

## บทที่ 4

### การแผ่ขยายพื้นที่ทะเล

- 4.1 บทนำ
- 4.2 ค่าความผิดปกติทางแม่เหล็กในทะเล
- 4.3 การแผ่ขยายพื้นที่ทะเล
- 4.4 การสลับขั้วแม่เหล็กโลก
- 4.5 สมมติฐานไวน์-เมททิว
- 4.6 ลำดับชั้นทางแม่เหล็ก
- 4.7 ผลการเจาะสำรวจทะเลลึก
- 4.8 จุดเริ่มต้นของรอยเลื่อนแปลงรูป

## บทที่ 4

### การแผ่ขยายพื้นทะเล

#### 4.1 บทนำ

ในราวปลาย คศ. 1950 (พศ.2493) ได้เริ่มรวบรวมหลักฐานเกี่ยวกับการเลื่อนทวีปขึ้น แต่ทฤษฎีเกี่ยวกับทวีปเลื่อนในตอนนั้นยังไม่ร้อนและไม่เป็นที่ยอมรับ ตอนนั้นก็ยังไม่มีใครพบเส้นทางที่ทวีปเคลื่อนไปยังตำแหน่งปัจจุบัน ดังนั้นเมื่อต้องการศึกษากลไกการเลื่อนทวีปจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาบริเวณที่ปัจจุบันแยกจากกันแต่เมื่อก่อนเคยเชื่อมต่อกัน ด้วยเหตุนี้แนวความสนใจจึงหันเหจากทวีปไปสู่มหาสมุทรส่วนที่ขวางกันทวีปต่างๆ อยู่นั่นเอง

การวัดหรือตรวจสอบพื้นทะเลโดยตรงอาจทำได้โดยการขุดเจาะ การก่อกวน หรือการใช้เรือดำน้ำ ซึ่งทั้งหมดเป็นเรื่องที่มีราคาแพง ใช้ระยะเวลาและให้ข้อมูลไม่ได้มากนักอีกทั้งยังกินพื้นที่ได้จำกัด แต่ข้อมูลมากมายมหาศาลสามารถจัดหาได้จากการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ โดยบินสำรวจหรือเดินทะเล การสำรวจธรณีฟิสิกส์เหนือพื้นทะเลอาจทำได้โดยการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งอาจกระทำได้โดยการใช้เครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่เรียก magnetometer ซึ่งมีหลายชนิด เช่น ใช้โปรตอน ใช้แสง หรือใช้ฟลักเกต (fluxgate) โดยปล่อยให้เครื่องอัดลอยในน้ำหรืออากาศ เพื่อลดผลทางแม่เหล็กจากเรือหรือเครื่องบิน ด้วยวิธีนี้ค่าความผิดพลาดมีเพียง  $\pm 2$  นาโน เทสลา (nanotesla หรือ nT) เครื่องตรวจวัดนี้จึงสามารถบันทึกกำลังแรงของสนามแม่เหล็ก (โลก) ตามเส้นทางที่ผ่านได้ และสามารถนำมาปรับแก้กับค่าความผิดพลาดประจำวัน/เดือน (diurnal effect) และค่ากำลังแรงจากแก่นโลกได้ ซึ่งในที่สุดเราจะได้ค่าความผิดปกติของหินบริเวณนั้นจริงๆ

ค่าความผิดปกตินี้เกิดจากรังที่เหนี่ยวนำแม่เหล็กได้ (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในบทที่ 14) ที่อยู่ในหิน ซึ่งแน่นอนแร่ที่สำคัญที่สุดก็คือแร่ที่มีสารแม่เหล็ก ซึ่งคือแมกนีไทต์ (magnetite) ซึ่งโดยทั่วไปหินที่มีแร่ดังกล่าวอยู่มากก็คือหินอัคนีสีเข้ม (mafic rocks) และหินอัคนีสีเข้มจัด (ultramafic rocks) นั่นเอง ดังนั้นหินพวกนี้จึงมีโอกาที่จะให้ค่าความผิดปกติทางแม่เหล็กได้สูง หินแปรอาจให้ความผิดปกติได้ปานกลาง ส่วนหินตะกอนหรือหินอัคนีบางชนิดมักให้ค่าความผิดปกติที่ต่ำ หนังสือแนะนำที่เขียนเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้ดี ได้แก่ หนังสือชื่อ “An Introduction to Geophysical Exploration” พิมพ์ครั้งที่ 2 ซึ่งเขียนโดย Kearey & Brooks (1991)

เมื่อพิจารณาอย่างผิวเผินเราอาจบอกว่าบนแผ่นดินค่าความผิดปกติทางแม่เหล็กสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะธรณีวิทยาใต้ดินที่แตกต่างกันบนเปลือกทวีปส่วนบน แต่ตรงข้ามในเปลือกสมุทร

ดูเหมือนค่าความผิดปกติทางแม่เหล็กจะนำดูราบเรียบกว่า เพราะเห็นท่าจะมีความเป็นวิวิธกัณฑ์ (heterogeneous) น้อยกว่า ซึ่งต้องดูรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

