

ระบบรอยแตกของหมวดหินมอนเทอร์เรย์ บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร สหรัฐอเมริกา

นางสาววิชาณี มณีไถกย์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

FRACTURE SYSTEM OF THE MONTEREY FORMATION AT ARROYO BURRO BEACH, USA

Miss Wichanee Maneelok

A report submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of the Bachelor of Science in Geology  
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University  
Academic Year 2014

วันที่ส่ง

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

วันที่อนุมัติ

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

ลงชื่อ \_\_\_\_\_

( \_\_\_\_\_ )

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

หัวข้องานวิจัย:	ระบบรอยแตกของหมวดหินมอนเทอเรย์ บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร สหรัฐอเมริกา
นิสิตผู้ทำการวิจัย:	นางสาววิชาณี มณีโลกย์
ภาควิชา:	ธรณีวิทยา
อาจารย์ที่ปรึกษา:	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญพงศ์ กาญจนพยนต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม:	Professor Atilla Aydin, Ph.D.
ปีการศึกษา:	2557

### บทคัดย่อ

หินโผล่ของหมวดหินมอนเทอเรย์ (The Monterey Formation) บริเวณด้านตะวันตกเฉียงใต้ของชายฝั่งแคลิฟอร์เนียปรากฏลักษณะของรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่เกี่ยวข้องในหลายระดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการแปรสัณฐานทางธรณีวิทยายุคนีโอซีน ในกระบวนการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกฟาราลอนใต้แผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือ วิวัฒนาการของชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำตะวันตกและวิวัฒนาการของระบบรอยเลื่อนแบบขวาเข้าซานแอนเดรียส นอกจากนี้ยังมีลักษณะเป็นชั้นหินกักเก็บปิโตรเลียมและเส้นทางการเคลื่อนที่ของของไหลที่สำคัญอีกด้วย

จากการสำรวจภาคสนามและเก็บข้อมูลของรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นที่พบในระดับกลาง (Mesoscopic scale) บริเวณหินโผล่หน้าผาตลอดแนวชายหาดอาร์โรโยเบอร์โรเป็นระยะทาง 2 กิโลเมตร รวมทั้งการบันทึกข้อมูลและวิเคราะห์รอยแตกโดยอาศัยภาพถ่ายและการกำหนดตำแหน่งข้อมูลในตาข่ายมิติสเตอร์ไอกร้าฟิซนิคพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ สามารถสรุปผลได้ดังนี้ (1) หินโผล่ในพื้นที่ศึกษาปรากฏลักษณะรอยแตกที่มีความสัมพันธ์กัน 6 ประเภท ได้แก่ รอยแตกที่ตั้งฉากกับชั้นหิน รอยแตกในแนวตั้ง รอยแตกในแนวระดับ รอยเลื่อนย้อน รอยเลื่อนปกติ และรอยเลื่อนตามแนวระดับ (2) มีแรงหลักกระทำแบบบีบอัดในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะธรณีแปรสัณฐานของพื้นที่ (3) รอยแตกมีความสัมพันธ์หลักกับการเกิดชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำและมีความสัมพันธ์รองกับการเกิดรอยแตกเฉือน (4) มีลำดับชั้นกลไกการเกิดและวิวัฒนาการของรอยแตก 4 ลำดับชั้นได้แก่ ลำดับชั้นการสะสมตัว ลำดับชั้นการดึงออก ลำดับชั้นการเฉือนและการบีบอัด และลำดับชั้นการบีบอัด

**คำสำคัญ:** หมวดหินมอนเทอเรย์, ชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำตะวันตก, ระบบรอยเลื่อนแบบขวาเข้าซานแอนเดรียส

**Project title:** FRACTURE SYSTEM OF THE MONTEREY FORMATION AT  
ARROYO BURRO BEACH, USA

**Researcher:** Wichanee Maneelok

**Department:** Geology

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

**Co-Advisor:** Professor Atilla Aydin, Ph.D.

**Academic Year:** 2014

---

### Abstract

Outcrops of the Monterey Formation at the southwestern coastal California display the abundance of complex fractures and related structural features at many scales. Those fractures and structural features are related to the Neocene tectonic activities; subduction of the Farallon microplate under the North America plate, the evolution of Western Transverse folds and thrust faults and development of San Andreas transtentional dextral system. Moreover, they also display as high permeability reservoirs and major conduits for fluid transportation.

Using field observation and collecting attitude of fractures and related structural features in mesoscopic scale along 2-km-long cliff-face exposures at Arroyo Burro beach with structures mapping and several software packages (Stereonet and Rose diagram), I deciphered fracture system and relationship with the structural mechanism. I find that (1) There are 6 types of fractures displayed; bed-perpendicular fractures, vertical fractures, sub-horizontal fractures, thrust faults, normal faults and strike-slip faults (2) Major compression force occur in NE-SW direction (3) Fractures have major relationship with fold and thrust faults and minor relationship with shear fractures (4) There are 4 structural mechanisms and evolution stages; deposition, tension, shear and compression and compression.

**KEY WORDS:** The Monterey Formation, Western Transverse Fold and Thrust faults, San Andreas transtentional dextral system

## กิตติกรรมประกาศ

ประการแรกขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทางด้านงบประมาณและค่าใช้จ่ายในการศึกษาครั้งนี้ รวมไปถึงยานพาหนะ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆในการทำงานภาคสนาม

ประการที่สองขอขอบคุณโครงการงานวิจัยภาคฤดูร้อน (Summer Undergraduate Research in Geosciences and Engineering (SURGE 2014) School of Earth, Energy and Environmental Sciences) มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford University) ที่ให้การสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่าย เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการทำงานภาคสนาม

ประการที่สามขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงแด่ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญพงศ์ กาญจนพยนต์ และศาสตราจารย์ ดร. Atilla Aydin (Professor Atilla Aydin, Ph.D.) ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยในครั้งนี้ อาจารย์ทั้งสองท่านได้เสียสละเวลามาให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาตลอดจนคำตักเตือนในการออกภาคสนามและการทำงานขั้นตอนต่างๆ ตลอดการทำงานวิจัย

ประการที่สี่ขอขอบคุณนายธนพันธ์ ผาทอง, นายพงศภัค ธิระเศรษฐ์, นายปริดา ภาเปียง, นาย นวภัทร กลมเกลียว, นายวัชรพล ศรีียงนอก, นายธนเนตร มีรัตน์ และนางสาวภัสติกร สุวรรณจินลา ที่ให้การช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนามรวมทั้งให้คำแนะนำและคำปรึกษาตลอดการทำงานวิจัย

ประการสุดท้ายขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่ให้กำเนิด ให้การเลี้ยงดู ให้การอบรมสั่งสอน ตลอดจนให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยครั้งนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูปภาพ	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ (Introduction)</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญ (Background and Rationale)	1
1.2 พื้นที่ศึกษา (Study Area)	4
1.3 นิยามปัญหา (Problem Defined)	6
1.4 วัตถุประสงค์ (Objectives)	6
1.5 สมมุติฐาน (Hypothesis)	6
1.6 ขอบเขตการศึกษา (Scope of study)	6
1.7 ระยะเวลาการดำเนินงาน (Work plan)	7
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ (Expected Output)	7
1.9 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา (General setting of study area)	7
1.10 ธรณีวิทยาทั่วไป (General Geology)	8
1.11 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literatures Review)	9

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)</b>	
2.1 การศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น	13
2.2 การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม	14
2.3 การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากภาคสนาม	15
2.4 การตีความผลการวิเคราะห์ข้อมูล	18
2.5 การสรุปผลการศึกษา	18
2.6 การจัดทำรายงานและนำเสนอ	18
<b>บทที่ 3 ผลการศึกษา (Results)</b>	
3.1 ธรณีวิทยาและธรณีฐานฐานวิทยา (Geology and Geomorphology)	20
3.2 ธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural geology)	21
1) จุดศึกษาที่ 1	22
2) จุดศึกษาที่ 2	25
3) จุดศึกษาที่ 3	28
4) จุดศึกษาที่ 4	34
<b>บทที่ 4 อภิปรายผลการศึกษา (Discussion)</b>	
4.1 กลไกและวิวัฒนาการของชั้นหิน	
1) ลำดับชั้นการสะสมตัวของชั้นหิน (Deposition stage)	40
2) ลำดับชั้นการดึงออก (Tension stage)	41
3) ลำดับชั้นการเฉือนและการบีบอัด (Shear and Compression stage)	42
4) ลำดับชั้นการบีบอัด (Compression stage)	43



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา (Conclusion)</b>	
5.1 ลักษณะรอยแตกที่พบ	46
5.2 สรุปกลไกและวิวัฒนาการของชั้นหิน	47
5.3 ความสัมพันธ์ของรอยแตกกับกระบวนการธรณีแปรสัณฐาน	48
5.4 ความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจ	48
<b>เอกสารอ้างอิง (Reference)</b>	49

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ภาพตัดขวางแสดงแนวการวางตัวของชั้นหิน ชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนที่พบในหินโผล่บริเวณริมชายหาดอาร์โรโยเบอร์โรทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนีย	2
รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันของชั้นหินแต่ละชนิด ได้แก่ รอยเลื่อนในชั้นหิน A รอยแตกแบบเปิดออกในชั้นหิน C และชั้นหิน B ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง	2
รูปที่ 1.3 วิวัฒนาการของรอยแตกที่มีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจ โดยมีลักษณะเป็นชั้นหินกักเก็บปิโตรเลียมและมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของสารไฮโดรคาร์บอน	3
รูปที่ 1.4 น้ำมันดินปริมาณมากที่ซึมออกมาจากรอยแตกของหินในพื้นที่ศึกษา	3
รูปที่ 1.5 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษาบริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โรด้านตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา	5
รูปที่ 1.6 แผนที่ธรณีวิทยามาตราส่วน 1:24,000 ของพื้นที่ศึกษาในหมวดหินมอนเทอร์เรย์ บริเวณเมืองซานตาบาร์บารา ประเทศสหรัฐอเมริกา	5
รูปที่ 1.7 ลักษณะการแปรสัณฐานทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา	11
รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการตามระเบียบวิธีวิจัยทั้ง 6 ขั้นตอน	12
รูปที่ 2.2 การวัดค่าการวางตัวประกอบด้วยแนววางตัว มุมเอียงเทและทิศทางการเอียงเทของชั้นหิน	14
รูปที่ 2.3 ทำการบันทึกภาพหินโผล่และร่างภาพลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏบนพื้นผิวหินโผล่ลงบนภาพถ่าย	15
รูปที่ 2.4 ทำการวาดภาพลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏบนพื้นผิวของหินโผล่	16

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของการกำหนดตำแหน่งข้อมูลในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่าเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์การแสดงของรูปทรงพื้นฐานการวางตัวของเส้นและระนาบ	17
รูปที่ 2.6 การกำหนดตำแหน่งข้อมูลแนวการวางตัวของชั้นหินลงในแผนภาพกุหลาบ ทำให้ทราบแนวการวางตัวหลักของรอยแตก กลุ่มชุดรอยแตกและปริมาณของรอยแตกแต่ละกลุ่ม	17
รูปที่ 2.7 แผนภาพสามมิติแสดงลำดับชั้นกลไกและวิวัฒนาการการเกิดรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่มีความสัมพันธ์กัน จากหลักฐานข้อมูลที่ได้จากภาคสนาม	18
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงเส้นทางการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามของหินโผล่หน้าผาบริเวณริมชายหาดอาร์โยเบอร์โร เมืองซานตาบาร์บารา	19
รูปที่ 3.2 หินโผล่ในพื้นที่ศึกษาที่มีลักษณะเป็นหินโผล่ธรรมชาติแสดงหน้าตัดแบบหน้าผาบริเวณริมชายหาดอาร์โยเบอร์โรซึ่งมีลักษณะหินโผล่ที่พบเป็นชั้นหินดินดานเนื้อซิลิกา สีขาวเทาที่แทรกสลับเป็นชั้นบางกับหินปูนและหินโดโลไมต์ในหมวดหินมอนเทอเรย์	20
รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงจุดศึกษาที่ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามของหินโผล่ทั้ง 4 จุดศึกษาที่แบ่งโดยใช้ลักษณะทางระบบรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่พบ	21
รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการวางตัวของชั้นหิน การวางตัวของรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่เกี่ยวข้องที่พบในการสำรวจภาคสนามของทั้ง 4 จุดศึกษา	22
รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงตำแหน่งของหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 1 บริเวณด้านตะวันตกของบันไดเมซ่าเลน มีระยะห่างจากตัวบันไดประมาณ 1 กิโลเมตร	22

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 หินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 1 มีขนาดความยาวประมาณ 15 เมตรและสูงประมาณ 20 เมตร	23
รูปที่ 3.7 ภาพวาดพื้นผิวการเฉือนและโซนหินกรวดเหลี่ยมขนาดกว้างประมาณ 4.9 ฟุต ที่พบในจุดศึกษาที่ 1	23
รูปที่ 3.8 ตาข่ายมิติสเตอร์ไอกรราฟิกันชนิดพื้นที่เท่าแสดงการวางตัวของชั้นหินในแนวเหนือ-ใต้ และการวางตัวของพื้นผิวการเฉือนในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้และแผนภาพกุหลาบแสดงแนวการวางตัวหลักของพื้นผิวการเฉือนในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้	24
รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงตำแหน่งของหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 2 บริเวณด้านตะวันตกของบันไดเมซ่าเลน มีระยะห่างจากตัวบันไดประมาณ 700 เมตร	25
รูปที่ 3.10 หินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 2 มีขนาดความยาวประมาณ 25 เมตรและสูงประมาณ 20 เมตร	25
รูปที่ 3.11 ภาพวาดชั้นหินคดโค้งประทุนที่มีแกนการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก และรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำที่พบในจุดศึกษาที่ 2	26
รูปที่ 3.12 แผนภาพกุหลาบแสดงการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับที่มีแนวการวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้	27
รูปที่ 3.13 รอยเลื่อนย้อนที่มีระนาบรอยเลื่อนวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้	27
รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงตำแหน่งของหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 3 บริเวณด้านตะวันออกเฉียงของบันไดเมซ่าเลน มีระยะห่างจากตัวบันไดประมาณ 15 เมตร	28

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.15 หินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 3 มีขนาดความยาวประมาณ 10 เมตรและสูงประมาณ 5 เมตร	29
รูปที่ 3.16 การแบ่งหินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 3 ออกเป็น 3 บริเวณย่อย ได้แก่ บริเวณ A, B และ C	29
รูปที่ 3.17 รอยเลื่อนเฉือนและรอยแตกที่แยกออกมาจากรอยเลื่อนเฉือนทั้งสองลำดับ	30
รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายมิติสเตอร์ิโกราฟิคนิคมิตินิที่เท่าแสดงการวางตัวของชั้นหิน รอยเลื่อนเฉือนและรอยแตกที่แยกออกทั้งสองลำดับและแผนภาพสามมิติแสดงการวางตัวและลักษณะการเคลื่อนที่ของชั้นหิน รอยเลื่อนเฉือนและรอยแตกที่แยกออกทั้งสองลำดับ	31
รูปที่ 3.19 หินโผล่ที่พบในบริเวณ B และภาพวาดรอยเลื่อนปกติที่พบบนพื้นผิวหินโผล่ที่เกิดการส่งผ่านและเปลี่ยนลักษณะต่อเนื่องมาจากรอยแตกในบริเวณ A	32
รูปที่ 3.20 หินโผล่ที่พบในบริเวณ C และภาพวาดรอยเลื่อนปกติที่พบบนพื้นผิวหินโผล่ที่ต่อเนื่องมาจากบริเวณ B รวมทั้งรอยแตกในแนวตั้งที่ต่อเนื่องขึ้นไปในชั้นหินด้านบน	33
รูปที่ 3.21 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงตำแหน่งของหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 4 บริเวณด้านตะวันออกของบันไดเมซ่าเลน มีระยะห่างจากตัวบันไดประมาณ 700 เมตร	34
รูปที่ 3.22 หินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 4 มีขนาดความยาวประมาณ 100 เมตรและสูงประมาณ 15 เมตร	35
รูปที่ 3.23 การแบ่งหินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 4 ออกเป็น 3 บริเวณย่อย ได้แก่ บริเวณ A, B และ C	35
รูปที่ 3.24 แสดงชั้นหินคดโค้งและรอยแตกที่พบในบริเวณ A	36

