



MECHANICAL AND HYDRAULIC PERFORMANCE OF
SLUDGE-MIXED CEMENT GROUT IN ROCK FRACTURES

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

ศักยภาพเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์ของส่วนผสมตะกอนดินกับซีเมนต์อุดในรอยแตกของหิน
MECHANICAL AND HYDRAULIC PERFORMANCE OF SLUDGE-MIXED CEMENT
GROUT IN ROCK FRACTURES

คมกริช เวชสิทธิ์¹ และ กิตติเทพ เฟื่องขจร²

นักศึกษาปริญญาเอก¹, ศาสตราจารย์², สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือเพื่อประเมินศักยภาพของตะกอนดินผสมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 เพื่อใช้ลดความซึมผ่านของน้ำในรอยแตกของหินทราย รอยแตกถูกทำขึ้นโดยแรงกดในแนวเส้นขนต้วอย่างหินทรายชุดถูกกระดิ่งเพื่อให้หินแตกออกจากกันด้วยแรงดึง ตัวอย่างหินมีขนาด 15×15×15 ซม. ตะกอนจากโรงงานกำจัดตะกอนบางเขนถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงเคมี ผลทดสอบระบุว่าสัดส่วนที่เหมาะสมของตะกอนต่อซีเมนต์(S:C)เท่ากับ 1:10, 3:10, 5:10 และเบentonite ต่อซีเมนต์ (B:C) เท่ากับ 1:10, 2:10, 3:10 ใช้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 เนื่องจากให้ค่าความหนืดของส่วนผสมเหลวไม่เกิน 5 Pa×s และให้ค่ากำลังกดสูงสุด สัดส่วนของ S:C เท่ากับ 3:10 จะให้ค่ากำลังกดเท่ากับ 1.77MPa และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 224MPa ซึ่งต่ำกว่าค่าจาก B:C เล็กน้อย ค่ากำลังเฉือนระหว่างผิวรอยแตกกับส่วนผสมทั้ง 6 สัดส่วน มีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 0.36 ถึง 0.90 MPa ภายใต้ความเค้นตั้งฉากจาก 0.25 ถึง 1.25 MPa ค่าความซึมผ่านของทุกส่วนผสมจะลดลงในเชิงเวลาซึ่งให้ค่าอยู่ในช่วง 10⁻¹⁷ ถึง 10⁻¹⁵ ตร.ม. สัดส่วนของ S:C เท่ากับ 5:10 ให้ค่าความซึมผ่านต่ำสุด ค่าความซึมผ่านของรอยแตกประชิดภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่ผันแปรจาก 1 ถึง 4 MPa อยู่ในช่วง 10⁻⁸ ถึง 10⁻¹⁰ ตร.ม. และของส่วนผสมที่อยู่ในรอยแตกมีระยะการเปิดเผยเท่ากับ 0.2, 1.0 และ 2.0 ซม. มีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 10⁻¹⁵ ตร.ม.

คำสำคัญ: รอยแตกหิน, อุด, ความซึมผ่าน, ตะกอน, ซีเมนต์

ABSTRACT

The objective of this study is to assess the performance of sludge mixed with the commercial grade Portland cement type I for use in reducing permeability of fractures in sandstone. The fractures are artificially made in Phu Kraeng sandstone by applying a line load to induce a splitting tensile crack in 15×15×15 cm prismatic blocks. The Bang Khen water treatment sludge is used. The physical and chemical properties of the sludge are examined. The results indicate that the suitable mixing ratios for sludge:cement (S:C) are 1:10, 3:10, 5:10 and for bentonite:cement (B:C) are 1:10, 2:10, 3:10 with water-cement ratio of 1:1 by weight. These proportions yield the lowest slurry viscosity of 5 Pa×s and the highest compressive strength. For S:C = 3:10, the compressive strength and elastic modulus are 1.77 MPa and 224 MPa which are similar to those of bentonite mixed with cement. The shear strength of grouted fractures varies from 0.36 to 0.90 MPa under normal stresses ranging from 0.25 to 1.25 MPa. Permeability of grouting materials are from 10⁻¹⁷ to 10⁻¹⁵ m² and decrease with curing time. S:C of 5:10 give the lowest permeability. Fracture permeability under normal stress of 1 to 4 MPa ranges from 10⁻⁸ to 10⁻¹⁰ m². Permeabilities of grouted fractures with aperture of 0.2, 1.0 and 2.0 cm are about 10⁻¹⁵ m².

KEYWORDS: rock fracture, grouting, permeability, sludge, cement

1. บทนำ

ปัจจุบันโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีการผลิตและจ่ายน้ำในปริมาณที่สูงขึ้นวันละประมาณ 3.6 ล้าน ลบ.ม. มีตะกอนที่ต้องทำการกำจัดเฉลี่ย 247 ตันต่อวัน [1] และยังไม่สามารถนำตะกอนไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้เท่าที่ควร ซึ่งในแต่ละปีจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนเป็นจำนวน 38 ล้านบาท และด้วยพื้นที่ที่ใช้เป็นบ่อกักตะกอนและบ่อตากตะกอนมีอยู่อย่างจำกัด ไม่สามารถขยายออกไปได้ การประปานครหลวงจึงได้ก่อสร้างโรงงานกำจัดตะกอนบางเขน โดยใช้วิธีรีดกรองเพื่อแยกกากตะกอนหมด และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นวัสดุทดแทนในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างด้วยการใช้เป็นวัสดุลุด (Grouting Material) โดยผสมกับซีเมนต์เพื่อลดความชื้นผ่านของรอยแตกในมวลหินบริเวณรอบ ๆ โครงสร้างวิศวกรรม เช่น อุโมงค์ที่อยู่ใต้ระดับน้ำบาดาล ฐานรากของเขื่อนที่ตั้งอยู่บนมวลหินที่มีรอยแตกและการรูก้ำของน้ำเค็มเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลบริเวณชายฝั่งทะเล อีกทั้งยังช่วยลดการใช้วัสดุลุดที่ผลิตจากทรัพยากรธรรมชาติและยังเป็นการลดวัสดุเหลือทิ้งที่ระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือเพื่อทำการศึกษาศักยภาพของตะกอนดินประปาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้อุดรอยแตกในมวลหินเพื่อลดค่าความชื้นผ่าน

