157270

รายงานการวิจัย

ชุดโครงการวิจัย

การพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

(Industrial Wastes Storage in Rock Salt)

โครงการวิจัยย่อย

1 **การศึกษาศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคามภายใต้สภาวะกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม**
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

2 **การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบดในเชิงกลศาสตร์และซลศาสตร์**
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: อ.ดร.บัณฑิตา ธีระกุลสถิตย์

3 **การทดสอบประสิทธิภาพการอุดของซีเมนต์เชิงกลศาสตร์ในหลุมเจาะของเกลือหิน**
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: อ.ดร.ปรัชญา เทพณรงค์

4 **การทดสอบประสิทธิภาพการอุดของส่วนผสมเกล็ดเกลือกับเบนโทไนต์ในรอยแตกของเกลือหิน**
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: ศ.ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

5 **การขึ้นรูปกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน**
หัวหน้าโครงการวิจัยย่อย: ผศ.ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล

ผู้อำนวยการชุดโครงการวิจัย
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2555

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุร...

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2554 ซึ่งสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความร่วมมือจากคณาจารย์และทีมงานผู้รับผิดชอบโครงการวิจัยย่อยต่างๆ รวมทั้งทีมงานจากหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กุมภาพันธ์ 2555

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของชุดโครงการวิจัยนี้คือการประเมินศักยภาพของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคามเพื่อใช้เป็นแหล่งกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งได้ดำเนินการในหลายประเด็น รวมไปถึงผลกระทบของอุณหภูมิ (สูงถึง 200°C) ที่สูงขึ้นต่อกำลังดึงของเกลือหิน ศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของวัสดุที่ใช้อุดช่องเหมือง (เกลือบด ส่วนผสมของเกลือบดกับเบนทอไนต์ และซีเมนต์ทนเค็ม) และความทนทานของแผ่นกระเบื้องเซรามิกที่เคลือบด้วยสารปรุงพิเศษ CZS (Cao, ZrO_2 และ SiO_2) ภายใต้สภาวะความเป็นกรดเกลือ ผลการทดสอบระบุว่าค่ากำลังรับแรงกด ค่ากำลังรับแรงดึง และความยืดหยุ่นของเกลือหินจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ภายใต้แนวคิดของพลังงานความเครียดสามารถสรุปได้ว่า พลังงานความเครียดเบี่ยงเบนที่จุดแตกและจุดการบวมตัวของเกลือหินสามารถพัฒนาให้อยู่ในฟังก์ชันของพลังงานความเครียดเฉลี่ยได้ เกลือบดที่อยู่ภายใต้แรงกด และส่วนผสมของเกลือบดกับเบนทอไนต์ที่ถูกบดอัดแล้วมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุอุดในช่องเหมืองเพื่อป้องกันการรั่วไหลของของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เกลือบดที่ผสมกับน้ำเกลือร้อยละ 5 ถึง 10 โดยน้ำหนัก จะสามารถอัดตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ค่ากำลังเฉือนที่สูงขึ้นตามเวลาภายใต้การอัดตัว ส่วนผสมของเบนทอไนต์และเกลือบดในอัตราส่วน 30:70 จะให้ค่ากำลังเฉือนสูงสุดและค่าความซึมผ่านต่ำสุด โดยเกลือบดควรมีขนาด 3 ถึง 4 มิลลิเมตร และมีปริมาณน้ำเกลือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งวัสดุผสมนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุถมกลับในตำแหน่งที่ต้องการลดการไหลเวียนของน้ำเกลือหรือน้ำบาดาลเค็มในรอยแตกรอบๆ ช่องเหมือง ผลการทดสอบยังระบุปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ใช้อยู่ทั่วไปที่ผสมสารต่อต้านคลอรีนสามารถให้ความเสียดทานที่ผิวรอยแตกระหว่างเกลือบดกับซีเมนต์ที่สูงพอ ผลการทดสอบการดันตัวในหลุมเจาะให้ค่าความเสียดทานดังกล่าวที่สูงกว่าผลการทดสอบกำลังเฉือนแบบตรง เหตุผลเนื่องจากอัตราส่วนของบัวซองที่ทำให้ซีเมนต์อุดในหลุมเจาะบวมตัวติดกับผนังของหลุมเจาะภายใต้แรงดันในแนวแกน เกลือชั้นล่างของชุดหินมหาสารคามมีการแผ่กระจายความลึกและความหนาที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นที่กักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ตำแหน่งหรือพื้นที่ในแอ่งโคราชที่ยกมาเป็นตัวอย่างในชุดโครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงถึงการออกแบบโพรงละลายและช่องเหมืองแห้งที่แตกต่างกันสำหรับความลึกและความหนาของชั้นเกลือหินที่แตกต่างกัน

Abstract

The objective of this research program is to assess the performance of the Maha Sarakham rock salt for use as a host rock for the industrial waste repository. Several aspects of the performance assessment for the industrial waste disposal include the effects of elevated temperatures (up to 200 Celsius) on the compressive and tensile strengths of the salt, the mechanical performance of sealing materials (crushed salt, mixtures of crushed salt and bentonite, and saline resistant cement), and durability of the ceramic tiles coating with CZS (CaO, ZrO and SiO_2) under saline environment. The results indicate that the salt compressive and tensile strengths and elasticity decreases with increasing temperature. Based on the concept of the strain energy density the distortional strain energy density at failure and at dilation can be derived as a function of the mean strain energy. The energy criteria can well describe the failure and dilation of salt under various temperatures. The pre-compressed crushed salt and compacted mixtures of crushed salt and bentonite are recommended for use as sealing materials. The crushed salt with 5-10% brine content can be effectively consolidated, and providing shear strength that increases with time. The compacted bentonite-crushed salt weight ratio of 30:70 with grain sizes ranging from 2-4 mm and brine content of 20% gives the greatest shear strength and lowest permeability. It is suitable as backfill materials to minimize the brine or groundwater flow in the leakage cracks and solution channels. The commercial grade Portland cement with chlorine resistant agent can give sufficiently high mechanical resistance at the salt-cement interface. The borehole push-out test results yield greater interface resistance than those obtained from the direct shear testing due to the effect of the Poisson's ratio. The Lower salt member of the Maha Sarakham formation is suitable for the industrial waste disposal in terms of the extent, depth and thickness. The specific locations in the Khorat basin have been given as examples here to demonstrate that different tentative designs of the solution caverns and dry mine openings can be implemented for different depths and thickness of the hosted salt.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญรูปภาพ ..... ฉ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์หลักของแผนงานวิจัย 3
1.3 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
1.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ 4
1.6 แผนการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่จากการทำการวิจัยตามแผนงานวิจัย 4
1.7 กลยุทธ์ของแผนงานวิจัย 6

บทที่ 2 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย 7
2.1 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 1 7
2.2 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 2 8
2.3 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 3 8
2.4 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 4 9
2.5 ผลการดำเนินงานของโครงการวิจัยที่ 5 10

บทที่ 3 การประมวล วิเคราะห์ และออกแบบโพรงกักเก็บเบื้องต้น จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ 11
3.1 การประเมินเสถียรภาพ 11
3.2 การป้องกันการรั่วซึม 12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การพัฒนาวัสดุทนกรด 12
3.4 การศึกษาศักยภาพของเกลือหินชุดมหาสารคามเพื่อใช้กักเก็บกากของเสีย จากภาคอุตสาหกรรม 13

บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ 23
4.1 สรุปรวมผลงานวิจัย 22
4.2 การศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต 24

บรรณานุกรม 25

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ลักษณะการอุดหลุมเจาะ และการถมกลับหรืออุดช่องในเหมืองเกลือใต้ดิน สำหรับเทคโนโลยีการทิ้งของเสียอันตราย	2
1.2	กลยุทธ์ของแผนงานวิจัยหรือชุดโครงการวิจัย	6
3.1	แบบจำลองโพรงกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมเพื่อการเปรียบเทียบรูปร่างและความลึกในพื้นที่ศึกษา 5 แห่ง คือ บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุดรธานี (KM–S) บ้านศรีเมือง อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร (SW–S) บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร (KW–S) บ้านโพธิ์พาน อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม (PN–S) บ้านหนองปรู อ.บรบือ จ.อุดรธานี (NB–S)	14
3.2	แบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบความกว้างและความลึกของอุโมงค์ในชั้นเกลือหินที่ใช้กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม	16
3.3	โครงข่ายของแบบจำลองอุโมงค์ทางเข้าหลัก (main entry) ในชั้นเกลือหินที่บ้านเก่า อ.เมือง จังหวัดอุดรธานี (อุโมงค์มีความกว้าง 5 เมตร สูง 4.5 เมตร และเสาค้ำยันมีความกว้าง 20 เมตร)	17
3.4	เส้นชั้นความสูงของความเค้นเฉือน ขนาด และทิศทางของความเค้นหลัก ขนาดและทิศทางของความเครียดหลัก (ล่าง) ที่เกิดขึ้นรอบอุโมงค์กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ 50 ปี	18
3.5	การหดตัวที่แกนกลางของเสาค้ำยันบริเวณอุโมงค์ทางเข้าหลักที่ 1 และ 2 ในช่วง 50 ปี หลังจากสร้างอุโมงค์	19
3.6	แนวคิดเบื้องต้นของการออกแบบอุโมงค์ด้วยวิธีเสาค้ำยันยาว (long–wall pillar) สำหรับกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในชั้นเกลือหินที่บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุดรธานี	20

