

การประเมินแผ่นหินอ่อนด้วยสมรรถนะการเลื่อยและการแผ่รังสีความร้อน Assessment of Marble Slabs with Sawability and Heat Radiation

دنوپل دننโยپاس* สิทธิญาณ ลิวา และสุชาติ จันทรมณีย์

Danupon Tonnayopas* Sittiyan Liwa and Suchart Chantaramanee

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

บทคัดย่อ

ศึกษาวิธีการใหม่สำหรับสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการตัดด้วยเลื่อยกับสมบัติของแผ่นหินอ่อนห้าชนิดที่ต่างกัน โดยตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ การแผ่รังสีความร้อน และสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแบบชอร์ ความเร็วในการตัด กำลังอัดแกนเดียว แผ่นหินอ่อนทั้งหมดให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 200 และ 250 องศาเซลเซียส และวัดการแผ่รังสีความร้อนด้วยเครื่องตรวจรังสีได้แดงบนหน้าผิวด้านในและหน้าผิวขัดมัน สหสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและทางกลของตัวอย่างหินอ่อนกับความเร็วกในการตัดเฉพาะของเลื่อยได้พัฒนาด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น ผลทดสอบพบว่าความแข็งแบบชอร์มีค่า 526-566 ความเร็วในการตัดมีค่า 33.06-65.02 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที และกำลังอัดมีค่า 26.22-79.29 เมกะพาสคัล ได้บ่งว่าความแข็งแบบชอร์มีสหสัมพันธ์อย่างแนบแน่นกับความเร็วของเลื่อยในการตัดหิน แต่การแผ่รังสีความร้อนคงอภิปรายผล

คำสำคัญ : ความหนาแน่นรวม การแผ่รังสีความร้อน การดูดซึมน้ำ ความเร็วในการตัด กำลังอัด

Abstract

A new method for establishing the relations between saw cutting and some properties of five different marble slab types was investigated. The operation is carried out in consideration with the physical properties (bulk density, water absorption, electrical resistivity, heat radiation) and the mechanical properties (Shore hardness, speed of cut, uniaxial compressive strength). Some slab specimens were heated at temperature of 150, 200 and 250 Celsius degree and measured via infrared detector on inner side and polished surfaces. Correlations between physical and mechanical properties of the marbles with specific cutting speed of the saw are developed using linear regression method. Testing results were Shore hardness of 526-566, cutting speed of 33.06-65.02 mm²/s and compressive strength of 26.22-79.29 MPa. It indicated Shore hardness having strong correlation with speed of cut but heat radiation was discussed.

Key words : bulk density, heat radiation, water absorption, speed of cut, compressive strength

*Corresponding author. E-mail : danupon.t@psu.ac.th

บทนำ

หินอ่อน (marble) เป็นหินคาร์บอนเนตชนิดหนึ่ง ที่แปรสภาพมาจากหินปูนและ/หรือหินโดโลไมต์ โดยกระบวนการทางธรณีวิทยา ทำให้เนื้อหินมีการตกผลึกใหม่ (recrystallization) เม็ดแร่หยาบขนาดเท่ากัน เรียกว่าเนื้อเม็ดแปร (granoblastic texture) เนื้อแน่นหรือมีลวดลาย และมีการนำมาแปรรูปเป็นแผ่นเพื่อปูพื้น ผนัง หรือนำมาแกะสลักหลากหลายชนิด ราคาจึงขึ้นอยู่กับเนื้อหิน ลวดลายของหินและความนิยมของตลาด บางครั้งหินปูนที่มีลวดลายสวย ก็สามารถนำมาตัดและขัด จำหน่ายเป็นหินอ่อนได้เช่นกัน หินอ่อนที่นิยมมักมีเนื้อหินสีขาว แต่มักพบปนกับแร่ชนิดอื่นๆ อยู่เสมอ เช่น หินอ่อนสีดำเกิดจากอินทรีย์สาร หินอ่อนสีเขียวเกิดจากแร่ไดออปไซด์ ฮอร์นเบลนด์ เซอร์เพนทีน หินอ่อนสีน้ำตาลเกิดจากไลมอไนต์ และหินอ่อนสีแดงเกิดจากแร่เหล็กแดงฮีมาไทต์ เป็นต้น หินปูนที่มีซากดึกดำบรรพ์หรือหินปูนที่มีสีแดงเข้มหรือดำสนิทก็จัดเป็นหินประดับประเภทหินอ่อนที่มีราคาสูง ควรมีรอยแตกน้อย สามารถตัดเป็นก้อนขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร หรือขนาดใหญ่กว่าได้ก็ยิ่งดี แหล่งหินและการผลิตในประเทศ ได้แก่ จังหวัดสระบุรี กำแพงเพชร สุโขทัย ลำปาง นครราชสีมา และประจวบคีรีขันธ์ (دنพุล ตันนโยภาส, 2553) ในอดีตประเทศไทยเคยผลิตหินอ่อนได้สูงถึง 145,166 ลูกบาศก์เมตร ในปี พ.ศ. 2539 คิดเป็นเงิน 271 ล้านบาท (<http://www.dmr.go.th>) และลดลงมาเรื่อยๆ จนกระทั่งในปัจจุบันมีการนำเข้าจากต่างประเทศเป็นส่วนมาก โดยเฉพาะสาธารณรัฐประชาชนจีน อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมการตัดแผ่นหินก็ยังคงมีความสำคัญ ที่ทำให้ผู้ประกอบการผลิตแผ่นหินประดับในประเทศไทยสามารถดำเนินงานไปได้ภายใต้ภาวะแข่งขันที่สูง

