

รหัสโครงการ SUT7-719-58-24-42



## รายงานการวิจัย

ผลกระทบของแรงดันน้ำในหินที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์  
ของหินประดับสามชนิดในประเทศไทย

(Effects of Pore Pressure on Mechanical Behaviors  
of Three Thai Decorating Stones)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

ผลกระทบของแรงดันน้ำในหินที่มีผลต่อพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์  
ของหินประดับสามชนิดในประเทศไทย

(Effects of Pore Pressure on Mechanical Behaviors  
of Three Thai Decorating Stones)

คณะผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558-2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

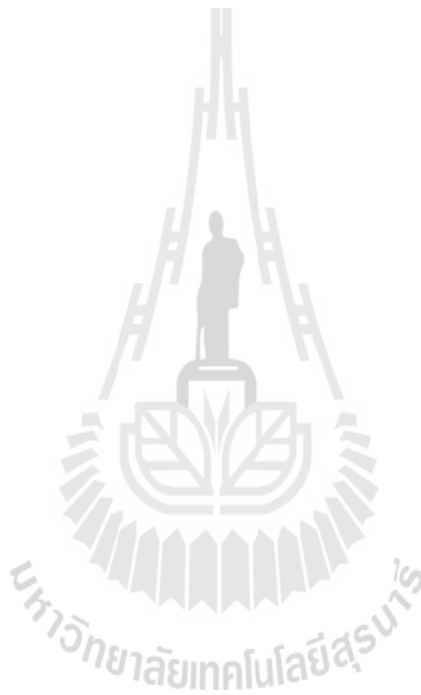
มิถุนายน 2559

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558-2559 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัญญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัยและ พิสูจน์อักษร ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2559



## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาคือ เพื่อหาผลกระทบของแรงดันน้ำต่อกำลังกดและความยืดหยุ่นของหินแกรนิต หินมาร์ล และหินอ่อน ในการทดสอบได้เสนอคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินระดับ 3 ชนิด ทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการทดสอบได้ใช้ตัวอย่างหินขนาด  $50 \times 50 \times 100$  mm ในการทดสอบกำลังกดในสามแกนภายใต้สภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ อัตราความเค้นหลักกับเวลาต่อตัวอย่างหินผันแปรระหว่าง 0.001 ถึง 10 MPa/s และทำการผันแปรความดันล้อมรอบระหว่าง 0 ถึง 12 MPa โดยใช้โครงกดทดสอบในสามแกนจริง ผลการทดสอบระบุว่า ค่ากำลังกดของหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าน้อยกว่าสภาวะแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับความดันล้อมรอบและอัตราความเค้นหลักกับเวลามีค่าสูง ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในสภาวะแห้งมีค่าสูงกว่าสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากสภาวะแห้ง หลังจากนั้นได้อธิบายเกณฑ์การแตกของหินจากการทดสอบโดยใช้กฎของคูลอมป์ ผลระบุว่าค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเค้นหลักกับเวลาสูงขึ้น และไม่ขึ้นกับค่าความดันล้อมรอบสำหรับผลจากเกณฑ์การแตกในสามแกนซึ่งถูกพัฒนามาบนพื้นฐานของพลังงานความเครียดระบุว่าพลังงานความเครียดเชิงเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงเมื่อพลังงานความเครียดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยผลกระทบของแรงดันน้ำส่งผลให้ค่าดังกล่าวในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำกว่าในสภาวะแห้งเพียงเล็กน้อย จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปประเมินค่าความแข็งและค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินระดับในอาคารทั่วไปหรืออาคารที่ก่อสร้างด้วยหินที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันน้ำได้

## Abstract

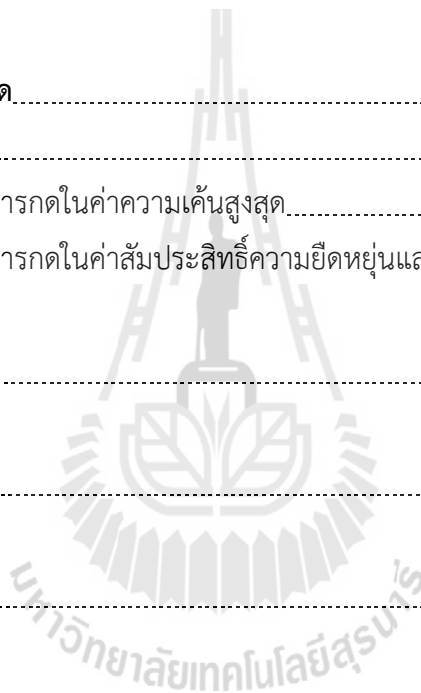
The objective of this study is to experimentally determine the effects of pore pressure on the compressive strengths and elasticity of granite, marl and marble. Mechanical Behavior of Three Thai Decorating Stones both in dry and saturated conditions are proposed. Rectangular rock specimens ( $50 \times 50 \times 100 \text{ mm}^3$ ) under dry and saturated conditions are axially loaded under different rates from 0.001 to 10 MPa/s. The constant confining pressures are maintained between 0 and 12 MPa using polyaxial load frame. The results indicate that the strengths of the saturated specimens are lower than those of the dry ones particularly under the high confining pressures and loading rates. The elastic modulus of dry specimens is higher than that of the saturated specimens and the Poisson's ratios of saturated specimens are slightly higher than the dry specimens. Based on the Coulomb strength criterion the cohesion and internal friction angle of the rocks have been calculated. The cohesions and friction angle of the dry and saturated specimens are comparable and tends to increase with loading rate, and tend to be independent of the confining pressure. The results from strength criterion based on strain energy density shows that the distortional strain energy increases linearly with the mean strain energy for dry and saturated conditions. The saturated specimens yield slightly lower strain energy than the dry specimens. The results can be used to assess the strength and deformation of these decorating and building stones as affected by pore pressure.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
<b>บทที่ 3 การเก็บและการจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....</b>	<b>11</b>
3.1 วัตถุประสงค์.....	11
3.2 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	11
<b>บทที่ 4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....</b>	<b>21</b>
4.1 วัตถุประสงค์.....	20
4.2 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว.....	20
4.3 การทดสอบกำลังกดในสามแกน.....	22
4.3.1 โครงกกดทดสอบในสามแกนจริง.....	22
4.3.2 วิธีการทดสอบกำลังกดในสามแกน.....	22
4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างเกณฑ์การแตก.....	37
5.1 วัตถุประสงค์.....	37
5.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหิน.....	37
5.3 เกณฑ์การแตกของคูลอมป์.....	42
5.4 เกณฑ์การแตกบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด.....	45
บทที่ 6 การกำจัดอัตราการกด.....	53
6.1 วัตถุประสงค์.....	53
6.2 การกำจัดอัตราการกดในค่าความเค้นสูงสุด.....	53
6.3 การกำจัดอัตราการกดในค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์.....	60
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผล.....	67
บรรณานุกรม.....	69
ประวัตินักวิจัย.....	71



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินแกรนิตในสภาวะแห้ง.....	15
3.2 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินแกรนิตในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	16
3.3 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินมาร์ลในสภาวะแห้ง.....	17
3.4 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินมาร์ลในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	18
3.5 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินอ่อนในสภาวะแห้ง.....	19
3.6 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินอ่อนในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	20
5.1 ค่าความเค้นสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของหินที่ทดสอบ ในสภาวะแห้ง.....	40
5.2 ค่าความเค้นสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของหินที่ทดสอบ ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	41
5.3 ผลการคำนวณของตัวอย่างหินในสภาวะแห้ง.....	51
5.4 ผลการคำนวณของตัวอย่างหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	52
6.1 ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ A และ B.....	54
6.2 ค่าความเค้นสูงสุดและค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างหินแห้งและหินอิ่มตัว ด้วยน้ำที่ถูกกำจัดอัตราการกดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 MPa/s.....	57
6.3 ค่าแรงดันน้ำของแต่ละตัวอย่างหิน.....	58



## สารบัญรูปภาพ

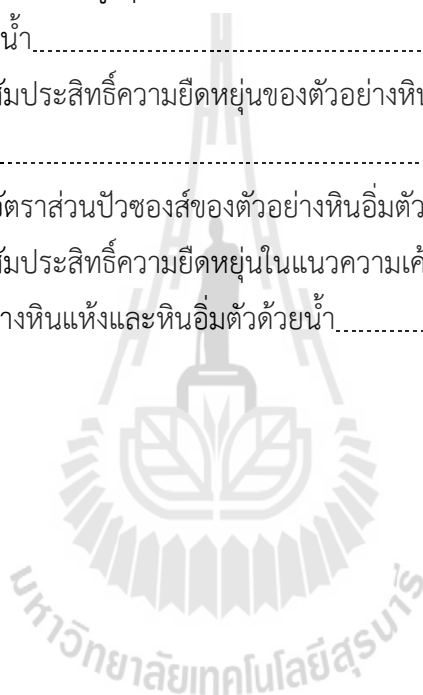
รูปที่	หน้า
2.1 ความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นในแนวตั้งฉาก.....	6
2.2 ความเค้นกดในฟังก์ชันของอัตราการกดและผันแปรแรงดันล้อมรอบของหินแกรนิต.....	6
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดในแกนเดียวในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ของหิน Denizli travertine.....	9
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดในแกนเดียวที่สภาวะแห้งและสภาวะอุณหภูมิต่ำ ของหิน Denizli travertine.....	9
2.5 กราฟความสัมพันธ์ค่าความชื้นเมื่อเทียบกับค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวและ ค่าความยืดหยุ่น.....	10
3.1 แหล่งกำเนิดของตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบ.....	12
3.2 ตัวอย่างหินแกรนิต หินมาร์ล และหินอ่อนที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว และสามแกน.....	13
3.3 การจัดเตรียมตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	13
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพันธ์กับเวลา.....	14
4.1 การเตรียมตัวอย่างหินในโครงกดทดสอบในแกนเดียว.....	20
4.2 โครงกดทดสอบในสามแกนจริง.....	23
4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้ได้นำมาใช้ในการ คำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง.....	24
4.4 ตัวอย่างหินที่ติดแผ่น Neoprene เพื่อลดผลกระทบของแรงเสียดทานระหว่างแผ่นเหล็ก และผิวหิน ซึ่งตัวอย่างหินด้านขวาจะมีการเจาะรูไว้เพื่อให้มีการระบายน้ำออกขณะทดสอบ สำหรับตัวอย่างหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ.....	24
4.5 ตัวอย่างหินแกรนิตหลังการทดสอบการรับแรงกด.....	26
4.6 ตัวอย่างหินมาร์ลหลังการทดสอบการรับแรงกด.....	27
4.7 ตัวอย่างหินอ่อนหลังการทดสอบการรับแรงกด.....	28
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหินแกรนิตทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะ อิ่มตัวด้วยน้ำที่อัตราการกดเท่ากับ 0.001 และ 1 MPa/s.....	29
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหินมาร์ลทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะ อิ่มตัวด้วยน้ำที่อัตราการกดเท่ากับ 0.001 และ 1 MPa/s.....	30

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหินอ่อนทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่อัตราการกดเท่ากับ 0.001 และ 1 MPa/s.....	31
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดและค่าอัตราการกดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	32
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดและค่าความดันล้อมรอบของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	33
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนในสามมิติและค่าความเครียดเฉือนในสามมิติภายใต้การแปรผันความดันล้อมรอบของตัวอย่างหินแกรนิตในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	34
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนในสามมิติและค่าความเครียดเฉือนในสามมิติภายใต้การแปรผันความดันล้อมรอบของตัวอย่างหินมาร์ลในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ..	35
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนในสามมิติและค่าความเครียดเฉือนในสามมิติภายใต้การแปรผันความดันล้อมรอบของตัวอย่างหินอ่อนในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ...	36
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราการกดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	38
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนปัวซองส์และค่าอัตราการกดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	39
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นยึดติดและค่าอัตราการกดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	43
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานและค่าอัตราการกดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	44
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ก้อนและอัตราการกดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	47
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เฉือนและอัตราการกดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	48
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดเชิงเบี่ยงเบนในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างหินในสภาวะแห้ง.....	49
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดเชิงเบี่ยงเบนในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ.....	50

## สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 ค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินแห้งและหินอิมตัวด้วยน้ำที่ถูกกำจัดอัตราการกดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 MPa/s ในฟังก์ชันของค่าความดันล้อมรอบ.....	56
6.2 ค่าแรงดันน้ำในฟังก์ชันของความดันล้อมรอบภายใต้อัตราการกดที่ 0.1 MPa/s.....	59
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินอิมตัวด้วยน้ำและค่าแรงดันน้ำ.....	61
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินอิมตัวด้วยน้ำและความดันล้อมรอบภายใต้การผันแปรแรงดันน้ำ.....	62
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินอิมตัวด้วยน้ำและค่าแรงดันน้ำ.....	64
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนปัวซองของตัวอย่างหินอิมตัวด้วยน้ำและค่าแรงดันน้ำ...	65
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในแนวความเค้นสูงสุด ( $E_1$ ) และในแนวความเค้นต่ำสุดของตัวอย่างหินแห้งและหินอิมตัวด้วยน้ำ.....	66



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

หินแกรนิต หินอ่อน และหินมาร์ล เป็นตัวแทนของกลุ่มหินระดับที่นิยมใช้ในปัจจุบัน สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตหินระดับที่เกี่ยวกับการนำทรัพยากรธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ในเชิงสถาปัตยกรรม และวิศวกรรมของอาคาร อนุสรณ์สถาน กำแพง และทางเท้า ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่เสริมสร้างเศรษฐกิจของประเทศ ความเข้าใจในเชิงกลศาสตร์ซึ่งรวมไปถึงความเค้นสูงสุด การเปลี่ยนรูปร่าง และความคงทนต่อสภาวะเปียก-แห้ง จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อนำหินเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมตามสภาวะที่หินเหล่านี้ต้องเผชิญในระยะยาว น้ำในรูพรุนของหินเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลให้ความเค้นสูงสุดและความยืดหยุ่นของหินลดลง แต่ปัจจัยนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาโดยละเอียด เนื่องจากหินเหล่านี้มีรูพรุนน้อยและมีอัตราการซึมผ่านต่ำ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของหินเหล่านี้ในระยะยาวเป็นสิ่งสำคัญ ถ้าน้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อหินได้จะส่งผลให้เกิดการแตก การศึกษาผลกระทบของน้ำต่อความเค้นสูงสุดของหินได้มีการดำเนินการมากมายทั้งในและต่างประเทศ แต่ผลกระทบของน้ำในเนื้อหินที่มีรูพรุนน้อยและความซึมผ่านต่ำยังไม่มีผู้ใดศึกษามาก่อน สาเหตุหลักเนื่องจากการตรวจวัดแรงดันน้ำในเนื้อหินในขณะที่หินอยู่ภายใต้แรงกดทำได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหินที่มีความพรุนและความซึมผ่านต่ำ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างหินแกรนิต หินมาร์ล และหินอ่อน ภายใต้อัตราการกดและความดันล้อมรอบที่ต่างกันโดยที่ตัวอย่างหินอยู่ในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ
- 2) อธิบายเกณฑ์การแตกของหินจากผลของการทดสอบโดยใช้กฎของคูลอมบ์
- 3) สร้างเกณฑ์การแตกในสามแกนบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ตัวอย่างหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหินแกรนิต หินมาร์ล และหินอ่อน
- 2) การทดสอบกำลังรับแรงกดของตัวอย่างหินจะดำเนินการทั้งในสภาวะปกติและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้โครงกดทดสอบในสามแกนจริง
- 3) ในการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวจะใช้อัตราการกด 5 อัตรา คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1.0 และ 10 MPa/s

- 4) ในการทดสอบกำลังกดในสามแกนจะใช้อัตราการกด 5 อัตรา และจำลองสภาวะความดันล้อมรอบ 3 ระดับ คือ 3, 7 และ 12 MPa
- 5) ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเท่ากับ  $50 \times 50 \times 100 \text{ mm}^3$
- 6) ในงานวิจัยนี้จะไม่มีการทดสอบและสำรวจในภาคสนาม

#### 1.4. ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ค่าความเค้นสูงสุดของหินในธรรมชาติมีทั้งปัจจัยภายนอกและภายในที่ส่งผลทำให้ค่าความเค้นสูงสุดลดลง ซึ่งน้ำเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักในการลดค่าความเค้นสูงสุดของหินและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การนำหินระดับไปประยุกต์ใช้ในสภาวะต่างๆ ดังนั้นการทดสอบในห้องปฏิบัติการแท้จริงแล้วเพื่อศึกษาพฤติกรรมของชั้นหินที่มีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะจริงที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำในช่องว่างของเนื้อหินที่มีความเค้นมากกระทำในอัตราที่แตกต่างกัน เพื่อหาผลกระทบของแรงดันน้ำในหินต่อค่าความเค้นสูงสุดของหินที่ศึกษาทั้ง 3 ชนิด โดยการทดสอบประกอบด้วย การทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนภายใต้การผันแปรความเค้นล้อมรอบ ซึ่งมีค่าคงที่และค่าความเค้นด้านบน แล้วทำการผันแปรอัตราการกด ผลการทดสอบที่ได้สามารถนำไปเป็นปัจจัยในการออกแบบโครงสร้างอาคารที่ทำจากหินระดับที่มีโอกาสอิ่มตัวด้วยน้ำเพื่อกำหนดค่ากำลังรับแรงกดที่แท้จริงของชั้นหิน การนำหินระดับมาประยุกต์ใช้ให้ถูกวิธีจะส่งผลให้มีการเพิ่มมูลค่าด้านเศรษฐกิจของการผลิตหินดังกล่าว

แนวคิดในงานวิจัยนี้คือการนำตัวอย่างหินแกรนิต หินมาร์ล และหินอ่อน รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด  $50 \times 50 \times 100 \text{ mm}^3$  มาประยุกต์ใช้กับโครงกดทดสอบในสามแกนจริงที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งโครงกดทดสอบในสามแกนจริงสามารถให้ความเค้นล้อมรอบคงที่ในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ ตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจะดำเนินการโดยนำตัวอย่างหินบรรจุในหม้อดูดสุญญากาศที่มีน้ำอยู่ภายในและใช้ปั๊มแรงดันเพื่อช่วยให้น้ำในหม้อดูดสุญญากาศดันตัวแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดหิน โดยค่าความยืดหยุ่นและค่าสัดส่วนปัวซองส์ของตัวอย่างหินได้มาจาก การคำนวณด้วยกราฟความเค้นและความเครียด ค่าความเค้นยึดติด (c) และค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) ที่ได้จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ตามเกณฑ์ของคูอมบ์ ซึ่งเกณฑ์การแตกในสามแกนได้สร้างบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด

#### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

### ขั้นตอนที่ 1 การคั่นคว่ำและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คั่นคว่ำและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของน้ำที่เข้าไปอยู่ในช่องว่างของเนื้อหินต่อค่าความเค้นสูงสุดของหิน การศึกษาผลกระทบอัตราการกดต่อค่าความเค้นสูงสุดของหิน และการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในเนื้อหินด้วยการทดสอบแรงกดในสามแกนที่สภาวะอิมตัวด้วยน้ำ

### ขั้นตอนที่ 2 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินที่ใช้ในการวิจัยนี้คือหินแกรนิต หินมาร์ล และหินอ่อน ซึ่งถูกจัดเตรียมให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยมทรงกระบอก มีขนาดกว้าง 50 mm ยาว 50 mm สูง 100 mm สำหรับการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวใช้ตัวอย่างหิน 30 ตัวอย่าง และการทดสอบกำลังกดในสามแกนใช้ตัวอย่างหิน 90 ตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างหินอิมตัวด้วยน้ำจัดเตรียมด้วยการนำตัวอย่างหินบรรจุในหม้อดูดสุญญากาศที่มีน้ำอยู่ภายในและใช้ปั๊มแรงดันเพื่อช่วยให้น้ำในหม้อดูดสุญญากาศดันตัวแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดหิน

### ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างหินที่สภาวะคล้ายจริงในภาคสนาม กล่าวคือ ชั้นหินในธรรมชาติส่วนใหญ่จะอิมตัวด้วยน้ำบาดาล และมีแรงดันล้อมรอบทั้ง 3 ทิศทาง ดังนั้น การทดสอบนี้จะแบ่งเป็น 2 ชุดการทดสอบ ได้แก่

1) การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว เป็นการศึกษาคูณสมบัติค่าความเค้นสูงสุดของหิน ซึ่งจะทดสอบในสองสภาวะปกติคือ หินที่ไม่อิมตัวด้วยน้ำ และในสภาวะที่หินอิมตัวด้วยน้ำ โดยจะให้อัตราการกดที่แตกต่างกัน 5 อัตรา คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa/s เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากแรงดันน้ำในเนื้อหินต่ออัตราการรับแรงกดของหิน โดยจะใช้ตัวอย่างหินไม่น้อยกว่า 30 ตัวอย่าง

2) การทดสอบกำลังกดในสามแกน เป็นการศึกษาคูณสมบัติค่าความเค้นสูงสุดของหิน ซึ่งจะทดสอบในสองสภาวะปกติคือ หินที่ไม่อิมตัวด้วยน้ำและในสภาวะที่หินอิมตัวด้วยน้ำ โดยจะให้อัตราการกดที่แตกต่างกัน 5 อัตรา คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa/s โดยทำการจำลองสภาวะความดันล้อมรอบต่างกันที่ 0, 3, 7 และ 12 MPa เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากแรงดันน้ำในเนื้อหินต่ออัตราการรับแรงกดของหินในสภาวะใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด โดยจะใช้ตัวอย่างหินไม่น้อยกว่า 90 ตัวอย่าง

### ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างเกณฑ์การแตก

นำผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติหินในขั้นตอนที่ 3 มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหิน และอธิบายเกณฑ์การแตกของหินจากผลของการทดสอบโดยใช้กฎของคูลอมบ์ แล้วนำมาสร้างเกณฑ์การแตกในสามแกนซึ่งถูกพัฒนาบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด

## ขั้นตอนที่ 5 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมาย

ผลงานวิจัยจะนำไปเผยแพร่องค์ความรู้ในรูปของบทความในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ และวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

## ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

ผลที่ได้จากการศึกษาตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 5 ได้สรุปและเขียนเป็นรายงานฉบับสมบูรณ์เพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในวงกว้างต่อไป

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากในด้านอุตสาหกรรม วิศวกรรม และสถาปัตยกรรม ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

#### 1.6.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เป็นองค์ความรู้ใหม่ในการนำหินประดับมาประยุกต์ใช้ในอาคาร และอนุสรณ์สถาน เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของการให้แรงกดของหินในสามแกนจริงที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ การศึกษานี้ยังได้รวบรวมองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์หินเพื่อใช้ในการคาดคะเนเสถียรภาพของโครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อประโยชน์สำหรับผู้สนใจ

#### 1.6.2 บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การให้ความรู้แก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของแรงดันน้ำต่อค่าความเค้นสูงสุดของหิน เพื่อใช้ในการพิจารณาและคาดคะเนเสถียรภาพในการออกแบบโครงสร้างหินประดับที่นำมาประยุกต์ใช้ในอาคารพาณิชย์ กำแพงอนุสรณ์สถาน ทางเดินเท้า และสิ่งก่อสร้างด้านสถาปัตยกรรม ให้เหมาะสมกับความเค้นที่สามารถรับได้จริง

#### 1.6.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นแหล่งข้อมูลและให้ความรู้แก่หน่วยงานภาคธุรกิจ เช่น งานด้านการก่อสร้าง ในการประเมินเสถียรภาพหินประดับที่นำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของการใช้งาน และความเค้นที่หินสามารถรับได้จริง

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของน้ำที่เข้าไปอยู่ในช่องว่างของเนื้อหินต่อค่าความเค้นสูงสุดของหิน การศึกษาผลกระทบอัตราการกดต่อความเค้นสูงสุดของหิน และการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในเนื้อหินด้วยการทดสอบแรงกดในสามแกนที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

#### คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

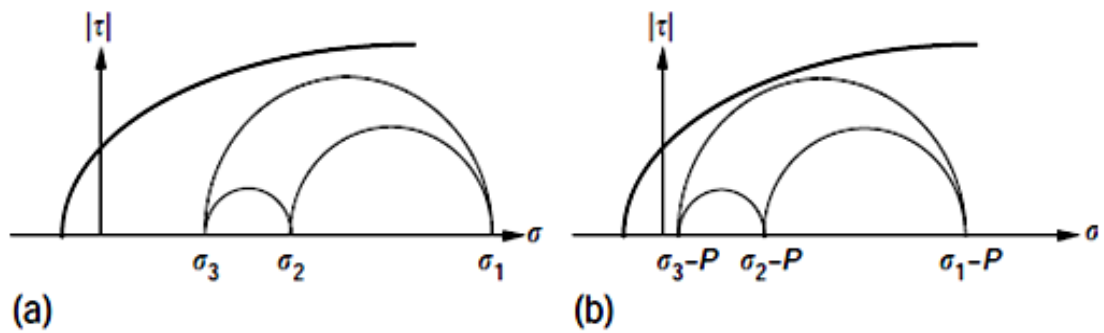
Jeager and Cook (2007) ได้อธิบายการแตกของหินภายใต้ผลกระทบของแรงดันน้ำและความแตกต่างของช่องในเนื้อหินภายใต้ความดันล้อมรอบ โดยทำการทดสอบการกดในสามแกนและการวิเคราะห์โดยใช้เกณฑ์การแตกของคูลอมป์ ในการพิจารณาผลกระทบของแรงดันน้ำ ผลที่ได้พบว่าแรงดันน้ำจะส่งผลกระทบทำให้ค่าความเค้นหลักที่จุดแตกต่ำลง ดังรูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นที่จุดแตกของหินภายใต้แรงดันน้ำ

