บทที่ 2
สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ผลงานการวิจัยทั้งหมดในชุดโครงการนี้ได้นำมาสรุปไว้โดยสังเขปในบทนี้ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ได้รวบรวมและเขียนลงในรายงานของแต่ละชุดโครงการเป็นที่เรียบร้อย ผลการดำเนินงานและข้อสรุปโดยสังเขปของแต่ละโครงการมีดังต่อไปนี้

2.1 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 1

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อพัฒนาเกณฑ์การแตกในหลายแกนของเกลือหินภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและความดันล้อมรอบ ความสามารถในการคาดคะเนการแตกของเกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นถูกพิสูจน์โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังกดในแกนเดียวและในสามแกน และกำลังดึงแบบบราซิลของตัวอย่างเกลือหินภายใต้อุณหภูมิที่ผันแปรจาก 273, 298, 404 ถึง 467 Kelvin (0–191 องศาเซลเซียส) การทดสอบกำลังกดได้ใช้ตัวอย่างเกลือหินรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 5.4×5.4×5.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร การทดสอบกำลังดึงแบบบราซิลได้ใช้ตัวอย่างเกลือหินที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร มีความหนา 24 มิลลิเมตร ผลการศึกษาระบุว่าค่ากำลังกดและกำลังดึงของเกลือหินจะลดลงเป็นเชิงเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แนวคิดทางด้านพลังงานความเครียดได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเค้นและความเครียดที่จุดแตก และต่อคุณสมบัติความยืดหยุ่นของเกลือหิน โดยสมมติว่าเกลือหินมีคุณสมบัติเชิงเส้นตรงก่อนเกิดการวิบัติ พลังงานความเครียดเบี่ยงเบน (W_d) ที่จุดแตกสามารถคำนวณในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ย (W_m) ดังนั้นเกณฑ์การแตกในหลายแกนของเกลือหินภายใต้การผันแปรความดันล้อมรอบและอุณหภูมิได้พิจารณาผลกระทบของพลังงานความร้อนโดยใส่ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความยืดหยุ่นและอุณหภูมิเข้าไปในความสัมพันธ์ระหว่าง W_d และ W_m เกณฑ์การแตกของพลังงานความเครียดที่พัฒนาขึ้นนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบกำลังกดและกำลังดึงของเกลือหินที่อุณหภูมิต่างระดับกัน เกณฑ์การแตกที่เสนอขึ้นเป็นประโยชน์ในการหาเสถียรภาพเชิงอนุรักษ์ของโพรงเกลือที่ใช้กักเก็บอากาศอัดและก๊าซธรรมชาติ ที่ซึ่งชั้นเกลือหินที่อยู่ล้อมรอบจะมีการผันแปรอุณหภูมิอย่างมากในระหว่างการอัดและการปล่อยอากาศหรือก๊าซธรรมชาติออกจากโพรง (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2555)

2.2 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 2

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือเพื่อกำหนดปัจจัยสำหรับเกล็ดเกลือบดที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุดในช่องเหมือง และเพื่อประเมินศักยภาพเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์ของเกล็ดเกลือภายใต้การอัดตัว การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบการอัดตัว ความซึมผ่านของก๊าซ และค่ากำลังเฉือนของเกล็ดเกลือ 3 ขนาด คือ 0.425–1.0, 1.0–2.0 และ 2.0–4.75 มิลลิเมตร ตัวอย่างเกล็ดเกลือที่นำมาทดสอบการบดอัดมีปริมาณน้ำเกลือผสมอยู่ 0, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเค้นกดในแนวแกนผันแปรจาก 1, 2, 3 ถึง 4 MPa เป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง หรือประมาณ 41 วัน ผลการทดสอบระบุว่าความเค้นที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการอัดตัวเร็วขึ้น และมีอัตราการเพิ่มของความหนาแน่นสูงขึ้น ตัวอย่างเกล็ดเกลือที่แห้งสนิทจะไม่สามารถถูกบดอัดได้โดยง่าย ปริมาณน้ำเกลือที่ผสมอยู่ 5% และ 10% จะทำให้การอัดตัวมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนั้นปริมาณน้ำเกลือทั้งสองระดับจะให้ผลของอัตราการอัดตัวที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นเช่นนี้ทุกขนาดของเกล็ดเกลือที่นำมาทดสอบ การลดตัวของช่องว่างในเชิงเวลาของตัวอย่างเกล็ดเกลือสามารถคาดคะเนได้ด้วยสมการ exponential โดยมุมเสียดทานภายในและความเค้นยึดติดของตัวอย่างเกล็ดเกลือที่ถูกบดอัดจะเพิ่มขึ้นในเชิงเวลา ตัวอย่างเกล็ดเกลือที่มีขนาดเล็กจะให้ค่ามุมเสียดทานและค่าความเค้นยึดติดสูงกว่าเกล็ดเกลือที่มีขนาดใหญ่ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของเกล็ดเกลือทุกขนาดจะลดลงในเชิงเวลาภายใต้การบดอัดเช่นกัน ซึ่งจะมีการลดตัวอย่างรวดเร็วในช่วง 5 วันแรก และมีค่าค่อนข้างคงที่หลังทดสอบได้ 10 วัน โดยเกล็ดเกลือทั้งสามขนาดจะมีค่าความซึมผ่านใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบระบุว่าควรใช้เกล็ดเกลือที่มีขนาดเล็กมาเป็นวัสดุอุด ควรผสมด้วยน้ำเกลือประมาณ 5% และถูกบดอัดด้วยความดันล้อมรอบไม่ต่ำกว่า 5 MPa (บัณฑิตา ธีระกุลสถิตย์, 2555)

