

สมบัติและสมรรถนะการตัดของหินบางชนิดของภาคใต้ประเทศไทย

ดนุพล ตันบุญกลาง และ วีระธัช พงศ์โอภาส

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Email : danupon.t@psu.ac.th1

บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงทดลองถึงสมรรถนะการตัดของใบเลื่อยวงเดือนขนาดเล็กแก่หิน 6 ชนิด ประกอบด้วย หินอ่อน หินปูน หินโดโลไมต์ หินไนส์ หินทรายแป้ง และแอนไฮไดรต์ ได้เก็บมาจากตามผลประกอบการเหมืองแร่ และหินโพลีธรรมชาติ เพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ การทดสอบความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ กำลังอัดแกนเดียว ความแข็งแบบชอร์ สมรรถนะการตัดหิน การดูดซับความร้อน และความต้านทาน ไฟฟ้าจำเพาะ เพิ่มการศึกษา กำลังอัดแกนเดียวของหินชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้องและสูงขึ้น โดยประเมินความสัมพันธ์ในบรรดาค่าความเร็วในการตัดตัวอย่างกับบรรดาสสมบัติหินด้วยการวิเคราะห์แบบถดถอยอย่างง่าย พบว่ามีแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการตัดกับค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ค่าความแข็งแบบชอร์ และค่ากำลังอัดแกนเดียว แบบจำลองประกอบไปด้วยสมบัติทางกายภาพเชิงกล และความร้อนให้ประโยชน์ แก่การปฏิบัติงาน และแง่เศรษฐกิจสำหรับอุตสาหกรรมหินประดับ

□ คำสำคัญ :

สมรรถนะการตัด กำลังอัดแกนเดียว การดูดซับความร้อน การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย อุตสาหกรรมหินประดับ

ABSTRACT

Experimental investigation of small-diameter circular saw was conducted on 6 rock types from southern Thailand. Rock type samples were collected from the quarries and outcrops for laboratory tests. It consisted of limestone, dolomite, marble, siltstone, gneiss and anhydrite. Bulk density, water absorption, uniaxial compressive strength, Shore hardness, sawability, thermal adsorption and electrical resistivity values were determined. Different types of rock on uniaxial compressive strength at ambient and elevated temperature were also determined. Specimen



cutting and rock properties were evaluated using simple regression analysis was developed. The regression equations revealed that potential relationship between electrical resistivity, shore hardness and uniaxial compressive strength input sets with sawability. The models which include physical, mechanical and thermal adsorption have practical and economical advantages for the dimension stone industry.

Keywords :

sawability, uniaxial compressive strength, thermal adsorption, simple regression, dimension stone industry

1. บทนำ

คุณลักษณะวัสดุหินทางวิศวกรรมที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับการตรวจสอบลักษณะหินและการออกแบบ คือ กำลังของเนื้อหินภายใน ซึ่งได้จากการทดสอบการอัดแกนเดียว เป็นวิธีหาปริมาณโดยตรงสำหรับการเปลี่ยนรูปกำลังอัดเสมอมา ต่อมาได้มีการทดสอบทางอ้อมที่ง่ายกว่า รวดเร็วกว่า และสะดวกกว่า อาทิเช่น วิธีแรงกดจุด [1] และค้อนชนิด [2] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจัดตั้งสหสัมพันธ์และตัวประกอบการแปลงค่าระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับค่าจากวิธีการทางอ้อม พบว่ามีความแปรผันมาก ไม่มีตัวประกอบใดที่ดี และมีความสัมพันธ์หลายชนิดที่สามารถใช้ได้กับหินชนิดเดียวกัน สมการอย่างง่ายที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยด้านกำลังของยิปซัม [3] หินคาร์บอน [4] ไม่ว่าจะเป็นการวัดสมบัติทางกายภาพ เช่น ความพรุนทั้งหมด หรือสมบัติอย่างอื่น เช่น โมดูลัสยืดหยุ่น ทั้งหมดล้วนใช้เวลาทดสอบนาน และเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นความสัมพันธ์เชิงสถิติเหล่านี้ คือ หาค่ากำลังของหินหรือปัจจัยการตัดหิน โดยใช้ผล ข้อมูลจากการทดสอบที่รวดเร็ว รวดเร็ว [5, 6] และเสียค่าใช้จ่ายเบื้องต้นต่ำแก่การศึกษาแหล่งหินประดับนั้น

โรงงานตัดหินประดับนิยมใช้เลื่อยวงเดือนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ การคาดคะเนสมรรถนะการตัดหิน (rock sawability) เป็นสิ่งสำคัญในการประเมิน

ค่าใช้จ่าย และวางแผนของโรงงาน สมรรถนะการตัดหินจึงขึ้นกับลักษณะของเครื่องจักร ได้แก่ ชนิด เส้นผ่านศูนย์กลางของใบเลื่อย ความลึกในการตัด อัตราสึกหรอของเลื่อย และสมบัติหิน นักวิจัยบางคนได้ศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างสมรรถนะการตัดกับสมบัติหิน อาทิเช่น สหสัมพันธ์สมรรถนะการตัดกับสมบัติสีลาวรรณนา (petrography) พบว่าขนาดเม็ดแร่เกี่ยวข้องกับ สมรรถนะเลื่อยหินมากกว่าปริมาณแร่ควอตซ์ [7, 8] สมการทำนายการสึกหรอจำเพาะกับแรงตัดหิน [9] ได้มีการเสนอแบบจำลองการถดถอยสำหรับสมรรถนะเลื่อยบนพื้นฐานองค์ประกอบวิทยาแร่ ความแข็ง ขนาดเม็ด และความต้านทานการขัดสี [10] ซึ่งอัตราส่วนของแร่ที่มีระนาบแนวแตกเรียบชัดเจนมากขึ้นทำให้หินตัดได้ง่ายขึ้น [11] ได้มีการเสนอแปลงรังสีสวนศาสตร์ (acoustic emission) ในระหว่างขัดด้วยเพชรลงบน หินแกรนิต และสามารถจำแนกสภาพการตัดหินธรรมชาติได้ รวมถึงกระบวนการตัดมีผลกระทบต่อบริบทต่างๆ และความถี่ของแร่ ขนาดเม็ด และระดับชั้นของการขัดประสานกัน [12] มีการเสนอสหสัมพันธ์ระหว่างพลังงานการตัดจำเพาะกับการผลิตแผ่นหินกับสมบัติหิน และพบว่ามีความสัมพันธ์ดี [13] ได้ผลการคาดคะเนกำลังอัดของหินในด้านวิศวกรรมเปิดหน้างานจากค่าความแข็งแบบชนิดกับการตัดหินของหินโคลน (mudstone) หินดินดาน (shale) [14] และ Brook [15] ได้พัฒนา

