



รหัสโครงการ SUT7-719-52-24-66

รายงานการวิจัย

การศึกษาการทรุดตัวของผิวดิน
จากการสูบน้ำบาดาลเค็มด้วยแบบจำลองเชิงกายภาพ

**Study of Surface Subsidence
due to Brine Pumping Practice Using Physical**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.ปรัชญา เทพนรงค์
สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติเทพ เฟื่องขจร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2552 และ 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤศจิกายน 2553

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2552-2553 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี ในการทดสอบผล และ นางสาวกัลญา พับโพธิ์ ในการพิมพ์รายงานการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

พฤศจิกายน 2553

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อจำลองผลกระทบของการสูบน้ำบาดาลเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยใช้แบบจำลองย่อยส่วนเชิงกายภาพในห้องปฏิบัติการ และเพื่อประเมินผลกระทบของควมลึกของบ่อสูบ ความหนาของชั้นหินปิดทับ อัตราการสูบน้ำ และทิศทางการไหลของน้ำบาดาล ต่อขนาดและตำแหน่งของโพรงที่ถูกละลาย และต่อการทรุดตัวของผิวดิน พื้นที่การสูบน้ำบาดาลเค็มถูกย่อยส่วนให้อยู่ในรูปแบบ 2 มิติ โดยจะถูกแทนด้วยแบบจำลองในแนวตั้งที่มีชั้นหินปิดทับถึง 0.5 เมตร และแบบจำลองมีความกว้างเท่ากับ 1.6 เมตร ทราบค้ขนาด (0.6 - 0.8 มิลลิเมตร) จะใช้เป็นตัวแทนชั้นหินปิดทับ เกลือบขนาด 0.6 มิลลิเมตร จะใช้เป็นตัวแทนชั้นเกลือหินที่อยู่ด้านใต้ ความเค็มของน้ำเกลือที่สูบออกมาจะถูกวัดอย่างต่อเนื่องในระหว่างการทดสอบ การทดสอบจะทำภายใต้อุณหภูมิห้อง ผลที่ได้ระบุว่า บ่อสูบที่อยู่ระดับลึกใกล้กับผิวของชั้นเกลือจะทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินมากกว่าบ่อสูบที่อยู่ในระดับตื้นกว่าภายใต้อัตราการสูบที่เท่ากัน ความกว้างของการทรุดตัวของผิวดินจะมีขนาดเล็กถ้าชั้นเกลือหินอยู่ในระดับตื้น และมีขนาดใหญ่ขึ้นถ้าชั้นเกลือหินอยู่ในระดับลึก ชั้นน้ำบาดาลที่อยู่ระดับลึกจะทำให้เกิดการทรุดตัวมากกว่าและแคบกว่าเมื่อเทียบกับกรณีเดียวกัน โดยมีชั้นน้ำบาดาลอยู่ในระดับตื้นกว่า การสูบน้ำบาดาลเค็มด้วยอัตราสูงจะส่งผลให้มีการทรุดตัวมากและแผ่กระจายเป็นบริเวณกว้าง ตำแหน่งและขนาดของการทรุดตัวของผิวดินจะถูกควบคุมด้วยตำแหน่งของแหล่งที่มาของน้ำจืดด้วย

Abstract

The objectives of this research are to simulate the impacts of brine pumping process in the northeast of Thailand using a scaled-down or physical test model in laboratory and to assess the effects of the pumping well depth, overburden thickness, pumping rate, and groundwater flow direction on the magnitude and location of the leached caverns and their corresponding subsidence. The brine pumping area is scaled down and simplified in two-dimension, represented by a vertical cross-section with the maximum overburden depth of 0.5 m and width of 1.6 m. Sorted sand (0.6-0.8 mm) is used to simulate the overburden. Pure crushed salt (0.6 mm) simulates the underlying salt bed. Salinity of the pumped brine is continuously monitored during the pumping test. All tests are performed under room temperature. The results suggest that deeper pumping well (closer to the salt surface) induces greater magnitude of surface and formation subsidence than the shallower well does. Under the same pumping rate the extent of the surface subsidence over the shallow salt bed is smaller than that over the deeper salt bed. The deeper groundwater level used results in a greater magnitude of surface and formation subsidence. The groundwater level however has no impact on the extent of the subsidence area. The higher rate of brine pumping used, the greater magnitude and the lesser extent of the subsidence is obtained. The location and extent of subsidence is also controlled by the locations of the fresh water sources (recharge locations) in relation to the pumping well location.

สารบัญ

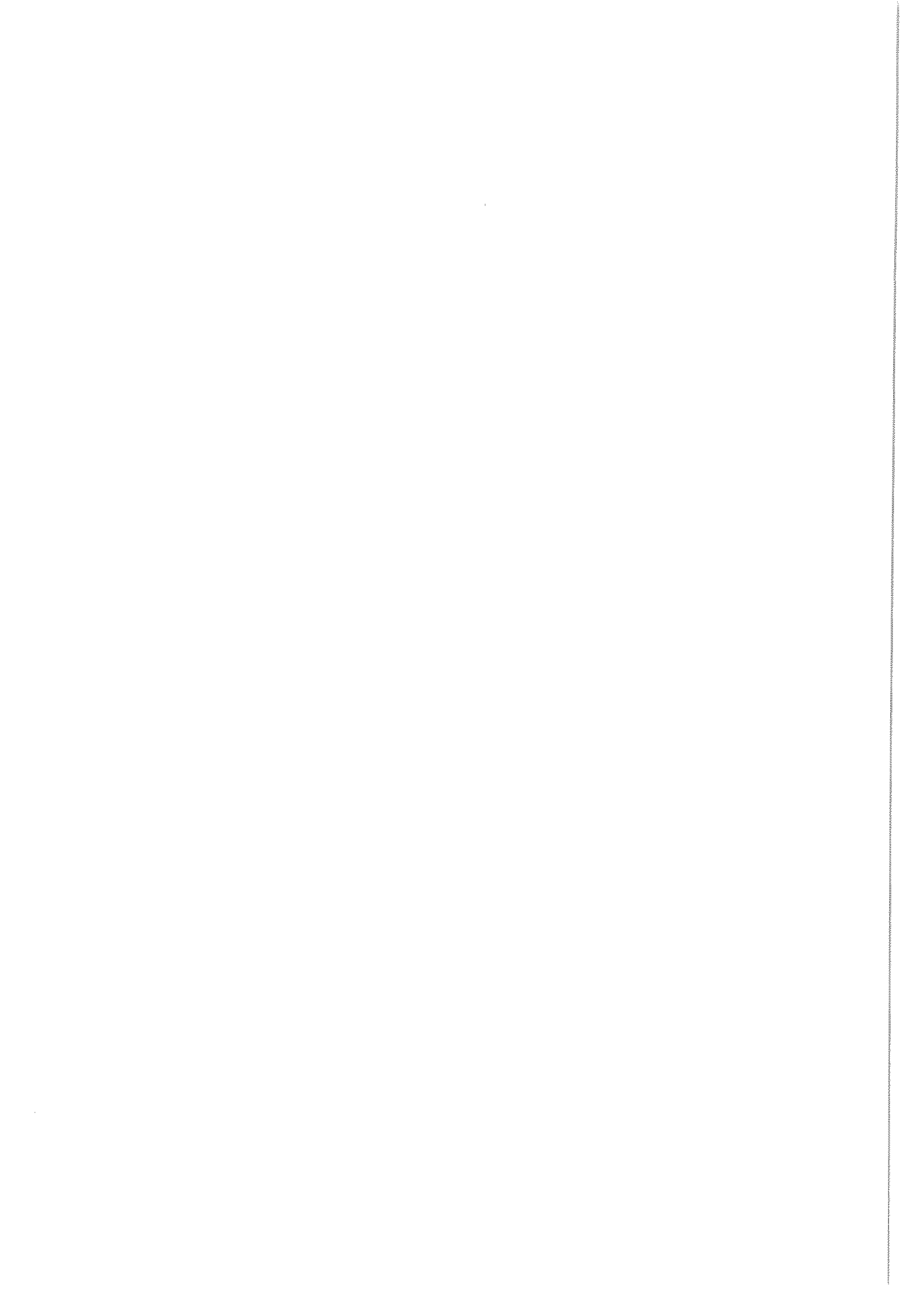
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของ โครงการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิด.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล.....	4
1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	7
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมวิจัยและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 ธรณีวิทยาของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.....	9
2.1.1 โครงสร้างและลักษณะธรณีวิทยาของชั้นเกลือหิน.....	9
2.1.2 อุทกธรณีวิทยา.....	14
2.1.3 ข้อมูลหลุมเจาะและผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.....	16
2.2 การคำนวณการทรุดตัวของผิวดิน.....	19
2.2.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน.....	19
2.2.2 การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	23
2.2.3 การคำนวณการทรุดตัวด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การเกิดแผ่นดินไหวเนื่องจาก โพรงธรรมชาติ.....	25
2.3.1 หลุมยุบที่เกิดจาก โพรงหินปูน.....	25
2.3.2 หลุมยุบที่เกิดจาก โพรงเกลือหิน.....	25
2.4 การทดสอบ Leaching test ของเกลือหิน.....	26
2.5 โครงจำลองทางกายภาพ.....	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนาโครงทดสอบ.....	33
3.1 แนวคิดในการประดิษฐ์.....	33
3.2 รูปแบบของโครงจำลอง.....	33
บทที่ 4 การทดสอบ.....	43
4.1 วัตถุประสงค์.....	43
4.2 วิธีการทดสอบ.....	43
4.2.1 ขั้นตอนเตรียมการทดสอบ.....	44
4.2.2 การทดสอบหาค่าความซึมผ่าน.....	44
4.3 ขั้นตอนการทดสอบ.....	46
4.3.1 ชุดการทดสอบที่ 1.....	46
4.3.1 ชุดการทดสอบที่ 2.....	49
4.3.1 ชุดการทดสอบที่ 3.....	50
4.3.1 ชุดการทดสอบที่ 4.....	52
4.4 ผลการทดสอบ.....	52
4.4.1 ผลการทดสอบผลกระทบของตำแหน่งในการสูบน้ำบาดาล.....	55
4.4.2 ผลการทดสอบหาผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับ.....	55
4.4.3 ผลการทดสอบผลกระทบของระดับน้ำบาดาล.....	67
4.4.4 ผลกระทบของอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็ม.....	67

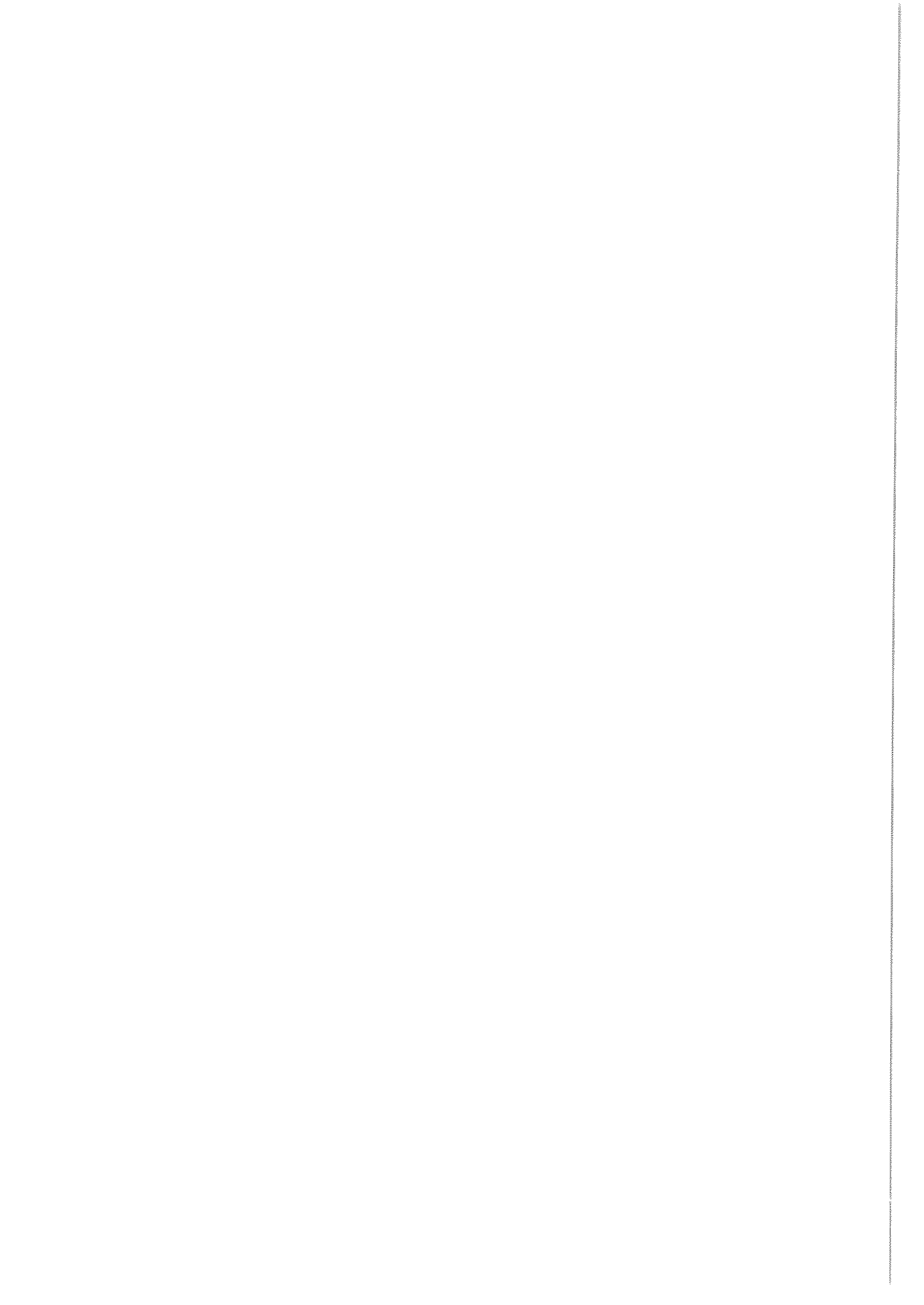
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การคำนวณด้วย Profile Function	87
5.1 วัตถุประสงค์.....	87
5.2 การคำนวณด้วย Profile Function.....	87
บทที่ 6 การคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID	91
6.1 วัตถุประสงค์.....	91
6.2 การคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID.....	91
6.3 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID.....	92
บทที่ 7 การคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์	93
7.1 วัตถุประสงค์.....	93
7.2 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	93
7.3 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	93
บทที่ 8 สรุปและข้อเสนอแนะ	95
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	95
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	97
บรรณานุกรม	99
ภาคผนวก ก ผลจากการวัดค่าการทรุดตัวและผลจากการวัดค่าความเข้มข้น	ก-1
ภาคผนวก ข ผลการคำนวณด้วย Profile Function	ข-2
ภาคผนวก ค ผลการคำนวณด้วย โปรแกรม SALT_SUBSID	ค-1
ภาคผนวก ง ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์(FEFLOW)	ง-1



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเกลือหินและหินชั้นหินปิดทับ	24
4.1 ตัวแปรต่างๆ ที่มีการผันแปรในแต่ละชุดการทดสอบ	48
4.2 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบการทรุดตัวในแต่ละวิธีการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ	54
4.3 ผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวของบ่อนผิวดินและผิวเกลือที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลา โดยใช้วิธีการสูบน้ำอย่างต่อเนื่อง	56
4.4 ผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวของบ่อนผิวดินและผิวเกลือที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาโดยใช้วิธี การสูบน้ำเป็นช่วงๆ	57
4.5 ผลการวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาโดยการผันแปรความหนาของชั้นหิน ปิดทับที่ขนาดต่างๆ	63
4.6 ผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาโดยผันแปรความกว้างของช่อง น้ำจืด	68
4.7 ผลการวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาโดยมีการผันแปรระดับน้ำบาดาล และทำการปล่อยน้ำจืดให้ซึมเข้ามาจากทางด้านบน	72
4.8 ผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลา โดยมีการผันแปรระดับน้ำบาดาล และทำการอัดน้ำจืดจากทางด้านข้าง	73
4.9 ผลการวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลา โดยการผันแปรอัตราการสูบน้ำ	81



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 แนวคิดเบื้องต้นของแบบจำลองทางกายภาพเพื่อศึกษาผลกระทบจากการสูบน้ำบาดาลเค็ม โดยมีแรงดันจากน้ำใต้ดินด้านข้างสองด้านหรือด้านเดียว และมีการผันแปรจำนวนและตำแหน่งของท่อสูบน้ำเค็ม.....	3
2.1 แอ่งสกลนครและแอ่งโคราชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มาตรฐาน 1:2,500,000.....	11
2.2 ภาพตัดขวางแสดงธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.....	15
2.3 แสดงตำแหน่งของชื่อทางภูมิศาสตร์ที่สำคัญ และตำแหน่งเส้นสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนของชั้นหิน.....	17
2.4 ภาพตัดขวางแสดงชั้นเกลือหินบางส่วนในแอ่งโคราช.....	20
2.5 ภาพตัดชั้นเกลือหินจากผลการสำรวจวัดคลื่นสั้นสะเทือนบริเวณหลุมเจาะสำรวจ K-66 อ.บอระเพ็ด จ.มหาสารคาม.....	20
2.6 ลักษณะทรุดตัวของผิวดินที่มีผลกระทบจากลักษณะของโพรงและธรณีวิทยาโครงสร้างที่ต่างกัน.....	22
2.7 ภาพถ่ายโครงจำลองทางกายภาพสำหรับคาดคะเนการทรุดตัวที่เสนอ โดย Asadi และคณะ	27
2.8 ภาพเครื่องทดสอบการพังทลายของชั้นหินลาดเอียงจากผลการทบของปริมาณน้ำ และแรงดันน้ำ และภาพถ่ายผลการทดสอบของชั้นหินลาดเอียงที่พังทลาย.....	28
2.9 พื้นที่สูบน้ำเกลือในแอ่งโคราช และแอ่งสกลนคร.....	31
3.1 ภาพเพอร์สเปคทีฟของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลาย และสังเกตการณ์การทรุดตัว.....	35
3.2 ภาพเพอร์สเปคทีฟโดยแยกส่วนของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว.....	36
3.3 ภาพด้านหน้าของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว.....	38
3.4 ภาพตัดขวางด้านหน้าของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว.....	39
3.5 ภาพตัดขวางด้านบนของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว.....	40

สารบัญรูปลูกภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 ภาพตัดขวางด้านข้างของ โครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตาม การละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว.....	42
4.1 วิธีการทดสอบการหาค่าความซึมผ่านของทรายคัดขนาดสำหรับใช้จำลองชั้นหินปิดทับ.....	45
4.2 ตำแหน่งของท่อสูบน้ำและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้สำหรับตรวจวัดค่าการทรุดตัวบนผิวดิน โดยมีทิศทางการไหลของน้ำจืดมาจากทางด้านบนของแบบจำลอง.....	47
4.3 ตำแหน่งของท่อสูบน้ำและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้สำหรับตรวจวัดค่าการทรุดตัวบนผิวดิน โดยมีทิศทางการไหลของน้ำจืดมาจากทางด้านข้างของแบบจำลอง.....	51
4.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการสังเกตการทรุดตัว.....	53
4.5 การจำลองสำหรับหาค่าการทรุดตัวบนผิวดินที่เกิดจากผลกระทบของระยะห่างระหว่างท่อสูบน้ำบาดาลเค็มกับชั้นเกลือจากการสูบน้ำอย่างต่อเนื่อง และมีความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม. อัตราการสูบน้ำบาดาลเค็มเท่ากับ 100 cc/min.....	58
4.6 การจำลองสำหรับหาค่าการทรุดตัวบนผิวดินที่เกิดจากผลกระทบของระยะห่างระหว่างท่อสูบน้ำบาดาลเค็มกับชั้นเกลือจากการสูบน้ำเป็นช่วงๆ และมีความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 11 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc/min.....	59
4.7 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่มีการผันแปรระยะห่างระหว่างท่อสูบน้ำบาดาลเค็มกับชั้นเกลือจากการสูบน้ำอย่างต่อเนื่อง และมีความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc/min.....	60
4.8 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่มีการผันแปรระยะห่างระหว่างท่อสูบน้ำบาดาลเค็มกับชั้นเกลือจากการสูบน้ำอย่างต่อเนื่อง และมีความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 11 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc/min.....	61
4.9 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเค็มที่ถูกสูบน้ำออกมาตามเวลาที่ระยะของตำแหน่งท่อแตกต่างกัน.....	62
4.10 การจำลองสำหรับหาค่าการทรุดตัวบนผิวดินที่เกิดจากการผันแปรความหนาของชั้นหินปิดทับที่ระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 2 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc/min.....	64
4.11 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาโดยการผันแปรความหนาของชั้นหินปิดทับที่ระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 2 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc/min.....	65

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเค็มที่ถูกสูบออกมาตามเวลาจากการผันแปรความหนาของชั้นหินปิดทับ.....	66
4.13 การทดสอบการละลายของเกลือและการทรุดตัวจากการผันแปรความกว้างของทางเข้าน้ำจืด โดยค่าคงที่ในการทดสอบคือความหนาของชั้นหินปิดทับและระดับของน้ำบาดาลเท่ากับ 25 ซม. และ 12.5 ซม. ตามลำดับ.....	69
4.14 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่มีการผันแปรความกว้างของทางเข้าน้ำจืด โดยค่าคงที่ในการทดสอบคือความหนาของชั้นหินปิดทับและระดับของน้ำบาดาลเท่ากับ 25 ซม. และ 12.5 ซม. ตามลำดับ.....	70
4.15 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเค็มที่ถูกสูบออกมาตามเวลา โดยมีการผันแปรความกว้างของช่องน้ำจืด.....	71
4.16 การทดสอบการละลายของชั้นเกลือที่เกิดจากผลกระทบของการผันแปรระดับน้ำบาดาลด้วยการปล่อยน้ำจืดให้ซึมเข้ามาจากทางด้านบน และทำการสูบน้ำบาดาลเค็มอย่างต่อเนื่อง โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 cc/min.....	74
4.17 การทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวที่เกิดจากผลกระทบของการผันแปรระดับน้ำบาดาลด้วยการอัดน้ำจืดจากทางด้านข้าง และทำการสูบน้ำบาดาลเค็มอย่างต่อเนื่อง โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม.....	75
4.18 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่เกิดจากผลกระทบของการผันแปรระดับน้ำบาดาลด้วยวิธีการสูบน้ำบาดาลเค็มแบบต่อเนื่อง และมีทิศทางการซึมผ่านของน้ำจืดจากทางด้านบน โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 cc/min.....	77
4.19 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่เกิดจากผลกระทบของการผันแปรทิศทางการไหลในแนวราบและระดับน้ำบาดาล ด้วยวิธีการสูบน้ำบาดาลเค็มแบบต่อเนื่อง โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม.....	78
4.20 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเค็มที่ถูกสูบออกมาตามเวลา โดยมีการผันแปรทิศทางการไหลและระดับน้ำบาดาล.....	80

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 การทดสอบการละลายของชั้นเกลือจากการผันแปรอัตราการสูบน้ำบาดาลโดยมีตัวแปร คงที่ คือ ความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 11 ซม. ระยะห่างของปลายท่อกับผิวเกลือ เท่ากับ 2 ซม.	82
4.22 ผลการทดสอบการละลายของเกลือตามเวลา โดยผันแปรอัตราการสูบน้ำบาดาลซึ่งมี ตัวแปรคงที่ คือ ความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 11 ซม. ระยะห่างของปลายท่อกับ ผิวเกลือเท่ากับ 2 ซม.	83
4.23 กราฟแสดงความเข้มข้นของน้ำเกลือที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเค็มที่ถูกสูบ ออกมาโดยมีการผันแปรอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็มที่อัตราต่างๆ	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

แผ่นดินทรุดหรือการเกิดหลุมยุบที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลเค็มในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มักส่งผลกระทบต่อผู้คน สัตว์เลี้ยง และที่อยู่อาศัย รวมทั้งพื้นที่การเกษตร เช่น พื้นที่บ้านหนองกั้ง บ้านโนนแสง อำเภอบ้านม่วง จังหวัดสกลนคร การทรุดตัวของผิวดินในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเกิดจากการที่น้ำใต้ดินละลายเกลือบริเวณผิวบนของชั้นเกลือออกไปจนทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงระหว่างชั้นเกลือหินและชั้นหินที่ปิดทับ หรืออาจจะเกิดจากการทำอุตสาหกรรมเกลือแบบดั้งเดิม (Brine Pumping) โดยผู้ประกอบการสูบน้ำเค็มที่ได้ละลายเอาเกลือบริเวณผิวบนของชั้นเกลือขึ้นมา ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและอากาศในโพรงทำให้เกิดแผ่นดินทรุด

ปัญหาการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จะปรากฏทั้งในและนอกเขตพื้นที่อุตสาหกรรมเกลือ โดยไม่สามารถคาดคะเนได้ อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของทิศทางการไหลของน้ำบาดาล อัตราการสูบน้ำบาดาลเค็ม ความอึดตัวของน้ำบาดาลเค็ม อุณหภูมิ และอื่นๆ การเข้าใจอย่างถ่องแท้เกี่ยวกับกระบวนการชะล้างเกลือหินจึงเป็นส่วนหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในกระบวนการละลายโพรงในชั้นเกลือหิน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อเข้าใจกระบวนการและกลไกที่ทำให้เกิดแผ่นดินทรุดอันเนื่องมาจากอุตสาหกรรมเกลือ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

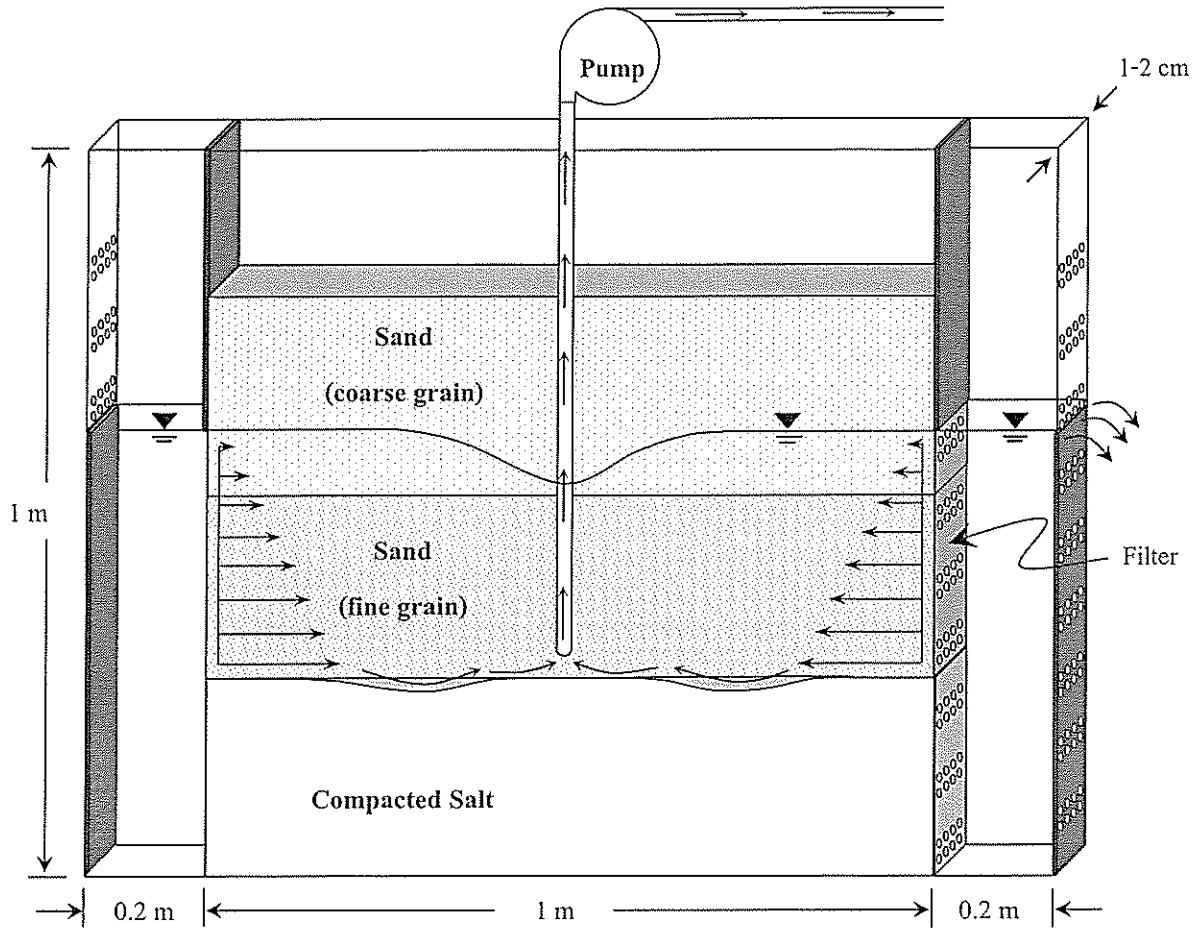
- 1) สร้างแบบจำลองทางกายภาพเพื่อศึกษาการทรุดตัวของผิวดินและชั้นหินที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลเค็ม
- 2) ทำการจำลองการละลายของชั้นเกลือหินที่อยู่ภายใต้ น้ำบาดาลซึ่งมีรูปแบบของทิศทางการไหลจากทางด้านข้างและทางด้านบน โดยมีการผันแปรอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็ม ระดับน้ำบาดาล ตำแหน่งท่อสูบน้ำบาดาล และความหนาของชั้นหินปิดทับ
- 3) นำผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อเสริมสร้างความเข้าใจในการเกิดแผ่นดินทรุดหรือหลุมยุบเพื่อกำหนดแนวทางในการลดผลกระทบของการสูบน้ำบาดาลเค็ม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาและประมวลข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เพื่อทราบถึงลักษณะของการวางตัวและลำดับของชั้นหินส่วนบนของชั้นเกลือ และข้อมูลทางด้านอุทกวิทยาน้ำบาดาลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เพื่อทราบถึงระดับน้ำบาดาล ทิศทางการไหล และแรงดันของน้ำบาดาลในแต่ละกรณี
- 2) สร้างแบบจำลองทางกายภาพเพื่อตรวจวัดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริง โดยมีการค้นแปรความหนาของชั้นปิดทับชั้นเกลือ ความลึกของชั้นเกลือ ระดับน้ำบาดาล ทิศทางและอัตราการไหลของน้ำบาดาล ความลึก และอัตราการสูบน้ำเกลือ
- 3) สร้างแบบจำลองทางกายภาพด้วยการใช้เกลือสินเธาว์บดอัดเพื่อสร้างชั้นเกลือหิน และใช้ทรายขนาด 0.6 ถึง 0.8 มิลลิเมตร เพื่อสร้างเป็นชั้นหินปิดทับด้านบน
- 4) แบบจำลองมีขนาดความกว้าง \times สูงเท่ากับ 1.8×1.2 ตารางเมตร หนา 1 ถึง 2 เซนติเมตร แบบจำลองมีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนที่ใช้จำลองชั้นเกลือหินและชั้นหินปิดทับ 2) ส่วนที่ใช้จำลองระดับน้ำบาดาลและแรงดันของน้ำบาดาล (ด้านบนและด้านข้าง) 3) ส่วนที่ใช้ในการจำลองการสูบน้ำบาดาลเค็มที่สามารถปรับอัตราการสูบได้
- 5) ผลจากแบบจำลองทางกายภาพจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขด้วย Profile function และโปรแกรม SALT_SUBSID
- 6) ลักษณะการเกิดแผ่นดินทรุดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จะเกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดินที่มีพฤติกรรมขึ้นกับเวลา (Time dependent) เท่านั้น ซึ่งจะไม่ครอบคลุมกรณีการทรุดตัวอย่างฉับพลัน เช่น การเกิดหลุมยุบเนื่องจากแผ่นดินไหว
- 7) การทดสอบจะไม่รวมไปถึงโครงสร้างของชั้นเกลือหินที่เป็นรูปโดม

1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิด

การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากโพรงใต้ดินส่วนใหญ่จะมีปัจจัยหลายอย่าง เช่น ทิศทางการไหลและระดับของน้ำบาดาล อัตราการสูบน้ำบาดาลเค็ม อุณหภูมิของน้ำบาดาล ความอืดตัวของน้ำบาดาลเค็ม และอื่นๆ กรอบแนวคิดของงานวิจัยนี้คือ การสร้างแบบจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตการณ์และติดตามผลการทรุดตัว ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบคือ พื้นที่ของผิวเกลือหินที่จะละลาย ทิศทางการไหลและระดับของน้ำบาดาล ตำแหน่งและจำนวนของบ่อสูบ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลต่อขอบเขตและปริมาณการละลายชั้นเกลือ ประโยชน์ของแบบจำลองที่จะพัฒนาขึ้นจะช่วยให้เข้าใจขอบเขตการทรุดตัว รูปแบบหรือลำดับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงเพื่อประเมินการออกแบบในการหาอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็มสำหรับทำนาเกลือที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 1.1 แนวคิดเบื้องต้นของแบบจำลองทางกายภาพเพื่อศึกษาผลกระทบจากการสูบน้ำบาดาลเค็ม โดยมีแรงดันจากน้ำใต้ดินด้านข้างสองด้านหรือด้านเดียว และมีการผันแปรจำนวนและตำแหน่งของท่อสูบน้ำเค็ม

1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

การวิจัยแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค้นคว้าและศึกษาวารสาร รายงาน และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยและธรณีวิทยาหินเกี่ยวกับความหนาและความลึกและคุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของหิน โดยชื่อของสิ่งพิมพ์เหล่านี้จะนำมาแสดงอย่างละเอียดในรายงานขั้นสุดท้าย ซึ่งจะเขียนในรูปของ Bibliography

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ

งานวิจัยจะดำเนินการสร้างแบบจำลองภายในห้องปฏิบัติการกลศาสตร์ธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับจำลองการทรุดตัวในสถานะที่แตกต่างกัน อาทิ ภายใต้อัตราการสูบน้ำเกลือที่แตกต่างกัน และระดับน้ำบาดาลและแรงดันที่แตกต่างกัน เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบด้วยแบบจำลอง

การทดสอบด้วยแบบจำลองจะคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- 1) ระดับความลึกของน้ำบาดาล
- 2) อัตราการไหลและแรงดันของน้ำบาดาล
- 3) ทิศทางการไหลของแหล่งน้ำที่ใช้ในการละลายชั้นเกลือ
- 4) อัตราการสูบน้ำเกลือ
- 5) ตำแหน่งและจำนวนของบ่อสูบ
- 6) ความหนาและความลึกของชั้นหิน

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณด้วย Profile function และกฎการทรุดตัว

งานวิจัยนี้มีการคำนวณการทรุดตัวด้วย Profile function ซึ่งเป็นวิธีการระดับสากล มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวดินในสองมิติที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณที่มีการทรุดตัว อันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical displacement) และแนวนอน (Horizontal displacement) ความลาดชัน (Slope) ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง (Vertical strain) และความโค้งตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical curvature) ข้อมูลที่ต้องใช้ในสมการประกอบด้วยการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ความลึกของโพรง (D) มุมที่วัดออกไปจากขอบโพรงถึงขอบเขตการทรุดตัว (Angle of draw, γ)

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณการทรุดตัวด้วย Salt-Subsid

มีการศึกษาการแพร่กระจายตัวและขอบเขตของการเกิดแผ่นดินทรุด โดยใช้โปรแกรม Salt-Subsid เพื่อแสดงลักษณะการทรุดตัวในสามมิติ (ปริมาณการทรุดตัวในแนวตั้งที่แสดงเป็นเส้นชั้นการทรุดตัว) การศึกษานี้จะอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่ขึ้นกับเวลา (Surface subsidence vs. Time) จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 3 เพื่อนำมาสอบเทียบค่าคงที่ด้วยโปรแกรม Salt-Subsid ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงการทรุดตัวที่ขึ้นกับเวลา ส่วนค่าคงที่อีกชนิดหนึ่งได้แก่ปริมาณการทรุดตัวสูงสุด (Smax) ซึ่งได้จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 3 เช่นเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ดำเนินการจำลองการไหลของน้ำด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของน้ำที่เกิดขึ้นในการจำลองทางกายภาพอันเนื่องมาจากทิศทางการไหล ความหนาของชั้นหินปิดทับ และอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็ม

ขั้นตอนที่ 7 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลที่จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพจะนำมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาแนวทางการลดผลกระทบของแผ่นดินทรุด ที่เกิดจากอุตสาหกรรมการสูบน้ำเค็ม

ขั้นตอนที่ 8 การสรุปผลและเขียนรายงาน

แนวคิด ขั้นตอน โดยละเอียด การวิเคราะห์ผลและข้อสรุปที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดจะนำเสนอโดยละเอียดในรายงานฉบับสมบูรณ์ เพื่อที่จะส่งมอบเมื่อเสร็จสิ้นโครงการ

ขั้นตอนที่ 9 การถ่ายทอดเทคโนโลยี

แผนการการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้คือ นำผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ และนำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อเผยแพร่ความรู้ในวงกว้างต่อไป

1.6 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลงานวิจัยที่เสนอนี้มีประโยชน์กับงานด้านธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณี ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1.6.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

เพื่อเป็นองค์ความรู้ริเริ่มและสร้างสรรค์ในการพัฒนาเครื่องมือทดสอบ และศึกษาการทรุดตัวของผิวดินและนำไปสู่ความเข้าใจเกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดินมากขึ้น การศึกษาดังกล่าวได้รวบรวมองค์ความรู้ทางด้านกลศาสตร์ดินเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่ง ขนาด รูปร่าง และลำดับการเกิดของโพรงใต้ดิน เพื่อแก้ไขและลดผลกระทบของแผ่นดินทรุดในบริเวณที่มีปัญหาหรือคาดว่าจะมีปัญหาคารทรุดตัวของดิน

1.6.2 บริการความรู้แก่ประชาชนและหน่วยงานราชการ

การให้ความรู้แก่ประชาชนเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเกิดและวิธีการป้องกันการเกิดหลุมยุบ และให้ความรู้แก่หน่วยงานหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้อง เช่น หน่วยงานบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรมทรัพยากรธรณี กรมน้ำบาดาล กระทรวงคมนาคม กรมทางหลวง และหน่วยงานอื่นๆ รวมทั้งหน่วยงานท้องถิ่น เช่น อบต. และ อบจ. เป็นต้น

1.6.3 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจ

เป็นแหล่งข้อมูลให้ความรู้แก่หน่วยงานในภาคธุรกิจ อาทิ อุตสาหกรรมนาเกลือที่ต้องสูบน้ำเกลือในชั้นดินปิดทับบนชั้นเกลือหินขึ้นมาใช้ทำเกลือและบริษัทผลิตเกลือต่างๆ เพื่อให้ผู้ประกอบการพึงระวังผลกระทบจากการสูบน้ำเกลือขึ้นมาอันเป็นสาเหตุของการเกิดโพรงใต้ดินและเกิดแผ่นดินทรุด

1.6.4 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

การผลิตเกลือด้วยวิธีการสูบน้ำเกลือขึ้นมาโดยไม่คำนึงถึงผลกระทบ จะส่งผลให้เกิดโพรงที่มีขนาดใหญ่จนเกิดการทรุดตัวของผิวดินขนาดใหญ่ได้ ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถใช้ในการปรับเปลี่ยนวิธีและอัตราการสูบน้ำเกลือเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแผ่นดินทรุดในพื้นที่นาเกลือและพื้นที่ใกล้เคียง

1.6.5 เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย

เป็นการให้ความรู้แก่ผู้ประกอบการทำนาเกลือด้วยวิธีการสูบน้ำเกลือเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเกิดและป้องกันการเกิดแผ่นดินทรุด

1.7 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยที่เสนอมานี้จะมีประโยชน์อย่างมากและโดยตรงกับหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี รวมไปถึงหน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างในชั้นหิน เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างอุโมงค์ เหมืองแร่ บนดินและใต้ดิน หน่วยงานเหล่านี้ได้แก่

- 1) กองธรณีเทคนิค กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- 2) สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- 3) กรมทรัพยากรน้ำ
- 4) กองธรณีเทคนิค กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- 5) สถาบันการศึกษาที่เปิดสอนทางด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ และวิศวกรรมธรณี
- 6) บริษัทเอกชนที่ออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ และความลาดชันในมวลหิน
- 7) กระทรวงพลังงาน
- 8) บริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันในประเทศไทย



บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมวิจัยและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรณีวิทยาของชั้นเกลือหินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

วัตถุประสงค์ของการทบทวนวรรณกรรมวิจัยในหัวข้อนี้คือ เพื่อค้นคว้า ศึกษา และสรุป บทความและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยา โครงสร้างทางธรณีวิทยาของที่ราบสูงโคราช (Khorat Plateau) การศึกษาและการสำรวจธรณีฟิสิกส์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการลำดับชั้นเกลือหินและหินข้างเคียงในเชิงการกระจายตัว ความหนา และความลึก รวมทั้งศึกษาคุณลักษณะธรณีวิทยา โครงสร้างของชั้นเกลือหิน โดยใช้สิ่งตีพิมพ์ที่มีอยู่ในหน่วยงานต่างๆ เพื่อศึกษาพื้นที่ที่สัมพันธ์กับชั้นเกลือหินที่มีการทำอุตสาหกรรมนาเกลือและบริเวณที่เกิดการทรุดตัว เนื่องจากการสูบน้ำบาดาลเค็ม

2.1.1 โครงสร้างและลักษณะธรณีวิทยาของชั้นเกลือหิน

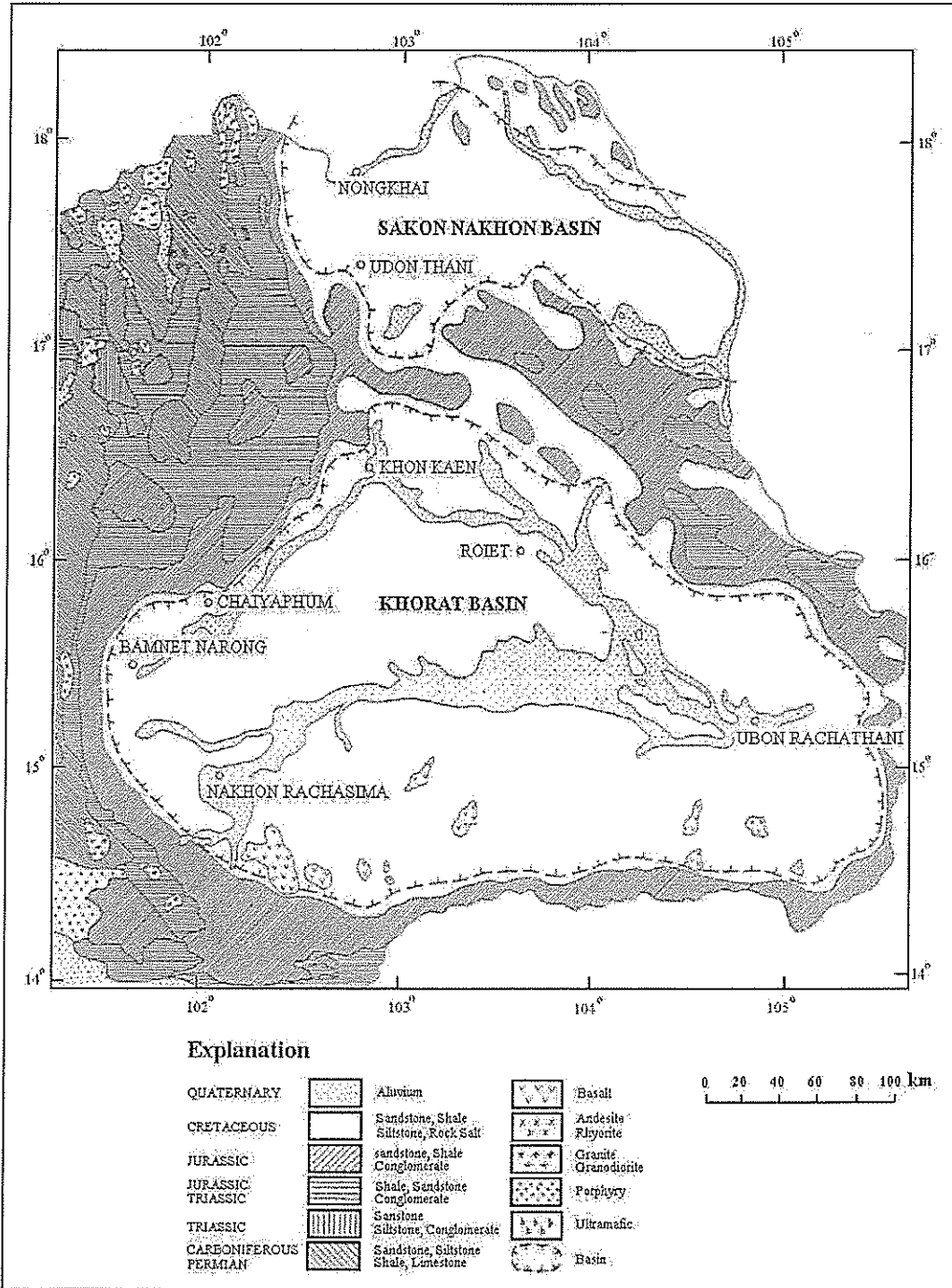
ที่ราบสูงโคราชมีพื้นที่ประมาณ 150,000 ตารางกิโลเมตร อยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 14 ถึง 19 องศาเหนือและเส้นแวงที่ 101 ถึง 106 องศาตะวันออก ทางทิศเหนือและทิศตะวันตกติดกับประเทศลาว ทางทิศใต้ติดประเทศกัมพูชา โครงสร้างทางธรณีวิทยาของที่ราบสูงโคราชมีรูปร่างเป็นแอ่ง (Structural Basin) เกิดจากการยกตัวในตอนเหนือและใต้ รวมทั้งการยกตัวของหมวดหินภูพานในทิศตะวันออกเฉียงใต้เกิดเป็นโครงสร้างสองแอ่งขึ้น แอ่งทั้งสองมีความลาดเอียงของชั้นหินประมาณ 20 องศา ไปทางกลางแอ่งที่มีความลึกเพิ่มขึ้น แอ่งสกนนครอยู่ทางตอนเหนือ มีพื้นที่ประมาณ 17,000 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย จังหวัดหนองคาย อุดรธานี สกนนคร นครพนม มุกดาหาร และบางส่วนของประเทศลาว ส่วนแอ่งโคราชอยู่ทางตอนใต้มีพื้นที่ประมาณ 33,000 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย จังหวัดนครราชสีมา ชัยภูมิ ขอนแก่น มหาสารคาม ร้อยเอ็ด กาฬสินธุ์ ยโสธร อุบลราชธานี และทางตอนเหนือของจังหวัดบุรีรัมย์ สุรินทร์และศรีสะเกษ (Sattayarak and Polachan, 1990; Wongsawat et al., 1992)

Sattayarak (1983) Rattanajarurak, (1990) และ Sattayarak et al. (1998) ได้ทำการศึกษา การลำดับชุดหินในยุคมีโซโซอิก (Mesozoic) ในประเทศไทยพบว่าการตกทับถมของตะกอนยุคมีโซโซอิกในประเทศไทยมีการกระจายตัวอย่างกว้างขวางเกือบทุกภาคของประเทศ ที่พบได้ชัดเจนได้แก่ ชั้นตะกอนสีแดงในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกว่าชุดหินโคราช (Khorat Group) ประกอบด้วย หมวดหินห้วยหินลาด หมวดหินน้ำพอง หมวดหินภูกระดึง หมวดหินพระวิหาร หมวดหินเสาขัว หมวดหินภูพาน และหมวดหินโคกกรวด สำหรับหมวดหินมหาสารคามซึ่งประกอบด้วยเกลือหินที่มี

การตกทับถมของเกลือในทะเลระดับตื้น และมีการตกตะกอนของชั้นหินดินเหนียวในช่วงที่ทะเลเปิด เป็นการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลขึ้นและลง ชั้นตะกอนสีแดงเกิดจากการทับถมของตะกอนบนพื้นทวีป (Non-marine deposits) การทับถมของตะกอนจากลมและน้ำ (Fluvio-Eolian deposits) การทับถมของตะกอนโดยลม (Eolian deposits) และตะกอนสีแดงอายุอ่อน (Younger redbeds) โดยหลังจากที่มีการเกิด Indosinian orogeny II แล้วจึงเกิดการตกทับถมของชุดหินโคราช จากนั้นเกิดการยกตัวขึ้นของรอยเลื่อนเลย-เพชรบูรณ์และทำให้เกิดการตกทับถมตัวของหมวดหินมหาสารคาม (Maha Sarakham Formation) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลทำให้เกิดชั้นสลับกับตะกอนดินเหนียว โดยหมวดหินนี้ประกอบไปด้วยเกลือชั้นล่าง (Lower Salt) ดินเหนียวชั้นล่าง (Lower Clay) เกลือชั้นกลาง (Middle Salt) ดินเหนียวชั้นกลาง (Middle Clay) และเกลือชั้นบน (Upper Salt) ซึ่งหลุมเจาะที่ทำการศึกษานี้จะพบชั้นแอนไฮไดรต์ (Anhydrite cap) อยู่ด้านบนเกือบทุกหลุม และมีหมวดหินภูทอก (Phutok Formation) ที่เกิดจากการตกทับถมตัวโดยลมและน้ำวางทับอยู่ด้านบนหมวดหินมหาสารคามอีกชั้นหนึ่ง (รูปที่ 2.1)

บริเวณที่ราบสูงโคราชสามารถอธิบายลักษณะของหมวดหินในชุดหินโคราช หมวดหินมหาสารคาม และหมวดหินภูทอก โดยเรียงลำดับจากอายุแก่ที่สุดถึงอายุอ่อนที่สุดได้ดังนี้

- 1) หมวดหินน้ำพอง ประกอบด้วยหินทรายและหินกรวดมนสีน้ำตาลแกมแดง ช่วงบนและล่างมีหินโคลนสลับกับหินทรายแป้ง ช่วงอายุตอนต้น Jurassic
- 2) หมวดหินภูกระดึง ประกอบด้วยหินโคลนและหินทรายแป้งสีน้ำตาลแกมแดง ช่วงอายุตอนต้น Jurassic
- 3) หมวดหินพระวิหาร ประกอบด้วยหินทรายสีขาว หินดินดานสีน้ำตาลแกมแดง และหินกรวดมน ช่วงอายุตอนกลาง Jurassic
- 4) หมวดหินเสาชั่ว 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



รูปที่ 2.1 แอ่งสกนนครและแอ่งโคราชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มาตรฐาน
1:2,500,000 (ดัดแปลงจาก Rattanajarurak, 1990 and Utha-aaron, 1993)

Yumuang (1983) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงจากชุดตะกอนสีแดงเป็นชั้นเกลือหินนั้นอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม ซึ่งไม่พบความไม่ต่อเนื่องระหว่างหมวดหิน โศกกรวดกับหมวดหินมหาสารคาม ต่อมา Mouret et al. (1993, 1994) ได้ศึกษาทางด้านธรณีวิทยา ลักษณะการทับถมตามธรรมชาติ และลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาของชุดหิน โคราชบริเวณเทือกเขาภูพาน พบว่าเป็นลักษณะของตะกอนที่เกิดจากแผ่นทวีปซึ่งต้องใช้เวลาในการตกทับถมจนเป็นชั้นหิน โดยมีลักษณะการตกทับถม 2 แบบ คือ การทับถมจากธารประสานสาย (Braided deposits) และการทับถมจากที่ราบตะกอนน้ำพา (Alluvial plain deposits) สำหรับการตกตะกอนเนื่องจากการระเหยของน้ำเค็ม (Evaporite) และสิ่งทับถมที่เกิดจากทางน้ำพา (Younger fluvial) จะคล้ายคลึงกับการทับถมของตะกอนเนื่องจากลม จากการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอินโดจีนและยุคคาร์บอนิเฟอรัส โดยการทำแบบจำลองในช่วงตอนต้นของยุคซีโนโซอิก พบว่าลักษณะของเทือกเขาภูพานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นตัวอย่างที่ดีสำหรับช่วงต้นของยุคซีโนโซอิก จากข้อมูลทางด้านคลื่นไหวสะเทือนและข้อมูลหลุมเจาะทำให้สามารถเข้าใจถึงกระบวนการก่อตัวของชุดหิน โคราชในปัจจุบัน โดยจากการศึกษาพบว่าการที่ชุดหิน โคราชมีโครงสร้างที่ซับซ้อนเกิดจากการรวมกันของการเกิดแบบแรงดึงและแรงบีบอัดในส่วนที่เป็นรอยเลื่อนเหลี่ยม (Wrenching) มีลักษณะที่เกิดแรงดึงในยุคพาลีโอโซอิกตอนต้นและยุคไทรแอสซิกซึ่งกระจายตัวเป็นบริเวณกว้างและมีการวางตัวในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ กระบวนการก่อเทือกเขาของอินโดจีนเนียนพบในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งเป็นผลจากบริเวณที่มีการชนกัน ในยุคมีโซโซอิกและช่วงซีโนโซอิกจะมีอัตราของการกร่อนสูงกว่าการยกตัวจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ไม่พบการก่อตัวเป็นเทือกเขามากนักในพื้นที่นี้

จากหลุมเจาะสำรวจโพแทชที่เจาะสำรวจโดยกรมทรัพยากรธรณีระหว่างปี พ.ศ. 2516-2526 จำนวน 194 หลุม (Japakasetr and Suwanich, 1982, 1983, 1984) ซึ่งได้เจาะสำรวจทะลุชั้นเกลือลงไปจนถึงหมวดหิน โศกกรวด สามารถเรียงลำดับชั้นจากหมวดหิน โศกกรวดไปจนถึงชั้นบนสุดได้ดังนี้

- 1) หินทรายสีน้ำตาลแดง (Red bed sandstone) หรือหินทรายแป้งสีเขียวเทา (Greenish gray siltstone) เนื้อแน่น บางแห่งมีหินดินดานสีน้ำตาลปนแดงแทรกอยู่
- 2) แอนไฮไดรต์ชั้นล่าง (Basal anhydrite) มีสีขาวถึงเทาอรองรับเกลือหินชั้นล่างก่อนถึงหมวดหิน โศกกรวด
- 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-KCl·MgCl₂·6H₂O) ส่วนมากที่พบมีสีส้ม แดง และชมพู และซิลวิไนต์ (Sylvinite-KCl) จะพบเป็นส่วนน้อย มีสีขาวและส้มอ่อน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากคาร์นัลไลต์ พบใกล้กับบริเวณ โคมเกลือ และแทชซีไฮไดรต์ (Tachyhydrite-CaCl₂·2MgCl₂·12H₂O) มักเกิดและมีเนื้อผสมกับ คาร์นัลไลต์ มีสีส้ม ส้มเหลือง และสีเหลือง เกิดจาก มีแร่แมกนีเซียมเกิดร่วมซึ่งละลายน้ำได้ง่าย
- 5) เกลือหินหลากสี (Rock salt) เป็นชั้นบางๆ มีสีแดง ส้ม น้ำตาล เทา และสีขาวใส มีความหนาโดยเฉลี่ย 3 เมตร
- 6) คลาสติกชั้นล่าง (Lower Clastic) เป็นดินเหนียวและหิน โคลนสีน้ำตาลแดงค่อนข้างอ่อน มีสายแร่เกลือและสายแร่คาร์นัลไลต์ปน
- 7) เกลือชั้นกลาง (Middle Salt) เป็นเกลือสกปรก มีสีน้ำตาลอ่อนถึงสีควันดำ มีความหนามากกว่าเกลือชั้นบน ตอนล่างอาจมีแร่คาร์นัลไลต์หรือซิลไวต์ มีความหนาโดยเฉลี่ย 70 เมตร
- 8) คลาสติกชั้นกลาง (Middle Clastic) ดินเหนียวและหิน โคลนสีน้ำตาลแดง ค่อนข้างอ่อน มียิบซั่ม (Gypsum) สีขาวแทรก
- 9) เกลือชั้นบน (Upper Salt) เป็นเกลือสกปรก มีตะกอนคาร์บอนปน สีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีควันดำ หรือสีส้มเมื่อปนดินเหนียว มีความหนา 3-65 เมตร
- 10) แอนไฮไดรต์ชั้นบน (Upper anhydrite) เป็นชั้นบาง ๆ สีขาวถึงสีเทา
- 11) ดินเหนียวและหินดินเหนียว (Clay and claystone) สีน้ำตาลแดง บางแห่งมีหินทรายแป้งและหินทรายสีน้ำตาลแดงเกิดร่วมอยู่ด้วย
- 12) ดินตะกอนชั้นบน เป็นดินเหนียวสีเทาแกมน้ำตาลปนดินร่วน ชั้นรองลงมาเป็นดินทรายและดินเหนียวปนดินทรายสีน้ำตาล สีชมพูและสีส้ม

Suwanich (1986) ทำการแปลข้อมูลหลุมเจาะเกลือหินและโพแทชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากลักษณะทางธรณีวิทยา ธรณีวิทยาโครงสร้าง และแร่วิทยา ในการจำแนกลักษณะของชั้นหินและเกลือหิน โดยทำภาพตัดขวางชั้นรายละเอียดจากหลุมเจาะจำนวน 115 หลุม จากหลุมเจาะที่มีในภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมด 194 หลุม ในพื้นที่บ่อน้ำมันจระจก จักราช บ้านท่อม ที่บ้านประคำ ขอนแก่น และพื้นที่นาเชือก พบว่าโครงสร้างของแอ่งโคราชและแอ่งสกลนครมีกลุ่มหินอีวาโพไรท์ (Evaporite) เช่น เกลือหิน และยิบซั่ม ซึ่งเกิดจากการยุบตัวในพื้นที่ด้านที่ติดกับทะเลในช่วงประมาณ Cretaceous และมีตะกอนสะสมจนถึงตอนกลางของยุค Cretaceous จากนั้นเกิดการสะสมตัวจากการระเหยของน้ำทะเล และในช่วงตอนปลายยุค Cretaceous จึงเกิดเป็นชั้นเกลือหินขึ้น ในช่วง

ยุค Tertiary เกิดการยกตัวสูงขึ้นของขอบแอ่งที่ราบสูงโคราชบริเวณเทือกเขาภูพาน เทือกเขาเพชรบูรณ์ และเทือกเขาพนมดงรักจนทำให้เกิดเป็นแอ่งซัดเจน การสะสมตัวของตะกอนและการระเหยของน้ำทะเลได้แบ่งเป็นสามวัฏจักร แต่ละวัฏจักรจะมีการหมุนเวียนของกระแสน้ำทะเลเข้าและออกภายในแอ่ง โดยมีอัตราการระเหยของน้ำทะเลที่เหมาะสมทำให้เกิดการสะสมตัวของแร่ เช่น แร่เฮไลต์ และแร่โพแทช แต่ละวัฏจักรประกอบด้วยชั้นอิวาโพไรต์และชั้นตะกอนที่เกิดเป็นวัฏจักรทับถมกันดังนี้

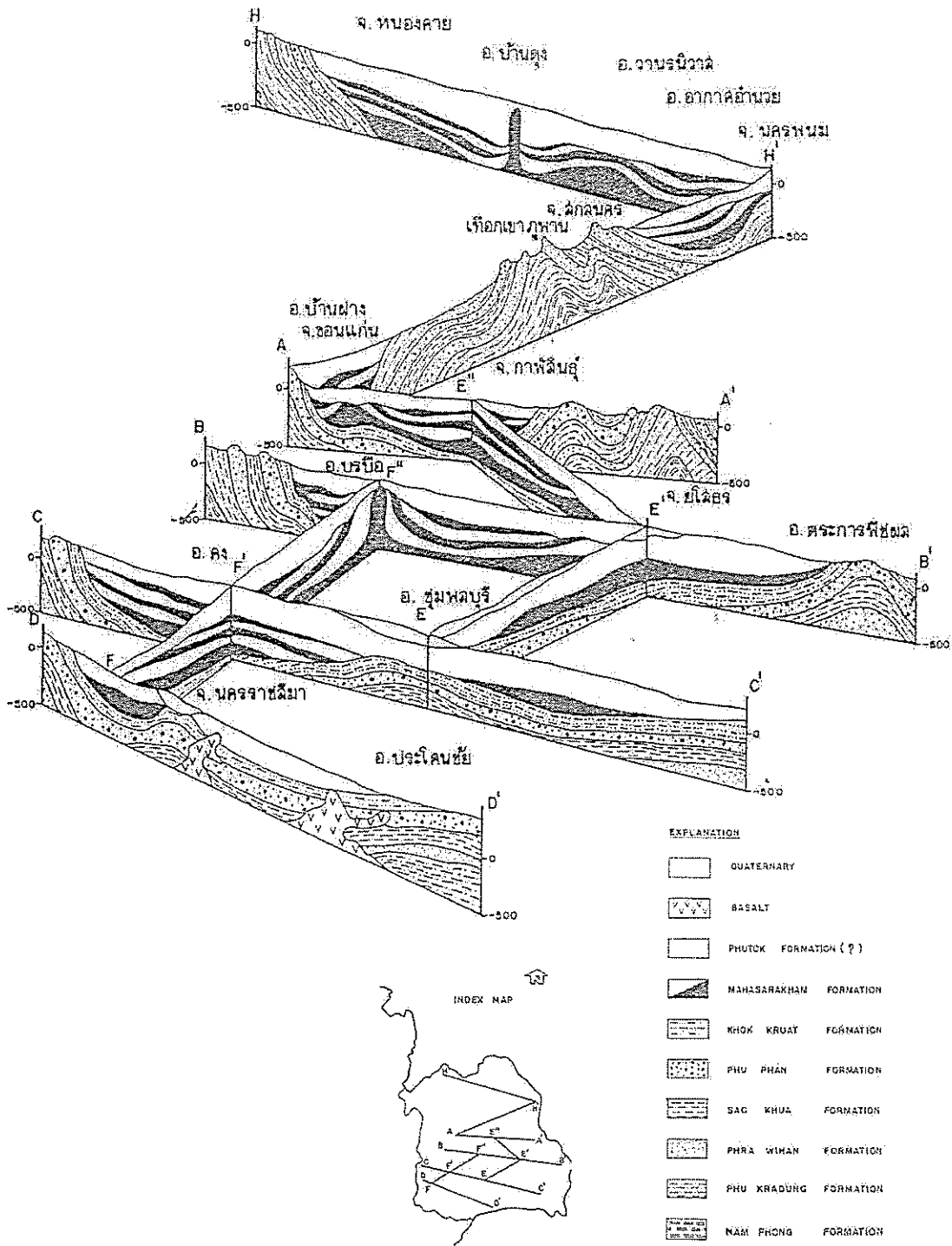
วัฏจักรล่าง (Lower cycle) ประกอบด้วย ตะกอนชั้นล่างเกิดระหว่างที่กระแสน้ำทะเลไหลเข้าภายในแอ่งก่อให้เกิดการตกตะกอนของชั้น Ferruginous clastic sediments และ Calcareous sandstone หินอิวา-โพไรต์ชั้นล่างเกิดระหว่างที่มีกระแสน้ำทะเลออกจากแอ่ง มีการตกตะกอนของแอนไฮไดรต์ (Anhydrite) เฮไลต์ (Halite) โพแทช (Potash) และซิลไวท์ (Sylvite)

วัฏจักรกลาง (Middle cycle) ประกอบด้วย ตะกอนชั้นกลางเกิดระหว่างที่มีกระแสน้ำทะเลไหลเข้าภายในแอ่งก่อให้เกิดการตกตะกอนของชั้นหินดินดาน และหินดินเหนียว หินอิวาโพไรต์ชั้นกลางเกิดระหว่างที่มีกระแสน้ำทะเลออกจากแอ่งและมีความเข้มข้นมากขึ้นทำให้เกิดการตกตะกอนของเฮไลต์และแอนไฮไดรต์เป็นชั้นบาง ๆ

วัฏจักรบน (Upper cycle) ประกอบด้วย ตะกอนชั้นบนเกิดระหว่างที่มีกระแสน้ำทะเลไหลเข้าภายในแอ่งก่อให้เกิดการตกตะกอนของชั้นดินเหนียวสีน้ำตาลแดง ส่วนหินอิวาโพไรต์ชั้นบนเกิดระหว่างที่มีกระแสน้ำทะเลออกจากแอ่ง

2.1.2 อุทกธรณีวิทยา

Wongsawat et al. (1992) ได้ศึกษาแหล่งน้ำบาดาลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและนำเสนอรูปภาพตัดขวางของชั้นหินในทิศทางต่างๆ (รูปที่ 2.2) พบว่าระบบการไหลของน้ำบาดาลในภูมิภาค (Regional flow system) เป็นการไหลระหว่างพื้นที่รับน้ำ (พื้นที่สูงสุด) กับพื้นที่ให้น้ำ (พื้นที่ต่ำสุด) เมื่อพิจารณาในแอ่งโคราช พื้นที่รับน้ำจะเป็นบริเวณเทือกเขารอบแอ่ง (เทือกเขาภูพาน เทือกเขาเพชรบูรณ์ เทือกเขาสนกำแพง เทือกเขาพนมดงรัก) และพื้นที่ให้น้ำจะเป็นบริเวณพื้นที่ราบลุ่มทุ่งกุลาร้องไห้ สรุปได้ว่าน้ำบาดาลจะมีการไหลจากขอบแอ่งเข้าสู่กลางแอ่ง ส่วนแอ่งสกลนครก็มีรูปแบบการไหลของน้ำบาดาลที่เหมือนกับแอ่งโคราชชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) ได้เน้นไปที่ชั้นน้ำที่มีผลกระทบต่อชั้นเกลือหินที่วางตัวอยู่ชั้นบนและชั้นล่างของชั้นเกลือหิน ได้แก่ ชั้นหินอุ้มน้ำภูทอก (Phutok aquifer) ชั้นหินอุ้มน้ำมหาสารคาม (Maha Sarakham aquifer) และชั้นหินอุ้มน้ำโคกกรวด (Khok Kruat aquifer) ชั้นหินอุ้มน้ำภูทอก มีความหนาเฉลี่ย 150 เมตร ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม ร้อยเอ็ด ยโสธร และอุบลราชธานีเป็นส่วนใหญ่ การกักเก็บน้ำบาดาลส่วนใหญ่จะพบอยู่ในรอยแตกที่เกิดจากการทรุดตัวหรือแทรกดันของเกลือหินที่อยู่ด้านล่าง สามารถจำแนกแหล่งน้ำ



รูปที่ 2.2 ภาพตัดขวางแสดงธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (จาก Wongsawat et al., 1992)
 (หมายเหตุ : คุณภาพของรูปไม่สามารถปรับปรุงได้ดีกว่านี้ เนื่องจากต้นฉบับมีคุณภาพต่ำ)

บาดาลออกเป็นสามชนิดตามลักษณะโครงสร้าง คือ 1) แหล่งน้ำบาดาลในโครงสร้างประทุนหงาย (Syncline) น้ำบาดาลจะอยู่ในชั้นรอยต่อระหว่างชั้นหิน มีปริมาณน้ำสูบได้ 2-10 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง 2) แหล่งน้ำบาดาลในโครงสร้างประทุนคว่ำ (Anticline) มีความหนาชั้นน้ำบาดาลไม่มาก คุณภาพน้ำจะกร่อยและเค็ม มีปริมาณน้ำสูบได้ 5-20 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง และ 3) แหล่งน้ำบาดาลในโครงสร้างรอยต่อประทุนคว่ำกับประทุนหงาย เป็นแหล่งน้ำบาดาลขนาดใหญ่ มีปริมาณน้ำที่สูบได้ 20-100 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

ชั้นหินอุ้มน้ำมหาสารคาม ส่วนใหญ่น้ำจะมีคุณภาพกร่อยและเค็ม มีการแทรกซึมอยู่ในชั้นหินทรายหรือชั้นหินที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ และจะกักเก็บน้ำบาดาลใต้บริเวณด้านบนของชั้นเกลือหินซึ่งเป็นชั้นน้ำเค็มที่มีปริมาณมาก

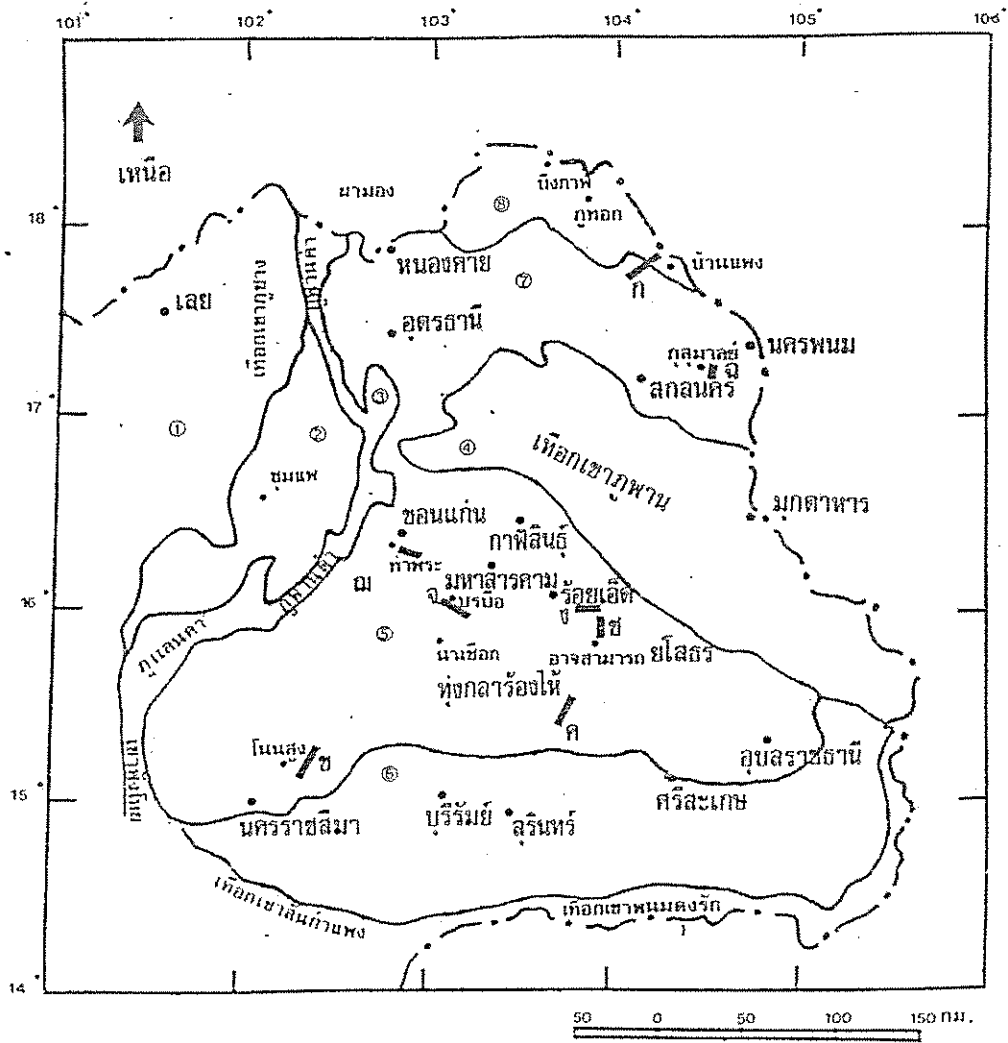
ชั้นหินอุ้มน้ำโคกกรวด มีโอกาสพบน้ำได้เพียงร้อยละ 60 เพราะหมวดหินนี้จะประกอบด้วยหินทรายเนื้อแน่นและค่อนข้างแข็ง มีปริมาณน้ำสูบได้ 3-5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

2.1.3 ข้อมูลหลุมเจาะและผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

Sattayarak et al. (1987) ศึกษาอิทธิพลของชั้นเกลือหินที่มีต่อน้ำใต้ดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากการศึกษาธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยอาศัยข้อมูลจากการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนและข้อมูลจากการสำรวจแร่โพแทชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าเกลือหินของหมวดหินมหาสารคามสะสมตัวอยู่ในแอ่งอุดร-สกลนคร และแอ่งโคราช-อุบล ทั้งนี้ได้คัดเลือกพื้นที่ตัวอย่างเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพน้ำใต้ดินที่ได้จากลักษณะธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยอาศัยแผนที่อุทกธรณีวิทยาของภาคตะวันออกเฉียงเหนือและรายงานผลการสำรวจน้ำบาดาลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างปี 2497-2508 จำนวน 7 พื้นที่ (รูปที่ 2.3) ประกอบด้วย 1) พื้นที่อำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา 2) พื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ จังหวัดสุรินทร์-ร้อยเอ็ด 3) พื้นที่อำเภอรวัชบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด 4) พื้นที่อำเภอบอระเพ็ด จังหวัดมหาสารคาม 5) พื้นที่อำเภอกุสุมาลย์ จังหวัดสกลนคร-นครพนม 6) พื้นที่อำเภออาจสามารถ จังหวัดร้อยเอ็ด และ 7) พื้นที่อำเภอท่าพระ จังหวัดขอนแก่น

พื้นที่อำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา การศึกษาได้จากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจโพแทชหมายเลข K-023 และ K-026 พบเกลือหินอยู่ที่ความลึก 65 เมตรและ 73 เมตร โดยเกลือหินที่พบเป็นเกลือหินชั้นล่างของหมวดหินมหาสารคาม วางตัวอยู่บนหมวดหินโคกกรวดในแนวเกือบระนาบ ชั้นดินและชั้นหินที่ปิดทับอยู่ด้านบนมีความบางมาก

พื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ จังหวัดสุรินทร์-ร้อยเอ็ด ศึกษาจากหลุมเจาะสำรวจโพแทชหมายเลข K-64 พบว่าชั้นเกลือหินอยู่ที่ระดับความลึก 172 เมตร เป็นเกลือชั้นล่างของหมวดหินมหาสารคาม ส่วนบนถูกกัดเซาะหายไป



รูปที่ 2.3 แสดงตำแหน่งของชื่อทางภูมิศาสตร์ที่สำคัญ และตำแหน่งเส้นสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนของชั้นหิน (Sattayarak et al., 1987)

- ① บริเวณจังหวัดเลย
 - ② บริเวณอำเภอชุมแพ
 - ③ ที่ราบสูงโคราช
 - ④ เทือกเขาภูพาน
 - ⑤ แอ่งโคราช-อุบล
 - ⑥ บริเวณอีสานใต้
 - ⑦ แอ่งหนองคาย-สกลนคร
 - ⑧ บริเวณบึงกาฬ-บ้านแพง
- ก — ตำแหน่งเส้นสำรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนของชั้นหิน

พื้นที่อำเภอวังบูร จังหวัดร้อยเอ็ด มีลักษณะการวางตัวของหมวดหิน โคนกรวดและหมวดหินมหาสารคามขนานกัน จากหลุมเจาะสำรวจโพแทช K-015 พบชั้นเกลือหินที่ความลึก 165 เมตร เป็นเกลือชั้นล่าง

พื้นที่อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม ศึกษาจากข้อมูลหลุมเจาะสำรวจโพแทชหมายเลข K-066 พบโดมเกลือหินที่ก่อให้เกิดการทำนาเกลือในบริเวณอำเภอบรบือ ระดับผิวดินบริเวณ โดมเกลือหินเป็นที่ลุ่มซึ่งเกิดจากน้ำใต้ผิวดินละลายเอาเกลือหินส่วนที่ปูดขึ้นมาทำให้เกิดการยุบตัวของชั้นดินและหินข้างบน และพบหมวดหินภูทอกปิดทับอยู่ด้านบน

พื้นที่อำเภอกุสุมาลย์ จังหวัดสกลนคร-นครพนม พบหมวดหิน โคนกรวดวางตัวอยู่ในแนวราบใต้หมวดหินมหาสารคามซึ่งถูกปิดทับด้วยหมวดหินภูทอก ชั้นเกลือมีความหนาประมาณ 240 เมตร

พื้นที่อำเภออาจสามารถ จังหวัดร้อยเอ็ด หมวดหิน โคนกรวดมีการ โกงตัวและวางตัวเอียงเทลงมาทางทิศใต้ พบหมวดหินมหาสารคามที่วางตัวอยู่ด้านบนจึงเอียงเทตามไปด้วยและถูกปิดทับด้วยหมวดหินภูทอก

พื้นที่อำเภอท่าพระ จังหวัดขอนแก่น พบว่าหมวดหิน โคนกรวดมีการ โกงตัวเล็กน้อย หมวดหินมหาสารคามวางตัวอยู่บนหมวดหิน โคนกรวด โดยไม่มีการถูกกัดเซาะ เกลือชั้นล่างมีการเคลื่อนตัวจนเป็น โดมเกลือรูปหมอนขนาดเล็ก หมวดหินภูทอกที่วางตัวอยู่บนหมวดหินมหาสารคาม ในบริเวณนี้มีความหนาค่อนข้างมาก โดยเฉลี่ยประมาณ 540 เมตร

