



การศึกษาขั้นต้นของอำนาจแม่เหล็กโบราณจากอิฐยุคเก่าของภาคใต้

**Preliminary Study on Archaeomagnetism from
Ancient Bricks in Southern Thailand**

สุรียันต์ พรหมดวง

Suriyan Promduang

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

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาขั้นต้นของอำนาจแม่เหล็กโบราณจากอัญมณีเก่าของภาคใต้
ผู้เขียน นายสุรียันต์ พรหมดวง
สาขาวิชา ธรณีฟิสิกส์

| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | คณะกรรมการสอบ |
|---|--|
| (รองศาสตราจารย์ ดร.ไตรภพ ผ่องสุวรรณ) |ประธานกรรมการ (ดร.กำแหง วัฒนเสน) |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม |กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ไตรภพ ผ่องสุวรรณ) |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.ชวิช ชิตตระการ) |กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ชวิช ชิตตระการ) |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรณี ผ่องสุวรรณ) |กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล) |

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

| | |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาขั้นต้นของอำนาจแม่เหล็กโบราณจากอัญมณีเก่าของภาคใต้ |
| ผู้เขียน | นายสุริยันต์ พรหมดวง |
| สาขาวิชา | ธรณีฟิสิกส์ |
| ปีการศึกษา | 2551 |

บทคัดย่อ

การศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กตกค้างโบราณ โดยใช้วิธีดินเผาเก่าจากแหล่งต่าง ๆ ของภาคใต้ จำนวน 5 แหล่ง โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อน 2 ครั้งของ Thellier ร่วมกับการทำ pTRM check ของ Coe ผลการศึกษาพบว่าดินเผาจากชุมชนโบราณศรีวิชัย จ.สุราษฎร์ธานี มีค่าสภาพปรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก หรือค่า k เฉลี่ย 653.65 μSI ซึ่งสูงกว่าแหล่งอื่น ส่วนตัวอย่างจากชุมชนโบราณเกาะยอ จ.สงขลา มีค่า k เฉลี่ยต่ำที่สุด 3.54 μSI การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า k ร่วมกับการทำ pTRM check แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสารแม่เหล็กในระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ และจากการศึกษาพบความสัมพันธ์ระหว่างค่า k ว่าสัมพันธ์เป็นส่วนกลับกับสภาพแอนไอโซทรอปีของสภาพปรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (AMS) ของตัวอย่าง โดยพบตัวอย่างที่มีค่า k น้อยกว่า 10 μSI ถึง 67% มีสภาพ AMS สูงกว่า 25% ผลการศึกษาพบว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณของภาคใต้ช่วง 700 - 1,200 ปีที่ผ่านมา มีค่าเฉลี่ยประมาณ 40.2 μT ใกล้เคียงกับข้อมูลความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกปัจจุบัน และสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา โดยในปี พ.ศ. 1400 สนามแม่เหล็กโลกบริเวณภาคใต้ของประเทศไทยมีความเข้ม $43.6 \pm 8.5 \mu\text{T}$ จากนั้นก็ลดลง จนมีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 1550 โดยมีค่า $36.8 \pm 6.8 \mu\text{T}$ แล้วจึงเพิ่มขึ้น จนถึงปี พ.ศ. 1650 มีค่าประมาณ $41.0 \pm 14.7 \mu\text{T}$ แล้วลดลงอีกเล็กน้อยจนมีค่า $40.5 \pm 5.0 \mu\text{T}$ ประมาณปี พ.ศ. 1750 จากผลที่ได้สามารถสร้างกราฟอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กในอดีตของภาคใต้ได้

| | |
|----------------------|--|
| Thesis Title | Preliminary Study on Archaeomagnetism from Ancient Bricks in Southern Thailand |
| Author | Mr.Suriyan Promduang |
| Major Program | Geophysics |
| Academic Year | 2008 |

ABSTRACT

We have performed the archaeomagnetic intensity determination on ancient bricks from 5 civilizations of Southern Thailand, and compared the results to previous global VADM studies. The experiments were performed on the fired structure samples using the Thellier double heating and Coe methods. Samples from Kao Srivichai, Suratthani, have the highest k value with the mean value of 653.65 μ SI. Samples from Ko Yoh, Songkhla, have the lowest k value with the mean value of 3.54 μ SI. Magnetic susceptibility and pTRM checks reveal the changes of the remanence properties during heating steps to higher temperatures. We found that the magnetic susceptibility of samples correlated well with magnetic anisotropy, 67% of samples having the k values of less than 10 μ SI will have the magnetic anisotropy larger than 25%. Results of this study show that the mean archaeomagnetic intensity of the period A.D. 157 - 657 is about 40.2 μ T. The field intensity around A.D. 857 is 43.6 ± 8.5 μ T and decreases to 36.8 ± 6.8 μ T at A.D. 1007. In A.D. 1107 the field intensity is about 41.0 ± 14.7 μ T and about 40.5 ± 5.0 μ T in A.D. 1207. Results from the different civilizations and ages can be used to construct the secular variation standard curve of the archaeomagnetic intensity for Southern Thailand.

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| ปกใน | (1) |
| คำอัญมัติ | (2) |
| บทคัดย่อ | (3) |
| Abstract | (4) |
| กิตติกรรมประกาศ | (5) |
| สารบัญ | (6) |
| รายการตาราง | (9) |
| รายการภาพประกอบ | (10) |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 บทนำต้นเรื่อง | 1 |
| 1.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแหล่งโบราณสถานศึกษา | 3 |
| 1.1.2 การหาอายุของวัตถุโบราณ | 7 |
| 1.1.3 การหาอายุของวัตถุโบราณด้วยวิธีทางแม่เหล็ก | 8 |
| 1.2 การตรวจเอกสาร | 9 |
| 1.2.1 การหาอายุวัตถุโบราณของภาคใต้ | 9 |
| 1.2.2 ความแตกต่างของค่าสนามแม่เหล็กโลก | 9 |
| 1.2.3 การศึกษาอำนาจแม่เหล็กโบราณโดยเทคนิค Thellier | 10 |
| 1.2.4 ความคลาดเคลื่อนของเทคนิค Thellier | 12 |
| 1.2.5 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสารแม่เหล็ก | 13 |
| 1.2.6 การเลือกใช้กราฟในการคำนวณความเข้มของสนามแม่เหล็กโบราณ | 13 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ | 17 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี | |
| 2.1 สนามแม่เหล็ก (Magnetic field) | 18 |
| 2.2 การมีสภาพแม่เหล็กและหมดสภาพแม่เหล็กของวัตถุ | 19 |
| 2.3 การเป็นแม่เหล็กตกค้าง (Remanent magnetization, RM) | 20 |
| 2.4 สนามแม่เหล็กโลก (Earth's magnetic field) | 21 |
| 2.5 การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกกับเวลา | 22 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สนามแม่เหล็กหลักของโลก (International Geomagnetic Reference Field; IGRF) | 23 |
| 2.7 การหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกในอดีต | 25 |
| 2.8 เทคนิคการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณของ Thellier | 27 |
| 2.9 ความคลาดเคลื่อนในการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ | 31 |
| 2.10 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง | 35 |
| 2.11 การวิเคราะห์ข้อมูล | 38 |
| บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ | |
| 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ | 41 |
| 3.1.1 การศึกษาอำนาจแม่เหล็ก | 41 |
| 3.1.2 การเตรียมตัวอย่าง | 44 |
| 3.1.3 อุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ร่วมกัน | 44 |
| 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย | 45 |
| 3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง | 45 |
| 3.2.2 การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก | 46 |
| 3.2.3 การวัดค่าอำนาจแม่เหล็กตกค้าง | 47 |
| 3.2.4 การลบล้างอำนาจแม่เหล็กตกค้างโดยความร้อน การให้สนามเหนี่ยวนำแก่ตัวอย่าง และการทำ pTRM check | 47 |
| 3.2.5 การเขียนกราฟ NRM-pTRM หรือ Arai plot | 49 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง | |
| 4.1 ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก | 50 |
| 4.2 ค่าความไม่สม่ำเสมอของค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (AMS) | 56 |
| 4.3 ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กตกค้างโบราณ | 61 |
| บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ | |
| 5.1 บทสรุป | 74 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 76 |
| บรรณานุกรม | 78 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| ภาคผนวก | 84 |
| ภาคผนวก ก ทฤษฎีและลักษณะเฉพาะที่เกี่ยวกับคุณสมบัติทางแม่เหล็กในงานวิจัย | 85 |
| ภาคผนวก ข กราฟ Arai plot, Thermal demagnetization และ Magnetic susceptibility | 95 |
| ประวัติผู้เขียน | 133 |

รายการตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 1.1 แสดงตัวอย่างพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มของ สนามแม่เหล็กโลกโบราณ | 16 |
| ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (ค่า k) ของตัวอย่างดินเผาจาก แหล่งต่าง ๆ | 50 |
| ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแอนไอโซทรอปีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวอย่าง | 56 |
| ตารางที่ 4.3 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณของ ภาคใต้ | 68 |
| ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลกในอดีตจากแหล่งต่าง ๆ ของภาคใต้ | 72 |

รายการภาพประกอบ

| | | หน้า |
|-------------|--|------|
| ภาพที่ 1.1 | กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า VADM ของ McElhinny และ Senanayake, Yang และคณะ และ Constable และ Korte | 11 |
| ภาพที่ 2.1 | การเปลี่ยนแปลงของค่า k ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของสารแม่เหล็กชนิดโดเมนเดี่ยวสมบูรณ์ | 20 |
| ภาพที่ 2.2 | แสดงชั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กหลักของโลก จาก IGRF ปรับปรุงครั้งที่ 10 | 22 |
| ภาพที่ 2.3 | วงฮีสเทอรีซิสแสดงการเกิดอำนาจแม่เหล็กตกค้างในวัสดุแม่เหล็ก | 23 |
| ภาพที่ 2.4 | ความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation time กับขนาดของเกรนแม่เหล็ก | 26 |
| ภาพที่ 2.5 | การเปลี่ยนแปลงของ Relaxation time กับอุณหภูมิของแมกนีไทต์ | 26 |
| ภาพที่ 2.6 | กฎของความเป็นอิสระและกฎการรวมกันของค่า pTRM ที่ได้จากการเย็นตัวในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะเป็นอิสระต่อกันและผลรวมของแต่ละช่วงจะเป็นค่า TRM ทั้งหมด | 29 |
| ภาพที่ 2.7 | ลักษณะกราฟการหาความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้เทคนิค Thellier a) การลดลงของค่า NRM และค่า pTRM ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ b) กราฟ Arai plot | 31 |
| ภาพที่ 2.8 | การเกิดค่า pTRM และการลบล้าง NRM โดยใช้ความร้อนของแร่ plagioclase ซึ่งมีลักษณะเป็นโดเมนเดี่ยว และแร่สีเข้ม (dark minerals) ซึ่งมีลักษณะเป็นมัลติโดเมน | 32 |
| ภาพที่ 2.9 | เปรียบเทียบลักษณะของกราฟที่ได้จากแร่แมกนีไทต์ซึ่งมีขนาดเกรนแม่เหล็กต่างกัน | 33 |
| ภาพที่ 2.10 | รูปแบบการศึกษาและการทำ pTRM checks ของ Coe (1967) โดยการให้ความร้อน 2 ครั้ง ครั้งแรกให้ความร้อนในสนามภายนอกเป็นศูนย์ และครั้งที่สองให้ความร้อนในสนามภายนอก | 36 |
| ภาพที่ 3.1 | เครื่องวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก Spinning Specimen Magnetic Susceptibility Anisotropy Meter รุ่น KLY-3 Kappabridge | 41 |
| ภาพที่ 3.2 | เครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบหมุน JR-4 Spinning Magnetometer | 42 |
| ภาพที่ 3.3 | เครื่องลบล้างแมกนีไทเซชันโดยใช้ความร้อน Magnetic Measurement Thermal Demagnetizer รุ่น MMTD-18 | 43 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| | | หน้า |
|-------------|--|------|
| ภาพที่ 3.4 | เครื่องจ่ายกระแสตรง ยี่ห้อ GW instek รุ่น GPR-1810HD | 43 |
| ภาพที่ 3.5 | การเตรียมตัวอย่างและแบบสำหรับใส่ตัวอย่างเพื่อใช้ในการวัดแมกนีไทเซชันตกค้าง | 46 |
| ภาพที่ 4.1 | ตัวอย่างกราฟแสดงค่า k ของตัวอย่างจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปั้ง โดย (A) เป็นตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง และ (B) เป็นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10% | 52 |
| ภาพที่ 4.2 | ตัวอย่างกราฟแสดง k ของตัวอย่างจากโบราณสถานพระสยาม โดย (A) เป็นตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง และ (B) เป็นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10% | 53 |
| ภาพที่ 4.3 | ตัวอย่างกราฟแสดงค่า k ของตัวอย่างจากโบราณสถานเขาศรีวิชัย โดย (A) เป็นตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง และ (B) เป็นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10% | 54 |
| ภาพที่ 4.4 | ตัวอย่างกราฟแสดงค่า k ของตัวอย่างจากชุมชนโบราณเกาะยอ ในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ และในสนามแม่เหล็กภายนอก | 54 |
| ภาพที่ 4.5 | ตัวอย่างกราฟค่า k ของตัวอย่างจากกำแพงเมืองนครศรีธรรมราช โดย (A) เป็นตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง และ (B) เป็นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10% | 55 |
| ภาพที่ 4.6 | ตัวอย่างกราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปั้ง | 62 |
| ภาพที่ 4.7 | กราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปั้ง ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด | 63 |
| ภาพที่ 4.8 | ตัวอย่างกราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถานพระสยาม | 64 |
| ภาพที่ 4.9 | ตัวอย่างกราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถานพระสยาม ซึ่งมีลักษณะโค้งขึ้น | 64 |
| ภาพที่ 4.10 | ตัวอย่างกราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถานเขาศรีวิชัย | 65 |
| ภาพที่ 4.11 | ลักษณะกราฟ Arai plot และ Thermal demagnetization ของตัวอย่าง KS1-1 ซึ่งไม่สามารถหาค่าความชันได้ | 66 |
| ภาพที่ 4.12 | ลักษณะกราฟ Arai plot ของตัวอย่าง KS4-1 และ KS4-2 ซึ่งไม่ผ่านการพิจารณาค่า pTRM check | 66 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| ภาพที่ 4.13 ตัวอย่างกราฟ Arai plot ของตัวอย่างจากชุมชนโบราณเกาะยอ (A) เป็นตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์การพิจารณา (B) เป็นตัวอย่างที่กราฟมีลักษณะโค้งขึ้นเนื่องจากการแปรสภาพของสารแม่เหล็กในระหว่างการให้ความร้อน | 67 |
| ภาพที่ 4.14 กราฟ Arai plot และกราฟ Thermal demagnetization ของตัวอย่าง NK4-1 และ NK5-2 | 68 |
| ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบค่า VADM จากตัวอย่างดินเผาภาคใต้ที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลที่มีการศึกษามาก่อน | 73 |
| ภาพที่ 5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกของภาคใต้ในยุคต่าง ๆ | 75 |

บทที่ 1

บทนำ

ภาคใต้เป็นแหล่งรวมของอารยธรรมจากยุคสมัยต่าง ๆ ที่มีคุณค่าควรแก่การศึกษาอยู่เป็นจำนวนมาก ทั้งเครื่องปั้นดินเผาพื้นเมืองสมัยก่อนประวัติศาสตร์ สมัยแรกเริ่มประวัติศาสตร์ และสมัยประวัติศาสตร์ (สถาบันทักษิณคดีศึกษา, 2529) ซึ่งพบอยู่ในหลายแหล่งและเกือบทุกจังหวัด ไม่ว่าจะเป็น เมืองโบราณยะรัง เตาเผาโบราณบ้านดี จ.ปัตตานี, เตาเผาและเครื่องปั้นดินเผาชุมชนโบราณบ้านปะโอ ในบริเวณคาบสมุทรสทิงพระ จ.สงขลา, เครื่องถ้วยและดินเผาจากโบราณสถานเขาศรีวิชัย จ.สุราษฎร์ธานี, แหล่งโบราณสถาน (ร้าง) ตุมปัง ฐานพระสยาม ดินเผาบ้านโมคลาน และดินเผาจากกำแพงเมืองเก่า จ.นครศรีธรรมราช เป็นต้น โดยแต่ละแหล่งก็จะมีประวัติความเป็นมาที่แตกต่างกันออกไป การศึกษาประวัติ ที่มา องค์ประกอบ และคุณลักษณะต่าง ๆ ของโบราณวัตถุเหล่านี้ จะช่วยให้เข้าใจอารยธรรมในยุคเหล่านั้นได้ดียิ่งขึ้น

การศึกษาคุณลักษณะของวัสดุโดยใช้วิธีการทางธรณีฟิสิกส์จะอาศัยความแตกต่างทางกายภาพของวัตถุที่ต้องการศึกษากับสภาพแวดล้อม ซึ่งคุณลักษณะสำคัญประการหนึ่งของวัสดุประเภทดินเผาคือ การมีส่วนประกอบของเหล็กออกไซด์ซึ่งมีความสามารถในการกักเก็บอำนาจแม่เหล็กในระหว่างที่ถูกเผาไว้ได้ และเนื่องจากสนามแม่เหล็กโลกมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นดินเผาซึ่งถูกเผาที่เวลาต่างกันก็จะมีลักษณะเฉพาะทางแม่เหล็กต่างกัน การศึกษาในครั้งนี้จึงมุ่งไปที่การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกในช่วงอายุต่าง ๆ ที่เก็บอยู่ในโบราณวัตถุประเภทอิฐดินเผา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก และหาอายุของอิฐดินเผาที่ผลิตในภาคใต้ ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อทราบความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกในขณะที่ตัวอย่างนั้นถูกเผาได้

1.1 บทนำต้นเรื่อง

แหล่งโบราณคดีนับตั้งแต่สมัยก่อนประวัติศาสตร์ของภาคใต้กระจายอยู่ให้พบเห็นได้เกือบทุกจังหวัด นับตั้งแต่แหล่งโบราณคดีถ้ำหลังโรงเรียนทับปด จ.กระบี่ ซึ่งเป็นแหล่งโบราณคดีเกี่ยวกับมนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์และนับเป็นแหล่งเก่าแก่ที่สุดบนคาบสมุทรแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่มนุษย์อาศัยอยู่ และยังมีแหล่งโบราณคดีที่สำคัญอื่นอีก เช่น ถ้ำอ่าวปากหมาก ควนลูกปัด และเขานาบน้ำ แหล่งโบราณคดีใน จ.ชุมพร เช่น ชุมชนโบราณเขา

สามแก้ว แหล่งโบราณคดีถ้ำฉานเรน และแหล่งโบราณคดีถ้ำช้างเล่น ส่วนใน จ. พังงา มีแหล่งโบราณคดีวัดสุวรรณคูหา แหล่งโบราณคดีเกาะคอเขา แหล่งโบราณคดีเขาพัง แหล่งโบราณคดีถ้ำนาค และแหล่งโบราณคดีเขาหุ้ม นอกจากนี้ยังมีมัสยิดกรือเซะ เมืองโบราณยะรัง จ.ปัตตานี แหล่งโบราณคดีเขาคา และชุมชนบ้านโมคลาน จ.นครศรีธรรมราช ชุมชนโบราณบนคาบสมุทรสทิงพระ จ.สงขลา ถ้ำเขาสามบาตร จ.ตรัง เป็นต้น

ในที่นี้ เครื่องปั้นดินเผาพื้นเมืองภาคใต้ หมายถึง เครื่องปั้นดินเผาที่ชนพื้นเมืองโบราณที่เคยอาศัยอยู่ในดินแดนภาคใต้ ตั้งแต่ชุมชนสมัยก่อนประวัติศาสตร์ สมัยแรกเริ่มประวัติศาสตร์ จนกระทั่งถึงสมัยประวัติศาสตร์ ได้ทำขึ้นใช้ในชีวิตประจำวัน และหลงเหลืออยู่เป็นหลักฐานทางโบราณคดี (สารานุกรมวัฒนธรรมภาคใต้, 2529)

เครื่องปั้นดินเผาพื้นเมืองโบราณในภาคใต้ อาจจำแนกตามลักษณะต่าง ๆ กัน ได้ดังนี้

1) ภาชนะดินเผาและเครื่องปั้นดินเผาที่เกี่ยวข้องกับภาชนะ มีมาตั้งแต่สมัยก่อนประวัติศาสตร์ โดยเผาที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนในสมัยแรกเริ่มประวัติศาสตร์ มีการเลือกวัตถุดิบมากขึ้น มีอุณหภูมิการเผาตั้งแต่ 700-1,000 °C มีลักษณะเด่นคือเป็นภาชนะเนื้อเนียนละเอียด สีขาว ขาวนวล สีเทาปนขาว ทำด้วยดินที่มีแร่แคลไซต์สูง และสมัยประวัติศาสตร์ มีทั้งภาชนะเนื้อแกร่ง แนน อุณหภูมิการเผาสูง แบบอย่างอิทธิพลเมืองหลวง และแบบที่สืบทอดกันมาจนถึงปัจจุบัน ลักษณะดินเผาของภาคใต้ทุกสมัยจะมีการตกแต่งลวดลายให้กับภาชนะในลักษณะต่าง ๆ กัน ที่สำคัญได้แก่ การขีดผิวมัน ลายทาบเชือก ลวดลายขูดขีด-เซาะร่องให้เป็นริ้วหรือแถบเส้นเป็นแนว ลายกดประทับ ลายเขียนสี ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะในแบบของภาคใต้ โดยรูปแบบของภาชนะที่ปรากฏตามหลักฐานทางโบราณคดีที่สำคัญ เช่น หม้อสามขา ภาชนะทรงพาน ภาชนะรูปหม้อน้ำ กุณฑีและกุนที เป็นต้น

2) เครื่องมือเครื่องใช้อื่นที่ทำด้วยดินเผา ได้แก่ ลูกถือหรือหินดูดินเผา ใช้ดูดินภาชนะด้านในขณะตีลายประทับลงบนผิวด้านนอก เพื่อรักษารูปทรงของภาชนะไม่ให้บิดเบี้ยวไปตามแรงตี แ่งดินเผามีลายหรือเรียกว่า ไม้ตาม ใช้ตกแต่งผิวภาชนะด้วยการกดประทับ แวดินเผา ซึ่งเป็นเครื่องปั้นดินเผาที่เป็นอุปกรณ์ประกอบในการปั้นฝ้าย ตะคันดินเผา เป็นจานหรือถ้วยขนาดเล็ก ใช้ใส่น้ำมันสำหรับจุดไฟหรือวางเทียนอบ หรือเผากำยานในการทำน้ำอบ นอกจากนี้ยังมีลูกกระสุนดินเผา ตุ่มถ่วงแหดินเผา ลูกปัดดินเผา ลูกล้อและเบียดดินเผา กระเบื้องขอลและกาบหรือกระบุง และตราประทับดินเผา เป็นต้น

3) หุ่นจำลองหรือรูปจำลองดินเผา เป็นเครื่องปั้นดินเผาที่จำลองหรือย่อส่วนจากของจริง เพื่อวัตถุประสงค์อย่างใดอย่างหนึ่งที่อาจเกี่ยวเนื่องกับความเชื่อ พิธีกรรม หรือเพื่อประดับตกแต่ง เช่น พิมพ์ดินเผาเป็นรูปสตรีที่บ้านทุ่งตึก จ. พังงา ดินเผารูปตัวสัตว์และดินเผารูปใบไม้พบที่ชุมชนโบราณเขาสามแก้ว จ. ชุมพร สถูปจำลองดินเผาที่ชุมชนโบราณยะรัง จ.ปัตตานี

และที่ถ้ำคูหาภิมุข อ.เมือง จ.ยะลา นอกจากนี้ก็ยังพบดินเผารูปอวัยวะเพศ และพระพิมพ์ดินเผา ซึ่งตามหลักฐานมีมาแล้วไม่น้อยกว่าพุทธศตวรรษที่ 13 เป็นต้น

เครื่องปั้นดินเผาหรือเครื่องถ้วยจำนวนมากที่พบ ทั้งชนิดเนื้อดินไม่เคลือบซึ่งมีอายุเก่าแก่นับพันปีขึ้นไป และชนิดเคลือบซึ่งผลิตขึ้นด้วยเทคนิคและฝีมือชั้นสูง เพียบพร้อมไปด้วยความสวยงาม ซึ่งมีอายุนับพันปีเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน เป็นหลักฐานที่แสดงถึงความเจริญและความเป็นปึกแผ่นของชุมชนในแถบชายทะเลฝั่งตะวันออกและตะวันตกตามแนวคาบสมุทรภาคใต้ได้เป็นอย่างดี โดยแต่ละแหล่งก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งรูปทรง สี ลวดลาย และคุณสมบัติอื่น ๆ เนื่องจากมีวัตถุดิบ อุปกรณ์ กรรมวิธีการผลิต และมีรูปแบบวัฒนธรรมซึ่งได้รับการพัฒนามาในช่วงสมัยที่ต่างกัน (สารานุกรมวัฒนธรรมภาคใต้, 2529)

1.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแหล่งโบราณสถานที่ศึกษา

ตัวอย่างดินเผาที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ได้มาจากสถานที่ต่าง ๆ จำนวน 5 แหล่ง ซึ่งประกอบด้วย

1) กำแพงเมืองโบราณนครศรีธรรมราช

ตั้งอยู่ที่ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช สร้างขึ้นครั้งแรกสุดในสมัยพระเจ้าศรีธรรมโศกราช โดยสร้างเป็นกำแพงดิน มีคูน้ำล้อมรอบ ต่อมาในสมัยหลังจึงได้ก่ออิฐขึ้นบนแนวคันดิน และได้มีการบูรณะหลายครั้ง โดยยังคงรักษาแนวกำแพงเดิมไว้ การก่อสร้างกำแพงเมืองอิฐน่าจะปรากฏขึ้นชัดเจนในสมัยอยุธยา

ในราว พ.ศ. 1950 สมเด็จพระรามาเมศวรแห่งกรุงศรีอยุธยา ได้เสด็จไปตีล้านนา แล้วกวาดต้อนผู้คนมาไว้ที่เมืองนคร ชาวล้านนาจึงเอาแบบอย่างการสร้างกำแพงเมืองจากเชียงใหม่มาซ่อมกำแพงเมืองนคร ในสมัยสมเด็จพระมหาจักรพรรดิ กำแพงเมืองถูกดัดแปลงเป็นกำแพงก่ออิฐ เพื่อให้เป็นป้อมปราการที่แข็งแรง ตามแบบตะวันตก โดยชาวโปรตุเกสได้นำวิธีการสร้างแบบก่ออิฐและตั้งฐานป้อมใหญ่ขึ้นมา ต่อมาในสมัยสมเด็จพระนารายณ์มหาราช ไทยได้นำเอาวิทยาการและเทคโนโลยีจากประเทศตะวันตกเข้ามามากมาย เพื่อซ่อมแซมและดัดแปลงกำแพงเมืองและป้อมปราการต่าง ๆ รวมทั้งกำแพงเมืองนครศรีธรรมราชด้วย

ในสมัยพระเจ้ากรุงธนบุรี ซึ่งตรงกับสมัยเจ้าพระยาานครศรีธรรมราช (หนู) ผู้เป็นเจ้าเมือง มีหลักฐานว่าได้มีการซ่อมแปลงกำแพงค่ายคูประตูเมืองอีกครั้ง จนสมัยพระบาทสมเด็จพระพุทธเลิศหล้านภาลัย ซึ่งตรงกับสมัยเจ้าพระยาศรีธรรมราช (พัด) ได้มีการซ่อมกำแพงเมืองอีกเป็นครั้งสุดท้าย ก่อนจะมีการบูรณะต่อมาโดยกรมศิลปากร

รูปแบบศิลปกรรม เป็นไปตามรูปแบบสถาปัตยกรรมอยู่ในสมัยอยุธยา แต่ลักษณะผังเมือง กำแพงเมือง คูเมือง ครั้งแรกสุดสันนิษฐานว่าราวพุทธศตวรรษที่ 18

สภาพปัจจุบัน กำแพงเมืองนครศรีธรรมราชมีแผนผังเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีคูเมืองล้อมรอบ 1 ชั้น ขนาดความกว้างของเมือง (ตามแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก) ประมาณ 500 เมตร ความยาว (ตามแนวทิศเหนือ-ใต้) ประมาณ 2,239 เมตร ปัจจุบันเนื่องจากเมืองใหม่เจริญเติบโตทับซ้อนเมืองโบราณ มีอัตราการบุกรุกทำลายโบราณสถานสูงมาก ทำให้แนวกำแพงเมืองด้านทิศตะวันออกและตะวันตกถูกเกลี้ยกลายไปเป็นถนนตั้งแต่ปลายรัชกาลที่ 6 เหลือเพียงกำแพงด้านทิศเหนือปากตะวันออกประมาณ 100 เมตร ที่ยังมีสภาพสมบูรณ์ ลักษณะเป็นกำแพงก่ออิฐเป็นรูปใบเสมา มีป้อมตรงกลางปากประตูเมือง คูเมืองด้านเหนือยังมีสภาพค่อนข้างดี เนื่องจากได้รับการบำรุงรักษาขุดลอกอยู่เสมอ คูเมืองด้านทิศตะวันออกได้รับผลกระทบจากการรื้อกำแพงเมืองไปปรับเป็นถนนศรีธรรมโศก คูเมืองจึงถูกถมและถูกบุกรุกปลูกสร้างบ้านเรือน สภาพตื้นเขินและขาดเป็นช่วง ๆ กำแพงเมืองด้านทิศตะวันตกกลายเป็นถนนนครศรีธรรมราช คูเมืองตื้นเขินเหลือเพียงร่องน้ำเล็ก ๆ กำแพงเมืองด้านทิศใต้กลายเป็นที่ราบ

2) โบราณสถานฐานพระสยาม

ตั้งอยู่ที่ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช โดยคำว่า พระสยาม หรือพระสยามภูวนาท หมายถึง พระอิศวร ฐานพระสยามก็คือหอพระอิศวร ประวัติการก่อสร้างไม่มีการบันทึกไว้ สันนิษฐานจากหลักฐานทางโบราณคดีที่ปรากฏ และผลจากการขุดค้นทางโบราณคดีของ ดร. ควอริทซ์ เวลส์ (H.G. Quaritch Wales) นักโบราณคดีชาวอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2478 อาจกล่าวได้ว่า ฐานพระสยามก่อสร้างขึ้นไม่เก่าไปกว่าพุทธศตวรรษที่ 16 โบราณวัตถุที่ปรากฏได้แก่ ชากอาคาร ศิวลึงค์ ฐานโยนิ ฐานเทวรูป โดยโบราณวัตถุมีอายุเก่ากว่าตัวอาคาร

รูปแบบศิลปกรรม จากตัวชากอาคารซึ่งเหลือแต่เพียงฐานก่ออิฐสอดินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า คาดว่าน่าจะสร้างก่อนพุทธศตวรรษที่ 18

สภาพปัจจุบันเหลือเพียงส่วนฐานของชากอาคารเป็นฐานก่ออิฐสอดินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตัวอาคารแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ฐานทั้งหมดของอาคารก่ออิฐสูงชันราว 3 ศอก ผังก่ออิฐหนาราว 50 เซนติเมตร ฐานอาคารยาวประมาณ 15.90 เมตร กว้างประมาณ 5.90 เมตร ลักษณะคล้ายวิหาร มีบันไดขึ้นด้านหน้า (ทิศตะวันออก) 1 บันได อีกส่วนหนึ่งอยู่ด้านหลัง ทำเป็นห้องสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ยาว 3.30 เมตร กว้าง 2.70 เมตร มีประตูเข้าทางด้านทิศตะวันออกขนาดกว้าง 52 เซนติเมตร ผังที่เหลืออยู่สูงราว 1.85 เมตร ก่ออิฐที่บั้งสี่ด้านภายในประดิษฐานศิวลึงค์วางอยู่บนฐานโยนิ ทรงกลม ขนาดใหญ่ด้านหน้าห้องมีฐานเทวรูปสันนิษฐานว่าเป็นรูปโคหนที

3) โบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มป้ง

ตั้งอยู่ที่หมู่ที่ 6 ต.ไทยบุรี อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช โดยได้มีการค้นพบเทวรูปพระนารายณ์บนเนินดินโบราณสถาน อาคารศาสนสถานที่เป็นชากเนินอิฐปึกหักพัง ที่

พบน่าจะเป็นเทวาลัย เนื่องในศาสนาพราหมณ์ลัทธิไวษณพนิกายซึ่งนับถือพระวิษณุ หรือพระนารายณ์เป็นเทพเจ้าสูงสุด จากร่องรอยซากโบราณสถานที่เกิดกระจายทำให้เชื่อได้ว่าเทวสถานตมปังเป็นเทวาลัยในลัทธิไวษณพนิกายที่ใหญ่มากที่สุดแห่งหนึ่ง น่าจะมีอายุร่วมสมัยกับโบราณสถานที่ยุขมชนโมคลาน จากการสำรวจพบเนินโบราณสถาน 3 เนิน โดยมีโบราณวัตถุที่พบได้แก่ ท่อนล่างของเทวรูปพระนารายณ์ ทำจากหินทราย สูงราว 62 เซนติเมตร กว้าง 23 เซนติเมตร ฐานเทวรูป ทำจากหินปูนเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดกว้างด้านละ 46 เซนติเมตร และฐานเสาอาคาร ทำจากหินปูน ตรงกลางสกัดเป็นช่องวงกลม

รูปแบบศิลปะกรรม กำหนดอายุจากเทวรูปพระนารายณ์ราวพุทธศตวรรษที่ 14-15 ปัจจุบันโบราณสถานแห่งนี้เป็นที่รกร้าง ไม่ได้ใช้ประโยชน์ และเนื่องจากอยู่ห่างไกลจากเส้นทางคมนาคม ทำให้ถูกทอดทิ้ง ปัจจุบันมีต้นไม้ขึ้นปกคลุมตลอดพื้นที่ ซากเนินโบราณสถานเหลือเพียงเนินดินปนเศษอิฐ สูงจากพื้นโดยเฉลี่ยราว 2 เมตร ส่วนสระน้ำยังมีน้ำขังอยู่บ้าง รอบบริเวณไม่สามารถสังเกตเห็นร่องรอยหลักฐานได้ชัดเจนนัก เนื่องจากเป็นป่ารกทึบไปหมด

4) โบราณสถานเขาศรีวิชัย

อยู่ที่บ้านหัวเขา หมู่ที่ 1 ต.ศรีวิชัย อ.พุนพิน จ.สุราษฎร์ธานี เป็นแหล่งโบราณคดีที่สำคัญแหล่งหนึ่งในบริเวณคาบสมุทรภาคใต้ของไทย เป็นแหล่งที่พบเทวรูปรุ่นเก่าในศาสนาฮินดูรุ่นแรก ๆ และเป็นแหล่งที่พบลูกปัดจำนวนมาก เขาศรีวิชัยมีลักษณะเป็นภูเขาสูงโดดอยู่ท่ามกลางที่ราบลุ่มลำนน้ำคลองพุนพิน รวมโบราณสถานที่เชิงเขาคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 84 ไร่ 1 งาน 40 ตารางวา

บริเวณสันเขาพบเนินดินที่มีสภาพผิปกติ ซึ่งน่าจะเป็นเนินโบราณสถานเรียงกันอยู่ทางปลายเขาด้านทิศใต้ 4 เนิน และทิศเหนืออีก 4 เนิน นอกจากนี้ยังพบโบราณสถานบริเวณเชิงเขาอีก 10 เนิน ซึ่งบางส่วนมีร่องรอยการถูกขุดหรือทำลายไป ทั้งการปรับพื้นที่เป็นสวนยางพารา และการลักลอบขุดค้นหาวัตถุโบราณ

หลักฐานทางโบราณคดีที่พบ ประกอบด้วย

4.1) เทวรูปพระนารายณ์ จำนวนทั้งสิ้น 4 องค์ กำหนดอายุโดยพิธียะ ไกรฤกษ์ไว้ประมาณพุทธศตวรรษที่ 12-13

4.2) ฐานโยนิศิลา รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 88 x 88 เซนติเมตร เจาะรูกลมตรงกลาง ซึ่งอาจเป็นวิษณุโศรณะ

4.3) พระพิมพ์ดินดิบ หรือที่เรียกว่าพระเม็ดกระดุม ลักษณะเป็นรูปทรงกลมขนาดเล็กคล้ายกระดุม ภายในเป็นภาพพระพุทธรูปนูนต่ำ นั่งขัดสมาธิราบบนดอกบัว แสดงปางสมาธิ บริเวณพระเศียรมีประภามณฑล (รัศมี) รอบองค์พระมีจารึกคาถา เย ธมมาช

4.4) ชั้นส่วนพระพิมพ์ดินเผา มีลักษณะเป็นพระพิมพ์รูปสี่เหลี่ยมขนาดกว้างประมาณ 5-6 เซนติเมตร มีรูปตาคอดประทับนั่งขัดสมาธิราบ มีสฎูปเคียงข้างพระองค์ซ้ายขวา กำหนดอายุอยู่ประมาณศตวรรษที่ 13-14

4.5) ชั้นส่วนประติมากรรมศิลา พบเฉพาะส่วนลำตัว ในลักษณะยืนตรีภังค์ ห่มผ้าบางแนบเนื้อ สันนิษฐานว่าเป็นชั้นส่วนพระพุทธรูปหรือพระโพธิสัตว์

4.6) ลูกปัด พบเป็นจำนวนมาก อาจเป็นสินค้าสำคัญอย่างหนึ่งที่มีการติดต่อซื้อขายกันระหว่างชุมชนโบราณเขาศรีวิชัย กับชุมชนโบราณรอบอ่าวบ้านดอน

4.7) เครื่องประดับ ได้แก่ แหวนโลหะ ต่างหูโลหะ กำไลทำด้วยหินและแก้ว

4.8) เครื่องมือเครื่องใช้ เช่น เศษภาชนะดินเผา เต้าเผาพื้นเมือง ชั้นส่วนพวยกา ตะคันดินเผา เป็นต้น

4.9) เหรียญรูปศรีวิวัตสะและรูปพระอาทิตย์ ด้านหนึ่งปรากฏรูปพระอาทิตย์รุ่งอรุณ อีกด้านเป็นรูปศรีวิวัตสะ (ชนหน้าอกของพระนารายณ์)

4.10) ขวานหินมีป่า อยู่ในสภาพชำรุด

4.11) ส่วนประกอบสถาปัตยกรรม เช่น ชั้นส่วนธรณีประตู กรอบประตู จากหลักฐานทางโบราณคดีที่พบสันนิษฐานว่าบริเวณนี้เป็นที่ตั้งถิ่นฐานของเมืองโบราณขนาดใหญ่ มีอายุตั้งแต่พุทธศตวรรษที่ 12-13 เป็นต้นมา ต่อมาพุทธศาสนamahayan ได้เผยแพร่เข้ามาในช่วงประมาณพุทธศตวรรษที่ 14-15 จนกระทั่งถึงสมัยอยุธยาได้มีการก่อสร้างวัดพุทธหินยานบริเวณเชิงเขาด้านทิศใต้ อันเป็นที่ตั้งของวัดเขาศรีวิชัยในปัจจุบัน

5) แหล่งโบราณคดีเตาเผาบริเวณคลองปะโอ

แหล่งโบราณคดีบริเวณนี้เป็นแหล่งที่มีการค้นพบเตาเผาโบราณ ตลอดจนหลักฐานของการทำเครื่องปั้นดินเผาอย่างหนาแน่นในชุมชนแรกเริ่มประวัติศาสตร์ ที่พบเป็นแห่งแรกและแห่งเดียวในภาคใต้ (ธราพงศ์ ศรีสุชาติ, 2542ข) พบตั้งแต่บ้านท่าบอน อ.ระโนด จนถึงบ้านหัวเขาแดง ต.หัวเขา อ.สิงหนคร จ.สงขลา

ในครั้งแรกที่มีการค้นพบกลุ่มเตาเผาโบราณปะโอนั้น พบว่าเป็นเนินดินที่สูงกว่าบริเวณอื่น และเมื่อไถคราดปรับพื้นดิน พบว่าเป็นบริเวณที่มีเศษกระเบื้อง หรือเศษภาชนะดินเผาปรากฏเกลื่อนกลาดอยู่มากมาย จากการสำรวจและขุดค้นทางโบราณคดีบริเวณที่เป็นเตาเผาโดยหน่วยศิลปากรที่ 9 สำรวจพบเตาเผาจำนวน 4 เตา และหลายส่วนได้ถูกทำลายโดยความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ของชาวบ้าน เหลือแต่เพียงส่วนที่เป็นฐานเตาเผา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.30-2.00 เมตร

ผลการกำหนดอายุด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ จากตัวอย่างเศษภาชนะดินเผาที่เนินโคกหม้อ โดยมหาวิทยาลัยออกซ์ฟอร์ด ประเทศอังกฤษ เปรียบเทียบกับผลการกำหนดอายุโดยใช้เครื่องเคลือบจีน สมัยราชวงศ์ซ่งตอนปลาย ที่พบในชั้นดินเดียวกับเตาเผาปะโอ

ทำให้อนุมานได้ว่าเตาเผาโบราณปะโอมีอายุอยู่ในช่วงประมาณพุทธศตวรรษที่ 16-18 และจากความแพร่หลายของภาชนะดินเผาโบราณปะโอ ทำให้กรมศิลปากรคาดว่ามียุทธศาสตร์การผลิตเครื่องปั้นดินเผาเรียงรายอยู่ทั้งสองฝั่งคลองปะโอ และมีจำนวนของเตาเผาโบราณมากกว่า 4 เตา ตามที่เคยได้สำรวจพบ

1.1.2 การหาอายุของวัตถุโบราณ

การศึกษาเชื่อมโยงเรื่องราวและลักษณะของอารยธรรมต่าง ๆ ที่ผ่านมาโดยอาศัยวัตถุโบราณที่ค้นพบนั้น สิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ต้องศึกษาคือการระบุอายุของวัตถุ ซึ่งโดยทั่วไปการหาอายุทางธรณีวิทยาแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การหาอายุสัมพัทธ์ (Relative dating) และการหาอายุสัมบูรณ์ (Absolute dating)

1) การหาอายุสัมพัทธ์ เป็นการหาอายุหินเปรียบเทียบซึ่งบอกว่าหินใดมีอายุมากหรือน้อยกว่ากัน หาได้โดยอาศัยข้อมูลจากซากดึกดำบรรพ์ที่ทราบอายุ ลักษณะการลำดับชั้นของหินชนิดต่าง ๆ และลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของหิน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับช่วงเวลาทางธรณีวิทยาที่เรียกว่า ธรณีกาล (Geologic time)

2) การหาอายุสัมบูรณ์ เป็นอายุของหินหรือซากดึกดำบรรพ์ ที่สามารถบอกเป็นจำนวนปีที่ค่อนข้างแน่นอน โดยส่วนมากจะใช้วิธีคำนวณจากครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในหินหรือวัตถุที่ต้องการศึกษา ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นิยมนำมาหาอายุสัมบูรณ์ ได้แก่ ไอโซโทปคาร์บอน-14 ไอโซโทปโพแทสเซียม-40 ไอโซโทปเรเดียม-226 และไอโซโทปยูเรเนียม-238 เป็นต้น การหาอายุสัมบูรณ์มักใช้กับหินที่มีอายุมากเป็นแสนเป็นล้านปี เช่น หินแกรนิตบริเวณฝั่งตะวันตกของเกาะภูเก็ต ซึ่งเคยเป็นหินต้นกำเนิดแร่ดีบุก มีอายุสัมบูรณ์ประมาณ 100 ล้านปี ส่วนตะกอนและซากดึกดำบรรพ์ที่มีอายุน้อยกว่า 50,000 ปี มักจะใช้วิธีกัมมันตภาพรังสีคาร์บอน-14

ธาตุส่วนใหญ่เสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะปกติ แต่บางธาตุเกิดขึ้นในรูปที่ไม่เสถียร เมื่อเวลาผ่านไปธาตุเหล่านี้จะสลายตัวโดยการปล่อยอนุภาคต่างๆ และพลังงานออกมาในกระบวนการที่เรียกว่า การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive decay) ธาตุที่ไม่เสถียรเรียกว่า กัมมันตรังสี ในระหว่างการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี อะตอมของธาตุชนิดหนึ่งแตกตัวออกและเกิดเป็นอะตอมของธาตุชนิดอื่น ธาตุกัมมันตรังสีเกิดขึ้นตามธรรมชาติในหินอัคนี นักวิทยาศาสตร์ใช้อัตราการสลายตัวของธาตุในการคำนวณหาอายุของหิน

นอกจากนี้ยังมีการหาอายุโดยวิธีการอื่นอีก เช่น การใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ และการหาอายุด้วยวิธีทางแม่เหล็ก เป็นต้น

1.1.3 การหาอายุของวัตถุโบราณด้วยวิธีทางแม่เหล็ก

ลักษณะสำคัญประการหนึ่งของวัตถุโบราณประเภทเครื่องปั้นดินเผาคือ ดินเผามีส่วนประกอบของสารแม่เหล็กชนิดเฟอร์โร ซึ่งสามารถเก็บรักษาอำนาจแม่เหล็กทั้งทิศทางและความเข้มสนามแม่เหล็กในขณะที่เผาไว้ได้ ทำให้สามารถศึกษาข้อมูลทั้งในด้านขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กโลกในอดีตจากวัตถุโบราณดินเผาได้

วิธีหาอายุด้วยวิธีทางแม่เหล็กนั้นจะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำให้เกิดแมกนีไทเซชันตกค้าง (Remanent magnetization) ขึ้นกับสารแม่เหล็กภายในวัตถุ เหมาะกับวัตถุซึ่งถูกเผาที่อุณหภูมิสูง และถูกปล่อยให้เย็นตัวภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลก เช่น เตาเผา ถ้วยชาม หรือหินภูเขาไฟ วัตถุจะมีความเป็นแม่เหล็กเกิดขึ้น โดยแมกนีไทเซชันในวัตถุจะมีทิศทางขนานไปกับสนามแม่เหล็กโลก ทำให้วัตถุนั้นมีการบันทึกทิศทางและความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกหลังจากที่ได้มีการเผาครั้งสุดท้ายไว้ และเนื่องจากสนามแม่เหล็กโลกมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือเรียกว่าการเปลี่ยนแปลงแบบเซกูลาร์ (Secular variation) จึงส่งผลให้วัตถุซึ่งถูกเผาที่เวลาต่างกันมีการเก็บอำนาจแม่เหล็กซึ่งมีความเข้มและทิศทางแม่เหล็กแตกต่างกัน

การหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณที่ถูกต้องของสนามแม่เหล็กโลกมีความสำคัญในแง่ของการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเกิดกระแสไฟฟ้าภายในโลก (Geodynamic) ลักษณะความสัมพันธ์ภายในส่วนลึกของโลก ซึ่งส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกที่ผ่านมา (Oishi et al., 2005; Spatharas et al., 2000; Ramaswamy, 1985) ซึ่งในแต่ละพื้นที่จะมีรูปแบบ ลักษณะ และขนาดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน

Thellier และ Thellier (1959) ได้นำเอาการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างของสารแม่เหล็กนี้มาใช้ในการหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ แต่ในระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงอาจส่งผลให้เกิดการแปรสภาพของสารแม่เหล็ก ทำให้ได้ผลที่คลาดเคลื่อน Coe (1967) จึงปรับปรุงโดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเพิ่มขึ้นเป็นขั้น ๆ เพื่อตรวจสอบการแปรสภาพที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อน เรียกว่าการทำ pTRM check (Partial of thermoremanence magnetization check) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในงานที่เกี่ยวกับการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

การนำเอาเทคนิคการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณโดยการให้ความร้อนของ Thellier และที่ประยุกต์โดย Coe มาใช้กับตัวอย่างอิฐและดินเผาโบราณที่ผลิตในภาคใต้ของประเทศไทย จะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกของพื้นที่ในช่วงเวลาที่ผ่านมามาตามข้อมูลอายุที่มีอยู่ ซึ่งหากมีข้อมูลที่เพียงพอจะสามารถสร้างเป็น

กราฟอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณของภาคใต้ และยังสามารถนำมาใช้ในการหาอายุของวัตถุโบราณที่ผลิตในภาคใต้ได้อีกทางหนึ่งด้วย

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 การหาอายุวัตถุโบราณของภาคใต้

ภาคใต้แม้ว่าจะมีการค้นพบโบราณสถานและโบราณวัตถุเป็นจำนวนมาก แต่การระบุอายุของโบราณวัตถุเหล่านี้ส่วนใหญ่จะเป็นการหาอายุสัมพัทธ์ จะให้ช่วงอายุที่ค่อนข้างกว้าง เช่น การกำหนดอายุของเศษภาชนะดินเผาที่เนินดินโคกหม้อจากชุมชนโบราณปะโอ โดยมหาวิทยาลัยออกซฟอร์ด ประเทศอังกฤษ ทำให้อนุมานได้ว่าเตาเผาโบราณปะโอมีอายุในช่วงพุทธศตวรรษที่ 16-18 (ธราพงศ์ ศรีสุชาติ, 2542ก) การระบุอายุโดยใช้เทคนิคทางวิทยาศาสตร์ซึ่งจะให้ข้อมูลอายุที่มีความถูกต้องมากกว่า ยังมีค่อนข้างน้อย เช่น สมหมาย ช่างเขียน (2542) ได้ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์วิเคราะห์หาอายุโบราณวัตถุซึ่งเป็นสฤปและอิฐดินเผาจากเมืองโบราณยะรัง จ.ปัตตานี พบว่าเมื่อนำปริมาณรังสีที่วัดได้ไปคำนวณหาอายุจะได้อายุของสฤปเท่ากับ 579 ± 17 ปี และอายุอิฐเท่ากับ 538 ± 15 ปี

1.2.2 ความแตกต่างของค่าสนามแม่เหล็กโลก

สนามแม่เหล็กโลกมีความเข้มและทิศทางแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ซึ่งนอกจากจะเกิดจากความแตกต่างของละติจูดแล้ว ยังเกิดจากสนามแม่เหล็กส่วนที่ไม่ใช่ไดโพล (Non-dipole) อีกด้วย การศึกษาส่วนใหญ่จึงเน้นไปที่การศึกษาสนามแม่เหล็กส่วนที่ไม่ใช่ไดโพลมากกว่าส่วนของไดโพล (Dipole) เช่น Carvallo และ Dunlop (2000) ได้ศึกษาแมกนีไทเซชันตกค้างโบราณจากเศษหม้อและกระเบื้องในเมืองแกรนด์แบงก์ (Grand Banks) รัฐออนแทรีโอ (Ontario) พบว่าค่าไดโพลโมเมนต์สมมติ (Virtual axial dipole moments; VADM) ทางตะวันตกเฉียงใต้ของอเมริกาเหนือมีความผิดปกติค่อนข้างสูง ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กโลกในส่วนที่ไม่ใช่ไดโพลที่มีขนาดถึง 40% ของสนามแม่เหล็กทั้งหมดในเวลานั้น ในขณะที่ปัจจุบันมีขนาดเพียง 20%

ข้อมูลจาก International Geomagnetic Reference Field (IGRF) 1990 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกในส่วนที่ไม่ใช่ไดโพลจะต่างกันมากขึ้นตามละติจูดที่สูงขึ้น โดยเฉพาะในส่วนที่อยู่บริเวณละติจูดที่สูงกว่า 30 องศา สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Pesonen และ Leino (1998) ที่ว่ากราฟความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ

ของประเทศฟินแลนด์และบัลแกเรียมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่มีช่วงกว้างและเฟสที่ต่างกัน โดยในประเทศฟินแลนด์ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กโลกมีค่าสูงสุดประมาณปี ค.ศ. 500 ก่อนบัลแกเรียประมาณ 130 ปี ส่วนพื้นที่ซึ่งอยู่ในแถบละติจูดเดียวกันจะมีความเข้มข้นสนามแม่เหล็กโลกใกล้เคียงกัน ดังเช่นการศึกษากระเบื้องและอิฐดินเผาจากทางตอนเหนือของประเทศกรีซ โดย Spatharas และคณะ (2000) เปรียบเทียบผลที่ได้กับกราฟการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกโบราณในบัลแกเรียของ Kavocheva (1998) ซึ่งอยู่ในแถบละติจูดเดียวกับตอนเหนือของกรีซ พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

1.2.3 การศึกษาอำนาจแม่เหล็กโบราณโดยเทคนิค Thellier

หลายเทคนิคได้รับการปรับปรุงขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเรื่องราวในอดีต เทคนิคหนึ่งที่ได้รับการนิยมนิยมและสามารถใช้ในการหาอายุของวัตถุประเภทดินเผาโบราณได้ คือ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กโลก ที่ได้รับการยอมรับกันมากเป็นเทคนิคการให้ความร้อน 2 ครั้งของ Thellier (1959) และที่ปรับปรุงโดย Coe (1967) ซึ่งเป็นการศึกษาสนามแม่เหล็กโลกที่ติดค้างอยู่ในวัสดุซึ่งถูกเผาที่เวลาต่าง ๆ กัน จากนั้นจึงรวบรวมเป็นกราฟขึ้น

กราฟที่ได้จากการศึกษาสามารถนำมาใช้อ้างอิงเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกโบราณในพื้นที่นั้น ๆ ได้ เช่น ในประเทศญี่ปุ่น Arata และคณะ (2003) ได้ศึกษาหินบะซอลต์ภูเขาไฟ โดยใช้เทคนิค Thellier และสร้างกราฟอ้างอิงของประเทศญี่ปุ่นในช่วง 2,000 ปีที่ผ่านมา พบว่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กโลกในประเทศญี่ปุ่นมีการลดลงในช่วงปี ค.ศ. 1200 และ 1700 และมีค่าสูงในช่วงปี ค.ศ. 500 และ 1400 ส่วนในประเทศอินเดีย Ramaswamy และคณะ (1985) ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กกับอายุจากอิฐและดินเผาเก่า พบว่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กโลกที่ศึกษามีค่ามากกว่าปัจจุบันจนถึงประมาณ ค.ศ. 900 จากนั้นลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ 1,400 ปีที่ผ่านมา และเพิ่มขึ้นจนถึงเมื่อ 2,300 ปีที่แล้ว ซึ่งมีค่าสูงกว่าปัจจุบันถึง 57%

ค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่ได้ในแต่ละที่จะแตกต่างกันตามละติจูดที่อยู่ จึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ จำเป็นต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูป VADM ดังสมการ

$$VADM = \frac{4\pi r^3}{\mu_0} H_a (1 + 3\cos^2 \theta)^{-\frac{1}{2}}$$

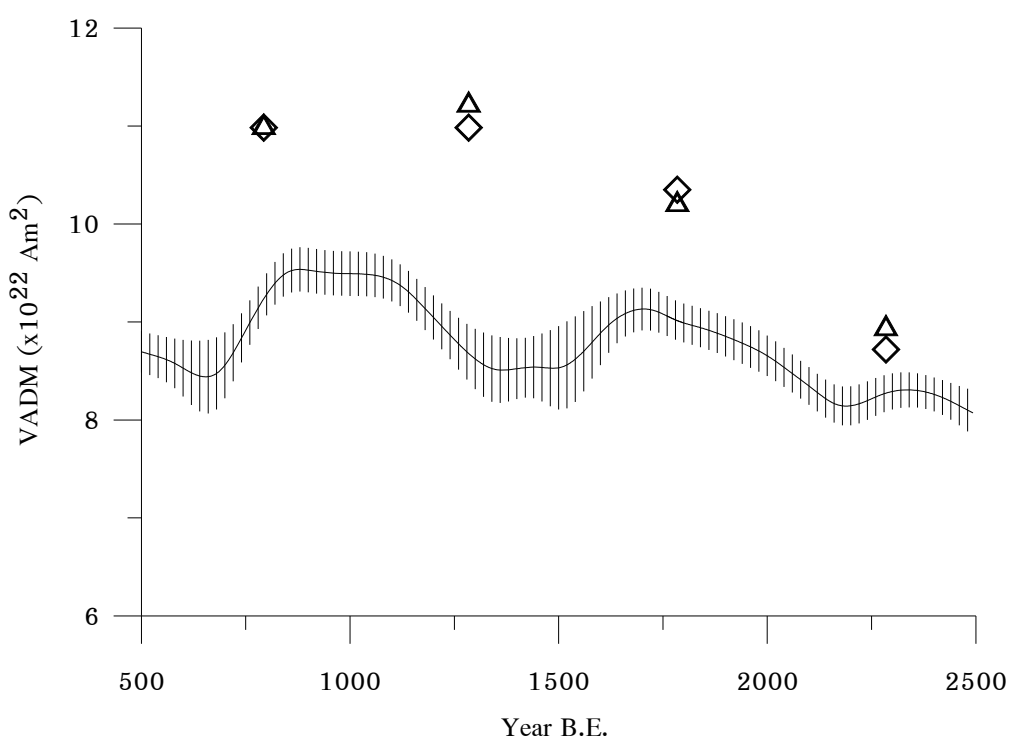
เมื่อ r คือ รัศมีของโลก (ประมาณ 6,372 กิโลเมตร)

μ_0 คือ สภาพซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก ($4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A-m)

θ คือ co-latitude

H_a คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณ

ซึ่งจากการศึกษาของ McElhinny และ Senanayake (1982), Yang และคณะ (2000) และของ Constable และ Korte (2005) จะได้กราฟการเปลี่ยนแปลงค่า VADM ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า VADM ของ McElhinny และ Senanayake (◊), Yang และคณะ (Δ) และ Constable และ Korte (→)

การสร้างกราฟอ้างอิงของแต่ละบริเวณจะทำให้สามารถย้อนกลับไปศึกษาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีตได้ เช่น Zhu และคณะ (2003) ได้ศึกษาอายุและอำนาจแม่เหล็กบรรพกาลของลาวาภูเขาไฟจากเมือง Sihetun ทางตอนเหนือของประเทศจีน พบว่ามีแนวรอยเลื่อนเกิดขึ้นในยุคจูราสสิกตอนปลาย และจากข้อมูลที่ได้จากเทคนิค Thellier พบว่ามีสนามแม่เหล็กโลกอ่อน ๆ เกิดขึ้นก่อนยุคครีเตเชียส นอกจากนี้ Tauxe และ Stuadigel (2004) ได้ศึกษาความเข้มในยุคเดียวกันโดยใช้หินแก้วบะซอลต์ท้องทะเลจากหมู่เกาะ Troodos Ophiolite พบว่าเมื่อสนามแม่เหล็กโลกมีการกลับขั้วความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกจะลดลง

อย่างรวดเร็วจนมีค่าน้อยมาก และหลังจากการกลับขั้วหยุดลงสนามแม่เหล็กโลกจะมีความเสถียรอีกครั้ง

แต่การใช้กราฟอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกโบราณในการหาอายุอาจพบปัญหาหนึ่ง คือการได้อายุออกมาหลายค่า นั่นคือค่าความเข้มที่ได้จากตัวอย่างซึ่งไม่ทราบอายุนั้นอาจตรงกับหลายช่วงอายุ ดังนั้นการจะหาอายุของวัตถุโบราณจึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการอื่นร่วมด้วย เพื่อให้ได้ค่าที่น่าเชื่อถือและใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุด เช่นการใช้วิธีทางอำนาจแม่เหล็กโบราณร่วมกับวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของ Becker และคณะ (1994) ซึ่งทำให้ได้ค่าอายุที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