การทดสอบดัชนีใหม่ เรียกว่า ความแข็งบรูค (Brook Hardness) ด้วยเครื่องเฉพาะ เพื่อตรวจสอบรอยแหว่ง จากใบเลื่อยเพชรเลื่อนได้ นอกจากนี้ยังคาดคะเนพลังงานที่ได้จากการทดสอบดัชนีด้วย ต่อมาได้ใช้การวิเคราะห์การถดถอยและโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks -ANNs) เพื่อคาดคะเนกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น ความเร็วคลื่นพี ดัชนีกำลังแรงกดจุด ความแข็งแบบกระดอนค้อนชนิดตวัด และความพรุณสมการการถดถอยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชุดนำเข้า ได้แก่ ความเร็วคลื่นพี ดัชนีแรงกดจุด ตัวเลขกระดอนค้อนชนิดตวัดกับกำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นภายใต้ความสัมพันธ์เชิงเส้นที่มีสัมประสิทธิ์ (ส.ป.ส.) แห่งการตัดสินใจ (R^2) 0.64 และ 0.56 ตามลำดับ โครงข่ายประสาทเทียม ช่วยปรับให้ค่า ส.ป.ส. อยู่ในระดับยอมรับมากขึ้นคือ 0.86 และ 0.92 สำหรับกำลังอัด และถึง 0.77 และ 0.82 สำหรับโมดูลัสยืดหยุ่น [16]

ผลการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกระดอน ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ค่าการดูดซับความร้อน กำลังอัดแกนเดียวและสมรรถนะตัดหินของหินชนิดต่างๆ จะช่วยในการประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตหินประดับ และพยากรณ์ค่าสมบัติของหินนั้น โดยเฉพาะความเร็วในการตัดหินจากสมการความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จากการผลการทดลองนี้ ช่วยลดการทดสอบที่ต้องเตรียมตัวอย่างซับซ้อน การคำนวณงานสำรวจแหล่งแร่ และการทำเหมืองแร่ ก็จะทำให้สะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น รวมถึงการวางแผนจัดการผลิตหินประดับและกลยุทธ์จำหน่าย

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาสมบัติทางกายภาพเชิงกลและความร้อนของหินบางชนิดจากภาคใต้ และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะตัดหินกับสมบัติดังกล่าวด้วยสมการความสัมพันธ์อย่างง่าย

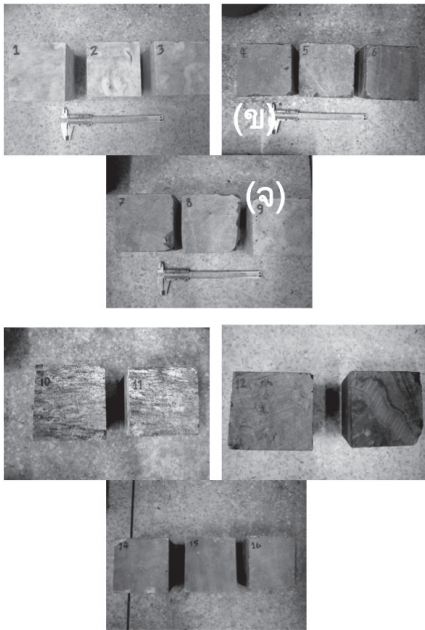
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้

ตัวอย่างหินทดลองมี 6 ชนิด ประกอบด้วย หินอ่อน หินทรายแป้ง หินปูน โดโลไมต์ หินชีสต์ และแอนไฮไดรต์ ซึ่งหินอ่อนมาจากเหมืองหินอ่อนหน้า วัดถ้ำ อ.เมือง จ.ยะลา มีสีขาวขุ่น เนื้อผลึกละเอียดถึงปานกลาง (ภาพที่ 1 ก) หินปูนมาจากเหมืองโซคพนา จ.สุราษฎร์ธานี เป็นหินสีเทา เนื้อจุณผลึก (cryptocrystalline) ดังในภาพที่ 1 (ข) หินโดโลไมต์มาจากเหมืองโซคพนา จ.สุราษฎร์ธานี เป็นหินสีเทาเนื้อจุณผลึก (ภาพที่ 1 ค) หินโนสมาจากเขาพลาญดำ ต.ทุ่งไผ่ อ.สิชล จ.นครศรีธรรมราช มีเนื้อริ้วขนานไม่ชัดเจน บางครั้งลายคล้ายเลียนไม้ (ภาพที่ 1 ง) หินทรายแป้งมาจากเหมืองหินเก่า อ.ศรีบรรพต จ.พัทลุง เป็นหินสีเทาดำ มีลักษณะเนื้อละเอียดสลับกับชั้นหินเชิร์ต มักมีสายแร่ควอตซ์ขาวขุ่นตัดผ่านมาก (ภาพที่ 1 จ) และแอนไฮไดรต์มาจากเหมืองโซคพนา จ.สุราษฎร์ธานี มีสีเทา เนื้อละเอียด และมีความวาวแบบน้ำมันสน (ภาพที่ 1 ฉ)

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบความหนาแน่นรวม (bulk density) การดูดซึมน้ำ (water absorption) ความแข็งแบบชอร์ (Shore Hardness) ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (resistivity) และอัตราความเร็วในการตัดหินด้วยความเร็วคงที่ ได้แก่หินตัวอย่างทรงลูกบาศก์ มีขนาด กว้าง×ยาว×หนาประมาณ 100×100×100 มม. ส่วนกำลังอัดแกนเดียวที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูงกว่า ใช้ตัวอย่างเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง×ยาว×สูง ประมาณ 50×50×100 มม. อัตราส่วนสูงต่อกว้างเป็น 2



ภาพที่ 1 ตัวอย่างหินมองด้านบน (ก) หินอ่อน (ข) หินปูน (ค) หินโดโลไมต์ (ง) หินไนล์ (จ) หินทรายแป้ง และ (ฉ) หินแอนไฮไดรต์

3. วิธีการทดสอบ

3.1 ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำ

ความหนาแน่นรวม คือการรวมน้ำหนักมวลหินต่อปริมาตรหิน แสดงนิพจน์ดังสมการที่ (1) และการดูดซึมน้ำ คือปริมาณน้ำที่ดูดซึมเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของมวลหินตัวอย่างแช่น้ำ 48 ชั่วโมง อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามวิธีของ ISRM [17] คำนวณตามสมการที่ (2)

$$D = M/V \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$Ab = (W_w - W_d) / W_d \times 100 \quad \dots\dots\dots(2)$$

D = ความหนาแน่นรวม หน่วย กิโลกรัม/ลบ.ม.

