รหัสโครงการ SUT7-719-55-12-07

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย
การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสีย
จากภาคอุตสาหกรรมในระยะยาว
(Long-Term Storage of Industrial Wastes in Rock Salt)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-719-55-12-07

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสีย จากภาคอุตสาหกรรมในระยะยาว

(Long-Term Storage of Industrial Wastes in Rock Salt)

โครงการวิจัยย่อย

1 **การศึกษาศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคามภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม**
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: รศ.ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

2 **การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบดในเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง**
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: อ.ดร.เดโช เผือกภูมิ

3 **การขึ้นรูปกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดเกลือสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง**
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: ผศ.ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

มีนาคม 2556

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของชุดโครงการวิจัยนี้คือเพื่อประเมินศักยภาพของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคามเพื่อใช้เป็นแหล่งกักเก็บกากนิวเคลียร์ การประเมินศักยภาพเพื่อทิ้งของเสียในชั้นเกลือหินนี้ได้ดำเนินการในหลายประเด็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบของอุณหภูมิ (สูงถึง 100°C) ที่สูงขึ้นต่อกำลังดึงของเกลือหิน ศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของวัสดุที่ใช้อุดช่องเหมือง และความทนทานของแผ่นกระเบื้องเซรามิกที่เคลือบด้วยสารปรุงพิเศษ CZS (Cao, ZrO_2 และ SiO_2) ภายใต้สภาวะความเป็นกรดเกลือและอุณหภูมิสูง ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังดึงสูงสุดของเกลือหินมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 10 จากอุณหภูมิ 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส และค่ากำลังดึงสูงสุดของเกลือหินมีค่าลดลงเมื่อมีอัตราการให้แรงกดลดลงคิดเป็นร้อยละ 12 จาก 0.3 ถึง 0.00003 MPa/s ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่ากำลังดึงสูงสุดที่ผันแปรอัตราการให้แรงภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันเป็นสมการยกกำลัง นอกจากนี้เกลือหินบดที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันและระยะเวลาในการกดอัดเท่ากัน ค่าความเครียดในแนวแกน ค่าความหนาแน่น และค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับขนาดความเค้นกดในแนวแกนที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพและอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรมีค่าแปรผกผันกับค่าความเค้นกดในแนวแกน และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้ตัวอย่างเกลือหินบดที่กำลังกดอัดพบว่า ความเครียดในแนวแกนและความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ผลการทดสอบทั้งเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีคุณสมบัติเหมาะสมในระดับหนึ่งสำหรับใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องว่างของเหมืองใต้ดินหลังจากที่กดอัดด้วยความเค้นกดในแนวแกน 10 MPa เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 15 วัน และค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคิดเป็น 1.2 เท่า จากอุณหภูมิ 30 ถึง 100 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดที่อุณหภูมิ 60 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าส่วนผสมของเคลือบที่มี ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก จะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ดีที่สุดในทุกอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ เนื่องจากมีปริมาณของเฟส Wollastonite เกิดขึ้นจำนวนมาก และมีค่าน้ำหนักที่หายไปหลังทดสอบการทนกรดที่อุณหภูมิต่างๆ น้อยที่สุด คิดเป็นร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่มีความร้อนสูงเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน

Abstract

The objective of this research program is to assess the performance of rock salt of the Maha Sarakham formation for use as host rock for nuclear waste disposal. The study is emphasized on determining the time–dependent tensile strength of the salt, the consolidation of crushed salt backfill, and the acid–resistant coating for ceramic plates (CZS – Cao, ZrO_2 and SiO_2) designed for the repository under elevated temperatures (up to 100 Celsius). The results indicate that the salt tensile strength decreases by 10% when the temperatures increase from 0 to 100 Celsius. The strength also decreases by about 12% when the loading rates decrease from 0.3 to 0.0003 MPa/s. The strength variations with temperature and loading rate can be best described by a power equation. The consolidation of the crushed salt backfill with the optimum brine content of 5% increase with the applied axial stresses and temperatures. This results in a higher density and lower permeability of the backfill. The consolidation test results suggest that under 10 MPa stress for the duration of 15 days the crushed salt strengths increase by about 1.2 times when the temperatures increase from 30 to 100 Celsius. Test results from the ceramic coating under a variety of compositions suggest that the coating material with 14% of ZrO2 can resist the acid under elevated temperatures better than other compositions. This is contributed by the production of the Wollastonite. The weight loss is also less than other compositions, which is about 0.20% by weight. As a result this composition is recommended for use with the ceramic to protect important engineering structures designed under the repository environment.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญรูปภาพ ..... ฉ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์หลักของแผนงานวิจัย 3

1.3 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 4

1.5 แผนการบริหารแผนงานวิจัยและแผนการดำเนินงาน พร้อมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน ตลอดแผนงานวิจัย 4

1.6 แผนการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่จากการทำการวิจัยตามแผนงานวิจัย 5

บทที่ 2 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย 7

2.1 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 1 7

2.2 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 2 8

2.3 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 3 9

บทที่ 3 การประมวลและวิเคราะห์ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ 11

3.1 การประเมินเสถียรภาพ 11

3.2 การป้องกันการรั่วซึมภายใต้อุณหภูมิสูง 12

3.3 การพัฒนาวัสดุทนกรดภายใต้อุณหภูมิสูง 12

บทที่ 4 สรุปรวมผลงานวิจัย 15

4.1 สรุปรวมผลงานวิจัย 15

4.2 การศึกษาวิจัยเพิ่มเติม 16

สารบัญ (ต่อ)

บรรณานุกรม 17

ประวัตินักวิจัย 19

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ **หน้า**

1 ลักษณะการอุดหลุมเจาะและการถมกลับหรืออุดช่องในเหมืองเกลือใต้ดินสำหรับเทคโนโลยีการทิ้งของเสียอันตราย 2
2 โครงสร้างคณะผู้บริหารแผนงานวิจัยหรือชุดโครงการวิจัย 6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