## 4.2 ค่าความผิดปกติทางแม่เหล็กในทะเล (Marine Magnetic Anomalies)

การสำรวจค่าแม่เหล็กสามารถทำได้โดยง่ายจากเรือสำรวจตั้งแต่กลางปี ค.ศ. 1950 แผนที่ความผิดปกติทางแม่เหล็ก (รูป 4.1) ได้ถูกสร้างขึ้น หลังการสำรวจนอกชายฝั่งตะวันตกของอเมริกา โดยละเอียด (Raff & Mason, 1961) ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กเป็นค่าที่เกือบคงที่และแสดงถึงแถบค่าแม่เหล็ก 2 แถบที่คล้ายคลึงกัน คือ แถบค่าแม่เหล็กที่เป็นบวกสูง และแถบที่มีค่าลบสูง แนวแม่เหล็กนี้คงทนมากจนสามารถตรวจสอบแถบที่มีค่าใกล้เคียงกันได้เป็นระยะทางหลายร้อยกิโลเมตร แต่บางครั้งก็พบว่าถูกสอดแทรกด้วยแนวรอยแยกจนทำให้แถบแม่เหล็กแต่ละแถบเคลื่อนไปตามรอยแตกจากแถบเดิมได้ในบางครั้งและเป็นระยะทางถึง 1,100 กม ผลการศึกษาในช่วงต่อมาแสดงให้เห็นว่า แนวหรือแถบแม่เหล็กต่างๆ นี้ปรากฏทั่วพื้นท้องทะเลและมหาสมุทร ซึ่งแต่ละแถบอาจกว้างเพียง 10 – 20 กม และมีช่วงคลื่น (amplitude) สูงประมาณ 500 – 1,000 nT โดยแถบแม่เหล็กดังกล่าวขนานกับแนวสันสมุทรและมีความสมมาตรกันออกไปทางทั้งสองข้างของสันสมุทร (รูป 4.2) เชื่อกันว่าแหล่งกำเนิดความเป็นแม่เหล็กของค่าผิดปกติน่าจะมาจากหินบะซอลต์ที่เป็นชั้น 2 ของแผ่นสมุทรและไม่ใช่ชั้น 1 ซึ่งเป็นตะกอน ไร้สภาพแม่เหล็ก หรือชั้น 3 ซึ่งเป็นหินอัคนีสีเข้มจัด ซึ่งใกล้เคียงกับผลการขุดเจาะหรือคว้านเอาตัวอย่างจากใต้โลกมาศึกษาว่าน่าจะมาจากหินบะซอลต์ในชั้นที่ 2 เพราะหินบะซอลต์ในชั้นที่มักมีค่าทางแม่เหล็กสูงอยู่แล้ว

ถ้าแนวเส้นแม่เหล็กเกิดจากชั้นที่ 2 ของแผ่นสมุทรซึ่งคือชั้นหินละลายบะซอลต์ที่มีเนื้อเดียวกันตลอด แต่ทำไมค่าความแตกต่างจึงมีเพียงค่าผิดปกติที่ถ้าไม่เป็นบวกสูง ก็เป็นลบสูงได้ ลักษณะรูปทรงที่ความผิดปกติเช่นนี้แสดงถึงรูปร่างของแหล่งกำเนิดและสภาพการวางตัวของทิศทางการเป็นแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามชั้นที่ 2 ในเปลือกสมุทรดูเหมือนจะคงความลึกและความหนาไว้ได้โดยตลอด ทั้งนี้เป็นเพราะสภาพภูมิประเทศแบบขรุขระ (rugged topography) บนส่วนยอดที่ลดทอนอย่างรวดเร็วเกินกว่าที่จะทำให้ได้ค่าความผิดปกติที่วัดได้ 3-7 กม จากพื้นทะเล ดังนั้นค่าที่สูงขึ้นนี้จึงไม่ได้มาจากภูมิประเทศแต่กลับเป็นการสลับทิศแม่เหล็กในชั้นที่ 2 นั่นเอง รูป 4.3 แสดงการตีความหมายค่าผิดปกติทางแม่เหล็กที่ตรวจวัดได้เหนือสันฮวนเดอฟูคา (Juan de Fuca) ทางแปซิฟิกตอนเหนือ ในกรณีนี้ชั้นที่ 2 ของแผ่นสมุทรแบ่งออกเป็นชุดเป็นแนวที่ขนานกับสันสมุทร ซึ่งอาจเป็นแนวที่มีทิศทางเดียวกับทิศทางสนามแม่เหล็กโลกในปัจจุบัน หรืออาจเป็นทิศที่ตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กในปัจจุบันก็ได้ ในกราฟล่างสุดของรูป 4.3 แสดงให้เห็นว่าค่าความแตกต่างต้อง

มีค่าประมาณ  $10 \text{ Am}^{-1}$  จึงจะทำให้เกิดค่าความผิดปกติทางแม่เหล็กได้ ส่วนในรูป 4.4 แสดงถึงกระบวนการที่ทำให้เกิดการสลับขั้วแม่เหล็ก ตามแนวคิดของ Fuller (1987)

### 4.3 การแผ่ขยายพื้นทะเล

ราวต้น ค.ศ.1960 อาร์ เอส ไดเอต (Dietz, 1961) และแฮร์รี เอส เฮส (Hess, 1962) ได้เสนอแนวคิดที่น่าสนใจว่าการเลื่อนทวีปจะสำเร็จได้ต่อเมื่อมีกระบวนการแผ่ขยายพื้นทะเล ซึ่งไดเอตเป็นคนแรกที่ใช้คำว่า Sea-floor spreading (หรือการแผ่ขยายพื้นทะเล) ในบทความของเขาที่ชื่อ “วิวัฒนาการของทวีปและพื้นทะเลจากการแผ่ขยายพื้นทะเล” โดยเชื่อว่าแผ่นสมุทรใหม่เกิดจากสารจากฐานธรณีภาคเคลื่อนขึ้นข้างบน (upwelling) และหลอมละลายบางส่วนตรงสันสมุทร ขณะที่พื้นทะเลหรือมหาสมุทรขยายกว้างขึ้นจนได้แผ่นเปลือกโลกเกิดขึ้นเรื่อยๆ ทวีปที่ติดกับมหาสมุทรก็เคลื่อนออกไปจากกันเรื่อยๆ ด้วยเหตุนี้แผ่นอเมริกาเหนือจึงเคลื่อนออกไปจากแผ่นยูเรเชีย(หรือในที่นี้คือแผ่นทวีปยุโรป) ด้วยการขยวมมหาสมุทรแอตแลนติกออกไปตั้งแต่ 180 ล้านปีมาแล้ว และเนื่องจากที่โลกเราไม่สามารถแผ่ขยายพื้นที่ผิวมานานแล้ว ดังนั้นเมื่อแผ่นเปลือกโลกมีการสร้างขึ้นใหม่ ณ จุดหนึ่งก็ต้องมีการทำลายไปในที่สุดด้วยอัตราที่เท่ากันด้วย โดยการมุดตัวลงไปใบบริเวณร่องทะเลลึก ตรงขอบแผ่นเปลือกนั่นเอง