Ab = การดูดซึมน้ำ หน่วย %

W_w = น้ำหนักหินอิ่มน้ำผิวแห้ง หน่วย กิโลกรัม

W_d = น้ำหนักหินอบแห้ง หน่วย กิโลกรัม

3.2 ความต้านทานไฟฟ้า

เป็นการวัดด้วยเครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้า ขนาด 1000 เมกะโอห์ม โดยนำขั้วบวกและลบแตะที่ผิวก่อนหินตัวอย่างในบริเวณที่ต้องการวัด และให้ขั้วทั้งสองอยู่ในตำแหน่งตรงกันข้ามกัน คำนวณจากสมการที่ 3

$$\rho = (R \times A) / L \quad \dots\dots\dots(3)$$

ρ = ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

R = ความต้านทานไฟฟ้า

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ

L = ความยาวของก้อนตัวอย่าง

3.3 การทดสอบการดูดซับความร้อน

เป็นการวัดอุณหภูมิของหินหลังจากได้รับความร้อน และแผ่รังสีความร้อนออกมาที่ผิวตัวอย่าง (thermal radiation) นำก้อนตัวอย่างเข้าตู้อบความร้อนที่ตั้งอุณหภูมิไว้ต่างกัน 3 ระดับ คือ 100 200 และ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำก้อนตัวอย่างออก มาวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องเทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (DIGICON DP-88)

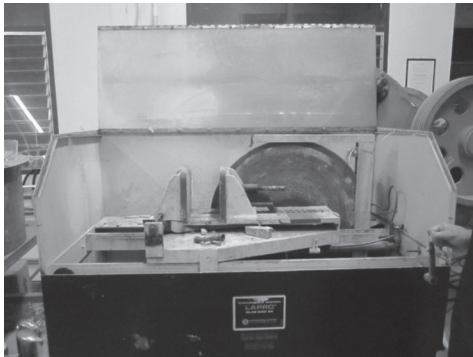
3.4 การทดสอบสมรรถนะการตัด

การทดสอบสมรรถนะการตัด คือ การวัดความเร็วในการเลื่อยด้วยเครื่องตัดหินชนิดใบเลื่อยวงเดือนขอบเคลือบด้วยทั้งสแตนคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ซม. (ภาพที่ 2) หล่อลื่นใบเลื่อยในระหว่างการตัดด้วยน้ำมันก๊าด ก้อนหินตัวอย่างเลื่อนเข้าหาใบเลื่อยด้วยน้ำหนักถ่วง 12 กิโลกรัม ความเร็วคงที่ในการตัดหินขนาดพร้อมบันทึกเวลา คำนวณอัตราการตัดหินเชิงปริมาตร (ความยาวตัวอย่าง×ความสูงตัวอย่าง×ความหนาใบเลื่อย) ได้ตามสมการที่ (4)

$$\text{สมรรถนะการตัด} = V/t \quad \dots\dots\dots(4)$$

V = ปริมาตรหินตัดได้ หน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร

t = เวลาตัดหิน หน่วย วินาที



ภาพที่ 2 เครื่องตัดหินวงเดือนใบมีด
เคลือบด้วยทั้งสแตนคาร์ไบด์

3.4 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและแข็งแบบชอร์

ทดสอบด้วยเครื่องกดระบบไฮดรอลิกที่มีแรงกดสูงสุด 1,500 กิโลนิวตัน ติดตั้งเครื่องรับรู้การแตกความเร็วกดในช่วงกำหนด 0.5-1.0 เมกะพาสคัลต่อวินาที กับตัวอย่างที่ไม่ผ่านและผ่านการอบความร้อนของอุณหภูมิทั้งสามระดับดังกล่าว ซึ่งต่างจากวิธี C ใน ASTM D7012-13 [18] ตรงที่ก่อนทดสอบเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยม (ภาพที่ 1 และ 11) ส่วนการทดสอบความแข็งแบบชอร์ (Shore hardness) ใช้เครื่อง EQUATIP SN 898-1540 V.2.8 วัด 3 ตำแหน่ง และเฉลี่ยค่าสมบัติทั้งหมดมาสร้างสมการความสัมพันธ์แบบถดถอยอย่างง่าย (simple regression analysis)

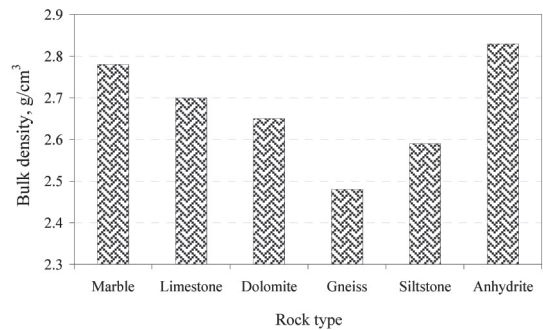
4. ผลการวิจัย

การทดสอบสมบัติทางกายภาพได้ดำเนินการทดสอบ 3 ชนิด คือ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ และความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ตารางที่ 1) ทางความร้อนและเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแบบชอร์ กำลังอัดและสมรรถนะการตัดหิน (ตารางที่ 2)

4.1 ความหนาแน่นรวม

จากผลการทดสอบหินทั้งหกชนิด (ตารางที่ 1) พบว่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของแอนไฮไดรต์ มีค่ามากที่สุดประมาณ 2,830 กก./ลบ.ม. ส่วนความ

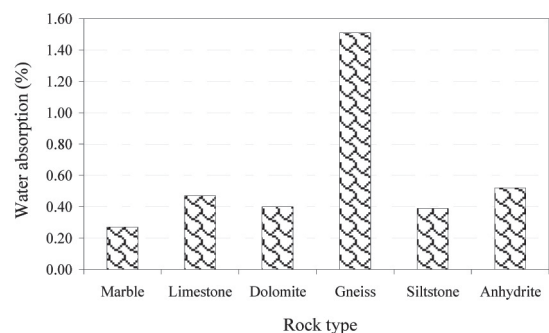
หนาแน่นน้อยที่สุดคือ หินไนส์ประมาณ 2,480 กก./ลบ.ม. ส่วนหินอ่อนมีค่า 2,780 กก./ลบ.ม. หินปูน 2,700 กก./ลบ.ม. โดโลไมต์ 2,650 กก./ลบ.ม. และหินทรายแป้ง 2,590 กก./ลบ.ม. (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 ความหนาแน่นรวมของหิน
ทดสอบจากภาคใต้

