



รหัสโครงการ SUT7-719-58-12-41

รายงานการวิจัย

การวางแผนแม่บทสำหรับลดผลกระทบการทรุดตัวของผิวดิน
จากการทำเหมืองเกลือหินใต้ดิน

(Development of Master Plan for Minimization of
Surface Subsidence Impacts Due to Salt Mining)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-719-58-12-41

รายงานการวิจัย

การวางแผนแม่บทสำหรับลดผลกระทบการทรุดตัวของผิวดิน
จากการทำเหมืองเกลือหินใต้ดิน

(Development of Master Plan for Minimization of
Surface Subsidence Impacts Due to Salt Mining)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2558

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณีในการทดสอบและ นางสาวกัลยา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กันยายน 2558

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของรายงานนี้คือ เพื่อร่างแผนแม่บทสำหรับลดผลกระทบจากการทรุดตัวของผิวดินอันเนื่องจากการทำเหมืองเกลือหินและหินโปแทชใต้ดิน เพื่อนำไปใช้ประกอบกิจกรรมการทำเหมือง โดยเน้นไปที่การประเมินและการลดผลกระทบจากการลดระดับของผิวดิน ในการศึกษานี้ได้นำเสนอกลยุทธ์และแนวทางการดำเนินงานที่สำคัญ ได้แก่ 1) การสำรวจภาคสนามและการทดสอบเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ 2) การคำนวณองค์ประกอบจากการลดระดับของผิวดิน 3) การประเมินการกระจายตัวจากการลดระดับของผิวดิน 4) การสำรวจภาคสนามครั้งที่ 2 และกำหนดพื้นที่อ่อนไหว 5) การศึกษาผลกระทบจากการลดระดับของผิวดินต่อภูมิประเทศ และ 6) มาตรการควบคุม แก้ไข และเฝ้าระวังการลดระดับของผิวดิน โดยกลยุทธ์และแนวทางการดำเนินงานที่ได้นำเสนอนี้ได้ผ่านการปฏิบัติงานจริงกับสถานประกอบการด้านเหมืองมาแล้ว และได้เสนอขั้นตอนการปฏิบัติงานในรูปของแผนแม่บทในรายงานนี้ ซึ่งสามารถนำไปใช้กับเหมืองแร่อื่นๆ เพื่อให้เกิดเป็นแนวปฏิบัติที่ปลอดภัยและสามารถลดผลกระทบจากการลดระดับของผิวดินที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดิน

Abstract

The objective of the report is to develop a master plan for use as a guideline to minimize the impacts of surface subsidence induced by salt and potash mines. The master plan focuses on the evaluation of the subsidence and method to reduce the subsidence and its impacts. Six strategies are proposed here, including 1) field investigation and mechanical laboratory testing, 2) evaluation of the subsidence components, 3) determination of the subsidence distribution, 4) field investigation to determine the sensitive areas, 5) determination of the impacts of subsidence to the topography in the mine area, and 6) methods to control, monitor and remediation. The proposed strategies have been applied to the actual mines. This report proposes method and procedure to apply the strategies to other mines to minimize for impacts of the mining-induced subsidence.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
 บทที่ 1 บทนำ	 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.5 ประเด็นยุทธศาสตร์.....	2
1.6 เป้าหมายและตัวชี้วัด.....	2
1.7 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
 บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง	 6
2.1 ธรณีวิทยาของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.....	6
2.2 การคำนวณองค์ประกอบของการลดระดับของผิวดิน.....	10
2.2.1 การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	10
2.2.2 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน.....	11
2.2.3 การประเมินการกระจายตัวจากการลดระดับของผิวดิน.....	12
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดระดับของผิวดิน.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 กลยุทธ์และแนวทางการดำเนินงาน.....	14
3.1 การสำรวจภาคสนามและการทดสอบเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ.....	14
3.2 การคำนวณองค์ประกอบจากการลดระดับของผิวดิน.....	14
3.3 การประเมินการกระจายตัวจากการลดระดับของผิวดิน.....	15
3.4 การสำรวจภาคสนามครั้งที่ 2 และกำหนดพื้นที่อ่อนไหว.....	16
3.5 การศึกษาผลกระทบจากการลดระดับของผิวดินต่อภูมิประเทศ.....	16
3.6 มาตรการควบคุม แก้ไข และเฝ้าระวังการลดระดับของผิวดิน.....	17
บทที่ 4 ตัวอย่างการปฏิบัติงานในเหมืองแร่โปแตชอาเซียน จ.ชัยภูมิ.....	19
4.1 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา.....	19
4.2 กลยุทธ์และขั้นตอนการดำเนินงาน.....	19
บทที่ 5 สรุปแนวทางแผนแม่บท.....	30
บรรณานุกรม.....	31
ประวัตินักวิจัย.....	34

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตำแหน่งโดยสังเขปของการติดตั้งเครื่องตรวจวัด Inclinator.....	29

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ลำดับการคำนวณและประเมินผลกระทบจากการลดระดับของผิวดิน.....	3
2.1 แอ่งสกลนครและแอ่งโคราชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (พิทักษ์ รัตนจารุรักษ์, 2533).....	7
2.2 องค์ประกอบทางฟิสิกส์ในโปรแกรม GEO เพื่อใช้ในการคำนวณพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ ของเกลือหิน.....	10
4.1 ลักษณะของผิวดินที่มีการลดระดับของผิวดินเนื่องจากการเปิดช่องเหมือง.....	21
4.2 องค์ประกอบของการลดระดับของผิวดินจากการเปิดช่องเหมืองเกินจุดวิกฤติ.....	21
4.3 จุดสำรวจในพื้นที่ขอบเขตประทานบัตรและบริเวณโดยรอบของบริษัท เหมืองแร่โปแตช- อาเซียน จำกัด (มหาชน).....	23
4.4 เส้นชั้นความสูงการลดระดับของผิวดินเมื่อซ้อนทับกับหมู่บ้านและสถานที่สำคัญ (ค่าการลดระดับมีหน่วยเป็นเซนติเมตร).....	24
4.5 รูปแบบและวิธีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเอียงตัวและบ่อสังเกตการณ์.....	26
4.6 รูปแบบและวิธีการติดตั้งเครื่องมือวัดการยัดตัวของมวลหิน และเครื่องมือวัด การยุบตัวของห้องอุโมงค์.....	26
4.7 ตัวอย่างอุปกรณ์ Borehole extensometer.....	27
4.8 ตัวอย่างอุปกรณ์ Vibrating wire strain gauge.....	27
4.9 ตัวอย่างอุปกรณ์ Convergence meter.....	28
4.10 ตัวอย่างอุปกรณ์ Microseismic detector.....	28

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การลดระดับของผิวดินหรือการหลุดตัวของผิวดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองเกลือหินใต้ดินเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประการหนึ่ง แต่การนำทรัพยากรธรรมชาติขึ้นมาใช้ประโยชน์เป็นสิ่งจำเป็นในการพัฒนาเศรษฐกิจของชาติ โดยทั่วไปการทำเหมืองใต้ดินเป็นที่นิยมสำหรับสายแร่ที่อยู่ในระดับลึก ซึ่งจะมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการทำเหมืองแร่บนดิน คือ ช่วยลดต้นทุน ไม่ส่งผลกระทบต่อทัศนียภาพ และไม่ส่งผลกระทบจากฝุ่นละอองและเสียง ซึ่งประเด็นเหล่านี้มักจะพบเสมอจากการทำเหมืองแร่บนดิน

การลดระดับของผิวดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองแร่ใต้ดินเป็นผลกระทบที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ความรู้ทางด้านวิชาการขั้นสูง การบริหารจัดการรูปแบบการทำเหมือง การกำหนดมาตรการเฝ้าระวังและมาตรการแก้ไขผลกระทบที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น วิศวกรเหมืองแร่และวิศวกรธรณีจะสามารถควบคุมและคาดการณ์การลดระดับของผิวดินได้อย่างเป็นระบบและแม่นยำ โดยองค์ความรู้ดังกล่าวยังไม่แพร่หลายในประเทศไทยและยังไม่มีแนวทางปฏิบัติที่เหมาะสม ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ใต้ดินที่จะมีแผนแม่บทเพื่อลดผลกระทบการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองใต้ดิน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อร่างแผนแม่บทสำหรับการประเมินและลดผลกระทบการลดระดับของผิวดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองแร่เกลือหินใต้ดิน ซึ่งรวมไปถึงการร่างขั้นตอนการศึกษา วิธีการคำนวณการลดระดับ วิธีการประเมินผลกระทบจากการลดระดับและการแปลงแผนแม่บทไปสู่การปฏิบัติ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาและรวบรวมข้อมูลลักษณะการลดระดับของผิวดินและผลกระทบของการลดระดับต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม พื้นที่เกษตรกรรม และแหล่งทรัพยากรธรรมชาติในพื้นที่เหมืองใต้ดิน
- 2) กำหนดวิสัยทัศน์ พันธกิจ เป้าหมาย กลยุทธ์ แนวทางการดำเนินงาน ผลผลิต และตัวชี้วัดเพื่อให้แผนแม่บทที่จะร่างขึ้นมีความสมบูรณ์ และครอบคลุมปัญหาทุกรูปแบบในแต่ละพื้นที่ส่งผลให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้อย่างเป็นรูปธรรม
- 3) มีการแปลงแผนแม่บทไปสู่การปฏิบัติโดยการยกตัวอย่างกรณีศึกษาจริงเพื่อใช้เป็นตัวอย่างและเสริมความเข้าใจในการนำแผนแม่บทไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การวางแผนแม่บทสำหรับลดผลกระทบการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือหินใต้ดินได้อาศัยองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์หินขั้นสูง การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข การคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การคำนวณด้วยสมการเชิงตรีโกณมิติ การอ้างอิงถึงเกณฑ์มาตรฐานสากล การพิจารณาลักษณะทางธรณีวิทยา และการนำความลึกและรูปทรงทางเรขาคณิตของช่องเหมืองใต้ดินเข้ามาประกอบ รูปที่ 1.1 แสดงแผนภูมิของการศึกษา ซึ่งระบุแนวคิดของการศึกษาเพื่อให้การลดระดับของผิวดินที่เกิดขึ้นสามารถคาดคะเนและควบคุมได้ กล่าวคือ มีมาตรการป้องกันหรือตรวจวัดเพื่อใช้เป็นดัชนีบ่งบอกถึงอัตราการลดระดับที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ดังนั้น วิศวกรจะสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำเหมืองได้ อาทิ เพิ่มขนาดของเสาค้ำยันให้กว้างขึ้น หรือลดขนาดของช่องเหมืองให้น้อยลง ในแผนภูมิดังรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณการลดระดับของผิวดินถูกนำมาเป็นปัจจัยในการออกแบบเหมืองตั้งแต่ต้น และถือเป็นปัจจัยสำคัญในทุกกิจกรรมของการทำเหมืองที่มีผลต่อการกำหนดกิจกรรมต่างๆ ในการทำเหมือง กรอบแนวคิดนี้ผู้วิจัยได้ร่างจากประสบการณ์ในการศึกษา วิเคราะห์ และออกแบบเหมืองใต้ดินทั้งในและต่างประเทศมากกว่า 20 ปี

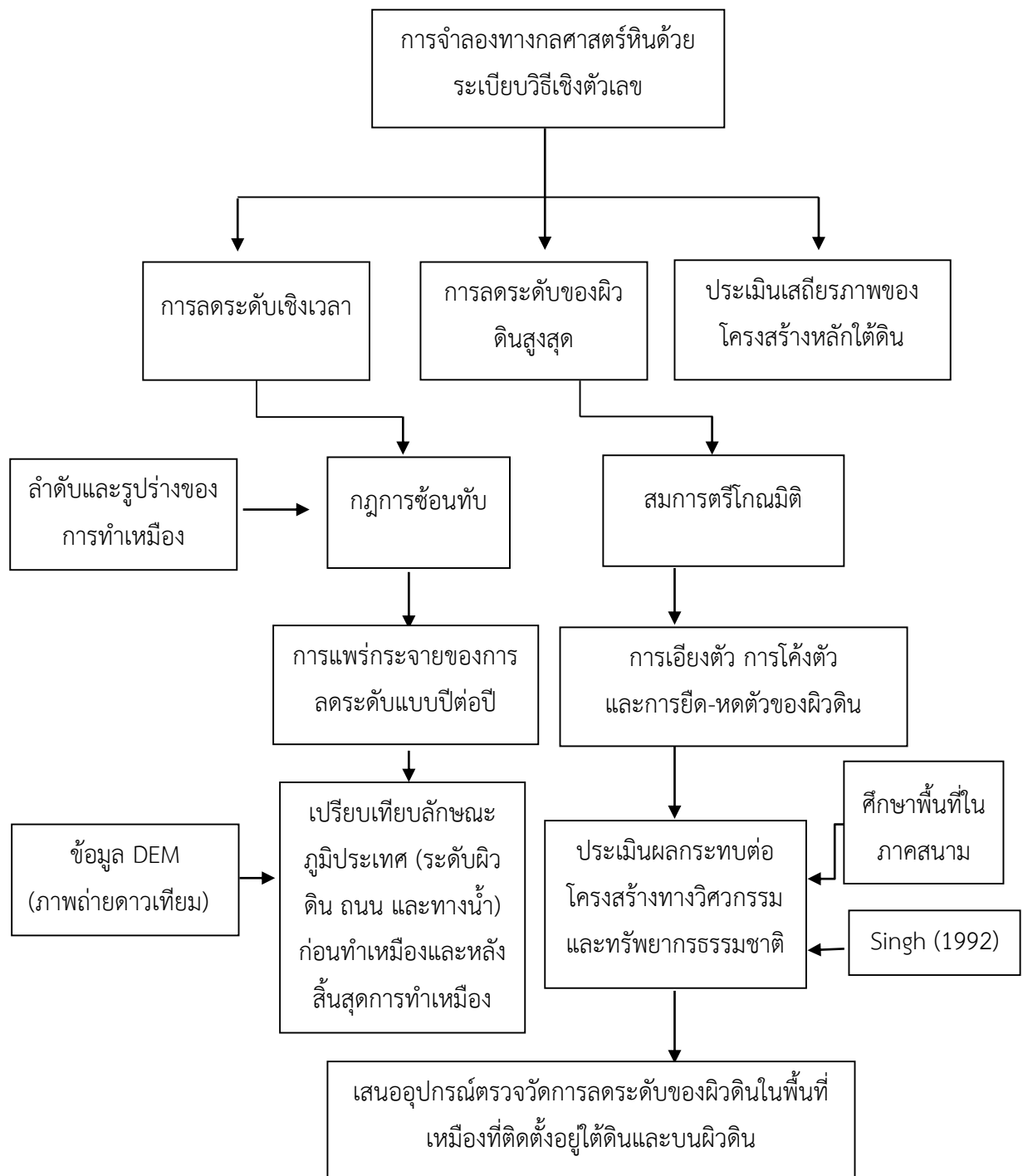
1.5 ประเด็นยุทธศาสตร์

- 1) ยุทธศาสตร์ที่ 1: ตรวจสอบและวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยและสาเหตุการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน
- 2) ยุทธศาสตร์ที่ 2: ออกแบบเหมืองเพื่อลดผลกระทบการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือหินใต้ดิน
- 3) ยุทธศาสตร์ที่ 3: คำนวณการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน
- 4) ยุทธศาสตร์ที่ 4: กำหนดมาตรการป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน

1.6 เป้าหมายและตัวชี้วัด

เป้าหมาย

- 1) แผนแม่บทนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงกับเหมืองที่ประสบปัญหาการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน
- 2) การลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดินลดน้อยลงจนไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หรือส่งผลกระทบน้อยมาก (อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้) ตามที่กฎหมายกำหนด
- 3) การลดระดับของผิวดินจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและแหล่งชุมชนหากปฏิบัติตามแผนแม่บทนี้อย่างเคร่งครัด



รูปที่ 1.1 ลำดับการคำนวณและประเมินผลกระทบจากการลดระดับของผิวดิน

ตัวชี้วัดความสำเร็จ

- 1) เมืองเกลือใต้ดินต่างๆ มีแผนการปรับปรุงและแก้ไขเกี่ยวกับปัญหาการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน
- 2) มีการพัฒนาและปรับปรุงการทำเหมืองเกลือใต้ดินอย่างเป็นรูปธรรม
- 3) ปัญหาจากการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดินสู่ชุมชนได้รับการแก้ไข

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยและองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตจะช่วยให้การวางแผนแม่บทนี้สามารถครอบคลุมประเด็นปัญหาและสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริงได้มากที่สุด โดยผลจากการศึกษานี้ได้นำมาสรุปในรายงานฉบับสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดสถานการณ์และประเด็นปัญหา

ในขั้นตอนนี้ได้มีการกำหนดและจำแนกสถานการณ์รวมทั้งประเด็นปัญหาโดยอาศัยเกณฑ์ทางด้านลักษณะและวิธีการทำเหมือง ลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่เหมืองและโครงสร้างทางวิศวกรรมและทรัพยากรน้ำในพื้นที่เหมือง เป็นต้น ซึ่งประโยชน์ของการจำแนกจะสามารถทำให้แผนแม่บทที่ร่างขึ้นมีความเฉพาะเจาะจงมากขึ้น และนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดวิสัยทัศน์และพันธกิจของแผนแม่บท

ในขั้นตอนนี้ได้มีการกำหนดวิสัยทัศน์และภาระหน้าที่อย่างเป็นระบบ เพื่อให้มั่นใจว่าแผนแม่บทนี้ได้ถูกดำเนินการโดยพิจารณาปัจจัยและความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องทุกรูปแบบ และเพื่อให้มั่นใจว่าผลที่ได้รับจากการนำแผนแม่บทไปประยุกต์ใช้จะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ กล่าวคือ ลดผลกระทบจากการลดระดับของผิวดินให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและเป็นไปตามมาตรฐานสากล

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดวัตถุประสงค์และเป้าหมายของแผนแม่บท

ในแผนแม่บทได้มีการเสนอวิธีการร่างวัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับพันธกิจที่กำหนดไว้ โดยการกำหนดวัตถุประสงค์และเป้าหมายอาจมีได้หลายประเด็น ซึ่งแล้วแต่สถานการณ์และปัญหาที่ได้ศึกษา

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดกลยุทธ์และแนวทางดำเนินงาน

ในขั้นตอนนี้ได้เสนอวิธีการศึกษาอย่างเป็นขั้นตอนตั้งแต่การศึกษาโครงสร้างของเหมืองแร่ ใต้ดิน การประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างเหมืองใต้ดินด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ การคำนวณ การลดระดับของผิวดินสูงสุด และการลดระดับของผิวดินในเชิงเวลา การประเมินการแพร่กระจายของ การลดระดับของผิวดินในเชิงพื้นที่ที่สอดคล้องกับลำดับและขั้นตอนในการทำเหมืองใต้ดิน วิธีการ ประเมินผลกระทบจากการลดระดับผิวดินต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม แหล่งน้ำ และทรัพยากรธรรมชาติ อื่นๆ บนผิวดิน

ขั้นตอนที่ 6 การแปลงแผนแม่บทไปสู่การปฏิบัติ

ในขั้นตอนนี้ได้เสนอวิธีการแปลงแผนแม่บทไปสู่การปฏิบัติอย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งได้อ้างถึง กรณีศึกษาที่เกิดขึ้นจริงและเสนอตัวอย่างขั้นตอนการดำเนินงานที่เสนอไว้ในขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 7 สรุปผลและเขียนรายงาน

ผลที่ได้จากการศึกษาตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 6 ได้สรุปและเขียนเป็นรายงานฉบับ สมบูรณ์เพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในวงกว้างต่อไป

ขั้นตอนที่ 8 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้ คือ การนำข้อมูลไปเผยแพร่ในเว็บไซต์ของหน่วยวิจัย กลศาสตร์ธรณีเพื่อให้ผู้ที่สนใจทั่วไปสามารถสืบค้นได้

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยนี้มีประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมธรณีและวิศวกรรมเหมืองแร่ และที่สำคัญ คือ มีการสนับสนุนการนำทรัพยากรจากธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ในขณะเดียวกันก็มีมาตรการ วิธีการ และขั้นตอนการดำเนินงานในการทำเหมืองที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านการลดระดับ ของผิวดินให้น้อยที่สุด

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

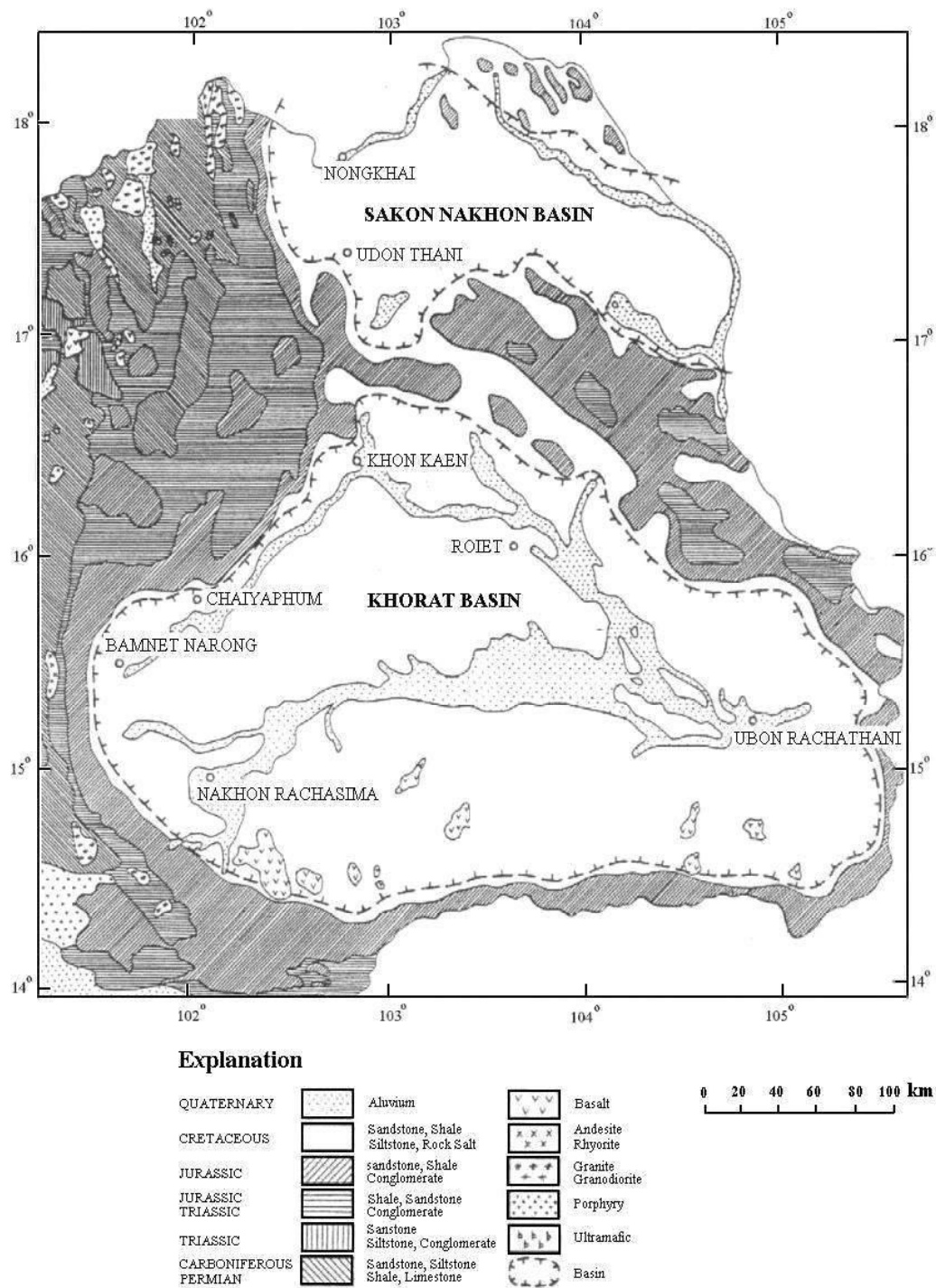
2.1 ธรณีวิทยาของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

วัตถุประสงค์ของการทบทวนวรรณกรรมวิจัยคือ เพื่อค้นคว้า ศึกษา และสรุปบทความและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยา โครงสร้างทางธรณีวิทยาของที่ราบสูงโคราช (Khorat Plateau) การศึกษาและการสำรวจธรณีฟิสิกส์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการลำดับชั้นเกลือหินและหินข้างเคียงในเชิงการกระจายตัว ความหนา และความลึก รวมทั้งศึกษาคุณลักษณะทางธรณีวิทยาโครงสร้างของชั้นเกลือหินโดยใช้สิ่งตีพิมพ์ที่มีอยู่ในหน่วยงานต่างๆ เพื่อเลือกพื้นที่ที่สัมพันธ์กับชั้นเกลือหินที่มีความเหมาะสมในการก่อสร้างโรงเพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบอากาศอัดต่อไป

โครงสร้างและลักษณะธรณีวิทยาของชั้นเกลือหิน

ที่ราบสูงโคราชมีพื้นที่ประมาณ 150,000 ตารางกิโลเมตร อยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 14 ถึง 19 องศาเหนือ และเส้นแวงที่ 101 ถึง 106 องศาตะวันออก ทางทิศเหนือและทิศตะวันออกติดกับประเทศลาว ทางทิศใต้ติดประเทศกัมพูชา โครงสร้างทางธรณีวิทยาของที่ราบสูงโคราชมีรูปร่างเป็นแอ่ง (Structural Basin) เกิดจากการยกตัวในตอนเหนือและใต้ รวมทั้งการยกตัวของหินหน่วยภูพานในทิศตะวันออกเฉียงใต้ได้เกิดเป็นโครงสร้างแอ่งสองแอ่งขึ้น แอ่งทั้งสองมีความลาดเอียงของชั้นหินประมาณ 20 องศา ไปทางกลางแอ่งที่มีความลึกเพิ่มขึ้น แอ่งสกลนครอยู่ทางตอนเหนือ มีพื้นที่ประมาณ 17,000 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย จังหวัดหนองคาย อุดรธานี สกลนคร นครพนม มุกดาหาร และบางส่วนของประเทศลาว ส่วนแอ่งโคราชอยู่ทางตอนใต้มีพื้นที่ประมาณ 33,000 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย จังหวัดนครราชสีมา ชัยภูมิ ขอนแก่น มหาสารคาม ร้อยเอ็ด กาฬสินธุ์ ยโสธร อุบลราชธานี และทางตอนเหนือของจังหวัดบุรีรัมย์ สุรินทร์ และศรีสะเกษ (นเรศ สัตยารักษ์ และทรงภพ พลจันทร์, 2533; Wongsawat et al., 1992) (รูปที่ 2.1)

Sattayarak (1983) พิทักษ์ รัตนจารุรักษ์ (2533) และ Sattayarak et al. (1998) ได้ทำการศึกษาการลำดับชุดหินในยุคมีโซโซอิก (Mesozoic) ในประเทศไทยพบว่าการตกทับถมของตะกอนยุคมีโซโซอิกในประเทศไทยมีการกระจายตัวอย่างกว้างขวางเกือบทุกภาคของประเทศ ที่พบได้ชัดเจนได้แก่ชั้นตะกอนสีแดงในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เรียกว่าชุดหินโคราช (Khorat Group) ประกอบด้วยหมวดหินห้วยหินลาด หมวดหินน้ำพอง หมวดหินภูกระดึง หมวดหินพระวิหาร หมวดหินเสาขัว หมวดหินภูพาน และหมวดหินโคกกรวด สำหรับหมวดหินมหาสารคามซึ่งประกอบด้วยเกลือหินที่มีการตกทับถมของเกลือในระดับตื้น และมีการตกตะกอนของชั้นหินดินเหนียวในช่วงที่ทะเลเปิดซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลขึ้นและลง ชั้นตะกอนสีแดงเกิดทั้งจากการทับถมของตะกอนบนพื้น



รูปที่ 2.1 แอ่งสกลนครและแอ่งโคราชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (พิทักษ์ รัตนจารุรักษ์, 2533)

