



อำนาจแม่เหล็กและภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหินภูเขาไฟยุคเพอร์โม-ไทรแอสซิก  
ในพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์และจังหวัดเลย

**Rock Magnetism and Palaeomagnetism of Permo-Triassic Volcanic Rocks of  
Phetchabun and Loei Provinces**

เอกรัตน์ ฤทธิเนียม

**Akekarat Rittiniam**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**Master of Science in Geophysics**

**Prince of Songkla University**

**2559**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



อำนาจแม่เหล็กและภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหินภูเขาไฟยุคเพอร์โม-ไทรแอสซิก  
ในพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์และจังหวัดเลย

**Rock Magnetism and Palaeomagnetism of Permo-Triassic Volcanic Rocks of  
Phetchabun and Loei Provinces**

เอกรัตน์ ฤทธิเนียม

**Akekarat Rittiniam**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Science in Geophysics**

**Prince of Songkla University**

**2559**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์      อำนาจแม่เหล็กและภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหินภูเขาไฟ  
 ยุคเพอร์โม-ไทรแอสซิก ในพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์และจังหวัดเลย

ผู้เขียน                นายเอกรัฐ ฤทธินิยม

สาขาวิชา             ธรณีฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร. ไตรภพ ผ่องสุวรรณ)

.....ประธานกรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาสกร ปนานนท์)

.....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร. ไตรภพ ผ่องสุวรรณ)

.....กรรมการ  
 (ดร. กำแหง วัฒนเสน)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น ส่วน  
 หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ  
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ไตรภพ ผ่องสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายเอกรัฐ ฤทธิเนียม)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายเอกรัฐ ฤทธินิยม)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	อำนาจแม่เหล็กและภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหินภูเขาไฟ ยุคเพอร์โม-ไทรแอสซิก ในพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์และจังหวัดเลย
ผู้เขียน	นายเอกรัฐ ฤทธิเนียม
สาขาวิชา	ธรณีฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2558

### บทคัดย่อ

ทำการเก็บตัวอย่างหินจำนวน 149 ตัวอย่าง จากพื้นที่ที่ถูกเลือก 14 จุด ของหินที่มีอายุตั้งแต่ยุคดีโวเนียน ถึงยุคไทรแอสซิก บริเวณจังหวัดเพชรบูรณ์ และจังหวัดเลย ซึ่งอยู่ทางด้านขอบตะวันตกของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ตัวอย่างมาตรฐานสำหรับศึกษาสมบัติแม่เหล็ก และภาวะแม่เหล็กบรรพกาล ถูกเตรียม แล้วนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย แอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก แมกนีไทเซชันตกค้างธรรมชาติ ลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้างด้วยสนามแม่เหล็กสลับ และตัวแปรอิทธิพล

ข้อมูลแม่เหล็กของหินมีค่ากระจายตัวสูง แม้ว่าตัวอย่างหินเก็บมาจากพื้นที่เดียวกันก็ตาม ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวอย่างหินจากพื้นที่ศึกษาค่อนข้างมีความซับซ้อน และ/หรือ เกิดจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของแร่แม่เหล็กที่เป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ตัวอย่างหินจากพื้นที่ภาคกลางของจังหวัดเลย มีค่า  $P_j$  สูง (มากกว่า 10%) แสดงให้เห็นว่าหินได้รับอิทธิพลจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐานสูง

ผลภาวะแม่เหล็กบรรพกาลที่ได้จากองค์ประกอบค่าสภาพบังคับสูง ที่สนามแม่เหล็กลบล้างมากกว่า 20 mT ทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างเฉพาะสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม มีค่าทิศทาง  $Dec/Inc(\alpha_{95})$  เฉลี่ย เท่ากับ  $40.9^\circ/27.2^\circ(28.5^\circ)$ ,  $117.5^\circ/42.1^\circ(24.9^\circ)$  และมีตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาลอยู่ที่  $49.9^\circ N/187.6^\circ E (27.7^\circ)$ ,  $17.1^\circ S/157.9^\circ E (28.3^\circ)$  ช่วงยุคเพอร์เมียน-ไทรแอสซิก (PTr) และยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน (CP) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (พื้นที่ศึกษา) ช่วง PTr และ CP อยู่ที่ตำแหน่งละติจูด  $14.4^\circ N (+36.2^\circ N, -0.7^\circ S)$ ,  $24.3^\circ N (+49.7^\circ N, 8.8^\circ N)$  และมุม  $9.7^\circ (\pm 23.2^\circ)$ ,  $61.6^\circ (\pm 25.2^\circ)$  ในทิศตามเข็มนาฬิกา เมื่อเทียบกับแผ่นจีนใต้ตามลำดับ ข้อมูลช่วง PTr ค่อนข้างสอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ แต่ช่วง CP ข้อมูลที่ศึกษาคั้งนี้ค่อนข้างแตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยหลายๆ ชิ้นก่อนหน้านี้

**Thesis Title** Rock magnetism and Palaeomagnetism of Permo-Triassic Volcanic Rocks of Phetchabun and Loei Provinces

**Author** Mr. Akekarat Rittiniam

**Major Program** Geophysics

**Academic year** 2015

### Abstract

Fourteen sites of Devonian to Triassic rock in Phetchabun and Loei provinces, located on the western rim of Indochina block were selected and 149 rock samples were collected. The standard specimens for rock magnetism and palaeomagnetism were prepared and subjected to laboratory tests, consisting of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), natural remanent magnetization (NRM), alternating field (AF) demagnetization and hysteresis parameters.

The rock magnetic data showed a high scatter, even for specimens from the same core suggesting that rock samples from study area experienced a complex and/or inhomogeneity of magnetic mineralogy. Moreover, rock samples collected from central of Loei province possessed a high corrected anisotropy degrees ( $P_j > 10\%$ ) suggesting that the rocks were strongly affected from tectonic activity.

Palaeomagnetic results were derived from a high coercivity component having a high demagnetizing field of  $>20$  mT. The characteristic remanent magnetization (ChRM) can be classified into two groups with the mean direction Dec/Inc( $\alpha_{95}$ ) at  $40.9^\circ/27.2^\circ$  ( $28.5^\circ$ ),  $117.5^\circ/42.1^\circ$  ( $24.9^\circ$ ) and corresponding virtual geomagnetic pole (VGP) at  $49.9^\circ\text{N}/187.6^\circ\text{E}$  ( $27.7^\circ$ ),  $17.1^\circ\text{S}/157.9^\circ\text{E}$  ( $28.3^\circ$ ) for Permian-Triassic (PTr) and Carboniferous-Permian (CP), respectively. The interpretation results indicated that Indochina block (study area) in PTr and CP periods located at palaeolatitude  $14.4^\circ\text{N}$  ( $+36.2^\circ\text{N}$ ,  $0.7^\circ\text{S}$ ),  $24.3^\circ\text{N}$  ( $+49.7^\circ\text{N}$ ,  $8.8^\circ\text{N}$ ) and rotated  $9.4^\circ$  ( $\pm 23.2^\circ$ ),  $61.6^\circ$  ( $\pm 25.2^\circ$ ) with the clockwise direction relative to South China, respectively. This result of PTr agrees well with the previous studies but the result of CP is much different from the previous reports

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จได้เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือ จากคณาจารย์ หน่วยงานและบุคลากรหลายฝ่าย จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไตรภพ ผ่องสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และให้แนวคิดในการแก้ปัญหา จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ International Program in the Physical Science (IPPS) ที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับเก็บตัวอย่างหิน และเครื่องมือสำหรับการวิจัยทางด้านแม่เหล็กบรรพกาล

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ประจำหลักสูตร ธรณีฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้ความรู้ และคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณสันติ รัชชาวงศ์ และ Dr. Sounthone Singsopho ที่ช่วยเก็บตัวอย่าง และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงศกร จันทรัตน์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุณาให้ความอนุเคราะห์ ใช้เครื่องมือ VSM สำหรับทดสอบตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ธรณีฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้คำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับความรู้ทางด้านธรณีฟิสิกส์ และให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาต่างๆ

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องสาว ที่ให้กำลังใจ และช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่างๆ เรื่อง ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาครั้งนี้

เอกรัฐ ฤทธิเนียม



## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	
รายการตาราง	(11)
รายการรูป	(12)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 ประวัติธรรมเนียมสันฐานและลักษณะทางธรรมเนียมวิทยาของประเทศไทย	3
1.3 พื้นที่ศึกษา	13
1.3.1 พื้นที่ศึกษาจังหวัดเลย	15
1.3.2 พื้นที่ศึกษาจังหวัดเพชรบูรณ์	16
1.5 วัตถุประสงค์	17
2. ทฤษฎี	20
2.1 สนามแม่เหล็กโลก	20
2.2 ทฤษฎีทางด้านวัสดุแม่เหล็ก	25
2.2.1 วัสดุแม่เหล็ก	25
2.2.2 แม่เหล็ก	26
2.2.3 สมบัติทางแม่เหล็กของหิน	30
2.3 แอนไอโซทรอปีของสภาพรีบไว้ได้ทางแม่เหล็ก	38
2.4 กระบวนการศึกษาทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาล	42
3. วิธีการวิจัย	48
3.1 ขั้นตอนเก็บตัวอย่างและเตรียมตัวอย่าง	48
3.2 ขั้นตอนทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ	51
3.2.1 ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กและภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหิน	51
3.2.2 วิเคราะห์ตัวอย่างหินด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	54
3.2.3 วิเคราะห์ตัวอย่างหินด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์	55
3.2.4 วิเคราะห์ตัวอย่างหินด้วยเทคนิคฟูรีเยร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	56

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนวิเคราะห์ข้อมูล	57
3.3.1 วิเคราะห์ผลจากกราฟเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของแม่เหล็ก	57
3.3.2 วิเคราะห์แอนไอโซโทรปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก	58
3.3.3 วิเคราะห์ทิศทางแมกนีโทเซชันตกค้าง	58
3.3.4 การจัดการแผนที่และแสดงผลข้อมูล	59
4. ผลและวิเคราะห์ผล	61
4.1 สมบัติทางแม่เหล็กของหิน	61
4.1.1 ผลทดสอบองค์ประกอบแร่ในหิน	61
4.1.2 ผลทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กของหิน	65
4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กของหิน	73
4.2 แอนไอโซโทรปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก	76
4.2.1 ผลทดสอบแอนไอโซโทรปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก	76
4.2.2 ผลการวิเคราะห์แอนไอโซโทรปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก กับกรณี แปรสัณฐานในอดีต	82
4.3 ภาวะแม่เหล็กบรรพกาล	84
4.3.1 ผลทดสอบภาวะแม่เหล็กบรรพกาล	84
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ภาวะแม่เหล็กบรรพกาล	89
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	99
5.1 สรุปผล	99
5.2 ข้อเสนอแนะ	101
บรรณานุกรม	102
ภาคผนวก	111
ก แผนที่ธรณีวิทยา ประเทศไทย	112
ข แผนที่ธรณีวิทยา จังหวัดเลย	113
ค แผนที่ธรณีวิทยา จังหวัดเพชรบูรณ์	114
ง แผนภาพธรณีกาล	115
จ การคำนวณทางด้านแม่เหล็กบรรพกาล	116

**สารบัญ (ต่อ)**

	หน้า
จ ผลทดสอบ เรื่องรังสีเอกซ์	125
ช ผลทดสอบ ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	126
ซ ผลทดสอบ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	129
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	135
ประวัติผู้เขียน	144

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ตัวอย่างข้อมูลศึกษาทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของตัวอย่างหินในประเทศไทย จากฐานข้อมูลของ The IAGA Global Palaeomagnetic Database version 4.6 (2005)	2
1.2	รายละเอียดตัวอย่างหินที่เก็บจากพื้นที่ศึกษา จังหวัดเพชรบูรณ์ และ จังหวัดเลย	19
2.1	ตัวอย่างแร่แม่เหล็กและสมบัติทางแม่เหล็ก	28
3.1	รายละเอียดและเงื่อนไขการทดสอบหินด้วยเทคนิค XRD	55
4.1	สรุปผลการทดสอบตัวอย่าง FTIR XRD และ XRF	64
4.2	สรุปค่าสมบัติทางแม่เหล็กของตัวอย่างหินจากแต่ละพื้นที่ศึกษา	72
4.3	สรุปข้อมูล AMS ของตัวอย่างหินตะกอน และสการ์น	78
4.4	สรุปข้อมูล AMS ของตัวอย่างหินอัคนี	79
4.5	สรุปทิศทางเฉลี่ยของแมกนีไทเซชันตกค้างของตัวอย่างแต่ละพื้นที่ศึกษา	87-88
4.6	สรุปข้อมูลภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ชาน-ไทย และจีนใต้ จากตัวอย่างที่ศึกษาครั้งนี้ และที่ได้รายงานการศึกษาก่อนหน้านี้	97-98
4.7	มุมหมุน และตำแหน่งทิศทางสนามแม่เหล็กโลกของจุดอ้างอิง เทียบกับข้อมูลขั้วแม่เหล็กโลกช่วงเวลาเดียวกับตัวอย่างที่ศึกษา (ตารางที่ 4.6) ของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน แผ่นเปลือกโลกชาน-ไทย เทียบกับแผ่นเปลือกโลกจีนใต้ ในยุคต่างๆ	98

## รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แบบจำลองของแผ่นทวีปช่วง 400-250 ล้านปี ที่ผ่านมา	4
1.2	แบบจำลองมหาทวีปก่อนคั้วานา (Gondwana) และมหาทวีปลอเรเซีย (Laurussia) เมื่อ 310 และ 250 ล้านปี พันเจีย C สร้างตามแบบจำลอง GAD และ พันเจีย A ได้ทำการปรับแก้อิทธิพลจากสนามแม่เหล็กส่วนไม่ใช่ไดโพล	5
1.3	รายละเอียดแผ่นเปลือกโลกของพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้	6
1.4	แบบจำลองภาพตัดขวางของแผ่นเปลือกโลกภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในช่วงอายุ 300 ถึง 5 ล้านปี	8
1.5	แบบจำลองลักษณะการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในช่วงอายุ 300 ถึง 5 ล้านปี	9
1.6	รายละเอียดโครงสร้างแผ่นเปลือกโลกของประเทศไทย	11
1.7	ลักษณะการกระจายตัวของกลุ่มหินแกรนิต ในประเทศไทย	14
1.8	ตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง และลักษณะการกระจายตัวของหินที่มีอายุอยู่ในช่วงยุค ดีโวเนียน ถึงยุคไทรแอสซิก	18
2.1	(ก)(ข) สนามแม่เหล็กโลก (ค)-(จ) องค์ประกอบของแม่เหล็กโลก H (total field), Inc (inclination) และ Dec (declination)	22
2.2	ข้อมูลสนามแม่เหล็กโลกที่วัดได้ (ก) สนามแม่เหล็กโลกในแนวตั้ง ( $B_z$ ) (ข) สนามแม่เหล็กโลกในแนวราบ ( $B_H$ ) (ค) สนามแม่เหล็กโลกรวม ( $B_T$ )	23
2.3	ตัวอย่างแสดงค่า Dec และ Inc ที่เวลาต่างๆ (ก) ข้อมูลแม่เหล็กจากพื้นที่ศึกษา Greenwich England (ข) ตำแหน่งขั้วเหนือของแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา (ค) ข้อมูลแม่เหล็กบริเวณรอยต่อของแผ่นทวีปในมหาสมุทร แอบสิด้า คือ ขั้วแม่เหล็กปกติ และแอบสิด้า คือ ช่วงเวลาแม่เหล็กกลับขั้ว	24
2.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอำนาจแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (H) กับแมกนีไทเซชัน (M) (ก) ไดอะแมกเนติก (ข) พาราแมกเนติก และ (ค) เฟอร์โรแมกเนติก	26
2.5	ช่วงค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของหิน และแร่แม่เหล็กประเภทต่างๆ	29
2.6	(ก) รายละเอียดแผนภาพไตรภาค (ternary diagram) ของ $TiO_2$ -FeO- $Fe_2O_3$ และ กราฟแสดงอุณหภูมิคูรี ( $T_C$ ) และค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว ( $J_s$ ) ของแร่แม่เหล็กที่ อัตรารส่วนต่างๆ (ข) Titanomagnetite (ค) Titanohematite	30

### รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.7	โมเมนต์แม่เหล็ก และเกรนของแร่แม่เหล็ก	33
2.8	ขอบเขตขนาดเกรนแร่แม่เหล็กชนิดต่างๆ $d_0$ ช่วงขอบเขตระหว่างเกรนขนาดโดเมนเดียวกับโดเมนผสม และ $d_s$ ช่วงขอบเขตระหว่างเกรนขนาดโดเมนเดียวกับซูปเปอร์พาราแมกเนติก	34
2.9	ตัวอย่างกราฟเส้นโค้งฮิสทีอรีซิส (ก) ไดอะแมกเนติก (ข) พาราแมกเนติก (ค) ซูปเปอร์พาราแมกเนติกจากตัวอย่างหินบะซอลต์ใต้ทะเล (ง) โดเมนเดี่ยว (จ) แร่แมกนีไทต์ผสมกับแร่ฮีมาไทต์ และ (ฉ) โดเมนเดี่ยวผสมกับซูปเปอร์พาราแมกเนติกของตัวอย่างแร่แมกนีไทต์	35
2.10	กราฟของเคย์ของแร่แม่เหล็กแมกนีไทต์	36
2.11	รูปทรงรีที่มีแกนทั้งสามแทนด้วยค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (K1 K2 และ K3)	40
2.12	(ก) รูปทรงแบบจาน (oblate) มี K3 เกาะกลุ่มและ K1 K2 เป็นริ้วขนาน (foliation) ตั้งฉากกับ K3 (ข) รูปทรงแบบเข็ม (prolate) มีทิศของแนวเส้น (lineation) ตามทิศ K1 มีลักษณะเกาะกลุ่ม ส่วน K2 K3 มีลักษณะเป็นริ้วขนาน (foliation) (ค) รูปทรงแบบผสม (oblate + prolate) มี K1 K2 K3 เป็นลักษณะเกาะกลุ่ม (ง) ลำดับการแบ่งกลุ่มของข้อมูล AMS ที่พิจารณาบริเวณ fold และ trust belt โดยมี bedding ในแนวตั้ง แนวแรงที่มากกระทำในทิศซ้าย-ขวา Type I เป็นข้อมูล AMS ตอนเริ่มต้น (initial sedimentary) (จ) กราฟ Pj-T ลักษณะการเปลี่ยนรูปของหิน	42
2.13	แบบจำลองทิศทางของ NRM ที่เกิดจากผลรวมของค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง ในช่วงเวลาต่างๆ ( $\overrightarrow{NRM} = \vec{A} + \vec{B} + \vec{C} + \vec{D}$ )	43
2.14	ลำดับการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของแมกนีไทเซชันตกค้าง ที่ระดับความแรงลบ ล้าง ตั้งแต่ 0-6 (ก)(ข) องค์ประกอบแมกนีไทเซชันตกค้าง (ค) ข้อมูลทิศทางของแมกนีไทเซชันตกค้างบนเส้นโครงแผนที่คงพื้นที่ (equal-area projection) (ง) ความเข้มแมกนีไทเซชันตกค้างที่ระดับความเข้มสนามแม่เหล็กลบล้างต่างๆ และ (จ) ถึง (ซ) ทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างที่แสดงข้อมูลด้วยกราฟ Zijderveld	44

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.15	องค์ประกอบทิศทางของข้อมูลแมกนีไทเซชันตกค้าง	45
2.16	เปรียบเทียบข้อมูลแมกนีไทเซชันตกค้างที่มีองค์ประกอบของทิศทางซ้อนทับกันแต่ละองค์ประกอบ (ข) กับข้อมูลที่สามารถแยกองค์ประกอบได้อย่างชัดเจน (ก)	46
2.17	ตัวอย่างข้อมูลทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างเฉลี่ย $I_m$ และ $D_m$ ซึ่งเป็นทิศทางมุมเอียงเท (Inc) และมุมบ่าเบน (Dec) ตามลำดับบนเส้นโครงแผนที่คงพื้นที่ (ก) ข้อมูลมีคุณภาพสูง และ(ข) ข้อมูลที่มีคุณภาพต่ำ	47
3.1	ลำดับอ้างอิงตัวอย่างที่เก็บจากพื้นที่ศึกษา	49
3.2	ลำดับการเจาะแท่งตัวอย่างหินจากหิน โพล์ (outcrop) (ก) เจาะตัวอย่างด้วยเครื่องเจาะหล่อเย็นด้วยน้ำ (ข) วัดทิศทางของตัวอย่างด้วยเข็มทิศสุริยะ (ค) สกัดแท่งตัวอย่างออกจากหิน โพล์ และ (ง) แท่งตัวอย่างพร้อมรายละเอียดทิศทาง	50
3.3	ขนาดแท่งหินตัวอย่างที่เตรียมเพื่อทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กในห้องปฏิบัติการ	50
3.4	ตัวอย่างรูปจากพื้นที่ศึกษาจริง (ก) เจาะแท่งตัวอย่างหิน (ข) วัดทิศทางของตัวอย่างด้วยเข็มทิศสุริยะ และ (ค) แสดงทิศทางของตัวอย่าง	51
3.5	โครงสร้างเครื่องมือสำหรับสร้างกราฟเส้นโค้งฮิสเทอริซิสของแร่แม่เหล็กด้วยเครื่อง Vibrating Sample Magnetometer (VSM)	53
3.6	เครื่องมือสำหรับทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กของหิน (ก) เครื่องมือวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก รุ่น Kappabridge KLY-35 (ข) เครื่อง JR-6 สำหรับวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง และ (ค) เครื่องมือสำหรับลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้างแบบสนามแม่เหล็กสลับ	54
3.7	โครงสร้างการทำงานของเครื่องมือ XRF	56
3.8	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาตัวแปรต่างๆ จากกราฟเส้นโค้งฮิสเทอริซิสของแร่แม่เหล็ก	57

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.9	รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยโปรแกรม Anisoft 4.2 (ก) ตัวอย่างทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ (ข) แสดงผลข้อมูลในพิกัดภูมิศาสตร์ (Geographic coordinate) (ค) ตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ (ง) กราฟ $K_m$ -Pj และ (จ) กราฟ Pj-T	58
3.10	รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยโปรแกรม Ramesoft 4.2 (ก) ข้อมูลตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ (ข) ถึง (ง) แสดงข้อมูลทิศทางและความเข้มแมกนีไทเซชันตกค้างที่ความเข้มสนามแม่เหล็กกลับล้างต่างๆ (จ) ช่วงข้อมูลที่นำมาพิจารณาคำนวณหาทิศทางสนามแม่เหล็กตกค้าง (ฉ) ข้อมูลทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างช่วงที่พิจารณา และ (ช) คำนวณแมกนีไทเซชันตกค้างเฉลี่ยของพื้นที่ศึกษาทั้งหมด	60
4.1	กราฟแจกแจงค่าเฉลี่ย $K_m$ ของแต่ละพื้นที่ศึกษา	65
4.2	ค่าความเข้ม NRM แจกแต่ละพื้นที่ศึกษา	67
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $K_m$ กับ NRM และค่า Q-value	68
4.4	กราฟแสดงการลดลงของความเข้มแมกนีไทเซชันตกค้าง (แกน x (M/M0)) กับความเข้มสนามแม่เหล็กกลับล้าง (แกน y (mT)) (ก) ตัวอย่างจากพื้นที่ L01 (MDF>20 mT) (ข) ตัวอย่างจากพื้นที่ L02 MDF มีค่ากระจายตัวสูง (ค) ตัวอย่างจากพื้นที่ PC01 (MDF<10 mT) และ (ง) ตัวอย่างจากพื้นที่ PB3 (MDF>30 mT)	69
4.5	กราฟของเคย์ กราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส และขนาดเกรนแร่แม่เหล็กในตัวอย่างหินจากพื้นที่ศึกษา (M คือ ข้อมูลที่ได้จากการวัด และ M-PARA คือ ข้อมูลที่ลบข้อมูลส่วนที่มาจากพาราแมกเนติกออก)	71
4.6	กราฟ Pj-T ของตัวอย่างหินตะกอน และสการ์น	78
4.7	กราฟ Pj-T ของตัวอย่างหินอัคนี	79
4.8	กราฟกระจายทิศทางทรงรี AMS และทิศทางแรงบีบอัด แต่ละพื้นที่ศึกษาของตัวอย่าง หินตะกอน และหินสการ์น	80



### รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	กราฟกระจายทิศทางทรงรี AMS และทิศทางไหลบรรพกาลของหินเหลว (palaeo flow) แต่ละพื้นที่ศึกษาของตัวอย่าง หินอัคนี	81
4.10	ทิศทางเฉลี่ย NRM ของพื้นที่ศึกษา 14 จุด เทียบกับทิศทางสนามแม่เหล็กโลกปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา ( $\star$ , Inc = 22.5°, Dec = -0.75°), * คือ $\alpha_{95}$ (°) มีค่าสูงมาก	84
4.11	เปรียบเทียบข้อมูลองค์ประกอบทิศทางของแมกนีไทเซชันหลังจากคลบด้างด้วยสนามแม่เหล็กสลับ (ก) แยกองค์ประกอบได้ง่าย มีค่า MDF สูง และ MAD ต่ำ (ข) องค์ประกอบแยกได้ยาก MDF ต่ำ และ MAD สูง	85
4.12	ทิศทางเฉลี่ย Dec/Inc ช่วง $H_c$ สูง ของแต่ละตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษาต่างๆ และทิศทางเฉลี่ย ( $\star$ ) ของกลุ่มตัวอย่าง ( $\star$ คือ สนามแม่เหล็กโลกปัจจุบันบริเวณพื้นที่ศึกษา, Inc = 22.5°, Dec = -0.75°)	89
4.13	ข้อมูลทิศทาง Dec เฉลี่ย จากข้อมูลภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของตัวอย่างแต่ละจุด (เส้นทึบ) เทียบกับทิศทางปัจจุบัน (เส้นประ)	91
4.14	ตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาล และ A95 ของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (INC) แผ่นเปลือกโลกชาน-ไทย (SNT) และแผ่นเปลือกโลกจีนใต้ (SCN) จากข้อมูลที่ศึกษารั้งนี้และที่รายงานการศึกษาก่อนหน้านี้ และ (ข) เปรียบเทียบข้อมูล ขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาล (PTr และ CP) กับข้อมูลที่ศึกษาก่อนหน้านี้ของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน	92
4.15	เปรียบเทียบตำแหน่งละติจูดบรรพกาล ( $\lambda_p$ ) จากตัวอย่างหินที่ศึกษากับข้อมูลที่รายงานการศึกษาก่อนหน้านี้	93
4.16	แบบจำลองธรณีแปรสัณฐาน ช่วง CP และ PTr ของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนชาน-ไทย และจีนใต้ โดยอาศัยข้อมูลภาวะแม่เหล็กบรรพกาลที่ได้จากการศึกษารั้งนี้ ร่วมกับข้อมูลที่รายงานมาก่อนหน้านี้ ( $\star \lambda_p$ พิจารณาช่วงสนามแม่เหล็กโลกกลับขั้ว)	95

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.17	(ก)ตำแหน่งแผ่นเปลือกโลกซาน-ไทย แผ่นเปลือกโลกอินโดจีน แผ่นเปลือกโลกจีนใต้ ปัจจุบัน และตำแหน่งแอ่งตะกอนต่างๆ (Morley, 2012) (ข) ตำแหน่งแอ่งตะกอนมหาสมุทรไซไซอิก (แอ่งโคราช แอ่งยูนนาน และแอ่งเสฉวน) เทียบกับแบบจำลองแผ่นเปลือกโลกยุค PTr (รูปที่ 4.16)	96

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

จากรายงานฐานข้อมูลของ “The IAGA Global Palaeomagnetic Database” (McElhinny and Lock, 2005) และรายงานทางวิชาการเกี่ยวกับการศึกษาสมบัติทางด้านแม่เหล็ก (rock magnetism) และภาวะแม่เหล็กบรรพกาล (palaeomagnetism) ของตัวอย่างหินในประเทศไทย พบว่ามีรายงานการศึกษา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1975 โดย Haile N.S. และคณะ ซึ่งได้ทำการศึกษาจากตัวอย่างหินตะกอนพื้นที่ราบสูงโคราช และหลังจากนั้นเป็นต้นมามีรายงานทางด้านวิชาการเกี่ยวกับการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก และภาวะแม่เหล็กบรรพกาล จากตัวอย่างหินในประเทศไทยเรื่อยมา จนถึงปัจจุบัน ตามแสดงในตารางที่ 1.1 แต่จากรายงานวิชาการที่นำเสนอ ส่วนใหญ่เสนอข้อมูลจากตัวอย่างหินช่วงมหายุคมีโซโซอิก (Mesozoic) ส่วนตัวอย่างหินที่มีอายุเก่ากว่านั้น เช่น ช่วงคาบเกี่ยวระหว่างมหายุคมีโซโซอิก-พาลีโอโซอิก (Mesozoic-Paleozoic) หรือช่วงมหายุคพาลีโอโซอิก (Paleozoic) มีรายงานศึกษาน้อยมาก จึงทำให้ข้อมูลทางด้านแม่เหล็กบรรพกาลในยุคนี้มีน้อย และจำกัดสำหรับวิเคราะห์ และศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการธรณีแปรสัณฐาน (tectonic) ของประเทศไทย ในช่วงเวลาดังกล่าว

ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของข้อมูลสมบัติทางด้านแม่เหล็ก และข้อมูลภาวะแม่เหล็กบรรพกาล จากตัวอย่างหินช่วงยุคเพอร์เมียน (Permian) ถึงยุคไทรแอสซิก (Triassic) (หรือ เพอร์โม-ไทรแอสซิก (PTr)) จึงเลือกพื้นที่ศึกษาบริเวณ จังหวัดเลย และจังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (Indochina) มีพื้นที่ครอบคลุมภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ลาว กัมพูชา และเวียดนามทางทิศเหนือ เป็นพื้นที่เก็บตัวอย่างหิน เพราะบริเวณนี้สามารถพบหินโผล่ (outcrop) ที่มีอายุช่วงยุคดีโวเนียน (Devonian) ถึงยุคไทรแอสซิก แต่จะเน้นตัวอย่างจำพวกหินภูเขาไฟที่มีอายุช่วงยุคเพอร์เมียน ถึงยุคไทรแอสซิก เป็นหลัก (หรือเรียกว่า “PTrv” อ้างอิงตามแผนที่กรมทรัพยากรธรณี ปี พ.ศ. 2552) เพราะแสดงสมบัติทางแม่เหล็กที่เด่นชัดกว่าหินตะกอน เพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็ก และศึกษาทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาล หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้สำหรับอธิบายปรากฏการณ์ทางด้านธรณีแปรสัณฐานในช่วงคาบเกี่ยวระหว่างมหายุคพาลีโอโซอิก ถึงยุคไทรแอสซิก ของแผ่น

เปลือกโลกอินโดจีน รวมทั้งเปรียบเทียบตำแหน่งกับแผ่นเปลือกโลกข้างเคียง (แผ่นเปลือกโลก  
 ชาน-ไทย และแผ่นเปลือกโลกจีนใต้) ในยุคเดียวกัน

**ตารางที่ 1.1** ตัวอย่างข้อมูลศึกษาทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของตัวอย่างหินในประเทศ  
 ไทย จากฐานข้อมูลของ The IAGA Global Palaeomagnetic Database version 4.6 (2005)  
 (<http://www.ngu.no/geodynamics/gpmdb/>)

ROCK UNIT or FORMATION	RLAT (°N)	RLONG (°E)	AGE (Ma)	DEC (°)	INC (°)	ED95 (°)	AUTHORS	YEAR
Redbeds	16.90	100.70	146-200	21.9	36.9	11.7	Haile,N.S., Tarling,D.H.	1975
Red sediments	16.80	100.00	146-161	2.0	22.6	20.0	Barr,S.M., MacDonald,A.S., Haile,N.S.	1978
Red sediments	17.50	100.00	176-245	35.6	38.8	12.0	Barr,S.M., MacDonald,A.S., Haile,N.S.	1978
Denchai Basalts	17.90	100.10	5-7	200.0	-30.0	5.0	Barr,S.M., MacDonald,A.S.	1979
Huai Hin Lat	16.60	101.80	204-217	43.2	42.9	7.5	Achache,J., Courtillot,V.	1985
Khok Kruat	17.50	103.00	88-132	47.0	29.0	14.0	Maranate,S., Vella,P.	1986
Phu Phan	17.50	102.00	132-146	45.0	19.0	41.0	Maranate,S., Vella,P.	1986
Phra Wihan	13.00	102.00	161-176	31.0	41.0	13.0	Maranate,S., Vella,P.	1986
Sao Khua	13.00	102.00	161-176	33.0	35.0	8.0	Maranate,S., Vella,P.	1986
Phu Kradung	17.00	101.00	176-200	33.0	29.0	7.0	Maranate,S., Vella,P.	1986
Nam Phong	17.00	101.00	176-228	34.0	41.0	12.0	Maranate,S., Vella,P.	1986
Lom Sak	17.00	101.00	228-241	18.0	21.0	14.0	Maranate,S., Vella,P.	1986
Basalts, Central Chao Phraya Basin	15.30	100.90	0-11	24.4	26.2	6.9	McCabe,R., Celaya,M., Cole,J., Han,H- C., Ohnstad,T., Pajitprapon,V., Thitipawarn,V.	1988
Basalts, Khorat Plateau	14.60	103.40	0-11	4.3	27.8	5.2	McCabe,R., Celaya,M., Cole,J., Han,H- C., Ohnstad,T., Pajitprapon,V., Thitipawarn,V.	1988
Khorat Plateau	16.50	102.00	20-50	31.9	39.9	4.6	Yan,C., Courtillot,V.	1989
Sediments and Volcanics								
Khok Kruat	16.20	102.60	100-125	28.1	40.5	2.4	Yang,Z., Besse,J.	1993
Sao Khua	16.60	103.00	146-161	26.6	37.3	2.6	Yang,Z., Besse,J.	1993
Nam Phong	16.70	101.80	176-204	37.2	40.1	6.6	Yang,Z., Besse,J.	1993
Huai Hin Lat	16.70	101.80	204-217	39.5	44.4	8.3	Yang,Z., Besse,J.	1993
Upper Permian	16.70	101.80	251-260	33.0	39.4	6.0	Yang,Z., Besse,J.	1993
Limestone								
Mae Sot	16.80	98.70	168-200	359.8	31.4	5.0	Yang,Z.Y., Besse,J., Suthectorn,V., Bassoulet,J.P., Fontaine,H., Buffetaut,E.	1995

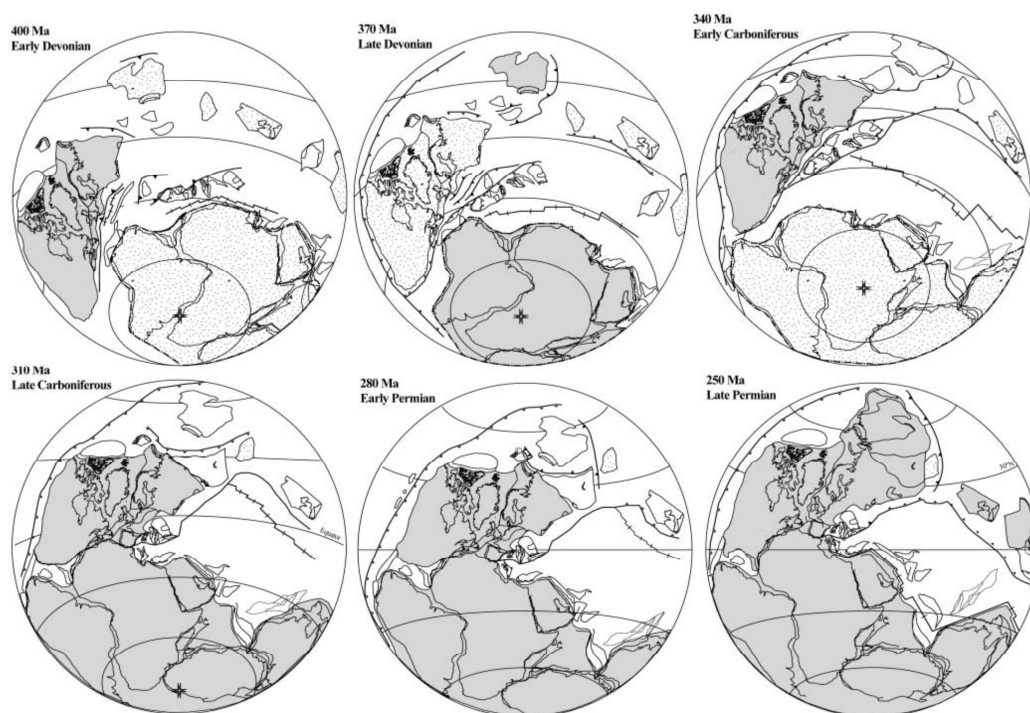
**Note:** RLAT: Reference latitude, RLONG: Reference longitude, DEC: Declination, INC: Inclination, ED95: Confident limit  
 (or  $\alpha_{95}$ )

## 1.2 ประวัติธรณีแปรสัณฐาน และลักษณะทางธรณีวิทยาของประเทศไทย

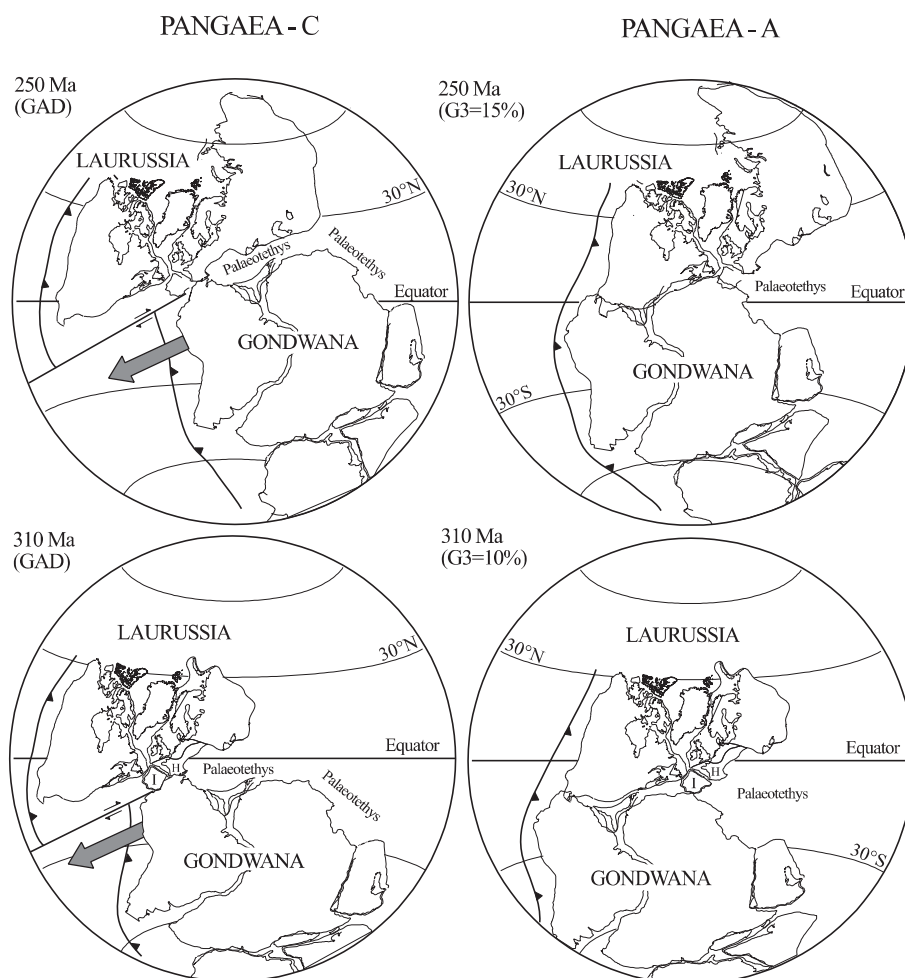
ในปี ค.ศ. 1915 อัลเฟรด เวเกเนอร์ (Alfred Wegener) ได้ศึกษาความเชื่อมโยงของข้อมูลซากดึกดำบรรพ์พืชและสัตว์ รวมทั้งข้อมูลหินจากพื้นที่แต่ละทวีป พบว่ามีความสอดคล้องกัน ดังนั้น อัลเฟรด เวเกเนอร์ จึงได้เสนอสมมติฐานว่า ในอดีตแผ่นเปลือกโลกเคยเป็นผืนเดียวมาก่อน และมีการเคลื่อนที่ไปจากเดิมในอดีต หรือที่เรียกว่า “ทวีปเลื่อน (continental drift)” ซึ่งนับว่าเป็นจุดเริ่มต้นสมมติฐานเรื่องธรณีแปรสัณฐาน หรือการก่อกำเนิดแผ่นทวีป (plate tectonic) แต่ก็ไม่เป็นที่แน่ชัดว่าสมมติฐานของ อัลเฟรด เวเกเนอร์ มีความถูกต้องหรือไม่ จนกระทั่งในเวลาต่อมาได้พัฒนากระบวนการศึกษาทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาล จากตัวอย่างหิน จึงทำให้ทราบถึงทิศทางของสนามแม่เหล็กโลกในอดีตจากกระบวนการศึกษาแมกนีไทเซชันตกค้างในตัวอย่างหิน และสามารถคำนวณย้อนกลับไปยังตำแหน่งของแผ่นเปลือกโลกต่างๆ ในอดีตได้ ดังนั้น จึงทำให้สามารถยืนยันได้ว่าแผ่นทวีปปัจจุบัน ไม่ได้อยู่ตรงตำแหน่งปัจจุบันมาก่อน นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าเปลือกโลกประกอบด้วย 13 แผ่นหลัก และตรงรอยต่อของแผ่นเปลือกโลกมีกิจกรรมทางด้านธรณีแปรสัณฐาน (tectonic) ต่างๆ เช่น การเคลื่อนที่แยกออกจากกัน หรือเข้าหากันของแผ่นต่างๆ รวมทั้งมีการเกิดและทำลายของแผ่นเปลือกโลกตรงบริเวณรอยต่อ จึงเป็นข้อมูลบ่งชี้ว่าแผ่นเปลือกโลกมีการเคลื่อนที่และเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นเหตุผลที่สนับสนุนแนวคิด หรือสมมติฐานของ อัลเฟรด เวเกเนอร์ มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือจากการค้นพบทั้งหมดนี้ จึงนับว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาเรื่องธรณีแปรสัณฐานมาจนถึงปัจจุบัน

ปี ค.ศ. 2004 Trosvik T.H. และ Cocks L.R.M. ได้รวบรวมข้อมูลภาวะแม่เหล็กบรรพกาลจากตัวอย่างหินแต่ละพื้นที่บนโลก ข้อมูลซากดึกดำบรรพ์พืชและสัตว์ ที่ได้รายงานการศึกษาก่อนหน้านี้ และศึกษาความเชื่อมโยงของข้อมูลต่างๆ จนนำมาสร้างแบบจำลองตำแหน่งแผ่นทวีปต่างๆ ในอดีต ตั้งแต่ช่วงอายุ 400 ถึง 250 ล้านปี โดยแบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆ 30 ล้านปี พบว่ามีลักษณะเป็นไปตามรูปที่ 1.1 จะเห็นว่าช่วงต้นถึงกลางยุคดีโวเนียน (early to middle Devonian) แผ่นทวีปแตกออกเป็นสองส่วน คือ มหาทวีปกอนด์วานา (Gondwana) ประกอบด้วยพื้นที่ อเมริกาใต้ แอฟริกา อินเดีย แอนตาร์กติกา ออสเตรเลีย และทวีปย่อยอื่นๆ อีก ส่วนที่สองคือ มหาทวีปลอเรเซีย (Laurasia) ประกอบด้วยพื้นที่ของทวีป อเมริกาเหนือ ยุโรป และแผ่นทวีปย่อยอื่นๆ จากนั้นในช่วงปลายยุคเพอร์เมียน (late Permian) แผ่นทวีปทั้งสองเคลื่อนที่เข้ามารวมกัน กลายเป็นแผ่นทวีปเดียว เรียกว่า พันเจีย (Pangea) ซึ่งข้อมูลของแผ่นทวีปพันเจีย ช่วงปลายยุคเพอร์เมียนยังมีความขัดแย้งกันอยู่จากงานวิจัยหลายชิ้น อันเนื่องมาจากข้อมูลทางด้านสนามแม่เหล็กโลก

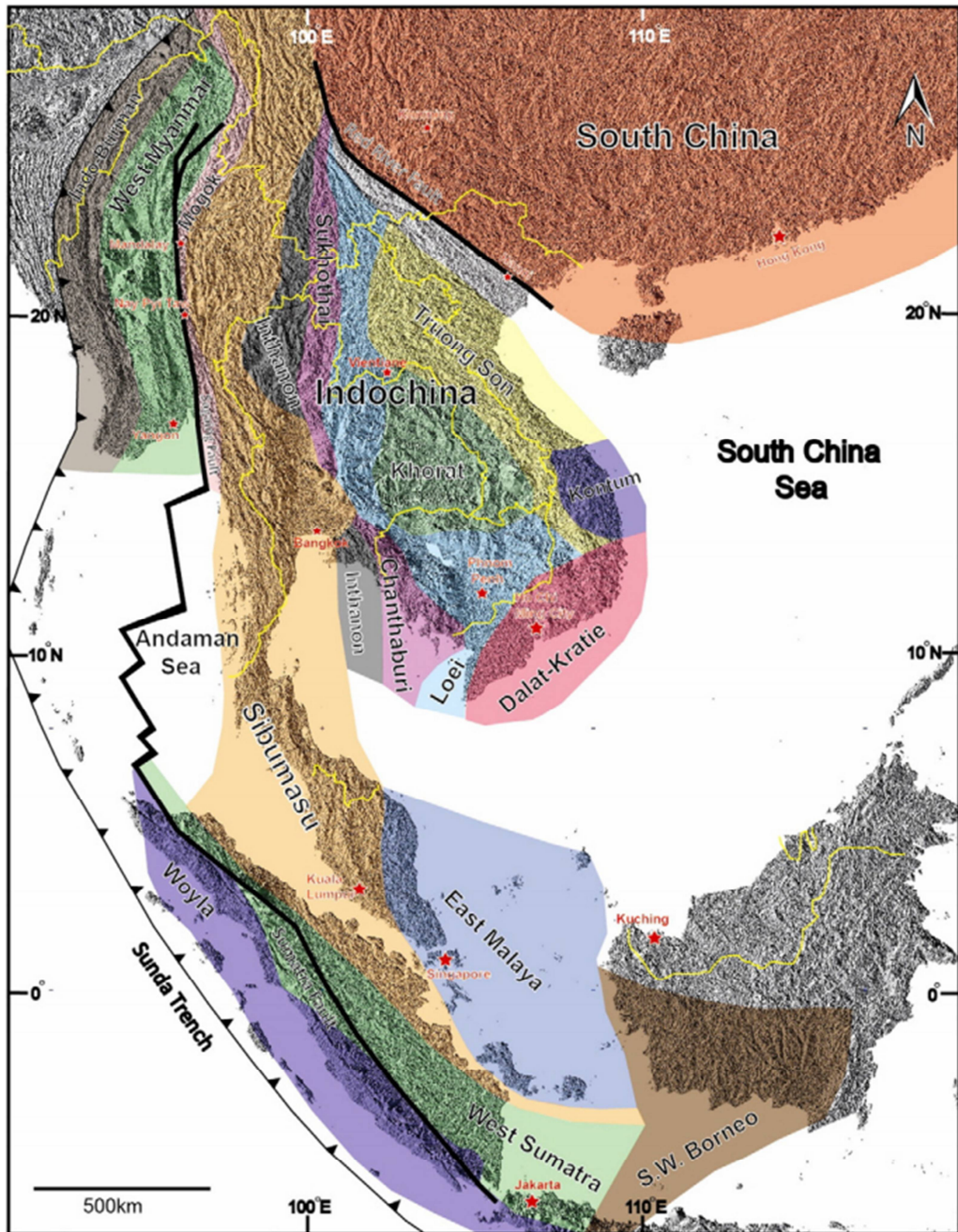
ในอดีตที่มีไม่เพียงพอ รวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กในอดีตในส่วนของไม่ใช่ไดโพล (non dipole) ยังมีไม่ชัดเจน แต่นักวิจัยหลายๆ ท่านยอมรับแบบจำลองแผ่นทวีปในช่วง 250 ล้านปี ตามแบบจำลองพินเจีย A แสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 แบบจำลองของแผ่นทวีปช่วง 400-250 ล้านปี ที่ผ่านมา (Trosvik and Cocks, 2004)



รูปที่ 1.2 แบบจำลองมหาทวีปกอนด์วานา (Gondwana) และมหาทวีปลอเรเซีย (Laurussia) เมื่อ 310 และ 250 ล้านปี พันเจีย C สร้างตามแบบจำลอง GAD และพันเจีย A ได้ทำการปรับแก้ทิศทางจากสนามแม่เหล็กส่วนไมโซไดโพล (Trosvik and Cocks, 2004)



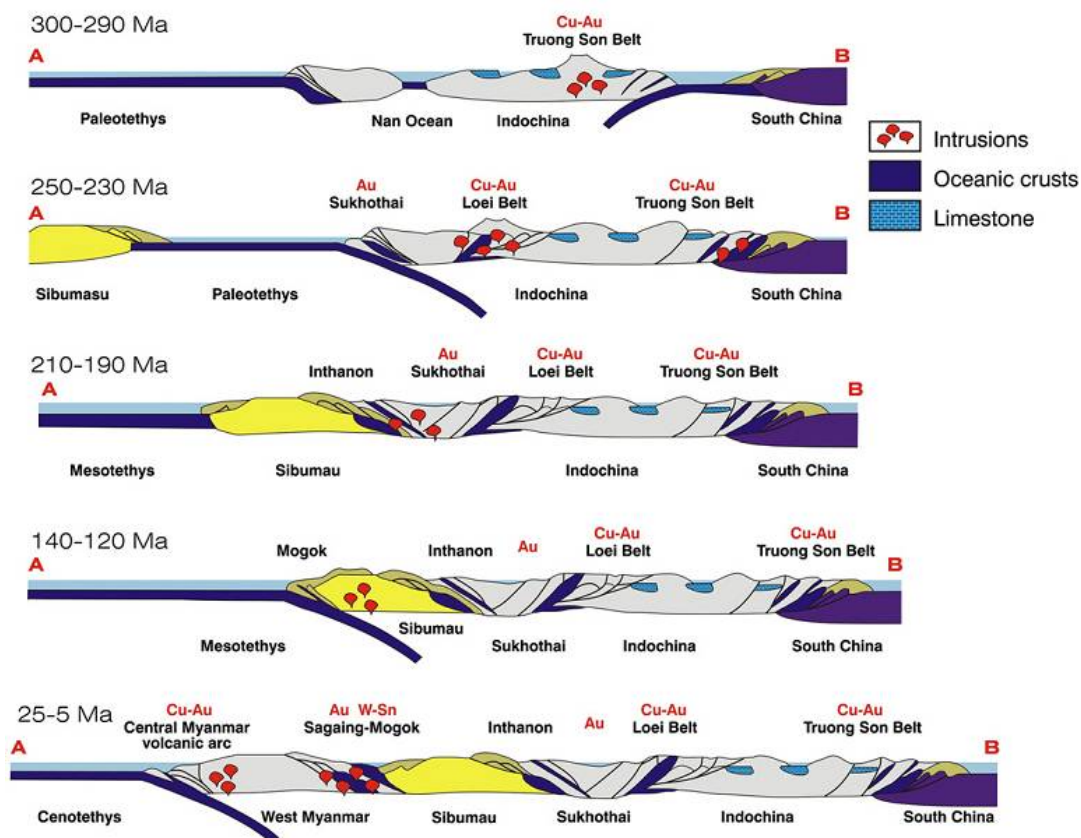
รูปที่ 1.3 รายละเอียดแผ่นเปลือกโลกของพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Khin Zaw et al., 2014)



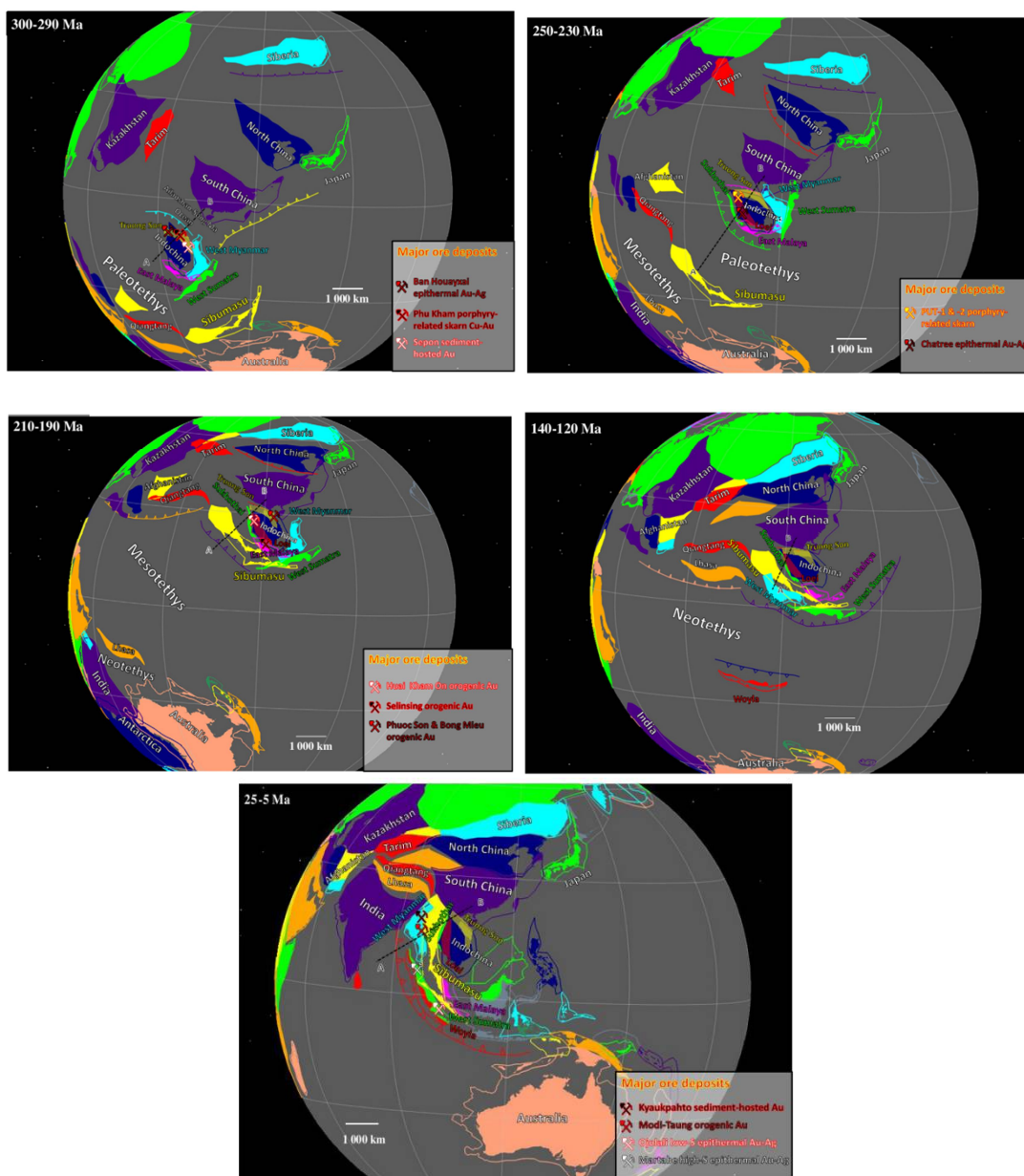
สำหรับพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (South East Asia) Khin Zaw และคณะ (2014) ได้นำเสนอประวัติธรณีแปรสัณฐาน ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย ลาว กัมพูชา เมียนมาร์ เวียดนาม มาเลเซีย อินโดนีเซีย และพื้นที่ยูนนาน (Yunnan) ในประเทศจีน โดยแบ่งเปลือกโลกของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ออกเป็นส่วนต่างๆ เช่น แผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (Indochina) แผ่นเปลือกโลกซิบูมาสุ (Sibumasu) แผ่นเปลือกโลกเมียนมาร์ตะวันตก (west Myanmar) และอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 นอกจากนี้ข้อมูลที่รายงานโดย Metcalfe (2011) ได้รายงานว่า แผ่นเปลือกโลกทั้งหมดของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เคยอยู่ทางด้านตะวันออกของมหาทวีปกอนด์วานา (Gonwana) มาก่อน ตรงกับพื้นที่ตะวันตกของออสเตรเลียในปัจจุบัน

Khin Zaw และคณะ (2014) ได้ใช้โปรแกรม G-Plate (พัฒนาโดย Earth Byte Project in the School of Geoscience at University of Syney) สร้างแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของแผ่นเปลือกโลกเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ตั้งแต่ 300 ถึง 5 ล้านปี ที่ผ่านมา โดยอาศัยข้อมูลการศึกษาทางด้านธรณีแปรสัณฐานที่มีรายงานก่อนหน้านี้ แสดงในรูปที่ 1.4 และ 1.5 พบว่าช่วงยุคไซลูเรียน (Silurian) ถึงยุคดีโวเนียน แผ่นเปลือกโลกต่างๆ ของพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แยกออกจากพื้นที่ตะวันออกมหาทวีปกอนด์วานา (Gondwana) และเคลื่อนที่ขึ้นมาทางเหนือ ช่องว่างระหว่างแผ่นทวีปย่อยต่างๆ กั้นด้วยมหาสมุทรบรรพกาล (palaeotethys) ต่อจากนั้นช่วงปลายยุคคาร์บอนิเฟอรัส (late Carboniferous) ถึงยุคเพอร์เมียนตอนต้น (early Permian) ระยะห่างระหว่างแผ่นทวีปต่างๆ แคลง เปลือกโลกส่วนที่เป็นพื้นมหาสมุทรของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนได้ เคลื่อนที่มุดใต้แผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (รูปที่ 1.4) เกิดแนวประทุนของหินภูเขาไฟ แนวคดโค้งตรังซอน (Truong Son fold belt) และแนวรอยเลื่อนแม่น้ำแดง (Red river fault) ต่อมาช่วงยุคเพอร์เมียนตอนปลาย (late Permian) ถึงช่วงต้นของยุคไทรแอสซิก (early Triassic) พื้นมหาสมุทรทางด้านแผ่นเปลือกโลกซิบูมาสุ เคลื่อนที่ชนกับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (รูปที่ 1.4) เกิดเป็นแนวคดโค้งสุโขทัย (Sukhothai fold belt – SKFB) และแนวคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ (Loei-Petchabun fold belt - LPFB) ผลจากการเคลื่อนชนกันของแผ่นทวีปทั้งสองช่วงดังกล่าวข้างต้น ส่งผลให้เกิดการยกตัวของชั้นหินตะกอนใต้ทะเล เกิดแนวประทุนของหินภูเขาไฟ และการดันตัวของหินแกรนิตให้เห็น ตามแนวรอยต่อระหว่างแผ่นเปลือกโลกต่างๆ จากข้อมูลนี้จึงสรุปได้ว่า การชนกันของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน กับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนได้ เกิดขึ้นในช่วงยุคเพอร์เมียนตอนปลาย ถึงช่วงต้นและกลางยุคไทรแอสซิก (earliest to middle Triassic) ส่วนการชนกันระหว่างแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน กับแผ่นเปลือกโลกซิบูมาสุ เกิดขึ้นในช่วงปลายของยุคไทรแอสซิก หลังจากนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านธรณีวิทยาในภูมิภาคนี้ เนื่องจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐานที่สำคัญอีกช่วง คือ ในยุคเทอร์เชียรี (Tertiary) แผ่นอินเดียเคลื่อนเข้ามาชนกับแผ่นยูเรเชีย ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาต่างๆ เช่น

เกิดแนวรอยเลื่อน (fault) เกิดชั้นหินคดโค้ง (fold) ของหินเดิม เกิดการหมุนและการเคลื่อนของแผ่นเปลือกโลกของพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จนกลายมาเป็นพื้นที่ในปัจจุบัน



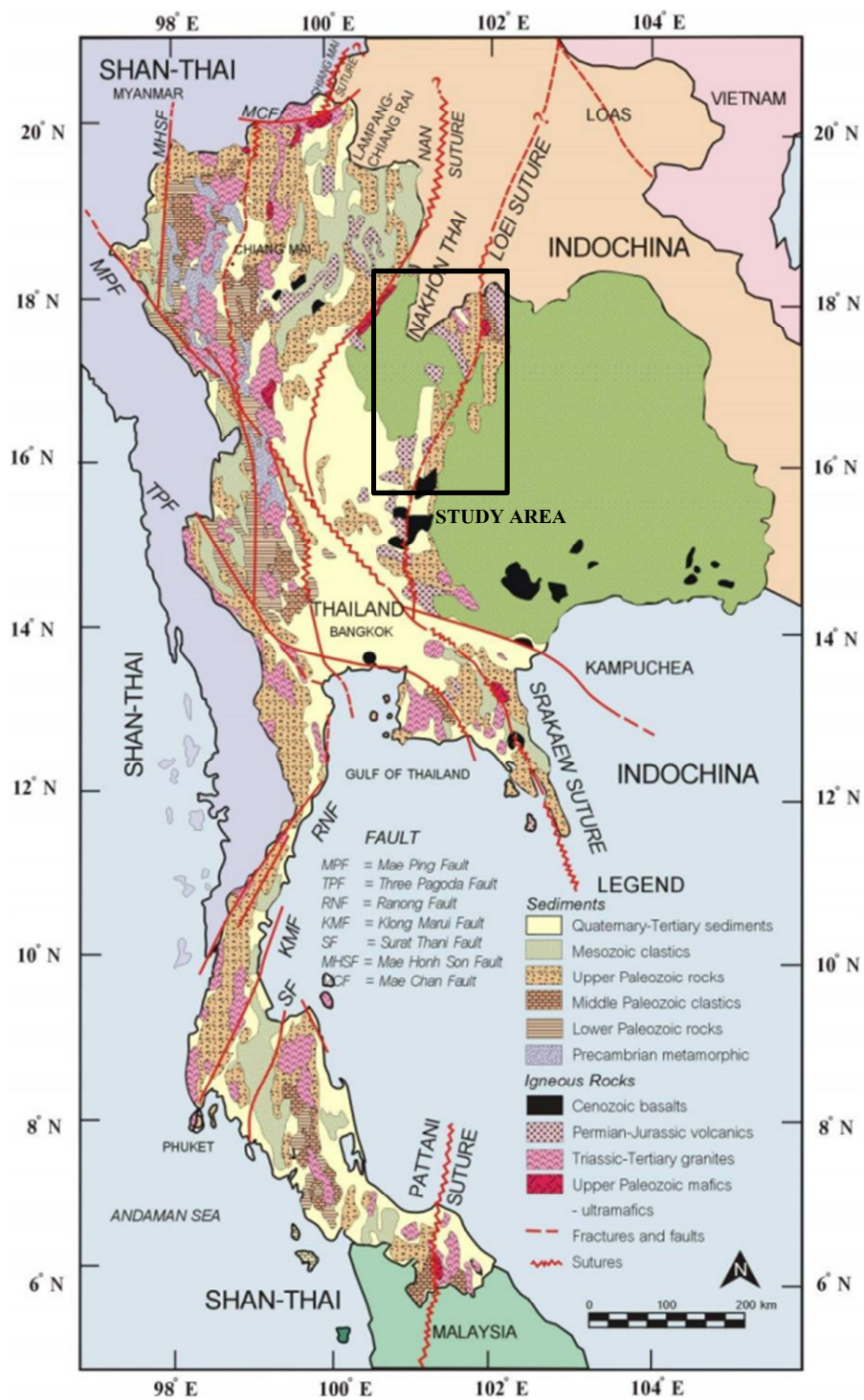
รูปที่ 1.4 แบบจำลองภาพตัดขวางของแผ่นเปลือกโลกภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในช่วงอายุ 300 ถึง 5 ล้านปี (Khin Zaw et al., 2014)