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.25 การแบ่งพื้นที่ศึกษาบริเวณชั้นหินคดโค้งที่พบในบริเวณ A ออกเป็น 4 พื้นที่ย่อย เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการวางตัวของชั้นหินกับการวางตัวของรอยแตก	37
รูปที่ 3.26 ภาพวาดรอยแตกที่พบบนพื้นผิวหินโผล่และตาข่ายมิติสเตอร์โกลาฟิกชนิดพื้นที่เท่าแสดงแนวการวางตัวของชั้นหินและรอยแตกที่พบ พบว่ารอยแตกที่พบในพื้นที่ศึกษาย่อยทั้ง 4 พื้นที่มีการวางตัวตั้งฉากกับชั้นหินตลอดแนวของชั้นหินคดโค้ง	37
รูปที่ 3.27 รอยเลื่อนย้อนที่พบในบริเวณ B	38
รูปที่ 3.28 รอยแตกในแนวระดับที่พบในบริเวณ C	39
รูปที่ 4.1 ลำดับชั้นการสะสมตัวของชั้นหินของหมวดหินมอญเทอเรียในแนวระดับบริเวณแอ่งสะสมตะกอนทะเลน้ำลึกสมัยไมโอซีน	40
รูปที่ 4.2 ลำดับชั้นการดึงออก ซึ่งชั้นหินถูกแรงดึงออกเข้ามากระทำทำให้เกิดการเปิดออกเป็นรอยแตกในโหมดการเปิดออกของรอยแตก ซึ่งมีทิศทางการเปิดออกในแนวเดียวกับแรงดึงและได้เป็นรอยแตกที่มีการวางตัวตั้งฉากกับชั้นหิน	41
รูปที่ 4.3 ลำดับชั้นการเฉือนและการบีบอัด ซึ่งชั้นหินในบางบริเวณเกิดเป็นลักษณะของรอยเลื่อนในแนวระดับซึ่งมีการเคลื่อนที่แบบเฉือนและเกิดลักษณะของรอยแตกที่แยกออกจากรอยเลื่อนนั้น	42
รูปที่ 4.4 ลำดับชั้นการเฉือนและการบีบอัด ซึ่งชั้นหินในบางบริเวณเกิดเป็นลักษณะของชั้นหินคดโค้งที่มีแกนของการคดโค้งวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้	43
รูปที่ 4.5 ลำดับชั้นการบีบอัด ซึ่งชั้นหินถูกแรงมากกระทำอย่างรุนแรงทำให้ไม่สามารถทนต่อแรงบีบอัดที่มากกระทำได้ จึงเกิดการแตกหักของชั้นหินคดโค้งในรูปแบบการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะและเกิดเป็นรอยเลื่อนย้อน ซึ่งมีแนวการวางตัวในแนวตะวันตก-ตะวันตก	44

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 ลำดับชั้นการบีบอัด ซึ่งชั้นหินถูกแรงมากกระทำอย่างรุนแรงทำให้ไม่สามารถทนต่อแรงบีบอัดที่มากกระทำได้ จึงเกิดเป็นรอยแตกในแนวระดับในบริเวณใกล้เคียงกับรอยเลื่อนย้อน	45
รูปที่ 5.1 สรุปลำดับชั้นของกลไกการเกิดและวิวัฒนาการของชั้นหิน รอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่เกิดขึ้น	47

## บทที่ 1

### บทนำ (Introduction)

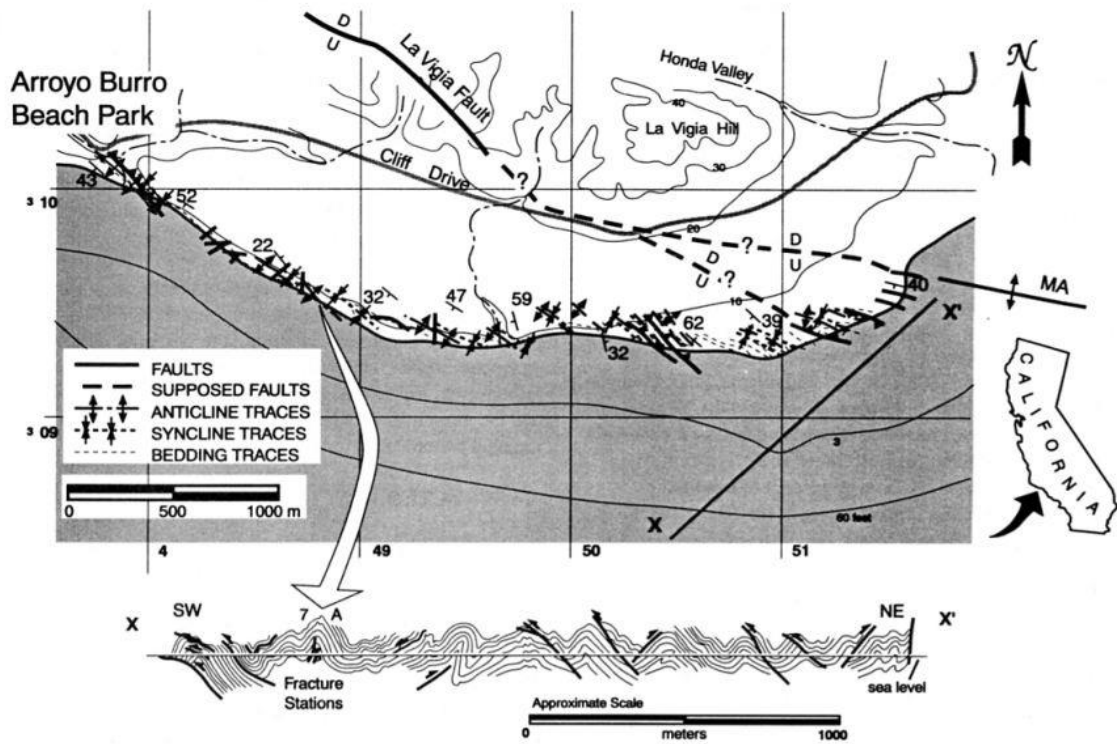
#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ (Background and Rationale)

หมวดหินมอนเทอเรย์ (The Monterey Formation) บริเวณชายฝั่งด้านตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนียปรากฏลักษณะของรอยแตกมากมายในหลายระดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ (Brittle deformation) ได้แก่ รอยเลื่อน (Faults) แนวแตก (Joints) พื้นผิวการเฉือน (Slip surface) หินกรวดเหลี่ยมรอยเลื่อน (Fault breccias) และสายแร่ (Veins) เป็นต้น (Gutierrez-Alonso and Gross, 1997) การศึกษาระบบรอยแตกของหินโผล่บริเวณหาดอาร์โรโยเบร์โรช่วยให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับชนิด รูปแบบ ความสัมพันธ์ วิวัฒนาการและกลไกการเกิดของรอยแตกรวมทั้งลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่เกี่ยวข้องอย่างชัดเจนขึ้น

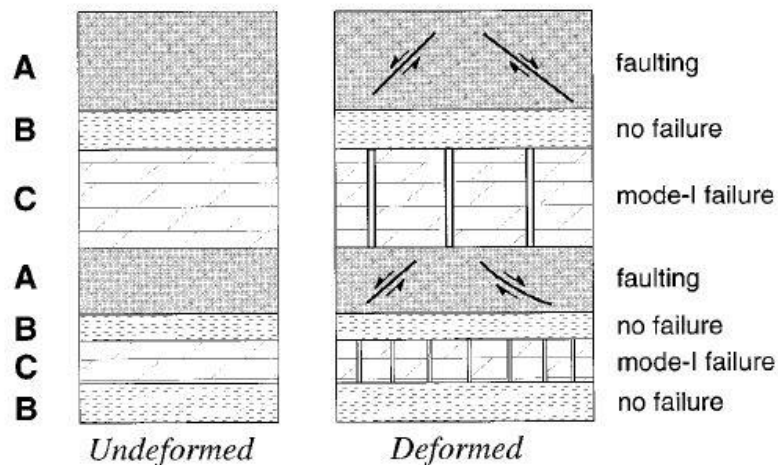
หมวดหินมอนเทอเรย์เกิดจากการสะสมตัวในลักษณะของแอ่งตะกอนทะเลน้ำลึก ในสมัยไมโอซีนตอนต้นถึงไมโอซีนตอนปลาย (Early to Late Miocene) ประกอบด้วยหินหลากหลายชนิด ได้แก่ หินโคลน หินปูน หินโดโลสโตน และหินเนื้อซิลิกา (Bramlette, 1946) โดยลักษณะการเกิดรูปแบบ และระบบรอยแตกในหมวดหินมอนเทอเรย์มีความสัมพันธ์กับกลไกการเกิดและวิวัฒนาการของชั้นหินคดโค้งและแนวรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำตะวันตก (Western Transverse Range fold and thrust faults) ทำให้ปรากฏลักษณะของชั้นหินคดโค้งที่มีแกนการคดโค้งวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (รูปที่ 1.1) ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากการแปรสัณฐานของแผ่นเปลือกโลกในยุคนีโอซีน (Neocene tectonic activities) ได้แก่ การมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกฟาราลอน (Farallon microplate) ใต้แผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือ (North America plate) ทำให้เกิดแรงบีบอัดในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ การหมุนตามเข็มนาฬิกาของแผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือ (Clockwise vertical-axis rotation) และวิวัฒนาการของระบบรอยเลื่อนแบบขวาเข้าชานแอนเดรียส (San Andreas Transensional Dextral Transform system) (Gross et al., 1998)



โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะของชั้นหินจะขึ้นอยู่กับชนิดของหิน ได้แก่ การเกิดรอยเลื่อนในหินโคลนและการเกิดแนวแตกและสายแหว่ในหินโดโลสโตน เป็นต้น (Gross, 1995) (รูปที่ 1.2)

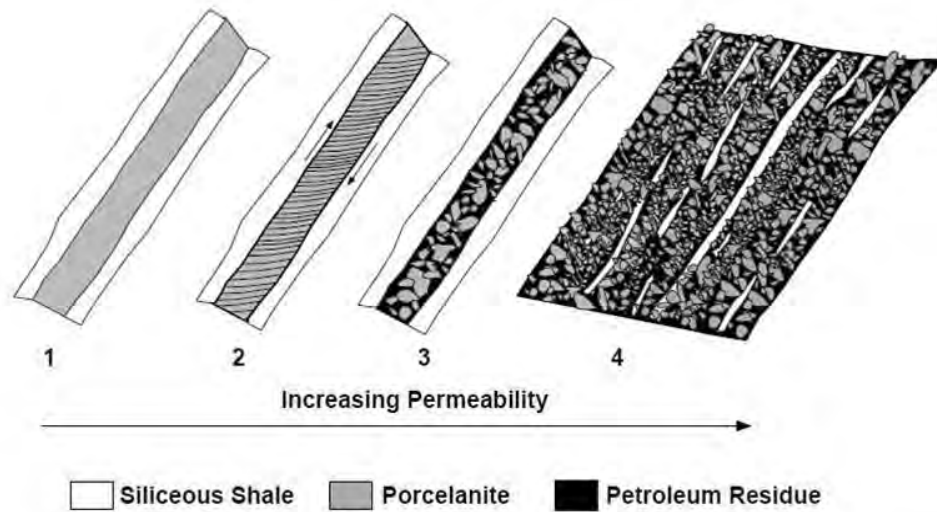


รูปที่ 1.1 ภาพตัดขวางแสดงแนวการวางตัวของชั้นหิน ชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนที่พบในหินโคลนบริเวณริมชายหาดอาร์โรโยเบอร์โรทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนีย (Gross et al., 1998)



รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันของชั้นหินแต่ละชนิด ได้แก่ รอยเลื่อนในชั้นหิน A รอยแตกแบบเปิดออกในชั้นหิน C และชั้นหิน B ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (Gross, 1995)

นอกจากนี้หมวดหินมอนเทอเรย์ยังมีลักษณะที่สำคัญทางด้านเศรษฐกิจ โดยเป็นชั้นหินกักเก็บ (Reservoir rock) และท่อลำเลียงของไหล (Fluid conduits) ที่สำคัญ ได้แก่ สารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนที่สะสมตัวในหินดินดานเนื้อซิลิกาของหมวดหินนี้มีความสัมพันธ์กับรอยเลื่อนและความต่อเนื่องของรอยแตกทุติยภูมิที่เกิดจากระบวนการเคลื่อนที่แบบเฉือน (Dholakia et al., 1998) (รูปที่ 1.3) และแสดงภาพตัวอย่างการซึมของน้ำมันดิน (Tar) ออกมาตามรอยแตกของหินในพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 1.4)



รูปที่ 1.3 วิวัฒนาการของรอยแตกที่มีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจ โดยมีลักษณะเป็นชั้นหินกักเก็บปิโตรเลียมและมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของสารไฮโดรคาร์บอน (Dholakia et al., 1998)



รูปที่ 1.4 น้ำมันดินปริมาณมาก (สีดำ) ที่ซึมออกมาจากรอยแตกของหินในพื้นที่ศึกษา

ในปัจจุบันยังคงมีการขุดเจาะและผลิตปิโตรเลียมในบริเวณพื้นที่ด้านตะวันตกของรัฐแคลิฟอร์เนียอย่างต่อเนื่องและกว้างขวาง นอกจากนี้ยังมีการอาศัยเทคโนโลยีการสร้างรอยแตกในชั้นหินดินดานจากการอัดน้ำ (Hydraulic fracturing) ซึ่งช่วยขยายรอยแตกและเพิ่มความต่อเนื่องของรอยแตกในชั้นหินดินดาน ทำให้ชั้นหินดินดานมีประสิทธิภาพในการเป็นเส้นทางการลำเลียงสารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon pathway) และของไหลชนิดอื่น ๆ ที่สำคัญและมีมูลค่าทางเศรษฐกิจได้

การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษารายละเอียดของระบบรอยแตกของหินโคลนบริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โรในระดับกลาง การเปลี่ยนแปลงระบบแตกเปราะ และลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏบนพื้นผิวของหินโคลน รวมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ วิวัฒนาการ และกลไกการเกิดของรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในบริเวณนี้

## 1.2 พื้นที่ศึกษา (Study Area)

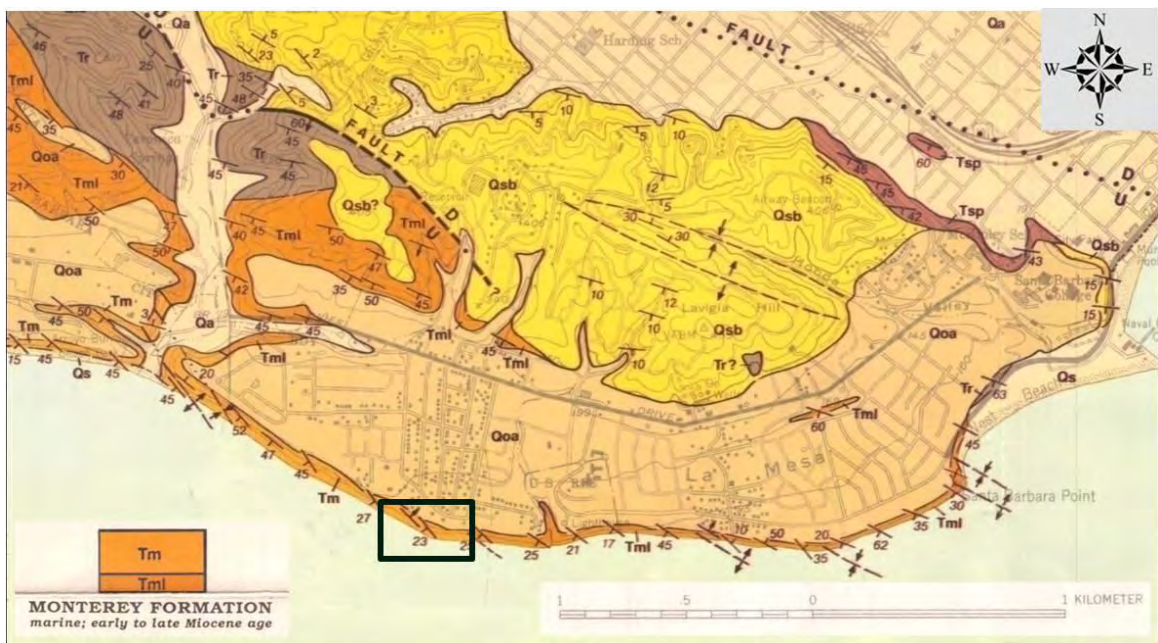
พื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นหินโคลนน้ำผาบริเวณริมหาดอาร์โรโยเบอร์โร (Arroyo Burro beach) เมืองซานตาบาร์บารา (Santa Barbara) ทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนีย (California) ประเทศสหรัฐอเมริกา (แสดงด้วยสัญลักษณ์ดาวสีแดง)