ทวีป (Non-marine deposits) การทับถมของตะกอนจากลมและน้ำ (Fluvio-Eolian deposits) การทับถมของตะกอนโดยลม (Eolian deposits) และตะกอนสีแดงอายุน้อย (Younger red beds) โดยหลังจากที่มีการเกิด Indosinian orogeny II แล้วจึงเกิดการตกทับถมของชุดหินโคราช จากนั้นเกิดการยกตัวขึ้นของรอยเลื่อนเลย-เพชรบูรณ์ และทำให้เกิดการตกทับถมของหมวดหินมหาสารคาม (Maha Sarakham formation) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลทำให้เกิดชั้นสลับกับตะกอนดินเหนียว โดยหมวดหินนี้ประกอบด้วยเกลือชั้นล่าง (Lower salt) ดินเหนียวชั้นล่าง (Lower clay) เกลือชั้นกลาง (Middle salt) ดินเหนียวชั้นกลาง (Middle clay) และเกลือชั้นบน (Upper salt) ซึ่งหลุมเจาะที่ทำการศึกษานี้จะพบชั้นแอนไฮไดรต์ (Anhydrite cap) อยู่ด้านบนเกือบทุกหลุม ยกเว้นหมวดหินภูทอก (Phutok formation) ที่เกิดจากการตกทับถมโดยลมและน้ำวางทับอยู่ด้านบนหมวดหินมหาสารคามอีกชั้นหนึ่ง

บริเวณที่ราบสูงโคราชสามารถอธิบายลักษณะของหมวดหินโคราช หมวดหินมหาสารคาม และหมวดหินภูทอก โดยเรียงลำดับจากอายุแก่ที่สุดถึงอายุน้อยที่สุดได้ดังนี้

- 1) หมวดหินน้ำพอง ประกอบด้วยหินทรายและหินกรวดมนสีน้ำตาลแกมแดง ช่วงบนและล่างมีหินโคลนสลับกับหินทรายแป้ง ช่วงอายุตอนต้น Jurassic
- 2) หมวดหินภูกระดึง ประกอบด้วยหินโคลนและหินทรายแป้งสีน้ำตาลแกมแดง ช่วงอายุตอนต้น Jurassic
- 3) หมวดหินพระวิหาร ประกอบด้วยหินทรายสีขาว หินดินดานสีน้ำตาลแกมแดง และหินกรวดมน ช่วงอายุตอนกลาง Jurassic
- 4) หมวดหินเสาขัว ประกอบด้วยหินทราย หินทรายแข็ง หินโคลน และหินกรวดมนสีแดง ช่วงอายุตอนปลาย Jurassic
- 5) หมวดหินภูพาน ประกอบด้วยหินกรวดมนและหินทรายสีขาวและเทาอ่อน ช่วงอายุตอนต้น Cretaceous
- 6) หมวดหินโคกกรวด ประกอบด้วยหินทรายและหินโคลนสีน้ำตาลแกมแดง และหินกรวดมน ช่วงอายุตอนกลาง Cretaceous
- 7) หมวดหินมหาสารคาม ประกอบด้วยชั้นเกลือและชั้นตะกอนสลับกันสามกลุ่ม และมีแอนไฮไดรต์ปิดทับชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดของหมวดหินนี้ ช่วงอายุตอนปลาย Cretaceous
- 8) หมวดหินภูทอก ประกอบด้วยหินทรายสีอิฐและน้ำตาลแกมแดง หินทรายแป้งและหินโคลนสีอิฐและน้ำตาลแกมแดง ช่วงอายุตอนต้น Tertiary

จากหลุมเจาะสำรวจโพแทชที่เจาะสำรวจโดยกรมทรัพยากรธรณีระหว่างปี พ.ศ. 2516-2526 จำนวน 194 หลุม (Japakasetr and Suwanich, 1982, 1983, 1984) ซึ่งได้เจาะสำรวจทะลุชั้นเกลือลงไปจนถึงหมวดหินโคกกรวด สามารถเรียงลำดับชั้นจากหมวดหินโคกกรวดไปจนถึงชั้นบนสุดได้ดังนี้

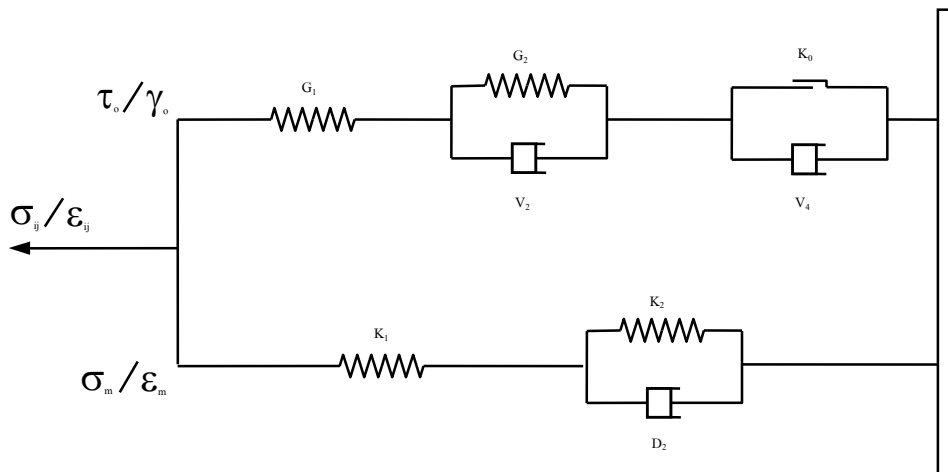
- 1) หินทรายสีน้ำตาลแดง (Red bed sandstone) หรือหินทรายแป้งสีเขียวเทา (Greenish gray siltstone) เนื้อแน่น บางแห่งมีหินดินดานสีน้ำตาลปนแดงแทรกอยู่
- 2) แอนไฮไดรต์ชั้นล่าง (Basal anhydrite) มีสีขาวถึงเทาองรับเกลือหินชั้นล่างก่อนถึงหมวดหินโคกกรวด
- 3) เกลือหินชั้นล่าง (Lower salt) เป็นชั้นเกลือที่หนาที่สุด สะอาดที่สุดและตอนล่างจะมีอินทรีย์วัตถุปนอยู่ บางพื้นที่เป็นชั้นหนามากกว่า 400 เมตร บางพื้นที่มีการก่อตัวเป็นโดมเกลือมีความหนาถึง 1,000 เมตร มีความหนาโดยเฉลี่ย 134 เมตร
- 4) โพแทช (Potash) ที่พบมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ คาร์นัลไลต์ (Carnallite - $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ส่วนมากที่พบมีสีส้ม แดง และชมพู และซิลวินต์ (Sylvinite - KCl) จะพบเป็นส่วนน้อย มีสีขาวและส้มอ่อน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคาร์นัลไลต์พบใกล้กับบริเวณโดมเกลือ และแทชชีไฮไดรต์ (Tachyhydrite - $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) มักเกิดและมีเนื้อผสมกับ คาร์นัลไลต์ มีสีส้ม ส้มเหลือง และสีเหลือง เกิดจากมีแร่แมกนีเซียมเกิดร่วมซึ่งละลายน้ำได้ง่าย
- 5) เกลือหินหลากสี (Rock salt) เป็นชั้นบางๆ มีสีแดง ส้ม น้ำตาล เทา และสีขาวใส มีความหนาโดยเฉลี่ย 3 เมตร
- 6) คลาสติกชั้นล่าง (Lower clastic) เป็นดินเหนียวและหินโคลนสีน้ำตาลแดงค่อนข้างอ่อน มีสายแร่เกลือและสายแร่คาร์นัลไลต์ปน
- 7) เกลือชั้นกลาง (Middle salt) เป็นเกลือสกปรก มีสีน้ำตาลอ่อนถึงสีควันดำ มีความหนามากกว่าเกลือชั้นบน ตอนล่างอาจมีแร่คาร์นัลไลต์หรือซิลไวต์ มีความหนาโดยเฉลี่ย 70 เมตร
- 8) คลาสติกชั้นกลาง (Middle clastic) ดินเหนียวและหินโคลนสีน้ำตาลแดง ค่อนข้างอ่อน มียิบซัม (Gypsum) สีขาวแทรก
- 9) เกลือชั้นบน (Upper salt) เป็นเกลือสกปรก มีตะกอนคาร์บอนปน สีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีควันดำหรือสีส้มเมื่อปนดินเหนียว มีความหนา 3-65 เมตร
- 10) แอนไฮไดรต์ชั้นบน (Upper anhydrite) เป็นชั้นบางๆ สีขาวถึงสีเทา
- 11) ดินเหนียวและหินดินเหนียว (Clay and claystone) สีน้ำตาลแดง บางแห่งมีหินทรายแป้งและหินทรายสีน้ำตาลแดงเกิดร่วมอยู่ด้วย
- 12) ดินตะกอนชั้นบน เป็นดินเหนียวสีเทาแกมน้ำตาลปนดินร่วน ชั้นรองลงมาเป็นดินทรายและดินเหนียวปนดินทรายสีน้ำตาล สีชมพู และสีส้ม

2.2 การคำนวณองค์ประกอบจากการลดระดับของผิวดิน

2.2.1 การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางด้านวิศวกรรมธรณีเป็นสิ่งจำเป็นในการอธิบายพฤติกรรมของเกลื้อหินรอบๆ โครงสร้างทางวิศวกรรมในเชิงกลศาสตร์ เช่น พฤติกรรมในเชิงความเค้น ความเครียด และความชื้นผ่าน เป็นต้น โดยอาศัยคุณสมบัติเชิงยืดหยุ่น ความหนืดเชิงยืดหยุ่น ความหนืดเชิงพลาสติก และความเป็นพลาสติก โปรแกรมที่ใช้ในการคาดคะเนพฤติกรรมทั้งในระยะเวลาด้านและระยะเวลายาวมีหลายโปรแกรม ในแต่ละโปรแกรมต่างก็ได้พัฒนาเพื่อให้การวิเคราะห์ง่าย สะดวก และรวดเร็ว โดยส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและใช้กฎเกณฑ์พฤติกรรมเกลื้อหินในเชิงกลศาสตร์เป็นสมการหลัก ในการคำนวณค่าคงที่ต่างๆ สามารถหาได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และในภาคสนาม ซึ่งรายละเอียดของแต่ละโปรแกรมจะไม่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้ ยกเว้นโปรแกรมที่จะนำมาใช้ในโครงการวิจัยนี้เท่านั้น

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือโปรแกรม GEO ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณจะอธิบายการเปลี่ยนรูปตามกาลเวลาและการแตกของเกลื้อหิน รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างเชิงกลศาสตร์ของสมการที่อยู่ในโปรแกรม GEO สมการและโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ได้ถูกเสนอขึ้นโดย Fuenkajorn and Serata (1992) และ Serata and Fuenkajorn (1993)



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบทางฟิสิกส์ในโปรแกรม GEO เพื่อใช้ในการคำนวณพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเกลื้อหิน

โปรแกรม GEO จะใช้วิธี Weighted residual เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์และคำนวณพฤติกรรมของหินโดยใช้การเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลาเป็นหลัก สามารถคาดคะเนได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงในโครงสร้างธรณีวิทยาที่ซับซ้อน ทฤษฎีและโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโพรงในเกลือหินหลายแห่งในสหรัฐอเมริกาและแคนาดา โพรงเหล่านี้ได้รวมไปถึงโพรงที่ใช้เก็บของเสีย ก๊าซธรรมชาติ อากาศอัด และใช้เก็บผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมอื่นๆ ทฤษฎีนี้มีความน่าเชื่อถือมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำมาคาดคะเนพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของเกลือหินในอนาคตอันยาวนาน ค่าคงที่ต่างๆ ที่แสดงให้เห็นในสมการข้างต้นก็สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม รายละเอียดและทฤษฎีของโปรแกรมนี้สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Fuenkajorn and Serata (1992, 1994) Serata and Fuenkajorn (1993) และ Stormont and Fuenkajorn (1994)

2.2.2 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน

Singh (1992) กล่าวว่า การลดระดับเป็นผลจากการถูกรบกวนด้วยความเค้นภายนอก ซึ่งความเค้นที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลกับการเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนตัวของชั้นดินหรือชั้นหิน ขอบเขตของการลดระดับจะขึ้นกับขนาดของความเค้นและขนาดของโพรงหรือช่องเหมืองที่จะส่งผลต่อความไม่มั่นคงสภาพ ดังนั้นการลดระดับของผิวดินจึงสามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนตัวใต้ดินที่เกิดจากการถล่มในโพรงใต้ดิน การลดระดับของผิวดินโดยทั่วไปจะนำมาซึ่งการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและการเคลื่อนที่ด้านข้าง

การลดระดับของผิวดินเกิดได้ 3 แบบ คือ

- 1) มีรอยแตก ร่องแยก หรือระดับของการแตก
- 2) บ่อหรือหลุมยุบ
- 3) เกิดเป็นแอ่งน้ำหรือเป็นรูปท้องช้าง

การแตกของผิวดินอาจจะอยู่ในรูปแบบของการเปิดรอยแตก ระดับการเลื่อนไถล หรือโพรงที่อยู่ใบบ่อ และผลสะท้อนของความเค้นดึงและความเค้นเฉือนใต้ดิน

การคำนวณด้วย Profile function มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณที่มีการลดระดับของผิวดิน ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical displacement) และแนวนอน (Horizontal displacement) ความลาดชัน (Slope) ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง (Vertical strain) และความโค้งตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical curvature) ข้อมูลที่ต้องกรอกเข้าไปในสมการประกอบการลดระดับสูงสุด (S_{max}) ความลึกของโพรง (D) มุมที่วัดจากขอบโพรงถึงขอบเขตการลดระดับ (Angle of draw, γ) ระยะทางในแนวราบ (x) Arbitrary constant (c) ค่าคงที่ (b) และรัศมีสูงสุดของพื้นที่โพรง (B)

การคำนวณการลดระดับด้วย Profile function

$$S(x) = \frac{1}{2} S_{\max} \left[1 - \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right]$$

การคำนวณความชัน

$$G(x) = S'(x) = -\frac{1}{2} S_{\max} \frac{c}{B} \operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right)$$

การคำนวณค่าส่วนโค้ง

$$\rho(x) = S''(x) = S_{\max} \frac{c^2}{B^2} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right]$$

การคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวนอน

$$u(x) = -\frac{1}{2} S_{\max} \frac{bc}{B} \operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right)$$

การคำนวณความเครียดในแนวนอน

$$\varepsilon(x) = S_{\max} \frac{bc^2}{B^2} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right]$$

2.2.3 การประเมินการกระจายตัวจากการลดระดับของผิวดิน

โปรแกรม SALT_SUBSID ถูกพัฒนาโดยบริษัท RE/SPEC Inc. เพื่อมอบให้กับ Solution Mining Institute สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของผิวดินที่อยู่เหนือโพรงละลายหรือเหมืองใต้ดินในชั้นเกลือ โพแทช และถ่านหิน โปรแกรมนี้ยังใช้วิเคราะห์การลดระดับของผิวดินในเชิงเวลาด้วย ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดระดับและอัตราการลดระดับกับเวลา ภาพตัดขวางแสดงการลดระดับและอัตราการลดระดับ เส้นชั้นการลดระดับและอัตราการลดระดับ ทั้งนี้ โปรแกรมดังกล่าวสามารถใส่ข้อมูลการลดระดับที่วัดได้จริงในภาคสนามเพื่อแสดงผลเปรียบเทียบกับ การคำนวณด้วยโปรแกรม

ค่าคงที่ที่ป้อนให้กับโปรแกรมสำหรับการคำนวณประกอบด้วย Y_{ss} , Y_0 และ β (สำหรับเหมืองละลาย) และ Y_0 , β และ N (สำหรับเหมืองแบบแห้ง) สำหรับตัวแปรที่บ่งชี้ค่าการลดระดับสูงสุด ได้แก่ Y_{ss} และ Y_0 ส่วนค่า β และ N เป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวกับพฤติกรรมในเชิงเวลาของการลดระดับ การลดระดับที่ตำแหน่งใดๆ บนพื้นผิวที่ขึ้นกับเวลา $Z(x, y, t)$ มีสมการทั่วไปดังนี้

$$Z(x, y, t) = Z_u(x, y) \cdot G(t)$$

$$G(t) = Y_{ss} \cdot t + Y_0[1 - \exp(-\beta E^N t)] \text{ และ}$$

$$G(t) = 1 \text{ ถ้า } Y_{ss} \cdot t + Y_0[1 - \exp(-\beta E^N t)] > 1$$

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดระดับของผิวดิน

Shahriar (2009) และคณะได้ศึกษาและคาดคะเนการลดระดับบนผิวดินที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดินที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างที่อยู่บนผิวดิน ซึ่งการลดระดับที่เกิดจากการทำเหมืองที่มีช่องเหมืองต้น 2 ช่อง ในชั้นถ่านหินที่มีการเอียงตัวสามารถคาดคะเนการลดระดับด้วยโปรแกรม Finite difference method (FLAC 3D) การคาดคะเนลักษณะการลดระดับจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดจริงและค่าจากการคำนวณด้วย Profile function สำหรับการวิเคราะห์จากค่าตัวแปรต่างๆ สามารถระบุตำแหน่งของการลดระดับสูงสุดบนผิวดิน โดยอัตราส่วนความกว้าง (W) ต่อความลึก (H) ที่จุดวิกฤต (W/H) จะมีค่าระหว่าง 1.0 ถึง 1.4

Asadi (2005) และคณะได้ศึกษาการลดระดับที่เกิดจากการทำเหมืองใต้ดิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างที่อยู่บนผิวดินในพื้นที่ของเหมือง การคาดคะเนการลดระดับบนผิวดินในชั้นถ่านหินที่มีการเอียงตัวและมีความชันมากไม่นิยมเท่ากับการคาดคะเนการลดระดับของชั้นถ่านหินที่อยู่ในแนวระนาบ เนื่องจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัวสูงทำได้ยาก ทำให้มีการพัฒนาวิธีการคำนวณหรือการคาดคะเนการลดระดับที่เกิดจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัวจึงมีน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการคำนวณด้วย Profile function แบบใหม่ที่ใช้สำหรับคาดคะเนการลดระดับที่เกิดจากการทำเหมืองในสายแร่ที่มีการเอียงตัว โดยผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยวิธีใหม่นี้จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดในภาคสนาม

Aracheeploha (2009) ได้ศึกษาการคาดคะเนลักษณะของโพรงเกลือใต้ดินโดยใช้ข้อมูลการลดระดับบนผิวดิน ซึ่งข้อมูลการลดระดับบนผิวดินได้มาจากการจำลองการลดระดับด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLAC แล้วนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของการลดระดับ อาทิ ค่าการลดระดับสูงสุด (S_{max}) ค่าความลาดชันสูงสุด (G) กับขนาดความลึกของโพรงเกลือ (d) เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเกลือ (w) การยุบตัวของหลังคาโพรง (R_s) และขอบเขตของการลดระดับ (B) ซึ่งผลลัพธ์จะได้สมการที่ใช้สำหรับคำนวณรูปร่างของโพรงเกลือที่อยู่ใต้ดิน

Thongprapha and Fuenkajorn (2013) ได้ศึกษาผลกระทบด้านความหนาของชั้นหินกดทับและขอบเขตของช่องเปิดใต้ดินที่มีผลต่อค่า Angle of draw จากการลดระดับของพื้นผิว โดยได้ใช้เม็ดกรวดสะอาดขนาด (2.0-9.5 mm) จำลองเป็นชั้นหินกดทับ ผลที่ได้ระบุว่า ค่า Angle of draw จะขึ้นกับความกว้าง ความยาว ความสูง และความลึกของช่องเปิดใต้ดิน ซึ่งค่า Angle of draw จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้นหินกดทับเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่ออัตราส่วนระหว่าง $D/W=3$ และที่ภายใต้ความลึกและความยาวของช่องเปิดใต้ดินเดียวกัน การลดลงของอัตราส่วน B_s/W จาก 0.1 ไปยัง 0.05 จะส่งผลให้ค่า Angle of draw ลดลง เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลที่ได้จากการคำนวณ PFC ให้ผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดี

Alejano และคณะ (1999) ได้ศึกษาการลดระดับบนผิวดินที่เกิดจากโครงสร้างของชั้นถ่านหินที่มีการเอียงตัวที่แตกต่างกันมากในบริเวณรอยต่อของถ่านหิน โดยมีลักษณะการเอียงแบบเกือบแบนราบ และเอียงมากเกือบตั้งฉาก ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เกิดการลดระดับ โดยในขั้นแรกของการคาดคะเนใช้วิธีการจำแนกลักษณะทางกายภาพ และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยนี้มีการคำนวณโดยใช้ Profile function และ influence function หรือ Physical model และคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLAC ที่อยู่บนพื้นฐานของการคำนวณแบบ Finite Difference Method (FDM) ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยกระบวนการดังกล่าวทำให้ทราบถึงเหตุผลของการลดระดับที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการเอียงตัวที่ไม่เท่ากันของชั้นถ่านหิน

มีทฤษฎีและสมการควบคุมต่างๆ มากมายที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อคาดคะเนลักษณะการลดระดับที่เกิดขึ้นบนผิวดินที่เป็นผลมาจากการทำเหมืองใต้ดินซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Nieland (1991); Shu and Bhattacharyya (1993) และ Cui et al. (2000)

บทที่ 3

กลยุทธ์และแนวทางการดำเนินงาน

ข้อมูลและหลักการที่ใช้ประกอบในการวางแผนแม่บทฉบับนี้ ได้มาจากการศึกษาการลดระดับของผิวดิน ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติและพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเหมืองใต้ดิน ทั้งในภาคสนาม และในห้องปฏิบัติการของการลดระดับของผิวดินจากตัวอย่างจริง ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4 กลยุทธ์ และแนวทางที่เสนอในบทนี้ เป็นข้อปฏิบัติหลักที่ไม่เจาะจงเกี่ยวกับปริมาณเชิงตัวเลข เพื่อให้เหมืองแร่ อื่นๆ สามารถปรับใช้ได้เหมาะสม ซึ่งประกอบด้วย 6 กลยุทธ์สำคัญ ได้แก่

3.1 การสำรวจภาคสนามและการทดสอบเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ

แนวทางและหลักการ

- 1) การเก็บตัวอย่างหิน มีการเก็บตัวอย่างหินที่ได้จากการทำเหมืองและหินบริเวณใกล้เคียงเพื่อนำไปตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ
- 2) การทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหินในห้องปฏิบัติการมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่สนใจอย่างถูกต้องสำหรับนำไปใช้ประโยชน์หลายด้าน อาทิ ใช้ประเมินเสถียรภาพของมวลหินภายใต้กิจกรรมต่างๆ ทางด้านวิศวกรรม

การปฏิบัติงาน

- 1) การเก็บตัวอย่างหินควรคำนึงถึงการนำไปใช้งานและควรเก็บจากตำแหน่งการทำเหมืองในสภาพแวดล้อมจริงเพื่อนำไปตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหิน
- 2) การทดสอบหินในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหิน เช่น ความต้านแรงกดสูงสุด ความต้านแรงดึงสูงสุด และความยืดหยุ่นของหิน ไปจนถึงการหาคุณสมบัติของหินภายใต้สภาวะที่ซับซ้อน เช่น ผลกระทบของอุณหภูมิ แรงดันน้ำ ขนาด อัตราการกด เป็นต้น

3.2 การคำนวณองค์ประกอบจากการลดระดับของผิวดิน

แนวทางและหลักการ

- 1) Singh (1992) เสนอแนวทางการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากองค์ประกอบการลดระดับของผิวดินเพื่อใช้กำหนดผลกระทบต่อโครงสร้างบนผิวดินประกอบด้วย อาคาร สะพาน ถนน เสไฟฟ้าแรงสูง ทางรถไฟ ท่อส่งน้ำ พื้นที่เกษตรกรรม และแหล่งน้ำใต้ผิวดิน
- 2) องค์ประกอบการลดระดับของผิวดินเหล่านี้สามารถคำนวณด้วยสมการที่หลากหลาย แต่สมการที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางและให้ผลในเชิงอนุรักษ์คือ Hyperbolic profile function

- 3) ผลที่ได้จากการคำนวณถูกนำมาเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสากลที่เสนอโดย Singh (1992) โดยการศึกษาจะเน้นไปที่ อาคาร สะพาน ทางรถไฟ พื้นที่เกษตรกรรม และแหล่งน้ำใต้ดิน

การปฏิบัติงาน

- 1) คำนวณค่าการลดระดับสูงสุดของผิวดิน (S_{max}) ที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, 2012)
- 2) คำนวณองค์ประกอบการลดระดับของผิวดินที่นำเสนอโดย Singh ประกอบด้วย การเอียงตัวของผิวดิน ความโค้งของผิวดิน การเคลื่อนตัวในแนวระนาบ และความเครียดในแนวระนาบตามระยะทาง (x)
- 3) การคำนวณองค์ประกอบการลดระดับของผิวดินจะใช้ค่าการลดระดับสูงสุดของผิวดิน (S_{max}) ความลึกของช่องเหมือง (D) และคุณลักษณะของชั้นหินสำหรับใช้ประเมินขอบเขตหรือบริเวณการลดระดับของผิวดิน (B)
- 4) ผลการคำนวณที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ๆ หนึ่งเพื่อกำหนดระดับหรือความรุนแรงของการลดระดับของผิวดินต่อโครงสร้างบนผิวดิน

3.3 การประเมินการกระจายตัวจากการลดระดับของผิวดิน

แนวทางและหลักการ

- 1) โปรแกรม SALT_SUBSID ใช้สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของผิวดินที่อยู่เหนือโพรงละลายหรือเหมืองใต้ดินในชั้นเกลือ โพแทช และถ่านหิน โปรแกรมนี้ยังใช้วิเคราะห์การลดระดับของผิวดินในเชิงเวลาด้วย
- 2) ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดระดับและอัตราการลดระดับกับเวลา ภาพตัดขวางแสดงการลดระดับและอัตราการลดระดับ เส้นชั้นการลดระดับและอัตราการลดระดับ ทั้งนี้ โปรแกรมดังกล่าวสามารถใส่ข้อมูลการลดระดับที่วัดได้จริงในภาคสนามเพื่อแสดงผลเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณด้วยโปรแกรม
- 3) เส้นชั้นการลดระดับของผิวดินจะถูกนำไปซ้อนทับกับแผนที่และภาพถ่ายทางอากาศซึ่งจะมีประโยชน์ในการกำหนดตำแหน่งของจุดที่จะติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือตรวจสอบการลดระดับของผิวดิน

การปฏิบัติงาน

- 1) ค่าที่ใช้คำนวณประกอบด้วย Y_{ss} , Y_0 และ β (สำหรับเหมืองละลาย) และ Y_0 , β และ N (สำหรับเหมืองแบบแห้ง) ตัวแปรที่บ่งชี้ค่าการลดระดับสูงสุดได้แก่ Y_{ss} และ Y_0 ส่วนค่า β และ N เป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวกับพฤติกรรมในเชิงเวลาของการลดระดับ การลดระดับที่ตำแหน่งใดๆ บนพื้นผิวที่ขึ้นกับเวลา $Z(x, y, t)$
- 2) ค่าปัจจัยที่ได้จากซอฟต์แวร์ SALT_SUBSID จะถูกสอบเทียบจากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, 2012)
- 3) การกระจายตัวจากการลดระดับของผิวดินจะต้องตรวจวัดเป็นประจำทุกปีไปจนถึงสิ้นสุดการทำเหมือง

3.4 การสำรวจภาคสนามครั้งที่ 2 และกำหนดพื้นที่อ่อนไหว

แนวทางและหลักการ

เก็บรวบรวมข้อมูลในสภาพปัจจุบันทั้งตำแหน่งที่ตั้งและลักษณะทางกายภาพของสิ่งปลูกสร้างพื้นที่สาธารณประโยชน์ แหล่งน้ำ เสาไฟฟ้า ทางรถไฟ และถนนที่ปรากฏในพื้นที่ขอบเขตประทานบัตร