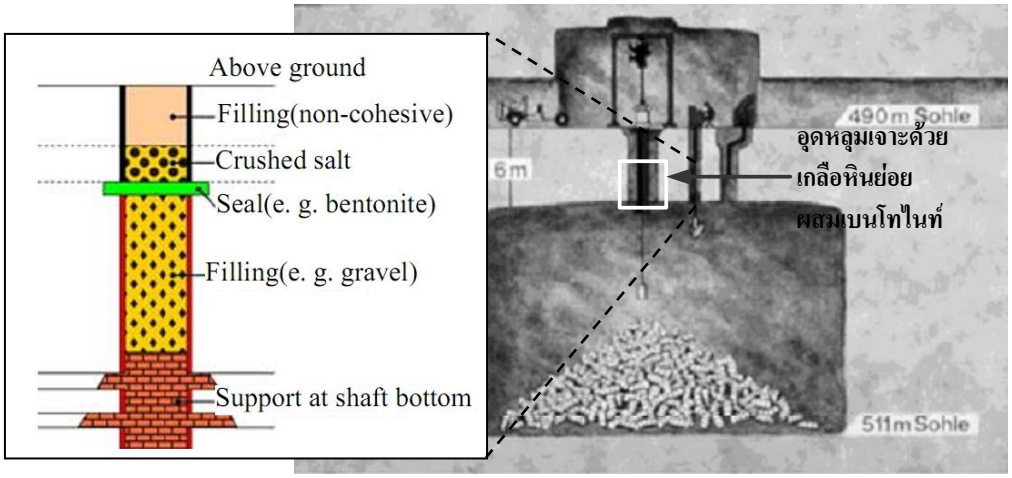
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

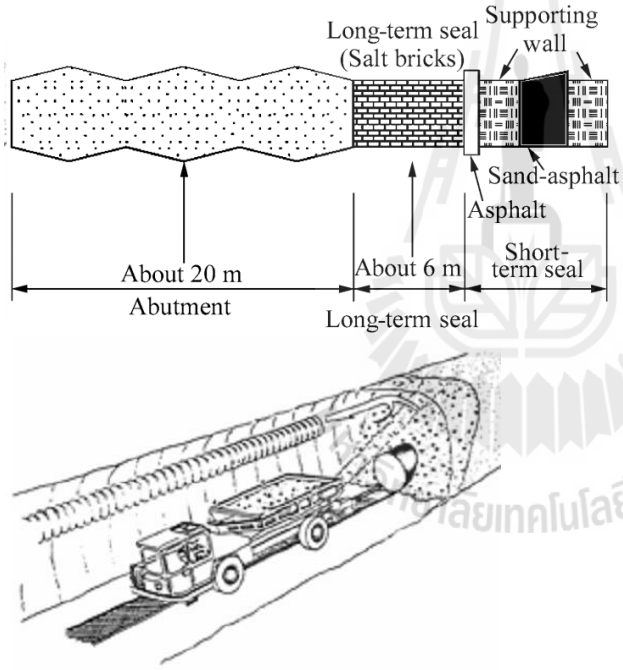
เทคโนโลยีการกักเก็บหรือการทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมไว้ในเหมืองเกลือใต้ดินนับว่ามีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับประเทศไทย กุญแจสำคัญที่จะทำให้การดำเนินการประสบความสำเร็จได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหิน การออกแบบลักษณะการวางตัวและขนาดช่องเปิดของเหมืองที่มีเสถียรภาพ และเทคนิคการอุดช่องเหมืองและรอยแตกในชั้นเกลือหินที่อาจจะเกิดจากการขุดเจาะ นอกจากนี้ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญอาทิ คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินและวัสดุที่ใช้ถมกลับเข้าไปยังช่องว่างในเหมืองใต้ดินภายหลังจากที่มีการนำเอากากของเสียอันตรายไปทิ้ง การลดค่าความซึมผ่านของรอยแตกในชั้นเกลือหินโดยใช้ดินเบนทอไนต์ผสมกับปูนซีเมนต์ ประสิทธิภาพในการอุดหลุมเจาะของปูนซีเมนต์หรือแม้กระทั่งผลกระทบจากกรดเกลือที่มีผลกับโครงสร้างทางวิศวกรรมในระยะยาว

เทคโนโลยีการกักเก็บนี้ได้ใช้อย่างเป็นรูปธรรมในต่างประเทศกว่า 20 ปี โครงการที่เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง คือ “Waste Isolate Pilot Plant (WIPP)” วัสดุถมกลับหรือวัสดุอุดช่องเหมืองที่นิยมใช้ คือ ซีเมนต์ เบนทอไนต์ และเกลือหินบดบริสุทธิ์หรือเกลือหินบดผสมกับเบนทอไนต์ (ในอัตราส่วนที่เหมาะสม) แล้วทำกันบดอัด (Compaction) หรือกดอัด (Compression) ให้เป็นแท่งเกลือก้อนสี่เหลี่ยม (รูปที่ 1) อนึ่งการใช้เกลือหินบดนับว่ามีความเหมาะสมมากเพราะมีความเข้ากันได้ในเชิงเคมีและกายภาพกับเกลือหินเดิม ในขบวนการขุดเจาะช่องเหมืองจะได้เกลือหินซึ่งสามารถนำไปใช้ได้เลย จึงทำให้ประหยัดเวลาในการจัดหาวัสดุทดแทนอย่างอื่น

เทคโนโลยีนี้ยังเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับประเทศไทย ดังนั้นหากจะพิจารณาสร้างเหมืองเกลือใต้ดินเพื่อการทิ้งของเสียจะต้องมีการออกแบบและทดสอบคุณสมบัติของเกลือหินและวัสดุถมกลับให้ละเอียดเพื่อให้เข้าใจกลไกการอัดตัว พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของเกลือหินจากแอ่งเกลือหินในประเทศไทย ซึ่งจะเป็นประเด็นสำคัญที่จะประเมินความเป็นไปได้ของการนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้อย่างเป็นรูปธรรมเพื่อลดและป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อมจากของเสียอันตรายในประเทศไทย



(ก) การอุดหลุมเจาะในแนวดิ่ง



(ข) การอุดหลุมช่องเหมืองในแนวระดับ

รูปที่ 1 ลักษณะการอุดหลุมเจาะ (ก) และการถมกลับหรืออุดช่องในเหมืองเกลือใต้ดิน (ข) สำหรับเทคโนโลยีการทิ้งของเสียอันตราย (Brewitz and Rothfuchs, 2007; Zhang et al., 2006)

1.2 วัตถุประสงค์หลักของแผนงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาศักยภาพของแหล่งเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยสำหรับใช้เป็นที่กักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในระยะยาว
2) เพื่อศึกษาแนวทางที่เป็นไปได้ในการทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในชั้นเกลือหินอย่างเป็นรูปธรรมภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง
3) เพื่อออกแบบลักษณะของโพรงกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรมเบื้องต้นและการใช้วัสดุทางวิศวกรรมเพื่ออุดในช่องเหมืองและรอยแตกในชั้นเกลือหินที่อยู่ในบริเวณแหล่งกักเก็บซึ่งอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง
4) ทดลองและวิจัยวัสดุที่ทนทานต่อการกัดของกรดเกลือสำหรับใช้เคลือบผิวโครงสร้างทางวิศวกรรมที่อยู่ในสภาวะกักเก็บในชั้นเกลือหินภายใต้อุณหภูมิสูง