การศึกษาในครั้งนี้มีระยะทางการเดินสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามประมาณ 2 กิโลเมตร (รูปที่ 1.5) ทั้งทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกของบันไดเมซ่าเลน (เส้นประสีเหลือง) และแสดงเส้นทางเดินสำรวจหินโคลนน้ำผา (เส้นประสีแดง) และแสดงเส้นทางเข้าถึงพื้นที่ด้วยถนนสาย 225 และถนนเมซ่าเลน (เส้นทึบสีดำ)





รูปที่ 1.5 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษาบริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร ด้านตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยแสดงเส้นทางการสำรวจและเก็บข้อมูลหินโผล่ด้วยเส้นประสีแดง และเส้นทางการเข้าถึงพื้นที่ศึกษาด้วยเส้นทึบสีดำ (Google Earth)



รูปที่ 1.6 แผนที่ธรณีวิทยามาตราส่วน 1:24,000 ของพื้นที่ศึกษาในหมวดหินมอนเทอร์เรย์ บริเวณเมืองซานตาบาร์บารา ประเทศสหรัฐอเมริกา (Santa Barbara Quadrangle) (Dibblee, Jr., 1986)

### 1.3 นิยามปัญหา (Problem Defined)

- 1.3.1) หินโผล่บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โรมีลักษณะรอยแตกและการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะที่ปรากฏบนพื้นผิวเป็นอย่างไร
- 1.3.2) ลักษณะรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่ปรากฏบนพื้นผิวของหินโผล่บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร มีวิวัฒนาการ กลไกการเกิด รวมทั้งมีความสัมพันธ์กันอย่างไร

### 1.4 วัตถุประสงค์ (Objectives)

- 1.4.1) เพื่อศึกษาลักษณะรอยแตกและการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะที่ปรากฏบนพื้นผิวของหินโผล่บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร
- 1.4.2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ วิวัฒนาการ และกลไกการเกิดของรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่ปรากฏ

### 1.5 สมมุติฐาน (Hypothesis)

ลักษณะรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆ ที่ปรากฏบนพื้นผิว รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะของหินโผล่บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร มีวิวัฒนาการและกลไกการเกิดที่มีความสัมพันธ์กัน

### 1.6 ขอบเขตการศึกษา (Scope of study)

การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษารายละเอียดของรูปแบบรอยแตก รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะที่ปรากฏบนพื้นผิวของหินโผล่บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โรในระดับกลาง จากการสำรวจภาคสนาม การทำภาพวาดลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่พบ การกำหนดตำแหน่งข้อมูลในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพภูทาบ

## 1.7 ระยะเวลาการดำเนินงาน (Work plan)

ระหว่างเดือนมิถุนายน 2557 – เมษายน 2558 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 11 เดือน

## 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ (Expected Output)

- 1.8.1) ทราบข้อมูลลักษณะรอยแตกและการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะที่ปรากฏบนพื้นผิวของหินโผล่บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร
- 1.8.2) ทราบข้อมูลความสัมพันธ์ วิวัฒนาการ และกลไกการเกิดของรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่พบ

## 1.9 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา (General setting of study area)

### 1.9.1) ภูมิประเทศ (Topography)

สภาพภูมิประเทศทั่วไปของชายหาดอาร์โรโยเบอร์โร มีพื้นที่ตั้งอยู่ที่เมืองซานตาบาร์บารา รัฐแคลิฟอร์เนีย ทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ของชายฝั่งประเทศสหรัฐอเมริกา มีระยะทางห่างจากเมืองลอสแอนเจลิสประมาณ 145 กิโลเมตร

ซานตาบาร์บาราตั้งอยู่ระหว่างเทือกเขาซานตานีซ (Santa Ynez) กับมหาสมุทรแปซิฟิก ซึ่งเทือกเขาซานตานีซมีแนวการวางตัวอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ด้านหลังของพื้นที่เมืองซานตาบาร์บารา มียอดเขาที่สูงใหญ่มีความลาดชันและมีความสูงมากกว่า 1200 เมตร

### 1.9.2) ภูมิอากาศ (Weather)

เมืองซานตาบาร์บารามีสภาพภูมิอากาศแบบเมดิเตอร์เรเนียนอบอุ่นถึงร้อน (Warm-summer Mediterranean climate) และถูกจัดเปรียบเทียบกับเป็นชายฝั่งริเวียร่าแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (America Riviera) เนื่องจากมีสภาพภูมิอากาศคล้ายคลึงกับสภาพภูมิอากาศในบริเวณตอนเหนือของชายฝั่งทะเลเมดิเตอร์เรเนียน

สภาพภูมิอากาศของเมืองซานตาบาร์บาราได้รับอิทธิพลมาจากลมบก ทำให้พื้นที่มีอากาศอุ่นมากกว่าในฤดูหนาวและอากาศหนาวกว่าในฤดูร้อนเมื่อเทียบกับพื้นที่ใกล้เคียง โดยมีรายละเอียดในแต่ละฤดูดังนี้

- ฤดูหนาว จะมีลมพายุพัดผ่านรัฐแคลิฟอร์เนีย ทำให้เกิดฝนตกหนัก
- ฤดูร้อน จะมีฝนตกน้อยมากเทียบกับพื้นที่ชายฝั่งตะวันออกบริเวณอื่นของมหาสมุทรแปซิฟิก
- ฤดูใบไม้ร่วง จะมีลม Sundowners พัดลงต่ำทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและในบางบริเวณของยอดเขาซานตานีจะมีหิมะปกคลุมในบางช่วงเวลา

### 1.10 ธรณีวิทยาทั่วไป (General Geology)

หมวดหินมอนเทอเรย์บริเวณเมืองซานตาบาร์บาราทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนียตั้งอยู่ในบริเวณที่เกิดกระบวนการทางธรณีแปรสัณฐานที่มีความซับซ้อนและรุนแรง ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากการชนกันและมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกฟาราลอนใต้แผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือ รวมทั้งการเลื่อนตัวผ่านกันแบบขวาเข้าของแผ่นเปลือกโลกแปซิฟิกและแผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือ ทำให้เกิดรอยเลื่อนซานแอนเดรียสที่ส่งผลต่อทั้งลักษณะทางธรณีวิทยา ลักษณะภูมิประเทศ รวมทั้งลักษณะอื่นๆที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบบีโตรเลียม

จากข้อมูลธรณีวิทยาในแผนที่ธรณีวิทยาเมืองซานตาบาร์บารา มาตราส่วน 1:24,000 (Dibblee, Jr., 1986) โดยกรมแผนที่ทหารสหรัฐและสำนักงานธรณีวิทยาของสหรัฐ (US Army Map Service and US Geological Survey) (รูปที่ 1.6) พบว่าหินโผล่ในพื้นที่ศึกษาจัดอยู่ในหมวดหินมอนเทอเรย์ในยุคเทอร์เชียรี ช่วงสมัยไมโอซีนตอนต้นถึงไมโอซีนตอนปลาย

หินโผล่มีลักษณะเป็นชั้นหินดินดานเนื้อซิลิกาสีเทาอมขาว มีความแข็งและเปราะ แทรกสลับเป็นชั้นบางกับหินปูนเนื้อแน่นและหินโดโลสโตน มีสีผิวเป็นสีขาว และมีลักษณะของชั้นหินคดโค้งกระจายอยู่โดยทั่ว

### 1.11 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literatures Review)

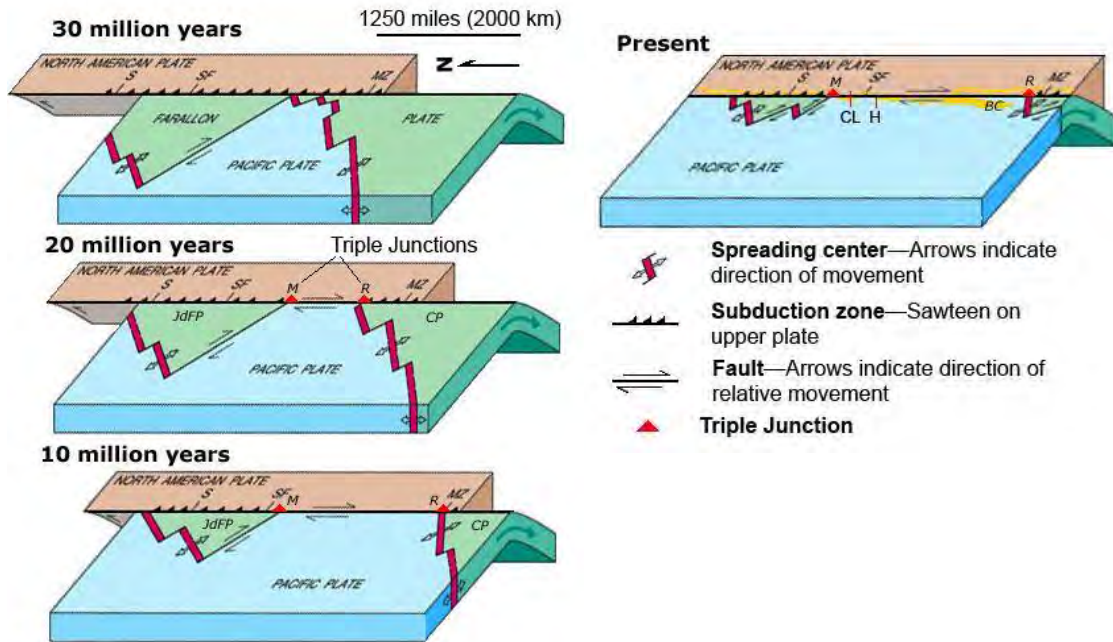
Gross (1995) ได้สรุปถึงลักษณะวิวัฒนาการของรอยแตกและความสัมพันธ์ของรอยแตกกับชนิดของหินในหมวดหินมอโนเทอเรียบริเวณชายฝั่งของรัฐแคลิฟอร์เนียว่า รอยเลื่อนในหินโคลนมีการเกิดในช่วงเวลาเดียวกันกับการเกิดรอยแตกแบบเปิดออกที่วางตัวขนานกับแนวการวางตัวของชั้นหิน (Strike-perpendicular mode I fracture) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกิดและวิวัฒนาการของการเกิดเทือกเขาด้านตะวันตก (Western Transverse range) ในลักษณะของการถูกบีบอัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวการวางตัวของชั้นหิน นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบเปราะของชั้นหินยังขึ้นอยู่กับชนิดของหิน ได้แก่การเกิดรอยเลื่อนในหินโคลน และการเกิดแนวแตกและสายแร่ในหินโดโลสโตนและหินเนื้อซิลิกา

Dholokia และคณะ (1998) ได้สรุปถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้รับอิทธิพลและถูกควบคุมโดยรอยเลื่อนในหมวดหินมอโนเทอเรียของรัฐแคลิฟอร์เนียโดยอาศัยการสำรวจและเก็บข้อมูลจากหินโผล่ในภาคสนาม รวมทั้งการใช้ข้อมูลจากเครื่องมือแท่งเจาะและข้อมูลภาพถ่ายจากหลุมเจาะ มาช่วยในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแบบเฉือนกับการเคลื่อนที่ของสารไฮโดรคาร์บอนว่า ในชั้นหินดินดานเนื้อซิลิกาที่มีค่าการซึมผ่านได้ของหินต่ำสามารถเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของสารไฮโดรคาร์บอนได้ โดยมีวิวัฒนาการการแตกหักของชั้นหินเริ่มจากการเกิดการเคลื่อนที่แบบเฉือนผ่านช่องว่างของหินที่ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้ช่องว่างของหินมีความต่อเนื่องมากขึ้นและเกิดการแตกหักของหินเป็นชิ้นเล็กลง จนสามารถเกิดการเปิดเป็นท่อและเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของสารไฮโดรคาร์บอนได้



Gross และคณะ (1998) ได้สรุปถึงความสัมพันธ์ระหว่างรอยแตกกับชั้นหินคดโค้งของหินโผล่ในหมวดหินมอญเทอเรย์ บริเวณหาดอาร์โรโยเบอริโรว์ว่า วิวัฒนาการของรอยแตกของหมวดหินมอญเทอเรย์ถูกควบคุมโดยกระบวนการดึงออก (Extension) และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับวิวัฒนาการของชั้นหิน คดโค้ง นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการวางตัวของลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างทั้งรอยเลื่อน รอยแตกและสายแร่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการแปรสัณฐานทางธรณีวิทยา ได้แก่ การเกิดการบีบอัดในสมัยไพลโอซีนถึงโฮโลซีน (Pliocene-Holocene regional shortening) ทำให้เกิดการดึงออกในทิศทางขนานกับแนวแกนของชั้นหินคดโค้ง

Nicholson และคณะ (1994) ได้สรุปถึงกระบวนการแปรสัณฐานของพื้นที่และวิวัฒนาการของเทือกเขาด้านตะวันตกว่า ในสมัยไมโอซีนตอนต้นเกิดการแยกตัวของแผ่นเปลือกโลกฟาราลอนออกจากแผ่นเปลือกโลกแปซิฟิก ทำให้แผ่นเปลือกโลกฟาราลอนเกิดการเคลื่อนที่ไปทางด้านตะวันตกออกเข้าไปหาและมุดตัวลงใต้แผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือ ทำให้เกิดเทือกเขาทางด้านตะวันตกและเกิดการแตกออกของแผ่นเปลือกโลกออกเป็นแผ่นย่อยๆอีกมากมาย จากนั้นเกิดการหมุนตามเข็มนาฬิกาของแผ่นเปลือกโลกส่งผลให้เทือกเขาด้านตะวันตกเกิดการหมุน เกิดการเปลี่ยนกลไกการแปรสัณฐานทางธรณีวิทยา จากลักษณะของการมุดตัวไปเป็นลักษณะการเคลื่อนที่แบบผ่านกัน โดยแผ่นเปลือกโลกแปซิฟิกมีการเคลื่อนที่ไปทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือ และแผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือมีการเคลื่อนที่ไปทางด้านตะวันออกเฉียงใต้ ส่งผลให้เกิดเป็นระบบรอยเลื่อนแบบขวาเข้าซานแอนเดรียสในปัจจุบัน (รูปที่ 1.7)

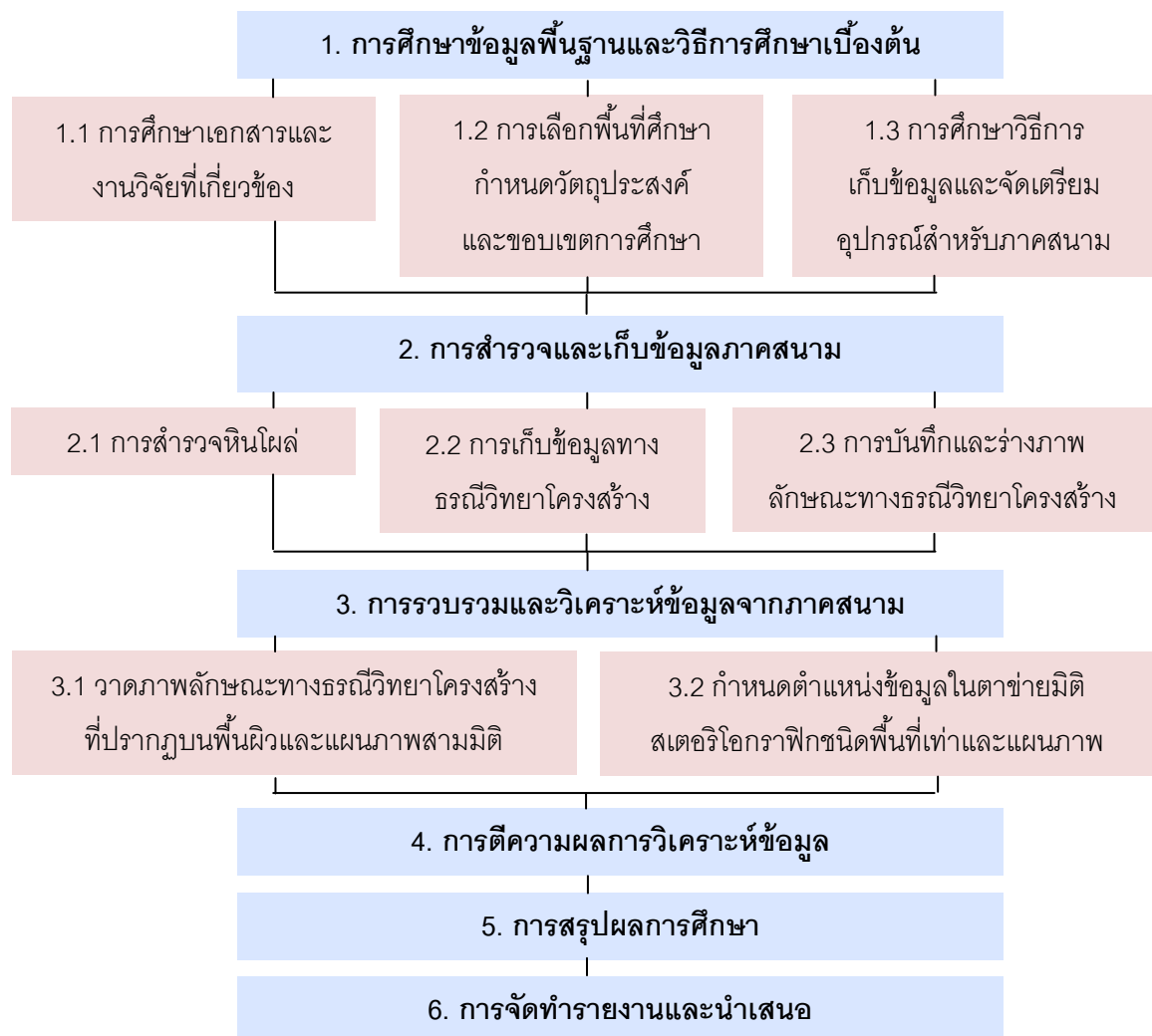


รูปที่ 1.7 ลักษณะการแปรสัณฐานทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา โดยเกิดการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกฟาราลลอนลงใต้แผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือ การเคลื่อนที่ผ่านกันของแผ่นเปลือกโลกแปซิฟิกไปทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือและแผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือไปทางด้านตะวันออกเฉียงใต้ รวมทั้งวิวัฒนาการการเกิดรอยเลื่อนแบบขวาเข้าซานแอนเดรียส (Nicholson et al., 1994)