การปฏิบัติงาน

- 1) สำรวจพื้นที่ในขอบเขตประทานบัตรและบริเวณโดยรอบในรัศมี 1 กิโลเมตร จากขอบเขตประทานบัตร โดยทำการสำรวจพื้นที่หมู่บ้าน พื้นที่สาธารณประโยชน์ แหล่งน้ำและสิ่งปลูกสร้างต่างๆ
- 2) กำหนดพื้นที่อ่อนไหวในบริเวณพื้นที่ประทานบัตร ซึ่งเป็นโครงสร้างสำคัญในพื้นที่ เช่น เขื่อน บ่อน้ำขนาดใหญ่ โบราณสถาน วัด โรงเรียน เป็นต้น
- 3) นำพิกัดของจุดอ่อนไหวมาเปรียบเทียบกับเส้นชั้นการลดระดับของผิวดิน เพื่อระบุบริเวณที่จะได้รับผลกระทบจากการลดระดับของผิวดิน

3.5 การศึกษาผลกระทบจากการลดระดับของผิวดินต่อภูมิประเทศ

แนวทางและหลักการ

- 1) เปรียบเทียบการลดระดับของผิวดินภายหลังการทำเหมืองกับข้อมูลภูมิประเทศต่างๆ เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าการทำเหมืองจะไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเกินกว่าที่กำหนดไว้
- 2) องค์ประกอบที่พิจารณา 3 ประการ คือ ผลกระทบต่อระดับผิวดิน ถนน และการไหลของทางน้ำ

- 3) นำข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม ข้อมูลแบบจำลองระดับสูงเชิงตัวเลข (DEM) และข้อมูลจากระบบ GIS มาประกอบในการศึกษา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกซ้อนทับกับเส้นชั้นความสูงของการลดระดับของผิวดิน เพื่อใช้แสดงผลและเปรียบเทียบลักษณะภูมิประเทศหลังจากสิ้นสุดการทำเหมือง

การปฏิบัติงาน

- 1) เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงลักษณะภูมิประเทศภายหลังจะดำเนินการหลังจากสิ้นสุดการทำเหมือง โดยการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและแบบจำลองระดับสูงเชิงตัวเลข (DEM: Digital Elevation Model) มาประกอบในการศึกษาเพื่อใช้เปรียบเทียบกับสภาพผิวดินปัจจุบัน ซึ่งสามารถนำมาซ้อนทับกับทางน้ำ หมู่บ้าน ทางหลวง ทางรถไฟ และการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ รวมไปถึงแนวขอบเขตประทานบัตรได้
- 2) ตรวจสอบทิศทางการไหลของทางน้ำ (ถ้ามี) โดยการลดระดับของผิวดินจะต้องไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของทางน้ำ

3.6 มาตรการควบคุม แก๊ส และเฝ้าระวังการลดระดับของผิวดิน

แนวทางและหลักการ

- 1) การค้ายันเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์ทางวิศวกรรม เช่น หมุดยึดหินหรือตาข่ายลวด สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับชั้นหินที่อยู่รอบอุโมงค์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของชั้นหินได้
- 2) คาคคเน ตรวจสอบ และวิเคราะห์คุณลักษณะการลดระดับของผิวดินจากความรู้และเทคโนโลยีล่าสุดประกอบกับประสบการณ์และทักษะที่เกี่ยวข้อง
- 3) นำเกณฑ์ที่ยอมรับเป็นมาตรฐานสากลมาใช้ในการตัดสินใจและประเมินระดับผลกระทบจากการลดระดับของผิวดินต่อสิ่งแวดล้อม
- 4) นำแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ขั้นสูงมาช่วยในการออกแบบแผนการทำเหมืองเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการณ์การลดระดับของผิวดินที่แท้จริงที่จะเกิดขึ้นในอนาคต
- 5) กำหนดความเหมาะสมเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุถมกลับรวมถึงขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการถมกลับ เพื่อให้การควบคุมการลดระดับของผิวดินเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเพื่อเสริมสร้างเสถียรภาพเชิงกลศาสตร์ของห้องและเสาค้ำยัน
- 6) ติดตั้งเครื่องมือหรืออุปกรณ์ในภาคสนามและตรวจวัดในพื้นที่เหมืองตั้งแต่ก่อนการทำเหมืองจนถึงสิ้นสุดการทำเหมือง เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์
- 7) ถ้ามีการใช้ระเบิดในการทำเหมือง คลื่นพลศาสตร์ที่เกิดจากการระเบิดจะอยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของชั้นหินหรือเกิดผลเสียหายต่อโครงสร้างทางวิศวกรรม

- 8) การเฝ้าระวังบนผิวดิน ควรติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือตรวจวัดเพื่อตรวจสอบการลดระดับของผิวดินอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ก่อนทำเหมือง ในระหว่างการทำเหมือง และหลังจากการทำเหมืองสิ้นสุดลง เพื่อให้มั่นใจว่าการลดระดับของผิวดินและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจะเป็นไปตามที่คาดคะเนไว้ และไม่มากไปกว่าเกณฑ์มาตรฐานสากล
- 9) การเฝ้าระวังใต้ดินจะต้องดำเนินการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องในระหว่างการทำเหมือง

การปฏิบัติงาน

- 1) ใช้ Grout อุดรอยแตกหรือรอยแยกของชั้นหินที่อยู่เหนือตัวเหมือง ซึ่งอาจเกิดจากการเคลื่อนตัวของชั้นหินในอัตราที่ต่างกัน
- 2) ต้องอุดช่องเปิดต่างๆ (Incline, Ventilation shaft, Exploratory borehole) ทั้งที่กำลังใช้อยู่และเลิกใช้แล้วในเวลาที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการแทรกซึมของชั้นน้ำบาดาลเข้ามาในตัวเหมือง
- 3) เจาะหลุมระบายความดัน (ถ้าจำเป็น) เพื่อลดแรงดันของน้ำเกลือหรือก๊าซที่อาจสะสมอยู่ในบริเวณหน้าเหมือง
- 4) การเฝ้าระวังบนดินควรมีการติดตั้ง Tilt meter หรือ Inclinator (เครื่องมือตรวจวัดการเอียงตัว) ซึ่งจะติดตั้งในหลุมเจาะระดับตื้นบนผิวดินในพื้นที่การทำเหมือง เครื่องมือชนิดนี้จะมีการบันทึกข้อมูลอัตโนมัติในท่อค้ำยันในหลุมเจาะ (Casing) โดยมีความถี่ของการบันทึกค่าไม่ต่ำกว่า 1 ครั้งต่อวัน เครื่องมือชนิดนี้สามารถเคลื่อนย้ายจากหลุมเจาะได้เพื่อตรวจสอบในพื้นที่วิกฤติหรือในบริเวณที่ตรงกับหน้าเหมืองที่อยู่ใต้ดิน
- 5) การเฝ้าระวังใต้ดิน อุปกรณ์ที่ควรติดตั้ง ได้แก่
 - Borehole extensometer หรือเครื่องมือวัดการยืดตัวของมวลหินในหลุมเจาะ เครื่องมือชนิดนี้จะติดตั้งในแนวตั้ง โดยเจาะหลุมเข้าไปในเพดานของอุโมงค์เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนรูปของหลังคาอุโมงค์ว่ามีการแอ่นตัวตามที่คาดคะเนไว้ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์หรือไม่ และจะติดตั้งในแนวระดับตามแนวตัดขวางของเสาค้ำยัน (Borehole) เพื่อตรวจสอบว่าเสาค้ำยันมีการบวมตัวเล็กน้อยเพียงใดและเป็นไปตามที่คาดคะเนไว้หรือไม่
 - Vibrating wire strain gauge หรืออุปกรณ์วัดความเครียดในแนวตรง เครื่องมือชนิดนี้จะติดตั้งอยู่ในผนังของทางเข้าเหมือง (Incline) เพื่อตรวจสอบการบิดตัวหรือการยืดตัว ซึ่งจะติดตั้งหลายจุดตามแนวของผนังดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่สัมพันธ์กับความลึกที่มีการเปลี่ยนแปลงของชั้นหิน

- Convergence meter หรือเครื่องมือวัดการยุบตัวของห้องอุโมงค์ การติดตั้งเครื่องมือจะถูกยึดตั้งแต่จุดกึ่งกลางของเพดานห้องลงมาถึงกึ่งกลางของพื้นห้อง การเปลี่ยนแปลงของระยะระหว่างเพดานกับพื้นห้องจะถูกตรวจสอบอย่างต่อเนื่องเพื่อยืนยันว่าอัตราและขนาดของการยุบตัวที่ได้เป็นไปตามที่คาดคะเนด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์หรือไม่
- Micro seismic detector อุปกรณ์ชุดนี้ประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณแรงสั่น สะเทือนขนาดเล็กที่มีความไวสูง (Geophone) โดยจะติดตั้งบนผิวดินบริเวณพื้นที่ทำเหมือง ในหลุมเจาะ และในอุโมงค์เหมืองใต้ดิน

บทที่ 4

ตัวอย่างการปฏิบัติงานในเมืองแรโปแตชอาเซียน จ.ชัยภูมิ

4.1 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

บริษัท เมืองแรโปแตชอาเซียน จำกัด (มหาชน) มีแผนการทำเหมืองแร่ใต้ดินที่อำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ เพื่อขุดเจาะแรโปแตช ซึ่งบริษัทฯ ได้ตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจากการทำเหมืองต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมและทรัพยากรธรรมชาติบนผิวดิน โดยผลกระทบดังกล่าวที่อาจเกิดขึ้นคือ การลดระดับของผิวดินซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติและพฤติกรรมเชิงกลศาสตร์ของเหมืองใต้ดิน ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม บริษัทฯ จึงได้มอบหมายให้หน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี (Geomechanics Research Unit - GMR) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ศึกษาการลดระดับของผิวดินของเหมืองแรโปแตชที่อำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ

4.2 กลยุทธ์และขั้นตอนการดำเนินงาน

การลดระดับของผิวดินเนื่องมาจากการทำเหมืองเกลือใต้ดินเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประการหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ความรู้ทางด้านวิชาการขั้นสูง การบริหารจัดการรูปแบบการทำเหมือง การกำหนดมาตรการเฝ้าระวังและมาตรการแก้ไขผลกระทบที่เหมาะสมจึงจำเป็นอย่างยิ่งซึ่งสามารถปฏิบัติตามกลยุทธ์ที่ได้กำหนดไว้ดังนี้

กลยุทธ์ที่ 1 การสำรวจภาคสนามและการทดสอบเชิงกลศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ

การสำรวจภาคสนามมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสภาพจริงของเหมืองและเก็บตัวอย่างหินเพื่อนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในการหาคุณสมบัติที่สนใจอย่างถูกต้องสำหรับนำไปใช้ประโยชน์หลายด้าน อาทิ ใช้ประเมินเสถียรภาพของมวลหินภายใต้กิจกรรมต่างๆ ทางด้านวิศวกรรม

การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติขั้นพื้นฐาน เช่น ความต้านแรงกดสูงสุด ความต้านแรงดึงสูงสุด และความยืดหยุ่นของหิน ไปจนถึงการหาคุณสมบัติของหินภายใต้สภาวะที่ซับซ้อน เช่น ผลกระทบของอุณหภูมิ แรงดันน้ำ ขนาด และอัตราการกด เป็นต้น

กลยุทธ์ที่ 2 การคำนวณองค์ประกอบจากการลดระดับของผิวดิน

การคำนวณองค์ประกอบจากการลดระดับของผิวดิน (Subsidence components) สามารถคำนวณได้จากค่าการลดระดับสูงสุดของผิวดินที่ได้จากรายงานการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, 2012) องค์ประกอบเหล่านี้คือ การเอียงตัวของผิวดิน ความโค้ง (การบิดตัว) ของผิวดิน ความเครียดในแนวระนาบ และการเคลื่อนตัวในแนว

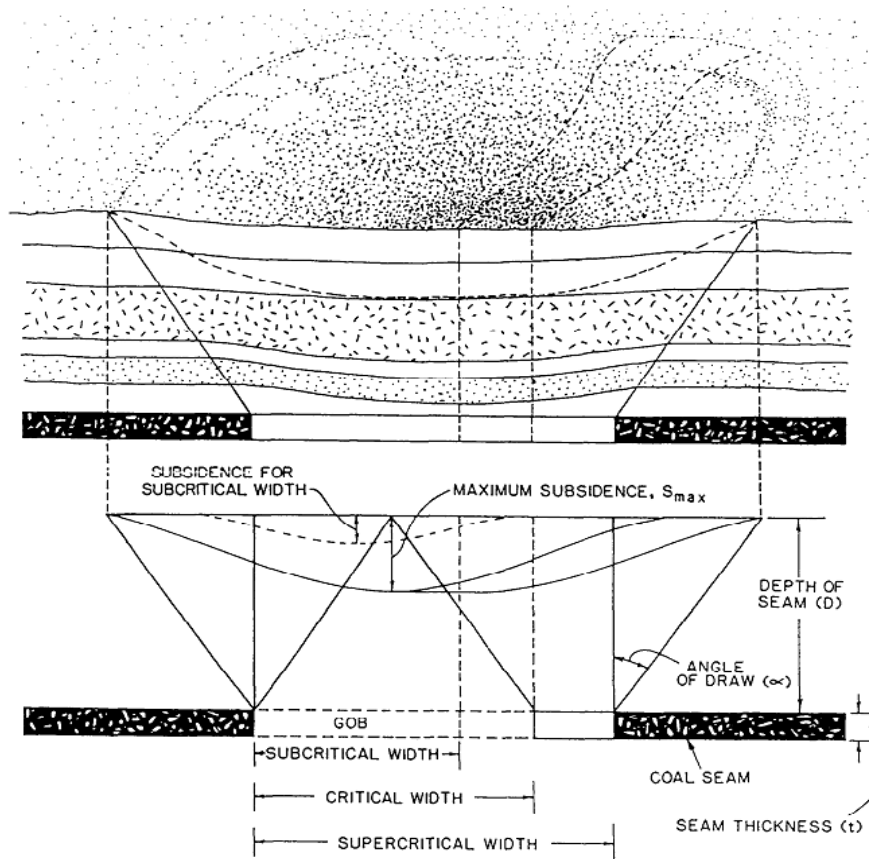
ระนาบของผิวดิน ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณได้ถูกนำมาเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสากลที่เสนอโดย Singh (1992) โดยการศึกษาการลดระดับของผิวดินนี้เน้นไปที่สิ่งปลูกสร้าง อาทิ อาคาร สะพาน ทางรถไฟ รวมไปถึงพื้นที่เกษตรกรรม และแหล่งน้ำใต้ดิน

การลดระดับของผิวดินสำหรับเหมืองใต้ดินโดยทั่วไปจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างทางวิศวกรรมและลักษณะธรรมชาติในพื้นที่เหมืองและพื้นที่ใกล้เคียง Singh (1992) ได้เสนอแนวทางการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากองค์ประกอบการลดระดับของผิวดินเพื่อใช้กำหนดว่ามีผลกระทบต่อโครงสร้างบนผิวดินหรือไม่และอย่างไร โครงสร้างเหล่านี้ประกอบด้วย อาคาร สะพาน ถนน เสาไฟฟ้าแรงสูง ทางรถไฟ ท่อส่งน้ำ พื้นที่เกษตรกรรม และแหล่งน้ำใต้ผิวดิน เป็นต้น องค์ประกอบการลดระดับของผิวดินที่ Singh นำเสนอคือ การเอียงตัวของผิวดิน $g(x)$ ความโค้งของผิวดิน $p(x)$ การเคลื่อนตัวในแนวระนาบ $\mu(x)$ และความเครียดในแนวระนาบตามระยะทาง $\varepsilon(x)$ จากขอบของแผงการผลิต การคำนวณจะใช้ค่าการลดระดับสูงสุดของผิวดิน (S_{max}) ความลึกของช่องเหมือง (D) และคุณลักษณะของชั้นหินสำหรับใช้ประเมินขอบเขตหรือบริเวณการลดระดับของผิวดิน (B) (รูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2) องค์ประกอบเหล่านี้สามารถคำนวณด้วยสมการที่หลากหลาย แต่สมการที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางและให้ผลในเชิงอนุรักษ์คือ Hyperbolic profile function ผลการคำนวณที่ได้สามารถนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ๆ หนึ่งเพื่อกำหนดระดับหรือความรุนแรงของการลดระดับของผิวดินที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างบนผิวดิน

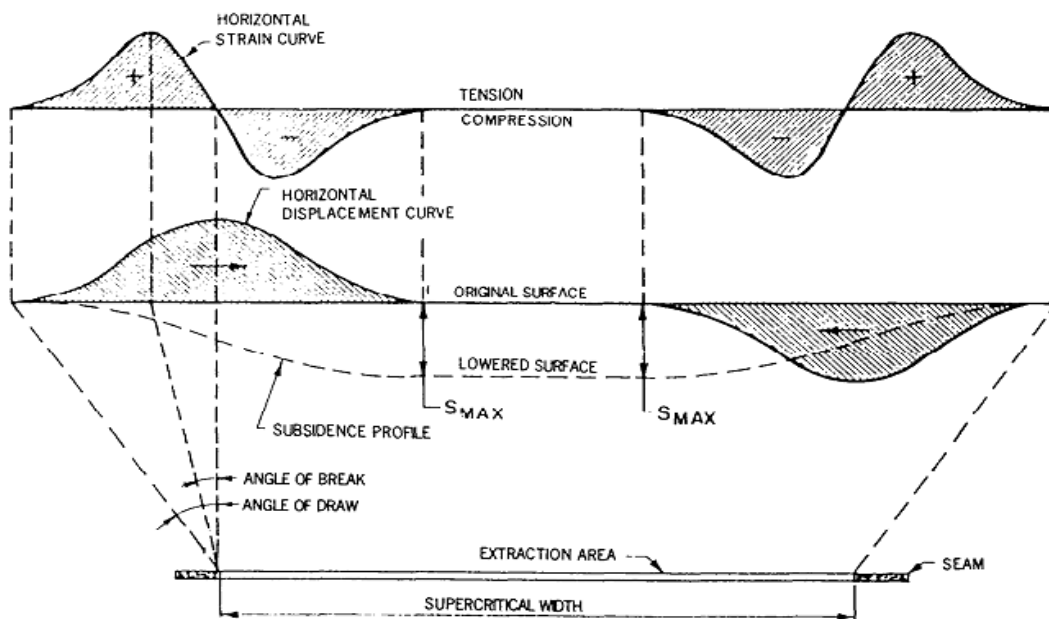
กลยุทธ์ที่ 3 การประเมินการกระจายตัวจากการลดระดับของผิวดิน

วัตถุประสงค์คือ เสนอการคาดคะเนขอบเขตการลดระดับของผิวดินในสามมิติโดยใช้ซอฟต์แวร์ SALT_SUBSID โดยผลที่ได้จะแสดงการเอียงตัวและความต่างระดับของผิวดินที่เกิดขึ้นในพื้นที่เหมืองและบริเวณโดยรอบ นอกจากนั้นเส้นชั้นของการลดระดับของผิวดินจะถูกนำไปซ้อนทับกับแผนที่และภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งจะมีประโยชน์ในการกำหนดตำแหน่งของจุดที่จะติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือตรวจสอบการลดระดับของผิวดิน

1) การคำนวณการลดระดับของผิวดิน นำซอฟต์แวร์ SALT_SUBSID ที่พัฒนาขึ้นโดย RE/SPEC (Nieland, 1991) มาใช้ในการคาดคะเนการลดระดับของผิวดินในสามมิติสำหรับการทำเหมืองแร่โปแตช ซึ่งการคำนวณนี้อยู่บนพื้นฐานของแผนผังการทำเหมืองเบื้องต้นที่ได้รับข้อมูลจากบริษัท เหมืองแร่โปแตชอาเซียน จำกัด (มหาชน) โดยจะมีการคำนวณเส้นระดับของผิวดินในพื้นที่เหมืองและพื้นที่ข้างเคียงตามลำดับ ซึ่งจะมีการคำนวณระยะเวลาการทำเหมืองและขอบเขตของพื้นที่การลดระดับสูงสุดของผิวดิน โดยค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในบริเวณของการทำเหมืองที่เริ่มจากแผงการผลิตแรก จากนั้นจะเปลี่ยนไปตามการพัฒนาและลำดับของการขุดเจาะแผงการผลิต



รูปที่ 4.1 ลักษณะของผิวดินที่มีการลดระดับเนื่องจากการเปิดช่องเหมือง



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบการลดระดับของผิวดินจากการเปิดช่องเหมืองเกินจุดวิกฤติ

ค่าปัจจัยที่สำคัญเบื้องต้นสำหรับใช้ในซอฟต์แวร์ SALT_SUBSID จะถูกสอบเทียบจากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์จากรายงานการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, 2012)

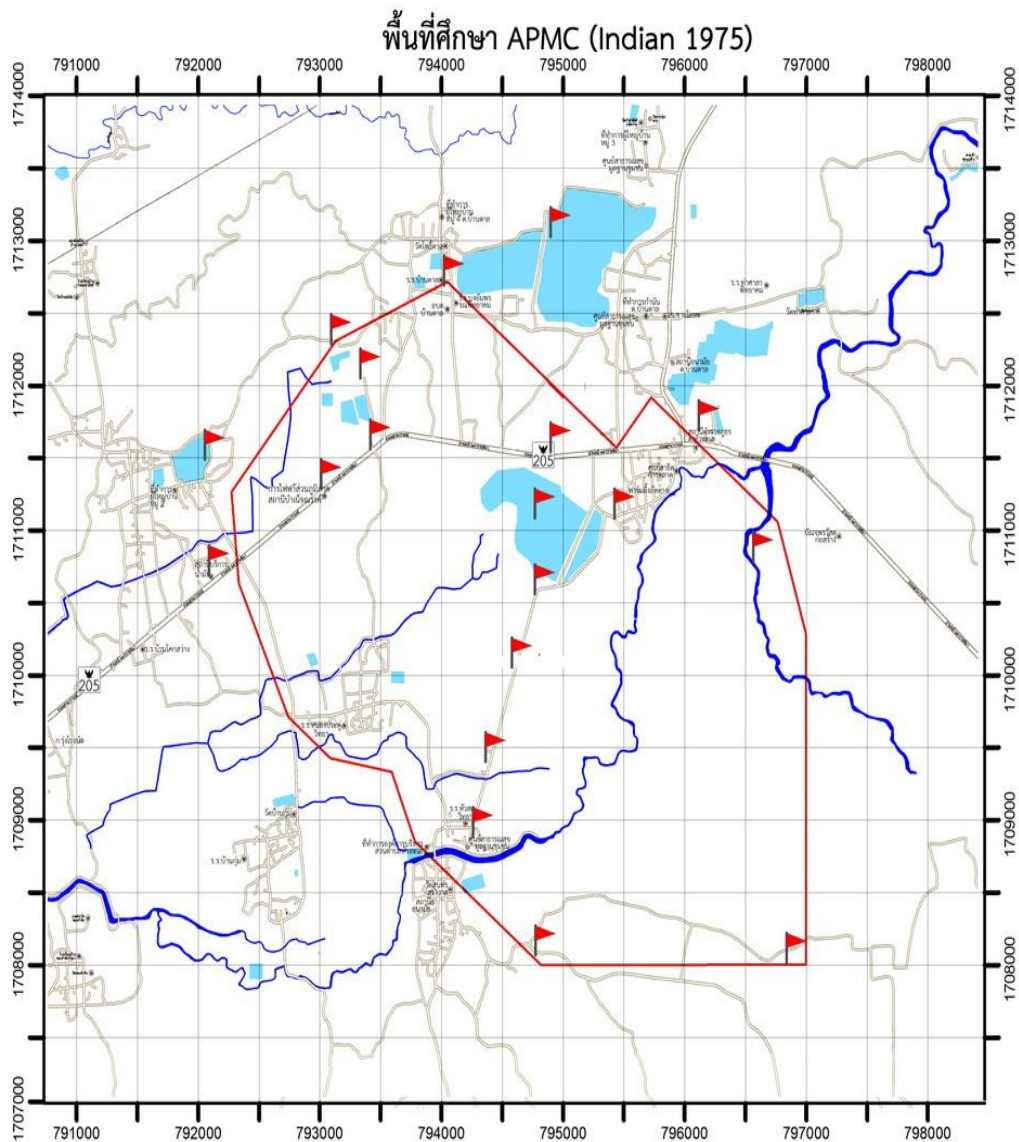
2) ผลการคำนวณการลดระดับของผิวดิน ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นถึงความสูงจากการลดระดับของผิวดินในพื้นที่เหมืองทุก 1 ปี หลังจากเริ่มดำเนินการทำเหมืองจนถึงปีที่ 50 หลังจากเสร็จสิ้นการทำเหมือง ผลการศึกษาพบว่าสอดคล้องกับผลที่คำนวณได้จากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะเห็นว่าขนาดและการแพร่กระจายการลดระดับของผิวดินจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาและตามลำดับการขุดเจาะของแผนการผลิต

กลยุทธ์ที่ 4 การสำรวจภาคสนามครั้งที่ 2 และกำหนดพื้นที่อ่อนไหว

วัตถุประสงค์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูล ณ ปัจจุบันของเหมือง ทั้งตำแหน่งที่ตั้งและลักษณะทางกายภาพของสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่สาธารณประโยชน์ แหล่งน้ำ เสาไฟฟ้า ทางรถไฟ และถนนที่ปรากฏในพื้นที่ขอบเขตประทานบัตร เพื่อใช้ในการกำหนดพื้นที่อ่อนไหวที่อาจจะได้รับผลกระทบจากการลดระดับของผิวดิน ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดจุดติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดการลดระดับของผิวดินในกลยุทธ์ต่อไป

1) การสำรวจภาคสนาม ทำการสำรวจพื้นที่ในขอบเขตประทานบัตรของบริษัทฯ และบริเวณโดยรอบในรัศมี 1 กิโลเมตร จากขอบเขตประทานบัตร โดยทำการสำรวจพื้นที่หมู่บ้าน พื้นที่สาธารณประโยชน์ แหล่งน้ำและสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ซึ่งมีตำแหน่งสำคัญทั้งหมด 19 ตำแหน่ง โดยรอบพื้นที่ประทานบัตร จากการสำรวจภาคสนามไม่ปรากฏการลดระดับของผิวดินในพื้นที่ประทานบัตรแต่อย่างใด (รูปที่ 4.3)

