



รายงานการวิจัย

การประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนจากลักษณะทางศิลาวิทยา
และองค์ประกอบเคมี

Prediction of Mechanical Properties of Limestones from
Petrographic Features and Chemical Composition



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนจากลักษณะทางศิลาวิทยา
และองค์ประกอบเคมี

Prediction of Mechanical Properties of Limestones from
Petrographic Features and Chemical Composition

ผู้วิจัย

อาจารย์ ดร.อานิสงส์ จิตนารินทร์

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ.2557 และ 2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

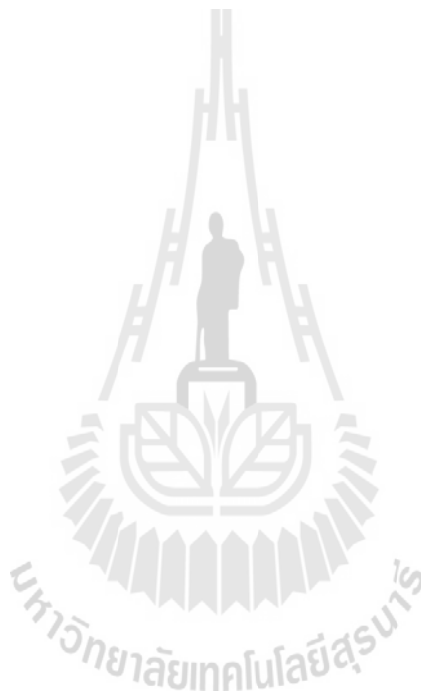
กรกฎาคม 2558

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 และ 2558 ซึ่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ จากหน่วยวิจัยกลศาสตร์หิน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และความช่วยเหลือจากนางสาวเสมอแซร์ พรหมมา และนักศึกษาช่วยงานของหน่วยวิจัยกลศาสตร์หินฯ ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผู้วิจัย

กรกฎาคม 2558



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนกลุ่มหินสระบุรี ที่เก็บตัวอย่างจากพื้นที่ลพบุรี สระบุรี นครสวรรค์และนครราชสีมา โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางศิลาวิทยา และองค์ประกอบทางเคมี ทั้งนี้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่ทำการศึกษาและทดสอบในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ค่ากำลังรับแรงกดแบบบราซิลเลียน (σ_B) ค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (I_d) และค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (LAAI) สำหรับลักษณะทางศิลาวิทยาได้ทำการศึกษาแผ่นหินบางภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหินด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) แล้วจึงหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ของหิน ผลจากการศึกษาพบว่า หินปูนที่นำมาทดสอบจัดเป็น mudstone และ wackstone (Dunhams, 1962) เมื่อศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์สามารถจำแนกเป็น micrite และ poorly washed sparite (Folk, 1959; 1962) หินอ่อนจำแนกเป็น brownish grey marble และ white marble โดยมีผลึกแร่แคลไซต์ขนาดละเอียดถึงปานกลาง ซึ่งแตกต่างชัดเจนจากเนื้อหินปูน องค์ประกอบทางเคมีของหินทั้งหมด ร้อยละ 79-100 เป็นแร่แคลไซต์ พบโดโลไมต์เป็นแร่รอง และมีควอตซ์ แร่กลุ่มดินเหนียวและเหล็กออกไซด์และซัลไฟต์ในปริมาณน้อย ผลการทดสอบเชิงกลศาสตร์พบว่า ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวมีค่าระหว่าง 43.55-70.65 MPa ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียนมีค่าระหว่าง 8.80-12.93 MPa ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าระหว่าง 2.00-30.39 GPa ค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบมีค่าระหว่างร้อยละ 17.13-25.47 และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนมีค่ามากกว่าร้อยละ 99 โดยมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2.66-2.74 g/cm³

การหาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และลักษณะเนื้อหิน โดยใช้อัตราส่วน sparite/micrite ในการเปรียบเทียบ พบว่ามีความสัมพันธ์ไม่ชัดเจน โดยหินชนิด D-micrite มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูงที่สุดในกลุ่ม และหินชนิด A-poorly washed biosparite มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวสูงที่สุดในกลุ่ม ส่วนค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนและค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะเนื้อหิน แต่กลับพบว่า หินที่มีแร่อื่นปนอยู่จะมีความแข็งมากขึ้น แร่กลุ่มดินเหนียวมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว งานวิจัยนี้สรุปว่า ในกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษาคั้งนี้ หินปูน mudstone (micrite) มีแนวโน้มจะมีคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่ดีกว่ากลุ่ม wackstone (poorly washed sparite) และคุณสมบัติทางเคมีของหินปูนมีอิทธิพลต่อความแข็งของหินมากกว่าคุณสมบัติทางศิลาวิทยา

Abstract

The objective of this study is to estimate mechanical properties of limestone by using petrographic features and chemical composition. Limestone and marble of the Saraburi Group were collected from several localities in Lopburi, Saraburi, Nakhon Sawan and Nakhon Ratchasima. The mechanical tests were performed to determine uniaxial compressive strength (σ_c), Young's modulus (E), Brazillian tensile strength (σ_B), slake durability index (I_d) and Los Angeles abrasion and impaction index (LAAI). The studied limestones can be defined as mudstone and wackstone (Dunhams, 1962). The petrographic study under a polarized light microscope enabled to classified as micrite and poorly washed sparite (Folk, 1959; 1962). The sparite-to-micrite ratio of each sample was calculated. Marbles can be classified as brownish grey and white, both types are of crystalline texture with fine to medium size of calcite crystals. Chemical composition was analyzed by X-ray diffraction technique. All specimens are composed primarily of calcite (about 79-100%), secondly of dolomite with small amounts of quartz, clay minerals and Fe-oxide and sulfide minerals. Results from mechanical tests show that the uniaxial compressive strength ranges between 43.55-70.65 MPa, the Young's modulus is about 2.00-30.39 GPa, the Brazillian tensile strength ranges between 8.80-12.93 MPa, the slake durability index is more than 99% and the Los Angeles abrasion and impaction index ranges 17.13-25.47 (density is 2.66-2.74 g/cm³).

The relationships between the mechanical properties and texture of the rocks as represented by sparite/micrite are obscure. Among micritic limestones, D type limestone (micrite) has the highest uniaxial compressive strength and the Young's modulus. The A type, poorly washed limestone has the highest uniaxial compressive strength. The slake durability index and the Los Angeles abrasion and impaction index are independent from the texture. The limestones containing other minerals than calcite seem to have higher strength. The higher amount of clay minerals is related to the higher uniaxial compressive strength. It can be concluded that within the group of the tested specimens, the mudstone (micrite) type tends to have the better mechanical properties than the wackstone (poorly washed sparite) type. And the chemical composition rather than the petrographic features influences the strength of the rocks.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
แนวคิดของงานวิจัย.....	2
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
ขอบเขตงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
หน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	6
บทที่ 1	
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	7
1.1 การจำแนกหินปูน.....	7
1.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางศิลาวิทยาและสมบัติทางกลศาสตร์.....	11
บทที่ 2 ลักษณะของตัวอย่างหิน	18
2.1 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างหิน.....	18
2.2 การจำแนกหินในขั้นต้น.....	20
2.3 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	23
2.3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบด้านกลศาสตร์.....	23
2.3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาศิลาวิทยา.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 ตัวอย่างหินสำหรับการศึกษาลักษณะขององค์ประกอบทางเคมี.....	25
บทที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์.....	28
3.1 การทดสอบในแกนเดียว.....	28
3.2 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน.....	29
3.3 การทดสอบดัชนีความคงทนต่อการสึกกร่อน.....	32
3.4 การทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุเม็ดหยาบ.....	34
บทที่ 4 การวิเคราะห์ทางด้านศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี.....	38
4.1 การวิเคราะห์ทางด้านศิลาวิทยา.....	38
4.2 การวิเคราะห์ทางด้านองค์ประกอบทางเคมี.....	50
บทที่ 5 การศึกษาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์.....	58
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ และลักษณะทางศิลาวิทยา.....	58
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ และองค์ประกอบทางเคมี.....	62
บทที่ 6 บทสรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ.....	68
6.1 บทสรุปและอภิปราย.....	68
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
บรรณานุกรม.....	74
ประวัตินักวิจัย.....	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกหินตัวอย่างชั้นต้นในภาคสนาม ตามรูปแบบของ Dunham (1962).....	21
3.1 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และ Poisson's ratio ของตัวอย่างหินที่ทดสอบ.....	29
3.2 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนและความหนาแน่นของ ตัวอย่างหินที่ทดสอบ.....	31
3.3 ค่าดัชนีคงทนต่อการผุกร่อน (I_d) และดัชนีความต้านทานการสึกกร่อนของ มวลหินหยาบ (LAAI) ของหินที่ทดสอบ.....	34
4.1 ลักษณะจุลภาคและการจำแนกหินปูนและหินอ่อน (A=allochem; M=lime-mud matrix (micrite); S=spar cement (sparite)).....	40
4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของหินตัวอย่าง ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD).....	51
5.1 การเปรียบเทียบลักษณะเนื้อหินปูน คุณสมบัติทางเคมีและค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด	61



สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 การจำแนกหินปูนของ Dunhams.....	8
1.2 การจำแนกหินปูนของ Folk.....	9
1.3 ลักษณะเนื้อแบบ micrite.....	12
1.4 ลักษณะเนื้อแบบ sparite.....	12
1.5 ลักษณะเนื้อหินปูนที่แตกต่างกัน.....	13
1.6 ลักษณะเนื้อผลึกของหินอ่อน.....	13
1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเสียง (SV) และค่าคุณสมบัติทาง กลศาสตร์เบื้องต้นของหินคาร์บอนเนต.....	17
2.1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างหินปูนกลุ่มสระบุรี.....	18
2.2 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างหินบริเวณเหมืองหินปูนร้าง อำเภอตากลี จังหวัด นครสวรรค์.....	19
2.3 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างหินบริเวณเหมืองหินปูนร้าง อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี.....	19
2.4 ลักษณะเนื้อหินของหินปูนในการศึกษาครั้งนี้.....	22
2.5 ลักษณะเนื้อหินของหินอ่อนในการศึกษาครั้งนี้.....	23
2.6 การตัดแต่งตัวอย่างหินเพื่อให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแต่ละชนิด.....	24
2.7 ตัวอย่างหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (L/D=2.0-2.5).....	24
2.8 ตัวอย่างหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงสูงสุดในแบบบราซิลเลียน.....	26
2.9 ตัวอย่างหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน และการทดสอบความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ.....	26
2.10 ตัวอย่างแผ่นหินบางในการศึกษาครั้งนี้.....	27
2.11 ตัวอย่างหินที่ถูกบดเป็นผงสำหรับการวิเคราะห์ X-ray diffraction technique.....	27
3.1 การทดสอบแรงกดในแกนเดียว ตัวอย่างหินถูกกดด้วยเครื่อง Compression load fame.....	28
3.2 ตัวอย่างแท่งหินปูนก่อนทดสอบ (a) และหลัง (b) ทดสอบแรงกด ในแกนเดียว.....	30

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน ตัวอย่างหินถูกกดด้วยเครื่อง Compression load fame.....	31
3.4 ตัวอย่างแท่งหินปูนก่อนการทดสอบ (a) และหลัง (b) ทดสอบแรงดึงแบบ บราซิลเลียน.....	32
3.5 อุปกรณ์ใช้ทดสอบดัชนีค่าความคงทนต่อการผุกร่อน (Slake durability index testing apparatus).....	33
3.6 ตัวอย่างหินก่อนการทดสอบ (a) และหลังการทดสอบ (b) ความคงทนต่อการผุกร่อน.....	35
3.7 Los Angeles abrasion and impaction machine.....	36
3.8 ลูกเหล็กทรงกลม ใช้ในการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน.....	37
4.1 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด A: poorly washed biosparite.....	41
4.2 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด B: sparse biomicrite.....	42
4.3 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด C: micrite.....	43
4.4 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด D: micrite.....	44
4.5 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด E: poorly washed intrasparite.....	45
4.6 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด F: sparse biomicrite.....	46
4.7 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด J: sparse biomicrite.....	47
4.8 ลักษณะจุลภาคของหินอ่อน (MA 1): brownish grey marble.....	48
4.9 ลักษณะจุลภาคของหินอ่อน (MA2): white marble.....	49
4.10 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray diffraction (a) หินปูนชนิด A (b) หินปูนชนิด B.....	52
4.11 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray diffraction (a) หินปูนชนิด C (b) หินปูนชนิด D.....	53
4.12 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray diffraction (a) หินปูนชนิด E (b) หินปูนชนิด F.....	54
4.13 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray diffraction ของหินปูนชนิด J.....	55

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray diffraction (a) หินอ่อนชนิด MA1 (b) หินอ่อนชนิด MA2.....	56
5.1 ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (UCS) ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน (BTS) และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E-หน่วยเป็น GPa) ของตัวอย่างหินปูน และหินอ่อนที่ทดสอบ.....	59
5.2 ความหนาแน่น (density) ค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (LAAI) และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (Id) ของตัวอย่างหินปูนและหินอ่อนที่ทดสอบ.....	59
5.3 อัตราส่วน sparite/micrite เปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (UCS) ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน (BTS) ของตัวอย่างหินปูนและหินอ่อนที่ทดสอบ.....	62
5.4 อัตราส่วน sparite/micrite เปรียบเทียบกับค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุ ชนิดเม็ดหยาบ (LAAI) และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (Id) ของ ตัวอย่างหินปูนและหินอ่อนที่ทดสอบ.....	62
5.5 ปริมาณแร่ประกอบหลักในตัวอย่างหินปูนและหินอ่อนที่ทำการศึกษา.....	63
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและปริมาณของ แร่กลุ่มดินเหนียว.....	64
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนและปริมาณ ของแร่กลุ่มดินเหนียว.....	64
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและปริมาณของแร่ควอตซ์	65
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและปริมาณของแร่โดโลไมต์	65
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและปริมาณของแร่กลุ่มดินเหนียว.....	66
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและปริมาณของโดโลไมต์และควอตซ์...	66

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

หินปูน (limestone) เป็นทรัพยากรธรณีที่กระจายตัวอยู่เกือบทุกภาคของประเทศไทย ซึ่งถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม อาทิ ผลิตปูนซีเมนต์ หินเพื่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง และหินประดับ การเลือกหินปูนเพื่อเป็นวัตถุดิบในแต่ละกิจกรรมต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ ทั้งนี้คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของหินปูนมีความหลากหลาย ตัวอย่างเช่น หินปูนที่พบอาจมีลักษณะเนื้อแน่นเป็นเนื้อเดียว (homogenous) หรืออาจมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) แต่ประกอบด้วยเศษหิน ซากบรรพชีวิน หรือมีตะกอนดินเหนียวปะปน หินปูนพบบางบริเวณมีสีขาวยิ่งถึงเทาจาง แต่บางบริเวณมีสีเทาเข้มถึงสีดำ อาจมีแร่แคลไซต์ (calcite) เป็นองค์ประกอบหลัก หรืออาจพบว่ามีแร่ชนิดอื่นปะปนอยู่ได้ด้วยเช่นกัน ลักษณะดังที่กล่าวข้างต้นเป็นเกณฑ์เบื้องต้นในการเลือกนำหินปูนมาใช้ประโยชน์ ยิ่งไปกว่านั้นหินปูนที่เหมาะสมกับงานวิศวกรรมจะต้องมีสมบัติเชิงกลศาสตร์ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งคุณสมบัติ อาทิ ความแข็ง (strength) ความคงทน (durability) ความยืดหยุ่น (elasticity) ล้วนเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของหินปูน

คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินมีความสำคัญต่อกิจกรรมด้านวิศวกรรมธรณีและวิศวกรรมโยธา ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างการทดสอบพื้นฐาน เช่น 1) การทดสอบแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial Compression Test) 2) การทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน (Brazilian Tensile Strength Test) 3) การทดสอบค่าดัชนีคงทนต่อการผุกร่อน (Slake Durability Index Test) และ 4) การทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles Abrasion and Impaction Test) เป็นต้น ทำให้ได้ค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ คือ กำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (uniaxial compressive strength) กำลังรับแรงดึงสูงสุด (tensile strength) ค่าดัชนีความคงทน (slake durability index) และค่าความต้านทานการสึกกร่อนของมวลหินหยาบ (abrasion and impaction index) ตามลำดับ ในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องนำตัวอย่างหินส่งมายังห้องปฏิบัติการ เพื่อเตรียมตัวอย่างให้ตรงตามมาตรฐานที่กำหนด และต้องใช้เครื่องมือทดสอบ กระบวนการทั้งหมดต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้น เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายและเวลา ลักษณะเนื้อหินและองค์ประกอบของหินตลอดจนคุณสมบัติทางเคมี จึงถูกนำมาพิจารณาในการวิจัยครั้งนี้ เนื่องจากเป็นลักษณะเฉพาะของหินและอาจใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาคุณสมบัติของหินในขั้นต้นได้

ศิลาวิทยา (petrology) เป็นการศึกษาการกำเนิดของหิน องค์ประกอบในหิน และลักษณะเนื้อหิน รวมถึงองค์ประกอบทางเคมี โดยศึกษาในระดับจุลภาค พิจารณาจากลักษณะที่ปรากฏในกล้องจุลทรรศน์เป็นหลัก รวมทั้งการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหินด้วย โดยธรรมชาติหินปูนมีหลายลักษณะเนื้อหินและองค์ประกอบ การศึกษาศิลาวิทยาของหินปูนจะทำให้รู้ถึงการเกิด องค์ประกอบที่อยู่ในเนื้อหิน และแร่ประกอบหินได้อย่างละเอียด และลักษณะดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับเนื้อหินที่มองจากก้อนตัวอย่างหรือบริเวณหินโผล่ ซึ่งอาจสร้างความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ได้ แนวคิดพื้นฐานของงานวิจัยนี้คือ การหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์กับปัจจัยเชิงศิลาวิทยา ที่มีผลกระทบต่อ การตอบสนองเชิงกลศาสตร์ของหินปูน โดยใช้ข้อมูลของหินปูนที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาประกอบการศึกษาในงานวิจัยนี้ ประโยชน์ของความสัมพันธ์เหล่านี้คือ สามารถลดค่าใช้จ่ายและเวลาที่ใช้ในการทดสอบเชิงกลศาสตร์ กล่าวคือวิศวกรสามารถคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนได้ โดยทำการตรวจสอบคุณสมบัติเชิงศิลาวิทยาของหินปูนด้วยตาเปล่า ไม่ต้องวิเคราะห์ทางเคมีและไม่ต้องจัดเตรียมหรือทดสอบตัวอย่างหินปูนเชิงกลศาสตร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์การเลือกใช้ประโยชน์จากหินปูนได้อย่างเหมาะสม และยังสามารถลดจำนวนการทดสอบและความแปรปรวนในการทดสอบเชิงกลศาสตร์ของหินปูน เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่ใช้เป็นตัวแทนอย่างแท้จริง (representative properties) ในภาคสนาม

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาศิลาวิทยา องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนในกลุ่มหินสระบุรี โดยมีแนวคิดเพื่อสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้คาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนจากลักษณะทางศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีด้วยความสัมพันธ์นี้วิศวกรหรือนักธรณีวิทยาสามารถใช้คำนวณคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนในภาคสนาม ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความสะดวกรวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่ายในงานวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกันหินปูน

แนวคิดของงานวิจัย

หินปูนเป็นหินตะกอนที่มีแร่แคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปหินปูนจะเกิดโดยการสะสมตัวของสิ่งมีชีวิต เศษหินและการตกผลึกของแร่แคลไซต์ในทะเล สภาพแวดล้อมของการสะสมตัวของหินปูนจึงเป็นปัจจัยที่ทำให้หินปูนมีลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งในแง่ของเนื้อหิน ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบเคมี หินปูนแต่ละลักษณะจะมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมหรือกิจกรรม

เฉพาะอย่างเท่านั้น การเข้าใจถึงสภาพแวดล้อมและกระบวนการเกิดของหินปูน สามารถใช้เป็นแนวทางพิจารณาคูณสมบัติ และลักษณะการใช้ประโยชน์ของแหล่งหินปูนในแต่ละแหล่ง

หินปูนถูกจำแนกด้วยลักษณะเนื้อหินออกเป็นหลายชนิด (Folk, 1959; 1962; Dunhams, 1962) เนื้อหินส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ อาทิ หินปูนที่เกิดจากการตกผลึกของสารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต มีเนื้อเดียว (homogenous) และเนื้อแน่นกว่าหินปูนที่เกิดจากการสะสมตัวของเม็ดตะกอนคาร์บอเนตซึ่งมีเนื้อประสาน (heterogeneous) ซึ่งจะมองเห็นเศษตะกอนหรือเศษซากสิ่งมีชีวิตเชื่อมประสานกันอยู่ในเนื้อหิน ทางเคมีหินปูนมีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยอาจสูงถึงร้อยละ 98.5 ในกรณีที่เป็นหินปูนบริสุทธิ์ (Harrison, 1992) แต่ในธรรมชาติมักมีสิ่งเจือปน เช่น แมกนีเซียม (Mg) ในรูปของแร่โดโลไมต์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ซิลิกา (SiO_2) ในรูปของตะกอนขนาดดินเหนียว ทรายแป้งและทราย อะลูมิเนียม (Al) ในรูปของแร่ดินเหนียว เหล็ก (Fe) ในรูปของแร่ไฮโดรออกไซด์ ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$) และไพไรต์ (FeS_2) รวมทั้งอินทรีย์สาร (organic matters) เป็นต้น ซึ่งแม้จะปะปนอยู่เพียงเล็กน้อย ก็ทำให้องค์ประกอบทางเคมีแปรผัน ลักษณะเนื้อหินและองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าว มีผลต่อสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนนั้นๆ

คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูน อาทิ ความแข็ง ความคงทน และความยืดหยุ่นเป็นสมบัติสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคูณสมบัติเชิงกลของวัสดุทางธรณี ทั้งนี้ลักษณะเนื้อหินและองค์ประกอบทางเคมีน่าจะเป็นปัจจัยที่ควบคุมคุณสมบัติเชิงกล ยกตัวอย่างเช่น หินปูนที่มีเนื้อแน่นควรจะมีค่าความแข็งมากกว่าหินปูนที่มีเนื้อประสาน การเจือปนของเหล็กและซิลิกาอาจเพิ่มความแข็งและความคงทนในทางกลับกันการเจือปนอะลูมิเนียมและอินทรีย์สารอาจลดทอนคุณสมบัติทั้งสอง จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของลักษณะทางศิลาวิทยา องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์น่าจะสร้างขึ้นได้ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาคูณสมบัติ ซึ่งจะช่วยให้การคัดเลือกหินปูนเพื่อวัตถุประสงค์ทางวิศวกรรมอย่างเหมาะสม

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน ซึ่งรายละเอียดสามารถนำเสนอต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารสาร เอกสารการประชุม และรายงานการวิจัยทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหินกับลักษณะทางกายภาพ ศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของหิน ได้นำมาศึกษาเพื่อค้นหาข้อสรุปและนำประโยชน์ที่ได้ไปช่วยในการวิเคราะห์ในงานวิจัย รายชื่อของสิ่งตีพิมพ์ทั้งหมดนี้ได้แสดงไว้ในส่วนบรรณานุกรม

ขั้นตอนที่ 2 ลักษณะของตัวอย่างหิน

การเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บตัวอย่างจากหินปูนของกลุ่มหินสระบุรี (Saraburi Group) ที่โผล่ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา สระบุรี ลพบุรี นครสวรรค์ และพื้นที่ใกล้เคียง โดยการเก็บตัวอย่างจะเลือกหินที่มีลักษณะเนื้อหินที่แตกต่างกัน ซึ่งสังเกตและจำแนกเบื้องต้นในภาคสนาม จากนั้นจะนำมาศึกษาลักษณะทางศิลาวิทยา องค์ประกอบทางเคมีและทำการทดสอบทางกลศาสตร์

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์

ตัวอย่างหินปูนแต่ละชนิดจะถูกเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบทางกลศาสตร์ 4 แบบ โดยให้เป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM การทดสอบแต่ละแบบจะกำหนดจำนวนของหินตัวอย่างที่เหมาะสม (ดูรายละเอียดใน บทที่ 2) การทดสอบประกอบด้วย

1) การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial Compressive Strength Test: UCST) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุด (uniaxial compressive strength: σ_c) และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Young's modulus; E) และอัตราส่วนของ Poisson (Poisson's ratio; ν) ของตัวอย่างหินปูน การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM D7012

2) การทดสอบแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน (Brazilian Tensile Strength Test: BTST) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (Brazilian tensile strength: σ_B) ของตัวอย่างหินปูน การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM D3967

3) การทดสอบความคงทนต่อการฟุกร่อน (Slake Durability Index test: SDIT) มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบศักยภาพของตัวอย่างหินที่สามารถทนทานต่อการซัดถู หรือหาค่าดัชนีคงทนต่อการฟุกร่อน (slake durability index: SI) ภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและวัฏจักรเปียก-แห้ง การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM D4644

4) การทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles Abrasion and Impaction Test, LAAT) มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (abrasion and impaction index: AI) โดยการทาน้ำหนักของหินที่สูญหายไปเนื่องจากการถู การซัดสี ถูกบดทับและถูกระแทกด้วยลูกเหล็กตามจำนวนที่กำหนด การทดสอบจะใช้มาตรฐาน ASTM C-131

ขั้นตอนที่ 4 การศึกษาด้านศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี

ตัวอย่างหินปูนจะถูกเตรียมโดยตัดให้เป็นแผ่นหิน (slap) จากนั้นจึงนำไปทำแผ่นหินบาง (rock thin section) เพื่อใช้ศึกษาศิลาวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ (polarized light microscopes) ส่วนด้านเคมี ตัวอย่างหินปูนที่เป็นตัวแทนจะถูกบดเป็นผง (powder) แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์

การหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกลศาสตร์ในรูปแบบต่างๆ กับลักษณะทางศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี จะถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แล้วนำตัวแปรที่ได้มาเชื่อมโยงกัน เพื่อให้สะดวกและง่ายต่อการใช้และมีประสิทธิภาพ

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

ขั้นตอนและผลการศึกษาทั้งหมดได้นำมาสรุปในรายงานฉบับสมบูรณ์เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จโครงการ นอกจากนี้แล้วผลการวิจัยชิ้นนี้จะนำเสนอในการประชุมวิชาการ เพื่อเผยแพร่ความรู้และรับข้อเสนอแนะในหมู่นักวิชาการทางด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมโยธา และทางด้านธรณีวิทยาประยุกต์

ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหินปูนจากกลุ่มหินสระบุรี และเก็บตัวอย่างหินโพลีบริเวณจังหวัด นครราชสีมา สระบุรี ลพบุรี นครสวรรค์ และพื้นที่ใกล้เคียง
- 2) ทำการศึกษาด้านศิลาวิทยาของตัวอย่างหินปูนด้วยแผ่นหินบาง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง โพลาริไรซ์
- 3) การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยวิธีเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
- 4) จำแนกชนิดของหินปูนตามแบบของ Dunhams (1962) และ Folk (1959; 1962)
- 5) การทดสอบตัวอย่างหินเชิงกลศาสตร์แบบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว การทดสอบแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน และการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ เป็นตามมาตรฐานของ ASTM และคำแนะนำของ ISRM
- 6) การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติทางกลศาสตร์กับลักษณะทางศิลาวิทยาของหินปูน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากผลการวิจัยที่เสนอมานี้มีหลายด้าน ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

ทางด้านเศรษฐศาสตร์

ลดค่าใช้จ่ายด้านการทดสอบคุณสมบัติของหินปูน กล่าวคือ การทดสอบหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของตัวอย่างหิน ซึ่งต้องทำในห้องทดลอง จะต้องมีการเก็บตัวอย่างขนส่งมายังห้องปฏิบัติการ เตรียมตัวอย่างและทดสอบ โดยต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน (ASTM standards) การทดสอบ

ดังกล่าวจะมีราคาสูงและใช้เวลานานเนื่องจากมีกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน เครื่องมือที่จะนำมาใช้ในการทดสอบก็มีราคาสูง ซึ่งในเมืองไทยมีเพียงไม่กี่สถาบันเท่านั้นที่มีเครื่องมือที่สามารถทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินได้อย่างสมบูรณ์แบบ โดยงานวิจัยนี้จะทำให้วิศวกรสามารถประเมินคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินปูนจากลักษณะทางศิลาวิทยาของหินโผล่ ซึ่งผลจากการตรวจสอบทางด้านศิลาวิทยาจะสามารถนำมาคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น กำลังรับแรงกดสูงสุด กำลังรับแรงดึงสูงสุด และค่าคงทนต่อการสึกกร่อน