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

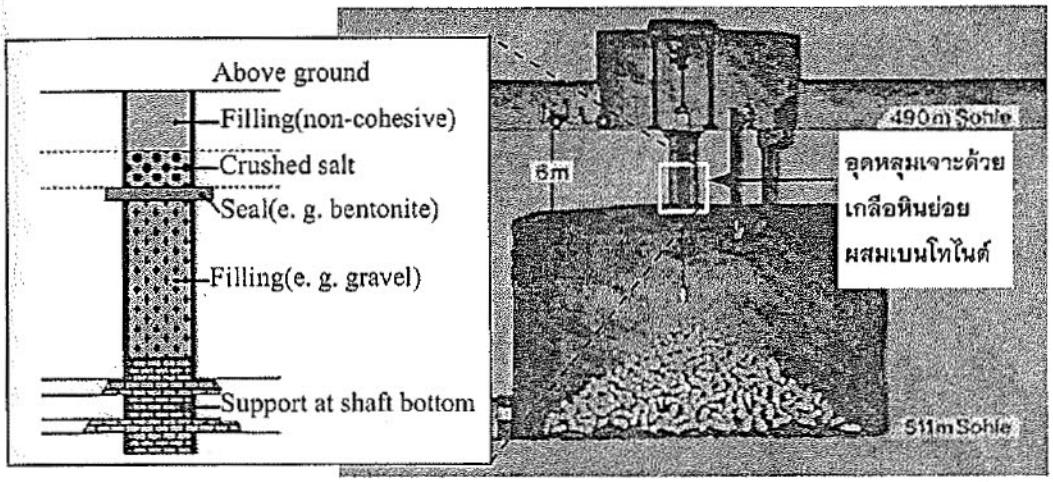
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

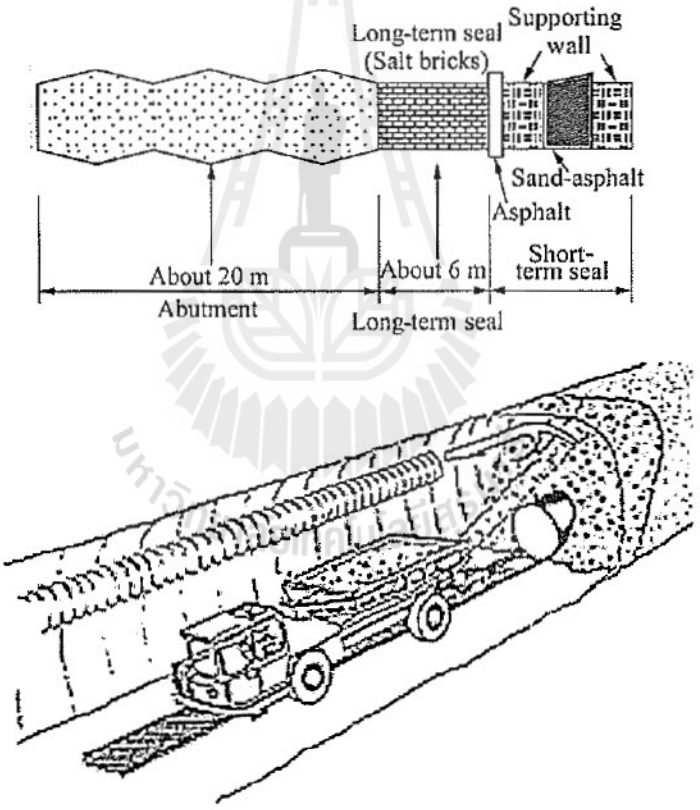
เทคโนโลยีการกักเก็บหรือการทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรมไว้ในเหมืองเกลือใต้ดิน นับว่ามีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับประเทศไทย กุญแจสำคัญที่จะทำให้การดำเนินการประสบความสำเร็จได้นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหิน การออกแบบลักษณะการวางตัวและขนาดช่องเปิดของเหมืองที่มีเสถียรภาพ และเทคนิคการอุดช่องเหมืองและรอยแตกในชั้นเกลือหินที่อาจจะเกิดจากการขุดเจาะ นอกจากนี้ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญ อาทิ คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหิน และของวัสดุที่ใช้ถมกลับเข้าไปยังช่องว่างในเหมืองใต้ดินภายหลังจากที่มีการนำเอากากของเสียอันตรายไปทิ้ง การลดค่าความซึมผ่านของรอยแตกในชั้นเกลือหินโดยใช้ดินเบนโทไนต์ผสมกับปูนซีเมนต์ ประสิทธิภาพในการอุดหลุมเจาะของปูนซีเมนต์ หรือแม้กระทั่งผลกระทบจากกรดเกลือที่มีผลกับโครงสร้างทางวิศวกรรมในระยะยาว

เทคโนโลยีการกักเก็บนี้ได้ใช้อย่างเป็นรูปธรรมในต่างประเทศกว่า 20 ปี โครงการที่เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง คือ Waste Isolate Pilot Plant (WIPP) วัสดุถมกลับหรือวัสดุอุดช่องเหมืองที่นิยมใช้ คือ ซีเมนต์ เบนโทไนต์ และเกลือหินบดบริสุทธิ์หรือเกลือหินบดผสมกับเบนโทไนต์ (ในอัตราส่วนที่เหมาะสม) แล้วทำการบดอัด (Compaction) หรือกดอัด (Compression) ให้เป็นแท่งเกลือก้อนสี่เหลี่ยม (รูปที่ 1.1) อนึ่งการใช้เกลือหินบดนับว่ามีความเหมาะสมมากเพราะมีความเข้ากันได้ในเชิงเคมีและเชิงกายภาพกับเกลือหินเดิม ในขบวนการขุดเจาะช่องเหมืองจะได้เกลือหินออกมาและนำไปใช้ได้เลย จึงทำให้ประหยัดเวลาในการจัดหาวัสดุอย่างอื่น

เทคโนโลยีนี้ยังเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับประเทศไทย ดังนั้นหากจะพิจารณาสร้างเหมืองเกลือใต้ดินเพื่อการทิ้งของเสียจะต้องมีการออกแบบและทดสอบคุณสมบัติของเกลือหินและวัสดุถมกลับให้ละเอียด เพื่อเข้าใจกลไกการอัดตัว พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของเกลือหินจากแอ่งเกลือหินในประเทศไทย ซึ่งจะเป็นประเด็นสำคัญที่จะประเมินความเป็นไปได้ของการนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้อย่างเป็นรูปธรรมเพื่อลดและป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อมจากของเสียอันตรายในประเทศไทย



(ก) การอุดหลุมเจาะในแนวดิ่ง



(ข) การอุดหลุมช่องเหมืองในแนวระดับ

รูปที่ 1.1 ลักษณะการอุดหลุมเจาะ (ก) และการถมกลับหรืออุดช่องในเหมืองเกลือใต้ดิน (ข) สำหรับเทคโนโลยีการทิ้งของเสียอันตราย (Brewitz and Rothfuchs, 2007; Zhang et al., 2006)

1.2 วัตถุประสงค์หลักของแผนงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาศักยภาพของแหล่งเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยสำหรับใช้เป็นที่กักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม
2) เพื่อศึกษาแนวทางที่เป็นไปได้ในการทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในชั้นเกลือหินอย่างเป็นรูปธรรม
3) เพื่อออกแบบลักษณะของโพรงกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรมเบื้องต้น และการใช้วัสดุทางวิศวกรรมเพื่ออุดในช่องเหมืองและรอยแตกในชั้นเกลือหินที่อยู่ในบริเวณแหล่งกักเก็บ
4) ทดลองและวิจัยวัสดุที่ทนทานต่อการกัดของกรดเกลือสำหรับใช้เคลือบผิวโครงสร้างทางวิศวกรรมที่อยู่ในสภาวะกักเก็บในชั้นเกลือหิน

1.3 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัย

ในการออกแบบและก่อสร้างโพรงในชั้นเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม สิ่งสำคัญที่สุด 2 ประการที่ควรพิจารณา คือ 1) คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินและวัสดุถมกลับ 2) คุณสมบัติเชิงชลศาสตร์ของเกลือหินและวัสดุถมกลับ ดังนั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวผู้วิจัยจึงจำเป็นจะต้องทดสอบด้วยแบบจำลองเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการ ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบการอุดของปูนซีเมนต์จะจำลองขึ้นโดยใช้แท่งตัวอย่างเกลือหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว เจาะรูทะลุตัวอย่างตามแนวหน้าตัดเพื่อเป็นตัวแทนของหลุมเจาะที่จะถูกอุดด้วยปูนซีเมนต์ หรือทดสอบเกล็ดเกลือที่จะใช้ทำเป็นวัสดุถมกลับด้วยการบดอัดเป็นแท่งให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถนำไปทดสอบหาค่าความเค้นกดในแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM เป็นต้น