1.2.4 ความคลาดเคลื่อนของเทคนิค Thellier

แม้เทคนิค Thellier จะได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย ในการใช้ศึกษาสนามแม่เหล็กโลกโบราณ แต่ก็ยังมีบางส่วนที่ต้องคำนึงถึงคือ สภาพแอนไอโซทรอปีเชิงแม่เหล็ก (Magnetic anisotropy) ของสารแม่เหล็ก ซึ่ง Hus และคณะ (2002) ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างอิฐเผาและอิฐแห้งซึ่งไม่ผ่านการให้ความร้อน พบว่าโครงสร้างแม่เหล็กจะถูกเหนี่ยวนำในระหว่างกระบวนการปั้นขึ้นรูป การกดดินลงในแบบและการตัดแต่งจะทำให้มีความเป็นแอนไอโซทรอปีเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สภาพแอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก หรือเรียกว่า สภาพ AMS (Anisotropy of magnetic susceptibility) ยังมีความสัมพันธ์กับรูปทรงในขณะขึ้นรูป โดยค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก หรือค่า k จะมีค่าสูงสุดบริเวณหน้าตรงส่วนขอบที่ยาวที่สุด และมีค่าต่ำสุดจะตั้งฉากกับขอบหน้าที่ยาวที่สุด ส่งผลให้ทิศทางของแมกนีไทเซชันตกค้างเกิดการเบี่ยงเบนไปได้มาก นอกจากนี้ยังพบว่าแอนไอโซทรอปีทางแม่เหล็กของดินเผาจะสูงกว่าอิฐที่ไม่ได้เผาถึงประมาณ 5 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการก่อรูปแม่เหล็กขึ้นใหม่ในระหว่างการเผา หรือกล่าวได้ว่าสภาพแอนไอโซทรอปีทางแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เช่นเดียวกับการเพิ่มโครงสร้างทางแม่เหล็กในตะกอนโดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ของ Tarling และ Hroudal (1993)

จากข้อมูลของ Odah และคณะ (2001) บอกให้ทราบว่าแอนไอโซทรอปีของสารแม่เหล็กอาจมีผลต่อค่าแมกนีไทเซชันตกค้างธรรมชาติ (Natural remanent magnetization หรือ NRM) และค่าแมกนีไทเซชันตกค้างจากความร้อน (Thermal remanent magnetization หรือ TRM) ทั้งในอดีตและในการทดลองสูงถึง 25% ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับแก้ข้อมูลจากส่วนที่เป็นแอนไอโซทรอปีด้วย (Gallet et al., 2003; Roger et al., 1979 และ Watson, 1998)

นอกจากลักษณะของสารแม่เหล็กแล้ว ยังมีสิ่งนี้อาจส่งผลให้ค่าที่ได้ไม่ถูกต้องด้วย เช่น Odah และคณะ (2001) พบว่าอัตราการเพิ่มของแมกนีไทเซชันตกค้างที่ได้จากการให้ความร้อน (pTRM) กับสนามแม่เหล็กภายนอกและอุณหภูมิ ขึ้นอยู่กับมุม (θ) ที่ตัวอย่างทำกับ

สนามแม่เหล็กภายนอก โดยความเข้มของ pTRM จะลดลงเมื่อมุม θ เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Watson (1998) ยังกล่าวว่าในการศึกษาควรกำหนดสนามแม่เหล็กที่ให้กับตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกับสนามแม่เหล็กโลกในอดีต หรือประมาณ 10% ของสนามแม่เหล็กโลกในปัจจุบัน และอาจต้องปรับแก้ในส่วนของอัตราเร็วในการเย็นตัวที่ต่างกันระหว่างเมื่อตัวอย่างถูกเผาและขณะให้ความร้อนในการทดลองด้วย (Fox et al., 1980)

1.2.5 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสารแม่เหล็ก

ปัญหาสำคัญในการศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณโดยใช้เทคนิค Thellier คือ การแปรสภาพของสารแม่เหล็กในระหว่างการให้ความร้อน ซึ่ง Coe ได้ปรับปรุงวิธีตรวจสอบการแปรสภาพที่เกิดขึ้นนั้น โดยกลับไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิก่อนหน้าอีกครั้ง เรียกว่า การทำ pTRM check หรืออาจตรวจสอบได้จากการดูการเปลี่ยนแปลงค่า k ซึ่งควรจะคงที่หากสารแม่เหล็กไม่เกิดการแปรสภาพ แต่การทำ pTRM check ก็อาจไม่สามารถระบุผลได้ถูกต้องเสมอไป เช่นการศึกษาของ Watson (1998) โดยให้เหตุผลว่าเนื่องจากค่า pTRM ที่อยู่ในแต่ละเกรนแม่เหล็ก (Magnetic grain) จะขึ้นอยู่กับขนาดของเกรนนั้น ซึ่งหากเกิดการแปรสภาพโดยหากมีเกรนเกิดขึ้นใหม่และมีเกรนหายไปปริมาณที่เท่ากัน จะส่งผลให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่า pTRM ที่เกิดขึ้น

ในขณะที่ Levi (1977) และ Calvo และคณะ (2002) ชี้ให้เห็นว่าการทำ pTRM check อาจชี้ว่าไม่ผ่าน ทั้ง ๆ ที่ไม่มีการแปรสภาพเกิดขึ้น และการดูการเปลี่ยนแปลงของค่า k ไม่สามารถใช้เป็นตัววัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ เช่นเดียวกับ Biggin และ Thomas (2003) ที่กล่าวว่า การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสารแม่เหล็กโดยดูจากค่า k ที่อุณหภูมิห้อง (χ_{RT}) จะให้ผลที่ไม่น่าเชื่อถือ เพราะแม้ค่า k จะมีการเปลี่ยนแปลง แต่จะยังให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ถูกต้องได้ ทั้งนี้เนื่องจาก χ_{RT} ของตัวอย่างถูกควบคุมโดยส่วนที่เรียกว่า Low coercivity phase ซึ่งเป็นส่วนเล็ก ๆ ที่อยู่ในสารแม่เหล็ก ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อความจุของตัวอย่างในการทำให้เกิดแมกนีไทเซชันตกค้าง

1.2.6 การเลือกใช้กราฟในการคำนวณความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ

ในการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณมีอีกปัญหาที่พบคือค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกที่สูงเกินไป เนื่องจากการเลือกใช้กราฟ Arai plot ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะมีความชันสูง โดยปกติจะเลือกใช้กราฟส่วนที่เป็นเส้นตรงในการคำนวณความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก แต่บางครั้งแม้กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรงก็อาจให้ค่าที่ไม่ถูกต้องได้ Valet

(2003) พบว่าแม็กกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง แต่ทิศทางของสนามแม่เหล็กในระหว่างการลบล้างแม็กนีไทเซชันอาจไม่ได้เข้าสู่จุดกำเนิด ทั้งนี้เนื่องจากเกิดแม็กนีไทเซชันใหม่ขึ้นในทิศทางของสนามแม่เหล็กของเตาเผา จะก่อให้เกิดเกรนแม่เหล็กใหม่ที่มีอุณหภูมิกักเก็บ (Blocking temperature) สูงขึ้น ส่งผลให้ค่า NRM ถูกกระทบกระเทือนและเกิดการสูญเสียค่า NRM บางส่วนไป โดยการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันหลาย ๆ อย่าง อาจส่งผลให้ไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยการทำ pTRM check นอกจากนี้ยังระบุว่าหากข้อมูลจากกราฟที่นำมาศึกษาเป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำเกินไป หรือประมาณน้อยกว่า 300 °C ส่วนใหญ่จะได้รับผลกระทบจากเกรนแม่เหล็กชนิดมัลติโดเมน ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการศึกษา Hill และ Shaw (2000) ได้ศึกษาตัวอย่างหินภูเขาไฟจากหมู่เกาะฮาวาย พบว่ากราฟที่มีความชันเป็น 2 ตอน ค่าที่จะใช้หาความเข้มสนามแม่เหล็กต้องเป็นความชันของกราฟที่ได้จากจุดทุกจุด ซึ่งจะให้ผลถูกต้องมากกว่าการเลือกใช้ความชันเฉพาะช่วงอุณหภูมิต่ำ

กราฟที่พบระหว่างการศึกษางานบางส่วนอาจมีลักษณะโค้งขึ้น ซึ่ง Chauvin และคณะ (2005) พบว่าพฤติกรรมการโค้งขึ้นของกราฟ Arai plot โดยทั่วไปจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและการเพิ่มขึ้นของ TRM capacity ของสารแม่เหล็กที่อุณหภูมิสูง ๆ ในระหว่างการทดลอง หรือเกิดจากเกรนแม่เหล็กชนิดมัลติโดเมนหรือโดเมนเทียม ซึ่งหากตัวอย่างเป็นชนิดมัลติโดเมน การเลือกกราฟในช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ จะให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่สูงกว่าค่าจริง แต่การเลือกใช้จุดแรกและจุดสุดท้ายของกราฟมาคำนวณจะให้ค่าที่ถูกต้องได้เช่นกัน Biggin และ Thomas (2003) ก็พบว่าส่วนของกราฟที่ได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำจากตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นโดเมนเทียมจะให้ผลที่สูงเกินไป แม้ผลการทดลองจะผ่านตามเกณฑ์ต่าง ๆ ก็ตาม เช่นเดียวกับ Shcherbakov และ Shcherkova (2001) ที่ว่าเกรนแม่เหล็กของตัวอย่างทั้งที่เป็นโดเมนเทียมและมัลติโดเมน ในช่วงแรกจะให้กราฟที่มีความชันค่อนข้างสูงเกินไป และอาจสูงกว่าค่าจริงถึง 20% นอกจากนี้การใช้ทุกจุดของกราฟซึ่งไม่ผ่านตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้มาหาค่าความเข้มก็อาจให้ผลที่ถูกต้องได้ แม้ว่าตัวอย่างนั้นมีลักษณะเป็นมัลติโดเมนก็ตาม แต่ทั้งนี้สารแม่เหล็กภายในตัวอย่างต้องไม่มีการแปรสภาพระหว่างการให้ความร้อน

การเลือกใช้จุดทั้งหมดของกราฟและการใช้หลาย ๆ เทคนิคพร้อมกันจึงเป็นวิธีที่นำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น Nobutatsu และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกจากหินภูเขาไฟบนเกาะโอชิม่า (Oshima) ประเทศญี่ปุ่น ซึ่ง Tanaka และคณะ (1995) เคยศึกษาโดยใช้เทคนิคของ Coe และได้ค่าเฉลี่ยสูงเกินไป พบว่าเทคนิค Thellier จะให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่สูงกว่าค่าที่คาดไว้ เนื่องจากสารแม่เหล็กของตัวอย่างเป็นไททานอแม็กนีไทต์ และสัมพันธ์กับการเกิดออกซิเดชันของเกรนแม่เหล็ก เนื่องจากเกิดการแปรสภาพของแม็กนีไทเซชันตกค้างแบบ TCRM ขึ้น ในระหว่างการเย็นตัวที่อุณหภูมิสูง (Yamamoto et al., 2003) การเกิดออกซิเดชันของตัวอย่างนั้นอาจหยุดไปในระหว่างการเย็นตัวในธรรมชาติ แต่จะเกิดขึ้นใหม่ในระหว่างการให้ความร้อนในการทดลอง

Kosterov และ Prévot (1998) ยังได้เสนอว่าการลดลงอย่างรวดเร็วของกราฟจากเทคนิค Thellier ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ ทำให้กราฟมีความชันมาก และส่งผลให้ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กที่ได้สูงเกินไป การใช้วิธีอื่นร่วมด้วยจะให้ผลที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Yamamoto และคณะ (2003) และ Yusule และคณะ (2005) ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากเทคนิคของ Coe ให้ค่าที่สูงเกินไป แต่เมื่อใช้เทคนิคของ Shaw มาร่วมด้วยจะได้ค่าที่ดีขึ้น และได้อธิบายว่าสาเหตุที่ความเข้มข้นแม่เหล็กมีค่าสูงเกินไปขึ้นอยู่กับเกิดการออกซิเดชันของตัวอย่าง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเกิดขึ้นของ TCRM ในระหว่างการเย็นตัวในธรรมชาติ นอกจากนี้ก็เกิดจากผลของลักษณะภูมิประเทศองค์ประกอบของสารแม่เหล็กชนิดมัลติโดเมนและโดเมนเทียม

นอกจากนี้ยังมีการใช้คลื่นไมโครเวฟในการศึกษาความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กโลกโบราณด้วย ซึ่งเทคนิคทั้งสองจะทำให้ระบบการหมุนของเกรนแม่เหล็กถูกระตุ้น (Walton, 1986) แต่การใช้คลื่นไมโครเวฟนั้น คลื่นความถี่สูงจะเข้าไปกระตุ้นตัวสารแม่เหล็กโดยตรง โดยไม่ต้องอาศัยความร้อน (Walton et al., 1992, 1993) ซึ่งเกิดความร้อนขึ้นเพียงเล็กน้อย (Hill and Shaw, 2000) McArdle และคณะ (2004) และ Hill และคณะ (2002) ได้เปรียบเทียบความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กระหว่างวิธีใช้คลื่นไมโครเวฟและเทคนิค Thellier พบว่าในส่วนที่ไม่มีการแปรสภาพของสารแม่เหล็กทั้งสองวิธีให้ผลที่สอดคล้องกัน แต่ในส่วนที่เกิดการแปรสภาพทางเคมีเนื่องจากความร้อน การใช้คลื่นไมโครเวฟจะให้ผลที่ดีกว่า

Thomas และคณะ (2004) ก็ได้เปรียบเทียบการหาความเข้มข้นแม่เหล็กโลกโบราณโดยเทคนิค Thellier ซึ่งปรับปรุงโดย Coe (CTT) กับเทคนิคการใช้คลื่นไมโครเวฟ (MW) ในหินบะซอลต์จากประเทศออสเตรเลียพบว่าเทคนิค CTT จะมีอัตราความสำเร็จ 68% ส่วนเทคนิค MW มีอัตราความสำเร็จมากกว่า คือ 82% ซึ่งสูงกว่าเทคนิค CTT เนื่องจากไม่มีการแปรสภาพของสารแม่เหล็กเนื่องจากความร้อน โดยทั้งสองวิธีได้ผลที่สอดคล้องและให้อัตราความสำเร็จสูง ซึ่งการใช้สองวิธีร่วมกันในการหาความเข้มข้นแม่เหล็กโลกโบราณจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีคุณภาพมากขึ้น

เนื่องจากสิ่งสำคัญที่สุดในการศึกษาทิศทางและความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กโลกในอดีต โดยใช้เทคนิคของ Thellier คือสารแม่เหล็กที่เป็นตัวพาให้เกิดแม่เหล็กไทเทเนียมออกไซด์ต้องไม่มีการแปรสภาพในระหว่างการให้ความร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเกณฑ์หรือพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการบ่งชี้ความน่าเชื่อถือ หรือการเลือกที่จะยอมรับหรือปฏิเสธข้อมูลที่ได้ ซึ่งเกณฑ์ที่จะใช้ในการศึกษาของแต่ละคนก็จะแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงตัวอย่างพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ

| | f | β | Q | R^2 | pTRM check | อื่น ๆ |
|-------------------------------------|-------------|------------|-----|-------|------------------|---|
| Jean-Pierre (2003) | >0.33 | | | >0.98 | <5% | $n \geq 6$ จุด |
| Zho (2003) | >0.33 | | | >0.98 | <5% | $n \geq 6$ จุด |
| Biggin (2003) | >0.15 | <0.1 | | | <10% | $n \geq 4$ จุด |
| Yoshihara (2003) | | | | >0.99 | Instrument Error | $n \geq 4$ จุด $k < 20\%$ |
| McArdle (2004) | | | >5 | | | |
| Coe (1978), Selkin และ Tauxe (2000) | >0.3 | ≤ 0.1 | >1 | | $\leq 10\%$ | MAD < 10 องศา $n \geq 4$ จุด tail check < 10% |
| Chauvin (2005) | >0.15 | | | | $\leq 15\%$ | $n \geq 4$ จุด |
| Carvallo (2003) | >1/3 | | | | $\leq 10\%$ | $n \geq 4$ จุด |
| Mochizuki (2004) | >15% | | >5 | | $\pm 2\sigma^*$ | $n \geq 4$ จุด MAD < 15 องศา |
| Thomas (1993) | ≥ 0.15 | | | | <15% | $n \geq 4$ จุด $\sigma_b \leq 0.5$ pTRM test ≥ 2 ครั้ง |
| Laj และ Kissel (1999) | >0.2 | | | >0.97 | <5% | $n \geq 4$ จุด pTRM test ≥ 3 ครั้ง |
| Prévot (1985) | | | >10 | | | |

หมายเหตุ: f คือค่าอัตราส่วนของ NRM ที่เลือกใช้ในการคำนวณ, β คือความคลาดเคลื่อนของความชัน, q คือปัจจัยคุณภาพของตัวแปร, R^2 คือสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น, n คือจำนวนจุดที่เลือก, k คือค่าสภาพปรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก และ σ_b คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชัน

Chauvin และคณะ (2005) ได้ศึกษาความน่าเชื่อถือของข้อมูลความเข้มข้นแม่เหล็กโลกโบราณ จากผลของค่า f และพฤติกรรมการโค้งขึ้นของกราฟ โดยการใช้เทคนิค Thellier โดยใช้วิธีการกลับขึ้นตัวอย่าง 180 องศา ในระหว่างการให้ความร้อนทั้ง 2 ครั้ง พบว่าการกระจายของค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโลกโบราณที่ได้จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับค่า f ที่ลดลง ซึ่งค่า f ที่น้อยจะทำให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อนมากขึ้น และมีแนวโน้มจะได้ค่าที่สูงกว่าค่าจริง หากค่า f มาก จะทำให้ตัวแปรที่มีคุณภาพสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ควรเลือกใช้กราฟที่ให้ค่า f สูง ดีกว่ากราฟที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นสูง แต่ค่า f ต่ำ

จากผลการวิจัยต่าง ๆ ข้างต้น จะเห็นได้ว่าเทคนิคการให้ความร้อน 2 ครั้งของ Thellier และที่ปรับปรุงโดย Coe เป็นเทคนิคพื้นฐานที่ได้รับการยอมรับว่ามีเหตุผลและน่าเชื่อถือที่สุด ในการศึกษาสนามแม่เหล็กโลกโบราณ การรวบรวมข้อมูลจากหลายช่วงอายุ และหลายพื้นที่ รวมถึงการใช้เทคนิคการศึกษาหลายวิธี จะช่วยให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือและถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงน่าจะเป็นไปได้ที่จะนำเทคนิคนี้มาใช้ในการศึกษาความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กโลกจากอิฐดินเผาของภาคใต้จากแต่ละช่วงอายุได้ อีกทั้งการศึกษาจากข้อมูลหลาย ๆ ช่วงอายุก็สามารถใช้ในการสร้างกราฟอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกในอดีต และใช้ในการหาอายุของดินเผาเก่าที่ไม่ทราบค่าได้

1.3 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาขั้นตอนความเข้มข้นแม่เหล็กโลกในอดีตจากอิฐและดินเผายุคเก่าสมัยต่าง ๆ ในภาคใต้ของประเทศไทย
2. สร้างกราฟอ้างอิงอำนาจแม่เหล็กโบราณในอิฐและดินเผายุคเก่าสมัยต่าง ๆ ของภาคใต้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในการศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก จำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับสมบัติทางแม่เหล็ก ดังนี้

2.1 สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)

สนามแม่เหล็ก คือ บริเวณที่แสดงอำนาจความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กในธรรมชาติเกิดจาก 3 สาเหตุ คือ

1) มีวัตถุที่มีธาตุแสดงอำนาจแม่เหล็กเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีเพียง 3 ธาตุที่สามารถเกิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงได้ในสภาวะอุณหภูมิห้อง คือ เหล็ก โคบอลต์ และ นิกเกิล

2) มีองค์ประกอบของธาตุที่สามารถเหนี่ยวนำให้มีอำนาจแม่เหล็กได้

3) มีการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ดังเช่นกรณีของสนามแม่เหล็กโลก

การเกิดสนามแม่เหล็กของวัตถุอธิบายได้จากทฤษฎีอะตอมคือ ภายในโครงสร้างอะตอมของวัตถุจะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนในทุก ๆ อะตอมจะเกิดการเคลื่อนที่เป็นวงโคจรรอบนิวเคลียส การเคลื่อนที่นี้ก่อให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กจากการเคลื่อนที่รอบวงโคจร (orbit) สัมพันธ์กับโมเมนต์เชิงมุม และในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะหมุนรอบแกนของอิเล็กตรอน เป็นผลให้เกิดโมเมนต์เชิงมุมของการหมุน (spin) ส่วนโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมเป็นผลจากการรวมเวกเตอร์โมเมนต์ของการเคลื่อนที่รอบวงโคจรและโมเมนต์ของการหมุนรอบแกนตนเองของอิเล็กตรอน

หากผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมไม่เป็นศูนย์ วัตถุนั้นจะมีสภาพโมเมนต์แม่เหล็กถาวร แต่ถ้าผลรวมเป็นศูนย์ วัตถุจะไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวร ดังนั้นวัตถุใด ๆ จึงอาจมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรหรือไม่ก็มีก็ได้ และถึงแม้วัตถุบางตัวมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรประกอบอยู่ก็อาจไม่สามารถแสดงสภาพแม่เหล็ก เพราะทิศทางการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละอะตอมหรือโมเลกุลไม่เป็นระเบียบ จึงเกิดการหักล้างกัน มีวัตถุบางจำพวกเท่านั้นที่แสดงโมเมนต์แม่เหล็ก เพราะมีการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กอย่างเป็นระเบียบ

2.2 สนามแม่เหล็กโลก (Earth's magnetic field)

สนามแม่เหล็กโลกเกิดจากแกนโลกชั้นนอก (Outer core) ที่เป็นของเหลวเคลื่อนที่ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลรอบ ๆ แกนโลกชั้นในที่เป็นของแข็งผลสมของเหล็กและนิกเกิล เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่ขึ้น สนามแม่เหล็กโลกแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ

1) สนามแม่เหล็กหลัก (Main field)

เป็นสนามแม่เหล็กหลักที่เกิดขึ้นจากภายในตัวโลก มีสมบัติเป็นสนามไดโพล เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในแกนโลกชั้นนอกที่เป็นของเหลว ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเหล็กและนิกเกิลที่อยู่ในแกนโลกชั้นใน เป็นผลให้เกิดเป็นสนามแม่เหล็ก ผลจากสนามแม่เหล็กในกรณีนี้มีปริมาณมาก และมีผลต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กปกติส่วนใหญ่ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกเปลี่ยนไปกับเวลา แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงช้ามาก ความเข้มของสนามแม่เหล็กหลักมีค่าสูงบริเวณขั้วโลก และมีค่าต่ำบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร

2) สนามแม่เหล็กภายนอก (External field)

เป็นส่วนเล็ก ๆ ส่วนหนึ่งของสนามแม่เหล็กหลัก ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเร็วมาก มีสาเหตุมาจากภายนอกโลก เช่น การเกิดจุดดับบนดวงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอิทธิพลของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ในแต่ละวัน และพายุแม่เหล็ก เป็นต้น

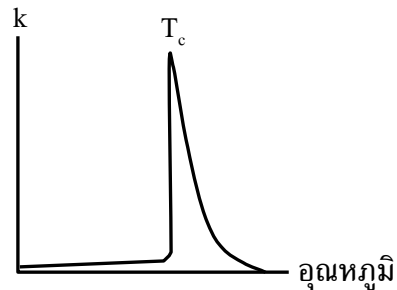
3) ค่าผิดปกติของสนามแม่เหล็กเฉพาะบริเวณ (Local magnetic anomalies)

เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับทั้งเวลาและสถานที่ เป็นค่าผิดปกติที่เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณเนื่องจากวัตถุที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กตกค้างใต้ผิวดิน

วัตถุทุกชนิดบนผิวโลกจะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลกเสมอและตลอดเวลา อาจมีบางวันบ้างในระหว่างเกิดปรากฏการณ์กลับขั้วแม่เหล็กโลก ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สนามแม่เหล็กโลกมีค่าเป็นศูนย์ สนามแม่เหล็กโลกจะมีอิทธิพลต่อทิศทางการวางตัวและความเข้มของแมกนีไทเซชันตกค้างของวัสดุแม่เหล็ก หินหรือดินซึ่งมีส่วนประกอบที่เป็นเหล็กออกไซด์ของแมกนีไทต์และฮีมาไทต์ ในขณะที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติหรืออุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) ของสารแม่เหล็กนั้น (T_c ของแมกนีไทต์ และฮีมาไทต์ ประมาณ 580 และ 680 °C ตามลำดับ) โมเมนต์แม่เหล็กจะมีการวางตัวแบบสุ่ม ส่งผลให้แมกนีไทเซชันรวมมีค่าเป็นศูนย์

เมื่ออุณหภูมิลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิคูรี ค่าแมกนีไทเซชันจะค่อย ๆ สูงขึ้น เนื่องจากค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility) หรือ ค่า k สูงขึ้น (ดังภาพที่ 2.1) โมเมนต์แม่เหล็กซึ่งมีการวางตัวแบบสุ่มจะถูกเหนี่ยวนำให้ชี้ไปในทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กโลก และเนื่องจากสารแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติในการเกิดแมกนี-

ไทเซชันตกค้าง ทำให้มีแมกนีไทเซชันตกค้างอยู่ในวัสดุเหล่านั้น โดยมีทิศจะขนานกับทิศของสนามแม่เหล็กโลก



ภาพที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของค่า k ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของสารแม่เหล็กชนิดโดเมนเดี่ยว สมบูรณ์ (O'Reilly, 1984)

2.3 การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกกับเวลา

สนามแม่เหล็กโลกมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยอยู่ในลักษณะที่เป็นไปอย่างช้า ๆ แบบต่อเนื่อง อาจใช้เวลาหลายสิบ หลายร้อย หรือหลายแสนปี เกิดขึ้นเป็นประจำทุกวัน หรือเกิดขึ้นทันทีทันใดแบบชั่วครั้งชั่วคราว ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกกับเวลาประกอบด้วย

1) การเปลี่ยนแปลงแบบเซกูลาร์ (Secular variation)

เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องของสนามแม่เหล็กโลก ใช้เวลา 10 ถึง 100 ปี กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกปัจจุบันยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่ชัด และการเปลี่ยนแปลงประเภทนี้ไม่มีผลต่อการสำรวจวัดสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่ใช้เวลานานกว่าจะเห็นการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการสำรวจ

2) การเปลี่ยนแปลงประจำวัน (Diurnal variation)

การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้แบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภท คือ การเปลี่ยนแปลงประจำวันโดยดวงจันทร์ (Lunar diurnal variation) ซึ่งเกิดขึ้นในคาบประมาณ 25 ชั่วโมง มีขนาด 20-80 nT การเปลี่ยนแปลงนี้เชื่อว่าเกิดจากอิทธิพลของดวงจันทร์กับชั้นบรรยากาศที่มีประจุไฟฟ้าอิสระที่เคลื่อนที่ไปมา ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และการเปลี่ยนแปลงประจำวันโดยดวงอาทิตย์ (Solar diurnal variation) เกิดขึ้นในคาบประมาณ 24 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 30-60 nT การเปลี่ยนแปลงประเภทนี้เชื่อว่าเกิดจากการมีกระแสไฟฟ้าไหลในชั้นบรรยากาศของโลก ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกในรอบวัน

3) พายุแม่เหล็ก (Magnetic storm)

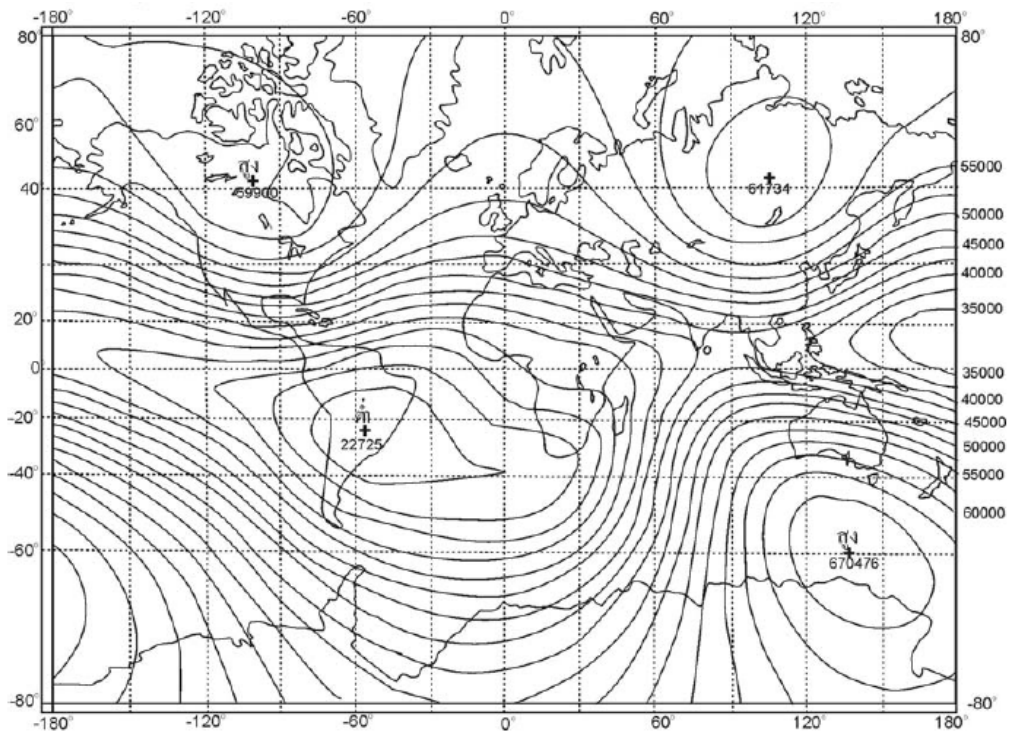
การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กเนื่องจากพายุแม่เหล็กไม่สามารถปรับแก้ได้ และการเกิดพายุแม่เหล็กไม่สามารถทำนายได้อย่างถูกต้องแม่นยำว่าจะเกิดเมื่อไร แต่ส่วนใหญ่พบว่าพายุแม่เหล็กเกิดขึ้นในรอบประมาณ 27 วัน พายุแม่เหล็กอาจมีขนาด 1,000 nT อาจมากกว่าหรือน้อยกว่านี้ โดยมีการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาสั้น ๆ ไม่แน่นอน อาจเกิดเป็นระยะเวลาหลายชั่วโมงหรือหลายวัน พบว่าการเกิดพายุแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับจุดดับบนดวงอาทิตย์

4) การกลับขั้วของสนามแม่เหล็กโลก (Magnetic reversal)

จากการศึกษาสนามแม่เหล็กโลกในอดีตพบว่าสนามแม่เหล็กโลกมีการกลับขั้วมาอย่างต่อเนื่อง คาบของการกลับขั้วมีค่ามาก จึงไม่มีผลต่อการสำรวจวัดสนามแม่เหล็กโลก เช่นเดียวกับกรณีของการเปลี่ยนแปลงเซกูลาร์

2.4 แบบจำลองสนามแม่เหล็กโลกอ้างอิง (International Geomagnetic Reference Field; IGRF)

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กหลักของโลกและการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กหลักของโลก ซึ่งนิยมใช้ในการศึกษาแผ่นเปลือกโลก แกนโลกชั้นใน ไอออนในชั้นบรรยากาศของโลก และสนามแม่เหล็กโลก ประกอบด้วยชุดของ Spherical harmonics ซึ่งอาศัยข้อมูลสนามแม่เหล็กทั่วโลกทั้งทางพื้นดิน ทางอากาศ ทางทะเล และการสำรวจทางดาวเทียม โดยจะสร้างเป็นแบบจำลองสนามแม่เหล็กโลกบริเวณต่าง ๆ ทั่วโลกขึ้นมา (ภาพที่ 2.2) แบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกในปี 1968 และมีการสร้างขึ้นใหม่ทุก ๆ 5 ปี และมีการปรับปรุงอยู่เป็นระยะ ๆ ปัจจุบันใช้แบบจำลองที่ 10 ซึ่งใช้ในระหว่างปี ค.ศ. 2006-2010

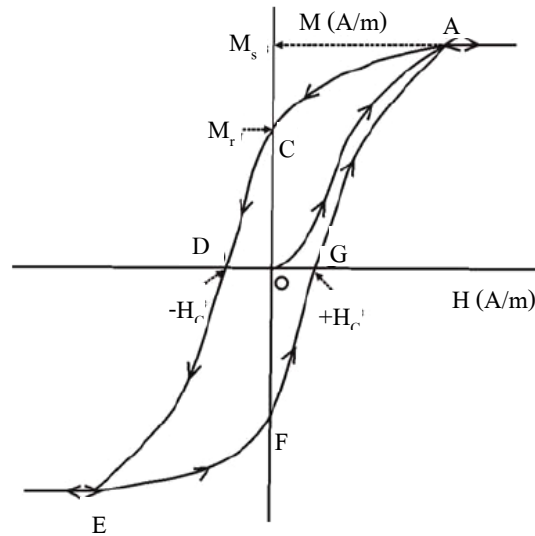


ภาพที่ 2.2 แสดงชั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กหลักของโลก จาก IGRF ปรับปรุงครั้งที่ 10 (คัดลอกจาก International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 2006)

2.5 การเกิดแมกนีไทเซชันและลบล้างแมกนีไทเซชัน

วัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกจะมีแมกนีไทเซชันและความเข้มสนามแม่เหล็กสูง หากนำเอาสนามแม่เหล็กภายนอกมาเหนี่ยวนำให้เกิดแมกนีไทเซชัน ลบล้างแมกนีไทเซชัน หรือกลับคืนสภาพแม่เหล็กอีกครั้ง จะได้ดังภาพที่ 2.3 โดยให้วัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรตกอยู่ในอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้มีการเหนี่ยวนำสูงด้วยการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอก สารแม่เหล็กจะเริ่มถูกเหนี่ยวนำจากจุด O มาที่จุด A และจะมีค่าการเหนี่ยวนำคงที่ไปตลอดเรียกว่า สารแม่เหล็กถึงจุดอิ่มตัว ไม่ว่าจะเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอกมากขึ้น แต่ค่าแมกนีไทเซชันเมื่อถึงจุดอิ่มตัวแล้วจะคงที่ และเมื่อเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออก ค่าแมกนีไทเซชันจะไม่กลับมาที่ O แต่จะอยู่ที่จุด M_r เรียกว่า การเหนี่ยวนำตกค้าง (Remanent induction) ทั้งนี้เพราะโดเมนของโมเมนต์แม่เหล็กได้จัดเรียงตัวและมีสภาพเป็นแม่เหล็กไปแล้ว แม้สภาพของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับศูนย์ ก็จะมียังคงรักษาสภาพการเรียงตัวนั้นไว้

หากต้องการให้หมดสภาพความเป็นแม่เหล็ก จะต้องให้สนามแม่เหล็กภายนอก ในทิศทางตรงกันข้าม ในปริมาณ H_c แมกนีไทเซชันจะเป็นศูนย์ที่จุด D หรือหากต้องการให้เกิดสภาพแม่เหล็กอีกครั้ง ก็ทำได้โดยเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กขึ้น แมกนีไทเซชันจะเพิ่มขึ้นจาก ศูนย์มาถึงจุดอิ่มตัวอีกครั้งที่จุด E และเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก แมกนีไทเซชันจะ ลดลงมาอยู่ที่จุด F



ภาพที่ 2.3 วงฮีสเทอรีซิสแสดงการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างธรรมชาติในวัสดุแม่เหล็ก

เส้นโค้งจาก OACDEFGA เรียกว่า วงฮีสเทอรีซิส (Hysteresis loop) พื้นที่ภายในวงฮีสเทอรีซิสครบหนึ่งรอบแสดงถึงพลังงานที่สูญเสียในรูปของค่าความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เพื่อให้วัตถุเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กและหมดสภาพความเป็นแม่เหล็ก วงรอบฮีสเทอรีซิสของวัตถุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกจะมีพื้นที่แตกต่างกัน ถ้าวัตถุใดมีพื้นที่มาก แสดงว่าวัตถุนั้นจะรักษาสภาพความเป็นแม่เหล็กได้ดีกว่าวัตถุที่มีพื้นที่น้อย

2.6 การเกิดแมกนีไทเซชันตกค้าง (Remanent magnetization, RM)

วัตถุที่มีสารแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกและเฟอร์ริแมกเนติกอาจมีลักษณะของการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้าง ซึ่งจะอาศัยคุณสมบัตินี้ของแร่ประกอบหินในการศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก การกลับขั้วของสนามแม่เหล็กโลกในอดีต และลักษณะทางแม่เหล็กอื่น ๆ ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์แมกนีไทเซชันตกค้าง เช่น หินอัคนีซึ่งเกิดจากการเย็นตัวของลาวาหรือหินหนืด หรือดินซึ่งถูกเผาที่อุณหภูมิสูง โมเมนต์แม่เหล็กของสารแม่เหล็กภายในจะถูกเหนี่ยวนำให้อยู่ในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กโลกขณะจับผลึกในสภาวะ

อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี แม้ต่อมาสนามแม่เหล็กโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทาง แต่ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำในขณะที่เย็นตัวจะคงอยู่ในทิศทางเดิม

กระบวนการทางธรรมชาติที่ทำให้เกิดแมกนีไทเซชันตกค้างมีอยู่หลายวิธี ได้แก่

1) การเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างจากความร้อน (Thermal RM; TRM)

เป็นกระบวนการที่เกิดในขณะที่หินหนืดเย็นตัวแล้วตกผลึกภายใต้สนามแม่เหล็กโลก จึงทำให้แร่บางชนิดที่เป็นส่วนประกอบหิน เช่น แร่แมกนีไทต์ หรือแร่ฮีมาไทต์ กลับมามีสมบัติเป็นเฟอร์โรแมกเนติก หรือเฟอร์ริแมกเนติกได้ใหม่ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีของสารแม่เหล็กในขณะนั้น และคงการเรียงตัวไว้เช่นนั้นแม้ว่าสนามแม่เหล็กโลกจะเปลี่ยนไปในเวลาต่อมาก็ตาม ความเข้มของการเป็นแมกนีไทเซชันตกค้างโดยกระบวนการนี้จะถูกลบล้างได้ยาก แต่เนื่องจากอุณหภูมิต่ำที่หินหนืดตกผลึกเป็นหินอัคนีสูงกว่าอุณหภูมิคูรีค่อนข้างมาก คืออาจอยู่ในช่วง 800-1,100 °C ดังนั้นการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างแบบนี้จึงไม่เกิดขึ้นทันทีที่หินตกผลึก แต่จะเกิดหลังจากนั้นแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะนี้จะสั้นหรือยาวก็ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของหินดังกล่าว

2) การเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างทางเคมี (Chemical RM; CRM)

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในระหว่างการตกผลึก หรือการเปลี่ยนรูปของสารแม่เหล็กโดยกระบวนการทางเคมี ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอกที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี

3) การเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างโดยการตกตะกอน (Depositional RM; DRM)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากการตกตะกอนของเกรนแม่เหล็กภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอก เช่น การตกตะกอนของเม็ดแร่แมกนีไทต์ ไททาโนแมกนีไทต์ หรือฮีมาไทต์ ในสนามแม่เหล็กโลก เป็นต้น

4) การเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างแบบไอโซเทอร์มัล (Isothermal RM; IRM)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากการที่สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำภายนอก ที่กระทำต่อสารเฟอร์โรแมกเนติกใดๆ ลดค่าลงจนเป็นศูนย์ และจะยังคงเหลือความเป็นแม่เหล็กอยู่ในสารนั้น ตามหลักของวงฮิสเทอรีซิส ซึ่งก็อาจก่อให้เกิดความเป็นแมกนีไทเซชันตกค้างชนิดนี้ในพื้นที่แคบๆ ได้

5) การเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างแบบวิสคอส (Viscous RM; VRM)

เกิดขึ้นในขณะที่สารที่มีอำนาจแม่เหล็กวางตัวอยู่ในสนามแม่เหล็กเป็นเวลานาน สนามแม่เหล็กจะถูกเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น

6) การเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างแบบแอนฮิสเทอรีซิส (Anhysteretic RM; ARM)

เกิดเมื่อความแรงสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากเกิดการปรับลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่ยังมีสนามแม่เหล็กค่าน้อยคงอยู่ และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

7) การเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างทางเคมีและความร้อน (Thermo-Chemical RM; TCRM)

เกิดในลักษณะผสมระหว่างทางเคมีและโดยความร้อน

ขนาดของการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างจะขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณสารแม่เหล็ก และขนาดของเกรนแม่เหล็กที่อยู่ในวัตถุนั้น ๆ เนื่องจากขนาดของเกรนแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับแรงยึดเหนี่ยวภายใน (Coercive force) เกรนแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่จะมีแรงยึดเหนี่ยวน้อย ซึ่งก็จะส่งผลให้แมกนีไทเซชันตกค้างที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยด้วย Lund และ Schwantz (1999) กล่าวว่าความเข้มของสารแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบางครั้งยังมีความสัมพันธ์กับภูมิอากาศ ซึ่งจะมีผลต่อการหาค่าสนามแม่เหล็กด้วย นอกจากนี้ก็อาจจะยังขึ้นอยู่กับละติจูดด้วย โดยเฉพาะที่ละติจูดสูงกว่า 30 องศา (Pesonen and Leino, 1998)

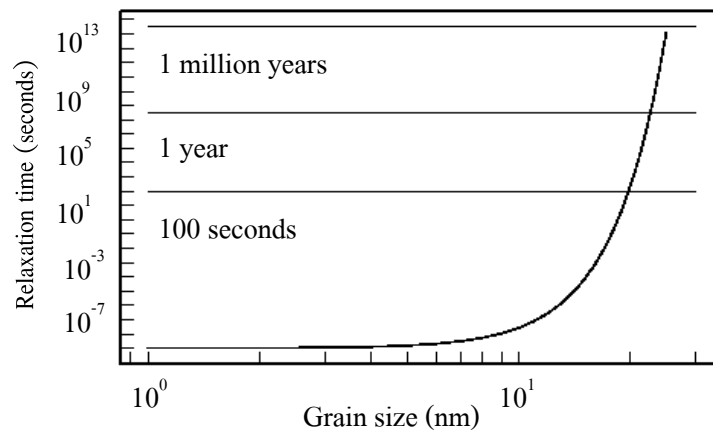
2.7 การหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกในอดีต

หลักการสำคัญของเทคนิคการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กในอดีตที่ติดค้างอยู่ในโดเมนแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติก คือการเปรียบเทียบค่าความเข้มของแมกนีไทเซชันตกค้างธรรมชาติ (NRM) ของวัสดุ กับความเข้มของแมกนีไทเซชันตกค้างจากความร้อน (TRM) ภายในสนามแม่เหล็กที่ทราบค่า โดยเมื่อวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกได้รับความร้อน โมเมนต์แม่เหล็กภายในเกรนแม่เหล็กส่วนที่มีเวลาในการลดลงของแมกนีไทเซชันตกค้าง หรือเรียกว่า Relaxation time (τ) และถูกยึดไว้ด้วยแรงยึดเหนี่ยวต่ำ (สมการ 2.1) จะถูกทำให้สมมูลกับสนามแม่เหล็กภายนอก และมีแมกนีไทเซชันเป็นศูนย์ เรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกรนแม่เหล็กมีสภาพสมมูลกับสนามแม่เหล็กภายนอก และโมเมนต์แม่เหล็กมีการวางตัวแบบสุ่ม หรือถูกลบล้างแมกนีไทเซชันนี้ว่า อุณหภูมิปลดปล่อย (Unblocking temperature, T_{ub}) ส่วนเกรนแม่เหล็กที่มีแรงยึดเหนี่ยวสูงกว่าพลังงานความร้อนที่ให้ จะยังคงสภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ดังเดิม

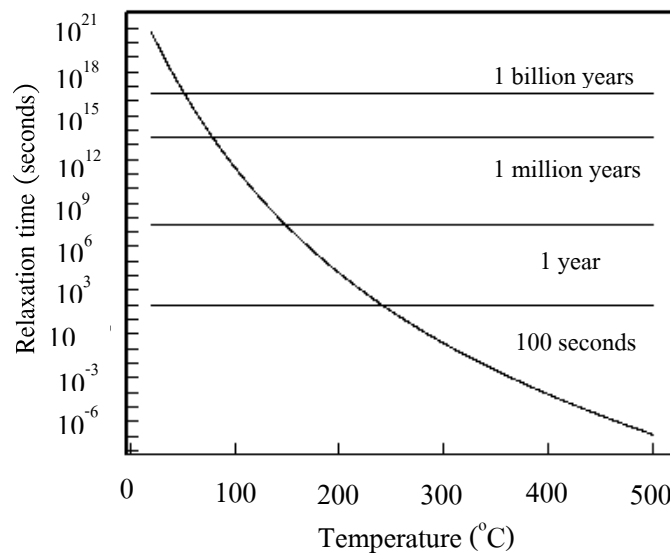
$$\tau = \frac{1}{C} \exp\left(\frac{Vh_c j_s}{2kT}\right) \quad \dots \text{สมการ (2.1)}$$

- เมื่อ C คือ Frequency factor = 10^8 s^{-1}
 v คือ ปริมาตรของเกรนแม่เหล็กโดเมนเดี่ยว
 h_c คือ แรงยึดเหนี่ยวภายในของแม่เหล็กโดเมนเดี่ยว
 j_s คือ อำนาจแม่เหล็กอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็ก
 kT คือ พลังงานความร้อน

Relaxation time มีความสัมพันธ์กับขนาดของเกรนแม่เหล็กและอุณหภูมิภายนอก โดยภาพที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าสารแม่เหล็กที่มีเกรนแม่เหล็กขนาดใหญ่จะสามารถกักเก็บค่าแมกนีไทเซชันไว้ได้นานกว่าเกรนแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายนอกที่วัตถุนั้นวางอยู่ ดังภาพที่ 2.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสารแม่เหล็กจะมีเวลาในการกักเก็บแมกนีไทเซชันไว้ได้น้อยกว่าสารแม่เหล็กที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Relaxation time กับขนาดของเกรนแม่เหล็ก (Tauxe, 4-7)



ภาพที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของ Relaxation time กับอุณหภูมิของแมกนีไทต์ (Tauxe, 5-6)

เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปจนถึง T_{ub} ของเกรนแม่เหล็กที่มีแรงยึดเหนี่ยวน้อยกว่าพลังงานความร้อนนั้นจะถูกทำให้ว่างตัวแบบสุ่ม เมื่อให้ความร้อนต่อไปจนถึงอุณหภูมิคูรีของสารแม่เหล็กภายในตัวอย่าง จะทำให้สารแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกถูก

เปลี่ยนสภาพเป็นพาราแมกเนติก เกรนแม่เหล็กทั้งหมดจะมีการวางตัวแบบสุ่ม แมกนีไทเซชันรวมมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อตัวอย่างนั้นเย็นตัวลงผ่านอุณหภูมิคูรีอีกครั้ง เกรนแม่เหล็กบางส่วนจะถูกเหนี่ยวนำให้ชี้ไปในทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก หรือสนามแม่เหล็กโลก ณ จุดนั้น

ในกรณีที่สารแม่เหล็กไม่เกิดการแปรสภาพ เกรนแม่เหล็กส่วนที่ถูกกลบล้างแมกนีไทเซชันที่อุณหภูมิหนึ่ง เมื่อเย็นตัวผ่านอุณหภูมินั้น โมเมนต์แม่เหล็กซึ่งวางตัวแบบสุ่มจะถูกเหนี่ยวนำให้มีทิศทางและความเข้มสัมพันธ์กับทิศทางและความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอก และกักเก็บแมกนีไทเซชันเหล่านั้นไว้ หรือหากสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ ก็จะทำให้แมกนีไทเซชันที่เกรนแม่เหล็กนั้นเก็บไว้เป็นศูนย์ด้วย เรียกอุณหภูมิจากที่ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กมีการวางตัวและกักแมกนีไทเซชันนี้ว่า อุณหภูมิกักเก็บ (Blocking temperature, T_b)

แม่เหล็กแต่ละเกรนซึ่งอยู่ภายในตัวอย่างจะมี T_b และ T_{ub} แตกต่างกัน แต่ภายในเกรนแม่เหล็กเดียวกันหากไม่เกิดการแปรสภาพของสารแม่เหล็กจะมี T_b เท่ากับ T_{ub} ในวัสดุประเภทเครื่องปั้นดินเผาจะมี T_b กระจายอยู่ต่อเนื่องตั้งแต่ T_c ลงมา (Ramaswamy, 1985) เกรนแม่เหล็กที่มีค่า T_b หรือ T_{ub} ต่ำ จะถูกกลบล้างและเหนี่ยวนำได้ง่ายกว่าเกรนแม่เหล็กที่มี T_b หรือ T_{ub} สูงกว่า

2.8 เทคนิคการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณของ Thellier

เทคนิค Thellier (1959) เป็นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปในการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ ทั้งนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าสารแม่เหล็กไม่เกิดการแปรสภาพ (Coe, 1967; Prévot et al., 1990) โดยความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้ประมาณ 50% มีสาเหตุมาจากการแปรสภาพของสารแม่เหล็กในระหว่างการให้ความร้อน (Walton, 1998) และอัตราความสำเร็จในการทดสอบเกี่ยวกับความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณส่วนใหญ่จะไม่เกิน 10-20% (Valet, 2003) เนื่องจากสารแม่เหล็กตามธรรมชาติโดยทั่วไปไม่ได้มีลักษณะเป็นโดเมนเดี่ยวโดยสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้สารแม่เหล็กเกิดการแปรสภาพเมื่อได้รับความร้อน ส่งผลให้ค่าแมกนีไทเซชันตกค้างที่ได้ไม่ใช่ค่าของสนามแม่เหล็กในขณะวัตถุนั้นเย็นตัวจริง และยังต้องใช้กับวัสดุแม่เหล็กซึ่งมีผนังโดเมนขนาดเล็กและต้องมีการกักเก็บแมกนีไทเซชันซึ่งเสถียรไว้ในปริมาณที่มากพอด้วย (Tauxe and Struadigel, 2004)

Nagata (1943) ได้แสดงให้เห็นว่าความเข้มของค่า TRM ของตัวอย่างที่เป็นโดเมนเดี่ยวซึ่งมีขนาดเกรนแม่เหล็กในช่วง 20-80 nm เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามเหนี่ยวนำอ่อน ๆ เช่นสนามแม่เหล็กโลก โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกที่ยังทำให้ความสัมพันธ์นี้เป็นเส้นตรงมีค่าประมาณ 65 μT หรือบางครั้งก็อาจมีค่าสูงถึงหลายร้อยไมโครเทสลา ก่อนที่ความสัมพันธ์นั้นจะไม่เป็นเส้นตรง (Scherbakov et al., 1993; Tauxe, 2005)

เนื่องจากค่า NRM ซึ่งได้จากการที่ตัวอย่างได้รับความร้อนและเย็นตัวภายใต้สนามแม่เหล็กโลกหรือสนามแม่เหล็กภายนอก มีความสัมพันธ์กับขนาดของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ (H_a) ของโลกในขณะนั้น จะได้

$$NRM = k_1 H_a \quad \dots \text{สมการ (2.2)}$$

ในทำนองเดียวกัน TRM ที่ได้จากการเย็นตัวของวัตถุตัวอย่าง ภายใต้สนามแม่เหล็กในห้องปฏิบัติการ (H_{lab}) จะได้

$$TRM = k_2 H_{lab} \quad \dots \text{สมการ (2.3)}$$

หากค่าคงที่ k_1 และ k_2 มีค่าเท่ากัน จากสมการ (2.2) และ (2.3) จะได้

$$H_a = \frac{NRM}{TRM} H_{lab} \quad \dots \text{สมการ (2.4)}$$

สมการที่ 2.4 ถือเป็นสมการพื้นฐานในการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ โดย k_1 และ k_2 จะมีค่าเท่ากันก็ต่อเมื่อสมบัติต่าง ๆ ทางแม่เหล็กของตัวอย่างไม่มีการเปลี่ยนแปลงนับตั้งแต่สมบัติแม่เหล็กเหล่านั้นก่อตัวขึ้น ไม่มีการเกิดแมกนีไทเซชันตกค้างแบบ VRM และไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังจากตัวอย่างเกิด NRM หรือในระหว่างให้ความร้อนในการทดลอง ซึ่งถือเป็นสมมติฐานสำคัญข้อหนึ่งในการหาความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณ โดยปกติแมกนีไทเซชันตกค้างแบบ VRM นั้นจะเกิดเฉพาะกรณีของเกรนแม่เหล็กส่วนที่มี T_b ต่ำ ๆ เท่านั้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจะเกิดเมื่อมีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง หากค่าคงที่นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บค่า TRM ที่จะเกิดขึ้น และได้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณที่สูงหรือต่ำกว่าค่าจริงได้

สำหรับเกรนแม่เหล็กที่เป็นโดเมนเดี่ยวซึ่งไม่มีการทำปฏิกิริยาใด ๆ ที่จะส่งผลให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังเกรนแม่เหล็กนั้นก่อตัวขึ้น จะเป็นไปตามทฤษฎีของ Néel (1955) นั่นคือ

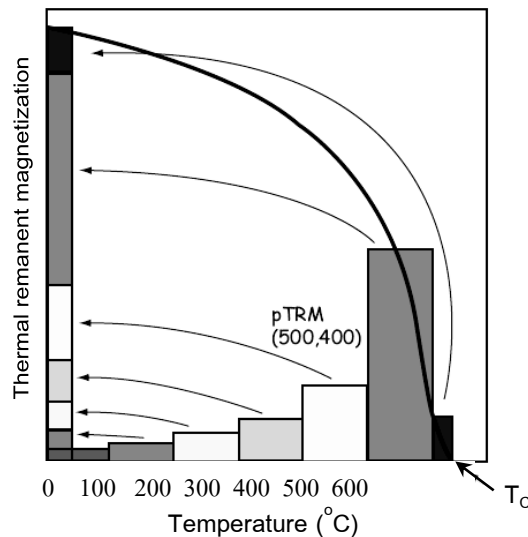
1. กฎของการเท่ากัน (Law of reciprocity) คือ T_b และ T_{ub} ที่อุณหภูมิเดียวกัน จะมีค่าเท่ากัน นั่นคือค่า pTRM ที่ได้ในช่วงอุณหภูมิ T_1 และ T_2 ($T_1 > T_2$) ในสนามแม่เหล็ก H_0 หรือ pTRM(T_1, T_2, H_0) จะถูกลบล้างโดยสมบูรณ์โดยการให้ความร้อนในสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน (T_1, T_2)

2. กฎของความเป็นอิสระ (Law of independence) คือ ค่า $pTRM(T_1, T_2, H_0)$ จะไม่ขึ้นกับค่า $pTRM$ อื่น ซึ่งได้จากช่วงอุณหภูมิซึ่งไม่ซ้อนทับกัน (T_1, T_2) ทั้งขนาดและทิศทาง

3. กฎการรวม (Law of additivity) คือ ค่า $pTRM$ ที่ได้จากสนามแม่เหล็ก (H_0) เดียวกัน จะได้มาจากหลายความเข้มซึ่งนำมารวมกัน ดังสมการที่ 2.5 และแสดงในภาพที่ 2.6 นั่นคือ

$$pTRM(T_c, T_1, H_0) + pTRM(T_1, T_2, H_0) + \dots + pTRM(T_n, T_0, H_0) = pTRM(T_c, T_0, H_0) = TRM$$

...สมการ (2.5)



ภาพที่ 2.6 กฎของความเป็นอิสระและกฎการรวมกันของค่า $pTRM$ ที่ได้จากการเย็นตัวในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะเป็นอิสระต่อกันและผลรวมของแต่ละช่วงจะเป็นค่า TRM ทั้งหมด (Korte and Constable, 2005)

จากกฎดังกล่าวข้างต้น ในกรณีที่วัตถุมีเกรนแม่เหล็กของโดเมนเดี่ยวและไม่มี การเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้น ส่วนของ NRM และ TRM สามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่า ความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณได้ ซึ่งก็เป็นหลักการพื้นฐานของเทคนิคการหาความเข้ม สนามแม่เหล็กโลกโบราณของ Thellier ทั้งนี้ Perrin (1998) ได้ชี้ให้เห็นว่าผลของการ เกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ของสารแม่เหล็กอาจส่งผลให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้สูงกว่าค่าจริง ถึง 30%

การศึกษาในช่วงแรก Thellier (1938) ได้ให้ความร้อนครั้งเดียวถึงอุณหภูมิคูรี ของตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่า TRM ทั้งหมด แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่า NRM เดิม ซึ่งจะส่งผลให้ เกิดแมกนีไทเซชันตกค้างแบบ VRM กับส่วนที่มี T_0 ต่ำ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงทางเคมีก็จะ

เกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ต่อมาจึงเปลี่ยนเป็นการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง 2 ครั้ง โดยครั้งแรกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ T_1 และปล่อยให้เย็นตัวในสนามแม่เหล็กภายนอก (H_{lab}) ซึ่งจะได้แมกนีไทเซชันตกค้าง คือ

$$M_{first} = M_{NRM} + M_{pTRM} \quad \dots\text{สมการ (2.6)}$$

จากนั้นให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิเดียวกัน (T_1) และปล่อยให้เย็นตัวในสนามแม่เหล็กภายนอกอีกครั้ง โดยพลิกตัวอย่าง 180 องศา หรือทำให้ได้สนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม ($-H_{lab}$) จะได้ค่าแมกนีไทเซชันตกค้างเป็นดังสมการ

$$M_{second} = M_{NRM} - M_{pTRM} \quad \dots\text{สมการ (2.7)}$$

การให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงในครั้งเดียวอาจส่งผลให้สารแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในการศึกษาไม่ได้ต้องการค่า TRM และ NRM ทั้งหมด แต่ต้องการเพียงบางส่วนของค่า TRM เท่านั้น ดังนั้น Coe (1967) จึงได้ปรับปรุงวิธีของ Thellier เป็นการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง 2 ครั้ง โดยครั้งแรกให้ความร้อนในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ (H_0) เพื่อให้ได้เป็นทิศทางและค่า NRM และครั้งที่สองให้ความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกันในสนามเหนี่ยวนำ (H_{lab}) เรียกว่า zero-field/in-field (ZI) หรืออาจปล่อยให้ตัวอย่างเย็นตัวครั้งแรกในสนาม H_{lab} และครั้งที่ 2 ปล่อยให้เย็นตัวในสนาม H_0 เรียกว่า in-field/zero-field (IZ) ก็ได้ ซึ่งความแตกต่างของค่า NRM ที่วัดได้ทั้งสองครั้งจะเป็นค่าของ TRM ของตัวอย่าง นั่นคือ

$$M_{first} = M_{NRM} \quad \dots\text{สมการ (2.8)}$$

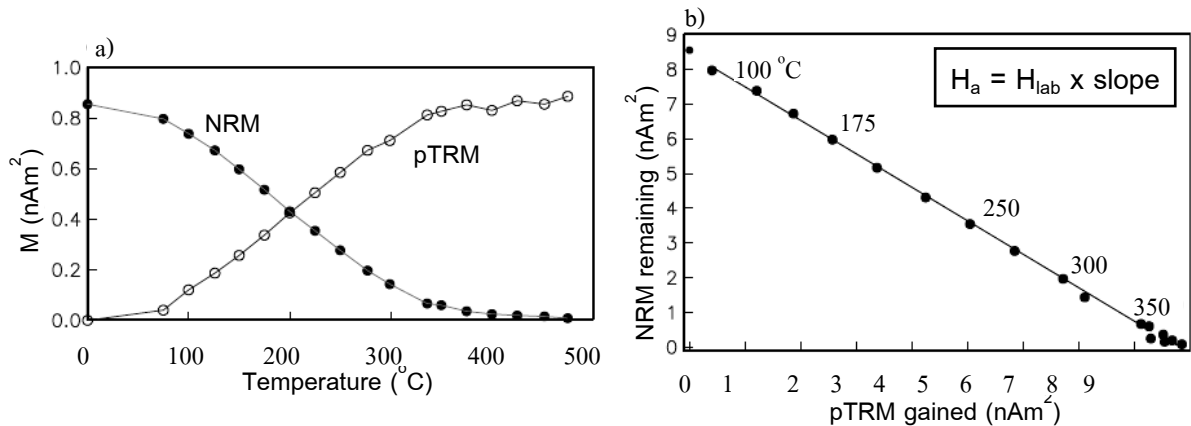
และ

$$M_{second} = M_{NRM} + M_{pTRM} \quad \dots\text{สมการ (2.9)}$$

โดยทั่วไปผลที่ได้จากการใช้เทคนิค Thellier จะถูกนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า NRM ที่เหลืออยู่ (NRM remaining) กับค่า TRM ที่เกิดขึ้น (TRM gained) ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ เรียกกราฟที่ได้ว่า Arai plot (Nagata et al., 1963) โดยสมการความสัมพันธ์ของเส้นตรงในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง คือ

$$pNRM(T_c, T_R) = NRM + (-H_a/H_{lab})pTRM(T_c, T_R) \quad \dots\text{สมการ (2.10)}$$

หรืออาจเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 2.4 โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ (H_a) สามารถหาได้จากความชันของกราฟในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะกราฟการหาความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้เทคนิค Thellier a) การลดลงของค่า NRM และค่า pTRM ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ b) กราฟ Arai plot (Tauxe, 2005)

เทคนิค Thellier ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการหาความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณจากอิฐและดินเผาซึ่งสารแม่เหล็กมีความซับซ้อนไม่มากเหมือนหินในธรรมชาติ เนื่องจากหินในธรรมชาติโดยทั่วไปประกอบด้วยเกรนแม่เหล็กซึ่งไม่ได้เป็นโดเมนเดี่ยวโดยสมบูรณ์ ส่วนใหญ่จะเป็นโดเมนเทียม หรือมัลติโดเมน (Fabian, 2001) เช่น หินบะซอลต์ ซึ่งสารแม่เหล็กส่วนใหญ่จะเป็นไททานอแมกนีไทด์ที่มีโดเมนแม่เหล็กเป็นแบบโดเมนเทียม สารแม่เหล็กในวัตถุที่ใช้ในการหาความเข้มสนามแม่เหล็กโดยเทคนิคนี้ต้องมีเกรนที่ละเอียด และมีลักษณะเกรนแบบโดเมนเดี่ยว ซึ่งดินเผาที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันก็เป็นหนึ่งในวัตถุที่เหมาะสมในการใช้หาความเข้มสนามแม่เหล็กนี้ (Thellier, 1977)

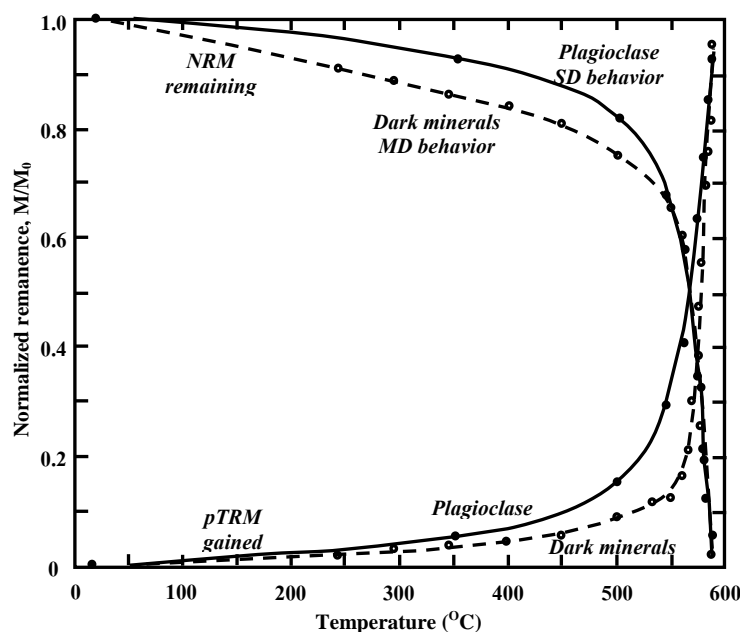
2.9 ความคลาดเคลื่อนในการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ

แม้เทคนิคการหาความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณของ Thellier จะมีการยอมรับกันมาก แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาทั้งตัวอย่างในธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น บางครั้งชี้ให้เห็นว่าวิธีนี้ให้ผลที่ไม่ถูกต้อง ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาของ Tanaka และ Kono (1991), Kosterov และ Prévot (1998), Calvo และคณะ (2002), Yamamoto และคณะ (2003), Biggin และ Thomas (2003) และ Mochizuki และคณะ (2004) ซึ่งส่วนใหญ่จะให้ค่าที่สูงกว่า

ความเป็นจริง ทั้งนี้ความแตกต่างของตัวอย่างทั้งการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและทางเคมี จะเป็นตัวที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อใช้ในการหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอย่างมีเหตุผลและน่าเชื่อถือ (Coe et al., 1978; Selkin and Tauxe, 2000; Biggin and Thomas, 2003)

Pesonen และคณะ (1995) ได้อธิบายว่าความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การเปลี่ยนแปลงของเกรนแม่เหล็กในสารแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแมกนีไทเซชันตกค้าง อัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันระหว่างการเย็นตัวในธรรมชาติกับในระหว่างการทดลอง ความเป็นแอนไอโซทรอปีเชิงรูปทรง (Shape anisotropy) และเชิงโครงสร้าง (Fabric anisotropy) หรืออาจเกิดจากเทคนิคที่ใช้ โดยเฉพาะความเป็นแอนไอโซทรอปีของโครงสร้างนั้นอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงถึง 12%

การศึกษาขนาดของเกรนแม่เหล็กต่อผลที่ได้ในการใช้เทคนิค Thellier โดย Levi (1977) พบว่ายิ่งเกรนแม่เหล็กมีขนาดเพิ่มขึ้นจะยิ่งส่งผลให้การใช้เทคนิคนี้ไม่เป็นไปตามอุดมคติมากขึ้น ดังภาพที่ 2.8

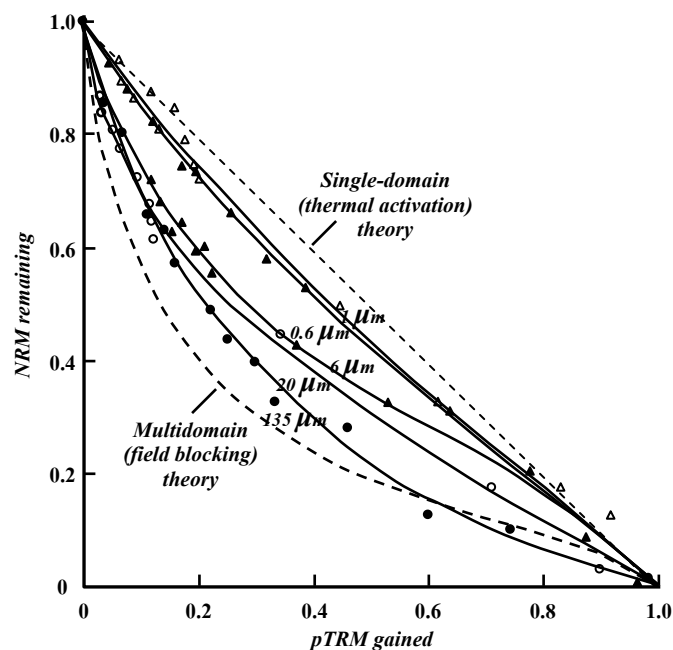


ภาพที่ 2.8 การเกิดค่า pTRM และการลบล้าง NRM โดยใช้ความร้อนของแร่ plagioclase ซึ่งมีลักษณะเป็นโดเมนเดี่ยว และแร่สีเข้ม (dark minerals) ซึ่งมีลักษณะเป็นมัลติโดเมน (Hill, 2000)

จากภาพแสดงลักษณะของ T_b และ T_{ub} ของโดเมนเดี่ยวและมัลติโดเมนเกรน โดยในกรณีของเกรนแม่เหล็กชนิดโดเมนเดี่ยวจะมี T_b เท่ากับ T_{ub} ซึ่งจะส่งผลให้กราฟของ pTRM และ NRM เป็นเหมือนเงาในกระจกของกันและกัน แต่หากเป็นชนิดมัลติโดเมนเกรน T_b

จะไม่เท่ากับ T_{ub} กราฟของ pTRM จะเพิ่มขึ้นช้ากว่าที่อุณหภูมิต่ำ และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง ในการลบล้างแม่เหล็กไนโอเซชันของเกรนแม่เหล็กชนิดมัลติโดเมน ค่าของ pNRM จะลดลงอย่างรวดเร็ว ความไม่สมมาตรของ T_b และ T_{ub} นี้จะส่งผลให้การใช้เทคนิค Thellier ไม่ได้ผล เนื่องจากขัดแย้งกับกฎการเท่ากัน (ข้อ 1) ในที่นี้ตัวอย่างที่เกรนแม่เหล็กชนิดมัลติโดเมนนั้นอาจทำให้ได้ค่าที่สูงกว่าค่าจริงถึง 60% (Shcherkov and Shcherkova, 2001)

นอกจากนี้หากเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า NRM ที่เหลืออยู่กับค่า TRM ที่เกิดขึ้นจากการให้ความร้อนในสนามแม่เหล็กภายนอกของแร่แม่เหล็กไนโอไซด์ ซึ่งมีขนาดของเกรนแม่เหล็กต่างกัน จะพบว่ายิ่งเกรนแม่เหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือมีลักษณะเป็นมัลติโดเมนมากขึ้น จะยิ่งส่งผลให้กราฟที่ได้หย่อนลงมากขึ้น (ภาพที่ 2.9) และเกรนแม่เหล็กแบบโดเมนเทียมจะโค้งน้อยกว่าเกรนแม่เหล็กแบบมัลติโดเมน (Xu and Dunlop, 1995) ค่าความเข้มข้นสนามแม่เหล็กโลกโบราณของสารแม่เหล็กทั้งสองแบบจะได้ค่าที่ถูกต้องก็ต่อเมื่อใช้ทุกจุดของกราฟ หรือทั้งหมดของค่า NRM และ TRM ในกรณีที่สารแม่เหล็กไม่มีการแปรสภาพ และไม่คิดส่วนที่เกิดจากอำนาจแม่เหล็กทุติยภูมิ (Levi, 1977) เพื่อหาความชันของกราฟ



ภาพที่ 2.9 เปรียบเทียบลักษณะของกราฟที่ได้จากแร่แม่เหล็กไนโอไซด์ที่มีขนาดเกรนแม่เหล็กต่างกัน (Dunlop and Xu, 1994)

สำหรับการศึกษาความผิดพลาดจากลักษณะของกราฟนั้น Fabian (2001) กล่าวว่า หากกราฟมีความโค้งไม่มาก การใช้จุดแรกและจุดสุดท้ายของกราฟมาคำนวณจะยังให้

ค่าที่ถูกต้องและมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงประมาณ 10% เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hill และ Shaw (2000) ซึ่งพบว่ากราฟมีลักษณะความชันเป็น 2 ช่วง ค่าความชันที่ได้จากการใช้ทุกจุดบนกราฟ จะให้ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กที่ถูกต้องมากกว่าการเลือกใช้ความชันเฉพาะช่วงอุณหภูมิต่ำซึ่งจะให้ค่าที่สูงเกินไป ส่วน Scherbakov และ Scherbakova (2001) พบว่าหินอัคนีที่เกรนแม่เหล็กเป็นแบบโดเมนเทียม จะให้ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กสูงกว่าค่าจริงประมาณ 20% ในช่วงอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ Chauvin และคณะ (2005) ได้ให้ข้อสังเกตว่าแม้จะได้กราฟลักษณะโค้งก็ยังสามารถให้ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กที่ถูกต้องในช่วงอุณหภูมิสูง ๆ นั่นก็ขึ้นอยู่กับว่าจะเลือกส่วนไหนมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งการเลือกช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ ก็อาจทำให้ได้ค่าที่สูงกว่าค่าจริง แต่ทั้งนี้ก็ต้องทำการตรวจสอบการแปรสภาพของสารแม่เหล็กในระหว่างการทดลองด้วย

ความไม่เท่ากันของ T_b และ T_{ub} ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในอดีตที่อาจส่งผลให้เกิดเกรนแม่เหล็กที่เป็นมัลติโดเมนขึ้นภายในตัวอย่าง ทั้งนี้ความเข้มข้นของค่า pTRM ที่ได้ในช่วงอุณหภูมิหนึ่งก็ยังขึ้นอยู่กับว่าค่า pTRM ที่ได้นั้นเกิดจากตัวอย่างเย็นตัวจากอุณหภูมิสูง หรือได้จากการที่ตัวอย่างได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งก็จะส่งผลต่อการแปรสภาพของเกรนแม่เหล็กของตัวอย่าง นอกจากการไม่เท่ากันของ T_b และ T_{ub} ในกรณีของโดเมนแบบมัลติโดเมนและโดเมนเทียม หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระหว่างการให้ความร้อนแล้ว การเปลี่ยนรูปของแร่ที่มีสารแม่เหล็กไปเป็นแร่ใหม่ ซึ่งมี T_{ub} สูงกว่าเดิม ยังเป็นสาเหตุให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ด้วย (Chauvin et al., 2005) แต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมักก่อให้เกิดแมกนีไทเซชันแบบ TCRM ขึ้น ทั้งนี้หากในขณะที่ตัวอย่างเย็นตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_c มีการเพิ่มปริมาตรขึ้น ค่า NRM ที่ได้จะเป็น TCRM ซึ่งเมื่อให้ความร้อนในกระบวนการลบล้างแมกนีไทเซชันจะทำให้ได้ค่า T_{ub} ของ TCRM สูงกว่าอุณหภูมิที่แมกนีไทเซชันถูกกักเก็บไว้ในกรณีเดิมตอนต้น อาจต้องทำการปรับแก้ค่าความเข้มข้นที่ได้หากนำค่าที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ มาใช้ในการคำนวณ (McClelland, 1996)

ความเข้มข้นของค่า TRM หรือ T_b ของเกรนที่เป็นโดเมนเดี่ยวมีความสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวของวัสดุ ซึ่ง Dodson และ McClelland-Brown (1980) ชี้ให้เห็นว่าแมกนีไทต์และฮีมาไทต์ที่มีเกรนแม่เหล็กชนิดโดเมนเดี่ยวจะมีความเข้มข้นของค่า TRM เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อลดอัตราการเย็นตัวลง ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Fox และ Aitken (1980) Halgedahl และคณะ (1980) ได้ชี้ให้เห็นว่าเมื่ออัตราการเย็นตัวเปลี่ยนไปอาจส่งผลให้ค่าความเข้มข้นแม่เหล็กตามวิธีของ Thellier สูงขึ้นถึง 50% จากผลการศึกษาของ McClelland-Brown (1984) พบว่ามัลติโดเมนเกรนที่เย็นตัวอย่างช้า ๆ จะมีความเข้มข้นแม่เหล็กน้อยกว่ากรณีที่เย็นตัวอย่างรวดเร็ว Tauxe (2005) กล่าวว่ากรณียุคที่ใช้ในการศึกษาทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 1 หรือ 2 วัน

Yamamoto และคณะ (2003) ได้สรุปสาเหตุที่ทำให้ได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่สูงเกินไปว่าเกิดจากหลายสาเหตุคือ เกิดจากผลของลักษณะภูมิประเทศ การมีองค์ประกอบของแร่ซิลิเกตโดเมนและโดเมนเทียม และการเกิดอำนาจแม่เหล็กแบบ TCRM ขึ้นในระหว่างการเย็นตัวในธรรมชาติของตัวอย่าง ซึ่งในกรณีของความคลาดเคลื่อนซึ่งได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่สูงเกินไปนั้น Mochizuki และคณะ (2004) ได้แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถอ้างว่าเกิดจากความผิดปกติของสนามแม่เหล็กในพื้นที่ได้ หากแต่จะเกิดจากสมบัติทางแม่เหล็กบางอย่างของตัวอย่าง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงบางอย่างในระหว่างการทดลอง

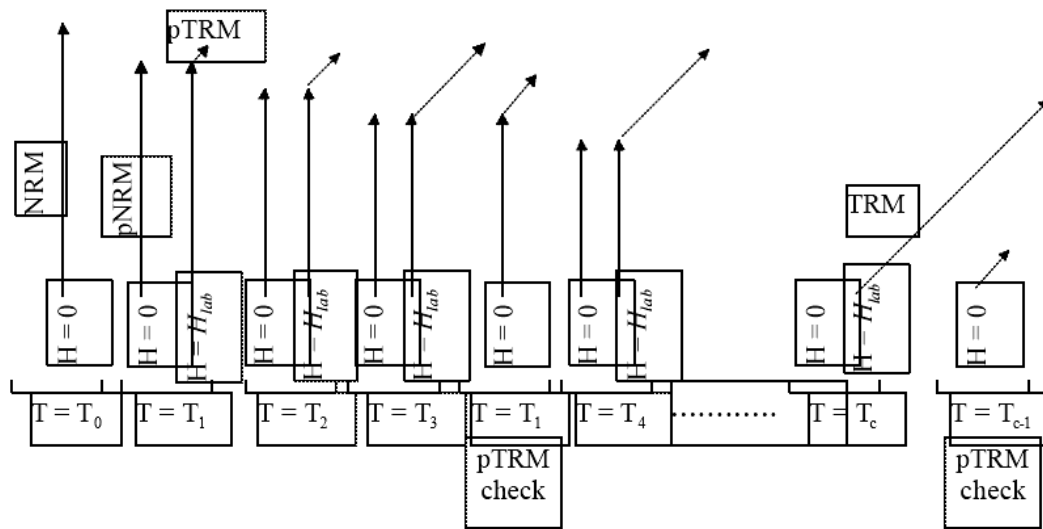
ตัวบ่งชี้สำคัญในการหาความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณ (Tauxe, 2005) คือค่า NRM ที่ได้เป็นแมกนีไทเซชันตกค้างธรรมชาติซึ่งเป็นองค์ประกอบเดียว มีการแปรสภาพของสารแม่เหล็กในระหว่างการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในระหว่างการทดลอง และ T_b และ T_{ub} มีค่าเท่ากันตามกฎการเท่ากันหรือไม่ ซึ่งสาเหตุของการแปรสภาพหรือการไม่เป็นไปตามกฎนั้นอาจเกิดจากหลายปัจจัย โดยในการศึกษาความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณนั้นต้องมีการตรวจสอบ และกำหนดเกณฑ์ที่จะใช้เพื่อยอมรับการแปรสภาพ หรือประเมินความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้

2.10 การตรวจสอบการแปรสภาพของสารแม่เหล็ก

การแปรสภาพของตัวอย่างในระหว่างการให้ความร้อนเป็นสาเหตุหลักที่จะส่งผลให้เทคนิค Thellier ใช้ไม่ได้ผล เพราะจะทำให้สมมติฐานที่ว่า k_{lab} เท่ากับ k_{anc} ผิดไป และยังขัดแย้งกับกฎการเท่ากันด้วย การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเนื่องจากวัสดุได้รับความร้อนสูงจะทำให้กราฟ Arai plot ที่ได้ไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งคล้ายกับกรณีของการเกิดเกรนแม่เหล็กชนิดมัลติ-โดเมน แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้อาจให้กราฟที่เป็นเส้นตรงได้เช่นกัน แต่ความชันที่ได้จะไม่ใช้สัดส่วนของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในอดีตกับในห้องปฏิบัติการ (Prévot et al., 1983; Tanaka and Kono, 1991)

วิธีที่ได้รับการยอมรับและใช้กันมากในการตรวจสอบการแปรสภาพของสารแม่เหล็กในระหว่างการให้ความร้อน คือการทำ pTRM check ของ Coe (1967) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่า pTRM เดิมที่ได้จากการให้ความร้อนในขั้นก่อน (T_1) กับค่า pTRM ที่อุณหภูมิเดียวกัน หลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น (T_2) เพื่อตรวจสอบว่าค่าความจุในการทำให้เกิดแมกนีไทเซชันตกค้างของตัวอย่างได้รับผลกระทบจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือไม่ ซึ่งสามารถทำได้โดยการย้อนกลับไปให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิก่อนหน้า (T_1) ในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์

ผลที่ได้หากตัวอย่างไม่เกิดการแปรสภาพคือ ค่า NRM ที่เหลืออยู่จากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า (T_2) ซึ่งเป็นค่า NRM ที่มี T_b สูง และไม่สามารถลบล้างได้ด้วย การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ T_2 จะยังคงมีค่าเท่าเดิมเมื่อกลับไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า (T_1) ส่วนค่า pTRM ที่เกิดขึ้นบางส่วนเกิดจากเกรนที่มี T_b ต่ำ ซึ่งอุณหภูมิต่ำ (T_1) สามารถลบล้างได้ เมื่อกลับไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ T_1 จึงส่งผลให้ค่า pTRM ที่ได้จากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า (T_2) มีค่าลดลงเท่ากับค่า pTRM ที่ได้ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า (T_1) หากสารแม่เหล็กมีการแปรสภาพจะส่งผลให้ค่าที่ได้ทั้ง 2 ครั้งไม่เท่ากัน เนื่องจาก T_b ของสารแม่เหล็กเปลี่ยนไป ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งอธิบายขั้นตอนการหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณ แสดงการลดลงของค่า NRM และการเพิ่มขึ้นของค่า pTRM และการทำ pTRM check ที่อุณหภูมิต่างๆ

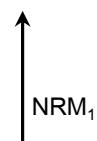


ภาพที่ 2.10 รูปแบบการศึกษาและการทำ pTRM checks ของ Coe (1967) โดยการให้ความร้อน 2 ครั้ง ครั้งแรกให้ความร้อนในสนามภายนอกเป็นศูนย์ และครั้งที่สองให้ความร้อนในสนามภายนอก (Mimi, 2000)

ขั้นตอนการวัดค่าและการทำ pTRM check สามารถทำได้ดังนี้

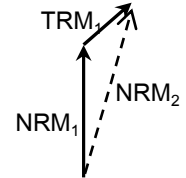
- 1) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ T_1 ในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ (H_0) ค่าที่วัดได้ (x_1, y_1, z_1) เป็นค่า NRM_1 โดยที่

$$NRM_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$$



2) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิเดิม (T_1) ในสนามแม่เหล็กภายนอก (H_{lab}) ซึ่งจะมีค่า TRM_1 เกิดขึ้น และ NRM_1 มีค่าเท่าเดิม ค่าที่วัดได้ (x_2, y_2, z_2) เป็นค่า NRM_2 โดยที่

$$NRM_2 = NRM_1 + TRM_1 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}$$



$$TRM_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

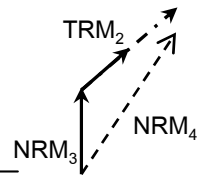
3) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ T_2 ($T_2 > T_1$) ในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ ค่า TRM_1 ทั้งหมด และ NRM_1 บางส่วนจะหายไป ค่าที่วัดได้ (x_3, y_3, z_3) เป็นค่า NRM_3 โดยที่

$$NRM_3 = \sqrt{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2}$$



4) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิเดิม (T_2) ในสนามแม่เหล็กภายนอก มีค่า TRM_2 เกิดขึ้น ($TRM_2 > TRM_1$) แต่ NRM_3 มีค่าเท่าเดิม ค่าที่วัดได้ (x_4, y_4, z_4) เป็นค่า NRM_4 โดยที่

$$NRM_4 = NRM_3 + TRM_2 = \sqrt{x_4^2 + y_4^2 + z_4^2}$$



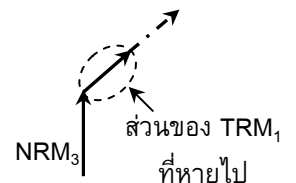
$$TRM_2 = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + (z_4 - z_3)^2}$$

5) กลับไปทำ pTRM check ที่อุณหภูมิ T_1 ในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ จะได้ NRM_3 มีค่าเท่าเดิม หรือเท่ากับค่า NRM ก่อนทำ pTRM check แต่ค่า TRM_2 จะหายไป เท่ากับ TRM_1 เนื่องจาก TRM_1 มีแรงยึดเหนี่ยวน้อยที่อุณหภูมิ T_1 ดังนั้นค่าที่วัดได้ (x_5, y_5, z_5) หรือ NRM_5 จึงควรจะมีค่าเป็น

$$NRM_5 = NRM_3 + (TRM_2 - TRM_1)$$

$$= (x_3 + y_3 + z_3) + [(x_4 - x_3 - x_2 + x_1) + (y_4 - y_3 - y_2 + y_1) + (z_4 - z_3 - z_2 + z_1)]$$

$$= \sqrt{(x_4 - x_2 + x_1)^2 + (y_4 - y_2 + y_1)^2 + (z_4 - z_2 + z_1)^2}$$



2.11 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์กราฟ Arai plot การยอมรับหรือปฏิเสธข้อมูลและกราฟที่ได้จากการทดลอง ทั้ง York (1966), Coe (1978) และ Tauxe (2004) ได้พัฒนาตัวบ่งชี้คุณภาพและการวิเคราะห์ข้อมูลไว้วาง ๆ ดังนี้

1) ความชัน (b) และความคลาดเคลื่อนของความชัน (σ_b)

ความชันของเส้นตรงจากข้อมูลในช่วงอุณหภูมิที่เลือก และค่าความคลาดเคลื่อนของความชัน มีความสัมพันธ์กับค่า NRM (y_i) และ pTRM (x_i) ของข้อมูล ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$b = - \left[\frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \right]^{1/2} \quad \dots \text{สมการ (2.11)}$$

โดยที่จุดตัดแกน NRM (y_0) = $\bar{y} - b\bar{x}$ และค่าความคลาดเคลื่อนของความชัน คือ

$$\sigma_b = \left[\frac{2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2 - 2b \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(N-2) \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \right]^{1/2} \quad \dots \text{สมการ (2.12)}$$

เมื่อ \bar{x} และ \bar{y} เป็นค่าเฉลี่ยของค่า x และ y ทั้งหมด โดยจุดตัดแกน y หรือ y_0 จะเท่ากับ $\bar{y} - b\bar{x}$

สำหรับการหาความชันของกราฟจะไม่ใช้สมการความชันทั่วไป หรือ normal equation เนื่องจากข้อมูลที่ศึกษามีความคลาดเคลื่อนทั้งค่า NRM (แกน y) และค่า pTRM (แกน x) ในขณะที่กราฟทั่วไปจะคำนึงถึงเฉพาะความคลาดเคลื่อนในแกน x เท่านั้น (Tauxe, ติดต่อบุคคลเมื่อสิงหาคม 2548)

2) ความไม่แน่นอนของความชัน (β)

ข้อมูลที่เลือกใช้ในการคำนวณหาความชันมีได้หลายรูปแบบ เนื่องจากการกระจายของข้อมูลจุดต่าง ๆ ทำให้ความชันที่ได้ไม่แน่นอน ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้ม

สนามแม่เหล็กที่ได้ด้วย เส้นตรงที่เลือกควรจะมีค่าแน่นอนสูง หรือมีค่า β น้อย และควรมีค่าไม่เกิน 0.1 (Selkin and Tauxe, 2000) ค่า β สามารถหาได้จาก

$$\beta = \frac{\sigma}{|b|} \quad \dots\text{สมการ (2.13)}$$

3) Remanence fraction (f) และ gap factor (g)

ค่า f เป็นอัตราส่วนของค่า NRM ซึ่งถูกเลือกใช้ในการหาความชัน เทียบกับค่า NRM ที่ได้จากการต่อกราฟไปยังแกน NRM หรือเป็นส่วนหนึ่งของค่า NRM ทั้งหมดที่ควรจะเป็น การกระจายของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับค่า f ที่ลดลง ซึ่งค่า f น้อยจะให้ข้อมูลที่คลาดเคลื่อนได้มาก และยังมีแนวโน้มจะได้ค่าที่สูงกว่าความเป็นจริงด้วย และค่า f มากจะทำให้ค่าปัจจัยคุณภาพ (q) มากด้วย (Chauvin et al., 2005) โดยค่า f ตามแบบของ Coe (1978) สามารถหาได้จาก

$$f = \frac{\Delta y_t}{y_t} \quad \dots\text{สมการ (2.14)}$$

เมื่อ Δy_t เป็นความยาวของกราฟ Arai plot ที่เลือกใช้ในการคำนวณ
 y_t เป็นค่า NRM ที่ต่อจากเส้นตรงที่เลือกไปยังแกน NRM

ค่า f จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1 เมื่อทุกจุดบนกราฟถูกนำมาใช้คำนวณ ส่วนค่า g เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสม่ำเสมอและช่องว่างระหว่างข้อมูล (Δy_i) ของจุดที่อยู่บนเส้นตรงที่เลือกใช้ในการคำนวณ ซึ่งข้อมูลแต่ละชุดจะมีการกระจายที่แตกต่างกัน ยิ่งข้อมูลแต่ละจุดบนเส้นมีการกระจายมาก ค่า g และคุณภาพของข้อมูลก็จะลดลง ค่า g สามารถหาได้จาก

$$g = 1 - \frac{\overline{\Delta y}}{\Delta y_t} \quad \dots\text{สมการ (2.15)}$$

โดยที่

$$\overline{\Delta y} = \frac{1}{\Delta y_t} \sum_{i=1}^{N-1} \Delta y_i^2 \quad \dots\text{สมการ (2.16)}$$

ค่า g จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1 และน้อยสุดเป็น 0 หากจำนวนจุดที่อยู่บนเส้นมีจำนวนน้อย จะส่งผลให้ข้อมูลกระจายและมีช่องว่างมาก แต่หากมีจำนวนจุดบนเส้นตรงที่เลือกจำนวนมากก็จะส่งผลให้ข้อมูลมีความสม่ำเสมอมากกว่า

4) Quality factor (q)

เป็นการรวมเอาค่าความไม่แน่นอนของค่า β , f และค่า g เข้าด้วยกัน เพื่อประเมินเป็นคุณภาพของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ข้อมูลที่มีค่า q สูง จะให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้มีคุณภาพและน่าเชื่อถือมากกว่าโดย

$$q = \frac{f \cdot g}{\beta} = \frac{|b| \cdot f \cdot g}{\sigma_b} \quad \dots \text{สมการ (2.17)}$$

ข้อมูลที่มีคุณภาพสูงส่วนใหญ่จะใช้ค่า q ที่มากกว่า 1 (Prévot et al., 1985) เกณฑ์ในการพิจารณากราฟว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ตามหลักของ Coe (1978) คือ

- 1) ค่า NRM ในอุณหภูมิที่เลือกช่วงหนึ่ง ๆ จะมีได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น
- 2) แมกนีไทเซชันตกค้างในวัตถุจะต้องถูกสร้างขึ้นจากเหตุการณ์ในอดีต ไม่ได้ถูกสร้างขึ้นใหม่
- 3) จุดต่าง ๆ บนกราฟในช่วงอุณหภูมิที่เลือกต้องอยู่บนเส้นตรง หรือใกล้เคียงกับเส้นตรง
- 4) กราฟที่จะยอมรับได้อย่างน้อยต้องประกอบด้วย 4 ค่า หรือ 4 ช่วงอุณหภูมิ
- 5) ต้องไม่มีจุดใดจุดหนึ่งในแนวเส้นตรงที่เลือกถูกแยกหรือโดนตัดออก ยกเว้นจะเป็นความผิดพลาดจากการวัด

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ใช้วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีในการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้จำแนกตามวิธีการศึกษามีดังนี้

3.1.1 การศึกษาอำนาจแม่เหล็ก ประกอบด้วย

1) เครื่องวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก Spinning Specimen Magnetic Susceptibility Anisotropy Meter รุ่น KLY-3 Kappabridge (ภาพที่ 3.1) ความถี่ที่ใช้ 870 Hz ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้ 300 A/m ช่วงการวัดถึง 0.1 SI (0.0001, 0.001, 0.01 และ 0.1 SI) ความไว 3×10^{-8} SI ความถูกต้อง $\pm 3\%$ ผลิตโดยบริษัท AGICO, INC ประเทศสาธารณรัฐเช็ก เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ และประมวลผลโดยใช้โปรแกรม SUSAM และโปรแกรม SUSAR เพื่อศึกษาสภาพ AMS ของตัวอย่าง



ภาพที่ 3.1 เครื่องวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก Spinning Specimen Magnetic Susceptibility Anisotropy Meter รุ่น KLY-3 Kappabridge

2) เครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบหมุน Spinner Magnetometer ยี่ห้อ UGF รุ่น JR-4 ประเทศสาธารณรัฐเช็ก ใช้วัดความเข้มและทิศทางของแมกนีไทเซชันตกค้างของตัวอย่าง ขนาดไม่เกิน 1 นิ้ว ตัวเครื่องมีความไว 2.4×10^{-6} A/m ความถี่ในการหมุน 89.2 Hz และมีช่วงในการวัด 0.1-1,000 mA/m ภายนอกจะมีกำบังแม่เหล็กทำด้วยโลหะผสม mu-metal 3 ชั้น เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ และประมวลผลโดยใช้โปรแกรม JR-4 ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 เครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบหมุน JR-4 Spinning Magnetometer

3) เครื่องลบล้างแมกนีไทเซชันโดยใช้ความร้อน Magnetic Measurement Thermal Demagnetizer รุ่น MMTD-18 ประเทศสหราชอาณาจักร (ภาพที่ 3.3) อัตราการแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นความเข้มสนามแม่เหล็ก $0.49 \mu\text{T}/\text{mA}$ ภายนอกจะมีกำบังแม่เหล็กทำด้วยโลหะผสม mu-metal 4 ชั้น สามารถกำหนดอุณหภูมิของเตาเผาได้ถึง 800°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 0-150 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้สนามแม่เหล็กคงที่ 0-300 μT



ภาพที่ 3.3 เครื่องลบล้างแม่เหล็กไนโอเซชันโดยใช้ความร้อน Magnetic Measurement Thermal Demagnetizer รุ่น MMTD-18

4) เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply) ยี่ห้อ GW instek รุ่น GPR-1810HD (รูปที่ 3.4) ประเทศไต้หวัน ใช้ควบคุมกระแสที่จ่ายให้เครื่องลบล้างแม่เหล็กไนโอเซชันให้คงที่



ภาพที่ 3.4 เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง ยี่ห้อ GW instek รุ่น GPR-1810HD

5) มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ HIOKI รุ่น 3802 Digital Hitester ประเทศญี่ปุ่น ใช้วัดค่ากระแสที่ผ่านจากเครื่องจ่ายไฟก่อนเข้าสู่เตาเผา

3.1.2 การเตรียมตัวอย่าง ประกอบด้วย

- 1) เครื่องตัดหินที่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ใช้มอเตอร์ทำงานขนาด 1/2 แรงม้า ใช้ใบตัดหินชนิดเปียก ใช้ในการตัดแต่งชิ้นตัวอย่างให้มีขนาดเหมาะสม
- 2) ดินผสม (Compound) ทนความร้อน ใช้ทำรางวางตัวอย่าง (Boat) เพื่อวางตัวอย่างในระหว่างเผาตัวอย่างภายในเครื่องลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้าง
- 3) ท่อน้ำพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ใช้ทำแบบสำหรับใส่ตัวอย่างระหว่างวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง
- 4) ปลาสเตอร์ ใช้หล่อแบบสำหรับใส่ชิ้นตัวอย่าง
- 5) แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ ใช้หุ้มชิ้นตัวอย่างในขั้นตอนการสร้างแบบสำหรับใส่ตัวอย่าง
- 6) ป้ายสติ๊กเกอร์
- 7) เทปใส

3.1.3 อุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ร่วมในการวิจัย

- 1) เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์
- 2) เตาเผา Lenton furnace รุ่น Muffle Furnace 1600 °C ผลิตโดย Lenton thermal designs LTD ประเทศสหราชอาณาจักร
- 3) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์และแปลผลข้อมูล ซึ่งประกอบด้วย
 - 3.1) โปรแกรม Microsoft Excel 2003 และโปรแกรม Grapher สำหรับเขียนกราฟและวิเคราะห์ข้อมูล
 - 3.2) โปรแกรม JR4 สำหรับทำการวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้างธรรมชาติ (NRM) ของตัวอย่างที่ทำการศึกษา
 - 3.3) โปรแกรม Susam สำหรับวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตัวอย่าง
 - 3.4) โปรแกรม Susar สำหรับวัดค่าแอนไอโซทรอปีของค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยได้แบ่งออกเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง มีขั้นตอนดังนี้

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยซึ่งเป็นอิฐและดินเผาจากแหล่งต่าง ๆ ของภาคใต้ ประกอบด้วยอิฐและเครื่องปั้นดินเผาจากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

1) อิฐดินเผาจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มบั้ง หมู่ที่ 6 ต.ไทยบุรี อ.ท่าศาลา ในบริเวณมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช อายุประมาณพุทธศตวรรษที่ 14-15 ซึ่งมีทั้งที่เป็นเครื่องปั้นดินเผาประเภทถ้วยชาม และอิฐดินเผา

2) เครื่องปั้นดินเผาบริเวณกำแพงเมือง ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งมีอายุประมาณพุทธศตวรรษที่ 18

3) ดินเผาจากโบราณสถานพระสยาม ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งมีอายุประมาณพุทธศตวรรษที่ 16

4) เครื่องปั้นดินเผาที่ขุดพบบริเวณเขาศรีวิชัย บ้านหัวเขา ต.ศรีวิชัย อ.พุนพิน จ.สุราษฎร์ธานี มีอายุประมาณพุทธศตวรรษที่ 14-15

5) อิฐดินเผาจากเตาเผาบ้านปะโอ และชุมชนโบราณเกาะยอ อ.สิงหนคร จ.สงขลา ทั้งที่เป็นอิฐดินเผาเก่า ซึ่งมีอายุประมาณพุทธศตวรรษที่ 16-18 และอิฐดินเผาใหม่ซึ่งผลิตในปี พ.ศ. 2548

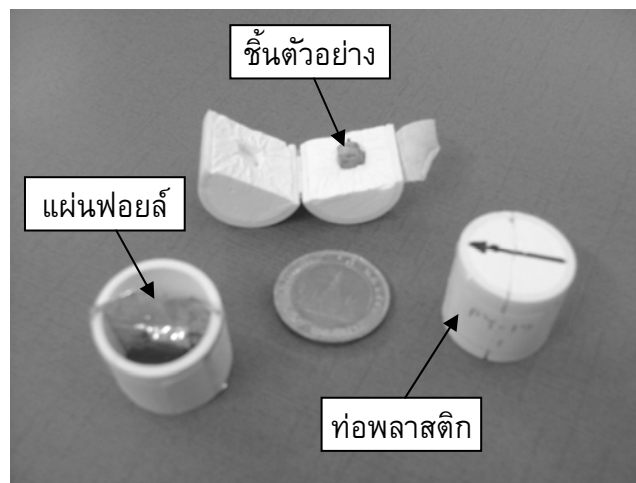
อิฐดินเผาที่ได้จากแต่ละแหล่งจะมีลักษณะ ขนาด และรูปร่างที่แตกต่างกัน จำเป็นต้องนำมาเตรียมให้มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมกับการวัด โดยการเตรียมตัวอย่างจะมีขั้นตอนดังนี้

1) ตัดตัวอย่างด้วยเครื่องตัดหินของภาควิชาฟิสิกส์ ให้เป็นรูปลูกบาศก์ขนาดประมาณ $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ เซนติเมตร โดยพยายามกำจัดส่วนที่อยู่บริเวณผิวหน้าของตัวอย่างออก เพื่อเลี่ยงการใช้ส่วนที่อาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่ละตัวอย่างจะตัดแบ่งออกเป็นชิ้นตัวอย่างประมาณ 2-3 ชิ้น

2) ตัดท่อพลาสติกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ให้ยาว 2.3 เซนติเมตร ซึ่งเท่ากับขนาดของตัวอย่างมาตรฐานสำหรับการวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง จากนั้นผ่าท่อตามยาวออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน

3) ตัดแผ่นฟอยล์เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมให้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของท่อเล็กน้อย แล้วนำมาห่อชั้นตัวอย่างให้แนบสนิทกับชั้นตัวอย่างพอดี จากนั้นจึงนำท่อซึ่งผ่าออกเป็น 2 ซีก มาประกบกันโดยให้แผ่นฟอยล์ซึ่งมีตัวอย่างอยู่ระหว่างกลาง ดังภาพที่ 3.5

4) ผสมพลาสติกอร์กับน้ำในสัดส่วนที่พอเหมาะแล้วเทลงในท่อให้เต็ม แผ่นฟอยล์จะเป็นตัวแบ่งให้พลาสติกอร์แยกเป็น 2 ส่วน และมีรูปร่างเมื่อแกะออกเหมือนชั้นตัวอย่างนั้นพอดี ตั้งทิ้งไว้ให้พลาสติกอร์แห้ง จากนั้นแยกเอาแผ่นฟอยล์ออก โดยแบบแต่ละชั้นจะมีขนาดเฉพาะกับตัวอย่างเฉพาะชั้นเท่านั้น เขียนทิศทางและตำแหน่งการวางในแบบเพื่อความสะดวกในการวางตัวอย่างในทิศทางเดิมทุกครั้งที่ทำกรวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง ติดเทปใสทับบนป้ายชื่อตัวอย่างระหว่างรอยต่อด้านหนึ่งเพื่อให้แบบยึดติดกันแน่น ส่วนอีกด้านใช้กระดาษกาวติดเพื่อให้สามารถนำตัวอย่างออกมาลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้างได้ จะได้แบบพลาสติกอร์ในท่อที่มีตรงกลางกลวงสำหรับใส่ตัวอย่าง (ดังภาพที่ 3.5)



ภาพที่ 3.5 การเตรียมตัวอย่างและแบบสำหรับใส่ตัวอย่างเพื่อใช้ในการวัดแมกนีไทเซชันตกค้าง

3.2.2 การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

การวัดค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (ค่า k) ใช้เครื่อง KLY-3S Kappabridge และโปรแกรม SUSAM เป็นการวัดค่า k ที่อาศัยหลักการของการวัดด้วยระบบวงจรบริดจ์หม้อแปลง (Transformer bridge) ที่มีความถี่ 875 เฮิรตซ์ โดยจะทำการวัดค่า k ทุกครั้งหลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบการแปรสภาพหรือการเกิดสารแม่เหล็กใหม่จากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ หากสารแม่เหล็กเดิมเกิดการแปรสภาพไปจากสภาวะเริ่มต้นขณะตัวอย่างเย็นตัวในสนามแม่เหล็กโลกโบราณ จะส่งผลให้แมกนีไทเซชันและความเข้ม

สนามแม่เหล็กที่ได้ไม่ใช่สนามแม่เหล็กโลกโบราณในขณะนั้นจริง หากสารแม่เหล็กไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ค่า k ในระหว่างการทดลองควรมีค่าเท่าเดิม

3.2.3 การวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง

วิธีการวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้างในวัสดุแม่เหล็กทำได้โดย ใส่ตัวอย่างในระบบ และวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง โดยใช้เครื่องวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้างแมกนีโตมิเตอร์แบบหมุน JR-4 Spinning magnetometer จัดวางทิศของลูกศรบนตัวอย่างให้วางตัวในตำแหน่งต่างๆ เพื่อวัดค่าในแนวแกน x , y และแกน z ตัวอย่างจะหมุนรอบแกนตั้งภายในขดลวดรับสัญญาณ เครื่องมือเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์พีซี ควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมการทำงานและประมวลผลหลังจากการวัดครบ 6 ตำแหน่ง ($\pm x$, $\pm y$ และ $\pm z$) ค่าความเข้มและทิศทางของแมกนีไทเซชันตกค้างจะถูกคำนวณโดยอัตโนมัติและแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

3.2.4 การลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้างด้วยความร้อน เทคนิค Thellier และการทำ pTRM check

หลักการสำคัญของการลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้างได้นิยามไว้โดยสมการ Relaxation time (τ) ของ Néel (สมการที่ 2.1) ซึ่งเมื่อพิจารณาพบว่า ค่า τ จะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนระหว่าง h_c/kT โดย h_c แทนความแข็งแรงคงทนของค่า NRM ต่ออิทธิพลของสนามภายนอกที่มากระทำ ส่วน kT แทนพลังงานความร้อนของวัสดุหรือสิ่งแวดล้อม ซึ่งหลักการลบล้างแมกนีไทเซชันโดยใช้ความร้อนทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ (T) โดยที่ค่า h_c คงที่ จะส่งผลให้ค่า τ ลดลง

วิธีการลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้าง การเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็ก และการทำ pTRM check โดยใช้เทคนิค Thellier และที่ปรับปรุงโดย Coe ทำได้โดยนำตัวอย่างมาลบล้างแมกนีไทเซชันตกค้างแบบเป็นขั้น (Progressive stepwise demagnetization) ด้วยเครื่องลบล้างแมกนีไทเซชันโดยใช้ความร้อน โดยเพิ่มอุณหภูมิในการเผาขึ้นเป็นขั้น ๆ ซึ่งการลบล้างแมกนีไทเซชันแบบเป็นขั้น ๆ นี้ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างแต่ละชั้นจะมีองค์ประกอบแม่เหล็กหลายอันประกอบอยู่ แต่ละองค์ประกอบก็จะมีอุณหภูมิกักเก็บ หรือ T_b ที่ต่างกัน องค์ประกอบที่มีค่า T_b สูงโดยปกติจะถูกลบล้างให้หมดได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500°C องค์ประกอบกลาง ๆ สามารถลบล้างแม่เหล็กให้หมดได้ที่อุณหภูมิ $250-500^\circ\text{C}$ ส่วนองค์ประกอบอ่อนได้จากการลบล้างที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C

ตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิหนึ่ง 2 ครั้ง โดยครั้งแรกจะให้ความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ (Zero field; H_0) จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่า k และแมกนีไทเซชันตกค้าง เกรนแม่เหล็กที่มีค่า T_b ต่ำกว่าอุณหภูมินี้ก็จะเกิดการวางตัวแบบสุ่ม (Random) เสมือนกับถูกลบล้างแมกนีไทเซชันไป เหลือเฉพาะส่วนของเกรนที่มี T_b สูงกว่า บันทึกค่าที่ได้เป็น remaining NRM (x_1, y_1, z_1) คือค่า NRM ที่เหลืออยู่เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิใด ๆ

จากนั้นนำตัวอย่างมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกันอีกครั้ง แต่ในระหว่างที่ปล่อยให้ตัวอย่างเย็นตัวจะให้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำภายนอก (H_{lab}) แก่ตัวอย่าง สนามเหนี่ยวนำที่ใช้มีความเข้ม $39.7 \mu T$ โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 81 mA ให้กับเครื่องลบล้างแมกนีไทเซชัน กระแสไฟฟ้าจะถูกแปลงเป็นสนามแม่เหล็กในอัตราส่วน $0.49 \mu T/\text{mA}$ สนามเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีทิศออกจากปากของเครื่องเหมือนกันทุกครั้ง หลังจากตัวอย่างเย็นตัวจึงนำมาวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง และค่า k อีกครั้ง ส่วนของเกรนแม่เหล็กที่มีค่า T_b ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ให้ จะถูกเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กภายนอก ให้มีทิศทางเดียวกับสนามเหนี่ยวนำ บันทึกค่าที่ได้เป็น x_2, y_2 และ z_2 โดยค่า TRM ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ หรือ TRM gained สามารถหาได้จาก

$$TRM \text{ gained} = \sqrt{(x_2 + x_1)^2 + (y_2 + y_1)^2 + (z_2 + z_1)^2}$$

ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงขึ้นครั้งละ $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์และในสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำอีกครั้ง จนถึงอุณหภูมิประมาณ $500 \text{ }^\circ\text{C}$ หรือจนกระทั่งสารแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสังเกตได้จากค่า k ซึ่งจะคงที่ หรือสังเกตจากการทำ pTRM check

การทำ pTRM check จะทำหลังจากให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจนถึงอุณหภูมิ $300, 400$ และ $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ในสนามเหนี่ยวนำภายนอกแล้ว โดยกลับไปให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ $250, 300$ และ $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ แล้วปล่อยให้เย็นตัวในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ สนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำในสนามแม่เหล็กภายนอกที่อุณหภูมิก่อนหน้า (T_1) บางส่วน ซึ่งมี T_b ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ให้ในการทำ pTRM check (T_2) จะถูกลบล้างไป เหลือเฉพาะค่า NRM ซึ่งมีค่า T_b สูงกว่า T_1 และส่วนของ TRM ที่มี T_b สูงกว่า T_2

3.2.5 การเขียนกราฟ Arai plot

นำข้อมูล NRM และ pTRM มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ โดยให้แกน x เป็นค่า pTRM และแกน y เป็นค่า NRM จากนั้นจึงคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ (H_a) ของหินตัวอย่าง โดยพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของ NRM ที่เลือกใช้ (NRM fraction, f), ความคลาดเคลื่อนของความชัน (Uncertainty in slope, β), ปัจจัยคุณภาพของตัวแปร (Quality factor, q) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชัน (Standard error of the slope, σ_b) จากนั้น โดยคำนึงถึงเกณฑ์ความน่าเชื่อถือต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ค่า $f > 0.3$
- 2) ค่า $\beta \leq 0.2$
- 3) ค่า $q > 1$
- 4) ค่า pTRM check $\leq 15\%$
- 5) $n \geq 4$ จุด

จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟอ้างอิง แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกที่ได้จากวัตถุดินเผาโบราณในช่วงอายุต่าง

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

ตัวอย่างดินเผาโบราณของภาคใต้ในยุคสมัยต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย โบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปิ้ง โบราณสถานพระสยาม กำแพงเมืองนครศรีธรรมราช ชุมชนโบราณ เขาศรีวิชัย และชุมชนโบราณเกาะยอ ได้ถูกนำมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็ก ได้แก่ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ค่าแอนไอโซทรอปีของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก และความเข้มของสนามแม่เหล็กตกค้างโบราณ โดยใช้เทคนิค Thellier (1959) และ Coe (1967) ทำให้ได้ผลดังนี้

4.1 สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

ผลการวัดสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตัวอย่างดินเผาจากแหล่งโบราณสถานต่าง ๆ ทั้ง 5 แหล่งของภาคใต้ โดยใช้เครื่องวัดสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก Spinning Specimen Magnetic Susceptibility Anisotropy Meter ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (ค่า k) ของตัวอย่างดินเผาจากแหล่งต่าง ๆ

| ตัวอย่าง | ค่า k (μ SI) | ตัวอย่าง | ค่า k (μ SI) | ตัวอย่าง | ค่า k (μ SI) |
|---------------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| โบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปิ้ง | | โบราณสถานพระสยาม | | กำแพงเมืองนครศรีธรรมราช | |
| TP1-1 | 19.95 | PY1-1 | 4.36 | NK4-1 | 65.81 |
| TP1-2 | 31.69 | PY1-2 | 3.89 | NK4-2 | 78.71 |
| TP2-1 | 92.58 | PY2-1 | 2.62 | NK5-1 | 74.63 |
| TP2-2 | 95.34 | PY2-2 | 2.62 | NK5-2 | 80.40 |
| TP3-1 | 7.05 | PY3-1 | 108.27 | NK13-1 | 16.15 |
| TP3-2 | 6.49 | PY3-2 | 61.31 | NK13-2 | 6.79 |
| TP4-1 | 8.73 | PY4-1 | 1.65 | NK14-1 | 10.63 |
| TP4-2 | 5.32 | PY4-2 | 1.83 | NK14-2 | 14.04 |

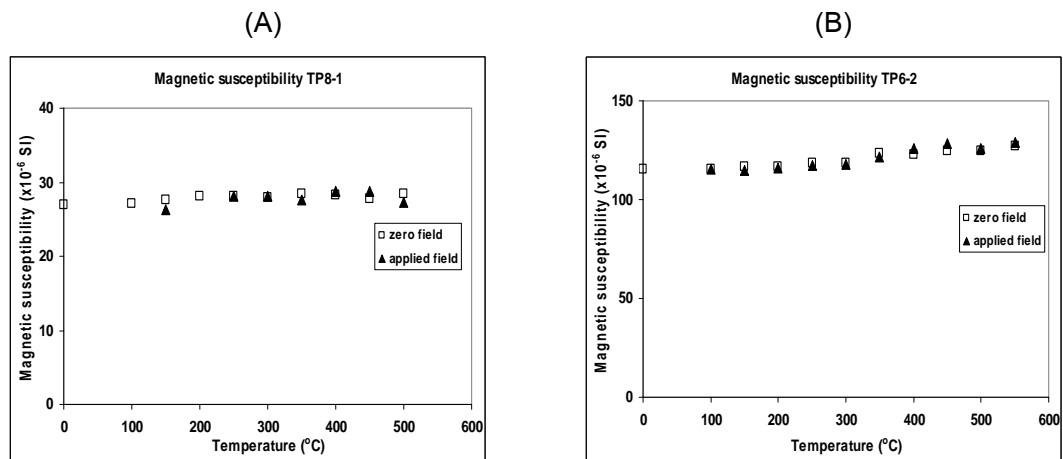
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ค่าสภาพปรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (ค่า k) ของตัวอย่างดินเผาจากแหล่งต่าง ๆ

| ตัวอย่าง | ค่า k (μSI) | ตัวอย่าง | ค่า k (μSI) | ตัวอย่าง | ค่า k (μSI) |
|-------------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|
| โบราณสถาน (ร้าง) ตุมปัง | | โบราณสถานพระสยาม | | ชุมชนโบราณเกาะยอ | |
| TP6-1 | 101.80 | PY5-1 | 4.52 | KY1-1 | 2.19 |
| TP6-2 | 115.17 | PY5-2 | 3.63 | KY1-2 | 2.17 |
| TP8-1 | 26.86 | PY6-1 | 9.57 | KY2-1 | 2.81 |
| TP8-2 | 12.16 | PY6-2 | 11.36 | KY2-2 | 2.39 |
| TP9-1 | 90.76 | PY7-1 | 97.14 | KYnew1-1 | 3.35 |
| TP9-2 | 70.84 | PY7-2 | 158.47 | KYnew1-2 | 3.36 |
| ชุมชนโบราณเขาศรีวิชัย | | PY8-1 | 2.56 | KYnew2-1 | 8.77 |
| KS1-1 | 556.96 | PY8-2 | 2.82 | KYnew2-2 | 3.27 |
| KS1-2 | 663.36 | PY9-1 | 4.45 | | |
| KS1-3 | 793.20 | PY9-2 | 6.07 | | |
| KS2-1 | 955.74 | PY10-1 | 1.14 | | |
| KS2-2 | 763.12 | PY10-2 | 1.70 | | |
| KS2-3 | 507.56 | PY11-1 | 3.19 | | |
| KS2-4 | 797.84 | PY12-1 | 8.58 | | |
| KS3-1 | 599.20 | PY12-2 | 9.98 | | |
| KS3-2 | 560.84 | PY13-1 | 8.06 | | |
| KS3-3 | 706.00 | PY13-2 | 8.38 | | |
| KS3-4 | 554.78 | PY14-1 | 5.83 | | |
| KS4-1 | 621.90 | PY14-2 | 4.43 | | |
| KS4-2 | 520.58 | PY17-1 | 5.81 | | |
| KS4-3 | 550.02 | PY17-2 | 5.41 | | |

ผลการวัดค่าสภาพปรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตัวอย่าง พบว่าดินเผาจากชุมชนโบราณเขาศรีวิชัย จ.สุราษฎร์ธานี มีค่าสูงที่สุด โดยตัวอย่างทั้งหมดมีค่า k สูงกว่า 500 μSI และมีค่าเฉลี่ย $653.65 \pm 132.39 \mu\text{SI}$ ตัวอย่างจากชุมชนโบราณเกาะยอ จ.สงขลา มีค่า k น้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ย $3.54 \pm 2.17 \mu\text{SI}$ ส่วนตัวอย่างจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุมปัง กำแพงเมืองนครศรีธรรมราช และโบราณสถานพระสยาม มีค่าเฉลี่ย 48.91 ± 42.54 , 43.40 ± 34.04 และ $18.95 \pm 38.00 \mu\text{SI}$ ตามลำดับ

1) ดินเผาจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปั้ง (TP)

ค่า k ของตัวอย่างจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปั้ง มี 2 ตัวอย่าง จากจำนวนทั้งหมด 14 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 14% เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10% คือ TP4-2 ที่ 100 และ 200 °C และ TP6-2 ที่ 500 °C ซึ่งตัวอย่างที่ TP6-2 มีค่า NRM จากการทำ pTRM check ที่ 500 °C ต่างจากค่าเดิมถึง 99.73% (ภาพที่ 4.1) ทำให้เชื่อได้ว่าที่อุณหภูมินี้สารแม่เหล็กที่มีอยู่เดิมเกิดการแปรสภาพ จึงไม่พิจารณาตำแหน่งนี้ในการคำนวณความเข้มข้นแม่เหล็ก



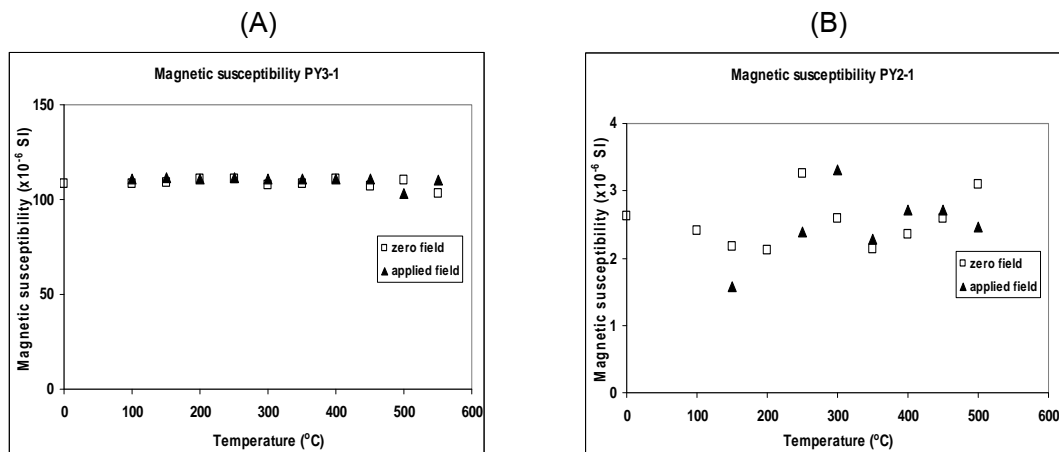
ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างกราฟแสดงค่า k ของตัวอย่างจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปั้ง โดย (A) เป็นตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง และ (B) เป็นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10%