รูปที่ 1.5 แบบจำลองลักษณะการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในช่วงอายุ 300 ถึง 5 ล้านปี (Khin Zaw et al., 2014)

ปัจจุบันประเทศไทยตั้งอยู่บนคาบสมุทรเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีพื้นที่ประมาณ 518,000 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดตั้งแต่ละติจูด  $6.0^{\circ}$  ถึง  $20.5^{\circ}$  เหนือ และลองจิจูด  $97.5^{\circ}$  ถึง  $106^{\circ}$  ตะวันออก พื้นที่ตอนเหนือติดกับประเทศเมียนมาร์ และลาว ด้านตะวันตกติดกับประเทศเมียนมาร์ ทางตะวันออกติดต่อกับประเทศลาว และกัมพูชา ทิศใต้เป็นคาบสมุทร มีอ่าวไทย และทะเลอันดามันขนานทั้งสองข้าง มีพื้นที่ทางบกติดกับประเทศมาเลเซีย ลักษณะภูมิประเทศส่วน

ใหญ่มีแนวภูเขาขวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ พื้นที่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นที่ราบสูง และพื้นที่ภาคกลางเป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำ จากรายงานวิชาการที่นำเสนอก่อนหน้านี้ (Bunopas, 1981; Khin Zaw et al., 2014) รายงานว่า พื้นที่ประเทศไทยประกอบด้วยแผ่นเปลือกโลกสองแผ่น คือ แผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ครอบคลุมพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงบางส่วน ส่วนที่เหลือพื้นที่ทางด้านตะวันตก ภาคเหนือ และภาคใต้ เป็นส่วนของแผ่นเปลือกโลกซิบูมาสุ แต่จากรายงานของกรมทรัพยากรธรณีปี พ.ศ. 2550 ได้เรียกพื้นที่ส่วนนี้ว่า แผ่นเปลือกโลกชาน-ไทย (Shan-Thai) โดยตัดพื้นที่ ตะวันตกของประเทศเมียนมาร์ และพื้นที่ของเกาะอินโดนีเซียออก ซึ่งอ้างอิงตามการศึกษาของ Bunopas (1981) บริเวณรอยต่อของแผ่นเปลือกโลกทั้งสองจะปรากฏแนวคดโค้งที่สำคัญ คือ แนวคดโค้งน่าน-สุโขทัย (Nan-Sokhothai fold belt – NKFB) และแนวคดโค้งเลขเพชรบูรณ์ วางตัวแนวเหนือใต้ ตามแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 รายละเอียดโครงสร้างแผ่นเปลือกโลกของประเทศไทย (Charusiri et al., 2002)

ผลจากการเคลื่อนตัวเข้ามาชนกันของแผ่นเปลือกโลกซัน-ไทย กับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน และแผ่นเปลือกโลกอินเดียชนกับยูเรเชีย ก่อให้เกิดแนวตะเข็บ (suture) แนวรอยเลื่อน (fault) แนวคดโค้ง (fold) ต่างๆ และเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างธรณีวิทยา ปรากฏหินที่มีอายุตั้งแต่มหายุคพรีแคมเบรียน (Precambrian) ถึงปัจจุบันให้เห็น ตามแสดงรายละเอียดข้อมูลลำดับชั้นหินประเทศไทย ที่รายงานโดยกรมทรัพยากรธรณี พ.ศ. 2550 และแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย พ.ศ. 2542 (ภาคผนวก ก) ซึ่งสรุปข้อมูลของหินแต่ละยุคดังต่อไปนี้

**1.) หินมหายุคพรีแคมเบรียน (Precambrian)** พบกระจายตัวตามแนวขอบตะวันตกของแผ่นเปลือกโลกซัน-ไทย หรือ แนวตะวันตกของประเทศไทย แนวหินยุคนี้วางตัวตั้งแต่ตอนบนจากจังหวัดแม่ฮ่องสอน จนมาถึงทางตอนใต้ จังหวัดนครศรีธรรมราช และบริเวณจังหวัดชลบุรี หินส่วนใหญ่เป็นหินแปรสภาพอย่างไพศาล เป็นหินแปรเกรดสูง จำพวกหินออร์โทไนส์ หินพาราไนต์ หินแคลก์ซิลิเกต หรือหินอ่อน

**2.) หินมหายุคพาลีโอโซอิกตอนล่าง (lower Paleozoic)** พบกระจายตัวทางภาคเหนือ และภาคตะวันตกตอนบน ประกอบด้วยหินยุคแคมเบรียน ถึงดีโวเนียน เป็นหินชั้นพวกหินทราย หินดินดาน หินคาร์บอนेट และหินแปรเกรดต่ำ

**3.) หินมหายุคพาลีโอโซอิกตอนบน (upper Paleozoic)** ประกอบด้วยหินยุคคาร์บอนิเฟอรัส ถึงยุคเพอร์เมียน พบกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศยกเว้นที่ราบสูงโคราช หินคาร์บอนิเฟอรัสส่วนใหญ่เป็นพวกหินทราย หินดินดาน และหินกรวดปนทราย มีหินเชิร์ตและหินปูน ส่วนหินยุคเพอร์เมียนส่วนใหญ่เป็นหินปูน มีหินดินดาน หินทราย และหินเชิร์ต หินปูนยุคเพอร์เมียนสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนว คือ ทางด้านซีกตะวันตกรวมถึงบริเวณภาคใต้ (กลุ่มหินปูนราชบุรี) และแนวทางด้านตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของจังหวัดสระบุรี ลพบุรี นครสวรรค์ (กลุ่มหินปูนสระบุรี) และพื้นที่ตามแนวขอบที่ราบสูงโคราชด้านตะวันตก และนอกจากนั้น สามารถพบหินภูเขาไฟ และหินจำพวกอัลตราเมฟิก ในยุคนี้ด้วย

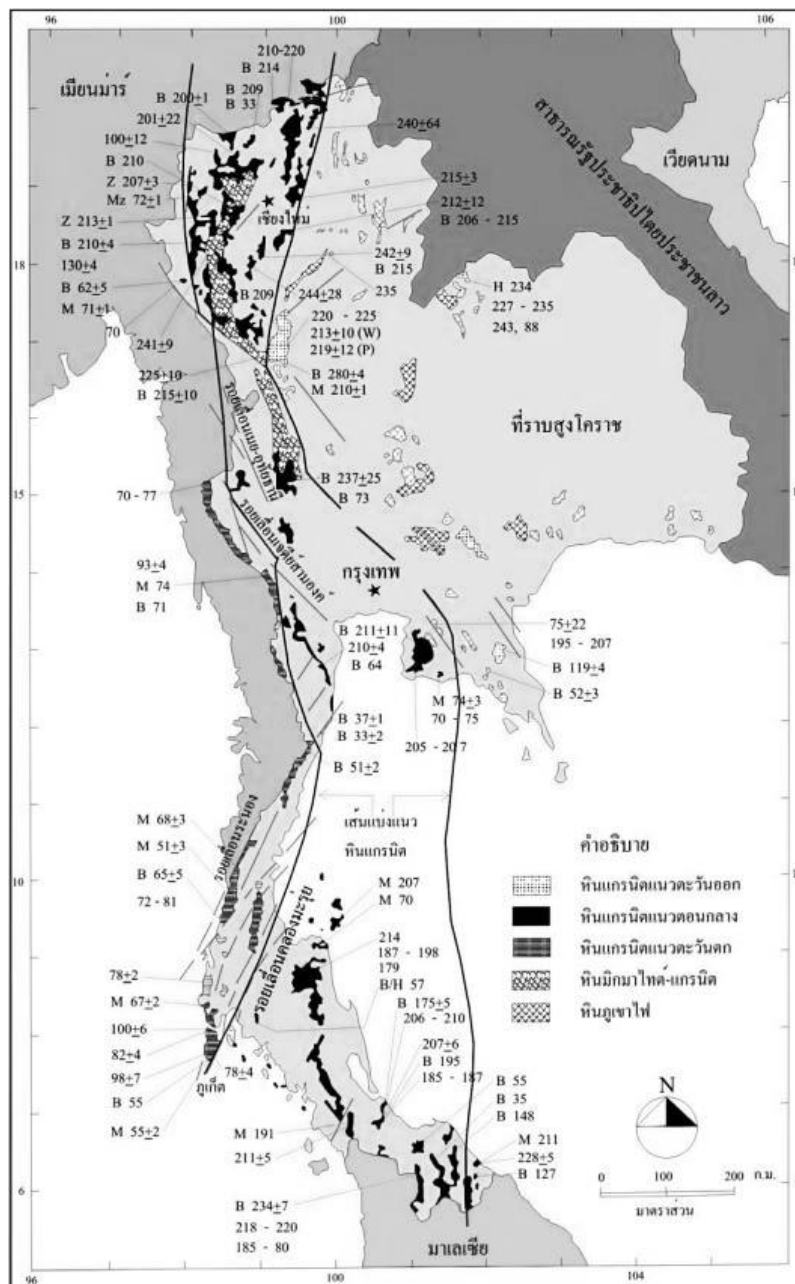
**4.) หินมหายุคมีโซโซอิก (Mesozoic)** ประกอบด้วยหินยุคไทรแอสซิก จูแรสซิก และครีเทเชียส ในช่วงยุคไทรแอสซิก เป็นการสะสมตัวของชั้นหินดินดาน หินปูน และหินทรายในสภาวะแวดล้อมภาคพื้นสมุทร ส่วนใหญ่พบบริเวณทางภาคเหนือ และภาคตะวันตก (กลุ่มหินลำปาง) แต่ก็มีปรากฏให้เห็นทางด้านชายฝั่งทะเลตะวันออก และภาคใต้เช่นกัน สำหรับหินในยุคจูแรสซิก-ครีเทเชียส จะเป็นหินทราย หินทรายแป้ง หินดินดาน และหินกรวดมน โดยชั้นหินมีลักษณะสีแดง บ่งบอกถึงการสะสมตัวภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมภาคพื้นทวีป ขอบเขตหินยุคจูแรสซิก-ครีเทเชียส แผ่ปกคลุมบริเวณที่ราบสูงโคราชทั้งหมด (กลุ่มหินโคราช) ส่วนบริเวณด้านตะวันตกของภาคเหนือ และในบางพื้นที่ของภาคตะวันตกตอนบน ภาคกลางตอนล่าง และบริเวณ

ภาคใต้นั้น จะเป็นหินดินดาน และหินปูนยุคจูแรสซิก เกิดการสะสมตัวในสภาวะแวดล้อมภาคพื้นสมุทร

5.) หินมหายุคซีโนโซอิก (Cenozoic) ประกอบด้วยหินยุคเทอร์เชียรี และหินยุคควอเทอร์นารี เป็นหินที่เกิดจากการสะสมตัวบนบก และในทะเลลึกของแอ่งที่จมตัวลงไป ในลักษณะบล็อกรังกรaben จะวางตัวในแนวเหนือใต้เป็นส่วนใหญ่ เป็นผลมาจากการยกตัวของแผ่นดิน และการเกิดรอยเลื่อนในช่วงแผ่นเปลือกโลกอินเดียชนกับยูเรเชีย ในยุคเทอร์เชียรี ส่วนมากจะเรียกว่า “แอ่งเทอร์เชียรี” พบกระจายอยู่ทั้งบนบก และในทะเล ประกอบด้วยหินทราย หินดินดาน และหินโคลน ส่วนชั้นตะกอนยุคควอเทอร์นารีจะเป็นตะกอนสะสมตัวที่ยังไม่แข็ง ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยตะกอน กรวด ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว ชั้นศิลาแลง และเศษหินผุพังจากหินเดิม แล้วเกิดการสะสมตัวบริเวณตะพักลุ่มน้ำ (alluvial fan) บริเวณที่ราบน้ำท่วมชายฝั่งทะเล และทะเลสาบ

### 1.3 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่เก็บตัวอย่างสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ทั้งหมดอยู่บริเวณจังหวัดเลย และจังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแนวคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ (บริเวณขอบตะวันตกของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน) มีพื้นที่ครอบคลุม พื้นที่ประเทศลาว จังหวัดเลย จังหวัดเพชรบูรณ์ พื้นที่ตอนกลางของประเทศ ภาคตะวันออก และบางส่วนของประเทศกัมพูชา บริเวณนี้สามารถพบหินตะกอนตั้งแต่ยุคดีโวเนียน ถึงปัจจุบัน หินภูเขาไฟจำพวก แอนดีไซต์ และไรโอไลต์ ตั้งแต่ยุคเพอร์เมียน ตอนปลาย ถึงยุคไทรแอสซิก แต่จากรายงานของ Intasopa และ Dunn (1994) บริเวณตอนเหนือของจังหวัดเลย สามารถพบหินภูเขาไฟที่มีอายุอยู่ในช่วงยุคดีโวเนียน-คาร์บอนิเฟอรัส และยุคไซลูเรียน และที่สำคัญบริเวณพื้นที่แนวคดโค้งนี้ ยังเป็นแหล่งแร่เศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทยอีกด้วย เช่น ทองคำ ทองแดง เป็นต้น โดยจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะการเกิดหินอัคนี



รูปที่ 1.7 ลักษณะการกระจายตัวของกลุ่มหินแกรนิต ในประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

แนวหินแกรนิตในประเทศไทยส่วนใหญ่พบตามแนวตะเข็บต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็นสามแนวด้วยกัน ตามรายงานของ กรมทรัพยากรธรณี (2550) และ Charusiri และคณะ (1993) แสดงในรูปที่ 1.7 ประกอบด้วย แนวหินแกรนิตตะวันตก มีอายุอยู่ในช่วงยุคเทอร์เชียรีตอนกลาง (middle Tertiary) ประมาณ 80 ถึง 50 ล้านปี แนวหินแกรนิตภาคกลาง มีอายุอยู่ในช่วงตอนปลายของยุคไทรแอสซิก ถึงยุคกลางของไทรแอสซิก ประมาณ 220 ถึง 180 ล้านปี และแนว



สุดท้ายทางด้านตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่แนวคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ มีอายุตั้งแต่ตอนต้นถึงตอนปลายของยุคไทรแอสซิก ประมาณ 245 ถึง 210 ล้านปี ในพื้นที่นี้ค่อนข้างมีความหลากหลายของหินภูเขาไฟ และหินแกรนิต มีนักวิจัยหลายท่านได้รายงานอายุของหินบริเวณนี้ เช่น Intasopa และ Dunn (1994) ได้ศึกษาอายุของหินภูเขาไฟบริเวณจังหวัดเลย และได้รายงานอายุของหินไรโอไลต์ ด้วยเทคนิค Rb-Sr และ Sm-Nd มีอายุอยู่ในช่วงยุคดีโวเนียน หินบะซอลต์มีอายุอยู่ในช่วงตอนกลางยุคดีโวเนียน ถึงตอนต้นยุคคาร์บอนิเฟอรัส และหินแอนดีไซต์ มีอายุอยู่ในช่วงยุคเพอร์เมียน ถึงยุคไทรแอสซิก สำหรับพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์ Salam และคณะ (2014) และ Kamvong และคณะ (2006) ได้รายงานอายุของหินภูเขาไฟ พบว่ามีอายุอยู่ในช่วงยุคเพอร์เมียนตอนปลายถึงยุคไทรแอสซิกตอนต้น

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ตัวอย่างหินที่เก็บจากพื้นที่ศึกษาจะเน้นเก็บตัวอย่างหินจำพวกหินภูเขาไฟ ยุคเพอร์เมียน ถึงยุคไทรแอสซิก เป็นหลัก แต่ก็มีบางจุดที่เป็นหินตะกอนที่มีอายุในช่วงยุคเพอร์เมียน แสดงในรูปที่ 1.8 ซึ่งสรุปรายละเอียดธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา ตั้งแต่ยุคไซลูเรียน ถึงยุคไทรแอสซิก พร้อมตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมด 14 จุด รายละเอียดของพื้นที่ศึกษาที่ทำการเก็บตัวอย่างจะแยกอธิบายแต่ละจังหวัด ดังนี้

### 1.3.1 พื้นที่ศึกษาจังหวัดเลย

จังหวัดเลยเป็นจังหวัดเหนือสุดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีพื้นที่ระหว่างละติจูด  $16^{\circ}45'$  -  $18^{\circ}10'$  เหนือ และลองจิจูด  $100^{\circ}50'$  -  $102^{\circ}10'$  ตะวันออก จังหวัดเลยเป็นส่วนหนึ่งของที่ราบสูงโคราช ตั้งอยู่บริเวณแอ่งสกลนคร ภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นเทือกเขาวางตัวในแนวเหนือใต้ มีที่ราบลุ่มระหว่างหุบเขาวางตัวสลับอยู่ระหว่างแนวเทือกเขาเหล่านั้น หินส่วนใหญ่เป็นกลุ่มหินโคราช มีแม่น้ำเลยเป็นแม่น้ำสายสำคัญไหลจากใต้ขึ้นเหนือ

ช่วงมหายุคพาลีโอโซอิกพื้นที่จังหวัดเลย มีลักษณะการสะสมตัวของตะกอนเกิดขึ้นบริเวณขอบทวีปที่ไม่มีการปรับตัวรุนแรงในทะเลบรรพกาล ผลจากการเคลื่อนเข้าหากันระหว่างแผ่นเปลือกโลกซัน-ไทย กับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ในยุคไทรแอสซิก ก่อให้เกิดการบีบอัดของกลุ่มหินตะกอน เกิดเป็นชั้นหินคดโค้ง และแนวรอยเลื่อน ขนานไปกับแนวเชื่อมต่อของแผ่นเปลือกโลกทั้งสอง สามารถพบหินตะกอนตั้งแต่ยุคไซลูเรียน-ดีโวเนียน บริเวณตอนกลางตะวันออก รวมทั้งพื้นที่ทางทิศใต้ของจังหวัด และหินบางส่วนถูกแปรสภาพไปเป็นหินแปร ถัดจากนั้นมหายุคมีโซโซอิกเรื่อยมาจนถึงมหายุคซีโนโซอิก เกิดการสะสมของตะกอนน้ำจืดบนพื้นแผ่นเปลือกโลกที่มีการยกตัว เป็นลักษณะการสะสมตะกอนบนบก เริ่มสะสมตัวตั้งแต่ปลายยุคไทรแอสซิกเรื่อยมา และกลายเป็นชั้นหินสีแดงกระจายตัวบริเวณภูเขาสูงทางด้านทิศใต้ และตะวันตก

เฉียงใต้ ซึ่งเป็นกลุ่มหินโคราช ส่วนหินอัคนีพบกระจายตัวเป็นแห่งๆ ประกอบด้วยหินบะซอลต์ และหินเซอร์เพนทีไนต์ หินอัคนีแทรกซอน เช่น หินแกรนิต หินแกรโนไดออไรต์ หินไดออไรต์ และหินฮอร์นเบลนไดต์ หินภูเขาไฟที่พบมีทั้งแบบการไหลของลาวา และการสะสมตะกอนของถ้ำภูเขาไฟ เช่น หินบะซอลต์ หินแอนดีไซต์ หินเดไซต์ และ หินไรโอไลต์ เป็นต้น ดังแสดงในแผนที่ธรณีวิทยา (ภาคผนวก ข)

### 1.3.2 พื้นที่ศึกษาจังหวัดเพชรบูรณ์

จังหวัดเพชรบูรณ์มีแนวเขตติดต่อระหว่างภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง ตั้งอยู่ประมาณละติจูดที่  $16^{\circ}$  เหนือ กับลองจิจูดที่  $101^{\circ}$  ตะวันออก ลักษณะภูมิประเทศทั่วไปของจังหวัดเพชรบูรณ์ประกอบด้วยภูเขาวางตัวเป็นรูปเกือกม้ารอบพื้นที่ด้านเหนือของจังหวัดเป็นแนวนานทั้งสองข้างทางทิศตะวันออกและทิศตะวันตก คิดเป็นเนื้อที่ประมาณร้อยละ 40 ของพื้นที่ทั้งหมด ตอนกลางจังหวัดเป็นแอ่งที่ราบ มีลักษณะลาดชันจากเหนือลงมาได้ มีแม่น้ำป่าสัก เป็นแม่น้ำสายสำคัญของจังหวัด ไหลผ่านตอนกลางของจังหวัดจากทิศเหนือไปยังทิศใต้ ระยะทางประมาณ 250 กิโลเมตร

บริเวณพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์สามารถพบหินตะกอน หินอัคนี และตะกอนร่วน ตั้งแต่ช่วงยุคคาร์บอนิเฟอรัส ถึงยุคควอเตอร์นารี จากการศึกษาชั้นหินมหายุคพาลีโอโซอิก พบว่าเกิดจากการตกตะกอนในสภาวะแวดล้อมแบบทะเลตื้น จึงเป็นหลักฐานบ่งชี้ว่าพื้นที่นี้เคยเป็นขอบของแผ่นเปลือกโลกมาก่อน ช่วงยุคเพอร์เมียนตอนกลางการสะสมตัวของตะกอนค่อนข้างสงบ ส่งผลให้พบหินปูนในยุคนี ช่วงรอยต่อระหว่างยุคคาร์บอนิเฟอรัสและเพอร์เมียนตอนล่าง มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านธรณีวิทยาบ้างเล็กน้อย แต่ไม่รุนแรงมากนัก จึงส่งผลให้พบตะกอนของหินภูเขาไฟในหินยุคนีบ้าง ช่วงปลายยุคเพอร์เมียนไปจนถึงยุคไทรแอสสิกตอนต้น เกิดหินภูเขาไฟในลักษณะลาวาทัฟฟ์ และเกิดเป็นผนังหินแทรกเข้าไปในชั้นหินตะกอนเดิม

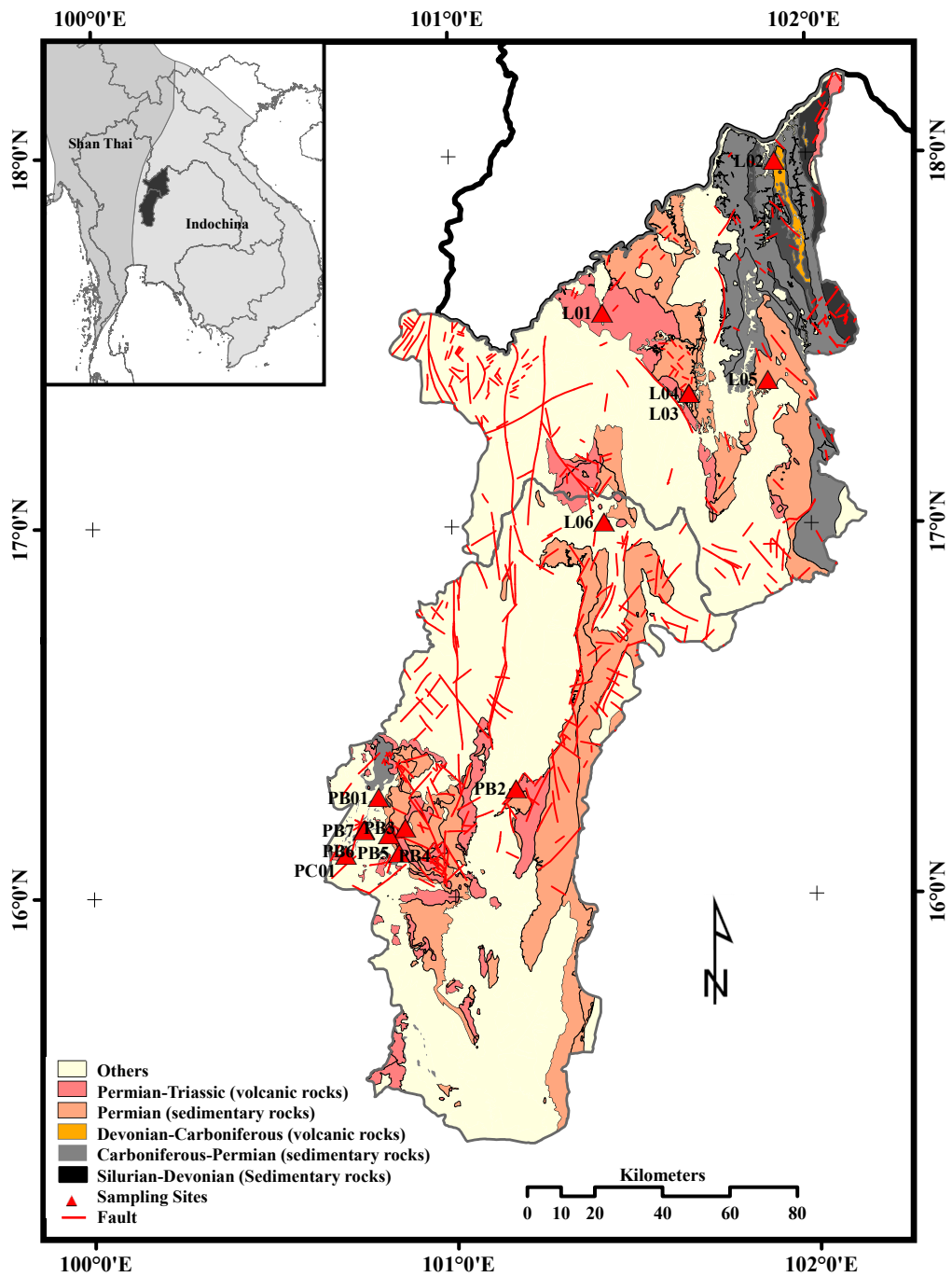
ในช่วงปลายยุคไทรแอสสิก เกิดหินภูเขาไฟ และการแทรกคั่นตัวของหินอัคนีพุ ประเภทหินแกรนิตแกรโนไดออไรต์ และหินไดออไรต์ โดยเกิดบริเวณต้นใกล้เปลือกโลก จึงส่งผลให้เกิดความรุนแรงในแง่ความร้อนและความดันต่ำ ทำให้ไม่เกิดการแปรสภาพบริเวณไพศาล (regional metamorphism) ของหินที่เกิดอยู่ก่อน ภายหลังในยุคไทรแอสสิกตอนปลาย เปลือกโลกบริเวณนี้มีการปรับสภาพอีกในบางบริเวณมีการโค้งงอของชั้นหิน และมีการยกตัวของแผ่นดิน โดยเฉพาะการยกตัวของหินแกรนิตขึ้นมาเหนือผิวโลก ซึ่งต่อมาผุพัง และถูกพัดพาโดยกระแสน้ำ แล้วสะสมตัวใหม่กลายเป็นหินตะกอนยุคจูแรสสิกในสภาวะที่ถูกควบคุมโดยอิทธิพลของทางน้ำ ช่วงตอนต้นของยุคเทอร์เชียรีมีการปรับตัวของเปลือกโลกอีกครั้ง สาเหตุจากการเคลื่อนของแผ่น

เปลือกโลกอินเดียชนกับแผ่นยูเรเชีย ก่อให้เกิดการขยายตัวและทรุดตัวของแผ่นดินทำให้เกิดแอ่ง  
 สะสมตะกอนในลักษณะกราเบนหรือกึ่งกราเบน (graben หรือ half graben) และลักษณะธรณี  
 โดยรวมของจังหวัดเพชรบูรณ์ ดังแสดงในแผนที่ธรณีวิทยา (ภาคผนวก ค)

จุดเก็บตัวอย่างทั้งหมด 14 จุด ซึ่งประกอบด้วยตัวอย่างที่เป็นหินอัคนี 8 จุด หิน  
 ตะกอน 3 จุด และหินสการ์น (skarn) 3 จุด ซึ่งรายละเอียดจุดเก็บตัวอย่างทั้ง 14 จุด จากพื้นที่จังหวัด  
 เลย และจังหวัดเพชรบูรณ์ ตามแสดงในรูปที่ 1.8 และตารางที่ 1.2

#### 1.4 วัตถุประสงค์

ศึกษาอำนาจแม่เหล็กในหินและภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหินภูเขาไฟในยุค  
 เพอร์โม-ไทรแอสซิก (Permo-Triassic) จากพื้นที่จังหวัดเลยและจังหวัดเพชรบูรณ์ เพื่ออธิบายธรณี  
 สันฐานของพื้นที่ศึกษาในยุคเพอร์โม-ไทรแอสซิก



รูปที่ 1.8 ตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง และลักษณะการกระจายตัวของหินที่มีอายุอยู่ในช่วงยุคดีโวเนียน ถึงยุคไทรแอสซิก (ปรับปรุงจากแผนที่ธรณีวิทยา 1:250,000 กรมทรัพยากรธรณี ปี พ.ศ. 2552)

**ตารางที่ 1.2** รายละเอียดตัวอย่างหินที่เก็บจากพื้นที่ศึกษา จังหวัดเพชรบูรณ์ และจังหวัดเลย

หมายเลขตัวอย่าง	พิกัด/พื้นที่	ชนิดของหิน <sup>(1)</sup>	อายุ	อื่นๆ <sup>(2)</sup>
L01	17.57237°N 101.42616°E อ.ท่าลี่ จ.เลย	หินแกรนิต เนื้อดอกสีน้ำตาล	PTr <sup>(1)</sup>	อดีตเคยเป็นเหมืองหินประดับชนิดหินแกรนิตมาก่อน ปัจจุบันหยุดกิจการไปแล้ว
L02	17.97809°N 101.91169°E อ.ปากชม จ.เลย	หินสปีดิกบะซอลต์และหินทัฟฟ์ และหินปูน	DC <sup>(1)</sup>	เป็นเหมืองหินสำหรับงานก่อสร้าง ดำเนินกิจการโดย หจก.เลขวิสูทธิ์
L03	17.35481°N 101.66357°E อ.วังสะพุง จ.เลย	หินสการ์น (skarn) เกิดจากการแทรกตัวของหินแกรนิตไดออไรต์	Tr <sup>(1)(3)</sup>	เป็นแหล่งแร่ทองคำทับฟ้า ดำเนินกิจการโดย บริษัท พุ่งคำ จำกัด
L04	17.35472°N 101.66363°E อ.วังสะพุง จ.เลย	(granodiorite) และหินไมโครไดออไรต์ (microdiorite) แทรกตัวผ่านชั้นหินเดิมที่เป็นหินตะกอนยูคเปอร์เมียน จำพวกหินปูน (limestone) และหินทรายแป้ง (siltstone)		
L05	17.38790°N 101.88397°E กิ่งอ.เอราวัณ จ.เลย	หินปูนเนื้อสีขาว	P <sup>(1)</sup>	เป็นเหมืองหินอุตสาหกรรมชนิดหินปูนเพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง ดำเนินกิจการโดย บจก.เพชรเมืองเลยอสังหาริมทรัพย์
L06	17.00914°N 101.42178°E อ.หล่มเก่า จ.เพชรบูรณ์	หินแกรนิตเนื้อดอกสีเขียว	PTr <sup>(1)</sup>	เป็นเหมืองหินประดับชนิดหินแกรนิต ดำเนินกิจการโดย บริษัท สยามกรีน แกรนิต จำกัด
PC01	16.11464°N 100.69835°E อ.ชนแดน จ.เพชรบูรณ์	หินแอนดีไซต์ลักษณะหินเนื้อละเอียด สีเทาแกมเขียว <sup>(5)</sup>	PTr <sup>(1)</sup>	บริเวณหิน โผล่ มีลักษณะภูมิประเทศรอบๆ เป็นพื้นที่ทำเกษตรกรรม
PB01	16.27128°N 100.78835°E อ.ชนแดน จ.เพชรบูรณ์	หินแอนดีไซต์ลักษณะหินเนื้อละเอียด สีเทาแกมเขียว <sup>(5)</sup>	PTr <sup>(1)</sup>	บริเวณหิน โผล่ มีลักษณะภูมิประเทศรอบๆ เป็นพื้นที่ทำเกษตรกรรม
PB2	16.29246°N 100.17011°E อ.เมืองเพชรบูรณ์ จ.เพชรบูรณ์	พนักหินบะซอลต์ แอนดีไซต์	PTr <sup>(1)</sup>	เป็นเหมืองหินอุตสาหกรรมชนิดหินแอนดีไซต์เพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง ดำเนินกิจการโดย หจก.พฤติพงษ์ก่อสร้าง
PB3	16.18973°N 100.86233°E อ.ชนแดน จ.เพชรบูรณ์	หินดินดานเนื้อละเอียดสีเทาแกมเขียว	P <sup>(1)</sup>	เป็นหิน โผล่ บริเวณวัดพระบาทชนแดน
PB4	16.16998°N 100.81646°E อ.ชนแดน จ.เพชรบูรณ์	หินไรโอไลต์ เนื้อละเอียดสีน้ำตาล	PTr <sup>(1)</sup>	แนวตัดถนน บริเวณริมทางหลวงหมายเลข 113 ระหว่าง อ.ชนแดน-บ้านท่าข้าม
PB5	16.12069°N 100.84472°E อ.ชนแดน จ.เพชรบูรณ์	หินปูนเนื้อสีเทาดำ	P <sup>(1)</sup>	เป็นเหมืองหินอุตสาหกรรมชนิดหินปูนเพื่ออุตสาหกรรม ดำเนินกิจการโดย บจก.ทองขาว
PB6	16.18272°N 100.74754°E อ.ชนแดน จ.เพชรบูรณ์	พนักหินบะซอลต์ แอนดีไซต์	PTr <sup>(1)</sup>	เป็นเหมืองหินอุตสาหกรรมชนิดหินแอนดีไซต์เพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง ดำเนินกิจการโดย บจก.สิลาทวีโชค
PB7	16.18261°N 100.74748°E อ.ชนแดน จ.เพชรบูรณ์	หินแกรนิตสีชมพู	C <sub>u</sub> <sup>(4)</sup>	เป็นเหมืองหินอุตสาหกรรมชนิดหินแอนดีไซต์เพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง ดำเนินกิจการโดย บจก.สิลาทวีโชค

**หมายเหตุ** (1) ชนิดของหินอ้างอิงจากข้อมูลแผนที่ธรณีวิทยา 1:250,000 กรมทรัพยากรธรณี ปี พ.ศ. 2552, (2) อ้างอิงรายงานข้อมูลประทานบัตร กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, (3) Khin Zaw et al. (2014), (4) Salam et al. (2014) และ (5) รายงานกรมทรัพยากรธรณี ฉบับ 11/37 พ.ศ.2537, Tr : Triassic, PTr : Permo-Triassic, DC : Devonian-Carboniferous, P: Permian, C<sub>u</sub>: Upper Carboniferous

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 สนามแม่เหล็กโลก

โลกสามารถแบ่งออกเป็นสี่ชั้นหลักๆ คือ ชั้นนอกหรือส่วนของเปลือกโลก (crust) มีความหนาเฉลี่ย 38 กิโลเมตร ถัดจากนั้นเป็นชั้นแมนเทิล (mantle) มีความหนาประมาณ 2,885 กิโลเมตร แกนโลกชั้นนอก (outer core) เป็นหินหนืด มีความหนา ประมาณ 2,270 กิโลเมตร และชั้นสุดท้าย คือ แกนโลกชั้นใน (inner core) เป็นของแข็งมีความหนาประมาณ 1,216 กิโลเมตร (Fowler, 2005) โลกมีสนามแม่เหล็กปกคลุมอยู่รอบๆ ทำหน้าที่เสมือนเป็นเกราะป้องกันรังสีจากนอกโลก และจากบันทึกในอดีต พบว่าประเทศจีนได้ใช้ประโยชน์จากสนามแม่เหล็กโลก ร่วมกับเข็มทิศที่ทำมาจากแร่แมกนีไทต์ (magnetite -  $Fe_3O_4$ ) สำหรับการนำทางตั้งแต่ 200 ปี ก่อนคริสตกาล จากนั้นจนถึงปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กโลก จนพัฒนา มาเป็นทฤษฎี และองค์ความรู้ต่างๆ มากมาย และกลายมาเป็นส่วนสำคัญ สำหรับการศึกษาด้านแม่เหล็กและภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหินในปัจจุบัน

แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กโลก แบ่งเป็นสองส่วน คือ เกิดจากปัจจัยภายนอกโลก (external field) เช่น อวกาศ การเคลื่อนที่ของประจุในชั้นบรรยากาศ และส่วนที่สองเป็นผลมาจากปัจจัยภายในโลก (internal field) เกิดจากการเคลื่อนที่ของหินหนืดที่มีอุณหภูมิสูงในแกนโลกชั้นนอก และเกือบทั้งหมดเคลื่อนไปในทิศทางเดียวกันรอบๆ แกนโลกชั้นใน ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ดังนั้น แกนโลกจึงเปรียบเสมือนเป็นแท่งแม่เหล็กไดโพล มีทิศโมเมนต์แม่เหล็กชี้ไปทางขั้วโลกใต้ ซึ่งปัจจุบันมีทิศทางวางตัวทำมุมประมาณ 11.2 องศา กับแกนหมุนของโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.1

พิจารณาแกนโลกมีลักษณะเป็นไดโพลโมเมนต์ มีค่าโมเมนต์แม่เหล็กเท่ากับ  $M$  ดังนั้น ที่ตำแหน่งต่างๆ บนโลก สามารถคำนวณหาค่าศักย์แม่เหล็ก (magnetic potential -  $V$ ) ตามสมการที่ (2.1) และสามารถคำนวณความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก (Earth magnetic field -  $H$ ) ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ตามสมการที่ (2.2)

$$V = \frac{M \cdot \hat{r}}{r^2} = \frac{M \cos \theta}{r^2} \quad (2.1)$$

$$H = -\nabla V = -\left(\frac{\partial}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \hat{\theta}\right) \left(\frac{M \cos \theta}{r^2}\right) \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.2) องค์กรประกอบสนามแม่เหล็กโลกขึ้นอยู่กับ ละติจูด ( $\lambda$ ) รูปที่ 2.1(ค) และรัศมีของโลก ( $r$ ) เพียงอย่างเดียว ถ้าพิจารณาแมกนีไทเซชัน (magnetization -  $M$ ) คงที่ ดังนั้น สมการ (2.2) สามารถแจกแจงรายละเอียดความเข้มสนามแม่เหล็กโลกได้ตามสมการที่ (2.3) ซึ่งมีองค์กรประกอบเวกเตอร์ตามแสดงในรูปที่ 2.1(จ) ที่มีองค์กรประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง ( $H_v$ ) และสนามแม่เหล็กในแนวราบ ( $H_h$ ) ตามสมการที่ (2.4) และ (2.5) นอกจากนี้ยังเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าของละติจูด ( $\lambda$ ) และมุมเอียงเท (inclination -  $I$ ) ของสนามแม่เหล็กโลกรวมที่จุดต่างๆ บนโลก ได้ตามสมการที่ (2.6) จากความสัมพันธ์นี้ แสดงให้เห็นว่า ค่าสนามแม่เหล็กรวมที่จุดต่างๆ มีค่าคงที่ และเป็นผลรวมของค่าสนามแม่เหล็กโลกในแนวนอน และแนวตั้ง ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.7) โดย  $M$  มีค่าเท่ากับ  $8.75 \times 10^{25} \text{ G} \cdot \text{cm}^3$  หรือ  $8.75 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$  (Butler, 1992)

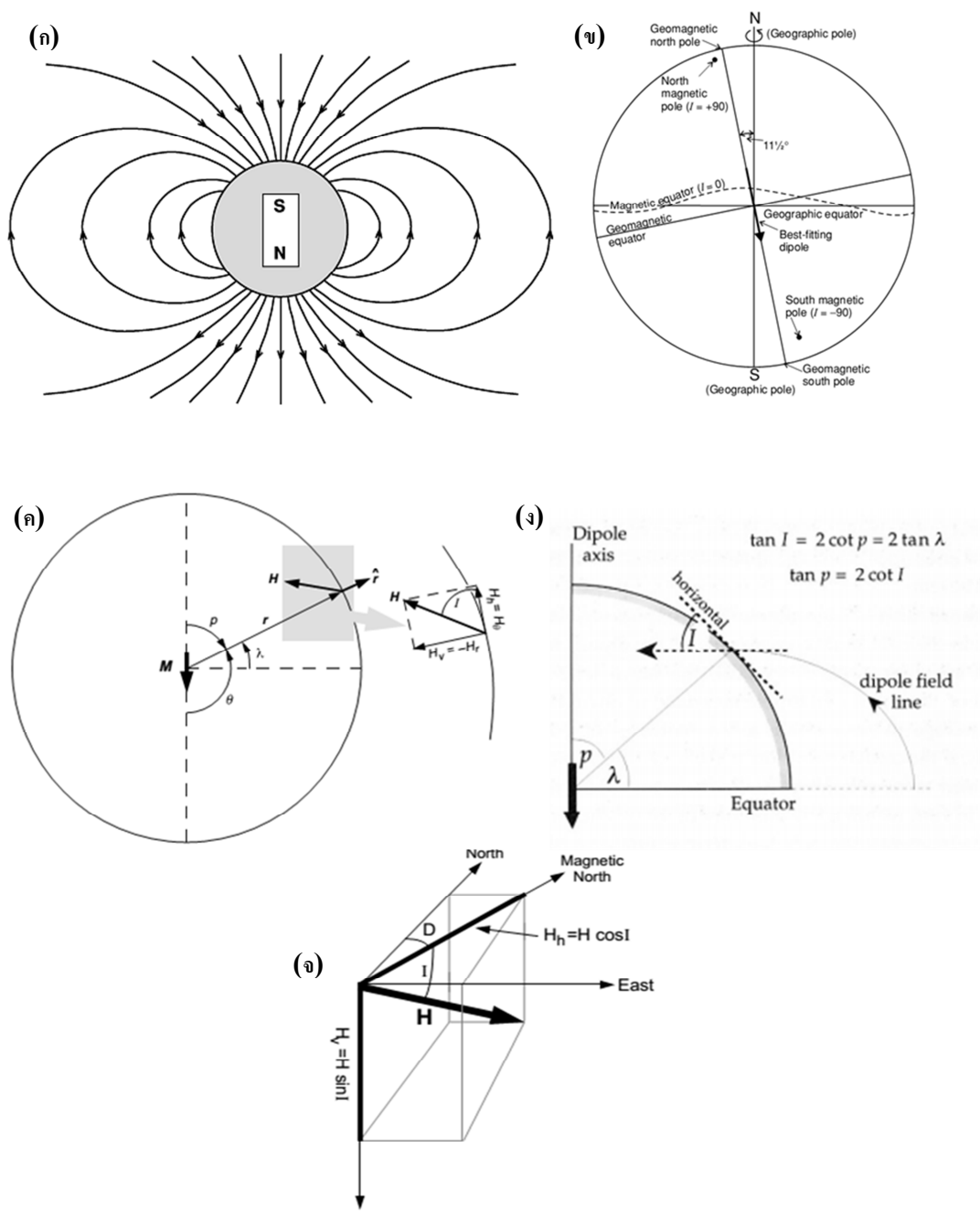
$$H = \frac{2M \cos \theta}{r^3} \hat{r} + \frac{M \sin \theta}{r^3} \hat{\theta} = H_r \hat{r} + H_\theta \hat{\theta} \quad (2.3)$$

$$H_h = H_\theta = \frac{M \sin \theta}{r^3} = \frac{M \cos \lambda}{r^3} \quad (2.4)$$

$$H_v = -H_r = -\frac{2M \cos \theta}{r^3} = \frac{2M \sin \lambda}{r^3} \quad (2.5)$$

$$\tan I = 2 \tan \lambda \quad (2.6)$$

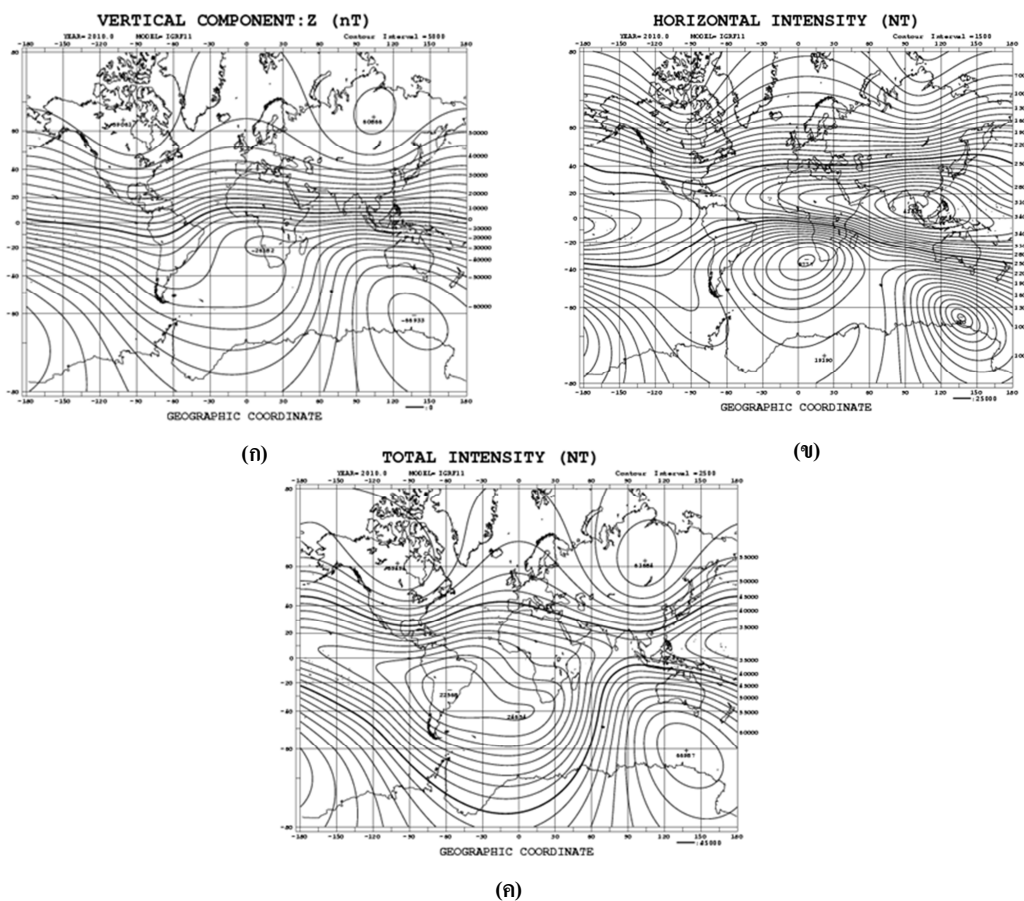
$$H = \sqrt{H_h^2 + H_v^2} = \frac{M}{r^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.1 (ก)(ข) สนามแม่เหล็กโลก (ค)-(จ) องค์ประกอบของแม่เหล็กโลก H (total field), Inc (inclination) และ Dec (declination) (Fowler, 2005; Butler, 1992)



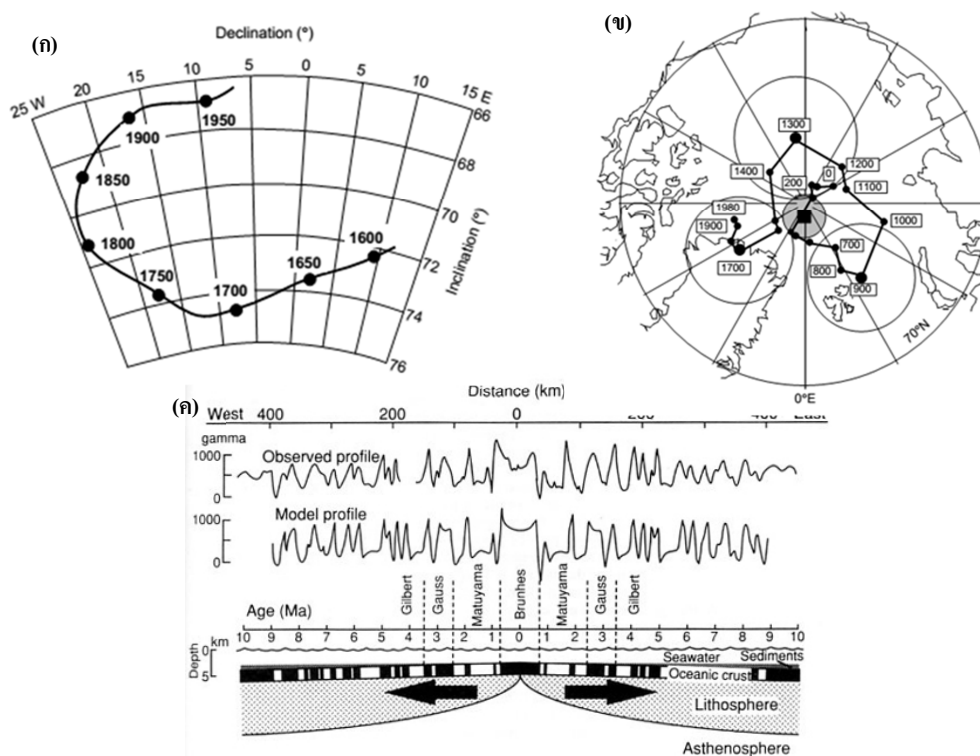
แบบจำลองที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ตามสมการข้างต้นเรียกว่า “geocentric axial dipole - GAD” โดยนิยาม แกนไดโพลแม่เหล็กโลกวางตัวแนวเดียวกับแกนหมุนของโลก และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลกทุกจุดบนพื้นโลกมีค่าแน่นอน คำนวณได้ตามสมการที่ (2.7) แต่ความเป็นจริงจากข้อมูลวัดค่าสนามแม่เหล็กโลกที่ตำแหน่งต่างๆ (อ้างอิงจากข้อมูล International Geomagnetic Reference Field - IGRF) ไม่ได้เป็นไปตามสมการข้างต้น เพราะสาเหตุจากองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กส่วนที่ไม่ใช่ไดโพล (non-dipole field) ผสมอยู่กับค่าที่วัดได้ แสดงในรูปที่ 2.2 แต่ยังไม่แน่ชัดว่าสนามแม่เหล็กส่วนนี้มาจากสาเหตุอะไร และยังมีข้อถกเถียงกันอยู่ในเรื่องนี้ ซึ่งจากการเก็บข้อมูลสนามแม่เหล็กโลก (ความเข้ม และทิศทาง) ในช่วงเวลาต่างๆ ในอดีตพบว่า มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงสองแบบ คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กโลก และการกลับขั้วแม่เหล็กโลก



รูปที่ 2.2 ข้อมูลสนามแม่เหล็กโลกที่วัดได้ (ก) สนามแม่เหล็กโลกในแนวตั้ง ( $B_z$ ) (ข) สนามแม่เหล็กโลกในแนวราบ ( $B_H$ ) (ค) สนามแม่เหล็กโลกทั้งหมด ( $B_T$ ) (อ้างอิงจาก

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html>)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทิศทาง และความเข้มสนามแม่เหล็กโลกในช่วงคาบของการเปลี่ยนแปลง 1 ถึง  $10^5$  ปี เรียกว่า “geomagnetic secular variation - GSV” ยกตัวอย่างในรูปที่ 2.3 แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กโลก บริเวณพื้นที่ Greenwich England พบว่ามุม Dec และมุม Inc มีค่าแตกต่างกันในช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กส่วนที่ไม่ใช่ไดโพลที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะแต่ละพื้นที่ นอกจากนั้น จากข้อมูลสนามแม่เหล็กตกค้างจากตัวอย่างหินบริเวณรอยแยกของแผ่นทวีปในมหาสมุทร (sea floor spreading) และจากชั้นดินตะกอน พบว่าสนามแม่เหล็กโลกมีการกลับขั้วไปมาหลายรอบในอดีต ซึ่งครั้งล่าสุดที่มีการกลับขั้วเกิดขึ้นเมื่อประมาณ เจ็ดแสนปีที่ผ่านมา ตามแสดงในรูปที่ 2.3(ค) และภาคผนวก ง ส่วนสาเหตุการกลับทิศทางขั้วแม่เหล็กโลกยังไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะอธิบายว่ามาจากสาเหตุใด



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแสดงค่า Dec และ Inc ที่เวลาต่างๆ (ก) ข้อมูลแม่เหล็กจากพื้นที่ศึกษา Greenwich England (ข) ตำแหน่งขั้วเหนือของแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา (ค) ข้อมูลแม่เหล็กบริเวณรอยต่อของแผ่นทวีปในมหาสมุทร แถบสีดำ คือ ขั้วแม่เหล็กปกติ และแถบสีขาว คือ ช่วงเวลาแม่เหล็กกลับขั้ว (Butler, 1992)

## 2.2 ทฤษฎีทางด้านวัสดุแม่เหล็ก

ทฤษฎีและองค์ความรู้ต่างๆ เกี่ยวกับการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก และภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหิน ได้มีรายงานมากมายหลายชิ้น ในช่วงที่ผ่านมา (เช่น Tarling, 1983; Collinson, 1983; O'Reilly, 1984; Butler, 1992; Tarling and Hroudá, 1993; Dunlop and Ozdemir, 1997; McElhinny and McFadden, 2000; Tauxe, 2003) นับว่ามีประโยชน์อย่างมากสำหรับการศึกษาทางด้านนี้ ซึ่งจะสรุปเฉพาะในส่วนประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ดังต่อไปนี้

### 2.2.1 วัสดุแม่เหล็ก (magnetic material)

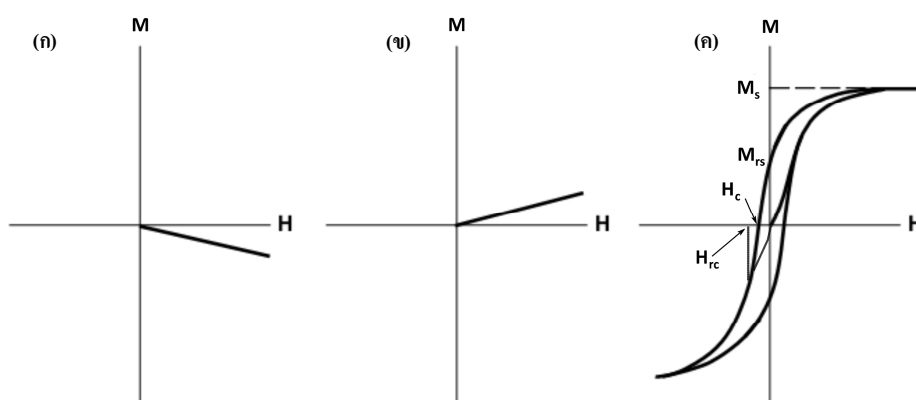
ผลจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบอะตอมและรอบตัวเอง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้น โดยโมเมนต์แม่เหล็กสัมพันธ์กับทิศทางสปิน และแกนหมุนของอิเล็กตรอน ซึ่งแต่ละตัวจะมีโมเมนต์แม่เหล็กเท่ากับ  $9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$  เรียกค่านี้ว่า “Bohr magneton -  $\mu_B$ ” ถ้าอิเล็กตรอนมีอยู่ครบคู่ในระดับชั้นพลังงาน โมเมนต์แม่เหล็กก็จะหักล้างกันหมด ส่งผลให้โมเมนต์รวมมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าไม่ครบคู่ โมเมนต์แม่เหล็กรวมที่ได้ก็จะต่างออกไป ยกตัวอย่างเช่น  $^{26}\text{Fe}^{2+}$  มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ 2 ตัว ในลำดับชั้นพลังงาน 3d ดังนั้น โมเมนต์แม่เหล็กรวมมีค่าเท่ากับ  $2\mu_B$  ( $1.85 \times 10^{-23} \text{ Am}^2$ )

กรณีวัสดุถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก H ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศของโมเมนต์แม่เหล็ก และเกิดอำนาจแม่เหล็กเหนี่ยวนำ เรียกว่า “induced magnetization - M” ถ้าทิศทางของ M มีทิศตรงข้ามกับ H เรียกวัสดุพวกนี้ว่า ไดอะแมกเนติก (diamagnetic) และถ้ามีทิศทางเดียวกับ H เรียกว่า พาราแมกเนติก (paramagnetic) โดยที่ M กับ H จะมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเชิงเส้นของวัสดุทั้งสอง ตามสมการที่ (2.8) แต่โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำจะสลายไป หรือกลับไปเป็นแบบสุ่มเหมือนเดิมตอนไม่มีสนาม H

$$M = KH \quad (2.8)$$

เมื่อ M คือ อำนาจแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (induced magnetization) A/m  
 H คือ สนามแม่เหล็กภายนอก (external magnetic field) A/m  
 K คือ สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility)

แต่มีวัสดุอยู่ประเภทหนึ่งที่ไม่เป็นไปตามลักษณะข้างต้น คือ เมื่อเหนี่ยวนำด้วยสนาม  $H$  จะส่งผลให้เกิด  $M$  สูงมาก (เมื่อเทียบกับสองชนิดแรก) หรือมีค่า  $K$  สูง และความสัมพันธ์ระหว่าง  $H$  กับ  $M$  ไม่เป็นลักษณะเชิงเส้น นอกจากนั้นทิศทางโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะยังคงอยู่ไม่สลายไป ถึงแม้ไม่มีสนามแม่เหล็ก  $H$  ก็ตาม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า แมกนีไทเซชันตกค้าง (remanent magnetization) วัสดุประเภทนี้เรียกว่า เฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) (ยกเว้นวัสดุจำพวกซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic)) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $H$  กับ  $M$  ของตัวอย่างทั้งสามประเภท แสดงในรูปที่ 2.4 โดยปกติวัสดุไดอะแมกเนติก จะมีค่า  $K$  ประมาณ  $-10^{-5}$  SI ส่วนพาราแมกเนติก จะมีค่า  $K$  ประมาณ  $10^{-2}$  ถึง  $10^{-4}$  SI และมากกว่านั้นก็จะเป็นเฟอร์โรแมกเนติก (Tarling and Hrouda, 1993)



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอำนาจแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ( $H$ ) กับแมกนีไทเซชัน ( $M$ ) (ก) ไดอะแมกเนติก (ข) พาราแมกเนติก และ (ค) เฟอร์โรแมกเนติก (ดัดแปลงจาก Butler, 1992)

### 2.2.2 แร่แม่เหล็ก (magnetic minerals)

ต้นกำเนิดแร่แม่เหล็กในหินสัมพันธ์โดยตรงกับหินอัคนี เพราะหินหนืดได้เปลือกโลกจะนำแร่แม่เหล็กขึ้นมาบนพื้นโลกจากกระบวนการเกิดหินอัคนี ซึ่งเป็นแร่แม่เหล็กในกลุ่มไททาโนแมกนีไทต์ (titanomagnetite - TM) ส่วนมากมีองค์ประกอบของแร่ในกลุ่ม TM60 เป็นหลัก (O'Reilly, 1984) ระหว่างที่หินหนืดเหล่านั้นแทรกดันตัวขึ้นมา ผ่านชั้นหินตะกอนเดิม ก็จะเกิดการแพร่ของแร่แม่เหล็กเข้าไปยังหินตะกอนเหล่านั้นบริเวณแนวสัมผัส (contact zone) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแร่ต่างไปจากเดิม และเมื่อเวลาผ่านไปหินอัคนีเกิดการผุพัง ก็จะถูก

พัฒนาไปสะสมตัวเป็นหินตะกอน ซึ่งคุณสมบัติทางแม่เหล็กของหินตะกอนเหล่านี้สัมพันธ์โดยตรงกับหินอัคนีที่เป็นต้นกำเนิด

หินแต่ละประเภทมีองค์ประกอบของแร่หลากหลาย แร่แต่ละชนิดมีสมบัติทางแม่เหล็กแตกต่างกัน ดังนั้น สมบัติทางแม่เหล็กของหินจะขึ้นอยู่กับแร่ที่เป็นองค์ประกอบของหิน ตามตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.5 ถ้าพิจารณาค่า K ของหินแต่ละประเภท พบว่าหินตะกอนจะมีค่าต่ำ และสูงในกลุ่มของหินอัคนี (หินจำพวกอัลตราเมฟิกจะมีค่า K สูงสุด) ในตัวอย่างหินถึงแม้มีแร่แม่เหล็กจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก ในปริมาณที่น้อยๆ ก็จะส่งผลต่อสมบัติแม่เหล็กของวัสดุต่างๆ อย่างชัดเจน (Tarling and Hrouda, 1993) สำหรับการศึกษาด้านแม่เหล็กบรรพกาล และสมบัติทางแม่เหล็กของหิน แร่แม่เหล็กสำคัญมีสองกลุ่มด้วยกัน ที่เกี่ยวข้องกับตัวอย่างหินในธรรมชาติ ซึ่งทั้งสองตกผลึกที่อุณหภูมิประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส ในกระบวนการเกิดหินอัคนี (Butler, 1992) ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.) ไททานอแมกนีไทต์ (titanomagnetite - TM) แร่แม่เหล็กในกลุ่มนี้ มีอัตราส่วนระหว่างแมกนีไทต์ (magnetite -  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) กับ ulvöspinel -  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  ผสมกันอยู่ มีโครงสร้างเป็นแบบสปินเนล (spinel) สามารถเขียนในรูปสมการทั่วไปได้  $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$  โดยที่ x เป็นอัตราส่วนระหว่างแร่แม่เหล็กทั้งสอง มีค่าตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 โดยอัตราส่วนดังกล่าวจะเป็นตัวบอกลักษณะสมบัติทางแม่เหล็กของแร่ในกลุ่มนี้ เช่น อุณหภูมิคูรี ( $T_C$ ) ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ตามแสดงในรูปที่ 2.6 (ข)

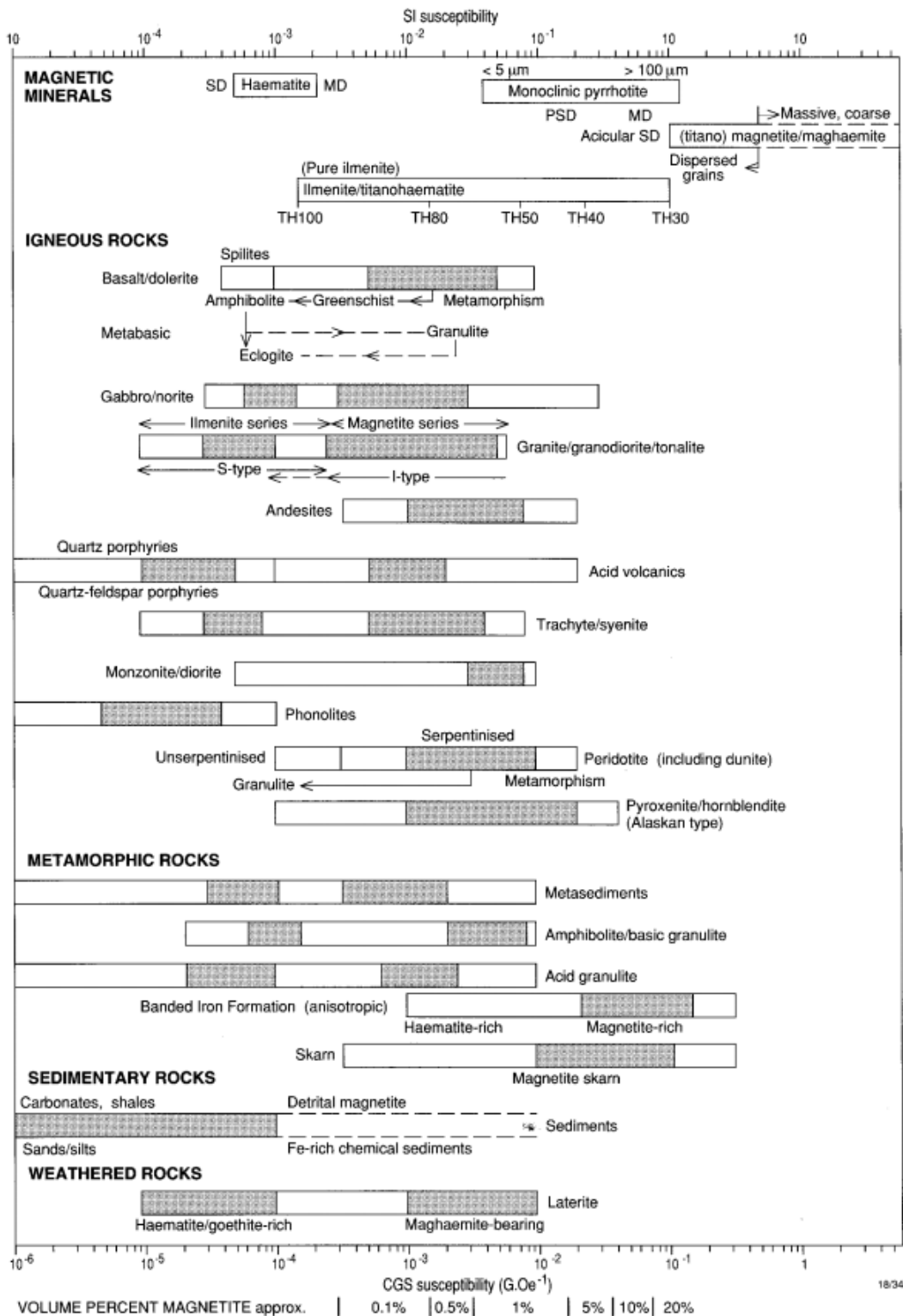
2.) ไททานฮีมาไทต์ (titanohematite - TH) แร่แม่เหล็กในกลุ่มนี้ มีอัตราส่วนระหว่างฮีมาไทต์ (hematite -  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) กับแร่อิลเมไนต์ (ilmenite -  $\text{FeTiO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบ เขียนอยู่ในรูปสมการทั่วไป คือ  $\text{Fe}_{2-y}\text{Ti}_y\text{O}_3$  ค่า y จะบอกอัตราส่วนผสมของแร่ทั้งสอง และเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแร่ในกลุ่มนี้ ซึ่งมีลักษณะที่ซับซ้อนกว่าในกลุ่มแรก (มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น) ตามแสดงในรูปที่ 2.6 (ค)