การคาดคะเนถึงอัตราการผลิตหินประดับชนิดหินอ่อนนั้นเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินค่าใช้จ่ายต้นทุนและการวางแผนโรงงานตัดหิน ดังนั้นการพัฒนาวิธีการจัดลำดับสำหรับประเมินอัตราการผลิตสำหรับหินประดับบางโรงงานได้ ปัจจัยบางประการ ได้แก่ กำลังอัด ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ จึงควรทราบเพื่อประเมินอัตราการเลื่อยหรือตัด ซึ่งควบคุมค่าใช้จ่ายในการผลิตหินประดับโดยตรง (Buyuksagis & Goktan, 2005) จึงมีการศึกษาและคาดคะเนการสึกหรอของเลื่อยเพชรตัดหิน (Wright *et al.*, 1986) เลื่อยตัดหินนั้นอนุภาคเพชรอย่างเดี่ยวกระทำคดัดแผ่นด้วยการเกิดขยายพลังงานอัดในหินในรูปแบบ ความเค้นเหนือศูนย์กึ่งกลางจุดตัดกระทำบด การกดเป็นสาเหตุกลไกรอยแตกของหิน ดังนั้นเครื่องตัดควรมีความแข็งแรงสูง ซึ่งเลื่อยกดลงไปตัดหินต้องทนความร้อนได้สูง การทดสอบกำลังหินไม่ได้บ่งว่าทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน แต่กลับพบว่าความสัมพันธ์กับการทดสอบความแข็งแบบชอร์ (Shore) และแบบบริเนล (Brinell hardness) และสามารถคาดการณ์เปลืองพลังงานได้จากดัชนีใหม่ เรียกว่า ความแข็งแบบบรูค (Brook hardness) การตัดหินหลายชนิดด้วยใบเลื่อยวงเดือนฉาบเพชรด้วยอัตราการป้อนหินและความลึกในการตัดกับความเร่งการตัดคงที่ พบว่ามีผลต่อพลังงานจำเพาะของคุณภาพงาน (Ersoy & Atici, 2004) ซึ่ง Bandini *et al.* (2012) ทดสอบความแข็งของหินอ่อน เพื่อกำหนดบทบาทของรอยร้าวภายในเม็ดที่ต่อพฤติกรรมเชิงกล พบว่าสภาพความแปรผันขึ้นกับเนื้อและเม็ดแร่ โดยเฉพาะเนื้อเม็ดแปรถึงเนื้อแปลกปลอมแปร (xenoblastic) รวมทั้งความยาวและความไม่ต่อเนื่องขนาดจุลภาคชนิดต่างๆ (รอยร้าวแนวแตกเรียบ รอยร้าวตามขอบเม็ด) แม้ว่ามืองค์ประกอบผลึกแร่แคลไซต์เกือบชนิดเดียวกันก็ตาม สมบัติเชิงกลของเม็ดแคลไซต์หาจากเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ และแบบน็อพ (Knoop) และความแข็งนาโนแบบเบิร์กโควิช (Berkovich) ชนิดเครื่องตัดหินอ่อนแบบเจาะและแบบเลื่อยเพชรวงเดือนก็มีผลต่อการผลิตแผ่นหินเช่นกัน (Wang & Clausen, 2002) ในขณะที่คาดการณ์สภาพการเลื่อยตัดหิน (sawability) คาร์บอนเนตโดยวิเคราะห์ด้วยการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ (multiple curvilinear regression analysis) จากหินคาร์บอนเนต 13 ชนิด จากโรงงานหินอ่อนเพื่อนำไปทดสอบ แรงยึดเกาะกัน มุมเสียดทาน กำลังอัด กำลังดึง (tensile strength)

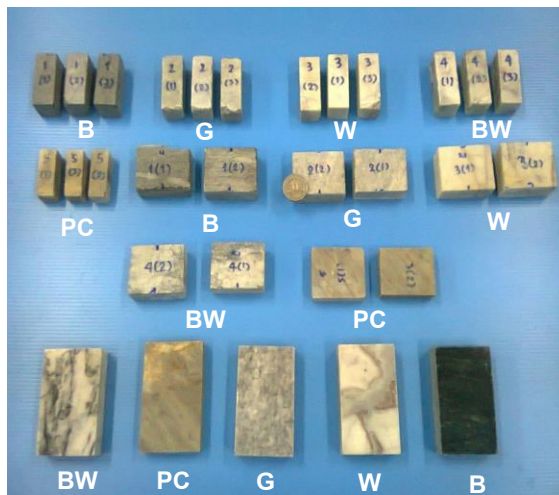
ค่าค้อนชมิคิตต์ (Schmidt hammer value) กำลังแรงกดจุด (point load strength) กำลังกระแทก (impact strength) การขัดสีแบบลอสแอนเจลิส (Los Angeles abrasion loss) และความเร็วคลื่นพี (P-wave velocity) และค่าอัตราความเร็วของเลื่อยเส้นผ่าศูนย์กลางของเลื่อย ความลึกในการตัด กำลังดึงและกำลังกระแทก นำไปคิดในแบบจำลองที่ดีที่สุด ได้สร้างแบบจำลองเพื่อเลือกและทั่วไป ประกอบด้วยแต่ละสมบัติของหินเปลี่ยนไปตามแต่ละความแรงของการเลื่อย (Kahraman *et al.*, 2004) นอกจากนี้ยังนำปัจจัยกำลังเฉือนโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural networks) วิเคราะห์ความสัมพันธ์การตัดหินคาร์บอนเนต (Kahraman *et al.*, 2006) Tutmez *et al.* (2007) ประเมินโรงงานผลิตหินประดับใช้เลื่อยจักรวงเดือนในการตัด นำตัวอย่างจากโรงงานมาทดสอบหาค่าต่างๆ ทำนองเดียวกัน แต่วิเคราะห์ด้วยวิธีตัวประกอบเชิงพหุคูณแบบฟัชซี (multifactorial fuzzy) ได้จำแนกสภาพการเลื่อยตัดหินก่อสร้างออกเป็นสามระดับคือ ดีเยี่ยม ดี และเลว ยังมีการจัดลำดับสภาพการตัดหินประดับโดยใช้เทคนิค Fuzzy Delphi และการตัดสินใจด้วยพหุเกณฑ์ (multi-criteria decision) (Mikaeil *et al.*, 2013) Deliormanli (2012) ได้จัดทำค่าดัชนีสภาพขัดสีแบบเซอร์ชาร์ (Cerchar abrasivity index -CAI) สำหรับก้อนหินอ่อนในสนาม สัมพันธ์กับวิธีการทดสอบกำลังและการขัดสีแบบ Bohme และแบบ Wide-Wheel ได้ทดสอบกำลังอัดแกนเดียวและเฉือนโดยตรงมีอิทธิพลต่อค่า CAI กับตัวอย่างหินอ่อน 15 ชนิด พบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างดีกับค่า CAI โดยวิเคราะห์ด้วยการถดถอยเชิงพหุคูณ