2.3 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 3

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ของปูนซีเมนต์เพื่อนำมาใช้อุดในชั้นเกลือหินที่ถูกขุดเจาะเป็นโพรงหรืออุโมงค์สำหรับเป็นแหล่งทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ผลการทดสอบที่ได้จะนำมาใช้ในการออกแบบซีเมนต์สำหรับการอุดรอยแตกเพื่อให้มีผลกระทบจากการรั่วไหลน้อยที่สุดสำหรับชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

การทดสอบกำลังแรงเฉือนสูงสุดระหว่างซีเมนต์อุดและรอยแตกในเกลือหินประกอบด้วย การทดสอบ Push-out และการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) โดยเตรียมตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร จากเกลือหินชุดมหาสารคาม ซีเมนต์สำหรับอุดเตรียมจากปูนซีเมนต์ชนิดทนเค็มที่มีขายอย่างแพร่หลายในท้องตลาด โดยหล่อให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และความยาว 25 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบ Push-out และ

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ซึ่งแบ่งการสร้างรอยแตกเป็น 2 ชนิด คือรอยแตกแบบตัดเรียบและรอยแตกแบบขรุขระ เพื่อศึกษาผลกระทบของความขรุขระของรอยแตกในเกลือหิน ตัวอย่างซีเมนต์ถูกเตรียมให้มีอายุ 3 วัน เพื่อการทดสอบ ผลการทดสอบที่ได้ตามเกณฑ์ของคูลอมป์พบว่าให้ค่าของแรงเสียดทานยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินเท่ากับ 69 และ 53 องศา สำหรับรอยแตกแบบตัดเรียบและรอยแตกแบบขรุขระตามลำดับ แรงยึดติดในรอยแตกระหว่างซีเมนต์และเกลือหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 เมกกะปาสคาล การทดสอบ Push-out ให้ค่าผลการทดสอบที่สูงกว่าผลที่ได้จาการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง โดยมีค่าแรงเฉือนสูงสุดตามแรงกดในแนวแกน 6-11 เมกกะปาสคาล อันเป็นผลมาจากผลกระทบของค่าอัตราส่วนปัวซองที่จะเพิ่มขึ้นตามความเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของตัวอย่างซีเมนต์และเกลือหินในขณะที่ให้แรงกดตามแนวแกน จึงชี้ให้เห็นว่าผลที่ได้จาการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงนั้นให้ค่าที่อยู่ในเชิงอนุรักษ์ที่มากกว่าสำหรับการทดสอบหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดระหว่างเกลือหินและซีเมนต์ที่ใช้ในการอุดหลุมเจาะ ซีเมนต์สำหรับอุดหลุมเจาะที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์เป็นไปตามที่ต้องการ (ปรัชญา เทพณรงค์, 2555)

