



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างบริเวณเขตการเลื่อนตามแนวระดับ
ภาคตะวันตกของประเทศไทย

โดย

พิชญพงศ์ กาญจนพยนต์

มีนาคม ๒๕๕๘

กติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนทั้งหมดจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ประจำปีงบประมาณ 2557 (ครั้งที่ 4) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผ่านทางส่วนส่งเสริมและพัฒนาวิจัย สำนักบริหารวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์เครื่องมือวิเคราะห์ตลอดการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือให้ งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ชื่อโครงการวิจัย การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างบริเวณเขตการเลื่อนตามแนวระดับ ภาคตะวันตก
ของประเทศไทย
ชื่อผู้วิจัย พิษณุพงศ์ กาญจนพยนต์
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ มีนาคม 2558

บทคัดย่อ

เขตรอยเลื่อนแม่ปิงที่มีการวางตัวในทิศตะวันตกเฉียงเหนือแสดงหินโผล่จำพวกหินแปรที่มีชื่อว่าลาน
สางไนส์ในจังหวัดตาก ภาคตะวันตกของประเทศไทย หินในเขตการเลื่อนตามแนวระดับประกอบด้วยหินอโอ
ไนส์และพาราไนส์ ด้วยวิธีของ Fry สำหรับการวิเคราะห์ความเครียดในสองมิติแสดงอัตราความเครียดเฉลี่ยของ
ระนาบเท่ากับ 1.35–1.69 ผลการศึกษาตีความว่าหินที่มีการเปลี่ยนลักษณะเนื้อเดียวภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงมี
การเลื่อน ตัวชี้บ่งการเคลื่อนที่ทั้งจากหินโผล่และระดับจุลภาคบ่งชี้การเคลื่อนที่แบบซ้ายเข้า รูปร่างของวงรี
ความเครียดแสดงกระบวนการเปลี่ยนลักษณะซึ่งส่งผลให้ธรณีวิทยาโครงสร้างมีการสะสมความเครียดอยู่ภายใน
และในท้ายที่สุดเกิดการเปลี่ยนลักษณะในกระบวนการเลื่อนแบบซ้ายเข้าซึ่งเกิดขึ้นในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงในทิศ
ตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้

Project Title Structural geology analysis within the strike-slip zone, western Thailand
Name of the Investigators Pitsanupong Kanjanapayont
Year March 2015

Abstract

The NW trending Mae Ping shear zone exposes a high grade metamorphic rocks named Lansang gneiss in Tak region, western Thailand. The lithologies within the strike-slip zone mainly consist of the orthogneisses and paragneisses. Using Fry's method for 2-dimensional strain analysis showed that the averaged finite strain ratio (R_s) of XY-plane is $R_s = 1.35-1.69$. The results implied that the homogeneously deforming rocks within the Mae Ping shear zone have the simple shear. The kinematic indicators from both outcrop and microscopic scales indicates the sinistral sense of movement. The shape of strain ellipses intensifies the deformation process that applied and lead structural geology accumulated strain inside. And it finally deformed in the process of sinistral simple shear, which applied in the Mae Ping shear zone in the direction of NW-SE.

สารบัญ

หน้า

กติกกรมประกาศ.....	i
บทคัดย่อ.....	ii
Abstract.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญรูป.....	vi
สารบัญตาราง.....	vii

บทที่ 1

บทนำ.....	1-3
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.6 สถานที่ทำการวิจัย.....	3

บทที่ 2

ธรณีวิทยาทั่วไป.....	4-10
2.1 ธรณีวิทยามุมิกภาค.....	4
2.2 ธรณีวิทยาเขตการเลื่อนตามแนวระดับในภาคตะวันตกของประเทศไทย.....	6

บทที่ 3

การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้าง.....	11-12
3.1 การประมวลข้อมูลเชิงพื้นที่.....	11
3.2 การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้าง.....	11
3.3 การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาค.....	12
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณความเครียดของหิน.....	12

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้าง.....	13-28
4.1 ผลการประมวลข้อมูลเชิงพื้นที่.....	13
4.2 ธรณีวิทยาโครงสร้าง.....	15
4.3 ธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาค.....	20
4.4 ปริมาณความเครียดของหิน.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5	
อภิปรายและสรุปผลการวิจัย.....	29-30
เอกสารอ้างอิง.....	31-33

สารบัญรูป

รูป		หน้า
2.1	ธรณีวิทยาแปรสัณฐานของประเทศไทยแสดงเขตรอยเลื่อนตามแนวระดับหลักและ โครงสร้างที่สัมพันธ์ ได้แก่ เขตรอยเลื่อนแม่ปิง เขตรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ เขตรอยเลื่อน ระนอง และเขตรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย (ดัดแปลงจาก Macdonald et al., 2010; Mitchell et al., 2012; Morley, 2002; Polachan and Sattayarak, 1989) กรอบสี่เหลี่ยมแสดงตำแหน่ง ของรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ	5
2.2	แผนที่แสดงธรณีวิทยาของเขตรอยเลื่อนแม่ปิง (ดัดแปลงจาก Department of Mineral Resources, 1982) แถบสีขาวแสดงแนวการสำรวจในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตก เฉียงใต้	8
2.3	แผนที่แสดงธรณีวิทยาของเขตรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ (ดัดแปลงจาก Department of Mineral Resources, 1982) แถบสีขาวแสดงแนวการสำรวจในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ- ตะวันตกเฉียงใต้	10
4.1	กรอบสีขาวแสดงพื้นที่การเก็บตัวอย่างในบริเวณเขตรอยเลื่อนแม่ปิง (ดัดแปลงจาก Department of Mineral Resources, 1982) (บน) ภาพขยายจากกรอบสีขาวรูปบนแสดง ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (ล่าง)	14
4.2	รื้อขานานและโครงสร้างชนิดเส้นในหินออร์โทไนต์ (บน) พาราไนต์ (ล่าง)	16
4.3	ตาข่ายมิติสเตรโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่ทำของโครงสร้างทางธรณีวิทยา (a) รื้อขานาน 249 ข้อมูล (เส้นชั้นความสูง 1%, 5%, 10%, 15% และ 20% ต่อ 1% ของพื้นที่) (b) โครงสร้าง ชนิดเส้นการยึด 45 ข้อมูล	17
4.4	การเปลี่ยนลักษณะภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงโครงสร้าง δ แบบซ้ายเข้า (บน) และ รอยพับไม่สมมาตรในหินแคลซิติเกต (ล่าง)	17
4.5	การเปลี่ยนลักษณะภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงโครงสร้าง σ ของแร่เฟลด์สปาร์ (บน) โครงสร้าง σ ในชั้นเฟลด์สปาร์มาก (ล่าง)	19
4.6	ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินแปรชั้นสูงภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงการไม่ สม่ำเสมอทางแสงของแร่และการเคลื่อนที่ของขอบแร่ควอตซ์ (บน) ควอตซ์และไบโอไทต์ ที่มีการเปลี่ยนลักษณะแสดงการยึดภายใต้สภาวะอ่อนนุ่ม (ล่าง)	21
4.7	ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินแปรชั้นสูงภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงการการเรียง ตัวของรูปร่างของควอตซ์ในเส้น S-C (บน) และโครงสร้าง σ ของแร่เฟลด์สปาร์ (ล่าง)	22
4.8	ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินแปรชั้นสูงภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงโครงสร้าง σ แบบซ้ายเข้าของแร่เฟลด์สปาร์ (บน) และไมก์ไรต์ (ล่าง)	23
4.9	วงรีความเครียดที่ได้จากวิธีของ Fry ตัวอย่าง LS 1 (บน) และ LS 4 (ล่าง)	25
4.10	วงรีความเครียดที่ได้จากวิธีของ Fry ตัวอย่าง LS 5 (บน) และ LS 11 (ล่าง)	26
4.11	วงรีความเครียดที่ได้จากวิธีของ Fry ตัวอย่าง LS 13 (บน) และ LS 15 (ล่าง)	27
5.1	วงรีความเครียดแสดงความเครียดเชิงปริมาณตามแนววางของเขตรอยเลื่อนแม่ปิง แผนภาพภูหาลาบแสดงรื้อขานานหลักในทิศ 150°	30

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	ข้อมูลความเครียดเชิงปริมาณของหินแปรในพื้นที่เขตรอยเลื่อนแม่ปิง ภาคตะวันตกของประเทศไทย	28

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เขตการเลื่อนตามแนวระดับ (strike-slip zone) เป็นลักษณะธรณีวิทยาสำคัญที่เกิดขึ้นในประเทศไทย บริเวณภาคตะวันตกต่อเนื่องไปจนถึงภาคใต้ ได้แก่ เขตการเลื่อนแม่ปิง เจดีย์สามองค์ ระนอง และคลองมะรุ่ย โดยเขตการเลื่อนตัวแม่ปิงและเจดีย์สามองค์มีการวางตัวอยู่ที่ทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ในขณะที่เขตการเลื่อนตัวระนองและคลองมะรุ่ยมีการวางตัวอยู่ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ เขตการเลื่อนตามแนวระดับนี้มักถูกเทียบเคียงกับเขตการเลื่อนอายลาวจาน-แม่น้ำแดงในยูนาน ประเทศจีน ที่มีการวางตัวขนานกันกับในประเทศไทยและมีการศึกษาอย่างละเอียด แต่จากการศึกษาธรณีวิทยาในหลายพื้นที่ในโลกพบว่าแต่ละเขตการเลื่อนตัวก็มีลักษณะธรณีวิทยาเฉพาะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ ซึ่งข้อมูลแผนที่ธรณีวิทยาพื้นฐานของประเทศไทยก็แสดงถึงเขตการเลื่อนตัวในประเทศไทยที่มีลักษณะหินแตกต่างจากเขตการเลื่อนตัวอายลาวจาน-แม่น้ำแดงในประเทศจีน ในบางการศึกษาเขตการเลื่อนตัวนี้ถูกเชื่อมโยงให้สัมพันธ์กันทั้งหมดและถูกสรุปในรูปแบบการเกิดแหล่งปิโตรเลียมในประเทศไทย (Polachan et al., 1991) นอกจากนี้เขตการเลื่อนตัวยังถูกนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาพื้นที่ศักยภาพแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Pailoplee et al., 2009)

การศึกษาเขตการเลื่อนตามแนวระดับของประเทศไทยในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นการศึกษาของชาวต่างประเทศ (i.e. Lacassin et al., 1993, 1997; Palin et al., 2013) ซึ่งยังไม่ครบถ้วน ส่งผลให้ขาดการพัฒนาองค์ความรู้ที่สมบูรณ์ในประเทศไทย การศึกษาลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเขตการเลื่อนตามแนวระดับในครั้งนี้เป็นการพัฒนาองค์ความรู้ทางธรณีวิทยาของประเทศไทยให้สมบูรณ์ มีมาตรฐานเทียบเท่าในระดับนานาชาติ และจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาแหล่งทรัพยากรธรณีที่สำคัญต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของธรณีวิทยาโครงสร้างบริเวณเขตการเลื่อนตามแนวระดับ
2. เพื่ออธิบายประวัติการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเขตการเลื่อนตามแนวระดับในภาคตะวันตกของประเทศไทย

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการตามระเบียบวิธีวิจัยดังต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเขตการเลื่อนตามแนวระดับในภาคตะวันตกของประเทศไทยโดยสืบค้นจากงานวิจัยทั่วโลก
2. ประมวลข้อมูลเชิงพื้นที่เขตการเลื่อนตามแนวระดับในภาคตะวันตกของประเทศไทยจากข้อมูลพื้นฐาน เช่น แผนที่ธรณีวิทยา แผนที่เส้นชั้นความสูง และภาพถ่ายเทียม โดยใช้โปรแกรม ArcGIS เพื่อกำหนดพื้นที่ที่เหมาะสมในการเก็บข้อมูล
3. สืบเสาะภาคสนามเพื่อเก็บตัวอย่างหินชนิดระบุตำแหน่งและข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้าง โดยเขตรอยเลื่อนแม่ปิงบริเวณจังหวัดตาก และเขตแนวรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์บริเวณจังหวัดกาญจนบุรี เป็นหลัก
4. จัดทำตัวอย่างหินขัดและแผ่นหินบางจากตัวอย่างหินชนิดระบุตำแหน่ง
5. วิเคราะห์ข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้างจากภาคสนามร่วมกับตัวอย่างหินขัด
 - 5.1 จำแนกและบันทึกข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้างภาคสนามในโปรแกรมสำหรับกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตรโอโกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า
 - 5.2 ส่งตัวอย่างหินขัดไปวิเคราะห์โครงสร้างเนื้อหินที่ห้องปฏิบัติการเฉพาะทาง
 - 5.3 วิเคราะห์ข้อมูลจากตาข่ายมิติสเตรโอโกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าร่วมกับผลวิเคราะห์โครงสร้างเนื้อหิน
6. วิเคราะห์ข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงโพลาไรซ์จำแนกข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาคจากแผ่นหินบาง
7. อภิปรายและสรุปผล ในเรื่องลักษณะเฉพาะของธรณีวิทยาโครงสร้าง และประวัติการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเขตแนวรอยเลื่อนตามแนวระดับในภาคตะวันตกของประเทศไทย
8. นำเสนอผลการวิจัยในบทความวิชาการ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้างในภาคสนามและระดับจุลภาคจากแผ่นหินบาง จากหินโผล่ที่อยู่ในเขตการเลื่อนตามแนวระดับ ภาคตะวันตกของประเทศไทย

1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว

1. คอมพิวเตอร์ประมวลผล
2. ข้อมูลเชิงพื้นที่ เช่น แผนที่ธรณีวิทยา แผนที่เส้นชั้นความสูง และภาพถ่ายเทียม
3. เครื่องมือธรณีสนาม ได้แก่ ฆ้อนธรณี เข็มทิศ และอื่นๆ
4. โปรแกรม ArcGIS
5. โปรแกรมสำหรับกำหนดตำแหน่งในตาข่ายมิติสเตริ โอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า
6. กล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงโพลาไลซ์