Sattayarak and Polachan (1990) และกรมทรัพยากรธรณี (2541) ได้รวบรวมข้อมูลการใช้ประโยชน์จากเกลือสินเธาว์ในบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ข้อมูลการลำดับชั้นหินและตั้งชื่อชุดหิน โคราช ข้อมูลการเรียกชื่อหมวดหินมหาสารคาม ข้อมูลการเรียกชื่อหมวดหินภูทอก ข้อมูลจากหลุมเจาะสำรวจแร่โพแทช และข้อมูลที่ได้จากการแปลความคลื่นไหวสะเทือน ข้อมูลหลุมเจาะปิโตรเลียมแสดงให้เห็นว่าแอ่งโคราชวางตัวอยู่ในแนวทิศตะวันตก-ตะวันตกเฉียงเหนือ และทิศตะวันออก-ตะวันออกเฉียงใต้ แต่ไม่พบลักษณะที่แสดงให้เห็นว่าโดมเกลือเกิดขึ้นก่อนการสะสมตัวของหมวดหินภูทอก โดยพบว่าบริเวณที่มีเกลือหินรูปหมอน เกลือชั้นล่างจะถูกปิดทับด้วยเกลือหินชั้นกลาง เกลือชั้นบนและหมวดหินภูทอก ในบริเวณที่เป็นโดมเกลือที่มีการยุบตัวจะไม่พบเกลือชั้นกลาง เกลือชั้นบนหรือหมวดหินภูทอกอยู่เลย และพบว่าโดมเกลือจะเริ่มเกิดขึ้นเนื่องจากการปูดขึ้นมาของเกลือชั้นล่างเท่านั้น ส่วนการกระจายตัวของชั้นเกลือในปัจจุบันพบว่าเกลือหินแบ่งเป็น 2 แอ่ง คือ แอ่งโคราช-อุบล และแอ่งอุดร-สกลนคร โดยชั้นเกลือหินของหมวดหินมหาสารคามซึ่งเคยปิดทับบนหินชุดโคราชบริเวณตั้งแต่ขอบแอ่งที่ราบสูงโคราชด้านตะวันตกและบริเวณเทือกเขาภูพานทั้งหมด ถูกทำลายหมดไปจึงเหลือแต่ในบริเวณที่ลุ่มของสองแอ่งนี้ จากข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนภาพตัดขวางที่แอ่งโคราช-อุบล และแอ่งอุดร-สกลนคร พบว่าลักษณะชั้นเกลือหินแบ่งตามลักษณะรูปร่างได้สามแบบ คือ ชั้นเกลือหิน ชั้นเกลือหินคดโค้ง และโดมเกลือหิน โดยหมวดหินมหาสารคามและภูทอกจะ

มีการคดโค้งตามหินชุดโคราชและภาพตัดขวางชั้นเกลือหินบางส่วนในแอ่งโคราชได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ซึ่งผลกระทบจากการชนกันของทวีปเอเชียและอนุทวีปอินเดีย ในช่วงอายุ Tertiary ทำให้เกิดแรงดันด้านข้างคั่นหินในหมวดหินภูทอกจนแตก เนื่องจากคุณสมบัติของเกลือหินที่คล้ายพลาสติกทำให้เคลื่อนไหลได้ง่ายชั้นเกลือหินจึงสามารถคั่นแทรกเข้าไปในรอยแตกได้ รวมทั้งน้ำหนักกดทับของดินและหินชั้นบน (Overburden) ในแต่ละพื้นที่ที่มีน้ำหนักกดทับไม่เท่ากันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากชั้นเกลือหินเป็นชั้นเกลือหินคดโค้ง และเป็น โดมเกลือตามลำดับ Junmaha (1987) และ Supajanya et al. (1992) ยังพบว่าจากการสำรวจวัดคลื่นสั้นสะท้อนบริเวณหลุมเจาะสำรวจ หมายเลข K-066 อำเภอบ่อระบือ จังหวัดมหาสารคาม (รูปที่ 2.5) และหลุมเจาะยางตลาด-1 อำเภอยางตลาด จังหวัดกาฬสินธุ์ โดมเกลือจะมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน บางแห่งเพิ่งเริ่มก่อตัวเป็น โดม และจะก่อตัวได้ดีถ้าเป็นเกลือชั้นล่าง

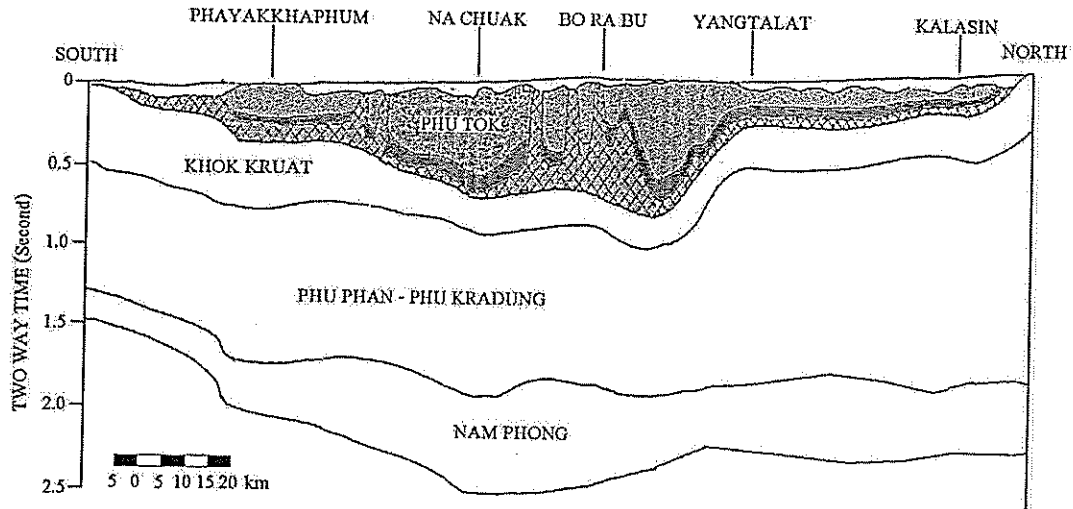
Booth (2000) ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะธรณีวิทยาปีโตรเลียมของแอ่งโคราชในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยทำการเจาะหลุมสำรวจหาส่วนของคาร์บอนเนตในหมวดหินผานกเค้า (Pha Nok Khao Formation) เพื่อสำรวจแหล่งกักเก็บ มีหลุมเจาะสำรวจทั้งสิ้น 18 หลุม พบคาร์บอนเนตจำนวน 11 หลุม แต่อีก 7 หลุมเจาะสำรวจไม่พบ โดยคาดว่าเกิดจากแบบจำลองทางธรณีวิทยาไม่ถูกต้องหรืออาจเกิดจากการวิเคราะห์ทางด้านคลื่นไหวสะเทือนที่ไม่ถูกต้อง โดยใน 11 หลุมเจาะสำรวจที่พบคาร์บอนเนตนั้นมี 5 หลุมที่ทำการเจาะแล้วไม่ตรงตามแผนที่วางไว้เนื่องจากโครงสร้างของชั้นหินได้ก่อตัวหลังจากที่ก๊าซธรรมชาติได้แพร่จากโครงสร้างของชั้นหินไปแล้ว ซึ่งสรุปได้ว่าการหาลักษณะทางธรณีวิทยาของไฮโดรคาร์บอนในพื้นที่ที่มีความสลับซับซ้อนจึงจำเป็นที่จะต้องมีการนำเอาข้อมูลการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนมาทำการแปลความใหม่เพื่อให้ได้ผลสำรวจที่ดีขึ้น

2.2 การคำนวณการทรุดตัวของผิวดิน

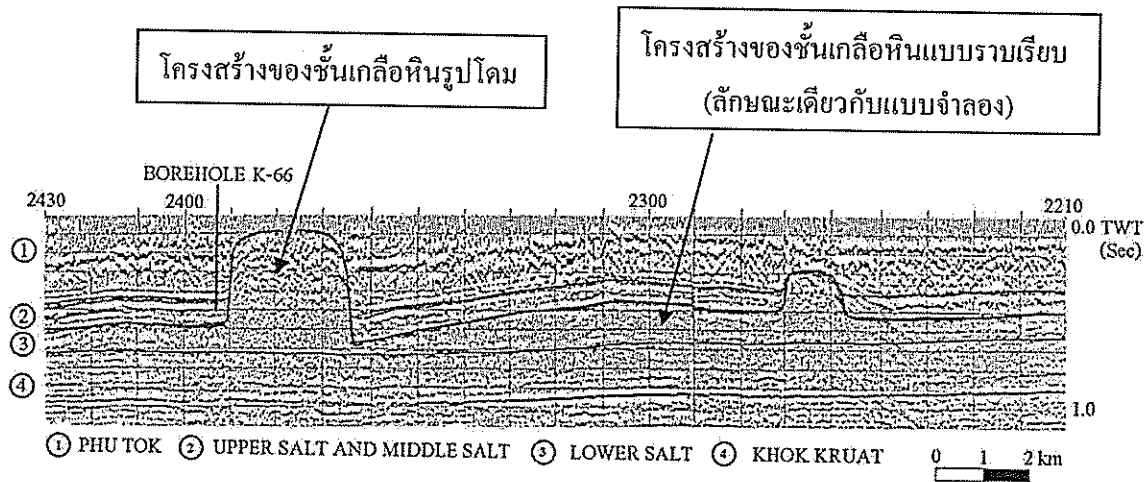
2.2.1 ทฤษฎีและกฎเกณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน

Singh (1992) กล่าวว่า การทรุดตัวเป็นผลจากการถูกรบกวนด้วยความเค้นภายนอก ซึ่งความเค้นที่เปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลกับการเปลี่ยนรูปร่างและการเคลื่อนที่ของชั้นดินหรือชั้นหินขอบเขตของการทรุดตัวจะขึ้นกับขนาดของความเค้นและขนาดของโพรงที่จะส่งผลต่อความไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นการทรุดตัวของผิวดินจึงสามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ได้ดินที่เกิดจากการถล่มในโพรงใต้ดิน การทรุดตัวของผิวดินโดยทั่วไปจะนำมาซึ่งการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการเคลื่อนที่ด้านข้าง การทรุดตัวของผิวดินเกิดได้ 3 แบบ คือ

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



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางแสดงชั้นเกลือหินบางส่วนในแอ่งโคราช (Sattayarak and Polachan, 1990)



รูปที่ 2.5 ภาพตัดชั้นเกลือหินจากผลการสำรวจวัดคลื่นสั้นสะท้อนบริเวณหลุมเจาะสำรวจ K-66 อ.บอระเพ็ด จ.มหาสารคาม (Junmaha, 1987)

การแตกของผิวดินอาจจะอยู่ในรูปแบบของการเปิดรอยแตก ระดับการเลื่อนไถล หรือ โพรงที่อยู่ใบบ่อ และผลสะท้อนของความเค้นดึงและความเค้นเฉือนใต้ดิน

การคำนวณด้วย Profile function มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณที่มีการทรุดตัว ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical displacement) และแนวนอน (Horizontal displacement) ความลาดชัน (Slope) ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง (Vertical strain) และความโค้งตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical curvature) ข้อมูลที่ต้องกรอกเข้าไปในสมการประกอบด้วย การทรุดตัวสูงสุด (S_{\max}) ความลึกของโพรง (D) มุมที่วัดจากขอบโพรงถึงขอบเขตการทรุดตัว (Angle of draw, γ) ระยะทางในแนวระนาบ (x) arbitrary constant (c) ค่าคงที่ (b) และรัศมีสูงสุดของพื้นที่โพรง (B) รูปที่ 2.6 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทรุดตัวของผิวดิน

การคำนวณการทรุดตัว 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

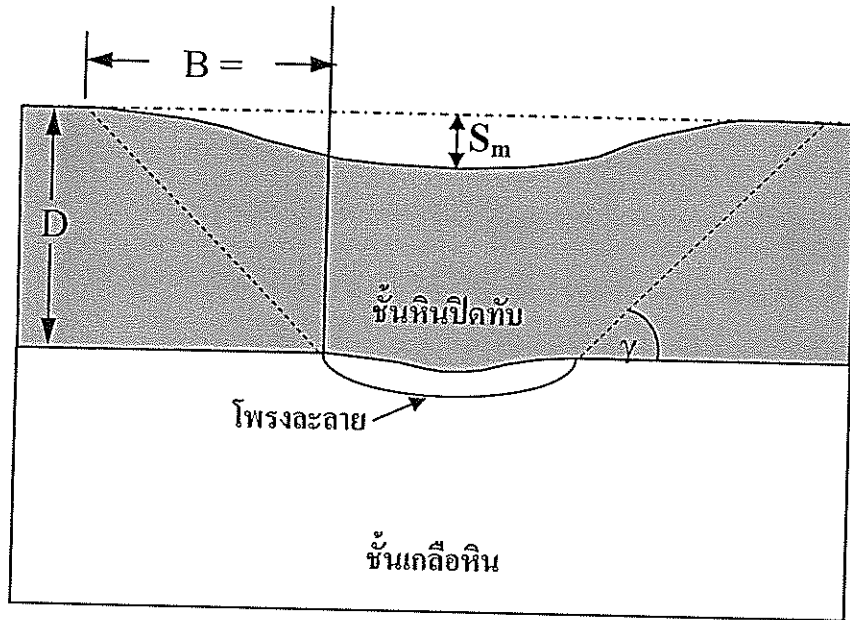
$$\rho(x) = S''(x) = S_{\max} \frac{c^2}{B^2} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right]$$

การคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวนอน

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

การคำนวณความเครียดในแนวนอน

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



รูปที่ 2.6 ลักษณะการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากผลกระทบของโพรงละลายและลักษณะธรณีวิทยาที่ต่างกัน

2.2.2 การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางด้านวิศวกรรมธรณีเป็นสิ่งจำเป็นในการอธิบายพฤติกรรมของเกลือหินรอบๆ โครงสร้างทางวิศวกรรมในเชิงกลศาสตร์ เช่น พฤติกรรมในเชิงความเค้น ความเครียด และความซึมผ่าน เป็นต้น โดยอาศัยคุณสมบัติเชิงยืดหยุ่น ความหนืดเชิงยืดหยุ่น ความหนืดเชิงพลาสติกและความเป็นพลาสติก โปรแกรมที่ใช้ในการคาดคะเนพฤติกรรมทั้งในระยะเวลาดสั้นและระยะเวลายาวมีอยู่หลายโปรแกรม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ในแต่ละโปรแกรมต่างก็ได้พัฒนาเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ สะดวก และรวดเร็ว โดยส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและใช้กฎเกณฑ์พฤติกรรมเกลือหินในเชิงกลศาสตร์เป็นสมการหลักในการคำนวณ โดยค่าคงที่ต่างๆ จะหาได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ซึ่งรายละเอียดของแต่ละโปรแกรมจะไม่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้ ยกเว้น โปรแกรมที่จะนำมาใช้ในโครงการวิจัยนี้เท่านั้น

2.2.3 การคำนวณการทรุดตัวด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID

โปรแกรม SALT_SUBSID ถูกพัฒนาโดยบริษัท RE/SPEC Inc. เพื่อมอบให้กับ Solution Mining Institute สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของผิวดินที่อยู่เหนือโพรงละลายหรือเหมืองใต้ดินในชั้นเกลือ โพแทช และถ่านหิน โปรแกรมนี้ยังใช้วิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินในเชิงเวลาด้วย ผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวกับเวลา ภาพตัดขวางแสดงการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัว เส้นชั้นการทรุดตัวและอัตราการทรุด ทั้งนี้โปรแกรมดังกล่าวสามารถใส่ข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้จริงในภาคสนามเพื่อแสดงผลเทียบกับการคำนวณจากโปรแกรมด้วย

ค่าคงที่ที่ Input ให้กับโปรแกรมสำหรับการคำนวณประกอบด้วย Y_{ss} , Y_0 และ β สำหรับเหมืองละลาย และ Y_0 , β และ N สำหรับเหมืองแบบแห้ง สำหรับตัวแปรที่บ่งชี้ค่าการทรุดตัวสูงสุดได้แก่ Y_{ss} และ Y_0 ส่วนค่า β และ N เป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวกับพฤติกรรมในเชิงเวลาของการทรุดตัว การทรุดตัวที่ตำแหน่งใดๆ บนพื้นผิวที่ขึ้นกับเวลา $Z(x, y, t)$ มีสมการทั่วไปดังนี้คือ

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

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

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

ตารางที่ 2.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของเกลือหินและหินชั้นหินปิดทับ

Code Names	Methods	References
BEFE	BEM (3D)	Beddoes (1994)
VELMINA	DDM (3D)	Frayne (1998)
VNFOLD	DDM (3D)	Beddoes (1994)
FLAC	FDM (2D)	Itasca (1992)
FLAC	FDM (3D)	Frayne (1996, 1998)
ADINA	FEM (2D)	Pudewills and Hornberger (1996)
ANSALT	FEM (2D)	Heusermann et al. (1998)
ANSPRE	FEM (2D)	Honecker and Wulf (1988)
ANTEMP, ANSPP	FEM (2D)	Honecker and Wulf (1988)
ASTHER	FEM (2D)	Rolnik (1988)
CODE-BRIGHT	FEM (2D)	Olivella et al. (1996, 1998a, 1998b)
COYOTE	FEM (2D)	Gartling (1981a)
DAPROK	FEM (2D)	Harrington et al. (1991)
FAST-BEST	FEM (2D)	Pudewills (1998)
GEO/REM	FEM (2D)	Serata (1991), and Serta and Fuenkajorn (1993)
GEOMECH	FEM (2D)	Nguyen-Minh and Menezes (1996)
JAC	FEM (2D)	Biffle (1984)
LUBBY-1	FEM (2D)	Rokahr and Staudtmeister (1996)
LUBBY-2	FEM (2D)	Lux and Schmidt (1996)
MARC	FEM (2D)	Van Eckelen (1988)
MERLIN	FEM (2D)	Gartling (1981b)
SANCHO	FEM (2D)	Stone et al. (1985)
SPECTROM-32	FEM (2D)	de Vries and Callahan (1998)
VIPLEF	FEM (2D)	Vouille et al. (1996)
VISCOT	FEM (2D)	INTERA (1982), and Frayne (1996)
SUVIC-D	FEM (2D/3D)	Julien et al. (1998)

Notes: FEM is finite element method, FDM is finite difference method, DDM is displacement discontinuity method, BEM is boundary element method, 2D is two-dimension, and 3D is three-dimension.

2.3 การเกิดแผ่นดินทรุดเนื่องจากโพรงธรรมชาติ

แผ่นดินทรุดหรือหลุมยุบเป็นธรณีพิบัติภัยประเภทหนึ่งที่เกิดตามธรรมชาติ แต่กิจกรรมของมนุษย์ก็สามารถเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้ โดยทั่วไปในภูมิภาคประเทศที่ได้ผิวดินมีหินปูน หินโคลโลไมต์ หินอ่อนและเกลือหินเป็นองค์ประกอบ หินเหล่านี้สามารถละลายได้ในน้ำใต้ดิน จึงทำให้เกิดโพรงหรือถ้ำใต้ดินขึ้นและเมื่อเพดานด้านบนน้ำหนักของดินและสิ่งก่อสร้างที่กดทับด้านบนไม่ไหวจึงพังทลายกลายเป็นหลุมยุบ (กรมทรัพยากรธรณี, 2548)

เมื่อหลุมยุบเกิดขึ้นจะสร้างความเสียหายกับสิ่งปลูกสร้าง บ้านเรือน และพื้นที่ทางการเกษตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศชาติในการซ่อมบำรุงบ้านเรือนที่เสียหาย รวมถึงการกักเก็บและช่วยเหลือผู้ที่ประสบกับภาวะแผ่นดินทรุด ทั้งนี้ภาครัฐได้มีการศึกษาหลุมยุบและได้กำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดหลุมยุบ โดยพบว่าพื้นที่เสี่ยงภัยหลุมยุบส่วนใหญ่อยู่นอกเขตเมืองประมาณร้อยละ 66 ของพื้นที่เสี่ยงภัยทั้งหมด

2.3.1 หลุมยุบที่เกิดจากโพรงหินปูน (Sink hole)

โดยทั่วไปหลุมยุบที่เกิดในบริเวณหินปูนมักเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากสาเหตุตามธรรมชาติหรือมีส่วนที่มนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้องน้อย หลุมยุบจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1-200 เมตร และลึกตั้งแต่ 1 ถึงมากกว่า 20 เมตร ส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณที่ราบใกล้กับภูเขาที่เป็นหินปูน โดยมีสาเหตุมาจากน้ำที่มีสภาพเป็นกรดไหลผ่านตามรอยแตกของหินปูนและเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้น้ำที่ไหลผ่านละลายจนเป็นช่องว่างหรือโพรงใต้ดิน เมื่อรับน้ำหนักไม่ไหวจึงเกิดการพังทลาย แผ่นดินด้านบนจึงทรุดตัวกลายเป็นหลุมยุบ ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการยุบตัวของหินปูนได้แก่ ความหนาและการแผ่กระจายของหินปูน บริเวณที่มีหินปูนรองรับอยู่ในระดับตื้น (ลึกจากผิวดินไม่เกิน 50 เมตร) การวางตัวของชั้นหินเนื้อที่บด ถักขยี้และจำนวนรอยแตกในหิน การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน และสภาพความเป็นกรดของน้ำ

2.3.2 หลุมยุบที่เกิดจากโพรงเกลือหิน

สำหรับหลุมยุบที่เกิดในบริเวณที่มีชั้นเกลือหินรองรับ มักเป็นผลมาจากการกระทำของมนุษย์ อันเนื่องมาจากการสูบน้ำเกลือใต้ดินเพื่อการผลิตเกลือในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่เสี่ยงภัยหลุมยุบของ 5 จังหวัด ได้แก่ หนองคาย สกลนคร อุดรธานี มหาสารคาม และนครราชสีมา ซึ่งมีพื้นที่ผลิตเกลือประมาณ 12,439 ไร่ ทั้งนี้การสูบน้ำเกลือใต้ดินทำให้น้ำบาดาลในบริเวณใกล้เคียงต้องไหลเข้าไปแทนที่ และเกิดการละลายของมวลเกลือตามเส้นทางการไหลของน้ำ เกิดเป็นโพรงและมีการขยายตัวขึ้นตามลำดับจนถึงจุดที่เพดานโพรงไม่สามารถรับน้ำหนักดินและหินที่ปิดทับอยู่ได้ นอกจากการเกิดหลุมยุบแล้ว การผลิตเกลือโดยไม่มีการ

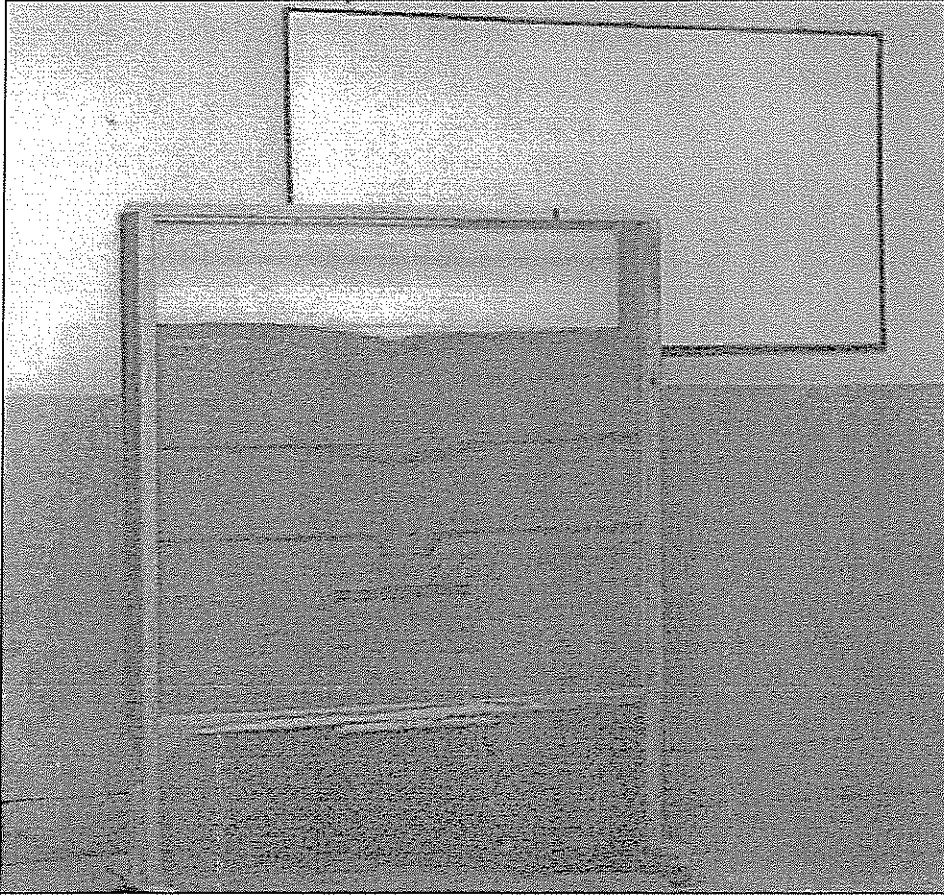
ควบคุมด้านสิ่งแวดล้อมที่รัดกุมเพียงพอมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของดินเค็มและน้ำเค็มสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ส่งผลกระทบต่อการเกษตรกรรมในพื้นที่ใกล้เคียง

2.4 การทดสอบ Leaching test ของเกลือหิน

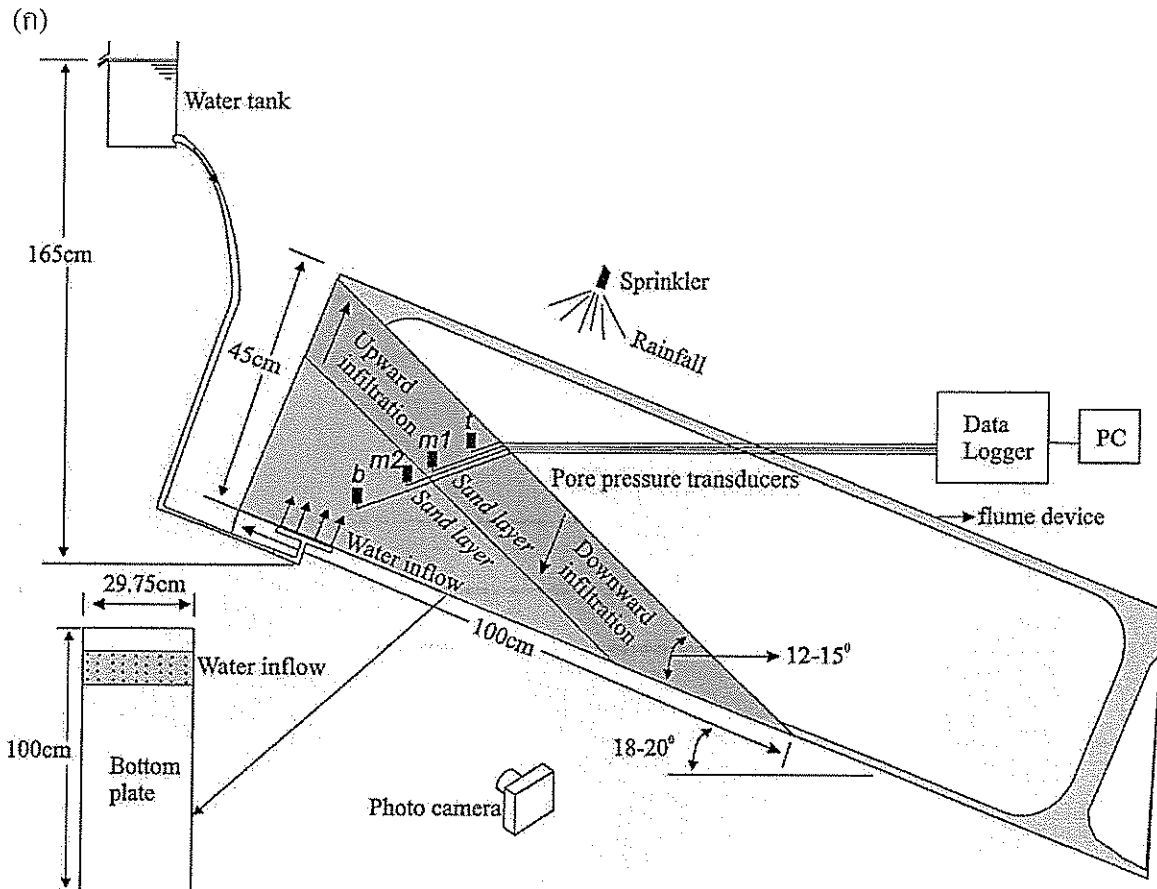
Leaching test เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของการชะล้างของวัสดุ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก คือ 1) Equilibrium-based leaching tests (agitation test) เป็นการทดสอบที่ไม่คำนึงถึงขนาดของเกลือ เพื่อตรวจวัดสิ่งปนเปื้อนที่ปล่อยออกมาว่ามีความสัมพันธ์กับสภาวะทางเคมีหรือไม่ 2) Mass transfer-based leaching tests (serial batch test) เป็นการทดสอบกับเกลือที่เป็นก้อนขนาดใหญ่ เพื่อตรวจวัดอัตราของสิ่งปนเปื้อนที่ปล่อยออกมา ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเกลือ 3) Percolation (column) leaching tests เป็นการทดสอบที่ผสมผสานกันของชนิดที่ 1 และ 2 โดยการปล่อยให้ น้ำชะล้างเกลือในแท่งทรงกระบอกที่มีขนาดความสูง 30 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร (ASTM D4874) ซึ่งการทดสอบชนิดที่ 3 นี้จะนิยมใช้ในการทดสอบการชะล้างเกลือหินในงานอุตสาหกรรมเกลือ ทั้งการออกแบบเหมืองใต้ดินแบบละลายและโครงสร้างใต้ดินที่เกี่ยวข้องกับเกลือหิน

2.5 โครงจำลองทางกายภาพ

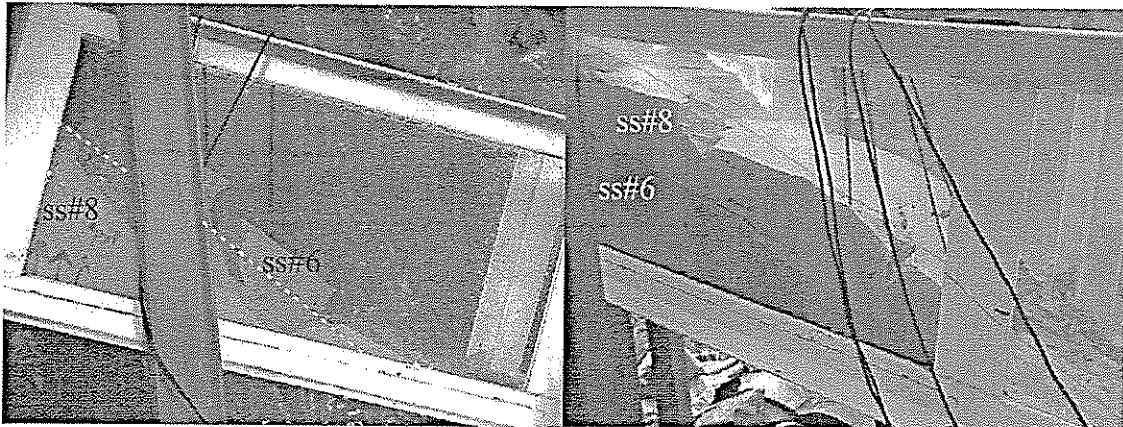
เครื่องทดสอบทางกายภาพที่มีอยู่ในปัจจุบันถูกออกแบบสำหรับการศึกษาเฉพาะด้าน อาทิเช่น Asadi et al. (2005) ได้ทำการสร้างเครื่องจำลองเชิงกายภาพในสองมิติเพื่อศึกษาเกี่ยวกับการทรุดตัวของผิวดินหลังจากการทำเหมือง เพื่อให้ทราบว่าแร่ที่นำออกมาจะส่งผลให้ผิวดินเกิดการทรุดตัวเท่าใดในเหมืองถ่านหิน โดยแบบจำลองทำจากไม้ที่สร้างเป็นโครงเพื่อใช้จำลองชั้นหินในรูปแบบของภาพตัดขวางในแนวดิ่ง (รูปที่ 2.7) นอกจากนี้ Lourenco et al. (2006) ได้สร้างเครื่องทดสอบทางกายภาพเกี่ยวกับการพังของชั้นดินที่อยู่บริเวณพื้นที่ลาดเอียงอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำฝนหรือแรงดันน้ำ โดยเครื่องดังกล่าวประกอบด้วยโครงเหล็กที่อยู่ในลักษณะเอียงเพื่อจำลองชั้นหิน มีแผ่นอะคริลิกปิดอยู่ทางด้านหน้า และมีหัวจำลองน้ำฝนอยู่ทางด้านบน โดยข้างล่างมีทางสำหรับน้ำเข้าเพื่อแทนแรงดันจากน้ำ (รูปที่ 2.8) และยังมีผู้ทำการศึกษาทดสอบทางกายภาพอีกจำนวนมาก ซึ่งจะเจาะจงลงไปในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ผู้ทดลองสนใจ ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ไม่เกี่ยวข้องกับสิ่งประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.7 ภาพถ่ายโครงจำลองทางกายภาพสำหรับคาดคะเนการทรุดตัวที่เสนอ โดย Asadi et al., 2005



(ข)



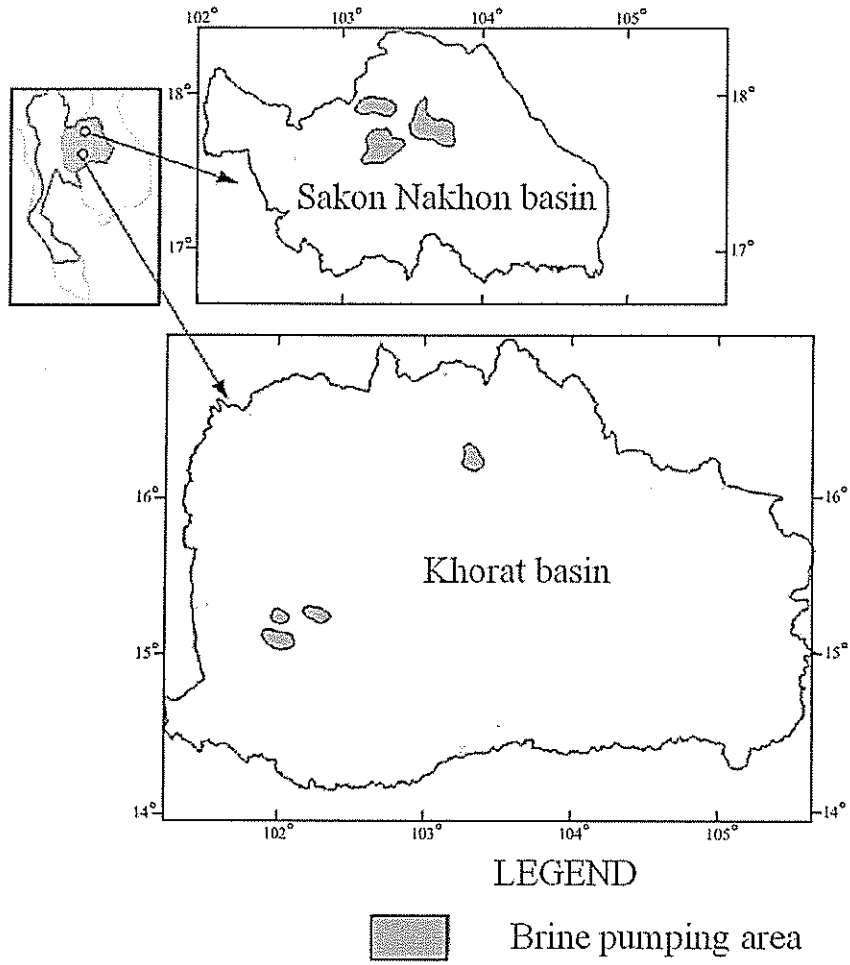
รูปที่ 2.8 (ก) ภาพเครื่องทดสอบการพังทลายของชั้นหินลาดเอียงจากผลการทบของปริมาณน้ำ และแรงดันน้ำ (ข) ภาพถ่ายผลการทดสอบของชั้นหินลาดเอียงที่พังทลาย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

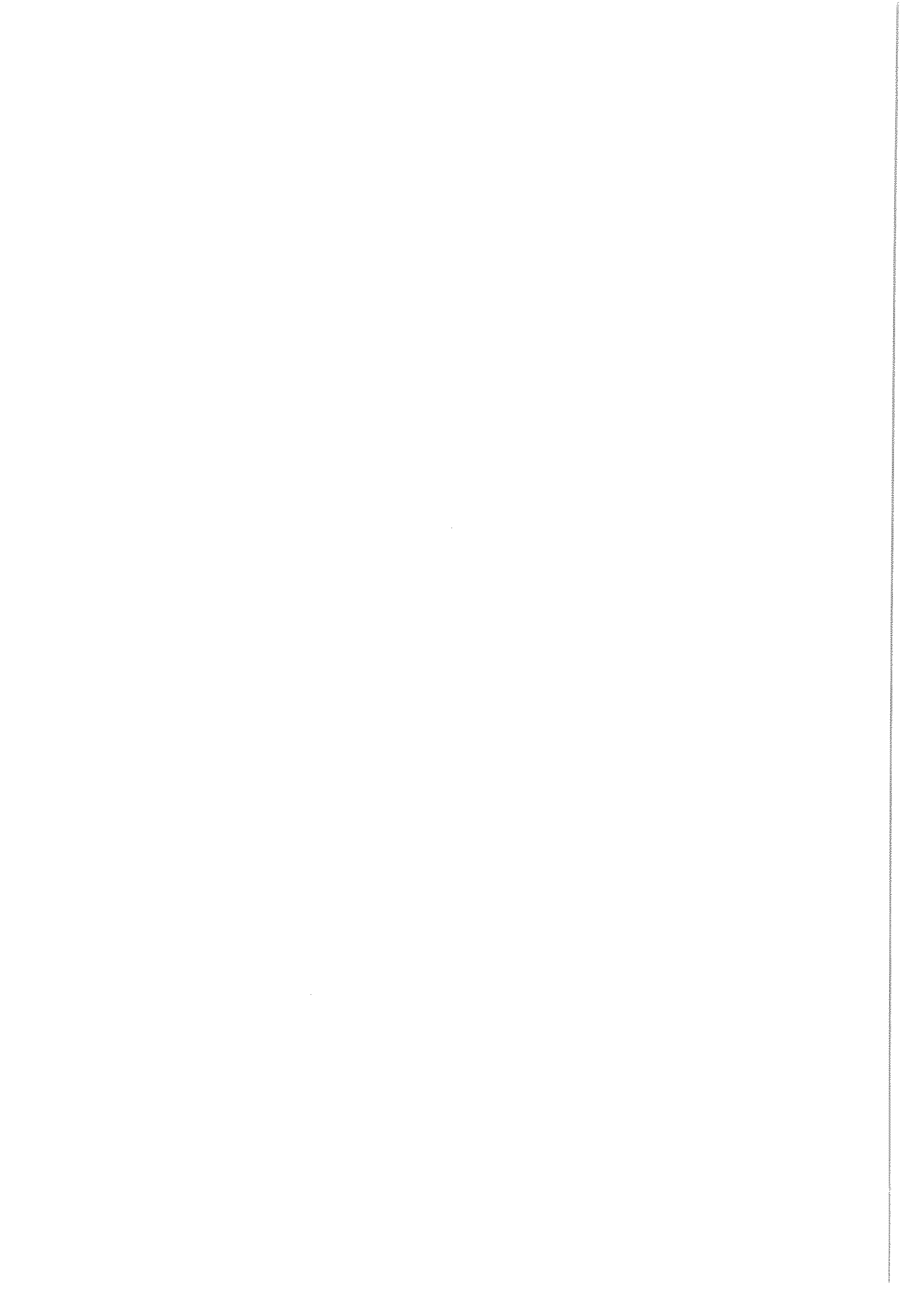
นอกจากได้ศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือแล้ว กรมทรัพยากรธรณีได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับหลุมยุบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเอาไว้อย่างมากและมีข้อสรุปที่สำคัญโดย Satarugsa et al. (2002) ที่ได้ศึกษาถึงปัญหาการเกิดแผ่นดินทรุดเนื่องจากโพรงเกลือใต้ดินในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าหลุมยุบจากโพรงเกลือใต้ดินเกิดได้ 2 ลักษณะ คือ 1) โพรงเกลือที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเนื่องจากมีรอยแตกแล้วมีน้ำใต้ดินซึมลงไปละลายเกลือให้ขาดหายไปอย่างต่อเนื่อง และหากมีการเร่งให้โพรงเกลือขยายกว้างมากขึ้นด้วยการสูบน้ำเกลือในบริเวณใกล้เคียงเพื่อนำมาผลิตเกลือ โพรงก็จะขยายใหญ่ขึ้นและเกิดการยุบ และ 2) โพรงเกลือที่เกิดจากการเจาะบ่อสูบน้ำเกลือลงไปในพื้นที่เกลือหินและสูบน้ำเกลือกลับขึ้นมาเพื่อผลิตเกลือ หลุมยุบจะเกิดบริเวณที่เป็นบ่อสูบเกลือ ผลการศึกษาการประยุกต์ทางธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีวัดความต้านทานไฟฟ้า วัดคลื่นสั้นสะเทือน และวัดการนำไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบโพรงพบว่า การสำรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยการวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล ทั้งแบบ electrical profile และ electrical imaging สามารถตรวจสอบโพรงได้ผลชัดเจน การสำรวจด้วยวิธีนี้ทำได้รวดเร็วและเสียค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับอีก 2 วิธี โดยพบลักษณะของโพรงจะปรากฏเป็นรูปร่างที่มีขอบเขตเป็นวงรอบและมีความต้านทานต่ำ (ประมาณ 0.1-0.5 โอห์ม-เมตร) การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะเทือนแบบสะท้อนและแบบหักเหสามารถหาความลึกของชั้นเกลือหินได้ แต่ไม่เหมาะในการหาโพรงในชั้นเกลือหินเพราะคลื่นสะท้อนและคลื่นหักเหมีความไม่ต่อเนื่อง ค่าอัตราส่วนระหว่างคลื่นสัญญาณต่อคลื่นรบกวนมีค่าสูง (signal-to-noise) ทำให้ขาดความเชื่อมั่นในการแปลความหมายเมื่อเปรียบเทียบกับผลสำรวจด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ การสำรวจด้วยวิธีวัดการนำไฟฟ้ายังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของโพรงใต้ดินได้เนื่องจากมีขีดจำกัดการวัดที่ระดับตื้น (7-15 เมตร) นอกจากนี้ผลการสำรวจยังพบอีกว่ามีบริเวณที่คาดว่าจะมีโพรงเกลือที่บรรจุด้วยน้ำเกลือยาวประมาณ 700-800 เมตร กว้างประมาณ 20-40 เมตร ความลึกไม่แน่นอนเนื่องจากชั้นเกลือหินมีการเอียงเท

Warren (1999) ได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะธรณีวิทยาและชั้นเกลือหิน โดยอาศัยหลุมเจาะสำรวจมากกว่า 300 หลุม ซึ่ง Suwanich (1978) ได้ประเมินปริมาณสำรองของเกลือหินจากทั้งแอ่งโคราช และแอ่งสกลนครไว้ที่ 18 ล้านล้านตัน จากนั้น Vattanasak (2006) ได้รวบรวมข้อมูลหลุมเจาะเพื่อออกแบบการทำเหมืองเกลือแบบละลายในเบื้องต้นโดยอ้างอิงจากชุดการจำลองด้วยวิธี finite element analyses และได้ให้ปริมาณสำรองในการทำเหมืองเกลือแบบละลายของเกลือชั้นล่าง (Lower Salt member) ในแอ่งโคราชประมาณ 2 หมื่นล้านตัน ซึ่งการประเมินนี้ไม่ได้รวมพื้นที่ที่อยู่อาศัยและพื้นที่ป่าอนุรักษ์

Wannakao and Walsri (2007) กล่าวว่า 1 ใน 3 ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยทั่วไป จะวางตัวอยู่บนชั้นหินตะกอนของชุดหินมหาสารคาม (Maha Sarakham Formation) การทับถมจะ แยกเป็น 2 แอ่ง คือ แอ่งโคราช และแอ่งสกลนคร การผลิตเกลือจากการสูบน้ำบาดาลเค็มส่วนใหญ่จะมี อยู่ในพื้นที่ของทั้ง 2 แอ่ง บ่อสูบน้ำบาดาลเค็มจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว และมีท่ออัดอากาศ เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว มีความลึกประมาณ 60-100 เมตร เมื่อน้ำบาดาลเค็มถูกสูบขึ้นมาแล้วจะนำไป ตากแดดในบ่อพักเพื่อให้ตกผลึกเป็นเกลือ วิธีการผลิตเกลือจากการสูบน้ำบาดาลเค็มนี้จะส่งผลให้เกิด การทรุดตัวของบึงผิวดิน ซึ่งพบมากในพื้นที่บ้านโนนแสงง จังหวัดสกลนคร รูปที่ 2.9 แสดงพื้นที่ที่มีการ ทำนาเกลือแบบสูบ โดยที่ความลึกของชั้นเกลือที่ตื้นที่สุดในพื้นที่นั้นผันแปรตั้งแต่ 40 เมตร ถึง 200 เมตร ซึ่งจะเป็นเกลือชั้นกลางหรือเกลือชั้นล่างขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นที่ อย่างไรก็ตามโดย ส่วนมากการทำนาเกลือแบบสูบในพื้นที่ดังกล่าวจะมีลักษณะภูมิประเทศที่แบนราบ ระดับน้ำบาดาล อยู่ใกล้กับผิวดิน ในแอ่งสกลนครพบชั้นเกลือที่อยู่ลึกน้อยกว่า 50 เมตร ส่วนในแอ่งโคราชพบชั้น เกลือที่อยู่ลึกประมาณ 100 เมตร (Jenkunawat, 2005; Wannakao et al., 2005) ซึ่งอ้างอิงจากการ ดำรงในภาคสนามของ (Jenkunawat, 2007) ที่กล่าวว่า การทรุดตัวของบึงผิวดินโดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้น ในพื้นที่ที่ชั้นเกลือมีความลึกน้อยกว่า 50 เมตร ชั้นหินปิดทับส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย mudstone siltstone และ sandstone ซึ่งอยู่ในชั้น Middle Clastics ส่วนในชั้น Lower Clastics จะประกอบด้วย claystone และ mudstone โดยมีรอยแตกทำมุมน้อยกว่า 30 องศา และบางรอยแตกทำมุม 70 องศา (Crosby, 2007) ในแต่ละชั้นของเกลือจะถูกจำแนกโดยใช้ปริมาณของแร่ halite และ แร่ anhydrite ที่ ถูกแทรกอยู่ในรอยแตกโดยมีความหนาตั้งแต่ 2 เซนติเมตร ถึง 5 เซนติเมตร



รูปที่ 2.9 พื้นที่สูบน้ำเกลือในแอ่งโคราช และแอ่งสกลนคร



บทที่ 3

การออกแบบและพัฒนาโครงทดสอบ

3.1 แนวคิดในการประดิษฐ์

โครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัวสร้างขึ้นโดยใช้หลักการของการเติมน้ำ (จำลองสถานการณ์ฝนตก) ลงไปละลายชั้นเกลือที่ถูกปิดด้วยแผ่นวัสดุโปร่งใสทางด้านข้างและชั้นทรายทางด้านบน โดยให้อัตราการซึมผ่านของน้ำคงที่ตลอดเวลา ด้วยการเจาะรูวัสดุโปร่งใสในบริเวณผิวสัมผัสของชั้นเกลือกับชั้นทรายด้านบน โดยรูเจาะนี้เปรียบเสมือนการสูบน้ำออกไปเพื่อที่จะทดสอบค่าความเค็มของน้ำและวัดค่าการทรุดตัว ณ เวลานั้นๆ ของการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างส่วนฐานที่ทำจากเหล็กสำหรับรับน้ำหนักและยึดวัสดุโปร่งใส แผ่นยางยึดระหว่างแผ่นวัสดุโปร่งใสทั้งสองแผ่น และเหล็กเส้นสำหรับค้ำยันโครงสร้างวัสดุโปร่งใสไม่ให้มีการโก่งตัว

สิ่งประดิษฐ์ใหม่นี้เป็นการจำลองทางกายภาพ โดยเลือกใช้ความหนาที่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อจำลองภาพตัดขวางในแนวตั้ง วิธีการจำลองและทดสอบสิ่งประดิษฐ์นี้คือ จำลองชั้นเกลือหินด้วยการนำเกลือที่ละเอียดมากเทลงในแบบจำลองให้มีความสูงประมาณ 10-15 เซนติเมตร ปรับระดับให้เรียบ จากนั้นนำทรายละเอียดที่ได้คัดขนาดไว้ใส่ลงไปปิดทับชั้นเกลือหินตามด้วยทรายหยาบ แล้วเติมน้ำลงไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา เช่น การศึกษาระดับน้ำบาดาลเค็ม การเติมน้ำ (จำลองสถานการณ์ฝนตก) ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลจะมีลักษณะการไหลจากซ้ายไปขวา (สูงไปต่ำ) จากนั้นจึงทำการสูบน้ำบาดาลเค็มตามอัตราการไหลที่ต้องการศึกษาแล้ววัดค่าความเข้มข้นของน้ำ โดยการทดสอบนี้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทราบพฤติกรรมของชั้นเกลือหินที่เกิดขึ้นว่าเป็นเช่นใด

3.2 รูปแบบของโครงจำลอง

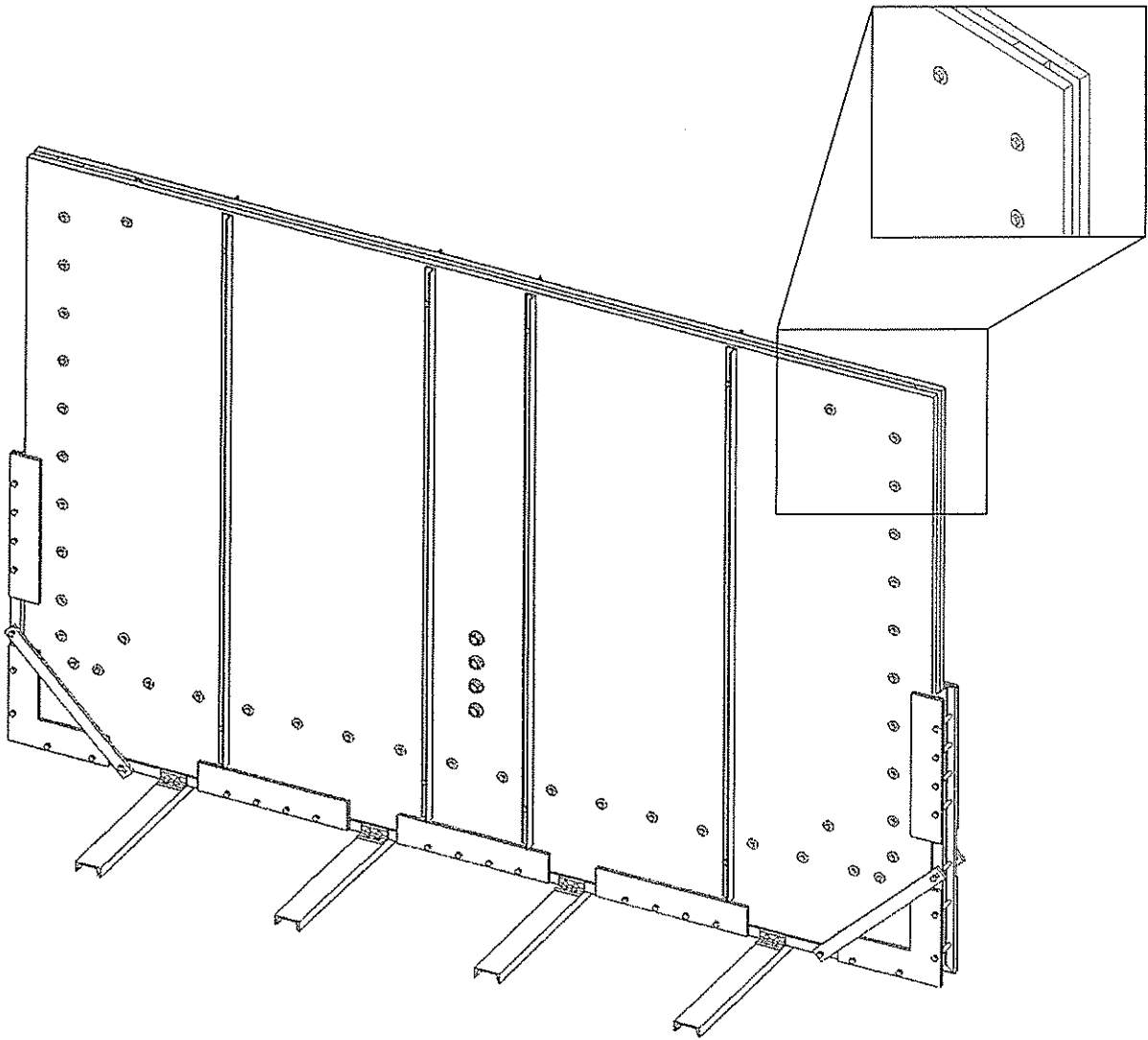
การออกแบบโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว ได้รับการออกแบบให้สามารถจำลองชั้นเกลือหินและตัวแปรต่างๆ โดยโครงทดสอบนี้มีขนาดสองในสามของความยาวต่อความสูง มีความกว้างของช่องทดสอบสูงสุดไม่เกิน 2 เซนติเมตร ซึ่งเครื่องทดสอบนี้แบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือชุดทดสอบ ประกอบด้วยแผ่นอะคลิลิก 2 แผ่น ทำหน้าที่ป้องกันหิน ทราย และน้ำเข้ามาจากทางด้านหน้าและด้านหลัง คุณสมบัติของแผ่นอะคลิลิก คือมีลักษณะใสและยืดหยุ่นได้มาก ทำให้ผู้วิจัยสามารถสังเกตเห็นลักษณะการละลายและการทรุดตัวได้อย่างชัดเจน แผ่นอะคลิลิกด้านหลังจะมีท่อสำหรับปล่อยน้ำออก โดยขึ้นอยู่กับการออกแบบการ

ทดสอบซึ่งสามารถเจาะเพิ่มเติมได้ตามต้องการ แผ่นยางด้านข้างและแผ่นยางด้านล่าง จำนวน 3 แผ่น ทำหน้าที่ปิดกั้นไม่ให้ น้ำและวัสดุต่างๆ ไหลออกจากชุดทดสอบ อีกทั้งยังเป็นตัวกำหนดช่องในการทดสอบด้วย โครงเหล็กและตะแกรงลวดทองเหลือง จำนวน 2 ชิ้น ทำหน้าที่ปิดกั้นทรายไม่ให้ไหลออกทางด้านข้างในระยะความกว้างที่ต้องการทดสอบ เพื่อให้ น้ำสามารถไหลผ่านได้โดยไม่มีปริมาณ น้ำสูญหายและยังเหลือที่ด้านข้างเล็กน้อยเพื่อใช้ในการออกแบบการไหล คานเหล็ก จำนวน 8 ชิ้น ทำหน้าที่ค้ำยันการโค้งตัวของแผ่นอะคลิลิกที่ยึดด้วยน๊อต โดยมีวงแหวนรองน๊อตทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นอะคลิลิกส่วนที่สองคือฐานใส่ชุดทดสอบ ประกอบด้วยเหล็กที่มีลักษณะคล้ายรางน้ำซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าชุดทดสอบเล็กน้อย เหล็กส่วนล่างมีความยาวเท่ากับ ความกว้างของแผ่นอะคลิลิก เหล็กด้านข้างสูงหนึ่งในสองของแผ่นอะคลิลิก จำนวน 2 ชิ้น เหล็กขาตั้งยาว ไม่น้อยกว่าหนึ่งในสองของความสูงของแผ่นอะคลิลิก จำนวน 4 ชิ้น แผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จำนวน 10 แผ่น สำหรับยึดระหว่างฐานกับชุดทดสอบ แผ่นเหล็กยึดชุดทดสอบรูปฉากหนา ไม่น้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้น แผ่นเหล็กฉากยึดโครงกับส่วนของขาตั้งหนา ไม่น้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร จำนวน 8 ชิ้น และเหล็กยึดโครง จำนวน 4 ชิ้น

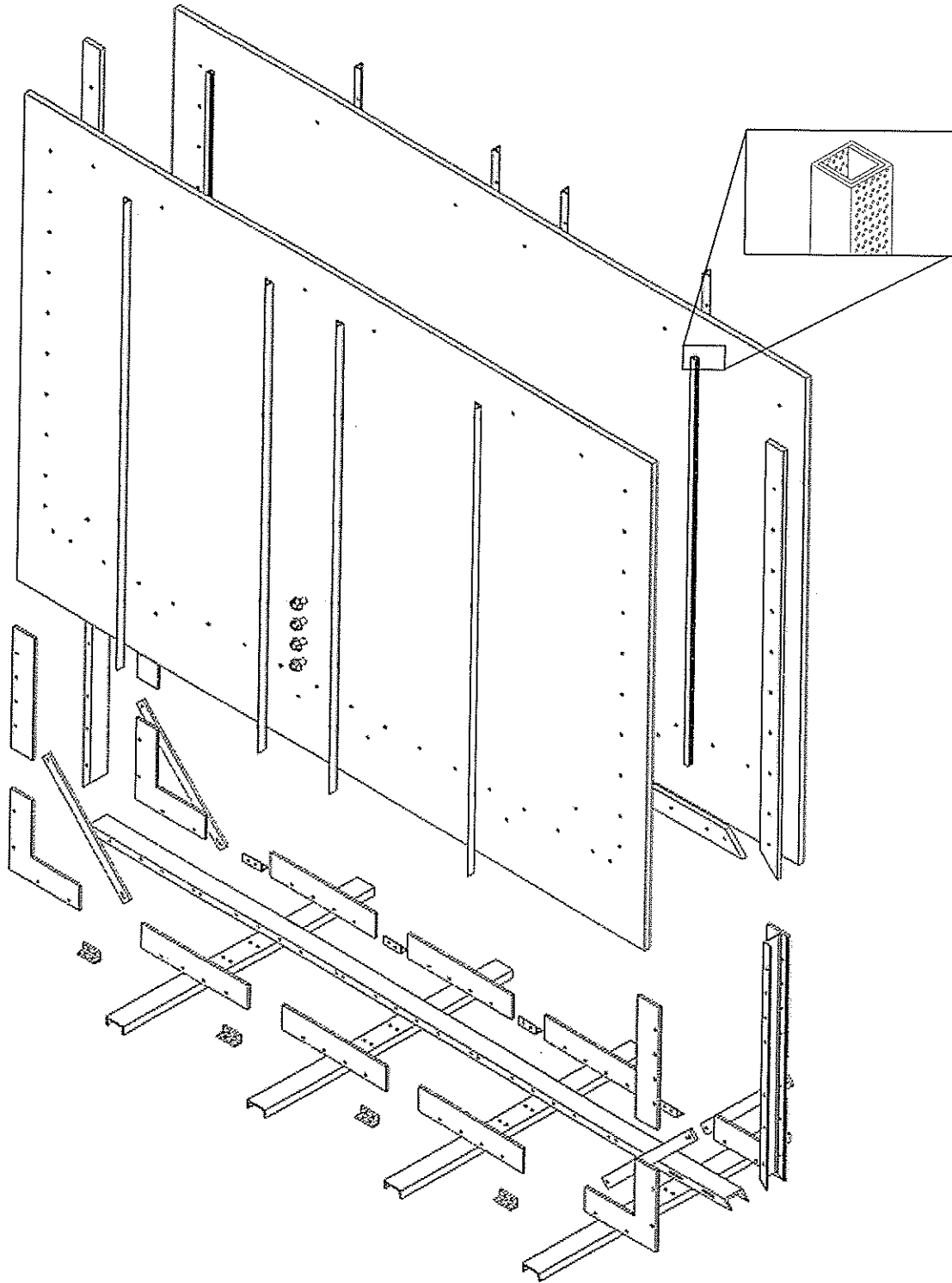
การประกอบอุปกรณ์ เริ่มจากนำแผ่นอะคลิลิกด้านหลังมาวางแล้วนำแผ่นยางทั้งด้านข้างและด้านล่างประกบให้รูตรงกัน แล้วนำแผ่นอะคลิลิกด้านหน้ามาประกบไว้ด้านบนแผ่นยางด้านข้างและแผ่นยางด้านล่าง จากนั้นนำคานมาประกบทั้งด้านหน้าและด้านหลัง รองด้วยวงแหวนรองน๊อตแล้วยึดด้วยน๊อต จากนั้นให้ทดลองใส่น้ำเพื่อตรวจสอบว่ามีรอยรั่วหรือไม่ แล้วจึงนำไปใส่ในฐานใส่ชุดทดสอบที่ประกอบไว้แล้ว ส่วนขั้นตอนการทดสอบทำตามทีกล่าวมาในตอนต้น

รูปที่ 3.1 แสดงภาพเพอร์สเปคทีฟของ โครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัวที่ได้ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว ซึ่งแสดงองค์ประกอบและตำแหน่งของสองส่วนหลักคือ ส่วนที่ใช้สำหรับทดสอบ และส่วนของฐาน

รูปที่ 3.2 แสดงภาพเพอร์สเปคทีฟโดยแยกส่วนของ โครงจำลองทางกายภาพในสองมิติ เพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว ตามการประดิษฐ์นี้ประกอบด้วย แผ่นอะคลิลิกจำนวน 2 แผ่น ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันหิน ทราย และน้ำเข้ามาจากทางด้านหน้าและด้านหลัง คุณสมบัติของแผ่นอะคลิลิกคือมีลักษณะใสและยืดหยุ่นได้มาก ทำให้ผู้วิจัยสามารถสังเกตเห็นลักษณะการละลายและการทรุดตัวได้อย่างชัดเจน ซึ่งเลือกใช้แผ่นอะคลิลิกที่มีขนาดสองในสามของความยาวต่อความสูงมาทำการเจาะรูที่ด้านล่าง ด้านซ้าย และด้านขวาที่ระยะทุก 10 เซนติเมตร เพื่อเป็นการยึดกับส่วนต่างๆ ด้วยน๊อต จากนั้นเลือกแผ่นอะคลิลิกมาหนึ่งแผ่นเพื่อทำการเจาะรูตามตำแหน่งและจำนวนที่ต้องการ สำหรับแผ่นยางควรเลือกใช้ขนาดความกว้าง ไม่น้อยกว่า 5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.1 ภาพเพอร์สเปคทีฟของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลาย
และสังเกตการณ์การทรุดตัว



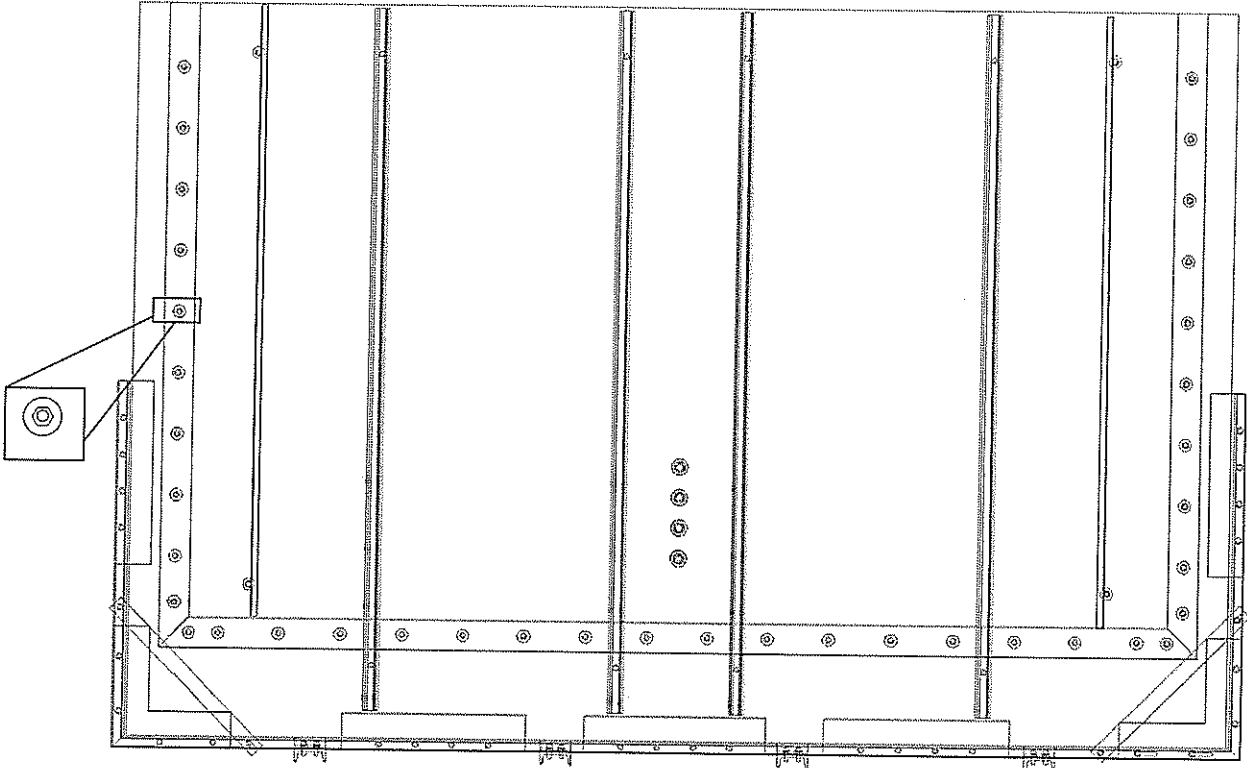
รูปที่ 3.2 ภาพเพอร์สเปกทีฟโดยแยกส่วนของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว

สูงเท่ากับแผ่นอะคลิลิกทั้ง 2 แผ่น โดยแผ่นยางด้านล่างยาวเท่ากับแผ่นอะคลิลิก จำนวน 1 แผ่น ทำการเจาะรูที่จุดกึ่งกลางของความกว้างให้มีขนาดและระยะเดียวกันกับแผ่นอะคลิลิก โครงเหล็กและตะแกรงลวดทองเหลือง จำนวน 2 ชั้น มีช่องระหว่างเส้นลวด ไม่น้อยกว่า 0.5×0.3 ตารางมิลลิเมตร ทำหน้าที่ปิดกั้นทรายไม่ให้ไหลออกทางด้านข้าง ในระยะความกว้างที่ต้องการทดสอบ เพื่อให้ให้น้ำสามารถไหลผ่านได้โดยไม่มีปริมาณน้ำตกค้างอยู่ภายในวัสดุและยังเหลือที่ด้านข้างเล็กน้อยเพื่อใช้ในการออกแบบการไหล คานเหล็ก จำนวน 8 แท่ง ทำหน้าที่ค้ำยันการโค้งตัวของแผ่นอะคลิลิกซึ่งอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดจากการทดสอบได้ ท่อสำหรับปล่อยน้ำออกทำหน้าที่แทนการสูบน้ำออกจากชุดทดสอบ ฐานใส่ชุดทดสอบ ประกอบด้วยเหล็กที่มีลักษณะคล้ายรางน้ำขนาด ไม่น้อยกว่า 2×5 เซนติเมตร เหล็กด้านล่างยาวเท่ากับความกว้างของแผ่นอะคลิลิก และเหล็กด้านข้างสูงหนึ่งในสองของแผ่นอะคลิลิก จำนวน 2 ชั้น ส่วนของขาตั้งยาวไม่น้อยกว่าหนึ่งในสองของความสูงของแผ่นอะคลิลิก จำนวน 4 ชั้น แผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับยึดชุดทดสอบหนาไม่น้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร จำนวน 10 ชั้น แผ่นเหล็กยึดชุดทดสอบรูปฉากหนาไม่น้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชั้น เหล็กฉากยึดโครงกับขาตั้ง จำนวน 8 ชั้น และเหล็กยึดโครง จำนวน 4 ชั้น

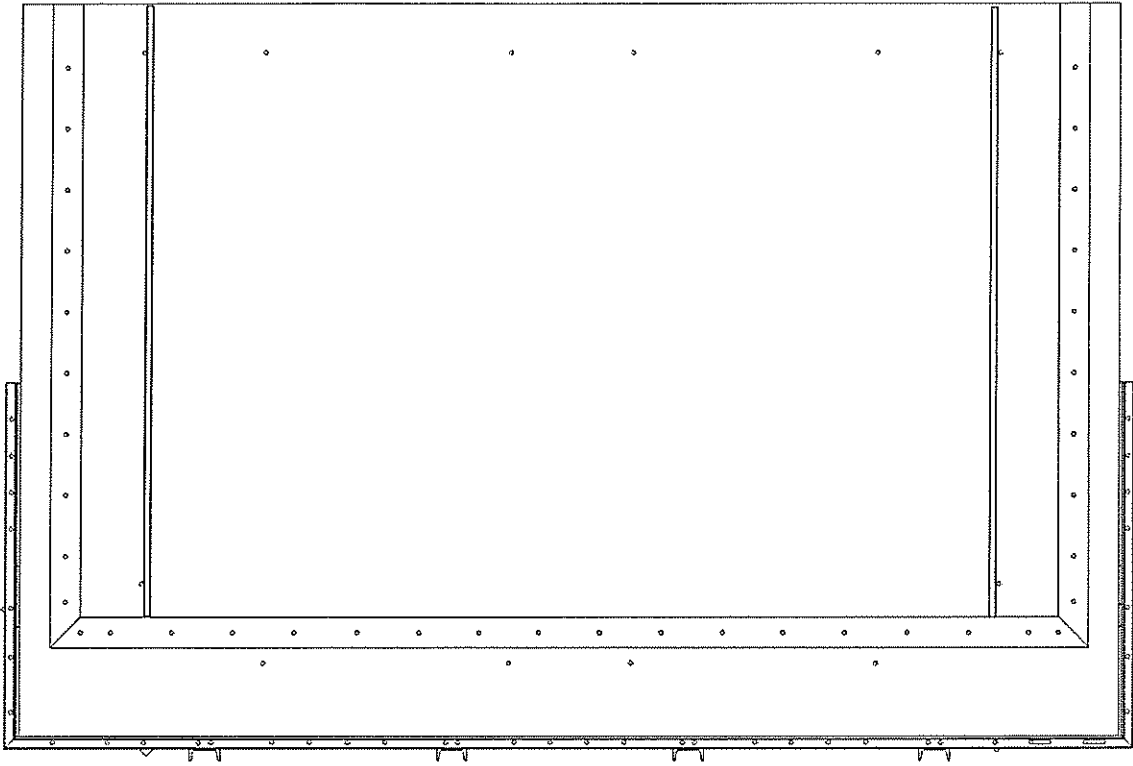
รูปที่ 3.3 แสดงภาพด้านหน้าของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัวที่แสดงองค์ประกอบและตำแหน่งของสองส่วนหลักคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนที่ใช้สำหรับทดสอบ ประกอบด้วยแผ่นอะคลิลิกด้านหลังที่เจาะรูไว้เพื่อทำหน้าที่สูบน้ำออก ประกบกับยางทั้งด้านข้างและด้านล่าง นำคานเหล็กมาประกบเข้ากับแผ่นอะคลิลิกด้านหน้าตามตำแหน่งที่เจาะรูไว้ด้วยวงแหวนรองน็อตและน็อต ส่วนที่สองคือส่วนของฐาน ประกอบด้วยเหล็กด้านข้างประกบกับเหล็กด้านล่างด้วยตัวยึดแผ่นเหล็กจับชุดทดสอบรูปฉากและแผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับยึดชุดทดสอบ จากนั้นนำเหล็กฉากยึด โครงกับขาตั้งประกบกับส่วนของขาตั้งและเหล็กยึดโครงด้วยวงแหวนรองน็อตและน็อต

รูปที่ 3.4 แสดงภาพตัดขวางด้านหน้าของ โครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัวที่แสดงตำแหน่งของ โครงเหล็ก และตะแกรงลวดทองเหลือง และตำแหน่งของชิ้นส่วนต่างๆ จากภาพตัดขวางด้านหน้าที่ได้ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว

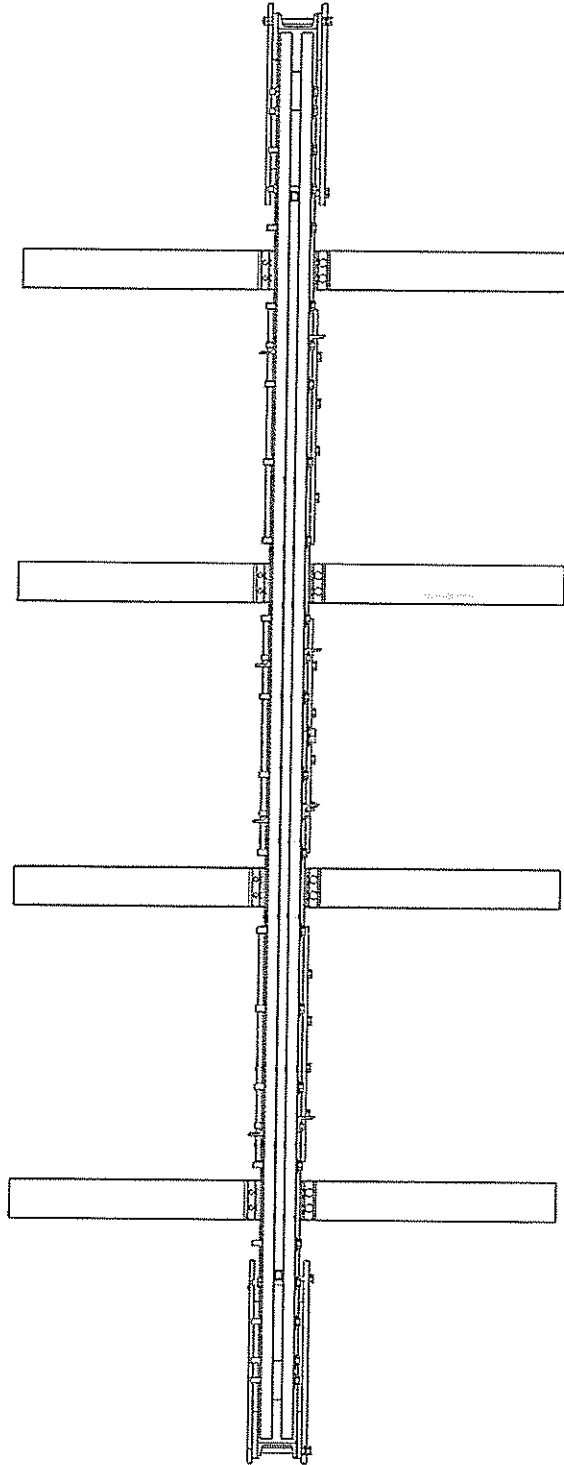
รูปที่ 3.5 แสดงภาพตัดขวางด้านบนของ โครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัวที่แสดงตำแหน่งของชุดทดสอบในขณะที่อยู่ในส่วนของฐานด้านบน



รูปที่ 3.3 ภาพด้านหน้าของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตาม
การละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางด้านหน้าของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตาม
การละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว



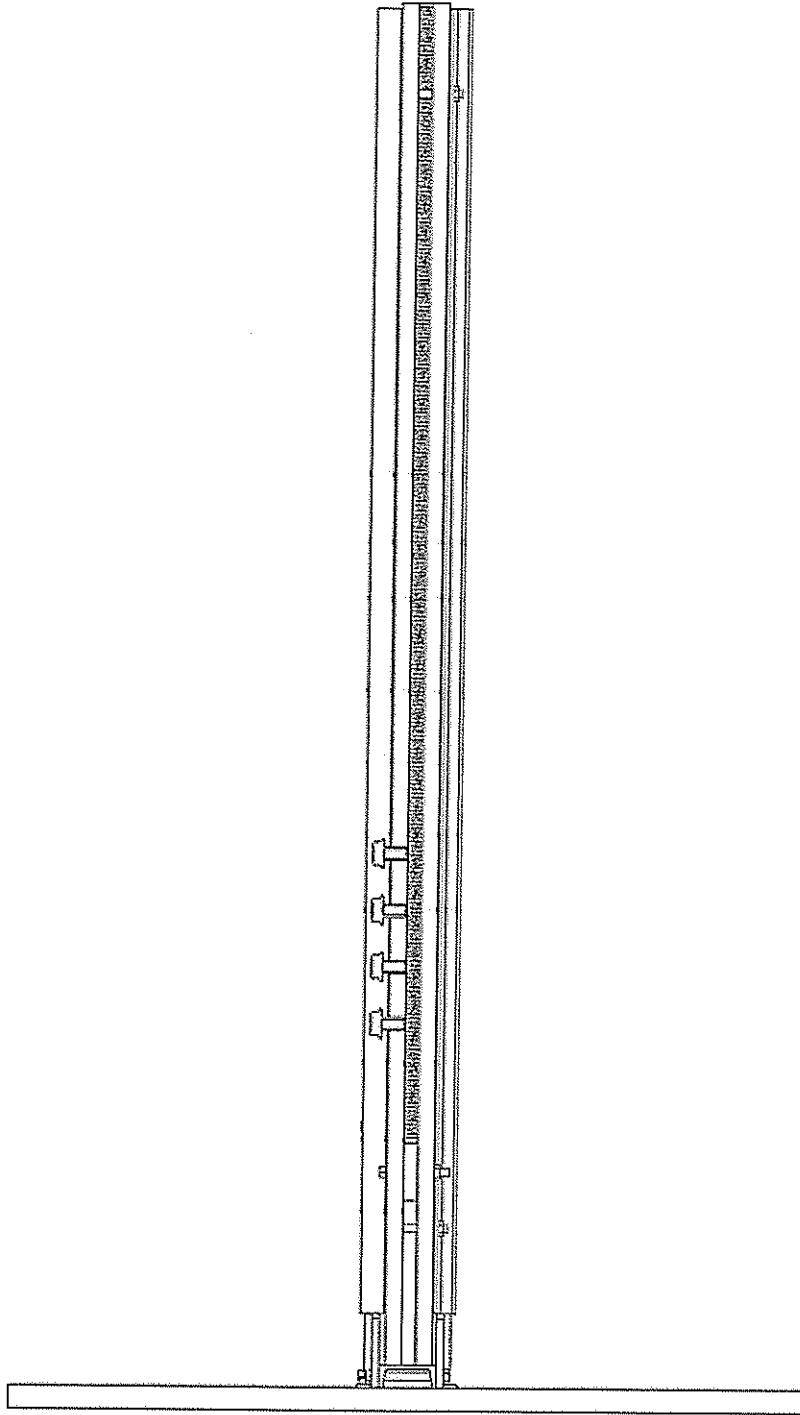
รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางด้านบนของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตาม
การละลายและสังเกตการณ์การหลุดตัว

