



รหัสโครงการ SUT7-719-53-24-26

## รายงานการวิจัย

การประดิษฐ์เครื่องจำลองการผุกร่อนของหินในห้องปฏิบัติการ

(Invention of Laboratory Device for Simulation of Rock Degradation)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-53-24-26

## รายงานการวิจัย

การประดิษฐ์เครื่องจำลองการผุกร่อนของหินในห้องปฏิบัติการ

(Invention of Laboratory Device for Simulation of Rock Degradation)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 และ 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

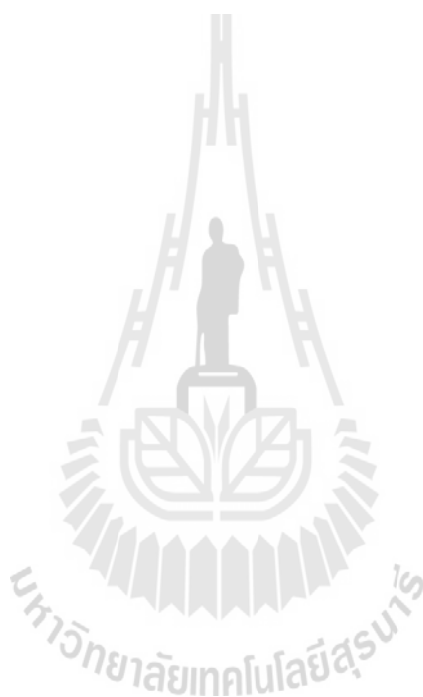
มิถุนายน 2554

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 และ 2554 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2554



## บทคัดย่อ

อุปกรณ์ทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนขนาดใหญ่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการผุกร่อนในระยะยาวของหินทรายสามชนิดที่ได้จากหน่วยหินโคกกรวด ภูกระดึง และพระวิหาร อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยวงล้อหมุนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 64 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร เพื่อใช้บรรจุก้อนตัวอย่างหิน 10 ก้อน ที่มีขนาด 4-5 นิ้ว อุปกรณ์นี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับที่ใช้ในมาตรฐาน ASTM ทุกประการ ยกเว้นมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นประมาณ 5 เท่า ผลการทดสอบด้วยอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ใช้อุปกรณ์มาตรฐานของ ASTM เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดตัวอย่างหินต่อการจำลองการผุกร่อน การทดสอบด้วยอุปกรณ์ทั้งสองได้ดำเนินการในลักษณะทั้งแห้งและเปียก โดยทดสอบ 6 รอบวัฏจักร (สำหรับอุปกรณ์ขนาดมาตรฐาน) และ 10 รอบวัฏจักร (สำหรับอุปกรณ์ขนาดใหญ่) ผลที่ได้ระบุว่า การทดสอบในมาตราส่วนขนาดใหญ่จะคาดคะเนการผุกร่อนของหินได้ดีกว่าการทดสอบในมาตราส่วนขนาดเล็ก เหตุผลหลักคือการทดสอบได้ใช้ตัวอย่างที่มีเนื้อหินมากกว่าและใช้พลังงานในการขัดถูมากกว่า โดยตัวอย่างหินทรายทุกชนิดที่ใช้ทดสอบจะแสดงค่าการเสียน้ำหนักที่มากกว่าเมื่อทดสอบด้วยตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นผลที่ได้สามารถจึงนำมาสัมพันธ์กับสภาวะจริงในภาคสนามได้ดีกว่า นอกจากนี้หินทรายทุกชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้จะอ่อนไหวเมื่อมีการสัมผัสน้ำ ซึ่งระบุได้จากการเปรียบเทียบแบบแห้งและแบบเปียก โดยที่หินทรายจากหน่วยหินโคกกรวดจะอ่อนไหวต่อการสัมผัสน้ำมากที่สุด ดังนั้น ระบบการจำแนกความคงทนของหินแบบใหม่จึงถูกเสนอขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการคาดคะเนความแข็งของหินที่มีผลกระทบจากขบวนการการผุกร่อนได้ หลักเกณฑ์ทางด้านพลังงานความร้อนได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างหินที่ประสบกับการจำลองการผุกร่อนในห้องปฏิบัติการกับตัวอย่างหินที่อยู่ในสภาวะจริงนอกห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้ระบุว่า การจำลองวัฏจักรร้อนและเย็นหนึ่งรอบในห้องปฏิบัติการสามารถเทียบเท่ากับ 18 วัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงในภาคสนามในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

## Abstract

A large-scaled slake durability index testing device has been developed to assess the long-term deterioration of Khok Kruat, Phu Kradung and Phra Wihan sandstones. A rotating drum with a diameter of 64 cm and length of 40 cm is fabricated to accommodate ten 4–5 in rock fragments. The proposed device is similar to that of the ASTM standard except that it is about 5 times larger. The large-scaled results are compared with those obtained from the ASTM standard testing to assess the size effect of rock fragments on the rock durability. Both are performed under dry and wet conditions for up to 6 cycles (for standard-scaled) and 10 cycles (for large-scaled). The results indicate that the large-scaled test results tend to predict the rock deterioration better than do the small-scaled results, primarily because of the greater energy imposed to the larger rock fragments. All tested sandstones show a greater weight loss when they are tested with large rock fragments compared to the small rock fragments. This allows a better correlation with the actual in-situ conditions. All tested sandstones are sensitive to water. Khok Kruat sandstone shows the greatest water-sensitivity than do the other two. A concept is proposed to describe the rock degradation characteristics under the slake durability test cycles. A new classification system is also introduced for rock durability, which allowed predicting the rock strength as affected by weathering process. For the in situ condition, the absorbed energy in one day is correlated with the energy used during simulation in the laboratory. The results show that one simulation cycle of heating and cooling in the laboratory approximately equals to 18 days under in-situ condition in the northeast of Thailand.

## 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
1.6 ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	6
<b>บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 กระบวนการการผูกก่อนของมวลหิน.....	7
2.2 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงและความคงทนต่อการผูกก่อนของหินเนื้ออ่อน.....	10
2.2.1 ขนาดเม็ดตะกอน (Grain Size).....	10
2.2.2 รูปร่างเม็ดตะกอน (Shape of Grains).....	10
2.2.3 แร่ประกอบหิน (Mineral Compositions).....	11
2.2.4 พันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดตะกอน (Bonding of Grain Contact).....	12
2.2.5 ความหนาแน่นในการอัดตัว (Packing Density).....	12
2.2.6 การแตกหักในสภาวะแห้ง (Slaking).....	12
2.2.7 ปริมาณน้ำ (Water Contents).....	13
2.2.8 ค่าความพรุน (Porosity).....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 การออกแบบและประดิษฐ์เครื่องจำลองการผูกมัดของหิน</b> .....	15
3.1 แนวคิดในการประดิษฐ์เครื่องจำลองการผูกมัดขนาดใหญ่.....	15
3.2 รายละเอียดและคุณสมบัติของเครื่องทดสอบการผูกมัด.....	15
<b>บทที่ 4 การทดสอบความคงทนต่อการผูกมัดด้วยเครื่องจำลองขนาดใหญ่</b> .....	21
4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	21
4.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	21
4.3 วิธีการทดสอบ.....	23
4.4 ผลการทดสอบ.....	23
<b>บทที่ 5 การจำลองการผูกมัดในห้องปฏิบัติการ</b> .....	31
5.1 วัตถุประสงค์.....	31
5.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน.....	31
5.3 การจำลองในห้องปฏิบัติการ.....	31
5.4 การจำลองในสภาวะจริง.....	33
5.5 การคำนวณผล.....	33
5.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ.....	35
5.7 สรุปผลการทดสอบ.....	37
<b>บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ</b> .....	41
6.1 วัตถุประสงค์.....	41
6.2 พลังงานความร้อน.....	41
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการจำลองในห้องปฏิบัติการกับสภาวะจริงในภาคสนาม.....	42
<b>บทที่ 7 บทสรุป</b> .....	47
<b>บรรณานุกรม</b> .....	49
<b>ประวัตินักวิจัย</b> .....	53

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	สรุปผลการทดสอบหาองค์ประกอบของหินโดยวิธี Petrographic analysis.....	24
4.2	สรุปผลการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนตามมาตรฐาน ASTM D4644..	28
4.3	สรุปผลการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนในสภาวะแห้ง.....	28
6.1	ค่าคงที่ของหินทรายสามชนิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta SDI$ กับ $N^*$ .....	44
6.2	ค่าคงที่ของหินทรายทั้งสามชนิดในสภาวะแวดล้อมจริงและในห้องปฏิบัติการ.....	46



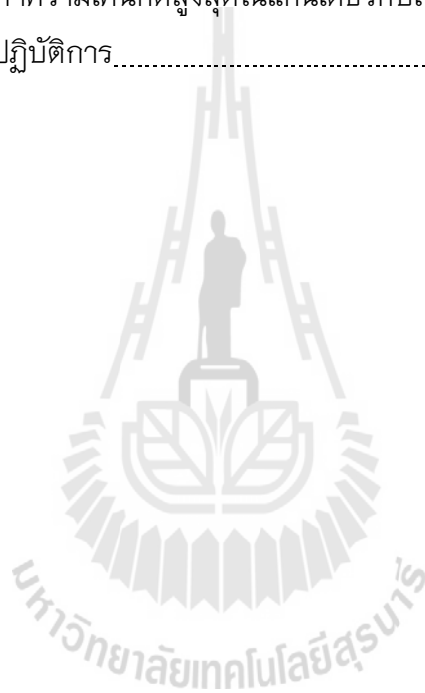


## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 ภาพเพอร์สเปคทีฟขนาดชิ้นส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์สำหรับการจำลองการผูกกร่อนของหิน.....	16
3.2 ภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์สำหรับการจำลองการผูกกร่อนของหินแสดงตำแหน่งของเพลลาโลหะแข็ง โดยปลายข้างหนึ่งจะยึดติดกับลูกรอก และปลายข้างหนึ่งยึดติดกับแผ่นเหล็ก.....	18
3.3 อุปกรณ์สำหรับจำลองการผูกกร่อนที่ใช้ในการทดสอบการชูดึงของตัวอย่างหินขนาด 4 นิ้ว.....	20
4.1 ตัวอย่างหินทราย 3 ชนิด ที่นำมาทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผูกกร่อน.....	22
4.2 การทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผูกกร่อน.....	25
4.3 ตัวอย่างหินทราย 3 ชนิด หลังการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผูกกร่อนตามแบบมาตรฐานและสภาวะแห้ง.....	26
4.5 ดัชนีความคงทนต่อการผูกกร่อนในสภาวะแห้งเปรียบเทียบระหว่างขนาดมาตรฐานและขนาดใหญ่.....	29
4.6 ดัชนีความคงทนต่อการผูกกร่อนของหินทั้ง 3 ชนิด ในวัฏจักรที่ 10 ทั้งสภาวะเปียกและแห้ง.....	30
5.1 ตัวอย่างหินทรายชุดโคกกรวด พระวิหารและภูกระดึง (จากซ้ายไปขวา) สำหรับการทดสอบความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว.....	32
5.2 ตัวอย่างหินที่หึ่งไว้กลางแจ้งให้เผชิญกับสภาวะแวดล้อมจริง.....	32
5.3 การทดสอบความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวของหินทราย.....	34
5.4 ตัวอย่างหินทรายชุดโคกกรวด พระวิหาร และภูกระดึงหลังการทดสอบความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว.....	34
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเวลาการทดสอบที่สภาวะแวดล้อมจริงและห้องปฏิบัติการ.....	36
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักกับเวลาการทดสอบที่สภาวะแวดล้อมจริงและห้องปฏิบัติการ.....	38
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำกับเวลาการทดสอบที่สภาวะแวดล้อมจริงและห้องปฏิบัติการ.....	39

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวกับเวลาการทดสอบ ที่สภาวะแวดล้อมจริงและห้องปฏิบัติการ.....	40
6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta SDI$ กับ $N^*$ จากการจำลองความคงทนการผูกมัด แบบมาตรฐานและแบบขนาดใหญ่กว่ามาตรฐาน.....	43
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวกับเวลาการทดสอบที่สภาวะ แวดล้อมจริงและห้องปฏิบัติการ.....	45



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การทดสอบการผุกร่อนของหินแบบ Slake Durability Test (ASTM D4644) ตามมาตรฐานสากล มีข้อดีหลายประการ กล่าวคือ ตัวอย่างหินมีขนาดเล็ก (50 กรัม) จึงไม่สามารถที่จะใช้เป็นตัวแทนของมวลหินในภาคสนาม นอกจากนี้ผลที่ได้ยังเป็นเพียงดัชนีอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบว่าหินที่ต่างชนิดกันมีความทนทานหรืออ่อนไหวต่อการผุกร่อนมากน้อยเพียงใดเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถที่จะนำมาใช้ในการคาดคะเนการลดตัวของความคงทนหรือความแกร่ง (Durability) ของหินในเชิงเวลา อนึ่ง ความสามารถในการคาดคะเนการผุกร่อนของหินในเชิงเวลาเป็นสิ่งจำเป็นในงานวิศวกรรมธรณีทั่วไป เช่น ความลาดชันของมวลหินในอ่างเก็บน้ำ ถนน ทางรถไฟ และเสถียรภาพของหินรอบอุโมงค์ส่งน้ำ อุโมงค์ถนน อุโมงค์ทางรถไฟ และเหมืองใต้ดิน ดังนั้น วิธีการทดสอบแบบใหม่ที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น ประกอบกับการวิเคราะห์ผลของวิธีดังกล่าวที่สามารถจำลองและคาดคะเนพฤติกรรมของการผุกร่อนของหินได้อย่างแท้จริงจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะภูมิอากาศของประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตร้อนชื้น ส่งผลให้มวลหินที่โผล่โดยธรรมชาติหรือโดยการขุดเจาะมีอัตราการผุกร่อน (Erosion) และอัตราการผุกร่อน (Weathering) สูง ซึ่งแม้แต่ในต่างประเทศยังไม่มีการพัฒนาขบวนการทดสอบหรือสมการการคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของมวลหินที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะแวดล้อมอย่างเป็นรูปธรรม

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์แบบใหม่สำหรับการทดสอบและจำลองการผุกร่อนของหินในห้องปฏิบัติการเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับหินที่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงในภาคสนาม ผลที่ได้สามารถนำมาสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อใช้คาดคะเนระดับการผุกร่อนของหินในระยะยาว

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์จำลองการผุกร่อนของหิน โดยมีลักษณะคล้ายกับเครื่องจำลองแบบมาตรฐานสากล แต่จะมีขนาดใหญ่กว่าประมาณ 4-5 เท่า ทั้งนี้เพื่อต้องการทดสอบหินที่มีขนาด 4-5 นิ้ว จำนวน 10 ก้อน พร้อมกัน และใช้เป็นตัวแทนของหินในภาคสนามได้ดีขึ้น

- 1.3.2 ออกแบบกระบวนการทดสอบเพื่อให้ก้อนตัวอย่างหินเผชิญกับสภาวะอุณหภูมิสูงกว่า 100°C เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 6 ชั่วโมง
- 1.3.3 สอบเทียบผลการทดสอบกับสภาวะการผุกร่อนของหินจริงในภาคสนาม
- 1.3.4 สร้างสมการความสัมพันธ์ของสภาวะการผุกร่อนเชิงเวลาระหว่างตัวอย่างหินที่ทดสอบและตัวอย่างหินในภาคสนาม
- 1.3.5 ตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบมีอย่างน้อย 3 ชนิด ซึ่งเป็นหินที่มักจะมีปัญหาในเชิงเสถียรภาพและเชิงกลศาสตร์

#### 1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

แนวความคิดของงานวิจัยนี้คือ การจำลองการผุกร่อนและผุกร่อนของหินในห้องปฏิบัติการ โดยมีการทดสอบเพื่อเร่งปฏิกิริยาของขบวนการเชิงกายภาพและเชิงเคมีในสภาวะที่ควบคุมได้ เพื่อเปรียบเทียบกับสภาพของมวลหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ วิธีดังกล่าวประกอบด้วย การอบแห้งตัวอย่างหินให้มีอุณหภูมิถึง 100°C และมีการทำให้ตัวอย่างหินเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการจุ่มลงในภาชนะบรรจุน้ำขนาดใหญ่ จากนั้นนำหินมาขัดถูด้วยการบรรจุในตะแกรงเหล็กทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่มีการหมุนด้วยความเร็วตามที่กำหนด จากนั้นนำตัวอย่างหินไปแช่น้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่หายไปจากสภาวะร้อน เย็น และการขัดถู ขบวนการดังกล่าวจะมีการทำซ้ำๆ เป็นวัฏจักรอย่างต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ จะมีการใช้ตัวอย่างหินขนาดใหญ่ (3-4 นิ้ว) ซึ่งใหญ่กว่าที่เคยใช้ในการทดสอบมาตรฐานสากล (1-1.5 นิ้ว) ในช่วงระยะเวลาการทดสอบจะมีการนำหินมาทดสอบความเค้นกดเพื่อตรวจวัดค่ากำลังรับแรงกดที่เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนวัฏจักรที่เพิ่มขึ้น ชุดตัวอย่างหินอีกส่วนหนึ่งจะจัดไว้ให้เผชิญกับสภาวะจริงในภาคสนามด้วยการตากแดดและตากฝน จากนั้นจึงจะนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ ซึ่งการคาดคะเนในเชิงคณิตศาสตร์สามารถทำได้ในเชิงอนุรักษ์ด้วยการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่ตัวอย่างหินได้รับระหว่างสองสภาวะ และเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินที่ทดสอบได้จากหินทั้งสองสภาวะดังกล่าว การทดสอบแบบใหม่นี้นอกจากจะใช้ก้อนตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งเป็นตัวแทนของตัวอย่างหินในภาคสนามได้ดีแล้วยังสามารถสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติของหินที่ถูกจำลองการผุกร่อนและคุณสมบัติของหินที่ผุกร่อนจริงในภาคสนาม

#### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

**วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล**

การวิจัยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

### ขั้นตอนที่ 1 ทบทวนวรรณกรรมวิจัย

ได้มีการค้นคว้าเอกสารอ้างอิง รายงานการประชุม และวารสารที่เกี่ยวข้องกับการผูกกร่อนและการผูกกร่อนของหิน รวมไปถึงวิธีการทดสอบ การสำรวจในภาคสนาม และการคาดคะเนการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพและเชิงเคมีของหิน

### ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์จำลองการผูกกร่อนของหิน

มีการออกแบบและประดิษฐ์วงล้อตะแกรงเหล็กเพื่อใช้จำลองการขัดถูของตัวอย่างหิน วงล้อสามารถบรรจุก้อนตัวอย่างหินขนาด 4-5 นิ้ว จำนวน 10 ก้อน ได้พร้อมกัน ตะแกรงวงล้อถูกจัดอยู่ในแนวระนาบจมอยู่ในน้ำครึ่งหนึ่ง (คล้ายกับตะแกรงที่ใช้ในมาตรฐาน ASTM) และจะหมุนด้วยความเร็วที่สามารถปรับอัตราได้โดยต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้ระบบรอกและสายพาน

### ขั้นตอนที่ 3 การเก็บและจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้เน้นไปที่หินที่มีความอ่อนไหวต่อการผูกกร่อนที่มักพบอยู่ทั่วไปในประเทศไทย การผูกกร่อนของหินเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณี เช่น อ่างเก็บน้ำ อุโมงค์ ฐานราก เขื่อน และความลาดชันของมวลหิน หินส่วนหนึ่งได้นำมาจำลองการผูกกร่อนในห้องปฏิบัติการ อีกส่วนหนึ่งถูกจัดให้เผชิญกับสภาวะจริงในภาคสนามโดยใช้ตัวอย่างหินอย่างน้อย 5 ชุดต่อหินหนึ่งชนิด และได้มีการศึกษาแร่องค์ประกอบหินโดยใช้วิธี Petrographic analysis และมีการวัดค่าความจุความร้อนของหินที่ใช้ในการทดสอบ

### ขั้นตอนที่ 4 การจำลองการผูกกร่อนในห้องปฏิบัติการ

ตัวอย่างหินชุดที่ใช้จำลองการผูกกร่อนได้นำมาผ่านขบวนการอบในชั้นทรายที่ถูกให้ความร้อนด้วยเตาอบที่อุณหภูมิอย่างน้อย 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และทำให้เย็นทันทีด้วยการจุ่มในถังน้ำที่ผสมกรดอย่างอ่อนเป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 12 ชั่วโมง จากนั้นได้นำมาใส่ในตะแกรงที่ประดิษฐ์ขึ้นในขั้นตอนที่ 2 เพื่อจำลองการขัดถูและดำเนินการเช่นนี้เป็นวัฏจักรอย่างต่อเนื่องขึ้นกับอัตราการผูกกร่อนของตัวอย่างหิน ในแต่ละรอบได้มีการชั่งน้ำหนักตัวอย่างหินที่หาย การทดสอบด้วยขบวนการความร้อน เย็น และการขัดถูได้มีการทดสอบความแข็งของหินทุก 10 รอบวัฏจักร โดยใช้วิธี Point Load Index Testing ดังนั้นน้ำหนักหินที่หายไปและความแกร่งของหินที่ลดลงตามรอบวัฏจักรจึงถูกนำมาวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ในเชิงเวลา

ตัวอย่างหินที่เหมือนกันอีกชุดหนึ่งถูกทิ้งไว้กลางแจ้งให้เผชิญกับสภาวะแวดล้อมจริงเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ปี และมีการทดสอบความแข็งของหินเหล่านั้นทุก 4 เดือน (โดยประมาณ) ความแข็งที่ลดลงไปได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างหินที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ต่อไป

ปัจจัยที่ใช้ในห้องปฏิบัติการได้มีการผันแปรเพื่อให้ได้วิธีการทดสอบที่มีมาตรฐานและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้ระยะเวลาสั้นที่สุด

### **ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์**

ข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการได้นำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของหินที่เปลี่ยนไปกับปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง มีการศึกษาความอ่อนไหวของหินแต่ละชนิดต่อสภาวะการจำลอง และมีการศึกษาผลกระทบของแรงค์ประกอบหินแต่ละชนิด สุดท้ายได้มีการสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคาดคะเนความแข็งและอัตราการผุกร่อนของหินแต่ละชนิด

### **ขั้นตอนที่ 6 การคาดคะเนการผุกร่อน**

การคาดคะเนการผุกร่อนได้ใช้แนวคิดของการสะสมและการปล่อยพลังงานความร้อนของตัวอย่างหิน (Fuenkajorn, 2008; Sri-in and Fuenkajorn, 2007) โดยการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานความร้อนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการในขบวนการจำลองกับพลังงานความร้อนที่หินเผชิญในภาคสนาม โดยใช้ข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา จากนั้นได้ทำการสอบเทียบสมการคาดคะเนจากผลการผุกร่อนของตัวอย่างหินที่ทิ้งไว้ให้เผชิญกับสภาวะจริงกับหินที่อยู่ภายใต้การจำลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการเปรียบเทียบได้นำมาใช้ปรับปรุงค่าคงที่หรือรูปแบบของสมการที่ใช้ต่อไป

### **ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผลและเขียนรายงาน**

ผลของการประดิษฐ์เครื่องจำลองการผุกร่อนและวิธีการใช้เครื่องมือได้นำเสนอในรายงานวิจัย รายละเอียดของการทดสอบ ผลการทดสอบ และสมการที่ใช้ในการคาดคะเนการผุกร่อนได้นำเสนอในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

### **ขั้นตอนที่ 8 การถ่ายทอดเทคโนโลยี**

ผลการประดิษฐ์เครื่องมือและการทดสอบจะนำตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ และจะนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติหรือนานาชาติ

## 1.6 ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

อุปกรณ์ที่จะออกแบบและประดิษฐ์ขึ้น รวมทั้งวิธีการทดสอบแบบใหม่หลังจากจดสิทธิบัตรแล้วจะสามารถใช้เป็นต้นแบบเพื่อเผยแพร่ต่อหน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องซึ่งจะเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญของประเทศ นอกจากนี้สถาบันการศึกษาระดับอุดมศึกษาสามารถนำสิ่งประดิษฐ์ใหม่ไปทำการวิจัยหรือใช้เป็นสื่อการสอนในวิชาที่เกี่ยวข้องกับการผูกเรือนของวัสดุธรรมชาติทั่วไป

กฎเกณฑ์ใหม่ที่จะพัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้ได้นำผลกระทบของการผูกเรือนมาพิจารณาในเชิงตัวเลขโดยสามารถนำมาใช้ในการคาดคะเนเสถียรภาพความลาดเอียงของมวลหินในระยะยาวอย่างมีหลักเกณฑ์ นอกจากนี้ผลที่ได้จากการวิจัยยังสามารถนำมาใช้ปรับเปลี่ยนรูปแบบของการค้ำยันมวลหิน (รูปแบบของหมุดยึดหิน ตาข่ายลวด ซีเมนต์คาด) เพื่อให้สอดคล้องกับสภาวะการผูกเรือนของมวลหินที่เปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งท้ายสุดการปรับเปลี่ยนนี้จะนำไปสู่การรักษาเสถียรภาพของมวลหินที่มีเสถียรภาพต่ำในปัจจุบันให้มีเสถียรภาพยืนยาวขึ้นและเป็นไปตามหลักวิชาการ

วิศวกรในหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนต่างๆ สามารถนำกฎเกณฑ์หรือองค์ความรู้ใหม่ไปใช้ออกแบบและประเมินเสถียรภาพความลาดชันของมวลหินที่มีคุณสมบัติผูกเรือนตามกาลเวลาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เสริมสร้างความปลอดภัยแก่สาธารณะชน ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และลดค่าใช้จ่ายในการว่าจ้างผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศเพื่อมาออกแบบรูปทรงของความลาดชันหรือออกแบบระบบการค้ำยัน นอกจากนี้วิศวกรในหน่วยงานดังกล่าวยังสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดชันที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม อาทิ บำรุงรักษาป่าไม้ที่มีอยู่หรือที่ปลูกทดแทน เป็นต้น

องค์ความรู้ที่ได้นี้ยังเป็นประโยชน์ในวงการวิชาการระดับสูง ซึ่งสามารถทำให้เข้าใจอัตราการผูกเรือนของหินที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหิน โดยถือว่าเป็นองค์ความรู้ใหม่ไม่มีผู้ใดเคยศึกษาทั้งในและต่างประเทศและสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาอัตราการผูกเรือนของหินชนิดอื่นนอกเหนือจากหินดินดานและหินทรายแบ่งที่เสนอมาในงานวิจัยนี้ องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องจะรวมไปถึงการเข้าใจการผูกเรือนของหินที่กลายเป็นดินซึ่งอยู่ในรายวิชา Geomorphology การเข้าใจการผูกเรือนของหินที่อยู่ตามแนวชายฝั่งทะเล ซึ่งอยู่ในรายวิชา Coastal Geology การเข้าใจลักษณะและคุณสมบัติของดินตามธรรมชาติที่ใช้ในการเกษตร ซึ่งอยู่ในรายวิชา Soil Science และการเข้าใจคุณสมบัติเชิงกายภาพและเคมีของหินและดินที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างซึ่งอยู่ในรายวิชา Rock and Soil in Construction เป็นต้น

## 1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่
- 3) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 4) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (เหมืองถ่านหินแม่เมาะ)
- 5) กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม
- 6) กรมเจ้าท่า กระทรวงคมนาคม
- 7) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 8) การรถไฟแห่งประเทศไทย กระทรวงคมนาคม
- 9) บริษัทที่ทำเหมืองเปิด เพื่อใช้หินในเชิงอุตสาหกรรม
- 10) ตัวแทนชุมชนในท้องถิ่นที่ได้รับผลกระทบ



## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ กระบวนการการผุกร่อนของมวลหินและตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงและความคงทนต่อการผุกร่อนของหินเนื้ออ่อน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการการผุกร่อนของมวลหิน

กระบวนการการผุกร่อนของหินสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การผุกร่อนทางกายภาพหรือทางกลศาสตร์ (Physical or Mechanical Weathering) และการผุกร่อนทางเคมี (Chemical Weathering) การผุกร่อนทางกลศาสตร์หรือทางกายภาพมีผลกระทบมาจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศซึ่งมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การที่น้ำแข็งตัวกลายเป็นน้ำแข็งและการละลายของน้ำแข็งอย่างต่อเนื่อง เป็นสาเหตุให้เกิดรอยแตกและช่องว่างภายในหิน การกระทำซ้ำๆ กันของสภาวะเปียกและแห้งจะทำให้หินเกิดการแตกตัวออกเป็นชิ้นเล็กๆ อันเป็นผลมาจากแรงกระทำของน้ำ ซึ่งแรงกระทำทางกายภาพ (Physical Forces) หมายความว่ารวมถึงแรงลม การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สภาวะอากาศร้อนสลับหนาว และการกัดกร่อน (Erosion) โดยธารน้ำหรือแม่น้ำ ส่วนการผุกร่อนทางเคมีเกิดจากการเปลี่ยนแปลงหรือสลายตัวของแร่ประกอบหินที่มีสารประกอบบางชนิดเป็นตัวกระทำ เช่น กรดในอากาศ น้ำฝน และแม่น้ำ ทำให้กลายเป็นสารประกอบใหม่ (Abramson et al., 1997) การเปลี่ยนแปลงเป็นผลกระทบโดยกระบวนการ Oxidation Hydrolysis และ Carbonation อัตราการผุกร่อนขึ้นกับความทนทานของหินซึ่งถูกควบคุมโดยแร่องค์ประกอบ เนื้อหิน ความพรุน และความแข็งแรงของหิน ชนิดและอัตราการผุกร่อนจะแปรเปลี่ยนตามภูมิอากาศ ในสภาพภูมิอากาศเปียกชื้นการผุกร่อนทางเคมีมีผลมากกว่าการผุกร่อนทางกลศาสตร์ ซึ่งระดับของอัตราการผุกร่อนในภูมิอากาศเปียกชื้นขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความชื้นเป็นสาเหตุให้เกิดการผุกร่อนที่เพิ่มขึ้น (Bell, 2000)

Moon and Jayawardane (2004) ได้ศึกษาการผุกร่อนเชิงกลศาสตร์และเชิงเคมีของหินบะซอลต์ (Basalt) ในเหมืองแห่งหนึ่งของประเทศนิวซีแลนด์ผลที่ได้สรุปว่า การผุกร่อนในระยะแรกคือหินเกิดรอยแตกเนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ ตามด้วยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของแร่ประกอบหินเป็นผลให้ความแข็งแรงของหินลดลง ธาตุองค์ประกอบของแร่ที่สำคัญและใช้ในการศึกษาคือ Mg, Ca และ Fe ซึ่งสามารถวัดได้ทางเคมี ธาตุองค์ประกอบเหล่านี้เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำแล้วจะเกิดการละลายหรือเปลี่ยนสภาพไป ถ้าหินที่มีรอยแตกมากหรือมีรอย

แตกหนาแน่นก็จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูงตามไปด้วย และส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงลดลงอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามนักวิจัยกลุ่มนี้ไม่ได้สรุปในเชิงวิศวกรรมศาสตร์ว่าอัตราการลดลงของดัชนีความแข็งแรงมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่หินภูเขาไฟเกิดขบวนการผุกร่อนอย่างไร

Yokato and Iwamatsu (1999) ได้ศึกษากระบวนการการผุกร่อนของหินตะกอนภูเขาไฟเนื้ออ่อน (Soft Pyroclastic Rocks) และสรุปว่าคุณสมบัติทางกายภาพขึ้นกับระดับการเชื่อมประสานกันของเนื้อหิน โดยทั่วไปการผุกร่อนของหินเนื้ออ่อนไม่ได้มีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางกลศาสตร์แต่ยังรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีด้วย การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกลศาสตร์ของหินชนิดนี้ในระยะแรกจะมีการแตกสลายของหินและพื้นผิวมีการหลุดลอก ส่วนประกอบทางเคมีที่เกิดจากการแตกตัวทางเคมีของตัวเชื่อมประสานและหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ได้แก่ เหล็กออกไซด์ (FeO) และซิลิกา (Silica) ที่มีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ส่งผลให้หินภูเขาไฟเนื้อแก้วเปลี่ยนเป็นแร่ดิน (Clay Minerals) เช่น Allophone และ Halloysite การเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้เองที่เป็นตัวเร่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางกลศาสตร์ เมื่อความพรุนของหินเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงลดลงตามเวลา

Aristizábal et al. (2005) ได้ศึกษาการผุกร่อนทางเคมีของหินตะกอนภูเขาไฟหินแกรนิต และหินแปร ของพื้นที่ความลาดเอียงมวลหินเขตร้อนในประเทศโคลัมเบีย โดยใช้การทดสอบ X-Ray Diffraction และ X-Ray Fluorescence ผลที่ได้ระบุว่าปริมาณแร่ Kaolinite และ Halloysite ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงระดับการผุกร่อนของหินที่เพิ่มขึ้นด้วย และมีผลทำให้ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และโพแทสเซียมออกไซด์ลดลง

กิตติเทพ เฟื่องขจร (2550) Fuenkajorn (2008) และ Sri-in and Fuenkajorn (2007) ได้ศึกษาการผุกร่อนของตัวอย่างหินในห้องปฏิบัติการ และนำผลมาใช้ในการคาดคะเนเสถียรภาพความลาดชันมวลหิน หินที่ทดสอบเป็นหินที่เกิดจากภาคสนามในประเทศไทยทั้งหมด 13 ชนิด ซึ่งกิจกรรมหลักประกอบด้วย การทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนตามมาตรฐานและแบบแห้ง โดยมีจำนวนวัฏจักรมากกว่าที่กำหนดในมาตรฐานสากล และการจำลองการผุกร่อนภายใต้วัฏจักรร่อนสลับเย็นเป็นจำนวน 140 วัฏจักร นอกจากนั้นยังมีการทดสอบเชิงกายภาพ (การตรวจวัดน้ำหนักที่สูญเสียบไปในแต่ละวัฏจักร และการทดสอบค่าความคงทนต่อการผุกร่อน) และการทดสอบเชิงกลศาสตร์ (การทดสอบค่าดัชนีจุดกด ค่ามุมเสียดทานพื้นฐาน และค่าความเร็วคลื่น) การทดสอบเหล่านี้ได้นำมาใช้เป็นดัชนีบ่งบอกถึงการผุกร่อนของตัวอย่างหิน รวมทั้งได้มีการเสนอแนวคิดในการสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์เพื่อที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดี

ผลงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า การสร้างกราฟความสัมพันธ์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้โดยตรงคือ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{s(50)}$  กับ  $\Delta SDI$  (ดัชนีจุดกดและอัตราการผูกרון) และความสัมพันธ์ระหว่างวัฏจักรของการทดสอบดัชนีความคงทนต่อการผูกרוןกับระยะเวลาจริงในภาคสนาม ( $N^* \approx 18$  วัน) ในการคาดคะเนเสถียรภาพความลาดชันมวลหินจะเน้นไปที่เสถียรภาพของรอยแตกในมวลหินที่อาจมีการเคลื่อนตัว ดังนั้นจึงนำกฎของ Barton's มาใช้ในงานวิจัย เนื่องจากมีค่ามุมเสียดทานพื้นฐาน ( $\phi_B$ ) และค่ากำลังกดสูงสุดของหิน ( $\sigma_c$ ) เป็นตัวแปรที่สำคัญ ซึ่งค่าทั้งสองจะมีผลกระทบโดยตรงต่อการผูกרוןของเนื้อหิน กล่าวโดยรวมคือ จะมีค่าลดลงในขณะที่หินผูกרוןตามกาลเวลานั่นเอง ซึ่งสามารถสรุปเป็นชุดสมการของค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยแตกในมวลหินดังนี้

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_B + JRC \log_{10} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right) \right]$$

$$\sigma_c = \alpha I_{s(50)}$$

$$I_{s(50)} = 6.406 \cdot \Delta SDI^{-0.875}$$

$$\Delta SDI = \alpha \cdot \exp(\beta N^*)$$

$$\phi_B = C \cdot N^{*\lambda}$$

$$N^* \approx \Delta/18$$

โดยที่

$\tau$  คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของรอยแตกในมวลหิน

$\sigma_n$  คือ ความเค้นในแนวตั้งฉาก (Normal Stress)

$\phi_B$  คือ มุมของความเสียดทานพื้นฐาน (Basic Friction Angle)

JRC คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความขรุขระมีค่าระหว่าง 0 ถึง 20

$\sigma_c$  คือ ค่ากำลังกดสูงสุดของหิน

$I_{s(50)}$  คือ ค่าดัชนีจุดกด

$\alpha$  คือ ปัจจัยตัวคูณที่หาได้จากมาตรฐานสากล

$\Delta SDI$  คือ อัตราการผูกרוןซึ่งได้จากการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผูกרון

$N^*$  คือ ค่าสมมติในเชิงอนุรักษ์มีค่าเท่ากับ  $n$  หรือจำนวนวัฏจักรร่อนสลบเย็น

$D$  คือ จำนวนวันในอนาคต

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการผูกרוןคงที่ได้จากสมการความสัมพันธ์

$\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเวลาของอัตราการผูกרון

$C$  คือ สัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเสียดทานพื้นฐาน

$\lambda$  คือ สัมประสิทธิ์เชิงเวลาของค่ามุมเสียดทานพื้นฐาน

การคาดคะเนขั้นต้นจะอยู่ในเชิงอนุรักษ์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการมีการจำลองให้เกิดขึ้นอย่างฉับพลัน ผลงานวิจัยดังกล่าวยังระบุว่า การทดสอบค่าความเร็วคลื่นปฐมภูมิ (P-wave) อาจไม่สามารถนำมาใช้เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงการผุกร่อนของเนื้อหิน ถึงแม้ในเชิงทฤษฎีแล้วค่าความเร็วคลื่นจะลดลงเมื่อหินมีการผุกร่อนมากขึ้นดังแสดงได้จากผลงานวิจัยต่างประเทศ (Begonha and Braga, 2002 และ Sousa et al., 2005)

ค่าการสูญเสียน้ำหนัก ค่ามุมเสียดทานพื้นฐาน และดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน สามารถใช้เป็นดัชนีบ่งบอกถึงการผุกร่อนของหินได้ดีพอสมควร อย่างไรก็ตามการแปรปรวนของผลที่ได้ยังมีอยู่บ้าง แต่ก็เป็นส่วนน้อยซึ่งคาดว่าเกิดขึ้นจากการแปรปรวนของเนื้อหินในกลุ่มตัวอย่างที่ได้คัดสรรมา

## 2.2 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งและความคงทนต่อการผุกร่อนของหินเนื้ออ่อน

แร่ประกอบหินและลักษณะรูปร่างของการจัดเรียงตัวของเม็ดแร่หรืออนุภาค (Microfabric) มีผลต่อความคงทนต่อการผุกร่อนและความแข็งของหินเนื้ออ่อน โดยหินดินดาน (Shale) เป็นหินเนื้ออ่อนชนิดหนึ่งที่จำแนกอยู่ในกลุ่ม Argillaceous Rocks การที่จะหาคุณลักษณะทางกลศาสตร์ของหินดินดานจึงไม่่ง่ายนัก เพราะการจัดเตรียมตัวอย่างหินชนิดนี้ทำได้ยาก การคาดคะเนพฤติกรรมของหินดินดานจำเป็นต้องทำความเข้าใจผลกระทบของเม็ดตะกอนและแร่ดินในเชิงกลศาสตร์ของหินก่อน (Koncagul and Santi, 1999) ตัวแปรที่มีผลกระทบดังกล่าวอธิบายได้ดังนี้

### 2.2.1 ขนาดเม็ดตะกอน (Grain Size)

ตะกอนเม็ดละเอียดมีความอ่อนไหวต่อการสลายตัวและมีอัตราการสลายตัวที่สูงกว่าตะกอนเม็ดหยาบ (D'Appolonia Consulting Engineering, 1980) ในทางกลับกันตะกอนเม็ดละเอียดจะมีความต้านทานแรงกดได้สูงกว่า (Brace, 1961; Fahy and Guccions, 1979) เนื่องจากจุดสัมผัสระหว่างเม็ดตะกอนมีมากทำให้สามารถกระจายแรงบนพื้นผิวได้มาก

### 2.2.2 รูปร่างเม็ดตะกอน (Shape of Grains)

ความกลมมนของเม็ดตะกอนในหินจะส่งผลให้มีความคงทนต่อการผุกร่อนสูง (D'Appolonia Consulting Engineering, 1980) จะเห็นได้จากผลึกหรือเม็ดตะกอนที่มีรูปร่างเหลี่ยมจะเกิดการผุกร่อนในระดับสูง และทำให้ค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (Slake Durability Index Test) มีค่าต่ำ เช่นเดียวกับค่าความเค้นที่จะรวมตัวอยู่บริเวณขอบของเม็ด

ตะกอนในการทดสอบความต้านทานแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial Compressive Strength) ซึ่งขึ้นกับระดับของพันธะระหว่างเม็ดตะกอน เช่น อนุภาคที่มีผิวขรุขระทำให้เกิดแรงต้าน ส่งผลให้ความต้านทานแรงกดสูง Fahy and Guccions (1979), Ulusay and Aksoy (1994) และ Shakoor and Bonelli (1991) ได้รายงานผลที่ยืนยันถึงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกดในแกนเดียวและเปอร์เซ็นต์ของตะกอนเม็ดเหลี่ยม เม็ดแร่ และตัวเชื่อมประสานของตะกอนเม็ดเหลี่ยมที่ทำให้เกิดแรงต้านระหว่างเม็ดตะกอน แต่ให้ค่าการผุกร่อนที่สูงกว่าหินที่มีเม็ดตะกอนกลมมน ขอบเขตและชนิดของรอยต่อระหว่างเม็ดตะกอนอาจจะมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของหินเช่นกัน (Ulusay and Aksoy 1994; Shakoor and Bonelli, 1991) งานวิจัยนี้ยังค้นพบความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างความหลากหลายของเม็ดตะกอนและความต้านทานแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างหินทรายอันเนื่องมาจากชนิดจุดสัมผัสของเม็ดตะกอนที่ดีทำให้มีความคงทนต่อการขูดขีด (hardness) และการผุกร่อน

### 2.2.3 แร่ประกอบหิน (Mineral Compositions)

Fahy and Guccions (1979), Shakoor and Bonelli (1991) และ Gunsallus and Kulhawy (1984) ได้ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแร่ควอตซ์ (Quartz) และความต้านทานแรงกดในแกนเดียวของหินทราย Handlin and Hager (1957), Bell (1978) และ Barbour et al. (1979) กล่าวว่า หินที่มีเม็ดควอตซ์เป็นองค์ประกอบจะมีค่าความคงทนต่อการผุกร่อนสูง ซึ่งทำให้ความต้านทานของแร่ต่อการครูดถูทางกลศาสตร์ (Mechanical Abrasion) สูง หินดินดานมีแร่ องค์ประกอบที่หลากหลาย เช่น แร่ดิน วัสดุอินทรีย์ และแร่อื่นๆ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของหินทุกชนิด (Mitchell, 1993) ในทางวิศวกรรมดิน จะมีขนาดเม็ดตะกอนเล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร ประกอบด้วยแร่ดินเช่น Talc, Mica, Chlorite และ Smectite โดยทั่วไปแล้วผิวของแร่ดินมีประจุลบ (Negative Electrical Charge) ซึ่งเป็นตัวปรับสมดุลด้วยการดูดซับของประจุบวกจากสารละลายต่างๆ (Mitchell, 1993) ความแตกต่างกันของแร่ดินคือ ความสามารถในการบวมตัว ซึ่งสามารถจัดลำดับการบวมตัวของแร่จากมากไปน้อยได้ คือ มอนท์มอริโอไนท์ (Montmorillonite) อีไลท์ (Illite) ฮาลอยไซต์ (Halloysite) และคาโอไลไนท์ (Kaolinite) ชนิดของอะตอมเป็นตัวบ่งบอกลักษณะโครงสร้างในการเชื่อมประสานซึ่งมีผลต่อระดับการบวมตัวด้วย จากกรณีตัวอย่างการบวมตัวของมอนท์มอริโอไนท์ที่ลดลงตามปริมาณอะตอมที่รวมตัวกับโซเดียม (Sodium) จากมากไปน้อยคือ ลิเทียม (Lithium, Li) โพแทสเซียม (Potassium, K) แคลเซียม (Calcium, Ca) แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) และไฮโดรเจน (Hydrogen, H) มีความเป็นไปได้ที่การบวมตัวส่งผลให้ความคงทนต่อการผุกร่อนลดลง แต่มีผลน้อยมากต่อความแข็งแรงหรือความแข็งต่อการขูดขีด

#### 2.2.4 พันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดตะกอน (Bonding of Grain Contact)

ในเชิงแร่วิทยา พันธะและวัสดุเชื่อมประสานเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการควบคุมความแข็ง ความคงทนต่อการขูดขีด และความคงทนต่อการผุกร่อน โดย Vutukuri et al. (1974) กล่าวว่าแร่ควอตซ์และแร่เหล็กมีความแข็งแรงสูง ส่วนดินเป็นวัสดุที่อ่อน โดย Bell (1978) ได้แสดงการเพิ่มขึ้นของความแข็งที่เป็นสัดส่วนกับตัวเชื่อมประสานที่ปริมาณคาร์บอนเตสูง Fahy and Guccione (1979) และ Shakoor and Bonelli (1991) กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวเชื่อมประสานและความแข็งมีความสำคัญ จึงคาดว่าชนิดของตัวเชื่อมประสานและระดับของพันธะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญกว่าเปอร์เซ็นต์ของตัวเชื่อมประสานเพียงอย่างเดียว

#### 2.2.5 ความหนาแน่นในการอัดตัว (Packing Density)

Bell (1978) ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในการอัดตัว ซึ่งหาได้จากช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอนต่อพื้นที่สำหรับค่าความต้านทานแรงกดในแกนเดียว และค่าความต้านทานแรงดึงของหินทราย ผลที่ได้คือเมื่อค่าความแข็งของหินเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน Hoek and Brown (1980) กล่าวว่า การเชื่อมประสานกัน (Interlocking) ของเม็ดตะกอนในหินตะกอนขึ้นกับความหนาแน่นในการอัดตัวและวัสดุเชื่อมประสาน โดย Doberner and DeFreitas (1986) ได้สรุปว่าความหนาแน่นในการอัดตัวที่ต่ำเป็นคุณลักษณะทั่วไปของหินทรายเนื้ออ่อน แต่ Shakoor and Bonelli (1991) ไม่พบความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างความหนาแน่นในการอัดตัวและความแข็ง แต่สามารถคาดการณ์ได้ว่าเมื่อความต้านทานแรงกดในแกนเดียว ความคงทนต่อการขูดขีด และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนมีค่าสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นในการอัดตัวจะมีค่าสูงตามไปด้วย

#### 2.2.6 การแตกหักในสถานะแห้ง (Slaking)

ปัจจัยนี้จะมีผลกระทบในเชิงกลศาสตร์ต่อการผุกร่อน (Degradation) ทางกายภาพของหินที่มีดินเป็นองค์ประกอบ Moriwaki and Mitchell (1977) ได้อธิบายถึงความหลากหลายของการแตกหัก และตัวแปรอื่นๆ เช่น อัตราส่วนการดูดซับประจุบวก (Adsorbed-Cation Ratios) ปริมาณน้ำ (Water Content) และความเข้มข้นในการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation-Fluid Electrolyte Concentrations) ซึ่งสรุปได้ว่าชนิดของการแตกหักเป็นตัวควบคุมที่สำคัญ เนื่องจากแร่ดินและความเข้มข้นของการแลกเปลี่ยนอะตอมโซเดียมโดยทั่วไป การแตกหักสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ 1) Dispersion Slaking (Na-kaolinite) 2) Swelling Slaking (Na-montmorillonite) 3) Body Slaking (Ca-kaolinite and Ca-illite) และ 4) Surface Slaking (Ca-montmorillonite) (Moriwaki and Mitchell, 1977) ด้วยเหตุนี้พฤติกรรมภายในของ

การแตกหักในหินดินดานจึงขึ้นกับชนิดของแร่ดิน การรวมกันของแร่ดินก็จะให้ผลของการแตกหักที่แตกต่างกันออกไป (Santi and Koncagul, 1996) การเพิ่มขึ้นของแรงผลักระหว่างชั้นและความดันโพรง (Negative Pore Pressure) เป็นกลไกทั่วไปของการแตกหักของแร่ Smectite (D'Appolonia Consulting Engineers, 1980)

### 2.2.7 ปริมาณน้ำ (Water Contents)

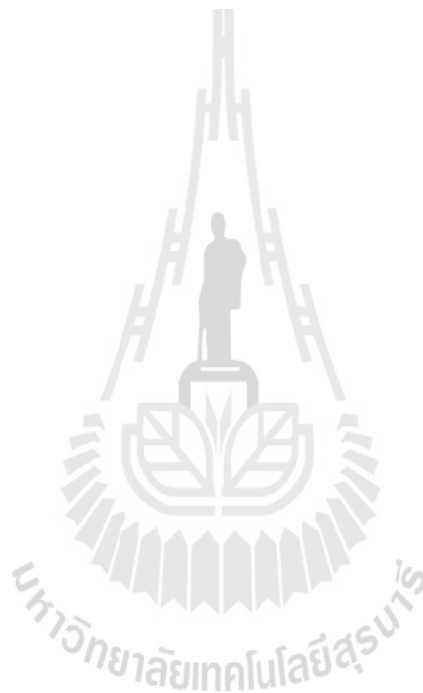
จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำในตัวอย่างหินจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดลดลง เหตุผลประการแรกคือน้ำสามารถรองรับรอยแตกกับพื้นผิวของแร่และเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของพื้นผิว (Horn and Deere, 1962) ประการที่สองคือความดันน้ำในโพรง (Pore Water Pressure) เป็นสาเหตุหนึ่งของความไม่มีเสถียรภาพของรอยแตกในหินน้ำเป็นตัวลดค่าความต้านทานแรงเฉือนหรือเปลี่ยนคุณลักษณะแร่ดินที่เป็นส่วนประกอบของหิน (Touloukian et al., 1981) Kjaernsli and Sande (1966) และ Moon (1993) ได้แสดงให้เห็นว่าน้ำเป็นตัวการที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงกดลดลง อย่างไรก็ตามหินที่ประกอบด้วยแร่ดินที่ไม่มีพฤติกรรมการบวมตัวเช่นแร่คาโอลิไนท์ จะมีความทนทานต่อ Slake ขึ้นกับการแช่อยู่ในน้ำของหินเมื่อสภาวะเริ่มต้นของหินอยู่ในสภาวะแห้ง (Moriwaki and Mitchell, 1977)

### 2.2.8 ค่าความพรุน (Porosity)

คือปริมาตรของช่องว่างในตัวอย่างต่อปริมาตรของตัวอย่าง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (Hydraulic Conductivity) หาได้จากความสามารถของน้ำในการซึมผ่านช่องว่าง ซึ่งบ่งบอกถึงความต่อเนื่องของเครือข่ายช่องว่าง (Pore Network) ของตัวอย่าง ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน คือ แร่ประกอบหิน เนื้อหิน (Texture) การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) คุณลักษณะของของเหลว องค์ประกอบของการแลกเปลี่ยนประจุ อัตราส่วนโพรง (Void Ratio) และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำในมวลหิน (Domenico and Schwartz, 1990) หินที่มีความแตกต่างของแร่ประกอบหินเช่น หินดิน (Clay Rocks) จะมีค่าความพรุนสูงและค่าความซึมผ่าน (Permeability) อยู่ระหว่าง  $10^{-8}$  ถึง  $10^{-10}$  เมตร/วินาที และจะขึ้นกับแร่ประกอบหินคือ แร่ดินที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กหรือเป็นเส้นใย (Granular or Fibrous Shape) เช่น คาโอลิไนท์ และอีไลท์ จะให้ค่าความซึมผ่านได้ดีกว่าลักษณะรูปร่างเป็นชั้นบางๆ (Flake Shaped) เช่น มอนท์มอรีโอไนท์ หินดินดานที่ประกอบด้วยแร่คาโอลิไนท์จะมีค่าความต้านทานการ Slaking ต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของคาโอลิไนท์มีช่องว่างมากจึงทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้างพันธะไฮโดรเจนในแต่ละชั้น (Vallejo et al., 1994) ในทางกลับกันจะทำให้ค่าความต้านทานแรงกด ความคงทนต่อการขูดขีด และความต้านทานแรงกดแบบจุดกด (Point

Load) ของหินดินดานลดลง (Deere and Miller, 1966 และ Vallejo et al., 1994) ความพรุนมีผลกระทบที่สำคัญในเชิงกลศาสตร์ Price (1960) และ Dube and Singh (1972) กล่าวว่า หินตะกอนมีคุณสมบัติความแข็งแรงลดลงเมื่อมีความพรุนมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายทางกายภาพได้ว่า ความพรุนที่สูงจะทำให้เกิดเครือข่ายการเชื่อมของรอยแตกขนาดเล็ก

Moon (1993) ได้สรุปว่าโครงสร้างขนาดเล็กบนเนื้อหินดินดานเป็นตัวควบคุมที่สำคัญเชิงพฤติกรรมทางกลศาสตร์ธรณี ความแข็งและความคงทนต่อการผุกร่อนถูกควบคุมโดยความหนาแน่นรวมทั้งระดับการเชื่อมกันของเม็ดตะกอนและขนาดเฉลี่ยของผลึก ซึ่งได้แสดงคุณสมบัติรูปพรรณสัณฐานที่มีผลกระทบจากคุณลักษณะกลศาสตร์ธรณีของหินในตารางที่ 2.1





## บทที่ 3

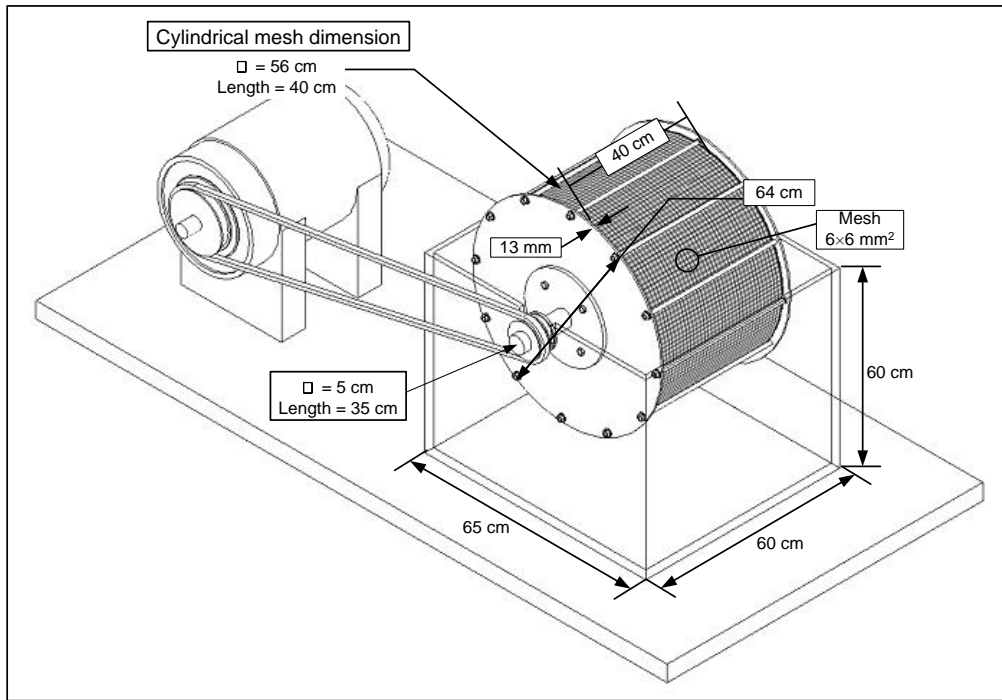
### การออกแบบและประดิษฐ์เครื่องจำลองการผุกร่อนของหิน

#### 3.1 แนวคิดในการประดิษฐ์เครื่องจำลองการผุกร่อนขนาดใหญ่

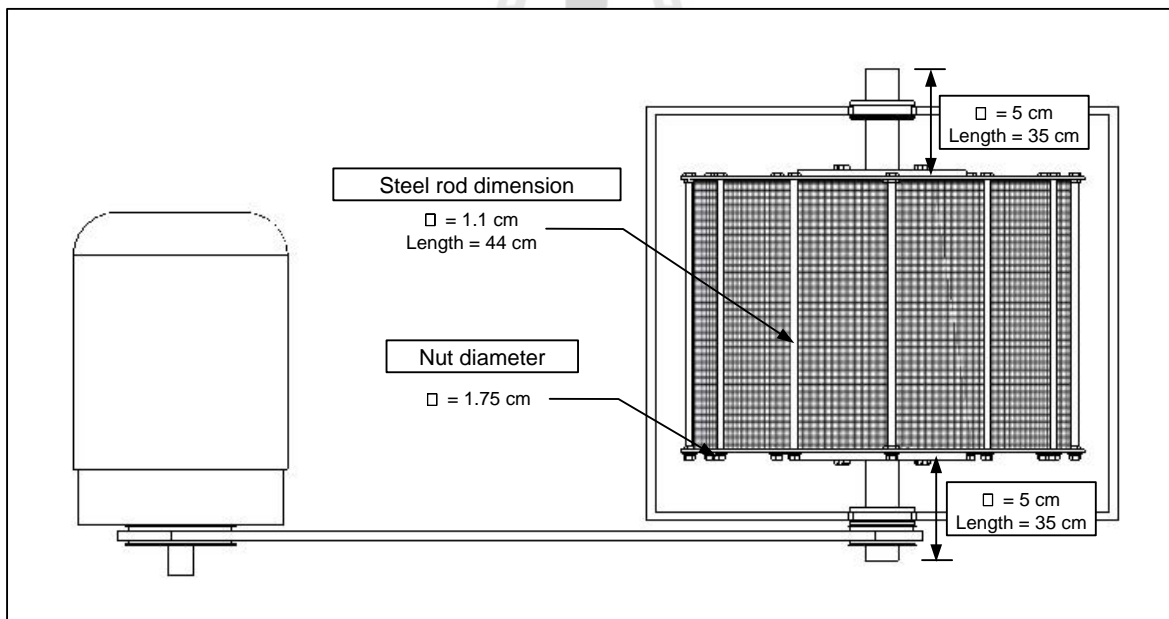
การประดิษฐ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของอุปกรณ์ทดสอบแบบเดิมที่เสนอโดย ASTM ซึ่งได้เสนอแนวความคิดในการจำลองการผุกร่อนของมวลหินด้วยการใช้ตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ผลการทดสอบสามารถคาดคะเนการผุกร่อนของมวลหินจริงในธรรมชาติ กล่าวคือ เครื่องจำลองการผุกร่อนขนาดใหญ่จะมีลักษณะคล้ายกับเครื่องจำลองแบบมาตรฐานสากล แต่มีขนาดใหญ่กว่าประมาณ 4-5 เท่า และมีขบวนการทดสอบที่ต่างออกไป ทั้งนี้เพื่อใช้ในการทดสอบตัวอย่างหินที่มีขนาด 4-5 นิ้ว จำนวน 10 ก้อน พร้อมกัน และเพิ่มความรุนแรงของขบวนการซัดถูและวัฏจักรร้อน-เย็นให้มากขึ้น เพื่อเป็นตัวแทนของมวลหินในภาคสนามได้ดีขึ้น โดยมีการอบแห้งตัวอย่างหินที่อุณหภูมิสูงถึง 110°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และมีการทำให้ตัวอย่างหินเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการจุ่มลงในภาชนะบรรจุน้ำขนาดใหญ่เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำหินมาผ่านขบวนการซัดถูด้วยการบรรจุในตะแกรงเหล็กทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่มีการหมุนด้วยความเร็ว 30 รอบต่อนาที จากนั้นนำตัวอย่างหินไปซังน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่หายไปจากสภาวะร้อน-เย็นและการซัดถู ขบวนการดังกล่าวจะมีการทำซ้ำเป็นวัฏจักรอย่างต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการจำนวน 10 วัฏจักร และจะนำน้ำหนักของหินที่หายไปจากการทดสอบแต่ละวัฏจักรมาลงจุดเพื่อสร้างเส้นกราฟ โดยให้น้ำหนักที่หายไปในแต่ละวัฏจักรเป็นแกนตั้ง และจำนวนรอบกำหนดถอยหลังจาก 10 ถึง 1 เป็นแกนนอน แต่ละรอบของวัฏจักรในการทดสอบสามารถเทียบเป็นค่าเวลาโดยใช้การคำนวณจากค่าพลังงานความร้อนที่ให้กับตัวอย่างหินในช่วง 12 ชั่วโมง เทียบกับค่าพลังงานความร้อนที่หินได้รับที่วัดได้ในภาคสนามในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะมีอุณหภูมิผันแปรในแต่ละพื้นที่ ดังนั้น เส้นกราฟที่สร้างจากผลการทดสอบจะสามารถคาดคะเนได้ว่าหินที่ทดสอบจะมีอัตราการผุกร่อนในเชิงเวลามากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะขึ้นกับแร่องค์ประกอบหินและการยึดติดของผลึกหรือเม็ดแร่ของหินนั้นๆ เครื่องจำลองการผุกร่อนขนาดใหญ่จะสามารถแก้ไขข้อบกพร่องของอุปกรณ์ทดสอบความทนทานต่อการผุกร่อนแบบดั้งเดิม

#### 3.2 รายละเอียดและคุณสมบัติของเครื่องทดสอบการผุกร่อน

รายละเอียดของอุปกรณ์สำหรับจำลองการผุกร่อนได้แสดงในรูปที่ 3.1(a) ซึ่งเป็นภาพเพอร์สเปคทีฟของอุปกรณ์สำหรับการจำลองการผุกร่อนเพื่อใช้จำลองการซัดถูของตัวอย่างหิน



(a)



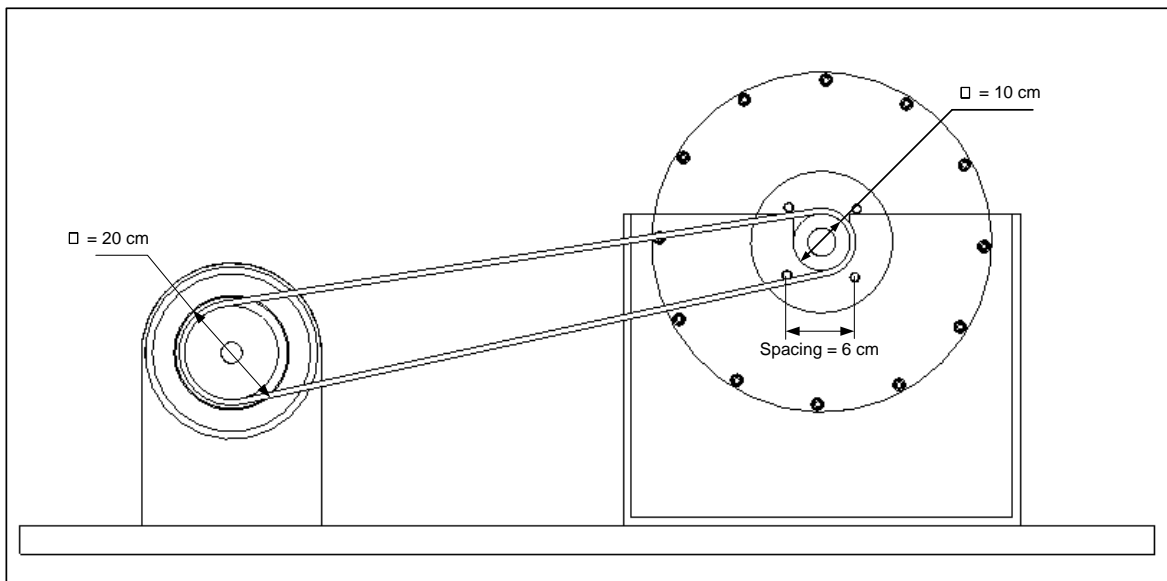
(b)

รูปที่ 3.1 ภาพเพอร์สเปคทีฟขนาดขึ้นส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์สำหรับการจำลองการผูกมัดของหิน

การประดิษฐ์นี้ประกอบด้วยตะแกรงลวดรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 56 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร โดยมีช่องระหว่างเส้นลวดเท่ากับ  $6 \times 6$  ตารางมิลลิเมตร ปลายทั้งสองข้างของตะแกรงลวดประกบด้วยแผ่นเหล็กรูปวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 64 เซนติเมตรหนา 1.3 เซนติเมตร และมีแท่งเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.1(b) จำนวน 12 แท่ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร ยาว 44 เซนติเมตร เป็นตัวยึดติดกับตะแกรงลวดรูปทรงกระบอกระหว่างแผ่นเหล็กที่ปลายทั้งสองด้านด้วยน็อตตัวเมียซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.75 เซนติเมตร ส่วนจุดกึ่งกลางด้านนอกของแผ่นเหล็กทั้งสองถูกยึดด้วยเพลาลโลหะแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตร ใช้เป็นแกนหมุนของอุปกรณ์สำหรับการจำลองการฟุ่ร่อน โดยชุดอุปกรณ์นี้จะวางอยู่บนถังน้ำขนาดกว้าง 65 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ลึก 60 เซนติเมตร ที่ปลายของเพลาลโลหะแข็งจะมีลูกรอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.2 ยึดติดไว้เพื่อใช้เป็นตัวรับกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้ารอบต่ำ-แรงบิดสูง ที่ส่งผ่านสายพานเบอร์ 60 ซึ่งคล้องอยู่บนลูกรอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 20 เซนติเมตร โดยลูกรอกนี้ถูกยึดติดอยู่กับแกนของมอเตอร์ไฟฟ้า

รูปที่ 3.2 แสดงภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์สำหรับการจำลองการฟุ่ร่อนของหิน ซึ่งในรูปนี้แสดงตำแหน่งของเพลาลโลหะแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ที่วางอยู่ด้านบนของถังน้ำ โดยปลายข้างหนึ่งจะยึดติดกับลูกรอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และปลายข้างหนึ่งยึดติดกับแผ่นเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 64 เซนติเมตร ด้วยน็อตตัวผู้ขนาด 1 เซนติเมตร จำนวน 4 ตัว แต่ละตัวมีระยะห่างจากแกนกลาง 6 เซนติเมตร และทำมุมต่อกัน 90 องศา เพื่อใช้เป็นแกนหมุน เพลาลโลหะแข็งด้านขวาจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกมีความยาว 5 เซนติเมตร เพื่อใช้ยึดติดกับแผ่นเหล็ก ส่วนที่ 2 มีความยาว 30 เซนติเมตร เพื่อยึดติดกับลูกรอก ซึ่งใช้เป็นตัวรับกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าและเป็นแกนหมุนให้กับอุปกรณ์ทดสอบ

อุปกรณ์สำหรับจำลองการฟุ่ร่อนของหินเป็นสิ่งประดิษฐ์เพื่อจำลองการขัดถูของตัวอย่างหินในห้องปฏิบัติการ โดยสามารถทดสอบกับตัวอย่างหินที่มีขนาด 4-5 นิ้ว จำนวน 10 ก้อน ได้พร้อมกัน ซึ่งจะสามารถจำลองการฟุ่ร่อนของหินได้แม่นยำกว่าอุปกรณ์ทดสอบแบบดั้งเดิม กล่าวคือ ผลการทดสอบจะใช้เป็นตัวแทนของขบวนการการฟุ่ร่อนที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนามได้ดีขึ้น สามารถทดสอบหินที่มีเนื้ออ่อน (มีความแข็งน้อย) ได้ เนื่องจากการใช้ก้อนตัวอย่างหินขนาดใหญ่สามารถระบุความแตกต่างของอัตราการฟุ่ร่อนของกลุ่มหินเนื้อแข็งได้ละเอียดขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถคาดคะเนอัตราการฟุ่ร่อนหรือการลดตัวของความแข็งของหินในเชิงเวลาจริง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบความลาดชันหรืออุโมงค์ในมวลหิน



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางด้านหน้าของอุปกรณ์สำหรับการจำลองการหมุนของหินแสดงตำแหน่งของเพลาลอยหะแข็ง โดยปลายข้างหนึ่งจะยึดติดกับลูกกรอก และปลายข้างหนึ่งยึดติดกับแผ่นเหล็ก



รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์สำหรับการจำลองการผูกเรือนที่ได้ทำการประดิษฐ์ขึ้น โดยใช้วิธีหมุนวงล้อด้วยมือ ซึ่งมีความสะดวกในการเคลื่อนย้ายและถอดประกอบสำหรับการทำความสะอาด วงล้อนี้สามารถบรรจุก้อนตัวอย่างหินขนาด 4 นิ้ว จำนวน 10 ก้อน ได้พร้อมกัน ตะแกรงวงล้อถูกจัดอยู่ในแนวระนาบจมอยู่ในน้ำ 40% (คล้ายกับตะแกรงที่ใช้ในมาตรฐาน ASTM)





รูปที่ 3.3 อุปกรณ์สำหรับจำลองการฟูกร่อนที่ใช้ในการทดสอบการชูดงของตัวอย่างหินขนาด 4 นิ้ว



## บทที่ 4

# การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนด้วยเครื่องจำลองขนาดใหญ่

### 4.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความคงทนต่อการผุกร่อนของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิดภายใต้เครื่องจำลองการผุกร่อนที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้ เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (Slake durability index test) และการทดสอบในสภาวะแห้ง (Modified slake durability index test, MSDI) เพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำต่อค่าความคงทนต่อการผุกร่อนและผลกระทบด้านขนาดของตัวอย่างหิน

### 4.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้เน้นไปที่หินที่มีความอ่อนไหวต่อการผุกร่อน คือ หินทรายชุดโคกกรวด หินทรายชุดภูกระดึง และหินทรายชุดพระวิหารที่มีขนาด 4-5 นิ้ว จำนวน 10 ก้อน โดยตัวอย่างหินแต่ละก้อนของการทดสอบแต่ละชุดจะมีน้ำหนักประมาณ 1-2 กิโลกรัม รูปที่ 4.1 แสดงหินทั้งสามชนิดที่จัดเตรียมสำหรับงานวิจัยนี้ซึ่งพบอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การผุกร่อนของหินเหล่านี้มักมีผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณี เช่น อ่างเก็บน้ำ อุโมงค์ สุสานราก เขื่อน และความลาดชันของมวลหิน เหนือที่เลือกใช้คัดเลือกตัวอย่างหินได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งตัวอย่างหิน และแหล่งที่มาที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และแนวคิดของงานวิจัยนี้ เหนือดังกล่าวประกอบด้วย

- 1) ตัวอย่างหินจะต้องมีความอ่อนไหวต่อการผุกร่อน ชนิดของหินดังกล่าวอาจประกอบด้วย กลุ่มหินดินดาน หินทรายแป้ง และหินภูเขาไฟ อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างหินไม่ควรอ่อนเกินไปจนไม่สามารถจัดเตรียมได้
- 2) ตัวอย่างหินจากแต่ละแหล่งหรือแต่ละพื้นที่จัดเก็บจะต้องมีความสม่ำเสมอในเชิงกายภาพและกลศาสตร์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งจะต้องมีความแปรปรวนภายในตัวอย่างหินน้อย
- 3) พื้นที่หรือแหล่งที่มาของตัวอย่างหินและชนิดของหินจะต้องมีมากพอเพื่อให้สามารถจัดเก็บเพิ่มเติมได้ในกรณีที่จำเป็นต้องมีการทดสอบใหม่เพื่อยืนยันผลการทดสอบ
- 4) ควรเป็นหินที่พบกระจายอยู่ทั่วไป และเป็นหินที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างเชิงวิศวกรรมธรณี เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



(หินทรายชุดโคกกรวด)



(หินทรายชุดภูกระดึง)



(หินทรายชุดพระวิหาร)

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างหินทราย 3 ชนิด ที่นำมาทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน



ได้มีการศึกษาแร่องค์ประกอบหินทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธี Petrographic Analysis ซึ่งผลที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1

### 4.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนได้ทำการทดสอบ 10 วัฏจักร โดยใช้อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดมาตรฐานของ ASTM โดยมีสองชุดการทดสอบคือ การทดสอบตามแบบมาตรฐาน ASTM D4644 (Standard slake durability index test, SSDI) ซึ่งอยู่ในสภาวะเปียก ส่วนการทดสอบที่อยู่ในสภาวะแห้งจะไม่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำต่อค่าความคงทนต่อการผุกร่อน ในการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนมีวิธีการทดสอบดังนี้

- 1) นำตัวอย่างหินแต่ละชนิดขนาด 4-5 นิ้ว จำนวน 10 ก้อน ใส่ในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 2) นำตัวอย่างหินที่อบได้จากเตาอบมาชั่งน้ำหนัก
- 3) นำตัวอย่างหินใส่เครื่องจำลองการผุกร่อน ซึ่งวงล้อที่บรรจุหินต้องจมอยู่ในน้ำประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ของระดับความสูงวงล้อ
- 4) หมุนวงล้อที่มีตัวอย่างหิน 200 รอบ ในเวลา 10 นาที
- 5) นำตัวอย่างหินออกจากเครื่องทดสอบมาชั่งน้ำหนัก
- 6) นำเข้าเตาอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

จากขั้นตอนที่กล่าวข้างต้นถือเป็นการทดสอบ 1 รอบวัฏจักร ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 10 รอบวัฏจักรในแต่ละตัวอย่างหิน ส่วนการทดสอบในสภาวะแห้งจะไม่มีน้ำในการทดสอบเหมือนกับการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนในขั้นตอนที่ 3 รูปที่ 4.2 แสดงการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน

### 4.4 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการมีค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนซึ่งได้ทำการตรวจวัดทุกรอบวัฏจักรทดสอบมีทั้งหมด 10 รอบวัฏจักร ทั้งในสภาวะเปียกและสภาวะแห้งโดยใช้อุปกรณ์ทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัย ซึ่งสภาวะในการทดสอบมีความใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนาม รูปที่ 4.3 ได้แสดงตัวอย่างหินที่ทำการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนตามแบบมาตรฐานในสภาวะเปียกและในสภาวะแห้งของหินทรายชุด

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบหาองค์ประกอบของหินโดยวิธี Petrographic analysis

Rock Descriptions	Rock Names		
	Khok Kruat Sandstone	Phu Kradung Sandstone	Phra Wihan Sandstone
Density (g/cc)	2.62	2.59	2.35
Quartz (%)	58.41	90.00	97.00
Mica (%)	3.00	2.00	-
Feldspar (%)	5.00	5.00	-
Kaolinite (%)	-	-	-
Calcite (%)	-	-	-
Halite (%)	-	-	-
Other (%)	20.00	3.00	3.00
Cementing	Calcite	Hematite	Silica
Contact	Grain contact	Grain	Grain contact
Grain size (mm)	0.1-1.5	0.1-1.0	2.00
Grain Shape	angular	angular	angular
Sorting	Poorly	moderate	Well
Color	Brownish Red	Brownish	Yellow



รูปที่ 4.2 การทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน





(หินทรายชุดโคกกรวด)



(หินทรายชุดภูกระดึง)



(หินทรายชุดพระวิหาร)

**รูปที่ 4.3** ตัวอย่างหินทราย 3 ชนิด หลังการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนตามแบบมาตรฐาน (ขวา) และสภาวะแห้ง (ซ้าย)

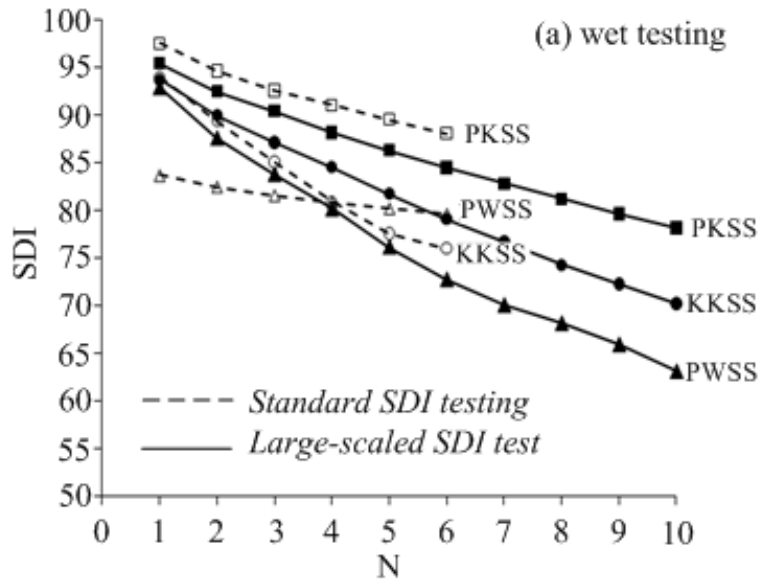
โคกกรวด ชุดฎุกระดิ่ง และชุดพระวิหาร ผลการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนได้แสดงในรูปแบบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน โดยตารางที่ 4.2 แสดงค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนตามมาตรฐาน ASTM D4644 ซึ่งอยู่ในสภาวะเปียก ในตารางที่ 4.3 แสดงค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนของการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนในสภาวะแห้ง ผลการทดสอบได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนกับวัฏจักรทดสอบไว้ในรูปที่ 4.4 สำหรับการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนในสภาวะเปียกซึ่งอุปกรณ์ทดสอบมีขนาดใหญ่กว่ามาตรฐานได้นำผลการทดสอบทั้ง 10 วัฏจักร มาเปรียบเทียบกับค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนตามแบบมาตรฐาน 6 วัฏจักร (Sri-in and Fuenkajorn, 2007) ในหินทรายทั้งสามชนิด ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าในรอบวัฏจักรที่เท่ากันผลการทดสอบของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้ค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนที่ต่ำกว่าผลการทดสอบด้วยอุปกรณ์ขนาดมาตรฐาน รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนต่อรอบวัฏจักรของการทดสอบในสภาวะแห้งซึ่งผลการทดสอบที่ได้จากอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้มีค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนที่ต่ำกว่าอุปกรณ์มาตรฐานเช่นกัน แต่มีค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนที่สูงกว่าในสภาวะเปียก สำหรับหินชุดโคกกรวดและหินชุดฎุกระดิ่ง ส่วนหินชุดพระวิหารมีความแตกต่างของค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนไม่แตกต่างกันมากสำหรับทั้งสองสภาวะ รูปที่ 4.6 แสดงค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนในวัฏจักรที่ 10 ทั้งสภาวะเปียกและแห้งที่ได้จากอุปกรณ์ทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ในสองสภาวะ (เปียกและแห้ง) หินทรายชุดโคกกรวดจะแสดงผลกระทบที่ได้จากน้ำมากที่สุด กล่าวคือค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนจะลดลงมากที่สุดเมื่อมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องในการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนตามมาตรฐาน ASTM D4644

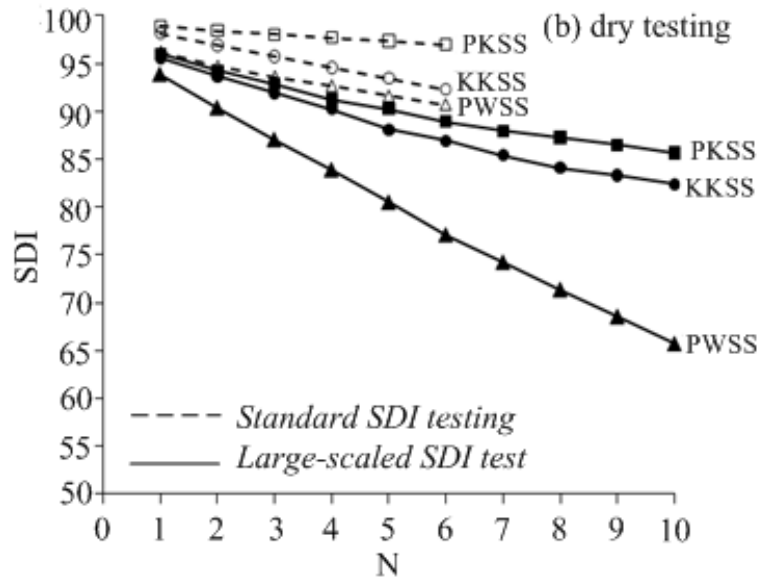
Rock Name	Slake Durability Index ,I <sub>d</sub> (%)									
	Number of Cycles									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KKSS	93.68	89.98	87.13	84.54	81.72	79.07	76.70	74.29	72.28	70.22
PKSS	95.42	92.44	90.39	88.16	86.30	84.49	82.79	81.21	79.63	78.15
PWSS	92.84	87.57	83.77	80.14	76.17	72.76	70.10	68.18	65.96	63.14

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนในสภาวะแห้ง

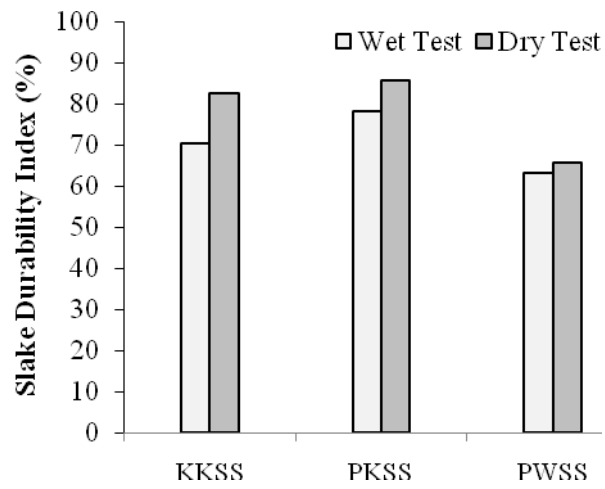
Rock Name	Slake Durability Index ,I <sub>d</sub> (%)									
	Number of Cycles									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KKSS	95.60	93.67	91.92	90.23	88.10	86.94	85.41	84.11	83.31	82.39
PKSS	96.01	94.27	92.89	91.20	90.23	88.93	87.94	87.28	86.49	85.68
PWSS	93.87	90.38	87.05	83.88	80.49	77.08	74.23	71.36	68.55	65.70



รูปที่ 4.4 ดัชนีความคงทนต่อการฟุ้งกระจายตามมาตรฐาน ASTM D4644 เปรียบเทียบกับการทดสอบขนาดใหญ่



รูปที่ 4.5 ดัชนีความคงทนต่อการฟุ้งกระจายในสถานะแห้งเปรียบเทียบระหว่างขนาดมาตรฐานและขนาดใหญ่



รูปที่ 4.6 ดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนของหินทั้ง 3 ชนิด ในวัฏจักรที่ 10 ทั้งสภาวะเปียกและแห้ง





## บทที่ 5

### การจำลองการผูกมัดในห้องปฏิบัติการ

#### 5.1 วัตถุประสงค์

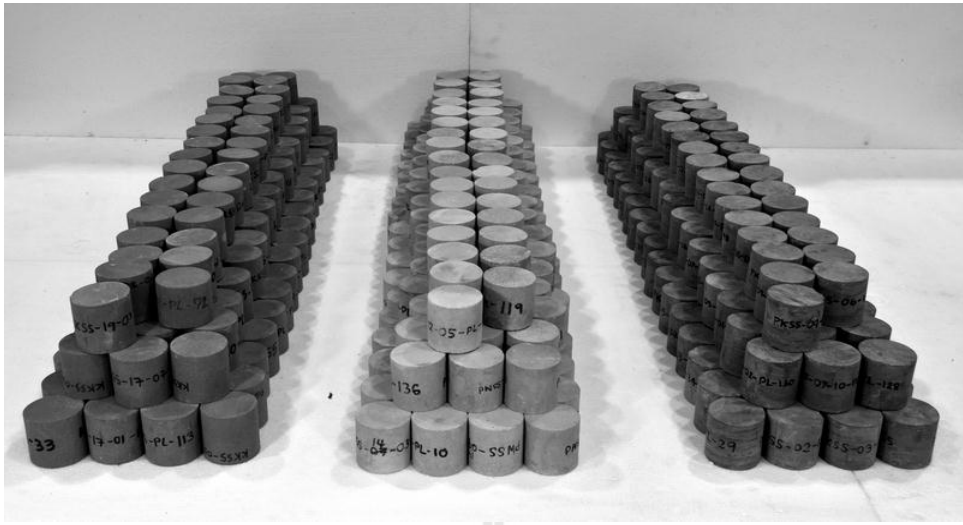
การจำลองการผูกมัดมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการผูกมัดของตัวอย่างหินทั้งสามชนิดในสภาวะแวดล้อมจริงในภาคสนามกับสภาวะการจำลองการผูกมัดในห้องปฏิบัติการภายใต้วัฏจักรแห้ง-เปียก ผลการเปรียบเทียบสามารถนำมาคาดคะเนคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินในระยะยาว

#### 5.2 การเตรียมตัวอย่างหิน

ตัวอย่างหินที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้คือ หินทรายชุดโคกกรวด หินทรายชุดภูกระดึง และหินทรายชุดพระวิหาร โดยทำการเจาะและตัดให้มีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร สูง 54 มิลลิเมตร ใช้ตัวอย่างหินแต่ละชนิดจำนวนทั้งสิ้น 250 ตัวอย่าง ซึ่งจะใช้สำหรับการจำลองในห้องปฏิบัติการ 200 ตัวอย่าง ของแต่ละชนิดหินดังแสดงในรูปที่ 5.1 ตัวอย่างหินสำหรับการจำลองในสภาวะแวดล้อมจริงมี 5 ชุด ชุดละ 10 ตัวอย่าง ของแต่ละชนิดหินดังแสดงในรูปที่ 5.2 การจำลองในสภาวะแวดล้อมจริงมีวัฏจักรตรวจวัดหาคุณลักษณะทางกายภาพและความแข็งแรงของหินแต่ละชุดทุก 4 เดือน การจำลองในห้องปฏิบัติการจะมีการตรวจวัดเพื่อหาคุณลักษณะทางกายภาพและความแข็งแรงของหินทุกวัฏจักรที่ 20 รายละเอียดคุณลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างหินทั้งสองชุดแสดงไว้ในภาคผนวก ก

#### 5.3 การจำลองในห้องปฏิบัติการ

การจำลองการผูกมัดในห้องปฏิบัติการภายใต้วัฏจักรสภาวะแห้ง-เปียก ได้นำตัวอย่างหินเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่น้ำทันทีเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากการจำลองดังกล่าวคือหนึ่งวัฏจักร ซึ่งได้ทำการจำลองในห้องปฏิบัติการอย่างต่อเนื่อง 200 วัฏจักร (200 วัน) จากตัวอย่างหินทั้งหมด 200 ตัวอย่าง โดยในวัฏจักรที่ 20 ได้นำตัวอย่างหินมาทดสอบหาคุณลักษณะทางกายภาพและค่ากำลังกดสูงสุด โดยการตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพคือ การตรวจวัดค่าความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างหิน (Dry density) การดูดซับน้ำ (water Absorption) และการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ซึ่งการจำลองการผูกมัดภายใต้สภาวะแห้ง-เปียกในทุกวัฏจักรที่ 20 ได้มีการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างหินทั้งในสภาวะแห้ง-เปียกเพื่อการคำนวณค่าคุณสมบัติทางกายภาพดังกล่าว ส่วนการทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงคือ การทดสอบหาค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว (Uniaxial compressive strength test) ตาม



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างหินทรายชุดโคกกรวด พระวิหารและภูกระดึง (จากซ้ายไปขวา) สำหรับการทดสอบความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างหินที่ทิ้งไว้กลางแจ้งให้เผชิญกับสภาวะแวดล้อมจริง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D7012-04 (Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures) โดยทุกวัฏจักรที่ 20 ได้นำตัวอย่างหิน 10 ตัวอย่าง มาทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติความแข็งดังกล่าว รูปที่ 5.3 แสดงการทดสอบความแข็งของหินเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวภายใต้วัฏจักรสภาวะแห้ง-เปียก รูปที่ 5.4 แสดงตัวอย่างหินที่ได้ทำการทดสอบค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของการจำลองการผูกธร่อน

#### 5.4 การจำลองในสภาวะจริง

การจำลองการผูกธร่อนในสภาวะแวดล้อมจริง ได้ทิ้งตัวอย่างหินไว้กลางแจ้งให้เผชิญกับสภาวะแวดล้อมจริงเป็นเวลาประมาณ 2 ปี โดยจะมีการหาคุณสมบัติทางกายภาพคือ การตรวจวัดค่าความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างหิน การดูดซับน้ำ และการสูญเสียน้ำหนัก รวมทั้งคุณสมบัติความแข็งคือ การทดสอบความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงของหินเหล่านั้นทุก 4 เดือน (120 วัน) เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 5.5 การคำนวณผล

ในการคำนวณหาคุณสมบัติทางกายภาพจากการจำลองความคงทนต่อการผูกธร่อน ทั้งในห้องปฏิบัติการและสภาวะแวดล้อมจริงคือ ค่าความหนาแน่นแห้ง การดูดซับน้ำ และการสูญเสียน้ำหนัก ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C127-04 (Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate) มีวิธีการดังนี้

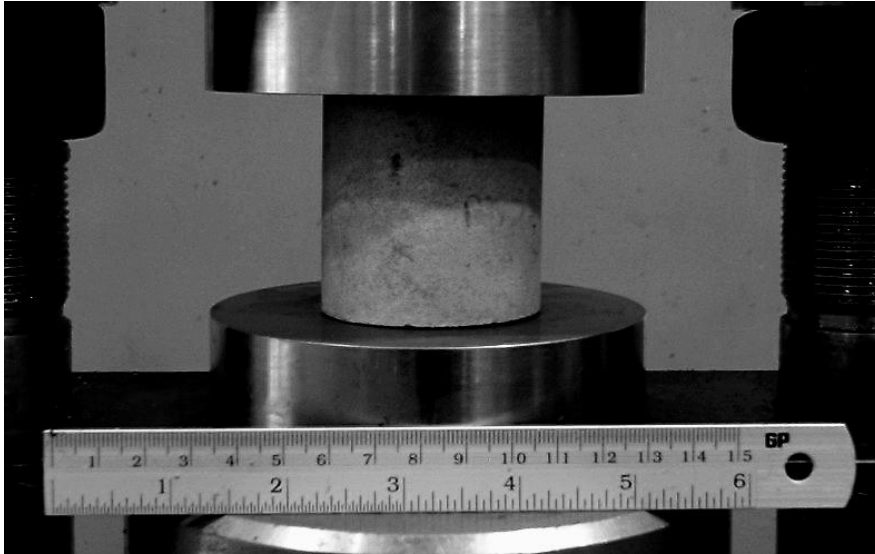
##### ค่าความหนาแน่นแห้ง

$$\rho_d = \frac{m}{V} \quad (5.1)$$

โดยที่  $\rho_d$  = ความหนาแน่นแห้ง

$m$  = มวลของตัวอย่างหินในสภาวะแห้ง หน่วยเป็นกิโลกรัม

$V$  = ปริมาตรของตัวอย่างหิน หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 5.3 การทดสอบความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวของหินทราย



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างหินทรายชุดโคกกรวด พระวิหาร และภูกระดึง (จากซ้ายไปขวา) หลังการทดสอบความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว

**การดูดซับน้ำ** มีการคำนวณค่าการดูดซับน้ำออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักทั้งหมดดังสมการ

$$\text{Water absorption(\%)} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (5.2)$$

โดยที่  $W_w$  = น้ำหนักหลังจากแช่น้ำ  
 $W_d$  = น้ำหนักหลังจากอบแห้ง

**การสูญเสียน้ำหนัก**

$$\text{Weight loss (\%)} = \frac{W_i - W_n}{W_i} \times 100 \quad (5.3)$$

โดยที่  $W_i$  = น้ำหนักเริ่มต้น  
 $W_n$  = น้ำหนัก ณ เวลาทดสอบ

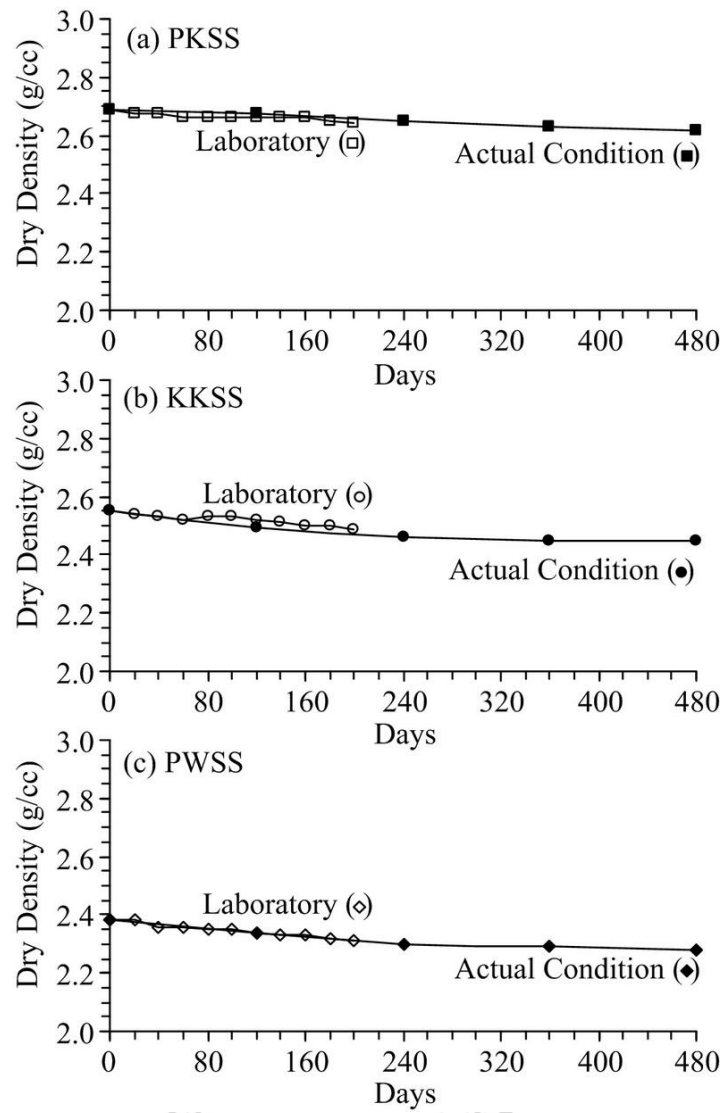
ส่วนการคำนวณหาค่าคุณสมบัติความแข็งแรงของตัวอย่างหินจากการจำลองความคงทนต่อการผุกร่อนได้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D7012-04 เพื่อหาค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวจากการจำลองในห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบผลในสภาวะแวดล้อมจริงในภาคสนาม สมการที่ 5.4 เป็นสมการคำนวณหาค่าความแข็งแรงของหินที่ให้ไว้โดย Jaeger et al. (2007)

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (5.4)$$

โดยที่  $\sigma_c$  = ค่าความแข็งแรงของหิน  
 $F$  = แรงที่ให้กับตัวอย่างหิน  
 $A$  = พื้นที่ของตัวอย่างหินที่รับแรง

## 5.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ

การจำลองความคงทนต่อการผุกร่อนในห้องปฏิบัติการและสภาวะแวดล้อมจริงถูกนำมาเปรียบเทียบผลของคุณสมบัติทางกายภาพเพื่อหาความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ทำการจำลองการผุกร่อนและเปรียบเทียบผลการจำลองในสภาวะจริงกับห้องปฏิบัติการ โดยรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเวลาการจำลองในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับ



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเวลาการทดสอบที่สภาวะแวดล้อมจริง (ที่ป) ห้องปฏิบัติการ (ไปรง)

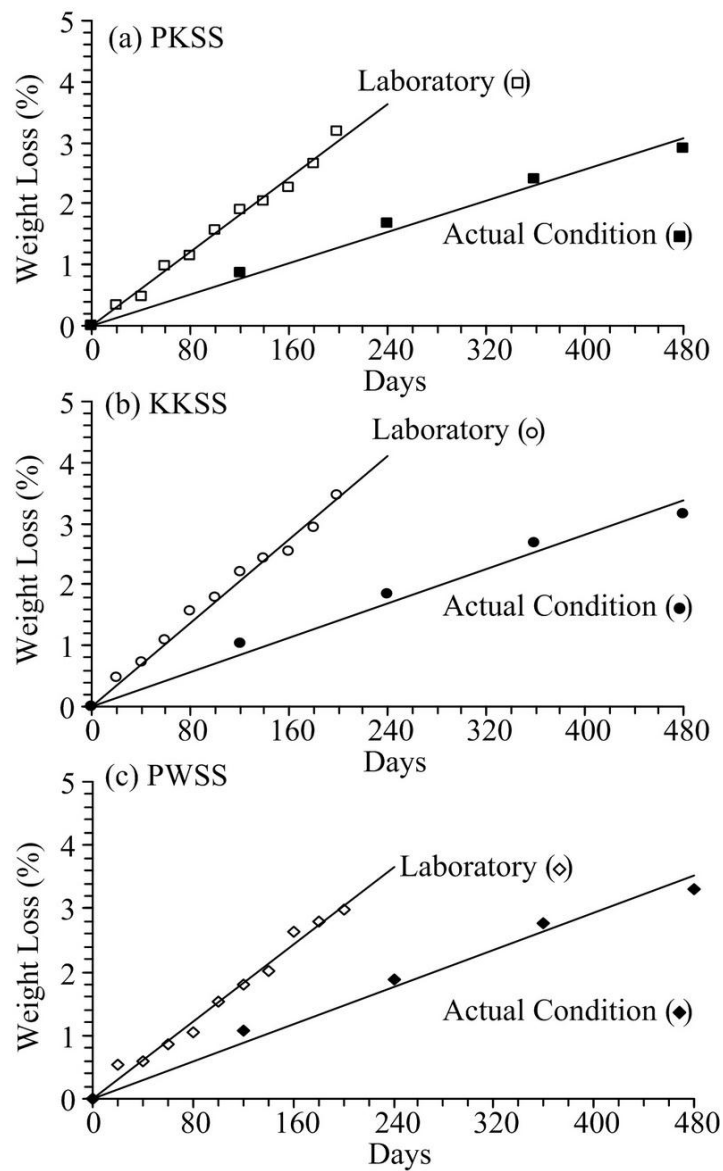
สภาวะจริง ซึ่งค่าความหนาแน่นของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลงตามเวลาการจำลอง รูปที่ 5.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่สัมพันธ์กับเวลาทดสอบ ซึ่งผลการจำลองการผุกร่อนในห้องปฏิบัติการมีค่าการสูญเสียน้ำหนักในอัตราที่รวดเร็วกว่าในสภาวะจริงในระยะเวลาที่เท่ากัน รูปที่ 5.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สัมพันธ์กับเวลา ซึ่งผลการจำลองการผุกร่อนในสภาวะจริงมีการดูดซับน้ำน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการจำลองในห้องปฏิบัติการในระยะเวลาที่เท่ากัน

ส่วนการหาค่าความแข็งของหินจากการจำลองการผุกร่อนด้วยการทดสอบค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียว ผลการทดสอบได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกดกับระยะเวลาการจำลองการผุกร่อนไว้ในรูปที่ 5.8 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวของหินทราย 3 ชนิด ทั้งสองสภาวะการจำลองมีค่าความเค้นกดลดลงตามเวลาทดสอบ ในระยะเวลาการจำลองที่เท่ากันหินทรายชุดภูกระดึงมีค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวของสภาวะแวดล้อมจริงซึ่งสูงกว่าในห้องปฏิบัติการอย่างเห็นได้ชัดมากกว่าหินทรายอีกสองชนิด

## 5.7 สรุปผลการทดสอบ

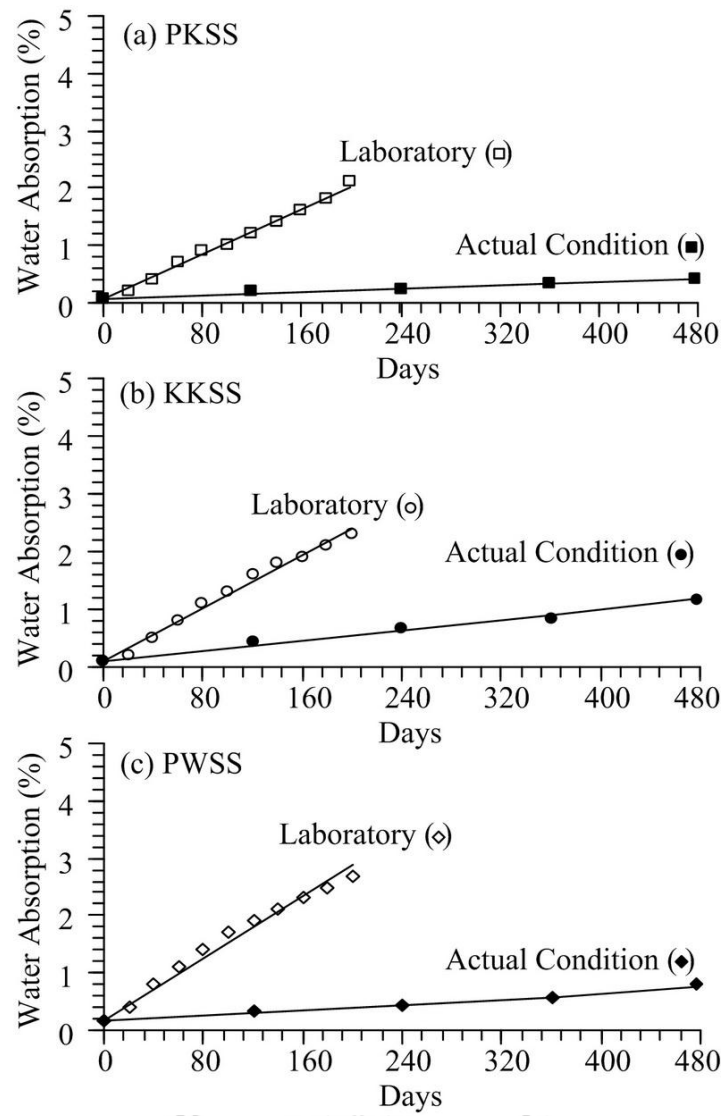
ผลการทดสอบการจำลองความคงทนต่อการผุกร่อนแสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติทางกายภาพของหินทรายชุดโคกกรวด ชุดภูกระดึง และชุดพระวิหาร ได้แก่ การดูดซับน้ำ และการสูญเสียน้ำหนัก ในห้องปฏิบัติการมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าในสภาวะแวดล้อมจริงกล่าวคือ ในการจำลองในห้องปฏิบัติการค่าของการดูดซับน้ำและการสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากกว่าในสภาวะแวดล้อมจริง ส่วนค่าความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างหินมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากของทั้งสองสภาวะจำลอง

ค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวที่ได้ทำการจำลองในห้องปฏิบัติการมีค่าลดลงในอัตราที่สูงกว่าการจำลองในสภาวะแวดล้อมจริงอันเนื่องมาจากการเร่งอัตราการผุกร่อนของการจำลองในห้องปฏิบัติการ

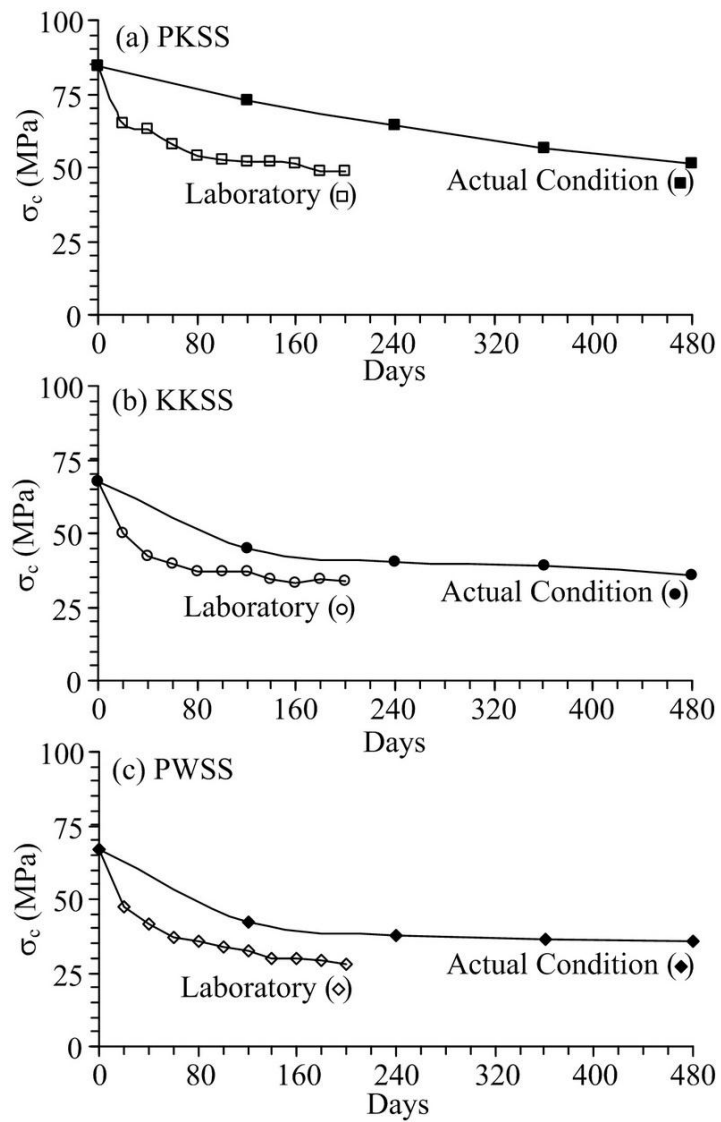


รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักกับเวลาการทดสอบที่สภาวะแวดล้อมจริง (ที่บ) ห้องปฏิบัติการ (ไปรง)





รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำกับเวลาการทดสอบที่สภาวะแวดล้อมจริง (ที่บ) ห้องปฏิบัติการ (ไปรง)



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวกับเวลาการทดสอบที่สภาวะแวดล้อมจริง (ที่บ) ห้องปฏิบัติการ (โปร่ง)

## บทที่ 6

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 6.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะที่จำลองในห้องปฏิบัติการกับสภาวะของหินที่อยู่นอกห้องปฏิบัติการ (ในภาคสนาม) เพื่อนำผลที่ได้มาใช้ประกอบกับการคาดคะเนในเชิงเวลาของการผุกร่อนหรือการลดลงของความแข็งของหินในเชิงเวลา

#### 6.2 พลังงานความร้อน

แนวคิดทางด้านการสะสมพลังงานของตัวอย่างหินได้นำมาใช้เพื่อสร้างความสัมพันธ์ของการผุกร่อนในห้องปฏิบัติการกับการผุกร่อนในภาคสนาม ซึ่งในภาคสนามจะใช้ข้อมูลที่ได้จากกรมอุตุนิยมวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยที่พลังงานความร้อนที่หินจะได้รับได้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = \sum_{i=1}^n \{m \cdot C_p \cdot \Delta T_i \cdot \Delta t_i\} \quad (6.1)$$

โดยที่

- Q = พลังงานที่ตัวอย่างหินดูดซับได้ (kJ)
- m = มวลของตัวอย่างหิน (kg)
- C<sub>p</sub> = การจุความร้อนของหิน (kJ/kg K)
- ΔT<sub>i</sub> = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในหน่วย (Kelvin)
- Δt<sub>i</sub> = ช่วงเวลาที่ใช้ดูดซับพลังงาน (hr)
- n = จำนวนชั่วโมง

ค่าการจุความร้อนของหินโดยทั่วไปจะผันแปรระหว่าง 0.6–1.2 kJ/kg K โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.90 kJ/kg K จากสมการข้างต้นการดูดซับพลังงานความร้อนที่ถูกจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการจะมีค่าเท่ากับ 12.960 MJ h สำหรับในภาคสนามการดูดซับพลังงานความร้อนของหินชนิดเดียวกันในหนึ่งวันจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0.735 MJ h ดังนั้น การจำลองในห้องปฏิบัติการด้วยวัฏจักรร้อนสลับเย็นโดยฉับพลัน 1 รอบ จะมีค่าเทียบเคียงกับ 18 วัน ในภาคสนาม (12.96/0.735 = 17.63) ด้วยความสัมพันธ์นี้การชะลอการผุกร่อนด้วยอุปกรณ์ขนาด

ใหญ่จะสามารถนำมาลงจุดเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างระหว่างการเสียน้ำหนัก (ΔSBI) ในเชิงเวลาได้ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ผลที่ได้จากการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์สำหรับหินทรายทั้งสามชนิดได้ให้ไว้ในตารางที่ 6.1

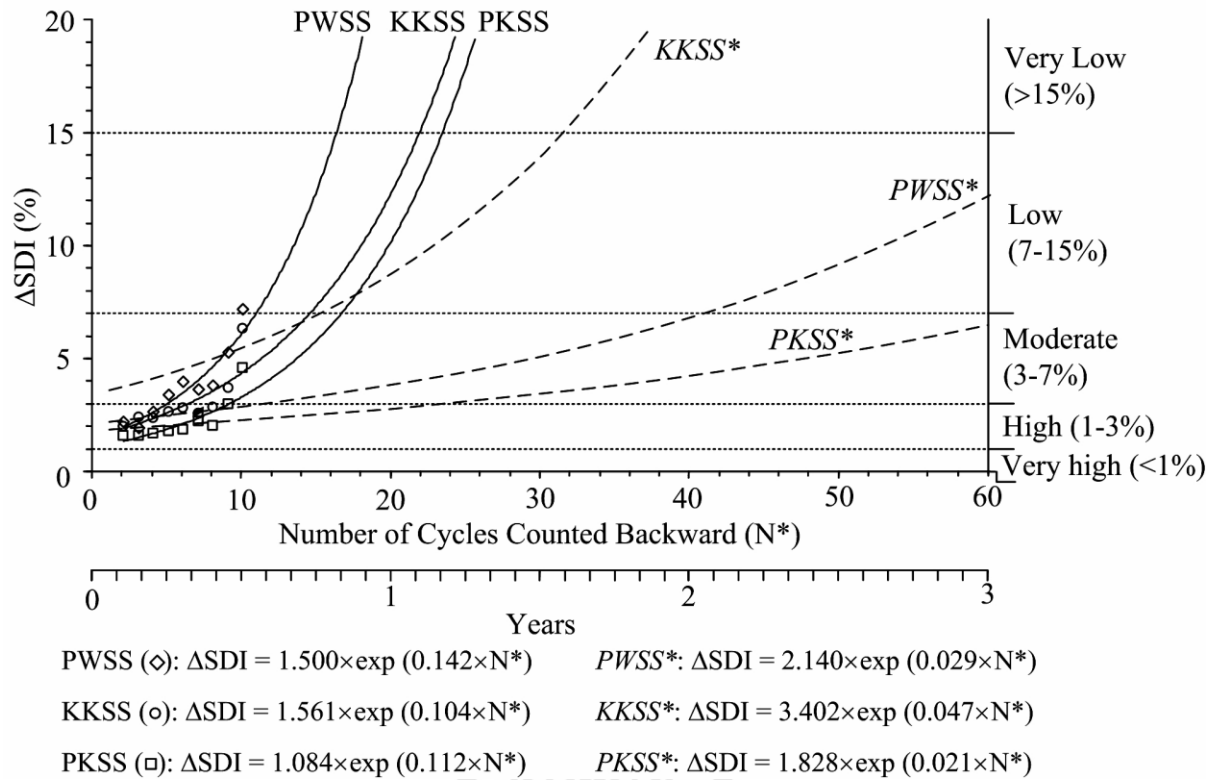
ในรูปที่ 6.1 ได้เปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบด้วยอุปกรณ์ทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนขนาดใหญ่ในงานวิจัยนี้กับผลที่ได้จากอุปกรณ์ทดสอบขนาดมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ทดสอบขนาดมาตรฐานอาจให้ค่าความคงทนของตัวอย่างหินทรายทั้งสามชนิดสูงกว่าความเป็นจริง กล่าวคือ ผลที่ได้จากอุปกรณ์ทดสอบขนาดใหญ่ระบุว่าหินทรายทั้งสามชนิดถูกจำแนกเป็นหินที่มีความผุกร่อนระดับสูงหลังจาก 1 ปี ที่อยู่ในภาคสนาม ในขณะที่เดียวกันผลที่ได้จากอุปกรณ์ขนาดมาตรฐานระบุว่าหินทรายชุดพระวิหารและชุดภูกระดึงมีความคงทนต่อการผุกร่อนต่ำถึงแม้เวลาจะผ่านไป 3 ปี ในสภาวะแวดล้อมในภาคสนาม

### 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการจำลองในห้องปฏิบัติการกับสภาวะจริงใน

#### ภาคสนาม

ความแข็งแรงของหินเป็นปัจจัยที่สำคัญในประเด็นของความคงทนต่อการผุกร่อน ในการศึกษาเรื่องนี้จึงนำค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวที่ทดสอบได้จากหินทรายทั้งสามชนิด ทั้งที่จำลองในห้องปฏิบัติการและที่ตรวจสอบได้นอกห้องปฏิบัติการในช่วงเวลาที่ต่างกันมาเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้ระบุว่าค่ากำลังกดของกำลังกดสูงสุดของหินทรายทั้งสามชนิดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยที่สภาวะร้อนสลับเย็นที่จำลองในห้องปฏิบัติการ (ทั้งหมด 200 รอบ หรือ 200 วัน) จะส่งผลให้ความแข็งแรงของหินลดตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งอัตราการลดตัวอย่างนี้จะสูงกว่าค่าความแข็งแรงของหินที่ตรวจวัดได้ในช่วงเวลาเดียวกัน รูปที่ 6.2 แสดงค่าความแข็งแรงของหินในฟังก์ชันของเวลาและสมการที่ใช้เพื่อเทียบเคียงกับผลการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและนอกห้องปฏิบัติการ สมการดังกล่าวจะมีประโยชน์เพื่อใช้ในการคาดคะเนความแข็งแรงของหินในอนาคต ตารางที่ 6.2 แสดงค่าคงที่ที่ใช้ในสมการสำหรับหินทรายทั้งสามชนิด

ผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองชุดนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลที่ได้จากการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนด้วยอุปกรณ์ขนาดใหญ่ นอกจากนี้การจำลองสภาวะการผุกร่อนด้วยความร้อนสลับเย็นสามารถเร่งอัตราการผุกร่อนของหินได้ กล่าวคือจะเป็นประโยชน์ในการสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อคาดคะเนความแข็งแรงของหินในอนาคตในภาคสนาม



รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta SDI$  กับ  $N^*$  จากการจำลองความคงทนการผูกเรือนแบบมาตรฐานและแบบขนาดใหญ่กว่ามาตรฐาน

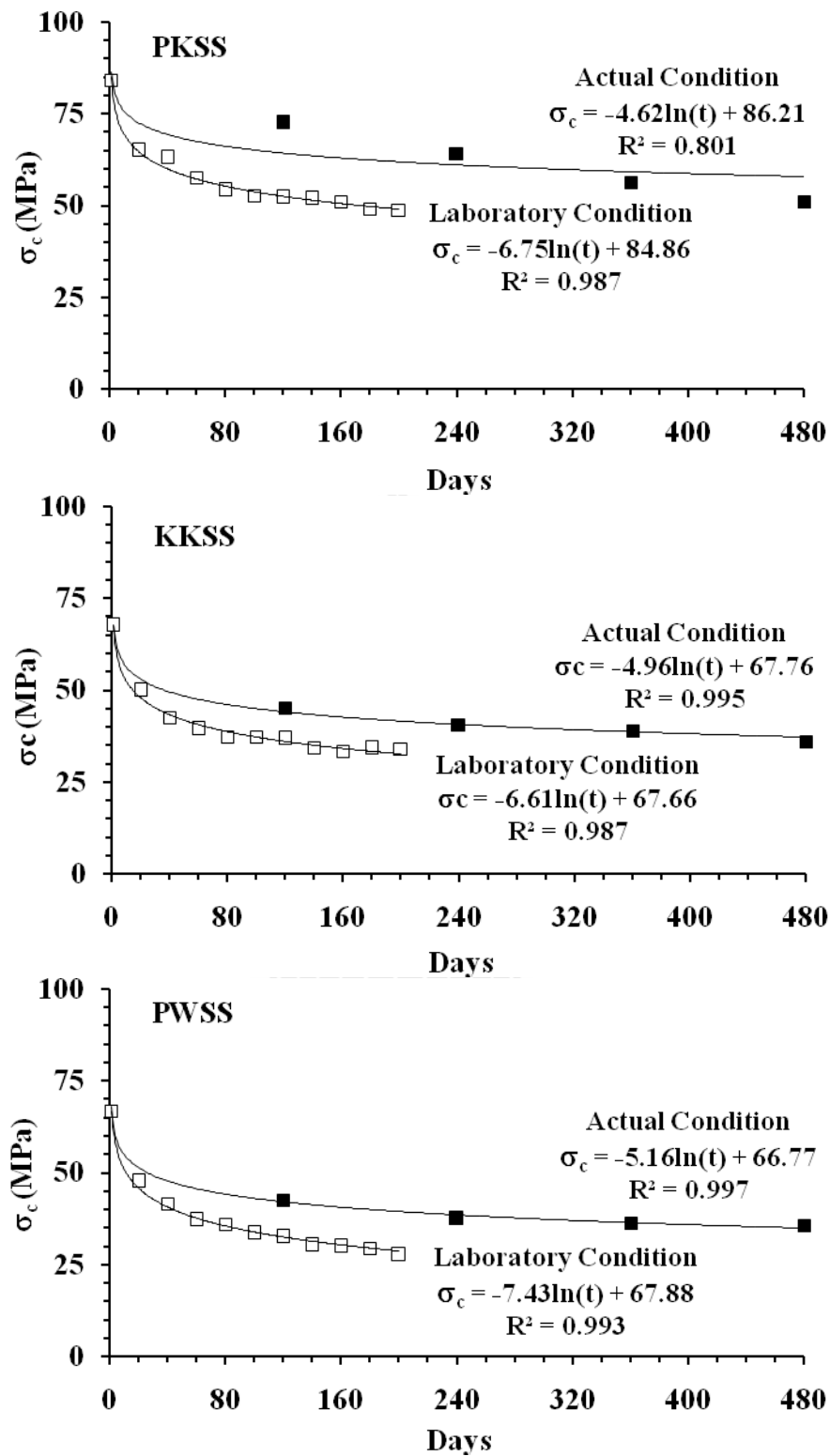
วิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตาราง 6.1 ค่าคงที่ของหินทรายสามชนิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta SDI$  กับ  $N^*$

Rock Types	$\Delta SDI = \alpha \times \exp[\beta \times N^*]$		Correlation Coefficient
	$\alpha$	$\beta$	
<u>*Standard Slake Durability Test<sup>1</sup></u>			
KKSS	3.402	0.047	0.999
PKSS	1.828	0.021	0.999
PWSS	2.140	0.029	0.999
<u>Large-Scaled Slake Durability</u>			
KKSS	1.561	0.104	0.717
PKSS	1.084	0.112	0.776
PWSS	1.500	0.142	0.891

\*From Sri-in and Fuenkajorn (2007)

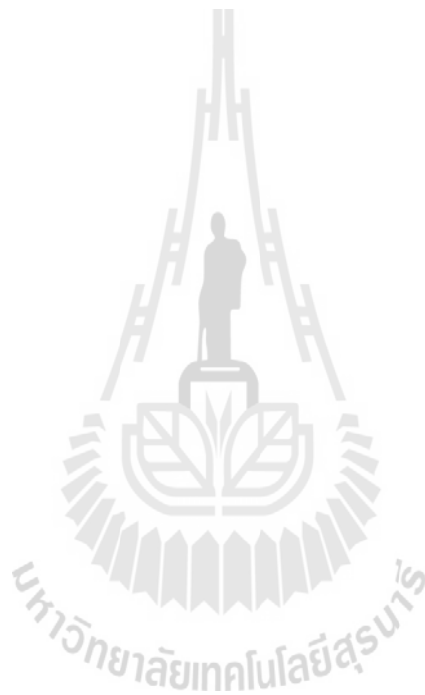




รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกดสูงสุดในแกนเดียวกับเวลาการทดสอบที่สภาวะแวดล้อมจริง (จุดทึบ) ห้องปฏิบัติการ (จุดโปร่ง)

ตารางที่ 6.2 ค่าคงที่ของหินทรายทั้งสามชนิดในสภาวะแวดล้อมจริงและในห้องปฏิบัติการ

Rock Types	$\sigma_c = -A \ln(t) + B$			
	Actual Condition		Laboratory Condition	
	A	B	A	B
PKSS	4.62	86.21	6.75	84.86
KKSS	4.96	67.76	6.61	67.66
PWSS	5.16	66.77	7.43	67.88





## บทที่ 7

### บทสรุป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์แบบใหม่สำหรับการทดสอบและจำลองการผุกร่อนของหินในห้องปฏิบัติการเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับหินที่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงในภาคสนาม ผลที่ได้สามารถนำมาสร้างสมการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อใช้คาดคะเนระดับการผุกร่อนของหินในระยะยาว

งานวิจัยนี้ใช้หินทรายเป็นตัวอย่งทดสอบซึ่งได้มาจากสามแหล่งคือ หน่วยหินโคกกรวด ภูกระดึง และพระวิหาร โดยแบ่งการศึกษาในห้องปฏิบัติการออกเป็นสองส่วนคือ 1) การจำลองการผุกร่อนของหินทรายด้วยอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นใหม่ และ 2) การเปรียบเทียบการผุกร่อนของหินทรายที่ถูกจำลองในสภาวะร้อนและเย็นขึ้นในห้องปฏิบัติการกับหินทรายที่ถูกทิ้งไว้ในนอกห้องปฏิบัติการ (ในภาคสนาม)

อุปกรณ์ทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนขนาดใหญ่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการสึกกร่อนในระยะยาวของหินทรายสามชนิดที่ได้จากหน่วยหินโคกกรวด ภูกระดึง และพระวิหาร อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยวงล้อหมุนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 64 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร เพื่อใช้บรรจุก้อนตัวอย่างหิน 10 ก้อน ที่มีขนาด 4-5 นิ้ว อุปกรณ์นี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับที่ใช้ในมาตรฐาน ASTM ทุกประการ ยกเว้นมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นประมาณ 5 เท่า ผลการทดสอบด้วยอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ใช้อุปกรณ์มาตรฐานของ ASTM เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดตัวอย่างหินต่อการจำลองการสึกกร่อน การทดสอบด้วยอุปกรณ์ทั้งสองได้ดำเนินการในลักษณะทั้งแห้งและเปียก โดยทดสอบ 6 รอบวัฏจักร (สำหรับอุปกรณ์ขนาดมาตรฐาน) และ 10 รอบวัฏจักร (สำหรับอุปกรณ์ขนาดใหญ่) ผลที่ได้ระบุว่าการทดสอบในมาตราส่วนขนาดใหญ่จะคาดคะเนการสึกกร่อนของหินได้ดีว่าการทดสอบในมาตราส่วนขนาดเล็ก เหตุผลหลักคือการทดสอบใช้ตัวอย่างที่มีเนื้อหินมากกว่าและใช้พลังงานในการขัดถูมากกว่า โดยตัวอย่างหินทรายทุกชนิดที่ใช้ทดสอบจะแสดงค่าการเสียน้ำหนักที่มากกว่าเมื่อทดสอบด้วยตัวอย่างหินที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นผลที่ได้จึงสามารถนำมาสัมพันธ์กับสภาวะจริงในภาคสนามได้ดีกว่า นอกจากนั้นหินทรายทุกชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้จะอ่อนไหวเมื่อมีการสัมผัสน้ำ ซึ่งระบุได้จากการเปรียบเทียบแบบแห้งและแบบเปียก โดยที่หินทรายจากหน่วยหินโคกกรวดจะอ่อนไหวต่อการสัมผัสน้ำมากที่สุด ดังนั้น ระบบการจำแนกความคงทนของหินแบบใหม่จึงถูกเสนอขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการคาดคะเนความแข็งของหินที่มีผลกระทบจากขบวนการการผุกร่อนได้ หลักเกณฑ์ทางด้านพลังงานความร้อนได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างหินที่ประสบกับการจำลองการผุกร่อนในห้องปฏิบัติการกับตัวอย่างหินที่อยู่ใน

สภาวะจริงนอกห้องปฏิบัติการ ผลที่ได้ระบุว่า การจำลองวัฏจักรร้อนและเย็นหนึ่งรอบในห้องปฏิบัติการสามารถเทียบเท่ากับ 18 วัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงในภาคสนามในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จากผลการเปรียบเทียบค่ากำลังกวดสูงสุดของตัวอย่างหินทรายที่เผชิญกับการทดลองการผุกร่อนในห้องปฏิบัติการคือร้อนสลับเย็นทั้งหมด 200 รอบ (200 วัน) กับผลการผุกร่อนของตัวอย่างหินทรายชนิดเดียวกันที่อยู่นอกห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 480 วัน พบว่าสภาวะร้อนสลับเย็นในห้องปฏิบัติการสามารถลดค่ากำลังกวดสูงสุดของตัวอย่างหินทรายในอัตราที่สูงกว่าหรือเร็วกว่าการลดลงของค่าความเค้นสูงสุดของหินทรายที่อยู่ในภาคสนาม โดยที่หินทรายทั้งสามชนิดจะมีพฤติกรรมดังกล่าวคล้ายคลึงกันดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการจำลองสภาวะร้อนสลับเย็นในห้องปฏิบัติการสามารถนำมาคาดคะเนความแข็งของหินในภาคสนามในเชิงเวลาได้ โดยที่มีปัจจัยตัวคูณที่ได้จากการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนคือหนึ่งวัฏจักรร้อนสลับเย็นในห้องปฏิบัติการ (หนึ่งวัน) จะมีผลกระทบต่อ การผุกร่อนของหินเท่ากับ 18 วัน ในสภาวะจริงในภาคสนาม อนึ่งค่าคงที่ในสมการที่ใช้คาดคะเนความเค้นกวดของหินแต่ละชนิดอาจมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของหินนั้นๆ



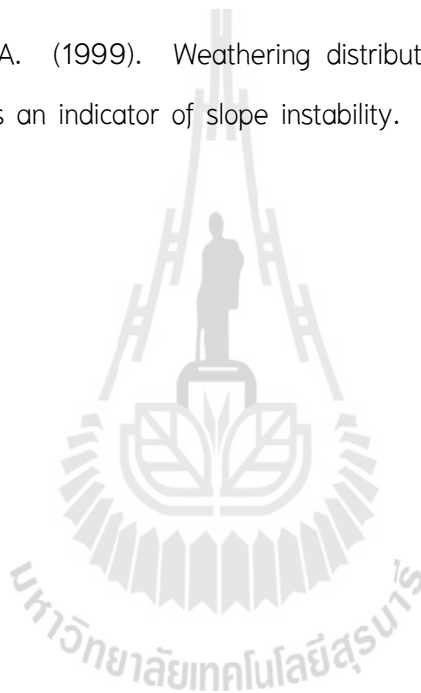
## บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เฟื่องขจร (2550) การออกแบบความลาดเอียงมวลหินในประเทศไทยให้มีเสถียรภาพในระยะยาว โดยเพิ่มการพิจารณาการผุกร่อนของมวลหิน, รายงานการวิจัย SUT7-719-49-24-50, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- Abramson, L. W., Thomas, S. L., Sunil, S., and Glenn, M. (1997). Slope stability and stabilization methods. **Engineering Structures**. 19: 93–94.
- Aristizábal, E., Roser, B., and Yokota, S. (2005). Tropical chemical weathering of hillslope deposits and bedrock source in the Aburrá valley, northern colombian andes. **Engineering Geology**. 81(4): 389–406.
- ASTM C127–04. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.02). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4644–87. Standard Test Method for Slake durability of shale and similar weak rocks. **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D7012–04. Standard test method for compressive strength and elastic modulus 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.
- Barbour, T. G., Atkinson, R. H., and Ko, H. Y. (1979). Relationship of mechanical index and mineralogical properties of coal measure rock. In **Proceeding of the 20<sup>th</sup> Symp. Rock Mechanics** (pp. 189–198). Austin, Texas.
- Begonha, A. and Braga, M. A. S. (2002). Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties. **Catena**. 49: 57–76.
- Bell, F. G. (1978). The physical and mechanical properties of the fell sandstones northumberland, england. **Eng. Geol.** 12: 1–29.
- Bell, F. G. (1992). **Engineering in Rock Masses**. London: Butterworth–Heinemann Ltd.
- Brace, W. F. (1961). Dependence of fracture strength of rocks on grain size. In **Proceeding of the 4<sup>th</sup> Symp. Rock Mechanics**. (pp. 99–103). University Park.

- Brown, E. T. (1981). **Rock characterization testing and monitoring ISRM suggested methods**. New York: Pergamon Press.
- Deere, D. U. and Miller, R.P. (1966). **Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock**. Urbana: Department of Civil Engineering, University of Illinois. pp. 90–101.
- 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.
- Dobereni, L. and DeFreitas, M. H. (1986). Geotechnical properties of weak sandstones. **Geotechnique**. 36 (1): 79–94.
- Domenico, P. A. and Schwartz, F. W. (1990). **Physical and Chemical Hydrogeology**. Wiley, J. and Sons. New York (pp.824).
- Dube, A. K. and Singh, B. (1972). Effect of humidity on tensile strength of sandstone. **Journal of Mines Metals and Fuel**. 20 (1): 8–10.
- Fahy, M. P. and Guccione, M. J. (1979). Estimating strength of sandstone using petrographic thin-section data. **Bull. Assoc. Eng. Geo.** 16: 467–485.
- Fuenkajorn, K. (2008). Prediction of long-term strength of some weak rock in Thailand. In **Proceeding of the 1<sup>st</sup> Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium**. Perth, Australia.
- Gunsallus, K. L. and Kulhawy, F. H. (1984). A comparative evaluation of rock strength measures. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** 21: 233–248.
- Handlin, J. and Hager, R. V. (1957). Experimental deformation of sedimentary rock under a confining pressure. **J. Am. Assoc. Pet. Geol.** 41: 1–50.
- Hoek, E., and Brown, J. W. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. **J. Geotechnical Engineering**. 106: 1013–1035.
- Horn, H. M. and Deere, D. U. (1962). Frictional characteristics of minerals. **Geotechnique**. 12: 319–335.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., and Zimmerman, R. W. (2007). **Fundamentals of Rock Mechanics**. Fourth Edition. Oxford: Blackwell Publishing:

- Kjaernsli, B. and Sande, A. (1966). **Compressibility of some coarse grained material**. Norwegian Geotechnical Institute Report (pp.245–251).
- Koncagul, E. C. and Santi, P. M. (1999). Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability shore hardness and rock structural properties. **Int. J. Rock Mechanics and Min. Sci.** 36 (2):139–153.
- Mitchell, J. K. (1993). **Fundamentals of Soil Behavior**. Wiley J. and Sons. New York (pp. 437).
- Moon, V. (1993). Microstructural controls on geomechanical behavior of ignimbrite. **Engineering Geology.** 35: 19–31.
- Moon, V. and Jayawardane, J. (2004). Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of karamu basalt new zeland. **Engineering Geology.** 74 (1–2): 57–72.
- Moriwaki, Y. and Mitchell. J. K. (1977). The role of dispersion in the slaking of intact clay. **American Society for Testing and Materials** (pp. 287–302).
- Price, N. J. (1960). The compressive strength of coal measure rocks. **Colliery Engineering.** 37 (437): 283–292.
- Santi, P. M., and Koncagul, E. C. (1996). Predicting the mode susceptibility and rate of weathering of shales. **In Design with Residual Materials in Geotechnical and Construction Considerations** (pp. 12–27).
- Shakoor, A. and Bonelli, R. E. (1991). Relationship between petrographic characteristics, Engineering index properties and mechanical properties of selected sandstone. **Bull. Assoc. Eng. Geol.** 21: 233–248.
- Sousa, L. M. O., Suarez del Rio, L.M., and Calleja, L. (2005). Influence of microfractures and porosity on the physico–mechanical properties and weathering of ornamental granites. **Engineering Geology.** 77(1–2): 153–168.
- Sri-in, T. and Fuenkajorn, K. (2007). Slake durability index strength testing of some weak rocks in Thailand. **In Proceeding of the ThaiRock 2007** (pp. 145–159).
- Touloukian, Y. S., Judd, W. R., and Roy, R. F. (1981). **Physical Properties of Rocks and Minerals. Circlas Data Series on Material Properties** (2): 85–91.

- Ulusay, R., and Aksoy, H. (1994). Assessment of the failure mechanism of a highway slope under spoil pile loading at a coal mine. **Eng. Geol.** 38: 117–134.
- Vallejo, L. E., Robinson, M. K., Stewart, M., and Ann, C. (1994). Role of shale pores in settlement. In **Proceedings of the Conference on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments** Part 2 (pp. 1425–1434). University of Pittsburgh.
- Vutukuri, V. S., Lama, R. D., and Saluja S. S. (1974). **Handbook on Mechanical Properties of Rocks**. Vol. 1. Clausthal, Germany: Trans Tech Publications. p. 280.
- Yokota, S. and Iwamatsu, A. (1999). Weathering distribution in a steep slope of soft pyroclastic rocks as an indicator of slope instability. **Engineering Geology.** 55 (1-2): 57–68.



## ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก 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 การออกแบบ และการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์การรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา 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 และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์