## บทที่ 2

### ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)

ในการศึกษาครั้งนี้แบ่งระเบียบวิธีวิจัยออกเป็น 6 ขั้นตอน ได้แก่ การศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากภาคสนาม การตีความผลการวิเคราะห์ข้อมูล การสรุปผลการศึกษา และการจัดทำรายงานและนำเสนอ โดยมีรายละเอียดระเบียบวิธีวิจัยและแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย (รูปที่ 2.1) ดังนี้



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการตามระเบียบวิธีวิจัยทั้ง 6 ขั้นตอน

## 2.1 การศึกษาข้อมูลพื้นฐานและวิธีการศึกษาเบื้องต้น

### 2.1.1 การศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ลักษณะธรณีวิทยาทั่วไปของหมวดหินมอญตอนเหนือ  
วิธีการเก็บข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้างจากการสำรวจภาคสนาม และลักษณะของรอยแตก รูปแบบ  
และกลไกการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบเปราะ และของไหลที่เกี่ยวข้องกับรอยแตก โดยการสืบค้นจาก  
หนังสือ วารสารงานวิจัย และเอกสารงานประชุมจากอาจารย์ที่ปรึกษา จากห้องสมุดภาควิชา  
ธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทางอินเทอร์เน็ต

### 2.1.2 การเลือกพื้นที่ศึกษา กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา

เลือกพื้นที่ศึกษาในหมวดหินมอญตอนเหนือที่มีความสัมพันธ์กับแนวรอยเลื่อนซานแอนเดรียส  
รวมทั้งยังมีลักษณะเป็นเส้นทางเคลื่อนที่ของสารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า  
หินโคล์หน้าผาของหมวดหินมอญตอนเหนือบริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โรแสดงลักษณะของโครงสร้างทาง  
ธรณีวิทยาที่ปรากฏชัดเจนบนพื้นผิวตลอดแนวหินโคล์หน้าผาเป็นระยะทาง 2 กิโลเมตร รวมทั้งมีการ  
แสดงการซึมของน้ำมันดินออกมาตามรอยแตกของหิน จึงสรุปพื้นที่ศึกษาเป็นหินโคล์หน้าผาบริเวณ  
หาดอาร์โรโยเบอร์โร เมืองซานตาบาร์บารา ทางชายฝั่งด้านตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนีย

### 2.1.3 การศึกษาวิธีการเก็บข้อมูลภาคสนามและจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับออก ภาคสนาม

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์สำหรับการออกภาคสนาม ได้แก่ ค้อนธรณีวิทยา  
กล้องถ่ายภาพดิจิทัล เซลล์สุริยะ เครื่องระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS: Global Positioning  
System) อุปกรณ์เครื่องเขียน สายวัดระยะ สเกล และแผนที่ภูมิศาสตร์มาตราส่วน 1:24,000 ของพื้นที่  
เมืองซานตาบาร์บารา รัฐแคลิฟอร์เนีย (Dibblee, Jr., 1986) โดยสามารถเตรียมอุปกรณ์ภาคสนาม  
และสืบค้นแผนที่ที่ต้องการได้จากห้องสมุด แผนที่ และภาพถ่ายทางอากาศ ของภาควิชาธรณีวิทยา  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและห้องสมุดกลางของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
สแตนฟอร์ด

## 2.2 การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม

การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักคือ การสำรวจหินโผล่ การเก็บข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้าง และการบันทึกภาพและร่างภาพลักษณะทางธรณีวิทยา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 การสำรวจหินโผล่

สำรวจหินโผล่หน้าผาบริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร เป็นระยะทางประมาณ 2 กิโลเมตรตลอดแนวชายฝั่งหาดอาร์โรโยเบอร์โร โดยเริ่มการสำรวจจากบันไดเมซ่าเลน (Road-cud Mesa Lane stair) ไปทางด้านทิศตะวันออกและตะวันตกของบันไดเมซ่าเลนตามลำดับ เพื่อดูลักษณะระบบรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏบนพื้นผิวของหินโผล่

### 2.2.2 การเก็บข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้าง

ข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ทำการเก็บค่าได้แก่ แนวการวางตัวของชั้นหิน รอยแตกที่ตั้งฉากกับแนวการวางตัวของชั้นหิน (Bed-perpendicular fractures) รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fractures) และรอยเลื่อน ซึ่งค่าการวางตัวประกอบด้วยแนววางตัว (strike) มุมเอียงเท (dip angle) และทิศทางการเอียงเท (dip direction) (รูปที่ 2.2) ซึ่งในแต่ละจุดศึกษาได้ทำการวัดค่าการวางตัวของลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างหลายค่า เพื่อนำมาเป็นข้อมูลเชิงสถิติและประมวลผลให้ได้แนวการวางตัวที่แม่นยำที่สุด โดยใช้การกำหนดตำแหน่งข้อมูลแนวการวางตัวของชั้นหินและลักษณะทางธรณีวิทยาในตาข่ายมิติสเตอร์ไอกร้าฟิซนิคพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ



รูปที่ 2.2 การวัดค่าการวางตัวประกอบด้วยแนววางตัว มุมเอียงเท และทิศทางการเอียงเทของชั้นหิน

(seismo.berkeley.edu)

### 2.2.3 การบันทึกภาพและร่างภาพลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง

ทำการบันทึกภาพหินโผล่และภาพลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏบนพื้นผิวของหินโผล่ รวมทั้งทำการร่างภาพลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏลงบนภาพถ่าย (Field-photo mapping) (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 ทำการบันทึกภาพหินโผล่และร่างภาพลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏบนพื้นผิวหินโผล่ลงบนภาพถ่าย

### 2.3 การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากภาคสนาม

ทำการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากภาคสนามมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการและเครื่องมือต่างๆ เพื่ออธิบายถึงลักษณะของระบบรอยแตก กลไกการเกิด และความสัมพันธ์ของรอยแตกกับลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆ ในพื้นที่ศึกษาหมวดหินมอญตอนเหนือ บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร แคลิฟอร์เนีย โดยมีหลักการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจภาคสนามดังนี้



### 2.3.1 วาดภาพลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏบนพื้นผิวและ แผนภาพสามมิติ

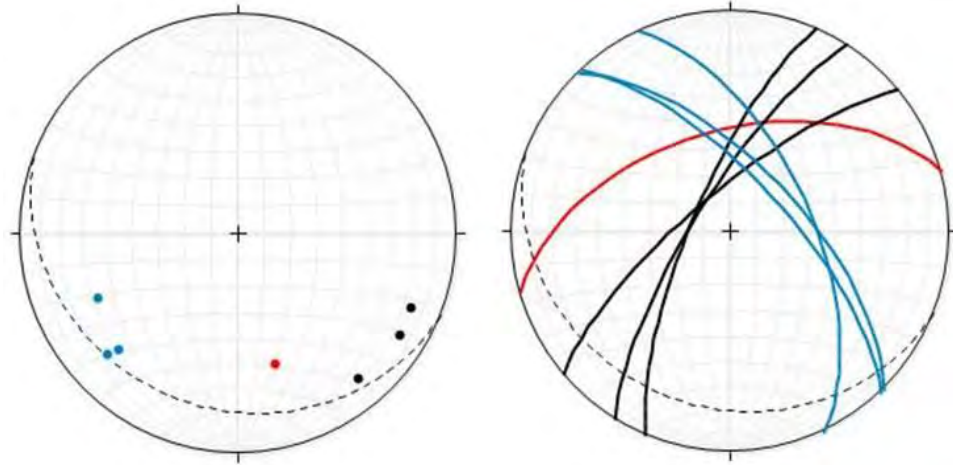
นำภาพถ่ายหินโผล่ที่เก็บจากภาคสนามมาทำการวาดภาพลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏบนพื้นผิวของหินโผล่ ได้แก่ รอยแตก รอยเลื่อน ชั้นหินคดโค้ง และพื้นผิวการเฉือน (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 ทำการวาดภาพลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่ปรากฏบนพื้นผิวของหินโผล่

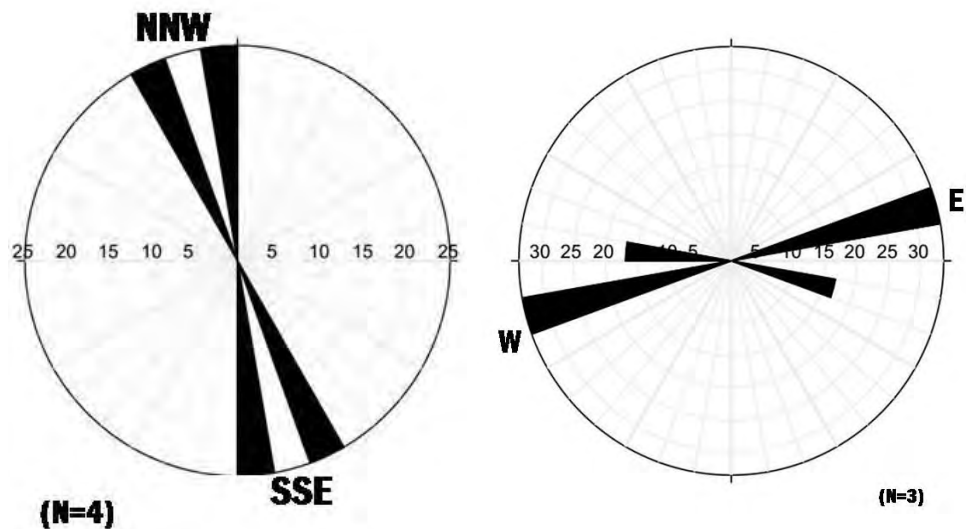
### 2.3.2 จัดการข้อมูลและกำหนดตำแหน่งข้อมูลในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิด พื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ

นำข้อมูลแนวการวางตัวของชั้นหิน รอยแตกที่ตั้งฉากกับชั้นหิน รอยแตกเฉือนและระบบรอยแตกที่เกี่ยวข้อง มากำหนดตำแหน่งข้อมูลในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่า (รูปที่ 2.5) เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์การแสดงของรูปทรงพื้นฐานการวางตัวของเส้นและระนาบ โดยการวางตัวของระนาบสามารถแสดงแทนได้ด้วยการวางตัวของเส้นที่ตั้งฉากกับระนาบ



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของการกำหนดตำแหน่งข้อมูลในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่าเพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์การแสดงผลของรูปทรงพื้นฐานการวางตัวของเส้นและระนาบ

นำข้อมูลแนวรอยแตกที่เก็บจากภาคสนามมากำหนดตำแหน่งข้อมูลแนวการวางตัวของแนวแตกลงในแผนภาพกู่หลาบ ในลักษณะของแผนภูมิเชิงปริมาณ ทำให้ทราบแนวการวางตัวหลักของรอยแตก กลุ่มชุดรอยแตก และปริมาณของรอยแตกแต่ละกลุ่ม (รูปที่ 2.6)



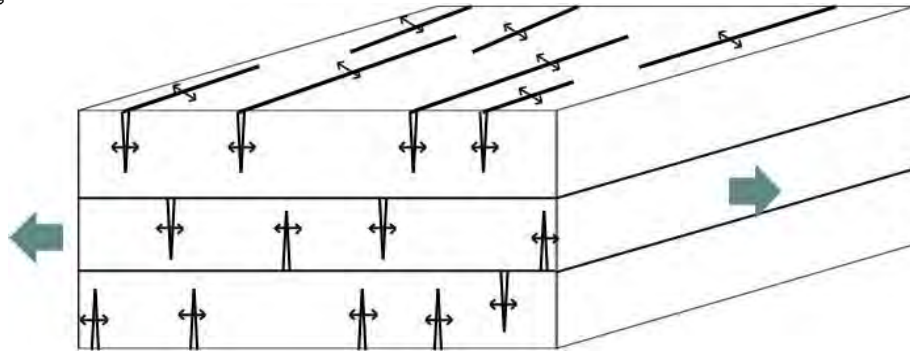
รูปที่ 2.6 การกำหนดตำแหน่งข้อมูลแนวการวางตัวของชั้นหินลงในแผนภาพกู่หลาบทำให้ทราบแนวการวางตัวหลักของรอยแตก กลุ่มชุดรอยแตก และปริมาณของรอยแตกแต่ละกลุ่ม



## 2.4 การตีความผลการวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งในภาคสนามและการใช้เครื่องมือรวมทั้งโปรแกรมต่างๆ มาตีความและอภิปรายถึงลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างและรอยแตกที่มีความสัมพันธ์กัน รวมทั้ง วิวัฒนาการและกลไกการเกิดของรอยแตกและลักษณะทางธรณีโครงสร้างอื่นๆ

โดยทำการแบ่งลักษณะของวิวัฒนาการของการเกิดรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยา โครงสร้างอื่นๆที่มีความสัมพันธ์กันเป็นลำดับชั้น แสดงโดยแผนภาพสามมิติ (รูปที่ 2.7) ซึ่งใช้หลักฐาน เป็นข้อมูลที่เก็บจากภาคสนามและเชื่อมโยงให้มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางธรณีวิทยา แปรสัณฐานของพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 2.7 แผนภาพสามมิติแสดงลำดับชั้นกลไกและวิวัฒนาการการเกิดรอยแตกและลักษณะทาง ธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่มีความสัมพันธ์กัน จากหลักฐานข้อมูลที่ได้จากภาคสนาม

## 2.5 การสรุปผลการศึกษา

หลังจากทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากภาคสนามด้วยเครื่องมือและโปรแกรมต่างๆ และทำ การตีความผลการวิเคราะห์ข้อมูล จึงทำการสรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาเกี่ยวกับ การวิเคราะห์ระบบรอยแตก ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้าง ความสัมพันธ์ วิวัฒนาการและกลไก การเกิดของรอยแตกรวมทั้งลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ แปรสัณฐานทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

## 2.6 การจัดทำรายงานและนำเสนอ

จัดทำรายงานการศึกษาเป็นรูปเล่ม และนำเสนอการศึกษาในรูปแบบของการสัมมนา

### บทที่ 3

#### ผลการศึกษา (Results)

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการแสดงผลลัพธ์ทั้งหมดจากการศึกษาระดับกลาง โดยการสำรวจและเก็บข้อมูลหินโผล่จากภาคสนามในระหว่างวันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ.2557 ถึงวันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ.2557 ซึ่งทำการศึกษาหินโผล่หน้าผา บริเวณริมชายหาดอาร์โยเบอร์โร เมืองซานตาบาร์บารา รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นระยะทางประมาณ 2 กิโลเมตร ทางด้านตะวันออกและด้านตะวันตกของบันไดเมซ่าเลน (รูปที่ 3.1) โดยมีภาพรวมและรายละเอียดการศึกษาดังนี้



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงเส้นทางการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามของหินโผล่หน้าผา บริเวณริมชายหาดอาร์โยเบอร์โร เมืองซานตาบาร์บารา (เส้นประสีแดง) ทางด้านตะวันออกและทางด้านตะวันตกของบันไดเมซ่าเลน (Google Earth)