กำลังขับเคลื่อนที่สำคัญของการเลื่อนพื้นทะเลหรือทวีปก็คือ กระแสการพาในบริเวณฐานธรณีภาคนั้นเอง ซึ่งเปลี่ยนการขับเคลื่อนในแนวคิ่งบริเวณสันสมุทร โดยเอาสารร้อนขึ้นมาจากชั้นเนื้อโลกให้ไหลเลื่อนไปเป็นขนานกับผิวพื้นทะเลเมื่อห่างจากสันสมุทรออกมาและก็ไหลเวียนเป็นเซลล์รูปกลม จนในที่สุดก็ไหลจมลงสู่เนื้อโลกตรงขอบแผ่นแฉกร่องทะเลลึก (ดูรายละเอียดในบทหลังๆ)

### 4.4 การสลับขั้วแม่เหล็กโลก

ความรู้เรื่องสนามแม่เหล็กโลกสามารถสลับขั้วกันได้เกิดขึ้นเมื่อต้นศตวรรษที่ 20 เนื่องจากค้นพบว่าหินบางก้อนแสดงกำลังแรงของแม่เหล็กที่กลับกัน และค่าความผิดปกติทางแม่เหล็กที่ลดต่ำลงในชั้นภูเขาไฟอาจเป็นผลมาจากการสลับขั้ว

ราวต้นๆ ค.ศ.1960 จึงเริ่มเกิดแนวคิดเกี่ยวกับการสลับขั้วสนามแม่เหล็กโลกขึ้น (ดูรูป 4.4) เนื่องจากนักธรณีวิทยาได้ค้นพบความเป็นแม่เหล็กที่สลับกับปัจจุบันมากขึ้นและเชื่อว่าการสลับโดยตัวเองอาจเป็นเรื่องยาก จนกระทั่งกลาง ค.ศ.1960 อาจารย์ค็อก (Cox และคณะ, 1969 และ 1967) ได้ค้นพบว่าชั้นธารละลายไหลอายุหลายล้านปีแสดงการสลับขั้ว ยิ่งในปัจจุบันได้พบว่าตะกอนที่

สะสมตัวอย่างเร็วและหินอัคนีตกพลีกร้าๆ สามารถแสดงการสลับขั้วได้ในนานประมาณ 2,000-3,000 ปี ภาวะเช่นนี้เกิดควบคู่กับการลดกำลังแรงของสนามแม่เหล็กประมาณ 10 % จากค่าเดิมไป เป็นเรื่อยๆ จนกระทั่งประมาณ 10,000 ปี จึงจะเกิดการสลับขั้วแบบสมบูรณ์

ในปัจจุบันยังไม่มีใครสามารถอธิบายการเกิดสนามแม่เหล็กโลกได้อย่างชัดเจน แต่เป็นที่ยอมรับว่าการเกิดน่าจะมาจากปัจจัยภายในโลกมากกว่า และน่าจะเป็นกระบวนการพลวัต แบบแท่งแม่เหล็ก (magnetostatic process) ภายในโลกจะไม่เป็นที่ยอมรับเนื่องจากไม่น่าจะมีกำลังแรงพอ (เพียงแต่เป็นเรื่องสมมติเพื่ออธิบายสนามแม่เหล็กเท่านั้น ที่เราเห็นในตำราต่างๆ) เพราะได้เคลื่อนที่ลงไปอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ซึ่งทำให้สารแม่เหล็กสลายตัวหมด และถ้าเป็นแท่งแม่เหล็กจริงเราก็ไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังแรงของสนามแม่เหล็กไปตามกาลเวลาได้ (temporal variation)

ด้วยเหตุนี้นักธรณีศาสตร์ส่วนใหญ่จึงเชื่อว่า การเกิดสนามแม่เหล็กโลกน่าจะเป็นผลมาจากกระบวนการพลวัตของไหลแม่เหล็ก (magnetohydrodynamic process) มากกว่า โดยเฉพาะมาจากแกนโลกบวก ซึ่งมีสมบัติเป็นของไหลอันเป็นผลจากการเคลื่อนตัวของของไหลในแกนโลกจนทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้ยังเชื่อว่าจะเกิดอยู่จริงในดาวเคราะห์และดาวไกลบางดวงด้วย ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการหมุนของดวงดาวและการเคลื่อนไหวของของไหลภายในจนเกิดสภาพการนำไฟฟ้าด้วย การไหลวนหรือการพาของไหลทำให้เหมือนไดนาโมปั่นไฟฟ้า คือถ้าเกิดการหมุนก็ได้ทั้งกำลังไฟฟ้าและกำลังแม่เหล็กด้วย ด้วยเหตุนี้เมื่อไดนาโมทำงานได้ การขับเคลื่อนก็จะเกิดขึ้น กระแสการเท็จเกิดโดยหลักการง่ายๆ แบบนี้ สนามแม่เหล็กจึงเกิดจากการไหลเวียนของของไหลในแถบโลก ซึ่งอาจถูกขับเคลื่อนโดยวัดความร้อนหรือแรงโน้มถ่วง (Jacobson, 1975)

