

การทดลองการอุดตันของขบวนการเติมน้ำในชั้นน้ำบาดาลด้วยหลอดทราย
ทดลองที่มีอิทธิพลจากปัจจัยด้านกายภาพและเคมีของน้ำเติม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**CLOGGING OF AQUIFER RECHARGE DUE TO
PHYSICAL AND CHEMICAL FACTORS
INVESTIGATED BY SAND
COLUMN TESTS**

Theerasak Tangsutthinon



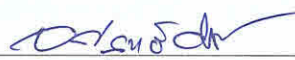
**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2014

การทดสอบการดูดตันของขบวนการเติมน้ำในชั้นน้ำบาดาลด้วยหลอดทรายทดลองที่มี
อิทธิพลจากปัจจัยด้านกายภาพและเคมีของน้ำเดิม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชิงกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ



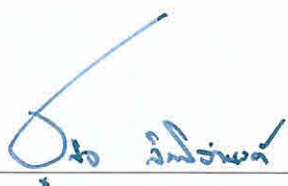
(ศ. ดร.สุขสันติ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.นัตถชัย โชติชัยยางกูร)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธีรศักดิ์ ตั้งสุทธินันท์ : การทดลองการอุดตันของขบวนการเติมน้ำในชั้นน้ำบาดาลด้วยหลอด
ทรายทดลองที่มีอิทธิพลจากปัจจัยด้านกายภาพและเคมีของน้ำเดิม (CLOGGING OF
AQUIFER RECHARGE DUE TO PHYSICAL AND CHEMICAL FACTORS
INVESTIGATED BY SAND COLUMN TESTS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.
สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 93 หน้า

การเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและสูบกลับ (Aquifer Storage Recovery, ASR) เป็น
เทคโนโลยีการแก้ปัญหาภัยแล้งที่ได้รับการยอมรับทั่วโลกและได้มีการประยุกต์ใช้ในหลายประเทศ
ผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการเกิดตะกอนอุดตันในบ่อเติมน้ำและในชั้นน้ำบาดาลในระหว่างการ
เติมน้ำลดศักยภาพการเติมน้ำและประสิทธิภาพบ่อเติมน้ำ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา
อิทธิพลของปัจจัยทางด้านความขุ่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และเฮคของน้ำเดิม ต่อการอุดตันของ
ทรายเยือก (S1) ในหลอดทดลองที่อิมมิดด้วยน้ำกร่อยเค็มที่สูบจากชั้นน้ำบาดาลบางกอก (Bangkok
Aquifer) พร้อมเปรียบเทียบกับทรายหยาบ (S2) และทรายละเอียดมาก (S3) โดย S1, S2 และ S3 มีค่า
สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 2.39, 2.82 และ 3.25 พร้อมค่าเฉลี่ยขนาดทราย (D_{50}) เท่ากับ 0.37, 0.92
และ 0.23 มม. ตามลำดับ ผลการศึกษารูปได้เห็นว่าน้ำเดิมที่มีค่า pH สูงกว่า 9 หรือค่าความขุ่นมากกว่า
5 NTU และค่าความลาดเชิงกลศาสตร์ (hydraulic gradient, i) มากกว่า 0.85 มีผลต่อการอุดตันของ
ทราย S1 น้ำที่มีค่า pH ระหว่าง 7.0-8.5 ค่าความขุ่นน้อยกว่า 5 NTU และ i เท่ากับ 0.85 สามารถผ่าน
ทราย S1 ที่อิมมิดด้วยน้ำบาดาลได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีปริมาณน้ำรวม 432 ลิตร ในเวลาช่วงทดสอบ
รวม 95 ชั่วโมง และยังคงมีอัตราการไหล 3.1 ลิตร/ชั่วโมง ในเงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน ปริมาณ
น้ำรวมที่เดินผ่านทรายหยาบ (S2) และทรายละเอียดมาก (S3) มีค่าเท่ากับ 2,380 และ 206 ลิตร โดย
ยังคงมีอัตราการไหล 22.2 และ 1.75 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์อย่างมากในแง่
ทฤษฎีและปฏิบัติ และสามารถใช้เป็นความรู้พื้นฐานในการกำหนดแผนการทดลองการเติมน้ำลงใน
บ่อบาดาลและสูบกลับจริงในภาคสนาม ผลการศึกษานี้รวมกับผลการศึกษาในสนามจะนำมาซึ่ง
ความรู้อย่างสมบูรณ์แบบในการบริหารจัดการน้ำด้วยวิธีการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและสูบกลับที่
ยั่งยืน

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

THEERASAK TANGSUTTHINON : CLOGGING OF AQUIFER
RECHARGE DUE TO PHYSICAL AND CHEMICAL FACTORS
INVESTIGATED BY SAND COLUMN TESTS. THESIS ADVISOR :
PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 93 PP.

AQUIFER STORAGE RECOVERY/ CLOGGING/ INFLUENTIAL FACTORS/ TEST
COLUMN

Aquifer Storage Recovery, ASR is a worldwide technology to solve drought problems in many countries. Literature showed that clogging during water recharging declines recharging efficiencies both in recharged well and aquifer sediments. The objective of this thesis is thus to study a cause of clogging from influential factors, inclusive of turbidity, pH, and hydraulic head of recharged water of fine sand (S1) using a test column, which was saturated with salty groundwater of the Bangkok Aquifer. The test results of fine sand are compared with those of coarse sand (S2) and very fine sand (S3). The coefficient of uniformity (C_u) of S1, S2 and S3 are 2.39, 2.82 and 3.25 with average grain size of 0.37, 0.92 and 0.23, respectively. Studied result indicates that recharged water having pH over 9 or turbidity higher 5 NTU with hydraulic gradient (i) over 0.85 causes the clogging in S1. The recharged water with pH between 7.0 and 8.5, turbidity of 5 NTU and i of 0.85 can continuously recharge in S1 even for 95 hours with a total volume of 432 liters and a flow rate of 3.1 lit/hr. For the same testing condition, coarse sand (S2) and very fine sand (S3) have the total volume of 2,380 and 206 liters and the flow rate of 22.2 and 1.75 lit/hr, respectively. This study is useful in term of both theoretical and practical perspectives and can be applied to be fundamental to determine

a field ASR test program. Both outputs from this study and the future field study will lead to a complete knowledge for sustainable ASR management.



School of Civil Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature Dr. [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ประธานกรรมการ และรองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร กรรมการ ที่ให้โอกาส คำชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ พร้อมตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงขอบคุณบุคลากรประจำห้องปฏิบัติการ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการวิเคราะห์ SEM และ XRD ตลอดจนคุณณัฐญา กิ่งโคกกรวด และคุณพรรณวลัย เชิญกลาง สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องการติดต่อประสานงานกับหน่วยงานต่างๆ ภายในมหาวิทยาลัยฯ

ขอบพระคุณกรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่อนุญาตให้ การสูบน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์เพื่อสำหรับการทดลอง และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ให้ ใช้สถานที่ในการวิจัย

ขอบคุณบริษัท ดีเทอร์มิเนชั่น กรุ๊ป จำกัด และคุณฉกรรจ์ ประยูรชาติ ที่สนับสนุนในส่วน ของงานวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมีของตัวอย่างน้ำที่เก็บได้จากการวิจัย รวมถึงให้คำปรึกษาทางด้านเคมี ห้างหุ้นส่วนจำกัด สิมะอารีย์ ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างท่อกรองประกอบในชุดอุปกรณ์การทดลอง บริษัท เชมณัฐ จำกัด ที่จัดหาทรายให้สำหรับการทดลอง และบริษัท ทิพย์ จำกัด ที่สนับสนุนเครื่องมือ วิเคราะห์คุณภาพน้ำ ตลอดจนอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการวิจัยในสนาม

ขอบคุณนายชวลิต สุขจี นางสาวนันทิพย์ ตั้งสุทธินนท์ และนายประชัน บุญมา ที่ได้ช่วย งานวิจัยในสนามและช่วยจัดทำรายงาน และนายจิรวัฒน์ จิตสุรพงษ์พร ที่ช่วยอำนวยความสะดวก การเดินทาง

ขอบคุณ Mr. Adam S. Hutchinson และ Mr. Kevin M. Bral ที่สนับสนุนเอกสารที่เกี่ยวข้อง กับการศึกษาเรื่องการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและสูบกกลับในประเทศสหรัฐอเมริกา

ท้ายนี้ หากการวิจัยนี้สามารถก่อให้เกิดประโยชน์ใดต่อสาธารณะชนแล้ว ขออนุโมทนาบุญ ความดีที่เกิดขึ้นให้กับบิดาและมารดาที่ล่วงลับ ซึ่งเป็นผู้ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรมและส่งเสริมการศึกษา ตลอดจนคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่ถ่ายทอดความรู้ให้กับผู้วิจัยในอดีตที่ผ่านมา

ธีรศักดิ์ ตั้งสุทธินนท์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 การทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ปรกัสนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พัฒนาการการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาลในต่างประเทศ.....	6
2.2 พัฒนาการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาลในประเทศไทย.....	7
2.2.1 โครงการในจังหวัดปทุมธานี.....	8
2.2.2 โครงการในจังหวัดระยอง.....	11
2.2.3 โครงการในจังหวัดสุโขทัย	16
2.3 ตัวอย่างเครื่องมือหลอดทดลองที่ใช้ในต่างประเทศ	26
3 วิธีและขั้นตอนการดำเนินงาน	28
3.1 ตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	28
3.1.1 ตัวแปร	28
3.1.1.1 ทราบ	29
3.1.1.2 น้ำที่ใช้ทดลอง	29
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.2.1 ชุดหลอดทดลอง.....	29
3.1.2.2 อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ	32
3.2 วิธีและขั้นตอนการทดลอง.....	32
3.2.1 การเตรียมหลอดทรายทดลอง	32
3.2.2 การเตรียมน้ำที่ใช้เดิม.....	33
3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	33
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา.....	43
4.1 กลุ่มทดลองน้ำประปา/น้ำประปา(TWC/TW)	43
4.2 กลุ่มทดลองน้ำบาดาล/น้ำประปา (GWC/TW)	50
5 บทสรุป	90
5.1 สรุปผลงานวิจัย	90
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยที่ต่อเนื่องต่อไป	91
รายการอ้างอิง	92
ประวัติผู้เขียน	93

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการทดลองการเติมน้ำด้วยวิธีแรงโน้มถ่วงและแรงดันปัม	8
2.2 ผลของคุณภาพน้ำที่ใช้เดิมและที่เก็บได้จากบ่อเติมน้ำและบ่อสังเกตการณ์	10
2.3 ผลการคำนวณประสิทธิภาพบ่อ (จากข้อมูลการสูบทดลองและสูบล้าง).....	24
2.4 ตารางแสดงข้อมูลเปรียบเทียบระยะเวลาการเติม ปริมาณน้ำเติมรวม และจำนวนครั้งการสูบล้างบ่อ	25
4.1 ประสิทธิภาพการไหลผ่านของทั้ง 5 แบบทดลอง.....	50
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของ 4 เซกทดลอง ได้ค่าเฉลี่ย = 0.039 ซม/วินาที	56
4.3 ผลวิเคราะห์น้ำทางเคมี.....	63
4.4 ประสิทธิภาพการไหลผ่านลดลงอย่างมีนัย เมื่อน้ำเดิมมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 9.5 ..	68
4.5 ประสิทธิภาพการไหลผ่านลดลงและปริมาณน้ำเติมรวมของ 5 และ <2 NTU.....	71
4.6 ประสิทธิภาพการไหลผ่านและปริมาณน้ำเติมรวมของเซก 0.50, 0.75 และ 1.00 เมตร.....	76
4.7 ค่า HYDRAULIC GRADIENT ของเซก 0.50, 0.75 และ 1.00 เมตร	77
4.8 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมน้ำของขนาดทราย S1, S2 และ S3	81
4.9 ค่าขนาดต่างๆของทราย S1, S2 และ S3.....	82
4.10 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของทราย S1, S2 และ S3	82
4.11 ผลการคำนวณค่าความเร็ววิกฤตของทราย S1, S2 และ S3	83
4.12 ผลการคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำเติมผ่านทราย S1, S2 และ S3	83
4.13 ผลการคำนวณค่า SIZE PORE CONSTRICTION ของทราย S1, S2 และ S3	84
4.14 ค่า EFFECTIVE SIZE, ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ และร้อยละของขนาดทรายที่เล็กกว่า 0.15 มม. ของทราย S1, S2 และ S3	85
4.15 สรุปค่าอัตราการไหลและอัตราการไหลลดลงเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละแบบทดสอบ.	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16 ผลการวิเคราะห์ TDS ในตัวอย่างน้ำออกที่เก็บได้ในช่วง 60 นาทีแรก ของการเติมน้ำ แบบทดสอบ GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/0.75, GWC/TW-S2/(7.0-8.5,5)/0.75 และ GWC/TW-S3/(7.0-8.5,5)/0.75	87