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีผู้วิจัยหลายท่าน [2] ได้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของ องค์ประกอบเชิงเคมีและเชิงกลศาสตร์ของตะกอนดินจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน โดยเสนอแนะให้ใช้ตะกอนดินประปาเป็นวัสดุเติมในอุตสาหกรรมเซรามิก เช่น ถ้วยชาม เครื่องประดับ มวลรวมประดิษฐ์ กระเบื้อง อิฐมวลเบา และบล็อกประสานดิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีผู้วิจัยท่านอื่นอีกหลายท่าน [3] ได้ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับตะกอนประปาเพื่อลดสีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

การศึกษาความชื้นผ่านในรอยแตกเดี่ยว [4] มีปัจจัยหลักที่ควบคุมการไหลและค่าความชื้นผ่าน คือ ความเป็ดเผยอ ความขรุขระของผิวรอยแตก ทิศทางการวางตัว ความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน นอกจากนี้มีการทดสอบการไหลเพื่อคำนวณค่าเหนี่ยวนำชลศาสตร์ในรอยแตกหินภายใต้ความเค้นตั้งฉากและแนวเฉือนโดยใช้ตัวอย่างหินทราย [7-5]

ส่วนการศึกษาการลดค่าความชื้นผ่านของรอยแตกในหิน เช่น งานชุดเจาะอุโมงค์ งานเหมืองแร่ งานกำแพงกั้นน้ำใต้ดิน งานทิ้งกากกัมมันตรังสี ผู้วิจัยหลายท่านได้ศึกษาทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนามโดยใช้ซีเมนต์ ดินเบนทอนไนต์ ดิน หรือซีเมนต์ลุดมาเป็นส่วนผสมวัสดุลุดในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์อยู่ในเกณฑ์ดีและมีความหนืดน้อย ผลวิจัยระบุว่าสามารถลดความชื้นผ่านได้ [13-8]

3. ระเบียบวิธีวิจัยและผลการศึกษา

วัสดุหลักที่ใช้ในการศึกษานี้คือ 1) ตะกอนดินจากโรงกำจัดตะกอนบางเขนที่ถูกคัดขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.075 มม. 2) ดินเบนทอนไนต์ 3) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ 4) หินที่มีรอยแตก โดยมีพื้นที่ของรอยแตกไม่ต่ำกว่า 152.4×152.4 มม. จำนวน 60 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบความชื้นผ่านและเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 10 ซม. ประมาณ 40 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังเฉือนของวัสดุลุดกับรอยแตกหิน ในการศึกษานี้เลือกใช้หินทรายชุดภูกระดึง ซึ่งเป็นหินที่มีความชื้นผ่านต่ำ เป็นเนื้อเดียวกัน และจัดเตรียมรอยแตกได้ง่าย

3.1 การทดสอบคุณสมบัติกายภาพ

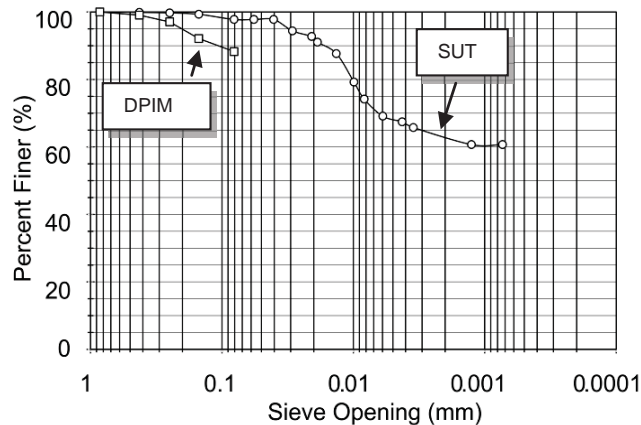
ตะกอนดินประปาและดินเบนทอนไนต์ถูกทดสอบคุณสมบัติกายภาพเกี่ยวกับค่าขีดจำกัดของ Atterberg ค่าความถ่วงจำเพาะ การกระจายอนุภาคตามมาตรฐาน ASTM(D422,D854) เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน

ผลการทดสอบคุณสมบัติกายภาพของตะกอนและเบนทอนไนต์สามารถสรุปในตารางที่ 1 และผลการทดสอบการกระจายอนุภาคของตะกอนดินประปาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของกรมอุตสาหกรรมและการเหมืองแร่แสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าขีดจำกัดของ Atterberg และค่าความถ่วงจำเพาะของตะกอนดินประปาและดินเบนทอนไนต์

Atterberg Limits	Bentonite content (%)		Sludge content (%)	
	SUT*	US [14]	SUT*	KU [15]
Liquid limit	357	478	55	69
Plastic limit	44	28	22	42
Plasticity index	313	449	23	28
Specific gravity	-	-	2.56	-

