บทที่ 3
การประมวล วิเคราะห์ และออกแบบโพรงกักเก็บเบื้องต้น จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การวิจัยของแต่ละโครงการมีความเกี่ยวโยงกันโดยมุ่งเน้นไปที่การประเมินเสถียรภาพของเกลือหินภายใต้อุณหภูมิ (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2555) และการออกแบบโพรงเกลือหรือช่องเหมืองเพื่อใช้กักเก็บของเสียจากภาคอุตสาหกรรม โดยผลที่ได้ของแต่ละโครงการได้นำมาสังเคราะห์เพื่อประเมินศักยภาพของแหล่งเกลือหินในประเทศไทยว่ามีความเหมาะสมสำหรับทิ้งกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมหรือไม่ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงวิธีการที่ใช้สำหรับป้องกันการรั่วซึมและป้องกันความเป็นกรดของสารพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ (บัณฑิตา ธีระกุลสถิตย์, 2555; ปรัชญา เทพณรงค์, 2555; สุขสันต์ 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

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

3.4 การศึกษาศักยภาพของเกลือหินชุดมหาสารคามเพื่อใช้กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม

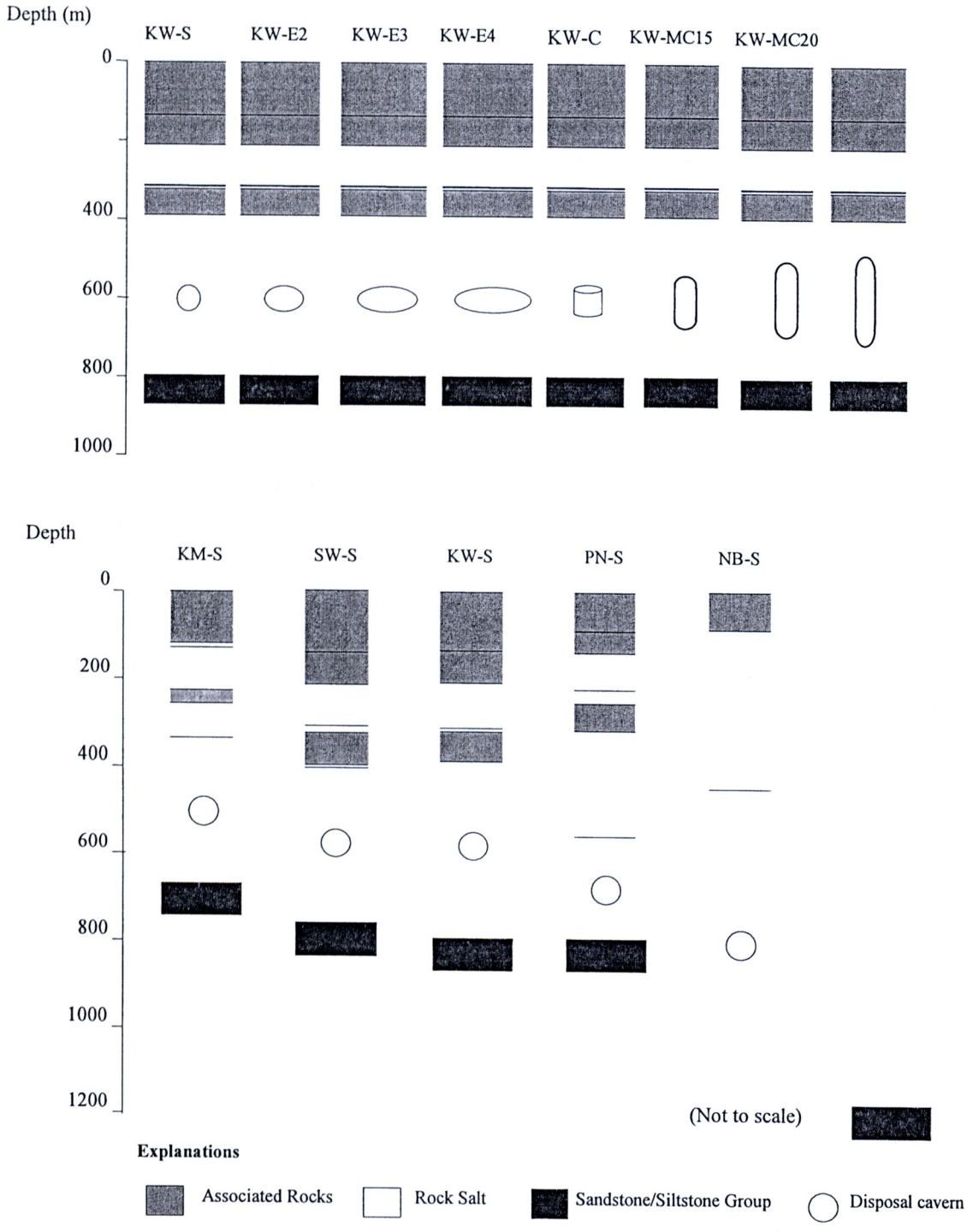
ปริมาณกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตรารวดเร็วจากอุตสาหกรรมและโรงพยาบาลต่างๆ ทำให้ประเทศไทยจำเป็นต้องหาทางออกและแนวทางการแก้ไขปัญหานี้อย่างถาวร เนื่องจากในอนาคตประเทศไทยจำเป็นต้องมีโรงงานผลิตไฟฟ้าที่ใช้พลังงานปรมาณู เพราะพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้รูปแบบพลังงานทางธรรมชาติจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20-30 ปีข้างหน้า