### 3.1 ธรณีวิทยาและธรณีสัณฐานวิทยา (Geology and Geomorphology)

พื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นหินโหล่น้ำผาสูงชันติดชายหาดอาร์โรโยเบอริโร ทางตอนเหนือของพื้นที่มีลักษณะเป็นพื้นที่ราบที่ถูกยกตัวขึ้นจากกระบวนการทางธรณีแปรสัณฐาน หินโผล่ที่พบเป็นหินโผล่ธรรมชาติที่กระจายตัวอย่างต่อเนื่องตามชายหาดที่เกิดการยกตัวและแสดงหน้าตัดแบบหน้าผามีลักษณะเป็นหินดินดานสีเทาเทาแทรกสลับเป็นชั้นบางกับหินปูนและหินโดโลไมต์สีเทาในหมวดหินมอนเทอเรย์อายุไมโอซีนตอนต้นถึงไมโอซีนตอนปลาย (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 (A) หินโผล่ในพื้นที่ศึกษาที่มีลักษณะเป็นหินโผล่ธรรมชาติแสดงหน้าตัดแบบหน้าผาบริเวณริมชายหาดอาร์โรโยเบอริโรและ (B) ลักษณะหินโผล่ที่พบเป็นชั้นหินดินดานเนื้อซิลิกาสีเทาเทาที่แทรกสลับเป็นชั้นบางกับหินปูนและหินโดโลไมต์สีเทาในหมวดหินมอนเทอเรย์



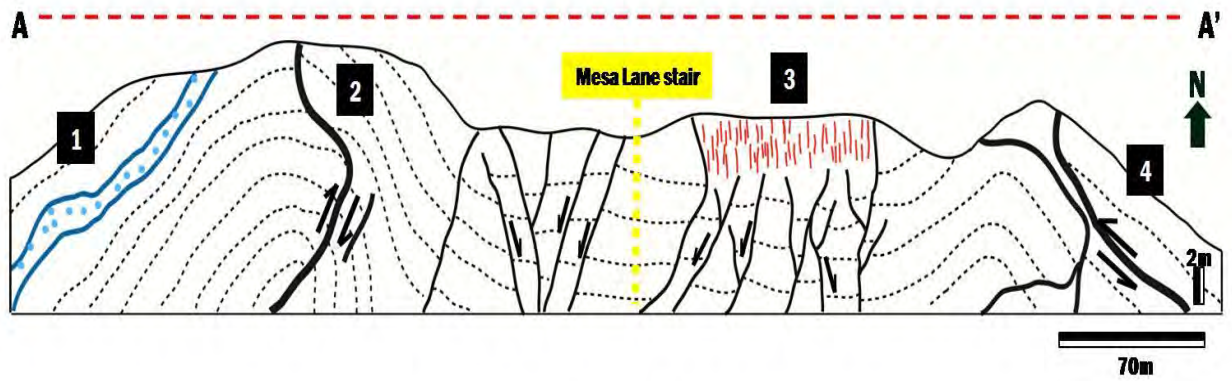
### 3.2 ธรณีวิทยาโครงสร้าง (Structural geology)

การวิเคราะห์ระบบรอยแตกของหมวดหินมอนเทอเรย์ บริเวณหาดอาร์โอยเบอร์โร สหรัฐอเมริกาในระดับกลางจากการสำรวจภาคสนาม พบว่าชั้นหินส่วนใหญ่มีการวางตัวในแนวเกือบเป็นแนวระดับ และมีมุมเอียงเทค่อนข้างต่ำไปทางด้านตะวันออกเฉียงเหนือ แสดงชั้นหินคดโค้งที่มีแกนการคดโค้งวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้

ทำการเก็บข้อมูลภาคสนามและแบ่งจุดศึกษาออกเป็น 4 จุดศึกษาจากลักษณะของระบบรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่พบ ได้แก่ด้านตะวันออกของบันไดเมซ่าเลน 2 จุดศึกษา และด้านตะวันตกของบันไดเมซ่าเลน 2 จุดศึกษา (รูปที่ 3.3) โดยแต่ละจุดศึกษาทำการเก็บค่าและบันทึกข้อมูลของชั้นหินและข้อมูลทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่พบ ได้แก่ ข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน รอยแตก รอยเลื่อน สายแร่ และลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างบ่งชี้อื่นๆที่เกี่ยวข้อง และแสดงภาพตัดขวางของลักษณะการวางตัวของชั้นหิน การวางตัวของรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่เกี่ยวข้องที่พบในการสำรวจภาคสนามของทั้ง 4 จุดศึกษา (รูปที่ 3.4) ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละจุดศึกษาดังนี้



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงจุดศึกษาที่ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามของหินเผล่ทั้ง 4 จุดศึกษาที่แบ่งโดยใช้ลักษณะทางระบบรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างที่พบ



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการวางตัวของชั้นหิน การวางตัวของรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่เกี่ยวข้องที่พบในการสำรวจภาคสนามของทั้ง 4 จุดศึกษา

1) จุดศึกษาที่ 1

จุดศึกษาที่ 1 บริเวณด้านตะวันตกของบ้านโดเมซ่าเลน ระยะห่างจากบ้านโดประมาณ 1 กิโลเมตร (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงตำแหน่งของหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 1 บริเวณด้านตะวันตกของบ้านโดเมซ่าเลน มีระยะห่างจากตัวบ้านโดประมาณ 1 กิโลเมตร



ในจุดศึกษาที่พบหินโผล่ที่มีขนาดความยาวประมาณ 15 เมตรและความสูงประมาณ 20 เมตร (รูปที่ 3.6) มีลักษณะเป็นหินดินดานเนื้อซิลิกาสลับเป็นชั้นบางกับหินปูนที่ถูกเปลี่ยนแปลงลักษณะจากแรงที่มากกระทำอย่างรุนแรง ทำให้พบเป็นผิวดารเฉียงและโซนหินกรวดเหลี่ยมที่เกิดการแตกหักอยู่ระหว่างผิวดารเฉียงขนาดความยาวประมาณ 10 เมตรและความกว้างประมาณ 4.9 ฟุต (รูปที่ 3.7)



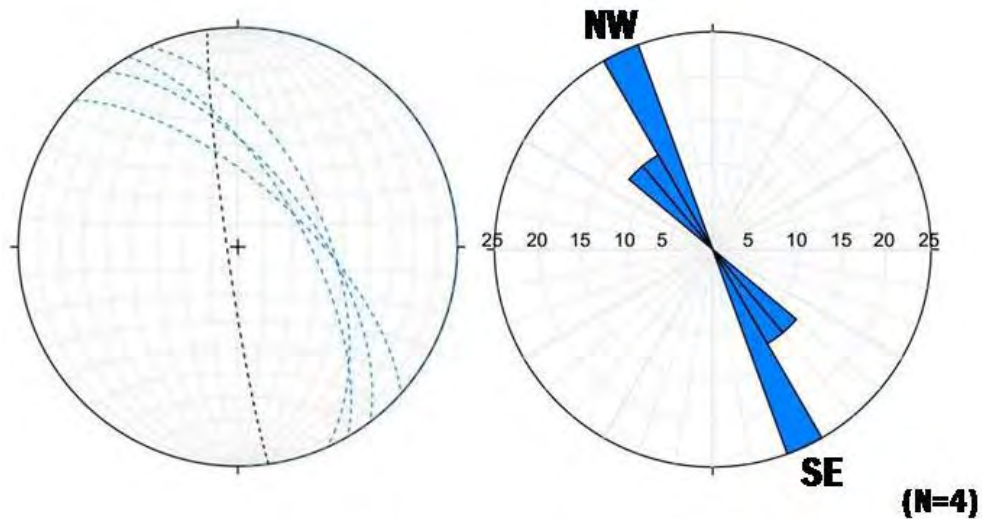
รูปที่ 3.6 หินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 1 มีขนาดความยาวประมาณ 15 เมตรและสูงประมาณ 20 เมตร



รูปที่ 3.7 ภาพวาดพื้นผิวดารเฉียง (เส้นที่บสีดำ) และโซนหินกรวดเหลี่ยม (เส้นที่บสีฟ้า) ขนาดกว้างประมาณ 4.9 ฟุต ที่พบในจุดศึกษาที่ 1

■ ข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน (Attitude of bedding)

จากการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามในจุดศึกษานี้พบว่าชั้นหินมีการวางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ แนวการวางตัวของระนาบการเฉือนอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ แสดงโดยการกำหนดตำแหน่งข้อมูลการวางตัวของชั้นหินและระนาบการเฉือนในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่าและแผนภาพกุหลาบ (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 ตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่าแสดงการวางตัวของชั้นหินที่มีการวางตัวอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ (เส้นประสีดำ) และการวางตัวของพื้นผิวการเฉือนที่มีการวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (เส้นประสีฟ้า) และแผนภาพกุหลาบแสดงแนวการวางตัวหลักของพื้นผิวการเฉือนที่มีการวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้



## 2) จุดศึกษาที่ 2

จุดศึกษาที่ 2 บริเวณด้านตะวันตกของบันไดเมซ่าเลน ระยะห่างจากบันไดประมาณ 700 เมตร (รูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงตำแหน่งของหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 2 บริเวณด้านตะวันตกของบันไดเมซ่าเลน มีระยะห่างจากตัวบันไดประมาณ 700 เมตร

ในจุดศึกษานี้พบหินโผล่ที่มีขนาดความยาวประมาณ 25 เมตรและความสูงประมาณ 20 เมตร (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 หินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 2 มีขนาดความยาวประมาณ 25 เมตรและสูงประมาณ 20 เมตร



- ข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน (Attitude of bedding)

จากการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามในจุดศึกษาที่พบความสัมพันธ์ระหว่างชั้นหินคดโค้ง ประทุนที่มีแกนวางตัวอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตกกับรอยเลื่อนย้อนนวมต่ำ (รูปที่ 3.11)

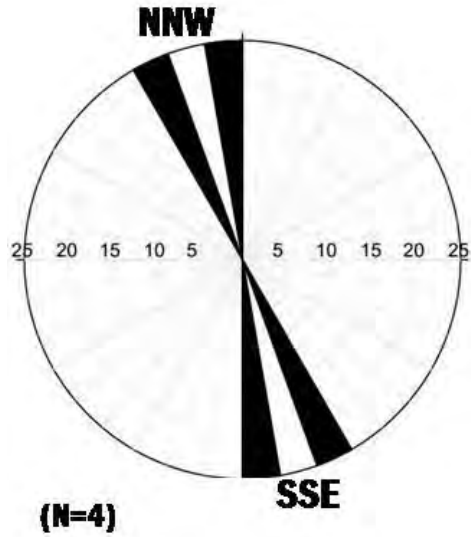


รูปที่ 3.11 ภาพวาดชั้นหินคดโค้งประทุนที่มีแกนการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตกและรอยเลื่อนย้อนนวมที่พบในจุดศึกษาที่ 2

- การเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ (Brittle deformation)

- 1) โครงสร้างรอยแตก (Fractures)

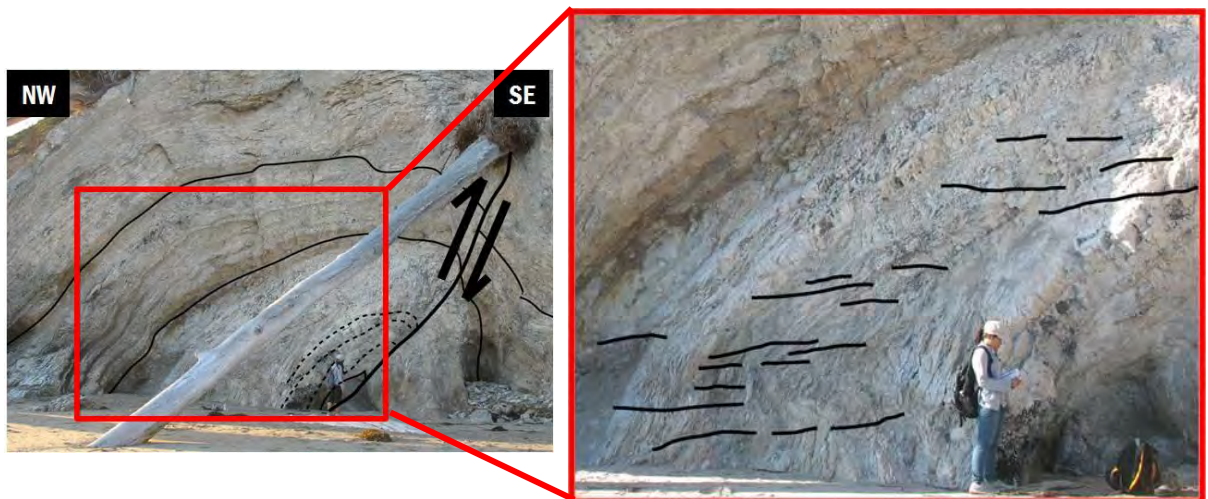
จากการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามพบระบบรอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fractures) ที่มีการวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ แสดงโดยการกำหนดตำแหน่งข้อมูลการวางตัวของรอยแตกในแผนภาพกุกหลาบ (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 แผนภาพกุหลาบแสดงการวางตัวของรอยแตกในแนวระดับที่มีแนวการวางตัวอยู่ในแนว ตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้

## 2) โครงสร้างรอยเลื่อน (Faults)

นอกจากนี้ยังพบลักษณะของรอยเลื่อนย้อนที่มีระนาบรอยเลื่อนวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (รูปที่ 3.13)



รูปที่ 3.13 รอยเลื่อนย้อนที่มีระนาบรอยเลื่อนวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้

### 3) จุดศึกษาที่ 3

จุดศึกษาที่ 3 บริเวณด้านตะวันออกของบันไดเมซ่าเลน ระยะห่างจากบันไดประมาณ 15 เมตร (รูปที่ 3.14)



รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงตำแหน่งของหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 3 บริเวณด้านตะวันออกของบันไดเมซ่าเลน มีระยะห่างจากตัวบันไดประมาณ 15 เมตร

ในจุดศึกษาที่พบหินโผล่ที่มีขนาดความยาวประมาณ 10 เมตรและความสูงประมาณ 5 เมตร (รูปที่ 3.15) มีลักษณะเป็นหินดินดานเนื้อซิลิกาแทรกสลับเป็นชั้นบางกับหินปูนและวางตัวสลับชั้นกับหินโดโลสโตน ในลักษณะของชั้นหินที่มีความเป็นหินดินดานมากกว่า ได้แก่ หินดินดานเนื้อซิลิกาและชั้นหินที่มีความแตกเปราะมากกว่า ได้แก่ หินโดโลสโตนและหินปูน โดยทำการแบ่งหินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ออกเป็น 3 บริเวณย่อย ได้แก่บริเวณ A บริเวณ B และบริเวณ C (รูปที่ 3.16)

ซึ่งมีรายละเอียดจากการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามของแต่ละบริเวณดังนี้





รูปที่ 3.15 หินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 3 มีขนาดความยาวประมาณ 10 เมตรและสูงประมาณ 5 เมตร



รูปที่ 3.16 การแบ่งหินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 3 ออกเป็น 3 บริเวณย่อย ได้แก่ บริเวณ A, B และ C

### 3.1) บริเวณ A

มีลักษณะเป็นหินโผล่ที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวแนวระดับ (Horizontal surface) มีขนาดความกว้างประมาณ 2 เมตรและมีความยาวประมาณ 10 เมตร ในบริเวณนี้พบลักษณะของรอยเลื่อนเฉือน (Strike-slip faults) ที่มีความสัมพันธ์กับรอยแตก (Splay fractures) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### ▪ การเปลี่ยนแปลงแบบแตกเปราะ (Brittle deformation)

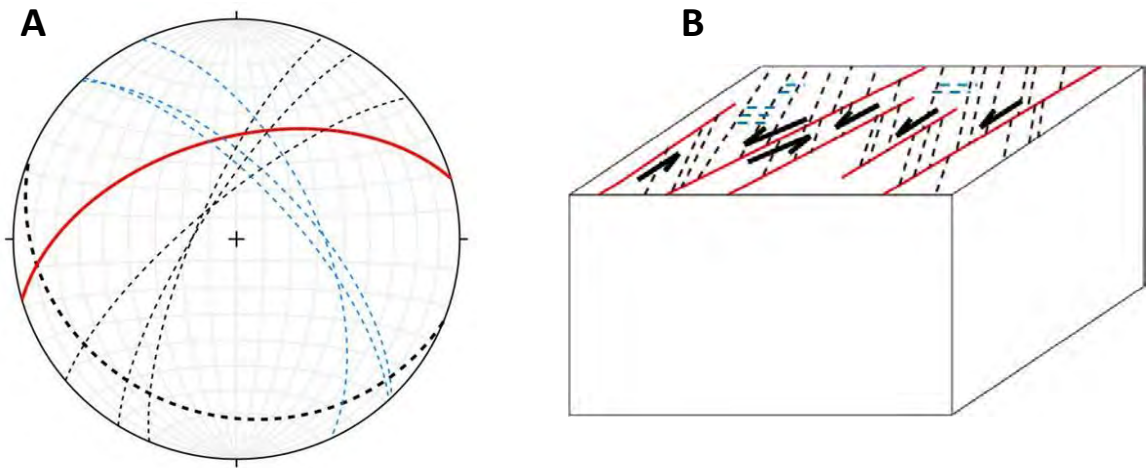
##### 1) โครงสร้างรอยแตก (Fractures)

จากการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามพบระบบรอยแตก 3 แนวที่มีความสัมพันธ์กัน โดยมีรอยแตกหลัก (แสดงด้วยเส้นทึบสีแดง) เกิดขึ้นเป็นลำดับแรกในโหมดการเฉือนของรอยแตก (Mode II – Shearing fracture) มีแนวการวางตัวของระนาบรอยแตกในแนวตะวันออก-ตะวันตก รอยแตกลำดับที่สอง (แสดงด้วยเส้นประสีดำ) เป็นรอยแตกที่แยกออกมาจากรอยแตกลำดับแรก ในโหมดการเปิดออกของรอยแตก (Mode I – Opening splay fracture) หลังจากที่ยอยแตกลำดับแรก ถูกแรงมากระทำและเกิดการเคลื่อนที่แบบซ้ายเข้า (Sinistral slip) มีแนวการวางตัวของระนาบรอยแตกในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ และรอยแตกลำดับที่สาม (แสดงด้วยเส้นประสีฟ้า) เป็นรอยแตกที่แยกออกมาจากรอยแตกลำดับที่สองหลังจากเกิดการเคลื่อนที่แบบเฉือนขึ้น มีแนวการวางตัวของระนาบรอยแตกในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (รูปที่ 3.17)



รูปที่ 3.17 รอยเลื่อนเฉือน (เส้นทึบสีแดง) และรอยแตกที่แยกออกมาจากรอยเลื่อนเฉือนทั้งสองลำดับ (เส้นประสีดำและเส้นประสีฟ้า ตามลำดับ)

โดยแสดงการกำหนดตำแหน่งการวางตัวของชั้นหินและการวางตัวของรอยแตกทั้งสามลำดับ ในตาข่ายมิติสเตอร์ไอกราฟิซนิตพื้นที่เท่า (รูปที่ 3.18 A) พบว่ารอยแตกทั้งสามลำดับมีการวางตัวทำมุมแบบเอียงกัน (Oblique orientation) และวางตัวเกือบตั้งฉากกับระนาบการวางตัวของชั้นหิน (sub-perpendicular) รวมทั้งแสดงแผนภาพสามมิติที่แสดงการวางตัวและลักษณะการเคลื่อนที่ของชั้นหินและรอยแตกทั้งสามลำดับ (รูปที่ 3.18 B)



รูปที่ 3.18 (A) ตาข่ายมิติสเตอร์ไอกราฟิซนิตพื้นที่เท่าแสดงการวางตัวของชั้นหิน (เส้นประเข้มสีดำ) รอยเลื่อนเฉือน (เส้นทึบสีแดง) และรอยแตกที่แยกออกทั้งสองลำดับ (เส้นประสีดำและเส้นประสีฟ้า ตามลำดับ) และ (B) แผนภาพสามมิติแสดงการวางตัวและลักษณะการเคลื่อนที่ของชั้นหิน รอยเลื่อนเฉือนและรอยแตกที่แยกออกทั้งสองลำดับ

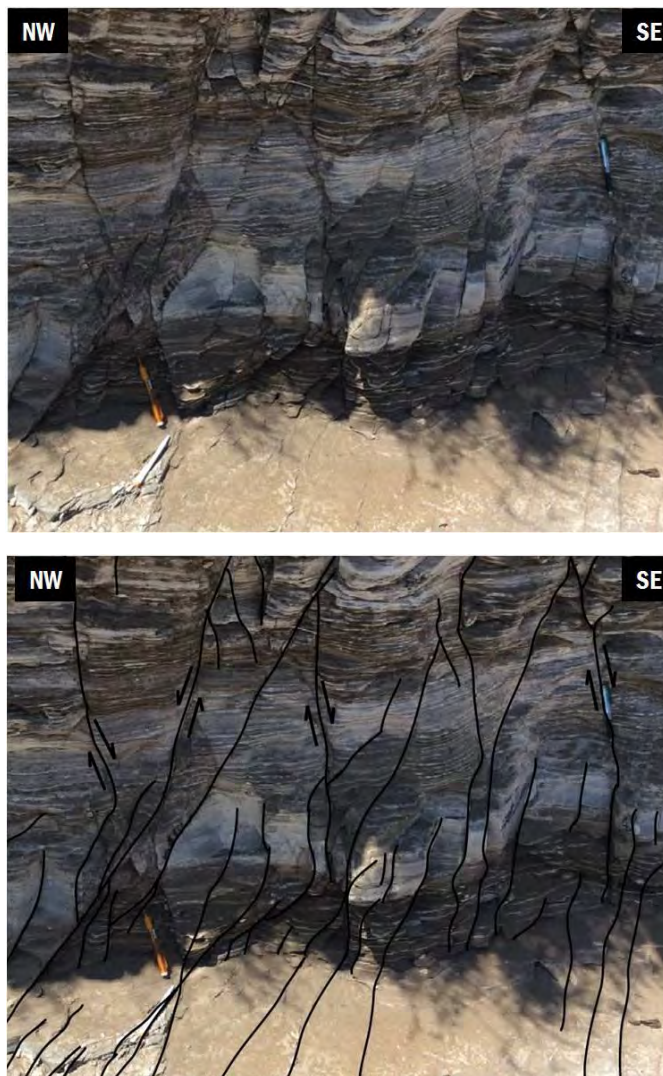
## 2) โครงสร้างรอยเลื่อน (Faults)

นอกจากนี้จากยังพบลักษณะการเคลื่อนตัวของรอยแตกลำดับแรกดังที่กล่าวในข้อ 1) ทำให้เกิดเป็นรอยเลื่อนแบบซ้ายเข้า (Sinistral strike-slip faults) และพบรอยเลื่อนปกติที่มีลักษณะโหมดการเฉือนของรอยแตก (Mode II- shearing mode fracture) เช่นเดียวกัน



### 3.2) บริเวณ B

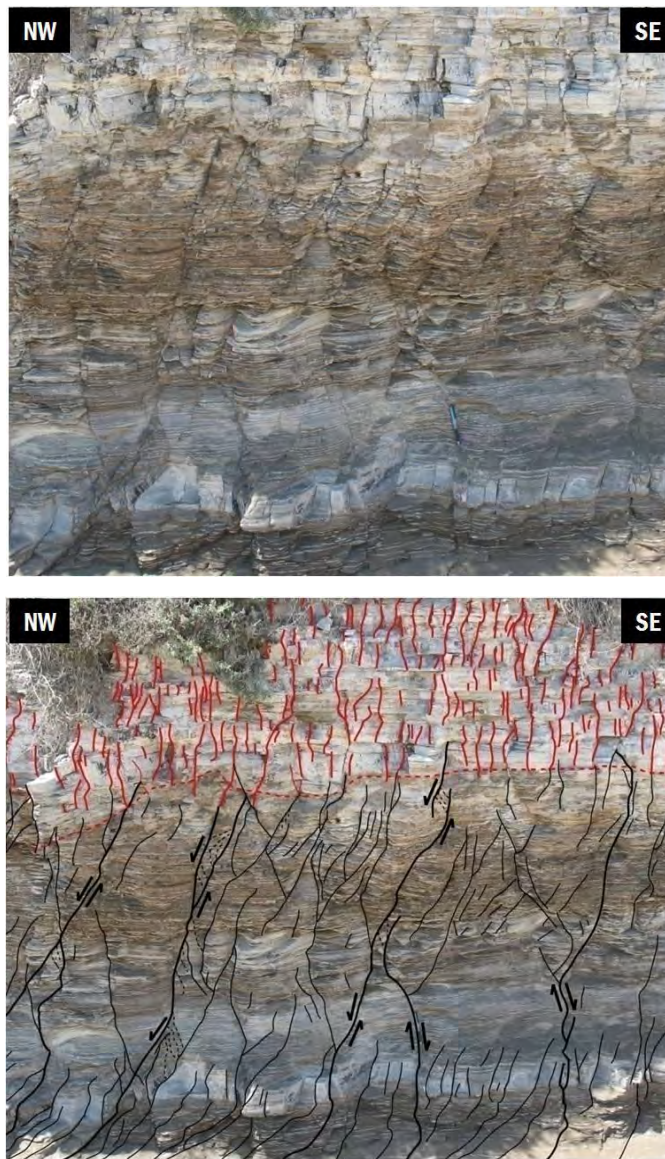
มีลักษณะเป็นหินโผล่ที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวแนวตั้ง (Vertical surface) มีขนาดความยาวประมาณ 10 เมตรและมีความสูงประมาณ 1 เมตร ในบริเวณนี้พบลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างรอยแตกที่เกิดขึ้นในบริเวณ A กับรอยเลื่อนปกติ (Normal faults) ที่เกิดในชั้นหินที่วางตัวอยู่ด้านบน โดยแสดงลักษณะการส่งผ่านหรือการเปลี่ยนแปลงที่ต่อเนื่องกัน โดยเปลี่ยนจากรอยแตกและรอยเลื่อนในแนวระดับบนพื้นผิวของบริเวณ A ไปเป็นรอยเลื่อนปกติบนพื้นผิวของบริเวณ B (รูปที่ 3.19)



รูปที่ 3.19 หินโผล่ที่พบในบริเวณ B และภาพวาดรอยเลื่อนปกติที่พบบนพื้นผิวหินโผล่ที่เกิดการส่งผ่านและเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องมาจากรอยแตกในบริเวณ A

### 3.3) บริเวณ C

มีลักษณะเป็นหินโคลที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวแนวตั้ง มีขนาดความยาวประมาณ 10 เมตรและมีความสูงประมาณ 4 เมตร ในบริเวณนี้พบลักษณะของรอยเลื่อนปกติบนพื้นผิวหินโคลที่ต่อเนื่องมาจากบริเวณ B และลักษณะของรอยแตกในแนวตั้งที่ต่อเนื่องขึ้นไปบนชั้นหินที่วางตัวอยู่ด้านบน (รูปที่ 3.20)



รูปที่ 3.20 หินโคลที่พบในบริเวณ C และภาพวาดรอยเลื่อนปกติที่พบบนพื้นผิวหินโคลที่ต่อเนื่องมาจากบริเวณ B (เส้นที่บสีดำ) รวมทั้งรอยแตกในแนวตั้งที่ต่อเนื่องขึ้นไปในชั้นหินด้านบน (เส้นที่บสีแดง)



#### 4) จุดศึกษาที่ 4

จุดศึกษาที่ 4 บริเวณด้านตะวันออกของบันไดเมซ่าเลน ระยะห่างจากบันไดประมาณ 700 เมตร (รูปที่ 3.21)



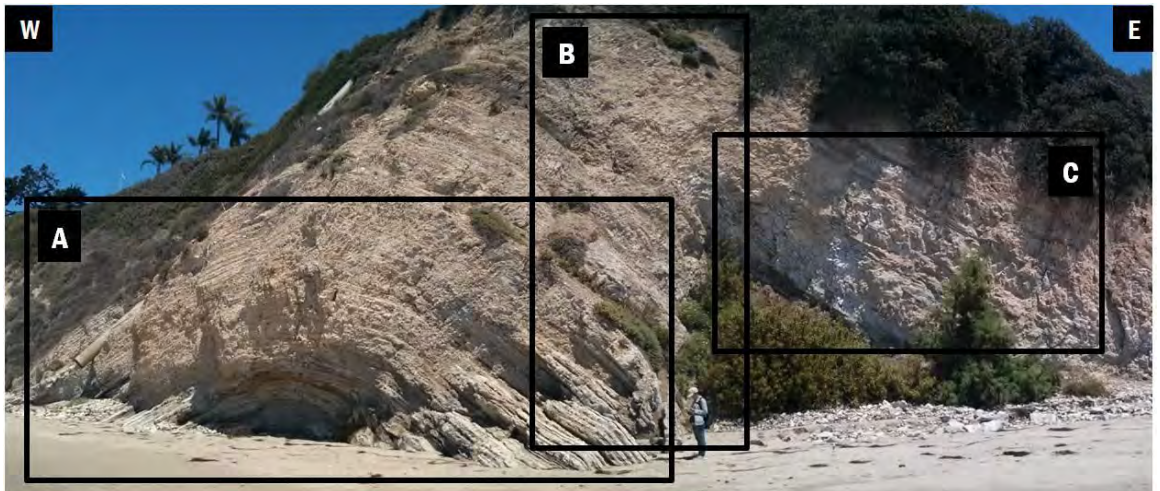
รูปที่ 3.21 ภาพถ่ายดาวเทียมแสดงตำแหน่งของหินโผล่ในจุดศึกษาที่ 4 บริเวณด้านตะวันออกของบันไดเมซ่าเลน มีระยะห่างจากตัวบันไดประมาณ 700 เมตร

ในจุดศึกษาที่พบลักษณะหินโผล่หน้าผาขนาดใหญ่ที่มีความยาวประมาณ 100 เมตรและความสูงประมาณ 15 เมตร (รูปที่ 3.22) มีลักษณะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นหินคดโค้ง รอยเลื่อนย้อนและรอยแตกในแนวระดับ และทำการแบ่งหินโผล่ที่พบในจุดศึกษาที่ 4 นี้ออกเป็น 3 บริเวณย่อย ได้แก่ บริเวณ A บริเวณ B และบริเวณ C (รูปที่ 3.23)

จะได้รายละเอียดจากการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามของแต่ละบริเวณดังนี้



รูปที่ 3.22 หินโคลนที่พบในจุดศึกษาที่ 4 มีขนาดความยาวประมาณ 100 เมตรและสูงประมาณ 15 เมตร



รูปที่ 3.23 การแบ่งหินโคลนที่พบในจุดศึกษาที่ 4 ออกเป็น 3 บริเวณย่อย ได้แก่ บริเวณ A, B และ C

#### 4.1) บริเวณ A

พบลักษณะของชั้นหินคดโค้งและรอยแตก (รูปที่ 3.24)

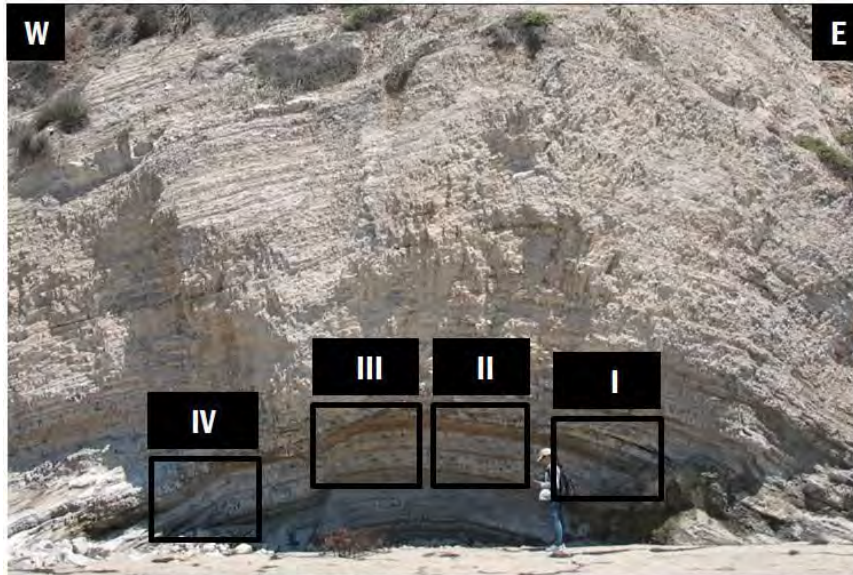


รูปที่ 3.24 ชั้นหินคดโค้งและรอยแตกที่พบในบริเวณ A

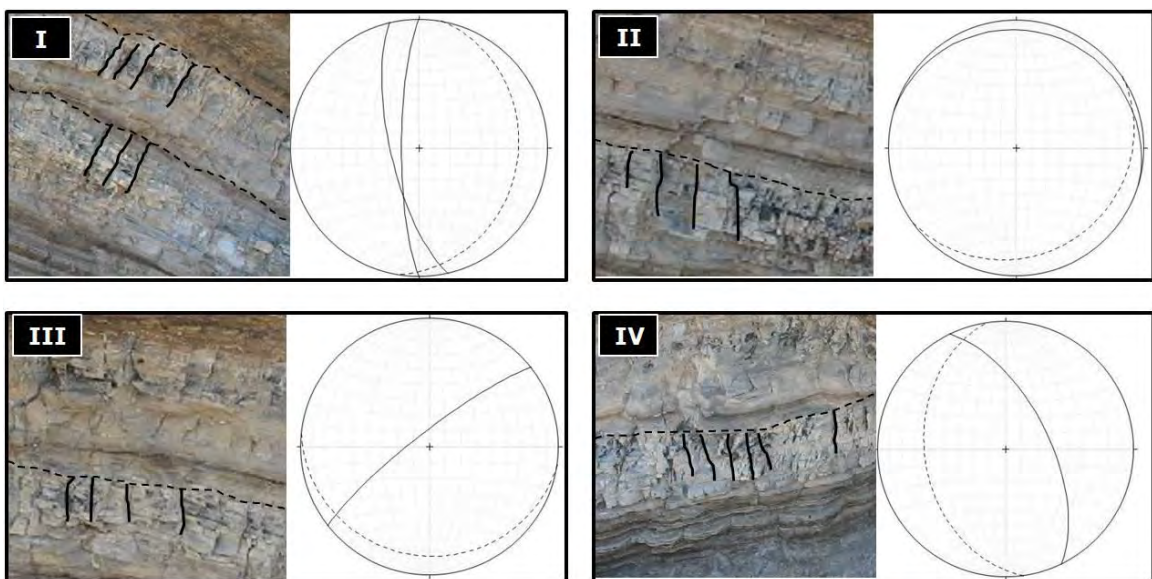
##### ▪ ข้อมูลการวางตัวของชั้นหิน (Attitude of bedding)