1.3 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัย

ในการออกแบบและก่อสร้างโพรงในชั้นเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม สิ่งสำคัญที่สุด 2 ประการที่ควรพิจารณา คือ 1) คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินและวัสดุถมกลับ และ 2) คุณสมบัติเชิงชลศาสตร์ของเกลือหินและวัสดุถมกลับ ดังนั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวผู้วิจัยจึงจำเป็นจะต้องทดสอบด้วยแบบจำลองเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการยกตัวอย่างเช่น การทดสอบการอุดของปูนซีเมนต์จะจำลองขึ้นโดยใช้แท่งตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว เจาะรูทะลุตัวอย่างตามแนวหน้าตัดเพื่อเป็นตัวแทนของหลุมเจาะที่ถูกอุดด้วยปูนซีเมนต์ หรือทดสอบเกล็ดเกลือที่จะใช้ทำเป็นวัสดุถมกลับด้วยการบดอัดเป็นแท่งให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถนำไปทดสอบหาค่าความเค้นกดในแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM เป็นต้น การทดสอบดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยได้ดำเนินงานมาแล้วแต่ยังมีคุณสมบัติบางประการที่ยังไม่ได้นำมาพิจารณาดังนั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินที่ครบถ้วนจึงจำเป็นต้องทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดและกำลังรับแรงดึงเชิงเวลาที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงของหลังคาอุโมงค์หรือหลังคาโพรง ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับความเค้นดึงและมีความเสี่ยงที่จะเกิดการพังทลาย นอกจากนี้ยังทำการทดสอบเกล็ดเกลือที่ใช้เป็นวัสดุถมกลับภายใต้อุณหภูมิสูงรวมไปถึงการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิสูงด้วย

การทดสอบต่างๆ จะดำเนินการในห้องปฏิบัติการทั้งสิ้นเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน วัสดุอุด และวัสดุถมกลับภายใต้สภาวะจริงที่เกิดขึ้นในภาคสนาม เมื่อผลการทดสอบสามารถพิสูจน์ได้ว่าชั้นเกลือหินที่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีศักยภาพทั้งทางด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์ที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นแหล่งทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรมจึงจะสามารถสรุปได้ว่าแหล่งเกลือหินในประเทศไทยสามารถสร้างเป็นโพรงกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรมได้อย่างเป็นรูปธรรม

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

งานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมเหมืองแร่ที่เกี่ยวข้องกับการปิดและฟื้นฟูเหมืองหลังจากเสร็จสิ้นกิจกรรมการทำเหมือง การป้องกันการทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองใต้ดิน และงานด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บของเสียอันตรายที่ไม่สามารถบำบัดได้ ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติไม่น้อยกว่า 3 บทความ และนำเสนอในรายงานวิจัยและการประชุมระดับชาติ
2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน
3) สร้างนักวิจัยระดับ Postgraduate อย่างน้อย 2 คน

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบเหมืองใต้ดินเพื่อเทคโนโลยีการทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
2) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
3) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่และวิศวกรรมธรณี
4) โรงพยาบาลทั้งภาครัฐและเอกชน
5) บริษัทเอกชนและโรงงานอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดสารพิษอันตราย

1.5 แผนการบริหารแผนงานวิจัยและแผนการดำเนินงาน พร้อมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน ตลอดแผนงานวิจัย

แผนการบริหารงานวิจัยประกอบด้วยคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิรวมทั้งสิ้น 3 ท่าน แต่ละท่านจะรับผิดชอบในแต่ละโครงการวิจัยย่อย โดยจะมีผู้ประสานงาน ผู้วางแผนงาน และเลขานุการเป็นนักวิจัยระดับ Postgraduate นอกจากนี้ยังมีผู้เชี่ยวชาญทางด้านเกลือหินจากต่างประเทศเป็นที่ปรึกษา คือ Prof. Dr. Jaak Daemenจาก University of Nevada, USA โดยแผนงานได้แสดงในรูปของแผนภูมิ (รูปที่ 2) ในส่วนของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของแต่ละโครงการได้รวบรวมไว้ในที่นี้ด้วย

1.6 แผนการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่จากการทำการวิจัยตามแผนงานวิจัย

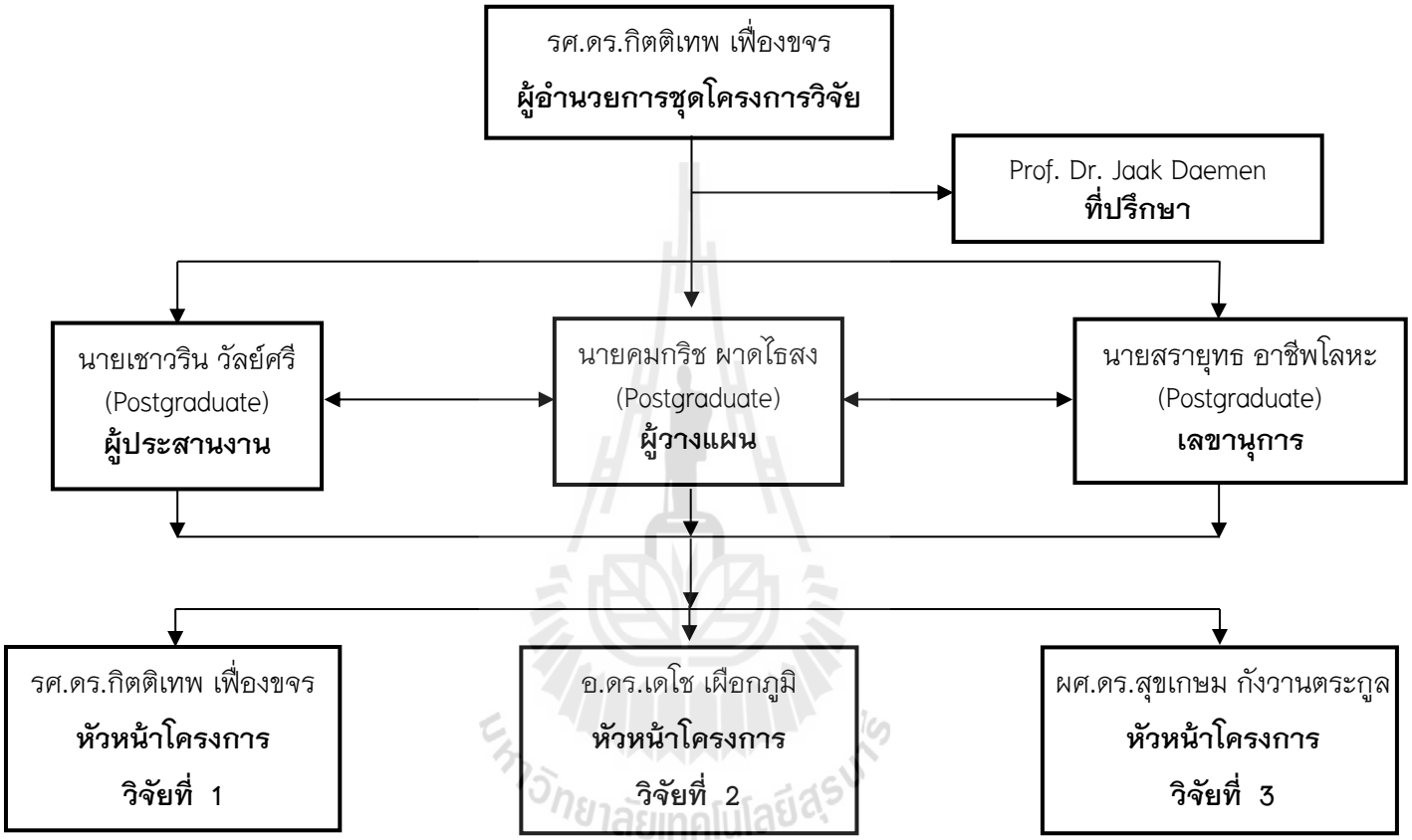
แผนงานการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่มีเป้าหมายเพื่อส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพของนักวิจัยในการสร้างสรรค์งานวิจัยและองค์ความรู้ใหม่ สามารถเป็นที่พึ่งพาให้กับนักวิจัยรุ่นหลังได้ รวมไปถึงผลักดันให้มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีก้าวไปสู่ความเป็นผู้นำด้านงานวิจัย เพื่อให้เป็นที่ประจักษ์ในวงวิชาการทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ ซึ่งแผนการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่สามารถแบ่งได้ดังนี้