เนื่องจากไดนาโมของไหลที่ได้กำลังแม่เหล็กจะหาคำตอบทางคณิตศาสตร์ไม่ได้ แต่ Glatzmeier & Roberts (1995) เชื่อว่ามีความเป็นไปได้ในแง่แบบจำลองเชิงตัวเลข (numerical modeling) จนทำให้เชื่อว่าการเกิดสนามแม่เหล็กโลกอาจทำได้ใน 2 วิธี วิธีแรกคล้ายกับการปั่นไดนาโมในการทำให้เกิดกระแสแม่เหล็กไฟฟ้า จากการหมุนขดลวดจนทำให้เกิดขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วบวกและขั้วลบ และภายใต้สภาวะบางอย่าง (ที่เรายังไม่รู้) ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่เกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหล จนทำให้สนามแม่เหล็กเกิดสลับทิศทางได้

ในอีกวิธีหนึ่งเชื่อว่าการสลับขั้วเป็นเรื่องของกระบวนการที่เกิดแบบไม่เป็นระบบ และเป็นผลจากการไหลเวียนของกระแสการพาในแกนโลก ซึ่งการไหลเวียนนี้เกิดขึ้นคล้ายกับแรงโคริโอลิส (Coriolis force) ที่เกิดจากการหมุนของโลก ทำให้เกิดกระแสไหลวนคล้ายกันหอยได้เหมือนการเกิดเป็นพายุไซโคลน (ดู Parker, 1969) คือหมุนในทิศตรงข้ามเมื่ออยู่นขละซีกโลก การเกิดไซโคลนมักไม่เป็นระบบ โดยลักษณะนี้หลายคนจึงเชื่อว่าการสลับขั้วมักเกิดขึ้นหลังจากการไหลวนแบบก้นหอยที่ขั้วโลก

Fuller (1987) ได้เสนอเรื่องการสลับขั้วของแม่เหล็กโลก (รูป 4.4) ว่าอาจจะเกิดเฉพาะแห่งในแกนโลกก็ได้ แต่ก่อนหน้านั้น Bloxham & Gubbins (1985) ได้นำเสนอแบบจำลองสนามแม่เหล็กว่ามาจากรอยต่อระหว่างแกนโลกกับเนื้อโลก เพราะเนื่องจากในช่วง ค.ศ. 1715-1980 ค่ากำลังแรงแม่เหล็กมีค่าลดลงเรื่อยๆ บนผิวโลก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ Gubbins (1989) ได้ใช้แบบจำลองนี้อธิบายว่าการที่สนามแม่เหล็กโลกลดกำลังลงเรื่อยๆ ว่าเป็นผลให้เกิดภาวะการสลับขั้วเฉพาะแห่งที่เกิดในซีกโลกใต้ก่อน และเป็นต้นแบบที่นำไปสู่ภาวะการสลับขั้วอย่างแท้จริงทั้งโลก ดังแสดงในรูป 4.4 ซึ่งก็มีนักโรณีศาสตร์หลายคน เช่น Kearey & Vine (1996) แย้งว่ากำลังแรงอาจค่อยกลับคืนสู่สภาพเดิมคือคงจะไม่ถึงกับทำให้สลับขั้วได้ เหมือนที่เคยเกิดในอดีต แต่ถ้าแนวคิดของ Gubbins ถูก การสลับขั้วคงเริ่มเกิดในบริเวณละติจูดหรือเส้นแวงต่ำทางซีกโลกใต้ก่อน ซึ่งอาจมีตำแหน่งที่ถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิตรงฐานของเนื้อโลกจากกระแสการพาในชั้นเนื้อโลก

ได้ประเมินกันว่าการสลับขั้วแม่เหล็กคงใช้เวลายาวนาน คือ ประมาณ 5000 ปี และตามด้วยการลดกำลังแรงของแม่เหล็ก แต่จากการศึกษาของ Cox และคณะ (1995) เชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงทิศการเป็นแม่เหล็กจากชั้นหินละลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก คือ ด้วยอัตรา 6° ต่อวัน ซึ่งถ้าการศึกษาของ Cox และคณะ ถูกต้องคงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองการเกิดสนามแม่เหล็กของเราใหม่แน่ๆ และอาจทำให้เราได้ปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงรูปลักษณะของโลกในเชิงสนามแม่เหล็กและเหตุการณ์จะเป็นอย่างไรคงต้องมานั่งรอดูกันแน่ๆ

ข้อมูลจากรูป 4.5 แสดงให้เห็นว่าจำนวนครั้งของการสลับขั้วเฉลี่ยในทุกๆ 10 ล้านปี มักไม่คงที่ ในช่วงกาลเวลาธรณีวิทยาอันยาวนาน ซึ่งในรูปคือ 160 ล้านปี แต่จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในช่วง 100 ล้านปีที่แล้ว หรือประมาณปลายยุคครีเตเชียส จะนวนการสลับขั้วลดลงเหลือศูนย์ คือไม่มีการสลับขั้วในช่วง 90 ถึง 100 ล้านปีที่แล้ว (Livermoore และคณะ, 1989, Stothers, 1986) และเชื่อกันว่าก่อนถึงตอนช่วงปลายยุคครีเตเชียสสนามแม่เหล็กโลกอยู่ในภาวะปกติไม่สลับขั้ว (normal polarity) เป็นเวลายาวนานถึง 35 ล้านปี จากการศึกษาสถานะแม่เหล็กโลกบรรพกาลในชั้นหินตะกอนบกของประเทศไทยสมัยยุคครีเตเชียส โดย Charusin และคณะ (2006) และ Imsamnt และคณะ (2002) ทำให้เชื่อว่าเกิดภาวะการสลับขั้ว(ไปมา)อย่างยาวนานตอนช่วงปลายยุคครีเตเชียสและการเกิดสลับขั้วยาวนานเกิดมาก่อนหน้านั้นอีกครั้งเมื่อตอนช่วงรอยต่อระหว่างปลายยุคคาร์บอนิเฟอรัสกับต้นยุคเพอร์เมียน อย่างไรก็ตาม Cox (1975) เชื่อว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ของการสลับขั้วเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสถานะที่เกิดตรงรอยต่อระหว่างเนื้อโลกกับแกนโลก ผลการเปลี่ยนแปลงบริเวณดังกล่าวในโลกทำให้ภาวะกระแสการพา(ความร้อน)ในโลกเปลี่ยนแปลง จนทำให้มีผลต่อการแปรสัณฐานของโลกในที่สุด Courttillo & Besse (1988) ได้เสนอรูปแบบจำลองที่ว่าความหนาของรอยต่อระหว่างเนื้อโลกกับแกนโลกมีผลต่อกระแสการพา(ความร้อน)ที่ขับเคลื่อนการแปรสัณฐานเปลือกโลก ในส่วนเนื้อโลกเหนือบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อโลกกับแกนโลก(ที่เรียกรอยไม่ต่อเนื่องกิวดินเบิร์ก – Gutenberg Ascontinvity) ได้รับชีพรความร้อน