Vasarhelyi (2003) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวเพื่อหาค่าความเค้นสูงสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินทรายทั้งหมด 35 ชนิด ซึ่งได้ทำการศึกษาในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยหินทรายมีความแตกต่างกันของแร่ประกอบ ขนาดเม็ด และความพรุน แต่ผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบพบว่าค่าความเค้นสูงสุดของหินทรายที่สภาวะแห้งจะมีค่าสูงกว่าสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินทรายในสภาวะแห้งจะมีค่าสูงกว่าสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

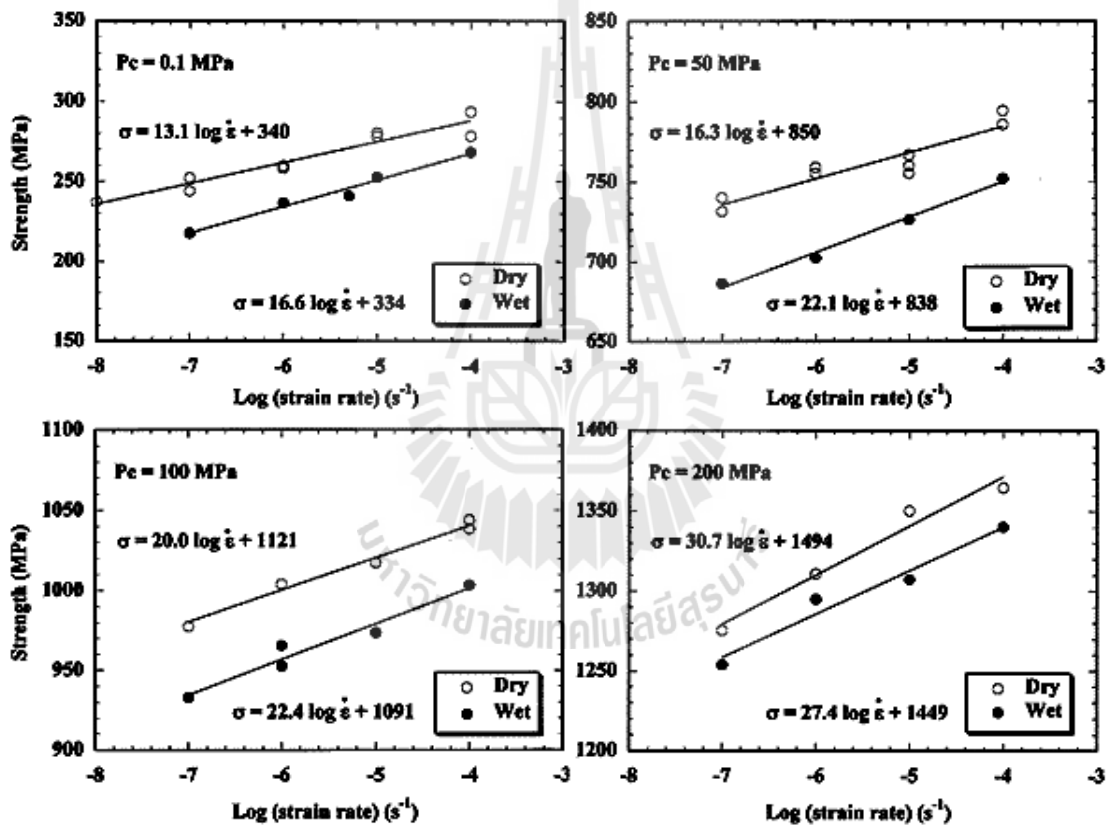
Li et al. (1999) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนของหินแกรนิต โดยใช้อัตราการกด 4 อัตรา คือ 0.0001, 0.001, 0.1 และ 10 MPa/s และผันแปรแรงดันล้อมรอบทั้งหมด 6 ระดับ คือ 20, 50, 80, 110, 140 และ 170 MPa พบว่าที่ระดับแรงดันล้อมรอบเดียวกัน ความเค้นสูงสุดมีค่าลดลงเมื่ออัตราการกดลดลง และที่อัตราการกดเดียวกัน ความเค้นสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันล้อมรอบเพิ่มขึ้น

Masuda (2001) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงกดในสามแกนของหินแกรนิตและหินแอนดีไซต์ โดยใช้อัตราการกดระหว่าง  $10^{-4}$  ถึง  $10^{-8}$  MPa/s และผันแปรความดันล้อมรอบทั้งหมด 4 ระดับ คือ 0.1, 50, 100 และ 200 MPa ซึ่งทำการทดสอบทั้งในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่าค่าความเค้นสูงสุดมีค่าลดลงเป็นเส้นตรงกับค่าอัตราการกดดังแสดงในรูปที่ 2.2 ที่ระดับแรงดันล้อมรอบเดียวกัน ค่าความเค้นสูงสุดมีค่าลดลงเมื่ออัตราการกดลดลง ซึ่งสภาวะแห้งมีค่าสูงกว่าสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และที่อัตราการกดเดียวกัน ค่าความเค้นสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันล้อมรอบเพิ่มขึ้น ซึ่งสภาวะแห้งมีค่าสูงกว่าสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ





รูปที่ 2.1 ความเค้นเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นในแนวตั้งฉากโดยที่ a) ไม่พิจารณาแรงดันน้ำ และ b) พิจารณาผลกระทบของแรงดันน้ำ (Jaeger and Cook, 2007)



รูปที่ 2.2 ความเค้นกดในฟังก์ชันของอัตราการกดและผันแปรแรงดันล้อมรอบของหินแกรนิต (Masuda, 2001)

Derakhshandi (2007) ได้ทำการศึกษาการเกิดแรงดันน้ำในช่วงระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งเกิดผลกระทบของค่าความเค้นเฉือน ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นแบบเฉือน และลักษณะการทรุดตัวในโครงสร้างของดินที่มีผลกระทบใน Plastic fines (Kaolinite) ต่อการเกิดแรงดันน้ำในชั้นดินอิมตัว และได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดิน โดยทำการทดสอบการกดในสาม

แกนแบบวัฏจักร ในการศึกษาจะมุ่งเน้นไปที่ค่าความเครียดเฉือนที่ทำให้เกิดแรงดันน้ำและปริมาตรเฉลี่ยจากการกวดอัดของตัวอย่างในช่วงการกระจายของดิน ผลลัพธ์ที่ได้นำไปสร้างเกณฑ์ความเครียดเฉือน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ระดับของความเครียดที่เกิดในช่องว่างภายในเนื้อดิน และคาดคะเนความแตกต่างของเนื้อดิน (Kaolinite-sand) เกณฑ์ความเครียดเฉือนนี้ได้แสดงพฤติกรรมของดิน (Clean sand) อยู่ที่ประมาณ 0-20% และพฤติกรรมของเนื้อดินอยู่ระหว่าง 20-30% ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างของดิน

Dasri (2013) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงดิ่งในสามแกนของหินทรายภูเขาหินทรายภูกระดิง และหินทรายพระวิหาร โดยใช้อัตราการกด 4 อัตรา คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa/s และผันแปรความดันล้อมรอบทั้งหมด 4 ระดับ คือ 0, 3, 7, และ 12 MPa ได้ทำการทดสอบในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่า ค่ากำลังรับแรงกดและความยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นตาม อัตราการกด ซึ่งกำลังกดของหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าต่ำกว่าสภาวะแห้งโดยเฉพาะ อัตราการกดและความเค้นรอบล้อมที่สูง ตัวอย่างหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีค่าอัตราส่วนปัวซองสูงกว่าหินที่สภาวะแห้งเล็กน้อย และการเพิ่มขึ้นของความยืดหยุ่นของหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าน้อยกว่าสภาวะแห้ง

Vasarhelyi and Van (2006) ได้ทำการศึกษาค่าความเค้นสูงสุดของหินในสภาวะแห้งและเปียกเพื่อแสดงวิธีการประมาณค่าความอ่อนไหวของค่าความชื้นของหินทราย จากการวิเคราะห์ของ Hawkins and McConnell (1992) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับค่ากำลังกดในแกนเดียวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\sigma_c(w) = a \cdot \exp(-bw + c) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\sigma_c$  คือกำลังกดในแกนเดียว (MPa),  $w$  คือค่าความชื้น (%) และ  $a, b, c$  คือค่าคงที่ซึ่งข้อเสียของการวิเคราะห์โดยใช้สูตรของ Hawkins และ McConnell (1992) คือ ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นมีค่าที่ไม่สิ้นสุด ดังนั้นจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนสูตรเดิมของ Hawkins and McConnell (1992) ด้วยการปรับเปลี่ยนค่า  $a, b, c$  เพื่อแสดงตัวชี้วัดที่แน่นอน (ค่าการอิ่มตัว ( $S$ )) ซึ่งถ้า  $S=0$  หมายถึงสภาวะแห้ง และถ้า  $S = 1$  หมายถึงสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และคำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$\sigma_c(w) = a^* + c^* e^{-b^* w} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$a^* = \sigma_{c0} - \frac{(\sigma_{c0} - \sigma_{csat})}{1 - e^{-b^*}} \quad (2.3)$$

$$b^* = -\ln\left(\frac{0.1}{\sigma_{c0} - \sigma_{csat}}\right) \quad (2.4)$$

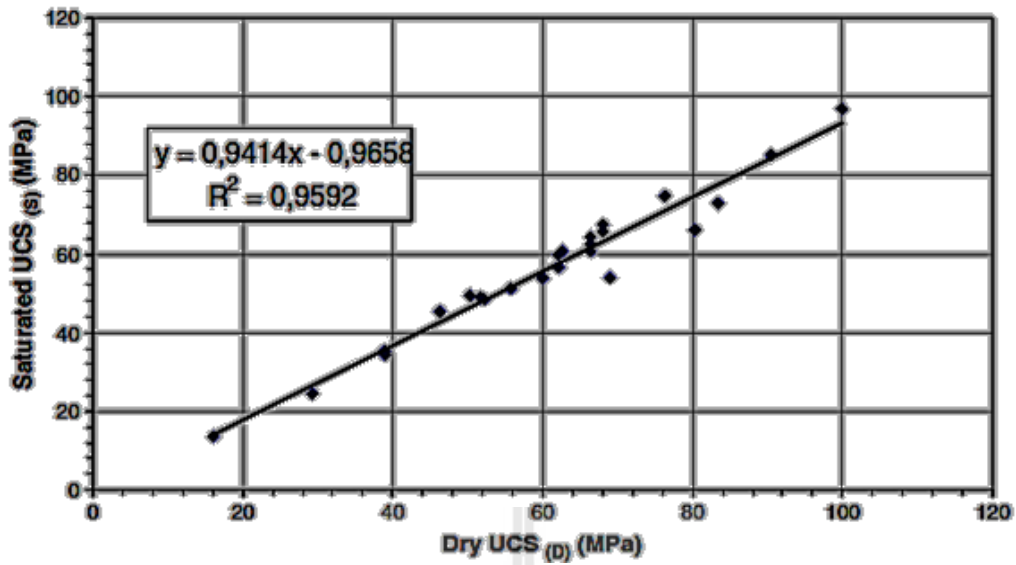
$$c^* = \frac{(\sigma_{c0} - \sigma_{csat})}{1 - e^{-b^*}} \quad (2.5)$$

Fredrich et al. (1995) ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการของหินเก้าภูเขาไฟ (Tuff) และหินทรายภายใต้แรงดันน้ำ พบว่าอัตราการกัดหรือการให้แรงต่อตัวอย่างหินจะมีผลกระทบต่อค่าความเค้นสูงสุดที่วัดได้ ซึ่งผลที่ได้ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ อาทิ ความพรุนของเนื้อหินและความสามารถในการคายน้ำของตัวอย่างหิน

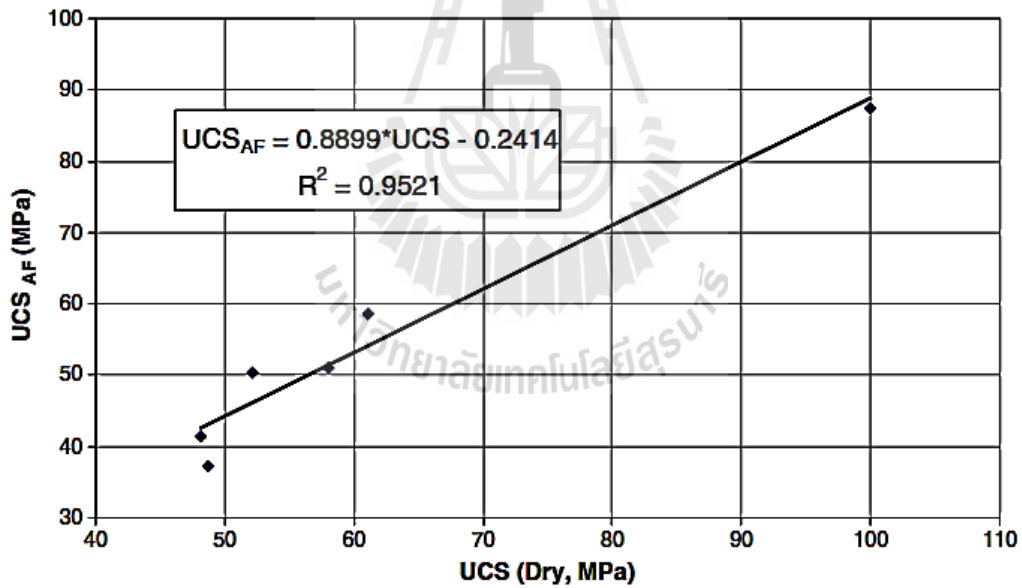
Cobanoglu and Celik (2012) ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงกดและค่ากำลังรับแรงดัดของหิน Denizli travertine ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด  $7 \times 7 \times 7$  cm สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว และขนาด  $3 \times 7 \times 18$  cm สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวได้ทำการทดสอบในสภาวะแห้ง สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่วนการทดสอบกำลังรับแรงดัดได้ทำการทดสอบ 2 แบบ คือ การทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบสามจุดและการทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบสี่จุด ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวของสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าต่ำกว่าสภาวะแห้ง ซึ่งในสภาวะแห้งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 9.58 MPa ถึง 132.32 MPa ส่วนในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจะมีค่าระหว่าง 8.40 MPa ถึง 131.11 MPa ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงกดที่สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำต่อสภาวะแห้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.922 และอัตราส่วนระหว่างสภาวะแห้งต่อสภาวะอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงระหว่าง 1.03 ถึง 1.14 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบสามจุดมีค่าเท่ากับ 13.78 MPa และการทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบสี่จุดมีค่าเท่ากับ 14.79 MPa

Yozinaka et al. (1997) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในเนื้อหินด้วยการทดสอบแรงกดในสามแกนแบบวัฏจักรในสภาวะอัดตัวคายน้ำของหิน 4 ชนิด ได้แก่ หินทัพ หินทราย หินโคลน หินทรายแป้ง โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงดันน้ำมีผลกระทบต่อค่าความเค้นสูงสุดของหินที่มีเนื้ออ่อน เนื่องจากค่ามุมเสียดทานในวัฏจักรการกดรอบแรกมีค่าสูงและลดต่ำลงเมื่อตัวอย่างหินถูกกดในวัฏจักรที่มากขึ้นทำให้เกิดรอยแตกในผลึกมากขึ้น แรงดันน้ำที่อยู่ในช่องว่างในเนื้อหินนอกจากจะลดค่ากำลังกดโดยรวมแล้วยังส่งผลให้หินมีพฤติกรรมแบบพลาสติก กล่าวคือมีความเปราะลดลง

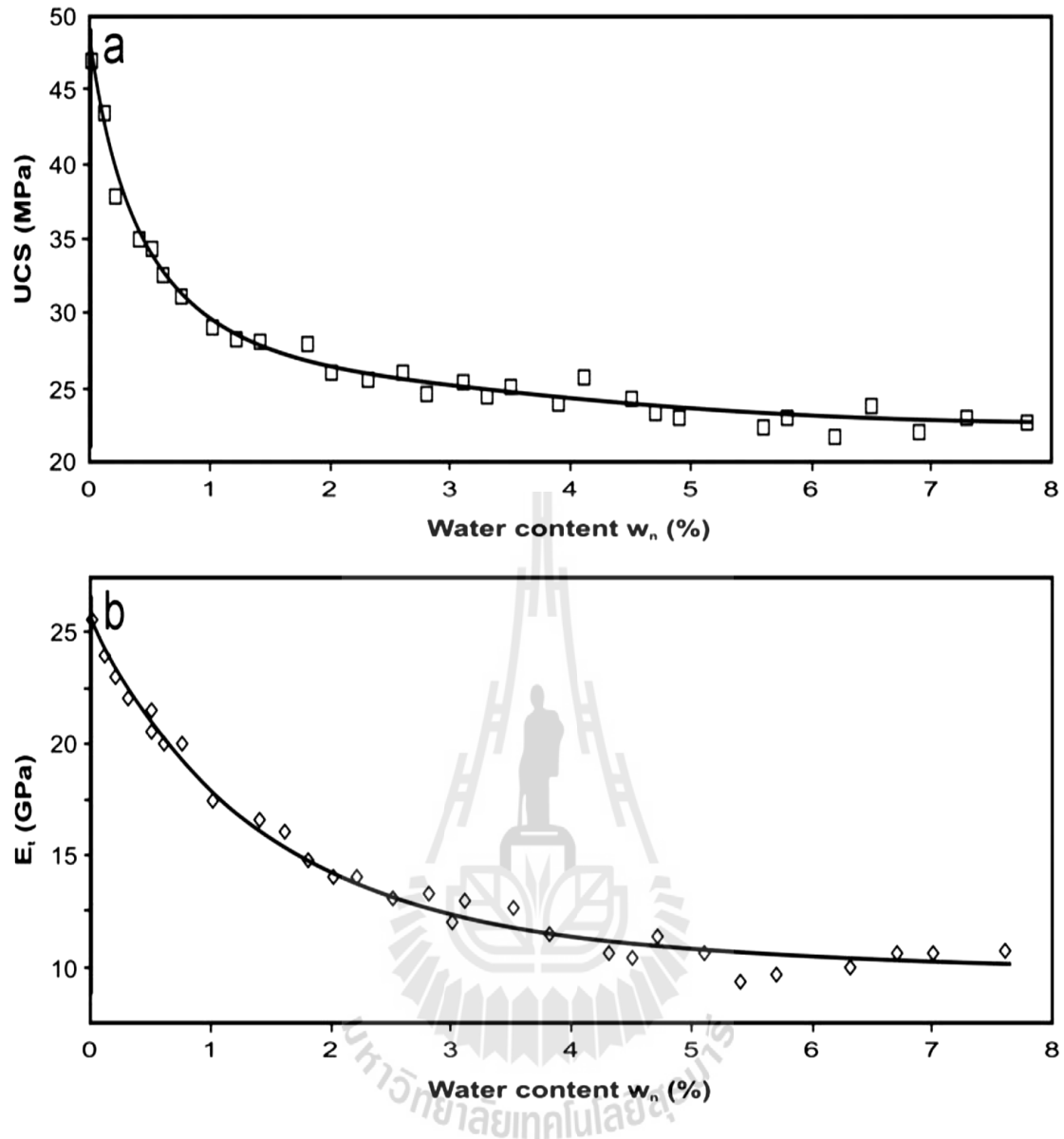
Yilmaz (2010) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่าความชื้นต่อค่าความเค้นสูงสุดและค่าความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินยิปซัมภายใต้สภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำพบว่า แม้ว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำจะมีค่าเล็กน้อย (1-2%) แต่ก็มีผลทำให้ค่าความเค้นสูงสุดลดลงอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดในแกนเดียวของสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และค่าความยืดหยุ่นระหว่างสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ทำให้ได้ 2 สมการ คือ  $UCS_{sat} = 0.3492UCS_{dry}$  และ  $E_{t,sat} = 0.5363E_{t,dry}$



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดในแกนเดียวในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำของหิน Denizli travertine (Cobanoğlu and Celik, 2012)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดในแกนเดียวที่สถานะแห้งและสถานะอุณหภูมิต่ำของหิน Denizli travertine (Cobanoğlu and Celik, 2012)



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ค่าความชื้นเมื่อเทียบกับค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว (a) และค่าความยืดหยุ่น (b) (Yilmaz, 2010)

## บทที่ 3

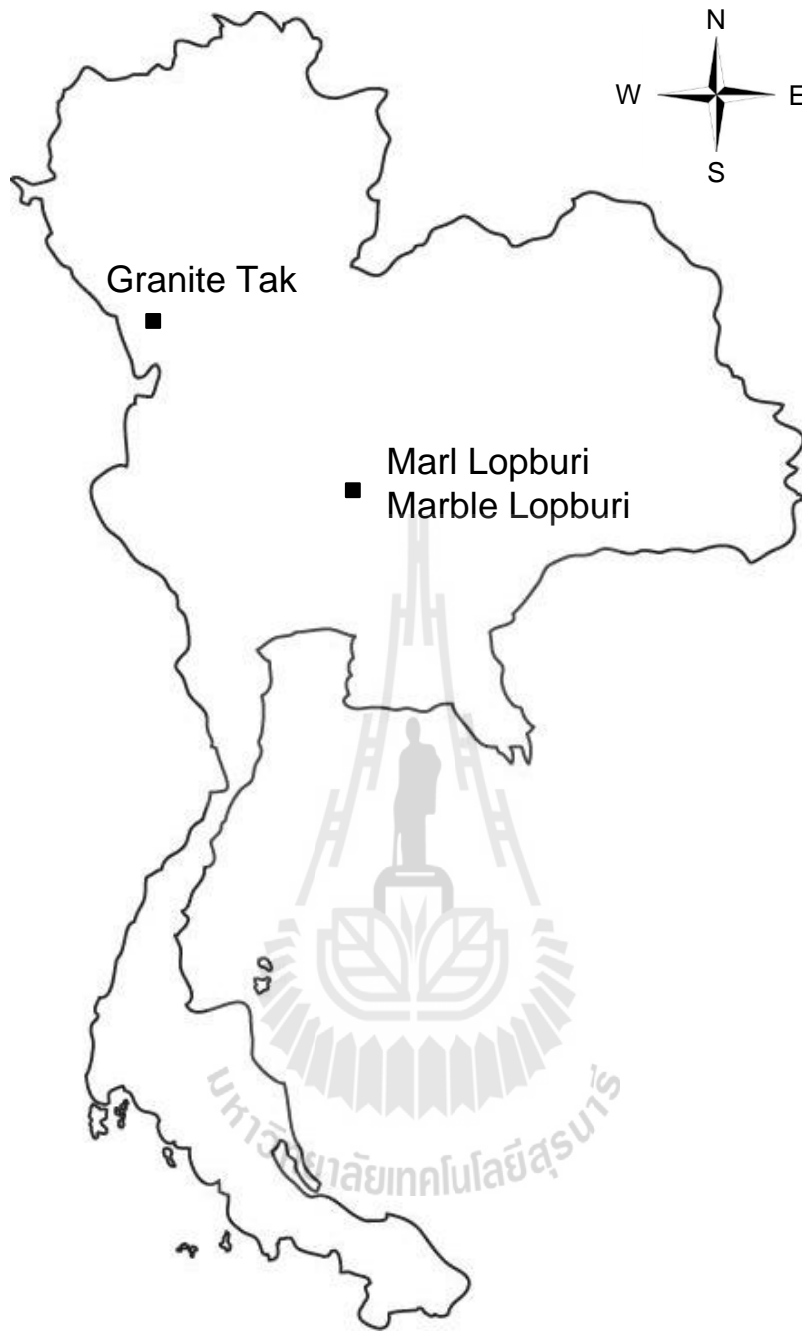
### การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหิน

#### 3.1 วัตถุประสงค์

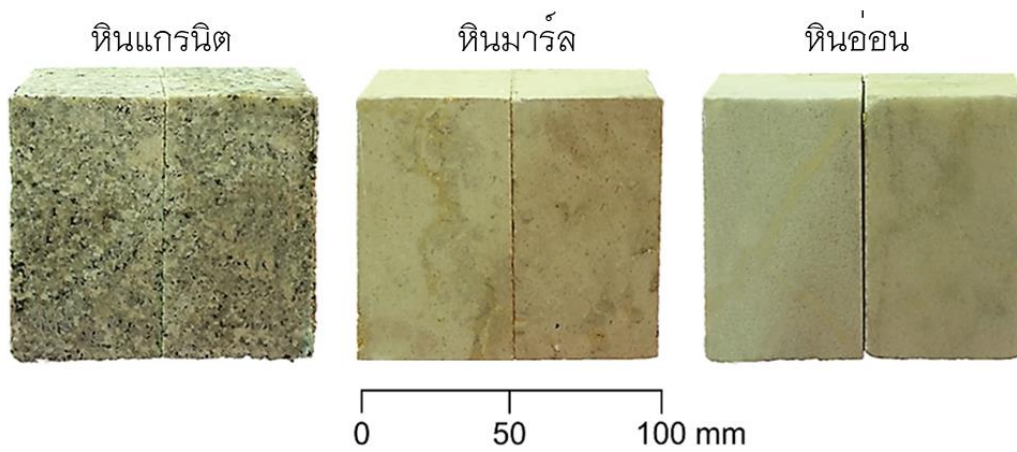
เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอน และวิธีการในการจัดเตรียมตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยหินที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ชนิด คือ หินแกรนิต (Atherton et al., 1992) หินมาร์ล และหินอ่อน (Bunopas, 1992) ซึ่งหินทั้ง 3 ชนิด มาจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันของประเทศไทยดังรูปที่ 3.1