Yurdakul & Akdas (2012) ได้ตัดหินคาร์บอนเนต 6 ชนิด ด้วยเครื่องตัด 7 ชนิด จากโรงงานตัดหิน 3 แห่ง บันทึกการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องตัดเลื่อยวงเดือนขนาดใหญ่หลายขนาด นอกจากนี้เก็บตัวอย่างหินจากโรงงาน มาทดสอบ กำลังอัด กำลังดึง กำลังดึงแบบบราซิล (Brazilian tensile strength) กำลังแรงกดจุด ความแข็งแบบชอร์ ความแข็งค้อนแบบชมิคิตต์ ความเร็วคลื่นไหวสะเทือน (seismic velocity) การดูดซึมน้ำที่ความดันบรรยากาศ ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ความพรุนเปิด เส้นผ่าศูนย์กลางใบมีดตัด และค่าความลึกในการตัดใช้เป็นปัจจัยนำเข้าวิเคราะห์การตัดหินถึงค่าพลังงานจำเพาะในการตัดจำเพาะด้วยทางสถิติ พบว่าสามารถใช้คาดการณ์ได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดหาวิธีการประเมินคุณภาพหินอ่อนใหม่จากตัวอย่างแผ่นหินประดับชนิดหินอ่อนวางจำหน่ายที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงเตรียมตัวอย่างได้ง่าย ขนาดเล็ก จำนวนน้อย และสมบัติตัวใหม่ เช่น สมรรถนะการตัดหิน วิเคราะห์ค่าทั้งหมดด้วยความสัมพันธ์ทางสถิติเชิงเส้นอย่างง่าย

วัตถุประสงค์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างหินอ่อนทั้ง 5 ชนิด ที่นำมาทดสอบ (ภาพที่ 1) มีลักษณะและเรียกชื่อดังนี้ สีดำเนื้อละเอียด (B) สีเทาเนื้อละเอียด (G) สีขาวเนื้อละเอียด (W) สีดำสลับขาวเนื้อละเอียด (Black-White -BW) มาจากแหล่งเหมืองหินที่ ตำบลหน้าถ้ำ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา และปากช่องสีเทาปนเหลืองเนื้อละเอียดถึงปานกลาง (Pak-Chong -PC) แหล่งเหมืองหินจาก อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ทั้งหมดเป็นแผ่นหินหนาประมาณ 20 มิลลิเมตร



ภาพที่ 1 ตัวอย่างหินอ่อนที่นำมาทดสอบครั้งนี้

2.2 เกณฑ์กำหนดหินระดับชนิดหินอ่อน

สำหรับค่าเกณฑ์คุณภาพหินอ่อนและวิธีการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเชิงกลของ ASTM C503 Standard Specification for Marble Dimension Stone (ตารางที่ 1) แบบเดิมมีสมบัติสำคัญคือ ค่าความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และค่ากำลังอัด แต่งานวิจัยครั้งนี้เพิ่มสมบัติไม่มีกำหนดไว้คือ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ความแข็งแบบชอร์ การแผ่รังสีความร้อน และความเร็วในการตัดหิน

ตารางที่ 1 ค่าเกณฑ์กำหนดมาตรฐานและวิธีการทดสอบของหินอ่อนของ ASTM C503 (دنۇفل دىننوبىگاس، 2536)

สมบัติทางด้านกายภาพและเชิงกล	ค่ากำหนด	วิธีการทดสอบ
ความหนาแน่นต่ำสุด หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (lb/ft ³)	2,590 (162)	ASTM C97
การดูดซึมน้ำสูงสุด หน่วย % โดยน้ำหนัก	0.20	ASTM C170
กำลังอัดต่ำสุด หน่วย เมกะพาสคัล (psi)	52 (7500)	ASTM C150
ความต้านทานต่อการขีดสีต่ำสุด	10	ASTM C241
กำลังตัดต่ำสุด หน่วย เมกะพาสคัล (psi)	7 (1000)	ASTM C880

2.3 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างหินอ่อนเพื่อวิจัยครั้งนี้แตกต่างจากที่กำหนดในตารางที่ 1 เพื่อให้ใกล้เคียงสภาพแผ่นหินใช้งานจริง โดยการตัดด้วยเครื่องตัดใบเลื่อยรูปวงเดือน ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมี 5 ชนิด ชนิดละ 3 ก้อน ขนาด 20×80×50 มิลลิเมตร สำหรับทดสอบ ได้แก่ ความเร็วในการเลื่อยตัด ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ตัวอย่างขนาดประมาณ 40×20×50 มิลลิเมตร ในการวัดความแข็งแบบชอร์ ชนิดละ 2 ตัวอย่าง วัด 5 ครั้งต่อตัวอย่าง วัดอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อน จำนวน 4 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิด แต่ละตัวอย่างวัด 4 จุด ในแต่ละหน้าทั้งด้านไม่ขีดและขีดมัน ซึ่งปริมาตรของตัวอย่างทดลองมากกว่า 20 ลูกบาศก์

เซนติเมตร ตาม ASTM D4612 กำหนด ตัวอย่างการดูดซึมน้ำและทดสอบกำลังอัดมีขนาด 20×20×40 มิลลิเมตร ตัดแปรจากวิธี ASTM D7012 โดยให้ตัวอย่างทดสอบเป็นรูปทรงคานสี่เหลี่ยมและผิวด้านหนึ่งได้ขัดมันตามแผ่นหินอ่อนวางจำหน่าย