เมื่อทำการสำรวจและเก็บข้อมูลการวางตัวของชั้นหินคดโค้งมีแนวแกนของชั้นหินคดโค้งวางตัวอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ จากนั้นแบ่งพื้นที่ศึกษาบริเวณชั้นหินคดโค้งออกเป็น 4 พื้นที่ย่อย เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการวางตัวของชั้นหินกับการวางตัวของรอยแตก (รูปที่ 3.25) ทำการกำหนดตำแหน่งข้อมูลแนวการวางตัวของชั้นหินและรอยแตกลงในภาพถ่ายมิติสเตอร์ไอกร้าฟิคนิดพื้นที่เท่า พบว่ารอยแตกที่พบในพื้นที่ศึกษาย่อยทั้ง 4 พื้นที่มีการวางตัวตั้งฉากกับการวางตัวของชั้นหินตลอดแนวของชั้นหินคดโค้ง (รูปที่ 3.26)





รูปที่ 3.25 การแบ่งพื้นที่ศึกษาบริเวณชั้นหินคดโค้งที่พบในบริเวณ A ออกเป็น 4 พื้นที่ย่อยเพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการวางตัวของชั้นหินกับการวางตัวของรอยแตก



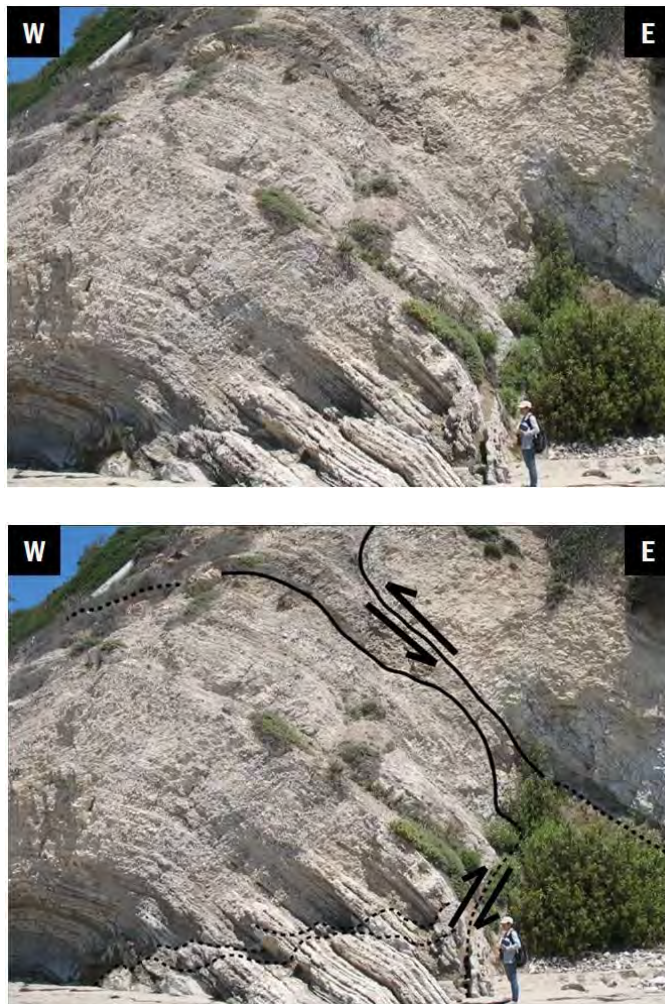
รูปที่ 3.26 ภาพวาดรอยแตกที่พบบนพื้นผิวนหินเผลและตาข่ายมิตสเตอร์โกราฟิคนิตพื้นที่เท่าแสดงแนวการวางตัวของชั้นหินและรอยแตกที่พบ พบว่ารอยแตกที่พบในพื้นที่ศึกษาย่อยทั้ง 4 พื้นที่มีการวางตัวตั้งฉากกับชั้นหินตลอดแนวของชั้นหินคดโค้ง

- การเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ (Brittle deformation)

พบลักษณะของรอยแตกซึ่งเมื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ของการวางตัวของรอยแตกกับการวางตัวของชั้นหินพบว่ารอยแตกที่พบเป็นรอยแตกในโหมดการเปิดออกและมีลักษณะเป็นรอยแตกที่ตั้งฉากกับชั้นหิน (Bed-perpendicular fracture)

#### 4.2) บริเวณ B

ในบริเวณนี้พบลักษณะของรอยเลื่อนย้อน (Thrust fault) (รูปที่ 3.27)



รูปที่ 3.27 รอยเลื่อนย้อนที่พบในบริเวณ B



- การเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะ (Brittle deformation)

เมื่อทำการสำรวจและเก็บข้อมูลจากภาคสนามในบริเวณนี้แล้วทำการกำหนดตำแหน่งข้อมูลการวางตัวของรอยเลื่อนย้อนลงในตาข่ายมิติสเตอริโอกราฟิกชนิดพื้นที่เท่าพบว่ารอยเลื่อนย้อนมีการวางตัวอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตก ซึ่งสอดคล้องกับแรงที่มาบีบอัดในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้

#### 4.3) บริเวณ C

ในบริเวณนี้พบลักษณะของรอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fracture) ซึ่งรอยแตกนี้มีการกระจายตัวอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับรอยเลื่อนย้อน (รูปที่ 3.28)



รูปที่ 3.28 รอยแตกในแนวระดับที่พบในบริเวณ C

## บทที่ 4

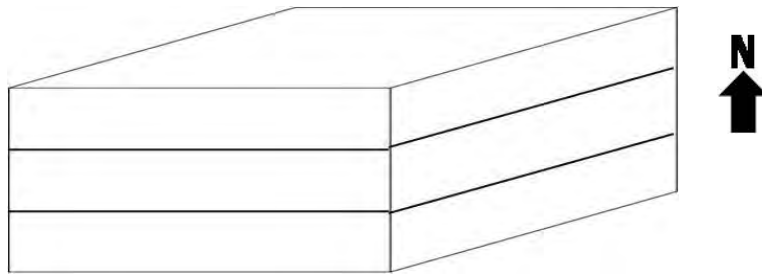
### อภิปรายผลการศึกษา (Discussion)

จากผลการศึกษาค้นคว้าและเก็บข้อมูลระบบรอยแตกรวมทั้งลักษณะทางธรณีวิทยา โครงสร้างอื่นๆในระดับกลางจากภาคสนามบริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร สหรัฐอเมริกา นำมารวบรวม วิเคราะห์ และอภิปรายผลเป็นลักษณะความสัมพันธ์ วิวัฒนาการและกลไกการเกิดของรอยแตกและ ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆ รวมทั้งความสัมพันธ์กับกระบวนการแปรสัณฐานทางธรณีวิทยา ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ลำดับชั้นของกลไกและวิวัฒนาการ คือ ลำดับชั้นการสะสมตัวของชั้นหิน ลำดับชั้นการดึงออก ลำดับชั้นการเฉือนและการบีบอัด และลำดับชั้นการบีบอัด โดยมีรายละเอียดของ กลไกและวิวัฒนาการในแต่ละลำดับชั้นดังนี้

#### 4.1 กลไกและวิวัฒนาการของชั้นหิน

##### 1) ลำดับชั้นการสะสมตัวของชั้นหิน (Deposition stage)

ลำดับแรกเกิดการสะสมตัวของตะกอนในแนวระดับ บริเวณแอ่งสะสมตะกอนทะเลน้ำลึกสมัย ไมโอซีนเกิดเป็นชั้นหินดินดานเนื้อซิลิกาแทรกสลับเป็นชั้นบางกับหินปูนและหินโดโลสโตนในหมวดหิน มอนเทอเรย์ (รูปที่ 4.1)

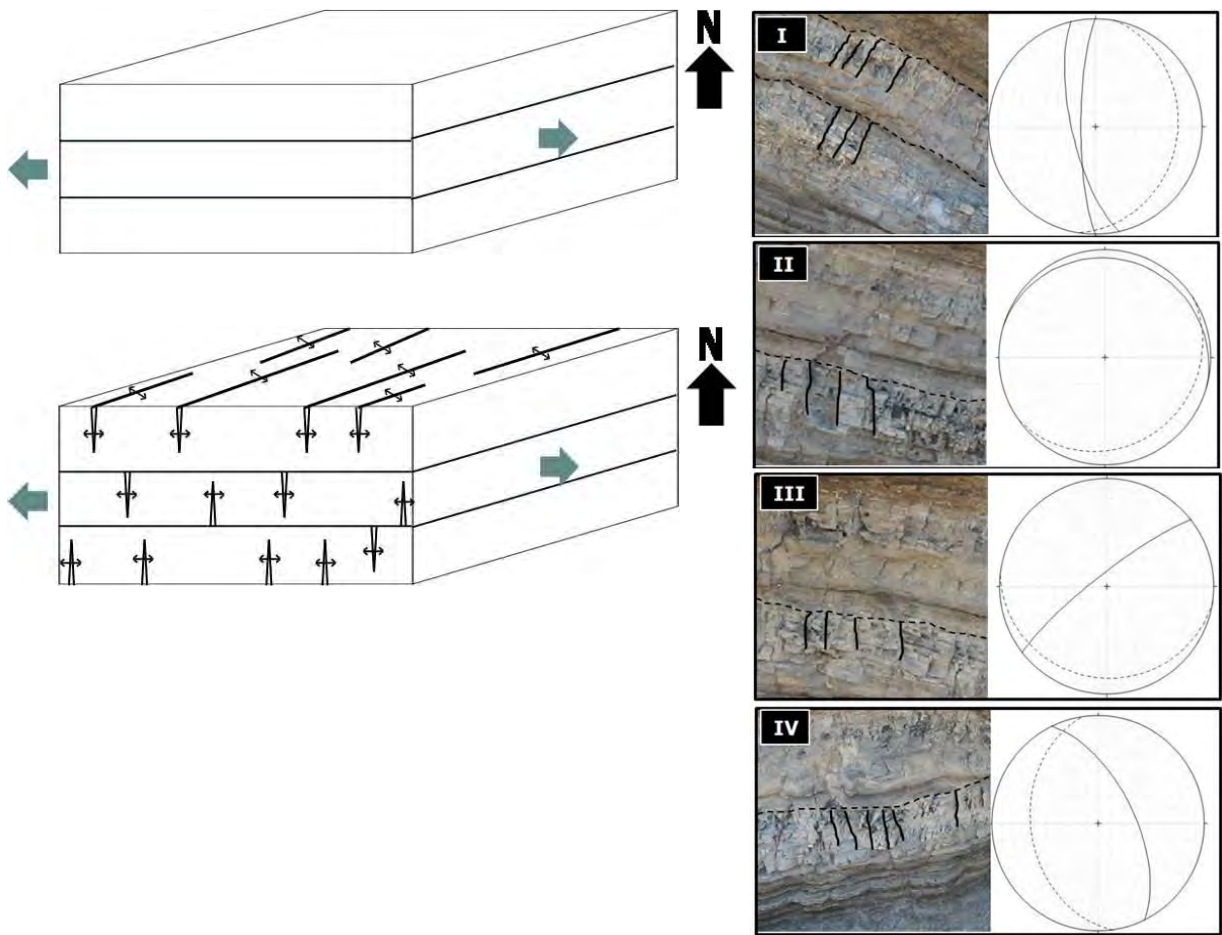


รูปที่ 4.1 ลำดับชั้นการสะสมตัวของชั้นหินของหมวดหินมอนเทอเรย์ในแนวระดับ บริเวณแอ่งสะสม ตะกอนทะเลน้ำลึกสมัยไมโอซีน



## 2) ลำดับชั้นการดึงออก (Tension stage)

ลำดับที่สองเป็นลำดับชั้นการดึงออก ซึ่งในช่วงเวลาของการสะสมตัวและการเปิดออกของแอ่งสะสมตัวสมัยไมโอซีน ชั้นหินถูกแรงดึงออกเข้ามากระทำ ทำให้เกิดลักษณะการเปิดออกเป็นรอยแตกในโหมดการเปิดออกของรอยแตก ซึ่งมีทิศทางการเปิดออกในแนวเดียวกับแรงดึง และได้เป็นรอยแตกที่มีการวางตัวตั้งฉากกับชั้นหิน (รูปที่ 4.2)

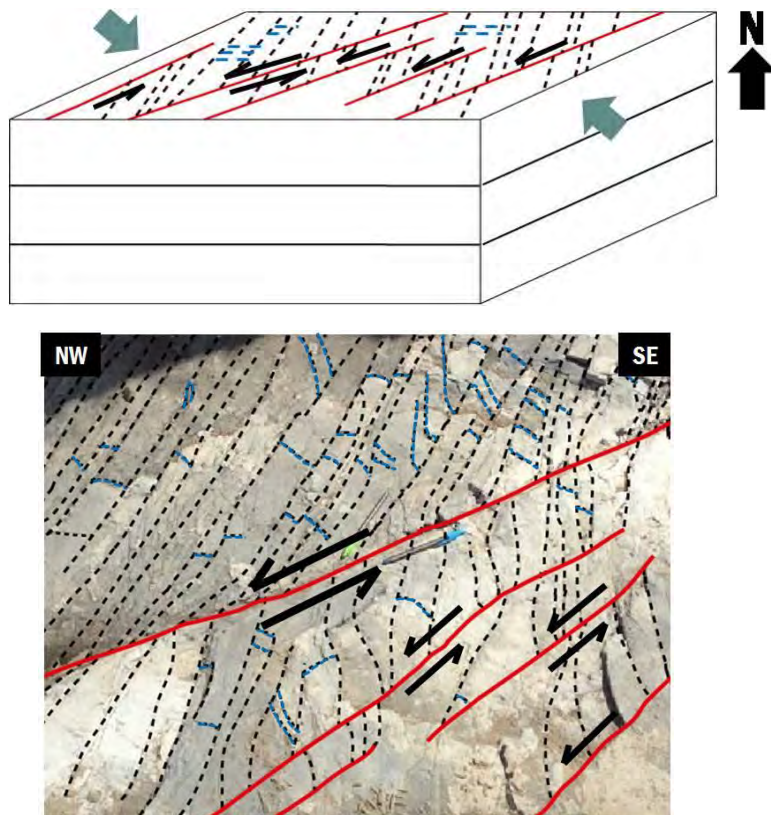


รูปที่ 4.2 ลำดับชั้นการดึงออก ซึ่งชั้นหินถูกแรงดึงออกเข้ามากระทำ ทำให้เกิดลักษณะการเปิดออกเป็นรอยแตกในโหมดการเปิดออกของรอยแตก ซึ่งมีทิศทางการเปิดออกในแนวเดียวกับแรงดึง และได้เป็นรอยแตกที่มีการวางตัวตั้งฉากกับชั้นหิน

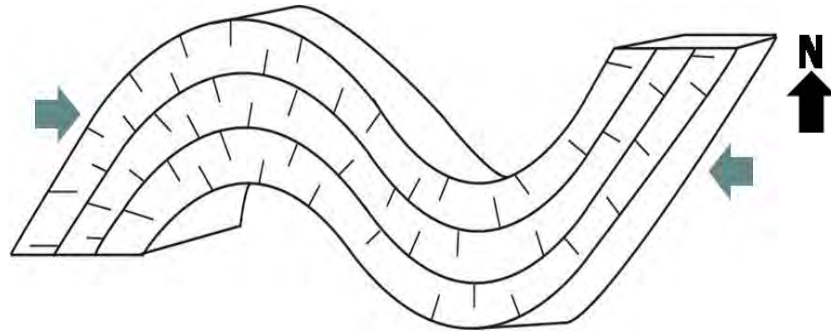
### 3) ลำดับชั้นการเฉือนและการบีบอัด (Shear and Compression stage)