รูปที่ 3.6 แสดงภาพตัดขวางด้านข้างของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัวที่แสดงตำแหน่งของชุดทดสอบในขณะที่อยู่ในส่วนของฐานทางด้านข้าง

ถึงประดิษฐ์นี้จึงสามารถจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อให้สามารถง่ายต่อการสังเกตการณ์และติดตามผลการทรุดตัวจากตัวแปรต่างๆ ที่ใกล้เคียงกับสภาวะความเป็นจริง และยังสามารถแก้ไขข้อบกพร่องของการทดสอบแบบเก่า ได้ดังนี้

1) โครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัวนี้ได้รับการออกแบบให้มีช่องทดสอบที่เล็กและบางเพื่อให้สามารถจำลองการละลายในสองมิติได้อย่างแท้จริง โดยได้ทำการจำลองชั้นเกลือหินที่คล้ายคลึงกับสภาวะความเป็นจริง อีกทั้งยังสอดคล้องกับความเป็นจริงมากขึ้นอีกด้วย

2) โครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัวนี้สามารถรับแรงดันน้ำปริมาณสูงได้ และสามารถจำลองลักษณะการไหลของชั้นน้ำบาดาลได้ ทำให้สามารถจำลองการละลายของชั้นเกลือในสองมิติได้อย่างแท้จริง และยังสามารถจำลองการสูบน้ำจากบ่อบาดาลที่มีปลายท่ออยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถผันแปรความลึกในระดับต่างๆ ได้ และสามารถผันแปรอัตราการสูบน้ำที่ต่างกันก็ได้



รูปที่ 3.6 ภาพตัดขวางด้านข้างของโครงจำลองทางกายภาพในสองมิติเพื่อติดตามการละลายและสังเกตการณ์การทรุดตัว

บทที่ 4

การทดสอบ

4.1 วัตถุประสงค์

การทดสอบการละลายของชั้นเกลือหินด้วยแบบจำลองทางกายภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวของผิวดินซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสถานะจริงในภาคสนาม โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัวประกอบด้วย

- 1) ระดับความลึกของชั้นน้ำบาดาล
- 2) อัตราการไหลและแรงดันของน้ำบาดาล
- 3) ทิศทางการไหลของแหล่งน้ำที่ใช้ในการละลายชั้นเกลือ
- 4) อัตราการสูบน้ำเค็ม
- 5) ตำแหน่งและจำนวนของบ่อสูบ
- 6) ความหนาและความลึกของชั้นหินปิดทับ

4.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการละลายของชั้นเกลือหินด้วยแบบจำลองทางกายภาพมีรูปแบบการทดสอบ 4 รูปแบบ ได้แก่

1) การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากผลกระทบของตำแหน่งการสูบน้ำบาดาลที่แตกต่างกัน โดยเปลี่ยนตำแหน่งของท่อสูบน้ำบาดาลในระดับที่ต้องการศึกษา ซึ่งจะแบ่งวิธีการสูบน้ำบาดาลออกเป็น 2 วิธี คือ การสูบบนตอเนื่องและการสูบบนไม่ตอเนื่อง โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ในการทดสอบมีค่าคงที่

2) การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับที่แตกต่างกัน โดยเปลี่ยนความหนาของชั้นหินปิดทับให้แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 11 เซนติเมตร 25 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ในการทดสอบมีค่าคงที่

3) การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากผลกระทบของระดับความลึกของชั้นน้ำบาดาลที่แตกต่างกัน การทดสอบนี้เน้นที่ระดับของน้ำบาดาลเป็นหลัก ซึ่งทำการทดสอบโดยเปลี่ยนระดับของน้ำบาดาลให้มีระดับที่แตกต่างกัน คือ 6 เซนติเมตร 12.5 เซนติเมตร และ 18 เซนติเมตร (วัดจากชั้นบนสุดของชั้นเกลือหิน) โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ในการทดสอบมีค่าคงที่

4) การทดสอบหาค่าการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากผลกระทบจากอัตราการสูบน้ำบาดาลที่ต่างกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการสูบน้ำบาดาล คือ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ในการทดสอบมีค่าคงที่

4.2.1 ขั้นตอนเตรียมการทดสอบ

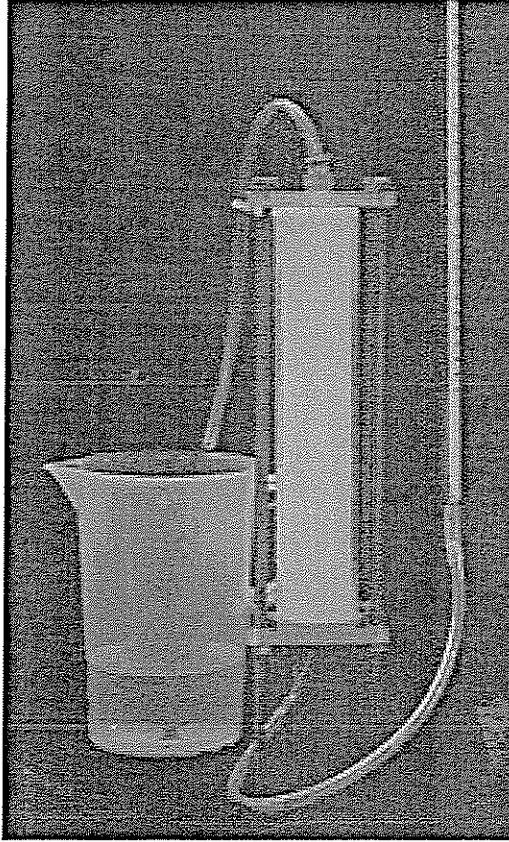
การทดสอบการละลายของชั้นเกลือหินด้วยแบบจำลองทางกายภาพจำเป็นต้องจัดเตรียมวัสดุสำหรับใช้จำลองชั้นหินปิดทับและชั้นเกลือหิน โดยที่ชั้นเกลือหินจะใช้เกลือบริสุทธิ์ละเอียด และชั้นหินปิดทับจะใช้ทรายที่มีการคัดขนาด สำหรับเกลือที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้มาจากบริษัท เกลือพิมาย จำกัด ซึ่งเป็นเกลือที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ เหตุผลที่ผู้วิจัยเลือกใช้เกลือชนิดนี้เนื่องจากมีขนาดเม็ดเล็ก (0.02 มิลลิเมตร) ซึ่งเป็นขนาดที่ละเอียดพอที่จะสามารถอัดให้แน่นจนมีค่าความซึมผ่านต่ำเพื่อให้สามารถจำลองชั้นเกลือหินได้ใกล้เคียงกับสถานะจริงในสนาม อีกทั้งเกลือชนิดนี้เป็นชนิดที่ไม่ได้ผสมไอโอดีนเข้าไปจึงเหมาะสำหรับใช้จำลองชั้นเกลือหิน เนื่องจากสารไอโอดีนอาจจะส่งผลกระทบต่อ การละลายของเกลือหรือความเข้มข้นของน้ำเกลือที่อาจจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อเทียบกับน้ำเกลือที่ละลายจากเกลือบริสุทธิ์

ในการจำลองชั้นหินปิดทับจะใช้ทรายคัดขนาดซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไป โดยทรายชนิดนี้นิยมใช้สำหรับตกแต่งเขียนเจด และที่เข็ญบุรีในโรงแรม ทรายชนิดนี้จะมีการคัดขนาดมาอย่างดี มีให้เลือกหลายขนาดและหลายสีขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน โดยที่ทรายจะมีสีตั้งต้นเป็นสีขาวซึ่งได้มาจากการนำหินทรายมาโม่และคัดขนาดตามเบอร์ของตะแกรงมาตรฐาน จากนั้นจึงย้อมสีทรายด้วยสีที่ไม่ละลายน้ำ ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ทรายที่มีขนาด 0.8 มิลลิเมตร ส่วนสีที่เลือกใช้คือสีขาวและสีเขียว

4.2.2 การทดสอบหาค่าความซึมผ่าน

ค่าความซึมผ่านของชั้นหินปิดทับสามารถหาได้ด้วยการตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำผ่านกระบอกทดสอบที่ใส่ตัวอย่างทรายคัดขนาดสำหรับใช้ในแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยควบคุมความดันให้คงที่ตลอดการทดสอบ

การตรวจวัดจะเริ่มต้นด้วยการปล่อยน้ำเข้าจากทางด้านล่างของกระบอกทดสอบ และปล่อยให้ไหลออกทางด้านบน โดยปรับแรงดันของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกให้คงที่ตลอดเวลา จากนั้นทำการวัดค่าอัตราการไหลที่ออกมาทางด้านบนของกระบอกทดสอบ ในขั้นตอนนี้สามารถคำนวณอัตราการไหล (Q) โดยใช้หน่วยเป็น cc/min จากนั้นหาระดับความสูงของน้ำ (H) โดยการวัดระยะห่างของระดับน้ำด้านบนถึงระดับน้ำด้านล่างของกระบอกทดสอบ ซึ่งสามารถวัดระดับความสูงของน้ำได้เท่ากับ 70 cm ส่วนกระบอกที่ใช้ในการทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) เท่ากับ 5 cm ความยาว (L) เท่ากับ 30 cm จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าอัตราความซึมผ่านจากสมการที่ (4.1) โดยพื้นที่หน้าตัด (A) กับค่า hydraulic gradient (i) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.2) และ (4.3) ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของทรายคัดขนาดมีค่าเท่ากับ 0.11 cm/min และค่าอัตราการไหลที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 5.2 cc/min



รูปที่ 4.1 วิธีการทดสอบการหาค่าความซึมผ่านของทรายคัดขนาดสำหรับใช้จำลองชั้นหินปิดทับ

$$Q = kAi \quad (4.1)$$

$$i = H/L \quad (4.2)$$

$$A = \pi d^2/4 \quad (4.3)$$

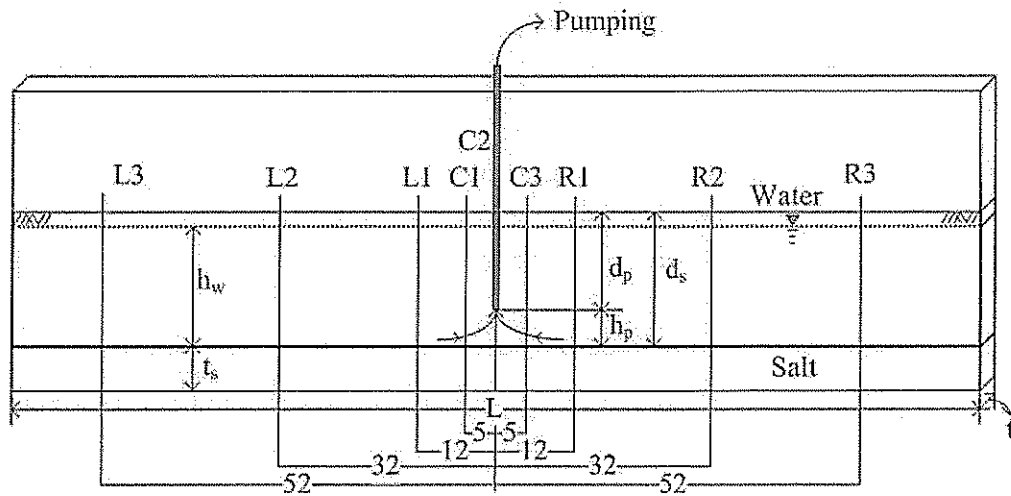
ค่าความซึมผ่านในชั้นเกลือหินที่จำลองโดยใช้เกลือบริสุทธิ์ละเอียดนั้นจะถูกอัดจนแน่น เพื่อให้มีค่าความซึมผ่านน้อยที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับสภาวะจริงในภาคสนาม เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ ชั้นหินปิดทับหรือชั้นของทรายที่ค้ำขนาด รวมไปถึงปริมาณการสูบน้ำบาดาลซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ ในการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ชั้นเกลือหินที่เกิดจากการอัดเกลือบริสุทธิ์ไม่มีค่าความซึมผ่าน

4.3 ขั้นตอนการทดสอบ

วิธีการทดสอบได้ถูกแบ่งออกเป็น 4 ชุด ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.3.1 ชุดการทดสอบที่ 1 การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบจากการสูบน้ำบาดาลเต็มที่ตำแหน่งต่างกัน

- (1) ตัวแปรคงที่ในชุดการทดสอบนี้ คือ ทิศทางการไหลของน้ำจืด ความหนาของชั้นเกลือหิน (t_g) เท่ากับ 12.5, 11.0 และ 10.5 เซนติเมตร ความหนาของชั้นหินปิดทับ (d_s) เท่ากับ 25 เซนติเมตร ความสูงของระดับน้ำบาดาล (h_w) เท่ากับ 24 เซนติเมตร และอัตราการสูบน้ำบาดาล (Q) เท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1
- (2) ตัวแปรที่ต้องผันแปรในชุดการทดสอบนี้คือ ระยะห่างจากปลายท่อสูบน้ำไปถึงผิวเกลือ (h_p) ตั้งแต่ 0.5 ถึง 3.5 เซนติเมตร ดังตารางที่ 4.1
- (3) ทำเครื่องหมายความหนาของชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับจากความหนาของชั้นเกลือที่ได้กำหนดไว้ในข้อที่ (1)
- (4) บรรจุเกลือบริสุทธิ์ลงในโครงทดสอบ และปรับระดับตามที่กำหนดไว้ จากนั้นอัดให้แน่น
- (5) บรรจุทรายค้ำขนาดย่อมสไลงไปในโครงทดสอบหนาประมาณ 1-2 เซนติเมตร เพื่อแสดงความแตกต่างระหว่างชั้นเกลือหินและชั้นทราย
- (6) บรรจุทรายค้ำขนาดสไลวลงไปได้ความหนาของชั้นหินปิดทับตามที่กำหนด และอัดให้แน่น



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของท่อสูบน้ำและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้สำหรับตรวจวัดค่าการทรุดตัวของดิน โดยมีทิศทางการไหลของน้ำจืดมาจากทางด้านบนของแบบจำลอง

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรต่างๆ ที่มีการผันแปรในแต่ละชุดการทดสอบ

รูปแบบการทดสอบ	ค่าตัวแปรต่างๆ ที่มีการผันแปรในการทดสอบ							
	วิธีการสูบลบ	h_s (cm)	d_s (cm)	h_w (cm)	t_s (cm)	อัตราการสูบลบ น้ำบาดาล (cc./min)	แหล่งน้ำจืด	
(ชุดที่ 1) ตำแหน่งท่อสูบลบ น้ำบาดาลเค็ม	สูบลบเป็นช่วงๆ	0.56	11	10	12.5	100	จากบ่อน้ำเค็ม	
		2.5			10.5			
		3.5			9.5			
	สูบลบแบบต่อเนื่อง	0.5	25	24	12.5			
		2			11			
		3.5			9.5			
(ชุดที่ 2) ความหนา ของชั้นหินปิดทับ	สูบลบแบบต่อเนื่อง	2	11	10	11	100	จากบ่อน้ำเค็ม	
			25	24				
			50	54				
(ชุดที่ 3) ระดับของน้ำ บาดาล	สูบลบแบบต่อเนื่อง	2	25	6	11	100		จากบ่อน้ำเค็ม
				12.5				
				18				
				6	(new)	100		
				12.5				
				12.5				
				18				
				18	(new)	100		
				12.5	r_a (2")			
				12.5	r_a (6")			
(ชุดที่ 4) อัตราการ สูบลบน้ำบาดาลเค็ม	สูบลบแบบต่อเนื่อง	2	11	10	11	20	บ่อน้ำเค็ม	
						100		

d_s = ความหนาของชั้นหินปิดทับ h_p = ระยะห่างจากปลายท่อไปจนถึงผิวเกลือ h_w = ความสูงของน้ำบาดาล
 new = การทำบ่อสูบลบใหม่ r_s = ขนาดความกว้างของแหล่งน้ำจืด h_s = ความสูงจากท่อถึงผิวเกลือ

- (7) เหน้ํานํ้าเกลืออํมตัวลงไปในโครงทดสอบ ให้ระดับนํ้าเกลืออํมตัวเท่ากับผิวบนของชั้นหินปิดทับ ทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้ชั้นทรายและชั้นเกลือบริสุทธิ์ที่จําลองไว้ยึดตัวกันในสภาวะที่มีนํ้าไหลผ่านตามธรรมชาติ
- (8) สูบนํ้าเกลือในระดับความสูงและอัตราที่กำหนดไว้ พร้อมทั้งเติมนํ้าจืดลงบนผิวชั้นหินปิดทับ จากนั้นควบคุมระดับนํ้าให้คงที่ตลอดเวลาในระดับที่กำหนดไว้ (ตามความสูงของระดับนํ้าบาดาล)
- (9) เมื่อสูบนํ้าเกลือได้ปริมาณ 2 ลิตร ให้ทำการเก็บตัวอย่างนํ้าเกลือ 20-30 มิลลิลิตร จากนั้นทำการวัดค่าการทรุดตัว ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้ดังรูปที่ 4.2 ทำตามขั้นตอนนี้จนกระทั่งสูบนํ้าเกลือได้ 120-130 ลิตร

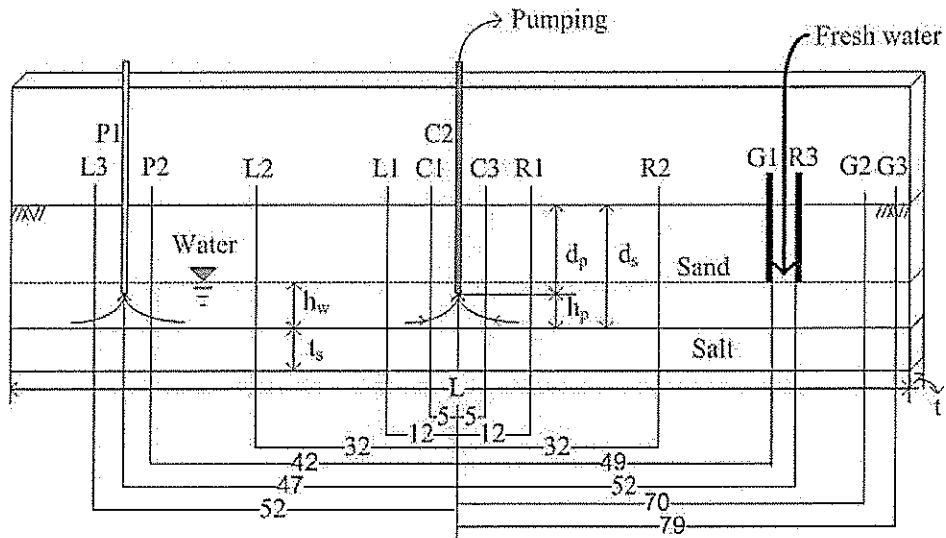
4.3.2 ชุดการทดสอบที่ 2 การทดสอบผลกระทบของชั้นหินปิดทับที่มีความหนาต่างกัน

- (1) ตัวแปรคงที่ในชุดการทดสอบนี้ คือ ทิศทางการไหลของนํ้าจืด ความหนาของชั้นเกลือหิน (t_g) เท่ากับ 11 เซนติเมตร ระยะห่างจากปลายท่อสูบนํ้าไปถึงผิวเกลือ (h_p) เท่ากับ 2 เซนติเมตร และอัตราการสูบนํ้าบาดาล (Q) เท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยตารางที่ 4.1 สรุปค่าตัวแปรคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ
- (2) กำหนดตัวแปรที่ต้องผันแปรในชุดการทดสอบนี้ คือ ความหนาของชั้นหินปิดทับ (d_r) เท่ากับ 11, 25 และ 50 เซนติเมตร และความสูงของระดับนํ้าบาดาล (h_w) เท่ากับ 10, 24 และ 54 เซนติเมตร
- (3) ทำเครื่องหมายความหนาของชั้นเกลือหินและชั้นหินปิดทับจากความหนาของชั้นเกลือที่ได้กำหนดไว้ในข้อที่ (1)
- (4) บรรจุเกลือบริสุทธิ์ลงในโครงทดสอบ ปรับระดับตามที่กำหนดไว้และอัดให้แน่น
- (5) บรรจุทรายคัดขนาดย้อมสีลงไปในโครงทดสอบหนาประมาณ 1-2 เซนติเมตร เพื่อแสดงความแตกต่างระหว่างชั้นเกลือหินและชั้นทราย
- (6) บรรจุทรายคัดขนาดสีขาวลงไปให้ได้ความหนาของชั้นหินปิดทับตามที่กำหนดไว้แล้วอัดให้แน่น
- (7) เหน้ํานํ้าเกลืออํมตัวลงไปในโครงทดสอบ ให้ระดับนํ้าเกลืออํมตัวเท่ากับผิวบนของชั้นหินปิดทับ ทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้ชั้นทรายและชั้นเกลือบริสุทธิ์ที่จําลองไว้ยึดตัวกันในสภาวะที่มีนํ้าไหลผ่านตามธรรมชาติ
- (8) สูบนํ้าเกลือในระดับความสูงและอัตราที่กำหนดไว้ พร้อมทั้งเติมนํ้าจืดลงบนผิวชั้นหินปิดทับ และควบคุมระดับนํ้าตามความสูงของระดับนํ้าบาดาล

- (9) เมื่อสูบน้ำเกลือได้ปริมาณ 2 ลิตร ให้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเกลือ 20-30 มิลลิลิตร จากนั้นทำการวัดค่าการทรุดตัว ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้ดังรูปที่ 4.2 ทำตามขั้นตอนนี้จนกระทั่งสูบน้ำเกลือได้ 120-130 ลิตร

4.3.3 ชุดการทดสอบที่ 3 การทดสอบผลกระทบของระดับน้ำบาดาลที่มีระดับต่างกัน

- (1) ตัวแปรคงที่ในชุดการทดสอบนี้ คือ ความหนาของชั้นเกลือหิน (t_g) มีค่าเท่ากับ 11 เซนติเมตร ระยะห่างจากปลายท่อสูบน้ำไปถึงผิวเกลือ (h_p) เท่ากับ 2 เซนติเมตร และความหนาของชั้นหินปิดทับ (d_g) เท่ากับ 25 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยตารางที่ 4.1 สรุปค่าตัวแปรคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ
- (2) กำหนดตัวแปรที่ต้องผันแปรในชุดการทดสอบนี้ คือ ทิศทางการไหลของน้ำจืด โดยซึมเข้าจากทางด้านบนและไหลออกทางด้านข้าง อัตราการสูบน้ำบาดาลในแนวตั้งเท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการสูบน้ำบาดาลในแนวการไหลด้านข้างเท่ากับ 14, 24 และ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
- (3) ทำเครื่องหมายความหนาของชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับจากความหนาของชั้นเกลือที่ได้กำหนดไว้ในข้อที่ (1) ถ้าเป็นการไหลจากด้านข้างจะทำการประกอบช่องเติมน้ำไว้ก่อนในขั้นตอนการประกอบโครงทดสอบ
- (4) บรรจุเกลือบริสุทธิ์ลงในโครงทดสอบ ปรับระดับตามที่กำหนดไว้และอัดให้แน่น
- (5) บรรจุทรายคัดขนาดย่อมสีลงไปในโครงทดสอบหนาประมาณ 1-2 เซนติเมตร เพื่อแสดงความแตกต่างระหว่างชั้นเกลือหินและชั้นทราย
- (6) บรรจุทรายคัดขนาดสีขาวลงไปให้ได้ความหนาของชั้นหินปิดทับตามที่กำหนดและอัดให้แน่น
- (7) เทน้ำเกลืออิ่มตัวลงไปในโครงทดสอบ ให้ระดับน้ำเกลืออิ่มตัวเท่ากับผิวบนของชั้นหินปิดทับ ทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้ชั้นทรายและชั้นเกลือบริสุทธิ์ที่จำลองไว้อัดตัวกันในสถานะที่มีน้ำไหลผ่านตามธรรมชาติ
- (8) สูบน้ำเกลือในระดับความสูงและอัตราที่ได้กำหนดไว้ พร้อมทั้งเติมน้ำจืดลงบนผิวชั้นหินปิดทับ หากทดสอบแบบทิศทางการไหลมาจากด้านข้างให้เติมน้ำจืดในช่องเติมน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.3 และควบคุมระดับน้ำตามความสูงของระดับน้ำบาดาล
- (9) เมื่อสูบน้ำเกลือได้ปริมาณ 2 ลิตร ให้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเกลือ 20-30 มิลลิลิตร จากนั้นทำการวัดค่าการทรุดตัว ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้ดังรูปที่ 4.2 ทำตามขั้นตอนนี้จนกระทั่งสูบน้ำเกลือได้ 120-130 ลิตร



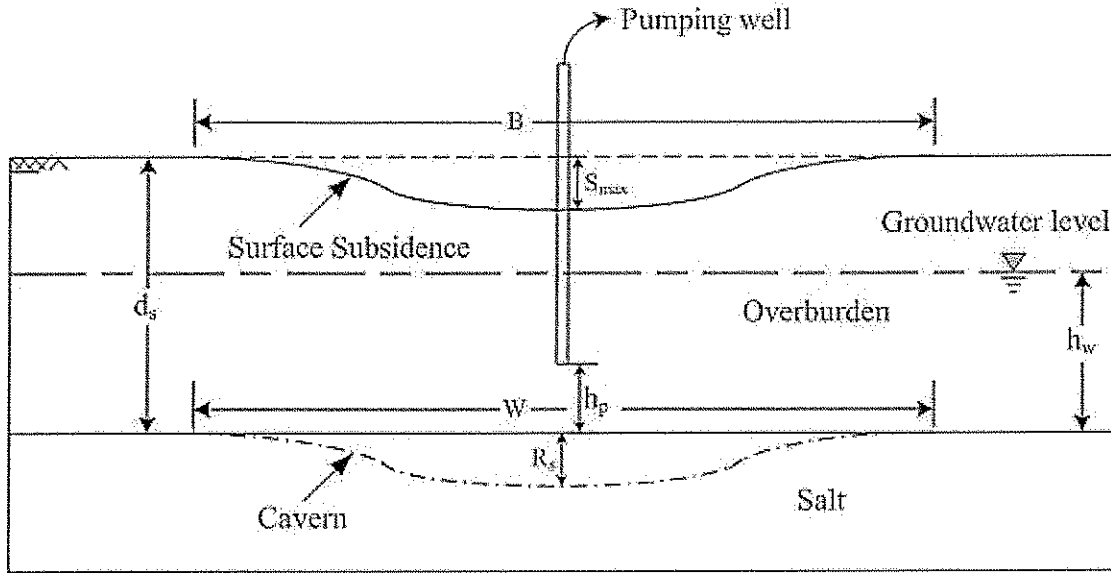
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของท่อสูบน้ำและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้สำหรับตรวจวัดค่าการทรุดตัวของดิน โดยมีทิศทางไหลของน้ำจืดมาจากทางด้านข้างของแบบจำลอง

4.3.4 ชุดการทดสอบที่ 4 การทดสอบผลกระทบของการสูบน้ำบาดาลเค็มในอัตราที่ต่างกัน

- (1) ตัวแปรคงที่ในชุดการทดสอบนี้ คือ ทิศทางการไหลของน้ำจืดไหลเข้าจากทางด้านบน ความหนาของชั้นเกลือหิน (t_e) เท่ากับ 11 เซนติเมตร ระยะห่างจากปลายท่อสูบน้ำถึงผิวเกลือ (h_p) เท่ากับ 2 เซนติเมตร และความหนาของชั้นหินปิดทับ (d) เท่ากับ 11 เซนติเมตร ความสูงของระดับน้ำบาดาล (h_w) เท่ากับ 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยตารางที่ 4.1 สรุปค่าตัวแปรคงที่ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ
- (2) กำหนดตัวแปรที่ต้องผันแปรในชุดการทดสอบนี้ คือ อัตราการสูบน้ำบาดาล (Q) เท่ากับ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
- (3) ทำเครื่องหมายความหนาของชั้นเกลือและชั้นหินปิดทับจากความหนาของชั้นเกลือที่ได้กำหนดไว้ในข้อที่ (1)
- (4) บรรจุเกลือบริสุทธิ์ลงในโครงทดสอบ ทำการปรับระดับตามที่กำหนดไว้และอัดให้แน่น
- (5) บรรจุทรายคัดขนาดข้อมสี่ลงไปในโครงทดสอบหนาประมาณ 1-2 เซนติเมตร เพื่อแสดงความแตกต่างระหว่างชั้นเกลือหินและชั้นทราย
- (6) บรรจุทรายคัดขนาดสีชาวลงไปให้ให้ความหนาของชั้นหินปิดทับตามที่กำหนดและอัดให้แน่น
- (7) เทน้ำเกลืออิ่มตัวลงไปในโครงทดสอบ ให้ระดับน้ำเกลืออิ่มตัวเท่ากับผิวบนของชั้นหินปิดทับ ทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้ชั้นทรายและชั้นเกลือบริสุทธิ์ที่จำลองไว้อัดตัวกันในสถานะที่มีน้ำไหลผ่านตามธรรมชาติ
- (8) สูบน้ำเกลือในระดับความสูงและอัตราที่ได้กำหนดไว้ พร้อมทั้งเติมน้ำจืดลงบนผิวชั้นหินปิดทับ หากทดสอบแบบทิศทางการไหลมาจากด้านข้างให้เติมน้ำจืดในช่องเติมน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.3 และควบคุมระดับน้ำตามความสูงของระดับน้ำบาดาล
- (9) เมื่อสูบน้ำเกลือได้ปริมาณ 2 ลิตร ให้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเกลือ 20-30 มิลลิลิตร จากนั้นทำการวัดการทรุดตัว ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้ดังรูปที่ 4.2 ทำตามขั้นตอนนี้จนกระทั่งสูบน้ำเกลือได้ 120-130 ลิตร

4.4 ผลการทดสอบ

ผลจากการจำลองรูปแบบทางกายภาพของการสูบน้ำในลักษณะต่างๆ ทำให้เกิดการทรุดตัวที่ต่างกัน โดยการทรุดตัวที่เกิดขึ้นนั้นสามารถตรวจวัดได้จากตำแหน่งต่างๆ ในแบบจำลองสำหรับการทดสอบด้วยการเติมน้ำในแนวตั้ง (รูปที่ 4.2) และการทดสอบด้วยการเติมน้ำในแนวราบด้านข้าง (รูปที่ 4.3) โดยที่องค์ประกอบในการทรุดตัวที่ใช้สำหรับสังเกตพฤติกรรมการทรุดตัวได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2 คือผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบในการทรุดตัวในแต่ละวิธีการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ เนื่องจากในแต่ละชุดการทดสอบได้ทำการผันแปรค่าตัวแปรต่างๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ผลการทดสอบที่ได้จึงมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการสังเกตการทรุดตัว

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจวัดค่าองค์ประกอบการทรุดตัวในแต่ละวิธีการทดสอบตามตัวแปรต่างๆ

ตัวแปรในการทดสอบ					ผลการทรุดตัว				
รูปแบบการทดสอบ	วิธีการสูบ	h_p (cm)	(cm)	แหล่งน้ำจืด	S_{max} (cm)	B (cm)	R_s (cm)	W (cm)	
(ชุดที่ 1) ตำแหน่งท่อสูบน้ำบาดาลเค็ม	สูบเป็นช่วงๆ	0.56	$d_s = 11$	จากชั้นดินเหนียว	4.03	60	4.03	60	
		2.5			3.17	70	3.17	70	
		3.5			2.76	100	2.76	100	
	สูบแบบต่อเนื่อง	0.5	$d_s = 25$		3.26	160	3.53	100	
		2			2.07		2.83		
		3.5			2.34		2.49		
(ชุดที่ 2) ความหนาของชั้นหินปิดทับ	สูบแบบต่อเนื่อง	2	$d_s = 11$	จากชั้นดินเหนียว	2.34	100	2.34	100	
			$d_s = 25$		0.44	160	2.59	100	
			$d_s = 50$		0.44	160	7.5	160	
(ชุดที่ 3) ระดับของน้ำบาดาล	สูบแบบต่อเนื่อง	2	$h_w = 6$		จากชั้นดินเหนียว	0.65	160	2.53	160
			$h_w = 12.5$			1.94		2.56	
			$h_w = 18$			2.1		2.61	
			$h_w = 6$	2.86		70	3.41	70	
			$h_w = 12.5$	2.86		3.61			
			(new) $h_w = 12.5$	5.52		100	5.83	120	
			$h_w = 18$	3.35	80	4.2	80		
			(new) $h_w = 18$	5.57	120	6.02	120		
			$r_a(2), h_w = 12.5$	6.49	80	6.63	80		
$r_a(6), h_w = 12.5$	3.12	4.24							
(ชุดที่ 4) อัตราการสูบน้ำบาดาลเค็ม	สูบแบบต่อเนื่อง	2	$d_s (11), Q=20$	จากชั้นดินเหนียว	0.35	160	1.18	160	
			$d_s (11), Q=100$		2.34	100	2.34	100	

d_s = ความหนาของชั้นหินปิดทับ h_p = ระยะห่างจากปลายท่อไปจนถึงผิวเกลือ h_w = ความสูงของน้ำบาดาล

S_{max} = การทรุดตัวของผิวดินที่มากที่สุด B = ขอบเขตของการทรุดตัว R_s = การทรุดตัวที่มากที่สุดของผิวเกลือ

W = ขอบเขตการทรุดตัวของผิวเกลือ new = การทำบ่อสูบใหม่ r_a = ขนาดความกว้างของแหล่งน้ำจืด

4.4.1 ผลการทดสอบผลกระทบของตำแหน่งในการสูบน้ำบาดาล

ผลการทดสอบการทรุดตัวที่เกิดจากผลกระทบของตำแหน่งของท่อสูบน้ำบาดาลสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

แบบที่ 1 การสูบน้ำบาดาลเต็มแบบต่อเนื่อง ผลที่ได้คือ ในกรณีที่ตำแหน่งของท่อสูบน้ำบาดาลอยู่ใกล้กับชั้นเกลือจะทำให้เกิดการทรุดตัวอย่างมากที่ตำแหน่งของท่อสูบน้ำบาดาลและบริเวณโดยรอบ แต่ในกรณีที่ตำแหน่งของท่อสูบน้ำบาดาลอยู่ห่างจากชั้นเกลือพอสมควรจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันทั่วทั้งแบบจำลอง และในกรณีที่ตำแหน่งท่อสูบน้ำบาดาลอยู่ห่างจากชั้นเกลือมากจะส่งผลให้การทรุดตัวบนผิวดินที่ตำแหน่งท่อสูบน้ำมีค่าน้อยมากซึ่งต่างจากบริเวณโดยรอบที่เกิดการทรุดตัวอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ขอบเขตของการทรุดตัวจะไม่ขึ้นกับตำแหน่งของท่อสูบน้ำบาดาลยังพบอีกว่าความเข้มข้นของน้ำบาดาลบริเวณท่อสูบน้ำที่อยู่ใกล้กับชั้นเกลือจะมีความเข้มข้นสูงและจะลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้นระหว่างท่อสูบน้ำกับชั้นเกลือ

แบบที่ 2 การสูบน้ำบาดาลเต็มเป็นช่วงๆ ผลที่ได้คือ ในช่วงเวลาที่ไม่ได้ทำการสูบน้ำบาดาลจะเกิดการทรุดตัวที่ผิวดินและมีระดับความเข้มข้นของน้ำเกลือสูงขึ้น ซึ่งระดับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากกว่ากรณีที่มีการสูบน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่อง ผลจากการตรวจวัดค่าการทรุดตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าการทรุดตัวจากแบบจำลองที่ระยะห่างของท่อสูบน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก รูปการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 และรูปการจำลองลักษณะการทรุดตัวที่เวลาต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 โดยค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดในแต่ละชุดการทดสอบที่เวลาต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.9

4.4.2 ผลการทดสอบหาผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับ

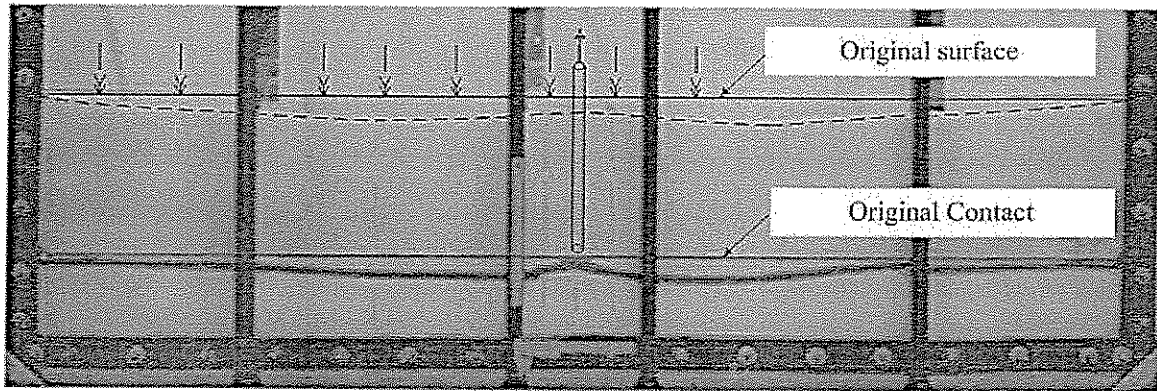
ผลการทดสอบการทรุดตัวที่เกิดจากผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับ ระบุว่า ถ้าชั้นหินปิดทับมีความหนามากจะส่งผลให้การทรุดตัวบนผิวดินมีค่าน้อย กล่าวคือ การทรุดตัวจะมีลักษณะแบนราบแต่จะส่งผลกระทบในวงกว้าง ในทางตรงกันข้ามถ้าชั้นหินปิดทับมีความหนาน้อยลงจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่ลึกและสูงขึ้นแต่มีการกระจายตัวน้อย ขนาดของการทรุดตัวจะขึ้นกับความหนาของชั้นหินปิดทับ ส่วนความเข้มข้นของน้ำเกลือจะแปรผันตามความหนา กล่าวคือ ถ้าชั้นหินปิดทับมีความหนามากขึ้น ความเข้มข้นจะน้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งคือ ความเข้มข้นจะสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการทรุดตัวบนผิวดิน ผลจากการตรวจวัดค่าการทรุดตัวได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าการทรุดตัวจริงจากแบบจำลองที่ระยะห่างจากท่อที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ก รูปการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 และรูปการจำลองลักษณะการทรุดตัวที่เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.11 โดยค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดในแต่ละชุดการทดสอบที่เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวของดินและผิวเกลือที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาโดยใช้วิธีการสูบน้ำอย่างต่อเนื่อง

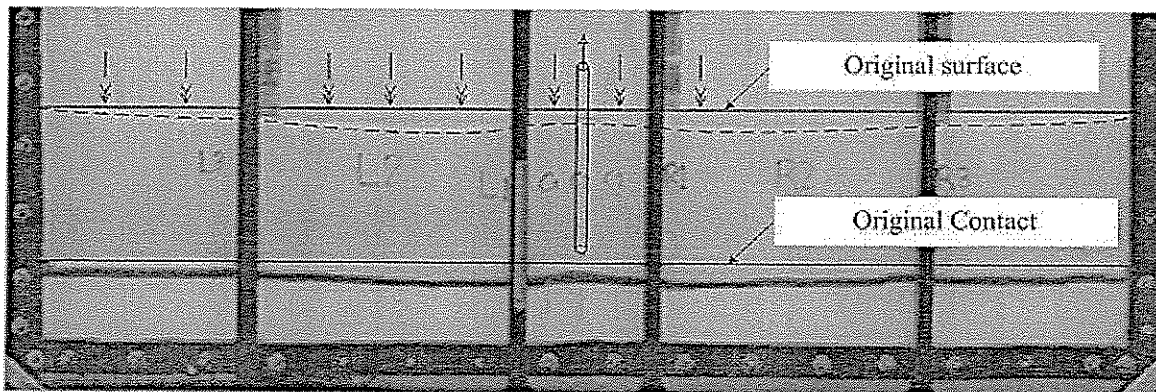
ผลการทดสอบผลกระทบของตำแหน่งที่สูบน้ำบาดาลเต็มจากแหล่งน้ำจืดทางด้านบน											
ความสูง (ชม.)	เวลา (ชั่วโมง)	การทรุด ตัว(มม.)	R3	R2	R1	C3	C2	C1	L1	L2	L3
0.5	10	ผิวดิน	8.62	11.93	14.88	9.16	0	9.12	14.29	13	8.78
		ผิวเกลือ	10.35	15.54	14.51	10.12	10.03	10.66	13.01	15.75	10.28
	20	ผิวดิน	23.23	30.23	36.48	28.59	11.22	23.45	37.45	32.58	23.07
		ผิวเกลือ	25.4	35.3	26.02	22.67	23.7	23.66	28.48	34.35	24.5
2	10	ผิวดิน	5.95	8.39	10.25	8.81	4.78	8.64	8.44	7.8	4.51
		ผิวเกลือ	8.89	11.85	11.84	12.01	9.79	11.87	13.07	13.58	8.20
	20	ผิวดิน	17.14	20.64	25.56	20.47	13.67	20.61	23.86	20.85	13.71
		ผิวเกลือ	21.27	27.33	22.48	22.3	21.3	22.65	24.34	29.32	17.84
3.5	10	ผิวดิน	5.82	8.53	4.86	1.14	3.8	0.94	3.62	3.89	5.17
		ผิวเกลือ	12.01	15.8	7.86	2.68	0	0.96	6.69	4.34	9.2
	20	ผิวดิน	18.49	27.97	15.49	13.26	12.59	11.9	14.02	24.9	17.24
		ผิวเกลือ	20.91	27.37	16.6	6.96	3.43	6.4	11.58	22.6	17.85

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวของพื้นผิวดินและผิวเกลือที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาโดยใช้วิธีการสูบน้ำเป็นช่วงๆ

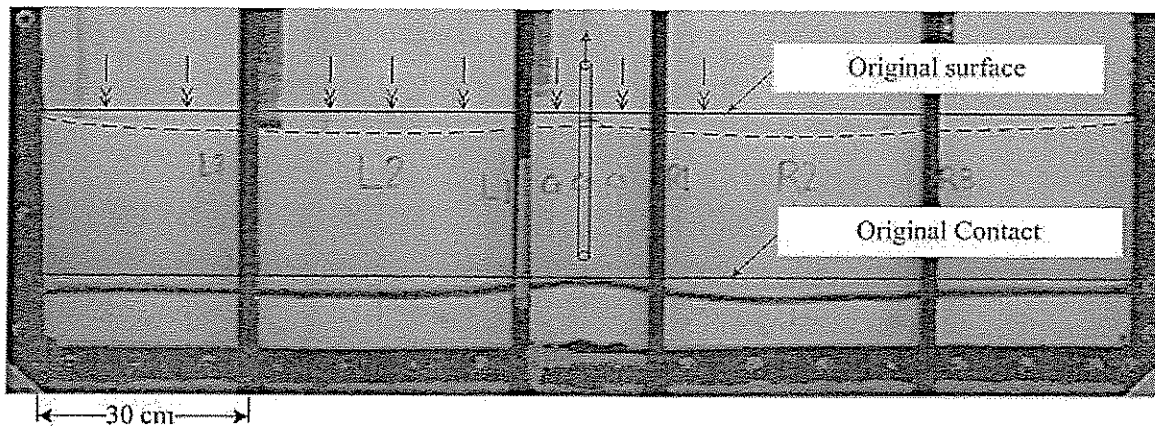
ผลการทดสอบผลกระทบของตำแหน่งท่อสูบน้ำบาดาลเค็มจากแหล่งน้ำจืดทางด้านบน											
ความสูง (ซม.)	เวลา (ชั่วโมง)	การทรุด ตัว(มม.)	R3	R2	R1	C3	C2	C1	L1	L2	L3
0.56	10	ผิวดิน	-	16	24.12	24.97	9.15	24.97	24.12	16	-
		ผิวเกลือ	-	16	24.12	24.97	9.15	24.97	24.12	16	-
	20	ผิวดิน	-	28.24	40.29	40.03	22.32	40.03	40.29	28.24	-
		ผิวเกลือ	-	28.24	40.29	40.03	22.32	40.03	40.29	28.24	-
2.5	10	ผิวดิน	-	17.23	21.37	18.33	9.48	18.33	21.37	17.23	-
		ผิวเกลือ	-	17.23	21.37	18.33	9.48	18.33	21.37	17.23	-
	20	ผิวดิน	-	24.95	31.73	29.84	18.72	29.84	31.73	24.95	-
		ผิวเกลือ	-	24.95	31.73	29.84	18.72	29.84	31.73	24.95	-
3.5	10	ผิวดิน	1.54	6.77	16.26	1.85	2.66	11.85	16.26	6.77	1.54
		ผิวเกลือ	1.54	6.77	16.26	1.85	2.66	11.85	16.26	6.77	1.54
	20	ผิวดิน	10.22	19.3	27.61	21.17	11.55	21.17	27.61	19.3	10.22
		ผิวเกลือ	10.22	19.3	27.61	21.17	11.55	21.17	27.61	19.3	10.22



(ก)



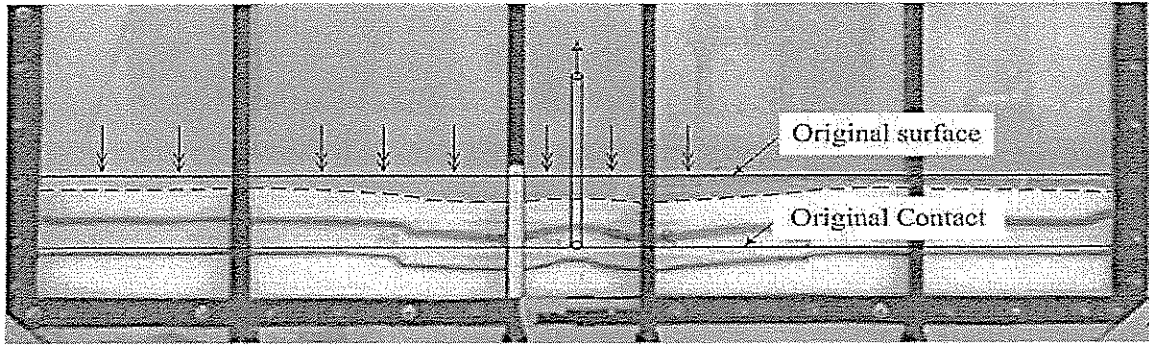
(ข)



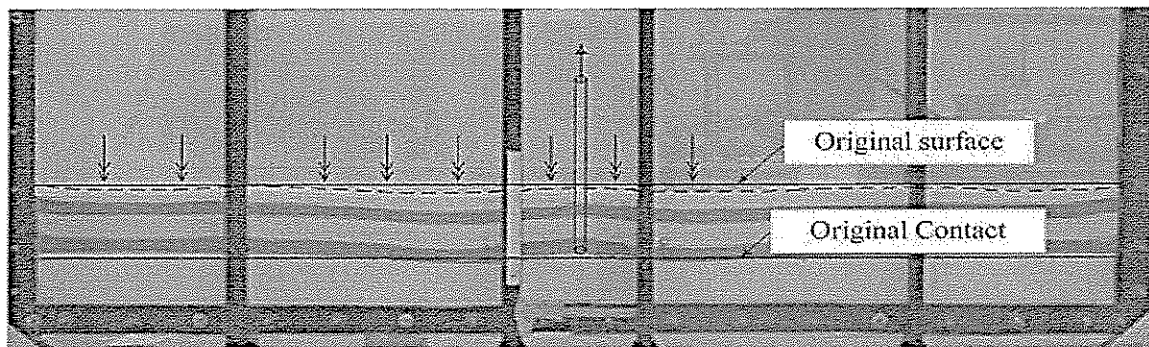
(ค)

รูปที่ 4.5 การจำลองสำหรับหาค่าการทรุดตัวของดินที่เกิดจากผลกระทบของระยะห่างระหว่างท่อสูบน้ำบาดาลเค็มกับชั้นเกลือจากการสูบน้ำอย่างต่อเนื่อง และมีความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม. อัตราการสูบน้ำบาดาลเค็มเท่ากับ 100 cc/min

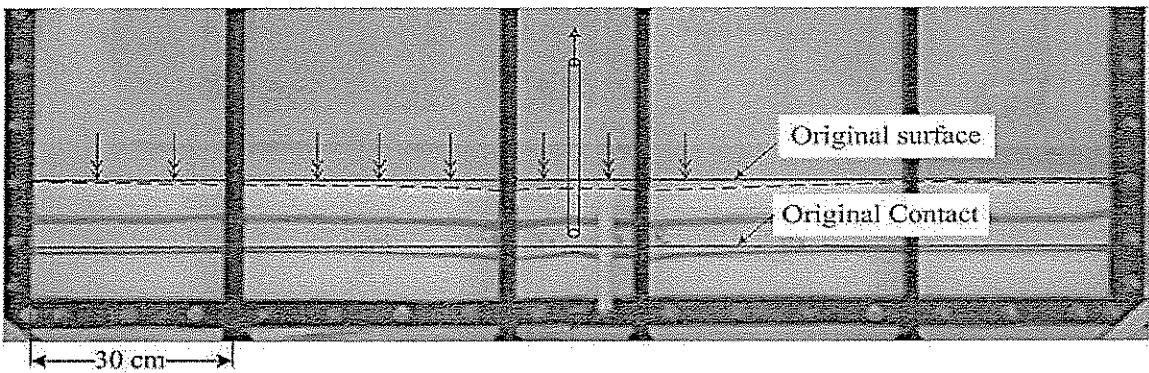
- (ก) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 0.5 ซม.
- (ข) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 2 ซม. และ
- (ค) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 3.5 ซม.



(ก)

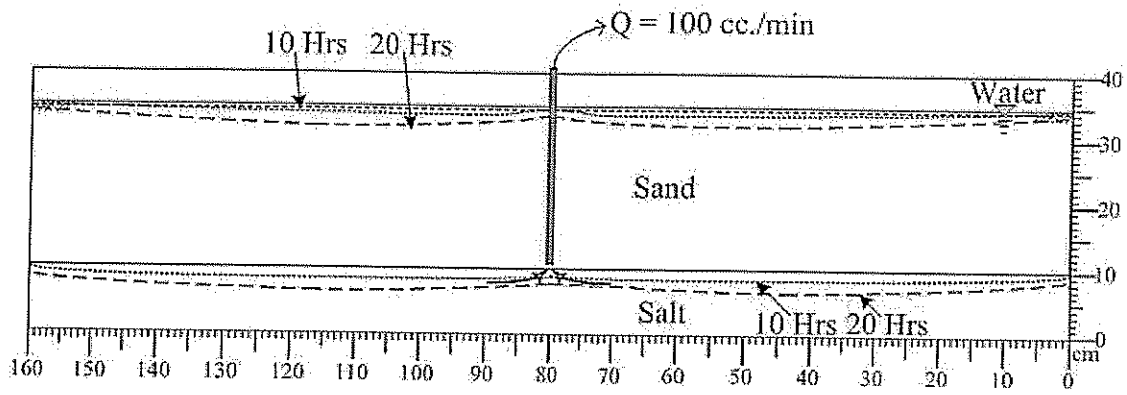


(ข)

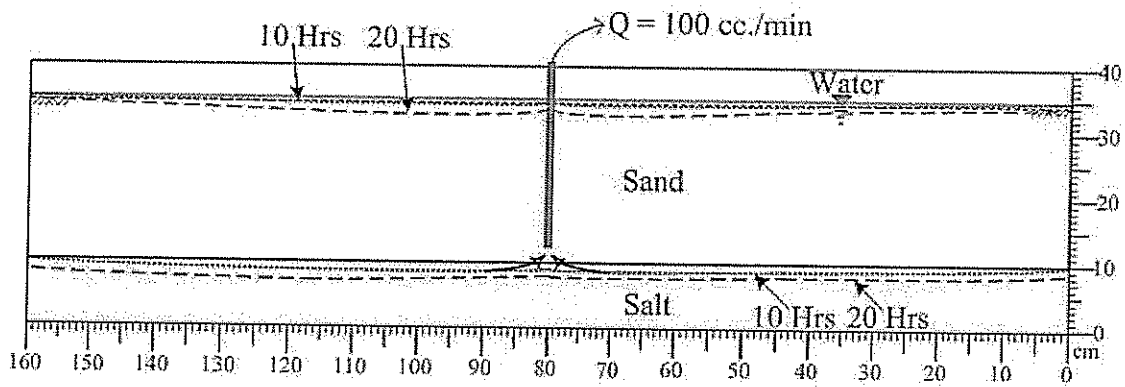


(ค)

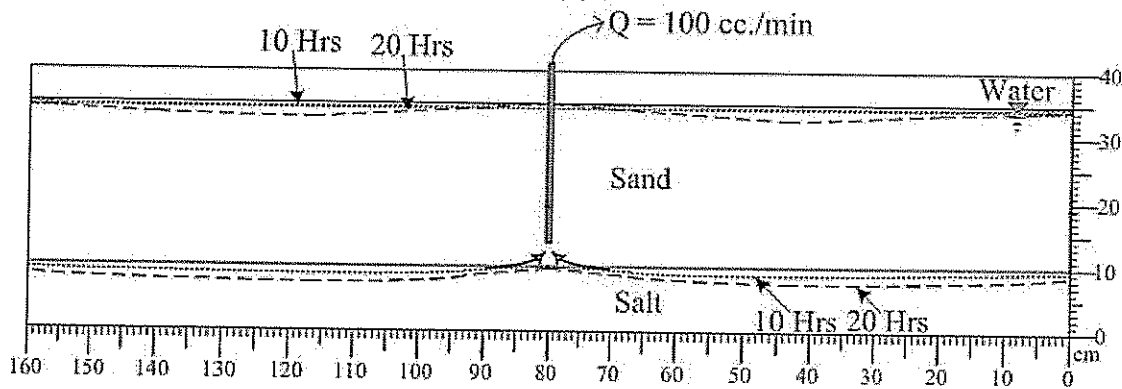
- รูปที่ 4.6 การจำลองสำหรับหาค่าการทรุดตัวของดินที่เกิดจากผลกระทบของระยะห่างระหว่างท่อสูบน้ำบาดาลเค็มกับชั้นเกลือจากการสูบน้ำเป็นช่วงๆ และมีความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 11 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc/min
- (ก) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 0.5 ซม.
- (ข) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 2.5 ซม. และ
- (ค) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 3.5 ซม.



(ก)



(ข)



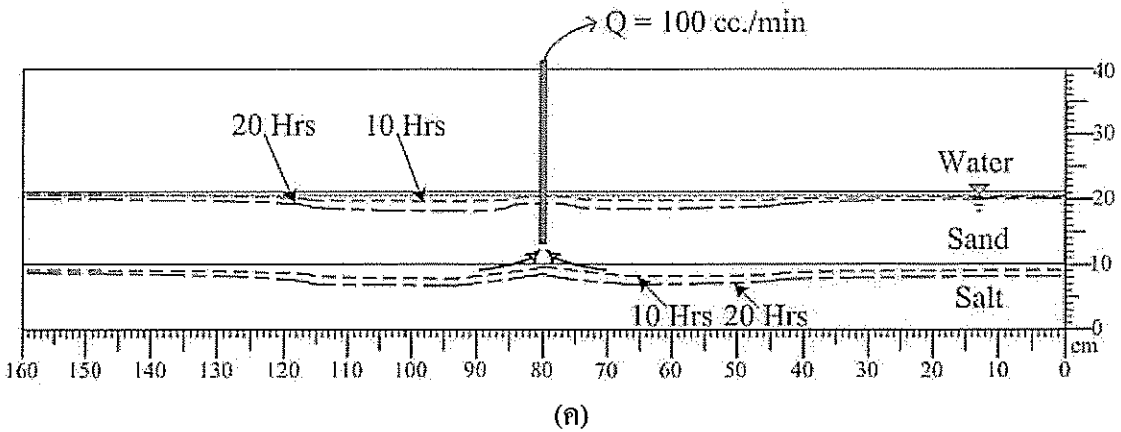
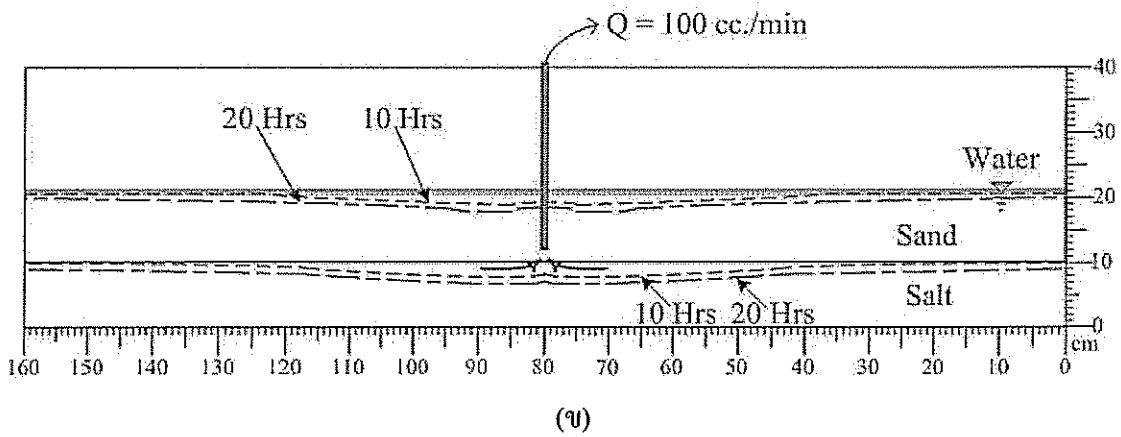
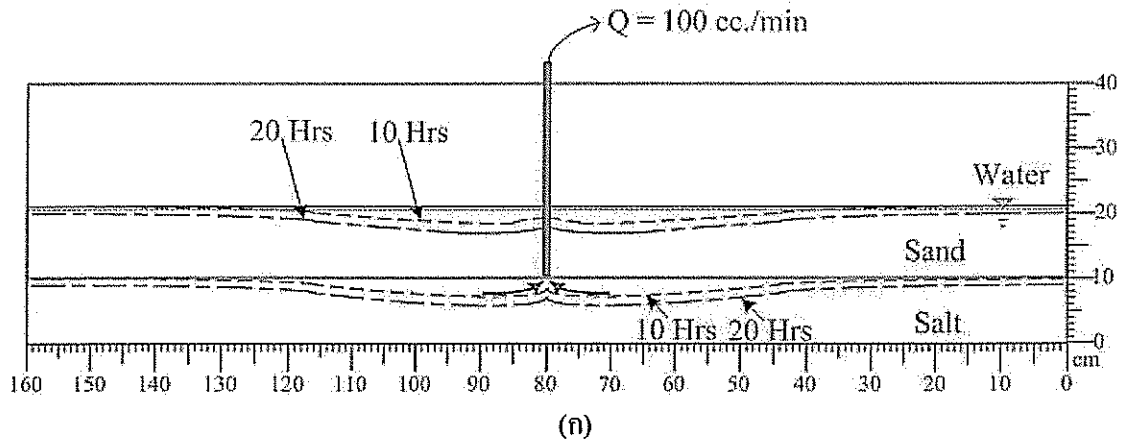
(ค)

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่มีการผันแปรระยะห่างระหว่างท่อสูบน้ำบาดาลเค็มกับชั้นเกลือจากการสูบน้ำอย่างต่อเนื่อง และมีความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc./min

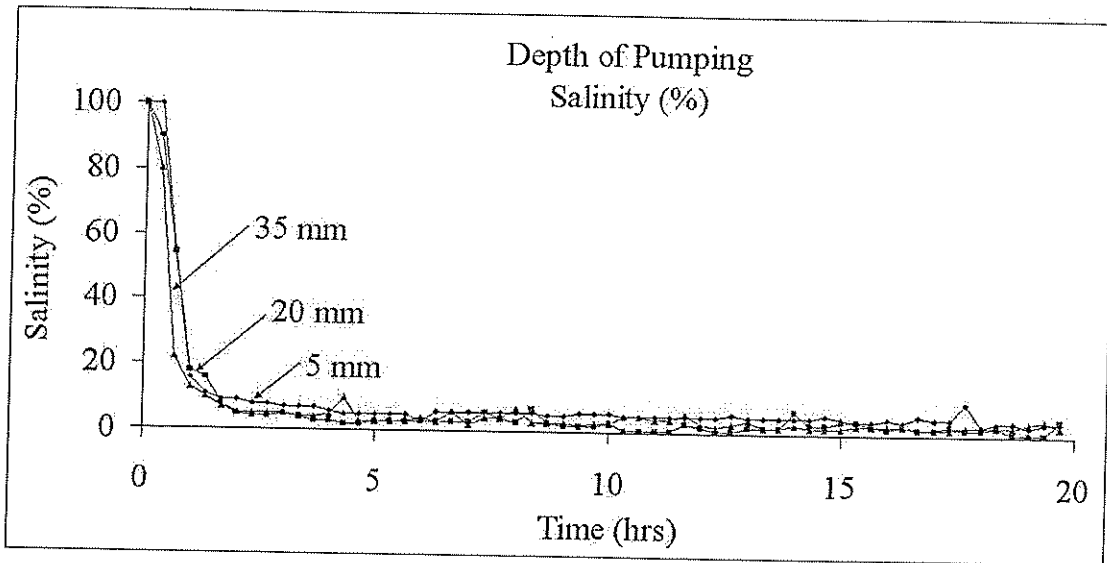
(ก) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 0.5 ซม.

(ข) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 2 ซม. และ

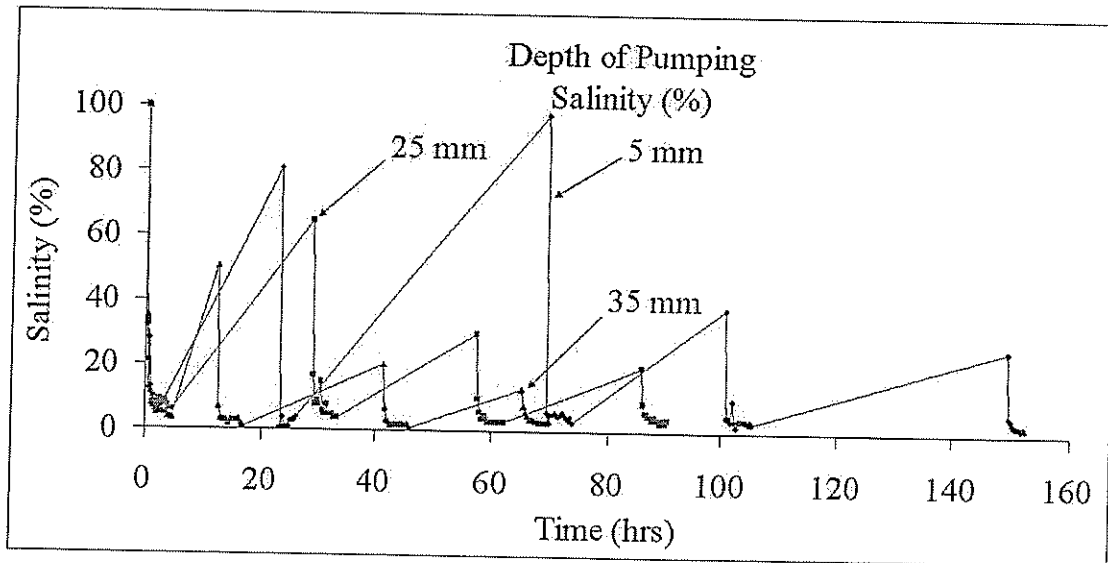
(ค) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 3.5 ซม.



- รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่มีการผันแปรระยะห่างระหว่างท่อสูบน้ำบาดาลเค็มกับชั้นเกลือจากการสูบน้ำอย่างต่อเนื่อง และมีความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 11 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc/min
- (ก) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 0.5 ซม.
- (ข) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 2.5 ซม. และ
- (ค) ท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 3.5 ซม.



(ก)



(ข)

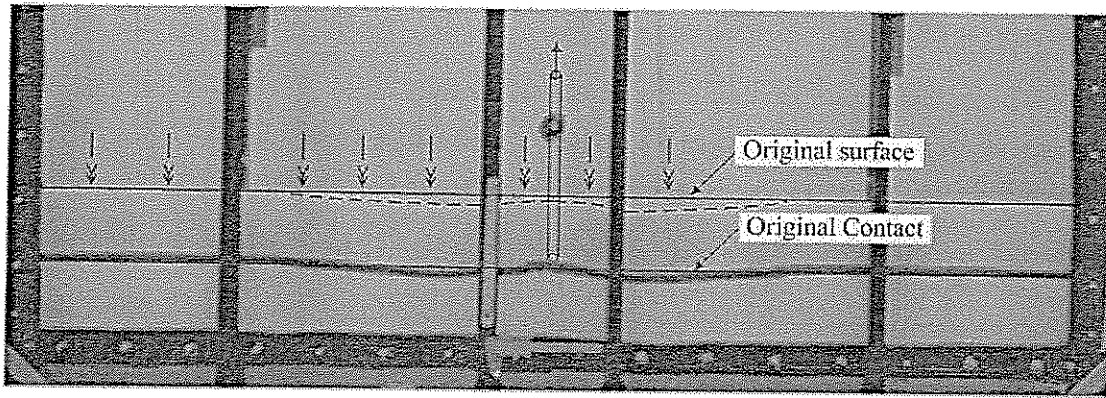
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเค็มที่ถูกสูบออกมาตามเวลาที่ระยะของตำแหน่งท่อแตกต่างกัน

(ก) ค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ตรวจวัดได้จากการสูบน้ำอย่างต่อเนื่อง และ

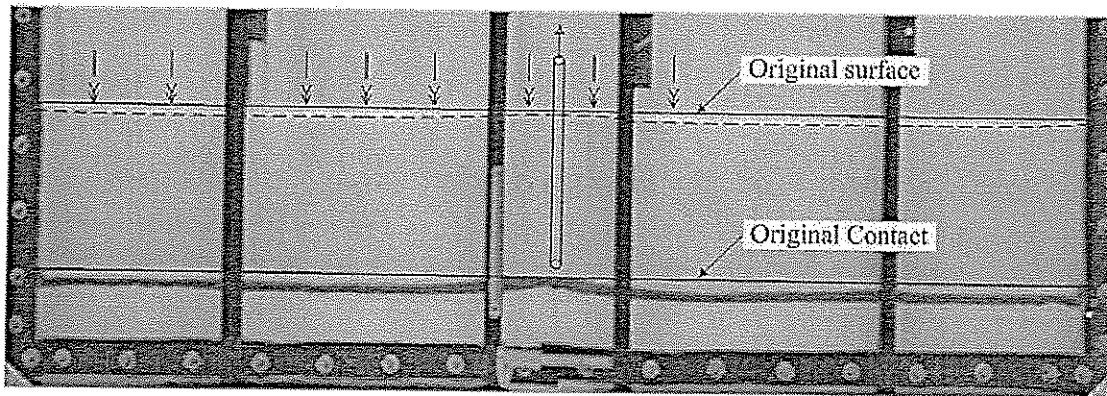
(ข) ค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ตรวจวัดได้จากการสูบน้ำเป็นช่วงๆ

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาโดยการผันแปรความหนาของชั้นหิน ปิดทับที่ขนาดต่างๆ

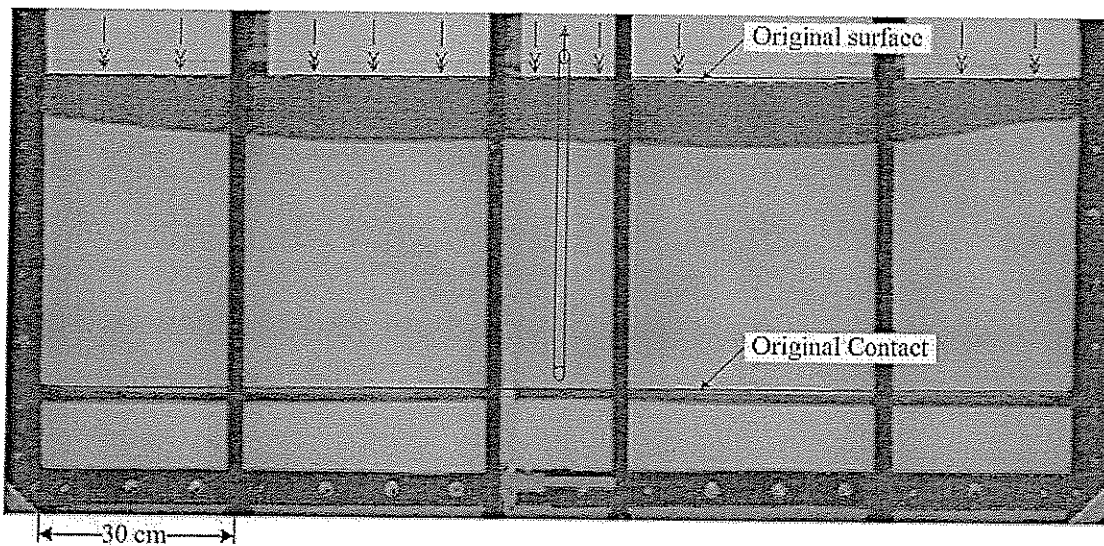
ผลการทดสอบผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับจากแหล่งน้ำจืดทางด้านบน											
ความหนา (ซม.)	เวลา (ชั่วโมง)	การทรุดตัว (มม.)	R3	R2	R1	C3	C2	C1	L1	L2	L3
11	10	ผิวดิน	1.94	1.3	2.04	3.27	1.72	6.24	6.73	1.53	1.45
		ผิวเกลือ	2.4	4.05	1.39	2.45	2.36	6.91	7.28	3.81	0.13
	20	ผิวดิน	6.1	12.34	25.62	14.73	18.08	15.83	21.21	14.69	8.04
		ผิวเกลือ	5.89	17.48	24.87	10.1	17.56	17.55	21.96	17.94	6.27
25	10	ผิวดิน	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		ผิวเกลือ	4.13	5.9	11.94	1.49	9.23	8.08	9.97	5.98	2.65
	20	ผิวดิน	0	4.33	2.77	0	0	0	3.39	4.54	0.28
		ผิวเกลือ	10.92	21.97	28.04	3.98	20.67	13.63	23.79	14.29	19.76
50	10	ผิวดิน	1.08	1.58	0.69	1.96	1.88	1.04	2.36	0.86	0.7
		ผิวเกลือ	1.58	2.66	2.06	1.64	1.48	1.36	1.74	1.78	2.36
	20	ผิวดิน	4.65	4.9	3.4	3.7	4.4	3.5	4.8	4	3.55
		ผิวเกลือ	7.3	7.4	4.65	4.9	3.65	5	4.4	7.6	7.7



(ก)

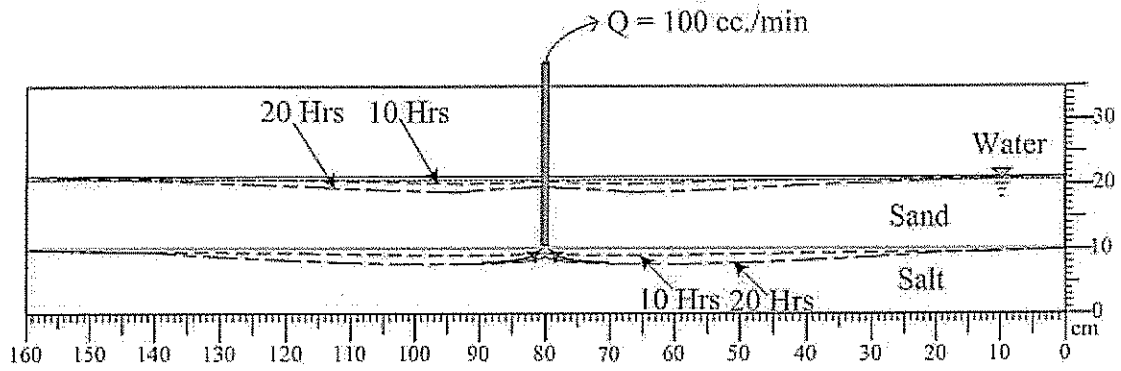


(ข)

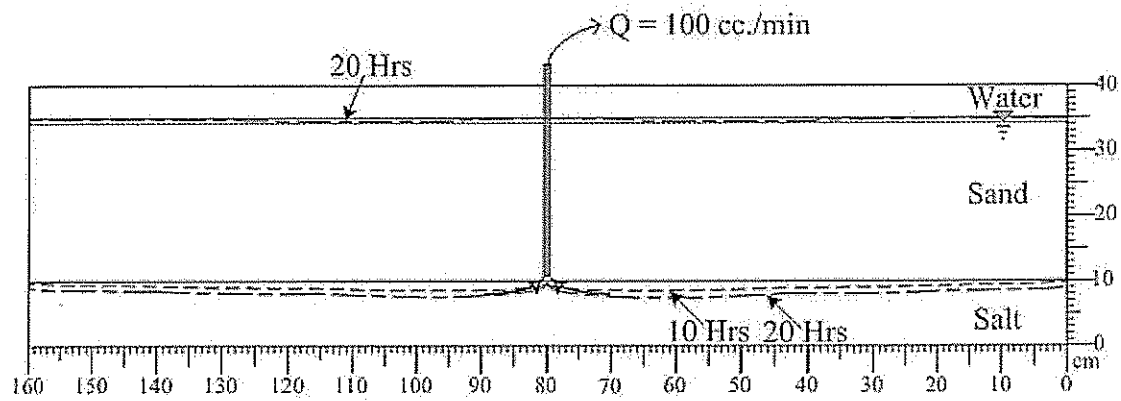


(ค)

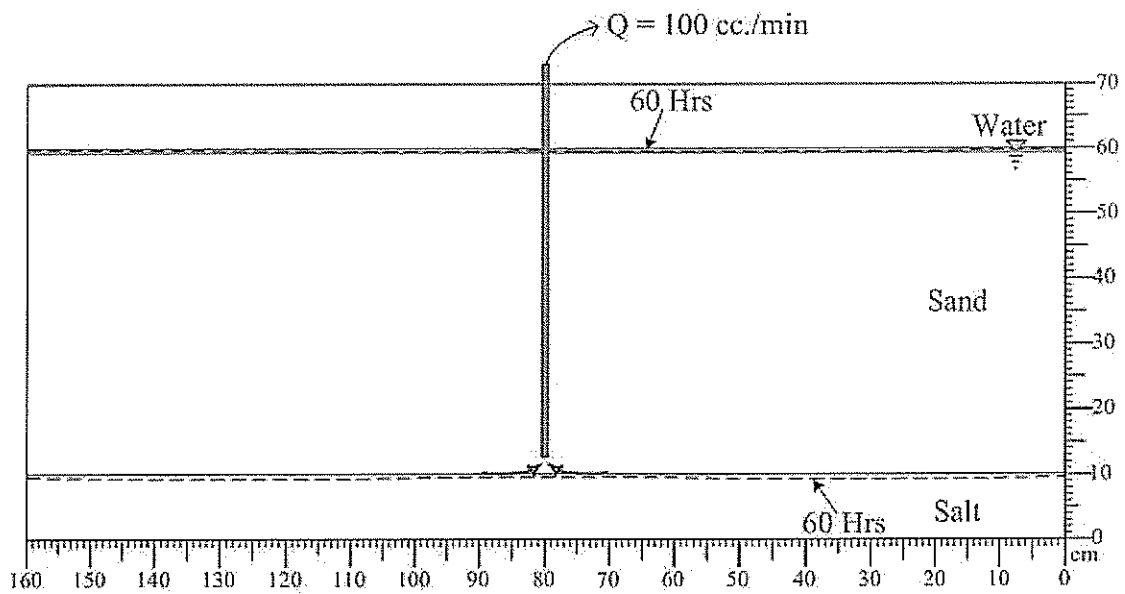
- รูปที่ 4.10 การจำลองสำหรับหาค่าการทรุดตัวของดินที่เกิดจากการผันแปรความหนาของชั้นหินปิดทับที่ระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 2 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc/min
- (ก) ชั้นหินปิดทับหนา 11 ซม.
 - (ข) ชั้นหินปิดทับหนา 25 ซม. และ
 - (ค) ชั้นหินปิดทับหนา 50 ซม.