การทดสอบต่างๆ จะดำเนินการในห้องปฏิบัติการทั้งสิ้นเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์ของเกลือหิน วัสดุอุด และวัสดุถมกลับภายใต้สภาวะจริงที่เกิดขึ้นในภาคสนาม เมื่อผลการทดสอบสามารถพิสูจน์ได้ว่าชั้นเกลือหินที่อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีศักยภาพทั้งทางด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์ที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นแหล่งทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรม จึงจะสามารถสรุปได้ว่าแหล่งเกลือหินในประเทศไทยสามารถสร้างเป็นโพรงกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรมได้อย่างเป็นรูปธรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยที่เสนอมานี้มีประโยชน์อย่างมากกับงานด้านวิศวกรรมธรณี วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมเหมืองแร่ที่เกี่ยวข้องกับการปิดและฟื้นฟูเหมืองหลังจากเสร็จสิ้นกิจการทำเหมือง การป้องกันการทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองใต้ดิน และงานด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บของเสียอันตรายที่ไม่สามารถบำบัดได้ ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1) ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติไม่น้อยกว่า 5 บทความ และนำเสนอในรายงานวิจัยและการประชุมระดับชาติ
2) เผยแพร่องค์ความรู้ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน
3) สร้างนักวิจัยระดับ postdoctoral อย่างน้อย 3 คน
4) สร้างนักวิจัยระดับ postgraduate อย่างน้อย 2 คน

1.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบเหมืองใต้ดินเพื่อเทคโนโลยีทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

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

1.6 แผนการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่จากการทำการวิจัยตามแผนงานวิจัย

แผนงานการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่มีเป้าหมายเพื่อส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพของนักวิจัยในการสร้างสรรค์งานวิจัยใหม่ องค์ความรู้ใหม่ และสามารถเป็นที่พึ่งพาให้กับนักวิจัยรุ่นหลังได้ รวมไปถึงผลักดันให้มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีก้าวไปสู่ความเป็นผู้นำในด้านงานวิจัย เพื่อให้เป็นที่ประจักในวงวิชาการทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ ซึ่งแผนการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่สามารถแบ่งได้เป็น

พัฒนานักวิจัยในระดับ Postdoctoral จำนวน 3 คน ได้แก่

1) อ.ดร.ปรัชญา เทพณรงค์
2) อ.ดร.บัณฑิตา ธีระกุลสถิต
3) ดร.เดโช เผือกภูมิ

พัฒนานักวิจัยในระดับ Postgraduate จำนวน 2 คน ได้แก่

1) นายเชาวริน วัลย์ศรี
2) นายสรายุทธ อาชีพโลหะ

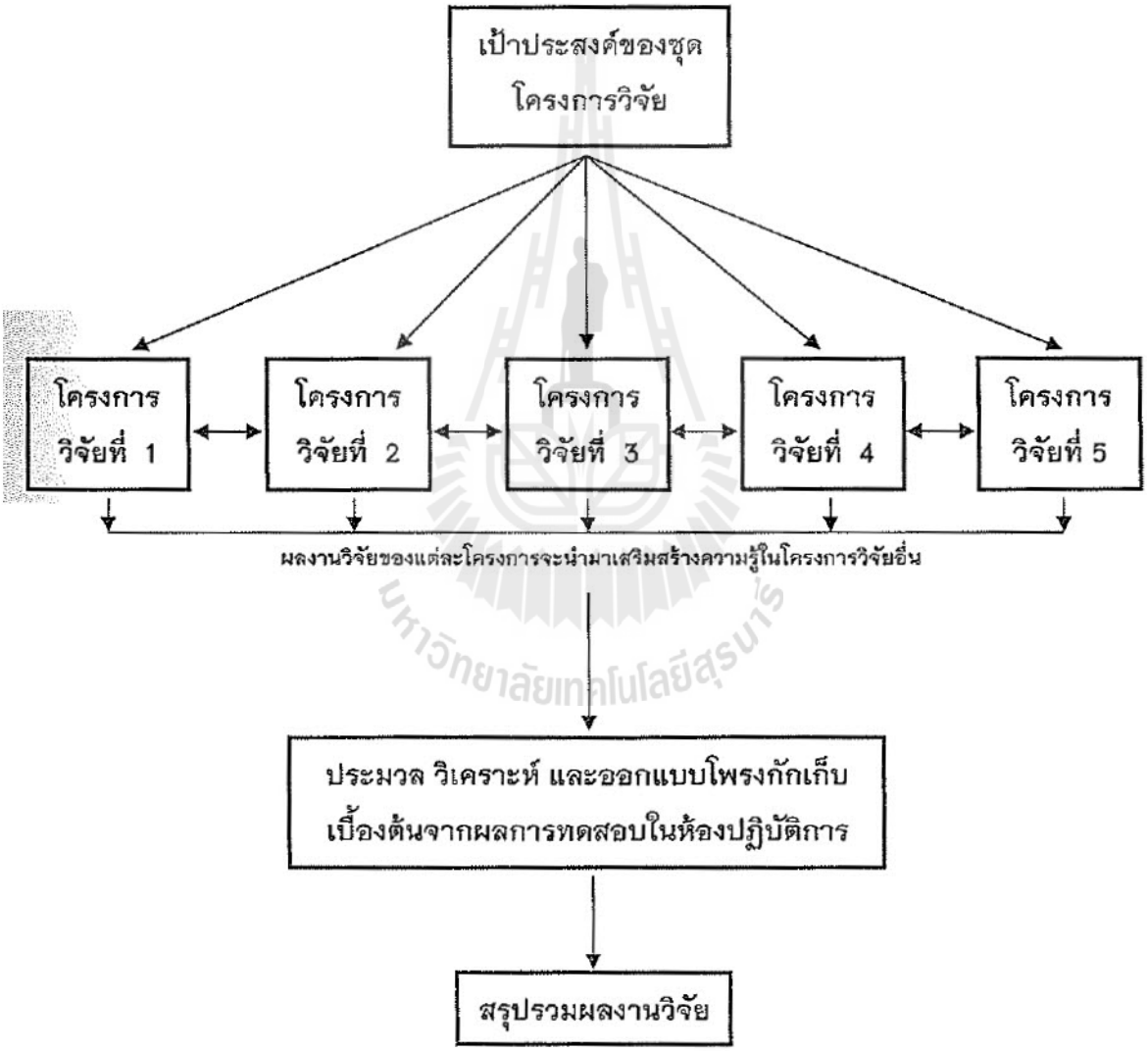
พัฒนานักวิจัยในระดับบัณฑิตศึกษา จำนวน 20 คน ได้แก่

1) นายรัตนชาติ รัตนพงศ์
2) นายสิปปกร กลั่นภูมีศรี
3) นายพิชิต เสมศรี
4) นายธนวัฒน์ พบวันดี
5) นายยรรยง วงศ์รำพันธ์
6) นายอดิศักดิ์ บุญบาตร
7) นายธนพล ศรีอภัย
8) นายสงวน ชูช้าง
9) นายเกียรติศักดิ์ อาจดงหาญ
10) นายธนากร กมลเพชร
11) นายนริศ มณีวรรณ
12) นายคมกริช ผาดไธสง
13) นายเผด็จ ดีทั่ว
14) นายชโนดม เลิศสุริยะกุล
15) นางสาวมัทรี กลีบเมฆ
16) นางสาวจิรานัท อบเชย
17) นางสาวสุกานดา รินทราวิไล
18) นางสาวภาวิณี มาสิงบุญ
19) นางสาวรัชฎาภรณ์ ภูกองพลอย
20) นางสาวพจีราภรณ์ เวียงจันดา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.7 กลยุทธ์ของแผนงานวิจัย

ในขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเพื่อให้สำเร็จไปยังเป้าประสงค์หลักคือ สามารถบ่งชี้ได้ว่าแหล่งเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีความเหมาะสมสำหรับพัฒนาเป็นแหล่งทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรมหรือไม่ ดังนั้นผลจากงานวิจัยในโครงการต่างๆ จะต้องนำมาประมวล วิเคราะห์ และสรุปผลของการวิจัยทั้งหมดเพื่อยืนยันและสามารถให้คำชี้แนะแก่ภาครัฐหรือเอกชนที่จะมาดำเนินการก่อสร้างโพรงกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรมได้อย่างเป็นรูปธรรมในอนาคต รูปที่ 1.2 แสดงกลยุทธ์ของแผนงานวิจัย



รูปที่ 1.2 กลยุทธ์ของแผนงานวิจัยหรือชุดโครงการวิจัย

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 พลังงานความเครียดเปี่ยงเบน (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)

บทที่ 3
การประมวล วิเคราะห์ และออกแบบโพรงกักเก็บเบื้องต้น จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การวิจัยของแต่ละโครงการมีความเกี่ยวโยงกันโดยมุ่งเน้นไปที่การประเมินเสถียรภาพของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2555) และการออกแบบโพรงเกลือหรือช่องเหมืองเพื่อใช้กักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม โดยผลที่ได้ของแต่ละโครงการได้นำมาสังเคราะห์เพื่อประเมินศักยภาพของแหล่งเกลือหินในประเทศไทยว่ามีความเหมาะสมสำหรับทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมหรือไม่ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงวิธีการที่ใช้สำหรับป้องกันการรั่วซึมและป้องกันความเป็นกรดของสารพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ (บัณฑิตา ธีระกุลสถิตย์, 2555; ปรัชญา เทพณรงค์, 2555; สุขสันติ์ หอพิบูลสุข, 2555; สุขเกษม กังวานตระกูล, 2555)