กิตติเทพ เฟื่องขจร (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)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 22 พ.ย. 2555
เลขทะเบียน 190764
เลขเรียกหนังสือ

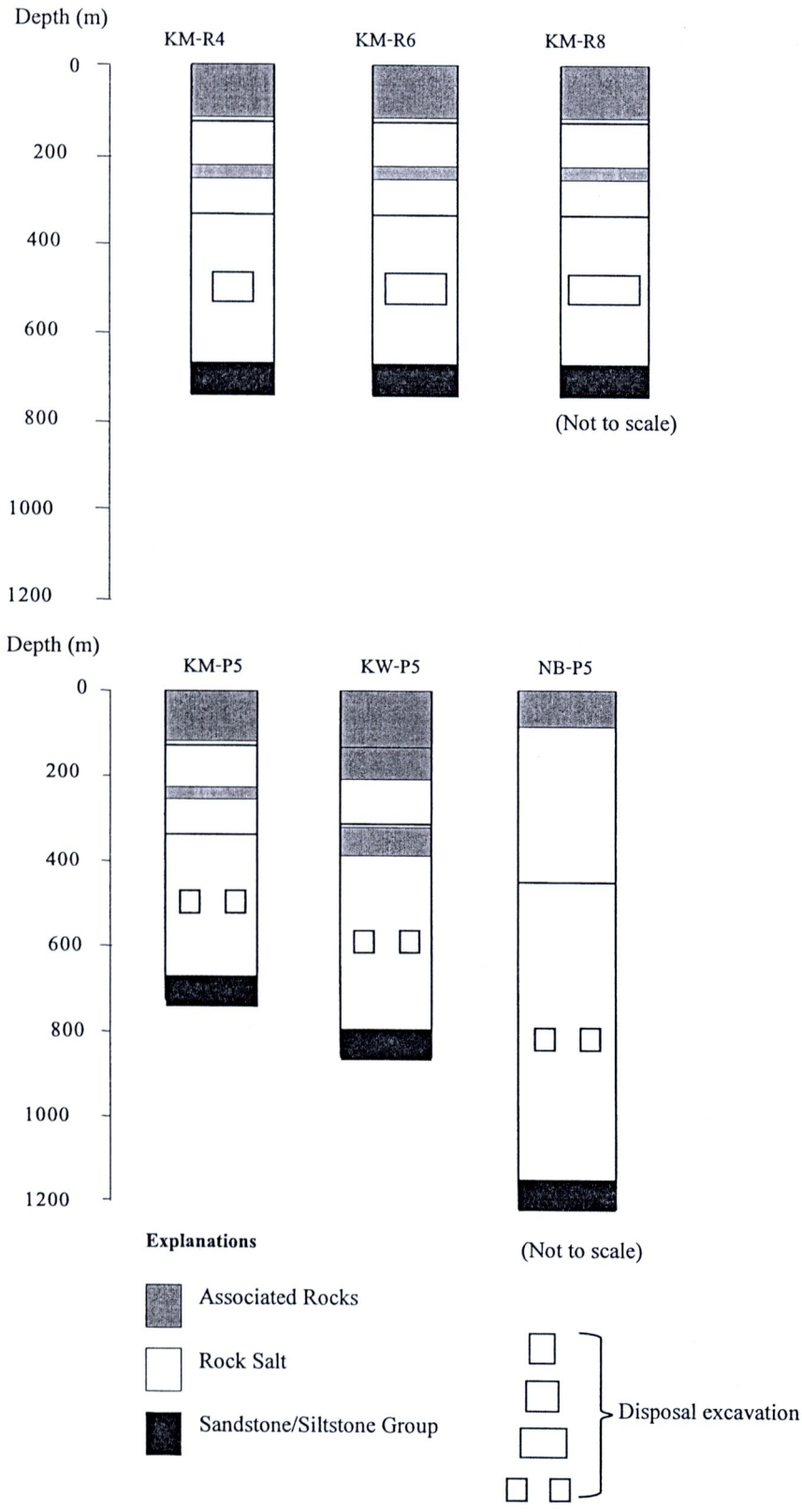


รูปที่ 3.1 แบบจำลองโพรงกักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมเพื่อการเปรียบเทียบรูปร่าง (บน) และความลึก (ล่าง) ในพื้นที่ศึกษา 5 แห่ง คือ บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุดรธานี (KM–S) บ้านศรีเมือง อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร (SW–S) บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร (KW–S) บ้านโพธิ์พาน อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม (PN–S) บ้านหนองปรู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

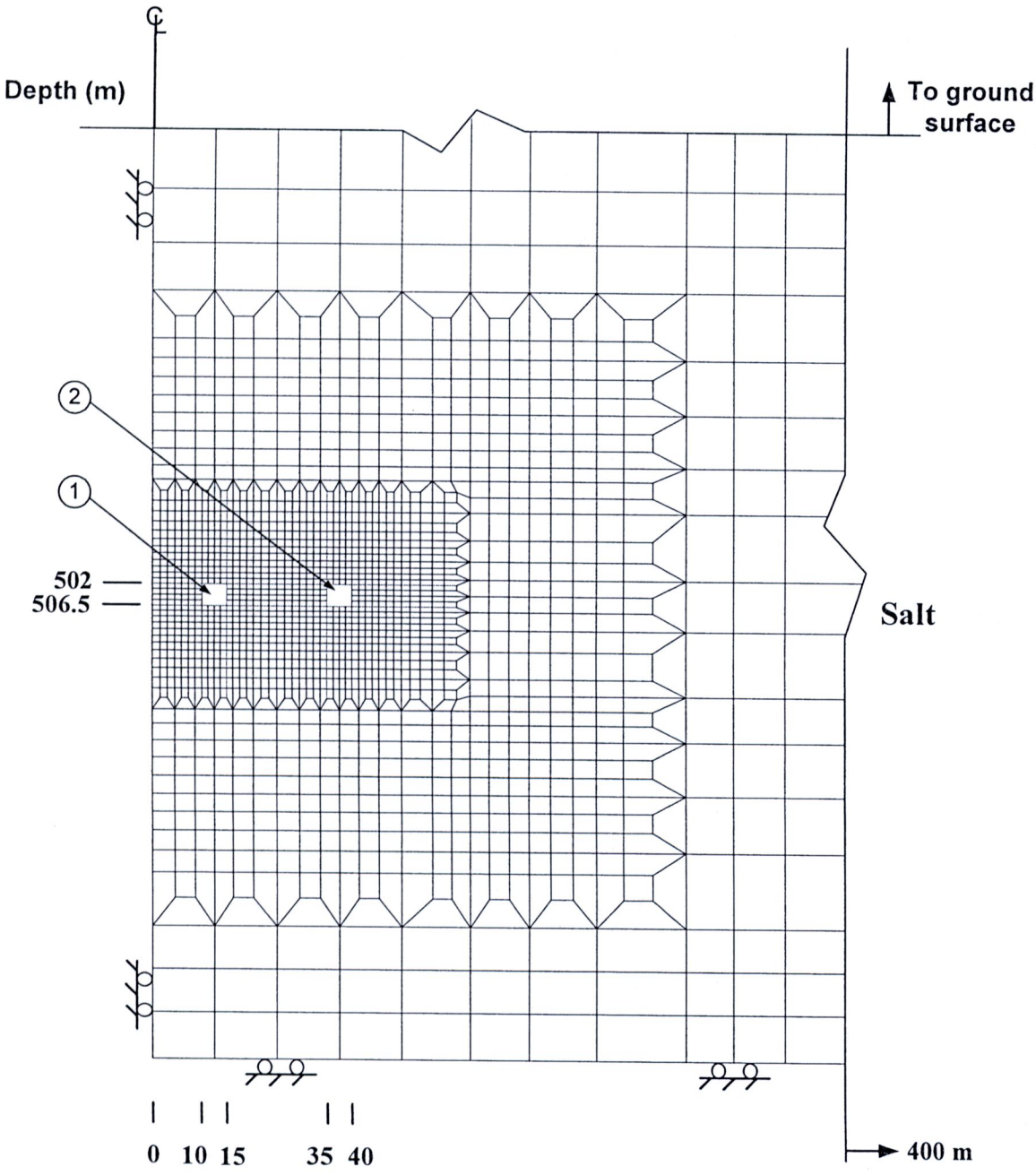
รูปทรงของโพรงที่จำลองขึ้นเพื่อการศึกษาประกอบด้วยรูปทรงกลม ทรงรี ทรงกระบอก และทรงกระบอกปรับเปลี่ยน โดยใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร เป็นตัวอย่างในการศึกษา พบว่าโพรงรูปทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เมตร มีการหดตัวในแนวดิ่งของโพรงน้อยที่สุดประมาณ 0.3% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโพรง 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