(ก)

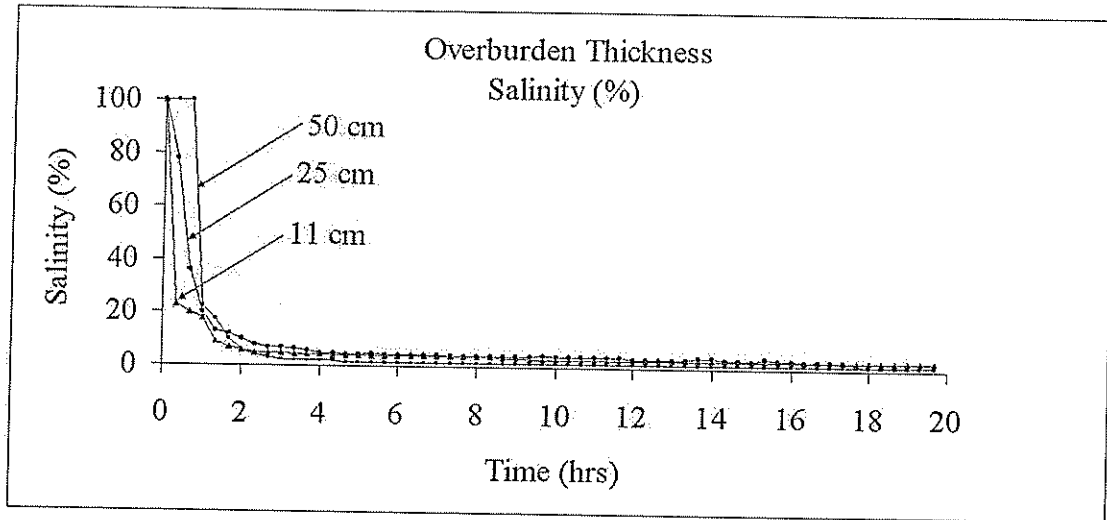


(ข)



(ค)

รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาโดยการผันแปรความหนาของชั้นหินปิดทับที่ระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 2 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc/min. (ก) ชั้นหินปิดทับหนา 11 ซม. (ข) ชั้นหินปิดทับหนา 25 ซม. (ค) ชั้นหินปิดทับหนา 50 ซม.



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเค็มที่ถูกสูบออกมาตามเวลาจากการผันแปรความหนาของชั้นหินปิดทับ

4.4.3 ผลการทดสอบผลกระทบของระดับน้ำบาดาล

ผลการทดสอบการทรุดตัวที่เกิดจากผลกระทบของระดับความลึกชั้นน้ำบาดาล ซึ่งได้มีการทดสอบ 2 ลักษณะ คือ การอัดน้ำจืดเข้ามาจากทางด้านข้างและการปล่อยให้ น้ำซึมจากผิวดินสามารถสรุปได้ดังนี้

ผลที่ได้จากการทดสอบโดยการอัดน้ำจืดเข้ามาจากทางด้านข้าง คือ เมื่อระดับน้ำบาดาลสูงขึ้นจะทำให้เกิดการทรุดตัวมากขึ้นแต่จะทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือต่ำ ในทางตรงกันข้ามถ้าระดับน้ำบาดาลต่ำลงจะส่งผลให้ค่าการทรุดตัวน้อยลง แต่กลับทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือสูงขึ้น ผลจากการตรวจวัดค่าการทรุดตัวบนผิวดินจากแบบจำลองระบุว่า เมื่อมีการอัดน้ำจืดเข้ามาจากทางด้านข้างจะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นแอ่งระหว่างแหล่งที่มาของน้ำจืดกับท่อสูบน้ำบาดาล ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และในกรณีที่ช่องทางเข้าของแหล่งน้ำจืดมีขนาดกว้าง จะทำให้เกิดการทรุดตัวสูงขึ้นตามขนาดของช่องทางเข้า ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าการทรุดตัวจริงจากแบบจำลองที่ระยะห่างจากท่อที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาอยู่ในภาคผนวก ก รูปการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 และรูปการจำลองลักษณะการทรุดตัวที่เวลาต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 โดยค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดในแต่ละชุดการทดสอบที่เวลาต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.15

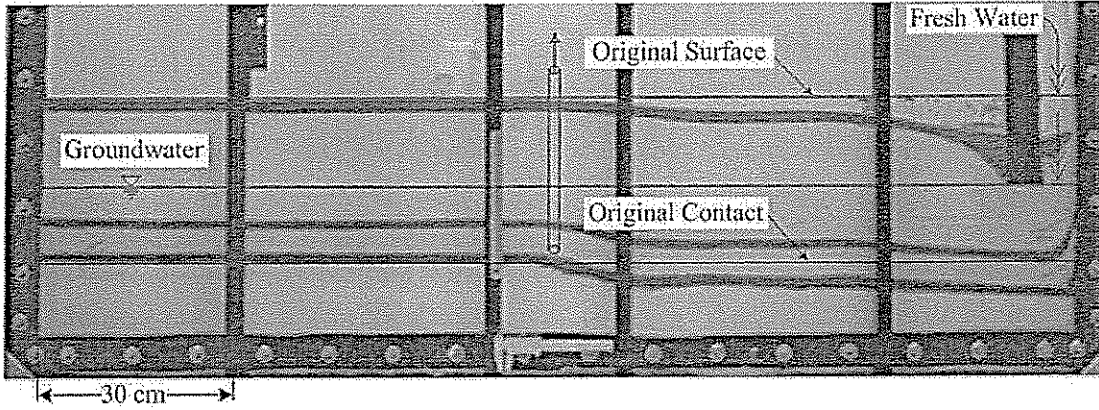
ผลที่ได้จากการทดสอบโดยการปล่อยน้ำจืดให้ซึมเข้ามาจากทางด้านบนนั้นคล้ายคลึงกับการทดสอบโดยการอัดน้ำจืดเข้ามาจากทางด้านข้าง แต่มีลักษณะของการทรุดตัวบนผิวดินที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ เมื่อมีการปล่อยน้ำจืดให้ซึมเข้ามาจากทางด้านบนจะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นแอ่งทั้งสองด้านของท่อสูบน้ำบาดาล หรือเกิด โคนขึ้นใต้ท่อสูบน้ำบาดาลเต็ม ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 และผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าการทรุดตัวจริงจากแบบจำลองที่ระยะห่างจากท่อที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาอยู่ในภาคผนวก ก รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 และรูปการจำลองลักษณะการทรุดตัวที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 โดยค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดในแต่ละชุดการทดสอบที่เวลาต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.20

4.4.4 ผลกระทบของอัตราการสูบน้ำบาดาลเต็ม

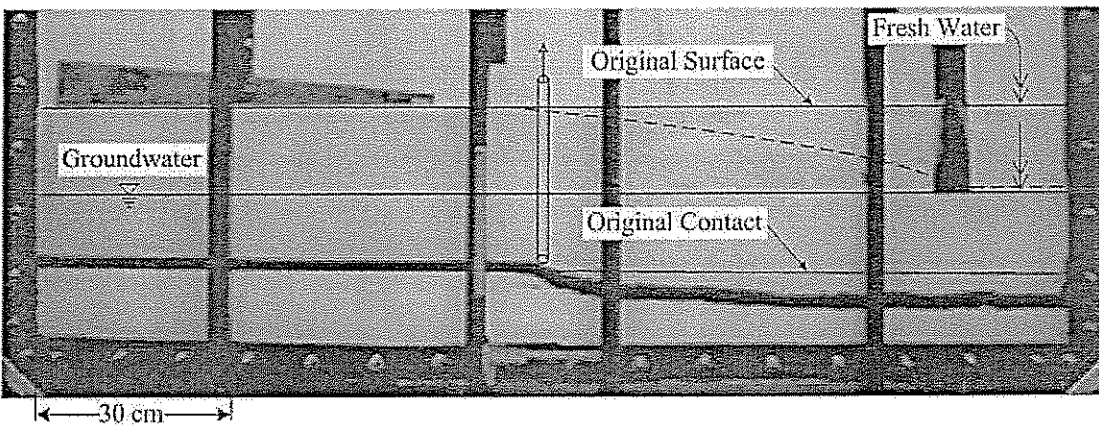
ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ค่าการทรุดตัวบนผิวดินจะขึ้นกับอัตราการสูบน้ำบาดาล กล่าวคือ ค่าการทรุดตัวบนผิวดินจะสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการสูบน้ำบาดาล นอกจากนี้อัตราการสูบน้ำบาดาลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลกระทบต่อขอบเขตการทรุดตัวอีกด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง เมื่อมีการสูบน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่ลึกและสูงขึ้นแต่มีการกระจายตัวน้อย (ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9) ผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าการทรุดตัวจริงจากแบบจำลองที่ระยะห่างจากท่อที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาอยู่ในภาคผนวก ก รูปการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 และรูปการจำลองลักษณะการทรุดตัวที่เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.22 โดยที่ค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดในแต่ละชุดการทดสอบที่เวลาต่างๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.6 ผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาโดยผันแปรความกว้างของช่องน้ำจืด

ผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวที่เกิดจากผลกระทบของแหล่งน้ำจืด												
ขนาด แหล่งน้ำ จืด	เวลา (ชม.)	การทรุดตัว (มม.)	G2	G1	R3	R2	R1	C3	C2	C1	L1	L2
6 นิ้ว	20	ผิวดิน	0	0.07	0.17	0.42	0.05	0	0	0	0	0
	20	ผิวเกลือ	42.24	41.23	34.2	29.83	27.91	22.67	6.26	1.08	0.17	0
2 นิ้ว	40	ผิวดิน	64.11	64.93	43.04	30.26	14.26	7.75	4.76	3.45	4.3	0
	40	ผิวเกลือ	66.35	55.8	49.15	46.29	41.24	29.77	11.2	0	0	0



(ก)

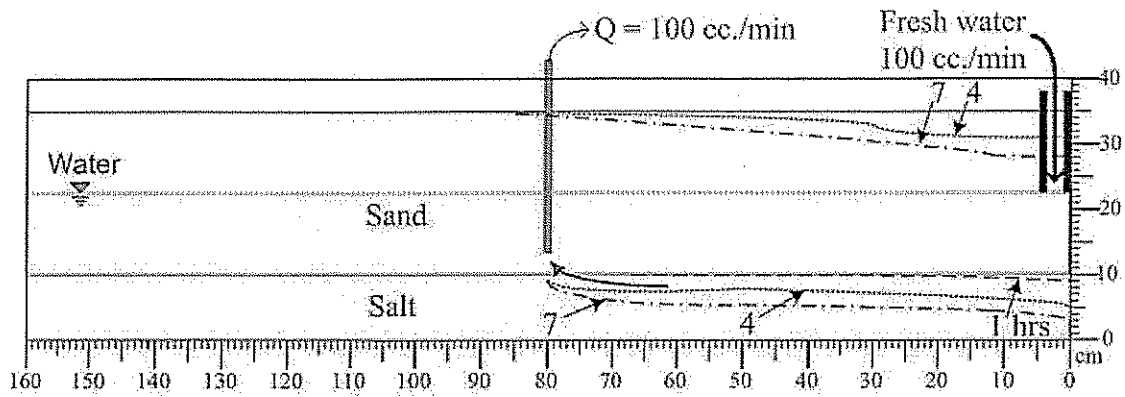


(ข)

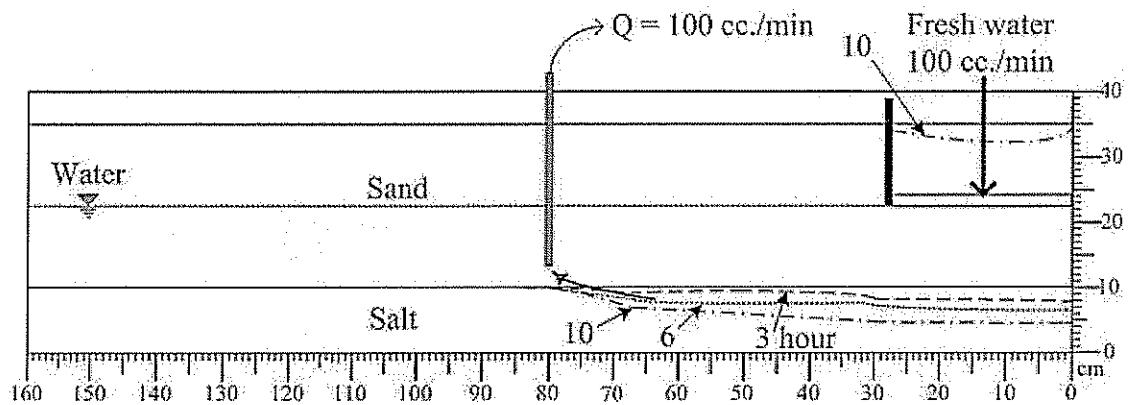
รูปที่ 4.13 การทดสอบการละลายของเกลือและการหลุดตัวจากการผันแปรความกว้างของทางเข้าน้ำจืด โดยค่าคงที่ในการทดสอบคือความหนาของชั้นหินปิดทับและระดับของน้ำบาดาลเท่ากับ 25 ซม. และ 12.5 ซม. ตามลำดับ

(ก) ความกว้างของทางเข้าน้ำจืดเท่ากับ 6 นิ้ว และ

(ข) ความกว้างของทางเข้าน้ำจืดเท่ากับ 2 นิ้ว



(ก)

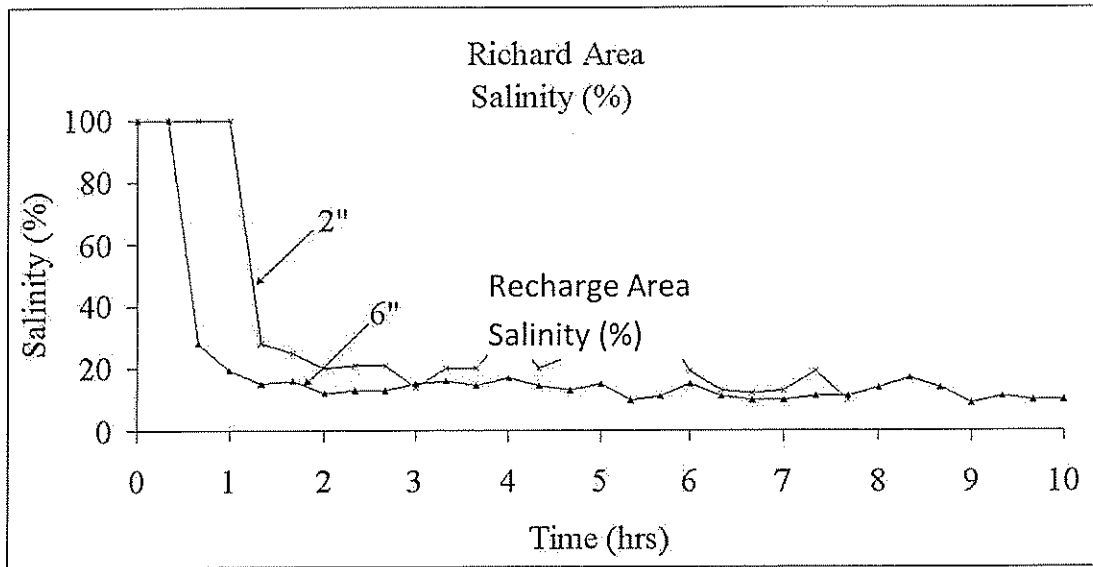


(ข)

รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่มีการผันแปรความกว้างของทางเข้าน้ำจืด โดยค่าคงที่ในการทดสอบคือความหนาของชั้นหินปิดทับและระดับของน้ำบาดาลเท่ากับ 25 ซม. และ 12.5 ซม. ตามลำดับ

(ก) ความกว้างของทางเข้าน้ำจืดเท่ากับ 6 นิ้ว

(ข) ความกว้างของทางเข้าน้ำจืดเท่ากับ 2 นิ้ว



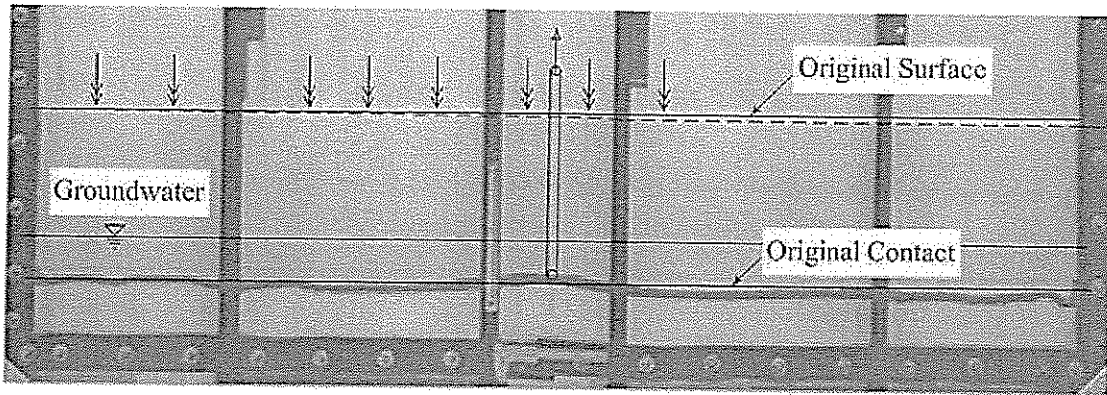
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเค็มที่ถูกสูบออกมาตามเวลา โดยมีการผันแปรความกว้างของช่องน้ำจืด

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาโดยมีการผันแปรระดับน้ำบาดาลและทำการปล่อยน้ำจืดให้ซึมเข้ามาจากทางด้านบน

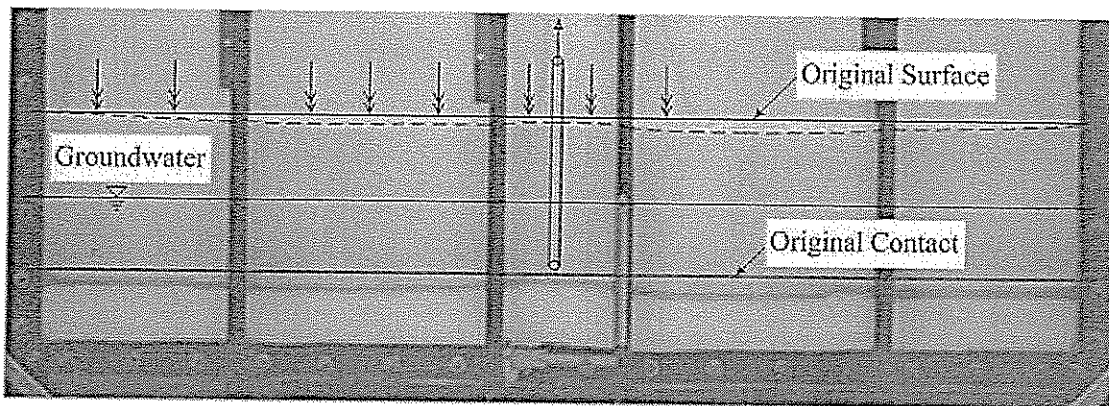
ผลการวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลา											
ระดับของ น้ำบาดาล (ซม)	เวลา (ชั่วโมง)	การทรุดตัว (มม.)	R3	R2	R1	C3	C2	C1	L1	L2	L3
6	10	ผิวดิน	3.82	5.6	3.32	0.9	0	0.9	3.32	5.6	3.82
		ผิวเกลือ	9.07	10.82	7.46	1.84	0	1.84	7.46	10.82	9.07
	20	ผิวดิน	2.42	6.46	4.19	2.14	0	2.14	4.19	6.46	2.42
		ผิวเกลือ	8.5	13.11	18.44	25.3	22.97	25.3	18.44	13.11	8.5
12.5	10	ผิวดิน	7.48	10.44	11.8	9.77	8.92	9.77	11.8	10.44	7.48
		ผิวเกลือ	8.01	11.99	10.68	7.52	8.55	7.52	10.68	11.99	8.01
	20	ผิวดิน	13.21	19.37	15.02	12.5	10.22	12.5	15.02	19.37	13.21
		ผิวเกลือ	20.5	25.63	17.69	11.81	10.83	11.81	17.69	25.63	20.5
18	10	ผิวดิน	13.38	14.98	13.72	10.7	9.84	11.28	10.43	11.25	12.16
		ผิวเกลือ	11.35	11.65	12.52	8.77	3.51	9.75	9.58	11.51	12.5
	20	ผิวดิน	25.98	27.58	21.7	15.01	12.5	16.31	17.22	28.8	27.65
		ผิวเกลือ	23.99	22.35	21.81	17.09	13.22	12.12	17.6	29.91	32.36

ตารางที่ 4.8 ผลการตรวจวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลา โดยมีการผันแปรระดับน้ำบาดาลและทำการอัดน้ำจืดจากทางด้านข้าง

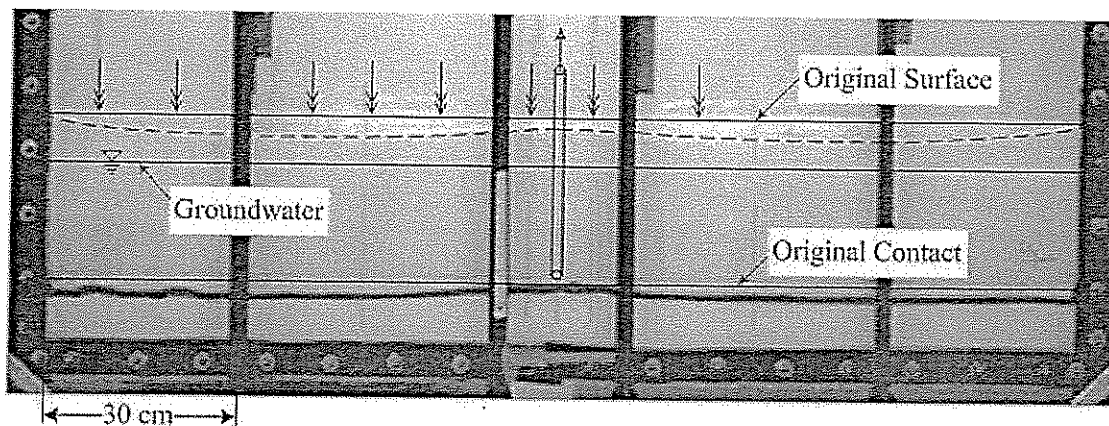
ผลการวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลา												
ระดับของ หน้าบาดาล (ซม.)	เวลา (ชั่วโมง)	การทรุดตัว (มม.)	G2	G1	R3	R2	R1	C3	C2	C1	L1	L2
6	20	ผิวดิน	0	0	3.76	0	10.92	0	0	0	0	0
		ผิวเกลือ	15.11	10.34	17.29	20.61	15.42	5.93	3.92	0.66	0	0
	40	ผิวดิน	3.5	11.03	13.48	28.64	22.43	2.4	0.83	0	0	0
		ผิวเกลือ	30.4	25.81	31.46	34.14	25.5	13.19	6.23	1.66	0	0
12.5	20	ผิวดิน	0	0	2.61	13.37	15.41	5.38	2.53	1.32	0	0
		ผิวเกลือ	0	13.02	23.62	94.32	45.59	19.32	9.85	8.84	6.73	1.85
	40	ผิวดิน	0	3.77	9.82	69.72	28.59	8.26	3.96	2.51	0.37	0
		ผิวเกลือ	11.23	13.56	28.5	34.46	36.11	22.47	10.7	9.41	1.89	0.29
18	20	ผิวดิน	0	3.96	1.75	34.05	8.41	2.6	1.12	0	0	0
		ผิวเกลือ	4.53	4.97	15.2	19.27	23.19	17.79	9.19	1.72	0	0
	40	ผิวดิน	0	13.92	10.2	85.79	33.51	9.61	2.19	0	0	0
		ผิวเกลือ	7.34	13.41	29.77	36.44	42.03	31.77	22.16	6.14	1.49	0



(ก)

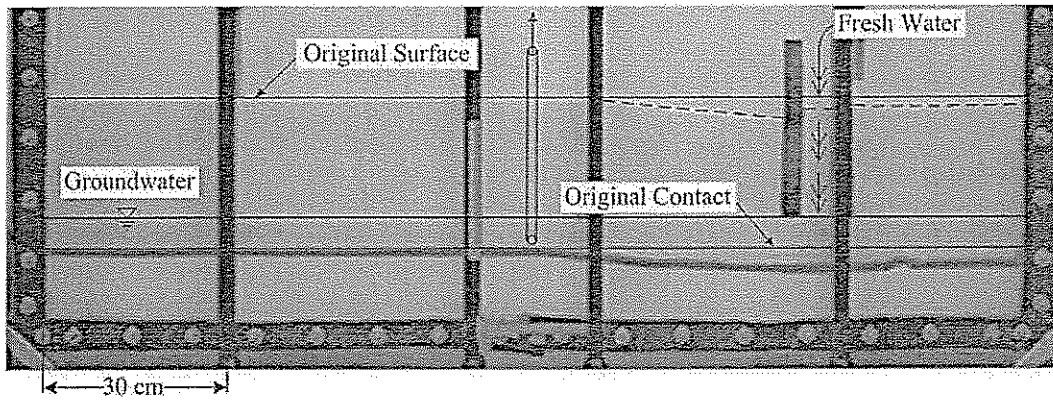


(ข)

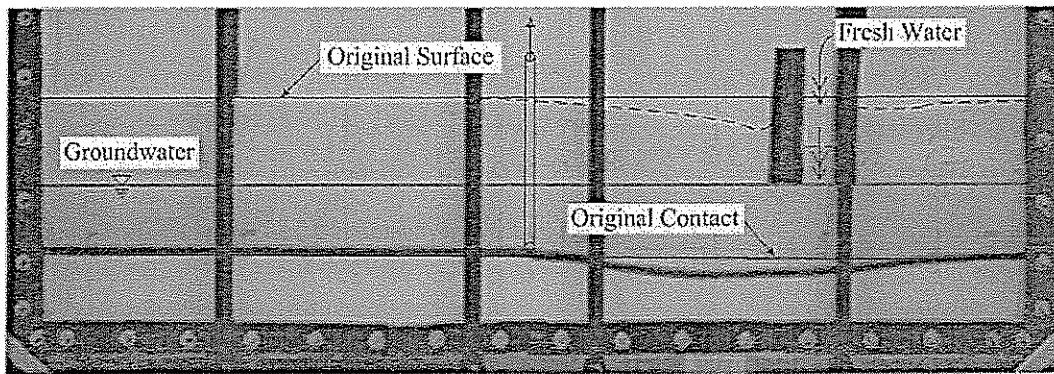


(ค)

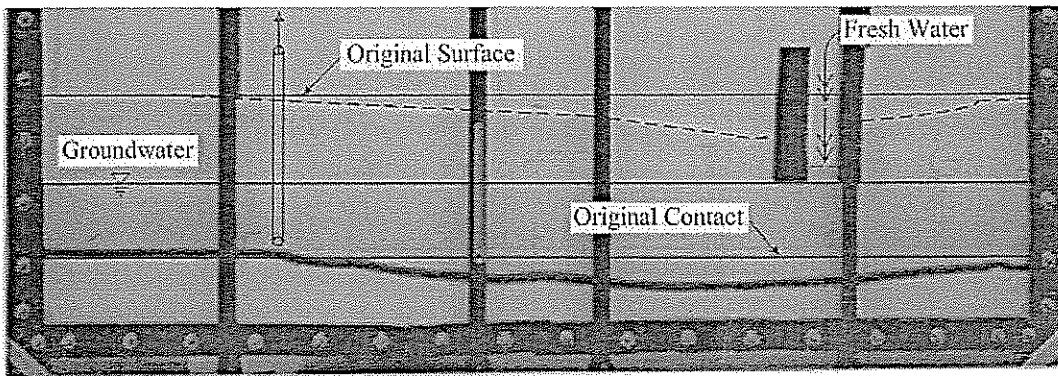
- รูปที่ 4-16 การทดสอบการละลายของชั้นเกลือที่เกิดจากผลกระทบของการผันแปรระดับน้ำบาดาล ด้วยการปล่อยน้ำจืดให้ซึมเข้ามาจากทางด้านบน และทำการสูบน้ำบาดาลเต็มอย่างต่อเนื่อง โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 cc/min
- (ก) ระดับน้ำบาดาล 6 ซม.
- (ข) ระดับน้ำบาดาล 12.5 ซม. และ
- (ค) ระดับน้ำบาดาล 18 ซม.



(ก)

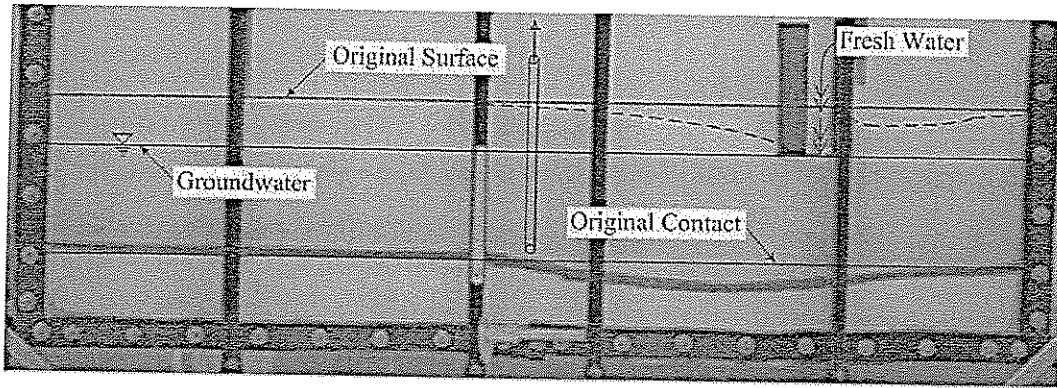


(ข)

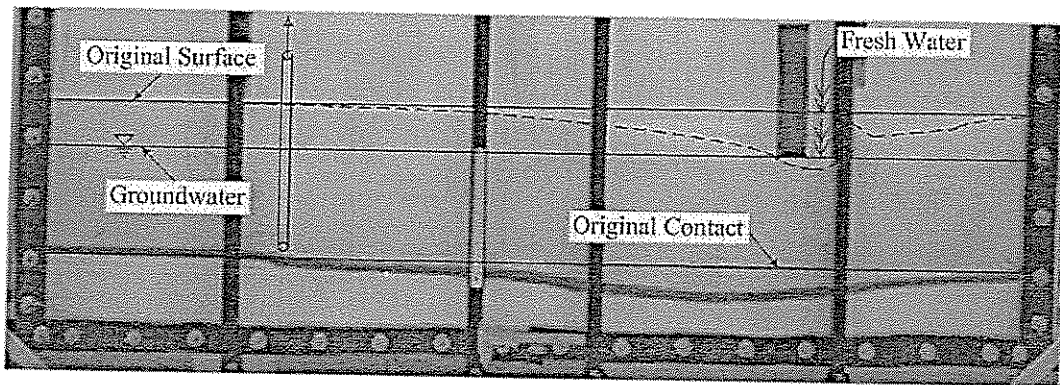


(ค)

- รูปที่ 4.17 การทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวที่เกิดจากผลกระทบของการผันแปรระดับน้ำบาดาลด้วยการอัดน้ำจืดจากทางด้านข้าง และทำการสูบน้ำบาดาลเต็มอย่างต่อเนื่อง โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม.
- (ก) การไหลในแนวราบที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 6.0 ซม.
- (ข) การไหลในแนวราบที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 12.5 ซม.
- (ค) การไหลในแนวราบที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 12.5 ซม. โดยเริ่มสูบน้ำใหม่

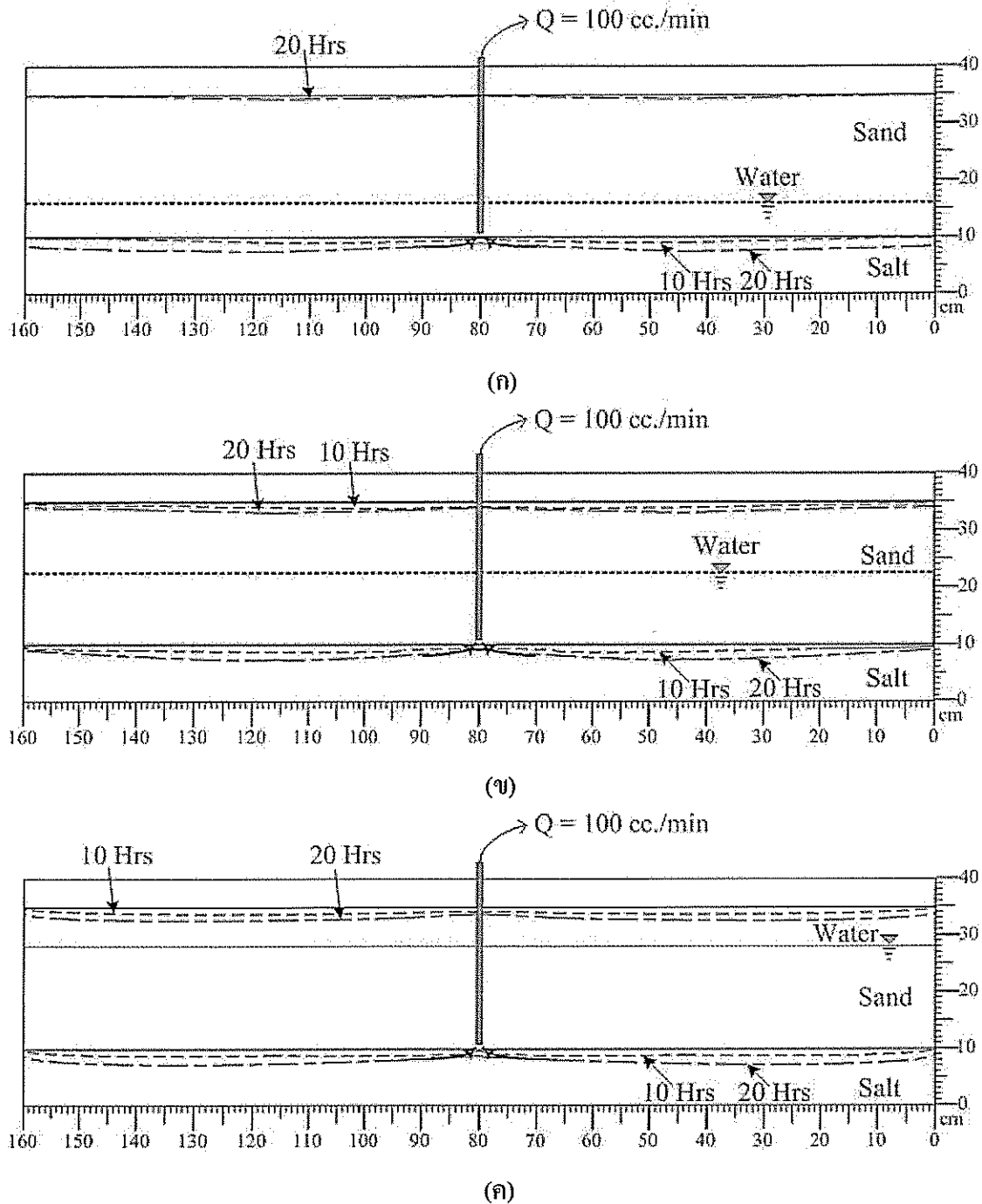


(ง)



(จ)

- รูปที่ 4.17 (ต่อ) การทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวที่เกิดจากผลกระทบของการผันแปรระดับน้ำบาดาลด้วยการอัดน้ำจืดจากทางด้านข้าง และทำการสูบน้ำบาดาลเต็มอย่างต่อเนื่อง โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม.
- (ง) การไหลในแนวราบที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 18 ซม.
- (จ) การไหลในแนวราบที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 18 ซม. โดยเริ่มสูบน้ำใหม่

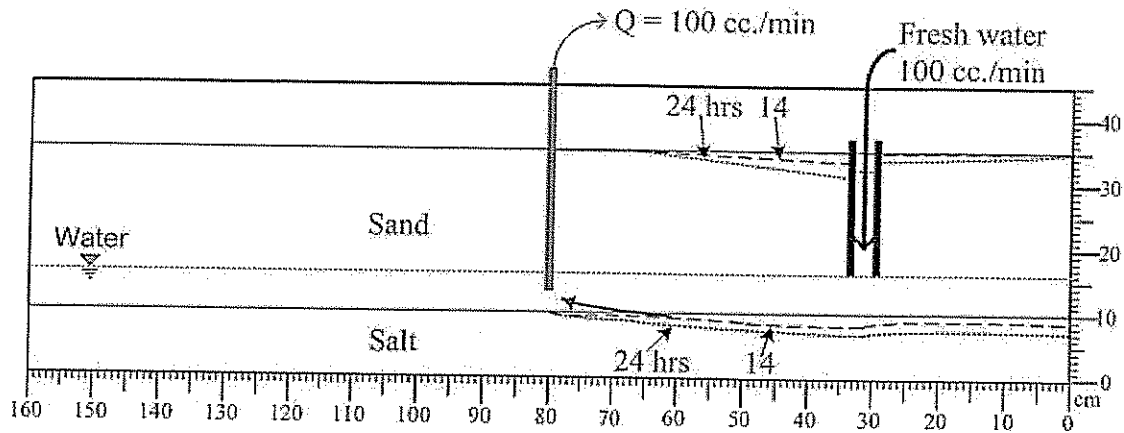


รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่เกิดจากผลกระทบของการผันแปรระดับน้ำบาดาลด้วยวิธีการสูบน้ำบาดาลเต็มแบบต่อเนื่อง และมีทิศทางการซึมผ่านของน้ำจืดจากทางด้านบน โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 cc./min

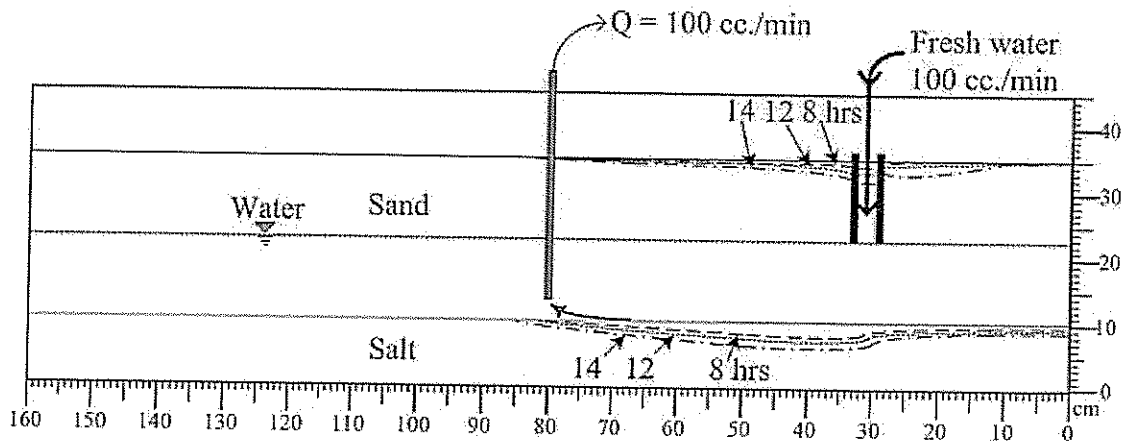
(ก) ระดับน้ำบาดาล 6 ซม.

(ข) ระดับน้ำบาดาล 12.5 ซม.

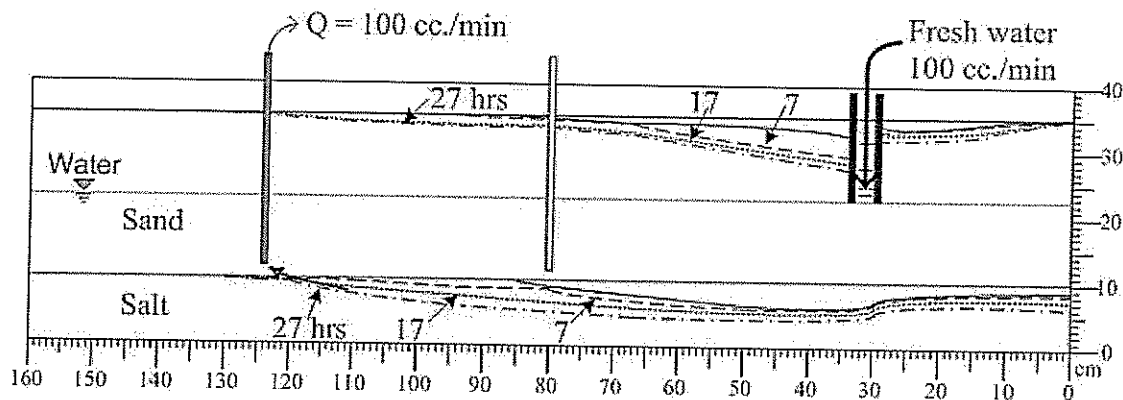
(ค) ระดับน้ำบาดาล 18 ซม.



(ก)



(ข)



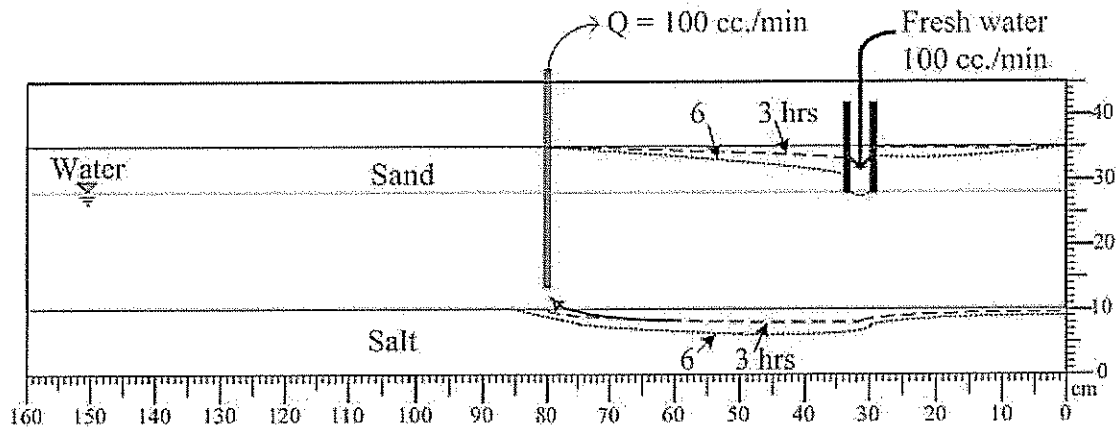
(ค)

รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่เกิดจากผลกระทบของการผันแปรทิศทางการไหลในแนวราบและระดับน้ำบาดาล ด้วยวิธีการสูบน้ำบาดาลเต็มแบบต่อเนื่อง โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม.

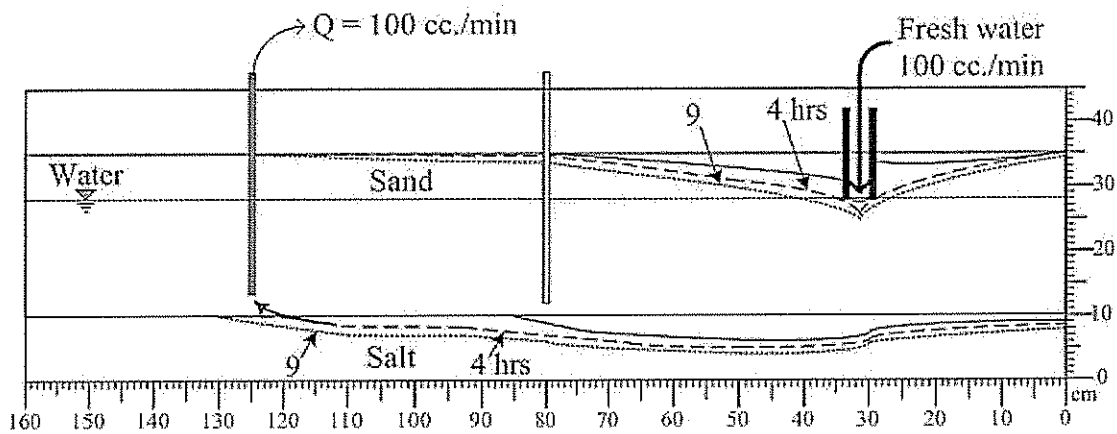
(ก) การไหลในแนวราบที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 6.0 ซม.

(ข) การไหลในแนวราบที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 12.5 ซม.

(ค) การไหลในแนวราบที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 12.5 ซม. โดยเริ่มสูบน้ำใหม่



(ง)

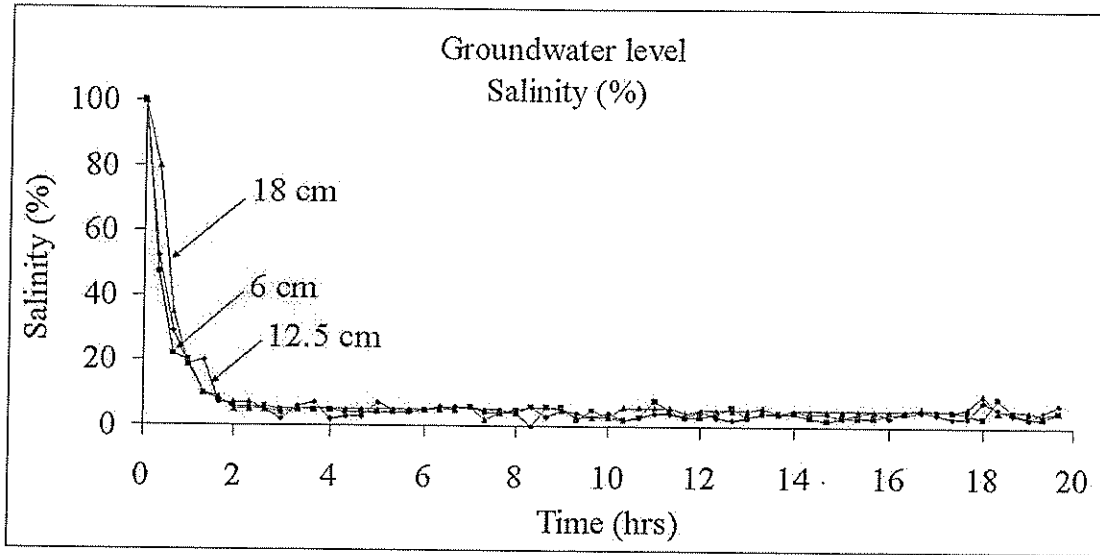


(จ)

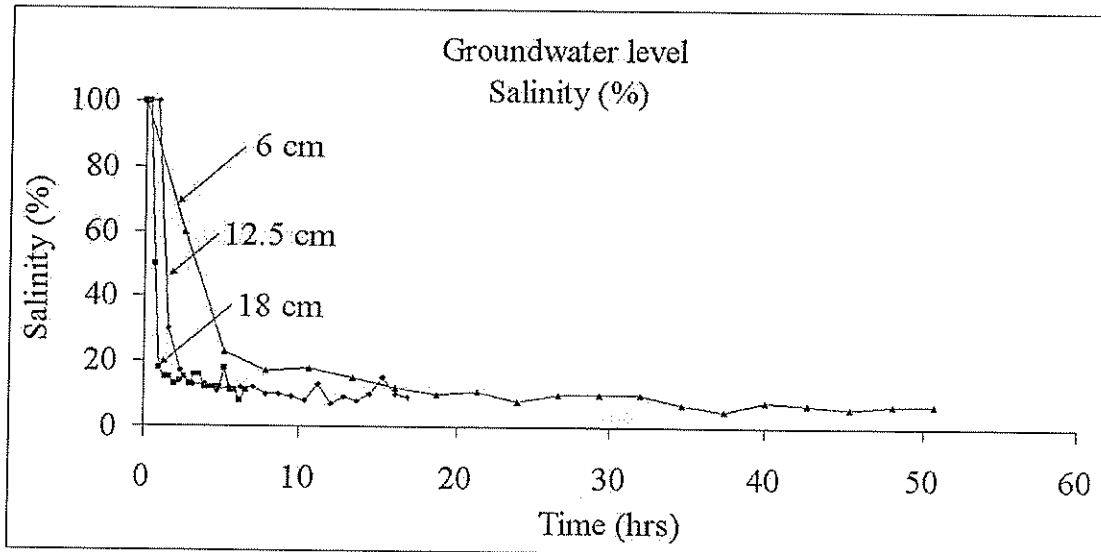
รูปที่ 4.19 (ต่อ) ผลการทดสอบการละลายของชั้นเกลือและการทรุดตัวตามเวลาที่เกิดจากผลกระทบของการผันแปรทิศทางการไหลในแนวราบและระดับน้ำบาดาล ด้วยวิธีการสูบน้ำบาดาลเต็มแบบต่อเนื่อง โดยความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม.

(ง) การไหลในแนวราบที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 18 ซม. และ

(จ) การไหลในแนวราบที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 18 ซม. โดยเริ่มสูบน้ำใหม่



(ก)



(ข)

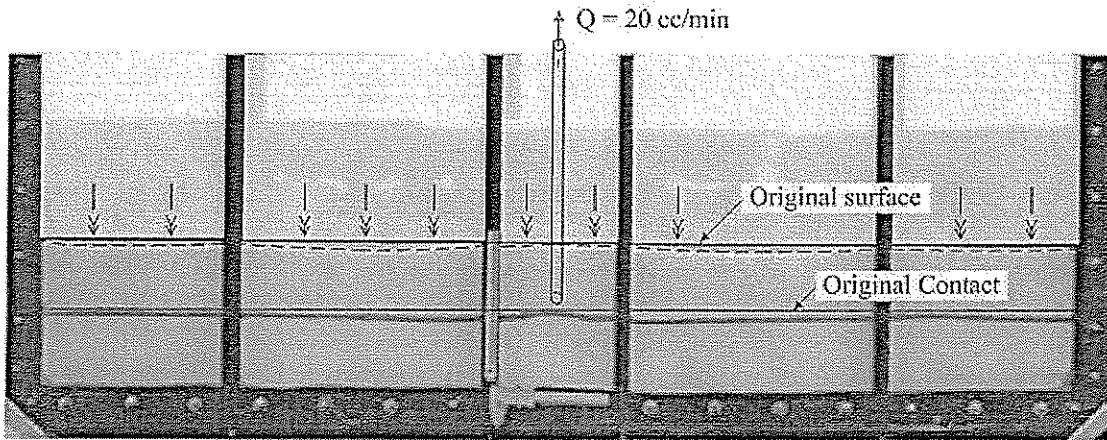
รูปที่ 4-20 กราฟแสดงความเข้มข้นของน้ำเกลือที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเค็มที่ถูกสูบออกมาตามเวลา โดยมีการผันแปรทิศทางการไหลและระดับน้ำบาดาล

(ก) ค่าความเข้มข้นที่วัดได้จากทางการไหลในแนวตั้ง

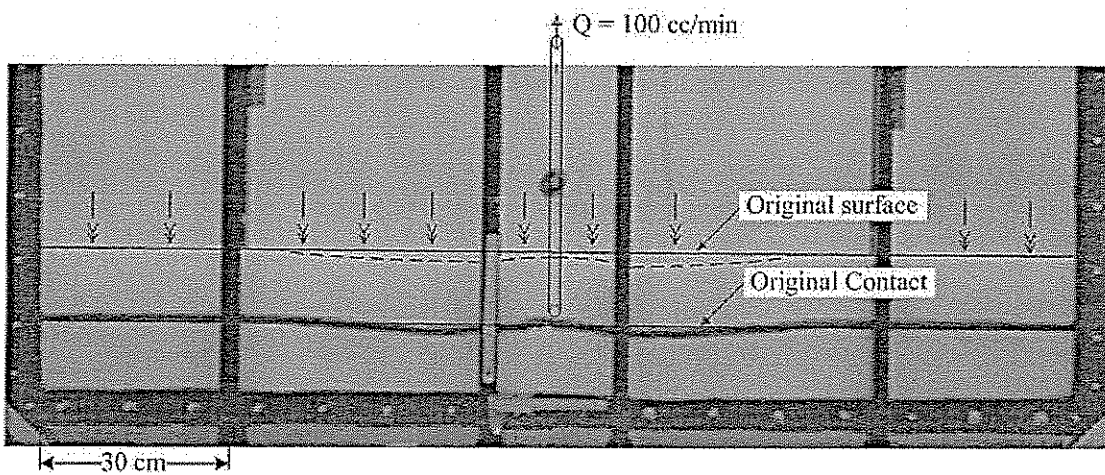
(ข) ค่าความเข้มข้นที่วัดได้จากทางการไหลในแนวราบ

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลา โดยการผันแปรอัตราการสูบ

ผลการทดสอบผลกระทบจากอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็ม โดยให้น้ำจืดเข้าทางด้านบน											
อัตราการสูบ (cc/min)	เวลา (ชั่วโมง)	การทรุดตัว (มม.)	R3	R2	R1	C3	C2	C1	L1	L2	L3
20	30	ผิวดิน	0	0	0	0	0	0	1.7	2.73	0.58
		ผิวเกลือ	0.85	1.45	1.37	1.65	1.38	1.76	1.06	0.85	1.14
	60	ผิวดิน	0	0.5	0	0.05	0.05	0.12	2.12	3.26	0.96
		ผิวเกลือ	1.13	2.94	3.76	2.39	2.03	2.32	3.05	1.86	1.81
100	10	ผิวดิน	1.94	1.3	2.04	3.27	1.72	6.24	6.73	1.53	1.45
		ผิวเกลือ	2.4	4.05	1.39	2.45	2.36	6.91	7.28	3.81	0.13
	20	ผิวดิน	6.1	12.34	25.62	14.73	18.08	15.83	21.21	14.69	8.04
		ผิวเกลือ	5.89	17.48	24.87	10.1	17.56	17.55	21.96	17.94	6.27



(ก)

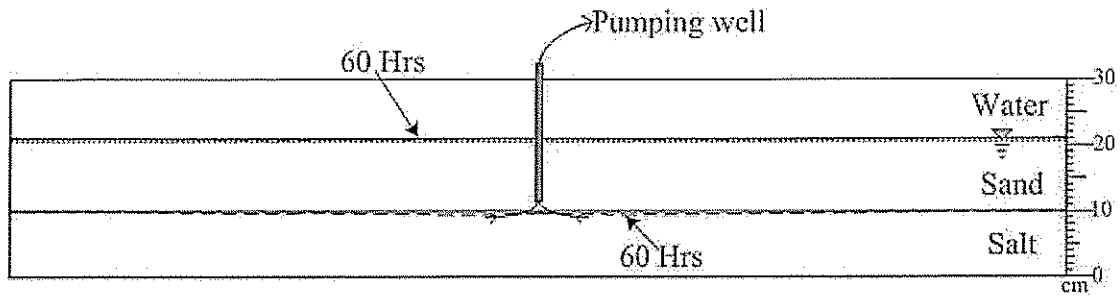


(ข)

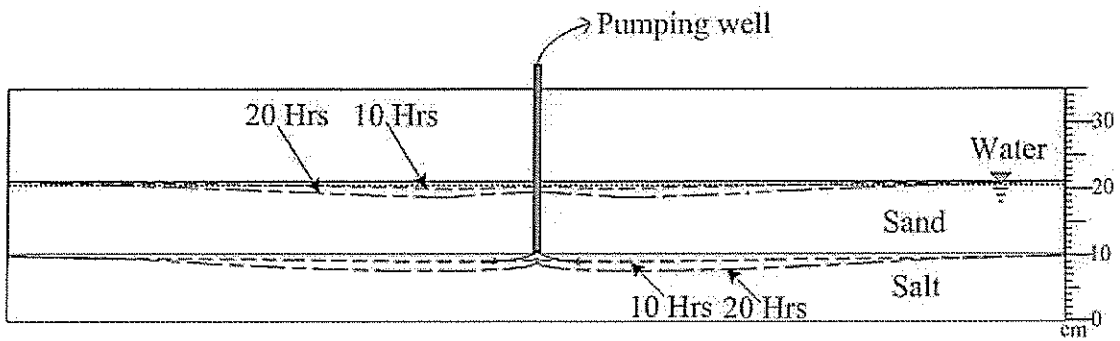
รูปที่ 4.21 การทดสอบการละลายของชั้นเกลือจากการผันแปรอัตราการสูบน้ำบาดาลโดยมีตัวแปร
คงที่ คือ ความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 11 ซม. ระยะห่างของปลายท่อกับผิวเกลือ
เท่ากับ 2 ซม.

(ก) อัตราการสูบน้ำบาดาลเท่ากับ 20 cc/min

(ข) อัตราการสูบน้ำบาดาลเท่ากับ 100 cc/min



(ก)

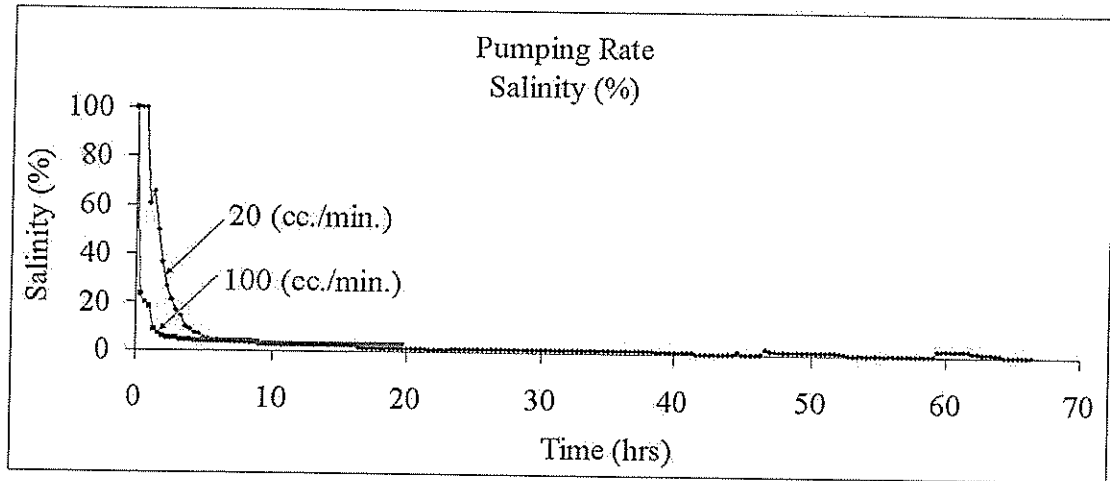


(ข)

รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบการละลายของเกลือตามเวลา โดยผันแปรอัตราการสูบน้ำบาดาลซึ่งมีตัวแปรคงที่ คือ ความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 11 ซม. ระยะห่างของปลายท่อกับผิวเกลือเท่ากับ 2 ซม.

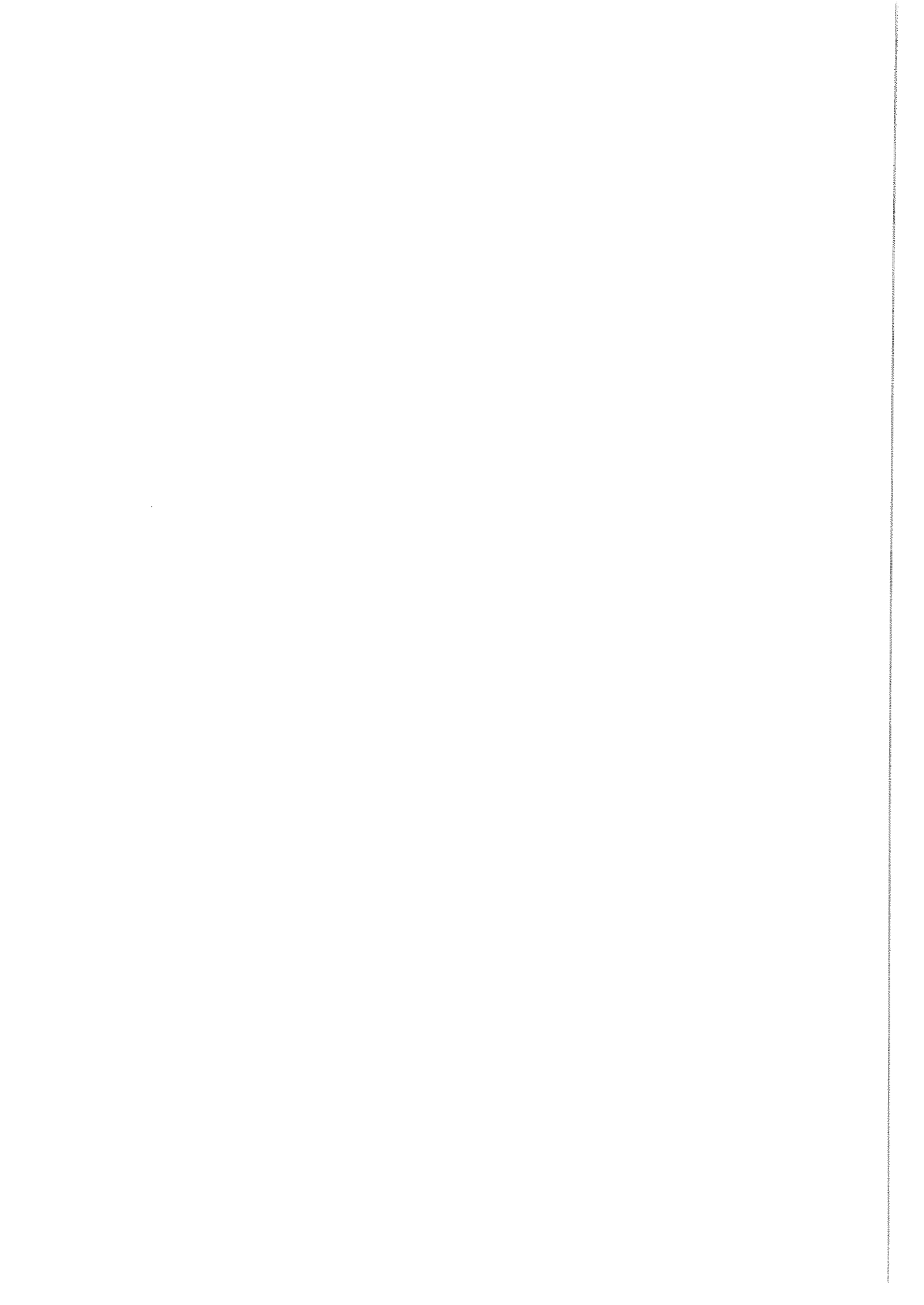
(ก) อัตราการสูบน้ำบาดาลเท่ากับ 20 cc/min

(ข) อัตราการสูบน้ำบาดาลเท่ากับ 100 cc/min



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความเข้มข้นของน้ำเกลือที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลเค็มที่ถูกสูบออกมาโดยมีการผันแปรอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็มที่อัตราต่างๆ

ผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับอุตสาหกรรมนาเกลือที่แท้จริงได้ เนื่องจากปัญหาการทรุดตัวที่เกิดจากการทำนาเกลือในปัจจุบันมีสาเหตุมาจากการสูบน้ำบาดาลเค็มขึ้นมาในปริมาณมากและต่อเนื่อง อีกทั้งชั้นหินปิดทับมีความหนาไม่มากทำให้เกิดการทรุดตัวหรือหลุมยุบที่ลึกและสูงชันมากตรงบริเวณรอบๆ บ่อสูบน้ำบาดาล วิธีการแก้ปัญหานี้ทำได้ไม่ยากเพราะเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแล้วการจะทำให้ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินลดลงจะต้องลดปริมาณการสูบน้ำบาดาลเค็มลงแต่ต้องสูบอย่างต่อเนื่องโดยให้ปลายท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือหินพอสมควร ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยลดผลกระทบการทรุดตัวบนผิวดินได้ แต่อาจจะไม่เป็นผลดีกับภาคอุตสาหกรรมเท่าใดนักเนื่องจากอัตราการผลิตจะลดลงไปจากเดิม แต่ข้อดีสำหรับผู้ประกอบการ คือ สามารถสูบน้ำบาดาลเค็มเพื่อผลิตเกลือได้ในระยะยาวเนื่องจากการทรุดตัวบนผิวดินลดลง อีกทั้งยังไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่การเกษตรและบ้านเรือนในบริเวณใกล้เคียง



บทที่ 5

การคำนวณด้วย Profile Function

5.1 วัตถุประสงค์

การศึกษาในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลจากการทดสอบการทรุดตัวของผิวดินด้วยแบบจำลองทางกายภาพมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณการทรุดตัวของผิวดินด้วย Profile Function ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องหรือความแตกต่างในการคำนวณค่าการทรุดตัวของทั้งสองวิธี

5.2 การคำนวณด้วย Profile Function

การเกิดหลุมยุบหรือการทรุดตัวของผิวดินในพื้นที่ทำนาเกลือเป็นผลมาจากการสูบน้ำบาดาลเค็มจากโพรงเกลือที่อยู่ใต้ดินเป็นปริมาณมากและต่อเนื่อง การทรุดตัวของผิวดินจะเกิดลักษณะสำคัญ 3 รูปแบบ คือ 1) เกิดรอยแตกรอยแยกบนผิวดิน 2) เกิดเป็นบ่อหรือหลุมยุบเหนือชั้นเกลือหิน และ 3) เกิดเป็นแอ่งน้ำบนผิวดิน

การคำนวณด้วย Profile function จะสามารถระบุการเปลี่ยนแปลงของผิวดินที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณที่มีการทรุดตัว ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical displacement) และแนวนอน (Horizontal displacement) ความลาดชัน (Slope) ความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง (Vertical strain) และความโค้งตัวของผิวดินในแนวตั้ง (Vertical curvature) ข้อมูลที่จำเป็นต้องนำไปใช้ในสมการประกอบด้วยการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) ความลึกของโพรง (d) มุมที่วัดจากขอบโพรงถึงขอบเขตการทรุดตัว (Angle of draw, γ) ระยะทางในแนวระนาบ (x) arbitrary constant (c) ค่าคงที่ (b) และรัศมีสูงสุดของพื้นที่การทรุดตัวของผิวดิน (B)

สมการคำนวณการทรุดตัวด้วย Profile function

$$S(x) = \frac{1}{2} S_{max} \left[1 - \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right] \quad (5.1)$$

สมการคำนวณความชัน

$$G(x) = S'(x) = -\frac{1}{2} S_{max} \frac{c}{B} \operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \quad (5.2)$$

สมการคำนวณค่าส่วนโค้ง

$$\rho(x) = S''(x) = S_{\max} \frac{c^2}{B^2} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right] \quad (5.3)$$

สมการคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวนอน

$$u(x) = -\frac{1}{2} S_{\max} \frac{bc}{B} \operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \quad (5.4)$$

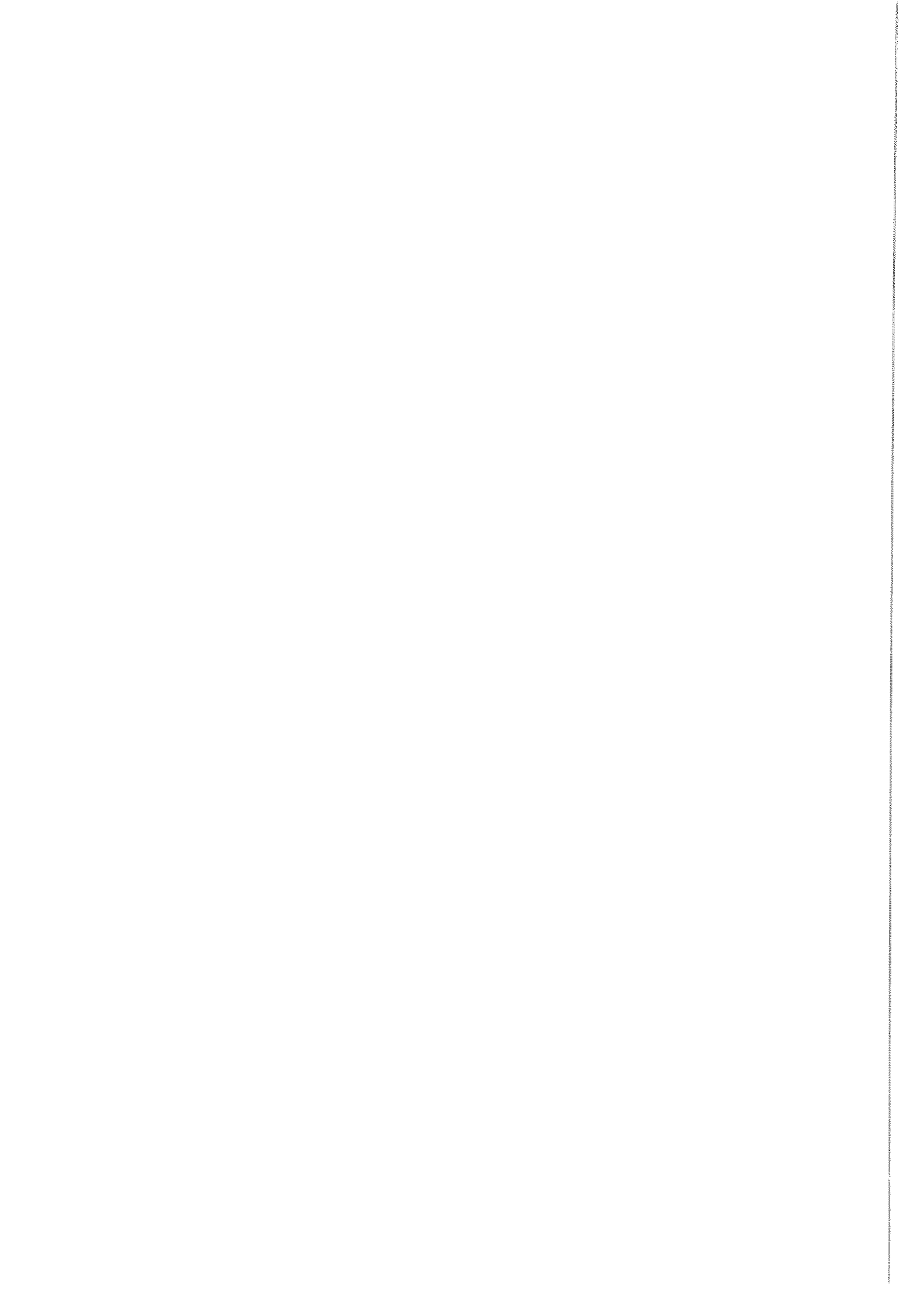
สมการคำนวณความเครียดในแนวนอน

$$\varepsilon(x) = S_{\max} \frac{bc^2}{B^2} \left[\operatorname{sech}^2\left(\frac{cx}{B}\right) \tanh\left(\frac{cx}{B}\right) \right] \quad (5.5)$$

ในงานวิจัยนี้ได้นำผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพจากบทที่ 4 มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยสมการข้างต้นซึ่งสามารถสรุปได้ว่า Profiles ของการทรุดตัวจากทั้ง 2 วิธี ไม่มีความสอดคล้องกัน โดยที่ผลจากแบบจำลองทางกายภาพนั้นจะเกิดการทรุดตัวที่เป็นรูปโคจรตรงกลางของบ่อสูบ แต่ผลจากการคำนวณค่าการทรุดตัวด้วย Profile function จะมีลักษณะคล้ายกับแอ่ง โดยส่วนที่ลึกที่สุดจะอยู่ตรงกลางของบ่อสูบ และไม่เกิดรูปโคจรเหมือนผลที่ได้จากการทดสอบด้วยการจำลองทางกายภาพ เมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งและขอบเขตการทรุดตัวที่คำนวณด้วย Profile function โดยไม่คำนึงถึงลักษณะการทรุดตัวที่แตกต่างกัน (สมมติว่าไม่เกิดรูปโคจรตรงกลางแอ่ง) พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันคือ กล่าวคือ ขอบเขตการทรุดตัวที่ได้จากการคำนวณด้วย Profile function และขอบเขตการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ รวมไปถึงค่าการทรุดตัวสูงสุดมีความใกล้เคียงกัน

ในการคำนวณหาขอบเขตการทรุดตัวด้วย Profile function นั้นจะต้องใช้ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ คือ ค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{\max}) และค่าความหนาของชั้นหินปิดทับ (d) โดยจุดที่ใช้คำนวณได้มาจากการสังเกตบริเวณที่ไม่มีทรุดตัวในแบบจำลองไปจนถึงจุดที่ลึกที่สุดโดยให้ระยะในแนวแกน x มีค่าเป็นศูนย์ ไปจนถึงประมาณสองเท่าของขอบเขตการทรุดตัว เพื่อที่จะหาค่าการทรุดตัว (S_x) ในสมการที่ 5.1 นั้นมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งหมายถึง ไม่มีการทรุดตัวที่ตำแหน่งนั้น โดยตำแหน่งที่ไม่มีทรุดตัวคือขอบเขตการทรุดตัวจากที่ได้จากการคำนวณการทรุดตัวด้วย Profile function

ผลการคำนวณมีความสอดคล้องกันอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่มีทิศทางการไหลของน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบน แต่การจำลองที่มีทิศทางการไหลของน้ำจืดจากทางด้านข้างนั้นไม่มีความสอดคล้องเท่าที่ควร เนื่องจากขอบเขตการทรุดตัวทั้งสองข้างของแหล่งน้ำจืดนั้นไม่เท่ากันจึงส่งผลให้เกิดการทรุดตัวอย่างมากในทิศทางที่ทำการสูบน้ำ ผลของการคำนวณด้วย Profile function จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข ซึ่งแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบ Profile ของการทรุดตัวของผิวดินและค่าความชันสูงสุดที่คำนวณได้



บทที่ 6

การคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID

6.1 วัตถุประสงค์

การคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID มีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลจากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID เพื่อหาความสอดคล้องหรือความแตกต่างในการคำนวณค่าการทรุดตัวของผิวดินของทั้งสองวิธี

6.2 การคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID

โปรแกรม SALT_SUBSID ถูกพัฒนาโดยบริษัท RE/SPEC Inc. เพื่อมอบให้กับ Solution Mining Institute สำหรับวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของผิวดินที่อยู่เหนือโพรงละลายหรือเหมืองใต้ดินในชั้นเกลือโปแตชและถ่านหิน โปรแกรมดังกล่าวสามารถใช้วิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินในเชิงเวลา ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมนี้อาจแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวและอัตราการทรุดตัวตามเวลา โดยแสดงเป็นภาพตัดขวางของการทรุดตัวของผิวดิน เส้นชั้นความสูงของการทรุดตัว และอัตราการทรุดตัว ทั้งนี้โปรแกรมดังกล่าวสามารถป้อนข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้จริงในภาคสนามเพื่อแสดงผลเทียบกับการคำนวณจากโปรแกรมด้วย

ค่าคงที่ที่ใส่ให้กับ โปรแกรมสำหรับการคำนวณประกอบด้วย Y_{ss} , Y_0 และ β (สำหรับเหมืองละลาย) และ Y_0 , β และ N (สำหรับเหมืองแบบแห้ง) โดยตัวแปรที่บ่งชี้ค่าการทรุดตัวสูงสุดได้แก่ Y_{ss} และ Y_0 ส่วนค่า β และ N เป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมในเชิงเวลาของการทรุดตัว ซึ่งการทรุดตัวที่ตำแหน่งใดๆ บนพื้นผิวที่ขึ้นกับเวลา $Z(x,y,t)$ มีสมการทั่วไปดังนี้

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

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

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

โดยที่	Y_{ss}, Y_0, β, N	คือ Model parameters
	t	คือ เวลาที่นับตั้งแต่เริ่มขุดเจาะ โพรง
	E	คือ อัตราส่วนการขุดเจาะของเหมือง (Extraction ratio)
	Z_u	คือ การเคลื่อนตัวของผิวสูงสุดที่ตำแหน่งใดๆ

ในเงื่อนไข $G(t) = 1$ จะใช้เมื่อโพรงถูกปิดอย่างสมบูรณ์ โดยที่ตัวแปร Y_{ss} เป็นตัวแทนของอัตราการปิดตัวคงที่ และ Y_0 เป็นตัวแทนของอัตราการปิดตัวไม่คงที่ ส่วนตัวแปร β และ N คือ Empirical constants ที่ใช้กับแบบจำลองที่มีอัตราการปิดตัวไม่คงที่ ในกรณีที่เป็นเหมือนแห้งตัวแปร Y_{ss} จะกำหนดให้เป็นศูนย์

6.3 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID

ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID จะแสดงอยู่ในรูปของเส้นชั้นความสูงของการทรุดตัวในแต่ละชุดการทดสอบ ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก ผลการคำนวณสามารถบอกได้ถึงขอบเขตของการทรุดตัวบนผิวดิน ความลึก และความกว้างของการทรุดตัวโดยอยู่ในรูปของภาพตัดขวางในแนวตั้งที่ทิศทางต่างๆ ได้

ผลการคำนวณสามารถสรุปได้ว่าค่าการทรุดตัวที่ได้จากโปรแกรม SALT_SUBSID นั้นไม่มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ เนื่องจากโปรแกรม SALT_SUBSID จะจำลองการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นแอ่งตรงกลาง แต่ผลจากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพจะให้ผลการทรุดตัวเป็นรูปโค่นที่ตรงกลางได้บ่อสูบ ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถทำการจำลองได้ในโปรแกรม สาเหตุการเกิดลักษณะรูปโค่นที่ได้ออกมาเนื่องจากผลกระทบของอัตราการสูบและความเร็วของน้ำที่เคลื่อนที่เข้าท่อสูบ ซึ่งการไหลของน้ำที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อสูบจะมีอัตราการไหลเข้าช้าที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอื่นๆ บริเวณท่อสูบ นอกจากนี้ น้ำที่เข้ามายังท่อสูบนั้นได้ไปละลายเกลือบริเวณรอบๆ ท่อสูบจนเกือบอิ่มตัว ส่งผลให้ความสามารถในการละลายลดลงในช่วงที่ใกล้จะถึงท่อสูบทำให้เกิดเป็นรูปโค่นขึ้นที่บริเวณใต้ท่อสูบน้ำ อย่างไรก็ตามผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม SALT_SUBSID นั้นให้ขอบเขตของการทรุดตัวกว้างกว่าแบบจำลองเป็นอย่างมาก จึงไม่สามารถนำมาคำนวณหรือเปรียบเทียบได้