4.2 การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำเฉลี่ยของหินตัวอย่างมีค่าสูงสุดของหินไนส์คือ 1.51% และค่าต่ำสุดของหินอ่อนมีค่า 0.27% (ตารางที่ 1) ส่วนหินชนิดอื่นๆ นั้น หินปูน 0.47% โดโลไมต์ 0.4% หินทรายแป้ง 0.39% และแอนไฮไดรต์ 0.52% (ภาพที่ 4) ซึ่งตามเกณฑ์ ISRM [17] กำหนดหินดูดซึมน้ำเกิน 0.4 จัดเป็นหินดูดซึมน้ำมาก ดังนั้นในกลุ่มหินตัวอย่าง ได้แก่ หินอ่อน โดโลไมต์ หินทรายแป้ง อยู่ในกลุ่มดูดซึมน้ำน้อย ส่วนหินปูน หินไนส์ แอนไฮไดรต์อยู่ในกลุ่มหินดูดซึมน้ำมาก นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการดูดซึมน้ำแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นอย่างเห็นได้ชัด (ภาพที่ 3)



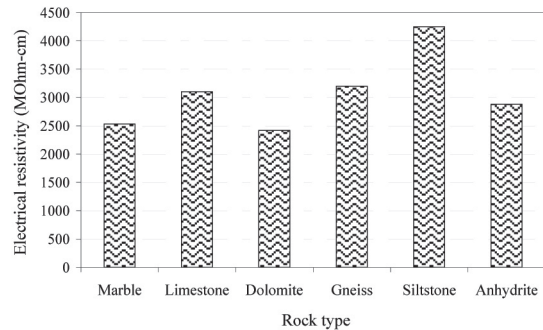
ภาพที่ 4 การดูดซึมน้ำของหินทดสอบจากภาคใต้



4.3 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงสุดคือ หินทรายแป้ง 5153 $M\Omega\text{-cm}$ และต่ำสุดคือ โดโลไมต์ 2,101 $M\Omega\text{-cm}$ และหินชนิดอื่นค่าเฉลี่ยคือ หินอ่อน 2,305 $M\Omega\text{-cm}$ หินปูน 3,103 $M\Omega\text{-cm}$ หินไนส์ 3200 $M\Omega\text{-cm}$ แอนไฮไดรต์ 2,881 $M\Omega\text{-cm}$ (ตารางที่ 1) สังเกตเห็นว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มสัมพันธ์กับเนื้อและชนิดแร่ประกอบในหิน หินซึ่งมีเนื้อประสมละเอียด (fined grain clastic texture) และแร่ซิลิกาเกิดมาก ได้แก่ หินทรายแป้ง หินไนส์ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูง (ภาพที่ 5) ส่วนหินมีเนื้อหยาบกว่ามี

ค่าลดลง โดยเฉพาะพวกหินเกลือระเหย (Evaporite) อย่างหินแอนไฮไดรต์และหินคาร์บอเนต (หินปูน หินโดโลไมต์ และหินอ่อน)



ภาพที่ 5 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินทดสอบจากภาคใต้

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพบางประการของหินบางชนิดของภาคใต้ประเทศไทย

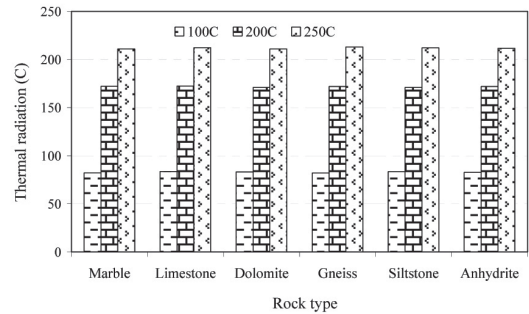
Test types	Marble	Limestone	Dolomite	Gneiss	Siltstone	Anhydrite
Bulk density, kg/m^3	2.78 ± 0.19	2.70 ± 0.04	2.65 ± 0.08	2.48 ± 0.01	2.59 ± 0.04	2.84 ± 0.06
Water absorption, %	0.28 ± 0.02	0.47 ± 0.14	0.97 ± 0.98	1.51 ± 0.01	0.40 ± 0.08	0.53 ± 0.14
Electrical resistivity $M\Omega\text{-cm}$	2532 ± 305	3103 ± 160	2417 ± 310	3200 ± 88	4252 ± 1274	2882 ± 88
Thermal absorption at room temperature	6 ± 2.08	7 ± 0.56	8 ± 0.37	8	6 ± 3.62	7 ± 0.12
Thermal adsorption at 100°C , $^\circ\text{C}$	75 ± 9.07	64 ± 2.62	66 ± 2.08	67	68 ± 1.72	65 ± 2.24
Thermal adsorption at 200°C .	113 ± 7.86	106 ± 3.96	110 ± 5.86	114	114 ± 0.60	102 ± 1.80
Thermal adsorption at 250°C .	156 ± 9.45	144 ± 1.86	162 ± 16.77	133	147 ± 8.82	146 ± 8.05

4.4 การดูดซับความร้อน

การดูดซับความร้อนแปรผันตามอุณหภูมิที่ให้อคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิความร้อนเป็น 100 200 และ 250° ซ. ค่าวัดได้ต่างจากอุณหภูมิที่ให้ (ตารางที่ 1) ดังนั้นตัวอย่างแต่ละชนิดมีการดูดซับความร้อน (thermal adsorption) ไว้ภายในเนื้อหินประมาณ 18 28 และ 38° ซ. ตามลำดับ แต่ในหินแต่ละชนิดมีการแผ่รังสีความร้อนของก้อนตัวอย่างที่ใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 6) พิจารณา ในรายละเอียดชนิดหิน พบว่ากลุ่มหินคาร์บอเนตแผ่รังสีความร้อนได้มากกว่ากลุ่มหินที่มีหมู่แร่ซิลิกาประกอบ แต่หินอาจเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแร่ภายใน เช่น หินแอนไฮไดรต์เปลี่ยนลักษณะ (deformation) สีซีดขึ้น และเนื้อกรอบร่วนหลุดง่ายมากขึ้น กลายเป็นปูนขาว แสดงถึงชนิดแร่และเนื้อหินมีอิทธิพลอย่างมากต่อการดูดซับความร้อน นอกจากนี้ยังแปรผันตามค่าการดูดซึม น้ำหรือนัยหนึ่งความพรุนปรากฏเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ugur et al. [19]

4.5 ความแข็งแบบชอร์

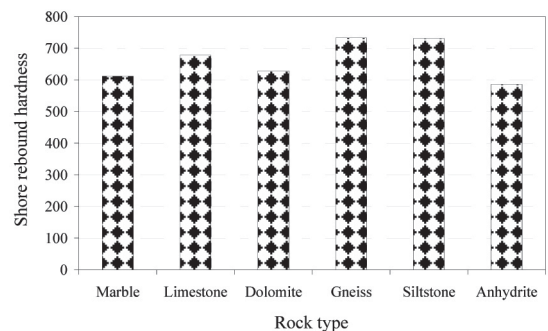
ความแข็งแบบชอร์ของหินตัวอย่างทดสอบพบว่ามีค่าที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน มีค่าสูงสุดที่หินไนส์ คือ 733 และต่ำสุดที่แอนไฮไดรต์ คือ 586 และหินชนิดอื่นๆ (ตารางที่ 2) ได้ค่าดังนี้ หินอ่อนมีค่า 612 หินปูนได้ค่า 678 โดโลไมต์มีค่า 629 และหินทรายแป้งมีค่า 731 (ภาพที่ 6) ค่านี้สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 6 การแผ่รังสีความร้อนของหิน

ทดสอบจากภาคใต้

หากพิจารณาค่าความแปรผันของความแข็งแบบชอร์เหล่านี้ขึ้นกับแร่ประกอบหิน หากหินประกอบด้วยแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ ก็ให้ค่าความแข็งแบบชอร์สูง นอกจากนี้ยังขึ้นกับลักษณะเนื้อหินเช่นกัน ตัวอย่างทดสอบครั้งนี้ได้ตัดตั้งฉากกับสภาพเรียงตัว แบบหินไนส์ (gneissosity) งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าความแข็งมักแปรผันตามค่ากำลังอัด [3] รวมทั้งผลกระทบจากมิติของก้อนตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน 1:2



ภาพที่ 7 ความแข็งแบบชอร์ของหิน

ทดสอบจากภาคใต้



ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลบางประการของหินบางชนิดของภาคใต้ประเทศไทย

Test types	Marble	Limestone	Dolomite	Gneiss	Siltstone	Anhydrite
Shore hardness	612±12.66	678±50.54	629±76.16	732±50.20	731±89.09	586±27.06
Sawability	105±4.23	75±11.68	89±8.50	80±5.67	54±2.94	81±6.10
Compressive strength at room temperature	66±13.11	46±17.82	364±6.33	34	82±1.41	85±47.48
Compressive strength at 100°C.	48±4.65	43±19.42	42±9.01	22	72±28.23	72±21.53
Compressive strength at 200°C.	73±22.12	46±27.32	38±18.83	91	111±7.28	98±47.04
Compressive strength at 250°C.	52±20.20	35±10.91	28±14.48	57	71±15.55	87±20.87

4.6 กำลังอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 2) เห็นได้ชัดว่าที่ระดับอุณหภูมิ 200°ซ. หินที่มีค่าสูงสุดคือ หินทรายแป้ง 110.79 เมกะพาสคัล และที่ความร้อนอุณหภูมิ 100°ซ. หินที่มีค่าต่ำสุดคือ หินไนส์ 22.35 เมกะพาสคัล ซึ่งจากการจำแนกของ Deere and Miller [2] ที่ใช้เกณฑ์กำลังอัดแกนเดียว สามารถจัดเข้าเป็นกลุ่มได้ว่า หินอ่อน มีกำลังอัดระดับปานกลาง หินปูน และโดโลไมต์ มีกำลังอัดระดับต่ำ และหินไนส์ หินทรายแป้ง และแอนไฮไดรต์ มีกำลังอัดอยู่ในช่วงระดับต่ำถึงสูง ขึ้นอยู่กับแต่ละระดับอุณหภูมิในหินนั้น (ภาพที่ 8) ซึ่งการทดสอบหินไนส์ชนอมได้ค่ากำลังแรงกดจุด 2.84 เมกะพาสคัล หรือแปลงเป็นกำลังอัดประมาณ 62.48 เมกะพาสคัลตามวิธี ISRM [17] สูงกว่ากำลังอัดหินไนส์เขาพลาายดาที่ทดสอบโดยตรงครั้งนี้ แต่ทั้งสองก็ต่ำกว่าหินไนส์เขาเต่าจากหัวหิน [20] อย่างไรก็ดีตามแนวโน้มหินที่ได้รับความร้อนสูงกว่า 100°ซ. ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 8)

เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดแกนเดียวของหินปูนและโดโลไมต์ จากในกลุ่มตัวอย่างทดสอบของ Kahraman [4] ได้ค่า 136.7 และ 175.0 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เห็นว่ากำลังอัดของหินปูน และโดโลไมต์ที่ทดสอบครั้งนี้มีค่าต่ำกว่ามาก คือค่าสูงสุดที่ 46.40 และ 41.74 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งสันนิษฐานว่าอาจมาจากสาเหตุความแตกต่างทางคิลาวรรณนา เนื่องจากหินปูนมีรอยแทรกของสายแร่แคลไซต์ อันส่งผลให้ขาดความเป็นเนื้อเอกพันธ์ ส่วนโดโลไมต์แม้เป็นเนื้อจุณผลึกแต่ก็มีรูพรุน ทำให้ดูดซึมน้ำมาก และหินไนส์เช่นกัน มีผลต่อกำลังอัดลดลง ทำนองเดียวกับค่าความพรุนของ Kahraman et al. [21] รวมทั้งขนาดและรูปร่างตัวอย่างที่ทดสอบเป็น ทรงแท่งแตกต่างกัน

ผลจากอุณหภูมิระดับต่างๆ ที่มีต่อค่ากำลังอัดแกนเดียวมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ค่ากำลังอัดของหินโดยเฉพาะหินทรายแป้ง หินไนส์ และแอนไฮไดรต์ (ตารางที่ 2) นอกจากนั้นหินอ่อน หินปูน และโดโลไมต์ จะมีผลค่อนข้างน้อย สังเกตว่าหิน

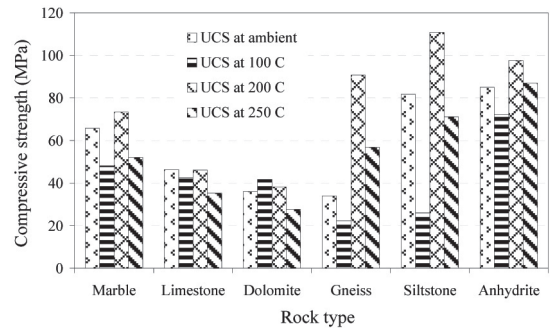


ประกอบด้วยหมู่แร่ซิลิเกตมาก (ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ ไมกา) แผ่รังสีความร้อนได้ดีกว่า และมีผลอย่างมากต่อกำลังอัด ในขณะที่หินคาร์บอเนต จะแผ่รังสีความร้อนได้น้อย จึงไม่ส่งผลต่อกำลังอัด (ภาพที่ 9)