พัฒนานักวิจัยในระดับ Postgraduate จำนวน 2 คน ได้แก่

1) นายคมกริช ผาดไธสง
2) นางสาวมัทรี กลีบเมฆ

พัฒนานักวิจัยในระดับบัณฑิตศึกษา จำนวน 19 คน ได้แก่

1) นายโสภณ วิเศษแสน
2) นายเกียรติศักดิ์ อาจคงหาญ
3) นายธนากร กมลเพชร
4) นายนริศ มณีวรรณ
5) นายเผด็จ ดีทั่ว
6) นายชโนดม เลิศสุริยะกุล
7) นางสาวภาวิณี มาสิงบุญ
8) นางสาวธิดารัตน์ ข่าทิพย์พาที
9) นางสาวบุญสุภา โชยชัย
10) นางสาวธนิษฐา ทองประภา
11) นางสาวปิยวรรณ สนสกุล
12) นายรณชัย ดาศรี
13) นายฮาซัน คอแด๊ะ
14) นายสมพงค์ โสมทอง
15) นายพัฒนไชย หนูค้อง
16) นายปิยะณัติ คำแพง
17) นางสาวสุภัทรา คำราช
18) นางสาวสายสุรีย์ ทวีบุญ
19) นางสาวสุรัติวดี ศาสตร์แก้ว



รูปที่ 2 โครงสร้างคณะผู้บริหารแผนงานวิจัยหรือชุดโครงการวิจัย

บทที่ 2
สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ผลงานการวิจัยทั้งหมดในชุดโครงการนี้ได้นำมาสรุปไว้โดยสังเขปในบทนี้ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ได้รวบรวมและเขียนไว้ในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ของแต่ละชุดโครงการ ผลการดำเนินงานและข้อสรุปโดยสังเขปของแต่ละโครงการมีดังต่อไปนี้

2.1 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 1

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการคาดคะเนการเปลี่ยนรูปร่างและการแตกภายใต้แรงดึงที่ขึ้นกับเวลาของเกลือหินชุดมหาสารคามภายใต้อุณหภูมิคงที่ต่างๆ ด้วยการให้แรงตามแนวของเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่างรูปวงแหวน และผันแปรอัตราการให้แรงกดซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับแรงดึงที่จุดแตกเริ่มต้นจาก 0.00003, 0.0003, 0.003, 0.03 ถึง 0.3MPa/s รอยแตกที่เกิดขึ้นจากแรงดึงส่วนใหญ่เกิดจากการหลุดแยกของรอยต่อระหว่างผลึกของแร่มากกว่าการเลื่อนภายในผลึกของแร่ จากผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังดึงสูงสุดของเกลือหินมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินสูงขึ้น และค่ากำลังดึงสูงสุดของเกลือหินมีค่าลดลงเมื่อมีอัตราการให้แรงกดลดลง ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่ากำลังดึงสูงสุดที่ผันแปรอัตราการให้แรงภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันเป็นสมการยกกำลัง ค่ากำลังดึงของเกลือหินมีค่าลดลงตามอัตราการให้แรงกดจาก 0.03 ถึง 0.00003 MPa/s เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0, 29, 75 ถึง100°C และความเครียดที่จุดแตกจะสูงขึ้นตามอัตราการให้แรงกดจาก 0.03 ถึง 0.00003 MPa/sและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0, 29, 75 ถึง 100°C ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับค่ากำลังดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณจุดแตกระบุว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการแรงดึงแบบวงแหวนและค่ากำลังดึงสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน

การทดสอบแรงดึงแบบวงแหวนของเกลือหินมีลักษณะคล้ายกับแรงดึงที่เกิดขึ้นบริเวณหลังคาอุโมงค์หรือโพรงในมวลเกลือหิน ซึ่งแรงที่กดจากด้านบนเมื่อมากระทำที่บริเวณหลังคาจะมีลักษณะเป็นแรงดึง ดังนั้นการทดสอบแบบวงแหวนแรงดึงจึงมีความเหมาะสมและถูกต้องมากกว่าการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล ข้อจำกัดสำหรับการประยุกต์ใช้สมการที่พัฒนาได้ คือ การศึกษาผลกระทบของการกักเก็บในระยะยาว เพราะการศึกษาการเปลี่ยนรูปร่างและค่ากำลังดึงของเกลือหินได้ทำการศึกษาอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงเชิงความเครียดของเส้นตรงและช่วงอัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเวลาเท่านั้น (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2556)