ตัวอย่างที่มีค่า k คงที่ และไม่พบการแปรสภาพของสารแม่เหล็กมีจำนวน 6 ตัวอย่าง คิดเป็น 43% ของตัวอย่างทั้งหมด ได้แก่ TP1-1, TP1-2, TP3-1, TP4-1, TP8-1 และ TP8-2

ส่วนตัวอย่าง TP2-1, TP2-2, TP3-2, TP6-1, TP9-1 และ TP9-2 พบว่าค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ pTRM check ที่บางอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมากกว่า 15%

2) ดินเผาจากโบราณสถานพระสยาม (PY)

ค่า k ของตัวอย่างจากแหล่งนี้มีการเปลี่ยนแปลงหลายตัวอย่าง โดยมีตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลงมีจำนวน 9 ตัวอย่าง จาก 29 ตัวอย่าง คิดเป็น 31% คือ PY3-1, PY3-2, PY6-2, PY7-1, PY8-1, PY8-2, PY9-2, 13-2 และ PY13-2 (ภาพที่ 4.2) ในจำนวนนี้มี 3 ตัวอย่างที่สอดคล้องกับการทำ pTRM check คือ ตัวอย่าง PY3-1, PY3-2 และ PY6-2 นอกจากนั้นยังตรวจพบการแปรสภาพของสารแม่เหล็กที่บางอุณหภูมิสูงกว่า 15% โดยไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่า k



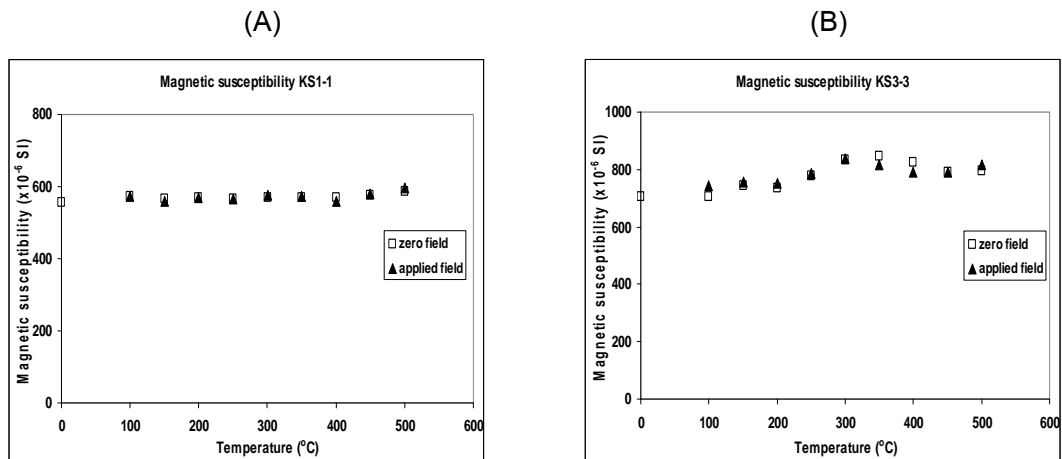
ภาพที่ 4.2 ตัวอย่างกราฟแสดง k ของตัวอย่างจากโบราณสถานพระสมม โดย (A) เป็นตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง และ (B) เป็นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10%

ตัวอย่างที่ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงค่า k มีจำนวน 20 ตัวอย่าง คิดเป็น 69% ของตัวอย่างทั้งหมด ในจำนวนนี้พบว่ามี 3 ตัวอย่าง หรือ 15% ที่พบการเปลี่ยนแปลงค่า k ตรงกับอุณหภูมิที่พบการแปรสภาพของสารแม่เหล็ก ได้แก่ PY10-2, PY11-1 และ PY14-2 โดยทั้ง 3 ตัวอย่าง พบตรงกันที่อุณหภูมิ 300 °C

ความสอดคล้องหนึ่งที่พบในตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถานพระสมมคือ ลักษณะกราฟ Arai plot ที่มีแนวโน้มขนานกับแกน x เนื่องจากค่า NRM มีค่าค่อนข้างคงที่ และไม่นำมาพิจารณาค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโลกโบราณ ซึ่งตรวจพบจำนวน 12 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 41.4% ของตัวอย่างทั้งหมด ได้แก่ ตัวอย่าง PY2-1, PY2-2, PY4-1, PY4-2, PY5-2, PY10-1, PY10-2, PY11-1, PY12-1, PY12-2, PY13-1 และ PY13-2 ในจำนวนนี้มี 10 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 83.3% ที่พบว่าค่า k มีการเปลี่ยนแปลง

3) ดินเผาจากโบราณสถานเขาศรีวิชัย (KS)

ค่า k ของตัวอย่างจากแหล่งนี้พบว่ามี 10 ตัวอย่าง จาก 14 ตัวอย่าง คิดเป็น 71.4% ที่มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ได้แก่ KS1-1, KS1-2, KS1-3, KS2-1, KS2-2, KS2-3, KS2-4, KS4-1, KS4-2 และ KS4-3 (รูปที่ 4.3) โดยตัวอย่างดังกล่าวทั้งหมดให้ค่าที่ไม่ตรงกับการทำ pTRM check ซึ่งพบการแปรสภาพของสารแม่เหล็กในทุกตัวอย่างที่บางอุณหภูมิ

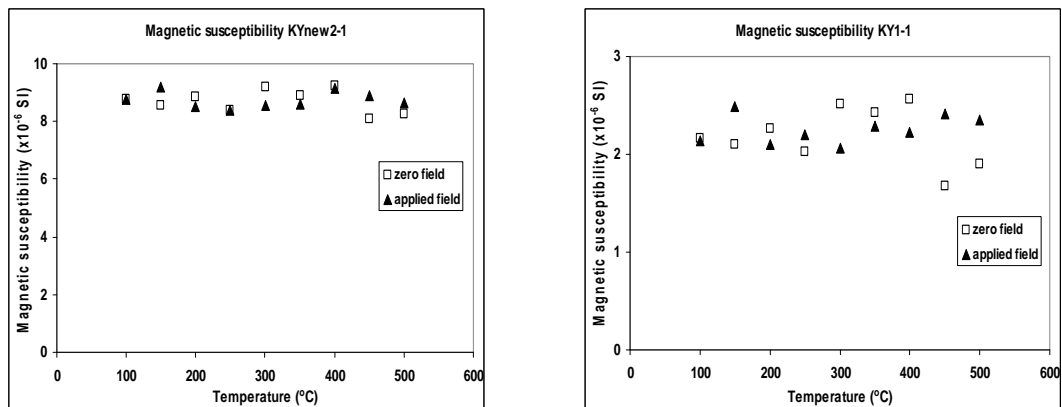


ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างกราฟแสดงค่า k ของตัวอย่างจากโบราณสถานเขาศรีวิชัย โดย (A) เป็นตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง และ (B) เป็นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10%

ตัวอย่างที่ค่า k เปลี่ยนแปลง ได้แก่ KS3-1, KS3-2, KS3-3 และ KS3-4 ซึ่งพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงกว่า 250°C

4) ดินเผาจากชุมชนโบราณเกาะยอ (KY)

ตัวอย่างจากชุมชนโบราณเกาะยอมีเพียง 1 ตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง คือตัวอย่างที่ KYnew2-1 (ภาพที่ 4.4) คิดเป็น 12.5% จากทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ซึ่งแม้จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่า k แต่ก็ตรวจพบการแปรสภาพของสารแม่เหล็ก ส่วนอีก 7 ตัวอย่างพบว่าค่า k มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมสูงที่อุณหภูมิสูงกว่า 250°C จนถึง 500°C

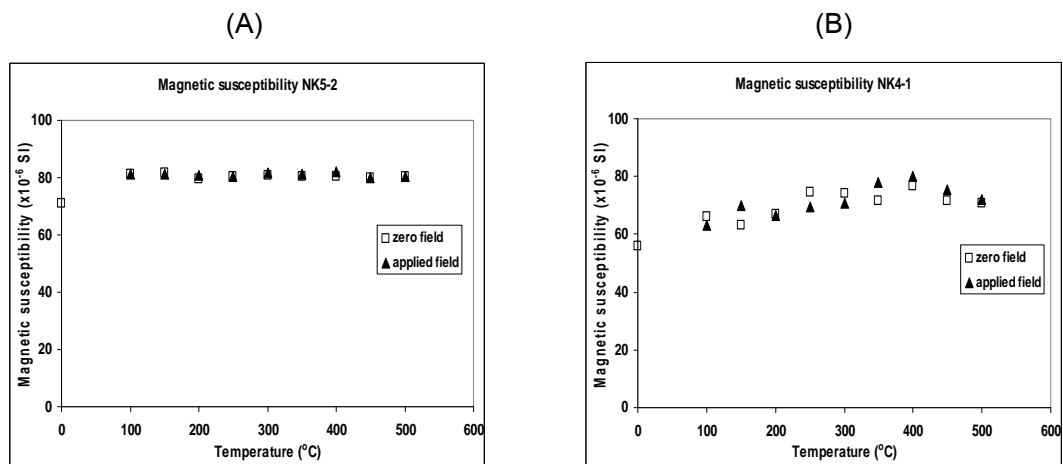


ภาพที่ 4.4 ตัวอย่างกราฟแสดงค่า k ของตัวอย่างจากชุมชนโบราณเกาะยอ ในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ และในสนามแม่เหล็กภายนอก

5) ดินเผาจากกำแพงเมืองนครศรีธรรมราช (NK)

พบการเปลี่ยนแปลงค่า k ของตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่าง จาก 8 ตัวอย่าง คือ NK4-1, NK4-2, NK13-1 ที่ $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ NK14-2 ที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ภาพที่ 4.5) แต่มีเพียงตัวอย่าง NK4-2 ที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงตรงกับการทำ pTRM check ตัวอย่างที่เหลือตรวจไม่พบการแปรสภาพของสารแม่เหล็กจากการทำ pTRM check ที่อุณหภูมิเดียวกัน

ส่วนตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง คือ NK5-1, NK5-2, NK13-2 และ NK14-1 ยังพบการเปลี่ยนแปลงของสารแม่เหล็กจากการทำ pTRM check ในปริมาณที่สูง



ภาพที่ 4.5 ตัวอย่างกราฟค่า k ของตัวอย่างจากกำแพงเมืองนครศรีธรรมราช โดย (A) เป็นตัวอย่างที่ค่า k ไม่เปลี่ยนแปลง และ (B) เป็นตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10%

จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่า k ในระหว่างการให้ความร้อน พบว่าตัวอย่างเกือบทั้งหมดมีค่า k คงที่ ทั้งในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ และภายใต้สภาวะที่มีสนามแม่เหล็กภายนอก แม้ว่าจะตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของสารแม่เหล็กจากการทำ pTRM check ก็ตาม แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถระบุการแปรสภาพของสารแม่เหล็กได้จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่า k แต่เพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงเลือกที่จะไม่ตัดข้อมูลส่วนที่พบว่าค่า k มีการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับในงานของ M. Gram-Jensen (2000)

4.2 สภาพแอนไอโซทรอปีของค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (AMS)

ตัวอย่างดินเผาโบราณจากแต่ละแหล่งนำมาวัดสภาพความเป็นแอนไอโซทรอปีของค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก หรือสภาพ AMS ก่อนให้ความร้อน โดยเครื่อง Spinning Specimen Magnetic Susceptibility Anisotropy Meter ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแอนไอโซทรอปีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวอย่าง

| Sample | Lineation (L) | Foliation (F) | Anisotropy degree (P) | Corrected anisotropy (P') | Shape factor (T) | Eccentricity of the ellipsoid (E = F/L) |
|---------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| โบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปิ้ง | | | | | | |
| TP1-1 | 1.02 | 1.04 | 1.06 | 1.06 | 0.26 | 1.02 |
| TP1-2 | 1.13 | 1.17 | 1.32 | 1.33 | 0.14 | 1.04 |
| TP2-1 | 1.02 | 1.05 | 1.07 | 1.07 | 0.44 | 1.03 |
| TP2-2 | 1.01 | 1.05 | 1.06 | 1.07 | 0.67 | 1.04 |
| TP3-1* | 1.95 | 10.64 | 20.75 | 24.21 | 0.56 | 5.45 |
| TP3-2 | 1.05 | 1.02 | 1.08 | 1.08 | -0.43 | 0.97 |
| TP4-1 | 1.17 | 1.10 | 1.28 | 1.29 | -0.26 | 0.94 |
| TP4-2 | 1.11 | 1.02 | 1.13 | 1.14 | -0.69 | 0.92 |
| TP6-2 | 1.01 | 1.03 | 1.04 | 1.04 | 0.37 | 1.01 |
| TP7-1 | 1.01 | 1.03 | 1.04 | 1.04 | 0.57 | 1.02 |
| TP7-2 | 1.01 | 1.02 | 1.03 | 1.03 | 0.36 | 1.01 |
| TP8-2 | 1.01 | 1.13 | 1.14 | 1.16 | 0.86 | 1.12 |
| TP9-1 | 1.04 | 1.04 | 1.08 | 1.08 | -0.04 | 1.00 |
| TP9-2 | 1.03 | 1.06 | 1.09 | 1.09 | 0.27 | 1.02 |
| mean | 1.05 | 1.06 | 1.11 | 1.11 | 0.19 | 1.01 |
| Std (σ) | 0.05 | 0.05 | 0.09 | 0.09 | 0.44 | 0.05 |
| โบราณสถานพระสยม | | | | | | |
| PY1-1 | 1.09 | 1.07 | 1.17 | 1.17 | -0.14 | 0.98 |
| PY1-2 | 1.64 | 2.60 | 4.27 | 4.37 | 0.32 | 1.58 |
| PY2-1 | 1.12 | 1.22 | 1.37 | 1.37 | 0.28 | 1.09 |

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) แสดงค่าแอนไอโซทรอปีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวอย่าง

| Sample | Lineation (L) | Foliation (F) | Anisotropy degree (P) | Corrected anisotropy (P') | Shape factor (T) | Eccentricity of the ellipsoid (E = F/L) |
|----------------------|------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| PY2-2 | 1.04 | 1.12 | 1.16 | 1.17 | 0.53 | 1.08 |
| PY3-1 | 1.02 | 1.06 | 1.08 | 1.09 | 0.53 | 1.04 |
| PY3-2 | 1.01 | 1.13 | 1.14 | 1.16 | 0.79 | 1.11 |
| PY4-1 | 1.21 | 1.21 | 1.47 | 1.47 | 0.00 | 1.00 |
| PY4-2 | 1.16 | 1.03 | 1.19 | 1.21 | -0.70 | 0.88 |
| PY5-1 | 1.27 | 4.35 | 5.52 | 6.36 | 0.72 | 3.42 |
| PY5-2 | 2.05 | 1.54 | 3.16 | 3.19 | -0.25 | 0.75 |
| PY6-2 | 1.23 | 1.79 | 2.20 | 2.26 | 0.48 | 1.46 |
| PY7-1 | 1.06 | 1.84 | 1.95 | 2.10 | 0.83 | 1.74 |
| PY7-2 | 1.52 | 1.76 | 2.68 | 2.69 | 0.15 | 1.16 |
| PY8-1 | 1.62 | 1.11 | 1.80 | 1.88 | -0.64 | 0.69 |
| PY8-2 | 1.44 | 1.21 | 1.73 | 1.75 | -0.32 | 0.84 |
| PY9-1 | 1.28 | 3.23 | 4.14 | 4.56 | 0.65 | 2.51 |
| PY10-1 | 1.19 | 1.98 | 2.35 | 2.47 | 0.60 | 1.67 |
| PY10-2 | 1.26 | 1.04 | 1.31 | 1.34 | -0.70 | 0.83 |
| PY11-1 | 1.07 | -24.40 | -26.04 | - | - | -22.87 |
| PY11-2* | 1.46 | 219.37 | 319.20 | 634.06 | 0.87 | 150.77 |
| PY12-1 | 1.04 | 2.87 | 2.97 | 3.45 | 0.94 | 2.77 |
| PY12-2 | 1.07 | 3.06 | 3.29 | 3.80 | 0.88 | 2.85 |
| PY13-1 | 1.03 | 1.25 | 1.29 | 1.32 | 0.81 | 1.22 |
| mean | 1.25 | 1.78 | 2.25 | 2.39 | 0.27 | 1.46 |
| Std (σ) | 0.27 | 0.92 | 1.24 | 1.43 | 0.54 | 0.78 |
| โบราณสถานเขาศรีวิชัย | | | | | | |
| KS1-1 | 1.01 | 1.02 | 1.03 | 1.03 | 0.35 | 1.01 |
| KS1-2 | 1.01 | 1.04 | 1.05 | 1.06 | 0.49 | 1.03 |
| KS1-3 | 1.00 | 1.03 | 1.04 | 1.04 | 0.93 | 1.03 |
| KS2-1 | 1.04 | 1.04 | 1.08 | 1.08 | 0.01 | 1.00 |

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) แสดงค่าแอนไอโซทรอปีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวอย่าง

| Sample | Lineation (L) | Foliation (F) | Anisotropy degree (P) | Corrected anisotropy (P') | Shape factor (T) | Eccentricity of the ellipsoid (E = F/L) |
|-------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| KS2-2 | 1.02 | 1.07 | 1.09 | 1.10 | 0.63 | 1.06 |
| KS2-3 | 1.01 | 1.06 | 1.06 | 1.07 | 0.77 | 1.05 |
| KS2-4 | 1.02 | 1.07 | 1.08 | 1.09 | 0.61 | 1.05 |
| KS3-1 | 1.01 | 1.10 | 1.11 | 1.12 | 0.77 | 1.08 |
| KS3-2 | 1.02 | 1.09 | 1.11 | 1.12 | 0.67 | 1.07 |
| KS3-3 | 1.00 | 1.10 | 1.11 | 1.12 | 0.94 | 1.10 |
| KS3-4 | 1.02 | 1.09 | 1.11 | 1.12 | 0.63 | 1.07 |
| KS4-1 | 1.00 | 1.05 | 1.05 | 1.06 | 0.85 | 1.04 |
| KS4-2 | 1.01 | 1.04 | 1.04 | 1.05 | 0.60 | 1.03 |
| KS4-3 | 1.01 | 1.03 | 1.04 | 1.04 | 0.62 | 1.02 |
| KS4-4 | 1.00 | 1.03 | 1.03 | 1.03 | 0.76 | 1.02 |
| KS5-1 | 1.02 | 1.04 | 1.05 | 1.05 | 0.39 | 1.02 |
| KS5-2 | 1.01 | 1.04 | 1.05 | 1.06 | 0.57 | 1.03 |
| KS5-3 | 1.01 | 1.04 | 1.05 | 1.05 | 0.70 | 1.03 |
| KS6-1 | 1.00 | 1.08 | 1.09 | 1.10 | 0.93 | 1.08 |
| KS6-2 | 1.01 | 1.12 | 1.13 | 1.15 | 0.90 | 1.12 |
| KS13-1 | 1.05 | 1.02 | 1.07 | 1.07 | -0.53 | 0.97 |
| KS13-2 | 1.05 | 1.03 | 1.09 | 1.09 | -0.19 | 0.98 |
| mean | 1.01 | 1.06 | 1.07 | 1.08 | 0.56 | 1.04 |
| Std (σ) | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.37 | 0.04 |
| กำแพงเมืองนครศรีธรรมราช | | | | | | |
| NK4-1 | 1.06 | 1.12 | 1.19 | 1.20 | 0.31 | 1.05 |
| NK4-2 | 1.09 | 1.12 | 1.22 | 1.22 | 0.13 | 1.02 |
| NK4-3 | 1.08 | 1.10 | 1.18 | 1.18 | 0.13 | 1.02 |
| NK5-1 | 1.06 | 1.05 | 1.10 | 1.10 | -0.12 | 0.99 |
| NK5-2 | 1.04 | 1.04 | 1.08 | 1.08 | -0.04 | 1.00 |
| NK5-3 | 1.01 | 1.13 | 1.15 | 1.16 | 0.80 | 1.12 |

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) แสดงค่าแอนไอโซทรอปีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวอย่าง

| Sample | Lineation (L) | Foliation (F) | Anisotropy degree (P) | Corrected anisotropy (P') | Shape factor (T) | Eccentricity of the ellipsoid (E = F/L) |
|------------------|------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| NK13-1 | 1.02 | 1.08 | 1.11 | 1.11 | 0.52 | 1.05 |
| NK13-2 | 1.05 | 1.15 | 1.21 | 1.22 | 0.45 | 1.09 |
| NK13-3 | 1.03 | 1.14 | 1.18 | 1.19 | 0.64 | 1.11 |
| NK14-1 | 1.05 | 1.10 | 1.15 | 1.15 | 0.36 | 1.05 |
| NK14-2 | 1.05 | 1.11 | 1.16 | 1.16 | 0.39 | 1.06 |
| NK14-3 | 1.02 | 1.03 | 1.05 | 1.05 | 0.15 | 1.01 |
| mean | 1.05 | 1.10 | 1.15 | 1.15 | 0.31 | 1.05 |
| Std (σ) | 0.02 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.27 | 0.04 |
| ชุมชนโบราณเกาะยอ | | | | | | |
| KY1 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.07 | 1.00 |
| KY2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.11 | 1.00 |
| KY7-1 | 1.00 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 0.50 | 1.00 |
| KY7-2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.01 | 0.51 | 1.00 |
| KY8-1 | 1.00 | 1.00 | 1.01 | 1.01 | 0.54 | 1.00 |
| mean | 1.00 | 1.00 | 1.01 | 1.01 | 0.35 | 1.00 |
| Std (σ) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.23 | 0.00 |

หมายเหตุ: *เป็นตัวอย่างที่มีสภาพ AMS สูง และไม่นำมาพิจารณาหาค่าเฉลี่ย

ในที่นี้จะพิจารณาว่า สภาพ AMS ไม่ส่งผลต่อค่าแมกนีไทเซชันตกค้างที่วัดได้ เมื่อค่าแอนไอโซทรอปีพารามิเตอร์ชนิด Corrected anisotropy หรือ $P' \leq 1.25$ หรือมีค่าไม่เกิน 25% เช่นเดียวกับในงานของ Gram-Jensen (2000) จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า k และค่า P' พบว่ามีตัวอย่างที่มีค่า k น้อยกว่า 10 μSI ถึง 67% มีค่า P' สูงกว่า 25% แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีค่า k น้อย มีแนวโน้มที่จะมีสภาพแอนไอโซทรอปีสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้แมกนีไทเซชันตกค้าง หรือค่า RM อาจมีทิศทางไม่สอดคล้องกับทิศของสนามเหนี่ยวนำ และค่าที่ได้จะคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริงมากขึ้นด้วย

1) ดินเผาจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปั้ง (TP)

ตัวอย่างจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปั้ง มีสภาพความเป็น AMS น้อย โดยมีค่า E เฉลี่ย 1.01 หรือมีสภาพ AMS เพียง 1% โดย 10 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 14 ตัวอย่าง คิดเป็น 71% มีลักษณะ AMS เป็นรูปทรงแบนรีเล็กน้อย ($E > 1$) โดยมีค่าเพียง 1-4% ยกเว้นตัวอย่าง TP8-2 มีค่า 12% และ TP3-1 ซึ่งมีค่า E สูงถึง 5.45 ส่วนอีก 4 ตัวอย่างคือ TP3-2, TP4-1, TP4-2 มีลักษณะ AMS เป็นทรงยาวรีเล็กน้อย ($E < 1$) โดยมีค่าน้อยกว่า 10% และตัวอย่าง TP9-1 AMS มีลักษณะเป็นทรงกลม ($E = 1$)

พารามิเตอร์ P' มีค่าเฉลี่ย 11% โดย 79% ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 25% แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างจากแหล่งนี้น่าจะมีสารแม่เหล็กจำพวกแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ที่มีสภาพ AMS ต่ำ ทำให้ค่า RM มีทิศทางไปทางเดียวกันกับทิศทางของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ส่งผลให้การวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กโลกในอดีตจากตัวอย่างเหล่านี้จะมีความถูกต้องมากขึ้น ยกเว้นตัวอย่างที่ TP1-2, TP3-1 และ TP4-1 ที่มีค่า P' สูงกว่า 25% ซึ่งต้องตัดตัวอย่างทั้ง 3 ออกจากการพิจารณาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ

2) ดินเผาจากโบราณสถานพระสยาม (PY)

สภาพ AMS ของตัวอย่างจากแหล่งนี้ 65% มีลักษณะเป็นทรงแบนรี แบบจานค่อนข้างมาก โดยมีค่า E เฉลี่ย 1.46 หรือมีสภาพ AMS สูงถึง 46% มีเพียงตัวอย่างที่ PY1-1, PY2-1, PY2-2, PY3-1 และ PY4-1 ที่มีค่า E น้อยกว่า 10%

ตัวอย่างจากแหล่งนี้มีค่า P' สูงกว่า 25% เกือบทุกตัวอย่าง โดยมีเพียง 5 ตัวอย่างคือ PY1-1, PY2-2, PY3-1, PY3-2 และ PY4-2 จากทั้งหมด 23 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 21.7% ที่มีค่าน้อยกว่า 25%

ค่า P' เฉลี่ย 2.39 สัมพันธ์กับค่า k ของตัวอย่าง ซึ่งมีค่าน้อยและบางตัวอย่างมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างจากแหล่งนี้น่าจะมีสารแม่เหล็กจำพวกฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) หรือพิร์โรไทต์ ($Fe_{1-x}S$) ที่มีสภาพ AMS สูง แต่มีค่า k ต่ำ ส่งผลให้ค่า RM มีค่าไม่เท่ากันในทิศทางต่าง ๆ นั่นคืออาจมีทิศไปทางอื่นที่ไม่ใช่ทิศทางของสนามเหนี่ยวนำหรือสนามแม่เหล็กโลก ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการวิเคราะห์ ซึ่งต้องพิจารณาตัดข้อมูลความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ได้ ออก แต่เนื่องจากมีตัวอย่างถึง 18 ตัวอย่าง หรือ 78.3% ต้องถูกตัดออก ดังนั้นจึงแยกการพิจารณาความเข้มของสนามแม่เหล็กออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีพิจารณาและไม่พิจารณาสภาพ AMS

3) ดินเผาจากชุมชนโบราณเขาศรีวิชัย (KS)

ตัวอย่างดินเผาจากชุมชนโบราณเขาศรีวิชัยมีสภาพ AMS ค่อนข้างน้อย มีค่า E เฉลี่ย 1.04 หรืออาจกล่าวได้ว่าสภาพ AMS ของตัวอย่างจากแหล่งนี้มีเพียง 4% โดยมี

เพียงตัวอย่าง KS2-1 ที่มีลักษณะ AMS เป็นรูปทรงกลม ส่วนตัวอย่าง KS13-1 และ KS13-2 มีลักษณะ AMS เป็นทรงยาวรีเล็กน้อย และที่เหลืออีก 18 ตัวอย่าง หรือ 85.7% ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด มีสภาพ AMS เป็นทรงแบนรีเล็กน้อย

พารามิเตอร์ P' มีค่าเฉลี่ย 1.08 หรือกล่าวได้ว่าตัวอย่างดินเผาจากแหล่งนี้มีสภาพ AMS เพียง 8% โดยไม่มีตัวอย่างใดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดคือ 25% สัมพันธ์กับค่า k ของตัวอย่างที่มีค่าสูง แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างจากแหล่งนี้น่าจะมีสารแม่เหล็กจำพวกแมกนีไทต์เป็นแร่ประกอบ ซึ่งจะส่งผลให้ค่า RM ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าสนามเหล็กโลกในอดีตจากตัวอย่างนี้มีความถูกต้องมากขึ้น

4) ดินเผาจากชุมชนโบราณเกาะยอ (KY)

ตัวอย่างจากชุมชนโบราณเกาะยอที่นำมาศึกษา AMS เป็นตัวอย่างดินเผาเก่า ซึ่งเป็นอิฐแผ่นที่ยังมีความสมบูรณ์สูง สภาพ AMS ของตัวอย่างทั้งหมดมีค่า E เป็น 1.00 หรือมีลักษณะ AMS เป็นทรงกลม

ค่า P' เฉลี่ยเท่ากับ 1.01 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินเผาจากแหล่งนี้มีสภาพ AMS เพียง 1% ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ค่าสนามเหล็กโลกในอดีตจากตัวอย่างเหล่านี้จะมีความถูกต้องมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลจากตัวอย่างที่นำมาศึกษาเป็นอิฐดินเผา ซึ่งถูกปรับแต่งรูปร่างและมีการอัดขึ้นรูปน้อย ส่งผลให้สารแม่เหล็กภายในตัวอย่างมีความเป็นแอนไอโซทรอปิต่ำ หรืออาจเนื่องมาจากดินเผาที่นำมาผลิตมีสารแม่เหล็กจำพวกแมกนีไทต์เป็นแร่ประกอบ

5) ดินเผาจากกำแพงเมืองนครศรีธรรมราช

ผลการวัดสภาพ AMS ของตัวอย่างดินเผาจากกำแพงเมืองนครศรีธรรมราช พบว่า 10 ตัวอย่าง หรือ 83% มีลักษณะ AMS เป็นทรงยาวรีเล็กน้อย ตัวอย่างที่เหลือมีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม มีค่า E เฉลี่ยเท่ากับ 1.05 หรือมีสภาพ AMS เพียง 5% และตัวอย่างทั้งหมดมีค่า P' น้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดคือ 25% โดยมีค่าเฉลี่ย 1.15 หรือ 15% นั่นคือความเป็นแอนไอโซทรอปิต่ำของตัวอย่างจะไม่ส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กโลก เพราะค่า RM ที่ได้มีทิศไปทางเดียวกับสนามแม่เหล็กโลกที่มาเหนี่ยวนำ

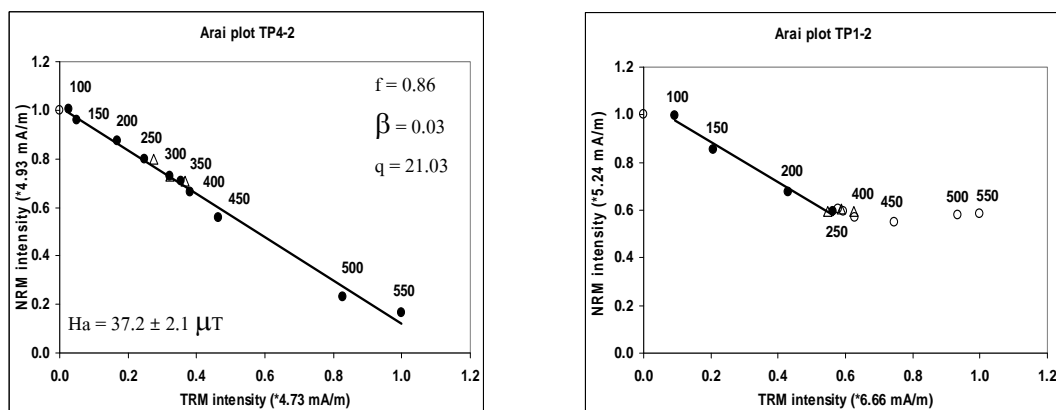
4.3 ความเข้มของสนามแม่เหล็กตกค้างโบราณ

จากการนำตัวอย่างดินเผามาทดสอบหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กตกค้างโบราณ โดยการนำตัวอย่างมาให้ความร้อนภายในเครื่องหลอมแมกนีไทต์เซชันในสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ และในสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ทราบค่า โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเรื่อย ๆ นำ

ตัวอย่างมาวัดค่าแมกนีไทเซชันตกค้างในแต่ละอุณหภูมิ แล้วจึงนำค่า NRM ที่หายไปกับค่า TRM ที่ได้ มาเขียนกราฟ Arai plot เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นแม่เหล็กโลกโบราณ โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณา คือ ค่า f มากกว่า 0.3, β ไม่เกิน 0.2, q มากกว่า 1, pTRM check ไม่เกิน 15% และ n ไม่น้อยกว่า 4 จุด ได้ค่าจากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

1) ดินเผาจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มป้ง (TP)

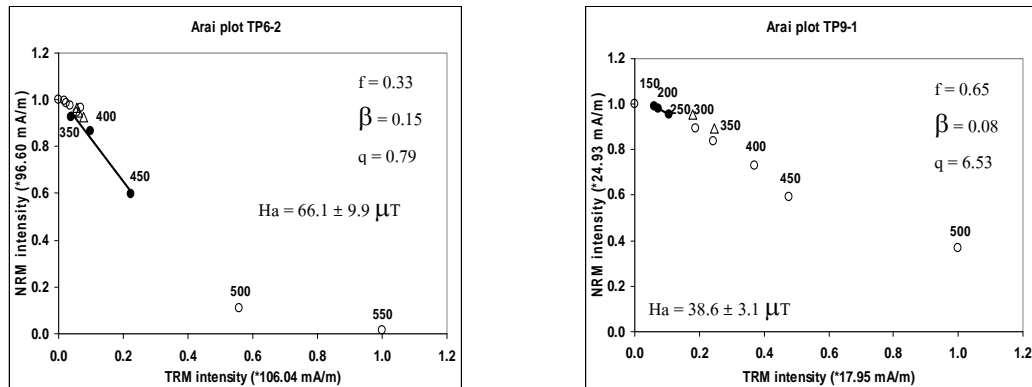
ตัวอย่างจากบริเวณนี้มีความสมบูรณ์ทางแม่เหล็กค่อนข้างสูง โดยสังเกตได้จากค่า k ที่ไม่ต่ำเกินไป สภาพ AMS มีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม และค่าแอนไอโซทรอปีพารามิเตอร์ P' โดยเฉลี่ยไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด เมื่อพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ส่งผลให้มีตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ในการคำนวณค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโลกโบราณจำนวน 9 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 14 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 64.3% ดังภาพที่ 4.6 ตัวอย่างในกลุ่มนี้เป็นตัวอย่างที่มีคุณภาพดี ซึ่งพิจารณาจากค่า q โดยตัวอย่างที่มีค่า q สูงกว่า 10 ได้แก่ TP4-2, TP8-1 และ TP8-2



ภาพที่ 4.6 ตัวอย่างกราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มป้ง

จากกราฟตัวอย่างที่ TP1-2 มีลักษณะโค้งขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารแม่เหล็ก (Chauvin, 2005) จึงต้องพิจารณาเลือกกราฟในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่ง Jean (2003) และ Biggin และ Thomas (2003) ได้อธิบายไว้ว่าการเลือกใช้กราฟในช่วงอุณหภูมิต่ำเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการศึกษา เพราะค่าที่ได้จะได้รับผลกระทบจากส่วนที่เป็นมัลติโดเมน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่า AMS ก็พบว่าตัวอย่างนี้มีค่า AMS สูงถึง 33% ดังนั้นจึงไม่พิจารณาตัวอย่างนี้ในการคำนวณค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโลกโบราณ ส่วนตัวอย่างที่ TP4-1 แม้จะมีค่า AMS สูงกว่า 25% แต่ลักษณะของกราฟได้เลือกช่วงข้อมูลเกือบทุกจุด ซึ่งจะทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องได้ จึงนำตัวอย่างนี้ไปพิจารณาด้วย

ส่วนอีก 4 ตัวอย่าง ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ประกอบด้วย TP2-1, TP3-1, TP6-2 และ TP9-1 (ภาพที่ 4.7) ส่วนใหญ่เกิดจากตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของสารแม่เหล็กในระหว่างการให้ความร้อน pTRM check มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ ยกเว้นตัวอย่างที่ TP3-1 ที่แม้จะผ่านการทำ pTRM check แต่กราฟที่ได้มีค่า f น้อยกว่า 0.3 และตัวอย่างนี้ก็ให้ข้อมูลที่สอดคล้องกับค่า AMS คือเป็นตัวอย่างที่มีค่า AMS สูงมาก มีค่า P' สูงถึง 24.21 จึงไม่พิจารณาตัวอย่างนี้

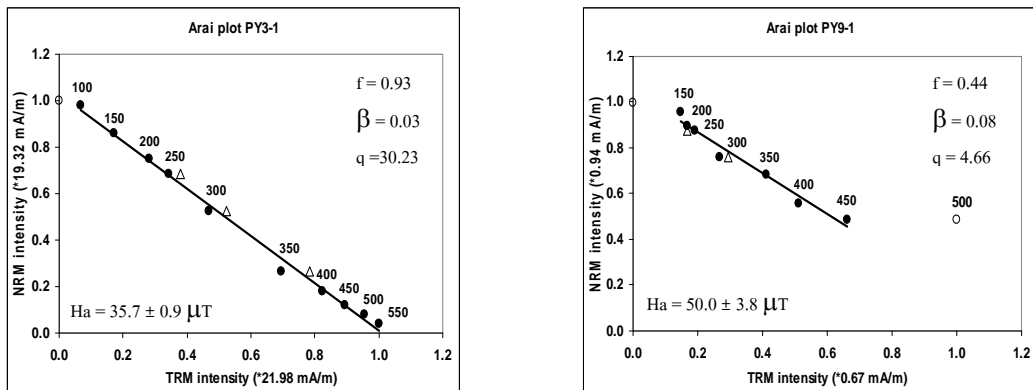


ภาพที่ 4.7 กราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มบั้ง ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด

2) ดินเผาจากโบราณสถานพระสยาม (PY)

จากการทดสอบที่ผ่านมาพบว่าตัวอย่างจากแหล่งนี้มีความสมบูรณ์ทางแม่เหล็กค่อนข้างต่ำ โดยมีค่า k น้อย และมีสภาพ AMS สูงในเกือบทุกตัวอย่าง ส่งผลให้ค่า RM เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ และค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้ไม่ผ่านเกณฑ์หลายตัวอย่าง ในจำนวนนี้มี 10 ตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์จาก 27 ตัวอย่าง คิดเป็น 37% ประกอบด้วย PY1-1, PY1-2, PY3-1, PY3-2, PY5-1, PY6-1, PY6-2, PY8-1, PY9-1 และ PY17-2 ดังภาพที่ 4.8

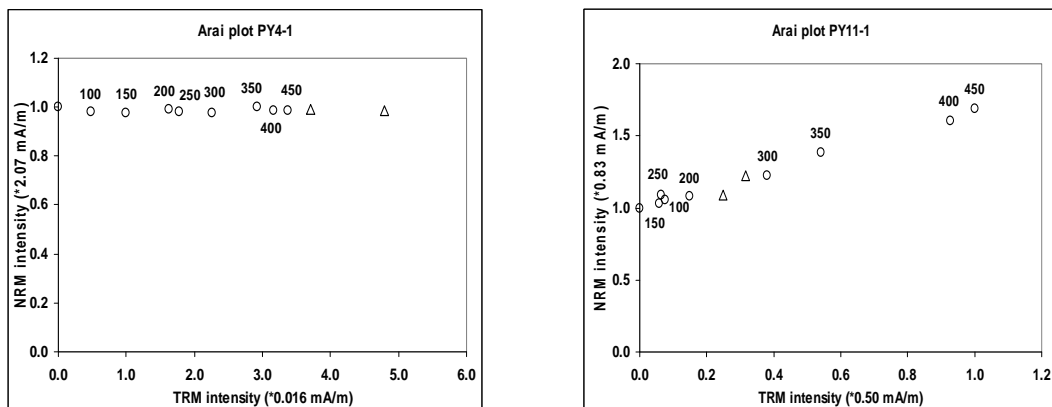
ในที่นี้หากตัวอย่างผ่านเกณฑ์ที่กำหนด แต่มีค่า P' เกิน 25% จะเลือกพิจารณาตัวอย่างที่คำนวณจากทุกจุดของกราฟ และผ่านการทำ pTRM check ส่วนตัวอย่างที่กราฟหาค่าความชันได้เพียงบางส่วนจะไม่นำมาพิจารณาแม้จะผ่านเกณฑ์อื่นก็ตาม



ภาพที่ 4.8 ตัวอย่างกราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถานพระสยาม

จากเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ข้างต้นจะพบว่ามตัวอย่างที่ไม่นำมาพิจารณาคือ PY5-1 และ PY8-1 ซึ่งพบการแปรสภาพของสารแม่เหล็ก จึงเหลือตัวอย่างที่นำมาพิจารณาเพียง 8 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 29.6% จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด

นอกจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดข้างต้นแล้ว ยังพบตัวอย่างซึ่งกราฟมีลักษณะขนานแกน TRM หรือมีแนวโน้มโค้งขึ้น (ภาพที่ 4.9) ซึ่งพบถึง 11 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 40.7% จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด ได้แก่ PY4-1, PY4-2, PY5-2, PY10-1, PY10-2, PY11-1, PY12-1, PY12-2, PY13-1, PY13-2 และ PY17-1



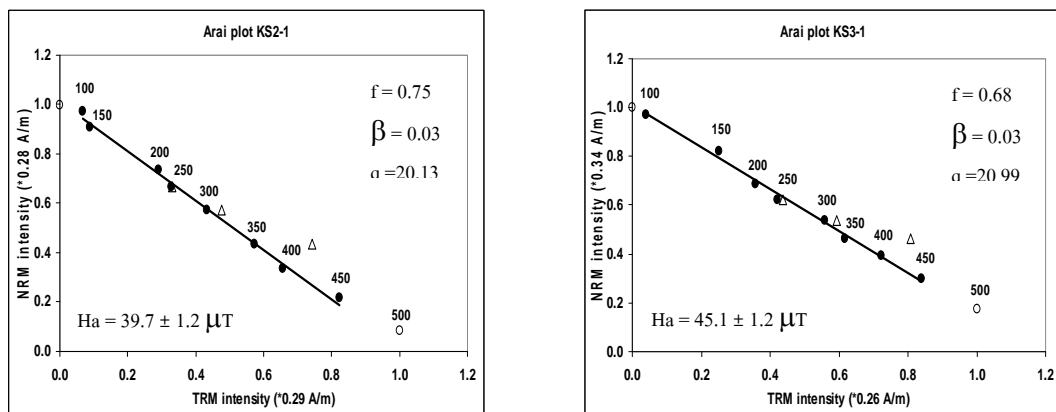
ภาพที่ 4.9 ตัวอย่างกราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถานพระสยาม ซึ่งมีลักษณะโค้งขึ้น

การโค้งขึ้นของกราฟในลักษณะนี้แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และมีการเพิ่มขึ้นของ TRM capacity ของสารแม่เหล็กที่อุณหภูมิสูงในระหว่างการทดลอง หรือการ

ที่เกรนแม่เหล็กเป็นมัลติโดเมนหรือโดเมนเทียม (Chauvin et al., 2005) ซึ่งจะส่งผลให้ไม่สามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กในตัวอย่างนั้นได้

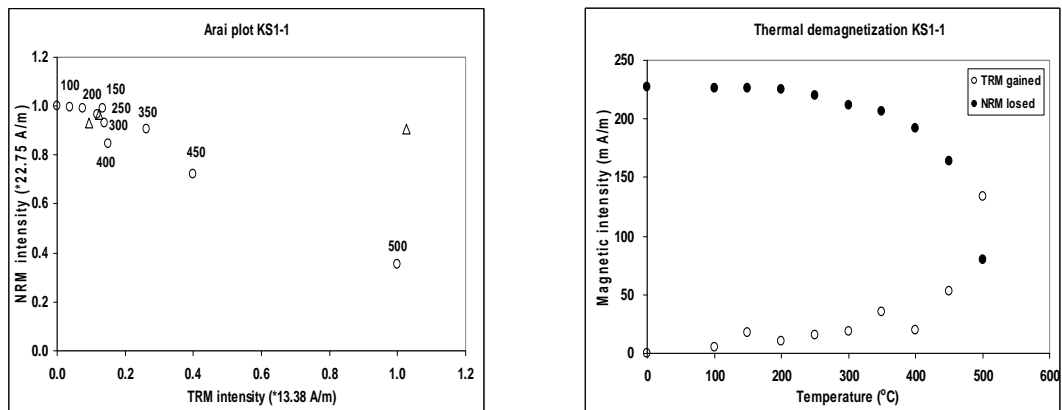
3) ดินเผาจากโบราณสถานเขาศรีวิชัย (KS)

ดินเผาจากโบราณสถานเขาศรีวิชัยเป็นตัวอย่างที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่มีคุณภาพสูง นั่นคือมีค่า k สูง AMS มีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม และ P' มีค่าต่ำ ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยตัวอย่างดินเผาจากแหล่งนี้มี 14 ตัวอย่าง ผ่านเกณฑ์จำนวน 7 ตัวอย่าง คิดเป็น 50% ของตัวอย่างทั้งหมด ประกอบด้วย KS2-1, KS2-2, KS2-3, KS2-4, KS3-1, KS3-2 และ KS3-3 ดังภาพที่ 4.10

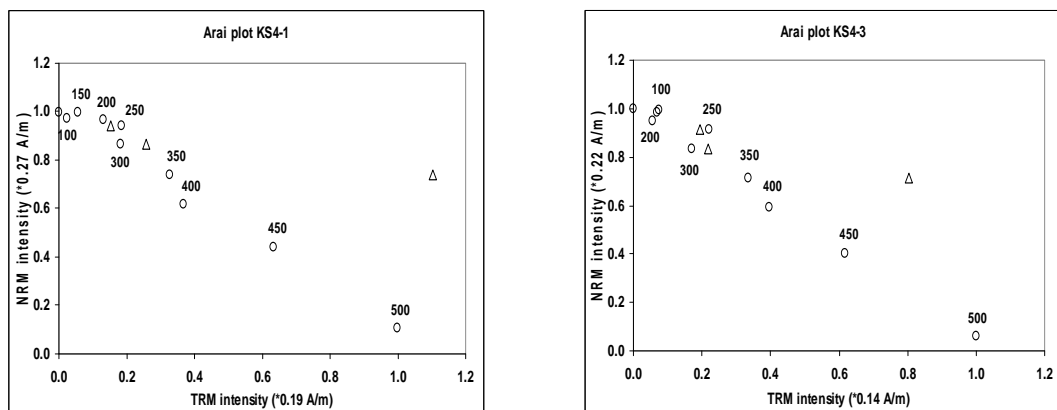


ภาพที่ 4.10 ตัวอย่างกราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาจากโบราณสถานเขาศรีวิชัย

ส่วนตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์ประกอบด้วย KS1-1, KS1-2, KS1-3, KS3-4, KS4-1, KS4-2 และ KS4-3 ซึ่งโดยส่วนใหญ่ตรวจพบการแปรสภาพของสารแม่เหล็ก ยกเว้นตัวอย่างที่ KS1-1 ซึ่งแม้ค่า k จะคงที่ แต่ค่า TRM ที่ได้ไม่คงที่ ส่งผลให้กราฟ Arai plot กลับไปกลับมา ไม่สามารถหาความชันได้ ตัวอย่างที่ KS4-1 และ KS4-3 เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่า มีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่ไม่ผ่านการทำ pTRM check ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ได้มีค่าค่อนข้างสูงกว่าตัวอย่างอื่นในกลุ่ม จึงไม่นำมาพิจารณา ดังภาพที่ 4.11 และ 4.12



ภาพที่ 4.11 ลักษณะกราฟ Arai plot และ Thermal demagnetization ของตัวอย่าง KS1-1 ซึ่งไม่สามารถหาค่าความชันได้

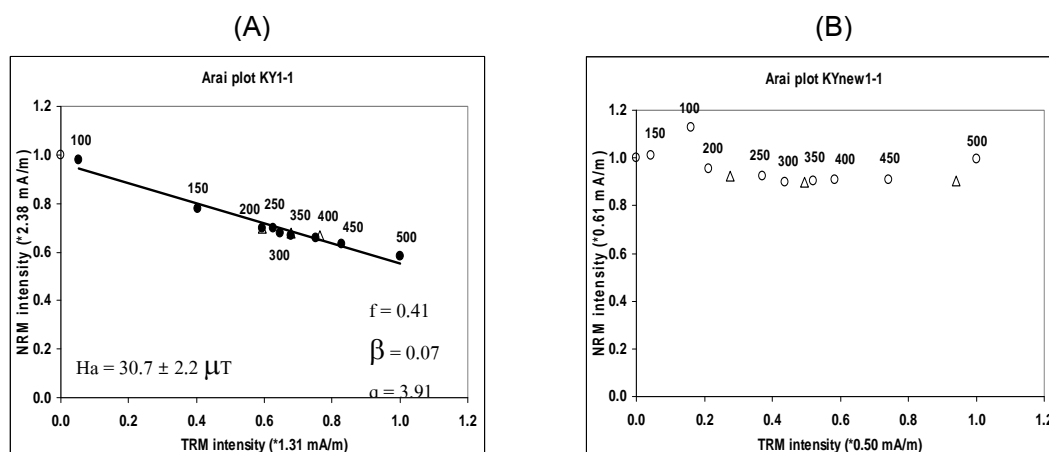


ภาพที่ 4.12 ลักษณะกราฟ Arai plot ของตัวอย่าง KS4-1 และ KS4-2 ซึ่งไม่ผ่านการพิจารณา ค่า pTRM check

4) ดินเผาจากชุมชนโบราณเกาะยอ (KY)

ตัวอย่างจากแหล่งนี้ได้รับผลกระทบจากความเป็นแอนไอโซทรอปีน้อย ทั้งตัวอย่างที่เป็นอิฐดินเผาเก่าและอิฐดินเผาใหม่ แต่พบเพียงอิฐเก่า 2 ตัวอย่าง คือ KY1-1 และ KY1-2 ที่พารามิเตอร์ต่าง ๆ ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งความเข้มข้นแม่เหล็กโลกโบราณที่ได้จากทั้ง 2 ตัวอย่าง มีค่าต่างกันค่อนข้างมาก

กราฟของตัวอย่างดินเผาใหม่มีลักษณะโค้งขึ้น (ภาพที่ 4.13) เนื่องจากค่า NRM มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาพบว่าค่า k มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง และผลการทำ pTRM check ก็พบการเปลี่ยนแปลงอยู่ในระดับที่สูง จึงแน่ใจว่าสารแม่เหล็กเกิดการแปรสภาพ ส่งผลให้ค่า NRM มีค่าสูงขึ้น

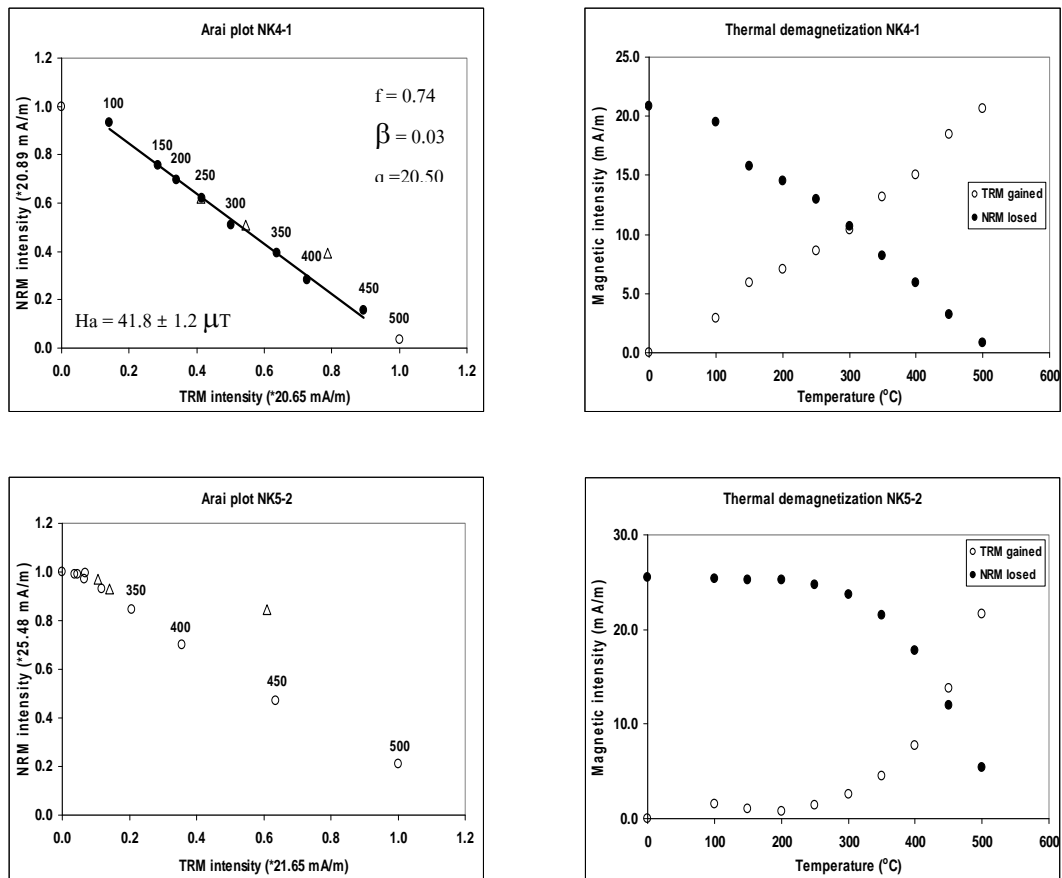


ภาพที่ 4.13 ตัวอย่างกราฟ Arai plot ของตัวอย่างจากชุมชนโบราณเกาะยอ (A) เป็นตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์การพิจารณา (B) เป็นตัวอย่างที่กราฟมีลักษณะโค้งขึ้นเนื่องจากการแปรสภาพของสารแม่เหล็กในระหว่างการให้ความร้อน

5) ดินเผาจากกำแพงเมืองนครศรีธรรมราช (NK)

จากการพิจารณารูป Arai plot และกราฟ Thermal demagnetization ของตัวอย่างดินเผาจากกำแพงเมืองนครศรีธรรมราช (ภาพที่ 4.14) แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น NRM มีค่าลดลง เป็นสัดส่วนเหมือนกับที่ TRM มีค่าเพิ่มขึ้น เหมือนเป็นกระจกเงาซึ่งกันและกัน ทั้งตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์และไม่ผ่านเกณฑ์การพิจารณา แสดงให้เห็นถึงความเสถียรของสารแม่เหล็กภายในชิ้นตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์การพิจารณาประกอบด้วย NK4-1, NK4-2, NK13-1 และ NK14-2 ส่วนตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์ได้แก่ NK5-1, NK5-2, NK13-2 และ NK14-1 โดยสาเหตุที่มีบางตัวอย่างไม่ผ่านเกณฑ์การพิจารณาส่วนใหญ่เกิดจากการแปรสภาพของสารแม่เหล็กจากการทำ pTRM check เกินกว่า 15%



ภาพที่ 4.14 กราฟ Arai plot และกราฟ Thermal demagnetization ของตัวอย่าง NK4-1 และ NK5-2

จากการพิจารณากราฟ Arai plot ของตัวอย่างดินเผาตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ทำให้สามารถสรุปค่าต่าง ๆ จากการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณของภาคใต้ ได้ ค่าดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณของภาคใต้

| ตัวอย่าง | อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) | | n | H_a (μT) | σ_{H_a} (μT) | β | f | q | pTRM check (%) | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|---|----------------------------|-------------------------------------|---------|------|-------|----------------|------|-------|--|
| | min | max | | | | | | | 250 | 300 | 350 | |
| โบราณสถาน (ร้าง) ตุมปัง | | | | | | | | | | | | |
| TP1-1* | 150 | 500 | 8 | 25.6 | 2.4 | 0.09 | 0.70 | 5.73 | 2.8 | 9.9 | | |
| TP1-2 | 100 | 250 | 4 | 26.5 | 2.3 | 0.09 | 0.38 | 2.73 | 2.6 | 1.6 | 5.0 | |
| TP2-1 | 350 | 450 | 3 | 74.1 | 1.7 | 0.02 | 0.94 | 24.45 | 35.1 | 12.0 | 166.9 | |
| TP2-2* | 300 | 500 | 5 | 41.6 | 6.4 | 0.15 | 0.90 | 3.61 | 28.6 | 3.8 | | |

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณของภาคใต้

| ตัวอย่าง | อุณหภูมิ (°C) | | n | Ha (μT) | σ_{Ha} (μT) | β | f | q | pTRM check (%) | | |
|------------------|---------------|-----|----|-------------------------|---|---------|------|-------|----------------|------|------|
| | min | max | | | | | | | 250 | 300 | 350 |
| TP3-1 | 150 | 450 | 7 | 13.8 | 2.0 | 0.14 | 0.21 | 0.61 | 8.5 | 5.5 | |
| TP3-2* | 300 | 550 | 6 | 31.6 | 3.4 | 0.11 | 0.35 | 2.24 | 19.0 | 4.7 | 0.3 |
| TP4-1* | 150 | 500 | 8 | 46.1 | 2.6 | 0.06 | 0.61 | 7.86 | 5.1 | 7.4 | |
| TP4-2* | 100 | 550 | 10 | 37.2 | 1.2 | 0.03 | 0.86 | 21.03 | 11.3 | 0.4 | 3.4 |
| TP6-1* | 300 | 500 | 5 | 47.1 | 6.8 | 0.14 | 0.90 | 3.58 | 94.4 | 4.5 | |
| TP6-2 | 350 | 450 | 3 | 66.1 | 9.9 | 0.15 | 0.33 | 0.79 | 15.3 | 8.9 | 99.7 |
| TP8-1* | 150 | 500 | 8 | 27.8 | 0.9 | 0.03 | 0.78 | 13.77 | 3.8 | 0.1 | |
| TP8-2* | 100 | 550 | 10 | 26.2 | 1.3 | 0.05 | 0.85 | 14.47 | 4.8 | 2.1 | 4.7 |
| TP9-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 70.2 | 29.9 | |
| TP9-2* | 150 | 450 | 7 | 45.0 | 2.2 | 0.05 | 0.34 | 5.18 | 0.2 | 3.2 | 21.5 |
| โบราณสถานพระสยาม | | | | | | | | | | | |
| PY1-1* | 100 | 450 | 8 | 34.6 | 0.9 | 0.03 | 0.32 | 7.79 | 7.8 | 1.4 | |
| PY1-2* | 100 | 450 | 8 | 38.0 | 1.5 | 0.04 | 0.44 | 7.33 | 2.4 | 5.6 | |
| PY3-1* | 100 | 550 | 10 | 35.7 | 0.9 | 0.03 | 0.93 | 30.23 | 11.2 | 11.7 | 12.8 |
| PY3-2* | 100 | 550 | 10 | 32.2 | 1.0 | 0.03 | 0.84 | 23.84 | 4.9 | 12.4 | 10.7 |
| PY4-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 127.7 | 41.9 | |
| PY4-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 158.5 | 12.1 | |
| PY5-1 | 300 | 500 | 5 | 19.8 | 3.3 | 0.17 | 0.31 | 1.03 | 23.2 | 9.4 | 5.5 |
| PY5-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 44.6 | 6.1 | 6.9 |
| PY6-1* | 100 | 450 | 8 | 47.6 | 1.8 | 0.04 | 0.57 | 6.55 | 1.2 | 3.6 | |
| PY6-2* | 100 | 450 | 8 | 42.0 | 1.8 | 0.04 | 0.52 | 6.12 | 0.7 | 6.5 | |
| PY7-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 96.8 | 39.0 | |
| PY7-2 | 100 | 250 | 4 | 71.2 | 8.0 | 0.11 | 0.09 | 0.46 | 55.3 | 1.3 | |
| PY8-1 | 150 | 350 | 5 | 57.8 | 10.9 | 0.19 | 0.35 | 1.43 | 11.9 | 28.3 | |
| PY8-2 | 100 | 350 | 6 | 49.8 | 8.2 | 0.16 | 0.28 | 0.63 | 0.4 | 31.0 | |
| PY9-1* | 150 | 450 | 7 | 50.0 | 3.8 | 0.08 | 0.44 | 4.66 | 11.6 | 9.3 | |
| PY9-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 29.4 | 87.6 | 17.0 |
| PY10-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 38.5 | 7.5 | |
| PY10-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 103.4 | 6.8 | |
| PY11-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 289.7 | 17.3 | |