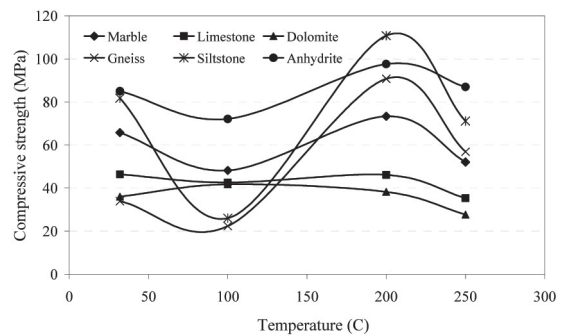
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจากระดับอุณหภูมิห้องเป็น 100 °ซ. ค่ากำลังอัดแกนเดียวได้เปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงต่ำสุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 200 °ซ. ค่ากำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นจนสูงสุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 250 °ซ. ค่ากำลังอัดแกนเดียวได้ลดลงอีกครั้ง (ตารางที่ 2) แต่มีเฉพาะแอนไฮไดรต์ที่การเปลี่ยนแปลงไม่เป็นไปตามที่กล่าวข้างต้น คือ กำลังอัดแกนเดียวที่ 100 °ซ. มีค่าสูงสุด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังอัดแกนเดียวได้มีค่าลดลง (ภาพที่ 10) ทั้งนี้เนื่องจากหินแอนไฮไดรต์บางส่วนได้เปลี่ยนลักษณะเข้าสู่ปูนขาว จากการที่โครงสร้างผลึกสูญเสียน้ำมาก ซึ่งค่ากำลังอัดในอุณหภูมิที่ต่างกันของหินกลุ่มดังกล่าว (ภาพที่ 10) สามารถแบ่งประเภทกลุ่มตัวอย่างตามผลของความร้อนที่มีต่อกำลังอัดของหิน ได้ดังนี้

ความร้อนมีผลกระทบมาก ได้แก่ หินทราย แป้ง และหินไนล์ ความร้อนมีผลกระทบปานกลาง ได้แก่ หินอ่อน และแอนไฮไดรต์ และความร้อนมีผลกระทบน้อย ได้แก่ หินปูน และโดโลไมต์

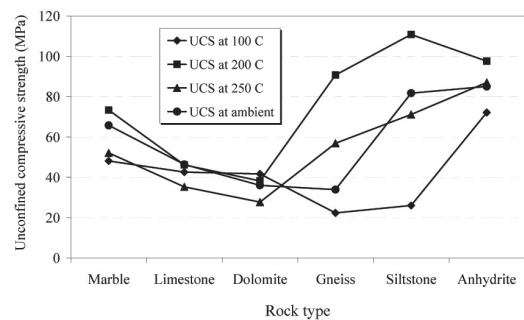
ลักษณะการแตกของหินตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องมีการแตกในแนวตั้งผ่าซีก ซึ่งเมื่อแตกแล้วมักเป็นเศษเหลี่ยมเกิดจากแรงกด และแรงดึงในหินประเภทเนื้อละเอียดมาก และเนื้อหยาบผลึก ได้แก่ หินปูน (ภาพที่ 11 ข) โดโลไมต์ (ภาพที่ 11 ค) หินทรายแป้ง และหินไนล์ (ภาพที่ 11 ง) ส่วนหินที่เนื้อละเอียดจะมีการแตกแบบรูปกรวยเกิดจากแรงเฉือนที่ไขว้กัน ได้แก่ หินอ่อน (ภาพที่ 11 ก) และแอนไฮไดรต์ (ภาพที่ 11 จ)



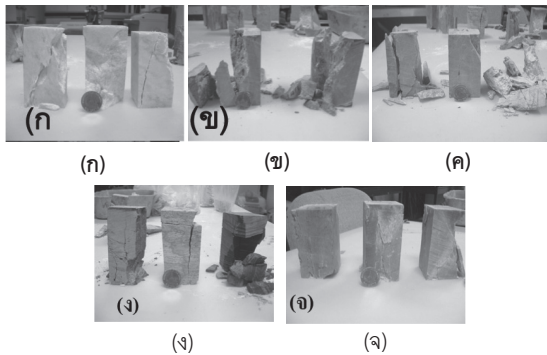
ภาพที่ 8 กำลังอัดของหินทดสอบจากภาคใต้ที่อุณหภูมิต่างกัน



ภาพที่ 9 ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนที่มีต่อกำลังอัดของหินทดสอบจากภาคใต้



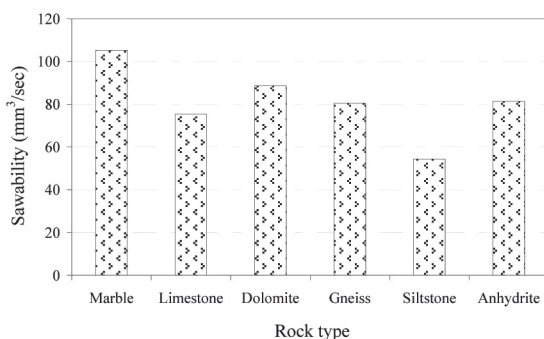
ภาพที่ 10 อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อนที่มีต่อกำลังอัดของหินทดสอบจากภาคใต้



ภาพที่ 11 ลักษณะตัวอย่างหินหลังพิบัติ (ก) หินอ่อน (ข) หินปูน (ค) หินโดโลไมต์ (ง) หินไนส์ (ก่อนตรงกลาง) หินทรายแป้ง (สองด้านข้าง) และ (จ) หินแอนไฮไดรต์

4.7 สมรรถนะการตัดหิน

ค่าสมรรถนะการตัดเฉลี่ยสูงสุด (เลื่อยได้ง่ายที่สุด) คือ หินอ่อน ที่มีค่าสมรรถนะการตัด 105.03 ลบ.มม./วินาที ใกล้เคียงกับผลทดสอบของ ดนุพล และคณะ [22] และค่าเฉลี่ยต่ำสุด (เลื่อยยากที่สุด) คือ หินทรายแป้ง ที่มีค่าสมรรถนะการตัด 54.34 ลบ.มม./วินาที (ตารางที่ 2) และสำหรับค่าสมรรถนะการตัดของหินอื่นๆ คือ หินปูน 73.3 ลบ.มม./วินาที หินไนส์ 80.49 ลบ.มม./วินาที โดโลไมต์ 88.61 ลบ.มม./วินาที แอนไฮไดรต์ 81.3 ลบ.มม./วินาที (ภาพที่ 12)



ภาพที่ 12 สมรรถนะการตัดหินทดสอบจากภาคใต้

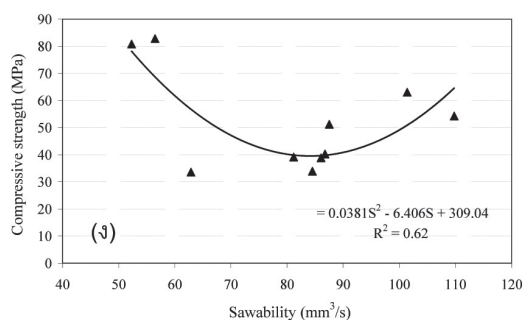
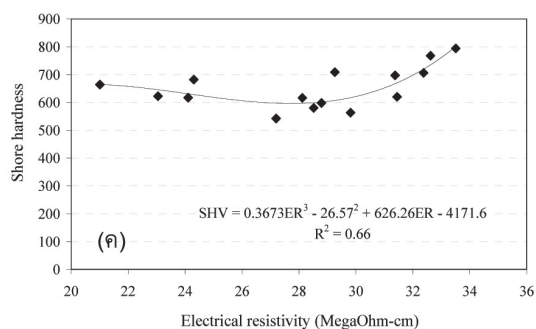
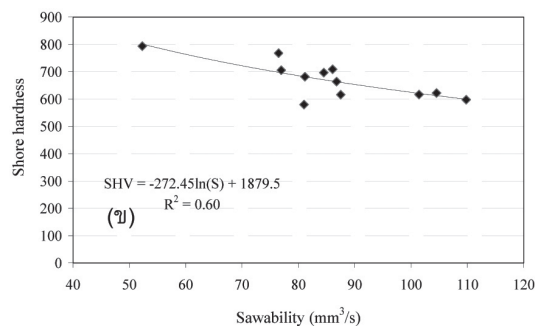
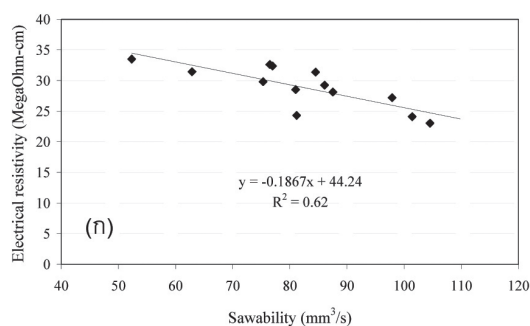
4.8 ความสัมพันธ์การถดถอยของหินทดสอบ

สมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลของหิน ตัวอย่างได้นำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ถดถอยอย่างง่าย (ตารางที่ 3) เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่ที่มีความสัมพันธ์ได้แก่ สมรรถนะการตัดหิน (S) ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ρ) ความแข็งแบบชอร์ (SHV) กำลังอัด (σ_c) มีค่าสัมประสิทธิ์แห่งการตัดสินใจ หรือ R^2 เกิน 0.50 หรือสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficients, r) มากกว่า 0.70 พบว่ามีอยู่เพียง 8 คู่ โดยเฉพาะความต้านทานไฟฟ้ากับสมรรถนะการตัดหินมีความสัมพันธ์เชิงเส้น (ภาพที่ 13 ก) ขณะที่สัมพันธ์แบบเดียวกันจากผลทดลองของ Kahraman and Fener [23] เป็นความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะกับความหนาแน่น การทดสอบครั้งนี้มีหินสองประเภท คือ หินตะกอน และหินแปร ซึ่งในหินแปรก็มีสภาพเรียงตัวแบบหินไนส์ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสมรรถนะการตัดหินพบว่า ขณะที่ทดสอบการตัดนั้นขนานไปกับร้าวขนานของหินไนส์ ดังนั้นตัวอย่างทดสอบสภาพร้าวขนานตั้งฉาก กับทิศทางแรงกดทำให้ค่ากำลังอัดสูง ขณะที่ค่าสมรรถนะ การตัดนั้นสูงเช่นกัน ซึ่งพบว่าค่าผลทดสอบของหินทั่วไป นั้นมักกระเจิง ค่าตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมักปรากฏค่าการเบี่ยงเบนสูง และความสัมพันธ์แห่งการตัดสินใจหลายคู่ของสมบัติเชิงกลที่มักต่ำ [24, 25] ซึ่ง Fener et al. [26] วิเคราะห์ด้วยสหสัมพันธ์อย่างง่าย มีค่าบางคู่ $R^2 = 0.29-0.50$ แต่เมื่อนำค่าพิจารณาด้วยการ



ตารางที่ 3 สมการความสัมพันธ์และค่าสัมประสิทธิ์แห่งการตัดลิไน

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม	สมการสหสัมพันธ์	R^2	r
Sawability	Compressive strength	$S = 0.0381\sigma_c^2 - 6.406\sigma_c + 309.04$	0.62	0.79
Shore hardness	Electrical resistivity	$SHV = 0.378\rho^3 - 27.487\rho^2 + 652.39\rho - 4417.3$	0.66	0.81
Electrical resistivity	Sawability	$\rho = -0.1867S + 44.24$	0.62	0.79
Shore hardness	Sawability	$SHV = -272.5\ln(S) + 1879.5$	0.60	0.77



ภาพที่ 13 สหสัมพันธ์ระหว่าง (ก) สมรรถนะการตัดหินกับความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ข) สมรรถนะการตัดหิน กับความแข็งแบบชอร์ (ค) ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะกับความแข็งแบบชอร์ และ (ง) สมรรถนะการตัดหินกับกำลังอัด



วิเคราะห์ค่า R^2 t-value และ F-ratio และสร้างความสัมพันธ์เชิงพหุคูณ (multiple regression analysis) ก็สามารถได้ผลการความสัมพันธ์ขึ้นมาสูง ($R^2 = 0.81-0.86$) หรือวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม [16] หรือ Fuzzy ranking [27] หรือ Fuzzy Delphi [28] ได้เช่นกัน แต่การศึกษาครั้งนี้กำหนดกรอบใช้ความสัมพันธ์อย่างง่ายเท่านั้น ดังนั้นเมื่อกลั่นกรองเพื่อให้ได้สมการสหสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับสมรรถนะการตัดจึงเหลือเพียง 4 คู่ ดังในภาพที่ 13 ซึ่งหากให้ความสัมพันธ์เด่นชัดควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างทดลองและชนิดหินให้มากกว่านี้ หรือวิเคราะห์ทางสถิติตรวจสอบด้วย t-value และ F-test สร้างความสัมพันธ์ที่ใช้ตัวแปรพหุคูณ เพื่อปรับปรุงให้ความสัมพันธ์ดีขึ้น จนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงเป็นที่ยอมรับได้สำหรับใช้ในงานด้านต่างๆ ต่อไป

5. สรุปและวิจารณ์ผล

อุณหภูมิมีผลต่อค่ากำลังอัด โดยมีค่าสูงหรือต่ำนั้นขึ้นกับระดับอุณหภูมิ และอุณหภูมิจะมีผลกระทบมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหมู่แร่ที่เป็นส่วนประกอบของหิน โดยหินประกอบด้วยหมู่แร่ซิลิเกต (ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ ไมกา) มากมีพฤติกรรมการแผ่รังสีความร้อนได้ดีกว่า หินคาร์บอเนต จึงทำให้ค่ากำลังอัดที่อุณหภูมิต่างกันมีความแตกต่างมากกว่า

จากผลการทดสอบกำลังอัดที่ระดับความร้อนต่างกันครั้งนี้ สามารถแบ่งประเภทกลุ่มตัวอย่างตามผลของความร้อนที่มีต่อกำลังอัดของหินได้ดังนี้ มีผลกระทบมาก ได้แก่ หินทรายแป้งและหินไนส์ มีผลกระทบปานกลาง ได้แก่ หินอ่อนและแอนไฮไดรต์ และมีผลกระทบน้อย ได้แก่ หินปูนและโดโลไมต์

ผลการทดสอบหิน 6 ชนิด จากพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย มีแนวโน้มความสัมพันธ์อย่างง่ายด้านสัมประสิทธิ์แห่งการตัดสินใจสูงกว่า 0.60 ประเมินค่าสมรรถนะ การตัดกับปัจจัย ได้แก่ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ความแข็งแบบชอร์ และกำลังอัดแกนเดียว

6. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยธรณีเทคนิค และวัสดุก่อสร้างนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Broch E and Franklin JA (1972). The point-load strength test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 9(6): 669-676.
- [2] Deere DU and Miller RP (1966). Engineering classification and index properties for intact rocks. Tech Report. Air Force Weapons Lab., New Mexico, No. AFNL-TR, 65-116. Kirtland.
- [3] Yilmaz I and Sendir H (2002). Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). Engineering Geology. 66(3-4): 211- 219.
- [4] Kahraman S (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 38: 981- 994.
- [5] ดนุพล ตันนโยภาส วิชัย กาญจนะ ชิตพล เอียดปาน และสุชาติ จันทรมณีย์. (2551). วิธีการใหม่สำหรับประเมินคุณภาพแผ่นหินระดับชนิดแกรนิตเชิงพาณิชย์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 8-9 พฤษภาคม 2551, หน้า 593-598.
- [6] ดนุพล ตันนโยภาส ไพโรจน์ พัฒนวิศุทธิ์ ชิตพล เอียดปาน และสุชาติ จันทรมณีย์. 2553. ประเมินคุณภาพแผ่นหินระดับชนิดหินอ่อนเชิงพาณิชย์. การประชุมวิชา

การทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8 22-23 เมษายน 2553 หน้า 836-840.

[7] Norling RG (1971). Mechanical properties and the composition of some Swedish natural stone types and their effect on cutting results. In: Presentation at the Conference on Diamond in the Construction and Stone Industry, [in German].

[8] Wright DN and Cassapi VB (1985). Factors influencing stone sawability. *Industrial Diamond Review*. 2: 84–87.

[9] Unver B (1996). A statistical method for practical assessment of sawability of rocks. In: Barla M, editor. *Proc. ISRM Int. Symp Eurock'96*. Rotterdam: Balkema: 59–65.

[10] Burgess RB (1978). Circular sawing granite with diamond saw blades. In: *Proceedings of the Fifth Industrial Diamond Seminar*. pp. 3–10.

[11] Hausberger P (1989). Causes of the different behaviour of rocks when machined with diamond tools. *Industrial Diamond Review*. 3: 1–25.

[12] Clausen R, Wang CY, and Meding M (1996). Characteristics of acoustic emission during single diamond scratching of granite. *Industrial Diamond Review*. 3: 96–99.

[13] Ceylanoglu A and Gorgulu K (1997). The performance measurement results of stone cutting machines and their relations with some material properties. *Proc. of the 6th Int. Symp. on Mine Plann. and Equip. Selection*, Balkema, Rotterdam, pp. 393–398.

[14] Goktan RM and Gunes N (2005). A comparative study of Schmidt hammer testing

procedures with reference to rock cutting machine performance prediction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 42(3): 466–472.

[15] Brook B (2002). Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 39: 41–58.

[16] Dehghan S, Sattari Gh, Chehreh CS, and Aliabadi MA (2010). Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for travertine samples using regression and artificial neural networks. *Mining Science and Technology (China)*. 20: 41–46.

[17] ISRM (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006, R. Ulusay & J.A. Hudson (ed.), Turkish Society for Rock Mechanics, 628 pages

[18] ASTM D7012-13 (2013). Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures.

[19] Ugur I, Sengun N, Demirdag S, and Altindag R (2014). Analysis of the alterations in porosity features of some natural stones due to thermal effect. *Ultrasonics*. 54(5): 1332–1336

[20] ดนุพล ตันนโยภาส และฉัตรชัย โตโส. (2537). ลักษณะธรณีเทคนิคและพฤติกรรมการความไม่เอกสภาพเชิงกำลังของหินไนส์หัวหิน ประชุมวิชาการเรื่องเทคโนโลยีกับการพัฒนาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โรงแรมโฆษะ จ.ขอนแก่น หน้า 300-316.

[21] Kahraman S, Gunaydin O and Fener M



(2005). The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 42(4): 584–589.

[22] ดนุพล ตันนโยภาส สิทธิญาณ ลิ่ว และสุชาติ จันทรมณี. (2557). การประเมินแผ่นหินอ่อนด้วยสมรรถนะการเลื่อยและการแผ่รังสีความร้อน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 หน้า 55-68.

[23] Kahraman S and Fener M (2006). Predicting the physico-mechanical properties of rocks from electrical impedance spectroscopy measurements. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 43(4): 543–553.

[24] ดนุพล ตันนโยภาส อนุรักษ์ เกดดี และสุชาติ จันทรมณี. (2557). การประเมินแผ่นหินแกรนิตด้วยสมรรถนะการเลื่อยและการแผ่รังสีความร้อน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลวิทยุ*. ปีที่ 12 ฉบับที่ 1: 15-22.

[25] Atici U and Ersoy A 2009. Correlation

of specific energy of cutting saws and drilling bits with rock brittleness and destruction energy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5): 2602-2612.

[26] Fener M, Kahraman S, and Ozder MO (2007). Technical note: Performance prediction of circular diamond saws from mechanical rock properties in cutting carbonate rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 40(5): 505–517.

[27] Wie X, Wang CY, and Zhou Z-H (2003). Study on the fuzzy ranking of granite sawability. *Journal of Materials Processing Technology* 139(1-3): 277–280.

[28] Mikaeil R, Ozcelik Y, Yousefi R, Ataei M, and Hosseini SM (2013). Ranking the sawability of ornamental stone using Fuzzy Delphi and multi-criteria decision-making techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 58: 118-126.