2.2 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 2

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของเกลือหินบดที่ขึ้นกับเวลา โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดตามแนวแกน ค่าความหนาแน่น ค่าอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตร และค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพของตัวอย่างเกลือหินบดที่ขึ้นกับเวลาในการกดอัด รวมทั้งพิจารณาค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดภายใต้สภาวะความเค้นกดและอุณหภูมิต่างๆ

การทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการใช้เกลือหินบดเป็นวัสดุถมกลับในช่องว่างหรือช่องทางเดินภายในเหมืองใต้ดินหลังจากที่มีการนำของเสียในภาคอุตสาหกรรมไปทิ้งไว้ โดยการกดอัดตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่บรรจุอยู่ในกระบอกทดสอบด้วยความเค้นต่างกัน 4 ระดับ คือ 2.5, 5, 7.5, และ 10 MPa เป็นระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 15 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 30, 65, และ 100 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบระบุว่าที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันและระยะเวลาในการกดอัดเท่ากัน ค่าความเครียดตามแนวแกน ค่าความหนาแน่น และค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแปรผันตรงกับขนาดความเค้นกดในแนวแกนที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพและอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรมีค่าแปรผกผันกับค่าความเค้นกดในแนวแกน และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้ตัวอย่างเกลือหินบดที่กำลังกดอัดพบว่า ความเครียดในแนวแกน ความหนาแน่น และกำลังกดสูงสุดในแกนเดียวมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยที่ค่าความเครียดในแนวแกน ค่าความหนาแน่น และค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ให้ค่าดังกล่าวข้างต้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่กดอัดที่อุณหภูมิ 65 และ 30 องศาตามลำดับ ในขณะที่ค่าความซึมผ่านเชิงกายภาพและค่าอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรแปรผกผันกับอุณหภูมิ ส่วนตัวอย่างเกลือหินบดที่มีการทดสอบด้วยการกดอัดภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ 2 อุณหภูมิ คือ 30 และ 100 องศาเซลเซียส โดยมีการผันแปรความเค้นกดในแนวแกนเพิ่มขึ้นจากความเค้นกดเริ่มต้นที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 MPa ทุกๆ 5 วัน พบว่าพฤติกรรมการยุบตัวของตัวอย่างเกลือหินบดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยค่าการยุบตัวหลังจากที่มีการผันแปรความเค้นในแต่ละระดับมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็นผลให้ค่าความเครียด ค่าความหนาแน่น ค่าความซึมผ่าน และอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรของตัวอย่างเกลือหินบดหลังจากมีการผันแปรความเค้นกดในหนึ่งแกนมีแนวโน้มเป็นไปตามพฤติกรรมของตัวอย่างเกลือหินบดที่กดอัดด้วยความเค้นกดคงที่ ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความเค้นกดเริ่มต้นที่ใช้กดอัดตัวอย่างเกลือหินบดมีผลต่อพฤติกรรมของเกลือหินบดมากกว่าความเค้นกดที่กระทำภายหลังทั้งในสภาวะที่อุณหภูมิ 30 และ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส การยุบตัวของตัวอย่างเกลือหินบดมีค่าการยุบตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการยุบตัวที่

อุณหภูมิห้อง เนื่องจากที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความร้อนทำให้น้ำระเหยออกจากตัวอย่างเกลือหินบดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ตัวอย่างเกลือหินบดมีอัตราการยุบตัวอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการกดอัดจากนั้นจึงมีค่าคงที่ ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากความชื้นในตัวอย่างเกลือหินบดที่ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากอุณหภูมิสูงส่งผลให้อัตราการยุบตัวของตัวอย่างเกลือหินบดหลังจากที่ความชื้นลดลงมีค่าต่ำกว่าอัตราการยุบตัวช่วงเริ่มต้นของการกดอัด

ค่ากำลังกดสูงสุดในแกนเดียวและการลดลงของอัตราส่วนช่องว่างต่อปริมาตรสามารถคาดคะเนได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการสอบเทียบผลการทดสอบ ซึ่งทำให้คาดคะเนคุณสมบัติและพฤติกรรมของเกลือหินบดที่ขึ้นกับความเค้นกดในแนวแกนและอุณหภูมิเชิงเวลาในระยะยาวได้ จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ เชิงชลศาสตร์ และสมการที่ได้จากการสอบเทียบผลการทดสอบในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและเลือกใช้เกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นเป็นวัสดุถมกลับในช่องว่างหรือทางเดินในเหมืองใต้ดินหลังจากที่มีการนำของเสียจากภาคอุตสาหกรรมไปทิ้งได้ โดยผลการทดสอบทั้งเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของตัวอย่างเกลือหินบดผสมน้ำเกลือข้มข้นอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักหลังจากที่กดอัดด้วยความเค้นกดในแนวแกน 10 MPa เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 15 วัน ระบุว่าเกลือหินบดผสมน้ำเกลือเข้มข้นดังกล่าวมีคุณสมบัติเหมาะสมในระดับหนึ่งสำหรับใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องว่างของเหมืองใต้ดิน (เดโช เผือกภูมิ, 2556)

2.3 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 3

งานวิจัยนี้ได้เน้นการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านเคมีของกระเบื้องเซรามิกสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยใช้วัสดุเคลือบที่มีส่วนผสมของ CaO, ZrO_2 และ SiO_2 หรือเรียกว่าเคลือบ CZS เป็นวัสดุในการก่อสร้างผนังของโพรงเกลือเพื่อเป็นตัวสัมผัสกับสภาพความเป็นกรดของชั้นเกลือหิน เนื่องจากเคลือบชนิดนี้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมีสูง มีความแข็งแรงเชิงกลสูง และมีคุณสมบัติทนต่อความร้อนได้ดี ซึ่งจะแตกต่างจากกระเบื้องเซรามิกเคลือบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันในรูปแบบของกระเบื้องปูพื้น–ปูผนัง สำหรับบ้านหรืออาคารต่างๆ ในการทดลองจะใช้ส่วนผสมของสารเคลือบกระเบื้องที่ประกอบด้วย SiO_2 ปริมาณร้อยละ 53 โดยน้ำหนัก CaO ปริมาณร้อยละ 31–35 โดยน้ำหนักและ ZrO_2 ปริมาณร้อยละ 12–16 โดยน้ำหนัก เป็นวัตถุดิบตั้งต้น แล้วทำการหลอมส่วนผสมทั้งหมดที่อุณหภูมิ 1500°C โดยใช้เบ้าหลอม Platinum Crucible จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการเทน้ำแก้วลงในน้ำ (Quenching) เพื่อให้ได้ฟริต (Frits) และบดให้ได้อนุภาคที่ละเอียดสำหรับนำไปเคลือบบนผิวของกระเบื้อง แล้วนำผงฟริตที่ได้ไปวิเคราะห์หาวัฏภาคด้วยเครื่อง XRD เพื่อตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่อง DTA จากนั้นนำชิ้นงานกระเบื้องที่ผ่านการเผาเคลือบมาทดสอบความทนทาน