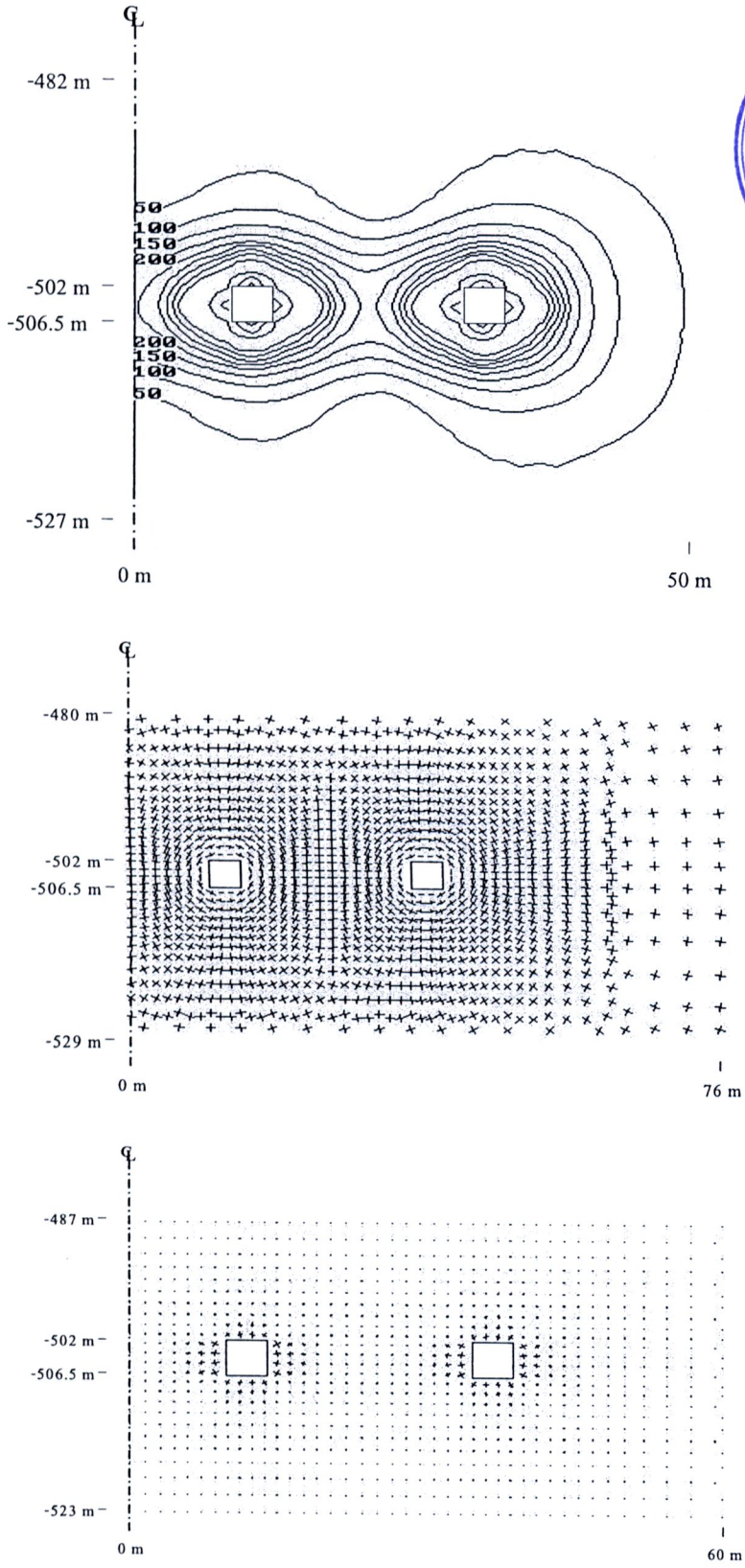


รูปที่ 3.2 แบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบความกว้าง (บน) และความลึก (ล่าง) ของอุโมงค์ในชั้นเกลือหินที่ใช้กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)

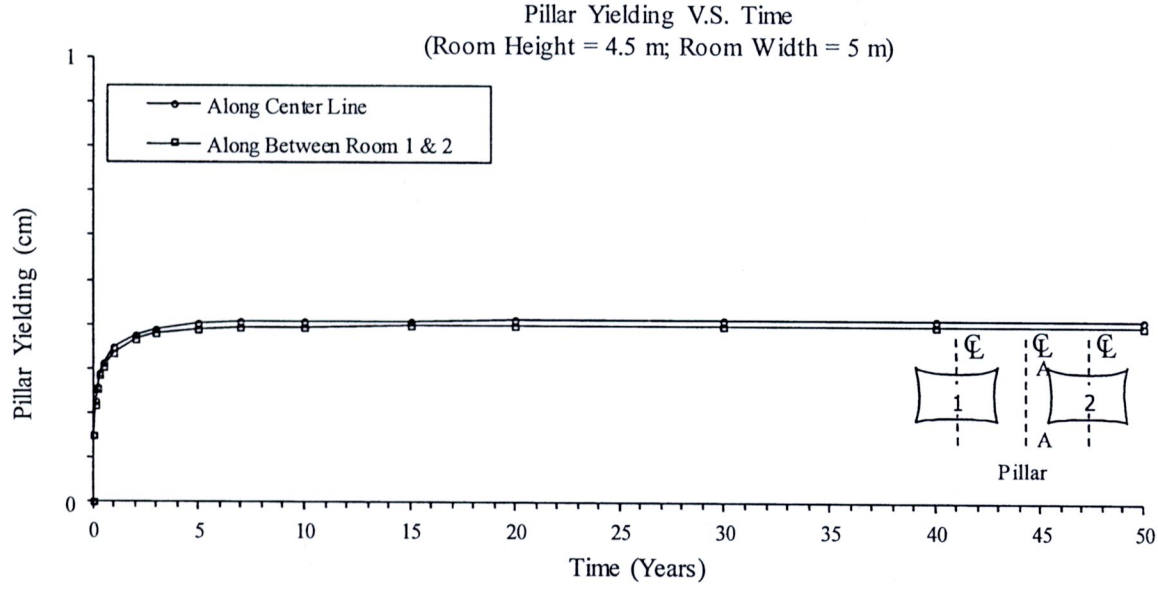


รูปที่ 3.3 โครงข่ายของแบบจำลองอุโมงค์ทางเข้าหลัก (main entry) ในชั้นเกลือหินที่บ้านเก่า อ.เมือง จังหวัดอุดรธานี (อุโมงค์มีความกว้าง 5 เมตร สูง 4.5 เมตร และเสาค้ำยันมีความกว้าง 20 เมตร) (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย

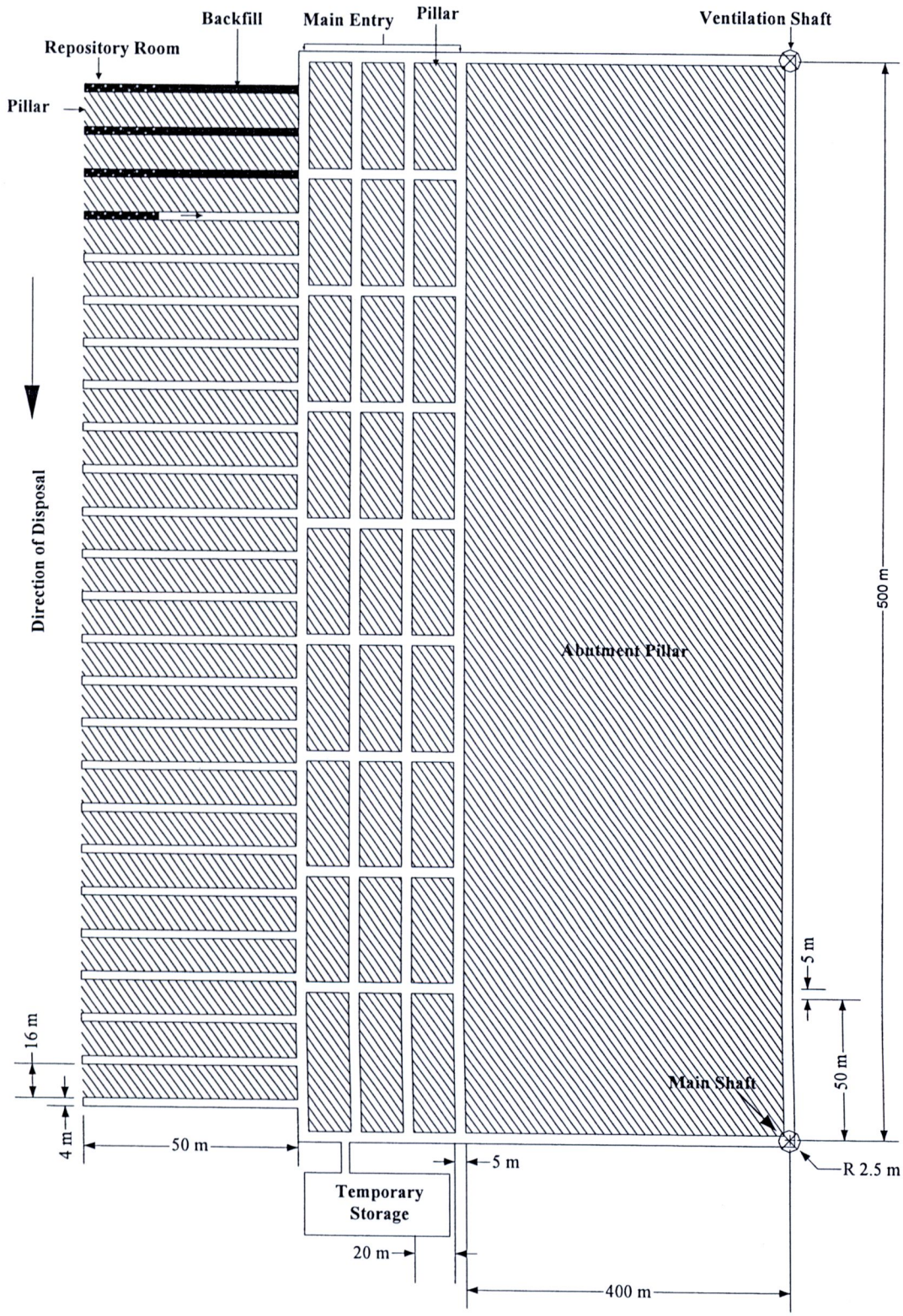


รูปที่ 3.4 เส้นชั้นความสูงของความเค้นเฉือน (บน) ขนาดและทิศทางของความเค้นหลัก (กลาง) ขนาดและทิศทางของความเครียดหลัก (ล่าง) ที่เกิดขึ้นรอบอุโมงค์กักเก็บกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่ 50 ปี (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2546)



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 เฟื่องขจร, 2546)

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