บทที่ 7

การคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

7.1 วัตถุประสงค์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการไหลของน้ำบาดาลด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของน้ำบาดาลที่เกิดขึ้นตามคุณสมบัติของชั้นหินปิดทับ โดยในบทนี้ได้อธิบายถึงตัวแปรและรูปแบบการไหลของน้ำบาดาลที่ใช้ในการจำลองรวมไปถึงผลการคำนวณ

7.2 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ผลจากการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (Finite Element Subsurface & Transport Simulation System) จะนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำบาดาลในชั้นหินปิดทับต่ออัตราการสูบน้ำ และค่าความซึมผ่าน โดยใช้โปรแกรม FEFLOW (WASY, 2006) ในการจำลองจะผันแปรอัตราการไหลของน้ำที่อยู่ใต้พื้นผิวซึ่งจะขึ้นกับขนาดของพื้นที่ทั้งแบบสองมิติและสามมิติ

ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ พื้นที่การไหลของน้ำ อัตราการซึมผ่าน อัตราการไหลของน้ำบาดาล และการพัดพาของตะกอน ความหนาของชั้นหินปิดทับ ตัวแปรต่างๆ ที่ป้อนเข้าสู่โปรแกรม ได้แก่ แรงดันน้ำ ระดับน้ำ ตำแหน่งที่ทำการสูบน้ำ และแหล่งที่มาของน้ำจืดทั้งจากทางด้านบนและทางด้านข้าง ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ โดยพิจารณาจากทิศทางการไหลของน้ำที่ละลายผิวของชั้นเกลือมายังบ่อสูบน้ำ

7.3 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม FEFLOW จะแสดงให้เห็นถึงการไหลของน้ำบาดาลในชั้นหินปิดทับ โดยที่อัตราการสูบน้ำที่ใช้ในโปรแกรมนี้เป็นอัตราเดียวกับที่ใช้ในแบบจำลองทางกายภาพ ซึ่งผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ง (รูป ง-1 ถึง ง-11) ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมโดยพิจารณาถึงผลกระทบของความลึกของบ่อสูบ หรือระยะห่างจากปลายท่อสูบถึงผิวเกลือระบุว่าเมื่อท่อสูบอยู่ใกล้กับชั้นเกลือมากจะทำให้ให้เกลือที่อยู่บริเวณใกล้กับท่อสูบถูกละลายมากและการละลายจะลดลงเมื่อท่อสูบอยู่ในระยะไกลออกไป แต่ถ้าท่อสูบอยู่ห่างจากชั้นเกลือมากขึ้นจะทำให้เกลือถูกละลายเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ

ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม FEFLOW โดยพิจารณาถึงผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับ โดยที่ตำแหน่งท่อสูบลบที่พบว่า เมื่อชั้นหินปิดทับมีความหนามากขึ้น ขอบเขตการไหลของน้ำบาดาลที่เข้าท่อสูบจะกว้างขึ้นตามความหนาของชั้นหินปิดทับที่เพิ่มขึ้นและส่งผลให้เกลือละลายน้อยลงแต่กระจายออกไปเป็นวงกว้าง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ

ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม FEFLOW โดยพิจารณาถึงทิศทางการไหลของน้ำบาดาล เมื่อมีการไหลของน้ำในแนวตั้งหรือน้ำซึมจากทางด้านบนจะให้ทิศทางการไหลของน้ำบาดาลที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ โดยผลจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์นั้นได้แสดงทิศทางการไหลของน้ำบาดาลที่เข้าไปยังบ่อสูบ ซึ่งพบว่าน้ำที่ไหลเข้าบ่อสูบก่อนส่วนใหญ่จะมาจากทางด้านข้าง ส่วนน้ำที่ไหลในแนวตั้งมีน้อยกว่า ถ้าเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพในกรณีการไหลของน้ำในแนวตั้งจะพบว่าเกลือที่ถูกละลายน้อยกว่าจะอยู่ที่บริเวณใต้บ่อสูบเนื่องจากมีการไหลของน้ำจืดน้อย (สอดคล้องตามผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์) ส่งผลให้เกิดเป็นเนินตรงกลางใต้บ่อสูบ ส่วนในกรณีที่ทิศทางการไหลของน้ำมาจากทางด้านข้างโดยให้น้ำไหลมาจากแหล่งน้ำจืดในบริเวณใกล้เคียง ผลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพนั้นมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ กล่าวคือ เกลือจะถูกละลายเฉพาะบริเวณที่น้ำไหลผ่าน ซึ่งน้ำที่ไหลเข้ามามากที่สุดอยู่ใต้บริเวณรอบๆ ของปลายท่อสูบ และจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ทำให้ทราบว่าเกลือในบริเวณที่อยู่ไกลออกไปจากทางเข้าของแหล่งน้ำจืดนั้นสามารถถูกละลายได้ เนื่องจากน้ำที่เข้ามาจะมีการกระจายไปในทิศทางต่างๆ ก่อนจะถูกดูดกลับมาในทิศทางที่มีการสูบน้ำ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ และผลจากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพตามที่ได้เสนอไว้ในบทที่ 4

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

ปัญหาแผ่นดินทรุดหรือการเกิดหลุมยุบมักได้ยื่นอยู่บ่อยครั้ง โดยเฉพาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้คน สัตว์เลี้ยง และที่อยู่อาศัย รวมทั้งพื้นที่การเกษตร การทรุดตัวของผิวดินในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีสาเหตุมาจากน้ำบาดาลหรือน้ำใต้ดินไหลมาละลายผิวของชั้นเกลือหินจนทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงระหว่างชั้นเกลือหินและชั้นหินที่ปิดทับ หรืออีกกรณีหนึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการทำอุตสาหกรรมเกลือแบบดั้งเดิม (Brine Pumping) โดยผู้ประกอบการได้สูบน้ำบาดาลเค็มขึ้นมาจากโพรงเกลือดังกล่าว ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันของน้ำและอากาศในโพรงทำให้เกิดการพังทลายของชั้นหินปิดทับที่อยู่ด้านบนจนกระทั่งถึงผิวดิน

ปัญหาการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยจะปรากฏทั้งในและนอกเขตพื้นที่อุตสาหกรรมเกลือ โดยไม่สามารถคาดคะเนได้ เนื่องจากผลกระทบจากทิศทางไหลของน้ำบาดาล ระดับอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็ม ความอืดตัวของน้ำบาดาลเค็ม อุณหภูมิ และอื่นๆ การเข้าใจอย่างถ่องแท้เกี่ยวกับกระบวนการชะล้างหรือการละลายในชั้นเกลือหินเป็นส่วนหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณา ซึ่งการจำลองการละลายของชั้นเกลือหินเพื่อศึกษาการทรุดตัวของผิวดินในห้องปฏิบัติการนั้นช่วยให้สามารถเข้าใจกระบวนการต่างๆ ได้ดีขึ้น และในการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการละลายของชั้นเกลือหินได้อย่างถ่องแท้และใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม ซึ่งทำให้สามารถอธิบายการทรุดตัวในบริเวณพื้นที่อุตสาหกรรมเกลือและบริเวณใกล้เคียงได้ โดยสามารถคาดคะเนระดับการทรุดตัวเมื่อมีการสูบน้ำบาดาลเค็มในรูปแบบต่างๆ ได้ไม่มากนัก และยังสามารถคาดเดารูปแบบของโพรงใต้ดินที่จะเกิดได้ ผลการทดสอบต่างๆ ทำให้ผู้วิจัยเข้าใจถึงพฤติกรรมเกิดการทรุดตัวที่ไม่เคยมีใครเข้าใจมาก่อน กล่าวคือเมื่อมีการสูบน้ำบาดาลเค็มขึ้นมาจะส่งผลให้เกิดโดมขึ้นที่ชั้นเกลือหินบริเวณตรงกลางของตำแหน่งบ่อสูบน้ำบาดาลเค็ม ทั้งนี้โดมที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นกับระยะห่างระหว่างท่อสูบน้ำบาดาลเค็ม และอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็ม ซึ่งยังไม่มียุทธศาสตร์หรืองานวิจัยใดๆ กล่าวถึงลักษณะการละลายของเกลือหินแบบนี้มาก่อน สูตรการคำนวณหรือโปรแกรมที่ใช้จำลองพฤติกรรมละลายหรือการทรุดตัวของผิวดินในปัจจุบันนี้จะบอกได้เพียงว่าผิวเกลือที่ถูกกลยุบนั้นมีลักษณะคล้ายถ้วยหงาย แต่โดมที่เกิดจากการทดสอบในครั้งนี้เป็นผลมาจากลักษณะการไหลของน้ำจืดเข้าสู่ท่อสูบน้ำหรืออีกนัยหนึ่งน้ำที่ไหลเข้าท่อสูบส่วนใหญ่จะไหลมาจากด้านข้างก่อนแล้วจึงลดระดับลงไปจนถึง

ตรงกลางของท่อสูบส่งผลให้เกิด โคมขึ้นบริเวณตรงกลางใต้ท่อสูบ นอกจากนี้การเกิด โพรงของชั้นเกลือหินขึ้นกับทิศทางการไหลของแหล่งน้ำจืด โดยชั้นเกลือหินถูกละลายมากบริเวณแหล่งน้ำจืดและลดลงจนกระทั่งถึงตำแหน่งของท่อสูบน้ำบาดาลเค็ม อีกนัยหนึ่ง โพรงเกลือที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำจืดที่เข้าไปละลายชั้นเกลือหิน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถอธิบายพฤติกรรมทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งในและนอกเขตพื้นที่อุตสาหกรรมนาเกลือได้

ผลการทดสอบการทรุดตัวที่เกิดจากผลกระทบของตำแหน่งท่อสูบน้ำบาดาลจากการสูบน้ำบาดาลเค็มแบบต่อเนื่อง คือ เมื่อตำแหน่งของท่อสูบน้ำบาดาลอยู่ใกล้กับชั้นเกลือจะทำให้เกิดการทรุดตัวอย่างมากที่ตำแหน่งของท่อสูบและบริเวณโดยรอบ แต่ในกรณีที่ตำแหน่งของท่อสูบน้ำบาดาลอยู่ห่างจากชั้นเกลือพอสมควรจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันทั่วทั้งแบบจำลอง นอกจากนี้ขอบเขตของการทรุดตัวจะไม่ขึ้นกับตำแหน่งของท่อสูบอีกด้วย ผลการจำลองยังพบว่าความเข้มข้นของน้ำบาดาลบริเวณท่อสูบที่อยู่ใกล้กับชั้นเกลือจะมีความเข้มข้นสูงและลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ในช่วงเวลาที่ไม่ได้สูบน้ำบาดาลจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่ผิวดินและมีระดับความเข้มข้นของน้ำเกลือสูงขึ้น ซึ่งระดับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากกว่ากรณีที่มีการสูบน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้การทรุดตัวยังขึ้นกับความหนาของชั้นหินปิดทับอีกด้วย ซึ่งถ้าชั้นหินปิดทับมีความหนามากจะส่งผลให้การทรุดตัวบนผิวดินมีค่าน้อย กล่าวคือ การทรุดตัวจะมีลักษณะแบนราบแต่จะส่งผลกระทบในวงกว้าง ในทางตรงกันข้ามถ้าชั้นหินปิดทับมีความหนาน้อยลงจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่ลึกและสูงชันแต่มีการกระจายตัวน้อย ขนาดของการทรุดตัวจะขึ้นกับความหนาของชั้นหินปิดทับและค่าความเข้มข้นจะสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการทรุดตัวบนผิวดิน

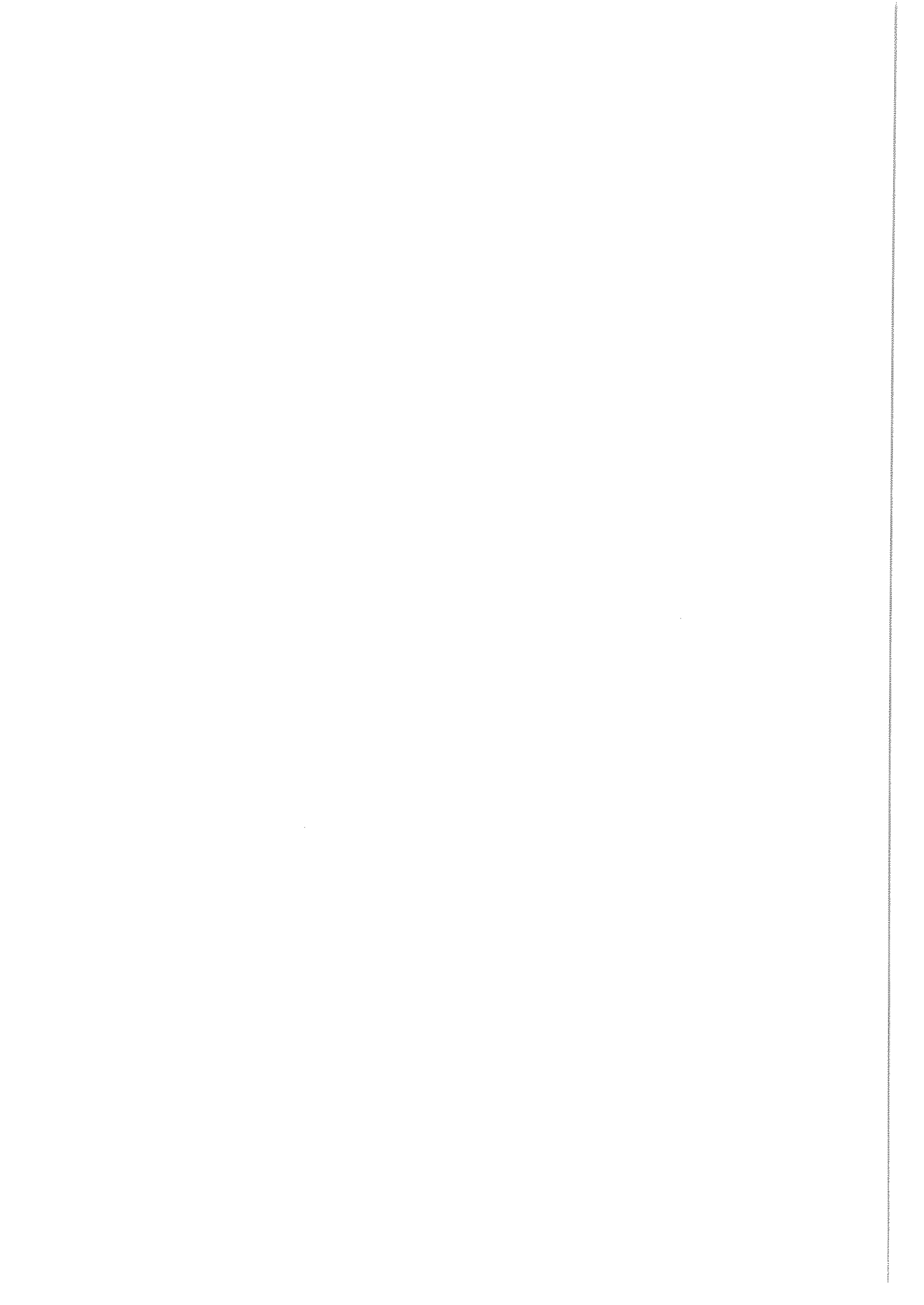
ผลที่ได้จากการทดสอบโดยการอัดน้ำจืดเข้ามาจากทางด้านข้าง สรุปได้ว่า เมื่อระดับน้ำบาดาลสูงขึ้นจะทำให้เกิดการทรุดตัวมากขึ้น แต่จะทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือต่ำ ในทางตรงกันข้ามถ้าระดับน้ำบาดาลต่ำลงจะส่งผลให้ค่าการทรุดตัวน้อยลง แต่กลับทำให้ค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือสูงขึ้น และผลจากการตรวจวัดค่าการทรุดตัวบนผิวดินจากแบบจำลองระบุว่า เมื่อมีการอัดน้ำจืดเข้ามาจากทางด้านข้างจะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นแอ่งระหว่างแหล่งที่มาของน้ำจืดกับท่อสูบน้ำบาดาล และในกรณีที่ช่องทางเข้าของแหล่งน้ำจืดมีขนาดกว้างจะทำให้เกิดการทรุดตัวสูงขึ้นตามขนาดของช่องทางเข้า ส่วนผลที่ได้จากการทดสอบ โดยการปล่อยน้ำจืดให้ซึมเข้ามาจากทางด้านบนนั้นคล้ายคลึงกับการทดสอบ โดยการอัดน้ำจืดเข้ามาจากทางด้านข้าง แต่มีลักษณะของการทรุดตัวบนผิวดินที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ เมื่อมีการปล่อยน้ำจืดให้ซึมเข้ามาจากทางด้านบนจะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่มีลักษณะเป็นแอ่งทั้งสองด้านของท่อสูบน้ำบาดาล หรือเกิด โคมขึ้นใต้ท่อสูบน้ำบาดาลเค็ม นอกจากนี้ขนาดการทรุดตัวบนผิวดินจะขึ้นกับอัตราการสูบน้ำบาดาล กล่าวคือ ค่าการทรุดตัวบนผิวดินจะสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการสูบน้ำบาดาล และอัตราการ

สูบน้ำบาดาลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลกระทบต่อขอบเขตการทรุดตัวอีกด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง เมื่อมีการสูบน้ำบาดาลเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่ลึกและสูงขึ้นแต่มีการกระจายตัวน้อย

ผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับอุตสาหกรรมเกลือที่แท้จริงได้ เนื่องจากปัญหาการทรุดตัวที่เกิดจากการทำนาเกลือในปัจจุบันนั้นมีสาเหตุมาจากการสูบน้ำบาดาลเค็มขึ้นมาในปริมาณมากและต่อเนื่อง โดยไม่มีการควบคุมทั้งจากภาครัฐและภาคเอกชน รวมไปถึงชาวบ้านที่ลักลอบสูบน้ำบาดาลเค็มอย่างผิดกฎหมาย โดยเฉพาะการทำนาเกลือในแอ่งสกลนครที่ชั้นหินปิดทับมีความหนาไม่มาก (ชั้นน้ำบาดาลเค็มอยู่ตื้น) ทำให้เกิดการทรุดตัวหรือหลุมยุบที่ลึกและสูงชันมากบริเวณรอบๆ บ่อสูบน้ำบาดาลเค็ม รวมไปถึงพื้นที่นาเกลือ เขตชุมชนที่พักอาศัย โรงงานอุตสาหกรรม และพื้นที่การเกษตร ซึ่งส่งผลกระทบในบริเวณกว้าง ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบดังกล่าวจะต้องได้รับความร่วมมือจากภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำนาเกลือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ประกอบการที่ใช้วิธีการทำนาเกลือแบบดั้งเดิม (Brine Pumping Method) อันเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการทรุดตัวที่ลึกและเป็นอันตราย ซึ่งวิธีการแก้ปัญหานี้ทำได้ไม่ยาก เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแล้วการจะทำให้ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินลดลงจะต้องลดอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็มลงแต่ต้องสูบอย่างต่อเนื่อง โดยให้ปลายท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือหินพอสมควร ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยลดผลกระทบการทรุดตัวบนผิวดินได้ แต่อาจจะไม่เป็นผลดีกับภาคอุตสาหกรรมเท่าใดนักเนื่องจากอัตราการผลิตจะลดลงไปจากเดิม แต่ข้อดีสำหรับผู้ประกอบการคือสามารถสูบน้ำบาดาลเค็มเพื่อผลิตเกลือได้ในระยะยาวเนื่องจากการทรุดตัวบนผิวดินลดลง และไม่ส่งผลกระทบต่อบ้านเรือนในบริเวณใกล้เคียง

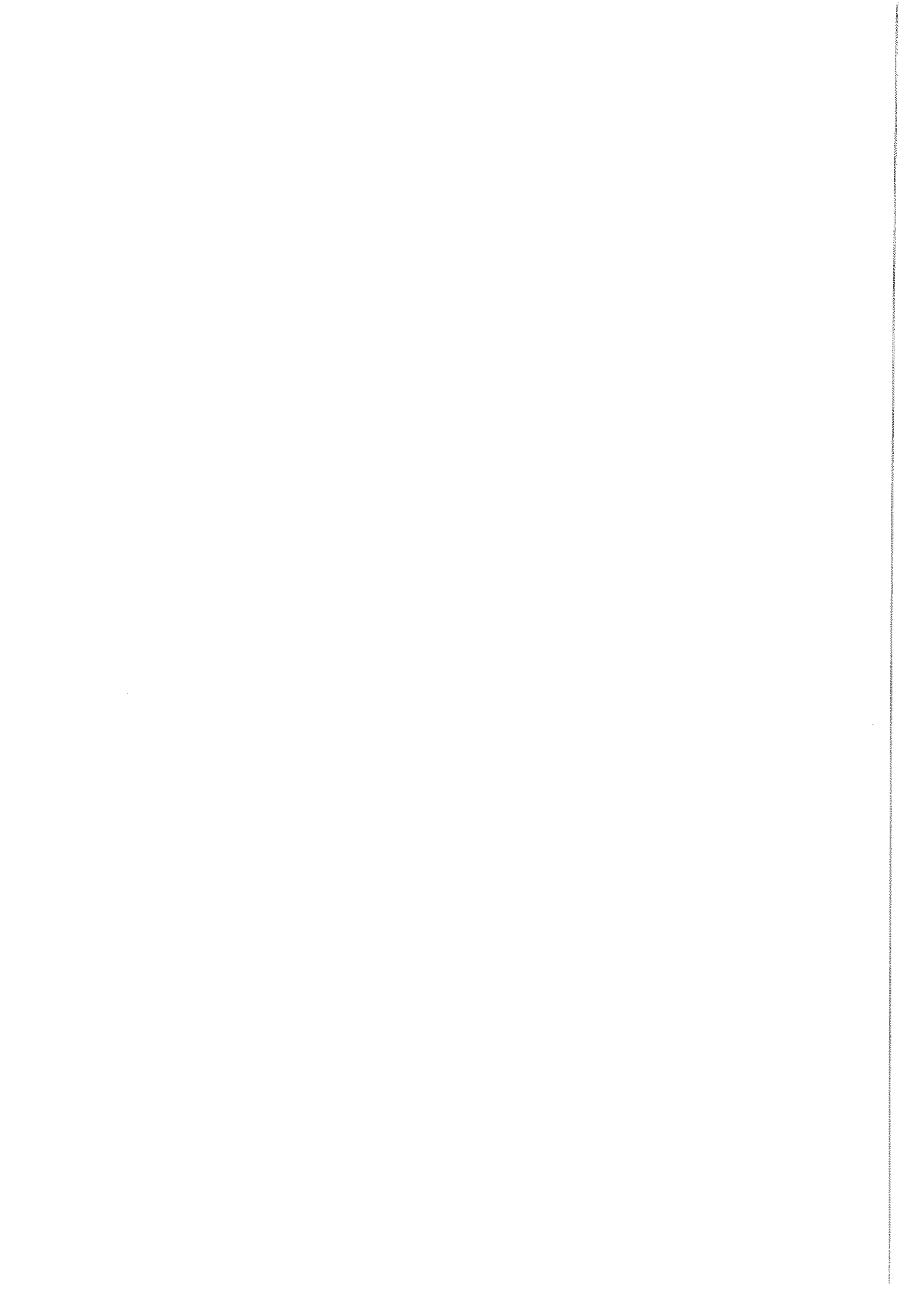
8.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการทดสอบควรจะมีการเปลี่ยนขนาดของทรายที่ใช้จำลองชั้นหินปิดทับเพื่อให้มีค่าความซึมผ่านที่หลากหลาย หรือควรใช้วัสดุที่นำมาจำลองชั้นหินปิดทับที่มีค่าความซึมผ่านและค่าความยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงกับพื้นที่ที่ต้องการศึกษา
- 2) ควรมีการเก็บตัวอย่างการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงด้วยวิธีทางธรณีฟิสิกส์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง
- 3) ควรมีการจำลองผลกระทบจากการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงในสามมิติจากข้อมูลโพรงเกลือที่มี และใช้ค่าความยืดหยุ่นของชั้นหินปิดทับที่ใกล้เคียงของจริงเพื่อดูขอบเขตผลกระทบของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริง และยังสามารถศึกษาได้ว่าจะเกิดการทรุดตัวที่สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤต (Sub-Critical) หรือการทรุดตัวที่จุดวิกฤต (Critical) หรือการทรุดตัวที่เกินกว่าจุดวิกฤต (Super-Critical)



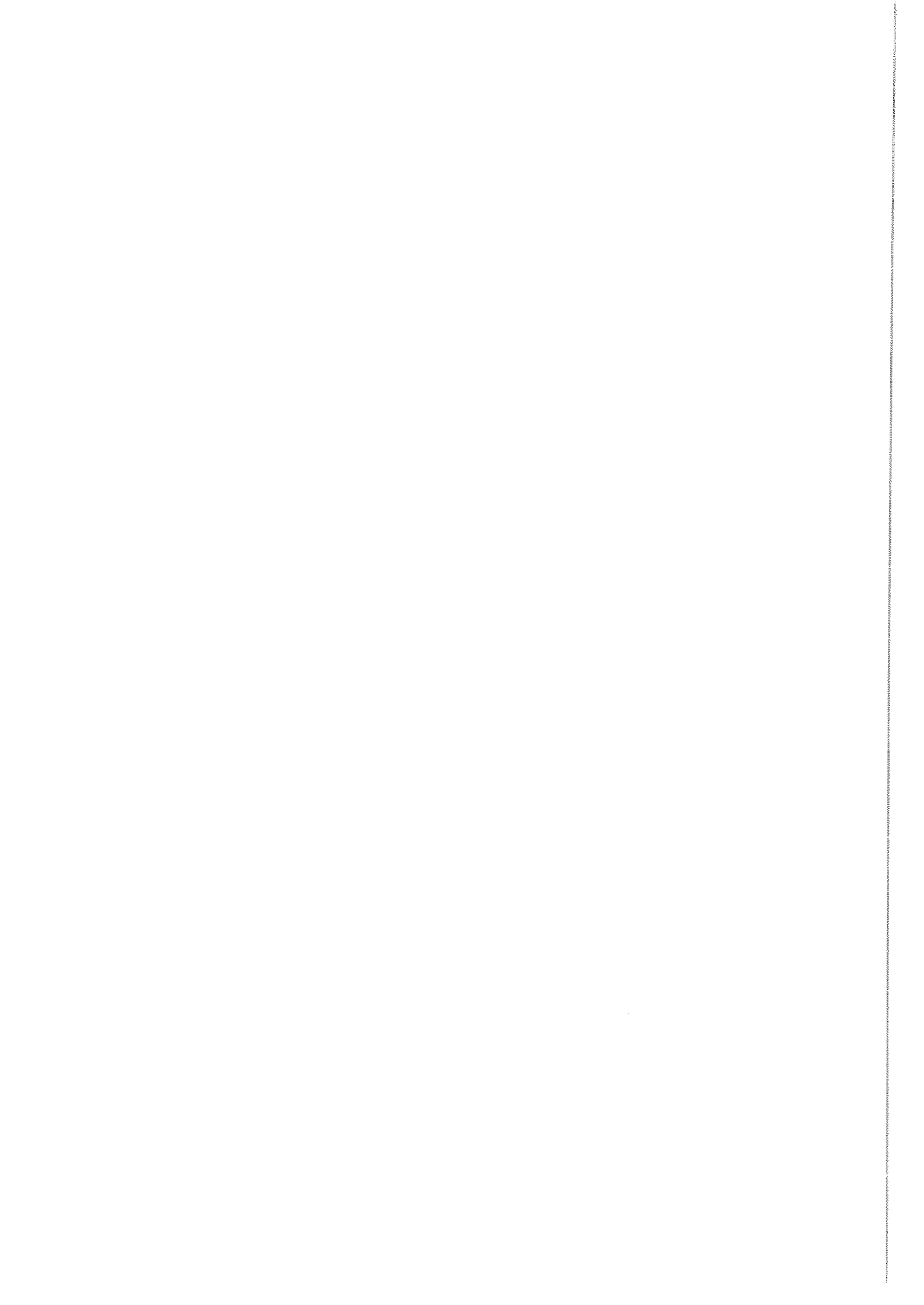
บรรณานุกรม

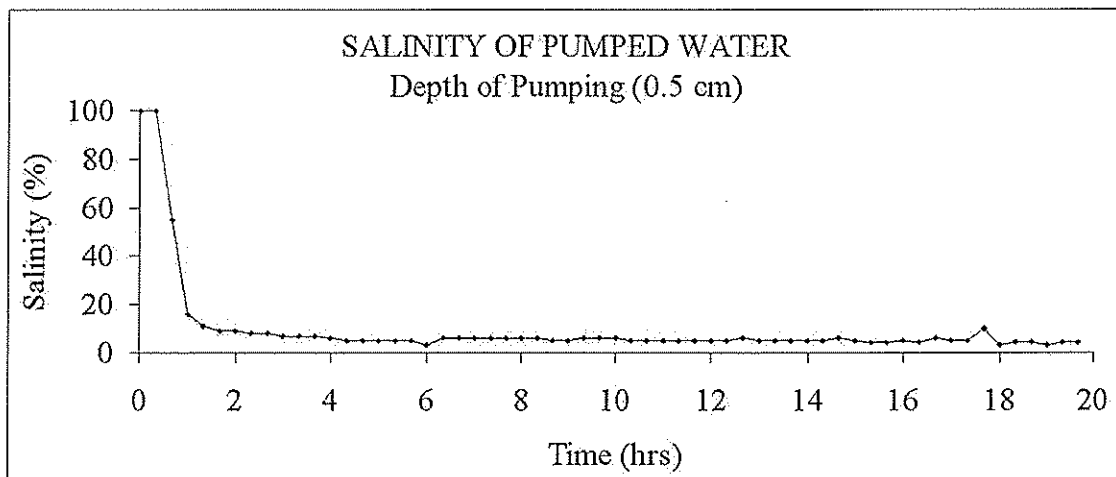
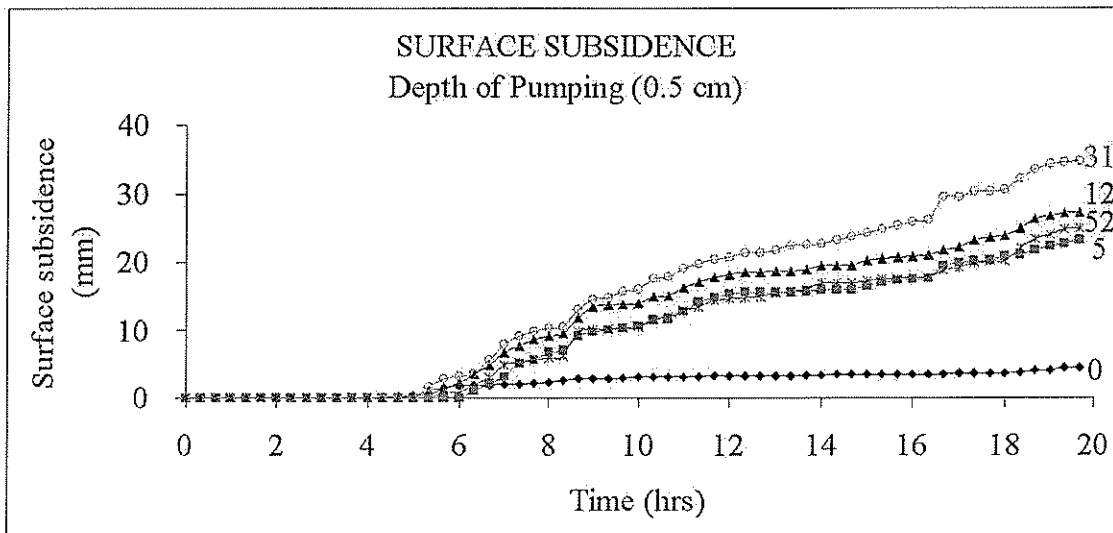
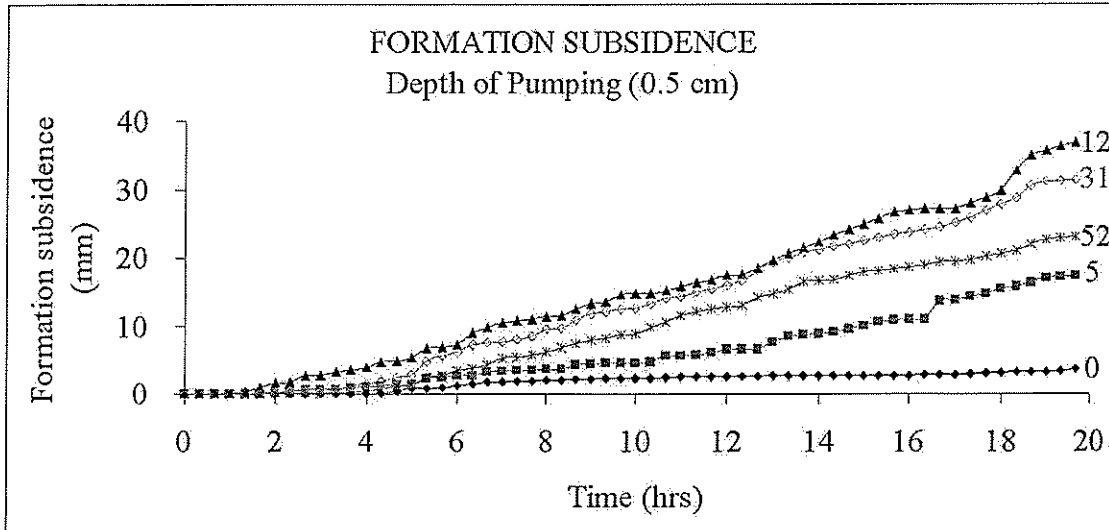
- กรมทรัพยากรธรณี (2548). หลุมยุบ, กระทรวงธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรธรณี (2541). การศึกษาชั้นเกลือหินบริเวณโครงการชลประทานลุ่มน้ำท่าตอนล่าง, จังหวัดนครพนม, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพมหานคร, 158 หน้า.
- ASTM D4874-95. Standard Test Method for Leaching Solid Material in a Column Apparatus. In **Annual Book of ASTM Standards** (Vol. 11.04). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Biffle, J. H. (1984). **JAC-A two-dimensional finite element computer program for the non-linear quasistatic response of solids with the conjugate gradient method.** SAND81-0998, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Gartling, D.K. (1981a). **COYOTE- A finite element computer program for nonlinear heat conduction problems.** SAND77-0463. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Gartling, D.K. (1981b). **MERLIN- A computer program to transfer data between finite element meshes.** SAND81-0463. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Pudewills, A. (1998). Influence of anhydrite strata on a waste disposal drift. In **Proceedings of the Fourth Conference on the Mechanical Behavior of Salt** (pp. 551-560). Clausthal-Zellerfeld, Germany: Trans Tech Publications.
- Satarugsa, P., Meesawat, N., Yongsanpoo, S., and Murnjai, D. (2002). Monitoring of Subsurface Cavity Collapsed into a Sinkhole with Resistivity Survey. **KKU Research Journal**. 8(2): 41-52
- Serata (1991). **GEO/REM computer programs for Sifto Canada's Goderich salt mine.** Internal report prepared by Serata Geomechanics Inc., Goderich, ON, Canada.
- Serata, S. and Fuenkajorn, K. (1993). Formulation of a constitutive equation for salt. **The Seventh Symposium on Salt** (pp.483-488). Amsterdam: Eisevier Science Publications.
- Stone, C. M., Krieg, R. D. and Beisinger, Z.E. (1985). **SANCHO, a finite element computer program for the quasistatic, large deformation, Inelastic response of two-dimensional solid,** SAND84-2618.



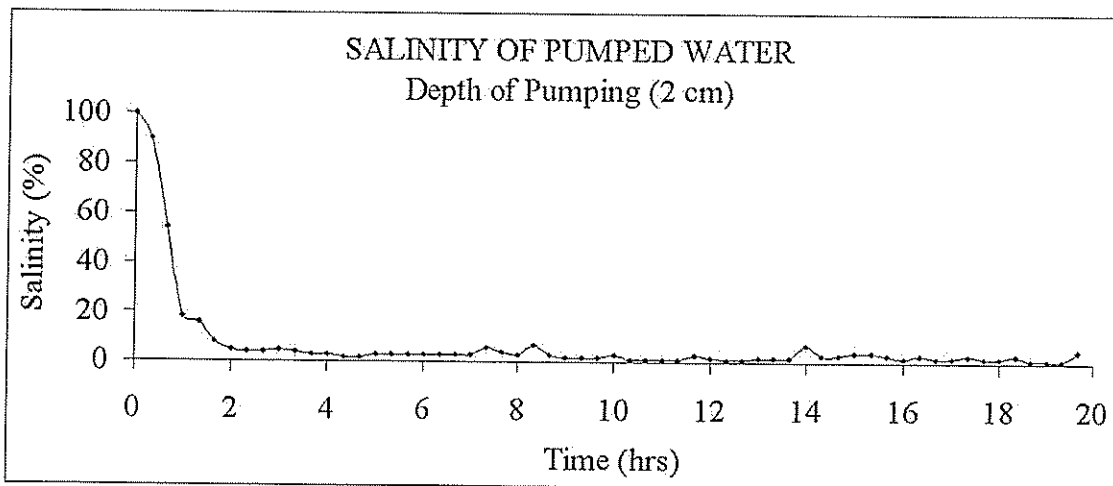
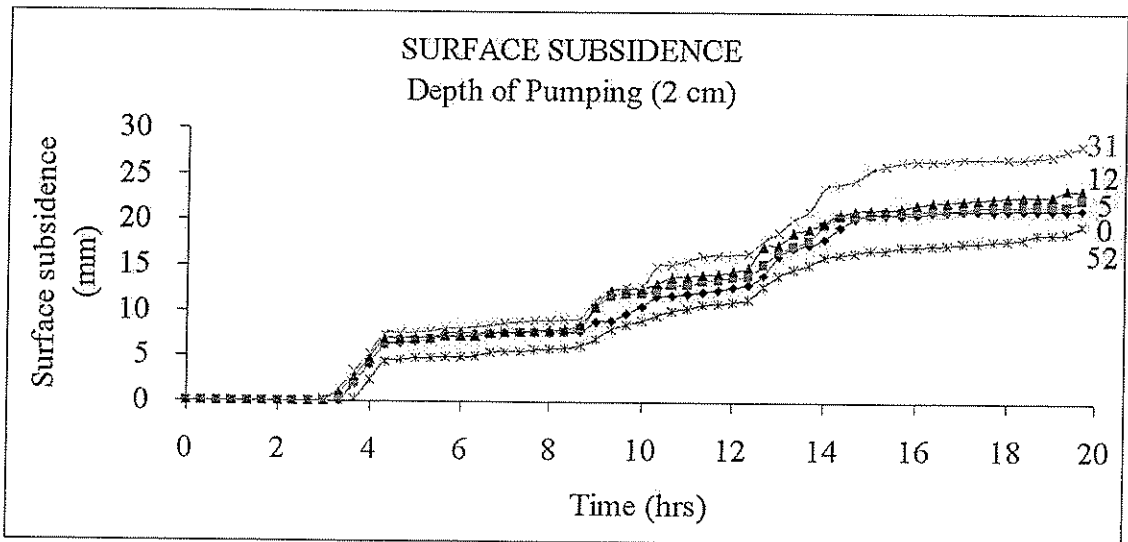
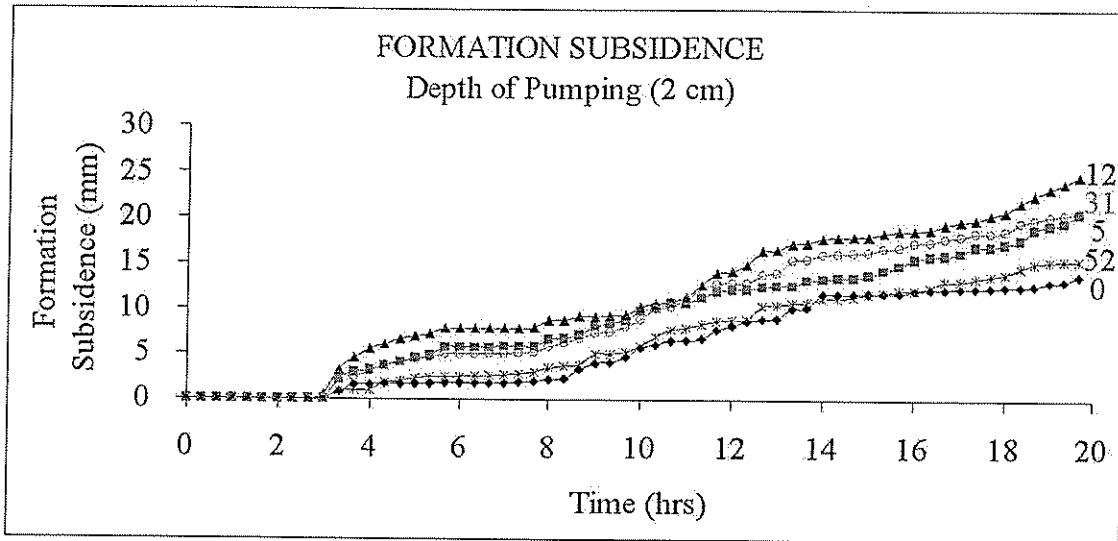
ภาคผนวก ก

ผลจากการวัดค่าการทรุดตัว
และผลจากการวัดค่าความเข้มข้น

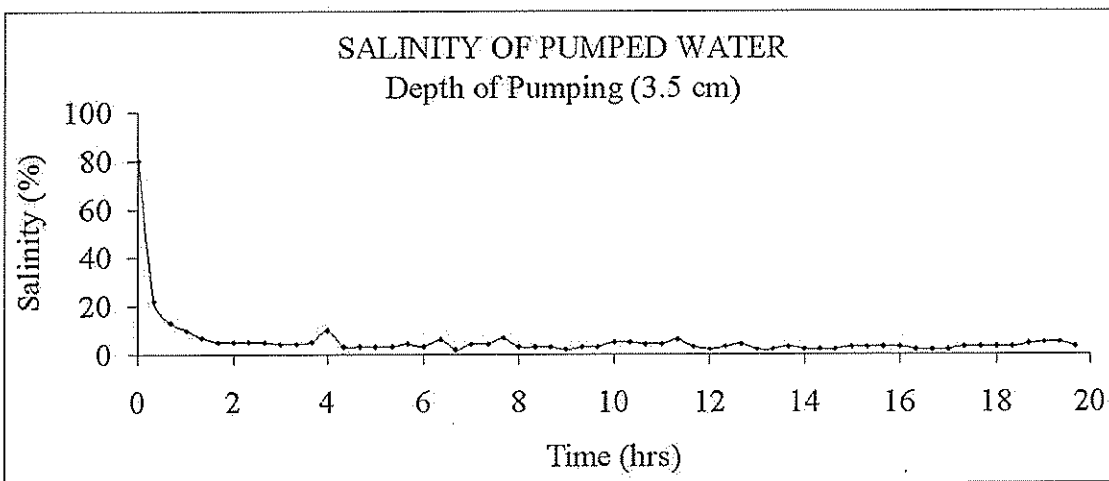
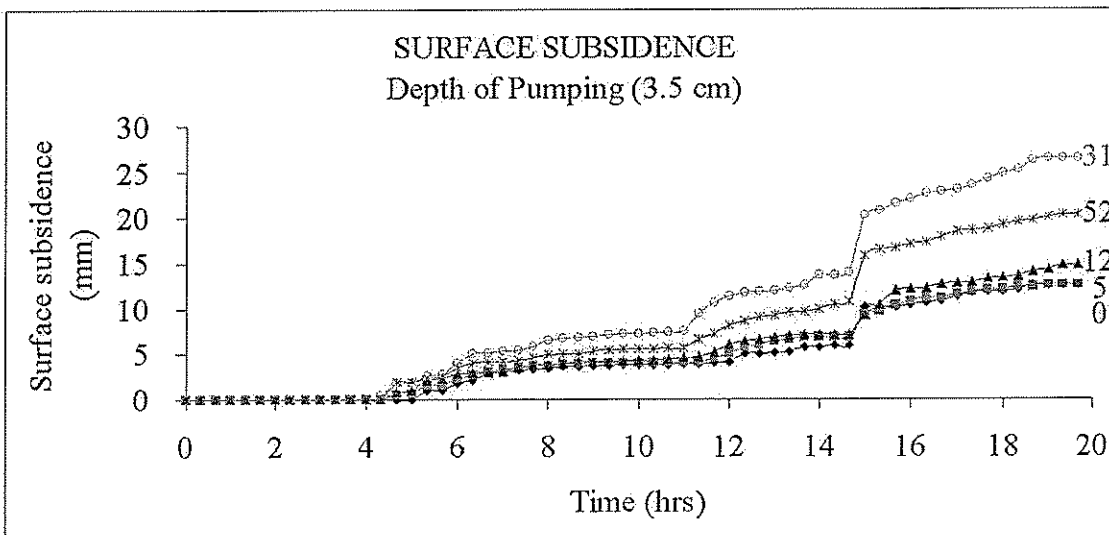
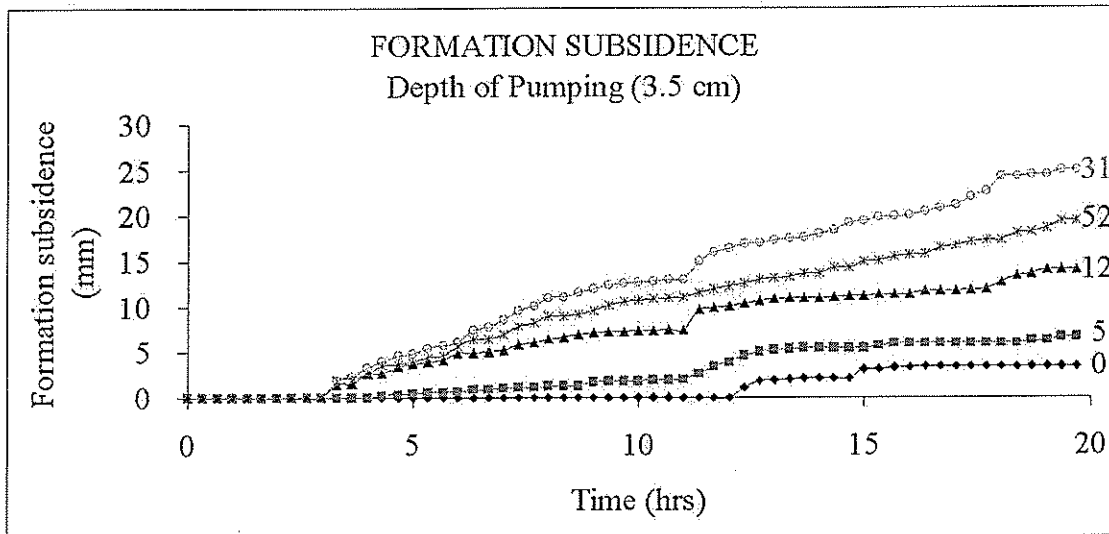




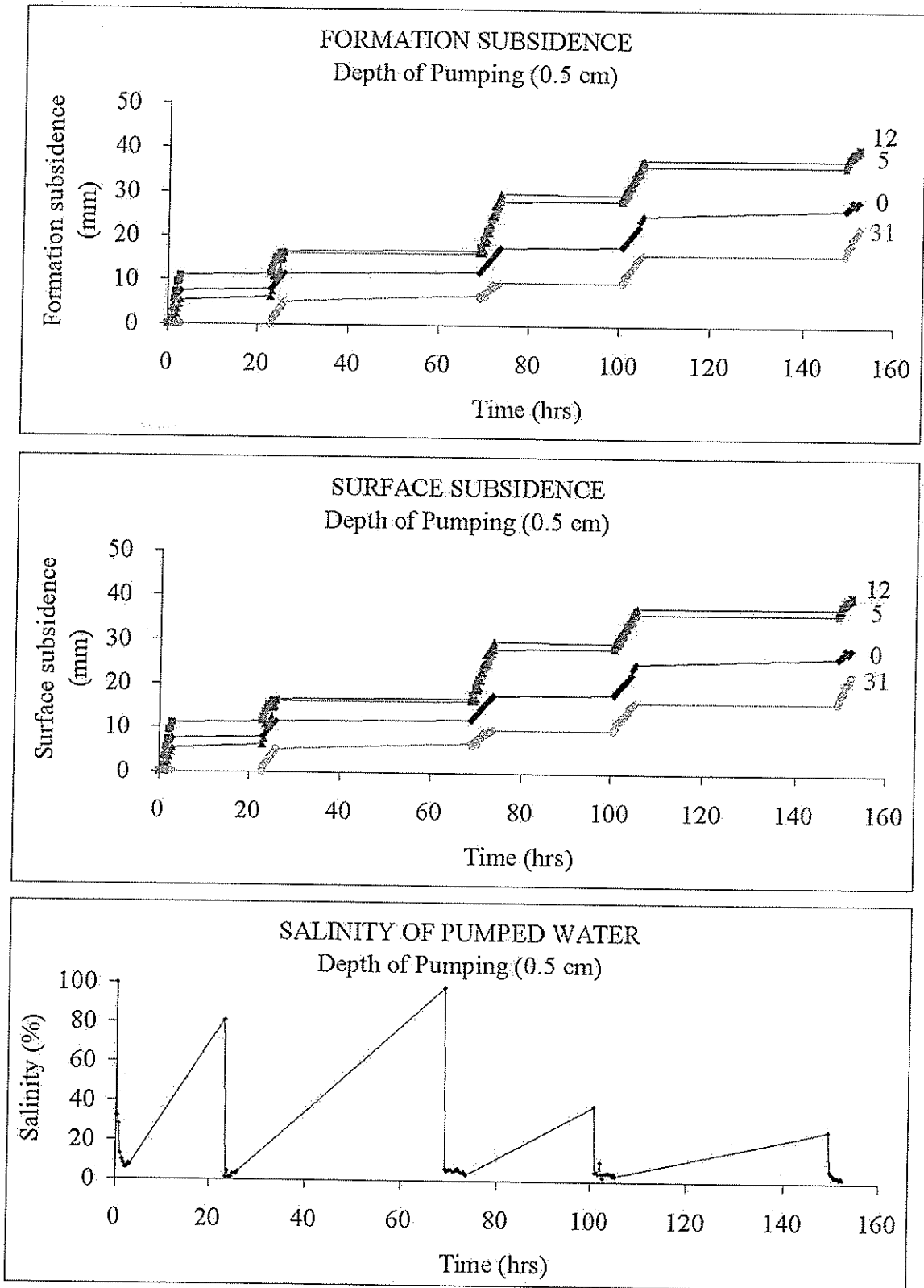
รูปที่ ก-1 กราฟผลกระทบของตำแหน่งท่อสูบ โดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบนที่ $h_s = 0.5$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยทำการสูบแบบต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



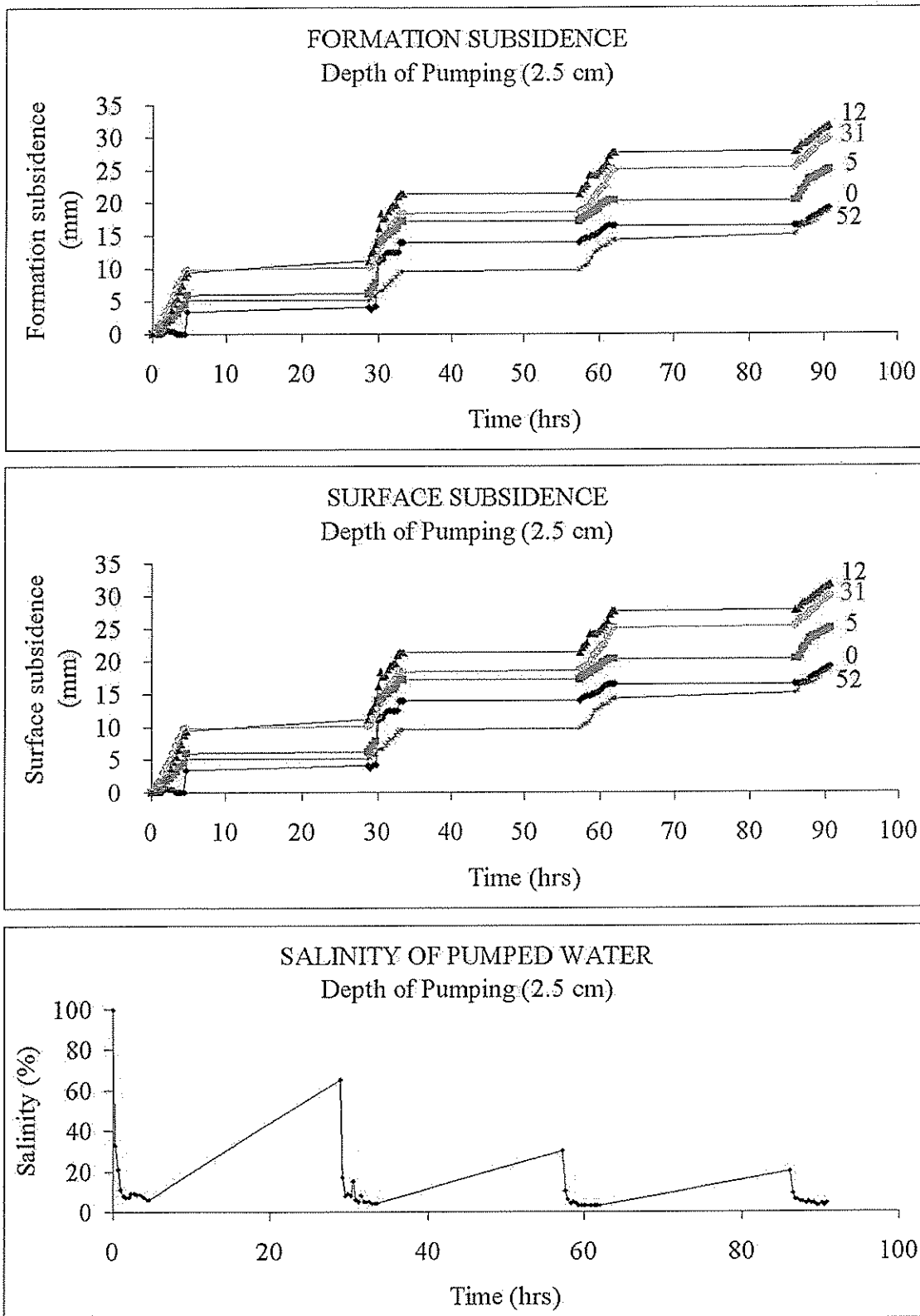
รูปที่ ก-2 กราฟผลกระทบของตำแหน่งท่อสูบ โดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบนที่ $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยทำการสูบแบบต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



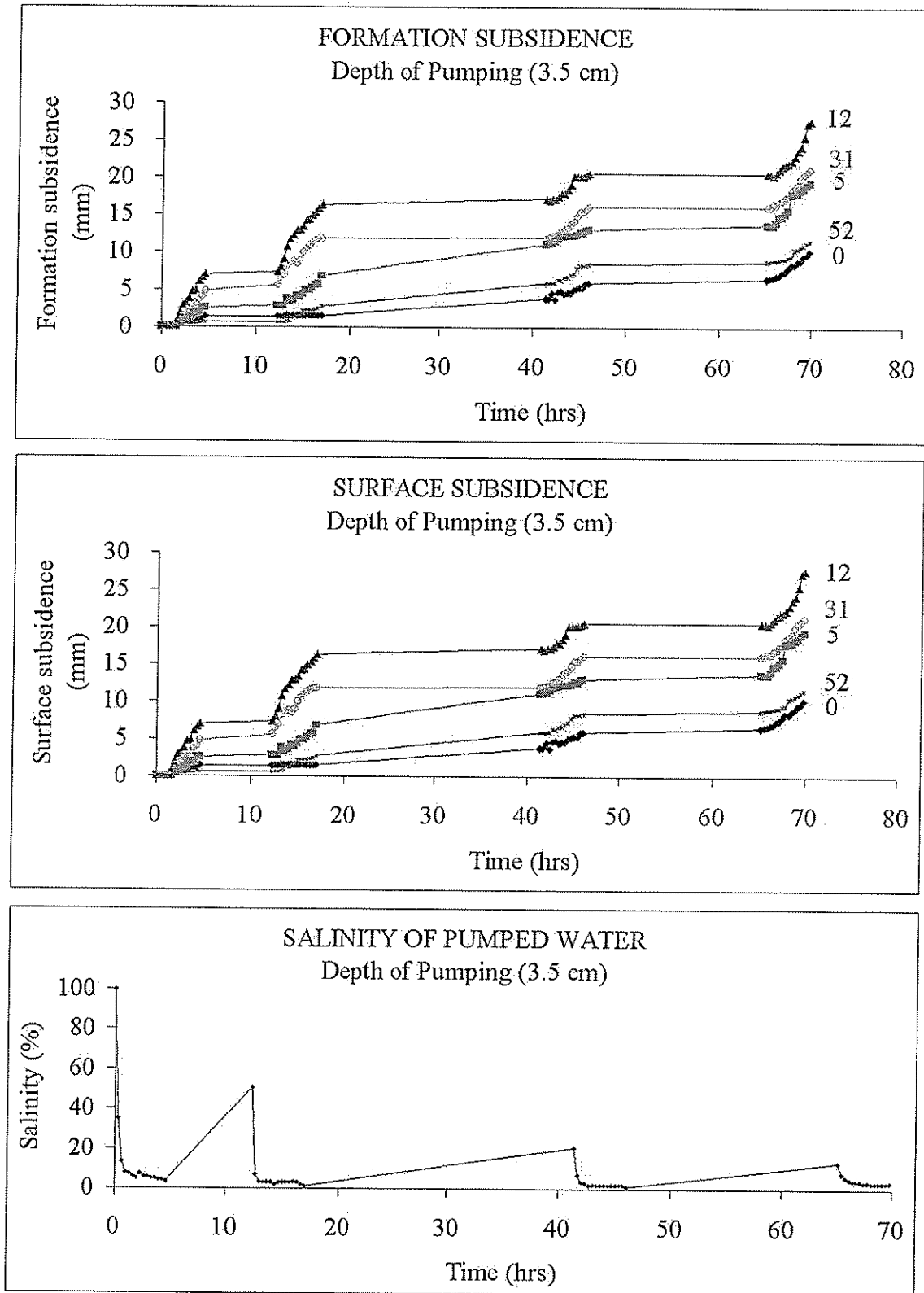
รูปที่ ก-3 กราฟผลกระทบของตำแหน่งท่อสูบ โดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบนที่ $h_s = 3.5$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยทำการสูบแบบต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



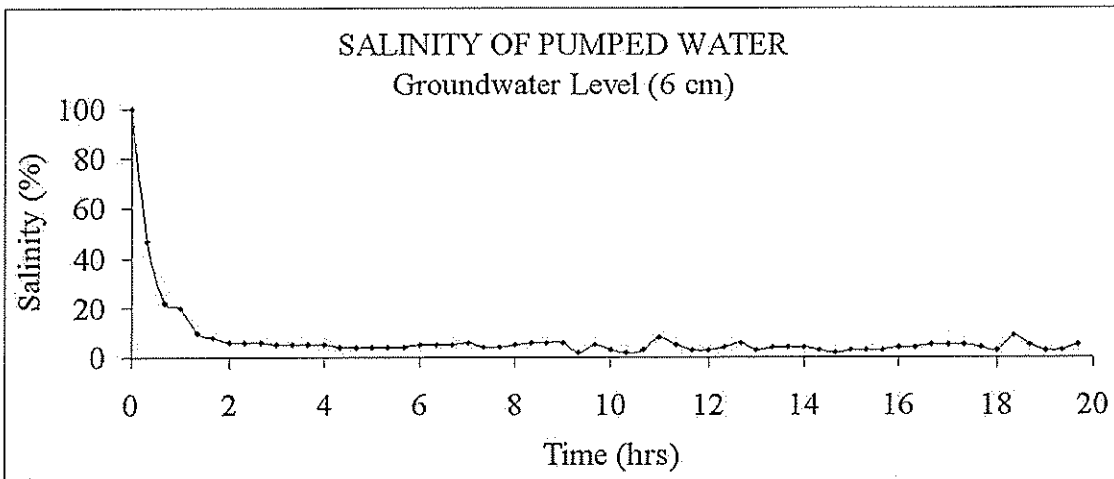
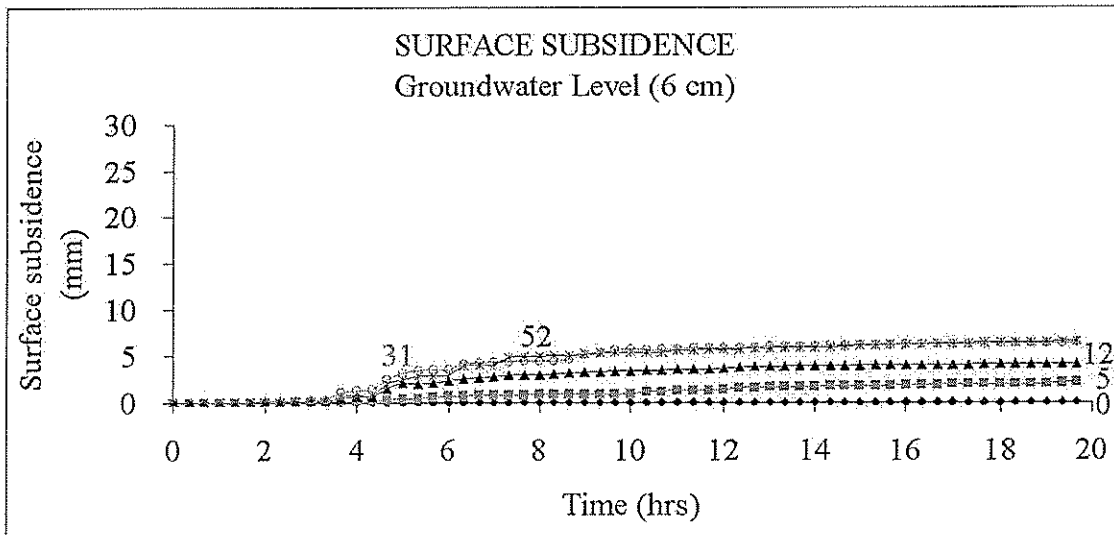
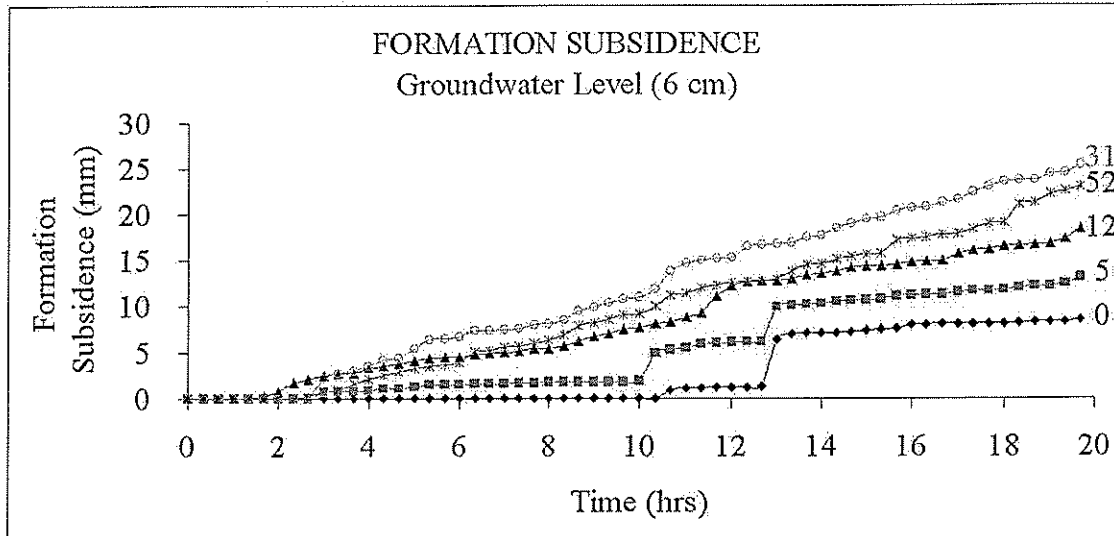
รูปที่ ก-4 กราฟผลกระทบของตำแหน่งท่อสูบโดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบนที่ $h_s = 0.5$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยทำการสูบแบบเป็นช่วงๆ ที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



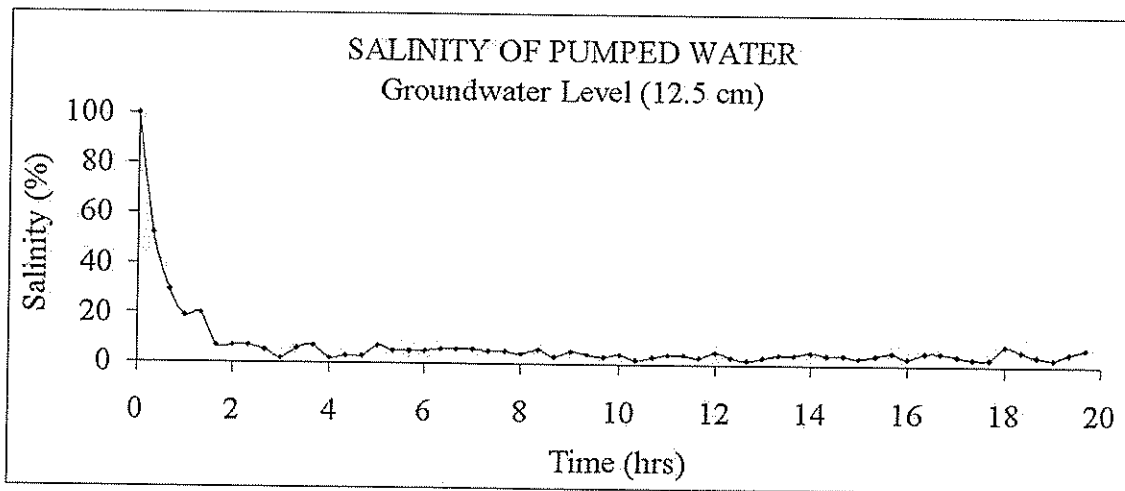
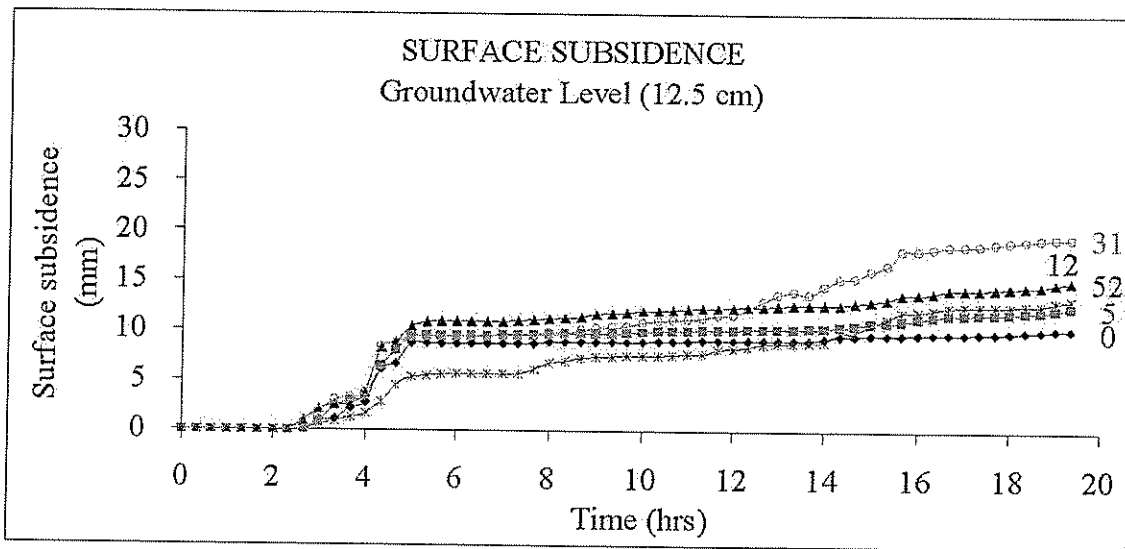
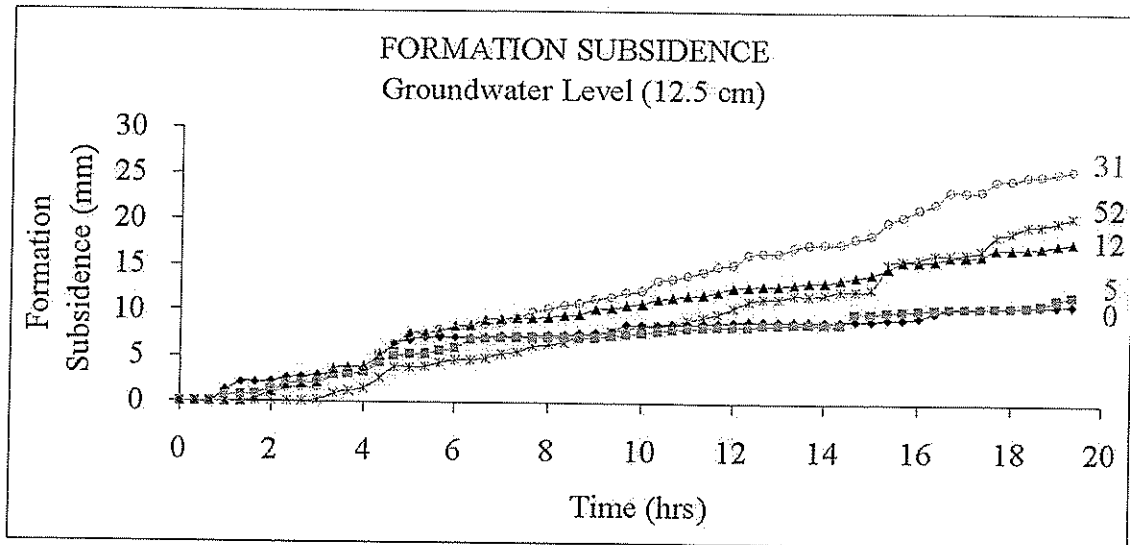
รูปที่ ก-5 กราฟผลกระทบของตำแหน่งท่อสูบ โดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบนที่ $h_s = 2.5$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยทำการสูบแบบเป็นช่วง ๆ ที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาทีซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



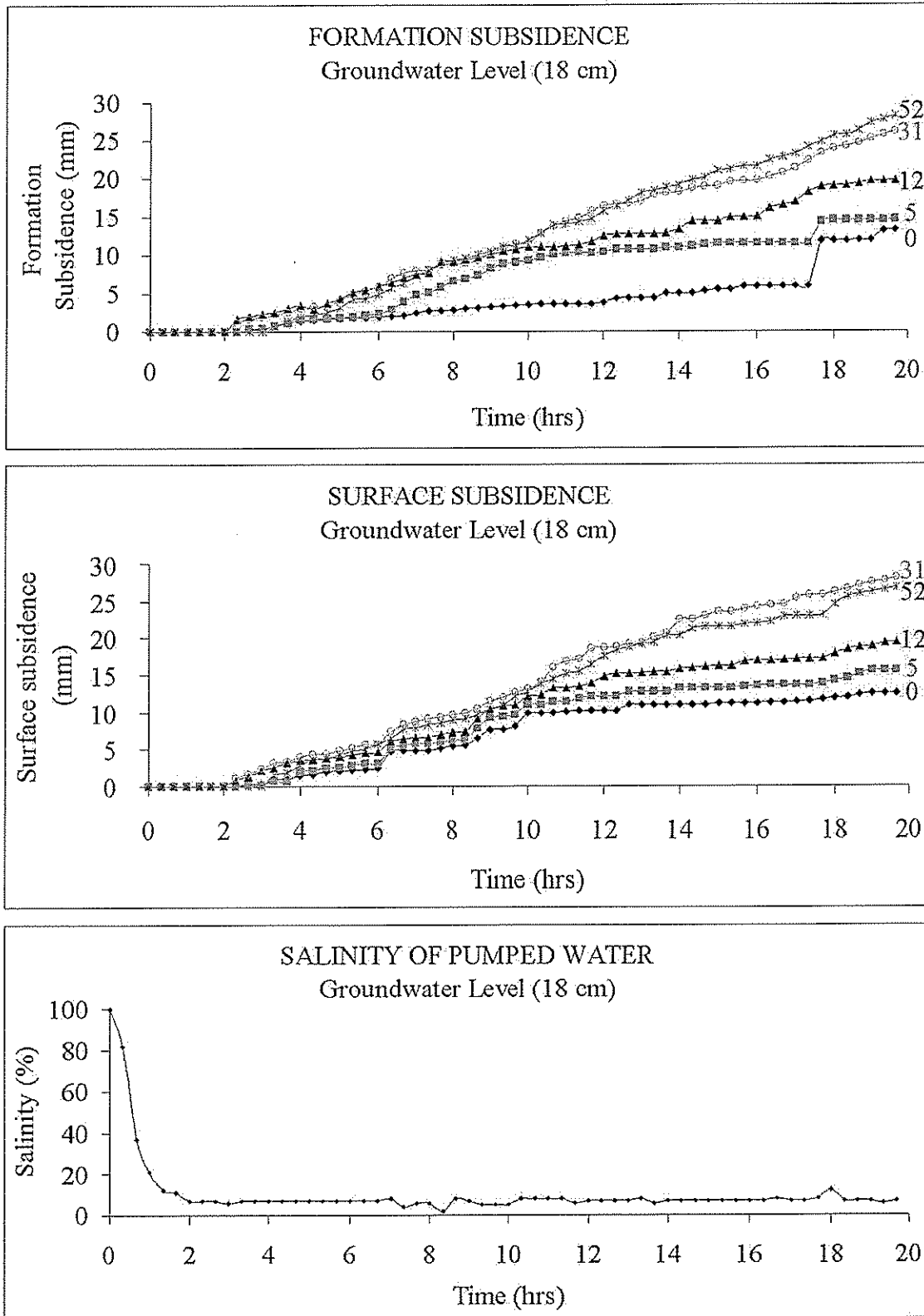
รูปที่ ก-6 กราฟผลกระทบของตำแหน่งท่อสูบโดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบนที่ $h_s = 3.5$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยทำการสูบแบบเป็นช่วงๆ ที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งอยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



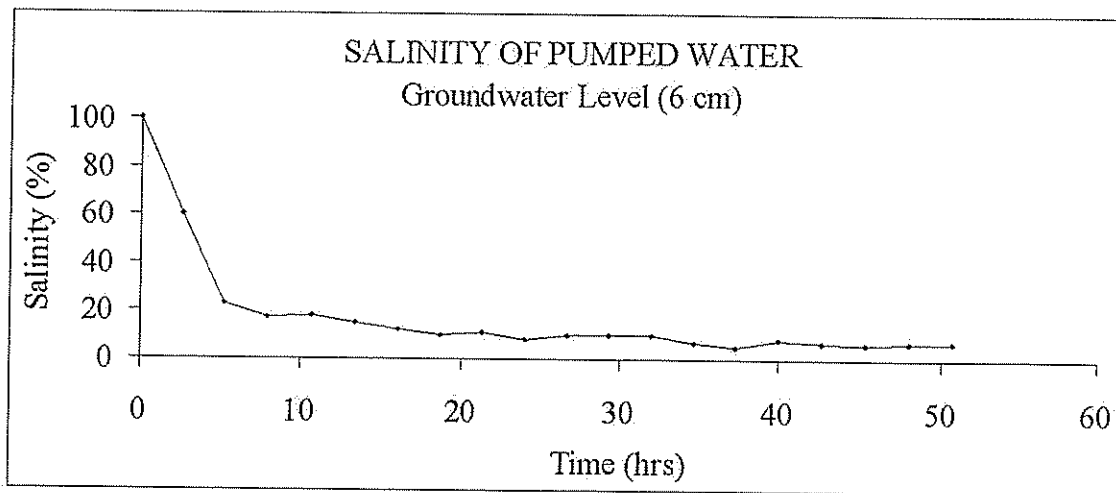
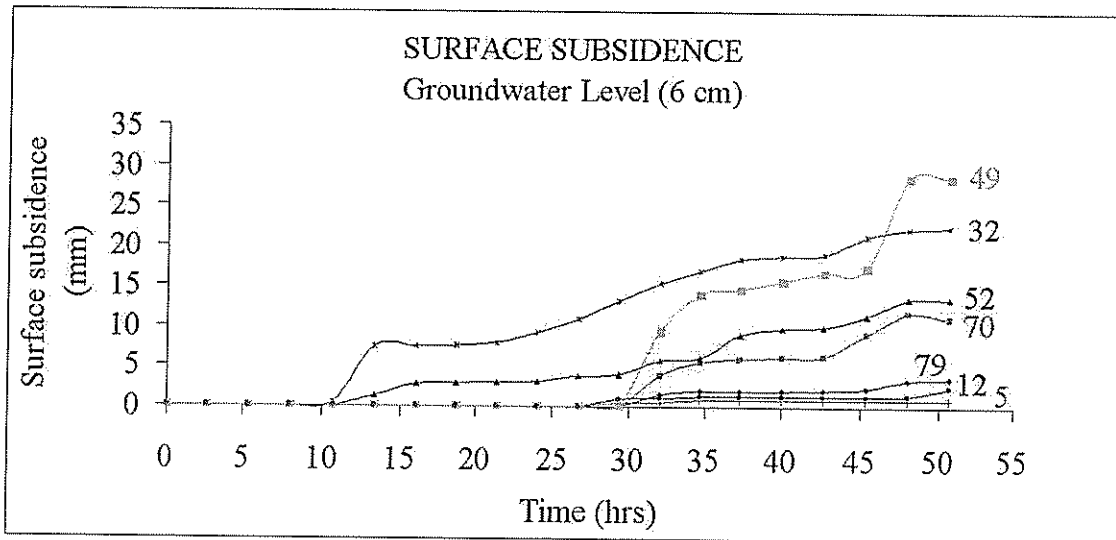
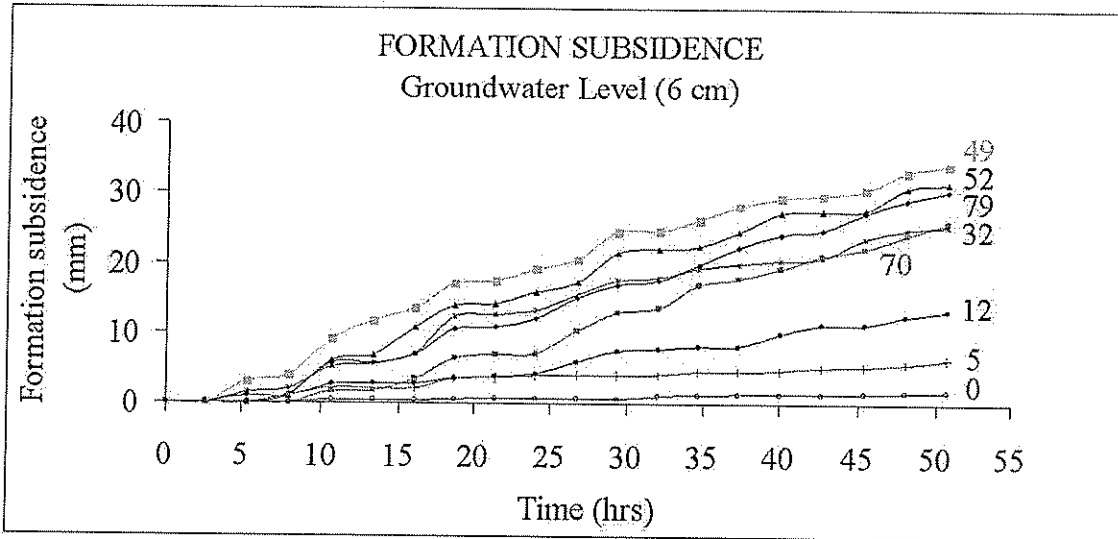
รูปที่ ก-7 กราฟผลกระทบของระดับน้ำบาดาลโดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบนที่ $h_w = 6$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยสูบบนต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งอยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



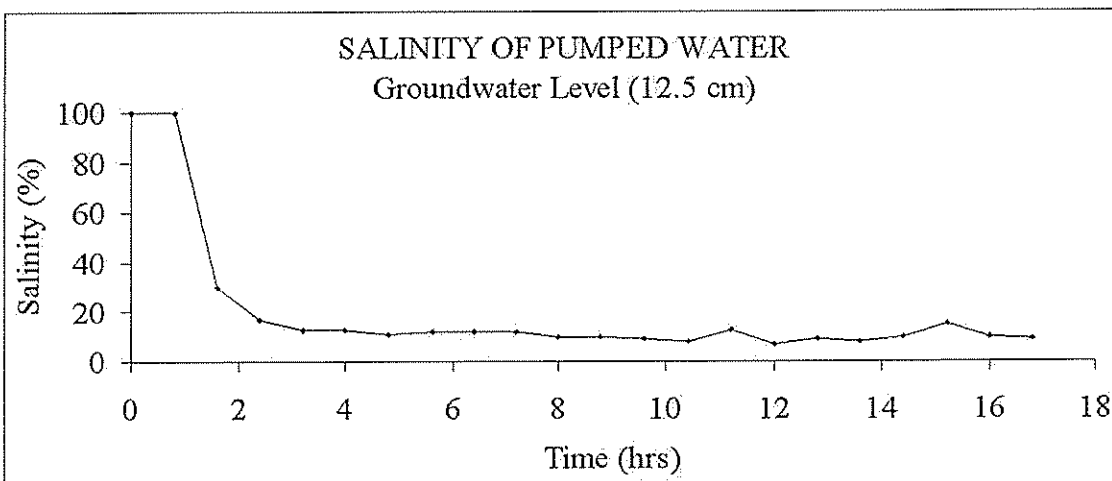
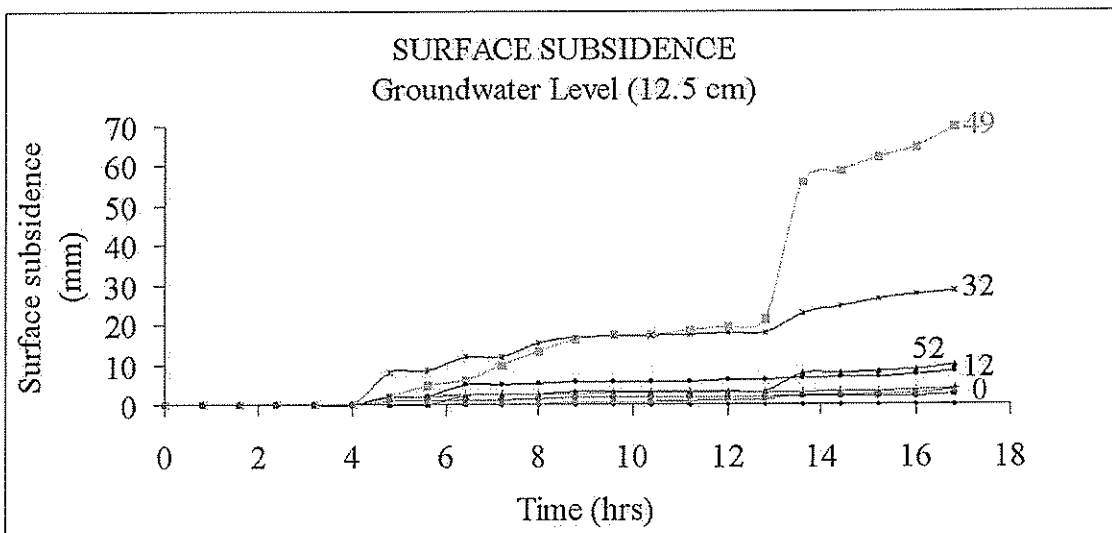
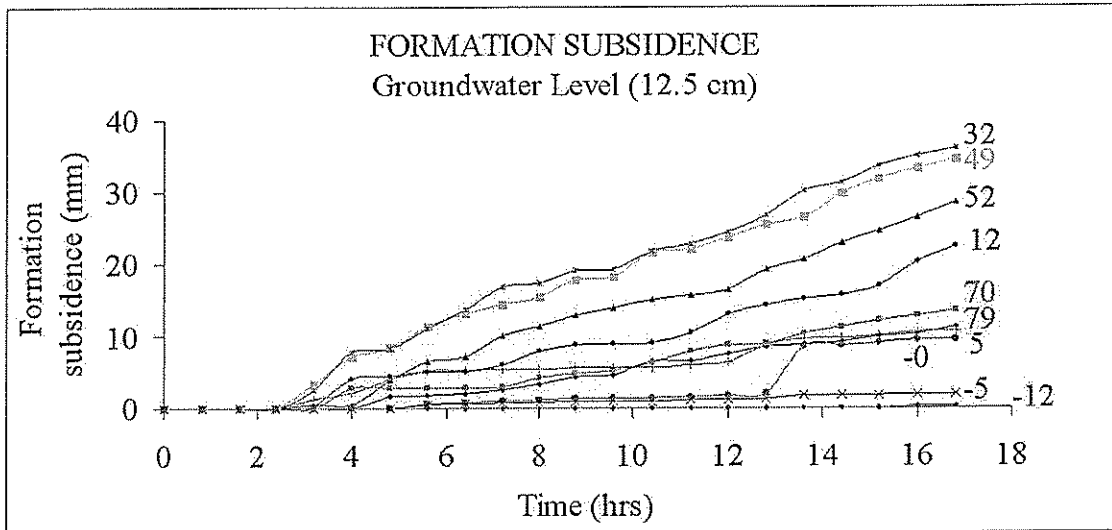
รูปที่ ก-8 กราฟผลกระทบของระดับน้ำบาดาล โดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบนที่ $h_w = 12.5$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยสูบแบบต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาทีซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งอยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



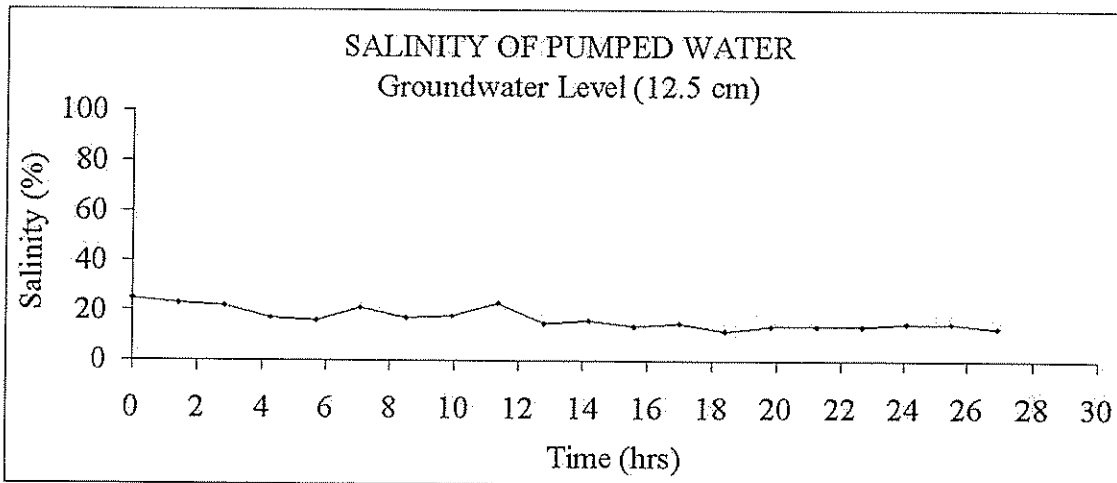
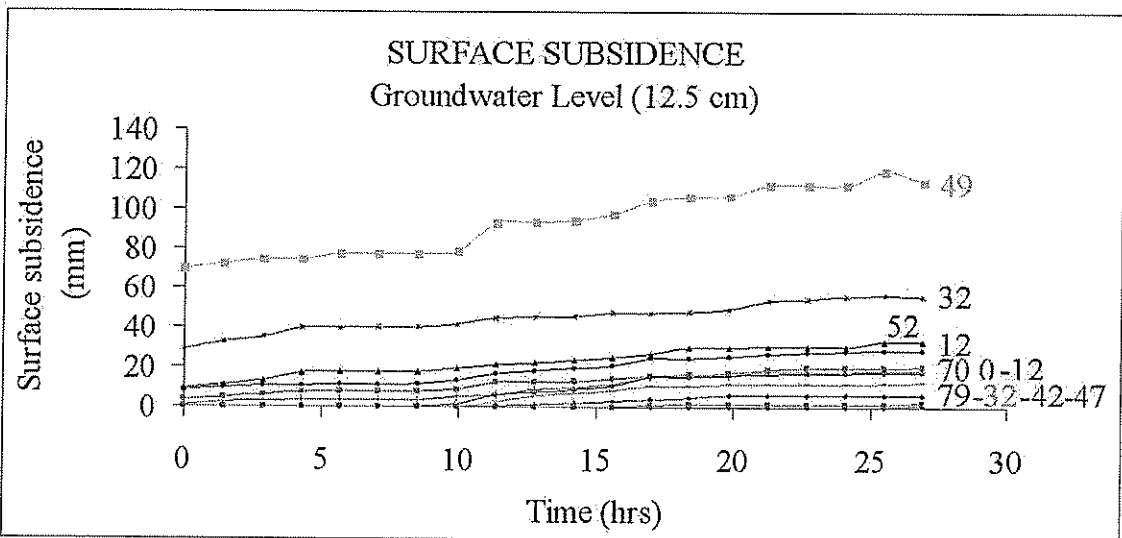
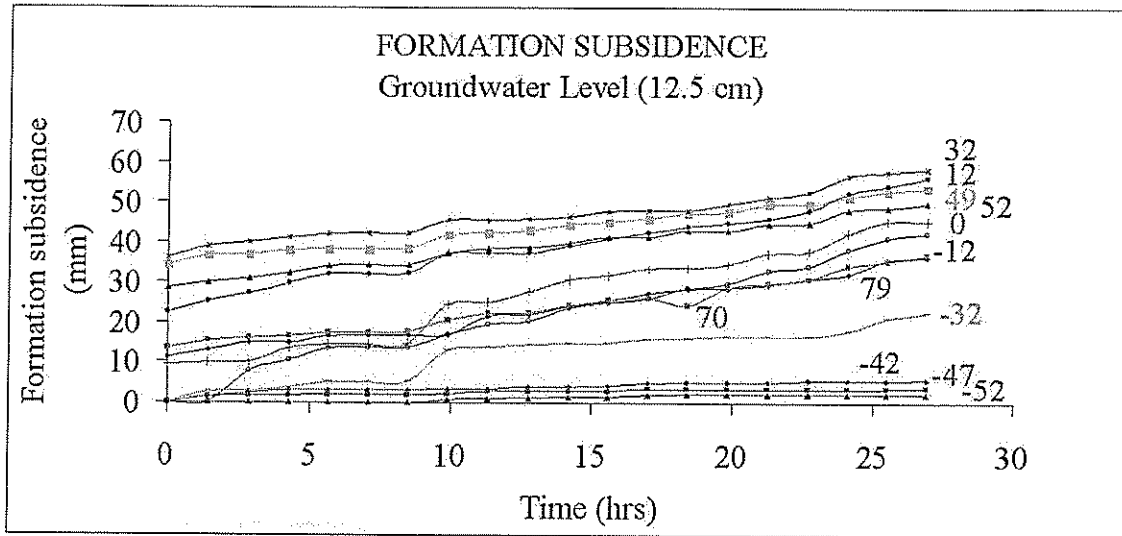
รูปที่ ก-9 กราฟผลกระทบของระดับน้ำบาดาลโดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบนที่ $h_w = 18$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยสูบแบบต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งอยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



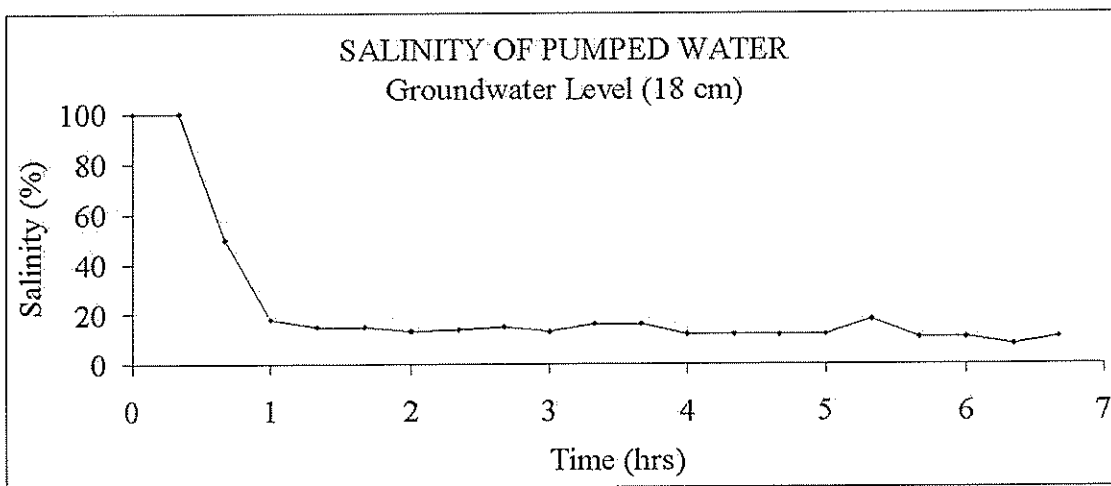
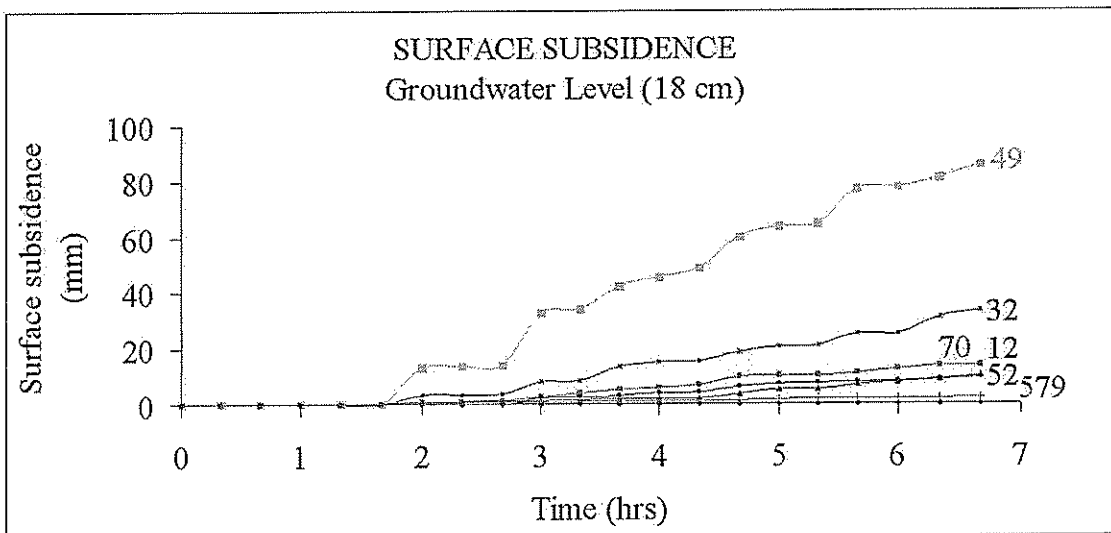
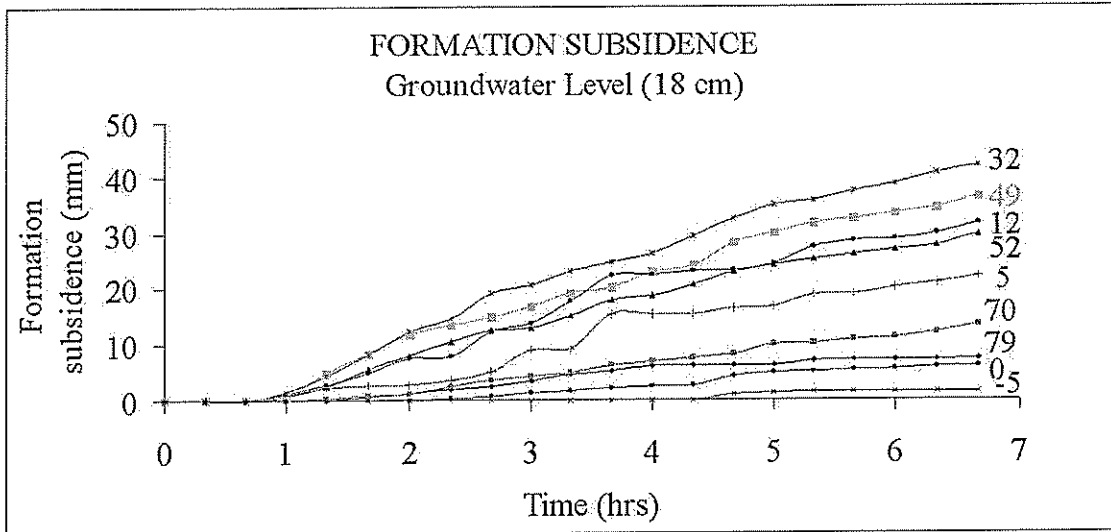
รูปที่ ก-10 กราฟผลกระทบของระดับน้ำบาดาล โดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านข้างที่ $h_w = 6$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยสูบแบบต่อเนื่องที่ $Q = 14$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งอยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



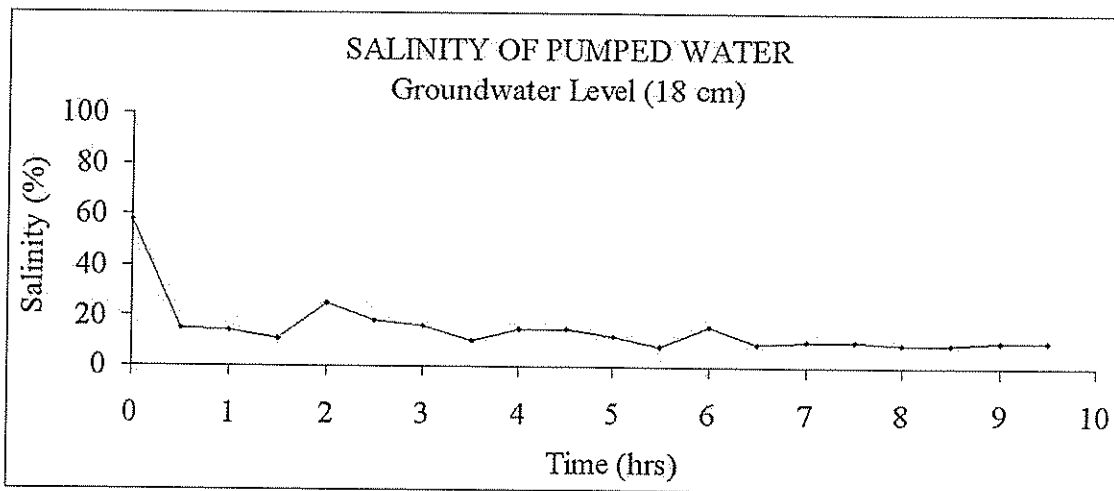
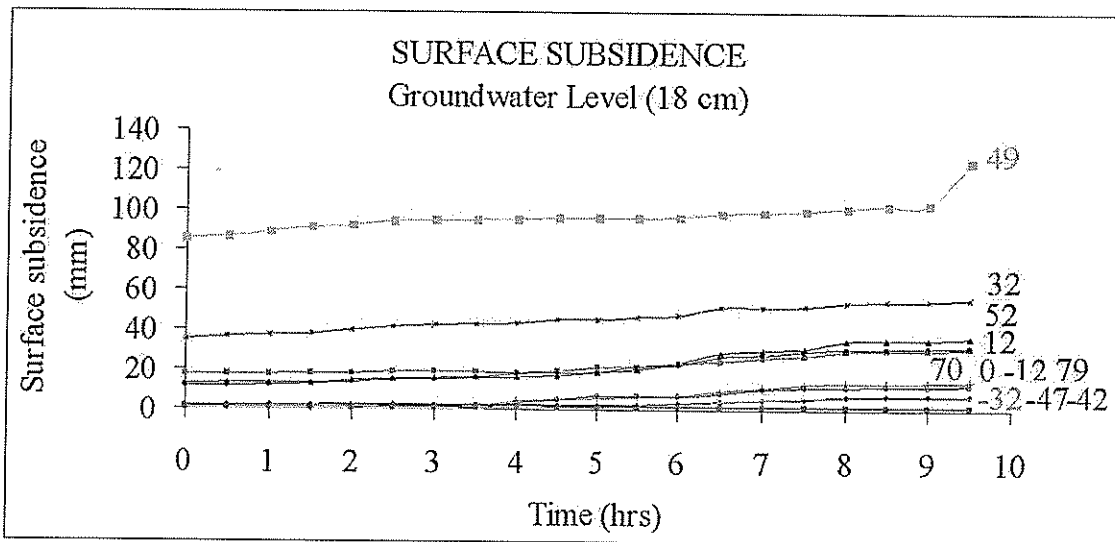
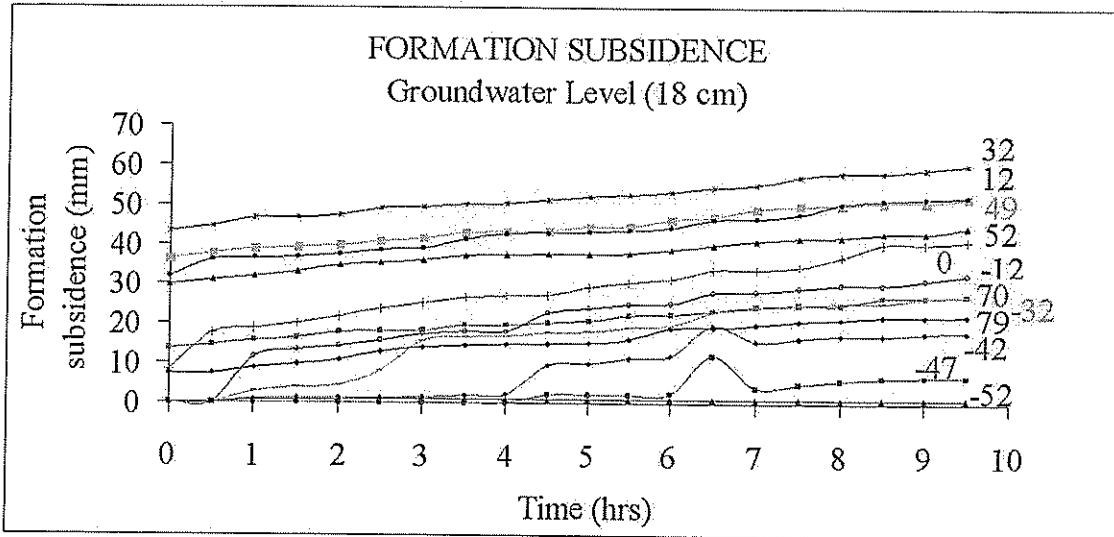
รูปที่ ก-11 กราฟผลกระทบของระดับน้ำบาดาลโดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านข้างที่ $h_w = 12.5$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยสูบแบบต่อเนื่องที่ $Q = 24$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งอยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลียว (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



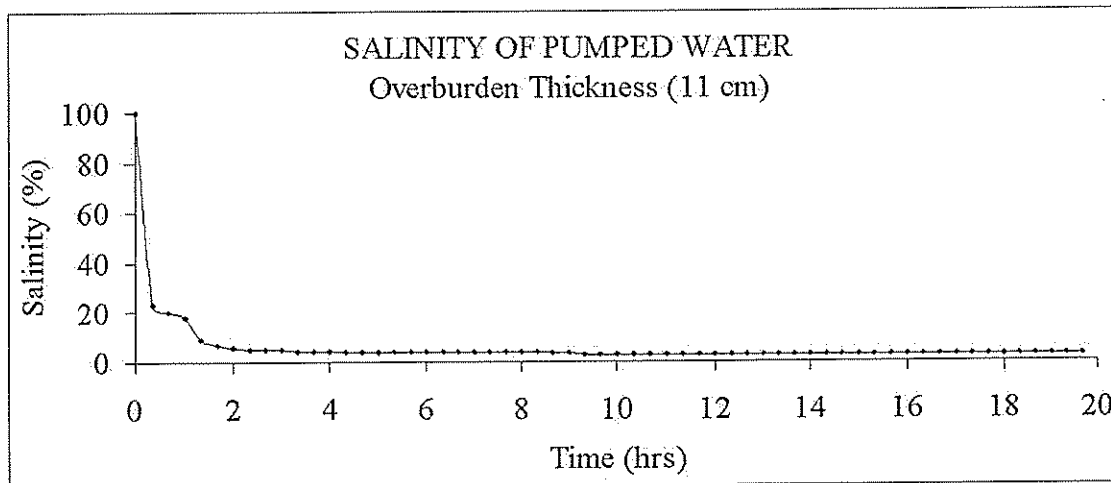
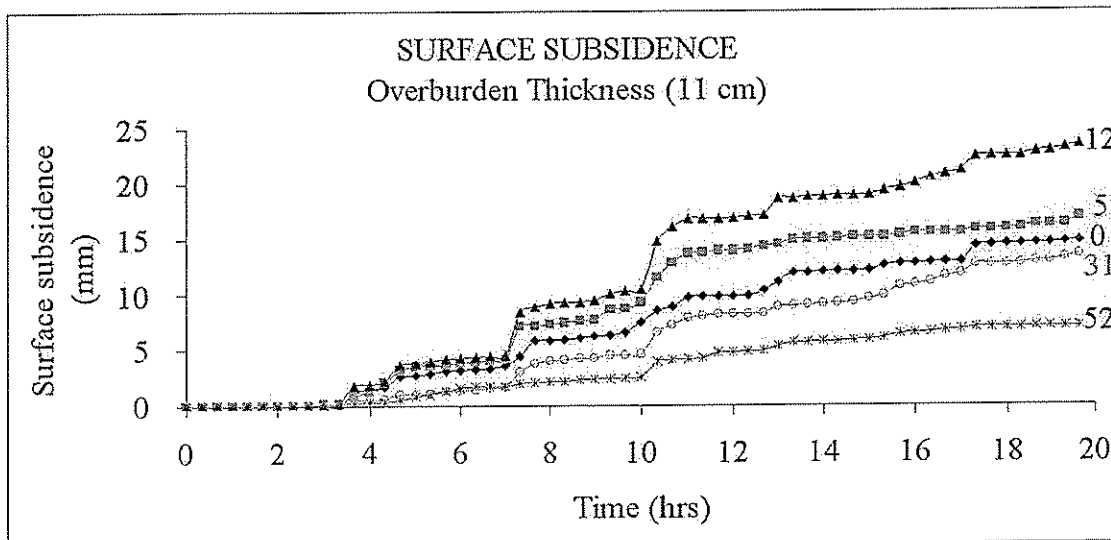
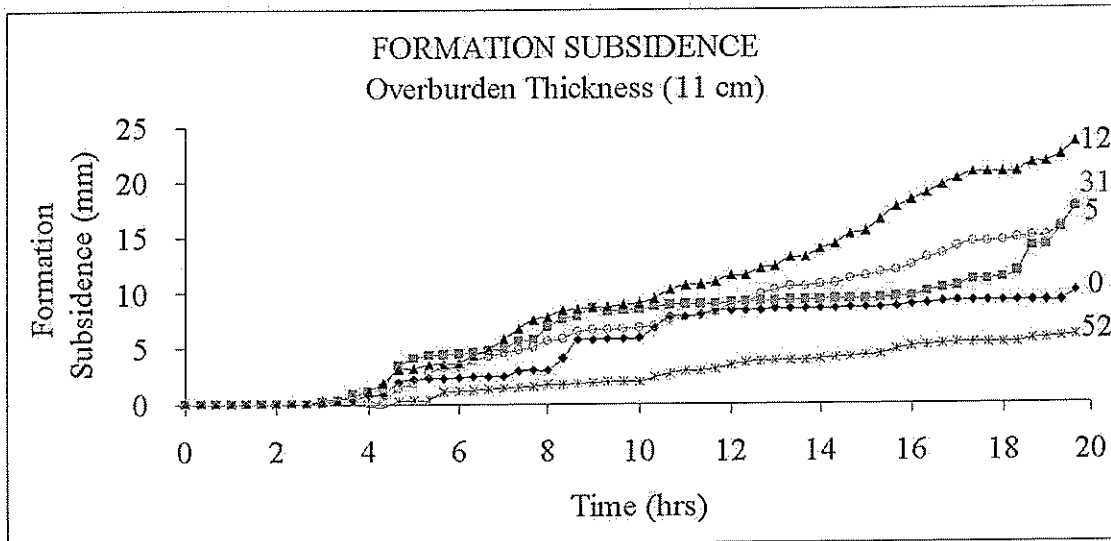
รูปที่ ก-12 กราฟผลกระทบของระดับน้ำบาดาลโดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านข้างที่ $h_v = 12.5$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยสูบแบบต่อเนื่องที่บ่อใหม่ $Q = 24$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งอยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



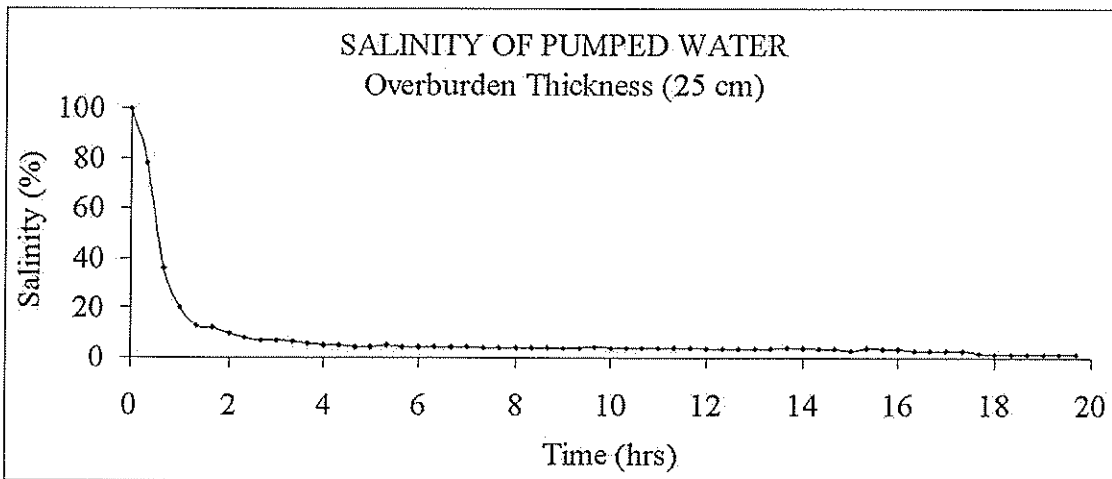
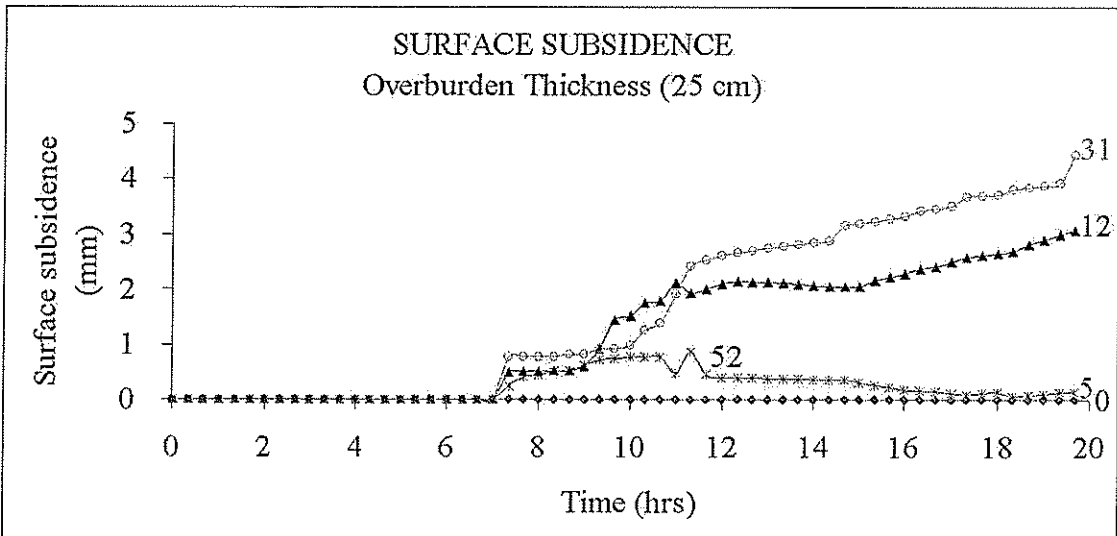
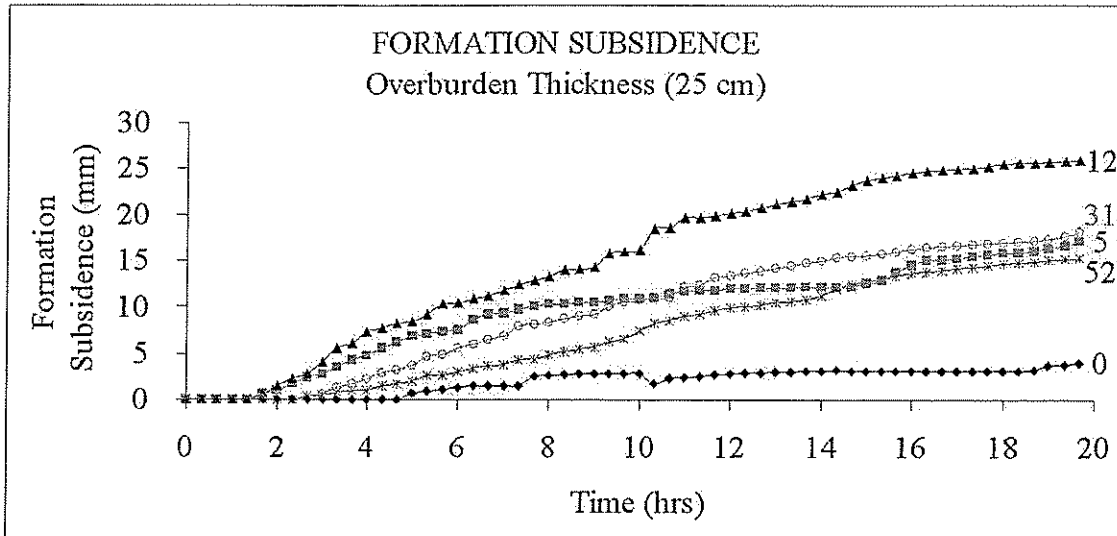
รูปที่ ก-13 กราฟผลกระทบของระดับน้ำบาดาลโดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านข้างที่ $h_w = 18$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยสูบแบบต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



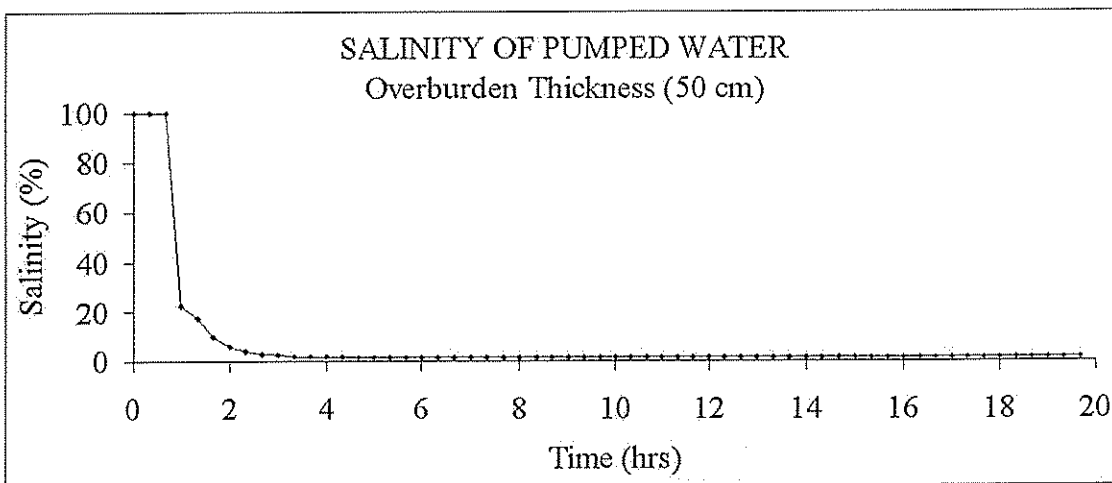
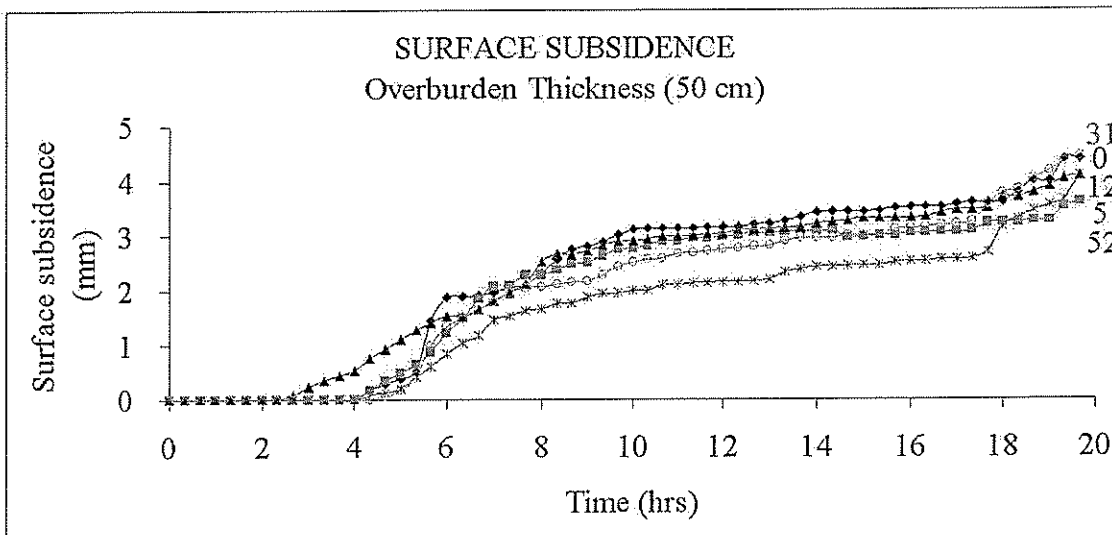
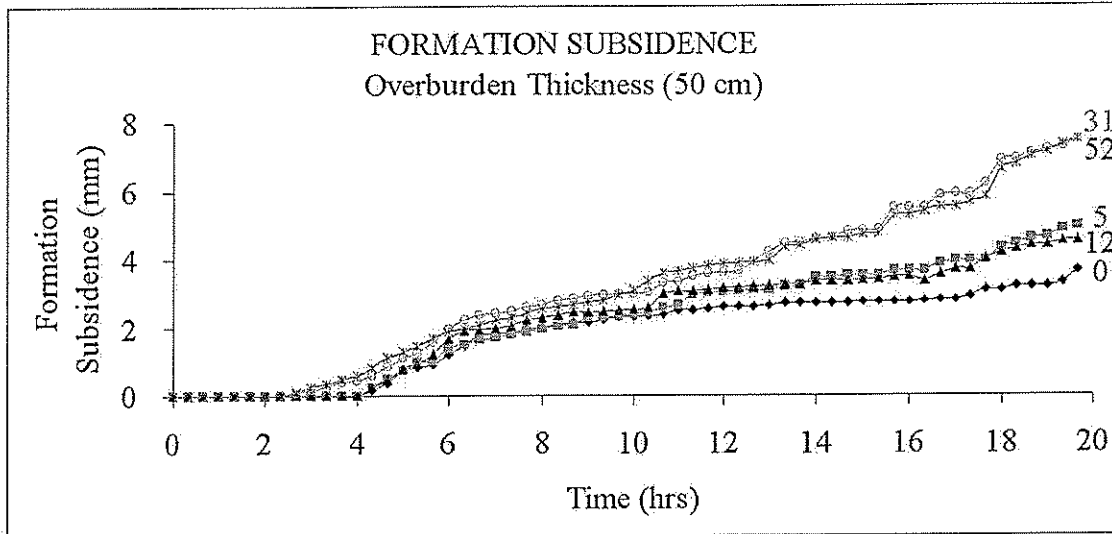
รูปที่ ก-14 กราฟผลกระทบของระดับน้ำบาดาลโดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านข้างที่ $h_w = 18$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยสูบแบบต่อเนื่องที่บ่อใหม่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



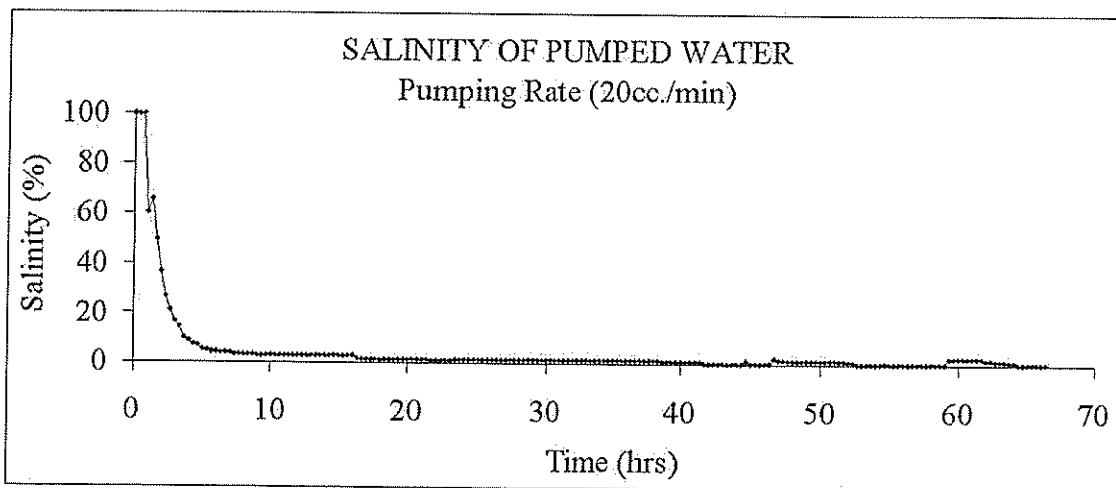
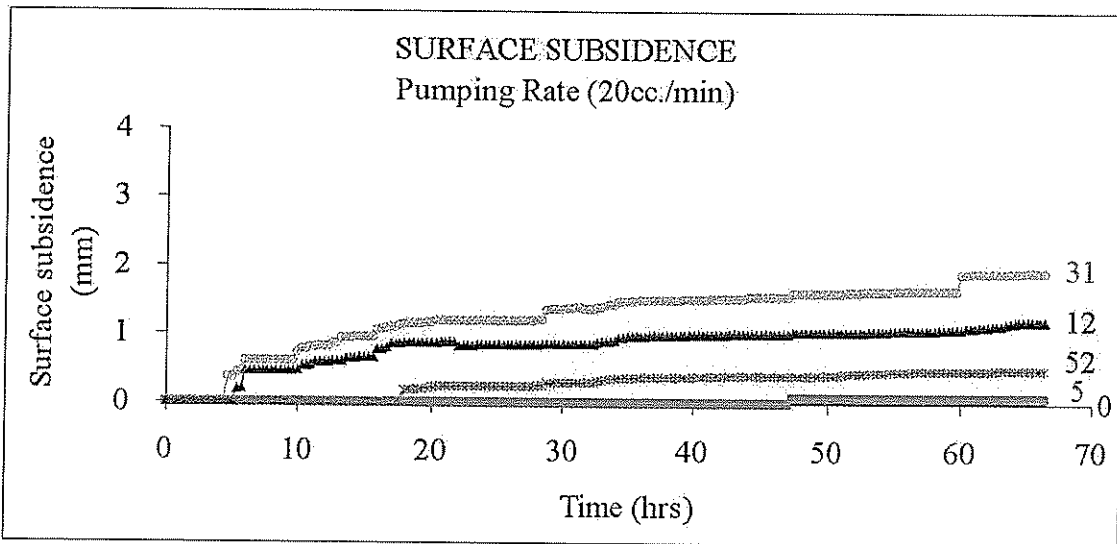
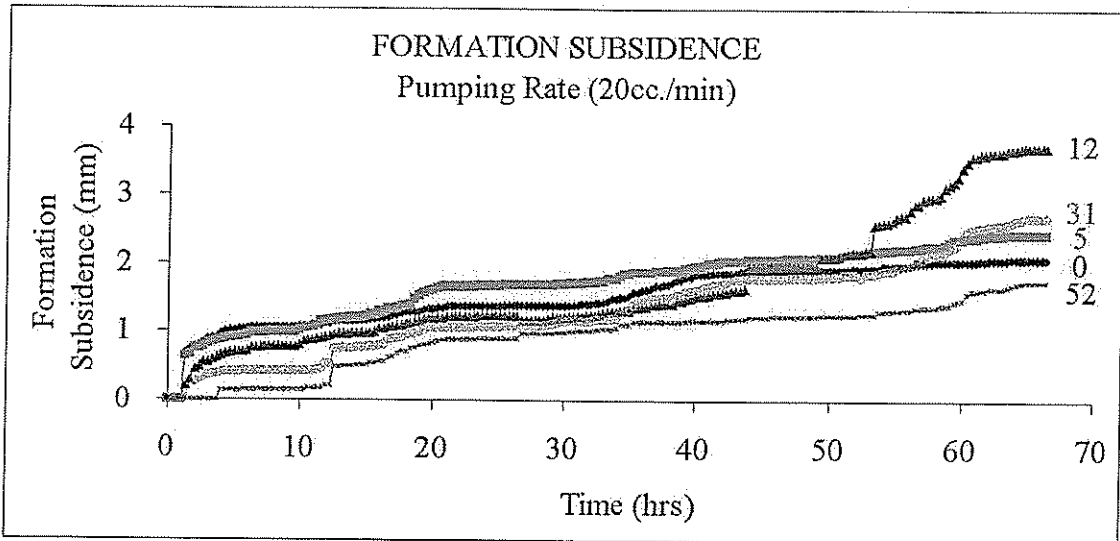
รูปที่ ก-15 กราฟผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับโดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบน ที่ $d_s = 11$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $h_w = 24$ ซม. โดยสูบบนแบบต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



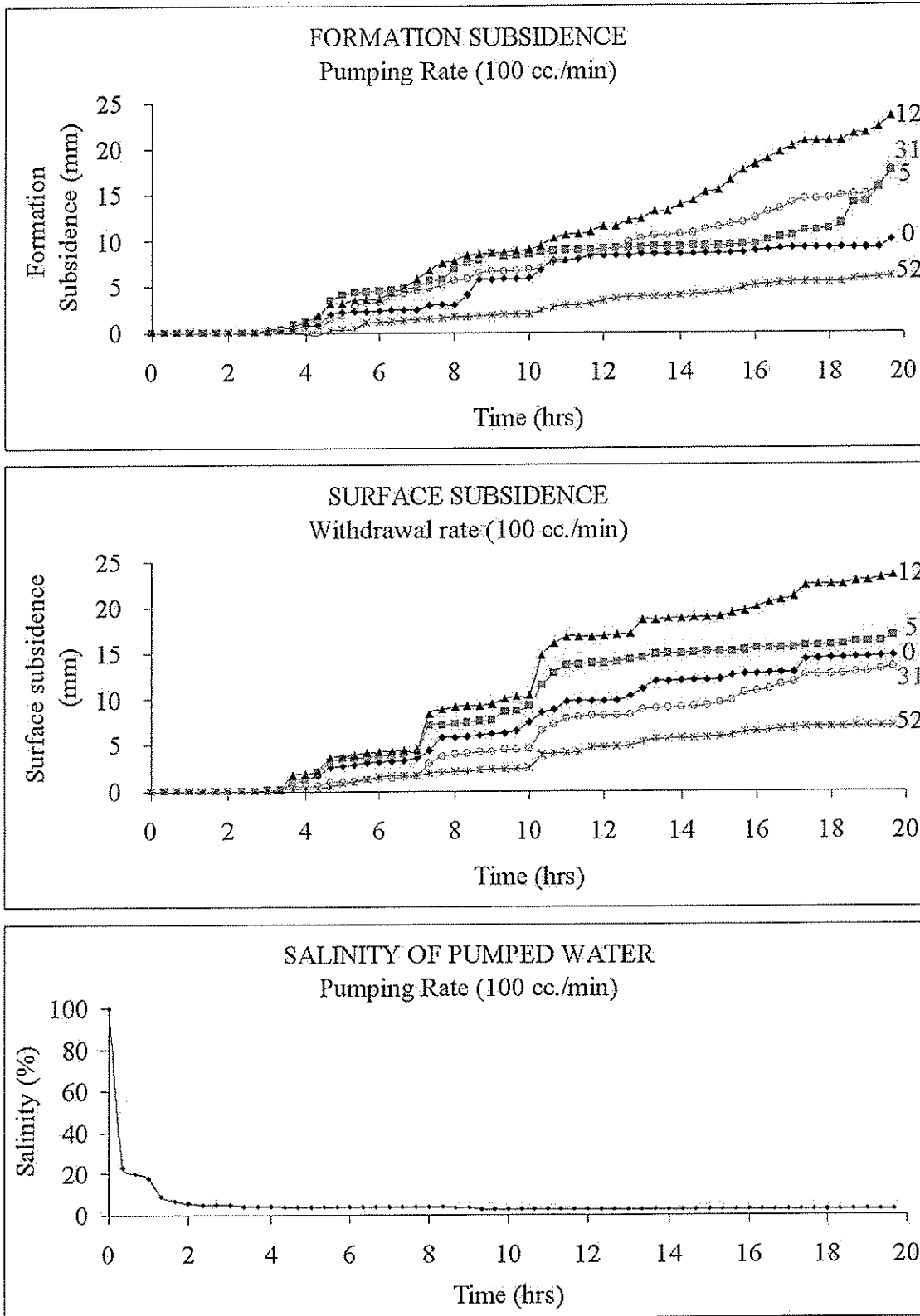
รูปที่ ก-16 กราฟผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับ โดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบน ที่ $d_s = 25$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $h_w = 24$ ซม. โดยสูบบนต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



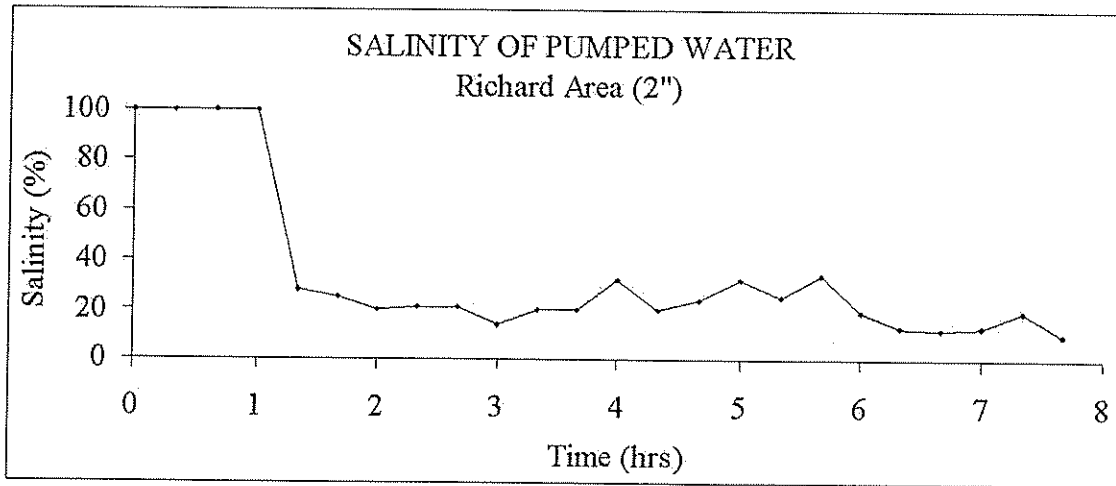
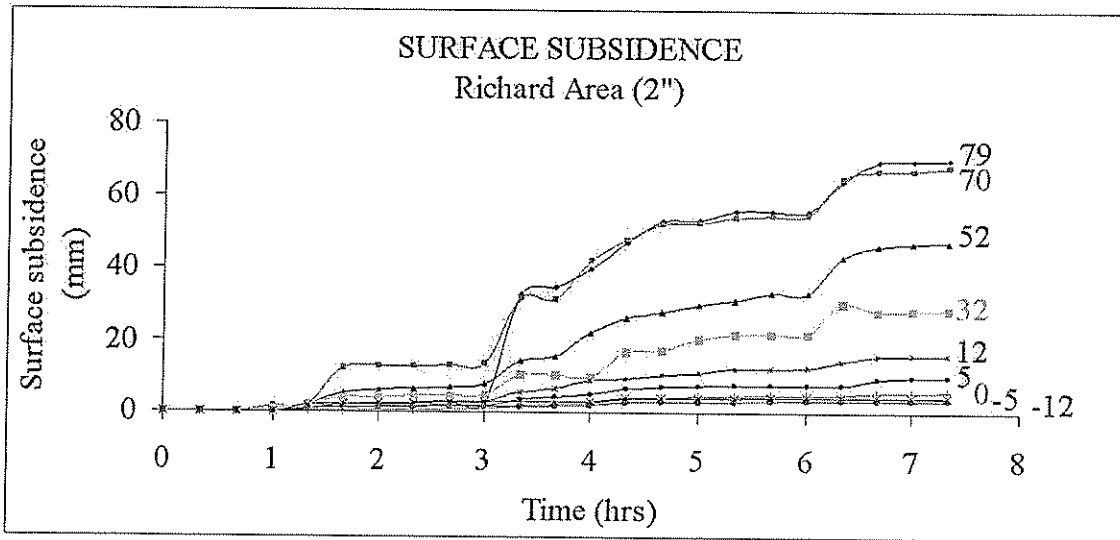
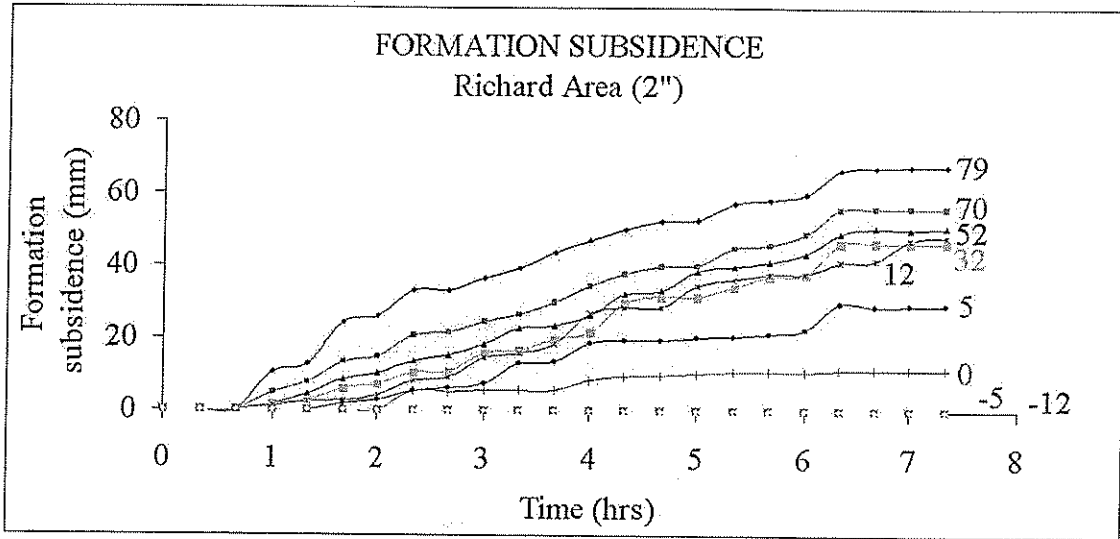
รูปที่ ก-17 กราฟผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับ โดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบน ที่ $d_s = 50$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $h_w = 24$ ซม. โดยสูบบนต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบน้ำ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



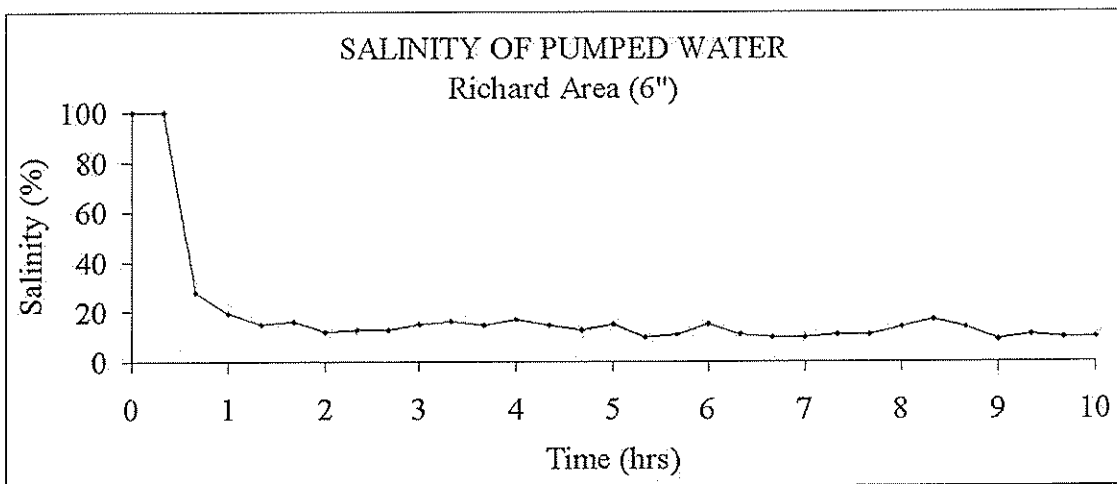
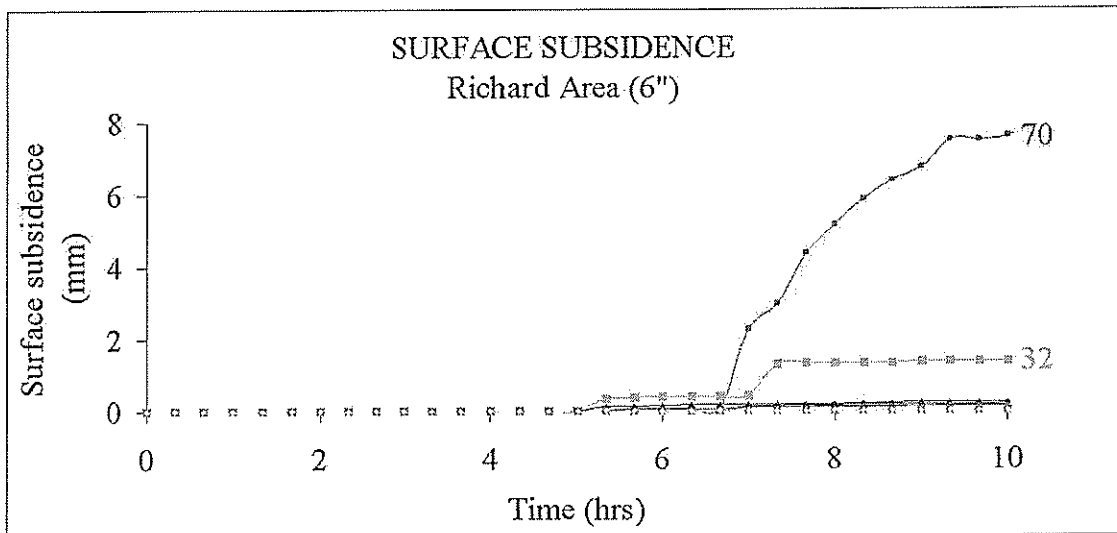
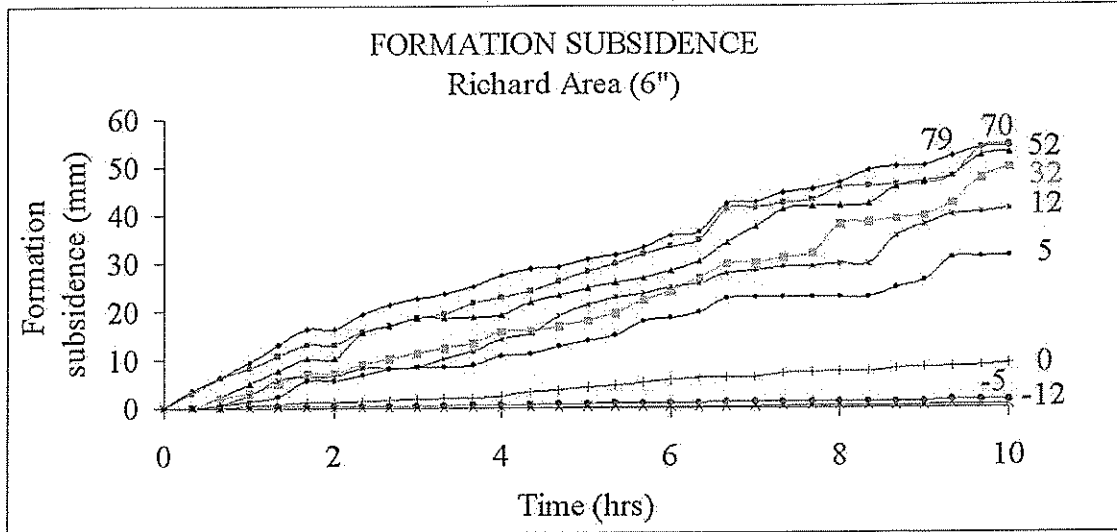
รูปที่ ก-18 กราฟผลกระทบของอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็มโดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบน โดยสูบบนแบบต่อเนื่องที่ $Q = 20$ ลบ.ซม./นาที และ $d_s = 11$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $h_w = 10$ ซม. ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบน้ำ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



รูปที่ ก-19 กราฟผลกระทบของอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็ม โดยแหล่งน้ำจืดซึมผ่านจากทางด้านบน โดยสูบน้ำแบบต่อเนื่องที่ $Q = 20$ ลบ.ซม./นาที และ $d_s = 11$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $h_w = 10$ ซม. ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)



รูปที่ ก-20 กราฟผลกระทบของขนาดที่มาจากแหล่งน้ำจืดที่ซึมผ่านทางด้านข้าง ที่มีขนาด 2 นิ้ว $h_w = 12.5$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยสูบแบบต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาทีซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)

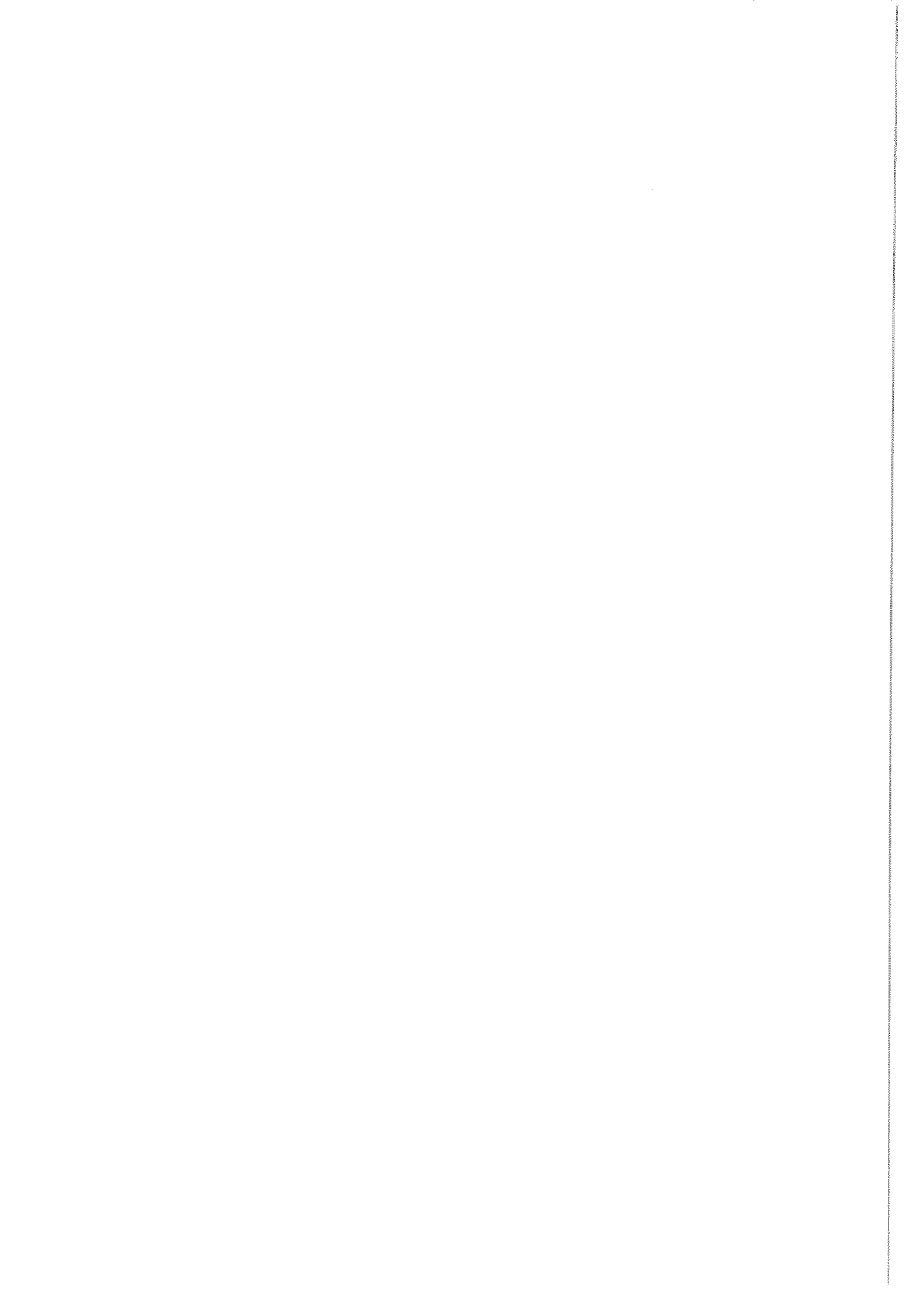


รูปที่ ก-21 กราฟผลกระทบของขนาดที่มาจากแหล่งน้ำจืดที่ซึมผ่านทางด้านข้าง ที่มีขนาด 6 นิ้ว $h_w = 12.5$ ซม. $h_s = 2$ ซม. $d_s = 25$ ซม. โดยสูบแบบต่อเนื่องที่ $Q = 100$ ลบ.ซม./นาที่ ซึ่งค่าการทรุดตัวตามเวลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่อยู่ห่างจากกึ่งกลางของท่อสูบ ที่ผิวของเกลือ (รูปบน) ที่ผิวดิน (รูปกลาง) ค่าความเข้มข้น (รูปล่าง)

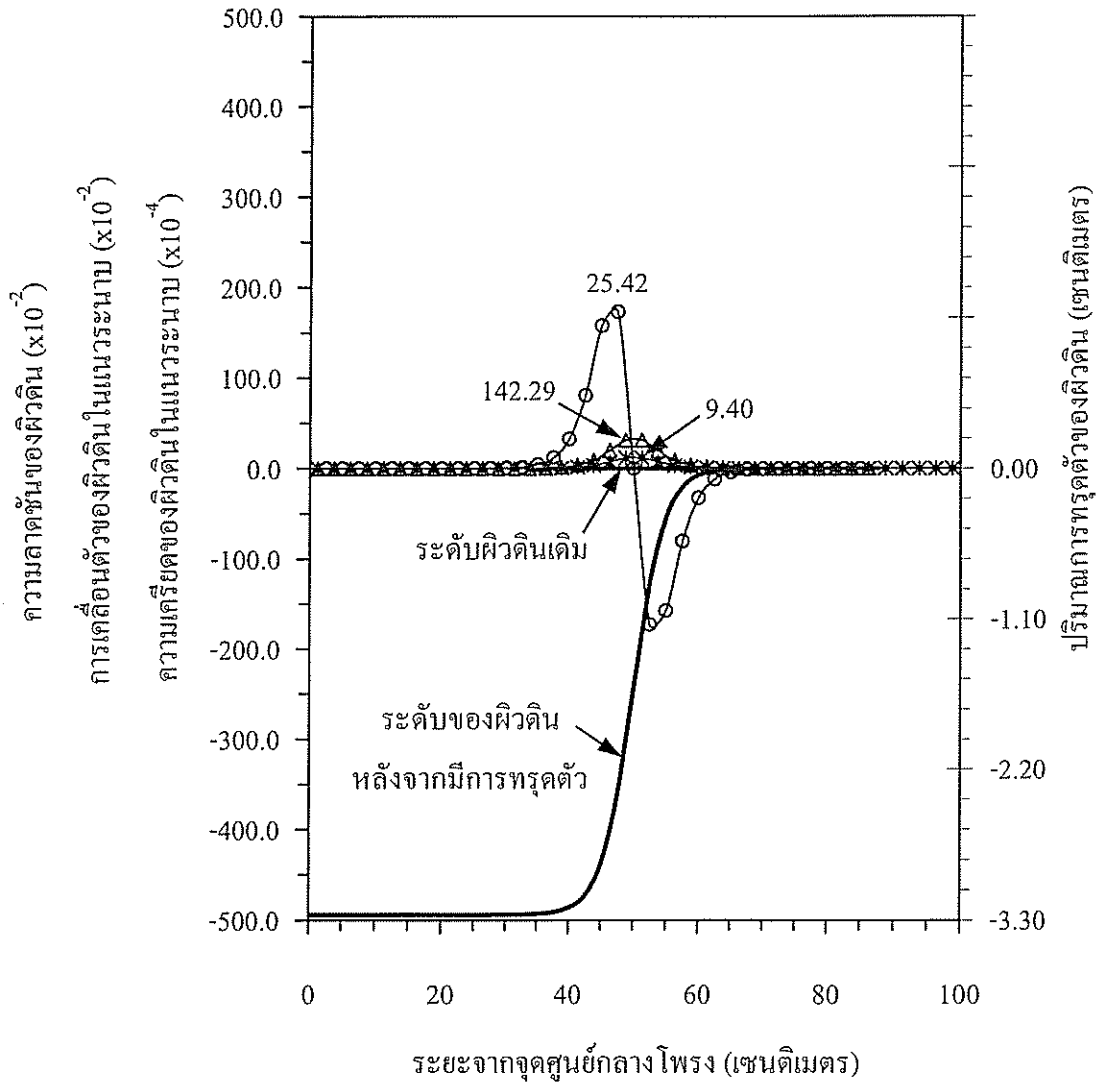
11

ภาคผนวก ข

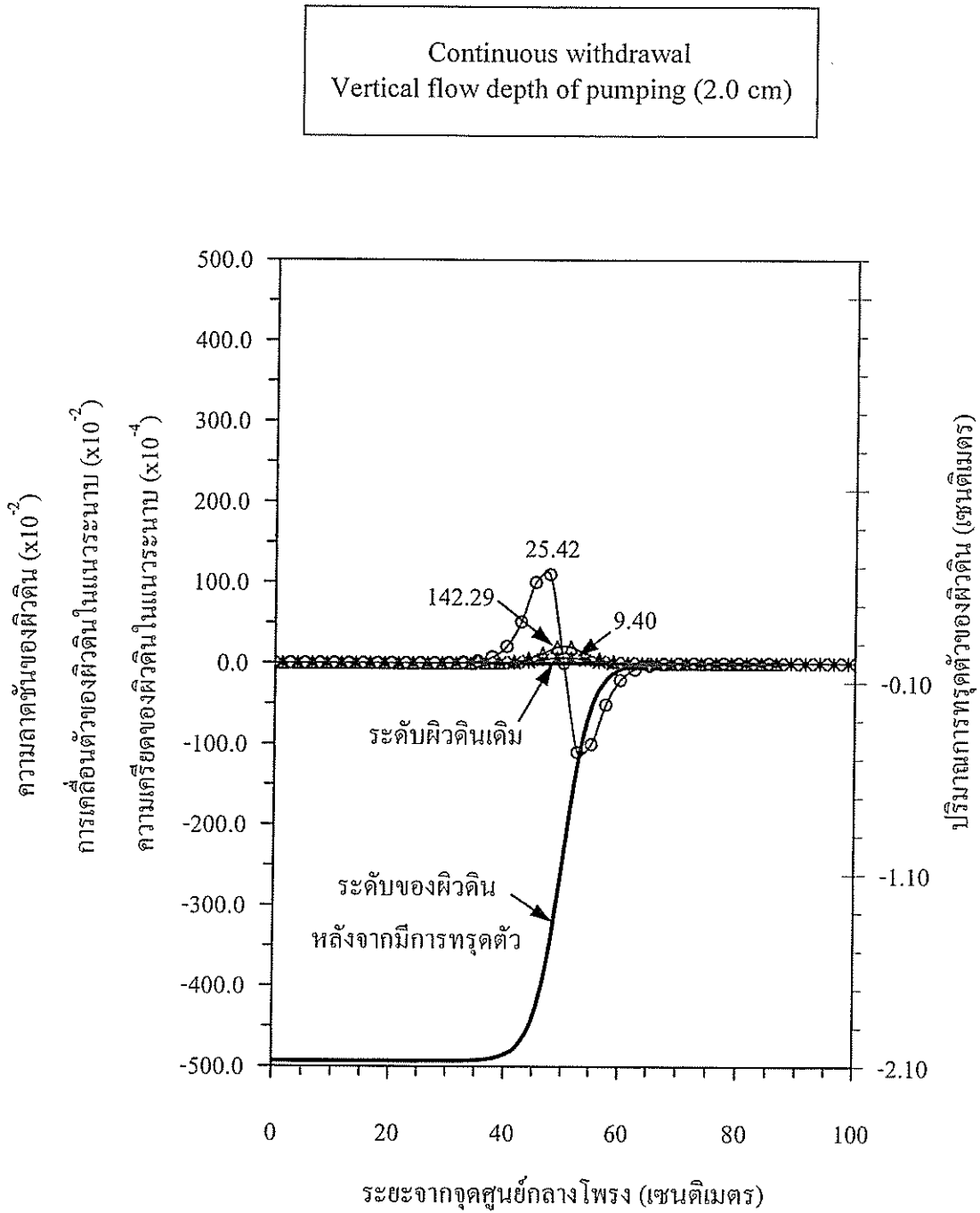
ผลการคำนวณด้วย Profile Function



Continuous withdrawal
Vertical flow depth of pumping (0.5 cm)

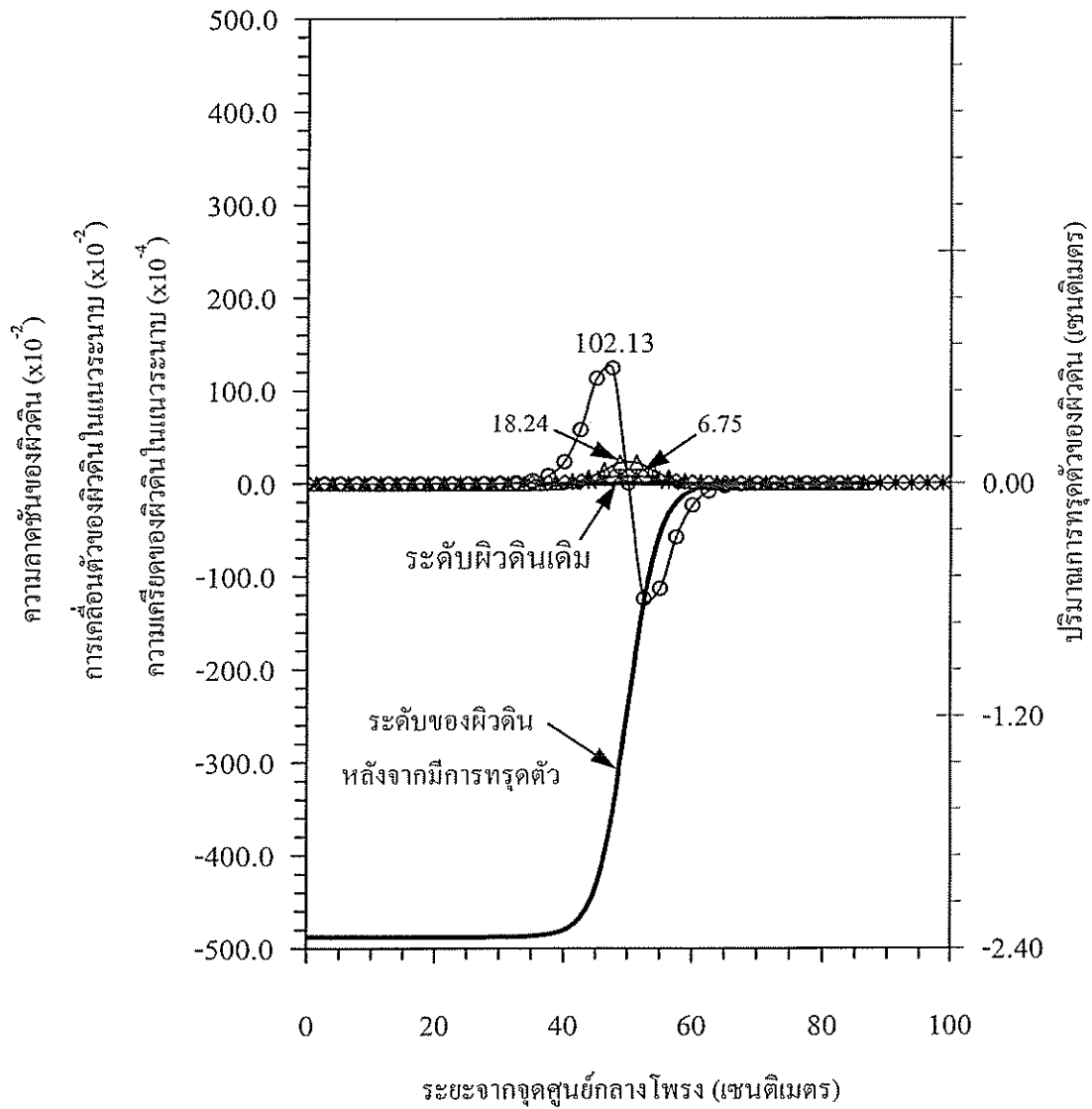


รูปที่ ข-1 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 0.5 ซม. โดยทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน

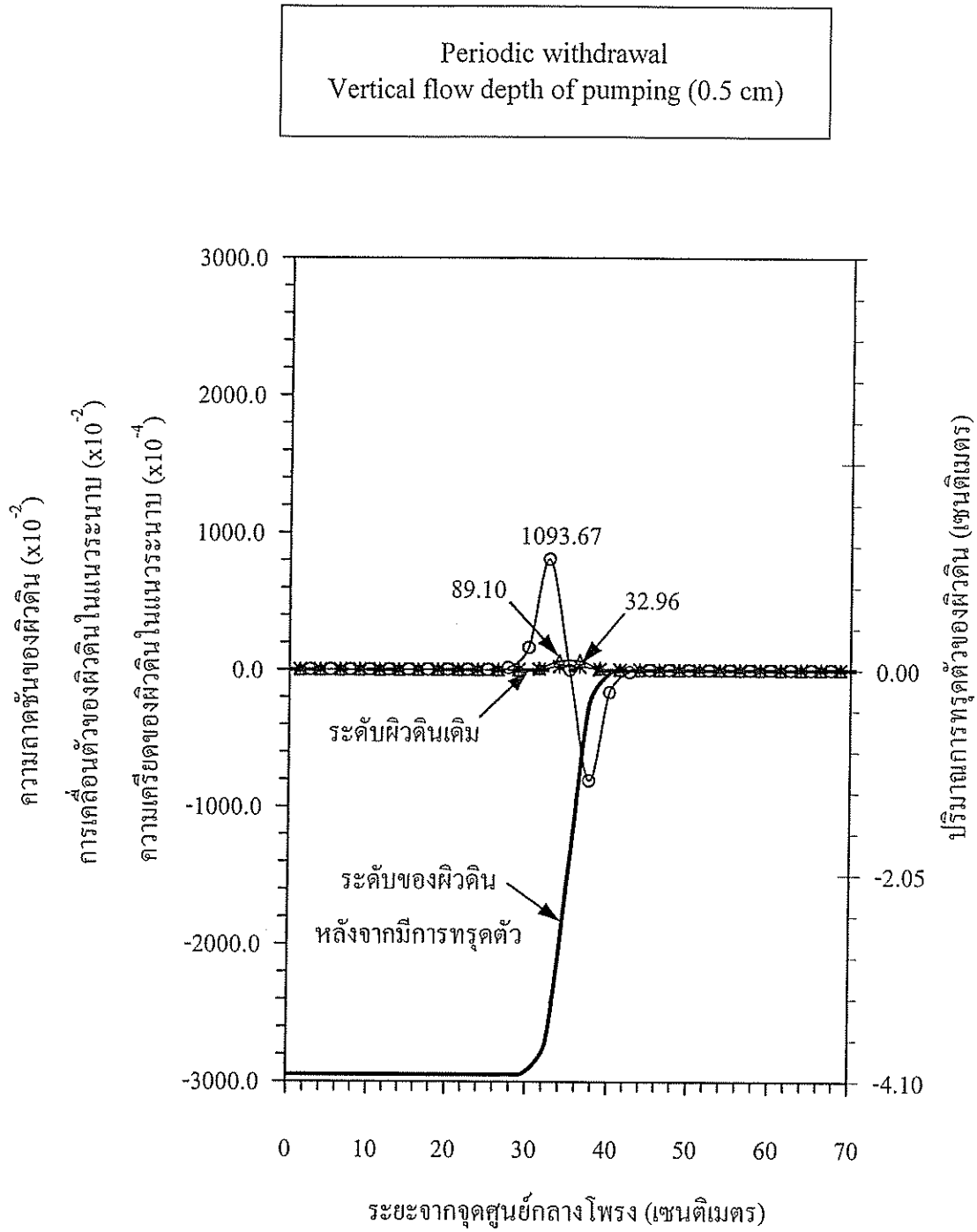


รูปที่ ข-2 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 2.0 ซม. โดยทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจัดมาจากทางด้านบน

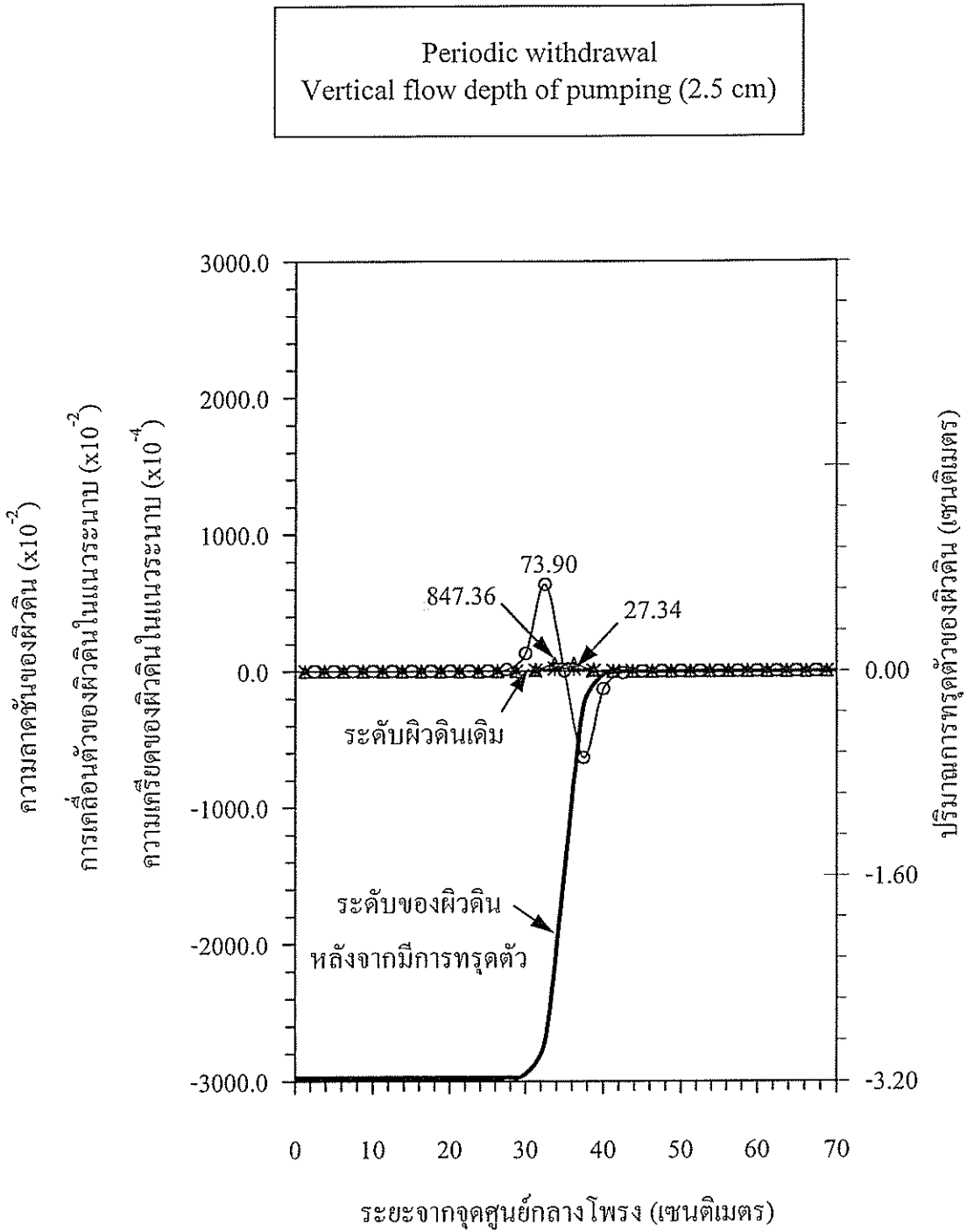
Continuous withdrawal
Vertical flow depth of pumping (3.5 cm)



รูปที่ ข-3 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 3.5 ซม. โดยทำการสูบน้ำอย่างต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน

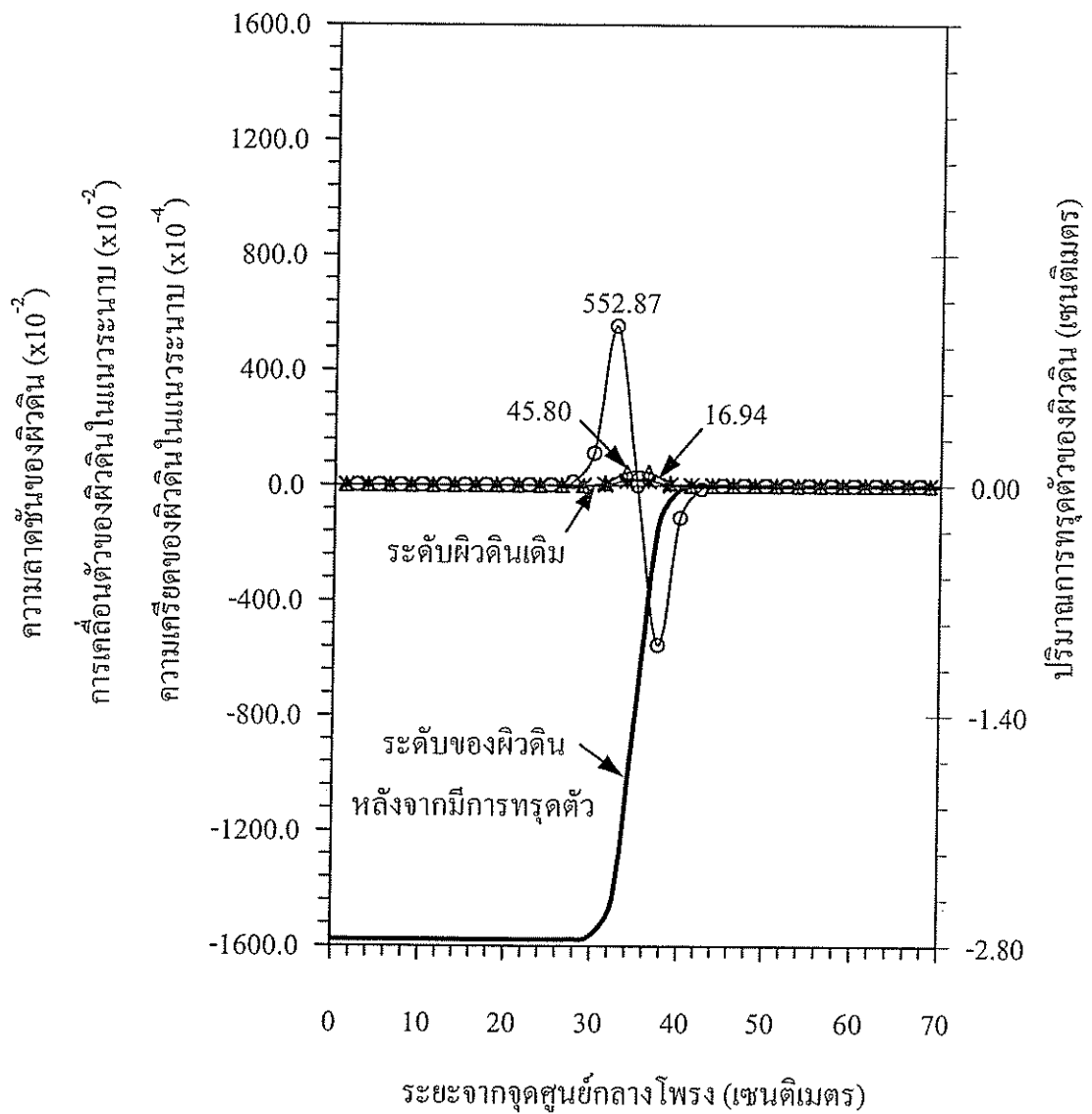


รูปที่ ข-4 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 0.5 ซม. โดยทำการสูบเป็นช่วงๆ และมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน



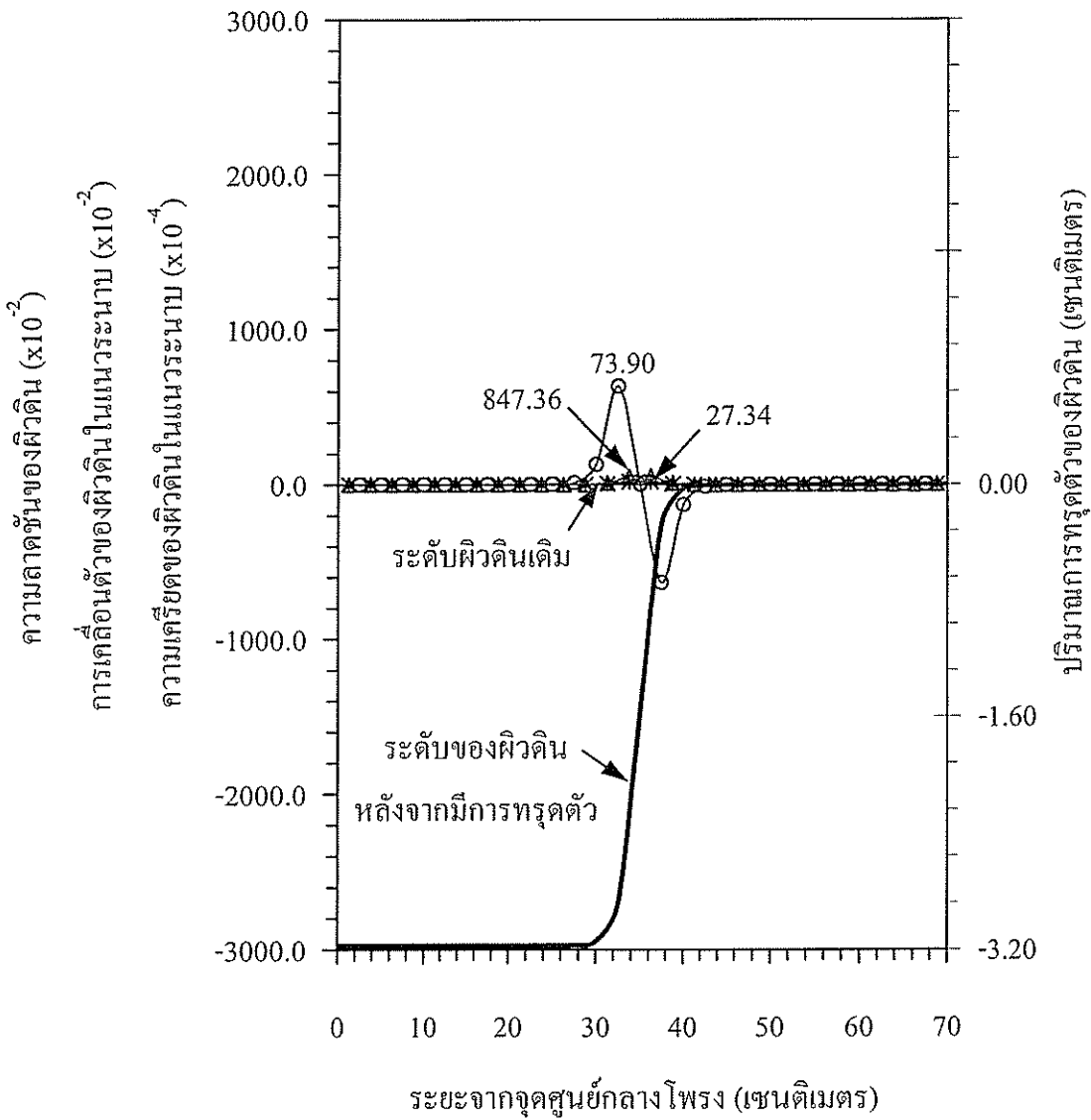
รูปที่ ข-5 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเคลื่อนเท่ากับ 2.5 ซม. โดยทำการสูบเป็นช่วงๆ และมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน

Periodic withdrawal
Vertical flow depth of pumping (3.5 cm)



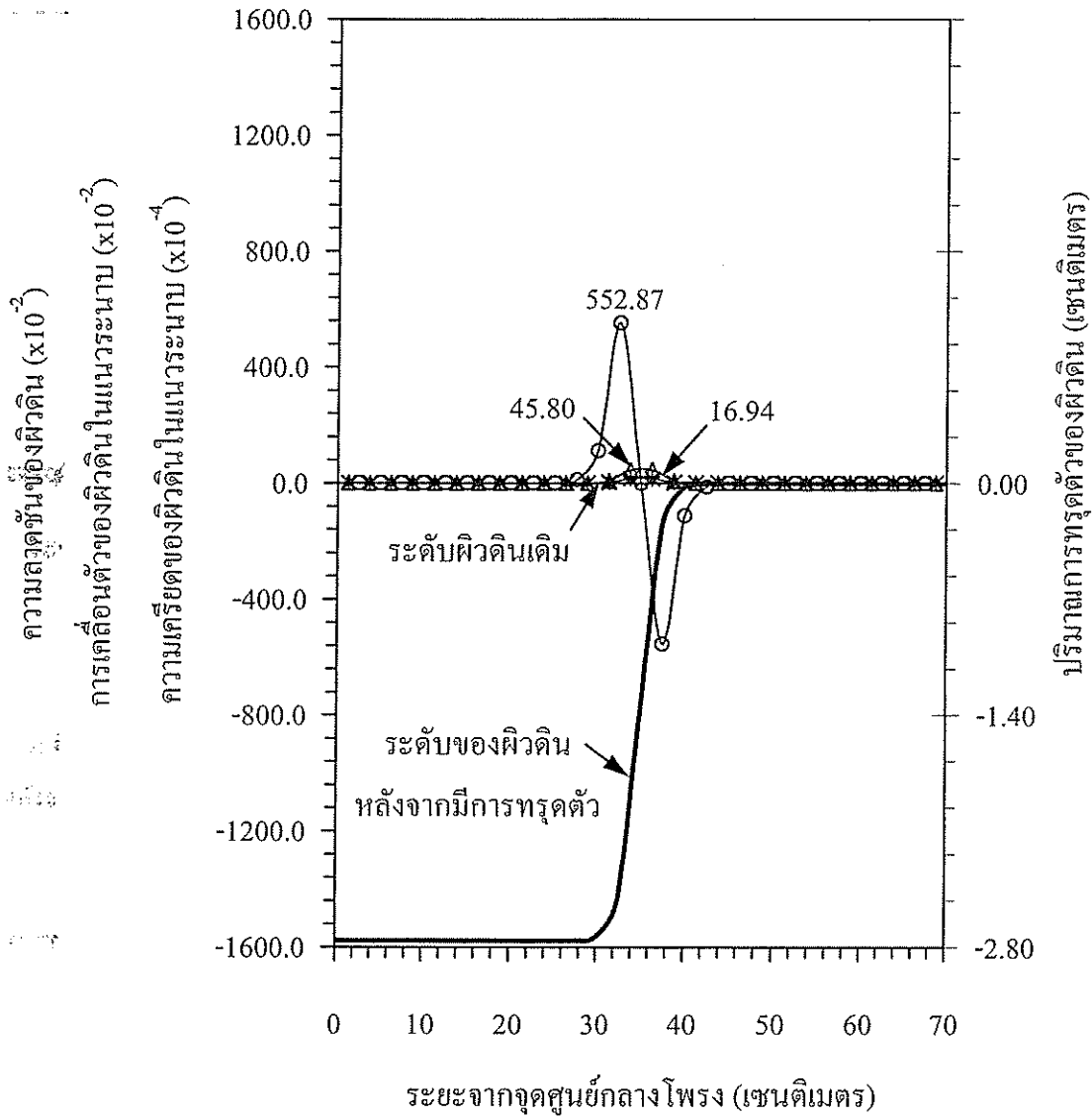
รูปที่ ข-6 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 3.5 ซม. โดยทำการสูบเป็นช่วงๆ และมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน

Periodic withdrawal
Vertical flow depth of pumping (2.5 cm)



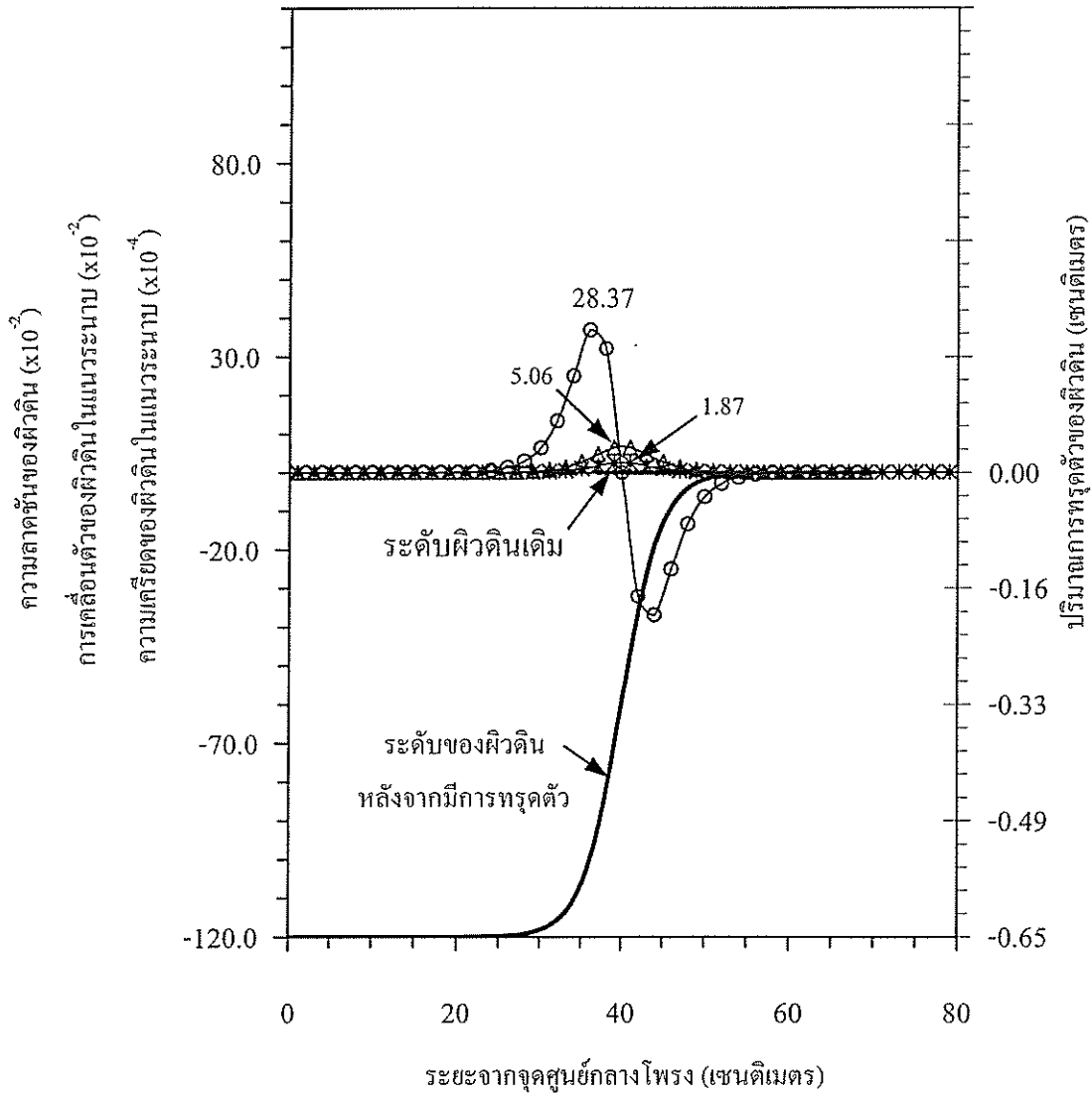
รูปที่ ช-5 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 2.5 ซม. โดยทำการสูบเป็นช่วงๆ และมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน

Periodic withdrawal
Vertical flow depth of pumping (3.5 cm)



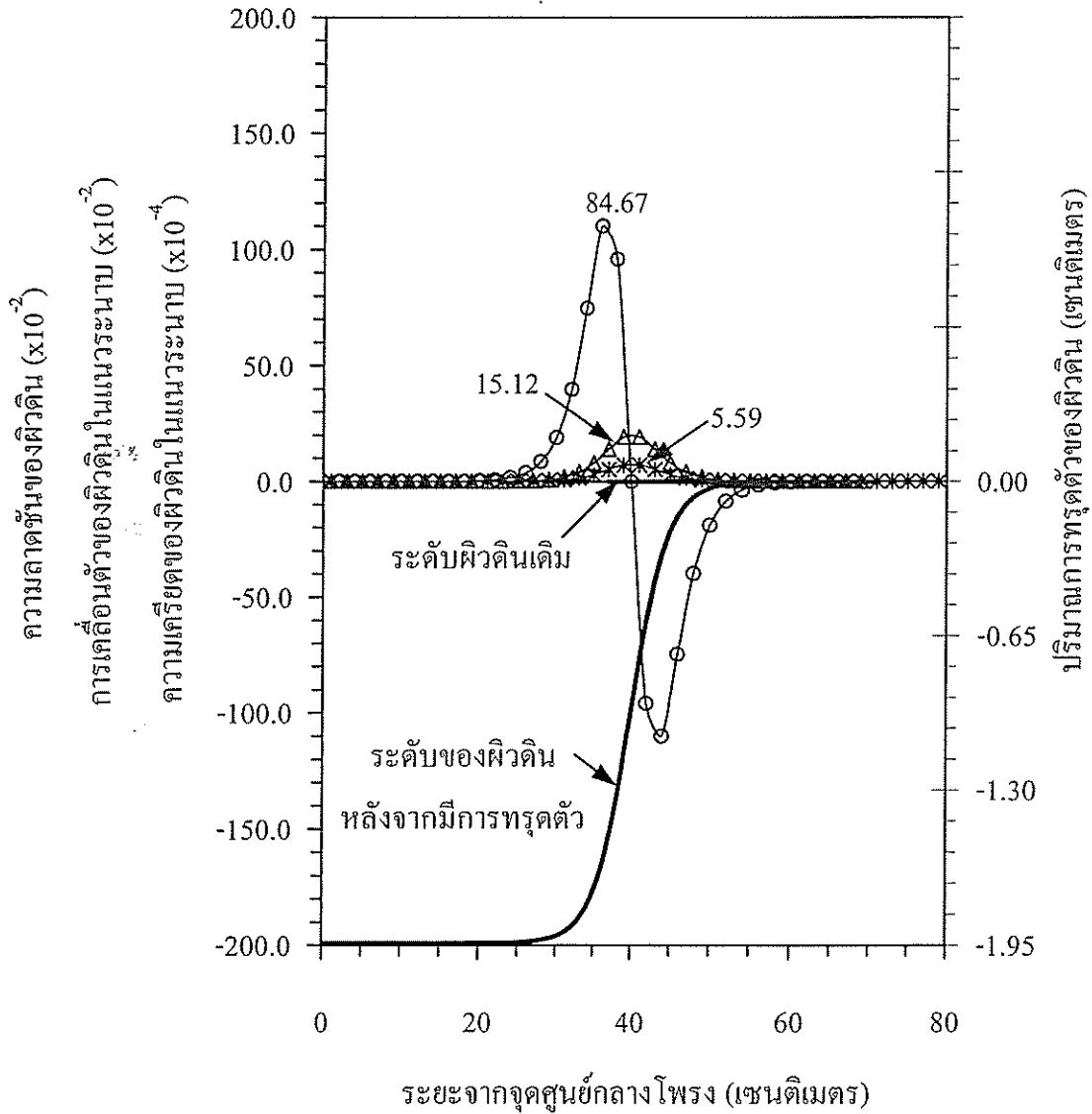
รูปที่ ข-6 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระยะห่างจากปลายท่อถึงผิวเกลือเท่ากับ 3.5 ซม. โดยทำการสูบเป็นช่วงๆ และมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน

Continuous withdrawal
Vertical flow groundwater level (6 cm)



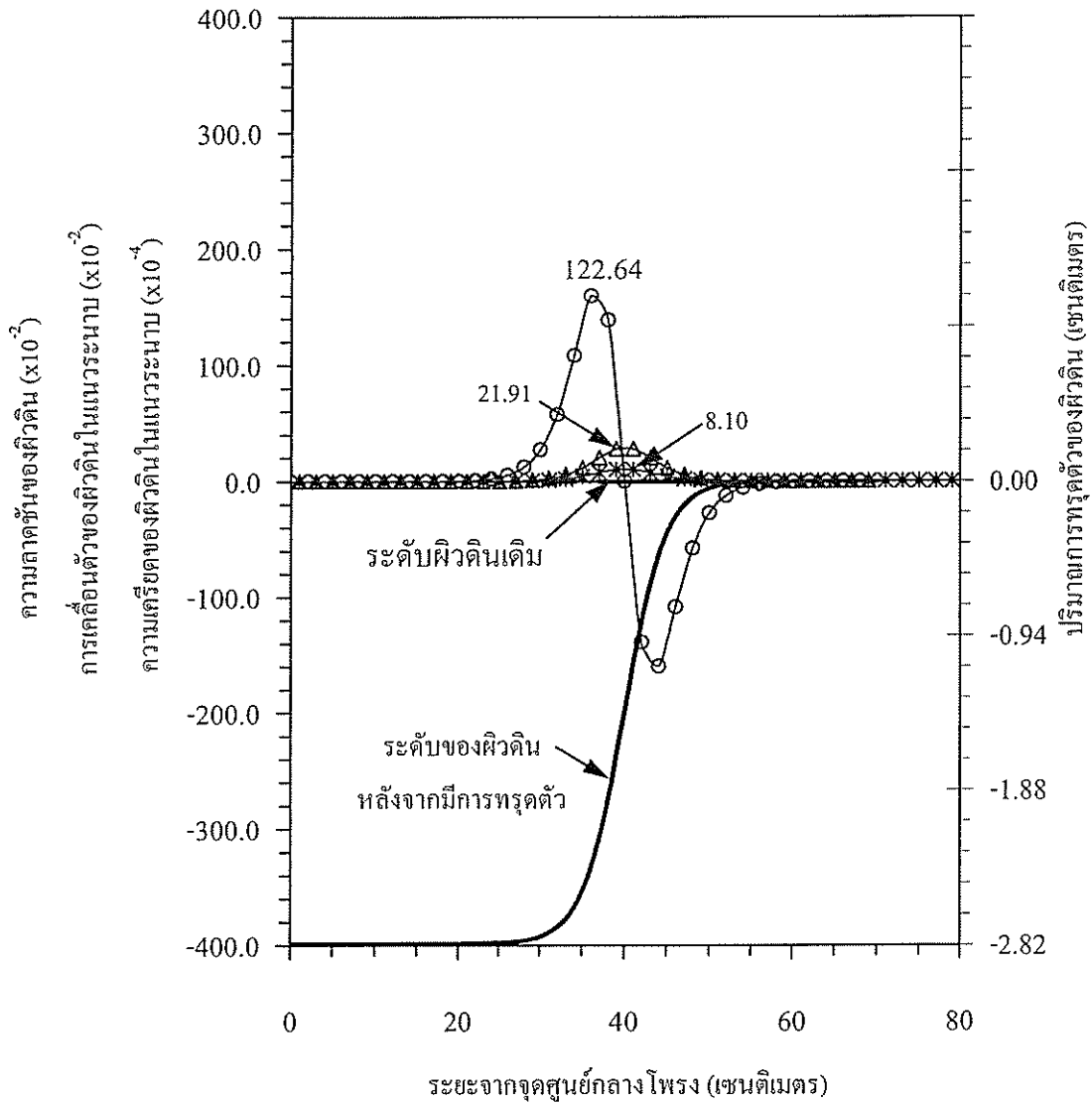
รูปที่ ข-7 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระดับความสูงของน้ำบาดาลเท่ากับ 6 ซม. โดยทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน

Continuous withdrawal
Vertical flow groundwater level (12.5 cm)



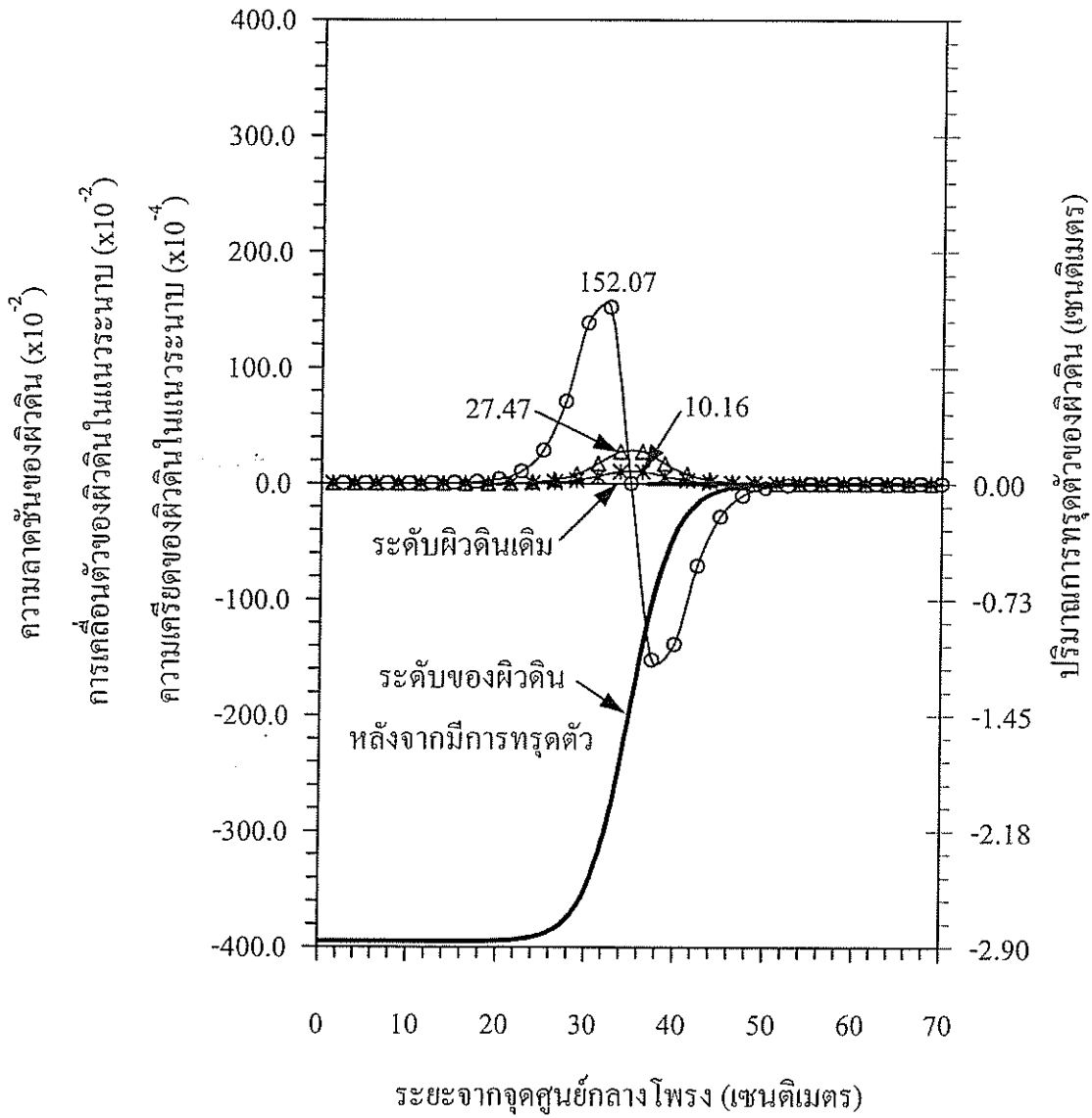
รูปที่ ข-8 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระดับความสูงของน้ำบาดาลเท่ากับ 12.5 ซม. โดยทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน

Continuous withdrawal
Vertical flow groundwater level (18 cm)

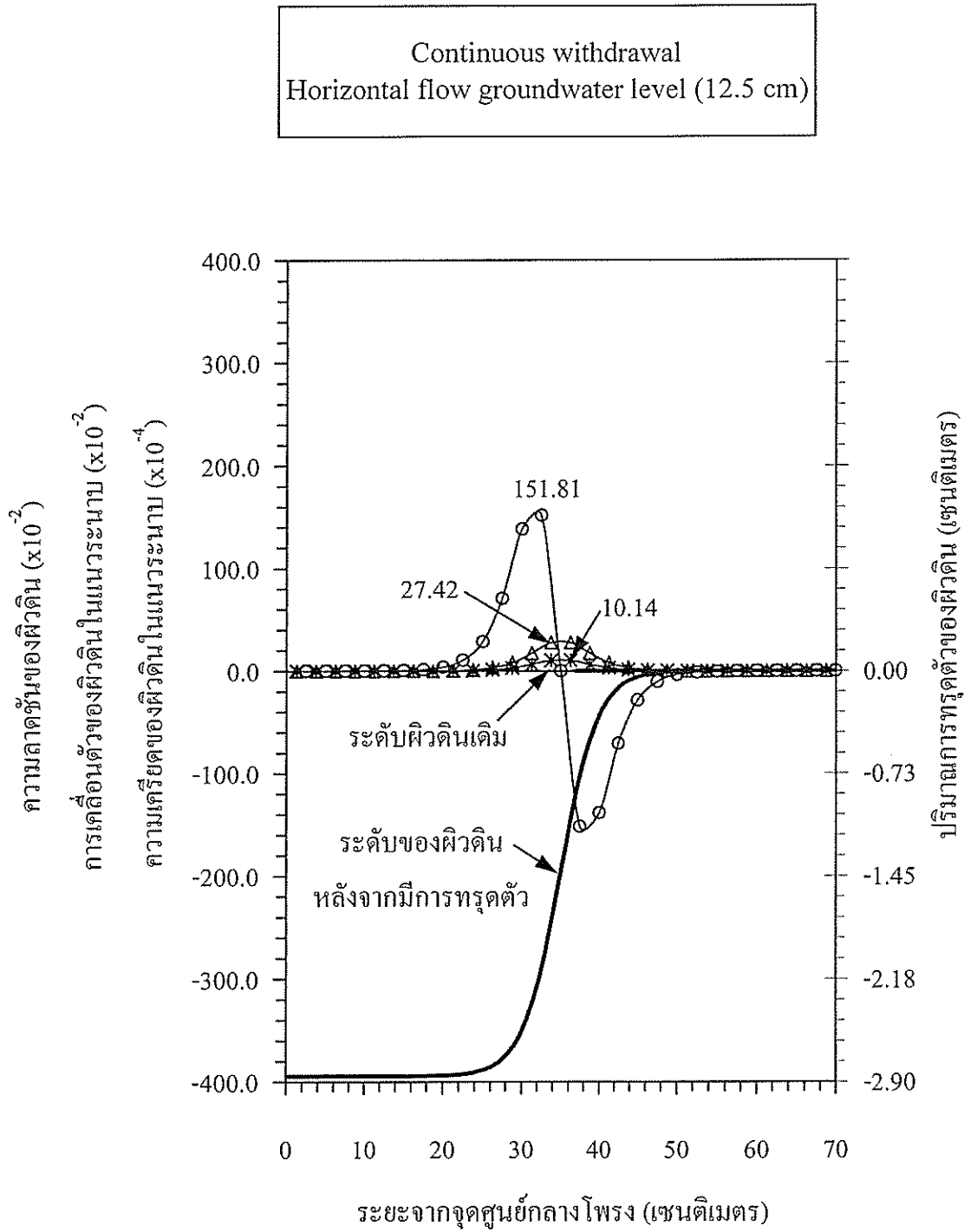


รูปที่ ข-9 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระดับความสูงของน้ำบาดาลเท่ากับ 18 ซม. โดยทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน

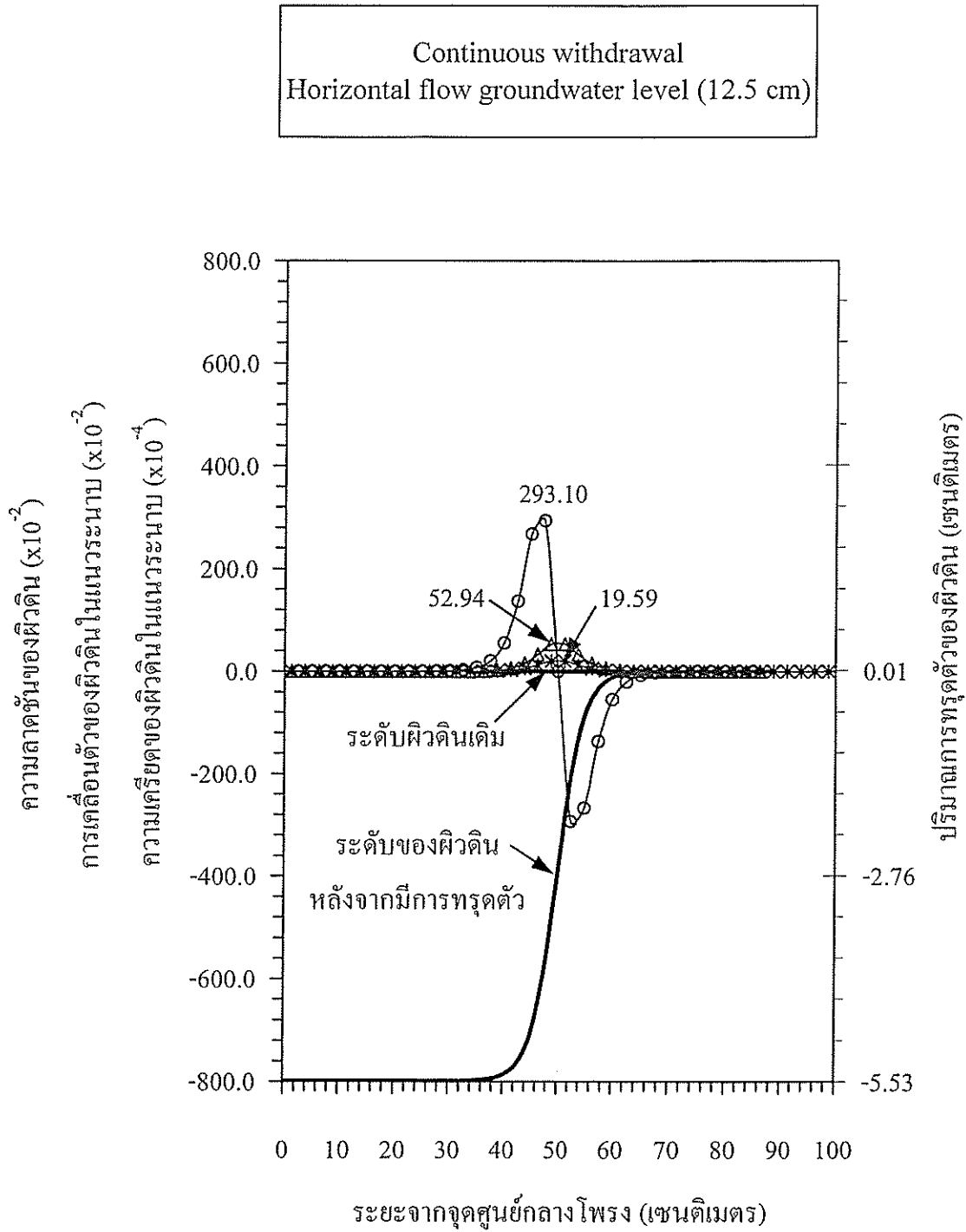
Continuous withdrawal
Horizontal flow groundwater level (6 cm)



รูปที่ ข-10 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระดับความสูงของน้ำบาดาลเท่ากับ 6 ซม. โดยทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจัดมาจากทางด้านข้าง

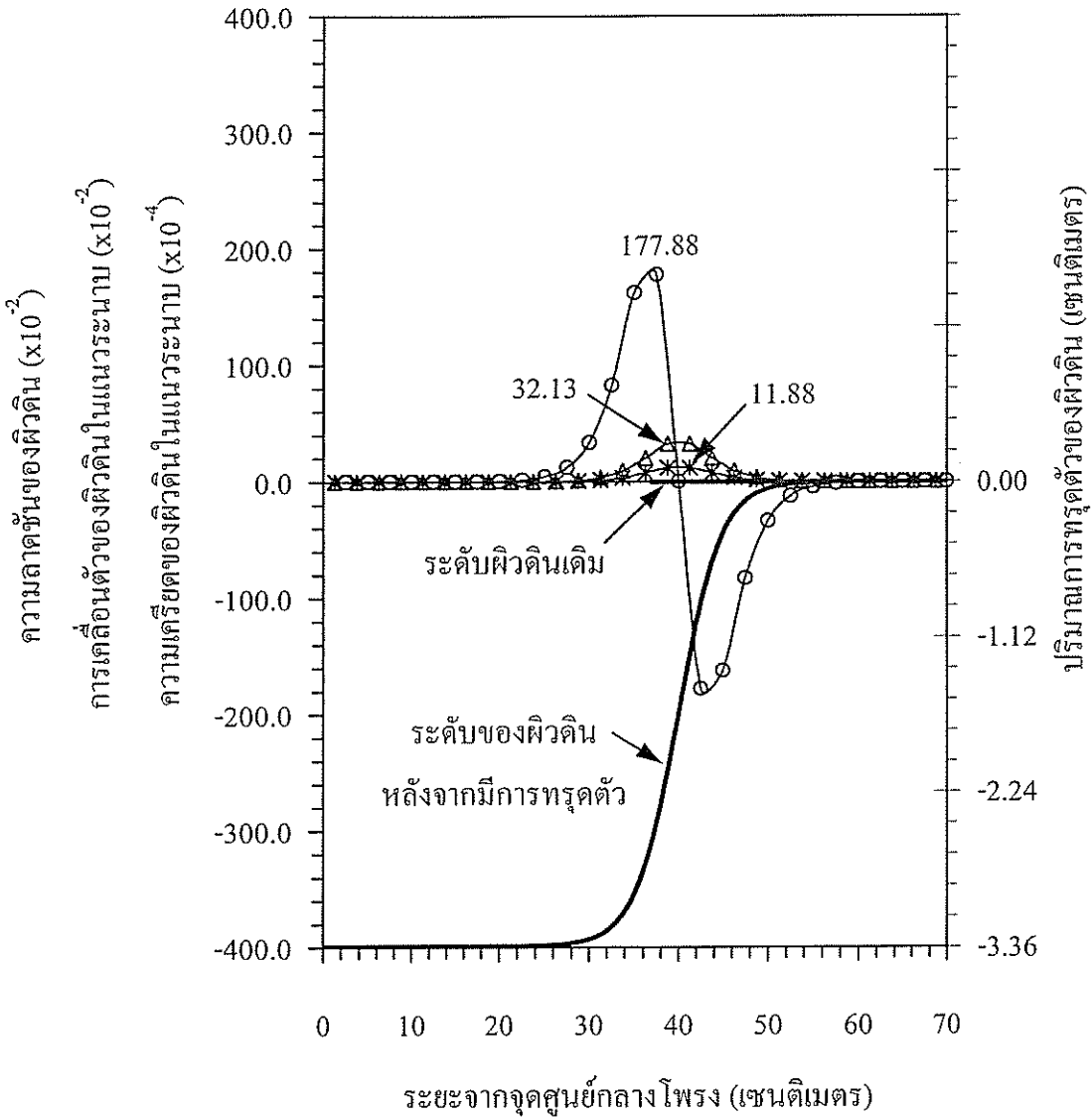


รูปที่ ข-11 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระดับความสูงของน้ำบาดาลเท่ากับ 12.5 ซม. โดยทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจัดมาจากทางด้านข้าง

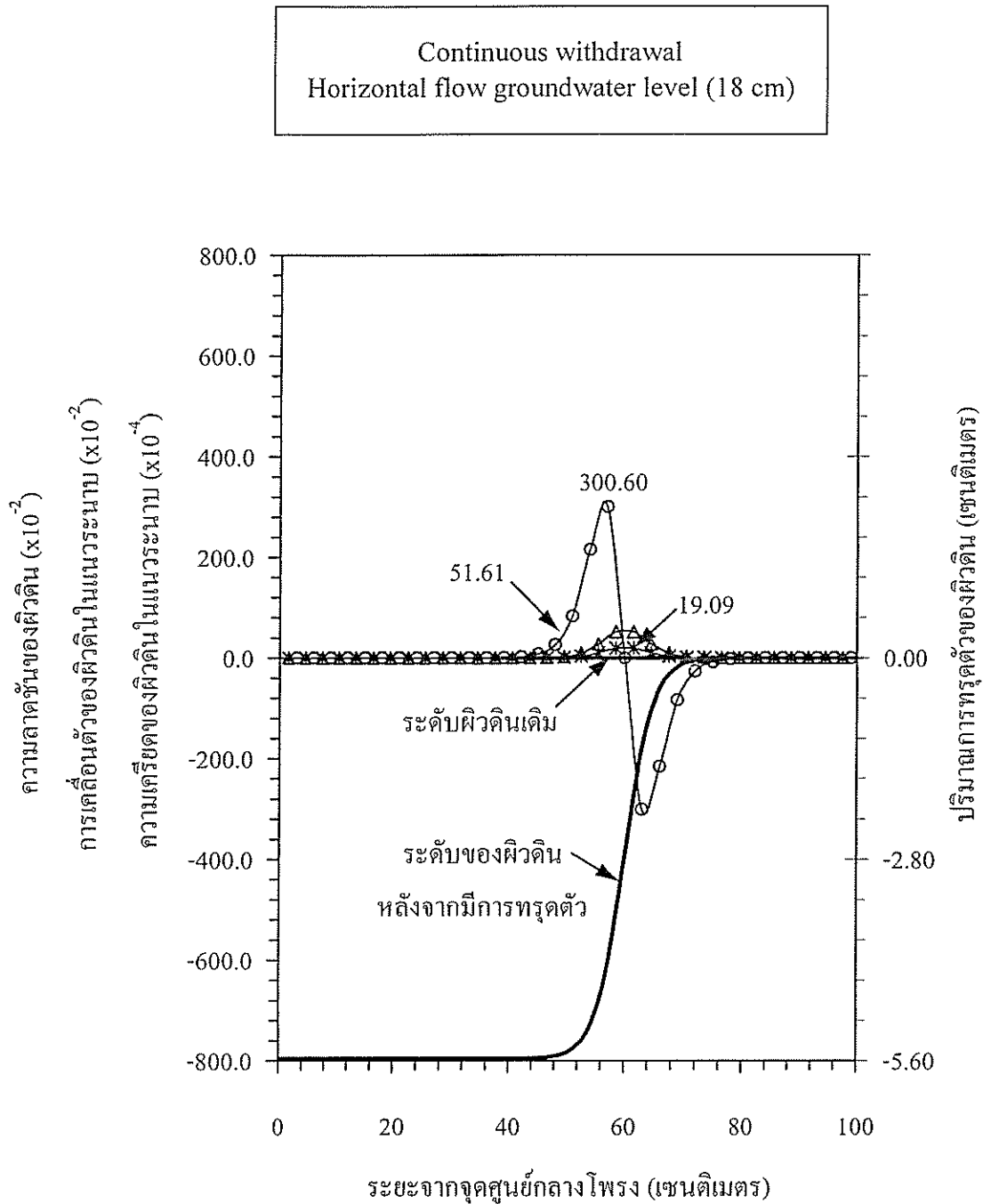


รูปที่ ช-12 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระดับความสูงของน้ำบาดาลเท่ากับ 12.5 ซม. โดยเริ่มสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจัดมาจากทางด้านข้าง

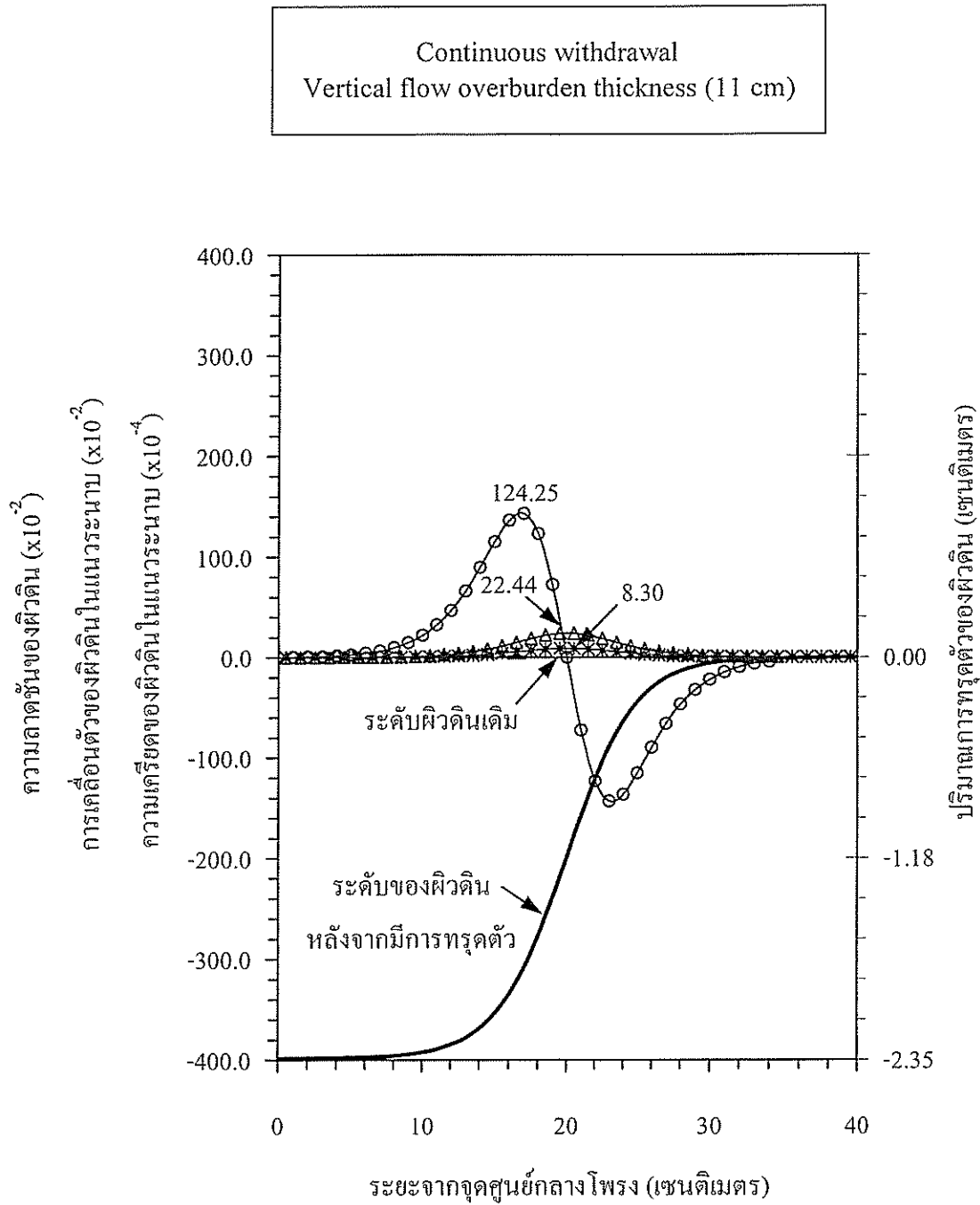
Continuous withdrawal
Horizontal flow groundwater level (18 cm)



รูปที่ ข-13 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระดับความสูงของน้ำบาดาลเท่ากับ 18 ซม. โดยทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านข้าง

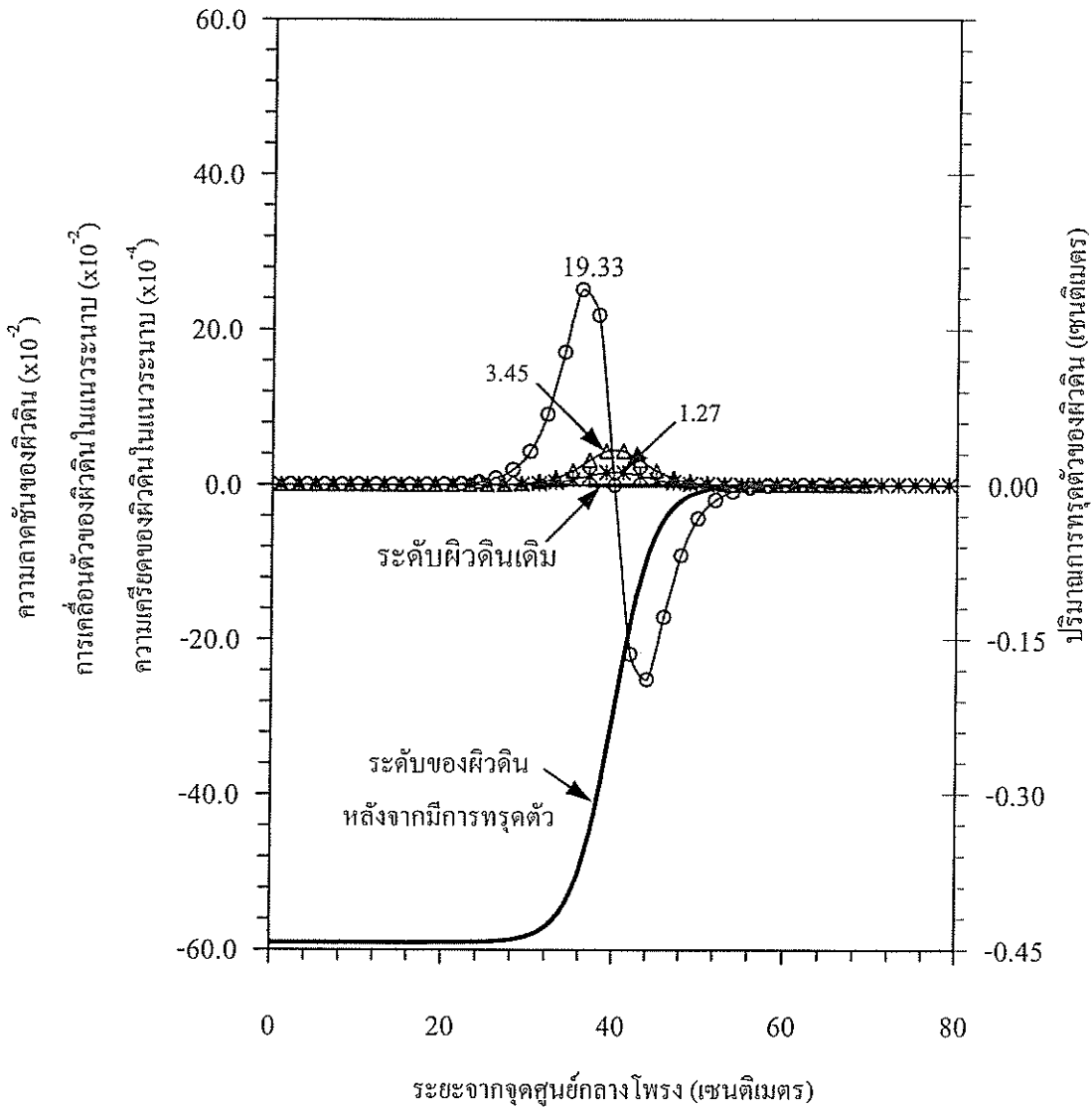


รูปที่ ข-14 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของระดับความสูงของน้ำบาดาลเท่ากับ 18 ซม. โดยเริ่มสูบน้ำใหม่แบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำชิดมาจากทางด้านข้าง

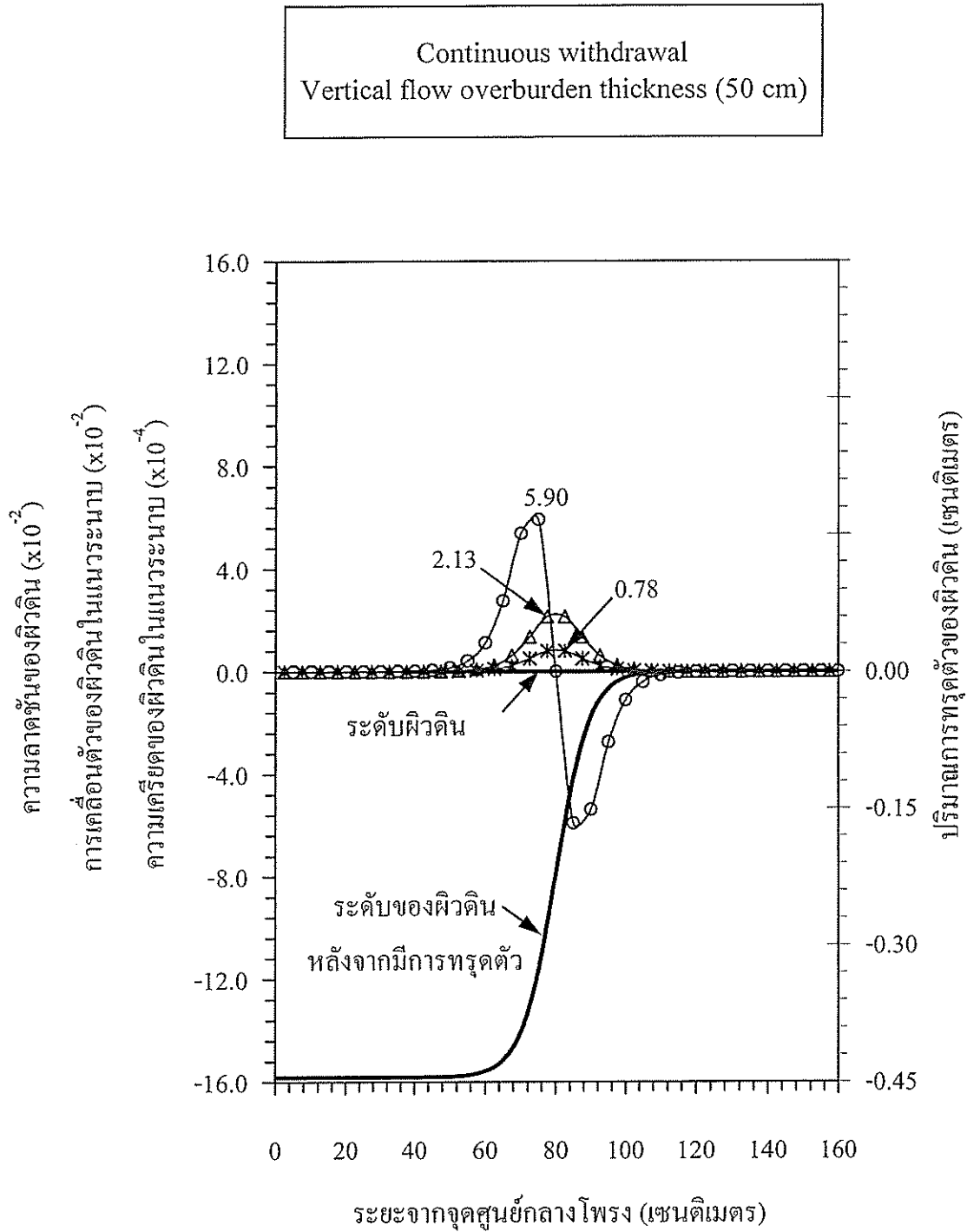


รูปที่ ข-15 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 11 ซม. โดยทำการสูบแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านบน

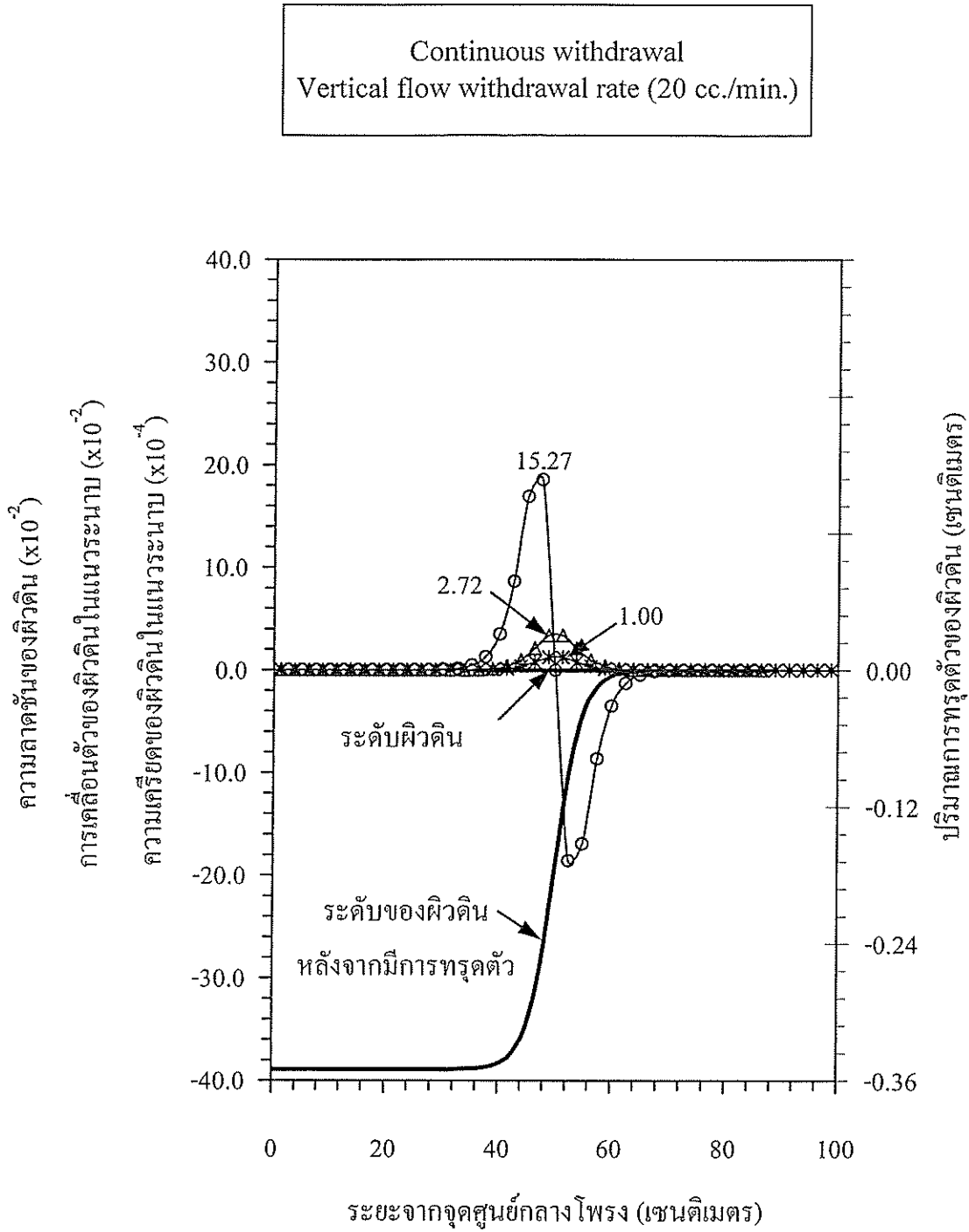
Continuous withdrawal
Vertical flow overburden thickness (25 cm)



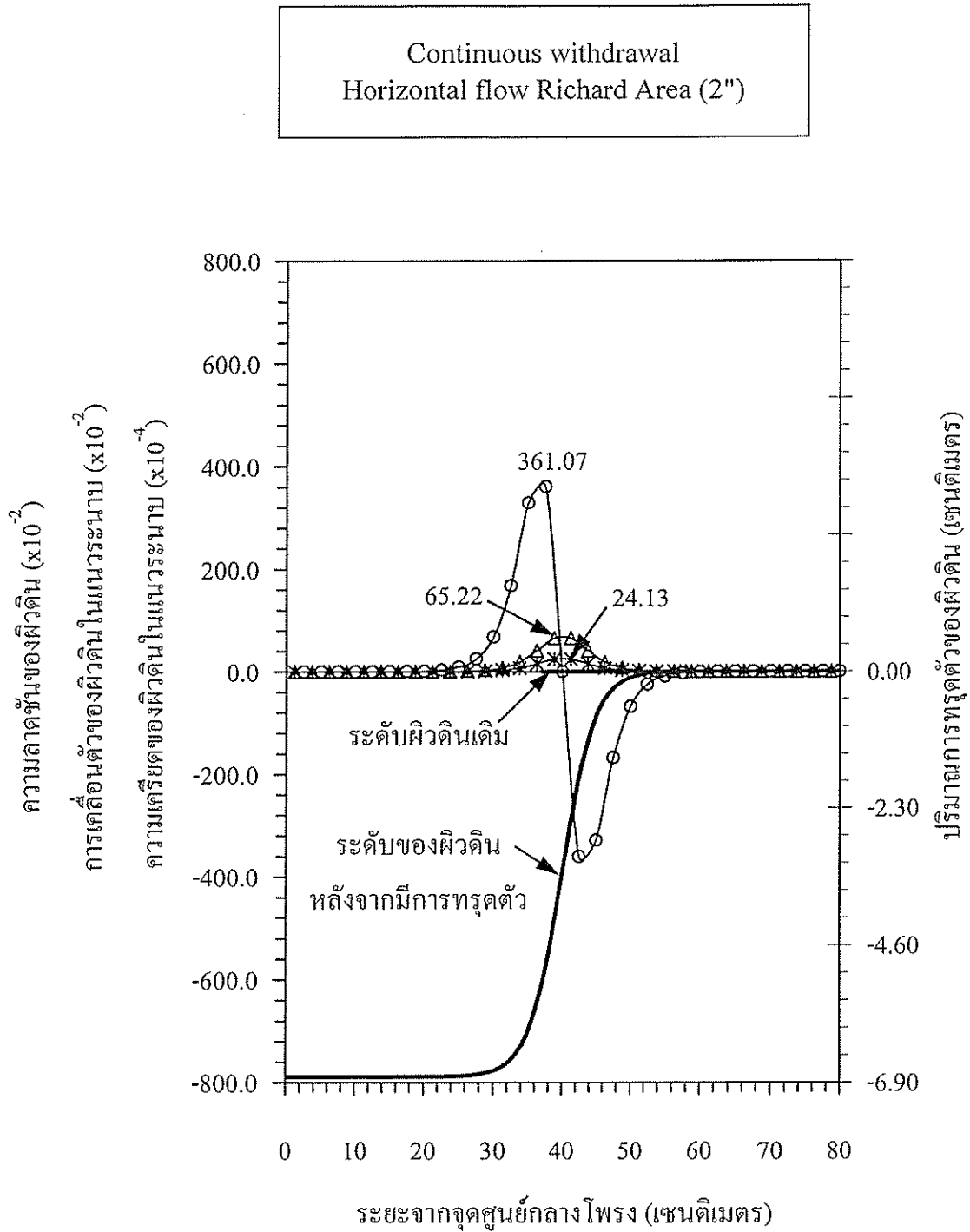
รูปที่ ข-16 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 25 ซม. โดยทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านข้าง



รูปที่ ข-17 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 50 ซม. โดยทำการสูบแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านข้าง

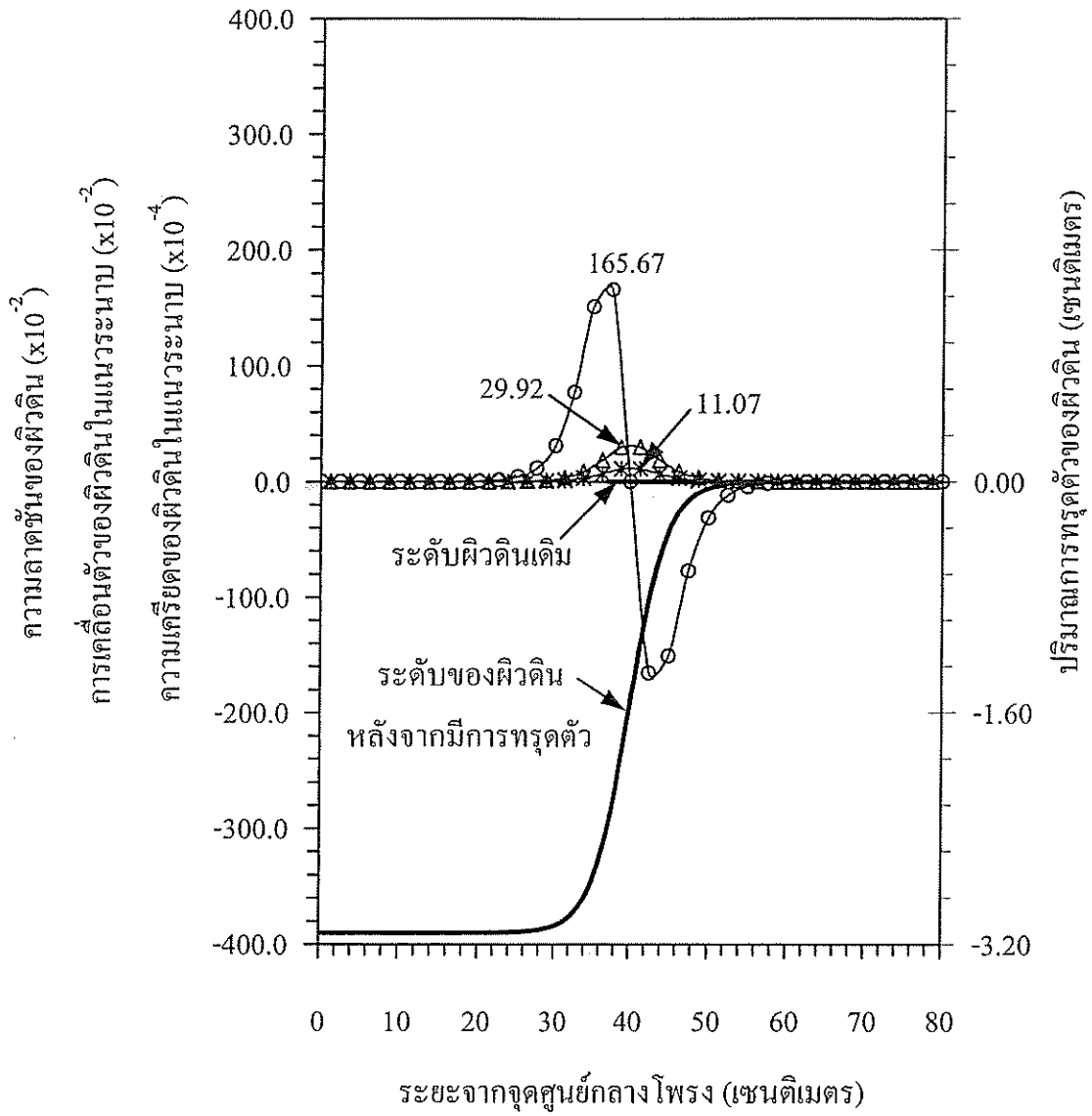


รูปที่ ข-18 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของอัตราการสูบน้ำบาดาลเค็มเท่ากับ 20 ลบ.ชม./นาที่ โดยทำการสูบบ่อยต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านข้างที่อัตรา 100 ลบ.ชม./นาที่ และความหนาของชั้นหินปิดทับเท่ากับ 11 ซม.