อุปกรณ์ที่ต้องจัดหาเพิ่ม

1. วัสดุสำนักงาน ได้แก่ เครื่องเขียน และอื่นๆ
2. วัสดุสำรวจภาคสนาม ได้แก่ ปากกาเขียนตัวอย่าง ถุงเก็บตัวอย่าง และอื่นๆ
3. วัสดุทำตัวอย่างหินขัดและแผ่นหินบาง ได้แก่ ผงขัด กระจกสไลด์ กาว และอื่นๆ

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

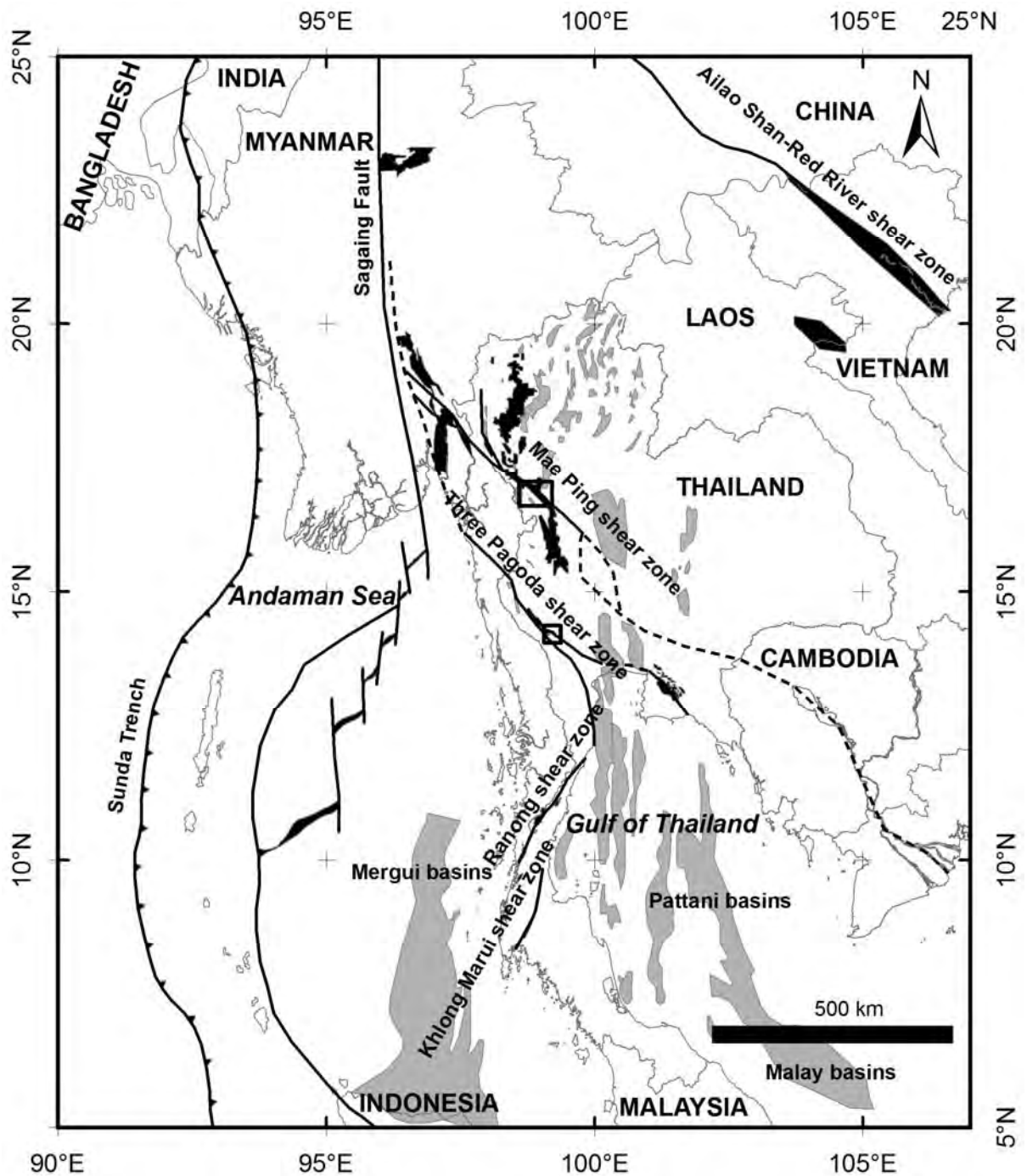
- 1 เขตการเลื่อนตามแนวระดับ ภาคตะวันตกของประเทศไทย โดยเขตรอยเลื่อนแม่ปิงบริเวณจังหวัดตาก และเขตแนวรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์บริเวณจังหวัดกาญจนบุรี เป็นหลัก
- 2 ห้องปฏิบัติการภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ธรณีวิทยาทั่วไป

2.1 ธรณีวิทยาภูมิภาค

เขตการเคลื่อนตามแนวระดับทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ในภาคตะวันตกของประเทศไทย ได้แก่ เขตการเลื่อนแม่ปิงและเจดีย์สามองค์ ได้ถูกรายงานว่าสัมพันธ์กับการแทรกดันของทวีปซึ่งถูกเสนอและอธิบายวิวัฒนาการโครงสร้างของธิเบตและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Tapponnier et al., 1982, 1986) รูปแบบสมมุติฐานนี้ซึ่งเปลือกโลกทวีปหนาทวีปของซุนต้าแลนส์ ธิเบต และจีนได้เกิดการแทรกดันโดยการเคลื่อนที่ของอินเดียด้วยระบบการเคลื่อนตามแนวระดับในทิศตะวันออกเฉียงและตะวันออกเฉียงใต้ (Tapponnier et al., 1986) ทั้งหมดนี้ถูกรายงานด้วยการแทรกดันของซุนต้าแลนส์ไปทางตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งแสดงโดยการเกิดการเคลื่อนที่แบบขวาเข้าของรอยเลื่อนสะกายในพม่า การเคลื่อนที่แบบซ้ายเข้าของรอยเลื่อนอายุลาวหลาน-แม่น้ำแดง รอยเลื่อนแม่ปิง และเจดีย์สามองค์ในประเทศจีนและไทยตามลำดับ (e.g. Tapponnier et al., 1990; Lacassin et al., 1997; Morley et al., 2007) ตรงข้ามกับการแทรกดันของธิเบตในทิศตะวันออกเฉียงที่ถูกรายงานว่าเกิดการเคลื่อนที่แบบขวาเข้าตามรอยเลื่อนคาราโกรัมในปากีสถาน รอยเลื่อนเจียในจีน และการเคลื่อนที่แบบซ้ายเข้าตามอัลทังในจีน (e.g. Tapponnier et al., 1986; Searle et al., 1998; Phillips and Searle, 2007) รอยเลื่อนเหล่านี้ถูกรายงานว่ามีพื้นที่ของหินแปรชั้นสูงและหินอัคนีซึ่งเป็นพื้นที่เป้าหมายสำหรับการศึกษาวิวัฒนาการแปรสัณฐาน กระบวนการในอดีตทำให้เกิดพื้นที่ขนาดใหญ่ของความเครียดบนด้านข้างของบริเวณการชนกันและถูกทับซ้อนด้วยการเหลื่อมของหินแปรชั้นสูงและหินอัคนีเกิดขึ้นบนเขตการเลื่อนตามแนวระดับซึ่งรวมถึงเขตรอยเลื่อนแม่ปิงและเจดีย์สามองค์ (Lacassin et al., 1997) รูปแบบของการแทรกดันยุคเทอร์เทียร์และการเปิดของทะเลจีนใต้ในเขตรอยเลื่อนอายุลาวหลาน-แม่น้ำแดงถูกเสนอว่าเกิดการเคลื่อนที่แบบซ้ายเข้าภายใต้สภาวะอ่อนนุ่มในช่วงอีโอซีนถึงโอลิโกซีน (Lacassin et al., 1997) อย่างไรก็ตามการศึกษาในปัจจุบันรายงานว่าการเคลื่อนที่ตามแนวระดับภายใต้สภาวะอ่อนนุ่มไม่มีความเกี่ยวข้องกับการชนกันของอินเดียและเอเชีย (e.g. Palin et al., 2013) และการศึกษาบางงานในธิเบตและเขตรอยเลื่อนอายุลาวหลาน-แม่น้ำแดงขัดแย้งกับรูปแบบการแทรกดันของทวีป (e.g. Searle, 2006; Searle et al., 2010, 2011)

หินโผล่ของหินแปรชั้นสูงและหินอัคนีในบริเวณใกล้เคียงธิเบตมีความสำคัญที่จะเป็นกุญแจสำหรับการกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่และช่วงเวลาของวิวัฒนาการแปรสัณฐาน (e.g. Lacassin et al., 1997; Palin et al., 2013) ในประเทศไทยหินเหล่านี้โผล่ตามแนวรอยเลื่อนแม่ปิง เจดีย์สามองค์ ระนอง และคลองมะรุ่ย (Lacassin et al., 1997; Kanjanapayont et al., 2012a; Nantasit et al., 2012; Palin et al., 2013) (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ธรณีวิทยาแปรสัณฐานของประเทศไทยแสดงเขตรอยเลื่อนตามแนวระดับหลักและโครงสร้างที่สัมพันธ์ ได้แก่ เขตรอยเลื่อนแม่ปิง เขตรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ เขตรอยเลื่อนระนอง และเขตรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย (ดัดแปลงจาก Macdonald et al., 2010; Mitchell et al., 2012; Morley, 2002; Polachan and Sattayarak, 1989) กรอบสี่เหลี่ยม แสดงตำแหน่งของรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

2.2 ธรณีวิทยาเขตการเลื่อนตามแนวระดับในภาคตะวันตกของประเทศไทย

ระบบการเคลื่อนที่ตามแนวระดับซึ่งเกิดขึ้นทั้งนอกและในประเทศไทยมีความสำคัญในการตีความวิวัฒนาการแปรสัณฐานของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ระบบนี้มีการวางตัวซึ่งอ้างอิงถึงการเคลื่อนที่ไปทางเหนือของแผ่นอินเดียและการหมุนตามเข็มนาฬิกาของแผ่นเอเชียตามขอบด้านตะวันตกของหิมาลัย (e.g. Tapponnier et al., 1982; 1986; Leloup et al., 1995) โครงสร้างที่โดดเด่นใกล้กับประเทศไทยคือรอยเลื่อนสะกายแบบขวาเข้าทิศเหนือ-ใต้ในพม่าและเขตรอยเลื่อนอายุลาवान-แม่น้ำแดงแบบซ้ายเข้าในจีน ในประเทศไทยโครงสร้างการเคลื่อนที่ตามแนวระดับหลักประกอบด้วยรอยเขตรอยเลื่อนแม่ปิงและเจดีย์สามองค์แบบซ้ายเข้าในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และเขตรอยเลื่อนระนองและคลองมะรุ่ยแบบขวาเข้าในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (Kanjapayont et al., 2012a) เขตรอยเลื่อนแม่ปิงและเจดีย์สามองค์ซึ่งมีระบบการเคลื่อนที่ตามแนวระดับแบบซ้ายเข้าอาจแยกแขนงมาจากรอยเลื่อนสะกายในพม่าแม้ว่ารอยต่อจะไม่มีกรารายงานมาก่อนซึ่งทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ดังกล่าวยังคงคลุมเครือ การตีความของนักธรณีวิทยาหลายคนยังต่อขยายเขตการเลื่อนตัวตามแนวระดับแม่ปิงไปถึงรอยเลื่อนแกลงในภาคตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศไทยอีกด้วย (Lacassin et al., 1993, 1997; Leloup et al., 1995; Gilley et al., 2003; Gead, 2008; Nantasin et al., 2012) ซึ่งมีการรายงานว่ามีการเลื่อนแบบซ้ายเข้าภายใต้สภาวะอ่อนนุ่มในสมัยอีโอซีน (Kanjapayont et al., 2013) เขตรอยเลื่อนระนองและคลองมะรุ่ยในภาคใต้ของประเทศไทยถูกอ้างถึงว่าเป็นส่วนขยายจากขอบทวีปและแอ่งเมอร์กูยถึงอ่าวไทยจากด้านตะวันตกไปด้านตะวันออก (Tapponnier et al., 1986; Lacassin et al., 1997; Charusiri et al., 2002) เขตรอยเลื่อนตามแนวระดับทั้งหมดนี้แสดงทิศทางการเลื่อนในสมัยอีโอซีน (Lacassin et al., 1997; Watkinson et al., 2011; Kanjanapayont et al., 2012b; Nantasin et al., 2012; Palin et al., 2013)

รอยเลื่อนแม่ปิงและเจดีย์สามองค์มีการเลื่อนแบบซ้ายเข้าตัดแนวหินแปรและหินอัคนีที่เรียกว่าแนวเชิงใหม่-ลินคาง (e.g. Lacassin et al., 1993; Palin et al., 2013) แนวเหนือ-ใต้นี้เป็นส่วนที่ถูกโครงสร้างทับซ้อนบริเวณตะวันตกของประเทศไทยซึ่งมีจุดที่แสดงรูปร่างสามเหลี่ยมที่มุมด้านเหนือของอินโดจีน แนวเชิงใหม่-ลินคางกว้างประมาณ 70 กิโลเมตรและเหลื่อมด้วยระบบการเลื่อนตามแนวระดับจำนวนมาก เช่น เขตรอยเลื่อนแม่ปิงและเจดีย์สามองค์ หินแปรชั้นสูงของพาราไนส์ ออโทไนส์ และไมก้าชีสต์ เกิดขึ้นภายในแนวเชิงใหม่-ลินคางและบางส่วนถูกเฉือนและโผล่ให้เห็นภายในบริเวณเขตรอยเลื่อนแม่ปิงและเจดีย์สามองค์ (Lacassin et al., 1997; Nantasin et al., 2012; Palin et al., 2013) ในช่วงเวลาแรกหินปิดทับที่มีการแปรสภาพน้อยกว่ายุคพาลีโอโซอิกทำให้เข้าใจว่าหินแปรชั้นสูงนี้มีอายุพรีแคมเบรียน (Department of Mineral Resources, 1982) หลังจากนั้นหินจึงถูกเปลี่ยนลักษณะไปสู่หินมิกมาไทต์และภายหลังถูกแทรกดันด้วยมวลหินแกรนิตยุคเพอร์โม-ไทรแอสซิกเป็นหลัก กระบวนการเกิดมิกมาไทต์พร้อมการแปรสัณฐานและการแทรกดันของหินแกรนิตเกี่ยวข้องกับกระบวนการสองอย่างที่สำคัญคือการแปรสภาพขั้นสูงในช่วงอายุเพอร์โม-ไทรแอสซิก และการเกิดหินอัคนีและหินแปรในแนวเชิงใหม่-ลินคางในช่วงอายุครีเตเชียสและเทอร์เทียรี (Lacassin et al., 1997)

