fault zone (HPFZ) (B) พื้นที่ศึกษา และดาวสีเหลืองแทนจุดศึกษา

นอกจากลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างที่พบในหินโพล์และตัวอย่างหินซึ่งสามารถนำมาพิจารณาถึงแรงที่เข้ามากระทำในพื้นที่ได้แล้วนั้น หลักฐานที่พบในแผ่นหินบางที่บอกถึงโครงสร้างจุลภาคและร่องรอยประกอบของหิน ก็สามารถนำมาวิเคราะห์ถึงลักษณะของแรงที่เข้ามากระทำ และยังสามารถนำไปเป็นหลักฐานในการตีความวิวัฒนาการของธรณีวิทยาโครงสร้างที่เกิดในพื้นที่ศึกษาได้อีกด้วย ซึ่งลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่พบ เช่น taper twin และ undulose extinction ที่พบเป็นส่วนใหญ่ของแร่พลสจีโอเครสและแร่ควอตซ์ตามลำดับ ในทุกจุดศึกษา และ subgrain rotation (รูปที่ 4.3 C) ที่พบในจุดศึกษาที่ 1 และ 3 โดยการเกิดลักษณะเหล่านี้สามารถบ่งบอกถึงอุณหภูมิในการเปลี่ยนลักษณะได้ Passchier และ Trouw ในปี 2005 ได้กล่าวไว้ว่า taper twin และ undulose extinction มักจะเกิดในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 400°C ในขณะที่ subgrain rotation คือลักษณะหนึ่งของการเกิดผลึกใหม่พลวัต ที่มีทั้งอุณหภูมิ แรง และความเครียดเข้ามาเกี่ยวข้อง ในการเกิดผลึกใหม่พลวัตนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ (รูปที่ 4.3) ซึ่งแบ่งตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และอัตราความเครียด (strain rate) ที่ลดลง คือ Grain Boundary Migration (GBM) Subgrain Rotation (SGR) และ Bulging (BLG) ตามลำดับ โดยอุณหภูมิในการเกิดนั้น BLG มักจะเกิดในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 300°C ในขณะที่ SGR จะเกิดในอุณหภูมิระหว่าง 300°C ถึง 500°C และ GBM จะเกิดในอุณหภูมิที่มากกว่า 500°C

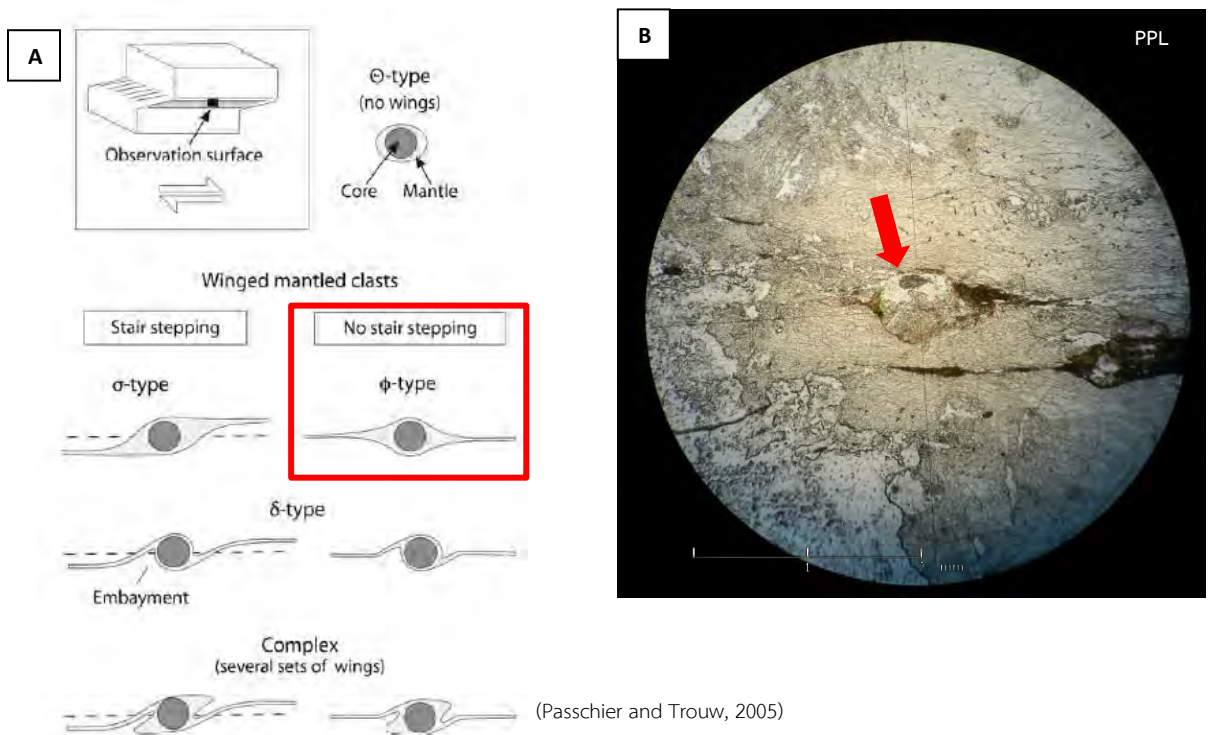
นอกจากกลไกการเปลี่ยนลักษณะแล้ว โครงสร้างจุลภาคยังสามารถบ่งบอกถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของหินได้ เช่น mica fish และ strain shadow ที่พบในพื้นที่ศึกษา โดย mineral fish หรือ mica fish นั้นมักจะเกิดในแร่ไมก้าจำพวกแร่ไบโอไทต์ ซึ่งสามารถบอกทิศทางการเฉือนได้ โดยสามารถจำแนกได้เป็นหลายกลุ่มตามลักษณะของแรงที่เข้ามากระทำและตามรูปร่างของแร่ที่เปลี่ยนไป (รูปที่ 4.4) โดย mica fish ที่พบในพื้นที่ศึกษาซึ่งพบในจุดศึกษาที่ 3 นั้นเป็นแบบกลุ่มที่ 2 (Group 2) (รูปที่ 4.4 A1) ที่แสดงลักษณะของแรงที่เข้ามากระทำตามรูปที่ 4.4 A2 และบอกทิศทางการเฉือนทั้งแบบซ้ายเข้าและขวาเข้า (รูปที่ 4.4 B) บ่งบอกถึงการได้รับแรงที่เข้ามากระทำในสองทิศทาง และนอกจาก mica fish แล้วยังพบลักษณะของ strain shadow (รูปที่ 4.5) ที่มีแร่โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์เป็นพอร์ไฟโลคลาสท์ และมีแร่ไบโอไทต์เกิดเป็นเงารอบๆ โดยลักษณะนี้สามารถบอกทิศทางการเฉือนได้เช่นกันหากลักษณะของแร่ไบโอไทต์เกิดเป็นลักษณะคล้ายขั้นบันได (step) แต่เนื่องจาก strain shadow ที่พบในพื้นที่ศึกษาซึ่งพบในจุดศึกษาที่ 3 นั้น เป็นชนิดที่ไม่มีขั้นบันได หรือเป็น \emptyset -type (รูปที่ 4.5A) จึงไม่สามารถบอกทิศทางการเฉือนได้



รูปที่ 4.3 (A) การจำแนกลักษณะการเกิดผลึกใหม่พลวัตตามอุณหภูมิและอัตราความเครียดออกเป็น 3 แบบ (B) แสดงวิวัฒนาการการเกิดผลึกใหม่พลวัตทั้ง 3 แบบ โดยในพื้นที่ศึกษาพบเป็นแบบ SGR (กรอบสีแดงทั้งในรูป A และ B) ซึ่งแสดงลักษณะที่มีการหมุนของแกนผลึกทำให้เกิดเป็นขอบสีดำ (Passchier and Trouw, 2005) (C) ลักษณะ Subgrain Rotation (SGR) ที่พบในจุดศึกษาที่ 3 โดยลูกศรสีแดงชี้ผลึกที่มีการหมุนและเกิดขอบสีดำ



รูปที่ 4.4 (A1) แสดงการจำแนกลักษณะของ mica fish ซึ่งจำแนกออกเป็น 6 กลุ่ม (A2) แสดงวิวัฒนาการของการเกิด mica fish ทั้ง 6 กลุ่ม (B) ลักษณะ mica fish ที่พบในจุดศึกษาที่ 3 เป็นแบบกลุ่ม 2 (กรอบสีแดงในรูป A1 และ A2) บอกทิศทางการเฉือนทั้งแบบซ้ายเข้าและขวาเข้า