* Suranaree University of Technology Laboratory



รูปที่ 1 การกระจายอนุภาคของตะกอนดินประปา

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของส่วนผสม

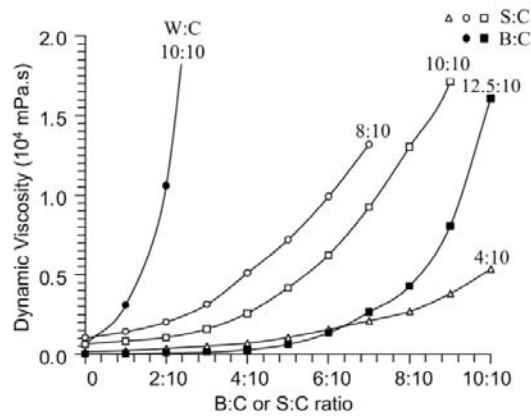
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของส่วนผสมเพื่อกำหนดวิธีและสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบเชิงกลศาสตร์และเชิงพลศาสตร์ โดยใช้เกณฑ์ความหนืด กำลังกดสูงสุดและความซึมผ่าน ประกอบด้วย 3 กลุ่ม คือ 1) การทดสอบความหนืด 2) การทดสอบกำลังกดในแกนเดียวเบื้องต้น และ 3) การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม

การจัดเตรียมส่วนผสมตะกอนดินประปากับซีเมนต์ (S:C) และส่วนผสมของดินเบนทอนไนต์กับซีเมนต์ (B:C) มีค่าตั้งแต่ 0:10, 1:10, 2:10, 3:10, 4:10, 5:10, 6:10, 7:10, 8:10, 9:10 ถึง 10:10 แปรผันกับสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) ตั้งแต่ 4:10, 8:10, 10:10 ถึง 12.5:10 ซึ่งวัสดุทั้งสิ้นชนิดตามสัดส่วนที่กำหนด ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม โดยใช้ความเร็วไม่เกิน 275 รอบต่อนาที

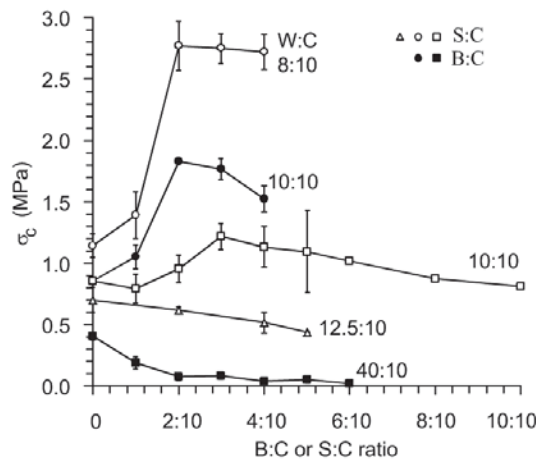
การทดสอบความหนืดเริ่มจากนำส่วนผสมที่ได้จัดเตรียมไปทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดพร้อมหาค่าความหนาแน่น และความถ่วงจำเพาะ (ASTM D2196) ของส่วนผสมเหลวขณะที่ยังไม่แข็งตัว

ผลการทดสอบความหนืดของส่วนผสมในสัดส่วนที่ต่างกันแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งระบุว่า เมื่อสัดส่วนของซีเมนต์ลดลง ส่วนผสมจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ B:C หรือ S:C มากกว่า 0.5 นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำจะทำให้ความ

หนืดของส่วนผสมมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกันทั้งส่วนผสมที่ใช้กับเบนทอไนต์และตะกอนดินประปา สำหรับส่วนผสมที่ใช้ดินเบนทอไนต์ สัดส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W:C) ต้องไม่น้อยกว่า 1.0 เนื่องจากจะทำให้ส่วนผสมเหนียว เกาะตัวกันแน่น และหมดสภาพความเป็นของเหลว ทั้งนี้เกิดจากดินเบนทอไนต์มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้มาก และจับตัวกันเป็นก้อน ในขณะที่ส่วนผสมที่ใช้ตะกอนดินประปาสามารถเพิ่มและลดปริมาณของน้ำได้ในสัดส่วนที่กว้างกว่า และยังคงตัวเป็นของเหลวที่สามารถนำมาทดสอบความหนืดและค่ากำลังกดสูงสุดได้



รูปที่ 2 ค่า Dynamic viscosity ของ ส่วนผสมเหลว



รูปที่ 3 ค่ากำลังกดสูงสุดของ B:C และ S:C ที่อัตราส่วนต่างๆ

การทดสอบกำลังกดในแกนเดียวเบื้องต้นส่วนผสมของตัวอย่างแท่งรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 ซม. สัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) ประมาณ 2.5-2.0 ที่ถูกบ่มมาแล้ว 3 วัน ตัวอย่างแท่งถูกกดในแนวแกนด้วยโครงทดสอบที่อัตรา 1 MPa/s จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ

ผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวเบื้องต้นแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งระบุว่าค่ากำลังกดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะเมื่อใช้ W:C = 1:1 เมื่อลดสัดส่วนของน้ำลงจะทำให้ค่ากำลังกดสูงขึ้น แต่ไม่เกิน 3 MPa และจะทำให้ส่วนผสมเหลวมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจจะไม่เป็นผลดีต่อการนำไปเป็นวัสดุอุดในรอยแตกของหิน เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นที่ W:C > 1:1 ค่ากำลังกดจะ

ลดลงอย่างมาก ดังนั้นผลการทดสอบนี้สามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่า W:C = 1:1 จะมีความเหมาะสมที่สุด