เขตรอยเลื่อนแม่ปิงในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้มีขนาดมากกว่า 600 กม.พาดผ่านประเทศไทย ทำให้เกิดรูปแบบการเคลื่อนที่ตามแนวระดับคู่เพลกจำนวนมากและการโผล่ของหินแกรนิต-ไนส์ที่ซับซ้อนประมาณ 120-150 กม. ซึ่งถูกใช้สำหรับการประมาณการเคลื่อนที่ (Lacassin et al., 1997) ธรณีวิทยาของ

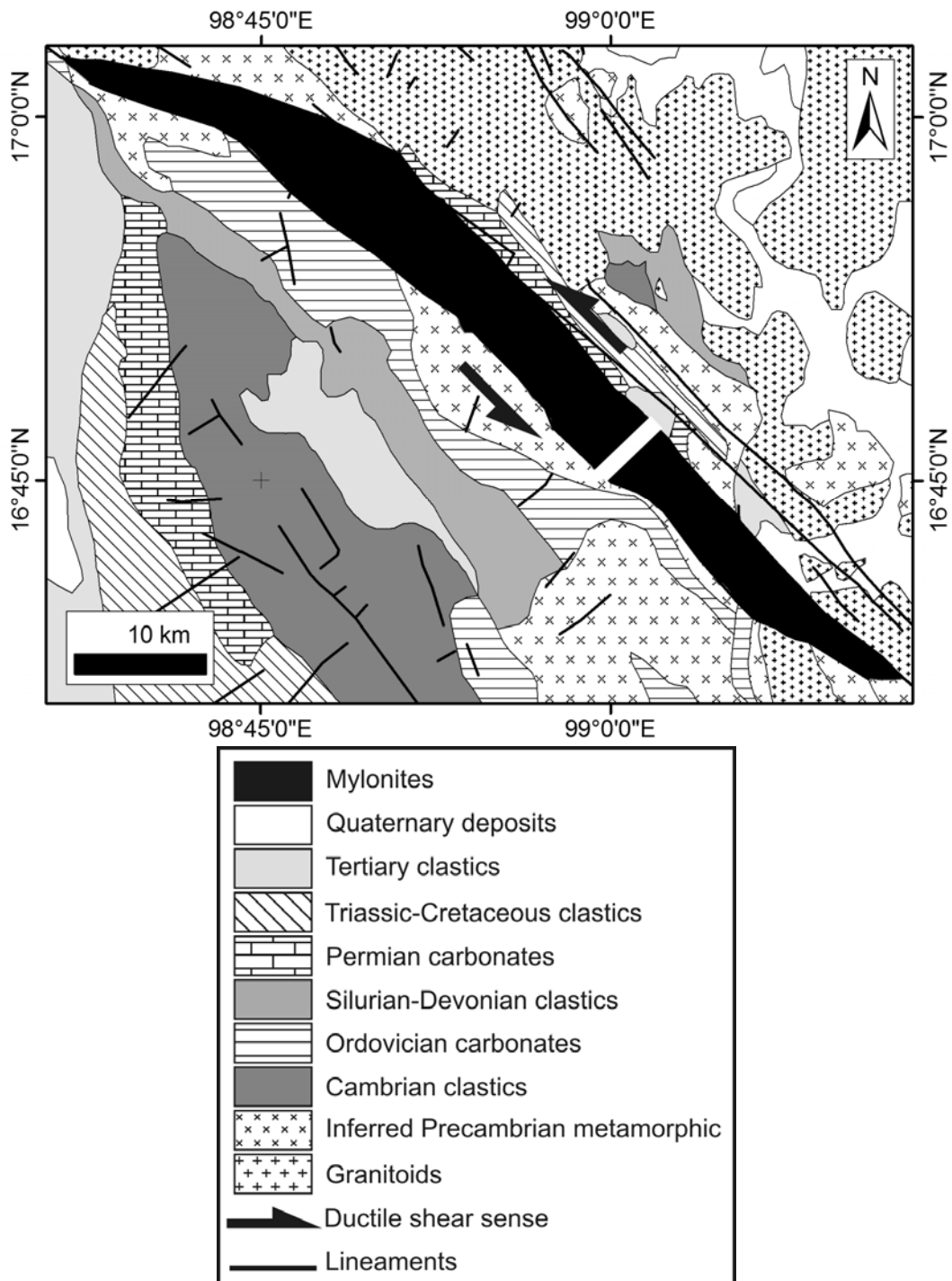
เขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงโดยหินไมโลไนต์อโทไนต์และพาราไนต์ที่เรียกว่าลานสางไนต์ที่จังหวัดตากในภาคตะวันตกของประเทศไทย (รูปที่ 2.2) การศึกษาสิลาเวลารรณาในอดีตชี้ให้เห็นว่าลานสางไนต์ประกอบขึ้นจากหินอโทไนต์ หินพาราไนต์ที่มีการเปลี่ยนลักษณะรุนแรง สายเพกมาไทต์ ควอตซ์และหินแกรนิตขนาดเล็ก หินไนต์ที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ ไบโอไทต์ เป็นหินที่พบมากที่สุดเท่า ๆ กับหินแคลซิลิเกตและหินอ่อน หินเหล่านี้เกิดเป็นแถบของชั้นหินไมโลไนต์บาง ๆ ซึ่งทั้งขนานไปกับริวขนานและชั้นรอบ ๆ หินไนต์ และสลับกับหินพาราไนต์ ไมก้าชีสต์ สายแร่เพกมาไทต์ที่ถูกเปลี่ยนลักษณะ และอโทไนต์ หินแคลซิลิเกตประกอบด้วยชั้นสีเขียวและสีน้ำตาลของแร่ควอตซ์ เฟลซิโอเคลส ไพรอกซีน ฮอนเบรน แคลไซต์ มัสโคไวต์ และการ์เนต หินอ่อนประกอบด้วยชั้นหินสีค้ำซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยแคลไซต์และในชั้นหินนี้มีโครงสร้างบุนดินของหินแคลซิลิเกตและหินแกรนิตสีขาว

การศึกษาการกำหนดอายุทางธรณีวิทยาในช่วงแรกมีการกำหนดอายุโดยใช้ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ของหินไนต์ลานสางตามเขตรอยเลื่อนแม่ปิงตีความว่าการเปลี่ยนลักษณะแบบซ่ายเข้าภายใต้สภาวะอ่อนนุ่มสิ้นสุดประมาณ 30.5 ล้านปี และแนวหินแปรและหินอัคนีอายุมีโซโซอิกตอนล่างของภาคเหนือประเทศไทยเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในช่วงอายุเทอร์เทียรีหรือประมาณ 23 ล้านปี (Lacassin et al., 1997) การเคลื่อนที่แบบซ่ายเข้านี้เกิดขึ้นหลังจากการเคลื่อนที่ของทวีปอินเดียสู่ทวีปเอเชียซึ่งภายหลังเกิดการหมุนและผลัดชั้นส่วนขนาดใหญ่ของอินโดจีนไปทางตะวันออกเฉียงใต้ไปสู่การเกิดทะเลจีนใต้ (Lacassin et al., 1993; 1997) ตามผลการศึกษาดังกล่าวนี้การแทรกดันของส่วนของอินโดจีนเกิดขึ้นในสมัยอีโอซีนตอนบนถึงสมัยโอลิโกซีนตอนล่างและอายุนี้เป็นหลักฐานของเขตรอยเลื่อนแบบซ่ายเข้าภายใต้สภาวะอ่อนนุ่ม นอกจากนี้ผลการศึกษายังใช้สำหรับรูปแบบวิวัฒนาการแปรสัณฐานของรอยเลื่อนตามแนวระดับหลักของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ทางเหนือของมุด้านตะวันออกเฉียงใต้

ต่อมาการวิเคราะห์การกำหนดอายุทางธรณีวิทยาของแร่โมนาไซต์ในหินอโทไนต์ที่ถูกเลื่อนนำไปสู่การศึกษาของสองเหตุการณ์การตกผลึกใหม่ (Palin et al., 2013) ในพื้นที่แกนได้อายุ 114-123 ล้านปี ในขณะที่ส่วนพื้นที่ขอบแสดงอายุที่อ่อนกว่า 37-45 ล้านปี ตามผลอายุนี้การเลื่อนแบบอ่อนนุ่มตามรอยเลื่อนแม่ปิงเกิดขึ้นระหว่างหรือหลังจากเหตุการณ์แปรสภาพซึ่งเป็นเหตุการณ์สุดท้ายของการเกิดการแปรสภาพระหว่างสมัยอีโอซีน นอกจากนี้การวิเคราะห์แร่โมนาไซต์จากผนังหินหินแกรนิตซึ่งแทรกดันหินแปรที่เขื่อนภูมิพลได้อายุ 66.2 ± 1.6 ล้านปี อายุนี้ตีความว่ารอยเลื่อนแม่ปิงมีการตัดก่อนการเกิดหินอัคนีและหินแปรชั้นสูง อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ปัจจุบันนี้สรุปว่าทั้งการแปรสภาพและการเย็นตัวทั้งหมดไม่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ตามแนวระดับและการเปลี่ยนลักษณะในมหาสมุทรไซโนโซอิกที่เขตรอยเลื่อนแม่ปิงไม่สัมพันธ์กับธรณีแปรสัณฐานแทรกดัน (Palin et al., 2013)

การศึกษาการยื้อตำแหน่งพื้นผิวของการเหยียดของชั้นบุนดิน (boudinage restoration) เพื่อประมาณความเครียดขั้นต่ำในหินไมโลไนต์ไนต์ของเขตรอยเลื่อนวังเจ้าหรือรอยเลื่อนแม่ปิง ประเทศไทย แสดงค่าการยืดในแนวขนานกับชั้นหินอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 250-786 (Lacassin et al., 1993) การศึกษานี้แสดงค่าการยืดที่เป็นขอบเขตของความเค้นเลื่อนในเขตรอยเลื่อนขนาดใหญ่นี้ หากเป็นการเลื่อนแบบซิมเพิล (simple shear) ค่านี้แสดงถึงค่าน้อยสุดและความเครียดเลื่อนสุดท้าย (shear strain) 7 ± 4 จากข้อมูลหลายตำแหน่งตามเขตรอยเลื่อน

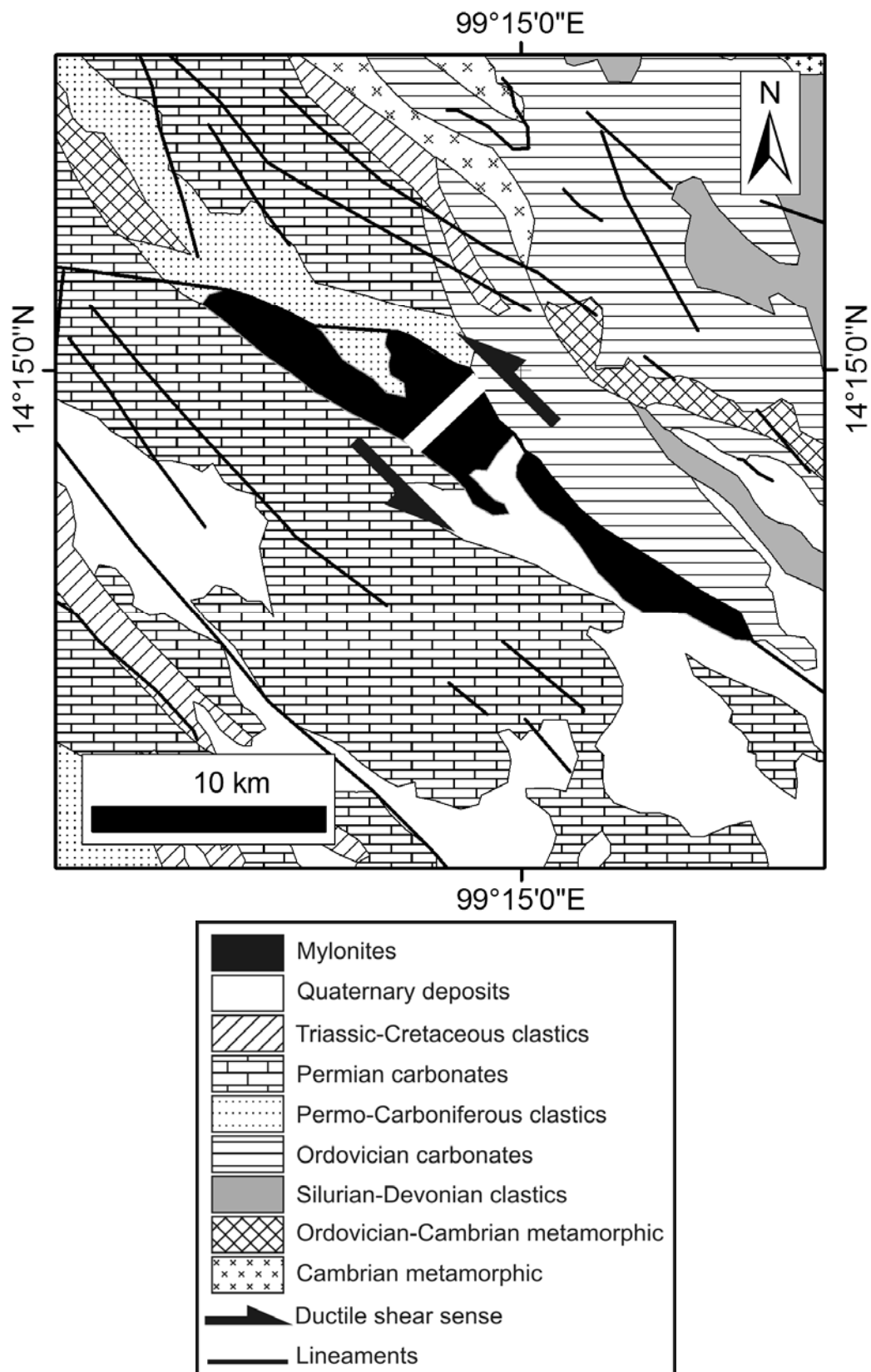
แม่ปิ้ง หากเป็นการเลื่อนแบบเนื้อเดียวจะสรุปได้ว่าการเคลื่อนที่ตามแนวระดับตามเขตรอยเลื่อนแนวระดับสองแห่งนี้ซึ่งถูกตีความว่าเป็นผลจากการชนกันของอินเดีย-เอเชียว่ามีระยะ 35 กิโลเมตร