ทางด้านวิศวกรรมออกแบบ

การออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมหิน เช่น งานฐานรากของเขื่อนหรือสะพาน งานชุดเจาะอุโมงค์ งานตัดถนน และเหมืองเปิด ที่ต้องกระทำในชั้นหินหรือมวลหิน มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของรอยแตกในมวลหินเชิงกำลังรับแรงเฉือนในบริเวณที่ทำการก่อสร้างเพื่อนำมาคำนวณเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของโครงสร้างนั้น ๆ หลักการและข้อปฏิบัติในปัจจุบัน คือทำการคัดเลือกตัวอย่างหิน ซึ่งอาจจะได้มาจากการชุดเจาะในงานฐานรากหรือเก็บมาจากหินโผล่ โดยตัวอย่างที่เลือกมานั้นจะต้องครอบคลุมพื้นที่และความลึกของโครงสร้างนั้นมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ปริมาณหรือจำนวนตัวอย่างหินที่จะนำมาทดสอบจะถูกจำกัดด้านค่าใช้จ่ายในการทดสอบ ทำให้มีราคาค่อนข้างสูง ประกอบกับสถาบันที่สามารถทำการทดสอบทางด้านกลศาสตร์หินในประเทศไทยยังมีน้อย ในกรณีในพื้นที่ก่อสร้างมีความแปรปรวนของคุณสมบัติทางกลศาสตร์หินสูง ผลการทดสอบที่มีตัวอย่างหินจำนวนน้อยหรือไม่ครอบคลุมพื้นที่ก็อาจจะไม่เป็นตัวแทนของคุณสมบัติของชั้นหินได้อย่างแท้จริง แต่ด้วยผลงานวิจัยนี้วิศวกรสามารถคาดคะเนคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินปูนในภาคสนามได้รวดเร็ว และสะดวกมากขึ้นจากการสังเกตลักษณะทางศิลาวิทยา เนื่องจากจะใช้เวลาและค่าใช้จ่ายลดลง ทำให้ครอบคลุมพื้นที่ และศึกษาได้ครบถ้วน

ทางการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ของประเทศ

ดังได้กล่าวมาแล้วว่าการประเมินคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินปูนด้วยลักษณะทางศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีสำคัญที่ได้จาก ซึ่งแนวคิดนี้ยังไม่มีนักวิจัยผู้ใดได้คิดหรือริเริ่มมาก่อนในประเทศ องค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญมากในแง่ของการพัฒนาประเทศด้านงานก่อสร้างทางวิศวกรรมของประเทศไทย เนื่องจากทรัพยากรหินปูนมีการกระจายตัวอยู่ทั่วประเทศไทย ซึ่งจะทำให้มีการพัฒนาอย่างยั่งยืน มีประสิทธิผล และที่สำคัญที่สุดคือวิศวกรที่เกี่ยวข้องในอนาคตจะได้องค์ความรู้ที่พัฒนาขึ้นจากประเทศของเราเอง

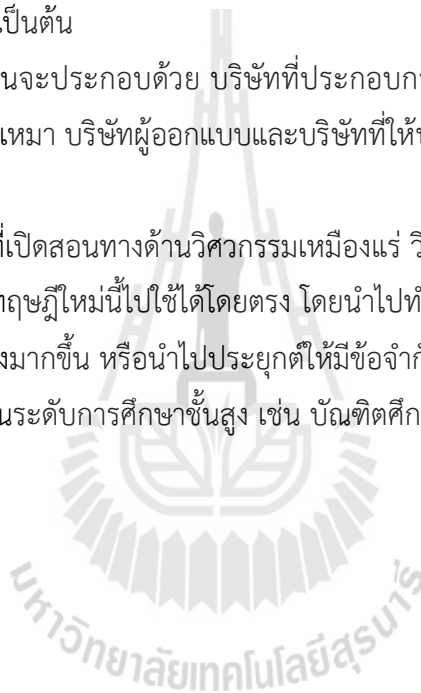
หน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน รวมไปถึงสถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมโยธา

หน่วยงานในภาครัฐประกอบด้วยหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่บนดินและใต้ดิน ถนน ทางรถไฟ การสำรวจและผลิตน้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ สะพานและตึกขนาดใหญ่ที่มีฐานรากอยู่ในหิน หน่วยงานเหล่านี้ คือ กรมทรัพยากรธรณี กรมชลประทาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิต กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทางหลวง กรมโยธาธิการ และการรถไฟแห่งประเทศไทย เป็นต้น

หน่วยงานในภาคเอกชนจะประกอบด้วย บริษัทที่ประกอบการทางด้านการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น บริษัทที่ปรึกษา บริษัทผู้รับเหมา บริษัทผู้ออกแบบและบริษัทที่ให้บริการด้านการทดสอบคุณสมบัติของหิน

ส่วนสถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมธรณี และวิศวกรรมโยธา จะสามารถนำข้อเสนอทางด้านทฤษฎีใหม่นี้ไปใช้ได้โดยตรง โดยนำไปทำการศึกษาต่อ หรือปรับปรุง เพื่อให้มีความแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น หรือนำไปประยุกต์ให้มีข้อจำกัดของทฤษฎีน้อยลง การปรับปรุงทฤษฎีนี้สามารถทำได้ในระดับการศึกษาชั้นสูง เช่น บัณฑิตศึกษา เป็นต้น



บทที่ 1

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้เสนอผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งหัวข้อหรือองค์ความรู้ที่นำมาทบทวนและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของหินปูน ลักษณะทางศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของหินปูน

1.1 การจำแนกหินปูน

หินปูนเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ถูกนำไปใช้อุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะด้านวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นหินก่อสร้าง หินถมฐานเขื่อนและหินประดับ เนื่องจากหินปูนมีองค์ประกอบหลักเป็นแร่แคลไซต์หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยทั่วไปหินปูนที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์จึงอาจรวมหินคาร์บอเนตชนิดอื่นๆ ด้วย ตัวอย่างเช่น หินอ่อน (marble) ซึ่งเป็นจัดเป็นหินแปรที่แปรสภาพมาจากหินปูนแต่ตกผลึกใหม่และมีแคลไซต์เป็นองค์ประกอบทั้งหมด และหินปูนโดโลไมต์ (dolomitic limestone) ซึ่งมีแร่โดโลไมต์ปะปนอยู่ในเนื้อหินหรือมีการแทนที่กับหินปูนบางส่วน (Pettijohn, 1957; Folk, 1959; 1962)

การจำแนกหินปูนทางตะกอนวิทยาทำได้หลายแบบ อาทิ รูปแบบของ Pettijohn (1957) และ Harrison (1992) เป็นการแบ่งหินปูนตามองค์ประกอบทางเคมีและแร่ประกอบหิน ส่วนรูปแบบของ Folk (1959; 1962) และ Dunhams (1962) ใช้ลักษณะเนื้อหินและองค์ประกอบของเม็ดตะกอนเป็นเกณฑ์ในการจำแนก ยิ่งไปกว่านั้นการศึกษาลักษณะเนื้อหินและองค์ประกอบในรายละเอียด สามารถบ่งบอกสภาพแวดล้อมของการสะสมตัวของหินปูนและการเปลี่ยนแปลงของตะกอนหลังจากการตกทับถม (diagenesis) ได้ (Flügel, 2004)

การจำแนกของ Dunhams (1962) และ Folk (1959; 1962) เป็นสากลและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน โดยแบบของ Dunhams (รูปที่ 1.1) เหมาะสำหรับการศึกษาในภาคสนามเนื่องจากใช้ลักษณะที่ปรากฏของก้อนหินในการพิจารณา ส่วนของ Folk (1959; 1962) สามารถใช้ได้ภาคสนามและเหมาะสมสำหรับการภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (รูปที่ 1.2)

กลุ่มหินสระบุรี (Saraburi Group) มีการสะสมตัวในยุคเพอร์เมียน (295-250 ล้านปีก่อน) ผลิตให้เห็นในพื้นที่จังหวัดสระบุรี ลพบุรี นครสวรรค์ นครราชสีมา เพชรบูรณ์และเลย โดยสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนจากลักษณะของเทือกเขาหินปูนที่มียอดแหลมหยัก และมีลักษณะภูมิประเทศสูงๆต่ำๆ แตกต่างจากเทือกเขาหินทรายของกลุ่มหินโคราช พื้นที่ที่มีภูเขาหินปูนมักจะเป็นที่ตั้งของเหมืองหินอุตสาหกรรมและโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ และเป็นแหล่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในงานวิศวกรรมในพื้นที่ภาคกลางและภาค

Allochthonous Limestone Original components not organically bound during deposition					Allochthonous Limestone Original components organically bound during deposition				
Less than 10% > 2 mm component				Greater than 10% > 2 mm components		By organisms that build a rigid framework	By organisms that encrust and bind	By organisms that act as baffles	
Contains lime mud (< 0.03 mm)			No lime mud		Mud-supported				Supported by grain components coarser than 2 mm
Mud-supported		Grain-supported							
Less than 10% grains (> 0.03 mm < 2 mm)	Greater than 10% grains				Boundstone				
Mudstone	Wackstone	Packstone	Grainstone	Floatstone	Rudstone	Framestone	Bindstone	Bafflestone	

รูปที่ 1.1 การจำแนกหินปูนของ Dunhams (อ้างอิงใน Tucker,1991)



	OVER 2/3 LIME-MUD MATRIX				SUBEQUAL SPAR AND LIME MUD	OVER 2/3 SPAR CEMENT		
	0-1%	1-10%	10-50%	OVER 50%		SORTING POOR	SORTING GOOD	ROUNDED AND ABRADED
Percent allochems								
Representative rock terms	MICRITE AND DISMICRITE	FOSSILIFEROUS MICRITE	SPARSE BIOMICRITE	PACKED BIOMICRITE	POORLY WASHED BIOSPARITE	UNSORTED BIOSPARITE	SORTED BIOSPARITE	ROUNDED BIOSPARITE
Terminology	Micrite and dismicrite	Fossiliferous micrite	Biomicrite		Biosparite			
Terrigenous analogues	Claystone		Sandy claystone	Clayey or immature sandstone		Submature sandstone	Mature sandstone	Supermature sandstone

Lime-mud matrix
 Sparry calcite cement

รูปที่ 1.2 การจำแนกหินปูนของ Folk (Boggs, 2009)

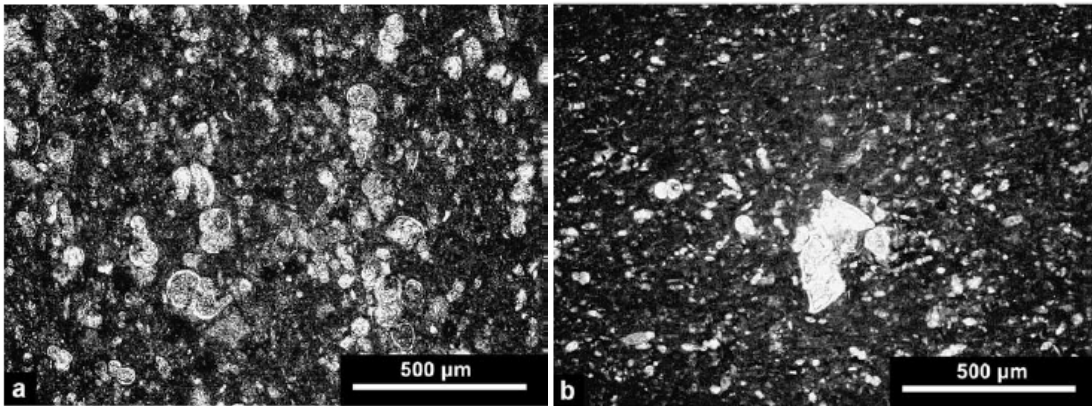
ตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น เป็นหินถมฐานเขื่อน หินก่อสร้าง และเนื่องจากการกระจายตัวเป็นบริเวณกว้าง จึงมักมีการตัดถนนและมีสิ่งก่อสร้างอยู่บนชั้นหินด้วย หินปูนของกลุ่มหินสระบุรีมีลักษณะเนื้อหินหลากหลาย เนื่องจากเกิดในที่แตกต่างกัน (Bunopas 1981; 1992; Thambunya et al., 2007; Ueno and Charoenththrat, 2011)

1.2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางศิลาวิทยาและสมบัติทางกลศาสตร์

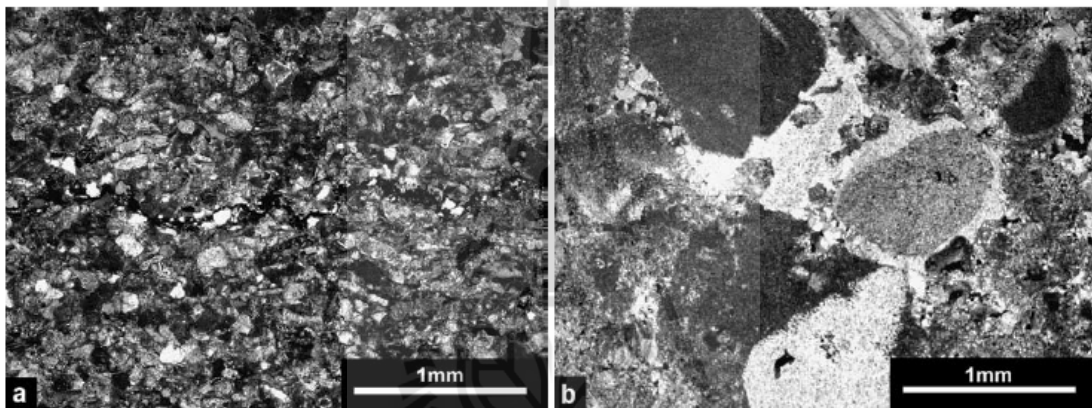
การศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางศิลาวิทยาและสมบัติทางกลศาสตร์ของหินเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง อาทิ Fuenkajorn and Daemon (1992) ศึกษาความสัมพันธ์ของความเค้นสูงสุดของหินภูเขาไฟกับคุณสมบัติทางกลศาสตร์ ซึ่งได้ให้ข้อเสนอแนะไว้ว่าความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของมวลหินส่งผลต่อคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปและความแข็งของหิน โดยความแปรปรวนต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินอาจเป็นไปได้ทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมี หินชนิดหนึ่งอาจจะมีตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัว และความแปรปรวนเกิดจากขนาดของตัวอย่างหินที่พิจารณาด้วย

สำหรับหินปูน Handlin and Hager (1957) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกับขนาดของผลึกแร่ในหินปูนและหินอ่อน พบว่าขนาดของผลึกแร่ที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้น Olsson (1974) พบว่าขนาดของผลึกแร่แคลไซต์มีผลต่อการรับแรงของหินอ่อน โครงสร้างขนาดเล็ก เช่น รอยแตกขนาดเล็ก (micro fractures) ความพรุน (porosity) ความต้านทานของหินต่อการเสียรูป (rock stiffness) ต่างก็มีผลกระทบต่อความ (strength) และการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) ของหินปูน (Al-Jassar and Hawkins, 1991; 1997; Wong et al., 1996; Palchik and Hatzor, 2000) ในปี 2002 Andriani and Walsh อธิบายลักษณะทางศิลาวิทยา ได้แก่ ขนาดเม็ดตะกอน รูปร่าง การอัดตัวของเม็ดตะกอน (packing of grains) ความพรุน เนื้อพื้น (matrix) และวัตถุประสาน (cement) มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินปูนชนิด calcarenites

Tarawneh et al. (2007) ได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินปูนในประเทศจอร์แดน และพบว่าหินปูนที่มีองค์ประกอบเป็นซากดึกดำบรรพ์ถึงร้อยละ 50-80 ของเนื้อหิน มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับเป็นหินสร้างบ้าน (building stone) ระดับดีมากและมีราคาสูง Gaji et al. (2011) ประเมินคุณภาพของหินปูนในภาคตะวันตกของประเทศเซอร์เบียด้วยลักษณะทางศิลาวิทยา พบว่าหินปูนที่มีลักษณะเนื้อแบบมิคริต์ (micrite) มีค่ารับแรงกดสูงและความคงทนสูง ในทางตรงข้ามหินปูนที่มีเนื้อแบบสปาร์ไรท์ (sparite) หรือมีเนื้อผสมแร่ดินเหนียว มีค่ารับแรงกดต่ำและความคงทนน้อย ซึ่งหินที่ศึกษาเหมาะสำหรับทำหินปูพื้น แต่ไม่เหมาะสำหรับเป็นหินสำหรับสิ่งปลูกสร้างอาคาร (รูปที่ 1.3-1.4)



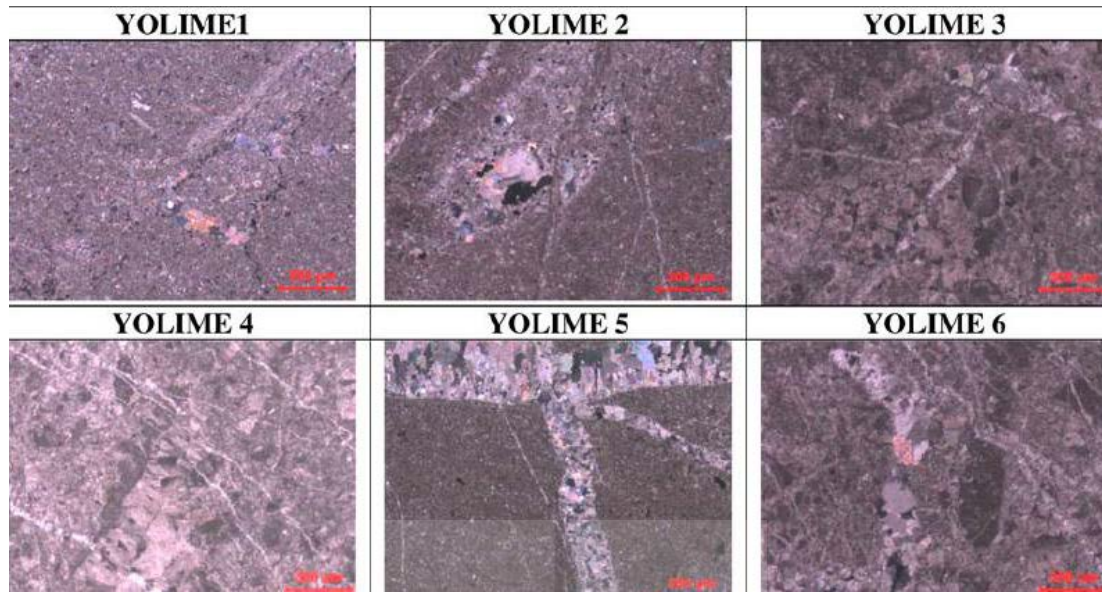
รูปที่ 1.3 ลักษณะเนื้อหินปูนแบบ micrite (Gaji et al., 2011)



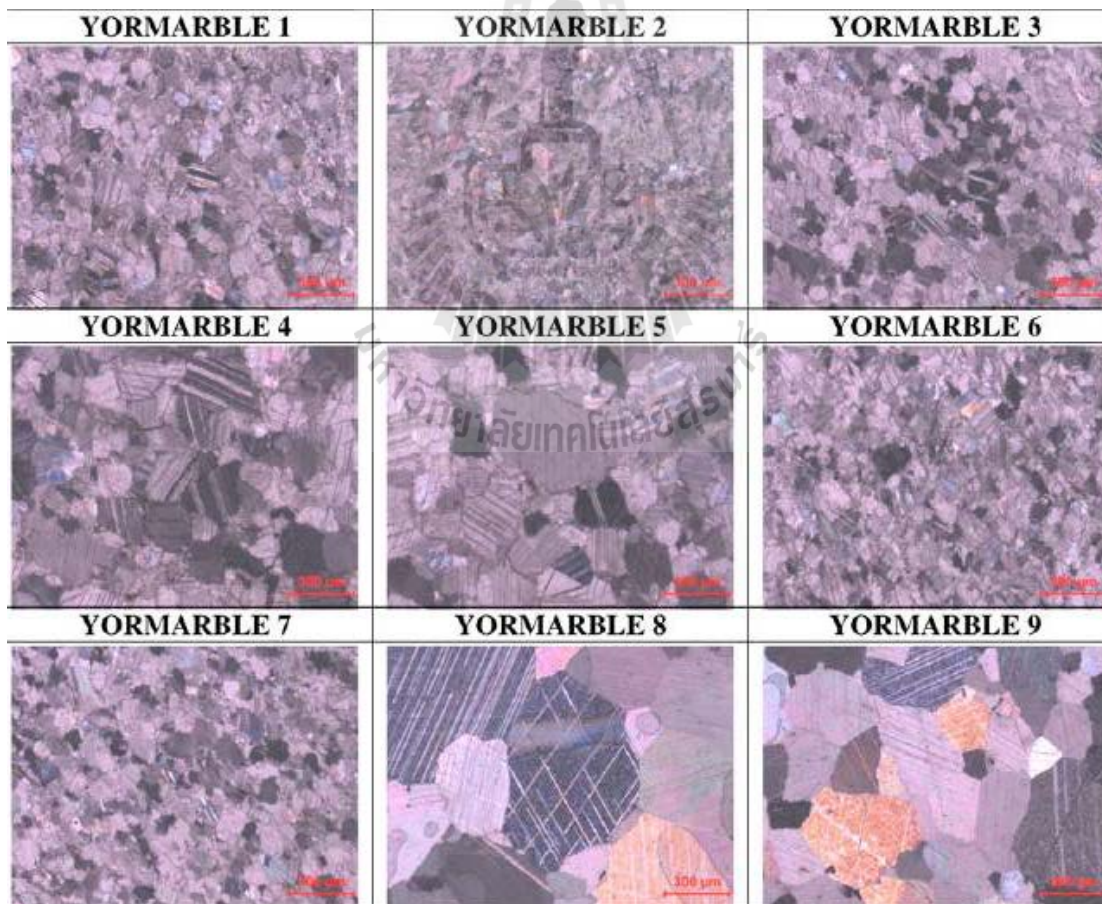
รูปที่ 1.4 ลักษณะเนื้อหินปูนแบบ sparite (Gaji et al., 2011)

Ozcelik et al. (2013) ได้ทำการพัฒนารูปแบบสมการสำหรับการประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลศาสตร์ของหินปูนและหินอ่อน จากคุณสมบัติทางศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี โดยพบว่าหินปูนและหินอ่อนที่มีขนาดของผลึกที่เล็กส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงกดมีค่าสูงและค่ากำลังรับแรงกดยังขึ้นอยู่กับการปริมาณร้อยละของแร่ควอตซ์ (quartz) และแร่แคลไซต์ที่อยู่ในหิน (รูปที่ 1.5-1.6)

Onodera and Asoka Kumara (1980) แสดงให้เห็นว่าเนื้อหินซึ่งประกอบด้วย ขนาดและลักษณะของเม็ดตะกอนและผลึกแร่ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหินทราย ลักษณะเนื้อหินมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงของหินและความยืดหยุ่น โดยกำลังรับแรงจะเพิ่มขึ้นถ้าผลึกแร่มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดมากๆ แต่ในหินแกรนิตกำลังรับแรงของหินจะลดลงเมื่อขนาดของผลึกแร่มีขนาดใหญ่ขึ้น Fahy and Guccione (1979) พบว่าขนาดของเม็ดตะกอนในหินทรายที่มีขนาดเท่ากัน จะส่งผลให้กำลังรับแรงมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 1.5 ลักษณะเนื้อหินปูนที่แตกต่างกัน (Ozcelik et al., 2013)



รูปที่ 1.6 ลักษณะเนื้อผลึกของหินอ่อน (Ozcelik et al., 2013)

Handlin and Hager (1957) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกับขนาดของผลึกแร่ในหินปูนและหินอ่อน โดยพบว่าขนาดของผลึกแร่ที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงเพิ่มขึ้น Lounsbery and West (1965) ทำการศึกษากลุ่มหินคาร์บอนเนตในทางเหนือของประเทศอินเดีย พบว่าขนาดของผลึกแร่และลักษณะของเนื้อหินที่แตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินต่างกัน โดยลักษณะเนื้อหินพิจารณาจาก ช่องว่างในเนื้อหิน (voids) ขนาดของผลึกแร่ ความเป็นเหลี่ยม ความกลมมนของผลึกแร่ และสัดส่วนของปริมาณร้อยละของแคลเซียม (Ca) ต่อแมกนีเซียม (Mg) ในหินปูนและหินโดโลไมต์ Sabatakakis et al. (2008) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและลักษณะทางศิลาวิทยาในหินตะกอน รวมทั้งหินปูน และพบว่าเนื้อหินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินปูน

แร่ประกอบหินเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงของหิน (Ulusay et al., 1994) เนื่องจากแร่ประกอบที่กระจายตัวในหินมีหลายชนิด บางชนิดทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น แต่บางชนิดทำให้กำลังรับแรงกดต่ำลง Vutukuri et al. (1974) พบว่าหินทรายที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ แร่แคลไซต์และแร่เหล็ก จะทำให้มีความแข็งมากกว่าหินที่มีส่วนประกอบของแร่ดินเหนียว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่ควอตซ์ และค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวของหินทราย โดยปริมาณแร่ควอตซ์มากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวเพิ่มขึ้น (Bell, 1978; Fahy and Guccione, 1979; Gunsallus and Kulhawy, 1984; Dobereiner and De Fretias, 1986; Shakoor and Bonelli, 1991).

ความหนาแน่นของเม็ดตะกอน (packing density) หรือปริมาณช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงของหิน โดย Bell (1978) และ Doberener and De Freitas (1986) ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์เกี่ยวกับความหนาแน่นของเม็ดตะกอนในหินทรายกับค่ากำลังรับแรงกด ค่ากำลังรับแรงดึง และค่าความยืดหยุ่น พบว่าเมื่อความหนาแน่นของเม็ดตะกอนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าทางกลศาสตร์เหล่านี้เพิ่มขึ้น Howarth and Rowlands (1986) ได้เสนอตัวแปร texture coefficient เพื่อใช้ร่วมกับความหนาแน่นของเม็ดตะกอน Doberener and De Fretias (1986) ได้สรุปไว้ว่าหินทรายที่มีความแข็งต่ำโดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นของเม็ดตะกอนต่ำ ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงกดของหินทรายและกำลังรับแรงกดของหินในสภาวะอิมมิตัวซึ่งมีค่าเท่ากับ 20 MPa ซึ่งใช้สำหรับแสดงค่าขอบเขตของกำลังรับแรงกดสูงสุดของหินที่มีกำลังรับแรงกดต่ำ นอกจากนี้ Bell (1978) ได้แสดงว่าการวิบัติของหินจะถูกควบคุมโดยลักษณะการแตกตามขอบของเม็ดหิน นอกจากนี้แล้วยังพบว่าความหนาแน่นที่มีค่าสูงยังทำให้หินมีกำลังรับแรงกดสูงขึ้นด้วย

ความชื้นในหินส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงของหินทราย โดย Dyke and Dobereiner (1991) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความชื้นที่มีต่อกำลังรับแรงอัด (compressive strength) โดยพบว่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

การศึกษาในเชิงคณิตศาสตร์หรือความพยายามนำเอาสูตรทางคณิตศาสตร์เข้ามาอธิบายการแปรปรวนของคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่มีผลกระทบมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันนั้นมีน้อย

มาก ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะรวมไปถึงค่าความต้านแรงกดหรือแรงดึงสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ของความยืดหยุ่น เป็นต้น Fuenkajorn and Daemen (1992) เสนอแนวคิดอันหนึ่งว่า “ระดับของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของหินจะขึ้นอยู่กับขนาดของหินที่กำลังพิจารณาอยู่ และระดับของความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของหินโดยส่วนใหญ่จะลดลง ถ้าขนาดของหินที่พิจารณามีค่าสูงขึ้น (หรือใหญ่ขึ้น)” การที่จะเข้าใจผลกระทบของการแปรปรวนต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินจำเป็นต้องหาตัวแปรหรือปัจจัยที่เป็นต้นเหตุขึ้น (Key parameters) ซึ่งตัวแปรนี้อาจจะเป็นคุณลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางแร่วิทยา เช่น ความหนาแน่น ความพรุน ปริมาณของสิ่งเจือปน หรือปริมาณของแร่ที่ทำให้เกิดการแปรปรวน เป็นต้น ต่อมาจะต้องรู้ถึงผลกระทบของตัวแปรนี้เชิงคณิตศาสตร์ในแต่ละขนาดของหิน หินชนิดหนึ่งอาจจะมีตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวที่ทำให้เกิดการแปรปรวนของคุณสมบัติก็เป็นได้ นอกจากนี้บทบาทของ Key parameter แต่ละตัวก็อาจจะต่างกันในแต่ละขนาดของหินที่พิจารณา ดังนั้นในการคำนวณหรือศึกษาคุณสมบัติของหินที่มีความแปรปรวนสูงควรพิจารณาขนาดของหินและผลกระทบของตัวแปรเหล่านี้ด้วย

ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์ของหิน ผลกระทบด้านขนาดของตัวอย่างหินต่อกำลังรับแรงที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการเกิดขึ้นจากการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของรูพรุนและรอยแตกหรือรอยร้าวเล็ก ๆ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในเนื้อหิน (Griffith, 1924) ตัวอย่างหินที่มีขนาดต่างกันจะมีองค์ประกอบของรูพรุนและรอยแตกในอัตราส่วนที่ต่างกันและในรูปแบบที่ต่างกัน ตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีโอกาสมันจะมีลักษณะของรูพรุนและรอยแตกที่หลากหลายขึ้น ผลจากการทดสอบโดยทั่วไปสามารถสรุปได้ว่า เมื่อตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นค่ากำลังรับแรงของหินจะมีค่าลดลง