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณของภาคใต้

| ตัวอย่าง | อุณหภูมิ (°C) | | n | Ha (μ T) | σ_{Ha} (μ T) | β | f | q | pTRM check (%) | | |
|-------------------------|---------------|-----|---|------------------|-----------------------------|---------|------|-------|----------------|------|-------|
| | min | max | | | | | | | 250 | 300 | 350 |
| PY12-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 8.5 | 5.6 | |
| PY12-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.3 | 1.6 | |
| PY13-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 39.0 | 8.3 | |
| PY13-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3.9 | 37.8 | |
| PY14-1 | 300 | 400 | 3 | 30.2 | 10.4 | 0.35 | 0.43 | 0.50 | 19.7 | 4.7 | 21.0 |
| PY14-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 31.1 | 31.3 | 12.1 |
| PY17-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 6.6 | 8.7 | |
| PY17-2* | 150 | 550 | 9 | 32.6 | 2.2 | 0.07 | 0.49 | 6.08 | 6.9 | 4.6 | 6.7 |
| ชุมชนโบราณเขาศรีวิชัย | | | | | | | | | | | |
| KS1-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 5.2 | 32.7 | 292.9 |
| KS1-2 | 300 | 450 | 4 | 54.3 | 4.3 | 0.08 | 0.20 | 1.30 | 16.5 | 13.0 | 564.1 |
| KS1-3 | 300 | 450 | 4 | 54.8 | 3.0 | 0.05 | 0.20 | 2.15 | 26.9 | 1.0 | 374.1 |
| KS2-1* | 100 | 450 | 8 | 39.7 | 1.2 | 0.03 | 0.75 | 20.10 | 0.8 | 10.5 | 29.1 |
| KS2-2* | 300 | 500 | 5 | 45.3 | 2.5 | 0.06 | 0.51 | 6.81 | 23.1 | 5.6 | 8.2 |
| KS2-3* | 300 | 500 | 5 | 48.0 | 2.6 | 0.05 | 0.56 | 7.73 | 50.5 | 13.5 | 10.3 |
| KS2-4* | 300 | 450 | 4 | 42.2 | 5.5 | 0.13 | 0.40 | 2.07 | 28.0 | 9.8 | 60.5 |
| KS3-1* | 100 | 450 | 8 | 45.1 | 1.2 | 0.03 | 0.68 | 20.99 | 3.7 | 6.5 | 30.9 |
| KS3-2* | 100 | 450 | 8 | 46.3 | 2.3 | 0.05 | 0.71 | 11.56 | 1.9 | 9.9 | 41.6 |
| KS3-3* | 100 | 450 | 8 | 53.8 | 1.3 | 0.02 | 0.63 | 21.51 | 10.8 | 7.8 | 31.5 |
| KS3-4 | 300 | 450 | 4 | 45.9 | 6.3 | 0.14 | 0.25 | 1.19 | 17.4 | 1.3 | 43.9 |
| KS4-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 16.8 | 42.3 | 238.0 |
| KS4-2 | 300 | 450 | 4 | 69.6 | 14.6 | 0.21 | 0.37 | 1.20 | 26.6 | 1.9 | 136.2 |
| KS4-3 | - | - | - | - | - | - | - | - | 11.7 | 28.1 | 139.5 |
| กำแพงเมืองนครศรีธรรมราช | | | | | | | | | | | |
| NK4-1* | 100 | 450 | 8 | 41.8 | 1.2 | 0.03 | 0.74 | 20.50 | 0.9 | 8.3 | 23.7 |
| NK4-2* | 300 | 450 | 4 | 31.2 | 2.7 | 0.09 | 0.35 | 2.74 | 34.4 | 7.4 | 33.5 |
| NK5-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 5.3 | 23.8 | 418.8 |
| NK5-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 64.1 | 19.3 | 196.7 |
| NK13-1* | 100 | 450 | 8 | 39.7 | 1.1 | 0.03 | 0.65 | 17.96 | 10.6 | 10.5 | 70.7 |
| NK13-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 88.7 | 15.2 | 173.8 |
| NK14-1 | 100 | 250 | 4 | 28.9 | 7.9 | 0.27 | 0.07 | 0.01 | 5.1 | 42.0 | 170.4 |

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณของภาคใต้

| ตัวอย่าง | อุณหภูมิ (°C) | | n | Ha (μT) | σ_{Ha} (μT) | β | f | q | pTRM check (%) | | |
|------------------|---------------|-----|---|-------------------------|---|---------|------|-------|----------------|------|-------|
| | min | max | | | | | | | 250 | 300 | 350 |
| NK14-2* | 150 | 450 | 8 | 41.2 | 1.3 | 0.03 | 0.62 | 15.70 | 2.1 | 4.5 | 147.5 |
| ชุมชนโบราณเกาะยอ | | | | | | | | | | | |
| KY1-1* | 100 | 500 | 9 | 30.7 | 2.2 | 0.07 | 0.41 | 3.91 | 5.3 | 5.0 | 12.6 |
| KY1-2* | 100 | 450 | 8 | 51.4 | 4.0 | 0.08 | 0.31 | 2.25 | 7.2 | 8.1 | 45.2 |
| KY2-1 | 300 | 450 | 4 | 27.7 | 4.0 | 0.14 | 0.09 | 0.39 | 21.0 | 3.3 | 65.7 |
| KY2-2 | 300 | 450 | 4 | 29.4 | 11.2 | 0.38 | 0.04 | 0.06 | 15.0 | 2.4 | 64.9 |
| KYnew1-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 25.6 | 13.0 | 80.6 |
| KYnew1-2 | 300 | 450 | 4 | 31.8 | 3.8 | 0.20 | 0.08 | 0.25 | 26.7 | 6.6 | 59.1 |
| KYnew2-1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 60.1 | 17.5 | 222.6 |
| KYnew2-2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 36.4 | 18.0 | 113.0 |

หมายเหตุ: * คือตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดและใช้ในการคำนวณ, n คือจำนวนจุดที่เลือกใช้ในการคำนวณ, Ha คือความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณ, σ_{Ha} คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชัน, β คือค่าความคลาดเคลื่อนของความชัน, f คืออัตราส่วนของ NRM ที่ใช้คำนวณ, q คือค่าคุณภาพของตัวแปร และเครื่องหมายขีด (-) หมายความว่ากราฟไม่อยู่ในรูปที่จะคำนวณได้

จากการพิจารณาพบว่า องค์ประกอบสำคัญที่จะส่งผลให้ตัวอย่างมีความสมบูรณ์หรือผ่านเกณฑ์ต่าง ๆ คือ ความสมบูรณ์ของตัวอย่าง ส่วนประกอบของดิน และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำเครื่องปั้นดินเผา นั้น นอกจากนี้การใช้เทคนิค Thellier ในการวิเคราะห์ความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณจากตัวอย่างอิฐดินเผา มีเกณฑ์ที่ต้องพิจารณาอยู่หลายประการ เพื่อให้การวิเคราะห์มีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือมากที่สุด ทำให้มีหลายตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์การพิจารณา ซึ่งจากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า มีจำนวนตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์มีประมาณ 44% จากจำนวนทั้งหมด 71 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างจากแหล่งโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มปั้ง มีจำนวนตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์มากกว่าแหล่งอื่นคือประมาณ 64% ตัวอย่างจากชุมชนโบราณเขาศรีวิชัย และกำแพงเมืองนครศรีธรรมราชมี 50% ส่วนตัวอย่างจากโบราณสถานพระสยามและชุมชนโบราณเกาะยอ มีจำนวนตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์เพียง 30% และ 25% ตามลำดับ

จากค่าความชันที่ได้ต้องเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกที่ได้ให้อยู่ในรูปของค่าไดโพลโมเมนต์เสมือน (Virtual axial dipole moment; VADM) เพื่อให้เป็นค่าที่

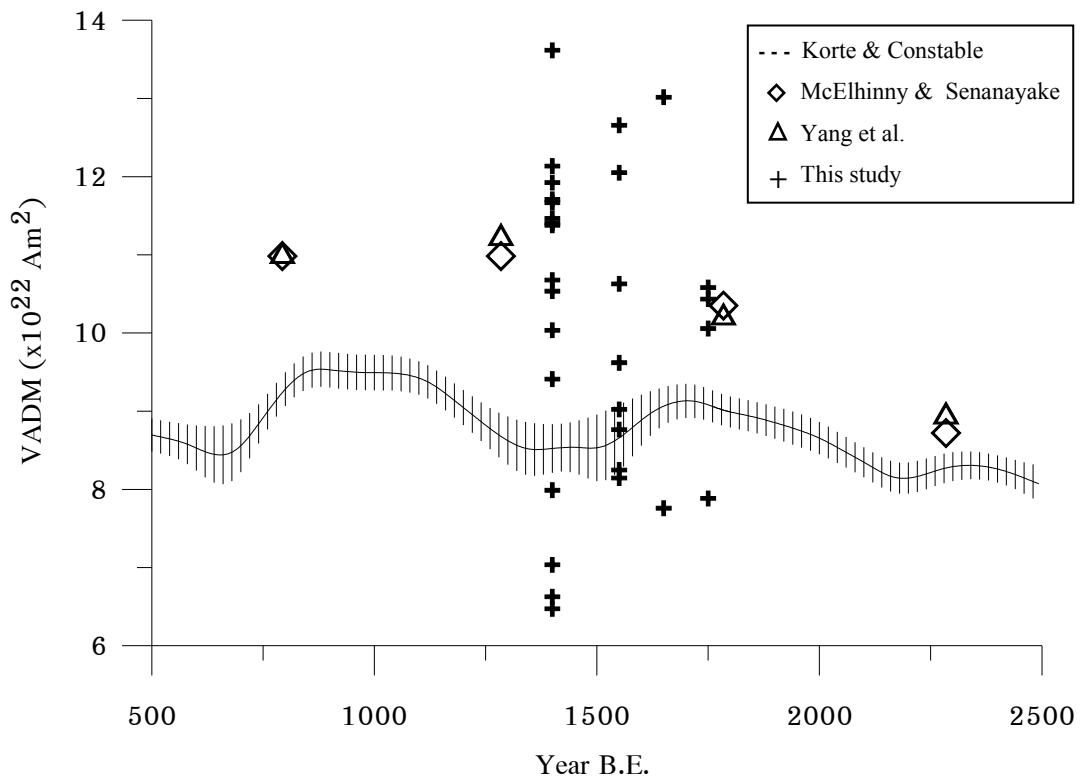
สามารถเปรียบเทียบหรืออ้างอิงได้เหมือนกันทั่วโลก และไม่ขึ้นอยู่กับละติจูด โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มข้นแม่เหล็กโลกในอดีตจากแหล่งต่าง ๆ ของภาคใต้

| ตัวอย่าง | อายุ (ศตวรรษที่) | จำนวน ตัวอย่าง | Ha (μT) | VADM ($\times 10^{22} \text{ Am}^2$) |
|-------------------------|---------------------|-------------------|-------------------------|---|
| โบราณสถาน (ร้าง) ตุมปัง | 14-15 | 9 | 37.2 ± 8.9 | 9.41 ± 2.24 |
| ชุมชนโบราณเขาศรีวิชัย | 14-15 | 7 | 45.3 ± 4.5 | 11.47 ± 1.13 |
| โบราณสถานพระสยาม | 16 | 8 | 36.8 ± 6.8 | 9.32 ± 1.72 |
| ชุมชนโบราณเกาะยอ | 16-18 | 2 | 41.0 ± 14.7 | 10.39 ± 3.72 |
| กำแพงเมืองนครศรีธรรมราช | 18 | 4 | 40.5 ± 5.0 | 10.25 ± 1.26 |

ในที่นี้ตัวอย่างดินเผาจากชุมชนโบราณเกาะยอมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากมีตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์เพียง 2 ตัวอย่าง ส่วนตัวอย่างจากเขาศรีวิชัยและโบราณสถาน (ร้าง) ตุมปัง ซึ่งมีอายุอยู่ในช่วงเดียวกัน แต่หาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ต่างกัน น่าจะเกิดสนามแม่เหล็กส่วนที่เป็นไม่ใช่ไดโพล ซึ่งเป็นผลจากสภาพพื้นที่ในขณะเผาตัวอย่างมีสนามภายนอก นอกเหนือจากสนามแม่เหล็กโลกต่างกัน ไม่ได้เกิดจากความแตกต่างของตำแหน่งที่ตั้ง เนื่องจากตัวอย่างจากเขาศรีวิชัย ตั้งอยู่ในพื้นที่ จ.สุราษฎร์ธานี และจากโบราณสถาน (ร้าง) ตุมปัง ตั้งอยู่ใน จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งอยู่บนเส้นละติจูดที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อนำค่า VADM ของตัวอย่างที่ศึกษามาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับของ McElhinny และ Senanayake (1982), Yang และคณะ (2000) และของ Constable และ Korte (2005) จะได้กราฟดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบค่า VADM จากตัวอย่างดินเผาภาคใต้ที่ได้จากการศึกษากับข้อมูลที่มีการศึกษามาก่อน

จากภาพที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกในอดีตของภาคใต้ที่ทำการศึกษาในช่วง 700 ถึง 1,200 ปีที่ผ่านมา ซึ่งได้จากตัวอย่างในแต่ละช่วงอายุมีค่าที่ค่อนข้างกว้าง แต่ยังมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงและสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา ทั้งของ McElhinny และ Senanayaki และการศึกษาของ Yang และคณะ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณของภาคใต้ โดยใช้ตัวอย่างดินเผาในยุคสมัยต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย โบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มบั้ง กำแพงเมือง นครศรีธรรมราช โบราณสถานพระสยาม จ.นครศรีธรรมราช ชุมชนโบราณเขาศรีวิชัย จ.สุราษฎร์ธานี และชุมชนโบราณเกาะยอ จ.สงขลา ซึ่งมีอายุอยู่ในช่วงประมาณ 700-1,200 ปีก่อน โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อน 2 ครั้งของ Thellier (1959) และ Coe (1967) สามารถสรุปได้ว่าดินเผาจากชุมชนโบราณศรีวิชัย จ.สุราษฎร์ธานี มีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (ค่า k) สูงกว่าแหล่งอื่น โดยมีค่าเฉลี่ย 653.65 μSI ส่วนตัวอย่างจากชุมชนโบราณเกาะยอ จ.สงขลา มีค่า k น้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ย 3.54 μSI

ค่า k ของตัวอย่างสามารถคาดเดาถึงสภาพแอนไอโซทรอปี (AMS) ของสารแม่เหล็กได้ในระดับหนึ่ง นั่นคือตัวอย่างที่มีค่า k สูง แนวโน้มจะมีสภาพ AMS ต่ำ เนื่องจากมีแร่แม่เหล็กที่มีค่า AMS ต่ำ เช่น แมกนีไทต์ ส่วนตัวอย่างที่มีค่า k น้อย จะมีสภาพ AMS สูง เนื่องจากมีแร่ฮีมาไทต์ หรือพีโรไทต์ เป็นแร่ประกอบ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ตัวอย่างที่มีค่า k น้อยกว่า 10 μSI ถึง 67% มีค่าแอนไอโซทรอปีพารามิเตอร์ P' สูงกว่า 25% ซึ่งจะทำให้ค่าแมกนีไทเซชันตกค้าง (RM) ที่ได้คลาดเคลื่อนไปจากค่าจริงมากขึ้นด้วย เพราะจะทำให้แมกนีไทเซชันตกค้างที่ได้มีค่าไม่เท่ากันในทิศทางต่าง ๆ

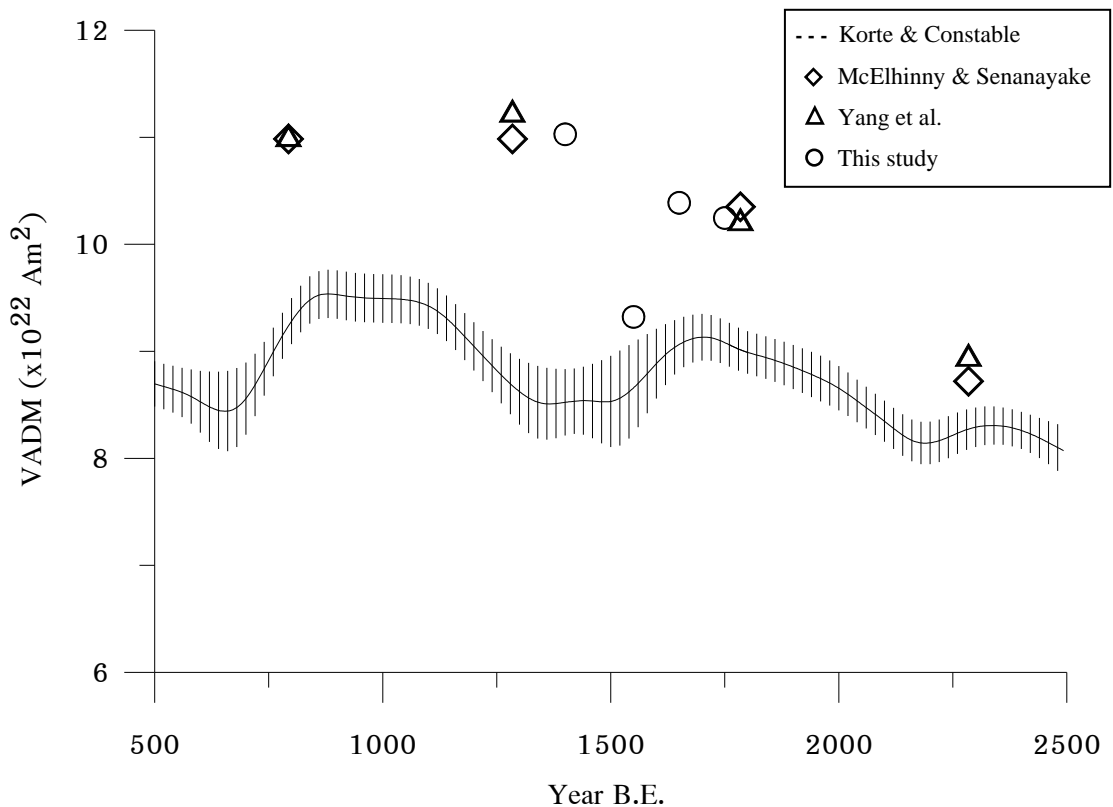
ตัวอย่างส่วนใหญ่มีลักษณะแอนไอโซทรอปีเกือบเป็นทรงกลม โดยมีค่า E เฉลี่ยไม่เกิน 5% และ P' เฉลี่ยน้อยกว่า 15% บอกให้ทราบว่ามีแร่ประกอบที่มีความเป็น AMS น้อย เช่น แร่แมกนีไทต์เป็นแร่ประกอบ ทำให้เกิดความแน่นอนในการวิเคราะห์ค่าอำนาจแม่เหล็กตกค้างโบราณ ยกเว้นตัวอย่างจากพระสยามซึ่งผลการวิเคราะห์อาจให้ค่าที่ไม่แน่นอน เนื่องจากมีค่า E เฉลี่ยสูงถึง 46% และมีค่า P' เกิน 25% ซึ่งคิดเป็น 77.3% ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด อาจเป็นผลมาจากมีแร่ฮีมาไทต์หรือพีโรไทต์เป็นแร่ประกอบ

การใช้เทคนิค Thellier ในการวิเคราะห์ความเข้มสนามแม่เหล็กโลกโบราณนั้นมีเกณฑ์ที่ต้องพิจารณาอยู่หลายประการ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือมากที่สุด ซึ่งจากการศึกษามีจำนวนตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์การพิจารณา 44% โดยตัวอย่างจากแหล่งโบราณสถาน (ร้าง) ตุ่มบั้ง มีจำนวนตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์การพิจารณามากกว่าแหล่งอื่นคือประมาณ 71% ตัวอย่างจากชุมชนโบราณเขาศรีวิชัย และกำแพงเมืองนครศรีธรรมราช คิด

เป็น 50% ส่วนตัวอย่างจากพระสมณและชุมชนโบราณเกาะยอ มีจำนวนตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ 30% และ 25% ตามลำดับ

ความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณของภาคใต้ช่วง 700-1,200 ปีที่ผ่านมา มีค่าเฉลี่ยประมาณ $40.2 \mu\text{T}$ ใกล้เคียงกับข้อมูลความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกปัจจุบัน ซึ่งมีค่า $41.49 \mu\text{T}$ โดยในปี พ.ศ. 1400 สนามแม่เหล็กโลกมีความเข้ม $43.6 \pm 8.5 \mu\text{T}$ จากนั้นก็ลดลงอย่างรวดเร็ว จนมีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 1550 โดยมีค่า $36.8 \pm 6.8 \mu\text{T}$ แล้วจึงเพิ่มขึ้น จนถึงปี พ.ศ. 1650 มีค่าประมาณ $41.0 \pm 14.7 \mu\text{T}$ แล้วลดลงอีกเล็กน้อยจนมีค่า $40.5 \pm 5.0 \mu\text{T}$ ประมาณปี พ.ศ. 1750

จากข้อมูลต่าง ๆ เมื่อมาเขียนกราฟการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกบริเวณภาคใต้ของไทย เปรียบเทียบค่า VADM กับข้อมูลอื่น จะได้ดังภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกของภาคใต้ในยุคต่าง ๆ

ข้อมูลที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบกับข้อมูลอื่นซึ่งได้มีการศึกษามาก่อนหน้า พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียง และกราฟมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน ยกเว้นในปี พ.ศ. 1550 ซึ่งค่า

ความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกมีการลดลงมากกว่าปกติ อาจเกิดจากผลของสภาพ AMS ของตัวอย่างจากแหล่งโบราณสถานพระสยาม ทำให้ได้ค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง จึงอาจไม่พิจารณาค่านี้ในการวิเคราะห์

เราสามารถใช้อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกของภาคใต้ที่ได้นี้ เป็นกราฟอ้างอิงเพื่อใช้ประกอบการศึกษาหาความเข้มชั้นของสนามแม่เหล็กโลกเพิ่มเติม หรืออาจใช้ประกอบในการหาอายุของวัตถุโบราณของภาคใต้ต่อไป ซึ่งการใช้อุณหภูมิอ้างอิงที่ได้ในการหาอายุของวัตถุโบราณประเภทดินเผาของภาคใต้ สามารถทำได้โดยนำตัวอย่างนั้นมาหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกที่เก็บอยู่ในวัตถุนั้น โดยใช้เทคนิค Thellier จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟอ้างอิงที่ได้จากการศึกษานี้ ก็จะทำให้ได้อายุของวัตถุนั้นได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ตัวอย่างดินเผาที่ใช้ศึกษาควรเป็นตัวอย่างที่มีความสมบูรณ์ ไม่ควรเลือกใช้ตัวอย่างที่ผุกร่อนจนเกินไป เพราะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมีผลให้ค่าแมกนีไทเซชันตกค้างเปลี่ยนแปลงไป วิธีการที่จะลดปัญหานี้คือการตัดแต่งตัวอย่าง ให้เหลือเฉพาะส่วนที่ยังสมบูรณ์ ในขณะที่ตัวอย่างดินเผาจากบางแหล่งมีลักษณะเป็นแผ่นบาง จึงควรใช้ตัวอย่างจำนวนมากขึ้น

ปัจจัยหนึ่งที่เป็นอย่างยิ่งในการหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ โดยใช้เทคนิค Thellier คือ การแปรสภาพของสารแม่เหล็กในระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเราไม่สามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงนี้ได้จากการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของค่า k ในระหว่างการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวได้ เนื่องจากมีหลายตัวอย่างที่ตรวจพบการแปรสภาพของสารแม่เหล็กจากการทำ pTRM check ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 15% แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่า k ของตัวอย่าง ดังนั้นการพิจารณาหลาย ๆ ปัจจัยจะส่งผลให้การตรวจสอบมีความถูกต้องยิ่งขึ้น ซึ่งจากการพิจารณาตัวอย่างที่ศึกษาพบว่า ความสมบูรณ์ของตัวอย่างส่วนประกอบของดินที่ใช้ผลิต และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำเครื่องปั้นดินเผา นั้น เป็นองค์ประกอบสำคัญที่จะส่งผลให้ตัวอย่างมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

การศึกษาครั้งนี้ได้อ้างอิงอายุของดินเผาจากข้อมูลของสำนักโบราณคดีที่ 11 จังหวัดนครศรีธรรมราช และข้อมูลจากเอกสารต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการระบุอายุแบบสัมพัทธ์ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลประกอบภายนอก จึงทำให้มีช่วงอายุที่กว้าง การใช้ตัวอย่างที่สามารถระบุอายุได้ชัดเจนจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีความเจาะจงมากขึ้น ดังนั้นควรหาอายุของตัวอย่างให้

ชัดเจนด้วยวิธีการอื่นเพิ่มเติมก่อน เช่น วิธีเรดิโอคาร์บอน (C-14) และการใช้ตัวอย่างจำนวน
หลาย ๆ แหล่ง และหลายช่วงอายุ จะทำให้ได้กราฟอ้างอิงที่มีความละเอียดและสมบูรณ์มากขึ้น
อายุที่หาได้จากการใช้กราฟอ้างอิงนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง ดังนั้น
จึงควรใช้กราฟนี้ควบคู่กับการหาอายุของวัตถุโบราณโดยวิธีอื่นด้วย

บรรณานุกรม

- ธราพงศ์ ศรีสุชาติ. 2542ก. เตาเผาโบราณชุมชนปะโอ. สารานุกรมวัฒนธรรมภาคใต้ เล่ม 6. อมรินทร์การพิมพ์: กรุงเทพฯ.
- ธราพงศ์ ศรีสุชาติ. 2542ข. สหิงพระ: ชุมชนโบราณ. สารานุกรมวัฒนธรรมภาคใต้ เล่ม 16. อมรินทร์การพิมพ์: กรุงเทพฯ.
- สถาบันทักษิณคดีศึกษา. 2529. สารานุกรมวัฒนธรรมภาคใต้. สถาบันทักษิณคดีศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ: สงขลา. 2: 573-606.
- สมหมาย ช่างเขียน และพวงทิพย์ แก้วทับทิม. 2542. การหาอายุโบราณวัตถุประเภทเครื่องปั้นดินเผาโดยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์บริเวณเมืองโบราณยะรัง อำเภอยะรัง จังหวัดปัตตานี. วารสารสงขลานครินทร์. 21. 3(ก.ค.-ก.ย.): 347-353.
- Becker, H., Göksu, H.Y. and Regulla, D.F. 1994. Combination of archaeomagnetism and thermoluminescence for precision dating. *Quaternary Geochronology (Quaternary Science Reviews)*. 13: 563-567.
- Biggin, A.J. and Thomas, D.N. 2003. The application of acceptance criteria to results of Thellier palaeointensity experiments performed on samples with pseudo-single-domain-like characteristics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 138: 279-287.
- Calvo, M., Prévot, M., Perrin, M. and Riisager, J. 2002. Investigating the reasons for the failure of palaeointensity experiments: a study on historical lava flows from Mt. Etna (Italy). *Geophysical Journal International*. 149: 44-63.
- Carvallo, C., Camps, P., Ruffet, G., Henry, B. and Poidras, T. 2002. Mono Lake or Laschamp geomagnetic event recorded from lava flows in Amsterdam Island (southeastern, Indian Ocean). *Geophysical Journal International*. 154: 767-782.
- Carvallo, C. and Dunlop, D.J. 2001. Archeomagnetism of potsherds from Grand Banks, Ontario: a test of low paleointensities in Ontario around A.D. 1000. *Earth and Planetary Science Letters*. 186: 437-450.
- Chauvin, A., Roperch, P. and Levi, S. 2005. Reliability of geomagnetic paleointensity data: the effects of the NRM fraction and concave-up behavior on paleointensity determinations by the Thellier method. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 150: 265-286.

- Coe, R.S. 1967. Palaeointensities of the Earth's magnetic field determined from tertiary and quaternary rocks. *Journal of Geophysical Research*. 72: 3247-3262.
- Coe, R.S., Grommé, S. and Mankinen, E.A. 1978. Geomagnetic palaeointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low. *Journal of Geophysical Research*. 83: 1740-1756.
- Dodson, M.H. and McClelland-Brown, E. 1980. Magnetic blocking temperature of single-domain grains during slow cooling. *Journal of Geophysical Research*. 85: 2625-2637.
- Fabian, K. 2001. A theoretical treatment of palaeointensity determination experiments on rocks containing pseudo-single or multidomain magnetic particles. *Earth and Planetary Science Letters*. 188: 45-58.
- Fox, J.M.W. and Aitken, M.J. 1980. Cooling rate dependence of the thermoremanent magnetization. *Nature*. 283: 462-463.
- Gallet, Y. and Genevey, A. 2003. On the possible occurrence of archaeomagnetic jerks in the geomagnetic field over the past three millennia. *Vincent Courtillot a Earth and Planetary Science Letters*. 6743: 1-6.
- Gram-Jensen, M., Abrahamsen, N. and Chauvin, A. 2000. Archaeomagnetic intensity in Denmark. *Physics and Chemistry of the Earth*. 25: 525-531.
- Halgedahl, S.L., Day, R. and Fuller, M. 1980. The effect of cooling rate on the intensity of weak-field TRM in single-domain magnetite. *Journal of Geophysical Research*. 85: 3690-3698.
- Hill, M.J., Gratton, M.N. and Shaw, J. 2002. A comparison of thermal and microwave palaeomagnetic techniques using lava containing laboratory induced remanence. *Geophysical Journal International* .151: 157-163.
- Hill, M.J. and Shaw, J. 2000. Magnetic field intensity study of the 1960 Kilauea lava flow Hawaii, using the microwave palaeointensity technique. *Geophysical Journal International*. 142: 487-504.
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M. and Banejee, S.K. 1995. Rock physics and phase relations a handbook of physical constants. American Geophysical Union. 189-204.
- Hus, J., Ech-Chakrouni, S. and Jordanova, D. 2002. Origin of magnetic fabric in bricks: its implications in archaeomagnetism. *Physics and Chemistry of the Earth*. 27: 1319-1331.

- Korte, M. and Constable, C.G. 2005. The geomagnetic dipole moment over the last 7000 years-new results from a global model. *Earth and Planetary Science Letters*. 236: 348-358.
- Kosterov, A.A. and Prévot, M., 1998. Possible mechanisms causing failure of Thellier palaeointensity experiments in some basalts. *Geophysical Journal International*. 134: 554-572.
- Levi, S. 1977. The effect of magnetite particle size on palaeointensity determinations of the geomagnetic field. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*.13: 245-259.
- McArdle, N.J., Halls, H.C. and Shaw, J. 2004. Rock magnetic studies and a comparison between microwave and Thellier palaeointensities for Canadian Precambrian dykes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 147: 247-254.
- McElhinny, M.W. and Senanayake, W.E. 1982. Variation in the geomagnetic dipole, I: the past 50000 years. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. 34: 39-51.
- Mochizuki, N., Tsunakawa, H., Oishi, Y., Wakai, S., Wakabayashi, K. and Yamamoto, Y. 2004. Palaeointensity study of the Oshima 1986 lava in Japan: implications for the reliability of the Thellier and LTD-DHT Shaw methods. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 146: 395-416.
- Nagata, T. 1943. The natural remanent magnetism of volcanic rocks and its relation to geomagnetic phenomena. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*. 21: 1-196.
- Nagata, T., Arai, Y. and Momose, K. 1963. Secular variation of the geomagnetic total force during the last 5000 years. *Journal of Geophysical Research*. 68: 5277-5281.
- Odah, H., Hussain, A.G., Hoffmann, V., Soffel, H.C., El-Gamili, M. and Deebes, H. 2001. Effect of magnetic anisotropy on the experimentally determined palaeointensity of the geomagnetic field. *Earth Planets Space*. 53: 363-371.
- Oishi, Y., Tsunakawa, H., Mochizuki, N., Yamamoto, Y., Wakabayashi, K. and Shibuya, H. 2005. Validity of the LTD-DHT Shaw and Thellier palaeointensity methods: a case study of the Kilauea 1970 lava. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 149: 243-257.
- O'Reilly, W. 1984. *Rock and mineral magnetism*. Chapman and Hall. New York.

- Ozima, M., Ozima, M. and Akimoto, S. 1964. Low temperature characteristics of remanent magnetization of magnetite-selfreversal and recovery phenomena of remanent magnetization. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. 16: 165-177.
- Pesonen, L.J. and Leino, M.A.H. 1998. Archaeomagnetic intensity in Finland and Bulgaria problems in the applied techniques or evidence of a non-dipole field?. *Physics and Chemistry of the Earth*. 23: 1021-1025.
- Prévot, M., Derder, M.E.M., McWilliams, M. and Thompson, J. 1990. Intensity of the earth's magnetic field: evidence for a Mesozoic dipole low. *Earth and Planetary Science Letters*. 97: 129-139.
- Prévot, M., Mankinen, E.A., Gromme, C.S. and Coe, R.S. 1985, The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition. 2. Field intensity variation and discussion of reversal models. *Journal of Geophysical Research*. 90: 10417-10448.
- Ramaswamy, K., Dheenathayalu, M. and Bharathan, S. 1985. Archaeomagnetic determination of the ancient intensity of the geomagnetic field in Tamilnadu, India. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 40: 61-64.
- Selkin, P.A. and Tauxe, L. 2000. Long-term variations in palaeointensity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 358: 1065-1088.
- Shaw, J. 1974. A new method of determining the magnitude of the palaeomagnetic field: application to five historic lavas and five archaeological samples. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 39: 133-141.
- Shcherbakov, V.P. and Shcherbakova, V.V. 2001. On the suitability of the Thellier method of palaeointensity determinations on pseudo-single-domain and multidomain grains. *Geophysical Journal International*. 146: 20-30.
- Spatharas, V., Kondopoulou, D., Liritzis, I. and Tsokas, G.N. 2000. Archaeointensity results from two ceramic kilns from N. Greece, *Journal of the Balkan Geophysical Society*. 3: 67-72.
- Tanaka, H. and Kono, M. 1991. Preliminary results and reliability of palaeointensity studies on historical and ¹⁴C dated Hawaiian lavas. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. 43: 375-388.

- Tanaka, H., Kono, M. and Kaneko, S. 1995. Paleosecular variation of direction and intensity from two Pliocene-Pleistocene lava sections in southwestern Iceland. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. 47: 89-102.
- Tarling, D.H. and Hrouda, F. 1993. *The magnetic anisotropy of rocks*. Chapman & Hall: London.
- Tauxe, L. 2005. *Lectures in Paleomagnetism*. <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>. (accessed 9/11/06).
- Tauxe, L. and H. Staudigel, 2004, Strength of the geomagnetic field in the Cretaceous Normal Superchron: New data from submarine basaltic glass of the Troodos Ophiolite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 5.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. 1990. *Applied geophysics*. 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press.
- Thellier, E. 1977. Early research on the intensity of the ancient geomagnetic field. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 13: 241-244.
- Thellier, E. and Thellier, O. 1959. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans la passé historique et géologique. *Annales Geophysicae*. 15: 285-376.
- Thomas, D.N., Hill, M.J. and Garcia, A.S. 2004. Comparison of the Coe-Thellier-Thellier and microwave palaeointensity techniques using high-titanium titanomagnetites: results from a Tertiary basaltic intrusion from the Sydney Basin, New South Wales. *Earth and Planetary Science Letters*. 229: 15-29.
- Valet, J.P. 2003. Time variation in geomagnetic intensity. *Reviews of Geophysics*. 41: 4-44.
- Walton, D. 1986. Rate of transition for single domain particles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 62: 392-396.
- Walton, D. 1988. The lack of reproducibility in experimentally determined intensities of the Earth's magnetic field. *Reviews of Geophysics*. 26: 15-22.
- Walton, D. 1998. Dating with archaeomagnetic intensities. *Physics and Chemistry of the Earth*. 23: 987-990.
- Walton, D., Share, J.A., Rolph, T.C. and Shaw, J. 1993. Microwave magnetization. *Geophysical Research Letters*. 20: 109-111.
- Walton, D., Shaw, J., Share, J.A. and Hakes, J. 1992. Microwave demagnetization. *Journal of Applied Physics*. 71: 1549-1551.

- Xu, S. and Dunlop, D.J. 1995. Thellier palaeointensity determination using PSD and MD grains (abstract). EOS Transactions of the American Geophysical Union. 76: F170.
- Yamamoto, Y., Tsunakawa, H. and Shibuya, H. 2003. Palaeointensity study of the Hawaiian 1960 lava: implications for possible causes of erroneously high intensities. *Geophysical Journal International*. 153: 263-276.
- Yang, S., Odah, H. and Shaw, J. 2000. Variations in the geomagnetic dipole moment over the last 12000 years. *Geophysical Journal International*. 140: 158-162.
- Yoshihara, A., Kondo, A., Ohno, M. and Hamano, Y. 2003. Secular variation of the geomagnetic field intensity during the past 2000 years in Japan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 210: 219-231.
- Zhu, R., Hoffman, K.A., Pan, Y., Shi, R. and Li, D. 2003. Evidence for weak geomagnetic field intensity prior to the Cretaceous normal superchron. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 136: 187-199.

ภาคผนวก ก

ทฤษฎีและลักษณะเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางแม่เหล็กในงานวิจัย

ในการศึกษาความเข้มของสนามแม่เหล็กโลกโบราณ จำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางแม่เหล็ก ดังนี้

1. โมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic dipole moment, m)

คือผลคูณระหว่างกำลังขั้วของแม่เหล็กขั้วคู่ (+p หรือ -p) กับระยะห่างของขั้ว +p และ -p ดังสมการ

$$m = pl$$

เมื่อ m คือ โมเมนต์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น $A\cdot m^2$

p คือ กำลังขั้วแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น $A\cdot m$

l คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว +p และ -p มีหน่วยเป็น m

2. ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)

ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก หรือ ค่า k เป็นสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่งของวัสดุ ที่สะท้อนถึงความสามารถของวัสดุกับสนามแม่เหล็กภายนอกในการถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็ก ซึ่งเป็นค่าคงตัวของวัตถุที่เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่าการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetization, M) ต่อค่าความแรงสนามแม่เหล็ก (Magnetic force, H) เราอาจใช้ค่านี้ในการจำแนกชนิดของสารแม่เหล็กที่มีอยู่ในหินได้ นอกจากนั้นค่า k ยังมีความสัมพันธ์กับสมบัติอย่างอื่นของเม็ดแร่ เช่น ขนาด รูปร่าง ความเค้น และส่วนประกอบ

การวัดค่า k สามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ วัดเทียบกับค่าการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และค่าความแรงสนามแม่เหล็กหน่วยปริมาตรเช่นเดียวกัน ใช้สัญลักษณ์ k (Volume susceptibility) ในกรณีนี้สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กไม่มีหน่วย ซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้ในการสำรวจสนามแม่เหล็กทั่วไป หรือวัดเทียบกับค่าการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยมวล และค่าความแรงสนามแม่เหล็ก ใช้สัญลักษณ์ χ (specific หรือ mass susceptibility) ในที่นี้จะมียุ่หน่วยเป็น m^3/kg

การถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กของวัสดุใด ๆ นั้น จะแปรผันโดยตรงกับค่า k ตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$M = kH$$

เมื่อ M คือ การเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น A/m

k คือ ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก

H คือ ความแรงสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น A/m

เมื่อวัตถุเกิดการเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็ก ค่าของการเหนี่ยวนำ (M) จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความแรงสนามแม่เหล็ก (H) ที่ใส่เข้าไป ทำให้ค่า k เป็นค่าคงตัว ซึ่งค่านี้มี ความสัมพันธ์กับสภาพยอมให้ซึมได้เชิงแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) ดังสมการ

$$k = \mu_r - 1$$

ค่า k ของตัวอย่างจากแต่ละแหล่งจะแตกต่างกัน ตามแร่ประกอบของหินหรือ ดิน และสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการเกิดหรือการผลิต เช่น ในหินหรือดินที่ ประกอบด้วยแร่แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) จะมีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กสูง แร่ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) จะมีค่าต่ำ ส่วนแร่ควอตซ์ (SiO_2) หินเกลือ (NaCl) และแคลไซต์ (CaCO_3) จะมีค่าที่ต่ำมาก หรือ อาจกล่าวได้ว่าค่า k ของวัตถุแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุแม่เหล็กที่เป็น องค์ประกอบภายในวัตถุนั้น

นอกจากความแตกต่างกันของแร่ประกอบในตัวอย่างแล้ว ค่า k ยังอาจ แปรปรวนเนื่องจากกิจกรรมอื่น เช่น การถูกพัดพาของตะกอนหรือการเกิดน้ำท่วมขัง การถูกกัดกร่อน หรือการอยู่ภายใต้สภาวะที่ได้รับความร้อนจากภายนอกที่แตกต่างกัน ซึ่งกิจกรรมต่าง ๆ เหล่านี้อาจส่งผลให้สารประกอบภายในแร่เกิดการเรียงตัวใหม่ที่มีค่า k แตกต่างกันไป นอกจากนี้ขนาดและทิศทางของค่า k อาจถูกเปลี่ยนได้เนื่องจากแรงเค้น (stress) จากภายนอก ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับทิศทางที่แรงนั้นมากระทำกับสนามแม่เหล็ก โดยหากแรงเค้นที่มากระทำ ขนานกับทิศของสนามแม่เหล็ก ค่า k จะลดลง แต่หากแรงเค้นนั้นมีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ก็จะส่งผลให้ค่า k เพิ่มขึ้น และก็จะขึ้นกับองค์ประกอบและขนาดของเกรนแม่เหล็กของวัสดุนั้น ด้วย ค่า k อาจเปลี่ยนแปลงได้ถึง $\pm 40\%$ ที่แรงเค้นต่างกัน 2 kbar (Hunt et al., 1995) ตัวอย่าง ค่า k ของวัสดุต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

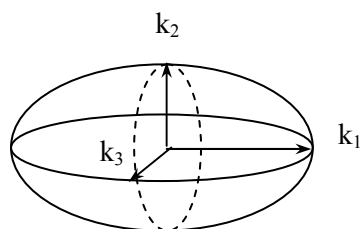
ตารางที่ 1 ความหนาแน่นและค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของแร่ประกอบหินและองค์ประกอบที่พบได้ทั่วไปในดิน

| แร่ | ความหนาแน่น ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$) | ค่าสภาพรับไว้ได้ทาง แม่เหล็ก (μSI) |
|--|---|---|
| น้ำแข็ง (ice, H_2O) | 0.92 | -9 |
| ควอตซ์ (quartz, SiO_2) | 2.65 | -13 ถึง -17 |
| ไพไรต์ (pyrite, FeS_2) | 5.02 | 35-5,000 |
| ฮีมาไทต์ (Hematite, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) | 5.26 | 500-40,000 |
| โกไทต์ (goethite, $\alpha\text{-FeOOH}$) | 4.27 | 1,100-12,000 |
| แมกนีไทต์ (maghemite, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) | 4.90 | 2,000,000-2,500,000 |
| แมกนีไทต์ (magnetite, Fe_3O_4) | 5.18 | 1,000,000-5,700,000 |
| ไททานอแมกนีไทต์ (titanomagnetite, $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$, $x=0.6$) | 4.98 | 130,000-620,000 |
| อิลเมนไนต์ (ilmenite, FeTiO_3) | 4.72 | 2,200-3,800,000 |

ที่มา: Hunt et al. (1995)

3. สภาพแอนไอโซทรอปีของค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (Anisotropy of magnetic susceptibility, AMS)

เป็นการแปรเปลี่ยนค่า k ซึ่งเกิดขึ้นจากธรรมชาติของโครงสร้างผลึกแม่เหล็ก (Magnetocrystalline) ซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งของสารแม่เหล็กสามัญทั่วไป และเกิดจากสภาพเบี่ยงเบนไปจากทรงกลมของรูปร่างของอนุภาค (Shape anisotropy) เกิดจากการวางตัวของกลุ่มอนุภาค ซึ่งโดยปกติจะมีไม่ได้มีลักษณะที่เป็นทรงกลมโดยสมบูรณ์ แต่จะมีลักษณะอนุภาคที่บิดเบี้ยวไปในลักษณะของทรงกลมรี (Ellipsoid) โดยกำหนดให้ทิศที่มีค่า k มากที่สุด (k_{\max}) ค่า k ปานกลาง (k_{int}) และค่า k น้อยที่สุด (k_{\min}) เป็น k_1 , k_2 และ k_3 ตามลำดับ ดังรูป



พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาความเป็น AMS ของตัวอย่างโดยทั่วไปจะประกอบด้วยค่า Foliation (F), Lineation (L), Shape factor (T), Degree of anisotropy (P') และ Eccentricity of the ellipsoid (E) โดย

$$F = k_2 / k_3 \qquad L = k_1 / k_2$$

$$T = \frac{(\ln F - \ln L)}{(\ln F + \ln L)}$$

$$P' = \exp \sqrt{2 \left[(\ln k_1 - n)^2 + (\ln k_2 - n)^2 + (\ln k_3 - n)^2 \right]}$$

$$n = \frac{1}{3} (\ln k_1 + \ln k_2 + \ln k_3)$$

$$E = F / L$$

หาก E มีค่ามากกว่า 1 สภาพ AMS จะมีลักษณะเป็นทรงแบนรี (Oblate shape) แต่หากค่า E น้อยกว่า 1 แล้ว AMS จะมีลักษณะเป็นทรงยาวรี (Prolate shape) และหาก E เท่ากับ 1 สภาพ AMS จะมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งโดยทั่วไปจะพิจารณาว่าความเป็น AMS จะไม่ส่งผลต่อค่า NRM ที่วัดได้เมื่อค่า $P' \leq 1.25$ หรือ 25%

4. ชนิดของวัสดุแม่เหล็ก

เมื่อพิจารณาสมบัติทางแม่เหล็ก โดยการพิจารณาค่า k ของวัตถุ หรือค่าความยากง่ายของการเกิดแมกนีไทเซชันของวัตถุ จะสามารถแบ่งวัสดุแม่เหล็กออกได้เป็น 3 ชนิด คือ วัสดุไดอะแมกเนติก พาราแมกเนติก และเฟอร์โรแมกเนติก ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัตถุเชิงแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

| ชนิดของวัตถุ | สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก | โมเมนต์แม่เหล็กภายในอะตอม | อะตอม/กราฟลักษณะการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก |
|----------------------|-----------------------------|--|---|
| ไดอาแมกเนติก | มีค่าต่ำ และมีค่าเป็นลบ | ไม่มี | |
| พาราแมกเนติก | มีค่าต่ำ และมีค่าเป็นบวก | มี และมีการเรียงตัวระเกะระกะ | |
| เฟอร์โรแมกเนติก | มีค่าสูงมาก และมีค่าเป็นบวก | มี และมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในทิศทางเดียวกัน | |
| แอนติเฟอร์โรแมกเนติก | มีค่าต่ำ และมีค่าเป็นบวก | มี และมีการเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกัน มีขนาดเท่ากัน | |
| เฟอร์ริแมกเนติก | มีค่าสูง และมีค่าเป็นบวก | มี และมีทิศทางการเรียงตัวตรงกันข้ามกัน ขนาดแตกต่างกัน | |

1) วัสดุไดอาแมกเนติก (Diamagnetic) เป็นวัตถุที่แสดงคุณสมบัติแม่เหล็กในเชิงต้านกับสนามแม่เหล็กภายนอก ไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรในโครงสร้างอะตอม โดยที่เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำต่ออะตอมของวัตถุ จะทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนเป็นวงโคจรรอบนิวเคลียสของอะตอมเสียสมดุล เกิดขั้วแม่เหล็กขนาดเล็กขึ้นในอะตอม ขั้วแม่เหล็กจะต้านกับสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้เกิดผลในเชิงลบ วัสดุจำพวกนี้มีคุณสมบัติค่า k เป็นลบ และเมื่อนำสนามภายนอกออก แมกนีไทเซชันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นก็จะกลับมีค่าเป็นศูนย์อีก (reversible) ตัวอย่างแร่ที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กประเภทนี้ ได้แก่ ควอตซ์ เกลือหิน แคลไซต์ เป็นต้น

2) วัสดุพาราแมกเนติก (Paramagnetic) เป็นวัสดุที่เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอก วัสดุจะถูกเหนี่ยวนำให้มีสภาพเป็นแม่เหล็ก นั่นคือ ในโครงสร้างอะตอมของวัสดุจำพวกนี้มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรประกอบอยู่ แต่การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำจึงมีการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กไปตามสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำ การเรียงตัวจะไม่เป็นระเบียบอย่างสมบูรณ์ และเมื่อนำสนามแม่เหล็กออกไป วัสดุนั้นก็จะไม่มีความเป็นแม่เหล็กอีกต่อไป วัสดุจำพวกนี้มีคุณสมบัติของค่า k ของวัสดุเป็นค่าบวก และมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-6} ถึง 10^{-2} วัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กจำพวกนี้ได้แก่ วัสดุทุกชนิดที่ไม่ใช่วัสดุจำพวกไดอะแมกเนติก

3) วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) เป็นวัสดุที่เมื่อถูกเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีสภาพแม่เหล็ก และเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปจะยังคงมีสภาพความเป็นแม่เหล็กอยู่ นั่นคือ วัสดุมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรในโครงสร้างอะตอม วัสดุจำพวกนี้มีค่า k เป็นค่าบวกและมีค่ามากกว่า 100 ขึ้นไป หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ เป็นวัสดุจำพวกพาราแมกเนติกที่มีค่า k มากกว่า 100 แร่ที่จัดว่าเป็นจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก คือ แร่ที่ประกอบด้วย ธาตุเหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) กาโดไลเนียม (Gadolinium, Gd) และไดสพรอเซียม (Dysprosium, Dy) วัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกแบ่งย่อยได้ 3 ประเภท คือ

3.1) เฟอร์โรแมกเนติกบริสุทธิ์ (Pure Ferromagnetism) วัสดุที่จัดในประเภทนี้จะมีทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กถาวรที่เรียงในโดเมนทุก ๆ โดเมน เรียงเป็นแนวขนานตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทำให้มีค่า k สูงและมีค่าบวก ในธรรมชาติส่วนใหญ่พบได้เฉพาะในธาตุเหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ (กาโดไลเนียม และไดสพรอเซียม พบน้อยมาก โดยไดสพรอเซียม อยู่ในสภาวะก๊าซ ส่วนกาโดไลเนียมสภาพความเป็นแม่เหล็กถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิห้อง จึงไม่นำมาพิจารณา) ถ้าหินมีเพียงส่วนประกอบของธาตุ เหล็ก นิกเกิล หรือ โคบอลต์ จะไม่จัดเป็นประเภทเฟอร์โรแมกเนติกบริสุทธิ์

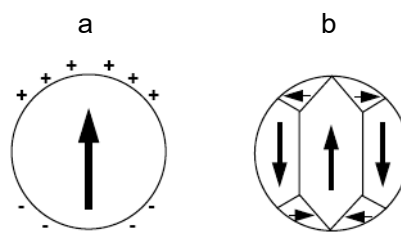
3.2) แอนติเฟอร์โรแมกเนติก (Antiferromagnetism) เป็นวัสดุที่ถึงแม้ว่าจะมีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรประกอบอยู่ในวัสดุ แต่ทิศทางการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กถาวรภายในแต่ละโดเมน มีการเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม และมีขนาดเท่ากัน จึงหักล้างกันหมด ทำให้มีค่า k เป็นศูนย์ แร่ที่มีคุณสมบัติประเภทนี้ คือ ฮีมาไทต์

3.3) เฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetism) เป็นวัสดุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กถาวรประกอบอยู่ในวัสดุ และทิศทางการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กถาวรภายในโดเมน มีการเรียงในทิศทางตรงกันข้าม แต่มีขนาดไม่เท่ากัน จึงทำให้มีอำนาจแม่เหล็ก และมีค่า k เป็นบวก วัสดุที่มีคุณสมบัติประเภทนี้ คือ จำพวกเฟอร์ไรต์ มีสูตรทางเคมีคือ $XOFe_2O_3$ เมื่อ X คือ Mn, Co, Ni, Cu, Mg, Zn เป็นต้น

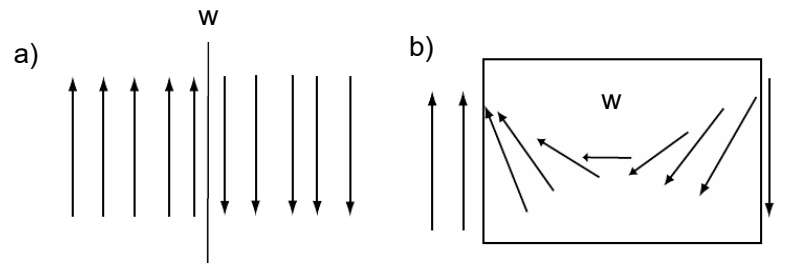
5. โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมน (Domain and Domain wall)

ในธรรมชาติเรามักพบว่าหินหรือแร่ธาตุธรรมชาติบางชนิดจะมีแม่เหล็กไทเซชันถาวร ซึ่งเกิดจากการที่วัสดุเหล่านี้มีสารแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกเป็นส่วนประกอบ สารแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเองเหล่านี้ประกอบด้วยแร่ในกลุ่มออกไซด์ เช่น แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) แร่กลุ่มเหล็กซัลไฟด์ (FeS) และแร่กลุ่มออกซีไฮดรอกไซด์ (FeOOH) แต่ที่สำคัญและพบบ่อย ๆ ได้แก่ แมกนีไทต์ ฮีมาไทต์ กิไทต์ และฟีโรไทต์ โดยแร่เหล่านี้จะประกอบด้วยหน่วยแม่เหล็กเล็กๆ เรียกว่า ไดโพลแม่เหล็ก (Magnetic dipole) กระจายอยู่ในเนื้อวัสดุ และอาจจะจับกันอยู่เป็นกลุ่มก้อน แต่ละกลุ่มนั้นเรียกว่า โดเมนแม่เหล็ก (Magnetic domain)

จากการศึกษาวงฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop) ของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแม่เหล็กไทเซชันเนื่องจากการเหนี่ยวนำวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งลักษณะเส้นกราฟจะไม่ซ้้ารอยเดิม จะพบว่าตัวแปรที่ทำให้เกิดกราฟลักษณะดังกล่าวมาจากโดเมนจำนวนมากในตัววัสดุ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมสมบัติแม่เหล็กต่าง ๆ ตามธรรมชาติของวัสดุนั้น หลักการของโดเมนแม่เหล็กสามารถอธิบายได้จากการเกิดขึ้นเองของแม่เหล็กไทเซชันในวัสดุ ซึ่งมีการแบ่งแยกขอบเขตของไดโพลแม่เหล็กภายในวัสดุออกเป็นโดเมนจำนวนมาก โดเมนที่พบอาจจะมียองศาประกอบของไดโพลแม่เหล็กที่มีการวางตัวในทิศเดียว หรืออาจจะมีการวางตัวในทิศทางแบบสลับ (ภาพที่ 1) โดยผลรวมของแม่เหล็กไทเซชันของโดเมนจะเท่ากับศูนย์ เนื่องจากการหักล้างกันหมดทางเวกเตอร์ของค่าแม่เหล็กไทเซชันที่เกิดขึ้น ความหนาของผนังโดเมน (ภาพที่ 2) ขึ้นอยู่กับจำนวนไดโพลแม่เหล็กในอะตอมที่มีการสร้างอำนาจชักจูงของโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละโดเมนที่อยู่ติดกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการหมุนของแม่เหล็ก (magnetic spin) ระหว่างโดเมน



ภาพที่ 1 โดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมนในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก a) ทิศทางของแม่เหล็กไทเซชันตกค้างรวมในวัสดุ b) ทิศทางของแม่เหล็กไทเซชันตกค้างในแต่ละโดเมน ซึ่งมีผนังโดเมนกันอยู่ (Butler, 1992)



ภาพที่ 2 รูปแบบผนังโดเมนแม่เหล็ก a) การกลับทิศของแมกนีไทเซชันตกค้างในโดเมนแม่เหล็กของอะตอมที่อยู่ติดกัน b) การกลับทิศภายในผนังโดเมน w คือ ผนังโดเมน (Tauxe, 2005)

สมบัติต่าง ๆ ทางแม่เหล็กของวัสดุ รวมทั้งการเกิดวงฮีสเทอรีซิส และแมกนีไทเซชันตกค้างในวัสดุใด ๆ จะขึ้นอยู่กับขนาดของเกรนแม่เหล็ก ซึ่งเกี่ยวข้องกับโดเมนแม่เหล็กของวัสดุ เราจำแนกประเภทของโดเมนแม่เหล็กออกเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกโดเมน โดเมนเดี่ยว โดเมนเทียม และมัลติโดเมน โดย

1) ซูเปอร์พาราแมกเนติกโดเมน (Super-paramagnetic; SPM) เกิดจากการก่อตัวของโมเลกุลแม่เหล็ก 1 โมเลกุล ภายใต้สนามแม่เหล็ก เกิดเป็นวัสดุแม่เหล็กซึ่งมีค่าแมกนีไทเซชันตกค้างที่ไม่เสถียร จนเข้าสู่สภาวะที่เป็นซูเปอร์พาราแมกเนติก ซึ่งมีพฤติกรรมที่เกิดจากการวางตัวในสนามแม่เหล็กคล้ายกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก แต่มีค่า Relaxation time (เวลาที่ค่าอำนาจแม่เหล็กตกค้างลดลง $1/e$ จากค่าเดิม) น้อยกว่ามาก รวมทั้งมีค่าแมกนีไทเซชันและค่า k สูงกว่าวัสดุพาราแมกเนติก เมื่อขนาดเม็ดตะกอนมีขนาดใหญ่อขึ้นค่าความเป็นแม่เหล็กของวัสดุซูเปอร์พาราแมกเนติกจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า k จะลดลง โดยขนาดเม็ดตะกอนจะโตขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง จากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงจากซูเปอร์พาราแมกเนติกไปเป็นโดเมนเดี่ยว

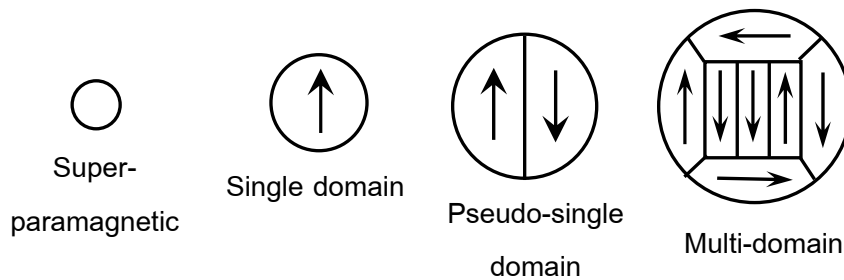
2) โดเมนเดี่ยว (Single domain; SD) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดเม็ดตะกอนของ SPM ที่มีขนาดใหญ่อขึ้นและมีการเกิดขั้วไดโพลขึ้นในโดเมน โดยไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีทิศของไดโพลเพียงทิศเดียว ค่าแมกนีไทเซชันตกค้างเริ่มมีความเสถียรมากขึ้น