2.4 วิธีการวิจัย

ทดสอบความแข็งแบบชอร์ (Shore hardness) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งของ EQUO TIP รุ่น CA 6525 การทดสอบความหนาแน่นตาม ASTM C97 ส่วนการดูดซึมน้ำตาม ASTM C170 วิธีการทดสอบกำลังอัดตาม ASTM D7012 เนื่องจาก ASTM C150 ได้ยกเลิกไปเมื่อ พ.ศ. 2548 ด้วยเครื่องกระดบไฮดรอลิกที่มีแรงกดสูงสุด 1,500 กิโลนิวตัน เครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้ารุ่น CA 6525 MEGOHMMETER การทดสอบความแข็งแบบชอร์ด้วยเครื่อง EQUATIP SN 898-1540 V.2.8 เครื่องตัดหินใบเลื่อยวงเดือนเคลือบผงเพชร (Discottom-2) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 22.5 เซนติเมตร ตั้งแรงดันป้อนตัวอย่างให้คงที่ ตู้อบระบบไฟฟ้า (Memmert Beschickung – Loading Modell 100–800) ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างแบบบรรยากาศออกซิเจน กำหนดให้ระดับความร้อนทดลองต่างกัน 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 150 200 และ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วง 20 ถึง 300 องศาเซลเซียส ครอบคลุมในการทดสอบสมบัติทางความร้อนตาม ASTM D4612 ที่หาค่าสภาพการแพร่ความร้อน (thermal diffusivity) ความร้อนจำเพาะ (specific heat) วัดอุณหภูมิการแผ่รังสีความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรดรุ่น DIGICON DP-88 ค่าเฉลี่ยจากชนิดละ 3 ตัวอย่างทดสอบ

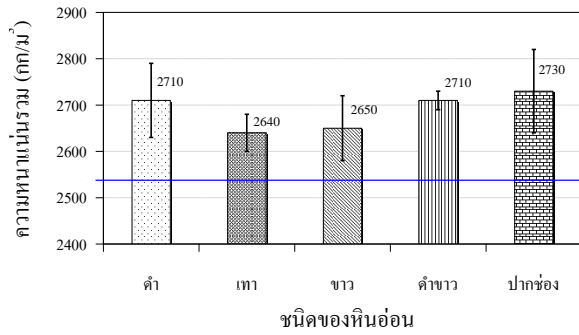
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ความหนาแน่นรวม

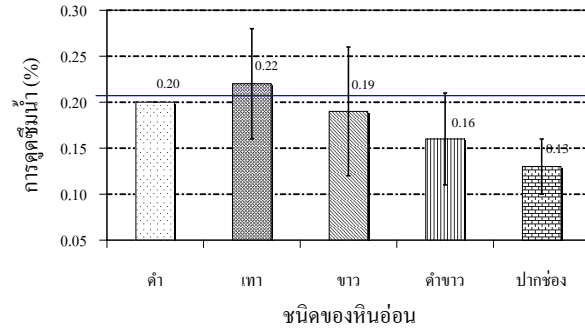
ผลทดสอบพบว่าค่าความหนาแน่นรวมของทุกตัวอย่างมีค่าตามเกณฑ์ ASTM C503 ที่กำหนดไว้ 2,590 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ตารางที่ 1) ค่าความหนาแน่นรวมสูงสุดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2,730 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นตัวอย่างหินอ่อนปากช่อง (PC) ส่วนค่าความหนาแน่นรวมต่ำสุดเป็นตัวอย่างหินอ่อนสีเทา (G) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2,640 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ภาพที่ 2) สันนิษฐานเป็นผลเนื่องจากชนิดแร่รอง (accessory mineral) ต่างกันผสมกับแร่หลัก (essential mineral) แคลไซต์ และขนาดเม็ดแร่เนื้อหิน เมื่อเทียบกับผลงานวิจัยของดนูพล ตันนโยภาส และคณะ (2553) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 2565.92–2675.79 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3.2 การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำของตัวอย่างหินอ่อนพบว่าค่าส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ ASTM C503 ซึ่งได้กำหนดไว้ที่ 0.2% โดยค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดเป็นหินอ่อนตัวอย่างสีเทา (G) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.22% ส่วนค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดเป็นหินอ่อนตัวอย่างปากช่อง (PC) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.13% และเมื่อเทียบกับงานวิจัยของดนูพล ตันนโยภาส และคณะ (2553) พบว่ามีใกล้เคียงกันคือ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1–0.2% ค่าการดูดซึมน้ำของหินอ่อนทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาพที่ 3 เนื่องจากตัวอย่างหินอ่อนมีหน้าผิวขัดมันด้านหนึ่ง ต่างจากตัวอย่างของการประเมินหินประดับชนิดหินอ่อนใน ASTM C503 ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าผลการหน้าขัดมันได้เคลือบมีอิทธิพลทำให้ดูดซึมน้ำได้ลดลงและค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดบ้างเล็กน้อย



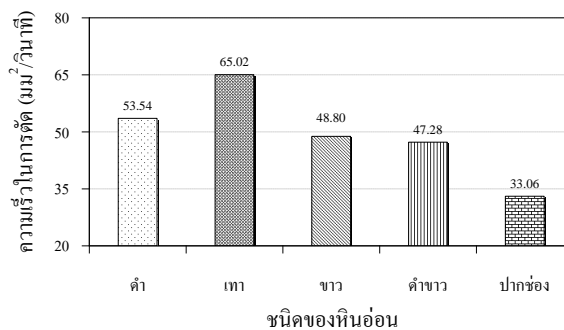
ภาพที่ 2 ความหนาแน่นรวมของหินอ่อนต่างชนิด