#### 3.2 การเตรียมตัวอย่างหินสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบถูกจัดเตรียมให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมทรงกระบอก ขนาดกว้าง 50 mm ยาว 50 mm สูง 100 mm หินแต่ละชนิดถูกจัดเตรียมทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D4543-85 เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและการทดสอบกำลังกดในสามแกน (รูปที่ 3.2) โดยตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบภายใต้สภาวะแห้งจัดเตรียมด้วยการนำตัวอย่างหินไปอบให้แห้งเป็นเวลาทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ ส่วนตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำจัดเตรียมด้วยการนำตัวอย่างหินบรรจุในหม้อดูดสุญญากาศที่มีน้ำอยู่ภายในและใช้ปั๊มแรงดันเพื่อช่วยให้น้ำในหม้อดูดสุญญากาศดันตัวแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างเม็ดหินดังรูปที่ 3.3 โดยทุกๆ 1 ชั่วโมง จะนำตัวอย่างหินออกมาชั่งน้ำหนักจนกว่าค่าน้ำหนักของตัวอย่างหินจะมีค่าคงที่ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างหินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วและพร้อมนำไปใช้ในการทดสอบต่อไป ผลดังกล่าวระบุว่าหินแกรนิต หินมาร์ล และหินอ่อนในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.14, 2.71 และ 0.09 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 3.4) ตัวอย่างหินที่จัดเตรียมทุกก้อนมีการอ่านและบันทึกขนาดของตัวอย่างอย่างละเอียดและมีการชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณความหนาแน่นดังแสดงในตารางที่ 3.1 ถึง 3.6



รูปที่ 3.1 แหล่งกำเนิดของตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบ

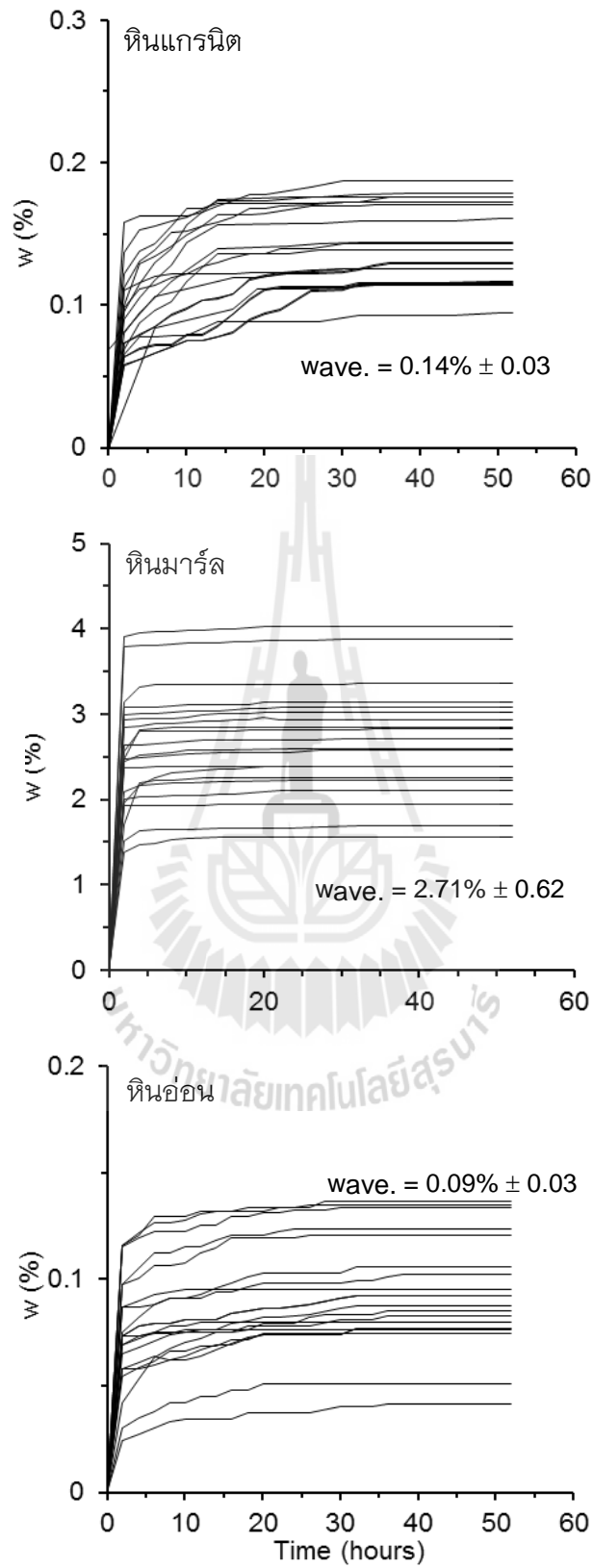


รูปที่ 3.2 ตัวอย่างหินแกรนิต หินมาร์ล และหินอ่อนที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและสามแกน



รูปที่ 3.3 การจัดเตรียมตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ





รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินแกรนิตในสภาวะแห้ง

ตัวอย่างหิน	น้ำหนัก (g)	ขนาดตัวอย่างหิน (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cc)
GR-01-Dry	670.35	50.80×49.40×99.90	2.67
GR-02-Dry	667.70	51.90×49.28×99.44	2.63
GR-03-Dry	669.43	50.08×50.36×100.00	2.65
GR-04-Dry	668.30	50.90×50.00×100.00	2.63
GR-05-Dry	667.05	50.50×49.64×99.92	2.66
GR-06-Dry	670.92	49.44×49.86×99.76	2.73
GR-07-Dry	678.65	50.10×50.74×100.00	2.67
GR-08-Dry	679.15	49.90×51.00×100.72	2.65
GR-09-Dry	673.31	50.24×50.34×99.70	2.67
GR-10-Dry	675.29	50.00×50.40×99.62	2.69
GR-11-Dry	671.43	50.40×49.50×100.00	2.69
GR-12-Dry	652.96	50.00×49.34×99.62	2.66
GR-13-Dry	663.77	50.00×50.44×100.00	2.63
GR-14-Dry	669.51	49.72×50.90×100.10	2.64
GR-15-Dry	655.52	49.56×50.04×99.90	2.65
GR-16-Dry	671.69	49.80×50.80×100.00	2.66
GR-17-Dry	667.49	50.00×50.56×99.74	2.65
GR-18-Dry	681.91	50.16×51.50×99.84	2.64
GR-19-Dry	662.77	50.16×50.24×100.08	2.63
GR-20-Dry	654.94	49.82×49.72×100.56	2.63

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินแกรนิตในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

ตัวอย่างหิน	น้ำหนัก (g)	ขนาดตัวอย่างหิน (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cc)	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)
GR-21-Sat	676.00	50.66×51.18×100.20	2.60	0.125
GR-22-Sat	667.18	50.00×50.46×100.64	2.63	0.117
GR-23-Sat	678.82	50.18×51.30×100.28	2.63	0.090
GR-24-Sat	646.42	48.84×49.40×101.86	2.63	0.178
GR-25-Sat	660.37	49.40×50.00×102.00	2.62	0.139
GR-26-Sat	625.80	49.34×48.24×99.00	2.66	0.144
GR-27-Sat	644.30	49.40×49.90×99.74	2.62	0.161
GR-28-Sat	654.19	49.30×49.50×102.00	2.63	0.170
GR-29-Sat	646.12	48.80×49.70×99.50	2.68	0.171
GR-30-Sat	660.84	49.00×49.70×101.80	2.67	0.175
GR-31-Sat	647.76	49.00×49.70×100.70	2.64	0.142
GR-32-Sat	637.69	48.20×50.00×99.40	2.66	0.187
GR-33-Sat	649.59	50.00×49.60×100.50	2.61	0.110
GR-34-Sat	649.92	50.00×49.80×100.40	2.60	0.113
GR-35-Sat	630.40	50.20×48.55×99.50	2.60	0.129
GR-36-Sat	635.99	49.10×50.00×99.85	2.59	0.175
GR-37-Sat	695.90	51.24×50.86×100.22	2.66	0.125
GR-38-Sat	695.73	50.40×51.20×102.26	2.64	0.120
GR-39-Sat	694.68	51.06×51.00×110.10	2.42	0.114
GR-40-Sat	675.62	51.70×49.70×100.70	2.61	0.128

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินมาร์ลในสถานะแห้ง

ตัวอย่างหิน	น้ำหนัก (g)	ขนาดตัวอย่างหิน (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cc)
MR-01-Dry	620.51	50.20×49.60×99.62	2.50
MR-02-Dry	637.54	49.56×50.10×100.20	2.56
MR-03-Dry	628.23	50.60×49.62×100.20	2.50
MR-04-Dry	639.82	49.90×50.00×99.60	2.57
MR-05-Dry	629.17	50.00×50.00×99.70	2.52
MR-06-Dry	614.96	49.80×50.20×99.50	2.47
MR-07-Dry	601.41	49.72×50.10×99.40	2.43
MR-08-Dry	604.68	50.00×49.80×100.00	2.43
MR-09-Dry	633.06	50.50×50.00×99.80	2.51
MR-10-Dry	616.39	49.64×50.00×99.60	2.49
MR-11-Dry	606.48	49.74×49.28×99.90	2.48
MR-12-Dry	642.62	51.00×50.50×100.20	2.49
MR-13-Dry	643.82	51.00×49.80×99.60	2.55
MR-14-Dry	612.56	49.70×50.00×99.50	2.48
MR-15-Dry	637.43	50.00×50.40×99.62	2.54
MR-16-Dry	633.97	50.00×50.20×100.00	2.53
MR-17-Dry	595.40	50.30×49.80×99.70	2.38
MR-18-Dry	649.13	50.40×51.20×100.00	2.52
MR-19-Dry	616.57	50.20×50.00×100.50	2.44
MR-20-Dry	622.56	50.00×50.20×99.80	2.49

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินมาร์ลในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

ตัวอย่างหิน	น้ำหนัก (g)	ขนาดตัวอย่างหิน (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cc)	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)
MR-21-Sat	642.62	51.40×50.00×100.70	2.48	2.580
MR-22-Sat	637.90	51.00×50.60×100.00	2.47	1.696
MR-23-Sat	625.41	50.90×50.50×100.20	2.43	2.595
MR-24-Sat	635.12	50.75×50.60×100.50	2.46	1.564
MR-25-Sat	622.80	50.30×50.80×100.00	2.44	2.224
MR-26-Sat	651.75	49.60×50.00×100.00	2.63	2.260
MR-27-Sat	637.64	50.50×50.50×99.92	2.50	2.379
MR-28-Sat	618.12	50.30×50.08×100.86	2.43	3.356
MR-29-Sat	623.48	50.24×50.26×100.08	2.47	2.848
MR-30-Sat	618.34	50.50×49.82×100.80	2.44	2.826
MR-31-Sat	610.16	50.25×50.60×100.30	2.39	2.110
MR-32-Sat	630.81	49.04×51.78×100.08	2.48	3.073
MR-33-Sat	619.04	49.00×50.96×100.90	2.46	3.025
MR-34-Sat	618.45	49.20×49.22×100.64	2.54	2.931
MR-35-Sat	598.65	49.52×50.28×100.28	2.40	4.028
MR-36-Sat	612.90	50.00×49.40×100.20	2.48	2.710
MR-37-Sat	622.77	49.60×50.00×100.00	2.51	3.878
MR-38-Sat	616.00	49.40×49.00×100.40	2.53	3.137
MR-39-Sat	632.26	49.00×49.34×100.40	2.60	2.750
MR-40-Sat	625.64	49.40×50.00×99.00	2.56	1.950

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินอ่อนในสภาวะแห้ง

ตัวอย่างหิน	น้ำหนัก (g)	ขนาดตัวอย่างหิน (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cc)
MB-01-Dry	692.85	50.00×50.50×100.00	2.74
MB-02-Dry	690.42	49.62×50.50×99.80	2.76
MB-03-Dry	693.58	50.00×50.40×100.10	2.75
MB-04-Dry	692.16	50.40×49.50×100.10	2.77
MB-05-Dry	699.05	50.20×50.42×100.50	2.75
MB-06-Dry	687.43	49.60×50.00×100.30	2.76
MB-07-Dry	688.84	49.30×49.80×99.72	2.81
MB-08-Dry	690.12	50.00×50.00×100.00	2.76
MB-09-Dry	693.96	50.20×50.00×100.00	2.76
MB-10-Dry	688.05	50.50×50.00×100.50	2.71
MB-11-Dry	698.05	50.90×50.50×100.40	2.70
MB-12-Dry	701.78	50.30×51.00×100.30	2.73
MB-13-Dry	688.27	50.30×49.80×101.00	2.72
MB-14-Dry	691.29	49.82×50.70×100.00	2.74
MB-15-Dry	695.15	50.40×49.64×100.34	2.77
MB-16-Dry	683.08	49.22×50.10×100.40	2.76
MB-17-Dry	683.25	50.20×49.22×100.76	2.74
MB-18-Dry	696.83	49.92×50.62×100.10	2.75
MB-19-Dry	694.30	49.90×50.20×99.90	2.77
MB-20-Dry	691.66	50.60×49.62×100.50	2.74

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติทางกายภาพสำหรับตัวอย่างหินอ่อนในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

ตัวอย่างหิน	น้ำหนัก (g)	ขนาดตัวอย่างหิน (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cc)	ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)
MB-21-Sat	697.02	51.00×50.50×100.80	2.68	0.070
MB-22-Sat	689.66	50.75×50.50×100.80	2.67	0.083
MB-23-Sat	695.15	51.00×50.75×100.90	2.66	0.087
MB-24-Sat	693.92	51.10×50.00×100.65	2.70	0.076
MB-25-Sat	689.52	51.30×50.20×100.70	2.66	0.077
MB-26-Sat	694.36	50.50×49.64×100.00	2.77	0.080
MB-27-Sat	693.53	49.56×50.50×100.10	2.77	0.102
MB-28-Sat	694.92	50.00×50.50×99.90	2.75	0.124
MB-29-Sat	695.80	50.70×50.00×99.90	2.75	0.121
MB-30-Sat	694.65	50.00×50.10×100.00	2.77	0.134
MB-31-Sat	688.83	49.80×49.90×100.00	2.77	0.135
MB-32-Sat	688.85	50.40×50.50×99.80	2.71	0.136
MB-33-Sat	689.69	49.50×50.70×99.70	2.76	0.050
MB-34-Sat	696.92	50.00×50.60×100.30	2.75	0.042
MB-35-Sat	693.12	49.70×50.50×100.40	2.75	0.092
MB-36-Sat	691.20	49.50×50.60×99.60	2.77	0.095
MB-37-Sat	690.92	49.80×50.60×100.00	2.74	0.077
MB-38-Sat	681.82	50.84×50.50×100.58	2.67	0.090
MB-39-Sat	697.25	50.16×50.96×100.82	2.71	0.079
MB-40-Sat	685.16	50.76×49.66×100.30	2.71	0.106

## บทที่ 4

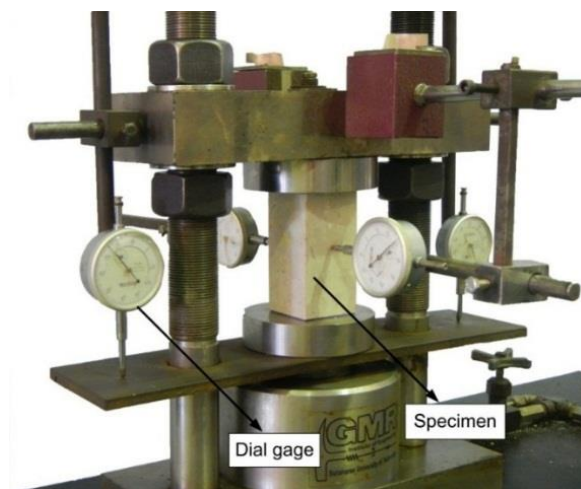
### การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างหินที่สภาวะคล้ายจริงในภาคสนาม กล่าวคือ ชั้นหินในธรรมชาติส่วนใหญ่จะอิ่มตัวด้วยน้ำบาดาล และมีแรงดันล้อมรอบทั้ง 3 ทิศทาง ผลการศึกษาจะแสดงถึงผลกระทบของอัตราการกดและน้ำที่อยู่ในช่องว่างต่อกำลังกดของหิน ซึ่งการทดสอบนี้จะแบ่งเป็น 2 ชุดการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว และการทดสอบกำลังกดในสามแกน

#### 4.2 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว

วัตถุประสงค์ของการทดสอบกำลังกดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) คือ เพื่อหาค่าความเค้นสูงสุด และค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินภายใต้สภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยจะให้อัตราการกดที่แตกต่างกัน 5 อัตรา คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa/s เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากแรงดันน้ำในเนื้อหินต่ออัตราการรับแรงกดของหิน โดยจะใช้ตัวอย่างหินไม่น้อยกว่า 30 ตัวอย่าง วิธีการทดสอบได้ดำเนินการตามมาตรฐานของ ASTM D 7012-07 และตามคำแนะนำของ ISRM (Bieniawski and Bernede, 1978) การทดสอบได้ดำเนินการให้แรงในแนวแกนกับแท่งตัวอย่างโดยแปรผันอัตราการกด 5 อัตรา ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น (รูปที่ 4.1) ในระหว่างการทดสอบได้บันทึกค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากและในแนวแกนกับแท่งตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างหินเกิดการแตก หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์รูปแบบการแตกของตัวอย่างหิน



รูปที่ 4.1 การเตรียมตัวอย่างหินในโครงกดทดสอบในแกนเดียว



### 4.3 การทดสอบกำลังกดในสามแกน

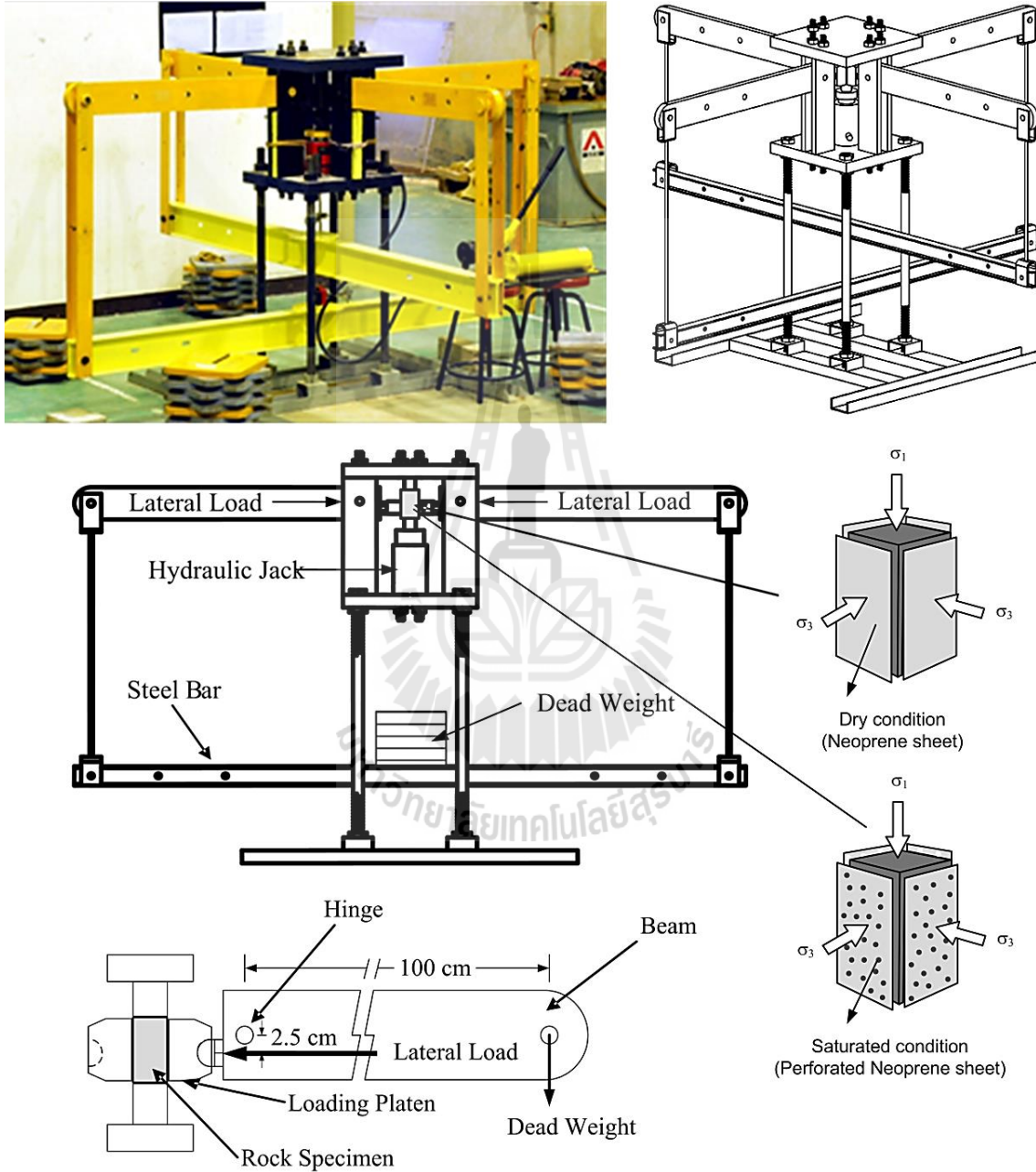
#### 4.3.1 โครงกทดสอบในสามแกนจริง

โครงกทดสอบในสามแกนจริงมีปัจจัยพื้นฐานของการออกแบบ 3 ประการ คือ 1) เพื่อกำหนดค่าความเค้นด้านข้าง ( $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$ ) ให้คงที่ในขณะที่ทำการทดสอบ 2) สามารถทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างหินที่ทดสอบแรงกดสูงสุดในสามแกนแบบดั้งเดิม และ 3) สามารถวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักได้โดยตรง รูปที่ 4.2 แสดงโครงกทดสอบในสามแกนจริงที่มีอยู่แล้ว (Fuenkajorn et al., 2012) ซึ่งได้ถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและในสามแกน ซึ่งค่าความเค้นด้านข้างที่กระทำบนตัวอย่างหินในแต่ละด้านจะได้รับแรงที่เกิดขึ้นจากแกนของคานทอดแรง ในส่วนล่างของคานรับตึมน้ำหนักจะใช้เหล็กเส้นแขวนตึมน้ำหนักเชื่อมต่อระหว่างจุดปลายของคานทั้งสองข้างที่จุดกึ่งกลางของคานรับตึมน้ำหนักเพื่อใช้ใส่ตึมน้ำหนักในการดึงแกนของคานทอดแรงทั้งสองข้างลงที่จุดปลายด้านในของคานทอดแรง ใช้เพลลาเชื่อมต่อกับเสายึดคานทอดแรงที่อยู่ในแต่ละด้านของโครงกทดสอบ ในขณะที่ทำการทดสอบคานทอดแรงทุกข้างจะปรับให้อยู่ในแนวระนาบซึ่งจะส่งผลต่อแรงกดด้านข้างบนตัวอย่างหินที่จุดกึ่งกลางของโครงกทดสอบ และได้กำหนดระยะห่างของเหล็กเส้นแขวนตึมน้ำหนักที่ใช้แขวนคานรับตึมน้ำหนักจากจุดปลายด้านนอกถึงปลายด้านใน อัตราส่วนของแรงจะมีค่าเท่ากับ 12.3 ในทิศตะวันออก-ตะวันตก และ 11.5 ในทิศเหนือ-ใต้ (รูปที่ 4.3) ซึ่งได้ทำการสอบเทียบโดย Electronic load cell อัตราส่วนของแรงที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างด้านข้างด้วยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของแท่งเหล็กทั้งสองที่อยู่ข้างล่าง ส่วนแรงกระทำด้านข้าง ( $\sigma_2$  และ  $\sigma_3$ ) ได้ออกแบบให้สามารถให้ความเค้นมากกว่า 50 MPa และปั๊มไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ให้ความเค้นกระทำในแนวตั้ง ( $\sigma_1$ ) สามารถให้ความเค้นสูงมากกว่า 100 MPa โครงกทดสอบสามารถรองรับขนาดของตัวอย่างหินได้ตั้งแต่ 2.5×2.5×2.5 cm ถึง 10×10×20 cm การทดสอบกับแท่งตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันจะต้องมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกดทั้งสองข้างให้เหมาะสม

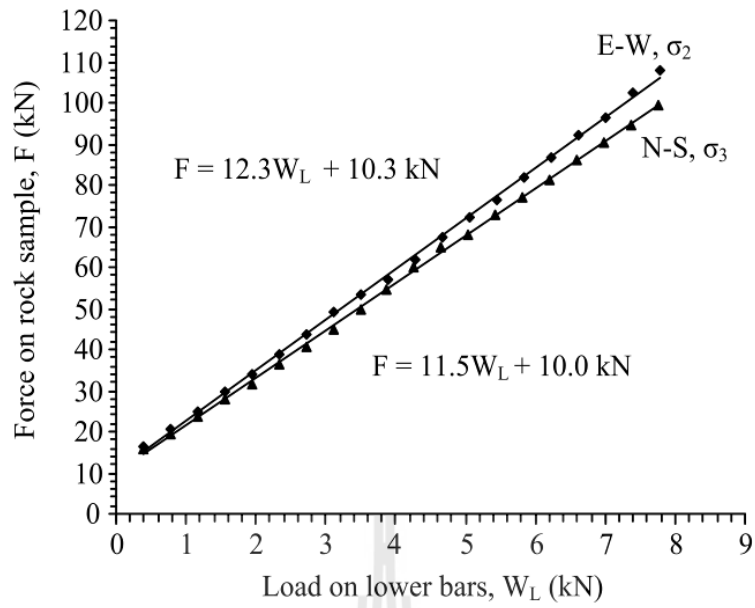
#### 4.3.2 วิธีการทดสอบกำลังกดในสามแกน

ในการทดสอบกำลังกดในสามแกนได้ใช้โครงกทดสอบในสามแกนจริงดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยโครงกทดสอบจะใช้หลักการของคานในการให้แรงแบบคงที่ในแนวด้านข้าง และให้แรงในแนวแกนด้วยปั๊มไฮดรอลิก การทดสอบได้จำลองสภาวะความดันล้อมรอบ ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) ต่างกันที่ 3, 7 และ 12 MPa เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากแรงดันน้ำในเนื้อหินในสภาวะใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด และทำการแปรผันอัตราการกดที่แตกต่างกัน 5 อัตรา คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1 และ 10 MPa/s โดยจะใช้ตัวอย่างหินไม่น้อยกว่า 90 ตัวอย่าง ก่อนนำตัวอย่างหินใส่ในโครงกทดสอบได้ทำการพันหินด้วยแผ่น Neoprene ทั้ง 6 ด้าน ของพื้นที่หน้าตัดเพื่อลดแรงเสียดทานที่จะเกิดขึ้นระหว่างเนื้อหินกับแผ่นเหล็ก (รูปที่ 4.4) หลังจากนั้นจึงใส่ตัวอย่างหินในโครงกทดสอบและให้ความเค้นด้านข้างแก่ตัวอย่างหินทั้ง 4 ด้าน เมื่อเสร็จสิ้นวิธีการข้างต้นจึงเริ่มทดสอบโดยเพิ่มแรงในแนวแกนในอัตราคงที่จนกระทั่งตัวอย่างหิน