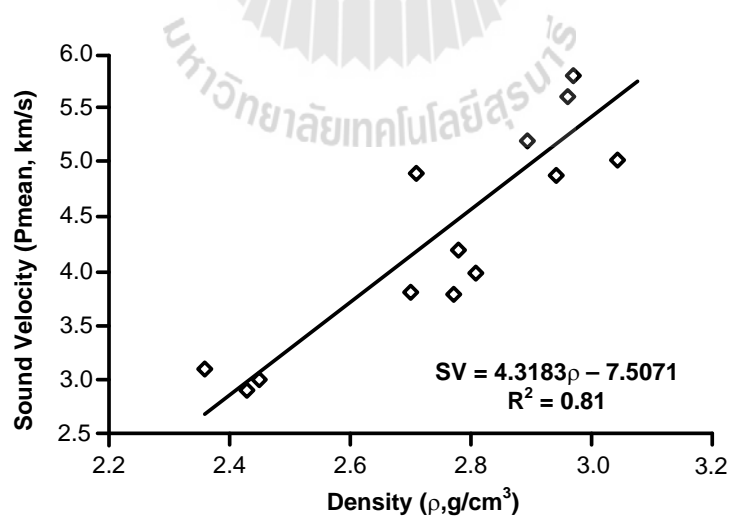
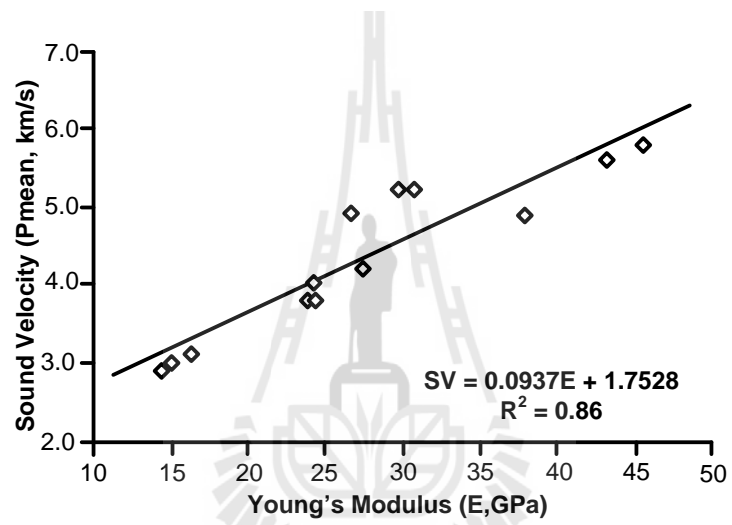
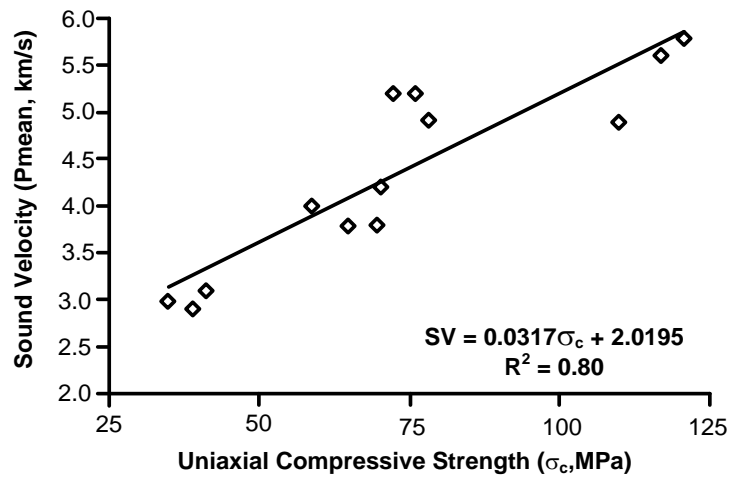
ยังมีผู้วิจัยหลายท่านได้ทำการประเมินคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของตัวอย่างหินจากคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น (density) ความเร็วคลื่น (wave velocity) ความพรุน ปริมาณน้ำ (water content) เป็นต้น Hecht et al. (2005) ได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกลศาสตร์และค่าความหนาแน่น Somordinov et al. (1970) พบว่าในหินโดโลไมต์และหินปูนความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกลศาสตร์และค่าความหนาแน่นเป็นแบบ exponential Kahraman et al. (2005) ศึกษาผลกระทบจากความพรุน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังกดสูงสุดและดัชนีจุดกด Li and Aubertin (2003) ศึกษาผลกระทบของความพรุนต่อกับคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุวิศวกรรม Rajabzadeh et al. (2012) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของผลกระทบจากความพรุนและค่ากำลังกดของหินคาร์บอนเนต ซึ่งพบว่าความพรุนไม่ได้แสดงผลกระทบที่ชัดเจนต่อค่ากำลังกดสูงสุด แต่สามารถสร้างรูปแบบสมการความสัมพันธ์ได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความหนาแน่น สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่ากำลังรับแรงดึงต่อต่อค่าความพรุน

นอกจากนี้ Prikryl (2001) และ Torok (2006) พบว่าเม็ดตะกอนคาร์บอนเนต (fabric) เป็นอีกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลศาสตร์ Torok and Vasarhelyi (2010) ได้ศึกษาอิทธิพลของ

เม็ดตะกอนคาร์บอเนต และปริมาณน้ำในหินทราเวอร์ทีน (travertine) ต่อคุณสมบัติทางกลศาสตร์ โดยพบว่าเม็ดตะกอนคาร์บอเนต และลักษณะของความพรุนมีผลกระทบอย่างมากต่อค่ากำลังกดและค่าคงคงต่อการสีกกร่อนของตัวอย่างหิน

คุณสมบัติทางกายภาพอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญต่อคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหิน คือ ความเร็วที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านหิน (wave velocity) มักใช้อธิบายถึงคุณสมบัติเชิงกลทางไดนามิกส์ (dynamic properties) ของตัวอย่างหิน เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่า Poisson's ratio วิธีการวัดความเร็วคลื่นให้หินเป็นวิธีที่สะดวกในการวัดทั้งในภาคสนามและห้องปฏิบัติการ จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกลศาสตร์และค่าความเร็วคลื่น เพื่อสามารถประเมินค่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์เบื้องต้นของหินได้ Yasar and Erdogan (2004) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเร็วคลื่นเสียง (sound velocity, SV) และค่ากำลังกดสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าความหนาแน่น ในหินคาร์บอเนตและสามารถสร้างรูปแบบสมการเชิงเส้น 3 แบบเพื่อประเมินคุณสมบัติต่างๆ ได้เบื้องต้น (รูปที่ 1.7)





รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเสียง (SV) และค่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์เบื้องต้นของหินคาร์บอนेट (Yasar and Erdongan, 2004)

บทที่ 2

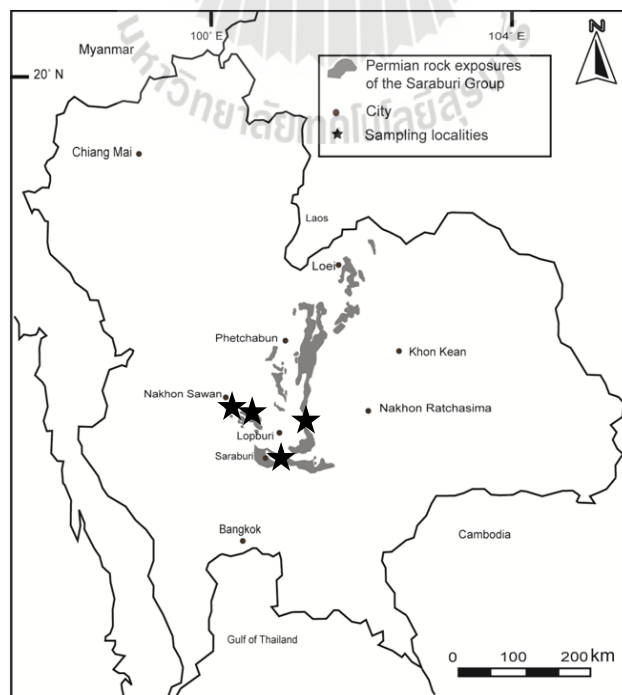
ตัวอย่างหินในการวิจัย

หินที่นำมาศึกษาในครั้งนี้เป็นหินคาร์บอนेटประกอบด้วยหินปูนและหินอ่อน ซึ่งเป็นหินของกลุ่มหินสระบุรี ที่โผล่และกระจายตัวอยู่ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา สระบุรี ลพบุรีและนครสวรรค์ โดยคัดเลือกจากลักษณะเนื้อหินที่แตกต่างกัน ที่สามารถสังเกตได้ในภาคสนาม รายละเอียดของตำแหน่งเก็บหินตัวอย่าง ลักษณะเนื้อหินและการจำแนกหิน รวมทั้งการเตรียมตัวอย่างหินเพื่อการทดสอบได้รวบรวมอยู่ในบทนี้

2.1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินทั้งหมดเก็บมาจากหินโผล่บริเวณเทือกเขาหินปูนของกลุ่มหินสระบุรีที่โผล่ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา สระบุรี ลพบุรี นครสวรรค์ (รูปที่ 2.1) บางตำแหน่งมีลักษณะเป็นเหมืองหินปูนร้าง บางบริเวณเป็นหินโผล่ตามธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ก้อนตัวอย่างหินปูนที่เก็บตัวอย่างมีขนาดประมาณ 30x30x30 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อนต่อหนึ่งลักษณะเนื้อหิน โดยพิจารณาลักษณะเนื้อหินที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าและกล้องขยายขนาดพกพา (hand lens) การจำแนกในขั้นต้นใช้รูปแบบของ Dunham (Dunham 1962) (หัวข้อ 2.2)



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างหินปูนกลุ่มหินสระบุรี



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างหินบริเวณเหมืองหินปูนร้าง อำเภอตากลี จังหวัดนครสวรรค์



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างหินบริเวณเหมืองหินปูนร้าง อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี

2.2 การจำแนกหินในชั้นต้น

หินปูนที่เลือกเก็บตัวอย่างมีลักษณะทางกายภาพและเนื้อหินที่แตกต่างกัน สามารถจำแนกโดยใช้รูปแบบของ Dunham (ดูรูปที่ 1.1) ออกเป็น 7 ชนิด การจำแนกอาศัยปริมาณร้อยละของเม็ดตะกอนคาร์บอเนตที่เรียกว่า อัลโลเคมี (allochem) ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนหรือซากบรรพชีวิน ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 0.2 มิลลิเมตร และปริมาณร้อยละของเนื้อพื้นที่เรียกว่า มัด เมทริกซ์ (mud matrix) ซึ่งมีขนาดละเอียดกว่า 0.2 มิลลิเมตร โดยมีรายละเอียดดังนี้ (ตารางที่ 2.1)

ชนิด A มีสีเทา มี allochem เป็นซากบรรพชีวินประมาณร้อยละ 30 ของมวลหินทั้งหมด จัดเป็นแว็กสโตน (wackstone) หินปูนชนิด A เก็บมาจากเหมืองหินปูนร้าง อ.ชัยบาดาล จ.ลพบุรี เป็นส่วนหนึ่งของหมวดหินตากฟ้า (Tak Fa formation)

ชนิด B มีสีน้ำตาลอ่อนปนเทา มี allochem เป็นประมาณร้อยละ 30 พบลักษณะของรอยแตกขนาดเล็กที่ถูกเติมด้วยแร่แคลไซต์ (calcite vein) จัดเป็น wackstone หินปูนชนิด B เก็บมาจากหินโผล่ตามธรรมชาติ อ.หนองม่วง จ. ลพบุรี เป็นส่วนหนึ่งของหมวดหินตากฟ้า

ชนิด C มีสีเทาอ่อน มีแร่แคลไซต์สลับเป็นชั้นๆ และมีคราบสีแดงของเหล็กออกไซด์ มี calcite vein ขนาดเล็ก มี allochem อยู่ในเนื้อหินน้อยกว่าร้อยละ 10 จัดเป็น mudstone หินปูนชนิด C เก็บมาจากหินโผล่ตามธรรมชาติ อ.หนองม่วง จ. ลพบุรี ส่วนหนึ่งของหมวดหินตากฟ้า

ชนิด D มีสีเทาเข้มไปจนถึงสีเทาปนเขียว มีลักษณะของแร่แคลไซต์สลับเป็นชั้นๆ และมีเนื้อดินปน มี allochem อยู่ในเนื้อหินน้อยกว่าร้อยละ 10 จัดเป็น mudstone หินปูนชนิด C เก็บมาจากเหมืองหินปูนร้าง อ.ตากลี จ. นครสวรรค์ เป็นส่วนหนึ่งของหมวดหินตากฟ้า

ชนิด E มีสีเทาจนถึงสีเทาเข้ม มีลักษณะของ เม็ดกลมกระจายตัวอยู่ในเนื้อหิน และพบ calcite vein ขนาดเล็กจำนวนมาก และรอยหักฟันปลา (stylolite) มี allochem เป็นประมาณร้อยละ 30 จัดเป็น wackstone หินปูนชนิด E เก็บมาจากเหมืองหินปูนร้าง อ.ตากลี จ. นครสวรรค์ เป็นส่วนหนึ่งของหมวดหินตากฟ้า

ชนิด F มีสีเทาเข้มถึงสีดำ มีเนื้อดินปน (argillaceous) มี allochem เป็นประมาณร้อยละ 20 จัดเป็น mudstone หินปูนชนิด F เก็บมาจากเหมืองหินปูนร้าง อ.ตากลี จ. นครสวรรค์ เป็นส่วนหนึ่งของหมวดหินตากฟ้า

ชนิด J มีสีเทาเข้ม มี allochem ประมาณร้อยละ 20 บางส่วนเป็นซากบรรพชีวิน จัดเป็น mudstone หินปูนชนิด J เก็บมาจากเหมืองหินปูนร้าง อ.ชัยบาดาล จ. ลพบุรี เป็นส่วนหนึ่งของหมวดหินตากฟ้า

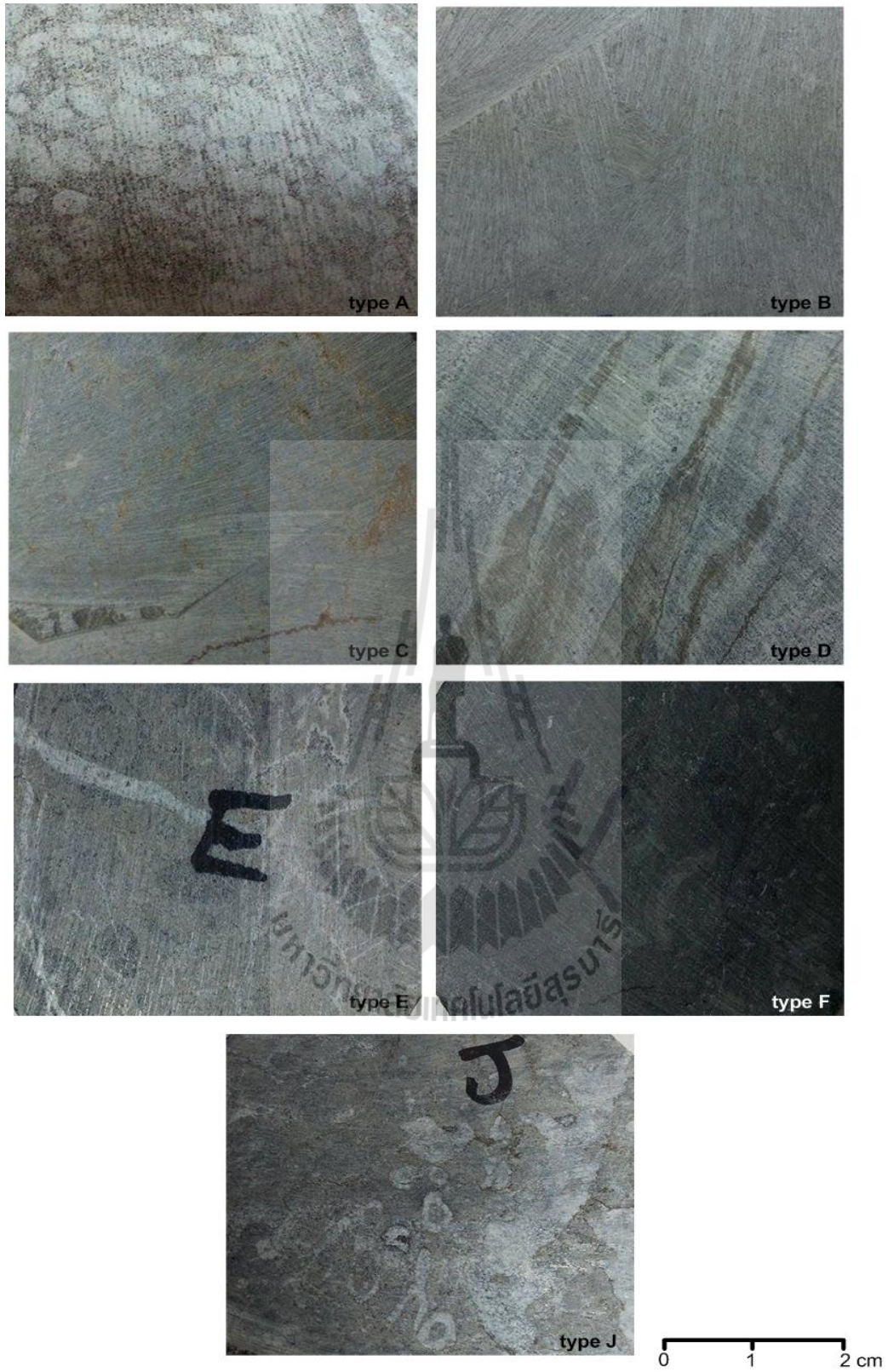
ลักษณะเนื้อของหินปูนทั้งหมดแสดงในรูปที่ 2.4

ตารางที่ 2.1 การจำแนกหินตัวอย่างชั้นต้นในภาคสนาม ตามรูปแบบของ Dunham (Dunham 1962)

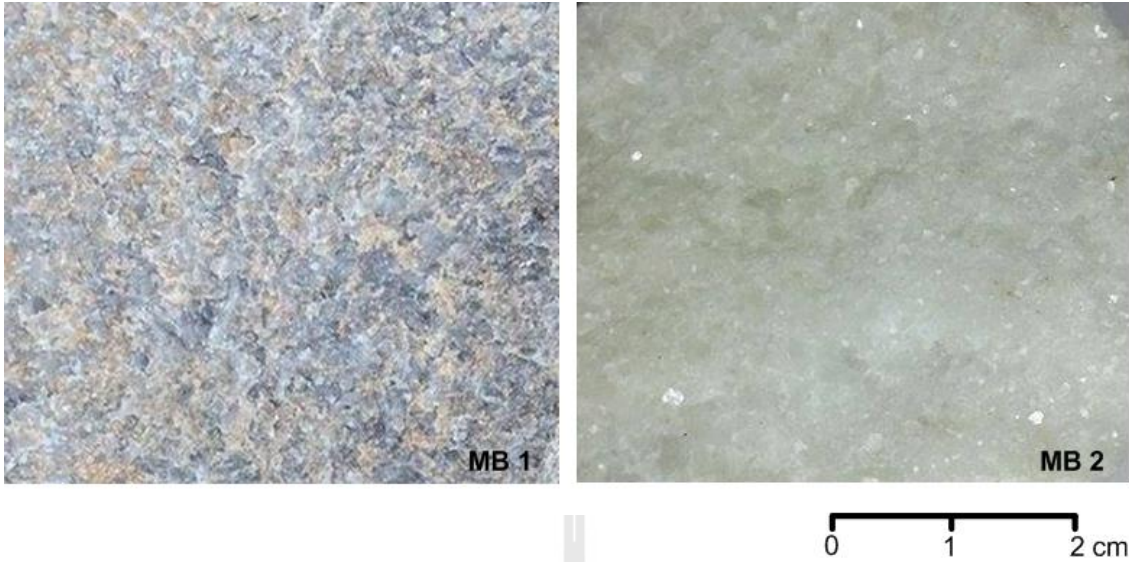
Type	Locality (district, province)	Formation	Lithological name (Dunham, 1962)	Sample description
A	Chai Badan, Lopburi	Tak Fa Formation	wackstone 30% allochem	Thick bedded, grey, with large fusulines (>0.2 mm) and other bioclasts
B	NongMuang, Lopburi	Tak Fa Formation	wackstone 30 % allochem	Thick bedded, light brownish grey, with circular bioclasts (1-2 mm)
C	NongMuang, Lopburi	Tak Fa Formation	mudstone <10% allochem	Thick bedded, light gray, colorless, with calcite laminations, orange stained
D	Ta Kli, NakhonSawan	Tak Fa Formation	mudstone <10% allochem	Thick bedded, dark grey to greenish grey, with clay and calcite laminations and intraclasts
E	Ta Kli, NakhonSawan	Tak Fa Formation	wackstone 20% allochem	Thick bedded, gray to dark gray, with rounded intraclasts, with frequent non-linear calcite veins
F	Ta Kli, NakhonSawan	Tak Fa Formation	mudstone 10% allochem	Thick bedded, very dark grey, argillaceous, with small bioclasts (<2 mm)
J	Chai Badan, Lopburi	Tak Fa Formation	wackstone 20% allochem	Thick bedded, dark grey, mud matrix, bioclasts greater than 10% > 2 mm,cf. Floatstone
MA1	KaengKhoi, Saraburi	KhaoKhad Formation	brownish grey marble	Inequigranular, fine to medium crystalline marble, brown and light grey in color
MA2	KaengKhoi, Saraburi	KhaoKhad Formation	white marble	Inequigranular, fine to medium crystalline white marble,

ชนิด MA1 เป็นหินอ่อนสีเทาแกมน้ำตาล เนื้อผลึก ขนาดละเอียดถึงปานกลางคล้ายเนื้อเศษหิน (รูปที่ 2.5) เก็บมาจากเหมืองหินร้าง อ.แก่งคอย จ. สระบุรี เป็นส่วนหนึ่งของหมวดหินเขาขาด (Khao Khad formation)

ชนิด MA2 เป็นหินอ่อนสีขาว เนื้อผลึกขนาดละเอียดจนถึงปานกลาง (ดูรูปที่ 2.5) เก็บมาจากเหมืองหินร้าง อ.แก่งคอย จ. สระบุรี ส่วนหนึ่งของหมวดหินเขาขาด (Khao Khad formation)



รูปที่ 2.4 ลักษณะเนื้อหินของหินปูนในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 2.5 ลักษณะเนื้อหินของหินอ่อนในการศึกษาครั้งนี้

2.3 การเตรียมตัวอย่างหิน

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมตัวอย่างหินจากหินปูนที่มีลักษณะเนื้อหินต่างกันเจ็ดชนิด และหินอ่อนสองชนิด โดยการเตรียมตัวอย่างแบ่งออกเป็นสามวัตถุประสงค์ ได้แก่ การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบด้านกลศาสตร์ การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาศิลาวิทยา และการเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์เคมี มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบด้านกลศาสตร์

การทดสอบด้านกลศาสตร์ของหินประกอบด้วย 1) การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial Compressive Strength Test: UCS test) 2) การทดสอบแรงดึงสูงสุดในแบบบราซิลเลียน (Brazilian Tensile Strength Test: BTS test) 3) การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน (Slake Durability Index test: SDI test) 4) การทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles Abrasion and Impaction Test, LAAI test) มีรายละเอียดดังนี้

1) ตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว

ตัวอย่างหินถูกเจาะด้วยเครื่องเจาะแท่งตัวอย่างหินทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร มีสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D ratio) เท่ากับ 2.0-2.5 และทำการขัดปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างหินให้เรียบและขนานกัน เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D7012 รูปที่ 2.6-2.7 แสดงตัวอย่างหินบางส่วนที่จัดเตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.6 การตัดแท่งตัวอย่างหินเพื่อให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแต่ละชนิด



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ($L/D=2.0-2.5$)

2) ตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน

ตัวอย่างหินถูกเจาะด้วยเครื่องเจาะแท่งตัวอย่างหินทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร โดยมีสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D ratio) เท่ากับ 0.5 เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM D3967 รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างหินบางส่วนที่จัดเตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดสอบ

3) ตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน

เตรียมตัวอย่างหินแต่ละชนิด โดยมีลักษณะเป็นก้อนที่มีน้ำหนักประมาณ 40-60 กรัม ขนาดเท่ากันจำนวน 10 ก้อน (รูปที่ 2.9) และน้ำหนักรวมมีค่าประมาณ 500 กรัม เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D4644

4) ตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ

เตรียมตัวอย่างหินมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 นิ้ว นำมาร้อนโดยใช้ตัวอย่างหินที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 1 นิ้วครึ่ง และ ขนาด 1 นิ้ว นำไปล้างแล้วทำการอบจนแห้งให้มีน้ำหนักรวม 5000 กรัม เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C-131 รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างหินบางส่วนที่จัดเตรียมไว้เพื่อใช้ในการทดสอบ

2.3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาศิลาวิทยา

หินตัวอย่างถูกตัดให้เป็นแผ่นหิน (rock slap) ขนาดประมาณ 60x60 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่นต่อชนิดหิน แผ่นหินถูกส่งไปตัดและเตรียมเป็นแผ่นหินบาง (rock thin section) ที่มีมาตรฐานตามการศึกษาด้านศิลาวิทยา โดยส่งไปจัดเตรียมที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเทคโนโลยีธรณี คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น แผ่นหินบางแต่ละแผ่นจะมีความหนาของหินไม่เกิน 0.03 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อนำมาศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ จะมองเห็นลักษณะจุลภาคของหินได้ชัดเจน (รูปที่ 2.10)

2.3.3 ตัวอย่างหินสำหรับการศึกษาลักษณะขององค์ประกอบทางเคมี

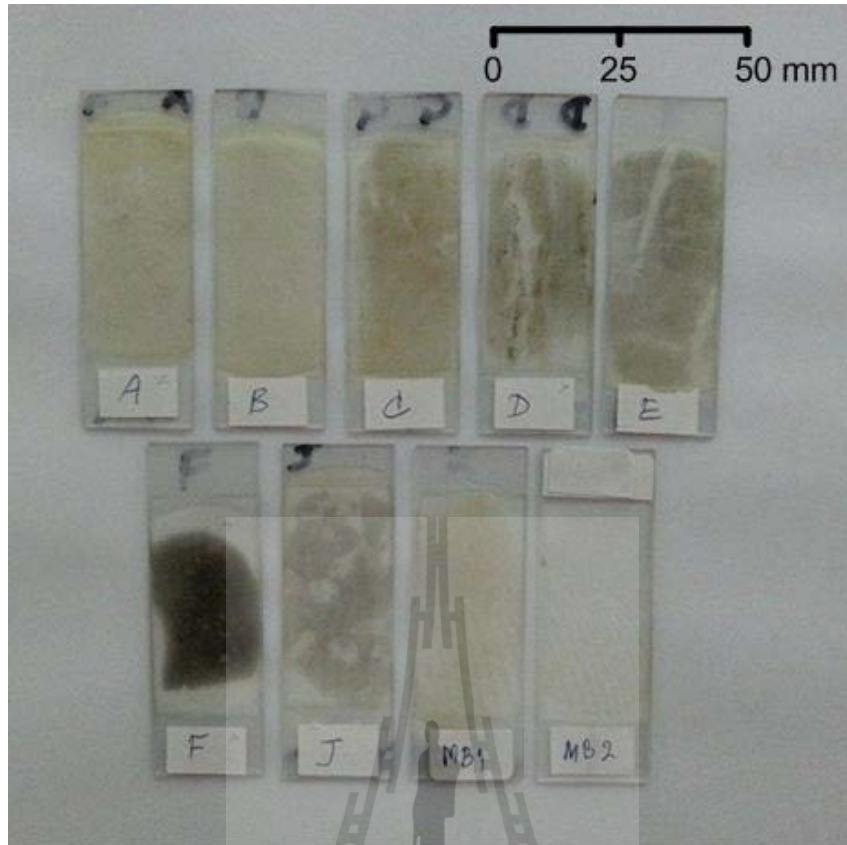
องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างหิน วิเคราะห์โดย X-ray diffraction technique ตัวอย่างหินแต่ละชนิดจะถูกบดให้เป็นผง ให้มีน้ำหนักประมาณ 50 กรัม (รูปที่ 2.11) แล้วจึงส่งไปวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างหินบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน และการทดสอบความลึกทรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างแผ่นหินบางในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างหินที่ถูกบดเป็นผงสำหรับการวิเคราะห์ X-ray diffraction technique

บทที่ 3

การทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์

การทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของตัวอย่างหินปูนและหินอ่อน การทดสอบจำแนกออกเป็น 4 ชนิดคือ

- 1) การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว
- 2) การทดสอบแรงดึงสูงสุดในแบบบราซิลเลียน
- 3) การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน
- 4) การทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ

3.1. การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial Compressive Strength Test: UCS test)

การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (uniaxial compressive strength) ของตัวอย่างหินปูนและหินอ่อน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับลักษณะทางศิลาวิทยา การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 2.5 หรือมีความยาวประมาณ 135 มิลลิเมตร โดยหินแต่ละชนิดจะใช้ตัวอย่างหินจำนวน 5 ก้อนในการทดสอบ

ในการทดสอบตัวอย่างหินจะถูกกดด้วยอัตราการกดคงที่ (constant loading rate) คือ 0.1-1.0 MPa/min ในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง และปฏิบัติตามข้อกำหนดมาตรฐานสากล ASTM D7012 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) เครื่องมือที่ใช้กดทดสอบคือเครื่องกดทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุด (compression load fame) ซึ่งเครื่องกดทดสอบจะให้แรงกดในแนวแกนของตัวอย่างหิน (รูปที่ 3.1) โดยมีอัตราการกดคงที่จนกระทั่งตัวอย่างหินแตกด้วยแรงกดสูงสุด ระหว่างทำการทดสอบจะมีการบันทึกค่าแรงกดและระยะการยุบตัวของตัวอย่างหินอย่างต่อเนื่อง สำหรับค่าแรงกดสูงสุดที่อ่านได้จะเป็นหน่วยของน้ำหนักกด ซึ่งสามารถคำนวณเป็นความเค้นโดยการนำพื้นที่หน้าตัดของแต่ละตัวอย่างหินไปหารน้ำหนักกด ส่วนค่าความเครียดในแนวแกนคำนวณจากระยะการยุบตัวหารด้วยความยาวเดิมของแท่งตัวอย่างหิน การคำนวณจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\sigma_{\text{axial}} = P/A \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1 การทดสอบแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ตัวอย่างหินถูกกดด้วย compression load fame

$$\varepsilon_{\text{axial}} = \Delta L/L \quad (3.2)$$

$$E = \sigma_{\text{axial}}/\varepsilon_{\text{axial}} \quad (3.3)$$

โดยที่ σ_{axial} คือ ความเค้นในแนวแกน P คือ แรงกดในแนวแกน A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างหิน $\varepsilon_{\text{axial}}$ คือ ความเครียดในแนวแกน ΔL คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างหิน (หรือการเปลี่ยนรูปในแนวแกน) L คือ ความยาวทั้งหมดของตัวอย่างหินก่อนที่จะทดสอบ และ E คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น ถ้าค่าแรงกดในแนวแกนสูงสุดที่จุดวิบัติหรือจุดแตกของตัวอย่างหินเท่ากับ P_f ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว σ_c (uniaxial compressive strength) จะคำนวณได้จาก

$$\sigma_c = P_f/A \quad (3.4)$$

ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วยหินปูนและหินอ่อน รวมจำนวน 40 ตัวอย่าง โดยค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวของหินปูนมีค่าเฉลี่ย 51.52 ± 10.37 MPa และค่ากำลังรับแรงกด