รูปที่ 4.5 (A) แสดงการจำแนกลักษณะของ strain shadow (B) ลักษณะ strain shadow ที่พบในจุดศึกษาที่ 3 เป็นแบบ ϕ -type

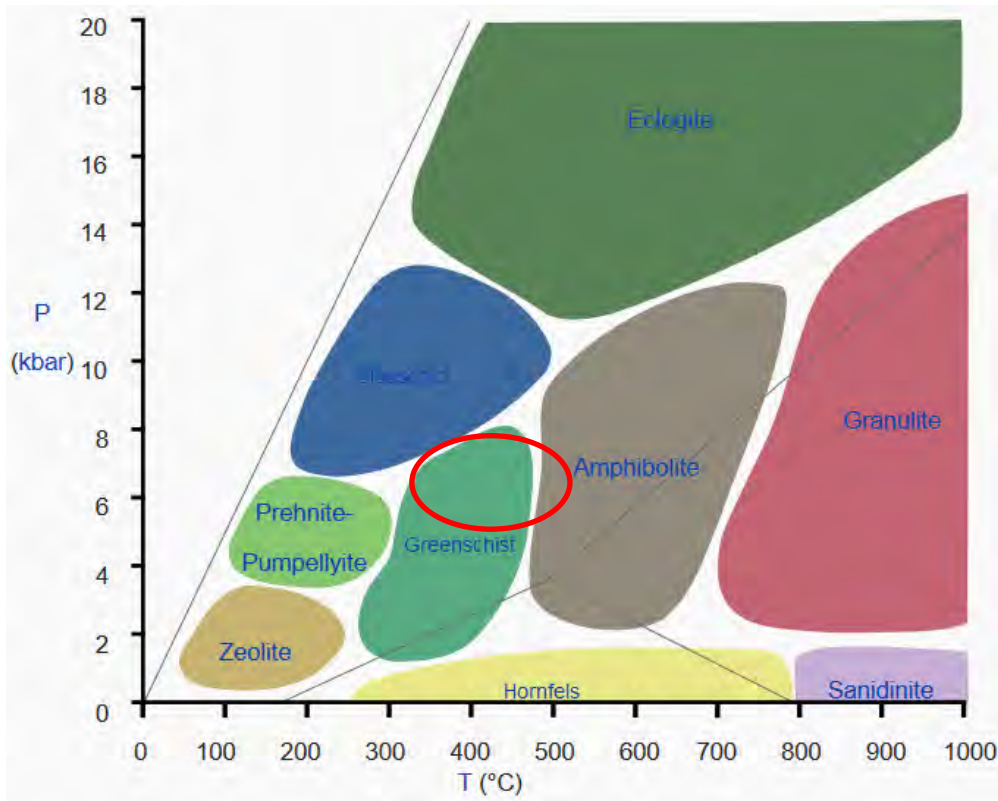
จะสังเกตเห็นว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่พบส่วนใหญ่ นั้นมักจะพบในจุดศึกษาที่ 3 ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวอย่างหินของจุดศึกษาที่ 3 (รูปที่ 4.6) จะพบว่าลักษณะเม็ดแร่เฟลด์สปาร์มีขนาดเล็ก และเนื้อหินส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยแร่ควอตซ์ ซึ่งลักษณะหินนี้แตกต่างจากจุดศึกษาอื่นที่พบเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ขนาดใหญ่ และสัดส่วนของแร่เฟลด์สปาร์และแร่ควอตซ์มีสัดส่วนที่เท่าๆกัน จากลักษณะเม็ดแร่ที่มีขนาดเล็กในจุดศึกษาที่ 3 นั้นอาจเป็นสาเหตุที่เราพบโครงสร้างจุลภาคในแผ่นหินบางได้ชัดเจนมากกว่าจุดศึกษาอื่นที่มีเม็ดแร่ที่ใหญ่ ซึ่งเมื่อนำมาตัดทำเป็นแผ่นหินบางจะทำให้ไม่สามารถมองเห็นภาพรวมได้ชัดเจน จึงยากที่จะตีความถึงลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างในระดับจุลภาคได้ โดยลักษณะของหินจากจุดศึกษาที่ 3 ที่แตกต่างจากจุดศึกษาอื่นนี้ อาจมีสาเหตุมาจาก 2 กรณีคือ หินต้นกำเนิด (protolith) ของบริเวณนี้อาจเป็นแกรนิตที่มีขนาดเม็ดแร่เล็ก หรือ fine – grained granite ในขณะที่บริเวณอื่นเป็นแกรนิตที่มีขนาดเม็ดแร่ใหญ่ หรือ coarse – grained granite หรืออีกกรณีคือบริเวณจุดศึกษาที่ 3 นี้ อาจได้รับแรงที่เข้ามากระทำหรือเกิดการแปรรุนแรงกว่าบริเวณอื่น จากลักษณะ subgrain rotation ที่พบซึ่งบ่งบอกว่าเกิดในอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 300°C ถึง 500°C แต่เนื่องจากจุดศึกษาที่ 1 ที่มีเม็ดแร่ขนาดใหญ่ก็พบลักษณะ subgrain rotation เช่นกัน ทำให้ข้อสันนิษฐานนี้มีความเป็นไปได้น้อยกว่ากรณีแรก จึงสามารถสรุปได้ว่าหินแกรนิตที่เป็นหินต้นกำเนิดนี้อาจมีเนื้อหินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด ทำให้หินในสไลกแกรนิตที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป



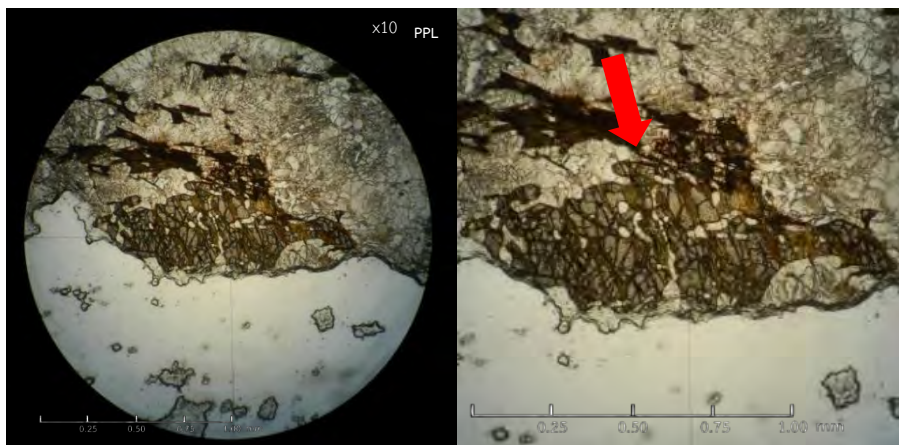
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างหินในสไลกแกรนิตที่พบในจุดศึกษาที่ 3 ซึ่งแสดงลักษณะเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ขนาดเล็ก และมีสัดส่วนแร่ควอตซ์ที่มากกว่าจุดศึกษาอื่น

แร่องค์ประกอบที่พบ นอกจากจะมีแร่เฟลด์สปาร์ แร่ควอตซ์ และแร่ไบโอไทต์ ที่พบเป็นส่วนใหญ่แล้ว ยังพบแร่ฮอร์นเบลนด์ แร่การ์เนต และแร่คลอไรต์อีกด้วย แร่เหล่านี้ถึงแม้จะพบเป็นส่วนน้อยแต่พบว่าเป็นหนึ่งในกลุ่มแร่ (mineral assemblages) (รูปที่ 4.9) ที่บ่งชี้ลักษณะและอุณหภูมิการแปรสภาพได้ แต่ทั้งนี้เนื่องจากในหลายๆกลุ่มแร่นั้นประกอบไปด้วยแร่ที่คล้ายคลึงกัน ทำให้สามารถตีความลักษณะการแปรสภาพไปได้หลายทิศทาง โดยแร่ฮอร์นเบลนด์และแร่การ์เนตที่พบนั้นเป็นแร่ในกลุ่มแร่ที่แสดงชุดลักษณะการแปรสภาพทั้งแบบแอมฟิโบลิต (amphibolite facies) และแบบแกรนูไลต์ (granulite facies) ซึ่งเกิดในอุณหภูมิที่สูง ในขณะที่แร่คลอไรต์ที่พบเป็นแร่ในกลุ่มแร่การแปรสภาพแบบกรีนชิสต์ (greenschist facies) ที่เกิดในอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ (รูปที่ 4.7) จากการวิเคราะห์สามารถตีความและแบ่งข้อสันนิษฐานของการเกิดออกได้เป็น 2 กรณี คือกรณีที่หนึ่ง แร่ฮอร์นเบลนด์และแร่การ์เนตที่พบเกิดจากการแปรสภาพแบบแอมฟิโบลิต จากนั้นมีการแปรสภาพแบบย้อนกลับ กลายเป็นการแปรสภาพแบบกรีนชิสต์จากการพบแร่คลอไรต์ และกรณีที่สองคือ แร่การ์เนตที่พบนั้นเป็นแร่ที่เกิดในหินต้น