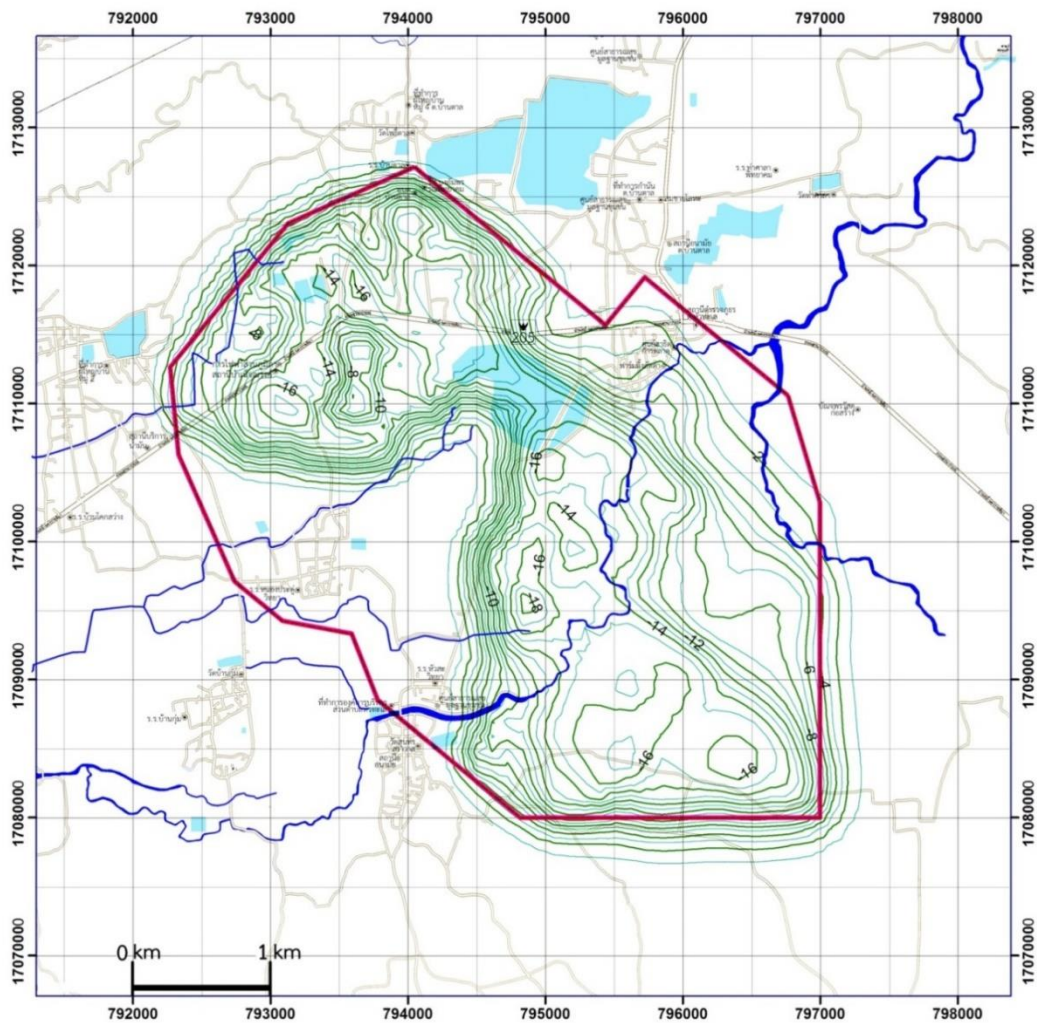
2) การกำหนดพื้นที่อ่อนไหว ผลจากการสำรวจภาคสนามสามารถกำหนดพื้นที่อ่อนไหวในบริเวณพื้นที่ประทานบัตรได้ทั้งหมด 11 พื้นที่ เมื่อนำพิกัดของจุดอ่อนไหวมาเปรียบเทียบกับเส้นชั้นการลดระดับของผิวดินสามารถระบุได้ว่าสถานีนํ้ามันโคกสว่าง สถานีตำรวจภูธรตำบลหัวทะเล และบ่อน้ำสาธารณะบ้านโคกสว่างจะไม่ได้รับผลกระทบจากการลดระดับของผิวดิน ส่วนในพื้นที่อ่อนไหวอื่นจะมีการลดระดับของผิวดินไม่เกิน 16 เซนติเมตร ซึ่งได้นำค่าองค์ประกอบของการลดระดับของผิวดินที่ได้จากการคำนวณในกลยุทธ์ที่ 2 มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ของ Singh (1992) ผลปรากฏว่าพื้นที่อ่อนไหวทั้งหมดจะไม่ได้รับผลกระทบจากการลดระดับของผิวดิน



รูปที่ 4.3 จุดสำรวจในพื้นที่ขอบเขตประทานบัตรและบริเวณโดยรอบของบริษัท เหมืองแร่โปแตช อาเซียน จำกัด (มหาชน)

กลยุทธ์ที่ 5 การศึกษาผลกระทบจากการลดระดับของผิวดินต่อภูมิประเทศ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการเปรียบเทียบการลดระดับของผิวดินภายหลังการทำเหมืองในปีที่ 50 กับข้อมูลภูมิประเทศต่างๆ เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าการทำเหมืองจะไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเกินกว่าที่กำหนดไว้ ซึ่งมีองค์ประกอบที่พิจารณา 3 ประการ คือ ผลกระทบต่อระดับผิวดิน ถนน และการไหลของทางน้ำ โดยการนำข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม ข้อมูลแบบจำลองระดับสูงเชิงตัวเลข (DEM) และข้อมูลจากระบบ GIS มาประกอบในการศึกษา ข้อมูลเหล่านี้จะถูกซ้อนทับกับเส้นชั้นความสูงของการลดระดับของผิวดิน เพื่อใช้แสดงผลและเปรียบเทียบลักษณะภูมิประเทศหลังจากสิ้นสุดการทำเหมือง (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.4 เส้นชั้นความสูงการลดระดับของผิวดินเมื่อซ้อนทับกับหมู่บ้านและสถานที่สำคัญ
(ค่าการลดระดับมีหน่วยเป็นเซนติเมตร)

กลยุทธ์ที่ 6 มาตรการควบคุม แก้ไข และเฝ้าระวังการลดระดับของผิวดิน

การกำหนดมาตรการป้องกัน แก้ไข และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อให้การดำเนินการทำเหมืองแร่ใต้ดินของทางบริษัทฯ เป็นไปตามแผนที่วางไว้ มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

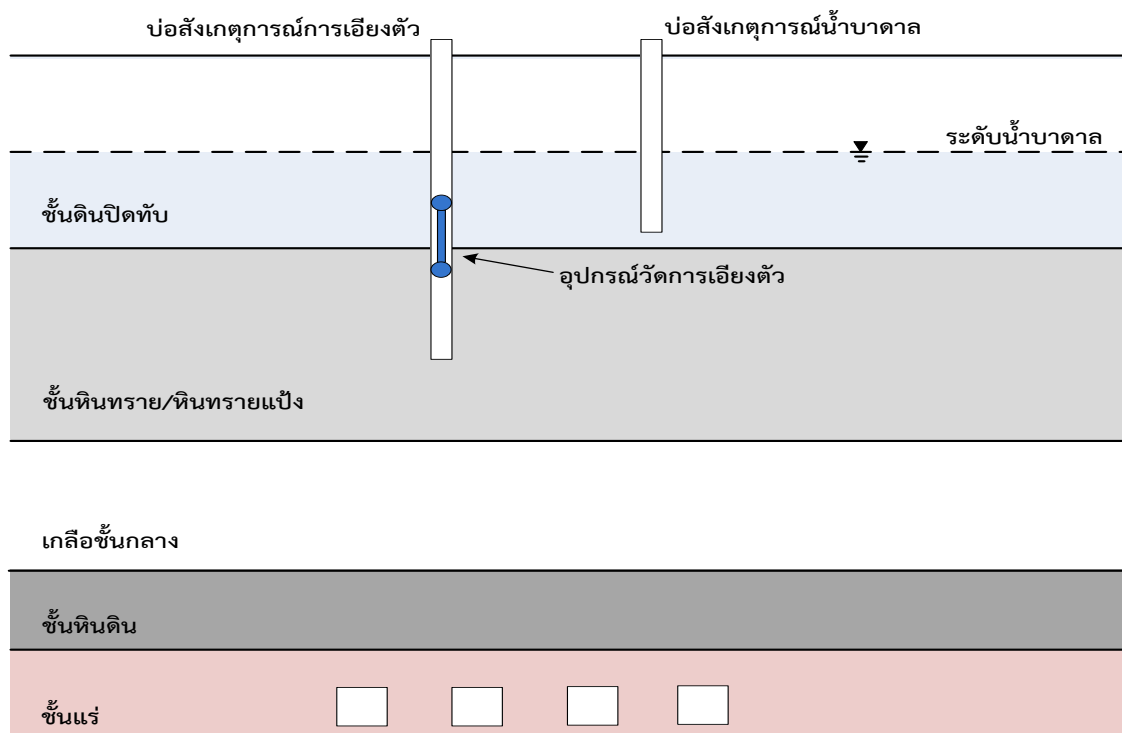
- 1) เพื่อกำหนดแผน มาตรการป้องกันและแก้ไขในการลดผลกระทบที่อาจเกิดจากการลดระดับของผิวดิน
- 2) กำหนดตำแหน่งสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เฝ้าระวังบนผิวดินและใต้ดินเพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบความสอดคล้องกับคุณลักษณะการลดระดับของผิวดิน (ด้านการเอียงตัว) ที่คำนวณไว้ในกลยุทธ์ที่ 2
- 3) กำหนดแนวทางแก้ไขในกรณีที่มีการลดระดับของผิวดินมีแนวโน้มไม่เป็นไปตามแผนหรือค่าที่คำนวณไว้

มาตรการเฝ้าระวังผลกระทบจากการทำเหมืองใต้ดิน

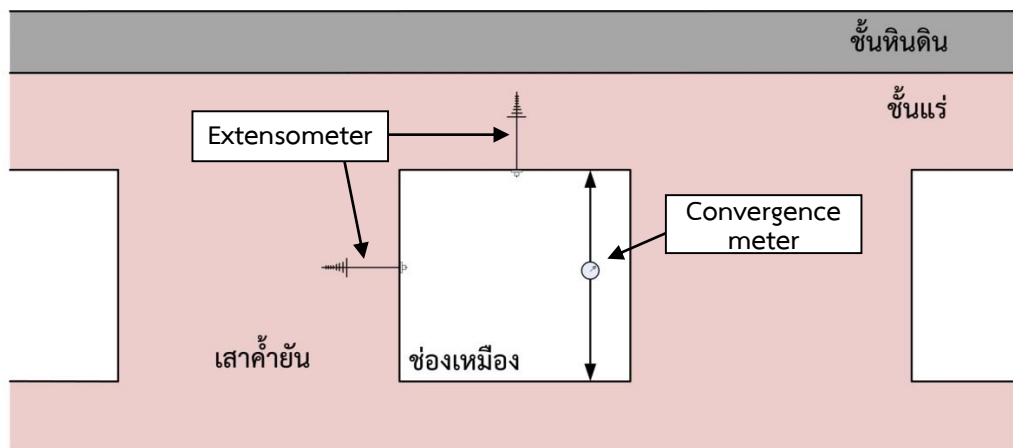
1) การเฝ้าระวังบนผิวดิน ทางบริษัทฯ ควรติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือตรวจวัดเพื่อตรวจสอบการลดระดับของผิวดินอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ก่อนทำเหมือง ในระหว่างการทำเหมือง และหลังจากการทำเหมืองสิ้นสุดลง เพื่อให้มั่นใจว่าการลดระดับของผิวดินและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจะเป็นไปตามที่คาดคะเนไว้ และไม่มากไปกว่าเกณฑ์มาตรฐานสากล เทคนิคและอุปกรณ์ดังกล่าวอาจประกอบด้วย การติดตั้ง Tiltmeter หรือ Inclinator (เครื่องมือตรวจวัดการเอียงตัว) ซึ่งจะติดตั้งในหลุมเจาะระดับตื้นบนผิวดินในพื้นที่การทำเหมือง (รูปที่ 4.5)

2) การเฝ้าระวังใต้ดิน อุปกรณ์และการตรวจวัดใต้ดินเป็นสิ่งสำคัญ การตรวจวัดจะต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องในระหว่างการทำเหมือง อุปกรณ์ที่ทางบริษัทฯ ควรติดตั้งได้แก่

- Borehole extensometer หรือเครื่องมือวัดการยืดตัวของมวลหินในหลุมเจาะ เครื่องมือชนิดนี้จะติดตั้งในแนวตั้ง โดยเจาะหลุมเข้าไปในเพดานของอุโมงค์เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนรูปของหลังคาอุโมงค์ว่ามีการแอ่นตัวตามที่คาดคะเนไว้ด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์หรือไม่ (รูปที่ 4.6) และติดตั้งในแนวระดับตามแนวตัดขวางของเสาค้ำยัน (Borehole) เพื่อตรวจสอบว่าเสาค้ำยันมีการบวมตัวเล็กน้อยเพียงใดและเป็นไปตามที่คาดคะเนไว้หรือไม่ เครื่องมือที่ตรวจวัดลักษณะนี้จะติดตั้งอย่างถาวรและสามารถอ่านค่าได้อัตโนมัติ ตัวอย่างจริงของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.7
- Vibrating wire strain gauge หรืออุปกรณ์วัดความเครียดในแนวตรง เครื่องมือชนิดนี้จะติดตั้งอยู่ในผนังของทางเข้าเหมือง (Incline) เพื่อตรวจสอบการบิดตัวหรือการยืดตัวอัตโนมัติ ซึ่งจะติดตั้งหลายจุดตามแนวของผนัง รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างจริงของอุปกรณ์
- Convergence meter หรือเครื่องมือวัดการยุบตัวของห้องอุโมงค์ การติดตั้งเครื่องมือจะถูกยึดตั้งแต่จุดกึ่งกลางของเพดานห้องลงมาถึงกึ่งกลางของพื้นห้อง การเปลี่ยนแปลงของระยะระหว่างเพดานกับพื้นห้องจะถูกตรวจสอบอย่างต่อเนื่องเพื่อยืนยันว่าอัตราและขนาดของการยุบตัวเป็นไปตามที่คาดคะเนด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์หรือไม่ ซึ่งแผนการตรวจสอบจะเหมือนกับเครื่อง Borehole extensometer รูปที่ 4.9 ตัวอย่างจริงของอุปกรณ์



รูปที่ 4.5 รูปแบบและวิธีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเอียงตัวและบ่อสังเกตการณ์



รูปที่ 4.6 รูปแบบและวิธีการติดตั้งเครื่องมือวัดการยืดตัวของมวลหิน และเครื่องมือวัดการยุบตัวของห้องอุโมงค์



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างอุปกรณ์ Borehole extensometer (<http://www.rstinstruments.com>)

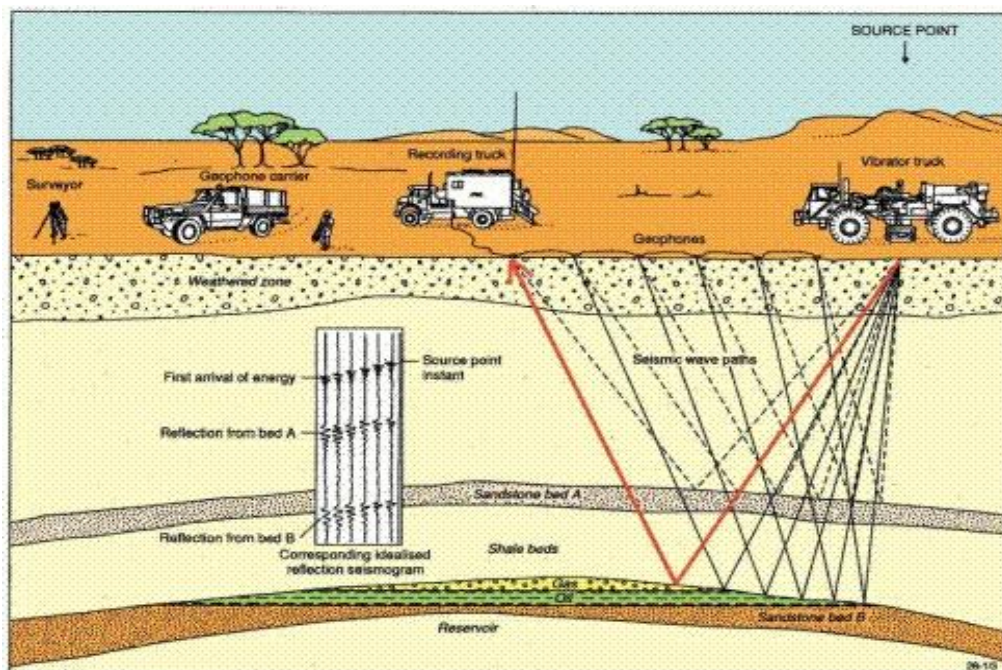


รูปที่ 4.8 ตัวอย่างอุปกรณ์ Vibrating wire strain gauge (<http://www.rstinstruments.com/>)