สูงสุดในแกนเดียวของหินอ่อนมีค่าเฉลี่ย 50.93 ± 0.89 MPa จากการทดสอบหาค่าแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ยังสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และค่า Poisson's ratio ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยรูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการแตกของหินบางส่วนหลังการทดสอบ

ตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และ Poisson's ratio ของตัวอย่างหินที่ทดสอบ

Type	Rock type	Density (g/cc) (mean)	σ_c (MPa) (mean)	E (GPa) (mean)	Poisson's ratio (mean)
Limestone	A	2.72	61.35	10.98	0.17
	B	2.70	48.31	8.22	0.23
	C	2.66	46.82	8.60	0.22
	D	2.69	70.65	17.24	0.23
	E	2.66	46.01	2.00	0.21
	F	2.68	43.95	10.66	0.18
	J	2.70	43.55	11.88	0.22
Averages		2.69 ± 0.02	51.52 ± 10.37	9.94 ± 4.59	0.21 ± 0.02
Marble	MA 1	2.65	50.30	30.39	0.16
	MA 2	2.74	51.56	10.40	0.24
Averages		2.70 ± 0.06	50.93 ± 0.89	20.40 ± 14.13	0.20 ± 0.05

3.2 การทดสอบแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน (Brazilian Tensile Strength Test: BTS test)

การทดสอบแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (tensile strength) การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D3967 และข้อแนะนำของ ISRM (Brown, 1981) ใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงกดสูงสุด (compression load fame) ในการทดสอบ ตัวอย่างหินจะถูกกดตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นในอัตราคงที่คือ 0.5 MPa/s (รูปที่ 3.3) บริเวณจุดสัมผัสระหว่างตัวอย่างหินกับแท่นกดถูกรองรับด้วยแผ่นกระดาษแข็งทั้งสองด้าน เพื่อให้ผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างหินกับแท่นกดมีความสม่ำเสมอ การทดสอบจะกดจนกระทั่งตัวอย่างหินแตกและแยกออกจากกัน ค่าแรงกดที่จุดวิบัตินำมาคำนวณเป็นค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนได้ตามสมการที่ (3.5) (Jaeger and Cook, 1979)

$$\sigma_B = 2 P_f / \pi DL \quad (3.5)$$

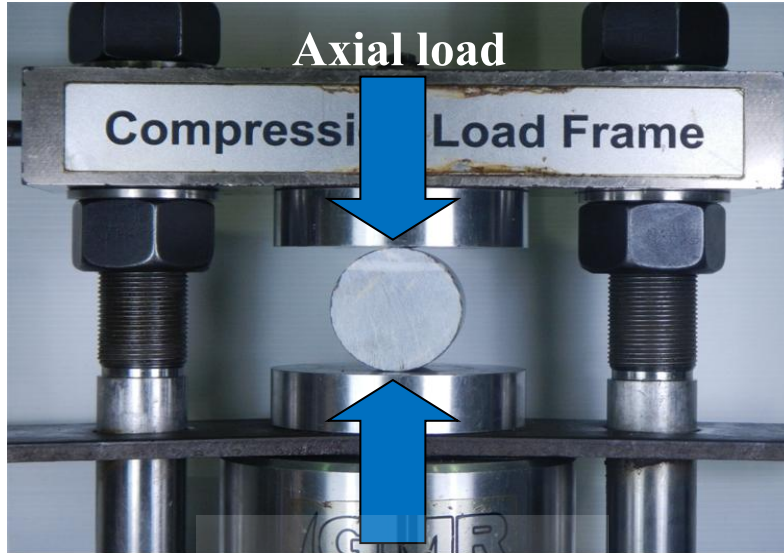


(a)



(b)

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างแท่งหินปูนก่อนทดสอบ (a) และหลังการทดสอบ (b) แรงกดสูงสุดในแกนเดียว



รูปที่ 3.3 การทดสอบแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน ตัวอย่างหินถูกกดด้วย compression load fame

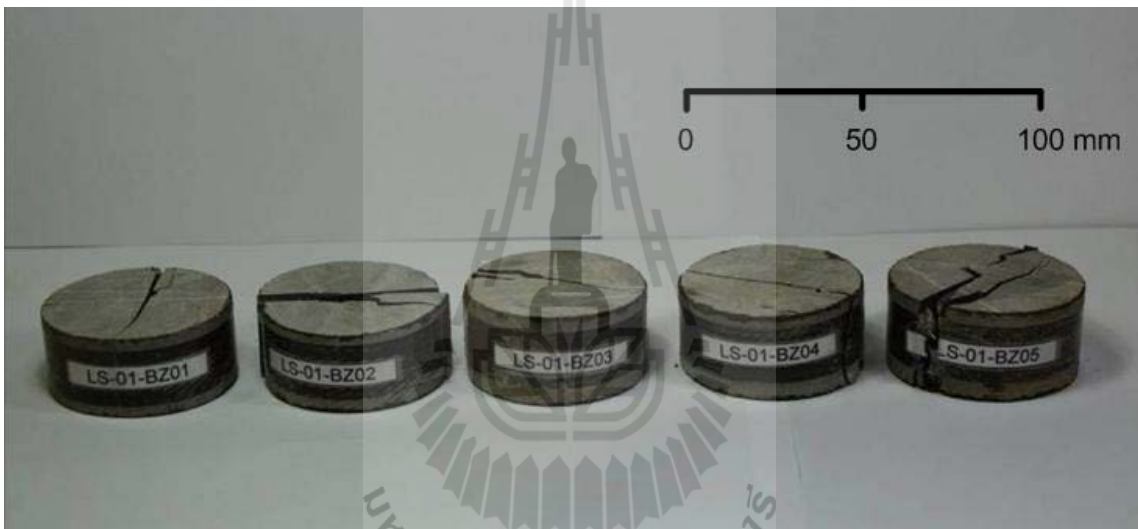
โดยที่ σ_B คือ กำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน P_f คือ แรงกดที่จุดวิบัติ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของตัวอย่าง และ L คือ ความหนาของตัวอย่าง ผลการทดสอบของตัวอย่างทั้งหมด 45 ตัวอย่าง ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.2 ตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบมีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนและความผันแปรในหินปูนเท่ากับ 11.30 ± 1.35 MPa และหินอ่อนเท่ากับ 10.28 ± 3.21 MPa รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างบางส่วนหลังทำการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนและความหนาแน่นของตัวอย่างหินที่ทดสอบ

Type	Limestone							Marble	
	A	B	C	D	E	F	J	MA1	MA2
Density (g/cc) (mean)	2.72	2.70	2.66	2.69	2.66	2.68	2.70	2.65	2.74
Average	2.69 ± 0.02							2.70 ± 0.06	
σ_B (MPa) (mean)	12.03	10.98	11.35	12.93	10.67	12.37	8.80	8.01	12.55
Average	11.30 ± 1.35							10.28 ± 3.21	



(a)

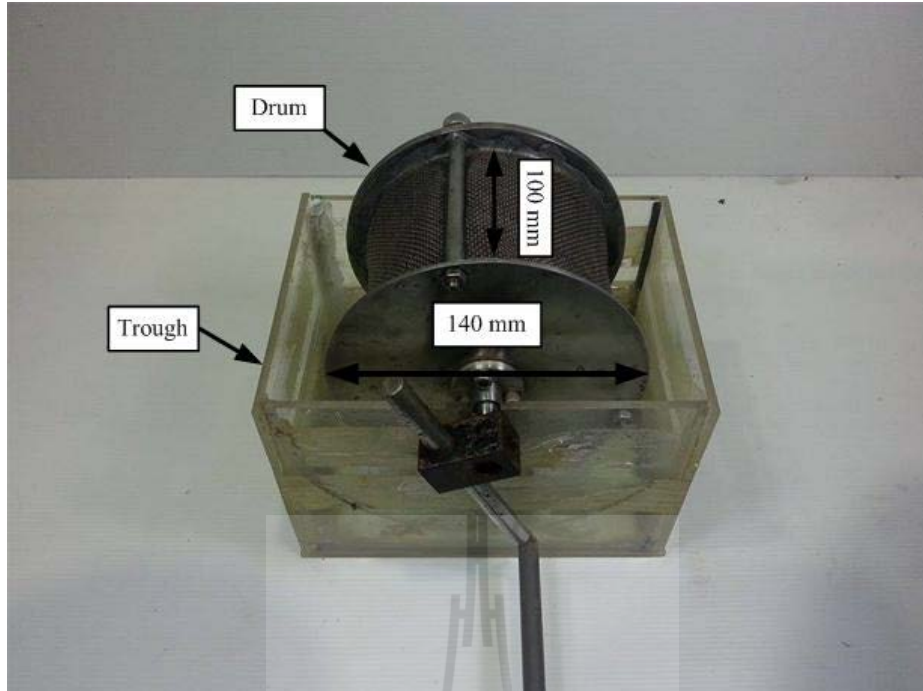


(b)

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแท่งดินปูนก่อนการทดสอบ (a) และหลังการทดสอบ (b) แรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน

3.3 การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน (Slake Durability Index test: SDI test)

การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน เป็นการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบศักยภาพของตัวอย่างดินที่สามารถทนทานต่อการซัดถู การผืนแปรของอุณหภูมิและวัฏจักรเปียก-แห้ง ตามมาตรฐาน ASTM D4644 (รูปที่ 3.5) โดยการนำดินตัวอย่างขนาดเท่ากัน 10 ก้อน ก้อนละประมาณ 50 กรัม (รูปที่ 3.6a) ใส่ลงในตะกร้อโครงเหล็กรูปทรงกระบอกที่จุ่มอยู่ในถังน้ำที่มีความสูงเกือบถึงเส้นผ่าศูนย์กลางของตะกร้อ แล้วทำการหมุนด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างดินไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างดินและบันทึก



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ใช้ทดสอบดัชนีค่าความคงทนต่อการผุกร่อน (Slake durability index testing apparatus)

จากนั้นเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนที่จะทำการขัดถูในตะกร้อโครงเหล็ก ทำซ้ำสองรอบ เพื่อนำน้ำหนักที่หายไปในรอบที่สองมาคำนวณค่าดัชนีความคงทน (slake durability index: I_d) ตามสมการที่ (3.6)

$$I_d = [W_2/W_1] \times 100 \quad (3.6)$$

โดยที่ I_d คือ ค่าดัชนีคงทนต่อการผุกร่อน W_1 คือ น้ำหนักของตัวอย่างหินที่ผ่านการทดสอบในวัฏจักรที่ 1 W_2 คือ น้ำหนักของตัวอย่างหินที่ผ่านการทดสอบในวัฏจักรที่ 2 ผลการทดสอบตัวอย่างของหินแต่ละชนิดพบว่า หินปูนที่นำมาทดสอบมีความคงทนต่อสภาวะเปียกหรือชุ่มน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นจากค่า I_d ของตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบมีค่ามากกว่าร้อยละ 99 และสำหรับหินอ่อนทั้งสองชนิดพบว่ามีค่า I_d เท่ากัน ผลจากการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ตัวอย่างหินหลังการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.6b

ตารางที่ 3.3 ค่าดัชนีคงทนต่อการสึกกร่อน (I_d) และดัชนีความต้านทานการสึกกร่อนของมวลหินหยาบ (LAAI) ของหินที่ทดสอบ

Type	Rock type	Density (g/cc) (mean)	I_d (%) (mean)	LAAI (%) (mean)
Limestone	A	2.72	99.72	20.11
	B	2.70	99.81	25.47
	C	2.66	99.77	17.52
	D	2.69	99.8	17.52
	E	2.66	99.76	19.63
	F	2.68	99.75	17.16
	J	2.70	99.78	17.13
Averages		2.69 ± 0.02	99.77 ± 0.03	19.22 ± 3.01
Marble	MA 1	2.65	99.58	-
	MA 2	2.74	99.58	21.11
Averages		2.70 ± 0.06	99.58 ± 0.00	-

3.4 การทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles Abrasion and Impaction Test, LAAI test)

การทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาดัชนีความต้านทานการสึกกร่อนของมวลหินหยาบ (abrasion and impaction index) โดยการทาน้ำหนักของหินปูนที่สูญเสียไปเนื่องจากการถู การขัดสี ถูกบดทับและถูกกระแทกด้วยลูกเหล็กตามจำนวนที่กำหนด โดยใช้เครื่องมือทดสอบความสึกหรอลอสแอนเจลิส (Los Angeles abrasion and impact machine) ตามมาตรฐาน ASTM C131 โดยผลที่ได้จากการทดสอบคือความแข็งของหิน (hardness) หรืออาจเรียกว่าความต้านทานการสึกกร่อน การทดสอบแบบนี้เป็นที่ยอมรับในงานวิศวกรรมโยธา โดยใช้ทดสอบกับหินที่เป็นวัสดุผสมคอนกรีต เป็นต้น การทดสอบทำโดยการเตรียมมวลหินที่มีขนาดตามต้องการ ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ก้อนตัวอย่างหินปูนมีขนาดเท่ากับตัวอย่างที่ใช้ในหัวข้อ 3.3 (รูปที่ 3.6a) ต่อจากนั้นนำตัวอย่างไปใส่ในภาชนะทรงกระบอก ซึ่งเรียกว่าดรัม (drum) (รูปที่ 3.7) ที่บรรจุลูกเหล็กทรงกลม (abrasive charges) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 46.8 มิลลิเมตรหนักประมาณ 390-445 กรัม จำนวน 12 ลูก (รูปที่ 3.8) แล้วหมุน drum ด้วยความเร็ว 30-33 รอบต่อนาที ตามจำนวนรอบที่กำหนด จากนั้นเทก้อนหินตัวอย่างบนตะแกรงหมายเลข 12 (No.12) แล้วทำการร่อนเพื่อตัดเอาก้อนหินที่ค้างบนตะแกรง



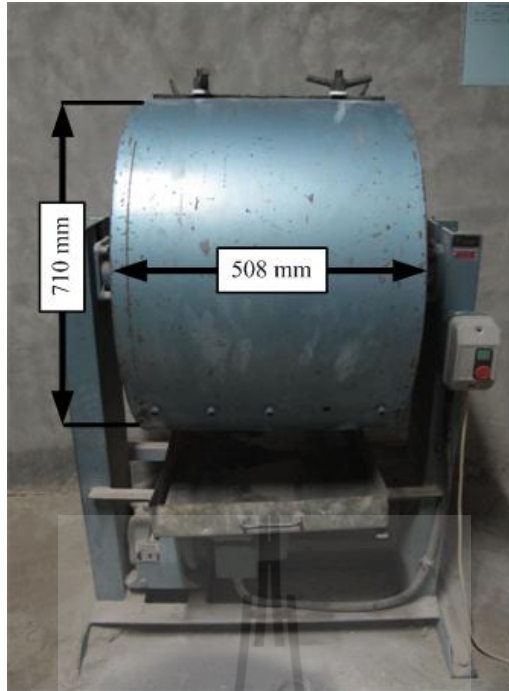
(a)



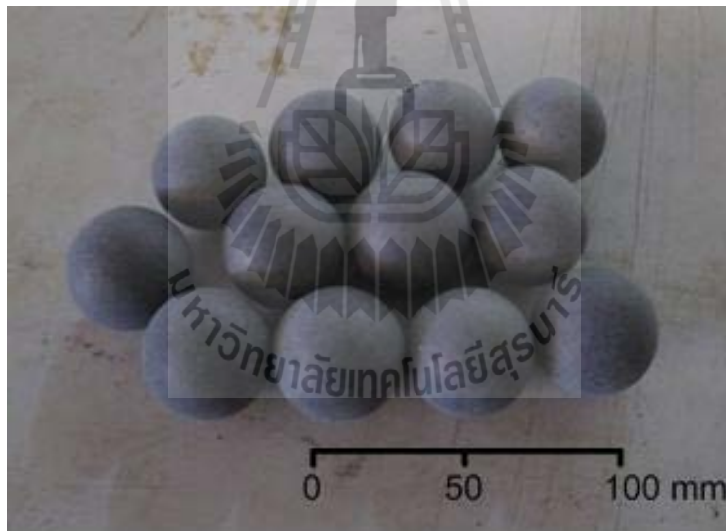
(b)

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างหินก่อนการทดสอบ (a) และหลังการทดสอบ (b) ความคงทนต่อการผุกร่อน

จากนั้นล้างเศษวัสดุที่มีขนาดเล็กออก แล้วนำไปอบแห้งที่ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จึงนำออกมาชั่งน้ำหนัก ก็จะสามารถหาค่าการสูญเสียของมวลรวมหรือปริมาณหินที่ถูกบดย่อยได้ตามสมการที่ (3.7) ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุที่ใช้ทดสอบทั้งหมด



รูปที่ 3.7 Los Angeles abrasion and impact machine



รูปที่ 3.8 ลูกเหล็กทรงกลม ใช้ในการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน

กับน้ำหนักของวัสดุที่สูญเสียไป เนื่องจากถูกขัดสีระหว่างวัสดุและลูกเหล็กทรงกลมตามจำนวนที่กำหนด การกระแทกเกิดโดยการตกจากด้านหนึ่ง ลงมากระแทกอีกด้านหนึ่งของเครื่องทดสอบ

$$LAAI = [(W_f - W_i)/W_i] \times 100 \quad (3.7)$$

โดยที่ $LAAI$ คือดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ W_i คือ น้ำหนักของมวลรวมหยาบ ก่อนทดสอบ W_f คือ น้ำหนักของมวลรวมหยาบหลังทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบของตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบมีค่าสูง แสดงว่าตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบมีค่าความต้านทานต่อการสึกหรอสูงเช่นกัน (ดูตารางที่ 3.3) ตัวอย่างหินหลังทดสอบแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างหินหลังทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ

บทที่ 4

การศึกษาด้านศิลาวิทยาและองค์ประกอบเคมี

ข้อมูลการศึกษาทางด้านศิลาวิทยาและองค์ประกอบเคมีของหินตัวอย่างถูกนำเสนอในบทนี้ ซึ่งประกอบด้วย ลักษณะเนื้อหินและองค์ประกอบในเนื้อหินจากแผ่นหินบาง และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมี ด้วยเทคนิค X-ray diffraction เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการหาความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของตัวอย่างหิน

4.1 การศึกษาด้านศิลาวิทยา

การศึกษาด้านศิลาวิทยาในงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเข้าใจลักษณะของเนื้อหินและองค์ประกอบในเนื้อหินปูนและหินอ่อน โดยทำการศึกษาแผ่นหินบางภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ ทั้งนี้การศึกษาลักษณะจุลภาคของหินปูนใช้รูปแบบการจำแนกหินของ Folk (1959; 1962) (ดูรูปที่ 1.2) โดยองค์ประกอบในเนื้อหินถูกแบ่งออกเป็น

- allochem ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดตะกอน เศษหินหรือซากบรรพชีวิน ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 0.2 มิลลิเมตร เมื่อมองในกล้องจุลทรรศน์อาจมีลักษณะเป็นกลุ่มตะกอนขนาดละเอียดจับตัวกัน หรืออาจมีลักษณะเป็นเปลือกของสิ่งมีชีวิต ที่แสดงการตกผลึกของแร่ตามโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ

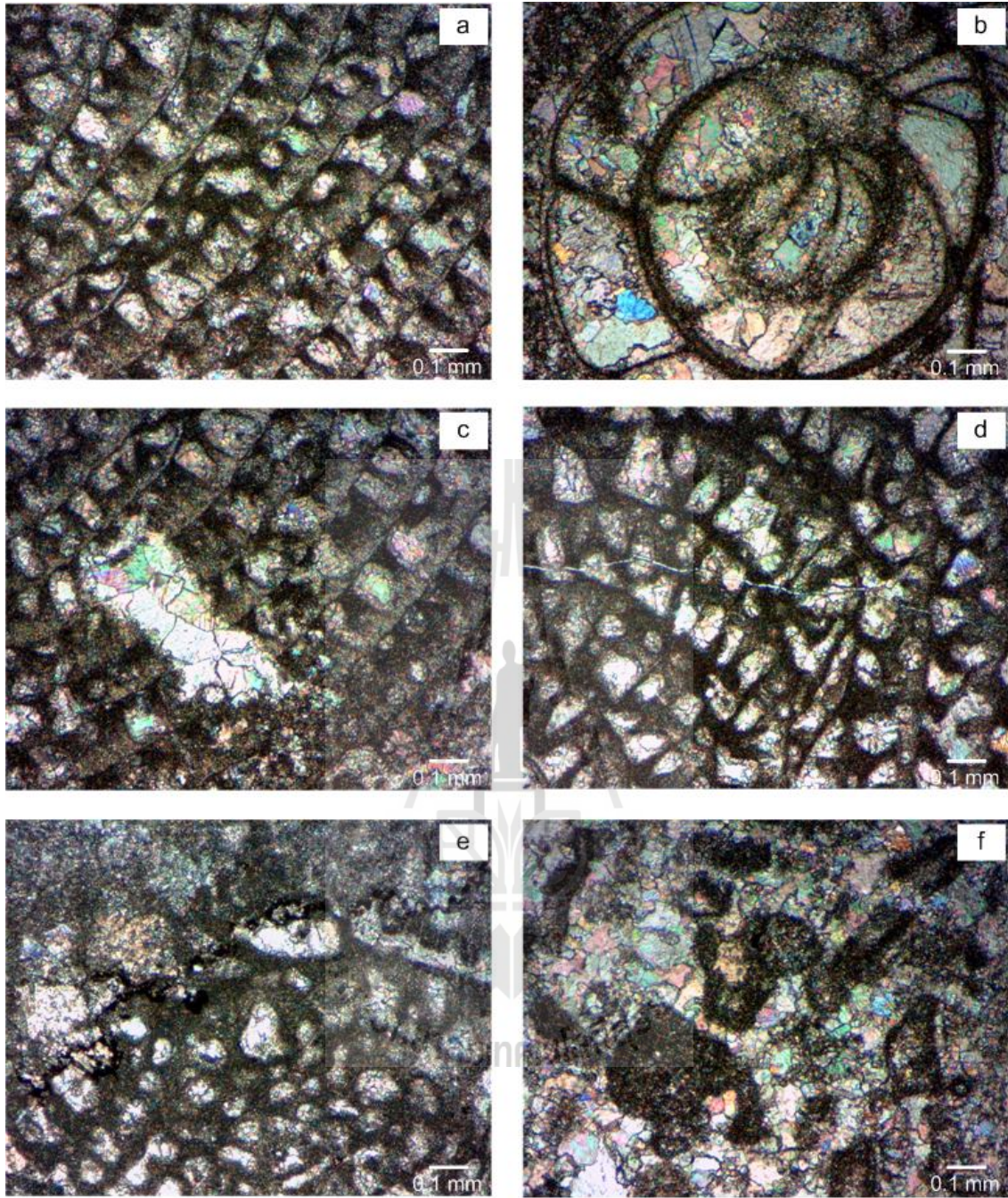
- lime-mud matrix มีลักษณะเป็นตะกอนขนาดละเอียดกว่า 0.2 มิลลิเมตร เมื่อมองภายใต้กล้องจุลทรรศน์จะมีสีเทา ทึบ

- spar cement หรือผลึกแร่แคลไซต์ มีลักษณะเป็นผลึกแร่ อาจมีขนาดละเอียดหรือหยาบก็ได้ เมื่อมองภายใต้กล้องจุลทรรศน์ผลึกแร่แคลไซต์จะแสดงสมบัติทางแสงของแร่ คือมีความสูงต่ำของผลึกแร่สูง (high relief) แสดงแนวแตกเรียบรูปข้าวหลามตัด (rhombohedral cleavage) และเมื่อใส่ฟิล์มโพลาไรซ์ (analyzer) จะเห็นสีที่เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นแสง (interference color) ที่ชัดเจนอยู่ในระดับ 4th order

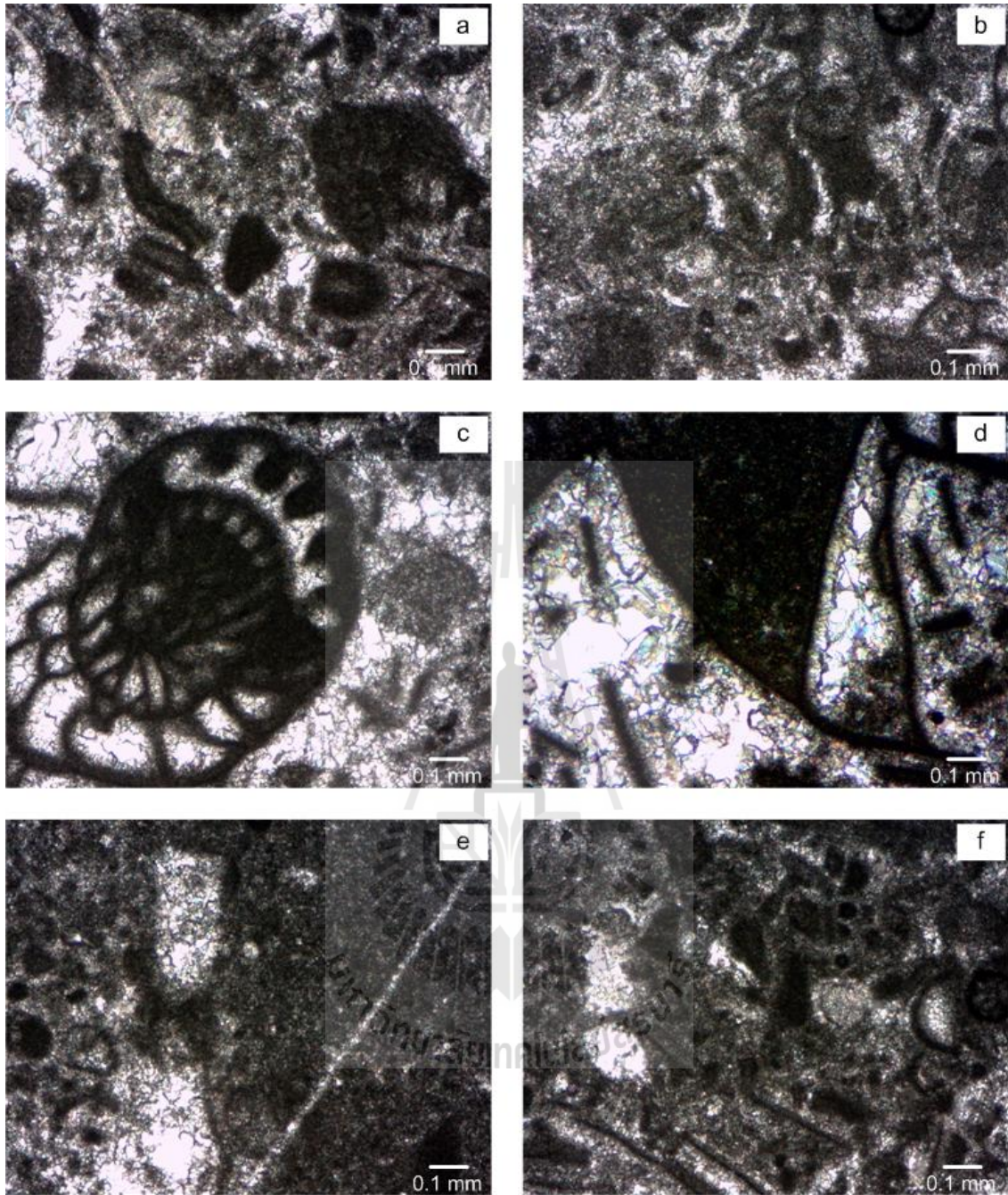
องค์ประกอบทั้งสามนี้จะถูกประเมินเป็นปริมาณร้อยละโดยการเปรียบเทียบกับแผนภาพของ Folk (1959; 1962) และวิธีนับแบบ point counting method (Flügel, 2004) การจำแนกหินปูนที่ทำการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และภาพถ่ายจุลภาคของตัวอย่างหินปูนชนิด A-J แสดงในรูปที่ 4.1-4.7 ส่วนหินอ่อนไม่สามารถจำแนกด้วยวิธีการเดียวกับหินปูน ลักษณะของหินอ่อนชนิด MA1 และ MA2 พิจารณาจากขนาดของผลึกแร่แคลไซต์และโครงสร้างที่เห็นภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8-4.9

ตารางที่ 4.1 ลักษณะจุลภาคและการจำแนกหินปูนและหินอ่อน (A=allochem; M=lime-mud matrix (micrite); S=spar cement (sparite))