3.1 การประเมินเสถียรภาพ

โครงการวิจัยที่ 1 ได้ศึกษาและพัฒนาเกณฑ์การแตกในหลายแกนของเกลือหินภายใต้การผันแปรของอุณหภูมิและความดันล้อมรอบ ผลการศึกษาระบุว่าค่ากำลังกดและกำลังดึงของเกลือหินจะลดลงเป็นเชิงเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเกณฑ์การแตกที่เสนอขึ้นเป็นประโยชน์ในการหาเสถียรภาพเชิงอนุรักษ์ของโพรงเกลือที่ใช้กักเก็บอากาศอัดและก๊าซธรรมชาติ ที่ซึ่งชั้นเกลือหินที่อยู่ล้อมรอบจะมีการผันแปรอุณหภูมิอย่างมากในระหว่างการอัดและการปล่อยอากาศหรือก๊าซธรรมชาติออกจากโพรง

ในการนำเกณฑ์การแตกที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโพรงกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมนั้นต้องคำนึงถึงวัสดุที่นำไปทิ้งและระยะเวลาในการกักเก็บ นอกจากนี้อุณหภูมิยังเป็นตัวแปรที่สำคัญซึ่งผู้วิจัยได้ตระหนักถึงผลกระทบนี้เป็นอย่างดีจึงได้พัฒนาเกณฑ์การแตกในหลายแกนของเกลือหินภายใต้การผันแปรความดันล้อมรอบและอุณหภูมิโดยพิจารณาผลกระทบของพลังงานความร้อน และใส่ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความยืดหยุ่นและอุณหภูมิเข้าไปในความสัมพันธ์ระหว่าง W_d และ W_m เกณฑ์การแตกของพลังงานความเครียดที่พัฒนาขึ้นนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดสอบกำลังกดและกำลังดึงของเกลือหินที่อุณหภูมิต่างระดับกัน

ผลการศึกษาในโครงการวิจัยที่ 1 สามารถกำหนดรูปร่าง ขนาด และความลึกของโพรงได้โดยอาศัยกฎเกณฑ์ดังกล่าวในการประเมินเสถียรภาพของโพรงกักเก็บซึ่งมีความน่าเชื่อถือและแม่นยำ

3.2 การป้องกันการรั่วซึม

โครงการวิจัยที่ 2, 3, และ 4 ได้ศึกษาวัสดุอุดที่ช่วยลดค่าความซึมผ่านในเกลือหิน รวมไปถึงการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของกำลังเฉือนระหว่างซีเมนต์กับเกลือหินสำหรับงานอุดหลุมเจาะเพื่อป้องการการรั่วซึมของสารพิษ และศึกษาส่วนผสมดินเบนทอไนต์กับเกล็ดเกลือสำหรับอุดรอยแตก โดยผลการทดสอบหาค่าความซึมผ่านภายใต้ความดันน้ำเกลือคงที่ระบุว่า ดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์ที่ถูกบดอัดมีความซึมผ่านน้อยกว่า 10^{-18} m^2 ค่าความซึมผ่านของส่วนผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดใหญ่จะสูงกว่าที่มีเกล็ดเกลือขนาดเล็ก ส่วนผสมทั้งหมดมีค่าความซึมผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-14} ถึง 10^{-12} m^2 ส่วนผสมที่มีดินเบนโทไนต์น้อยจะให้ค่าความซึมผ่านสูงกว่าส่วนผสมที่มีดินเบนโทไนต์มาก ผลจากงานวิจัยนี้แนะนำว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือควรจะเท่ากับ 30:70 โดยมีขนาดของเกล็ดเกลืออยู่ในช่วง 2–4 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุอุดในอุโมงค์ใต้ดินที่ใช้ทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากส่วนผสมนี้มีค่ากำลังเฉือนสูงสุด แต่ในขณะเดียวกันก็มีค่าความซึมผ่านและความสามารถในการบวมตัวใกล้เคียงกับส่วนผสมอื่นที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้

3.3 การพัฒนาวัสดุทนกรด

กากของเสียหรือสารพิษที่นำไปทิ้งในโพรงกักเก็บอาจมีความเป็นกรดสูง ดังนั้นโครงการวิจัยที่ 5 จึงได้คิดค้นวัสดุทนกรดขึ้นเพื่อป้องกันการกัดกร่อนต่ออุปกรณ์ที่เก็บกากของเสีย โดยใช้วัสดุเคลือบที่มีส่วนผสมของ CaO, ZrO_2 และ SiO_2 หรือเรียกว่า "เคลือบ CZS" เนื่องจากมีความทนต่อการกัดกร่อนทางเคมีและมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเติม CaO ลงในเนื้อเคลือบที่มีองค์ประกอบของ SiO_2 เป็นหลักจะสามารถทนต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ แต่อย่างไรก็ตามหากมีการเติม ZrO_2 ในปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก จะสามารถทำให้ต้านทานการกัดกร่อนจากกรดเพิ่ม เนื่องจาก CaO, ZrO_2 และ SiO_2 จะทำให้เกิดสารประกอบใหม่ในการเคลือบ 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 จะทำให้การเคลือบเกิดการเดือดเป็นฟองได้ง่ายทำให้เกิดรูพรุน เมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรด พบว่าส่วนผสมของสารเคลือบที่มี ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก จะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ดีที่สุดซึ่งเหมาะสมสำหรับทำกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน

3.4 การศึกษาศักยภาพของเกลือหินชุดมหาสารคามเพื่อใช้กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

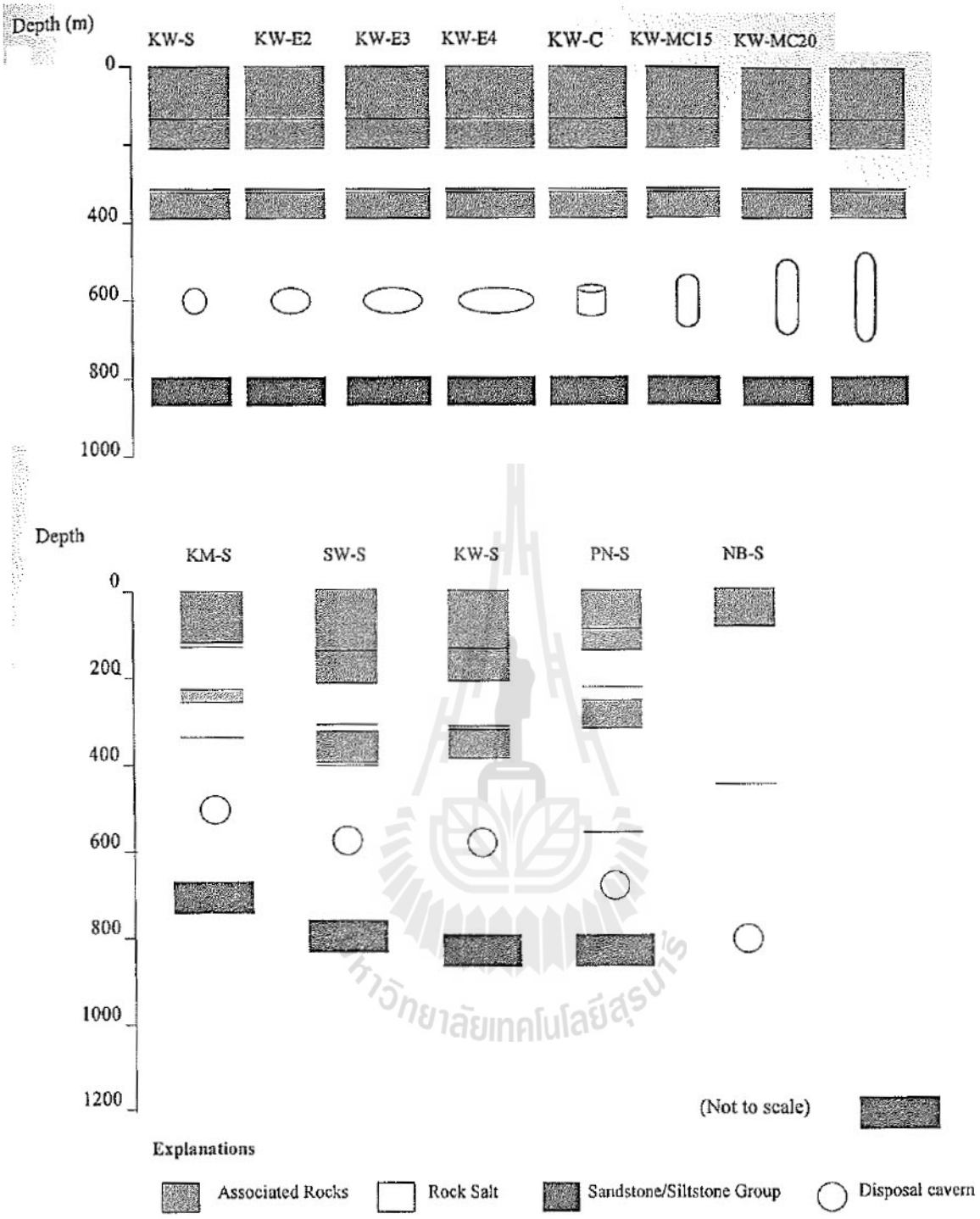
ปริมาณกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร่งเร็วจากอุตสาหกรรมและโรงพยาบาลต่างๆ ทำให้ประเทศไทยจำเป็นต้องหาทางออกและแนวทางการแก้ไขปัญหานี้อย่างถาวร เนื่องจากในอนาคตประเทศไทยจำเป็นต้องมีโรงงานผลิตไฟฟ้าที่ใช้พลังงานปรมาณู เพราะพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้รูปแบบพลังงานทางธรรมชาติจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20-30 ปีข้างหน้า