(northern pulse) ที่ถูกปล่อยออกมาจากรอยต่อนั้น ซึ่งพิจารณาว่านี่คือการปล่อยความร้อนแปรผันตามความหนาของรอยต่อ ยิ่งรอยต่อหนายิ่งมีการปล่อยความร้อนมาก การพวยพุ่งของความร้อนเป็นแนวตั้งจนมาถึงรอยต่อระหว่างฐานธรณีภาคกับธรณีภาค จนเกิดเป็นจุดร้อนในที่สุด ในอีกด้านหนึ่งให้รอยต่อระหว่างเนื้อโลกกับแกนโลก บางส่วนอาจปล่อยความร้อน (Cold thermal pulse) ออกมา ด้วยเหตุนี้ Vogt (1975) เชื่อว่าแบบจำลองดังกล่าวบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดเป็นจุดร้อนกับปริมาณความถี่ของการสลับขั้ว และต่อมา Larson & Olson (1991) ได้เสนอว่าการสลับขั้วที่บ่อยครั้งคงสัมพันธ์กับปริมาณการพวยพุ่งความร้อนจากเนื้อโลก ซึ่งภาวะเช่นนี้เป็นผลทำให้เกิดกระแสการพาความร้อนแบบจมลง (convective overturn) ไปยังแกนโลกเพื่อแทนที่การสูญเสียความร้อน ดังนั้นการเพิ่มกระแสการพา(ความร้อน)ยังผลให้เกิดการสลับขั้วแม่เหล็กโลกนั่นเอง

#### 4.5 สมมติฐานไวน์-แมททิว (Vine-Mathews Hypothesis)

Vine & Mathews (1963) ได้เสนอผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ลงในวารสาร Nature เกี่ยวกับการเชื่อมโยงสลับขั้วแม่เหล็กโลกกับการแผ่ขยายของทวีป ซึ่งต่อมาผลการศึกษาของพวกเขาเป็นที่ยอมรับจนเป็นสมมติฐานที่เรียก สมมติฐานไวน์-แมททิว

สมมติฐานไวน์-แมททิว เป็นสมมติฐานที่อธิบายถึงการเกิดแถบแม่เหล็กในพื้นที่ท้องทะเล ซึ่งตั้งอยู่บนแนวคิดที่ว่านี่เปลือกสมุทรใหม่เกิดมาจากการแข็งตัวของหินหนืดที่แทรกดันเข้ามาตามรอยแตกของสันสมุทร (ดูรูป 4.6) และเมื่อหินหนืดเกิดการเย็นตัวลงจนต่ำกว่าจุดคูรี (Curie point) ผลทำให้สารในหินหนืดเกิดการเหนี่ยวนำจนเป็นเส้นแม่เหล็ก (magnetic lineation) ซึ่งวางตัวตามแนวสนามแม่เหล็กโลกในขณะนั้น กระบวนการเกิดแผ่นเปลือกโลกที่เกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน (แม้ในขณะนี้ก็ยังเกิดอยู่) นี้เองที่ทำให้เกิดภาวะสมมาตรของกำลังแรงสนามแม่เหล็กทั้งสองข้างของสันสมุทรจนมีลักษณะเป็นแถบแม่เหล็กขนานกับสันสมุทรได้ ขณะที่หินหนืดเย็นและแข็งตัวพร้อมๆ กัน ถ้าขั้วแม่เหล็กโลกตอนนั้นแสดงภาวะการสลับขั้ว หินหนืดที่กำลังแข็งตัวก็เกิดการสลับขั้วด้วย (Vine, 1966) ด้วยเหตุนี้เปลือกสมุทรที่เกิดใหม่ทั้งสองข้างของสันสมุทรจึงเปรียบเสมือนแผ่นบันทึบทวีปผาแผ่สลับกันไปมานั่นเอง

เปลือกสมุทรหินบะซอลต์มักแสดงลักษณะเฉพาะที่เรียกอัตราส่วน โคนิงส์เบอร์เกอร์ (Koningsberger) ซึ่งเป็นกำลังแรงของการเป็นแม่เหล็กส่วนที่เหลือที่มากกว่ากำลังแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำมาก และเนื่องจากรูปทรงความผิดปกติทางแม่เหล็กถูกควบคุมด้วยแรงทิศหรือเวกเตอร์ (vector) แม่เหล็กทั้งหมดซึ่งหมายถึงผลรวมระหว่างการเป็นแม่เหล็กที่เหลืออยู่กับที่ถูกเหนี่ยวนำ ส่วนรูปร่างเส้นแรงแม่เหล็กถูกควบคุมด้วยทิศทางแม่เหล็กปฐมภูมิ ด้วยเหตุนี้ส่วนของเปลือกโลกที่แสดงสนามกำลังแม่เหล็กปกติในซีกโลกเหนือ(หรือซีกโลกใต้) ณ เส้นรุ้งสูงๆ จึงทำมุมเอียงเท