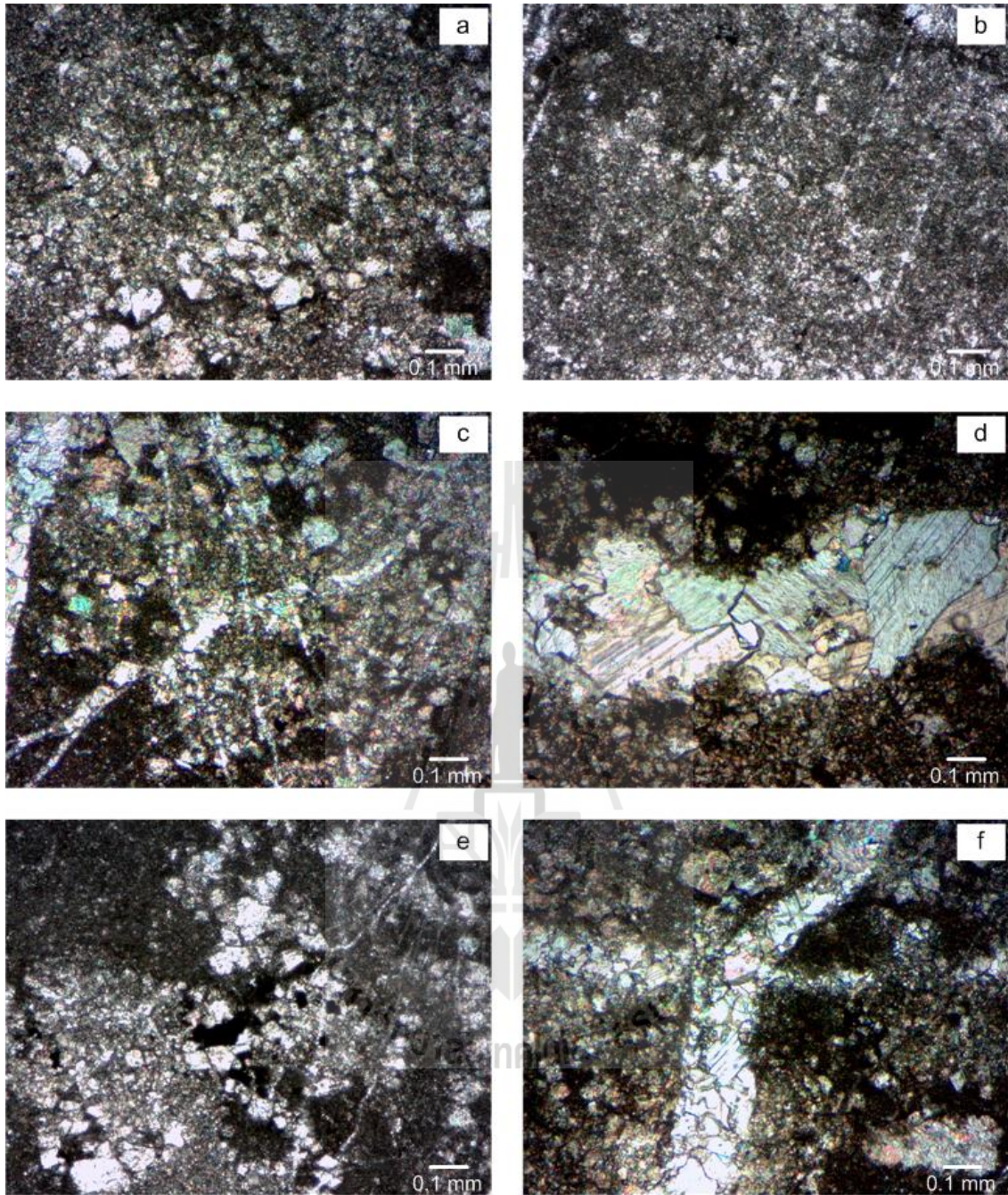
Rock type	Type	Dunham's classification	Folk's classification	Component (%)				Microscopic description (matrix alteration, micro fracture, vein, allochem type)
				A	M	S	S/M	
Limestone	A	wackstone	poorly washed biosparite	29.79	37.29	37.75	1.01	allochems partly altered to microspars, matrix partly replaced by sparry calcite, allochems mostly fusuline fossils
	B	wackstone	sparse biomicrite	27.20	57.35	15.46	0.27	allochems partly altered, some intraclasts and fossils, mostly lime-mud matrix, with little sparry calcite
	C	mudstone	micrite	3.86	92.49	3.83	0.04	matrix mostly altered to microspars, rhombic grains of dolomite present, small calcite veins (<0.5 mm width)
	D	mudstone	micrite	0.50	99.00	0.50	0.01	matrix mostly altered to microspars (<0.1 mm crystal size), partly replaced by calcite (<2 mm), clay minerals present
	E	wackstone	poorly washed intrasparite	3.68	55.46	40.87	0.74	matrix partly altered to microspars and some sparry calcite, more than 2 sets of calcite-fill microfractures present, stylolites present
	F	mudstone	sparse biomicrite	12.04	78.01	9.96	0.13	matrix and allochems mostly altered to microspars, argillaceous, organic materials present
	J	wackstone	sparse biomicrite	14.50	82.25	2.25	0.03	bioclasts and intraclasts, mud matrix rarely altered
Marble	MA1	brownish grey marble	brownish grey marble	-	-	-	-	Inequigranular, fine to medium crystalline marble, brown and light grey, granoblastic, anhedral, bending twin lamellae
	MA2	white marble	white marble	-	-	-	-	Inequigranular, fine to medium crystalline marble, white, anhedral granoblastic



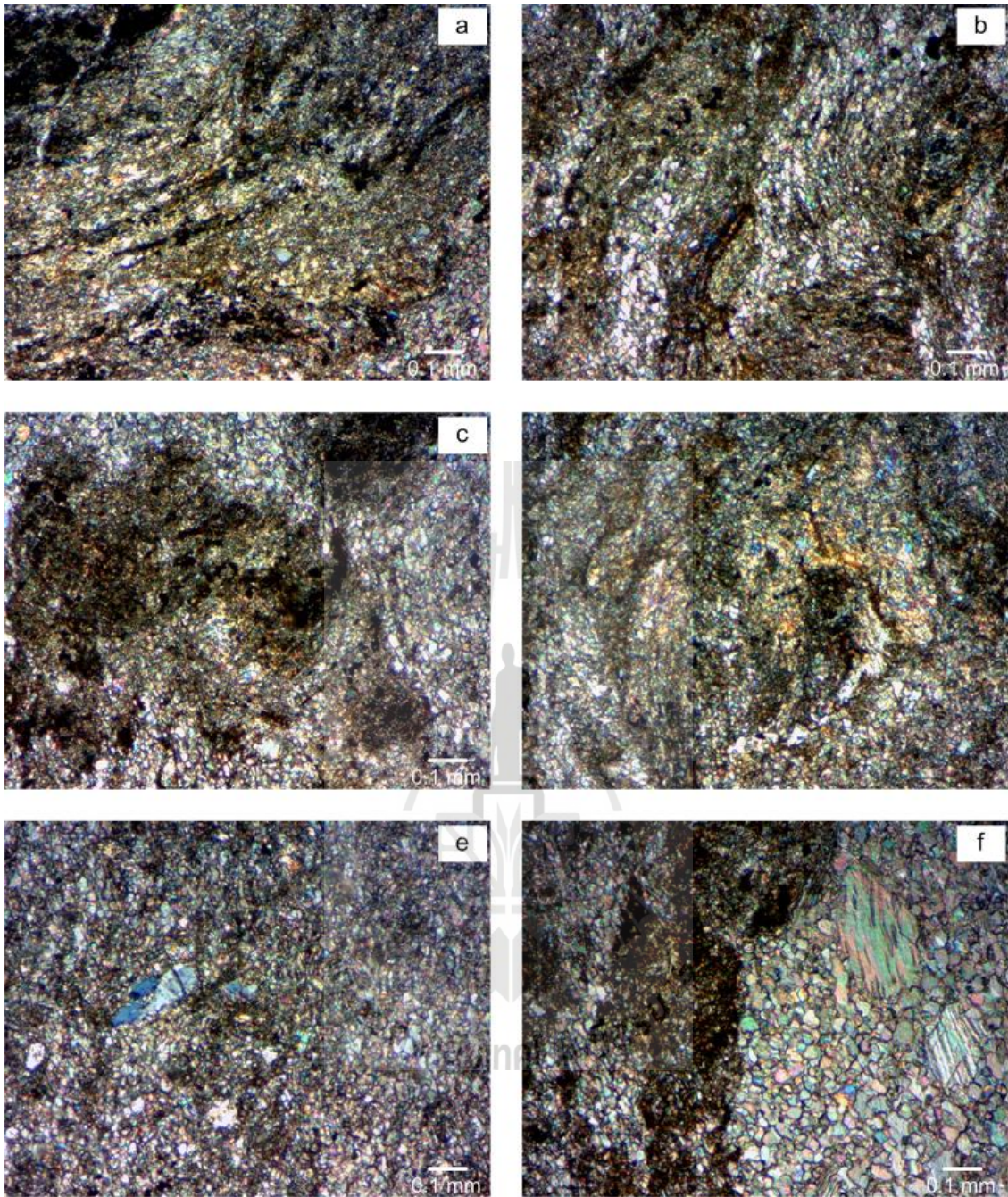
รูปที่ 4.1 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด A-poorly washed biosparite



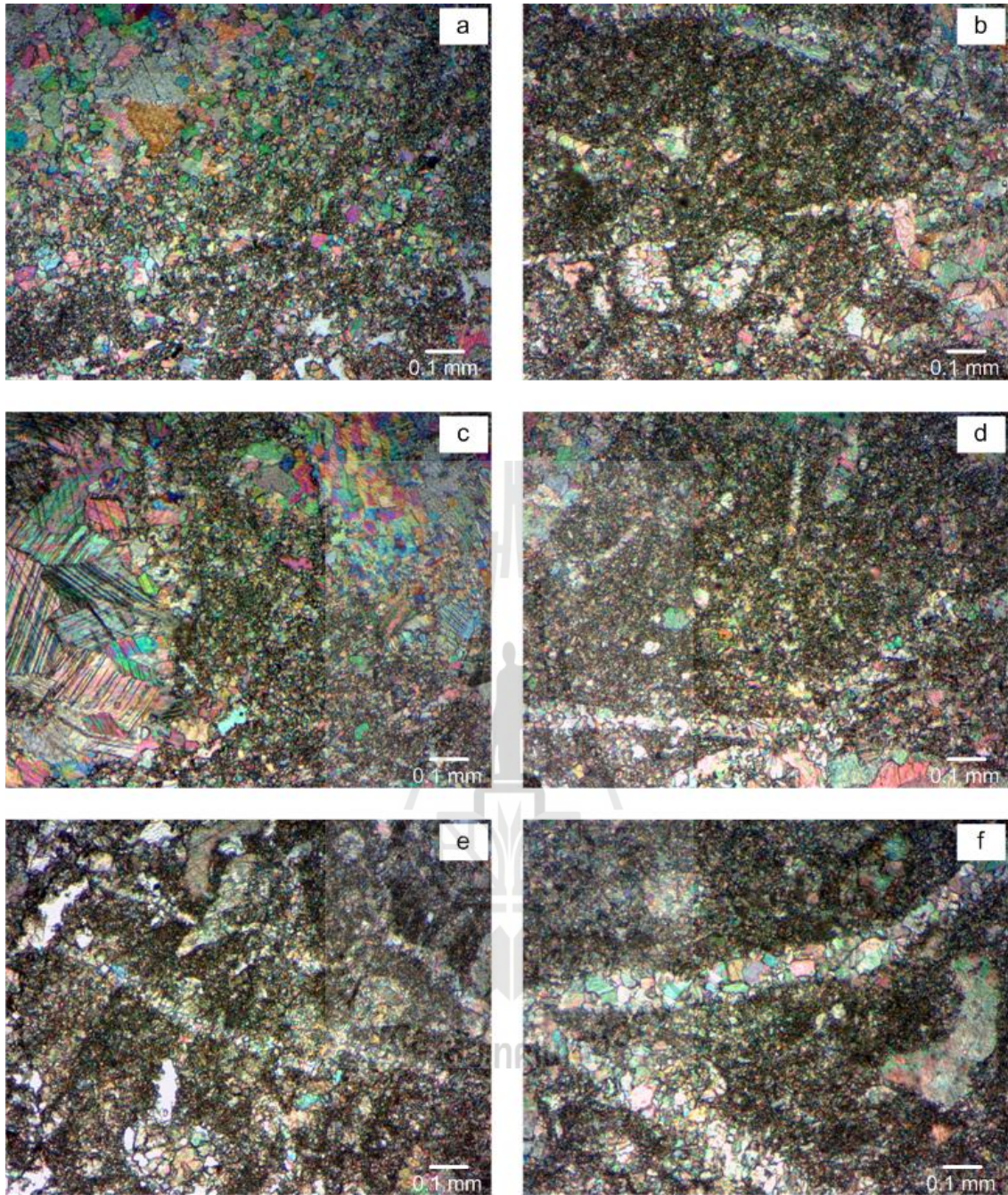
รูปที่ 4.2 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด B-sparse biomicrite



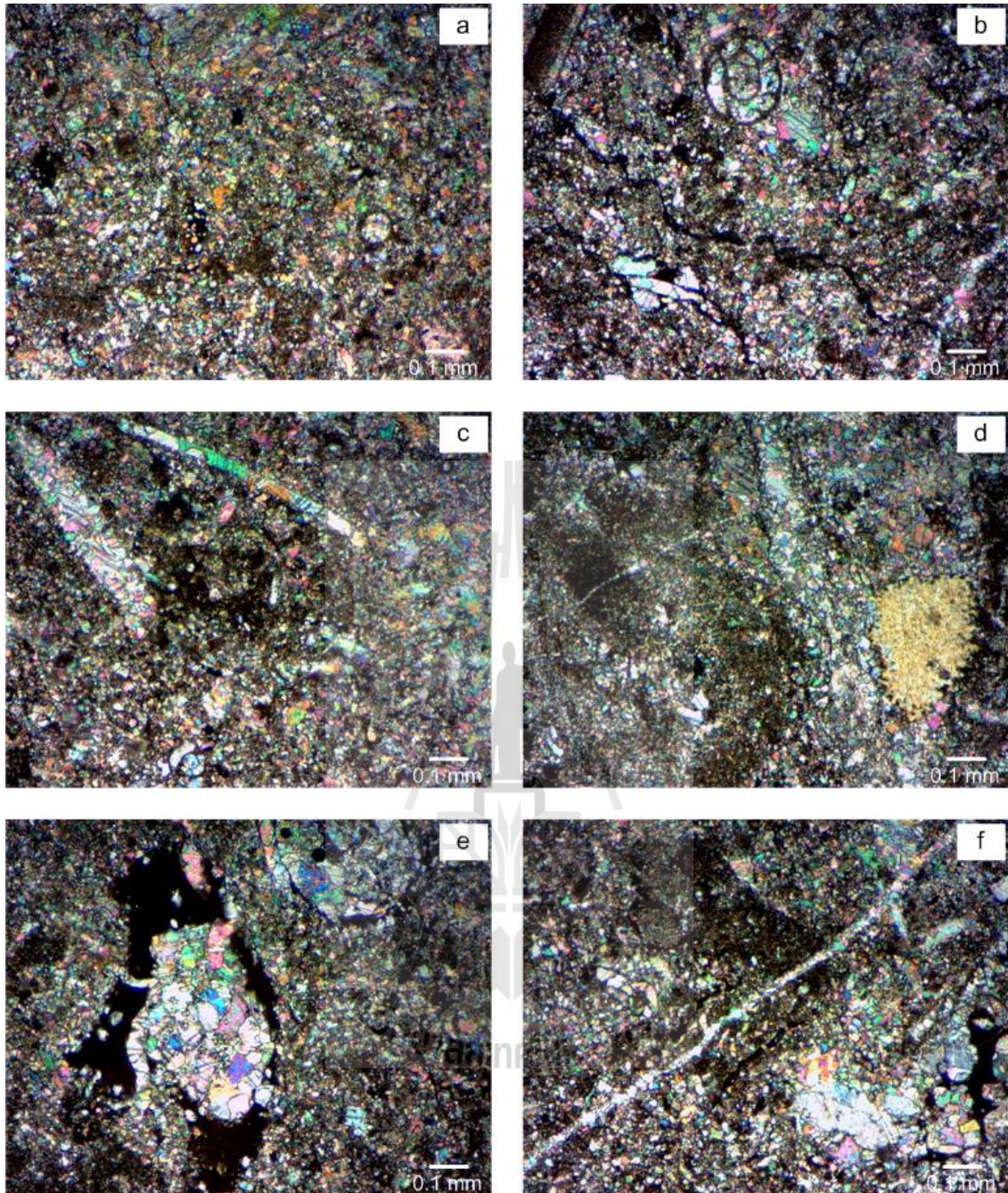
รูปที่ 4.3 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด C-micrite



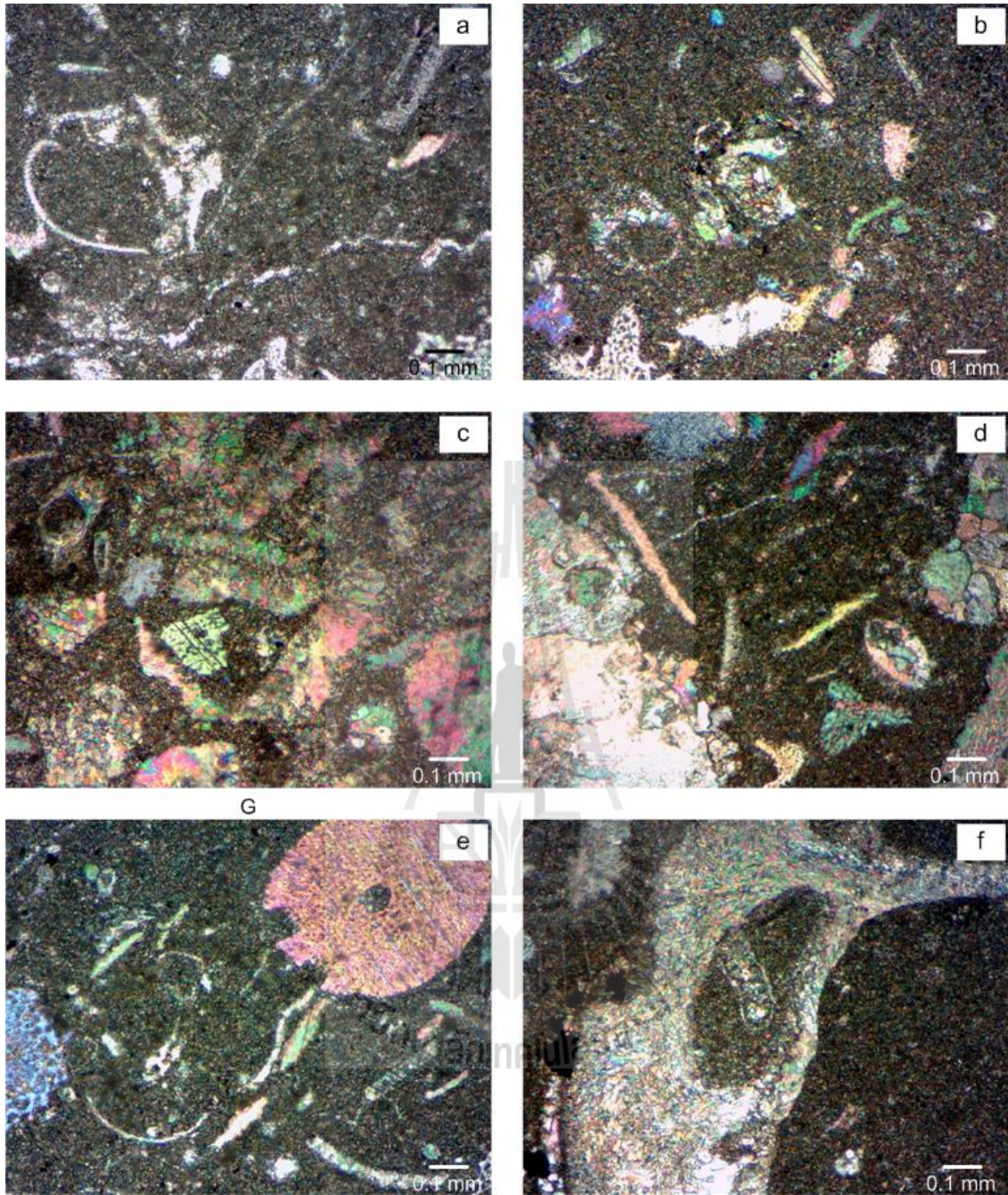
รูปที่ 4.4 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด D-micrite



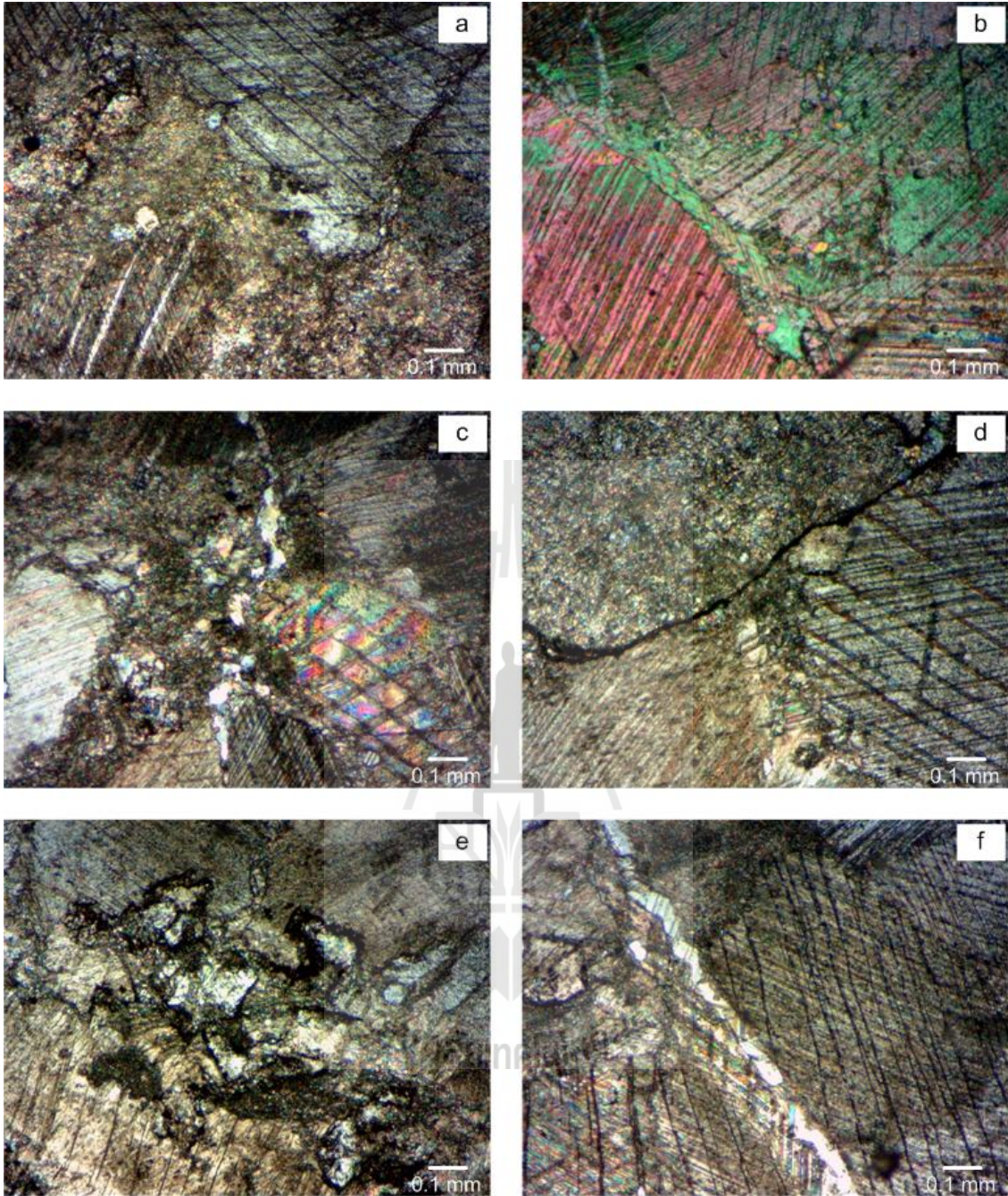
รูปที่ 4.5 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด E-poorly washed intrasparite



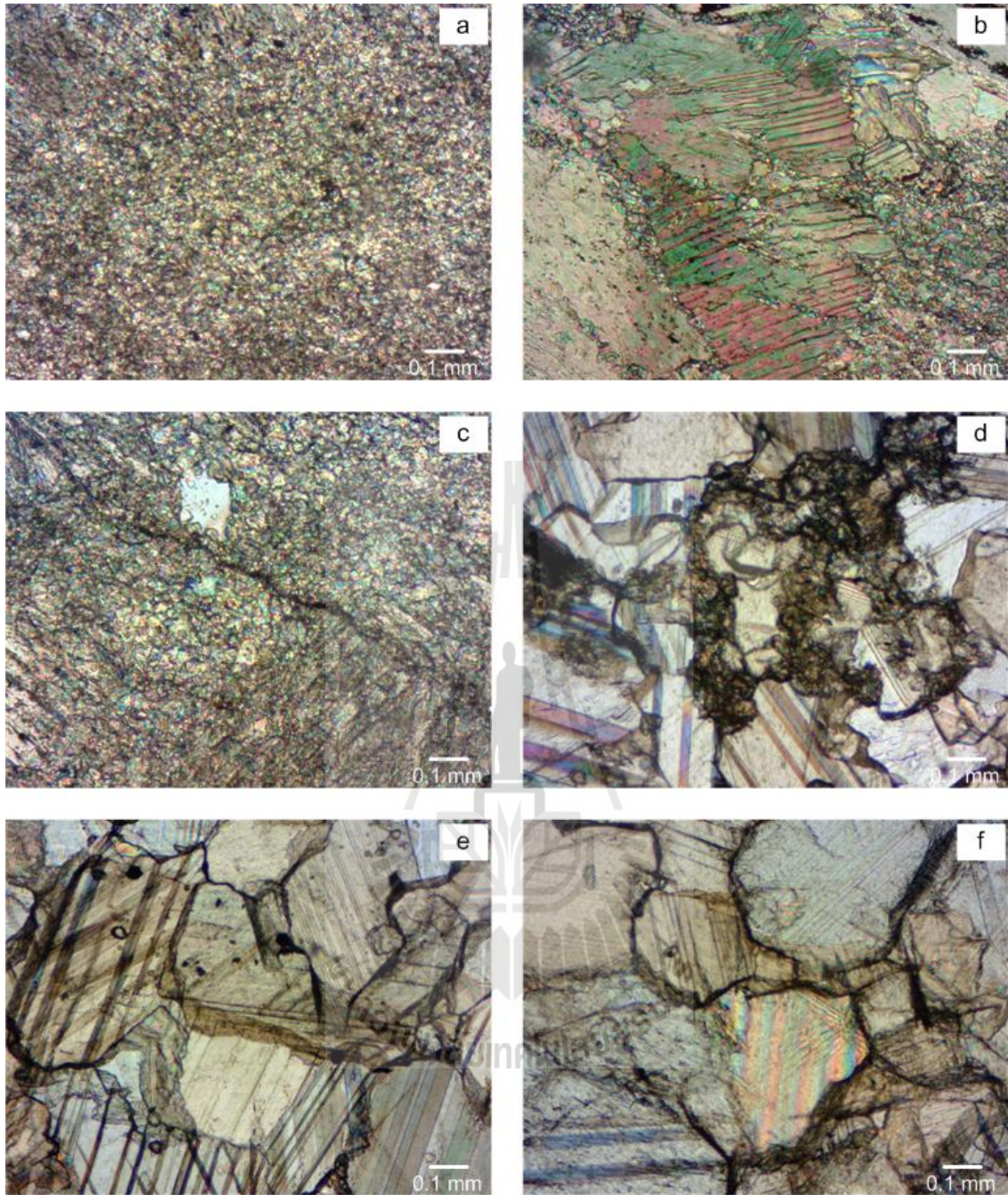
รูปที่ 4.6 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด F-sparse biomicrite



รูปที่ 4.7 ลักษณะจุลภาคของหินปูนชนิด J-sparse biomicrite



รูปที่ 4.8 ลักษณะจุลภาคของหินอ่อน (MA 1): brownish grey marble



รูปที่ 4.9 ลักษณะจุลภาคของหินอ่อน (MA2): white marble

การจำแนกหินปูนตามแบบของ Folk (ดูรูปที่ 1.2) จะแบ่งได้เป็นสามกลุ่มหลักคือ 1) micrite (เนื้อพื้นเป็น lime-mud matrix), 2) poorly washed sparite (มีเนื้อพื้นเป็น lime-mud matrix และ spar cement) และ 3) sparite (มีเนื้อพื้นเป็น spar cement) หินตัวอย่างที่ทำการศึกษาครั้งนี้จัดอยู่ในกลุ่ม micrite ได้แก่ชนิด B-sparse biomicrite, ชนิด C-micrite, ชนิด D-micrite, ชนิด F-sparse biomicrite และ ชนิด J-sparse biomicrite และที่เหลือถูกจัดอยู่ในกลุ่ม poorly washed sparite คือ ชนิด A-poorly washed biosparite และชนิด E-poorly washed intrasparite แต่ไม่มีหินปูนชนิดใดที่สามารถจัดอยู่ในกลุ่ม sparite เนื่องจากไม่พบว่ามีเนื้อพื้นทั้งหมดเป็นผลึกแร่แคลไซต์