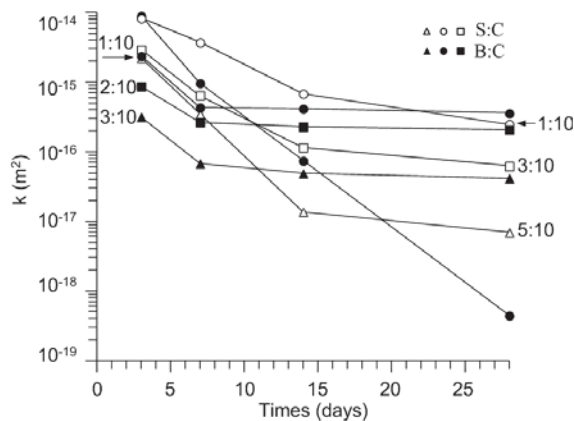
การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมหลังจากนำส่วนผสมที่ได้จัดเตรียมหล่อลงในท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 ซม. สูง 15.24 ซม. ในการทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (C938, C39) ซึ่งมีการหาค่าความซึมผ่านในช่วงเวลาของการบ่มที่ต่างกัน คือ 3, 7, 14 และ 28 วันการทดสอบเริ่มจากการติดตั้งชุดประกอบแผ่นอะคริลิกหนา 1.5 ซม. ที่ปลายบนและล่างของแบบหล่อ PVC ที่จุดกึ่งกลางของแผ่นอะคริลิกมีรูที่ต่อกับหมุดยึดท่อแรงดันสูงเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 มม. แผ่นด้านล่างต่อเข้ากับปั้มน้ำ และแผ่นด้านบนจะต่อเข้ากับหลอดวัดปริมาตรน้ำปิเปตต์ ในขณะที่ทดสอบจะทำการอัดน้ำ ด้วยความดันคงที่เท่ากับ 13.8 kPa โดยใช้วาล์วปรับความดันที่ส่วนบนของถังก๊าซไนโตรเจนและไล่ฟองอากาศออกให้ก่อนการตรวจวัดความซึมผ่านสามารถทำได้โดยจับเวลาการไหลของน้ำในเชิงปริมาตรที่หลอดวัดปริมาตรน้ำปิเปตต์ ความซึมผ่านของตัวอย่างส่วนผสมสามารถคำนวณได้จากสมการ (1) และ (2) [4]

$$K = \frac{Q}{iA} \quad (1)$$

$$k = \frac{K \cdot \mu}{\gamma_w} \quad (2)$$

โดยที่ K คือ ค่าเหนี่ยวนำชลศาสตร์ของน้ำ (Hydraulic conductivity) Q คือ ปริมาตรของน้ำที่ไหลต่อช่วงเวลาที่ตรวจวัดจากหลอดวัดปริมาตรน้ำปิเปตต์ i คือ Hydraulic gradient A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง k คือค่าความซึมผ่านทางกายภาพ (Intrinsic permeability) γ_w คือความหนาแน่นโดยมวลของน้ำ และ μ คือความหนืดของน้ำ (ใช้ที่อุณหภูมิ 25°C)

ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของทุกส่วนผสมจะลดลงในเชิงเวลาแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสม

3.3 การทดสอบกำลังกดในแกนเดียว

การทดสอบกำลังกดในแกนเดียวมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังกดสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น และอัตราส่วน Poisson ของส่วนผสมที่ได้คัดสรรมาจากการทดสอบเบื้องต้นในหัวข้อ 3.2 ดังนี้ S:C เท่ากับ 1:10, 3:10, 5:10, B:C เท่ากับ 1:10, 2:10, 3:10 และซีเมนต์ล้วน ทุกส่วนผสมกำหนด W:C เท่ากับ 1:1 การจัดเตรียมตัวอย่างและการทดสอบได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM (D7012, C938, C39) และทำการบ่มเป็นเวลา 3 วันก่อนนำมาทดสอบ โดยตัวอย่างถูกกดในแนวแกนด้วยเครื่องกดทดสอบที่อัตรา 1 MPa/s ในขณะเดียวกันได้มีการตรวจวัดการเปลี่ยนรูปร่างในแนวแกนและแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง ด้วยมาตรวัด

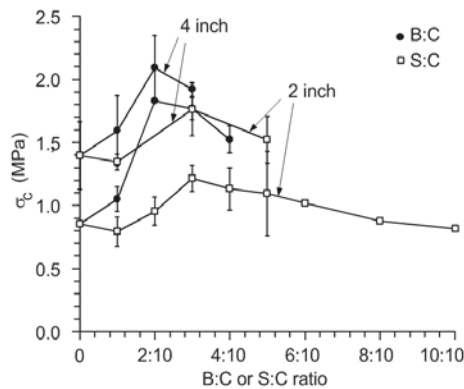
ที่มีความละเอียด ± 0.01 มม. ซึ่งดำเนินการจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ผลที่ได้นำเสนอในความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับความเครียดในแนวแกนและแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง

รูปที่ 5 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่ากำลังกดที่ได้จากตัวอย่างส่วนผสมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 ซม. และ 5.08 ซม. ซึ่งระบุว่าส่วนผสมที่มีแบบหล่อขนาดใหญ่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับดินเบนทอนไนต์ หรือซีเมนต์กับตะกอนดินประปาได้ดีกว่าส่วนผสมที่ได้จากแบบหล่อขนาดเล็ก

ค่ากำลังกดในแกนเดียว (σ_c) และคุณสมบัติความยืดหยุ่น (E) ของส่วนผสมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มม. ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังกดสูงสุดของส่วนผสมที่ใช้ดินเบนทอนไนต์และที่ใช้ตะกอนดินประปามีค่าใกล้เคียงกัน โดยส่วนผสมทั้งสองชนิดมีค่ากำลังกดสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 2 MPa

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียว

Type	Mix ratio	σ_c (MPa)	ν	E (MPa)
C	0:10	1.40	0.18	212
B:C	1:10	1.59	0.17	193
B:C	2:10	2.09	0.14	275
B:C	3:10	1.92	0.16	228
S:C	1:10	1.35	0.15	190
S:C	3:10	1.77	0.21	224
S:C	5:10	1.52	0.16	261