ภาพที่ 3 การดูดซึมน้ำของหินอ่อนต่างชนิด

3.3 ความเร็วในการตัด

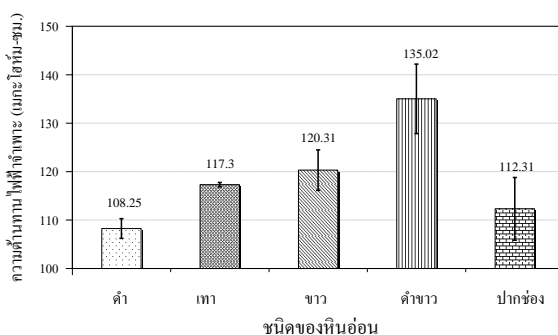
พบว่าค่าความเร็วในการตัดหินสูงสุดเป็นหินอ่อนตัวอย่างสีเทา (G) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 65.02 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนค่าความเร็วในการตัดช้าสุดเป็นหินอ่อนตัวอย่างปากช่อง (PC) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 33.06 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที (ภาพที่ 4) นั้นหมายความว่าหินอ่อนตัวอย่างสีเทามีความอ่อนที่สุดและหินอ่อนตัวอย่างปากช่องแข็งที่สุด ดังนั้นจึงทำให้เวลาในการเลื่อยตัดน้อยและมากตามลำดับ หรือก็คืออัตราความเร็วในการเลื่อยสูงและต่ำตามลำดับเช่นกัน สังเกตว่าความเร็วในการตัดสอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำ (ภาพที่ 3) และตรงกันข้ามกับค่าความหนาแน่นรวม (ภาพที่ 2) เนื่องจากสมบัติทั้งสองมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับชนิดแร่และเนื้อหินของคุณภาพหินอ่อน จึงส่งผลโดยตรงกับอัตราการเลื่อยตัดหิน ซึ่งโดยทั่วไปโรงงานประกอบธุรกิจแผ่นหินประดับชนิดหินอ่อนมักเป็นโรงงานผลิตขนาดกลางและขนาดย่อม (Gazi et al., 2012) ดังนั้นการตั้งค่าความเร็วในการเลื่อยตัดให้เหมาะสมกับชนิดหินอ่อนจึงมีความสำคัญมาก การใช้อัตราความเร็วที่สูงในการตัดหินอ่อนที่แข็งทำให้ความสึกหรอของซี่เลื่อยเร็วขึ้น ทำให้ต้องซ่อมบำรุงบ่อย จนอาจถึงขั้นเปลี่ยนใบเลื่อยบ่อยเสียค่าใช้จ่ายขั้นตอนการผลิตสูง ส่งผลยอดขายตามมา ในขณะที่การตั้งค่าความเร็วต่ำก็ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หินอ่อนผลิตได้น้อย ขาดประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อสภาพแวดล้อมของโรงงานก่อให้เกิดฝุ่นของเสีย (waste) จากการตัดหินทวีมากขึ้น



ภาพที่ 4 ความเร็วในการตัดของหินอ่อนต่างชนิด

3.4 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

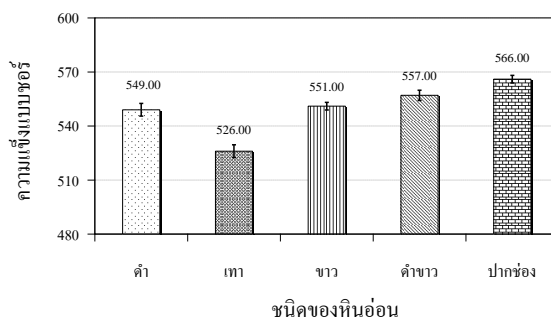
ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยสูงสุดเป็นหินอ่อนตัวอย่างสีดำสลับขาว (BW) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 135.02 เมกะโอห์ม-เซนติเมตร ส่วนค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะต่ำสุดเป็นหินอ่อนสีดำ (B) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 108.25 เมกะโอห์ม-เซนติเมตร (ภาพที่ 5) และเมื่อเทียบกับงานวิจัยของอนุพล ตันนโยภาส และคณะ (2553) พบว่ามีค่าห่างกันไม่มากโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 113 – 123.3 เมกะโอห์ม-เซนติเมตร ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจะลดลงหากตัวเนื้อหินมีความหนาแน่นสูง เนื่องจากไฟฟ้าใช้เวลาเดินทางผ่านนาน ดังนั้นค่านี้จึงแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นรวม (ภาพที่ 2) ในทางกลับกันเนื้อตัวอย่างหินอ่อนที่มีรูพรุนมากก็จะดูดซึมน้ำได้มาก ดังนั้นกระแสไฟฟ้าผ่านตัวกลางมีความชันนำให้ผ่านได้รวดเร็ว ดังนั้นจึงมีแนวโน้มแปรผันตามกับการดูดซึมน้ำ (ภาพที่ 3) การทดสอบวิธีนี้ช่วยลดเวลาและขั้นตอนทดสอบลงอย่างมาก



ภาพที่ 5 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินอ่อนต่างชนิด

3.5 ความแข็งแบบชอร์

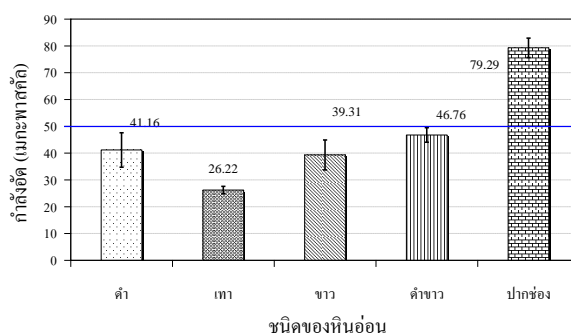
ค่าความแข็งแบบชอร์สูงสุดเป็นหินอ่อนตัวอย่างปากช่อง (PC) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 566 ส่วนค่าความแข็งแบบชอร์ต่ำสุดเป็นหินอ่อนตัวอย่างสีเทา (G) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 526 แสดงไว้ในภาพที่ 6 ซึ่งค่านี้สอดคล้องกับความหนาแน่นรวม (ภาพที่ 2) แปรผกผันกับค่าการดูดซึมน้ำ (ภาพที่ 3) และค่าความเร็วในการตัด (ภาพที่ 4) ดังนั้นการทดสอบแบบนี้ นอกจากไม่ทำลายตัวอย่างแล้ว ยังมีกระบวนการทดสอบได้ผลรวดเร็ว ยังประเมินสมรรถนะการเลื่อยหรือตัดหินโดยทางอ้อมเช่นเดียวกับความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 6 ความแข็งแบบชอร์ของหินอ่อนต่างชนิด