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างอุปกรณ์ Convergence meter (<http://www.geokon.com/convergence-meters>)

- Microseismic detector อุปกรณ์ชุดนี้ประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณแรงสั่นสะเทือนขนาดเล็กที่มีความไวสูง (Geophone) โดยจะติดตั้งบนผิวดินบริเวณพื้นที่ทำเหมือง ในหลุมเจาะ และในอุโมงค์เหมืองใต้ดิน ซึ่งมีสายสัญญาณต่อเข้ากับตัวรับสัญญาณเพื่อสร้างเครือข่ายของการรับความสั่นสะเทือนในพื้นที่ โดยเครื่องมือนี้จะทำการตรวจวัดอย่างต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบความสั่นสะเทือน ซึ่งอาจมีค่าเพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวหรือการแตกร้าวของชั้นหิน หลังคาอุโมงค์และเสาค้ำยัน (รูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างอุปกรณ์ Microseismic detector (<http://www.made-in-china.com>)

ตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์

ตำแหน่งโดยสังเขปของเครื่องตรวจวัด Inclinator (รูปที่ 4.1) ที่ติดตั้งในหลุมเจาะ (Borehole) จำนวน 16 หลุม เพื่อตรวจวัดค่าการเอียงตัว และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งโดยสังเขปของการติดตั้งเครื่องตรวจวัด Inclinator

ลำดับที่	สถานที่	พิกัด	ข้อมูล
1	บริเวณทางลงอุโมงค์	47P 0793334 UTM 1712224	ห่างจากทางลงอุโมงค์ประมาณ 30 เมตร
2	ทางแยกเข้าสำนักงานของบริษัทฯ	47P 0793441 UTM 1711617	ทางแยกจากถนนหลวงหมายเลข 205
3	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สถานีไฟฟ้าแรงสูง บำเหน็จณรงค์	47P 0793087 UTM 1711311	อาคารซีเมนต์ 2 ชั้น ตั้งอยู่ติดกับ ถนนหลวงหมายเลข 205
4	สถานีน้ำมันโคกสว่าง	47P 0792250 UTM 1710821	ตั้งอยู่ติดกับถนนหลวงหมายเลข 205
5	บ่อน้ำสาธารณะบ้านโคกสว่าง	47P 0792178 UTM 1711408	พื้นที่บริเวณทิศด้านตะวันตกของ ขอบเขตประทานบัตร
6	พื้นที่ประทานบัตรด้านทิศตะวันตก เฉียงเหนือ	47P 0793261 UTM 1712323	เป็นพื้นที่นาข้าว
7	องค์การบริหารส่วนตำบลบ้านตาล	47P 0794073 UTM 1712662	อาคารก่ออิฐ 2 ชั้น
8	รตามณี รีสอร์ท	47P 0794866 UTM 1711500	ตั้งอยู่ติดกับถนนหลวงหมายเลข 205 เป็นอาคารไม้ 1 ชั้น
9	สถานีตำรวจภูธร ตำบลหัวทะเล	47P 0796135 UTM 1711566	เป็นอาคารก่ออิฐและอาคารไม้ 2 ชั้น
10	วัดหัวทะเล	47P 0795724 UTM 1711059	เป็นอาคารก่ออิฐ 2 ชั้น
11	พื้นที่ด้านทิศตะวันตกของบึงทะเล สีดอ	47P 0794764 UTM 1710588	เป็นถนนดิน
12	ถนนซีเมนต์กลางพื้นที่ประทานบัตร	47P 0794701 UTM 1710187	เป็นพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งโดยสังเขปของการติดตั้งเครื่องตรวจวัด Inclinator (ต่อ)

ลำดับที่	สถานที่	พิกัด	ข้อมูล
13	คลองห้วยโอบ	47P 0794373 UTM 1718818	คลองสาธารณะ
14	พื้นที่สามแยกด้านทิศใต้ของพื้นที่ ประเทานบัตร	47P 0795280 UTM 1717865	เป็นพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง
15	พื้นที่สามแยกด้านทิศตะวันออก เฉียงใต้ของพื้นที่ประเทานบัตร	47P 0796738 UTM 1718038	เป็นพื้นที่ไร่ข้าวโพด
16	คลองโอบ	47P 0796509 UTM 1710886	เป็นพื้นที่ราบลุ่มและนาข้าว

บทที่ 5

สรุปแนวทางแผนแม่บท

แผนแม่บทฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานสำหรับลดผลกระทบการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน ตามประเด็นยุทธศาสตร์ที่ได้กำหนดไว้ในตอนต้น 4 ประการ คือ การตรวจสอบและวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยและสาเหตุการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน วิธีการคำนวณการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน ประเมินผลกระทบจากการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน และกำหนดมาตรการป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน ซึ่งผู้ประกอบการเหมืองสามารถนำไปใช้ได้จริง สอดคล้องกับแผนงานวิจัยกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2555-2559)

ภารกิจหลักที่แผนแม่บทฉบับนี้นำเสนอคือ การประเมินและลดผลกระทบจากการลดระดับของผิวดินอันเนื่องมาจากการทำเหมืองเกลือหินใต้ดิน รวมไปถึงการร่างขั้นตอนการศึกษา วิธีการคำนวณการลดระดับของผิวดิน วิธีการประเมินผล และการแปลงแผนแม่บทไปสู่การปฏิบัติจริงเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการลดระดับของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือใต้ดิน

ก่อนที่จะมีการจัดทำแผนแม่บทฉบับนี้ ผู้จัดทำได้ทำการศึกษาจริงจากตัวอย่างเหมืองเกลือหินใต้ดิน เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสม ไม่ซับซ้อน และประหยัดค่าใช้จ่ายในการลดผลกระทบจากการลดระดับของผิวดิน เพื่อเป็นการสร้างแรงกระตุ้นให้ผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องเห็นความสำคัญของปัญหานี้ โดยผู้ประกอบการที่จะนำแผนแม่บทนี้ไปใช้เป็นแนวทางควรตระหนักถึงรายละเอียดในการปฏิบัติงานจริงในเหมืองของตน ซึ่งจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในบางส่วนให้เหมาะสมกับสภาพเหมืองนั้นๆ เช่น ลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่ ลักษณะธรรมชาติในพื้นที่เหมืองและพื้นที่ใกล้เคียง และรูปแบบการทำเหมือง เป็นต้น นอกจากนี้ในการปฏิบัติงานทุกครั้งควรอยู่ภายใต้มาตรฐานความปลอดภัยในทุกขั้นตอน ควรมีการวางแผนเพื่อให้การปฏิบัติงานเป็นไปอย่างถูกต้อง เช่น การเก็บรวบรวมข้อมูลในสภาพปัจจุบัน ทั้งตำแหน่งที่ตั้งและลักษณะทางกายภาพของสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่สาธารณประโยชน์ แหล่งน้ำ เสาไฟฟ้า ทางรถไฟ และถนนที่ปรากฏในพื้นที่ขอบเขตประทานบัตร เป็นต้น หากทุกสถานประกอบการร่วมมือกันแก้ไขปัญหาอย่างจริงจัง จะเป็นการลดปัญหาการทรุดตัวของผิวดินจากการทำเหมืองเกลือหินใต้ดินได้อย่างเป็นรูปธรรม

บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี, 2541, การศึกษาชั้นเกลือหินบริเวณโครงการชลประทานลุ่มน้ำท่าตอนล่าง จังหวัดนครพนม, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, 158 หน้า.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2548). หลุมยุบ, กระบวนการธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กิตติเทพ เพื่องขจร. (2543). การวิเคราะห์และออกแบบโครงที่ที่เกิดจากการผลิตเกลือโดยวิธีละลายในชั้นหินเกลือที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยโดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขในคอมพิวเตอร์, มทส.
- กิตติเทพ เพื่องขจร. (2548). การประเมินคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของเกลือหินในลักษณะทางศิลาวิทยาโดยใช้ระบบเครือข่ายความคิด, มทส.
- นเรศ สัตยารักษ์ และทรงภพ พลจันทร์, 2533, เกลือหินใต้ที่ราบสูงโคราช, การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ประจำปี 2533, 16-17 สิงหาคม 2533 เรื่อง การจัดการทรัพยากรธรณี, กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, กรมทรัพยากรธรณี, หน้า 1-14.
- พิทักษ์ รัตนจารักษ์, 2533, อิทธิพลของชั้นเกลือหินต่อสภาพดินเค็มในภาคอีสาน, การประชุมวิชาการกรมทรัพยากรธรณี ประจำปี 2533, 16-17 สิงหาคม 2533 เรื่อง การจัดการทรัพยากรธรณี, กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, หน้า 15-25.
- Alejano L.R., RamóÁrez-Oyanguren P., Taboada J., 1999, FDM predictive methodology for subsidence due to at and inclined coal seam mining. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36 (1999) 475-491.
- Archeeploha S., 2009, Estimation of cavern configurations from subsidence data, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 70, pp. 53.
- Asadi, A., Shahriar, K., Goshtasbi, K., and Najm, K., 2005, Development of new mathematical model for prediction of surface subsidence due to inclined coal-seam mining. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 105:15-20.
- Cui, X., Miao, X., Wang, J., Yang, S., Liu, H., Song, Y., Liu, H., and Hu, X., 2000, Improved prediction of differential subsidence caused by underground mining. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(4), pp. 615-627
- Fuenkajorn, K., and Serata, S., 1992a, Finite element model to predict permeability increase around salt cavern, SMRI Paper, presented at the Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, Houston, Texas, October 19-22, pp. 34.

- Fuenkajorn, K., and Serata, S., 1992b, Geohydrological integrity of CAES in rock salt, Second International Conference on Compressed-Air Energy Storage Electric Power Research Institute, July 7-9, 1992, San Francisco, CA., pp. 4.1-4.21.
- Fuenkajorn, K., and Serata, S., 1994, Dilation-induced permeability increase around caverns in rock salt, Proceeding 1st North American Rock Mechanics Symposium, University of Texas at Austin, June 1-3, pp. 648-656.
- Japakasetr, T. and Suwanich, P., 1982, Potash and Rock Salt in Thailand Appendix A Nonmetallic Minerals Bulletin No. 2, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, pp. A1-A252.
- Japakasetr, T. and Suwanich, P., 1983, Potash and Rock Salt in Thailand Appendix F Showing Locations Maps of Drilled Holes: Nonmetallic Minerals Bulletin No.2, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, and Bangkok, Thailand.
- Japakasetr, T. and Suwanich, P., 1984, Potash and Rock Salt in Thailand Appendix C Core log of Bamnet Narong Area: Nonmetallic Minerals Bulletin No.2, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Nieland, J.D., 1991, SALT_SUBSID: A PC-Based Subsidence Model, Research project report No.1991-2-SMRI, Solution Mining Research Institute, 67pp.
- Sattayarak, N., 1983, Continental Mesozoic stratigraphy of Thailand, Symposium on Stratigraphy of Thailand, 18-19 November, Bangkok, pp. 77-80.
- Sattayarak, N., Chaisilboon, B., Srikulwong, S., Charusirisawat, R., Mahattanachai, T. and Chantong, W., 1998, Tectonic evolution and basin development of the northeast Thailand, Seminar on Mesozoic Redbeds in the Northeastern Thailand, August 28, pp. 1-19.
- Serata, S. and Fuenkajorn, K., 1993, Formulation of a constitutive equation for salt, In Proc. Seventh International Symposium on Salt, Amsterdam, Eisevier Science, Vol. 1, pp. 483-488.
- Shahriar, K., Amoushahi, S. and Arabzadeh, M., 2009, Prediction of surface subsidence due to inclined very shallow coal seam mining using FDM, In 2009' Coal Operators' Conference 12 – 13 February 2009, pp. 103 – 139.

- Shu, D.M. and Bhattacharyya, A.K., 1993, Prediction of sub-surface subsidence movements due to underground coal mining. *Geotechnical and Geological Engineering*, Springer Netherlands. 11(4):221-234.
- Singh, M.M., 1992, Mine subsidence. In: *SME Mining Engineering Handbook*. Hartman, H.L. (ed). Society for Mining Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, pp. 938-971.
- Thongprapha, T., and Fuenkajorn, K., 2013, Physical model simulations of surface subsidence induced by underground openings, In *Proceedings of the Fourth Thailand Symposium on Rock Mechanics*, January 24-25, Suranaree University of Technology, pp. 309-320.
- Wongsawat, S., Dhanesvanich, O. and Panjasutaros, S., 1992, Groundwater resources of Northeastern THAILAND, *Conference on Geologic Resources of Thailand: Potential for Future Development* November 17-24, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, pp.507-521.

ประวัตินักวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน 2500 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร 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 ดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาทางวิชาการขององค์กร รัฐบาลและหลายบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดา เช่น U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. Department of Energy, Dow Chemical Co., Southwest Research Institute, UNOCAL, Phelps Dodge Co. และ Amoco Oil Co. เป็นวิศวกรที่ปรึกษาของ UNISEARCH จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นคณะกรรมการในการคัดเลือกข้อเสนอโครงการของ U.S. National Science Foundation และ Idaho State Board of Education และเป็นคณะกรรมการในการคัดเลือก บทความทางวิชาการของสำนักพิมพ์ Chapman & Hall ในประเทศอังกฤษ และ Elsevier Sciences Publishing Co. ในประเทศเนเธอร์แลนด์