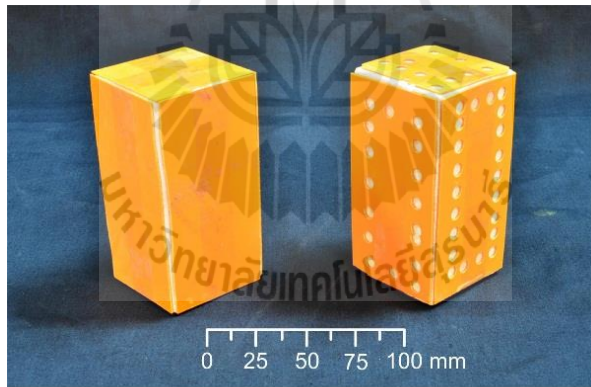
เกิดการแตก ในการทดสอบได้ติดตั้งมาตรวัดการเคลื่อนตัว (Dial gauge) ในแนวแกนและในแนว  
 ด้านข้างเพื่อทำการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวระหว่างการทดสอบในขณะที่ตัวอย่างหินทรายถูกกดเพิ่มขึ้น  
 ด้วยปั๊มไฮดรอลิกด้วยอัตราที่กำหนดจนกระทั่งหินแตกเพื่อนำไปคำนวณความยืดหยุ่นของหิน  
 (สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองส์)



รูปที่ 4.2 โครงกทดสอบในสามแกนจริง



รูปที่ 4.3 การสอบเทียบอัตราส่วนของแรงโดย Electronic load cell อัตราส่วนนี้ได้นำมาใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งตัวอย่างหินด้านข้าง



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างหินที่ติดแผ่น Neoprene เพื่อลดผลกระทบของแรงเสียดทานระหว่างแผ่นเหล็กและผิวหิน ซึ่งตัวอย่างหินด้านขวาจะมีการเจาะรูไว้เพื่อให้มีการระบายน้ำออกขณะทดสอบสำหรับตัวอย่างหินที่อิมตัวด้วยน้ำ

#### 4.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและในสามแกน

รูปที่ 4.5 ถึง 4.7 แสดงตัวอย่างหินหลังการทดสอบภายใต้การผันแปรความดันล้อมรอบ 0, 3, 7 และ 12 MPa และอัตราการกดที่ 1 และ 0.001 MPa/s จากการสังเกตชี้ให้เห็นว่าที่อัตราการกดต่ำได้เกิดการแตกของหินแบบเฉือน และที่อัตราการกดสูงเกิดการแตกของหินแบบแยกออกจากกันตามแนวยาวที่ขนานกับแรงกด และเมื่อความดันล้อมรอบสูงขึ้นปริมาณรอยแตกของหินมีจำนวนเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.8 ถึง 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหินทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำภายใต้การผันแปรความดันล้อมรอบและอัตราการกดที่ระดับต่างๆ ผลที่ได้จะนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Elastic modulus) และอัตราส่วนปัวซองของแต่ละแท่งตัวอย่าง จากกราฟแสดงให้เห็นว่าภายใต้อัตราการกดต่ำ กราฟความสัมพันธ์มีความเป็นเส้นโค้งมากขึ้น และที่อัตราการกดสูงส่งผลให้ค่าความเค้นมีค่าสูงขึ้นขณะที่ค่าความเครียดมีค่าลดลง ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Li และคณะ (1999) and Masuda (2001) ส่วนที่อัตราการกดเดียวกันค่าความเค้นและค่าความเครียดมีค่าสูงขึ้นเมื่อความดันล้อมรอบสูงขึ้นทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ผลกระทบของแรงดันน้ำส่งผลให้ค่าความเค้นสูงสุดของหินลดลงโดยเฉพาะภายใต้แรงดันล้อมรอบและอัตราการกดสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Cobanoglu and Celik (2012), Masuda (2001), Hawkins and McConnell (1992), Vasarhelyi (2003, 2006) อาจเป็นเพราะว่าภายใต้อัตราการกดต่ำ น้ำที่อยู่ในตัวอย่างหินมีเวลามากเพียงพอต่อการไหลออกตามรูพรุน จึงส่งผลให้ตัวอย่างหินนั้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับผลการทดสอบของหินในสภาวะแห้ง ขณะเดียวกันที่อัตราการกดสูง น้ำไม่สามารถไหลออกมาได้ทันจึงทำให้เกิดแรงดันน้ำภายในหินและส่งผลให้ค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.11 สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดและค่าความดันล้อมรอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12

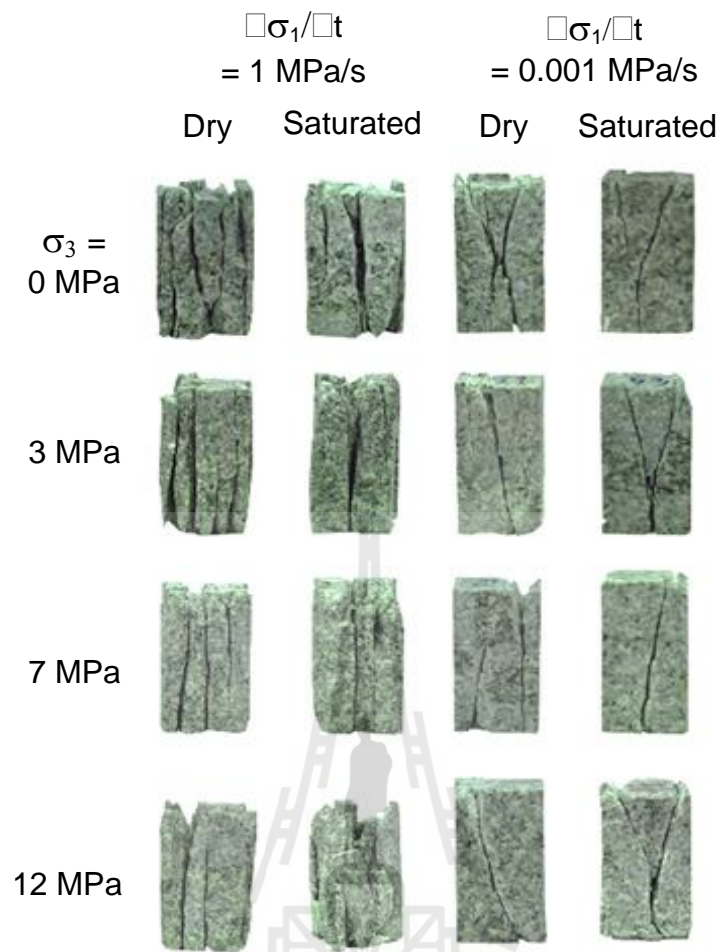
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความเค้นสูงสุดในสามมิติโดยแสดงในรูปแบบของความเค้นเฉือนในสามมิติกับความเครียดเฉือนในสามมิติสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\tau_{\text{oct}} = (1/3) [2 (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (4.1)$$

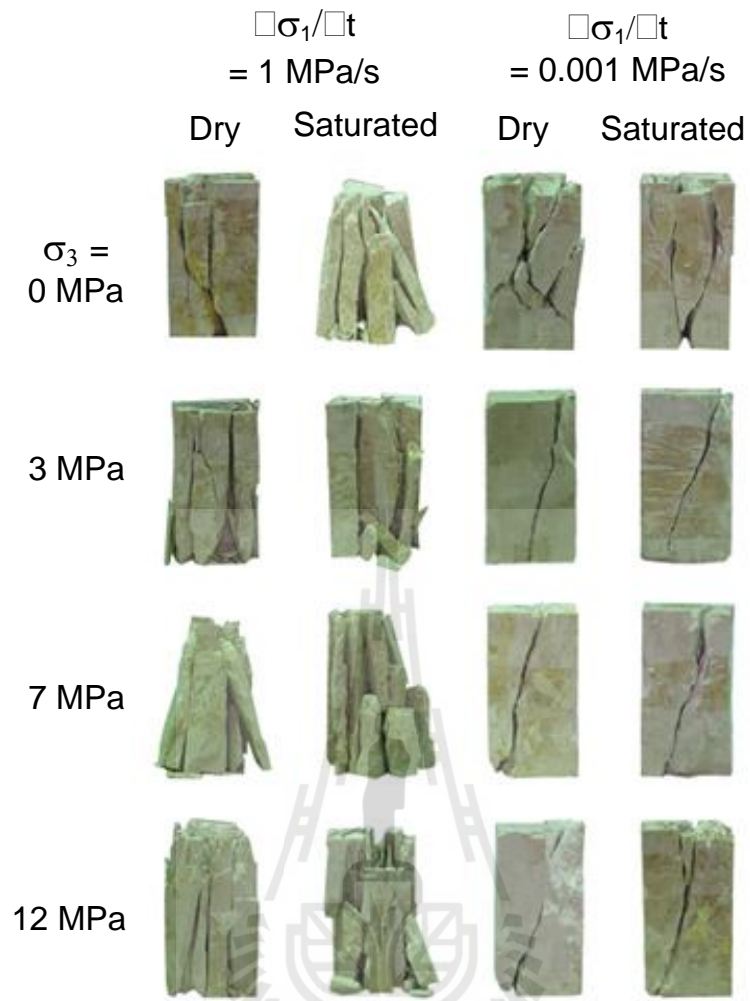
$$\gamma_{\text{oct}} = (1/3) [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]^{1/2} \quad (4.2)$$

โดยที่

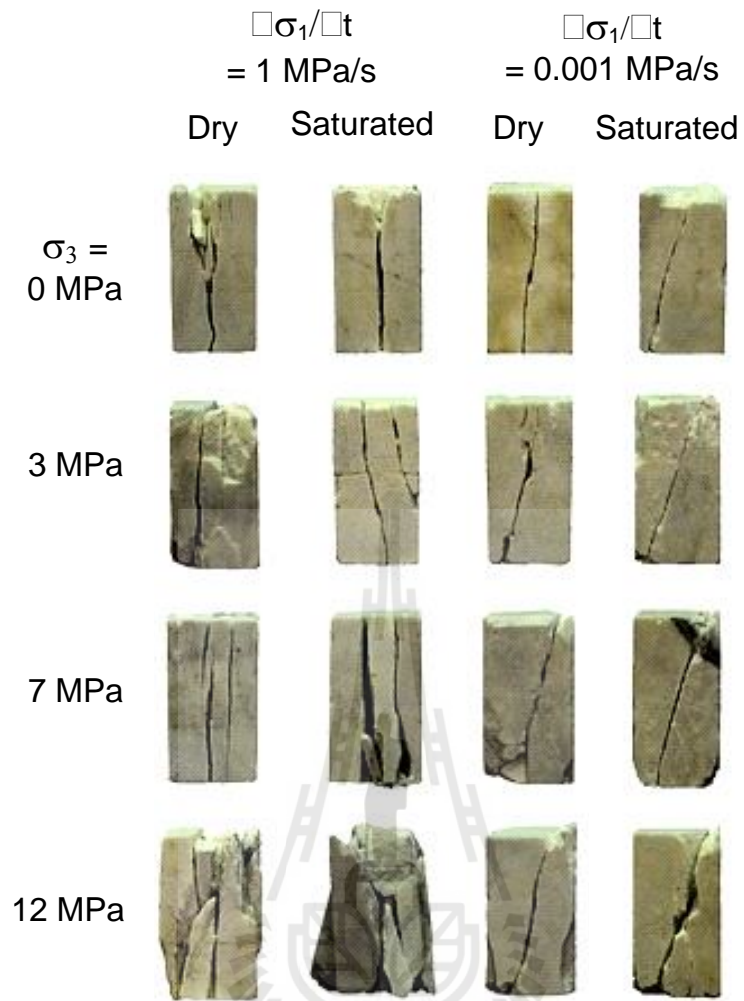
$\sigma_1$	=	ความเค้นสูงสุด
$\sigma_3$	=	ความเค้นต่ำสุด
$\varepsilon_1$ ,	=	ความเครียดในแนวความเค้นสูงสุด
$\varepsilon_2$ และ $\varepsilon_3$	=	ความเครียดในแนวความเค้นต่ำสุด



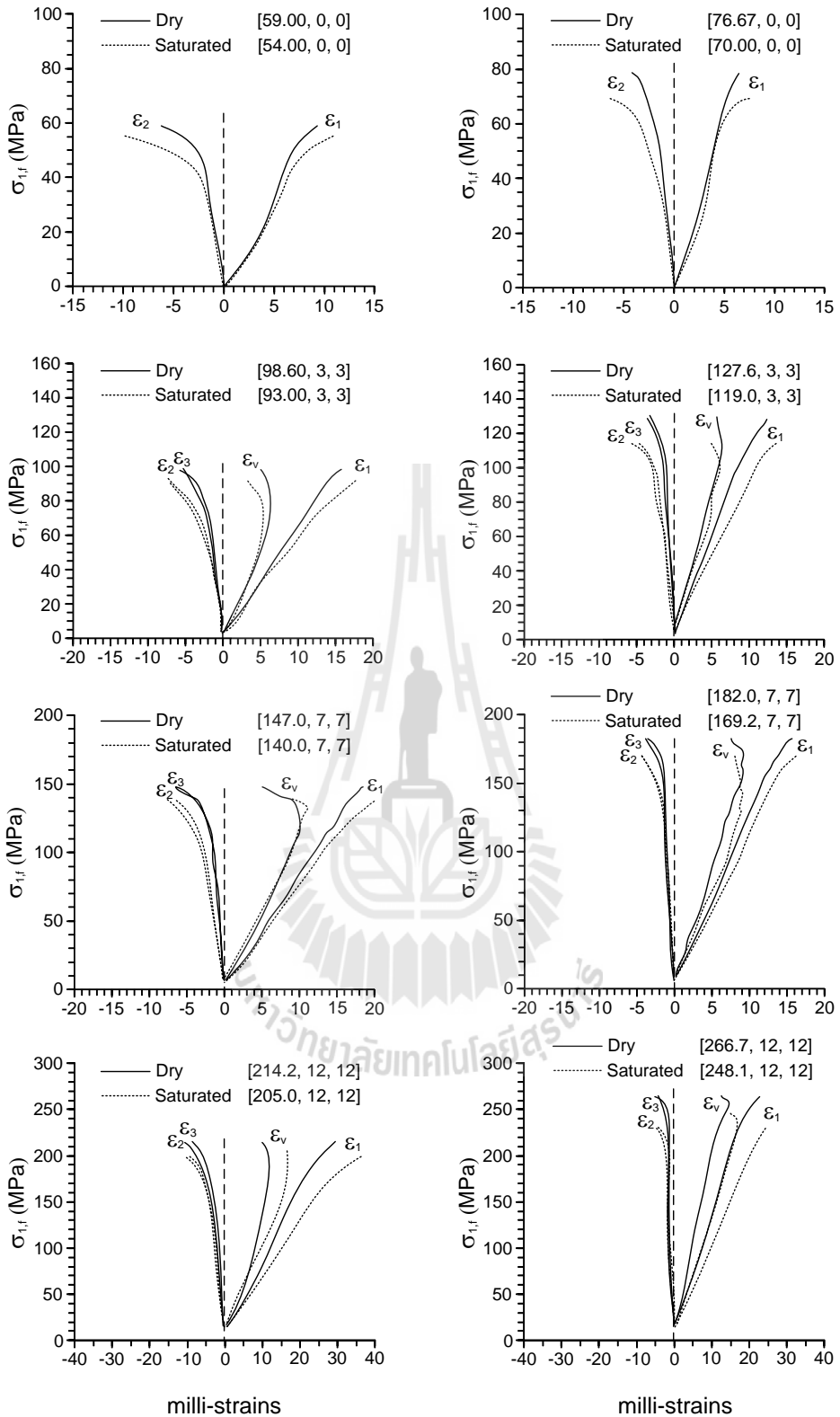
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างหินแกรนิตหลังการทดสอบการรับแรงกด



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างหินมาร์ลหลังการทดสอบการรับแรงกด

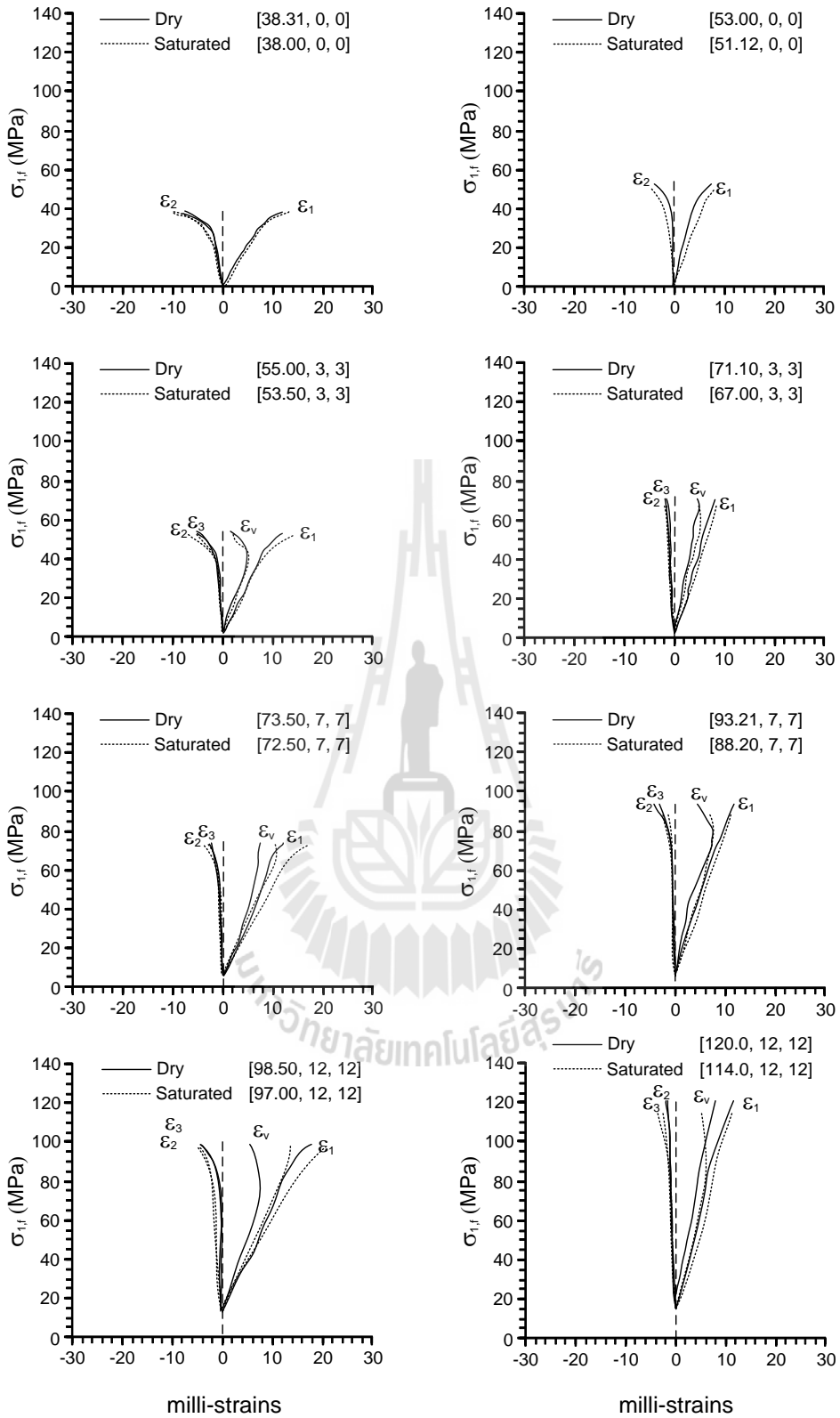


รูปที่ 4.7 ตัวอย่างหินอ่อนหลังการทดสอบการรับแรงกด

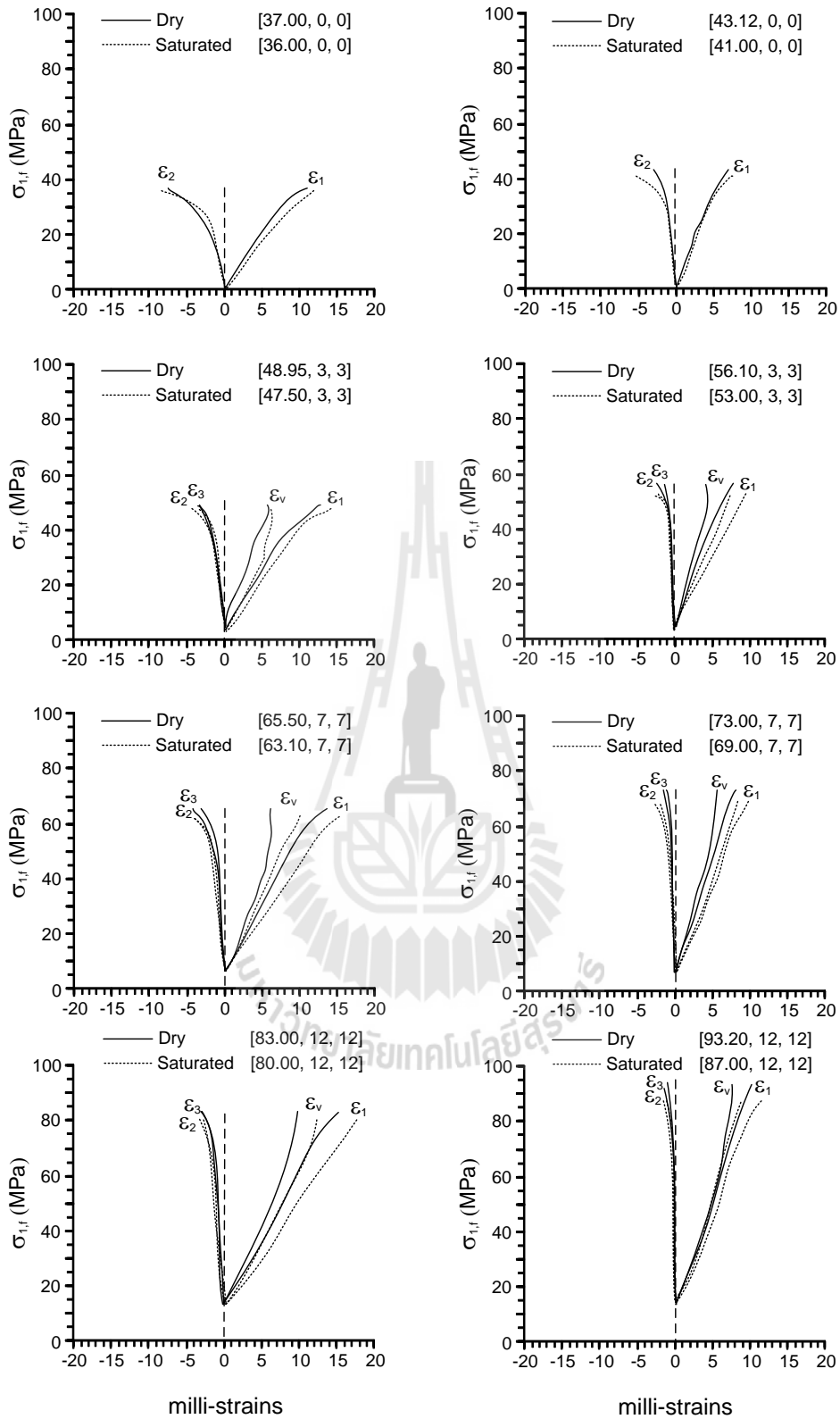


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหินแกรนิตทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่อัตราการกดเท่ากับ 0.001 และ 1 MPa/s ตัวเลขในวงเล็บแสดงค่า  $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  ที่จุดแตก]