ต่อการกัดกร่อนของกรดเกลือภายใต้อุณหภูมิสูง ด้วยการแช่ชิ้นงานลงในสารละลายที่มีส่วนผสมของโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (เกลือ 5 ส่วน และน้ำกลั่น 95 ส่วน) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 และ 120 องศาเซลเซียส โดยทำการควบคุมค่าความเป็นกรด (pH) ของสารละลายน้ำเกลือให้อยู่ระหว่าง 6.5–7.5 หลังจากครบเวลา 6 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนักก่อน–หลังการทดสอบเพื่อหาน้ำหนักที่หายไป แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบด้วยกล้อง SEM ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนภายใต้อุณหภูมิสูงเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเติม CaO ลงในเนื้อเคลือบที่มีองค์ประกอบของ SiO_2 เป็นหลักจะสามารถทนต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ แต่อย่างไรก็ตามหากมีการเติม ZrO_2 ในปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก จะสามารถทำให้ต้านทานการกร่อนจากกรดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CaO, ZrO_2 และ SiO_2 จะทำให้เกิดสารประกอบใหม่ในเคลือบ ได้แก่ Wollastonite ($CaSiO_3$) และCalcium 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 จะทำให้เคลือบเดือดเป็นฟองได้ง่ายและทำให้เกิดรูพรุน เมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดที่อุณหภูมิ 60 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าส่วนผสมของเคลือบที่มี ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก จะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ดีที่สุดในทุกอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ เนื่องจากปริมาณของเฟส Wollastonite เกิดขึ้นจำนวนมาก และมีค่าน้ำหนักที่หายไปหลังทดสอบการทนกรดที่อุณหภูมิต่างๆ น้อยที่สุด คือมีค่าเพียงร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเหมาะสมสำหรับทำกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดภายใต้การใช้งานที่มีความร้อนเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน (สุขเกษม กังวานตระกูล, 2556)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
การประมวลและวิเคราะห์ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การวิจัยของแต่ละโครงการมีความเกี่ยวโยงกันโดยมุ่งเน้นไปที่การประเมินเสถียรภาพของเกลือหิน โดยเฉพาะค่ากำลังรับแรงดึงภายใต้อุณหภูมิ (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2556) และการออกแบบโพรงเกลือหรือช่องเหมืองเพื่อใช้กักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม โดยผลที่ได้ของแต่ละโครงการได้นำมาสังเคราะห์เพื่อประเมินศักยภาพของแหล่งเกลือหินในประเทศไทยว่ามีความเหมาะสมสำหรับทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมหรือไม่ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงวิธีการที่ใช้สำหรับป้องกันการรั่วซึมและความเป็นกรดของสารพิษที่อาจก่อให้เกิดอันตราย (เดโช เผือกภูมิ, 2556; สุขเกษม กังวานตระกูล, 2556)

3.1 การประเมินเสถียรภาพ

โครงการวิจัยที่ 1 ได้ศึกษาและพัฒนาเกณฑ์การแตกในแรงดึงของเกลือหินภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและอัตราการให้แรงกดเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเกลือหินที่ได้รับความเค้นดึงเชิงเวลา ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังดึงสูงสุดของเกลือหินจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างเกลือหินสูงขึ้น และค่ากำลังดึงสูงสุดของเกลือหินจะมีค่าลดลงเมื่อมีอัตราการให้แรงกดลดลง ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่ากำลังดึงสูงสุดที่ผันแปรอัตราการให้แรงกดภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี รูปแบบของสมการยกกำลังและเกณฑ์การแตกที่นำเสนอยังเป็นประโยชน์ในการหาเสถียรภาพเชิงอนุรักษ์ของโพรงเกลือที่ใช้กักเก็บอากาศอัดและก๊าซธรรมชาติที่ซึ่งชั้นเกลือหินที่อยู่ล้อมรอบจะมีการผันแปรอุณหภูมิอย่างมากในระหว่างการอัดและการปล่อยอากาศหรือก๊าซธรรมชาติออกจากโพรง นอกจากนี้การปล่อยหรืออัดก๊าซธรรมชาติในโพรงกักเก็บที่สภาวะจริงในภาคสนามยังเป็นการลดหรือเพิ่มความเค้นให้กับเกลือหินล้อมรอบที่อัตราต่างๆ ซึ่งการทดสอบการผันแปรอัตราการให้แรงในห้องปฏิบัติการมีความสอดคล้องและครอบคลุมอัตราการให้แรงที่สภาวะจริงในภาคสนามเป็นอย่างดี

ในการนำเกณฑ์การแตกที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโพรงกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมต้องคำนึงถึงวัสดุที่นำไปทิ้งและระยะเวลาในการกักเก็บ นอกจากนี้อุณหภูมิยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ผู้วิจัยได้ตระหนักถึง จากการศึกษาที่ผ่านมา (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2555) ได้พัฒนาเกณฑ์การแตกในหลายแกนของเกลือหินภายใต้การผันแปรความดันล้อมรอบและอุณหภูมิ โดยพิจารณาผลกระทบของพลังงานความร้อน ในขณะที่เกณฑ์การแตกในความเค้นดึงได้ถูกพัฒนาขึ้นในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงแบบวงแหวน อุณหภูมิ และ

อัตราการให้แรงกด ซึ่งสมการดังกล่าวมีข้อจำกัดบางประการ คือไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับการกักเก็บในระยะยาว เนื่องจากในการศึกษานี้ได้พิจารณาการเปลี่ยนรูปร่างและค่ากำลังดึงของเกลือหินอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงความเครียดเชิงเส้นตรงและช่วงอัตราความเครียดเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเวลาเท่านั้น