กำเนิด จากนั้นโดนแปรสภาพแบบกรีนชีตถึงแอมฟิโบลิต์ ซึ่งจะพบทั้งแร่ฮอร์นเบลนด์และแร่คลอไรต์ เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้พบว่ากรณีที่สองมีความเป็นไปได้มากกว่า เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากหินต้นกำเนิดจากตารางในรูปที่ 4.9 ซึ่งพื้นที่ศึกษานั้นมีหินต้นกำเนิดเป็นหินแกรนิตซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มหินต้นกำเนิดแบบควอตซ์ – เฟลด์สปาร์ หรือ quartzo – feldspathic rocks ทำให้ความเป็นไปได้ในการเจอแร่การ์เนิตจากการแปรสภาพนั้นมีค่าน้อย จึงพิจารณาว่าแร่การ์เนิตที่พบเกิดในหินต้นกำเนิดตั้งแต่แรก และลักษณะการ์เนิตที่พบ (รูปที่ 4.8) มีขอบแร่ที่ค่อนข้างหยาบและคดโค้ง ซึ่งอาจเป็นลักษณะที่โดนแปรสภาพหลังจากที่เกิดในหินต้นกำเนิด และนอกจากนั้นจากโครงสร้างจุลภาคที่พบ ซึ่งบ่งบอกถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงลักษณะที่อาจจะสัมพันธ์กับการแปรสภาพ โดยมีอุณหภูมิประมาณ 300°C ถึง 500°C จากรูป 4.7 จะเห็นว่าอยู่ในช่วงการแปรสภาพแบบกรีนชีตถึงแอมฟิโบลิต์



รูปที่ 4.7 แผนภาพจำแนกชุดลักษณะการแปรสภาพตามความดันและอุณหภูมิการเกิด โดยกรอบสีแดงแสดงบริเวณชุดลักษณะการแปรสภาพแบบกรีนชีตถึงแอมฟิโบลิต์ มีอุณหภูมิการแปรสภาพประมาณ 300°C ถึง 500°C ซึ่งคาดว่าเกิดในพื้นที่ศึกษา โดยจากหลักฐานของแร่องค์ประกอบที่พบ (www.wikipedia.org)



รูปที่ 4.8 แร่การ์เนิตที่พบในพื้นที่ศึกษา แสดงขอบผลึกที่มีลักษณะหยาบและคดโค้ง ซึ่งอาจเป็นลักษณะที่เกิดจากการถูกแปรสภาพ

Table 14.2. Mineral assemblages in the conventionally recognized metamorphic facies listed according to major chemical groups of metamorphic rocks

FACIES	MAFIC ROCKS (ALL ASSEMBLAGES ± Fe–Ti OXIDES)	PELLITIC ROCKS (ALL ASSEMBLAGES ± QUARTZ ± Fe–Ti OXIDES)	QUARTZO-FELDSPATHIC ROCKS (ALL ASSEMBLAGES ± QUARTZ ± Fe–Ti OXIDES)	CALCAREOUS AND CALC–SILICATE ROCKS
Zoolite	Laumontite; heulandite	Mixed-layer clays	Heulandite + analcite and laumontite + albite (wairakite may occur in lieu of heulandite; some rocks contain chlorite)	Calcite, dolomite, quartz, talc, clays
Prehnite–pumpellyite	Prehnite + pumpellyite ± chlorite ± albite ± epidote; actinolite takes place of prehnite at higher <i>T</i> ; lawsonite + albite + chlorite occurs at higher <i>P</i>	White mica/illite + chlorite + albite ± stilpnomelane	Albite + chlorite ± pumpellyite ± prehnite ± stilpnomelane ± white mica ± titanite ± epidote ± carbonate; actinolite takes place of prehnite at higher <i>T</i> ; lawsonite is stable at higher <i>P</i>	Calcite, prehnite, albite, quartz, chlorite
Greenschist	Albite + chlorite + actinolite + epidote ± titanite ± quartz ± white mica ± calcite; stilpnomelane is widespread at lower <i>T</i> and biotite at higher <i>T</i> where hornblende also occurs	Muscovite + chlorite ± albite ± paragonite ± graphite ± rutile ± magnetite ± hematite ± carbonate ± epidote ± K-feldspar ± Fe–Ti oxides ± stilpnomelane (low Al) ± pyrophyllite ± chloritoid (the latter two in high-Al rocks); + biotite in the biotite zone; + almandine-rich garnet in the garnet zone	Albite + epidote + muscovite ± chlorite ± titanite ± stilpnomelane ± actinolite; biotite is stable at higher <i>T</i>	Calcite, dolomite, quartz, muscovite, albite, K-feldspar, chlorite, zoisite
Amphibolite	Hornblende + oligoclase ± epidote ± almandine-rich garnet ± titanite ± biotite ± chlorite ± quartz	Biotite ± muscovite ± plagioclase ± almandine-rich garnet ± cordierite ± aluminosilicate ± chlorite ± alkali feldspar ± magnetite ± graphite; + staurolite in the staurolite zone; + kyanite in the kyanite zone; + sillimanite in the sillimanite zone	Plagioclase + alkali feldspar + biotite ± muscovite ± hornblende	Calcite, dolomite, quartz, diopside, tremolite, forsterite, grossular, anorthite, hornblende, clinzoisite
Granulite	Plagioclase + clinopyroxene + orthopyroxene ± hornblende ± olivine (low <i>P</i>); Plagioclase + clinopyroxene + orthopyroxene + garnet ± hornblende (medium <i>P</i>); Plagioclase + clinopyroxene + garnet + quartz ± hornblende (high <i>P</i>)	Alkali feldspar ± plagioclase ± scapolite ± cordierite ± garnet ± rutile ± ilmenite ± magnetite ± graphite ± olivine ± corundum ± spinel ± kyanite (high <i>P</i>) ± sillimanite (moderate <i>P</i>); Orthopyroxene + sapphirine (high <i>T</i>)	Alkali feldspar + plagioclase + garnet ± kyanite ± orthopyroxene ± clinopyroxene ± hornblende ± magnetite ± ilmenite	Calcite, dolomite, quartz, diopside, scapolite, anorthite, forsterite, wollastonite, graphite
Blueschist	Glaucofane + lawsonite ± aragonite ± jadeitic clinopyroxene ± chlorite ± albite ± titanite ± pumpellyite ± actinolite or hornblende ± stilpnomelane ± epidote ± garnet	Glaucofane + lawsonite ± albite ± phengite ± paragonite ± garnet ± chlorite ± epidote ± kyanite ± chloritoid ± titanite	Jadeitic clinopyroxene + lawsonite + muscovite + chlorite + titanite ± glaucophane	Aragonite, calcite
Eclogite	Omphacite + pyrope-rich garnet ± kyanite ± rutile ± quartz or coesite	Pyrope-rich garnet + carpholite + phengite + chloritoid + chlorite + kyanite ± coesite	Essentially as granulite facies	Essentially as granulite facies ± vesuvianite ± wollastonite
Pyroxene hornfels	Essentially as granulite facies	Essentially as granulite facies but andalusite is typical aluminosilicate; cordierite + biotite tends to be more stable than almandine garnet, except where Fe ²⁺ /Mg is high; silica deficient rocks contain spinel, corundum, and alkali feldspar in lieu of an aluminosilicate	Essentially as granulite facies	
Sanidinite	Near subsolidus basalt assemblage	Sanidine, tridymite, cordierite, mullite (3Al ₂ O ₃ ·2H ₂ O), glass, clinopyroxene, spinel, corundum (in silica-poor rocks)	Sanidine, tridymite, cordierite, glass, clinopyroxene	Anorthite + wollastonite ± diopside in silica-rich rocks; calcite, wollastonite, melilite (Ca ₂ MgSi ₂ O ₇), larnite (Ca ₂ SiO ₄), merwinite (Ca ₃ MgSi ₂ O ₈), monticellite in silica-poor rocks