(inclination) ชันมากไปทางทิศเหนือ แต่แรงทิศหรือเวกเตอร์ของกำลังแม่เหล็กที่สลับขั้วกลับเอียงเทไปทางทิศใต้ ในขณะที่เปลือกโลกที่อยู่ในเส้นรุ้งต่างๆ (ใกล้เส้นศูนย์สูตร) ก็สามารถให้ความผิดปกติแบบเป็นบวกและเป็นลบเหมือนกัน แต่เนื่องจากมีค่ามุมเอียงเทที่ต่ำ (คือเอียงไม่มาก) ค่าความผิดปกติที่ได้จึงอาจเป็นได้ทั้งค่าปกติและสลับ ทำให้ภาวะความสมมาตรของกำลังแม่เหล็กไม่ชัดเจน สำหรับบริเวณเส้นศูนย์สูตร เนื่องจากสนามแม่เหล็กโลกอยู่ในแนว(เกือบ)ระดับ ค่าความผิดปกติจึงเกิดสอดคล้องกับมวลเปลือกโลกที่แสดงภาวะแม่เหล็กขั้วปกติ (normally magnetized block) ส่วนค่าความผิดปกติบวกจะเกิดสอดคล้องกับมวลเปลือกโลกที่แสดงภาวะแม่เหล็กสลับขั้ว (reversely magnetized block) โดยภาวะเหล่านี้แสดงลักษณะที่ตรงข้ามกับที่ปรากฏ ณ เส้นรุ้งสูงๆ ใกล้ขั้วโลก

นอกจากนั้น ความสูงของช่วงคลื่นความผิดปกติจะลดลงชัดเจนจากขั้วโลกไปยังเส้นศูนย์สูตร ด้วยเหตุนี้กำลังแรงสนามแม่เหล็กโลกจึงลดลงตามไปด้วย รูป 4.7 แสดงถึงรูปแบบและความสูงของความผิดปกติทางแม่เหล็ก ณ เส้นรุ้งต่างๆ ซึ่งอยู่ห่างออกไปจากทั้งสองข้างของสันสมุทรตามแนวเหนือ-ใต้ นอกจากนี้ นักธรณีศาสตร์ยังพบว่าการวางตัวของสันสมุทรก็มีผลต่อรูปแบบและความสูงหรือแอมพลิจูดของความผิดปกติทางแม่เหล็กอีกด้วย เพราะทิศแรงหรือเวกเตอร์แม่เหล็กที่วางตัวในแนวตั้งมีผลต่อค่าความผิดปกติทางแม่เหล็ก ซึ่งหมายถึงถ้าสันสมุทรอยู่ในแนวตะวันออก-ตกและแนวตัดขวางอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ ผลทำให้ความผิดปกติมีค่ามากที่สุด แต่ในทางตรงข้ามถ้าสันสมุทรวางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้และแนวตัดขวางอยู่ในทิศตะวันออก-ตะวันตก เราจะได้ค่าการผิดปกติที่น้อยที่สุด ซึ่งลักษณะดังกล่าวได้แสดงในรูป 4.8 ดังนั้นสรุปก็คือระยะความสูงหรือแอมพลิจูดของค่าการผิดปกติทางแม่เหล็กลดลง ณ ที่เขตเส้นรุ้งต่ำและเมื่อแนวการวางตัวของสันสมุทรเปลี่ยนจากทิศตะวันออก-ตะวันตกไปในทิศเหนือ-ใต้

คำถามก็คือเมื่อไหร่ที่เราจะเห็นความสมมาตรของการผิดปกติทางแม่เหล็กได้ชัดที่สุด และคำตอบที่ถูกต้องอาจมีได้ 3 กรณีดังนี้ (1) ถ้าสันสมุทรปรากฏในเขตเส้นรุ้งแม่เหล็กมากกว่า  $69^{\circ}$  (หรือเทียบเท่ากับเส้นรุ้งภูมิศาสตร์ประมาณที่  $45^{\circ}$ ) (2) ถ้าสันสมุทรวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ในทุกเขตเส้นรุ้ง และ (3) ณ สันสมุทรวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก ณ เขตศูนย์สูตร (แม่เหล็ก)

#### 4.6 ลำดับชั้นทางแม่เหล็ก

เมื่อเราทราบว่าค่าความผิดปกติทางแม่เหล็ก เราก็สามารถนำข้อมูลเหล่านี้มาใช้ในการหาอายุแผ่นสมุทรได้ และทำให้มีการกำหนดช่วงอายุทางแม่เหล็กเพื่อจัดทำตารางเวลาการสลับขั้วแม่เหล็ก วิธีการนี้เริ่มมีการปรับปรุงจนสามารถจัดทำช่วงอายุที่มีความถูกต้องแม่นยำไปจนถึงกลางยุคจูเรสซิกได้ สมมติฐานไวน์-แมททิวอธิบายถึงลำดับชั้นของความผิดปกติทางแม่เหล็กเมื่อห่างออกไปจากสันสมุทรในรูปของการเป็นแม่เหล็กค่าบวกและค่าลบของเปลือกสมุทร สมมติฐาน



นี้ได้นำมาใช้กับหินละลายบนบกโดย Cox และคณะ (1967) เมื่อพวกเขาได้วัดค่าความเป็นแม่เหล็กที่เหลือค้างในหินละลายบนบก โดยสามารถหาอายุโดยวิธี K-A ย้อนหลังไปได้ 4.5 ล้านปี แต่ก็ไม่สามารรถหาอายุที่มากกว่านี้ได้เนื่องจากค่าที่ได้มีความผิดพลาดสูงเกินไป ขณะเดียวกันช่วงอายุในการเกิดขั้วที่เชื่อถือได้ต้องมีอายุที่มากกว่า 50,000 ปี แต่ต่อมา Conde & Kent (1992) ได้เสนอตารางเวลาทางธรณีวิทยาของการสลับขั้วแม่เหล็กเสียวใหม่ ดังแสดงในรูป 4.9 และได้จัดแบ่งย่อยอายุการสลับขั้วลงไปถึง อายุขั้ว (Polarity chron) ซึ่งหมายถึงช่วงอายุโดยประมาณซึ่งอาจนับหลักหมื่นถึงหลักแสนปีที่ขั้วแม่เหล็กนั้นๆ จะคงอยู่ได้ อายุขั้วอาจประกอบด้วยขั้วปกติเป็นหลัก เช่น อายุขั้ว Brunhes (Brns) (ที่เริ่มตั้งแต่ 0.78 ล้านปีจนถึงปัจจุบัน) ที่เป็น + เสมอ อายุขั้ว Matuyama (Matuyama) (ตั้งแต่อายุ 2.60 ล้านปีถึง 0.78 ล้านปี) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นขั้ว + และมีขั้ว - บ้างสลับ ที่เรียก โอลดูไว (Olduvai)