นอกจากนั้นหินบางชนิดสามารถพบแร่แม่เหล็กชนิดอื่นๆ ได้อีก เช่น เกอไทต์ (goethite -  $\alpha\text{FeOOH}$ ) ส่วนมากพบในตะกอน หรือหินตะกอน มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลแดง มีสมบัติทางด้านแม่เหล็กตามแสดงในตารางที่ 2.1 ถ้าเผาเกอไทต์ที่อุณหภูมิ 250-400 องศาเซลเซียส เกอไทต์จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นฮีมาไทต์ โดยกระบวนการดึงน้ำออกจากโมเลกุล (dehydration) นอกจากนั้นเกอไทต์จะอิมตัวที่สนามเหนี่ยวนำสูงๆ (>10 T) แต่มีค่าแมกนีไทเซชันอิมตัวต่ำ ( $0.01-1 \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$ ) และมีความแข็งแรงของแมกนีไทเซชันตกค้างสูง ( $h_c$  สูง) จึงจำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กสูงมากถึงจะสามารถลบล้างได้ (Butler, 1992) แร่แม่เหล็กอีกชนิดที่สามารถพบเห็นได้จากตัวอย่าง

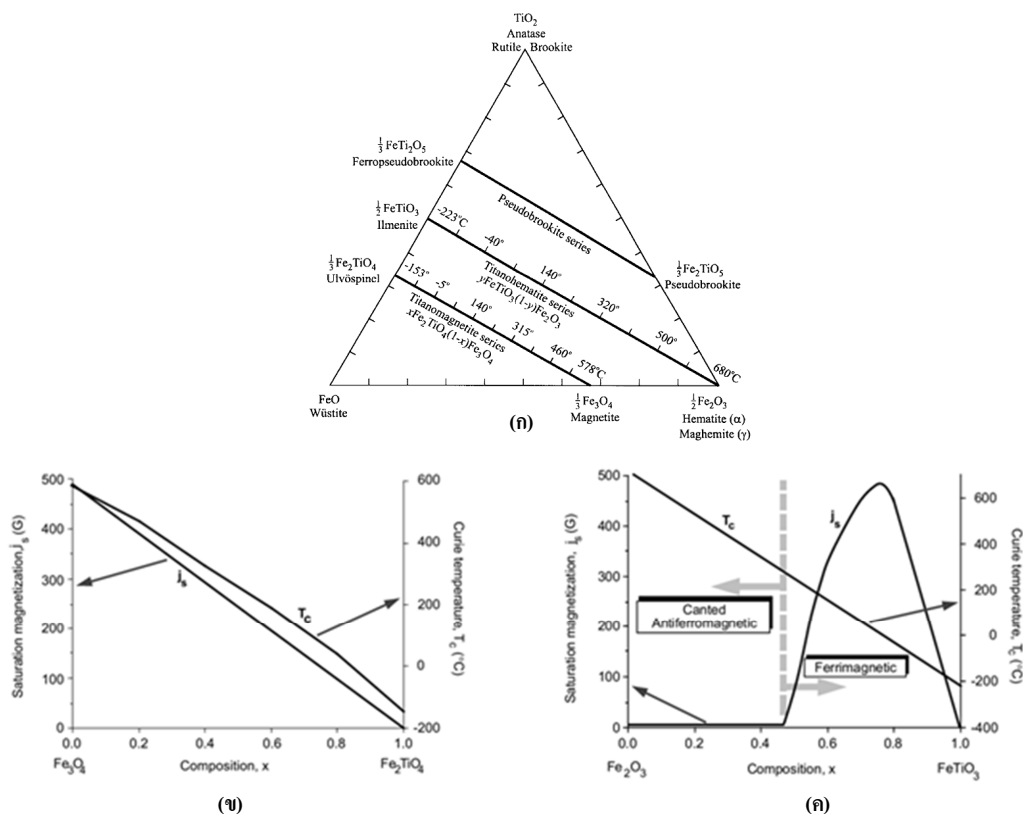
ในธรรมชาติ คือ แมกนีไทต์ (magnetite -  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันของแมกนีไทต์ มีโครงสร้างที่คล้ายๆ กัน แต่มีอุณหภูมิคูรีสูงกว่า ตามแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างแร่แม่เหล็กและสมบัติทางแม่เหล็ก (McElhinny and McFadden, 2000)

Mineral	Composition	Magnetic state	Ms ( $10^3 \text{ Am}^{-1}$ )	T <sub>c</sub> (°C)
Magnetite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Ferrimagnetic	480	580
Titanomagnetite (TM60)	$\text{Fe}_{2.4}\text{Ti}_{0.6}\text{O}_4$	Ferrimagnetic	125	150
Ulvöspinal	$\text{Fe}_2\text{TiO}_4$	Antiferromagnetic		-153
Hematite	$\alpha\text{Fe}_2\text{S}_3$	Canted antiferromagnetic	$\approx 2.5$	675
Ilmenite	$\text{Fe}_2\text{TiO}_4$	Antiferromagnetic		-233
Maghemite	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferrimagnetic	380	590-675
Pyrrhotite	$\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ( $0 < x \leq 1/8$ )	Ferrimagnetic	$\approx 80$	320
Greigite	$\text{Fe}_3\text{S}_4$	Ferrimagnetic	125	$\approx 330$
Goethite	$\alpha\text{FeOOH}$	Antiferromagnetic with defect ferromagnetic	$\approx 2$	120
Iron	Fe	Ferromagnetic	1715	765
Cobalt	Co	Ferromagnetic	1422	1131
Nickel	Ni	Ferromagnetic	484	358



รูปที่ 2.5 ช่วงค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของหิน และแร่แม่เหล็กประเภทต่างๆ (Clark, 1997)



รูปที่ 2.6 (ก) รายละเอียดแผนภาพไตรภาค (ternary diagram) ของ TiO<sub>2</sub>-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และกราฟแสดงอุณหภูมิคูรี (T<sub>c</sub>) และค่าแม่เหล็กไทเทชันอิ่มตัว (J<sub>s</sub>) ของแร่แม่เหล็กที่อัตราส่วนต่างๆ (ข) Titanomagnetite (ค) Titanohematite (Butler, 1992; McElhinny and McFadden, 2000)

### 2.2.3 สมบัติทางแม่เหล็กของหิน (rock magnetism)

สำหรับการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็ก และภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหิน จำเป็นต้องทำความเข้าใจสมบัติทางแม่เหล็กบางประการดังต่อไปนี้

#### 1.) สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility - K)

มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.8) ตัวอย่างหินแต่ละประเภท ค่าสภาพรับไว้ทางแม่เหล็กเฉลี่ย (K<sub>m</sub>) จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแร่ในหิน ซึ่งมีค่า K<sub>m</sub> แตกต่างกันไป เช่น ค่าเฉลี่ยของหินอัคนีมีค่า 550 ถึง 120,000 μSI หินตะกอนมีค่า 0 ถึง 50,000 μSI และหินแปรมีค่าเฉลี่ย 0 ถึง 73,000 μSI นอกจากนั้นค่า K<sub>m</sub> ของแร่แต่ละชนิดก็มีค่าแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น แร่แคลไซต์ (calcite - CaCO<sub>3</sub>) มีค่าระหว่าง -7.5 ถึง -39 μSI แร่ควอตซ์ (quartz - SiO<sub>2</sub>) มีค่าระหว่าง -13 ถึง 17 μSI ซึ่งทั้งสองมีสมบัติเป็นไดอะแมกเนติก ส่วนแร่ที่มีค่า K<sub>m</sub> เป็นบวก และมีสมบัติเป็นเฟอร์โรแมก



เนติก ได้แก่ แร่โอลิวีน (olivine -  $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ ) มีค่าประมาณ 1,600  $\mu\text{SI}$  แร่ไบโอไทต์ (biotite -  $(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ) มีค่าระหว่าง 1,500 ถึง 2,900  $\mu\text{SI}$  ส่วนจำพวกเหล็กซัลไฟด์ ได้แก่ แร่พิร์โรไทต์ (pyrrhotite -  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ) มีค่าประมาณ 3.2 SI และ ไพไรต์ (pyrite -  $\text{FeS}_2$ ) มีค่าระหว่าง 35 ถึง 5,000  $\mu\text{SI}$  เป็นต้น (Hunt and et al., 1995)

## 2.) กระบวนการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้าง (remanent magnetization - RM)

แมกนีไทเซชันตกค้างเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก เกิดจากวัสดุถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก (เช่น สนามแม่เหล็กโลก หรือสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำในห้องปฏิบัติการ) แล้วส่งผลให้เกิดการจัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็กในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ และสามารถคงสภาพนั้นไว้ได้ แม้ไม่มีสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำแล้วก็ตาม ในธรรมชาติ กระบวนการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้าง (natural remanent magnetization - NRM) เป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กโลกเหนี่ยวนำตัวอย่างธรรมชาติ เช่น ตะกอน หิน เป็นต้น ให้เกิดแมกนีไทเซชันตกค้างขึ้นในตัวอย่างนั้นๆ สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ แมกนีไทเซชันตกค้างปฐมภูมิ (primary remanence) เกิดขึ้นตอนหินหนืดแข็งตัว และมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี หรืออาจเป็นช่วงที่ตกตะกอน หรือเกิดหินตะกอน ส่วนกรณีเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างขึ้นใหม่ หรือเปลี่ยนไปจากเดิมบางส่วน หรือทั้งหมด หลังจากกระบวนการแรกข้างต้น เรียกว่า แมกนีไทเซชันตกค้างทุติยภูมิ (secondary remanence) กระบวนการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ตามลักษณะการเกิด ได้ดังต่อไปนี้

- **Thermo remanent magnetization (TRM)** คือ แมกนีไทเซชันตกค้างที่เกิดขึ้นเมื่อแร่แม่เหล็กมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ภายใต้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำภายนอก ยกตัวอย่างเช่น การเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างของหินอัคนีที่เย็นตัวภายใต้สนามแม่เหล็กโลก
- **Detrital remanent magnetization (DRM)** คือ แมกนีไทเซชันตกค้างที่เกิดจากกระบวนการตกตะกอนของแร่แม่เหล็กที่ปนอยู่กับตะกอน และเมื่อตะกอนแข็งตัวเป็นหิน ทิศทางของแมกนีไทเซชันตกค้างจะคงสภาพเดิมไว้ไม่เปลี่ยนแปลง
- **Chemical remanent magnetization (CRM)** คือ แมกนีไทเซชันตกค้างที่เกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี สามารถพบในกระบวนการตกตะกอนในดินตะกอน หรือการเกิดหินตะกอน เป็นต้น

- **Viscous remanent magnetization (VRM)** คือ แมกนีไทเซชันตกค้างใหม่ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กอย่างอ่อน (เช่น สนามแม่เหล็กโลก) เป็นเวลานานๆ ค่าของ VRM จะขึ้นอยู่กับเวลา (t) และค่าสัมประสิทธิ์ของการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้าง VRM แทนด้วย S ( $VRM = S \times \log(t)$ )
- **Isothermal remanent magnetization (IRM)** คือ กระบวนการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างของตัวอย่าง จากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มสูงในห้องปฏิบัติการ และอีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากฟ้าผ่าลงบนตัวอย่าง (เช่น หิน) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดเป็นแมกนีไทเซชันตกค้างใหม่ในตัวอย่างนั้นๆ
- **Partial thermo remanent magnetization (pTRM)** คือ เมื่อหินได้รับความร้อนอีกครั้งหลังจากหินเย็นตัวแล้ว และมีอุณหภูมิมากกว่า “blocking temperature -  $T_B$ ” ของแร่แม่เหล็กในหินบางองค์ประกอบ ก็จะส่งผลให้เกิดแมกนีไทเซชันตกค้างขึ้นมาใหม่บางส่วน ตามขนาดและทิศทางสนามแม่เหล็กโลกขณะนั้น

### 3.) โดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain)

เมื่อเกรนของแร่แม่เหล็กถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก H จะเกิดแมกนีไทเซชัน M ในทิศทางเดียวกับ H และเกิดประจุแม่เหล็ก (magnetic charge) สะสมที่ผิวของเกรน จากกระบวนการนี้ส่งผลให้มีพลังงานแม่เหล็กสถิตย์ (magnetostatic energy -  $E_m$ ) และอำนาจแมกนีไทเซชันลบภายใน (self-demagnetization -  $H_D$ ) ในทิศทางตรงข้าม เกิดขึ้น แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ

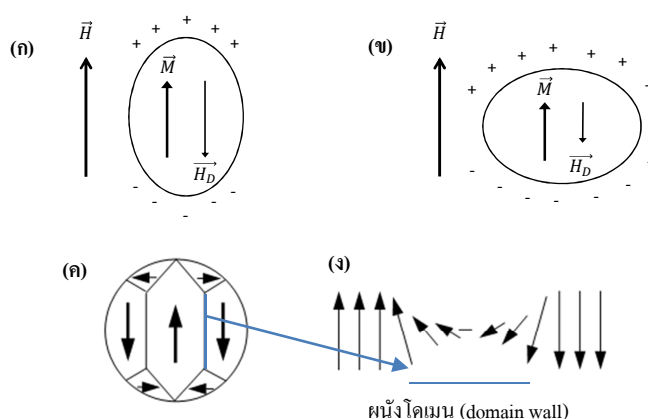
$$E_m = \frac{1}{2} \mu_0 v N M_s^2 \quad (2.9)$$

$$H_D = -N \vec{M} \quad (2.10)$$

- เมื่อ
- $E_m$  คือ พลังงานแม่เหล็กสถิตย์
  - $H_D$  คือ อำนาจลบภายในแมกนีไทเซชันภายใน
  - N คือ ปัจจัยลบภายในแมกนีไทเซชันภายใน (demagnetize factor)
  - $M_s$  คือ แมกนีไทเซชันอิ่มตัว
  - v คือ ปริมาตรของเกรน

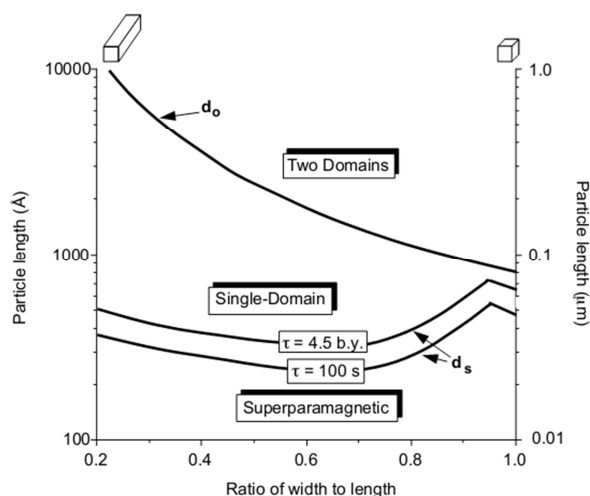
$\mu_0$  คือ ค่าสภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability)

ในกรณีเกรนมีขนาดโต พลังงาน  $E_m$  ที่ถูกสะสมจะมีค่ามากขึ้นตาม ดังนั้นเกรนจึงพยายามลดพลังงาน  $E_m$  ลง โดยการแบ่งออกเป็นหลายโดเมนในพื้นที่เกรนเดียวกัน โดเมนใหม่ที่เกิดขึ้นจึงมีทิศที่หักล้างซึ่งกันและกัน มีผนังโดเมน (domain wall) แบ่งแยกระหว่างโดเมนแต่ละส่วน ตามแสดงในรูปที่ 2.7 (ค) และ (ง)



รูปที่ 2.7 โมเมนต์แม่เหล็ก และเกรนของแร่แม่เหล็ก

ขนาดของเกรน และจำนวนโดเมนที่แตกต่างกัน สามารถจัดกลุ่มเกรนของแร่แม่เหล็กออกเป็นสี่กลุ่มด้วยกัน คือ 1.) ซูเปอร์พาราแมกเนติก (super paramagnetic - SP) มีขนาดเกรนอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร 2.) โดเมนเดี่ยว (single domain - SD) มีขนาดของเกรนอยู่ในช่วง 40-80 นาโนเมตร 3.) โดเมนผสม (multi domain - MD) มีขนาดเกรนที่โต กว่า 80 นาโนเมตรขึ้นไป และ 4.) โดเมนเดี่ยวเทียม (pseudo-single domain - PSD) มีขนาดของเกรนระหว่าง SD กับ MD ตามแสดงในรูปที่ 2.8 จากทั้งหมดสี่ประเภท มีเพียง SD และ PSD เท่านั้น ที่สามารถรักษาค่าของแมกนีไทเซชันตกค้างไว้ได้นาน และเหมาะสำหรับการศึกษาทางด้านแม่เหล็กบรรพกาล



**รูปที่ 2.8** ขอบเขตขนาดเกรนแร่แม่เหล็กชนิดต่างๆ  $d_o$  ช่วงขอบเขตระหว่างเกรนขนาดโดเมนเดียวกับ โดเมนผสม และ  $d_s$  ช่วงขอบเขตระหว่างเกรนขนาดโดเมนเดียวกับซูเปอร์พาราแมกเนติก (Butler, 1992)

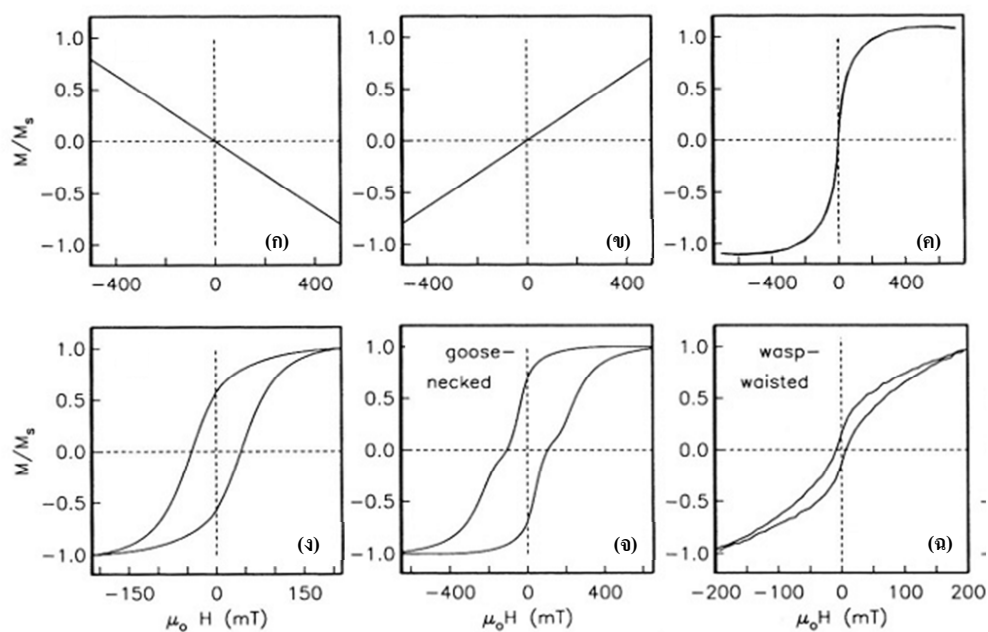
#### 4.) กราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส (hysteresis curve)

กราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ  $H$  กับอำนาจแม่เหล็กเหนี่ยวนำ  $M$  ที่เกิดจากตัวอย่างถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มสูงแบบวัฏจักร ลักษณะของกราฟถูกควบคุมโดยขนาดของเกรน และชนิดของแร่แม่เหล็ก (Tauxe, 2003) ตามแสดงในรูปที่ 2.9 ตัวแปรที่ได้จากกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสประกอบด้วย แมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization -  $M_s$ ) แมกนีไทเซชันตกค้างอิ่มตัว (saturation remanent magnetization -  $M_{rs}$ ) สภาพบังคับ (coercivity -  $H_c$ ) และแรงบังคับ (coercivity of remanence -  $H_{cr}$ )

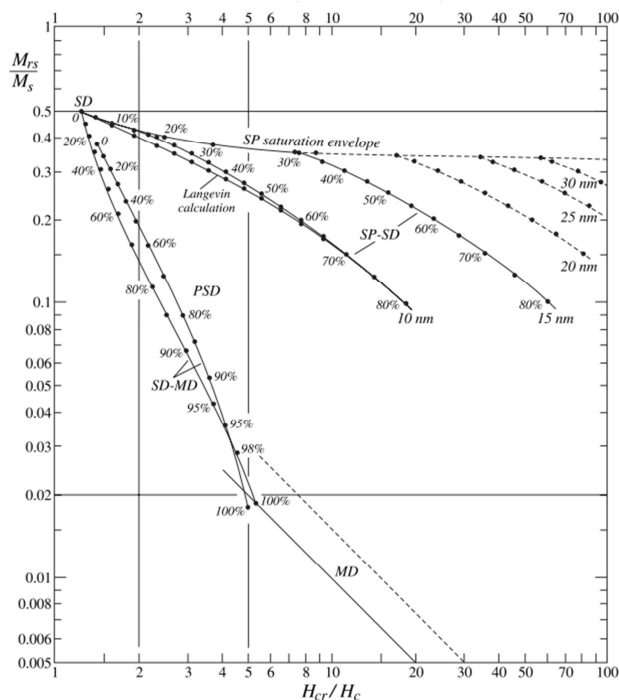
แต่เนื่องจากว่าตัวอย่างในธรรมชาติมีความซับซ้อนทั้งชนิด และขนาดเกรนแร่แม่เหล็กที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น ลักษณะกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสที่ปรากฏ จึงเป็นผลรวมของแต่ละองค์ประกอบในตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้กราฟที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปทรงปกติ ตามแสดงในรูปที่ 2.9 (จ) และ(ข)

ในปี ค.ศ. 1977 Day และคณะได้นำเสนอคุณสมบัติของกราฟฮิสเทอรีซิส ของแร่ไททาโนแมกนีไทต์ ที่มีขนาดของเกรนต่างๆ พบว่าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $M_{rs}/M_s$  (แกน y) และ  $H_{cr}/H_c$  (แกน x) หรือเรียกว่า กราฟของเดย์ (Day plot curve) สามารถแบ่งช่วงพิจารณาขนาดของ

เกรนแร่แม่เหล็กได้ 3 กลุ่ม คือ SD PSD และ MD และต่อมา Dunlop (2002) ได้ปรับปรุงกราฟของ เดย์ใหม่ โดยเพิ่มรายละเอียดเกี่ยวกับขนาดของเกรนแร่แม่เหล็กเพิ่มเติมเข้าไปจากตอนแรก ตาม แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส (ก)โดะแมกเนติก (ข)พาราแมกเนติก (ค)ซูเปอร์พาราแมกเนติกจากตัวอย่างหินบะซอลต์ใต้ทะเล (ง)โดเมนเดี่ยว (จ)แร่แมกนีไทต์ผสมกับแร่ฮีมาไทต์ และ(ฉ)โดเมนเดี่ยวผสมกับซูเปอร์พาราแมกเนติกของตัวอย่างแร่แมกนีไทต์ (Tauxe, 2003)



รูปที่ 2.10 กราฟของเคย์ของแร่แม่เหล็กแมกนีไทต์ (Day et al.,1977; Dunlop, 2002)

5.) เสถียรภาพแมกนีไทเซชันตกค้างในหิน (stability remanent magnetization)

ค่าแมกนีไทเซชันตกค้างที่เกิดขึ้น หลังจากวัสดุถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก จะมีค่าลดลง เมื่อเวลาผ่านไป  $t$  วินาที ซึ่งอัตราการลดลงของค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของเวลาเรียกว่า “relaxation time -  $\tau$ ” โดยที่  $\tau$  เป็นผลจากแอนไอโทรโทรปี ( $vh_c M_s/2$ ) และพลังงานความร้อน ( $kT$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.11) และ (2.12)

$$M(t) = M_0 e^{-t/\tau} \tag{2.11}$$

$$\tau = \frac{1}{c} \exp\left(\frac{vh_c M_s}{2kT}\right) \tag{2.12}$$

- เมื่อ  $M(t)$  คือ อำนาจแมกนีไทเซชันตกค้างที่เวลา  $t$  ใดๆ
- $M_0$  คือ อำนาจแมกนีไทเซชันตกค้างเริ่มต้น
- $t$  คือ เวลา (วินาที)
- $\tau$  คือ ค่าคงที่ของเวลา (relaxation time)

- c คือ frequency factor ( $10^{-9}$  s)  
 v คือ ปริมาตรของเกรน  
 $h_c$  คือ microscopic coercive force  
 $M_s$  คือ แมกนีไทเซชันอิ่มตัว  
 k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์ ( $1.38066 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>)  
 T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ ค่า  $\tau$  จะขึ้นอยู่กับเกรนของแร่แม่เหล็ก แสดงในรูปที่ 2.8 โดยที่ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของ SP จะมีค่า  $\tau$  ต่ำมากๆ (ระดับวินาที) จึงไม่สามารถรักษาแมกนีไทเซชันตกค้างไว้ได้ และจากเกรนสี่ประเภทข้างต้นมีเพียง SD และ PSD เท่านั้น ที่สามารถรักษาแมกนีไทเซชันตกค้างไว้ได้ ดังนั้น ตัวอย่างที่มี  $\tau$  สูงมากๆ จะมีค่าเสถียรภาพแมกนีไทเซชันตกค้างสูง จึงเหมาะสำหรับนำไปศึกษาทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาลในหิน (O'Reilly, 1984)

นอกจากนั้นค่าเสถียรภาพของแมกนีไทเซชันตกค้างในตัวอย่าง สามารถพิจารณาได้จากค่า “Königsberger ratios – Q-value” โดยขึ้นอยู่กับค่า K NRM และสนามแม่เหล็กโลก บริเวณที่เก็บตัวอย่าง ตามสมการที่ (2.13) ตัวอย่างประเภทหินตะกอนจะมีค่า Q-value เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.02-10 หินอัคนีอยู่ในช่วง 1-40 และหินแปรอยู่ในช่วง 0.003-50 (Hunt et al., 1995) หินทั่วไปที่มีองค์ประกอบของเกรนแม่เหล็ก MD จะมีค่า Q-value ที่ต่ำกว่าหนึ่ง ( $Q\text{-value} < 1$ ) (Dunlop, 1997; Clak, 1997) ดังนั้นตัวอย่างที่มีค่า Q-value ต่ำกว่าหนึ่ง จึงพิจารณาได้ว่า มีค่าเสถียรภาพของแมกนีไทเซชันตกค้างต่ำ (low stability remanent)

$$Q\text{-value} = \frac{NRM}{KH_c} \quad (2.13)$$

- เมื่อ Q-value คือ Königsberger ratios  
 NRM คือ ความเข้มแมกนีไทเซชันตกค้างธรรมชาติจากตัวอย่างหิน  
 K คือ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก  
 $H_c$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กโลก ณ. พื้นที่เก็บตัวอย่างหิน

### 2.3 แอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (anisotropy magnetic susceptibility - AMS)

องค์ประกอบแร่แม่เหล็กในตัวอย่างหินธรรมชาติ ประกอบด้วยแร่หลักๆ สามประเภทด้วยกัน คือ พาราแมกเนติก ไดอะแมกเนติก และเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งผสมอยู่ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ตามรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ แต่จากกระบวนการเหนี่ยวนำตัวอย่างด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มต่ำ  $H$  (น้อยกว่า 1 mT) พบว่าค่าอำนาจแม่เหล็กเหนี่ยวนำ  $M$  เกิดขึ้นแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับทิศทางที่ถูกเหนี่ยวนำ หรืออาจพิจารณาว่า ค่า  $K$  ของตัวอย่างขึ้นอยู่กับทิศทางที่ทำการวัด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า แอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (anisotropy magnetic susceptibility - AMS) หรือความไม่สมมาตรของค่า  $K$  สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของเทนเซอร์ (tensor) ลำดับที่สอง ตามสมการที่ (2.14) รูปแบบความไม่สมมาตรของค่า  $K$  มีสองประเภทที่สำคัญ คือ รูปทรงไม่สมมาตร (shape anisotropy) เป็นผลจากเกรนของแร่แม่เหล็กที่เรียงตัวในตัวอย่าง และความไม่สมมาตรจากโครงสร้างผลึก (crystalline anisotropy) ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างผลึกของแร่แม่เหล็ก (Tarling and Hrouda, 1993)

$$\vec{M} = K\vec{H} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\vec{M}$  คือ อำนาจแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (induced magnetization)

$\vec{H}$  คือ สนามแม่เหล็กภายนอก (external magnetic field)

$K$  คือ สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (susceptibility tensor)

Tarling และ Hrouda (1993) ได้สรุปตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา AMS ไว้หลายตัวแปร แต่ในงานวิจัยครั้งนี้ มีสามตัวแปรที่นำมาใช้สำหรับวิเคราะห์ คือ corrected anisotropy degree ( $P_j$ ) shape parameter ( $T$ ) และสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กเฉลี่ย ( $K_{mean}$ ) ตามแสดงในสมการด้านล่าง

$$P_j = \exp \sqrt{\left\{ 2 \left[ (\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2 \right] \right\}} \quad (2.15)$$

$$T = (2\eta_2 - \eta_1 - \eta_3) / (\eta_1 - \eta_3) \quad (2.16)$$



$$K_{\text{mean}} = (K1 + K2 + K3) / 3 \quad (2.17)$$

เมื่อ K1 คือ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กสูงสุด (K maximum)

K2 คือ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กระหว่างต่ำสุดและสูงสุด (K intermediate)

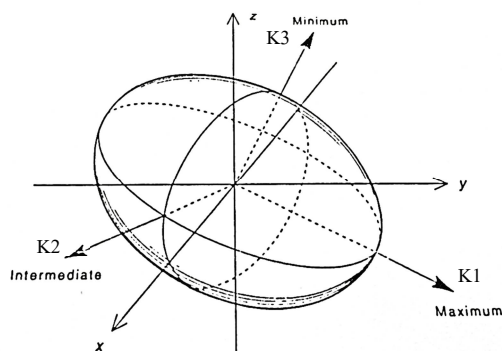
K3 คือ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กต่ำสุด (K minimum)

และ  $\eta_1 = \ln K1; \eta_2 = \ln K2; \eta_3 = \ln K3; \eta_m = \ln K1 \sqrt{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3}$

รูปทรงของ AMS อธิบายด้วยรูปทรงรี (ellipsoid) โดยแกนทั้งสามของรูปทรงแทนด้วยค่า K ต่างๆ (K1 K2 และ K3) ตามแสดงในรูป 2.11 และสัมพันธ์กับค่า T คือ เมื่อ T ใกล้เคียงกับศูนย์ ( $T \approx 0$ ) มีลักษณะรูปทรงรี (neutral ellipsoid) ถ้า  $T > 0$  มีรูปทรงเป็นลักษณะแบนจาน (oblate) และในกรณีที่  $T < 0$  มีรูปทรงเป็นแบบเข็ม (prolate) ตามแสดงในรูปที่ 2.12 ส่วนตัวแปร  $P_j$  เป็นตัวบอกระดับความไม่สมมาตรของค่า K ในกรณีที่  $P_j = 1 - 1.05$  (0-5%) พิจารณาว่าระดับความไม่สมมาตรต่ำ ถ้า  $P_j = 1.05 - 1.10$  (5-10%) พิจารณาว่าระดับความไม่สมมาตรปานกลาง และ  $P_j > 1.20$  (>20%) พิจารณาว่าระดับความไม่สมมาตรสูง (Petronis et al., 2008)

สำหรับหินตะกอนรูปทรงเริ่มแรกตอนตกตะกอน มีรูปทรงแบบจาน ( $T > 0$ ) ค่า K3 อยู่ตรงตำแหน่งโพล (pole) หรือต่างออกไปไม่เกิน 20 องศา เพราะเนื่องจากสภาวะแวดล้อมตอนตกตะกอนมีการไหลเข้ามาเกี่ยวข้อง หรือระนาบของการตกตะกอนมีความชันเพิ่มเข้ามาจึงทำให้ตำแหน่งกลุ่มของ K3 มีมุมที่ต่างไปจาก 0 องศา แต่โดยรวมกระบวนการตกตะกอนยังคงสัมพันธ์โดยตรงกับแรงโน้มถ่วง (แรงกดทับในแนวตั้ง) จึงทำให้รูปทรงไม่ต่างไปจากแบบจานมากนัก

สำหรับหินอัคนีปกติมีค่า  $P_j < 1.10$  (10%) และมีรูปทรงที่สัมพันธ์กับการไหลแรงดัน การเย็นตัวหินหนืดหรือลาวา และองค์ประกอบแร่ของหิน ถ้าตัดเงื่อนไขความไม่สมมาตรจากผลึกออกไป ทิศทางไหลของหินหนืดจะขนานไปกับ K1 และมีรูปทรงเป็นแบบเข็ม ( $T < 0$ ) แต่จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล หรือความหนืดของหินหนืด หรือแรงดันของหินหนืด แต่ยกเว้นหินอัคนีจำพวกหินเถ้าภูเขาไฟ (tuff) จะมีรูปทรงที่คล้ายกับหินตะกอน (Tarling and Hrouda, 1993)



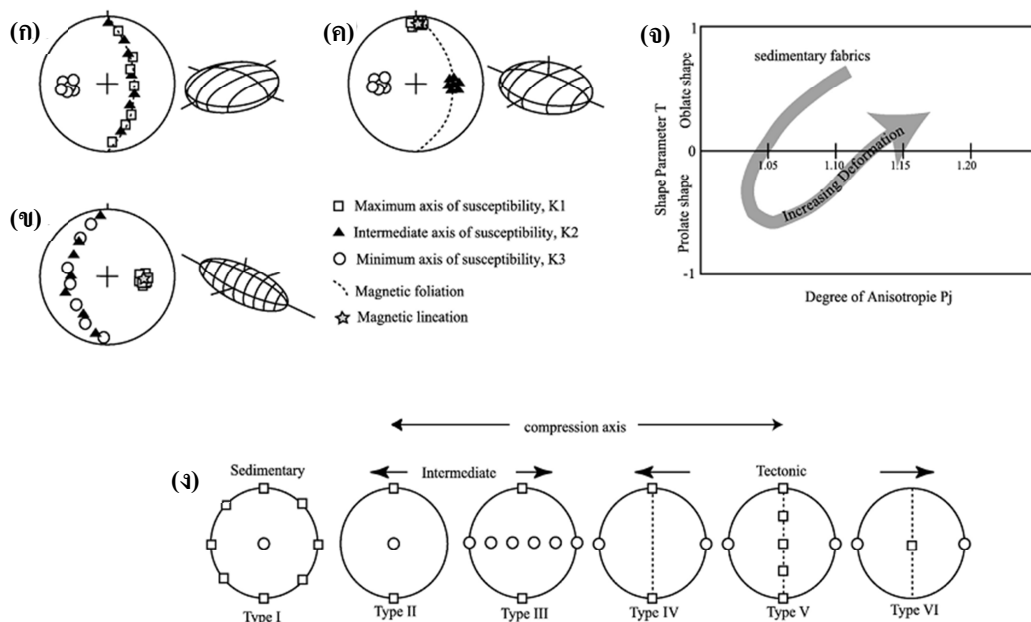
รูปที่ 2.11 รูปทรงรีที่มีแกนทั้งสามแทนด้วยค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (K1 K2 และ K3)  
(ดัดแปลงจาก Tarling และ Hrouda (1993))

ข้อมูล AMS จากตัวอย่างหินค่อนข้างมีความสำคัญอย่างมาก สำหรับการศึกษา ลักษณะการตกตะกอนในอดีต ทิศทางไหลของหินหนืดหรือลาวา และกระบวนการทางธรณีแปรสัณฐาน ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปของหินตะกอน เช่น การเปลี่ยนรูปของหินตะกอนจากแรงบีบอัดในช่วงที่เกิดเหตุการณ์ทางธรณีแปรสัณฐานต่างๆ ซึ่งพบว่าบริเวณแนวหินตะกอนที่ได้รับผลกระทบจากแรงบีบอัด (compression) จากกระบวนการธรณีแปรสัณฐาน จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า  $P_j$  สูงขึ้น มีทิศทางของ K3 ในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำ หรือในกรณีที่เป็นรอยเลื่อนทิศทางของ K1 มีทิศในแนวขนานกับรอยเลื่อน ลักษณะรูปทรงก็แตกต่างไปจากเดิม (แบบจาน) มากขึ้น

Robion และ คณะ (2007) ประยุกต์ใช้ข้อมูล AMS เพื่อศึกษาการเปลี่ยนรูปของหินตะกอนในสองพื้นที่ Pyrenees France และ Himalaya Pakistan แบ่งระดับการเปลี่ยนรูปของหินตะกอน ออกเป็น 3 กลุ่ม และ 4 ประเภท ตามระดับความรุนแรงของการเปลี่ยนรูปของหินตะกอน ที่ได้จากการวิเคราะห์ การกระจายตัว ทิศทางของค่า K1 K2 และ K3 ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการตกตะกอนในอดีต (primary depositional) และการเปลี่ยนรูปหลังจากตกตะกอน (post-depositional) แสดงในรูปที่ 2.12 (ก) (ข) และ (ค) ซึ่งลักษณะของตะกอนปกติจะมีลักษณะเป็นแบบ Type I ถ้าได้รับผลกระทบจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐานแต่ไม่รุนแรงมากนักจะมีลักษณะเป็นแบบ Type II-III แต่ถ้าได้รับผลกระทบที่รุนแรงก็จะเป็นลักษณะ Type IV-VI โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า  $P_j$  ตามแสดงในรูปที่ 2.12 (จ) และลักษณะการกระจายตัวของ K1 K2 และ K3 ตามแสดงในรูปที่ 2.12 (ง)

สำหรับบริเวณประเทศไทย มีงานวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้ข้อมูล AMS เพื่อศึกษาทางด้านธรณีแปรสัณฐาน เช่น Bhongsuwan (2000) ได้นำเสนอข้อมูล AMS เพื่อใช้สำหรับศึกษาทิศทางการไหลบรรพกาล (palaeocurrent) ของลาวา (Cenozoic basalts) บริเวณภาคกลางและทางตอนเหนือของประเทศไทย นอกจากนี้บริเวณพื้นที่ศึกษาประเทศลาว Singsoupho (2014) ก็ประยุกต์ใช้ข้อมูล AMS เพื่อศึกษาทิศทางการไหลบรรพกาล ของตะกอนมหายุคเมโซโซอิก (Mesozoic redbeds, Khorat group) และศึกษาทิศทางการไหลของลาวา (Cenozoic basalts) บริเวณที่ราบสูงโบลาวน (Bolaven plateau) ซึ่งการไหลของหินหนืด จะมีทิศทางที่สอดคล้องกับ K1

จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่าข้อมูล AMS มีประโยชน์อย่างมากสำหรับศึกษา หรือวิเคราะห์ทิศทางการไหลบรรพกาล และผลการเปลี่ยนแปลงของหินจากเหตุการณ์ทางธรณีแปรสัณฐานต่างๆ แต่ถ้าพิจารณาส่วนที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาล พบว่าในกรณีตัวอย่างหินมีค่า  $P_j$  สูงมาก จะส่งผลต่อทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างในอดีต และทำให้ผลการวิเคราะห์ทางด้านแม่เหล็กบรรพกาล มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าเดิมตอนหินก่อกำเนิดขึ้น (Clark, 1997) นอกจากนี้ บางครั้งในกรณีตัวอย่างหินมีแม่เหล็กที่มีค่า  $P_j$  สูง เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ (เช่น ฮีมาไทต์ ( $P_j > 100$ ) แร่พิร์โรไทต์ ( $P_j = 3-400$ )) อาจทำให้การวิเคราะห์ทางด้านธรณีแปรสัณฐาน และศึกษาภาวะแม่เหล็กบรรพกาล มีความคลาดเคลื่อนได้ เพราะค่า AMS ที่วัดได้จะเป็นผลมาจาก ความไม่สมมาตรจากผลึก มากกว่ารูปทรง และส่งผลต่อทิศทางของแมกนีไทเซชันตกค้างในอดีตมีความคลาดเคลื่อนได้ (Tarling and Hrouda, 1993; McElhinny and McFadden, 2000)



รูปที่ 2.12 (ก) รูปทรงแบบจาน (oblate) มี K3 เกาะกลุ่มและ K1 K2 เป็นริ้วขนาน (foliation) ตั้งฉากกับ K3 (ข)รูปทรงแบบเข็ม (prolate) มีทิศของแนวเส้น (lineation) ตามทิศ K1 มีลักษณะเกาะกลุ่ม ส่วน K2 K3 มีลักษณะเป็นริ้วขนาน (foliation) (ค) รูปทรงแบบผสม (oblate + prolate) มี K1 K2 K3 เป็นลักษณะเกาะกลุ่ม (ง) ลำดับการแบ่งกลุ่มของข้อมูล AMS ที่พิจารณาบริเวณ fold และ trust belt โดยมี bedding ในแนวตั้ง แนวแรงที่มากระทำในทิศซ้าย-ขวา Type I เป็นข้อมูล AMS ตอนเริ่มต้น (initial sedimentary) (จ) กราฟ Pj-T ลักษณะการเปลี่ยนรูปของหิน (ดัดแปลง จาก Robion และ คณะ(2007))

## 2.4 กระบวนการศึกษาทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาล (palaeomagnetism)

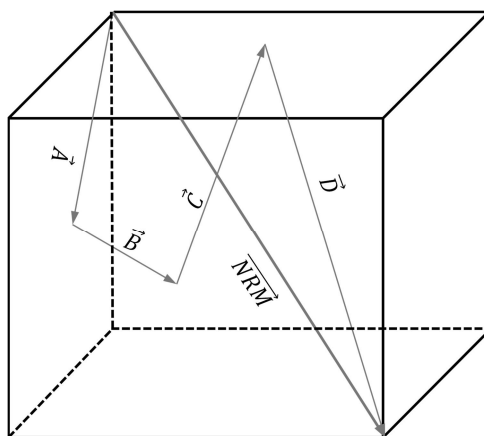
คือ กระบวนการศึกษาข้อมูลทิศทาง และความเข้ม ของสนามแม่เหล็กโลกในอดีต ที่ถูกบันทึกในตัวอย่างหิน ซึ่งถ้าทราบอายุของตัวอย่างหิน ก็จะทราบทิศทางของสนามแม่เหล็กโลก ตอนหินก่อกำเนิดขึ้น และจากข้อมูลนี้ สามารถคำนวณย้อนกลับไปหาตำแหน่ง หรือจุดกำเนิดในอดีตของตัวอย่างหินนั้นได้ ซึ่งหมายความว่า สามารถที่จะทราบตำแหน่งของแผ่นเปลือกโลกในอดีตได้เช่นกัน

ขั้นตอนและกระบวนการศึกษาทางด้านแม่เหล็กบรรพกาลได้มีรายงานวิชาการ และตำราต่างๆ มากมายหลายชิ้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เกี่ยวกับเทคนิคการทดสอบ ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง กระบวนการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เพื่อใช้อธิบายประวัติธรณีแปรสัณฐานในแต่ละพื้นที่ (เช่น Butler, 1992; Tauxe, 2002; Tarling, 1983; McElhinny and McFadden, 2000; Collinson, 1983)

จากหัวข้อ 2.1 องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กโลกเป็นแบบเวกเตอร์ ซึ่งตั้งแต่ตอนหินก่อกำเนิดขึ้นจนถึงปัจจุบัน ข้อมูลเหล่านี้ถูกบันทึกไว้ในหินจากกระบวนการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างต่างๆ (ตามอธิบายในหัวข้อ 2.2) ดังนั้น ข้อมูล NRM จากตัวอย่างหินที่วัดได้ จึงเป็นผลรวมเชิงเวกเตอร์ของแมกนีไทเซชันตกค้างในอดีตทั้งหมด แสดงในรูปที่ 2.13 แต่จุดประสงค์หลักของการศึกษาภาวะแม่เหล็กบรรพกาลจากตัวอย่างหิน คือ ต้องการวิเคราะห์หาค่าทิศทางของแมกนีไทเซชันตกค้างเริ่มต้นตอนหินก่อกำเนิดขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้าง (demagnetized) ในส่วนที่เกิดขึ้นช่วงหลังออกไป เพื่อให้เหลือเฉพาะตอนเริ่มแรกเท่านั้น ซึ่งจะพิจารณาแมกนีไทเซชันตกค้างส่วนนี้ว่า “characteristic remanent magnetization - ChRM” เป็นผลมาจากเกรนของแร่แม่เหล็กจำพวก SD และ PSD

สำหรับกระบวนการที่นำมาใช้ลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้าง นิยมใช้ความร้อน (thermal demagnetization) และสนามแม่เหล็กสลับ (alternating field demagnetization) สำหรับการลบล้าง (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก Collinson (1983) Butler (1992) และ Tauxe (2002))

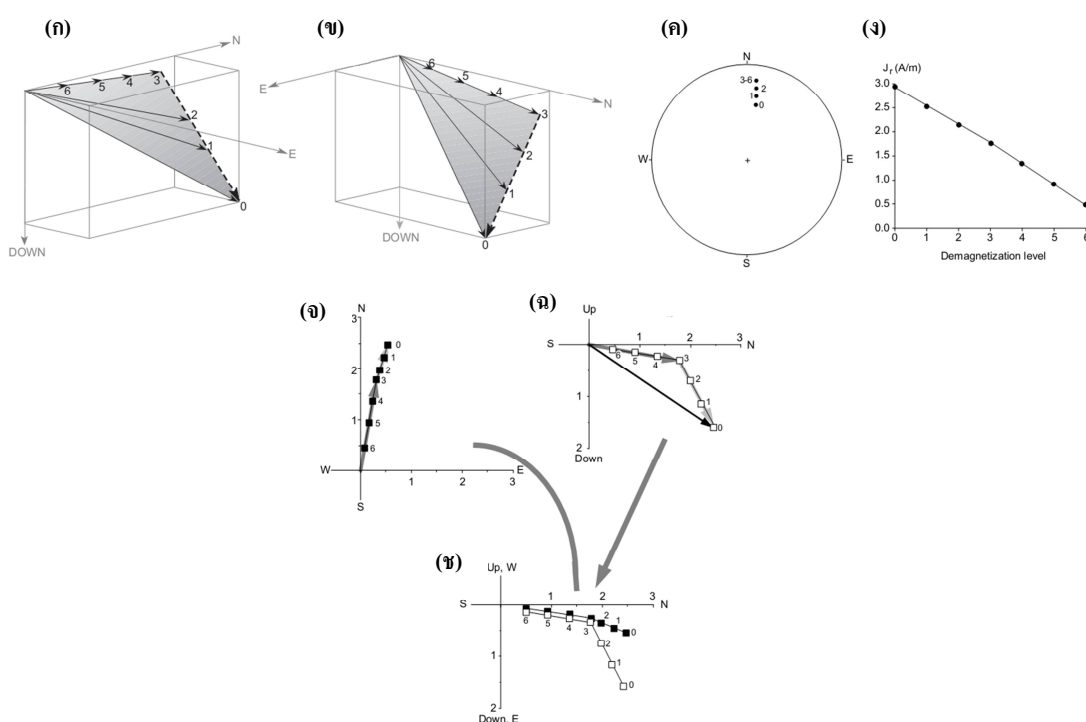


รูปที่ 2.13 แบบจำลองทิศทางของ NRM ที่เกิดจากผลรวมของค่าแมกนีไทเซชันตกค้างในช่วงเวลา

$$\text{ต่าง ๆ } \vec{NRM} = \vec{A} + \vec{B} + \vec{C} + \vec{D}$$

ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้าง ประกอบด้วยข้อมูลสองส่วนด้วยกัน คือ ข้อมูลความเข้ม และทิศทาง ที่ระดับความแรงลบล้างต่างๆ นิยมนำเสนอโดยใช้กราฟแสดงข้อมูลที่เสนอโดย Zijdeveld (1967) ตามแสดงในรูปที่ 2.14 (จ) ถึง (ข) อัตราการลดลง

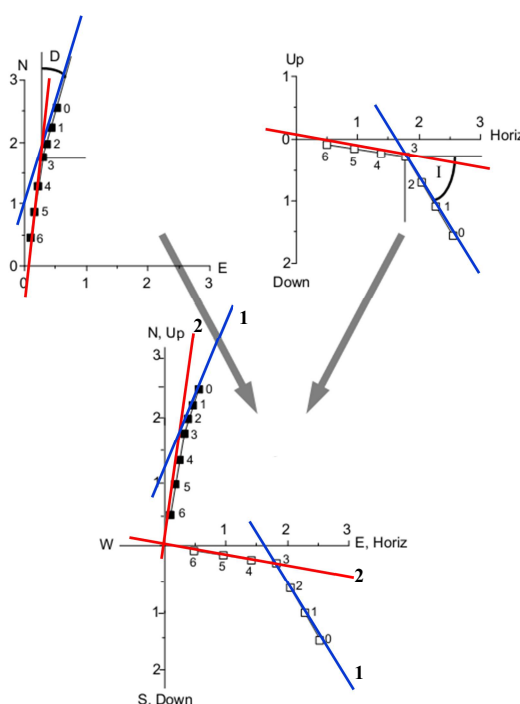
ของแมกนีไทเซชันตกค้าง จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแร่แม่เหล็กในตัวอย่างหิน ในกรณีของการลบล้างด้วยเทคนิคสนามแม่เหล็กสลับ ค่าความแรงของสนามแม่เหล็กลบล้างที่ทำให้แมกนีไทเซชันตกค้างลดลงเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเริ่มต้น เรียกว่า “median destructive field - MDF” ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของเกรนแร่แม่เหล็กที่เก็บรักษาแมกนีไทเซชันตกค้าง ซึ่งตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของ SD และ PSD จะมีค่า MDF ที่สูงกว่า MD (Dunlop and Ozdemir, 1997)



**รูปที่ 2.14** ลำดับการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของแมกนีไทเซชันตกค้าง ที่ระดับความแรงลบล้าง ตั้งแต่ 0-6 (ก) (ข) องค์ประกอบแมกนีไทเซชันตกค้าง (ค) ข้อมูลทิศทางของแมกนีไทเซชันตกค้างบนเส้นโครงแผนที่คงพื้นที่ (equal-area projection) (ง) ความเข้มแมกนีไทเซชันตกค้างที่ระดับความเข้มสนามแม่เหล็กลบล้างต่างๆ และ (จ) ถึง (ช) ทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างที่แสดงข้อมูลด้วยกราฟ Zijdeveld (Butler, 1992)

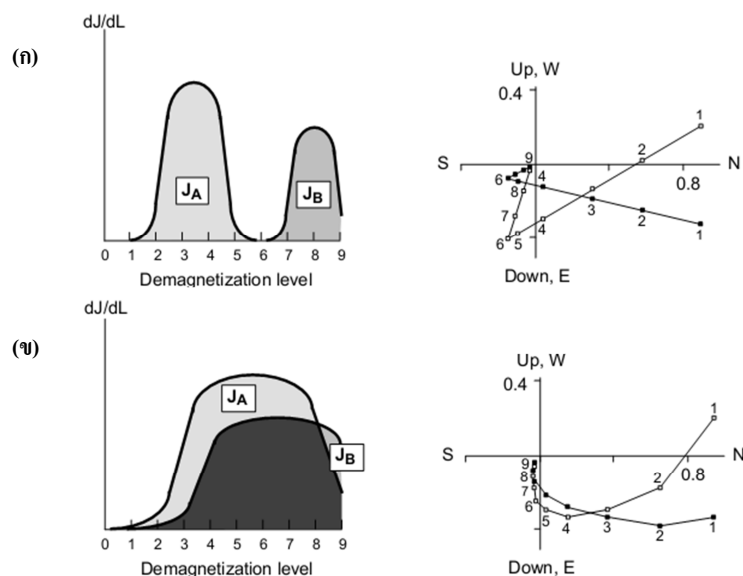
โดยส่วนมากข้อมูลแมกนีไทเซชันตกค้างที่ได้จากกระบวนการลบล้างด้วยสนามแม่เหล็กสลับ จะมีองค์ประกอบของทิศทางมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ เช่นรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตัวอย่างเช่น องค์ประกอบที่มีค่า  $H_c$  ต่ำกว่า 20 mT จะสามารถลบออกด้วยสนามแม่เหล็กสลับที่มีความเข้มมากกว่าหรือเท่ากับ 20 mT ( $H_{AF} \geq 20$  mT) ซึ่งเป็นองค์ประกอบแมกนีไทเซชันตกค้างที่

เป็นผลจากเกรนแม่เหล็กจำพวก MD จะพิจารณาองค์ประกอบส่วนนี้เป็นองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันตกค้างประเภท VRM ส่วนองค์ประกอบที่ค่า  $H_c$  มากกว่า 20 mT จะเป็นผลจากเกรนแม่เหล็กจำพวก SD และ PSD เป็นองค์ประกอบที่มีความเสถียรสูง ซึ่งจะพิจารณาองค์ประกอบส่วนนี้เป็น ChRM (Butler, 1992) สำหรับกระบวนการแยกองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันตกค้างจะพิจารณาโดยอาศัยหลักการของ “principal component analysis - PCA” (Kirschvink, 1980) ตามแสดงรายละเอียดในบทที่ 3 และ ภาคผนวก จ



รูปที่ 2.15 องค์ประกอบทิศทางของข้อมูลแมกนีไทเซชันตกค้าง (Butler, 1992)

แต่บางครั้งข้อมูลแมกนีไทเซชันตกค้างที่ได้ ยากที่จะแยกแต่ละองค์ประกอบออกจากกัน และบางครั้งอาจจะมีข้อมูลที่ซ้อนทับกันของแต่ละองค์ประกอบ ตามแสดงในรูปที่ 2.16(ข) ซึ่งจะส่งผลให้ข้อมูลทิศทางเฉลี่ยมีความคลาดเคลื่อน พิจารณาได้จากค่าเบี่ยงเบน ที่เรียกว่า “maximum angular deviation - MAD” มีค่าสูง หรืออาจจะไม่สามารถพิจารณาหาทิศทางของแมกนีไทเซชันตกค้างได้ ดังนั้น ตัวอย่างที่มีข้อมูลเป็นลักษณะซ้อนทับกัน หรือมีการกระจายตัวของข้อมูลสูง (MAD สูง) จึงมีความน่าเชื่อถือต่ำ หรือมีความคลาดเคลื่อนสูง



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบข้อมูลแมกนีไทเซชันตกค้างที่มีองค์ประกอบของทิศทางซ้อนทับกันแต่ละองค์ประกอบ (ข) กับข้อมูลที่สามารถแยกองค์ประกอบได้อย่างชัดเจน (ก) (Butler, 1992)

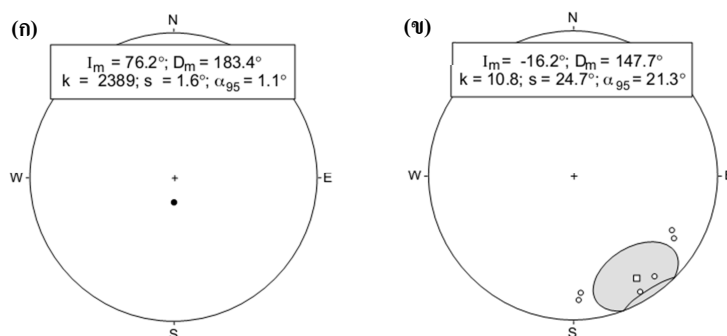
เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากขึ้น จำเป็นต้องเก็บข้อมูลจากตัวอย่างหินจำนวนหลายตัวอย่างในแต่ละพื้นที่ศึกษา แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้าง ซึ่งจะใช้การคำนวณทางสถิติของฟิชเชอร์ (Fisher statistic) (Fisher, 1953) เข้ามาช่วยในการคำนวณหาทิศทางเฉลี่ย (ภาคผนวก จ) มีข้อมูลที่สำคัญดังต่อไปนี้

- 1) ค่ามุม Dec และ Inc เฉลี่ย เป็นมุมที่ได้จากการเฉลี่ยข้อมูลทั้งหมดที่นำมาคำนวณ แสดงในรูปที่ 2.17
- 2) ค่า K (precision parameter) เป็นค่าที่บอกความเที่ยงตรงของข้อมูล หรือการกระจายตัวของข้อมูล ในกรณี K มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวสูง และมีความเที่ยงตรงต่ำ แต่ในกรณี K มีค่ามากๆ แสดงว่าข้อมูลมีความเที่ยงตรงสูง ถ้า K เท่ากับ  $\infty$  นั้นหมายความว่า ค่าของข้อมูลที่นำมาพิจารณาทั้งหมดอยู่ตรงจุดเดียวกัน
- 3) ค่า Alpha 95 ( $\alpha_{95}$ ) เป็นระดับความเชื่อมั่นของข้อมูลที่ 95% ของข้อมูลทั้งหมดแทนเป็นค่ามุม ในกรณีที่  $\alpha_{95}$  มีค่าน้อยๆ หมายความว่า 95% ข้อมูลทั้งหมดค่อนข้างกระจุกตัวอยู่บริเวณจุดเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด และถ้ามีค่า  $\alpha_{95}$  มีค่า



มากๆ แสดงว่าข้อ 95% ของข้อมูลทั้งหมดกระจายตัวสูง เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

กระบวนการศึกษาทางแม่เหล็กบรรพกาลเพื่อใช้ อธิบายประวัติธรณีแปรสัณฐานของแผ่นเปลือกโลกในอดีต จะอาศัยข้อมูลแมกนีไทเซชันตกค้างที่ได้จากตัวอย่างหินข้างต้น ไปคำนวณหาตำแหน่งละติจูดโบราณ (palaeolatitude -  $\lambda_p$ ) และขั้วแม่เหล็กบรรพกาล (virtual geomagnetic pole - VGP) ของสนามแม่เหล็กโลกในอดีต (ภาคผนวก จ) จากนั้นจึงนำข้อมูลนี้ไปใช้สร้างแบบจำลองตำแหน่งของแผ่นเปลือกโลกต่างๆ ในอดีต ที่สัมพันธ์กับอายุของตัวอย่างหินที่เก็บมาทดสอบ



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างข้อมูลทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างเฉลี่ย  $I_m$  และ  $D_m$  ซึ่งเป็นทิศทางมุมเอียงเท (Inc) และมุมป้ายเบน (Dec) ตามลำดับบนเส้นโครงแผนที่คงพื้นที่ (ก) ข้อมูลมีคุณภาพสูง และ(ข) ข้อมูลที่มีคุณภาพต่ำ (Butler, 1992)

## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

ขั้นตอนและกระบวนการวิจัยในครั้งนี้ ประกอบด้วยสามส่วนหลักๆ คือ ขั้นตอนเก็บตัวอย่างและเตรียมตัวอย่าง ขั้นตอนทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และขั้นตอนวิเคราะห์ผล ซึ่งรายละเอียดเป็นไปตามหัวข้อด้านล่างดังต่อไปนี้

#### 3.1 ขั้นตอนเก็บตัวอย่างและเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างที่เก็บจะเน้นตัวอย่างหินภูเขาไฟยุคเพอร์เมียน ถึงยุคไทรแอสซิก บริเวณจังหวัดเลย และจังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งอยู่ทางด้านขอบตะวันตกของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน และอยู่บนแนวคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ เป็นหลัก ตามแสดงรายละเอียดในบทที่ 1 โดยมีอุปกรณ์ที่สำคัญคือ เครื่องเจาะพร้อมหัวเจาะ ระบบน้ำหล่อเย็นตัวอย่าง เข็มทิสแม่เหล็ก เข็มทิสสุริยะ จีพีเอส สก๊าดทองเหลือง ฆ้อน และปากกาหมึกถาวรสำหรับระบุข้อมูลบนแท่งตัวอย่าง ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.2 และรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1:** กำหนดเงื่อนไขลำดับการเก็บตัวอย่างหิน ในการศึกษาครั้งนี้มีรายละเอียดตามรูป 3.1 พื้นที่ทำการเก็บหินจากหมวดหิน (formation) เดียวกัน เรียกว่า “sites” ทำการเจาะเป็นแท่งหินแต่ละแท่ง เรียกว่า “samples” และเมื่อนำแท่งหินไปตัดเป็นชิ้นมาตรฐานสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ เรียกว่า “specimens”

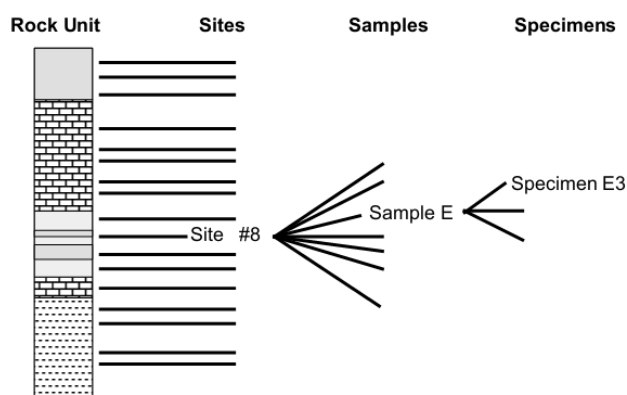
**ขั้นตอนที่ 2:** เลือกหมวดหินที่ต้องการ ที่มีความสด ใหม่ ติดอยู่กับหินฐานเดิม และไม่แตกหลุดแยกออกมา จดบันทึกพิกัดตำแหน่ง จากนั้นกำหนดจุดเจาะ พร้อมทั้งทำเครื่องหมายบนหินเพื่อใช้ระบุทิศทางของหิน

**ขั้นตอนที่ 3:** เจาะแท่งหินด้วยเครื่องเจาะที่มีกระบอกเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เจาะให้ได้แท่งหินยาวประมาณ 10 เซนติเมตร เป็นอย่างน้อย ในระหว่างเจาะต้องควบคุมเครื่องเจาะไม่ให้ส่ายไปมา เพื่อป้องกันแท่งหิน หัก เสียรูปทรง หรือบิดเบี้ยว และจะต้องหล่อเย็นด้วยน้ำตลอดเวลาในระหว่างเจาะเพื่อ ระบายเศษหินให้หลุดออกมาข้างนอก ป้องกันหัวเจาะเสื่อมสภาพ และป้องกันแท่งหินตัวอย่างมีอุณหภูมิสูง