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วิธีการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาล 5
2.2	การเติมน้ำและสูบกลับผ่านบ่อน้ำบาดาล 6
2.3	ASR ที่ก่อสร้างตามรัฐต่างๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกา 6
2.4	ระดับการยกตัวของน้ำที่วัดได้ในบ่อสังเกตการณ์ well nos. 3, 4, 5 และ 6 9
2.5	ทิศทางการไหลในแนวตั้งของการเติมน้ำด้วยวิธีแรงดันปั๊มบ่อเติมน้ำ RWD2..... 19
2.6	กราฟการยกตัวของระดับน้ำในบ่อ RWS2..... 22
2.7	กราฟเส้นตรงที่เป็นค่าโดยเฉลี่ยของกราฟการยกตัวของระดับน้ำในบ่อ RWS2 เมื่อทดลองการเติมน้ำ แบบระยะยาวด้วยวิธีแรงดันปั๊ม 22
2.8	กราฟแสดงระดับน้ำขณะสูบกลับด้วยอัตราการสูบ 60-62 ลบ.ม./ชม. ของบ่อเติมน้ำ RWS2 เมื่อทดลองการเติมน้ำแบบระยะยาวด้วยวิธีแรงดันปั๊ม 23
3.1	สถานที่และสถานบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลที่ใช้ดำเนินการทดลอง 28
3.2	ชุดหลอดทดลอง 30
3.3	ท่อกรองในหลอดทดลองปิดครึ่งด้านขวาเพื่อให้น้ำไหลออกเพียงครึ่งด้านซ้าย 31
3.4	ชุดวิเคราะห์คุณภาพน้ำในสนาม 31
3.5	ภาพแสดงการบรรจุน้ำบาดาลในหลอดทดลอง 33
3.6	ผังแสดงขั้นตอนการทดลอง 34
4.1	ผลการเติมน้ำของแบบทดลองที่มีความขุ่น 5, 10, 15, 20 และ 25 NTU 43
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่น้ำเดิมมีความขุ่น 50 NTU 44
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่น้ำเดิมมีความขุ่น 50 NTU 44
4.4	การอุดตันจากเติมน้ำของแบบทดลอง TWC/TW-S1/(7.0,50)/1.00 45
4.5	ภาพขยายขนาดของตะกอนที่อุดตันในทราย S1 45
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่น้ำเดิมมีความขุ่น 20 NTU 46
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่น้ำเดิมมีความขุ่น 20 NTU 46
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่น้ำเดิมมีความขุ่น 15 NTU 47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่น้ำเดิมมีความขุ่น 15 NTU ปริมาณตะกอนเข้ามากกว่าออก	47
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่น้ำเดิมมีความขุ่น 10 NTU.....	48
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่น้ำเดิมมีความขุ่น 10 NTU	48
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่น้ำเดิมมีความขุ่น 5 NTU.....	49
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่น้ำเดิมมีความขุ่น 5 NTU	49
4.14	ผลการเติมน้ำของแบบทดลองที่เฮด 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 เมตร	51
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่เฮด 0.25 เมตร	52
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่เฮด 0.25 เมตร	52
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่เฮด 0.50 เมตร	53
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่เฮดน้ำเดิม 0.50 เมตร	54
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่เฮด 0.75 เมตร	54
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่เฮดน้ำเดิม 0.75 เมตร	55
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่เฮด 1.00 เมตร	55
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่เฮดน้ำเดิม 1.00 เมตร	56
4.23	ผลการเติมน้ำของแบบทดลองที่ความเป็นกรด-ด่าง 10.5, 9.5, 9.0 และ 8.5	57
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่ความเป็นกรด-ด่าง 10.5 ปริมาณตะกอนเข้า มากกว่าออก	58
4.25	การดูดตันจากสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต(ตะกอนสีขาว)ในน้ำเดิม.....	59
4.26	ผลวิเคราะห์ XRD ทราย S1.....	59
4.27	ผลวิเคราะห์ XRD ทราย S3.....	60
4.28	ภาพขยายแสดงทราย S1 ถูกดูดตันด้วยตะกอนแร่และอื่นๆ	61
4.29	ลักษณะผลึกของตะกอนแร่และอื่นๆ	61
4.30	ผลวิเคราะห์ตะกอนแร่ ด้วยวิธี XRD.....	62
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 9.5	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่ความเป็นกรด-ด่าง 9.5 64
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 9.0 65
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่ความเป็นกรด-ด่าง 9.0 66
4.35	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลา ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.5 67
4.36	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่ความเป็นกรด-ด่าง 8.5 67
4.37	ผลการเติมน้ำของแบบทดลองเปรียบเทียบกับที่ความขุ่น 5 และ <2 NTU 69
4.38	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่ค่าความขุ่น 5 NTU 70
4.39	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่ค่าความขุ่น <2 NTU 71
4.40	ผลการเติมน้ำของแบบทดลองเปรียบเทียบกับเขต 0.50, 0.75 และ 1.00 เมตร 72
4.41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่เขตน้ำเดิม 0.50 เมตร 73
4.42	ความสัมพันธ์ระหว่างเขตระยะห่าง4จุดและเวลา ที่เขตน้ำเดิม 0.50 เมตร 73
4.43	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่เขตน้ำเดิม 0.75 เมตร ปริมาณตะกอนเข้า มากกว่าออกในช่วงต้น และหลังจากชั่วโมงที่ 37 ปริมาณตะกอนออกมากกว่าเข้า..... 74
4.44	ความสัมพันธ์ระหว่างเขตระยะห่าง4จุดและเวลา ที่เขตน้ำเดิม 0.75 เมตร 75
4.45	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่ค่าเขตน้ำเดิม 1.00 เมตร 75
4.46	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลา ที่ค่าเขตน้ำเดิม 1.00 เมตร 76
4.47	ผลการเติมน้ำของแบบทดลองเปรียบเทียบกับทราย S1, S2 และ S3 78
4.48	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลาของทราย S1 78
4.49	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลาของทราย S2 79
4.50	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมน้ำและเวลาของทราย S3 80
4.51	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นและเวลาของทราย S3 81
4.52	ขนาดของทราย S1, S2 และ S3 82
4.53	ตัวอย่างการอุดต้นแบบ bridging (Albert Hendrik DE ZWART, 2007) 84
4.54	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและเวลาของแบบทดสอบ 85
4.55	ความสัมพันธ์ระหว่าง TDS และ เวลา ของแบบทดสอบทั้งสาม..... 88
4.56	เวลาที่น้ำเดิมเข้าสู่สภาพคุณภาพน้ำเดิมที่ TDS 205 มก./ลิตร 88

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Aquifer	ชั้นน้ำบาดาลที่อยู่ลึกใต้ผิวดินในช่วงความลึกที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งอาจจะเป็นชั้นตะกอนหรือชั้นหินที่มีความพรุนหรือรอยแตกให้น้ำซึมผ่านและกักเก็บ
Aquifer Recharge	การเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ซึ่งมีหลายวิธีการ เช่น การเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลเพื่อกักเก็บและสูบกลับขึ้นมาใช้ การเติมน้ำผ่านสระลงสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น เป็นต้น ซึ่งสามารถนำไปแก้ปัญหการขาดแคลนน้ำในฤดูแล้ง หรือประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ เช่น การฟื้นฟูระดับน้ำบาดาลที่ลดลงให้กลับสู่สภาพเดิม การป้องกันการรุกล้ำของน้ำเค็ม เป็นต้น
Aquifer Storage Recovery	การเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลเพื่อกักเก็บน้ำในชั้นน้ำบาดาล โดยเติมน้ำในช่วงเวลาที่มีน้ำมาก และสูบกลับขึ้นมาใช้ในบ่อเดียวกันในช่วงเวลาที่ขาดแคลนน้ำหรือจำเป็น
GWC	ทรายในหลอดทดลองที่อิ่มตัวด้วยน้ำบาดาล
NTU	หน่วยวัดความขุ่น ย่อมาจาก Nephelometric Turbidity Unit
Scanning Electron Microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง ใช้ศึกษาสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค
TWC	ทรายในหลอดทดลองที่อิ่มตัวด้วยน้ำประปา
TW	น้ำดื่มที่เป็นน้ำประปา
X-Ray Diffraction	การศึกษารูปประกอบหรือแร่ของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการของการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบกับสารตัวอย่างและเกิดการหักเหของรังสี
μm	ไมโครเมตร หรือ ไมครอน เท่ากับ 0.001 มิลลิเมตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 การทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการขาดแคลนน้ำในช่วงฤดูแล้งมีการขยายตัวและทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นทุกปี การเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและสูบกลับ (Aquifer Storage Recovery, ASR) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้แก้หรือบรรเทาปัญหาการขาดแคลนน้ำ โดยการนำน้ำผิวดินในช่วงเวลาที่มีน้ำมากและเหลือใช้ไปกักเก็บไว้ในชั้นน้ำบาดาล แล้วนำกลับมาใช้ในช่วงเวลาที่จำเป็น วิธีการดังกล่าวเป็นการบูรณาการใช้น้ำร่วมระหว่างน้ำผิวดินและน้ำบาดาล และสามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการบริหารจัดการน้ำ สำหรับการอุปโภคบริโภค การเกษตร และอุตสาหกรรม การเติมน้ำและสูบกลับได้มีดำเนินการในประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2549 ถึง 2556 ผลการศึกษาพบว่าในช่วงระหว่างการเติมน้ำ บ่อเติมน้ำและในชั้นน้ำบาดาลเกิดตะกอนอุดตันเนื่องจากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทั้งในด้านกายภาพและเคมี ทำให้ศักยภาพการเติมน้ำและประสิทธิภาพบ่อเติมน้ำลดลง คุณภาพน้ำของชั้นน้ำบาดาลที่มีธาตุละลายในน้ำบาดาลสูงหรือเป็นน้ำกร่อยเค็ม เช่น ชั้นน้ำบาดาลบางกอก เมื่อผสมกับน้ำจืดที่ใช้เดิม มีโอกาสเกิดตะกอนของสารประกอบทางเคมี เกิดการอุดตันในช่วงท่อกรองน้ำของบ่อเติมน้ำและในชั้นน้ำบาดาล ทำให้ประสิทธิภาพการเติมน้ำและสูบกลับลดลง การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสาเหตุและแนวทางแก้ไขการอุดตันของบ่อเติมน้ำและชั้นน้ำบาดาลในขบวนการเติมน้ำและสูบกลับ โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่าง ความขุ่น และเสถียรของน้ำที่ใช้เดิม ตลอดจนขนาดของทรายที่ใช้ในการทดลอง การศึกษาวิจัยดังกล่าวนี้จะเป็นประโยชน์ต่อสถาบันการศึกษาและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่จะนำผลการศึกษาที่ได้พัฒนาเป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับการออกแบบระบบเติมน้ำและสูบกลับที่จะใช้ดำเนินการจริงในสนาม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อจัดจำลองการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในห้องปฏิบัติการ
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทางกายภาพและทางเคมี (ความเป็นกรด-ด่าง ความขุ่น และเสถียรของน้ำที่ใช้เดิม และขนาดของทราย) ต่อการอุดตันของชั้นน้ำบาดาลบางกอก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทำการทดสอบการอุดตันด้วยหลอดทดลอง โดยเติมน้ำที่ปรับความขุ่น ความเป็นกรด-ด่าง และเฮด ต่างๆ ผ่านหลอดทรายที่อิมตัวด้วยน้ำบาดาล จากสถานีบ่อดิตตามผลน้ำบาดาล ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ที่บริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย อำเภอกลองหลวง จังหวัดปทุมธานี
- 2) ทดสอบคุณสมบัติของทรายและตัวอย่างสารประกอบตะกอนในห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และในสนามที่สถานีบ่อดิตตามผลน้ำบาดาล ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ที่บริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี
- 3) รวมระยะเวลาศึกษาทดลองทั้งสิ้น 12 เดือน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นแนวทางเบื้องต้นในการหลีกเลี่ยงและแก้ปัญหการอุดตันของขบวนการเติมน้ำ
- 2) เป็นต้นแบบของการทดลองพื้นฐานในห้องปฏิบัติการก่อนหรือควบคู่ดำเนินงานจริงที่เกี่ยวข้องกับโครงการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและสูบกลับในสนาม

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้น้ำบาดาลที่เพิ่มขึ้นในหลายพื้นที่ของโลกนำมาซึ่งปัญหาการลดลงของระดับน้ำบาดาล การแก้ปัญหาโดยการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล (aquifer recharge) ที่ดำเนินการอยู่ทั่วโลกจากอดีตถึงปัจจุบัน ซึ่ง Dillon (2005) สรุปไว้ 12 วิธี ดังแสดงในรูปที่ 2-1 และจากรายงานฉบับสมบูรณ์โครงการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ดำเนินการศึกษาโดยศูนย์วิจัยน้ำบาดาล มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปี พ.ศ. 2554 สรุปไว้ดังนี้

1) การเติมผ่านบ่อน้ำบาดาลเพื่อกักเก็บและสูบกลับขึ้นมาใช้ในบ่อเดียวกัน (aquifer storage and recovery, ASR) เป็นวิธีการอัดน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลลงไปชั้นน้ำบาดาลในระดับความลึกที่ต้องการ เพื่อกักเก็บไว้และสูบกลับขึ้นมาใช้ในฤดูแล้งหรือช่วงเวลาที่ต้องการ ส่วนการเติมผ่านบ่อน้ำบาดาลเพื่อกักเก็บและส่งผ่านในชั้นน้ำบาดาลเพื่อสูบใช้ในพื้นที่ยื่น เรียกว่า aquifer storage transfer and recovery หรือ ASTR ดังแสดงในรูปที่ 2-1 (1) และ รูปที่ 2-2

2) การเติมผ่านบ่อแห้ง (dry wells) ส่วนใหญ่เป็นบ่อน้ำตื้น การเติมน้ำโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงเป็นการเติมน้ำในบริเวณที่มีการใช้น้ำบาดาลในระดับตื้น

3) ฝายเติมน้ำ (percolation tanks หรือ recharge weirs) เป็นการกักเก็บน้ำผิวดินเพื่อให้น้ำไหลซึมลงสู่ชั้นน้ำบาดาลที่อยู่ด้านล่างฝายเติมน้ำและมีความต่อเนื่องไปจนถึงพื้นที่รับประโยชน์ ฝายเติมน้ำควรสร้างบริเวณด้านล่างของบริเวณ run off zone

4) การเก็บเกี่ยวน้ำฝน (rainwater harvesting) เป็นวิธีการรวบรวมน้ำฝนจากหลังคาบ้านเรือนลงสู่บ่อน้ำตื้น การเติมน้ำโดยวิธีนี้สามารถทำได้ในพื้นที่ชุมชนที่มีหลังคาหรือส่วนที่รองรับน้ำฝน

5) การผ่านตะกอนตลิ่งแม่น้ำ (river bank filtration, RBF) เป็นวิธีการเหนี่ยวนำน้ำจากแม่น้ำเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดิน โดยใช้น้ำจากแม่น้ำ แอ่งน้ำ หรือทะเลสาบ ใช้ตะกอนดินทรายในธรรมชาติช่วยกรองน้ำ