ตารางเวลาทางแม่เหล็กได้มีการพัฒนามากขึ้นเมื่อมีการสำรวจสภาวะแม่เหล็กบรรพกาลจากหลุมเจาะลึกจากมหาสมุทรแอนตาร์กติก โดยออบไดค์ และจากกลางมหาสมุทรแปซิฟิก (Opdyke และคณะ, 1966, 1974) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลทั้งอายุและค่าแม่เหล็กที่ต่อเนื่องกว่าหินละลายบนบกและสามารถใช้หาอายุของสัต์ว์ขนาดเล็กได้ นอกจากนั้นยังใช้กับแท่งหิน (drill cores) ที่อยู่ในเส้นรุ้งสูงๆ ได้ ที่มีค่ามุมกดสูง (high inclination) ด้วยวิธีการนี้ทำให้เราสามารถค้นพบการสลับขั้วได้มากถึง 11 ขั้วในช่วงเวลา 3.5 ล้านปี และโดยเฉพาะข้อมูลที่ได้จากกลางมหาสมุทรแปซิฟิกทำให้ Opdyke และคณะ (1974) ได้ทราบพฤติกรรมของโลกทางแม่เหล็กย้อนหลังไปได้ถึง 20 ล้านปีจากข้อมูลของแท่งหินเจาะลึก

Pitman & Heirtzler (1966) และ Vine (1966) ซึ่งผลงานพวกเขาได้ดีพิมพ์ลงในนิตยสาร Science ได้เสนอข้อมูลอายุการสลับขั้วเพื่อคำนวณหารูปลักษณะทางแม่เหล็กที่ควรจะเป็นเมื่อเข้าใกล้ยอดสันสมุทรแปซิฟิกและแอตแลนติก และเมื่อประมาณการอัตราการแผ่กว้างพื้นทะเล ทำให้พวกเขาสามารถคำนวณหาลำดับค่าของความผิดปกติทางแม่เหล็ก (รูป 4.10) และอัตราการแผ่กว้างพื้นทะเลได้ (ดูตาราง 4.1) และด้วยวิธีดังกล่าวสามารถบ่งบอกถึงการสลับขั้วย้อนหลังได้ถึง 100 ล้านปี สำหรับส่วนที่เป็นขอบของสันสมุทร รูป 4.11 แสดงถึงลักษณะความผิดปกติทางแม่เหล็กของสันกลางมหาสมุทรแอตแลนติกทางตอนใต้ และต่อมาได้แผ่ขยายไปจนครอบคลุมแผ่นสมุทรที่มีอายุแก่ที่สุดคือในยุคจูแรสซิก การสลับขั้วแม่เหล็กเกิดมาก่อนยุคจูแรสซิกก็ได้ โดยอาศัยข้อมูลชั้นหินรู้อายุแน่นอนบนบกทำให้สามารถตรวจพบการสลับขั้วย้อนหลังไปถึงอายุ 2.1 พันล้านปีได้ การศึกษารูปลักษณะแม่เหล็กจากมหาสมุทรต่างๆ ทำให้เราทราบถึงอัตราการเคลื่อนที่หรือการแผ่ขยายของพื้นทะเลได้ รูป 4.12 แสดงถึงระยะทางจากสันสมุทรต่างๆ ที่มีรูปลักษณะแม่เหล็กเดียวกันกับของตอนใต้ ณ อายุเดียวกัน ซึ่งคิดว่ามีอัตราเร็วคงที่ ผลการศึกษาทำให้ทราบว่า ณ จุดเปลี่ยนความลาดชันของสันสมุทรแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วด้วย และเป็นการ

แสดงให้เห็นว่าแนวคิดที่ว่าอัตราเร็วในการแผ่ขยายพื้นทะเลของมหาสมุทรแอตแลนติกตอนใต้ ถูกต้องด้วย

Heirtzler และคณะ (1968) ได้สร้างตารางเวลาแม่เหล็กโลกขึ้น โดยอาศัยแนวคิดที่ว่าอัตราการเคลื่อนที่หรือแผ่ขยายพื้นทะเลแปซิฟิกใต้คงที่ตลอดเวลาในช่วง 4 ล้านปี และได้จัดแบ่งค่าผิดปกติเด่นๆ ที่สอดคล้องกับขั้ว + ออกเป็นตัวเลข ตั้งแต่ 1 ถึง 32 ตามอายุที่เพิ่มขึ้น ทำให้พวกเขาได้จัดแบ่งตารางเวลาได้ยาวนานถึง 80 ล้านปี โดยมีค่าความผิดพลาด  $\pm 5$  ล้านปี ต่อมา Larson & Pitman (1972) ได้ต่อบรรยายของ Heirtzler และคณะ (1968) ออกไป โดยใช้ข้อมูลแผ่นสมุทรเก่าของมหาสมุทรแปซิฟิกตะวันตกจนจบได้อายุถึง 160 ล้านปี จากข้อมูลการสำรวจของโครงการเจาะสำรวจทะเลลึก (DSDP หรือ Deep Sea Drilling Project) ในบริเวณแถบมหาสมุทรแปซิฟิกและแอตแลนติก ทำให้เราได้ตารางเวลาแม่เหล็กโลกใหม่ที่พัฒนาโดย Harland และคณะ (1982) (รูป 4.13) โดยพวกที่ระยะเวลาการสลับขั้วยาวนานจะได้รับการกำหนดเป็นตัวเลขตั้งแต่ M 0 ถึง M 29 (ในที่นี้ M หมายถึง Mesozoic) และก็ได้มีการปรับปรุงให้ดีขึ้นโดย Berggren และคณะ (1985) ในช่วงมหายุคควาซีวิน (ซีโนโซอิก) และโดย Kent & Gradstein (1985) สำหรับช่วงยุคครีเตเชียสและยุคจูแรสซิก การปรับปรุงตารางเวลาได้จัดทำให้ดีขึ้นโดยเน้นข้อมูลที่ได้อายุใหม่จากค่าผิดปกติ + หมายเลข 5, 12-13, 21-26 และ 31-32 ค่าที่เด่นชัดมากคือ ค่าขั้วปกติอันยาวนานในยุคครีเตเชียส ซึ่งเป็นช่วงยาวนานมากคือประมาณ 35 ล้านปี (ตั้งแต่ 82-117 ล้านปี) ซึ่งเป็นช่วงที่ในทะเลไม่แสดงภาวะความผิดปกติและจัดเป็นช่วงเรียบทางแม่เหล็ก (magnetic quiet zone)