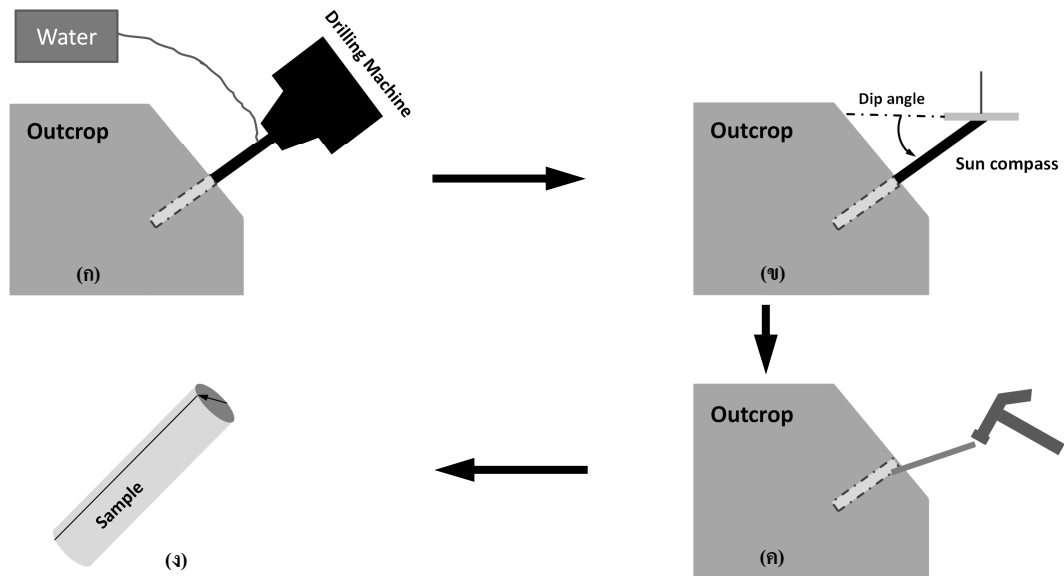
**ขั้นตอนที่ 4:** เมื่อได้ขนาดตามต้องการแล้ว ก่อนจะนำแท่งหินออกจากหินเดิม ต้องวัดทิศทาง มุมเอียงเท (dip) และแนววางตัว (strike) เทียบกับทิศเหนือภูมิศาสตร์ พร้อมจดบันทึก (รูปที่ 3.2 (ข)) ขั้นตอนนี้จะวัดทิศทางด้วยเข็มทิศแม่เหล็ก และเข็มทิศสุริยะ ส่วนขั้นตอนนี้จะนำแท่งหินออกจากหินเดิม ใช้สีกัดทองเหลืองเป็นเครื่องมือที่ใช้ตอกตัวอย่างให้หลุดออก (หลีกเลี่ยงใช้เครื่องมือที่เป็นเหล็กในขั้นตอนนี้ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเหล็กบนแท่งตัวอย่าง)

**ขั้นตอนที่ 5:** ระบุตำแหน่งทิศทางด้วยปากกาหมึกถาวร บนแท่งตัวอย่างหิน พร้อมทั้งระบุชื่อตัวอย่างบนแท่งหิน (ชื่อเดียวกับที่จะบันทึก)

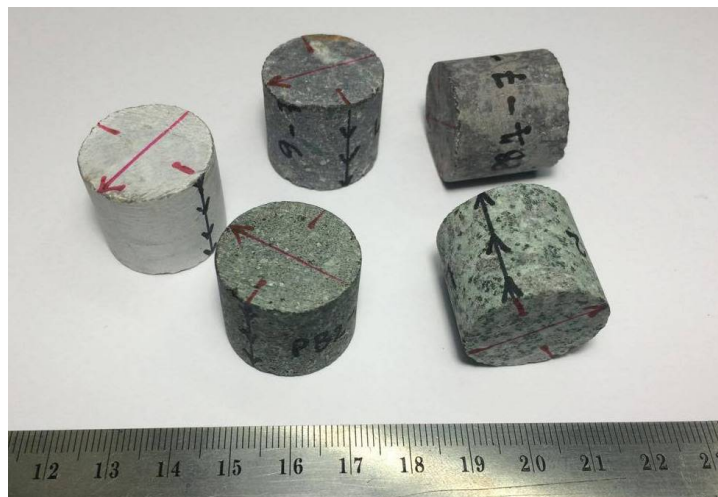
**ขั้นตอนที่ 6:** นำแท่งหินจากขั้นตอนที่ 5 มาทำความสะอาดผิว หลังจากนั้นกำหนดทิศทางของแท่งหินตามมาตรฐานการทดสอบ แล้วตัดเป็นแท่งเล็กๆ ขนาดความยาว 2 เซนติเมตร ด้วยเครื่องตัด ระหว่างตัดต้องหล่อเย็นด้วยน้ำตลอดเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างหินมีอุณหภูมิสูง ซึ่งตัวอย่างที่ได้ในขั้นตอนนี้พร้อมนำไปทดสอบทางด้านสมบัติทางแม่เหล็ก และวิเคราะห์ทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาล ตามแสดงในรูป 3.3



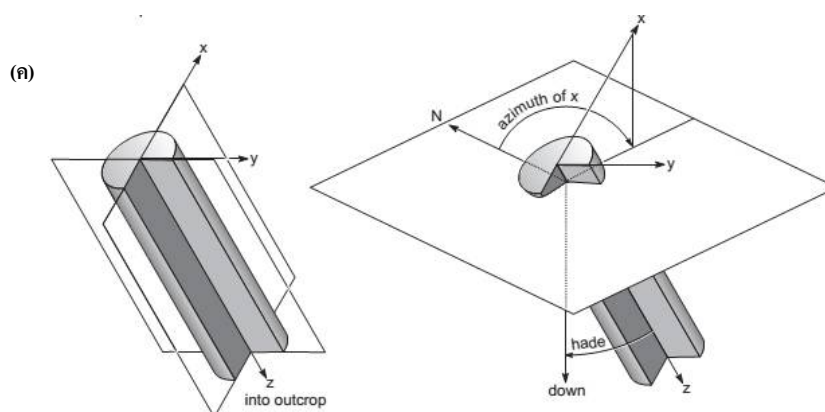
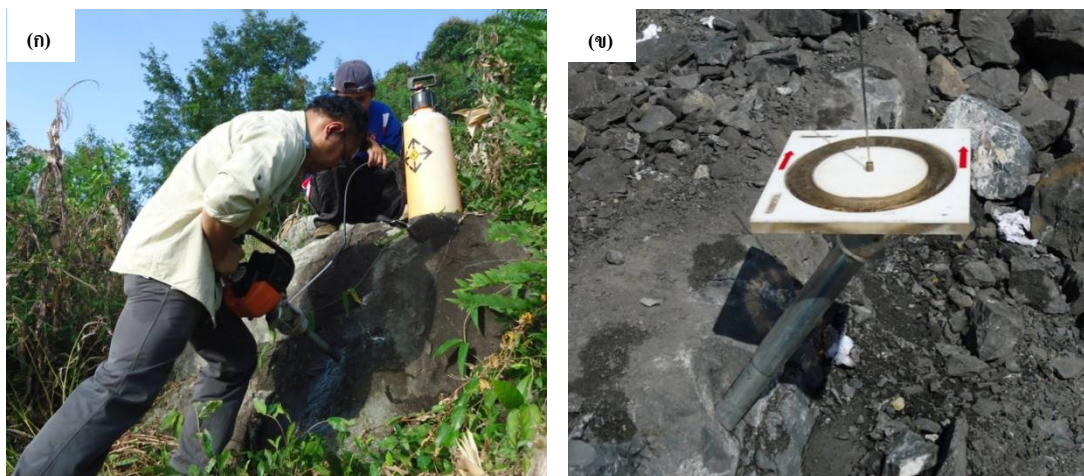
รูปที่ 3.1 ลำดับอ้างอิงตัวอย่างที่เก็บจากพื้นที่ศึกษา (Butler, 1992)



รูปที่ 3.2 ลำดับการเจาะแท่งตัวอย่างหินจากหินโผล่ (outcrop) (ก) เจาะตัวอย่างด้วยเครื่องเจาะหล่อเย็นด้วยน้ำ (ข) วัดทิศทางของตัวอย่างด้วยเข็มทิศสุริยะ (ค) สกัดแท่งตัวอย่างออกจากหินโผล่ และ (ง) แท่งตัวอย่างพร้อมรายละเอียดทิศทาง



รูปที่ 3.3 ขนาดแท่งหินตัวอย่างที่เตรียมเพื่อทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างรูปจากพื้นที่ศึกษาจริง (ก) เจาะแท่งตัวอย่างหิน (ข) วัดทิศทางของตัวอย่างด้วยเข็มทิศสุริยะ และ (ค) แสดงทิศทางของตัวอย่าง (Butler, 1992)

### 3.2 ขั้นตอนทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

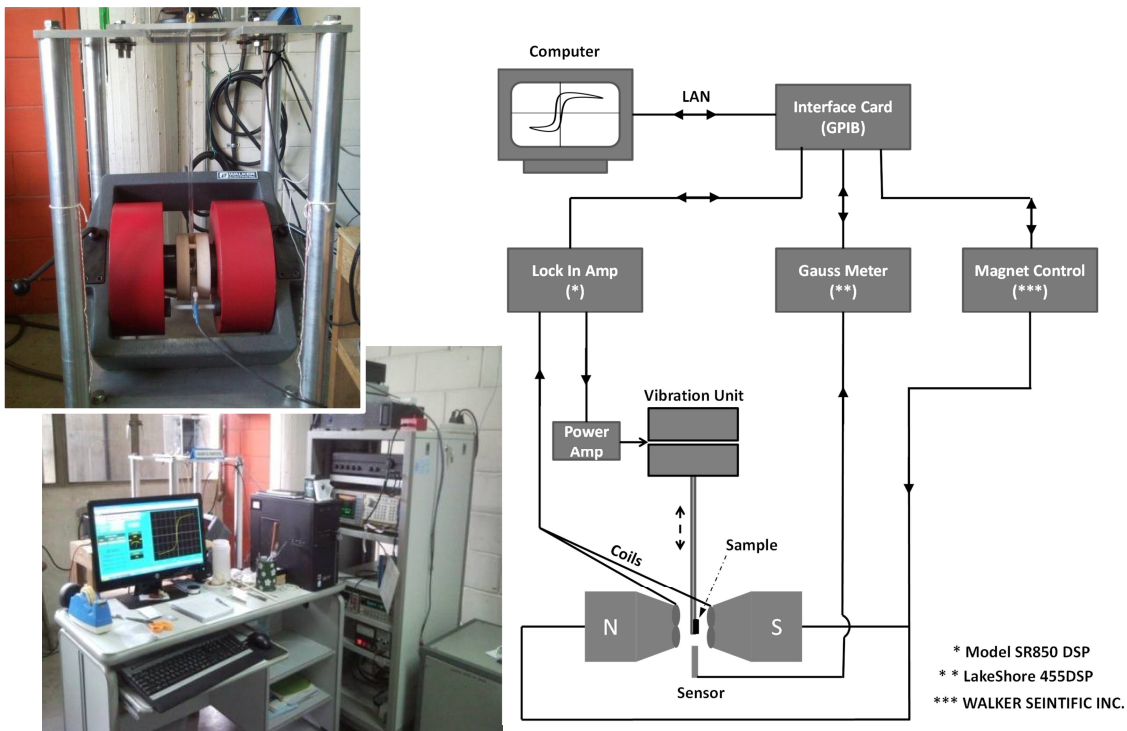
#### 3.2.1 ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กและภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหิน

ในส่วน of ขั้นตอนการศึกษาสมบัติแม่เหล็กและภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของหิน จะทำการทดสอบตัวอย่าง 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

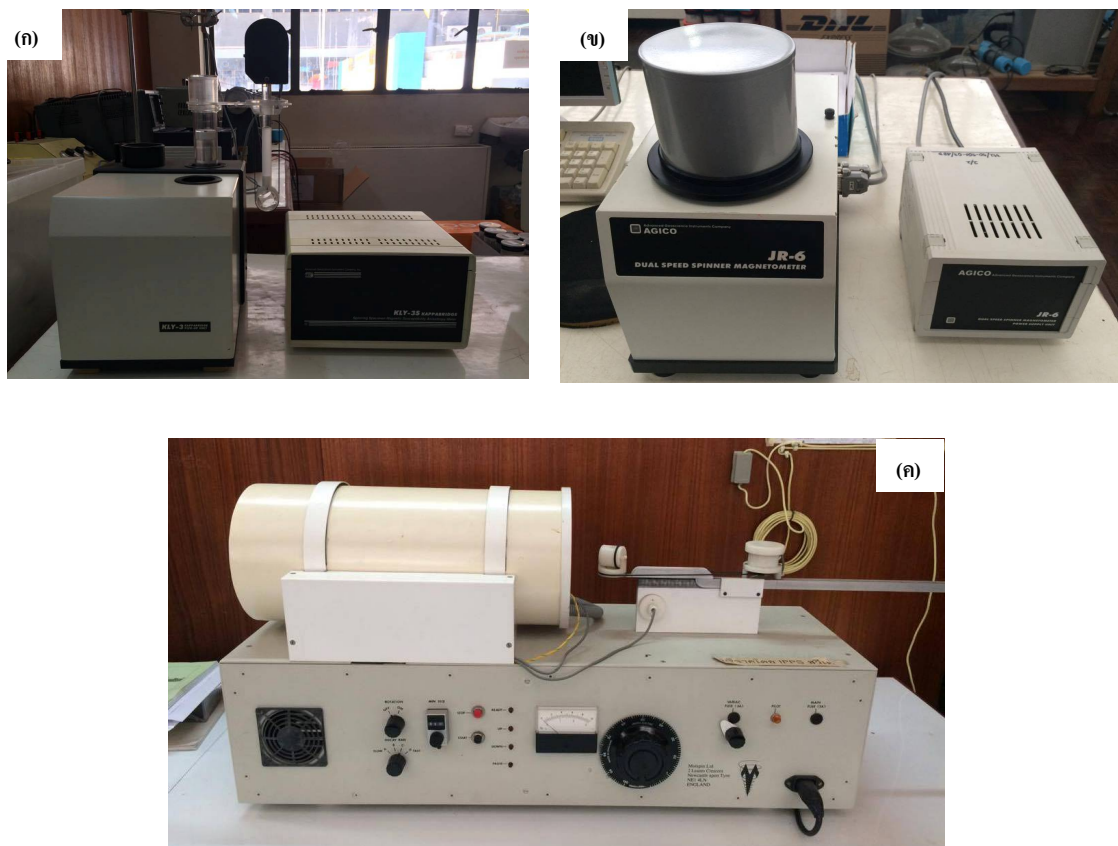
- 1.) ทดสอบและสร้างกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่แม่เหล็ก (Hysteresis loop) ของตัวอย่างหินแต่ละพื้นที่ศึกษา ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Vibrating Sample Magnetometer (VSM) ณ. ห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าและแม่เหล็ก (Electricity

and Magnetism) ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่ง โครงสร้างของ เครื่องเป็นตามแสดงในรูป 3.5 ขนาดตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ประมาณ ไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ซึ่งนำหนักก่อนทำการทดสอบ จากนั้นนำไปแปะติดที่จุดติด ตัวอย่าง ระหว่างแกนแม่เหล็กเหนี่ยวนำทั้งสอง กำหนดความเข้มสนาม เหนี่ยวนำสูงสุด 1 T เพิ่มและลดลง ครั้งละ 9 mT ทำการทดสอบจนครบรอบ (0T -> 1T -> 0T -> -1T -> 0T -> 1T) ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการนี้ คือ กราฟ ระหว่างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (H) แกน x มีหน่วยเป็น เออร์สเต็ด (Oersted - Oe) และ แมกนีไทเซชัน (M) แกน y มีหน่วยเป็น  $\text{Am}^2/\text{kg}$  ซึ่งจะนำข้อมูลที่ ได้ไปวิเคราะห์หาตัวแปรทางแม่เหล็กในขั้นตอนต่อไป

- 2.) วัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility - K) ขั้นตอนนี้ใช้ เครื่องมือ Kappabridge KLY-3S (รูปที่ 3.6 (ก)) ณ. ห้องปฏิบัติการวิจัย แม่เหล็กบรรพกาล ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งจะ ใช้ ตัวอย่างที่เตรียมในขั้นตอนที่ 6 หัวข้อ 3.1 วัดค่า K แบบ 15 ทิศทาง โดยทำ การวัดทุกตัวอย่างย่อย (specimen) เพื่อหาค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กเฉลี่ย (mean magnetic susceptibility -  $K_m$ ) และใช้สำหรับการวิเคราะห์แอนไอโซโทรปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (anisotropy magnetic susceptibility - AMS)
- 3.) วัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง (remanent magnetization) ก่อนและหลังลบล้าง แมกนีไทเซชันตกค้าง ขั้นตอนนี้ใช้เครื่องมือ Spinner Magnetometer JR-6 (Agico, Czech Republic) (รูปที่ 3.6 (ข)) สำหรับวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง โดยจะทำการวัด 4 ทิศทาง และเครื่องใช้มือ Alternating Field (AF) Demagnetizer (รูปที่ 3.6 (ค)) สำหรับลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้างของ ตัวอย่างตัวอย่างหินจากแต่ละพื้นที่ ณ. ห้องปฏิบัติการวิจัยแม่เหล็กบรรพกาล ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบใน ขั้นตอนนี้จะทดสอบเพียงแค่ตัวอย่างย่อย (specimen) เพียงตัวอย่างเดียวจาก แต่ละตัวอย่าง (sample) โดยค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลบล้างจะเพิ่มขึ้นทีละ ในช่วงแรก (5-15 mT) และหยาบในช่วงท้ายๆ (มากกว่า 20mT) จนถึงความเข้ม สูงสุดที่ 70 mT



รูปที่ 3.5 โครงสร้างเครื่องมือสำหรับสร้างกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็กด้วยเครื่อง Vibrating Sample Magnetometer (VSM) (ณ. ห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าและแม่เหล็ก ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)



รูปที่ 3.6 เครื่องมือสำหรับทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กของหิน (ก) เครื่องมือวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก รุ่น Kappabridge KLY-35 (ข) เครื่อง JR-6 สำหรับวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง และ (ค) เครื่องมือสำหรับลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้างแบบสนามแม่เหล็กสลับ (ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)

### 3.2.2 วิเคราะห์ตัวอย่างหินด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer - XRD)

ขั้นตอนวิเคราะห์ตัวอย่างหินด้วยเทคนิค XRD ได้ส่งตัวอย่างไปทดสอบยัง ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รายละเอียดการทดสอบเป็นไปตามตาราง 3.1 ตัวอย่างทดสอบในขั้นตอนนี้ได้เลือกตัวอย่างมาเพียงบางตัวอย่างเท่านั้น ไปทดสอบ

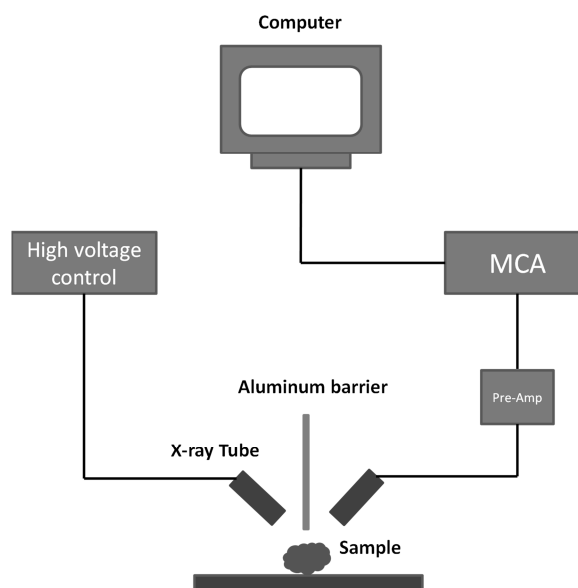


ตารางที่ 3.1 รายละเอียดและเงื่อนไขการทดสอบหินด้วยเทคนิค XRD

<b>Machine</b>	X-ray Diffractometer, X'Pert MPD, PHILIPS, Netherlands		
<b>Objective</b>	Phase identify	<b>Sample preparation</b>	Pressed power
<b>X-ray Tube</b>	Cu Tube	<b>X-ray generator</b>	40kV & 30 mA
<b>Wavelength</b>	0.154 nm(Cu-K $\alpha$ )	<b>Scan program</b>	Geo new-0.4
<b>Scan range (2<math>\theta</math>)</b>	5-90 degree	<b>Step size (2<math>\theta</math>)</b>	0.05 degree
<b>Time/step</b>	1 sec	<b>Scan speed</b>	3 degree/min

### 3.2.3 วิเคราะห์ตัวอย่างหินด้วยเทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence - XRF)

ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างด้วยเทคนิค XRF แบบทดสอบเชิงคุณภาพ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นหินตัวอย่างเดิมที่ไม่ผ่านการบด กระตุ้นด้วยหลอดรังสีเอกซ์ Oxford Instrument X-ray ที่พลังงานสูงสุด 30 keV และกระแส 1  $\mu$ A ชนิดหัววัดรังสีเป็นแบบสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอน (Si) รุ่น AMPTEX XR-100CR ทำงานร่วมกับ MCA รุ่น AMPTEX MCA8000A ซึ่งปรับช่วงของพลังงานที่วัดได้ตั้งแต่ 0-25 keV และความถี่ของแต่ละช่องประมาณ 0.01 keV เวลาที่ใช้ในการวัดประมาณ 1,000 วินาที สำหรับการเปรียบเทียบจะใช้พีคพลังงานของทองแดง (Cu-K $\alpha_1$  (8.048 keV)) และ Cu-K $\alpha_2$  (8.028 keV)) และพีคพลังงานของไทเทเนียม (Ti-K $\alpha_1$ (4.511 keV)) โครงสร้างการทำงานของเครื่องมือ เป็นไปตามแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างการทำงานของเครื่องมือ XRF

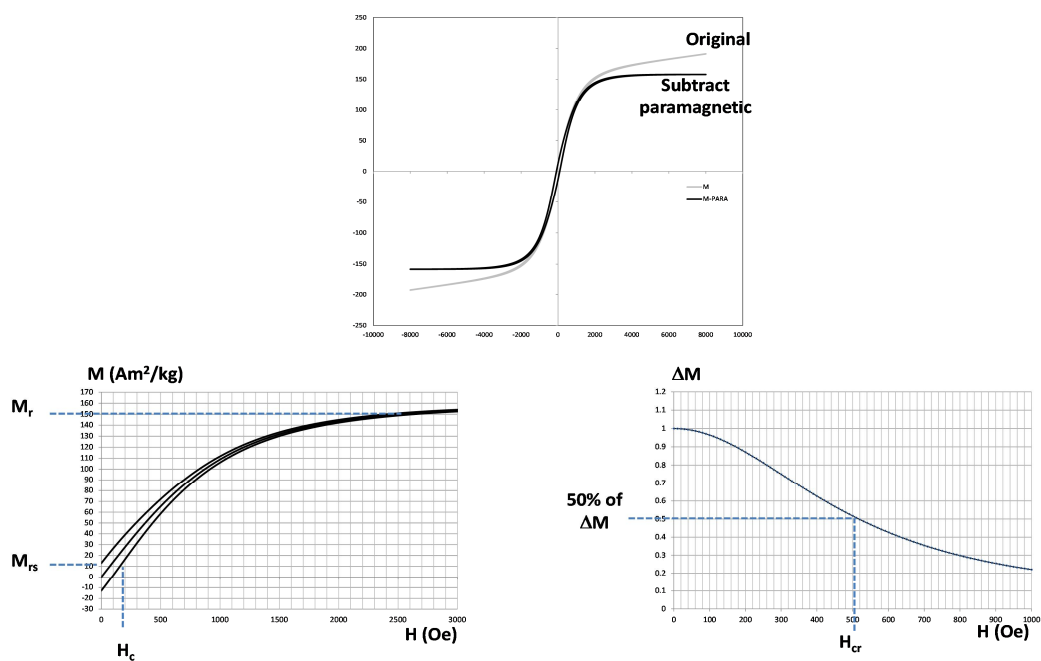
### 3.2.4 วิเคราะห์ตัวอย่างหินด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR)

ตัวอย่างที่นำมาทดสอบในกระบวนการนี้จะผ่านการเตรียมตัวอย่างโดยใช้ KBr เป็นตัวประสานตัวอย่างที่อัตราส่วน 100:1 เครื่องมือที่ใช้วัดเป็นเครื่องมือรุ่น Equinox 55 Bruker และย่านที่ทดสอบจะอยู่ในช่วง 4000 ถึง 30  $\text{cm}^{-1}$  ความละเอียด 2  $\text{cm}^{-1}$  สำหรับกระบวนการวิเคราะห์ยอดของสัญญาณจะพิจารณาเปรียบเทียบกับของ FTIR ของสารมาตรฐานที่ได้มีรายงานการศึกษา ก่อนหน้านี้ (เช่น ชงชัย และคณะ, 2558; Ojima, 2003; Vaculikova and Plevova, 2005 และ Chandrasekaran et al., 2015)

### 3.3 ขั้นตอนวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.3.1 วิเคราะห์ผลจากกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่แม่เหล็ก (Hysteresis loop)

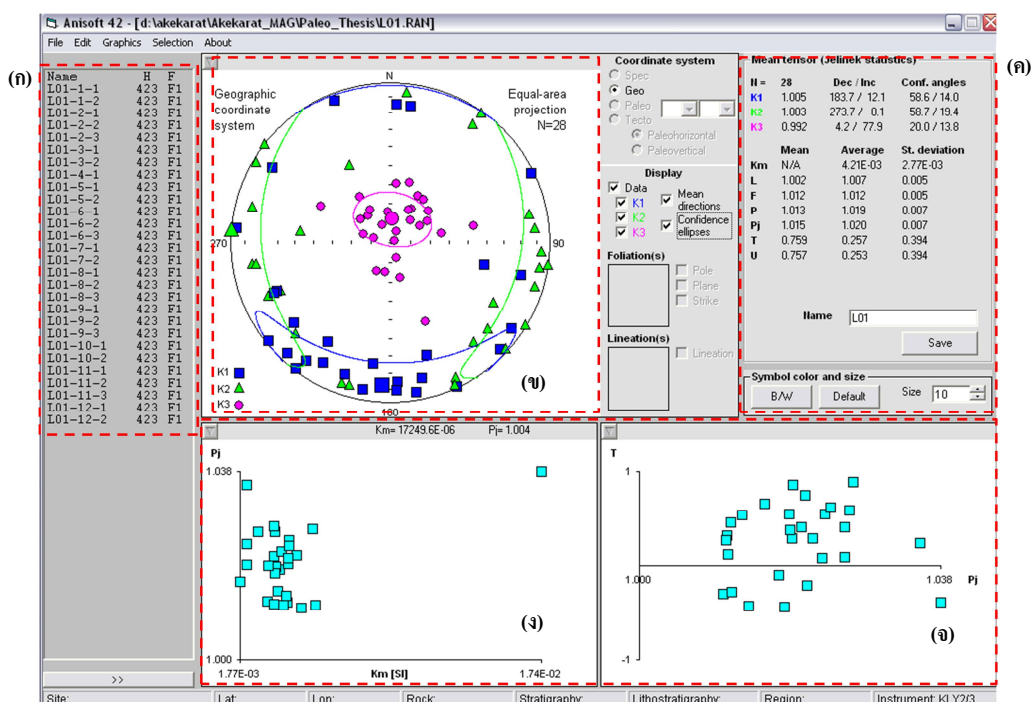
ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง VSM ประกอบไปด้วยข้อมูล สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ( $H$ ) มีหน่วยเป็น Oe (หรือเท่ากับ 0.1 mT) กับค่าแมกนีไทเซชัน ( $M$ ) ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ มีหน่วยเป็น  $\text{Am}^2/\text{kg}$  ตามแสดงในรูปที่ 3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ ขั้นตอนแรกจะสร้างกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่แม่เหล็กใหม่จากข้อมูลที่ได้ ด้วยโปรแกรม RockMag Analyzer V.1.0 (Leonhardt, 2006) จากนั้นจะปรับแก้ส่วนที่เป็น พาราแมกเนติก (paramagnetic) ออก และขั้นตอนสุดท้ายเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta M$  กับ  $H$  ซึ่งสามารถหาตัวแปรต่างๆ ซึ่งพิจารณาตามขั้นตอนที่นำเสนอโดย Tauxe (2003) ตามแสดงในรูป 3.8



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆ จากกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่แม่เหล็ก

### 3.3.2 วิเคราะห์แอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (anisotropy magnetic susceptibility - AMS)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล AMS ใช้โปรแกรม Anisoft 4.2 (Chadima and Jelinek, 2009) ข้อมูลที่ได้จะแสดงในรูปสเตอริโอกราฟิกโปรเจกชัน (stereographic projection) รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยโปรแกรมตามแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยโปรแกรม Anisoft 4.2 (ก) ตัวอย่างทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ (ข) แสดงผลข้อมูลในพิกัดภูมิศาสตร์ (Geographic coordinate) (ค) ตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ (ง) กราฟ  $K_m$  -  $P_j$  และ (จ) กราฟ  $P_j$  -  $T$

### 3.3.3 วิเคราะห์ทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้าง

องค์ประกอบทิศทางเฉลี่ยของแมกนีไทเซชันตกค้าง หลังจากทำการลบล้าง ด้วยสนามแม่เหล็กสลับ (AF demagnetization) ของแต่ละตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษา จะใช้โปรแกรม Remasoft 3.0 (Chadima and Hroudá, 2009) สำหรับการแยกองค์ประกอบของแมกนีไทเซชันตกค้างโดยอาศัยหลักการของ “principal component analysis (PCA)” (Kirschvink, 1980) ซึ่งความเที่ยงตรงของข้อมูลจะพิจารณาจากค่า “maximum angular deviation - MAD” ขั้นตอนการคำนวณ

ทิศทางแมกเนไทเซชันเฉลี่ยแต่ละพื้นที่ศึกษา อาศัยการคำนวณทางสถิติของพีชเชอร์ โดยมีค่า  $\alpha_{95}$  เป็นค่าเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ย รายละเอียดของโปรแกรม Remasoft 3.0 และข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ แสดงในรูปที่ 3.10

สำหรับเงื่อนไขในการแยกองค์ประกอบของแมกเนไทเซชันของการศึกษาครั้งนี้จะแยกพิจารณาสองช่วงด้วยกัน คือ

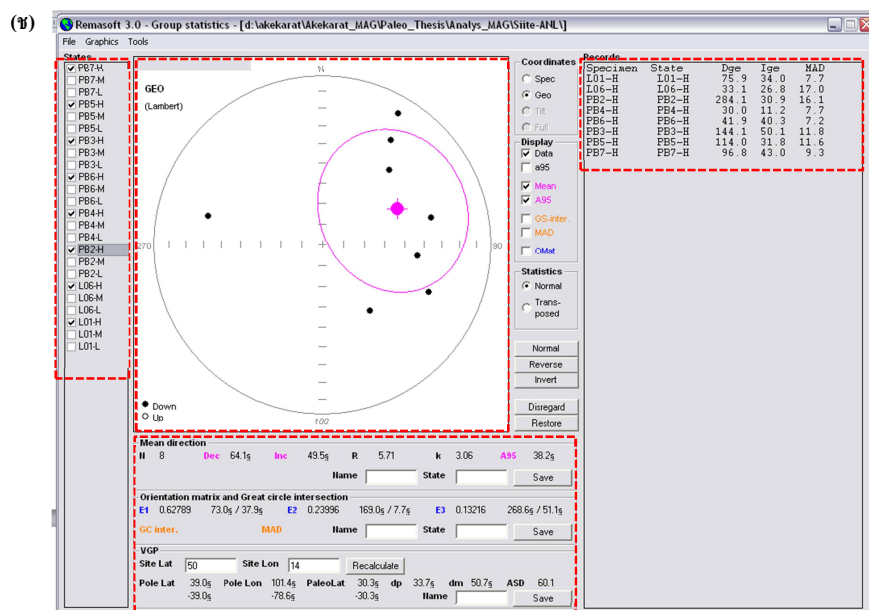
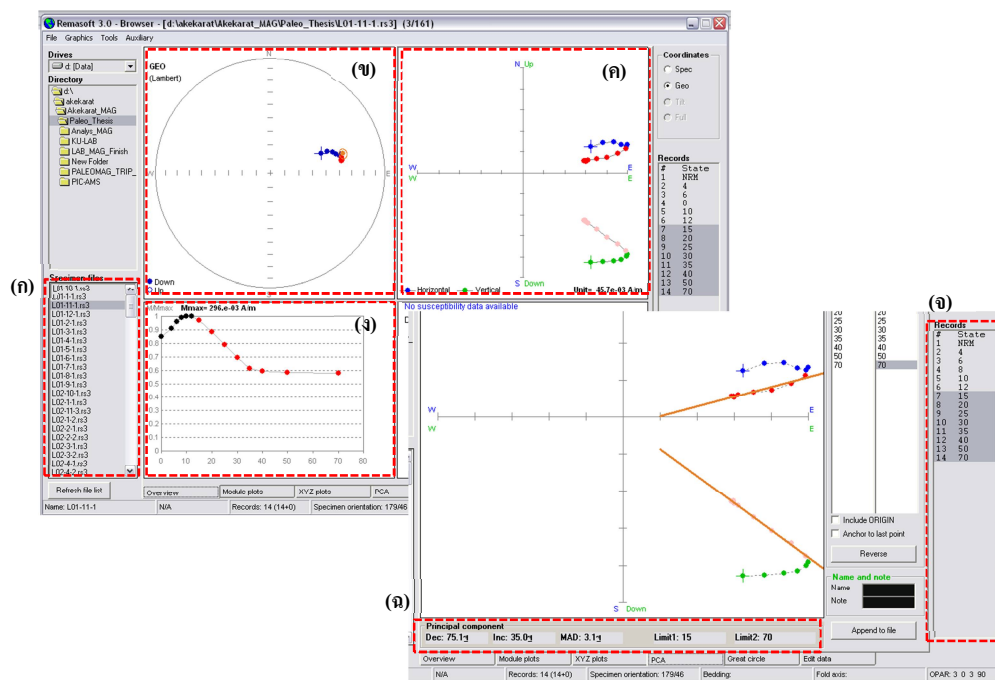
- 1.) องค์ประกอบแมกเนไทเซชันช่วงสนามแม่เหล็กกลบด้างน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 mT ( $H_{AF} < 20$  mT) จะพิจารณาช่วงนี้ว่าเป็นองค์ประกอบของ VRM หรือ ช่วงองค์ประกอบ  $H_c$  ต่ำ (low coercivity - LC)
- 2.) องค์ประกอบแมกเนไทเซชันช่วงสนามแม่เหล็กกลบด้างมากกว่า 20 mT ( $H_{AF} > 20$  mT) จะพิจารณาช่วงนี้ว่าเป็นองค์ประกอบของ ChRM หรือ ช่วงองค์ประกอบ  $H_c$  สูง (high coercivity - HC)

ขั้นตอนการหาทิศทางของแต่ละองค์ประกอบจะพิจารณาจากข้อมูลอย่างน้อย 3 จุด และในการหาทิศทางของทิศทางเฉลี่ยของแต่ละพื้นที่จะไม่นำข้อมูลที่มีค่า  $MAD > 20$  องศา มาคำนวณ

### 3.3.4 การจัดการแผนที่และแสดงผลข้อมูล

ในการวิจัยครั้งนี้ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องสำหรับนำมาจัดการข้อมูลประกอบด้วย

- 4.) Remasoft 3.0 ใช้สำหรับวิเคราะห์ทิศทางแมกเนไทเซชันตกค้าง การคำนวณทิศทางเฉลี่ยแมกเนไทเซชันตกค้างของแต่ละพื้นที่ศึกษา และการคำนวณทางด้านสถิติของพีชเชอร์
- 5.) Anisoft 4.2 ใช้สำหรับวิเคราะห์ AMS ของตัวอย่าง
- 6.) RockMag Analyzer V1.0 ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่แม่เหล็ก
- 7.) Super-IAPD ใช้สำหรับคำนวณค่าทิศทางจากเข็มทิศสุริยะ
- 8.) GPLATE 1.5.0 ใช้สำหรับอ้างอิงขอบเขตของแผ่นเปลือกโลกต่างๆ รวมทั้งแสดงผลข้อมูลของแมกเนไทเซชันตกค้าง
- 9.) Grapher และ MS Office (Word, Excel, Power point) ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.10 รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยโปรแกรม Ramesoft 4.2 (ก) ข้อมูลตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ (ข) ถึง (ง) แสดงข้อมูลทิศทางและความเข้มแแม่กนีโทเซชันตกค้างที่ความเข้มสนามแม่เหล็กคลดต่าง ๆ (จ) ช่วงข้อมูลที่นำมาพิจารณาคำนวณหาทิศทางสนามแม่เหล็กตกค้าง (ค) ข้อมูลทิศทางแแม่กนีโทเซชันตกค้างช่วงที่พิจารณา และ (ข) คำนวณแแม่กนีโทเซชันตกค้างเฉลี่ยของพื้นที่ศึกษาทั้งหมด

## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผล

จุดประสงค์การทดสอบตัวอย่างในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยสามส่วนหลักๆ คือ ศึกษาสมบัติแม่เหล็กของหิน (rock magnetism) ศึกษาแอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (anisotropy magnetic susceptibility - AMS) และศึกษาภาวะแม่เหล็กบรรพกาล (palaeomagnetism) ของตัวอย่างหินจากพื้นที่ศึกษา ซึ่งผลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ทางด้านสมบัติแม่เหล็กของหินของแต่ละพื้นที่ แอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กกับธรณีแปรสัณฐานในอดีต และภาวะแม่เหล็กบรรพกาลกับวิวัฒนาการธรณีแปรสัณฐานของแผ่นเปลือกโลกของประเทศไทยในอดีต ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 สมบัติทางแม่เหล็กของหิน

##### 4.1.1 ผลทดสอบองค์ประกอบแร่ในหิน

เทคนิคที่ใช้สำหรับศึกษาองค์ประกอบแร่ในหินประกอบด้วยสามเทคนิค คือ เทคนิคเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence - XRF) เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR) และเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction - XRD) ซึ่งวัตถุประสงค์หลักสำหรับการทดสอบตัวอย่างในขั้นตอนนี้เพื่อใช้ข้อมูลสำหรับจำแนก และยืนยันประเภทของหินจากพื้นที่เก็บตัวอย่างกับข้อมูลที่รายงานการศึกษาก่อนหน้านี้มีความสอดคล้องกันหรือไม่ ซึ่ง XRF และ FTIR ทำการทดสอบตัวอย่างทุกพื้นที่ ส่วน XRD ทำการทดสอบบางพื้นที่เท่านั้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลยืนยันผลของ FTIR โดยผลการทดสอบทั้งหมดสรุปไว้ในตารางที่ 4.1

ผลทดสอบ XRF ดังแสดงในภาคผนวก ฉ และในตารางที่ 4.1 เกือบทุกตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ยกเว้น L02-11 L05-1 PB5-9 และ PB7-1 ปรากฏยอดพลังงานของ Fe-K $\alpha_1$  (6.404 keV) อย่างเด่นชัด และเกือบทุกตัวอย่างปรากฏยอดพลังงานของ Ca-K $\alpha_1$  (3.692 keV) แต่จะเด่นชัดในตัวอย่างที่ L02-6 L05-1 และ PB5-9 นอกจากนั้นในบางตัวอย่าง เช่น L02-6 L06-7 และ PB4-10 ปรากฏยอดของพลังงาน Al-K $\alpha_1$  (1.487 keV) Ti-K $\alpha_1$  (4.511 keV) และ Mn-K $\alpha_1$  (5.899 keV) อีกด้วย แต่โดยรวมตัวอย่างหินอัครินทุกตัวอย่างจะปรากฏยอดพลังงานของ Fe-K $\alpha_1$  และตัวอย่างหินปูนจะ

ปรากฏยอดพลังงานของ  $\text{Ca-K}_{\alpha_1}$  อย่างเด่นชัด

ผลทดสอบ FTIR ของตัวอย่างทั้งหมดเมื่อเทียบกับกราฟตัวอย่างมาตรฐานของแร่ที่ทราบชนิด จากรายงานที่มีการศึกษาก่อนหน้านี้ (ซงชัย และ คณะ, 2558; Ojima, 2003; Vaculikova and Plevova, 2005; Chandrasekaran et al., 2015) สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 5 กลุ่ม ตามลักษณะของกราฟ (ภาคผนวก ข) และองค์ประกอบของแร่ที่ปรากฏ (ตารางที่ 4.1) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**กลุ่มที่ 1** ประกอบด้วยตัวอย่างจากพื้นที่ L01 L02 และ PB4 ตัวอย่างกลุ่มนี้ปรากฏยอดสัญญาณสอดคล้องกับแร่แคลไซต์ (calcite) แร่ควอตซ์ (quartz) อย่างเด่นชัด และนอกจากนั้นในบางตัวอย่างจากพื้นที่ L01 และ PB4 ยังปรากฏยอดสัญญาณของแร่แอลไบต์ (albite)

**กลุ่มที่ 2** ประกอบด้วยตัวอย่างจากพื้นที่ L02 และ PB3 ตัวอย่างกลุ่มนี้ปรากฏยอดสัญญาณของแร่แคลไซต์ แร่ควอตซ์ และ แร่เคโอลิไนต์ (kaolinite) ซึ่งหินในกลุ่มนี้มีองค์ประกอบของแร่ควอตซ์ค่อนข้างเด่นชัดเช่นเดียวกับกลุ่มแรก แต่ที่ต่างออกไป คือ มีส่วนผสมของแร่เคโอลิไนต์ เข้ามาปนอยู่ด้วย นอกจากนี้ยังปรากฏยอดสัญญาณของแร่แอลไบต์ ให้เห็นในตัวอย่างจากพื้นที่ PB3

**กลุ่มที่ 3** ประกอบด้วยตัวอย่างจากพื้นที่ L03 L04 L06 PC01 PB01 PB2 และ PB6 ตัวอย่างกลุ่มนี้ปรากฏยอดสัญญาณสอดคล้องกับข้อมูลของ แร่ควอตซ์ แร่แอลไบต์ และ แร่เคโอลิไนต์ นอกจากนี้ยังปรากฏให้เห็นยอดสัญญาณของ แร่ไมโครคลายน์ (microcline) และ แร่ออร์โทเคลส (orthoclase) อยู่บ้าง ที่สำคัญตัวอย่างกลุ่มนี้ไม่มียอดสัญญาณของแร่แคลไซต์ให้เห็น

**กลุ่มที่ 4** ประกอบด้วยตัวอย่างจากพื้นที่ L05 และ PB5 ซึ่งรายงานว่าเป็นหินปูนตามแผนที่ธรณีวิทยา พ.ศ 2552 และสอดคล้องกับข้อมูล FTIR ที่แสดงผลของแร่แคลไซต์อย่างชัดเจน แต่ในตัวอย่างจากพื้นที่ PB5 มียอดสัญญาณของแร่ควอตซ์ให้เห็นอยู่ด้วย

**กลุ่มที่ 5** มีเฉพาะตัวอย่างจากพื้นที่ PB7 เพียงตัวอย่างเดียว จากข้อมูล FTIR ปรากฏยอดสัญญาณของ แร่ควอตซ์ อย่างเด่นชัด สอดคล้องกับตัวอย่างที่เป็นหินแกรนิตที่มีเม็ดแกรนหายบ เห็นผลึกแร่ควอตซ์อย่างชัดเจน และนอกจากนั้นยังมียอดสัญญาณของ แร่แอลไบต์ และ แร่เคโอลิไนต์ ด้วย



ผลทดสอบ XRD ตามแสดงในตารางที่ 4.1 และภาคผนวก ซ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลของ FTIR ตัวอย่างเช่น กลุ่มที่ 1 ผลของ XRD จากตัวอย่าง L01-11 ให้ข้อมูลที่สอดคล้องกับ FTIR แต่ผลของ XRD จะมีส่วนของแร่ที่เพิ่มเติมขึ้นมา คือ แร่มีสโคไวท์ (muscovite) และ แร่ไมโครคลายน์

จากข้อมูลทั้งสามส่วนจะเห็นว่าองค์ประกอบของแร่ในตัวอย่างหินมีความซับซ้อนค่อนข้างมาก ตัวอย่างหินอัคนี จากพื้นที่ศึกษาจะมีองค์ประกอบของแร่ควอตซ์ แร่ในกลุ่มของออร์โทเคลส แร่แอลไบต์ เป็นหลัก แต่มีบางตัวอย่างจากพื้นที่ L01 และ PB4 มีส่วนผสมของแร่แคลไซต์เข้ามาปนด้วย สำหรับตัวอย่างหินปูนจากพื้นที่ L05 และ PB5 ผลการทดสอบทั้งสามวิธีแสดงรายละเอียดของแร่แคลไซต์ อย่างชัดเจน แต่ก็มีแร่ควอตซ์ผสมอยู่ด้วยในตัวอย่างจากพื้นที่ PB5 (ผลการทดสอบ FTIR) ตัวอย่างหินสการ์น จากพื้นที่ L03 และ L04 ในกลุ่มที่ 3 ผลการทดสอบ FTIR ใกล้เคียงกับหินอัคนี แต่หินสการ์นจะไม่ปรากฏข้อมูลของแร่แอลไบต์ให้เห็น

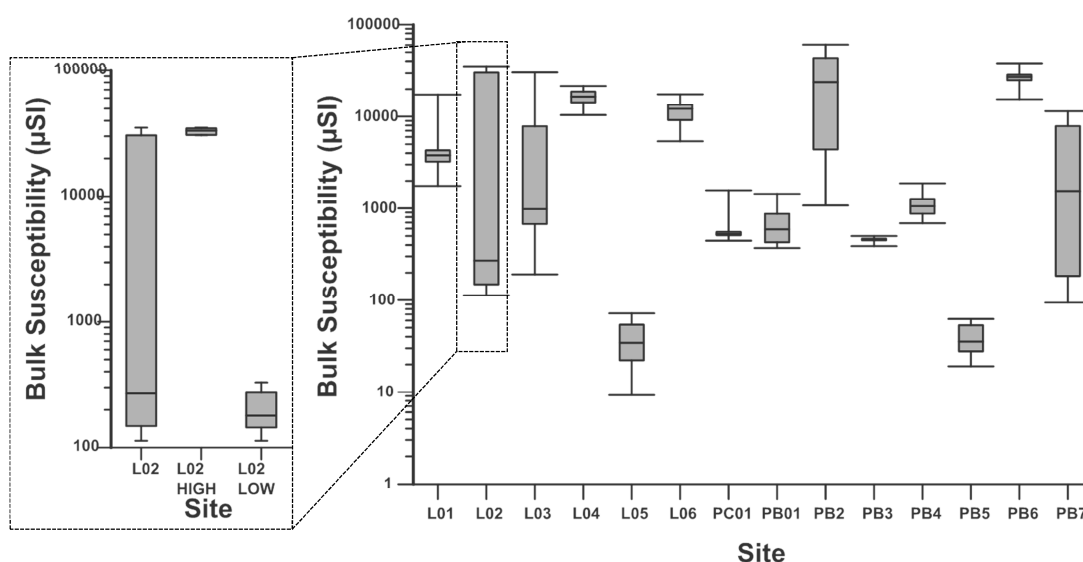
ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบตัวอย่าง FTIR XRD และ XRF

Group	Sample	Quartz	Orthoclase	Albite	Microcline	Kaolinite	Calcite	XRD Results	XRF Results - Peak Energy (keV)
1	L01-11	465, 695, 780, 1080	430				880, 1020, 1425, 1800	Quartz(SiO <sub>2</sub> ), Albite(Na <sub>0.98</sub> Ca <sub>0.02</sub> (Al <sub>1.02</sub> Si <sub>2.98</sub> O <sub>6</sub> )), Microcline[K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )], Calcite[CaCO <sub>3</sub> ]	Fe-Kα1(6.404), Mn-Kα1(5.899), Ti-Kα1(4.511), Cu-Kα1(3.962)
	L02-11	460, 1080					715, 880, 1425, 1800		Fe-Kα1(6.404), Cr-Kα1(3.962), Al-Kα1(1.487)
	PB4-2	470, 690, 800	430	720			880, 1430, 1800		Fe-Kα1(6.404), Cr-Kα1(3.962)
2	L02-5	460				1000-1025	715, 880, 1425, 1800	Quartz(SiO <sub>2</sub> ), Clinochlore[(Mg, Fe, Al) <sub>3</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ], Albite [(Na <sub>0.98</sub> Ca <sub>0.02</sub> (Al <sub>1.02</sub> Si <sub>2.98</sub> O <sub>6</sub> ))], Calcite [CaCO <sub>3</sub> ], Muscovite [KAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ]	Fe-Kα1(6.404), Mn-Kα1(5.899), Ti-Kα1(4.511)
	PB3-1	460, 780, 795, 1080	435			1000-1025	880, 1435, 1800	Quartz(SiO <sub>2</sub> ), Clinochlore[(Mg, Fe, Al) <sub>3</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ], Albite[(Na <sub>0.98</sub> Ca <sub>0.02</sub> (Al <sub>1.02</sub> Si <sub>2.98</sub> O <sub>6</sub> ))]	Fe-Kα1(6.404), Mn-Kα1(5.899), Ti-Kα1(4.511), Cu-Kα1(3.962)
	L03-1	470, 515, 690, 780, 800, 1080			640	1000-1025			Fe-Kα1(6.404), Mn-Kα1(5.899), Ti-Kα1(4.511), Cu-Kα1(3.962), Al-Kα1(1.487)
3	L04-7	460, 690, 780, 795	435		640	1000-1025			Fe-Kα1(6.404), Cr-Kα1(3.962)
	L06-14	785	430	725		1035			Fe-Kα1(6.404), Mn-Kα1(5.899), Ti-Kα1(4.511), Cu-Kα1(3.962), Al-Kα1(1.487)
	PC01-9	460, 510, 680, 780, 800	430	725		1000-1025		Quartz(SiO <sub>2</sub> ), Albite(Na <sub>0.98</sub> Ca <sub>0.02</sub> (Al <sub>1.02</sub> Si <sub>2.98</sub> O <sub>6</sub> )), Clinochlore[(Mg, Fe, Al) <sub>3</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ], aggestobornblends[Ca <sub>2</sub> Mg <sub>3</sub> (Al, Fe <sup>3+</sup> )Si <sub>7</sub> AlO <sub>23</sub> (OH)]	Fe-Kα1(6.404), Mn-Kα1(5.899), Ti-Kα1(4.511), Cu-Kα1(3.962), Al-Kα1(1.487)
4	PB01-11	460, 510	435	720	640	1030		Clinochlore[(Mg, Fe, Al) <sub>3</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ], Albite[(Na <sub>0.98</sub> Ca <sub>0.02</sub> (Al <sub>1.02</sub> Si <sub>2.98</sub> O <sub>6</sub> ))], Augite[(Mg, Fe, Ti, Al)(Ca, Fe, Na, Mn)(Si, Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	Fe-Kα1(6.404), Cr-Kα1(3.962)
	PB2-6	460	430, 1040	720					Fe-Kα1(6.404), Ti-Kα1(4.511), Cr-Kα1(3.962)
	PB6-5	790, 870	430	720					Fe-Kα1(6.404), Cr-Kα1(3.962)
5	L05-10					1020	710, 880, 1420-1450, 1800	Calcite [CaCO <sub>3</sub> ], Quartz [SiO <sub>2</sub> ]	Cu-Kα1(3.962)
	PB5-9	470, 510, 780, 800, 850, 1085					710, 880, 1420-1450, 1800		Fe-Kα1(6.404), Cr-Kα1(3.962), Al-Kα1(1.487)
5	PB7-3	460, 690, 780, 795	430	720		1000-1025			Fe-Kα1(6.404), Cr-Kα1(3.962), Al-Kα1(1.487)

#### 4.1.2 ผลทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กของหิน

##### 1.) สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของหิน (magnetic susceptibility - $K_m$ )

ตัวอย่างทั้งหมด 149 แห่ง จากพื้นที่ศึกษาทั้งหมด 14 จุด ครอบคลุมจังหวัดเพชรบูรณ์ และจังหวัดเลย ตามแสดงในรูปที่ 1.8 นำมาตัดเป็นชิ้นตัวอย่างมาตรฐานได้ 327 ตัวอย่าง ซึ่งทั้งหมดนำมาวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของหิน 15 ทิศทาง โดยใช้เครื่องมือ Kappabridge KLY-3S ซึ่งค่าเฉลี่ยของค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (mean magnetic susceptibility -  $K_m$ ) ของแต่ละตัวอย่างมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.17 และผลแจกแจงค่า  $K_m$  ของแต่ละพื้นที่ศึกษาตามแสดงในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟแจกแจงค่าเฉลี่ย  $K_m$  ของแต่ละพื้นที่ศึกษา

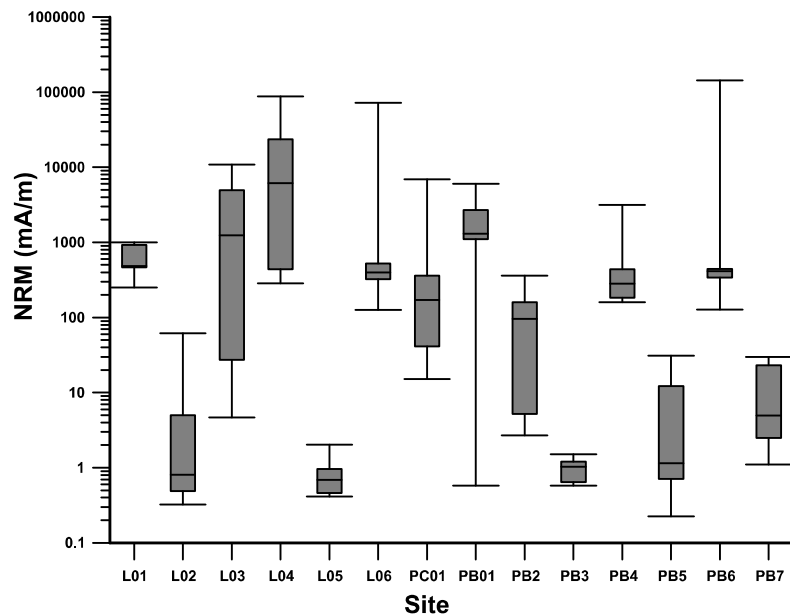
จากข้อมูลข้างต้นรูปที่ 4.1 พบว่ากลุ่มของหินอัคนี มีค่า  $K_m$  สูงกว่าหินตะกอนอย่างชัดเจน โดยที่หินอัคนีมีค่า  $K_m$  อยู่ระหว่าง 100 ถึง 50000  $\mu$ SI และหินตะกอน  $K_m$  มีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 100  $\mu$ SI ซึ่งเป็นหินตะกอนจำพวกหินปูน (L05 และ PB5) แต่มีอยู่พื้นที่ศึกษาหนึ่งคือ PB3 เป็นหินตะกอนจำพวกหินดินดาน มีค่า  $K_m$  ( $457 \pm 28$   $\mu$ SI) สูงกว่าหินปูน และปรากฏในช่วงระหว่างหินปูนกับหินอัคนี ถ้าพิจารณา  $K_m$  เฉลี่ยจากแต่ละพื้นที่ศึกษา พบว่าตัวอย่างหินจากพื้นที่ PB6 มีค่าเฉลี่ยสูงสุด ( $K_m = 26533 \pm 5645$   $\mu$ SI) และต่ำสุด ( $K_m = 37 \pm 18$   $\mu$ SI) จากพื้นที่ศึกษา L05 ส่วนค่ากระจายตัวของข้อมูลจากพื้นที่ศึกษา L02 มีค่าสูงสุด ( $SD \approx 170\%$ ) ถ้าเปรียบเทียบชนิดของหิน

พบว่าหินปูนจากพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์ และจังหวัดเลยมีค่า  $K_m$  ใกล้เคียงกัน ( $K_m < 100 \mu\text{SI}$ ) ส่วนหินอัคนีก็มีค่า  $K_m$  ใกล้เคียงเช่นกัน แต่ที่น่าสนใจคือ ตัวอย่างหินจากพื้นที่อำเภอปากชม จังหวัดเลย (L02) มีค่ากระจายตัวของข้อมูลสูงมาก และสามารถแยกข้อมูลออกเป็นสองกลุ่มได้อย่างชัดเจน โดยกลุ่มแรกมีค่า  $K_m$  สูง (มากกว่า  $20000 \mu\text{SI}$ ) และกลุ่มที่สองมีค่า  $K_m$  ต่ำ (น้อยกว่า  $300 \mu\text{SI}$ )

## 2.) แมกนีไทเซชันตกค้างธรรมชาติ (natural remanent magnetization - NRM)

ขั้นตอนนี้เลือกมาหนึ่งตัวอย่างย่อยจากแต่ละแท่งตัวอย่าง หลังจากนั้นนำไปวัดค่า NRM ก่อนที่จะทำการลบล้างด้วยสนามแม่เหล็กสลับ ในขั้นตอนต่อไป สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะแจกแจงข้อมูลค่า NRM ที่วัดได้ออกเป็นสองลักษณะด้วยกัน คือ ค่าเฉลี่ยของ NRM ในแต่ละพื้นที่ศึกษาตามแสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 ส่วนที่สองคือ ทิศทางเฉลี่ยของ NRM ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อการศึกษาภาวะแม่เหล็กบรรพกาล

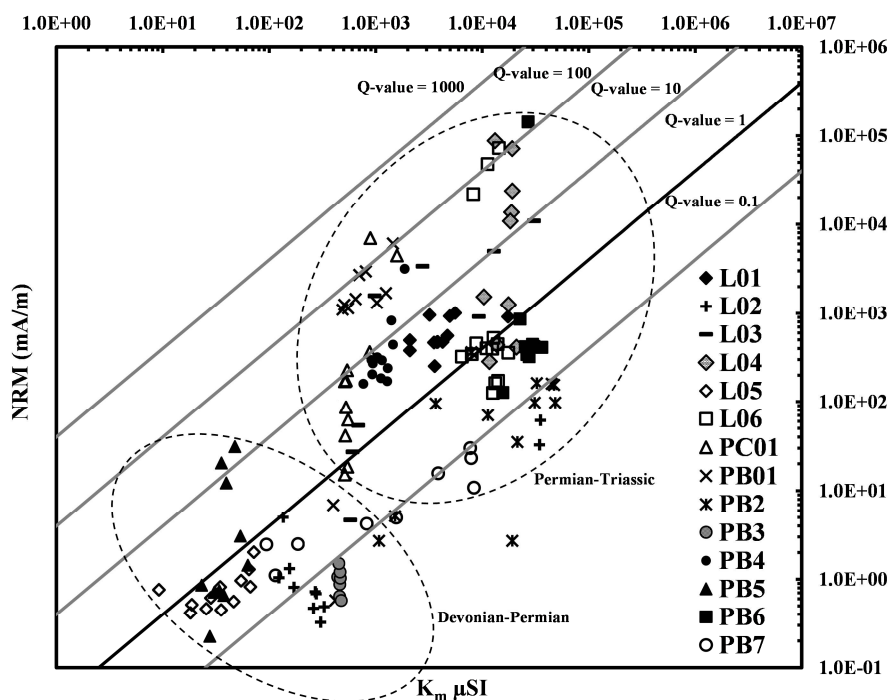
จากข้อมูลในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 ค่า NRM ของตัวอย่างทั้งหมดอยู่ระหว่าง  $0.2 \text{ mA/m}$  ถึง  $100000 \text{ mA/m}$  ตัวอย่างจากพื้นที่ L04 มีค่า NRM เฉลี่ยสูงสุด ( $21116 \pm 31989 \text{ mA/m}$ ) และเฉลี่ยต่ำสุดเป็นตัวอย่างหินปูนจากพื้นที่ L05 ( $0.8 \pm 0.5 \text{ mA/m}$ ) ถ้าพิจารณาข้อมูลโดยรวมทั้งหมดพบว่าค่า NRM เฉลี่ยของหินตะกอนมีค่าต่ำกว่าหินอัคนีอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นหินแกรนิตจากพื้นที่ PB7 มีค่าเฉลี่ย NRM ที่ไม่ต่างจากกลุ่มของหินตะกอนมากนัก ส่วนค่ากระจายตัวของข้อมูลพบว่าหินสการ์น มีการกระจายตัวของข้อมูลสูงสุด ( $SD \approx 150\%$ ) อาศัยค่า NRM ในการจำแนกกลุ่มของหิน จะพบว่า NRM มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า  $100 \text{ mA/m}$  เป็นตัวอย่างหินตะกอน ยกเว้นตัวอย่างจากพื้นที่ PB7 เพียงตัวอย่างเดียว ส่วนตัวอย่างที่มีค่าเฉลี่ย NRM มากกว่า  $100 \text{ mA/m}$  ทั้งหมดจะเป็นหินอัคนีและหินสการ์น (ยกเว้นตัวอย่าง L02 ที่ค่อนข้างมีข้อมูลที่คลุมเครือจากผลของค่า  $K_m$ )



รูปที่ 4.2 ค่าความเข้ม NRM แจกแจงแต่ละพื้นที่ศึกษา

### 3.) Königsberger ratios (Q-value)

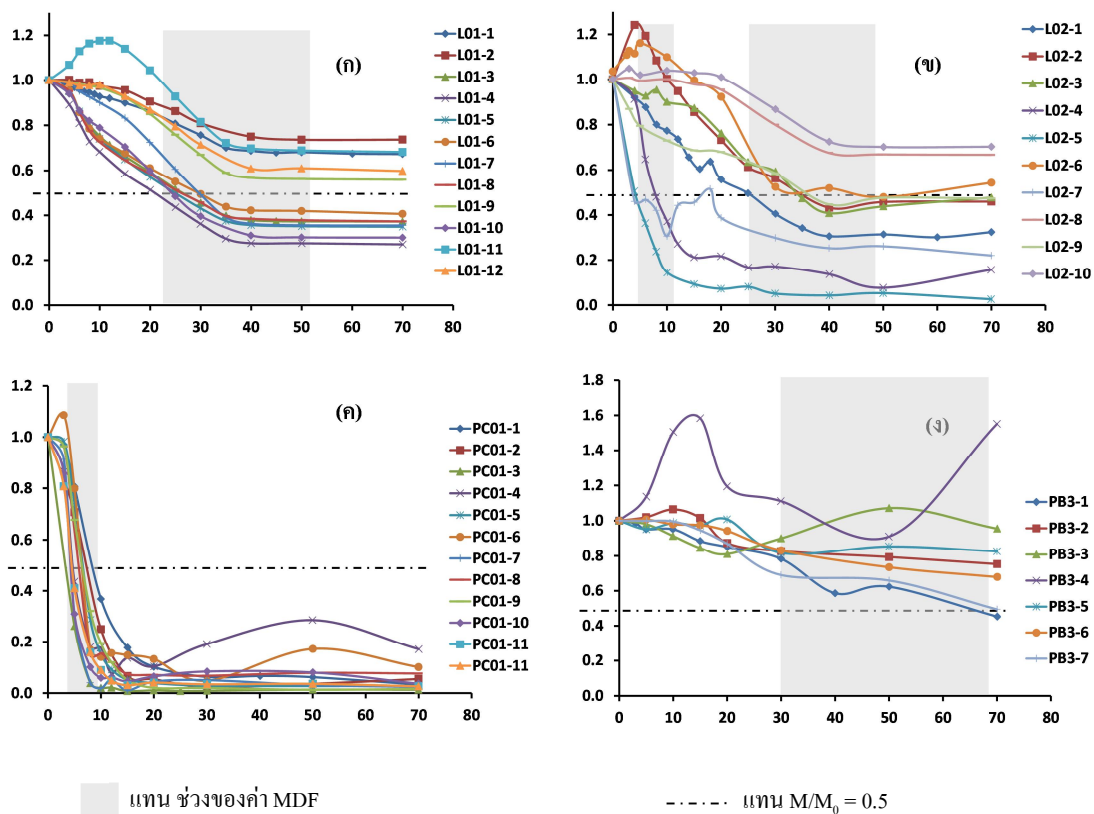
ข้อมูล NRM และ  $K_m$  สามารถวิเคราะห์หาค่า Q-value โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.13 ซึ่งค่า Q-value สามารถใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของแมกนีไทเซชันตกค้างในหิน (รายละเอียดในหัวข้อ 2.2.2) จากกราฟรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2 ค่า Q-value ของตัวอย่างทั้ง 14 พื้นที่ศึกษา ข้อมูลส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 100 ตัวอย่างหินจากพื้นที่ PB01 จะมีค่า Q-value เฉลี่ยสูงสุด ( $53 \pm 35$ ) และต่ำสุดจากพื้นที่ PB3 ( $0.1 \pm 0.0$ ) ประมาณครึ่งหนึ่งของตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบมีค่า Q-value น้อยกว่า 1 ซึ่งเป็นหินตะกอนจากพื้นที่ L05 PB5 PB3 หินอัคนีจากพื้นที่ L06 PB2 PB6 PB7 และตัวอย่างจากพื้นที่ L02 นอกจากนั้นการกระจายตัวของข้อมูลสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มอย่างชัดเจน โดยกลุ่มแรก ( $NRM < 10$  mA/m และ  $K_m < 1000$   $\mu$ SI) เป็นกลุ่มของหินที่มีอายุช่วงยุคดีโวเนียน ถึงยุคเพอร์เมียน และเป็นหินตะกอนเกือบทั้งหมด กลุ่มที่สองจะมีค่า  $K_m$  และ NRM สูงกว่ากลุ่มแรก ( $NRM > 10$  mA/m และ  $K_m > 1000$   $\mu$ SI) หินกลุ่มนี้มีอายุอยู่ในช่วงยุคเพอร์เมียน ถึงยุคไทรแอสซิก ซึ่งเป็นหินอัคนีและหินสการ์น จากตัวอย่างทั้งหมดมีเพียงหินแกรนิต PB7 ตัวอย่างเดียว ที่มีข้อมูลกระจายตัวอยู่ระหว่างสองกลุ่มก่อนหน้านี้ ถ้าพิจารณาการกระจายของข้อมูลแต่ละพื้นที่เก็บตัวอย่าง พบว่าตัวอย่างเกือบทั้งหมด มีการกระจายตัวของข้อมูลสูง



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_m$  กับ NRM และค่า Q-value

#### 4.) Median destructive field (MDF)

กราฟในรูปที่ 4.4 แสดงการลดลงของความเข้มแม่เหล็กในไทเซชันตกค้างของตัวอย่างเมื่อลบด้วยด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กกลบค่าต่างๆ เป็นลำดับ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกลบที่ทำให้ค่าความเข้มแม่เหล็กในไทเซชันตกค้างลดลง 50% เรียกว่า “median destructive field - MDF” โดยที่ค่า MDF จะสัมพันธ์กับขนาดของเกรนแร่แม่เหล็กที่เก็บรักษาแม่เหล็กในตัวอย่างหิน ซึ่งตัวอย่างหินที่ประกอบด้วยเกรนชนิด MD จะมีค่า MDF ที่ต่ำกว่าเกรนชนิด SD (Dunlop and Özdemir, 1997) ผลทดสอบตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษา 14 จุด ตามแสดงในตารางที่ 4.2 MDF ที่มีค่าน้อยกว่า 10 mT ประกอบด้วยตัวอย่างจากพื้นที่ L03 L04 PC01 PB01 และ PB2 ส่วนพื้นที่ที่มีค่า MDF สูงกว่า 20 mT จะเป็นตัวอย่างจากพื้นที่ L01 L02 PB3 PB4 และ PB5 นอกนั้นอยู่ระหว่าง 10-20 mT



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการลดลงของความเข้มแม่เหล็กไนเซชันตกค้าง (แกน  $x(M/M_0)$ ) กับความเข้มสนามแม่เหล็กกลับค้าง (แกน  $y(mT)$ ) (ก) ตัวอย่างจากพื้นที่ L01 (MDF>25 mT) (ข) ตัวอย่างจากพื้นที่ L02 MDF มีค่ากระจายตัวสูง (ค) ตัวอย่างจากพื้นที่ PC01 (MDF<10 mT) และ (ง) ตัวอย่างจากพื้นที่ PB3 (MDF>30 mT)

#### 5.) กราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ของแร่แม่เหล็ก และองค์ประกอบขนาดเกรนแร่แม่เหล็กในตัวอย่างหิน

จากพื้นที่ศึกษา 14 จุด เลือกตัวอย่างหินซึ่งเป็นตัวแทนของแต่ละพื้นที่จำนวน 1-2 ตัวอย่าง ไปทดสอบด้วยเครื่อง VSM (ตามรายละเอียดในบทที่ 3) โดยทดสอบที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำสูงสุด 1 T ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เพื่อสร้างกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส หลังจากทำการปรับแก้ในส่วนของพาราแมกเนติก และไดอะแมกเนติก แล้ว สามารถหาค่าตัวแปร  $M_s$ ,  $M_{rs}$ ,  $H_c$  และ  $H_{cr}$  ตามแสดงในตารางที่ 4.2

จากตัวแปรต่างๆ ข้างต้น นำไปวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบเกรนแร่แม่เหล็กในตัวอย่าง หิน โดยใช้กราฟของเดย์ (Day, 1977; Dunlop, 2002) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $M_{ss}/M_s$  กับ  $H_c/H_c$  ตามแสดงในรูปที่ 4.5 จากตัวอย่างทั้งหมดที่นำมาทดสอบ ส่วนใหญ่ข้อมูลกระจายในช่วง ของ PSD และ SD-SP มีเพียงบางตัวอย่างที่ข้อมูลตกอยู่ในช่วง MD (L02-5 และ PB7-5) และ นอกจากนั้นยังมีตัวอย่างจากพื้นที่ L05 และ PB5 ไม่สามารถวิเคราะห์ชนิดของเกรนแร่แม่เหล็กได้ เนื่องจากข้อมูลไม่สอดคล้องกับกราฟของเดย์ อาจเนื่องมาจากปริมาณของแร่เฟอร์โรแมกเนติกมีอยู่น้อยในตัวอย่างหิน หรือ สันฐานที่ตรวจวัดได้มีค่าใกล้เคียงกับขีดความสามารถต่ำสุดของเครื่องที่ ตรวจวัดได้ เลยทำให้สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio - SNR) มีค่าต่ำ

จากข้อมูลกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่แม่เหล็ก และชนิดของเกรนที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้น สามารถจัดกลุ่มตัวอย่างออกเป็นสี่กลุ่ม ดังต่อไปนี้

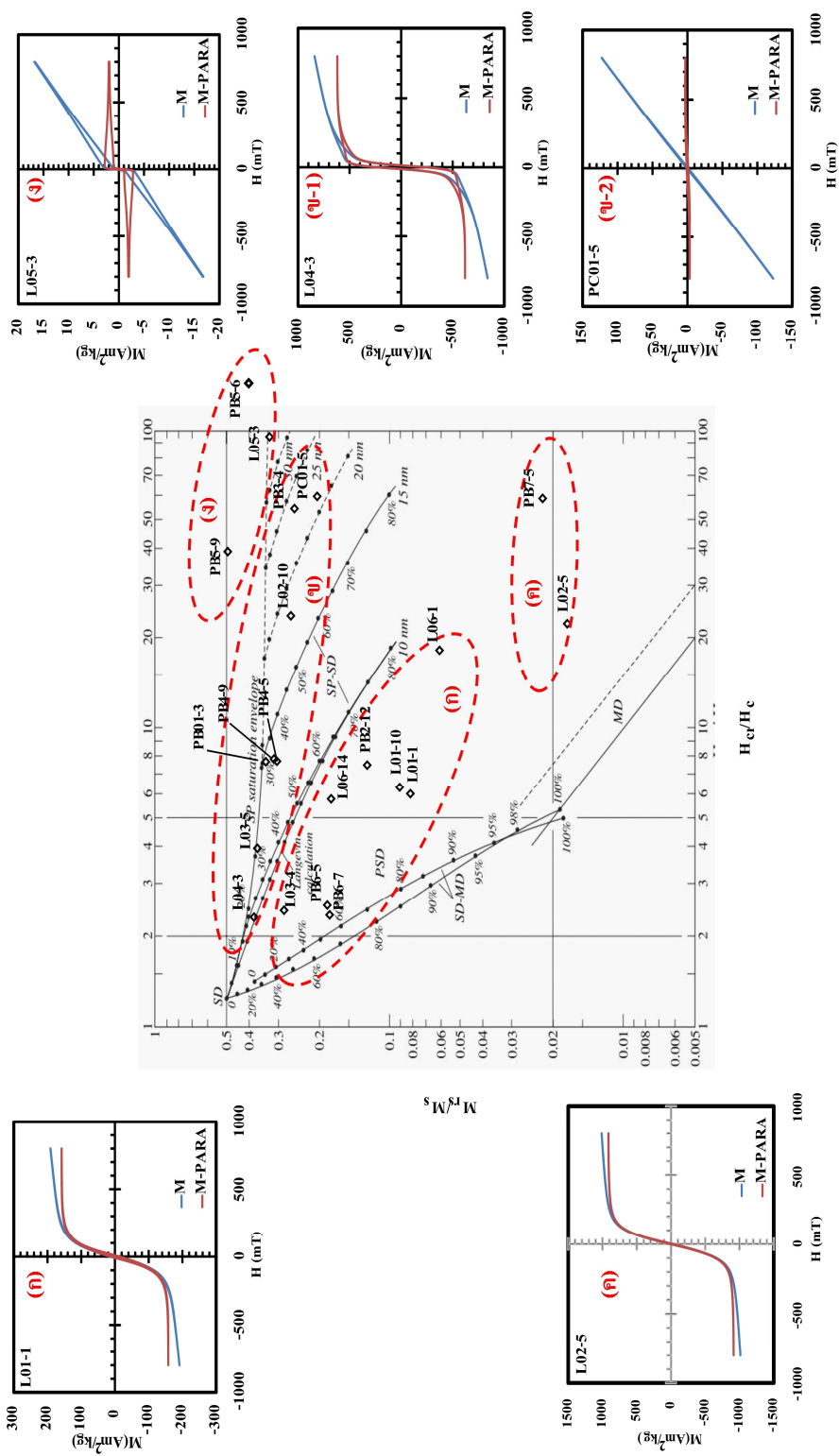
**กลุ่มที่ 1** ตามแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) ข้อมูลกระจายอยู่ในช่วง PSD มีค่า MDF และ  $K_m$  ค่อนข้างสูงกว่ากลุ่มอื่นๆ ลักษณะกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่แม่เหล็ก ค่อนข้างมีความ ผิดเพี้ยนน้อยมีค่า  $H_c/H_c$  อยู่ในช่วง 2-20 และ  $M_{ss}/M_s$  อยู่ในช่วง 0.005-0.3

**กลุ่มที่ 2** ตามแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) ข้อมูลกระจายอยู่ในช่วง SP-SD มีค่า MDF ค่อนข้างต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆ ลักษณะกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่แม่เหล็ก เป็นแบบ Wasp-Waisted (รูป 4.5 (ข-1)) และ Potbellied (รูป 4.5 (ข-2)) ซึ่งเป็นลักษณะของตัวอย่างที่มีองค์ประกอบ ของเกรนแร่แม่เหล็กมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบในตัวอย่างเดียว มีค่า  $H_c/H_c$  อยู่ในช่วง 2-100 และ  $M_{ss}/M_s$  อยู่ในช่วง 0.2-0.5

**กลุ่มที่ 3** ตามแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) ข้อมูลกระจายค่อนข้างไปทาง MD รูปทรงของ กราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่แม่เหล็ก มีลักษณะคล้ายกับกลุ่มแรก

**กลุ่มที่ 4** ตามแสดงในรูปที่ 4.5 (ง) ซึ่งมีรูปทรงกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่ แม่เหล็ก เป็นแบบ Wasp-Waisted ตัวอย่างทั้งหมดในกลุ่มนี้มีค่า  $K_m$  ต่ำ และทั้งหมดเป็นตัวอย่าง หินปูน มีค่า  $H_c/H_c$  อยู่ในช่วง 30-100 และ  $M_{ss}/M_s$  อยู่ในช่วง 0.4-0.5 ซึ่งอยู่นอกพื้นที่วิเคราะห์ผล





รูปที่ 4.5 กราฟของเดย์ กราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิส และขนาดเกรนแม่เหล็กในตัวอย่างหินจากพื้นที่ศึกษา

(M คือ ข้อมูลที่ได้จากการวัด และ M-PARA คือ ข้อมูลที่ลบข้อมูลส่วนที่มาจากพาราแมกเนติกออก)

ตารางที่ 4.2 สรุปค่าสมบัติทางแม่เหล็กของตัวอย่างหินจากแต่ละพื้นที่ศึกษา

Sites	N/n	Mean (SD)				Hysteresis Parameter				
		K <sub>m</sub> (μSI)	NRM (mA/m)	MDF (mT)	Q-value	M <sub>rs</sub> (Am <sup>2</sup> /kg)	M <sub>s</sub> (Am <sup>2</sup> /kg)	H <sub>cr</sub> (mT)	H <sub>c</sub> (mT)	
L01	12/28	4213 (2767)	613 (260)	>25	3.8 (1.8)	12.90, 14.80	158.00, 163.00	52.00, 60.00	8.69, 9.53	
L02	11/23	8392 (14509)	10 (20)	22 (14)	0.2 (0.3)	16.00, 0.76	915.00, 2.89	42.00, 310.00	1.88, 13.06	
L03	8/19	4900 (7318)	2731 (3753)	5 (3)	12.0 (15.2)	31.10, 9.73	110.00, 26.50	28.50, 58.00	11.66, 13.69	
L04	10/27	16606 (3051)	21116 (31989)	4 (1)	33.0 (54.4)	238.00	627.00	30.00	12.94	
L05	12/28	37 (18)	0.8 (0.5)	15 (7)	0.6 (0.5)	0.88	2.70	300.00	3.18	
L06	14/39	11405 (2624)	10425 (22362)	18 (13)	22.0 (43.9)	3.44, 21.18	56.10, 119.00	80.00, 115.00	4.40, 20.00	
PC01	11/21	611 (251)	1141 (2324)	5 (2)	28.6 (59.1)	0.91	4.47	300.00	5.04	
PB01	11/23	691 (306)	1787 (1681)	6 (1)	53.2 (35.3)	4.70	13.90	80.00	10.41	
PB2	12/28	25007 (18774)	104 (101)	9 (4)	0.2 (0.3)	4.32	34.60	50.00	6.68	
PB3	7/11	457 (28)	1.0 (0.3)	>30	0.1 (0.0)	0.77	3.03	256.00	4.72	
PB4	12/27	1105 (306)	548 (845)	>30	9.7 (10.6)	10.30, 9.14	34.00, 29.30	200.00, 257.00	25.92, 32.72	
PB5	10/16	38 (13)	7 (11)	23 (7)	4.3 (6.2)	0.80, 1.13	2.00, 2.30	456.00, 286.00	3.20, 7.32	
PB6	10/24	26533 (5645)	14695 (45153)	12 (3)	13.6 (41.8)	175.00, 186.00	947.00, 1030.00	36.00, 32.00	14.15, 13.57	
PB7	9/13	3515 (3987)	11 (10)	14 (11)	0.2 (0.2)	2.11	94.70	170.00	2.90	

**Note:** N(Number samples), n(Number specimens), K<sub>m</sub>(Mean susceptibility), NRM(Natural remanent magnetization), SD(Standard deviation), Q-value(Köenigsberger ratio), M<sub>s</sub>(Saturation magnetization), M<sub>rs</sub>(Saturation remanent magnetization), H<sub>c</sub>(Coercivity) and H<sub>cr</sub>(Coercivity of remanance)

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กของหิน

ตัวอย่างมากกว่าครึ่งหนึ่งจากพื้นที่ศึกษาได้มาจากเหมืองหินอุตสาหกรรม ทั้งที่ดำเนินการอยู่ และหยุดดำเนินการแล้ว ส่วนที่เหลือเป็นบริเวณหินโพล์ และแนวถนนตัดผ่าน สำหรับการระบุชนิดของหินเบื้องต้นอาศัยข้อมูลจากรายงานกรมทรัพยากรธรณี รายงานทางวิชาการต่างๆ และเอกสารรายงานประทานบัตรเหมืองหิน ซึ่งได้ระบุประเภทและชนิดของหินที่อนุญาตให้ดำเนินการเบื้องต้นอยู่แล้วเป็นข้อมูลอ้างอิง แสดงรายละเอียดในตารางที่ 1.2 แต่เนื่องจากบริเวณพื้นที่ศึกษาก่อนข้างมีความซับซ้อนทางธรณีวิทยาสูง ในพื้นที่เดียวกันอาจพบเห็นหินมากกว่าหนึ่งชนิด ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงอาศัยข้อมูลทดสอบหาแร่องค์ประกอบในหินเบื้องต้น โดยใช้เทคนิค FTIR XRF และ XRD เป็นข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับยืนยันตัวอย่างหินที่เก็บมาจากแต่ละพื้นที่ที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลก่อนหน้านี้หรือไม่ (ผลทดสอบตามแสดงในตารางที่ 4.1)

จากข้อมูลสมบัติทางแม่เหล็กของหิน พบว่าตัวอย่างหินจากพื้นที่ทั้งหมด 14 จุด ข้อมูลมีความซับซ้อนพอสมควร สังเกตได้จากข้อมูล  $K_m$  มีการกระจายตัวสูงในบางพื้นที่ เช่น ตัวอย่างจากพื้นที่ L02 ซึ่งบริเวณนั้นเป็นแนวที่มีความซับซ้อนทางธรณีวิทยาก่อนข้างสูง หินในพื้นที่สัมพันธ์กับหมวดหินปากชม เป็นหินตะกอนจำพวก หินปูน หินดินดาน และหินเชิร์ต ที่มีอายุช่วงปลายยุคไซลูเรียน ถึงยุคดีโวเนียน ปรากฏในแนวเหนือ-ใต้ นอกจากนั้นบริเวณดังกล่าวสามารถพบ หินเถ้าภูเขาไฟ แทรกสลับกันอยู่กับหินตะกอนอีกด้วย (กรมทรัพยากรธรณี, 2552) ผลทดสอบทางแม่เหล็ก พบว่าตัวอย่างหิน L02 มีค่า  $K_m$  กระจายตัวสูงมาก และสามารถแยกออกได้สองกลุ่มชัดเจน (รูปที่ 4.1) ซึ่งบ่งชี้ว่าบริเวณนี้การกระจายตัวของแร่แม่เหล็กในตัวอย่างหินที่เก็บมาไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน หรือตรงจุดเก็บตัวอย่างอาจจะในช่วงแนวสัมผัสของหินต่างชนิดที่มีการแปรของแร่จากหินต่างชนิดผสมกัน และจากข้อมูลวิเคราะห์แร่องค์ประกอบของหิน พบว่าในบางตัวอย่างมีองค์ประกอบของแร่แคลไซต์ (จากผลการทดสอบ XRD และ FTIR) ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากหินปูนในยุคเพอร์เมียน หรือดีโวเนียน ที่กระจายตัวให้เห็นในพื้นที่ดังกล่าว นอกจากนั้นยังพบกลุ่มแร่ของหินอัคนีให้เห็นอีก คือ แร่ควอตซ์ แร่แอลไบต์ แร่มีสโคไวต์ และกลุ่มของแร่ดิน จำพวกแร่เคโอลิไนต์ อีกด้วย จึงมีความเป็นไปได้ที่ตัวอย่างหินในกลุ่มนี้อาจจะได้รับผลกระทบจากความร้อนบริเวณแนวสัมผัส ในช่วงการเกิดหินอัคนี และกระบวนการธรณีแปรสัณฐาน ซึ่งส่งผลให้เกิดการแปรสภาพจากหินเดิมแต่ยังไม่สมบูรณ์ หรืออาจจะมีการผสมกันระหว่างหินเดิมกับหินที่เกิดขึ้นมาใหม่ โดยในตัวอย่างกลุ่มที่มีค่า  $K_m$  สูง น่าจะมีอัตราส่วนของแร่ที่มาจากหินอัคนีเข้ามาผสม มากกว่าส่วนที่มี  $K_m$  ต่ำ ถ้าพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแม่เหล็กของหินบริเวณนี้ จึงสรุปได้ว่าเกิดเหตุการณ์เปลี่ยนแปลงขึ้นหลายช่วง ตั้งแต่กำเนิดของหินตะกอนเดิม และการแปรสภาพของหิน

จากกระบวนการเกิดหินภูเขาไฟ ในช่วงยุคดีโวเนียน ถึงยุคเพอร์เมียน ส่งผลให้ตัวอย่างหินในกลุ่มนี้บางส่วนค่อนข้างมีสมบัติคล้ายกับหินที่เกิดการแปรสภาพโดยการแทนที่ของแร่จากหินภูเขาไฟเข้าไปในหินเดิม สังเกตได้จากบางตัวอย่างมีค่า  $K_m$  ที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยของหินตะกอนอย่างชัดเจน สำหรับเสถียรภาพของแมกนีไทเซชันตกค้าง ของตัวอย่างในกลุ่มนี้ค่อนข้างต่ำ พบในตัวอย่างที่มีค่า  $K_m$  สูง ซึ่งมีองค์ประกอบแร่แม่เหล็กที่เก็บรักษาแมกนีไทเซชันตกค้างส่วนใหญ่มาจากองค์ประกอบแร่แม่เหล็ก  $H_c$  ต่ำ และต่างจากตัวอย่าง  $K_m$  ต่ำ ที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่มาจากแร่แม่เหล็ก  $H_c$  สูง นอกจากนี้ทิศทางของแมกนีไทเซชันตกค้างของแต่ละองค์ประกอบมีการซ้อนทับกัน และกระจายตัวสูง ซึ่งน่าจะเป็นผลกระทบจากความร้อนในขั้นตอนของการเกิดหินอัคนี จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแร่แม่เหล็ก และการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างขึ้นมาใหม่ในภายหลัง

ตัวอย่างหินจากพื้นที่ศึกษา L03 และ L04 เป็นหินสการ์น ปัจจุบันเป็นเหมือนแร่ทองคำ ซึ่งมีรายงานชนิดและองค์ประกอบหินค่อนข้างชัดเจน (Khin Zaw et al., 2014) แหล่งแร่บริเวณนี้สัมพันธ์กับการเกิดหินอัคนีแทรกซอน (intrusive rocks) และกระบวนการเกิดแร่แบบอพิทีเทอร์มัล โดยนำน้ำแร่โลหะต่างๆ แทรกผ่านบริเวณรอยแยก หรือแพร่เข้าไปในชั้นหินตะกอนเดิมยุคเพอร์เมียน จำพวกหินดินดาน หินปูน หินทราย และหินตะกอนเดิมยุคคาร์บอนิเฟอรัส จำพวกหินทรายแป้ง มีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอยู่สองช่วงด้วยกัน คือ ช่วงยุคไทรแอสซิกตอนต้น และช่วงยุคไทรแอสซิกตอนปลาย จากกระบวนการนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแร่แม่เหล็กที่เป็นองค์ประกอบของหินเดิมต่างออกไป จากรายงานศึกษาก่อนหน้านี้ ระบุว่าตัวอย่างหินสการ์นจากพื้นที่นี้มีหินเดิม (host rocks) เป็นหินตะกอนเนื้อผสมซิลิกา (siliciclastic) และ หินปูน ที่มีอายุอยู่ในช่วงยุคเพอร์เมียน (Khin Zaw et al., 2014) แต่จากผลวิเคราะห์ตัวอย่างหินด้วย FTIR พบว่าตัวอย่างหินจากพื้นที่นี้ไม่ปรากฏยอดคลื่นของแร่แคลไซต์เลยทั้งสองตัวอย่าง จึงอาจสรุปได้ว่าตัวอย่างที่เก็บมาไม่น่าจะเกิดการเปลี่ยนสภาพมาจากหินเดิมที่เป็นหินปูน และข้อมูลวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กพบว่าตัวอย่างหินสการ์นมีค่า  $K_m$  สูงกว่าค่าเฉลี่ย  $K_m$  ของหินตะกอนต่างๆ ไป ดังนั้นสมบัติทางแม่เหล็กของตัวอย่างหินจากพื้นที่นี้ จึงมีความสัมพันธ์กับช่วงการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาในช่วงเวลาดังกล่าวข้างต้นเพียงอย่างเดียว (early-late Triassic) จากผลวิเคราะห์ขนาดเกรนของแร่แม่เหล็กในตัวอย่างกลุ่มนี้ แสดงให้เห็นว่ามีมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบผสมกันอยู่ โดยพิจารณาจากข้อมูลกราฟเส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแร่แม่เหล็ก ที่มีลักษณะเป็นแบบ Wasp-Waisted ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของเกรนผสมกันมากกว่าหนึ่งชนิด (Tauxe et al., 2003) และสอดคล้องกับข้อมูลที่วิเคราะห์ด้วยกราฟของเคย์ ที่แสดงเกรนแม่เหล็กอยู่ในช่วง SP-SD นอกจากนี้ตัวอย่างในกลุ่มนี้มีค่า MDF ค่อนข้างต่ำมาก ซึ่งสรุปได้ว่าอิทธิพลของแมกนีไทเซชันตกค้างส่วนใหญ่ เป็นผลมาจากองค์ประกอบของแร่แม่เหล็ก  $H_c$  ต่ำ ดังนั้นจึงค่อนข้างสูญเสีย

หรือเกิดสภาพแม่เหล็กตกค้างใหม่ได้ง่าย (low stability) และนอกจากนั้นตัวอย่างในกลุ่มนี้ ยังมีค่า  $P_j$  ก่อนข้างสูงกว่าปกติอีกด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐานในอดีต และจะส่งผลให้ทิศทางของของแมกนีไทเซชันตกค้างมีความผิดเพี้ยนไปจากตอนหินเกิดขึ้นครั้งแรก

ตัวอย่างในกลุ่มหินอัคนี ปรากฏองค์ประกอบของแร่ควอตซ์อย่างเด่นชัด (จากข้อมูล FTIR และ XRD) แต่บางตัวอย่าง (L01 และ PB4) มีส่วนประกอบของแร่แคลไซต์ให้เห็นอยู่บ้าง อาจจะเป็นผลมาจากแร่แคลไซต์จากหินปูนเดิมแพร่เข้ามาช่วงเกิดหินอัคนี แต่จากผลทดสอบสมบัติแม่เหล็กของตัวอย่างหินในกลุ่มนี้ เกือบทั้งหมดมีค่า  $K_m$  สูง และอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยทั่วไปของหินอัคนี (Hunt and et al., 1995) ดังนั้น แร่แคลไซต์ที่ปนเข้ามาจึงไม่มีผลต่อสมบัติแม่เหล็กในหินกลุ่มนี้ จากตัวอย่างทั้งหมดมีเพียงสองตัวอย่างจากพื้นที่ PC01 และ PB01 ที่มีค่า  $K_m$  ก่อนข้างต่ำ (ประมาณ 600-700  $\mu$ SI) ซึ่งจากรายงานศึกษาก่อนหน้านี้ระบุว่าเป็นหินแอนดีไซต์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2537) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับหินแอนดีไซต์ จากพื้นที่ PB2 และ PB6 ( $K_m \approx 26000$   $\mu$ SI) มีค่าแตกต่างอย่างชัดเจน ดังนั้น ตัวอย่างหินจากพื้นที่ PC01 และ PB01 อาจไม่ใช่ตัวอย่างหินแอนดีไซต์ หรืออาจจะมีอัตราส่วนของแร่อื่นเข้ามาผสมตอนหินเกิดขึ้น จึงทำให้คุณสมบัติทางแม่เหล็ก ( $K_m$ ) ต่างออกไปจากหินแอนดีไซต์ และจากข้อมูลสมบัติทางแม่เหล็ก ( $K_m$ , MDF และ NRM) พบว่ามีความสอดคล้องกันทั้งสองพื้นที่ จึงสรุปได้ว่าตัวอย่างหินจากพื้นที่ PB01 และ PC01 น่าจะเป็นหินที่มีองค์ประกอบของแร่แม่เหล็กเหมือนกัน ส่วนกลุ่มของหินอัคนีที่มีข้อมูล  $K_m$  กระจายตัวสูง เป็นผลมาจากการกระจายตัวของแร่แม่เหล็กในตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ หรือมีลักษณะโครงสร้างของเกรนเม็ดแร่ที่หายับ เช่น หินแกรนิตจากพื้นที่ PB7 เป็นต้น สำหรับเสถียรภาพของแมกนีไทเซชันตกค้างของกลุ่มหินอัคนีก่อนข้างมีความเสถียรสูง โดยเฉพาะตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษา L01 L06 และ PB6 ซึ่งมีองค์ประกอบของเกรนแม่เหล็ก PSD และมีค่า MDF Q-value สูง แต่บางพื้นที่ก็มีเสถียรภาพของแมกนีไทเซชันตกค้างต่ำ เช่น PC01 PB01 เนื่องจากมีองค์ประกอบของเกรนแม่เหล็ก SP-SD เป็นองค์ประกอบ

ตัวอย่างกลุ่มหินปูน ซึ่งมีสองพื้นที่ คือ L05 และ PB5 ผลทดสอบวิเคราะห์หาแร่ องค์ประกอบแสดงข้อมูลที่ชัดเจนของแร่แคลไซต์ เป็นแร่องค์ประกอบหลัก แต่ในตัวอย่าง PB5 มีแร่ควอตซ์ ปนมาด้วย (จากข้อมูล FTIR) ซึ่งสาเหตุน่าจะเกิดจากการแพร่ของแร่ควอตซ์ จากหินอัคนีข้างเคียง แต่โดยรวมจากผลศึกษาแร่องค์ประกอบในหินทั้งสามเทคนิค ยังไม่มีปรากฏแร่อื่นที่ต่างจากองค์ประกอบของหินปูนเดิมมากนัก ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ตัวอย่างหินปูน L05 กับ PB5 ยังคงส่วนประกอบหลักของแร่ที่เป็นส่วนของประกอบของหินปูนเดิมอยู่ และสอดคล้องกับค่า  $K_m$  ที่มีค่าต่ำ ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับที่มีรายงานก่อนหน้านี้ (Hunt et al., 1995) รวมทั้งการกระจายตัวของข้อมูล  $K_m$  ต่ำ และทั้งสองพื้นที่ก็มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าองค์ประกอบของแร่แม่เหล็กในตัวอย่างกระจาย

ตัวสมมุติเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนเสถียรภาพของแมกนีไทเซชันตกค้างในตัวอย่างหินปูนกลุ่มนี้ก็ค่อนข้างมีค่าสูง ใกล้เคียงกับตัวอย่างหินอัคนี

หินตะกอนจากพื้นที่ PB3 มีค่า  $K_m$  ไม่สูงมากนัก (มากกว่าหินปูน แต่น้อยกว่าหินอัคนี) ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $K_m$  ของหินตะกอนทั่วไป (63  $\mu$ SI ถึง 18600  $\mu$ SI) (Hunt et al., 1995) แมกนีไทเซชันตกค้างของตัวอย่าง PB3 เป็นผลมาจากองค์ประกอบของแร่แม่เหล็ก  $H_c$  สูง นอกจากนั้นค่า  $P_j$  มีค่าต่ำ และอยู่ในช่วงของค่าปกติของหินตะกอน ดังนั้นจึงพิจารณาว่าตัวอย่างหินจากพื้นที่นี้ ไม่ได้รับผลกระทบจากธรณีแปรสัณฐานในอดีต

#### 4.2 แอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (anisotropy magnetic susceptibility - AMS)

##### 4.2.1 ผลทดสอบแอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

ความแตกต่างของค่าแมกนีไทเซชัน (magnetization) ของตัวอย่างที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กความเข้มต่ำที่ทิศทางแตกต่างกัน เป็นผลมาจากแอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง สามารถอธิบายด้วยรูปทรงรีของค่า  $K$  (magnitude ellipsoid) ที่มีค่า  $K_1$   $K_2$  และ  $K_3$  แทนแกนทั้งสาม รวมถึงตัวแปรต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2.3

จากตัวอย่างทั้งหมด 14 จุด ข้อมูล AMS สามารถแยกออกเป็นสองกลุ่มตามประเภทของหิน ดังต่อไปนี้

##### 1.) ข้อมูล AMS ของตัวอย่างหินตะกอน และหินสกรัน

ประกอบด้วยตัวอย่างจากพื้นที่ L02 L03 L04 L05 PB3 และ PB5 มีข้อมูล AMS แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 มีข้อมูลค่อนข้างจับกลุ่มกันดี ยกเว้นตัวอย่างจากพื้นที่ L02 ลักษณะรูปทรง AMS ของตัวอย่างในกลุ่มนี้มีทั้งที่เป็นลักษณะแบบจาน ( $T > 0$ ) แบบเข็ม ( $T < 0$ ) โดยส่วนใหญ่ค่าเฉลี่ย  $P_j$  จากแต่ละพื้นที่กระจายตัวอยู่ในช่วง 1.03 ถึง 1.25 แต่ก็ยังมีบางตัวอย่างย่อยจากบางพื้นที่ที่มีค่า  $P_j$  สูงกว่าค่าเฉลี่ยดังกล่าว (รูปที่ 4.6) ถ้าใช้เงื่อนไขของ Robion (2007) ตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.2.3 พบว่าตัวอย่างหินจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถจัดประเภทตามความแรงของผลกระทบจากธรณีแปรสัณฐานได้ตามแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งตัวอย่างจากพื้นที่ PB3 และ L02 จัดอยู่ในกลุ่มที่ได้รับผลกระทบต่ำ (Type II) ตัวอย่างจากพื้นที่ PB5 รูปทรง AMS ค่อนข้างเปลี่ยนไปเป็นแบบเข็ม และมีค่า  $P_j$  ที่สูงกว่า ดังนั้นจึงจัดอยู่ในประเภทได้รับผลกระทบที่สูงกว่า (Type III) ตัวอย่างจากสองพื้นที่แรก ส่วนตัวอย่างจากพื้นที่ L05 เป็นตัวอย่างที่ได้รับผลกระทบ

สูงสุดจากตัวอย่างทั้งหมดในกลุ่มนี้ เพราะมีค่า  $P_j$  เฉลี่ยสูง และรูปทรง AMS เปลี่ยนไปจนทำให้ K3 อยู่ในตำแหน่งเกือบตั้งฉาก ( $\text{Inc}=5.3^\circ$ ) กับระนาบของการตกตะกอน แต่การพิจารณาครั้งนี้ไม่รวมตัวอย่างหินสการ์นจากพื้นที่ L03 และ L04 เพราะส่วนนี้มีความซับซ้อน และเปลี่ยนแปลงไปจากหินตะกอนเดิมค่อนข้างสมบูรณ์ เพราะค่า AMS ที่ตรวจวัดได้จึงไม่ได้เป็นข้อมูลของหินตะกอนเดิม

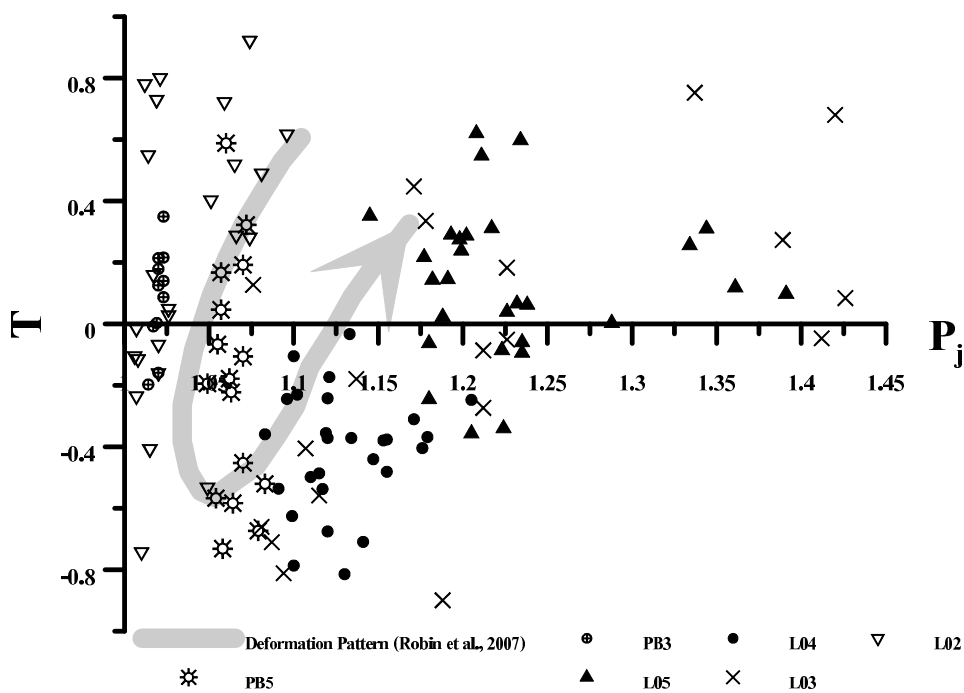
## 2.) ข้อมูล AMS ของตัวอย่างหินอัคนี

ประกอบด้วยตัวอย่างจากพื้นที่ L01 L06 PC01 PB01 PB2 PB4 PB6 และ PB7 ข้อมูล AMS แสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 มีข้อมูลกระจายตัวสูงในตัวอย่าง PC01 และ PB4 นอกนั้นค่อนข้างจับกลุ่มกันดี รูปทรงของ AMS มีลักษณะรูปแบบจาน และแบบเข็ม ค่า  $P_j$  ของตัวอย่างหินในกลุ่มนี้กระจายตัวอยู่ระหว่าง 1.0-1.1 ซึ่งน้อยกว่าในหินกลุ่มแรก แต่ตัวอย่างจากพื้นที่ PC01 มีค่าเฉลี่ย  $P_j$  สูงสุดในกลุ่มนี้ (1.085 หรือ 8.5%) เมื่อพิจารณาทิศทางการไหลบรรพกาล (palaeo flow) ของหินชนิด ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางของ K1 ตามแสดงในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.3 สรุปข้อมูล AMS ของตัวอย่างหินตะกอน และสการ์น

Sites	N(n)	Average (SD)		K1	K3	Fabric Type
		P <sub>j</sub>	T	Dec/Inc (conf. angles)	Dec/Inc (conf. angles)	
L02	11 (24)	1.035 (0.028)	0.207 (0.456)	109.1/6.4 (35.8/20.1)	18.1/8.3 (50.2/16.8)	Type II
L03	8(19)	1.215 (0.123)	-0.095 (0.489)	256.6/49.8 (24.2/9.4)	45.5/36.9 (23.8/16.5)	-
L04	10(27)	1.129 (0.030)	-0.413 (0.195)	270.9/6.4 (11.8/5.1)	140.9/80.0 (27.6/4.9)	-
L05	12(28)	1.230 (0.060)	0.134 (0.248)	276.1/6.4 (8.8/5.3)	6.5/3.1 (6.4/5.3)	Type IV
PB3	7(11)	1.020 (0.003)	0.086 (0.165)	115.4/18.1 (9.8/2.6)	286.4/71.7 (6.1/4.1)	Type II
PB5	10(16)	1.064 (0.009)	-0.186 (0.385)	68.1/6.4 (9.6/6.4)	160.0/15.9 (51.4/7.9)	Type III

**Note:** N(n)(Sites(Specimens)), P<sub>j</sub>(Corrected anisotropy degree), T(Shape parameter), K1(Maximum susceptibility), K3(Minimum susceptibility), SD(Standard deviation) and De/Inc (conf. angles)(Declination/Inclination axis with confident



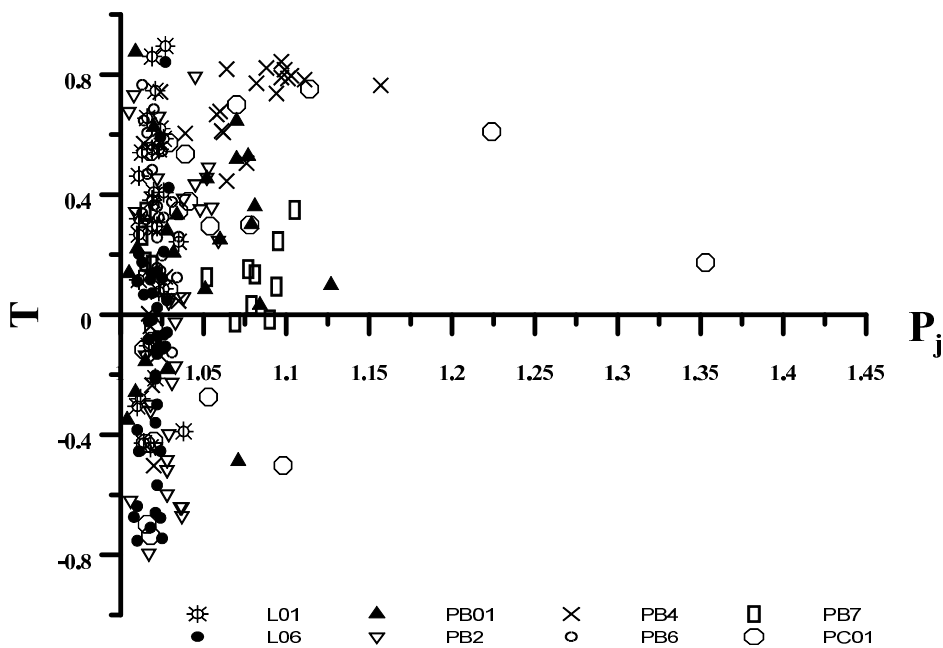
รูปที่ 4.6 กราฟ P<sub>j</sub>-T ของตัวอย่างหินตะกอน และสการ์น



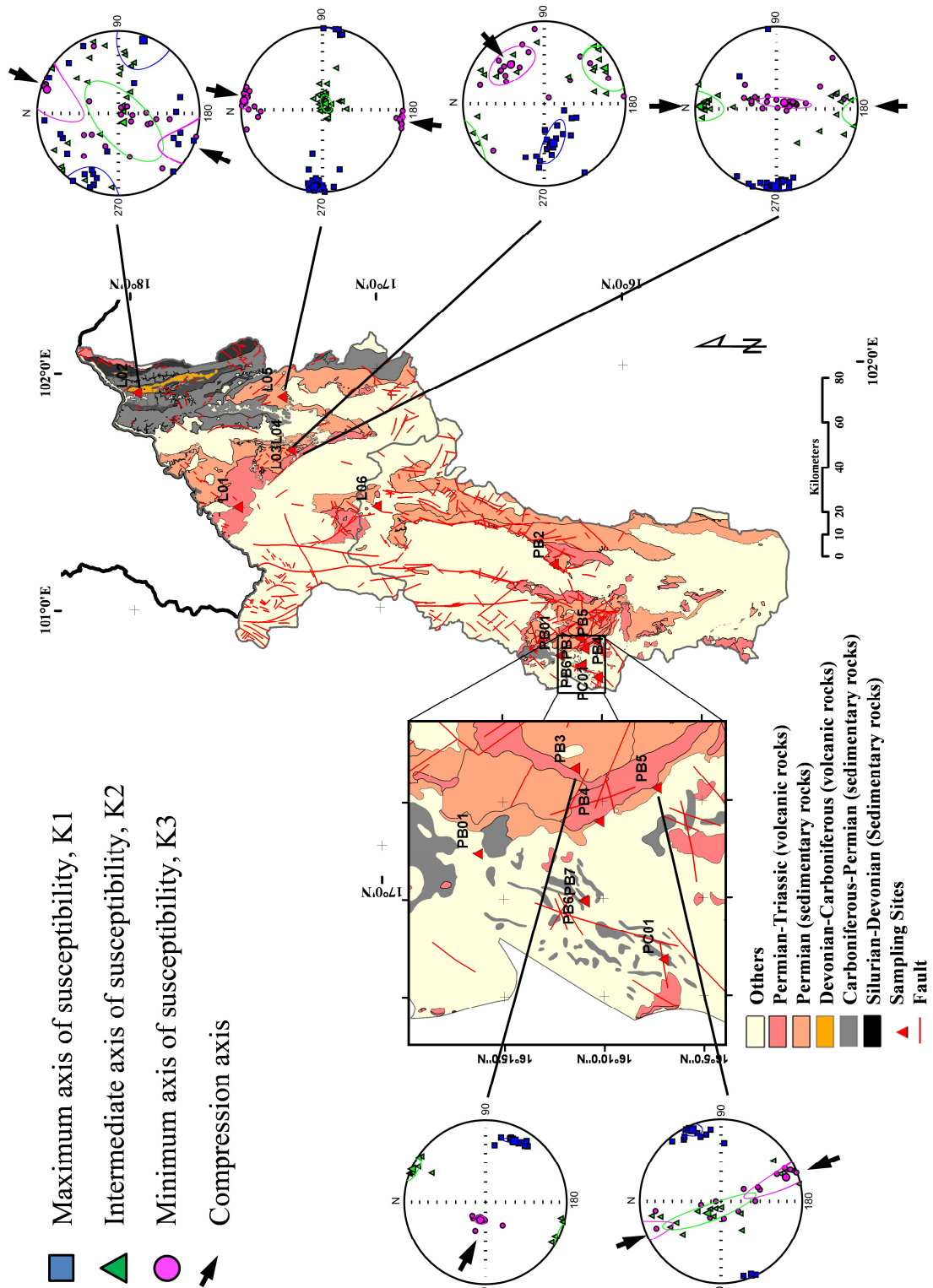
ตารางที่ 4.4 สรุปข้อมูล AMS ของตัวอย่างหินอัคนี

Sites	N(n)	Average (SD)		K1 Dec/Inc (conf. angles)	K3 Dec/Inc (conf. angles)	Palaeo-flow
		P <sub>j</sub>	T			
L01	12(28)	1.020 (0.007)	0.257 (0.394)	183.7/12.1 (58.6/14.0)	4.2/77.9 (20.0/13.8)	N-S
L06	14(39)	1.020 (0.006)	-0.133 (0.377)	47.1/14.1 (14.4/11.0)	210.6/75.3 (36.4/11.0)	SW-NE
PC01	11(22)	1.085 (0.126)	0.126 (0.479)	126.0/31.3 (77.0/60.3)	17.0/28.1 (60.8/47.7)	-
PB01	11(23)	1.045 (0.033)	0.192 (0.342)	297.3/54.7 (26.0/9.9)	163.7/26.0 (43.2/10.2)	SE-NW
PB2	12(32)	1.030 (0.014)	-0.014 (0.484)	343.8/83.4 (15.3/7.1)	250.0/0.4 (18.4/9.5)	Up
PB4	13(27)	1.063 (0.037)	0.497 (0.389)	221.3/5.6 (70.8/26.2)	317.7/48.3 (38.0/32.6)	NE-SW
PB6	10(24)	1.022 (0.006)	0.343 (0.230)	317.0/28.2 (29.0/11.2)	180.1/53.8 (28.7/14.5)	SE-NW
PB7	9(13)	1.062 (0.035)	0.157 (0.121)	255.4/71.9 (31.7/5.0)	94.6/17.1 (23.7/5.6)	UP

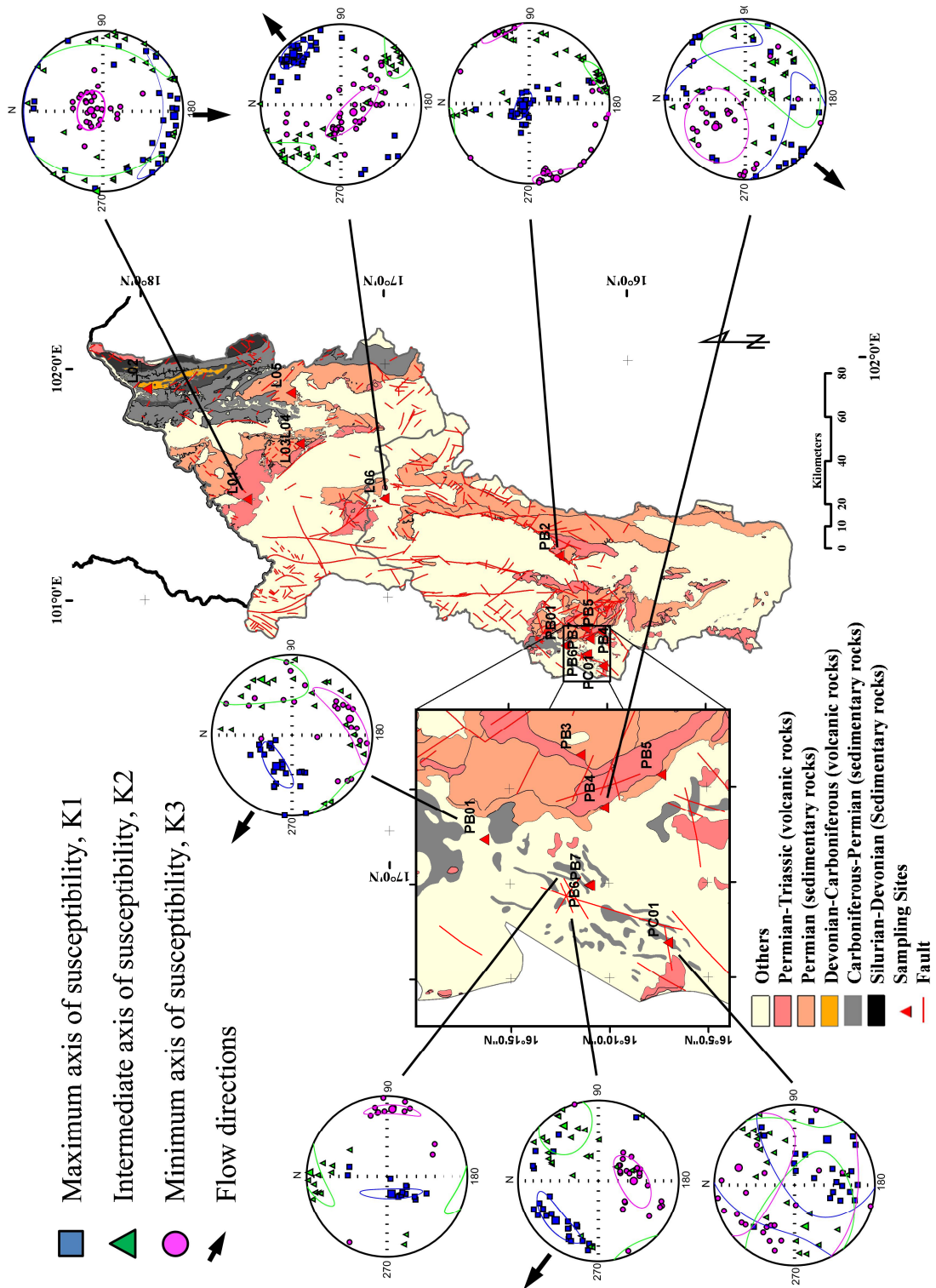
**Note:** N(n)(Sites(Speciments)), P<sub>j</sub>(Corrected anisotropy degree), T(Shape parameter), K1(Maximum susceptibility), K3(Minimum susceptibility), SD(Standard deviation) and De/Inc (conf. angles)(Declination/Inclination axis with confident



รูปที่ 4.7 กราฟ P<sub>j</sub>-T ของตัวอย่างหินอัคนี



รูปที่ 4.8 กราฟกระจายทิศทางทรงรี AMS และทิศทางแรงบีบอัด แต่ละพื้นที่ศึกษาของตัวอย่าง หินตะกอน และหินสกรัน



รูปที่ 4.9 กราฟกระจายทิศทางทรงรี AMS และทิศทางไหลบรรพกาลของหินหนืด (palaeoflow) แต่ละพื้นที่ศึกษาของตัวอย่างหินอัคนี

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์แอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก กับธรณีแปรสัณฐานในอดีต

พื้นที่เก็บตัวอย่างทั้งหมด 14 จุด เป็นส่วนหนึ่งของแนวคดโค้งเลย-เพชรบูรณ์ มีพื้นที่ครอบคลุมบริเวณขอบแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ด้านตะวันตก ติดกับแผ่นเปลือกโลกชาน-ไทย มีเหตุการณ์ธรณีแปรสัณฐานที่สำคัญอยู่สองช่วงด้วยกันตามที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งผลกระทบจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐานในอดีต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงธรณีโครงสร้างที่ซับซ้อนในบริเวณนี้ เช่น เกิดแนวคดโค้ง (fold) แนวแตก (fracture) รอยเลื่อน (fault) และการเกิดหินอัคนี ตามรายละเอียดในรายงานกรมทรัพยากรธรณี พ.ศ. 2552 ของจังหวัดเพชรบูรณ์ และจังหวัดเลย จากเหตุการณ์ดังกล่าว จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแม่เหล็กของหิน และถูกบันทึกในหินที่ได้รับผลกระทบนั้นๆ ซึ่งข้อมูล AMS ของตัวอย่างหินสามารถนำไปใช้วิเคราะห์และแปรความเหตุการณ์ธรณีแปรสัณฐานในอดีตได้ (บทที่ 2 หัวข้อ 2.3) จากข้อมูล AMS ของตัวอย่างทั้งหมด 14 จุด สามารถจัดกลุ่มได้เป็นสองกลุ่ม ตามหัวข้อ 4.2.1

ข้อมูล AMS จากตัวอย่างหินตะกอน จะสัมพันธ์กับลักษณะการตกตะกอน และการเปลี่ยนรูปของตะกอนจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐาน โดยเริ่มแรกตะกอนที่แข็งตัวเป็นหินภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่มีการไหลเข้ามาเกี่ยวข้อง หรือมีการไหลช้า เช่น ในทะเลสาบ หรือมหาสมุทร จะมีทิศทางของ K3 ตั้งฉาก K1 K2 ที่กระจายอยู่รอบๆ ระนาบของการตกตะกอน (sedimentation plan) และมีรูปทรงเป็นแบบจาน ( $T > 0$ ) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงแรงโน้มถ่วงตอนตกตะกอนเริ่มแรกในแนวตั้ง แต่ถ้ามีการไหลเข้ามาเกี่ยวข้อง ทิศทางการไหลในอดีต (palaeocurrent) จะสัมพันธ์กับ K1 และรูปทรงของ AMS จะเปลี่ยนไปจากเดิม ในกรณีที่ได้รับผลกระทบ จากกระบวนการธรณีแปรสัณฐานหลังจากการตกตะกอนครั้งแรก และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูป (deformation) ของหินตะกอนเดิม จะทำให้ทิศทางของ K1 K2 และ K3 เปลี่ยนไปจากเดิม โดยทิศทางของ K3 จะขนานกับแนวแรงบีบอัด (compression) และแนว K1 จะอยู่ในทิศตั้งฉากกับแนวแรงบีบอัด หรือขนานไปกับแนวรอยเลื่อน รวมทั้งค่า  $P_j$  จะสูงขึ้นตามความแรงของผลกระทบ

ข้อมูล AMS ของหินตะกอนจาก ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 ถ้ากำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของการตกตะกอนตอนแรกในสภาวะแวดล้อมที่นิ่ง จะเห็นว่ามีเพียงตัวอย่างเดียวจากพื้นที่ PB3 ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปทรง AMS เริ่มแรกของการตกตะกอน นอกนั้นค่อนข้างเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งเกือบทั้งหมดมีทิศของ K3 อยู่ในแนวเหนือ-ใต้ ซึ่งตีความได้ว่าหินตะกอนในกลุ่มนี้ได้รับอิทธิพลจากแรงบีบอัดในทิศทางเหนือ-ใต้ แสดงในรูปที่ 4.8 และจากตัวอย่างทั้งหมด พบว่าตัวอย่างจากพื้นที่ภาคกลางของจังหวัดเลย (L03 L04 และ L05) มีค่า  $P_j$  ค่อนข้างสูงมาก ซึ่งเป็น

ข้อมูลที่บ่งชี้ว่า ตัวอย่างจากพื้นที่นี้ได้รับผลกระทบจากกระบวนการทางธรณีแปรสัณฐานสูง แต่เนื่องจากว่า ผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิ ของหินตะกอนเดิม เช่น แนวรอยต่อของหินอัคนี กระบวนการอพิเทอร์มัล เป็นต้น จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแร่องค์ประกอบหิน และส่งผลให้แร่แม่เหล็กของหินตะกอนเดิมเปลี่ยนไป ดังนั้น ข้อมูล AMS จากพื้นที่ศึกษา L02 L03 และ L04 อาจจะไม่มีความคลาดเคลื่อนได้ หรือไม่สอดคล้องกับช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านธรณีวิทยา หรืออาจจะระบุช่วงการเปลี่ยนแปลงไม่ได้

สำหรับข้อมูล AMS ของตัวอย่างหินอัคนี จะสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของหินหนืด โดยปกติทิศทางการไหลมีทิศเดียวกับ K1 และทิศ K2 K3 ตั้งฉากกับทิศทางการไหล สำหรับตัวอย่างหินอัคนีที่ศึกษาครั้งนี้ มีค่า  $P_j$  ระหว่าง 1.0 ถึง 1.10 อยู่ในช่วงเฉลี่ยทั่วไปของหินอัคนี ( $P_j < 10\%$ ) (Tarling and Hrouda, 1993) ซึ่งสามารถตีความได้ว่าตัวอย่างหินอัคนีจากพื้นที่ศึกษาครั้งนี้ไม่มีการเปลี่ยนรูปหลังจากหินเกิดขึ้น จากข้อมูลที่แสดงรูปที่ 4.9 AMS ของตัวอย่างหินอัคนีค่อนข้างเกาะกลุ่มกันดี ยกเว้นข้อมูลจากพื้นที่ PC01 และ PB4 เมื่อวิเคราะห์ทิศทางไหลบรรพกาลของหินหนืด แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างจากพื้นที่ L01 ซึ่งมีรูปทรง AMS เป็นแบบจาน มีทิศทางไหลในแนวเหนือ-ใต้ ซึ่งลักษณะการไหลค่อนข้างมีความเร็วต่ำหรืออาจมีความหนืดสูง หรือต้นกำเนิดของหินหนืดมีความดันต่ำ ตัวอย่างจากพื้นที่ L06 ข้อมูล K1 เกาะกลุ่มกันชัดเจน และมีรูปทรงแบบเข็ม ( $T < 0$ ) มีทิศทางการไหลในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ และลักษณะการไหลค่อนข้างเร็วกว่าพื้นที่ L01 ตัวอย่างจากพื้นที่ PB01 และ PB6 มีลักษณะเดียวกับพื้นที่ L06 แต่ทิศทางการไหลอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ส่วนตัวอย่างหินที่เก็บจากบริเวณผนังหินซึ่งเป็นหินจำพวกแอนดีไซต์ (PB2 และ PB6) และหินแกรนิต (PB7) ที่แทรกตัวผ่านชั้นหินตะกอนเดิมยุคเพอร์เมียน พบว่าข้อมูล AMS จากพื้นที่ PB2 มีค่า K1 อยู่ตรงตำแหน่งโพล ซึ่งตีความได้ว่าทิศทางการไหลของหินหนืดมีทิศพุ่งขึ้น และสอดคล้องกับพื้นที่เก็บตัวอย่างที่เป็นลักษณะของผนังหินแอนดีไซต์ สำหรับตัวอย่างจากพื้นที่ PC01 และ PB4 ข้อมูล AMS กระจายตัวสูง คาดว่าหินจากพื้นที่นี้ มีทิศทางการไหลที่ไม่แน่นอน อาจจะเป็นหินที่มีความหนืดสูง และไหลช้า วางตัวอยู่ในแนวราบหรือส่วนขอบของแนวหินหนืดที่มีความชันต่ำ

นอกจากนั้นข้อมูล AMS ยังใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับพิจารณาหินตัวอย่างว่าเหมาะสมที่จะนำไปศึกษาทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาล เพราะหินที่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐาน จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศของแมกเน็ทไอเซชันตกค้างในอดีต ดังนั้นตัวอย่างที่มีค่า  $P_j$  สูงกว่าปกติ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาศึกษาภาวะแม่เหล็กบรรพกาล ซึ่งจากตัวอย่างทั้งหมด 14 จุด พบว่าตัวอย่างหินจากพื้นที่ภาคกลางของจังหวัดเลย (L03 L04 และ L05) ไม่

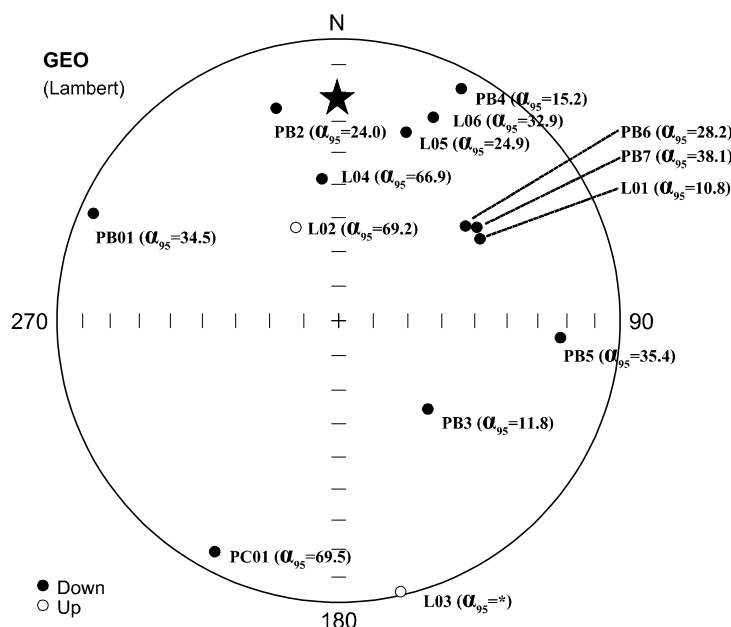
เหมาะที่จะนำมาวิเคราะห์ทางด้านภาวะแม่เหล็กบรรพกาล เนื่องจากมีค่า  $P_j$  ค่อนข้างสูงกว่าปกติ (Tarling and Hrouda, 1993; McElhinny and McFadden, 2000)

### 4.3 ภาวะแม่เหล็กบรรพกาล (palaeomagnetic)

#### 4.3.1 ผลทดสอบภาวะแม่เหล็กบรรพกาล

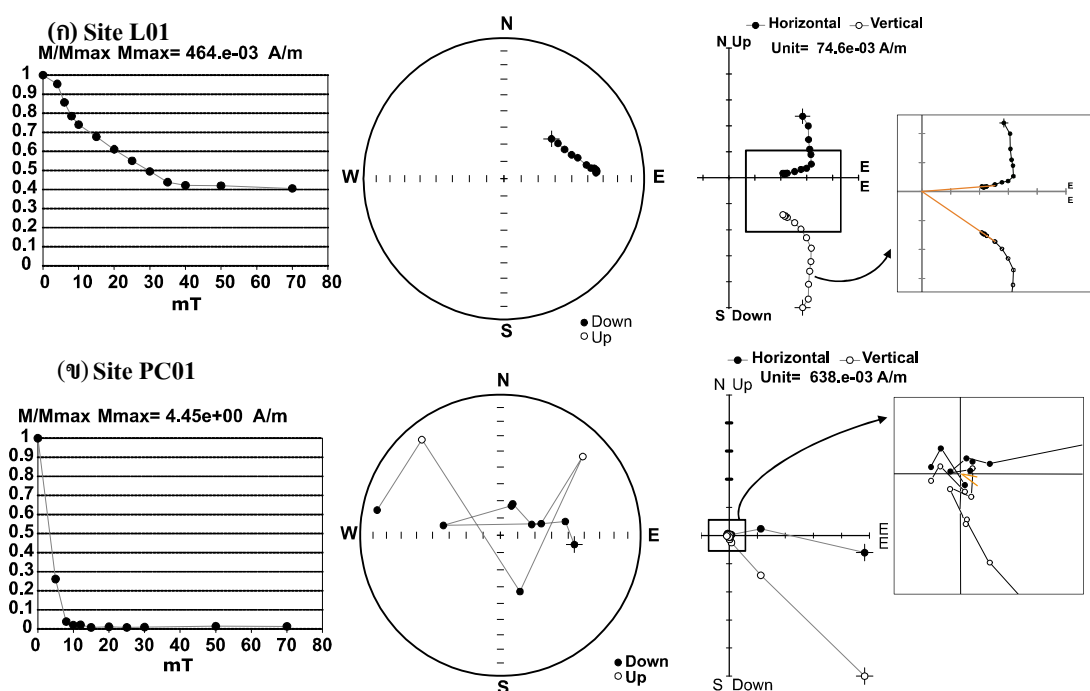
จุดประสงค์การทดสอบในขั้นตอนนี้เพื่อศึกษาองค์ประกอบทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างในอดีตที่ถูกบันทึกในตัวอย่างหินจากพื้นที่ศึกษา ซึ่งอาศัยข้อมูลที่ได้จากกระบวนการลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้างมาวิเคราะห์ ตามขั้นตอนในบทที่ 3