รูปที่ 2.2 แผนที่แสดงธรณีวิทยาของเขตรอยเลื่อนแม่ปิ้ง (คัดแปลงจาก Department of Mineral Resources, 1982) แถบสีขาวแสดงแนวการสำรวจในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้

เขตรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้แสดงโดยหิน ในสัที่เรียกว่าทับศิลาในสัที่จังหวัดกาญจนบุรีในภาคตะวันตกของประเทศไทย (รูปที่ 2.3) พื้นที่รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ประกอบไปด้วยหินตะกอนที่มีอายุในช่วงแคมเบรียนถึงจูแรสซิก หินแปรเป็นส่วนน้อย และหินที่มีลักษณะโครงสร้างแบบหินอัคนี โดยหินที่พบส่วนใหญ่ในพื้นที่คือหินปูนซึ่งมีทั้งประเภทที่เป็นหินปูนเนื้อดินยุคอโควิเซียน และหินปูนที่มีเนื้อแน่นยุคเพอร์เมียนในหินตะกอนเนื้อประสมทั้งที่อยู่ในรูปแบบเลนส์และแบบชั้นบางๆ วางตัวขนานกับแนวรอยเลื่อนพบเป็นส่วนน้อยในพื้นที่

หินทับศิลาในสัที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มตามลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางโครงสร้างของหิน (Nantasin et al., 2012) โดยกลุ่มแรกนั้นเรียกว่า Unit A ประกอบไปด้วยหินอ่อน สอดแทรกด้วยหิน ไมกาชีสต์ และหินไบโอไทต์ในสัเนื้อละเอียด รวมถึงหินหินควอร์ตไซต์ โดยกลุ่มนี้วางตัวอยู่ด้านตะวันออกเฉียงเหนือของหินแปรทับศิลา และพบหินโคล์ที่ทำมุมกดชันกับแนวการเรียงตัวของแร่ที่วางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ กลุ่มที่สองหรือ Unit B ประกอบไปด้วยหินในสัที่แสดงลักษณะการเลื่อน และหินไมโลไนต์ที่สอดแทรกด้วยหินแคลก์ซิลิเกต โดยหินกลุ่มนี้พบในลักษณะเป็นชั้นบางยาวประมาณ 500 เมตรวางตัววางกลุ่มแรกหรือ Unit A ที่วางตัวอยู่ข้างเคียง ลักษณะของเนื้อหินในสัที่แสดงลักษณะถูกเลื่อน ในพื้นที่บางครั้งพบมีลักษณะเป็นรูปดา ภายในแนวรี้วขนาน ส่วนหินแคลก์ซิลิเกตซึ่งพบเป็นส่วนน้อยในพื้นที่พบว่าเกิดในลักษณะโครงสร้างแบบบูดินหรือชั้นหินที่มีการคดโค้งรุนแรงภายในเนื้อของหินในสัที่แสดงลักษณะชั้นหินคดโค้ง และลักษณะของโครงสร้างบูดินไดออปไซค์ที่ไม่สมมาตรแสดงให้เห็นถึงทิศทางการเลื่อนแบบยืดหยุ่นแบบซ้ายเข้าพบแนวการวางตัวของแร่อยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และทำมุมประมาณ 70° ถึง 80° กลุ่มที่สามหรือ Unit C ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยหินแคลก์ซิลิเกต กลุ่มหินนี้พบวางตัวอยู่บริเวณตอนกลางของโครงสร้างหินแปรทับศิลาที่ซับซ้อน แนวการวางตัวของหินแคลก์ซิลิเกตขนานไปกับแนวการวางตัวของรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ แต่มุมกดชันของแนวหินทำมุมที่แตกต่างออกไปโดยแนวหินส่วนใหญ่จะทำมุมเฉียงเทประมาณ 70° ถึง 80° ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือหรือตะวันตกเฉียงใต้ และพบลักษณะของแนวการเรียงตัวของแร่ที่มีการยืดออกในแนวระนาบ และระนาบของรอยเลื่อนที่อยู่ในแนวตั้ง ในหินกลุ่มนี้เช่นเดียวกับที่พบในแนวรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ หินแคลก์ซิลิเกตในกลุ่มนี้มักเกิดเป็นชั้นหนาของแร่สีขาวซึ่งประกอบไปด้วยชั้นของไดออปไซค์สลับกับชั้นหินอ่อนที่เกือบบริสุทธิ์ นอกจากนี้ในบริเวณกลุ่มนี้ ยังพบลักษณะที่กลุ่มแกนของโครงสร้างชั้นหินคดโค้งที่อยู่กันอย่างหนาแน่น วางตัวขนานกับแนวการเรียงตัวของแร่ที่มีการยืดออก ส่วนบริเวณด้านตะวันตกของกลุ่มนี้เป็นพื้นที่รอยต่อกับกลุ่มที่สี่หรือ Unit D โดยภายในพื้นที่รอยต่อนี้ พบชั้นบางๆ ของแร่คาร์เนต-ฟรี แอมฟิโบไลต์ ซึ่งต่อมาเปลี่ยนไปเป็นหินไบโอไทต์ในสั โครงสร้างชั้นหินคดโค้งที่อยู่กันอย่างหนาแน่นพบเป็นส่วนใหญ่ในพื้นที่บริเวณนี้ กลุ่มสุดท้ายหรือ Unit D ในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยหินไบโอไทต์ในสั หินอโควิเซียน และหินซิลิมาไนต์ในสั ซึ่งหินในกลุ่มนี้จะพบการสอดแทรกของหินแคลก์ซิลิเกตน้อยมาก ระนาบรี้วขนานวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และทำมุมเฉียงเทประมาณ 60° ถึง 85° และแนวการเรียงตัวของแร่ที่มีการยืดออกวางตัวสอดคล้องกับระนาบการเรียงตัวของแร่ในทิศทางเดียวกัน ในเนื้อหินไบโอไทต์ในสั มักพบโครงสร้างรูปดาของแร่เฟลด์สปาร์ ถูกล้อมรอบด้วยพื้นหินเป็นแร่ควอตซ์ที่แสดงลักษณะถูกเลื่อน



รูปที่ 2.3 แผนที่แสดงธรณีวิทยาของเขตรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ (ดัดแปลงจาก Department of Mineral Resources, 1982) แถบสีขาวแสดงแนวการสำรวจในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้

บทที่ 3

การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้าง

การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างประกอบด้วยวิธีการศึกษาในมาตราส่วนระดับมหภาค ระดับมัชฌิมภาค และระดับจุลภาค ข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้างในแต่ละมาตราส่วนอาจแสดงลักษณะทางธรณีวิทยาได้หลากหลาย เช่น ทิศทางการวางตัวของระนาบ แนวการวางตัวของริ้วขนาน แนวแตก แนวรอยเลื่อน เป็นต้น การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้างระดับมัชฌิมภาคและระดับจุลภาคซึ่งน่าจะมีความสัมพันธ์กับเขตการเลื่อนตามแนวระดับในภาคตะวันตกของประเทศไทย

3.1 การประมวลข้อมูลเชิงพื้นที่

แนวการสำรวจในการเก็บข้อมูลภาคสนามประเมินจากข้อมูลธรณีวิทยาจากแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณีปี 1982 แผนที่เส้นชั้นความสูง และภาพดาวเทียม ซึ่งแสดงขอบเขตและทิศทางแนวการวางตัวของเขตรอยเลื่อนแม่ปิงและเจดีย์สามองค์ ซึ่งเป็นเขตการเลื่อนตามแนวระดับหลักที่อยู่ในภาคตะวันออกของประเทศไทย (รูปที่ 2.1)

3.2 การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้าง

ตัวอย่างหินที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหินในสัณฐานสูงถูกเก็บตามน้ำตกลานสูงในจังหวัดตาก ภาคตะวันตกของประเทศไทย ตัวอย่างนี้ถูกเก็บแบบเส้นทางสำรวจประกอบด้วยตำแหน่งและการวางตัวของหินโผล่ซึ่งบันทึกด้วยระบบจีพีเอส ตำแหน่งตัวอย่างหินถูกกำหนดลงบนแผนที่ธรณีวิทยาของภาคตะวันตกของประเทศไทยด้วยโปรแกรม ArcGIS สำหรับการบรรยายลักษณะเฉพาะทางธรณีวิทยาของเขตรอยเลื่อนแม่ปิงและแผนที่ตำแหน่งตัวอย่าง

ข้อมูลธรณีวิทยาโครงสร้างจะถูกจำแนกและบันทึกเพื่อนำไปสู่การกำหนดตำแหน่งและสร้างเส้นชั้นข้อมูลบนตาข่ายมิติสเตรโอกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่า การจำแนกหินและเนื้อหินแสดงถึงเนื้อหินแบบผลึกเท่าของแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ และไบโอไทต์ ซึ่งให้เห็นถึงแร่ประกอบของหินออร์โทไนส์ ในขณะที่การสลับของแถบแร่สีอ่อนและสีเข้มบ่งชี้แร่ประกอบของหินพาราไนส์ ดังนั้นตัวอย่างหินที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการวิจัยครั้งนี้ถูกจำแนกเป็นหินออร์โทไนส์และพาราไนส์ซึ่งภายหลังตัวอย่างหินชนิดระบุตำแหน่งถูกตัดตั้งฉากกับริ้วขนานและขนานกับทิศทางโครงสร้างชนิดเส้นซึ่งแสดงระนาบการเลื่อน

3.3 การวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาค

แผ่นหินบางหลากหลายของแต่ละตัวอย่างถูกศึกษาผ่านกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงโพลาไรซ์เพื่อศึกษา ลักษณะธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในหิน

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณความเครียดของหิน

รูปภาพจากแผ่นหินบางจะนำมาถูกเลือกจุดอ้างอิงความเครียดสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความเครียดเชิงปริมาณตามวิธีของ Fry (Fry, 1979) ตั้งแต่การนำเสนอโดย Ramsay and Huber (1983) วิธีหลากหลายเพื่อการวิเคราะห์ความเครียดเชิงปริมาณของหินในหนึ่ง สอง และสามมิติมีการเพิ่มมากขึ้น วิธีของ Fry เป็นหนึ่งในวิธีที่เน้นสองมิติและถูกอ้างอิงอย่างกว้างขวาง โดยการศึกษาที่ผ่านมาซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและแม่นยำ ทฤษฎีของ Fry ถูกพัฒนาจากเทคนิคของจุดข้างเคียงที่ใกล้จุดศูนย์กลางซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของแต่ละส่วนหรือแร่ซึ่งมีขนาดเท่ากันและอยู่ด้วยกันในสถานะเดียวกัน ดังนั้นเมื่อการเปลี่ยนลักษณะแบบเนื้อเดียวถูกใช้กับส่วนนี้ ระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางส่วนจะเปลี่ยนแปลงด้วยความเครียดและปริมาณของความเครียดและกลไกการเปลี่ยนลักษณะในบริเวณนี้จะแสดงปริมาณและแสดงในรูปของวงรีความเครียดด้วยวิธีของ Fry (Ramsay and Huber, 1983)

วิธีของ Fry ประยุกต์ใช้ภายใต้กล้องจุลทรรศน์สำหรับเลือกส่วนแข็งเกร็งซึ่งเหมาะสมกับสถานะของ Fry สำหรับจุดอ้างอิงความเครียด การเลือกจุดอ้างอิงความเครียดสำหรับการวิเคราะห์ความเครียดเชิงปริมาณโดยวิธีของ Fry ต้องการการจุดอ้างอิงความเครียดที่มีการเปลี่ยนลักษณะเนื้อเดียวและการกระจายตัวของจุดศูนย์กลางจุดอ้างอิงมีความสม่ำเสมอและไม่เป็นกระจุก (Ramsay and Huber, 1983; Genier and Epard, 2007) การศึกษาในอดีตอ้างอิงว่าลักษณะเฉพาะของแร่ที่มีการตกผลึกใหม่สำหรับแร่ควอตซ์เหมาะสมกับวิธีของ Fry เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงความเครียดในการวิเคราะห์ นอกจากนี้หินที่มีการเปลี่ยนลักษณะสำหรับหินในสมัยแร่ควอตซ์ซึ่งจะทำให้การกำหนดตำแหน่งของ Fry และแร่ควอตซ์ซึ่งไม่มีรอยแตกและมีอุณหภูมิการเปลี่ยนลักษณะของเขตรอยเลื่อนแม่ปิงที่ใช้ประโยชน์เพื่อการสังเกตระยะต่ำสุดระหว่างจุดอ้างอิงความเครียด ดังนั้นควอตซ์ที่มีการตกผลึกใหม่ถูกใช้ในความเหมาะสมสำหรับวิธีของ Fry และสามารถใช้เป็นจุดอ้างอิงความเครียดของหิน (Genier and Epard, 2007) และควอตซ์ที่แตกหรือมีขนาดใหญ่จะไม่นำมาใช้เป็นจุดอ้างอิงความเครียดของหิน (Lacassin and Van Den Driessche, 1983)

ด้วยวิธีของ Fry ในท้ายที่สุดการเปลี่ยนลักษณะเนื้อเดียวก็จะแสดงด้วยทรงรีความเครียด ปริมาณของความเครียดสามารถนิยามด้วยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแกนบนระนาบหรืออัตราส่วนของความเครียด (R_s) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแกนที่ยาวที่สุดและสั้นที่สุดของวงรีความเครียดและมุมระหว่างแกนที่ยาวที่สุดของวงรีความเครียดกับขอบการเปลี่ยนลักษณะ (θ)