กิตติเทพ เพื่องขจร (2546) ได้ศึกษาและทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินชุดมหาสารคาม เพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับเทคโนโลยีการกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม และได้เสนอแนวคิดรวมทั้งการออกแบบเบื้องต้นสำหรับการกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม การทดสอบจะเหมือนกับชุดของการทดสอบสำหรับเทคโนโลยีอากาศอัด เนื่องจากเสถียรภาพในระยะยาวเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อคาดคะเนความเค้นและความเครียดในเกลือหินรอบอุโมงค์กักเก็บ และใช้ในการคำนวณการยุบตัวของอุโมงค์และการทรุดตัวของผิวดินภายใต้สภาวะการกักเก็บ

สองแนวคิดในการสร้างแหล่งกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่นำเสนอ คือ 1) การกักเก็บในโพรงเกลือแบบละลาย และ 2) การกักเก็บในเหมืองเกลือแบบแห้ง ซึ่งข้อกำหนดที่สำคัญในการออกแบบประกอบด้วย 1) เสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ในช่วงระยะ 50 ปี ระหว่างดำเนินการ 2) ป้องกันการรั่วไหลของกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในระยะเวลา 500 ปี ระหว่างการกักเก็บ และ 3) การเคลื่อนตัวของหินข้างเคียงมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากความซับซ้อนทางรูปทรงเรขาคณิตและการคาดคะเนพฤติกรรมของชั้นเกลือหินที่อยู่รอบโพรงหรืออุโมงค์กักเก็บระยะยาวในอนาคต จึงจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยในการประเมินพฤติกรรมและเสถียรภาพของชั้นเกลือหินเชิงกลศาสตร์ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ คือ GEO ซึ่งมีสมการควบคุมที่สามารถคำนวณการเปลี่ยนรูปของเกลือหินได้ในเชิงยืดหยุ่น ความหนืดเชิงยืดหยุ่น และความหนืดเชิงพลาสติก

แนวคิดที่ 1 คือการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในโพรงเกลือแบบละลาย มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบด้านรูปทรงของโพรงเกลือและผลกระทบด้านความหนาและความลึกของชั้นเกลือหิน โดยใช้ตัวอย่างโครงสร้างทางธรณีวิทยาในพื้นที่ที่เลือกจากข้อมูลหลุมเจาะ 118 หลุม จำนวน 5 พื้นที่ ในแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร แบบจำลองจำนวน 12 แบบ ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ศึกษาผลกระทบเหล่านี้ ซึ่งแต่ละแบบมีปริมาตรประมาณ 33,000 ลูกบาศก์เมตร เพื่อรองรับปริมาณกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในช่วงเวลา 50 ปี หลังจากสร้างโพรงเกลือ (รูปที่ 3.1)

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

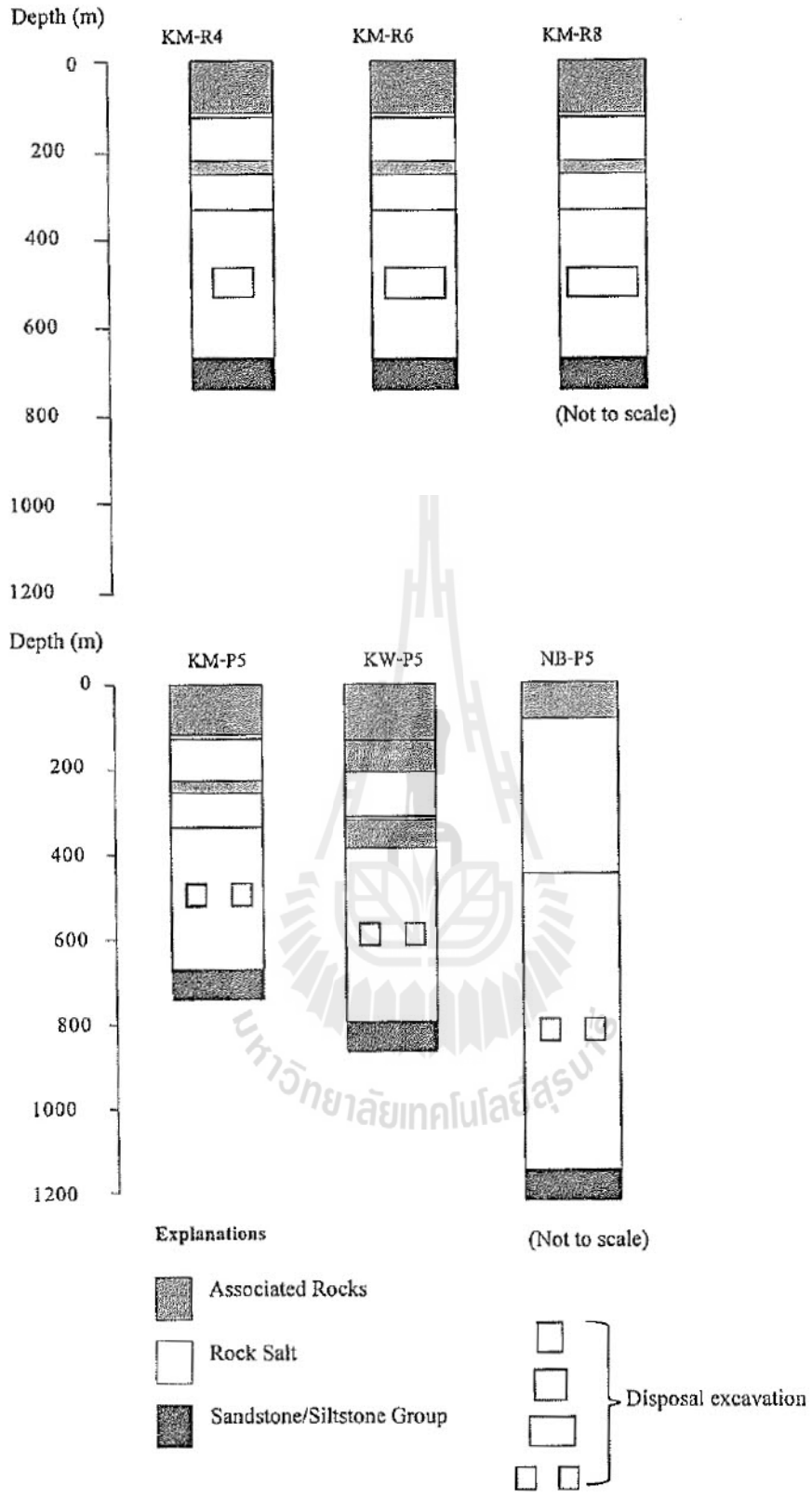


รูปที่ 3.1 แบบจำลองโพรงกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมเพื่อการเปรียบเทียบรูปร่าง (บน) และความลึก (ล่าง) ในพื้นที่ศึกษา 5 แห่ง คือ บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุดรธานี (KM–S) บ้านศรีเมือง อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร (SW–S) บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร (KW–S) บ้านโพธิ์พาน อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม (PN–S) บ้านหนองปรู อ.บรบือ จ.อุดรธานี (NB–S) (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)

