



รายงานการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติความคงทนของหินประดับและหินก่อสร้างเพื่อเพิ่ม
มูลค่าสินค้าแก่อุตสาหกรรมขนาดเล็ก
(Durability Testing of Decorating Rocks and Dimension Stones
to Enhance Economic values)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติความคงทนของหินประดับและหินก่อสร้างเพื่อเพิ่ม
มูลค่าสินค้าแก่อุตสาหกรรมขนาดเล็ก
(Durability Testing of Decorating Rocks and Dimension Stones
to Enhance Economic values)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร. ธนิษฐา ทองประภา

สาขาวิชาวิศวกรรมธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่ปรึกษาโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

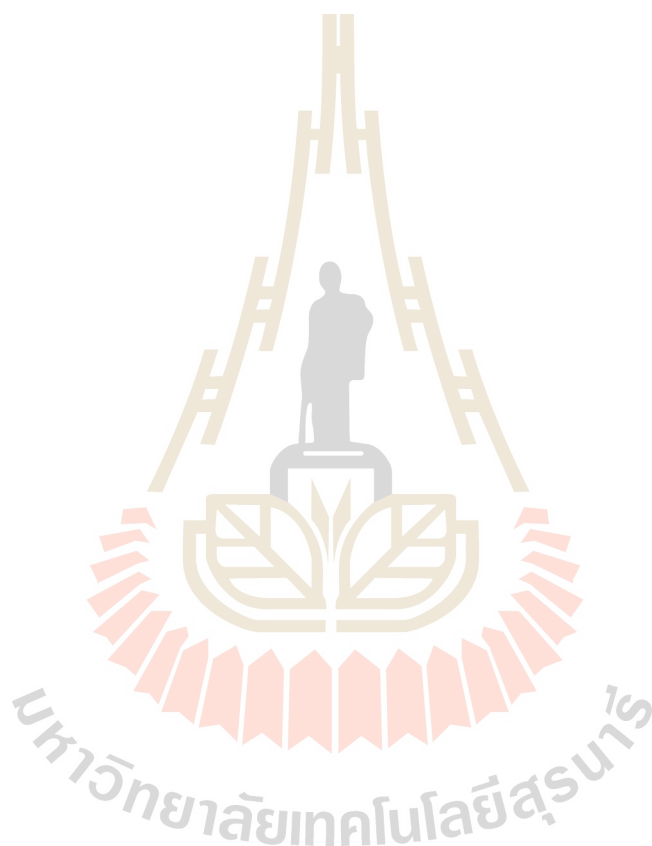
พฤษภาคม 2562

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จจุลวงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจาก ศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร และทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2562



บทคัดย่อ

การทดสอบดัชนีความคงทนต่อความฝูกร่อนได้ดำเนินการจำนวน 100 รอบ เพื่อประเมินความคงทนในระยะยาวของหินก่อสร้างและหินประดับที่ใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทยจำนวน 13 ชนิด ตัวอย่างหินแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ประกอบด้วยหินบะซอลต์ หินคาร์บอนเนต หินทรายและหินแกรนิต ซึ่งการทดสอบในระยะยาวมุ่งเน้นเพื่อหาความแตกต่างของอัตราการฝูกร่อนของหินที่มีค่ากำลังกดใกล้เคียงกัน โดยทำการทดสอบภายใต้ 3 สภาวะ คือสภาวะแห้ง สภาวะเปียกและสภาวะความเป็นกรด ผลที่ได้รับระบุว่า การฝูกร่อนของหินคาร์บอนเนต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหินทราเวอร์ทีนจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อหินเหล่านี้สัมผัสน้ำและกรดเป็นเวลานาน ปริมาณของแร่แคลไซต์และความพรุนเป็นตัวการสำคัญในการเร่งอัตราการฝูกร่อนของกลุ่มหินบะซอลต์ ชนิดและพันธะยึดติดของวัสดุเชื่อมประสาน และปริมาณของแร่คาร์บอนเนตเป็นปัจจัยสำคัญต่อความคงทนของกลุ่มหินทราย น้ำและกรดไม่มีผลต่อความคงทนของกลุ่มหินแกรนิต



Abstract

Slake durability index tests have been performed up to 100 cycles to investigate long-term durability of thirteen construction and decorating stones commonly used in Thailand, divided here into four groups including basalt, carbonate, sandstone and granite groups. This long-term test is intended to distinguish the degradation rates of the tested rocks with similar strengths. Three series of the slaking cycles are performed under dry, wet and acidic conditions. The results indicate that degradation of carbonate rocks, particularly travertine, significantly increase when they are subjected to water and acid. Calcite contents and pore spaces clearly accelerate the degradation rate of the tested basaltic rocks. Types and cohesive bonding of the cementing materials, and kaolinite contents are important factors controlling the durability of the tested sandstones. Water and acid have insignificant impact on the durability of the tested granites.

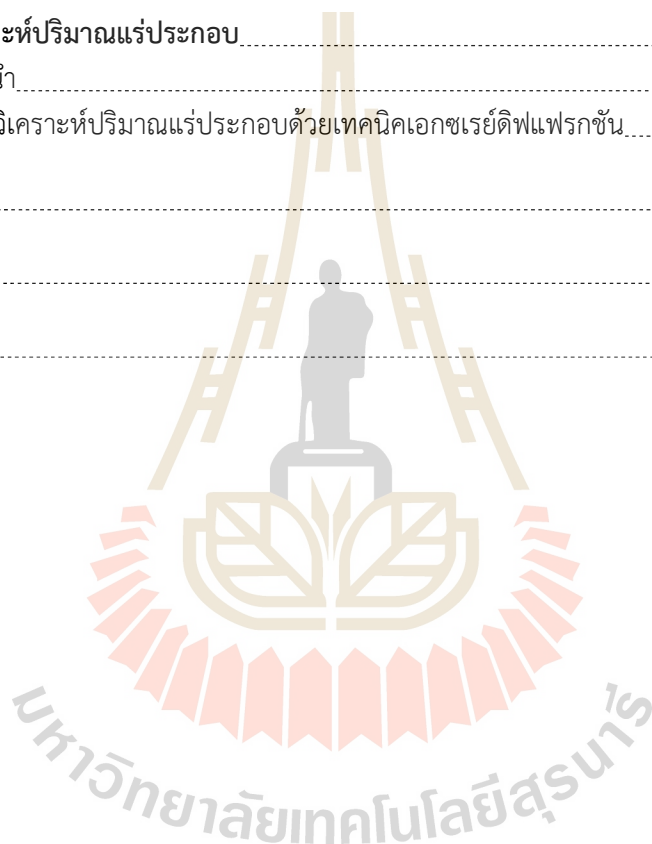


สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	5
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2.1 กระบวนการการสุกร่อนของมวลหิน.....	11
2.2 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งและความคงทนต่อการสุกร่อนของหินเนื้ออ่อน.....	13
2.2.1 ขนาดเม็ดตะกอน (Grain Size).....	13
2.2.2 รูปร่างเม็ดตะกอน (Shape of Grains).....	13
2.2.3 แร่ประกอบหิน (Mineral Compositions).....	14
2.2.4 พันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดตะกอน (Bonding of Grain Contact).....	14
2.2.5 ความหนาแน่นในการอัดตัว (Packing Density).....	14
2.2.6 การแตกหักในสภาวะแห้ง (Slaking).....	15
2.2.7 ปริมาณน้ำ (Water Contents).....	15
2.2.8 ค่าความพรุน (Porosity).....	15
2.3 การทดสอบที่มีสัมพันธ์ต่อความแข็งของหิน.....	16
บทที่ 3 การคัดเลือกตัวอย่างหิน	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 ตำแหน่งของตัวอย่างหินที่เลือกมาทดสอบ.....	19
3.3 การศึกษาทางแร่วิทยา.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบดัชนีความคงทนการกร่อนของตัวอย่างหิน.....	29
4.1 บทนำ.....	29
4.2 การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน.....	29
4.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	39
4.4 ความขรุขระและความกลมมนของหิน.....	44
บทที่ 5 การวิเคราะห์ปริมาณแร่ประกอบ.....	55
5.1 บทนำ.....	55
5.2 การวิเคราะห์ปริมาณแร่ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน.....	55
บทที่ 6 บทสรุป.....	62
บรรณานุกรม.....	64
ประวัตินักวิจัย.....	70



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 รายชื่อผู้ประกอบการร้านค้าหินก่อสร้างและหินประดับในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.....	6
2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ที่สัมพันธ์ต่อระดับการผูกมัด (Tuğrul, 2004).....	18
2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ที่สัมพันธ์ต่อระดับการผูกมัด (Tuğrul, 2004).....	18
3.1 ชื่อ ตำแหน่ง หน่วยหิน ยุค และอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลตัวอย่าง กลุ่มหินบะซอลต์.....	21
3.2 ชื่อ ตำแหน่ง หน่วยหิน ยุค และอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลตัวอย่าง กลุ่มหินคาร์บอนเนต.....	21
3.3 ชื่อ ตำแหน่ง หน่วยหิน ยุค และอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลตัวอย่าง กลุ่มหินทราย.....	22
3.4 ชื่อ ตำแหน่ง หน่วยหิน ยุค และอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลตัวอย่าง กลุ่มหินแกรนิต.....	22
3.5 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างหิน.....	24
3.6 องค์ประกอบแร่ของกลุ่มหินบะซอลต์.....	27
3.7 องค์ประกอบแร่ของกลุ่มหินคาร์บอนเนต.....	27
3.8 องค์ประกอบแร่ของกลุ่มหินทราย.....	28
3.9 องค์ประกอบแร่ของกลุ่มหินแกรนิต.....	28
4.1 ตัวอย่างหินก่อนการทดสอบความคงทนต่อการผูกมัด.....	32
4.2 ผลการประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินบะซอลต์ก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผูกมัดครบ 100 วัฏจักร.....	46
4.3 การประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินคาร์บอนเนตก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผูกมัดครบ 100 วัฏจักร.....	48
4.4 การประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินทรายก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผูกมัดครบ 100 วัฏจักร.....	50
4.5 การประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินแกรนิตก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผูกมัดครบ 100 วัฏจักร.....	52
5.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของกลุ่มหินบะซอลต์ก่อนและหลังทดสอบความคงทนต่อการผูกมัดครบ 100 วัฏจักร.....	58
5.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของกลุ่มหินคาร์บอนเนตก่อนและหลังทดสอบความคงทนต่อการผูกมัดครบ 100 วัฏจักร.....	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของกลุ่มหินทรายก่อนและหลังทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนครบ 100 วัฏจักร.....	60
5.4 ผลการวิเคราะห์ XRD ของกลุ่มหินแกรนิตก่อนและหลังทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนครบ 100 วัฏจักร.....	61



สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 ตำแหน่งของตัวอย่างหินที่เลือกมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	23
3.2 สไลด์แผ่นบางเพื่อศึกษาองค์ประกอบหินด้วยวิธีศิลาวรรณนาของ กลุ่มหินบะซอลต์.....	25
3.3 สไลด์แผ่นบางเพื่อศึกษาองค์ประกอบหินด้วยวิธีศิลาวรรณนาของ กลุ่มหินคาร์บอเนต.....	25
3.4 สไลด์แผ่นบางเพื่อศึกษาองค์ประกอบหินด้วยวิธีศิลาวรรณนาของ กลุ่มหินทราย.....	26
3.5 สไลด์แผ่นบางเพื่อศึกษาองค์ประกอบหินด้วยวิธีศิลาวรรณนาของ กลุ่มหินแกรนิต.....	26
4.1 เครื่องจำลองการผุกร่อนของหินแบบหมุนอัตโนมัติ.....	34
4.2 ดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้ง (บน) สภาวะเปียก (กลาง) และสภาวะความเป็นกรด (ล่าง) ของกลุ่มหินบะซอลต์.....	35
4.3 ดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้ง (บน) สภาวะเปียก (กลาง) และสภาวะความเป็นกรด (ล่าง) ของกลุ่มหินคาร์บอเนต.....	36
4.4 ดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้ง (บน) สภาวะเปียก (กลาง) และสภาวะความเป็นกรด (ล่าง) ของกลุ่มหินทราย.....	37
4.5 ดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้ง (บน) สภาวะเปียก (กลาง) และสภาวะความเป็นกรด (ล่าง) ของกลุ่มหินแกรนิต.....	38
4.6 ค่าการดูดซึมน้ำของหินเทียบกับจำนวนรอบการทดสอบของ กลุ่มหินบะซอลต์.....	40
4.7 ค่าการดูดซึมน้ำของหินเทียบกับจำนวนรอบการทดสอบของ กลุ่มหินคาร์บอเนต.....	41
4.8 ค่าการดูดซึมน้ำของหินเทียบกับจำนวนรอบการทดสอบของ กลุ่มหินทราย.....	42
4.9 ค่าการดูดซึมน้ำของหินเทียบกับจำนวนรอบการทดสอบของ กลุ่มหินแกรนิต.....	43
4.10 แผนภูมิเปรียบเทียบสำหรับการประเมินความซรุขระและความกลมมนของ เม็ดวัสดุ (Powers, 1982).....	45
4.11 แผนภูมิแห่งเปรียบเทียบผลการประเมินความกลมมนของกลุ่มหินบะซอลต์ (a) หินคาร์บอเนต (b) หินทราย (c) และหินแกรนิต (d).....	53
4.12 แผนภูมิแห่งเปรียบเทียบผลการประเมินความซรุขระของกลุ่มหินบะซอลต์ (a) หินคาร์บอเนต (b) หินทราย (c) และหินแกรนิต (d).....	54

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 เครื่องคัดแยกตัวอย่างหินที่บดละเอียด.....	56
5.2 เครื่อง X-ray diffractometer-D2 phaser.....	56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ประเทศไทยมีทรัพยากรหินเป็นปริมาณมากแพร่กระจายอยู่เกือบทั่วทุกจังหวัด หินบางชนิดจะถูกนำมาสร้างมูลค่าเพิ่มด้วยการนำมาใช้เป็นหินก่อสร้างและหินประดับตามอาคาร บ้านเรือน อย่างไรก็ตามหินเหล่านี้จะมีความคงทนต่อการผุกร่อนในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังนั้น หากผู้ประกอบการหรือร้านค้าหินก่อสร้างและหินประดับมีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นฐานของหิน อาทิ ความคงทนหรือความแข็งของหิน รวมถึงคุณสมบัติเชิงเคมีของหินต่อการนำไปประยุกต์ใช้จริงในงานก่อสร้างอาคารบ้านเรือนภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ จะก่อให้เกิดการสร้างมูลค่าของหินเหล่านี้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากผู้ประกอบการมีความมั่นใจและได้รับคำแนะนำที่ตรงตามความต้องการต่อการนำไปใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศหรือสภาวะแวดล้อมนั้น ๆ อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าบำรุงรักษาอาคารบ้านเรือนหรือการซ่อมแซมลดลงด้วย ดังนั้นหากผู้ประกอบการและผู้ประกอบการมีความเข้าใจมากขึ้นจะส่งผลต่อการเติบโตของเศรษฐกิจในประเทศไทยเป็นอย่างมาก

ในปี พ.ศ. 2550 ได้มีนักวิจัยทำการศึกษาคูณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างหินเนื้ออ่อนจำนวน 13 ชนิด ภายใต้สภาวะการผุกร่อนที่ต่างกันคือ สภาวะแห้งและเปียก เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนของหินกับค่าความแข็งและแรงจลน์ประกอบ ผลที่ได้สามารถระบุถึงความคงทนต่อการผุกร่อนของหินแต่ละชนิดและสามารถจำแนกหินเพื่อคาดคะเนความแข็งที่มีผลกระทบต่อกระบวนการการผุกร่อนได้ แต่ผลงานวิจัยในขณะนั้นยังไม่ครอบคลุมชนิดหินก่อสร้างและหินประดับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และไม่ครอบคลุมถึงผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมภายนอกอย่างเพียงพอ อาทิ สภาวะแวดล้อมแบบฝนกรด อีกทั้งระยะเวลาในการทดสอบยังไม่มากเพียงพอที่จะประเมินค่าความคงทนต่อการผุกร่อนของหินตลอดอายุการใช้งานได้

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ เพื่อหาผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมแบบแห้ง แบบเปียก และแบบที่เป็นกรดต่อกระบวนการผุกร่อนทั้งทางด้านกายภาพและทางเคมีของหินก่อสร้าง (หินปูนและหินบะซอลต์) และหินประดับ (หินแกรนิต หินอ่อน หินทราย และหินทราเวอร์ทีน) และนำผลที่ได้มาใช้คาดคะเนระดับการผุกร่อนของหินในเชิงเวลา ในการทดสอบจะพิจารณาถึงแรงจลน์ประกอบหลักของหิน รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะแวดล้อมภายนอกต่อเวลา ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อบ่งบอกถึงความคงทนของหินภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ ในระยะยาว เช่น การคาดคะเนอายุการใช้งานหรือความเสื่อมสภาพของหินแต่ละชนิดในสภาพอากาศแบบร้อนชื้น ฝน หรือสภาพอากาศแบบฝนกรด เพื่อนำมาปรับเปลี่ยนและเพิ่มมูลค่าของหินก่อสร้างและหินประดับ (พระพุทธรูป เฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ) ให้สอดคล้องกับสภาวะการผุกร่อนของหินนั้นๆ ที่เปลี่ยนไปตามเวลา

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความคงทนในระยะยาวของหินก่อสร้างและหินประดับที่ใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย หินแต่ละชนิดได้ถูกนำมาทดสอบดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้ง สภาวะเปียก และสภาวะที่เป็นกรด (เพื่อจำลองสภาวะของฝนกรด) จำนวน 100

รอบ นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำ การศึกษาองค์ประกอบแร่ด้วยวิธีสีลาวรรณนา และการวิเคราะห์ปริมาณแร่ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันก่อนและหลังการทดสอบดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนรอบที่ 100 เพื่อใช้อธิบายสาเหตุหรือลักษณะของการผุกร่อนของหินแต่ละชนิด ผลการวิจัยสามารถใช้ในการคาดคะเนความคงทนของหินก่อสร้างและหินประดับในเชิงเวลา ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อรัฐวิสาหกิจชุมชนที่เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มมูลค่าของสินค้า ส่งผลให้ผู้อุปโภคสามารถนำสินค้ามาประยุกต์การใช้งานได้อย่างเหมาะสม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 13 ชนิด แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ
 - หินที่ใช้ในงานก่อสร้าง
 - หินบะซอลต์แบบเนื้อแน่น
 - หินบะซอลต์แบบมีรูพรุน
 - หินบะซอลต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ
 - หินปูน (หมวดหินทุ่งสงและซับบอน)
 - หินประดับตกแต่ง
 - หินแกรนิต (มอนโซไนต์และโปไอไทต์)
 - หินอ่อน (หมวดหินเขาขาด)
 - หินทราย (หมวดหินภูกระดึง พระวิหาร เสาขัว และภูพาน)
 - หินทรายเวอร์ทีน (หมวดหินเขาขาด)
 - หินชนวน (หมวดหินเขาขาด)
- 2) การทดสอบจะดำเนินการภายใต้ 3 สภาวะ คือ
 - สภาวะแห้ง
 - สภาวะเปียก (น้ำสะอาด)
 - สภาวะที่เป็นกรด (สารละลายซัลฟูริก)
- 3) การทดสอบดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง
- 4) งานวิจัยนี้ไม่มีการทดสอบในภาคสนาม

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

แนวคิดของงานวิจัยนี้ คือ การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนของหิน (Slake durability test - ASTM D4644) เพื่อหาความคงทนของหินก่อสร้างและหินประดับในห้องปฏิบัติการ โดยทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาของขบวนการเชิงกายภาพและเชิงเคมีในสภาวะที่ควบคุมได้ เพื่อเปรียบเทียบกับสภาวะของหินก่อสร้างและหินประดับที่อยู่ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ หินก่อสร้างและหินประดับที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีทั้งหมด 14 ชนิด ในขั้นตอนแรกของการทดสอบจะทำการอบแห้งตัวอย่างหินที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำหินมาขัดถูด้วยการบรรจุในตะแกรงเหล็ก

ทรงกระบอกที่มีการหมุนด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ คือ (1) สภาวะแห้ง (2) สภาวะเปียกด้วยการจุ่มลงในภาชนะบรรจุน้ำสะอาด และ (3) สภาวะที่เป็นกรดด้วยการจุ่มลงในภาชนะบรรจุสารละลายซัลฟูริก เมื่อทดสอบเสร็จจะนำตัวอย่างหินไปอบแห้งอีกครั้งแล้วจึงนำไปหาค่าน้ำหนักของหินที่หายไป กระบวนการดังกล่าวจะดำเนินการเป็นวัฏจักรอย่างต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการเป็นจำนวน 100 วัฏจักร ผลจากการทดสอบจะนำมาสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างคุณสมบัติความคงทนของหินทั้ง 3 สภาวะในเชิงเวลา ผลที่ได้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการเพิ่มมูลค่าของสินค้าในภาคอุตสาหกรรมและร้านค้าหินก่อสร้างและหินประดับ ผู้ประกอบการสามารถแนะนำชนิดหินก่อสร้างและหินประดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานและเหมาะสมแก่สภาพแวดล้อมต่างๆ แก่ลูกค้าได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะรวมไปถึงทฤษฎีและกฎต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการผุกร่อนและความคงทนของหิน รวมไปถึงการทดสอบที่มีความสัมพันธ์กับความแข็งของหิน ซึ่งจะทำให้การศึกษาผลงานวิจัยที่ดำเนินการมาแล้วทั้งในและต่างประเทศ ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยทั้งหมดรวมทั้งรายการเอกสารอ้างอิงจะถูกสรุปไว้ในรายงานวิจัยซึ่งแหล่งข้อมูลมาจาก วารสารทางวิชาการ รายงานทางวิชาการและรายงานการประชุมวิชาการ

ขั้นตอนที่ 2 การจัดเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ

งานวิจัยจะดำเนินการจัดซื้อหินจากร้านค้าจำหน่ายหินก่อสร้างและหินประดับเพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ศึกษาอัตราการผุกร่อนของหินโดยอาศัยมาตรฐาน ASTM และ ISRM ที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้จะใช้ตัวอย่างหินจำนวน 13 ชนิด ตัวอย่างหินทั้งหมดจะนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการหน่วยวิจัยกลศาสตร์หิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย การทดสอบ 3 ชุด คือ การทดสอบที่สภาวะแห้ง การทดสอบที่สภาวะเปียกด้วยการจุ่มลงในภาชนะบรรจุน้ำสะอาด และการทดสอบที่สภาวะเป็นกรดด้วยการจุ่มลงในภาชนะบรรจุสารละลายซัลฟูริก

1) การทดสอบที่สภาวะแห้งดำเนินการโดยนำตัวอย่างหินจำนวน 10 ก้อน ก้อนละประมาณ 50 กรัม ใส่ในตะแกรงเหล็กทรงกระบอกแล้วทำการหมุนตามแนวแกนด้วยอัตราเร็ว 20 รอบต่อนาที จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนทำการชั่งในตะแกรงเหล็ก โดยการทดสอบจะทำซ้ำ 100 วัฏจักร เพื่อนำน้ำหนักที่หายไปมาคำนวณค่าดัชนีคงทนต่อการผุกร่อน

2) การทดสอบที่สภาวะเปียกด้วยการจุ่มลงในภาชนะบรรจุน้ำสะอาดดำเนินการโดยนำตัวอย่างหินจำนวน 10 ก้อน ก้อนละประมาณ 50 กรัม ใส่ในตะแกรงเหล็กทรงกระบอกที่จุ่มอยู่ในถังน้ำ

สะอาดที่มีระดับน้ำสูงเกือบถึงเส้นผ่าศูนย์กลางของตะแกรงเหล็ก แล้วทำการหมุนตามแนวแกนด้วยอัตราเร็ว 20 รอบต่อนาที จากนั้นจะนำตัวอย่างไปอบแห้งและทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนที่จะทำการชั่งในตะแกรงเหล็ก โดยจะทำซ้ำ 100 วัฏจักร เพื่อนำน้ำหนักที่หายไปมาคำนวณค่าดัชนีคงทนต่อการผุกร่อน

3) การทดสอบที่สภาวะเป็นกรดด้วยการจุ่มลงในภาชนะบรรจุสารละลายซัลฟูริก ดำเนินการโดยนำตัวอย่างหินจำนวน 10 ก้อน ก้อนละประมาณ 50 กรัม ใส่ในตะแกรงเหล็กทรงกระบอกที่จุ่มอยู่ในถังสารละลายซัลฟูริกที่มีระดับสารละลายสูงเกือบถึงเส้นผ่าศูนย์กลางของตะแกรงเหล็กแล้วทำการหมุนตามแนวแกนด้วยอัตราเร็ว 20 รอบต่อนาที จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปอบแห้งและทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนที่จะทำการชั่งในตะแกรงเหล็ก โดยจะทำซ้ำ 100 วัฏจักร เพื่อนำน้ำหนักที่หายไปมาคำนวณค่าดัชนีคงทนต่อการผุกร่อน

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และความคงทนของหินที่ทดสอบภายใต้สภาวะแห้ง สภาวะเปียก และสภาวะที่เป็นกรด และสร้างสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความคงทนของหินเทียบกับเวลา

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของหินเชิงเคมี

วิเคราะห์คุณสมบัติเชิงเคมีของตัวอย่างหินที่ทดสอบทั้งหมด 13 ชนิด ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction, XRD) เพื่อหาปริมาณของธาตุหรือสารประกอบของหินตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 6 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอนโดยละเอียด การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมด และข้อสรุปจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เมื่อเสร็จสิ้นโครงการ

1.6 ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ความคงทนต่อการผุกร่อนของหินถูกนำมาพิจารณาในเชิงตัวเลขในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนต่อการผุกร่อนของหินก่อสร้างและหินประดับในเชิงเวลาของหินจำนวน 13 ชนิด ภายใต้สภาวะแห้ง สภาวะเปียก และสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมและร้านค้าหินก่อสร้างและหินประดับ เพื่อใช้คาดคะเนระดับการผุกร่อนและอายุการใช้งานของหินในระยะยาว ผู้ประกอบการมากกว่า 100 ราย (ตารางที่ 1.1) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยสามารถนำความรู้ดังกล่าวไปใช้ในการให้คำแนะนำแก่ผู้ประกอบการเกี่ยวกับการเลือกชนิดหินก่อสร้างและหินประดับให้เหมาะสมกับสภาพอากาศและประเภทของการใช้งาน เนื่องจากหินแต่ละชนิดจะมีความคงทนต่อสภาพอากาศที่แตกต่างกัน อันเป็นผลมาจากแร่องค์ประกอบของหินแต่ละชนิด ด้วยเหตุนี้หากภาคอุตสาหกรรมดังกล่าวมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติความคงทนของหินจะทำให้สามารถเพิ่มมูลค่าของสินค้าได้มากยิ่งขึ้น ทำให้ผู้ประกอบการมีความมั่นใจและมีความสนใจในการเลือกซื้อหินมาเป็นวัสดุในการตกแต่งอาคารบ้านเรือนเพิ่มมากขึ้นจากอดีต

เนื่องจากมีผลวิจัยรองรับและได้คำแนะนำที่ดีจากผู้ประกอบการและร้านค้าที่ทำให้มั่นใจได้ว่าอาคารบ้านเรือนของตนเองจะมีอายุการใช้งานและมีสภาพคงทนยาวนานยิ่งขึ้น

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

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



ตารางที่ 1.1 รายชื่อผู้ประกอบการร้านค้าหินก่อสร้างและหินประดับในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

ลำดับ	ชื่อนิติบุคคล	จังหวัด
1	ก้าวที่มั่นคง จำกัด	ขอนแก่น
2	ขอนแก่นปศุสัตว์	ขอนแก่น
3	ณัฐวัฒน์ ขนส่ง	ขอนแก่น
4	ทรายทอง เทพประทาน จำกัด	ขอนแก่น
5	ทรายภูเพชร จำกัด	ขอนแก่น
6	ฟ้าใส ดีไซน์	ขอนแก่น
7	ภักดีแผ่นดินขอนแก่น	ขอนแก่น
8	มหาเทพพรหมเทพประทานพร	ขอนแก่น
9	ไม้แก่นทรายทอง	ขอนแก่น
10	ศรีเจริญมหานคร 09 จำกัด	ขอนแก่น
11	ศิลาไทยสงวน (2540) จำกัด	ขอนแก่น
12	ศิลาภูผาม่าน	ขอนแก่น
13	ส.อมรพรรณ (1993) จำกัด	ขอนแก่น
14	หยุ่นศิลา อีสาน จำกัด	ขอนแก่น
15	เอ็นเคอาร์ท คอนสตรัคชั่น	ขอนแก่น
16	เอ็มทีพี แมททีเรียล จำกัด	ขอนแก่น
17	ชัยภูมิดินแดงอุตสาหกรรม จำกัด	ชัยภูมิ
18	เทพประทานพรศรีชัยภูมิ	ชัยภูมิ
19	เอ.แอล.เอส.เซอร์เวย์	ชัยภูมิ
20	ซี.เอ.วัสดุและก่อสร้าง	นครพนม
21	นพรัตน์ก่อสร้าง	นครพนม
22	168 โกรอิ่ง อินดัสเทรียล จำกัด	นครราชสีมา
23	กรีน ไบโอ พลาสติก จำกัด	นครราชสีมา
24	กวงถาวรการช่าง จำกัด	นครราชสีมา
25	เกษตรเกษม จำกัด	นครราชสีมา
26	เกษมอุตสาหกรรม จำกัด	นครราชสีมา
27	จี ไอ เอส ทิม	นครราชสีมา
28	โชคดีทรายทอง	นครราชสีมา
29	โชคศิลาชัย จำกัด	นครราชสีมา
30	โชคอนันต์ชัย เซอร์เวย์	นครราชสีมา

ตารางที่ 1.1 รายชื่อผู้ประกอบการร้านค้าสินค้าก่อสร้างและหินประดับในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อนิติบุคคล	จังหวัด
31	เซอร์เวย์ 22 คอนซัลท์ จำกัด	นครราชสีมา
32	เซอร์เวย์เทค	นครราชสีมา
33	ทรัพย์ เซอร์เวย์	นครราชสีมา
34	ทรัพย์รวงทอง คอนสตรัคชั่น	นครราชสีมา
35	เทพพิริฐ แพคทอรี่ จำกัด	นครราชสีมา
36	นครินทร์มาร์มาร่า จำกัด	นครราชสีมา
37	บ้านไร่มาร์เบิล จำกัด	นครราชสีมา
38	พระทองคำขาว	นครราชสีมา
39	พันธมิตรหินอ่อน	นครราชสีมา
40	พิมายทรายทอง	นครราชสีมา
41	พี พี เอส สตาร์ช จำกัด	นครราชสีมา
42	ยิงส์สวัสดิ์ อุตสาหกรรม จำกัด	นครราชสีมา
43	โรงโมหินโซคชัย จำกัด	นครราชสีมา
44	ศิลาทุ่งอรุณ จำกัด	นครราชสีมา
45	สวาทศิลา จำกัด	นครราชสีมา
46	อีเกิ้ล มารีน (ไทยแลนด์) จำกัด	นครราชสีมา
47	อีเอช แอนด์ พี รีนิวเอเบิล จำกัด	นครราชสีมา
48	อุดมทรัพย์ ทรายทอง	นครราชสีมา
49	เอส เอ มอเตอร์ปากช่อง	นครราชสีมา
50	เอี่ยมรุ่งเรือง รีนิวเอเบิล จำกัด	นครราชสีมา
51	แม่โขง รีเวอร์ ไมนิ่ง 2010 จำกัด	บึงกาฬ
52	กริชมิชัย	บุรีรัมย์
53	ทรายแก้วพุทไธสง จำกัด	บุรีรัมย์
54	นางรองศิลาทอง	บุรีรัมย์
55	บุรีรัมย์ภักดี	บุรีรัมย์
56	บุรีรัมย์รัชดา จำกัด	บุรีรัมย์
57	ปกรณสวัสดิ์ จำกัด	บุรีรัมย์
58	ยุคตสมบุรณ์ จำกัด	บุรีรัมย์
59	โรงโมหินราช จำกัด	บุรีรัมย์
60	ศิลาชัย บุรีรัมย์ (1991) จำกัด	บุรีรัมย์

ตารางที่ 1.1 รายชื่อผู้ประกอบการร้านค้าสินค้าหัตถกรรมและหัตถศิลป์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อนิติบุคคล	จังหวัด
61	หินเพชร จำกัด	บุรีรัมย์
62	เหมืองหินราช จำกัด	บุรีรัมย์
63	ก.โกสุมท่าทราย	มหาสารคาม
64	รวมทรัพย์มีชัย ก่อสร้าง	มหาสารคาม
65	โชคเจริญทรัพย์มุกดาหาร	มุกดาหาร
66	ยโสธรทรายทอง จำกัด	ยโสธร
67	ทรัพย์สินศิลาไทย จำกัด	ร้อยเอ็ด
68	ไทยพัฒน ธรกิจที่ดิน จำกัด	ร้อยเอ็ด
69	ปี.เอส.จี.ไอ.เอส.	ร้อยเอ็ด
70	บุญมงคล จำกัด	ร้อยเอ็ด
71	วสวิชัยทรายทอง	ร้อยเอ็ด
72	สุวรรณมงคลบพิตร จำกัด	ร้อยเอ็ด
73	หินฮาว อินด์สทรี จำกัด	ร้อยเอ็ด
74	ชาญยุทธ การศิลาเลย (1997) จำกัด	เลย
75	ทรัพย์ไพวัลย์ การศิลา จำกัด	เลย
76	นิลสุวรรณ สยามไมน์ จำกัด	เลย
77	บำรุงเทพการศิลา จำกัด	เลย
78	บุญยงค์กิจ(เลย)	เลย
79	พรรราชันย์ จำกัด	เลย
80	พรสวรรค์ เจพี การโยธา	เลย
81	พรหมมังกร จำกัด	เลย
82	เพชรเมืองเลย อสังหาริมทรัพย์ จำกัด	เลย
83	เพาเวอร์ ไมน์ อินทานิย์	เลย
84	ภูผาไท ไมนิ่ง จำกัด	เลย
85	ศิลาศุภกิจ จำกัด	เลย
86	สยาม ชิโน ไมนิ่ง อินด์สทรี จำกัด	เลย
87	สหศิลาเลย จำกัด	เลย
88	สุรัตน์การศิลา จำกัด	เลย
89	ภูเงินเอ็นจิเนียริง	ศรีสะเกษ
90	มาทวิอินเตอร์กรุ๊ป 2006 จำกัด	ศรีสะเกษ

ตารางที่ 1.1 รายชื่อผู้ประกอบการร้านค้าสินค้าก่อสร้างและหินประดับในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อนิติบุคคล	จังหวัด
91	ศรีสะเกษเหมืองแร่	ศรีสะเกษ
92	ศิลาน้ำเย็น จำกัด	ศรีสะเกษ
93	สมใจนึก อินเตอร์	สกลนคร
94	ซ่มทอง ไมนิ่ง จำกัด	สุรินทร์
95	ดวงใจ 1992	สุรินทร์
96	นอร์ทอีสเทิร์นไทยดีเวลลอปเม้นต์ จำกัด	สุรินทร์
97	รัตนบุรีทรายทอง	สุรินทร์
98	สุรินทร์รุ่งนคร จำกัด	สุรินทร์
99	สุรินทร์ศิลาทรัพย์ จำกัด	สุรินทร์
100	สุรินทร์เหมืองหิน จำกัด	สุรินทร์
101	สุรินทร์แอกกรีเกต จำกัด	สุรินทร์
102	อารีย์สันติก่อสร้าง	สุรินทร์
103	โนเบลไพร์ซ์ จำกัด	หนองคาย
104	บอร์เดอร์ไลน์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด	หนองคาย
105	โรงโม่หินไทยประเทือง คอนสตรัคชั่น จำกัด	หนองคาย
106	ศิลาหินทอง รุ่งเรือง จำกัด	หนองคาย
107	หนองคายตรีทิพย์	หนองคาย
108	หาดทองบวรธุรกิจ	หนองคาย
109	อมตะคำกรวดทราย(2558) จำกัด	หนองคาย
110	อิทธิศักดิ์ขนส่งหนองคาย	หนองคาย
111	ปี.เค.เอส. การเหมืองแร่ จำกัด	หนองบัวลำภู
112	ช.นิยม จำกัด	อุดรธานี
113	ช.ศิลาสุวรรณ (2552) จำกัด	อุดรธานี
114	โซคอนันต์ก่อสร้างอุดรธานี จำกัด	อุดรธานี
115	ณ.สหการพลังงาน จำกัด	อุดรธานี
116	น้ำโสมภูผาทอง	อุดรธานี
117	ศรีนาวัง จำกัด	อุดรธานี
118	ศิลาผาสองห้อง จำกัด	อุดรธานี
119	ส.อุดร	อุดรธานี
120	อรพินก่อสร้าง จำกัด	อุดรธานี

ตารางที่ 1.1 รายชื่อผู้ประกอบการร้านค้าสินค้าหัตถกรรมและหัตถศิลป์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อนิติบุคคล	จังหวัด
121	อุดร ไบโอบีแก๊ซ จำกัด	อุดรธานี
122	กิตติวิดีศิลาพาณิชย์ จำกัด	อุบลราชธานี
123	เจ็ดจรัส ไทย-กัมพูชา	อุบลราชธานี
124	เจ็ดจรัส ไทย-กัมพูชา(บางกอก) จำกัด	อุบลราชธานี
125	ทรายตั้งโชคดี	อุบลราชธานี
126	บ้านทองศิลาทรัพย์ จำกัด	อุบลราชธานี
127	ปีซีเอ็น(2013)	อุบลราชธานี
128	ไพร่เพ็ญ จำกัด	อุบลราชธานี
129	มรรคาสาธิต จำกัด	อุบลราชธานี
130	วังทรายทอง จำกัด	อุบลราชธานี
131	ศิลาสากล ศรีสะเกษ จำกัด	อุบลราชธานี
132	ศิลาสากล อุบลราชธานี จำกัด	อุบลราชธานี
133	สุวรรณภูมิไทย จำกัด	อุบลราชธานี
134	หินหนึ่ง จำกัด	อุบลราชธานี
135	อี อี เอส รีนิวเอเบิล จำกัด	อุบลราชธานี



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ กระบวนการการผุ่ร่อนของตัวอย่างหิน ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งและความคงทนต่อการผุ่ร่อนของหิน และการทดสอบที่สัมพันธ์กับความแข็งของหิน

2.1 กระบวนการการผุ่ร่อนของมวลหิน

กระบวนการการผุ่ร่อนของหินสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การผุ่ร่อนทางกายภาพหรือทางกลศาสตร์ (Physical or mechanical weathering) และการผุ่ร่อนทางเคมี (Chemical weathering) การผุ่ร่อนทางกลศาสตร์หรือทางกายภาพที่มีผลกระทบมาจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่แข็งตัวกลายเป็นน้ำแข็ง และการละลายของน้ำแข็งอย่างต่อเนื่อง เป็นสาเหตุให้เกิดรอยแตกและช่องว่างภายในหิน การกระทำซ้ำๆ กันของสภาวะเปียกและแห้งจะทำให้หินเกิดการแตกตัวออกเป็นชิ้นเล็กๆ อันเป็นผลมาจากแรงกระทำของน้ำ ซึ่งแรงกระทำทางกายภาพ (Physical forces) หมายรวมถึง แรงลม การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สภาวะอากาศร้อนสลับหนาว และการกัดกร่อน (Erosion) จากธารน้ำหรือแม่น้ำ ส่วนการผุ่ร่อนทางเคมีเกิดจากการเปลี่ยนแปลงหรือสลายตัวของแร่ประกอบหินที่มีสารประกอบบางชนิดเป็นตัวกระทำ เช่น กรดในอากาศ น้ำฝน และแม่น้ำ ทำให้กลายเป็นสารประกอบใหม่ (Abramson et al., 1997)

การเปลี่ยนแปลงมีผลกระทบจากกระบวนการ Oxidation hydrolysis และ Carbonation อัตราการผุ่ร่อนขึ้นกับความหนาแน่นของหินซึ่งถูกควบคุมโดยแร่องค์ประกอบเนื้อหิน ความพรุน และความแข็งของหิน ชนิดและอัตราการผุ่ร่อนจะแปรเปลี่ยนตามภูมิอากาศ ในสภาพภูมิอากาศเปียกชื้นการผุ่ร่อนทางเคมีมีผลมากกว่าการผุ่ร่อนทางกลศาสตร์ ซึ่งระดับของอัตราการผุ่ร่อนในภูมิอากาศเปียกชื้นขึ้นขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความชื้นเป็นสาเหตุให้เกิดการผุ่ร่อนที่เพิ่มขึ้น (Bell, 1992)

Yokato and Iwamatsu (1999) ได้ศึกษากระบวนการการผุ่ร่อนของหินตะกอนภูเขาไฟเนื้ออ่อน (Soft Pyroclastic Rocks) และสรุปว่าคุณสมบัติทางกายภาพขึ้นกับระดับการเชื่อมประสานกันของเนื้อหิน โดยทั่วไปการผุ่ร่อนของหินเนื้ออ่อนไม่ได้มีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางกลศาสตร์ แต่ยังรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีด้วย การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกลศาสตร์ของหินชนิดนี้ในระยะแรกจะมีการแตกสลายของหิน พื้นผิวมีการหลุดลอกส่วนประกอบทางเคมีที่เกิดจากการแตกตัวของตัวเชื่อมประสานและหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ได้แก่ เหล็กออกไซด์ (FeO) และซิลิกา (Silica) ที่มีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาล ส่งผลให้หินภูเขาไฟเนื้อแก้วเปลี่ยนเป็นแร่ดิน (Clay minerals) เช่น Allophone และ Halloysite การเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้เองที่เป็นตัวเร่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางกลศาสตร์ เมื่อความพรุนของหินเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งลดลงตามเวลา

Moon and Jayawardane (2004) ได้ศึกษาการผุ่ร่อนเชิงกลศาสตร์และเชิงเคมีของหินบะซอลต์ (Basalt) ในเหมืองแห่งหนึ่งของประเทศนิวซีแลนด์ ผลที่ได้สรุปว่าการผุ่ร่อนในระยะแรกคือหินเกิดการแตกเนื่องจากกระบวนการทางกายภาพ ตามด้วยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของแร่

ประกอบหิน ส่งผลให้ความแข็งของหินลดลง ธาตุองค์ประกอบของแร่ที่สำคัญและใช้ในการศึกษานี้คือ Mg, Ca และ Fe ซึ่งจะสามารถวัดเคมีธาตุองค์ประกอบเหล่านี้เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำแล้วจะเกิดการละลายหรือเปลี่ยนสภาพไป ถ้าหินที่มีรอยแตกมากหรือมีรอยแตกหนาแน่นก็จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูงตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งลดลงอย่างเห็นได้ชัด

Gupta and Ahmed (2007) ศึกษาผลกระทบของค่า pH ในน้ำด้วยการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนของหินต่างชนิด ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ระบุว่าหินที่มีองค์ประกอบเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแมกนีเซียมคาร์บอเนตได้รับผลกระทบจากสภาวะที่เป็นกรดอย่างมาก ในขณะที่หินที่มีองค์ประกอบเป็นควอตซ์ เฟลสปาร์ และมีสโควไวด์ไม่มีผลกระทบจากสภาวะที่เป็นกรดเลย

Aristizabal et al. (2005) ได้ศึกษาการผุกร่อนทางเคมีของหินตะกอนภูเขาไฟ หินแกรนิต และหินแปรของพื้นที่ความลาดเอียงมวหินเขตร้อนในประเทศโคลัมเบียด้วยการทดสอบ X-Ray Diffraction และ X-Ray Fluorescence ผลที่ได้ระบุว่าปริมาณแร่ Kaolinite และ Halloysite ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงระดับการผุกร่อนของหินที่เพิ่มขึ้น และมีผลทำให้ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และโพแทสเซียมออกไซด์ลดลง

กิตติเทพ เฟื่องขจร (2550) Fuenkajorn (2008) และ Sri-in and Fuenkajorn (2007) ได้ศึกษาการผุกร่อนของตัวอย่างหินในห้องปฏิบัติการ และนำผลมาใช้คาดคะเนเสถียรภาพความลาดชัน มวลหิน หินที่ใช้ทดสอบเป็นหินจากภาคสนามในประเทศไทยทั้งหมด 13 ชนิด ซึ่งกิจกรรมหลักประกอบด้วย การทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนตามมาตรฐานและแบบแห้ง โดยมีจำนวนวัฏจักรมากกว่าที่กำหนดในมาตรฐานสากล และการจำลองการผุกร่อนภายใต้วัฏจักรร้อนสลับเย็นเป็นจำนวน 140 วัฏจักร นอกจากนี้ยังมีการทดสอบเชิงกายภาพ (การตรวจวัดน้ำหนักที่สูญเสียไปในแต่ละวัฏจักร และการทดสอบค่าความคงทนต่อการผุกร่อน) และการทดสอบเชิงกลศาสตร์ (การทดสอบค่าดัชนีจุดกด ค่ามุมเสียดทานพื้นฐาน และค่าความเร็วคลื่น) การทดสอบเหล่านี้ได้นำมาใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงการผุกร่อนของตัวอย่างหิน รวมทั้งได้มีการเสนอแนวคิดในการสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์เพื่อที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างเป็นรูปธรรม

Rintrawilai (2010) ศึกษาหาผลกระทบจากการผุกร่อนของหินเนื้ออ่อนบางชนิดด้วยวิธีทดสอบดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนในสเกลใหญ่ และคาดคะเนความแข็งของหินในเชิงเวลา การทดสอบได้ดำเนินการกับตัวอย่างหินทราย 3 ชนิด ที่พบมากในภาคตะวันออกและตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ผลจากการทดสอบที่ได้บ่งชี้ว่าการทดสอบของหินที่มีขนาดใหญ่มีแนวโน้มการคาดคะเนการผุกร่อนของหินได้ดีกว่าหินที่มีขนาดเล็ก สาเหตุเนื่องมาจากมีพลังงานในการกระทบกันของหินที่มากขึ้น จากผลการทดสอบกับหินทรายทั้งหมดแสดงให้เห็นว่ามีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าเมื่อถูกทดสอบในหินขนาดใหญ่ โดยเปรียบเทียบกับทดสอบในหินขนาดเล็ก ซึ่งช่วยให้ความสัมพันธ์มีความถูกต้องแม่นยำขึ้น ตามสภาวะจริงที่เกิดขึ้นในภาคสนาม หินทรายทุกชนิดมีความอ่อนไหวต่อน้ำ หินทรายชุดโคกกรวดแสดงความอ่อนไหวต่อน้ำมากกว่าหินทรายอีกสองชนิด การทดสอบค่ากำลังกดในแกนเดียวจะลดลงต่างจากการทดสอบดัชนีการผุกร่อนที่ได้รับจากค่า ΔSDI ที่เพิ่มขึ้น ผลจากการทดสอบการจำลองการผุกร่อนใกล้เคียงกับการจำลองในสภาวะจริง โดยเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนที่หินได้ดูดซับในระหว่างการจำลองแบบเดียวกับการทดสอบในสภาวะจริง จากผลการคำนวณพบว่าหนึ่งวัฏจักรร้อน-เย็นที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเทียบเท่ากับ 18 วัน ภายใต้สภาวะจริง

ความสัมพันธ์นี้สามารถคาดคะเนความแข็งของหินและความคงทนของหินทรายหลังจากสัมผัสกับบรรยากาศ

Sri-in (2007) ศึกษาผลกระทบการผุกร่อนต่อกำลังรับแรงเฉือนของรอยแตกในหินเนื้ออ่อนบางชนิดด้วยวิธีการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน การทดสอบดัชนีจุดกด การทดสอบการเคลื่อนไหล และการวิเคราะห์แสง X-ray ด้วยการใช้ตัวอย่างหิน 13 ชนิด ที่พบมากในภาคเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนของหินกับค่าความแข็งและแรงรื้อประกอบ โดยได้เสนอแนวคิดเพื่ออธิบายคุณลักษณะการผุกร่อนของหิน ในการทดสอบดัชนีความคงทนภายใต้สภาวะร้อนและเย็นกระทำทั้งหมด 6 วัฏจักร ผลที่ได้ระบุว่าหินพืชมิกครวดเหลี่ยม หินทรายแป้งชุดพระวิหาร หินทรายสีขาวยุคภูกระดึง หินทรายชุดโคกกรวด และหินควอตซ์ไมกาซีสต์ ในกลุ่มของหินในสัลลูบริกจำแนกเป็นหินที่มีความคงทนต่ำถึงต่ำมาก เนื่องจากในเนื้อหินมีแร่ Kaolinite เป็นแร่รื้อประกอบ ส่วนหินดินดานกึ่งหินชนวนชุดน้ำตกจะมีความคงทนสูง ไม่อ่อนไหวต่อปริมาณน้ำแต่จะแตกได้ง่ายภายใต้วัฏจักรการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยรอบ ค่าดัชนีจุดกดของหินจะลดลงในขณะที่ผลต่างระหว่างค่าดัชนีความคงทนที่มากขึ้น มุมเสียดทานพื้นฐานของรอยแตกในหินที่จำลองด้วยการตัดด้วยเลื่อยจะมีค่าลดลง ในขณะที่วัฏจักรของสภาวะร้อน-เย็นที่จำลองในห้องปฏิบัติการมีค่าเพิ่มขึ้น

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) จะเห็นได้จากผลึกหรือเม็ดตะกอนที่มีรูปร่างเหลี่ยม จะเกิดการผุกร่อนในระดับสูง และทำให้ค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (Slake Durability Index Test) มีค่าต่ำ เช่นเดียวกับค่าความเค้นที่จะรวมตัวอยู่บริเวณขอบของเม็ดตะกอนในการทดสอบความต้านทานแรงกดในแกนเดียว (Uniaxial Compressive Strength) ซึ่งขึ้นกับระดับของพันธะระหว่างเม็ดตะกอน เช่น อนุภาคที่มีผิวขรุขระทำให้เกิดแรงต้าน ส่งผลให้ความต้านทานแรงกดสูง Fahy and

Guccions (1979), Ulusay and Aksoy (1994) และ Shakoor and Bonelli (1991) ได้รายงานผลที่ยืนยันถึงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกดในแกนเดียวและเปอร์เซ็นต์ของตะกอนเม็ดเหลี่ยมเม็ดแร่ และตัวเชื่อมประสานของตะกอนเม็ดเหลี่ยมที่ทำให้เกิดแรงต้านระหว่างเม็ดตะกอน แต่ให้ค่าการฝูกร่อนที่สูงกว่าหินที่มีเม็ดตะกอนกลมมน ขอบเขตและชนิดของรอยต่อระหว่างเม็ดตะกอนอาจจะมีผลกระทบต่อความแข็งของหินเช่นกัน (Ulusay and Aksoy 1994; Shakoor and Bonelli, 1991) งานวิจัยนี้ยังค้นพบความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างความหลากหลายของเม็ดตะกอนและความต้านทานแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างหินทรายอันเนื่องมาจากชนิดจุดสัมผัสของเม็ดตะกอนที่ดีทำให้มีความคงทนต่อการขูดขีด (hardness) และการฝูกร่อน

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 หินที่มีเม็ดควอตซ์เป็นองค์ประกอบจะมีค่าความคงทนต่อการฝูกร่อนสูง ซึ่งทำให้ความต้านทานของแร่ต่อการครูดถูทางกลศาสตร์ (Mechanical Abrasion) สูง หินดินดานมีแร่องค์ประกอบที่หลากหลาย เช่น แร่ดิน วัสดุอินทรีย์ และแร่อื่น ๆ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของหินทุกชนิด (Mitchell, 1993) ในทางวิศวกรรมดินจะมีขนาดเม็ดตะกอนเล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร ประกอบด้วยแร่ดินเช่น Talc, Mica, Chlorite และ Smectite โดยทั่วไปแล้วผิวของแร่ดินมีประจุลบ (Negative Electrical Charge) ซึ่งเป็นตัวปรับสมดุลด้วยการดูดซับของประจุบวกจากสารละลายต่างๆ (Mitchell, 1993) ความแตกต่างกันของแร่ดินคือ ความสามารถในการบวมตัว ซึ่งสามารถจัดลำดับการบวมตัวของแร่จากมากไปน้อยได้คือ มอนท์มอริโอไนท์ (Montmorillonite) อีไลท์ (Illite) ฮาลอยไซต์ (Halloysite) และคาโอลิไนท์ (Kaolinite) ชนิดของอะตอมเป็นตัวบ่งบอกลักษณะโครงสร้างในการเชื่อมประสานซึ่งมีผลต่อระดับการบวมตัวด้วย จากกรณีตัวอย่างการบวมตัวของมอนท์มอริโอไนท์ที่ลดลงตามปริมาณอะตอมที่รวมตัวกับโซเดียม (Sodium) จากมากไปน้อยคือ ลิเทียม (Lithium, Li) โพแทสเซียม (Potassium, K) แคลเซียม (Calcium, Ca) แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) และไฮโดรเจน (Hydrogen, H) มีความเป็นไปได้ที่การบวมตัวส่งผลให้ความคงทนต่อการฝูกร่อนลดลง แต่มีผลน้อยมากต่อความแข็งหรือความแข็งต่อการขูดขีด

2.2.4 พันธะเชื่อมประสานระหว่างเม็ดตะกอน (Bonding of Grain Contact)

ในเชิงแร่วิทยา พันธะและวัสดุเชื่อมประสานเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการควบคุมความแข็ง ความคงทนต่อการขูดขีด และความคงทนต่อการฝูกร่อน โดย Vutukuri et al. (1974) กล่าวว่าแร่ควอตซ์และแร่เหล็กมีความแข็งสูง ส่วนดินเป็นวัสดุที่อ่อน โดย Bell (1978) ได้แสดงการเพิ่มขึ้นของความแข็งที่เป็นสัดส่วนกับตัวเชื่อมประสานที่ปริมาณคาร์บอนสูง 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 Dobernier and DeFreitas (1986) ได้สรุปว่าความหนาแน่นในการอัดตัวที่ต่ำเป็นคุณลักษณะทั่วไปของหินทรายเนื้ออ่อน แต่ Shakoor and Bonelli (1991) ไม่พบความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างความหนาแน่นในการอัดตัวและความแข็ง แต่สามารถคาดการณ์ได้ว่าเมื่อความต้านทานแรงกดในแกนเดียว ความคงทนต่อการขูดขีด และค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนมีค่าสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นในการอัดตัวจะมีค่าสูงตามไปด้วย

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

2.2.7 ปริมาณน้ำ (Water Contents)

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำในตัวอย่างหินจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดลดลง เหตุผลประการแรกคือน้ำสามารถรองรับรอยต่อกับพื้นผิวของแร่และเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของพื้นผิว (Horn and Deere, 1962) ประการที่สองคือความดันน้ำในโพรง (Pore Water Pressure) เป็นสาเหตุหนึ่งของความไม่เสถียรภาพของรอยแตกในหิน น้ำเป็นตัวลดค่าความต้านทานแรงเฉือนหรือเปลี่ยนคุณลักษณะแร่ดินที่เป็นส่วนประกอบของหิน (Touloukian et al., 1981) Kjaernsli and Sande (1966) และ Moon (1993) ได้แสดงให้เห็นว่าน้ำเป็นตัวการที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงกดลดลง อย่างไรก็ตามหินที่ประกอบด้วยแร่ดินที่ไม่มีพฤติกรรมบวมตัวเช่นแร่คาโอลิไนท์ 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) คุณสมบัติของของเหลว องค์ประกอบของการแลกเปลี่ยนประจุ อัตราส่วนโพรง (Void Ratio) และระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำในมวลหิน (Domenico and Schwartz, 1990) หินที่มีความแตกต่างของแร่ประกอบหินเช่น หินดิน (Clay Rocks) จะมีค่าความพรุนสูงและค่าความซึมผ่าน (Permeability) อยู่ระหว่าง 10^{-8} ถึง 10^{-10} เมตร/วินาที และจะขึ้นกับแร่ประกอบหินคือแร่ดินที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กหรือเป็นเส้นใย (Granular or Fibrous Shape) เช่น คาโอลิไนท์ และ อีไลท์ จะให้ค่าความซึมผ่านได้ดีกว่าลักษณะรูปร่างเป็นชิ้นบางๆ (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) ความพรุนมีผลกระทบต่อเชิงกลศาสตร์ Price (1960) และ Dube and Singh (1972) กล่าวว่า หินตะกอนมีคุณสมบัติความแข็งแรงลดลงเมื่อมีความพรุนมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายทางกายภาพได้ว่าความพรุนที่สูงจะทำให้เกิดเครือข่ายการเชื่อมของรอยแตกขนาดเล็ก

Moon (1993) ได้สรุปว่าโครงสร้างขนาดเล็กบนเนื้อหินดินดานเป็นตัวควบคุมที่สำคัญเชิงพฤติกรรมทางกลศาสตร์ธรณี ความแข็งแรงและความคงทนต่อการผุกร่อนถูกควบคุมโดยความหนาแน่นรวมทั้งระดับการเชื่อมกันของเม็ดตะกอนและขนาดเฉลี่ยของผลึก

2.3 การทดสอบที่มีสัมพันธ์ต่อความแข็งแรงของหิน

การทดสอบในห้องปฏิบัติการที่สัมพันธ์ถึงการรับแรงกดของหินแข็ง รวมถึงการทดสอบการรับแรงกดในแกนเดียว การทดสอบความคงทน การวัดน้ำหนักที่หายไป การวัดความหนาแน่นและการดูดซับน้ำ การทดสอบความคงทนในสเกลใหญ่เพื่อที่จะทราบค่าความคงทนต่อการผุกร่อนของตัวอย่างหินตามมาตรฐาน (ASTM D4644) การทดสอบสามารถทำได้ด้วยการนำตัวอย่างหินขนาดเท่าๆ กันจำนวน 10 ก้อน ก้อนละประมาณ 50 กรัม ใส่ในตะแกรงเหล็กที่ระบุไว้ที่จุ่มอยู่ในถังน้ำที่มีระดับน้ำสูงเกือบถึงเส้นผ่าศูนย์กลางของตะแกรงเหล็กแล้วทำการหมุนตามแนวแกนด้วยอัตราเร็ว 20 รอบต่อนาที จากนั้นจะนำตัวอย่างไปอบแห้งและทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนที่จะทำการขูดหินในตะแกรงเหล็ก ทำซ้ำสองรอบ (2 วัฏจักร) เพื่อนำน้ำหนักที่หายไปในรอบที่สองมาคำนวณค่าดัชนีคงทนต่อการผุกร่อน (Slake durability index)

Koncagul and Santi (1999) ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดในแกนเดียว ความคงทนต่อการผุกร่อน และความแข็งแรงแบบชอร์โดยอาศัยคุณสมบัติทางแร่และคุณสมบัติของตัวอย่างหินดินดาน เพื่อที่จะอธิบายความแตกต่างระหว่างผลที่วัดได้กับผลที่คาดการณ์เอาไว้ ผลการทดสอบค่าดัชนีคงทนต่อการผุกร่อนหลังจากทำซ้ำ 2 วัฏจักร มีค่าอยู่ระหว่าง 30-97 เปอร์เซ็นต์ ความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$UCS = 658(l_d2) + 9081 : r = 0.63 \quad (1)$$

เมื่อ UCS คือ ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว (kPa)
 l_d2 คือ ค่าดัชนีคงทนต่อการผุกร่อนในวัฏจักรที่ 2 (%)

Gokceoglu et al. (2000) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความคงทนของหินโดยเน้นถึงผลกระทบของจำนวนครั้งของวัฏจักรการอบแห้งและเปียกของตัวอย่างหินเนื้ออ่อนทั้ง 141 ตัวอย่าง ประกอบด้วย หินซิสต์และหินทราย โดยใช้การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนและการทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว ผลจากการศึกษาทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดในแกนเดียวกับวัฏจักรที่ 4 ของดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนได้จากสมการ

$$UCS = 2.54l_d4 - 202 : r = 0.76 \quad (2)$$

เมื่อ UCS คือ ค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว (MPa)
 l_d4 คือ วัฏจักรที่ 4 ของดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (%)

การทดสอบดัชนีจุดกด (Point load strength index test) เป็นวิธีทางอ้อมเพื่อหาค่าความต้านทานแรงกดและแรงดึงของตัวอย่างหิน ASTM (D5731) มีทั้งการทดสอบในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการเพื่อจำแนกความแข็งของหิน การทดสอบนี้สามารถเป็นตัวบ่งบอกหรือคาดคะเนค่าความต้านทานแรงกดในแกนเดียวของตัวอย่างหินได้ Broch and Franklin (1975) กล่าวว่า ค่าความต้านทานแรงกดมีค่าประมาณ 24 เท่า ของค่าดัชนีจุดกด นอกจากนี้ Tsiambaos and Sabatakakis (2004) ได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่สัมพันธ์กับกำลังรับแรงกดในแกนเดียวและกำลังรับแรงกดแบบจุดของหินเนื้ออ่อนและหินเนื้อแข็ง ตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบส่วนใหญ่เป็นหินตะกอนคาร์บอนเนต เช่น หินปูน หินปูนเนื้อมาร์ล หินทราย และหินมาร์ล หินเหล่านี้เป็นหินที่สามารถพบได้ทั่วไปในประเทศกรีซ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีผลระหว่างจุดกดกับกำลังรับแรงกดในแกนเดียว สามารถแบ่งตัวแปรค่าคงที่ออกเป็น 3 ช่วง ตามค่าดัชนีจุดกดคือ 13 (สำหรับหินเนื้ออ่อนที่มีค่า $l_s(50) < 2$ MPa) 20 (สำหรับหินเนื้อแข็งปานกลางที่มีค่า $l_s(50) < 5$ MPa) และ 28 (สำหรับหินเนื้อแข็งที่มีค่า $l_s(50) > 5$ MPa)

การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (Specific gravity and water absorption tests) ใช้มาตรฐาน ASTM C127 ซึ่ง Tugrul (2004) ได้ศึกษาผลกระทบจากการผุกร่อนต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลศาสตร์ของหิน 4 ชนิด ในประเทศตุรกี คือหินทราย หินปูน หินบะซอลต์ และหินแกรนิตไดโอไรท์ โดยนำตัวอย่างหินที่มีระดับการผุกร่อนที่แตกต่างกันตั้งแต่ระดับ 1 ถึง 5 ที่อ้างอิงจาก ISRM (ตารางที่ 2.1) และได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียว ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำ ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและค่าความพรุน ผลที่ได้แสดงถึงหน่วยน้ำหนักแห้งและค่ากำลังรับแรงกดในแกนเดียวของหินลดลง แต่ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความพรุนมีค่าสูงขึ้นเมื่อหินมีระดับการผุกร่อนสูงขึ้น (ตารางที่ 2.2) ค่าการดูดซึมน้ำเป็นคุณสมบัติที่ใช้ประเมินค่าความแตกต่างของค่าความคงทนต่อการผุกร่อนได้ (Shakoor and Bonelli, 1991) นอกจากนี้ Begonha and Braga (2002) ยังได้ศึกษาคุณลักษณะของระดับการผุกร่อนของหินแกรนิตตามระดับความลึกต่างๆ บริเวณ

ทางเหนือของประเทศโปรตุเกสที่มีผลต่อคุณสมบัติทางธรณีเทคนิค ศีลาวิทยา คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมี เช่น ค่าความพรุน ความหนาแน่นรวมแห้ง (Dry bulk density) ความเร็วคลื่น (Ultrasonic velocity) กำลังรับแรงกดในแกนเดียว และค่าความยืดหยุ่น (Modulus of elastic) ตัวอย่างหินแกรนิตที่ใช้ทดสอบมี 2 ลักษณะ คือ หินที่เป็นก้อนและหินแกรนิตผุคังสภาพ (Saprolite) การทดสอบสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบหาคุณสมบัติทางเคมีประกอบด้วย X-Ray diffraction และ Scanning electron microscopy และการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วยการวิเคราะห์การกระจายตัวของเม็ดแร่ การทดสอบ Atterberg limits การทดสอบค่าความเร็วในการส่งผ่านคลื่น การทดสอบกำลังรับแรงกดในแกนเดียว การทดสอบหาความหนาแน่นและค่าความพรุน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ที่สัมพันธ์ต่อระดับการผุกร่อน (Tugrul, 2004)

Grade	Term	Typical characteristics
I	Unweathered	Unchanged from original state. No evident microfracturing.
II	Slightly weathered	Slight discolouration on major discontinuity surfaces.
III	Moderately weathered	Slight discolouration, slight weakening. Weathering penetrates through most discontinuities.
IV	Highly weathered	Considerably weakened, penetrative discolouration. Large pieces cannot be broken by hand.
V	Completely weathered	Significantly weaker than the fresh rock. Easily breakable with hand.
VI	Residual soil	Original texture is present. All microfractures tend to be open. Losses most of strength of fresh rock
		Soil derived by in situ weathering but retaining none of original texture or fabric.

Adapted from Dearman et al. (1978) and Anonymous (1995).

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ที่สัมพันธ์ต่อระดับการผุกร่อน (Tugrul, 2004)

Rock type	Weathering grade	Dry unit weight γ_s (kN/m ³)	Water absorption w_a (%)	Total porosity n_t (%)	Uniaxial comp. strength σ_c (MPa)
Sandstone	I	24.40–26.10	1.12–2.89	1.51–7.92	42–63
	II	23.60–24.70	2.78–3.38	6.44–10.61	26–45
	III	23.00–24.50	3.21–5.50	6.84–12.55	11–28
	IV	22.30–23.80	5.46–7.80	9.16–14.89	3.5–12
	V	<22.30	7.8<	13.57<	ND
Limestone	I	26.15–26.40	0.26–0.60	0.75–1.88	93–126
	II	26.04–26.42	0.13–0.65	1.38–2.89	77–110
	III	25.91–26.26	0.64–0.93	2.24–3.36	69–95
	IV	25.46–25.65	0.93–1.48	3.75–4.37	56–85
Basalt	I	25.70–28.40	1.50>	0.39–3.49	86–136
	II	24.50–27.90	1.50–3.50	0.62–7.75	60–108
	III	23.60–26.50	3.50–5.50	1.47–16.90	27–53
	IV	21.00–24.50	5.50–6.50	4.26–18.99	4–24
	V	18.50–23.90	6.50<	18.60–48.06	ND
Granodiorite	I	25.10–26.10	1.12–1.36	5.36–5.78	102–151
	II	25.00–25.60	1.33–1.74	5.60–7.36	67–130
	III	23.80–25.20	1.53–2.22	6.20–11.56	15–79
	IV	22.80–24.20	2.21–2.62	6.30–14.68	11–21
	V	20.10–23.70	3.28–4.92	12.14–16.57	1.2–3.5

บทที่ 3

การคัดเลือกตัวอย่างหิน

3.1 บทนำ

การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความคงทนต่อการผุกร่อนของตัวอย่างหินจำนวน 13 ชนิด ซึ่งแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ หินบะซอลต์ หินคาร์บอนเนต หินทราย และหินแกรนิต หินเหล่านี้สามารถพบได้ทั่วไปในภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคตะวันตกของประเทศไทย ส่วนใหญ่นำมาใช้ในงานก่อสร้างทางวิศวกรรม เช่น เขื่อน ฐานรากของสะพาน ทางรถไฟ แหล่งกักเก็บน้ำ และอุโมงค์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ต้องมีเสถียรภาพที่มั่นคงในระยะยาว ในการทดสอบนี้จึงควรคัดเลือกตัวอย่างหินที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากความผันแปรขององค์ประกอบภายในของตัวอย่างหิน รายงานบทนี้ได้อธิบายองค์ประกอบแร่ ตำแหน่งที่พบ และคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบ

3.2 ตำแหน่งของตัวอย่างหินที่เลือกมาทดสอบ

ตัวอย่างหินที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้เน้นไปที่หินที่มีความอ่อนไหวต่อการผุกร่อน ซึ่งการผุกร่อนของหินเหล่านี้มักมีผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมธรณี เช่น อ่างเก็บน้ำ อุโมงค์ ฐานราก เขื่อน และความลาดชันของมวลหิน เภณท์ที่ใช้คัดเลือกตัวอย่างหินได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งตัวอย่างหิน และแหล่งที่มาที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และแนวคิดของงานวิจัยนี้ เภณท์ดังกล่าวประกอบด้วย

- 1) ตัวอย่างหินจะต้องมีความอ่อนไหวต่อการผุกร่อน ชนิดของหินดังกล่าวอาจประกอบด้วย กลุ่มหินดินดาน หินทรายแป้ง และหินภูเขาไฟ อย่างไรก็ตามตัวอย่างหินไม่ควรอ่อนเกินไปจนไม่สามารถจัดเตรียมได้
- 2) ตัวอย่างหินจากแต่ละแหล่งหรือแต่ละพื้นที่จัดเก็บจะต้องมีความสม่ำเสมอในเชิงกายภาพและกลศาสตร์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งจะต้องมีความแปรปรวนภายในตัวอย่างหินน้อย
- 3) พื้นที่หรือแหล่งที่มาของตัวอย่างหินและชนิดของหินจะต้องมีมากพอเพื่อให้สามารถจัดเก็บเพิ่มเติมได้ในกรณีที่ต้องการมีการทดสอบใหม่เพื่อยืนยันผลการทดสอบ
- 4) ควรเป็นหินที่พบกระจายอยู่ทั่วไป และเป็นหินที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างเชิงวิศวกรรมธรณี เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 3.1 ถึง 3.4 แสดงชื่อ ตำแหน่ง หน่วยหิน ยุค และอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบ แผนที่แสดงตำแหน่งที่พบตัวอย่างหินแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยหิน 4 กลุ่ม จำนวน 13 ชนิด ประกอบด้วย

- กลุ่มหินบะซอลต์ ประกอบด้วย Aphanitic basalt (AB), ferrous basalt (FE) และ vesicular basalt (VB) นำมาจากเหมืองศิลาชัย อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ เป็นหินบะซอลต์เนื้อแน่นยุคควอเทอร์นารี
- กลุ่มหินคาร์บอนเนต ประกอบด้วยหินปูน 2 แบบ (SB1 และ SB2) นำมาจากหลุมเจาะของบริษัทสยามโทเนะ จำกัด จังหวัดลพบุรี เป็นหินยุคเพอร์เมียน และ Khao Khad

marble (MB) และ Khao Khad travertine (T) จากบริษัทหินอ่อน จำกัด จังหวัดสระบุรี เป็นหินยุคเพอร์เมียน

- กลุ่มหินทราย ประกอบด้วย Calcareous lithic sandstone (GST), white quartz sandstone (WST), arkosic feldspathic sandstone (RST) และ quartz sandstone (YST) นำมาจากบริษัท ซับเวย์คอนกรีต จำกัด จังหวัดนครราชสีมา เป็นหินยุคครีเทเชียส
- กลุ่มหินแกรนิต ประกอบด้วย White granite (GGR) และ pink granite (RGR) นำมาจากจังหวัดตาก เป็นหินยุคคาร์บอนิเฟอรัส

คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของหินแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 3.5

3.3 การศึกษาทางแร่วิทยา

การศึกษาองค์ประกอบแร่ของตัวอย่างหินด้วยวิธีสไลวารรณนา (petrographic thin section) (รูปที่ 3.2 ถึง 3.5) ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างหิน และอธิบายลักษณะของการสึกกร่อนของหิน ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.6 ถึง 3.9



ตารางที่ 3.1 ชื่อ ตำแหน่ง หน่วยหิน ยุค และอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลตัวอย่างกลุ่มหินบะซอลต์

Rock Names	Code	Locations	Rock Unit	Period	Reference
Aphanitic basalt	AB	Sila Chai mine Buriram province	Buriram Formation	Quaternary	Charusiri et al. (2004)
Ferrous basalt	FB	Sila Chai mine Buriram province	Buriram Formation	Quaternary	Charusiri et al. (2004)
Vesicular basalt	VB	Sila Chai mine Buriram province	Buriram Formation	Quaternary	Charusiri et al. (2004)

ตารางที่ 3.2 ชื่อ ตำแหน่ง หน่วยหิน ยุค และอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลตัวอย่างกลุ่มหินคาร์บอนेट

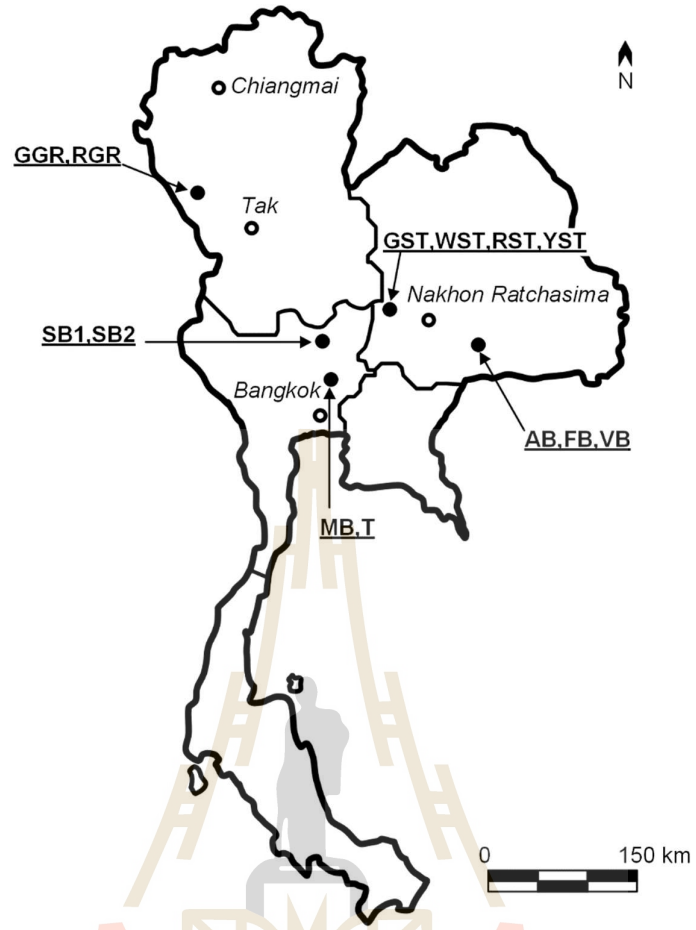
Rock Names	Code	Locations	Rock Unit	Period	Reference
Limestone1	SB1	Lopburi province	Saraburi Group	Permian	Warren et al. (2014)
Limestone2	SB2	Lopburi province	Saraburi Group	Permian	Chutakositkanon et al. (2000)
Khao Khad marble	MB	Saraburi province	Saraburi Group	Permian	Dew et al. (2018)
Khao Khad Travertine	T	Saraburi province	Saraburi Group	Permian	Thambunya et al. (2007)

ตารางที่ 3.3 ชื่อ ตำแหน่ง หน่วยหิน ยุค และอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลตัวอย่างกลุ่มหินทราย

Rock Names	Code	Locations	Rock Unit	Period	Reference
Calcareous Lithic sandstone	GST	Nakhon Rachasima province	Phu Kradung Formation	Jurassic	Racey et al. (1996)
Quartz sandstone	YST	Nakhon Rachasima province	Phu Phan Formation	Cretaceous-Jurassic	Racey et al. (1996)
Arkosic Feldspathic sandstone	RST	Nakhon Rachasima province	Sao Khua Formation	Cretaceous	Racey et al. (1996)
White Quartz sandstone	WST	Nakhon Rachasima province	Phra Wihan Formation	Cretaceous	Racey et al. (1996)

ตารางที่ 3.4 ชื่อ ตำแหน่ง หน่วยหิน ยุค และอ้างอิงแหล่งที่มาของข้อมูลตัวอย่างกลุ่มหินแกรนิต

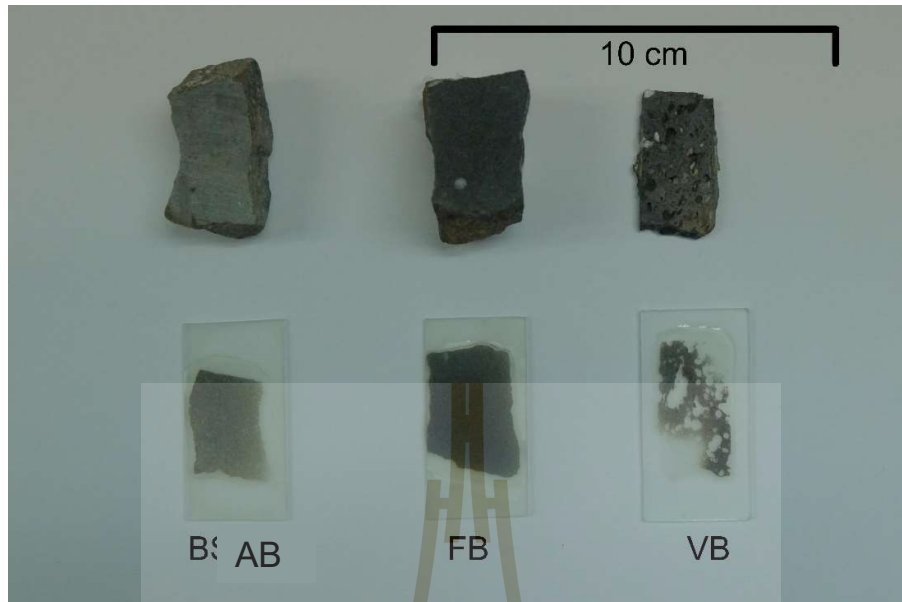
Rock Names	Code	Locations	Rock Unit	Period	Reference
White granite	GGR	Amphur Ban Tak, Tak Province	Tak Batholith	Carboniferous-Cretaceous	Mahawat et al. (1990)
Pink granite	RGR	Amphur Ban Tak, Tak Province	Tak Batholith	Carboniferous-Cretaceous	Mahawat et al. (1990)



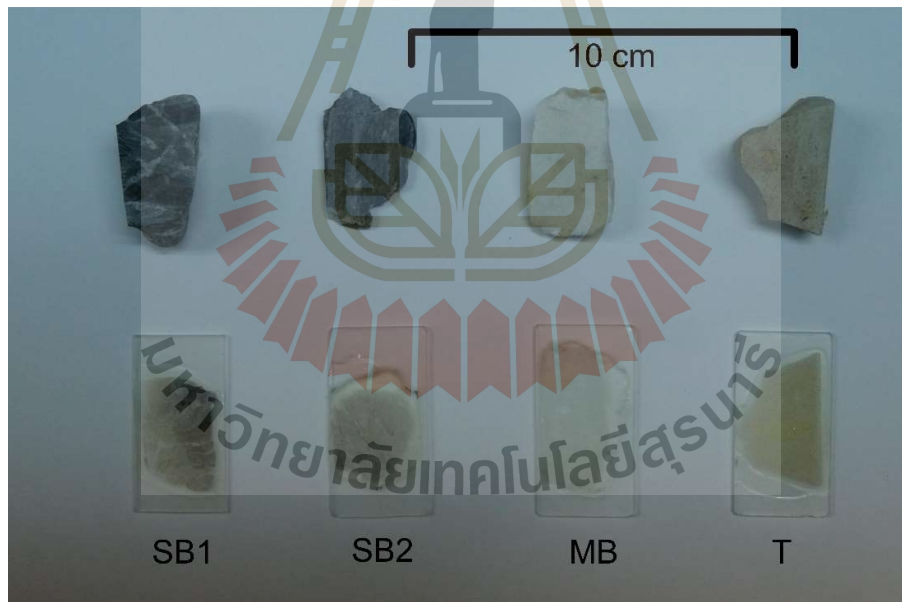
รูปที่ 3.1 ตำแหน่งของตัวอย่างหินที่เลือกมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลศาสตร์ของตัวอย่างหิน

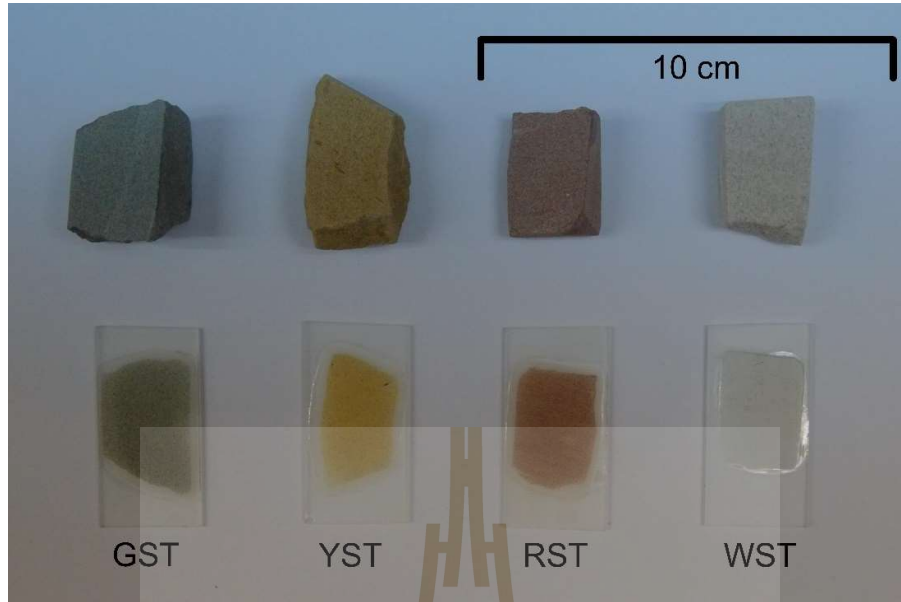
Groups	Code	Density (g/cm ³)	Color	σ_c (MPa)	σ_B (MPa)	E (GPa)	Sources
Basalt	AB	2.79	very dark grey to black	188.1± 26.3	14.4±0.8	33.2±3.4	Kemthong and Fuenkajorn (2005)
	FB	2.40		170.2±68.8	13.7±1.7	-	This study
	VB	2.71		43.7±12.2	9.5±2.9	-	This study
Carbonate	SB 1	2.73	dark gray	78.7±14.6	13.19±1.7	21.3±4.4	Promma and Chitnarin (2015)
	SB 2	2.70	light gray	74.4±12.6	10.0±0.2	28.7±2.4	Fuenkajorn and Klanphumeesri (2011)
	T	2.58	yellowish brown	41.7	7.9±0.7	8.1±0.1	Promma (2014), Khamrat et al. (2016)
	MB	2.73	white	50.5±1.6	8.0±0.3	13.1±5.7	Fuenkajorn and Klanphumeesri (2011)
Sandstone	GST	2.55	grayish green	84.1±12.7	9.7	10.1±1.3	Walsri et al. (2012)
	YST	2.43	brownish yellow	86.3±11.1	10.7±0.7	11.1±0.9	Fuenkajorn and Klanphumeesri (2011)
	RST	2.37	red	67.5±4.6	9.4±1.8	11.5±0.5	Fuenkajorn (2005)
	WST	2.36	brownish white	66.8±13.9	6.7	11.2±3.3	Phueakphum et al. (2013)
Granite	RGR	2.62	pink	138.1±18.9	15.0±3.6	34.5±4.3	Kemthong and Fuenkajorn (2005)
	GGR	2.62	white with scattered	119.3±18.3	11.3±1.5	32.4±4.6	Kemthong and Fuenkajorn (2005)



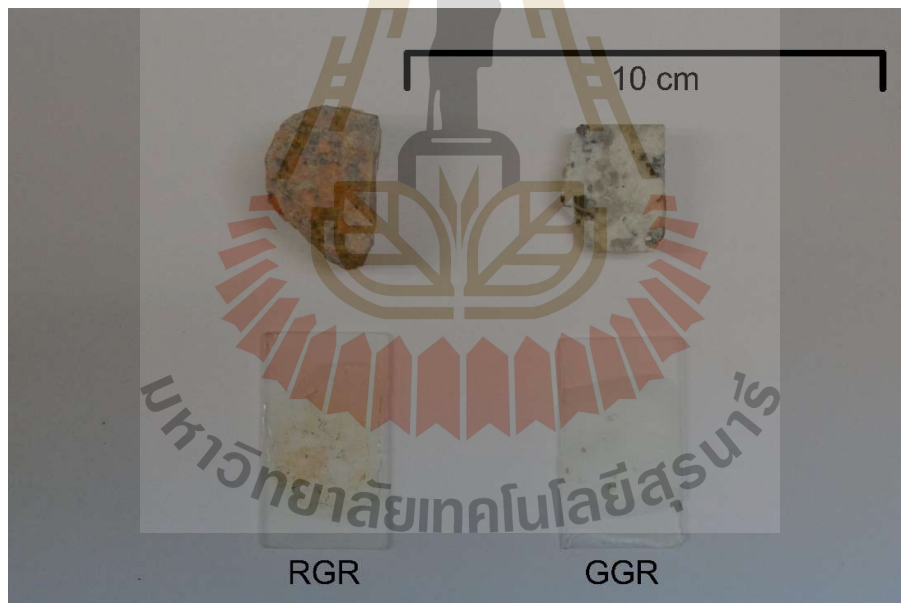
รูปที่ 3.2 สไลด์แผ่นบางเพื่อศึกษาองค์ประกอบหินด้วยวิธีสีลาวรรณนาของกลุ่มหินบะซอลต์



รูปที่ 3.3 สไลด์แผ่นบางเพื่อศึกษาองค์ประกอบหินด้วยวิธีสีลาวรรณนาของกลุ่มหินคาร์บอนเนต



รูปที่ 3.4 สไลด์แผ่นบางเพื่อศึกษาองค์ประกอบหินด้วยวิธีสีลาวรรณนาของกลุ่มหินทราย



รูปที่ 3.5 สไลด์แผ่นบางเพื่อศึกษาองค์ประกอบหินด้วยวิธีสีลาวรรณนาของกลุ่มหินแกรนิต

ตารางที่ 3.6 องค์ประกอบแร่ของกลุ่มหินบะซอลต์

Rock Types	Density (g/cc)	Pyroxene (%)	Plagioclase (%)	Other (%)	Grain size (mm)	Color
Aphanitic basalt	2.79	50.0	50.0	-	0.5-2.0	black
Ferrous basalt	2.71	66.0	34.0	-	0.5-1.5	black
Vesicular basalt	2.40	43.0	48.0	9.0	0.3-1.0	black

ตารางที่ 3.7 องค์ประกอบแร่ของกลุ่มหินคาร์บอนเนต

Rock Types	Density (g/cc)	Calcite (%)	Dolomite (%)	Quartz (%)	Other (%)	Grain size (mm)	Color
Limestone 1	2.73	98.4	0.3	0.3	1.0	0.1-0.5	dark gray
Limestone 2	2.70	95.1	2.2	1.3	1.5	1.0-2.0	light gray
Khao Khad marble	2.73	100.0	-	-	-	0.5-2.0	white
Khao Khad travertine	2.58	98.7	0.1	0.2	0.9	0.3-1.0	yellow brown

ตารางที่ 3.8 องค์ประกอบแร่ของกลุ่มหินทราย

Rock Types	Density (g/cc)	Quartz (%)	Feldspar (%)	Albite (%)	Kaolinite (%)	Mica (%)	Other (%)	Cementing	Grain size (mm)	Color
Calcareous lithic sandstone	2.55	48.8	-	46.1	5.1	-	-	calcium carbonate	<1.0	grayish green
Quartz sandstone	2.43	72.0	20.0	-	-	3.0	5.0	silica	0.1-0.2	brownish yell
Arkosic feldspathic sandstone	2.37	57.0	2.9	39.5	-	0.6	-	hematite	0.1-0.2	red
White quartz sandstone	2.36	75.0	15.0	-	-	7.0	3.0	hematite	0.1-0.4	brownish white

ตารางที่ 3.9 องค์ประกอบแร่ของกลุ่มหินแกรนิต

Rock Types	Density (g/cc)	Quartz (%)	Plagioclase (%)	Orthoclase (%)	Amphibole (%)	Other (%)	Grain size (mm)	Color
Pink granite	2.62	10.0	10.0	75.0	5.0	-	1.0-5.0	pink
White granite	2.62	30.0	40.0	5.0	-	5.0	2.0-5.0	white with scattered

บทที่ 4

การทดสอบดัชนีความคงทนการกร่อนของตัวอย่างหิน

4.1 บทนำ

การทดสอบดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (ASTM D4644) มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบศักยภาพของตัวอย่างหินที่สามารถทนทานต่อการขัดถู การผืนแปรของอุณหภูมิ และวัฏจักรเปียก-แห้ง ด้วยเครื่องจำลองการผุกร่อนของหิน เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน (slake durability index test) ภายใต้สภาวะเปียก สภาวะแห้ง และสภาวะความเป็นกรด มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความคงทนต่อการสึกกร่อนของหินในระยะยาว และประเมินผลกระทบของความชื้นและความเป็นกรดต่อการผุสลายของหิน และการทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption testing) ซึ่งจะดำเนินการภายหลังการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนทุก 20 วัฏจักร

4.2 การทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน

การทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนของหินได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D4644 ทุกขั้นตอน เว้นแต่ในการทดสอบนี้ได้ทดสอบเป็นจำนวน 100 วัฏจักร แทนการทดสอบแบบ 2 วัฏจักร โดยทดสอบภายใต้สภาวะเปียก สภาวะแห้งซึ่งจะไม่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำต่อค่าความคงทนต่อการผุกร่อน และสภาวะความเป็นกรดเพื่อศึกษาผลกระทบของฝนกรดต่ออัตราการผุกร่อนของหิน แต่ละชุดการทดสอบมีวิธีการดังนี้

- 1) นำตัวอย่างหินขนาดเท่ากันจำนวน 10 ก้อนๆ ละประมาณ 40-60 กรัม (น้ำหนักรวมเท่ากับ 450-550 กรัม) (ตารางที่ 4.1) ใส่ในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 2) นำตัวอย่างหินที่อบได้จากเตาอบมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.01 กรัม ทำการจดบันทึกค่า
- 3) นำตัวอย่างหินใส่เครื่องจำลองการผุกร่อน (รูปที่ 4.1) ซึ่งวงล้อที่บรรจุหินต้องจมอยู่ในน้ำประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ของระดับความสูงวงล้อ
- 4) หมุนวงล้อที่มีตัวอย่างหิน 200 รอบ ในเวลา 10 นาที
- 5) นำตัวอย่างหินออกจากเครื่องทดสอบมาชั่งน้ำหนัก
- 6) นำเข้าเตาอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

จากขั้นตอนที่กล่าวข้างต้นถือเป็นการทดสอบ 1 รอบวัฏจักร ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 100 รอบวัฏจักร (100 วัน) ในแต่ละตัวอย่างหิน ซึ่งการทดสอบในสภาวะแห้งจะไม่มีน้ำในการทดสอบเหมือนกับการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนในขั้นตอนที่ 3 ส่วนการทดสอบภายใต้สภาวะความเป็นกรด จะใช้สารละลายกรดที่มีค่า pH เท่ากับ 5.6 เพื่อจำลองสภาวะฝนกรดที่เกิดขึ้นในบริเวณภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่ตรวจวัดโดย EANET (Lee, 2016) แทนน้ำบริสุทธิ์ในขั้นตอนที่ 3 ทั้งนี้เพื่อจำลองลักษณะความเป็นฝนกรดในประเทศไทย

ค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I_{dn} = [(W_n)/(W_i)] \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ I_{dn} คือค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนรอบที่ n W_n และ W_i คือน้ำหนักของตัวอย่างหินที่ผ่านการทดสอบในวัฏจักรที่ n และน้ำหนักของตัวอย่างหินในรอบแรก ตามลำดับ n คือจำนวนรอบที่ทำการทดสอบ

รูปที่ 4.1 ถึง 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนกับวัฏจักรทดสอบภายใต้สภาวะเปียก สภาวะแห้ง และสภาวะความเป็นกรดของหินแต่ละกลุ่ม ผลการทดสอบระบุว่าค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนจะลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการทดสอบ และพบว่าการทดสอบเพียงสองรอบตามมาตรฐาน ASTM อาจทำให้ไม่สามารถสังเกตลักษณะการผุกร่อนของหินแข็งบางชนิดได้ จากการทดสอบเป็นจำนวน 100 รอบ ทำให้สามารถจำแนกลักษณะความคงทนต่อการผุกร่อนของหินได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยกลุ่มหินแกรนิตมีแนวโน้มที่จะทนทานต่อการผุกร่อนภายใต้ทุกสภาวะมากที่สุด ส่วนกลุ่มหินบะซอลต์และกลุ่มหินแกรนิตจะสามารถทนทานต่อสภาวะเปียกและสภาวะความเป็นกรดได้ดี ในขณะที่กลุ่มหินคาร์บอนเนตและกลุ่มหินทรายมีความอ่อนไหวต่อสภาวะเปียกและสภาวะความเป็นกรดอย่างมาก

การผุกร่อนของกลุ่มหินบะซอลต์มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันทั้งในสภาวะเปียก สภาวะแห้ง และสภาวะความเป็นกรด (รูปที่ 4.2) โดยหิน vesicular basalt (VB) ซึ่งมีความแข็งต่ำที่สุดในกลุ่มจะมีการผุกร่อนอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับ aphanitic basalt (AB) และ ferrous oxide basalt (FB) โดยพบว่าหิน aphanitic basalt (AB), ferrous oxide basalt (FB) และ vesicular basalt (VB) มีค่า I_d ภายใต้สภาวะแห้งที่ 100 รอบ เท่ากับ 94.78%, 92.31% และ 84.94% ภายใต้สภาวะเปียกเท่ากับ 93.70%, 90.52% และ 83.99% และภายใต้สภาวะความเป็นกรดเท่ากับ 89.62%, 85.24% และ 81.51% ตามลำดับ

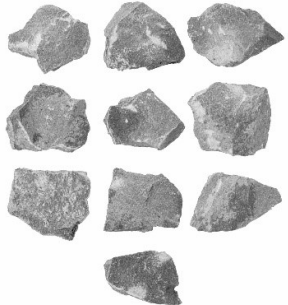
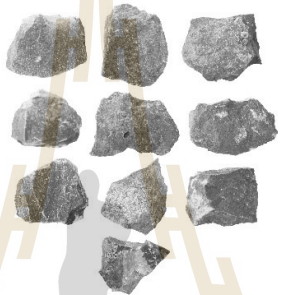
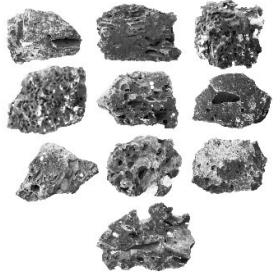
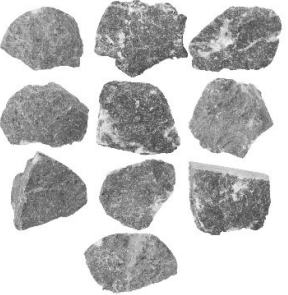
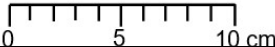
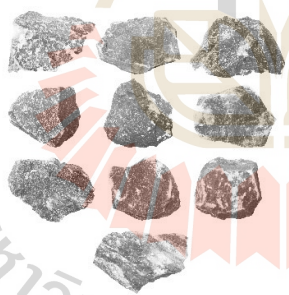
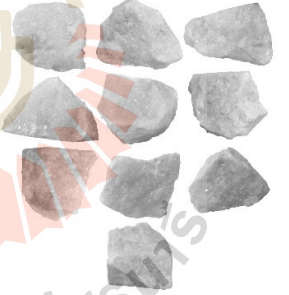
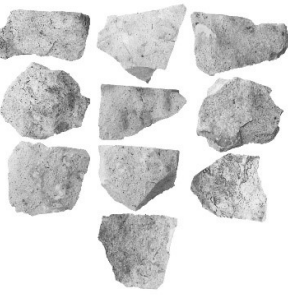
สารละลายกรดเป็นตัวเร่งกระบวนการผุกร่อนของหินทุกชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มหินคาร์บอนเนต (รูปที่ 4.3) พบว่าหินทรายเป็นหินที่มีความอ่อนไหวต่อน้ำและสารละลายกรดสูงมาก เมื่อเทียบกับหินอ่อนและหินปูน (รูปที่ 4.3) และหินอ่อนชุดเขาขาดจะมีอัตราการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้งสูงกว่าหินชนิดอื่นในกลุ่มหินคาร์บอนเนต แต่มีความคงทนมากกว่าหินทรายเป็นเล็กน้อยเมื่อทดสอบภายใต้สภาวะเปียกและสภาวะความเป็นกรด โดยพบว่าหิน limestone 1 (SB1), limestone 2 (SB2), Khao Khad marble (MB) และ Khao Khad travertine (T) มีค่า I_d ภายใต้สภาวะแห้งที่ 100 รอบ เท่ากับ 94.51%, 93.13%, 87.06% และ 91.56% ภายใต้สภาวะเปียกเท่ากับ 93.77%, 92.26%, 85.50% และ 87.17% และภายใต้สภาวะความเป็นกรดเท่ากับ 90.54%, 88.82%, 80.00% และ 76.60% ตามลำดับ

สำหรับกลุ่มหินทรายจะมีอัตราการผุกร่อนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาวะที่ทำการทดสอบ รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการทดสอบภายใต้สภาวะแห้ง หิน calcareous lithic sandstone (GST), quartz sandstone (YST), arkosic feldspathic sandstone (RST) และ white quartz sandstone (WST) มีค่า I_d ที่ 100 รอบ เท่ากับ 91.36%, 89.01%, 87.89% และ 81.42% ภายใต้สภาวะเปียกเท่ากับ 76.29%, 87.15%, 85.04% และ 79.30% และภายใต้สภาวะความเป็นกรด เท่ากับ 68.96%, 83.81%, 80.18% และ 77.17% ตามลำดับ โดยหิน calcareous lithic sandstone ซึ่งมีความแข็งสูงจะมีแนวโน้มว่าจะทนทานต่อการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้งสูงมาก แต่จะค่อนข้างอ่อนไหวต่อน้ำและสารละลายกรดเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับหินชนิดอื่นในกลุ่มหินเดียวกัน

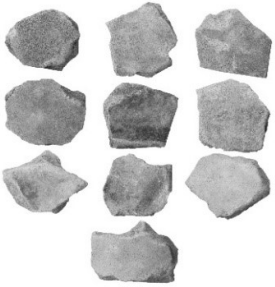
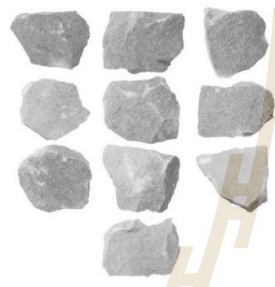

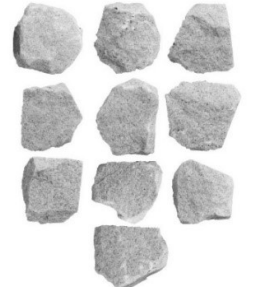
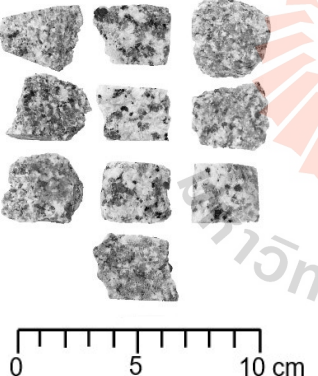
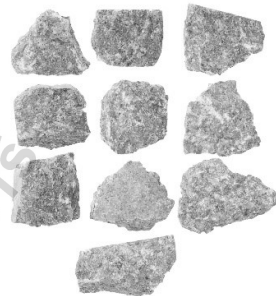
จากผลการทดสอบพบว่ากลุ่มหินแกรนิตมีแนวโน้มการผุกร่อนที่ใกล้เคียงกันทั้งภายใต้สภาวะเปียก สภาวะแห้ง และสภาวะความเป็นกรด ซึ่งหิน pink granite (RGR) จะมีความคงทนต่อการผุกร่อนสูงกว่าหิน white granite (GGR) เล็กน้อยในทุกสภาวะ โดยพบว่าหิน pink granite และหิน white granite มีค่า I_d ภายใต้สภาวะแห้งที่ 100 รอบ เท่ากับ 96.47% และ 94.62% และความคงทนจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะเปียกและสภาวะความเป็นกรด



ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างหินก่อนการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน

กลุ่มหิน	ตัวอย่างหินก่อนการทดสอบ		
หินบะซอลต์			
	Aphanitic basalt (AB)	Ferrous basalt (FB)	Vesicular basalt (VB)
หินคาร์บอเนต	 		
	Limestone1 (L1)	Limestone2 (L2)	Khao Khad marble (MB)
			
			Khao Khad travertine (T)

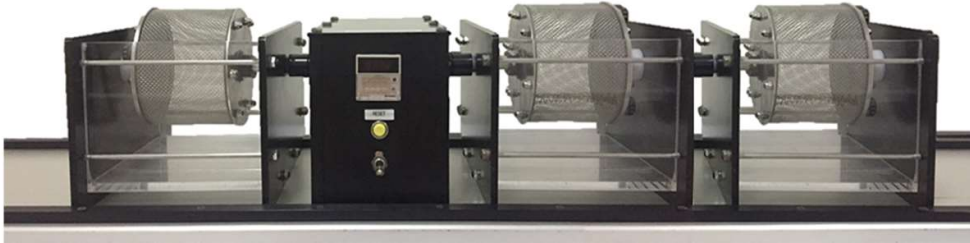
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างหินก่อนการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน (ต่อ)

กลุ่มหิน	ตัวอย่างหินก่อนการทดสอบ			
หินทราย				
	Calcareous lithic sandstone (GST)	Quartz sandstone (YST)	arkosic feldspathic sandstone (RST)	White quartz sandstone (WST)
หินแกรนิต				
	White granite (GGR)		Pink granite (RGR)	

Acidic condition

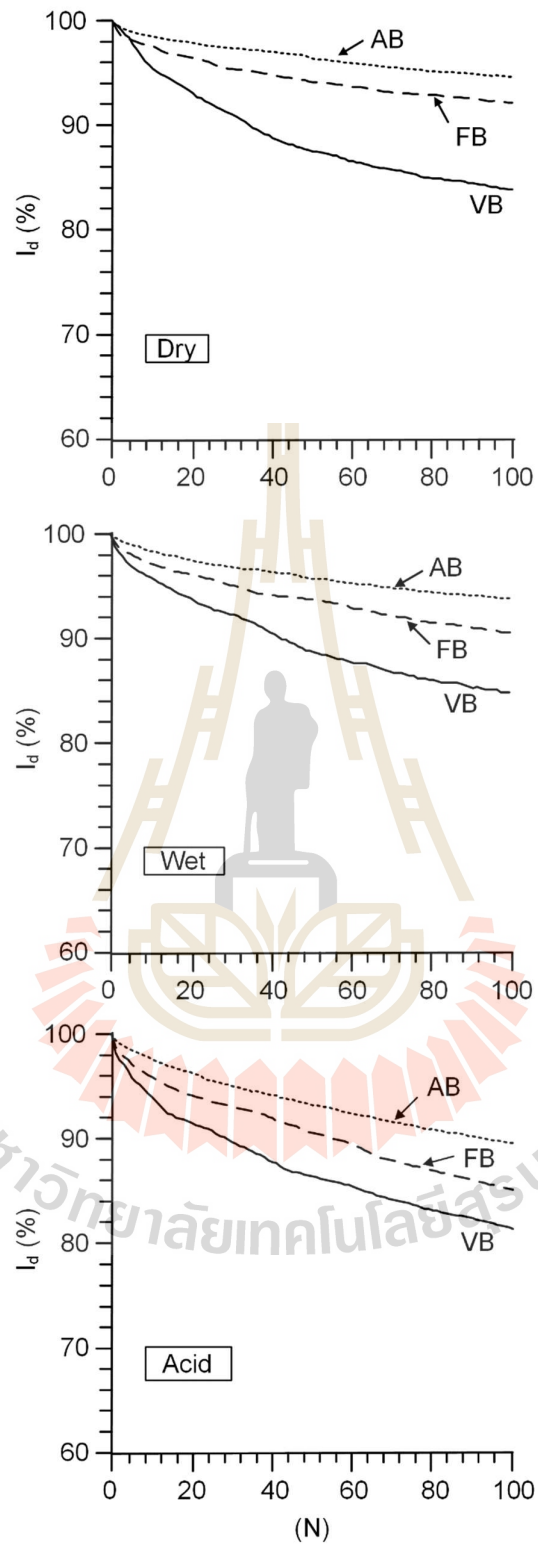
Wet condition

Dry condition

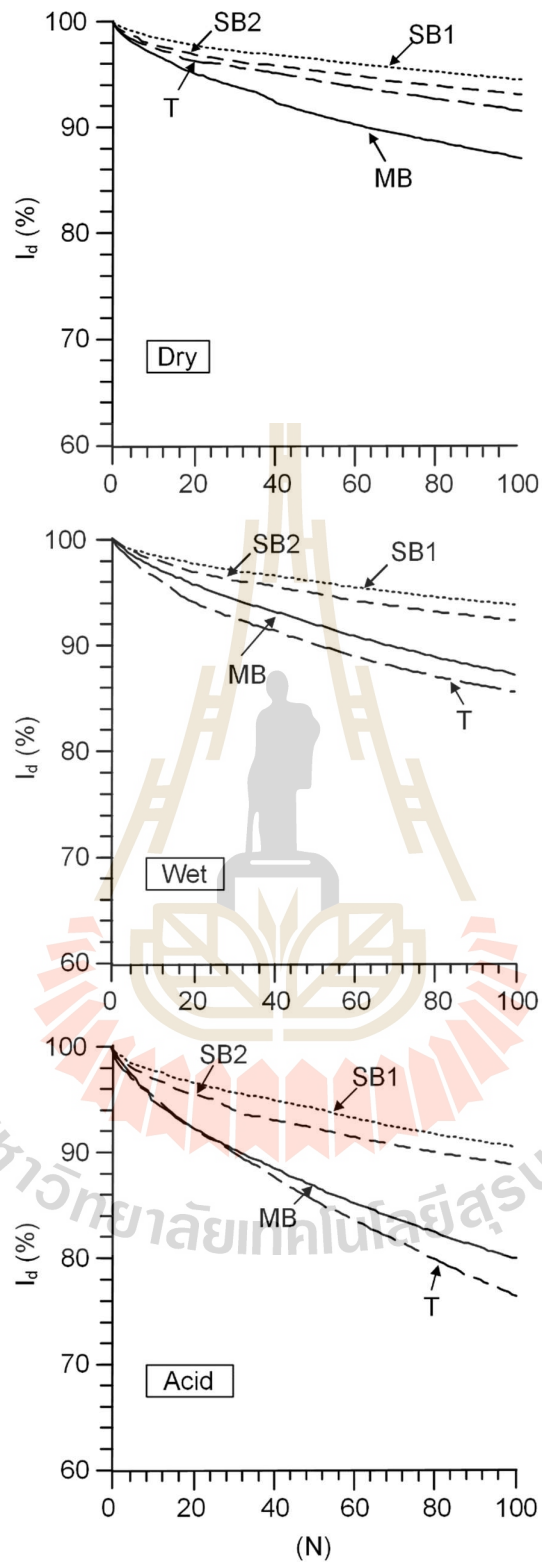


รูปที่ 4.1 เครื่องจำลองการผุกร่อนของหินแบบหมุนอัตโนมัติ

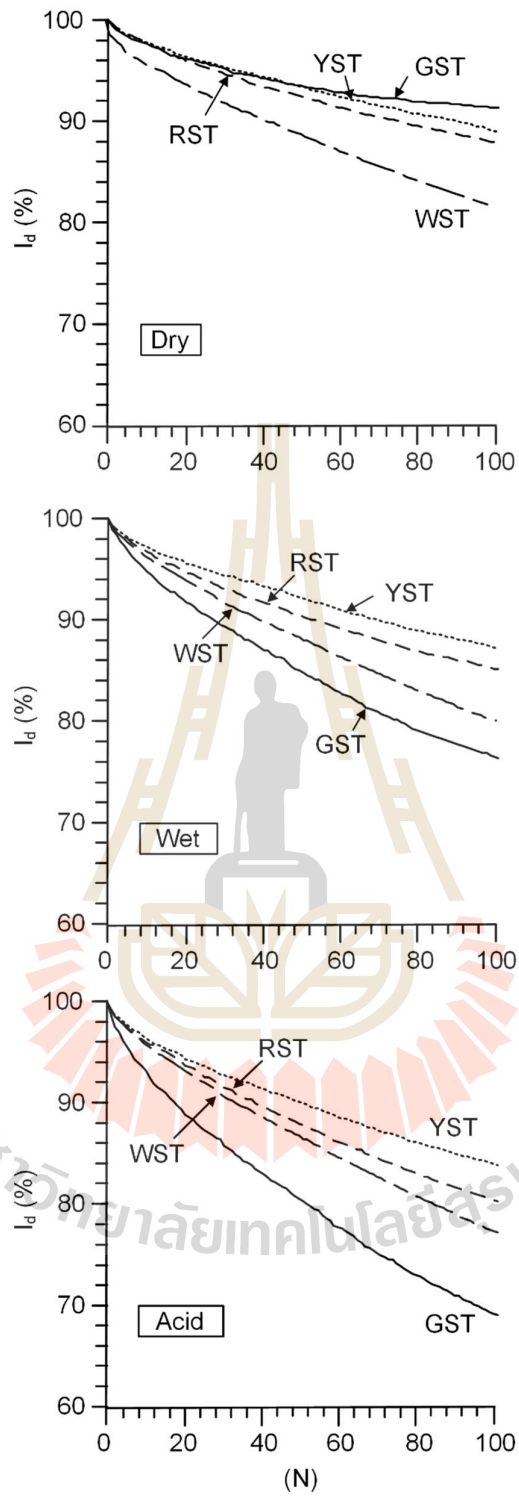




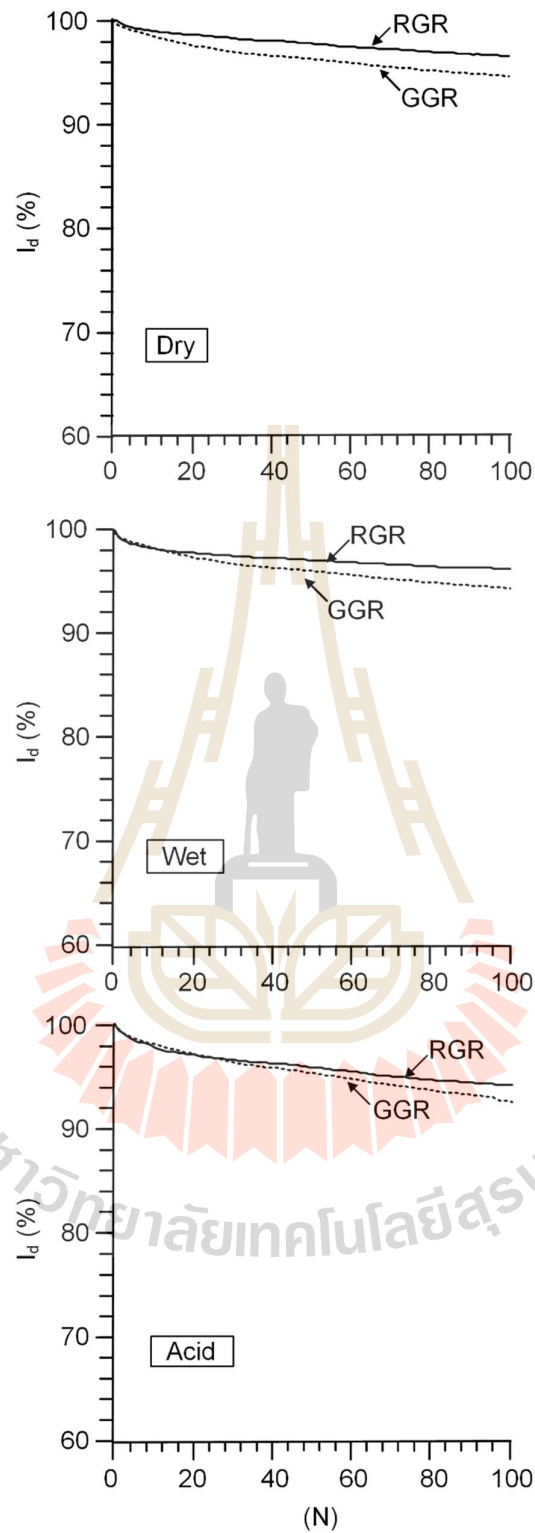
รูปที่ 4.2 ดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้ง (บน) สภาวะเปียก (กลาง) และสภาวะความเป็นกรด (ล่าง) ของกลุ่มหินปะชอลต์



รูปที่ 4.3 ดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้ง (บน) สภาวะเปียก (กลาง) และสภาวะความเป็นกรด (ล่าง) ของกลุ่มหินคาร์บอนेट



รูปที่ 4.4 ดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้ง (บน) สภาวะเปียก (กลาง) และสภาวะความเป็นกรด (ล่าง) ของกลุ่มหินทราย



รูปที่ 4.5 ดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนภายใต้สภาวะแห้ง (บน) สภาวะเปียก (กลาง) และสภาวะความเป็นกรด (ล่าง) ของกลุ่มหินแกรนิต

4.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

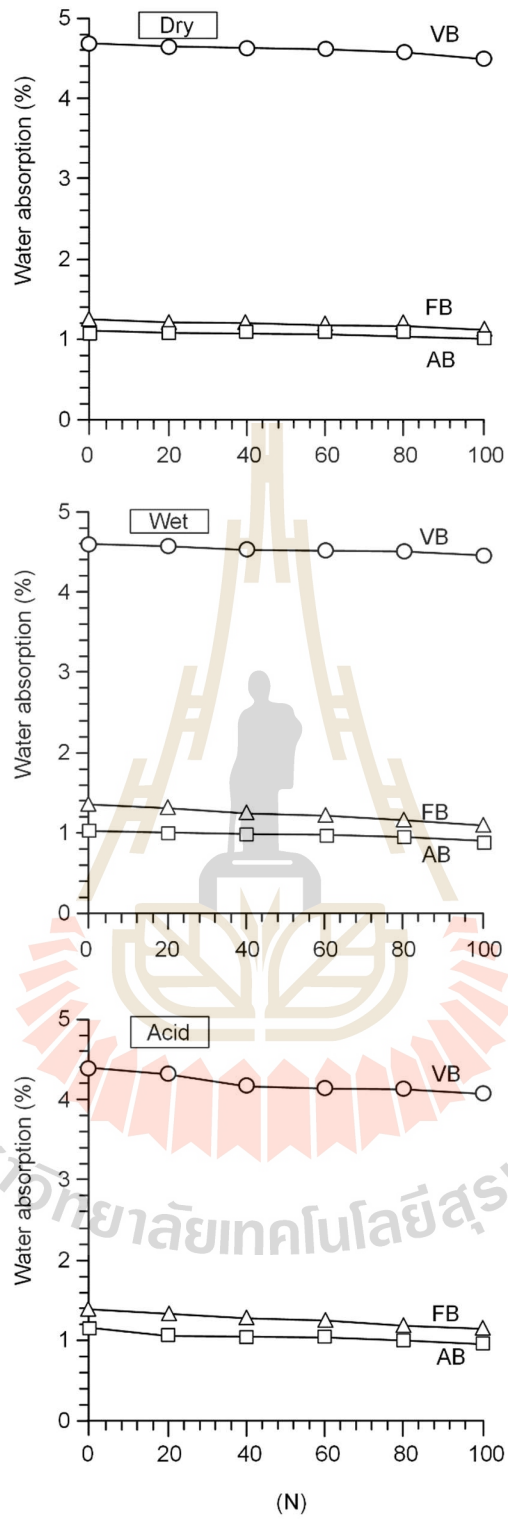
วัตถุประสงค์ของการทดสอบการดูดซึมน้ำของตัวอย่างหิน (ASTM C127-04) คือเพื่อประเมินอัตราการสึกกร่อนของหิน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสภาพอากาศ วิธีการทดสอบทำได้โดยนำตัวอย่างหินที่ผ่านการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนภายหลังวัฏจักรที่ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 รอบ เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างหินไปแช่ในน้ำอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของตัวอย่างหิน สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Absorption, \%} = [(B-A)/A] \times 100 \quad (4.2)$$

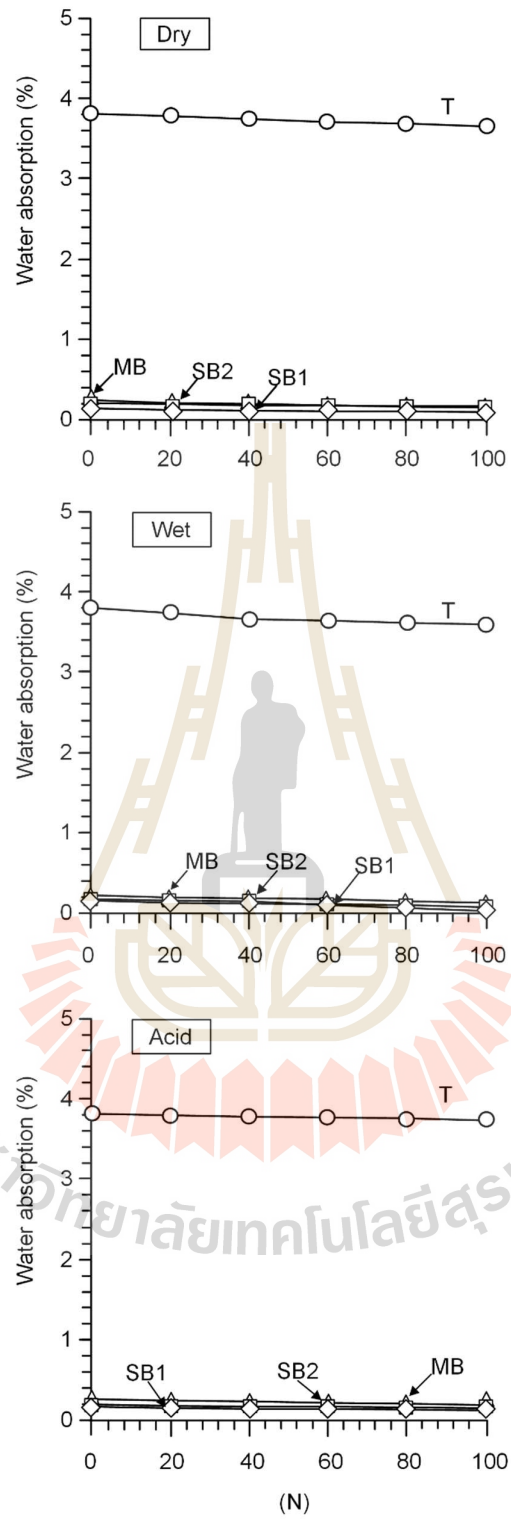
เมื่อ A คือน้ำหนักของตัวอย่างหินแห้งหลังจากนำเข้าเตาอบแล้ว และ B คือน้ำหนักของตัวอย่างหินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

รูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ค่าการดูดซึมน้ำของหินและจำนวนรอบของการทดสอบ ผลการทดสอบระบุว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำจะลดลงเมื่อจำนวนรอบของการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนเพิ่มขึ้นในทุกกรณี สำหรับกลุ่มหินบะซอลต์ ซึ่งประกอบด้วยหิน aphanitic basalt (AB), ferrous oxide basalt (FB) และ vesicular basalt (VB) มีค่าการดูดซึมน้ำหลังจากการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนรอบที่ 100 เท่ากับ 0.98%, 1.32% และ 4.40% ตามลำดับ โดยพบว่าหิน vesicular basalt จะมีการดูดซึมน้ำสูงที่สุด เนื่องจากเป็นหินที่มีความพรุนสูง (รูปที่ 4.6)

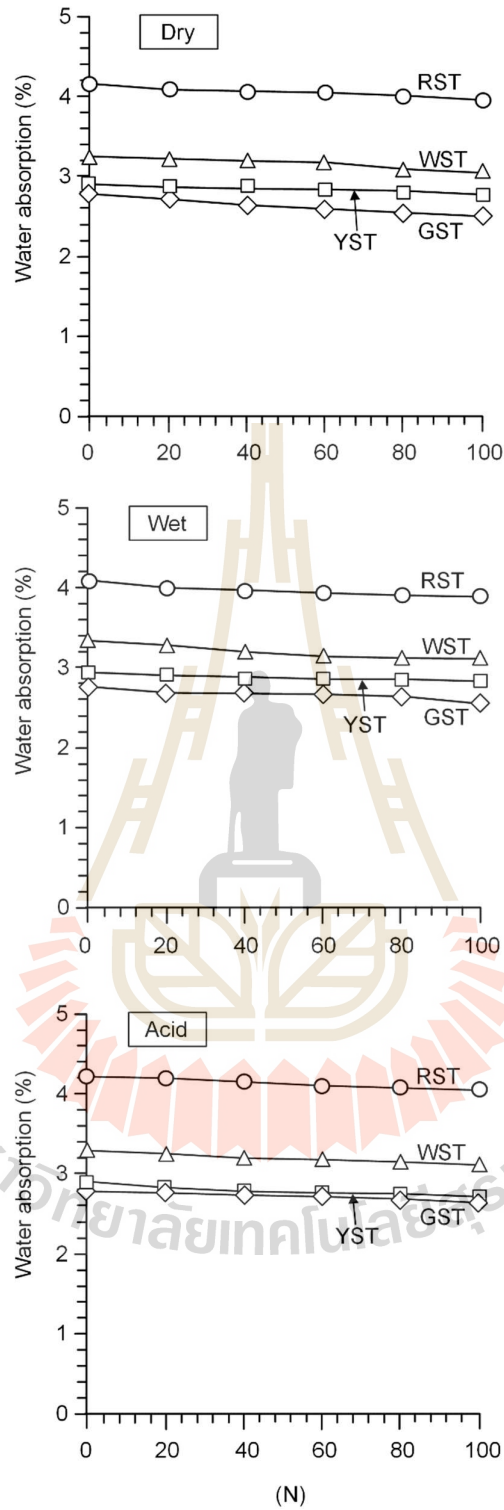
จากรูปที่ 4.7 พบว่าทรายเวอทีนเป็นหินที่สามารถดูดซึมน้ำได้สูงสุดในกลุ่มหินคาร์บอนเนต โดยที่หิน Limestone 1 (SB1), limestone 2 (SB2), Khao Khad marble (MB) และ Khao Khad travertine (T) มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 0.10%, 0.12%, 0.17 และ 3.69% และสำหรับกลุ่มหินทรายพบว่าหิน calcareous lithic sandstone (GST), quartz sandstone (YST), white quartz sandstone (WST) และ arkosic feldspathic sandstone (RST) มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 2.62%, 2.78%, 3.17 และ 3.94% ตามลำดับ (รูปที่ 4.8) ส่วนกลุ่มหินแกรนิต พบว่ามีค่าการดูดซึมน้ำน้อยมาก (รูปที่ 4.9) โดยที่หิน pink granite (RGR) สามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่าหิน white granite (GGR) เพียงเล็กน้อย



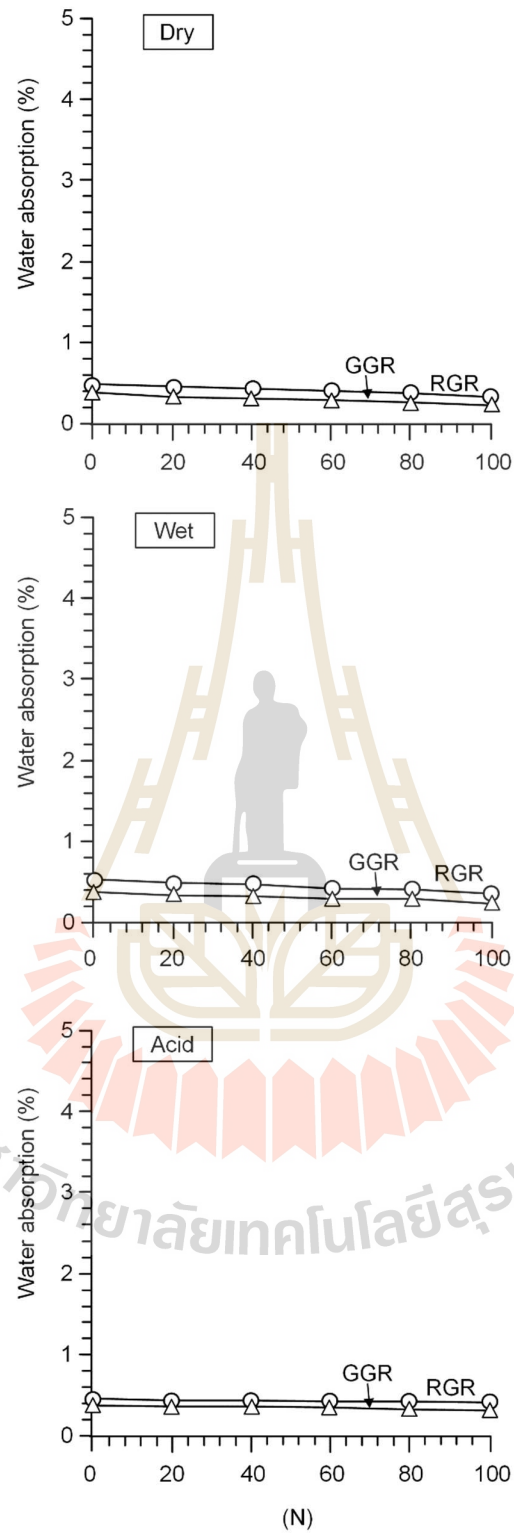
รูปที่ 4.6 ค่าการดูดซึมน้ำของหินเทียบกับจำนวนรอบการทดสอบของกลุ่มหินบะซอลต์



รูปที่ 4.7 ค่าการดูดซึมน้ำของหินเทียบกับจำนวนรอบการทดสอบของกลุ่มหินคาร์บอนेट



รูปที่ 4.8 ค่าการดูดซึมน้ำของหินเทียบกับจำนวนรอบการทดสอบของกลุ่มหินทราย

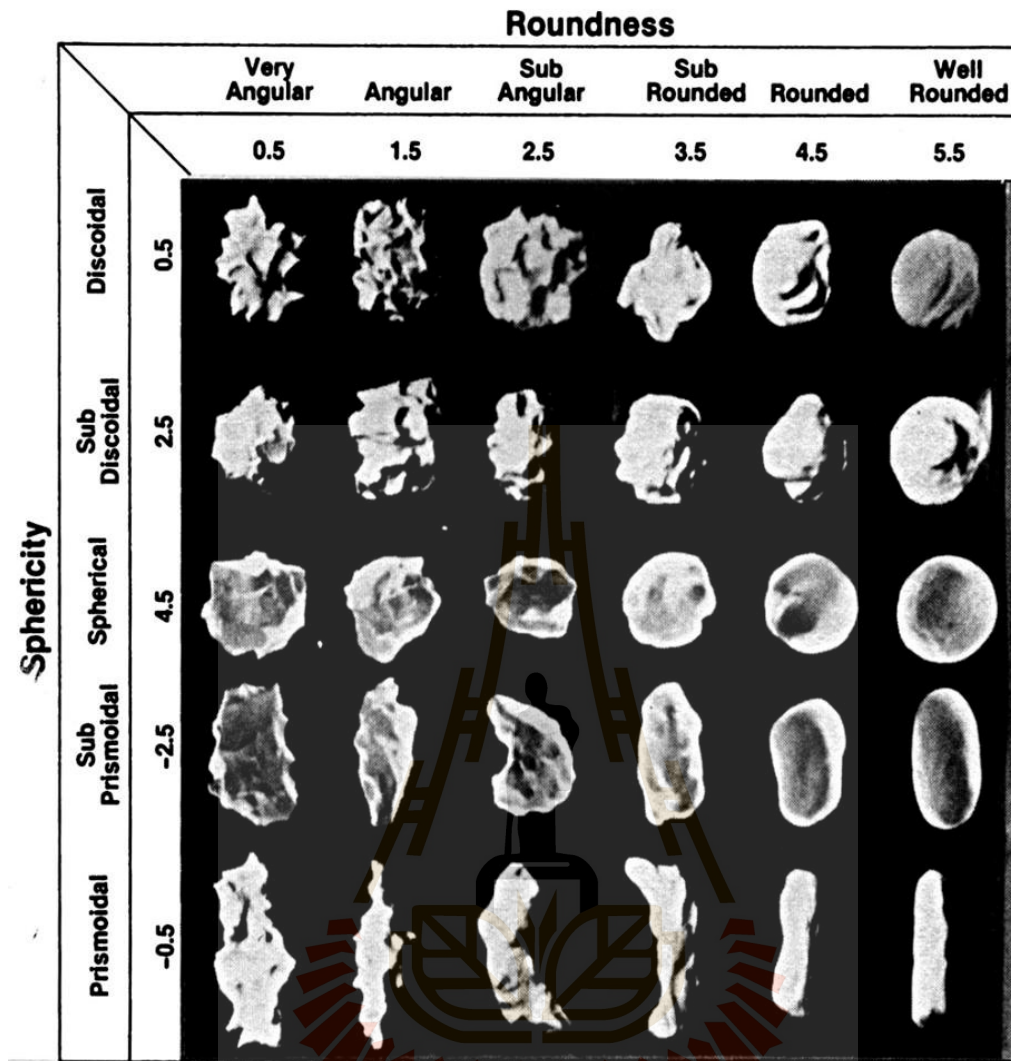


รูปที่ 4.9 ค่าการดูดซึมน้ำของหินเทียบกับจำนวนรอบการทดสอบของกลุ่มหินแกรนิต

4.4 ความขรุขระและความกลมมนของหิน

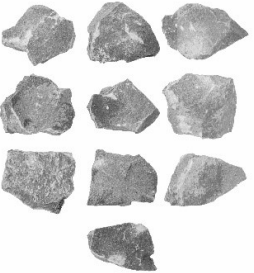

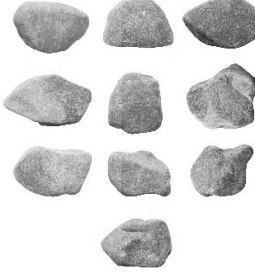
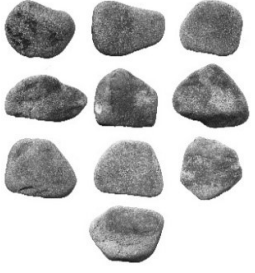




ตัวอย่างหินก่อนและหลังการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนของหินครบ 100 วัฏจักร ได้ถูกนำมาจำแนกความขรุขระ (roughness) และความกลมมน (sphericity) ของหินด้วยระบบของ Power (1982) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ผลการจำแนก (ตารางที่ 4.2 ถึง 4.5) ระบุว่าตัวอย่างกลุ่มคาร์บอนेट หินทราย และหินปูนมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงความกลมมนของเม็ดหิน กล่าวคือ เมื่อทำการทดสอบภายใต้สภาวะแห้ง สภาวะเปียก และสภาวะความเป็นกรดจะมีค่า sphericity คงที่ประมาณ 4.5 (จัดเป็น spherical) ยกเว้นหินชนิด vesicular basalt จะมีค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบเท่ากับ 0.5 (discoidal) และเพิ่มขึ้นเป็น 2.5 เมื่อทดสอบภายใต้สภาวะแห้ง และเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 4.5 (spherical) (อีกนัยหนึ่งคือ หินมีความเป็นเหลี่ยมลดลง) เมื่อทำการทดสอบภายใต้สภาวะเปียกและสภาวะความเป็นกรด (รูปที่ 4.11) สำหรับหินแกรนิตทั้ง 2 ชนิด ก่อนการทดสอบมีค่า Sphericity เท่ากับ 2.5 (sub discoidal) แต่ภายหลังจากการทดสอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.5 ภายใต้ทั้ง 3 สภาวะ

ค่าความขรุขระของตัวอย่างหินมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (หินมีความมนมากขึ้น ความเป็นเหลี่ยมลดลง) เมื่อทำการทดสอบภายใต้ทุกสภาวะ แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยกลไกหลักที่ทำให้เกิดความกลมของตัวอย่างหิน คือ กระบวนการขัดผิวและปฏิกิริยาทางเคมีของของเหลวในถึงบรรยากาศขณะทำการทดสอบ อย่างไรก็ตาม กลไกหลักที่ทำให้หินแกรนิตเกิดความกลมขึ้นนั้นดูเหมือนจะเป็นเพียงกระบวนการขัดสีผิวระหว่างตัวอย่างหินเท่านั้น โดยที่ไม่มีผลกระทบจากปฏิกิริยาทางเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง

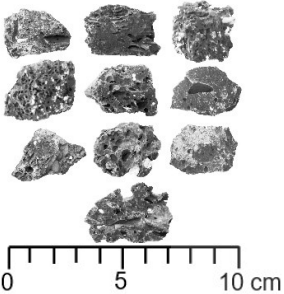
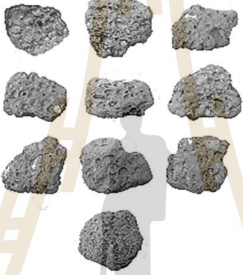
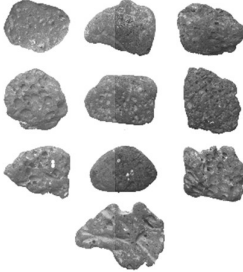
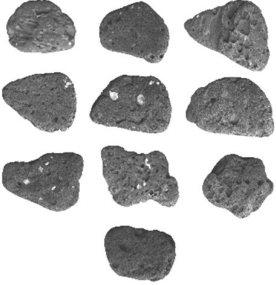


รูปที่ 4.10 แผนภูมิเปรียบเทียบสำหรับการประเมินความขรุขระและความกลมมนของเม็ดวัสดุ (Powers, 1982)

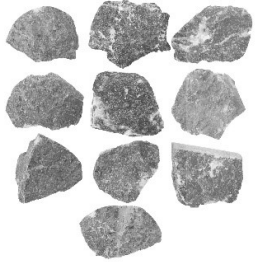

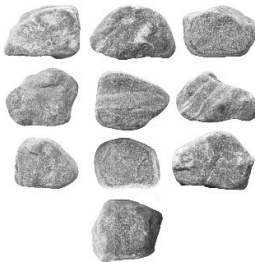
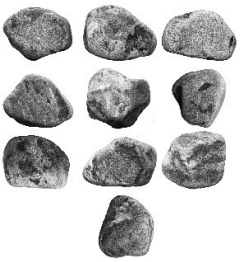
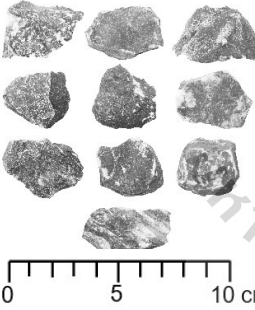
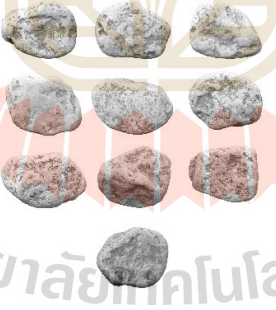

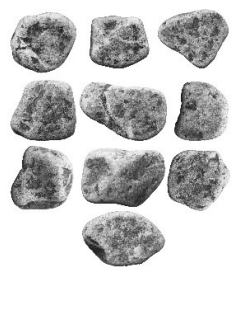
ตารางที่ 4.2 ผลการประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินบะซอลต์ก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนครบ 100 วัฏจักร

ชนิดหิน	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบครบ 100 วัฏจักร		
		สถานะแห้ง	สถานะเปียก	สถานะความเป็นกรด
Aphanitic basalt (AB)				
Sphericity	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub rounded (3.5)	Sub rounded (3.5)	Rounded (4.5)
Ferrous basalt (FB)				
Sphericity	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub angular (2.5)	Sub rounded (3.5)	Rounded (4.5)

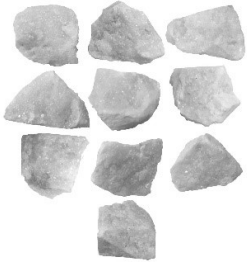

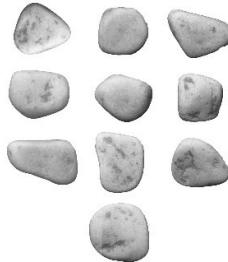
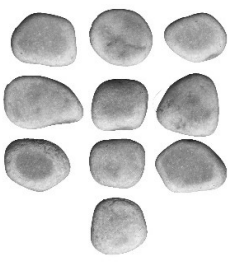

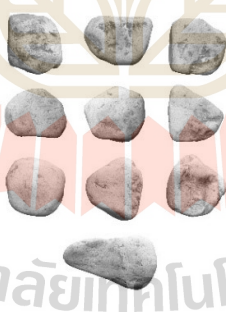


ตารางที่ 4.2 การประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินบะซอลต์ก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนครบ 100 วัฏจักร (ต่อ)

ชนิดหิน	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบครบ 100 วัฏจักร		
		สถานะแห้ง	สถานะเปียก	สถานะความเป็นกรด
Vesicular basalt (VB)				
Sphericity	Discolidal (0.5)	Sub discolidal (2.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Sub angular (2.5)	Sub rounded (3.5)	Rounded (4.5)	Rounded (4.5)

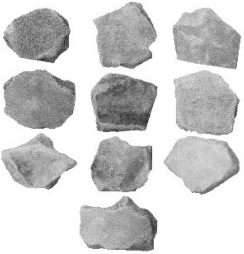


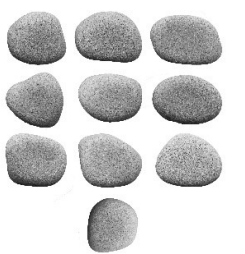
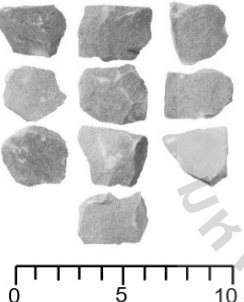
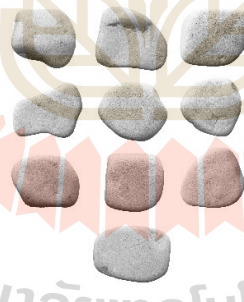

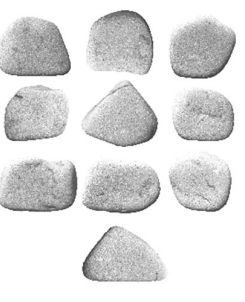
ตารางที่ 4.3 การประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินคาร์บอนเตก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนครบ 100 วัฏจักร

ชนิดหิน	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบครบ 100 วัฏจักร		
		สถานะแห้ง	สถานะเปียก	สถานะความเป็นกรด
Limestone1 (SB1)				
Sphericity	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub angular (2.5)	Sub rounded (3.5)	Rounded (4.5)
Limestone2 (SB2)				
Sphericity	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub angular (2.5)	Sub rounded (3.5)	Rounded (4.5)

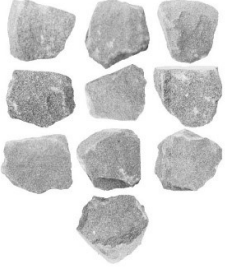

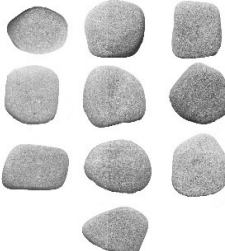


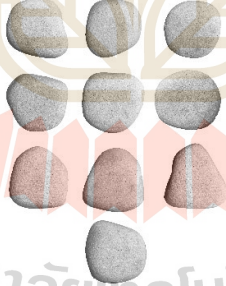

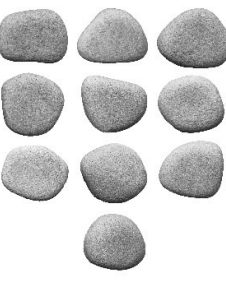
ตารางที่ 4.3 การประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินคาร์บอนेटก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน 100 วัฏจักร (ต่อ)

ชนิดหิน	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบครบ 100 วัฏจักร		
		สถานะแห้ง	สถานะเปียก	สถานะความเป็นกรด
Khao Khad marble (MB)				
Sphericity	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub rounded (3.5)	Rounded (4.5)	Rounded (4.5)
Khao Khad travertine (T)				
Sphericity	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub angular (2.5)	Rounded (4.5)	Rounded (4.5)

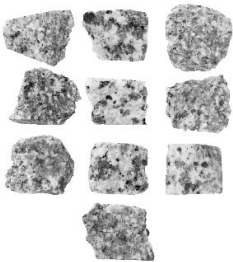

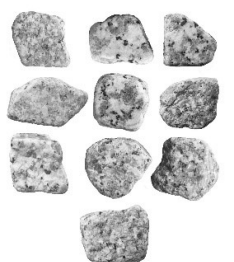
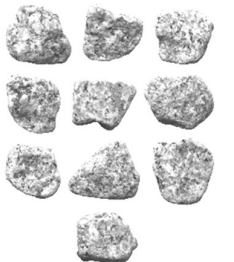
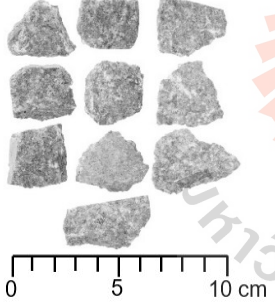


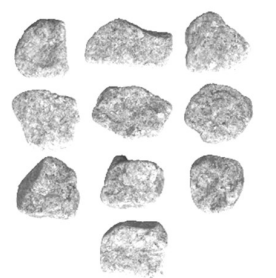
ตารางที่ 4.4 การประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินทรายก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนครบ 100 วัฏจักร

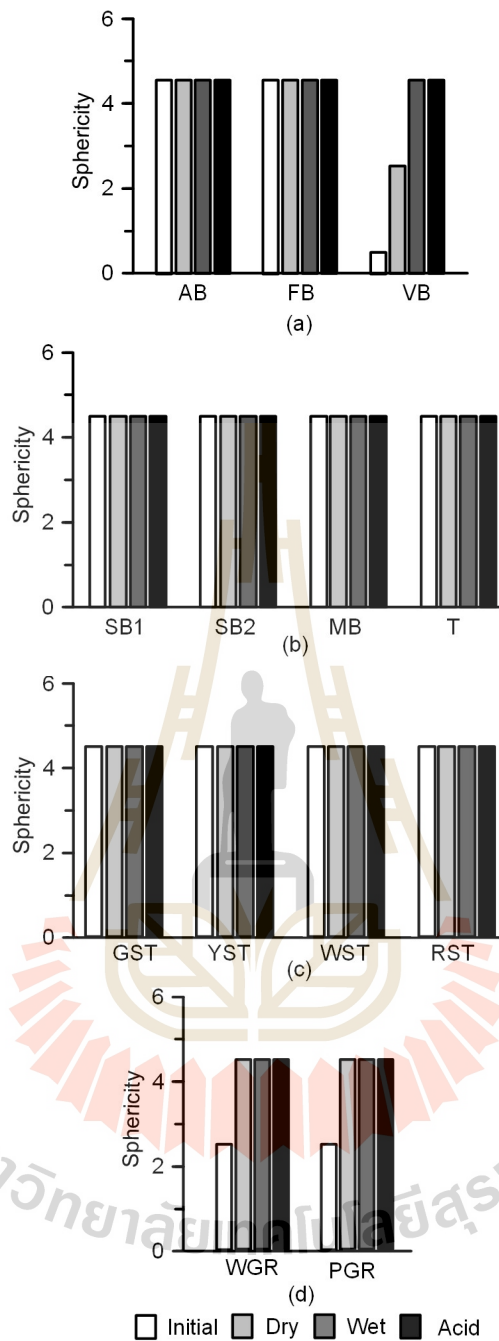
ชนิดหิน	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบครบ 100 วัฏจักร		
		สถานะแห้ง	สถานะเปียก	สถานะความเป็นกรด
Calcareous lithic sandstone (GST)				
Sphericity	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub rounded (3.5)	Rounded (4.5)	Well rounded (5.5)
Quartz sandstone (YST)				
Sphericity	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub angular (2.5)	Sub rounded (3.5)	Sub rounded (3.5)

ตารางที่ 4.4 การประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินทรายก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนครบ 100 วัฏจักร (ต่อ)

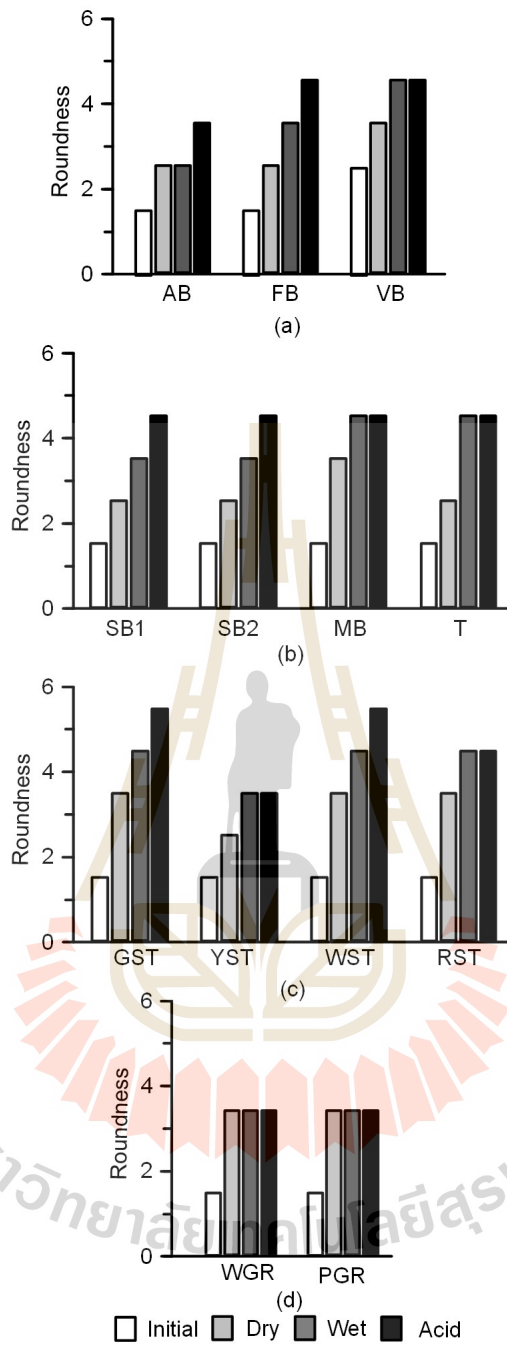
ชนิดหิน	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบครบ 100 วัฏจักร		
		สถานะแห้ง	สถานะเปียก	สถานะความเป็นกรด
Arkosic feldspathic sandstone (RST)				
Sphericity	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub rounded (3.5)	Rounded (4.5)	Rounded (4.5)
White quartz sandstone (WST)				
Sphericity	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub rounded (3.5)	Rounded (4.5)	Well rounded (5.5)

ตารางที่ 4.5 การประเมินความขรุขระและความกลมมนของกลุ่มหินแกรนิตก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนครบ 100 วัฏจักร

ชนิดหิน	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบครบ 100 วัฏจักร		
		สถานะแห้ง	สถานะเปียก	สถานะความเป็นกรด
White granite (GGR)				
Sphericity	Sub discoidal (2.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub rounded (3.5)	Sub rounded (3.5)	Sub rounded (3.5)
Pink granite (RGR)				
Sphericity	Sub discoidal (2.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)	Spherical (4.5)
Roundness	Angular (1.5)	Sub rounded (3.5)	Sub rounded (3.5)	Sub rounded (3.5)



รูปที่ 4.11 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบผลการประเมินความกลมมนของกลุ่มหินบะซอลต์ (a) หินคาร์บอนेट (b) หินทราย (c) และหินแกรนิต (d)



รูปที่ 4.12 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบผลการประเมินความขรุขระของกลุ่มหินบะซอลต์ (a) หินคาร์บอนेट (b) หินทราย (c) และหินแกรนิต (d)

บทที่ 5

การวิเคราะห์ปริมาณแร่ประกอบ

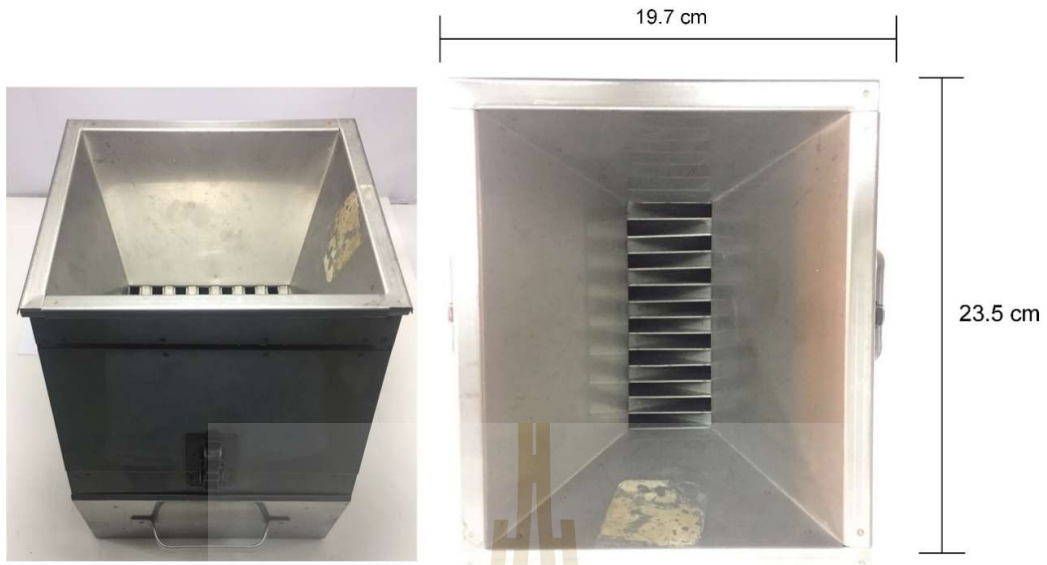
5.1 บทนำ

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงเคมีของตัวอย่างหินด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction, XRD) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณของธาตุหรือสารประกอบของหินตัวอย่าง ผลจากการวิเคราะห์จะถูกนำมาใช้ในอธิบายถึงปัจจัยและกระบวนการผุกร่อนของหินแต่ละชนิด โดยได้นำผงตัวอย่างหินมาทำการวิเคราะห์ก่อนและหลังการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนรอบที่ 100 เพื่อเปรียบเทียบปริมาณของแร่ประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้สภาวะการทดสอบที่แตกต่างกัน

5.2 การวิเคราะห์ปริมาณแร่ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์ (X-ray) มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) ในงานวิจัยนี้ได้ นำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการหาปริมาณแร่ประกอบของตัวอย่างหินก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน ทำได้โดยการนำตัวอย่างหินมาบดละเอียดจนเป็นผงละเอียดที่สามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 60 จากนั้นนำผงตัวอย่างหินดังกล่าวมาสุ่มคัดแยกด้วยอุปกรณ์ chute splitter (รูปที่ 5.1) ตามมาตรฐาน ASTM (B215-15) จนได้ปริมาณเท่ากับ 10 กรัม และนำเข้าเครื่อง X-ray diffractometer-D2 phaser (รูปที่ 5.2) เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณแร่ประกอบหิน

การหาปริมาณแร่ประกอบของตัวอย่างหินแต่ละชนิดจะถูกคำนวณโดยเทียบกับร้อยละของน้ำหนักคงเหลือหลังการทดสอบค่าดัชนีความคงทนต่อการผุกร่อนรอบที่ 100 ภายใต้สภาวะเปียก สภาวะแห้ง และสภาวะความเป็นกรด เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของกระบวนการขัดสีต่อแร่ประกอบหินที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณแร่ประกอบของหินทุกชนิดมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณแร่ก่อนนำตัวอย่างหินมาทดสอบค่าดัชนีความคงทน (ค่าน้ำหนักของตัวอย่างหินก่อนนำมาทดสอบค่าดัชนีความคงทน คิดเป็นร้อยละ 100) โดยตัวอย่างหินที่ทดสอบภายใต้สภาวะความเป็นกรดจะมีร้อยละของแร่ประกอบลดลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับการทดสอบภายใต้สภาวะเปียกและสภาวะแห้ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการขัดสีและปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลายกรดที่ส่งผลให้แร่ประกอบบางชนิดมีการผุกร่อนได้ง่ายและหลุดออกจากก้อนตัวอย่างหิน



รูปที่ 5.1 เครื่องคัดแยกตัวอย่างหินที่บดละเอียด



รูปที่ 5.2 เครื่อง X-ray diffractometer-D2 phaser

ผลการวิเคราะห์ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแร่ประกอบของกลุ่มหินบะซอลต์ (ตารางที่ 5.1) จะขึ้นอยู่กับ การลดลงของปริมาณแร่แคลไซต์ แพลจีโอเคลส และไพรอกซีน ซึ่งเกิดจากกระบวนการขัดสีระหว่างการทดสอบ โดยแร่แคลไซต์ที่พบในกลุ่มหินชนิดนี้อาจเกิดจากการที่เนื้อหินบะซอลต์ที่มักมีลักษณะเป็นรูพรุนหรือเป็นฟองอากาศเนื่องจากกระบวนการเกิด ทำให้แร่ทุติยภูมิ เช่น แร่แคลไซต์ หรือแร่คลอไรต์ สามารถไหลเข้าไปแทรกและแข็งตัวอยู่ในรูพรุนดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบจากน้ำและกรดต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแร่ประกอบยังไม่ชัดเจน เนื่องจากปริมาณแร่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เว้นแต่ว่าการทดสอบอยู่ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน สำหรับกลุ่มหินคาร์บอนेट (ตารางที่ 5.2) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแร่ประกอบภายใต้สภาวะแห้ง เปียก และความเป็นกรด โดยจะมีปริมาณของแร่ประกอบลดลงจากกระบวนการขัดสีและกระบวนการปฏิกิริยาเคมี เช่นเดียวกับกลุ่มหินทราย (ตารางที่ 5.3) ที่พบว่ามีปริมาณแร่ประกอบลดลง โดยเฉพาะแร่แคลไซต์ที่มีปริมาณลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งต่างจากกลุ่มหินแกรนิต (ตารางที่ 5.4) ที่มีปริมาณแร่ประกอบลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับหินในกลุ่มอื่น

ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของกลุ่มหินบะซอลต์ก่อนและหลังทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนครบ 100 วัฏจักร

ชนิดหิน	ชื่อแร่	ก่อนการทดสอบ (%)	หลังการทดสอบครบ 100 วัฏจักร		
			สถานะแห้ง (%)	สถานะเปียก (%)	สถานะกรด (%)
Aphanitic Basalt (AB)	Microcline	11.14	8.13	7.72	11.03
	Calcite	8.57	7.85	7.05	6.82
	Pyroxene	21.09	19.84	19.87	18.78
	Plagioclase	50.70	50.52	50.69	47.44
	Olivine	8.50	8.44	8.38	5.55
	Total	100.00	94.78	93.70	89.62
Ferrous Oxide Basalt (FB)	Microcline	15.12	15.03	13.75	14.19
	Calcite	6.77	5.94	5.35	3.51
	Pyroxene	15.78	14.51	13.94	15.43
	Plagioclase	56.76	52.14	52.94	48.56
	Magnetite	4.24	3.58	3.49	2.55
	Olivine	1.34	1.11	1.05	1.00
	Total	100.00	92.31	90.52	85.24
Vesicular Basalt (VB)	Microcline	14.16	11.98	13.13	13.21
	Calcite	13.48	8.82	8.71	7.74
	Pyroxene	18.63	13.52	14.10	13.35
	Plagioclase	46.33	46.25	43.81	43.27
	Olivine	7.40	4.37	4.24	3.94
	Total	100.00	84.94	83.99	81.51

ตารางที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของกลุ่มหินคาร์บอเนตก่อนและหลังทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อนครบ 100 วัฏจักร

ชนิดหิน	ชื่อแร่	ก่อนการทดสอบ (%)	หลังการทดสอบครบ 100 วัฏจักร		
			สถานะแห้ง (%)	สถานะเปียก (%)	สถานะกรด (%)
Limestone 1 (SB1)	Quartz	16.49	15.23	15.47	15.55
	Mica	0.82	0.67	0.65	0.43
	Calcite	81.66	78.08	77.19	74.08
	Dolomite	1.03	0.53	0.46	0.48
	Total	100.00	94.51	93.77	90.54
Limestone 2 (SB2)	Quartz	1.30	0.78	0.92	0.68
	Mica	0.44	0.21	0.24	0.24
	Calcite	95.80	90.09	89.47	86.52
	Dolomite	2.46	2.05	1.63	1.38
	Total	100.00	93.13	92.26	88.82
Khao Khad Marble (MB)	Mica	1.15	0.44	0.34	0.18
	Calcite	98.85	86.62	85.16	79.82
	Total	100.00	87.06	85.50	80.00
Khao Khad Travertine (T)	Mica	1.21	0.26	0.20	0.17
	Calcite	96.51	90.17	85.97	75.80
	Dolomite	1.70	0.81	0.71	0.51
	Quartz	0.58	0.32	0.29	0.12
	Total	100.00	91.56	87.17	76.60

ตารางที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของกลุ่มหินทรายก่อนและหลังทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน
ครบ 100 วันจ้ำกร

ชนิดหิน	ชื่อแร่	ก่อนการทดสอบ (%)	หลังการทดสอบครบ 100 วันจ้ำกร		
			สถานะแห้ง (%)	สถานะเปียก (%)	สถานะกรด (%)
Calcareous Lithic Sandstone (GST)	Quartz	43.90	38.90	33.91	32.67
	Chloride	14.45	13.12	11.92	9.29
	Calcite	4.75	4.64	2.28	1.69
	Albite	29.01	27.73	22.42	21.88
	Muscovite	7.89	6.96	5.76	3.45
	Total	100.00	91.36	76.29	68.96
Quartz Sandstone (YST)	Quartz	89.35	80.28	79.11	75.14
	Feldspar	2.45	1.49	1.32	2.05
	Mica	0.47	0.38	0.15	0.14
	Kaolinite	7.73	6.86	6.56	6.48
	Total	100.00	89.01	87.15	83.81
White Quartz Sandstone (WST)	Quartz	88.96	73.39	72.14	71.41
	Feldspar	1.62	1.60	0.94	0.42
	Mica	0.33	0.31	0.14	0.00
	Kaolinite	9.09	6.12	6.08	5.34
	Total	100.00	81.42	79.30	77.17
Arkosic Feldspathic Sandstone (RST)	Quartz	44.49	43.83	41.39	40.11
	Feldspar	5.51	2.72	4.58	3.02
	Mica	0.66	0.46	0.44	0.51
	Calcite	6.38	0.23	0.21	0.13
	Albite	42.97	40.65	38.42	36.41
	Total	100.01	87.89	85.04	80.18

ตารางที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์ XRD ของกลุ่มหินแกรนิตก่อนและหลังทดสอบความคงทนต่อการผุกร่อน
ครบ 100 วัฏจักร

ชนิดหิน	ชื่อแร่	ก่อนการทดสอบ (%)	หลังการทดสอบครบ 100 วัฏจักร		
			สถานะแห้ง (%)	สถานะเปียก (%)	สถานะกรด (%)
Pink Granite (RGR)	Quartz	33.86	32.11	32.38	32.61
	Plagioclase	22.32	21.90	21.29	20.70
	Orthoclase	42.58	41.89	41.72	40.21
	Amphibole	1.25	0.57	0.88	0.56
	Total	100.00	96.47	96.27	94.08
White Granite (GGR)	Quartz	50.13	49.77	49.76	48.08
	Orthoclase	19.83	19.21	18.44	18.49
	Plagioclase	26.08	24.60	25.17	24.29
	Feldspar	3.96	1.04	1.16	1.60
	Total	100.00	94.62	94.53	92.46

บทที่ 6

บทสรุป

การทดสอบดัชนีความคงทนต่อความผูกร้อนได้ดำเนินการจำนวน 100 รอบ โดยใช้ตัวอย่างหินจำนวน 13 ชนิด มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความคงทนของหินในระยะยาว นอกจากนี้ ได้ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำ และหาปริมาณของธาตุหรือสารประกอบของตัวอย่างหินด้วยวิธีทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) ผลการทดสอบสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมและร้านค้าหินก่อสร้างและหินประดับ เพื่อใช้คาดคะเนระดับการผูกร้อนและอายุการใช้งานของหินภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป

จากการทดสอบดัชนีความคงทนต่อความผูกร้อน พบว่าหินภายใต้สภาวะเปียกจะเกิดการผูกร้อนได้ง่ายและรวดเร็วกว่าภายใต้สภาวะแห้ง เนื่องจากความสามารถในการดูดซับน้ำของเนื้อหิน เมื่อวัฏจักรการทดสอบมากขึ้น จะทำให้เกิดกระบวนการขัดถูบริเวณผิวหิน และจะค่อย ๆ หลุดออกจนถึงเนื้อหินด้านใน ซึ่งเป็นเนื้อหินแน่นที่ผูกร้อนได้ยากกว่า โดยผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fuenkajorn and Sri-in (2009) และ Walsri et al. (2012).

หินที่ประกอบด้วยเนื้อหินหยาบมักจะเกิดการผูกร้อนทางกายภาพจากการกระแทกและขัดสีระหว่างกันของหินได้มากกว่าการผูกร้อนทางเคมี ในทางกลับกัน หินที่มีเนื้อละเอียดมักจะผูกร้อนทางเคมีได้ง่ายกว่าการผูกร้อนทางกายภาพ กล่าวคือ แร่บางชนิดอาจเกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือสารละลายกรด จนเกิดการผูกร้อนหรือละลายจนแร่ชนิดนั้น ๆ หลุดออกจากเนื้อหินไปในที่สุด

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ การศึกษาองค์ประกอบแร่ด้วยวิธีศิลาวรรณนา และการวิเคราะห์ปริมาณแร่ประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผูกร้อนของหินตะกอนเกิดจากการอัดแน่นของเม็ดตะกอน ลักษณะสัมผัสระหว่างเม็ดตะกอน และปริมาณของแร่คาลิไนต์ หินที่มีความหนาแน่นน้อยและมีปริมาณวัสดุเชื่อมประสานมาก มีแนวโน้มที่จะเกิดการผูกร้อนในอัตราที่เร็วขึ้น เนื่องจากแร่คาลิไนต์อ่อนไหวต่อน้ำเป็นอย่างมาก ทำให้เม็ดตะกอนที่เชื่อมต่อกันสามารถแตกและหลุดออกจากกันง่ายขึ้น ผลการวิจัยนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบของ Koncagul and Santi (1999).

สำหรับหินภูเขาไฟ ปริมาณของแร่แคลไซต์ ลักษณะเนื้อหิน และความพรุนจะมีผลกระทบต่ออัตราการผูกร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อทดสอบภายใต้สภาวะเปียกและสภาวะความเป็นกรด นอกจากนี้ ช่องว่างในหินภูเขาไฟมีส่วนอย่างมากต่อกระบวนการผูกร้อนของหิน เนื่องจากของเหลวสามารถไหลแทรกซึมเข้าไปตามช่องว่างดังกล่าวและทำการละลายเนื้อหินที่อยู่ภายในได้

สำหรับหินคาร์บอนที่มีปริมาณของแคลเซียมคาร์บอนเนตและแมกนีเซียมคาร์บอนเนตสูง จะส่งผลให้มีอัตราการผูกร้อนที่เร็วยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ภายใต้การทดสอบสภาวะความเป็นกรด ผลการทดสอบนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับงานวิจัยของ Ghobadi and Momeni (2011)

ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของหินเชิงเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อหาปริมาณของแร่ที่หายไปจากการทดสอบภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน สามารถสรุปได้ว่าน้ำหนักของตัวอย่างหินที่หายไป เกิดจากการสูญเสียปริมาณของแร่ระหว่างการทดสอบ การสูญเสียแร่แคลไซต์หรือแร่คาลิไนต์เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกลุ่มหินบะซอลต์ คาร์บอนเนตและหินทราย แต่จะไม่ใช่ปัจจัยสำคัญสำหรับกลุ่มหินแกรนิต

จากผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนการใช้ประโยชน์ของหินก่อสร้างและหินประดับให้เหมาะสมกับลักษณะงานและสภาพแวดล้อม เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของหินดังกล่าวได้ กล่าวคือ กลุ่มหินบะซอลต์และหินแกรนิตสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างถนน เทพื้นรองหมอนและรางรถไฟ และทำเป็นแผ่นปูพื้นหรือผนังได้ในทุกสภาวะ เนื่องจากกลุ่มหินดังกล่าวมีความคงทนสูง มีอัตราการผุกร่อนช้า สามารถนำไปใช้ในพื้นที่ที่มีปัญหาการเกิดฝนกรดได้

สำหรับกลุ่มหินคาร์บอนेट ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อสภาวะความเป็นกรดอย่างมาก โดยเฉพาะหินทรายเวทินที่นิยมนำไปทำเป็นหินประดับ ใช้ในการตกแต่งตัวอาคารให้สวยงาม หรือทำเป็นแผ่นปูพื้นหรือผนัง เนื่องจากเป็นหินที่มีลวดลายสวยงามตามธรรมชาติ และมีความคล้ายคลึงกับหินอ่อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการนำหินกลุ่มนี้ไปใช้ประโยชน์ในพื้นที่กลางแจ้ง ที่ต้องเผชิญกับสภาพอากาศฝนกรด เนื่องจากอาจทำให้หินเกิดการผุกร่อนได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความสวยงามลดลง หรือไม่สามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

เช่นเดียวกับกลุ่มหินทรายมีถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการสร้างปราสาทในสมัยโบราณ การแกะสลักรูปปั้น เช่น พระพุทธรูป รวมถึงใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างทำถนน ที่ต้องเผชิญกับสภาวะฝนตก หรือฝนกรดอยู่เสมอ ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงผลกระทบดังกล่าว เพื่อใช้ในการคาดคะเนอายุการใช้งาน และวางแผนในการทำนุบำรุงเพื่อให้เกิดความปลอดภัยอยู่เสมอด้วย



บรรณานุกรม

- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., and Boyce, G.M. (1995). Slope Stability and Stabilization Methods. New York: John Wiley & Sons.
- Andrews, D.E., Withiam, J.L., Perry, E.F., and Crouse, H.L. (1980). Environmental Effects of Slaking of Surface Mine Spoils: Eastern and Central United States. Final report, Bureau of Mines, United State department of the interior, Denver.
- ASTM B215-15. (2015). Standard practices for sampling metal powders. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM C127-04. Standard test method for determination of the specific gravity and water absorption of coarse aggregate. In Annual Book of ASTM Standards (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D4644-07. Standard test method for slake durability of shale and similar weak rocks. In Annual Book of ASTM Standards (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Bell, F.G. (1978). The physical and mechanical properties of the fell sandstones, Northumberland, England. *Engineering Geology*. 12(1): 1-29.
- Brace, W. F. (1961). Dependence of fracture strength of rocks on grain size. In *Proceedings of the Forth United States Rock Mechanics Symposium* (pp. 99-103). University Park, Pennsylvania.
- Cetin, H., Laman, M., and Ertunc, A. (2000). Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Ataturk dam in Turkey. *Engineering Geology*. 56(3-4): 225-242.
- Charola, A.E. (1987). Acid rain effects on stone monuments. *Journal of Chemical Education*. 64(5): 436.
- Charusiri, P., Sutthirat, C., Plathong, C., and Pongsapich, W. (2004). Geology and petrochemistry of basaltic rocks at Khao Kradong, Burirum, NE Thailand: implications for rock wool potentials and tectonic setting. *Journal of Scientific Research Chulalongkorn University*. 29: 81-103.
- Chigira, M. and Oyama, T. (1999). Mechanism and effect of chemical weathering of sedimentary rocks. *Engineering Geology*. 55(1-2): 3-14.
- Chutakositkanon, V., Charusiri, P., and Sashida, K. (2000). Lithostratigraphy of Permian marine sequences, Khao Pun Area, central Thailand: Paleoenvironments and tectonic history. *Island Arc*. 9(2): 173-187.

- Dew, R. E., King, R., Collins, A. S., Morley, C. K., Arboit, F., and Glorie, S. (2018). Stratigraphy of deformed Permian carbonate reefs in Saraburi province, Thailand. *Journal of the Geological Society*. 175(1): 163-175.
- Dick, J.C. and Shakoor, A. (1992). Lithological controls of mudrock durability. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 25(1): 31-46.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons, New York. 824p.
- Fahy, M.P. and Guccione, M.J. (1979). Estimating strength of sandstone using petrographic thin-section data. *Engineering Geology*. 16(4): 467-485.
- Fuenkajorn, K and Sri-in T. (2009). Prediction of long-term strength of some weak rocks in Thailand. In *Proceedings First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium* (pp. 16-19). Perth, Australia.
- Fuenkajorn, K. (2005). Predictability of Barton's joint shear strength criterion using field-identification parameters. *Suranaree Journal of Science and Technology*. 12: 296-308.
- Fuenkajorn, K. and Klanphumeesri, S. (2011). Laboratory determination of direct tensile strength and deformability of intact rocks. *Geotechnical Testing Journal*. 4(1): 97-102.
- Ghobadi, M.H. and Momeni, A.A. (2011). Assessment of granitic rocks degradability susceptible to acid solutions in urban area. *Environmental Earth Sciences*. 64(3): 753-760.
- Gökceoğlu, C. and Aksoy, H. (2000). New approaches to the characterization of clay-bearing, densely jointed and weak rock masses. *Engineering Geology*. 58(1): 1-23.
- Gökceoğlu, C., Ulusay, R., and Sönmez, H. (2000). Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. *Engineering Geology*. 57(3-4): 215-237.
- Gunsallus, K.T. and Kulhawy, F.H. (1984). A comparative evaluation of rock strength measures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. 21(5): 233-248.
- Gupta, A.S. and Seshagiri, K.R. (2000). Weathering effect on the strength and deformational behavior of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*. 56(3-4): 257-274.
- Gupta, V. and Ahmed, I. (2007). The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India. *Engineering Geology*. 95(3-4): 79-87.

- Handlin, J. and Hager, R.V. (1957). Experimental deformation of sedimentary rock under a confining pressure. *Journal American Association of Petroleum Geologists*. 41: 1-50.
- Hoek, E. (1965). *Rock Fracture Under Static Stress Conditions*. Mechanical engineering research institute. Report MEG383, Council for scientific and industrial research. South Africa.
- Horn, H.M. and Deere, D.U. (1962). Frictional characteristics of minerals. *Geotechnique*. 12(4): 319-335.
- ISRM. (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring*. New York: Oxford, 63p.
- Kasim, M. and Shakoor, A. (1996). An investigation of the relationship between uniaxial compressive strength and degradation for selected rock type. *Engineering Geology*. 44(1-4): 213-227.
- Kemthong, R and Fuenkajorn, K. (2005). Assessment of Barton's joint shear strength criterion using field-determined parameters. In *Proceeding of the International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of INDOCHINA (GEOINDO 2005)* (pp. 171-176). Khon Kaen, Thailand.
- Khamrat, S., Archeeploha, S. and Fuenkajorn, K. (2016). Pore pressure effects on strength and elasticity of ornamental stones. *ScienceAsia*. 42: 121-135.
- Kjaernsli, B. and Sande, A. (1963). Compressibility of some coarse-grained materials. In *Proceedings of the First European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 245-251). Wiesbaden, Germany.
- Kolay, E. and Kayabali, K. (2006). Investigation of the effect of aggregate shape and surface roughness on the slake durability index using the fractal dimension approach. *Engineering Geology*. 86(4): 271-284.
- 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. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 36(2): 139-153.
- Lashkaripour, G.R. and Ghafoori, M. (2003). Mineralogical controls of mudrock durability. In *Proceeding of the Ninth Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*. Durban, South Africa.
- Lee, S. (2016). *Acid Deposition Monitoring Network in East Asia. The third periodic report on the state of acid deposition in east Asia, part II national assessments*, Niigata-shi, Japan.
- Mahawat, C., Atherton, M. P., and Brotherton, M. S. (1990). The Tak Batholith, Thailand: the evolution of contrasting granite types and implications for tectonic setting. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*. 4(1): 11-27.

- Moon, V. (1993). Microstructural controls on geomechanical behavior of ignimbrite. *Engineering Geology*. 35(1-2): 19-31.
- Moon, V. and Jayawardane, J. (2004). Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu basalt, New Zealand. *Engineering Geology*. 74(1): 57-72.
- Moore, C. (1970). Suggested method for applications of x-ray diffraction of clay structural analysis to the understanding of the engineering behavior of soils, Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes: Fifth Edition. STP479-EB, ASTM Committee D-18, Ed., ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.
- 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.
- Nahon D.B. (1991). *Introduction to the Petrology of Soils and Chemical Weathering*. John Wiley and Sons, New York.
- Oguchi, C. T. and Matsukura, Y. (2000). Effect of porosity on the increase in weathering-rind thicknesses of andesite gravel. *Developments in Geotechnical Engineering*. 84: 305-317.
- Oyama, T. and Chigira, M. (1999). Weathering rate of mudstone and tuff on old unlined tunnel walls. *Engineering Geology*. 55: 15-27.
- Phueakphum, D., Fuenkajorn, K., and Walsri, C. (2013). Effects of intermediate principal stress on tensile strength of rocks. *International Journal of Fracture*. 181 (2): 163-175.
- Power, M.C. (1982). *Comparison Charts for Estimating Roughness and Sphericity*. AGI Data Sheets, American Geological Institute, Alexandria, VA.
- Promma, S. (2014). Prediction of mechanical property of carbonate rocks from physical, petrographic and chemical properties. Master Thesis, Suranaree University of Technology.
- Promma, S. and Chitnarin, A. (2015). The petrographic, geomechanical and chemical properties of carbonate rocks from central Thailand. In *Proceeding of the Rock Mechanics*. (pp. 414-429). Suranaree University of Technology.
- Racey, A., Love, M. A., Canham, A. C., Goodall, J. G. S., Polachan, S., and Jones, P. D. (1996). Stratigraphy and reservoir potential of the Mesozoic Khorat Group, NE Thailand: Part 1: stratigraphy and sedimentary evolution. *Journal of Petroleum Geology*. 19(1): 5-39.
- Robinson, D.A. and Williams, R.B.G. (1994). *Rock Weathering and Landform Evolution*. John Wiley and Sons. New York.

- Shakoor, A. and Bonelli, R.E. (1991). Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties and mechanical properties of selected sandstones. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. 28(1): 55-71.
- Singh, T. N., Madhusudhan, N., and Monjezi, M. (2001). Effect of acidic environment on slake durability of iron ore—An experimental approach. *Indian Journal of Engineering and Material*. 8:182-184.
- Sri-in, T. and Fuenkajorn, K. (2007). Slake durability index strength testing of some weak rocks in Thailand. In *Proceedings of the First Thailand Symposium*, (pp. 145-159). Nakhon Ratchasima.
- Tamrakar, N.K., Yokota, S., and Shrestha, S.D. (2007). Relationships among mechanical, physical and petrographic properties of Siwalik sandstones, central Nepal sub-Himalayas. *Engineering Geology*. 90(3-4): 105-123.
- Thambunya, S., Pisutha-Arnond, V., and Khantaprab, C. (2007). Depositional environments of Permian rocks of the Khao Khad Formation in central Thailand. *ScienceAsia*. 33: 371-381.
- Touloukian, Y.S., Judd, W.R., and Roy, R.F. (1981). *Physical properties of rocks and Minerals, Circlas Data Series on Materials Properties*. Vol. 2. McGraw Hill, pp. 85-91.
- Tugrul, A. (2004). The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology*. 75(3- 4): 215-227.
- Tugrul, A. and Zarif, I. H. (1999). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*. 51(4): 303-317.
- Ulusay, R., Tureli, K., and Ider, M.H. (1994). Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. *Engineering Geology*. 38(1-2): 135-157.
- Ündül, Ö. and Tuğrul, A. (2012). The influence of weathering on the engineering properties of dunites. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 45(2): 225-239.
- Vutukuri, V.S., Lama, R.D., and Saluja, S.S. (1974). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*. Trans tech publications. Clausthal, Germany. 280p.
- Walsri, C., Sriapai, T., Phueakphum, D., and Fuenkajorn, K. (2012). Simulation of sandstone degradation using large-scale slake durability index testing device. *Songklanalarin Journal Science and Technology*. 34: 587-596.
- Warren, J., Morley, C. K., Charoentitirat, T., Cartwright, I., Ampaiwan, P., Khositichaisri, P., and Yingyuen, J. (2014). Structural and fluid evolution of Saraburi Group sedimentary carbonates, central Thailand: A tectonically driven fluid system. *Marine and Petroleum Geology*. 55: 100-121.

- Yokota, S. and Iwamatsu, A. (1999). Weathering distribution in a steep slope of soft pyroclastic rock as an indicator of slope instability. *Engineering Geology*.55(1-2): 57-68.
- Yusof, N. Q. A. M. and Zabidi, H. (2016). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor. *Procedia Chemistry*. 19: 975-980.



ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร. ธนิษฐา ทองประภา เกิดเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม 2531 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชา เทคโนโลยี ธรณี ในปี พ.ศ. 2558 และเป็นนักวิจัยประจำหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2559 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้าน กลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์