รูปที่ 5 ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียว

3.4 การทดสอบกำลังเฉือนของส่วนผสมกับรอยแตกหิน

วัตถุประสงค์ของการทดสอบกำลังเฉือนของส่วนผสมกับรอยแตกหินเพื่อหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างผิวของส่วนผสมกับผิวของรอยแตกในหิน ซึ่งเป็นปัจจัยกำหนดความสามารถในการต้านแรงเฉือนของส่วนผสมที่สัดส่วนต่างๆ ต่อ

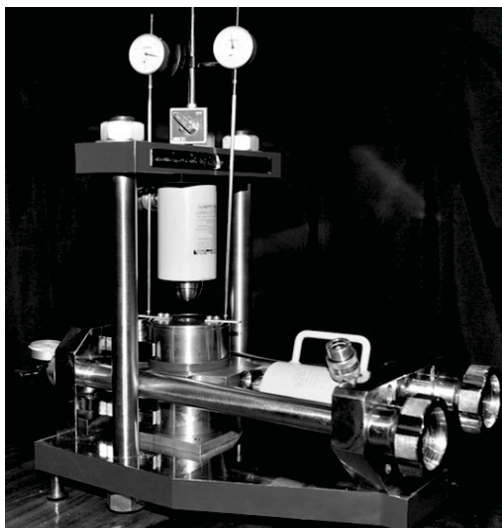
แรงที่มากกว่าในแนวขนานกับรอยแตก การทดสอบได้ใช้สัดส่วนของส่วนผสมที่คัดเลือกมาจากการทดสอบ วิธีการผสมและการบ่มได้ดำเนินการตามหัวข้อ 3.2

การทดสอบกำลังเฉือนของส่วนผสมกับรอยแตกของหินจะใช้อุปกรณ์ทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน โดยนำตัวอย่างหินที่มีวัสดุอยู่ในรอยแตกที่บ่มมาแล้ว 3 วัน ประกอบเข้ากับชุดทดสอบในรูปที่ 16] 6] การทดสอบได้ใช้ความเค้นในแนวตั้งฉาก 5 ระดับตั้งแต่ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 ถึง 1.25 MPa ระหว่างทำการทดสอบจะมีการบันทึกค่าแรงเฉือนและปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวเฉือนอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งสังเกตลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง ผลการทดสอบได้นำเสนอในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นในแนวตั้งและแนวเฉือน

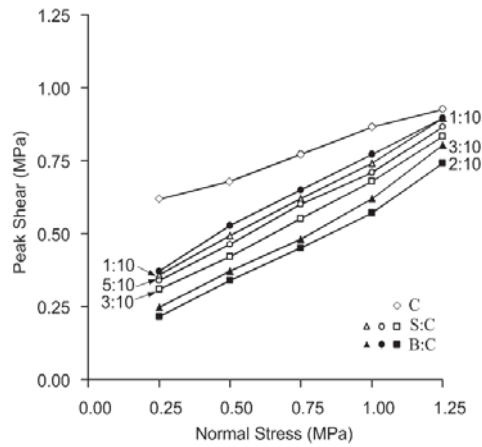
ผลการคำนวณค่าคงที่ของกฎ Coulomb แสดงในตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนในฟังก์ชันของความเค้นในแนวตั้งฉาก (รูปที่ 7) ซึ่งผลที่ได้ระบุว่าส่วนผสมที่เลือกมาทั้ง 6 สัดส่วน มีค่ามุมเสียดทาน (ϕ_p) ใกล้เคียงกันมากและมีค่าความเค้นยึดติด (c_p) ต่างกันเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ตามกฎการแตกของ Coulomb

Sample No.	c_p (MPa)	$\tan\phi_p$	ϕ_p ($^{\circ}$)	R^2
C	0.563	0.263	14.7	0.962
S:C=1:10	0.275	0.436	23.6	0.985
S:C=3:10	0.213	0.435	23.5	0.988
S:C=5:10	0.255	0.428	23.2	0.985
B:C=1:10	0.306	0.424	23.0	0.968
B:C=2:10	0.121	0.410	22.3	0.998
B:C=3:10	0.143	0.430	23.3	0.996



รูปที่ 6 เครื่องทดสอบกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน [16]



รูปที่ 7 ผลการทดสอบค่ากำลังเฉือนของส่วนผสม

3.5 การทดสอบความซึมผ่านในรอยแตกของหิน

ค่าความซึมผ่านในรอยแตกของหินเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบขีดความสามารถของส่วนผสมในระดับต่างๆ ทดสอบความซึมผ่านในรอยแตกภายใต้ความเค้นกดที่ตั้งฉากกับรอยแตกในระดับต่างๆ กัน คือ 1, 2, 3 และ 4 MPa จำนวน 5 ตัวอย่าง ตัวอย่างหินส่วนบนถูกเจาะเป็นรูกลมในทิศทางตั้งฉากกับระนาบการวางตัวของชั้นหิน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ลึก 10.16 ซม. อยู่ที่จุดกึ่งกลางเพื่อใช้เป็นทางส่งแรงดันน้ำเข้าสู่รอยแตก ตัวอย่างถูกทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบ รูปที่ 8 ระหว่างการทดสอบได้มีการบันทึกค่าปริมาตรน้ำและเวลา ผลที่ได้นำเสนอในรูปแบบภูมิระหว่างค่าความเค้นตั้งฉาก (σ_n) กับค่าความเปิดเฉยของรอยแตก (e_h) ค่าเหนี่ยวนำชลศาสตร์ (K) และค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยว (k) เป็นตามสมการ (3) ถึง (5) [6]