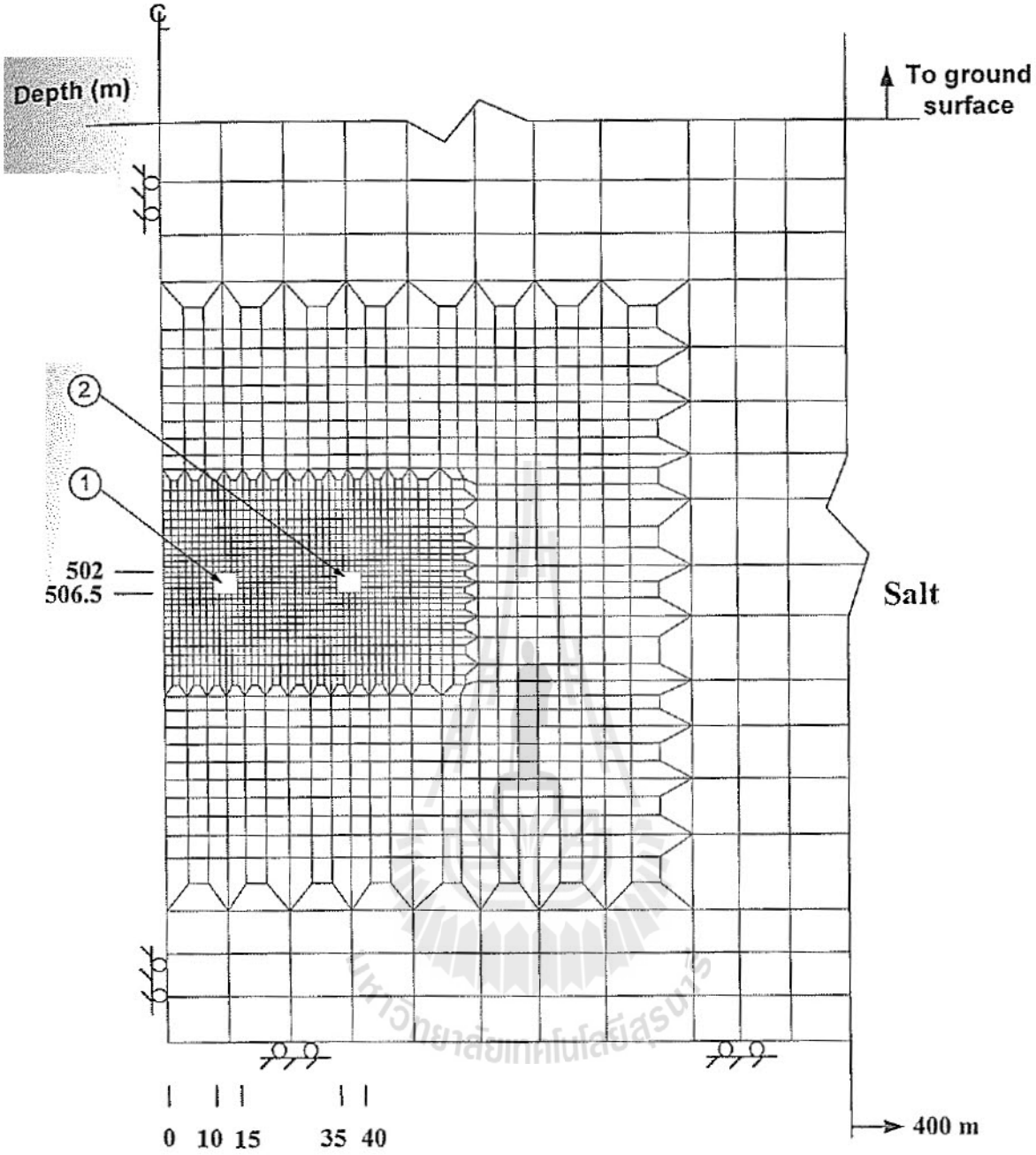
รูปทรงของโพรงที่จำลองขึ้นเพื่อการศึกษาประกอบด้วยรูปทรงกลม ทรงรี ทรงกระบอก และทรงกระบอกปรับเปลี่ยน โดยใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร เป็นตัวอย่างในการศึกษา พบว่าโพรงรูปทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เมตร มีการหดตัวในแนวดิ่งของโพรงน้อยที่สุดประมาณ 0.3% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโพรง และมีการทรุดตัวของผิวดินประมาณ 1 เซนติเมตร ที่ 500 ปี หลังจากสร้างโพรง ผลจากการศึกษาความหนาและความลึกของชั้นเกลือหินใน 5 พื้นที่ตัวอย่าง ระบุว่าลักษณะทางธรณีวิทยาทั้ง 5 พื้นที่ มีความเหมาะสมเชิงกลศาสตร์สำหรับใช้กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในรูปของโพรงเกลือแบบละลาย โดยความลึกที่เหมาะสมของโพรงกักเก็บควรอยู่ระหว่าง 480 เมตร ถึง 800 เมตร

แนวคิดที่ 2 คือการกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในเหมืองเกลือแบบแห้ง โดยอาศัยลักษณะการทำเหมืองแบบเสาค้ำยันยาว (long-wall pillar) ประกอบด้วยชุดของแบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบด้านรูปร่างและขนาดของอุโมงค์กักเก็บ ชุดของแบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบด้านขนาดของเสาค้ำยันและชุดของแบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบด้านความลึกของอุโมงค์ โดยมีการสร้างแบบจำลองจำนวน 11 แบบ เพื่อจำลองลักษณะทางธรณีวิทยาของ 3 พื้นที่ตัวอย่างในแอ่งโคราชและแอ่งสกลนคร เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณารูปร่าง ขนาด และความลึกของอุโมงค์ และเสาค้ำยันที่เหมาะสมคือการหดตัวในแนวดิ่งของอุโมงค์ การวิรูปของหลังคาและพื้นอุโมงค์ การหดตัวและเสถียรภาพของเสาค้ำยัน และการทรุดตัวของผิวดิน (รูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.5)

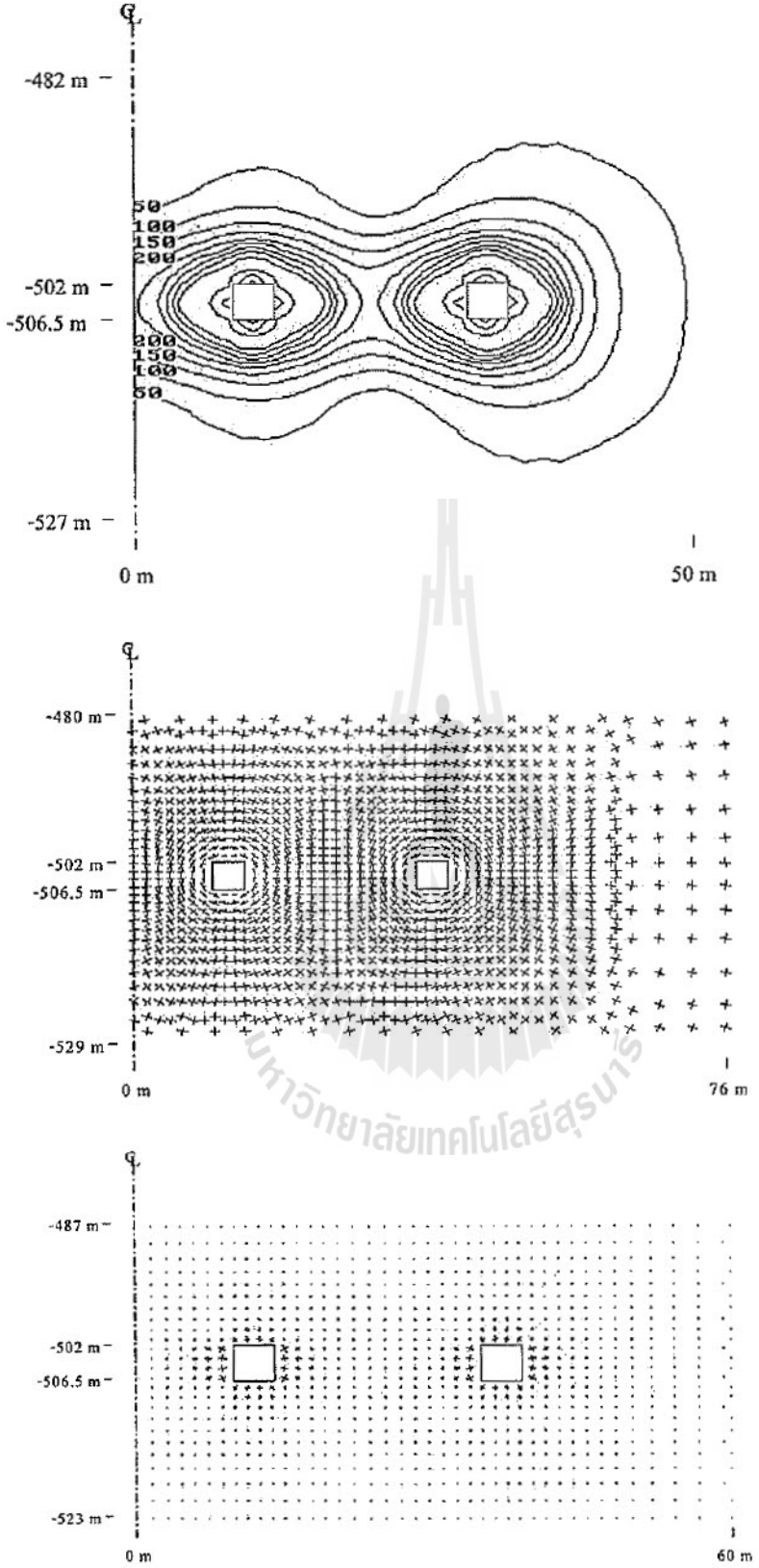
แบบจำลองสำหรับศึกษารูปทรงของอุโมงค์กักเก็บประกอบด้วยอุโมงค์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 4 เมตร และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 6 และ 8 เมตร ทั้งหมดมีความสูงเท่ากับ 4 เมตร ใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่ตัวอย่างที่บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุดรธานี พบว่าอุโมงค์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 4 เมตร มีการหดตัวในแนวดิ่งน้อยที่สุดประมาณ 6.7 เซนติเมตร มีการเคลื่อนตัวของหลังคาและพื้นอุโมงค์น้อยกว่า 3 เซนติเมตร และมีการทรุดตัวของผิวดินประมาณ 0.4 เซนติเมตร ที่ 500 ปี หลังจากสร้างอุโมงค์ การศึกษาขนาดของเสาค้ำยันได้ใช้อุโมงค์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดของเสาค้ำยันกว้าง 4, 8, 12, 16, 20 และ 36 เมตร ในพื้นที่ตัวอย่างเดียวกัน ผลจากการจำลองระบุว่าขนาดของเสาค้ำยันกว้าง 16, 20 และ 36 เมตร ทำให้อุโมงค์มีการหดตัวในแนวดิ่ง 6 เซนติเมตร มีการเปลี่ยนรูปของหลังคาและพื้นอุโมงค์ประมาณ 3 เซนติเมตร การหดตัวของเสาค้ำยันประมาณ 0.5 เซนติเมตร และมีการทรุดตัวของผิวดินน้อยกว่า 2 เซนติเมตร ที่ 500 ปี หลังจากสร้างอุโมงค์ การศึกษาผลกระทบด้านความลึกของอุโมงค์ใน 3 ระดับ ในพื้นที่ตัวอย่าง ระบุว่าลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุดรธานี ที่มีอุโมงค์ลึกประมาณ 500 เมตร จะมีความเหมาะสมเชิงกลศาสตร์สำหรับใช้กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในเหมืองเกลือแบบแห้ง



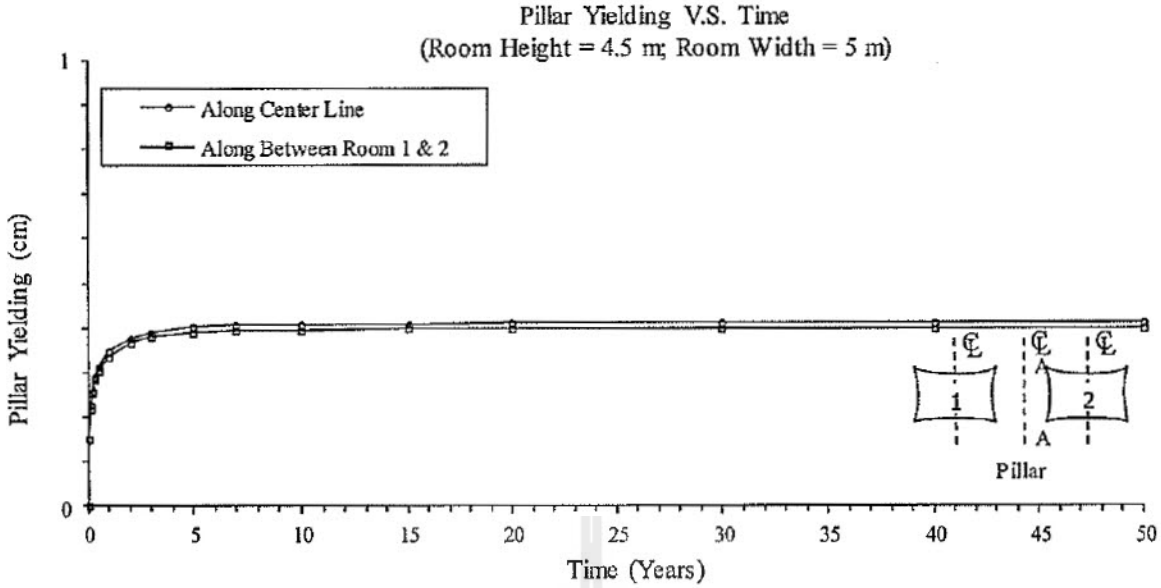
รูปที่ 3.2 แบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบความกว้าง (บน) และความลึก (ล่าง) ของอุโมงค์ในชั้นเกลือหินที่ใช้กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม (กิตติเทพ เพื่องขจร, 2546)



รูปที่ 3.3 โครงข่ายของแบบจำลองอุโมงค์ทางเข้าหลัก (main entry) ในชั้นเกลือหินที่บ้านเก่า อ.เมือง จังหวัดอุดรธานี (อุโมงค์มีความกว้าง 5 เมตร สูง 4.5 เมตร และเสาค้ำยันมีความกว้าง 20 เมตร) (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)

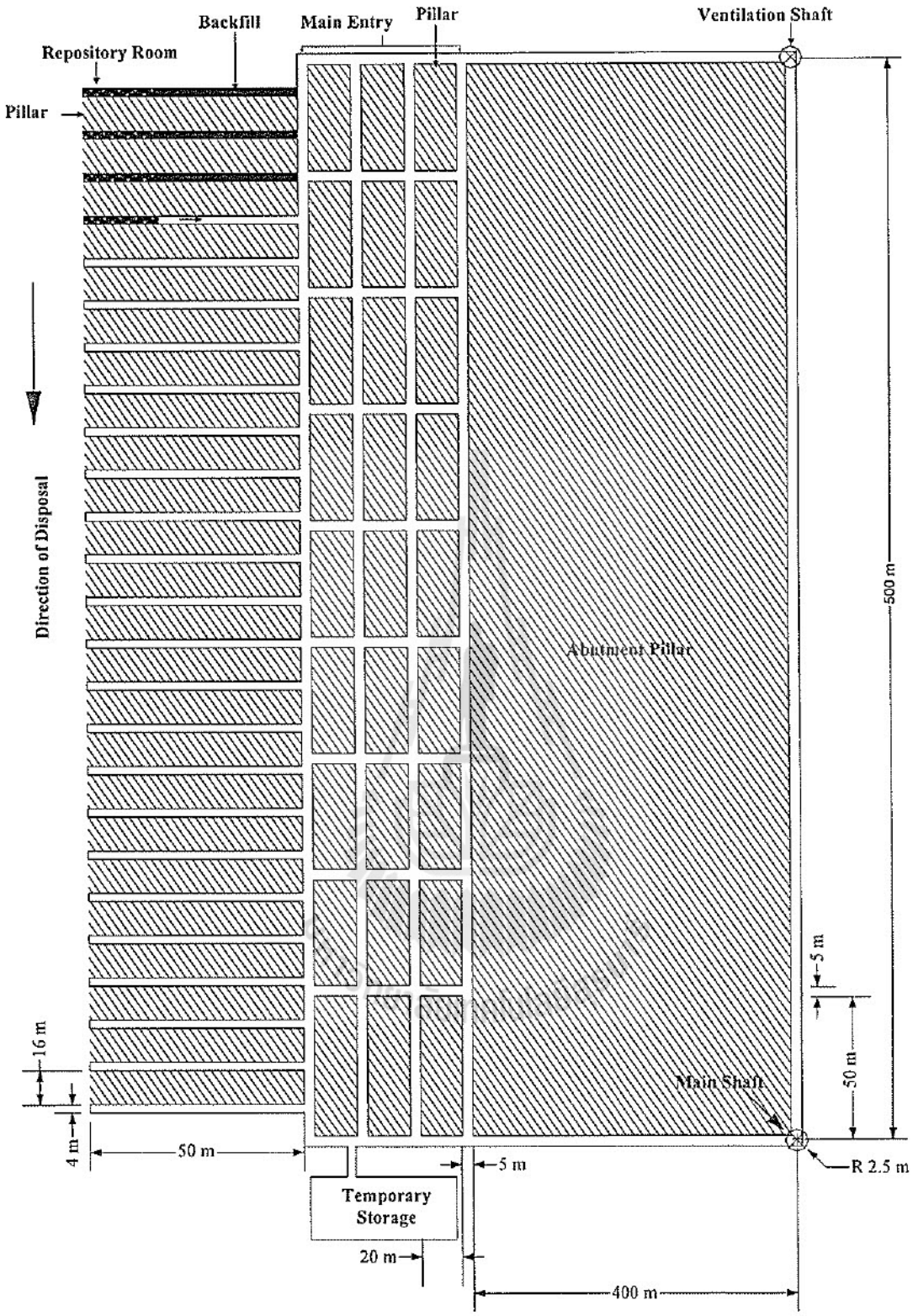


รูปที่ 3.4 เส้นชั้นความสูงของความเค้นเฉือน (บน) ขนาดและทิศทางของความเค้นหลัก (กลาง) ขนาดและทิศทางของความเครียดหลัก (ล่าง) ที่เกิดขึ้นรอบอุโมงค์กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ 50 ปี (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)



รูปที่ 3.5 การหดตัวที่แกนกลางของเสาค้ำยันบริเวณอุโมงค์ทางเข้าหลักที่ 1 และ 2 ในช่วง 50 ปี หลังจากสร้างอุโมงค์ (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)

ผลการศึกษาศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินเบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่าลักษณะทางธรณีวิทยาใน 5 พื้นที่ตัวอย่างมีความเหมาะสมเชิงกลศาสตร์สำหรับใช้กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในโพรงเกลือแบบละลาย โดยที่โพรงควรจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เมตร และมีความหนาของหลังคาและพื้นโพรงเท่ากับ 200 เมตร สำหรับการกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในเหมืองเกลือแบบแห้งมีลักษณะทางธรณีวิทยาที่เหมาะสมอย่างน้อยสามพื้นที่ โดยอุโมงค์ที่ใช้กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมควรอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 500 เมตร มีความกว้างของแต่ละห้องกักเก็บ 4 เมตร สูง 4 เมตร และยาว 50 เมตร ห้องควรกั้นด้วยเสาค้ำยันยาวที่มีความกว้างอย่างน้อย 16 เมตร เสาค้ำยันหลักควรมีความกว้างอย่างน้อย 400 เมตร (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 แนวคิดเบื้องต้นของการออกแบบอุโมงค์ด้วยวิธีเสาค้ำยันยาว (long-wall pillar) สำหรับกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในชั้นเกลือหินที่บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุดรธานี (กิตติเทพ เพื่องขจร, 2546)