บทที่ 4

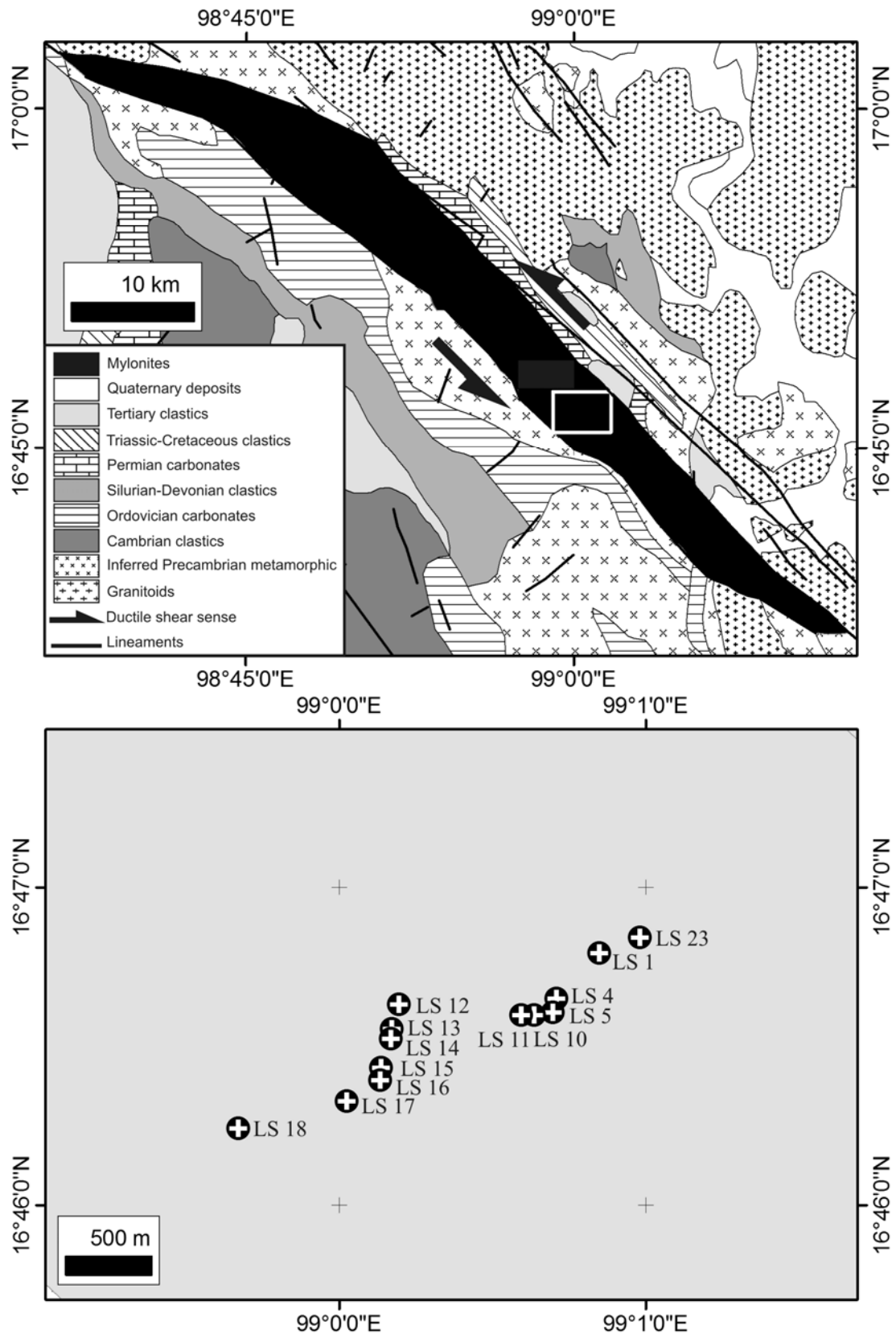
ผลการวิเคราะห์ธรณีวิทยาโครงสร้าง

4.1 ผลการประมวลข้อมูลเชิงพื้นที่

เขตรอยเลื่อนแม่ปิงมีการวางตัวในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ทำให้มีการวางแนวการสำรวจในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งคาดว่าจะทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงลักษณะชัดเจน (รูปที่ 2.2) โดยในเบื้องต้นพื้นที่ที่สามารถเข้าถึงได้คือพื้นที่เขตอุทยานแห่งชาติลานสาง จ.ตาก

เขตรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์มีการวางตัวในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้เช่นเดียวกับเขตรอยเลื่อนแม่ปิง ทำให้มีการวางแนวการสำรวจในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งคาดว่าจะทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นตัวบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงลักษณะชัดเจน (รูปที่ 2.3) โดยในเบื้องต้นพื้นที่ที่สามารถเข้าถึงได้คือพื้นที่บ้านทับศิลา จ.กาญจนบุรี

ผลจากการออกภาคสนามเบื้องต้นพบว่าพื้นที่ที่มีศักยภาพของหิน โผล่ในการวิเคราะห์ธรณีวิทยา โครงสร้างคือเขตรอยเลื่อนแม่ปิง รวมถึงข้อจำกัดด้านเวลาและงบประมาณ โครงการนี้จึงเลือกพื้นที่ศึกษาเขตรอยเลื่อนแม่ปิงเท่านั้น โดยมีตำแหน่งการเก็บตัวอย่างอยู่ในแนวการสำรวจตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ตั้งฉากกับแนวการวางตัวของเขตรอยเลื่อนแม่ปิงในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (รูปที่ 4.1)



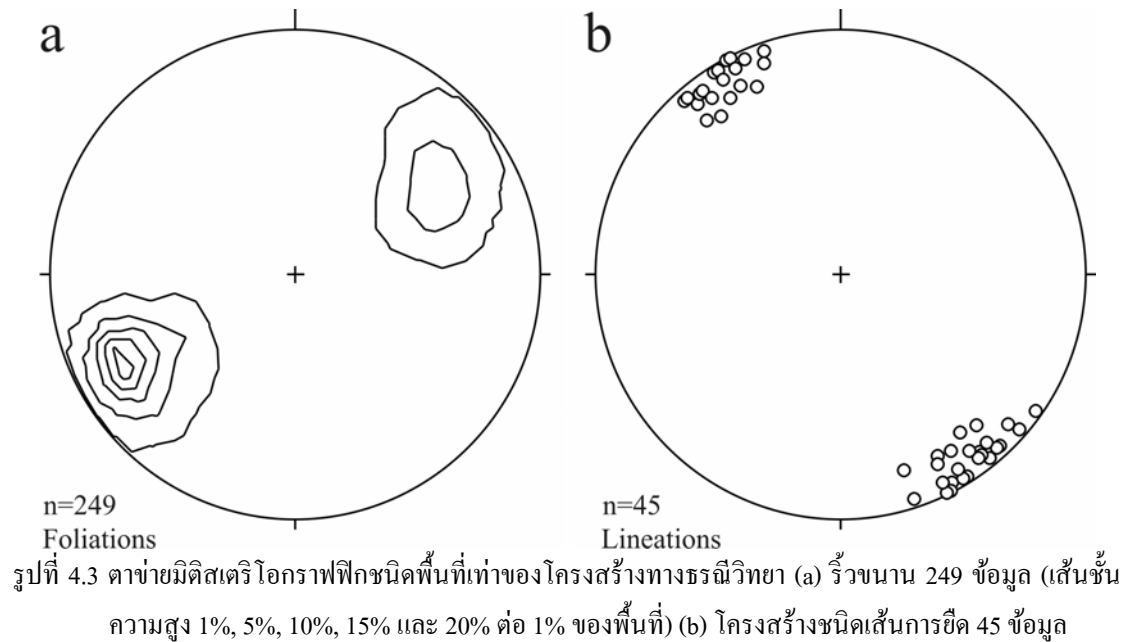
รูปที่ 4.1 กรอบสีขาวแสดงพื้นที่การเก็บตัวอย่างในบริเวณเขตรอยเลื่อนแม่ปิง (ดัดแปลงจาก Department of Mineral Resources, 1982) (บน) ภาพขยายจากกรอบสีขาวรูปบนแสดงตำแหน่งการเก็บตัวอย่างในแนว ตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (ล่าง)

4.2 ธรณีวิทยาโครงสร้าง

ลักษณะเฉพาะของการเปลี่ยนลักษณะภายใต้สภาวะอ่อนนี้มีผลกระทบในหินทุกชนิดในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงซึ่งแสดงด้วยริวขนานชั้นและโครงสร้างชนิดเส้นแนวระดับทั้งในหินอโชนีและพาราไนส์ (รูปที่ 4.2) ริวขนานและแถบของหินอโชนีมีความชันเกือบอยู่ในแนวตั้งในขณะที่หินพาราไนส์มีมุมเอียงเทชันไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันตกเฉียงใต้ด้วยความเบี่ยงเบนมากกว่า ลักษณะเฉพาะของการเลื่อนนำไปสู่ระนาบการเลื่อนที่มีหลากหลายบนระนาบริวขนาน ขั้วของริวขนานถูกกำหนดตำแหน่งและสร้างเส้นชั้นข้อมูลบนภาพถ่ายมิติสเตริโกราฟฟิกชนิดพื้นที่เท่าด้วยวิธีการนับของเกลลาซ์ (Robin and Jowett, 1986) รูปร่างของแนวชั้นข้อมูลแสดงริวขนานไมโลไนต์ในทิศ 150° มุมเอียงเทชันทั้งในทิศตะวันออกเฉียงเหนือและตะวันตกเฉียงใต้ ในขณะที่โครงสร้างชนิดเส้นแร่ชี้แสดงอย่างชัดเจนถึงทิศทางตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (รูปที่ 4.3)

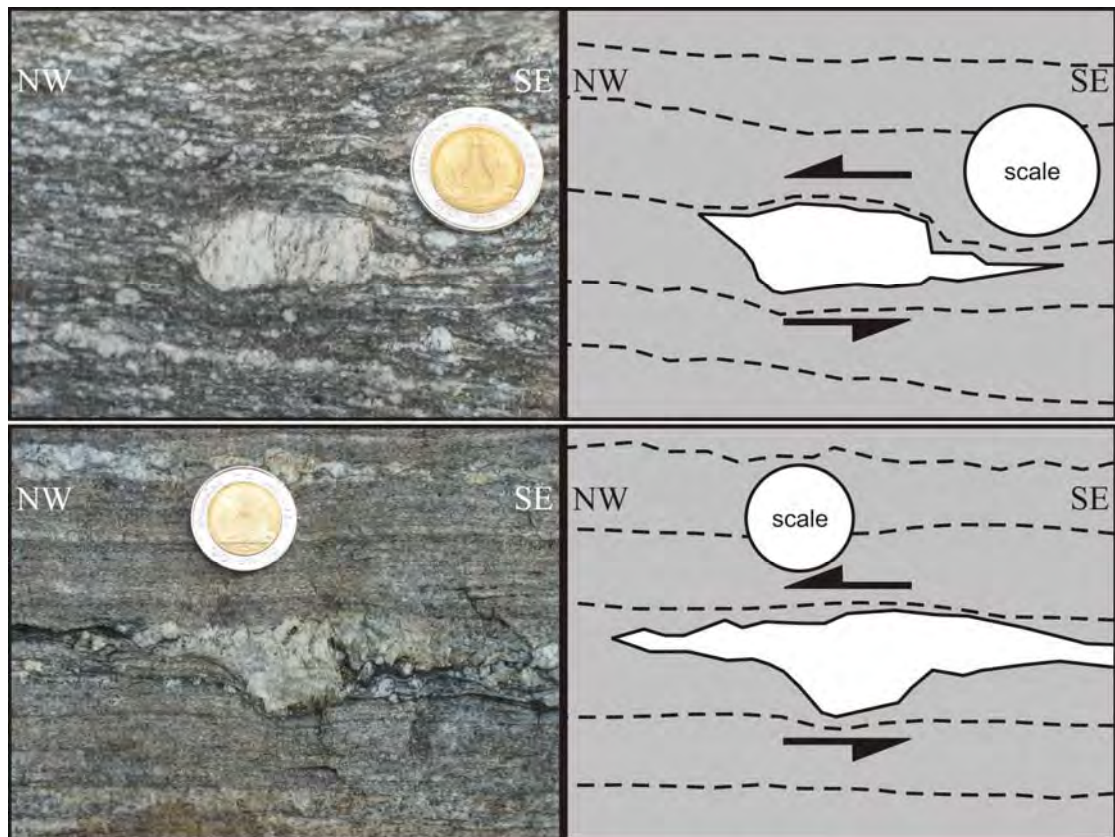


รูปที่ 4.2 รีวงน่านและ โครงสร้างชนิดเส้นในหินออร์โทไนส์ (บน) พาราไนส์ (ล่าง)