6) ระบายเติมน้ำ (infiltration galleries) เป็นการใช้ร่องคูบรรจวัสดุพูนที่กลบปิดด้วยดินเดิมรับน้ำดิบและปล่อยผ่านแรงโน้มถ่วงให้ซึมลงไปเพิ่มเติมในชั้นน้ำบาดาลที่ไม่มีแรงดัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ลงทุนสูงแต่ประหยัดเนื้อที่เหมาะกับพื้นที่เมือง ที่อยู่อาศัย หรือสวนสาธารณะ

7) การเติมน้ำผ่านสันทราย (dune filtration) เป็นการเติมน้ำตามหลักวิธี bank filtration แต่ใช้น้ำจากสระน้ำหรือเขื่อนที่สร้างขึ้นบนเนินทราย สูดน้ำขึ้นไปกักเก็บไว้ โดยทั่วไปใช้วิธีนี้เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ และช่วยสร้างสมดุลให้เกิดในระบบและตอบสนองการใช้น้ำจากใต้ดิน

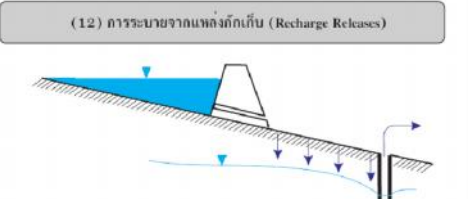
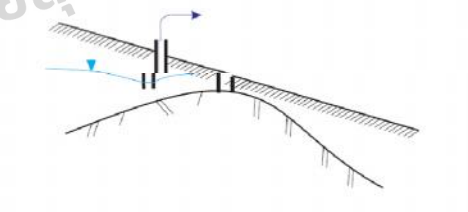
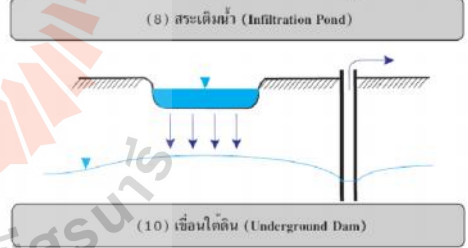
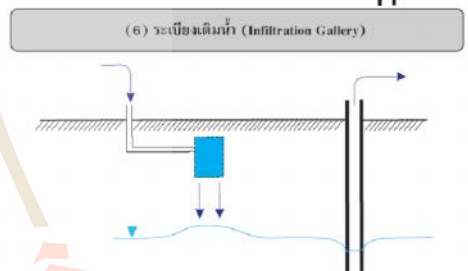
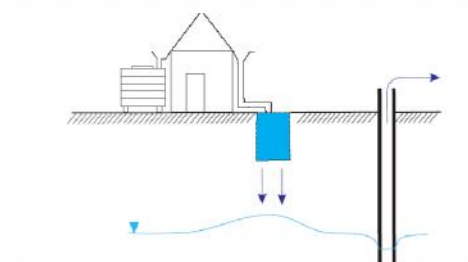
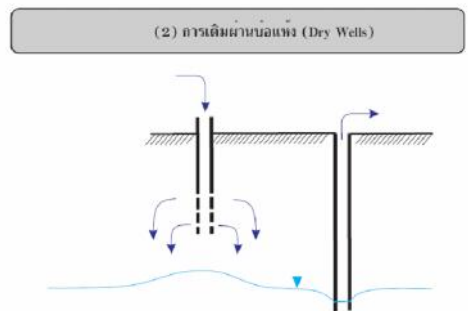
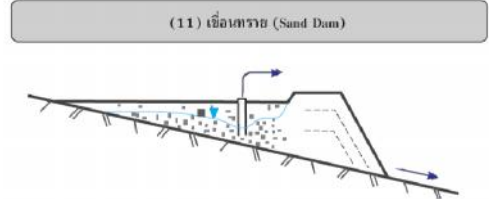
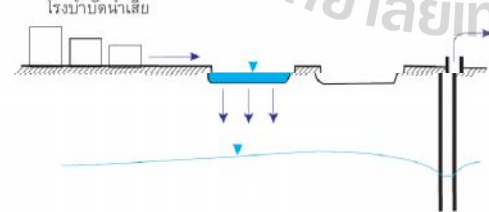
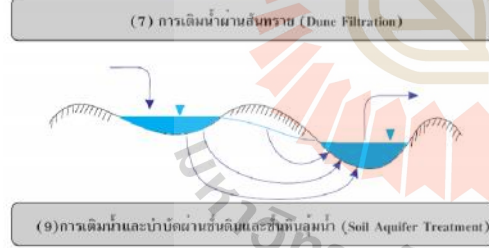
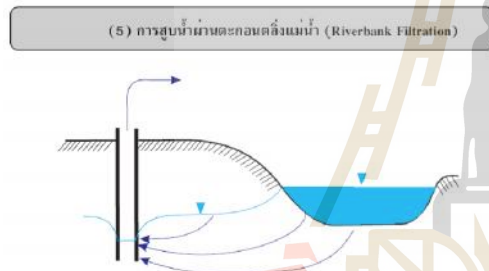
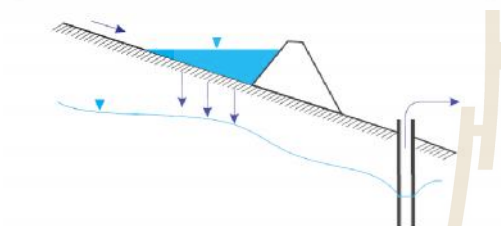
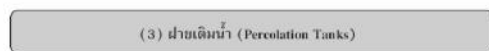
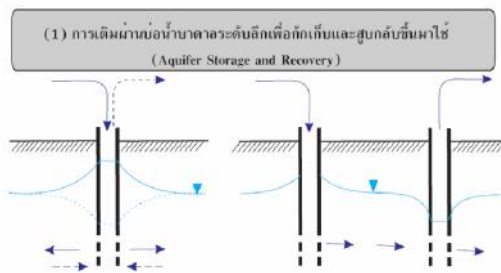
8) การเติมน้ำผ่านสระ (infiltration pond) เป็นการสร้างสระน้ำในพื้นที่ที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มเวลาและพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับผิวดินให้มากขึ้นในพื้นที่ที่มีตะกอนดินทรายที่ซึมได้เร็ว และมีแหล่งน้ำดิบที่มีปริมาณน้ำและคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเติมลงไปกักเก็บไว้ในชั้นน้ำบาดาล

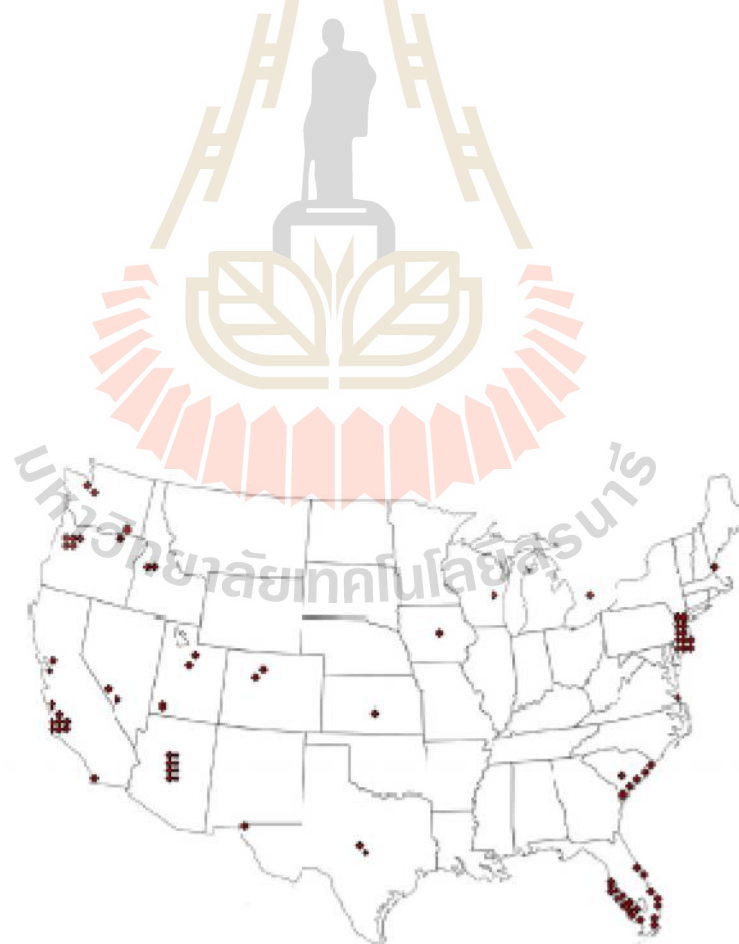
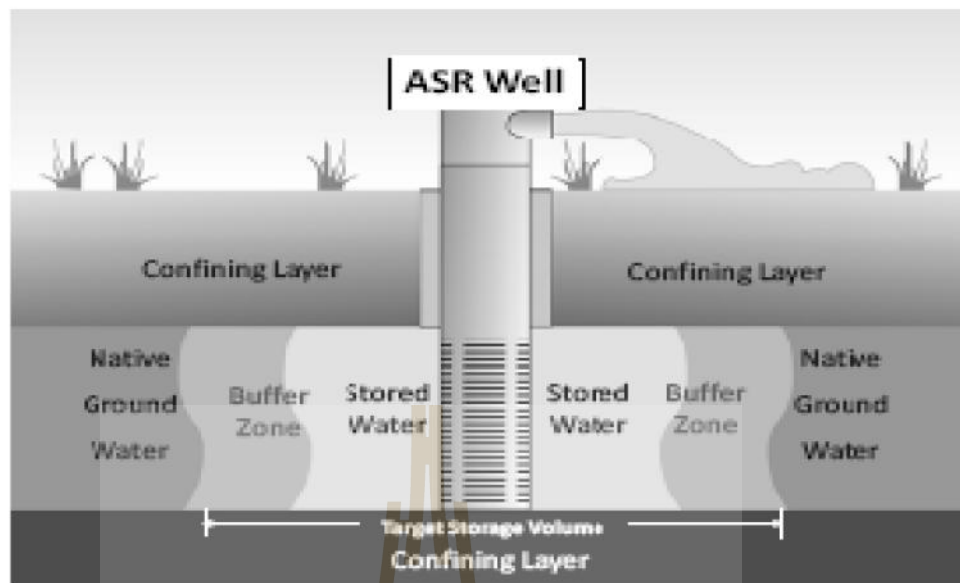
9) การเติมน้ำและบำบัดผ่านชั้นดินและชั้นน้ำบาดาล (soil aquifer treatment, SAT) เป็นการใช้น้ำหมุนเวียนผ่านการนำน้ำเสียที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นแล้วปล่อยให้ซึมผ่านสระเพื่อให้น้ำซึมลงใต้ดิน โดยอาศัยชั้นดินชั้นหินเป็นตัวช่วยกรองและปรับปรุงคุณภาพน้ำตามระยะทางที่น้ำไหลผ่าน แล้วสูบกลับขึ้นมาใช้ใหม่

10) เขื่อนใต้ดิน (underground dam) เป็นวิธีการสร้างอ่างเก็บน้ำใต้ดิน โดยการสร้างผนังกันขวางเส้นทางการไหลของน้ำบาดาล เพื่อยกระดับน้ำและเพิ่มปริมาณน้ำกักเก็บไว้ใช้ในพื้นที่ชุมชนหรือการชลประทาน ในช่วงเวลาที่ต้องการใช้น้ำ พื้นที่ที่เหมาะสมของวิธีนี้ต้องมีหินแข็งรองรับด้านล่างเพื่อความมั่นคงของโครงสร้าง ชั้นน้ำบาดาลบริเวณเขื่อนต้องมีการซึมผ่านได้ดี และควรหลีกเลี่ยงพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการเกิดธรณีพิบัติภัย เช่น แผ่นดินไหว

11) เขื่อนทราย (sand dam) เป็นวิธีการเก็บน้ำไว้ใต้ดิน โดยสร้างฝายกักน้ำและตะกอนทรายไว้เหนือพื้นที่ที่มีชั้นดินทราย่วนทับถมกันอยู่หนาพอสมควร โดยเฉพาะในบริเวณที่ชั้นดินทราย่วนเหล่านี้ทับถมตัวอยู่บนชั้นหินเนื้อแน่น น้ำฝนที่ตกลงมาเก็บกักอยู่ในอ่างน้ำจะซึมลงไปเก็บอยู่ในรูพรุนของทราย การเจาะบ่อเพื่อนำน้ำขึ้นมาใช้สามารถเจาะบริเวณท้องหรือขอบอ่างเก็บน้ำ

12) การระบายจากแหล่งกักเก็บ (recharge releases) เป็นวิธีการปล่อยน้ำจากเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำอย่างช้าๆ ที่สัมพันธ์กับปริมาณการไหลซึมของน้ำลงสู่ชั้นน้ำที่รองรับอยู่ด้านล่าง





ระบบการเติมน้ำและสูบลกลับในประเทศสหรัฐอเมริกาส่วนใหญ่มีจุดประสงค์เพื่อกักเก็บน้ำในฤดูฝนหรือน้ำจากหิมะละลายไว้สำหรับใช้ในเวลาที่ขาดแคลน หรือใช้สำหรับรักษาระบบนิเวศน์ดังตัวอย่างหลายโครงการ (R. David G. Pyne, 1994) ซึ่งพอสรุปในสิ่งที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้นี้ ดังนี้

1) คุณภาพน้ำเดิม หากมีค่าความเป็นกรด-ด่างใกล้เคียงกับน้ำในชั้นน้ำบาดาล ถึงแม้จะมีค่าความกระด้างค่อนข้างสูงก็ตาม แต่ไม่มีผลต่อการอุดตันทางด้านเคมี ดังเช่น โครงการ Peace River, Florida.

2) โครงการ Marathon, Florida. แสดงถึงความเป็นไปได้ในการเติมน้ำและสูบลกลับเพื่อกักเก็บน้ำสำหรับใช้บริโภคในยามฉุกเฉิน ในชั้นน้ำบาดาลที่มีคุณภาพน้ำเป็นน้ำเค็มและมีค่าระดับน้ำคงที่ ประมาณ 1 เมตร เท่านั้น ซึ่งคล้ายคลึงกับชั้นน้ำบาดาลบางกอกที่มีคุณภาพน้ำเป็นน้ำกร่อยและมีค่าระดับน้ำคงที่ประมาณ 6 เมตร

3) โครงการ Chesapeake, Virginia. แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง มีนัยสำคัญต่อการทำละลายหรือตกตะกอนของธาตุแมงกานีสและทรายปนดินเหนียวที่ประกอบอยู่ในชั้นน้ำบาดาล ตลอดจนการอุดตันของสารส้มที่หลงเหลือจากการตกตะกอนในขบวนการบำบัดน้ำเดิม

4) การปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้เหมาะสมกับการเติมน้ำและสูบลกลับในชั้นน้ำบาดาลที่มีธาตุเหล็กสูง เพื่อกักเก็บและสูบลกลับในโครงการ Swimming River, New Jersey เช่นเดียวกันกับการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 7.5 – 8.3 เพื่อลดศักยภาพการตกตะกอนของเหล็กไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนตของน้ำผสมในโครงการ Highlands Ranch, Colorado.

5) Las Vegas Valley Water District, Nevada เป็นโครงการเติมน้ำและสูบลกลับที่ใหญ่ที่สุดในโลก บำบัดน้ำด้วยวิธีการใช้ micro filter พบปัญหาการอุดตันน้อยมาก ซึ่งมีกำลังเติมน้ำ 80 MGD และสามารถสูบลกลับประมาณ 100 MGD เช่นเดียวกันกับโครงการ Calleguas Municipal Water District, California ซึ่งนอกจากกักเก็บเพื่อใช้อุปโภคและบริโภคแล้ว ยังเดิมเพื่อสร้างเป็นกำแพงน้ำจืดด้านยันไม่ให้น้ำทะเลแทรกตัวเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลจืด

2.2 พัฒนาการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาลในประเทศไทย

ประเทศไทยเริ่มศึกษาเรื่องการเติมน้ำและสูบลกลับโดย ดร. วชิร วัฒนรงค์ ในปี พ.ศ. 2513 และตีพิมพ์เอกสารการประชุมสัมมนา “Proceeding of International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, Anaheim, California, August 23-27, 1988. ที่รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา จากนั้นวางแผนการศึกษาในเรื่องดังกล่าวนี้เป็นระยะเวลานานถึง 36 ปี กระทั่งปี พ.ศ.

2539 กรมทรัพยากรธรณี เล็งเห็นว่าการเติมน้ำและสูบกลับเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้แก้ไขปัญหาน้ำในโครงการขาดแคลนน้ำได้ในอนาคต จึงได้ดำเนินการรื้อฟื้นศึกษาโครงการการเติมน้ำและสูบกลับใหม่ ซึ่งลำดับตัวอย่างโครงการการเติมน้ำและสูบกลับที่ได้ดำเนินการมาแล้วในประเทศ มีดังนี้

2.2.1 โครงการในจังหวัดปทุมธานี

กองน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี ได้ทำการทดลองการเติมน้ำและสูบกลับในชั้นน้ำบาดาลบางกอก (Bangkok Aquifer) ระดับความลึก 60 เมตร (ระดับท่อกรองน้ำแบบท่อเจาะร่องขนาด 10 นิ้ว ที่ 36 ถึง 59 เมตร) บริเวณตำบลบางพูน อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

2.2.1.1 วิธีการศึกษาทดลอง

ทำการเจาะบ่อเติมน้ำจำนวน 1 บ่อ และบ่อสังเกตการณ์จำนวน 6 บ่อ ท่อกรบ่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 มม. และท่อกรองบ่อขนาด 250 มม. เริ่มทดลองเติมน้ำด้วยวิธีแรงโน้มถ่วง น้ำที่ใช้เดิมเป็นน้ำใส ได้จากการสูบน้ำบาดาลด้วยแรงลม (air lifting) จากบ่อสังเกตการณ์ที่เป็นตัวแทนของชั้นน้ำบาดาลนครหลวง (Nakhon Luang Aquifer) บ่อมีขนาด 100 มม. ความลึก 155 เมตร (หมายเลขบ่อ 1) ที่อยู่ข้างเคียงระยะห่างประมาณ 25 เมตร เติมน้ำด้วยอัตรา 17 ม³/ชม. ผลปรากฏว่าสามารถเติมได้ต่อเนื่องเป็นเวลาถึง 10 ชั่วโมง รวมปริมาตรน้ำที่เติม 170 ลูกบาศก์เมตร และไม่พบการเกิดการอุดตัน จากนั้นได้ทดลองโดยสูบน้ำดิบจากคลองส่งน้ำที่อยู่ในบริเวณข้างเคียง น้ำมีความขุ่น (turbidity) 25 NTU และเติมน้ำด้วยอัตรา 136 ม³/ชม. ผลปรากฏว่าเติมได้เพียง 2 ถึง 3 นาที เกิดการอุดตัน น้ำล้นออกปากบ่อ

หลังจากนั้นได้ทดลองเติมน้ำด้วยวิธีแรงดันปั๊ม โดยสูบน้ำดิบจากคลองส่งน้ำเดียวกัน อัตราลงในบ่อเติมน้ำด้วยความดัน 2.46, 2.04, 1.26 และ 2.46 กก./ชม² ด้วยอัตรา 102, 163, 200 และ 240 ม³/ชม. ตามลำดับแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองการเติมน้ำด้วยวิธีแรงโน้มถ่วงและแรงดันปั๊ม

หมายเลข	อัตราการเติมน้ำ (ม ³ /ชม.)	ความดัน (กก./ชม ²)	ระยะเวลาเติม (ชม.)	ปริมาตรน้ำรวม (ลูกบาศก์เมตร)	วิธีการเติม
IF1	17	-	10	170	แรงโน้มถ่วง
IF2	136	-	0.12	16	แรงโน้มถ่วง
IP1	102	2.46	32	3,264	แรงดันปั๊ม
IP2	163	2.04	30	4,890	แรงดันปั๊ม
IP3	200	1.26	192	38,400	แรงดันปั๊ม
IP4	240	2.46	4	960	แรงดันปั๊ม
IP5	165	1.83	30	4,950	แรงดันปั๊ม

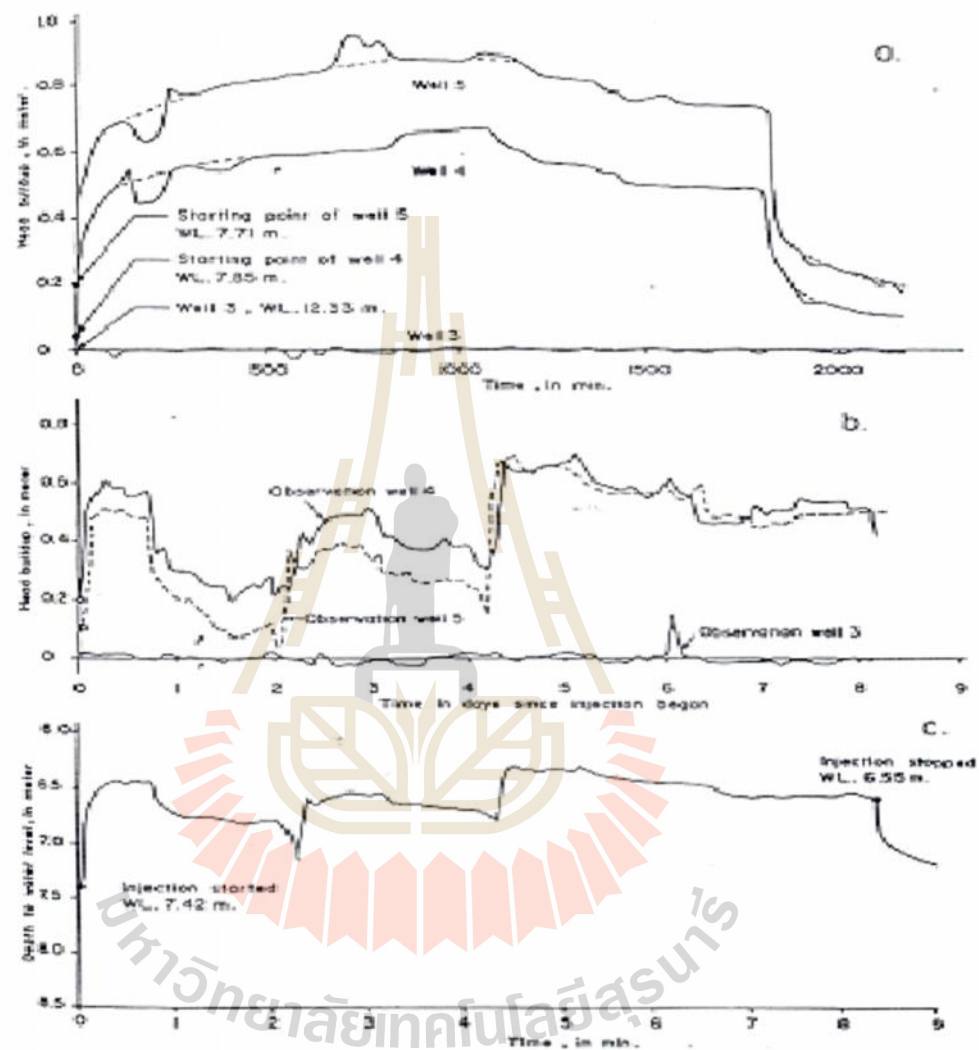


Figure 3. Head-buildup in the Observation Wells.

- Wells 3, 4 and 5 during IP2, duration 30 hours, $163 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Wells 3, 4 and 5 during IP3, duration 8 days, $200 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Well 6, during IP3

เมตร จึงทำการทดลองครั้งที่ IP5 ด้วยการปรับลดอัตราการเติมเหลือ 165 ม³/ชม. ที่ความดัน 1.83 กก./ชม² ดำเนินการทดลองรวมเป็นเวลา 30 ชม. ตามที่ได้แสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2.2 ผลของคุณภาพน้ำที่ใช้เติมและที่เก็บได้จากบ่อเติมน้ำและบ่อสังเกตการณ์

ตัวอย่างน้ำ	ค่าความขุ่น (NTU)	EC ($\mu\text{mho/cm}$)	เหล็ก (มก./ลิตร)	คลอไรด์ (มก./ลิตร)	TDS (มก./ลิตร)
น้ำที่ใช้เติม	25	201	0.92	9.4	139
บ่อเติมน้ำ ก่อนเติมน้ำ	6	11,691	3.2	3,615	7,076
นาที่แรกหลังพัฒนาบ่อ	400	444	22	18	294
บ่อสังเกตการณ์ 3 ก่อนเติมน้ำ	2	3,309	4.9	1,017	1,790
12 ชั่วโมงหลังพัฒนาบ่อ	15	3,267	8.8	995	1,772
บ่อสังเกตการณ์ 4 ก่อนเติมน้ำ	2	16,705	7.5	4,860	9,884
12 ชั่วโมงหลังพัฒนาบ่อ	35	15,828	18	5.40	11,672
บ่อสังเกตการณ์ 5 ก่อนเติมน้ำ	4	14,468	14	4,357	8,530
12 ชั่วโมงหลังพัฒนาบ่อ	6	5,324	20	1,430	3,200
บ่อสังเกตการณ์ 6 ก่อนเติมน้ำ	2	12,743	9.6	4,157	7,590
12 ชั่วโมงหลังพัฒนาบ่อ	2	12,927	10	4,055	7,880

ประสิทธิภาพบ่อเติมน้ำลดลงเนื่องจากสาเหตุการอุดตัน โดยเปรียบเทียบจากค่าการให้น้ำจำเพาะบ่อ (Specific Capacity, SC) ของแต่ละช่วงในการสูบน้ำพัฒนาบ่อ ดังนี้

หลังจากการทดลอง IF1 ค่า SC = 40.2 ม³/ชม ต่อ 1 เมตรระยะน้ำลด

หลังจากการทดลอง IP1 ค่า SC = 31.3 ม³/ชม ต่อ 1 เมตรระยะน้ำลด

หลังจากการทดลอง IP2 ค่า SC = 31.3 ม³/ชม ต่อ 1 เมตรระยะน้ำลด

หลังจากการทดลอง IP3 ค่า SC = 17.8 ม³/ชม ต่อ 1 เมตรระยะน้ำลด

หลังจากการทดลอง IP5 ค่า SC = 22.8 ม³/ชม ต่อ 1 เมตรระยะน้ำลด

ก่อนดำเนินการเติมน้ำ ค่า SC = 59.5 ม³/ชม ต่อ 1 เมตรระยะน้ำลด ซึ่งประสิทธิภาพการให้น้ำของบ่อลดลง 2.6 เท่า หลังจากเสร็จสิ้นการทดลอง IP5

2.1.1.2 ข้อเสนอแนะการศึกษาทดลอง

การเติมน้ำด้วยวิธีแรงโน้มถ่วงสามารถดำเนินการได้ต่อเนื่องในอัตราการเติมน้ำ 17 ม³/ชม. ด้วยน้ำใสที่สูบน้ำได้จากบ่อน้ำบาดาลข้างเคียง เป็นระยะเวลา 10 วัน ปริมาตรรวม 170 ลูกบาศก์เมตร โดยยังไม่บ่งบอกถึงการอุดตัน แต่ไม่มีผลของการสูบน้ำกลับของคุณภาพน้ำว่าปริมาณ

