



รายงานการวิจัย

การร่างคู่มือการทำเหมืองเกลือแบบละลายสำหรับผู้ประกอบการ
ขนาดกลาง และขนาดเล็กในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

**Derivation of Design Guidelines for Salt Solution Mining for Small
and Medium Sized Enterprises in Northeastern Thailand**

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติเทพ เฟื่องขจร
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2543
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2543

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2543 ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจาก นางสาวกัญญา หับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย และนางปราณี สิทธิคุณ ในการตรวจสอบความถูกต้องของรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

ตุลาคม 2543

บทคัดย่อ

ความเป็นไปได้ของการทำเหมืองเกลือแบบละลายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ได้นำมาศึกษาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม GEO พื้นที่ห้าแห่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยได้ถูกเลือกขึ้นมาเป็นตัวอย่างเพื่อสร้างแบบจำลองตัวแทนการวิเคราะห์จะมุ่งไปที่ความเหมาะสมของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบโรงแยกที่ถูกละลายในชั้นหินเกลือ ซึ่งจะรวมไปถึงเสถียรภาพทางกลศาสตร์และการเก็บกักของชั้นหินที่ใช้ ตัวโรงแยกที่ออกแบบจะต้องมีขนาดเหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจ ป้องกันการทรุดตัวของผิวดินและการหดตัวของโรงแยก ข้อมูลประสบการณ์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทางด้านกลศาสตร์หินเกลือได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ตัวโรงแยกจะถูกกำหนดเป็นรูปวงรีเรียงกันอยู่ในแนวราบโดยมีระยะห่างเท่ากัน ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะถูกประมวลเข้ากับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้ในการร่างคู่มือการออกแบบเหมืองเกลือแบบละลาย คู่มือนี้ได้จัดอยู่ในภาคผนวกของรายงานวิจัยนี้ และได้รวมผลงานที่เกี่ยวข้องทางด้านการทำเหมืองเกลือไว้ด้วย

Abstract

A feasibility study for the construction of solution mined caverns in rock salt formations in northeastern Thailand has been carried out using a time-dependent finite element code GEO. Five areas with different geologic settings in Khorat basin are selected as example to construct representative models. The computer analysis is aimed at determining the suitable design parameters for the salt caverns with long-term mechanical stability and hydrological integrity of the hosted rocks. An attempt is also made at achieving economically-justified extraction ratio for the caverns while minimizing the ground surface subsidence and cavern closure. Available geological data reported elsewhere are used in the analysis. Where applicable, supplementary theories and concepts on salt mechanics, as well as, in-house experience and data base on rock properties have been applied in the computer simulation. The cavern fields are assumed to be an array of identical elliptical caverns mined in an infinite square grid. The resulting designed parameters are then used to derive a user-friendly design guidelines to construct solution mined caverns in the Khorat basin. The design guidelines provided in the appendix of this report, have incorporated other knowledge and experience relevant to the solution mining in salt.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 1 ชั้นหินเกลือที่นำมาศึกษา.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษา.....	11
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	13
3.1 ลักษณะต่าง ๆ ของแบบจำลอง.....	13
3.2 การออกแบบ Mesh.....	15
3.3 ความเค้นในหิน (In-situ Stress).....	15
บทที่ 4 ผลของการคำนวณ.....	18
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลของการคำนวณ.....	20
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	23
บรรณานุกรม.....	66
ภาคผนวก.....	68
คู่มือการออกแบบโครงในชั้นเกลือหินสำหรับเหมืองเกลือแบบละลาย- ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย	
ประวัติผู้วิจัย.....	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติของหินเกลือและชั้นหินข้างเคียงที่ใช้ในการคำนวณ.....	10
2	ขนาดและรูปร่างของแบบจำลองโพรงในชั้นหินเกลือ.....	14
3	จำนวน Node และ Element ในแบบจำลอง.....	16
4	ข้อเสนอแนะในการออกแบบโพรงในชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.....	24

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านโพธิ์พาน อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม.....	25
2 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัด โนนเวียง บ้านศรีเมือง อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร...	26
3 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดอัมพวัน บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร.....	27
4 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุครธานี.....	28
5 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่โรงเรียนวัดพระยามีมิตร บ้านหนองขาม อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา.....	29
6 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านหนองปู อ.บรบือ จ.มหาสารคาม.....	30
7 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านโคกสง่า อ.พล จ.ขอนแก่น.....	31
8 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านหัวขัว อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม.....	32
9 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดสุทธิมงคล อ.พนมดงรัก จ.มหาสารคาม.....	33
10 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดไทยศรีมงคล อ.เมือง จ.ยโสธร.....	34
11 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดบ้านคู อ.ธวัชบุรี จ.ร้อยเอ็ด.....	35
12 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดขาม อ.ขามสะแกแสง จ.นครราชสีมา.....	36
13 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านโนนระเวียง อ.คำนูนตจ จ.นครราชสีมา.....	37
14 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านหนองประจักษ์ อ.เมือง จ.อุครธานี.....	38
15 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้าน โศกสง่า Model KS.....	39
16 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านหนองขาม Model NK.....	40
17 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านหนองปู Model NP.....	41
18 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโพธิ์พาน Model PP.....	42
19 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านขาม Model WK.....	43
20 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง KS.....	44
21 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NK.....	45
22 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NP.....	46
23 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง PP.....	47
24 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง WK.....	48
25 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง KS.....	49
26 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NK.....	50

ภาพที่	หน้า
27 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NP.....	51
28 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง PP.....	52
29 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง WK.....	53
30 การกระจายแรงเฉือนรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง KS.....	54
31 การกระจายแรงเฉือนรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NK.....	55
32 การกระจายแรงเฉือนรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NP.....	56
33 การกระจายแรงเฉือนรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง PP.....	57
34 การกระจายแรงเฉือนรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง WK.....	58
35 แรงเฉือนในหินเกล็ดที่อยู่ระหว่าง โพรงของแบบจำลอง KS.....	59
36 แรงเฉือนในหินเกล็ดที่อยู่ระหว่าง โพรงของแบบจำลอง NK.....	60
37 แรงเฉือนในหินเกล็ดที่อยู่ระหว่าง โพรงของแบบจำลอง NP.....	61
38 แรงเฉือนในหินเกล็ดที่อยู่ระหว่าง โพรงของแบบจำลอง PP.....	62
39 แรงเฉือนในหินเกล็ดที่อยู่ระหว่าง โพรงของแบบจำลอง WK.....	63
40 การหัดตัวในแนวตั้งของ โพรงของแบบจำลอง KS, NK, NP, PP และ WK.....	64
41 การหัดตัวในแนวราบของ โพรงของแบบจำลอง KS, NK, NP, PP และ WK.....	65

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทำเหมืองเกลือแบบดั้งเดิม (ในระดับชาวบ้าน) เพื่อผลิตเกลือสินเธาว์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยได้ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และต่อการเกษตรกรรมอย่างมาก ปัญหาที่เห็นเด่นชัดอย่างหนึ่งก็คือการเกิดแผ่นดินทรุดในบริเวณรอบพื้นที่การทำเหมือง และผลที่ตามมาอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบการไหลและคุณสมบัติ (ความเค็ม) ของน้ำบาดาลที่อยู่เหนือชั้นหินเกลือ และในที่สุดสามารถทำให้เกิดปัญหาดินเค็มเกิดขึ้นได้

การทำเหมืองแบบดั้งเดิมเช่นนี้ คือการสูบน้ำเกลือหรือน้ำบาดาลที่มีความเค็มที่ไหลอยู่บนชั้นหินเกลือขึ้นมายังผิวดินเพื่อตากให้แห้งให้เกลือตกผลึก หลังจากนั้นน้ำจืดที่เหลือก็จะสูบกลับลงไปชั้นหินเช่นเดิม ผลึกของเกลือที่ได้ก็จะถูกเก็บรวบรวมและนำออกจำหน่าย ปัญหาหลักประการหนึ่งคือเราไม่สามารถคาดคะเนได้ว่าน้ำเค็มที่สูบขึ้นมานั้นได้ละลายชั้นเกลือส่วนใดออกไปบ้าง หรือได้ละลายชั้นหินเกลือในพื้นที่ใดออกไปบ้าง การทำเหมืองเช่นนี้สามารถทำให้เกิดโพรงขนาดใหญ่ในส่วนบนของชั้นหินเกลือ โพรงเหล่านี้จะอยู่ในระดับตื้นจากผิวดินและเป็นสาเหตุทำให้เกิดแผ่นดินทรุดเป็นแห่ง ๆ (Sinkhole) ตำแหน่งของโพรงเหล่านี้ก็ไม่สามารถคาดคะเนได้เนื่องจากความซับซ้อนของระบบการไหลของน้ำบาดาลที่อยู่บนชั้นหินเกลือ ด้วยเหตุผลดังกล่าวการทำเหมืองแบบไม่มีระบบ ไม่มีการวางแผน (แบบชาวบ้าน) จึงควรถูกยกเลิกเพื่อป้องกันผลกระทบที่รุนแรงต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลกระทบนี้สามารถนำไปสู่ปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้

การทำเหมืองเกลือโดยวิธีละลายให้ได้มาตรฐานสากล ได้มีการทำขึ้นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยโดยผู้ประกอบการที่มีต้นทุนสูง เช่น บริษัทไทยอาซาฮี ซึ่งทำเหมืองเกลือแบบละลายอยู่ที่ อ.พิมาย จ.นครราชสีมา การทำเหมืองเช่นนี้จะต้องมีการออกแบบและใช้ความรู้ทางวิชาการที่สูงมาก รวมไปถึงจะต้องมีการสำรวจทางด้านธรณีวิทยา และทางด้านธรณีฟิสิกส์ของชั้นหินที่วางตัวอยู่ข้างบนและข้างล่างของชั้นหินเกลือในพื้นที่ที่จะทำเหมือง การออกแบบของตัวโพรงในชั้นหินเกลือจะต้องทำด้วยความละเอียดและถูกต้อง ตัวแปรจะรวมไปถึงความลึกของหลังคาโพรง เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรง ความสูงของโพรง ระยะห่างระหว่างโพรง ความหนาของชั้นหินเกลือข้างบนและข้างล่างของตัวโพรง ความดันของน้ำเกลือในโพรง ฯลฯ การคำนวณจะต้องรวมไปถึงการคาดคะเนของแผ่นดินทรุด (Subsidence) และการคาดคะเนของการหดตัวของโพรงในชั้นหินเกลือเนื่องมาจาก Creep deformation จะเห็นได้ว่าในระดับผู้ประกอบการขนาดเล็กโดยเฉพาะใน

ระดับชาวบ้านซึ่งมีต้นทุนต่ำและความรู้ที่น้อย จึงไม่สามารถที่จะออกแบบลักษณะทางวิศวกรรมธรณีของการทำเหมืองเกลือโดยวิธีละลายให้ได้มาตรฐานสากลได้

ปัญหาอีกประการหนึ่งของผู้ประกอบการ คือ ในประเทศไทยไม่มีข้อกำหนดและข้อแนะนำทางด้านวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการทำเหมืองเกลือแบบละลาย (Solution mining) อย่างเพียงพอ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องเช่น กรมทรัพยากรธรณีก็ไม่มีข้อแนะนำในการออกแบบที่ถูกต้องและปลอดภัย (Design guidelines) เผยแพร่ให้แก่ผู้ประกอบการขนาดเล็ก

จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ ประเมินความเหมาะสมทางวิศวกรรมธรณีของชั้นหินเกลือในหลายพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และทำการออกแบบลักษณะของโพรงในชั้นหินเกลือโดยการทำเหมืองแบบละลายแบบสากลโดยใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขเข้ามาช่วย ผลที่ได้รับจากข้อสรุปของงานวิจัยนี้จะมีประโยชน์โดยตรงกับผู้ประกอบการทำเหมืองขนาดเล็ก ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในแต่ละพื้นที่ อย่างน้อยที่สุดผู้ประกอบการก็สามารถนำหลักเกณฑ์ที่เสนอในรายงานนี้ไปใช้เป็นแนวทางทางด้านวิชาการ (Technical guidelines) ในการวางแผนการทำเหมืองเกลือแบบละลาย ซึ่งจะส่งผลให้ผู้ประกอบการสามารถลดต้นทุนในการออกแบบ ลดปัญหาแผ่นดินทรุดและดินเค็ม และลดความเสี่ยงของการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ (หินเกลือ) ในพื้นที่

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ขั้นต้นของโครงการวิจัย คือ การรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการทำเหมืองเกลือในระบบสากลของต่างประเทศ และชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เพื่อนำมาประเมินและวิเคราะห์ทางด้านกลศาสตร์และด้านอุทกวิทยาของชั้นหินเกลือรอบโพรงที่ถูกละลายไปในการทำเหมืองในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear time-dependent finite element) การวิเคราะห์จะถูกนำเสนอออกมาในรูปของพฤติกรรมทางด้านกลศาสตร์และความซึมผ่านของหินเกลือที่อยู่รอบโพรงในปัจจุบันและคาดคะเนพฤติกรรมเหล่านี้ไปถึง 50 ปีข้างหน้า การออกแบบโพรงในหินเกลือจะพิจารณาถึงรูปทรงของโพรง (เส้นผ่าศูนย์กลาง ความสูง และอัตราส่วนของความสูงกับเส้นผ่าศูนย์กลางที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของชั้นหิน) ความลึกของหลังคาโพรง ระยะห่างระหว่างโพรง ความดันภายใน และความหนาของเพดานชั้นหินเกลือ การวิเคราะห์จะมุ่งไปที่การให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวให้น้อยที่สุด และให้มีการทรุดตัวของพื้นดินและการเสื่อมสภาพของโพรงน้อยที่สุดในขณะเดียวกันการออกแบบก็จะคำนึงถึงผลลัพธ์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการทำเหมือง ตัวอย่างเช่น ขนาดของโพรงจะต้องไม่เล็กเกินไป และไม่อยู่ลึกเกินกว่าที่จะสามารถขุดเจาะนำเกลือขึ้นมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

วัตถุประสงค์เฉพาะของงานวิจัยสามารถแยกเป็นหัวข้อดังนี้คือ

- 1) ออกแบบโครงในหินเกลือเพื่อให้ง่ายต่อการก่อสร้างและมีเสถียรภาพสูงที่สุด
- 2) ประเมินเสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์ของเพดานโครง ผันด้านข้าง และพื้นของโครงภายใต้สภาวะแวดล้อมในระยะยาว
- 3) คาดคะเนการทรุดตัวของผิวดินหลังจากได้ก่อสร้างโครงขึ้น
- 4) คาดคะเนการหดตัวของโครงในระยะยาว
- 5) ประเมินศักยภาพการเพิ่มขึ้นของความชื้นผ่านได้ในชั้นหินเกลือรอบโครง
- 6) ประเมินศักยภาพการรั่วไหลในชั้นบนและชั้นล่างของหินที่ใช้เป็นที่ทิ้งของเสีย
- 7) ประเมินศักยภาพของผลกระทบต่อน้ำบาดาลที่อยู่ในชั้นหินบนหินเกลือ
- 8) นำผลที่ได้จากการวิจัยมาเรียบเรียงทำเป็นคู่มือการออกแบบโครงในหินเกลือ และการทำเหมืองเกลือเพื่อเผยแพร่ให้กับผู้ประกอบการ

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะมุ่งเฉพาะไปที่การประยุกต์ใช้ชั้นหินเกลือในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือเท่านั้น โดยจะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของชั้นหินเกลือรอบ ๆ โครง การศึกษาเสถียรภาพทั้งทางด้านกลศาสตร์และความชื้นผ่านในระยะยาวของโครงในชั้นหินเกลือจะถูกคำนวณไปถึง 50 ปีหลังจากที่โครงได้ขุดขึ้นมา ทุก ๆ โครงที่อยู่ในบริเวณที่ถูกกำหนดมีขนาดเท่ากัน และรูปร่างเหมือนกันจะถูกสมมติว่าได้มีการขุดขึ้นมาพร้อมกัน (Instantaneous excavation) อุณหภูมิของชั้นหินเกลือจะถือว่ามีความคงที่จากวันแรกถึง 50 ปี (Isothermal condition) เนื่องจากการวิจัยมีจุดมุ่งหวังเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการออกแบบ ดังนั้นข้อสมมติฐานปลีกย่อยที่ตั้งขึ้นและใช้ในการคำนวณจะเป็นข้อสมมติฐานแบบอนุรักษ์ (Conservative assumptions) เพื่อว่าการออกแบบโดยใช้ผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะมีความปลอดภัยค่อนข้างสูง เพิ่มผลผลิต ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องและป้องกันการสูญเสีย ข้อสมมติฐานเหล่านี้จะถูกกำหนดในหัวข้อต่อไป เนื่องจากชั้นหินเกลือและหินที่เกี่ยวข้องในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีลักษณะแตกต่างกันมาก งานวิจัยนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ลักษณะของชั้นหินเกลือในพื้นที่นี้ได้ทั้งหมด เนื่องจากงบประมาณที่จำกัด ดังนั้นลักษณะของชั้นหินเกลือที่มีข้อมูลสมบูรณ์มากที่สุดจะถูกเลือกนำมาศึกษา อย่างน้อยที่สุดลักษณะของชั้นหินเกลือใน 5 รูปแบบจำลองจะถูกสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในขั้นแรกจะมีการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับชั้นคอนและวิธีการทำเหมืองเกลือในระบบสากลในต่างประเทศ ทั้งนี้จะรวมไปถึงการสำรวจเบื้องต้น การวางแผน การออกแบบ การผลิต และการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และจะมีการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินเกลือและชั้นหินที่อยู่บนและล่างของหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ลักษณะทางธรณีวิทยานี้จะมุ่งไปที่ความหนา ความลึก และความกว้างของชั้นหินเกลือในแต่ละบริเวณ ชั้นหินเกลือในหลายจังหวัดจะถูกนำมารวบรวมและประมวลผลเพื่อเปรียบเทียบลักษณะความคล้ายคลึงและแตกต่าง ชั้นหินเกลือเหล่านี้จะถูกจัดกลุ่มโดยใช้หลักเกณฑ์ของความคล้ายคลึงกันทางด้านวิศวกรรมธรณี และทางด้าน การออกแบบโพรง

ในที่สุดบริเวณที่มีคุณลักษณะของชั้นหินเกลือที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเลือกนำมาใช้ในการออกแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ อย่างน้อยที่สุดลักษณะของชั้นหินเกลือ 3 แบบจะถูกเลือกมา

ในขั้นตอนที่ 2 ค่าคงที่ที่อยู่ในคอมพิวเตอร์โปรแกรมชื่อ GEO จะถูกกำหนดขึ้นในขั้นตอนนี้ คุณลักษณะทางด้านกลศาสตร์และฟิสิกส์ของหินเกลือและหินข้างเคียงจะถูกนำมาศึกษาเพื่อให้แน่ใจว่าค่าที่ได้รับจะเป็นค่าที่ปลอดภัย (Conservative estimate) เพื่อใช้ในการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 3 จะมีการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และจะมีการกำหนดค่าทางเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องกับขนาดและรูปร่างของโพรงในชั้นหินเกลือ ค่าเหล่านี้จะรวมไปถึงเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง ความสูงของโพรง ความลึกของหลังคาโพรง ระยะห่างระหว่างโพรง เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 จะมีการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมชื่อ GEO ในการคำนวณนี้จะมุ่งไปที่การคาดคะเนลักษณะทางกลศาสตร์ และความชื้นผ่านของชั้นหินเกลือที่อยู่รอบ ๆ โพรง นอกจากนั้นแล้วการคำนวณในการวิจัยนี้ยังจะมุ่งไปที่การป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นในรูปของแผ่นดินทรุด (Surface subsidence) และในขณะที่เดียวกันก็จะคำนึงถึงคุณค่าทางเศรษฐกิจของการผลิตเกลือสินเธาว์ กล่าวคือ การออกแบบของโพรงแต่ละโพรงจะทำให้ใหญ่ที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดค่าใช้จ่าย การคาดคะเนผลกระทบและลักษณะทางกลศาสตร์และความชื้นผ่านของชั้นหินเกลือนี้จะทำไปถึง 50 ปีข้างหน้าหลังจากที่เจาะโพรงในหินเกลือแล้ว

ในขั้นตอนที่ 5 และ 6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์จะถูกนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบในระหว่างแบบจำลอง และจะนำมาตรวจสอบ โดยเทียบกับค่าของจริงถ้าเป็นไปได้ ความถูกต้องของการคำนวณก็จะนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะของโพรงในหินเกลือที่มีขนาดทางเรขาคณิตคล้ายคลึงกัน

ในขั้นตอนที่ 7 จะเกี่ยวกับการทำรายงานและการเรียบเรียงคู่มือการทำเหมืองเกลือแบบละเอียดเบื้องต้น คู่มือนี้จะเขียนขึ้นมาให้ง่ายต่อผู้อ่าน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับโดยตรงจากงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งเป็นข้อได้ดังนี้

- 1) เพิ่มผลผลิตของน้ำเกลือและเกลือสินเธาว์
- 2) เพิ่มเสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์และของชั้นหินเกลือรอบ ๆ ตัวโพรง
- 3) ลดต้นทุนและการสูญเสียที่อาจจะเกิดจากการพังทลายของหลังคาโพรง ซึ่งการพังทลายนี้สามารถก่อให้เกิดความเสียหายกับท่อน้ำเกลือและท่อน้ำจืดในขณะที่ผลิตน้ำเกลือ เพิ่มเสถียรภาพของโพรงเกลือในระยะยาว ซึ่งต่อมาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเก็บกักวัตถุอื่น ๆ นอกจากน้ำเกลือ เช่น น้ำมันดิบ ของเสียเคมี ขี้วัว ก๊าซธรรมชาติ
- 4) ส่งเสริมการทำเหมืองเกลือให้ได้มาตรฐานสากล (Salt solution mining) ให้กับผู้ประกอบการขนาดเล็ก และกอบกู้อุตสาหกรรมเกลือสินเธาว์ในพื้นที่นี้ให้มีศักยภาพขึ้นมาได้อีก

ประโยชน์ที่จะได้รับในระยะยาว ซึ่งอาจจะไม่สามารถมองเห็นได้เด่นชัด คือ

- 1) ป้องกันแผ่นดินยุบและการเคลื่อนตัวของชั้นหินชั้นดินที่อยู่บนโพรงในชั้นหินเกลือ
- 2) ป้องกันการเสียหายของถนน ดิค สะพาน แม่น้ำ ป่าไม้ และสิ่งก่อสร้างอื่น ๆ ที่อยู่บนผิวดินข้างบนของโพรงหินเกลือ
- 3) อนุรักษ์คุณภาพและระดับของน้ำบาดาลในชั้นหินที่อยู่ข้างบนของหินเกลือเพื่อมิให้มีการเปลี่ยนแปลง
- 4) ป้องกันมิให้เกิดความเค็มในชั้นดินในบริเวณการทำเหมืองเกลือ

หน่วยงานที่จะได้รับผลประโยชน์จากงานวิจัยนี้

- 1) หน่วยงานรัฐบาลที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมทรัพยากรธรณี กรมโรงงาน และหน่วยงานที่เกี่ยวกับการรักษาสิ่งแวดล้อม ซึ่งหน่วยงานเหล่านี้จะสามารถนำผลของการออกแบบโพรงในชั้นหินเกลือมาใช้เพื่อเขียนกฎข้อบังคับ และข้อเสนอแนะทางวิชาการให้กับผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็กได้ดำเนินการ
- 2) ผู้ประกอบการที่เป็นเจ้าของสิทธิ์ของชั้นหินเกลือจะสามารถนำผลไปใช้เพื่อเป็นแนวทางการผลิตเกลือสินเธาว์ให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด
- 3) วิศวกรที่ปรึกษาสามารถนำผลไปเปรียบเทียบเพื่อให้มั่นใจว่าการออกแบบโพรงในชั้นหินเกลือของเขาได้มีการคำนวณมาอย่างถูกต้อง
- 4) บริษัทเงินทุนสามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าผู้ประกอบการที่ขอกู้ยืมเงินได้ออกแบบ วางแผน และดำเนินการทำเหมืองเกลือถูกต้องตามหลักวิชาการและไม่มีผลกระทบรุนแรงในระยะยาวต่อสิ่งแวดล้อม
- 5) นักวิจัยอื่น ๆ สามารถนำผลที่ได้ไปใช้เปรียบเทียบหรือเสนอโครงการต่อจากงานวิจัยนี้ เพื่อที่จะได้ผลงานวิจัยที่ละเอียดและแม่นยำมากขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในแต่ละพื้นที่ของการทำเหมืองเกลือแบบต่างๆ

บทที่ 1

ชั้นหินเกลือที่นำมาศึกษา

ผลของการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับชั้นหินเกลือจากหลุมสำรวจที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยแสดงให้เห็นว่าในพื้นที่นี้มีชั้นหินเกลือแพร่กระจายอยู่ทั่วไป ในแต่ละพื้นที่ ความลึกและความหนาของชั้นหินเกลือและชั้นหินข้างเคียง (Associated rocks) จะมีคุณลักษณะต่างกัน ข้อมูลที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้รวมมาจากเอกสารอ้างอิงหลายฉบับ เช่น Suwanapal (1992), Japan International Cooperation Agency (1981), Yumuang (1995), Yumuang et al (1986), Suwanich and Ratanajarurak (1982), Japakasetr and Suwanich (1977) รายละเอียดเกี่ยวกับการเกิดและอายุของชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงเหล่านี้จะไม่นำมากล่าวถึงในรายงานนี้ ผู้อ่านที่สนใจสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงข้างต้น

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลำดับและโครงสร้างของหินเกลือที่มีข้อมูลสมบูรณ์มากที่สุด ทั้งหมดนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมและจัดกลุ่มตามพื้นที่ในอำเภอและจังหวัดที่ใกล้เคียง และได้นำเสนอในภาคผนวกของรายงานนี้ เนื่องจากโครงการนี้สนใจเฉพาะชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงเท่านั้น การศึกษาและการจัดกลุ่มข้อมูลจึงใช้คุณลักษณะของชั้นหินเกลือเป็นเกณฑ์ ลำดับชั้นหินที่อยู่ต่ำกว่าชั้นหินเกลือจะไม่นำมากล่าวถึงในที่นี้ ในรายงานลำดับชั้นหินจะแสดงในรูปของ Stratigraphic column โดยมีการระบุหมายเลขของหลุมเจาะสำรวจ และตำแหน่งที่แน่ชัด ซึ่งสามารถอ้างอิงได้ถึงต้นฉบับ (ปกครณ์ สุวานิช, 2521)

จาก Stratigraphic column ที่แสดงไว้ในรายงานนี้จะเห็นได้ชัดว่าความลึกและความหนาของชั้นเกลือจะต่างกันมากแม้จะอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้แล้วชั้นหินข้างเคียงที่แทรกอยู่ก็จะมี ความหนาและลำดับที่ต่างกัน การที่จะออกแบบและวิเคราะห์เหมืองโพรงที่ได้จากการละลายในชั้นเกลือสำหรับพื้นที่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมดจึงเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบและการวิเคราะห์นี้จะต้องใช้ข้อมูลเฉพาะในพื้นที่เท่านั้น (Site-specific) ข้อมูลเฉพาะเหล่านี้คือ ความลึก ความหนา และลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียง

โครงการนี้มีงบประมาณที่จำกัดผู้วิจัยไม่สามารถออกแบบและวิเคราะห์โพรงในชั้นหินเกลือที่มีความหนาและความลึกในทุก ๆ ระดับได้ ดังนั้นพื้นที่ในบางจังหวัด เช่น มหาสารคาม สกลนคร อุดรธานี นครราชสีมา ขอนแก่น ร้อยเอ็ด และยโสธรจึงถูกเลือกขึ้นมาในโครงการวิจัยนี้ เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา

พื้นที่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นแหล่งที่มีชั้นหินเกลือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ลำดับของชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ถึงรูปที่ 14 ซึ่งประกอบด้วยหมู่บ้านต่าง ๆ ตามลำดับคือ บ้านโพธิ์พาน อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม วัดโนนเวียง บ้านศรีเมือง อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร วัดอัมพวัน บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุครธานี โรงเรียนวัดพระยานิมิตร บ้านหนองขาม อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา บ้านหนองปู อ.บรบือ จ.มหาสารคาม บ้านโคกสง่า อ.พล จ.ขอนแก่น บ้านหัวขัว อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม วัดสุทิมงคล อ.พนันานิคม จ.มหาสารคาม วัดไทยศรีมงคล อ.เมือง จ.ยโสธร วัดบ้านคู่อ.ธวัชบุรี จ.ร้อยเอ็ด วัดขาม อ.ขามสะแกแสง จ.นครราชสีมา บ้านโนนระเวียง อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา และบ้านหนองประจักษ์ อ.เมือง จ.อุครธานี

เพื่อความสะดวกในงานวิจัยนี้ชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะถูกจำแนกเป็น 5 กลุ่มใหญ่ ๆ โดยใช้ความคล้ายคลึงของความหนา ความลึก และจำนวนชั้นเกลือเป็นเกณฑ์ ลำดับชั้นหินทั้ง 5 กลุ่มนี้จะใช้ชื่อแทนดังต่อไปนี้

1. กลุ่มบ้านโคกสง่า (KS) ลำดับชั้นหินในกลุ่มนี้จะเป็นตัวแทนของลำดับชั้นหินของพื้นที่บ้านโคกสง่า อ.พล จ.ขอนแก่น บ้านหัวขัว อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม วัดสุทิมงคล อ.พนันานิคม จ.มหาสารคาม วัดไทยศรีมงคล อ.เมือง จ.ยโสธร วัดบ้านคู่อ.ธวัชบุรี จ.ร้อยเอ็ด
2. กลุ่มบ้านหนองขาม (NK) ลำดับชั้นหินในกลุ่มนี้จะเป็นตัวแทนของลำดับชั้นหินของพื้นที่โรงเรียนวัดพระยานิมิตร บ้านหนองขาม อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา
3. กลุ่มบ้านหนองปู (NP) ลำดับชั้นหินในกลุ่มนี้จะเป็นตัวแทนของลำดับชั้นหินของพื้นที่บ้านหนองปู อ.บรบือ จ.มหาสารคาม
4. กลุ่มบ้านโพธิ์พาน (PP) ลำดับชั้นหินในกลุ่มนี้จะเป็นตัวแทนของลำดับชั้นหินของพื้นที่บ้านโพธิ์พาน อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม วัดโนนเวียง บ้านศรีเมือง อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร วัดอัมพวัน บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุครธานี
5. กลุ่มบ้านขาม (WK) ลำดับชั้นหินในกลุ่มนี้จะเป็นตัวแทนของลำดับชั้นหินของพื้นที่วัดขาม อ.ขามสะแกแสง จ.นครราชสีมา บ้านโนนระเวียง อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา และบ้านหนองประจักษ์ อ.เมือง จ.อุครธานี

ลำดับชั้นหินจากแหล่งอื่น ๆ นอกจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะไม่นำมาศึกษาในโครงการนี้เนื่องจากชั้นหินเกลือในพื้นที่นั้นอาจจะอยู่ในระดับตื้นและมีความหนาไม่เพียงพอ การละลายโพรงในชั้นหินเกลือในพื้นที่นี้อาจทำให้เกิดแผ่นดินทรุด โพรงพังทลายและเกิดปัญหาดินเค็มตามมา

ชนิดของชั้นหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในทุกพื้นที่ดังกล่าวข้างต้นสามารถแบ่งออกเป็น 5 ชั้นใหญ่ ๆ จากชั้นบนลงล่าง คือ

1. ชั้นดินตะกอน (Sediment) คือดินชั้นบนที่เป็นดินเหนียวสีเทาผสมดินร่วนมีเม็ดทรายละเอียดปนอยู่บ้างเล็กน้อย ชั้นรองลงมาเป็นดินทรายและดินเหนียวปนทราย ชั้นนี้มีเม็ดทรายสีเทาปนน้ำตาล สีชมพู และสีส้ม มีเศษหินตะกอนและหินทรายสีน้ำตาลแดงรวมอยู่ด้วย ส่วนในดินเหนียวส่วนใหญ่จะมีสีเทาแกมน้ำตาลปนเหลือง

2. ชั้นหินดินดานและหินดินเหนียว (Mudstone และ Claystone) ชั้นนี้ส่วนมากเป็นสีน้ำตาลปนแดง ประกอบด้วยดินเหนียวสีเทา และหินดินเหนียวกรวดเหลี่ยมผสมกับ Anhydrite ดินเหนียวสีเทาจะพบกระจายอยู่ทั่วไป บางแห่งมีมุมเอียงประมาณ 10 องศา หินตะกอนกรวดเหลี่ยมจะมีสีน้ำตาลปนแดง ส่วนที่เป็นกรวดเหลี่ยมจะมีความอ่อนกว่า บางแห่งมีดินเหนียวสีเขียวปนเทาสลับกับชั้น Anhydrite บางแห่งพบ Halite และ Camallite เป็นสายแร่ขนาดเล็กแทรกอยู่

3. ชั้น Anhydrite และ Gypsum จะมีสีเทาปนขาวขุ่น มีลักษณะเนื้อแน่น บางแห่งพบชั้นบาง ๆ ของ Halite ในชั้น Gypsum ส่วนใหญ่ไม่มีสี บางแห่งมีผลึกแก้วสีน้ำตาลปนดำ

4. ชั้นหินเกลือ (Salt) โดยมากเป็นแร่ Halite ที่ไม่มีสี บางแห่งพบชั้น Halite ที่มีสีน้ำตาลอ่อนโดยเฉพาะบริเวณส่วนกลางถึงส่วนล่างของชั้นหินเกลือ บางแห่งจะพบผลึกของ Halite ที่มีสีน้ำตาลอ่อนกระจายอยู่ทั่วไป

5. หินทรายและหินทรายแป้ง (Sandstone and Siltstone) จะมีสีเทาเนื้อแน่นและมีจุดสีน้ำตาลปนแดง ส่วนในชั้นหินทรายจะมีเนื้อแน่นบางครั้งมีหินดินดานสีน้ำตาลปนแดงแทรกอยู่

ในอดีตชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้มีการศึกษาอย่างละเอียดทั้งทางด้านธรณีวิทยา ธรณีวิทยาโครงสร้าง ธรณีวิทยาเคมี และทางด้านกลศาสตร์ แต่ข้อมูลที่ได้เผยแพร่สู่ประชาชนในรูปของสิ่งตีพิมพ์จะเป็นข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาโครงสร้าง และธรณีวิทยาเคมีเท่านั้น ข้อมูลทางด้านกลศาสตร์ไม่เคยเผยแพร่ต่อประชาชน ส่วนข้อมูลทางด้านความซึมผ่าน (Permeability) ของหินเกลือในประเทศไทยไม่เคยมีการศึกษาทั้งในห้องทดลองและภาคสนาม อาจเป็นเพราะว่าการศึกษาจะต้องใช้ต้นทุนและความรู้ทางวิชาการสูง

ในโครงการนี้ผู้วิจัยได้กำหนดคุณสมบัติทางด้านกลศาสตร์และชลศาสตร์ของหิน ทั้ง 5 ชนิดดังกล่าวข้างต้น ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 1 คุณสมบัติเหล่านี้ได้มาจากชั้นหินเกลือและหิน ที่เกี่ยวข้องในประเทศสหรัฐอเมริกา คุณสมบัตินี้ได้ถูกเลือกขึ้นมาเพื่อให้มีความปลอดภัยในการออกแบบและวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น ค่า Shear modulus (G) และค่า Bulk modulus (K) ได้ถูกเลือกเป็น 0.5×10^6 psi และ 2.5×10^6 psi ตามลำดับ ค่าเหล่านี้จะค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับหินเกลือทั่ว ๆ ไปในประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา และเยอรมันนี ซึ่งจะมีค่าต่ำสุดของค่า $G = 1.0 \times 10^6$ psi และค่า $K = 5 \times 10^6$ psi เป็นต้น (Hansen et al., 1984) ในทำนองเดียวกันค่า Creep properties และคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของหินเกลือและหินข้างเคียงก็จะถูกเลือกขึ้นเพื่อให้เป็นค่าที่ปลอดภัยในการออกแบบและการวิเคราะห์เช่นกัน คุณสมบัติของหินเกลือและหินที่เกี่ยวข้องในภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเช่นกัน (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2542, 2543)

ตารางที่ 1 : คุณสมบัติของหินเกลือและชั้นหินข้างเคียงที่ใช้ในการคำนวณ

คุณสมบัติ	หน่วย	Sediment	Mudstone	Sandstone	Salt	Anhydrite
Shear Modulus	10^6 psi	0.005	0.050	2.0	1.0	0.5
Retarded Shear Modulus ($\tau_0 < K_0$)	10^6 psi	0.010	0.050	2.0	1.0	2.0
Retarded Shear Modulus ($\tau_0 > K_0$)	10^6 psi	0.010	0.050	2.0	1.0	2.0
Elastoviscosity ($\tau_0 < K_0$)	10^6 psi.day	0.001	0.005	0.5	1.0	0.5
Elastoviscosity ($\tau_0 > K_0$)	10^6 psi.day	0.001	0.005	0.5	1.0	1.0
Plastoviscosity	10^6 psi.day	0.4	0.4	2.0	4.00	4.0
Ultimate Bulk Modulus	10^6 psi	0.010	0.250	12.0	2.5	12.0
Retarded Bulk Modulus	10^6 psi	0.010	0.250	12.0	2.0	12.0
Hydrostatic Elastoviscosity	10^6 psi.day	0.003	0.002	12.0	7.0	12.0
Unconfined Octah. Shear Strength	psi	10	50	100	50	100
Ultimate Octah. Shear Strength	psi	100	500	1000	500	1000
Yield Surface Coefficient	10^{-3} psi	10	5.0	0.5	1.5	1.5
Critical Strain of Failure	-	0.010	0.010	0.002	0.010	0.01
Density Gradient	psi/ft	-1.12	-1.12	-1.12	-0.944	-1.20
Power Coeff. of Plastoviscosity	-	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
Deterioration Coeff. of Shear	-	4.0	4.0	2.0	0.2	2.0
Transition Pressure	psi	*	*	*	6000	*
Volume Expansion Coefficient	-	*	*	*	0.05	*
Shear Expansion Coefficient	-	*	*	*	0.20	*
Confinement Coefficient	-	*	*	*	10.0	*
Permeability Constant	microdarcy	*	*	*	2×10^{14}	*
Stress Coefficient	-	*	*	*	3.9	*
Minimum Stress Coefficient	-	*	*	*	40.0	*

* ไม่รวมอยู่ในการวิจัยนี้

บทที่ 2

ทฤษฎีและคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษา

ทฤษฎีที่นำมาใช้ในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์นี้จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปตามกาลเวลาของหินเกลือและการเปลี่ยนความชื้นผ่านตามกาลเวลาของหินเกลือ ทฤษฎีนี้ได้ถูกเสนอขึ้นโดย Fuenkajom & Serata (1992) รายละเอียดของทฤษฎีนี้จะไม่นำมาเสนอในที่นี้ ผู้อ่านที่สนใจสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง ในรายงานนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีนี้และคุณลักษณะของคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่นำมาใช้ อย่างคร่าว ๆ เท่านั้น

หลักเกณฑ์ของ von Mises criterion ได้นำมาใช้เพื่ออธิบายการเปลี่ยนรูปของหินเกลือ (Creep Shear Deformation) ในแนวเฉือน จากหลักเกณฑ์นี้อัตราการเปลี่ยนความต้านแรงเฉือน (Octahedral shear strength K_o) สามารถแสดงได้โดยสมการข้างล่างนี้

$$dK_o/d\sigma_m = \alpha(K^B - K_o) \quad (1)$$

α = yield surface coefficient

K^B = ultimate octahedral shear strength

K_o = octahedral shear strength

ในการคำนวณค่า K_o ผู้เสนอทฤษฎีนี้ได้ใช้การแปรรูปของหินเกลือประกอบกับแรงดันและความเค้นในชั้นหินเป็นเกณฑ์ ดังนั้นค่า K_o สามารถแสดงได้โดยสมการข้างล่างนี้

$$K_o = \exp[-C(\gamma_o - \gamma_c)/\gamma_c] \{ [K^A = (K^B - K^A)(1 - \exp(-\alpha\sigma_m))] - K^B\sigma_m/P \} + K^B\sigma_m/P \quad (2)$$

γ_o, γ_c คือ ค่า Octahedral shear strain และ Critical octahedral shear strain ตามลำดับ

σ_m คือ ค่าเฉลี่ยของความกดดันในหินเกลือที่จุด ๆ หนึ่ง

P คือ ค่าความกดดันที่หินเกลือเปลี่ยนจากคุณสมบัติเปราะเป็นคุณสมบัติแบบเหนียว

C คือ ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของหินเกลือ

ในขณะที่หินเกลือได้เปลี่ยนรูปเกินขีดจำกัด (Critical octahedral shear strain) หินเกลือนี้จะมีปริมาตรมากขึ้นเนื่องจากเนื้อในของหินเกลือจะมีการแตกร้าว การแตกร้าวนี้ตามหลักวิชาการก็เสมือนหนึ่งเป็นความพรุนของเนื้อหินที่เพิ่มขึ้น (Porosity increase) นั่นเอง การคำนวณ

ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งเรียกว่า Inelastic dilation การคำนวณนี้จะใช้สมการดังแสดงให้เห็นข้างล่างนี้

$$\epsilon_{IN} = F \{ \exp[C(\gamma_0 - \gamma_c) / \gamma_c] - 1 \} \exp[-H\sigma_m / (P - \sigma_m)]; \gamma_0 > \gamma_c \text{ and } \sigma_m < P \quad (3)$$

ϵ_{IN} คือ ค่า Inelastic dilation และให้มีค่าเท่ากับความพรุนที่เพิ่มขึ้น

H คือ ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของหินเกลือ

สมการที่ (3) นี้จะแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความพรุนของหินเกลือจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อหินเกลือถูกเปลี่ยนรูปเกินขีดจำกัดอันหนึ่ง ($\gamma_0 > \gamma_c$) และต่อเมื่อความกดดันในหินจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่แบ่งระหว่างความเปราะและความเหนียวของหินเกลือ ($\sigma_m < P$) ค่าคงที่นี้ (P) จะเรียกได้ว่าเป็น Brittle-to-Ductile Transition Pressure จากความพรุนที่คำนวณได้นี้เราสามารถคำนวณหาความซึมผ่าน (Permeability) ของชั้นหินเกลือที่อยู่ภายใต้แรงกด (Stresses) และการเปลี่ยนรูป (Deformation) ที่ต่างกัน ความซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$K = A (\sigma_3^*)^\lambda (\epsilon_{IN})^{(1 - \exp(-\lambda \sigma_3 / P))} \quad (4)$$

σ_3^* คือ ค่า Minimum Principal Stress ที่ตั้งฉากกับรอยร้าว (Micro-crack)

A, λ คือ ค่าคงที่ขึ้นกับคุณสมบัติทางด้านความซึมผ่านของหินเกลือ

สมการหลักทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นได้นำมาใช้ไว้ในคอมพิวเตอร์โปรแกรม GEO เพื่อคำนวณหาพฤติกรรมทางกลศาสตร์และความซึมผ่านของหินเกลือที่ใดก็ได้ โปรแกรมนี้ได้ถูกเขียนขึ้นมาโดยใช้วิธี Finite Element Method ซึ่งจะใช้วิธี Weighted residual เพื่อแก้สมการ Differential equations และจะคำนวณพฤติกรรมของวัตถุโดยใช้การเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลาเป็นหลัก (Explicit time domain integrator) รายละเอียดของโปรแกรมนี้และของทฤษฎีเบื้องต้นสามารถศึกษาต่อได้จาก Serata and Fuenkajorn (1992), Fuenkajorn and Serata (1992, 1994) และ Stormont and Fuenkajorn (1994)

ทฤษฎีและคอมพิวเตอร์โปรแกรมนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโพรงในหินเกลือหลายแห่งในสหรัฐอเมริกา และแคนาดา โพรงเหล่านี้ได้รวมไปถึงโพรงที่ใช้เก็บของเสีย ก๊าซธรรมชาติ อากาศอัด และใช้เก็บผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมอื่น ๆ ทฤษฎีนี้ได้ถูกพิสูจน์แล้วว่ามีความเชื่อถือได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำมาคาดคะเนพฤติกรรมทางกลศาสตร์และความซึมผ่านของหินเกลือในอนาคตอันยาวนาน ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่แสดงให้เห็นในสมการข้างบนก็สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องทดลองและในภาคสนาม

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

3.1 ลักษณะต่าง ๆ ของแบบจำลอง

โปรแกรม AutoCad ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างรูปร่างทางเรขาคณิต (Finite element mesh) ของแบบจำลองของโพรงในชั้นหินเกลือในพื้นที่ที่ใช้เป็นตัวแทน (Representative model) คือ บ้านโคกสง่า บ้านหนองขาม บ้านหนองปู บ้านโพธิ์พาน และวัดขาม แบบจำลองนี้จะทำใน 2 มิติ โดยใช้จุดศูนย์กลางของโพรงเป็นแกนเพื่อที่จะแสดงภาพตัดขวางในแนวตั้งตั้งแต่ชั้นผิวดินลงไปถึงชั้นหินที่อยู่ใต้ชั้นหินเกลือ การศึกษานี้ได้สร้าง 5 แบบจำลอง ตารางที่ 2 จะสรุปคุณลักษณะของแบบจำลองทั้ง 5 แบบ ซึ่งจะมีความลึก เส้นผ่าศูนย์กลาง ระยะห่างระหว่างโพรงที่ต่าง ๆ กัน แบบจำลองที่บ้านโคกสง่าจะใช้ตัวย่อ KS แบบจำลองที่บ้านหนองขามจะใช้ตัวย่อ NK แบบจำลองที่บ้านหนองปูจะใช้ตัวย่อ NP แบบจำลองที่บ้านโพธิ์พานจะใช้ตัวย่อ PP และแบบจำลองที่วัดขามจะใช้ตัวย่อ WK การเปรียบเทียบผลผลิตของเกลือสินเธาว์ที่ได้ซึ่งจะเปรียบเทียบในรูปของ Extraction ratio คือ ปริมาณของเกลือในหน่วยลูกบาศก์เมตรต่อตารางกิโลเมตรของพื้นที่ที่ทำเหมือง

ในการศึกษานี้แบบจำลองได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อพิจารณาขนาดและความลึกของโพรงที่มีผลทางด้านกลศาสตร์ของหินเกลือ ผลที่ได้รับจากการคำนวณจากแบบจำลองนี้จะบ่งบอกถึงขนาดและระยะห่างของโพรงที่เหมาะสมที่สุด คือ มีเสถียรภาพมากที่สุด มีโอกาสรั่วไหลน้อยที่สุด มีการทรุดตัวของผิวดินน้อยที่สุด และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องน้อยที่สุด การตัดสินใจว่าโพรงขนาดใดและความลึกเท่าใดจะเหมาะสมที่สุดนี้จะใช้วิธี Interpolation จากผลลัพธ์ของการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

จากลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหินเกลือในพื้นที่ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ในแต่ละแบบจำลองผู้วิจัยได้กำหนดความลึกของหลังคาของโพรงจากผิวดิน โดยอาศัยประสบการณ์และหลักเกณฑ์ที่ว่า หลังคาของโพรง (Salt roof) จะต้องมีความหนาเพียงพอที่จะค้ำยันตัวโพรงและชั้นหินหรือดินที่อยู่ข้างบนและในขณะเดียวกันก็จะต้องไม่ลึกเกินไปจนทำให้ปริมาตรของโพรงหรือความจุน้อยเกินไป พื้นของโพรงในหินเกลือ (Salt floor) จะต้องหนาพอเพื่อป้องกันมิให้ของเสียไหลออกไปและจะต้องไม่หนานเกินไปจนทำให้ความจุนของโพรงลดน้อยลงเกินไป

การคำนวณทางคอมพิวเตอร์จะตั้งสมมติฐานว่า โพรงในหินเกลือที่ถูกออกแบบจะมีหลายโพรง โดยมีความลึกและขนาดเท่ากันของแต่ละแบบจำลอง การเรียงตัวในแนวราบของโพรงจะเป็นแบบ Square grid โดยมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง (Spacing S) เท่ากันหมด Square grid นี้จะ

ตารางที่ 2 : ขนาดและรูปร่างของแบบจำลองโพรงในชั้นหินเกลือ

Model	Diameter (D) (ft)	Height (H) (ft)	Depth (d) (ft)	Salt Roof (r) (ft)	Spacing (S) (ft)	H/D	S/D	D/d	D/r	Extraction Ratio (m ³ /km ²)
KS	263	197	1032	696	790	3:4	3:1	1:3.9	1:2.7	1.96x10 ⁶
NK	263	197	1721	816	790	3:4	3:1	1:6.5	1:3.2	1.96x10 ⁶
NP	263	197	3092	2809	790	3:4	3:1	1:11.8	1:10.7	1.96x10 ⁶
PP	263	197	1931	1246	790	3:4	3:1	1:4.7	1:4.7	1.96x10 ⁶
WK	263	197	989	669	790	3:4	3:1	1:3.8	1:2.5	1.96x10 ⁶

เป็นแบบ infinite array อยู่ในบริเวณพื้นที่แนวราบในชั้นหินเกลือ การคำนวณจะใช้ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างโพรงเป็นส่วนกว้างของแบบจำลอง และจะคำนวณโดยใช้ข้อสมมติฐานของ Plane strain assumption ข้อสมมติฐานนี้จะปลอดภัยในการนำมาใช้ในกระบวนการออกแบบและในเชิงของพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของหินเกลือและปลอดภัยในเชิงของการทรุดตัวของผิวดิน ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยที่ได้ทำมาแล้ว (กิตติเทพ เฟื่องขจร, 2542, 2543) ก็ได้นำมาใช้ในการออกแบบโพรงในงานวิจัยนี้ด้วย

3.2 การออกแบบ Mesh

แบบจำลองทั้ง 5 แบบที่กล่าวมาจะสร้างมาจากภาพตัดขวางในแนวดิ่ง โดยมีแกนของโพรงทงรีเป็นขอบเขตทางด้านซ้ายมือ และมีระยะห่างครึ่งหนึ่งระหว่างตัวโพรงเป็นขอบเขตทางด้านขวามือ ขอบเขตทั้งสองด้านนี้จะเป็นแกนของโพรงทางด้านซ้าย และเป็นจุดกึ่งกลางของ Pillar ทางด้านขวา ภาพตัดขวางนี้จะถูกจำลองตั้งแต่ผิวดินลงไปถึงความลึกต่ำกว่าชั้นหินเกลือ รูปที่ 15 ถึงรูปที่ 19 แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองทั้ง 5 แบบที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูล ข้อกำหนด และข้อสมมติฐานที่กล่าวมาแล้ว ช่อง (element) ในโพรงจะไม่ได้ถูกเขียนลงเนื่องจากความต้องการที่จะแสดงขอบเขตของโพรงใน Mesh จะเห็นได้ว่าการออกแบบ Mesh จะใช้ช่อง (element) ที่มีขนาดเล็กในบริเวณที่ใกล้กับตัวโพรง เนื่องจากในบริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นและความเครียดสูง (high stress and strain gradient) ส่วนในบริเวณที่ไกลจากตัวโพรงจะใช้ช่อง (element) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลง ความเค้นและความเครียดต่ำ รูปที่ 15 ถึงรูปที่ 19 นี้ยังแสดงให้เห็นถึงความหนาของชั้นหินแต่ละชั้นในพื้นที่ที่นำมาศึกษา ตารางที่ 2 สรุปรูปร่างทางเรขาคณิตของแบบจำลองต่าง ๆ ปริมาณเกลือที่ผลิตได้ต่อหนึ่งตารางกิโลเมตรก็ได้นำมาเปรียบเทียบกับ ดังนั้น ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของการคำนวณจะพยายามให้เป็นค่าคงที่ หรือให้ใกล้เคียงกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ยกตัวอย่างเช่น จำนวนและขนาดของ Mesh เป็นต้น ตารางที่ 3 จะสรุปให้เห็นถึงจำนวนและขนาดของ element และ node ของ mesh ที่ได้ถูกออกแบบมาสำหรับ 5 แบบจำลองนี้

3.3 ความเค้นในหิน (In-situ Stress)

ความเค้นในชั้นหินเกลือและชั้นหินข้างเคียงจะถูกคำนวณจากสมมติฐานที่ว่า ชั้นหินทั้งหมดอยู่ภายใต้แรงกดแบบ Hydrostatic ดังนั้นการคำนวณความเค้นในหินทั้งในแนวดิ่งและแนวนอนที่ความลึกใด ๆ ก็สามารถคำนวณได้เมื่อเรารู้ค่าความถ่วงจำเพาะของหินแต่ละชั้น ข้อสมมติฐานนี้ค่อนข้างจะใกล้เคียงความจริงเนื่องจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นลักษณะแอ่งที่อยู่ในที่ราบสูง ถึงแม้จะไม่มีกรวัดค่าความเค้นในชั้นหินนี้ (In-situ Stress) แต่ว่าการคำนวณแบบ Hydrostatic จะได้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างปลอดภัย โดยเฉพาะในเชิงออกแบบและวิเคราะห์

ตารางที่ 3 : จำนวน Node และ Element ในแบบจำลอง

Model	Number of Nodes	Number of Elements
KS	1052	985
NK	1261	1177
NP	1394	1295
PP	1227	1143
WK	1070	1001

แรงดันที่อยู่ในโพรงจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของน้ำเกลือ ความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลือจะมีค่าโดยประมาณที่ 0.52 psi per ft ที่อุณหภูมิปกติ (Ambient temperature) ค่านี้จะนำมาคำนวณหาความดันในโพรงโดยใช้ความลึกของหลังกาโพรง ผนังของโพรงและพื้นของโพรงเข้ามาใช้ในการคำนวณ

สำหรับหินเกลือค่าความถ่วงจำเพาะในเชิงความลึกจะสามารถคำนวณได้จากค่า 0.944 psi per ft ส่วนในชั้นหินดินดานและหินตะกอนจะคำนวณได้จาก 1.20 psi per ft ค่านี้ที่นำมาใช้จะมีค่าประมาณ 10% สูงกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของหินนั้น ๆ การทดแทนเพื่อให้หินมีความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น (หรือหนักขึ้น) จะได้ผลลัพธ์ที่ปลอดภัย เพราะค่าเหล่านี้จะถูกแปรมาเป็นความเค้นในชั้นหินรอบ ๆ ตัวโพรง เพื่อป้อนเป็นข้อมูลในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

บทที่ 4

ผลของการคำนวณ

การคำนวณโดยใช้ Finite element program GEO จะมุ่งไปที่การพิจารณาความเค้นในแกนหลัก (Principal stresses) ความเครียดในแกนหลัก (Principal strains) การหดตัวของโพรง (Cavern closure) การทรุดตัวของผิวดิน (Surface subsidence) และการเพิ่มความซึมผ่านในชั้นหินเกลือ (Permeability increase) และประเมินการประพุดตัวและเสถียรภาพอันยาวนาน ซึ่งจะเป็นเป้าหมายอันสูงสุด ดังนั้นผลการคำนวณทางด้านพฤติกรรมของหินเกลือทั้งทางด้านกลศาสตร์และความซึมผ่านหลังจากที่โพรงได้ถูกละลายขึ้นมาแล้ว 50 ปี จะถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้

รูปที่ 20-24 แสดงขนาดและทิศทางของความเค้นในแกนหลัก (Principal stresses) ในชั้นหินเกลือที่อยู่รอบ ๆ โพรงที่มีอายุ 50 ปีของแบบจำลอง KS, NK, NP, PP และ WK ตามลำดับ ความเค้นที่มีค่าสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณมุมกลางของโพรง ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความลึกของหลังคาโพรงต่อค่าความเค้นรอบ ๆ โพรงก็จะไม่ต่างกัน

รูปที่ 25-29 แสดงขนาดและทิศทางของความเครียดในแกนหลัก (Principal strains) ในชั้นหินเกลือที่อยู่รอบ ๆ โพรงที่มีอายุ 50 ปีของแบบจำลอง KS, NK, NP, PP และ WK ตามลำดับ ขนาดและทิศทางของความเครียดนี้จะบ่งบอกให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปร่างของโพรงหลังจากที่ได้ถูกละลายขึ้น ซึ่งในที่สุดแล้วการเปลี่ยนรูปนี้จะแสดงออกมาในรูปของการหดตัวในแนวตั้งและในแนวตั้งของเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง ผลการคำนวณระบุว่า โพรงที่อยู่ลึกจะมีความเครียดสูงกว่าโพรงที่ละลายในระดับตื้น

รูปที่ 30-34 แสดงการกระจายตัวของความเค้นในแนวเฉียงรอบโพรงของแบบจำลองต่าง ๆ กัน ผลกระทบของความลึกในส่วนที่นำมาศึกษา (D/d) ต่อการกระจายตัวของความเค้นในแนวเฉียงจะมีไม่มากนัก ดังแสดงให้เห็นในรูปว่าการกระจายตัวของความเค้นของแต่ละพื้นที่จะคล้ายคลึงกัน

การกระจายตัวของความเค้นในแนวเฉียงจากบริเวณกลางผนังของโพรงเข้าไปในชั้นหินเกลือที่ค้ำยันและกั้นระหว่างโพรงของแบบจำลองทุกแบบได้นำมาแสดงไว้ในรูปที่ 35-39 รูปเหล่านี้แสดงความสัมพันธ์ของแรงเฉือนของโพรงที่มีอายุต่างกัน (คืออายุ 10 วัน 1 ปี 10 ปี และ 50 ปี) ผลที่ได้จากการคำนวณบ่งบอกว่าแรงเฉือนจะมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา โดยระยะห่างระหว่างโพรงเป็น 3:1 แรงเฉือนจะเข้าสู่ระบบสมดุล (Equilibrium) เกือบทันทีหลังจากที่โพรงได้ถูกละลายขึ้น กล่าวคือแรงเฉือนที่ 1 ปี 10 ปี และ 50 ปี รูปที่ 35-39 ยังแสดงให้เห็นผลกระทบของความ

ลึกลงต่อการกระจายตัวของแรงเฉือน ซึ่งจะมีค่าสูงสุดของแรงเฉือนใกล้เคียงกันและจะสะสมตัวอยู่ใกล้กับผนังของโพรง ถ้าโพรงอยู่ตื้นขึ้นการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนในชั้นหินเกลือก็จะมีแนวโน้มสูงขึ้น

ผลกระทบจากความลึกของโพรงต่อการทรุดตัวของผิวดินที่ได้จากผลการคำนวณจะมีค่าประมาณ 3-4 นิ้ว หรือน้อยกว่า การทรุดตัวของผิวดินในช่วง 50 ปี หลังจากโพรงได้ถูกละลายขึ้นก็ไม่ควรจะเกิน 4 นิ้ว ปริมาณการทรุดตัวจะเกิดมากและเร็วที่สุดในช่วง 1-2 ปีแรกหลังจากโพรงได้ถูกละลายขึ้น หลังจากนั้นแล้วก็จะมีความคงที่ไปจนถึง 50 ปีหรือนานกว่า ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการเข้าสู่ระบบสมดุลทางด้านกลศาสตร์ของหินเกลือและหินข้างเคียงที่วางตัวอยู่เบื้องบน

การหดตัวของโพรงในแนวตั้งได้แสดงในเชิงเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองต่าง ๆ ในรูปที่ 40 ถ้าขนาดของโพรงมีระดับตื้นขึ้น (หรืออีกนัยหนึ่งชั้นเกลือของหลังคาโพรงบางลง) จะทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้นดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 40 ซึ่งเปรียบเทียบการหดตัวของแบบจำลองของบ้านหนองปู่กับแบบจำลองอื่น ๆ ที่ความลึกต่างกัน

การหดตัวในแนวราบบริเวณเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงของทุกแบบจำลองจะมีค่าน้อยกว่าการหดตัวในแนวตั้งดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 41 ผลการคำนวณบ่งบอกว่าการหดตัวในแนวราบนี้จะมีมากขึ้นเช่นกันถ้าโพรงอยู่ในระดับลึก

ผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่าทั้ง 5 แบบจำลอง ค่าความซึมผ่านในชั้นหินเกลือจะไม่เพิ่มขึ้น คือมีค่า Permeability อยู่ที่ 10^{-10} Darcy ตั้งแต่ก่อนละลายโพรงไปจนถึง 50 ปีของอายุของโพรง เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปในชั้นหินเกลือทุกจุดที่อยู่รอบโพรง จะเปลี่ยนรูปในรูปของ Plastic deformation ไม่ใช่เป็นแบบ Brittle deformation และอีกประการหนึ่งคือค่าเฉลี่ยของแรงดันในชั้นหินเกลือก็มีค่าสูงพอสมควรที่จะทำให้เกลือรอบ ๆ โพรงเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และเนื่องจากความลึกของโพรงที่ได้กำหนดไว้

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลของการคำนวณ

การวิเคราะห์ผลของการคำนวณจะเน้นไปที่ความเหมาะสมในแต่ละพื้นที่ที่เป็นตัวแทนทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยความเหมาะสมนี้จะรวมไปถึง

1. โพรงจะต้องมีเสถียรภาพทางกลศาสตร์สูงและในระยะเวลากว่า 50 ปี
2. มีการทรุดตัวของผิวดินน้อยที่สุด หรือไม่ควรเกิน 4 นิ้ว ในช่วง 50 ปี
3. ไม่มีการรื้อซึมระหว่างโพรง กล่าวคือ ความซึมผ่านในชั้นหินเกลือจะต้องไม่เพิ่มขึ้นจากค่าที่ค่าที่อยู่ตามธรรมชาติก่อนที่จะสร้างโพรงขึ้น
4. มีการหดตัวของโพรงเนื่องจาก Creep Deformation น้อยที่สุด
5. แต่ละโพรงควรจะถูกใส่ใกล้กันเท่าที่จะทำได้เพื่อเพิ่มผลผลิตของปริมาณเกลือสินเธาว์ต่อพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตร

จากหลักเกณฑ์ข้างต้นผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลของการคำนวณที่เสนอในบทที่ 4 ประกอบกับเหตุผลอธิบายถึงการคัดเลือกข้อกำหนดของการออกแบบที่เหมาะสมของแบบจำลองใน 5 พื้นที่

ในพื้นที่บ้านโคกสง่า (Model KS) มีชั้นหินเกลืออยู่ 2 ชั้น ทั้ง 2 ชั้นนี้จะคั่นด้วยหินดินดาน ซึ่งมีความหนาประมาณ 87 ฟุต หินเกลือชั้นบนจะอยู่ที่ความลึก 336 ฟุต ส่วนชั้นหินเกลือชั้นล่างอยู่ที่ความลึก 550 ฟุต ชั้นหินดินดานนี้จะมีค่า Shear modulus และค่า Bulk modulus ต่ำมาก (ประมาณ 1 ใน 10 ของชั้นหินเกลือ) ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 1 โพรงที่จะทำการละลายในพื้นที่ที่บ้านโคกสง่าควรจะมีความลึกอย่างน้อย 1032 ฟุต และเพื่อให้เสถียรภาพสูงขึ้นเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงไม่ควรเกิน 260 ฟุต ความสูงของโพรงไม่ควรเกิน 200 ฟุต ทั้งนี้เพื่อเหลือชั้นหินเกลือที่หนาอย่างน้อย 100 ฟุต ไว้ใต้พื้นของโพรงเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเค็มในโพรงรั่วซึมลงไปชั้นหินทรายที่อยู่ข้างล่าง นอกจากนั้นแล้วในพื้นที่ที่บ้านโคกสง่านี้ระยะห่างระหว่างโพรงไม่ควรน้อยกว่า 790 ฟุต ถ้าระยะห่างระหว่างโพรงลดลงชั้นหินเกลือที่กั้นระหว่างโพรงซึ่งจะรองรับน้ำหนักของชั้นหินข้างบนทั้งหมด (Overburden) จะต้องรับน้ำหนักมากซึ่งจะทำให้หินเกลือที่อยู่ใกล้ผนังของโพรงมีเสถียรภาพต่ำลง และจะทำให้มีการหดตัวของโพรงสูงขึ้น

ในพื้นที่บ้านหนองขาม (Model NK) จะมีชั้นหินเกลืออยู่ 2 ชั้น ทั้ง 2 ชั้นนี้จะคั่นด้วยชั้นหินดินดานซึ่งมีความหนาประมาณ 36 ฟุต หินเกลือชั้นบนจะอยู่ในระดับความลึก 905 ฟุต ส่วนหินเกลือชั้นล่างจะอยู่ที่ระดับความลึก 1224 ฟุต เนื่องจากชั้นหินเกลือข้างบนอยู่ในระดับตื้นเกินไปการที่จะละลายโพรงขนาดใหญ่ให้เหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจอาจจะทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดิน

อย่างรุนแรงและอาจทำให้เกิดการพังทลายของโพรงได้ การที่เลือกละลายโพรงในชั้นหินเกลือชั้นล่างนี้จะทำให้เสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์ของโพรงมีค่าสูงขึ้น มีการทรุดตัวของผิวดินน้อยลง และจะทำให้เหมาะสมทางด้านเศรษฐกิจ ดังนั้นหลังคาของโพรงควรจะอยู่ที่ความลึก 1721 ฟุต เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงไม่ควรเกิน 260 ฟุต ความสูงของโพรงไม่เกิน 200 ฟุต ทั้งนี้เพื่อเหลือชั้นหินเกลือที่หนาระยะประมาณ 100 ฟุต เอาไว้ด้านล่างของโพรงเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำเค็มในโพรงลงไปถึงชั้นหินทรายที่อยู่ด้านล่างของโพรง ระยะห่างระหว่างโพรง (วัดจากจุดศูนย์กลาง) ไม่ควรต่ำกว่า 790 ฟุต

ในพื้นที่บ้านหนองปู (Model NP) มีชั้นหินเกลือ 2 ชั้นเช่นเดียวกัน หินเกลือชั้นนี้จะอยู่ในระดับตื้นแต่มีความหนากว่าหินเกลือที่อื่น ๆ ด้วยเหตุผลเดียวกันโพรงควรจะถูกละลายในชั้นหินเกลือชั้นล่าง หลังคาของโพรงควรจะอยู่ที่ความลึกประมาณ 3092 ฟุต ความสูงของโพรงไม่ควรเกิน 200 ฟุต เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงควรอยู่ที่ 260 ฟุต ระยะห่างระหว่างโพรงไม่ควรน้อยกว่า 790 ฟุต

ในพื้นที่บ้านโพธิ์พาน (Model PP) มีชั้นหินเกลือ 2 ชั้นเช่นเดียวกัน หินเกลือชั้นบนจะอยู่ที่ระดับ 685 ฟุต และหินเกลือชั้นล่างจะอยู่ที่ระดับ 1273 ฟุต โดยมีชั้นหินดินดานคั่นอยู่หนาประมาณ 219 ฟุต ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้โพรงควรจะถูกละลายในชั้นเกลือชั้นล่าง หลังคาของโพรงควรจะอยู่ที่ความลึก 1931 ฟุต ความสูงของโพรงไม่ควรเกิน 200 ฟุต เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงควรอยู่ที่ 260 ฟุต ระยะห่างระหว่างโพรงไม่ควรน้อยกว่า 790 ฟุต

ในพื้นที่วัดขาม (Model WK) มีชั้นหินเกลือ 2 ชั้นเช่นเดียวกัน แต่มีชั้นแอนไฮไดรท์คั่นอยู่ซึ่งหนาน้อยมาก หินเกลือชั้นบนจะอยู่ที่ระดับ 330 ฟุต และหินเกลือชั้นล่างจะอยู่ที่ระดับ 890 ฟุต ด้วยเหตุผลเดียวกันโพรงควรจะถูกละลายในชั้นเกลือชั้นล่าง หลังคาของโพรงควรจะอยู่ที่ความลึก 989 ฟุต ความสูงของโพรงไม่ควรเกิน 200 ฟุต เส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงควรอยู่ที่ 260 ฟุต ระยะห่างระหว่างโพรงไม่ควรน้อยกว่า 790 ฟุต

จากการกำหนดค่าการออกแบบบางค่าดังกล่าวข้างต้นผลที่ได้รับคือ โพรงจะมีเสถียรภาพสูงที่สุดทางด้านกลศาสตร์ ขนาดของโพรงก็จะเหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจ การที่จะเพิ่ม Extraction ratio ให้สูงกว่านี้อาจจะทำให้เสถียรภาพทางด้านกลศาสตร์ของโพรงต่ำลง ข้อเสนอแนะด้านการออกแบบดังกล่าวข้างต้นจะทำให้หินเกลือเข้าสู่ระบบสมดุลเร็วที่สุดหลังจากที่โพรงได้ถูกละลายขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในชั้นหินเกลือและชั้นหินข้างเคียงน้อยที่สุด

ผู้วิจัยขอเน้นในที่นี้ว่าผลที่ได้รับจากการคำนวณและข้อเสนอแนะทางด้านการออกแบบดังกล่าวข้างต้นจะต้องตั้งอยู่บนสมมติฐานหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น ชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงจะต้องมีลักษณะสมบูรณ์ ไม่มีโพรง รอยแตก หรือการผุพัง ชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงต้องอยู่ในแนวราบ ไม่มีการขุดเจาะมาก่อน และจะไม่มีการขุดเจาะเพิ่มเติมหลังจากที่ได้ทำการละลายโพรงตามที่แนะนำไปแล้ว โพรงที่จะทำการละลายต้องมีขนาดและรูปร่างทางเรขาคณิตคงที่ได้เสนอไว้ กล่าวคือจะต้องเป็นรูปทรงกระบอกในแนวตั้ง แรงดันของน้ำเกลือในโพรงก็ต้องเท่ากับน้ำหนักของน้ำเกลือที่มีระดับสูงถึงพื้นผิวดินด้านบน นอกจากนั้นแล้วควรตระหนักว่าผลที่ได้รับจากการคำนวณยังขึ้นกับข้อสมมติฐานและขอบเขตของการวิจัยอื่นดังที่ได้เสนอไว้ในบทต้น ๆ

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการทำเหมืองเกลือแบบละลายที่ได้มาตรฐานสากล เพื่อประยุกต์ใช้ในชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วย การศึกษาได้มุ่งไปที่การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินเสถียรภาพและคาดคะเนผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องไปจนถึง 50 ปีข้างหน้าหลังจากที่โพรงได้ถูกละลายขึ้น พื้นที่ที่เป็นตัวแทนที่ชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้เลือกขึ้นมาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ได้แก่ พื้นที่บ้านโคกสง่า บ้านหนองขาม บ้านหนองปู บ้านโพธิ์พาน และวัดขาม ผลที่ได้จากการคำนวณและการวิเคราะห์ที่สามารถสรุปในเชิงการออกแบบรูปร่างของโพรงดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4

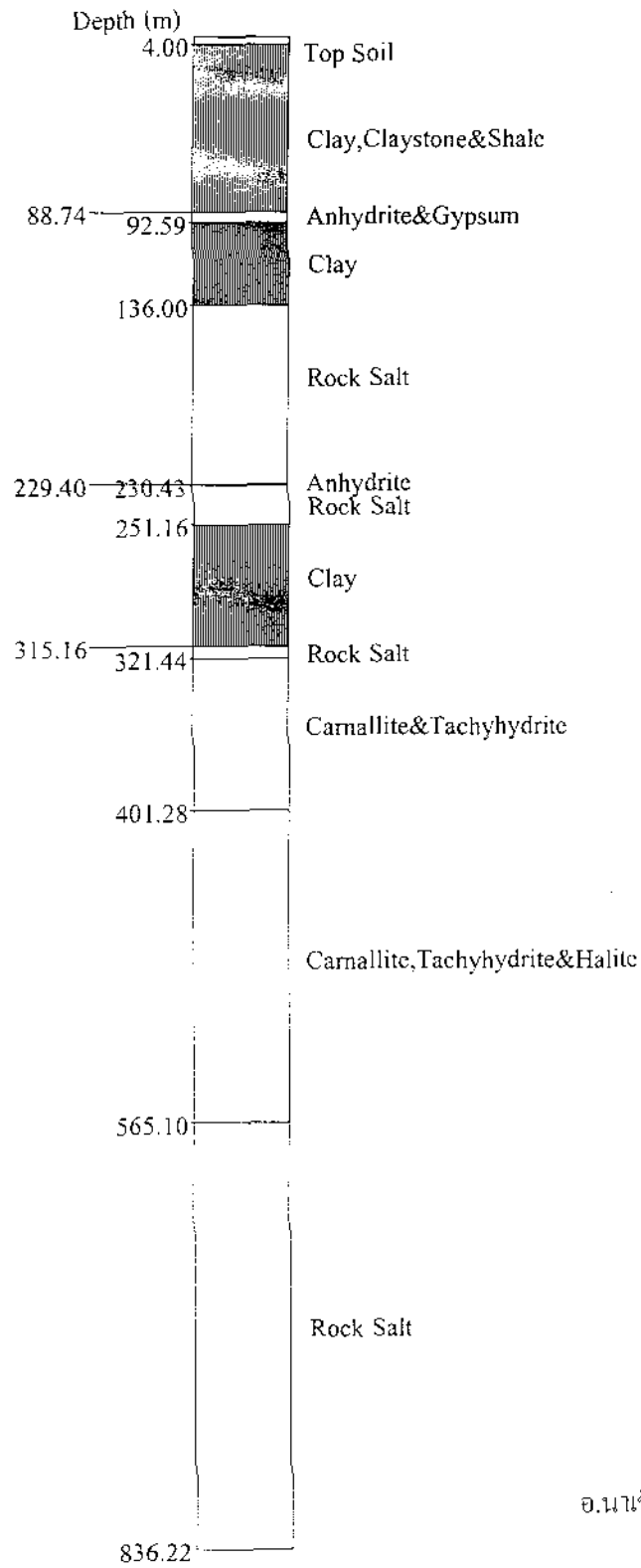
การวิจัยนี้ได้อาศัยข้อมูลบางส่วนทางด้านคุณสมบัติของหินเกลือ (Creep Properties) จากต่างประเทศ (สหรัฐอเมริกา แคนาดา และเยอรมันนี) เนื่องจากการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติของหินเกลือยังมิได้มีการทำในหินเกลือของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยอันอาจจะเนื่องมาจากจะต้องมีการลงทุนที่สูง ดังนั้นความแม่นยำของข้อสรุปของโครงการนี้จะสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ถ้ามีข้อมูลเพิ่มเติมทางด้านคุณสมบัติของหินเกลือ และเพื่อปรับปรุงผลการวิจัยนี้ให้ถูกต้องและแม่นยำขึ้นควรจะมีการวัดและตรวจสอบทางภาคสนาม ซึ่งเป็นการวัดการทรุดตัวของผิวดินที่อยู่เหนือโพรงในหินเกลือที่มีขนาดและการวางตัว (Layout) คล้ายคลึงกันกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้อาจจะขยายผลไปถึงการออกแบบโพรงในหินเกลือรูปแบบอื่นนอกเหนือจากรูปทรงรีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อให้มีความหลากหลายในการออกแบบ การเปลี่ยนตัวแปรนี้อาจจะรวมไปถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรง ความลึก แรงดันในโพรง และอุณหภูมิของโพรงในชั้นหินเกลือ หรือการเลือกใช้ชั้นหินเกลือที่บริเวณอื่นที่มีความลึกและความหนาต่างไปจากที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นต้น

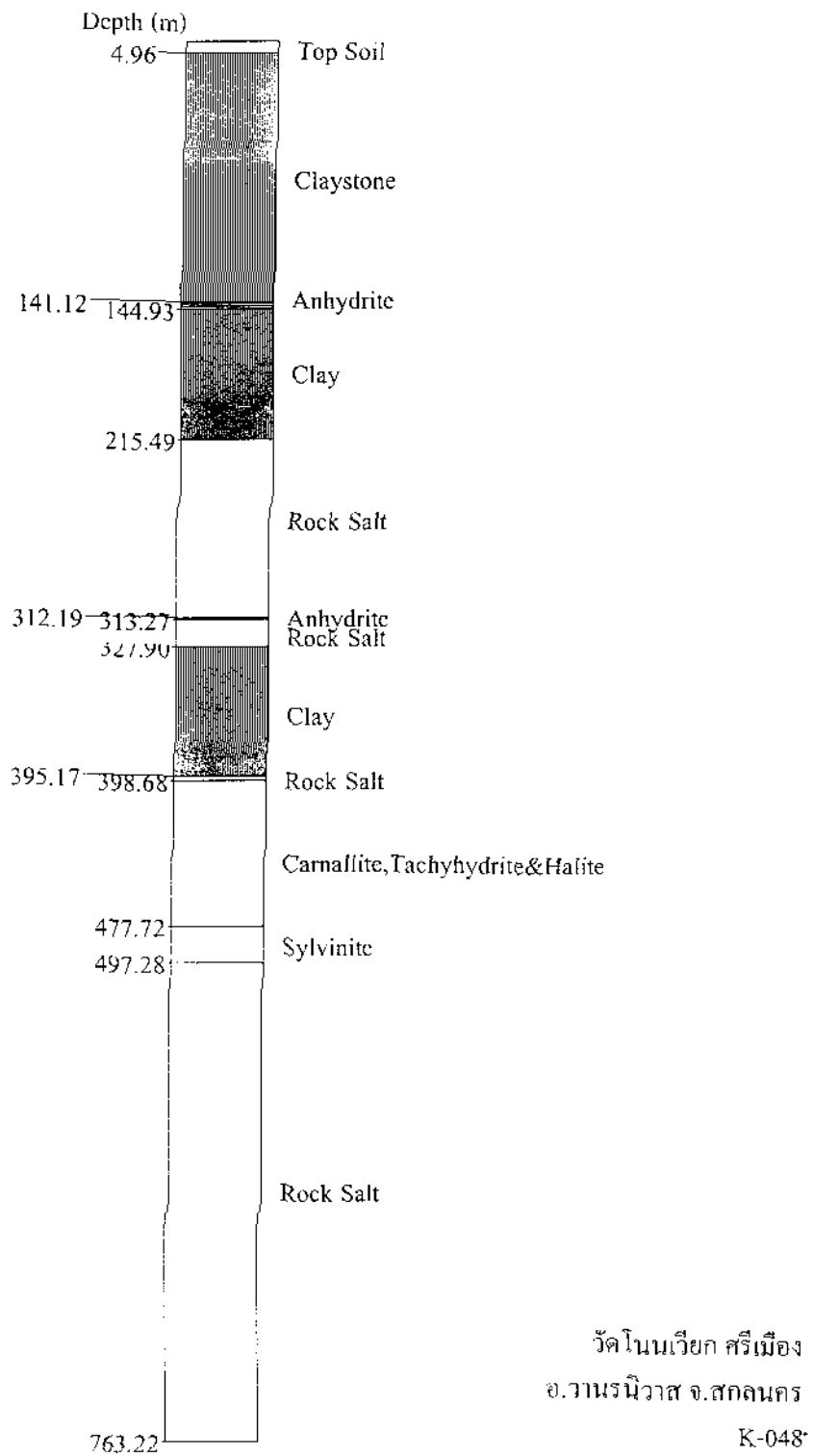
ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้นำมาร่างคู่มือการทำเหมืองเกลือแบบละลาย และได้แทรกไว้ในภาคผนวกของรายงานวิจัยนี้ ซึ่งผู้ประกอบการสามารถนำไปใช้เพื่อช่วยในการออกแบบเหมืองเกลือแบบละลายเบื้องต้นได้

ตารางที่ 4 : ข้อเสนอแนะในการออกแบบโพรงในชั้นหินเกลือในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

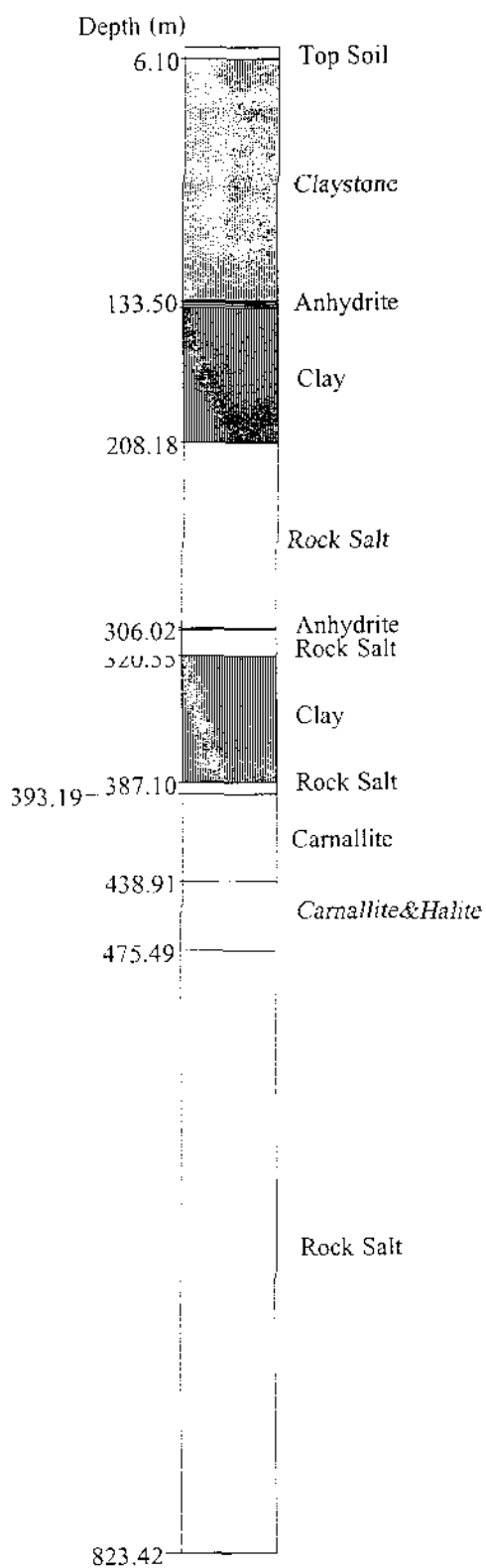
Model	ชื่อกลุ่มบ้าน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ฟุต)	ความสูงโพรง (ฟุต)	ความลึกโพรง (ฟุต)	ระยะห่างระหว่างโพรง (ฟุต)	ปริมาตรของเกลือ (ลูกบาศก์เมตร ต่อตารางกิโลเมตร)
KS	โคกสง่า	260	200	1032	790	1.96×10^6
NK	หนองขาว	260	200	1721	790	1.96×10^6
NP	หนองปู่	260	200	3092	790	1.96×10^6
PP	โพธิ์พาน	260	200	1931	790	1.96×10^6
WK	วัดขาม	260	200	989	790	1.96×10^6



รูปที่ 1 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านโพธิ์พาน อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม

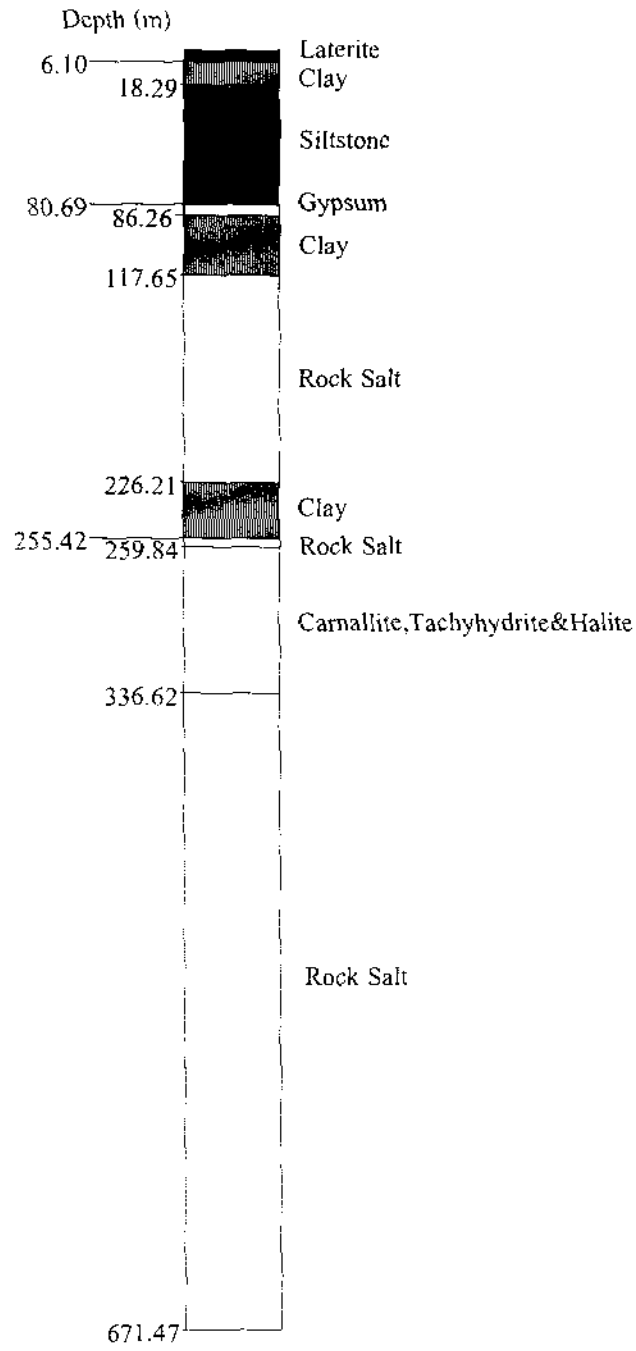


รูปที่ 2 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัด โนนเว็ยก บ้านศรีเมือง อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร



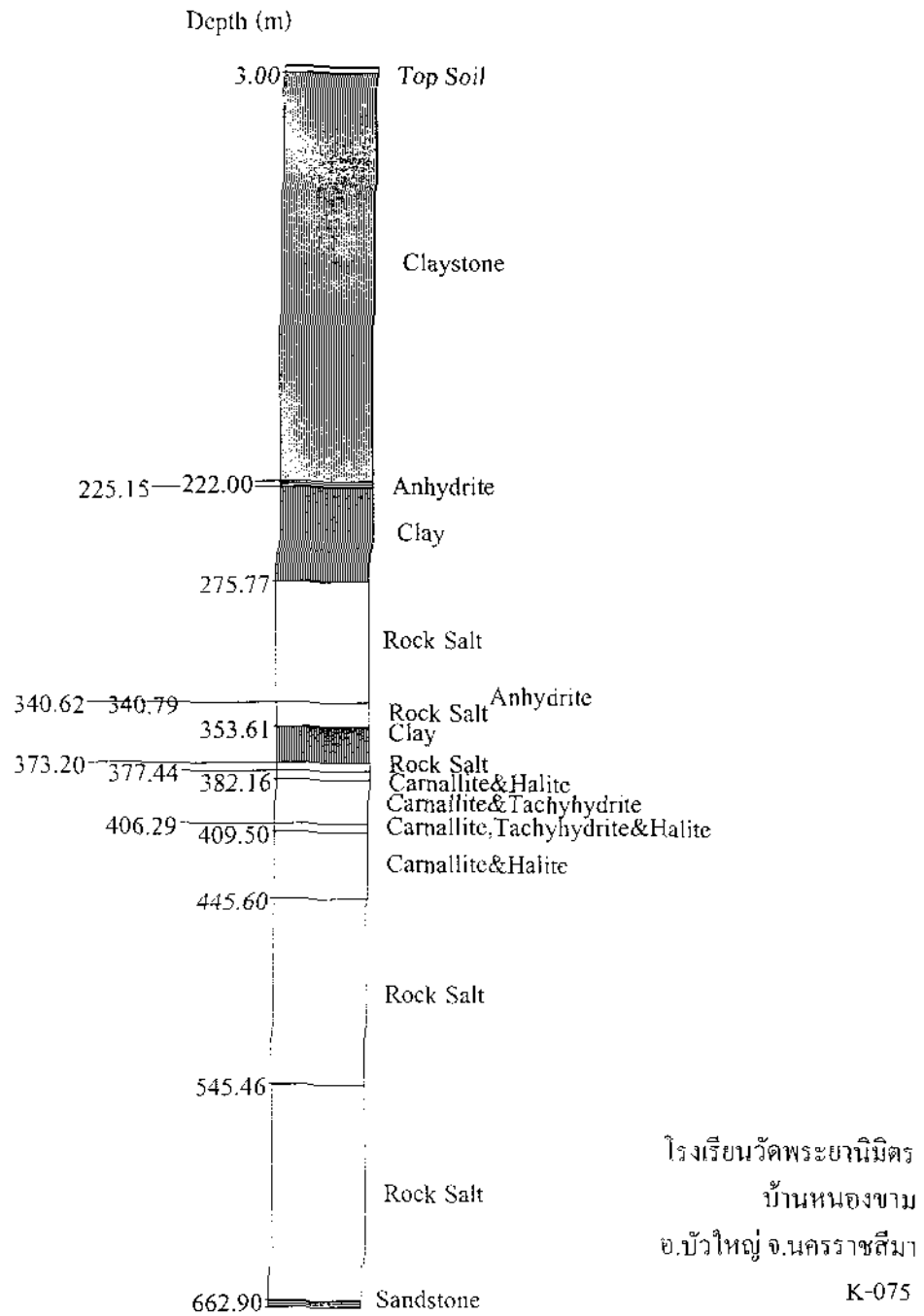
วัดอัมพวัน บ้านกุดจิก
อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร
K-055

รูปที่ 3 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดอัมพวัน บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร

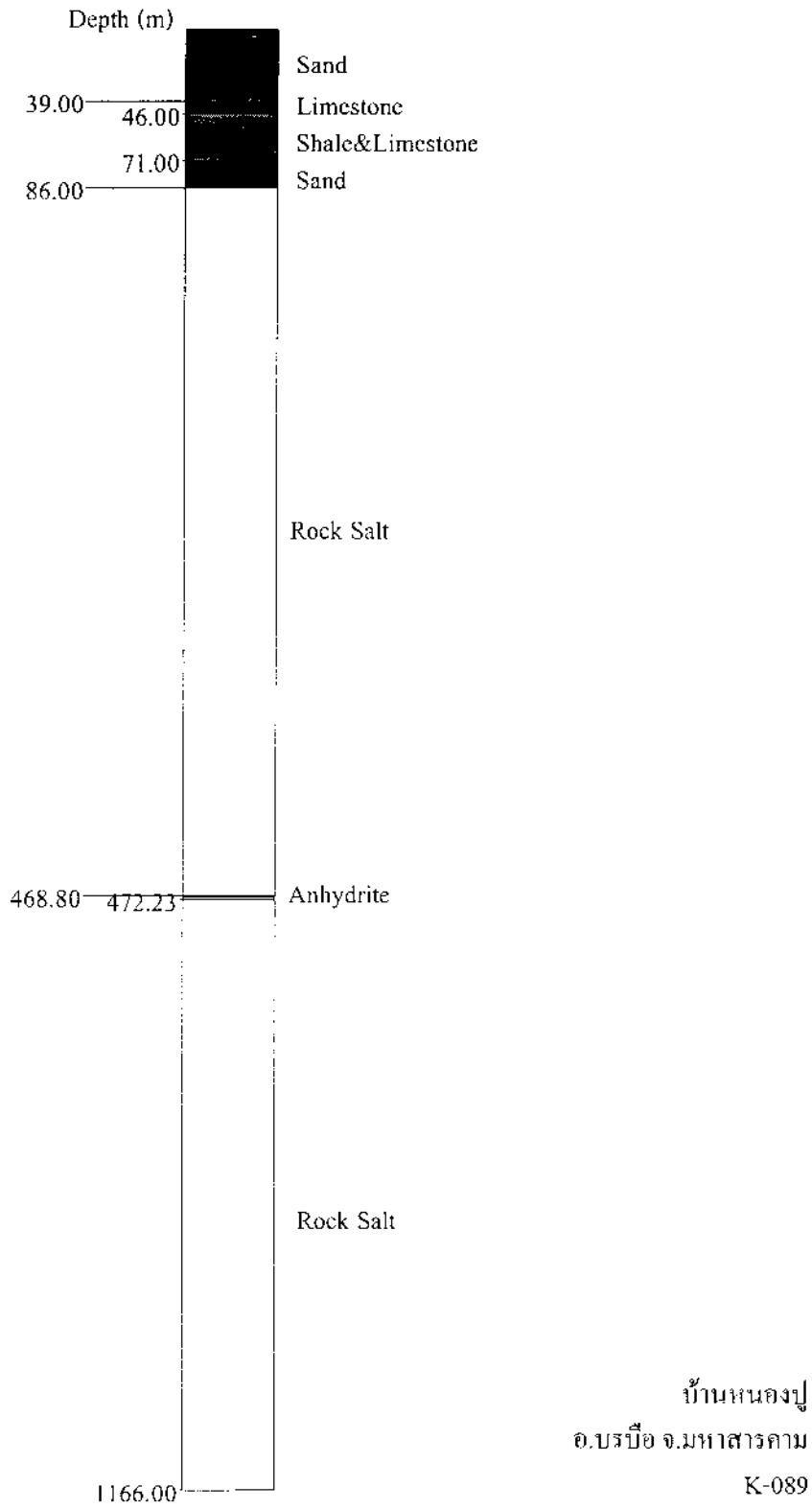


บ้านเก่า
อ.เมือง จ.อุตรธานี
K-006

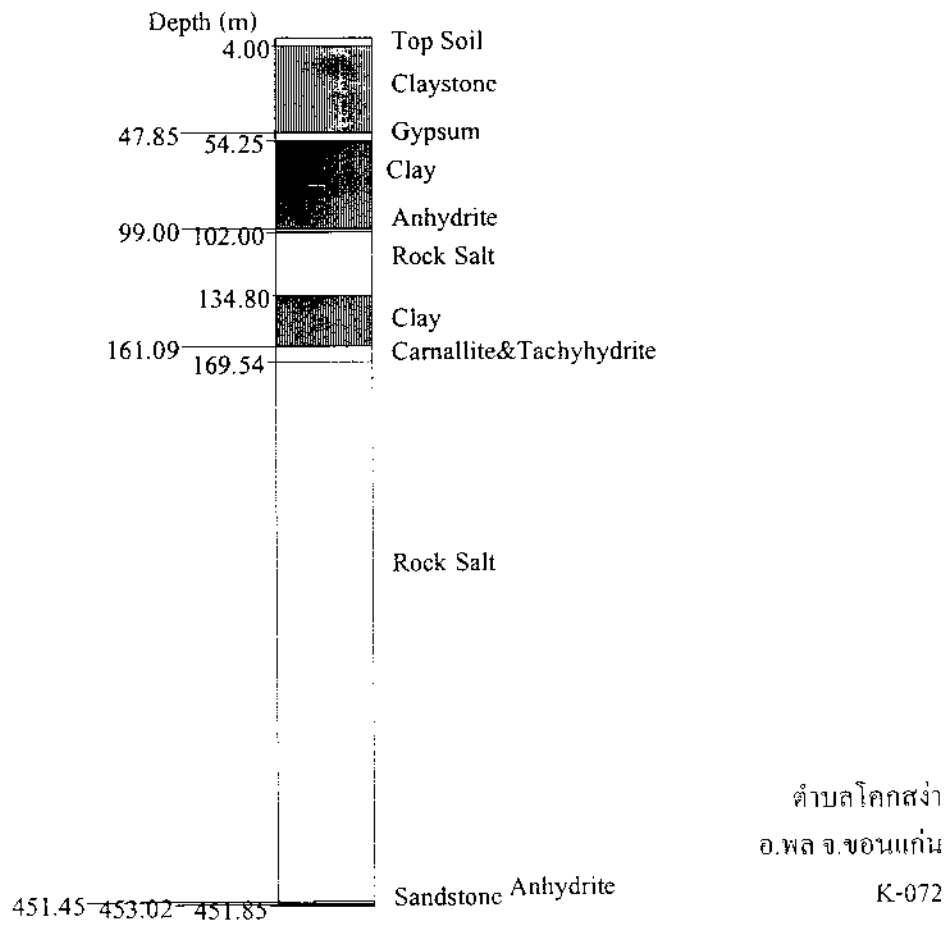
รูปที่ 4 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุตรธานี



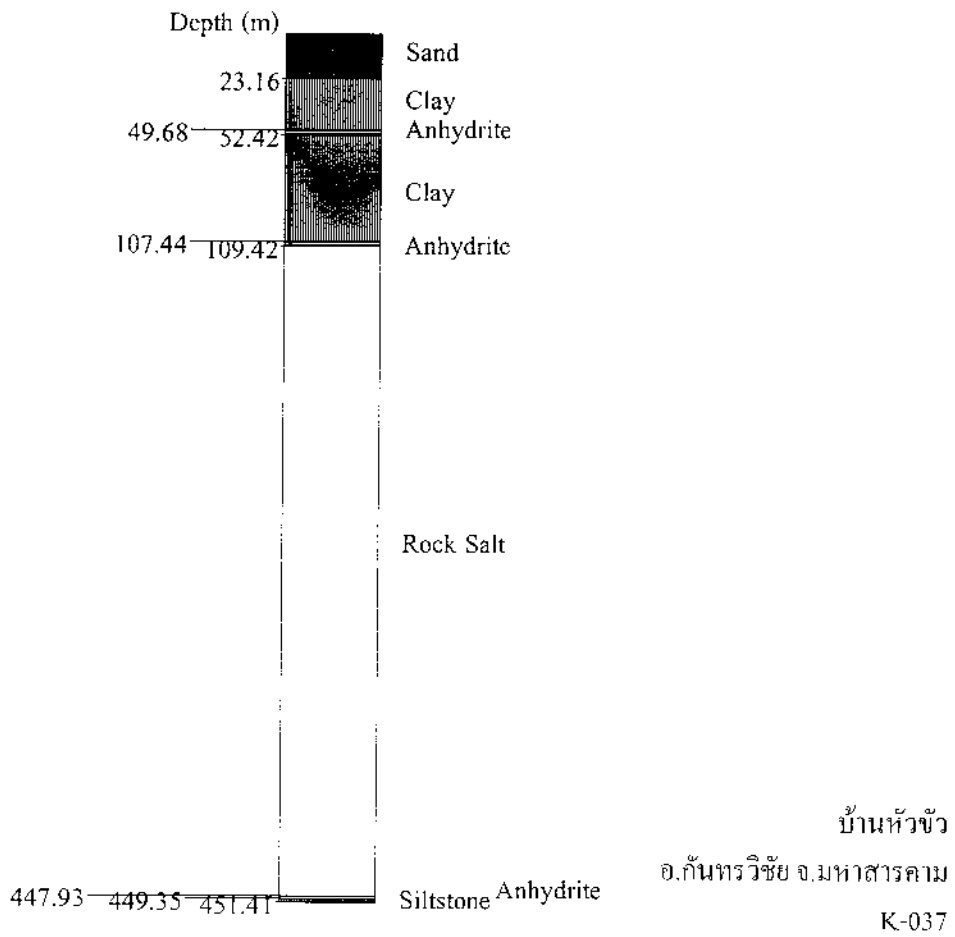
รูปที่ 5 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่โรงเรียนวัดพระยานิมิตร บ้านหนองขาม อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา



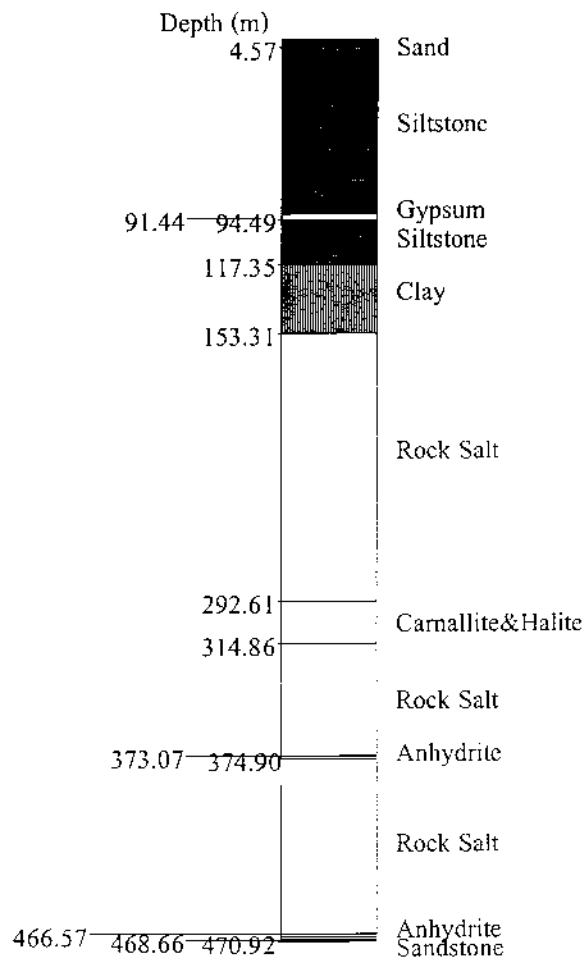
รูปที่ 6 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านหนองปู อ.บรบือ จ.มหาสารคาม



รูปที่ 7 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านโคกสง่า อ.พล จ.ขอนแก่น

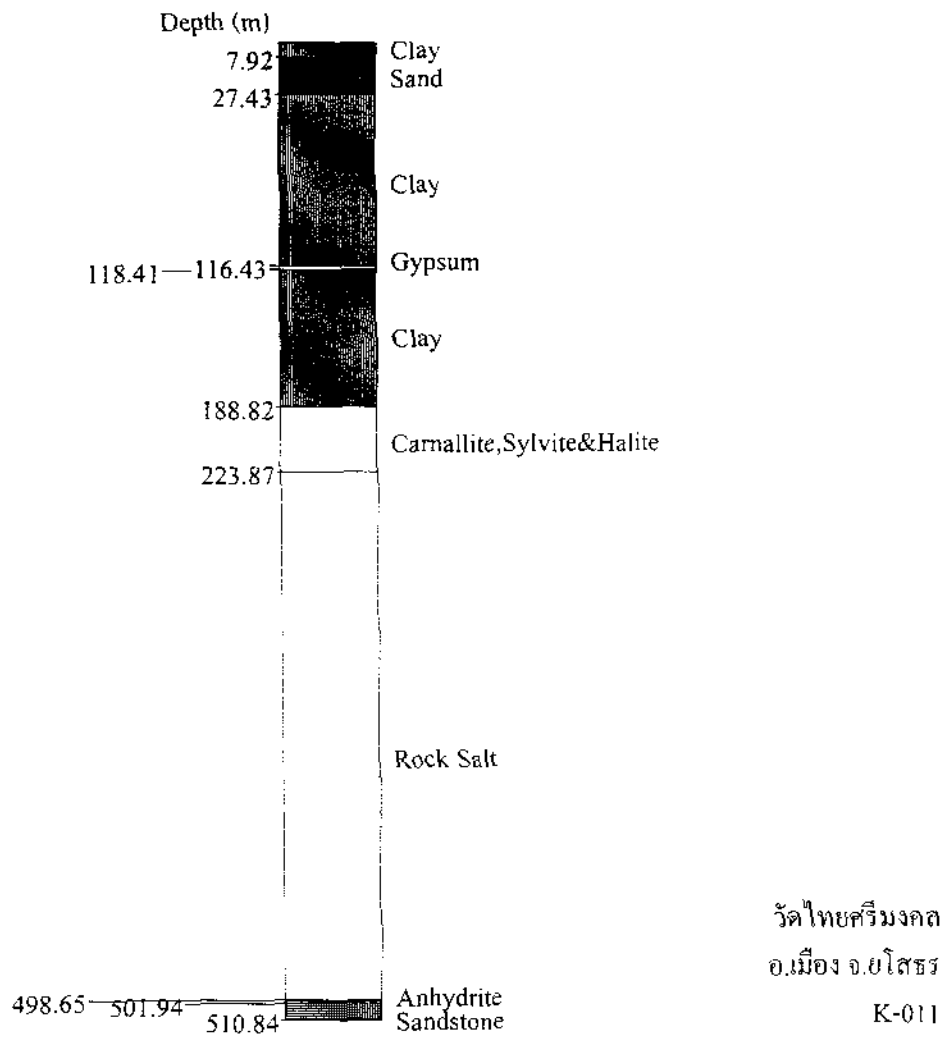


รูปที่ 8 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านหัวขัว อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม

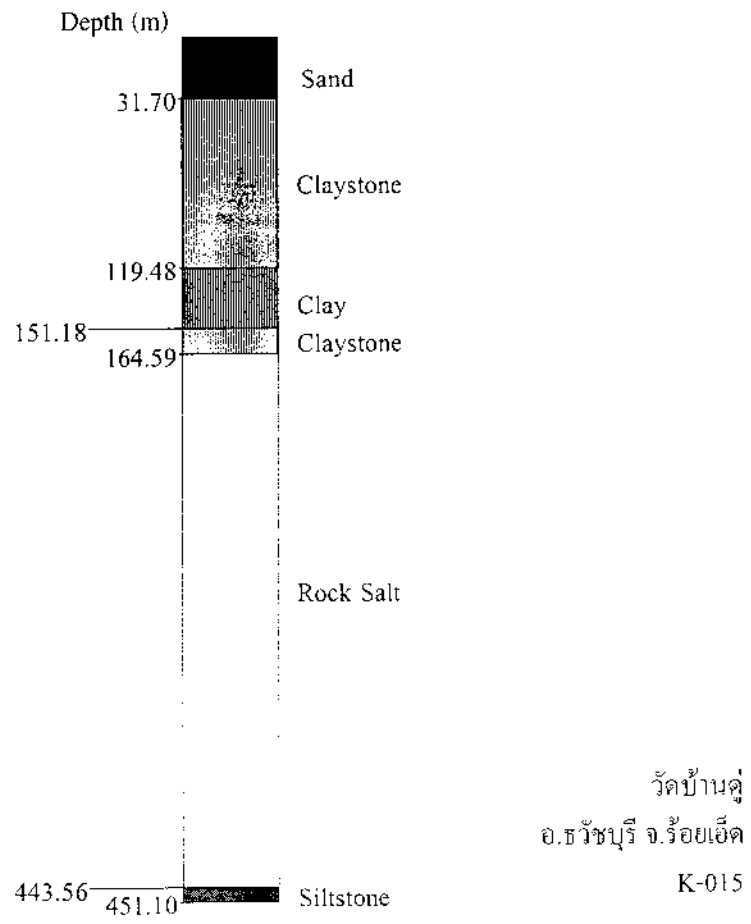


วัดสุทธิมงคล
 อ.พนนานิคม จ.มหาสารคาม
 K-043

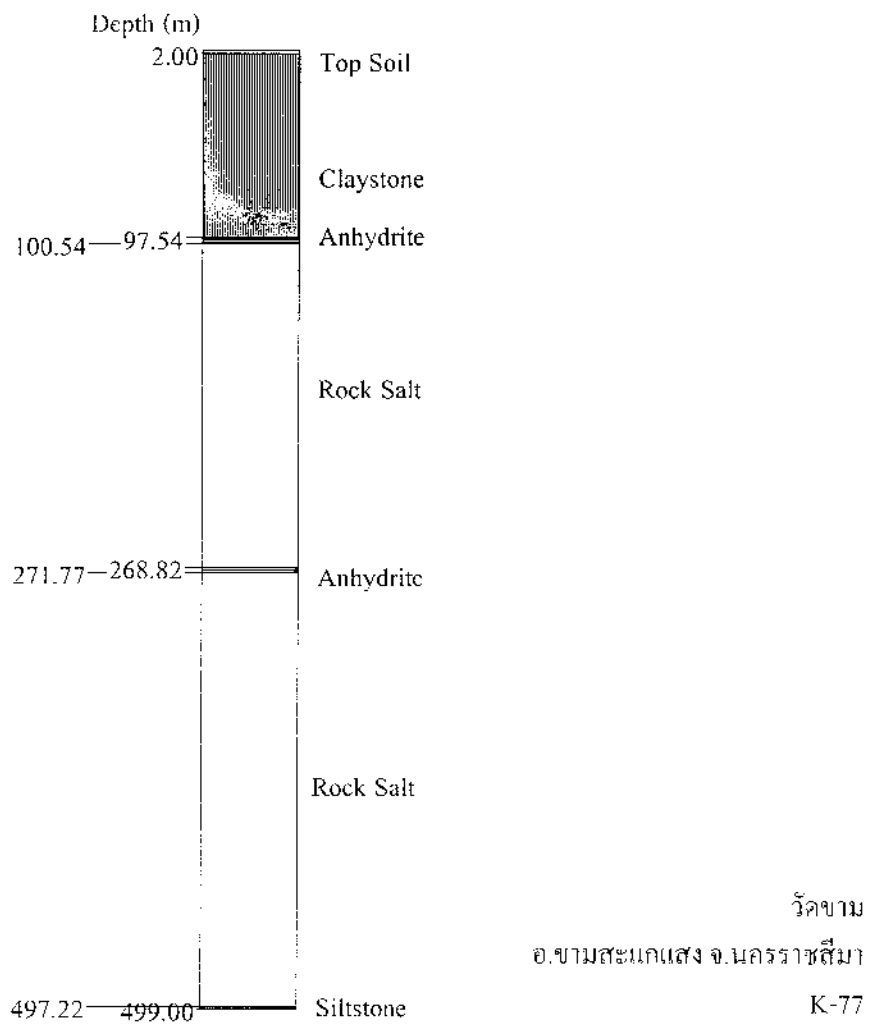
รูปที่ 9 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดสุทธิมงคล อ.พนนานิคม จ.มหาสารคาม



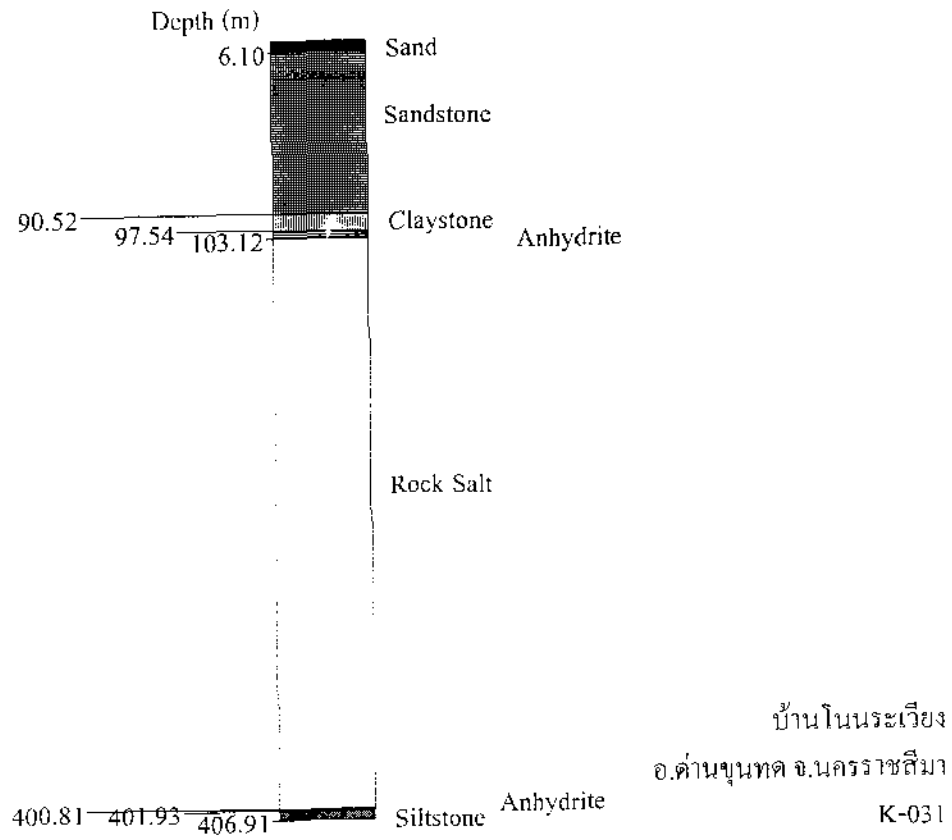
รูปที่ 10 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดไทยศรีมณฑล อ.เมือง จ.ยโสธร



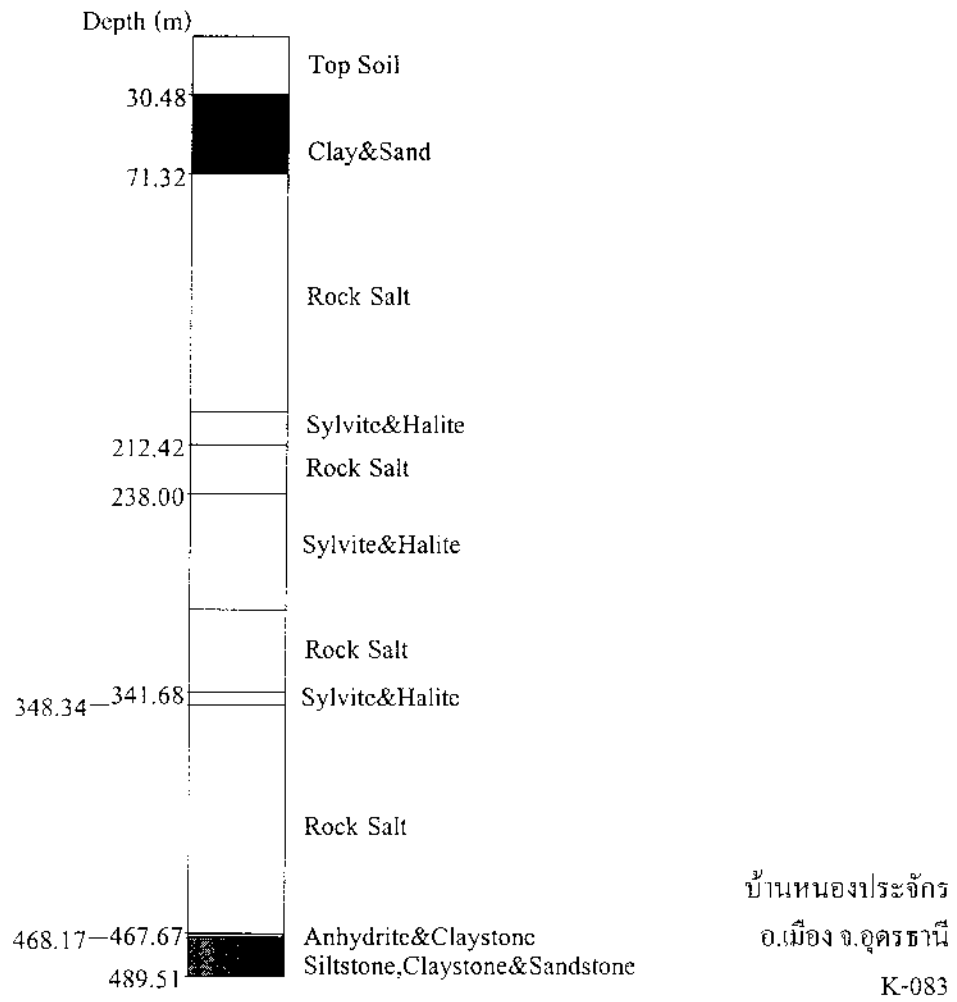
รูปที่ 11 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดบ้านคู้ อ.ธวัชบุรี จ.ร้อยเอ็ด



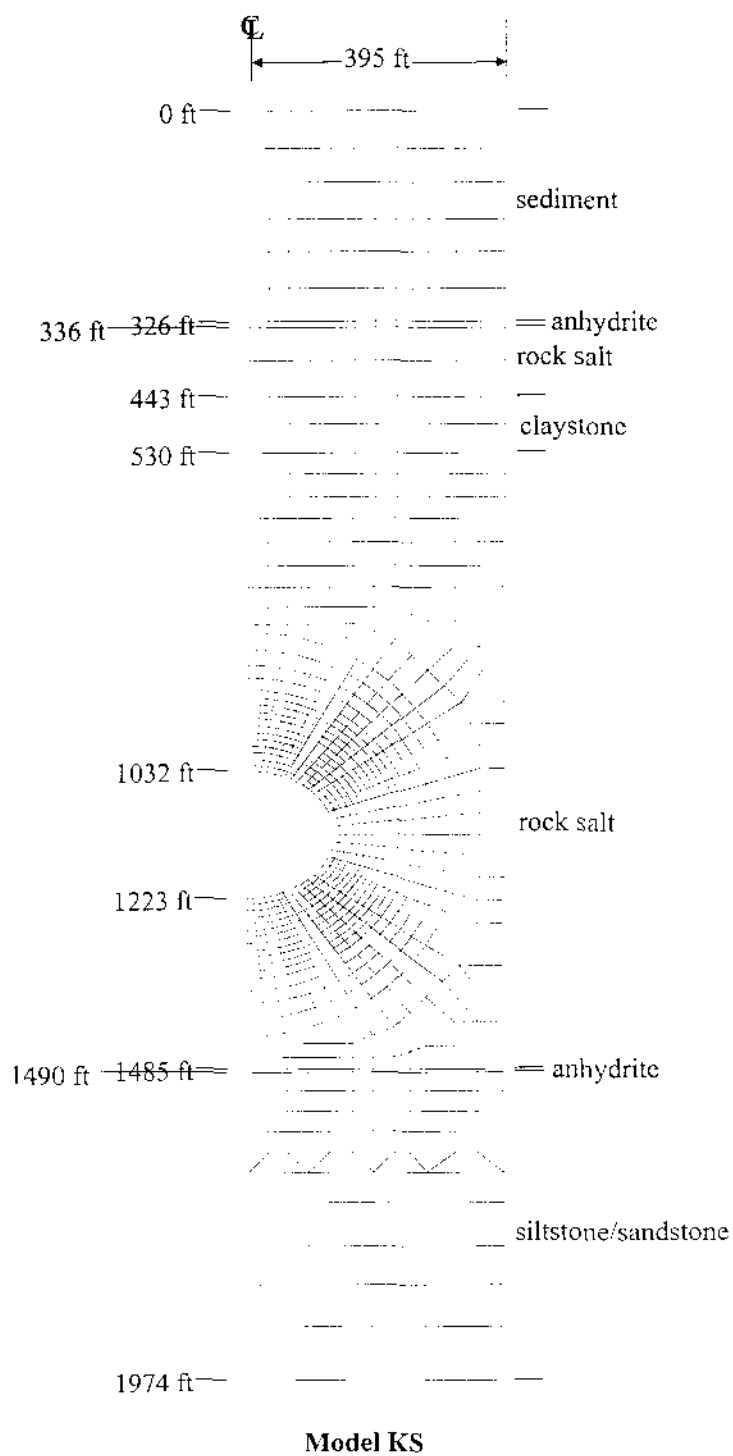
รูปที่ 12 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่วัดขาม อ.ขามสะแกแสง จ.นครราชสีมา



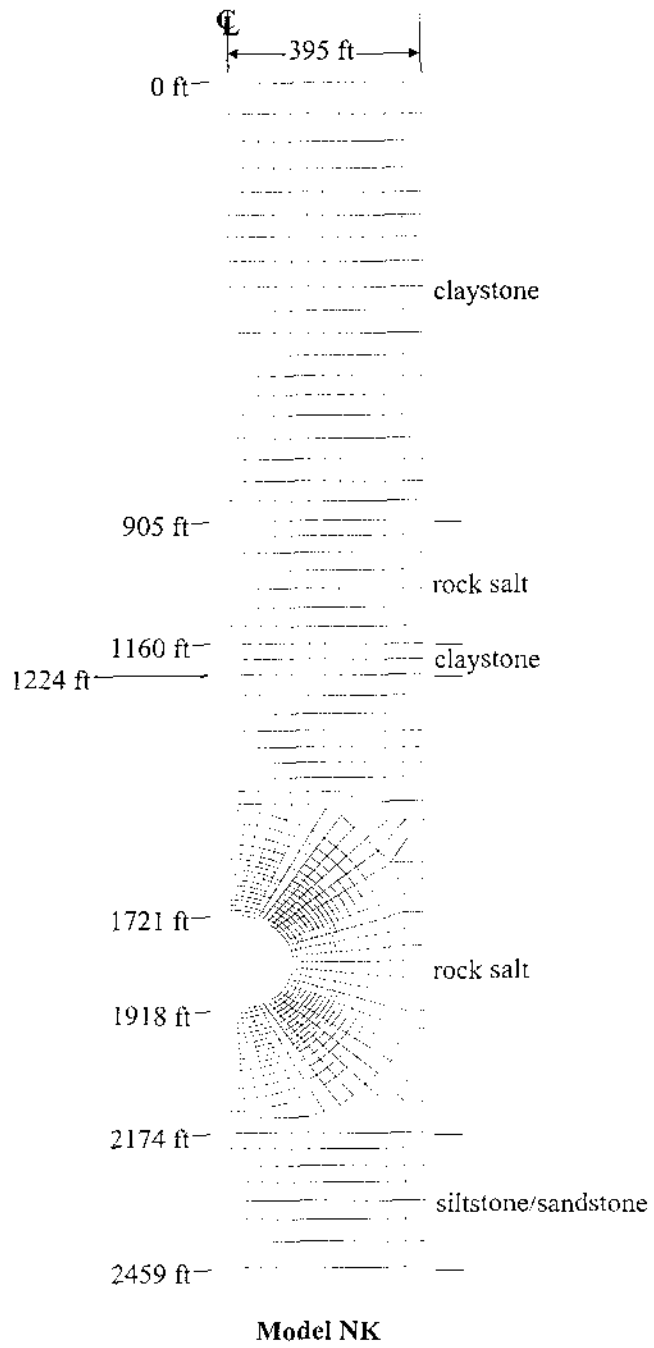
รูปที่ 13 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้าน โนนระเวียง อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา



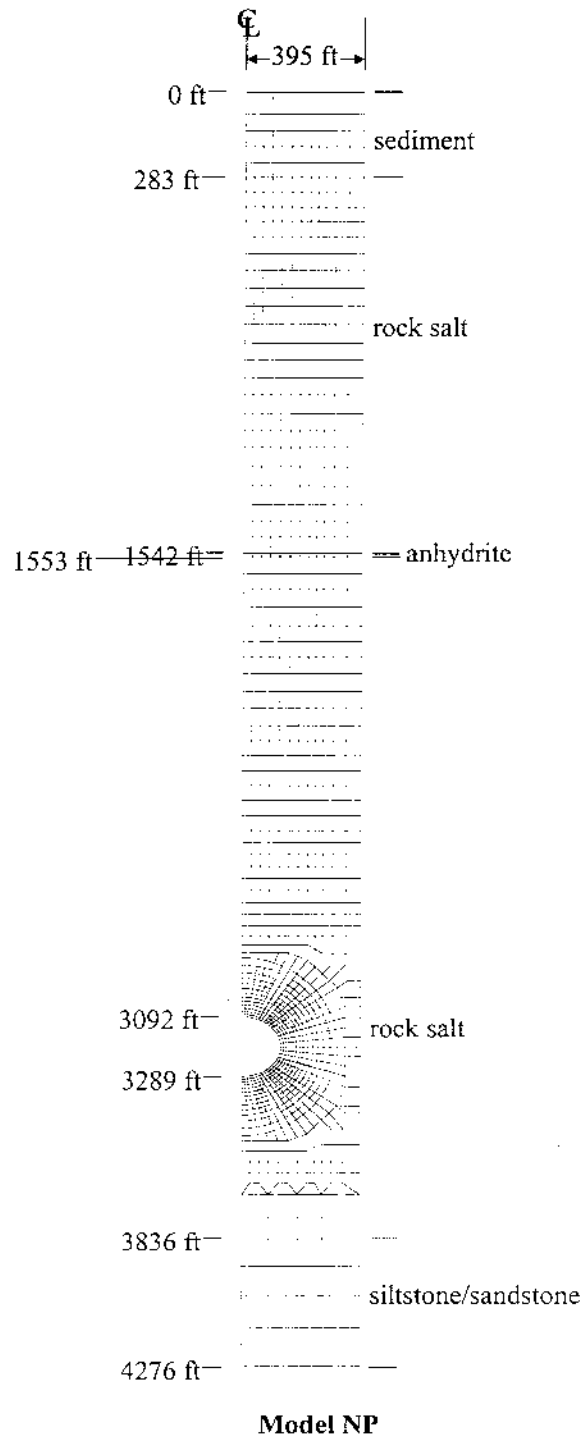
รูปที่ 14 ลำดับชั้นหินเกลือและหินข้างเคียงที่บ้านหนองประจักษ์ อ.เมือง จ.อุดรธานี



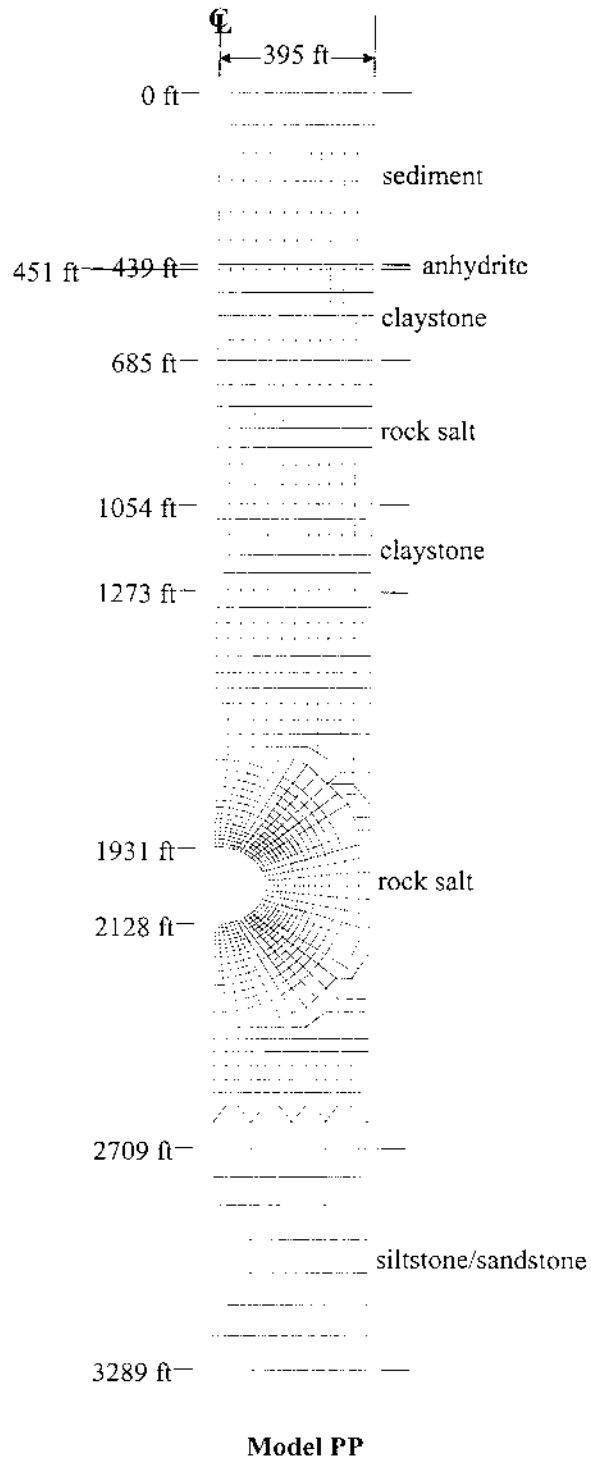
รูปที่ 15 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโคกสง่า Model KS



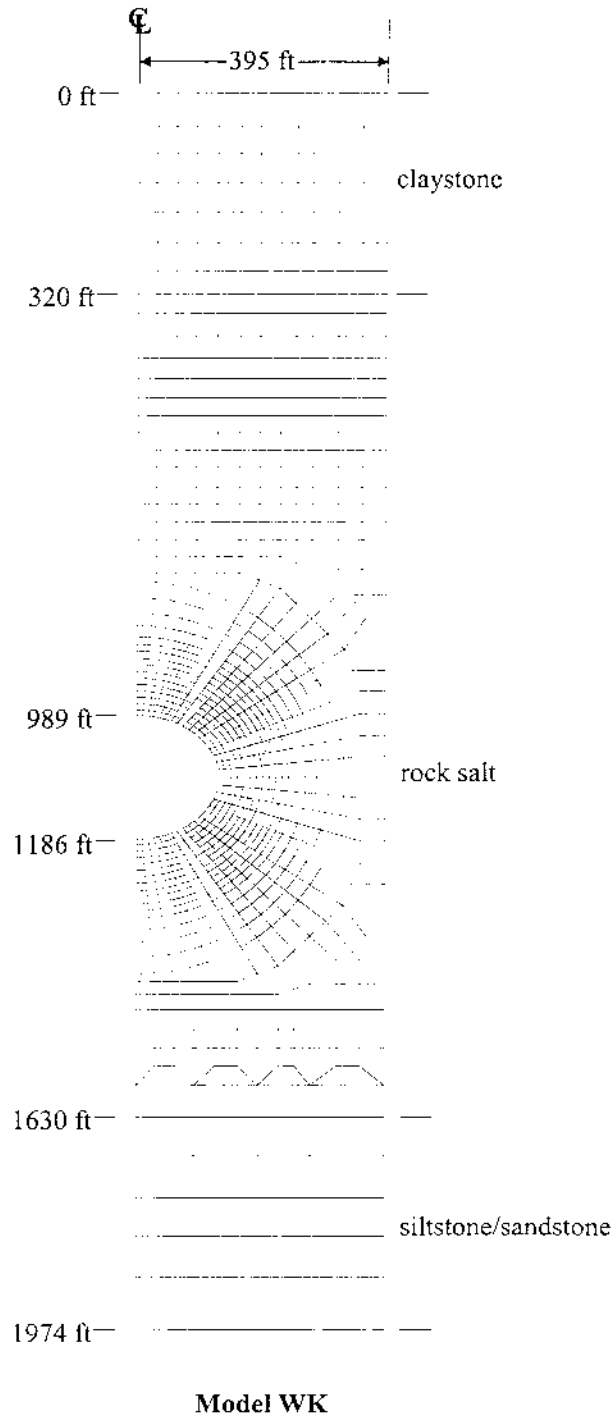
รูปที่ 16 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านหนองขาม Model NK



รูปที่ 17 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านหนองปู่ Model NP



รูปที่ 18 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านโพธิ์พาน Model PP

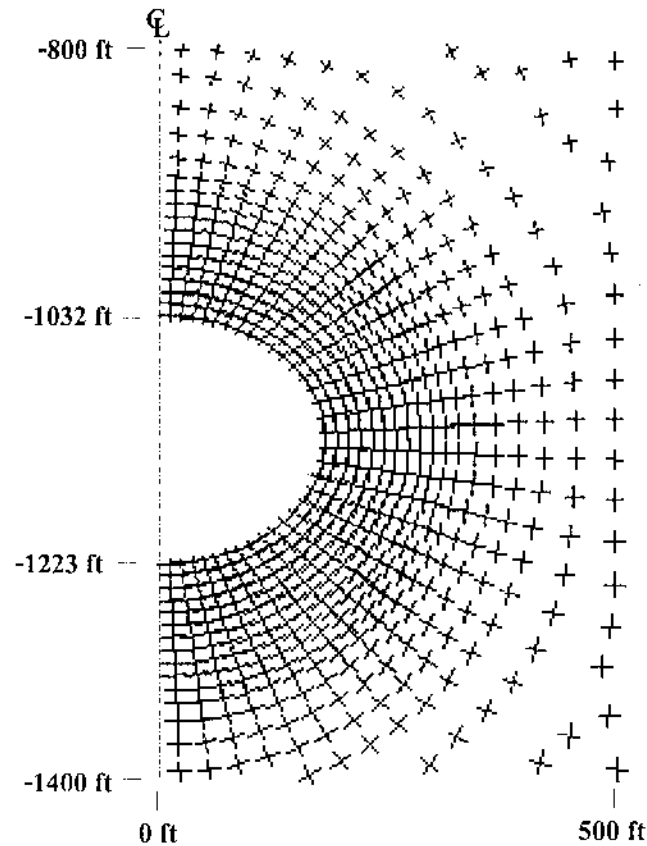


รูปที่ 19 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหินเกลือที่บ้านขม Model WK

Scale = 10000.000 psi/inch
DATA MAX: 2004.440 psi
S/S FILE: RUN1S

Smax AT TIMESTEP 26

Model KS

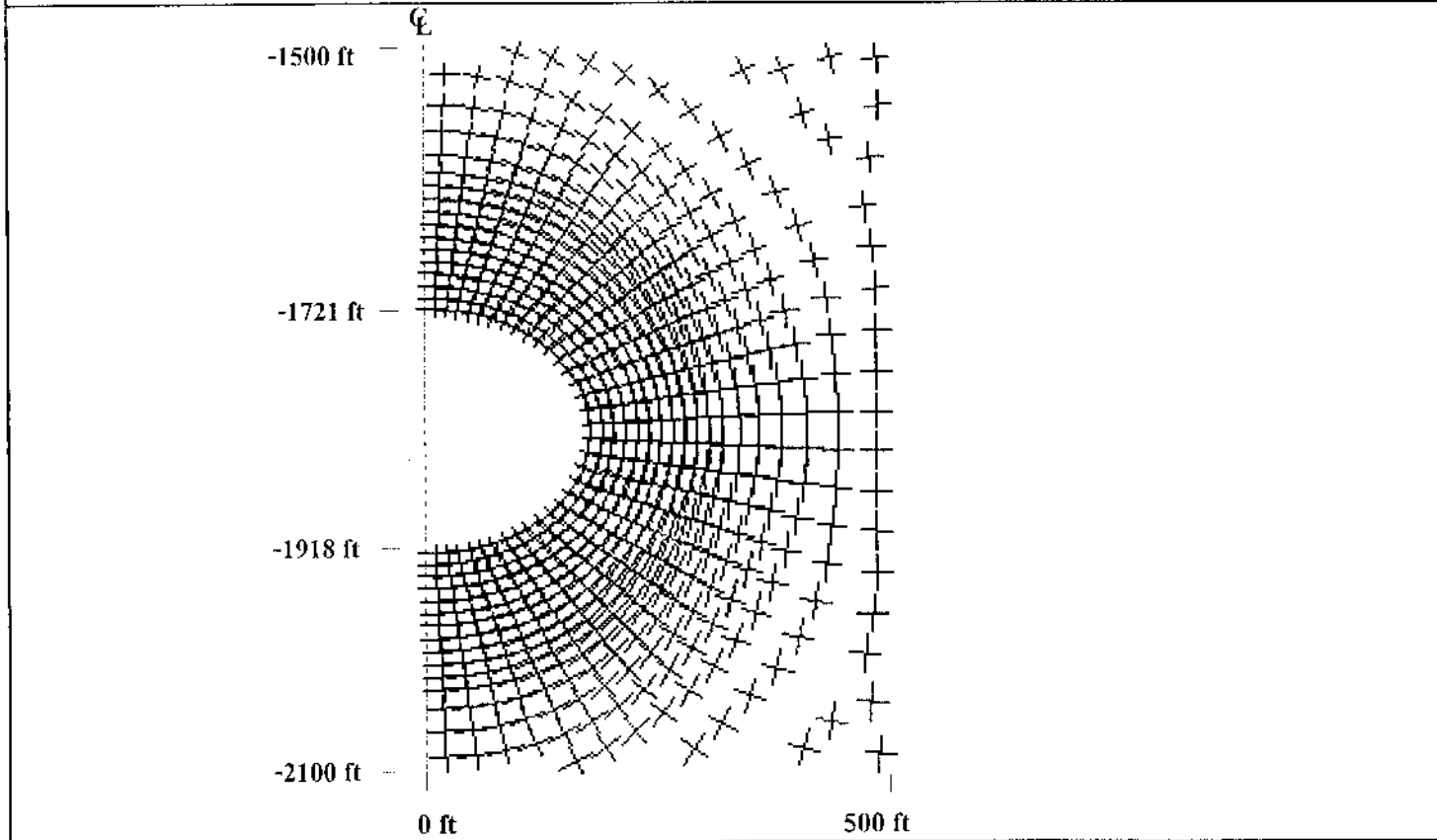


รูปที่ 20 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง KS

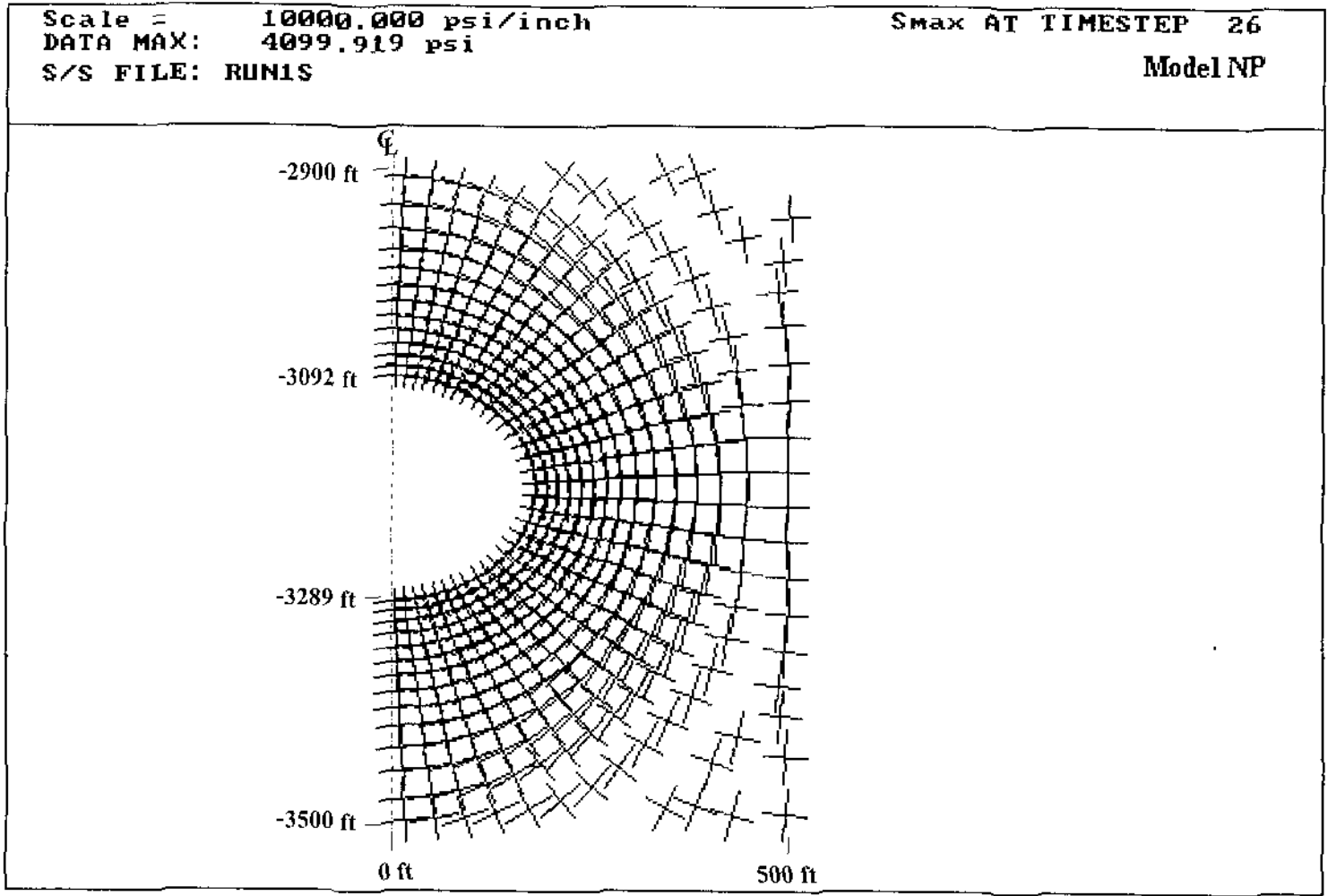
Scale = 10000.000 psi/inch
DATA MAX: 2560.984 psi
S/S FILE: RUN1S

Smax AT TIMESTEP 26

Model NK



รูปที่ 21 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NK

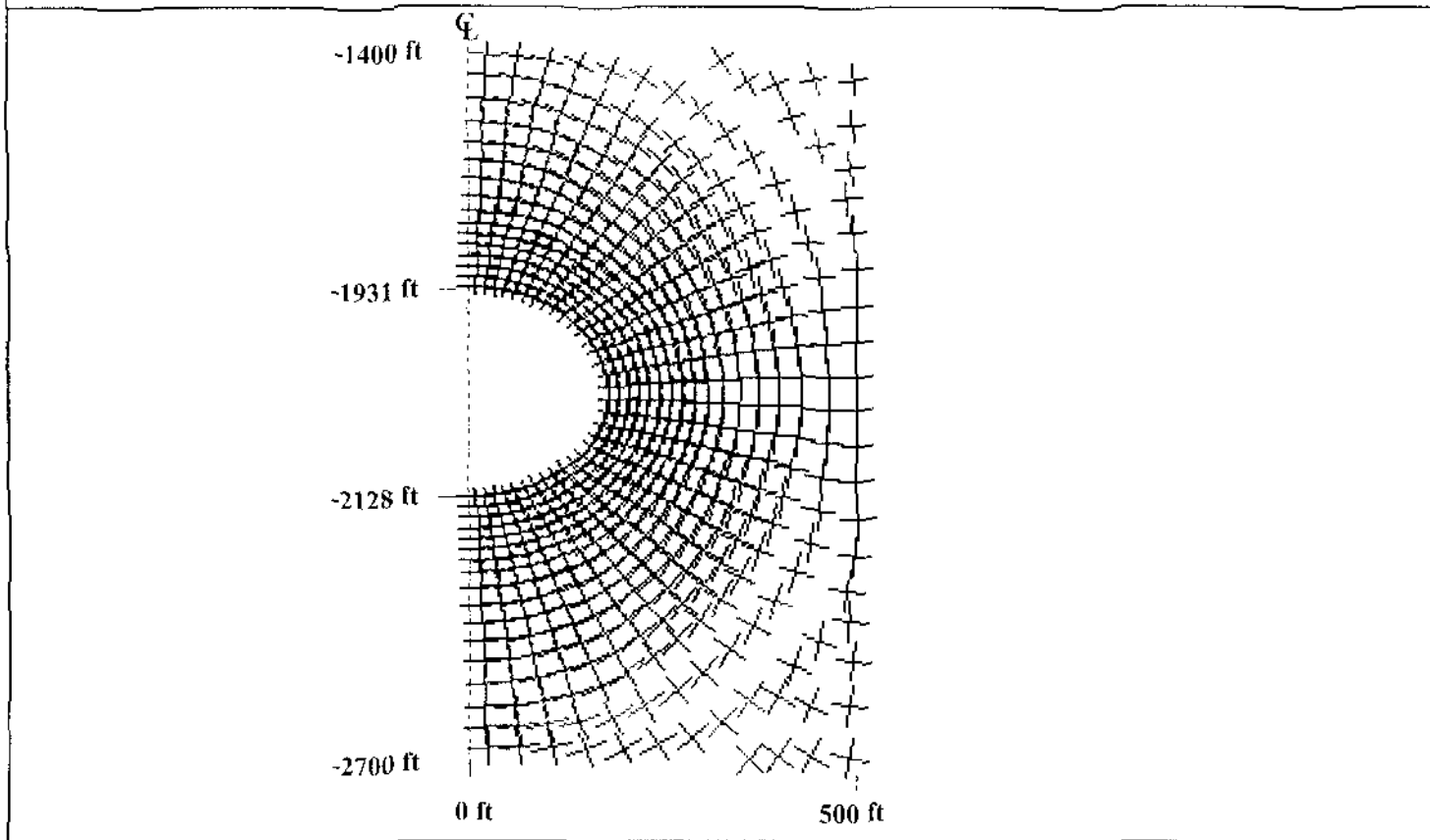


รูปที่ 22 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NP

Scale = 10000.000 psi/inch
DATA MAX: 3383.792 psi
S/S FILE: RUN1S

Smax AT TIMESTEP 26

Model PP



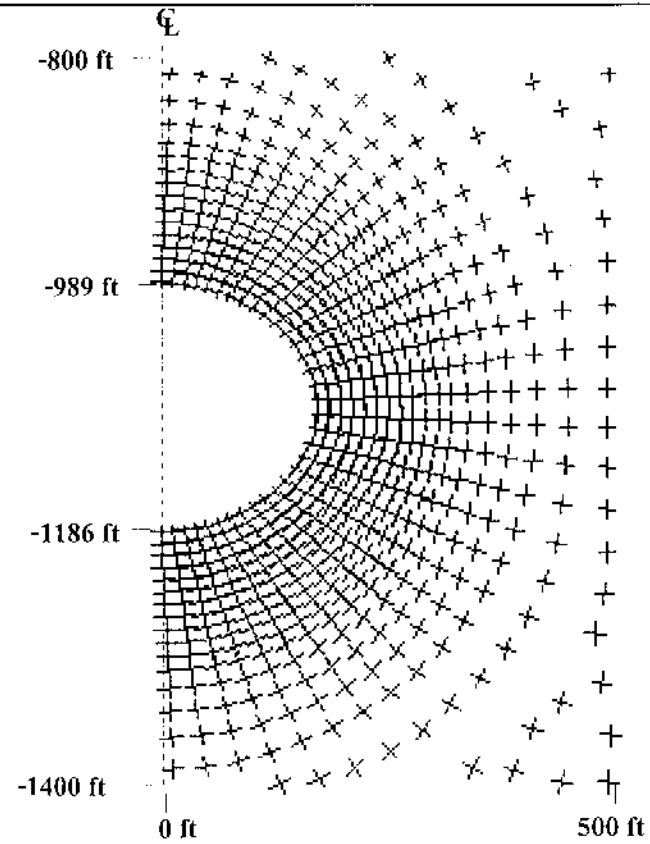
๕๗

รูปที่ 23 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง PP

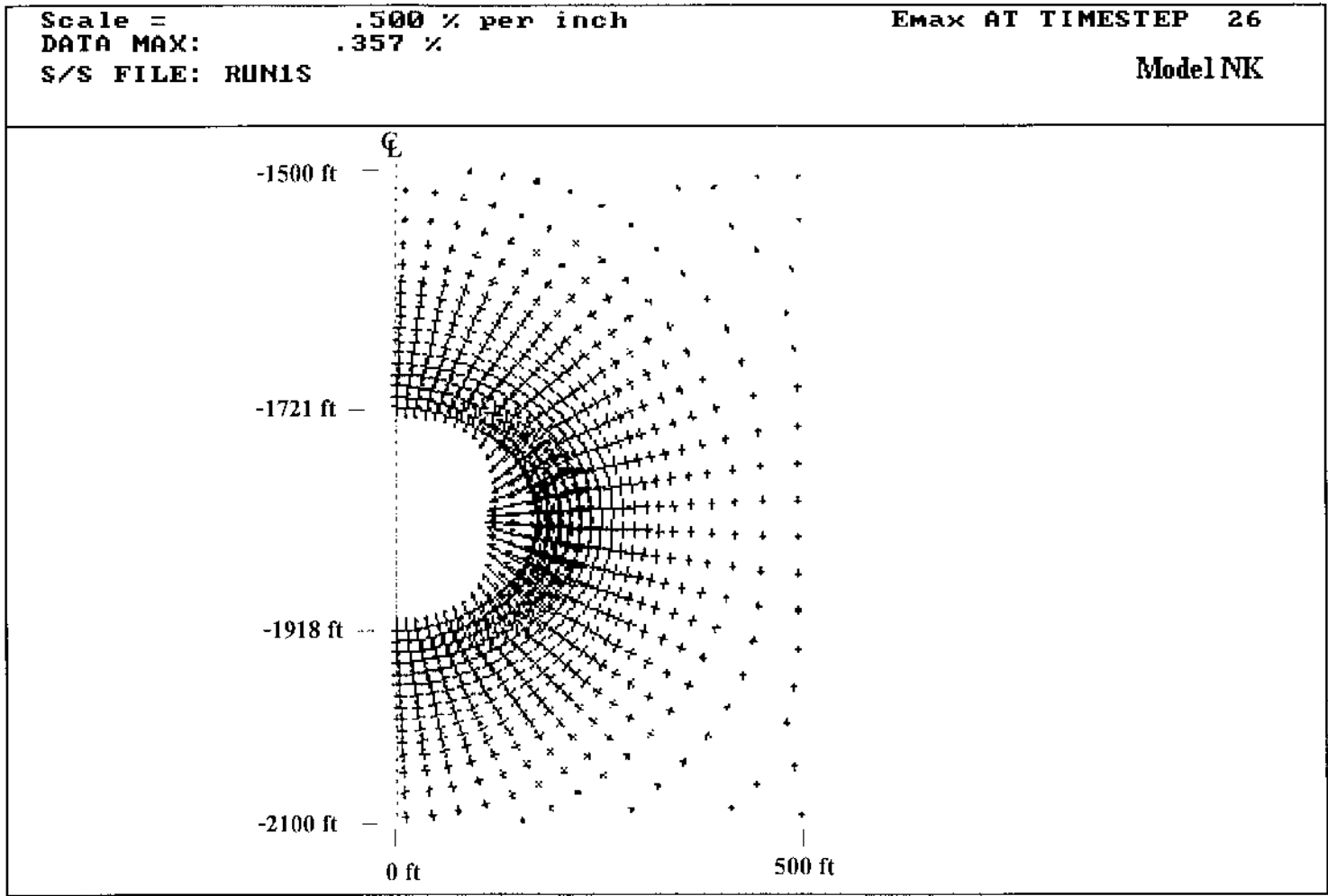
Scale = 10000.000 psi/inch
DATA MAX: 1938.123 psi
S/S FILE: RUN1S

Smax AT TIMESTEP 26

Model WK



รูปที่ 24 ขนาดและทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง WK

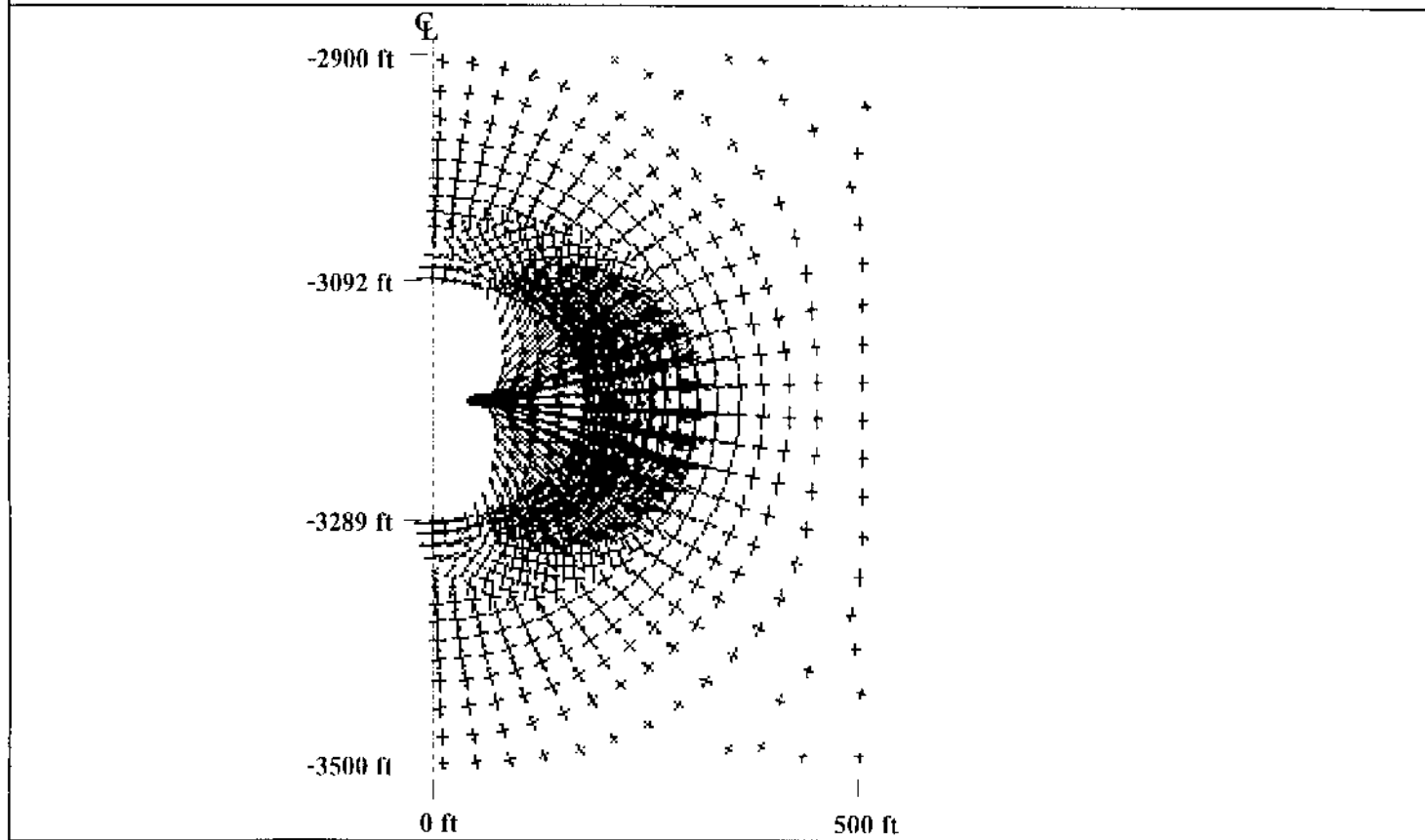


รูปที่ 26 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NK

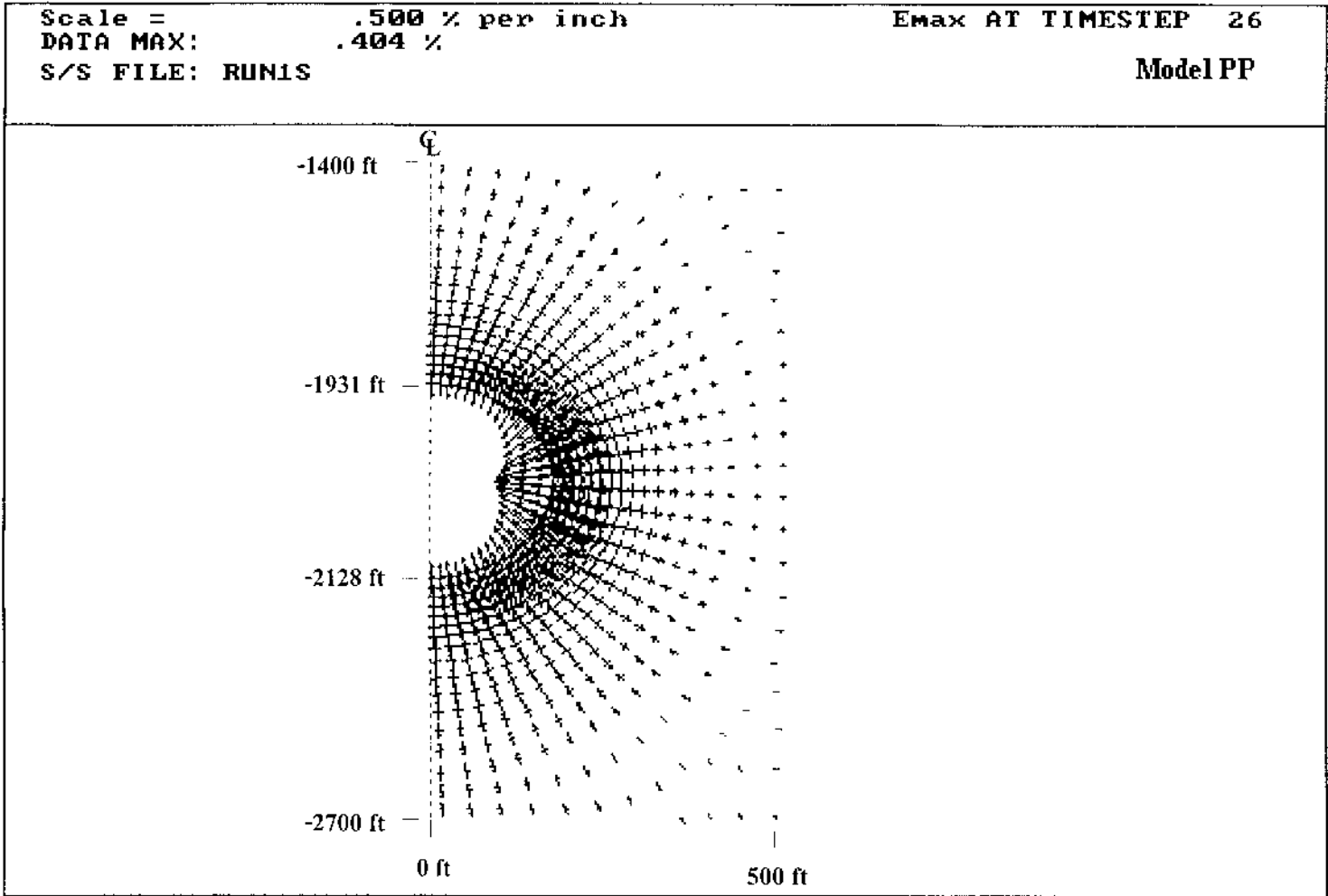
Scale = .500 % per inch
DATA MAX: .786 %
S/S FILE: RUN1S

E_{max} AT TIMESTEP 26

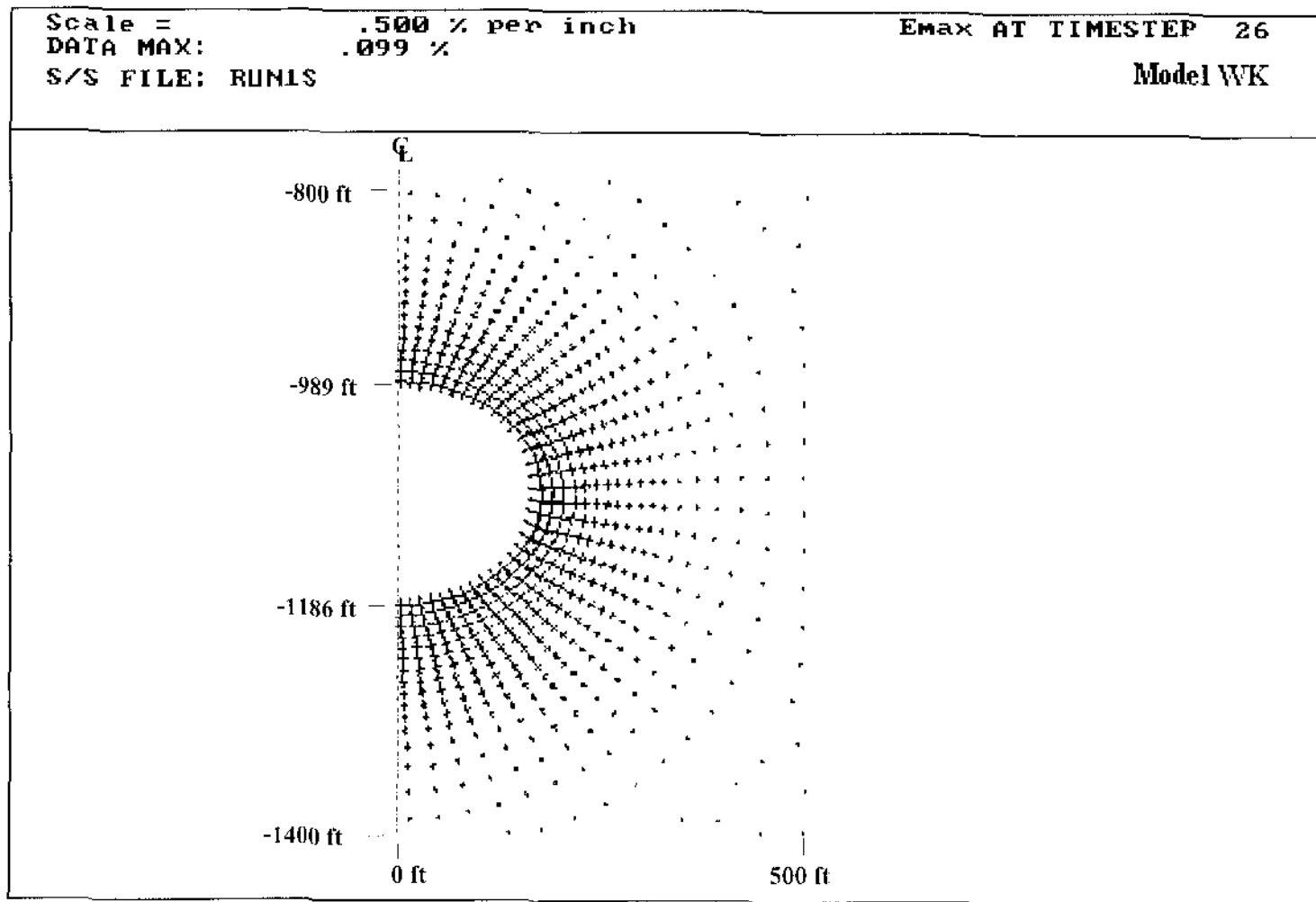
Model NP



รูปที่ 27 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NP



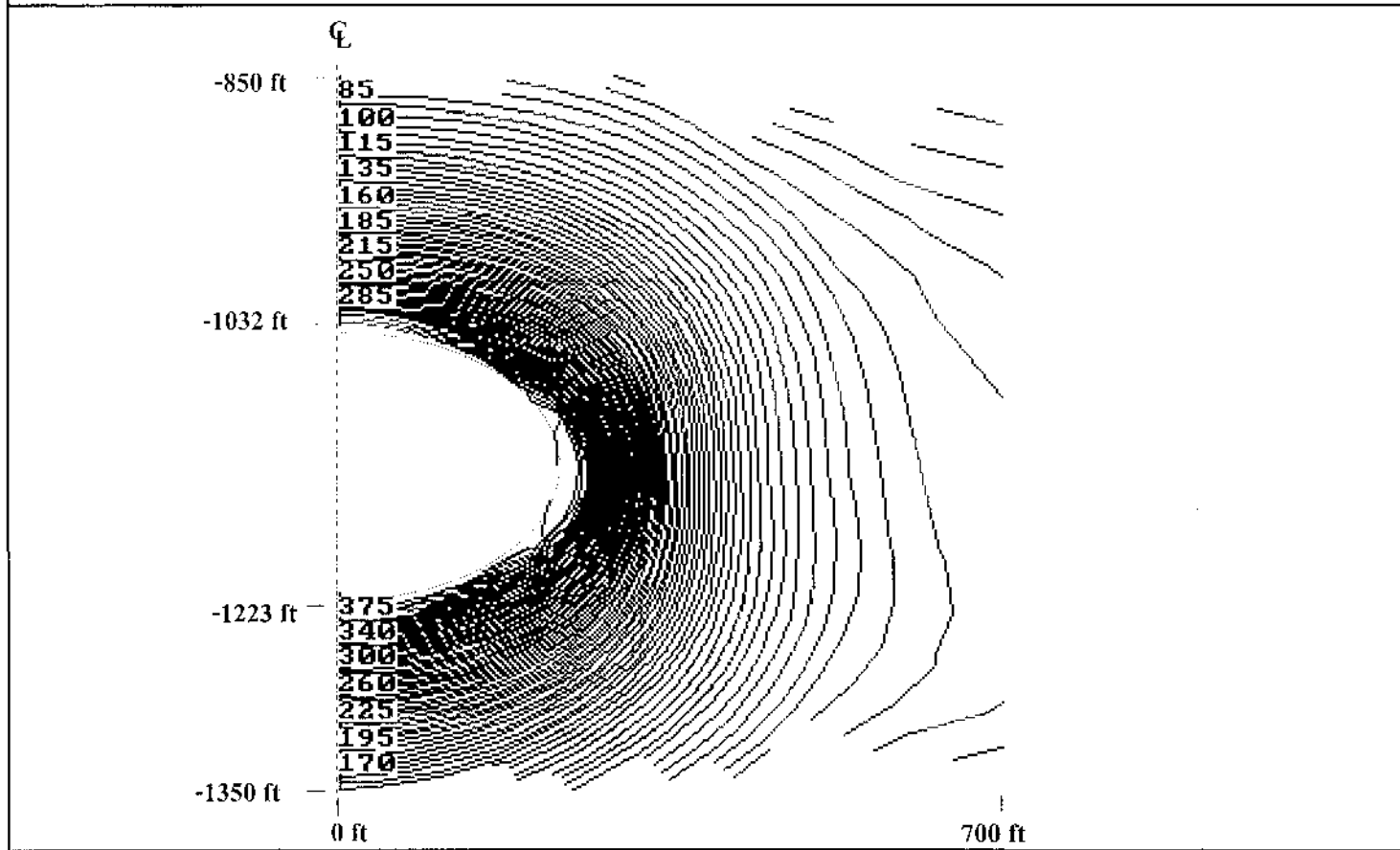
รูปที่ 28 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง PP



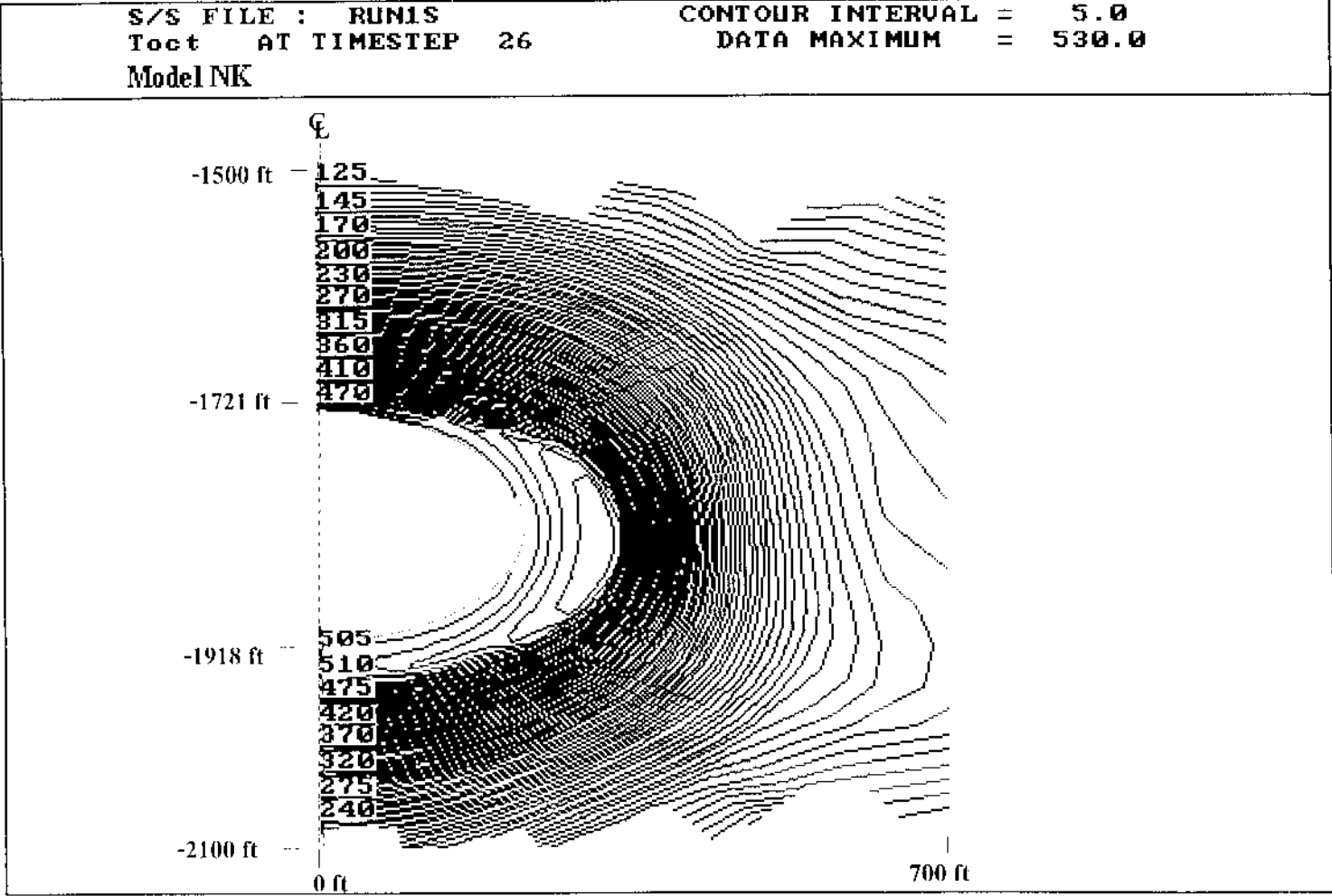
รูปที่ 29 ขนาดและทิศทางของความเครียดที่เกิดขึ้นรอบโพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง WK

S/S FILE : RUN1S
Toct AT TIMESTEP 26
Model KS

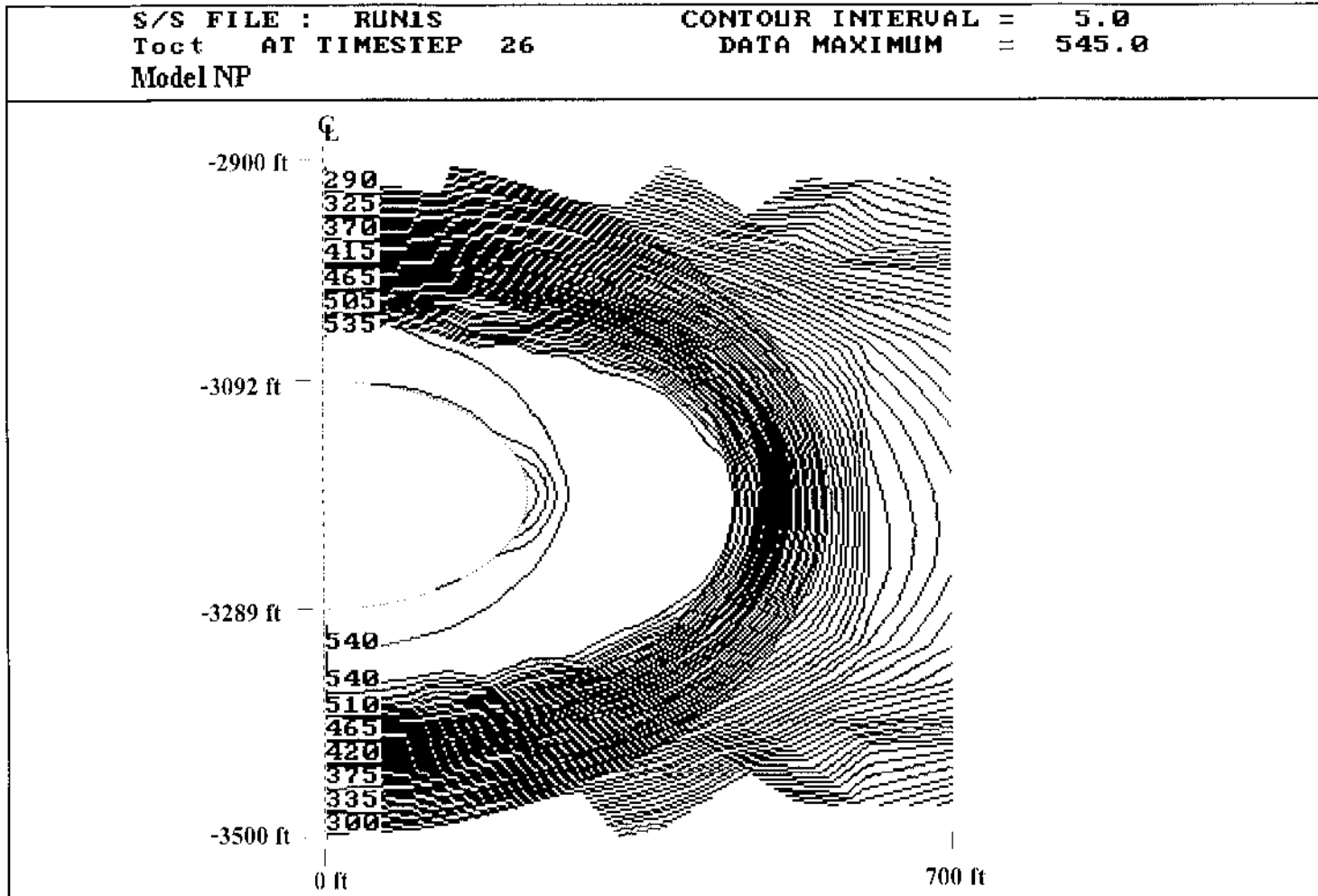
CONTOUR INTERVAL = 5.0
DATA MAXIMUM = 470.0



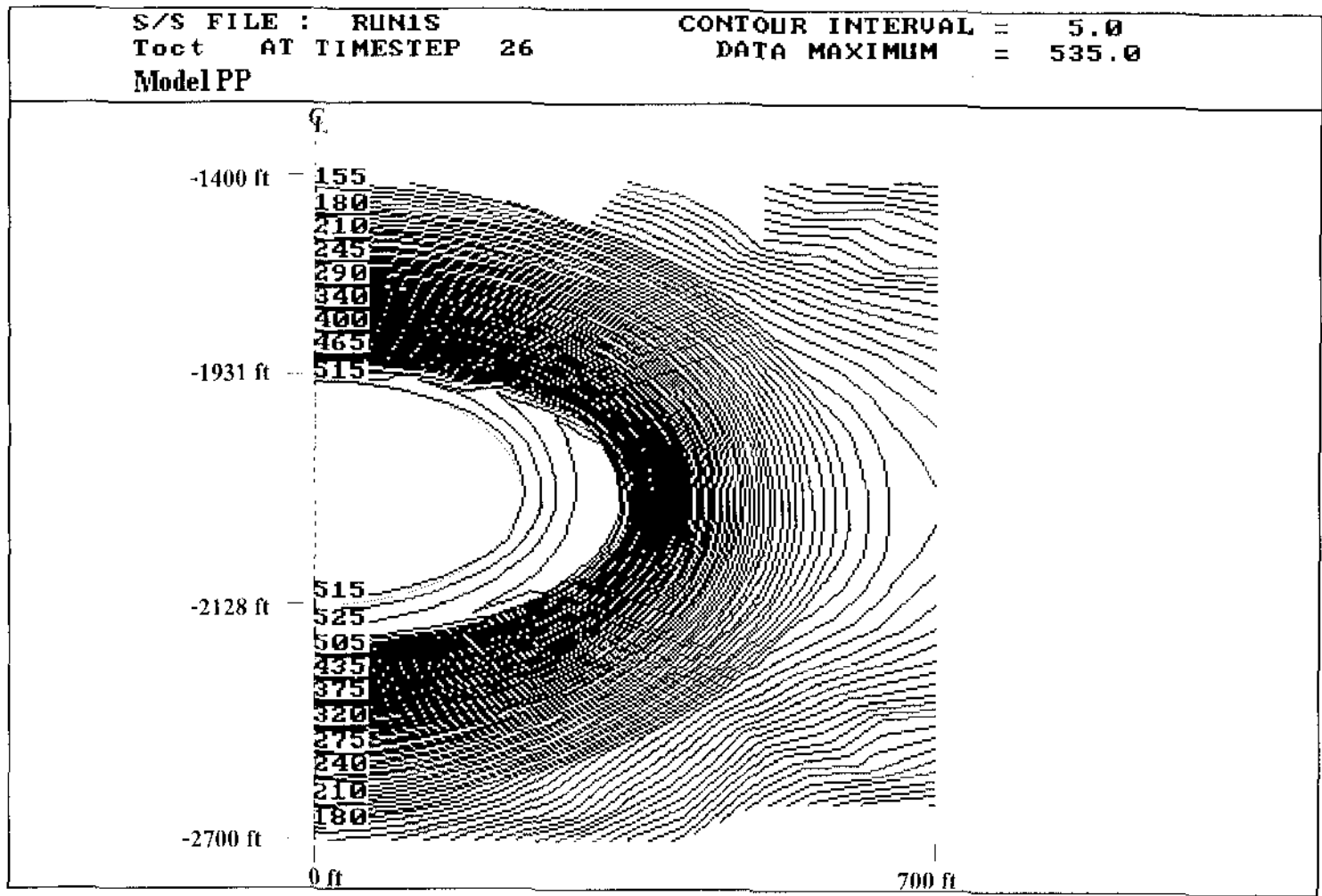
รูปที่ 30 การกระจายแรงเค้นรอบโพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง KS



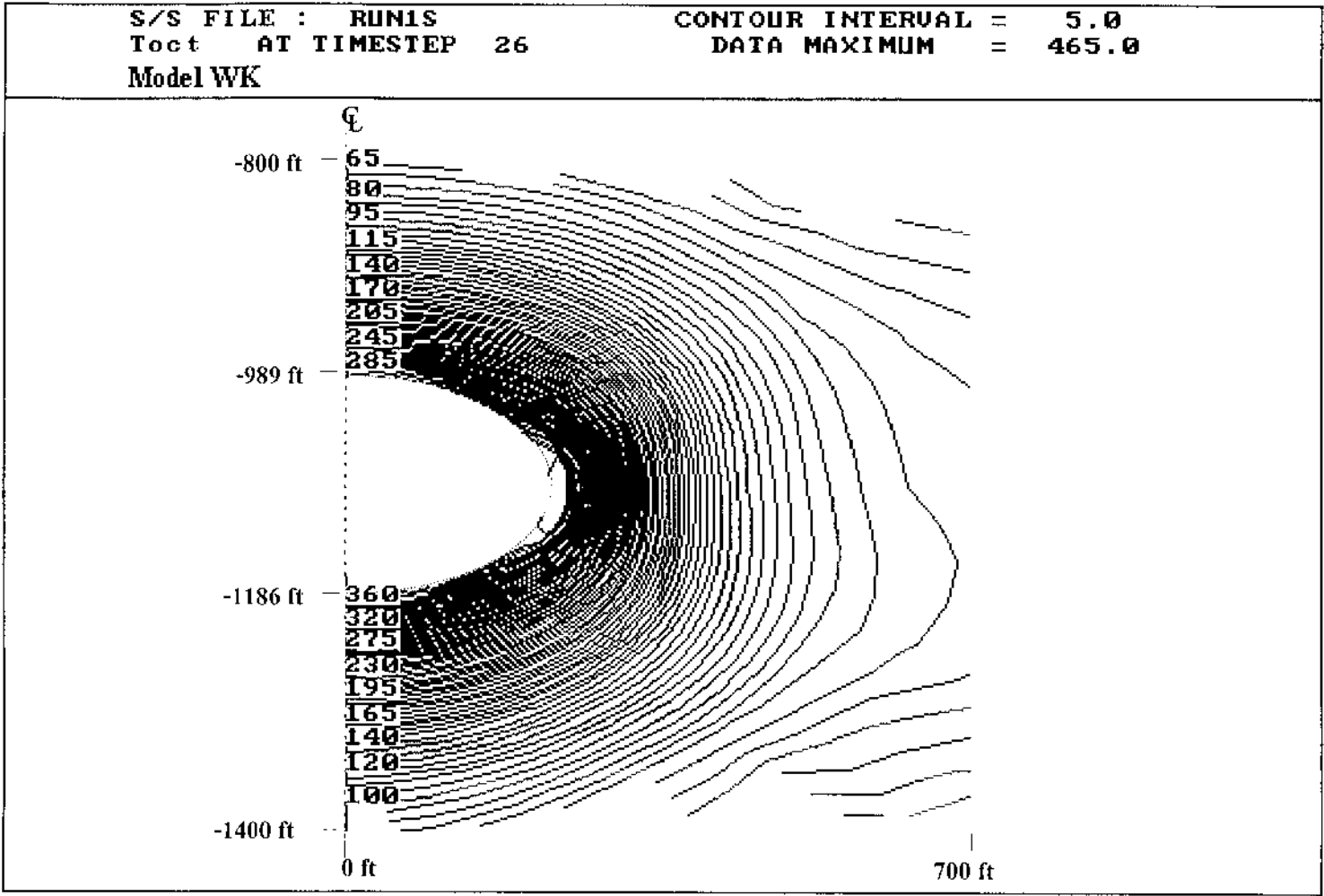
รูปที่ 31 การกระจายแรงเฉือนรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NK



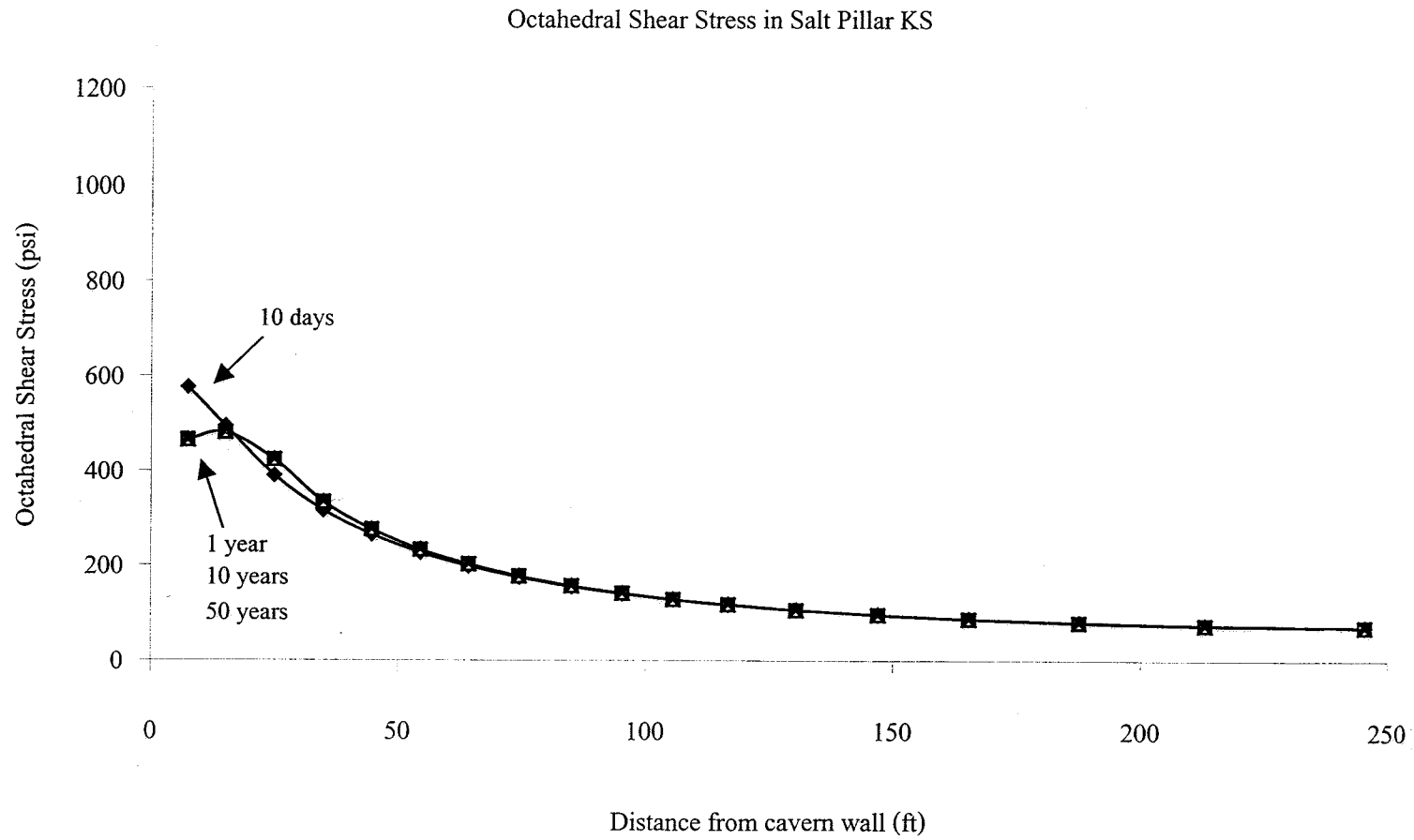
รูปที่ 32 การกระจายแรงเดือนรอบโพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง NP



รูปที่ 33 การกระจายแรงเฉือนรอบโพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง PP

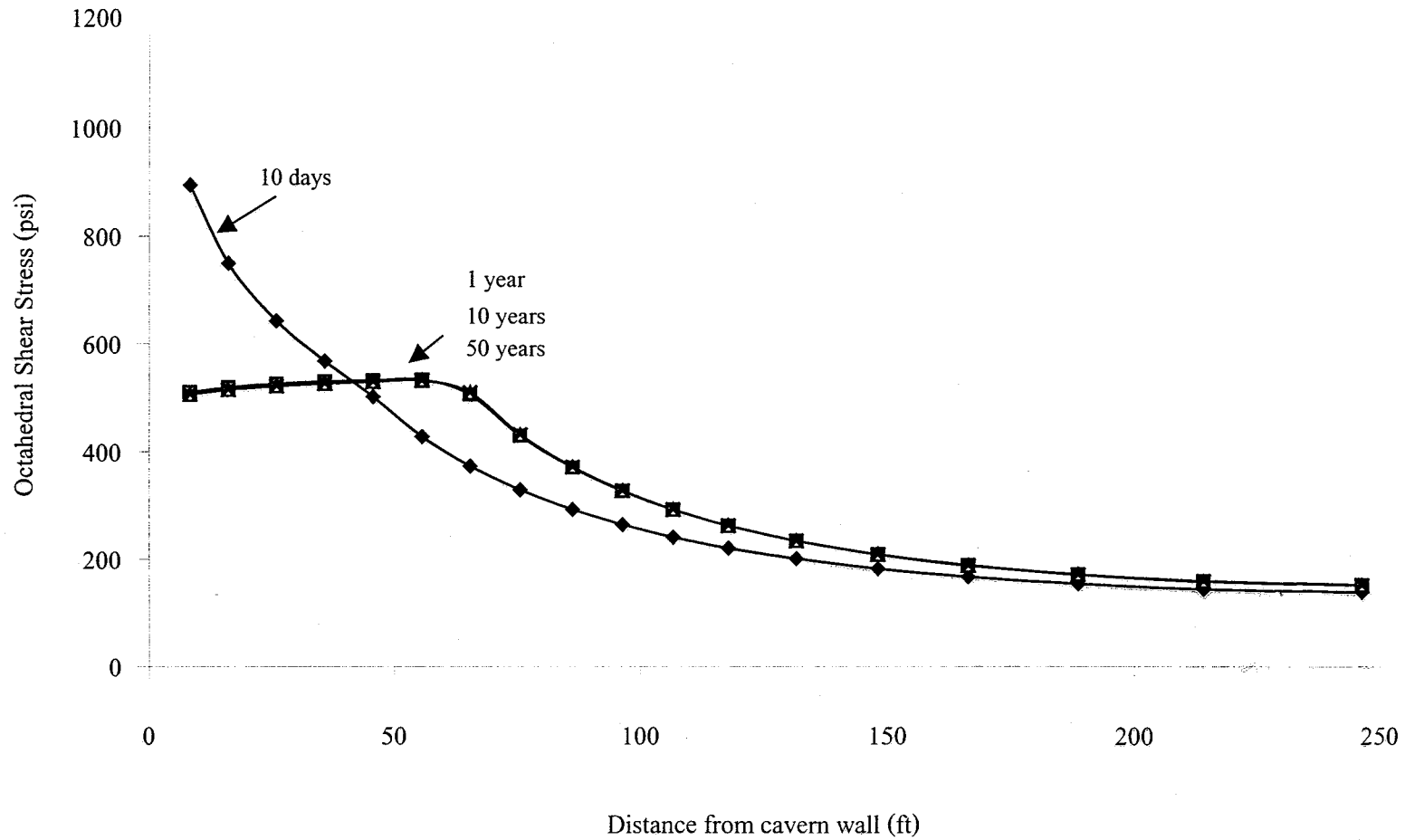


รูปที่ 34 การกระจายแรงเค้นรอบ โพรงที่อายุ 50 ปี ของแบบจำลอง WK

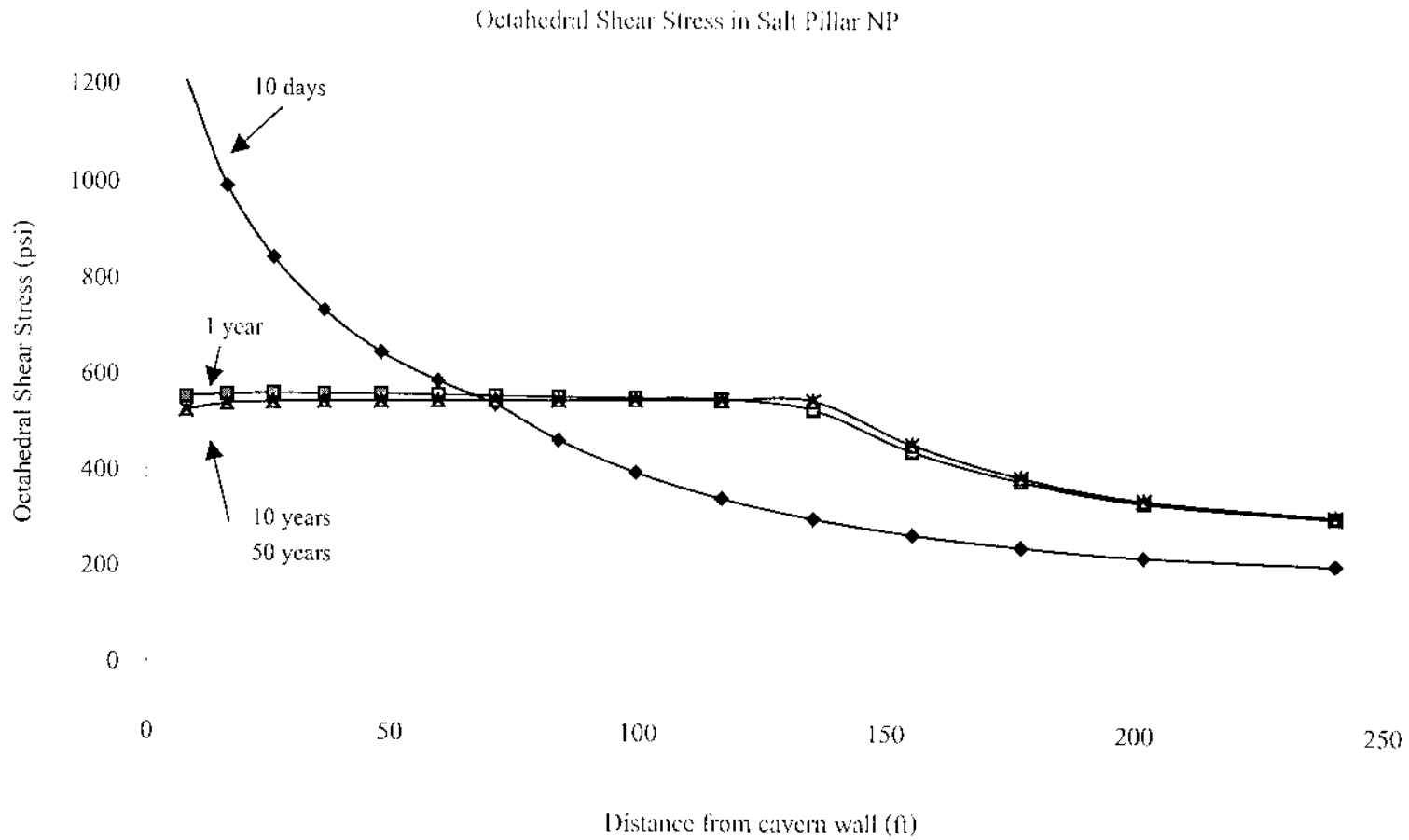


รูปที่ 35 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง KS

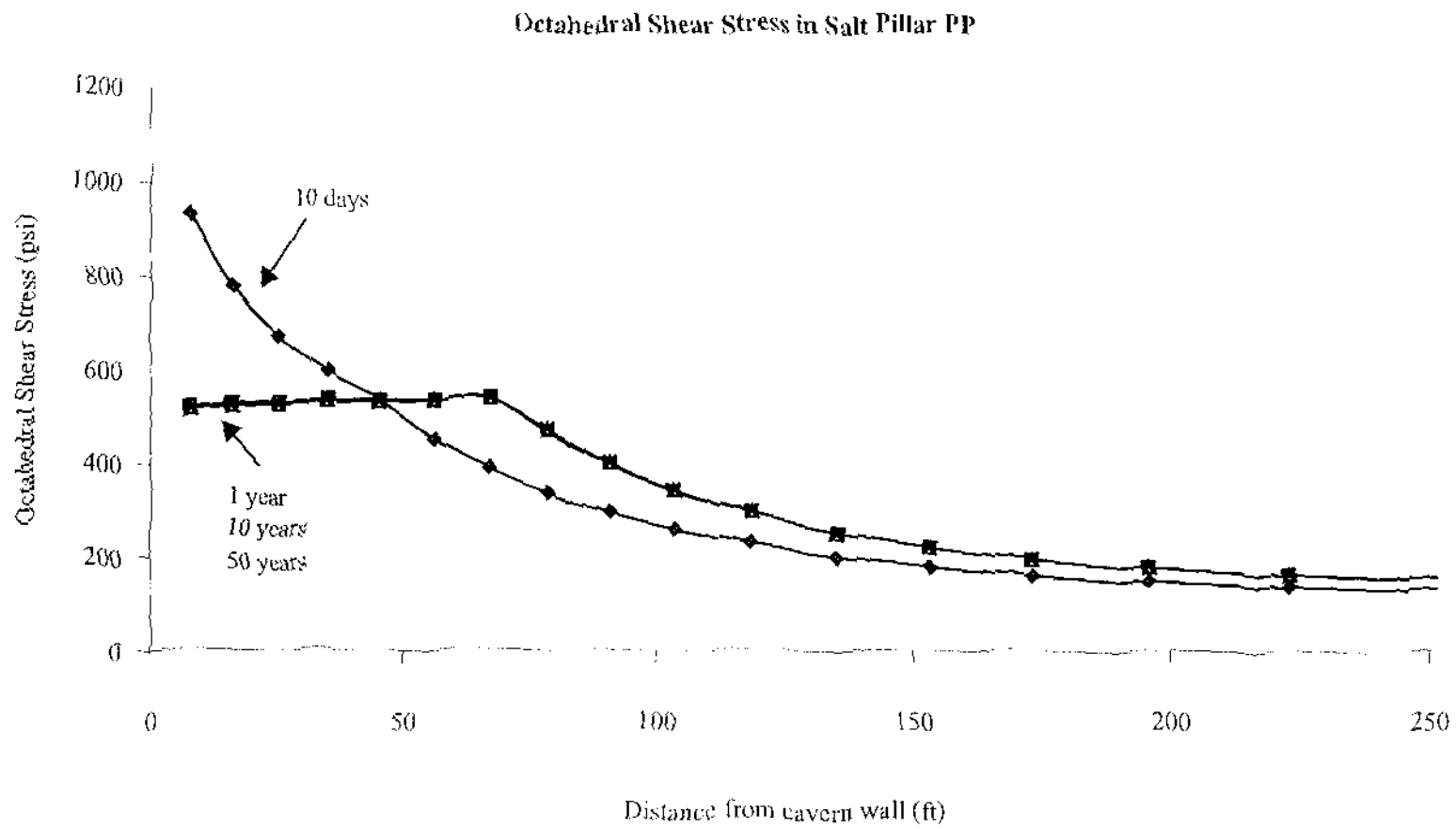
Octahedral Shear Stress in Salt Pillar NK



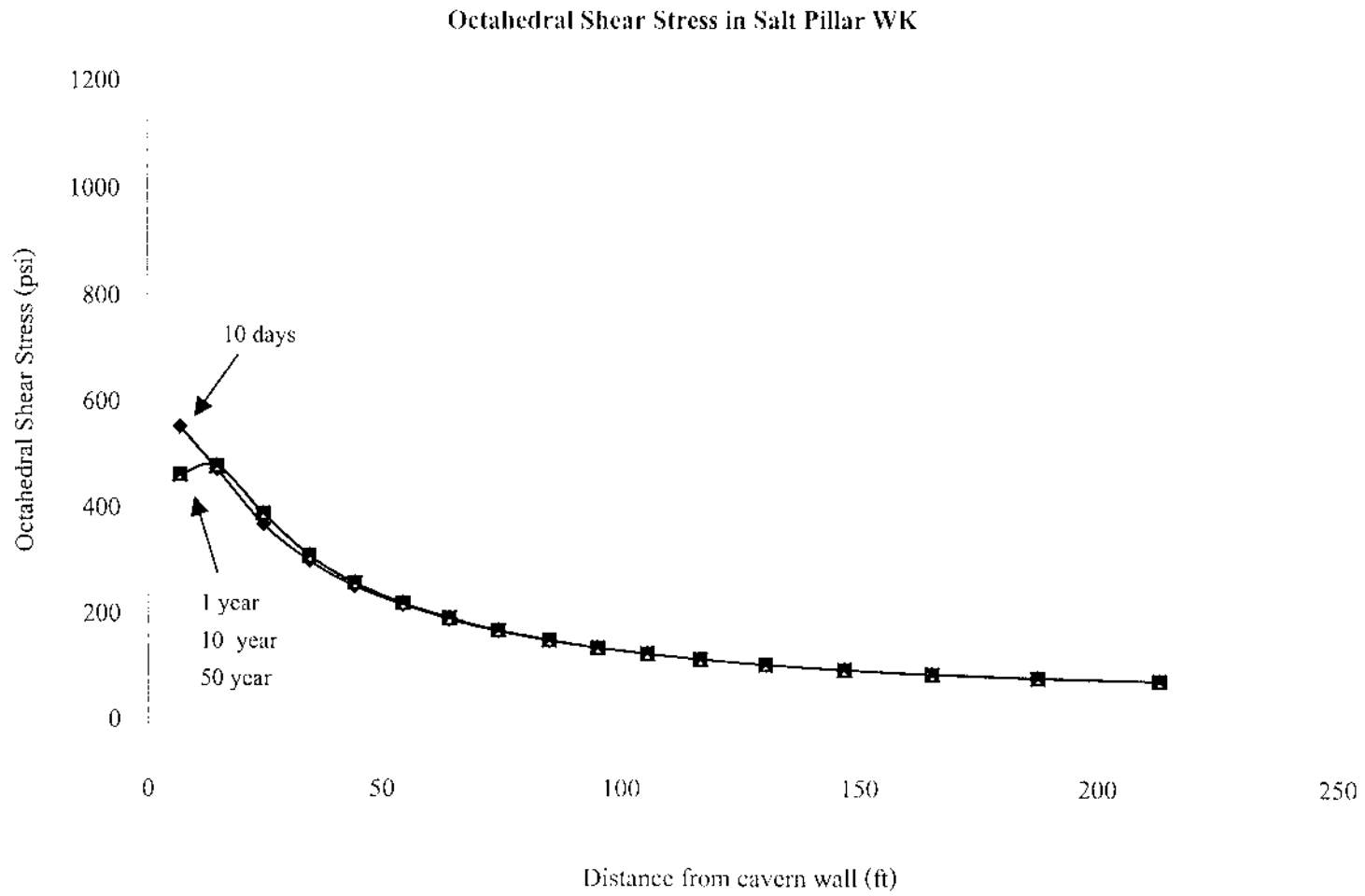
รูปที่ 36 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง NK



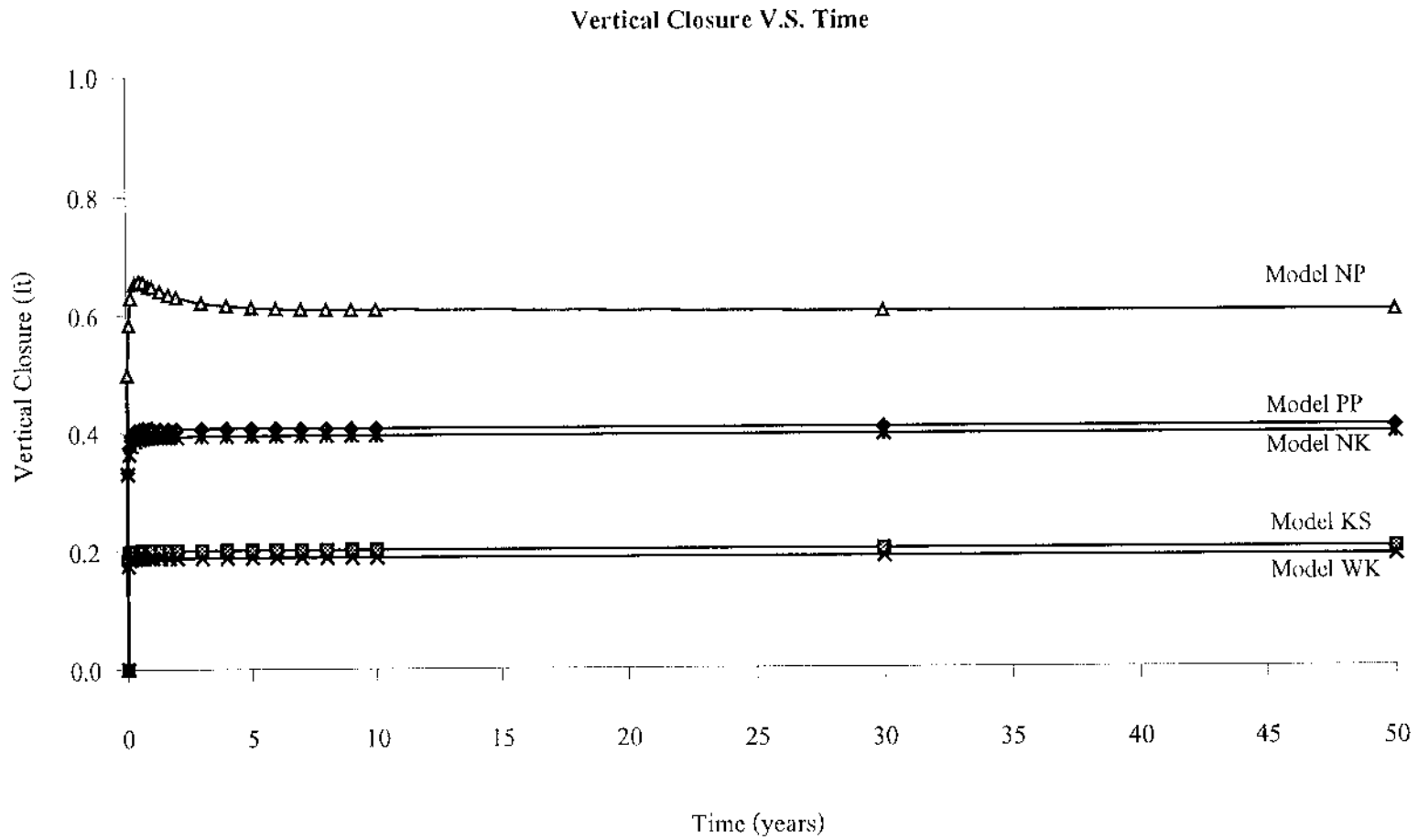
รูปที่ 37 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง NP



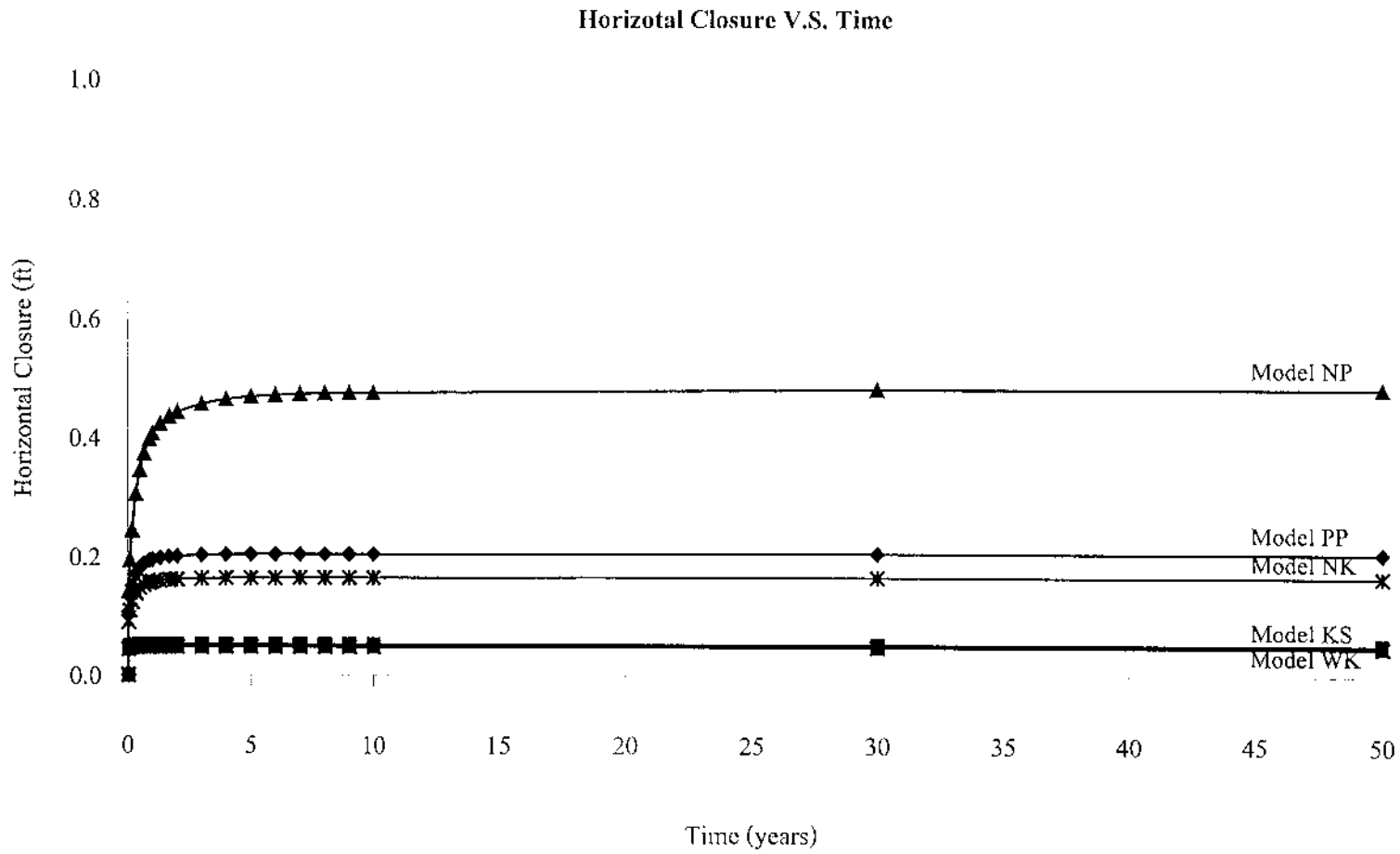
รูปที่ 38 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง PP



รูปที่ 39 แรงเฉือนในหินเกลือที่อยู่ระหว่างโพรงของแบบจำลอง WK



รูปที่ 40 การหาคัดไว้ในแนวตั้งของโพรงของแบบจำลอง KS, NK, NP, PP และ WK



รูปที่ 41 การหดตัวในแนวราบของโพรงของแบบจำลอง KS, NK, NP, PP และ WK

บรรณานุกรม

- กิตติเทพ เฟื่องขจร, (2542), การศึกษาเกี่ยวกับการทิ้งของเสียในชั้นหินเกลือในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข, รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- กิตติเทพ เฟื่องขจร, (2543), การวิเคราะห์และออกแบบโครงที่เกิดจากการผลิตเกลือโดยวิธีละลายในชั้นหินเกลือที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขในคอมพิวเตอร์, รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปกรณ สุวานิช, (2521), แร่โปแตชภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย, *เอกสารเศรษฐกิจธรณีวิทยา เล่มที่ 22*, กองเศรษฐกิจธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี.
- Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1992, "Finite Element Model to Predict Permeability Increase around Salt Cavern," SMRI Paper, presented at the Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, October 19-22, Houston, Texas, 34 pp.
- Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1992, "Geohydrological Integrity of CAES in Rock Salt," *Compressed-Air Energy Storage: Proceedings of the Second International Conference*, Electric Power Research Institute, July 7-9, San Francisco, California, pp. 4.1-4.21.
- Fuenkajorn, K. and S. Serata, 1994, "Dilation-Induced Permeability Increase around Caverns in Rock Salt," *Proc. 1st North American Rock Mechanics Symposium*, University of Texas at Austin, June 1-3, pp. 648-656.
- Hansen, F.D., K.D. Mellegard and P.E. Senseny, 1984, "Elasticity and Strength of Ten Natural Rock Salts," First Conference on Mechanical Behavior of Salt, November 9-11, Trans Tech Publications, Germany, pp. 71-83.
- Japakasetr, T. and P. Suwanich, (1977), *Potash and Rock Salt in Thailand*, Economic Geology Division, DMR, Bangkok, Thailand, pp. A1-A252.