2.4 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 4

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อประเมินขีดความสามารถทางกลศาสตร์และชล-ศาสตร์ของวัสดุอุดที่ได้มาจากการบดอัดดินเบนโทไนต์ผสมกับเกล็ดเกลือเพื่อนำมาใช้ในการอุดอุโมงค์ใต้ดินเพื่อใช้กักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เกล็ดเกลือสามขนาดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ 0.4-1, 1-2 และ 2-4 มิลลิเมตร ด้วยการนำเกล็ดเกลือเหล่านี้ผสมกับดินเบนโทไนต์จากบริษัท American Colloid Company อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักของดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือคือ 30:70, 40:60 และ 50:50 ผลการทดสอบการบดอัดดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์ที่ผสมกับน้ำเกลือระบุว่า ปริมาณน้ำเกลือที่เหมาะสมคือร้อยละ 20 ซึ่งจะให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดประมาณ 15 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ผลของการทดสอบความเค้นเฉือนระบุว่าส่วนผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดใหญ่จะให้ค่ากำลังเฉือนสูงกว่าส่วนผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดเล็ก ส่วนผสมที่มีปริมาณเกล็ดเกลือสูงจะมีค่ากำลังเฉือนสูงกว่าส่วนผสมที่มีปริมาณเกล็ดเกลือน้อย ผลการทดสอบการบวมตัวของส่วนผสมในระยะเวลา 10 วัน โดยใช้น้ำเกลือเข้มข้นระบุว่า ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนและขนาดเกล็ดเกลือต่างกันจะมีการบวมตัวคล้ายคลึงกัน แต่มีค่าการบวมตัวน้อยกว่าการบวมตัวของดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 70 ผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านภายใต้ความดันน้ำเกลือคงที่ระบุว่า ดินเบน-โทไนต์บริสุทธิ์ที่ถูกบดอัดมีความซึมผ่านน้อยกว่า 10^{-18} m^2 ค่าความซึมผ่านของส่วนผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดใหญ่จะสูงกว่าส่วนผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดเล็ก ส่วนผสมทั้งหมดมีค่าความซึมผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-14} ถึง 10^{-12} m^2 ส่วนผสมที่มีดินเบนโทไนต์น้อยจะให้ค่าความซึมผ่านสูงกว่า

ส่วนผสมที่มีดินเบนโทไนต์มาก ผลจากงานวิจัยนี้แนะนำว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือควรจะเท่ากับ 30:70 โดยมีขนาดของเกล็ดเกลืออยู่ในช่วง 2-4 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุอุดในอุโมงค์ใต้ดินที่ใช้ทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากส่วนผสมนี้มีค่ากำลังเฉือนสูงสุด แต่ในขณะเดียวกันก็มีค่าความซึมผ่านและความสามารถในการบวมตัวใกล้เคียงกับส่วนผสมอื่นที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ (สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2555)

2.5 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 5

งานวิจัยนี้ได้เน้นการปรับปรุงสมบัติทางด้านเคมีของกระเบื้องเซรามิกโดยใช้วัสดุเคลือบที่มีส่วนผสมของ CaO, ZrO_2 และ SiO_2 หรือเรียกว่า "เคลือบ CZS" เนื่องจากมีความทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมี และมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ในการทดสอบจะใช้ส่วนผสมของสารเคลือบกระเบื้องที่ประกอบด้วย SiO_2 ปริมาณร้อยละ 53 โดยน้ำหนัก CaO ปริมาณร้อยละ 31-35 โดยน้ำหนัก และ ZrO_2 ปริมาณร้อยละ 12-16 โดยน้ำหนัก เป็นวัตถุดิบตั้งต้น แล้วทำการหลอมส่วนผสมทั้งหมดที่อุณหภูมิ 1500°C โดยใช้เบ้าหลอม Platinum Crucible จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการเทน้ำแก้วลงในน้ำ (Quenching) เพื่อให้ได้ฟริต (Frits) และบดให้ได้อนุภาคที่ละเอียดสำหรับนำไปเคลือบบนผิวของกระเบื้อง แล้วนำผงฟริตที่ได้ไปวิเคราะห์หาวัฏภาคด้วยเครื่อง XRD ตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่อง DTA และตรวจสอบโครงสร้างของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศอิเล็คตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเติม CaO ลงในเนื้อเคลือบที่มีองค์ประกอบของ SiO_2 เป็นหลักจะสามารถทนต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ แต่อย่างไรก็ตามหากมีการเติม ZrO_2 ในปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก จะสามารถทำให้ต้านทานการกัดกร่อนจากกรดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CaO, ZrO_2 และ SiO_2 จะทำให้เกิดสารประกอบใหม่ในการเคลือบ ได้แก่ Wollastonite ($CaSiO_3$) และ Calcium zirconium silicate (Ca_2ZrSi_{12}, $Ca_3ZrSi_2O_9$, $CaZrSi_2O_9$ และ $Ca_{1.2}Si_{4.3}Zr_{0.2}O_8$) ในระบบ $CaO-ZrO_2-SiO_2$ system แต่ถ้ามีปริมาณ CaO มากเกินไป จะทำให้การเคลือบเกิดการเดือดเป็นฟองได้ง่ายทำให้เกิดรูพรุน เมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรด พบว่าส่วนผสมของสารเคลือบที่มี ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 13 โดยน้ำหนักมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ดีที่สุด เนื่องจากมีปริมาณของเฟส Wollastonite เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และมีค่าน้ำหนักที่หายไปหลังทดสอบการทนกรดน้อยที่สุด คือมีค่าเพียงร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเหมาะสมสำหรับทำกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน (สุขเกษม กังวาน-ตระกูล, 2555)