ผลวิเคราะห์ทิศทาง มุมเอียงเท (Inc) และมุมบ่ายเบน (Dec) เฉลี่ย NRM ทั้ง 14 จุด (รูป 4.10) พบว่าเกือบทั้งหมดมี Inc เป็นบวก มีเพียงสองจุดเท่านั้นที่เป็นลบ (L03 และ L02) ทิศทาง NRM เฉลี่ยส่วนใหญ่กระจายตัวใกล้เคียงกับทิศทางสนามแม่เหล็กโลกปัจจุบัน (★) ตัวอย่างจากพื้นที่ L03 มีข้อมูลกระจายตัวสูงสุด ( $\alpha_{95}$  มีค่ามาก) และต่ำสุดจากพื้นที่ศึกษา L01 แต่โดยรวมพบว่าการกระจายตัวทิศทางของ NRM จากพื้นที่ศึกษาทั้งหมดค่อนข้างสูง ( $\alpha_{95} > 20^\circ$ )



รูปที่ 4.10 ทิศทางเฉลี่ย NRM ของพื้นที่ศึกษา 14 จุด เทียบกับทิศทางสนามแม่เหล็กโลกปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา (★, Inc=22.5°, Dec=-0.75°), \* คือ  $\alpha_{95}$  (°) มีค่าสูงมาก

จากตัวอย่างแต่ละพื้นที่พบว่า บางตัวอย่างมีองค์ประกอบแมกนีไทเซชันตกค้างมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ และสามารถแยกแต่ละองค์ประกอบได้อย่างชัดเจน แต่บางตัวอย่างทิศทางแต่ละองค์ประกอบมีลักษณะซ้อนทับกันจนไม่สามารถแยกออกจากกันได้ หรือ มีค่า MAD สูง ( $>20^\circ$ ) ซึ่งตัวอย่างที่มีลักษณะแบบนี้จะไม่นำมาพิจารณาในขั้นตอนคำนวณหาทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างเฉลี่ยของแต่ละพื้นที่ แสดงตัวอย่างรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบข้อมูลองค์ประกอบทิศทางของแมกนีไทเซชันหลังจากลบด้วยสนามแม่เหล็กสลับ (ก) แยกองค์ประกอบได้ง่าย มีค่า MDF สูง และ MAD ต่ำ (ข) องค์ประกอบแยกได้ยาก MDF ต่ำ และ MAD สูง

จากข้อมูลลบด้วยแมกนีไทเซชันตกค้างของตัวอย่างทั้งหมด 14 จุด สามารถแบ่งกลุ่มออกเป็นสี่กลุ่ม ตามลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล และอายุของหินตัวอย่าง ตามรายละเอียดด้านล่าง และตารางที่ 4.5

1) กลุ่มตัวอย่างทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างกระจายตัวสูง ประกอบด้วยตัวอย่างจากพื้นที่ L03 L04 L05 PC01 และ PB01 ตัวอย่างในกลุ่มนี้มีองค์ประกอบของเกรนแม่เหล็กกระจายตัวอยู่ในกลุ่ม SP-SD และมีค่า MDF ค่อนข้างต่ำ ( $MDF < 10$  mT) ยกเว้น L05 ( $MDF \approx 15$  mT) แต่ L05 มีค่า  $P_j$  เฉลี่ยสูง จึงนำมารวมในกลุ่มนี้ด้วย ผลวิเคราะห์ทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างที่

องค์ประกอบต่างๆ พบว่ามีข้อมูลกระจายตัวสูง และมีบางตัวอย่างเท่านั้นที่สามารถวิเคราะห์ทิศทางของ Dec/Inc ได้

2.) กลุ่มตัวอย่างหินที่มีอายุอยู่ในช่วงยุคเพอร์เมียนถึงยุคไทรแอสซิก (PTr) ประกอบด้วยตัวอย่างจากพื้นที่ L01 L06 PB2 PB4 และ PB6 ซึ่งเป็นหินอัคนีทั้งหมด มีค่า MDF เฉลี่ยค่อนข้างสูง มีเกรนแร่แม่เหล็กอยู่ในช่วง PSD ข้อมูลแมกนีไทเซชันตกค้างสามารถแยกแต่ละองค์ประกอบออกจากกันได้ชัดเจน แต่บางตัวอย่างที่มีค่า MDF ต่ำ ทิศทางเฉลี่ยขององค์ประกอบช่วง  $H_c$  สูง มีค่า MAD มากกว่า  $20^\circ$  ซึ่งตัวอย่างที่มีลักษณะแบบนี้จะไม่นำมาพิจารณาเมื่อคำนวณทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างเฉลี่ยของแต่ละพื้นที่ สำหรับทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างเฉลี่ย ช่วง  $H_c$  ต่ำ มีทิศทางใกล้เคียงกับสนามแม่เหล็กโลกปัจจุบัน ส่วนช่วง  $H_c$  สูง เกือบทั้งหมดมีทิศทางเฉลี่ย Dec อยู่ระหว่าง  $25^\circ$  ถึง  $76^\circ$  ยกเว้นตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษา PB2 เพียงตัวอย่างเดียวที่มีทิศทางเฉลี่ยต่างไปประมาณ  $180^\circ$  ส่วนทิศทางเฉลี่ย Inc ของตัวอย่างในกลุ่มนี้มีค่าระหว่าง  $11^\circ$  ถึง  $41^\circ$  ในขั้นตอนการคำนวณทิศทางเฉลี่ยของตัวอย่างในกลุ่มนี้ จะไม่นำข้อมูลจากพื้นที่ PB2 มาคิด เพราะข้อมูลต่างไปจากกลุ่มมาก

3.) กลุ่มตัวอย่างหินที่มีอายุอยู่ในช่วงยุคคาร์บอนิเฟอรัส ถึงยุคเพอร์เมียน (CP) ประกอบด้วยตัวอย่างจากพื้นที่ PB3 PB5 และ PB7 มีการกระจายตัวของข้อมูลน้อย มีทิศทางเฉลี่ย Dec ช่วง  $H_c$  สูง อยู่ระหว่าง  $100^\circ$  ถึง  $145^\circ$  และทิศทางเฉลี่ย Inc อยู่ระหว่าง  $30^\circ$  ถึง  $50^\circ$  ส่วนช่วง  $H_c$  ต่ำ ข้อมูลการจัดกระจายต่างจากทิศทางสนามแม่เหล็กโลกปัจจุบันพอสมควร

4.) กลุ่มตัวอย่างหินที่มีอายุมากกว่าคาร์บอนิเฟอรัส มีเพียงตัวอย่างเดียวจากพื้นที่ศึกษา L02 ซึ่งเป็นหินที่มีอายุอยู่ในช่วงยุคครีโเวเนียน ถึงยุคคาร์บอนิเฟอรัส ทิศทาง Inc มีทั้งที่เป็นบวกและลบ โดยทิศทาง Inc เป็นบวกได้จากตัวอย่างที่มีค่า  $K_m$  สูง ส่วนที่เป็นลบได้จากตัวอย่างที่มีค่า  $K_m$  ต่ำ ทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างที่ได้จากการวิเคราะห์แต่ละองค์ประกอบค่อนข้างกระจายสูง



ตารางที่ 4.5 สรุปทิศทางเฉลี่ยของเมกนีไทเทเนียมตกค้างของตัวอย่างแต่ละพื้นที่ศึกษา

Sites	Lat. (°N)/Lon. (°E)	Rock	Age	Component	n/n <sub>c</sub>	Dec (°)	Inc (°)	K	α <sub>95</sub> (°)	Palaeo Lat (°N)	PLAT (°N)	PLONG (°E)	DP (°)	DM (°)
<b>Group #1</b>														
L03	17.35481/101.66357	Skarn	PTr	LC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				HC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L04	17.35472/101.66363	Skarn	PTr	LC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				HC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L05	17.38790/101.88397	Limestone	P	LC	12/10	40.2	45.1	13.2	13.8	26.7	51.8	170.6	11.1	17.5
				HC	12/8	338.8	-25.0	15.4	14.6	-13.1	53.0	-42.4	8.4	15.7
PC01	16.11464/100.69835	Andesite	PTr	LC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				HC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PB01	16.27128/100.78835	Andesite	PTr	LC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				HC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Group #2</b>														
L01	17.57237 /101.42616	Granodiorite	PTr	LC	12/9	354.8	36.3	10.1	16.0	17.6	86.3	12.6	10.2	18.1
				HC	12/12	75.9	33.5	32.7	7.7	18.3	18.4	177.4	5.0	8.8
L06	17.00914/101.42178	Granite	PTr	LC	14/12	22.0	29.9	3.2	29.3	16.0	68.9	-169.1	18.0	32.5
				HC	14/9	25.6	19.5	18.5	12.3	10.0	64.2	-156.2	6.7	12.8
PB2	16.29246/100.17011	Andesite	PTr	LC	12/11	356.4	20.7	17.1	11.4	10.7	83.4	-47.2	6.3	11.9
				HC	12/9	296.1	21.5	24.2	10.7	11.2	27.9	14.4	5.9	11.3
PB4	16.16998/100.81646	Rhyolite	PTr	LC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				HC	12/11	27.1	11.2	27.6	8.8	5.6	61.5	-150.6	4.6	9.0
PB6	16.18272/100.74754	Andesite	PTr	LC	10/6	18.2	40.5	33.0	11.8	23.2	71.6	165.7	8.7	14.3
				HC	10/8	41.4	38.8	72.7	6.5	21.9	50.6	175.8	4.6	7.8
<b>Mean</b>			<b>PTr</b>	<b>LC</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
				<b>HC</b>	<b>N=4</b>	<b>40.9</b>	<b>27.2</b>	<b>11.4</b>	<b>28.5</b>	<b>14.4</b>	<b>49.9</b>	<b>187.6</b>	<b>A95 = 27.7</b>	

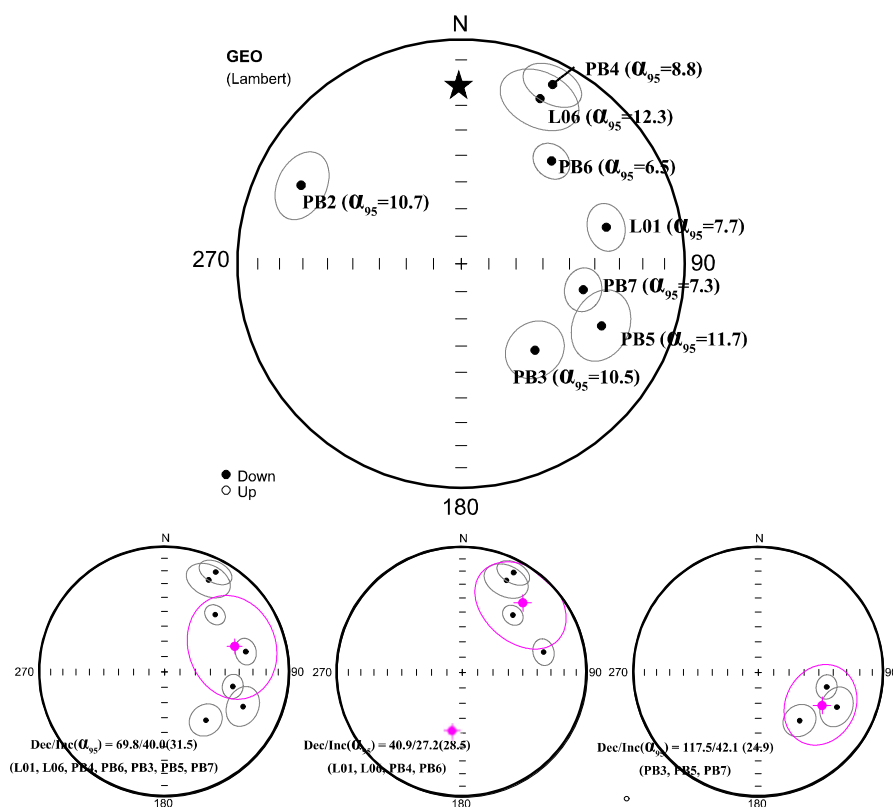
ตารางที่ 4.5 (ต่อ) สรุปทิศทางเฉลี่ยของแมกนีไทท์ระดับตึกค้ำของตัวอย่างแต่ละพื้นที่ศึกษา

Sites	Lat. (°N)/Lon. (°E)	Rock	Age	Component	n/n <sub>c</sub>	Dec (°)	Inc (°)	K	$\alpha_{95}$ (°)	Palaeo Lat (°N)	PLAT (°N)	PLONG (°E)	DP (°)	DM (°)
<b>Group #3</b>														
PB3	16.18973/100.86233	Shale	P	LC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				HC	7/6	139.4	47.9	41.5	10.5	28.9	-30.2	142.1	9.0	13.7
PB5	16.12069/100.84472	Limestone	P	LC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				HC	10/8	113.8	31.9	23.3	11.7	17.3	-16.7	166.7	7.4	13.2
PB7	16.18261/100.74748	Granite	C <sub>u</sub>	LC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				HC	9/8	102.0	43.5	58.8	7.3	25.4	-3.5	163.0	5.7	9.1
<b>Mean</b>		-	<b>CP</b>	<b>LC</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				<b>HC</b>	<b>N=3</b>	<b>117.5</b>	<b>42.1</b>	<b>25.6</b>	<b>24.9</b>	<b>24.4</b>	<b>-17.1</b>	<b>157.9</b>	<b>A95 = 28.3</b>	
<b>Group #4</b>														
L02 (+Inc)	17.97809/101.91169	Skarn	DC	LC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				HC	11/5	344.7	40.6	7.7	29.6	23.2	74.8	34.6	21.7	35.8
L02 (-Inc)		Skarn	DC	LC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				HC	11/5	191.9	-52.5	21.8	16.8	-33.1	-71.5	-45.3	15.9	23.1

**Note:** Lat./Long.(Latitude/Longitude), P(Permian), C<sub>u</sub>(Upper Carboniferous), DC(Devonian-Carboniferous), LC(Low H<sub>c</sub> component), HC(High H<sub>c</sub> component), n/n<sub>c</sub>(Number samples measured/calculated), N(Number sites), Dec(Declination), Inc(Inclination), K(Precision parameter),  $\alpha_{95}$ (Confidence limit of direction), Palaeo Lat(Palaeolatitude), PLAT(Pole latitude), PLONG(Pole longitude), DP DM or A95(Confidence limit of pole).

### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์ภาวะแม่เหล็กบรรพกาล

ทิศทางของ ChRM หรือ องค์ประกอบของทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างเริ่มต้น จากตัวอย่างหินแต่ละพื้นที่ จะพิจารณาช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กกลบล้างสูง หรือช่วง  $H_c$  สูง (>20 mT) เพียงอย่างเดียว เพราะช่วงนี้ทิศทางสนามแม่เหล็กที่ถูกบันทึกในตัวอย่างหินมีความเสถียรสูง ซึ่งเป็นผลมาจากเกรนแม่เหล็กจำพวก PSD และ SD ส่วนทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กกลบล้างต่ำ หรือช่วง  $H_c$  ต่ำ (<20 mT) ซึ่งเป็นผลมาจากเกรนแม่เหล็กจำพวก MD จะพิจารณาเป็น VRM หรือสัญญาณรบกวน และไม่นำมาพิจารณาหาทิศทางเฉลี่ย นอกจากนั้นในบางตัวอย่าง ช่วง  $H_c$  สูง เมื่อคำนวณทิศทางเฉลี่ยแมกนีไทเซชันตกค้าง พบว่ามีค่า MAD สูง (>20°) ซึ่งส่วนใหญ่พบในตัวอย่างที่มีค่า MDF ต่ำ (<10 mT) อาจเนื่องมาจากตัวอย่างมีองค์ประกอบของเกรนแม่เหล็กที่มีความเสถียรต่ำอยู่มาก จึงส่งผลให้เกิดการรบกวนในกระบวนการลบล้างแมกนีไทเซชัน



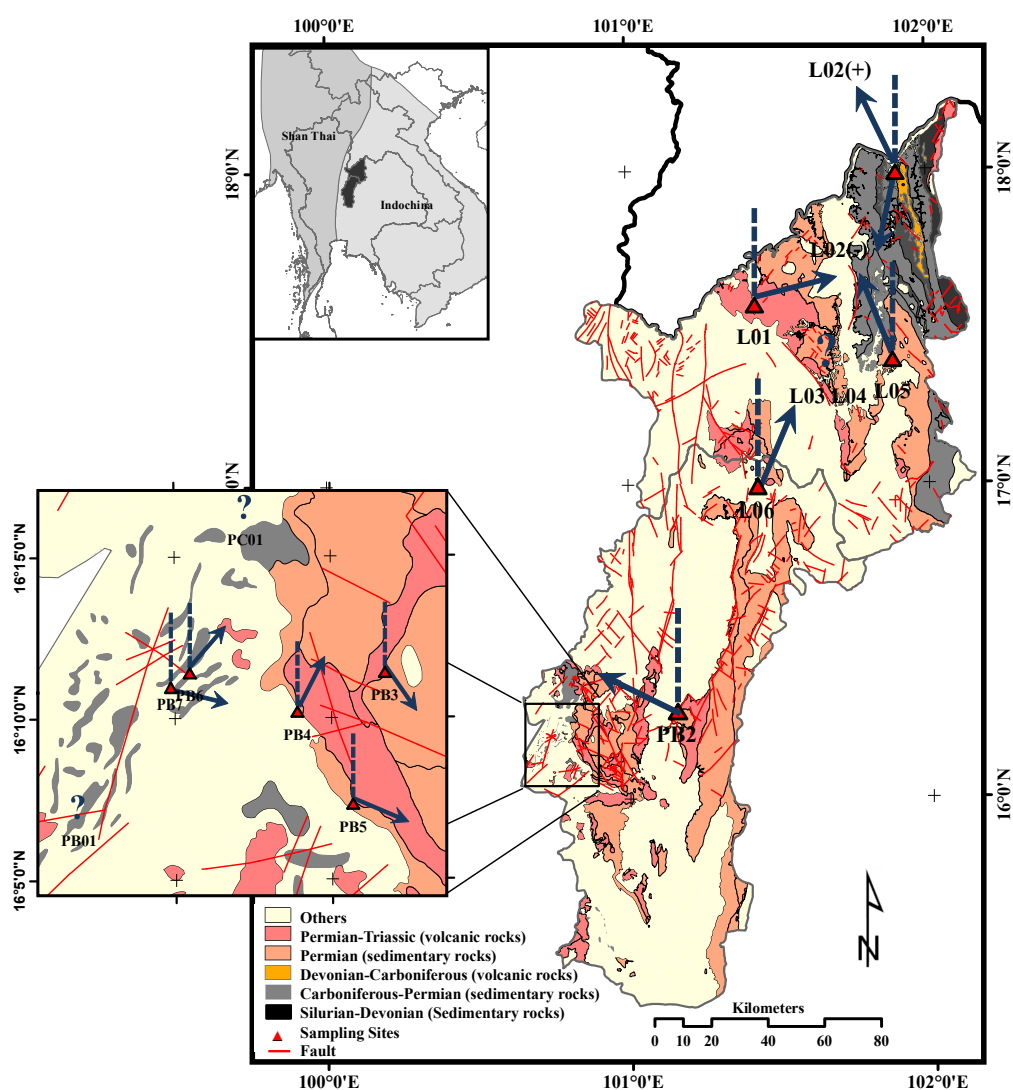
รูปที่ 4.12 ทิศทางเฉลี่ย Dec/Inc ช่วง  $H_c$  สูง ของแต่ละตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษาต่างๆ และทิศทางเฉลี่ย (♦) ของกลุ่มตัวอย่าง (★ คือ สนามแม่เหล็กโลกปัจจุบันบริเวณพื้นที่ศึกษา, Inc=22.5°, Dec=-0.75°)

จากข้อมูลทั้งหมดมีเพียง ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 และ 3 เท่านั้นที่เหมาะสมสำหรับนำไปวิเคราะห์ภาวะแม่เหล็กบรรพกาล ซึ่งมีทิศทางเฉลี่ยของแต่ละพื้นที่ แสดงในรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.5 มีทิศทาง Dec/Inc ( $\alpha_{95}$ ) เฉลี่ยรวมทุกตัวอย่าง (ยกเว้น PB2) เท่ากับ  $69.8^\circ/40.0^\circ$  ( $31.5^\circ$ ) และเมื่อแยกพิจารณาแต่ละกลุ่มตัวอย่าง พบว่ากลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 มีค่าเท่ากับ  $40.9^\circ/27.2^\circ$  ( $28.5^\circ$ ) และ  $117.5^\circ/42.1^\circ$  ( $24.9^\circ$ ) ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างข้อมูลจากกลุ่มที่ 1 และ 4 ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากมีข้อมูลกระจายตัวสูง จำนวนจุดเก็บข้อมูลน้อยเกินไปสำหรับคำนวณหาทิศทางเฉลี่ย และได้รับผลกระทบจากธรณีแปรสัณฐานสูง ( $P_j$  สูง)

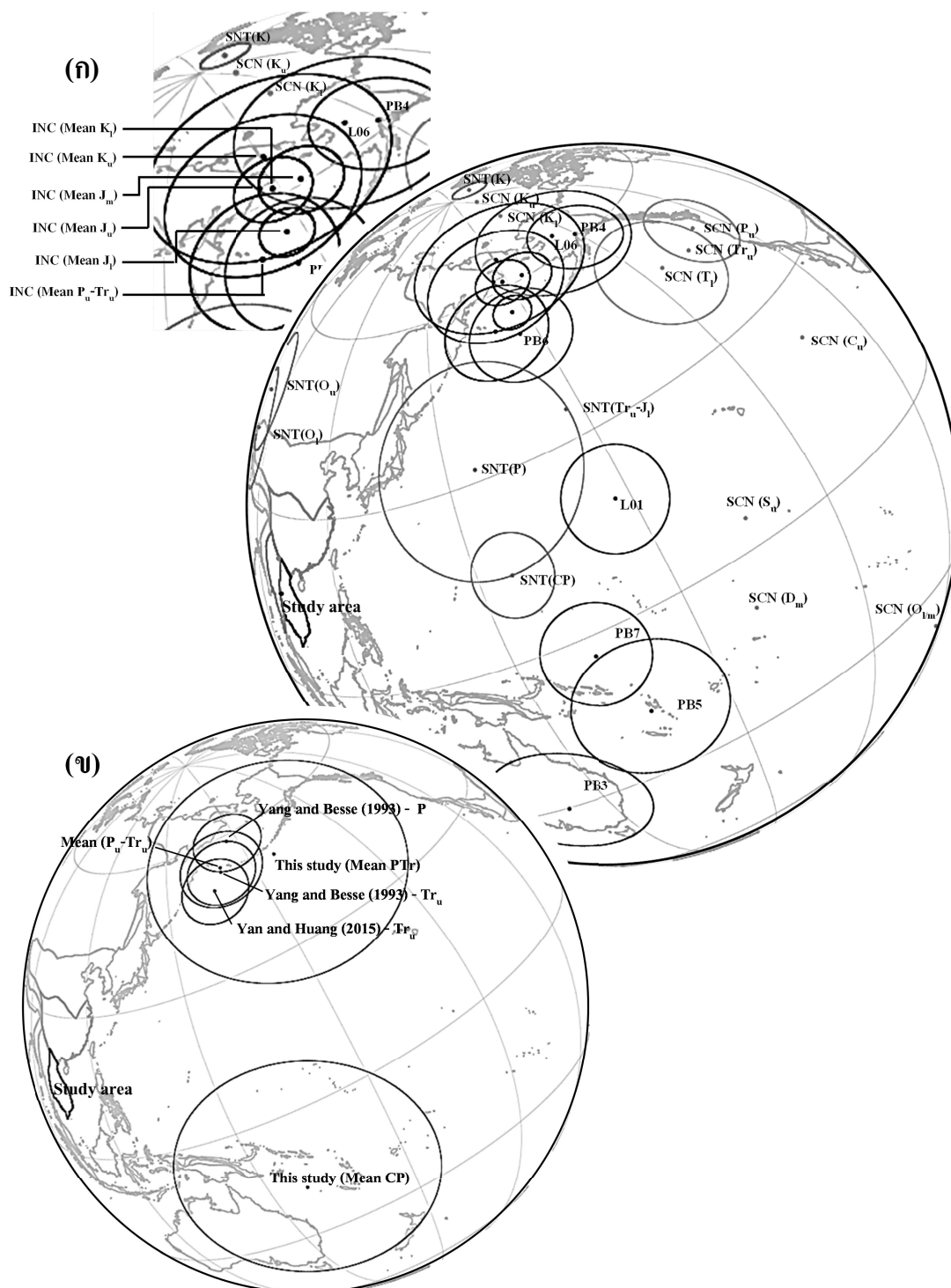
เมื่อวิเคราะห์ทิศทาง Dec เฉลี่ย จากข้อมูลแต่ละพื้นที่ศึกษา เทียบกับทิศทางปัจจุบัน แสดงตามในรูปที่ 4.13 พบว่ามีทิศทาง Dec เฉลี่ย ส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง  $20^\circ$  ถึง  $145^\circ$  ยกเว้น PB2 L05 และ L02 ซึ่งส่วนนี้อาจจะเป็นผลมาจากหินบริเวณนั้นได้รับผลกระทบจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐาน จึงส่งผลให้หินเกิดการเปลี่ยนรูป หรือเคลื่อนในทิศทางที่แตกต่างจากหินส่วนใหญ่ในพื้นที่

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลภาวะแม่เหล็กบรรพกาลที่ได้รวบรวม จากรายงานก่อนหน้านี ตั้งแต่ยุคคิโวเนียน ถึงยุคครีเทเชียส และข้อมูลที่ศึกษาครั้งนี้ ของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน แผ่นเปลือกโลกซัน-ไทย และแผ่นเปลือกโลกจีนใต้ พบว่าตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาล มีลักษณะกระจายตัวแสดงตามรูปที่ 4.14 (ก) ถ้าพิจารณาเฉพาะข้อมูลพื้นที่ศึกษา จะเห็นว่าตัวอย่างกลุ่มที่ 2 (PTr) มีตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาลอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรทั้งหมด มีข้อมูลส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาล ที่รายงานศึกษาก่อนหน้านี้ ยกเว้นตัวอย่างจากพื้นที่ L01 เพียงตัวอย่างเดียว ที่มีลักษณะแตกต่างไปกลุ่ม เมื่อคำนวณหาตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาลเฉลี่ยของตัวอย่างกลุ่มนี้ พบว่ามีค่า PLAT/PLONG เฉลี่ยเท่ากับ  $49.9^\circ\text{N}/187.6^\circ\text{E}$  ( $A95=27.7^\circ$ ) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang and Besse (1993) ซึ่งทำการศึกษาหินปูนยุคเพอร์เมียนบริเวณพื้นที่อำเภอชุมแพ จังหวัดขอนแก่น มีค่า PLAT/PLONG เฉลี่ยเท่ากับ  $58.4^\circ\text{N}/176.2^\circ\text{E}$  ( $dp/dm=4.3^\circ/7.2^\circ$ ) และ Yan and Huang (2015) ได้นำเสนอข้อมูลภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของตัวอย่างหินยุคไทรแอสซิกตอนปลาย และยุคจูแรสสิกตอนต้น ของหมวดหินห้วยหินลาด และหมวดหินน้ำพอง ซึ่งมีค่า PLAT/PLONG เฉลี่ยเท่ากับ  $48.7^\circ\text{N}/165.9^\circ\text{E}$  ( $A95=7.2^\circ$ ) และ  $55.2^\circ\text{N}/178.0^\circ\text{E}$  ( $A95=5.9^\circ$ ) ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลของ Yang and Besse (1993) กับ Yan and Huang (2015) มาคำนวณหาตำแหน่งขั้วแม่เหล็กบรรพกาลช่วงยุคเพอร์เมียนตอนปลายถึงยุคไทรแอสซิกตอนปลายจะได้ค่า PLAT/PLONG เฉลี่ยเท่ากับ  $53.1^\circ\text{N}/170.2^\circ\text{E}$  ( $A95=8.8^\circ$ ) ซึ่งใกล้เคียงกับที่ศึกษาเช่นกัน

ข้อมูลในกลุ่มที่ 3 (CP) ตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาลของแต่ละตัวอย่างในกลุ่มนี้อยู่ได้เส้นศูนย์สูตรทั้งหมด และมีค่า PLAT/PLONG เฉลี่ยเท่ากับ  $17.1^{\circ}\text{S}/157.9^{\circ}\text{E}$  ( $A95=28.3^{\circ}$ ) ซึ่งมีตำแหน่งห่างจากข้อมูลในกลุ่มที่ 2 (PTr) ประมาณ  $67^{\circ}$  แนวเหนือ-ใต้ และเท่าที่สืบค้นข้อมูล ยังไม่มีรายงานวิจัยขึ้น ไหนที่นำเสนอข้อมูลแม่เหล็กบรรพกาลในยุคนี้มาก่อนสำหรับพื้นที่แผ่นเปลือกโลกอินโดจีน

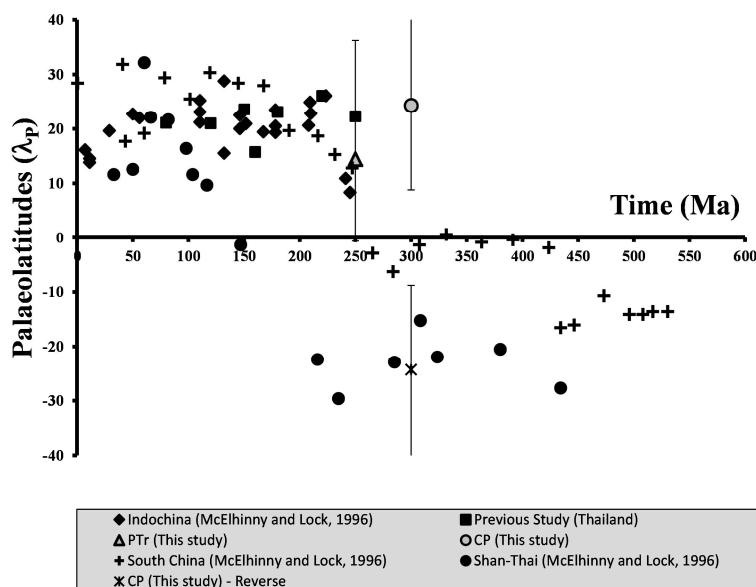


รูปที่ 4.13 ข้อมูลทิศทาง Dec เฉลี่ย จากข้อมูลภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของตัวอย่างแต่ละจุด (เส้นทึบ) เทียบกับทิศทางปัจจุบัน (เส้นประ) (แผนที่ปรับปรุงจากแผนที่ธรณีวิทยา 1:250,000 กรมทรัพยากรธรณี ปี พ.ศ. 2552)



รูปที่ 4.14 (ก) ตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาล และ A95 ของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (INC) แผ่นเปลือกโลกชาน-ไทย (SNT) และแผ่นเปลือกโลกจีนใต้ (SCN) จากข้อมูลการศึกษาครั้งนี้และที่รายงานการศึกษาก่อนหน้านี้ และ (ข) เปรียบเทียบข้อมูล ขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาล (PTr และ CP) กับข้อมูลการศึกษาาก่อนหน้านี้ ของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน

พิจารณาค่าแห่งละติจูดบรรพกาล (paleolatitude -  $\lambda_p$ ) บริเวณพื้นที่ศึกษา ของตัวอย่างทั้งสองกลุ่มข้างต้น พบว่าตัวอย่างหินกลุ่มที่ 2 (PTr) มีค่า  $\lambda_p$ (+/-) เท่ากับ 14.4°N (36.2°N/0.7°S) และกลุ่มที่ 3 (CP) มีค่า  $\lambda_p$ (+/-) เท่ากับ 24.3°N (49.7°N/8.8°N) ซึ่งตัวอย่างในกลุ่มที่ 2 (PTr) มีค่า  $\lambda_p$  ก่อนข้างสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ แต่ตัวอย่างกลุ่มที่ 3 (CP) ก่อนข้างที่จะแตกต่างกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พอสมควร จากที่ระบุว่าช่วงเวลาดังกล่าวแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนอยู่ทางซีกโลกใต้ (Khin Zaw et al., 2014; Metcalfe, 2011; Trosvik and Cocks, 2004) และจากการค้นคว้าข้อมูลประวัติการกลับขั้วของแม่เหล็กโลกในอดีต (ภาคผนวก ง) จะเห็นว่าช่วงยุคคาร์บอนิเฟอรัส ถึงยุคเพอร์เมียน สนามแม่เหล็กโลกมีแนวโน้มเป็นลักษณะกลับขั้ว (reverse) ถ้าอาศัยเงื่อนไขไปคำนวณตำแหน่ง  $\lambda_p$  ใหม่ ค่าที่ได้จะมีตำแหน่งอยู่ทางขั้วโลกใต้ ตามแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบตำแหน่งละติจูดบรรพกาล ( $\lambda_p$ ) จากตัวอย่างหินที่ศึกษากับข้อมูลที่รายงาน การศึกษาก่อนหน้านี้

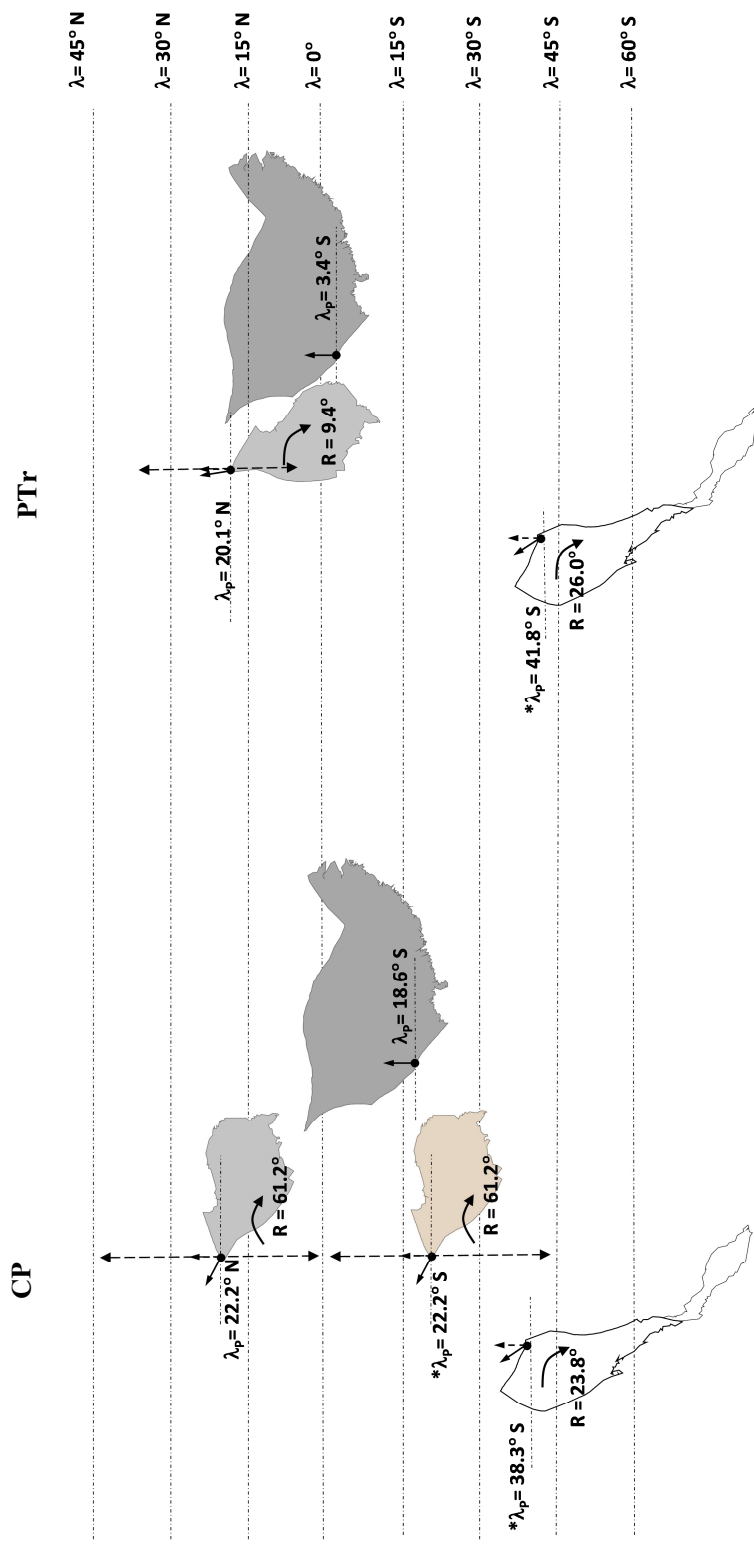
จากข้อมูลในตารางที่ 4.6 ทำการเปรียบเทียบตำแหน่งแผ่นเปลือกโลกทั้งสาม ในช่วงเวลาที่สอดคล้องกับอายุของตัวอย่างหินที่ศึกษา โดยกำหนดจุดอ้างอิงใหม่ที่พิกัด 23°N/102°E ซึ่งเป็นช่วงรอยต่อของแผ่นเปลือกโลกทั้งสาม แล้วทำการคำนวณทิศทาง สนามแม่เหล็กโลกที่จุดอ้างอิง (expected magnetic field direction) แต่ละช่วงเวลาเทียบกับตำแหน่ง ขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาล ในตารางที่ 4.6 (รายละเอียดการคำนวณตามแสดงในภาคผนวก จ) จะได้

ข้อมูลตำแหน่งใหม่ ตามแสดงในตารางที่ 4.7 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างแบบจำลองธรณีแปรสัณฐาน ตามแสดงในรูปที่ 4.16

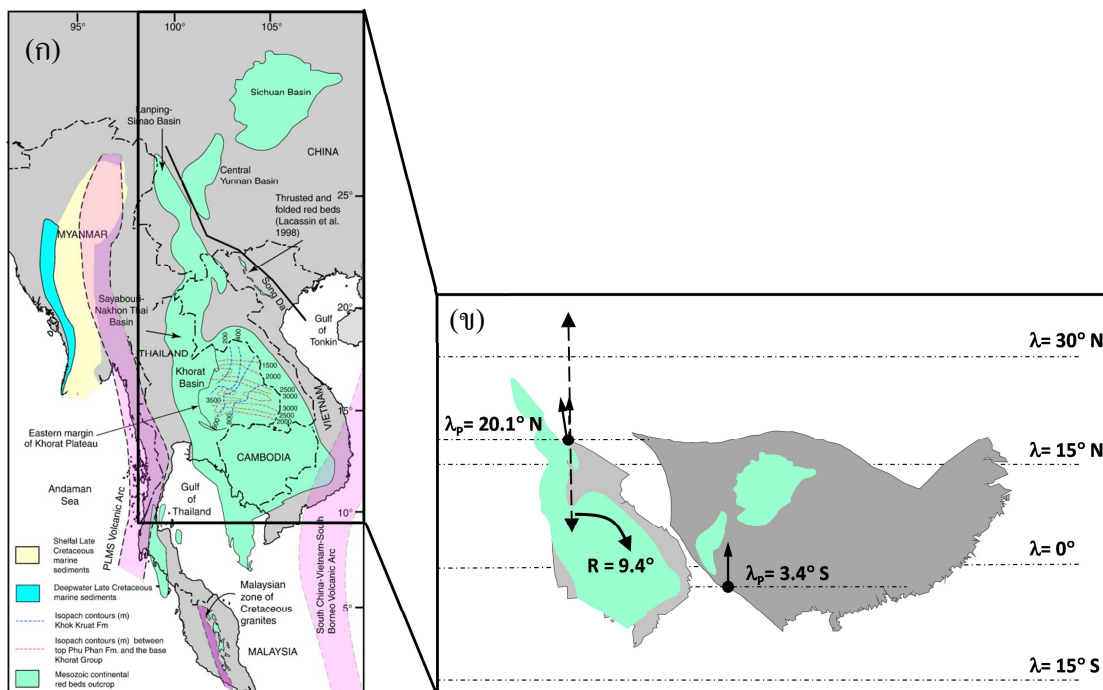
จากข้อมูลที่มีรายงานก่อนหน้านี้ เกี่ยวกับประวัติทางธรณีแปรสัณฐานของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Khin Zaw et al., 2014; Metcalfe, 2011) รายงานว่าแผ่นเปลือกโลกของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เคยอยู่ติดกับมหาทวีปกอนด์วานามาก่อน และเริ่มแยกออกเป็นแผ่นย่อยๆ จากมหาทวีปกอนด์วานา ในช่วงต้นของมหายุคพาลีโอโซอิก โดยเคลื่อนขึ้นมาทางทิศเหนือ และจากข้อมูลแม่เหล็กที่มีรายงานก่อนหน้านี้ (McElhinny and Lock, 1996; Li et al., 2004) แสดงให้เห็นว่าแผ่นเปลือกโลกซัน-ไทย และแผ่นเปลือกโลกจีนใต้ แยกจากกันอย่างชัดเจนในช่วงยุคเพอร์เมียน โดยมีตำแหน่ง  $\lambda_p$  อยู่ทางใต้เส้นศูนย์สูตร สำหรับข้อมูลแม่เหล็กบรรพกาลของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนในช่วงนี้เท่าที่สืบค้นยังไม่มีรายงานในช่วงที่ต่ำกว่ายุคเพอร์เมียน แต่ก็มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ได้สร้างแบบจำลองแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนช่วงต่ำกว่ายุคเพอร์เมียน ซึ่งตำแหน่งแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนอยู่ทางซีกโลกใต้ (Khin Zaw et al., 2014; Li et al., 2014; Metcalfe, 2011) ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบกับข้อมูลแม่เหล็กที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าแตกต่างกันพอสมควร เพราะช่วง CP ข้อมูลแม่เหล็กที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ ตำแหน่งแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน อยู่เหนือของเส้นศูนย์สูตร ( $\lambda_p$  (-/+)=22.2°N (44.0°N /8.1°N)) แต่ถ้าพิจารณาช่วงนี้ขั้วแม่เหล็กโลกเป็นลักษณะกลับขั้ว จะพบว่าแบบจำลองแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ค่อนข้างมีตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับรายงานที่ศึกษา ก่อนหน้านี้ และหมุนทำมุม  $61.2^\circ \pm 25.2^\circ$  ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเทียบกับแผ่นเปลือกโลกจีนใต้

ช่วง PTR ข้อมูลแม่เหล็กบรรพกาลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีตำแหน่งแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนอยู่ใกล้เคียงกับเส้นศูนย์สูตร ( $\lambda_p$  (-/+)=20.1°N (40.7°N /6.4°N)) และหมุนทำมุม  $9.4^\circ \pm 23.1^\circ$  ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเทียบกับแผ่นเปลือกโลกจีนใต้ ในยุคนี้จะเห็นว่าตำแหน่งของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนค่อนข้างสอดคล้องกับรายงานการศึกษาก่อนหน้านี้ (Khin Zaw et al., 2014; Li et al., 2014; Metcalfe, 2011) และเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งแอ่งตะกอนมหาสมุทรโซโซอิก จากข้อมูลที่รายงานโดย Morlay (2012) กับแบบจำลองแผ่นเปลือกโลกช่วง PTR ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่าพื้นที่ทางตอนใต้ของแอ่งโคราชบริเวณประเทศกัมพูชา และ ประเทศเวียดนาม ค่อนข้างอยู่ในแนวเดียวกับ แอ่งยูนนาน และแอ่งเสฉวน ตามแสดงในรูปที่ 4.17





รูปที่ 4.16 แบบจำลองกรณีเปลี่ยนฐาน ช่วง CP และ PTr ของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ฐาน-ไทย และจีนใต้ โดยอาศัยข้อมูลภาวะแม่เหล็ก  
 บรรพกาลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ ร่วมกับข้อมูลที่ยานมากกว่าก่อนหน้านี้ (\* $\lambda_p$  พิจารณาช่วงสนามแม่เหล็กโลกกลับขั้ว)



รูปที่ 4.17 (ก) ตำแหน่งแผ่นเปลือกโลกชาน-ไทย แผ่นเปลือกโลกอินโดจีน แผ่นเปลือกโลกจีนใต้ ปัจจุบัน และตำแหน่งแอ่งตะกอนต่างๆ (Morley, 2012) (ข) ตำแหน่งแอ่งตะกอนมหาสมุทรไซโซอิก (แอ่งโคราช แอ่งยูนนาน และแอ่งเสฉวน) เทียบกับแบบจำลองแผ่นเปลือกโลกยุค PT<sub>r</sub> (รูปที่ 4.16)

ตารางที่ 4.6 สรุปข้อมูลภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ชาน-ไทย และจีน  
ได้จากตัวอย่างที่ศึกษาครั้งนี้ และที่ได้รายงานการศึกษาก่อนหน้านี้

No.	Rock unit or Formation	RLAT (°N)	RLONG (°E)	Age	N/n	Dec (°)	Inc (°)	K	$\alpha_{95}$	PLAT (°N)	PLONG (°E)	A95 or DP/DM	Reference
<b>Indochina</b>													
1	Bolikhmxy	18.32	103.38	K <sub>u</sub>	16/171	19.7	37.4	23.5	7.5	69.9	181.5	3.9	Singsoupho (2014)
2	Suvannakhet	16.47	105.47	K <sub>u</sub>	12/147	25.6	38.0	103.5	4.3	63.3	180.0	4.9	Singsoupho (2014)
	<b>Mean K<sub>u</sub></b>				<b>2/-</b>	<b>22.6</b>	<b>37.7</b>	<b>593.1</b>	<b>10.3</b>	<b>66.6</b>	<b>180.7</b>	<b>14.5</b>	<b>-</b>
3	Phu Phan and Khok Khuat Fm.	-	-	K <sub>1</sub>	3/-	30.2	36.1	108.0	11.9	61.0	182.1	8.1	Bhongsuwan (2000)
4	Vientiane	18.12	102.44	K <sub>1</sub>	10/87	25.9	37.4	23.4	10.2	65.1	171.5	12.6	Singsoupho (2014)
5	Khammouane+Suvannakhet	16.65	105.43	K <sub>1</sub>	8/98	28.2	45.5	11.9	5.3	61.2	168.7	5.2	Singsoupho (2014)
6	Khorat Gp.	-	-	K <sub>1</sub>	10/-	32.0	38.2	170.8	4.1	59.4	177.4	4.5	Yang and Besse (1993)
7	Khorat Gp. (Earliest to Middle Cretaceous)	-	-	K <sub>1</sub> -K <sub>u</sub>	26/-	31.7	30.3	54.4	3.7	59.7	190.9	-	Charusiri et al. (2006)
	<b>Mean K<sub>1</sub></b>				<b>5/-</b>	<b>29.7</b>	<b>37.5</b>	<b>195.0</b>	<b>5.5</b>	<b>61.5</b>	<b>178.4</b>	<b>4.6</b>	<b>-</b>
8	Khorat Gp.	-	-	J <sub>u</sub>	10/-	26.6	37.3	339.2	2.6	64.8	178.1	2.3	Yang and Besse (1993)
9	Sao Khua Fm.	-	-	J <sub>u</sub>	5/-	30.4	45.1	59.1	10.0	59.9	173.7	10.5	Bhongsuwan (2000)
	<b>Mean J<sub>u</sub></b>				<b>2/-</b>	<b>28.4</b>	<b>41.2</b>	<b>190.5</b>	<b>18.2</b>	<b>62.4</b>	<b>175.7</b>	<b>11.6</b>	<b>-</b>
10	Phu Kradung Fm.	-	-	J <sub>m</sub>	5/-	30.6	31.0	60.8	9.5	60.7	182.8	10.6	Bhongsuwan (2000)
11	Pha Wihan Fm.	-	-	J <sub>m</sub>	11/-	30.3	27.6	97.5	4.6	60.7	187.4	4.0	Bhongsuwan (2000)
	<b>Mean J<sub>m</sub></b>				<b>2/-</b>	<b>30.4</b>	<b>29.3</b>	<b>1129.5</b>	<b>7.4</b>	<b>60.7</b>	<b>185.1</b>	<b>4.9</b>	<b>-</b>
12	Nam Pong Fm.	16.67	101.83	J <sub>1</sub>	13/-	38.1	41.8	77.5	4.7	53.6	173.3	4.9	Yang and Besse (1993)
13	Champasak	15.17	105.82	J <sub>1</sub>	8/92	35.2	38.9	259.8	3.2	56.0	178.6	2.9	Singsoupho (2014)
14	Nam Pong Fm.	-	-	J <sub>1</sub>	11/-	36.4	37.8	68.5	5.6	55.2	178.0	5.9	Yan and Huang (2015)
	<b>Mean J<sub>1</sub></b>				<b>3/-</b>	<b>36.5</b>	<b>39.5</b>	<b>1190.6</b>	<b>3.6</b>	<b>55.0</b>	<b>176.6</b>	<b>3.2</b>	<b>-</b>
15	Hau Hin Lat Fm.	16.67	101.83	Tr <sub>u</sub>	5/-	39.5	44.4	85.0	8.3	52.1	169.8	7.3	Yang and Besse (1993)
16	Hau Hin Lat Fm.	-	-	Tr <sub>u</sub>	13/-	43.0	48.0	47.4	6.1	48.7	165.9	7.2	Yan and Huang (2015)
17	Permian Limestone, Chum Phae	16.67	101.83	P <sub>u</sub>	8/-	33.0	39.4	75.4	6.0	58.4	176.2	4.3/7.2	Yang and Besse (1993)
	<b>Mean P<sub>u</sub>-Tr<sub>u</sub></b>				<b>3/-</b>	<b>38.3</b>	<b>44.0</b>	<b>204.3</b>	<b>8.6</b>	<b>53.1</b>	<b>170.2</b>	<b>8.8</b>	<b>-</b>
18	Site #L01, Granodiorite, Talei, Loei	17.57	101.43	PTr	1/12	75.9	33.5	32.7	7.7	18.4	177.4	5.0/8.8	This study
19	Site #L06, Granite, Lomsak, Petchabun	17.01	101.42	PTr	1/9	25.6	19.5	18.5	12.3	64.2	-156.2	6.7/12.8	This study
20	Site #PB4, Rhyolite, Chon Daen, Petchabun	16.17	100.82	PTr	1/11	27.1	11.2	27.6	8.8	61.5	-150.6	4.6/9.0	This study
21	Site #PB6, Andsite, Chon Daen, Petchabun	16.18	100.75	PTr	1/8	41.4	38.8	72.7	6.5	50.6	175.8	4.6/7.8	This study
	<b>Mean PTr</b>	<b>-</b>	<b>-</b>		<b>4/40</b>	<b>40.9</b>	<b>27.2</b>	<b>11.4</b>	<b>28.5</b>	<b>49.9</b>	<b>187.6</b>	<b>27.7</b>	<b>This study</b>
22	Site #BP3, Shale, Chon Daen, Petchabun	16.19	100.86	P	1/6	139.4	47.9	41.5	10.5	-30.2	142.1	11.9/17.7	This study
23	Site #PB5, Limestone, Chon Daen, Petchabun	16.12	100.84	P	1/8	113.8	31.9	23.34	11.7	-16.7	166.7	7.4/13.2	This study
24	Site #BP7, Granit, Chon Daen, Petchabun	16.18	100.75	C <sub>u</sub>	1/8	102	43.5	58.8	7.3	-3.5	163	6.6/10.7	This study
	<b>Mean CP</b>	<b>-</b>	<b>-</b>		<b>3/22</b>	<b>117.5</b>	<b>42.1</b>	<b>25.6</b>	<b>24.9</b>	<b>-17.1</b>	<b>157.9</b>	<b>28.3</b>	<b>This study</b>
	<b>Mean CP (Reverse)</b>					<b>-62.5</b>	<b>-42.1</b>						<b>This study</b>

**Note:** RLAT(Reference latitude), RLONG(Reference longitude), N/n(Number sites/Samples), Dec(Declination), Inc(Inclination), K(Precision limit),  $\alpha_{95}$ (Error of declination and inclination), PLAT(Pole latitude), PLONG(Pole longitude), A95 or DP/DM(Error of PLAT and PLONG), K<sub>u</sub>(Upper Cretaceous), K<sub>1</sub>(Lower Cretaceous), J<sub>u</sub>(Upper Jurassic), J<sub>m</sub>(middle Jurassic), J<sub>1</sub>(lower Jurassic), Tr<sub>u</sub>(Upper Triassic), Tr<sub>m</sub>(Middle Triassic), Tr<sub>l</sub>(Lower Triassic), P<sub>u</sub>(Upper Permian), P<sub>m</sub>(Middle Permian), P<sub>l</sub>(Lower Permian), PTr(Permo-Triassic), P(Permian), C<sub>u</sub>(Upper Carboniferous), D<sub>m</sub>(Middle Devonian), O<sub>u</sub>(upper Ordovician) and O<sub>l</sub>(Lower Ordovician)

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) สรุปข้อมูลภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ชาน-ไทย และจีนใต้ จากตัวอย่างที่ศึกษาครั้งนี้ และที่ได้รายงานการศึกษาก่อนหน้านี้

No.	Rock unit or Formation	RLAT (°N)	RLONG (°E)	Age	N/n	Dec (°)	Inc (°)	K	$\alpha_{95}$	PLAT (°N)	PLONG (°E)	A95 or DP/DM	Reference
<b>South China</b>													
25	-	-	-	K <sub>u</sub>	2/-	-	-	-	-	84	213	-	Gordon and Van Der Voo (1995)
26	-	-	-	K <sub>l</sub>	2/-	-	-	-	-	76	210	-	Gordon and Van Der Voo (1995)
27	-	-	-	J <sub>m</sub>	-	-	-	-	-	79.9	221.8	6.3	Yang and Basse (2001)
28	-	-	-	Tr <sub>u</sub>	1/-	-	-	-	-	45	224	-	Gordon and Van Der Voo (1995)
29	-	-	-	Tr <sub>u</sub>	-	-	-	-	-	52	187.3	-	Huang et al. (2008a)
30	-	-	-	Tr <sub>m</sub>	-	-	-	-	-	50.8	227.7	5.2	Su et al (2005)
31	-	-	-	Tr <sub>l</sub>	8/-	-	-	-	-	46	215	11	Gordon and Van Der Voo (1995)
32	-	-	-	P <sub>u</sub>	12/-	-	-	-	-	47	232	8	Gordon and Van Der Voo (1995)
33	-	-	-	P <sub>m</sub> -Tr <sub>l</sub>	-	-	-	-	-	42.7	215.9	3.3	Su et al (2005)
34	Feixianguan and Jialinjiang Formations	-	-	P/Tr	-	-	-	-	-	48.8	227.7	3.1	Yang and Basse (2001)
35	Feixianguan and Jialinjiang Formations	-	-	P <sub>m</sub>	-	-	-	-	-	52.7	246.4	9.1	Yang and Basse (2001)
36	South China sediments	-	-	P <sub>m</sub>	-	-	-	-	-	67.1	253.1	4.1	Zhu et al (1998)
37	-	-	-	P <sub>l</sub>	-	-	-	-	-	65.3	265.2	6.5	Lin and Fuller (1990)
38	-	-	-	C <sub>u</sub>	1/-	-	-	-	-	22	225	-	Gordon and Van Der Voo (1995)
39	-	-	-	D <sub>m</sub>	1/-	-	-	-	-	-9	190	-	Gordon and Van Der Voo (1995)
40	-	-	-	S <sub>u</sub>	1/-	-	-	-	-	5	195	-	Gordon and Van Der Voo (1995)
41	-	-	-	O <sub>lm</sub>	1/-	-	-	-	-	-39	236	-	Gordon and Van Der Voo (1995)
<b>Shan-Thai</b>													
42	Sandstone	7.6	100.4	K	1/16	259	8	127	3	86	296	2/3	Bhongsuwan (1993)
43	-	-	-	Tr <sub>u</sub> -J <sub>l</sub>	2/25	-	-	-	-	35	177	-	Bhongsuwan (1993)
44	-	10.44	99.25	P	2/11	58	53	13	13	32	156	12/18	Bhongsuwan (1993)
45	Oolitic hematite	12.33	99.84	P-C	1/24	82	55	36	5	14	156	5/7	Bhongsuwan (1993)
46	Limestone	6.4	99.8	O <sub>u</sub>	6/33	341	62	17	6	46	76	8/10	Haile (1980)
47	Limestone	6.97	99.77	O <sub>l</sub>	1/7	329	68	42	8	39	75	11/13	Bhongsuwan (1993)

**Note:** RLAT(Reference latitude), RLONG(Reference longitude), N/n(Number sites/Samples), Dec(Declination), Inc(Inclination), K(Precision limit),  $\alpha_{95}$ (Error of declination and inclination), PLAT(Pole latitude), PLONG(Pole longitude), A95 or DP/DM(Error of PLAT and PLONG), K<sub>u</sub>(Upper Cretaceous), K<sub>l</sub>(Lower Cretaceous), J<sub>u</sub>(Upper Jurassic), J<sub>m</sub>(middle Jurassic), J<sub>l</sub>(lower Jurassic), Tr<sub>u</sub>(Upper Triassic), Tr<sub>m</sub>(Middle Triassic), Tr<sub>l</sub>(Lower Triassic), P<sub>u</sub>(Upper Permian), P<sub>m</sub>(Middle Permian), P<sub>l</sub>(Lower Permian), PTr(Permo-Triassic), P(Permian), C<sub>u</sub>(Upper Carboniferous), D<sub>m</sub>(Middle Devonian), O<sub>u</sub>(upper Ordovician) and O<sub>l</sub>(Lower Ordovician)

ตารางที่ 4.7 มุมหมุน และตำแหน่งทิศทางสนามแม่เหล็กโลกของจุดอ้างอิง เทียบกับข้อมูล ขั้วแม่เหล็กโลกช่วงเวลาเดียวกับตัวอย่างที่ศึกษา (ตารางที่ 4.6) ของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน แผ่นเปลือกโลกชาน-ไทย เทียบกับแผ่นเปลือกโลกจีนใต้ ในยุคต่างๆ

Age	Site		PLAT(°N)/PLONG (°E) (A95)	Rot. (CC or CW)	expected magnetic field direction	
	Lat. (°N)	Lon. (°E)			D <sub>x</sub> /I <sub>x</sub> ( $\alpha_{95}$ )	$\lambda_p$ (+/-) °N
<b>Indochina</b>						
PTr	17	101	49.9/187.6(27.7)	9.4±23.2 (CW)	43.2/36.3 (23.5)	20.1 (40.7/6.4)
CP	16	101	-17.1/157.9(28.3)	61.2±25.2 (CW)	121.2/39.3 (23.4)	22.2 (44.0/8.1)
<b>Shan-Thai</b>						
P	10.44	99.25	32.0/156.0(12.0)	26.0±11.6 (CW)	66.9/60.7 (7.8)	41.8 (51.9/33.5)
CP	12.33	99.84	14.0/156.0(5.0)	23.8±4.9 (CW)	90.0/57.6 (3.4)	38.3 (42.1/34.8)
<b>South China</b>						
PTr	-	-	48.8/227.7(3.1)	-	32.4/-6.8 (3.1)	-3.4(-1.9/-5.0)
C <sub>u</sub>	-	-	22.0/225.0(-)	-	55.1/-33.9 (-)	-18.6 (-/-)

**Note:** PLAT/PLONG(Pole-Latitude/ Pole-Longitude), PTr(Permo-Triassic), CP(Carboniferous-Permian), C<sub>u</sub>(Upper Carboniferous), J<sub>l</sub>(Lower Jurassic), J<sub>m</sub>(Middle Jurassic), J<sub>u</sub>(Upper Jurassic), K<sub>l</sub>(Lower Cretaceous), K<sub>u</sub>(Upper Cretaceous), D<sub>x</sub>/I<sub>x</sub>(Declination/Inclination of expected magnetic field), A95 and  $\alpha_{95}$ (Confidence limit),  $\lambda_p$ (Palaeolatitute), Rot.(Rotation angle (degree)), CC(Counterclockwise rotation), CW(Clockwise rotation),

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

การศึกษาครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติแม่เหล็ก และภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของตัวอย่างหินจากพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์ และจังหวัดเลย ซึ่งอยู่ทางด้านขอบตะวันตกของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ตัวอย่างที่เก็บมาศึกษาครั้งนี้จะเน้นตัวอย่างหินภูเขาไฟยุคเพอร์โม-ไทรแอสซิก เป็นหลัก และตัวอย่างหินตะกอนยุคเพอร์เมียน ถึงยุคดีโวเนียน บางส่วน

จากผลทดสอบสมบัติทางแม่เหล็กของตัวอย่างหินแต่ละพื้นที่ มีค่า  $K_m$  และ NRM ระหว่าง 30 ถึง 27000  $\mu\text{SI}$  และ 0.5 ถึง 22000 mA/m ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง NRM และ  $K_m$  แสดงให้เห็นการกระจายตัวของค่า Q-value อยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 100 นอกจากนั้นผลวิเคราะห์ข้อมูลจากกราฟของเคย์ และผลวิเคราะห์ MDF แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ศึกษาครั้งนี้มีองค์ประกอบของเกรนแม่เหล็กหลากหลาย มีทั้งตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของเกรนชนิด PSD SP-SD และ MD ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมดบ่งชี้ว่าตัวอย่างที่เก็บมาศึกษาครั้งนี้ มีความหลากหลายของแร่แม่เหล็กที่เป็นองค์ประกอบของหิน และบางตัวอย่างจากพื้นที่เดียวกันยังแสดงผลของข้อมูลกระจายตัวสูง อาจจะเป็นผลมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของแร่แม่เหล็กที่กระจายในตัวอย่าง หรือจุดเก็บตัวอย่างอยู่ตรงบริเวณรอยต่อของแนวหินต่างชนิดกัน หรืออาจจะเกิดการแปรสภาพของแร่แม่เหล็กไปจากเดิม

ผลวิเคราะห์ AMS จากตัวอย่างหินทั้งหมด พบว่าตัวอย่างจากพื้นที่ตอนกลางของจังหวัดเลย (L03 L04 และ L05) ได้รับผลกระทบจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐานค่อนข้างสูง ( $P_j > 10\%$ ) และสูงกว่าตัวอย่างจากพื้นที่อื่นอย่างชัดเจน จากตัวอย่างหินตะกอนทั้งหมดมีเพียงตัวอย่างจากพื้นที่ PB3 เท่านั้นที่ได้รับผลกระทบจากกระบวนการธรณีแปรสัณฐานต่ำสุด สำหรับตัวอย่างกลุ่มหินอัคนีรูปทรง AMS มีให้เห็นทุกแบบ ค่า  $P_j$  ก็อยู่ในช่วงปกติของหินอัคนีทั่วไป (น้อยกว่า 10%) แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างหินยังคงรูปทรงของหินเดิมเอาไว้จนถึงปัจจุบัน เมื่อวิเคราะห์ทิศทางการไหลของหินเหลวในอดีต พบว่าบางพื้นที่ให้ผลที่สอดคล้องกับพื้นที่เก็บตัวอย่างจริง (เช่น PB2 PB7) แต่บางพื้นที่ข้อมูลค่อนข้างกระจาย และไม่สามารถวิเคราะห์ทิศทางได้ (PC01)

องค์ประกอบทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างของตัวอย่างหิน หลังจากลบล้างด้วยสนามแม่เหล็กสลับ มีทั้งองค์ประกอบเดียว และหลายองค์ประกอบ ผสมกันอยู่ บางตัวอย่างมีข้อมูล

ซ้อนทับกันของแต่ละองค์ประกอบ ส่งผลให้ไม่สามารถแยกแต่ละองค์ประกอบออกจากกันได้ จึงทำให้ข้อมูลทิศทาง ChRM เฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง มีค่าความผิดพลาดสูง (MAD มีค่าสูง) ส่วนใหญ่พบในตัวอย่างที่มีค่า MDF ต่ำกว่า 10 mT (หรือ  $H_c < 10$  mT) ดังนั้นตัวอย่างในกลุ่มนี้จึงไม่นำมาพิจารณาในขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล เพราะมีค่าเสถียรภาพของแมกนีไทเซชันตกค้างต่ำ

จากตัวอย่างหินทั้งหมดสามารถจัดกลุ่มได้สี่กลุ่ม (ตาราง 4.5) โดยมีเพียงสองกลุ่มเท่านั้น ที่เหมาะสมสำหรับนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านแม่เหล็กบรรพกาล ส่วนที่เหลืออีกสองกลุ่มไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากข้อมูลทิศทางเฉลี่ยกระจายตัวสูง ( $\alpha_{95}$  สูง) ตัวอย่างกลุ่มแรกเป็นตัวอย่างหินที่มีอายุช่วงยุคเพอร์เมียน-ไทรแอสซิก (PTr) เป็นหินอัคนีทั้งหมด มีทิศทางเฉลี่ยของ Dec/Inc( $\alpha_{95}$ ) เท่ากับ  $40.9^\circ/27.2^\circ(28.5^\circ)$  และมีค่า PLAT/PLONG (A95) เท่ากับ  $49.9^\circ\text{N}/187.6^\circ\text{E}(27.7^\circ)$  ก่อนข้างสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang and Besse (1993) ซึ่งรายงานข้อมูลทางด้านแม่เหล็กบรรพกาลของตัวอย่างหินปูนจากประเทศไทยที่มีอายุช่วงยุคเพอร์เมียนตอนปลาย โดยมีค่า Dec/Inc( $\alpha_{95}$ ) เท่ากับ  $33.0^\circ/39.4^\circ(6.0^\circ)$  และ PLAT/PLONG (A95) เท่ากับ  $58.4^\circ\text{N}/176.2^\circ\text{E}(4.3^\circ/7.2^\circ)$  และ Yan and Huang (2015) ซึ่งทำการศึกษาภาวะแม่เหล็กบรรพกาลจาก หมวดหินห้วยหินลาด ที่มีอายุอยู่ในช่วงไทรแอสซิกตอนปลาย โดยมีค่า Dec/Inc( $\alpha_{95}$ ) เท่ากับ  $43.0^\circ/48.0^\circ(6.1^\circ)$  และ PLAT/PLONG (A95) เท่ากับ  $48.7^\circ\text{N}/165.9^\circ\text{E}(7.2^\circ)$  จากตัวอย่างกลุ่มนี้เมื่อนำมาคำนวณตำแหน่งละติจูดโบราณ ( $\lambda_p$ ) พบว่าแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (บริเวณพื้นที่ศึกษา) อยู่ตรงตำแหน่ง  $\lambda_p(+/-)$  เท่ากับ  $14.4^\circ\text{N}$  ( $36.2^\circ\text{N}/0.7^\circ\text{S}$ ) และหมุนทำมุม  $9.4^\circ \pm 23.2^\circ$  ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเมื่อเทียบกับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนใต้ ในช่วงยุคเพอร์เมียน-ไทรแอสซิก

ส่วนตัวอย่างกลุ่มที่สองเป็นหินตะกอนช่วงยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน (CP) มีทิศทางเฉลี่ยของ Dec/Inc( $\alpha_{95}$ ) เท่ากับ  $117.5^\circ/42.1^\circ(24.9^\circ)$  และมีค่า PLAT/PLONG (A95) เท่ากับ  $17.1^\circ\text{S}/157.9^\circ\text{E}(28.3^\circ)$  สำหรับประเทศไทยยังไม่มีรายงานข้อมูลแม่เหล็กบรรพกาลจากตัวอย่างหินที่มีอายุช่วง CP มาก่อน สำหรับพื้นที่แผ่นเปลือกโลกอินโดจีน และเมื่อนำมาคำนวณตำแหน่งละติจูดโบราณ ( $\lambda_p$ ) พบว่าแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน (บริเวณพื้นที่ศึกษา) อยู่ตรงตำแหน่ง  $\lambda_p(+/-)$  เท่ากับ  $24.3^\circ\text{N}$  ( $49.7^\circ\text{N}/8.8^\circ\text{N}$ ) และหมุนทำมุม  $61.2^\circ \pm 25.2^\circ$  ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเมื่อเทียบกับแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนใต้ ในช่วงยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

บริเวณพื้นที่จังหวัดเลยและจังหวัดเพชรบูรณ์ ก่อนข้างนำเสนอสำหรับศึกษาสมบัติแม่เหล็ก และภาวะแม่เหล็กบรรพกาล จากตัวอย่างหิน เพราะสามารถพบเห็นหินโผล่ที่มีอายุตั้งแต่ช่วงยุคดีโวเนียน ถึงปัจจุบัน ทั้งที่เป็นหินอัคนี หินแปร และหินตะกอน แต่จากความซับซ้อนทางธรณีวิทยาของพื้นที่ ส่งผลให้สมบัติแม่เหล็กของตัวอย่างหินที่เก็บมามีความซับซ้อนพอสมควร สังเกตได้จากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสมบัติแม่เหล็ก (เช่น  $K_m$  NRM Q-value ขนาดของเกรน) ของหินมีการกระจายตัวสูง และในบางพื้นที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนจากตัวอย่างที่เก็บมาจากพื้นที่ศึกษาเดียวกัน ดังนั้น ในการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของหินและภาวะแม่เหล็กบรรพกาลของตัวอย่างหินจากพื้นที่นี้ในอนาคต จึงควรมีข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบเชิงเคมีของหินเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนมากขึ้น เกี่ยวกับองค์ประกอบของหิน รวมทั้งการศึกษาชนิดของแร่แม่เหล็กที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง

นอกจากนั้นข้อมูลทางด้านแม่เหล็กบรรพกาลจากตัวอย่างหินที่เก็บมาบางพื้นที่มีข้อมูลกระจายตัวสูงมาก จนไม่สามารถวิเคราะห์หาทิศทางเฉลี่ยของ ChRM ได้ เพราะ มีค่า MAD ก่อนข้างสูง ( $MAD > 20^\circ$ ) จำเป็นต้องตัดข้อมูลทิ้ง ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายจะส่งผลให้จำนวนข้อมูลที่นำมาหาทิศทางเฉลี่ยมีน้อยเกินไปในแต่ละจุดเก็บตัวอย่าง ทำให้มีค่าความผิดพลาดของข้อมูล ( $\alpha_{95}$  A95 หรือ  $dp/dm$ ) สูง ดังนั้น ในอนาคตการศึกษาทางด้านแม่เหล็กบรรพกาลจากตัวอย่างหินจากพื้นที่นี้ จึงจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนตัวอย่างที่ทำการเก็บให้มากขึ้น

## บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี (2552). *การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณีจังหวัดเพชรบูรณ์*. จันทวนิชย์ ซีเคียวริตี้ พรินท์ติ้ง, กรุงเทพฯ, 126.
- กรมทรัพยากรธรณี (2552). *การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณีจังหวัดเลย*. จันทวนิชย์ ซีเคียวริตี้ พรินท์ติ้ง, กรุงเทพฯ, 107.
- กรมทรัพยากรธรณี (2550). *ธรณีวิทยาประเทศไทย*. โรงพิมพ์ดอกเบี๋ย, กรุงเทพฯ, 628.
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. “ระบบฐานข้อมูลใบอนุญาตอาชีพบัตร” <[http://www.dpim.go.th/webservices/lpm\\_report.php](http://www.dpim.go.th/webservices/lpm_report.php)> (พฤษภาคม 1, 2016)
- กรมทรัพยากรธรณี (2537). *ผลการสำรวจธรณีวิทยาแหล่งแร่พื้นที่บ้านคงขุย อ.ชนแดน จ.เพชรบูรณ์*, กรุงเทพฯ, 14.
- ธงชัย พึ่งรัมย์, วชิราภรณ์ ปิสิตโร, สุกิจ อติพันธ์ และ ภาณุพงษ์ ลิมอุสัน โน, (2558). *รายงานวิชาการ ชุดแร่วิทยา เล่ม 3 แร่เฟลด์สปาร์*. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 196.
- ธงชัย พึ่งรัมย์, สุกิจ อติพันธ์, ภาณุพงษ์ ลิมอุสัน โน, วชิราภรณ์ ปิสิตโร, ทรงพล พรหมอุทัย และ อภิญา ศุกลรัตน์, (2558). *รายงานวิชาการ ชุดแร่วิทยา เล่ม 4 แร่ดิน*. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 237 หน้า.
- Barr, S.M., and MacDonald, A.S. (1979). “Paleomagnetism, age, and geochemistry of the Denchai basalt, northern Thailand”, *Earth and Planetary Science Letters*, 46, 113-124.
- Borradaile, G.J., and Henry, B. (1997). “Tectonic application of magnetic susceptibility and its anisotropy.” *Earth-Science Reviews*, 42, 49-93.
- Bhongsuwan, T. (2000). *Research in Rock Magnetism and Palaeomagnetism of Recent Sediments and Paleozoic to Tertiary Rocks.*, Ph.D. thesis, Division of Applied Geophysics, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.



- Bhongsuwan, T. (1993). *Palaeomagnetic Investigations in Thailand.*, Lincititate thesis, Division of Applied Geophysics, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- Bunopas, S., and Vella, P. (1978). "Late Palaeozoic and Mesozoic structural evolution of northern Thailand: A plate tectonic model." *Proceeding of 3rd Regional conference on Geology and Mineral Resources of Southeast Asia*, Asian Institute of Technology, Bangkok, 122-140.
- Bunopas, S. (1981). *Paleogeographic history of western Thailand and adjacent parts of Southeast Asia: a plate tectonic interpretation.*, Ph.D. thesis, Victoria University of Wellington, New Zealand, Reprinted as Geology. Surv.5, DMR, Bangkok, 810 p.
- Butler, R.F. (1992). *Paleomagnetism.* Boston. Blackwell Scientific Publications, 319.
- Chadima, M., and Jelinek, V. (2009). Anisoft 4.2: Anisotropy Data Browser for Windows. Agico, Inc.
- Chadima, M., and Hrouda, F., (2009). Remasoft 3.0: Paleomagnetic Data Browser and Analyzer. Agico, Inc.
- Chandrasekaran, A., Rajalakahmi, A., Ravisankar, R., and Kalarasai, S. (2015). "Analysis of Beach Rock Samples of Andaman Island, India by Spectroscopic Techniques." *Egyptian Journal of Basic and Applied Science*, 2, 55-64.
- Charusiri, P., Clark, A.H., Farrar, E., Archibald, D., and 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 Science*, 8, 127-136.
- Charusiri, P., Daorerk, V., Archibald, D., Hisada, K., and Ampaiwan, T. (2002). "Geotectonic Evolution of Thailand: A New Synthesis." *Journal of the Geological Society of Thailand*, 1, 1-20.
- Charusiri, P., Imsamut, S., Zhuang, Z., Ampaiwan, T., and Xu, X. (2006). "Paleomagnetic of the earliest Cretaceous to early late Cretaceous Sandstones, Khorat Group, Northeast

- Thailand: Implications for tectonic plate movement of the Indochina block.” *Journal of Gondwana Research*, 9, 301-325.
- Clark, D.A. (1997). “Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys.” *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17, 83-103.
- Collinson, D.W. (1983). *Methods in Rocks Magnetism and Palaeomagnetism: Techniques and Instrumentation*. Chapman and Hall, New York. 503.
- Day, R., Fuller, M., and Schmidt, V. A. (1977). “Hysteresis Properties of Titanomagnetites: Grain-Size and Composition Dependence.” *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13, 260-267.
- Department of Mineral Resources (DMR) (2009). Geological Map of Loei, 1:250000, Geological Survey Division, Bangkok, Thailand.
- Department of Mineral Resources (DMR) (2009). Geological Map of Phetchabun, 1:250000, Geological Survey Division, Bangkok, Thailand.
- Dunlop, D.J., and Özdemir, O. (1977). *Rock Magnetism Fundamentals and frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press. 573.
- Dunlop, D.J. (1995). “Magnetism in rocks.” *Journal of Geophysical Research*, 100, 2161-2174.
- Dunlop, D.J. (2002). “Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc).” *Journal of Geophysical Research*, 107, 1-19.
- Evans, M.E., and Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism. California*. Academic Press. 293.
- Fowler, C.M.R. (2005). *The Solid Earth An introduction to Global Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge. 685.
- Fujiwara, K.P., Zaman, H., Surinkum, A., Chaiwong, N., Fujihara, M., Ahn, H., and Otofujii, Y. (2014). “New insights into regional tectonics of the Indochina Peninsula inferred from

- Lower-Middle Jurassic paleomagnetic data of the Subumasu Terrane.” *Journal of Asian Earth Sciences*, 94, 126-138.
- Gordon, R.G., and Van der Voo, R. (1995). “Mean Paleomagnetic Poles for the Major Continents and the Pacific Plate.” *The American Geophysical Union*, 225-239.
- Gubbins D., and Herrero-Bervera E., 2007. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer, 1054.
- Haile, N.S., and Tarling, D.H. (1975). “Note on reconnaissance palaeomagnetic measurements on Jurassic redbeds from Thailand”. *Pacific Geology*, 10, 101-103.
- Haile, N.S. (1980). “Palaeomagnetic evidence from the Ordovician and Silurian of northwest Peninsular Malaysia.” *Earth Planet. Sci. Letters*, 48, 233-236.
- Huang, B.C., Zhou, Y.X., and Zhu, R.X. (2008a). “Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies.” *Earth Science Frontiers*, 15, 348–359.
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M., and Banerjee, S. (1995). “Magnetic Properties of Rocks and Minerals.” *The American Geophysical Union*, 189-204.
- Hutchinson, C. S. (1989), “Geologic evolution of Southeast Asia”, *Oxford Monographs on Geology and Geophysics*, 13, 368.
- Intasopa, S., and Dunn, T. (1994). “Petrology and Sr-Nd isotropic systems of the basalts and rhyolites, Loei, Thailand.” *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 9, 167-180.
- Kamvong, T., Charusiri, P., and Intasopa, S.B. (2006). “Petrochemical Characteristics of Igneous Rocks from the Wang Pong Area, Petchabun, North Central Thailand: Implications for Tectonic Setting.” *Journal of the Geological Society of Thailand*, 1, 9-26.
- Khin, Zaw, Meffre, S., Lai, C., Burrett, C., Santosh, M., Graham, I., Manaka, T., Salam, A., Kamvong, T., and Cromie P. (2014). “Tectonics and metallogeny of mainland Southeast Asia – A review.” *Gondwana Research*, 26, 5-30.

- Kirschvink, J.L. (1980). "The least squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data." *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 62, 699-718.
- Kromkhun, K., Baines, G., Satarugsa, P., and Foden, J. (2013). "Petrochemistry of Volcanic and Plutonic Rocks in Loei Province, Loei-Petchabun Fold Belt", Thailand, 2nd International Conference on Geological and Environmental Science IPCBEE, Thailand, 55-59.
- Leonhardt, R. (2006). "Analyzing rock magnetic measurements: The RockMagAnalyzer 1.0 software." *Computer & Geosciences*, 32, 1420-1431.
- Li P., Rui G., Junwen, C., and Ye, G. "2004. Paleomagnetic analysis of eastern Tibet: implications for the collisional and amalgamation history of the Three Rivers Region, SW China." *Journal of Asian Earth Sciences*, 24, 291-310.
- Lin, J.L., and Fuller, M. (1990). "Palaeomagnetism, North China and South China Collision, and the Tan-Lu Fault." *Philos. Trans. Roy. Soc.*, A331, 589-598.
- Maranate, S., and Vella, P. (1986). "Paleomagnetism of the Khorat Group, Mesozoic, northeast Thailand." *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 1, 23-31.
- McElhinny, M.W. and Lock (2005). "The IAGA Global Paleomagnetic Database" <<http://www.ngu.no/geodynamics/gpmbd/>> (Dec. 1, 2014)
- McElhinny, M.W., and McFadden P.L. (2000). *Paleomagnetism Continents and Oceans*. Academic Press, New York, 386.
- Metcalfe, I. (2011). "Paleozoic – Mesozoic history of SE Asia." *The Geological Society of London*, 7-35.
- Metcalfe, I. (2013). "Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys." *Journal of Asian Earth Science*, 66, 1-33.
- Morley, C.K. (2012). "Late Cretaceous–Early Palaeogene tectonic development of SE Asia." *Journal of Asian Earth Science*, 115, 37-75.

- Ogg, J.G., Ogg, G., and Gradstein, F.M. (2008). *The concise Geologic Time Scale*. Cambridge University Press, New York, 177.
- Ojima, J. (2003). "Determining of Crystalline Silica in Respirable Dust Samples by Infrared Spectrophotometry in the Presence of Interferences." *Journal of Occupational Health*, 45, 94-103.
- O'Reilly, W. (1984). *Rocks and Minerals Magnetism*. Chapman and Hall, Glasgow, 220.
- Pares, J. M. (2015). "Sixty years of anisotropy of magnetic susceptibility in deformed sedimentary rocks." *Frontiers in Earth Science*, 3(4), 1-13.
- Petronis, M.S., O'Driscoll, B., Troll, V.R., Emeleus, C.H., and Geissman, J.W. (2008). "Palaeomagnetic and anisotropy of magnetic susceptibility data bearing on the emplacement of the Western Granite, Isle of Rum, NW Scotland." *Journal of Geol. Mag.*, 1-8.
- Qian, X., Feng, Q., Wang, Y., Yang, W., Chonglakmani C, and Monjai, D. (2016). "Petrochemistry and Tectonic Setting of the Middle Triassic Arc-Like Volcanic Rocks in the Sayabouli Area, NW Laos." *Journal of Earth Science*, 27, 365-377.
- Richter, B., and Fuller M. (1996). "Palaeomagnetic of the Sibumasu and Indochina blocks: implication for the extrusion tectonic model." *Tectonic Evolution of Southeast Asia*, 106, 203-224.
- Ridd, M.F., Barber, A.J., and Crow, M.J. (2011). *The Geology of Thailand*. London. The Geology Society, London, 626.
- Robion, P., Grelaud, S., and Lamotte, D.F. (2007). "Pre-folding magnetic fabrics in fold-and-thrust belts: Why the apparent internal deformation of the sedimentary rocks from the Minervois basin (NE-Pyrenees, France) is so high compared to the Powar basin (SW-Himalaya, Pakistan)?"", *Journal of Sedimentary Geology*, 181, 181-200.

- Rochette, P., Jackson, M., and Aubourg, C. (1992). "Rock Magnetism and the Interpretation of Anisotropy of Magnetic Susceptibility." *The American Geophysical Union*, 30, 209-226.
- Salam, A., Khin, Zaw, Meffre, S., McPhil, J., and Lai, C. (2014). "Geochemistry and geochronology of the Chatree epithermal gold-silver deposit: Implication for the tectonic setting of the Loei Fold Belt, central, Thailand." *Journal of Gondwana Research*, 26, 198-217.
- Singsoupho, S. (2014). *Rock Magnetic and Palaeomagnetic Studies of Mesozoic to Tertiary Rocks in the Lao PDR.*, Ph.D. thesis, Division of Applied Geophysics, Prince of Songkla University, Thailand, 174.
- Su, L., Yang, Z.Y., Sun, Z.M., Yang, T.S., Zaman, H., Takemoto, K., and Otofujii, Y. (2005). "Regional deformational features of the South China Block inferred from Middle Triassic palaeomagnetic data." *Geophys. J. Int.*, 162, 339–356.
- Tarling, D.H., and Hrouda, F. (1993). *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman and Hall, London, 217.
- Tauxe L. (2003). *Paleomagnetic Principles and Practice*. Kluwer Academic Publishers, New York, 285.
- Thompson, R., and Oldfield, F. (1989). *Environmental Magnetism*. Allen & Unwin, London, 227.
- Torsvik, T.H., and Cocks, L.R.M. (2004). "Earth geography from 400 to 250 Ma: a palaeomagnetic, faunal and facies review." *Journal of the Geological Society*, 161, 555-572.
- Torsvik, T.H., and Cocks, L.R.M. (2002). "Earth geography from 500 to 400 million years ago: a faunal and palaeomagnetic review." *Journal of the Geological Society*, 159, 631-644.
- Tsuchiyama, Y., Zaman, H., Sotham, S., Samuth, Y., Sato, E., Ahn, H., Uno, K., Tsumura, K., Miki, M., and Otofujii, Y. (2016). "Paleomagnetism of Late Jurassic to Early Cretaceous

red beds from the Cardamom Mountains, southwestern Cambodia: Tectonic deformation of the Indochina Peninsula.” *Earth and Planetary Letters*, 434, 274-288.

Vaculikova, L., and Plevova, E. (2005). “Identification of Clay Minerals and Micas in Sedimentary Rocks.” *Journal of Acta Geodyn Geomater*, 2 (138), 167-175.

World Data Center for Geomagnetism Kyoto. “International Geomagnetic Reference Field (IGRF-12)” < <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html> > (Dec. 1, 2014)

Yan, Y., and Huang, B. (2015) “New paleomagnetic results from the Permian and Mesozoic rocks in central and northeast Thailand: their implications for the construction of the Indochina block in Pangea.” *AGU FALL MEETING 14-18 December 2015*, San Francisco, GP31A-1372.

Yang, Z., and Besse, J. (2001). “New Mesozoic apparent polar wander path for south China: tectonic consequences.” *Journal of Geophysics Research*, 106, 8493-8520.

Yang, Z., and Besse, J. (1993). “Paleomagnetic study of Permian and Mesozoic sedimentary rocks from Northern Thailand supports the extrusion model for Indochina.” *Earth Planet. Sci. Lett.*, 117, 525-552.

Yang Z.Y., Besse J., Sutheetorn, V., Bassoullet, J.P., Fontaine, H., and Buffetaut, E. (1995). “Lower-Middle Jurassic paleomagnetic data from the Mae Sot area (Thailand) : Paleogeographic evolution and deformation history of Southeastern Asia.” *Journal of Earth and Planetary Science Lettes*, 136, 325-341.

Zhu, R., Yang, Z., Wu, H., Ma, X., Huang, B., Meng, Z., and Fang, D. (1998). “Paleomagnetic constraints on the tectonic history of the major blocks of China during the Phanerozoic.” *Science in China (ser.D)*, 41, 1-19.

Zijderveld, J.D.A. (1967). *A.C. demagnetization of rocks: In Methods in Palaeomagnetism (D.W.CoUinson, K.M. Creer and S.K. Runcorn, Eds.)*, Elsevier, New York, 256-286.

Zhao, J., Huang, B., Yan, Y., and Zhang, D. (2015). "Late Triassic paleomagnetic result from the Baoshan Terrane, West Yunnan of China: Implication for orientation of the East Paleotethys suture zone and timing of the Sibumasu-Indochina collision." *Journal of Asian Earth science*, 111, 350-364.



ภาคผนวก





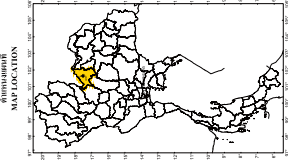
กรมทรัพยากรธรณี ประเทศไทย  
DEPARTMENT OF MINERAL RESOURCES, THAILAND  
ADISAK THONGKAMOOK, DIRECTOR GENERAL

แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัด  
GEOLOGICAL MAP OF CHANGWAT LOEI

ขนาดพื้นที่ 1:250,000  
Scale 1:250,000

2552

จัดทำโดย กรมทรัพยากรธรณีประเทศไทย  
Compiled by Geological Survey and Mineral Resources, Thailand  
กรมทรัพยากรธรณีประเทศไทย กรมทรัพยากรธรณี  
Department of Mineral Resources, Thailand



คำอธิบาย  
EXPLANATION

Table with 4 columns: Formation Group, Period, Age (m.y.), and Description. It lists geological units such as Quaternary, Cretaceous, Paleogene, and Tertiary, along with their corresponding geological periods and ages.

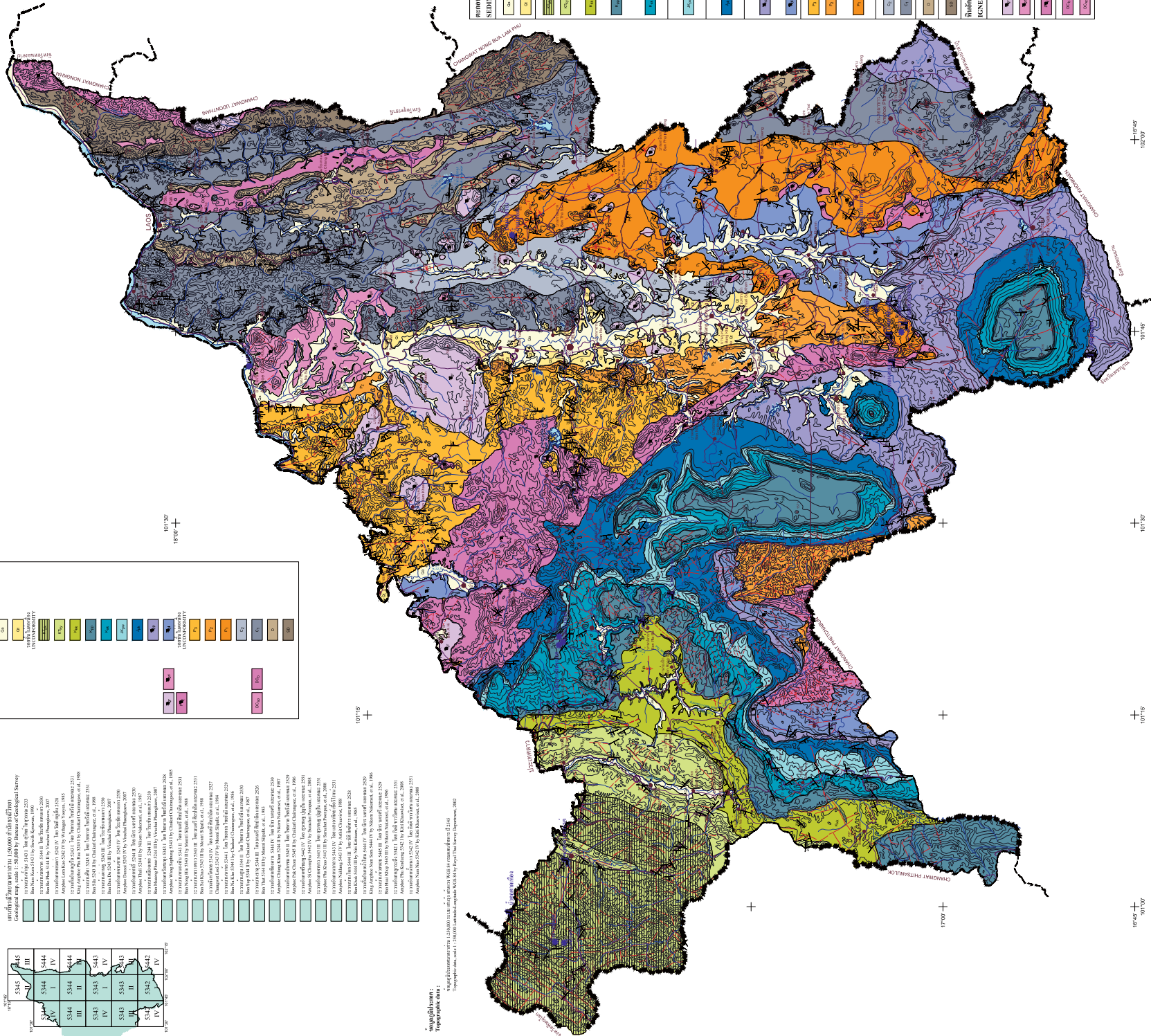
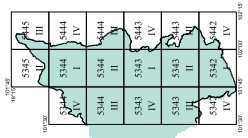
Table of Symbols. It lists various symbols used on the map, such as roads, rivers, and administrative boundaries, with their corresponding symbols and names in Thai and English.

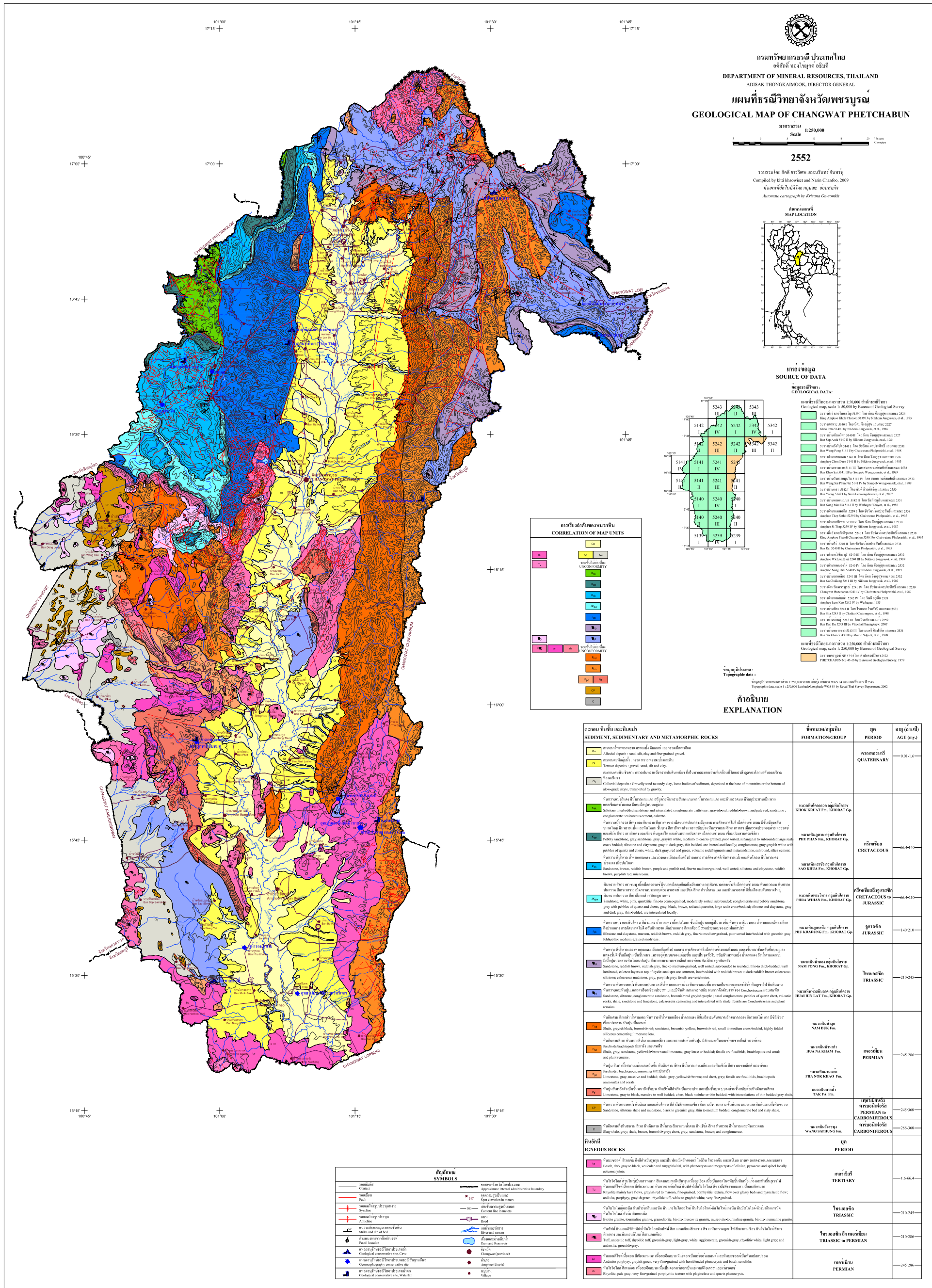
Table of Correlation of Map Units. It shows the correlation between different geological map units, listing their names and corresponding symbols.

แหล่งข้อมูล  
SOURCE OF DATA

ข้อมูลธรณีวิทยา  
GEOLOGICAL DATA

- List of sources of geological data, including references to various geological surveys and maps, such as 'Geological map, scale 1:50,000 by Bureau of Geological Survey' and 'Geological map, scale 1:250,000 by Geological Survey of Thailand'.



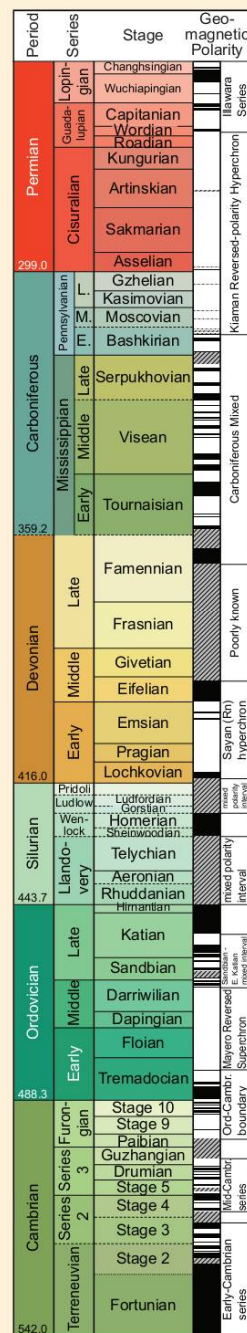
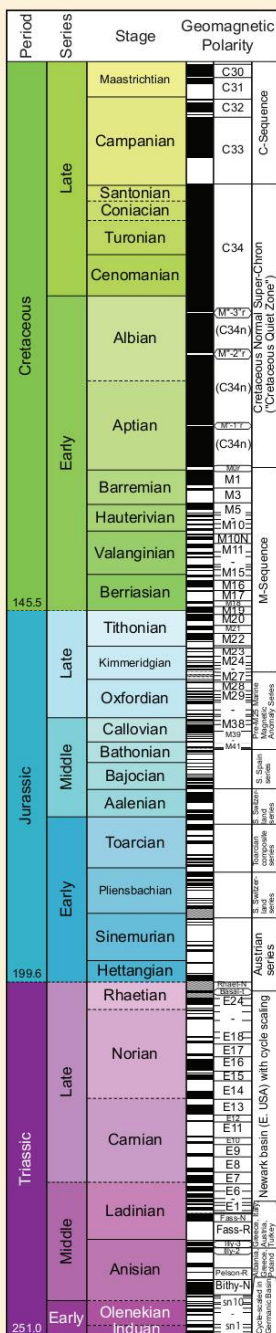
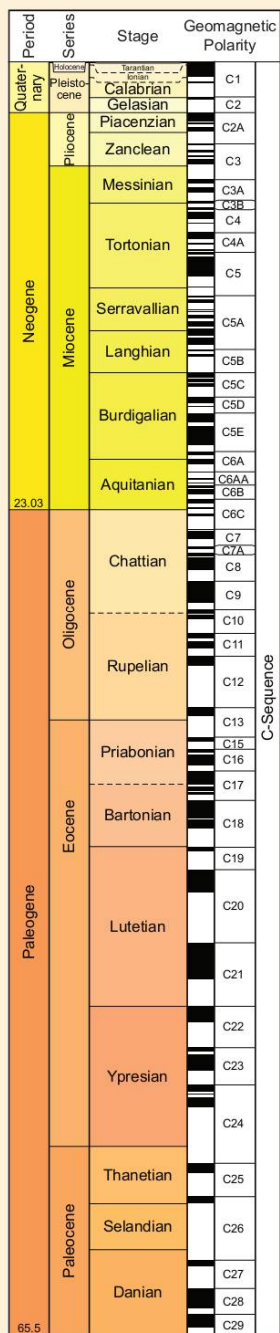


ภาคผนวก ง

แผนภาพธรณีกาล

# Geomagnetic Polarity Time Scale

modified from Concise Geologic Time Scale (Ogg et al., 2008)

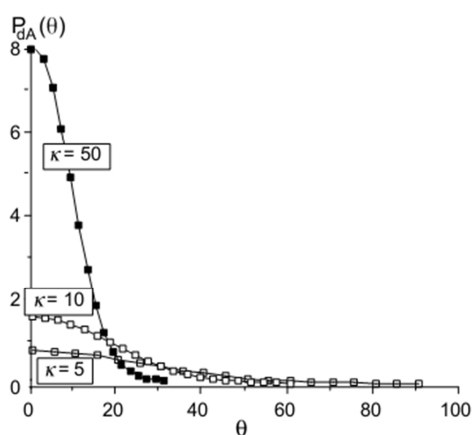


## ภาคผนวก จ

### การคำนวณทางด้านแม่เหล็กบรรพกาล

#### จ.1 การคำนวณทางสถิติของฟิชเชอร์ (Fisher Statistic)

สถิติที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ และคำนวณทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้างเฉลี่ย พัฒนาโดย R. A. Fisher (1953) เรียกว่า การแจกแจงตัวของฟิชเชอร์ (Fisher distribution) โดยพิจารณาข้อมูลทิศทางแมกนีไทเซชันตกค้าง (Inc และ Dec) ที่ได้จากตัวอย่างหินแต่ละตัวอย่างของพื้นที่ศึกษาหนึ่งๆ และกำหนดให้ข้อมูลการกระจายตัวอยู่บนผิวทรงกลม โดยมีฟังก์ชันความน่าจะเป็นต่อเนื่อง (probability density function) แทนการแจกแจงตัวของข้อมูลทั้งหมดตามสมการที่ (จ.1) และรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลที่เงื่อนไขของตัวแปรต่างๆ ตามแสดงในรูปที่ (จ.1)



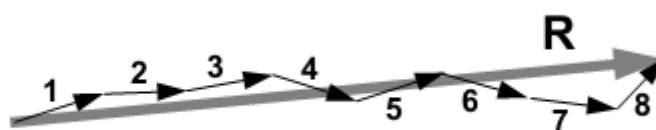
รูปที่ จ.1 กราฟแจกแจงการแจกแจงของฟิชเชอร์  $P_{dA}(\theta)$  บนผิวทรงกลม  $dA$  ตามสมการที่ จ.1 พิจารณาที่  $K$  ค่าต่างๆ (Butler, 1992)

$$P_{dA}(\theta) = \frac{K}{4\pi \sinh(K)} \exp(K \cos \theta) \quad (\text{จ.1})$$

เมื่อ  $\theta$  คือ มุมจากจุดเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด และ  $K$  เป็นความเที่ยงตรงของข้อมูล หรือ precision parameter ส่วน  $P_{dA}(\theta)$  คือ ความน่าจะเป็นการแจกแจงข้อมูลบนพื้นที่ผิวทรงกลม  $dA$  ที่พิจารณาที่มุม  $\theta$  จากจุดเฉลี่ยของข้อมูล

ในกรณี  $K$  มีค่าเท่ากับ 0 นั้นหมายความว่าข้อมูลที่วัดได้ มีค่าแจกแจงสม่ำเสมอบนพื้นที่ผิวทรงกลม และถ้า  $K$  ที่ค่าเข้าสู่  $\infty$  แสดงว่าค่าของข้อมูลที่นำพิจารณาทั้งหมด มีค่าอยู่ตรงจุดของค่าเฉลี่ย (ข้อมูลทั้งหมดกระจายตัวอยู่บนจุดเดียวกัน)

ในการศึกษาข้อมูลของแมกนีไทเซชันค้างในหิน จะมีสามองค์ประกอบ คือ องค์ประกอบของทิศทางสนามแม่เหล็กทิศเหนือ (north component -  $l$ ) ทิศตะวันออก (east component -  $m$ ) และในแนวตั้ง (down component -  $n$ ) ซึ่งทิศทางเฉลี่ยของแต่ละองค์ประกอบจากจำนวนข้อมูล  $N$  คำนวณได้ตามสมการที่ (จ.2) ถึง (จ.4) และสามารถคำนวณเวกเตอร์  $R$  ได้ตามสมการที่ (จ.5) ซึ่งเป็นผลบวกของแต่ละองค์ประกอบข้างต้น และมีค่าเบี่ยงเบนของค่าที่คำนวณได้ เรียกว่า “maximum angular deviation – MAD”



รูปที่ จ.2 ทิศทางเฉลี่ยเวกเตอร์  $R$  ที่ได้จากการคำนวณของเวกเตอร์ย่อย (Butler, 1992)

$$l = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{R} \quad (จ.2)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{R} \quad (จ.3)$$

$$n = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{R} \quad (จ.4)$$

$$R^2 = \left( \sum_{i=1}^N l_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N m_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^N n_i \right)^2 \quad (จ.5)$$

ทิศทางมุมบ่ายเบนเฉลี่ย (declination -  $D_m$ ) และทิศทางมุมเอียงเท (Inclination -  $I_m$ ) เฉลี่ย คำนวณได้จากสมการที่ (จ.6) และ (จ.7)

$$D_m = \tan^{-1} \left( \frac{m}{1} \right) \quad (\text{จ.6})$$

$$I_m = \sin^{-1} (n) \quad (\text{จ.7})$$

และค่าความเที่ยงตรงของข้อมูล (precision limit -  $K$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (จ.8) ซึ่งเป็นผลมาจากข้อมูล  $N$  และ  $R$

$$K = \frac{N-1}{N-R} \quad (\text{จ.8})$$

ดังนั้น ถ้าพิจารณาค่าทิศทางมุมเฉลี่ยที่คำนวณได้มีค่าเบี่ยงเบนไปจากข้อมูลทั้งหมด  $N$  มากแค่ไหน ซึ่งแทนด้วยค่า  $\alpha_{1-p}$  โดย  $1-p$  เป็นเปอร์เซ็นต์ที่ครอบคลุมข้อมูลทั้งหมด  $N$  ตัวอย่างเช่น ถ้า  $1-p$  เท่า 0.95 หรือ 95% นั้นหมายความว่า พิจารณาค่าเบี่ยงเบนของทิศทางเฉลี่ย ครอบคลุม 95% ของข้อมูลทั้งหมด  $N$  ในงานศึกษาทางด้านแม่เหล็กบรรพกาลจะนิยมนำเสนอข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ  $\alpha_{95}$  ของข้อมูลทั้งหมดที่นำมาพิจารณา คำนวณได้จากสมการที่ (จ.11)

$$\cos \alpha_{1-p} = 1 - \frac{N-R}{R} \left\{ \left( \frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right\} \quad (\text{จ.9})$$

$$\alpha_{63} \approx \frac{81^\circ}{\sqrt{KN}} \quad (\text{จ.10})$$

$$\alpha_{95} \approx \frac{140^\circ}{\sqrt{KN}} \quad (\text{จ.11})$$



## จ.2 ขั้วแม่เหล็กโลก (Geomagnetic Pole)

จากรูปที่ จ.3 กำหนดตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง หรือพื้นที่ศึกษามีพิกัด  $S (\lambda_s, \phi_s)$  มีค่า  $D_m$  และ  $I_m$  ที่ได้จากตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบ ดังนั้นสามารถคำนวณหาตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลก บรรพกาล  $(\lambda_p, \phi_p)$  ได้จากสมการด้านล่าง ดังต่อไปนี้

$$p = \cot^{-1} \left( \frac{\tan I_m}{2} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{2}{\tan I_m} \right) \quad (\text{จ.12})$$

$$\lambda_p = \sin^{-1} (\sin \lambda_p \cos p + \cos \lambda_p \sin p \cos D) \quad (\text{จ.13})$$

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{\sin p \sin D_m}{\cos \lambda_p} \right) \quad (\text{จ.14})$$

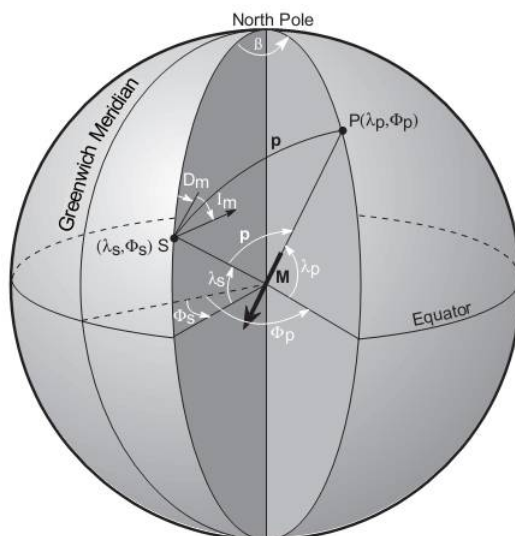
แต่ค่าของ  $\phi_p$  มีความเป็นไปได้สองกรณี คือ เมื่อ  $\cos p \geq \sin \lambda_p \sin \lambda_s$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (จ.15) และในกรณีที่  $\cos p \leq \sin \lambda_p \sin \lambda_s$  สามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ (จ.16) ส่วนค่าเบี่ยง หรือค่าความผิดพลาด ( $dp$  และ  $dm$ ) จากค่าที่คำนวณได้ มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (จ.17) และ (จ.18)

$$\phi_p = \phi_s + \beta \quad (\text{จ.15})$$

$$\phi_p = \phi_s + \pi - \beta \quad (\text{จ.16})$$

$$dp = \alpha_s \left( \frac{1 + 3 \cos^2 p}{2} \right) \quad (\text{จ.17})$$

$$dm = \alpha_s \left( \frac{\sin p}{\cos I_m} \right) \quad (\text{จ.18})$$



รูปที่ จ.3 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง กับตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาล (Butler, 1992)

### จ.3 Rotation and Poleward Transport in Pole Space

เมื่อต้องการเปรียบเทียบตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาลที่กำลังศึกษา (OP) และมี A95 เท่ากับ  $A_0$  กับขั้วแม่เหล็กโลกอ้างอิง (RP) มี A95 เท่ากับ  $A_r$  ตามแสดงในรูปที่ จ.4 กำหนดให้ตำแหน่งพื้นที่ศึกษา หรือจุดที่เก็บตัวอย่าง คือ S ดังนั้น สามารถคำนวณระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาลจากข้อมูลการศึกษา OP กับขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาลอ้างอิง RP มีระยะทางเท่ากับ  $s$  และมีมุมที่หมุนไปเป็น  $R$  ขั้นตอนการคำนวณเป็นไปตามสมการด้านล่าง ในกรณีที่  $R$  มีค่าเป็นบวกแสดงว่าหมุนตามเข็มนาฬิกา (clockwise rotation - CW) และหมุนทวนเข็มนาฬิกา (counterclockwise rotation - CC) ในกรณีที่  $R$  เป็นลบ ค่าความผิดพลาด  $\Delta R$  สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (จ.23) สำหรับค่า Poleward transport ( $p$ ) จะเป็นความแตกต่างระหว่างค่า  $p_0$  กับ  $p_r$  ( $p=p_0-p_r$ ) และมีค่าความผิดพลาด  $\Delta p$  ตามสมการที่ (จ.24)

$$p_r = \cos^{-1}(\sin \lambda_r \sin \lambda_s + \cos \lambda_r \cos \lambda_s \cos[\phi_r - \phi_s]) \quad (จ.19)$$

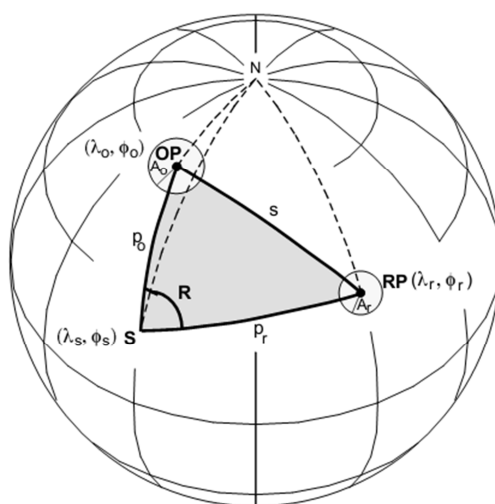
$$p_0 = \cos^{-1}(\sin \lambda_s \sin \lambda_0 + \cos \lambda_s \cos \lambda_0 \cos[\phi_s - \phi_0]) \quad (จ.20)$$

$$s = \cos^{-1}(\sin \lambda_r \sin \lambda_0 + \cos \lambda_r \cos \lambda_0 \cos[\phi_r - \phi_0]) \quad (จ.21)$$

$$R = \cos^{-1} \left( \frac{\cos s - \cos p_0 \cos p_r}{\sin p_0 \sin p_r} \right) \quad (\text{จ.22})$$

$$\Delta R = 0.8 \sqrt{\Delta D_0^2 + \Delta D_x^2} = 0.8 \sqrt{\sin^{-1} \left( \frac{\sin A_r}{\sin p_r} \right) + \sin^{-1} \left( \frac{\sin A_0}{\sin p_r} \right)} \quad (\text{จ.23})$$

$$\Delta R = 0.8 \sqrt{\Delta p_0^2 + \Delta p_x^2} = 0.8 \sqrt{A_r^2 + A_0^2} \quad (\text{จ.24})$$



รูปที่ จ.4 องค์ประกอบของข้อมูลของระหว่างพื้นที่ศึกษา (OP) ตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกที่ได้จากตัวอย่างหิน (S) และตำแหน่งขั้วแม่เหล็กโลกอ้างอิง (RP) (Butler, 1992)

#### จ.4 Expected Magnetic Field Direction

ในบางครั้งอาจจำเป็นต้องคำนวณหาทิศทางองค์ประกอบของแม่เหล็กโลกในอดีตใหม่ที่จุดต่างๆ บนแผ่นเปลือกโลกที่ต้องการศึกษา เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างแผ่นเปลือกโลกต่างๆ กระบวนการคำนวณจะอาศัยข้อมูลขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาลที่ได้จากการศึกษาในการคำนวณ พิจารณารูป จ.5 ตำแหน่ง  $(\lambda_s, \phi_s)$  คือ จุดที่ต้องหาองค์ประกอบทิศทางสนามแม่เหล็กโลกมุมเอียงเท และมุมขั้วเบน  $(I_x, D_x)$  เทียบกับขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาล  $(\lambda_p, \phi_p)$  ซึ่งได้จากการศึกษาภาวะแม่เหล็กบรรพกาลจากตัวอย่างหินของแผ่นเปลือกโลกที่ศึกษา ดังนั้น ตำแหน่ง  $(\lambda_s, \phi_s)$  สามารถคำนวณได้ตามสมการด้านล่าง และมีค่าความผิดพลาด หรือ  $\alpha_s$  เท่ากับสมการที่ จ.34

$$\cos p = \cos p_p \cos p_s + \sin p_p \sin p_s \cos \Delta\phi \quad (1.25)$$

$$\cos p = \sin \lambda_p \sin \lambda_s + \cos \lambda_p \cos \lambda_s \cos(\phi_p - \phi_s) \quad (1.26)$$

$$p = \cos^{-1}(\sin \lambda_p \sin \lambda_s + \cos \lambda_p \cos \lambda_s \cos(\phi_p - \phi_s)) \quad (1.27)$$

$$I_x = \tan^{-1}(2 \cot p) \quad (1.28)$$

$$\Delta I_x = A_{95} \left( \frac{2}{1 + 3 \cos^2 p} \right) \quad (1.29)$$

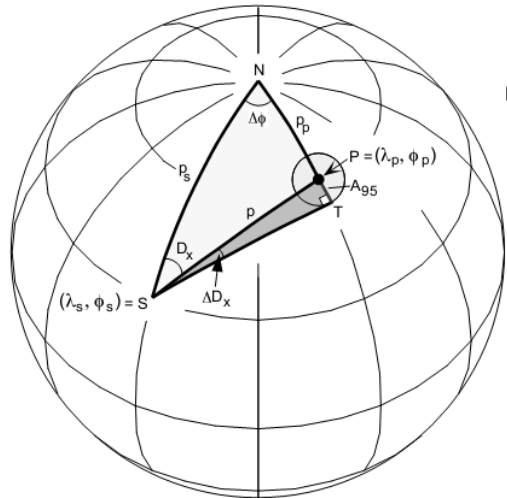
$$\sin \lambda_p = \sin \lambda_s \cos p + \cos \lambda_s \sin p \cos D \quad (1.30)$$

$$\cos D_x = \frac{\sin \lambda_p - \sin \lambda_s \cos p}{\cos \lambda_s \sin p} \quad (1.31)$$

$$D_x = \cos^{-1} \left( \frac{\sin \lambda_p - \sin \lambda_s \cos p}{\cos \lambda_s \sin p} \right) \quad (1.32)$$

$$\Delta D_x = \sin^{-1} \left( \frac{\sin A_{95}}{\sin p} \right) \quad (1.33)$$

$$c = \sin^{-1}(\cos I_x \sin \Delta D_x) \quad (1.34)$$



รูปที่ ๕.๕  $(\lambda_s, \phi_s)$  ตำแหน่งจุดที่ต้องการคำนวณหองค์ประกอบทิศทางสนามแม่เหล็กโลก ( $I_x, D_x$ ) เทียบกับขั้วแม่เหล็กโลกบรรพกาล  $(\lambda_p, \phi_p)$  (Butler, 1992)

#### ๕.๔ Palaeolatitude and confident limits

สำหรับการศึกษาทางด้านแม่เหล็กบรรพกาลข้อมูลแมกนีไทเซชันตกค้างที่ได้จากตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบ สามารถที่จะคำนวณย้อนกลับไปยังในอดีตได้ว่าช่วงเวลานั้นตำแหน่งของพื้นที่ที่หินก่อกำเนิดขึ้นอยู่ตรงตำแหน่งใด โดยอาศัยค่ามุมเอียงเทในการคำนวณ (Inclination -  $I_0$ ) ซึ่งตำแหน่งที่คำนวณได้จะเป็นค่าตำแหน่งของละติจูดบรรพกาล (palaeolatitude -  $\lambda_0$ ) โดยพิจารณาสนามแม่เหล็กโลกเป็นลักษณะไดโพลเพียงอย่างเดียว ตามแสดงในสมการด้านล่าง

$$\lambda_0 = \tan^{-1} \left( \frac{\tan I_0}{2} \right) \quad (๕.๓๕)$$

$$\lambda_0^+ = \tan^{-1} \left( \frac{\tan(I_0 + \alpha_{95})}{2} \right) \quad (๕.๓๖)$$

$$\lambda_0^- = \tan^{-1} \left( \frac{\tan(I_0 - \alpha_{95})}{2} \right) \quad (๕.๓๗)$$

#### จ.4 หน่วยวัดทางด้านแม่เหล็ก

ตารางที่ จ.1 หน่วยที่ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทางด้านแม่เหล็ก (Butler, 1992)

	cgs (emu) System		Système Internationale (SI)		Conversion
	Fundamental Units	Unit	Fundamental Units	Unit	
Energy		erg		joule (J)	1 erg = $10^{-7}$ joule
Force (F)	$\text{gm cm s}^{-2}$	dyne	$\text{kg m s}^{-2}$	newton (N)	1 dyne = $10^{-5}$ newton
Current (I)	$10 \text{ C s}^{-1}$	abampere	$\text{C s}^{-1}$	ampere (A)	1 abampere = 10 ampere
Magnetic Induction (B)	$0.1 \text{ gm s}^{-1} \text{ C}^{-1}$	gauss (G)	$\text{kg s}^{-1} \text{ C}^{-1}$	tesla (T)	1 gauss = $10^{-4}$ tesla
Magnetic Field (H)	$0.1 \text{ gm s}^{-1} \text{ C}^{-1}$	oersted (Oe)	$\text{C s}^{-1} \text{ m}^{-1}$	ampere $\text{m}^{-1}$ (A/m)	1 Oe = $(1/4\pi) \times 10^3$ A/m
Magnetization (J)	$0.1 \text{ gm s}^{-1} \text{ C}^{-1}$	gauss (G) (= emu $\text{cm}^{-3}$ )	$\text{kg s}^{-1} \text{ C}^{-1}$	tesla (T)	1 gauss = $4\pi \times 10^{-4}$ tesla
Magnetic Dipole Moment/Unit Volume	$0.1 \text{ gm s}^{-1} \text{ C}^{-1}$	gauss (G) (= emu $\text{cm}^{-3}$ )	$\text{C s}^{-1} \text{ m}^{-1}$	A/m	1 gauss = $10^3$ A/m
Magnetic Moment (M)	$0.1 \text{ gm s}^{-1} \text{ C}^{-1} \text{ cm}^3$	gauss $\text{cm}^3$ (G $\text{cm}^3$ = emu)	$\text{C s}^{-1} \text{ m}^2$	$\text{A m}^2$	1 gauss $\text{cm}^3$ = $10^{-3}$ A $\text{m}^2$
Magnetic Susceptibility ( $\chi$ )	Dimensionless		Dimensionless		$\chi$ (cgs) = $4\pi \chi$ (SI)

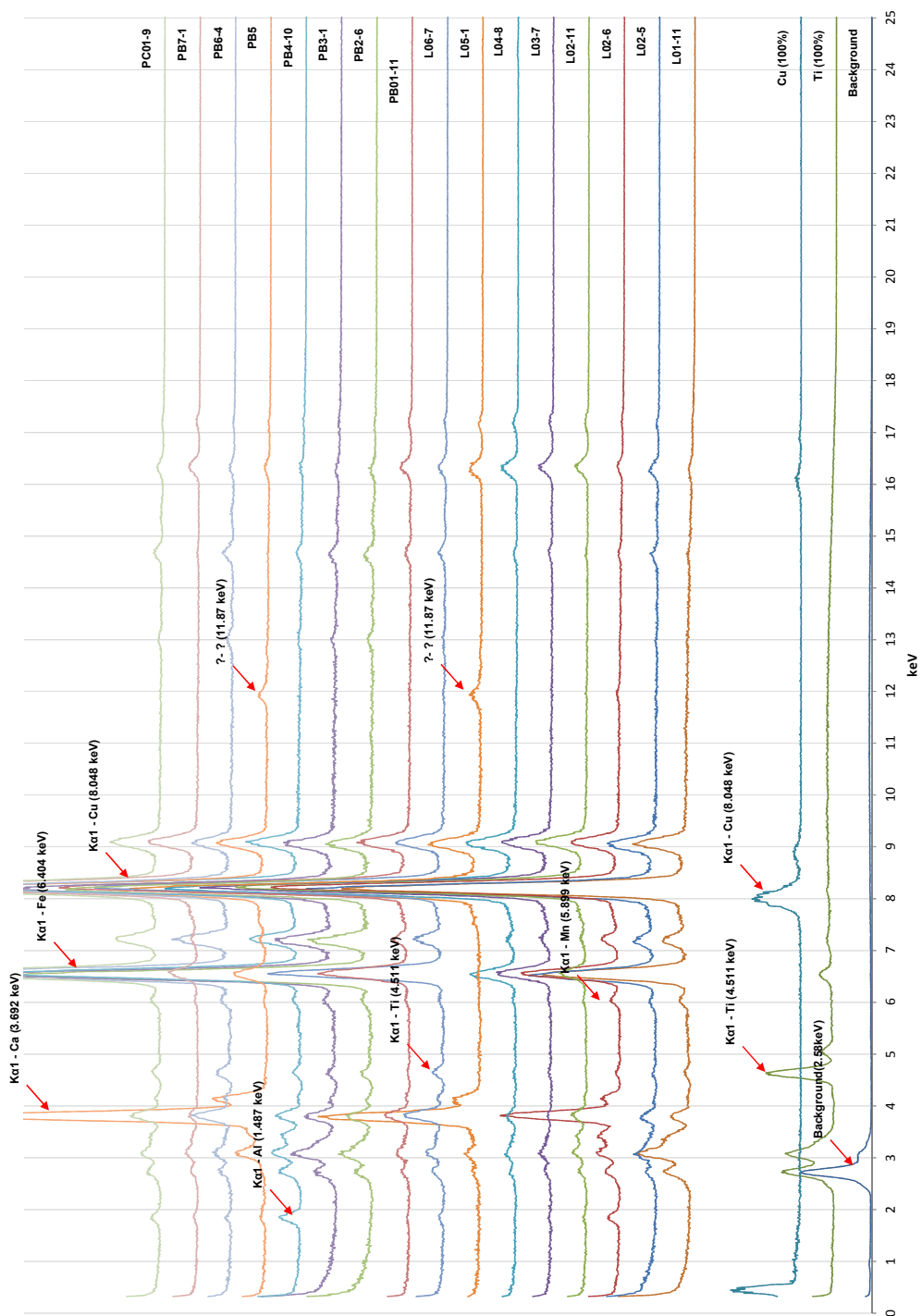
**Conversions commonly employed in paleomagnetism:** Magnetization,  $J = 10^{-3}$  G converts to "magnetization" = 1 A/m. Magnetic field,  $H = 1$  Oe converts to magnetic "field" =  $10^{-4}$  T = 0.1 mT.

**Some Examples:** Surface geomagnetic field strength: 0.24–0.66 Oe = 0.024–0.066 mT. Magnetic field generated by laboratory electromagnet: 2000 Oe = 0.2 T = 200 mT. Magnetic dipole moment of the earth:  $8 \times 10^{25}$  G  $\text{cm}^3$  =  $8 \times 10^{22}$  A  $\text{m}^2$ .

Natural remanent magnetization of rocks: basalt:  $10^{-3}$  G = 1 A/m; granite:  $10^{-4}$  G = 0.1 A/m; nonmarine siltstone:  $10^{-5}$  G =  $10^{-2}$  A/m; marine limestone:  $10^{-7}$  G =  $10^{-4}$  A/m.

## ภาคผนวก ฉ

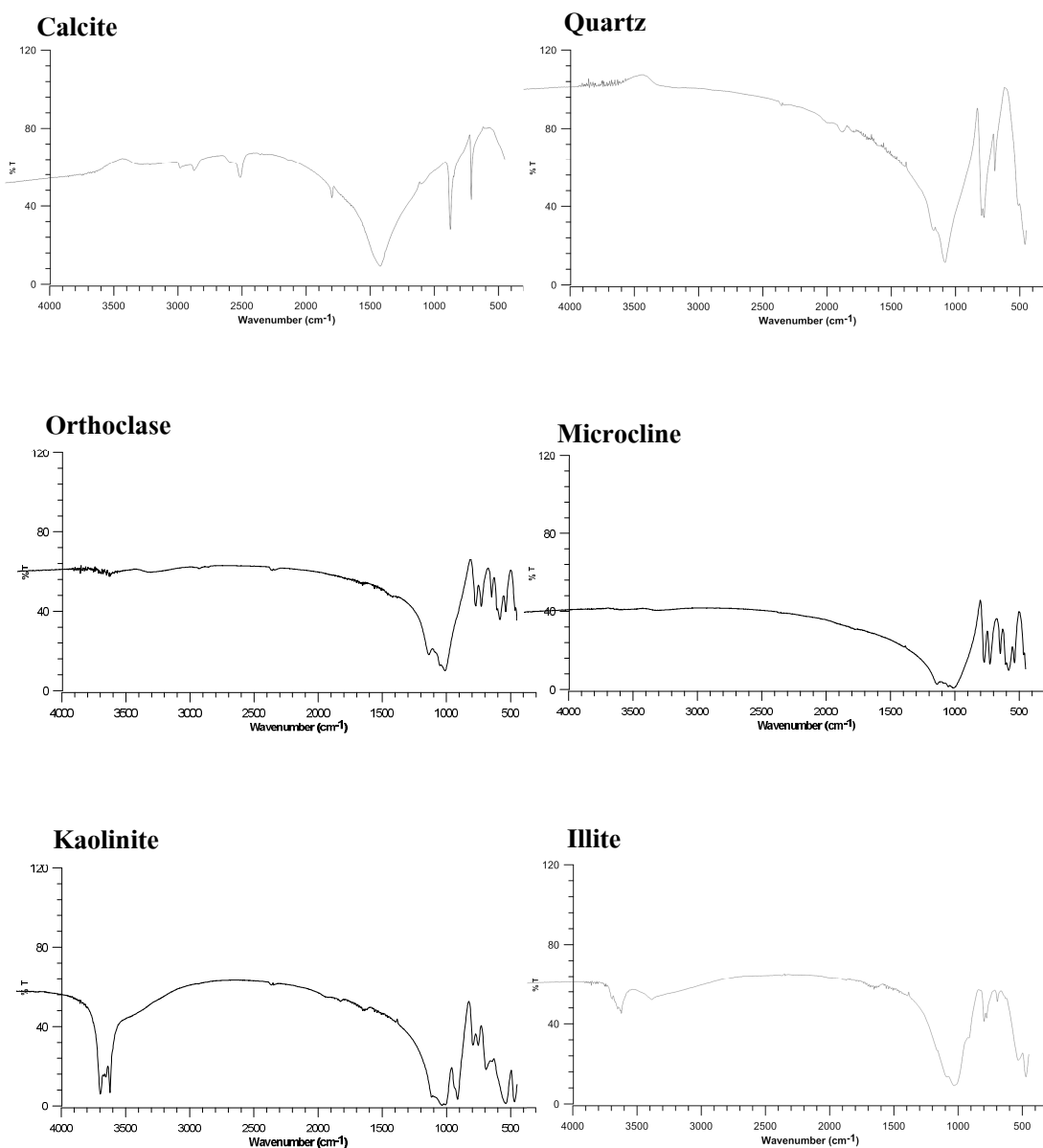
## ผลทดสอบ เรืองรังสีเอกซ์



## ภาคผนวก ข

## ผลทดสอบ ฟลูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

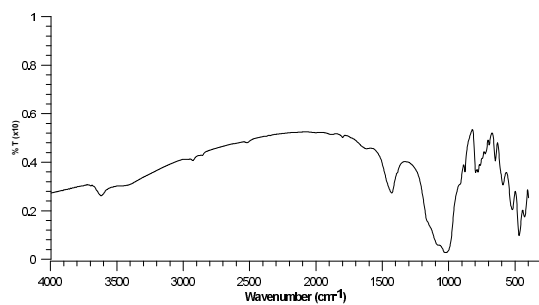
## ข.1 ตัวอย่างแร่มาตรฐาน



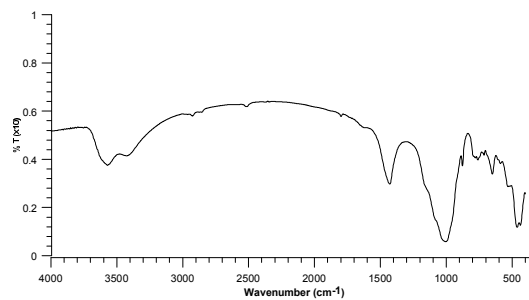


## ช.2 ตัวอย่างหินแต่ละพื้นที่

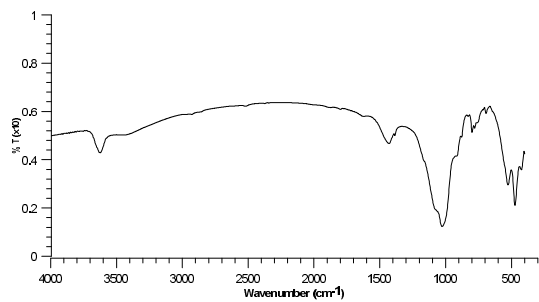
L01-11



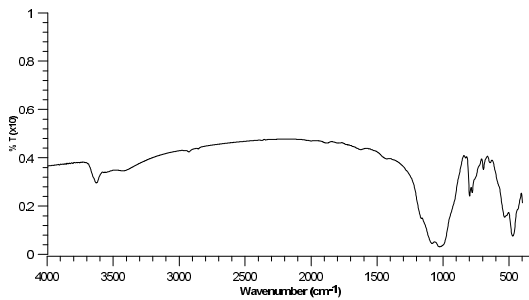
L02-5



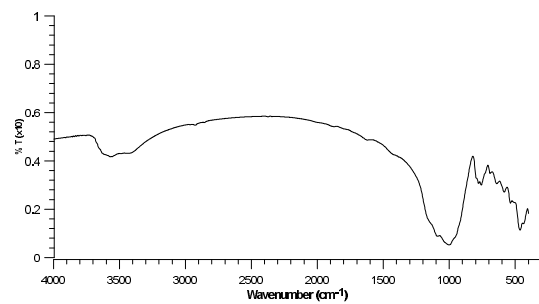
L02-11



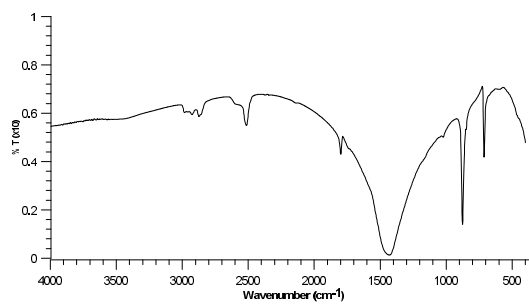
L03-1



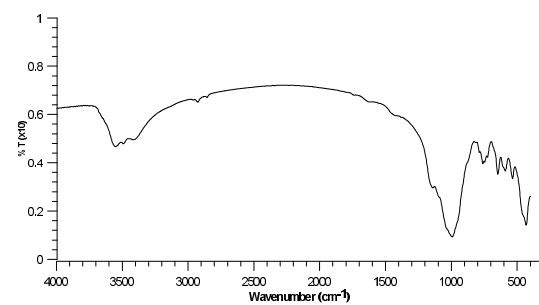
L04-7



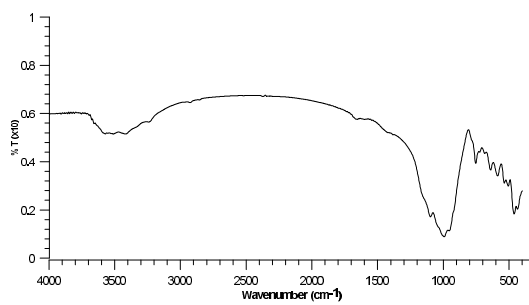
L05-10

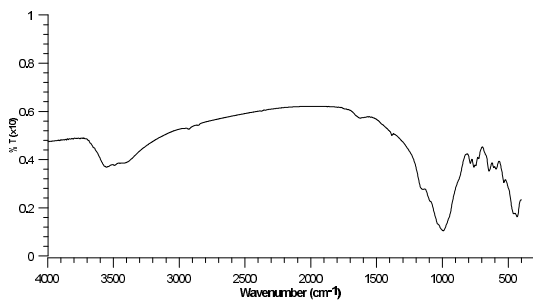
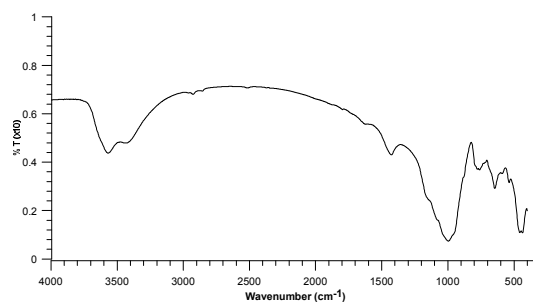
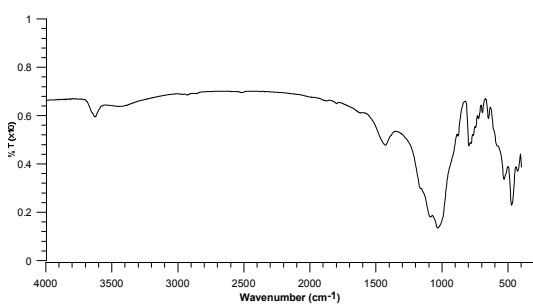
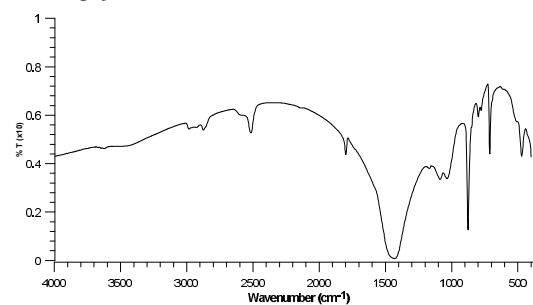
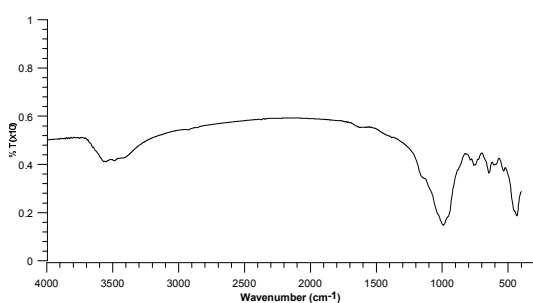
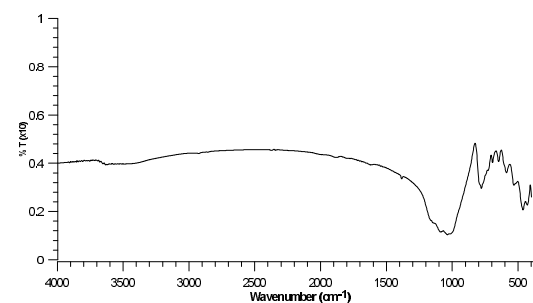
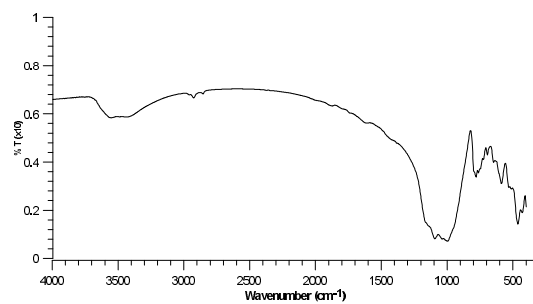


L06-14



PB01-11

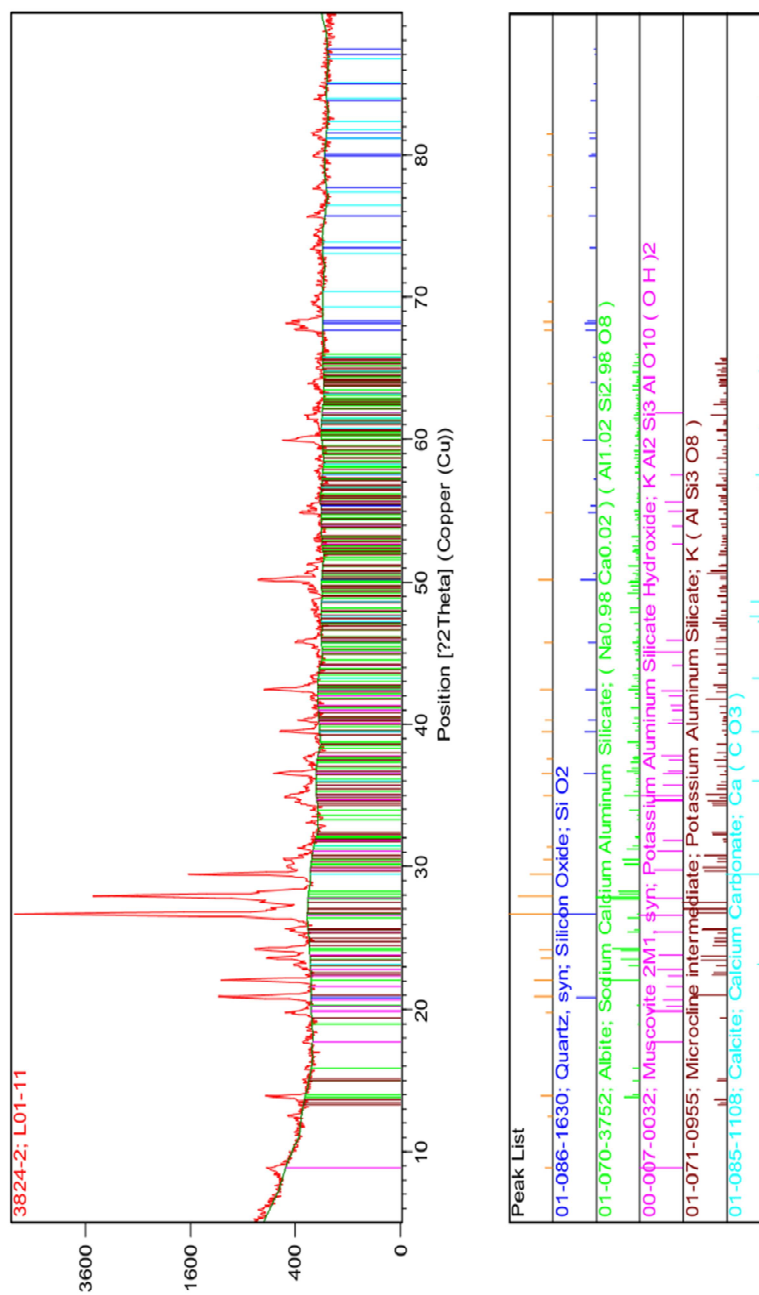


**PB2-6****PB3-1****PB4-2****PB5-9****PB6-5****PB7-3****PC01-11**

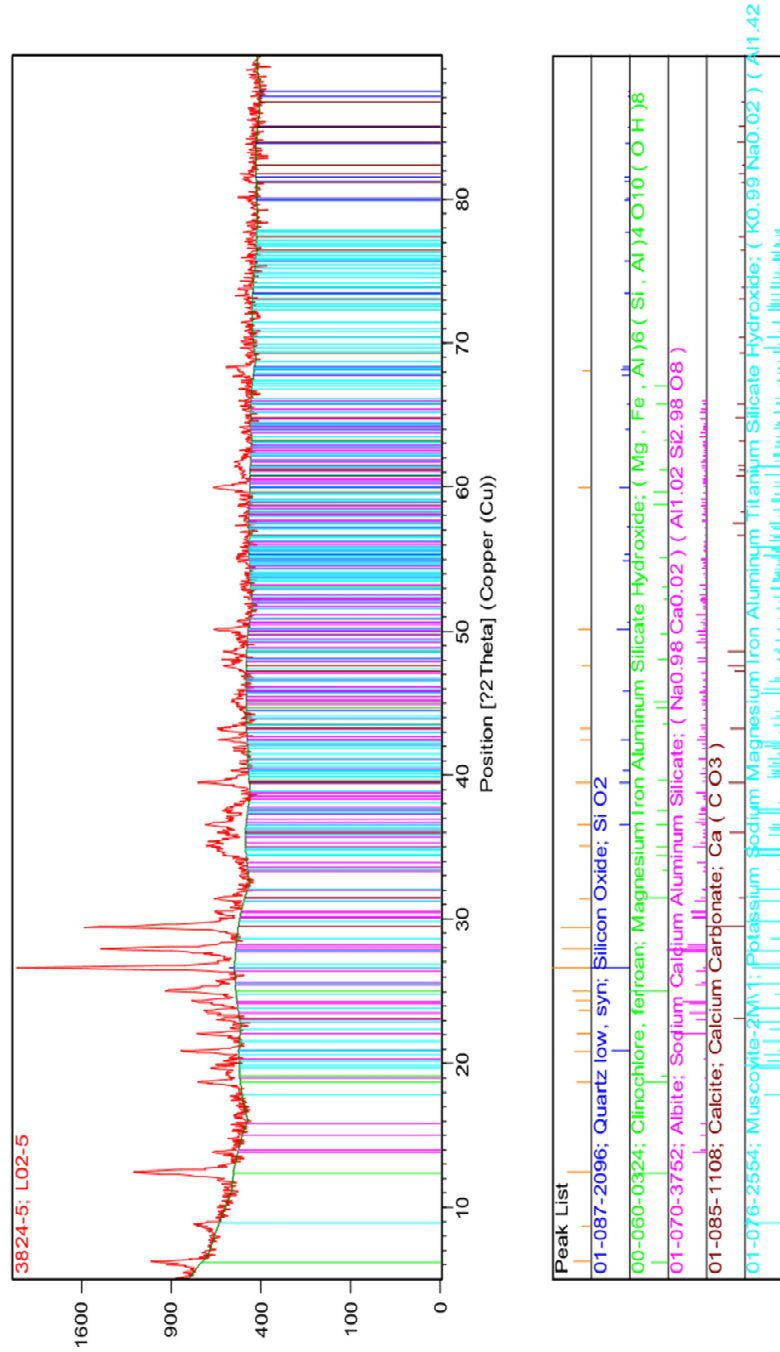
## ภาคผนวก ข

## ผลทดสอบ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

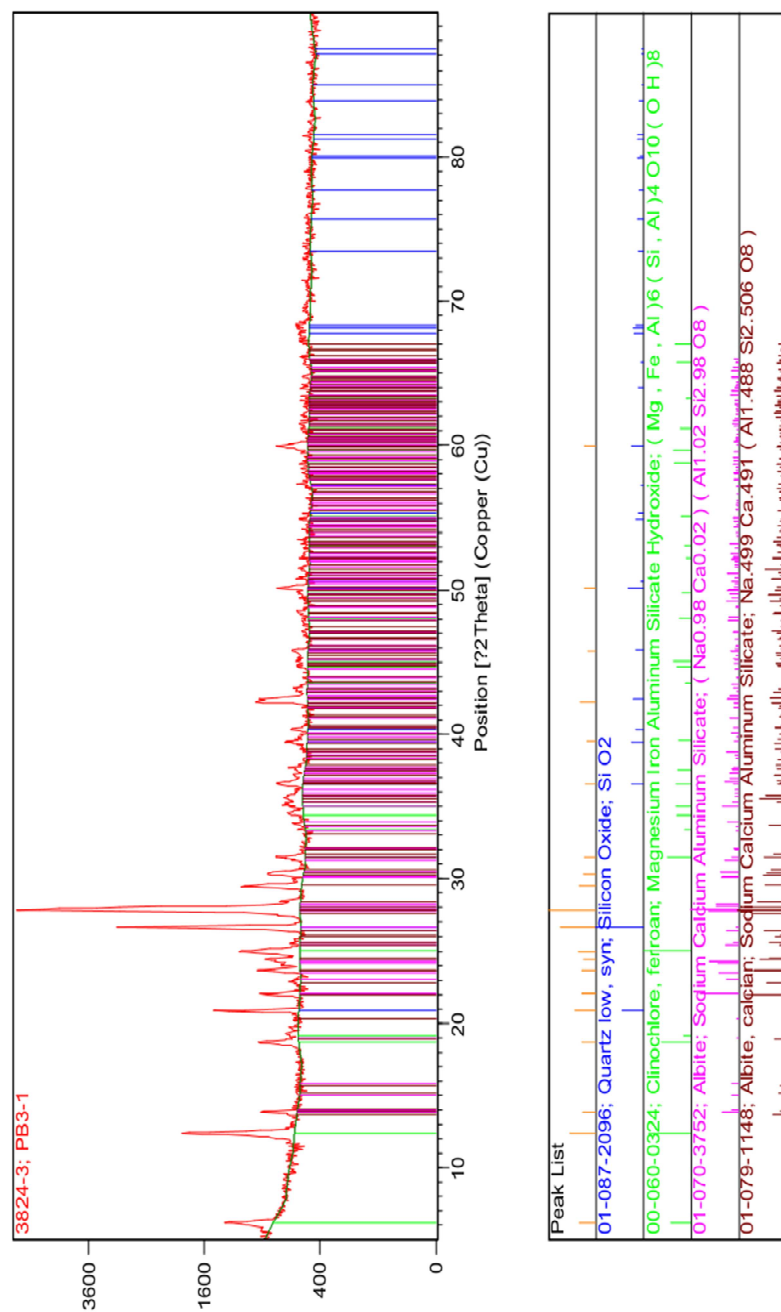
## ข.1 ตัวอย่าง L01-11



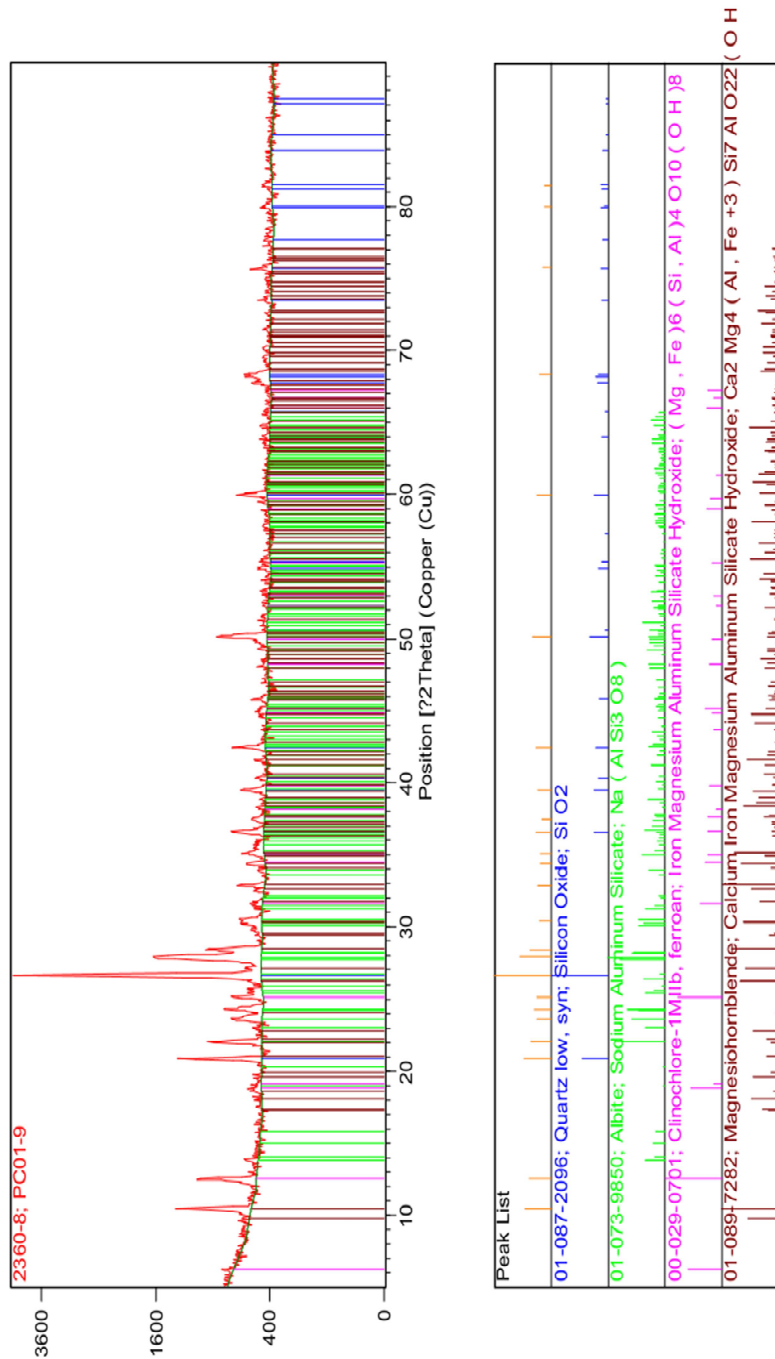
ข.2 ตัวอย่าง L02-5



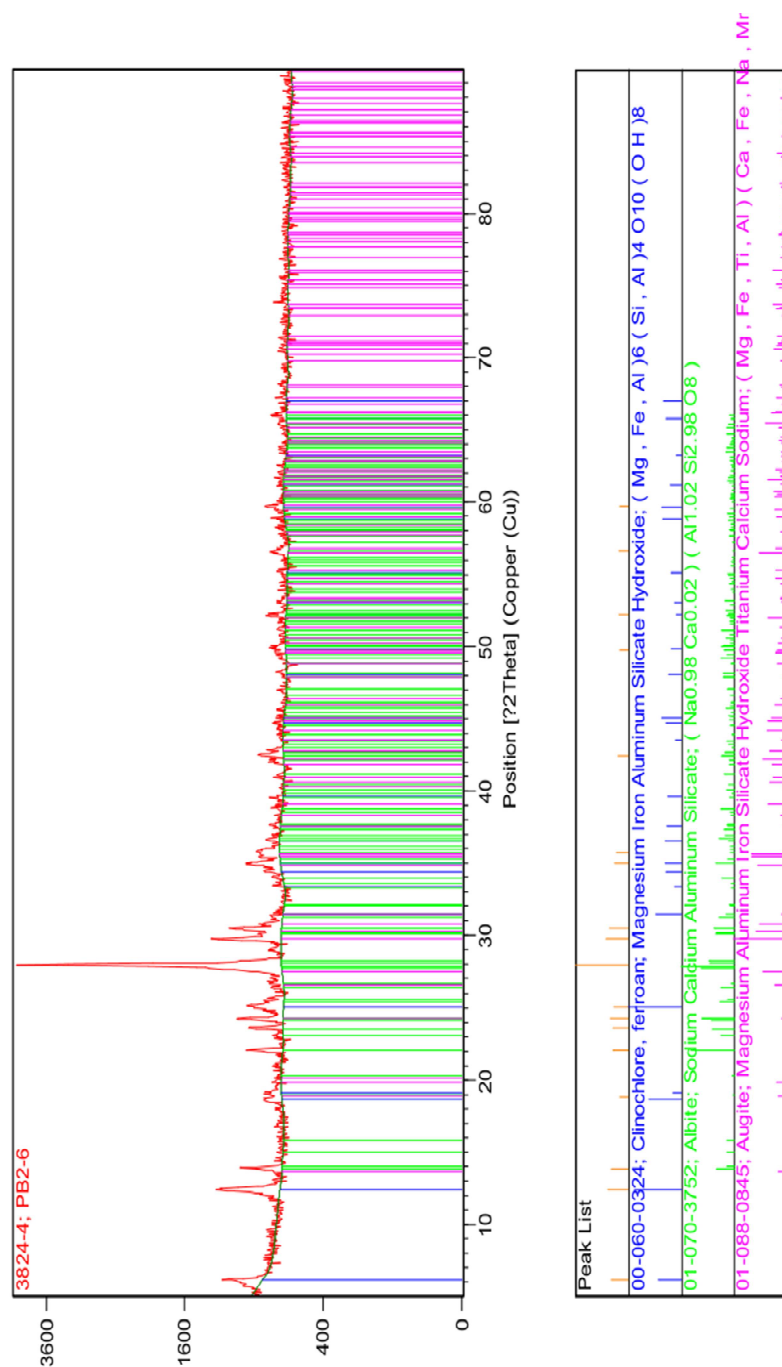
### ข.3 ตัวอย่าง P3-1



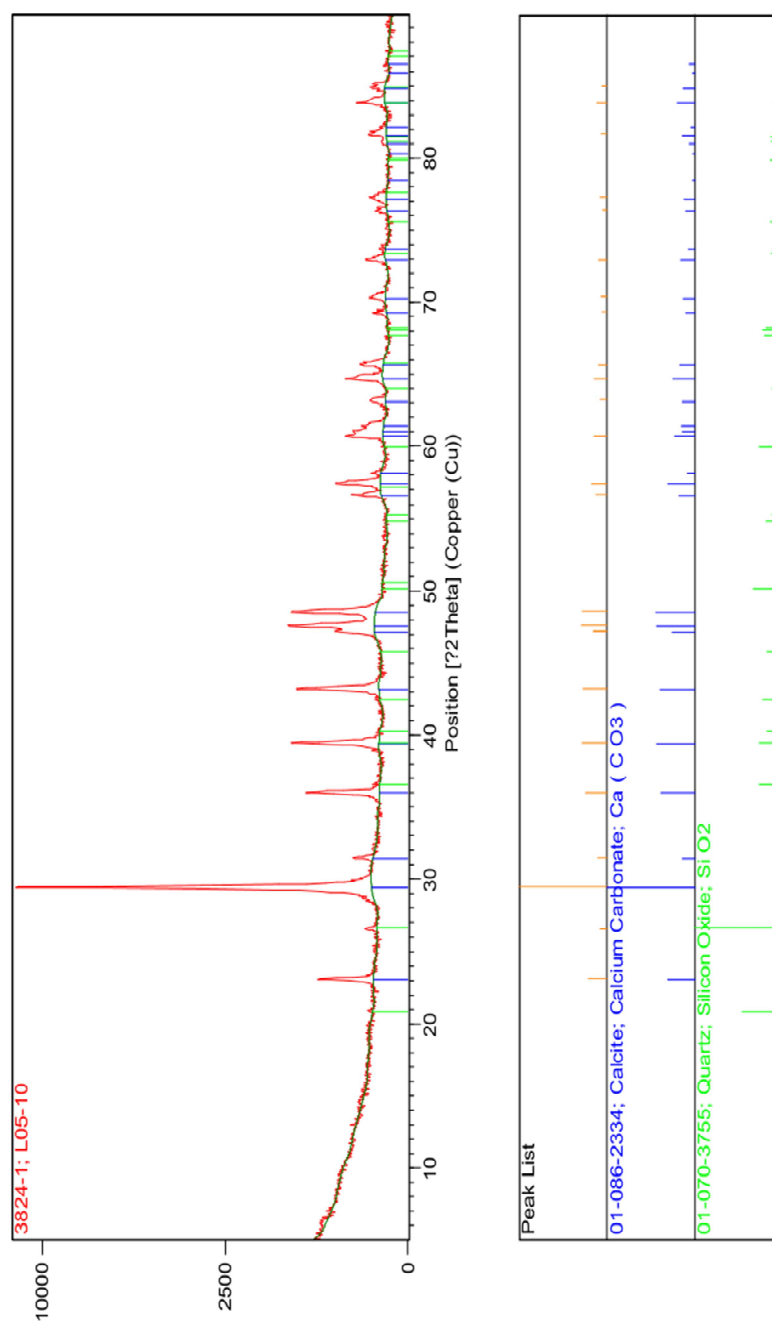
๗.4 ตัวอย่าง P01-9



## ๗.5 ตัวอย่าง P2-6



## ๗.6 ตัวอย่าง L05-10





ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์



# Proceedings of the International Conference on Geology, Geotechnology, and Mineral Resources of INDOCHINA

November 23-24, 2015, Khon Kaen, Thailand

## Organizer :



The Department of  
Geotechnology,  
Khon Kaen University



Anniversary of the Department of Geotechnology, Khon Kaen University

## Co-organizers :



GP-1

5<sup>th</sup> GEOINDO 2015

23-24 November 2015, Khon Kaen, Thailand

## Magnetic Properties of Devonian-Triassic rocks from Loei and Phetchabun provinces

Akekarat Rittiniam and Tripob Bhongsuwan

Geophysics Research Center, Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, 90112 Hatyai, Thailand.

### ABSTRACT

Rock magnetic study has been carried out on Devonian-Triassic rocks from Loei and Phetchabun provinces that located on the western part of Indochina Block. Oriented rock samples were collected from 14 sites and measured magnetic properties of rocks including anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), natural remanent magnetization (NRM), hysteresis parameters and alternating field (AF) demagnetization. Results show that the magnetic susceptibility ( $K$ ) and NRM of igneous and sedimentary rocks differ significantly. Igneous rocks have higher  $K$  and NRM than sedimentary rocks ( $K_{\text{igneous}} = 600 \times 10^6$  to  $27000 \times 10^6$  SI,  $K_{\text{sediment}} = 30 \times 10^6$  to  $500 \times 10^6$  SI,  $NRM_{\text{igneous}} = 100$  to  $22000$  mA/m, and  $NRM_{\text{sediment}} = 0.8$  to  $10$  mA/m). Koenigsberger ratio ( $Q$ ) of samples are within the range 0.1 to 54.0, and the most samples are in 0.5 to 10.0 region. Low  $Q$  values are dominated in the sediment rocks whereas only one site of volcanic rocks PB2 shows a low  $Q$  value ( $Q < 0.2$ ). Degrees of anisotropy ( $P_j$ ) of samples from central of Loei (Wang Saphung and Erawan) is higher ( $P_j > 1.10$ ) than that of samples from the other areas, whereas shape anisotropy of samples is mixed between prolate ( $T < 0$ ) and oblate ( $T > 0$ ). High anisotropy of rocks in this zone are supposed to be originated from palaeotectonic stress induced anisotropy that occurred at the time after rock formation. Day plot of  $H_w/H_c$  and  $M_r/M_s$  indicates grain size distribution of most samples in the zone of pseudo single domain (PSD) and superparamagnetic - single domain (SP-SD) regions of magnetite.

Keywords: Rock magnetism, Devonian-Triassic rocks, Loei-Phetchabun fold belt, Indochina Block

### 1. INTRODUCTION

Magnetic minerals are present in many types of rocks, soils and sediments. Study of magnetic properties of rocks or 'rock magnetism' is a powerful method to understand composition, concentration, evolution of magnetic minerals. This technique can be applied in various fields such as Palaeomagnetic/archaeomagnetic dating, Palaeoclimate, environment, lava flows, and Palaeocurrent studies (Butler, 1992; Collinson, 1983; Evans and Heller, 2003; Thompson and Oldfield, 1989; McElhinny and McFadden, 2000). Since the last three decade, many studies focused on topics in rock magnetism in Thailand (Haile and Tarling, 1975; Barr and MacDonald, 1979; Bunopas, 1978, 1981; Maranate and Vella, 1986; Bhongsuwan, 2000) but it still restrict in some areas and/or some groups of rocks. Most reports presented results from Mesozoic rocks, and just a few reports presented results from the Paleozoic rocks (Richer and Fuller, 1996; Yang and Basse, 1993; Bunopas and Vella, 1978; Bhongsuwan, 2000).

The objective of this study is to investigate the magnetic properties of Devonian-Triassic rocks collected from the Loei-Phetchabun fold belt (LPFB) in Loei and Phetchabun provinces, the north-western rim of Indochina Terrane. The magnetic properties of rocks including magnetic susceptibility ( $k$ ), natural remanent magnetization (NRM), Koenigsberger ratio ( $Q$ ), median destructive field (MDF), anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) and hysteresis parameters will be

### 2. GEOLOGICAL SETTING

Thailand is a part of SE-ASIA that comprised of two main Terrane. First, Shan-Thai covered the western and southern part of Thailand, parts of Myanmar and Malay Peninsula. Second, Indochina covered east part of Thailand (Bunopas, 1981), Laos, Cambodia and Vietnam. During the Silurian-Devonian, Indochina and Shan-Thai had broken from the Gondwana and driven to the north (Hutchison, 1989; Torsvik and Cocks, 2004; Metcalfe, 2013). Indochina and south-china Terranes were joined together in the Late Permian that created Truong Son fold belt in Vietnam. In the late Triassic, Indochina was collided with Shan-Thai Terrane along the Nan suture (Charusiri et al, 2002). The collision between India and Eurasia plate in Tertiary affected the tectonic deformation in Thailand as reported in previous studies (Charusiri et al, 2002; Khin Zaw et al, 2014).

Loei-Phetchabun Fold Belt (LPFB) is one of major fold belts in Thailand that starts from the northern Laos PDR through Thailand (Loei, Phetchabun, central Thailand and Sra Kaeo) into the western part of Cambodia (DMR, 2552; Ridd et al, 2011). LPFB consists of Late Permian to Triassic volcanic rocks in the north part, and Cenozoic basalt in southern part (Intasopa and Dunn, 1994; Khin Zaw et al, 2014; Kamvong et al, 2006; Kromkhun et al, 2013). Moreover, older volcanic rocks (Devonian-Carboniferous and Silurian magmatic rocks) have been found at Pakchom, Loei province that characterized by rhyolite (Intasopa and Dunn, 1994). These volcanic rocks in Loei province were analyzed by Intasopa (1994) and could be separated into 3 groups; (i) Devonian rhyolite, (ii) Middle Devonian to Lower Carboniferous basalt, and (iii) Permo-Triassic andesite. In Phetchabun province, most of volcanic rocks are Permo-Triassic (PTrv), which distributed at the central and western areas. Otherwise, young volcanic rocks were found in southern area (Bung

Corresponding author: tripob.b@psu.ac.th

Copyright is held by the author/owner(s)  
GEOINDO 2015, November 23-24, 2015

present.

## GP-1

5<sup>th</sup> GEOINDO 2015

Sam Pan, Wichain Buri and Sri Thep districts) that were indicated as Tertiary basalt (Bs) (Ridd et al, 2011; Khin Zaw et al, 2014 and Salam et al, 2014). Granitic rocks at LPFB were one of the three granitic belts in Thailand call "eastern granitic belt" that was formed in Early to Late Triassic (245-210 Ma) (Charusiri et al, 1993). The sedimentary rocks at LPFB consist of Paleozoic (e.g. Nam Duk Fm., Wang Saphung Fm., Pak Chom Fm., etc.) to Mesozoic (e.g. Nam Pong Fm., Khorat Gp., etc.) that almost aligns from the north to the south.

Figure 1 presents a geological map of the study area and sampling sites. In this study, identification of rocks and age determinations were following the reports of the Department of Mineral Resources, Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand (DMR) and previous studies (Intasopa and Dunn, 1994; Charusiri et al, 1993; Khin Zaw et al, 2014; Salam et al, 2014) as summarized in the Table 1.

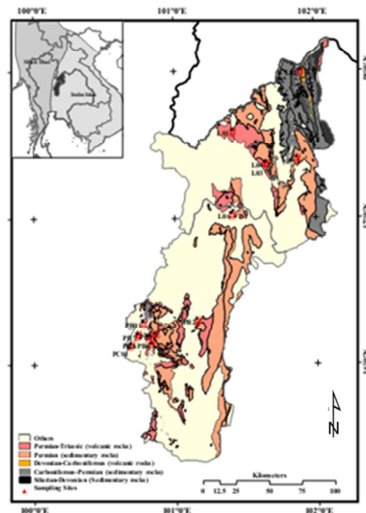


Figure 1. A Geological map with sampling site locations in the study area (modified from DMR, 2009).

## 3. METHODS

Altogether fourteen sites were visited. Most of them are Permo-Triassic volcanic rocks and few sites are Devonian-Permian sedimentary rocks (Figure 1 and Table 1). 149 samples were collected from selected sites by using portable drilling machine with water cooling system, and core orientations were made using both magnetic and sun compasses to avoid bad orientation in a high gradient earth field. Each sample was cut into standard specimens (2.5 cm diameter and 2.2 cm length) by a rock cutting machine with water cooling and selected for laboratory testing.

Magnetic measurements were performed at the Palaeomagnetic Laboratory of the Prince of Songkla University and at the Electricity & Magnetism Research

23-24 November 2015, Khon Kaen ,Thailand

Table 1. Summary of site and rocks information of study area.

Site	Location (Lat./Lon.)	Rock Type	Age	Reference
L01	17.57237/101.42616	Granodiorite	PTr	[1], [3]
L02	17.97809/101.91369	Skarn	DC	[3]
L03	17.35481/101.66357	Skarn	eTr	[2]
L04	17.35472/101.66363	Skarn	eTr	[2]
L05	17.38790/101.88397	Limestone	P	[3]
L06	17.00914/101.42178	Granodiorite	P	[3]
PC01	16.11464/100.69835	Andesite?	PTr	[3]
PB01	16.27128/100.78835	Andesite?	PTr	[3]
PB2	16.29246/100.17011	Andesite	PTr	[3]
PB3	16.18973/100.86233	Shale?	P	[3]
PB4	16.16998/100.81646	Rhyolite	PTr	[3]
PB5	16.12069/100.84472	Limestone	P	[3]
PB6	16.18272/100.74754	Andesite	PTr	[3]
PB7	16.18261/100.74748	Pink Granite	K	[4], [5]

Note: PTr: Permian to Triassic, DC: Devonian to Carboniferous, eTr: Early Triassic, P: Permian, IC: Late Carboniferous, [1] Intasopa (1993), [2] Khin Zaw et al. (2014), [3] DMR (2552), [4] Khin Zaw et al. (2007) and [5] Salam et al (2014)

Laboratory, Kasetsart University. Low field magnetic susceptibility ( $K_m$ ) and anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) measurement of representative specimens were performed by KLY-3S Kappabridge (Agico, Czech Republic) controlled and analyzed using Anisoft 4.2 software (Chadima and Jelinek, 2009).

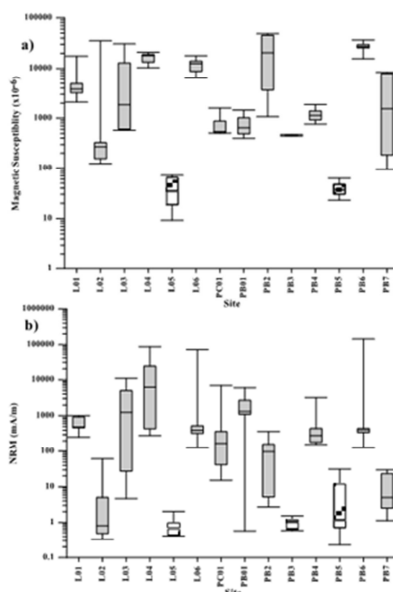


Figure 2. Box plot diagram of a) magnetic susceptibility (k) and b) natural remanent magnetization (NRM) (▨: sedimentary rocks, ■: igneous and skarn rocks)

Remanent magnetizations of representative specimen were measured by using JR-6 Spinner Magnetometer (Agico, Czech Republic), and demagnetized by AF

GP-1

5<sup>th</sup> GEOINDO 2015

demagnetizer (Molspin, England) with progressive stepwise applied field starting from 5 mT up to 70 mT. Demagnetized results were analyzed for the MDF parameter to evaluate stability of remanence by Remasoft 3.0 software (Chadima and Hrouda, 2009). Magnetic hysteresis measurements were performed at room temperature by using Vibrating Sample Magnetometer (VSM) with 1 T maximum field. Hysteresis parameters were analyzed from hysteresis loop by using RockMag Analyzer 1.0 software (Leonhardt, 2006) followed the recommendation of Tauxe (2003). Magnetic grain size distribution in rock samples were analyzed using Day (1977) and Dunlop (2002) technique.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

Summarized magnetic properties of rocks are presented in Table 2. Most of igneous rock samples have high magnetic susceptibility ( $K_m > 0.0001$  SI), whereas low  $K_m$  are found in limestone (L05 and PB5). The  $K_m$  values are highly scattered at sites L02, L03, PB2 and PB7 (Figure 2 a). Intensity of natural remanent magnetizations (NRM) can be separated in two groups (Figure 2 b). First group (NRM > 10.0 mA/m) includes sites L01, L03, L04, L06, PC01, PB01, PB2, PB4, PB6 and PB7. Second group (NRM < 10.0 mA/m) includes sites L02, L05, PB3 and PB5. Igneous rocks possesses a high NRM with exception for pink granite at site PB7 (NRM<sub>rem</sub> = 10.55 ± 10.34 mA/m). Relation between  $K_m$ -NRM as presented in Figure 3, clearly shows differences between those of Permo-Triassic and Devonian-Permian samples.

NRM intensity and  $K_m$  shall be directly related to volume content of single grain-sized ferromagnetic mineral in rock. However, natural samples usually possess ferromagnetic minerals of various grain sizes. Therefore, the variation of  $K_m$  value and NRM intensity can probably an effect of grain size variation, inhomogeneity of mineral contents that may relate to geologic histories. Magnetic examination is the best to understand the effects of such differences related to the geological histories.

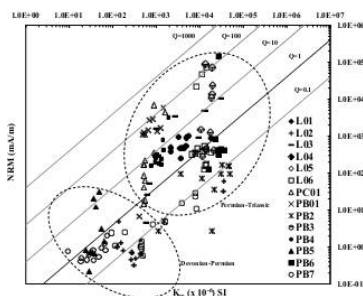


Figure 3. A log-log diagram of  $k$  and NRM with Koenigsberger ratios ( $Q$ ) of rock samples.

In this study, we apply hysteresis parameters (Table 2) with a modified Day plot (Day et al, 1977 and Dunlop, 2002) for grain size analysis. The results of representative samples are present in Figure 4. Half of

23-24 November 2015, Khon Kaen, Thailand

them shows their magnetic grain sizes in the PSD region, with exception for samples PB5-3, PB5-6, L05-3, L02-5 and PB7-5, which are located far away from this region. Data of samples from sites PB5 and L05 are not good for grain size analysis. Both sites contain too low ferromagnetic mineral.

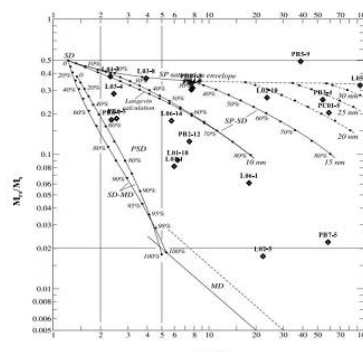


Figure 4. Day plot (Day et al., 1977 and Dunlop, 2002) of selected samples. SP: Superparamagnetic; SD: Single domain; PSD Pseudo single domain; and MD: Multi domain.

$Q$  value ( $Q=NRM/kH$ , where  $H$  is the magnitude of Earth's magnetic field (40000 nT) at the study area) of representative samples varies from 0.01 to 100, and approximately < 1.0 for half of all samples (Figure 3). Ranges of  $Q$  value for sedimentary rocks are usually 0.02-10 while 1-40 for igneous rocks (Hunt et al., 1995). Previous studies show that samples having  $Q < 1$ , can easily loss of their original remanent magnetization in the present earth field (Hunt et al., 1995). Therefore, Rock samples from sites L02, PB3 and PB5 having a very low  $Q$  value ( $Q < 0.1$ ) indicate unstable remanence.

Median destructive field (MDF) is the AF demagnetizing field required to reduce a remanence to 50% of its initial value. It is a measure of remanence stability related to coercivity ( $H_c$ ) and grain size of magnetic minerals. Remanence carrying by magnetic mineral with small grain-size in SD grains can be very hard to destroy by an AF field. Therefore, rocks containing multi domain (MD) grain size (>20  $\mu$ m) are easily demagnetized, whereas rocks containing single domain (SD) grain size (<20  $\mu$ m)

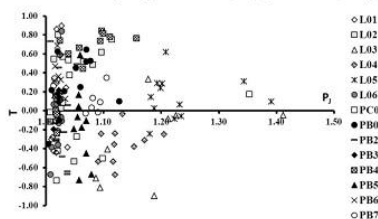


Figure 5. Jelinek (1981) plot of rocks sample from study area, T: the shape parameter and  $P_j$ : the degree of anisotropy.

## GP-1

5<sup>th</sup> GEOINDO 2015

are much harder. Dunlop and Özdemir (1997) summarized magnetic properties of rocks and showed that MDF of remanence ranged from 20 to 40 mT suggested pseudo single domain (PSD) magnetite. Follow this condition, MDF results in Table 2 may be interpreted that the specimens of sites L03, L04, PC01, PB01 and PB2 possess remanence carried by MD magnetite (MDF < 10 mT), while of sites L01, PB3, PB4 and PB5 are carried by PSD magnetite (MDF > 20 mT).

Difference magnetization within low field of induced magnetism in various directions of rock samples, can be described as anisotropy of magnetic susceptibility (AMS). Second rank tensor with three principal vectors

23-24 November 2015, Khon Kaen, Thailand

(PB2) show highest  $K_m$  values, and two sites of limestone (L05 and PB5) show very low  $K_m$  values.

- Relation between K-NRM (Figure 3) can separate sampled rocks into two groups (Devonian-Permian and Permian-Triassic) but the results of grain size analysis show a high scatter.

- Rock samples from central of Loei province (limestone site L05, skarn site L03 and L04) possess significantly high  $P_j$  values, indicative of tectonic compression.

- Rock samples from site L01, L06, and PB6 having a high stability of remanence are considered best

Table 2. Results of rocks magnetic properties.

Sites	N	Mean (SD)				Hysteresis Parameters					
		$K_m$ ( $\times 10^5$ SI)	NRM (mA/m)	MDF (mT)	$Q_{H=100}$	$P_j$	T	$M_s$ (Am <sup>2</sup> /kg)	$M_r$ (Am <sup>2</sup> /kg)	$H_c$ (mT)	$H_c$ (mT)
L01	12	4915.54 (4079.44)	613.21 (259.91)	26.14 (3.13)	3.78 (1.73)	1.02 (0.01)	0.06 (0.05)	12.90, 14.80	158.00, 163.00	52.00, 60.00	8.69, 9.53
L02	11	6512.04 (13990.34)	9.54 (19.60)	22.13 (14.30)	0.16 (0.26)	1.04 (0.03)	0.22 (0.40)	16.00, 0.76	91.500, 2.89	42.00, 310.00	1.88, 13.06
L03	8	7295.85 (10506.67)	2730.95 (3752.50)	4.57 (2.51)	11.95 (15.23)	1.19 (0.11)	-0.33 (0.44)	31.10, 9.73	110.00, 26.50	28.50, 58.00	11.66, 13.69
L04	10	16286.12 (6755.62)	2111.570 (31988.51)	3.50 (1.35)	32.96 (54.40)	1.13 (0.03)	-0.36 (0.19)	238.00	627.00	30.00	12.94
L05	12	39.45 (20.95)	0.81 (0.46)	15.25 (6.93)	0.62 (0.47)	1.23 (0.07)	0.14 (0.23)	0.88	2.70	300.00	3.18
L06	14	11766.60 (3038.08)	10424.82 (22361.79)	17.64 (12.60)	22.01 (43.90)	1.02 (0.01)	-0.01 (0.38)	3.44, 21.18	56.10, 119.00	80.00, 115.00	4.40, 20.00
PC01	11	687.05 (329.46)	1141.32 (2323.69)	5.36 (1.63)	28.62 (59.09)	1.07 (0.10)	0.05 (0.49)	0.91	4.47	300.00	5.04
PB01	11	748.00 (349.40)	1786.78 (1680.52)	6.00 (0.89)	53.15 (35.27)	1.05 (0.04)	0.28 (0.31)	4.70	13.90	80.00	10.41
PB2	12	22577.11 (18066.27)	103.65 (100.85)	8.50 (4.01)	0.21 (0.34)	1.03 (0.01)	-0.05 (0.48)	4.32	34.60	50.00	6.68
PB3	7	458.37 (10.51)	0.98 (0.32)	>30	0.05 (0.02)	1.02 (0.003)	0.06 (0.14)	0.77	3.03	256.00	4.72
PB4	12	1178.95 (291.99)	548.14 (845.36)	>30	9.74 (10.63)	1.07 (0.05)	0.51 (0.38)	10.30, 9.14	34.00, 29.30	200.00, 257.00	25.92, 32.72
PB5	10	39.09 (12.17)	7.15 (10.75)	22.63 (7.15)	4.32 (6.24)	1.06 (0.01)	-0.15 (0.39)	0.80, 1.13	2.00, 2.30	456.00, 286.00	3.20, 7.32
PB6	10	26860.00 (3389.95)	14695.39 (45153.37)	12.00 (2.98)	13.62 (41.81)	1.02 (0.1)	0.29 (0.18)	175.00, 186.00	947.00, 1030.00	36.00, 32.00	14.15, 13.57
PB7	9	3399.23 (3637.19)	10.55 (10.34)	14.33 (10.56)	0.19 (0.20)	1.06 (0.04)	0.15 (0.14)	2.11	94.70	170.00	2.90

Note: N: Number samples,  $K_m$ : mean susceptibility, NRM: natural remanent magnetization, SD: Standard deviation,  $Q_{H=100}$ : Koeningberger ratio,  $P_j$ : The degree of anisotropy, T: the shape parameter.

( $K_1 \geq K_2 \geq K_3$ ) were used to describe AMS, and shape of susceptibility presented by magnitude ellipsoid. This study presented only mean susceptibility ( $K_m$ ), shape parameter (T) and degree of anisotropy ( $P_j$ ) (Table 2). The shape parameter (T) of the study rocks is mixed between prolate (T<0) and oblate (T>0) susceptibility ellipsoids. Most sites show highly scatter values, except for sites L04, PB6 and PB7. Difference on shape factor (T) of rock samples can be caused by different magnetic minerals, deposition environment and deformation degree of rocks. For example, oblate can be found in normal sedimentation and prolate can be found in dikes, lava flows, fault zones, compression zone, etc. Degree of anisotropy ( $P_j$ ) of the study rocks varies from 1.02 - 1.23 (2 - 23%). Most samples from sites L03, L04 and L05 from central of Loei province have higher  $P_j$  values ( $P_j > 1.10$  or 10%) and T < 0. This result suggested that rocks from central of Loei are strongly affected by tectonic force under compression. The direction of the susceptibility ellipsoid can indicate the direction of tectonic force acted on rock. For palaeomagnetic analysis, a high magnetic anisotropy rock can affect the palaeomagnetic direction to some extents (Collison, 1983).

## 5. CONCLUSIONS

The results of this study can be summarized as follows:

- Bulk magnetic susceptibility ( $K_m$ ) and NRM of rock samples varies from 0.00003 to 0.027 SI and 0.8 to 22,000 mA/m, respectively. Rocks collected from dike area

for palaeomagnetic study. In contrast, sedimentary rocks from sites L05, PB3 and PB5 are not good because of too weak magnetic signals (low  $K_m$  and NRM), unstable remanent (low Q and low MDF) and strongly affected by tectonic stress (high  $P_j$ ). However, some site of igneous rocks could give the same results as sedimentary rocks (PB7 and PB2).

- Finally, the LPFB is considered a magnetic complex zone. The variations of magnetic properties of rocks as presented in this study could be useful for tectonic study of this zone. However, many more sampling sites in the LPFB are suggested to study for rock magnetism and palaeomagnetism in the near future.

## 6. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the International Program in the Physical Sciences (IPPS), Uppsala University, Sweden, Faculty of Science, Prince of Songkla University, for all necessary supports to our project, and thank to Electricity and Magnetism Research Laboratory, Kasetsart University for providing lab facilities (VSM machine) for hysteresis loop testing.

## 7. REFERENCES

- Barr, S.M. and MacDonald, AS., 1979. Palaeomagnetism, age, and geochemistry of the Denchai basalt, northern Thailand, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 46, pp. 113-124.
- Bhongsuwan, T., 2000. Research in Rock Magnetism and Palaeomagnetism of Recent Sediments and

## GP-1

5<sup>th</sup> GEOINDO 2015

23-24 November 2015, Khon Kaen ,Thailand

- Paleozoic to Tertiary Rocks, Ph.D. thesis, Division of Applied Geophysics, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 70 p.
- Bunopas, S. and Vella, P., 1978. Late Palaeozoic and Mesozoic structural evolution of northern Thailand: A plate tectonic model, Proceeding of 3rd Regional conference on Geology and Mineral Resources of Southeast Asia, pp. 122-140.
- Bunopas, S., 1981. Paleogeographic history of western Thailand and adjacent parts of Southeast Asia: a plate tectonic interpretation Ph.D. thesis, Victoria University of Wellington, New Zealand, Reprinted as Geology. Surv.5, DMR, Bangkok, 810 p.
- Butler, R.F., 1992. Paleomagnetism. Boston: Blackwell Scientific Publications, 319 p.
- Chadima M. and Jelinek V., 2009. Anisoft 4.2: Anisotropy Data Browser for Windows. Agico, Inc.
- Chadima M. and Hrouda F., 2009. Remasoft 3.0: Paleomagnetic Data Browser and Analyzer. Agico, Inc.
- Charusiri, P., Clark, A.H., Farrar, E., Archibald, D. and Charusiri, B., 1993. Granite belts in Thailand: evidence from the <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronological and geological syntheses, Journal of Southeast Asian Earth Science, Vol. 8, pp. 127-136.
- Charusiri, P., Daorerk, V., Archibald, D., Hisada, K. and Ampaiwan, T. 2002. Geotectonic Evolution of Thailand: A New Synthesis, Journal of the Geological Society of Thailand, Vol. 1, pp. 1-20.
- Collinson, D.W., 1983. Methods in Rocks Magnetism and Palaeomagnetism: Techniques and Instrumentation. New York: Chapman and Hall. 503 p.
- Day, R., Fuller, M. and Schmidt, V.A., 1977. Hysteresis Properties of Titanomagnetites: Grain-Size and Composition Dependence, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 13 (1977), pp. 260-267.
- Department of Mineral Resources (DMR), 2009. Geological Map of Loei, 1:250000, Geological Survey Division, Bangkok, Thailand.
- Department of Mineral Resources (DMR), 2009. Geological Map of Phetchabun, 1:250000, Geological Survey Division, Bangkok, Thailand.
- Dunlop, D.J. and Ozdemir, O., 1977. Rock Magnetism Fundamentals and frontiers. Cambridge: Cambridge University Press. 573 p.
- Dunlop, D.J., 2002. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc), Journal of Geophysical Research, Vol. 107, pp. 1-19.
- Evans, M.E. and Heller, F., 2003. Environmental Magnetism. California: Academic Press. 293 p.
- Haile, N.S. and Tarling, D.H., 1975. Note on reconnaissance palaeomagnetic measurements on Jurassic redbeds from Thailand. Pacific Geology, Vol. 10, pp. 101-103.
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M. and Banerjee, S., 1995. Magnetic Properties of Rocks and Minerals, The American Geophysical Union, pp. 189-204.
- Hutchinson, C. S., 1989. Geologic evolution of Southeast Asia, Oxford Monographs on Geology and Geophysics, No. 13, Oxford University press, 368 p.
- Intasopa, S. and Dunn, T., 1994. Petrology and Sr-Nd isotopic systems of the basalts and rhyolites, Loei, Thailand, Journal of Southeast Asian Earth Science, Vol. 9, pp. 167-180.
- Kamvong, T., Charusiri, P. and Intasopa, S.B., 2006. Petrochemical Characteristics of Igneous Rocks from the Wang Pong Area, Petchabun, North Central Thailand: Implications for Tectonic Setting, Journal of the Geological Society of Thailand, Vol. 1, pp. 9-26.
- Khin, Zaw, Meffre, S., Lai, C., Burrett, C., Santosh, M., Graham, I., Manaka, T., Salam, A., Kamvong, T. and Cromie P., 2014. Tectonics and metallogeny of mainland Southeast Asia – A review, Gondwana Research, Vol. 26, pp. 5-30.
- Kromkhun, K., Baines, G., Satarugsa, P. and Foden, J., 2013. Petrochemistry of Volcanic and Plutonic Rocks in Loei Province, Loei-Petchabun Fold Belt, Thailand, 2<sup>nd</sup> International Conference on Geological and Environment Science IPCBEE, Vol. 52, pp. 55-59.
- Leonhardt, R., 2006. Analyzing rock magnetic measurements: The RockMagAnalyzer 1.0 software, Computer & Geosciences, Vol. 32, pp. 1420-1431.
- Maranate, S. and Vella, P., 1986. Paleomagnetism of the Khorat Group, Mesozoic, northeast Thailand, Journal of Southeast Asian Earth Science, Vol. 1, pp. 23-31.
- McElhinny, M.W. and McFadden P.L., 2000. Paleomagnetism Continents and Oceans. New York: Academic Press. 386 p.
- Metcalfe, I., 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys, Journal of Asian Earth Science, 66, pp. 1-33.
- Richter, B. and Fuller M., 1996. Palaeomagnetic of the Sibumasu and Indochina blocks: implication for the extrusion tectonic model, Tectonic Evolution of Southeast Asia, Vol. 106, pp. 203-224.
- Ridd, M.F., Barber, A.J. and Crow, M.J., 2011. The Geology of Thailand. London: The Geological Society. 626 p.
- Salam, A., Khin, Zaw, Meffre, S., McPhil, J. and Lai, C., 2014. Geochemistry and geochronology of the Chatree epithermal gold-silver deposit: Implication for the tectonic setting of the Loei Fold Belt, central, Thailand, Gondwana Research, Vol. 26, pp. 198-217.
- Tarling, D.H. and Hrouda, F., 1993. The Magnetic Anisotropy of Rocks. London: Chapman and Hall, 217 p.
- Tauxe L., 2003. Paleomagnetic Principles and Practice. New York: Kluwer Academic Publishers, 285 p.
- Torsvik, T.H. and Cocks, L.R.M., 2004. Earth geography from 400 to 250 Ma: a paleomagnetic, faunal and facies review, Journal of the Geological Society, London, Vol. 161, pp. 555-572.
- Thompson, R. and Oldfield, F., 1989. Environmental Magnetism. London: Allen & Unwin. 227 p.
- Yang, Z. and Besse, J., 1993. Paleomagnetic study of Permian and Mesozoic sedimentary rocks from Northern Thailand supports the extrusion model for Indochina, Earth Planet. Sci. Lett. 117, pp. 525-552.

**GEOPHYSICS**  **THE 7<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED GEOPHYSICS**  
"Geophysics towards Sustainable Development of Thailand and AEC"



**PROCEEDINGS**

14<sup>th</sup> – 15<sup>th</sup> January 2016 : Bangkok, Thailand.





## Abstracts Session

of surface wave (MASW) and classify site condition based on the NEHRP in Bangkok and the vicinity. In addition, the predominant periods of the ground were determined from the ratio of horizontal to vertical Fourier spectra (HV spectral ratio) of the recorded microtremors. The result suggests that for 206 sites of combined active and passive MASW measurements, the  $V_{s30}$  of the soils vary from 85.6 – 308.6 m/s which is classified as the soil type Class E and class D based on the NEHRP soil type classification. Based on HV spectral ratio of all 115 sites, it suggests that the ground response ranges between 0.51 – 0.98 sec. The data from these two techniques are then combined to construct a site classification map for a seismic microzonation application and land-use planning of Bangkok and vicinity.

**Keywords:** Site classification, MASW,  $V_{s30}$ , microtremor, predominant period, Bangkok, seismic microzonation

Poster – P10

### Recent Investigation of Moho Depth and Crustal $V_p/V_s$ in Northern Thailand by Receiver Function Technique

Tosapol Pengsai

\*E-mail: pengsai.t@gmail.com

Current knowledge about Moho depth (H) and  $V_p/V_s$  (K) ratio in Northern Thailand (NT) have been derived by receiver function (RF) technique. However those results do not consider the azimuthal variation of crust beneath each station. This may lead to misinterpretation from the actual properties. In this study, we applied RF technique to 4 years long data (2011 - 2014) from 10 seismic stations operated by Thailand Meteorological Department (TMD) which contain more earthquake event than previous studies and also new stations that never have results. Additionally, for each site, we analyze a variation of Moho depth (H) and  $V_p/V_s$  from different source-receiver geometry (azimuth). For average crustal properties at each station, by using all source geometry, our results agree quite well with previous studies. The difference can be ranging from about -0.27 to 0.27 km and -0.01 to 0.04 for H and K, respectively. In term of variation, the different of H and K from different source geometry were observed at most of station. This variation can be refer to non-flatten crustal layer beneath each station such as a dipping of Moho. We expect that these results will improve the knowledge and understanding of Northern Thailand.

**Keywords:**

Poster – P11

### Preliminary palaeomagnetic results of Devonian-Triassic rocks from Loei-Phetchabun Fold Belt (LPFB)

Akekarat Rittiniam and Tripob Bhongsuwan\*

Geophysics Research Center, Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, 90112 Hatyai, Thailand.

\*E-mail: tripob.b@psu.ac.th

Major tectonic events of SE-Asia occurred during Permian to Triassic and Tertiary period. Palaeomagnetism is the study of the Earth's magnetic field recorded in rocks that provides information on the past behavior of Earth's field and past location of tectonic plates. In this study, we report the preliminary palaeomagnetic results of the Devonian-Triassic (D-Tr) rocks collected from Loei and Phetchabun provinces, in the Indochina Terrane (INC). 14 sites (149 cores) of oriented samples were collected from the study area. Sampled cores were cut into standard specimens and palaeomagnetic measurements were performed in the laboratory with alternating field (AF) demagnetization progressively from 5 – 70mT fields. Approximately half of samples showed a highly scattered remanence directions, which resulted in a high  $\alpha_{95}$  of characteristic remanence (ChRM) direction, which was not used for further palaeo magnetic analysis. The other samples showed a small scatter and can be classified into two groups. First, 4 sites (40 specimens) of Permian-Triassic (P-Tr) rocks, the mean direction  $D/I$  ( $\alpha_{95}$ ) and palaeolatitude were  $41.1^\circ/29.3^\circ$  ( $25.9^\circ$ ) and  $15.7^\circ\text{N}$  ( $+20.1^\circ$ ,  $-14.0^\circ$ ), respectively. Second, 3 sites (23 specimens) of Carboniferous-Permian (C-P) rocks, the mean direction and palaeolatitude were  $116.9^\circ/43.2^\circ$  ( $30.1^\circ$ ) and  $25.2^\circ\text{N}$  ( $+33.9^\circ$ ,  $-18.5^\circ$ ) respectively. During P-Tr and C-P, rotation of Indochina Terrane was in clockwise direction. INC plate rotated  $12.7^\circ$  ( $\pm 20.8^\circ$ ) during P-Tr and  $61.6^\circ$  ( $\pm 31.0^\circ$ ) during C-P relative to South China Block. However, this preliminary palaeomagnetic results are highly scattered and affected on tectonic model. Therefore, to increase the statistical accuracy of palaeomagnetic results, many more sampling sites shall be visited.

**Keywords:** tripob.b@psu.ac.th

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายเอกรัฐ ฤทธิเนียม		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5510220007		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2547
	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์)	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	2544

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนอุดหนุนเพื่อวิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2555

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- Rittiniam, A., Bhongsuwan, T., 2015. Magnetic Properties of Devonian-Triassic rocks from Loei and Phetchabun provinces, Proceeding of the International Conference on Geology Geotechnology and Mineral Resources of INDOCHINA (5<sup>th</sup> GEOINDO 2015), 23<sup>rd</sup> -25<sup>th</sup> November 2015, Khon Kaen, Thailand.
- Rittiniam, A., Bhongsuwan, T., 2016. Preliminary Palaeomagnetic Results of Devonian-Triassic rocks from Loei-Phetchabun Fold Belt (LPFB), Poster of the 7<sup>th</sup> International Conference on Applied Geophysics, 14<sup>th</sup> -15<sup>th</sup> January, Bangkok, Thailand.