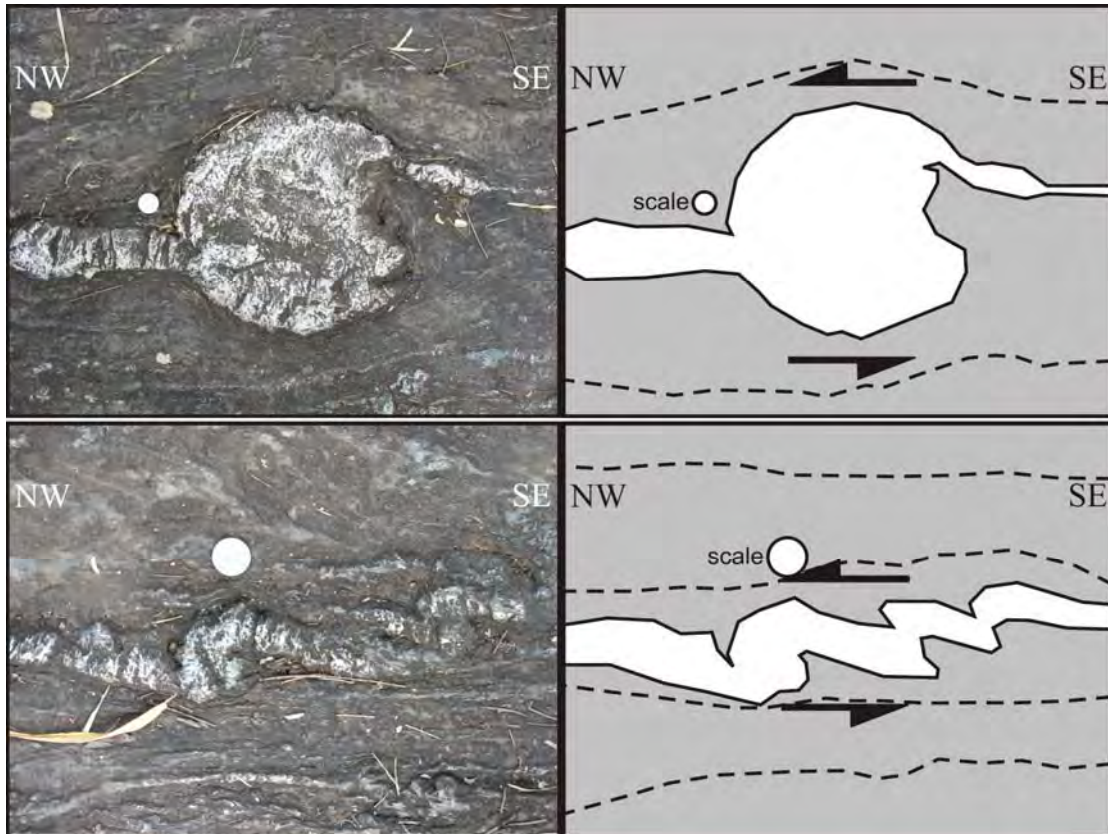


การเปลี่ยนแปลงลักษณะการเลื่อนตามแนวระดับภายใต้สภาวะอ่อนนุ่มของลักษณะอดีตในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงโดยโครงสร้างเฉือน โครงสร้าง σ เส้น S-C และ S-C' มักแสดงด้วยหินออลโซไนต์ ในขณะที่โครงสร้าง δ รอยพับไม่สมมาตร (รูปที่ 4.4) แถบเฉือน และโครงสร้างโดมิโนพบได้ในหินพาราไนส์ โครงสร้าง σ แสดงทั่วไปในแร่เฟลด์สปาร์หรือชั้นที่มีแร่เฟลด์สปาร์มาก (รูปที่ 4.5) ควอตซ์และเฟลด์สปาร์ของชั้นแทรกสลับในหินแคลซิลิกเกตมักเกิดโครงสร้างกึ่งหมุนวนในเนื้อพื้นหินที่ถูกเฉือนรุนแรง ตัวชี้บ่งการเคลื่อนที่ทั้งหมดในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงลักษณะการเลื่อนตามแนวระดับแบบซ้ายเข้า

โครงสร้างบูดินภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงด้วยสายแร่สีขาวที่ขนานกับริวขนานไมโลไนต์ โครงสร้างดังกล่าวนี้ก็แสดงการเฉือนแบบซ้ายเข้าอย่างชัดเจนและความเครียดเชิงปริมาณสามารถหาได้ด้วยสมการความเครียดหนึ่งมิติ (Lacassin et al., 1993) การย้อนกลับของโครงสร้างบูดินนำไปสู่ความเครียดเฉือนแบบซิมเปิลที่ต่ำที่สุดมีค่า 7 ± 4 และการเคลื่อนที่ตามแนวระดับที่ต่ำที่สุดตามเขตรอยเลื่อนแบบซ้ายเข้ามีระยะทาง 35 ± 20 กม. (Lacassin et al., 1993) ข้อมูลดังกล่าวบ่งชี้ว่าทิศทางของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงลักษณะถูกควบคุมด้วยทิศทาง การเฉือนและทำให้บริเวณนี้มีลักษณะเฉพาะของเขตการเฉือนแบบซ้ายเข้า (Lacassin et al., 1993)



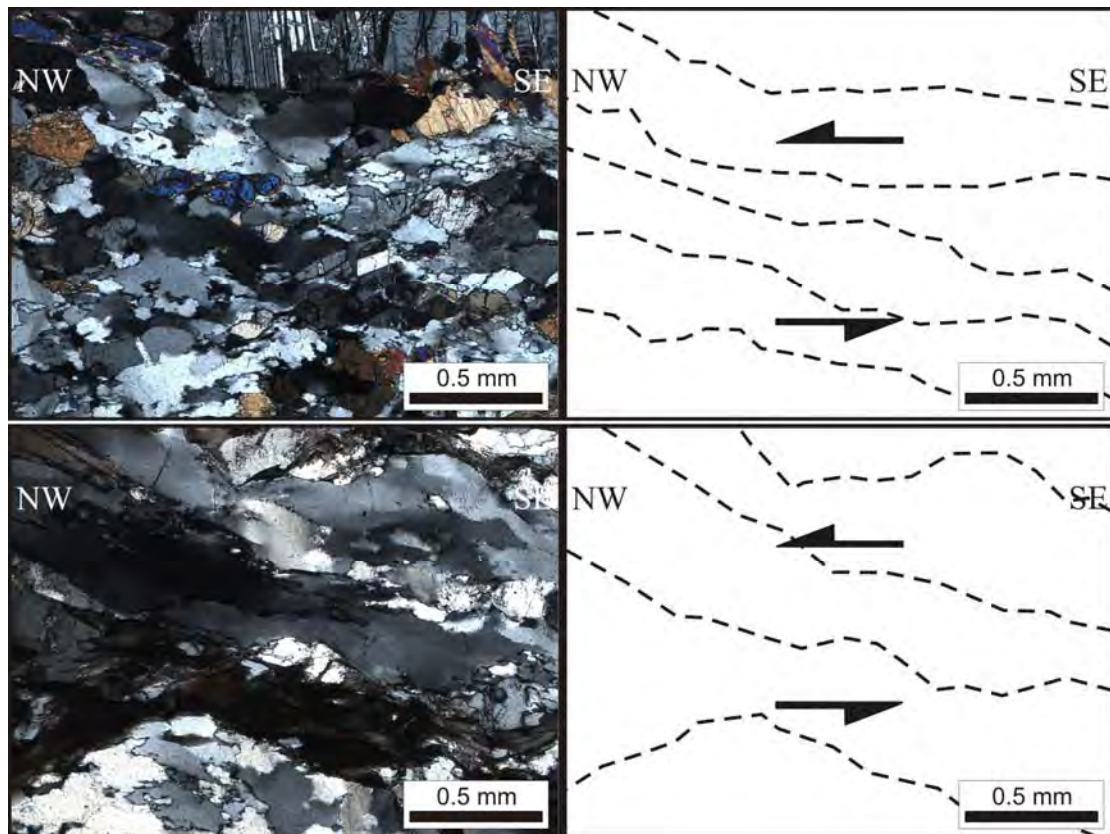
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนลักษณะภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงโครงสร้าง δ แบบซ้ายเข้า (บน) และรอยพับไม่สมมาตรในหินแคลซิติค (ล่าง)



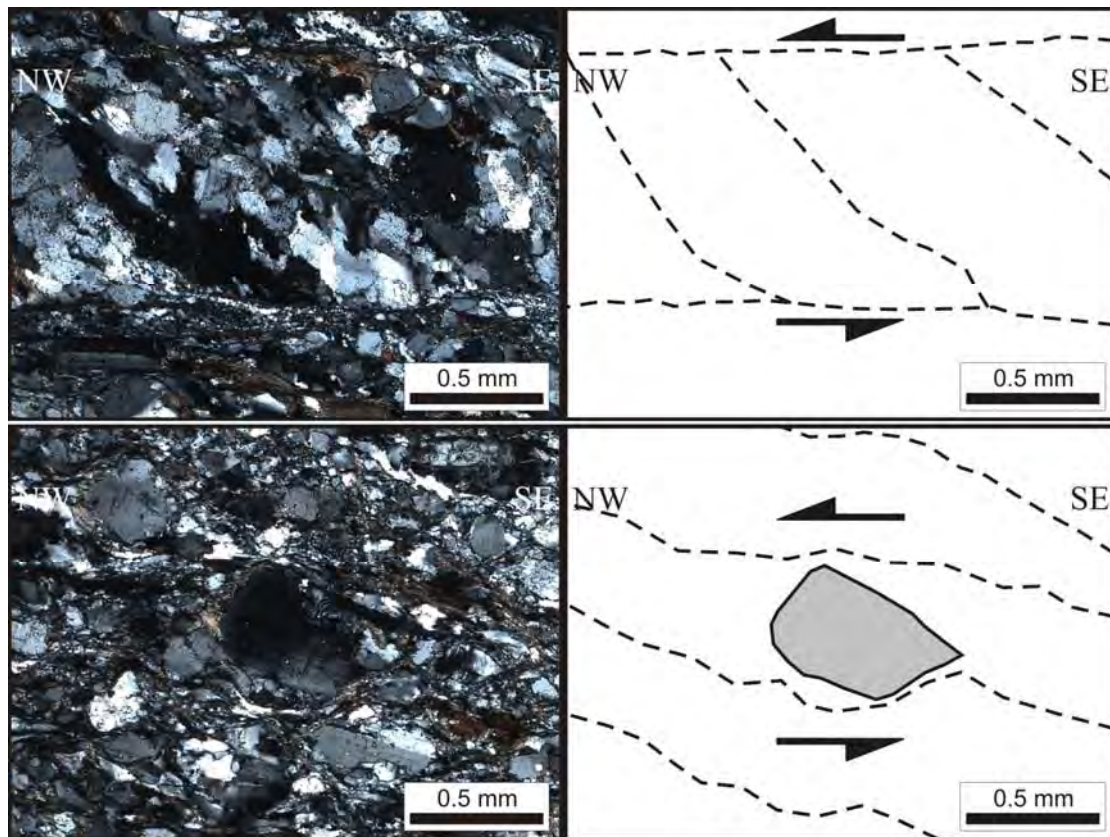
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงลักษณะภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดง โครงสร้าง σ ของแร่เฟลด์สปาร์ (บน) โครงสร้าง σ ในชั้นเฟลด์สปาร์มาก (ล่าง)

4.3 ธรณีวิทยาโครงสร้างจุลภาค

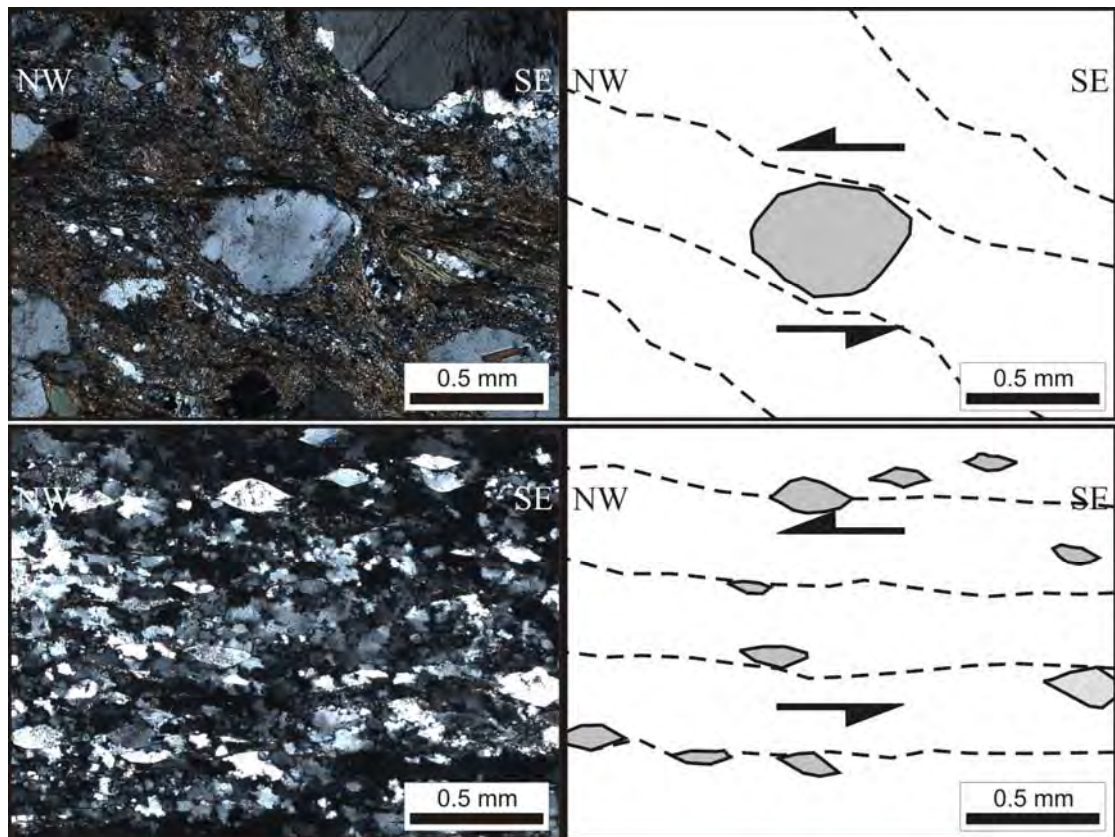
โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างตามเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงการเลื่อนแบบซ้ายเข้าชัดเจนซึ่งแสดงด้วยริวขนานเหลี่ยม โครงสร้างชั้นบันได โครงสร้าง σ พร้อมเงาความเครียด ไมก์ารูปปลา เส้น S-C และ S-C' ระดับจุลภาคของหินออร์โทไนส์แสดง โครงสร้างไมโทไนต์ซึ่งเป็นผลจากควอตซ์และไบโอไทต์เปลี่ยนลักษณะยึดแบบอ่อนนุ่มซึ่งแสดงด้วยการเรียงตัวของรูปร่างอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.6) เช่นเดียวกับควอตซ์ในหินออร์โทไนส์ หินพาราไนส์เกิดผลึกควอตซ์ยึดพร้อมกับรูปร่างเส้นเหลี่ยมกับริวขนานและแถบของหิน ผลึกแร่เฟลด์สปาร์มักเกิด โครงสร้าง σ (รูปที่ 4.7) ทั้งแร่มีสโคไวต์และไบโอไทต์พบผลึกการเลื่อนไม่สมมาตรซึ่งเกิดเช่นเดียวกับไมก์ารูปปลา (รูปที่ 4.8) การไม่สม่ำเสมอทางแสงของแร่ การบดบริเวณฐาน การรูก้ำของแร่ และการเคลื่อนที่ของขอบแร่ตามริวขนานเหลี่ยมบ่งชี้การตกผลึกใหม่แบบไดนามิกส์ในเขตรอยเลื่อนนี้