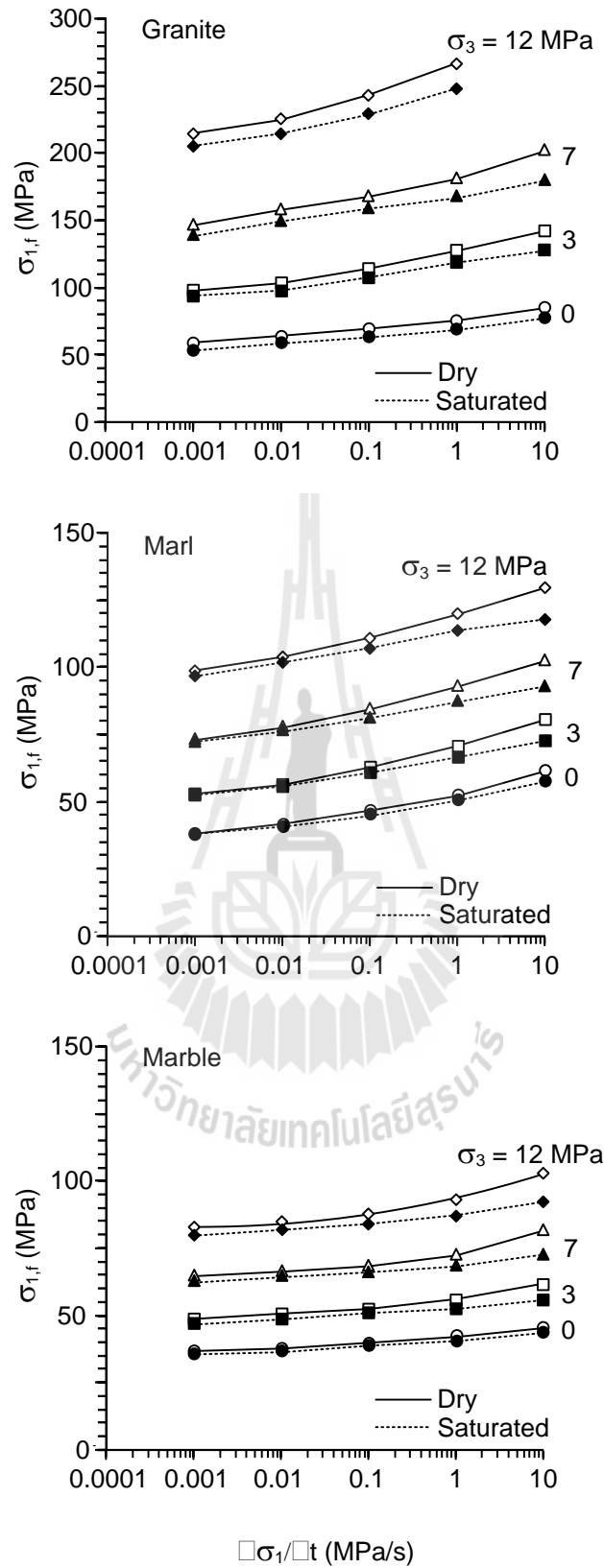




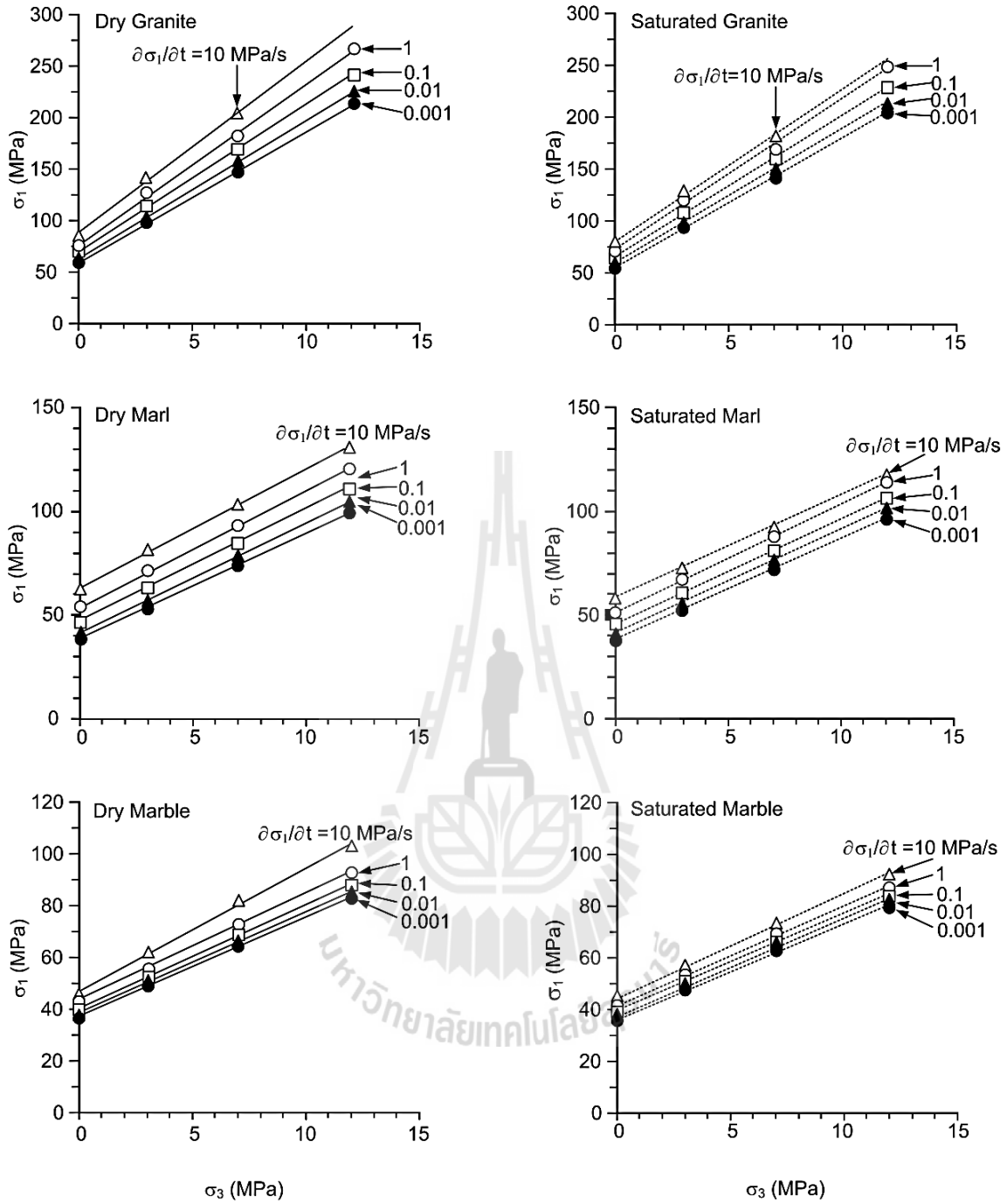
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหินมาร์ลทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่อัตราการกดเท่ากับ 0.001 และ 1 MPa/s ตัวเลขในวงเล็บแสดงค่า  $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  ที่จุดแตก]



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหินอ่อนทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำที่อัตราการกดเท่ากับ 0.001 และ 1 MPa/s ตัวเลขในวงเล็บแสดงค่า  $[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]$  ที่จุดแตก]

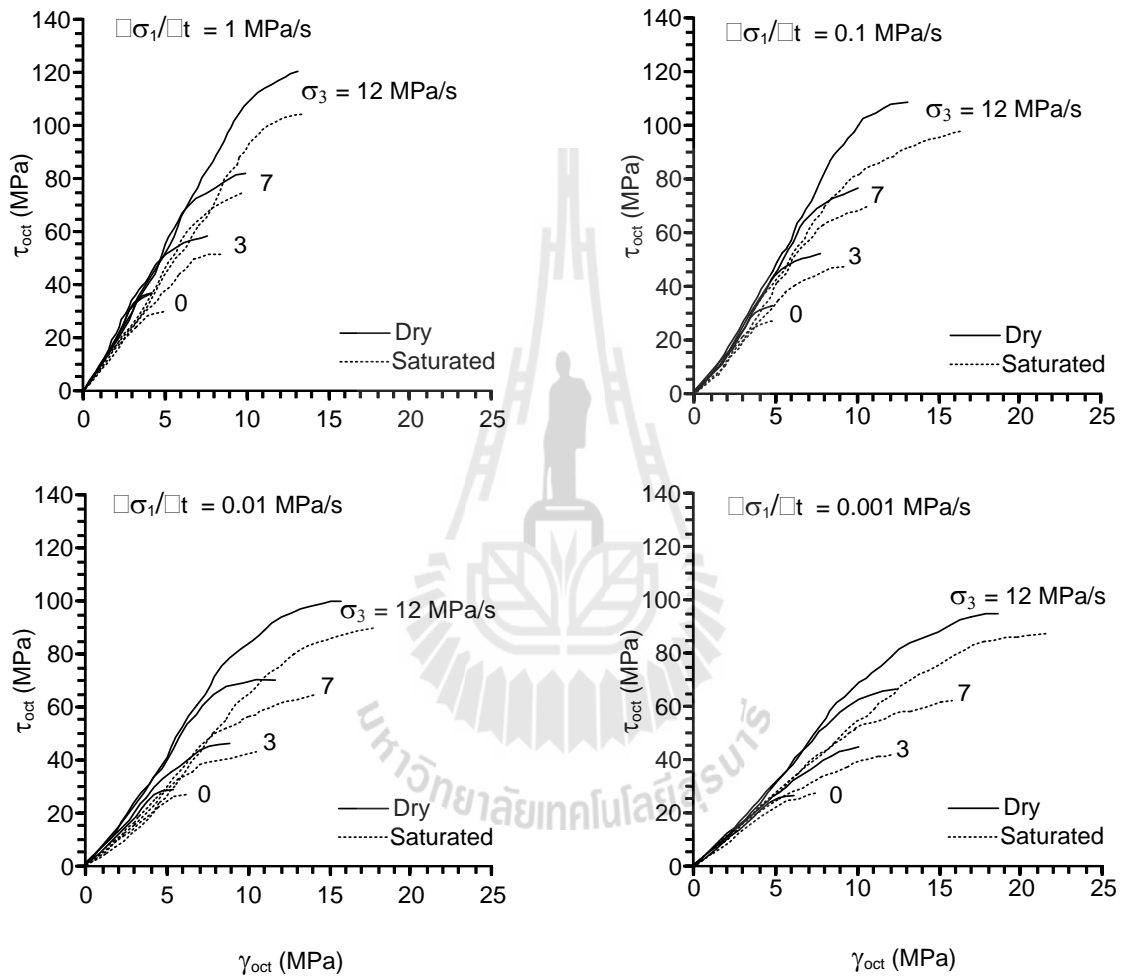


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดและค่าอัตราการกดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

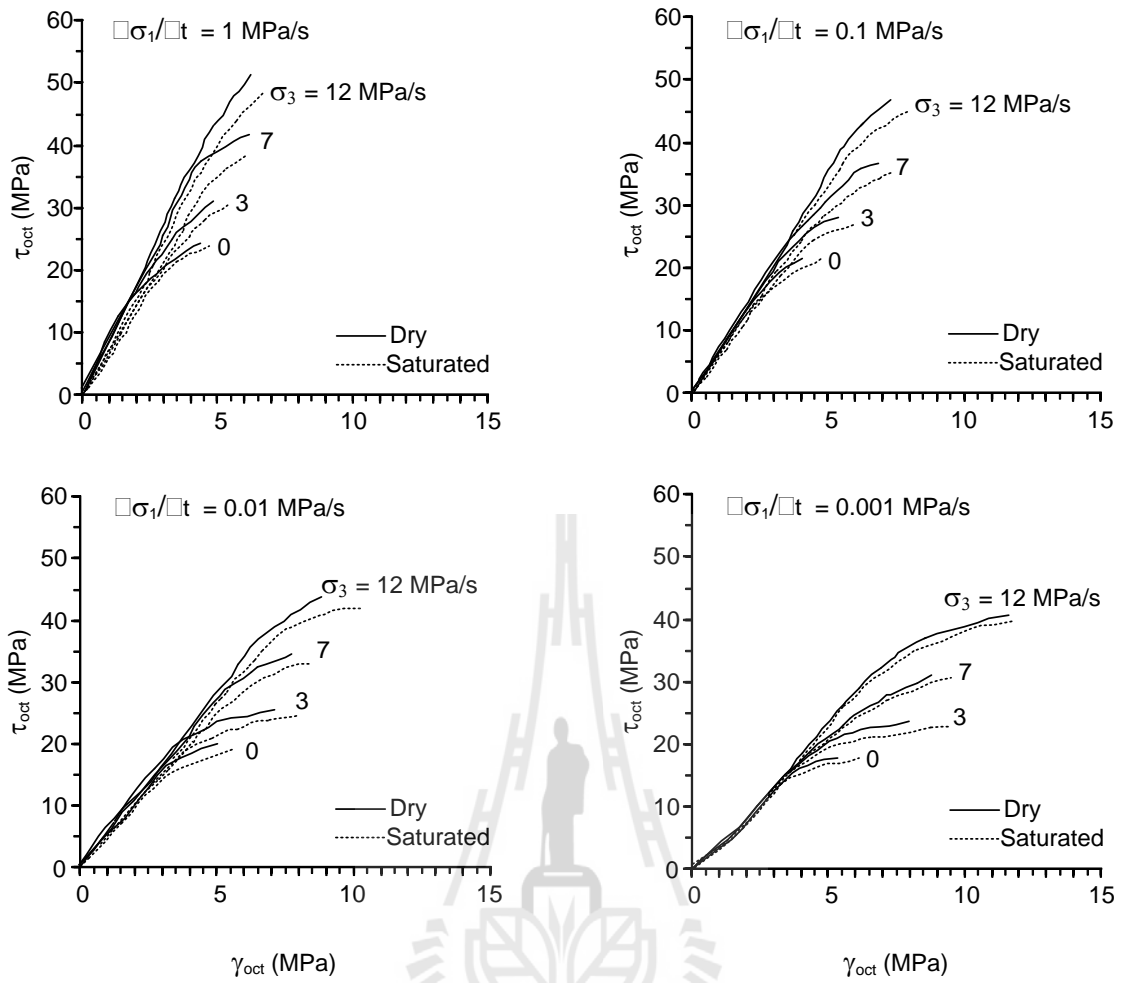


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดและค่าความดันล้อมรอบของตัวอย่างหินในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ

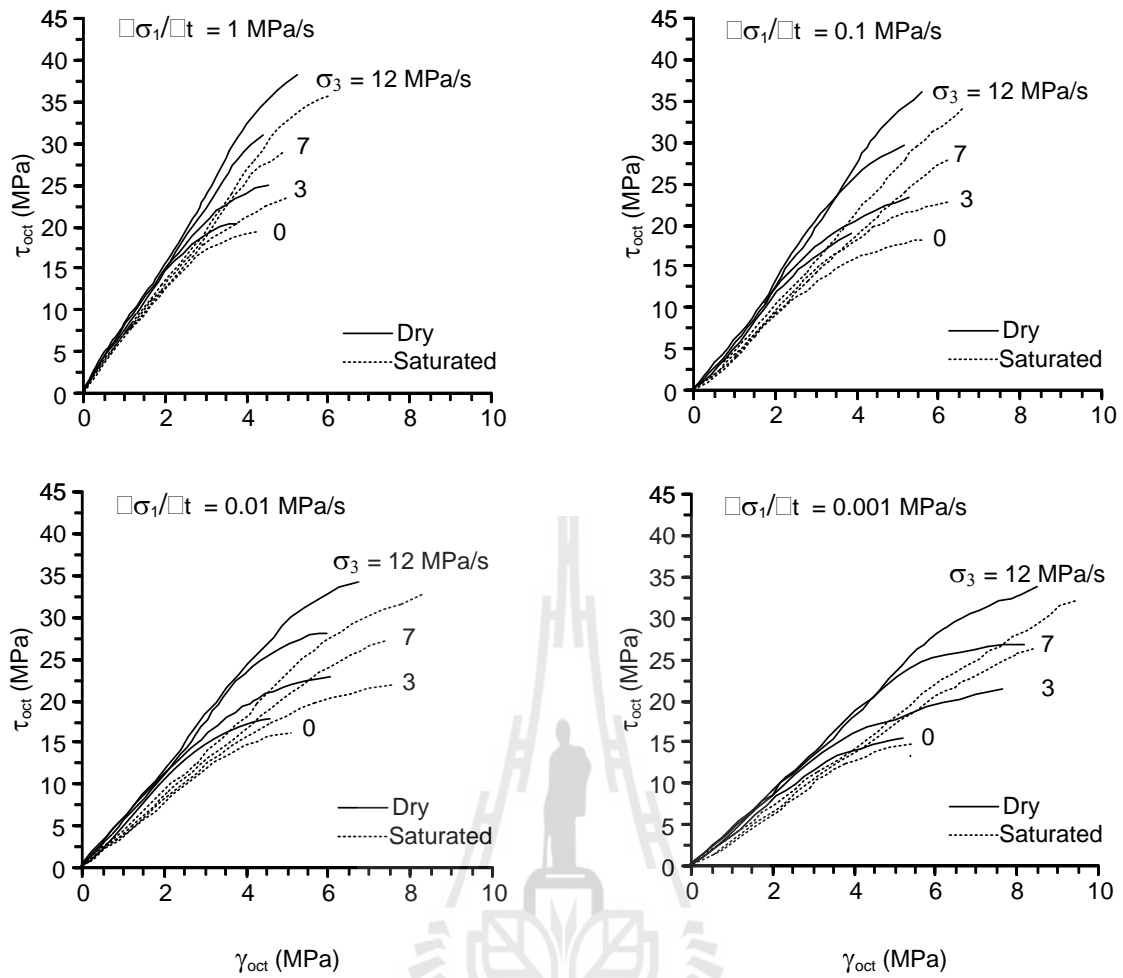
รูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนในสามมิติกับความเครียดเฉือนในสามมิติ จากกราฟแสดงให้เห็นว่ากราฟความสัมพันธ์มีความเป็นเส้นโค้งมากขึ้นเมื่อความดันล้อมรอบสูงขึ้น และที่อัตราการกดสูงส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติมีค่าสูงขึ้น ขณะที่ค่าความเครียดเฉือนในสามมิติมีค่าลดลงที่จุดแตก ผลกระทบของแรงดันน้ำส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติมีค่าลดลงขณะที่ค่าความเครียดเฉือนในสามมิติมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนในสามมิติและค่าความเครียดเฉือนในสามมิติภายใต้การแปรผันความดันล้อมรอบของตัวอย่างหินแกรนิตในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนในสามมิติและค่าความเครียดเฉือนในสามมิติภายใต้การแปรผันความดันล้อมรอบของตัวอย่างหินมาร์ลในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนในสามมิติและค่าความเค้นดัดเฉือนในสามมิติภายใต้การแปรผันความดันล้อมรอบของตัวอย่างหินอ่อนในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสร้างเกณฑ์การแตก

#### 5.1 วัตถุประสงค์

นำผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติหินในบทที่ 4 มาอธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหิน และนำมาสร้างเกณฑ์การแตกของหินโดยใช้กฎของคูอมม์และเกณฑ์การแตกในสามแกนซึ่งถูกพัฒนาบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด

#### 5.2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหิน

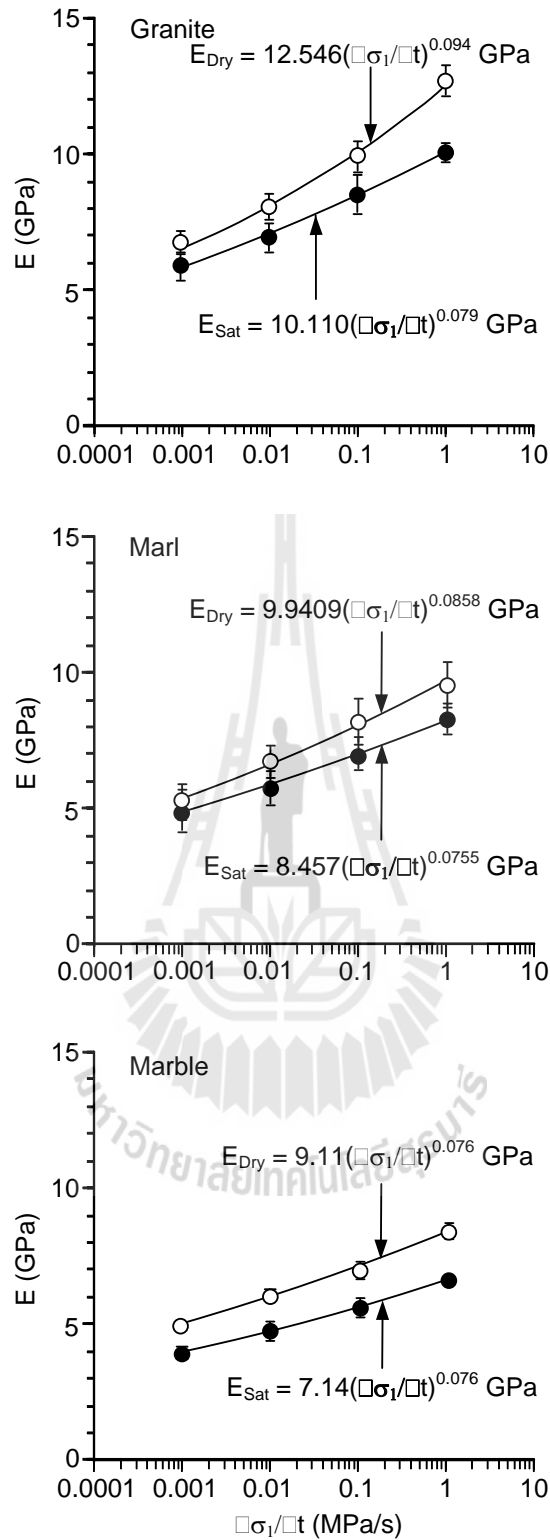
ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในบทที่ 4 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างหินจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการกดสูงขึ้นและไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความดันล้อมรอบสูงขึ้น ตัวอย่างที่อิมตัวด้วยน้ำมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นน้อยกว่าหินในสถานะแห้งดังแสดงในรูปที่ 5.1 ส่วนค่าอัตราส่วนปัวซองส์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อได้รับผลกระทบของแรงดันน้ำดังแสดงในรูปที่ 5.2 และภายใต้อัตราการให้แรงกดต่ำค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของหินในสถานะอิมตัวด้วยน้ำและสถานะแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li et al. (2012), Vasarhelyi (2003, 2006) and Yilmaz (2010) ค่าความเค้นสูงสุด ( $\sigma_1$ ) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (E) และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ ( $\nu$ ) ของหินในสถานะแห้งและสถานะอิมตัวด้วยน้ำถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์ในฟังก์ชันของความดันล้อมรอบและอัตราการกดสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$E = \alpha (\partial\sigma_1/\partial t)^\beta \quad (5.1)$$

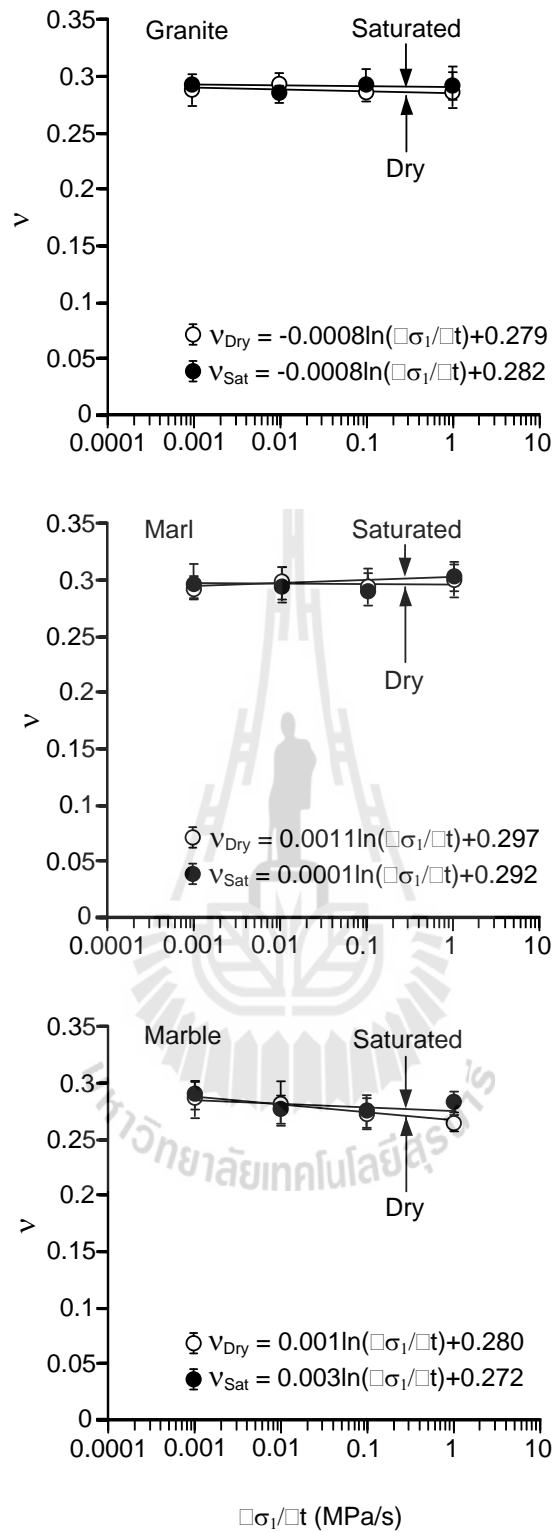
$$\nu = \kappa \ln (\partial\sigma_1/\partial t) + \xi \quad (5.2)$$

โดยที่  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\kappa$  และ  $\xi$  = ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการในรูปที่ 5.1 และ 5.2





รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราการกดของตัวอย่างหินในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนปัวซองของสี่และค่าอัตราการกดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

ตารางที่ 5.1 ค่าความเค้นสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของหินที่ทดสอบในสภาวะแห้ง

ชนิดหิน	อัตรา การกด (MPa/s)	$\sigma_3 = 0$ (MPa)			$\sigma_3 = 3$ (MPa)			$\sigma_3 = 7$ (MPa)			$\sigma_3 = 12$ (MPa)		
		$\sigma_1$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_1$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_1$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_1$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$
หินแกรนิต	10	86.0	N/A	N/A	142.1	N/A	N/A	203.0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	76.7	13.64	0.28	127.6	12.12	0.29	182.0	12.64	0.27	266.7	12.45	0.29
	0.1	69.7	10.75	0.29	114.0	9.08	0.29	169.2	10.08	0.28	243.0	9.83	0.28
	0.01	64.3	8.11	0.27	104.0	7.31	0.30	158.5	8.16	0.29	225.3	8.75	0.29
	0.001	59.0	6.25	0.28	98.6	5.83	0.27	147.2	7.06	0.29	214.2	7.31	0.30
หินมาร์ล	10	62.0	N/A	N/A	81.0	N/A	N/A	103.0	N/A	N/A	130.0	N/A	N/A
	1	53.0	9.88	0.30	71.0	8.88	0.29	93.2	9.11	0.31	120.4	10.99	0.28
	0.1	47.0	8.08	0.31	63.2	7.46	0.27	85.4	8.18	0.30	111.5	9.67	0.29
	0.01	41.7	6.36	0.27	56.7	6.44	0.30	78.5	6.73	0.29	104.0	7.88	0.31
	0.001	38.3	4.63	0.29	53.3	5.15	0.27	73.5	5.32	0.29	98.5	6.38	0.30
หินอ่อน	10	46.3	N/A	N/A	62.1	N/A	N/A	82.0	N/A	N/A	103.0	N/A	N/A
	1	43.0	9.28	0.27	56.3	8.75	0.26	73.2	9.10	0.28	93.0	9.41	0.27
	0.1	39.7	7.22	0.26	53.4	7.11	0.30	69.3	7.79	0.28	88.3	7.94	0.27
	0.01	38.2	6.45	0.32	50.9	6.48	0.26	66.8	6.73	0.28	85.0	6.72	0.28
	0.001	36.8	5.08	0.31	49.0	5.10	0.29	64.8	5.49	0.27	83.2	5.57	0.27