ส่วนลักษณะจุลภาคของหินอ่อนชนิด MA1 แสดงขนาดผลึกเล็กถึงปานกลาง เห็นลักษณะของเม็ดตะกอนคาร์บอเนตดั้งเดิมที่ถูกแปรสภาพ แนวแตกเรียบในบางผลึกมีการหักงอ ลักษณะผลึกแผดเบี้ยว (bending twin lamellae) อาจชี้ว่ามีการแปรสภาพในระดับไม่สูงมาก แร่แคลไซต์ยังไม่ตกผลึกใหม่หมด และมีการปะปนของแร่ชนิดอื่นอยู่ ต่างจากหินอ่อนชนิด MA2 ซึ่งแสดงผลึกแร่แคลไซต์ทั้งหมด ลักษณะของเนื้อพื้นที่เป็นแร่แคลไซต์ทั้งหมดนี้ ทำให้หินอ่อนมีลักษณะคล้ายหินปูนในกลุ่ม sparite แต่อย่างไรก็ตามหินปูนและหินอ่อนมีความแตกต่างของลักษณะผลึกและกระบวนการเกิด

4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมี

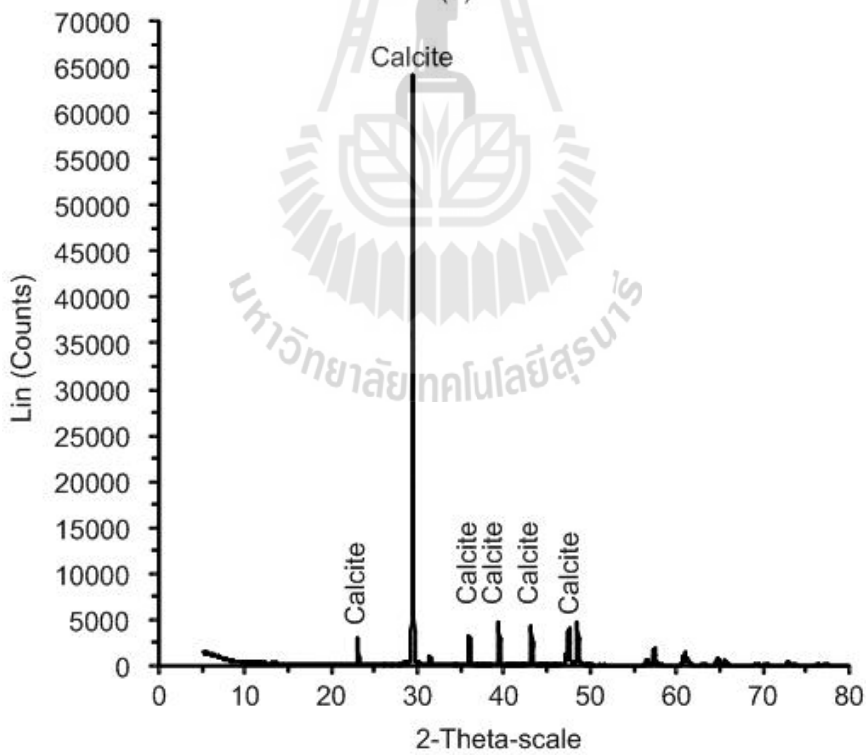
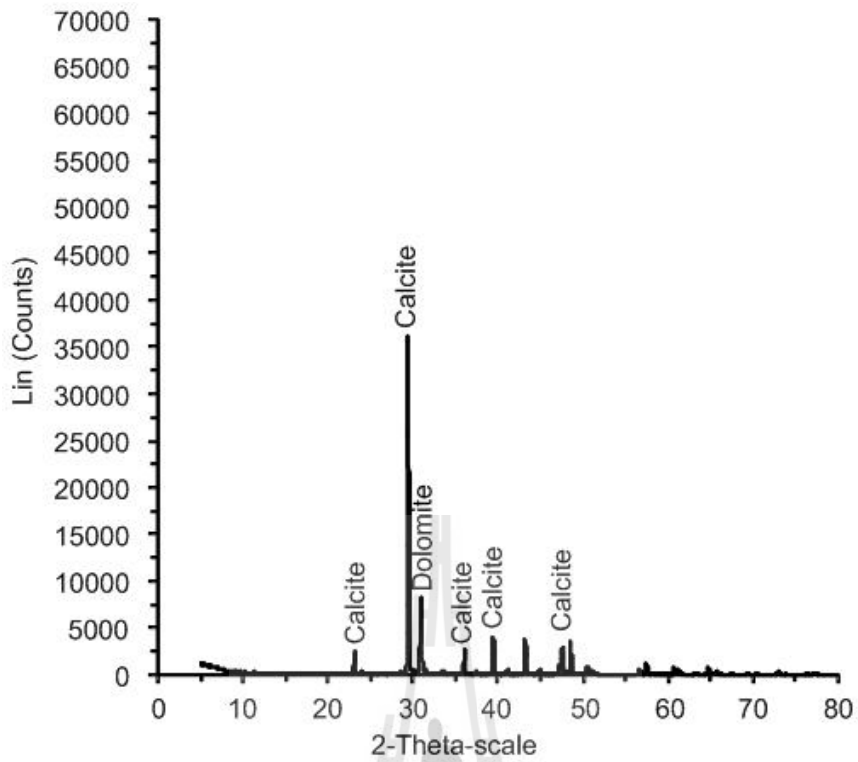
การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของตัวอย่างหินที่ทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อทราบถึงชนิดของแร่องค์ประกอบที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยทั่วไปหินปูนและหินอ่อนควรมีแร่แคลไซต์เป็นแร่ประกอบหลัก แต่เนื่องจากหินปูนเกิดจากการสะสมตัวของตะกอนคาร์บอเนตในทะเล จึงอาจมีการสะสมตัวของอินทรีย์สาร หรือการตกผลึกของแร่ชนิดอื่นร่วมด้วย การปรากฏและปริมาณของแร่อื่นที่อยู่ในเนื้อหินอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของหินด้วย ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เทคนิค X-ray Diffraction ด้วยเครื่องมือ X-ray Diffractometer และวิเคราะห์ข้อมูลธาตุที่พบด้วยโปรแกรม Topaz ซึ่งทั้งหมดดำเนินการโดยห้องปฏิบัติการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10-4.14

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ตัวอย่างหินทั้งหมดประกอบด้วยแร่แคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณร้อยละ 79 ถึง 100 ของน้ำหนัก แร่ที่มีปริมาณรองลงมาคือโดโลไมต์ (dolomite) ประมาณร้อยละ 0.20 ถึง 20 ของน้ำหนัก แร่ควอตซ์ (quartz) พบในปริมาณร้อยละ 0.02-6.71 ของน้ำหนัก และกลุ่มแร่ดินเหนียว (clay minerals) พบในปริมาณไม่เกินร้อยละ 5 ของน้ำหนัก แร่เหล็กออกไซด์และซัลไฟด์พบในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 ของน้ำหนัก โดยมีข้อสังเกต ดังนี้

- หินปูนชนิด A มีแร่โดโลไมต์เจือปนอยู่ถึงร้อยละ 19.46 ของน้ำหนัก และแร่กลุ่มดินเหนียวร้อยละ 1 ของน้ำหนัก

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของหินตัวอย่าง ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

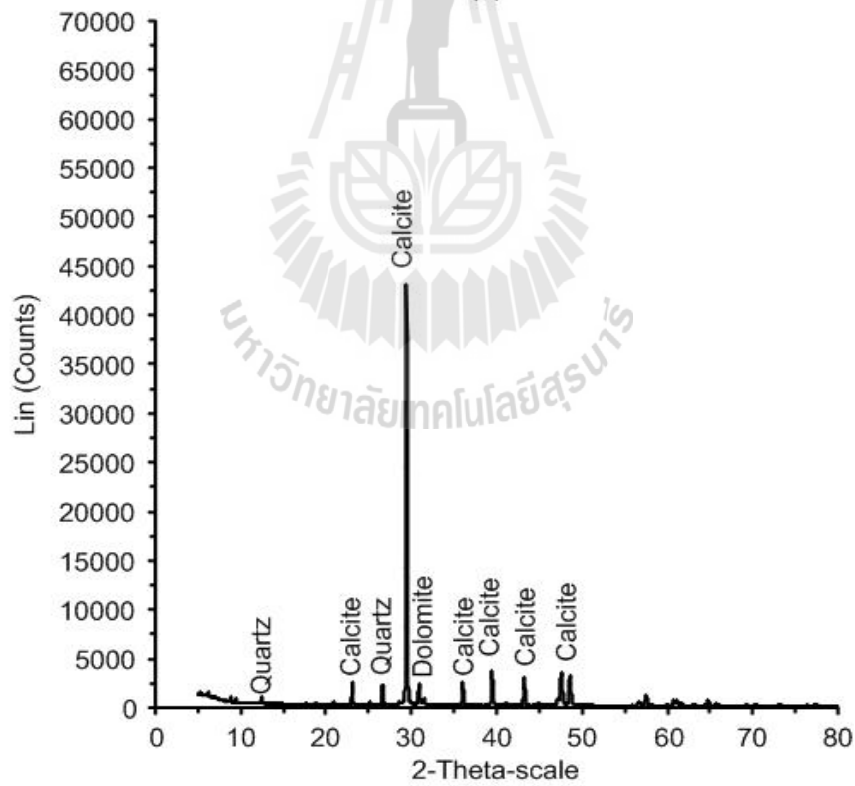
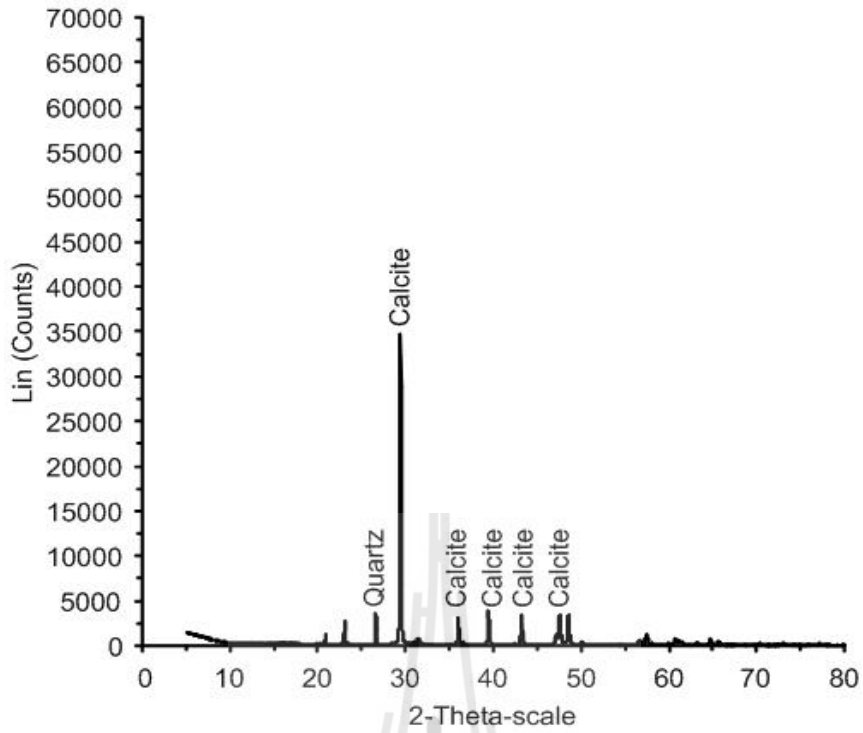
Rock type	Type	Dunham's classification	Folk's classification	Chemical composition (weight %)				
				calcite	dolomite	quartz	siderite & pyrite	clay minerals
Limestone	A	wackstone	poorly washed biosparite	79.18	19.46	0.27	0.01	1.09
	B	wackstone	sparse biomicrite	99.03	0.20	0.08	0.02	0.67
	C	mudstone	micrite	91.45	1.30	6.17	0.02	1.06
	D	mudstone	micrite	85.16	5.90	3.89	0.32	4.73
	E	wackstone	poorly washed intrasparite	98.48	0.75	0.02	0.00	0.75
	F	mudstone	sparse biomicrite	95.08	2.18	1.29	0.13	1.32
	J	wackstone	sparse biomicrite	88.70	8.58	0.62	0.16	1.94
Marble	MA1	brownish grey marble	brownish grey marble	98.48	0.31	0.10	0.12	0.67
	MA2	white marble	white marble	100	-	-	-	-



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray diffraction

(a) หินปูนชนิด A

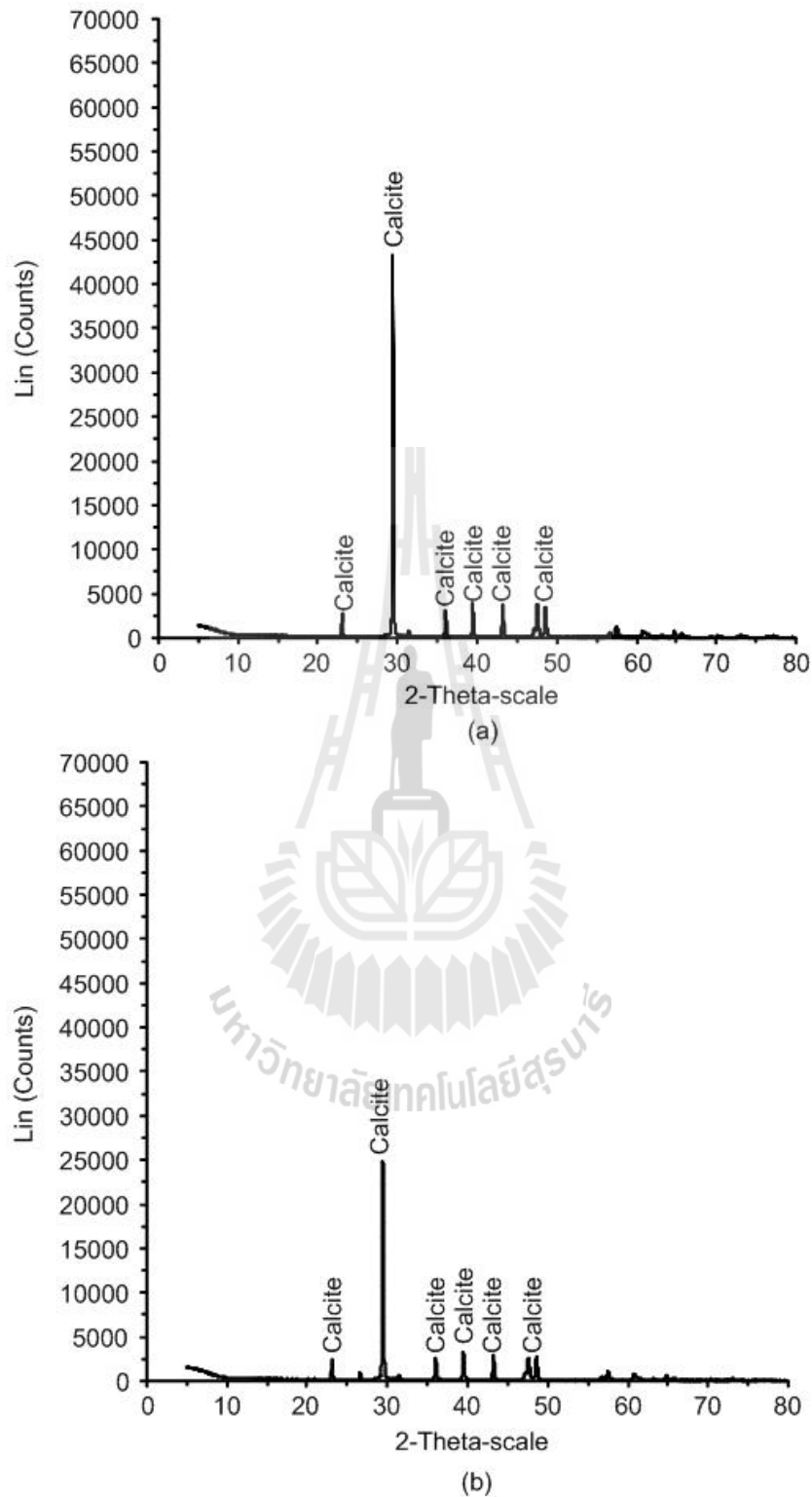
(b) หินปูนชนิด B



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray diffraction

(a) หินปูนชนิด C

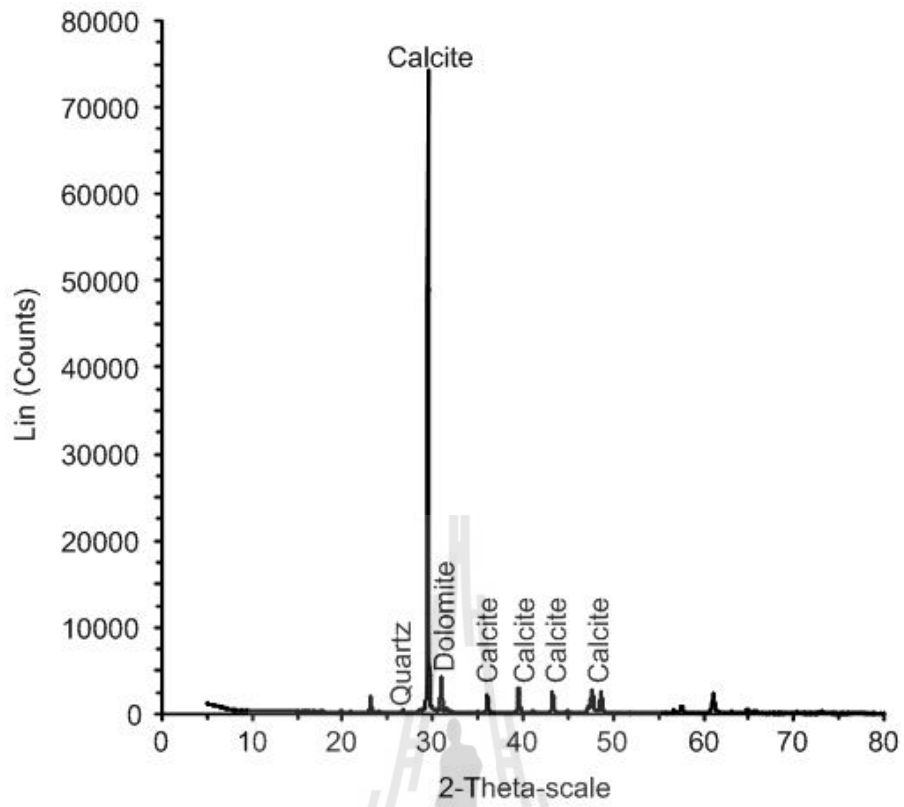
(b) หินปูนชนิด D



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray diffraction

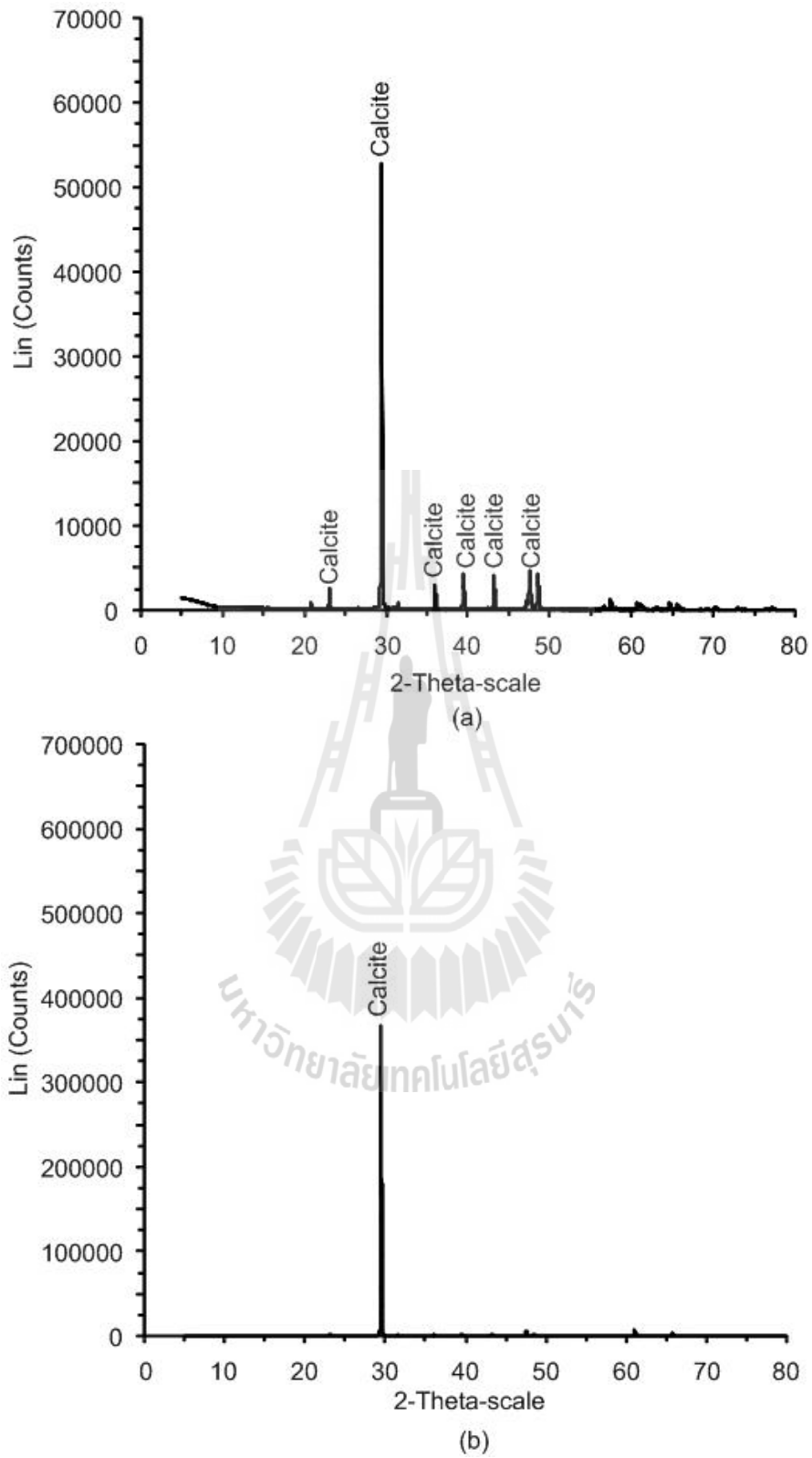
(a) หินปูนชนิด E

(b) หินปูนชนิด F



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray diffraction ของหินปูนชนิด J





รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray diffraction

(a) หินอ่อนชนิด MA1

(b) หินอ่อนชนิด MA2

- หินปูนชนิด C มีแร่ควอตซ์เจือปนอยู่ถึงร้อยละ 6.17 ของน้ำหนัก แร่กลุ่มดินเหนียวและโดโลไมต์ประมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนัก
- หินปูนชนิด D มีแร่โดโลไมต์เจือปนอยู่ถึงร้อยละ 5.90 ของน้ำหนัก แร่กลุ่มดินเหนียว (illite, montmorillonite, kaolinite) รวมร้อยละ 4.73 ของน้ำหนัก และแร่ควอตซ์ร้อยละ 3.89 ของน้ำหนัก
- หินปูนชนิด F มีแร่โดโลไมต์เจือปนอยู่ถึงร้อยละ 2.18 ของน้ำหนัก แร่กลุ่มดินเหนียวร้อยละ 1.32 ของน้ำหนัก และแร่ควอตซ์ร้อยละ 1.29 ของน้ำหนัก
- หินปูนชนิด มีแร่โดโลไมต์เจือปนอยู่ถึงร้อยละ 8.58 ของน้ำหนัก และแร่กลุ่มดินเหนียวร้อยละ 1.94 ของน้ำหนัก
- หินอ่อนชนิด MA1 มีปริมาณแคลไซต์ร้อยละ 98.48 ของน้ำหนัก



บทที่ 5

การศึกษาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์

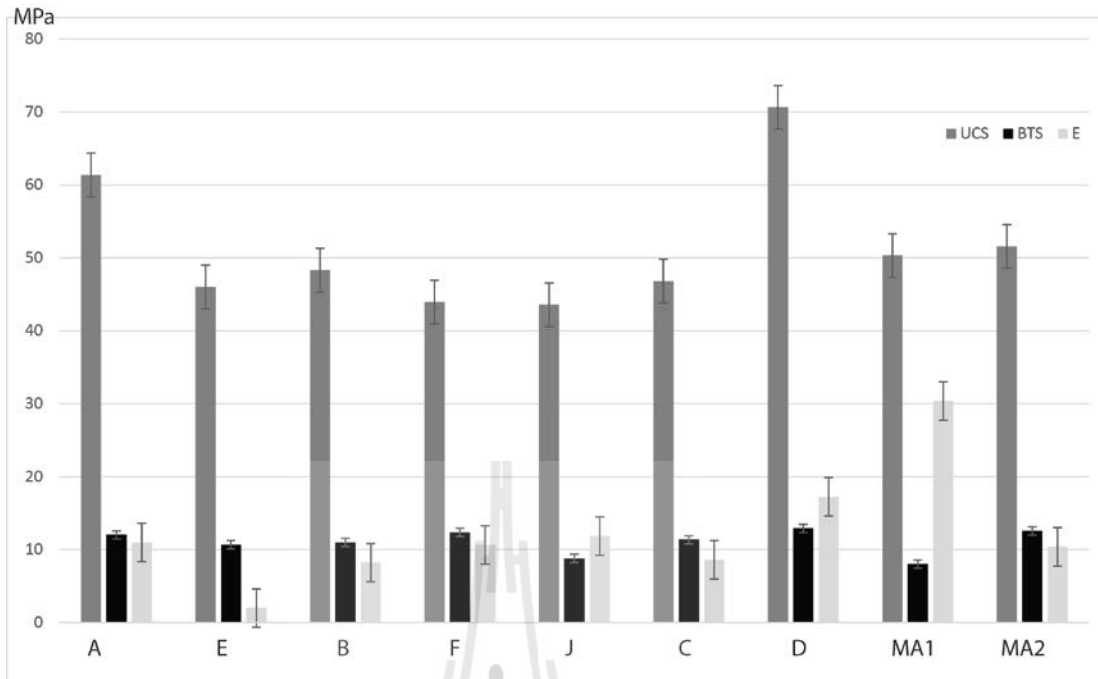
เนื้อหาในบทนี้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบกับลักษณะทางศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างหิน คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด (σ_c) ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน (σ_B) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (I_d) และค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (LAAI)

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และลักษณะทางศิลาวิทยา

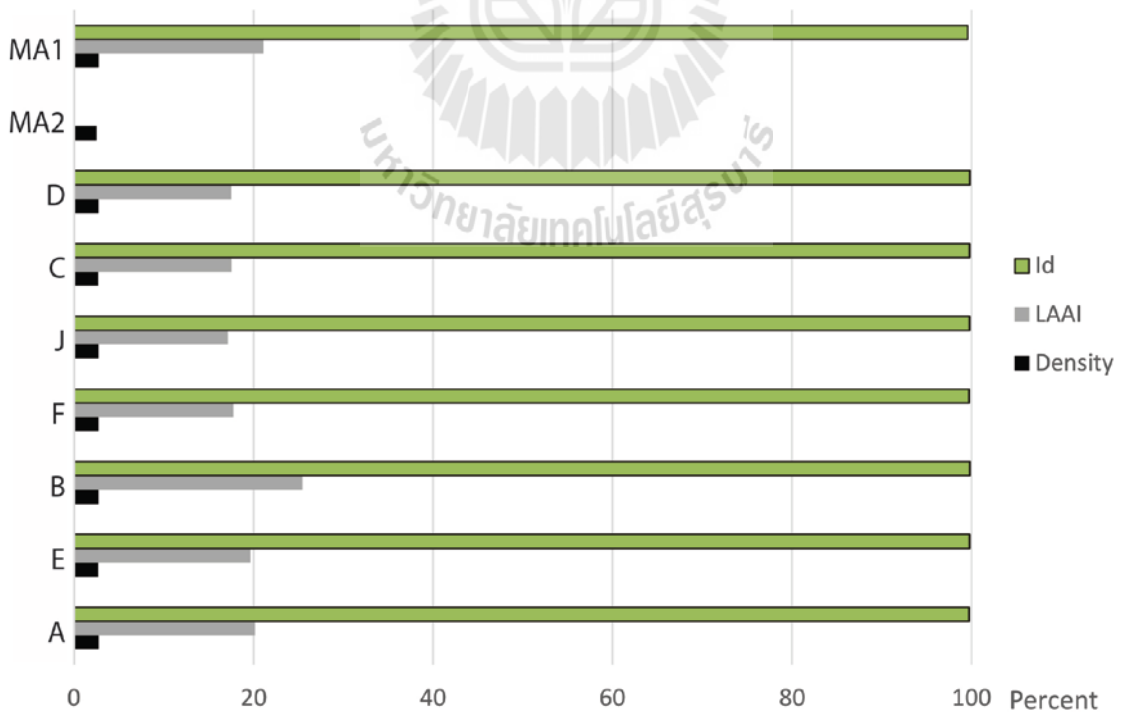
การศึกษาศิลาวิทยาของหินปูนทำให้สามารถจำแนกตามแบบของ Folk (1959; 1962) ออกเป็นสองกลุ่ม คือ 1) กลุ่มที่มีเนื้อพื้นเป็น lime mud เรียกว่า micrite ได้แก่ชนิด B-sparse biomicrite, ชนิด C-micrite, ชนิด D-micrite, ชนิด F-sparse biomicrite และ ชนิด J-sparse biomicrite และ 2) กลุ่มที่มีเนื้อพื้นเป็น lime mud และ spar cement เรียกว่า poorly washed sparite คือชนิด A-poorly washed biosparite และชนิด E-poorly washed intrasparite ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และลักษณะศิลาวิทยาของหินปูน จึงใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณของ spar cement (sparite) ต่อ lime-mud matrix (micrite) เป็นพารามิเตอร์เปรียบเทียบ (ดูตารางที่ 4.1)