เมื่อเราได้ค่าอายุขั้วสลับ (reversal chronology) ในทะเล เราก็สามารถตรวจหาแนวสนามแม่เหล็กจากแผ่นแม่เหล็กโลกได้ โดยการกำหนดจุดอายุเท่า (isochron) จนเราจัดแนวพื้นทะเลออกเป็นมณฑลอายุ (age province) เส้นแรงแม่เหล็กที่อายุเดียวกันจากด้านใดด้านหนึ่งของสันสมุทรจะต่อกันโดยใช้เทคนิคที่ทำโดยใช้ขอบทวีปในการต่อทวีป ซึ่งทำให้เราได้เส้นทางการเคลื่อนที่ของพื้นมหาสมุทรได้ รูป 4.14 แสดงรูปร่างการเคลื่อนที่ของทวีปอเมริกาเมื่อเทียบกับยุโรปและอฟริกา ต่อมา Nunns (1983) ได้ค้นพบว่าแนวการเคลื่อนที่ของกรีนแลนด์, ไอซ์แลนด์ และสก็อตแลนด์ แสดงการเคลื่อนที่ยุ่งยากซับซ้อนมากกว่า

#### 4.7 ผลการเจาะสำรวจทะเลลึก (Deep-sea Drilling)

สมมติฐานไวน์-เมททิว และตารางเวลาแม่เหล็กได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างเป็นอิสระต่อกัน ในช่วงที่สามของ DSDP ซึ่งต่อมาภายหลังเปลี่ยนชื่อเป็น ODP (หรือ Ocean Drilling Program) และทางมหาสมุทรแอตแลนติกตอนใต้ได้มีการเจาะสำรวจพื้นทะเลลึกเป็นชุด (รูป 4.15 a) โดยกำหนดให้หลุมเจาะขวางสันสมุทรแอตแลนติก เพื่อหาอายุหินบะซอลต์จากชั้น 2 ของแผ่นสมุทร แต่เนื่องจากสภาพหินสดไม่มาก ทำให้อายุที่ได้ไม่เป็นที่ยอมรับ จึงใช้อายุที่ได้จากบรรพชีวินจาก

ชั้น 1 ของแผ่นสมุทรแทน ในรูป 4.15 b ตะกอนที่แก่ที่สุดจากตัวอย่าง ได้ถูกกำหนดจุดเทียบกับระยะทางที่ห่างจากสันสมุทร ซึ่งทำให้เราได้เส้นกราฟที่เกือบเป็นเส้นตรงและสามารถคำนวณหาอัตราการเคลื่อนที่ของพื้นทะเลได้ประมาณ 4 มม ต่อปีสำหรับของสันสมุทรแอตแลนติก

#### 4.8 จุดเริ่มต้นของรอยเลื่อนแปลงรูป (Transform Faults)

แม้ว่าทฤษฎีการแผ่กว้างพื้นทะเลได้เสนอว่าแผ่นสมุทรจะถูกสร้างขึ้นตรงสันกลางสมุทร และถูกทำให้สมดุลย์โดยการถูกคูดกลงไปข้างใต้ในบริเวณแนวมุดตัว ซึ่งเป็นการอธิบายลักษณะของแผ่นธรณีภาคใน 2 มิติ แต่เมื่อพิจารณาถึงมิติที่ 3 ว่าสันสมุทรและเขตมุดตัวไปสิ้นสุดที่ไหนในแนวราบหรือแนวระดับ ปัญหานี้ได้ถูกเสนอและไขปัญหาโดย ศาสตราจารย์ ทุโซ วิลสัน (Wilson, 1965) ซึ่งอธิบายว่าจุดปลายของ 2 ลักษณะนี้เชื่อมต่อโดยแนวรอยเลื่อนอีกแบบหนึ่ง ที่เรียกรอยเลื่อนแปลงรูป (transform fault) และรอยเลื่อนนี้มีกวางตัวตั้งฉากกับสันสมุทรและ ณ ที่จุดนี้แผ่นธรณีภาคไม่มีการสร้างหรือทำลาย แต่เป็นเพียงลักษณะที่แผ่นเคลื่อนที่ผ่านกันแบบสัมผัสกัน ณ จุดนี้เราจึงพอทราบว่าแผ่นเปลือกโลกหรือแผ่นธรณีภาคมีการเคลื่อนที่ใน 3 ลักษณะ คือ การเคลื่อนที่แบบออกจากกัน การเคลื่อนที่แบบเข้าหากัน และการเคลื่อนที่แบบสวนทางกัน ซึ่งในรายละเอียดจะได้นำเสนอในบทที่ 7 ต่อไป