ตารางที่ 5.2 ค่าความเค้นสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของหินที่ทดสอบในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

ชนิดหิน	อัตรา การกด (MPa/s)	$\sigma_3 = 0$ (MPa)			$\sigma_3 = 3$ (MPa)			$\sigma_3 = 7$ (MPa)			$\sigma_3 = 12$ (MPa)		
		$\sigma_1$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_1$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_1$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_1$ (MPa)	E (MPa)	$\nu$
หินแกรนิต	10	80.0	N/A	N/A	120.0	N/A	N/A	174.1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	72.2	9.77	0.31	112.2	10.21	0.28	165.0	10.56	0.27	232.3	9.80	0.27
	0.1	66.0	8.16	0.30	101.6	8.54	0.27	156.2	9.65	0.27	221.2	7.72	0.27
	0.01	61.8	6.87	0.29	97.3	6.23	0.29	143.8	7.79	0.28	204.0	6.90	0.26
	0.001	57.4	5.19	0.29	91.9	5.63	0.29	139.0	6.45	0.29	197.8	6.31	0.29
หินมาร์ล	10	58.1	N/A	N/A	73.0	N/A	N/A	93.0	N/A	N/A	118.0	N/A	N/A
	1	51.4	7.98	0.32	67.0	8.13	0.29	88.0	8.21	0.29	113.8	9.41	0.29
	0.1	45.9	6.31	0.31	60.8	7.21	0.27	81.5	7.17	0.28	107.5	8.00	0.28
	0.01	41.2	4.85	0.31	56.0	6.18	0.29	77.3	6.25	0.27	101.7	6.36	0.28
	0.001	38.0	4.11	0.32	52.5	4.49	0.28	72.5	5.61	0.28	97.0	5.95	0.29
หินอ่อน	10	44.2	N/A	N/A	56.1	N/A	N/A	73.3	N/A	N/A	92.0	N/A	N/A
	1	42.5	7.11	0.29	53.9	7.13	0.29	69.0	6.98	0.27	87.7	7.21	0.30
	0.1	40.0	6.22	0.26	51.5	5.50	0.29	66.5	5.88	0.27	85.0	6.49	0.29
	0.01	38.2	5.26	0.26	48.9	4.68	0.28	64.0	4.81	0.30	81.7	5.57	0.28
	0.001	37.0	4.01	0.31	47.5	3.99	0.27	62.2	4.30	0.30	80.0	4.56	0.29

### 5.3 เกณฑ์การแตกของคูลอมบ์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำผลจากการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสามแกนมาหาค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานของตัวอย่างหินทั้งในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ จากความสัมพันธ์

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (5.3)$$

โดยที่  $\sigma_n$  = ความเค้นตั้งฉาก     $C$  = ความเค้นยึดติด     $\phi$  = ค่ามุมเสียดทาน

สามารถหาค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานได้โดยนำค่าความเค้นของหินที่ผันแปรกับอัตราการกดและความดันล้อมรอบในบทที่ 4 ไปหาความสัมพันธ์โดยอาศัยหลักการของวงกลม Mohr จากนั้นจึงนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานกับอัตราการกด ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 นอกจากนี้ยังสามารถรู้ค่ากำลังเฉือนสูงสุดที่ความเค้นตั้งฉากใดๆ ได้ด้วยการนำค่าความเค้นยึดติดและค่ามุมเสียดทานแทนลงในสมการที่ (5.3)

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ภายใต้พื้นฐานของคูลอมบ์ระบุว่า ค่าความเค้นยึดติดของหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่าน้ำไม่มีผลกระทบต่อค่าความเค้นยึดติดของหิน และเมื่ออัตราการกด ( $\partial\sigma_1/\partial t$ ) สูงขึ้น ค่าความเค้นยึดติดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน สามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

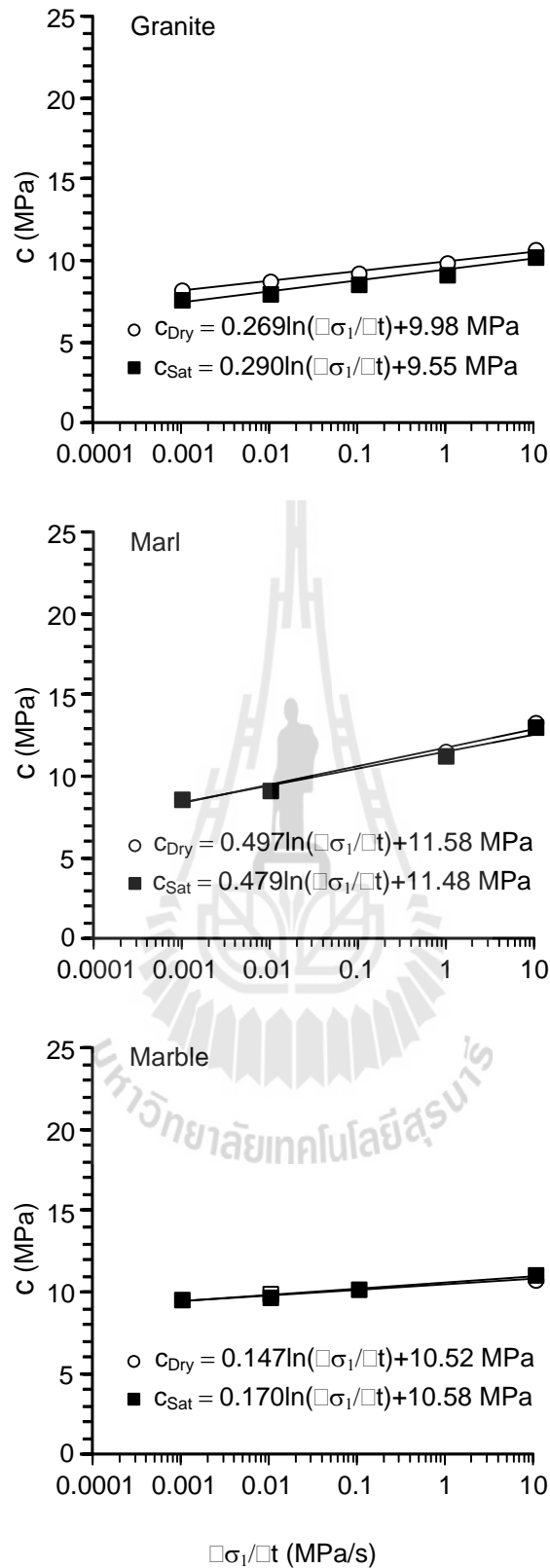
$$c = \chi \cdot \ln(\partial\sigma_1/\partial t) + \psi \quad (5.4)$$

โดยที่  $\chi$  และ  $\psi$  = ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการในรูปที่ 5.3

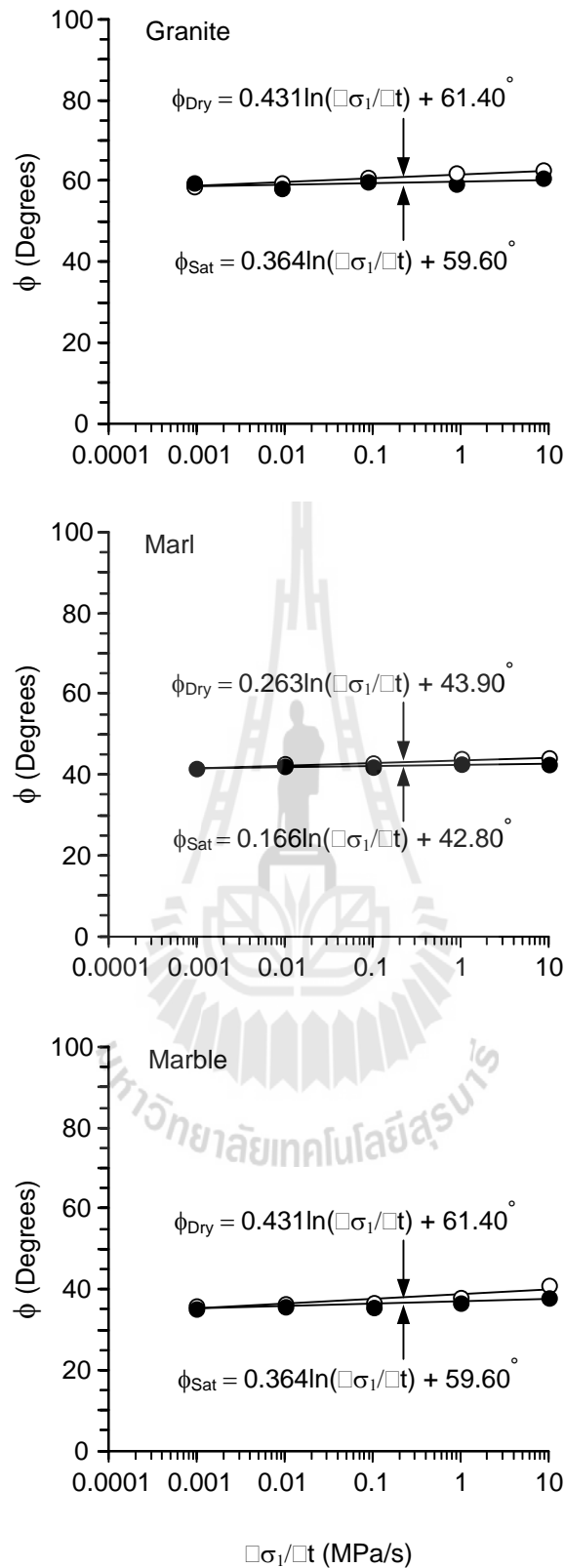
ส่วนค่ามุมเสียดทานของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งมีค่าสูงกว่าหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออัตราการกด ( $\partial\sigma_1/\partial t$ ) เพิ่มขึ้น สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\phi = \omega \cdot \ln(\partial\sigma_1/\partial t) + \epsilon \quad (5.5)$$

โดยที่  $\omega$  และ  $\epsilon$  = ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นยึดติดและค่าอัตราการกดของตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานและค่าอัตราการกดของตัวอย่างหินในสถานะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ

#### 5.4 เกณฑ์การแตกบนพื้นฐานของพลังงานความเครียด

พลังงานความเครียด (Strain energy) ที่ถูกเก็บอยู่ในหินที่อยู่ภายใต้ความเค้นหรือที่ถูกเปลี่ยนรูปเป็นองค์ประกอบของความรู้ที่สำคัญอันหนึ่งทางด้านกลศาสตร์หิน เหตุผลคือ คุณสมบัติและพฤติกรรมของหินจะซับซ้อนเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของหิน ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปหรือการแตกของหินบางครั้งไม่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีพื้นฐาน ดังนั้นการวิเคราะห์ในรูปของพลังงานจึงเป็นการวิเคราะห์อย่างตรงไปตรงมาและเป็นพื้นฐานที่สุด พลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ความหนาแน่นพลังงานความเครียดที่เกี่ยวข้องกับค่าเฉลี่ยของความเค้น (Mean strain energy,  $W_m$ ) ดังสมการ

$$W_m = s^2/2K \quad (5.6)$$

ส่วนที่สองคือ พลังงานความเครียดที่เกี่ยวกับค่าความเค้นและความเครียดเบี่ยงเบน ซึ่งบางครั้งเรียกว่า พลังงานความเครียดเชิงเบี่ยงเบน (Strain energy of distortion)

$$W_d = (3/4G) \times \tau_{oct}^2 \quad (5.7)$$

โดยที่

- K = ค่าสัมประสิทธิ์ก้อน
- G = ค่าสัมประสิทธิ์เฉือน
- s = ค่าความไม่ผันแปรของความเค้น
- $\tau_{oct}$  = ค่าความเค้นในแนวเฉือนรวมหกด้าน

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ก้อนและค่าสัมประสิทธิ์เฉือนสามารถหาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์ดังสมการต่อไปนี้

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5.8)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5.9)$$

ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ก้อนและค่าสัมประสิทธิ์เฉือนแสดงในรูปที่ 5.5 และ 5.6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้



$$K = \nu (\partial\sigma_1/\partial t)^\eta \quad (5.10)$$

$$G = \lambda (\partial\sigma_1/\partial t)^\rho \quad (5.11)$$

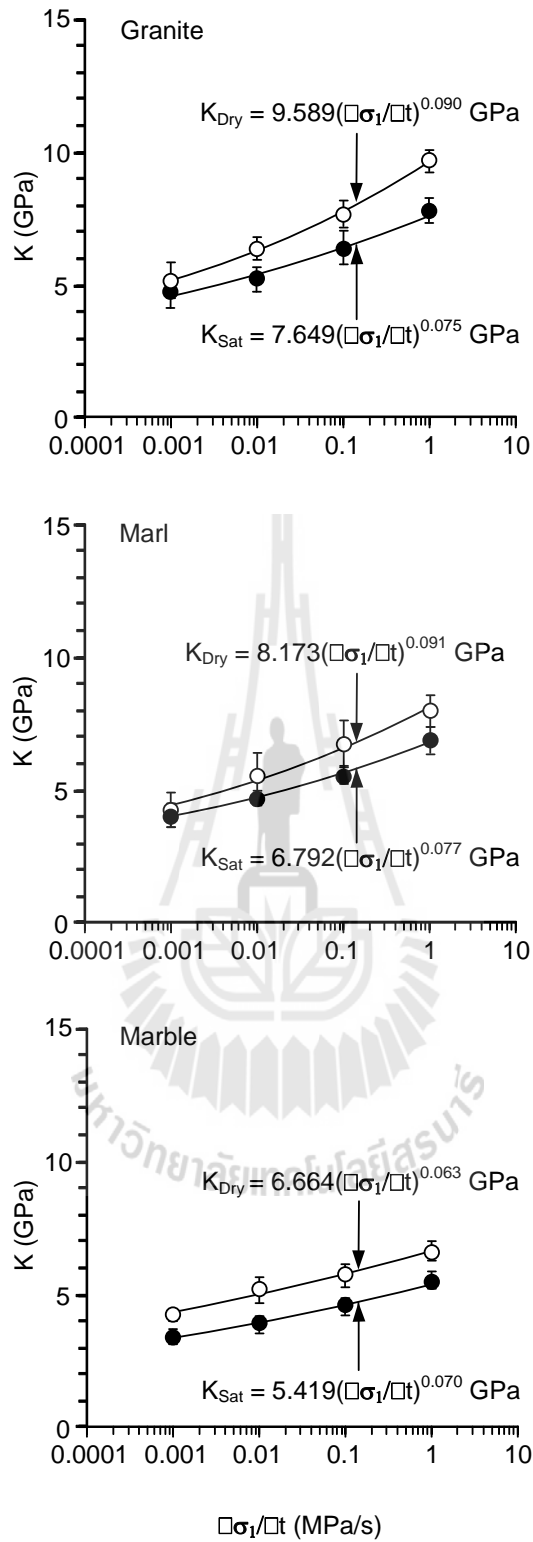
โดยที่  $\nu, \eta, \lambda$  และ  $\rho =$  ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการในรูปที่ 5.5 และ 5.6

ส่วนค่าความไม่ผันแปรของความเค้นและค่าความเค้นในแนวเฉือนรวมหกด้านสามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง โดยอาศัยค่าความเค้นในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ซึ่งผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.3 และ 5.4 ดังสมการต่อไปนี้

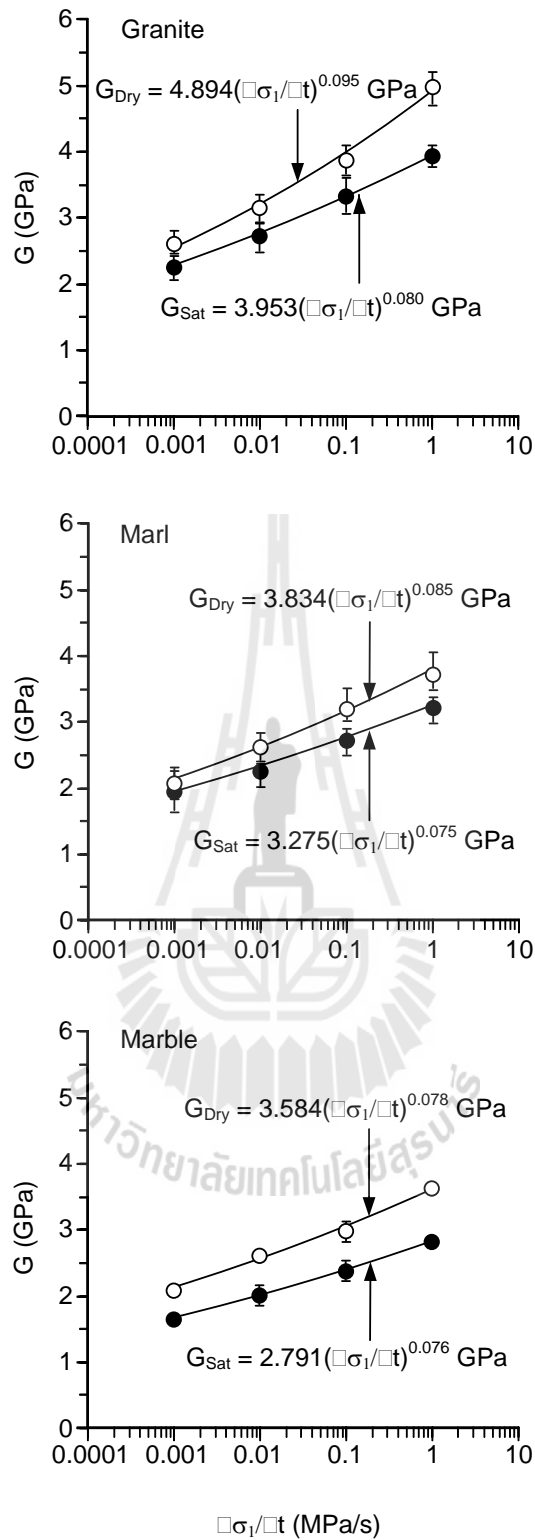
$$s = (1/3) (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5.12)$$

$$\tau_{\text{oct}} = (1/3) [2 (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (5.13)$$

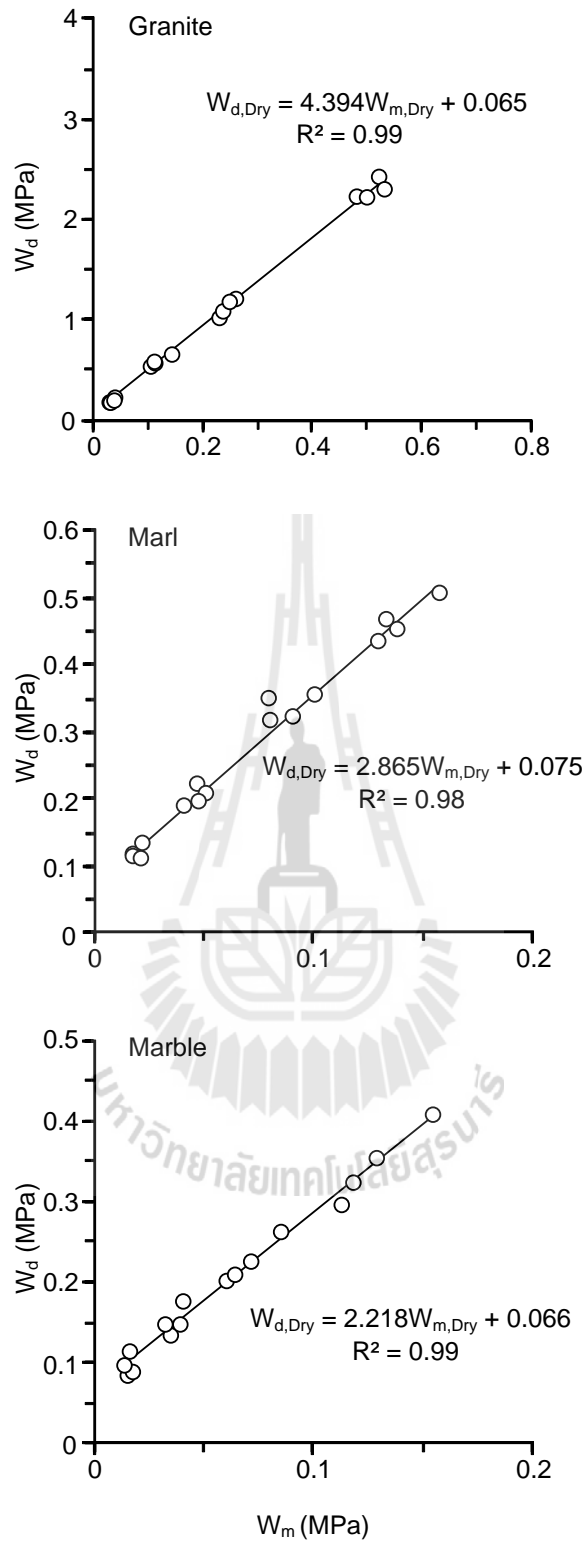
ผลการสร้างเกณฑ์การแตกในสามแกนบนพื้นฐานของพลังงานความเครียดได้นำเสนอในรูปแบบของพลังงานความเครียดเชิงเบี่ยงเบนในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉื่อยดังแสดงในรูปที่ 5.7 และ 5.8 และตารางที่ 5.3 และ 5.4 พบว่าพลังงานความเครียดเชิงเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงเมื่อพลังงานความเครียดเฉื่อยเพิ่มขึ้นทั้งในสภาวะแห้งและอิมมัตด้วยน้ำ โดยผลกระทบของแรงดันน้ำส่งผลให้ค่าดังกล่าวในสภาวะอิมมัตด้วยน้ำต่ำกว่าในสภาวะแห้งเพียงเล็กน้อย



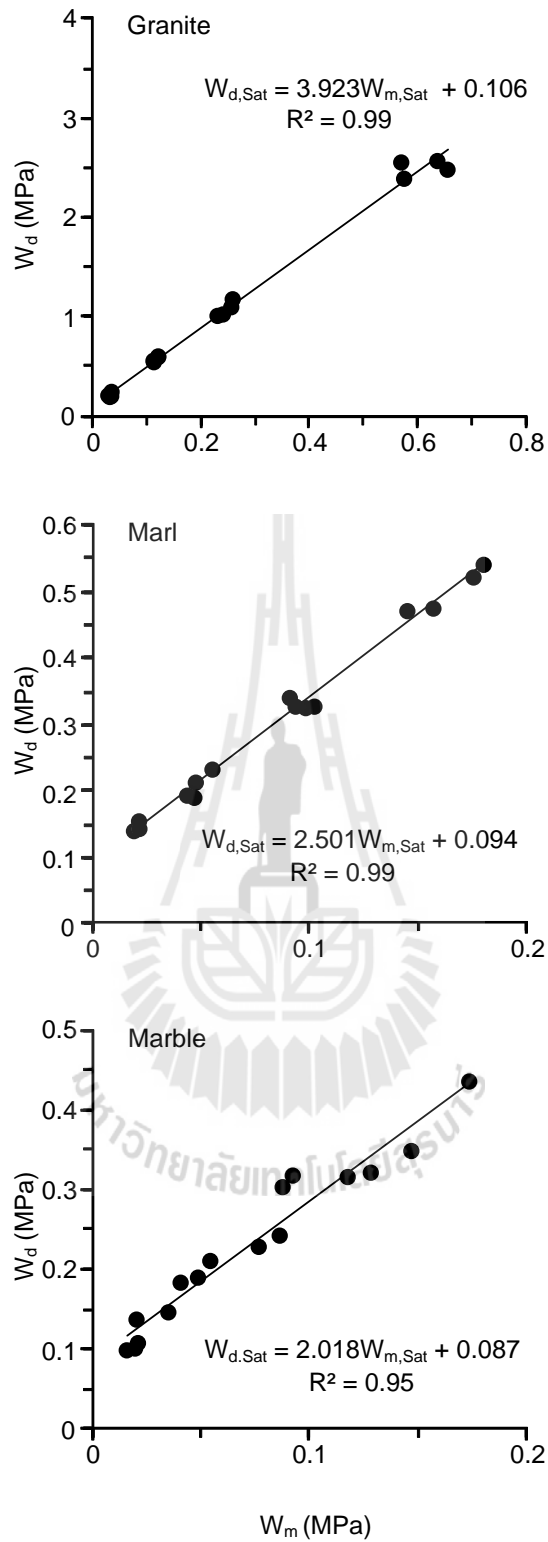
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ก่อนและอัตราการกรดของตัวอย่างหินในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เฉือนและอัตราการกรัดของตัวอย่างหินในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดเชิงเบี่ยงเบนในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างหินในสถานะแห้ง



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดเชิงเบี่ยงเบนในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณของตัวอย่างหินในสภาวะแห้ง