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์พบว่า สำหรับหินปูน กำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) มีค่าระหว่าง 43.55-70.65 MPa ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มมวลหินแข็งระดับปานกลางถึงระดับแข็ง (medium strong to strong) ตามเกณฑ์การจำแนกของ BS EN ISO 14689-1:2003 (British Standards Institution 2003) และ ISRM (1981) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) อยู่ระหว่าง 2.00-17.24 GPa ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน (σ_B) มีค่าระหว่าง 8.80-12.93 MPa (รูปที่ 5.1) ค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (LAAI) อยู่ระหว่างร้อยละ 17.13-25.47 และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (I_d) มีค่ามากกว่าร้อยละ 99 โดยตัวอย่างหินทุกชนิดมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2.66-2.74 g/cm³ (รูปที่ 5.2)

สำหรับหินอ่อน ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) มีค่าระหว่าง 50.30-51.56 MPa ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) อยู่ระหว่าง 10.40-30.39 GPa ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน (σ_B) มีค่าระหว่าง 8.01-12.55 MPa (รูปที่ 5.1) ค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (LAAI) ของตัวอย่าง MA2 คือร้อยละ 21.11 และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (I_d) มีค่ามากกว่าร้อยละ 99 โดยตัวอย่างหินทั้งสองชนิดมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2.65-2.74 g/cm³ (รูปที่ 5.2)



รูปที่ 5.1 ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (UCS) ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน (BTS) และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E-หน่วยเป็น GPa) ของตัวอย่างหินปูนและหินอ่อนที่ทดสอบ



รูปที่ 5.2 ความหนาแน่น (density) ค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (LAAI) และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (I_d) ของตัวอย่างหินปูนและหินอ่อนที่ทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่าหินปูนชนิด D-micrite (sparite/micrite=0.01) มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียนและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูงสุดคือ 70.65, 12.93, 17.24 MPa ตามลำดับ มีค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน เท่ากับร้อยละ 99.80 และค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ เท่ากับร้อยละ 17.50 หินปูนชนิดนี้มีลักษณะทางศิลาวิทยาคือมีเนื้อพื้นเป็น lime mud ซึ่งภายใต้กล้องจุลทรรศน์ แสดงลักษณะของการตกผลึกใหม่เป็นผลึกแคลไซต์ขนาดเล็ก เรียกว่า micro spar มี allochem ปริมาณน้อย แร่กลุ่มดินเหนียวสามารถมองจากกล้องจุลทรรศน์ได้ชัดเจน ส่วนคุณสมบัติทางเคมีคือมีแร่โดโลไมต์เจือปนอยู่ถึงร้อยละ 5.90 ของน้ำหนัก แร่กลุ่มดินเหนียว (illite, montmorillonite, kaolinite) รวมร้อยละ 4.73 ของน้ำหนัก และแร่ควอตซ์ร้อยละ 3.89 ของน้ำหนัก (ตารางที่ 5.1)

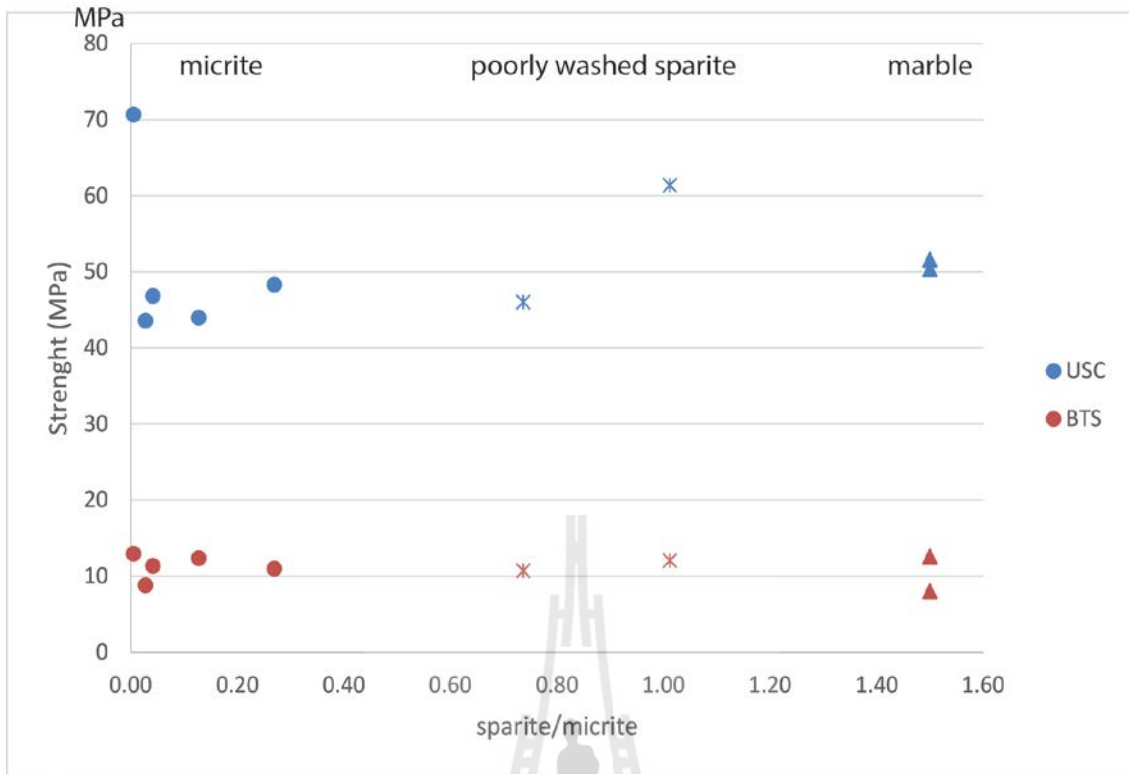
หินปูนชนิด A-poorly washed biosparite (sparite/micrite=1.01) มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียนและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 61.35, 12.03, 10.98 MPa ตามลำดับ มีค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน เท่ากับร้อยละ 99.72% และค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ เท่ากับร้อยละ 20.11 หินปูนชนิดนี้มีลักษณะทางศิลาวิทยาคือ เนื้อพื้นที่เป็น lime mud แสดงการตกผลึกใหม่เป็นเนื้อพื้นแบบ spar cement มี allochem ปริมาณมาก พบว่าการตกผลึกใหม่ของแคลไซต์พบในโครงสร้างของซากบรรพชีวินขนาดใหญ่ (ฟิวซิลินิด) คุณสมบัติทางเคมีคือมีแร่โดโลไมต์เจือปนอยู่ร้อยละ 19.46 ของน้ำหนัก และแร่กลุ่มดินเหนียวร้อยละ 1 ของน้ำหนัก (ดูตารางที่ 5.1)

หินปูนชนิดอื่นๆ (sparite/micrite=0.03-0.74) มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดต่ำกว่า 50 MPa (43.55-48.31 MPa ดูตารางที่ 5.1) โดยลักษณะของหินเมื่อมองภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ได้แสดงลักษณะของหินปูนทั่วไปคือ มีส่วน allochem และ matrix ซึ่งอาจเป็น lime mud หรือ spar cement ซึ่งอาจเกิดร่วมกันในสัดส่วนที่แตกต่าง allochem อาจเป็นเศษหินหรือซากบรรพชีวินก็ได้ หากเป็นซากบรรพชีวินที่มีขนาดใหญ่ มักพบว่าเกิดการตกผลึกของแคลไซต์ แต่หากมีขนาดเล็กมักจะอยู่ในรูปของ mud ในส่วนของ matrix พบว่าอาจมีการตกผลึกใหม่เป็น micro spar ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า spar cement มาก แร่กลุ่มดินเหนียวและแร่โดโลไมต์สามารถมองเห็นได้ และนอกจากนี้ ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ยังมองเห็นโครงสร้างรอยแตกขนาดเล็กในหินปูน ในหลายทิศทาง ที่ถูกเติมเต็มด้วยแร่แคลไซต์ จึงทำให้เนื้อหินประสานกันแน่น ไม่ปรากฏว่าเป็นรอยแยกในเนื้อหินแต่อย่างใด นอกจากนี้พบรอยฟันในหิน (stylolite) สามารถสังเกตเห็นได้จากลักษณะคราบสีน้ำตาลแดง ฝังอยู่ในเนื้อหิน โดยไม่แสดงความไม่ต่อเนื่องในเนื้อหิน ในขณะที่หินอ่อน MA1 และ MA2 ซึ่งมีลักษณะเนื้อหินเป็นผลึกแร่แคลไซต์ขนาดละเอียดถึงปานกลาง มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดเท่ากับ 50.30 และ 51.56 MPa ตามลำดับ และทั้งหินปูนและหินอ่อนมีค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียนอยู่ระหว่าง 8.01-12.55 MPa เนื่องจากหินอ่อนประกอบด้วยผลึกแคลไซต์ จึงไม่สามารถหาอัตราส่วน sparite/micrite ได้ ในการพล็อตข้อมูลลงในกราฟจึงใช้ค่า 1.5 เพื่อให้แยกออกจากหินปูนอย่างชัดเจน ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกลศาสตร์และลักษณะทางศิลาวิทยาของหินที่ทำการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4

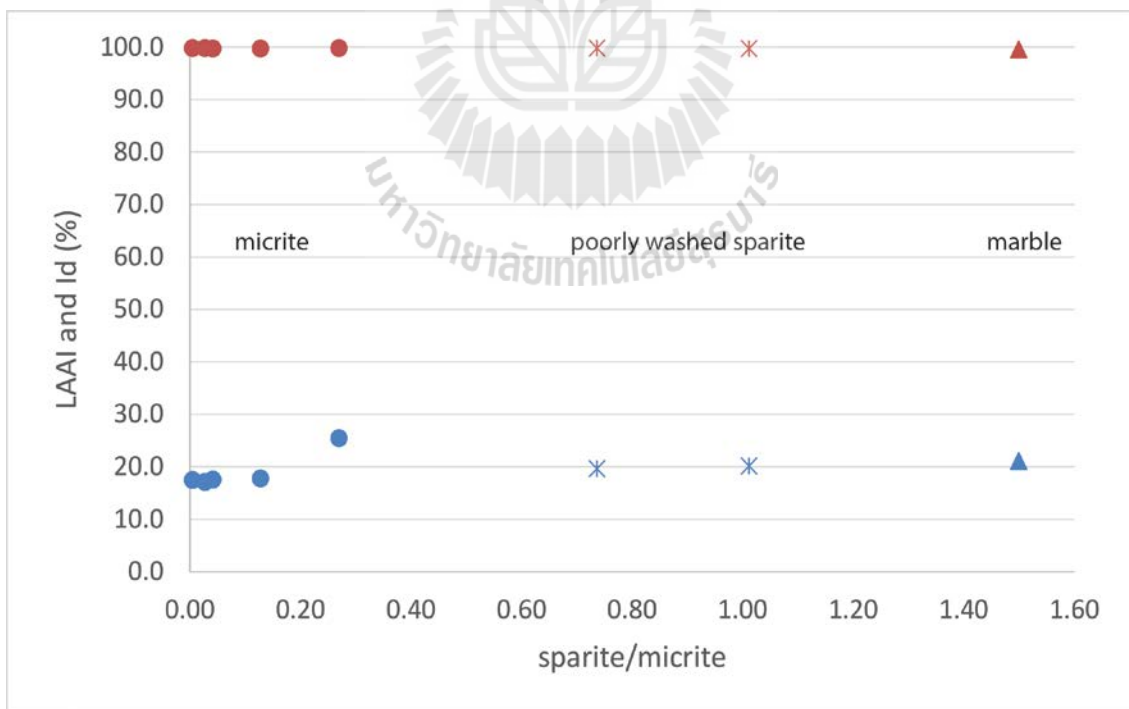
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบลักษณะเนื้อหินปูน คุณสมบัติทางเคมีและค่ากำลังรับแรงกดสูงสุด

Type	Dunham's classification	Folk's classification	Chemical composition (weight %)						Strength	
			calcite	dolomite	quartz	Fe-min	clay minerals	Impurity*	UCS (MPa)	Rock mass classification (BSI 2003)
D	mudstone	micrite	85.16	5.90	3.89	0.32	4.73	14.84	70.65	Strong
A	wackstone	poorly washed biosparite	79.18	19.46	0.27	0.01	1.09	20.28	61.35	Strong
MA2	white marble	white marble	100	-	-	-	-		51.56	Strong
MA1	brownish grey marble	brownish grey marble	98.48	0.31	0.10	0.12	0.67	1.52	50.30	Strong
B	wackstone	sparse biomicrite	99.03	0.20	0.08	0.02	0.67	0.97	48.31	Medium strong
C	mudstone	micrite	91.45	1.30	6.17	0.02	1.06	8.55	46.82	Medium strong
E	wackstone	poorly washed intrasparite	98.48	0.75	0.02	0.00	0.75	1.52	46.01	Medium strong
F	mudstone	sparse biomicrite	95.08	2.18	1.29	0.13	1.32	4.92	43.95	Medium strong
J	wackstone	sparse biomicrite	88.70	8.58	0.62	0.16	1.94	11.30	43.55	Medium strong

* Impurity คือ ร้อยละขององค์ประกอบที่ไม่ใช่แคลไซต์



รูปที่ 5.3 อัตราส่วน sparite/micrite เปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (UCS) ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน (BTS) ของตัวอย่างหินปูนและหินอ่อนที่ทดสอบ

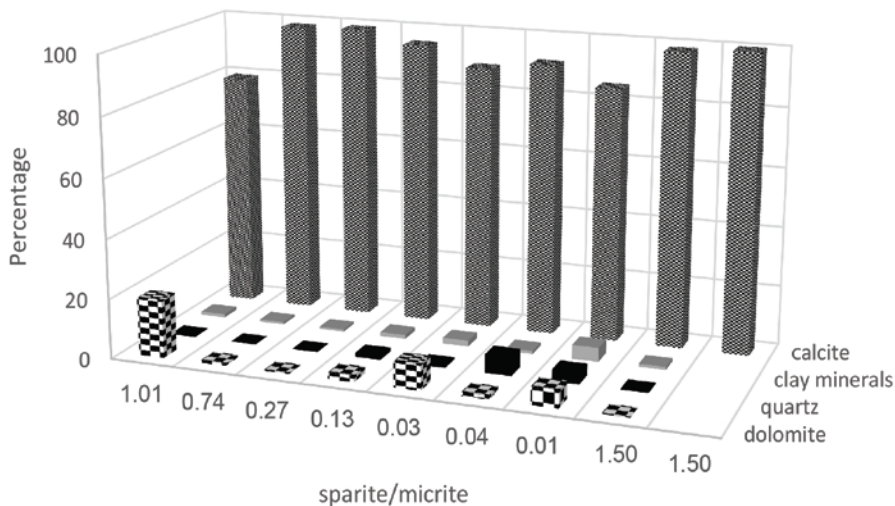


รูปที่ 5.4 อัตราส่วน sparite/micrite เปรียบเทียบกับค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (LAI) และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (I_d) ของตัวอย่างหินปูนและหินอ่อนที่ทดสอบ

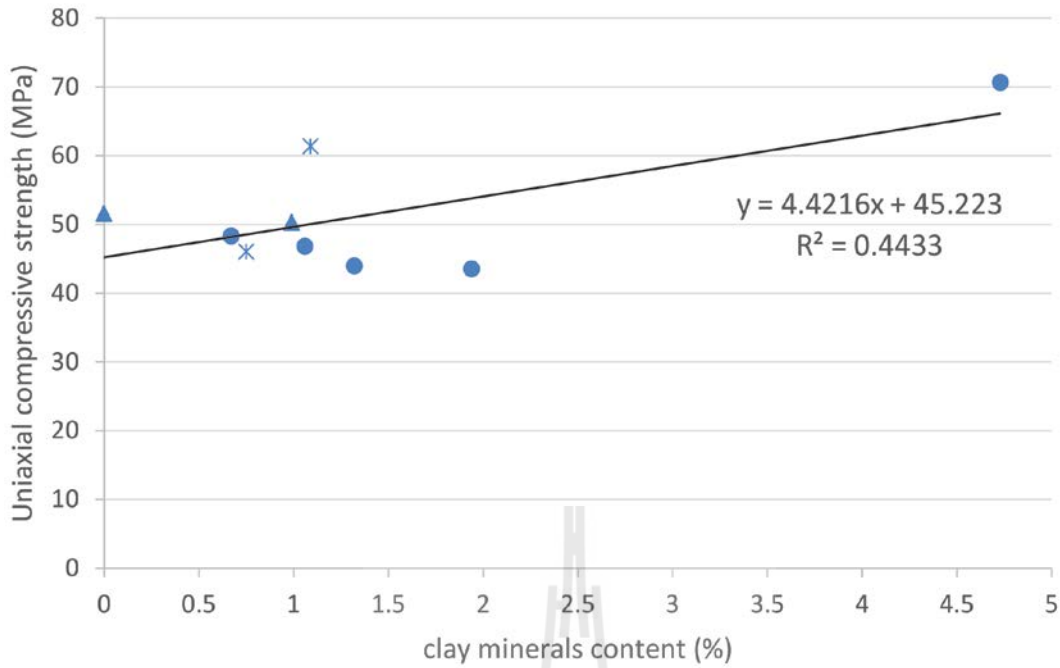
จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 อาจกล่าวได้ว่า micrite และ poorly washed sparite มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวเป็นช่วงกว้าง โดย micrite อาจแปรผันและสูงกว่า 70 MPa ในขณะที่ poorly washed sparite มีค่าสูงสุดประมาณ 60 MPa สำหรับค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน ค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนแปรผันอยู่ในช่วงแคบ และไม่มี ความแตกต่างกันมากนัก จึงอาจสรุปได้ว่าปริมาณของ lime-mud matrix (micrite) และ spar cement (sparite) ไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งของหินปูนที่ทดสอบ แต่ micrite มีแนวโน้มที่จะแข็งกว่า poorly washed sparite ส่วนหินอ่อนซึ่งมีลักษณะเนื้อหินแบบผลึก พบว่ามีความแข็งอยู่ระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับหินปูนทั้งสองแบบ

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และองค์ประกอบเคมี

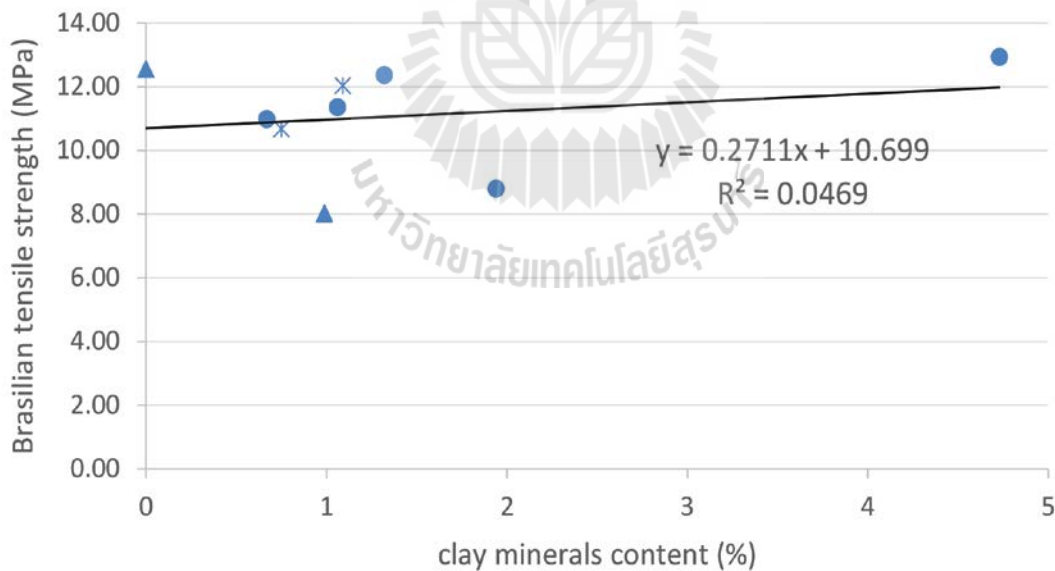
หินปูนและหินอ่อนเป็นหินกลุ่มคาร์บอเนต (carbonate rock) ซึ่งมีแร่แคลไซต์องค์ประกอบหลัก ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และองค์ประกอบเคมี จึงได้พิจารณาปริมาณของแคลไซต์และปริมาณของแร่ประกอบอื่นร่วมด้วย (ดูตารางที่ 4.2 และรูปที่ 5.5) จากการทดสอบพบว่าหินปูนชนิด A และ D ซึ่งมี sparite/micrite เท่ากับ 1.01 และ 0.01 ตามลำดับ มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวสูงถึง 61.35 และ 70.65 MPa แต่ผลการวิเคราะห์เคมีกลับพบว่า ตัวอย่างหินทั้งสองมีปริมาณแร่แคลไซต์ร้อยละ 79.18 และ 85.16 ของน้ำหนัก และมีการเจือปนของแร่อื่น อาทิ โดโลไมต์ ควอตซ์และกลุ่มแร่ดินเหนียว เมื่อหาความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว พบว่าปริมาณของกลุ่มแร่ดินเหนียว (clay minerals) มีความสัมพันธ์ใกล้ขีดที่สุด กล่าวคือ เมื่อปริมาณร้อยละของแร่ดินเหนียวเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวสูงขึ้น (รูปที่ 5.6) แต่ปริมาณของแร่ดินเหนียวไม่ได้แสดงผลกระทบที่ชัดเจนต่อค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียน (รูปที่ 5.7)



รูปที่ 5.5 ปริมาณแร่ประกอบหลักในตัวอย่างหินปูนและหินอ่อนที่ทำการศึกษา

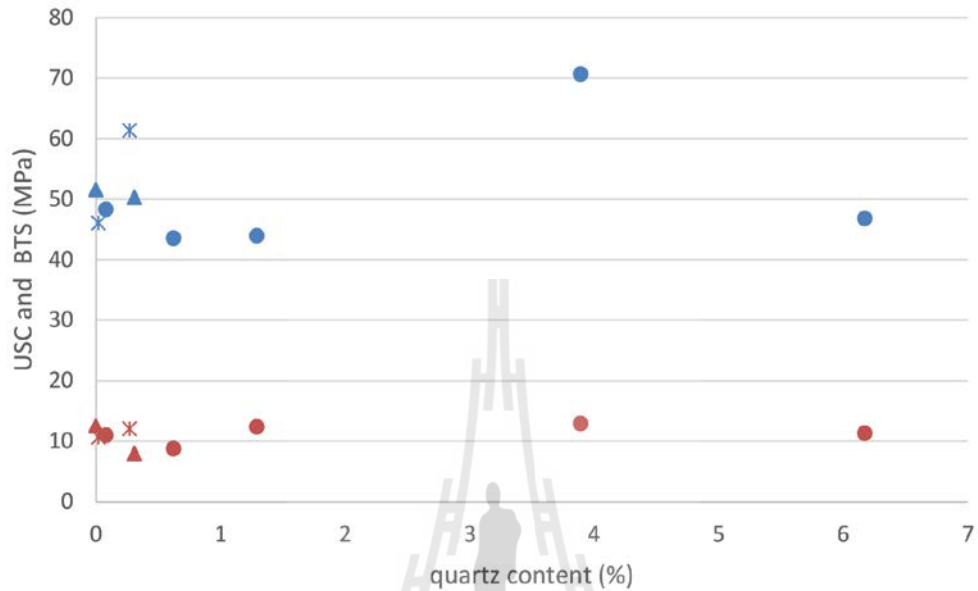


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและปริมาณของแร่กลุ่มดินเหนียว (สัญลักษณ์ จุดแทน micrite; ดาวแทน poorly washed sparite; สามเหลี่ยมแทน marble)

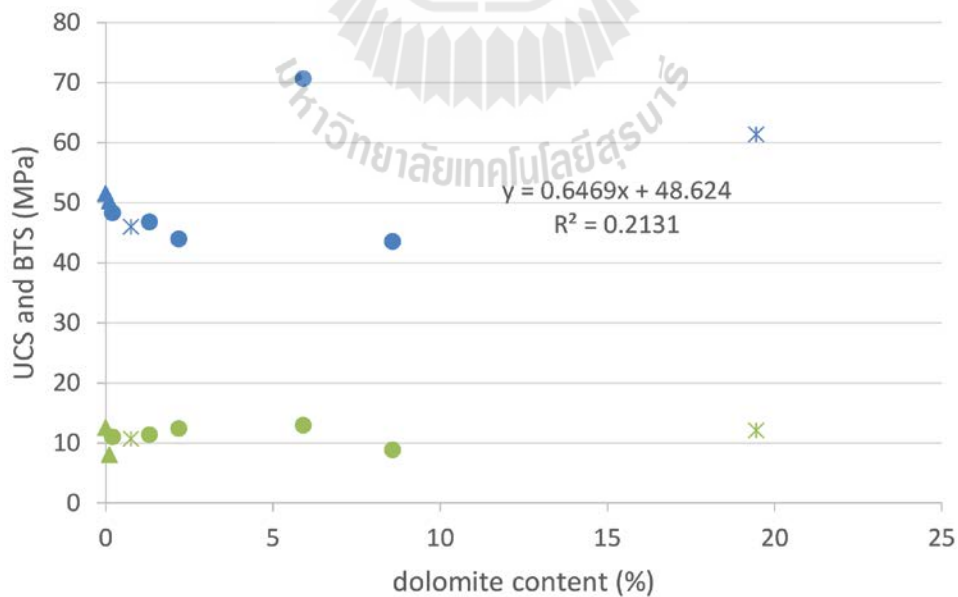


รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดแบบบราซิลเลียนและปริมาณของแร่กลุ่มดินเหนียว (สัญลักษณ์ จุดแทน micrite; ดาวแทน poorly washed sparite; สามเหลี่ยมแทน marble)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และปริมาณของแร่ควอตซ์ ซึ่งพบในตัวอย่างหินผกแปรตั้งแต่ร้อยละ 0.10 ถึง 6.17 และแร่โดโลไมต์ซึ่งพบในปริมาณร้อยละ 0.20 ถึง 19.46 ไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจน (รูปที่ 5.8-5.9)

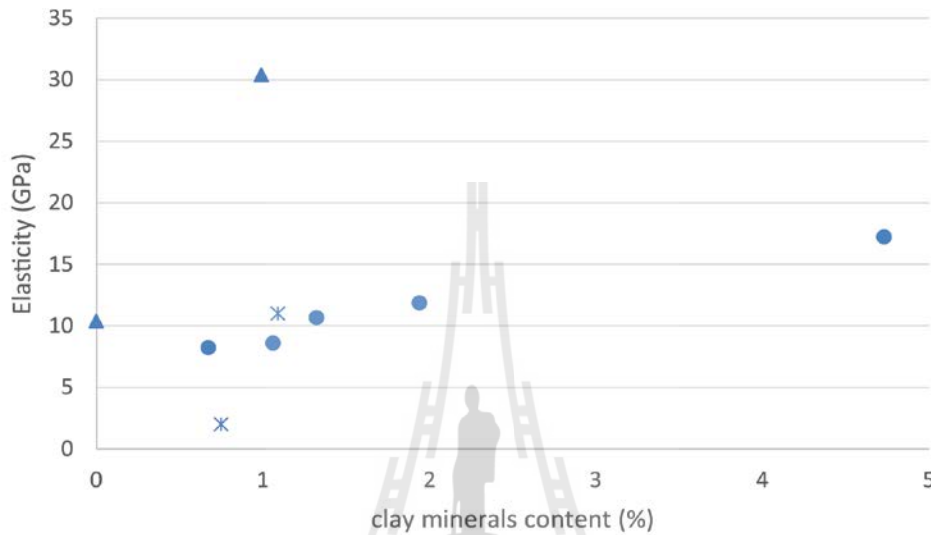


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและปริมาณของแร่ควอตซ์ (สัญลักษณ์จุดแทน micrite; ดาวแทน poorly washed sparite; สามเหลี่ยมแทน marble)

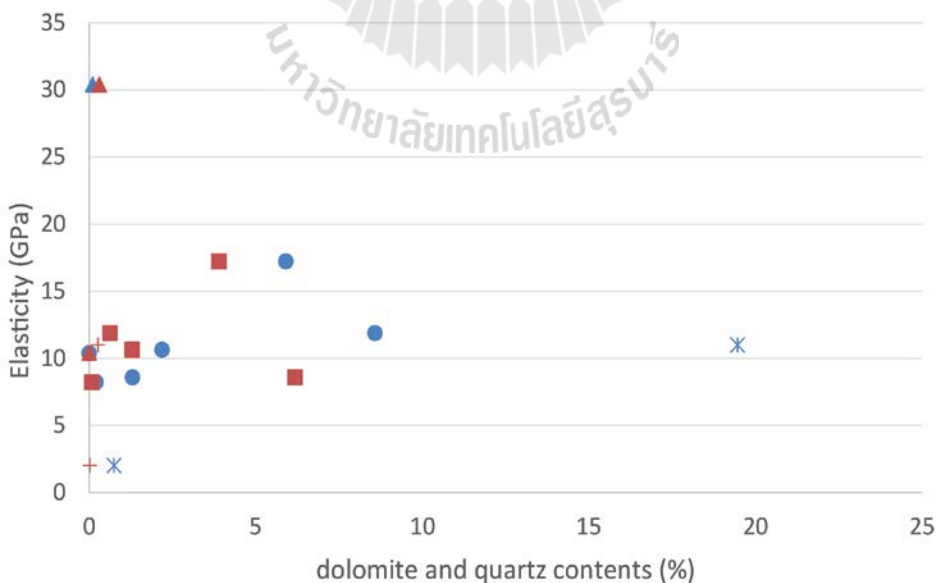


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและปริมาณของแร่โดโลไมต์ (สัญลักษณ์จุดแทน micrite; ดาวแทน poorly washed sparite; สามเหลี่ยมแทน marble)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น พบว่าปริมาณร้อยละของแร่กลุ่มดินเหนียว มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเฉพาะในกลุ่มหินปูน โดยเมื่อปริมาณร้อยละของแร่ดินเหนียวเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้นในลักษณะของสมการเชิงเส้น (รูปที่ 5.10) ด้วยความสัมพันธ์ $y = 0.2519x - 0.8521$, $R^2 = 0.6623$ แต่ปริมาณของแร่ควอตซ์และโดโลไมต์ไม่มีความสัมพันธ์ชัดเจนกับค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (รูปที่ 5.11)