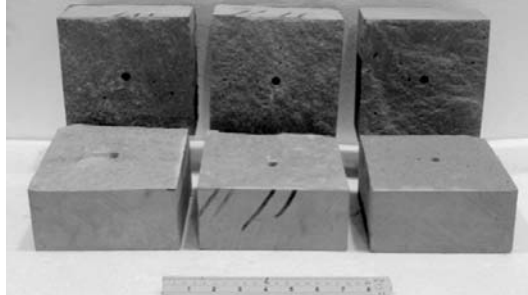
$$e_h = \left(\frac{1}{3} \right) \left\{ \frac{(6\mu q)}{\pi \Delta P} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) \right\} \quad (3)$$

$$K = \gamma_w \frac{e_h^2}{12\mu} \quad (4)$$

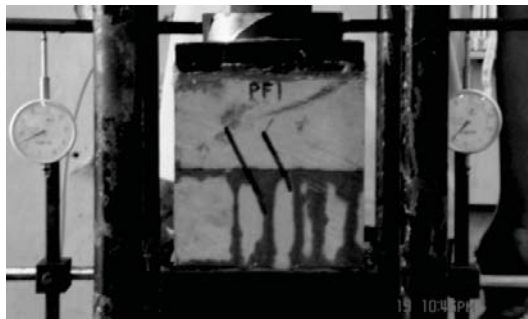
$$k = \frac{e_h^2}{12} \quad (5)$$

โดยที่ e_h คือระยะเปิดเฉยของไฮดรอลิกของรอยแตก γ_w คือความหนาแน่นโดยมวลของน้ำ μ คือความหนืดเชิงพลศาสตร์ r_0 คือรัศมีของรูที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างรอยแตก r คือระยะจากจุดกึ่งกลางของรอยแตกถึงขอบนอก q คืออัตราไหลเชิงปริมาตรที่วัดได้จากการทดสอบ และ ΔP คือค่าความดันของน้ำที่อัดเข้าไปที่รูกลางของตัวอย่างหิน

ผลที่ได้จากการทดสอบความซึมผ่านในรอยแตกของหินตัวอย่างที่ 1 ถึง 5 ที่ระดับความเค้นตั้งฉากตั้งแต่ 1 ถึง 4 MPa แสดงในรูปที่ 9 ระบุว่าค่าความซึมผ่านในรอยแตกเดี่ยวน้อยกว่า 1.4×10^{-9} ตร.ม.

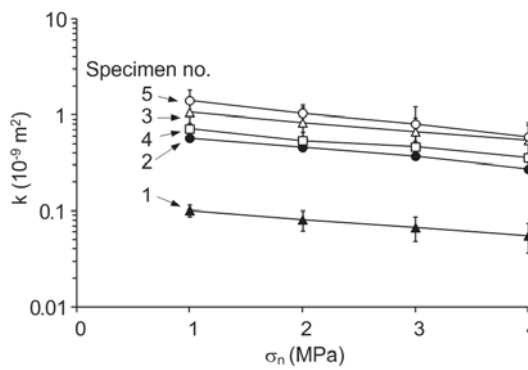


(a)



(b)

รูปที่ 8 (a) ตัวอย่างรอยแตกหิน (b) การทดสอบความซึมผ่านของรอยแตก



รูปที่ 9 ค่าความซึมผ่านที่สัมพันธ์กับ σ_n

3.6 การทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกหิน

ค่าความซึมผ่านของส่วนผสมเป็นปัจจัยสำคัญที่จะบ่งบอกถึงการไหลซึมของน้ำในรอยแตกของหินได้มากหรือน้อย การทดสอบความซึมผ่านจะมีวัสดุอุดอยู่ภายในรอยแตกที่มีการเปิดเผย 0.2, 1.0 และ 2.0 ซม. ที่เวลาบ่ม 3 วัน ตัวอย่างหินและวิธีทดสอบจะมีลักษณะตามหัวข้อ 3.2 แผนภูมิแสดงลักษณะการทดสอบและการจัดเตรียมอุปกรณ์แสดงตามรูปที่ 10 และ 11

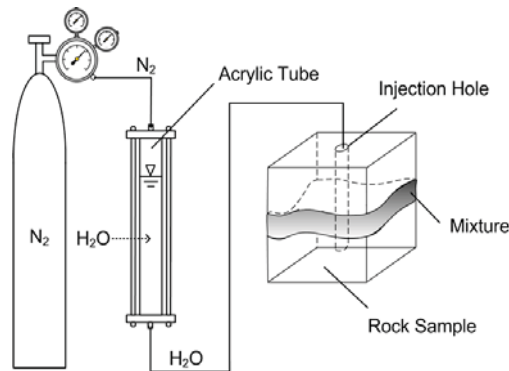
ตัวอย่างหินทั้ง 21 ตัวอย่างถูกให้แรงดันน้ำคงที่ในขณะทดสอบ ซึ่งอยู่ในช่วง 13.8 ถึง 551.7 kPa โดยการทดสอบเริ่มจาก

ความเค้นกตส่วนผสมในรอยแตกจากน้อยไปมาก กล่าวคือจาก 0.251.00 ,0.75 ,0.50 , และ 1.25 MPa ในแต่ละระดับความเค้นกตบนส่วนผสมในรอยแตก ค่าเหนี่ยวนำชลศาสตร์และค่าความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกสามารถคำนวณได้จากสมการ (6) และ (7) [4] ดังนี้

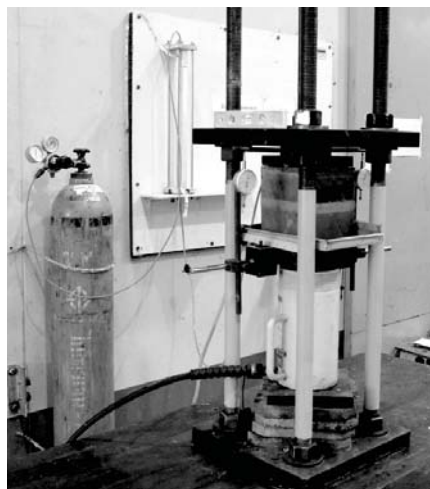
$$K = \frac{Q}{2\pi LH_c} \ln\left(\frac{2mL}{D}\right) \quad (6)$$

$$k = \frac{K\mu}{\gamma_w} \quad (7)$$

โดยที่ Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านส่วนผสม (หลังจากหักลบน้ำที่ไหลผ่านรอยต่อระหว่างส่วนผสมกับผิวหินแล้ว) m คือรากที่สองของสัดส่วนระหว่างค่าเหนี่ยวนำการไหลในแนวขนานกับรอยแตกกับแนวตั้งฉากกับรอยแตก กรณีนี้มีค่าคงที่เท่ากับ 1 ส่วน L คือความหนาของส่วนผสมในรอยแตก (0.2, 1.0 และ 2.0 ซม.) D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่าง H_c คือแรงดันเมื่อเทียบกับความสูงของน้ำ ซึ่งมีค่าคงที่



รูปที่ 10 แผนภูมิแสดงลักษณะการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกในหินที่มีการเปิดเผย



รูปที่ 11 การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมในรอยแตกที่เปิดเผย

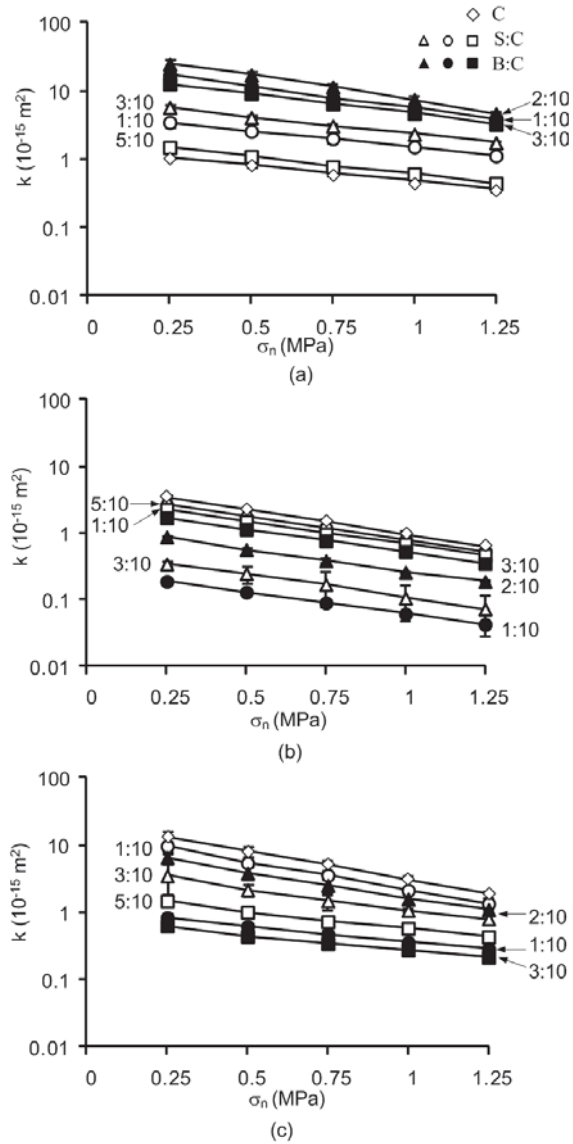
รูปที่ 12 ระบุว่าค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของส่วนผสมในรอยแตกหินทั้ง 21 ตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับผลที่ทดสอบได้ในหัวข้อ 3.5

7. สรุปผลการศึกษา

ตะกอนดินประปาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีศักยภาพเพื่อนำมาประยุกต์ใช้อุดรอยแตกในมวลหินเพื่อลดค่าความซึมผ่านแทนวัสดุอุดเบนทอไนต์กับซีเมนต์ โดยกำหนดชนิดของวัสดุอุดที่นำมาใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ตะกอนดินประปาจากโรงกำจัดตะกอนบางเขน ปูนซีเมนต์ตรานกอินทรีจากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด และดินเบนทอไนต์ของบริษัท American Colloid Company

การทดสอบส่วนผสมที่หลากหลายระหว่างตะกอนดิน ซีเมนต์ และน้ำ และระหว่างดินเบนทอไนต์ ซีเมนต์ และน้ำ เพื่อให้ได้มาซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสมและเลือกใช้อุดรอยแตกในหิน กล่าวคือ จะต้องมีความสมบัติเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์อยู่ในเกณฑ์ดีและมีความหนืดน้อย ในขั้นตอนนี้ได้มีการคัดเลือกสัดส่วน S:C เท่ากับ 1:10, 3:10 และ 5:10 และสัดส่วน B:C เท่ากับ 1:10, 2:10 และ 3:10 โดยทั้ง 6 สัดส่วนจะใช้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 เนื่องจากจะให้ค่ากำลังกดสูงประมาณ 2 MPa ในขณะที่มีความหนืดของส่วนผสมเหลวไม่เกิน 5 Pa·s ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลศาสตร์ระบุว่าส่วนผสมตะกอนดินกับซีเมนต์ที่อัตราส่วน 3:10 จะให้ค่ากำลังกดสูงสุดเท่ากับ 1.77 MPa และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นเท่ากับ 224 MPa ซึ่งจะต่ำกว่าค่าที่ได้จากส่วนผสมระหว่างดินเบนทอไนต์กับซีเมนต์เพียงร้อยละ 10 ค่ากำลังเฉือนระหว่างผิวรอยแตกกับส่วนผสมทั้ง 6 สัดส่วน มีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 0.36 ถึง 0.90 MPa ซึ่งขึ้นกับค่าความเค้นกดที่ให้บนตัวอย่างหิน

ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมระบุว่าค่าความซึมผ่านของทุกส่วนผสมจะลดลงในเชิงเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 7 วันแรก จากนั้นค่าความซึมผ่านจะมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจากบ่มได้ 14 ถึง 28 วัน หลังจากถูกบ่มมาแล้วส่วนผสมทุกสัดส่วนจะมีค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพผันแปรอยู่ในช่วง 10^{-17} ถึง 10^{-15} ตร.ม. ผลการทดสอบความซึมผ่านของรอยแตกประชิดระบุว่าที่ภายใต้ความเค้นตั้งฉากที่ผันแปรจาก 1 ถึง 4 MPa มีค่าความซึมผ่านอยู่ในช่วง 10^{-8} ถึง 10^{-10} ตร.ม. ผลการทดสอบความซึมผ่านของส่วนผสมที่อยู่ในรอยแตกมีระยะการเปิดเผยเท่ากับ 0.2, 1.0 และ 2.0 ซม. มีค่าความซึมผ่านใกล้เคียงกันคือประมาณ 10^{-15} ตร.ม. ซึ่งหมายถึงภายใต้การผสมในสัดส่วนที่เหมาะสมส่งผลให้ ตะกอนดินประปามีศักยภาพเชิงชลศาสตร์ที่ทัดเทียมกับส่วนผสมที่ใช้ดินเบนทอไนต์



รูปที่ 12 ค่าความซึมผ่านวัสดุอุดในรอยแตกหินที่มีค่าเปิดผเยอ (a) 0.2 ซม. (b) 1.0 ซม. และ (c) 2.0 ซม.

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากการส่งเสริมการศึกษาระดับอุดมศึกษา และมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งที่อนุญาตให้เผยแพร่บทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] คมกริช เวชส์สัถ์, สุทธิรักษ์ บูชากุล, ปาริฉัตร บันทอง และสุรเดช เหมรัมย์กุล. การออกแบบและก่อสร้างระบบกำจัดตะกอนโดยใช้วิธีกรองโรงงานผลิตน้ำบางเขน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15. อุบลราชธานี, 2553.

-
- [2] นพปฎล เสี่ยมศักดิ์ และเรืองรุชต์ ซีโรจน์. การศึกษาคุณสมบัติมวลรวมประติษฐ์ที่ทำจากตะกอนน้ำประปา. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13. พัทยา, 2551.
- [3] อุซากร คงทอง และกฤติยากร เลิศโกตะสมบัติ. การศึกษาตะกอนสลัดจ์จากโรงผลิตน้ำประปาในการดูดซับสี้อม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11. ภูเก็ต, 2549.
- [4] Indraratna B. and Ranjith P. Hydromechanical Aspects and Unsaturated Flow in Joints Rock. A. A. Balkema. Lisse, 2001.
- [5] Obcheoy J., Aracheeploha S. and Fuenkajorn K. Fracture permeability under normal and shear stresses. Rock Mechanics (Fuenkajorn & Phien-wej (eds)). Geomechanics Research Unit, Suranaree University of Technology, Thailand, 2011, pp. 133-140.
- [6] Akkrachattrarat N., Suanprom P., Buaboocha J. and Fuenkajorn K. Flow testing of sandstone fractures under normal and shear stresses. Rock Mechanics (Fuenkajorn & Phien-wej (eds)). Geomechanics Research Unit, Suranaree University of Technology, Thailand, 2009, pp. 319-334.
- [7] Suanprom P., Obcheoy J. and Fuenkajorn K. Permeability of Rock Fractures under Shear Stresses. EIT-JSCE Joint International Symposium Geotechnical Infrastructure Asset Management, Bangkok, Thailand, 2009.
- [8] Fransson A. Characterisation of a fractured rock mass for a grouting field Test. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2001, Vol. 16, pp. 331-339.
- [9] Gothall R., and Stille H. Fracture - fracture interaction during grouting. *Tunneling and Underground space technology*, 2001, Vol. 25, pp. 199-204.
- [10] Fransson A., Tsang C. F., Rutqvist J. and Gustafson G. Effects of the injection grout Silica sol on bentonite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, Vol. 47, pp. 887-893.
- [11] Fuenkajorn K. Design process for sealing of boreholes in rock mass. Rock Mechanics (Fuenkajorn & Phien-wej (eds)), Geomechanics Research Unit, Suranaree University of Technology, Thailand, 2007, pp. 245-252.
- [12] Funehag J., and Fransson A. Sealing narrow fractures with a Newtonian fluid: Model prediction for grouting verified by field study. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2006, Vol. 21, pp. 492-498.
- [13] Varol A., and Dalgic S. Grouting applications in the Istanbul metro, Turkey. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2006, Vol. 21, pp. 602-612.
- [14] Castelbaum D. and Shackelford C. D. Hydraulic Conductivity of Bentonite Slurry Mixed Sands. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, Vol. 135, No. 12, pp. 1941-1956.
- [15] Kanchanamai P. The utilization of sludge from Bang Khen water treatment plant in construction industry. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of master of engineering in the faculty of graduate studies, Kasetsart University, 2003.
- [16] กิตติเทพ เพื่อขจร. การประติษฐ์แบบหล่อทดสอบการบดอัดและกำลังเฉือนแบบสามวงแหวน. รายงานวิจัย รหัสโครงการ 3-1/54 กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประติษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2554, 53 หน้า.
- [17] Jaeger J. C. The frictional properties of joints in rocks. *Geofis pura appl.*, 1959, Vol. 43, pp. 148-158.