3) โดเมนเทียม (Pseudo-single domain; PSD) เกิดจากการโตขึ้นของ SD เป็นคู่โดเมนเทียม มีทิศทางของโมเมนต์ไดโพลแม่เหล็กที่ตรงข้ามกัน โดยมีผนังโดเมนเป็นตัวกั้นระหว่างไดโพลทั้งสอง ค่าความเป็นแม่เหล็กจะน้อยมาก เนื่องจากไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกัน

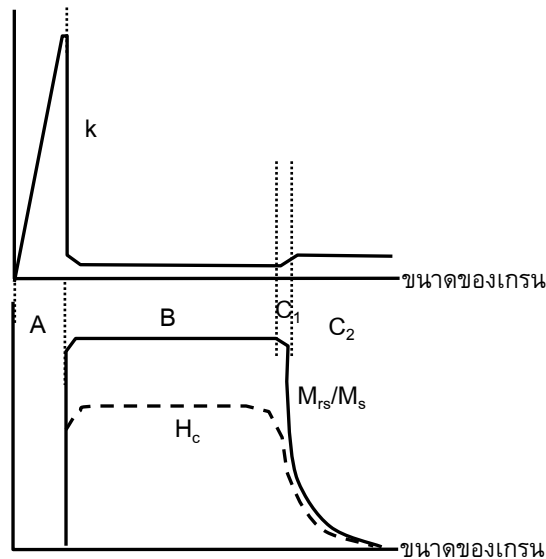
4) มัลติโดเมน (Multi-domain; MD) เกิดจากการโตขึ้นของคู่ PSD และมีการจับตัวกันเป็นหลาย ๆ โดเมน จนมีขนาดที่ใหญ่อขึ้น โดยการวางตัวของคู่ไดโพลจะมีลักษณะที่

เป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบปะปนกัน โดยมีผนังโดเมนเป็นตัวกั้นระหว่างไดโพลทั้งหมด ค่าความเป็นแม่เหล็กของมัลติโดเมนจะเป็นค่าลัพท์ของทั้งระบบ

โดยทั่วไปเมื่อเม็ดแรกกำเนิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีโดยเริ่มจาก 1 โมเลกุล หรือ 1 ไดโพล เป็นหลาย ๆ โมเลกุล หรือหลาย ๆ ไดโพล เข้าสู่สภาวะ SPD คือมีค่า k สูงแต่ไม่มีแมกนีไทเซชันตกค้าง จากสภาวะ SPD เมื่อเม็ดโตเมนโตขึ้นจนเข้าสู่อานโดเมนเดี่ยว ตรงนี้ค่า k จะลดลงแต่ยังคงมีค่าอยู่ และเริ่มแสดงอำนาจแม่เหล็กถาวรหรือแมกนีไทเซชันตกค้าง เมื่อเม็ดโตขึ้นก็จะเปลี่ยนเป็นโดเมนเทียม และมัลติโดเมน ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4



ภาพที่ 3 ขนาดของโดเมนประเภทต่าง ๆ ลูกศรแสดงลักษณะของโมเมนต์แม่เหล็กในแต่ละโดเมน



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่า k ของโดเมนที่มีขนาดต่างกัน คือซูเปอร์พาราแมกเนติก (A), โดเมนเดี่ยว (B), โดเมนเทียม (C_1) และมัลติโดเมน (C_2) และแมกนีไทเซชันตกค้างที่สารแม่เหล็กขนาดต่างกัน (O'Reilly, 1984)

6. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสถานะความเป็นแม่เหล็กของวัตถุ

อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้วัตถุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกที่มีสภาพเป็นแม่เหล็ก หดสภาพความเป็นแม่เหล็ก เรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_C) ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดจะมี T_C แตกต่างกันไป เช่น โคบอลต์ เหล็ก กาโดไลเนียม และไดสพรอเซียม มี T_C ประมาณ 1,115 - 1,131 °C, 770 °C, 17 - 19 °C และ -185 °C ตามลำดับ สมมติกรณีของเหล็ก เมื่ออยู่ในสถานะที่มีความร้อนมากกว่า 770 °C โมเมนต์แม่เหล็กถาวรในอะตอมของเหล็กจะหมดไป แต่เมื่อเหล็กกลับสู่สถานะอุณหภูมิต่ำกว่า 770 °C จะเกิดการจัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็กถาวรในอะตอมใหม่ โดยจะเรียงไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกในขณะที่เย็นตัว และจะมีสภาพคงการเรียงตัวเช่นนี้ตลอดไป จนกว่าจะอยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิก่อนกว่าอุณหภูมิคูรี

สำหรับวัตถุจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกและแอนติเฟอร์โรแมกเนติก อุณหภูมิที่สูงขึ้นจนทำให้วัตถุจำพวกนี้หมดสภาพความเป็นแม่เหล็ก เรียกว่า อุณหภูมิเนล (Neel temperature) เช่น ฟิโรไทต์ เป็นแร่จำพวกเฟอร์โรแมกเนติก มีอุณหภูมิเนลที่ 320 °C

7. หน่วยที่ใช้ในการศึกษา

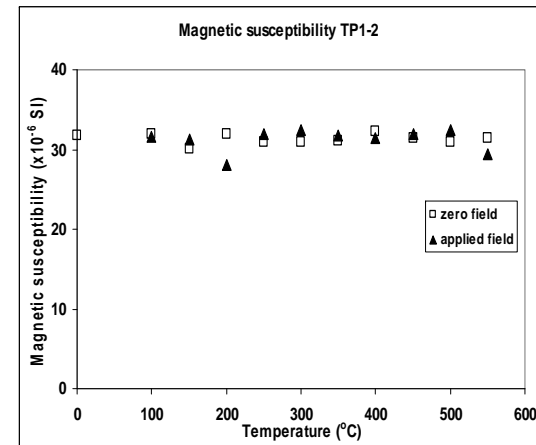
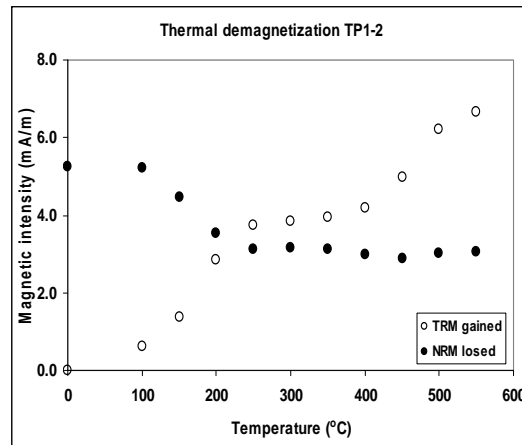
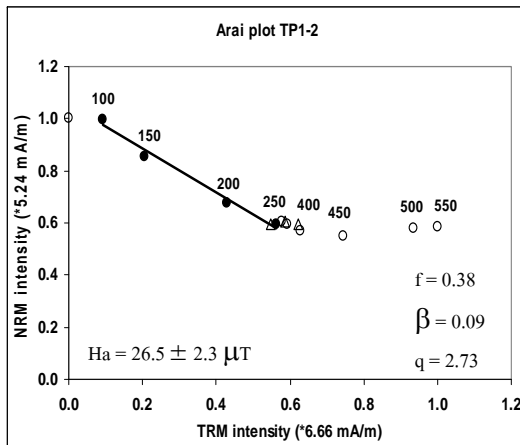
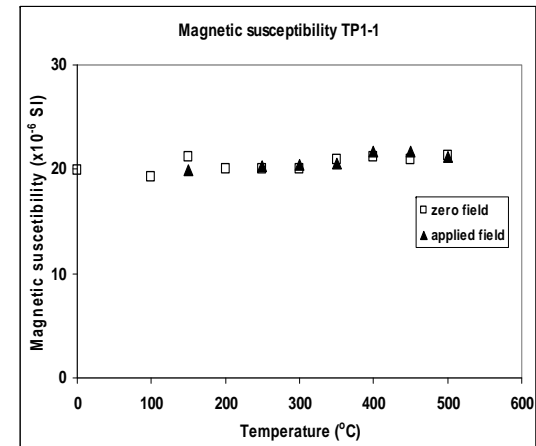
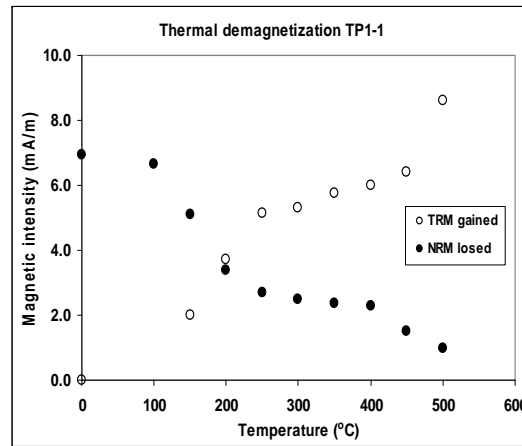
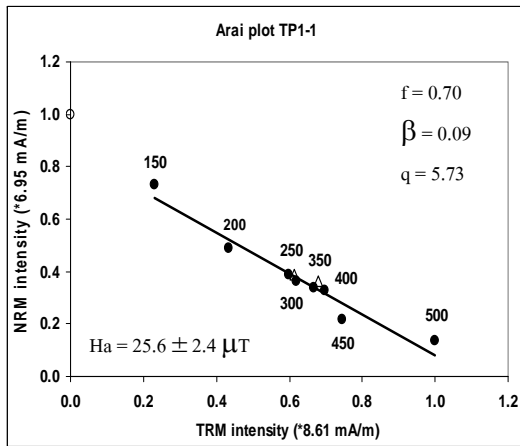
หน่วยทั่วไปที่ใช้ในการศึกษาปริมาณทางแม่เหล็กประกอบด้วย 2 หน่วยหลัก คือ หน่วยเอสไอ (SI) และ หน่วยซีจีเอส (cgs หรือ emu) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันดังตารางที่ 3

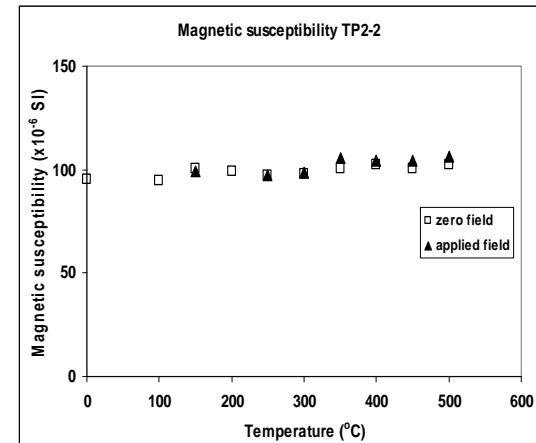
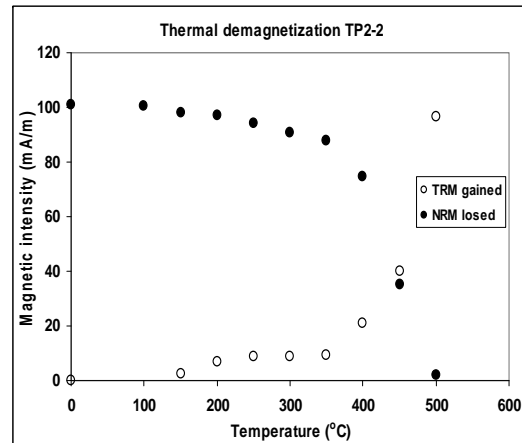
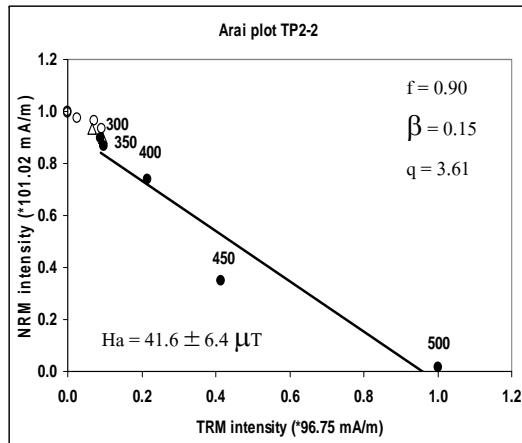
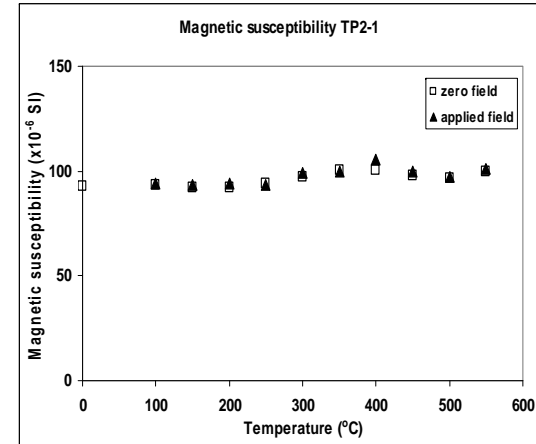
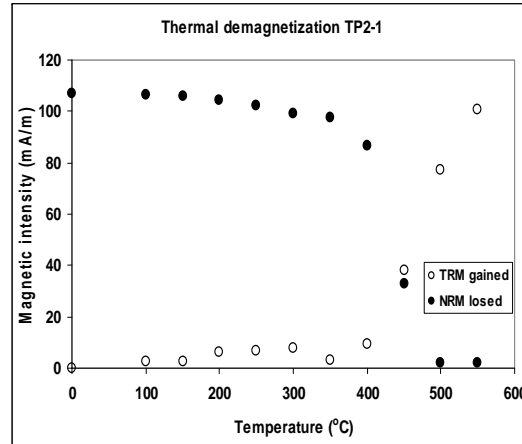
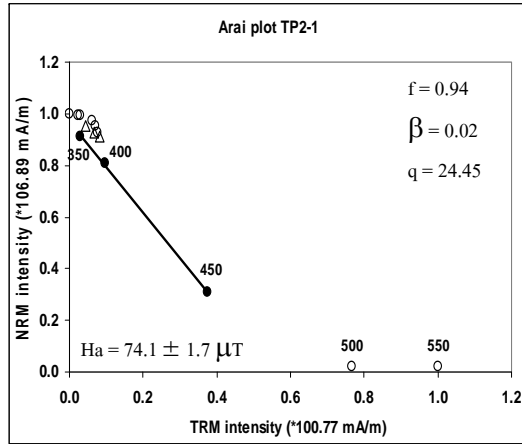
ตารางที่ 3 หน่วยที่ใช้ในการศึกษาปริมาณทางแม่เหล็กของระบบ SI และ cgs

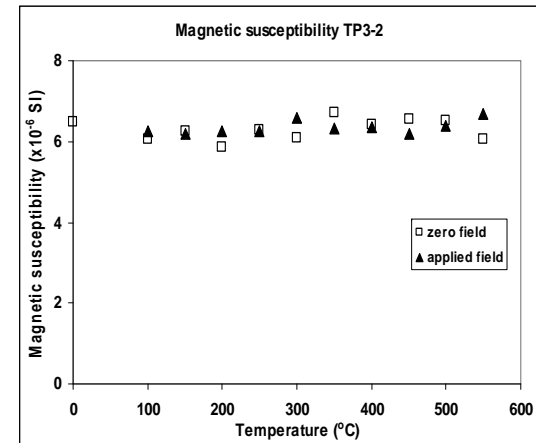
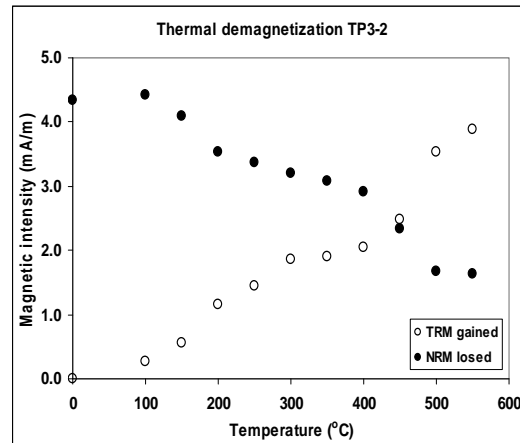
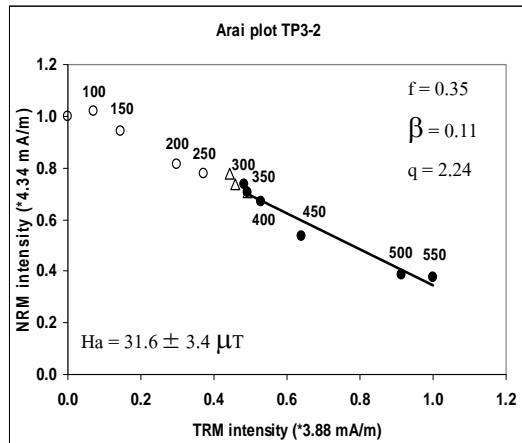
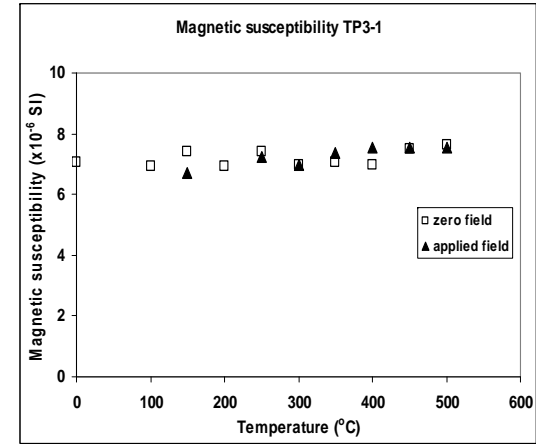
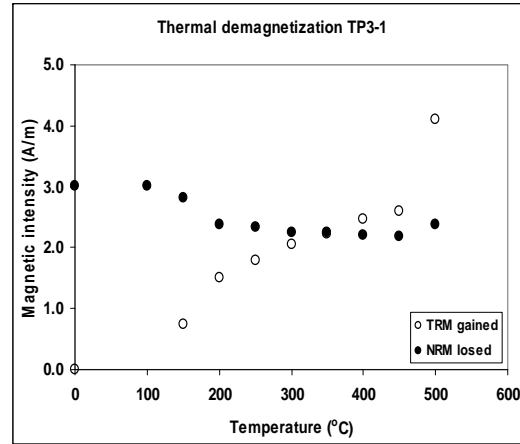
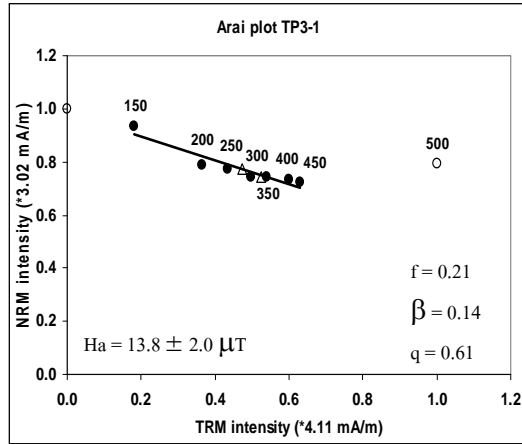
| ปริมาณ | สัญลักษณ์ | ระบบ SI | ระบบ cgs |
|--|-----------|---|---|
| สนามแม่เหล็ก, ความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field, magnetic intensity) | B | 1 tesla (T) = 1 Wb/m ² = 1 N/A-m | = 10 ⁴ gauss = 10 ⁹ gamma = 10 ⁴ maxwell/cm ² |
| ความแรงสนามแม่เหล็ก (magnetizing field) | H | 1 A/m | = 4π x 10 ⁻³ oersted |
| การเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก, ความเข้มของการเป็นแม่เหล็ก (magnetization, magnetization intensity) | M | 1 A/m | = 4π x 10 ⁻³ oersted |
| สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) | k | ไม่มีหน่วย | ไม่มีหน่วย = 4πk (SI) |

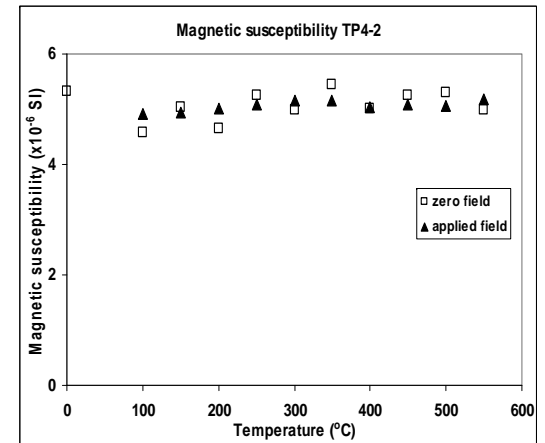
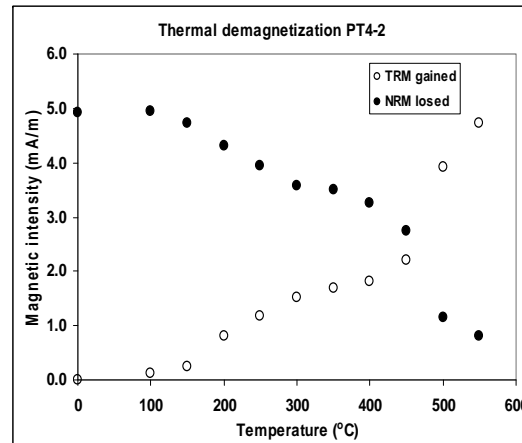
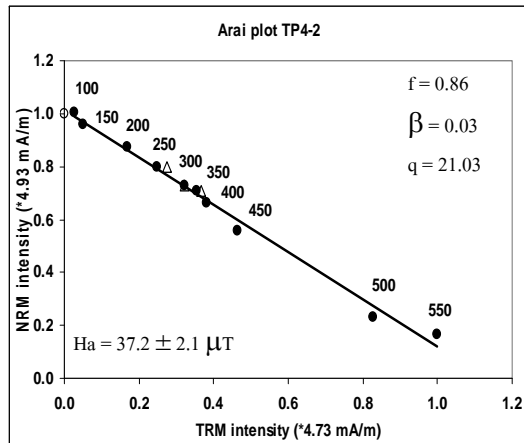
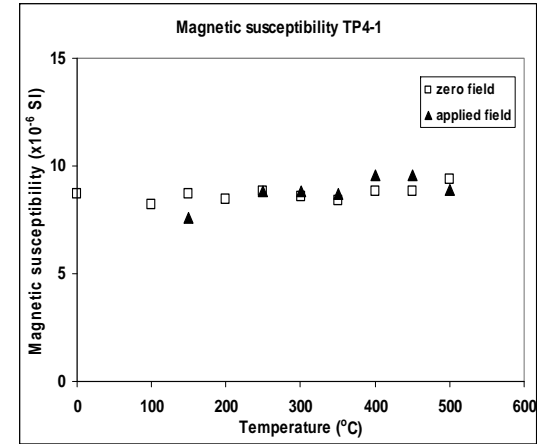
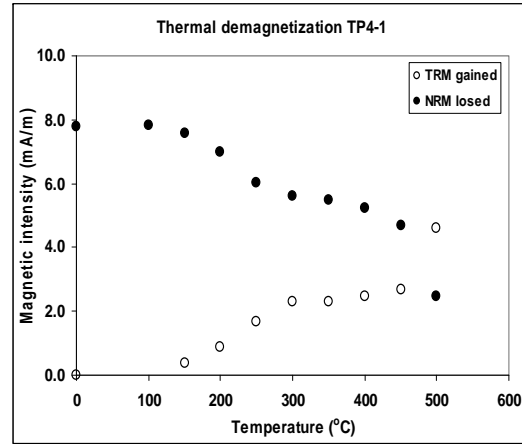
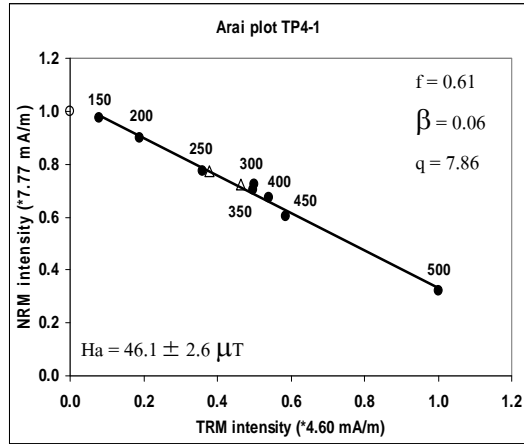
ภาคผนวก ข

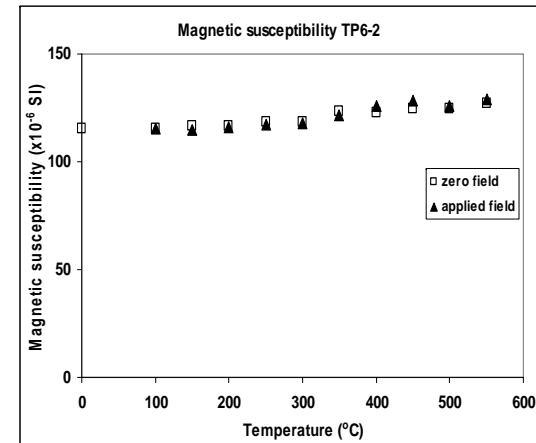
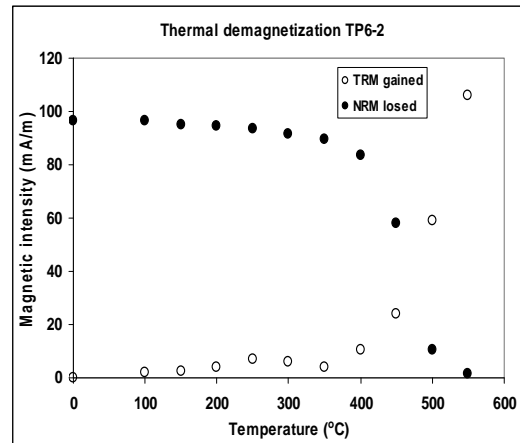
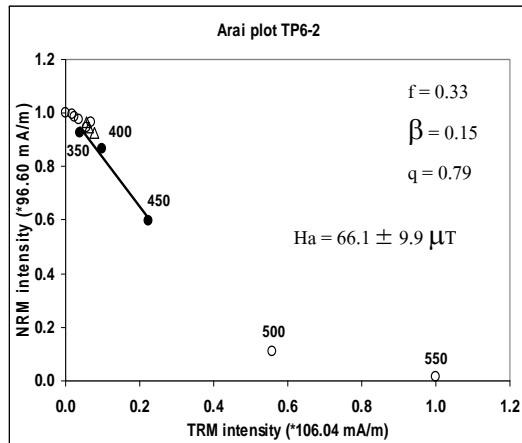
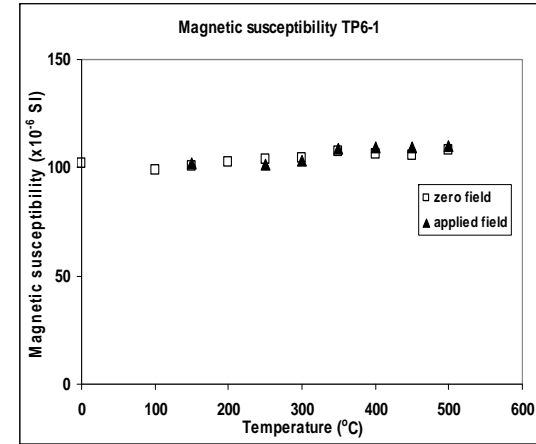
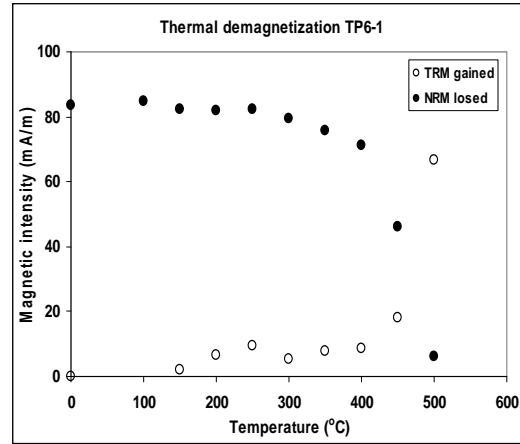
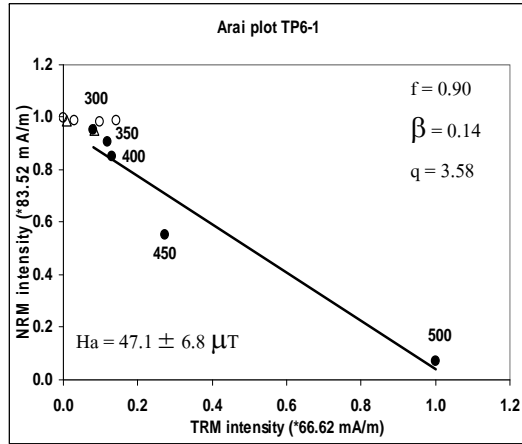
กราฟ Arai plot, Thermal demagnetization และ Magnetic susceptibility

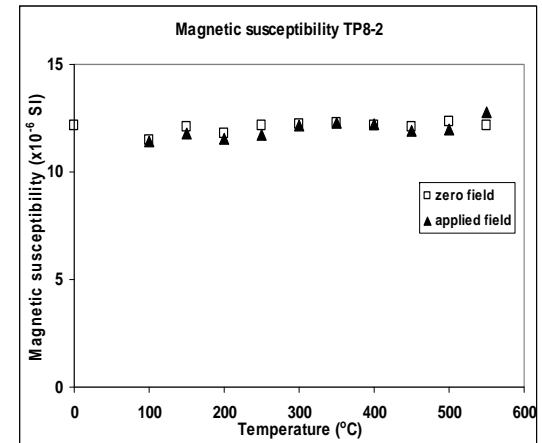
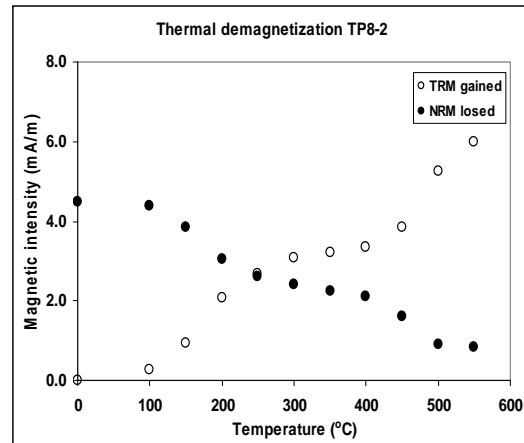
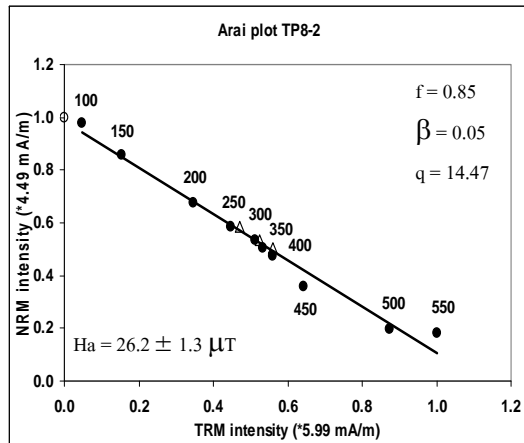
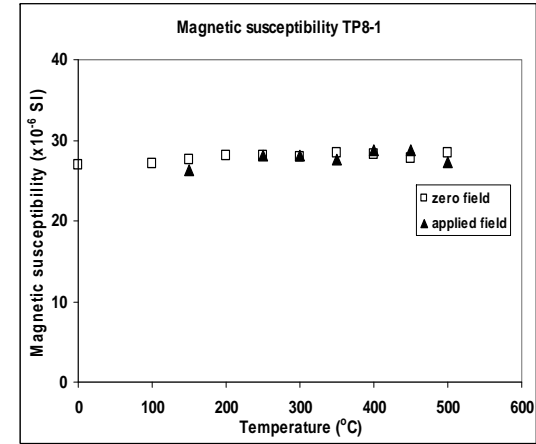
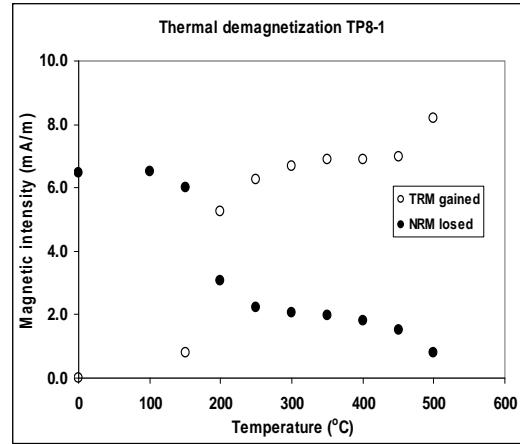
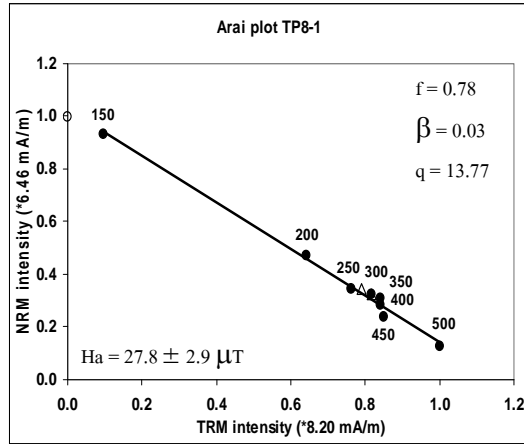


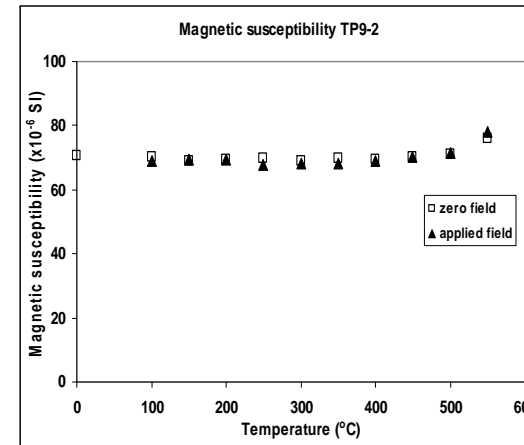
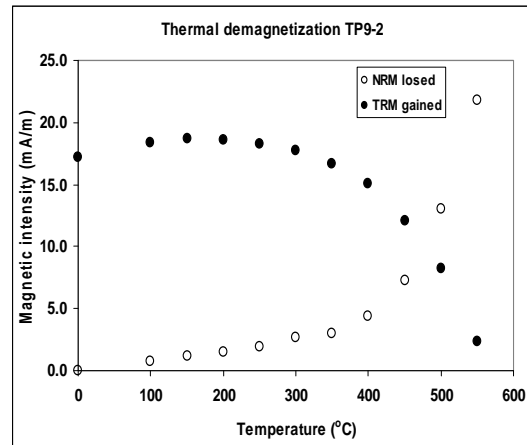
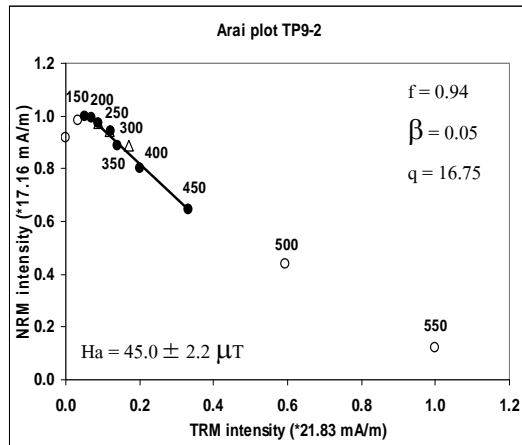
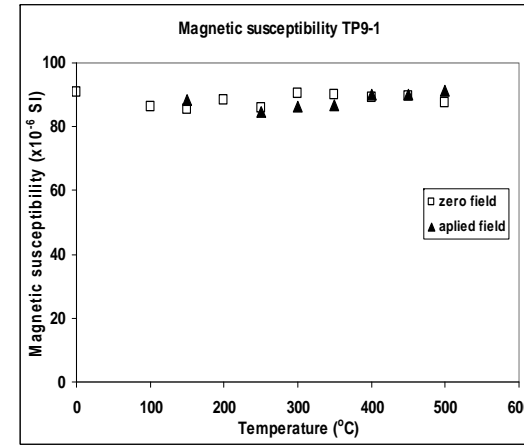
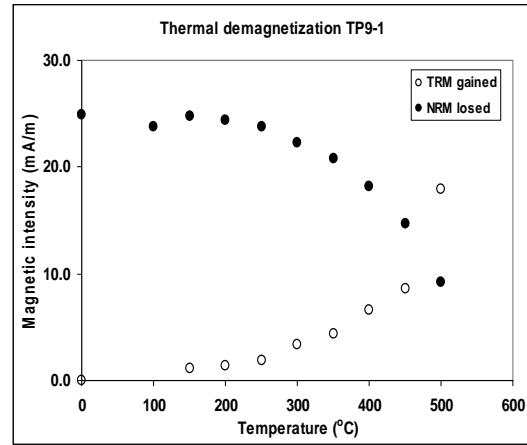
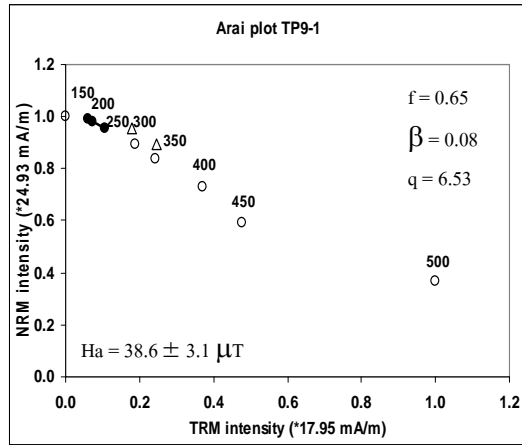


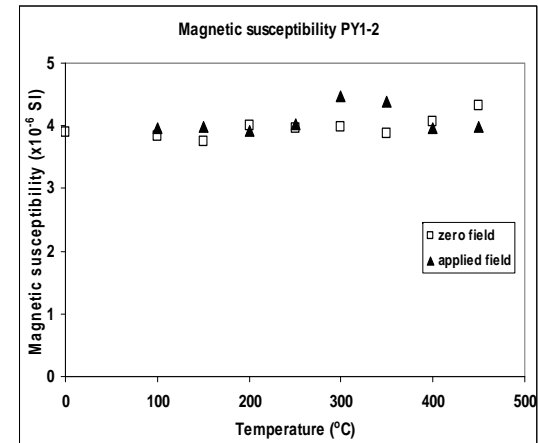
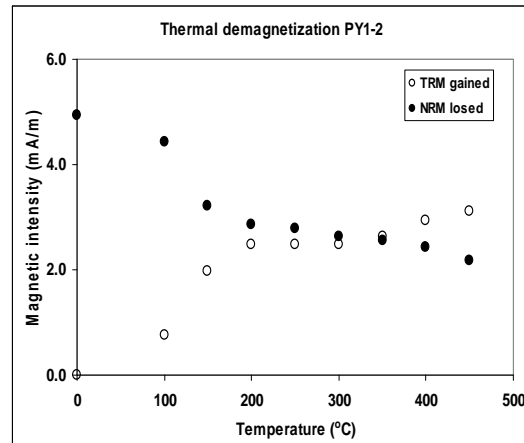
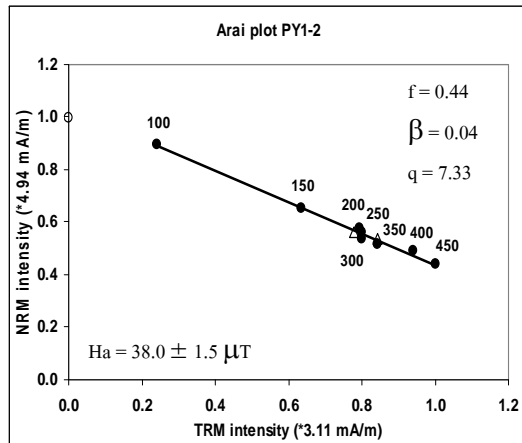
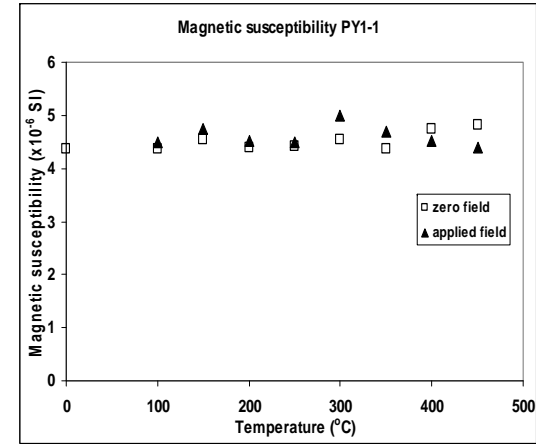
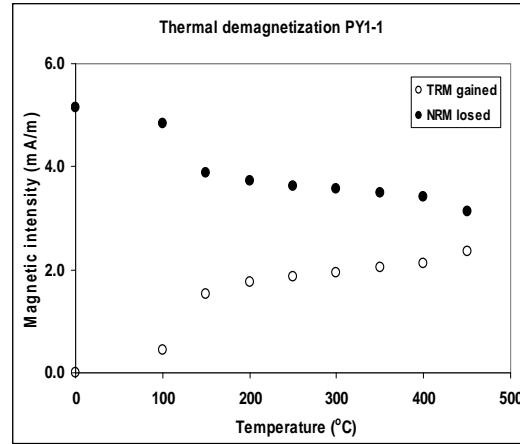
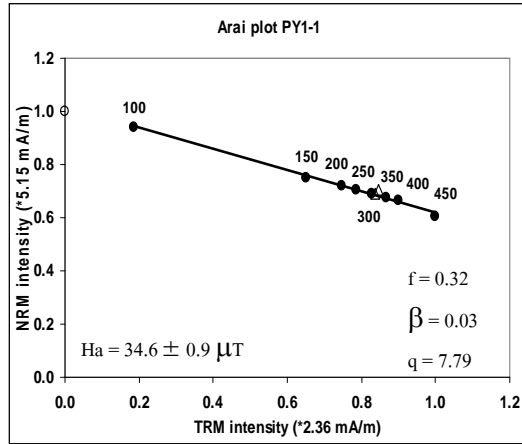


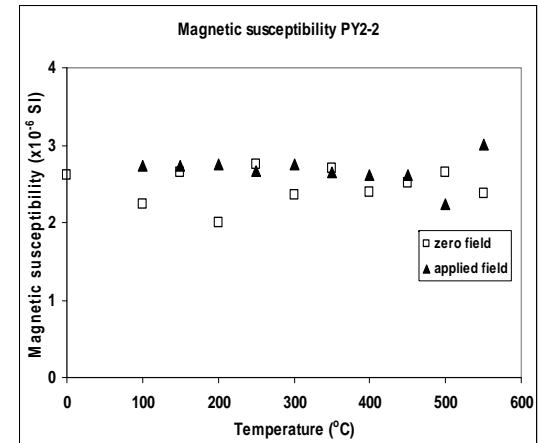
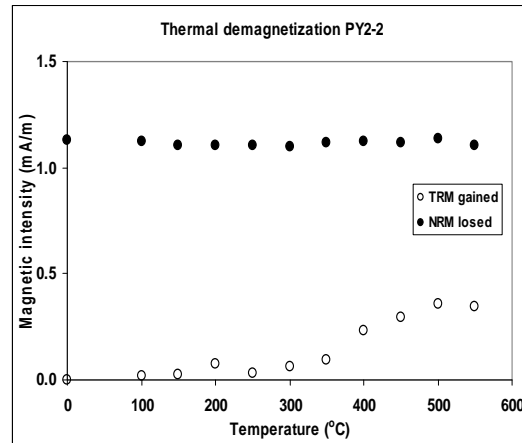
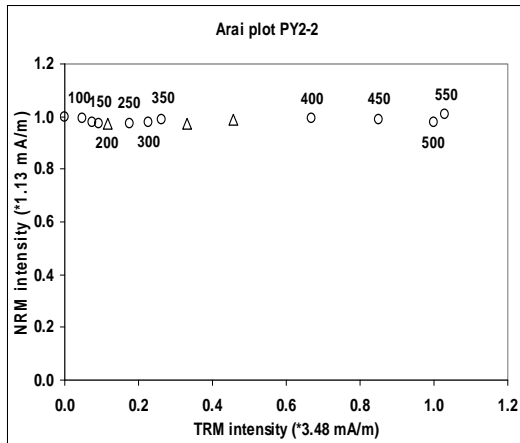
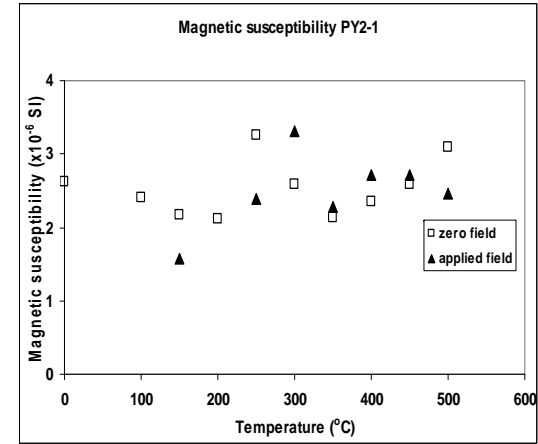
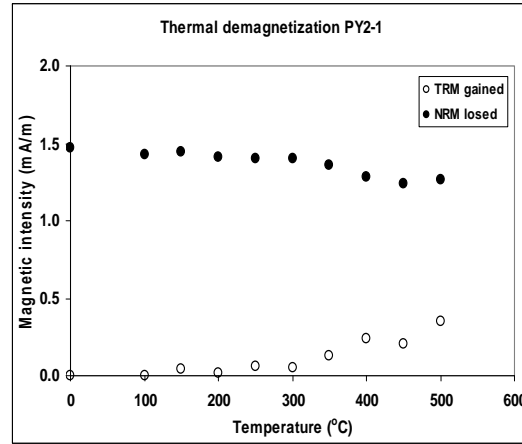
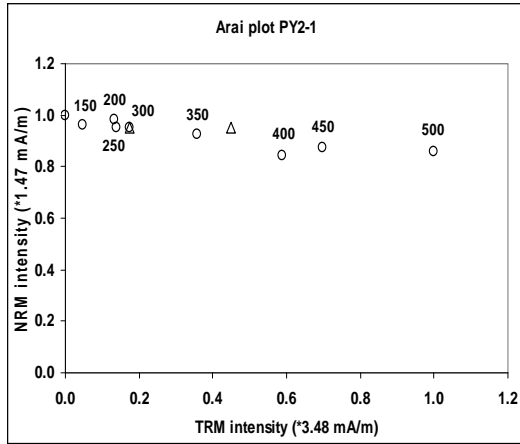


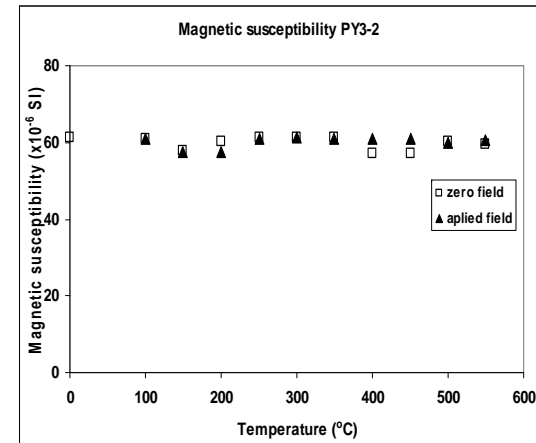
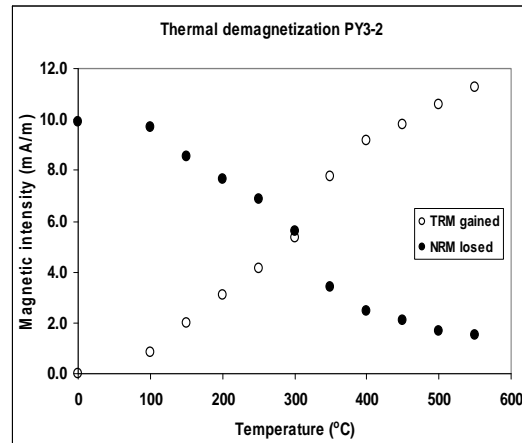
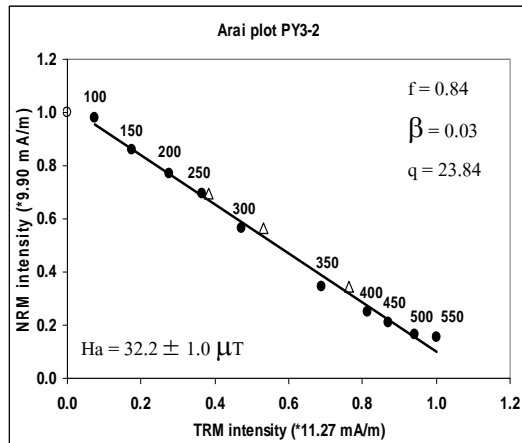
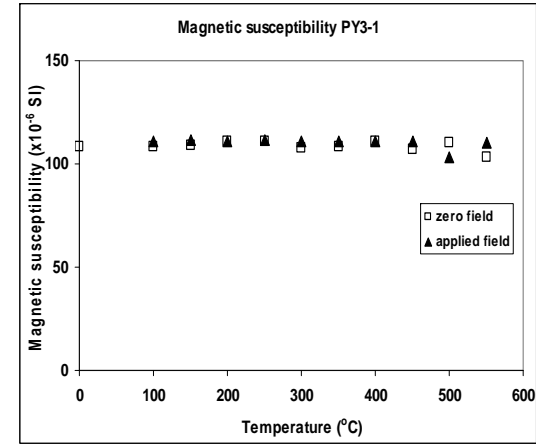
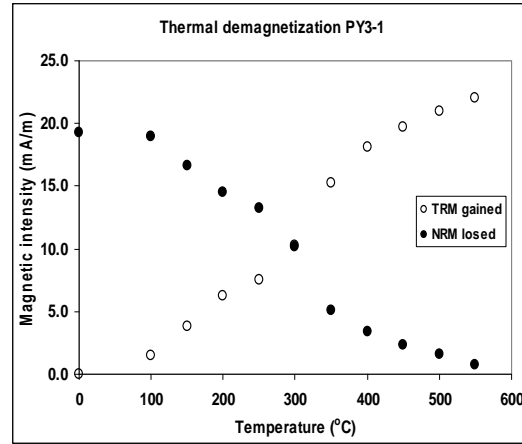
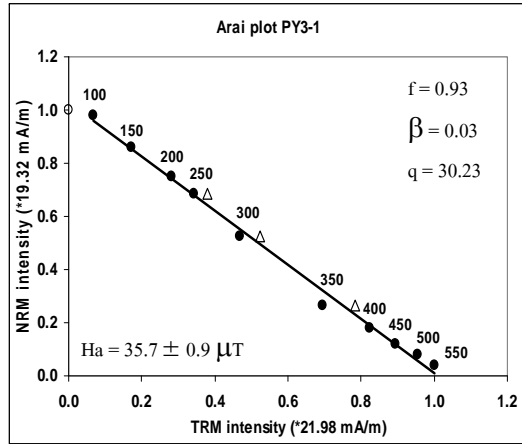


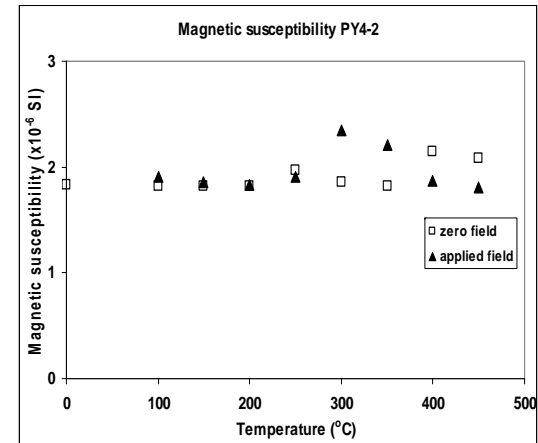
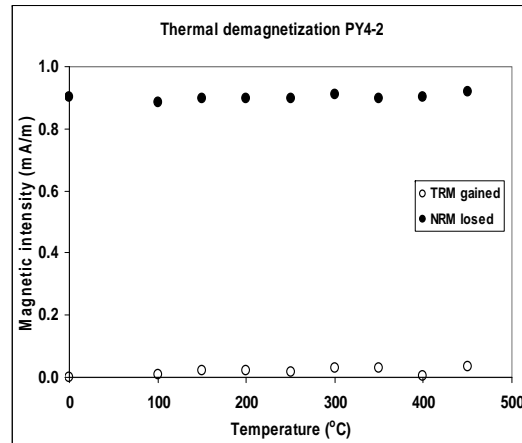
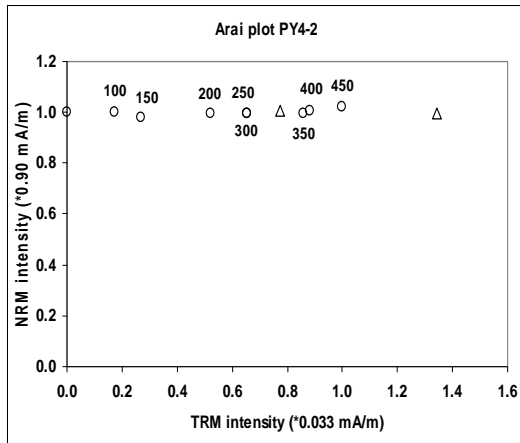
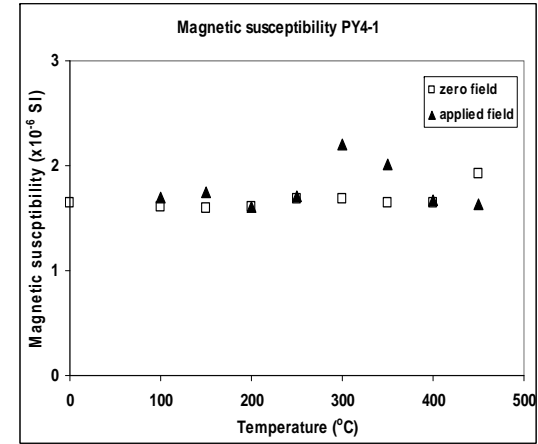
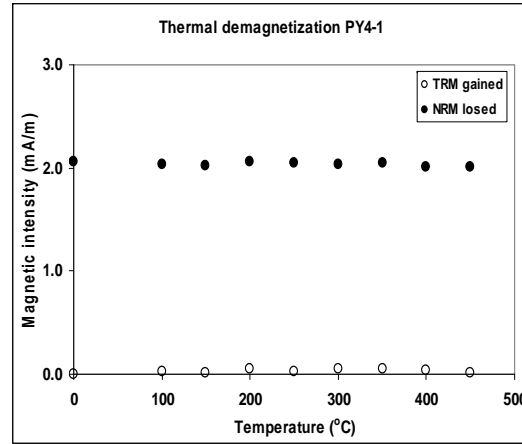
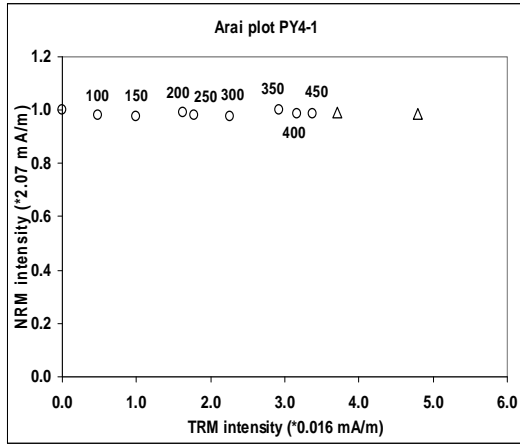


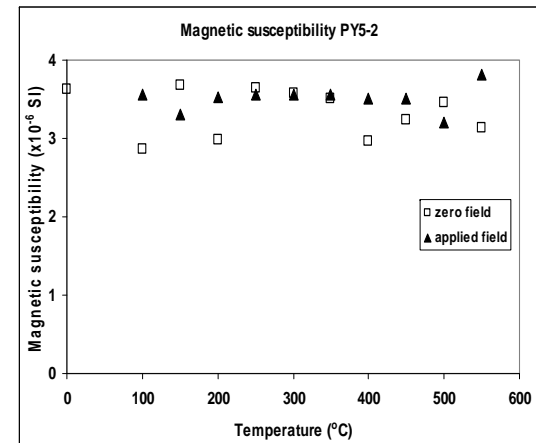
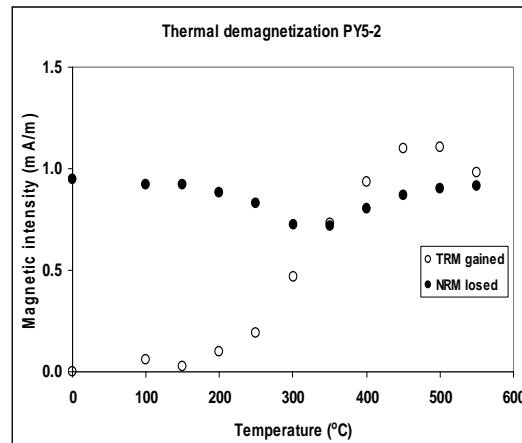
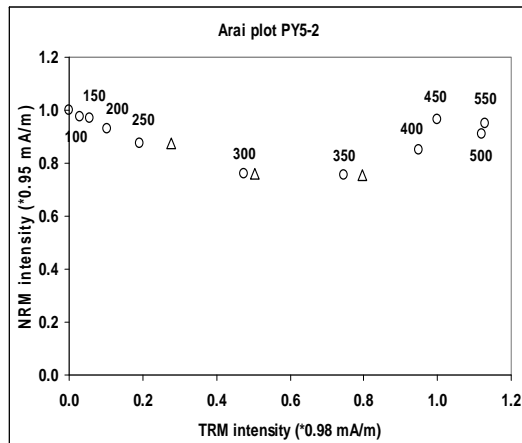
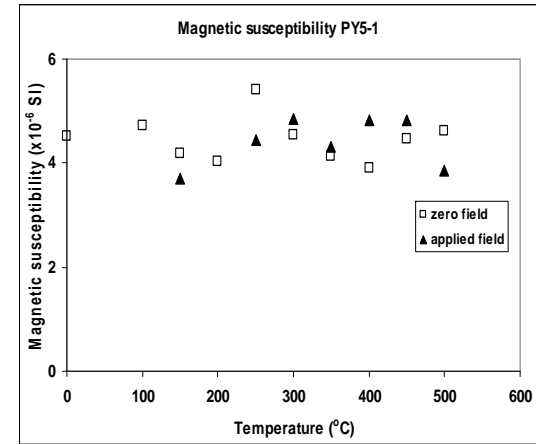
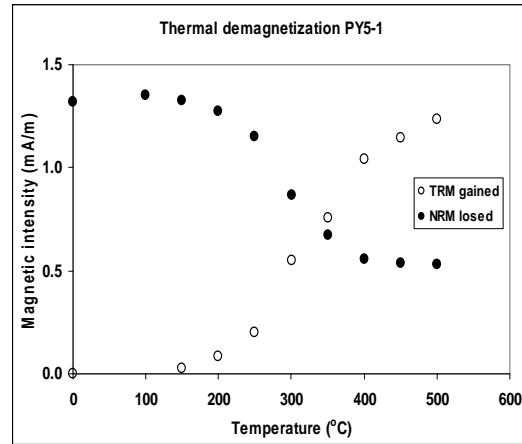
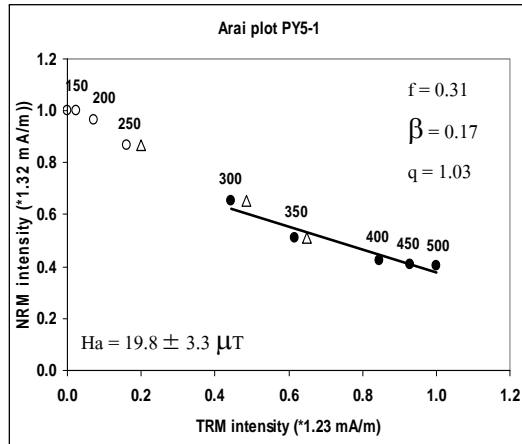


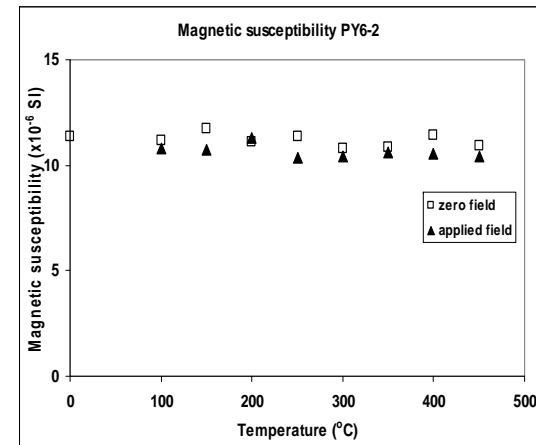
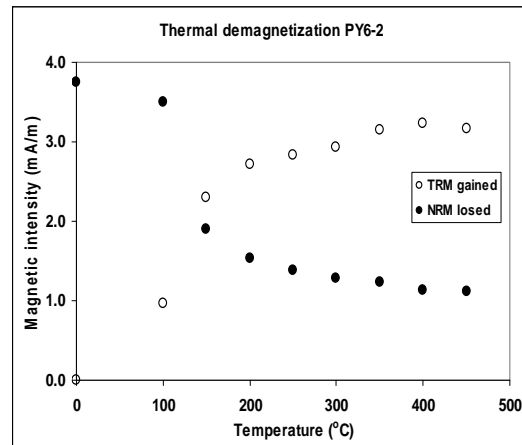
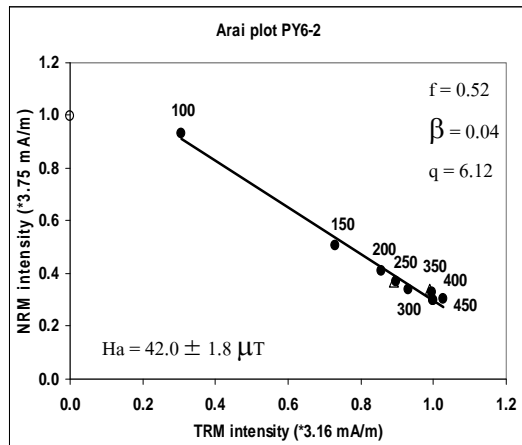
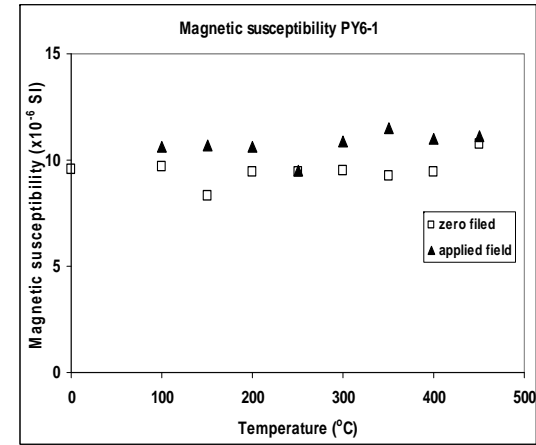
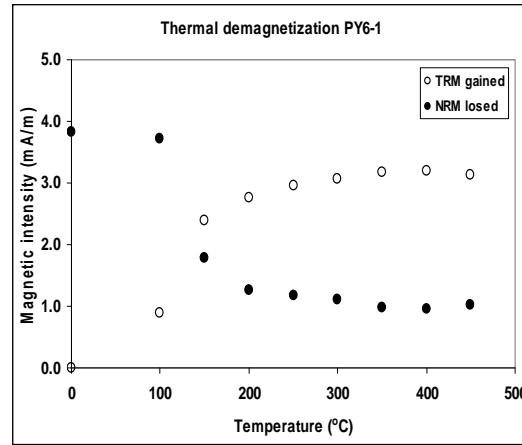
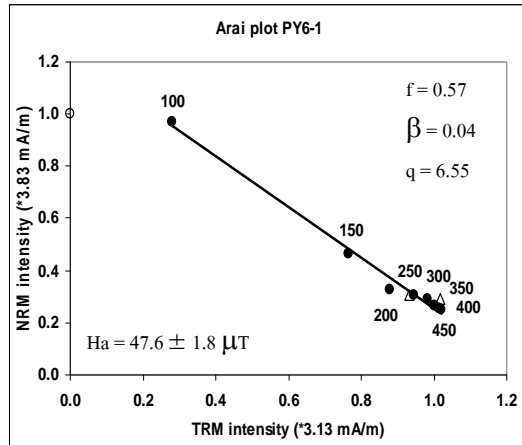


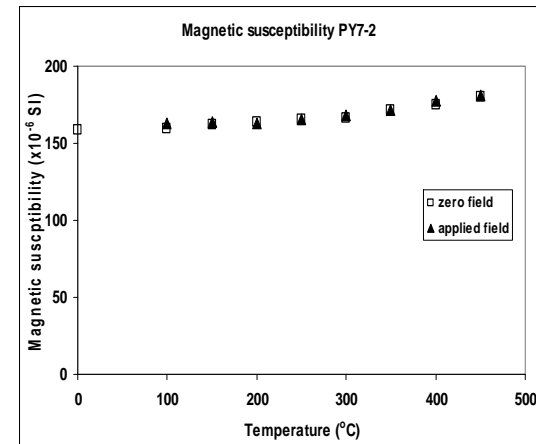
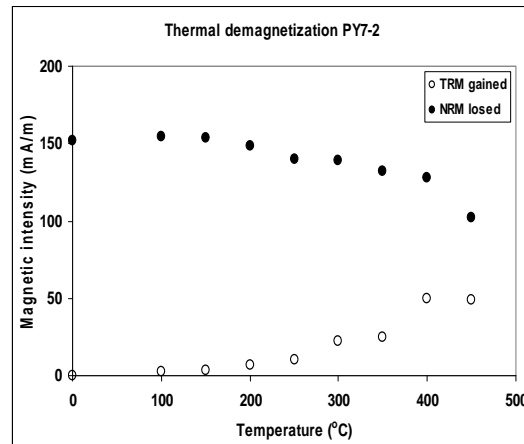
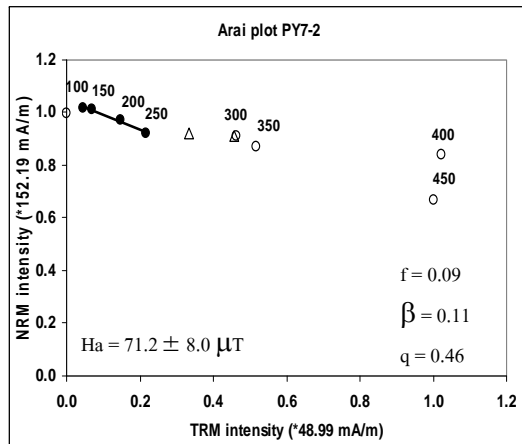
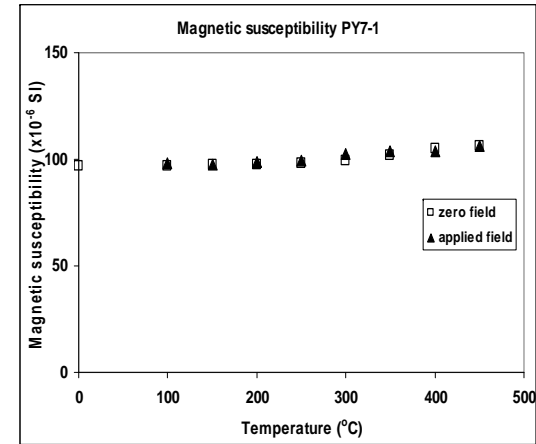
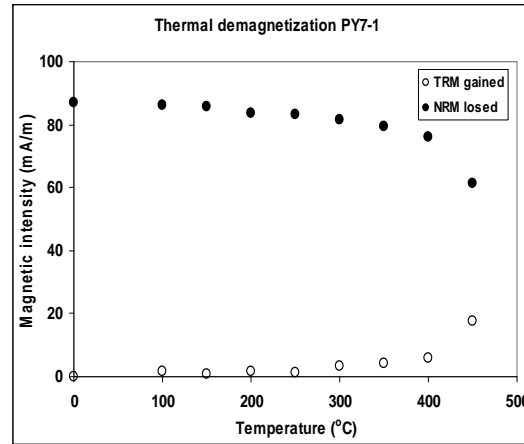
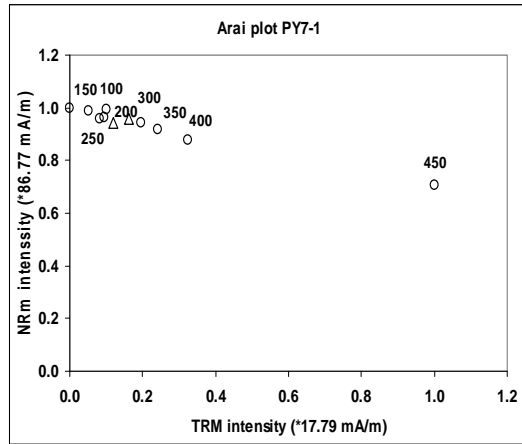


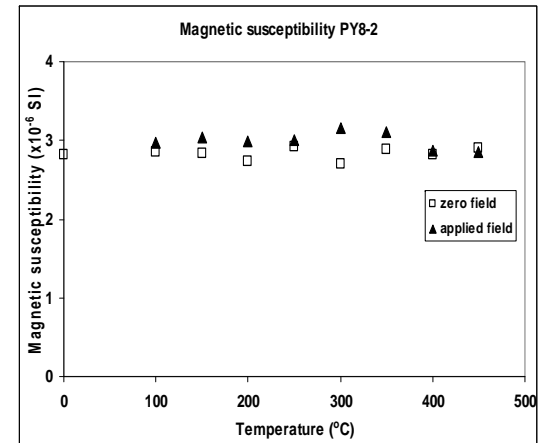
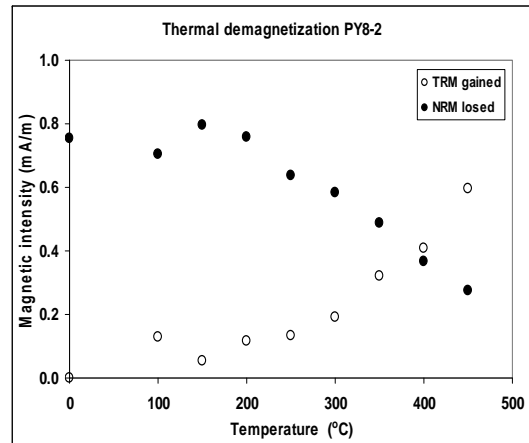
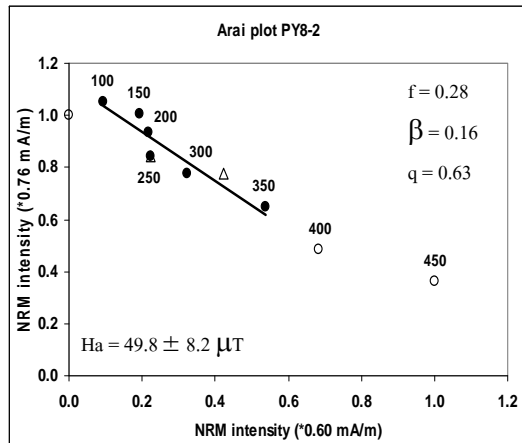
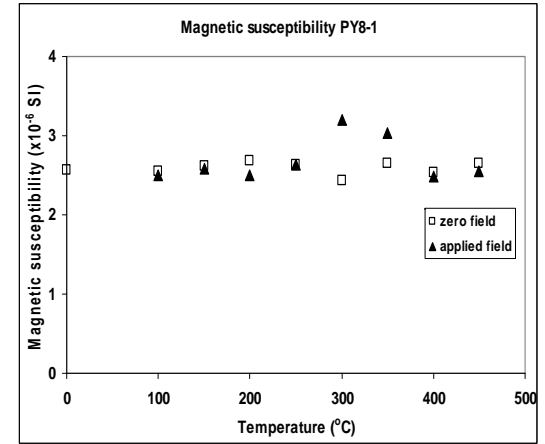
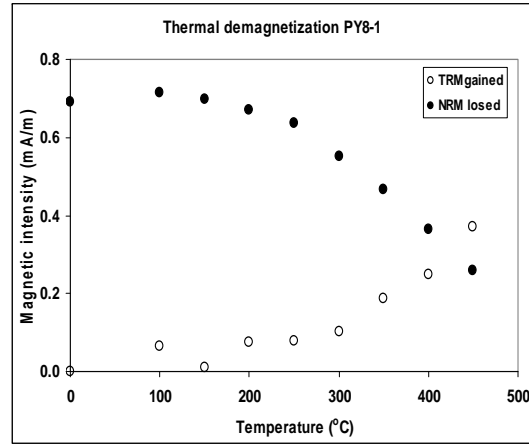
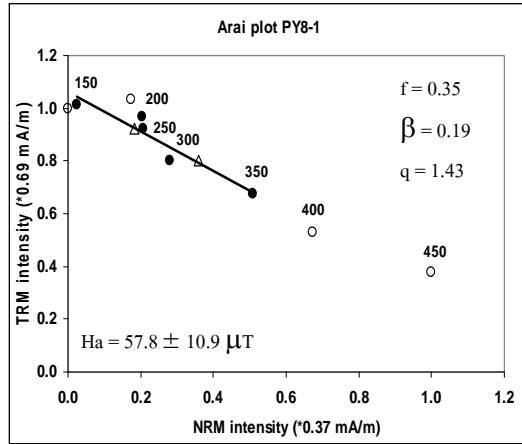


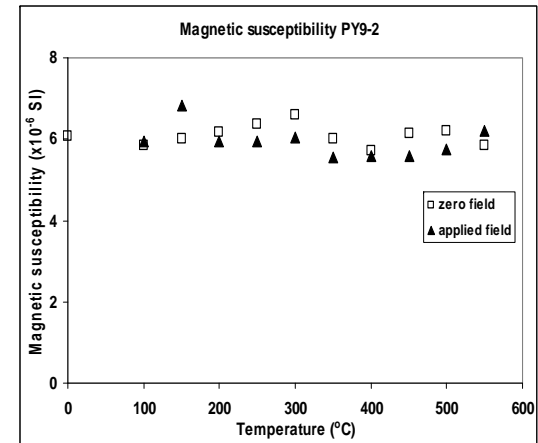
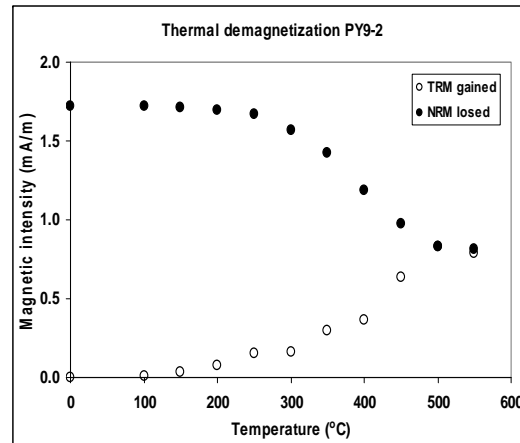
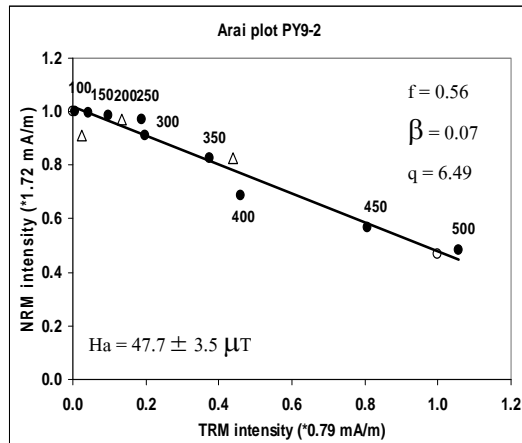
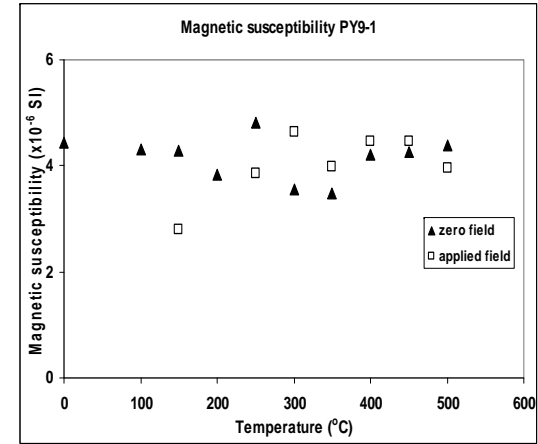
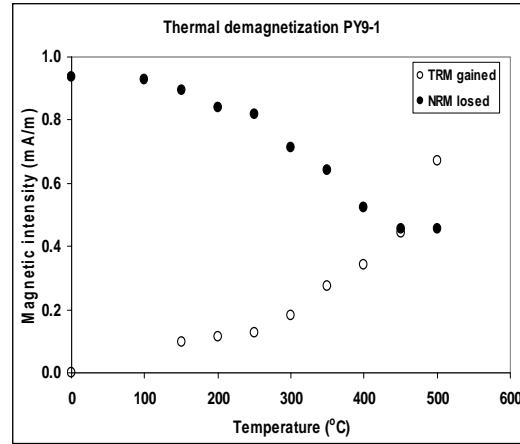
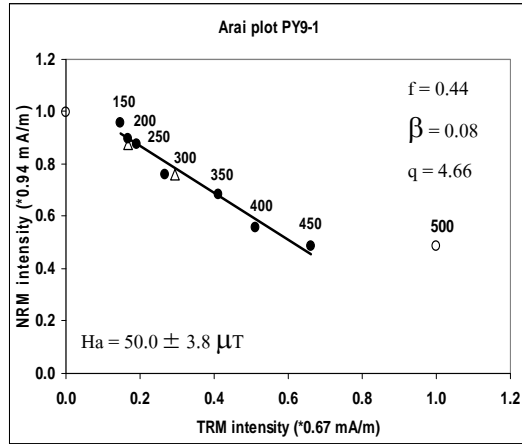


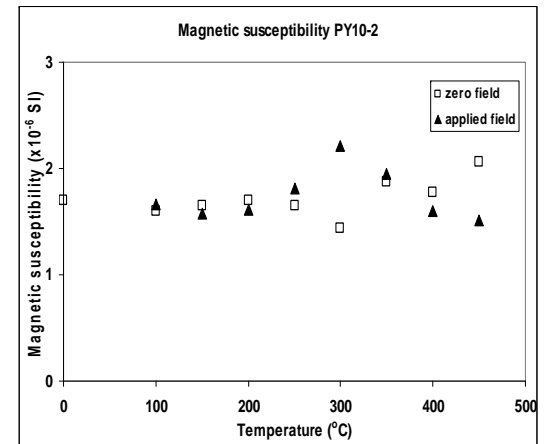
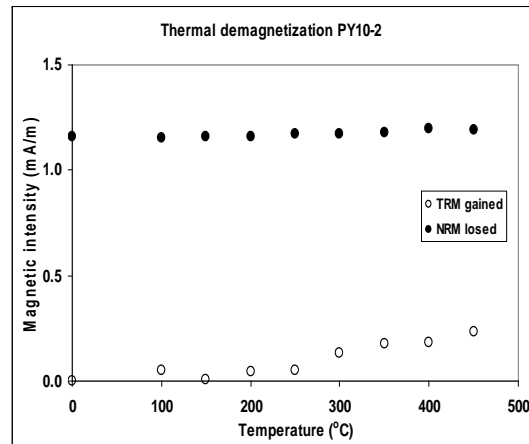
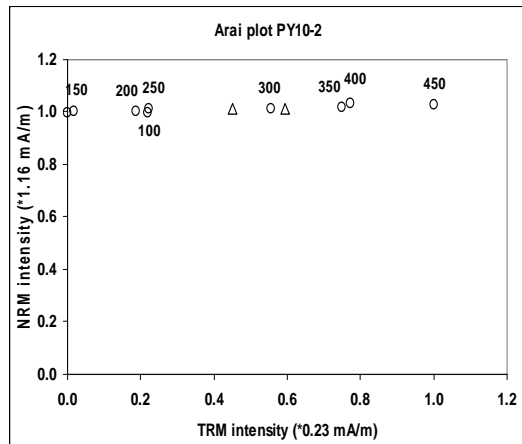
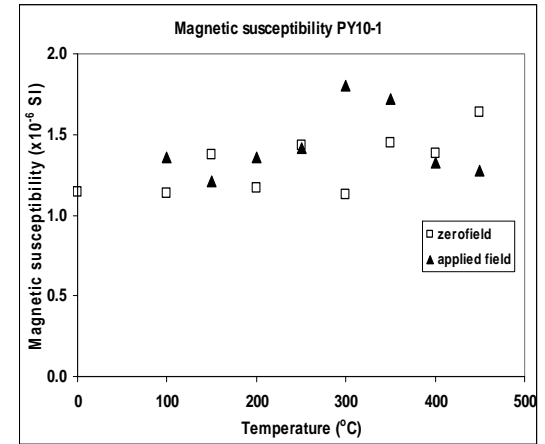
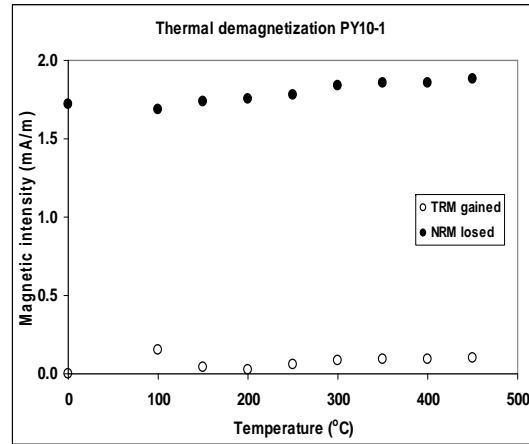
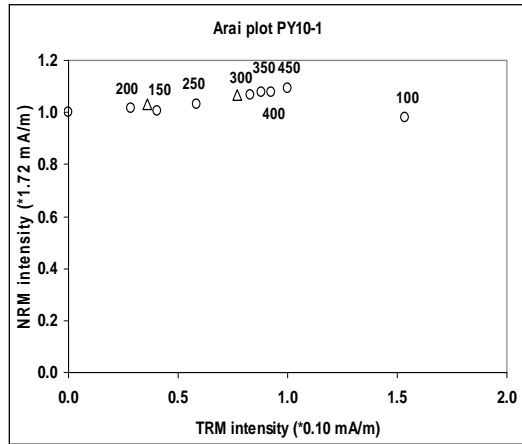


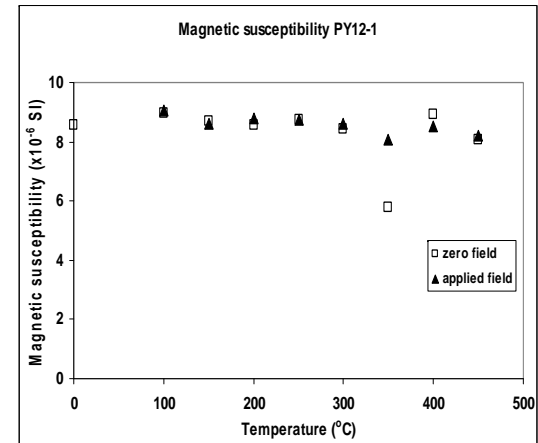
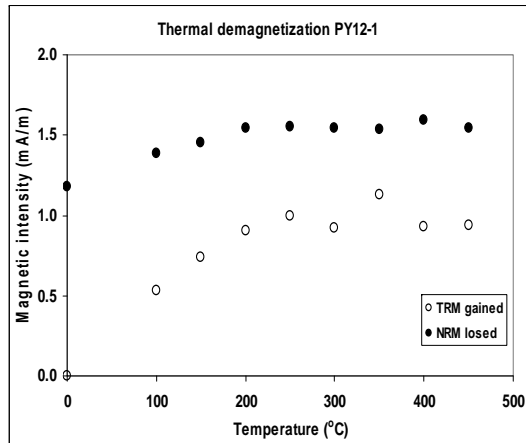
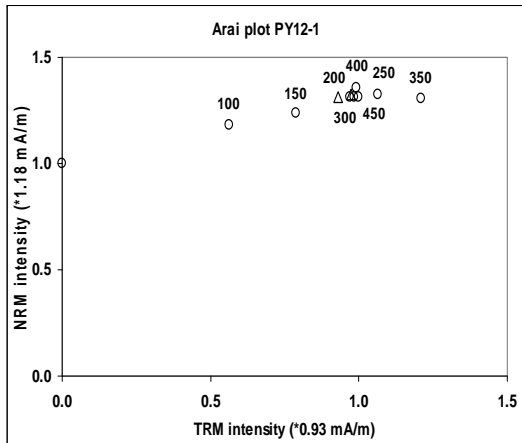
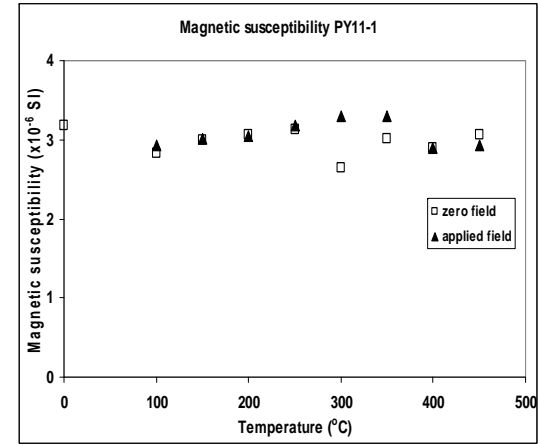
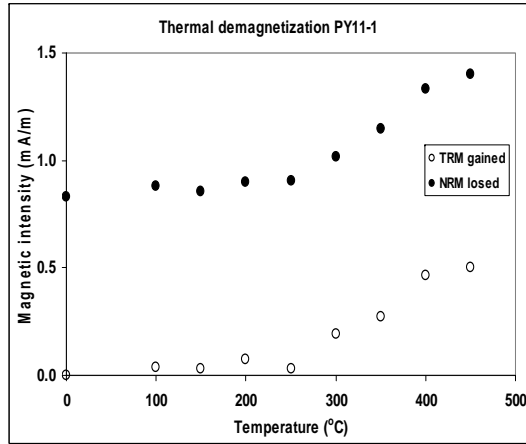
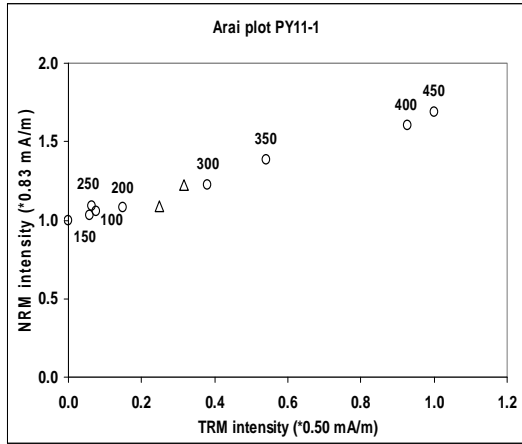


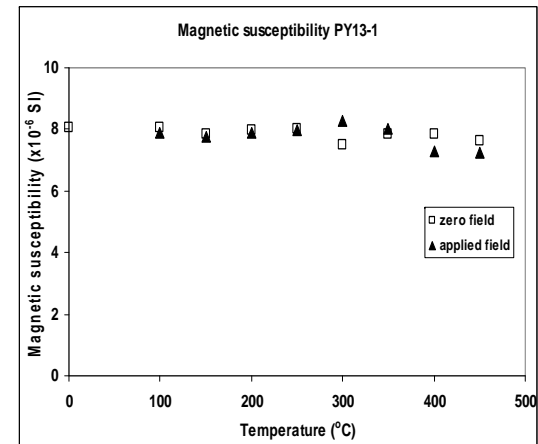
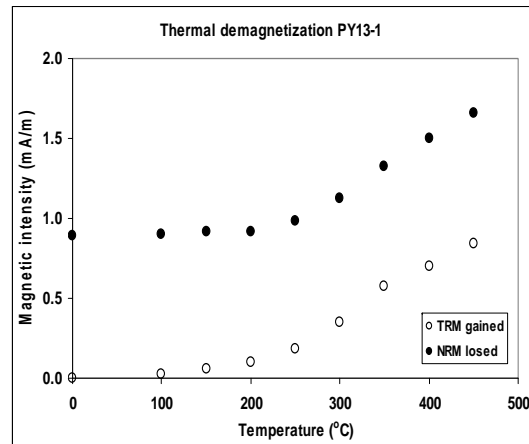
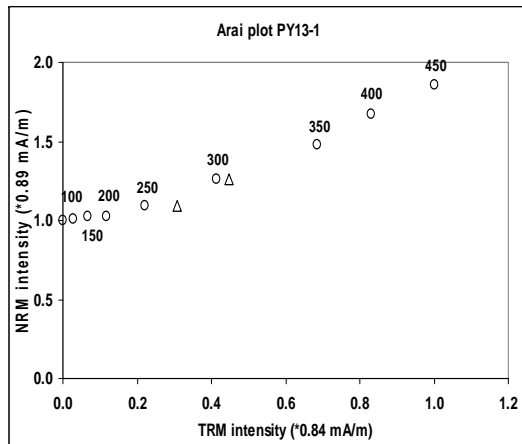
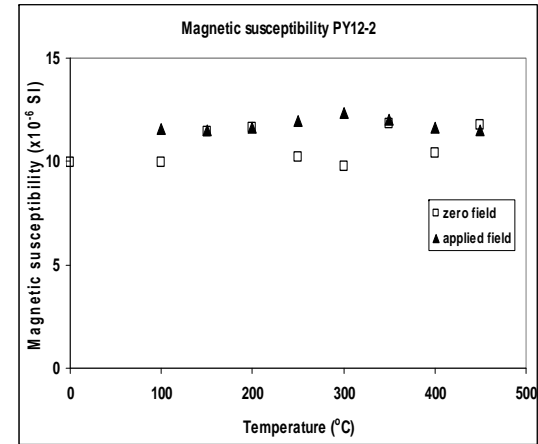
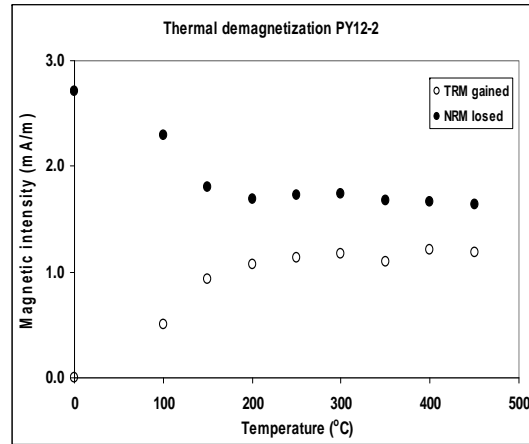
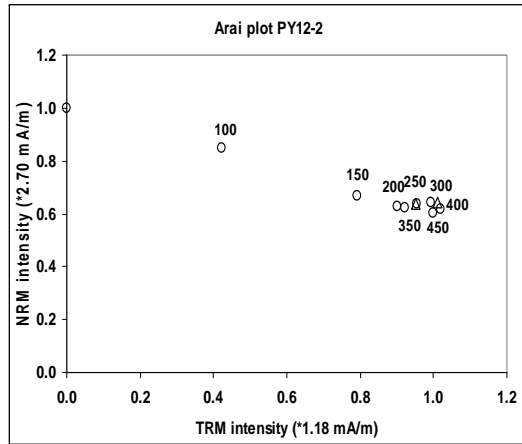


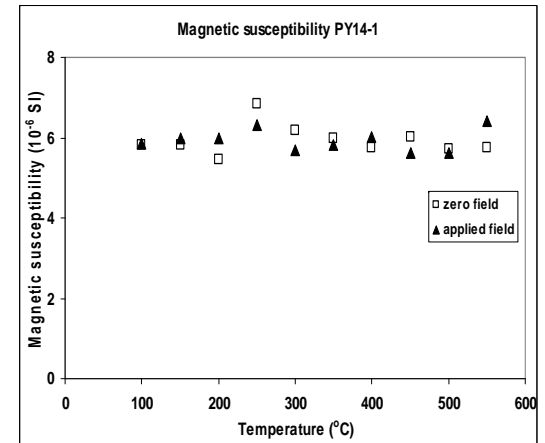
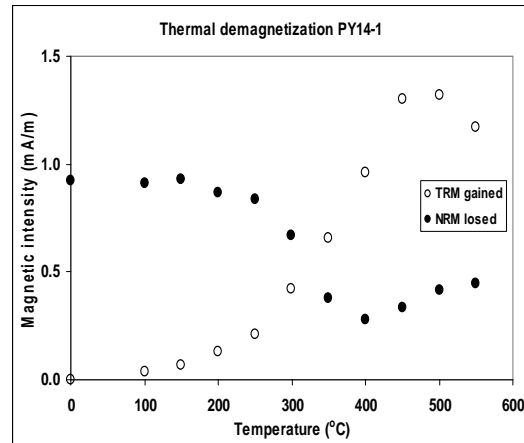
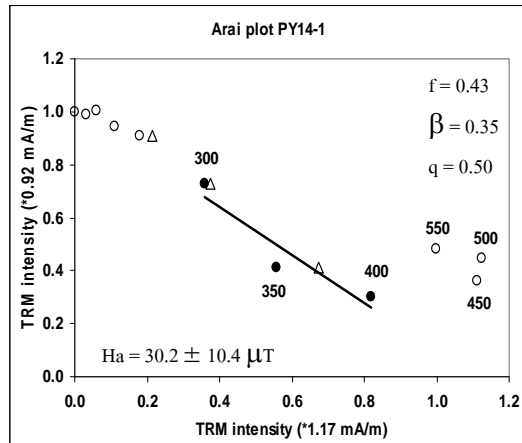
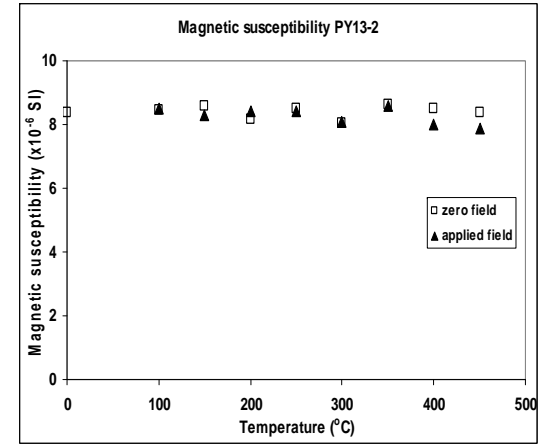
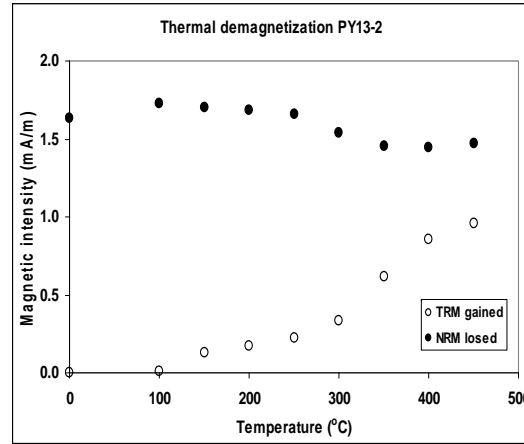
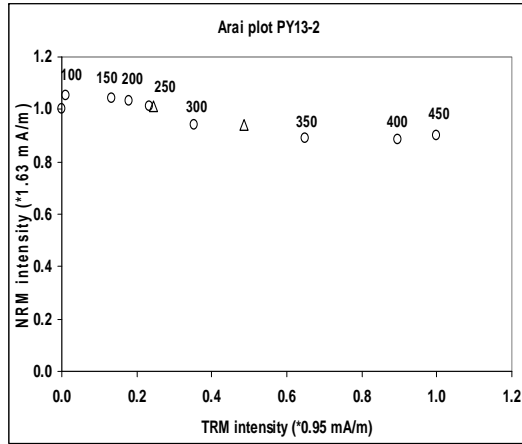


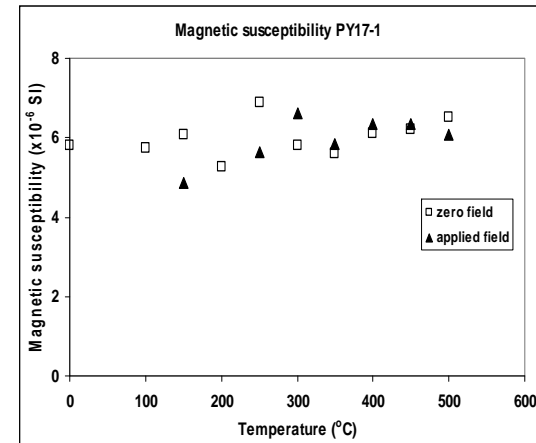
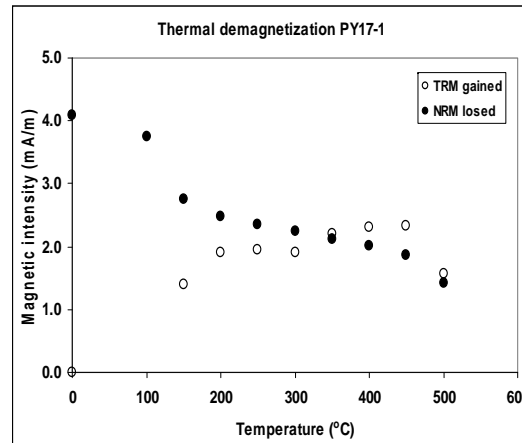
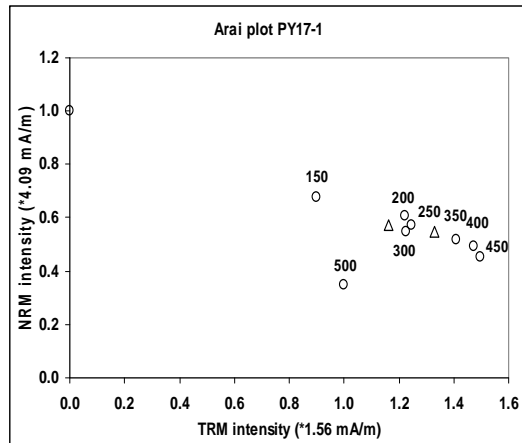
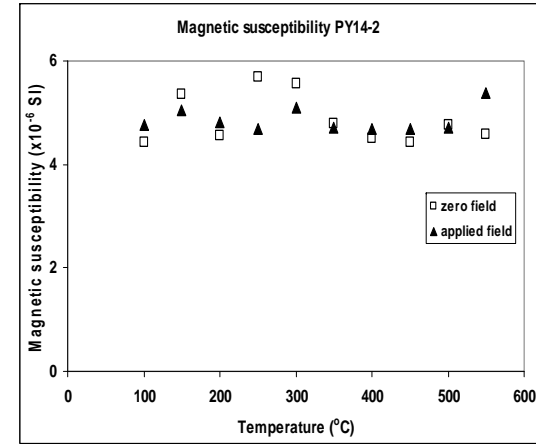
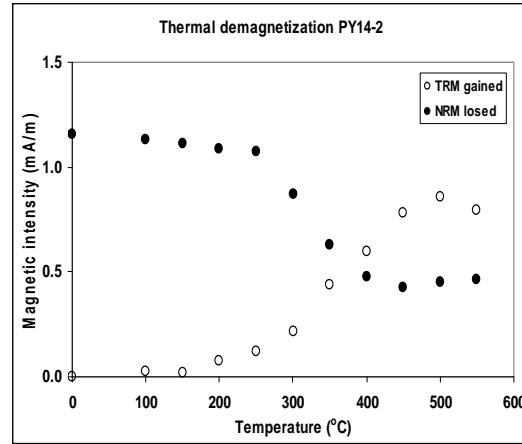
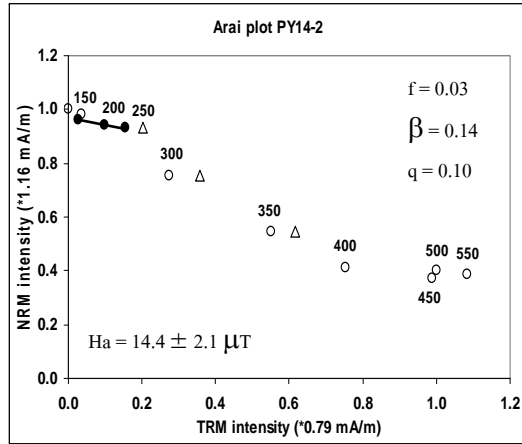


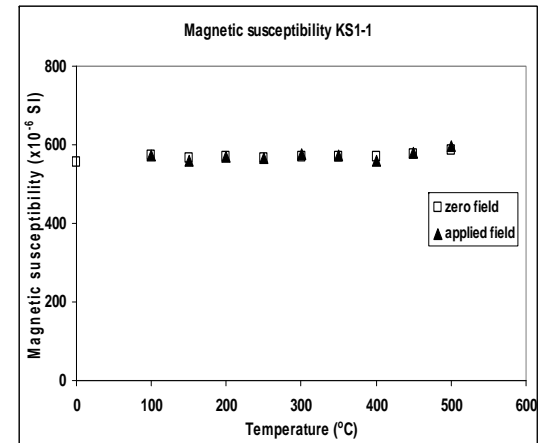
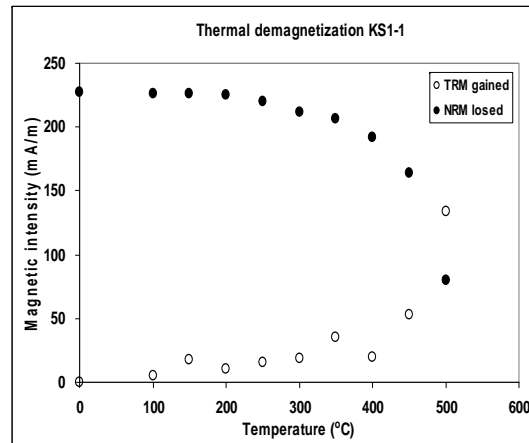
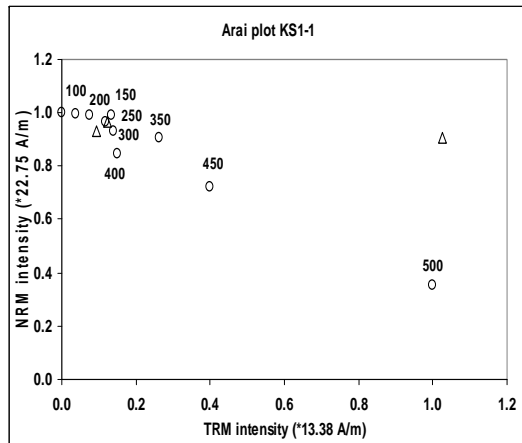
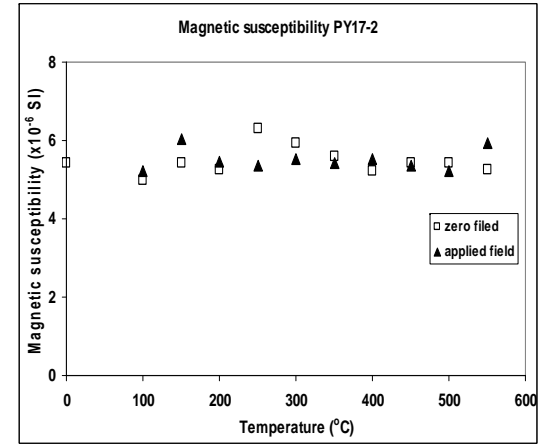
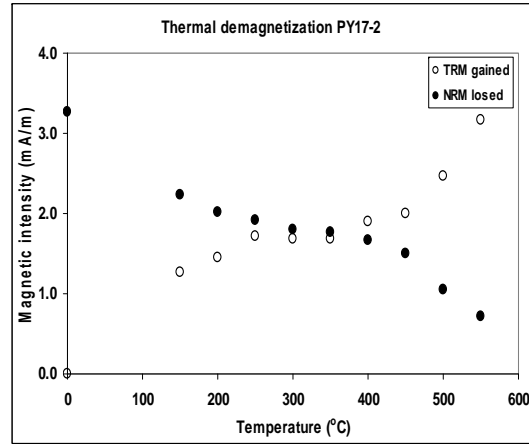
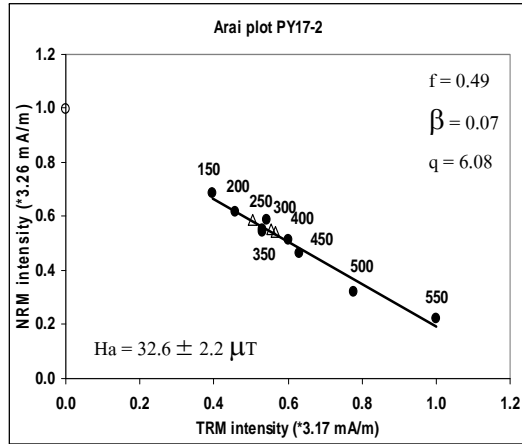


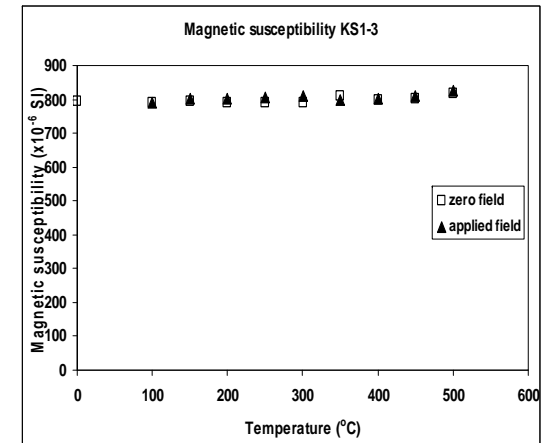
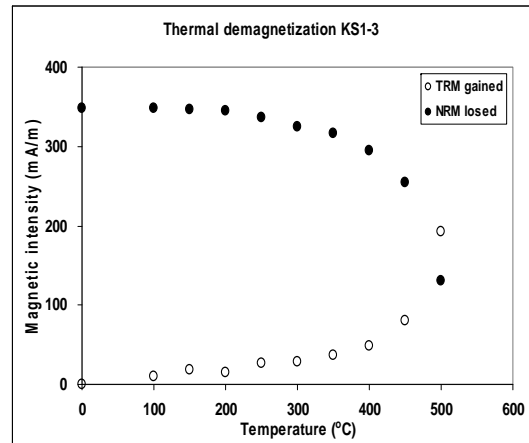
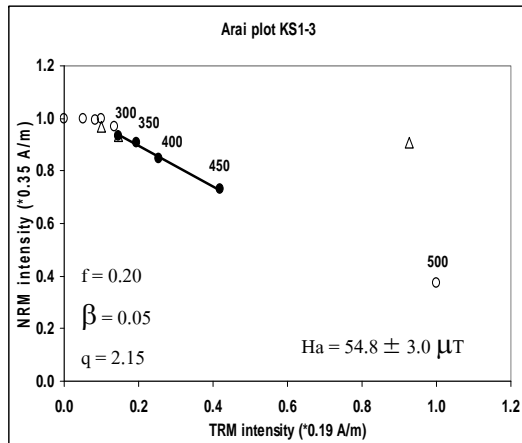
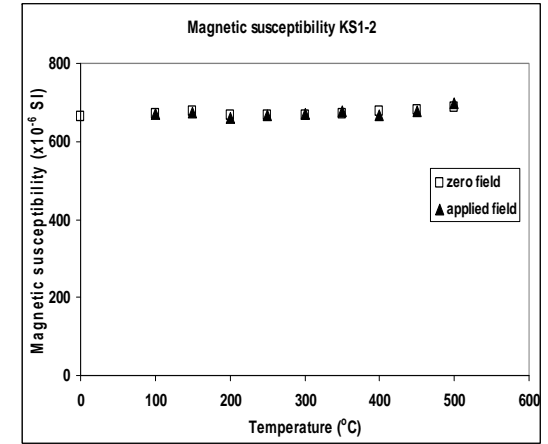
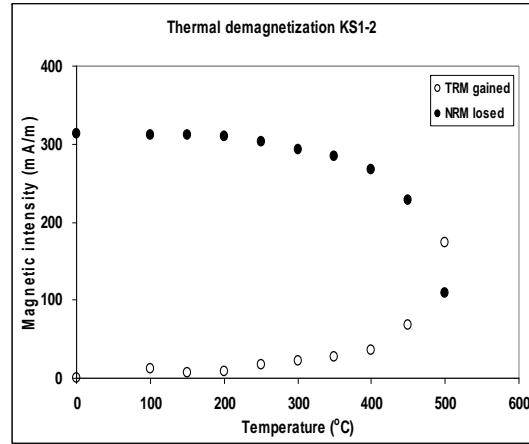
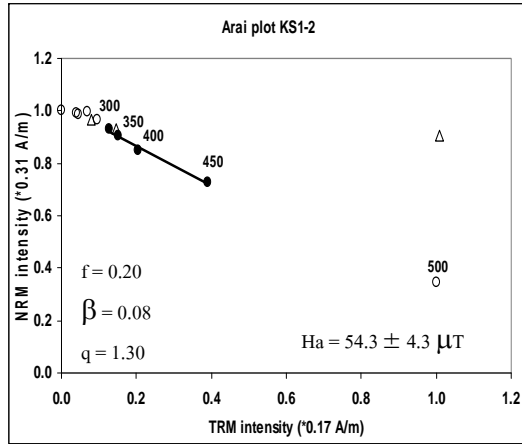


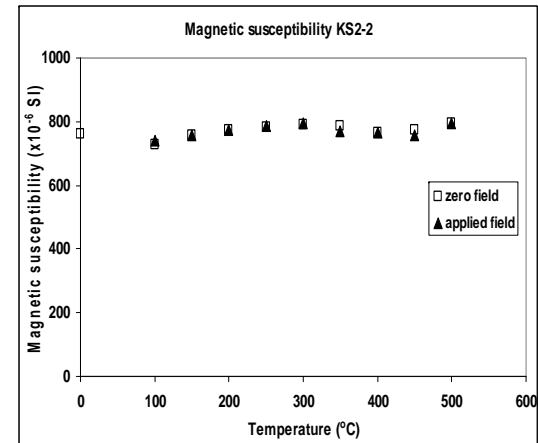
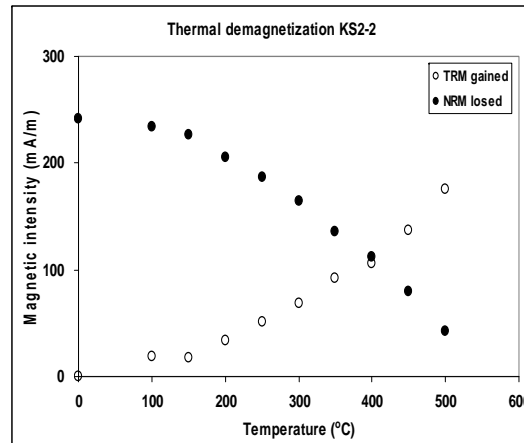
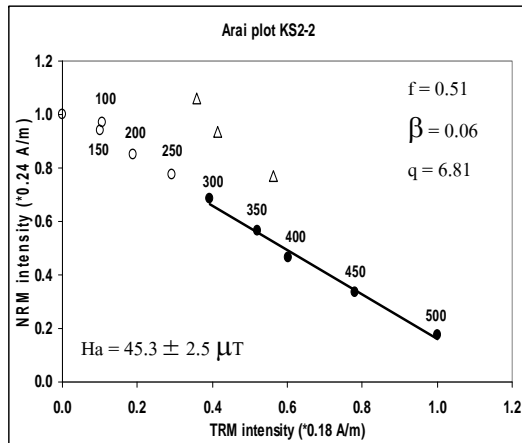
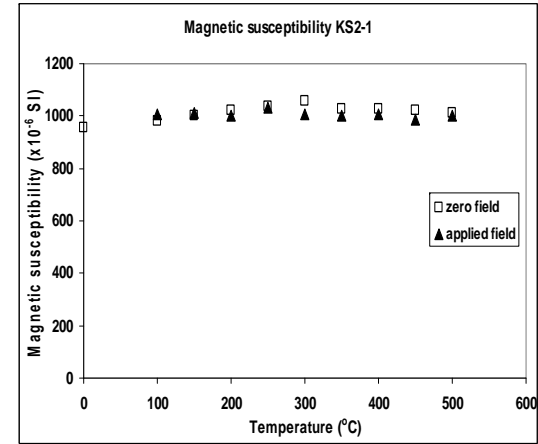
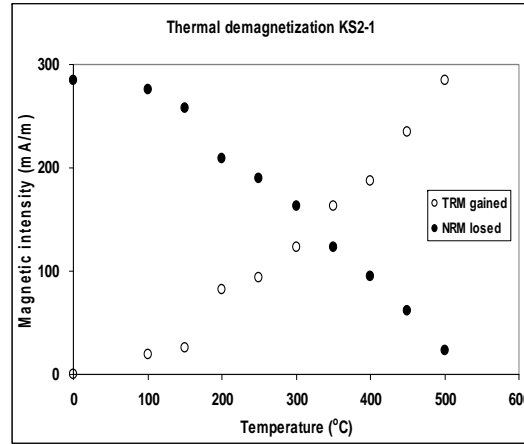
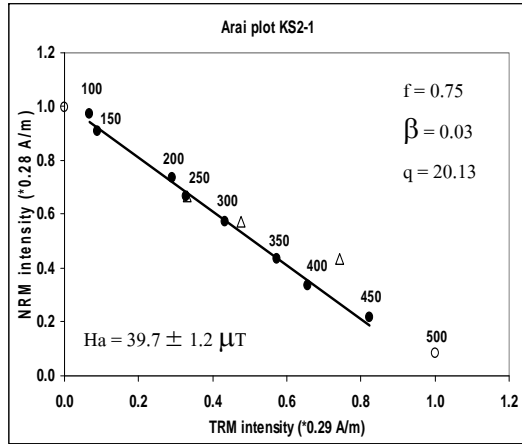


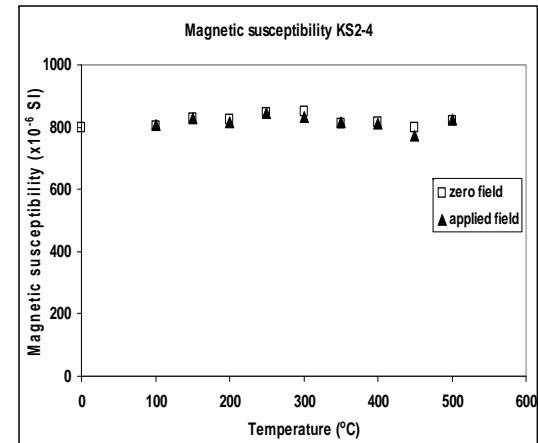
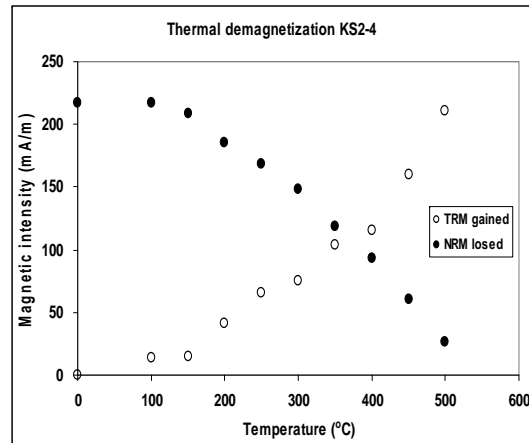
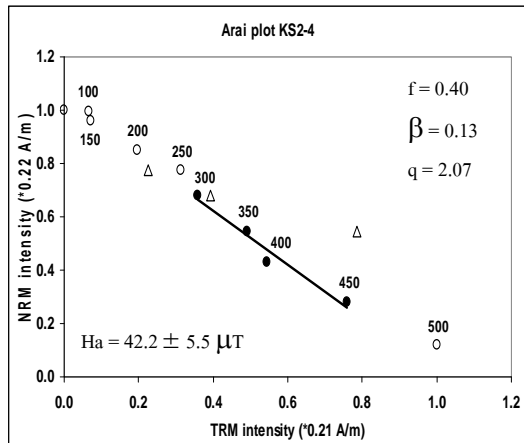
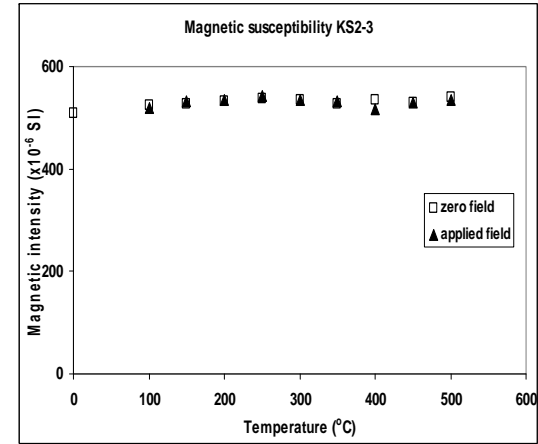
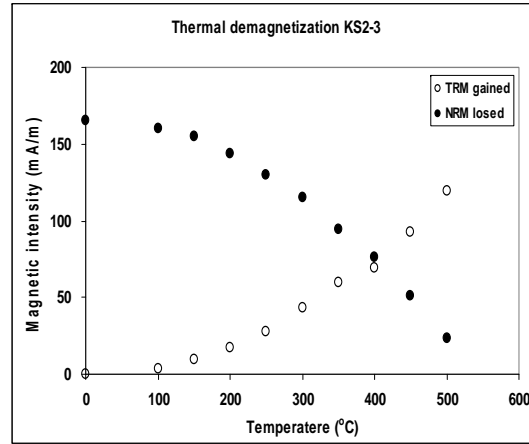
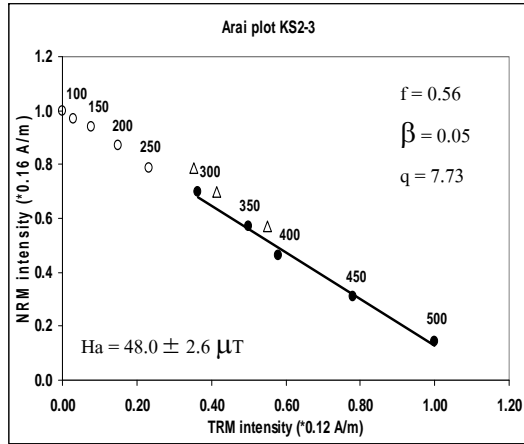


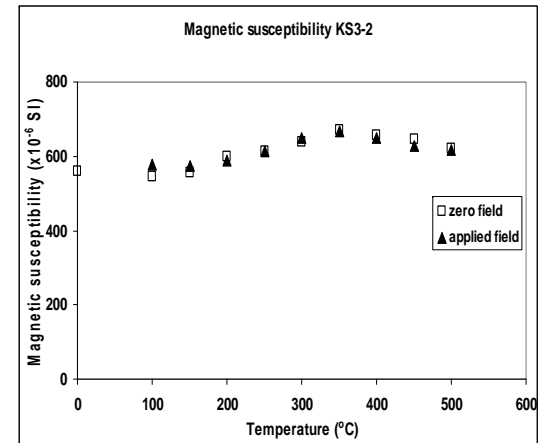
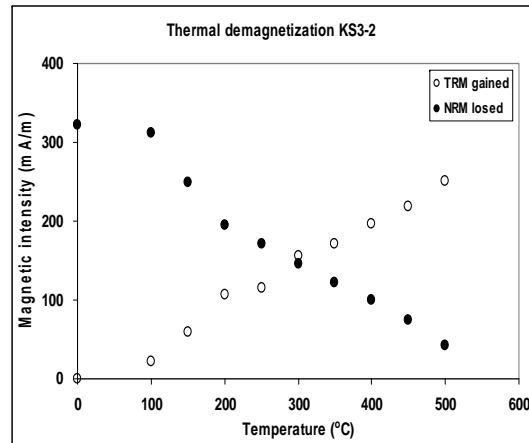
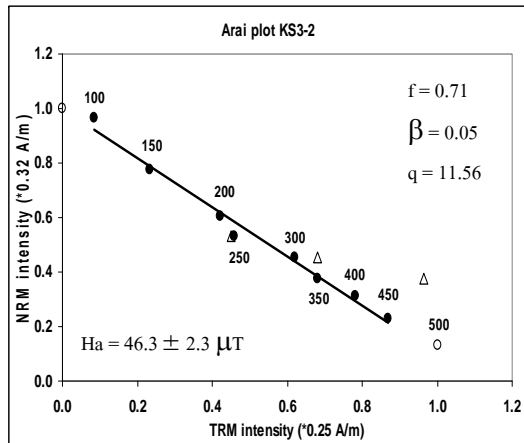
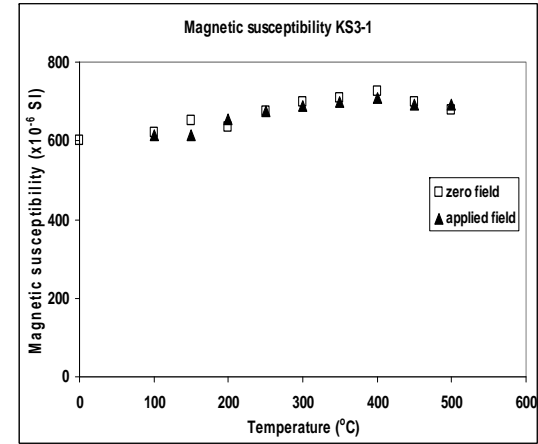
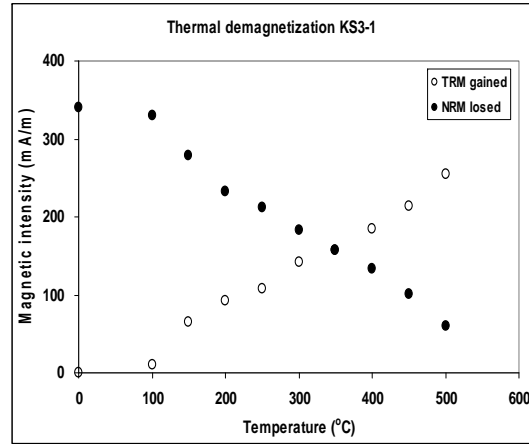
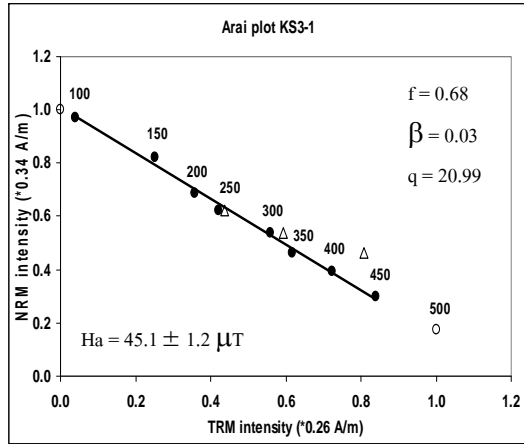


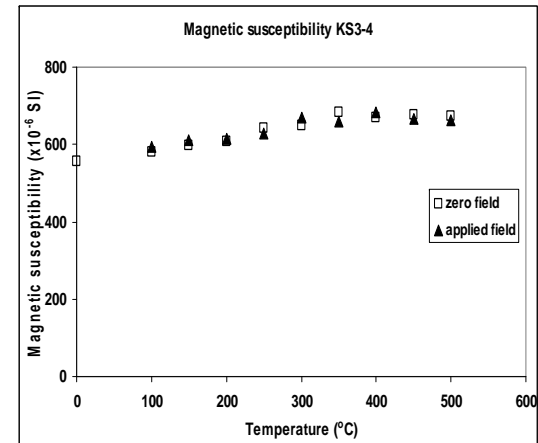
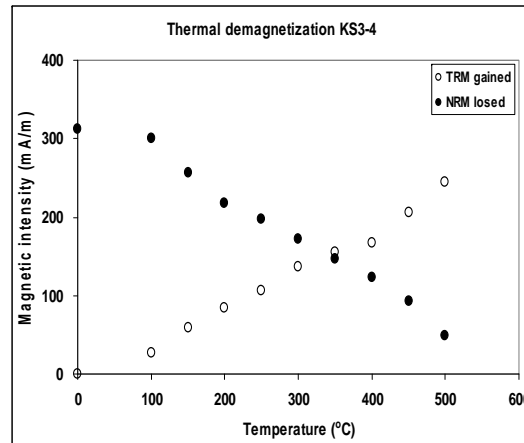
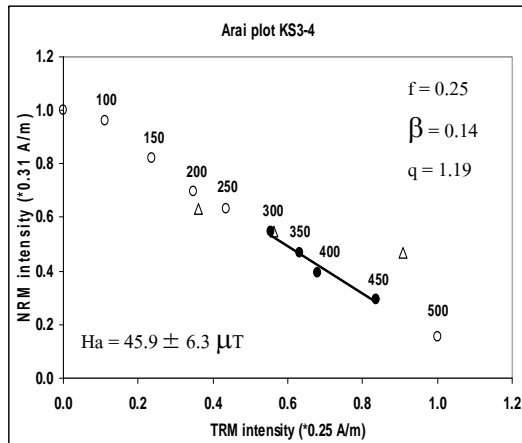
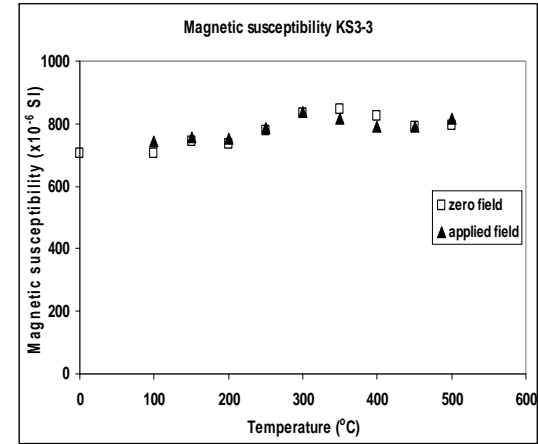
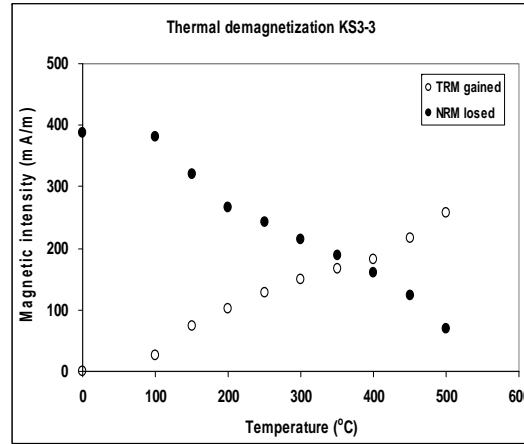
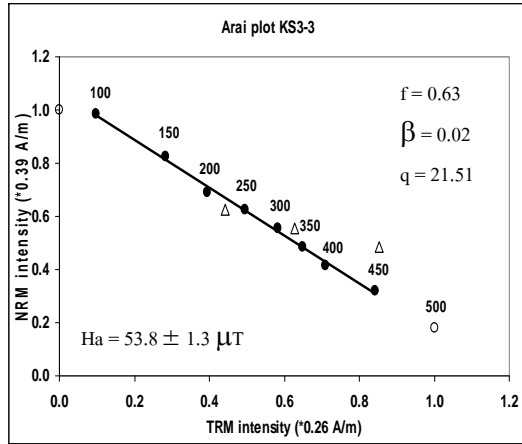


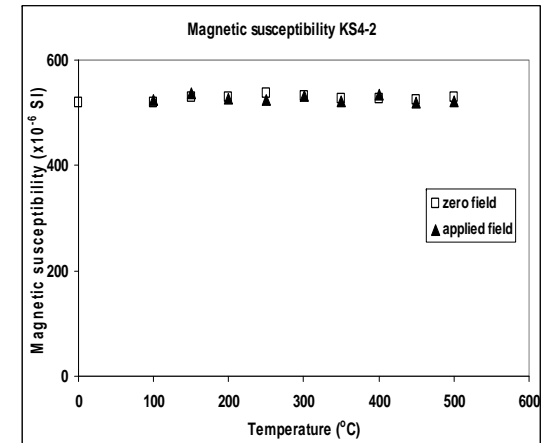
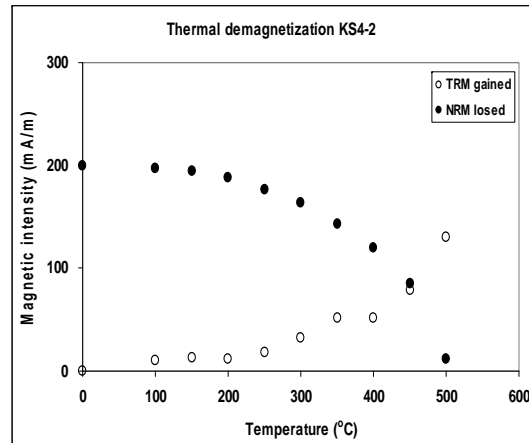
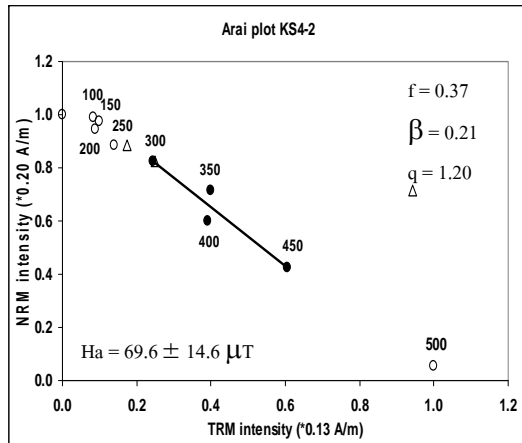
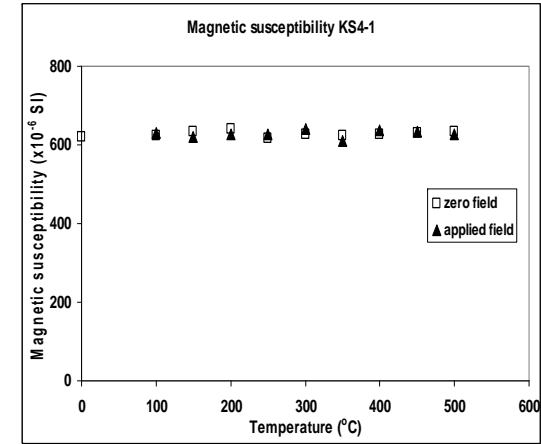
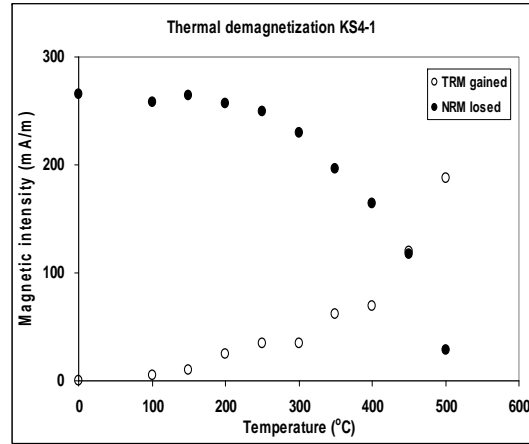
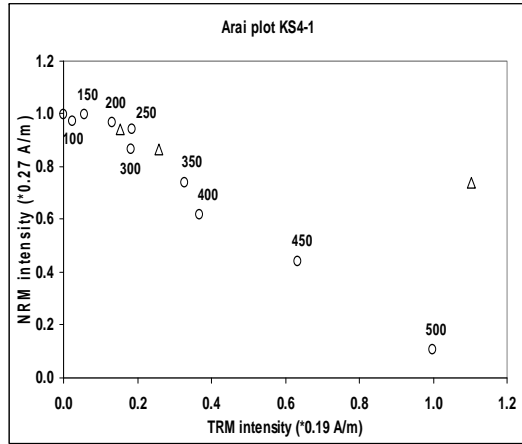


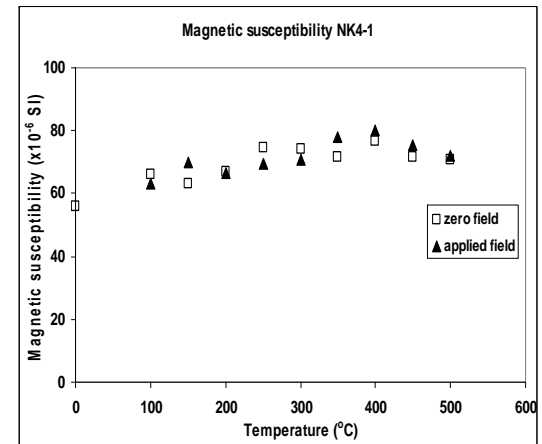
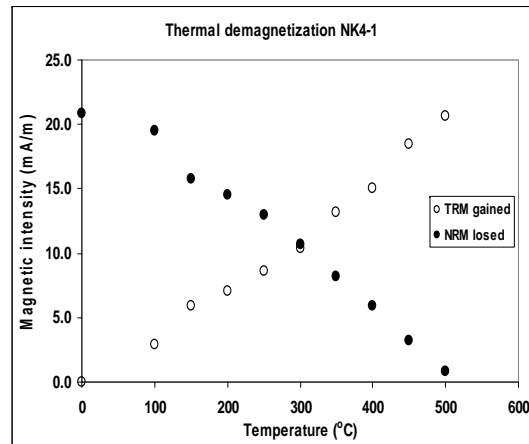
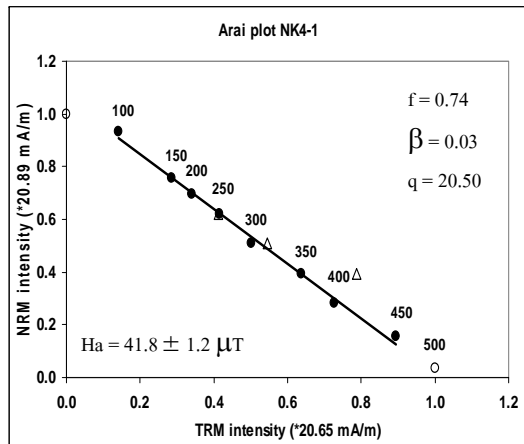
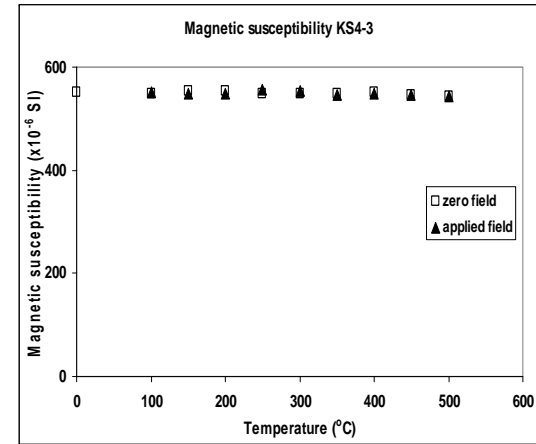
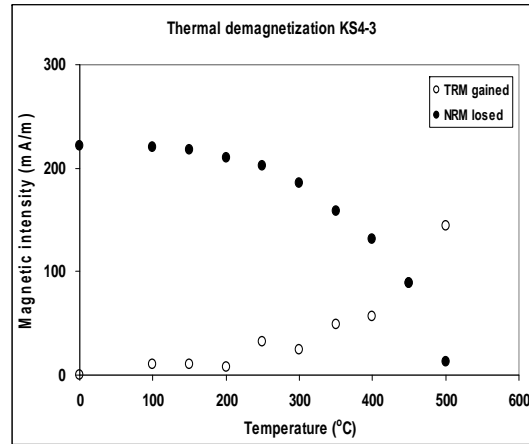
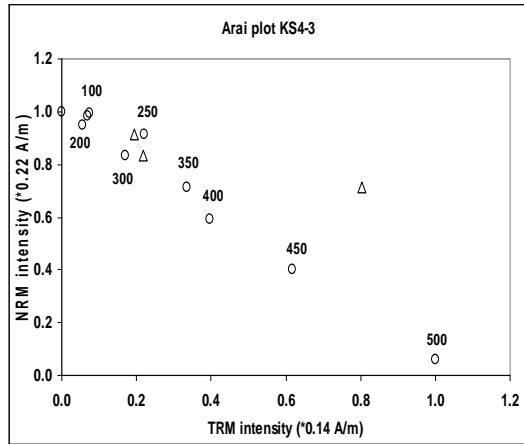


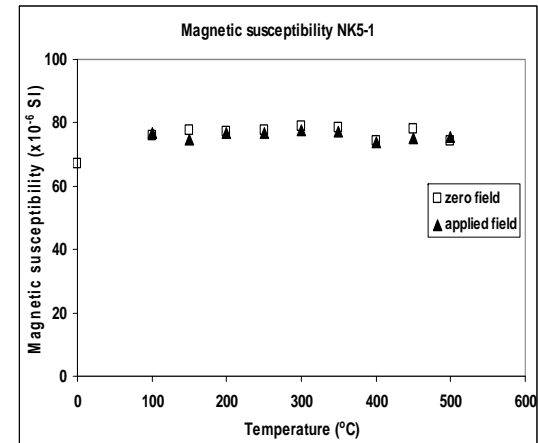
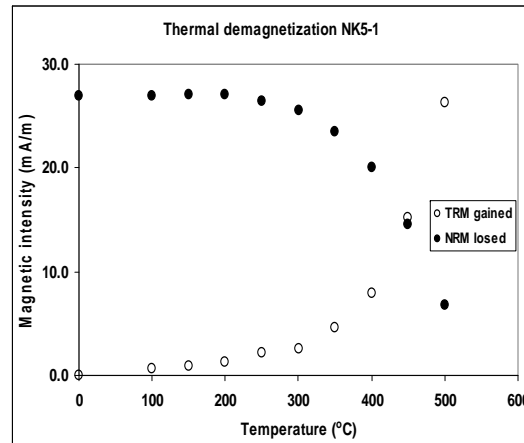
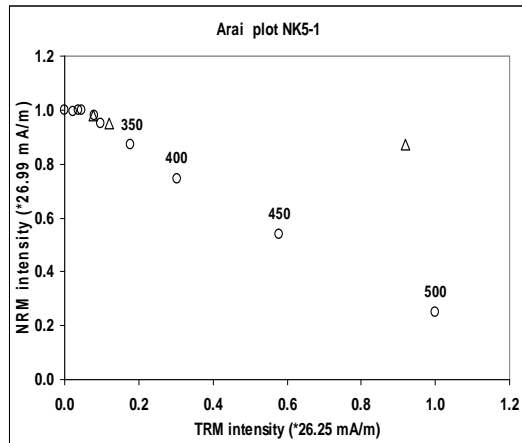
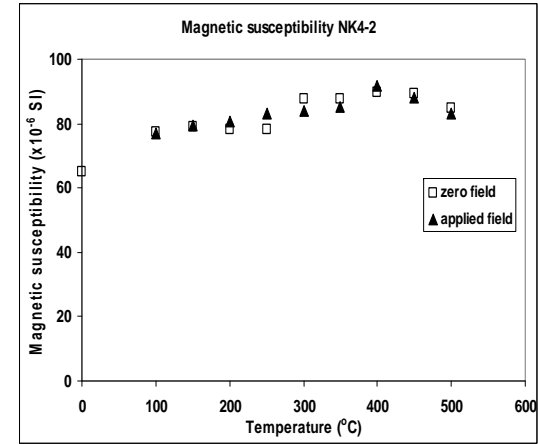
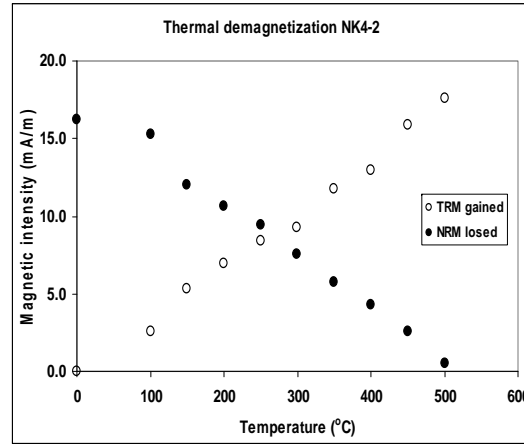
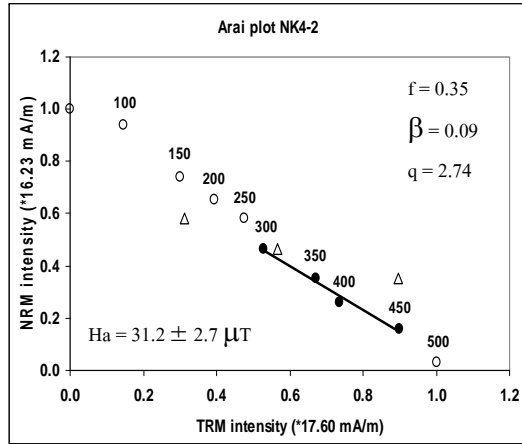


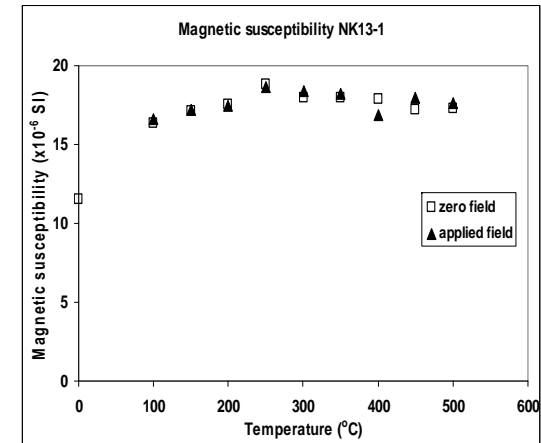
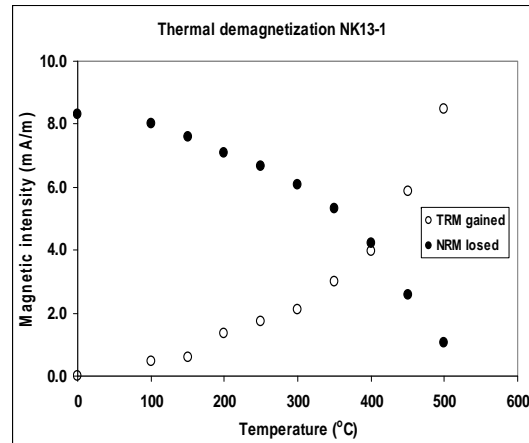
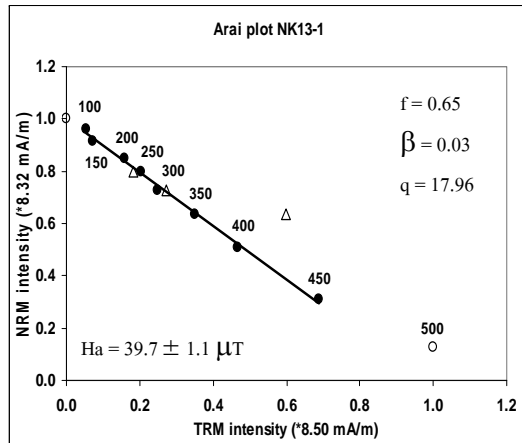
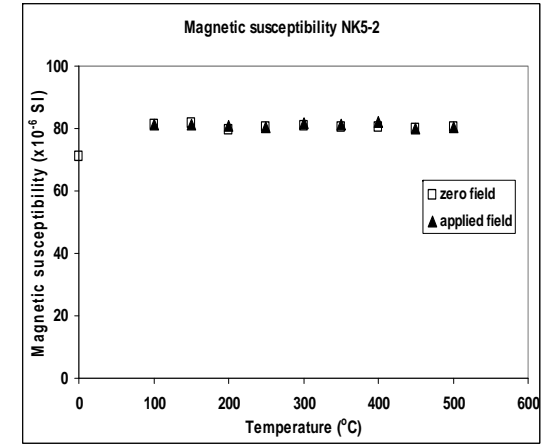
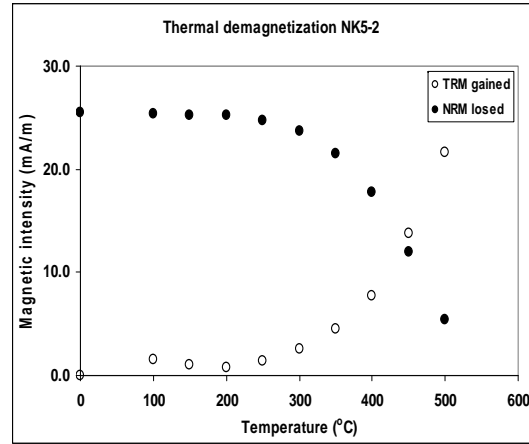
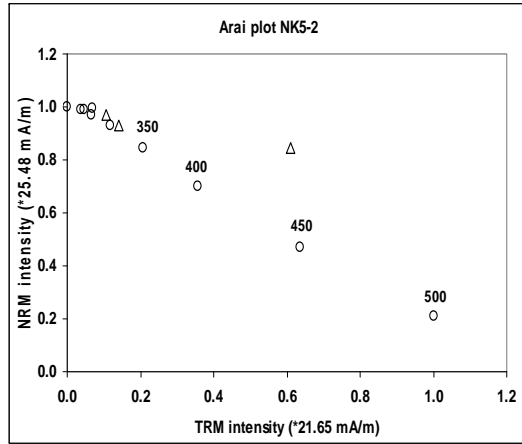


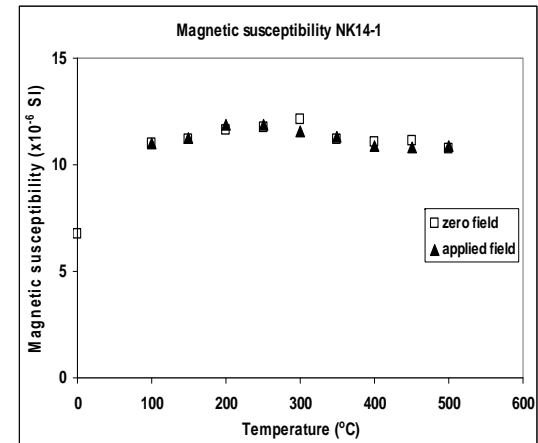
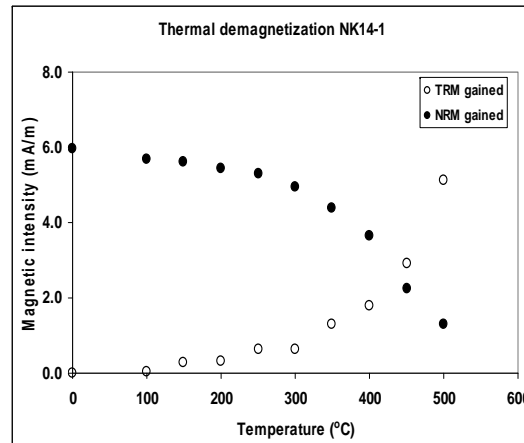
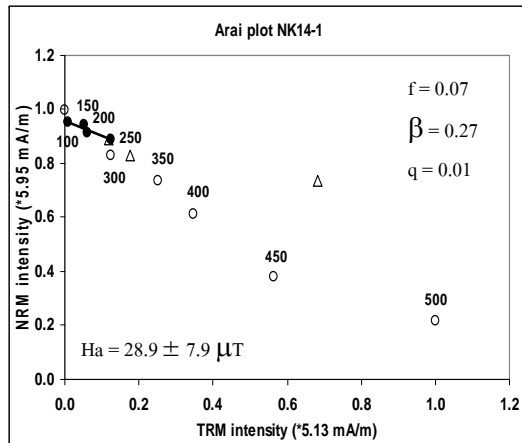
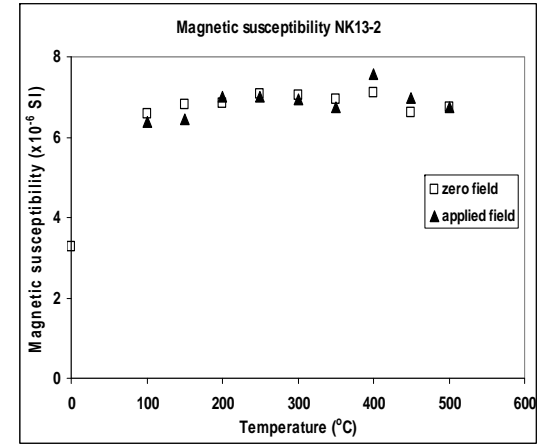
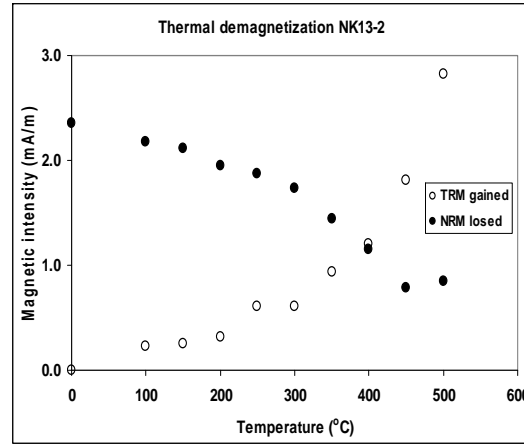
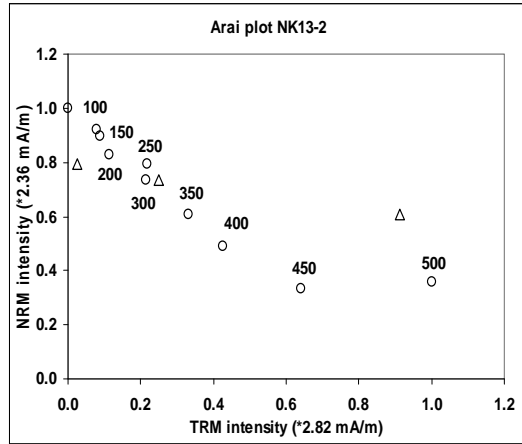


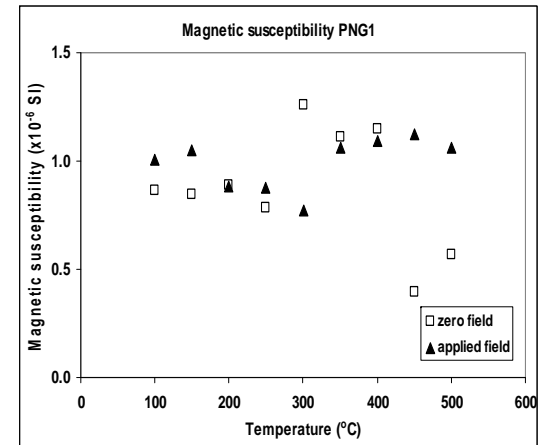
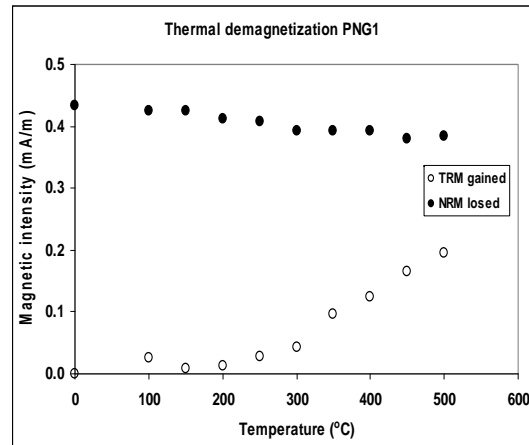
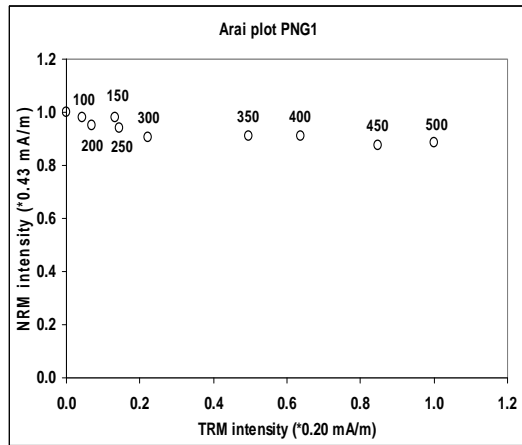
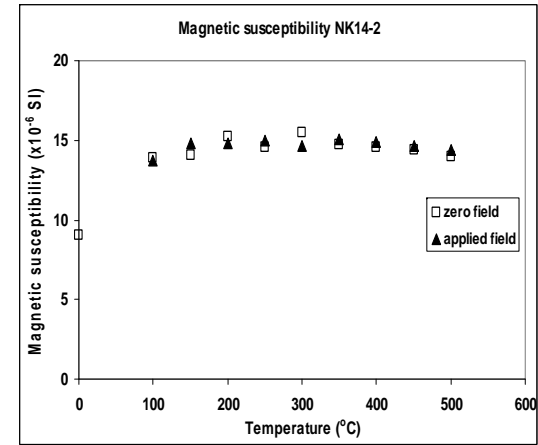
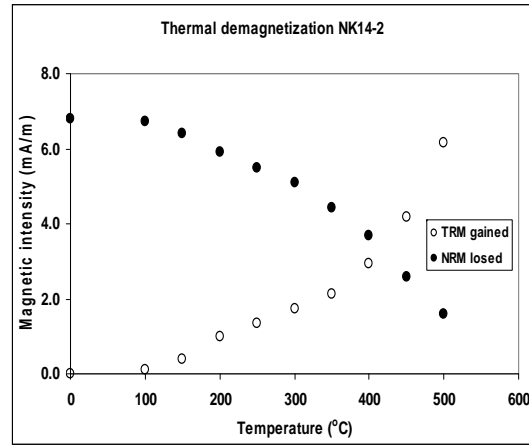
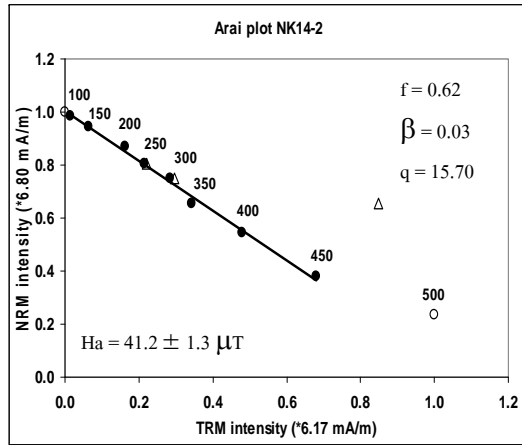


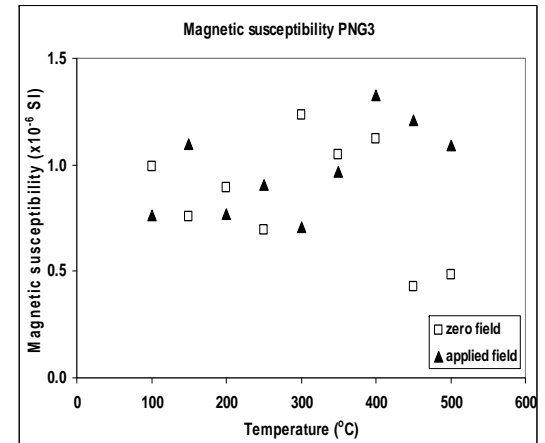
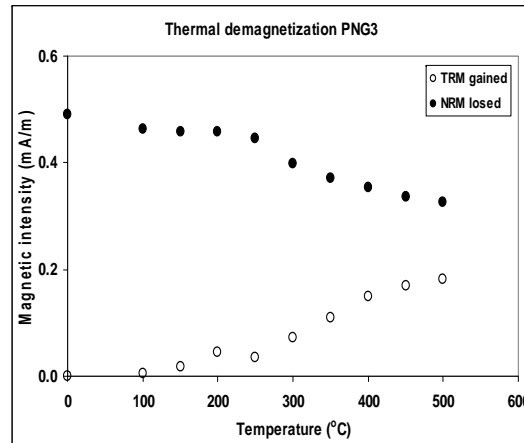
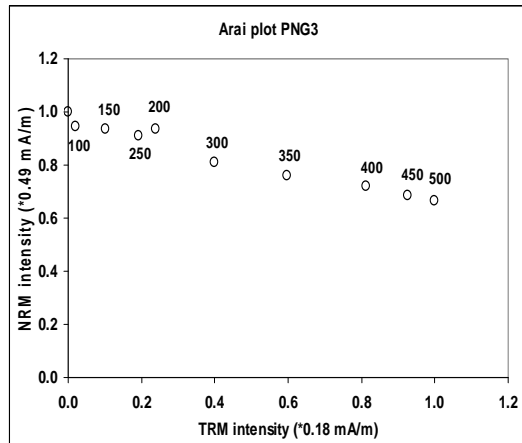
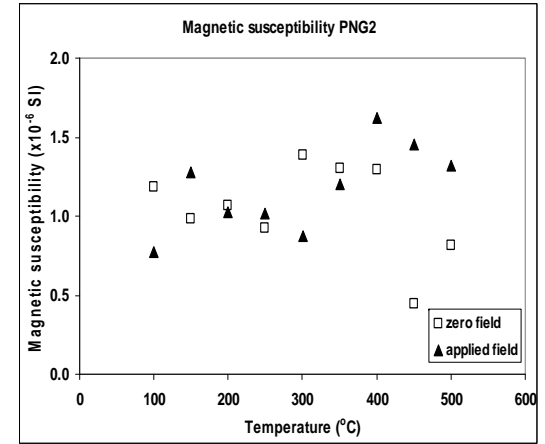
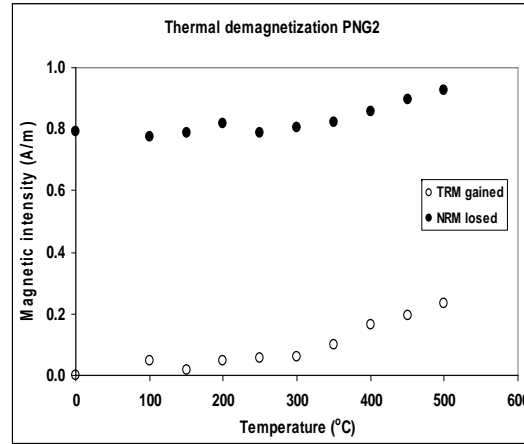
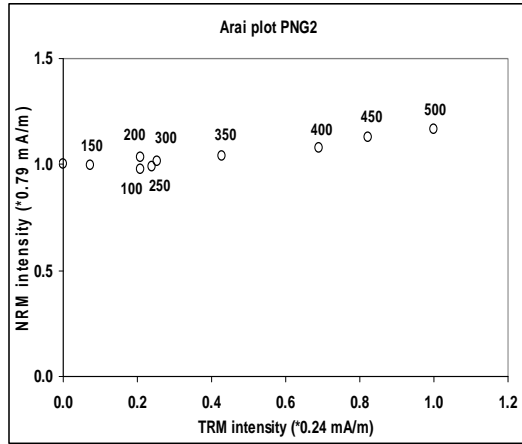


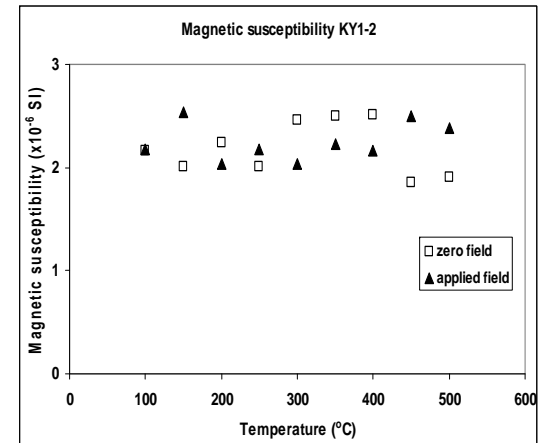
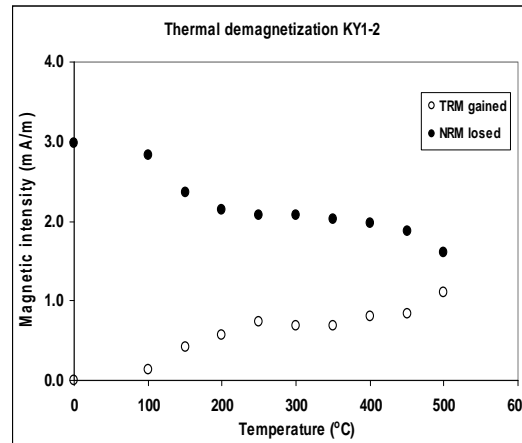
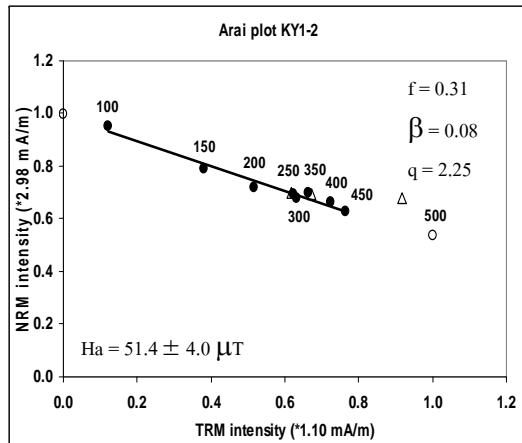
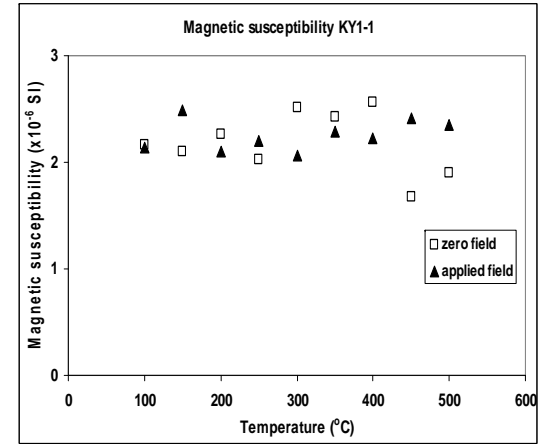
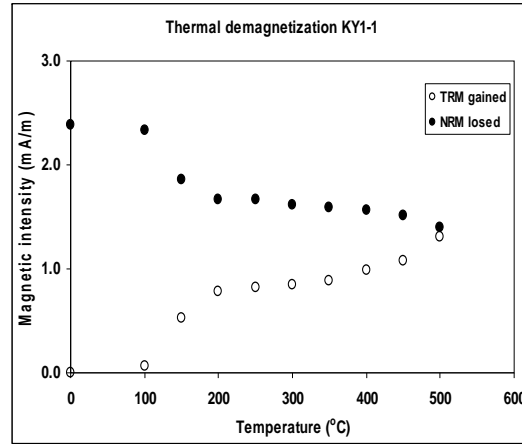
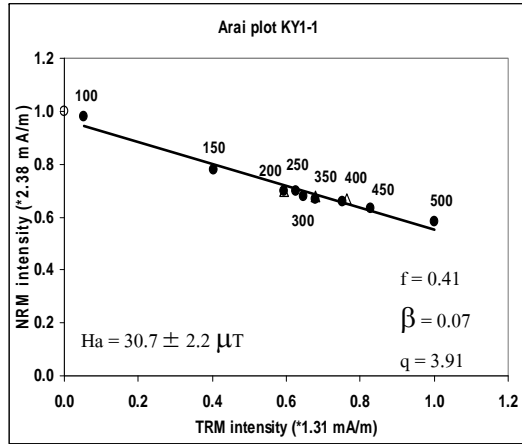


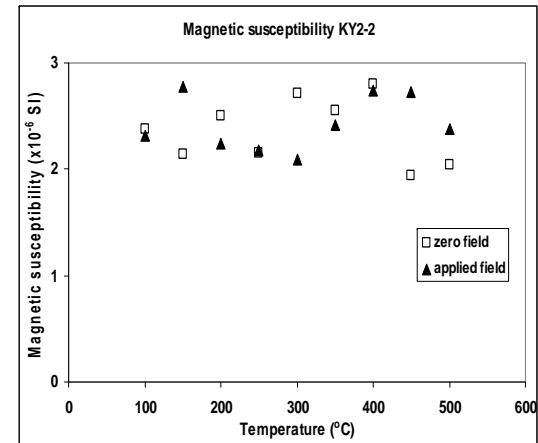
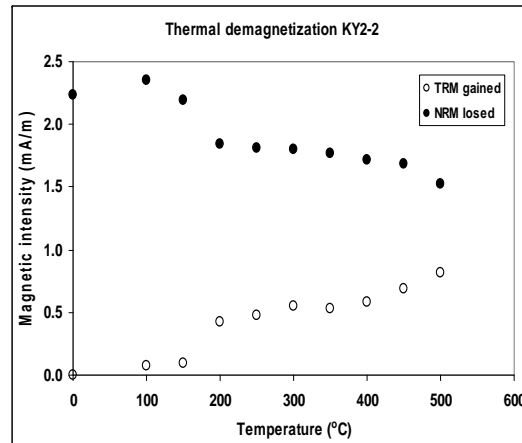
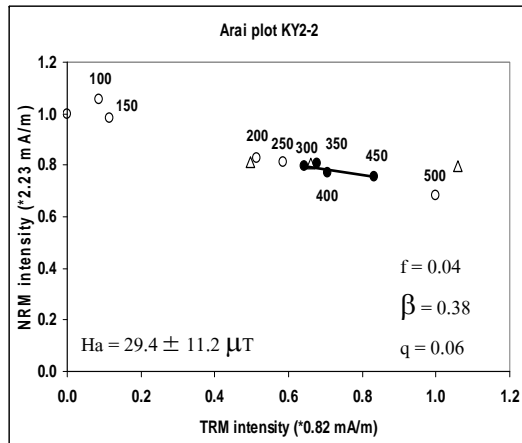
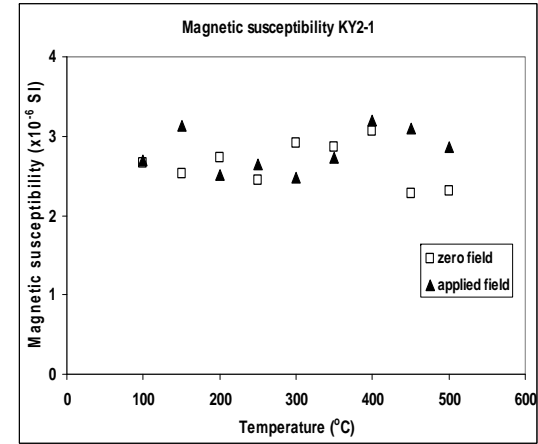
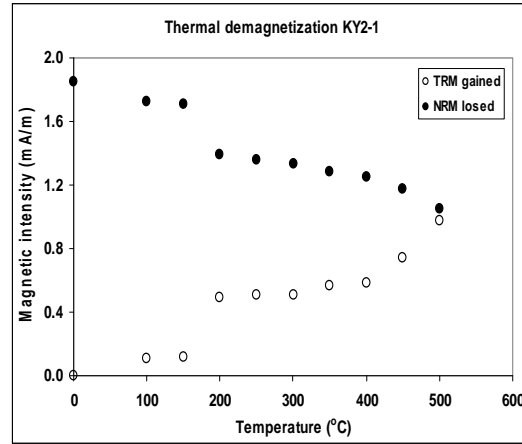
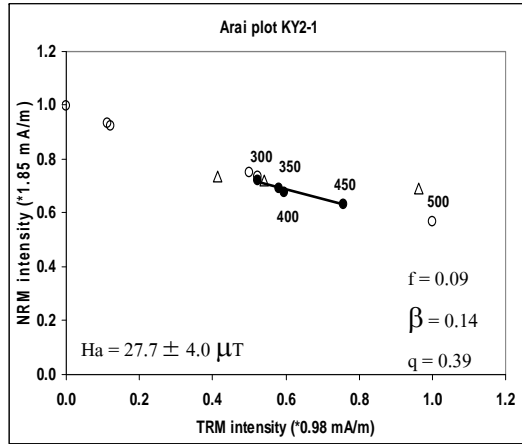


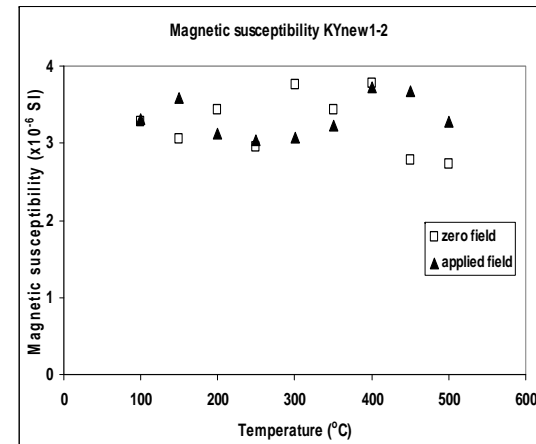
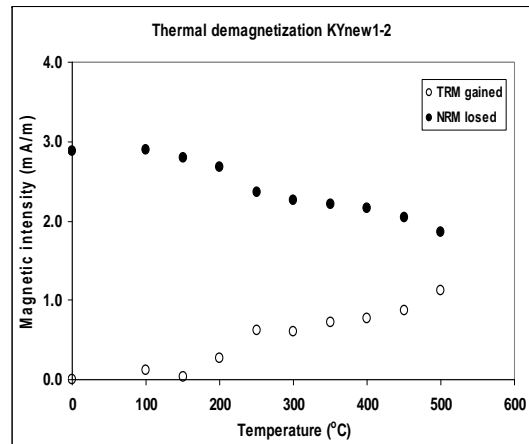
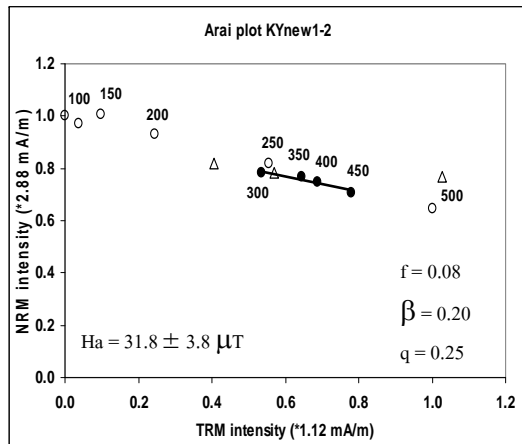
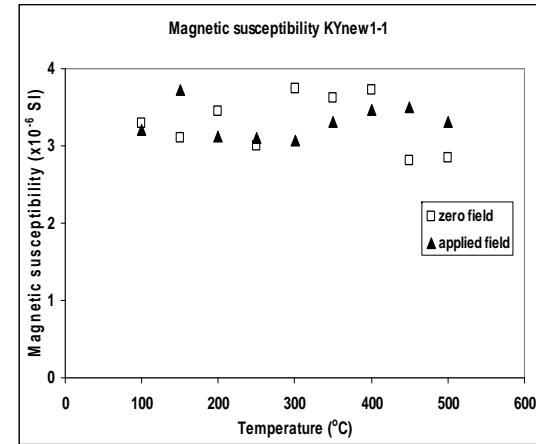
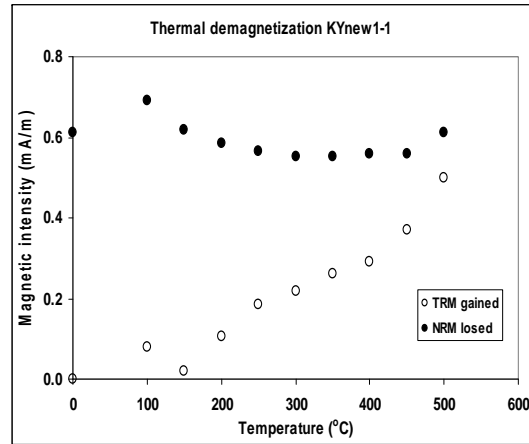
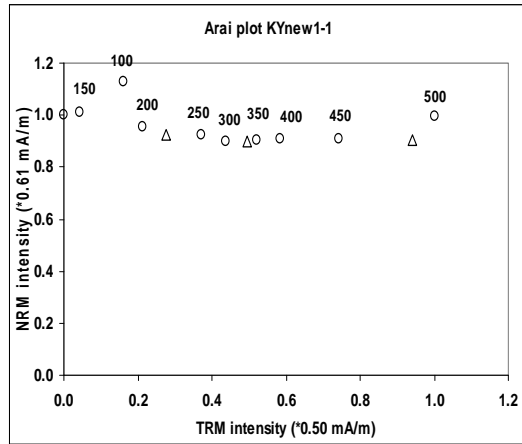


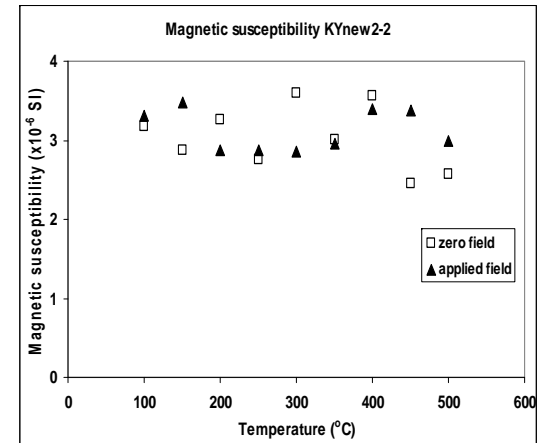
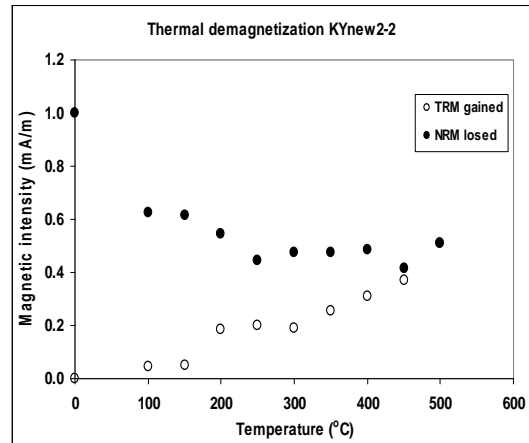
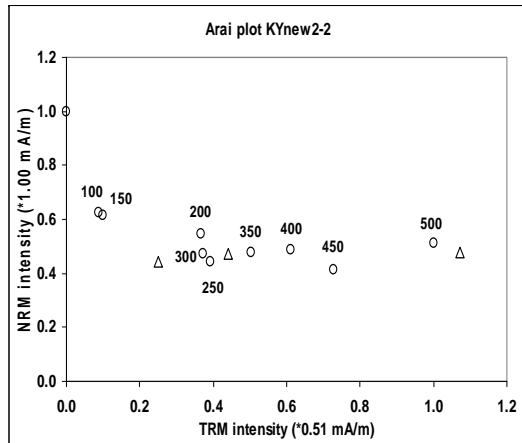
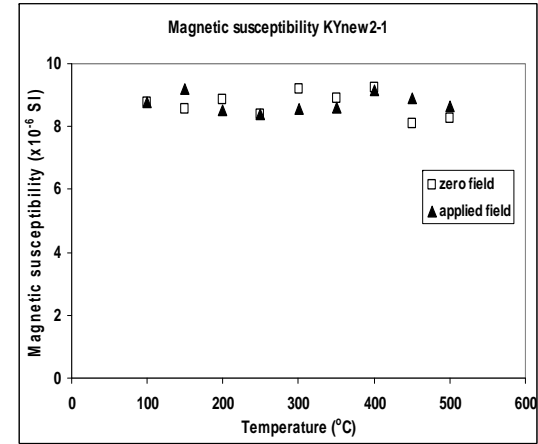
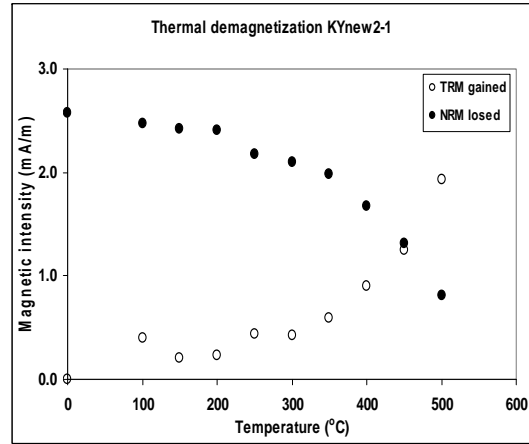
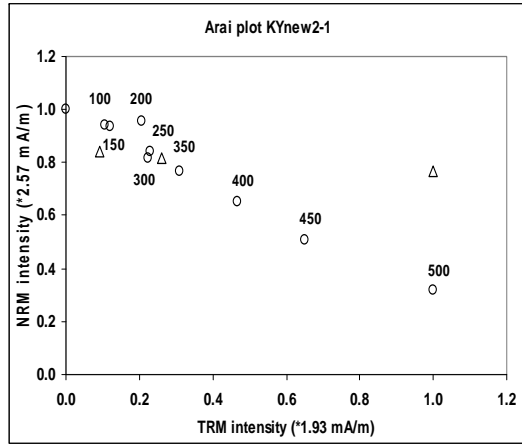












ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายสุริยันต์ พรหมดวง

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4622118

วุฒิการศึกษา

| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ศึกษาศาสตร์) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2545 |
| รัฐประศาสนศาสตรบัณฑิต | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช | 2546 |

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ครูผู้ช่วย โรงเรียนเมืองกลาง อำเภอกลาง จังหวัดภูเก็ต

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Promduang, S., Chittrakarn, T., Bhongsuwan, D. and Bhongsuwan, T. 2549. A study on ancient earth's magnetic field from old bricks in southern Thailand. Proceeding of the 31th Congress on Science and Technology of Thailand 2005. Suranaree University of Technology, October 18-20, 2005. pp. 201.