3.6 กำลังอัด

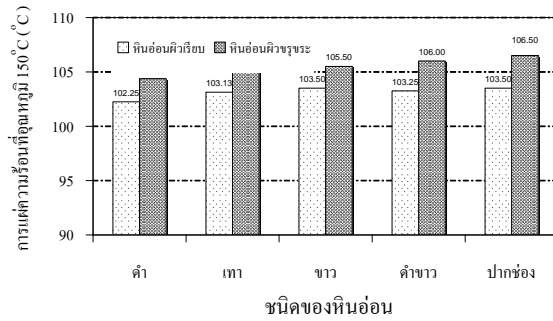
ค่ากำลังอัดสูงสุดเป็นหินอ่อนตัวอย่างปากช่อง (PC) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 79.29 เมกะพาสคัล ส่วนค่ากำลังอัดต่ำสุดเป็นหินอ่อนตัวอย่างสีเทา (G) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 26.22 เมกะพาสคัล และเมื่อเทียบกับงานวิจัยของดนูพลตันนโยบายส ตันนโยบายส และคณะ (2551) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 16.83 – 53.59 เมกะพาสคัล ผลทดสอบพบว่าส่วนใหญ่จะไม่ผ่านเกณฑ์ ASTM C503 ที่ได้กำหนดขั้นต่ำไว้ 52 เมกะพาสคัล (ภาพที่ 7) ทั้งนี้อาจเนื่องจากผลกระทบของขนาดตัวอย่างหินอ่อนที่ขนาดเล็กกว่าที่กำหนดตัวอย่างทดสอบไว้ใน ASTM C503 และการที่หินอ่อนมีสภาพเนื้อวิวิพันธุ์ (heterogeneity) ความไม่เอกสภาพ (anisotropy) อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่ากำลังอัดที่ทดสอบได้ครั้งนี้ต่ำกว่าในเกณฑ์ แต่ก็พบว่าสอดคล้องไปด้วยกันได้ดีกับค่าสมบัติอื่นๆ ที่ทดสอบมาก่อนหน้า เช่น แปรผันตามค่าความหนาแน่นรวม (ภาพที่ 2) และค่าความแข็งแบบชอร์ (ภาพที่ 6) และแปรผกผันกับค่าการดูดซึมน้ำ (ภาพที่ 3) ค่าความเร็วในการตัด (ภาพที่ 4) และความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ภาพที่ 5)



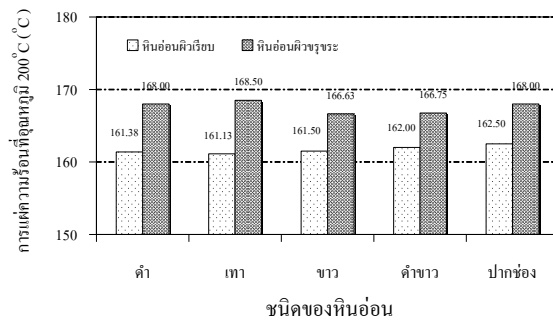
ภาพที่ 7 กำลังอัดของหินอ่อนต่างชนิด

3.7 การแผ่รังสีความร้อน

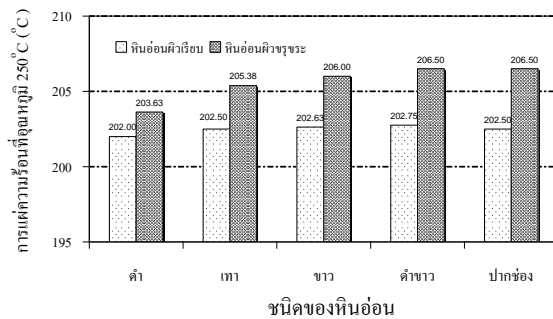
การแผ่รังสีความร้อนของตัวอย่างที่สามอุณหภูมิความร้อน (150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส) ของสภาพหน้าผิวหินอ่อนทั้งที่ขัดมัน (ผิวเรียบ) และไม่ขัดมัน (ผิวขรุขระ) ซึ่งพบว่าค่าการแผ่รังสีความร้อนของแต่ละด้านแตกต่างกันเล็กน้อยประมาณ 2-5 องศาเซลเซียส ซึ่งหน้าที่ไม่ขัดมันนั้นแผ่รังสีความร้อนได้มากกว่าหน้าที่ขัดมัน (ภาพที่ 8-10) ซึ่งเป็นผลจากตัวแปรของตัวอย่างหินอ่อนแต่ละชนิด ได้แก่ ลักษณะวิวิพันธุ์ จากวิถีเกิดทางธรณีวิทยาต่างกัน การแปรผันทั้งชนิดแร่และความพรุน (ดนูพล ตันนโยบายส, 2553) รวมทั้งผลจากการที่ผิวขัดมันอาบน้ำยาไปปิดรูพรุนและบดบังการแผ่รังสีความร้อน อุณหภูมิก็เก็บอยู่ในเนื้อหินทั้งสองหน้าเท่ากันอยู่ในช่วง 40-50 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส การแผ่รังสีความร้อนผันแปรตามกับค่าความหนาแน่นรวม (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบค่าการแผ่รังสีความร้อนของหินอ่อนหน้าผิวต่างกันที่ความร้อนอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบค่าการแผ่รังสีความร้อนของหินอ่อนหน้าผิวต่างกันที่ความร้อนอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบค่าการแผ่รังสีความร้อนของหินอ่อนหน้าผิวต่างกันที่ความร้อนอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