ความเค็มหรือค่าคลอไรด์ของน้ำผสมระหว่างน้ำในชั้นน้ำบาดาลที่เป็นน้ำกร่อยเค็มและน้ำที่เค็มซึ่งเป็นน้ำจืดลดลงอย่างไรและประสิทธิภาพของบ่อเติมน้ำหลังจากเติมน้ำลดลงอย่างไร ส่วนการเติมด้วยวิธีแรงดันปั๊มด้วยอัตรา 200 ม³/ชม. สามารถดำเนินการได้ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 8 วัน อัตราการเติมน้ำลดลงเหลือ 176 ม³/ชม. โดยเกิดการอุดตันที่มาจากความขุ่นของน้ำที่ใช้เติมหลังจากที่ได้เติมน้ำแล้วเป็นระยะเวลา 4 วัน แต่เมื่อเพิ่มอัตราเป็น 240 ม³/ชม. ที่ความดัน 2.46 กก./ชม² น้ำดันออกที่ผิวดินประเมินว่าอัตราการเติมน้ำในชั้นน้ำบาดาลกรุงเทพ สามารถเติมได้ถึง 200 ม³/ชม. แต่ทั้งนี้ต้องเป็นน้ำใสผ่านขบวนการบำบัดแล้ว ผลกระทบอีกอย่างที่มีโอกาสเกิดขึ้นจากการใช้แรงดันสูงในชั้นน้ำบาดาลที่มีแรงดัน คือการยกตัวของแผ่นดิน (ground heave) ซึ่งเกิดเมื่อแรงดันส่วนเกิน (ใช้แรงดันเพิ่ม) ในชั้นน้ำบาดาล และเกิดขึ้นจากกิจกรรมที่เติมน้ำเกินกว่าน้ำหนักของชั้นดินที่ทับอยู่ด้านบนในพื้นที่นั้นๆ ดังนั้นดินจึงถูกดันให้ยกตัวสูงขึ้น Ground heave สามารถเกิดขึ้นได้

2.2.2 โครงการในจังหวัดระยอง

ในปี พ.ศ. 2549 กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้ทำการทดลองการเติมน้ำและสูบกกลับในชื่อโครงการศึกษา ออกแบบและก่อสร้างระบบเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล พื้นที่ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก ที่บริเวณบ้านปากป่า หมู่ 4 ตำบลหนองตะพาน อำเภอบ้านค่าย จังหวัดระยอง

2.2.2.1 วิธีการศึกษาทดลอง

ดำเนินการเจาะบ่อเติมน้ำ จำนวน 2 บ่อ คือบ่อ ASR A เป็นตัวแทนชั้นน้ำบาดาล Qcl (Colluvial Deposit) และ ASR B เป็นตัวแทนชั้นน้ำบาดาล Qfd (Flood Plain Deposit) ความลึกของบ่อ 20 และ 62 เมตรตามลำดับ พร้อมเจาะบ่อสังเกตการณ์สำหรับชั้นน้ำ Qcl จำนวน 3 บ่อ คือ Qcl 1, Qcl 2 และ Qcl 3 และสำหรับชั้นน้ำ Qfd จำนวน 3 บ่อ คือ Qfd 1, Qfd 2 และ Qfd 3 ห้างธรณีฟิสิกส์ เพื่อตรวจสอบค่า natural-gamma (GM) self potential (SP) และความต้านทานไฟฟ้า (SPR) ประกอบกับการเจาะบ่อเติมน้ำและบ่อสังเกตการณ์

ดำเนินการสูบทดลองบ่อเติมน้ำทั้งสองเพื่อหาค่าคุณสมบัติของชั้นน้ำบาดาล Qcl และ Qfd ซึ่งสรุปได้ดังนี้

ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านรอยต่อระหว่างบ่อชั้นน้ำบาดาลของทั้งสองบ่อมีค่าต่ำ ถ้าบ่อถูกพัฒนาอย่างสมบูรณ์ย่อมหมายถึงว่า บ่อเติมน้ำทั้งสองบ่อมีประสิทธิภาพสูง อัตราการไหลอย่างช้า ๆ (linear) เข้าสู่บ่อ ASR A (Qcl) ที่ปริมาณน้ำ 15 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือด้วยอัตราเร็วประมาณ 2.5 เมตรต่อชั่วโมง (0.68 มิลลิเมตรต่อวินาที) และที่ปริมาณน้ำ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงซึ่งดูเหมือน

จะเป็นปริมาณที่ปลอดภัย และบ่อ ASR B (Qfd) ในอัตราเร็ว 0.27 เมตรต่อชั่วโมง (0.076 มิลลิเมตรต่อวินาที)

และจากผลดังกล่าวได้พิจารณาถึงการออกแบบบ่อว่ามีผลต่ออัตราการสูบที่ต่ำหรือไม่ การใช้กรวดกรุ (gravel packs) ที่มีขนาดตะกอน 3 ถึง 5 มิลลิเมตร มีความกลมมนมากถึงเกือบกลมมน และจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของบ่อที่อัตราการไหลของน้ำที่กล่าวไว้ข้างต้น กรณีของท่อกรองเป็นชนิดตะแกรงที่มีช่องเปิดประมาณระหว่าง 12 ถึง 16 % (เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกรองคือ 0.4 และ 0.5 เมตร ตามลำดับสำหรับบ่อ ARS A และบ่อ B) มากเพียงพอ ไม่น่าจะเป็นประเด็นที่ทำให้เกิดสภาพการณ์ดังที่ได้กล่าวไว้

ค่า specific capacity ของบ่อเติมน้ำคำนวณมาจากข้อมูลของสูบทดลองแบบ stepped-rate ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นโดย Bierschenk และ others ค่าของข้อมูลของ drawdown ไม่สม่ำเสมอเพียงพอสำหรับ automatic extrapolation ของเส้น yield-drawdown ดังนั้น อัตราที่ซึ่ง SWLs degraded ถูกประมาณโดยสายตาแทนซึ่งก็ใช้ได้ดีสำหรับข้อมูลของบ่อ ASR A (Qcl) แต่ก็ไม่ค่อยดีนักสำหรับข้อมูลจากบ่อ ASR B (Qfd)

การประมาณการความเป็นไปได้ของอัตราการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและไม่มีวิธีการใดที่จะถูกต้องแม่นยำ วิธีการง่าย ๆ และพอใช้ได้ คือการคูณค่า specific capacity ของบ่อด้วยค่า injection head ที่ได้ และผลที่ได้นำมาหารด้วยสอง การเติมน้ำทำให้ความลึกของ SWL ได้ผิวดิน

$$Q_i = (S_w/Q * h)/2$$

ซึ่ง Q_i = อัตราการเติมน้ำลง (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

S_w/Q = Specific capacity ของบ่อ (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อเมตร)

และ h = ระดับน้ำที่เพียงพอต่อการขับการไหลเต็ม (recharge) (เมตร)

ค่า SWL ในบ่อ ASR A (Qcl) คือ 3.7 เมตร ต่ำกว่าระดับผิวดิน เมื่อการสูบทดลองแบบ stepped-rate ขณะที่ในบ่อ ASR B (Qfd) มีค่าประมาณ 1.5 เมตร ต่ำกว่าระดับผิวดิน นำค่าเหล่านี้เป็นค่าของ h สำหรับบ่อทั้งสอง ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของ specific capacities ที่ 7.3 และ 1 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อเมตรดังที่กล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราการเติมน้ำที่เป็นไปได้ของทั้งสองบ่อ คือ

บ่อ ASR A (Qcl) 13.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

บ่อ ASR B (Qfd) 0.7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

Qualitative consideration ของข้อมูลชี้ให้เห็นว่าค่าอัตราสูงสุดของการเติมน้ำสำหรับบ่อ ASR A ดังที่ได้มาจากการใช้สูตรข้างต้น จะมีค่าค่อนข้างสูง ในทางตรงกันข้าม สำหรับบ่อ ASR B ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการจ่ายน้ำต่ำ อัตราที่เป็นไปได้สำหรับการเติมน้ำสูงสุดจะมีค่าต่ำมาก จากการประเมินข้อมูลประมาณได้ว่าชั้น Qc1 อาจจะไม่สามารถรับน้ำที่เติมลงไปด้วยอัตราที่มากกว่าประมาณ 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงเมื่อเริ่มเติมน้ำ ในขณะที่บ่อ ASR B ควรจะสามารถรับการเติมน้ำที่อัตรา มากกว่า 1 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

การประมาณการณ์การลดลงของอัตราเติมน้ำจากข้อมูลได้กล่าวแล้วข้างต้นว่าชั้นน้ำบาดาลชนิดมีแรงดันและระดับน้ำค่อนข้างใกล้เคียงผิว อย่างไรก็ตามการลดลงของอัตราการเติมน้ำค่อนข้างจะเร็ว และอัตราการเติมน้ำสุดท้ายอาจจะต่ำ รูปร่างของ decay curve นั้นมีผลทางลบมาจากความไม่สม่ำเสมอในชั้นน้ำบาดาลที่สูงถึงสูงมาก

ในด้านการศึกษาและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ปริมาณของเหล็กและแมงกานีสที่ได้จากการศึกษาในพื้นที่นี้มีค่าต่ำ ยกเว้นค่าของตัวอย่างที่เก็บมาจากบ่อ ASR A เหล็กและแมงกานีส จะถูกเติมออกซิเจนได้ง่ายและเร็วมากเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจากเหตุผลดังกล่าว จึงได้จัดหาขวดเก็บตัวอย่างชนิดพิเศษที่มีสารรักษาคุณภาพตัวอย่างน้ำ (preserved) ปกติจะใช้กรดไนตริก และตัวอย่างต้องเก็บตัวอย่างไว้ในขวดโดยให้สัมผัสบรรยากาศน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ การเก็บตัวอย่างเช่นนี้ทำได้ค่อนข้างง่ายกับตัวอย่างที่เก็บมาจากบ่อการสูบน้ำของบ่อ ASR A ตัวอย่างน้ำถูกเก็บจากท่อน้ำที่ขึ้นมาซึ่งเต็มไปด้วยน้ำและไม่มีอากาศอยู่

กรณีเก็บตัวอย่างจากบ่อสังเกตการณ์เก็บโดยการใช้ bailer น้ำจะสัมผัสกับอากาศทันทีที่ bailer ถูกยกขึ้นมาจากผิวของระดับน้ำในบ่อ และสัมผัสกับอากาศอีกครั้งในขณะที่ทำการเทน้ำลงใส่ลงไปในช่วงเก็บตัวอย่าง การเกิดกระบวนการเติมออกซิเจนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเสร็จสิ้นก่อนที่จะน้ำจะถูกเก็บลงไปในขวดตัวอย่างเสียอีก (กรดไนตริกที่ได้ต้องไม่แรงมากเกินไปจนไปจนไปละลายตะกอนที่ตกด้วยกระบวนการเติมออกซิเจน ซึ่งจะทำให้ผลของการวิเคราะห์มีค่าสูงเกินไป) การเก็บตัวอย่างจากบ่อเช่น ASR B ก็พบปัญหาเช่นเดียวกัน เพราะว่าปริมาณน้ำในบ่อน้อย เมื่อสูบน้ำเก็บตัวอย่างน้ำไม่เต็มท่อบ ดังนั้นน้ำที่ขึ้นมาจึงสัมผัสกับอากาศก่อนที่จะถูกเก็บ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของค่า total dissolved solids (TDS) ไม่ค่อยสัมพันธ์กับมวลรวมทั้งหมดของ ionic species ที่ได้ สำหรับทุก ๆ ผลการวิเคราะห์ ด้วยการที่การวิเคราะห์รวม ions หลัก ๆ ทุกชนิดความขัดแย้งของข้อมูลอาจเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย ทั้งความซับซ้อนของพื้นที่ (anisotropy conditions) การเก็บตัวอย่าง รวมถึงในห้องปฏิบัติการ

ค่าระดับของ Turbidity ความขุ่นมีค่าสูงถึงสูงมากในเกือบทุกตัวอย่าง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการตัดสินใจ เว้นเสียแต่ว่าจะต้องกรองความขุ่นออกก่อนนำไปวิเคราะห์ หรือจะใช้วิธีแบ่งตัวอย่างไปกรองก่อนนำไปวิเคราะห์หาค่าอื่น ๆ ไม่เช่นนั้นจะได้รับผลวิเคราะห์ที่ไม่ถูกต้องแม่นยำเท่าที่ควร

pH : ผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ทั้งหมดน่าจะสังเกตได้ว่า ค่า pH น่าจะมีความผิดพลาดไปบ้าง กล่าวคือ ค่า pH ของน้ำจากชั้น Qfd และ pH ของน้ำจากชั้น Qcl จากรายงานอยู่ระหว่าง 7.1 และ 8.6-8.7 ตามลำดับ

ค่า Ca, Mg, Na, K ธาตุประจุบวกหลัก (Major Cations) ปริมาณ Ca และ Mg ของน้ำจากชั้น Qfd มีปริมาณเท่ากัน แต่ Mg ของน้ำจากบ่อสังเกตการณ์ในชั้น Qcl มีปริมาณเป็นสองเท่าของปริมาณ Ca พิจารณาจากค่าไอออนหลักของน้ำตัวอย่างจากบ่อ ASR A ซึ่งให้เห็่นว่ามีความเกี่ยวข้องหรือมาจากน้ำของชั้น Qfd ดังนั้นความแตกต่างของปริมาณ Ca และ Mg คู่นี้จะมีนัยสำคัญ (significant) ในขณะที่ปริมาณ Na และ K ไม่แตกต่างกันเด่นชัดและอยู่ในช่วงแคบ ๆ เช่นเดียวกับสารอื่น ๆ ผลวิเคราะห์พบว่า มี Mg สูงในตัวอย่างจากชั้น Qcl พบว่าในชั้น Qfd มีปริมาณ Ca และ Mg ในสัดส่วนเท่ากันอยู่เพียงสองตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามในภาพรวมปริมาณ Ca และ Mg ในชั้น Qcl สูงกว่าในชั้น Qfd

ค่า Cl, SO₄, alkalinity, NO₂ และ NO₃ : ปริมาณไอออนประจุลบหลักในน้ำตัวอย่างทุกตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ มีค่าปกติที่พบน้ำจืดโดยทั่วไป ยกเว้นไบคาร์บอเนต (Alkalinity) ซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 ของไอออนทั้งหมด นั้นหมายความว่า น้ำบาดาลในพื้นที่อำเภอบ้านค่าย เป็นน้ำในกลุ่ม “ไบคาร์บอเนต” ส่วน Cl, SO₄, NO₂ และ NO₃ มีปริมาณที่ต่ำมาก

ปริมาณเฉลี่ยของคลอไรด์ในชั้น Qcl สูงกว่าชั้น Qfd เล็กน้อย เช่นเดียวกับไบคาร์บอเนตใน Qcl สูงกว่าในชั้น Qfd เพียงเล็กน้อย จนไม่สามารถใช้ Alkalinity เพียงอย่างเดียวไปพิจารณาแหล่งกำเนิดของน้ำได้

ค่าไนไตรท์ (NO₂) และไนเตรท (NO₃) ตรวจพบในทุกตัวอย่างในระดับปกติ และไม่มี ความแตกต่างกันทั้งในชั้น Qcl และชั้น Qfd ปริมาณ NO₃ 0.23 mg/l จาก ASR A ซึ่งให้เห็่นว่าต้นกำเนิดของน้ำมาจากผิวดิน

ปริมาณของ ซิลิกา ที่วัดได้อยู่ที่ประมาณ 2-12 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีความแตกต่างค่อนข้างชัดเจนระหว่างน้ำของชั้น Qfd และชั้น Qcl ปริมาณซิลิกาในทุกตัวอย่างจากชั้น Qfd และทุกตัวอย่างจากบ่อ ASR B มีค่าประมาณ 5 เท่าของที่วัดได้จากตัวอย่างของชั้น Qcl

ปริมาณของเหล็กและแมงกานีสที่วัดได้จะมีค่าต่ำในชั้นบาดาลของพื้นที่ ยกเว้นของตัวอย่างจากบ่อ ASR A (4.87 มิลลิกรัม-เหล็กต่อลิตร) ปริมาณของเหล็กและแมงกานีสของชั้น Qfd อยู่ที่ระหว่าง 1.22 ถึง 1.75 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าเฉลี่ย 1.43) ในขณะที่ชั้น Qcl ไม่รวมบ่อ ASR A มีค่าอยู่ที่

ระหว่าง 0.11 ถึง 0.54 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าเฉลี่ย 0.27) เป็นไปได้ที่ค่าความเข้มข้นที่วัดได้ของบ่อ ASR A จะเป็นตัวแทนของชั้นน้ำบาดาลได้มากกว่าบ่ออื่น ๆ เพราะว่าตัวอย่างที่ถูกสูบขึ้นมาปริมาณที่มากพอที่จะผสมกับสาร preservative ค่อนข้างรวดเร็วในขวด น้ำจากบ่อ ASR A จะมีผลทางเคมีกับน้ำที่เติมลงไปหนึ่งถึงสองวันก่อนการสูบทดลองบ้าง จนทำให้ปริมาณเหล็กลดลงกว่าบริเวณอื่น ๆ

ปริมาณฟลูออไรด์อยู่ในระดับที่ควรพบในน้ำบาดาลจากหินอัคนี วัดได้ในชั้น Qc1 ประมาณ 25% สูงกว่าในชั้น Qfd คือ 0.105 มิลลิกรัมต่อลิตร บ่อสังเกตการณ์ในชั้น Qc1 มีค่าสูงกว่าจากบ่อ ASR A ประมาณ 150% ซึ่งให้น้ำบางส่วนอาจมาจากแหล่งน้ำผิวดิน ปริมาณฟลูออไรด์ที่ค่อนข้างมากในน้ำจากชั้น Qc1 (นอกเหนือจากบ่อ ASR A) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำจากชั้น Qfd อาจจะทำให้เห็นว่าน้ำจากชั้น Qc1 บางส่วนมาจากน้ำในชั้นหินฐานแกรนิต (basal granite) และมีการเคลื่อนไหลขึ้นสู่ด้านบน

2.1.2.2 ข้อสรุปการศึกษาทดลอง

1) โครงการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและนำน้ำกลับมาใช้ (ASR) มีศักยภาพที่จะใช้เพื่อเป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในประเทศไทย และในบริบทของวัฒนธรรมไทยและสังคมไทย ทักษะในการออกแบบ เทคนิค วิธีการก่อสร้าง และจัดการโครงการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและสูบน้ำกลับ (ASR) มีพร้อมแล้วในประเทศไทย

2) บริเวณโดยรอบพื้นที่เติมน้ำจะต้องมีข้อมูลและความเข้าใจพื้นที่เป็นอย่างดี และต้องมีข้อมูลที่ตีพิมพ์คุณภาพที่พร้อม ข้อมูลจะต้องครอบคลุมประเด็นหลักๆที่เกี่ยวกับสภาพทางธรณีวิทยาในพื้นที่ รวมทั้งแร่วิทยา อุทกธรณีวิทยา แหล่งน้ำ ความต้องการ การใช้น้ำ ฯลฯ การเติมน้ำในชั้นน้ำไม่บ่อยจะได้ประโยชน์มากนักที่จะใช้เทคนิคการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลที่เป็นชั้นน้ำแบบมีแรงดันหรือชั้นน้ำบาดาลแบบกึ่งมีแรงดัน และหรือที่มีค่าระดับแรงดัน (potentiometric) อยู่ภายในระยะไม่กี่เมตรจากผิวดิน โครงการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลที่จะกักเก็บน้ำควรทำให้บริเวณที่เป็นชั้นน้ำบาดาลที่เป็นชั้นน้ำแบบไร้แรงดันและมีค่าระดับน้ำนิ่ง (SWL or potentiometric surface) อยู่ลึกกว่าระดับผิวดินมากพอที่จะดันน้ำให้เติมลงได้

3) การใช้แรงดันสูง (over-pressure or excess pressure) ไม่ค่อยได้รับประโยชน์ในโครงการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและสูบน้ำ (ASR) แต่จะทำให้เกิดปัญหาสำคัญในท้องถิ่น คือ เกิดการยกตัวของพื้นดิน (ground heave) และหรือแตก (disruption) ของวัสดุอุดข้างบ่อ (seals) ระหว่างท่อกรูบ่อและชั้นตะกอนในท้องถิ่น

4) มีความสำคัญเสมอที่จะต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำที่จะเติมลงไปให้มีมาตรฐานสูงและต้องต่อเนื่องสม่ำเสมอในคุณภาพที่ปรับปรุง และก็ต้องทำแม้กับน้ำที่สูบมาจากชั้น

น้ำบาดาลด้วย (กรณี que เติมน้ำจากชั้นน้ำมากกว่าไปสู่อีกชั้นหนึ่งที่มีน้ำน้อยกว่า) ลักษณะสำคัญที่สุดของการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อ

- ทำให้แน่ใจว่าน้ำที่เติมลงไปเข้าได้กับน้ำบาดาลเดิมในท้องที่ และในชั้นน้ำบาดาล เพื่อที่จะลดโอกาสของการเกิดปัญหายาในชั้นน้ำในอนาคค
- ลดโอกาสเสี่ยงของการเกิดการตกตะกอนของเหล็ก แมงกานีส หรือสารประกอบอื่นๆที่ไม่ละลายน้ำ เพราะว่ามันทำให้ชั้นน้ำบาดาลที่เติมน้ำลงไปเกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว และแก้ไขกลับคืนไม่ได้
- ลดโอกาสที่จะมีสารอาหารที่นำลงไปสู่ชั้นน้ำบาดาล ได้แก่ จำพวกสารอินทรีย์ ในโตรเจน และหรือฟอสฟอรัส ที่จะให้เกิดตะไคร่น้ำรอบๆบ่อเดิม
- ลดปริมาณของตะกอนแขวนลอยที่จะถูกนำลงไป ในชั้นน้ำบาดาล (ว่าจะเป็นแร่ หรือสิ่งมีชีวิต) ที่จะมผลกระทบต่อโอกาสเกิดการอุดตัน
- ลดปริมาณของแก๊สที่ละลายอยู่ในน้ำ (รวมทั้งพวกก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน) ที่จะเติมลงไป ในบ่อให้เพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดสารละลายจากน้ำเมื่อน้ำถูกเก็บอยู่ในชั้นน้ำบาดาล

2.2.3 โครงการในจังหวัดสุโขทัย

ในปี 2555 กรมทรัพยากรน้ำบาดาล ได้ทำการทดลองการเติมน้ำและสูบกลับในชื่อโครงการศึกษาและแก้ไขภัยแล้งและบรรเทา น้ำท่วม โดยการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล พื้นที่แอ่งเจ้าพระยาตอนบน (ระยะที่ 2) ที่บริเวณบ้านคู้ยง อำเภอสวรรคโลก จังหวัดสุโขทัย ซึ่งเป็นการทดลองต่อจากครั้งที่แล้ว แต่ครั้งนี้มีผู้เชี่ยวชาญจากประเทศสหรัฐอเมริกา ร่วมดำเนินการ เป็นระยะเวลาโครงการ 2 ปี เริ่ม เดือนมีนาคม 2555 และจะแล้วเสร็จเดือนมีนาคม 2557 และขณะนี้อยู่ระหว่างกำลังดำเนินการทดลองในรอบปีที่ 2

2.2.3.1 วิธีการศึกษาทดลอง

การทดลองระบบการเติมน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาลลงสู่ชั้นน้ำบาดาลในปีที่ 2 เป็นการดำเนินการเติมน้ำด้วยวิธีแรงดันปั๊ม (water recharging by pump pressure method) ซึ่งเป็นวิธีที่ดีกว่าวิธีแรงโน้มถ่วง (water recharging by gravity method) ทดลองเติมน้ำและสูบกลับผ่านบ่อน้ำบาดาล จำนวน 2 บ่อ คือ บ่อ RWS2 ที่ความลึก 44 เมตร ซึ่งเป็นชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น และบ่อ RWD2 ที่ระดับความลึกประมาณ 83 เมตร ซึ่งเป็นชั้นน้ำบาดาลระดับลึก พร้อมเจาะบ่อดังกล่าวเพื่อการดำเนินการสำหรับชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นจำนวน 8 บ่อ (MWS1 ถึง MWS8) และชั้นน้ำบาดาลระดับลึก จำนวน 8 บ่อ (บ่อ MWD 1 ถึง MWD8) เติมน้ำด้วยแรงดันปั๊ม (water recharging) ปล่อยให้น้ำที่เติมกักเก็บไว้ในชั้นน้ำบาดาล (water storage) และทำการสูบกลับ (water recovery)

ทบทวนข้อมูลพื้นฐานทางศาสตร์ของชั้นน้ำบาดาล ประสิทธิภาพบ่อน้ำ คุณภาพน้ำของแม่นํ้ายม คุณภาพน้ำที่ใช้เดิม และผลของการทดลองระบบเติมนํ้าลงสู่ชั้นน้ำบาดาลและสูบกลับในรอบปีที่ 1 เพื่อนํามาวิเคราะห์และกำหนดอัตราการเติมนํ้าให้เหมาะสมพร้อมคำนวณหาเส้นคาดการณ์การยกตัวของระดับน้ำ (predicted drawup line) ของแต่ละบ่อนํ้าของชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น (RWS2) และชั้นน้ำบาดาลระดับลึก (RWD2) ส่วนความสัมพันธ์ของคุณภาพน้ำระหว่างน้ำในชั้นน้ำบาดาลทั้งสองและน้ำในแม่นํ้า ถูกนำไปใช้วิเคราะห์เพื่อกำหนดวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำในแม่นํ้าให้เหมาะสมกับคุณภาพน้ำเดิมในแต่ละชั้นน้ำบาดาล

สูบน้ำดิบจากแม่นํ้ายม เป็นสถานีแพสูบน้ำ (floating pontoon intake) ติดตั้งเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (Centrifugal pump) จำนวน 3 เครื่อง มีอัตราการสูบ 50 ลบ.ม./ชม.ต่อเครื่อง โดยจะสูบน้ำดิบจากแม่นํ้าด้วยอัตราการสูบรวม 50-100 ลบ.ม./ชม. ส่งผ่านท่อชนิดพีวีซีอ่อน ขนาด 4 นิ้ว จำนวน 2 ท่อ แล้วรวมผ่านท่อเหล็กอาบสังกะสี ขนาด 6 นิ้ว มาพักไว้ในสระพักน้ำดิบ (settling pond) จากนั้นจะดำเนินการสูบน้ำจากสระพักน้ำดิบด้วยเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง จำนวน 1 ชุด ซึ่งประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำจำนวน 3 เครื่อง มีอัตราการสูบ 50 ลบ.ม./ชม.ต่อเครื่อง และจะสูบด้วยอัตราการสูบรวม 20 – 80 ลบ.ม./ชม. ผ่านท่อเหล็กอาบสังกะสี ขนาด 6 นิ้ว เข้าสู่ระบบตกตะกอน ซึ่งจะมีถังตกตะกอน (Clarifier tank) ที่มีกำลังการผลิต 100 ลบ.ม./ชม. โดยจะฉีดสารเคมีเหลวของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารประกอบสารส้ม (Poly Aluminum Chloride, PACI) จากห้องควบคุมสารเคมีเข้าในเส้นท่อเพื่อปรับสภาพน้ำดิบให้มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงขึ้นก่อนเข้าถังตกตะกอน เมื่อนํ้าผ่านขบวนการตกตะกอนแล้ว จะถูกส่งไปยังระบบกรอง ซึ่งมีถังกรองทราย (sand filter tank) ที่มีขนาดกำลังการผลิต 100 ลบ.ม./ชม. หลังจากนั้นน้ำที่ผ่านการกรองจะถูกฆ่าเชื้อด้วยสารประกอบคลอรีนเหลว (NaOCl) และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้สูงขึ้นด้วย NaOH ก่อนผ่านไปถึงถังนํ้าใส (clear well)

จากการทดลองพบว่าคุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเติมนํ้าในชั้นน้ำบาดาลทั้ง 2 ชั้น มีค่าดังนี้

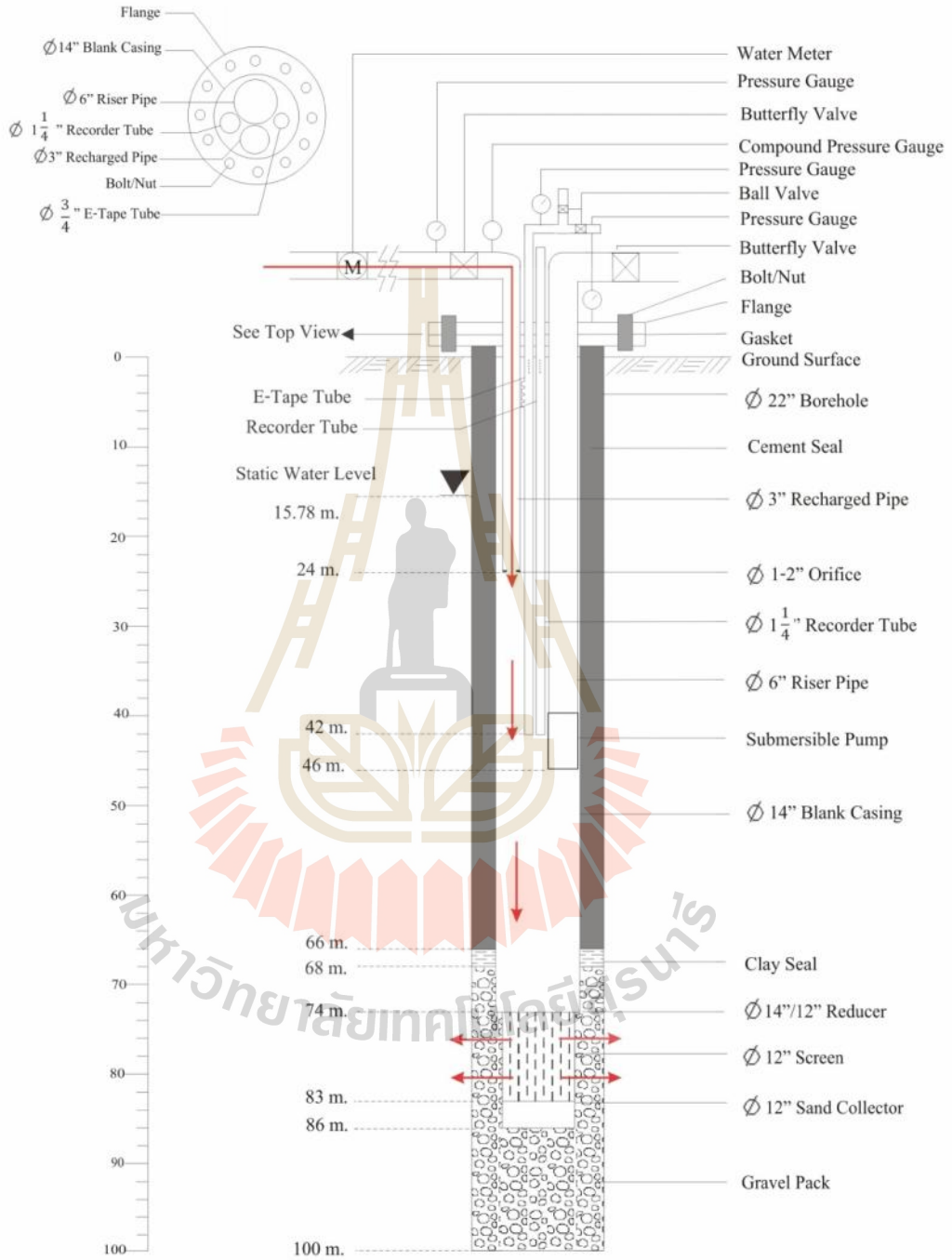
- ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) 7.7 - 8.5
- ความขุ่น 1 - 3 NTU
- คลอรีน 1 – 5 มก./ลิตร

ดำเนินการทดลองเติมนํ้าโดยใช้เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (centrifugal pump) จำนวน 1 ชุด ซึ่งประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมีอัตราการสูบ 50 ลบ.ม./ชม.ต่อเครื่อง โดยดำเนินการสูบน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (treated water) จากถังนํ้าใส ด้วยอัตราการสูบรวม 25-

60 ลบ.ม./ชม. ส่งผ่านท่อส่งน้ำชนิดเหล็กอาบสังกะสี ขนาด 6 นิ้ว ในแนวราบ จากนั้นน้ำก็ถูกอัดลงไป
ในแนวดิ่งตามท่อเติมน้ำที่ติดตั้งในบ่อเติมน้ำ (recharged well) ดังแสดงทิศทางการไหลในแนวดิ่งของ
การเติมน้ำด้วยวิธีแรงดันปั๊ม ตามตัวอย่างของบ่อเติมน้ำ RWD2 ในรูปที่ 2-5 โดยท่อเติมน้ำเป็นชนิด
ท่อเหล็กดำ ASTM A53 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว และมีความลึกของปลายท่อเติมน้ำต่ำกว่า
ระดับน้ำปกติ (static water level) ประมาณ 6 เมตร โดยมีความดันของน้ำที่เติมที่อ่านได้ที่ปากบ่อ
(well head) ประมาณ 20 – 30 ปอนด์/ตารางนิ้ว (psi) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำที่เติม ส่วนที่
ปลายของท่อเติมน้ำจะดำเนินการติดตั้ง orifice ขนาด 0.75 นิ้ว ในการดำเนินการทดลองระบบเติมน้ำ
ลงสู่ชั้นน้ำบาดาลแบบเบี่ยงต้นทั้งชั้นน้ำบาดาลระดับลึกและระดับตื้น เพื่อลดปัญหาที่อาจจะเกิดการ
อุดตันจากฟองอากาศ (air binding problem) ในขณะเติมน้ำ การทดลองการเติมน้ำและสูบกลับใน
รอบปีที่ 2 นี้ ได้ดำเนินการเติมน้ำพร้อมกันทั้งสองบ่อในเวลาเดียวกัน



TOP VIEW



การสูบล้างบ่อดำเนินการโดยใช้เครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม (submersible pump) ที่ได้ติดตั้งที่ระดับความลึก 46 เมตร และ 34 เมตร ในบ่อเติมน้ำ RWD2 และ บ่อเติมน้ำ RWS2 ตามลำดับ ซึ่งจะดำเนินการสูบน้ำออกจากบ่อเป็นระยะเวลาช่วงสั้นๆ ด้วยอัตราการสูบ 50-65 ลบ.ม./ชม. เป็นระยะเวลา 3-5 นาที สลับกับการหยุดสูบ 5 นาที และกระทำอย่างต่อเนื่องสลับกันไปจำนวน 5 รอบ จำนวนรอบอาจจะเพิ่มขึ้นถ้าหากน้ำที่สูบออกยังมีความขุ่นมาก โดยสามารถแสดงทิศทางการไหลของน้ำในบ่อเติมน้ำ เมื่อดำเนินการสูบล้างบ่อ การทดลองปีที่ 2 ไม่ได้กระทำสูบล้างบ่อในช่วงระหว่างการเติมน้ำ เนื่องจากไม่พบการอุดตันของท่อกรองของบ่อเติมน้ำหรือชั้นน้ำบาดาล โดยระดับน้ำในบ่อเติมน้ำที่ยกตัว (drawup) ยังคงต่ำกว่าระดับน้ำยกตัวที่กำหนดไว้ คือต่ำกว่า ประมาณ 1 เมตร จากระดับผิวดิน

การสูบล้างถังกรอง จะดำเนินการเมื่อพบว่า ในส่วนของทรายกรองในถังกรองเกิดการอุดตันเนื่องจากความขุ่นของน้ำที่ผ่านมาจากถังตกตะกอน โดยสามารถสังเกตได้จากระดับน้ำบนทรายกรองสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่งที่ได้กำหนดไว้ ก่อนที่น้ำจะล้นถังกรอง และเมื่อใช้งานต่อไปความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองก็จะเพิ่มสูงขึ้น จนเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ จึงจำเป็นต้องทำการล้างถังกรอง โดยเรียกว่าการล้างย้อน (backwashing) จนกระทั่งได้น้ำใสตามค่าความขุ่นที่กำหนดไว้

เมื่อดำเนินการเติมน้ำด้วยวิธีแรงดันปั๊มได้ตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว จะปล่อยให้ให้น้ำที่เดิมกักเก็บไว้ในชั้นน้ำบาดาล โดยในการทดลองการเติมน้ำแบบเบื้องต้นและแบบระยะยาว จะดำเนินการกักเก็บน้ำที่ใช้เดิมชั้นน้ำบาดาล เป็นระยะเวลา 0.5-3 วัน และ 4-20 วัน ตามลำดับ เพื่อให้ให้น้ำที่เดิมกับน้ำในชั้นน้ำบาดาลเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอย่างสมบูรณ์

การสูบน้ำที่ใช้เดิมกลับมาใช้ จะดำเนินการหลังจากได้ปล่อยให้ให้น้ำที่ใช้เดิมและน้ำในชั้นน้ำบาดาลทำปฏิกิริยาทางเคมี ดำเนินการสูบล้างในปริมาณ 1.0 ถึง 1.6 เท่าของปริมาตรน้ำสุทธิที่เดิมด้วยเครื่องสูบน้ำแบบจุ่มที่ติดตั้งไว้ในบ่อเติมน้ำด้วยอัตราการสูบ 55-80 ลบ.ม./ชม. การสูบน้ำกลับมาใช้ นอกจากจะได้ประโยชน์จากการนำมาใช้ในกิจกรรมต่างๆ แล้ว ยังช่วยทำความสะอาดและลดปัญหาการอุดตันของท่อกรองบ่อ กรวดกรูและในชั้นน้ำบาดาล สำหรับการศึกษาของโครงการนี้ น้ำที่ได้จากการสูบล้างนี้จะปล่อยกลับลงสู่แม่น้ำทางด้านท้ายน้ำของตำแหน่งสถานีสูบน้ำดิบ

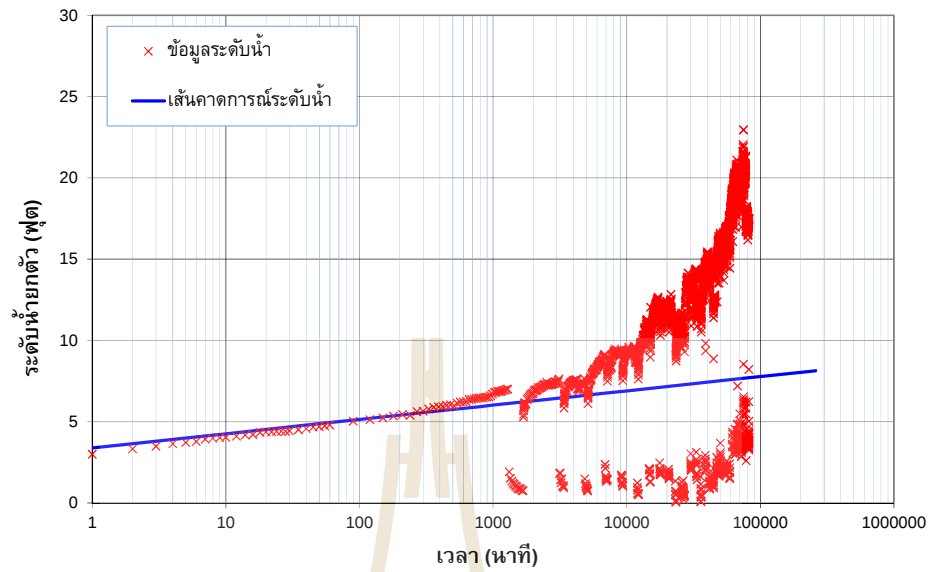
การกำหนดค่าอัตราการเติมน้ำ ระดับน้ำยกตัวในบ่อเติมน้ำ และคุณภาพน้ำที่จะใช้เดิมให้เหมาะสมกับบ่อเติมน้ำทั้งบ่อหมายเลข RWD2 และ RWS2 โดยมีหลักการคำนวณและผลการคาดการณ์ของระดับน้ำยกตัว ดังนี้

จากสูตรการคำนวณ : $s = A*Q + B*Q + C*Q^2$
 เมื่อ s = ระดับน้ำยกตัวหรือระยะน้ำลดในบ่อเติมน้ำ หน่วยเป็นฟุต
 A = linear aquifer-loss coefficient
 $= W(u)/(4*\pi*T)$, with $u=r^2*S/(4*T*t)$ จาก Theis Equation
 Q = อัตราการสูบ หน่วยเป็นแกลลอนต่อวัน
 B = linear well-loss coefficient
 C = power function well-loss coefficient