3.2 การป้องกันการรั่วซึมภายใต้อุณหภูมิสูง

ในโครงการวิจัยที่ 2 ได้ศึกษาวัสดุอุดที่ช่วยลดค่าความซึมผ่านในเกลือหินที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง (ที่สภาวะการทิ้งกากนิวเคลียร์) ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของตัวอย่างเกลือหินบดระบุว่า ที่ความเค้นกดในแนวแกนมีค่าสูงจะให้ค่าความซึมผ่านต่ำกว่าตัวอย่างที่มีความเค้นกดในแนวแกนต่ำ นอกจากนี้อัตราส่วนช่องว่างยังมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเค้นกด และเมื่อนำตัวอย่างออกมาจากเบ้าเพื่อทดสอบกำลังรับแรงกดของตัวอย่างพบว่า เมื่อเกลือหินบดได้รับความเค้นกดในแนวแกนสูงจะส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ผลจากการทดสอบการอัดตัวของเกลือหินบดภายใต้อุณหภูมิสูงระบุว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราส่วนช่องว่างนั้นจะมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลกับค่าความซึมผ่านที่ลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการนำเกลือหินบดไปถมกลับภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงเช่นในอุโมงค์ใต้ดินที่ใช้ทิ้งกากนิวเคลียร์จึงมีความเหมาะสม เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความซึมผ่านลดลงซึ่งสามารถป้องกันการรั่วไหลของกัมมันตภาพรังสีจากกากนิวเคลียร์ได้เป็นอย่างดี

3.3 การพัฒนาวัสดุทนกรดภายใต้อุณหภูมิสูง

กากของเสียหรือสารพิษที่นำไปทิ้งในโพรงกักเก็บอาจมีความเป็นกรดสูง ดังนั้นโครงการวิจัยที่ 3 จึงได้คิดค้นวัสดุทนกรดและทนความร้อนขึ้นเพื่อป้องกันการกัดกร่อนต่ออุปกรณ์ที่เก็บกากของเสียโดยใช้วัสดุเคลือบที่มีส่วนผสมของ CaO, ZrO_2 และ SiO_2 หรือเรียกว่าเคลือบ CZS เนื่องจากมีความทนต่อการกัดกร่อนทางเคมีสูงและมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ผลการทดลองพบว่าเมื่อเติม CaO ลงในเนื้อเคลือบที่มีองค์ประกอบของ SiO_2 เป็นหลักจะสามารถทนต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ แต่อย่างไรก็ตามหากมีการเติม ZrO_2 ในปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก จะสามารถทำให้ต้านทานการกัดกร่อนจากกรดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CaO,ZrO_2 และ SiO_2 จะทำให้เกิดสารประกอบใหม่ในเคลือบ ได้แก่ Wollastonite ($CaSiO_3$) และCalcium 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 มากเกินไปจะทำให้เคลือบเดือดเป็นฟองได้ง่ายทำให้เกิดรูพรุน เมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดที่อุณหภูมิ 60 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าส่วนผสมของเคลือบที่มี ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก จะมีความ

ต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ดีที่สุดในทุกอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ เนื่องจากมีปริมาณของเฟส Wollastonite เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และมีค่าน้ำหนักที่หายไปหลังทดสอบการทนกรดที่อุณหภูมิต่างๆน้อยที่สุด คือมีค่าเพียงร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเหมาะสมสำหรับทำกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดภายใต้การใช้งานที่มีความร้อนสูง เพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน (สุขเกษม กังวานตระกูล, 2556)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่4
สรุปรวมผลงานวิจัย

4.1 สรุปรวมผลงานวิจัย

ผลสรุปของชุดโครงการวิจัยการพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรมนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบโพรงหรือช่องเหมืองสำหรับกักเก็บกากของเสียได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่หลังคาโพรงซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะความเค้นดึง โดยเกณฑ์การแตกที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโพรงกักเก็บกากนิวเคลียร์ซึ่งอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงตลอดเวลาซึ่งในการนำเกณฑ์การแตกที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโพรงกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมต้องคำนึงถึงวัสดุที่นำไปทิ้งและระยะเวลาในการกักเก็บ นอกจากนี้อุณหภูมิยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ผู้วิจัยตระหนักถึง จากการศึกษาที่ผ่านมา (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2555) ได้พัฒนาเกณฑ์การแตกในหลายแกนของเกลือหินภายใต้การผันแปรความดันล้อมรอบและอุณหภูมิ โดยพิจารณาผลกระทบของพลังงานความร้อน ในขณะที่เกณฑ์การแตกในงานวิจัยนี้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงของตัวอย่างหิน อัตราการให้แรง และอุณหภูมิในเชิงตัวเลข เกณฑ์การแตกดังกล่าวเมื่อนำค่าการตรวจวัดในภาคสนาม เช่น อุณหภูมิ อัตราการปลดปล่อยและอัตราการอัดแรงดันที่อยู่ในโพรงกักเก็บมาแทนลงในสมการจะสามารถคาดคะเนกำลังรับแรงดึงสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นบนหลังคาโพรงได้ (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2556)

วัสดุอุดมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการป้องกันการรั่วซึมของสารพิษที่เป็นอันตรายและกากนิวเคลียร์ โดยวัสดุที่ใช้อุดต้องไม่ส่งผลกระทบต่อเกลือหิน หน้าที่หลักของวัสดุอุดคือป้องกันการรั่วซึมของสารเคมี ซึ่งผลจากงานวิจัยในการทดสอบประสิทธิภาพของเกลือหินบดเชิงกลศาสตร์และเชิงชลศาสตร์นี้สามารถนำมากำหนดอัตราส่วนที่เหมาะสมของเกลือหินบดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมือง หรือนำไปใช้เป็นกำแพงปิดกั้นช่องทางระหว่างพื้นที่กักเก็บกากของเสียอันตราย ซึ่งผลการทดสอบระบุว่าเกลือหินบดที่มีความเหมาะสม (มีความซึมผ่านต่ำและมีความแข็งแรงสูง) จะต้องมีขนาดเล็กและถูกบดอัดเป็นระยะเวลา 300 ชั่วโมง เพื่อให้มีค่าความซึมผ่านต่ำสุดและมีความแข็งสูงสุด (บัณฑิตา ธีระกุลสถิตย์, 2555) นอกจากนี้ยังได้ศึกษาวัสดุอุดที่ช่วยลดค่าความซึมผ่านในเกลือหินที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง (ที่สภาวะการทิ้งกากนิวเคลียร์) ผลการทดสอบค่าความซึมผ่านของตัวอย่างเกลือหินบดระบุว่า ที่ความเค้นกดในแนวแกนมีค่าสูงจะให้ค่าความซึมผ่านต่ำกว่าตัวอย่างที่มีความเค้นกดในแนวแกนต่ำ นอกจากนี้อัตราส่วนช่องว่างยังมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเค้นกด และเมื่อนำตัวอย่างออกมาจากเบ้าเพื่อทดสอบกำลังรับแรงกดของตัวอย่างพบว่า เมื่อเกลือหินบดได้รับความเค้นกดในแนวแกนสูงจะส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ผลจากการทดสอบการอัด