ความดัน ล้อมรอบ (MPa)	อัตรา การกด (MPa/s)	หินแกรนิต				หินมาร์ล				หินอ่อน			
		$\tau_{oct}$ (MPa)	s (MPa)	$W_d$ (MPa)	$W_m$ (MPa)	$\tau_{oct}$ (MPa)	s (MPa)	$W_d$ (MPa)	$W_m$ (MPa)	$\tau_{oct}$ (MPa)	s (MPa)	$W_d$ (MPa)	$W_m$ (MPa)
0	10	40.5	28.7	N/A	N/A	29.2	20.7	N/A	N/A	21.2	15.0	N/A	N/A
	1	36.1	25.6	0.18	0.03	24.8	17.5	0.12	0.02	20.2	14.3	0.08	0.02
	0.1	32.9	23.2	0.19	0.03	22.1	15.6	0.12	0.02	18.7	13.2	0.09	0.02
	0.01	30.3	21.4	0.22	0.04	19.7	13.9	0.12	0.02	17.9	12.7	0.10	0.01
	0.001	27.8	19.6	0.24	0.04	18.1	12.8	0.14	0.02	17.2	12.2	0.12	0.02
3	10	65.5	49.3	N/A	N/A	36.8	29.0	N/A	N/A	27.8	22.7	N/A	N/A
	1	58.7	44.5	0.55	0.11	32.1	25.7	0.22	0.05	25.0	20.7	0.13	0.04
	0.1	52.4	40.0	0.58	0.11	28.1	22.9	0.20	0.05	23.4	19.5	0.15	0.03
	0.01	47.6	36.6	0.60	0.11	25.3	20.9	0.19	0.04	22.5	18.9	0.15	0.04
	0.001	45.1	34.9	0.67	0.14	23.7	19.8	0.21	0.05	21.5	18.2	0.18	0.04
7	10	92.4	72.3	N/A	N/A	45.3	39.0	N/A	N/A	35.4	32.0	N/A	N/A
	1	82.6	65.4	1.03	0.23	40.5	35.6	0.35	0.08	30.9	28.8	0.20	0.06
	0.1	76.2	60.9	1.11	0.24	36.7	32.9	0.32	0.08	29.3	27.7	0.21	0.06
	0.01	70.9	57.2	1.20	0.25	33.7	30.8	0.33	0.09	28.3	27.0	0.23	0.07
	0.001	66.5	54.0	1.21	0.26	31.3	29.2	0.36	0.10	27.4	26.4	0.26	0.09
12	10	N/A	N/A	N/A	N/A	55.6	51.3	N/A	N/A	42.9	42.3	N/A	N/A
	1	120.0	96.9	2.24	0.48	50.9	48.0	0.45	0.14	38.3	39.0	0.30	0.11
	0.1	108.8	89.0	2.31	0.53	46.6	45.0	0.44	0.13	35.9	37.4	0.33	0.12
	0.01	100.4	83.0	2.23	0.50	43.4	42.7	0.47	0.13	34.4	36.3	0.36	0.13
	0.001	95.3	79.4	2.42	0.52	40.8	40.9	0.51	0.16	33.5	35.7	0.41	0.15

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณของตัวอย่างหินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ

ความดัน ล้อมรอบ (MPa)	อัตรา การกด (MPa/s)	หินแกรนิต				หินมาร์ล				หินอ่อน			
		$\tau_{oct}$ (MPa)	s (MPa)	$W_d$ (MPa)	$W_m$ (MPa)	$\tau_{oct}$ (MPa)	s (MPa)	$W_d$ (MPa)	$W_m$ (MPa)	$\tau_{oct}$ (MPa)	s (MPa)	$W_d$ (MPa)	$W_m$ (MPa)
0	10	36.8	26.0	N/A	N/A	27.3	19.3	N/A	N/A	20.7	14.7	N/A	N/A
	1	32.7	23.1	0.21	0.03	24.0	17.0	0.14	0.02	19.3	13.7	0.10	0.02
	0.1	29.8	21.1	0.21	0.03	21.7	15.3	0.15	0.02	18.4	13.0	0.10	0.02
	0.01	27.7	19.6	0.21	0.04	19.2	13.6	0.15	0.02	17.4	12.3	0.11	0.02
	0.001	25.4	18.0	0.24	0.04	17.9	12.7	0.15	0.02	16.9	12.0	0.14	0.02
3	10	58.9	44.7	N/A	N/A	33.0	26.3	N/A	N/A	26.4	20.7	N/A	N/A
	1	54.5	41.5	0.56	0.11	30.1	24.3	0.22	0.05	23.5	19.6	0.15	0.03
	0.1	49.1	37.7	0.54	0.11	27.1	22.2	0.19	0.05	22.9	19.2	0.19	0.04
	0.01	44.8	34.7	0.62	0.12	25.0	20.7	0.20	0.04	21.6	18.3	0.19	0.05
	0.001	42.4	33.0	0.62	0.12	23.3	19.5	0.23	0.05	21.0	17.8	0.21	0.05
7	10	82.0	65.0	N/A	N/A	40.5	35.7	N/A	N/A	31.1	29.0	N/A	N/A
	1	76.2	60.9	1.05	0.24	38.2	34.0	0.34	0.09	29.0	27.5	0.23	0.08
	0.1	71.6	57.6	1.01	0.23	35.1	31.8	0.33	0.09	27.8	26.7	0.25	0.09
	0.01	67.2	54.5	1.11	0.26	33.0	30.3	0.33	0.10	27.4	26.4	0.30	0.09
	0.001	62.3	51.1	1.16	0.26	30.9	28.8	0.33	0.10	26.5	25.7	0.32	0.09
12	10	N/A	N/A	N/A	N/A	50.0	47.3	N/A	N/A	37.7	38.7	N/A	N/A
	1	111.0	90.5	2.40	0.57	48.1	46.0	0.47	0.14	35.4	37.1	0.34	0.12
	0.1	102.0	84.1	2.56	0.64	44.6	43.6	0.48	0.16	34.0	36.1	0.34	0.13
	0.01	95.2	79.3	2.48	0.65	42.4	42.0	0.55	0.18	33.0	35.3	0.38	0.15
	0.001	90.9	76.3	2.54	0.57	40.1	40.4	0.52	0.17	32.1	34.7	0.44	0.17

## บทที่ 6

### การกำจัดอัตราการกัด

#### 6.1 วัตถุประสงค์

ในหัวข้อนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับการคำนวณเพื่อหาค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในแต่ละตัวอย่างหิน ด้วยวิธีการทางอ้อม และสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์กับค่าแรงดันน้ำ

#### 6.2 การกำจัดอัตราการกัดในค่าความเค้นสูงสุด

จากผลการศึกษาในบทที่ 4 การเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นสูงสุดในฟังก์ชันของอัตราการกัดสามารถอธิบายได้ด้วยสมการลอการิทึมดังสมการ

$$\sigma_{1,f,dry} = A \ln (\partial\sigma_1/\partial t) + B \quad (6.1)$$

โดยที่ A และ B = ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ในขั้นตอนต่อไปจะทำการปรับแก้ค่าความเค้นสูงสุดที่ความดันล้อมรอบเดียวกันเพื่อกำจัดผลกระทบของอัตราการกัด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma_{1,f,dry} = A \ln(\partial\sigma_1/\partial t)_i + B \quad (6.2)$$

$$\sigma_{1,f,dry}^* = A \ln 0.1 + B \quad (6.3)$$

โดยที่  $\sigma_{1,f,dry}$  = ค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินแห้งภายใต้อัตราการกัดใดๆ

$\sigma_{1,f,dry}^*$  = ค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินแห้งภายใต้อัตราการกัดใดๆ ที่ถูกกำจัดอัตราการกัดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 MPa/s

เมื่อนำสมการที่ (6.3) ลบสมการที่ (6.2) จะได้สมการ

$$\sigma_{1,f,dry}^* = \sigma_{1,f,dry} + A (\ln 0.1 - \ln(\partial\sigma_1/\partial t)_i) \quad (6.4)$$



ตารางที่ 6.1 ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ A และ B

ชนิดหิน	ความดันล้อมรอบ (MPa)	$\sigma_{1,dry} = A \ln \partial\sigma_1/\partial t + B$ (MPa)	
		A	B
หินแกรนิต	0	2.881	77.77
	3	4.801	128.31
	7	5.906	185.40
	12	7.643	263.56
หินมาร์ล	0	2.547	54.27
	3	3.053	71.97
	7	3.192	93.95
	12	3.431	120.60
หินอ่อน	0	0.999	43.10
	3	1.351	57.30
	7	1.737	75.20
	12	2.085	95.20

ดังนั้นสมการที่ 6.4 จึงสามารถนำมาหาค่าความเค้นสูงสุดของการทดสอบหินในสภาวะแห้งที่ถูกกำจัดผลกระทบของอัตราการกัดได้ ซึ่งค่าส่วนต่างที่ถูกลบออกนั้น คือค่าผลกระทบของอัตราการกัดดังสมการ

$$\Delta\sigma_{1,f,dry}^* = \sigma_{1,f,dry} - \sigma_{1,f,dry}^* \quad (6.5)$$

และการศึกษาครั้งนี้ได้ตั้งสมมุติฐานว่าค่าผลกระทบของอัตราการกัดมีค่าเท่ากันทั้งในการทดสอบหินแห้งและหินอิ่มตัวด้วยน้ำ ดังนั้น จึงนำค่าความเค้นสูงสุดของหินอิ่มตัวด้วยน้ำลบค่าส่วนต่างดังกล่าวเพื่อกำจัดอัตราการกัดในตัวอย่างหินที่ทดสอบในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำดังสมการ

$$\sigma_{1,f,sat}^* = \sigma_{1,f,sat} - \Delta\sigma_{1,f,dry}^* \quad (6.6)$$

รูปที่ 6.1 แสดงค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินแห้งและหินอิ่มตัวด้วยน้ำที่ถูกจำกัดอัตราการกัดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 MPa/s ในฟังก์ชันของค่าความดันล้อมรอบ ผลการคำนวณเผยให้เห็นว่าค่าความเค้นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความดันล้อมรอบเพิ่มขึ้น และค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างหินแห้ง ตารางที่ 6.2 ได้รวบรวมค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินแห้งและหินอิ่มตัวด้วยน้ำที่ถูกจำกัดอัตราการกัดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 MPa/s

การหาค่าแรงดันน้ำสามารถหาได้จากสูตรบนพื้นฐานของ Mohr-Coulomb (Goodman, 1989) โดยใช้ค่าความเค้นสูงสุดดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma_{1,f} = \sigma_{c,f} + \sigma_3 \tan^2 [45 + (\phi/2)] \quad (6.7)$$

โดยที่

- $\sigma_{1,f}$  = ค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินแห้ง
- $\sigma_{c,f}$  = ค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินแห้งที่ความดันล้อมรอบเท่ากับศูนย์
- $\sigma_3$  = ค่าความดันล้อมรอบ
- $\phi$  = ค่ามุมเสียดทาน

สำหรับตัวอย่างหินภายใต้สภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำสามารถเขียนสมการที่ 6.7 ใหม่ได้ดังสมการ

$$\sigma'_{1,f} - \sigma'_3 = \sigma_{u,f} + [\sigma'_3 \tan^2 (45 + \phi/2) - 1] \quad (6.8)$$

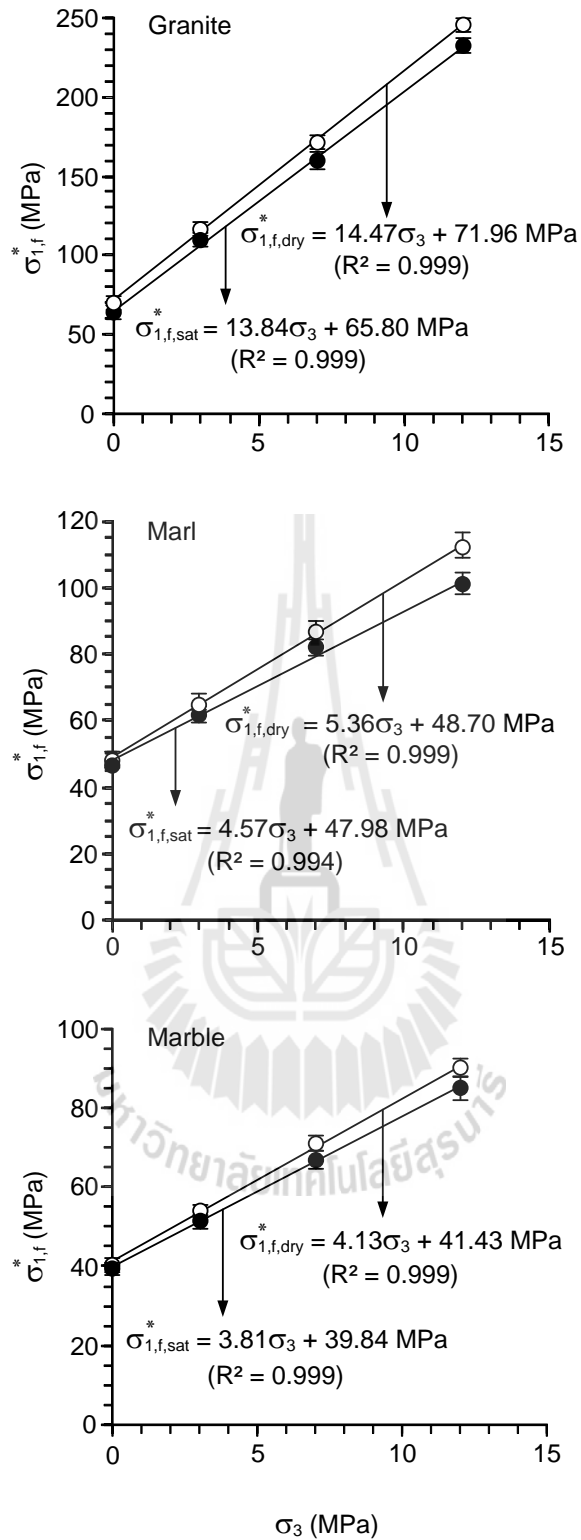
ค่าความแตกต่างของความเค้นที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\sigma^*_{1,f,sat} - \sigma_3 = \sigma^*_{u,f} + (\sigma_3 - P_w) [\tan^2 (45 + \phi/2) - 1] \quad (6.9)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ 6.9 ใหม่ ค่าแรงดันน้ำสามารถหาได้ดังสมการ

$$P_w = \sigma_3 - [(\sigma^*_{1,f,sat} - \sigma_3) \sigma^*_{u,f}] / [\tan^2 (45 + \phi/2) - 1] \quad (6.10)$$

ซึ่งตารางที่ 6.3 และรูปที่ 6.2 แสดงค่าแรงดันน้ำของหินที่ทดสอบทั้งหมด



รูปที่ 6.1 ค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินแห้งและหินอิมตัวด้วยน้ำที่ถูกกำจัดอัตราการกดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 MPa/s ในฟังก์ชันของค่าความดันล้อมรอบ

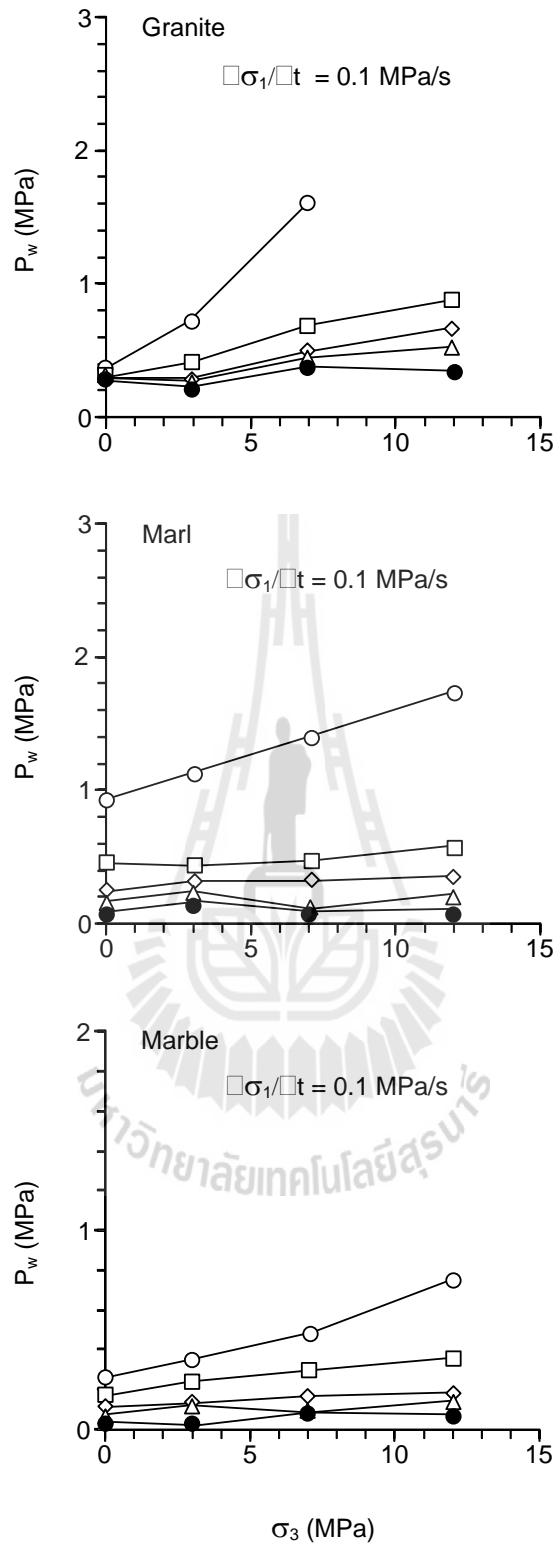
ตารางที่ 6.2 ค่าความเค้นสูงสุดและค่าตัวแปรการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างหินแห้งและหินอิมมัวด้วยน้ำที่ถูกกำจัดอัตราการกดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 MPa/s

ชนิดหิน	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_{1,f,dry}^*$ (MPa)	$\sigma_{1,f,sat}^*$ (MPa)	$E_{dry}^*$ (GPa)	$E_{sat}^*$ (GPa)	$v_{dry}^*$	$v_{sat}^*$
หินแกรนิต	0	71.14	65.00	10.69	8.06	0.28	0.29
	3	117.26	109.80	9.93	8.51	0.28	0.28
	7	171.80	160.20	10.09	8.96	0.28	0.28
	12	245.97	232.80	10.64	9.92	0.28	0.28
หินมาร์ล	0	48.41	46.80	8.13	6.85	0.30	0.30
	3	64.94	61.90	8.22	7.04	0.29	0.29
	7	86.60	82.40	8.17	7.23	0.29	0.29
	12	112.70	99.66	8.15	7.81	0.29	0.29
หินอ่อน	0	40.80	39.40	7.89	5.86	0.28	0.29
	3	54.19	51.40	7.51	6.02	0.28	0.28
	7	71.20	67.30	7.83	6.32	0.28	0.27
	12	90.40	85.00	7.78	6.69	0.28	0.28

ตารางที่ 6.3 ค่าแรงดันน้ำที่ปรับอยู่ในอัตรา 0.1 MPa/s ของแต่ละตัวอย่างหิน

ชนิดหิน	ความดันล้อมรอบ (MPa)	ค่าแรงดันน้ำ (MPa)				
หินแกรนิต	0	0.632	0.527	0.450	0.424	0.258
	3	0.297	0.237	0.286	0.228	0.173
	7	1.124	0.753	0.409	0.225	0.217
	12	N/A	1.085	0.505	0.249	0.154
หินมาร์ล	0	0.932	0.466	0.242	0.171	0.076
	3	1.228	0.482	0.327	0.189	0.046
	7	1.497	0.518	0.319	0.084	0.075
	12	2.441	1.275	0.582	0.197	0.365
หินอ่อน	0	0.701	0.701	0.350	0.350	0.350
	3	1.113	0.829	0.335	0.124	0.054
	7	1.179	0.933	0.548	0.092	0.197
	12	1.831	1.655	0.779	0.533	0.288





รูปที่ 6.2 ค่าแรงดันน้ำในฟังก์ชันของความดันล้อมรอบ (0, 3, 7 และ 12 MPa ภายใต้อัตราการกดที่ 0.1 MPa/s

รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินอิมิตต์ด้วยน้ำและค่าแรงดันน้ำซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเส้นตรง

$$\sigma_{1,f,sat}^* = f + (g \cdot \sigma_3) + (h \cdot P_w) \quad (6.11)$$

ตัวแปร  $f$  และ  $h$  คือ ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ ผลการทดสอบระบุว่าค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินอิมิตต์ด้วยน้ำที่ถูกจำกัดอัตราการกัดแล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงเมื่อค่าแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนรูปที่ 6.4 แสดงค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินอิมิตต์ด้วยน้ำในฟังก์ชันของความดันล้อมรอบภายใต้การผันแปรแรงดันน้ำที่ 0 ถึง 10 MPa

### 6.3 การจำกัดอัตราการกัดในค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์

สำหรับการจำกัดค่าอัตราการกัดจะมีวิธีการเหมือนกับหัวข้อที่ 6.2 เมื่อ  $E_{dry}$  และ  $v_{dry}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์ภายใต้การผันแปรอัตราการกัดและความดันล้อมรอบ ขณะที่  $E_{dry}^*$  และ  $v_{dry}^*$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของหินที่ทดสอบในสภาวะแห้งที่ถูกปรับอัตราการกัดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 MPa/s

ซึ่งสูตรในการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์ที่ความดันล้อมรอบเดียวกันเพื่อกำจัดผลกระทบของอัตราการกัดสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{dry}^* = E_{dry} + d (0.1^{\xi} - (\partial \sigma_1 / \partial t)_i^{\xi}) \quad (6.12)$$

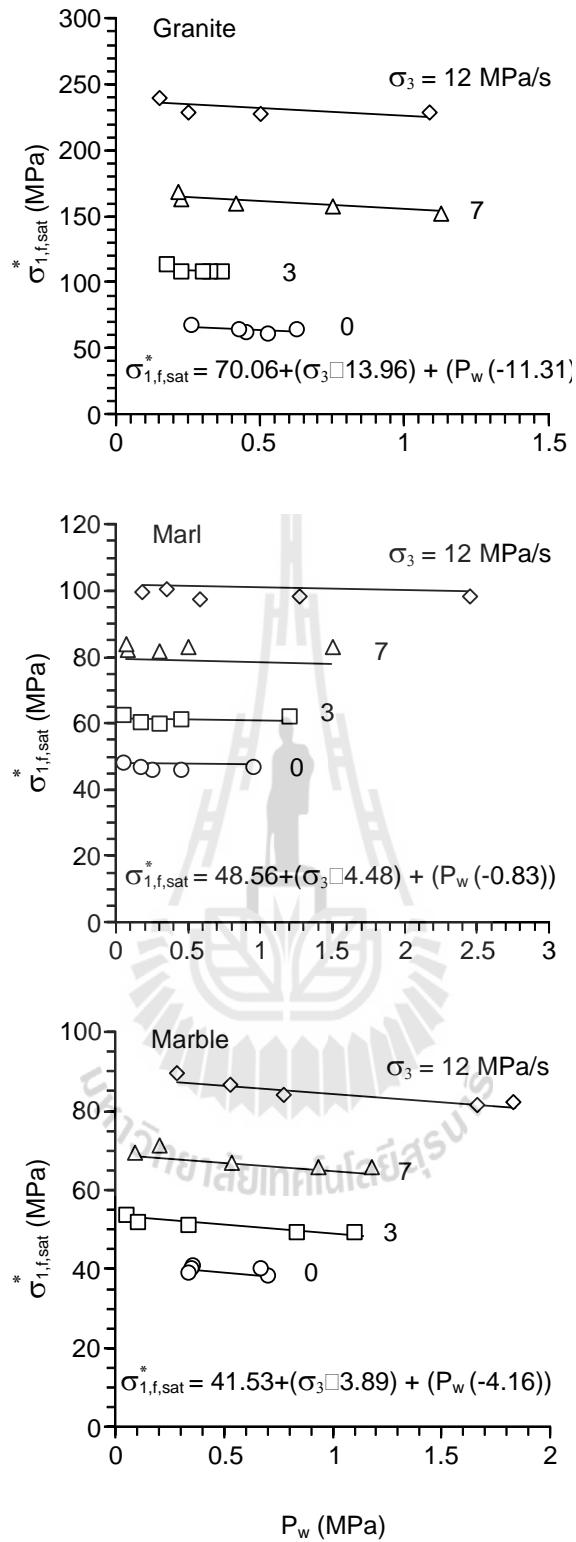
$$v_{dry}^* = v_{dry} + e (\ln 0.1 - \ln (\partial \sigma_1 / \partial t)_i) \quad (6.13)$$

โดยที่  $e$  และ  $d$  = ค่าตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์

ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของตัวอย่างหินภายใต้สภาวะอิมิตต์ด้วยน้ำที่ถูกจำกัดอัตราการกัดสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