รูปที่ 4.6 ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินแปรชั้นสูงภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงการไม่สม่ำเสมอทางแสงของแร่และการเคลื่อนที่ของขอบแร่ควอตซ์ (บน) ควอตซ์และไบโอไทต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะแสดงการยืดภายใต้สภาวะอ่อนนุ่ม (ล่าง)



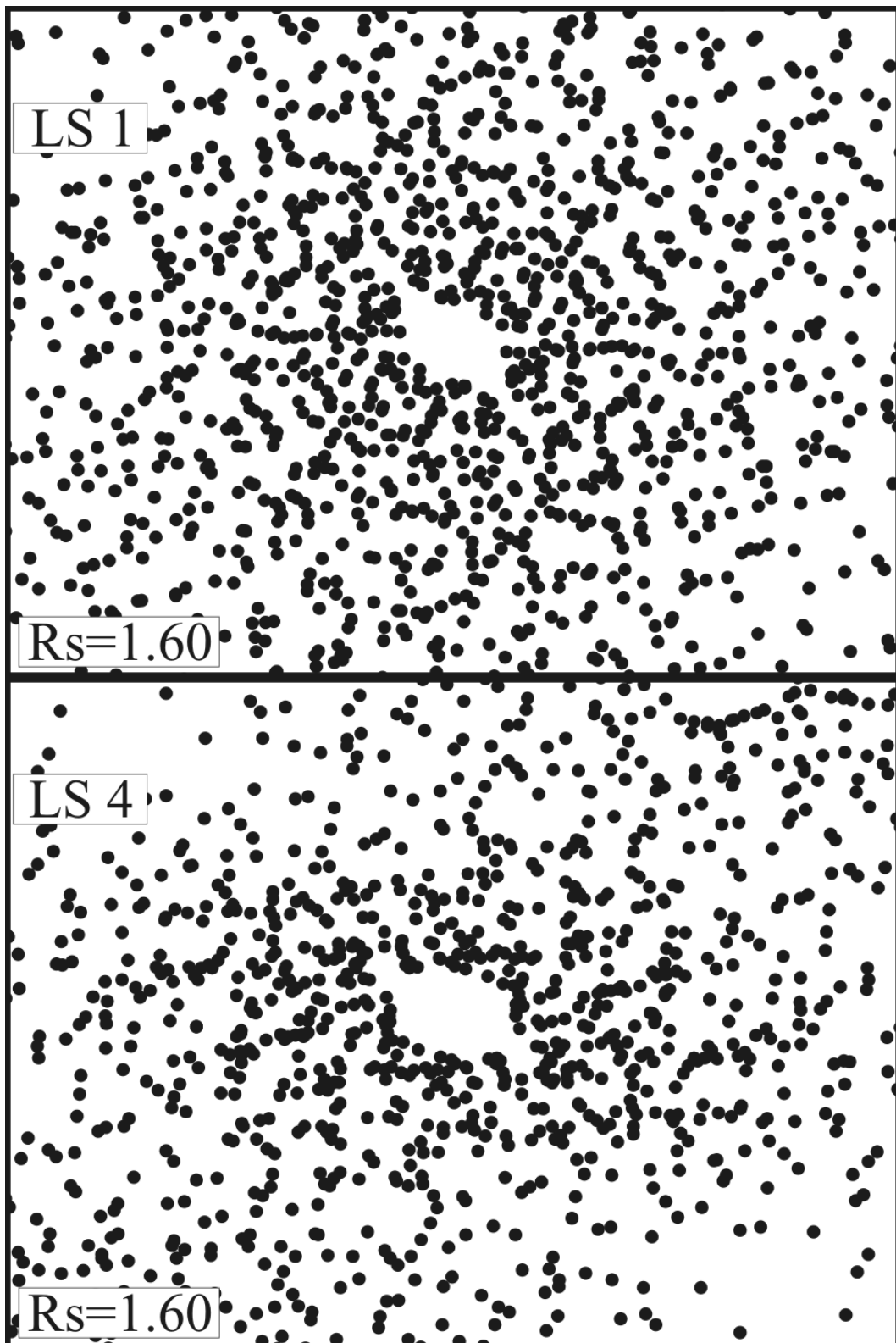
รูปที่ 4.7 ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินแปรชั้นสูงภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงการการเรียงตัวของรูปร่างของควอตซ์ในเส้น S-C (บน) และโครงสร้าง σ ของแร่เฟลด์สปาร์ (ล่าง)



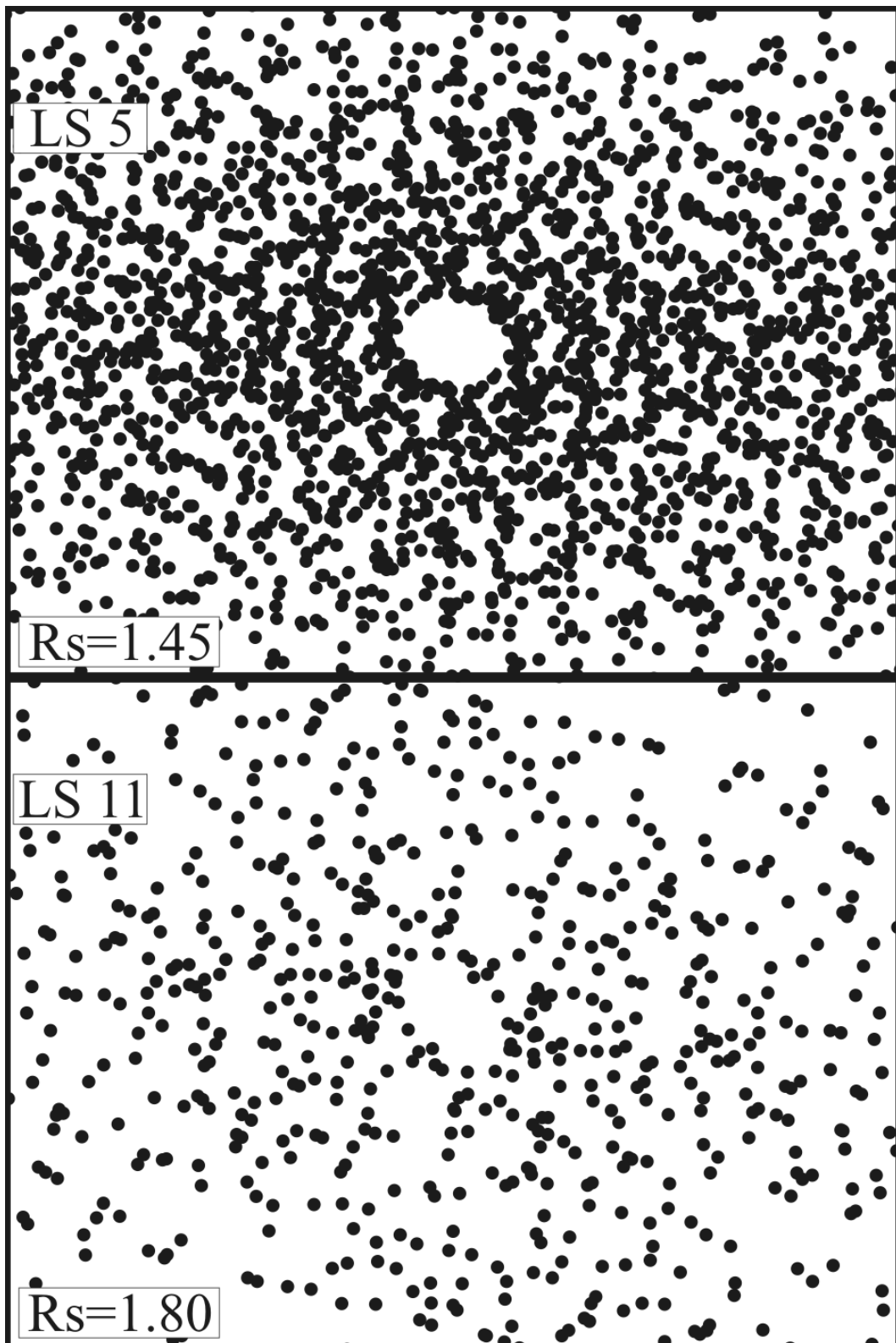
รูปที่ 4.8 ภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินแปรชั้นสูงภายในเขตรอยเลื่อนแม่ปิงแสดงโครงสร้าง σ แบบซ้ายเข้าของแร่เฟลด์สปาร์ (บน) และไมถ้ำรูปปลา (ล่าง)

4.4 ปริมาณความเครียดของหิน

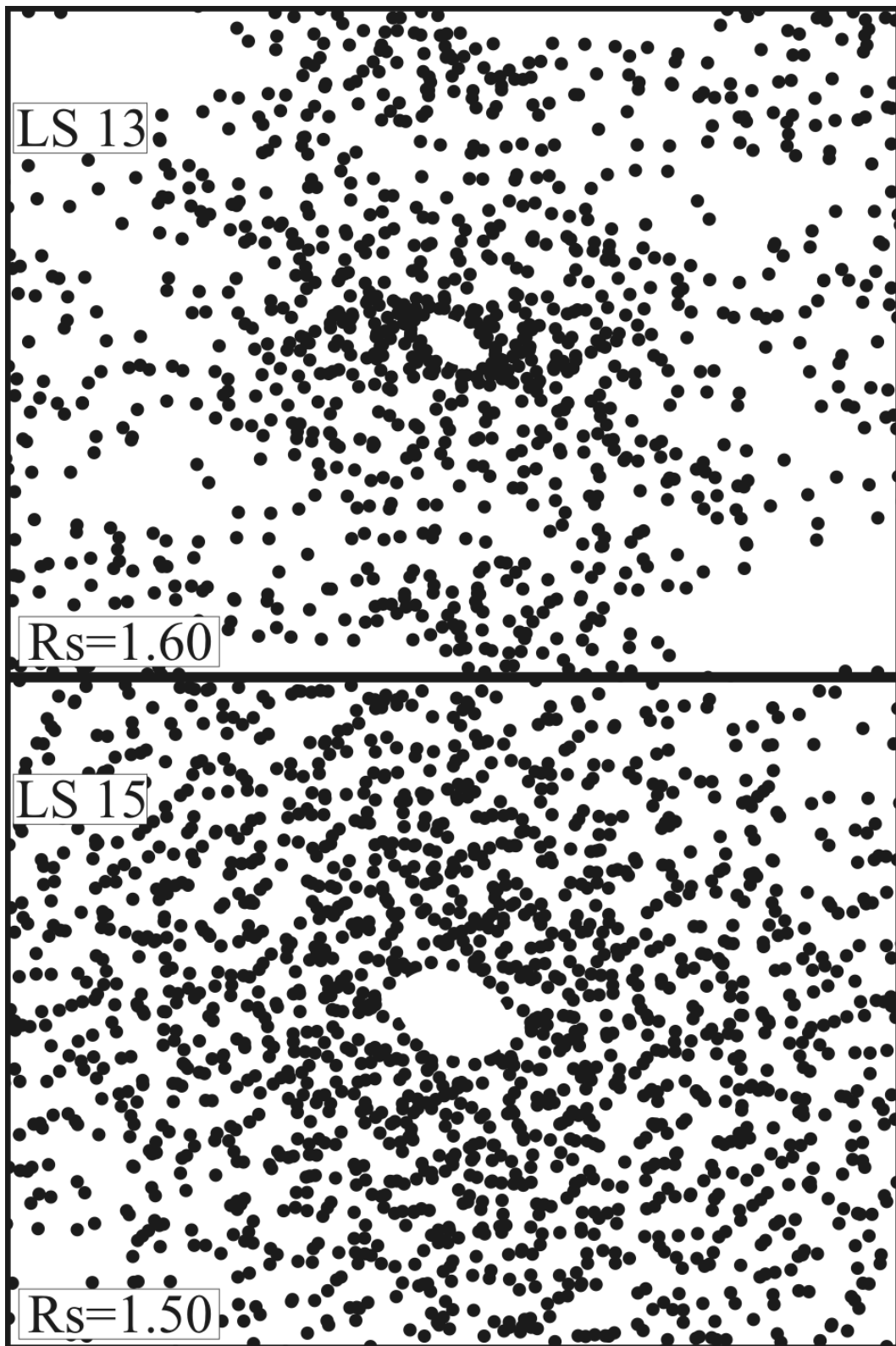
วิธีของ Fry (Fry, 1979) ถูกประยุกต์ใช้กับหินแปรตามเขตรอยเลื่อนแม่ปิง ความเครียดเชิงปริมาณแสดงด้วยวงรีความเครียด โดยมีอัตราส่วนความเครียดแตกต่างกันไปในแต่ละตัวอย่าง (รูปที่ 4.9 - 4.11) ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความเครียด (R_s) อยู่ระหว่าง 1.35 และ 1.69 และมุม (θ) มีค่าตั้งแต่ 22° ถึง 41° โดยแสดงในตาราง 4.1



รูปที่ 4.9 วงรีความเครียดที่ได้จากวิธีของ Fry ตัวอย่าง LS 1 (บน) และ LS 4 (ล่าง)



รูปที่ 4.10 วงรีความเครียดที่ได้จากวิธีของ Fry ตัวอย่าง LS 5 (บน) และ LS 11 (ล่าง)



รูปที่ 4.11 วงรีความเครียดที่ได้จากวิธีของ Fry ตัวอย่าง LS 13 (บน) และ LS 15 (ล่าง)

ตาราง 4.1 ข้อมูลความเครียดเชิงปริมาณของหินแปรในพื้นที่เขตรอยเลื่อนแม่ปิง ภาคตะวันตกของประเทศไทย

ตัวอย่าง	อัตราส่วนความเครียด		
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
LS 1	1.45	1.60	1.54
LS 4	1.38	1.80	1.59
LS 5	1.45	1.56	1.49
LS 10	1.38	1.64	1.56
LS 11	1.45	1.80	1.68
LS 12	1.33	1.40	1.37
LS 13	1.38	1.60	1.49
LS 14	1.50	1.70	1.57
LS 15	1.46	1.64	1.53
LS 16	1.50	2.00	1.69
LS 17	1.31	1.91	1.58
LS 18	1.42	1.67	1.53
LS 23	1.29	1.45	1.35