3.8 สหสัมพันธ์ของสมบัติของตัวอย่างหินอ่อน

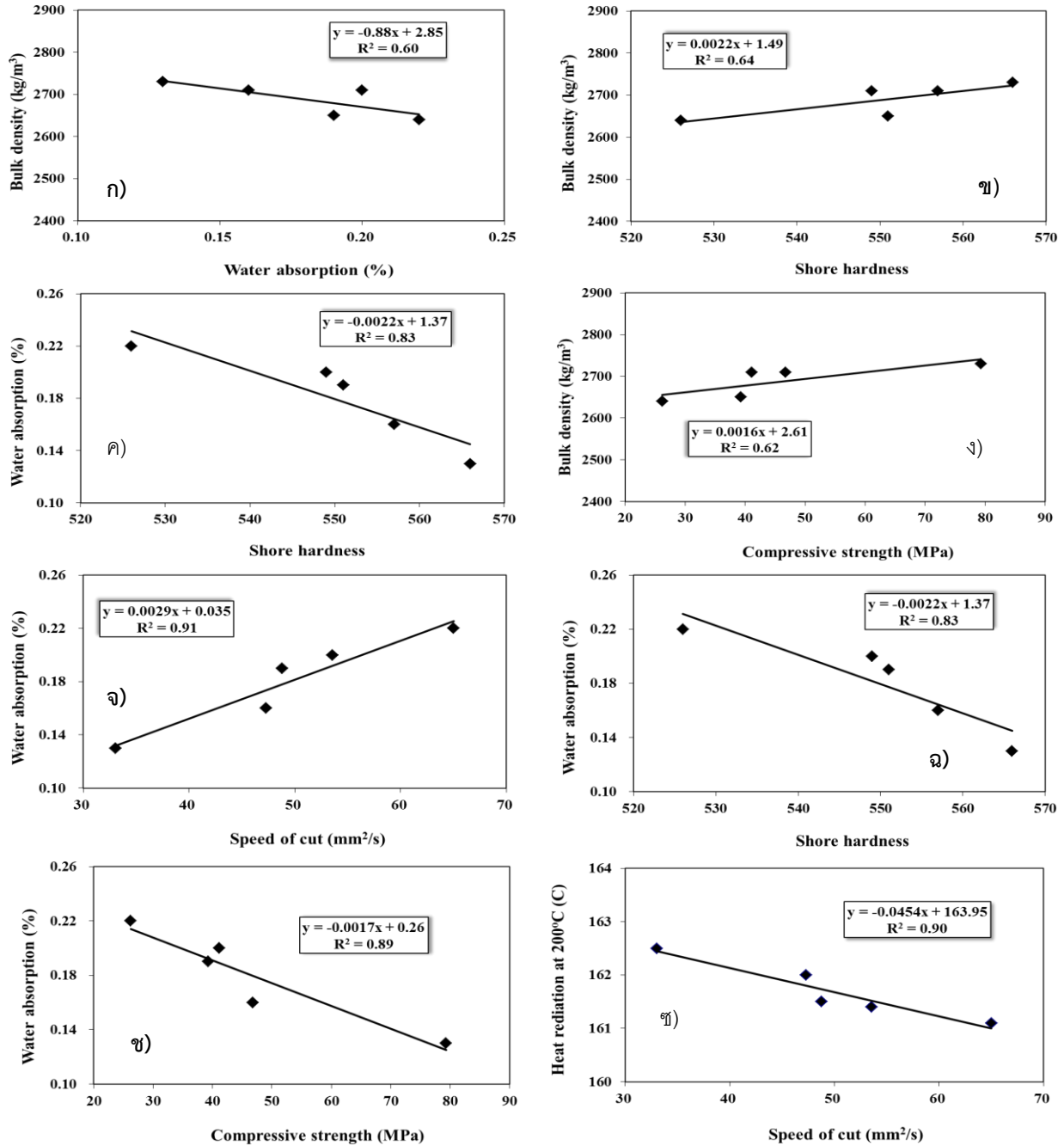
ค่าสมบัติทางกายภาพและเชิงกลทั้งหมดของตัวอย่างหินอ่อนได้นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ระดับ 1 (order 1) ได้ 13 คู่ เมื่อพิจารณาค่าจากตัวอย่างทั้งหมดนั้น พบว่าสัมประสิทธิ์ของค่า R² (coefficient of determination) มีค่าน้อยกว่า 0.5 ทุกคู่ ดังนั้นจึงใช้ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างแต่ละชนิดมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เป็นตัวแทนแผ่นหินแต่ละชนิด พบว่าค่าสัมประสิทธิ์มีค่า R² ที่เกินกว่า 0.5 เหลืออยู่เพียง 8 คู่ ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สหสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายของสมบัติของแผ่นตัวอย่างหินอ่อนทดสอบ

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม	สมการความสัมพันธ์	R ²
ความหนาแน่นรวม	ความเร็วในการตัดหินอ่อน	$BD = -0.0026C + 2.8153$	0.54
ความหนาแน่นรวม	ความแข็งแบบชอร์	$BD = 0.0022SH + 1.4935$	0.64
ความหนาแน่นรวม	กำลังอัด	$BD = 0.0016CS + 2.6134$	0.62
ความหนาแน่นรวม	การดูดซึมน้ำ	$BD = -0.88WA + 2.8464$	0.60
การดูดซึมน้ำ	ความเร็วในการตัดหินอ่อน	$WA = 0.0029C + 0.0349$	0.91
การดูดซึมน้ำ	ความแข็งแบบชอร์	$WA = -0.0022SH + 1.3695$	0.83
การดูดซึมน้ำ	กำลังอัด	$WA = -0.0017CS + 0.2583$	0.89
การแผ่รังสีความร้อน	ความเร็วในการตัดหินอ่อน	$HR_{200} = -0.0454C + 163.95$	0.90

หมายเหตุ: BD คือ ความหนาแน่นรวม; C คือ ความเร็วในการตัดหิน; SH คือ ความแข็งแบบชอร์; CS คือ กำลังอัด; WA คือ การดูดซึมน้ำ; HR₂₀₀ คือ การแผ่รังสีความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

พบว่าสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำ เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยทางกายภาพ (ภาพที่ 11 ก) และเชิงกลอย่างมาก (ภาพที่ 11 ข-จ) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับความเร็วในการตัดหิน (ภาพที่ 11 ฉ-ช) สาเหตุที่ค่าสหสัมพันธ์น้อยอาจเป็นเพราะ หินอ่อนแต่ละชนิดนำมาทดสอบมีความใกล้เคียงในสมบัติด้านชนิดแร่ ขนาดผลึกแร่ และเนื้อประกอบหิน ขณะเดียวกันมีผิวหินขัดมันรบกวนสมบัติบางประการเบี่ยงเบนไปจากธรรมชาติ การให้ค่าสหสัมพันธ์สูงขึ้นอาจต้องเพิ่มชนิดและจำนวนตัวอย่างหินอ่อนให้มากขึ้น



ภาพที่ 11 การถดถอยเชิงเส้นของสมบัติทางกายภาพและเชิงกล

- ก) การดูดซึมน้ำ ข) ความหนาแน่นกับความแข็งแบบชอร์ ค) การดูดซึมน้ำกับความแข็งแบบชอร์
 ง) ความหนาแน่นรวมกับความเร็วในการตัด จ) การดูดซึมน้ำกับความเร็วในการตัด
 ฉ) การดูดซึมน้ำกับกำลังอัด ช) ความหนาแน่นรวมกับความเร็วในการตัด
 ซ) การแผ่รังสีความร้อนกับความเร็วในการตัด