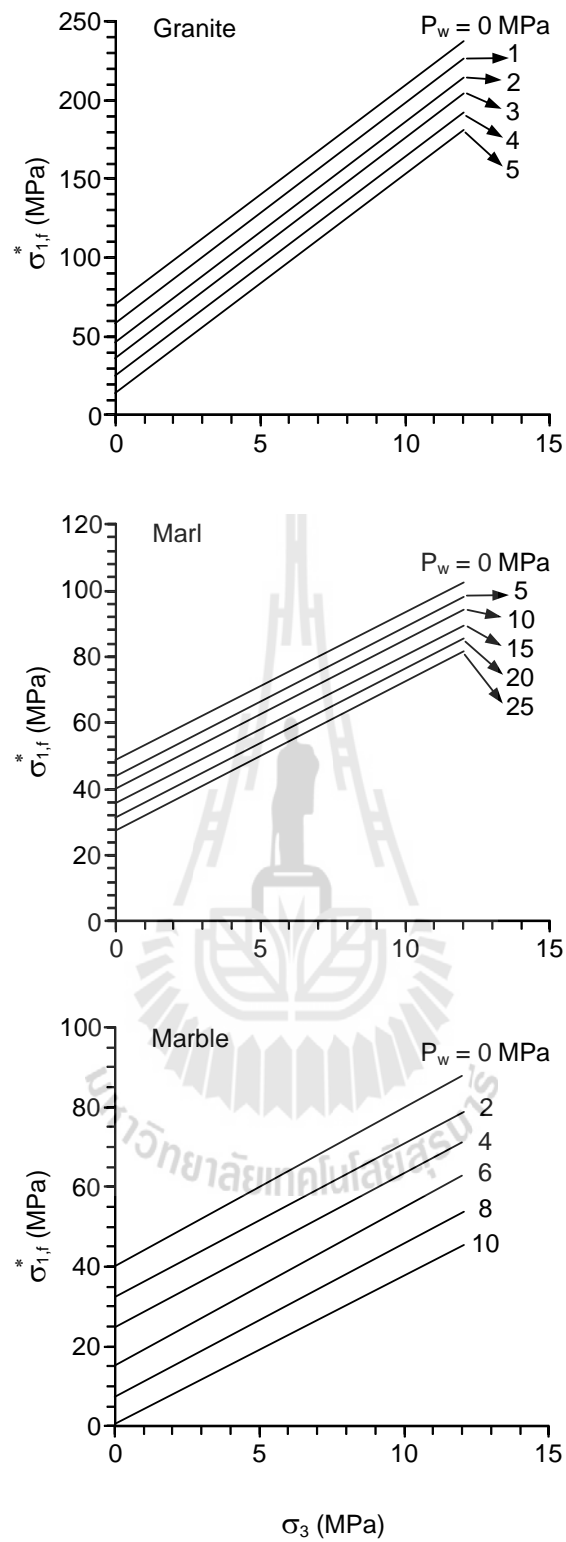
$$E_{sat}^* = E_{sat} - (E_{dry} - E_{dry}^*) \quad (6.14)$$

$$v_{sat}^* = v_{sat} - (v_{dry} - v_{dry}^*) \quad (6.15)$$



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินอิมิตัวด้วยน้ำและค่าแรงดันน้ำ





รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินอิ่มตัวด้วยน้ำและความดันล้อมรอบ ภายใต้การผันแปรแรงดันน้ำ

รูปที่ 6.5 และ 6.6 และตารางที่ 6.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์ที่ถูกจำกัดอัตราการกัดแล้วในฟังก์ชันของแรงดันน้ำ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับค่าความเค้นกดสูงสุด ส่วนค่าอัตราส่วนปัวซองส์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าหินที่อิมตัวด้วยน้ำมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่าหินแห้งภายใต้สภาวะความเค้นเดียวกัน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้พยายามแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในสามมิติ ซึ่งค่าอัตราส่วนปัวซองส์ที่ใช้ในการคำนวณได้ใช้ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนปัวซองส์จากบทที่ 5 โดยสมมติให้มีค่าเท่ากันทุกด้านของแนวความเค้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในแนวความเค้นสูงสุด ( $E_1$ ) และในแนวความเค้นต่ำสุด ( $E_2, E_3$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ (Jaeger et al., 2007)

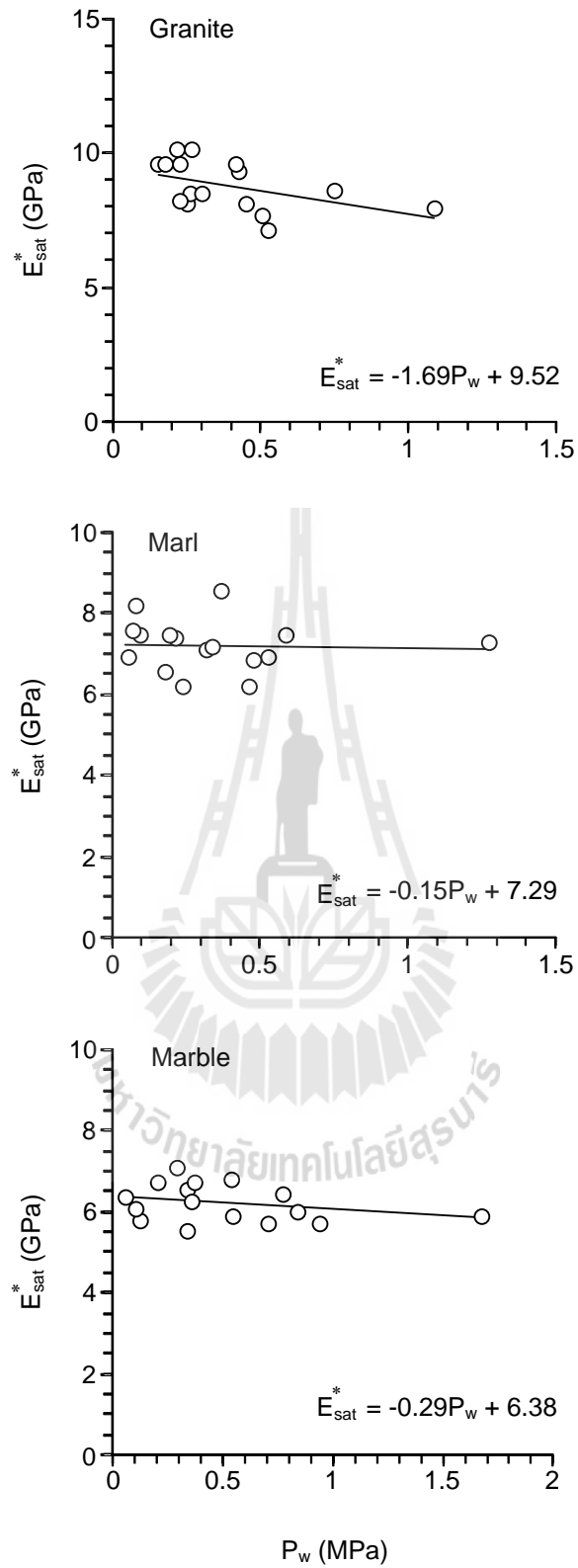
$$\varepsilon_1 = \sigma_1/E_1 - \nu (\sigma_2/E_2 + \sigma_3/E_3) \quad (5.30)$$

$$\varepsilon_2 = \sigma_2/E_2 - \nu (\sigma_1/E_1 + \sigma_3/E_3) \quad (5.31)$$

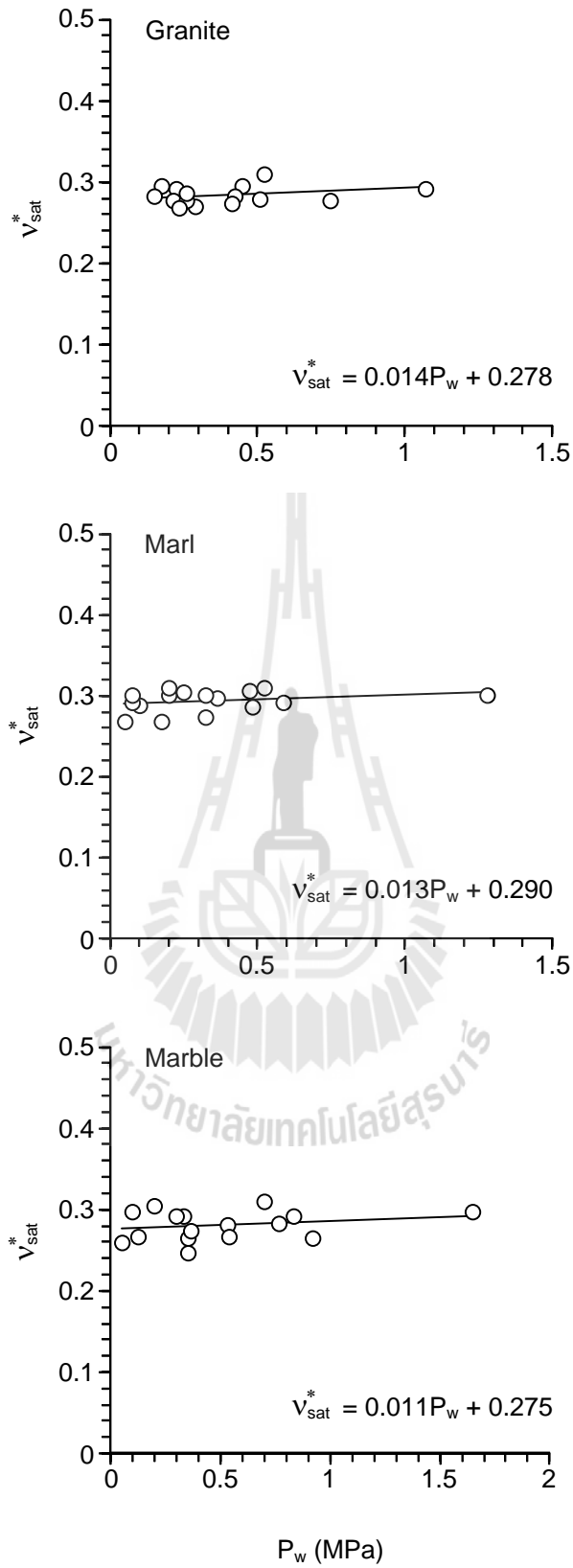
$$\varepsilon_3 = \sigma_3/E_3 - \nu (\sigma_1/E_1 + \sigma_2/E_2) \quad (5.32)$$

โดยที่  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  และ  $\varepsilon_3$  = ค่าความเครียดในแนวความเค้นสูงสุดและในแนวความเค้นต่ำสุด

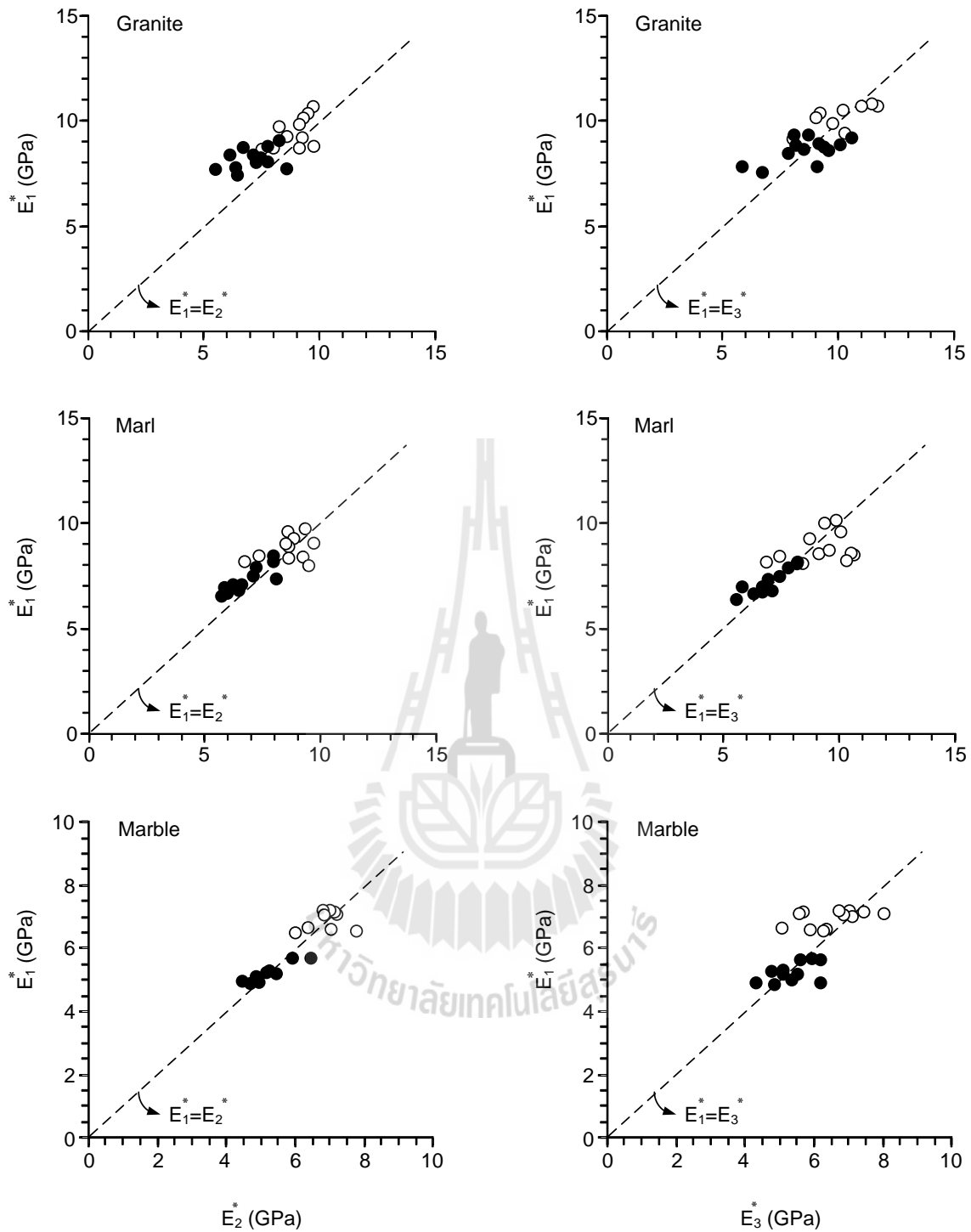
ผลการคำนวณได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.7 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในแนวความเค้นสูงสุด ( $E_1$ ) และในแนวความเค้นต่ำสุด ( $E_2, E_3$ ) มีค่าเท่ากันของทั้งตัวอย่างหินในสภาวะแห้งและสภาวะอิมตัวด้วยน้ำ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินในสภาวะอิมตัวด้วยน้ำมีค่าต่ำกว่าในสภาวะแห้ง



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินอิ่มตัวด้วยน้ำและค่าแรงดันน้ำ



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของตัวอย่างหินอิมิตต์ด้วยน้ำและค่าแรงดันน้ำ



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นในแนวความเค้นสูงสุด ( $E_1$ ) และในแนวความเค้นต่ำสุด ( $E_2, E_3$ ) ของตัวอย่างหินแข็ง (จุดโปร่ง) และหินอิมตัดด้วยน้ำ (จุดทึบ)

## บทที่ 7

### สรุปและวิจารณ์ผล

การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างหินแกรนิต หินมาร์ล และหินอ่อน ภายใต้อัตราการกดและความดันล้อมรอบที่ต่างกันของตัวอย่างหินที่อยู่ในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำ ในการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสามแกนจะใช้อัตราการกด 5 อัตรา คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1.0 และ 10 MPa/s และจำลองสถานะความดันล้อมรอบ 4 ระดับ คือ 0, 3, 7 และ 12 MPa ผลการทดสอบระบุว่า หินแกรนิต หินมาร์ล และหินอ่อนในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.14, 2.71 และ 0.09 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างหินแห้งโดยเฉพาะภายใต้ความดันล้อมรอบและอัตราการกดสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Cobanoglu and Celik (2012), Masuda (2001), Hawkins and McConnell (1992), Vasarhelyi (2003, 2006) ผลที่ได้ดังกล่าวอาจเป็นเพราะว่าภายใต้อัตราการกดต่ำ น้ำที่อยู่ในตัวอย่างหินมีเวลาเพียงพอต่อการไหลออกตามรูพรุน จึงส่งผลให้ตัวอย่างหินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับผลการทดสอบของหินในสถานะแห้ง ขณะเดียวกันที่อัตราการกดสูงน้ำไม่สามารถไหลออกมาได้ทัน จึงทำให้เกิดแรงดันน้ำภายในหิน ส่งผลให้ค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินมีค่าลดลง และจากรูปที่ 4.9 สามารถสังเกตได้ว่าค่าความเค้นสูงสุดของหินมีความอ่อนไหวต่อความดันล้อมรอบมากกว่าอัตราการกด และเมื่อพิจารณาความเค้นในสามมิติระหว่างค่าความเค้นเฉือนในสามมิติกับความเครียดเฉือนในสามมิติผลการทดสอบสรุปได้ว่า ที่อัตราการกดสูงส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติมีค่าสูงขึ้น ขณะที่ค่าความเครียดเฉือนในสามมิติมีค่าลดลงที่จุดแตก ผลกระทบของแรงดันน้ำส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนในสามมิติมีค่าลดลง ขณะที่ค่าความเครียดเฉือนในสามมิติมีค่าเพิ่มขึ้น

ผลกระทบของแรงดันน้ำส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นลดลง ส่วนค่าอัตราส่วนปัวซองมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li et al. (2012), Vasarhelyi (2003, 2006) and Yilmaz (2010) จากรูปที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินอ่อนในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าแตกต่างจากสถานะแห้งมากกว่าหินชนิดอื่นถึงแม้จะมีอัตราการกดที่ระดับสูงสุด และหินอ่อนมีความชื้นสัมพัทธ์เพียง 0.09% เท่านั้น โดยลักษณะดังกล่าวอาจเกิดจากหินอ่อนมีการผุกร่อนเชิงเคมีเมื่อสัมผัสกับน้ำมากกว่าหินชนิดอื่น ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้วิเคราะห์ในประเด็นดังกล่าว

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ภายใต้พื้นฐานของคูลอมบ์ระบุว่า ค่าความเค้นยึดติดของหินในสถานะแห้งและสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Li et al. (2012) โดยค่าทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการกดเพิ่มขึ้น ผลการสร้างเกณฑ์การแตกในสามแกนบนพื้นฐานของพลังงานความเครียดระบุว่า พลังงานความเครียดเชิงเบี่ยงเบนมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงเมื่อพลังงานความเครียดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นทั้งในสถานะแห้งและอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยผลกระทบของแรงดันน้ำส่งผลให้ค่าดังกล่าวในสถานะอิ่มตัวด้วยน้ำต่ำกว่าในสถานะแห้งเพียงเล็กน้อย อาจเป็นเพราะว่าหินที่ใช้ใน

การศึกษาทั้ง 3 ชนิด เป็นหินอัคนีและหินแปร จึงทำให้ปริมาณน้ำเข้าไปในหินได้เพียงเล็กน้อย (ความชื้นสัมพัทธ์ < 3%) ดังนั้น ผลกระทบของน้ำต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์จึงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

หลังจากทำการกำจัดอัตราการกดจากค่าความเค้นสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซองส์ ผลการศึกษาพบว่าค่าความเค้นสูงสุดและค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของตัวอย่างหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าลดลง และค่าอัตราส่วนปัวซองส์มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อค่าแรงดันน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวมีแนวโน้มสอดคล้องกับ Dyke and Dobereiner (1991), Hawkins and McConnell (1992) และ Yilmaz (2010) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ในฟังก์ชันของแรงดันน้ำสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้นตรงซึ่งเหมือนกับผลสรุปของ Handin et al. (1963)

ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของแรงดันน้ำอาจขึ้นกับช่วงของค่าความดันล้อมรอบและอัตราการกดที่นำมาใช้ เนื่องจากถ้าค่าเหล่านี้มีช่วงที่กว้างขึ้นก็จะทำให้สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และค่าอัตราส่วนปัวซองส์ในฟังก์ชันของแรงดันน้ำมีความถูกต้องมากขึ้น และจะส่งผลต่อการเลือกใช้รูปแบบของสมการด้วยเช่นกัน สำหรับความแตกต่างระหว่างผลการทดสอบและสมการที่นำเสนอ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นกับค่าแรงดันน้ำในรูปที่ 6.5 และค่าอัตราส่วนปัวซองส์กับค่าแรงดันน้ำในรูปที่ 6.6 อาจเกิดจากความแปรปรวนของคุณสมบัติทางกายภาพของหินเอง กล่าวคือหินทั้งสามชนิดมีลักษณะทางกายภาพเป็นแบบผลึก ดังนั้น จึงอาจเกิดความแปรปรวนของค่าการทดสอบมากนั่นเอง

จากการทดสอบพบว่าหินทั้งสามชนิดแสดงผลกระทบที่เกิดจากแรงดันน้ำคล้ายๆ กัน อาจเป็นเพราะว่าตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดค่อนข้างเล็กและมีปริมาณน้ำเข้าไปได้น้อย เมื่อสังเกตจากกราฟจะพบว่าค่าความเค้นสูงสุดของตัวอย่างหินมีค่าอ่อนไหวต่อค่าความดันล้อมรอบมากกว่าค่าแรงดันน้ำ (รูปที่ 6.3) เนื่องจากค่าแรงดันน้ำที่ได้จากการคำนวณนั้นจะมีค่าขึ้นกับอัตราการกดและความดันล้อมรอบที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอัตราการกดที่เร็วขึ้นหรือที่ความดันล้อมรอบที่สูงขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดแรงดันน้ำมากขึ้นเนื่องจากน้ำไม่สามารถไหลออกจากตัวอย่างได้ทันดังที่เคยสรุปไว้แล้วในตอนต้น

ผลการทดสอบดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นการศึกษาผลกระทบของแรงดันน้ำต่อคุณสมบัติของหินระดับในระยะเวลายันสั้น ซึ่งแน่นอนว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ในระยะยาวอาจจะขึ้นกับการผุกร่อนเชิงเคมี หรือระยะเวลา และรอยแตกในเนื้อหินด้วย ซึ่งไม่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยผลจากการศึกษาสามารถนำไปประเมินค่าความเค้นสูงสุดและค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหินระดับในอาคารทั่วไปหรืออาคารที่ก่อสร้างด้วยหินที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันน้ำเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้

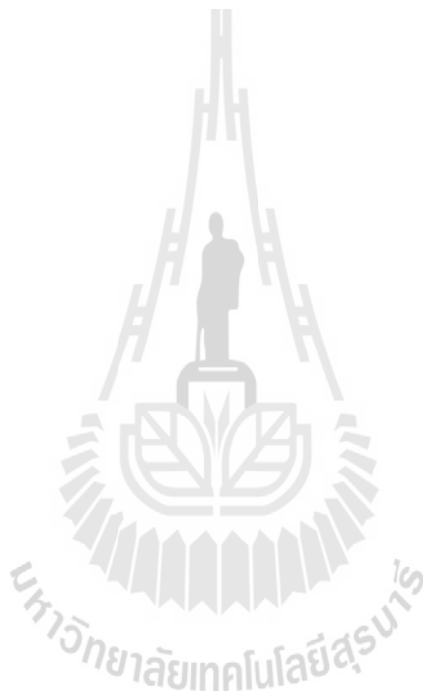
## บรรณานุกรม

- ASTM D4543-85. Standard practice for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances. **Annual Book of ASTM Standards (Vol. 04.08)**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D7012-07. Compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. **Annual Book of ASTM Standards (Vol. 04.08)**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Atherton, M., Brotherton, M. and Mahawat, C. (1992). Integrated chemistry, textures, phase relations and modelling of a composite granodioritic-monzonitic batholith, Tak, Thailand". **Journal of Southeast Asian Earth Sciences**. 7(2-3): 89-112.
- Bieniawski, Z.T. and Bernede, M.J. (1978). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 16(2): 138-140.
- Bunopas, S. (1992). Regional stratigraphic correlation in Thailand. **National Conference on Geological Resources of Thailand: Potential for Future Development, Department of mineral Resources**. 17-24 November, 1992, Bangkok, Thailand.
- Cobanoglu, I. and Celik, S.B. (2012). Determination of strength parameters and quality assessment of Denizli travertines (SW Turkey). **Engineering Geology**. 129-130: 38-47.
- Dasri, R. (2013). Indirect assessment of pore pressure effects on compressive strengths and elasticity of three Thai sandstones. **Proceedings of the Fourth Thailand Symposium on Rock mechanics**. January 24-25, 2013, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Derakhshandi, M., Rathje, E.M., Hazirbaba, K. and Mirhosseini, S.M. (2007). The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands. **International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. 28: 376 – 386.



- Dyke, C.G. and Dobereiner, L. (1991). Evaluating the strength and deformability of sandstones. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**. 24: 123–134.
- Fredrich, J.T., Martin, J.W. and Clayton, R.B. (1995). Induced pore pressure response during undrained deformation of tuff and sandstone. **International Journal of Mechanics of Material**. 20: 95-104.
- Fuenkajorn, K., Sriapai, T. and Samsri, P. (2012). Effects of loading rate on strength and deformability of Maha Sarakham Salt. **Engineering Geology**. 135–136, 10–23.
- Goodman, R.E. (1989). **Introduction to Rock Mechanics**, John Wiley and Sons, New York.
- Handin, J., Hager, R., Friedman, M. and Feather, J. (1963). Experimental deformation of sedimentary rocks under confining compression: pore pressure tests. **Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.** 47(5): 717–755.
- Hawkins, A.B. and McConnell, B.J. (1992). Sensitivity of sandstone strength and deferability to changes in moisture content. **Quarterly Journal of Engineering Geology**. 25: 115-130.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W and Zimmerman, R.W. (2007). **Fundamentals of Rock Mechanics, Fourth Edition**. Blackwell Publishing, Oxford.
- Li, D., Wong, L.N.Y., Liu, G. and Zhang, X. (2012). Influence of water content and anisotropy on the strength and deformability of low porosity meta-sedimentary rocks under triaxial compression. **Engineering Geology**. 126: 46-66.
- Li, H.B., Zhao, J. and Li, T.J. (1999). Triaxial compression tests on a granite at different strain rates and confining pressures. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 36: 1057-1063.
- Masuda, K. (2001). Effects of water on rock strength in a brittle regime. **Journal of Structural Geology**. 23(11): 1653-1657.
- Vasarhelyi, B. (2003). Some observations regarding the strength and deformability of sandstones in case of dry and saturated conditions. **Geology Environment**. 62: 245-249.
- Vasarhelyi, B. and Van, P. (2006). Influence of water content on the strength of rock. **Engineering Geology**. 84: 70-74.

- Yilmaz, I. (2010). Influence of water content on the strength and deformability of gypsum. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 42(2): 342-347.
- Yoshinaka, R., Tran, T.V. and Osada, M. (1997). Pore pressure changes and strength mobilization of soft rocks in consolidated-undrained cyclic loading triaxial tests. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 34(5): 715-726.



## ประวัตินักวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กร รัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelps Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือก บทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์