- Japan International Cooperation Agency, 1981, "Evaluation Study Report for ASEAN Rock Salt-Soda Ash Project in the Kingdom of Thailand," Tokyo, Japan.
- Serata S. and K. Fuenkajorn, 1992, "Formulation of A Constitutive Equation for Salt," *Proc. Seventh International Symposium on Salt*, April 6-9, Kyoto, Japan, published by Elsevier Science Publishers, B.V, Amsterdam. Vol. 1, pp. 483-488.
- Serata, S. and K. Fuenkajorn, 1992, "Finite Element Program 'GEO' for Modeling Brittle-Ductile Deterioration of Aging Earth Structures," SMRI Paper, presented at the Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, October 19-22, Houston, Texas, 24 pp.
- Stormont, J.C. and K. Fuenkajorn, 1994, "Dilation-Induced Permeability Changes in Rock Salt," *Proc. 8th International Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Morgantown, West Virginia, May 22-28, pp. 1296-1273.
- Suwanapai, A., 1992, "Potash Mine : A Co-operative Project Among ASEAN Countries and Private Sectors," National Conference on Geologic Resources of Thailand : Potential for Future Development," November 17-24, DMR, Bangkok, Thailand.
- Suwanich, P. and P. Ratanajaruraks, 1982, *Sequences of Rock Salt and Potash in Thailand*, Nonmetallic Minerals Bulletin No. 1, Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok.
- Suwanich, P., P. Ratanajaruraks and P. Kunawat, 1982, "Core Log Bamnet Narong Area Chaiyaphum Province," Economic Geology Division, DMR, Bangkok, Thailand.
- Yumuang, S., 1995, Potash Ore Researve Evaluation of Bamnet Narong Area, Northeast Thailand, Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.
- Yumuang, S., C. Khantaprab and M. Taiyagupt, 1986, "The Evaporite Deposits in Bamnet Narong Area, Northeastern Thailand," GEOSEA V Proceedings, Vol. II, Geological Society of Malaysia, Bulletin 20, August, pp. 249-267.

ภาคผนวก

คู่มือการออกแบบโพรงในชั้นเกลือหิน
สำหรับเหมืองเกลือแบบละลาย
ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

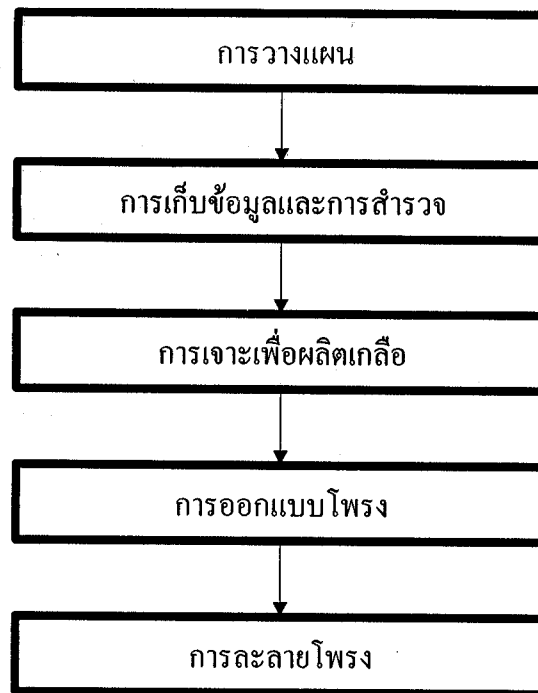
สารบัญ

	หน้า
บทนำ.....	1
1. การวางแผน.....	2
2. การเก็บข้อมูลและการสำรวจ.....	4
2.1 การศึกษาในสำนักงาน.....	4
2.2 การสำรวจภาคสนาม.....	5
3. การเจาะเพื่อผลิตเกลือ.....	6
3.1 ขั้นตอนการเจาะ.....	6
3.2 การวางท่อ.....	6
3.3 ตัวอย่างการวางท่อ.....	8
3.4 การตรวจสอบเสถียรภาพของหลุมเจาะ.....	9
4. การออกแบบโพรง.....	11
4.1 หลักการในการออกแบบ.....	11
4.2 รูปแบบโพรงในชั้นเกลือหินที่เหมาะสม.....	11
4.3 ตัวอย่างการออกแบบโพรง.....	11
5. การละลายโพรง.....	18
5.1 ลำดับการละลายโพรง.....	18
5.2 วิธีควบคุมลักษณะของโพรง.....	18
5.3 การตรวจสอบขนาดและรูปร่างโพรง.....	20
5.4 เสถียรภาพของโพรงในชั้นเกลือหินกับการทรุดตัวของแผ่นดิน.....	20
เอกสารอ้างอิง.....	23

1. การวางแผน

สิ่งสำคัญของการเริ่มโครงการ คือ การวางแผน การทำเหมืองเกลือแบบละลายจะมีการวางแผนทางวิชาการเพื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในพื้นที่ที่จะทำเหมืองเกลือ (รูปที่ 1) ตลอดจนการละลายโพรงเพื่อเอาเกลือขึ้นมา (Istvan and Querio, 1983) ซึ่งจะอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

ประการแรกคือการร่างวัตถุประสงค์ เพื่อกำหนดเป้าหมายการขุดเอาเกลือสินเธาว์ขึ้นมา ปริมาณเกลือที่จะผลิตต่อเดือน หรือต่อปี อายุของการทำเหมืองเกลือ ประการต่อมาคือการศึกษาและการเก็บข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับพื้นที่ตั้งเหมืองเกลือ เช่น ความลึกและความหนาของชั้นหิน ระดับและการเปลี่ยนแปลงน้ำบาดาล แหล่งน้ำจืด การเกษตร เพื่อป้องกันผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ข้างเคียง ข้อมูลเหล่านี้จะได้จากการศึกษาแผนที่ภูมิประเทศ แผนที่ธรณีวิทยา แผนที่แหล่งน้ำจืด และเอกสารที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจขอรับบริการจากกรมทรัพยากรธรณี กรมชลประทาน และกรมโยธาธิการ ประการสุดท้ายศึกษาและวิเคราะห์ความเหมาะสมในเชิงวิศวกรรมธรณีและเศรษฐกิจเพื่อพิจารณาความคุ้มค่าของการลงทุน บุคลากรและเครื่องมือที่จะนำมาใช้ก็จะนำมาพิจารณาด้วย



รูปที่ 1 ขั้นตอนโดยสังเขปในการทำเหมืองเกลือแบบละลาย

2. การเก็บข้อมูลและการสำรวจ

ในการเก็บข้อมูลและการสำรวจเบื้องต้นเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ทราบรายละเอียดต่าง ๆ ของพื้นที่ตั้งเหมืองเกลือ สิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมข้างเคียง ชนิดของหินและตัวอย่างหิน เป็นต้น โดยเริ่มทำการเก็บข้อมูลและการสำรวจตามลำดับดังต่อไปนี้

2.1 การศึกษาในสำนักงาน จะดำเนินการเพื่อการศึกษาเบื้องต้นในหัวข้อต่อไปนี้

1) ลักษณะภูมิประเทศ เช่น ความสูง-ต่ำของพื้นที่ เส้นทางการคมนาคม เนื้อที่ที่จะตั้งเหมืองเกลือ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้นตามมาภายหลังการก่อสร้างเหมืองเกลือ เช่น น้ำท่วมเหมืองเกลืออยู่ในเขตโบราณสถาน และเพื่อเตรียมการทำเหมืองเกลือให้มีความสะดวกในการขนส่งผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาได้จากแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 หรือ 1:250,000 ของกรมแผนที่ทหาร กรมทรัพยากรธรณี กรมป่าไม้ กรมโรงงานอุตสาหกรรม กรมพัฒนาที่ดิน และกรมศิลปากร เป็นต้น

2) สภาพทางธรณีวิทยา ในเบื้องต้นต้องทำการสำรวจทางธรณีวิทยาโดยสังเขปและบันทึกข้อมูลลงในแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 หรือ 1:250,000 ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ในภาคสนาม โดยใช้แผนที่ทางธรณีวิทยามาตราส่วน 1:50,000 ของกรมทรัพยากรธรณีประกอบการสำรวจ ข้อมูลประกอบด้วย ชนิดของดินและหิน ขอบเขตของหิน การวางตัวของชั้นหินในเชิงความลึก และความกว้าง เป็นต้น เพื่อหารูปร่างที่แน่นอนของความลึกและความหนาของชั้นหินต่าง ๆ ซึ่งอาจใช้ร่วมกับการแปลความหมายจากภาพถ่ายทางอากาศและภาพถ่ายดาวเทียม โดยขอรับบริการได้จากกรมแผนที่ทหาร กรมทรัพยากรธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อนำไปออกแบบโพรงในชั้นหินเกลือต่อไป

3) สภาพแหล่งน้ำ เช่น ปริมาณน้ำฝน ระดับและทิศทางการไหลของน้ำบาดาล เพื่อจะได้เตรียมการป้องกันผลกระทบของน้ำบาดาลที่มีอิทธิพลต่อการละลายในชั้นเกลือหิน สามารถศึกษาได้จากกรมทรัพยากรธรณี กรมชลประทาน และกรมโยธาธิการ เป็นต้น

4) สภาพสังคมและสิ่งแวดล้อม เช่น หมู่บ้าน วัด โรงเรียน เพื่อป้องกันผลกระทบในระหว่างการทำเหมืองเกลือที่มีต่อชุมชนใกล้เคียง

2.2 การสำรวจภาคสนาม

- 1) การเก็บข้อมูลภาคสนาม เพื่อคุณลักษณะภูมิประเทศและสภาพแวดล้อมของบริเวณที่ตั้งเหมือง และการประเมินลักษณะพื้นที่ การระบายน้ำบนผิวดินและใต้ดิน เป็นต้น
- 2) การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ เพื่อหาความลึกและความหนาของชั้นหิน
- 3) การสำรวจใต้ผิวดิน เพื่อตรวจสอบผลการแปลความหมายทางธรณีวิทยาให้ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยการเจาะหลุมสำรวจ จะสามารถหาความหนาของชั้นหิน รวมถึงการเก็บตัวอย่างหินของหลุมเจาะได้
- 4) การทดสอบคุณสมบัติของเกลือหิน คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของเกลือหิน จะต้องมี การทดสอบเพื่อใช้ในการประเมินค่าด้านเศรษฐกิจและประเมินเสถียรภาพภาพของโพรงที่จะถูกละลายขึ้น

3. การเจาะเพื่อผลิตเกลือ

3.1 ขั้นตอนการเจาะ

การเจาะและพัฒนาหลุมเจาะจะใช้เครื่องมือ หัวเจาะและวิธีการเจาะที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับลักษณะหินและเครื่องมือที่มีอยู่ ขั้นตอนการเจาะ (Bieniawski and Bieniawski, 1994) สามารถอธิบายเป็นลำดับขั้นตอนง่าย ๆ ได้ดังนี้

1) ดำเนินการเจาะหลุมลงไปถึงชั้นเกลือหินตามความลึกที่ได้ออกแบบไว้ ควรเจาะให้เลยส่วนของชั้นบนเกลือหินลงไป 100 ฟุต แล้วยึดด้วยฐานยึดท่อเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของปอกเหล็ก

2) เทซีเมนต์เป็นตัวยึดเกาะกับผนังหลุมไม่ให้หลุมเจาะพังทลาย ระวังอย่าให้ซีเมนต์แตกตัวเพราะจะทำให้เกิดปัญหาการรั่วซึมตามมา ซีเมนต์ที่ใช้จะต้องเป็นซีเมนต์ที่ออกแบบมาใช้กับหลุมเจาะเท่านั้น

3) หลังจากทีซีเมนต์ผนังหลุมเจาะแห้งก็จะเริ่มการละลายเกลือ โดยการฉีดน้ำจืดเข้าไปในท่อฉีดน้ำจืดเพื่อละลายเกลือ

4) หลังจากได้น้ำเกลือแล้วคุณกลับเขาไปในท่อคุณน้ำเกลือ

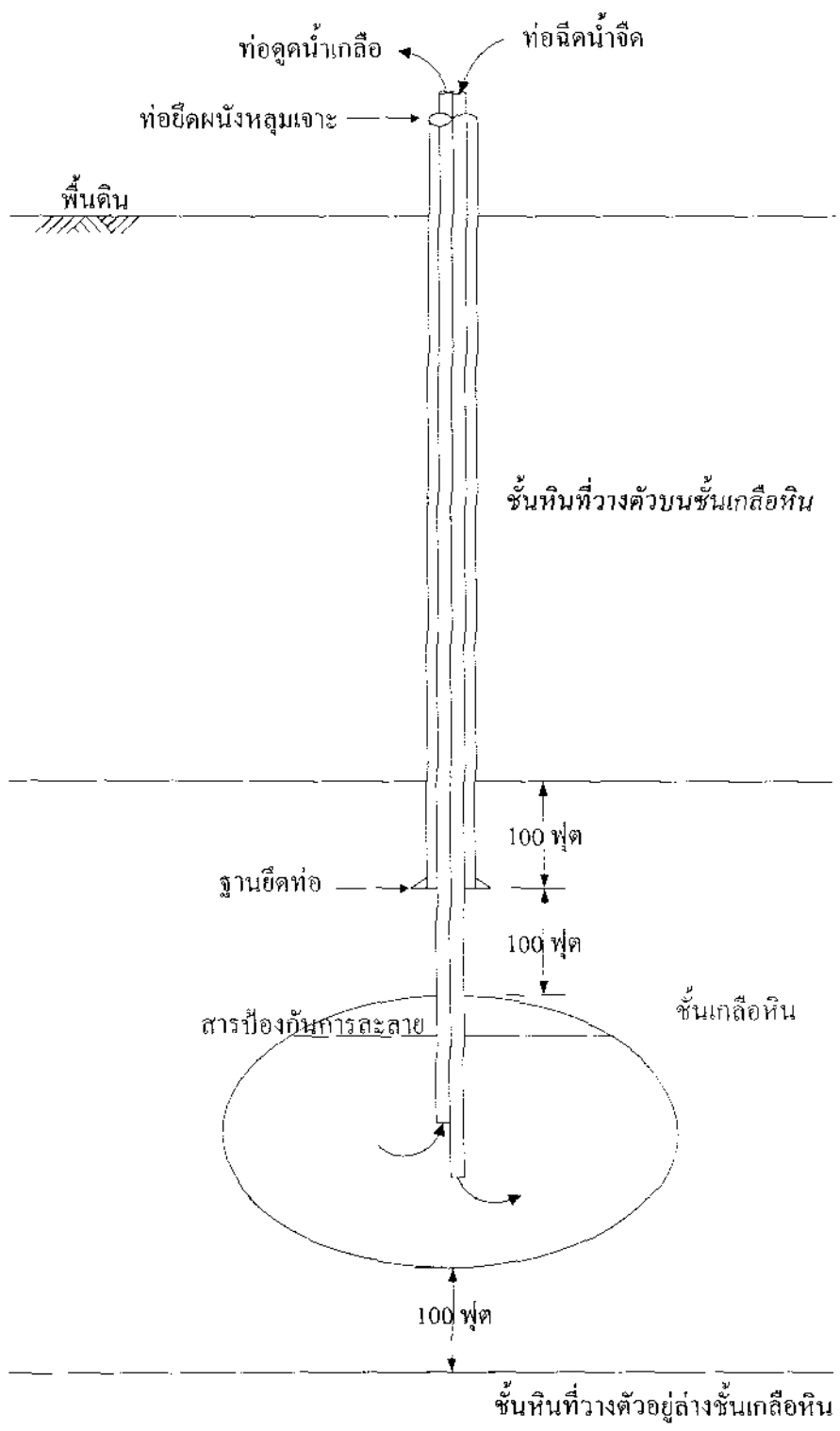
5) การควบคุมลักษณะโพรงทำได้โดยการติดตั้งท่อฉีดน้ำจืดและท่อคุณน้ำเกลือเคลื่อนที่ขึ้น-ลงได้

6) ทำการแยกน้ำเกลือแล้วผลิตเป็นเกลือสินเธาว์ (ไม่รวมอยู่ในคู่มือนี้)

7) ในกรณีที่มีหลุมเจาะมากกว่า 1 หลุม ควรให้โพรงมีระยะห่างกันตามที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อป้องกันการทรุดตัวของแผ่นดิน

3.2 การวางท่อ

ขนาดของท่อเหล็กที่ใช้ยึดหลุมเจาะจะขึ้นกับขนาดของหลุมเจาะ ท่อเหล็กจะมีขนาดหลายขนาด การเลือกความหนาและจำนวนท่อที่จะใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่และแรงดันที่กระทำด้านข้างผนังหลุมเจาะ วิธีการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวางท่อในหลุมเจาะ

1) ท่อยึดผนังหลุมเจาะและฐานยึดท่อ การเจาะหลุมในชั้นดินตะกอนจะไม่สามารถค้ำยันตัวเองให้อยู่ได้ทำให้ผนังหลุมเจาะพังทลาย ควรทำการตอกท่อเหล็กที่มีขนาดใหญ่สุดลงไปชั้นดินก่อน อาจใช้ท่อเหล็กหลายขนาดตอกซ้อนกันไปเรื่อย ๆ ตามสภาพของชั้นหิน ท่อเหล็กยึดผนังหลุมเจาะท่อสุดท้ายให้ตอกทะลุผ่านชั้นเกลือหินไป 100 ฟุต แล้วยึดด้วยฐานยึดท่อเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของท่อเหล็กและยังช่วยป้องกันไม่ให้น้ำใต้ดินไหลซึมเข้ามาด้วย แล้วจึงเทซีเมนต์ยึดผนังหลุมเจาะทันที

2) ท่อฉีดน้ำจืด จะติดตั้งหลังจากติดตั้งท่อยึดผนังหลุมเจาะและฐานยึดท่อเสร็จแล้ว โดยทำการติดตั้งอยู่ภายในท่อยึดผนังหลุมเจาะและให้อยู่ลึกจากฐานยึดท่ออีก 100 ฟุต สำหรับฉีดน้ำจืดเพื่อละลายเกลือหิน ข้อควรระวังหลังจากที่ได้มีการละลายโพรงแล้วความหนาของพื้นโพรงควรมีมากกว่า 100 ฟุต เพื่อป้องกันการรั่วซึมออกของน้ำเกลือสู่ชั้นน้ำบาดาล

3) ท่อคูดน้ำเกลือ จะติดตั้งคู่กับท่อฉีดน้ำจืด สำหรับคูดน้ำเกลือ และใช้เป็นตัวควบคุมรูปร่างของโพรงได้ด้วย โดยการควบคุมระดับความลึกของปลายท่อด้านล่าง บางครั้งอาจต้องมีการสลับหน้าที่กันระหว่างท่อคูดน้ำเกลือ และท่อฉีดน้ำจืดตามกระบวนการฉีดน้ำแบบปกติหรือกระบวนการผันกลับของการฉีดหรือคูด

4) ท่อส่งสารป้องกันการละลาย (ถ้ามี) จะวางขนานข้างกับท่อฉีดน้ำจืดกับท่อคูดน้ำเกลือ เพื่อใช้สำหรับการส่งสารป้องกันการละลายมาควบคุมลักษณะของโพรง หรือป้องกันการละลายของหลังคาโพรง ท่อส่งนี้จะวางตัวอยู่ในระดับบนของโพรง

3.3 ตัวอย่างการวางท่อ

ท่อยึดผนังหลุมเจาะจะมีการวางท่อขนาดต่าง ๆ ภายในหลุมเจาะตั้งแต่ขนาดใหญ่สุดถึงขนาดเล็กสุดแล้วจึงติดตั้งฐานยึดท่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อยึดผนังหลุมชั้นนอกสุด ควรมีขนาด 15-18 นิ้ว (ไม่ควรใหญ่กว่า 24 นิ้ว) และท่อยึดผนังหลุมเจาะที่ติดตั้งฐานยึดท่อ (ชั้นในสุด) ควรมีขนาด 8 5/8 นิ้ว (ไม่ควรเล็กกว่า 7 นิ้ว) ขนาดของท่อเหล็กในแต่ละชั้นอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามการออกแบบและสภาพพื้นที่ (Nigbor, 1982)

ท่อส่งสารป้องกันการละลายควรเลือกใช้ขนาดที่เล็กกว่าท่อยึดผนังหลุมเจาะชั้นในสุด เพื่อใช้เป็นท่อส่งสารป้องกันการละลายควบคุมลักษณะของโพรง และป้องกันการละลายของหลังคาโพรง

ท่อฉีดน้ำฉีดและท่อดูดน้ำเกลือ ควรจะใช้ขนาดที่เล็กกว่าท่อยึดผนังหลุมเจาะชั้นในสุดคือใช้ขนาด 3 นิ้ว สำหรับใช้เป็นท่อฉีดน้ำฉีดและดูดกลับน้ำเกลือขึ้นไปบนโรงงาน

3.4 การตรวจสอบเสถียรภาพของหลุมเจาะ

การตรวจสอบเสถียรภาพของหลุมเจาะ คือการตรวจสอบการรั่วซึมของหลุมเจาะเป็นช่วง ๆ ตลอดความลึกและตลอดระยะเวลาการทำเหมืองเกลือ เพื่อป้องกันการพังทลายของหลุมเจาะและป้องกันผลกระทบจากน้ำเค็มที่รั่วไหลออกจากหลุมเจาะ

หลังจากที่มีการก่อสร้างและพัฒนาหลุมเจาะแล้ว ควรทำการทดสอบเสถียรภาพของหลุมเจาะ ซึ่งมีหลายวิธี สามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง (Nigbor, 1982)

4. การออกแบบโพรงในชั้นเกลือหิน

4.1 ข้อกำหนดเบื้องต้น

- 1) การออกแบบให้มีเสถียรภาพในระยะยาว 50 ปี
- 2) โพรงที่ออกแบบจะมีรูปร่างเป็นทรงรีเพื่อความปลอดภัย
- 3) โพรงที่อยู่ในบริเวณเหมืองเกลือควรจะให้เป็นแถวเรียงกันอย่างมีระเบียบ
- 4) หลังคาโพรงต้องมีความหนาพอที่จะค้ำยันตัวโพรง
- 5) พื้นโพรงจะต้องหนาพอเพื่อป้องกันมิให้น้ำเกลือไหลออก
- 6) โพรงจะต้องใหญ่เพียงพอกับความค้ำค่าทางด้านเศรษฐกิจ
- 7) ระยะห่างระหว่างโพรงต้องมีความพอเหมาะเพื่อป้องกันการทรุดตัวของพื้นดิน
- 8) ผลลัพธ์ที่นำมาออกแบบโพรงเกลือต้องมีความปลอดภัย ลดต้นทุน ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แผ่นดินทรุด การรั่วซึมในชั้นเกลือหิน ไปสู่ชั้นน้ำบาดาล

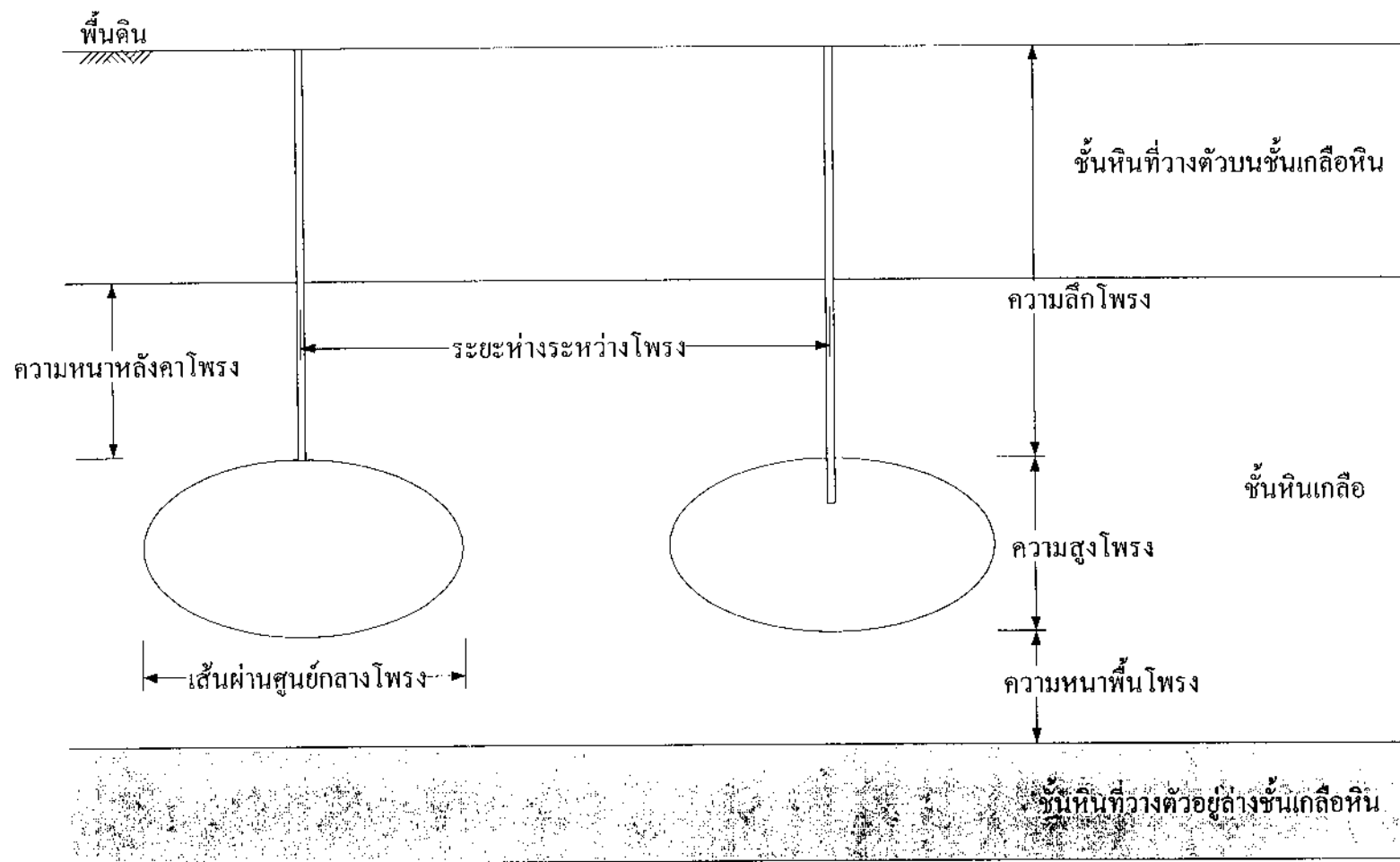
4.2 รูปแบบโพรงในชั้นเกลือหินที่เหมาะสม

การจัดวางรูปแบบโพรงในชั้นเกลือหิน (รูปที่ 3) ควรให้เป็นแถวเรียงกันในลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีด้านทั้งสี่ด้านหรือระยะห่างระหว่างโพรงเท่ากัน โพรงเกลือควรวางตัวอยู่ในระดับความลึกที่เท่ากันในบริเวณเหมืองเกลือหรือพื้นที่เดียวกัน และหลังคาโพรงต้องมีความหนาอย่างน้อย 100 ฟุต เพื่อค้ำยันตัวโพรงไม่ให้พังได้ และมีความหนาของพื้นโพรงอย่างน้อย 100 ฟุต เพื่อไม่ให้น้ำเกลือรั่วไหลออกได้

รูปร่างของโพรงเกลือในชั้นเกลือหินควรออกแบบให้มีรูปร่างเป็นทรงรีเพื่อความปลอดภัย โดยมีแกนในแนวนอนยาวกว่าแกนในแนวตั้ง แกนในแนวนอนจะเรียกว่า เส้นผ่าศูนย์กลางโพรง ส่วนแกนในแนวตั้งจะเรียกว่า ความสูงโพรง รูปร่างของโพรงในชั้นเกลือหินดังแสดงในรูปที่ 3

4.3 ตัวอย่างการออกแบบโพรงเกลือ

การออกแบบโพรงเกลือในพื้นที่ตัวอย่าง 5 กลุ่ม คือ บ้านโคกสง่า บ้านหนองขาม บ้านหนองปู่ บ้านโพธิ์พาน และบ้านขาม นำมาจากรายงานการวิจัยที่ได้มีการวิเคราะห์และออกแบบไว้แล้ว (กิตติเทพ เพ็ญขจร, 2543) ซึ่งจะมีความปลอดภัยสูง และมีผลกระทบจากแผ่นดินทรุดน้อยกว่า 1 ฟุต ตลอดระยะเวลาการทำเหมืองเกลือ 50 ปี โดยมีปริมาณเกลือที่นำขึ้นมาประมาณ 1 แสนลูกบาศก์เมตรต่อหนึ่งโพรง รูปร่างโพรงเกลือควรมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 263 ฟุต และความสูงน้อย



รูปที่ 3 ขนาดและรูปร่างของแบบจำลองโพรงในชั้นเกลือหิน

กว่า 197 ฟุต และระยะห่างระหว่างโพรงต้องมากกว่า 790 ฟุต โดยมีข้อเสนอแนะในการวางระดับความลึกของโพรงในชั้นเกลือหินในพื้นที่ตัวอย่างดังนี้

กลุ่มบ้านโคกสง่า ควรมีระดับความลึกของโพรงจากพื้นดินเดิมไม่น้อยกว่า 1032 ฟุต กลุ่มนี้จะประกอบด้วยหมู่บ้านโคกสง่า อ.พล จ.ขอนแก่น บ้านหัวขัว อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม วัดสุทธิมงคล อ.พนมกันคม จ.มหาสารคาม วัดไทยศรีมงคล อ.เมือง จ.ยโสธร วัดบ้านคู้ อ.ธวัชบุรี จ.ร้อยเอ็ด

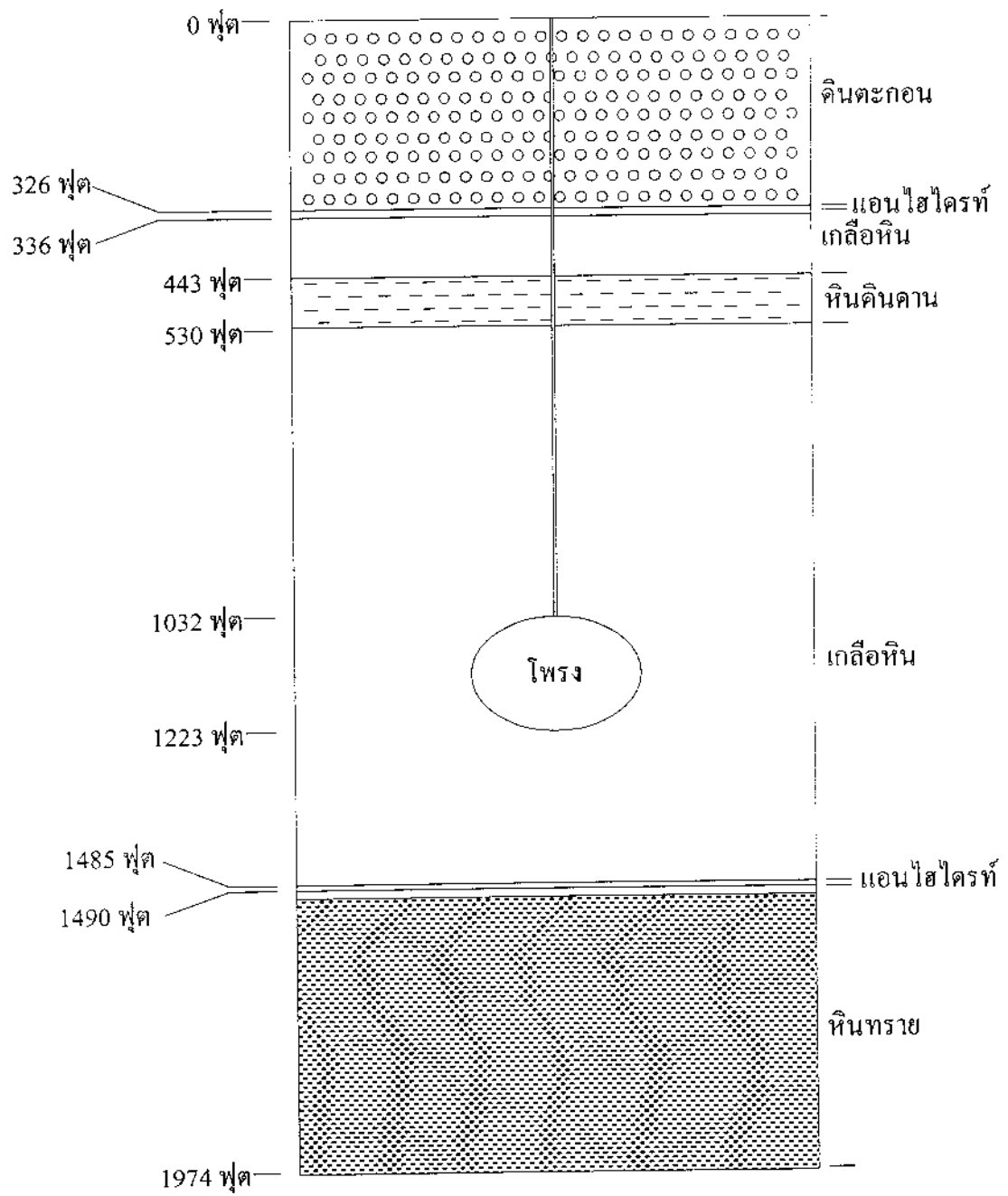
กลุ่มบ้านหนองขาม ควรมีระดับความลึกของโพรงจากพื้นดินเดิมไม่น้อยกว่า 1721 ฟุต กลุ่มนี้จะประกอบด้วยหมู่บ้านหนองขาม อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา

กลุ่มบ้านหนองปู ควรมีระดับความลึกของโพรงจากพื้นดินเดิมไม่น้อยกว่า 2092 ฟุต กลุ่มนี้จะประกอบด้วยหมู่บ้านหนองปู อ.บรบือ จ.มหาสารคาม

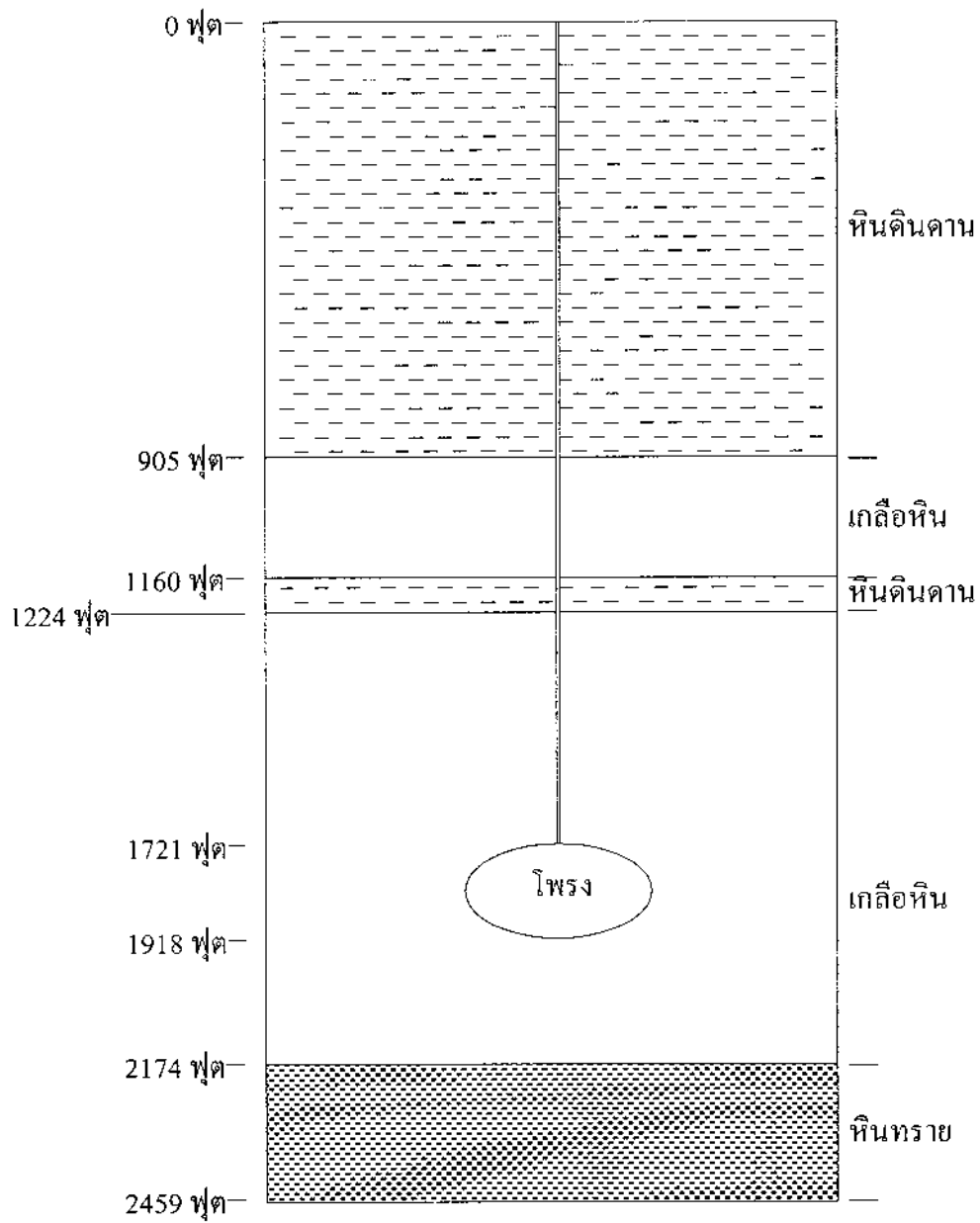
กลุ่มบ้านโพธิ์พาน ควรมีระดับความลึกของโพรงจากพื้นดินเดิมไม่น้อยกว่า 1931 ฟุต กลุ่มนี้จะประกอบด้วยหมู่บ้านโพธิ์พาน อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม วัดโนนเวียง บ้านศรีเมือง อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร วัดอัมพวัน บ้านกุดจิก อ.วานรนิวาส จ.สกลนคร บ้านเก่า อ.เมือง จ.อุครธานี

กลุ่มบ้านขาม ควรมีระดับความลึกของโพรงจากพื้นดินเดิมไม่น้อยกว่า 989 ฟุต กลุ่มนี้จะประกอบด้วยวัดขาม อ.ขามสะแกแสง จ.นครราชสีมา บ้านโนนระเวียง อ.ด่านขุนทด จ.นครราชสีมา และบ้านหนองประจักษ์ อ.เมือง จ.อุครธานี

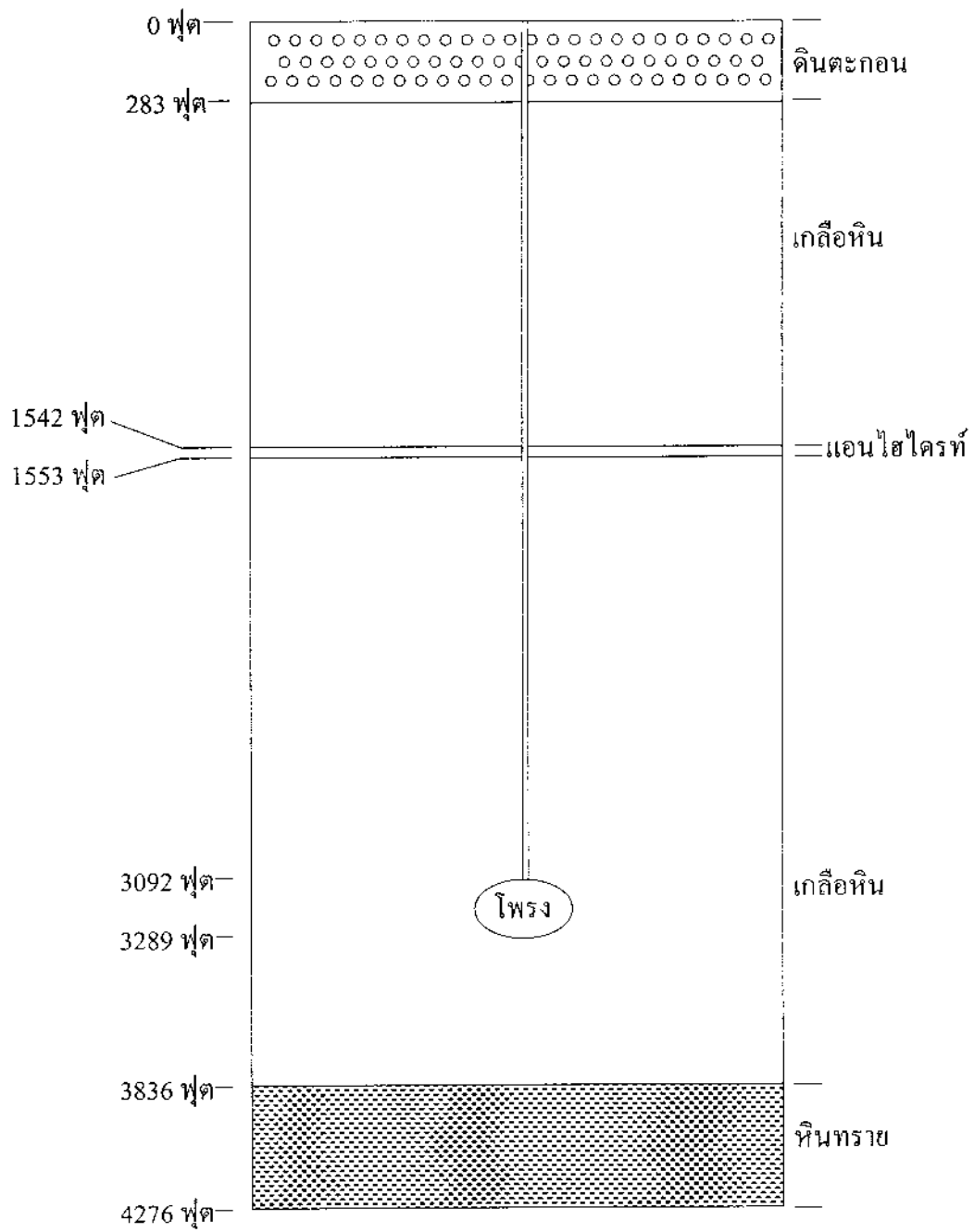
ลักษณะทางธรณีวิทยาในเชิงความหนาและความลึกที่เหมือนกันกับกลุ่มตัวอย่างข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ (รูปที่ 4-8) และในพื้นที่นั้นต้องไม่มีการทำโพรงในชั้นเกลือหินมาก่อน และไม่มีการรบกวนจากการขุดเจาะหรือก่อสร้างชั้นเกลือหินในบริเวณโดยรอบรัศมี 1,000 ฟุต ลักษณะทางธรณีวิทยาดังกล่าวสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง (ปกรณ สุวานิช, 2521)



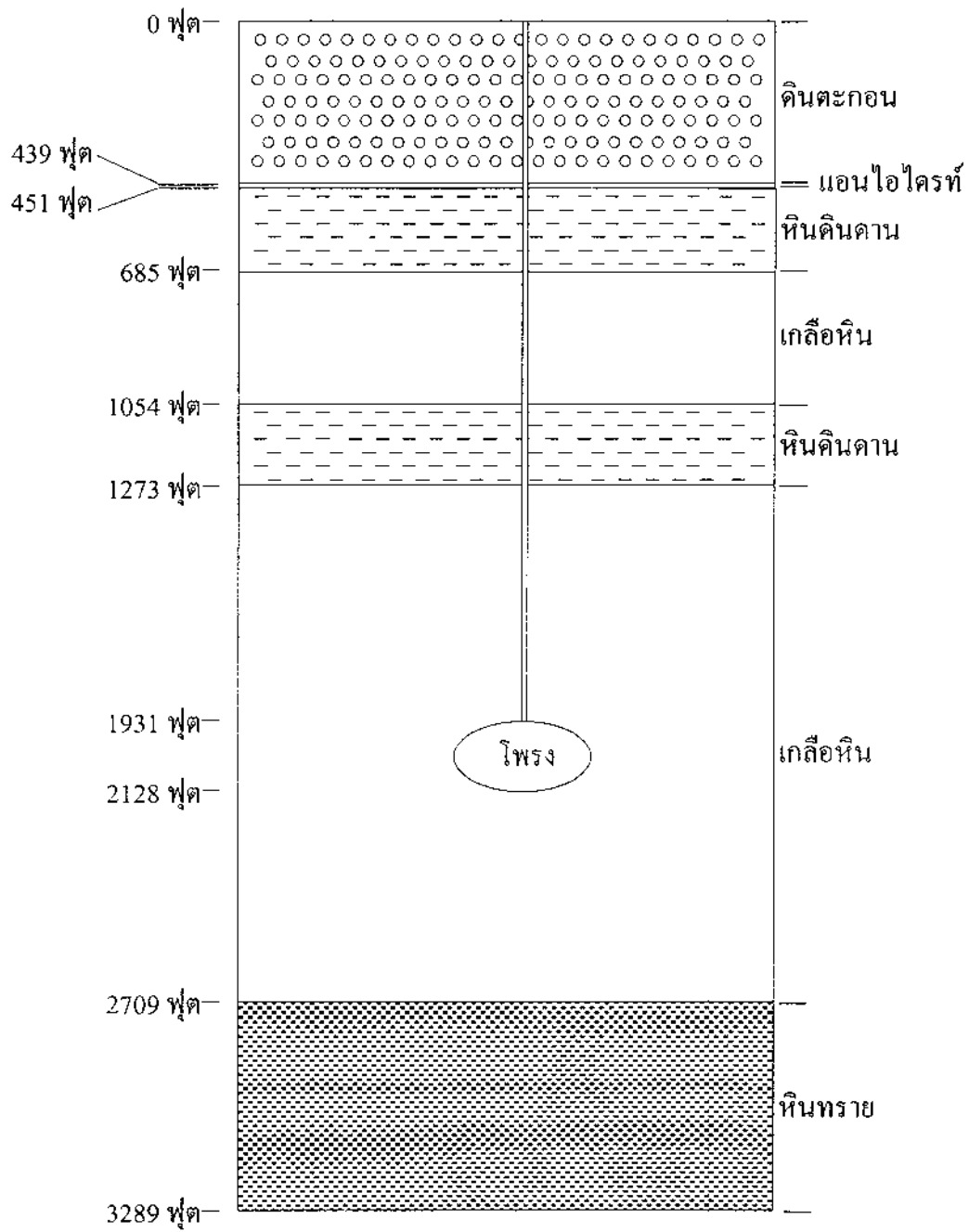
รูปที่ 4 ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหิน กลุ่มบ้านโคกสง่า



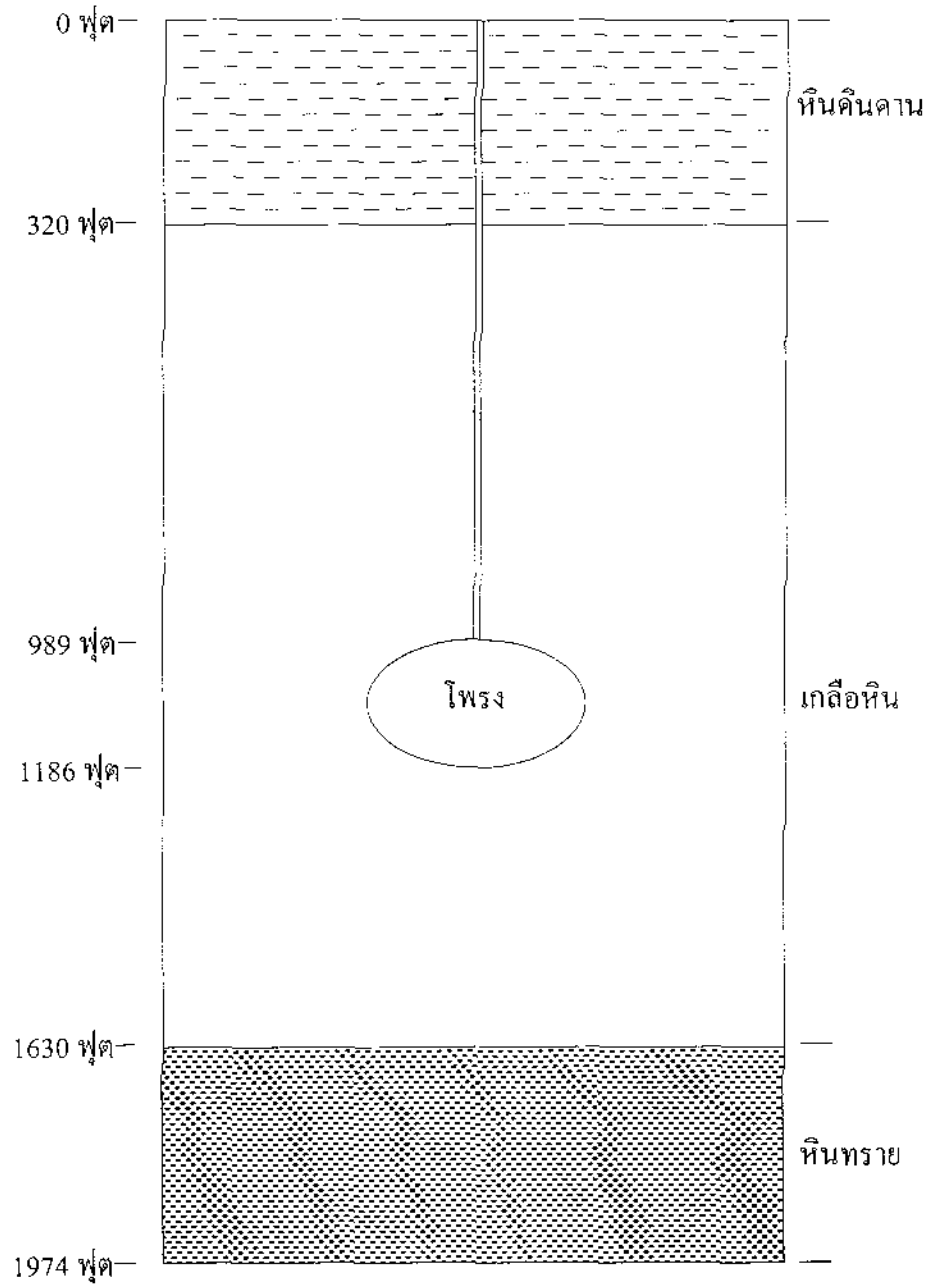
รูปที่ 5 ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหิน กลุ่มบ้านหนองขาม



รูปที่ 6 ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหิน กลุ่มบ้านหนองปู



รูปที่ 7 ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหิน กลุ่มบ้านโพธิ์พาน



รูปที่ 8 ลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหิน กลุ่มบ้านนาม

5. การละลายโพรงเกลือ

5.1 ลำดับการละลายโพรง ในรูปที่ 9 แบ่งออกเป็น 3 ลำดับ คือ

1) การละลายโพรงส่วนล่าง

- ดำเนินการโดยเคลื่อนท่อฉีดน้ำจืดลึกลงไปในระดับที่ออกแบบเป็นพื้นโพรง
- ส่วนท่อดูดน้ำเกลือจะทำการดูดน้ำเกลือขึ้นไปสู่โรงงาน กระบวนการทั้งหมดนี้จะเรียกว่า กระบวนการฉีดน้ำแบบปกติ

2) การละลายโพรงส่วนบน

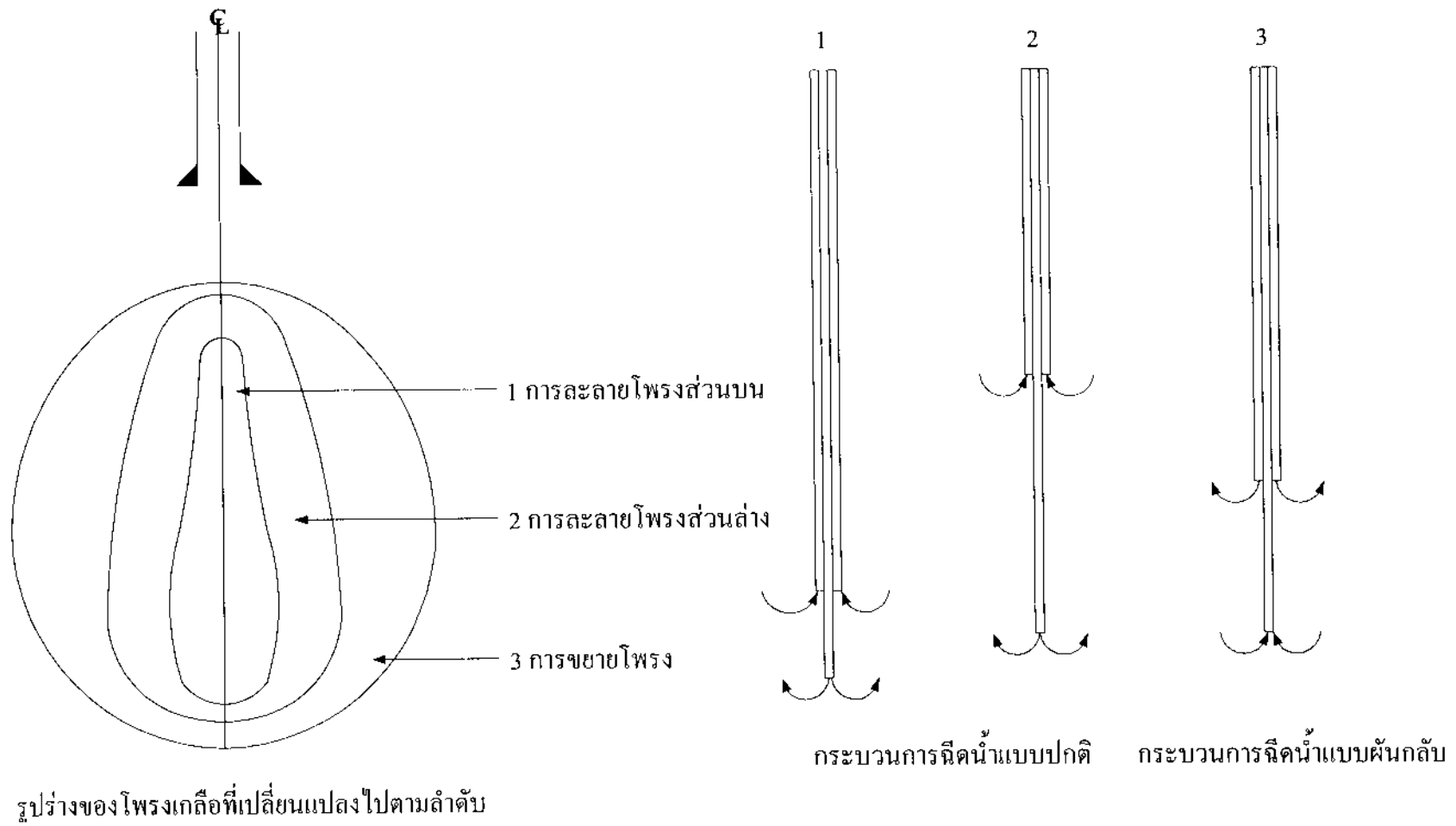
- ดำเนินการโดยเคลื่อนท่อฉีดน้ำจืดขึ้นสูงจากพื้นโพรงเล็กน้อย พร้อมกับเคลื่อนท่อดูดน้ำเกลือขึ้นสูงเรื่อย ๆ จนถึงระดับหลังคาโพรงที่ออกแบบ
- การฉีดน้ำจืดและการดูดน้ำเกลือจะดำเนินการตามแบบกระบวนการฉีดน้ำแบบปกติ

3) การขยายโพรง

- การขยายโพรงจะดำเนินการตามกระบวนการฉีดน้ำแบบผันกลับ คือ การสลับหน้าที่กันของท่อฉีดน้ำจืดเปลี่ยนเป็นท่อดูดน้ำเกลือ และท่อดูดน้ำเกลือเปลี่ยนเป็นท่อฉีดน้ำจืด
- หลังจากที่ได้ทำการสลับหน้าที่แล้ว ทำการละลายโพรงส่วนบน โดยจะวางท่อดูดน้ำเกลือไว้ที่ระดับเดิม
- เคลื่อนที่ท่อฉีดน้ำจืดลงจากระดับหลังคาโพรงไปเรื่อย ๆ ด้วยกระบวนการฉีดน้ำแบบผันกลับดังกล่าว ผลลัพธ์สุดท้ายจะได้โพรงรูปทรงรี ส่วนรูปร่างโพรงลักษณะอื่น ๆ ก็สามารถประยุกต์ใช้ได้ด้วยวิธีการเดียวกันนี้

5.2 วิธีควบคุมลักษณะของโพรง

วิธีการใช้สารป้องกันการละลายโพรงในชั้นเกลือหินเป็นวิธีประยุกต์ใช้กับระบบหลุมเจาะเพื่อป้องกันการละลายและการพังทลายบริเวณหลังคาโพรง อีกทั้งยังช่วยในการเพิ่มขนาดโพรง และควบคุมรูปร่างของโพรงด้วย



รูปที่ 9 ลำดับการละลายโพรงเกลือ

ถ้าปราศจากสารป้องกันการละลายในส่วนบนสุดของโพรงเกลือหรือหลังคาโพรงก็ จะถูกละลายและทำให้โพรงเกลือพังได้ ผลที่ตามมาคือจะได้หลังคาโพรงที่กว้างผิดปกติ และจะได้ ปริมาณน้ำเกลือที่น้อยกว่าที่ออกแบบไว้ตามรูปที่ 10ก

สารป้องกันการละลายในส่วนบนสุดของโพรงอาจเป็นน้ำมัน ก๊าซหรือ ไฮโดรคาร์บอน การใช้สารป้องกันการละลายโพรงเกลือจะช่วยให้การละลายและการควบคุมรูปร่าง ของโพรงดีขึ้นตามรูปที่ 10ข

5.3 การตรวจสอบรูปร่างโพรง

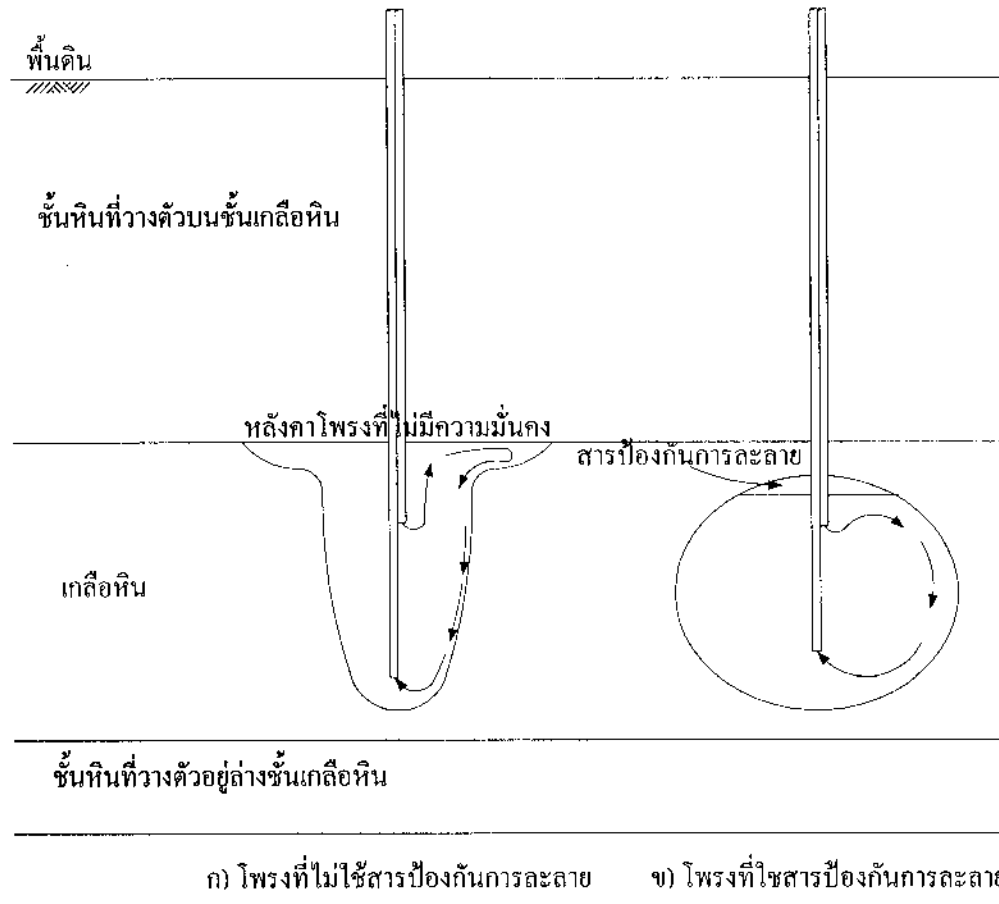
หลังจากทำเหมืองเกลือแล้วต้องทำการตรวจสอบรูปร่างโพรงที่ต้องการ เพื่อควบคุม รูปร่างโพรงให้ได้ตามขนาดที่ออกแบบไว้และป้องกันการพังทลายของโพรงซึ่งมีอยู่หลายวิธี สามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง (Nigbor, 1982)

ตัวอย่างวิธีที่ใช้ในการหารูปร่างโพรง เช่น วิธีสะท้อนคลื่นเสียง ผังการทำงานของ วิธีนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 11 เครื่องมือการสะท้อนคลื่นเสียงจะถูกติดตั้งไว้ในระดับที่ต้องการวัดขอบเขต ในโพรง เครื่องมือสามารถหมุนได้ 360° และสามารถทำซ้ำไปมาในระดับต่าง ๆ ได้ ผลลัพธ์ที่ได้ สามารถแสดงออกมาในรูปแบบจำลองของโพรงสามมิติ

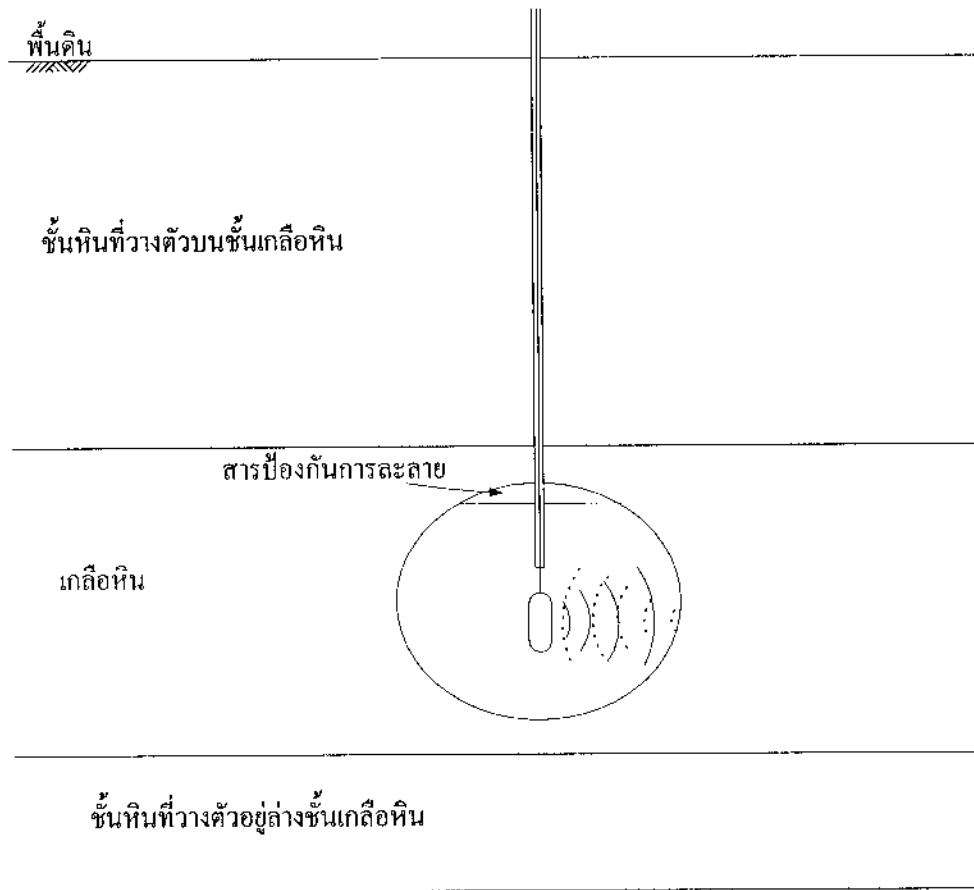
5.4 เสถียรภาพของโพรงในชั้นเกลือหินกับการทรุดตัวของแผ่นดิน

เสถียรภาพของโพรงในชั้นเกลือหินกับการทรุดตัวของแผ่นดินเหนือบริเวณการทำ เหมืองเกลือแบบละลาย ในที่นี้จะศึกษาการทำเหมืองเกลือในระยะยาวเท่านั้น โดยการทรุดตัวไม่ควร เกิน 1 ฟุต

การทรุดตัวของแผ่นดินตามธรรมชาติ อาจเกิดจากน้ำเกลือที่ไปละลายผิวชั้นบน เกลือหินจนเกิดเป็นหลุมขนาดใหญ่ และก่อให้เกิดแผ่นดินทรุดตามมา ถ้าไม่มีการควบคุมรูปร่างของ โพรงเกลือและความกว้างของหลังคาโพรงก็อาจเกิดการพังทลายลงมาได้ ผลสืบเนื่อง คือ จะทำให้ เกิดแผ่นดินทรุดเป็นบริเวณกว้าง และที่สำคัญอาจมีผลกระทบต่อชุมชนข้างเคียง เช่น ทำให้บ้านทรุด ถนนพัง การตรวจสอบการทรุดตัวของแผ่นดินนี้ควรมีการติดตามผลโดยการติดตั้งเครื่องมือวัดผล การทรุดตัวของแผ่นดิน เพื่อเป็นการระมัดระวังและป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นตามมาและเพื่อที่ จะแก้ไขปัญหาค่าได้ทัน่วงที



รูปที่ 10 สารป้องกันการละลายหลังคาโพรง



รูปที่ 11 การตรวจสอบรูปร่างโพรงเกลือโดยใช้วิธีสะท้อนคลื่นเสียง

เอกสารอ้างอิง

กิตติเทพ เพ็องขจร, 2543, รายงานการวิจัยการวิเคราะห์และออกแบบโพรงที่เกิดจากการผลิตเกลือ โดยวิธีละลายในชั้นหินเกลือที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขในคอมพิวเตอร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปกรณ์ สุวานิช, 2521, แร่โปแตชภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย, เอกสารเศรษฐธรณีวิทยา เล่มที่ 22, กองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี

Istvan, J. A. and Querio C. W., 1983, Storage of Natural Gas in Salt Caverns, Sixth International Symposium on Salt May 24-28, 1983, Toronto, Canada.

Nighbor, M. T., 1982, State of The Art of Solution Mining for Salt, Potash and Soda Ash, Research Project Report No. 82-0002-SMRI, Solution Mining Research Institute, Illinois, U.S.A.

Bieniawski, Z. T. and Bieniawski, P. W., 1994, Design Principles and Methodology Applied to Solution Mined Salt Caverns, Meeting Paper, Solution Mining Research Institute, Illinois, U.S.A.

ประวัตินักวิจัย

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