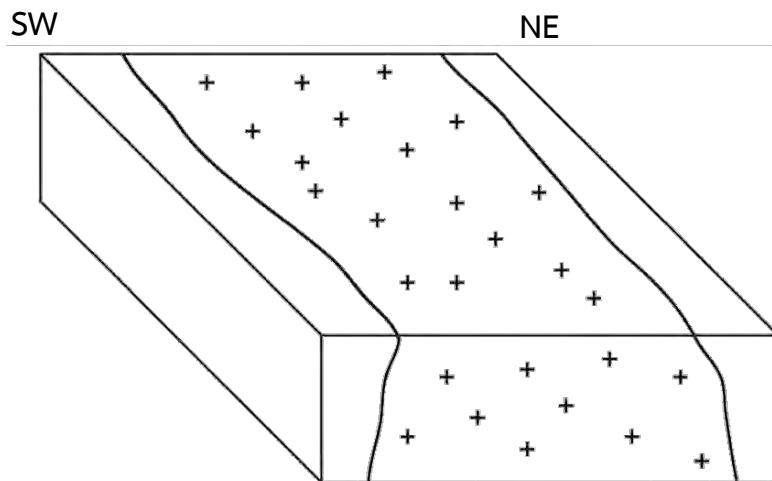
รูปที่ 4.9 ตารางแสดงกลุ่มแร่ (mineral assemblages) ที่พบในชุดลักษณะการแปรสภาพต่างๆ ซึ่งจำแนกตามชนิดหินต้นกำเนิด โดยในพื้นที่ศึกษาพบกลุ่มแร่ที่อยู่ในชุดลักษณะการแปรสภาพแบบกรีนชีตและแอมไฟโบลิต์ ซึ่งมีหินต้นกำเนิดเป็นชนิด quartzo – feldspathic rocks (กรอบสีแดง) (Vernon and Clarke, 2008)

4.2 วิวัฒนาการของลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural evolution)

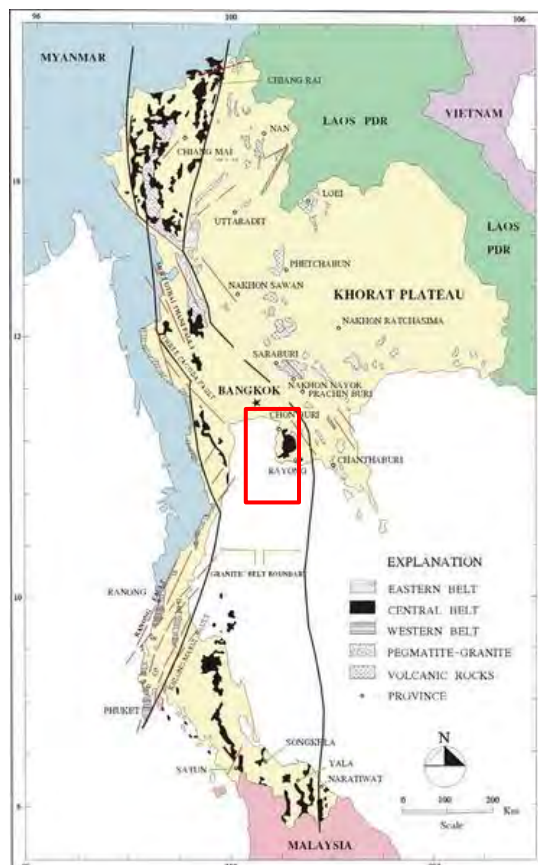
แบบจำลองของวิวัฒนาการของลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์ลิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1: การเกิดหินแกรนิต (D_0 : granite intrusion)

ช่วงแรกที่เกิดคือมีการปะทุของหินแกรนิต (รูปที่ 4.10) ซึ่งเป็นหินต้นกำเนิดของหินไนส์ลิกแกรนิตหัวหิน บริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยกรมทรัพยากรธรณีวิทยาให้เป็นหินแกรนิตตะกอนหรือ S - type granite ที่จัดเป็นส่วนหนึ่งของหินแกรนิตแนวตอนกลาง หรือ Central Belt Granite (รูปที่ 4.11)



รูปที่ 4.10 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างช่วงที่ 1 : การเกิดหินแกรนิต (D_0 : granite intrusion)

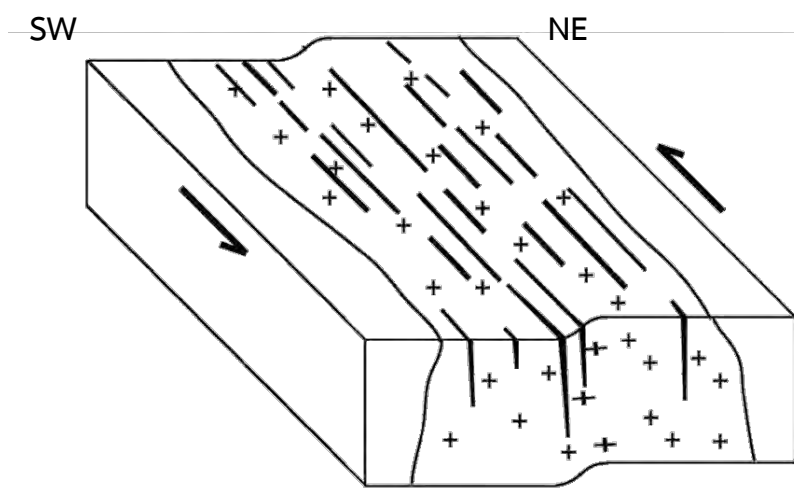


รูปที่ 4.11 แผนที่แสดงการกระจายตัวของหินแกรนิตที่แบ่งออกเป็น 3 บริเวณคือ Eastern belt Central belt และ Western belt โดยบริเวณที่เป็นสีดำทึบจะเป็น Central belt ซึ่งพบในบริเวณศึกษาด้วย (กรอบสีแดง) (กรมทรัพยากรธรณีวิทยา, 2551) 32

ช่วงที่ 2: การเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนุ่มและเฉือนแบบซ้ายเข้า ร่วมกับการแปรสภาพ

(D₁ : Sinistral ductile deformation and metamorphism)

จากหลักฐานที่พบในหินโผล่ที่บอกแนวการวางตัวของริ้วขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น อยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ รวมถึงในตัวอย่างหินและแผ่นหินบางที่ส่วนใหญ่พบการเฉือนแบบซ้ายเข้า ทำให้สันนิษฐานว่าการเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนุ่มที่ทำให้เกิดแนวริ้วขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น เกิดพร้อมกับการเฉือนแบบซ้ายเข้าที่มีแรงเฉือนเข้ามากระทำในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากแนวริ้วขนานที่พบและแร่ที่มีการเฉือนนั้นวางตัวอยู่ในแนวเดียวกัน นอกจากนั้นยังเกิดร่วมกับการแปรสภาพ จากหลักฐานที่พบร่องรอยประกอบซึ่งบอกการแปรสภาพแบบกรีนชิตต์ถึงแอมฟิโบลิต์ ซึ่งการวางตัวของแร่ดังกล่าว เช่นแร่คลอไรต์ มีแนวโน้มนำที่วางตัวแนวเดียวกับแนวริ้วขนานด้วย (รูปที่ 4.12)

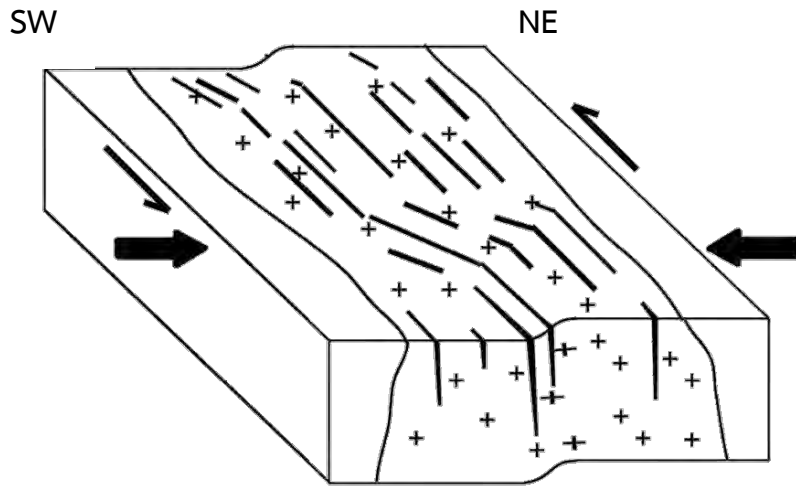


รูปที่ 4.12 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างช่วงที่ 2 : การเปลี่ยนลักษณะแบบอ่อนนุ่มและเฉือนแบบซ้ายเข้า ร่วมกับการแปรสภาพ (D₁ : Sinistral ductile deformation and metamorphism)

ช่วงที่ 3: เกิดแรงอัดเข้ามาในทิศเกือบตะวันตก - ตะวันออก และเกิดร่วมกับการเฉือนแบบซ้ายเข้า

(D₂ : Sinistral transpressional deformation)

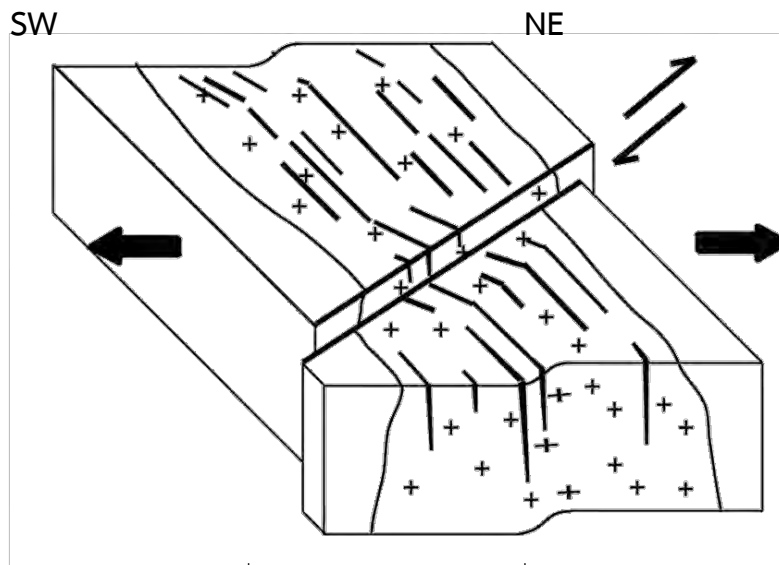
จากหลักฐานการพบแนวริ้วขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นในแนวเหนือ - ใต้ ที่พบในบางจุดศึกษา ซึ่งทำให้มีแนวการวางตัวที่ต่างกันและแสดงลักษณะบิดเบี้ยว นอกจากนั้นลักษณะของแนวเขายังมีการบิดเบี้ยวด้วยเช่นกัน จึงสันนิษฐานว่าอาจมีแรงอีกหนึ่งแรงที่เข้ามากระทำในทิศตะวันตก - ตะวันออก ซึ่งทำให้แนวการวางตัวของริ้วขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น รวมถึงการวางตัวของแนวเขา มีการเปลี่ยนแนวจากตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ เป็นแนวเหนือ - ใต้ ที่พบเพียงในบางบริเวณ ซึ่งอาจเนื่องมาจากในแต่ละบริเวณได้รับแรงที่ไม่เท่ากัน โดยเหตุการณ์นี้ยังเกิดขึ้นร่วมกับการเฉือนแบบซ้ายเข้าด้วยเช่นกัน เนื่องจากในบางจุดศึกษาที่มีแนวการวางตัวของริ้วขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นในแนวเหนือ - ใต้ ยังพบเม็ดแร่ที่มีการเฉือนในแนวเดียวกัน จึงสันนิษฐานว่าการเฉือนแบบซ้ายเข้านั้นได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากช่วงที่ 2 (D₁) มาจนถึงช่วงที่ 3 (D₂) นี้ (รูปที่ 4.13)



รูปที่ 4.13 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างช่วงที่ 3 : เกิดแรงอัดเข้ามาในทิศเกือบตะวันตก - ตะวันออก และเกิดร่วมกับการเฉือนแบบซ้ายเข้า (D₂ : Sinistral transpressional deformation)

ช่วงที่ 4: เกิดแรงดึงและมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ เกิดรอยเลื่อนปกติและรอยเลื่อนแนวระดับแบบขวาเข้า (D₃ : Dextral transtensional deformation)

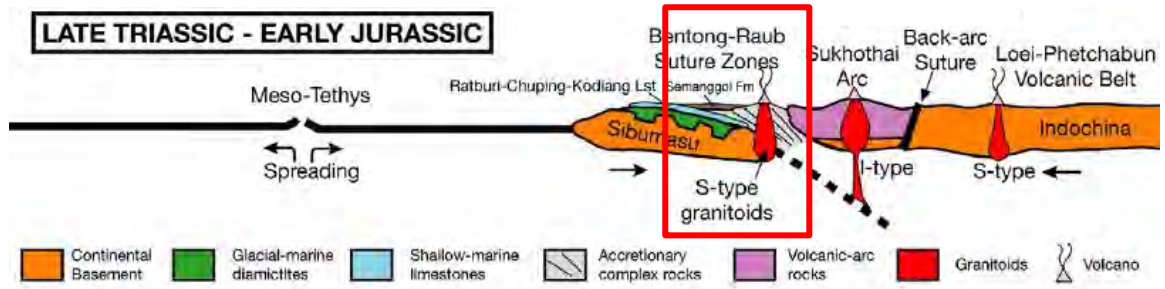
จาก Kawakami และคณะ ในปี 2014 ที่แสดงภาพที่มีรอยเลื่อนปกติ และรอยเลื่อนแนวระดับแบบขวาเข้าตัดผ่านพื้นที่ศึกษา และจากการวางตัวของแนวเขาในพื้นที่ศึกษาที่แสดงการโดนเลื่อนตัวของเขาแบบขวาเข้าในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างจุดศึกษาที่ 4 และ 5 จึงสันนิษฐานว่าอาจมีแรงเข้ามากระทำโดยเกิดเป็นแรงดึงในทิศเกือบตะวันตก - ตะวันออก ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ ที่เกิดเป็นรอยเลื่อนปกติและรอยเลื่อนแนวระดับที่วางตัวในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้ (รูปที่ 4.14)



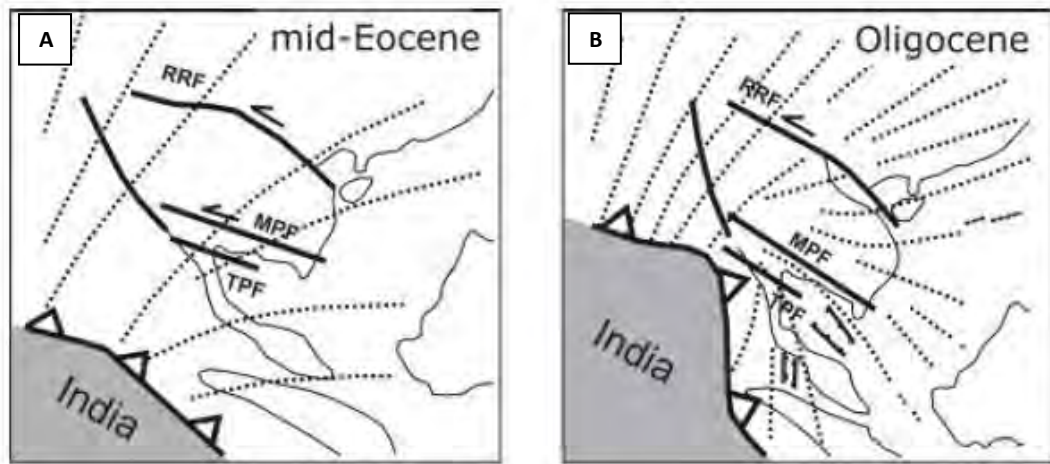
รูปที่ 4.14 แบบจำลองรูปแบบโครงสร้างช่วงที่ 4 : เกิดแรงดึงและมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ เกิดรอยเลื่อนปกติและรอยเลื่อนแนวระดับแบบขวาเข้า (D₃ : Dextral transtensional deformation)

4.3 ลักษณะธรณีแปรสัณฐาน (Tectonic setting)

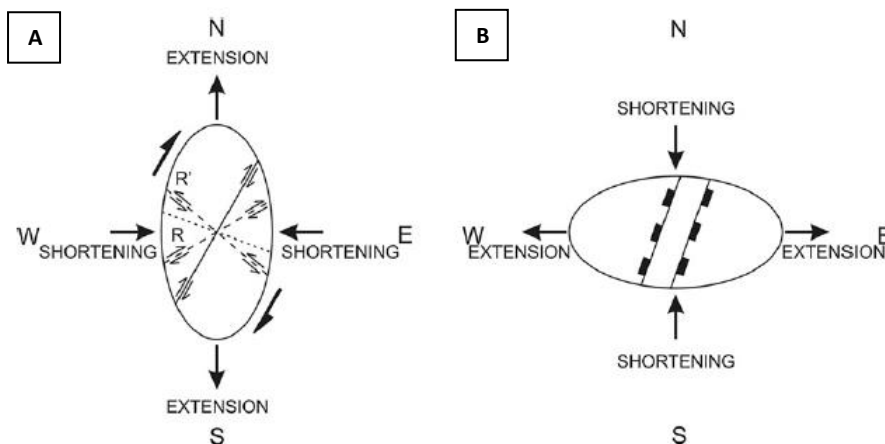
จากวิวัฒนาการของลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ที่แบ่งออกเป็น 4 ช่วงนั้น สัมพันธ์กับธรณีวิทยาแปรสัณฐานของประเทศไทย โดยเริ่มจากการเกิดหินแกรนิตซึ่งเป็นชนิดตะกอน หรือ S - type และเป็นส่วนหนึ่งของหินแกรนิตแนวตอนกลางนั้นสัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่แผ่นจูลทวีปไซบูมาสุชนกับแผ่นจูลทวีปอินโดไชน่า ในช่วงตอนปลายของยุคไทรแอสซิกถึงตอนต้นของยุคจูแรสซิก (รูปที่ 4.15) เนื่องจากมีการชนกันและเกิดแรงในทิศเกือบตะวันตก - ตะวันออก ทำให้เกิดแนวมุดตัวในแนวเกือบเหนือ - ใต้ ซึ่งส่งผลให้แนวหินแกรนิตที่เกิดขึ้นอยู่ในแนวเกือบเหนือ - ใต้ ในช่วงต่อมาเกิดแรงเฉือนแบบซ้ายเข้าในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งทำให้เกิดแนวรื้อขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นในแนวเดียวกันนี้ และยังเกิดร่วมกับการแปรสภาพในชุดลักษณะการแปรสภาพแบบกรีนชีทถึงแอมฟิโบลต์ ซึ่งสัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่แผ่นจูลทวีปมาตะวันตกชนกับแผ่นจูลทวีปไซบูมาสุ ในช่วงอายุตอนปลายของยุคครีเทเชียส นอกจากนั้นในงานวิจัยของ Watkinson และคณะ ในปี 2011 และงานวิจัยของ Kanjanapayont และคณะ ในปี 2012 ยังได้กล่าวไว้ว่าในช่วงเวลาดังกล่าว มีการเกิดแรงเฉือนที่แพร่กระจายไปทั่วภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากการชนกันของแผ่นจูลทวีปมาตะวันตกและแผ่นจูลทวีปไซบูมาสุ และยังเกิดร่วมกับการเกิดการแปรสภาพชั้นสูง (high metamorphic grade) อีกด้วย ต่อมาอ้างอิงจากงานวิจัยของ Rhodes และคณะ ในปี 2005 และ Kanjanapayont และคณะ ในปี 2012 ที่กล่าวว่าในช่วงตอนต้นของสมัยอีโอซีน แผ่นทวีปอินเดียนเริ่มเคลื่อนที่เข้ามาชนกับแผ่นทวีปยูเรเชีย ซึ่งทำให้เกิดแรงอัดเนื่องจากการชนกันนี้อยู่ในทิศตะวันตก - ตะวันออก (รูปที่ 4.16 A และรูปที่ 4.17 A) โดยเหตุการณ์นี้สัมพันธ์กับการเกิดแรงอัดเข้ามาในทิศเกือบตะวันตก - ตะวันออก ที่เกิดร่วมกับการเฉือนแบบซ้ายเข้า ในพื้นที่ศึกษา ซึ่งทำให้แนวรื้อขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น รวมถึงแนวเขามมีการบิดเบี้ยวไป และต่อมาในช่วงสุดท้าย มีการเกิดแรงดึงในทิศเกือบตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ ที่เกิดเป็นรอยเลื่อนปกติและรอยเลื่อนแนวระดับที่วางตัวในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้นั้น สัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่แผ่นทวีปอินเดียนชนกับแผ่นทวีปยูเรเชียในสมัยโอลิโกซีน ซึ่งทำให้เกิดแรงอัดในทิศเกือบเหนือ - ใต้ (รูปที่ 4.16 B และรูปที่ 4.17 B) ส่งผลให้มีการดึงออกในทิศเกือบตะวันตก - ตะวันออก และเกิดรอยเลื่อนปกติร่วมด้วย นอกจากนั้นในช่วงสุดท้ายนี้ยังมีการเกิดรอยเลื่อนแนวระดับแบบขวาเข้าที่ตัดผ่านพื้นที่ศึกษา ทำให้แนวเขามมีการเลื่อนตัว สันนิษฐานได้ว่าบริเวณนี้เป็นส่วนหนึ่งของ riedel shear (รูปที่ 4.18) ที่ได้รับอิทธิพลมาจากรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ โดย Nantasini และคณะ ในปี 2012 ได้กล่าวว่ารอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบซ้ายเข้า และหลังจากนั้นมีการเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่เป็นแบบขวาเข้าในสมัยโอลิโกซีน ซึ่งสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ศึกษา จึงสรุปได้ว่าพื้นที่ศึกษานั้นได้รับอิทธิพลและมีความสัมพันธ์กับรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์



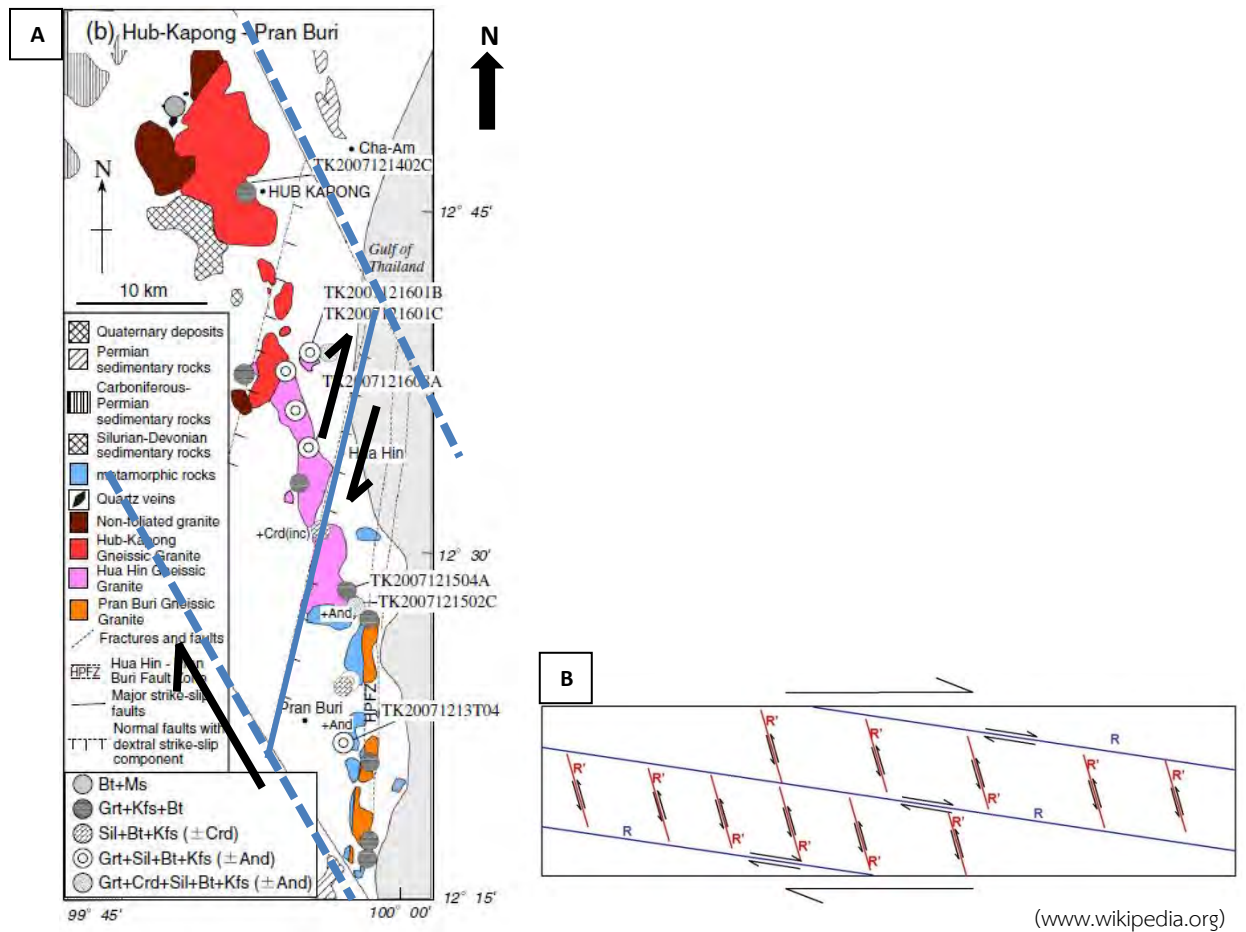
รูปที่ 4.15 ภาพวาดจำลองแสดงเหตุการณ์ธรณีแปรสัณฐานประเทศไทยที่เกิดในช่วงตอนปลายของยุคไทรแอสซิกถึงตอนต้นของยุคจูแรสซิก ทำให้เกิดหินแกรนิตตะกอน หรือ S - type บริเวณพื้นที่ศึกษา ซึ่งคาดว่าอยู่ในบริเวณที่เป็นกรอบสีแดง (Watkinson et al., 2011)



รูปที่ 4.16 ภาพวาดจำลองแสดงเหตุการณ์ธรณีแปรสัณฐานของแผ่นทวีปอินเดียและแผ่นทวีปยูเรเชีย (A) เกิดในช่วงตอนกลางของสมัยอีโอซีน ทำให้เกิดแรงอัดในทิศเกือบตะวันตก - ตะวันออก (เส้นประในภาพ) (B) ในสมัยโอลิโกซีน มีการเปลี่ยนทิศของแรงที่เกิดจากการชนของแผ่นทวีปอินเดีย เป็นทิศเกือบเหนือ - ใต้ (เส้นประในภาพ) (Huchon, 1994 and Rhodes et al., 2005)



รูปที่ 4.17 ภาพวาดจำลองแสดงทิศทางการที่แรงเข้ามากระทำ โดย (A) มีแรงอัดเข้ามากระทำในทิศตะวันตก - ตะวันออก และมีการเลื่อนเกิดร่วมด้วย สัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่เกิดในสมัยอีโอซีน และ (B) มีแรงอัดเข้ามากระทำในทิศเหนือ - ใต้ สัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่เกิดในสมัยโอลิโกซีน (Kanjanapayont et al., 2012)



รูปที่ 4.18 (A) พื้นที่ศึกษาที่มีรอยเลื่อนปกติและรอยเลื่อนแนวระดับแบบขวาเข้าตัดผ่าน (เส้นทึบสีฟ้า) โดยอาจเป็นส่วนหนึ่งของ riedel shear ที่ต่อมาจากรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ (เส้นประสีฟ้า) (B) แบบจำลองลักษณะของ riedel shear

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา (Conclusion)

5.1 สรุปผลการศึกษา (Conclusion)

จากการนำผลการศึกษาที่ได้จากการสำรวจภาคสนามและการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างระดับจุลภาคมา รวบรวม วิเคราะห์ และอภิปรายลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง รวมถึงวิวัฒนาการของลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง ของหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างที่พบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระดับ คือ ระดับมหัศจรรย์ภาค และระดับ จุลภาค โดยในระดับมหัศจรรย์ภาคนั้นจะศึกษาจากหินโพลีในภาคสนาม พบว่าลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างของหิน โพลีส่วนใหญ่มีการวางตัวของแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น อยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และแนวเหนือ-ใต้ นอกจากนี้ในตัวอย่างหินระบุตำแหน่งที่เก็บจากภาคสนามยังพบว่าเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ ส่วนใหญ่มีการแสดงลักษณะการเฉือนเป็นแบบซ้ายเข้า (sinistral shear sense) และในระดับจุลภาคซึ่งเป็นการศึกษาจากแผ่นหินบางภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่สามารถบอกถึงกลไกการเปลี่ยนแปลง ลักษณะ โดยแสดงในผลึกแร่ควอตซ์และแร่แพลสซิโอเครสซึ่งมีการเสียรูปผลึก ทำให้เกิดลักษณะการมืดสว่างไม่เท่ากัน หรือเรียกว่า undulose extinction ในแร่ควอตซ์ และเกิดการตีบของผลึกแฝด หรือเรียกว่า taper twin ที่เกิดในแร่แพลสซิโอเครส นอกจากนี้ยังพบแร่ควอตซ์ในบางจุดศึกษาที่มีการเกิดผลึกใหม่พลวัต เรียกว่า subgrain rotation โดยลักษณะเหล่านี้สามารถบ่งบอกอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงลักษณะประมาณ 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส และนอกจากจะพบลักษณะการเฉือนแบบซ้ายเข้าในตัวอย่างหินระบุตำแหน่งแล้วยังพบลักษณะ เดียวกันในผลึกแร่ไบโอไทต์ โดยแสดงเป็นลักษณะของ mica fish ที่เป็นตัวบ่งชี้การเคลื่อนตัวของหินได้ สำหรับแร่ ที่พบในพื้นที่ศึกษานั้นเป็นกลุ่มแร่ที่บ่งบอกถึงการถูกแปรสภาพในชุดลักษณะการแปรสภาพแบบแอมฟิโบลิต (amphibolite facies) เช่น แร่แพลสซิโอเครส แร่โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ แร่ควอตซ์ แร่ไบโอไทต์ แร่ฮอร์น - เบลนด์ และแบบกรีนชีสต์ (greenschist facies) เช่น แร่คลอไรต์ เป็นต้น

สำหรับวิวัฒนาการของธรณีวิทยาโครงสร้าง (รูปที่ 5.1) นั้น สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะออกเป็น 4 ช่วงที่อาจจะสัมพันธ์กับธรณีแปรสัณฐานของประเทศไทยและสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ที่อยู่ทางตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่ศึกษา โดยเริ่มจาก D_0 การเกิดหินแกรนิต (granite intrusion) ที่เกิดในช่วง ตอนปลายของยุคไทรแอสซิก สัมพันธ์กับการชนกันของแผ่นจูลทวีปไซบูมาสูและแผ่นจูลทวีปอินโดจีน จากนั้น D_1 เกิดการเฉือนแบบซ้ายเข้าและการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบอ่อนนิ่ม ร่วมกับการแปรสภาพ (sinistral ductile deformation and metamorphism) ในทิศเกือบเหนือ - ใต้ ทำให้เกิดแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้น ซึ่งสัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่แผ่นจูลทวีปมาตะวันตกชนกับแผ่นจูลทวีปไซบูมาสูที่เกิดในช่วงตอนปลายของยุคครีเทเชียส ต่อมา D_2 มีแรงอัดเข้ามากระทำในทิศเกือบตะวันตก - ตะวันออก ซึ่งเกิดร่วมกับการเฉือนแบบซ้ายเข้า (sinistral transpressional deformation) ทำให้แนวการวางตัวของแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นมีการบิดเบี้ยวคดโค้งไปมา สัมพันธ์กับเหตุการณ์ที่แผ่นเปลือกโลกอินเดียเริ่มชนกับแผ่นเปลือกโลกยูเรเชียในช่วง ตอนต้นของสมัยอีโอซีน และสุดท้าย D_3 เกิดแรงดึงและมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ (dextral transtensional deformation) ทำให้เกิดรอยเลื่อนปกติร่วมกับรอยเลื่อนแนวระดับแบบขวาเข้า และมีการเลื่อน