สรุปผลการวิจัย

ผลการประเมินคุณภาพแผ่นหินอ่อนด้วยวิธีใหม่นี้ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ได้ตามเกณฑ์ ASTM C503 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ การแผ่รังสีความร้อน ล้วนสอดคล้องกัน ค่าการแผ่รังสีความร้อนของตัวอย่างหินอ่อนในหน้าขัดมันกับหน้าไม่ขัดมันมีการแผ่ความร้อนไม่เท่ากัน ซึ่งหน้าที่ไม่ขัดมันแผ่ความร้อนได้มากกว่าหน้าที่ขัดมัน ในขณะที่เดียวกันสีหินอ่อนไม่พบอิทธิพลต่อการประเมินคุณภาพหินอ่อนในการศึกษาครั้งนี้อย่างมีนัยสำคัญ

ส่วนสมบัติเชิงกลนั้นค่ากำลังอัดของแผ่นตัวอย่างหินอ่อนส่วนใหญ่ต่ำกว่าในเกณฑ์ ASTM C503 ยกเว้นหินอ่อนตัวอย่างปากช่อง (PC) ความเร็วในการตัดหินและความแข็งแบบชอร์ได้ผลการทดสอบค่อนข้างดี นอกจากนี้ความแข็งแบบชอร์มีความสัมพันธ์ค่อนข้างดีกับสมบัติต่างๆ (ตารางที่ 2) ดังนั้นวิธีการประเมินพัฒนาแบบใหม่และสมการสหสัมพันธ์ที่ได้ จึงมีศักยภาพสูงในการนำไปวิเคราะห์คาดคะเนสมรรถนะในการเลื่อยตัดหินได้ในโรงงานผลิตหินประดับชนิดหินอ่อนขนาดกลางและขนาดย่อม และการนำชิ้นตัวอย่างจากอาคารสถานที่โบราณไปตรวจหาสาเหตุการพิบัติชิ้นก็สามารถกระทำได้อย่างมั่นใจ แต่สำหรับการแผ่รังสีความร้อนนั้นค่าที่วัดมีความแปรปรวน เนื่องจากมีปัจจัยองค์ประกอบแร่ในหินและความไม่เอกสภาพ ควรเพิ่มมาตรการวัด ขนาดตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างที่ศึกษามากขึ้นอีก

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และหน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและวัสดุก่อสร้างนวัตกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. เรื่องหินอ่อน. วันที่ค้นข้อมูลมิถุนายน 2556, เข้าถึงได้จาก <http://www.dmr.go.th/>
- دنۇفل دىنن يولاس. (2536). *คู่มือการทดสอบหินมิติ*. (พิมพ์ครั้งที่ 1). สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหะวิทยา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- دنۇفل دىنن يولاس. (2553). *แร่และหิน*. (พิมพ์ครั้งที่ 1). สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- دنۇفل دىنن يولاس. *ไฟโรจน์ พัฒนวิศุทธิ์ ชิตพล เอียดปาน และสุชาติ จันทร์มณี*. (2553). *ประมาณคุณภาพทางอ้อมของแผ่นหินประดับชนิดหินอ่อนเชิงพาณิชย์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ครั้งที่ 8* (หน้า 1-5). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- ASTM C97/C97M. (2009). *Standard test methods for absorption and bulk specific gravity of dimension stone*. Philadelphia.
- ASTM C150/C150M (2012). *Standard specification for Portland cement*. Philadelphia.

- ASTM C170/C170M. (2009). *Standard test method for compressive strength of dimension stone*. Philadelphia.
- ASTM C177. (2013). *Test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus*. Philadelphia.
- ASTM C241/C241M. (2013). *Standard test method for abrasion resistance of stone subjected to foot traffic*. Philadelphia.
- ASTM C503/C503M. (2010). *Standard specification for marble dimension stone*, Philadelphia.
- ASTM C880/C880M. (2009). *Standard test method for flexural strength of dimension stone*, Philadelphia.
- ASTM D4612. (2008). *Standard practice for calculating thermal diffusivity of rocks*. Philadelphia.
- ASTM D7012. (2013). *Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures*. Philadelphia.
- ASTM D5873. (2013). *Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method*. Philadelphia.
- Bandini, A., Berry, P., Bemporad, E., & Sebastiani, M. (2012). Effects of intra-crystalline microcracks on the mechanical behavior of a marble under indentation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54, 47-55.
- Brook, B. (2002). Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(1), 41-58.
- Buyuksagis, I.S. & Goktan, R.M. (2005). Investigation of marble machining performance using an instrumented block-cutter. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(2), 258-262.
- Deliormanli, A.H. (2012). Cerchar abrasivity index (CAI) and its relation to strength and abrasion test methods for marble stones. *Construction and Building Materials*, 30, 16-21.
- Ersoy, A. & Atici, U. (2004). Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks. *Diamond and Related Materials*, 13(1), 22-37.
- Gazi, A., Skevis, G., & Founti M.A. (2012). Energy efficiency and environmental assessment of a typical marblequarry and processing plant. *Journal of Cleaner Production* 32, 10-21.
- Kahraman, S., Fener, M., & Gunaydin, O. (2004). Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(7), 1123-1131.
- Kahraman, S., Altun, H., Tezekici, B.S., & Fener, M. (2006). Sawability prediction of carbonate rocks from shear strength parameters using artificial neural networks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(1), 157-164.

- Mikaeil, R., Ozcelik, Y., Yousefi, R., Ataei, M., & Hosseini, S.M. (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.
- Tutmez, B., Kahraman, S., & Gunaydin, O. (2007). Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1672-1679.
- Wang, C.Y. & Clausen, R. (2002). Marble cutting with single point cutting tool and diamond segments. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(9), 1045–1054.
- Wright, D.N., Wapler, H., & Tönshoff, H.K. (1986). Investigations and prediction of diamond wear when sawing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 35(1), 239-244.
- Yurdakul, M. & Akdas, H. (2012). Prediction of specific cutting energy for large diameter circular saws during natural stone cutting. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 53(2), 38–44.