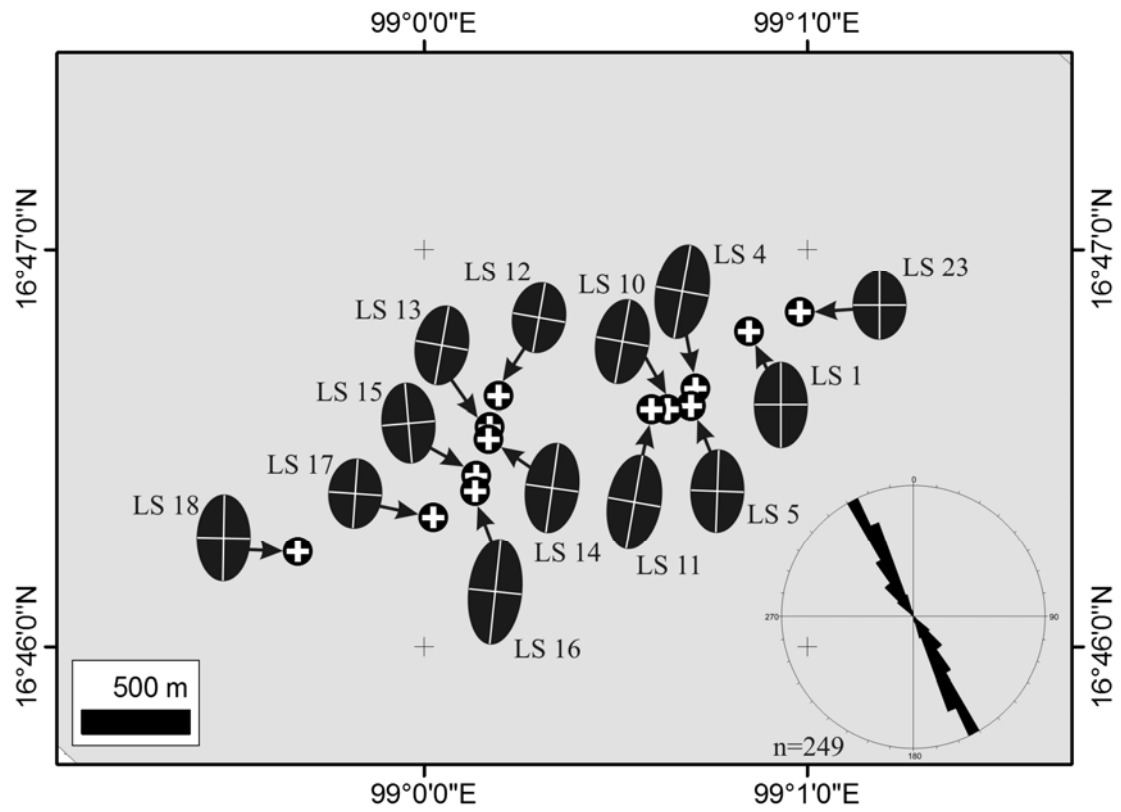
บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ตัวชี้บ่งการเคลื่อนที่ทั้งจากหิน โผล่และภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสดงนัยสำคัญในการศึกษาครั้งนี้ โครงสร้าง σ เส้น S-C และ S-C' รอยพับไม่สมมาตร แถบเฉือน และโครงสร้างโดมิโนสามารถพบได้ในหินโผล่ตลอดทั้งเขตรอยเฉือน จากข้อมูลลักษณะเฉพาะของแร่ที่ถูกเปลี่ยนลักษณะภายใต้กล้องจุลทรรศน์นั้น แร่ควอตซ์ที่เกิดการตกผลึกใหม่และตัวบ่งชี้การเคลื่อนที่ เช่น ริวซันานเหลี่ยม โครงสร้างชั้นบันได โครงสร้าง σ พร้อมแนวความเครียด ไมก์ารูปปลา เส้น S-C และ S-C' แสดงอย่างชัดเจนถึงลักษณะการเฉือน นอกจากนี้ควอตซ์ซึ่งถูกเปลี่ยนลักษณะอย่างรุนแรงแสดงการไม่สม่ำเสมอทางแสงของแร่ การบดบริเวณฐาน การรูก้ำของแร่ และการเคลื่อนที่ของขอบแร่ตามริวซันานเหลี่ยม ลักษณะเฉพาะของตัวบ่งชี้การเคลื่อนที่และจุดอ้างอิงความเครียดจากการศึกษาครั้งนี้ยังแสดงลักษณะเด่นของการเคลื่อนที่แบบซ้เข้าระหว่างกระบวนการเฉือนสอดคล้องกับผลการศึกษาในอดีต (Lacassin et al., 1993, 1997; Palin et al., 2013)

วิธีของ Fry (Fry, 1979) ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับพื้นที่ความเครียดสูงของเขตรอยเฉือนตามแนวระดับแม่โป่งในภาคตะวันตกของประเทศไทยเพื่อวิเคราะห์ความเครียดเชิงปริมาตรของการเปลี่ยนลักษณะการเฉือน ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความเครียด (R_v) ของเขตรอยเฉือนตามแนวระดับแม่โป่งอยู่ระหว่าง 1.35 และ 1.69 และมุม (θ) มีค่าตั้งแต่ 22° ถึง 41° การวางตัวของวงรีความเครียดยังสนับสนุนลักษณะการเคลื่อนที่แบบเฉือน ความแตกต่างในรูปร่างของวงรีความเครียดของหินจากแต่ละจุดศึกษาแสดงโดยค่าความเครียดซึ่งหินแต่ละพื้นที่มีการสะสมภายใน วงรีแสดงถึงการเปลี่ยนลักษณะในหินและอ้างอิงไปยังระดับของการเปลี่ยนลักษณะด้วยรูปร่างที่แตกต่างกัน ค่าความเครียดเชิงปริมาตรจากการวิจัยนี้เป็นข้อมูลที่แสดงความเครียดเชิงปริมาตร (volumetric strain) ซึ่งเป็นข้อมูลเพิ่มเติมจากข้อมูลการศึกษาความเครียดของ Lacassin et al. (1993) ได้แก่ ความเครียดเชิงเส้น (linear strain) ที่มีค่าการยัดในแนวนอนกับชั้นหินที่อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 250-786 และความเครียดเชิงมุม (shear strain) ที่มีค่าความเครียดเฉือนสุดท้าย 7 ± 4 หากเป็นการเฉือนแบบซิมเพิล (simple shear)

หลักฐานทั้งหมดจากการศึกษาครั้งนี้บ่งชี้ว่าประวัติการเปลี่ยนลักษณะหลักของเขตรอยเฉือนแม่โป่งเป็นการเคลื่อนที่ในแนวระดับแบบซ้เข้าด้วยการเฉือนในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ด้วยอัตราความเครียดเฉลี่ยของระนาบเท่ากับ 1.35–1.69 (รูปที่ 5.1)



รูปที่ 5.1 วงรีความเครียดแสดงความเครียดเชิงปริมาณตามแนววางของเขตรอยเลื่อนแม่ปิง แผนภาพกุหลาบแสดงรื้อวนานหลักในทิศ 150°

เอกสารอ้างอิง

- Charusiri, P., Daorerk, V., Archibald, D., Hisada, K., Ampaiwan, T., 2002. Geotectonic evolution of Thailand: A new synthesis. *Journal of the Geological Society of Thailand*, 1, 1–20.
- Department of Mineral Resources, 1982. Geological map of Thailand, Department of Mineral Resources, Bangkok, scale 1:1,000,000.
- Fry, N., 1979. Random point distribution and strain measurements in rocks. *Tectonophysics* 113, 163–183.
- Geard, A., 2008. Geology of the Klaeng Region (Southeast Thailand): Lithology, Structure and Geochronology. BSc Honors Thesis, University of Tasmania, Tasmania, Australia, 100 pp.
- Genier, F., Epard, J.L., 2007. The Fry method applied to an augen orthogneiss: Problems and results. *Journal of Structural Geology* 29, 209–224.
- Gilley, L.D., Harrison, T.M., Leloup, P.H., Ryerson, F.J., Lovera, O.M., Wang, J.H., 2003. Direct dating of left-lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam. *Journal of Geophysical Research* 108, 2127–2148.
- Kanjanapayont, P., Grasemann, B., Edwards, M.A., Fritz, H., 2012a. Quantitative kinematic analysis within the Khlong Marui shear zone, southern Thailand. *Journal of Structural Geology* 35, 17–27.
- Kanjanapayont, P., Kieduppatum, P., Klötzli, U., Klötzli, E., Charusiri, P., 2013. Deformation history and U–Pb zircon geochronology of the high grade metamorphic rocks within the Klaeng fault zone, eastern Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences* 77, 224–233.
- Kanjanapayont, P., Klötzli, U., Thöni, M., Grasemann, B., Edwards, M.A., 2012b. Rb–Sr, Sm–Nd, and U–Pb geochronology of the rocks within the Khlong Marui shear zone, southern Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences* 56, 263–275.
- Lacassin, R., Leloup, P.H., Tapponnier, P., 1993. Bounds on strain in large Tertiary shear zones of SE Asia from boudinage restoration. *Journal of Structural Geology* 15, 677–692.
- Lacassin, R., Maluski, H., Leloup, P.H., Tapponnier, P., Hinthong, C., Siribhakdi, K., Chauviroj, S., Charoenravat, A., 1997. Tertiary diachronic extrusion and deformation of western Indochina: Structure and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence from NW Thailand. *Journal of Geophysical Research* 102 (B5), 10013–10037.
- Lacassin, R., Van Den Driessche, J., 1983. Finite strain determination of gneiss: application of Fry's method to porphyroid in the southern Massif Central (France). *Journal of Structural Geology* 5, 245–253.
- Leloup, P.H., Lacassin, R., Tapponnier, P., Schärer, U., Dalai, Z., Xiaohan, L., Liangshang, Z., Shaocheng, J., Trinh, P.T., 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics* 251, 3–84.
- Macdonald, A.S., Barr, S.M., Miller, B.V., Reynolds, P.H., Rhodes, B.P., Yokart, B., 2010. P-T-t constraints on the development of the Doi Inthanon metamorphic core complex domain and implications for the evolution of the western gneiss belt, northern Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences* 37, 82–104.
- Mitchell, A., Chung, S., Oo, T., Lin, T., Hung, C., 2012. Zircon U-Pb ages in Myanmar: magmatic-metamorphic events and the closure of a neo-Tethys ocean? *Journal of Asian Earth Sciences* 56, 1–23.

- Morley, C.K., 2002. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia. *Tectonophysics* 347, 189–215.
- Morley, C.K., Smith, M., Carter, A., Charusiri, P., Chantraprasert, S., 2007. Evolution of deformation styles at a major restraining bend, constraints from cooling histories, Mae Ping fault zone, western Thailand. *Geological Society of London, Special Publication* 290, 325–349.
- Nantasin, P., Hauzenberger, C., Liu, X., Krenn, K., Dong, Y., Thöni, M., Wathanakul, P., 2012. Occurrence of the high grade Thabsila metamorphic complex within the low grade Three Pagodas shear zone, Kanchanaburi Province, western Thailand: Petrology and geochronology. *Journal of Asian Earth Sciences* 60, 68–87.
- Pailoplee, S., Sugiyama, Y., Charusiri, P., 2009. Deterministic and probabilistic seismic hazard analyses in Thailand and adjacent areas using active fault data. *Earth Planets Space* 61, 1313–1325.
- Palin, R.M., Searle, M.P., Morley, C.K., Charusiri, P., Horstwood, M.S.A., Roberts, N.M.W., 2013. Timing of metamorphism of the Lansang gneiss and implications for left-lateral motion along the Mae Ping (Wang Chao) strike-slip fault, Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences* 76, 120–136.
- Phillips, R.J., Searle, M.P., 2007. Macro-structural and micro-structural architecture of the Karakoram fault: relationship between magmatism and strike-slip faulting. *Tectonics* 26, TC3017.
- Polachan, S., Sattayarak, N., 1989. Strike-slip tectonics and the development of Tertiary basins in Thailand. In: Thanasuthipitak, T., Ounchanum, P. (Eds.), *Proceedings of the International symposium on intermontane basins: Geology and resources*. Chiang Mai University, Chiang Mai, pp. 243–253.
- Polachan, S., Pradidtan, S., Tongtaow, C., Janmaha, S., Intarawijitr, K., Sangsuwan, C., 1991. Development of Cenozoic basins in Thailand. *Marine and Petroleum Geology* 8, 84–97.
- Ramsay, J.G., Huber, M., 1983. *The Techniques of Modern Structural Geology*. Volume 1: strain analysis. Academic Press, London, 307 pp.
- Robin, P.-Y.F., Jowett, E.C., 1986. Computerized density contouring and statistical evaluation of orientation data using counting circles and continuous weighting functions. *Tectonophysics* 121, 207–233.
- Searle, M.P., Weinberg, R.F., Dunlap, W.J., 1998. Transpressional tectonics along the Karakoram fault zone, northern Ladakh: constraints on Tibetan extrusion. In: Holdsworth, R.E., Strachan, R.A., Dewey, J.F. (Eds.), *Continental Transpressional and Transtensional Tectonics*. Geological Society of London, Special Publication 135, pp. 307–326.
- Searle, M.P., 2006. Role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia. *Journal of the Geological Society of London* 163, 1025–1036.
- Searle, M.P., Yeh, M.W., Chung, S.L., 2010. Structural constraints on the timing of left-lateral shear along the Red River shear zone in the Ailao Shan and Diancang Shan Ranges, Yunnan, SW China. *Geosphere* 6, 316–338.
- Searle, M.P., Elliott, J.R., Phillips, R.J., Chung, S.L., 2011. Crustal-lithospheric structure and extension of Tibet. *Journal of the Geological Society of London* 168, 633–672.

- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A.Y., Armijo, R., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology* 10, 611–616.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Armijo, R., 1986. On the mechanism of collision between India and Asia. In: Coward, M.P., Ries, A.C. (Eds.), *Collision Tectonics*. Geological Society of London, Special Publication 19, 115–157.
- Tapponnier, P., Lacassin, R., Leloup, P.H., Schärer, U., Zhong, D., Wu, H., Liu, X., Ji, S., Zhang, L., Zhong, J., 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature* 343, 431–437.
- Watkinson, I., Elders, C., Batt, G., Jourdan, F., Hall, R., McNaughton, N.J., 2011. The timing of strike-slip shear along the Ranong and Khlong Marui faults, Thailand. *Journal of Geophysical Research* 116 (B9), 1–26.