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและปริมาณของแร่กลุ่มดินเหนียว (สัญลักษณ์จุดแทน micrite; ดาวแทน poorly washed sparite; สามเหลี่ยมแทน marble)



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและปริมาณของโดโลไมต์และควอตซ์ (micrite แสดงด้วยจุด (ควอตซ์) และสี่เหลี่ยม (โดโลไมต์); poorly washed sparite แสดงด้วยดาว (ควอตซ์) และเครื่องหมายบวก (โดโลไมต์); สามเหลี่ยมแทน marble)

จากผลการทดสอบในครั้งนี้ หินปูนชนิด D-micrite มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นสูงสุด และพบว่ามีแร่ดินเหนียวปริมาณร้อยละ 4.73 ซึ่งสูงที่สุดเช่นกัน ดังนั้นจึงอาจคาดการณ์ได้ว่า ปริมาณของแร่ดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามปริมาณของแร่กลุ่มดินเหนียว ไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนต่อค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน และค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ เนื่องจากดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนมีค่าระหว่างร้อยละ 99-99.81 และค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ มีค่าระหว่างร้อยละ 17.31-25.47 ส่วนหินอ่อน (MA2) ซึ่งมีปริมาณแร่แคลไซต์สูงเกือบร้อยละ 100 พบว่า ค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนและค่าความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบของหินอ่อนใกล้เคียงกับหินปูน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ปริมาณแร่กลุ่มดินเหนียว โดโลไมต์และควอตซ์ ซึ่งปนอยู่ในหินปูนที่ทดสอบไม่ส่งผลกระทบต่อความคงทนและความสึกหรอของตัวอย่างหิน โดยมีค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนและค่าความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบไม่แตกต่างจากหินอ่อน (ดูรูปที่ 5.4)



บทที่ 6

บทสรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปและอภิปราย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนที่ทำการทดสอบ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของหิน ทั้งนี้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ที่ทำการศึกษาและทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว (σ_c) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) ค่ากำลังรับแรงกดแบบบราซิลเลียน (σ_B) ค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (I_d) และค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (LAAI) ส่วนลักษณะทางศิลาวิทยาได้ทำการศึกษาแผ่นหินบางภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหินด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) แล้วจึงหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ของหิน

การจำแนกหินปูนในภาคสนามได้กระทำตามรูปแบบการจำแนกของ Dunhams (1962) เพื่อใช้ในการเลือกตัวอย่างหินจากภาคสนาม โดยหินปูนที่เลือกมามีทั้งหมดเจ็ดชนิด ที่มีความแตกต่างของลักษณะภายนอก เช่น เนื้อหิน สีสดของหิน ความถี่ของ calcite vein ซึ่งทั้งหมดเมื่อจำแนกด้วยเกณฑ์ที่เลือกไว้พบว่าอยู่ในกลุ่มของ wackstone (มีชิ้นตะกอน เศษหินหรือซากบรรพชีวิน ประมาณร้อยละ 10-30) และ mudstone (มีชิ้นตะกอน เศษหินหรือซากบรรพชีวิน น้อยกว่าร้อยละ 10) รวมทั้งตัวอย่างหินอ่อนสองชนิดที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน หินเหล่านี้ถูกนำมาเตรียมตัวอย่างเพื่อทำแผ่นหินบาง ทำการทดสอบทางกลศาสตร์และส่งไปวิเคราะห์ทางเคมี

เมื่อศึกษาเนื้อหินโดยละเอียดภายใต้กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ สามารถจำแนกอย่างละเอียดภายใต้กล้องจุลทรรศน์โดยวิธีการจำแนกของ Folk (1959; 1962) ออกเป็นสองลักษณะเนื้อหิน คือ

- กลุ่มที่หนึ่งมีเนื้อหินแบบเนื้อพื้น (matrix) เป็น lime mud เรียกว่า micritic limestone ซึ่งกลุ่มนี้สามารถจำแนกออกเป็นชนิดย่อยตามปริมาณและชนิดของ allochem ออกเป็น sparse biomicrite (มี allochem มากกว่าร้อยละ 10 และส่วนใหญ่เป็นซากดึกดำบรรพ์) และ micrite (มี allochem น้อยกว่าร้อยละ 10)

- กลุ่มที่สองมีเนื้อพื้นเป็น lime mud และ spar cement เรียกว่า poorly washed sparite มีลักษณะที่สังเกตได้คือ เนื้อพื้นส่วนที่เป็น lime mud มีลักษณะละเอียดและทึบแสง แต่บริเวณที่มีการตกผลึกใหม่ของแร่แคลไซต์ ที่เรียกว่า spar cement จะแสดงลักษณะทางแสงของผลึก แร่แคลไซต์อย่างชัดเจน ผลึกแคลไซต์ที่เป็น spar cement มีขนาดละเอียดถึงปานกลาง ผลึกไม่หนา ไม่แสดงแนวแตกเรียบ (cleavage) ขอบผลึกค่อนข้างกลม การตกผลึกเกิดขึ้นทั้งบริเวณที่เคยเป็น lime mud และเกิดการตกผลึกด้านในของซากดึกดำบรรพ์ หินกลุ่มนี้จำแนกเป็น เรียกว่า poorly washed biosparite (allochem เป็นซากดึกดำบรรพ์) และ poorly washed intrasparite (allochem เป็น เศษหิน)

หินอ่อนที่ศึกษามีลักษณะเนื้อแบบผลึก (crystalline texture) ขนาดผลึกละเอียดถึงปานกลาง จำแนกออกเป็นสองชนิดคือ brownish grey marble มีสีน้ำตาลเหลือง เนื้อผลึก เมื่อดูผ่านกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์เห็นลักษณะของเม็ดตะกอนคาร์บอนเนต ซึ่งแต่ละเม็ดเป็นแร่แคลไซต์ที่แสดงแนวแตกเรียบ ซึ่งแนวแตกมีลักษณะหักงอ เบี้ยว อาจกล่าวได้ว่าเป็นหินอ่อนที่ถูกแปรสภาพต่ำมาจากหินปูนดั้งเดิม และมีแร่ชนิดอื่นปนในเนื้อหินด้วย ส่วน white marble เป็นหินอ่อนสีขาว เนื้อผลึก มีผลึกของแร่แคลไซต์ที่มีความหนา แสดงแนวแตกเรียบและลักษณะสีแทรกสอดชัดเจน ซึ่งบ่งบอกว่ามีการตกผลึกใหม่ของแร่อย่างสมบูรณ์ เกิดจากการแปรสภาพในระดับสูงกว่า

การศึกษาศิลาวทยาของหินปูนและหินอ่อนในงานวิจัยนี้ มีข้อสังเกตสามารถสรุปได้ดังนี้

1. หินปูนที่จำแนกด้วยรูปแบบของ Dunhams (1962) และ Folk (1959; 1962) มีความคล้ายคลึงกันคือ mudstone จะเทียบเท่ากับ micrite และ wackstone จะเทียบเท่ากับชนิด sparse micrite หรือ poorly washed spariteตามลำดับ
2. หินปูนชนิด mudstone มีลักษณะเด่นคือมีเม็ดตะกอนปูนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 10 แต่อาจหมายรวมถึงหินปูนที่มีแร่หรือสิ่งเจือปนมาก (หินปูนสกปรก) หรือเป็นหินที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพมาก่อนก็ได้
3. หินปูนชนิด micrite เมื่อศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่าเริ่มมีการตกผลึกของแร่แคลไซต์ขนาดเล็กมาก ที่เรียกว่า micro spar แทนที่ lime mud แต่ขนาดของผลึกแร่เล็กกว่าขนาดของ spar cement

4. ลักษณะเนื้อหินแบบ poorly washed sparite จำแนกได้เฉพาะภายใต้กล้องจุลทรรศน์เท่านั้นเนื่องจาก spar cement ไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า

5. ลักษณะโครงสร้างที่มองเห็นด้วยตาเปล่า เช่น calcite veins และ stylolites เมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าลักษณะดังกล่าวเป็นเนื้อเดียวกับหิน ไม่พบว่าเป็นความไม่ต่อเนื่องในเนื้อหิน แร่แคลไซต์ที่ตกผลึกใน vein อาจมีขนาดผลึกละเอียดถึงปานกลาง

6. สิ่งเจือปนที่สามารถสังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ ได้แก่ แร่โดโลไมต์ แร่กลุ่มดินเหนียว และเศษอินทรีย์วัตถุ

7. หินอ่อนมีลักษณะของแร่แคลไซต์ที่แตกต่างจากหินปูน โดยแร่มีผลึกขนาดใหญ่กว่าและหนากว่า ขอบของผลึกเป็นเส้นตรง และแสดงแนวแตกเรียบชัดเจน

ผลการวิเคราะห์เคมีระบุว่า ตัวอย่างหินทั้งหมดประกอบด้วยแร่แคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณร้อยละ 79 ถึง 99 ของน้ำหนัก เฉพาะหินอ่อนสีขาว (MA2) มีแคลไซต์ถึงร้อยละ 100 แร่ที่มีปริมาณรองลงมาคือโดโลไมต์ ปริมาณร้อยละ 0.20 ถึง 20 ของน้ำหนัก ควอตซ์พบในปริมาณร้อยละ 0.02-6.71 ของน้ำหนัก และกลุ่มแร่ดินเหนียวพบในปริมาณไม่เกินร้อยละ 5 ของน้ำหนัก แร่เหล็กออกไซด์และซัลไฟด์พบในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 ของน้ำหนัก โดยมีข้อสังเกต ดังนี้

1. หินปูนมีแคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลัก แต่อาจมีโดโลไมต์ แร่กลุ่มดินเหนียว แร่ควอตซ์ และเหล็กออกไซด์และซัลไฟด์ปนอยู่ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD สามารถตรวจสอบได้

2. สีของหินปูนที่นำมาทดสอบมีสีเทาถึงสีเทาดำ ไม่ขึ้นกับชนิดของแร่ที่เจือปน แต่อาจเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมของการสะสมตัวของหินปูน หรือปริมาณคาร์บอนที่ปนในเนื้อหิน ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ไม่สามารถตรวจสอบได้

3. หินอ่อนที่แปรสภาพสมบูรณ์จะมีปริมาณแคลไซต์สูงมาก

การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินตัวอย่าง พบว่า ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวมีค่าอยู่ระหว่าง 43.55-70.65 MPa ซึ่งสามารถจัดอยู่ในค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดที่มีค่าความแข็งระดับปานกลางตามการจำแนกของ Arman et al. (2014) ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียนมีค่าอยู่ระหว่าง 8.80-12.93 MPa ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าอยู่ระหว่าง 2.00-30.39 GPa ค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 17.13-25.47 และค่า

ดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนมีค่ามากกว่าร้อยละ 99 โดยตัวอย่างหินทุกชนิดมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2.66-2.74 g/cm³

การหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และลักษณะทางศิลาวិทยา ซึ่งใช้อัตราส่วน sparite/micrite เป็นพารามิเตอร์ โดยหินปูน micrite จะมีค่า sparite/micrite ต่ำ ส่วนระบุว่ามีความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจน ทั้งนี้หินปูน micrite และ poorly-washed sparite มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวเป็นช่วงกว้าง โดย micrite มีค่าแปรผันตั้งแต่ประมาณ 43 MPa และอาจสูงถึง 70 MPa ในขณะที่ poorly-washed sparite มีค่าสูงสุดประมาณ 60 MPa สำหรับค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียน ค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนแปรผันอยู่ในช่วงแคบ และไม่มีความแตกต่างกันมากนัก จึงอาจสรุปได้ว่าปริมาณของ lime-mud matrix (micrite) และ spar cement (sparite) ไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งของหินปูนที่ทดสอบ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ micrite (sparse micrite หรือ micritic limestone หรือ mudstone) มีแนวโน้มที่จะมีความแข็งและทนกว่า poorly washed sparite (sparitic limestone หรือ wackstone) ปัจจัยอื่นนอกเหนือจากเนื้อหิน อาทิ กระบวนการตกทับถม หรือขนาดของเม็ดตะกอนในหินปูนอาจมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินด้วย (Hatzor and Plachik, 1997; 1998; Tugrul and Zarif, 2000; Andriani and Walsh, 2002; Gajić et al., 2011)

หินอ่อนซึ่งมีลักษณะเนื้อหินแบบผลึก พบว่ามีความแข็งอยู่ระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับหินปูนแบบ micrite และ poorly washed sparite ทั้งนี้หินอ่อนจะมีเนื้อเป็นผลึกแร่แคลไซต์เกือบทั้งหมด จากการศึกษาพบว่าลักษณะของผลึกแร่ในหินอ่อนจะมีขนาดใหญ่กว่าและหนากว่า spar cement ที่พบในหินปูน ซึ่งส่งผลต่อรูปแบบการแตกของหิน เนื่องจากมีแรงดันระหว่างผลึกแร่

การหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และองค์ประกอบทางเคมี ของตัวอย่างหินที่ศึกษา พบว่า หินทุกชนิดมีแร่แคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนแร่ที่มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ คือ กลุ่มแร่ดินเหนียว (clay minerals) ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD สามารถระบุได้ว่าเป็นอิลไลต์ (illite) มอนท์โมริลโลไนต์ (montmorillonite) และคาโอลิไนท์ (kaolinite) ซึ่งเมื่อปริมาณร้อยละของแร่กลุ่มดินเหนียวเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวสูงสุด และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีค่าสูงขึ้นตาม ในทางกลับกันโดโลไมต์และควอตซ์ มักพบปะปนอยู่ในหินปูนในปริมาณเล็กน้อยถึงมาก ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ได้ แต่มีแนวโน้มว่าหินปูนที่มีปริมาณแร่อื่นเจือปนอยู่มาก ปริมาณแคลไซต์น้อย จะมีความแข็งเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม แร่ทั้งสามชนิดไม่มีผลกระทบต่อค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน และค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ ผลของการวิจัยครั้งนี้ไม่สอดคล้องกับข้อสรุปของ Dhakal et al. (2002) ที่ระบุว่าแร่ประกอบในตัวอย่างหินมีผลกระทบต่อค่าดัชนีความคงทนต่อการสึกกร่อน แต่เนื่องจากตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบมีแคลไซต์เป็นหลัก ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าหินปูนซึ่งเป็นหินตะกอนเคมี (chemical origin) และมีแคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลัก ค่อนข้างคงทนต่อการผุกร่อนและความสึกหรอ ทั้งนี้การทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนสองรอบ (I_{d2}) ตามมาตรฐานนั้น ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ (Rintrawilai et al., 2011)

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า

1. คุณสมบัติทางเคมีของหินปูนมีอิทธิพลต่อความแข็งของหินมากกว่าคุณสมบัติทางศิลาวิทยา โดยปริมาณของแร่กลุ่มดินเหนียวในหินที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น
2. การประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินปูนชั้นต้นในภาคสนาม โดยใช้ลักษณะเนื้อหินเป็นเกณฑ์จากข้อมูลหินปูนกลุ่มหินสระบุรีในงานวิจัยนี้ สามารถกระทำได้อย่างมีข้อพึงระวัง โดยหิน mudstone มีแนวโน้มจะมีความแข็งมากกว่า wackstone
3. สำหรับ mudstone และ wackstone ชนิดของ allochem รวมถึงขนาดและความถี่ของ calcite vein และ stylolite ไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของหิน
4. จากข้อมูลหินปูนกลุ่มหินสระบุรีในงานวิจัยนี้ ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวมีค่าประมาณ 43-60 MPa ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียนระหว่าง 8.80-12.93 MPa (อาจสูงถึง 70 MPa และ 30 MPa หากมีแร่กลุ่มดินเหนียวเป็นส่วนประกอบ) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นระหว่าง 2.00-30.39 GPa ค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบระหว่างร้อยละ 17.13-25.47 และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนมีค่ามากกว่าร้อยละ 99 โดยตัวอย่างหินทุกชนิดมีความหนาแน่นระหว่าง 2.66-2.74 g/cm³
5. หินอ่อนจากกลุ่มหินสระบุรีมีเนื้อผลึกและมีแคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลัก มีค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียวประมาณ 50 MPa ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นระหว่าง 20.40 GPa ค่ากำลังรับแรงดึงแบบบราซิลเลียนประมาณ 12.28 MPa ค่าดัชนีความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ

ระหว่างร้อยละ 21.11 และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนมีค่าประมาณร้อยละ 99.51 ความหนาแน่น 2.70 g/cm^3

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต

ผลจากการวิจัยครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า การประเมินคุณสมบัติทางกลศาสตร์ โดยใช้ลักษณะทางศิลาวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของหินคาร์บอนเนต มีแนวโน้มจะสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติดังกล่าวได้ แต่ปัญหาที่พบในงานวิจัยครั้งนี้เกิดจากปัจจัยหลายประการ อาทิ จำนวนตัวอย่างหิน (specimen) ที่นำมาทำการทดสอบของหินแต่ละชนิด ในการทดสอบทั้งหมดมีหิน 9 ชนิด และใช้จำนวนชนิดละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ข้อมูลในการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ไม่เพียงพอ และความหลากหลายของหินปูน ซึ่งกลุ่มตัวอย่างที่นำมาทดสอบสามารถจำแนกเป็นสองกลุ่ม คือ mudstone และ wackstone (Dunhams, 1962) หรือ micrite และ poorly washed sparite (Folk, 1959; 1962) เท่านั้น จึงมีข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต ดังนี้

1. ควรมีการวิจัยเพิ่มเติมโดยเพิ่มชนิดของหินปูน ซึ่งจำแนกตามแบบ Dunhams (1962) กลุ่ม packstone grainstone และ boundstone
2. เพิ่มจำนวนตัวอย่างหินที่ทดสอบ เช่น 10-20 ตัวอย่างต่อชนิดหิน ให้เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์
3. พิจารณาปัจจัยอื่นเพิ่ม เช่น ชนิดและขนาดของ allochem
4. พิจารณาการประเมินรูปแบบอื่น เช่น การครูดหินตัวอย่างให้เป็นรอย

บรรณานุกรม

- Andriani, G.F., and Walsh, N. (2002). Physical properties and textural parameters of calcarenitic rocks: qualitative and quantitative evaluation. **Engineering Geology**. 67: 5–15.
- Arman, H., Hashem, W., El Tokhi, M., Abdelghany, O. and El Saiy, A. (2014) Petrographical and Geomechanical Properties of the Lower Oligocene Limestones from Al Ain City, United Arab Emirates. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 39:261–271
- ASTM C131-06. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. In **Annual Book of ASTM Standards**, (Vol. 04.02). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C97 Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone. In **Annual Book of ASTM Standards**, (Vol. 04.02). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 3967-05. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens In **Annual Book of ASTM Standards**, (Vol. 04.02). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 7012. Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. In **Annual Book of ASTM Standards**, (Vol. 04.02). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4543. Standard test method for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances. In **Annual Book of ASTM Standards**, (Vol. 04.02). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4644. Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks In **Annual Book of ASTM Standards**, (Vol. 04.02). West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

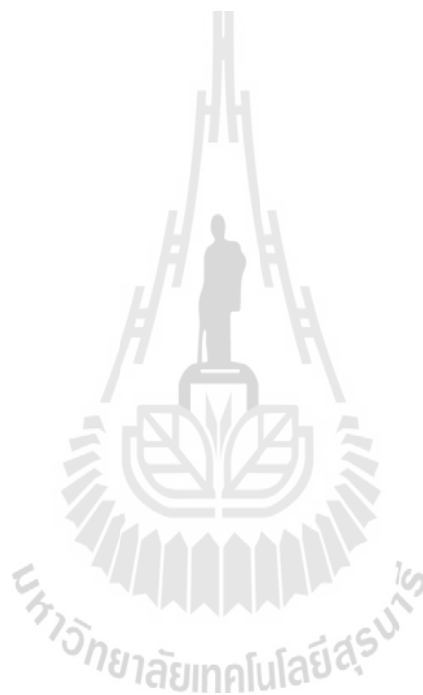
- Bell, F.G. (1978). The physical and mechanical properties of the Fell Sandstones Northumberland England. **Engineering Geology**. 12: 1-29.
- British Standards Institution. (2003). **EN ISO 14689-1**. Geotechnical Investigation and Testing-Identification and Classification of Rock – Part 1: Identification and Description.
- Brown, E.T. (1981). Rock Characterization Testing & Monitoring, **IRSM Suggested Methods**. New York: Pergamon Press.
- Bunopas, S. (1981). Paleogeographic history of the western Thailand and adjacent parts of Southeast Asia: a plate tectonics interpretation. **Ph.D. Thesis, Geology Department**, Victoria University, New Zealand.
- Bunopas, S. (1992). Regional stratigraphic correlation in Thailand. In Proceedings of the National Conference on Geologic Resources of Thailand: Potential for future development. **Department of Mineral Resources**, Thailand.
- Dhakal, G., Yoneda, T., Kata, Y., and Kaneko, K. (2002). Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks. **Engineering Geology**. 65(1): 31-45.
- Dobereiner, L., and De Freitas, M H. (1986). Geotechnical properties of weak sandstone. **Geotechnique**. 36 (1): 79-94.
- Dunham, R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In Classification of carbonate rocks: **American Association of Petroleum Geologists Memoir**. pp. 108-121.
- Dyke, C.G., and Dobereiner, L. (1991). Evaluating the strength and deformability of sandstones. **Quarterly Journal of Engineering Geology**. 24: 123-134.
- Fahy, M.P., and Guccione, M.J. (1979). Estimating strength sandstone using petrographic thin-section data. **Engineering Geology**. 16: 467-485.
- Flügel, E. (2004). **Microfacies of carbonate rocks**. New York: Springer-Verlag
- Folk, R.L. (1959). Practical petrographical classification of limestones. **American Association of Petroleum Geologist Bulletin**. 43: 1-38.
- Folk, R.L. (1962). Spectral subdivision of limestone types. In Classification of carbonate Rocks-A Symposium: **American Association of Petroleum Geologists Memoir**. 1: 62-84.

- Fuenkajorn, K., and Daemen, J.J.K. (1992). An empirical strength criterion for heterogeneous tuff. **Engineering geology**. 32: 209-223.
- Gajic, V., Matovic, V., Vasic, N., and S-B, D. (2011). Petrophysical and mechanical properties of the Struganik limestone, Vardar Zone, West Serbia. **Annales Geologiques de la Peninsular Balkanique**. 72: 80-100.
- Griffith, A.A. (1924). Theory of rupture. In **Proceedings of the First Congression of the Applied Mechanics**. Delft: Technische Bockhandel en Drukkerij. pp. 55-63
- Gunsallus, K.L., and Kulhawy, F.H. (1984). A comparative evaluation of rock strength measures. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts**. 21: 233-248.
- Gunsallus, K.L., and Kulhawy, F.H. (1984). A comparative evaluation of rock strength measures. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**. 21: 233-248.
- Handlin, J., and Hager, R.V. (1957). Experimental deformation of sedimentary rock under a confining pressure. **Journal of the American Association for Petroleum Geology**. 41:1-50.
- Harrison, D. (1993). High-purity limestones in England and Wales. **Engineering Geology and Hydrogeology**. 26 (4): 293-303.
- Hecht, C.A., Bonsch, C., and Bauch, E. (2005) Relations of rock structure and composition to petrophysical and geomechanical rock properties: examples from permocarboniferou red-beds. **Rock Engineering and Rock Mechanics**. 38:197–216
- Howarth, D.F., and Rowlands, J.C. (1986). Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. **Geotechnical Testing Journal**. 9: 169-179.
- International Society for Rock Mechanics. (1981). Basic geotechnical description of rock masses. **International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics Abstracts**, 18: 85-110.
- Kahraman, S., Gunaydin, and Fener, M. (2005) The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 42:584–589

- Li, L., and Aubertin, M., (2003). A general relationship between porosity and uniaxial strength of engineering materials. **Canadian Journal of Civil Engineering**. 30: 644–658.
- Lounsbery, R.W., and West, T.R. (1965). Petrography of some Indiana aggregates in relation to their engineering properties. **University of Kentucky Engineering Experiment Station Bulletin Series**. 20(2): 24–41.
- Olsson, W.A. (1974). Grain size dependence of yield stress in marble. **Journal of Geophysical Research**. 79: 4859–4862.
- Onodera, T.F., and Asoka Kumara, H.M. (1980). Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. **Bulletin of the International Association for Engineering Geology**. 22: 173-177.
- Ozcelik, Y., Bayram, F., and Yasitli N. E. (2013). Prediction of engineering properties of rocks from microscopic data. **Arabian Journal of Geosciences**. 6:3651–3668
- Palchik, V., Hatzor, Y. H. (2000): Correlation between mechanical strength and microstructural parameters of dolomites and limestones in the Judea group – Israel. **Israel Journal of Earth Sciences**. 49(2): 65–79.
- Pettijohn, F. J. (1957). **Sedimentary rocks** (3rd Ed.). New York: Harper & Row
- Prikryl, R. (2001). Some Microstructural Aspects of Strength Variation in Rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 38: 671-682.
- Rajabzadeh, M. A., Moosavinasab Z., and Rakhshandehroo G. (2012) Effects of rock classes and porosity on the relation between uniaxial compressive strength and some rock properties for Carbonate rocks. **Rock Engineering and Rock Mechanics**. 45:113–122
- Rinrawilai, S., Walsri, C., and Fuenkajorn, K. (2011) Large-scaled slake durability index testing. In Proceedings of the Third Thailand Symposium on Rock Mechanics (pp. 239-245). March 10-11, Sea Resort and Spa, Petchaburi, Thailand.
- Sabatakakis, N., Koukis, G., Tsiambaos, G. and Papanakli, S. (2008). Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks. **Engineering Geology**. 97:80-90.
- Shakoor, A., and Bonelli, R.E. (1991). Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstone. **Bulletin of the Association for Engineering Geology**. 28: 55-71.

- Smorodinov, M.I., Motovilov, E.A., and Volkov, V.A. (1970). Determinations of Correlation Relationships Between Strength and Some Physical Characteristics of Rocks. In **Proceedings of the Second ISRM Congress** (Vol. 2.). Belgrade, Yugoslavia, pp. 3–6.
- Tarawneh, K., Al-Thyabat, S., and Al-Harashsheh, M. (2007). Mineralogical, physical and mechanical properties of limestone rocks in Ma'an area, South Jordan. **Geology and Geophysics**. 50 (1): 123-128.
- Thambuya, S., Pisutha-Anond, V., and Khantaprab, C. (2007). Depositional Environments of Permian rocks of the Khao Khad Formation in Central Thailand. **Science Asia**. 33: 371-381.
- Torok, A. (2006). Influence of fabric on the physical properties of limestones. In: Kourkoulis, S.K. (Ed.), **Fracture and Failure of Natural Building Stones**. Springer, Dordrecht, pp. 487–495.
- Torok, A., and Vasarhelyi, B. (2010). The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. **Engineering Geology**. 115: 237–245
- Toservski, A., Pollak, D., Zenko, T., Aljinovic, D., and Tadej, N. (2011). Some engineering properties of limestone: Tunnel Strazina case study (Croatia). **Tunnelling and underground Space Technology**. 26 (1): 242-251.
- Tuğrul, A. and Zarif, I.H. (2000). Engineering aspects of limestone weathering in Istanbul, Turkey. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. 58: 191–206.
- Ueno, K. and Charoenththrat, T. (2011). Carboniferous and Permian. In *The Geology of Thailand*. **The Geological Society**. London.
- Ulusay, R., Tureli, K., and Bider, M.H. (1994) Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. **Engineering Geology**. 37:135
- Vutukuri, V.S., Lama, R.D., and Saluja, S.S. (1974). **Handbook on Mechanical Properties of Rocks** (Vol. 1). Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications.

- Wong, R.H.C., Chau, K.T., and Wang, P. (1996). Microcracking and grain size effect in Yeun Long marbles. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**. 33(5): 479–485.
- Yasar, E., and Erdogan Y. (2004) Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**. 41: 871–875



ประวัตินักวิจัย

นางสาวอานิสงส์ จิตนารินทร์ เกิดเมื่อวันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดเชียงใหม่ จบการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ธรณีวิทยา) จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2542 เริ่มต้นทำงานในตำแหน่งนักวิชาการสิ่งแวดล้อม (เหมืองแร่) และตำแหน่งนักวิจัยระหว่าง พ.ศ. 2542-2545 จากนั้นจึงศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ชีววิทยาสิ่งแวดล้อม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2548 ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (ชีววิทยาสิ่งแวดล้อม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2553 และ DOCTEUR de l'Université Paris VI (GEOSCIENCES ET RESSOURCES NATURELLES) จาก University Pierre & Marie CURIE ประเทศฝรั่งเศส ในปี พ.ศ. 2553 เช่นกัน ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมธรณี สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญด้านตะกอนวิทยา บรรพชีวินวิทยาและการลำดับชั้นหิน