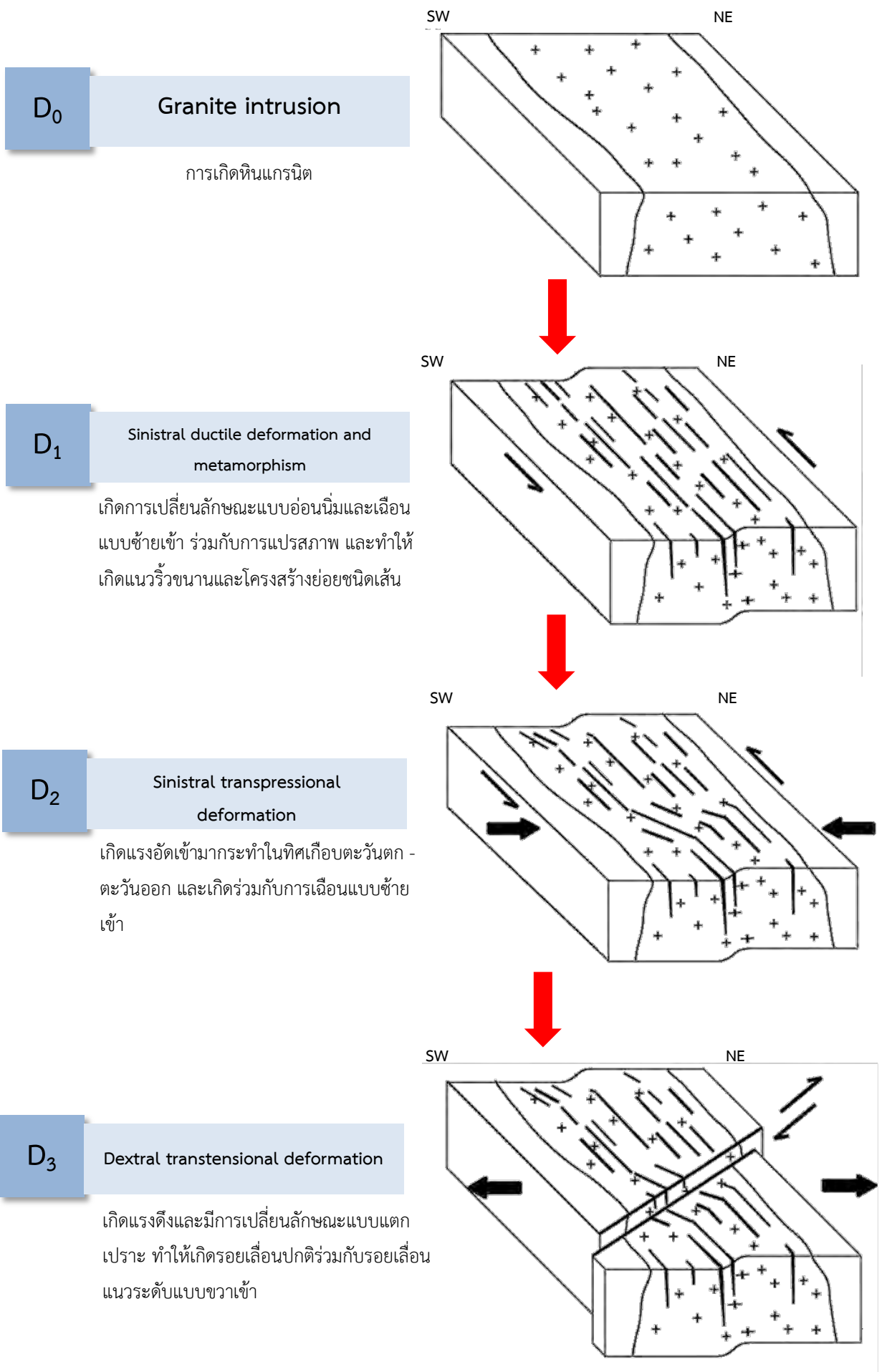
ตัวของเขาหินแกรนิตในพื้นที่ในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ – ตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งสัมพันธ์กับเหตุการณ์การเปลี่ยนทิศทางของแรงจากการชนของแผ่นเปลือกโลกอินเดีย โดยเปลี่ยนจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ – ตะวันตกเฉียงใต้ ในช่วงตอนต้นสมัยอีโอซีน เป็นทิศเกือบเหนือ – ใต้ในสมัยโอลิโกซีน ทำให้เกิดแรงดึงในทิศตะวันตก – ตะวันออก จึงทำให้เกิดรอยเลื่อนในช่วง D_3 นี้

5.2 ผลที่ได้รับ

ทราบลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้าง และแบบจำลองวิวัฒนาการธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์สิกแกรนิต หัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

5.3 ปัญหาและอุปสรรค

- 1) หินโผล่ในพื้นที่บางจุดศึกษา มีลักษณะที่ผุ ทำให้การวัดค่าการวางตัวของแนวร้าวขนานและโครงสร้างย่อยชนิดเส้นอาจจะไม่ถูกต้องหรือมีการคลาดเคลื่อน
- 2) เนื่องจากตัวอย่างหินระบุตำแหน่งที่เก็บจากภาคสนามนั้นค่อนข้างผุ ทำให้สูญเสียบางส่วนไปเมื่อนำไปตัดเพื่อทำแผ่นหินบาง



รูปที่ 5.1 สรุปวิวัฒนาการทางธรณีวิทยาโครงสร้างของหินไนส์สิกแกรนิตหัวหิน ทั้ง 4 ช่วง ของบริเวณพื้นที่ศึกษา 40

เอกสารอ้างอิง (References)

- กรมทรัพยากรธรณี, 2551. การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณี จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : บริษัท แอดวานซ์ วิชั่น เซอร์วิส จำกัด.
- Charusiri, P., Clark, A.H., Farrar, E., Archibald, D., Charusiri, B., 1993. Granite belts in Thailand: evidence from the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological and geological syntheses. Journal of Southeast Asian Earth Sciences 8, 127–136.
- Charusiri, P., Daorerk, V., Archibald, D., Hisada, K., Ampaiwan, T., 2002. Geotectonic evolution of Thailand: a new synthesis. Journal of Geological Society of Thailand 1, 1–20.
- Cobbing, E.J., 2011. Granitic rocks. In: Ridd, et al. (Eds.), The Geology of Thailand. Geological Society, London, pp. 441–457.
- Kanjanapayont, P., Grasemann B., Edwards M. and Fritz H., 2012. Quantitative Kinematic Analysis Within The Khlong Marui Shear Zone, Southern Thailand. Journal of Structural Geology 35 : 17-27.
- Kawakami, T., Nakano, N., Higashino, F., Hokada, T., Osanai, Y., Yuhara, M. and Hirata, T., 2014. U-Pb zircon and CHIME monazite dating of granitoids and high - grade metamorphic rocks from the Eastern and Peninsular Thailand. A new report of Early Paleozoic granite. Lithos : 64-79.
- Nantasin, P., Hauzenberger, C., Liu, X., Krenn, K., Dong, Y., Thöni, M. and Wathanakul, P., 2012. Occurrence of the high grade Thabsila metamorphic complex within the low grade ThreePagodas shear zone, Kanchanaburi Province, western Thailand: Petrology and geochronology. Journal of Asian Earth Sciences : 68-87.
- Passchier, Cees W. and Rudolf A. J Trouw., 2005. Microtectonics. Berlin: Springer.
- Rhodes, B., Charusiri, P., Kosuwan, S. and Lamjuan, A., 2005. Tertiary Evolution of the Three Pagodas Fault, Western Thailand. In Proceedings of the International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina (GEOINDO 2005), November 28-30, 2005, Khon Kaen, Thailand : 498-505.
- Vernon, R.H., Clarke, G.L., 2008. Principles of metamorphic petrology. Cambridge University Press.

เอกสารอ้างอิง (References)

- Watkinson, I., Elders, C. and Hall, R., 2008. The Kinematic History of The Khlong Marui and Ranong Faults, Southern Thailand. Journal of Structural Geology 30.12 : 1554-1571.
- Watkinson, I., Elders, C., Batt, G., Jourdan, F., Hall, R. and McNaughton, N., 2011. The Timing of Strike-Slip Shear Along The Ranong and Khlong Marui Faults, Thailand. J. Geophys. Res. 116.B9.

ภาคผนวก

- ข้อมูลภาคสนาม

จุดศึกษาที่ 1 Grid reference: 0598898E 1396281N

Foliation

Strike	Dip angle
338	44
305	41
328	32
165	59
160	62
190	63
154	35
137	31
120	39
140	34
340	33
335	47
320	35
321	43

Lineation

Trend	Plunge
148	2
144	8
140	4
160	2
165	15
170	4
225	33
250	20
315	8
325	12
312	10

จุดศึกษาที่ 2 Grid reference: 0599265E 1391891N

Foliation

Strike	Dip angle
347	44
358	47
346	42
344	56
338	66
350	65
343	55
352	52
347	35
343	46
354	36
350	31
358	72
347	53
324	56

Lineation

Trend	Plunge
182	3
13	2
206	7
175	8
176	12
170	13
148	16
155	13
164	8
175	4
120	15
80	18
104	19
150	32
144	24
149	7

จุดศึกษาที่ 3 Grid reference: 0600086E 1388215N

Foliation

Strike	Dip angle
176	27
168	18
163	30
165	22
190	59
173	60
175	53
168	72
30	35
46	36
70	28
120	16
102	14
150	23
170	10
353	34
140	40
127	36
305	30

Lineation

Trend	Plunge
190	3
205	2
200	2
190	12
175	22
173	26
185	18
100	20
185	10
190	14
190	6
290	20
320	21
280	31

จุดศึกษาที่ 4 Grid reference: 0602186E 138881N

Foliation

Strike	Dip angle
225	3
205	4
205	25
115	22
130	23
128	16
238	22
225	14
230	16
143	6
123	5
151	5

Lineation

Trend	Plunge
355	20
358	12
357	7
35	4
25	8
36	10
358	15
0	16
345	5
39	10
41	1
34	7

จุดศึกษาที่ 5 Grid reference: 0603734E 1384275N

Foliation

Strike	Dip angle
160	67
162	62
172	53
170	53
172	51
175	50
169	72
168	74
169	71
350	75
339	74
355	73

Lineation

Trend	Plunge
356	8
357	10
348	3
354	13
350	9
330	14
345	10
350	12
340	10
179	12
170	15
175	9