รูปที่ ช-19 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของขนาดทางเข้าของแหล่งน้ำจืดเท่ากับ 2 นิ้ว โดยทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านข้าง

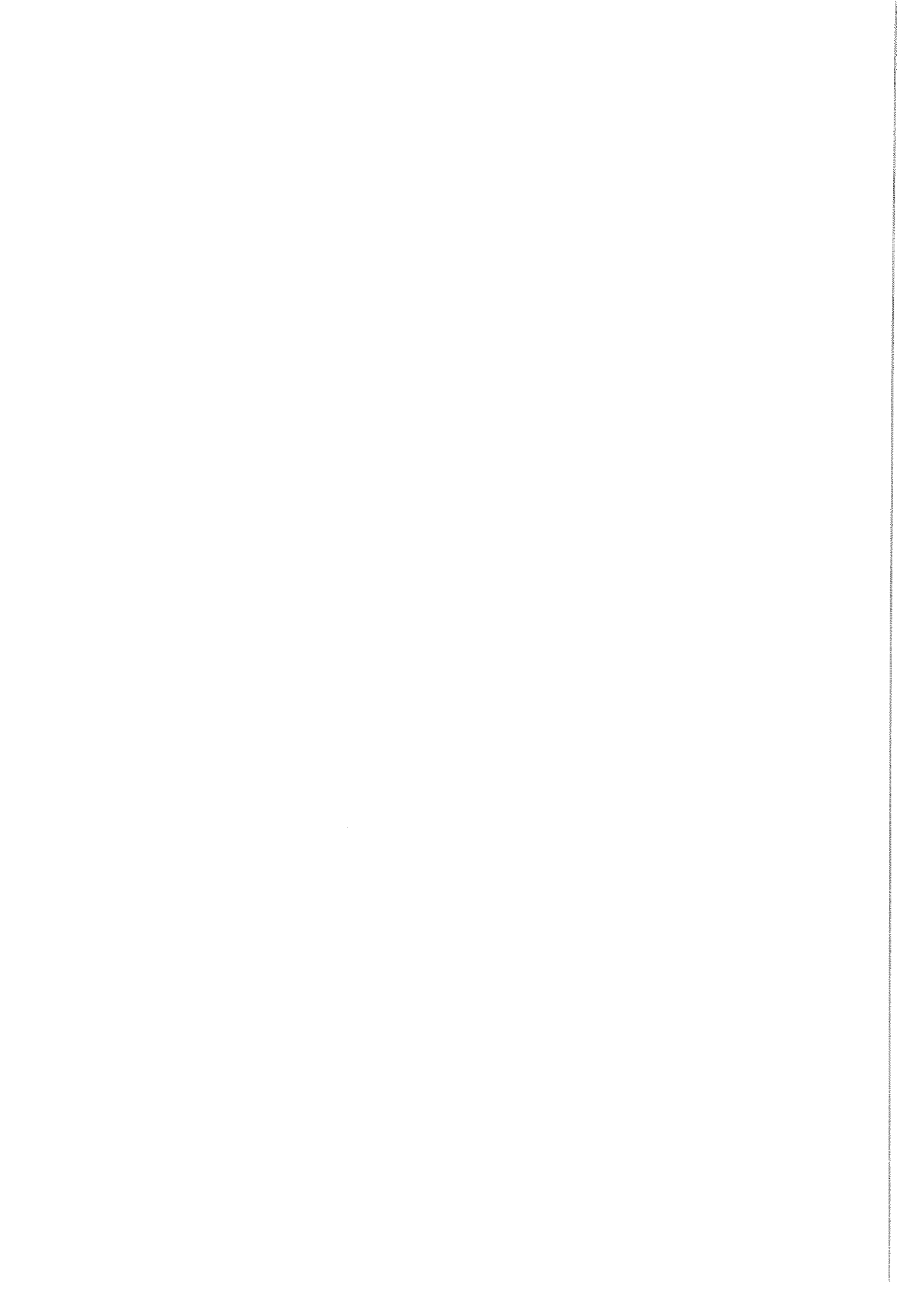
Continuous withdrawal
Horizontal flow Richard Area (6")

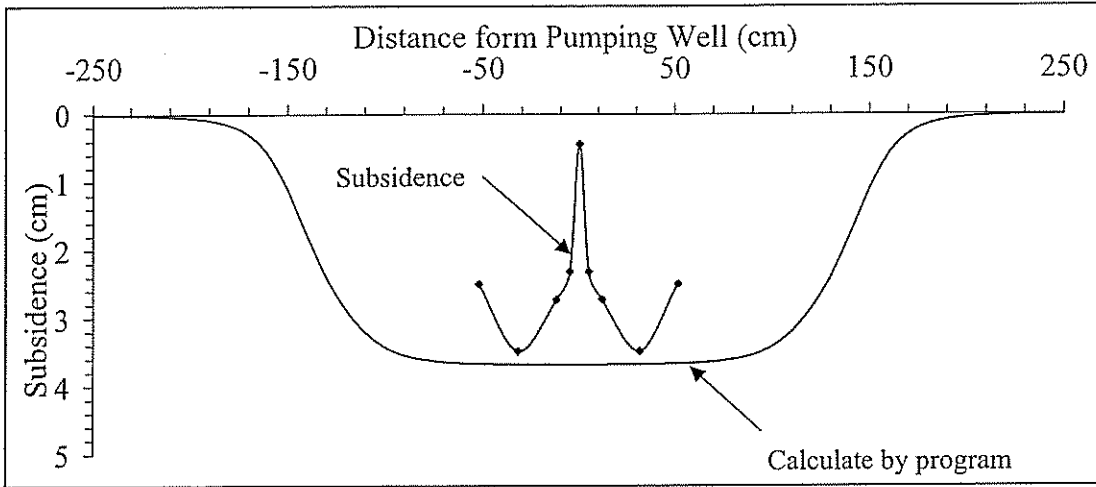


รูปที่ ช-20 ผลการคำนวณด้วย Profile Function จากการทดสอบหาผลกระทบของขนาดทางเข้าของแหล่งน้ำจืดเท่ากับ 6 นิ้ว โดยทำการสูบแบบต่อเนื่องและมีทิศทางของแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านข้าง

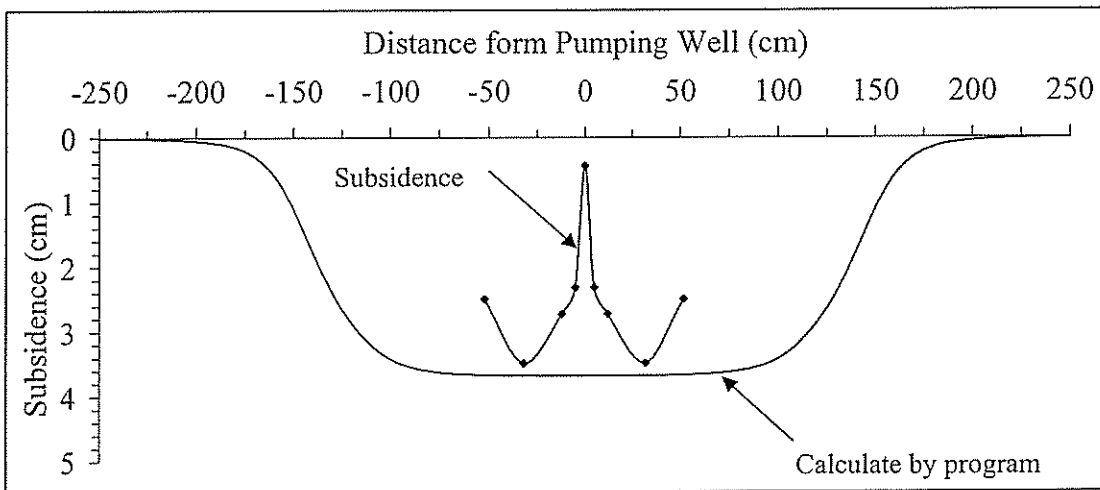
ภาคผนวก ค

ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม SALT_SUBSID

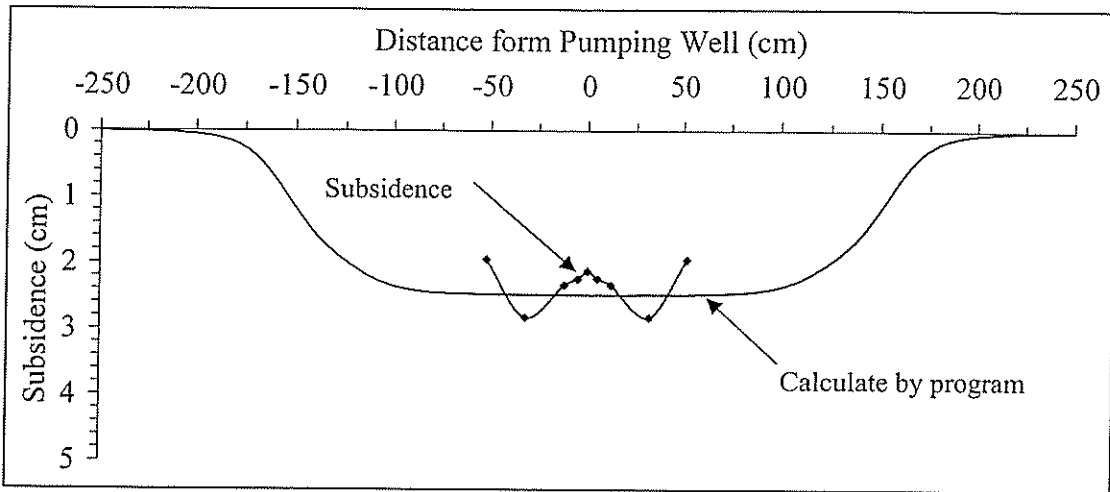




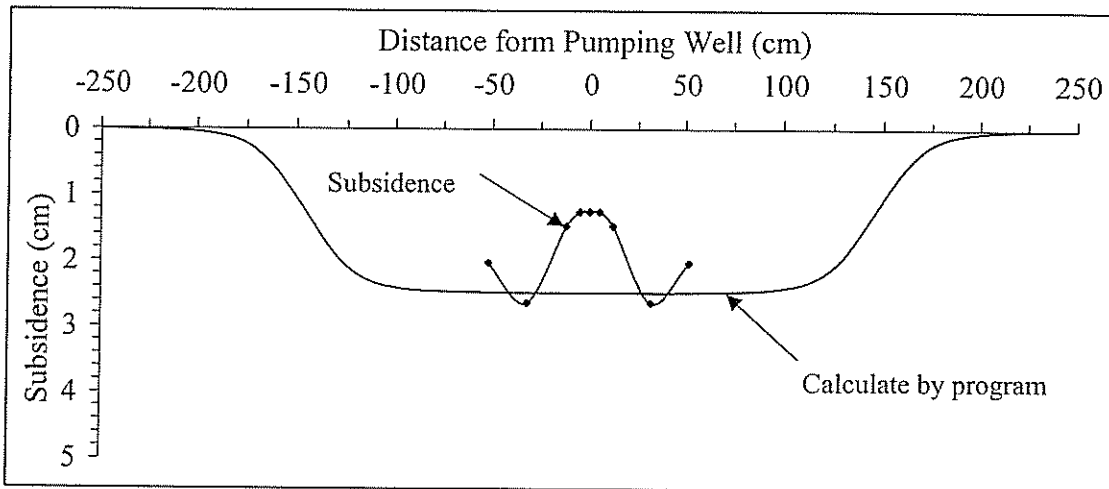
รูปที่ ก-1 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวระหว่างการทดสอบทางกายภาพและการคำนวณด้วยโปรแกรม



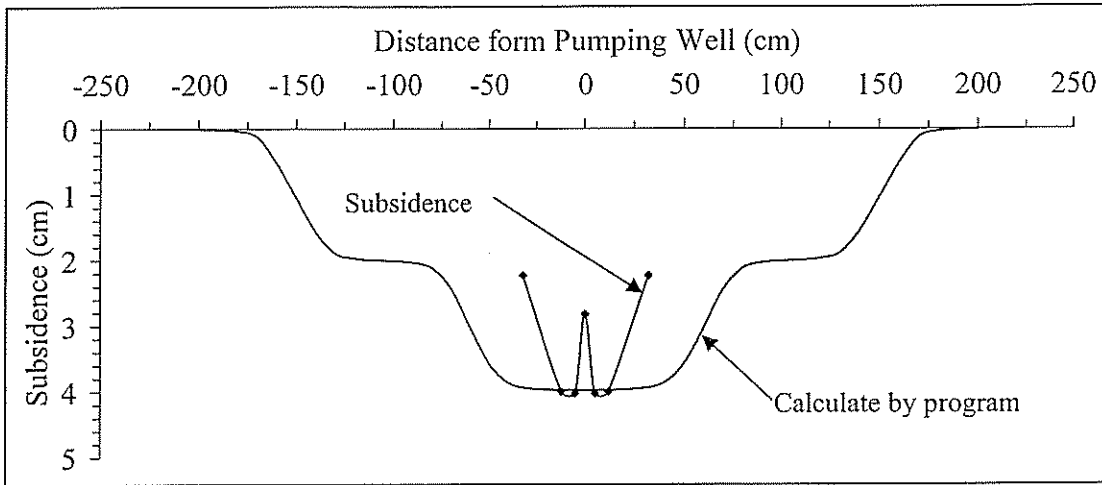
รูปที่ ก-2 ผลการคำนวณของ Salt_ SUBSID (กรณีที่ 1) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_p = 0.5$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



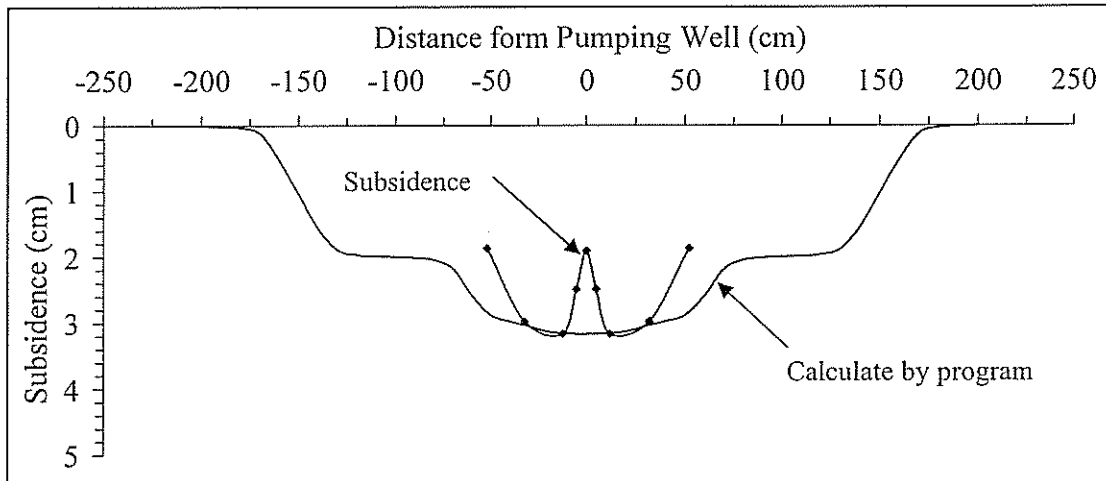
รูปที่ ก-3 ผลการคำนวณของ Salt_ SUBSID (กรณีที่ 1) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_p = 2.0$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



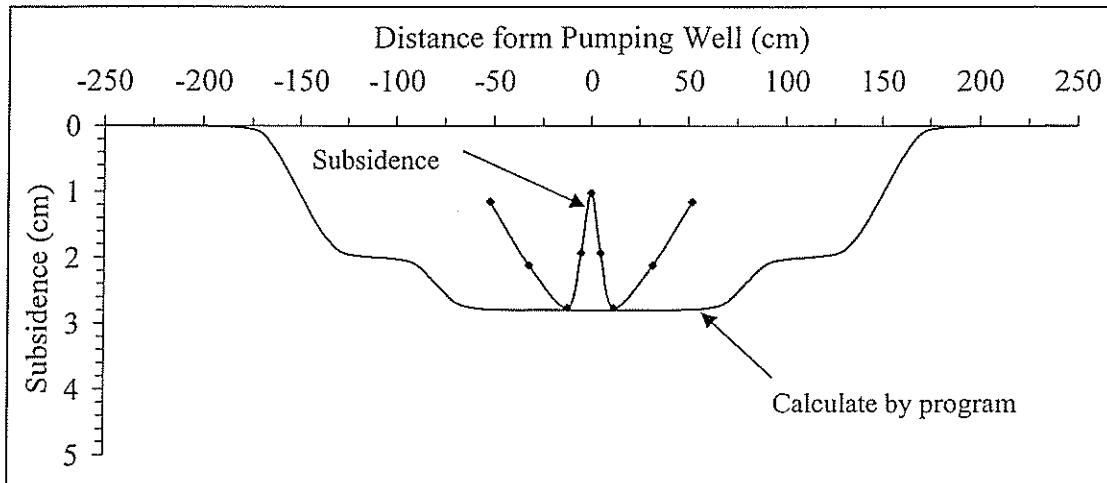
รูปที่ ก-4 ผลการคำนวณของ Salt_ SUBSID (กรณีที่ 1) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_p = 3.5$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



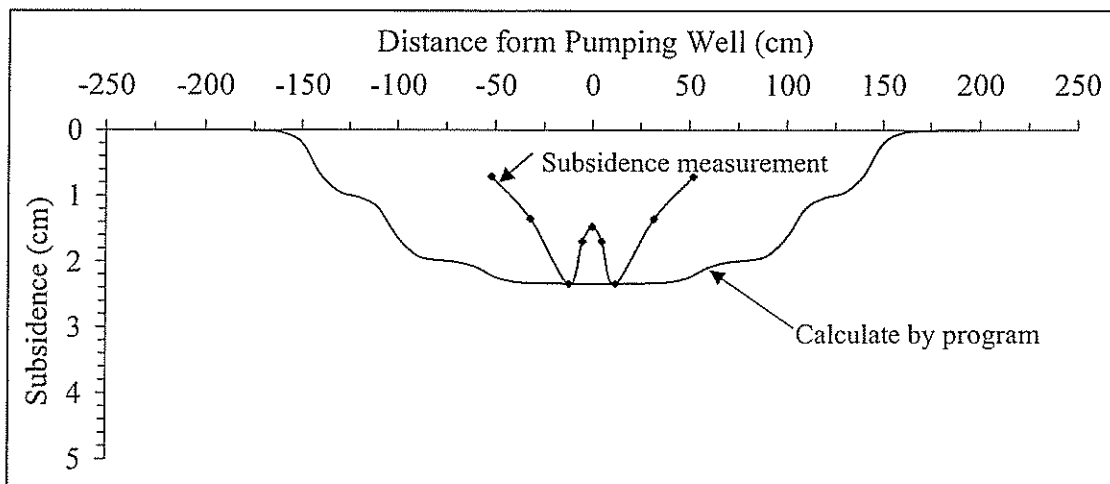
รูปที่ ค-5 ผลการคำนวณของ Salt_SUBSID (กรณีที่ 1) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบเป็นช่วงๆ โดยมีค่า $h_p = 0.5$ ซม. และ $d_s = 11$ ซม.



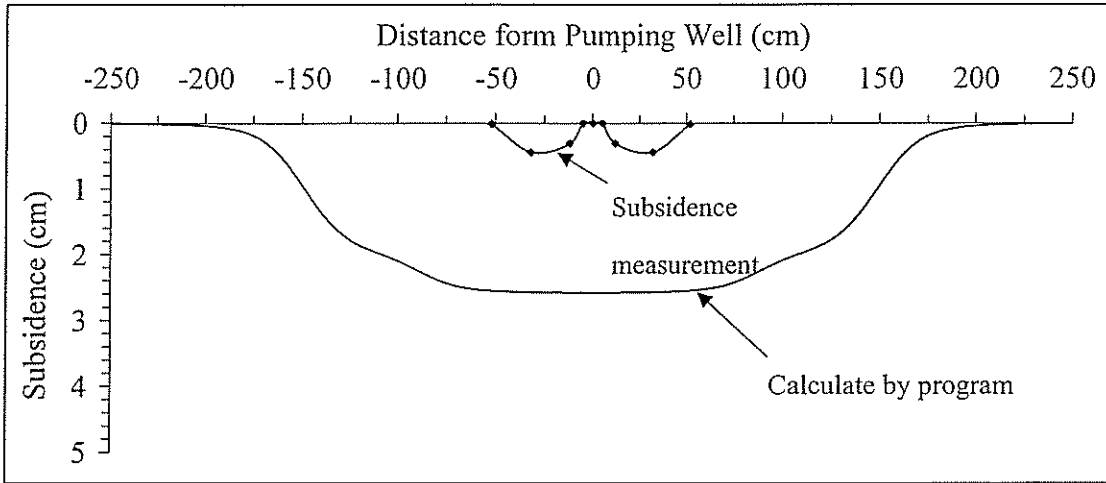
รูปที่ ค-6 ผลการคำนวณของ Salt_SUBSID (กรณีที่ 1) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบเป็นช่วงๆ โดยมีค่า $h_p = 2.0$ ซม. และ $d_s = 11$ ซม.



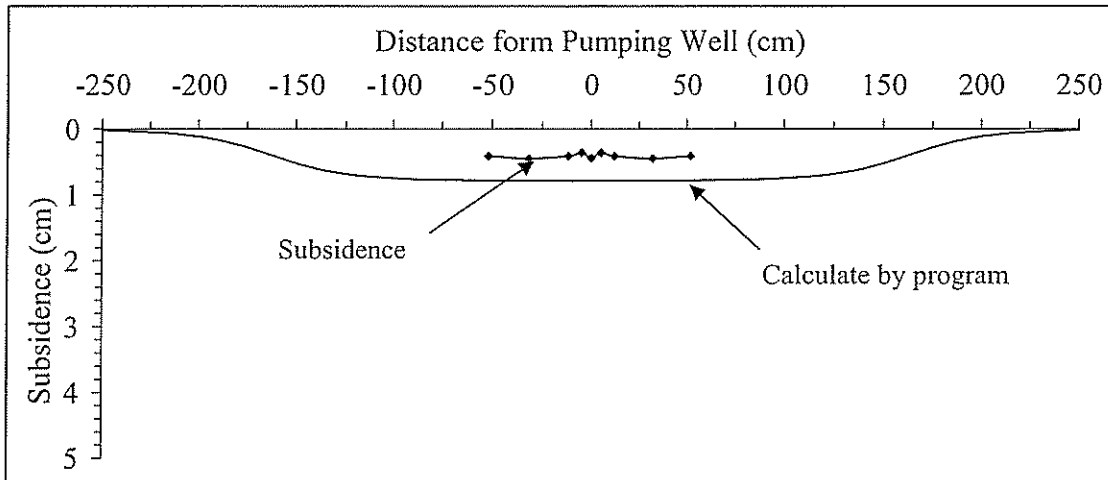
รูปที่ ก-7 ผลการคำนวณของ Salt_SUBSID (กรณีที่ 1) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบน้ำแบบเป็นช่วงๆ โดยมีค่า $h_p = 3.5$ ซม. และ $d_s = 11$ ซม.



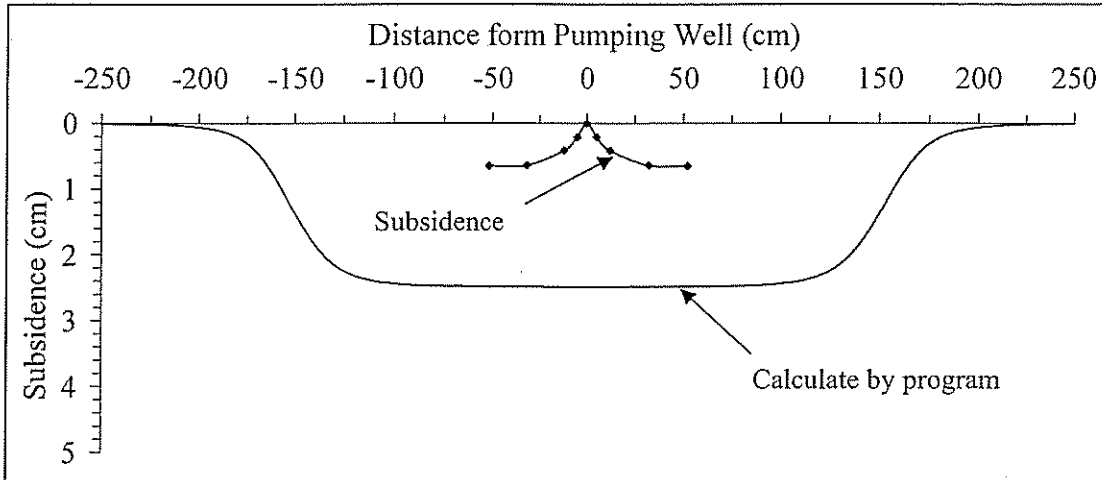
รูปที่ ก-8 ผลการคำนวณของ Salt_SUBSID (กรณีที่ 2) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $d_s = 11$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $h_w = 10$ ซม.



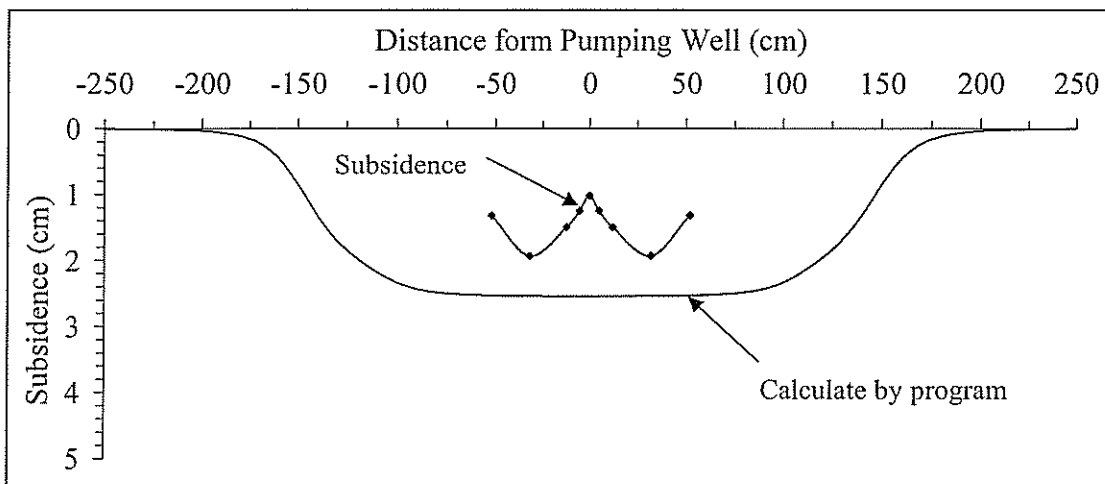
รูปที่ ก-9 ผลการคำนวณของ Salt_ SUBSID (กรณีที่ 2) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $d_s = 25$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $h_w = 24$ ซม.



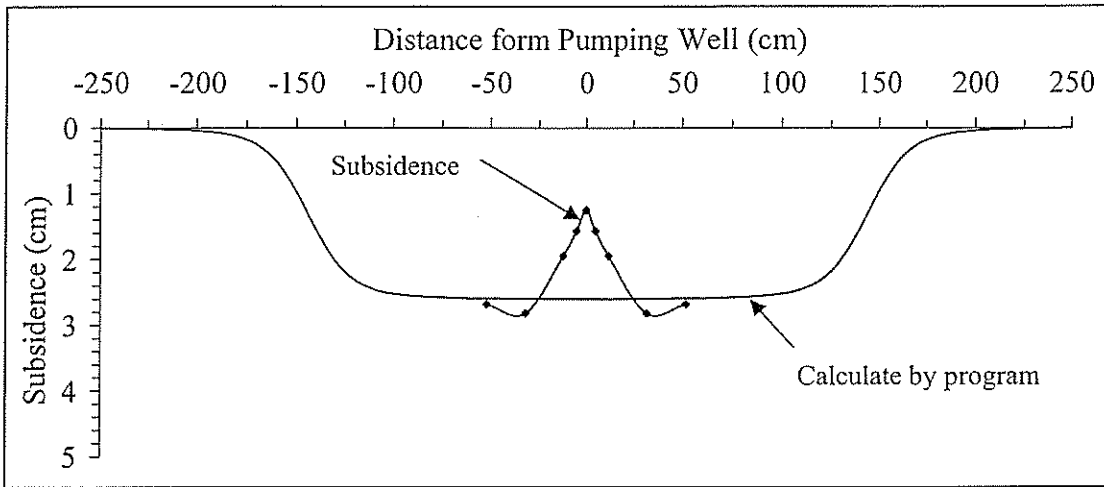
รูปที่ ก-10 ผลการคำนวณของ Salt_ SUBSID (กรณีที่ 2) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $d_s = 50$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $h_w = 49$ ซม.



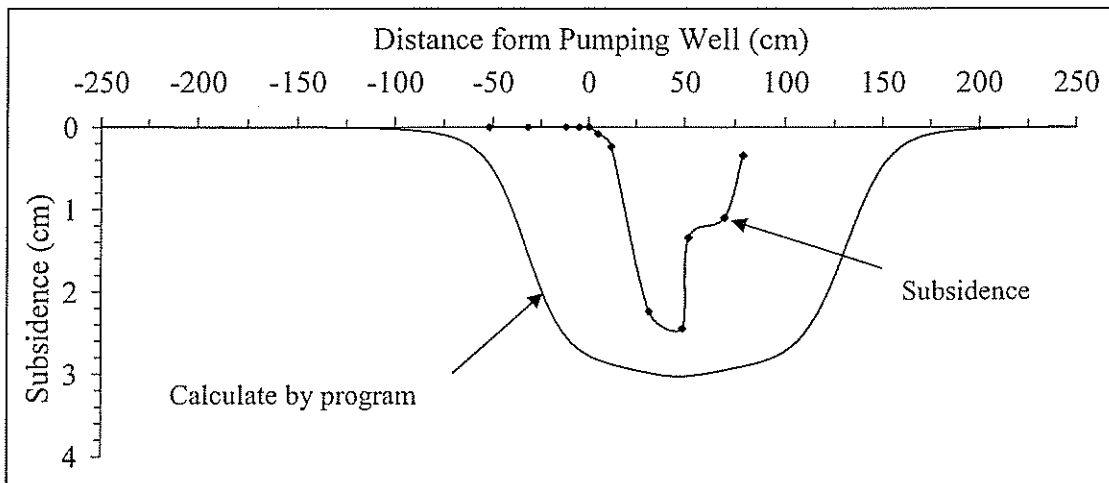
รูปที่ ก-11 ผลการคำนวณของ Salt_ SUBSID (กรณีที่ 3) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_w = 6$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



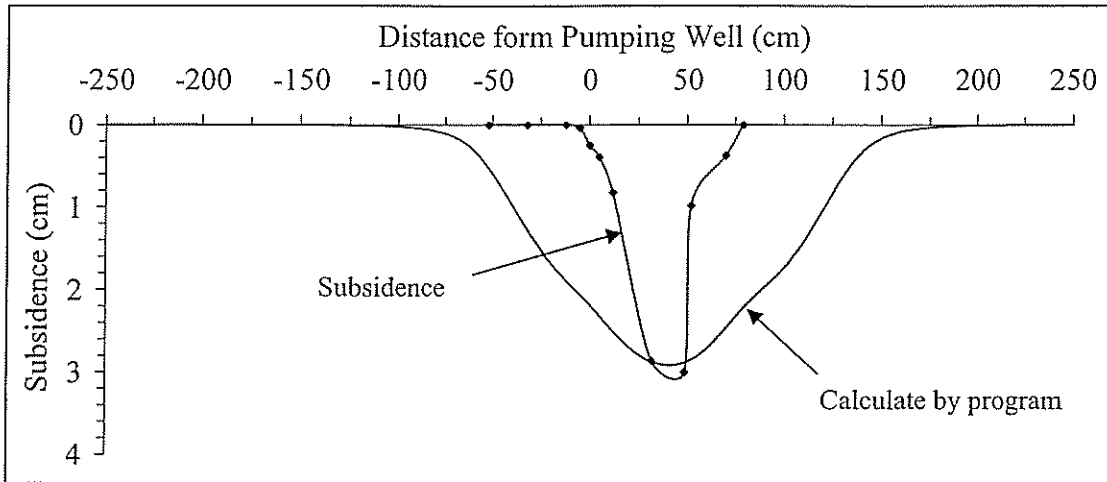
รูปที่ ก-12 ผลการคำนวณของ Salt_ SUBSID (กรณีที่ 3) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_w = 12.5$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



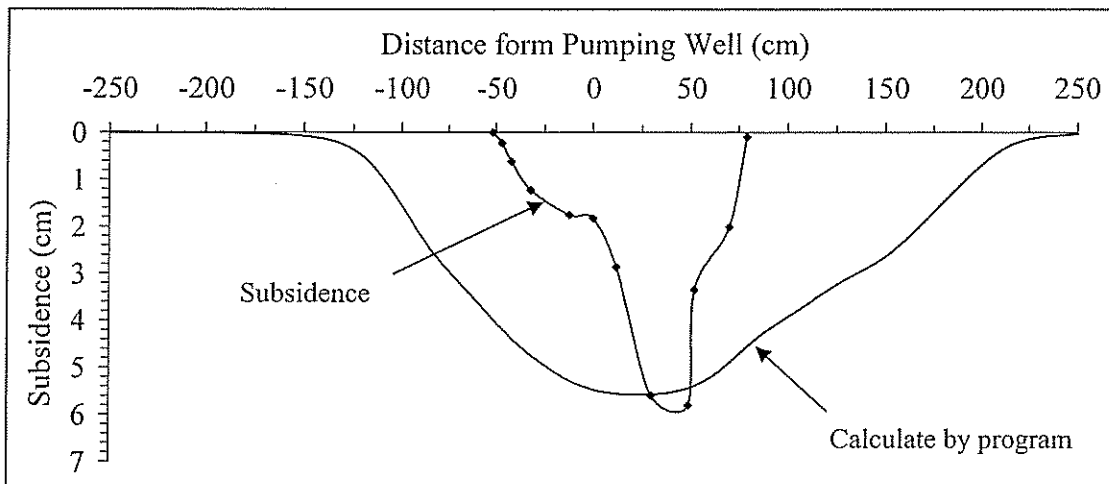
รูปที่ ก-13 ผลการคำนวณของ Salt_SUBSID (กรณีที่ 3) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_w = 18$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



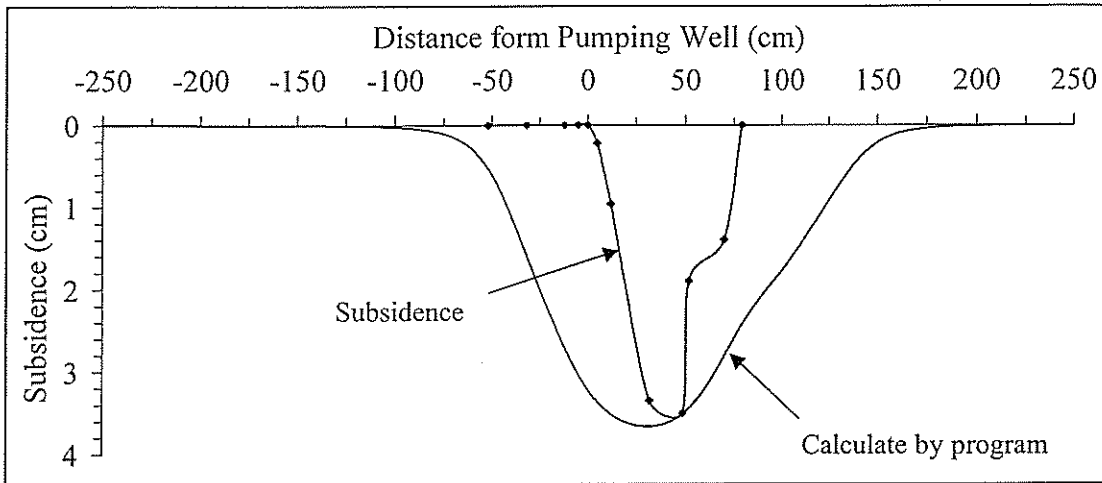
รูปที่ ก-14 ผลการคำนวณของ Salt_SUBSID (กรณีที่ 3) ทำการเติมน้ำจากด้านข้างและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_w = 6$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



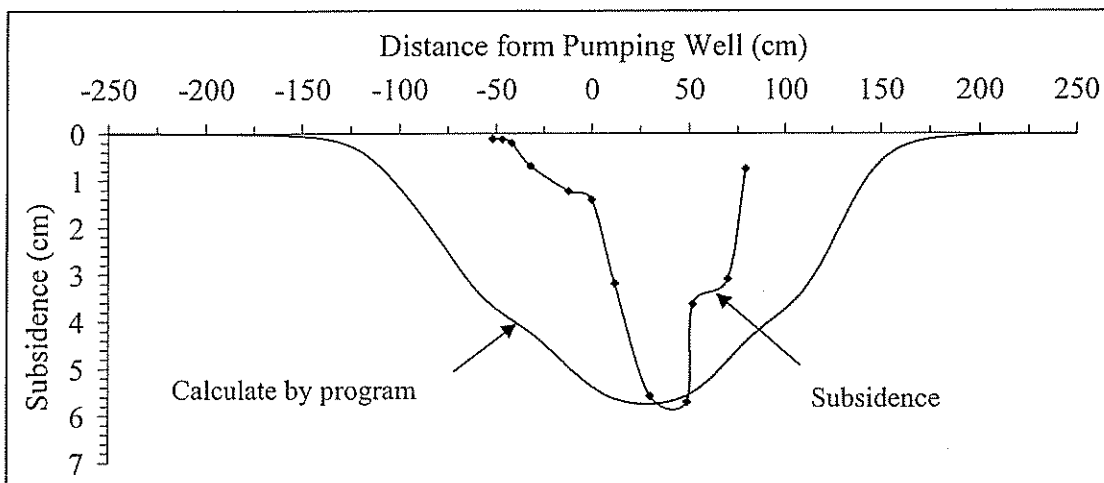
รูปที่ ก-15 ผลการคำนวณของ Salt_SUBSID (กรณีที่ 3) ทำการเติมน้ำจากด้านข้างและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_w = 12.5$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



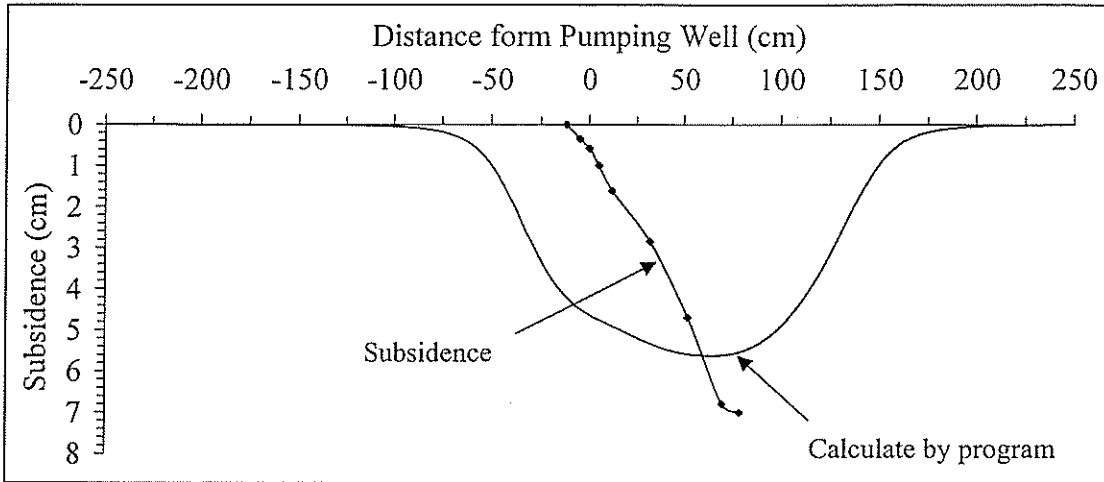
รูปที่ ก-16 ผลการคำนวณของ Salt_SUBSID (กรณีที่ 3) ทำการเติมน้ำจากด้านข้างและทำการสูบแบบต่อเนื่องในหลุมใหม่ โดยมีค่า $h_w = 12.5$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



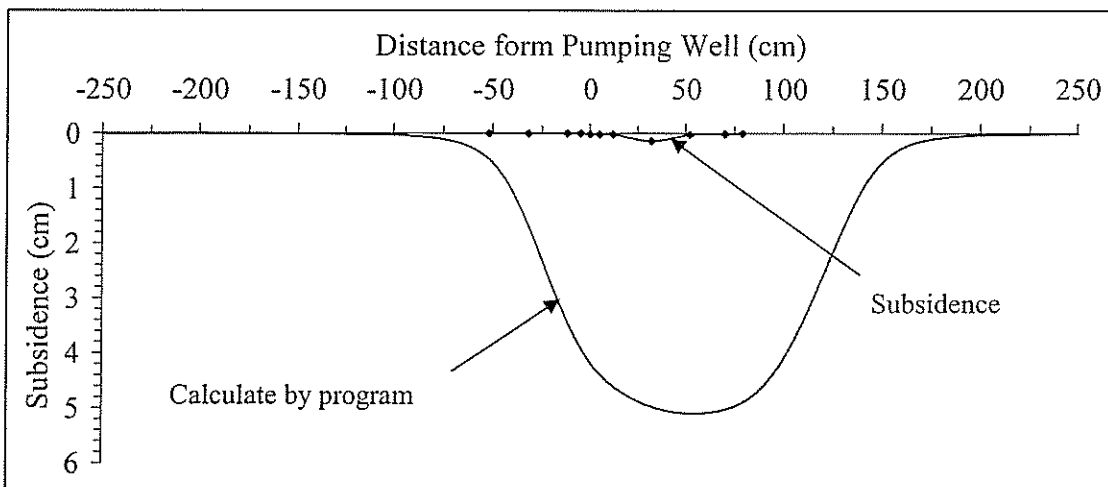
รูปที่ ก-17 ผลการคำนวณของ Salt_ SUBSID (กรณีที่ 3) ทำการเติมน้ำจากด้านข้างและทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_w = 18$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



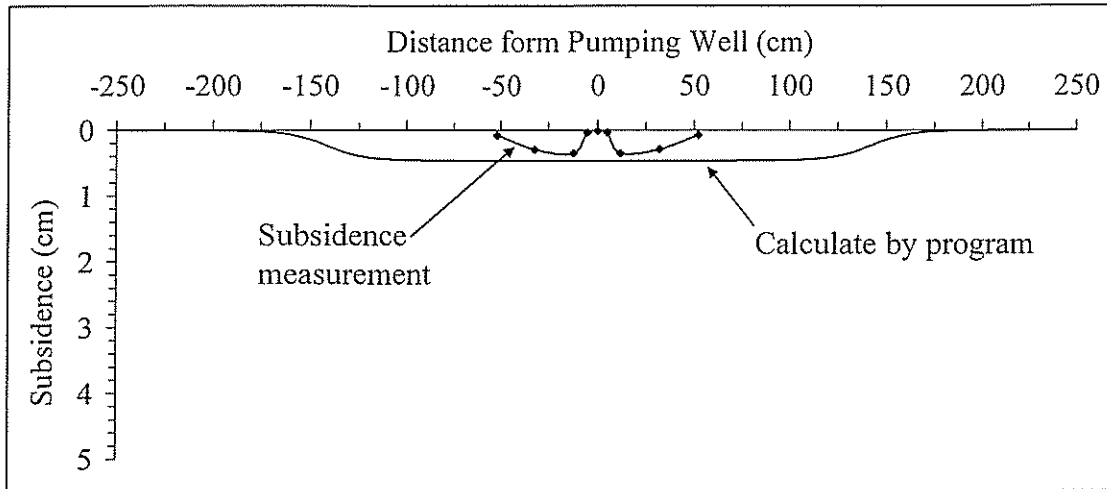
รูปที่ ก-18 ผลการคำนวณของ Salt_ SUBSID (กรณีที่ 3) ทำการเติมน้ำจากด้านข้างและทำการสูบน้ำแบบต่อเนื่องในหลุมใหม่ โดยมีค่า $h_w = 18$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



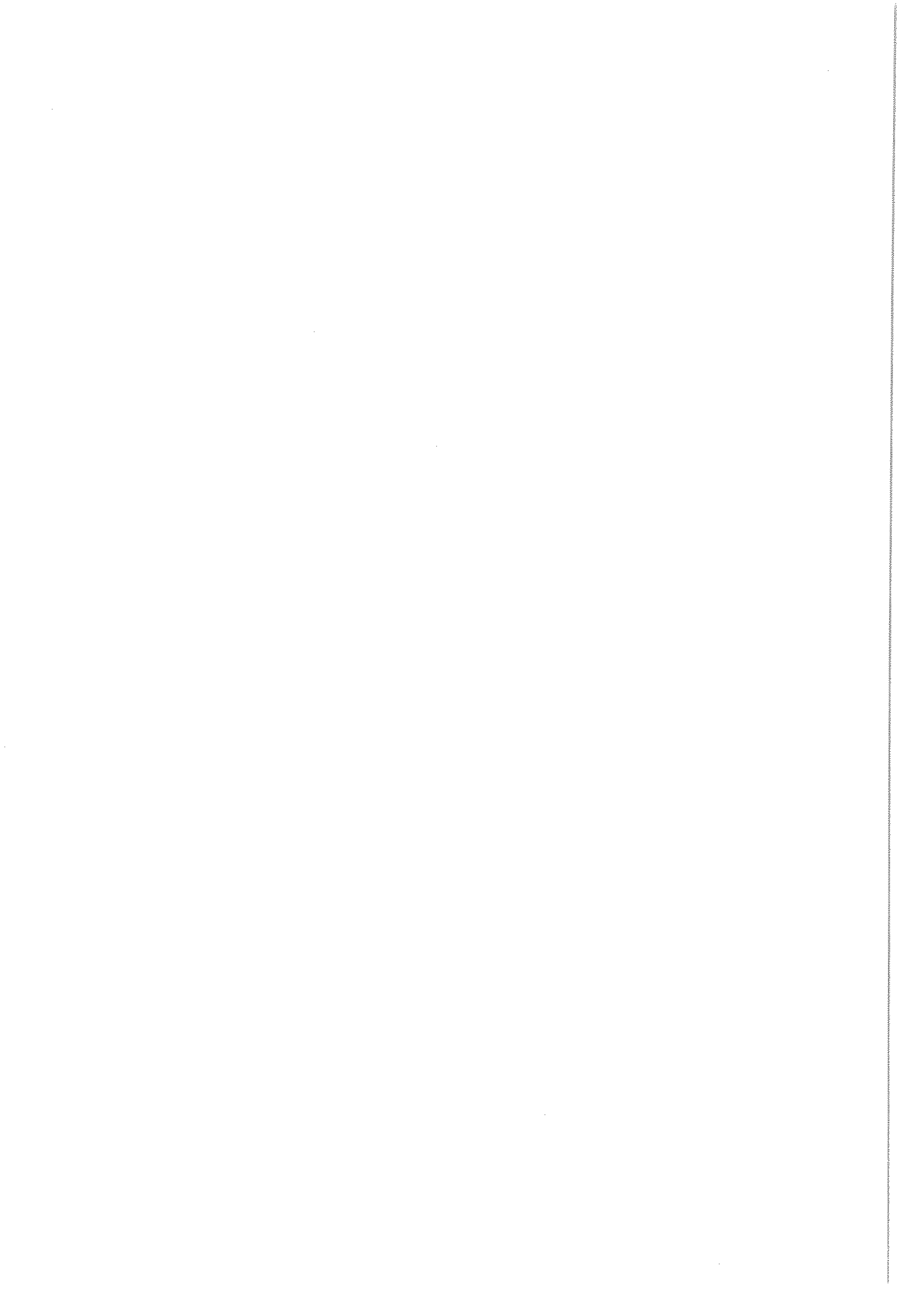
รูปที่ ก-19 ผลการคำนวณของ Salt_SUBSID (กรณีที่ 3) ทางเข้าของน้ำจืดจากด้านข้างมีค่าเท่ากับ 2 นิ้วและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_w = 12.5$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



รูปที่ ก-20 ผลการคำนวณของ Salt_SUBSID (กรณีที่ 3) ทางเข้าของน้ำจืดจากด้านข้างมีค่าเท่ากับ 6 นิ้วและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $h_w = 12.5$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $d_s = 25$ ซม.



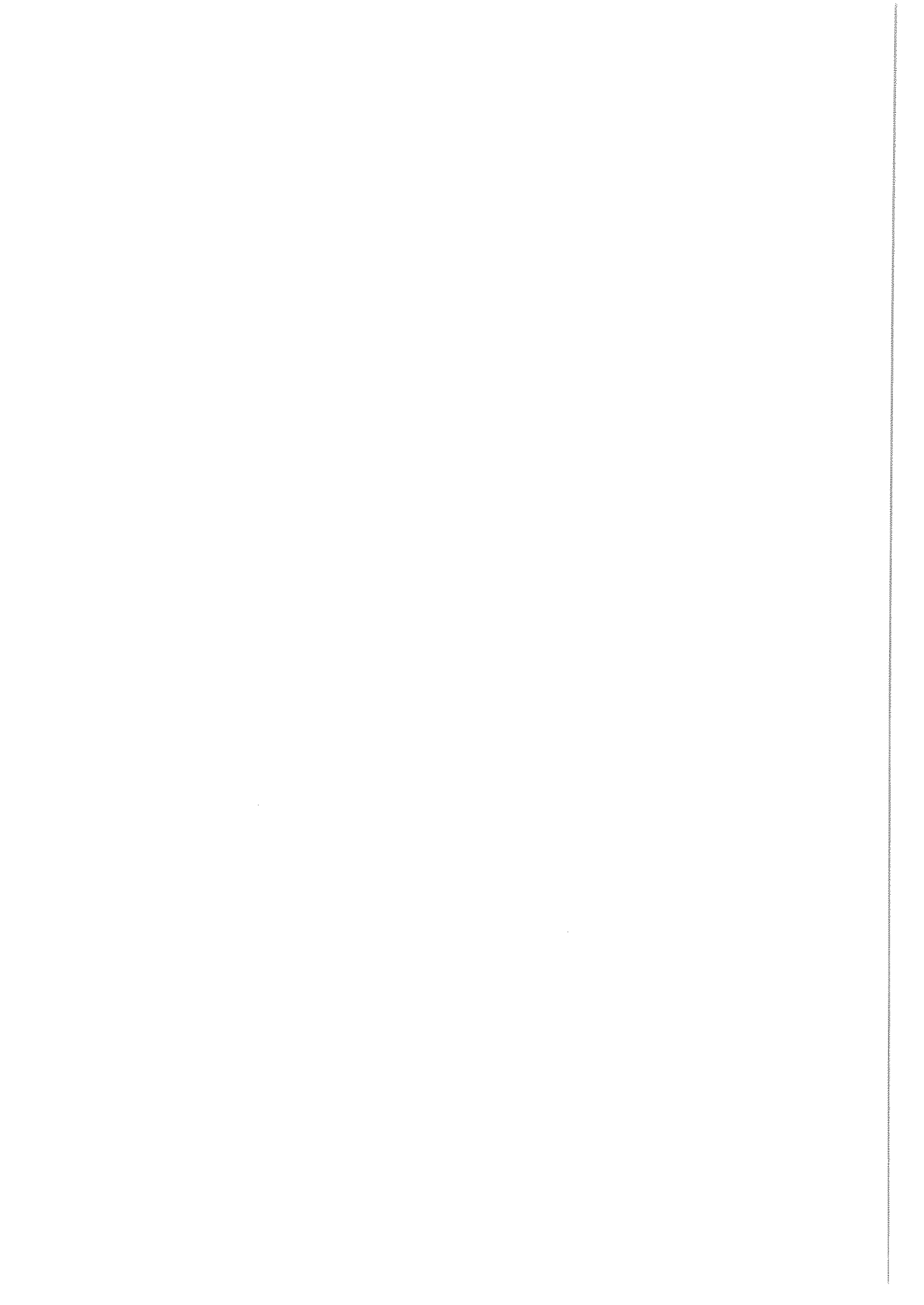
รูปที่ ก-21 ผลการคำนวณของ Salt_ SUBSID (กรณีที่ 4) ทำการเติมน้ำจากด้านบนและทำการสูบแบบต่อเนื่อง โดยมีค่า $d_s = 11$ ซม. $h_p = 2$ ซม. และ $h_w = 10$ ซม. ทำการสูบที่อัตรา $Q = 20$ ลบ.ชม./นาทื และ $Q = 100$ ลบ.ชม./นาทื



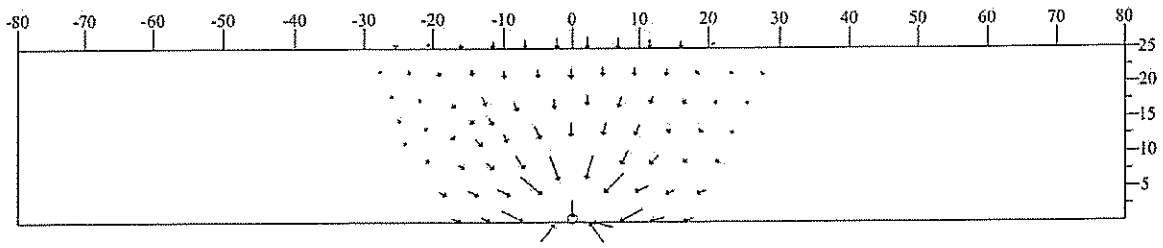
ภาคผนวก ง

ผลการคำนวณด้วย

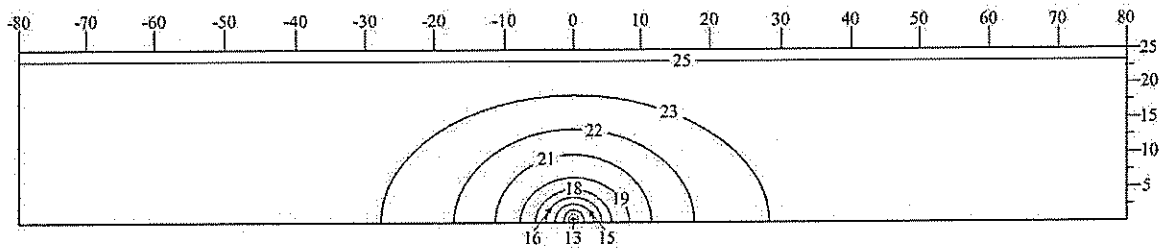
แบบจำลองคอมพิวเตอร์ (FEFLOW)



Velocity Arrow (m/d)

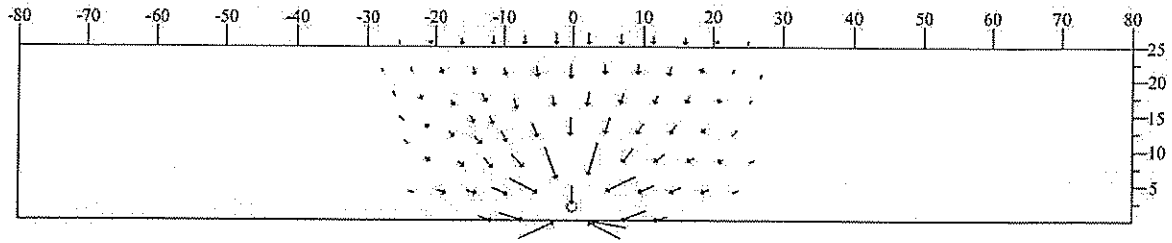


Hydraulic head (m)

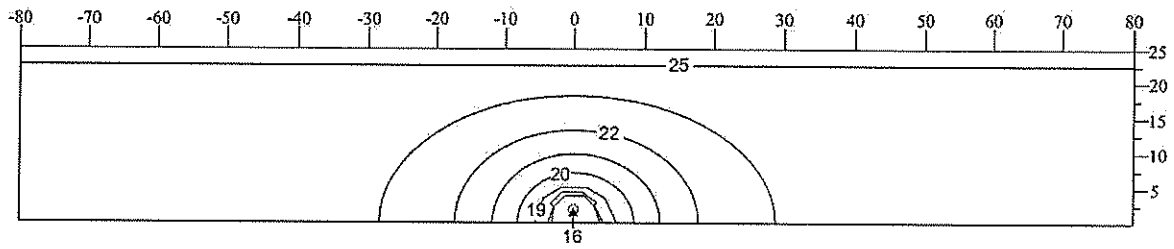


รูปที่ ง-1 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ชั้นหินปิดทับมีความหนา 25 ซม. ตำแหน่งท่อสูบอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 0.5 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 ลบ.ซม./นาทึ

Velocity Arrow (m/d)

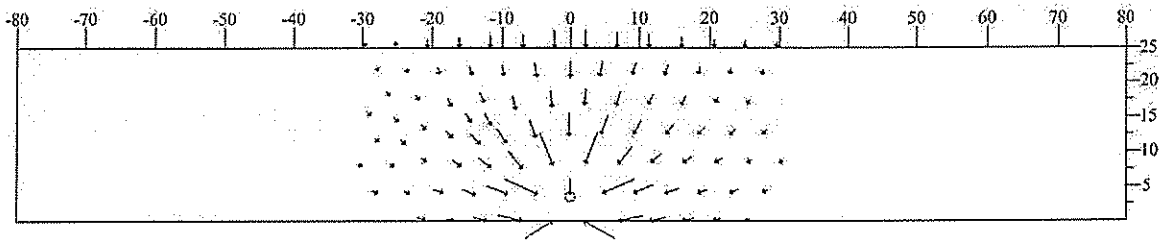


Hydraulic head (m)

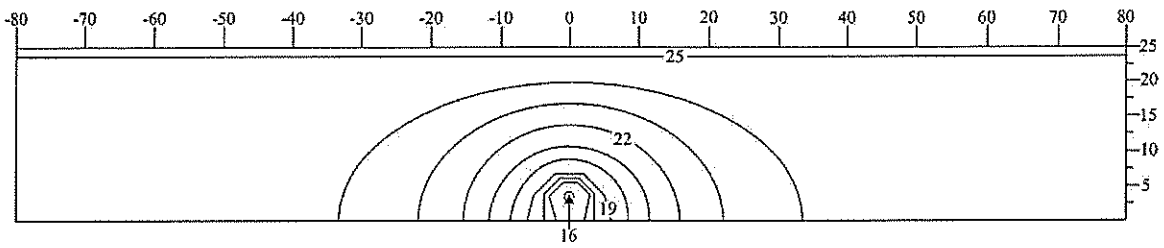


รูปที่ จ-2 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ชั้นหินปิดทับมีความหนา 25 ซม. ตำแหน่งท่อสูบอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 2 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 ลบ.ซม./นาที

Velocity Arrow (m/d)

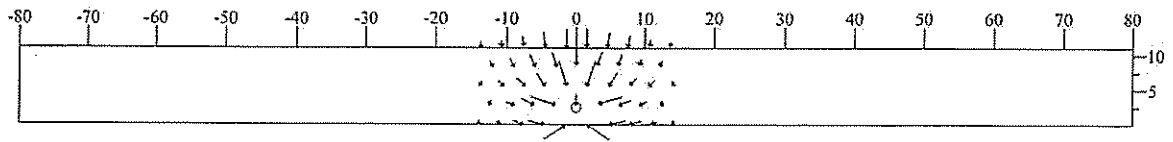


Hydraulic head (m)

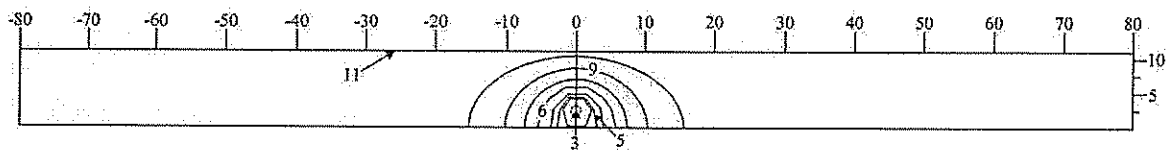


รูปที่ ง-3 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ชั้นหินปิดทับมีความหนา 25 ซม. ตำแหน่งท่อสูบอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 3.5 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 ลบ.ซม./นาทึ

Velocity Arrow (m/d)

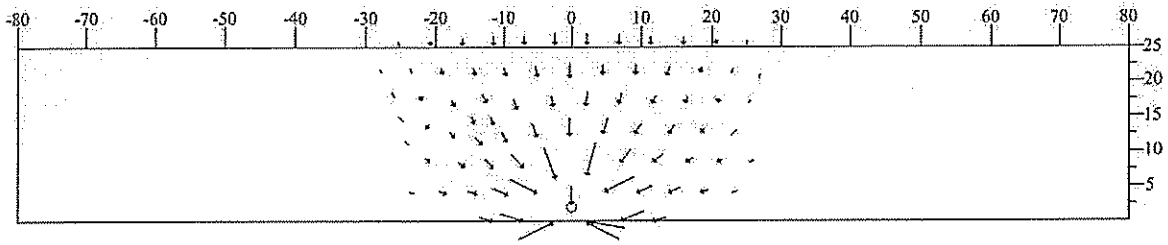


Hydraulic head (m)

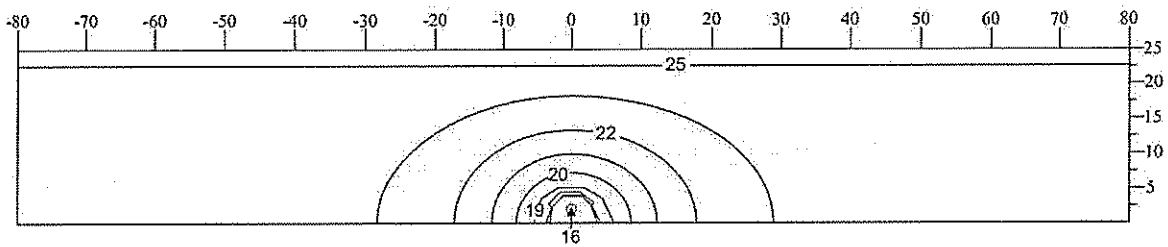


รูปที่ ๓-4 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ชั้นหินปิดทับมีความหนา 11 ซม. ตำแหน่งท่อสูบน้ำอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 2 ซม. อัตราการสูบน้ำเท่ากับ 100 ลบ.ซม./นาที

Velocity Arrow (m/d)

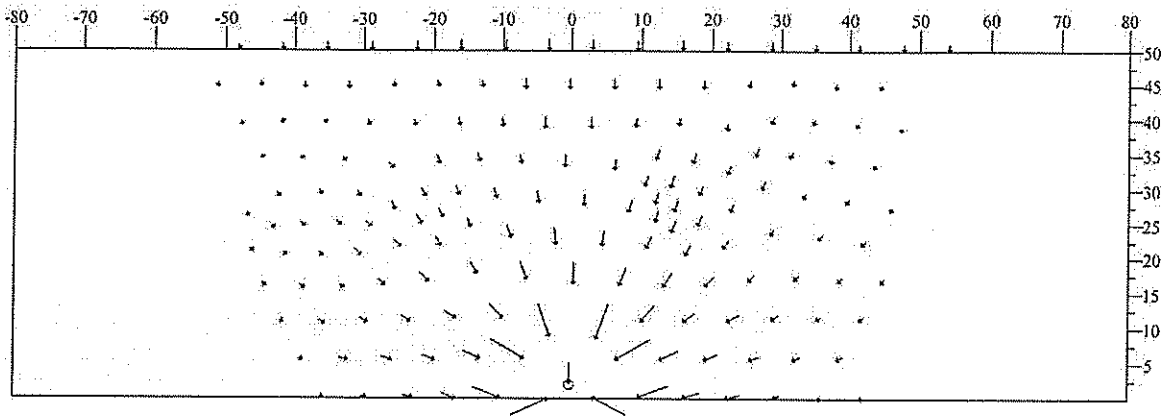


Hydraulic head (m)

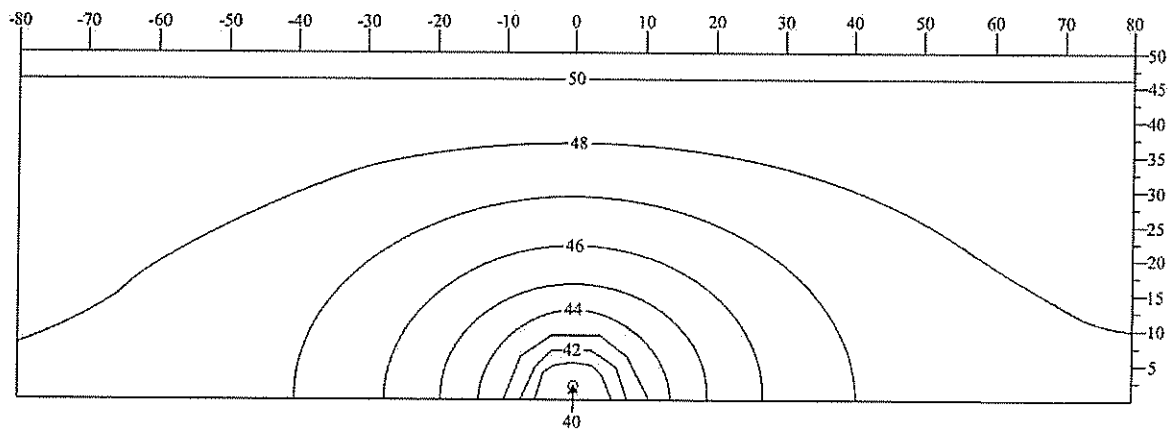


รูปที่ จ-5 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ชั้นหินปิดทับมีความหนา 25 ซม. ตำแหน่งท่อสูบอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 2 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 ลบ.ซม./นาที

Velocity Arrow (m/d)

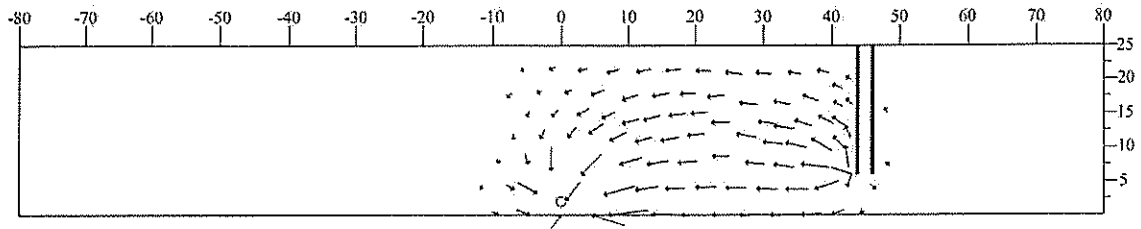


Hydraulic head (m)

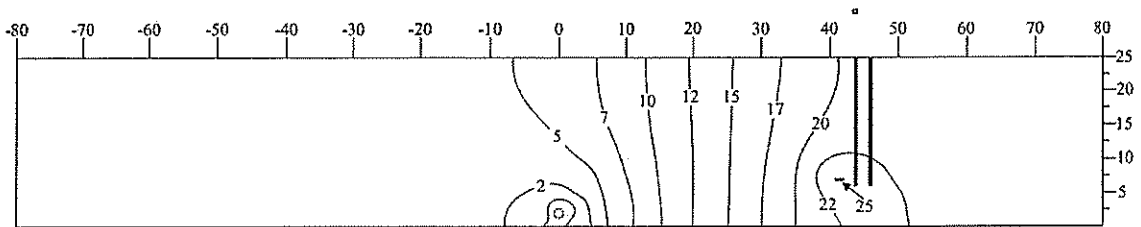


รูปที่ จ-6 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ชั้นหินปิดทับมีความหนา 50 ซม. ตำแหน่งท่อสูบอยู่ห่างจากชั้นเกลือ 2 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 ลบ.ชม./นาฬิกา

Velocity Arrow (m/d)

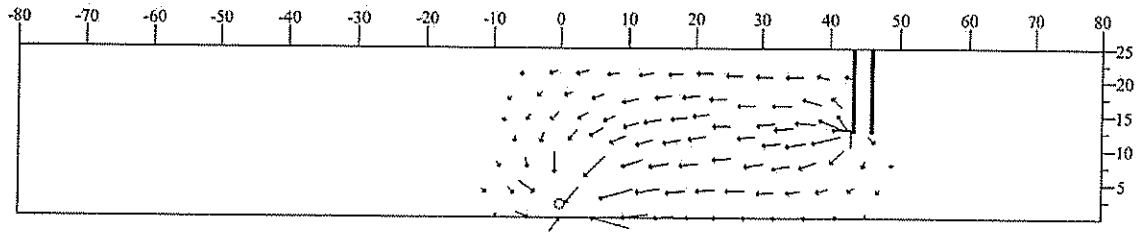


Hydraulic head (m)

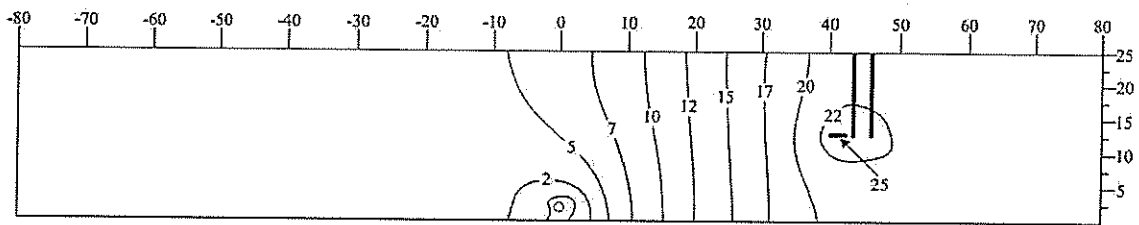


รูปที่ ๓-7 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ชั้นหินปิดทับมีความหนา 25 ซม. ทิศทาง
 ที่มาของแหล่งน้ำจืดจากทางด้านข้างที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 6 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ
 100 ลบ.ซม./นาที

Velocity Arrow (m/d)

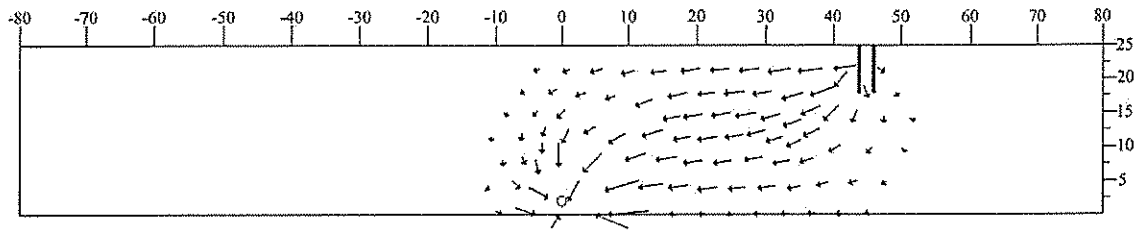


Hydraulic head (m)

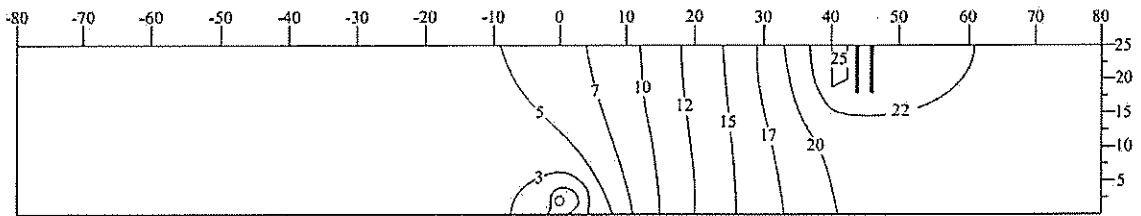


รูปที่ ง-8 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ชั้นหินปิดทับมีความหนา 25 ซม. โดยแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านข้างที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 12.5 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 ลบ. ซม./นาที่

Velocity Arrow (m/d)

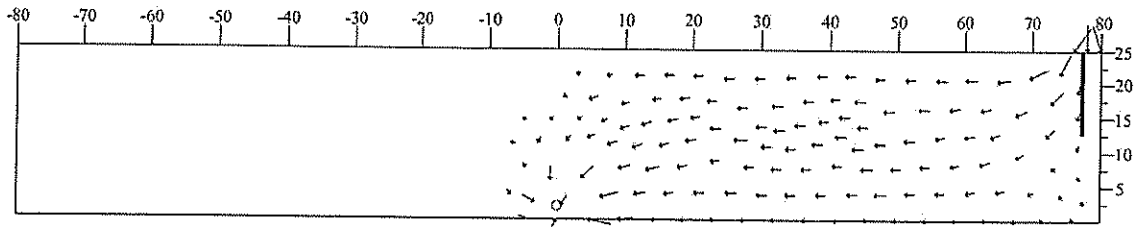


Hydraulic head (m)

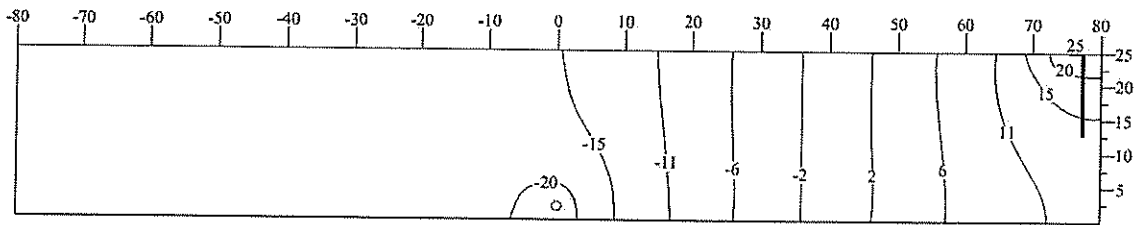


รูปที่ ๔-9 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ชั้นหินปิดทับมีความหนา 25 ซม. โดยแหล่งน้ำจืดมาจากทางด้านข้างที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 18 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 ลบ.ซม./นาที่

Velocity Arrow (m/d)

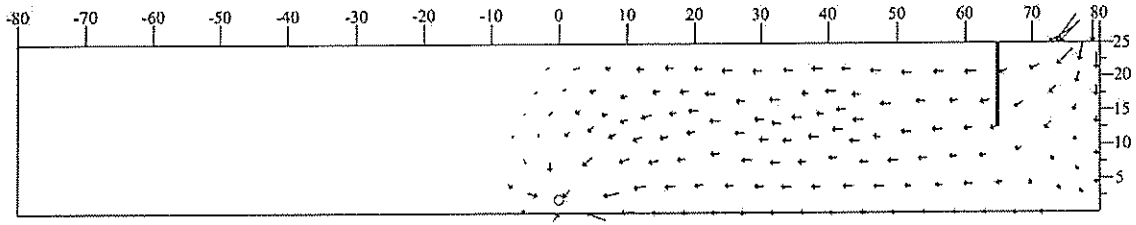


Hydraulic head (m)

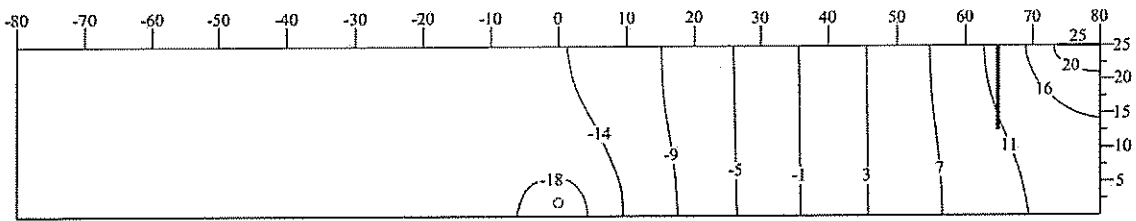


รูปที่ ง-10 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ชั้นหินปิดทับมีความหนา 25 ซม. โดยแหล่งน้ำจืดขนาด 2 นิ้ว ไหลมาจากทางด้านข้าง ที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 12.5 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 ลบ.ซม./นาที

Velocity Arrow (m/d)



Hydraulic head (m)



รูปที่ จ-11 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่ความหนาของชั้นหินปิดทับ 25 ซม. โดยแหล่งน้ำจืดขนาด 6 นิ้ว ไหลจากทางด้านข้าง ที่ระดับน้ำบาดาลเท่ากับ 12.5 ซม. อัตราการสูบเท่ากับ 100 ลบ.ซม./นาที

ประวัตินักวิจัย

อาจารย์ ดร.ปรัชญา เทพแรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2521 ที่จังหวัดกาญจนบุรี จบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โปรแกรมวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ในปี พ.ศ. 2550 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาเทคโนโลยีสุรนารี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา มีความชำนาญทางการทดสอบด้านกลศาสตร์ หินในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม การออกแบบและการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เป็นนักวิจัยประจำหน่วยวิจัยกลศาสตร์ธรณี และเป็นสมาชิกสามัญตลอดชีพของสมาคมธรณีวิทยาแห่งประเทศไทย