ตัวของเกลือหินบดภายใต้อุณหภูมิสูงระบุว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนช่องว่างมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลกับค่าความซึมผ่านที่ลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการนำเกลือหินบดไปถมกลับภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูงเช่นในอุโมงค์ใต้ดินที่ใช้ทิ้งกากนิวเคลียร์จึงมีความเหมาะสม เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความซึมผ่านลดลง ซึ่งสามารถป้องกันการรั่วไหลของกัมมันตภาพรังสีจากกากนิวเคลียร์ได้เป็นอย่างดี (เดโช เผือกภูมิ, 2556)

การศึกษาเสถียรภาพของเกลือหินรวมไปถึงวัสดุอุดยังไม่เพียงพอต่อการประเมินความปลอดภัยและประสิทธิภาพของเกลือหินสำหรับกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากกากของเสียหรือสารพิษที่นำไปทิ้งในโพรงกักเก็บอาจมีความเป็นกรดสูงและโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกากนิวเคลียร์ที่มีความร้อนสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบที่เกิดจากกรดและอุณหภูมิเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน โดยผลที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมา (สุขเกษม กังวานตระกูล, 2555) ระบุว่าเมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรด พบว่าส่วนผสมของเคลือบที่มี ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก จะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ดีที่สุด และเมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดที่อุณหภูมิ 60 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าส่วนผสมของเคลือบที่มี ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก จะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ดีที่สุดในทุกอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมอื่นๆ เนื่องจากมีปริมาณของเฟส Wollastonite เกิดขึ้นจำนวนมาก และมีค่าน้ำหนักที่หายไปหลังทดสอบการทนกรดที่อุณหภูมิต่างๆ น้อยที่สุด คือมีค่าเพียงร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเหมาะสมสำหรับทำกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดภายใต้การใช้งานที่มีความร้อนสูงเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน (สุขเกษม กังวานตระกูล, 2556)

4.2 การศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

จากการศึกษาวิจัยในชุดโครงการนี้ ผู้วิจัยพิจารณาเห็นว่ายังมีประเด็นสำคัญอื่นๆ ที่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1) เพื่อที่จะพัฒนาเกณฑ์การแตกสำหรับตัวอย่างเกลือหินที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิและอัตราการกดที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์หรือพัฒนาสมการดังกล่าวควรจะอาศัยแนวคิดเกี่ยวกับพลังงานความเครียดสูงสุดที่เกลือหินจะรับได้ก่อนเกิดการวิบัติ พลังงานความเครียดดังกล่าวจะรวมพลังงานกลและพลังงานความร้อนเข้าด้วยกัน ในการพิจารณาปัจจัยทั้งสองนี้การทดสอบควรจะมีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวแกนหลักและแนวแกนรอง เพื่อที่จะสามารถคำนวณพลังงานความเครียดที่พิจารณาอุณหภูมิและอัตราการให้แรงกดที่เกิดขึ้นบนตัวอย่าง

เกลือหิน ซึ่งการตรวจวัดดังกล่าวมิได้ดำเนินการในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีข้อจำกัดเกี่ยวกับเครื่องมือในห้องปฏิบัติการและรูปแบบของการทดสอบ

2) เนื่องจากงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาและอุปกรณ์ในการทดสอบ จึงทำให้ผลการทดสอบยังไม่ครอบคลุมคุณสมบัติของวัสดุที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องว่างของเหมืองใต้ดิน ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปควรที่จะศึกษาเกี่ยวกับการเลือกและออกแบบการใช้เกลือหินบดเป็นวัสดุถมกลับในช่องว่างเหมืองใต้ดิน และควรจะมีการศึกษาถึงพฤติกรรมและคุณสมบัติของเกลือหินบดในเชิงรายละเอียดที่หลากหลายเพิ่มมากขึ้น อาทิเช่น คุณสมบัติในการละลายของเกลือหินบด คุณสมบัติในการคืนตัวหรือขยายตัวของตัวอย่างเกลือหินบด ค่ากำลังดึงของเกลือหินบด พฤติกรรมที่เกิดจากการสั่นสะเทือน พฤติกรรมที่เกี่ยวเนื่องกับสารกัมมันตรังสี ตลอดจนพฤติกรรมที่ขึ้นกับความชื้น ความเค้นกดในแนวแกน และอุณหภูมิอื่นๆ ที่ไม่ได้มีการทดสอบในงานวิจัยนี้ เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ที่หลากหลายและเป็นประโยชน์สูงสุดในอุตสาหกรรมแหล่งกักเก็บในโพรงเกลือที่ยั่งยืนต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

กิตติเทพ เฟื่องขจร (2555) การศึกษาศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคาม ภายใต้สภาวะกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ SUT7-719-54-12-52 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

กิตติเทพ เฟื่องขจร (2556) การศึกษาศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคาม ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ SUT7-719-55-12-62 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

บัณฑิตา ธีระกุลสถิตย์ (2555) การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบดในเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ SUT7-719-54-12-53 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

เดโช เผือกภูมิ (2556) การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบดในเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ SUT7-719-55-12-63 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

สุขเกษม กังวานตระกูล (2555) การขึ้นรูปกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ SUT7-708-54-12-56 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

สุขเกษม กังวานตระกูล (2556) การขึ้นรูปกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดเกลือสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ SUT7-708-55-12-64 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

Brewitz, W. and Rothfuchs, T. (2007). Concept and technologies for radioactive waste disposal in rock salt. Acta Montanistica Slivaca 12 (1): 67-74.

Zhang, C., Wang, J., and Su, K. (2006). Concepts and tests for disposal of radioactive waste in deep geological formations. Chinese Journal of Rock Mechanic and Engineering 25(4): 750-768.

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาปริญญาเอกจาก University of Arizona ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา สาขาวิชา Geological Engineering ในปี ค.ศ. 1988 และสำเร็จ Post-doctoral Fellows ในปี ค.ศ. 1990 ที่ University of Arizona ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นประธานกรรมการบริษัท Rock Engineering International ประเทศสหรัฐอเมริกา และดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญพิเศษทางด้านกลศาสตร์ของหินในเชิงการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ได้เคยทำการวิจัยเป็นหัวหน้าโครงการที่สำเร็จมาแล้วมากกว่า 10 โครงการทั้งในสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย มีสิ่งตีพิมพ์นานาชาติมากกว่า 50 บทความ ทั้งวารสาร นิตยสาร รายงานรัฐบาล และบทความการประชุมนานาชาติ เป็นผู้แต่งตำรา “Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock” ที่ใช้อยู่ในหลายมหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกา ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กรรัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelp Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกบทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์