ถึงแม้ผลการศึกษาศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินเบื้องต้นจะมีข้อจำกัดที่หลีกเลี่ยงไม่ได้บางประการ เช่น จำนวนและความแปรปรวนของคุณสมบัติเกลือหิน และการขาดแคลนข้อมูลเชิงธรณีวิทยาเพื่ออธิบายการกระจายตัวของชั้นเกลือหินในบางพื้นที่ อย่างไรก็ตาม ขบวนการวิจัย วิเคราะห์และออกแบบที่นำเสนอในการศึกษาล้วนเป็นเชิงอนุรักษ์ทั้งสิ้น ซึ่งผลที่ได้ระบุว่าในเชิงวิศวกรรมธรณีชั้นเกลือหิน (เกลือชั้นกลางและเกลือชั้นล่าง) ในภาคตะวันออกเฉียง-เหนือมีความเหมาะสมสำหรับใช้กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งยืนยันโดย 5 พื้นที่ตัวอย่างที่นำมาศึกษา ในการเลือกพื้นที่เฉพาะแห่งใดแห่งหนึ่ง (site selection) สำหรับใช้ทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมจาก 5 พื้นที่ หรือจากพื้นที่อื่นที่มีลักษณะธรณีวิทยาคล้ายคลึงกัน จำเป็นต้องมีการสำรวจและศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
สรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปรวมผลงานวิจัย

ผลสรุปของชุดการวิจัยการพัฒนาแหล่งเกลือหินสำหรับกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรมนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบโพรงหรือช่องเหมืองสำหรับกักเก็บกากของเสียได้โดยใช้เกณฑ์การแตกที่ถูกพัฒนาขึ้นจากการรวมเกณฑ์การแตกทั้งสี่ระดับอุณหภูมิเข้าด้วยกันเป็นเกณฑ์เดียว ซึ่งอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความยืดหยุ่นและอุณหภูมิในเชิงตัวเลขและนำมาแทนค่าในความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเครียดเบี่ยงเบนและพลังงานความเครียดเฉลี่ย จากนั้นจึงนำมาประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนเสถียรภาพและปัจจัยความปลอดภัยของเกลือหินที่อยู่รอบโพรงกักเก็บพลังงานอากาศอัดและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเกลือหินในภาคสนามดังกล่าวจะอยู่ภายใต้การผันแปรอุณหภูมิและความดันล้อมรอบในขณะที่มีการอัดและปล่อยอากาศหรือก๊าซออกจากโพรงเกลือ (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2555) นอกจากนี้ผลจากงานวิจัยประสิทธิภาพของเกลือหินบดเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์นี้สามารถนำมากำหนดอัตราส่วนที่เหมาะสมของเกลือหินบดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุถมกลับในช่องเหมือง หรือนำไปใช้เป็นกำแพงปิดกั้นช่องทางระหว่างพื้นที่กักเก็บกากของเสียอันตราย โดยผลการทดสอบระบุได้อย่างชัดเจนว่าเกลือหินบดที่มีความเหมาะสม (มีความซึมผ่านต่ำและมีความแข็งแรงสูง) จะต้องใช้เกลือหินบดที่มีขนาดเล็กและบดอัดเป็นระยะเวลา 300 ชั่วโมง เพื่อให้เกลือหินบดมีค่าความซึมผ่านต่ำสุดและมีความแข็งสูงสุด (บัณฑิตา ธีระกุลสถิตย์, 2555)

วัสดุอุดมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการป้องกันการรั่วซึมของสารพิษที่เป็นอันตราย โดยเฉพาะซีเมนต์ที่ใช้อุดต้องเป็นชนิดทนเค็มและวัสดุที่ใช้อุดต้องไม่ส่งผลกระทบต่อเกลือหินด้วย หน้าที่หลักของวัสดุอุดคือป้องกันการรั่วซึมของสารเคมีโดยศึกษาค่ากำลังแรงเฉือนสูงสุดระหว่างซีเมนต์และรอยแตกในเกลือหิน และค่าความซึมผ่านของวัสดุอุดช่องเหมือง ซึ่งในโครงการวิจัยที่ 3 พบว่าค่าแรงเสียดทานยึดติดระหว่างซีเมนต์และเกลือหินเท่ากับ 69 และ 53 องศา สำหรับรอยแตกแบบตัดเรียบและรอยแตกแบบขรุขระตามลำดับ แรงยึดติดในรอยแตกระหว่างซีเมนต์และเกลือหินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 เมกกะปาสคาล การทดสอบ Push-out ให้ค่าผลการทดสอบที่สูงกว่าผลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง โดยมีค่าแรงเฉือนสูงสุดตามแรงกดในแนวแกนถึง 6-11 เมกกะปาสคาล (ปรัชญา เทพณรงค์, 2555) ในกรณีที่ต้องใช้วัสดุถมกลับสำหรับอุดช่องเหมืองซึ่งในโครงการวิจัยที่ 4 ระบุว่าดินเบนโทไนต์บริสุทธิ์ที่ถูกบดอัดจะมีความซึมผ่านน้อยกว่า 10^{-18} m^2 ค่าความซึมผ่านของส่วนผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดใหญ่จะสูงกว่าส่วนผสมที่มีเกล็ดเกลือขนาดเล็ก ส่วนผสมทั้งหมดมีค่าความซึมผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-14} ถึง 10^{-12} m^2 ส่วนผสมที่มีดินเบนโทไนต์น้อยจะให้ค่าความซึม-

ผ่านสูงกว่าส่วนผสมที่มีดินเบนโทไนต์มาก ผลที่ได้จากการทดสอบกำลังเฉือนและการบดอัดดินเบนโทไนต์กับเกล็ดเกลือสามารถกำหนดอัตราส่วนที่ดีที่สุดของดินเบนโทไนต์ต่อเกล็ดเกลือที่ใช้ในการอุดรอยแตกในชั้นเกลือหินได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30:70 โดยน้ำหนัก และมีขนาดของเกล็ดเกลืออยู่ในช่วง 2-4 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุอุดในอุโมงค์ใต้ดินที่ใช้ทิ้งของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากส่วนผสมนี้มีค่ากำลังเฉือนสูงสุด (สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 2555)

การศึกษาเสถียรภาพของเกลือหินรวมไปถึงวัสดุอุดยังไม่เพียงพอต่อการประเมินความปลอดภัยและประสิทธิภาพของเกลือหินสำหรับกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากกากของเสียหรือสารพิษที่นำไปทิ้งในโพรงกักเก็บอาจมีความเป็นกรดสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบที่เกิดจากกรดเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน โดยผลที่ได้จากโครงการวิจัยที่ 5 ระบุว่าเมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรด พบว่าส่วนผสมของเคลือบที่มี ZrO_2 ในปริมาณร้อยละ 13 โดยน้ำหนักจะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากกรดได้ดีที่สุดซึ่งเหมาะสมสำหรับทำกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน (สุขเกษม กังวานตระกูล, 2555)

4.2 การศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต

จากการศึกษาวิจัยในชุดโครงการนี้ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงประเด็นสำคัญอื่นๆ ที่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- เนื่องจากในชุดโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของเกลือหินภายใต้ความเค้นกดเพียงอย่างเดียวแต่ในสภาวะของอุโมงค์หรือโพรงกักเก็บที่แท้จริงนั้นยังมีผลกระทบที่เกิดจากความเค้นดึงอยู่ด้วย เช่น บริเวณหลังคาอุโมงค์ ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมที่สภาวะดังกล่าวในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้รวมไปถึงความเค้นดึงสูงสุด (tensile strength) และการคืบแบบแรงดึง (tensile creep test)
- สภาวะความเค้นรอบอุโมงค์ที่ได้ศึกษาในชุดโครงการนี้เป็นรูปแบบอย่างง่าย คือมีการให้ความเค้นกดในแกนเดียวในขณะที่ความเค้นแท้จริงในภาคสนามมีความซับซ้อนมากดังนั้นควรมีการศึกษาผลกระทบของความเค้นในหลายทิศทางด้วย

บรรณานุกรม

กิตติเทพ เฟื่องขจร (2546) การประเมินศักยภาพทางด้านกลศาสตร์ของเกลือหินเพื่อทิ้งกากนิวเคลียร์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ RDG5/0024/2544 สำนักงานกองทุนสนับสนุนกาวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

กิตติเทพ เฟื่องขจร (2555) การศึกษาศักยภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นเกลือหินชุดมหาสารคามภายใต้สภาวะกักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ RDG5/0024/2544 สำนักงานกองทุนสนับสนุนกาวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

บัณฑิตา ธีระกุลสถิตย์ (2555) การทดสอบประสิทธิภาพการอัดตัวของเกลือหินบดในเชิงกลศาสตร์และชลศาสตร์, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ RDG5/0024/2544 สำนักงานกองทุนสนับสนุนกาวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

ปรัชญา เทพณรงค์ (2555) การทดสอบประสิทธิภาพการอุดของซีเมนต์เชิงกลศาสตร์ในหลุมเจาะของเกลือหิน, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ RDG5/0024/2544 สำนักงานกองทุนสนับสนุนกาวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

สุขเกษม กังวานตระกูล (2555) การขึ้นรูปกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดเพื่อปกป้องโครงสร้างทางวิศวกรรมในชั้นเกลือหิน, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ RDG5/0024/2544 สำนักงานกองทุนสนับสนุนกาวิจัย กรุงเทพฯ, โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

สุขสันต์ หอพิบูลสุข (2555) การทดสอบประสิทธิภาพการอุดของส่วนผสมเกล็ดเกลือกับเบนโทไนต์ในรอยแตกของเกลือหิน, รายงานวิจัย สัญญาเลขที่ RDG5/0024/2544 สำนักงานกองทุนสนับสนุนกาวิจัย 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.

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี