



## การจำลองการผูกרוןของหินทรายภายใต้วัฏจักรร้อนเย็นแบบสภาวะแห้ง สภาวะเปียก และสภาวะความเป็นกรดในห้องปฏิบัติการ

ประทับใจ พระสุจันท์ ธนัชฐา ทองประภา และ กิตติเทพ เพ็องขจร\*  
หน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 4422 3363 อีเมล: kittittep@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.12.002

รับเมื่อ 3 สิงหาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 8 ตุลาคม 2563 ตอรับเมื่อ 12 ตุลาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 13 ธันวาคม 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

การจำลองการผูกרוןของหินทรายได้นำตัวอย่างหินทรายจำนวน 4 ชนิด มาทดสอบภายใต้วัฏจักรร้อน-เย็น เป็นจำนวน 300 วัฏจักร โดยนำตัวอย่างหินทรายแต่ละชนิดมาทำการทดสอบสภาวะการเย็นตัว 3 แบบ ได้แก่ การปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง การจุ่มลงในน้ำกลั่น และการจุ่มลงในกรดซัลฟิวริก (มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 5.6) ผลที่ได้ระบุว่าหินทรายทุกชนิดไม่อ่อนไหวต่อสภาวะร้อน-เย็นแบบแห้ง อย่างไรก็ตาม หินทรายเหล่านี้อ่อนไหวอย่างมากต่อน้ำและกรด การทำให้ตัวอย่างหินลดอุณหภูมิลงโดยฉับพลันในของเหลวอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กในวัสดุเชื่อมประสานของหิน ซึ่งต่อมาทำหน้าที่เป็นช่องเปิดให้ของเหลวซึมลึกลงไปในตัวอย่างหิน เมื่อวัสดุเชื่อมประสานของหินทรายถูกละลายด้วยของเหลวส่งผลให้ความหนาแน่น กำลังรับแรงสูงสุด และมอดูลัสความยืดหยุ่นของหินทรายมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบของวัฏจักรการจำลองเพิ่มขึ้น ผลที่ได้จากการศึกษานี้เป็นประโยชน์ในการคัดสรร และการนำหินทรายไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหินก่อสร้างและหินประดับ

**คำสำคัญ:** การกัดกร่อน หินทราย กำลังรับแรงสูงสุด มอดูลัสความยืดหยุ่น ความหนาแน่น

การอ้างอิงบทความ: ประทับใจ พระสุจันท์, ธนัชฐา ทองประภา และ กิตติเทพ เพ็องขจร, “การจำลองการผูกרוןของหินทรายภายใต้วัฏจักรร้อนเย็นแบบสภาวะแห้ง สภาวะเปียก และสภาวะความเป็นกรดในห้องปฏิบัติการ,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 521–529, ก.ค.-ก.ย. 2565.



## Laboratory Simulation of Sandstones Weathering under Cyclic Heating and Cooling with Dry, Wet and Acidic Conditions

Pratabjai Prasujan, Thanittha Thongprapha and Kittitep Fuenkajorn\*

Geomechanics Research Unit, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0 4422 3363, E-mail: kittitep@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.12.002

Received 3 August 2020; Revised 8 October 2020; Accepted 12 October 2020; Published online: 13 December 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Weathering simulations have been performed on four sandstone types by subjecting them up to 300 heating-cooling cycles. Three cooling conditions are imposed on three separate sets of specimens prepared from each sandstone type: air-cooling, submerging in distilled water and in sulfuric acid (pH = 5.6). Results indicate that all sandstones are insensitive to heating-dry cooling cycles. They are however highly sensitive to water and particularly to acid. Such rapid cooling in liquid induces micro-cracks in the cementing materials, which become preferential paths allowing liquid to penetrate deeper into the specimens. As the cementing materials are dissolved by the liquids, the sandstone density, strength and elastic modulus decrease as the simulation cycles increase. The findings can be useful for the selection criteria and application of these sandstones in the construction and decoration industry.

**Keywords:** Weathering, Sandstone, Strength, Elastic Modulus, Density

Please cite this article as: P. Prasujan, T. Thongprapha, and K. Fuenkajorn, "Laboratory simulation of sandstones weathering under cyclic heating and cooling with dry, wet and acidic conditions," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 521–529, Jul.–Sep. 2022 (in Thai).

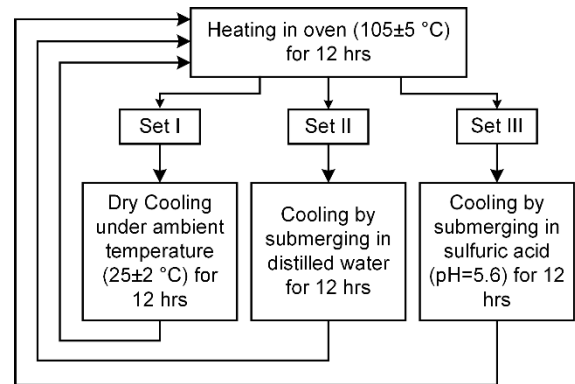
## 1. บทนำ

หินทรายถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างโบราณสถานซึ่งถือเป็นมรดกทางวัฒนธรรม เนื่องจากหินทรายมีสมบัติในการเชื่อมประสานสูง และสามารถหาได้ง่าย [1] การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน และความชื้นตามฤดูกาลทำให้เกิดวัฏจักรแบบเปียก-แห้งซึ่งเป็นการเร่งกระบวนการผุกร่อนของหิน ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพ และสร้างความเสียหายต่อมรดกทางวัฒนธรรม [2] นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาผลกระทบของกระบวนการผุกร่อนต่อสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของหิน [3]–[9] แต่ผลงานวิจัยเหล่านั้นเป็นการทดสอบในระยะเวลายาว และไม่ครอบคลุมถึงผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน อาทิ สภาวะแวดล้อมแบบฝนกรด ซึ่งยังมีไม่มากนักเพียงพอที่จะประเมินค่าความคงทนต่อการผุกร่อนของหินตลอดอายุการใช้งานได้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อจำลองผลกระทบของกระบวนการผุกร่อนจากสภาวะแวดล้อมแบบแห้ง แบบเปียก และแบบที่เป็นกรดต่อสมบัติเชิงกายภาพ กลศาสตร์และแรงองค์ประกอบของหินทราย 4 ชนิด ที่นิยมใช้เป็นหินก่อสร้างและหินประดับในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยทำการจำลองทั้งหมด 300 วัฏจักร ภายใต้ 3 สภาวะ ได้แก่ สภาวะแห้ง สภาวะเปียก และสภาวะเป็นกรด โดยจะทำการทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกลศาสตร์ และแรงองค์ประกอบเมื่อทำการจำลองครบทุก 100 วัฏจักร ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อบ่งบอกถึงความคงทนของหินภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ ในระยะยาว เช่น คาคณะอายุการใช้งาน หรือการเสื่อมสภาพของหินแต่ละชนิดในสภาพอากาศแบบร้อนชื้น ฝนตกชุก หรือฝนกรด ในการปรับเปลี่ยนเพื่อยืดอายุการใช้งาน และเพิ่มมูลค่าของหินก่อสร้างและหินประดับให้สอดคล้องกับสภาวะการผุกร่อนของหินนั้นๆ ที่เปลี่ยนไปตามเวลา

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ตัวอย่างหินที่ใช้ในการศึกษาเป็นหินทรายในกลุ่มหินโคราช (Khorat Group) จำนวน 4 หมวดหิน ประกอบด้วย หมวดหินภูกระดึง (Phu Kradung Formation) หมวดหิน



รูปที่ 1 รูปแบบของวัฏจักรการจำลองการผุกร่อนภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน

พระวิหาร (Phra Wihan Formation) หมวดหินเสาชั่ว (Sao Khua Formation) และหมวดหินภูพาน (Phu Phan Formation) โดยทำการตัดตัวอย่างหินทรายในแต่ละหมวดหินจำนวน 10 ตัวอย่าง เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $35 \times 35 \times 152$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร

รูปที่ 1 แสดงรูปแบบของวัฏจักรการจำลองการผุกร่อนภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันของหินทราย โดยตัวอย่างหินทรายแต่ละชนิดถูกแบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดสอบ แต่ละชุดการทดสอบได้ใช้หินทรายจำนวน 9 ตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างหินทรายทั้งหมดเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นดำเนินการดังนี้ 1) นำหินจำนวน 3 ตัวอย่าง ออกมาวางไว้ที่อุณหภูมิปกติ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง 2) นำหินจำนวน 3 ตัวอย่าง ไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ 3) นำหินจำนวน 3 ตัวอย่าง ไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีค่า pH เท่ากับ 5.6 เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาวะฝนกรดที่เกิดขึ้นในบริเวณภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่ตรวจวัดโดย EANET [10] จากขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นถือเป็นการทดสอบ 1 วัฏจักร ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 300 วัฏจักร (300 วัน) ในแต่ละตัวอย่างหิน

เมื่อทำการทดสอบครบทุก 100 วัฏจักร ได้นำตัวอย่างหินชนิดละ 1 ตัวอย่าง ของแต่ละชุดการทดสอบมาทำการทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกลศาสตร์ และแรงองค์ประกอบ



แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับตัวอย่างในสภาวะเริ่มต้น (ไม่ผ่านการทดสอบแบบเป็นวัฏจักร) ส่วนตัวอย่างที่เหลือยังคงอยู่ในรอบการจำลองการผุกร่อนต่อไป การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ เพื่อหาความหนาแน่นของตัวอย่างหินตามมาตรฐาน ASTM C127-15 [11] โดยใช้หลักการคำนวณจากการชั่งน้ำหนักตัวอย่างหินในอากาศและในน้ำ

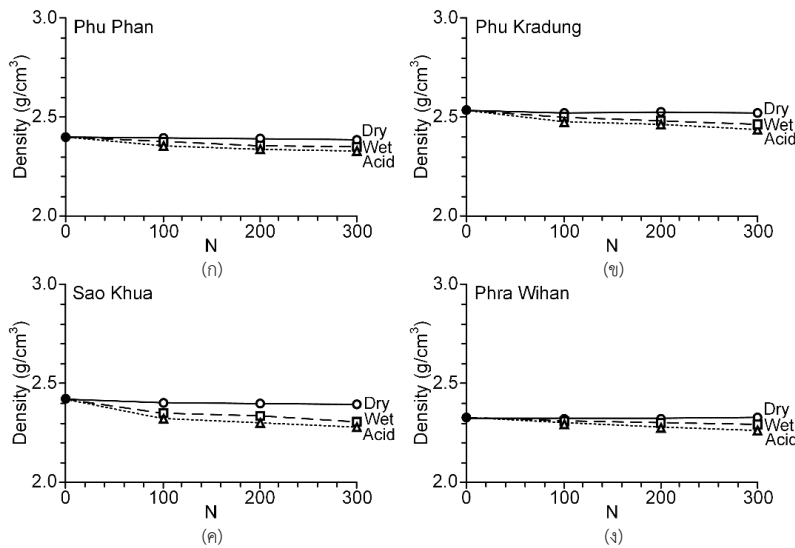
การทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงกลศาสตร์ แบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการดัดแบบกดสามจุด (Three-point Bending Test) และการทดสอบแรงอัดในแกนเดียว (Uniaxial Compression Test) ซึ่งหลังจากทดสอบหาความหนาแน่นแล้วจึงทำการทดสอบการดัดแบบกดสามจุด [12] เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ด้วยการติด Strain Gage บริเวณกึ่งกลางด้านล่างของตัวอย่างหิน เพื่อตรวจวัดการยืดตัวของตัวอย่างหินสำหรับนำไปคำนวณค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงดึง (Tensile Elastic Modulus)

หลังจากทำการทดสอบการดัดแบบกดสามจุด ตัวอย่างหินถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกได้นำมาตัดให้มีขนาด 35 x 35 x 70 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เพื่อใช้ทดสอบแรงอัดในแกนเดียว [13] โดยขณะทำการทดสอบได้ทำการวัดค่า

ความเครียดในแนวแกน (Axial Strain) และความเครียดในแนวตั้งฉากของตัวอย่างหินโดยใช้ Dial Gages เพื่อมาคำนวณค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงอัด (Compressive Elastic Modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ration) ตัวอย่างหินส่วนที่สองได้นำไปใช้วิเคราะห์แรงองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction Analysis; XRD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์ (X-ray) มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดของสารประกอบ รวมถึงโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) ทำได้โดยการนำตัวอย่างหินมาบดจนเป็นผงละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 60) จากนั้นนำผงตัวอย่างเข้าเครื่อง X-ray Diffractometer-D2 Phaser เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ประกอบหิน

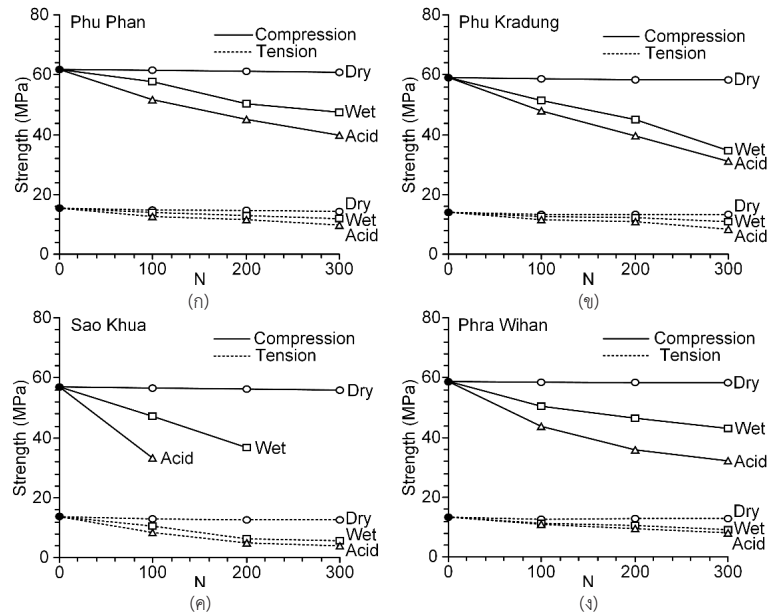
3. ผลการทดลอง

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของหิน และจำนวนรอบของการจำลองการผุกร่อน (N) จนครบ 300 วัฏจักร ภายใต้สภาวะแห้ง สภาวะเปียก และสภาวะเป็นกรด ผลการทดสอบระบุว่าตัวอย่างหินทรายทุกชนิดที่



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความหนาแน่นกับจำนวนรอบของการทดสอบ (N) หมวดหินภูพาน (ก) หมวดหินภูกระดึง (ข) หมวดหินเสาขัว (ค) และหมวดหินพระวิหาร (ง)

ประทับใจ พระสุจันทร์ และคณะ, “การจำลองการผุกร่อนของหินทรายภายใต้วัฏจักรร้อนเย็นแบบสภาวะแห้ง สภาวะเปียก และสภาวะความเป็นกรดในห้องปฏิบัติการ.”



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงกับจำนวนรอบของการทดสอบ (N) หินภูพาน (ก) หินภูกระดึง (ข) หินเสาขัว (ค) และหินพระวิหาร (ง)

ทดสอบภายใต้สภาวะแห้งมีความทนทานมากกว่าสภาวะเปียก และสารละลายกรดสามารถลดความหนาแน่นของหินลงได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะน้ำและกรดสามารถละลายวัสดุเชื่อมประสานของหินทราย และเพิ่มช่องว่างของรูพรุน ตัวอย่างหินที่อยู่ภายใต้สภาวะเป็นกรดจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าสภาวะเปียก หินทรายทุกชนิดมีแนวโน้มของความหนาแน่นลดลงคล้ายกันเมื่อจำนวนรอบของการทดสอบเพิ่มขึ้น

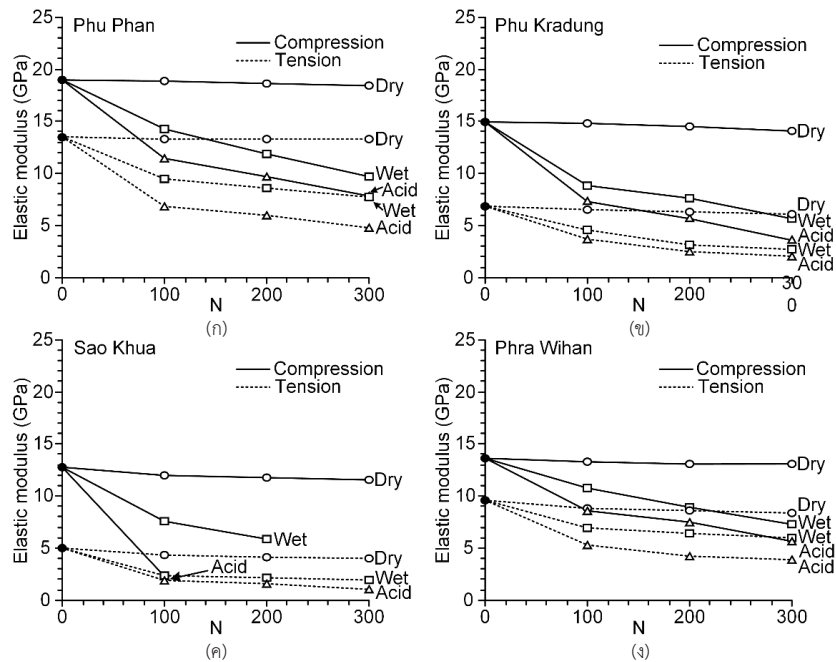
ผลกระทบของน้ำและกรดต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุด (Compressive Strength) และกำลังรับแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength) ของหินทรายทั้งสองชนิดแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนดังรูปที่ 3 พบว่า หลังจากทำการจำลองครบ 300 วัฏจักร กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดึงสูงสุดลดลงประมาณร้อยละ 30 ถึง 50 ของค่าเริ่มต้น ส่วนกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มที่จะไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะแห้ง

การแช่ตัวอย่างหินในสารละลายกรดสามารถลดความแข็งแรงของหินได้มากกว่าการแช่ในน้ำ โดยหินทรายหมวด

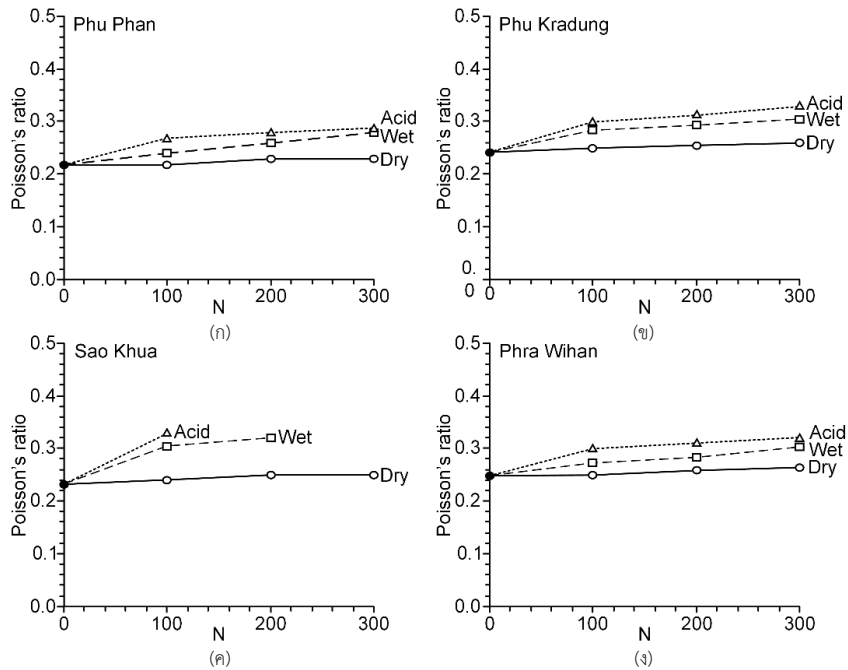
เสาขัวมีความอ่อนไหวต่อน้ำและกรดมากหลังทำการทดสอบ 100 วัฏจักร ภายใต้สภาวะเป็นกรด และ 200 วัฏจักร ภายใต้สภาวะเปียก พบว่า ตัวอย่างหินมีการผุกร่อน และสลายตัวไปตามระนาบของชั้นหิน ส่งผลให้ไม่สามารถทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียวได้

ผลกระทบของการทดสอบภายใต้สภาวะเปียก และสภาวะเป็นกรดต่อค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงอัด และแรงดึงของหินทรายมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกับค่ากำลังรับแรงกดและแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4) โดยพบว่า ภายใต้สภาวะเป็นกรดเมื่อจำนวนรอบของการทดสอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นภายใต้แรงอัด และแรงดึงของหินลดลงมากกว่าเมื่อเทียบว่าการทดสอบภายใต้สภาวะเปียก สำหรับตัวอย่างหินที่ทำการทดสอบภายใต้สภาวะแห้งจะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นภายใต้แรงกด และแรงดึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

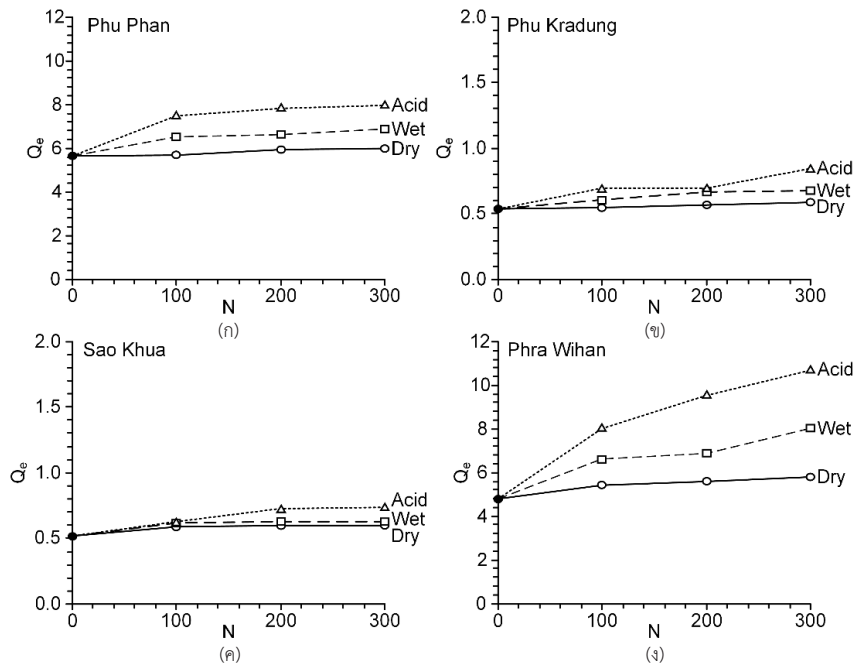
การแช่ตัวอย่างหินในของเหลวทำให้อัตราส่วนปัวซงเพิ่มขึ้นดังแสดงรูปที่ 5 โดยที่อัตราส่วนปัวซงสามารถคำนวณได้จากสัดส่วนการขยายตัวในแนวตั้งข้างต่อการหดตัว



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นกับจำนวนรอบของการทดสอบ (N) หมวดหินภูพาน (ก) หมวดหินภูกระดึง (ข) หมวดหินเสาขัว (ค) และหมวดหินพระวิหาร (ง)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองกับจำนวนรอบของการทดสอบ (N) หมวดหินภูพาน (ก) หมวดหินภูกระดึง (ข) หมวดหินเสาขัว (ค) และหมวดหินพระวิหาร (ง)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแร่ควอตซ์กับวัสดุเชื่อมประสานกับจำนวนรอบของการทดสอบ (N) หมวดหินภูพาน (ก) หมวดหินภูกระดึง (ข) หมวดหินเสาขัว (ค) และหมวดหินพระวิหาร (ง)

ในแนวแกนขณะทำการให้แรงในแนวแกนของการทดสอบ แรงกดในแกนเดียว สำหรับหินทรายทุกชนิดอัตราส่วนปูนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนวัฏจักรการทดสอบ อย่างไรก็ตามในการทดสอบภายใต้สภาวะแห้งจะมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และตัวอย่างหินที่แช่ในสารละลายกรดจะมีการขยายตัวมากกว่าแช่ในน้ำ

ได้มีการนำหินทั้งหมด 40 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์แร่องค์ประกอบในร้อยละของน้ำหนักด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ผลการวิเคราะห์ระบุว่า หินทรายทุกชนิดมีแร่ควอตซ์ปะปนเป็นปริมาณมากที่สุดภายใต้ทุกสภาวะการทดสอบ สำหรับแร่อื่นๆ ที่เหลืออยู่ในรูปของวัสดุเชื่อมประสาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างแร่ควอตซ์กับวัสดุเชื่อมประสานหรือ Equivalent Quartz Content ( $Q_e$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับจำนวนรอบของการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ค่า  $Q_e$  เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับตัวอย่างที่ทำการทดสอบภายใต้สภาวะเป็นกรด อย่างไรก็ตาม

ค่า  $Q_e$  จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยสำหรับตัวอย่างหินที่อยู่ภายใต้สภาวะแห้ง จากผลการทดสอบข้างต้นสนับสนุนการตั้งสมมติฐานก่อนหน้านี้นี้ว่า การทดสอบภายใต้สภาวะของของเหลว สามารถละลายวัสดุเชื่อมประสาน ส่งผลให้ความพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้หินมีความหนาแน่นลดลงนั่นเอง

#### 4. อภิปรายผลและสรุป

จำนวนตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบถูกจำกัดจำนวน กล่าวคือทำการทดสอบเพียง 1 ตัวอย่าง สำหรับหินทรายแต่ละชนิดและแต่ละสภาวะการทดสอบเท่านั้น อย่างไรก็ตามผลการทดสอบแสดงแนวโน้มของการเสื่อมสภาพของหินอย่างชัดเจนในรูปแบบการลดลงของสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ การออกแบบการทดสอบแบบวัฏจักรมีวัตถุประสงค์เพื่อเร่งกระบวนการผุกร่อน นอกจากนั้นยังจำลองสมบัติของหินทรายในระยะยาวในรูปแบบของความหนาแน่น ความแข็ง ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และแร่องค์ประกอบ





- mudrocks as affected by experimental wetting-drying cycles and freezing-thawing cycles,” *Catena*, vol. 27, no. 3-4, pp. 149-165, 1996.
- [4] P. D. Sumner and M. J. Loubser, “Experimental sandstone weathering using different wetting and drying moisture amplitudes,” *Earth Surface Processes and Landforms: Journal of the British Geomorphological Research Group*, vol. 33, no. 6, pp. 985-990, 2008.
- [5] A. Özbek, “Investigation of the effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 73, no. 2, pp. 595-609, 2014.
- [6] G. Khanlari and Y. Abdilor, “Influence of wet-dry, freeze-thaw, and heat-cool cycles on the physical and mechanical properties of Upper Red sandstones in central Iran,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 74, no. 4, pp. 1287-1300, 2015.
- [7] H. F. Deng, J. L. Li, M. Zhu, K. W. Wang, L. H. Wang, and C. J. Deng, “Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under “saturation-air dry” circulation function,” *Rock and Soil Mechanics*, vol. 33, no. 11, pp. 3306-3312, 2012.
- [8] P. A. Hale and A. Shakoor, “A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones,” *Environmental and Engineering Geoscience*, vol. 9, no. 2, pp. 117-130, 2003.
- [9] Z. Zhao, J. Yang, D. Zhang, and H. Peng, “Effects of wetting and cyclic wetting-drying on tensile strength of sandstone with a low clay mineral content,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 50, no. 2, pp. 485-491, 2017.
- [10] S. Lee, “The third periodic report on the state of acid deposition in east Asia, part II national assessments,” presented at the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia, Niigata-shi, Japan, 2016.
- [11] *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*, ASTM C127-15, 2015.
- [12] *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*, ASTM C293 / C293M-16, 2016.
- [13] *Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*, ASTM D7012-14e1, 2014.
- [14] A. Racey, M. A. Love, A. C. Canham, J. G. S. Goodall, S. Polachan, and P. D. Jones, “Stratigraphy and reservoir potential of the Mesozoic Khorat Group, NE Thailand: Part 1: Stratigraphy and sedimentary evolution,” *Journal of Petroleum Geology*, vol. 19, no. 1, pp. 5-39, 1996.