ลำดับที่สามเป็นลำดับชั้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะแตกต่างกัน 2 รูปแบบเนื่องจากที่ชั้นหินถูกแรงบีบอัดมากกระทำ ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่เข้าหาและเกิดการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกฟาราลอนใต้แผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือในสมัยไพลโอซีนตอนปลาย โดยในบางบริเวณชั้นหินถูกแรงมากกระทำในทิศทางเหลื่อมกับแนวการวางตัวของชั้นหิน ทำให้รอยแตกที่เกิดขึ้นในลำดับแรกเกิดการเคลื่อนที่แบบเฉือน เกิดเป็นรอยเลื่อนแนวระดับซึ่งเป็นรอยแตกในโหมดการเฉือนของรอยแตกและลักษณะของรอยแตกที่แยกออกจากรอยเลื่อนแนวระดับนั้น (รูปที่ 4.3)

นอกจากนี้ชั้นหินในบริเวณอื่นที่ถูกแรงมาบีบอัดในทิศทางขนานกับแนวการวางตัวจะเกิดการคดโค้ง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบอ่อนนิ่ม (Ductile deformation) เกิดเป็นชั้นหินคดโค้งที่มีแกนของการคดโค้งวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.3 ลำดับชั้นการเฉือนและการบีบอัด ซึ่งชั้นหินในบางบริเวณเกิดเป็นลักษณะของรอยเลื่อนในแนวระดับซึ่งมีการเคลื่อนที่แบบเฉือน และเกิดลักษณะของรอยแตกที่แยกออกจากรอยเลื่อนนั้น

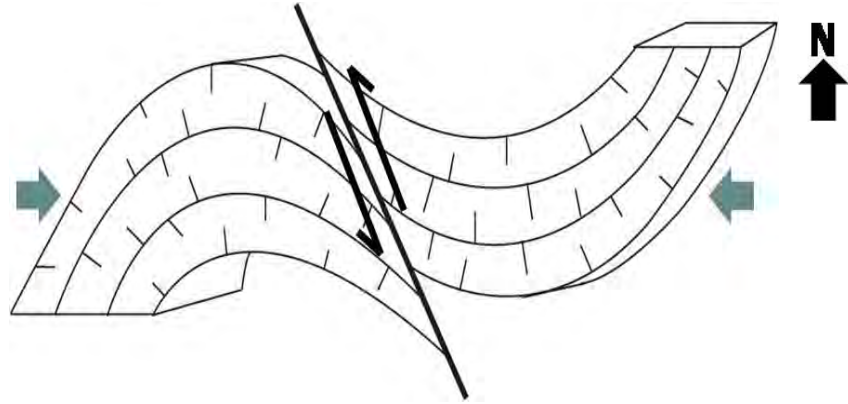


รูปที่ 4.4 ลำดับชั้นการเขี้ยวและการบีบอัด ซึ่งชั้นหินในบางบริเวณเกิดเป็นลักษณะของชั้นหินคดโค้งที่มีแกนของการคดโค้งวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้

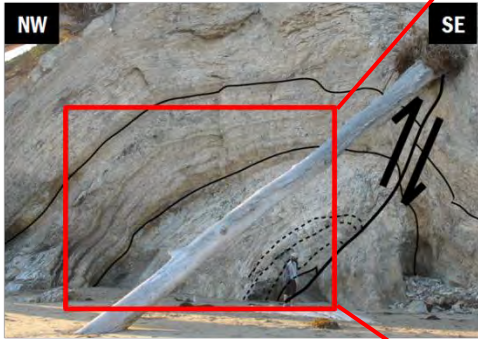
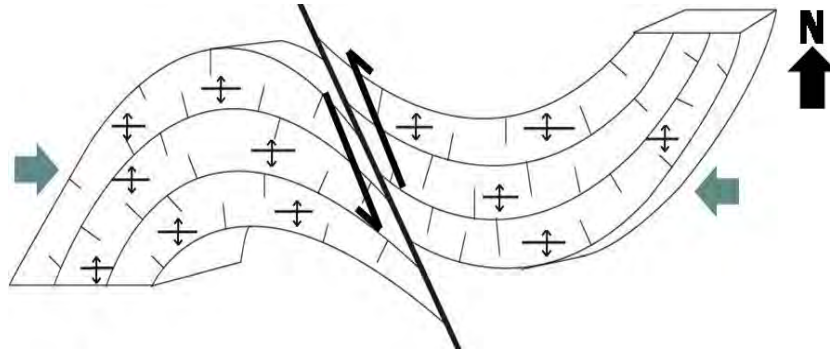
#### 4) ลำดับชั้นการบีบอัด (Compression stage)

ลำดับที่สี่เป็นลำดับชั้นการบีบอัด ซึ่งเป็นลำดับชั้นที่ต่อเนื่องมาจากลำดับชั้นการบีบอัดลำดับที่สาม โดยเมื่อมีแรงบีบอัดมากกระทำต่อชั้นหินอย่างต่อเนื่องและรุนแรงมากขึ้น ชั้นหินคดโค้งจะไม่สามารถทนต่อการถูกบีบอัดได้อีกต่อไป จึงเกิดการแตกหักของชั้นหินในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงลักษณะแบบแตกเปราะ โดยเกิดเป็นรอยเลื่อนย้อนที่มีแนวการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก (รูปที่ 4.5) และเกิดเป็นรอยแตกในแนวระดับในบริเวณใกล้เคียงกับรอยเลื่อนย้อนนั้น (รูปที่ 4.6)





รูปที่ 4.5 ลำดับชั้นการบีบอัด ซึ่งชั้นหินถูกแรงมากกระทำอย่างรุนแรงทำให้ไม่สามารถทนต่อแรงบีบอัด  
 ที่มากกระทำได้ จึงเกิดการแตกหักของชั้นหินคดโค้งในรูปแบบการเปลี่ยนลักษณะแบบแตกเปราะและ  
 เกิดเป็นรอยเลื่อนย้อน ซึ่งมีแนวการวางตัวในแนวตะวันออก-ตะวันตก



รูปที่ 4.6 ลำดับชั้นการบีบอัด ซึ่งชั้นหินถูกแรงมากกระทำอย่างรุนแรงทำให้ไม่สามารถทนต่อแรงบีบอัดที่มากกระทำได้ จึงเกิดเป็นรอยแตกในแนวระดับในบริเวณใกล้เคียงกับรอยเลื่อนย้อน

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา (Conclusions)

จากผลการศึกษาการสำรวจและเก็บข้อมูลระบบรอยแตกรวมทั้งลักษณะทางธรณีวิทยา โครงสร้างอื่นๆในระดับกลาง จากภาคสนามบริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร สหรัฐอเมริกา นำมารวบรวม วิเคราะห์ และอภิปรายผลเป็นลักษณะความสัมพันธ์ วิวัฒนาการและกลไกการเกิดของรอยแตกและ ลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆ รวมทั้งความสัมพันธ์กับกระบวนการแปรสัณฐานทางธรณีวิทยา สามารถสรุปเป็นผลการศึกษาได้ดังนี้

#### 5.1 ลักษณะรอยแตกที่พบ

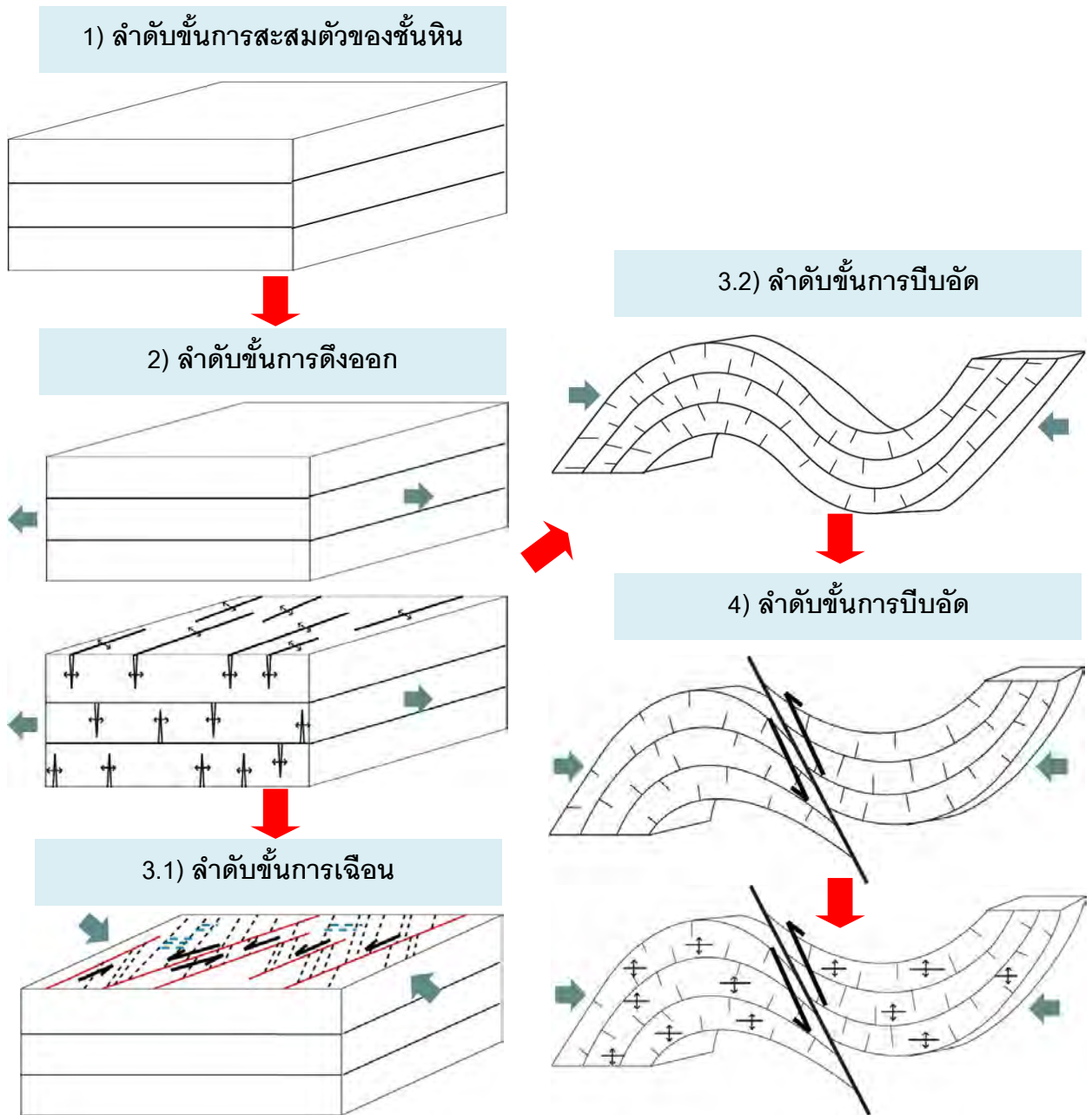
หินโผล่ของหมวดหินมอนเทอเรย์บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร เมืองซานตาบาร์บาราทางด้าน ตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ปรากฏลักษณะของรอยแตก 6 ประเภทที่มี ความสัมพันธ์กัน ได้แก่

- 1) รอยแตกที่ตั้งฉากกับชั้นหิน (Bed-perpendicular fractures)
- 2) รอยแตกในแนวตั้ง (Vertical fractures)
- 3) รอยแตกในแนวระดับ (Sub-horizontal fractures)
- 4) รอยเลื่อนย้อน (Thrust faults)
- 5) รอยเลื่อนปกติ (Normal faults)
- 6) รอยเลื่อนตามแนวระดับ (Strike-slip faults)



## 5.2 สรูปกลไกและวิวัฒนาการของชั้นหิน

จากการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม การวิเคราะห์และตีความผลการวิเคราะห์ รวมทั้งความสัมพันธ์กับกระบวนการแปรสัณฐานทางธรณีวิทยาของพื้นที่ สามารถสรุปลำดับขั้นของกลไกการเกิดและวิวัฒนาการของชั้นหิน รอยแตก และลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆ (รูปที่ 5.1) ได้ดังนี้



รูปที่ 5.1 สรุปลำดับขั้นของกลไกการเกิดและวิวัฒนาการของชั้นหิน รอยแตก และลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่เกิดขึ้น

### 5.3 ความสัมพันธ์ของรอยแตกกับกระบวนการธรณีแปรสัณฐาน

ลักษณะของรอยแตกที่พบมีความสัมพันธ์หลักกับการเกิดชั้นหินคดโค้งและรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำและมีความสัมพันธ์รองกับการเกิดรอยแตกเฉือน

นอกจากนี้จากหลักฐานของรอยแตกและลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างอื่นๆที่พบสามารถบ่งชี้ได้ว่ามีแรงที่มากกระทำต่อชั้นหินในลักษณะของแรงบีบอัดในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้เป็นหลัก ซึ่งแรงบีบอัดที่มากกระทำนี้มีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่เข้าหากันและการมุดตัวของแผ่นเปลือกโลกฟาราลอนลงใต้แผ่นเปลือกโลกอเมริกาเหนือ วิวัฒนาการการเกิดเทือกเขาด้านตะวันตกและวิวัฒนาการการเกิดรอยเลื่อนแบบขวาเข้าซานแอนเดรียส

### 5.4 ความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจ

ระบบรอยแตกที่พบจากการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนามของหินโผล่บริเวณหาดอาร์โรโยเบอร์โร นอกจากจะเป็นหลักฐานที่ช่วยบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ของลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างกลไกการเกิดและวิวัฒนาการที่เกี่ยวข้องกับการแปรสัณฐานทางธรณีวิทยาของพื้นที่ชายฝั่งด้านตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนียแล้ว ยังเป็นตัวอย่งที่ดีในการศึกษาความสัมพันธ์ของระบบรอยแตกกับการเคลื่อนที่ของของไหลในลักษณะการเป็นชั้นหินกักเก็บและช่องทางการไหลของทั้งปิโตรเลียมและของไหลชนิดอื่น เพื่อใช้ประโยชน์ในการพัฒนาและสามารถนำทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในอนาคตอีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง (References)

- Atwater, T.M., 1998, Plate tectonic history of Southern California with emphasis on the western Transverse Ranges and northern Channel island, in Weigand, P.W., ed., Contributions to the geology of the Northern Channel Islands, Southern California: American Association of Petroleum Geologists, Pacific Section, MP 45, p.1-8.
- Bramlette, M.N., 1946, The Monterey Formation of California and the Origin of its Siliceous Rocks: Geological Survey, Professional Paper 212, v.2, p.1-80.
- Dholakia, S.K., Aydin, A., Pollard, D.D., and Zoback, M.D., 1998, Fault - Controlled Hydrocarbon Pathways in the Monterey Formation, California: The American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Bulletin, v.82, no.8, p.1551-1574.
- Dibblee, T.W., Jr., 1986, Geologic map of the Santa Barbara quadrangle, Santa Barbara Country, California: Dibblee Geological Foundation, Map DF-06 (Ehrenspeck, H.E., ed.), scale 1:24,000.
- Gutierrez-Alonso, G., and Gross, M.R., 1997, Geometry of inverted faults and related folds in the Monterey Formation: implications for the structural evolution of the southern Santa Maria basin, California: Journal of Structural Geology, v.19, no.10, p.1303-1321.
- Gross, M.R., 1995, Fracture partitioning: Failure mode as a function of lithology in the Monterey Formation of coastal California: Geological Society of America Bulletin, v.107, no.7, p.770-792.
- Gross, M.R., Gutierrez-Alonso, G., and Bartlett, W.L., 1998, Fold-related fractures in coastal outcrops of the Monterey Formation: Effects of structure style, mechanical stratigraphy, and scale at Arroyo Burro beach: in Eichhubl, P., ed., Diagenesis, Deformation, and Fluid Flow in the Monterey Formation: Pacific Section SEPM Special Publication, Book 83, p.37-65.

## เอกสารอ้างอิง (References)

Nicholson, C., Sorlien, C.C., Atwater, T., Crowell, J.C., and Luyendyk, B.P., 1994, Microplate capture, rotation of the western Transverse Ranges, and initiation of the San Andreas transform as a low-angle fault system: *Journal of Geology*, Institute of Crustal Studies and Department of Geological Sciences, University of California, Santa Barbara, v.22, p.491-495.