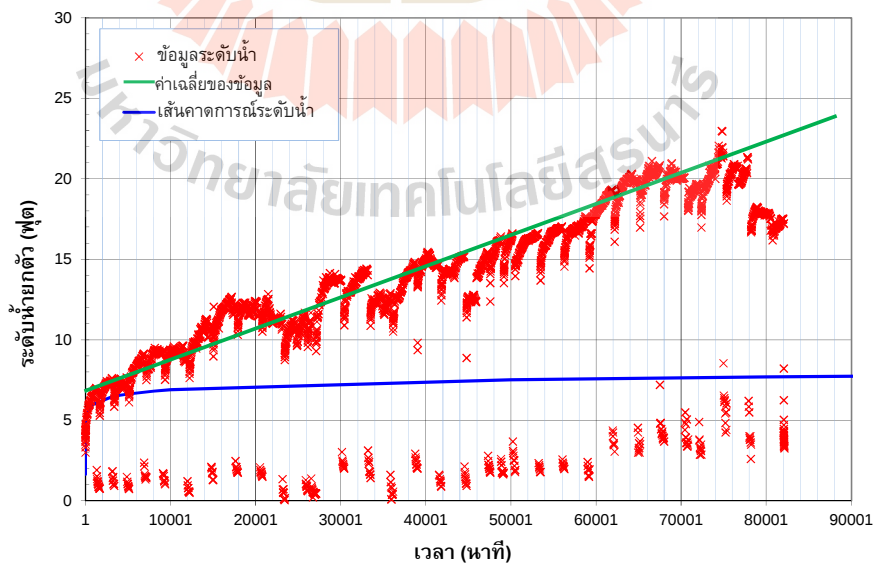
ตัวอย่างการเติมน้ำในบ่อ RWS2 เมื่อวันที่ 13 สิงหาคม พ.ศ.2556 กำหนดอัตราการเติมน้ำอยู่ในช่วง 20-23 ลบ.ม./ชม. ระดับน้ำยกตัวอยู่ในช่วง 1-2 เมตร ลึกจากระดับพื้นดิน และคุณภาพน้ำมีค่า pH 7.59-8.40 ค่าความขุ่น 0.3-2.1 NTU และมีค่าคลอรีน 1-3 มก./ลิตร ผลการทดลองพบว่าการเติมน้ำสามารถดำเนินการได้ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1,368 ชั่วโมง ระดับน้ำในบ่อเติมน้ำยกตัวจากระดับน้ำปกติ 46.71 ม.รทก. เป็น 52.27 ม.รทก. และในกลุ่มบ่อสังเกตการณ์ที่เป็นตัวแทนชั้นน้ำบาดาลระดับลึก คือ บ่อ MWS7 ซึ่งอยู่ต้นน้ำ และบ่อที่อยู่ท้ายน้ำ ประกอบด้วย บ่อ MWS1, MWS2, MWS3, MWS4, MWS6 และ MWS8 ระดับน้ำยกตัวจากระดับน้ำปกติ 47.09, 47.01, 47.04, 47.06, 47.03, 47.04 และ 47.07 ม.รทก. เป็น 48.41, 48.65, 48.60, 48.69, 48.51, 45.55 และ 48.51 ม.รทก. ตามลำดับ

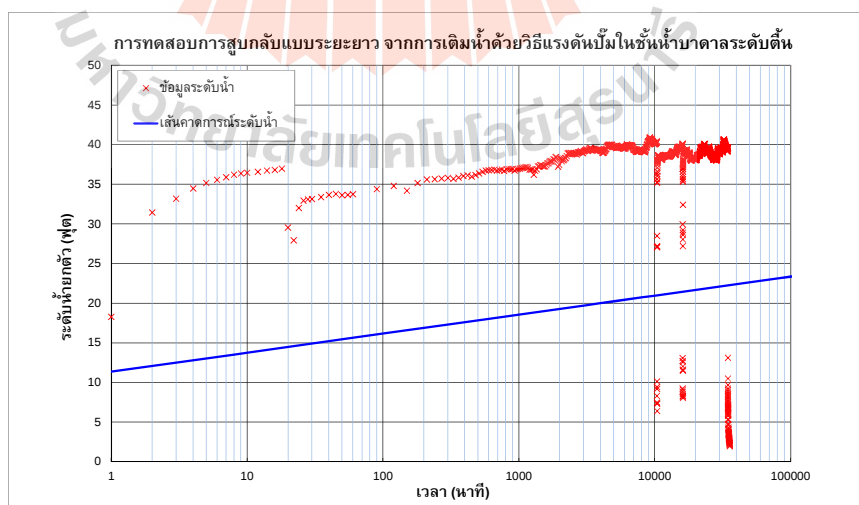
การดำเนินการเติมน้ำได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องและแล้วเสร็จในวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2556 รวมระยะเวลาการทดลองระบบเติมน้ำแบบระยะยาวด้วยวิธีแรงดันปั๊มในบ่อ RWS2 เป็นจำนวน 1,368 ชั่วโมง โดยไม่มีการสูบล้างบ่อ ซึ่งจำแนกเป็นการเติมน้ำ 1,218 ชั่วโมง 30 นาที สูบล้างถังกรองและปรับสภาพน้ำ 149 ชั่วโมง 30 นาที ปริมาณน้ำที่เติมรวมเท่ากับ 26,811.52 ลูกบาศก์เมตร ดังกราฟแสดงการยกตัวของระดับน้ำในบ่อ RWS2 เมื่อมีการเติมน้ำด้วยอัตรา 20-23 ลบ.ม./ชม. ดังแสดงในรูปที่ 2-6 และ 2-7

การทดสอบการเติมน้ำแบบระยะยาว ด้วยวิธีแรงดันบีมในชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น



การทดสอบการเติมน้ำแบบระยะยาว ด้วยวิธีแรงดันบีมในชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น





กราฟของการสูบกลับแสดงตามแนวทางที่คาดการณ์ไว้ และบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของบ่อเติมลดลงระหว่างการเติมน้ำ หรือกล่าวได้ว่าการเติมน้ำมีผลทำให้ประสิทธิภาพลดลง โดยสังเกตจากกราฟของระยะน้ำลดมีความชันลดลงเข้าหาสู่เส้นคาดการณ์ และเมื่อเวลาที่ 11,000 นาที เริ่มขนานกับเส้นคาดการณ์ และเมื่อเวลาที่ 34,000 นาที ค่าระยะน้ำลดสูงกว่าการคาดการณ์ 16 ฟุต หรือบ่อเติมน้ำ RWS2 มีประสิทธิภาพลดลงร้อยละ 53.31

ขณะดำเนินการทดลองระบบเติมน้ำและระบบสูบกลับแบบระยะยาว ได้เก็บตัวอย่างจากบ่อเติมน้ำทั้ง 2 บ่อ และบ่อสังเกตการณ์ทั้ง 16 บ่อ โดยทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในสนาม จำนวนรวม 1,415 ตัวอย่าง และห้องปฏิบัติการจำนวนรวม 50 ตัวอย่าง โดยแยกเป็นวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมีแบบบางส่วน จำนวนรวม 22 ตัวอย่าง และแบบสมบูรณ์ จำนวนรวม 28 ตัวอย่าง

การคำนวณประสิทธิภาพบ่อ

ประสิทธิภาพของบ่อเติมน้ำจะลดลงหลังจากผ่านการเติมน้ำ สามารถหาค่าได้จากการเปรียบเทียบค่าการให้น้ำจำเพาะของบ่อก่อนและหลังเติมน้ำ ซึ่งผลปรากฏว่าบ่อเติมน้ำ RWD2 ลดประสิทธิภาพลงร้อยละ 51.48 ถึง 53.82 ส่วน RWS2 ลดลงร้อยละ 48.59 ถึง 53.31 ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการคำนวณประสิทธิภาพบ่อ (จากข้อมูลการสูบทดลองและสูบกลับ)

ปีที่	ชั้นน้ำบาดาล	อัตราการสูบ (ลบ.ม./ชม.)	ระดับ เริ่มต้น (เมตร)	ระดับน้ำ ขณะสูบ (เมตร)	ระดับน้ำลด ตัว (เมตร)	Specific capacity (ลบ.ม./ชม.)	ประสิทธิภาพ ของบ่อที่ลดลง
Pump test	ระดับลึก	144	15.78	35.08	19.3	7.46	-
	ระดับตื้น	95	15.37	23.96	8.59	11.06	-
ปีที่ 1	ระดับลึก	90	15.63	41.75	26.12	3.45	53.82
	ระดับตื้น	75	16.36	29.55	13.19	5.69	48.59
ปีที่ 2	ระดับลึก	58	18.15	34.17	16.02	3.62	51.48
	ระดับตื้น	60	16.98	28.6	11.62	5.16	53.31

2.2.3.2 ข้อสรุปการศึกษาทดลอง

จากผลการทดลองระบบเติมน้ำและระบบสูบล้างในรอบปีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือธรณีเคมีไม่เป็นผลของการอุดตัน แต่ที่เป็นนัยสำคัญของการอุดตันเนื่องมาจากตะกอนขนาดเล็กที่สะสมตัวในระหว่างการเติมน้ำ กลุ่มบริษัทที่ปรึกษาจึงได้พยายามปรับสารเคมีที่ใช้บำบัดน้ำที่จะใช้เดิมในรอบปีที่ 2 ให้มีคุณภาพน้ำทั้งด้านทางเคมีและกายภาพให้เหมาะสมการเติมน้ำ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงขึ้นและวิเคราะห์หาสาเหตุของการอุดตัน ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) pH 8.0-8.6 ไม่มีผลต่อการปฏิกิริยาละลายดินเหนียวและเป็นสาเหตุเกิดการอุดตัน และปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำเดิมกับน้ำบาดาลหรือกับดินทรายที่ประกอบอยู่ในชั้นน้ำบาดาลทั้งสองชั้น ไม่ปรากฏว่าเกิดผลต่อการเกิดตะกอนและอุดตันในชั้นน้ำบาดาล

2) การลดค่าความขุ่นจาก 1-3 NTU เหลือ ≤ 1 NTU ไม่ช่วยลดการอุดตัน ก็เนื่องจาก PACI ที่เหลือใช้ยังคงรูปสารแขวนลอยขนาดเล็กสะสมและทำให้เกิดการอุดตัน โดยผล MFI testing บ่งบอกถึงสารแขวนลอยขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนี้เป็นนัยสำคัญในเรื่องการอุดตัน แต่การอุดตันในลักษณะนี้ จะเกิดเฉพาะบริเวณในร่องเปิดของท่อกรอง กรวดกรู และพื้นผิวบางส่วนของชั้นน้ำบาดาลที่ติดกับกรวด

3) การเติมด้วยอัตราการเติมน้ำที่สูง เช่น 65 ลบ.ม./ชม. จะเกิดผลการอุดตันอย่างรวดเร็ว ภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่ถ้าปรับอัตราให้ต่ำกว่าที่ 19-22 ลบ.ม./ชม. ผลปรากฏว่าสามารถดำเนินการเติมน้ำได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 54 วัน และ 57 วัน ในชั้นน้ำบาดาลระดับลึกและระดับตื้น ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกว่า ความเร็วของน้ำมีผลต่อการเร่งการอุดตัน

4) เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการเติม ปริมาณน้ำเติมรวม และจำนวนครั้งการล้างสูบล้าง ในตารางที่ 2-4 จะเห็นว่าการเติมน้ำในอัตราที่ 19-22 ลบ.ม./ชม. จะมีความเหมาะสมกว่าการเติมด้วยอัตรา 55 ลบ.ม./ชม.

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงข้อมูลเปรียบเทียบระยะเวลาการเติม ปริมาณน้ำเติมรวม และจำนวนครั้งการสูบล้างบ่อ

รายการ	ชั้นน้ำบาดาลระดับลึก		ชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น	
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 1	ปีที่ 2
อัตราการเติม (ลบ.ม./ชม.)	55	19	27	22
ระยะเวลาที่เติม (วัน)	33	54	30	57
ปริมาณน้ำรวมที่เติม (ลบ.ม.)	18,949.14	20,734.77	17,932.63	26,811.52
จำนวนครั้งที่สูบล้างบ่อ	15	0	0	0

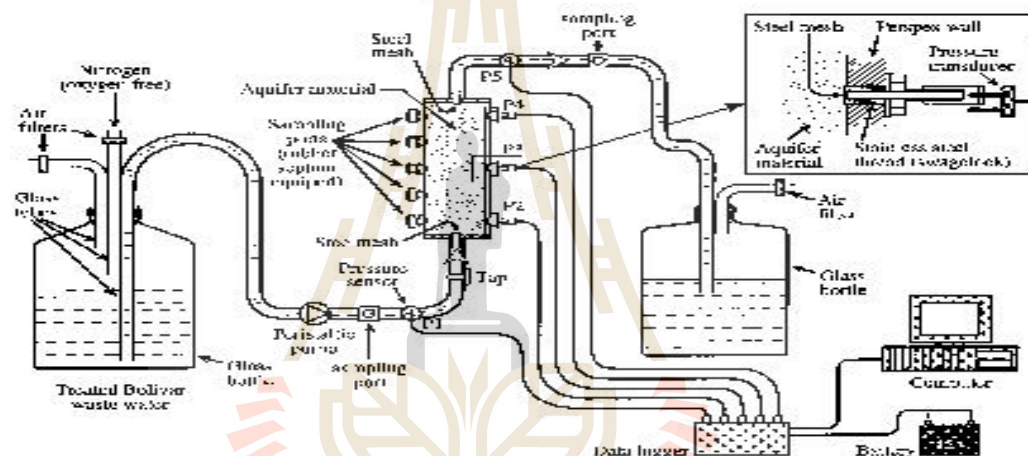


Fig. 1. Schematic representation of column experimental set up.

difference in hydraulic head between the same two points along the column. Porosity at the time of packing was calculated from the dry and wet weight of the columns. Additionally, breakthrough times of a bromide tracer which was passed through the columns before the start of the experiment, was used to check the packing and pore volume of the columns. In the three columns the porosity was calculated to be 0.38 (38%).

Composition of recycled water

The post-treated recycled water pumped through the columns was essentially the same as the recharge water to be used at an ASR site in the Northern Adelaide Plains, except that the wastewater passed through the columns was not chlorinated so as to obtain more severe clogging

as a worst case scenario. The main recycled water quality parameters are listed in Table 1.

Analytical measurements

Samples of both the recycled water being pumped into the column (influent) and the water coming out of the columns (effluent) were taken daily to record water quality changes.

Parameters such as pH, temperature, Eh, DO and EC were measured daily using probes and a flow through cell in which the influent and effluent sample was collected from each column separately, allowing for more accurate and reliable measurements. Other measurements included turbidity, measured in nephelometric units using a turbidity meter, and flow rates measured daily using a measuring cylinder and a stopwatch.

Additional samples were collected every 2–3 days to be analysed for cations, anions, metals, *E. coli* and total bacterial count.

Dismantling of the columns at the end of the experimental run

At the end of the experiment the contents of the columns were sampled at 0.5 cm intervals for the first 3 cm of the column (inlet) and then at 1 cm intervals for the remaining part of the column. The following parameters were analysed. Polysaccharides were quantified using the method by Dubois *et al.* (1956), which involves the addition of 5% phenol and concentrated sulphuric acid. The absorbance of standards and the samples was measured at 485 nm using a UV/visible spectrophotometer (LKB Ultraspec II). The polysaccharide concentration was quantified using glucose as a standard.

Total biomass was evaluated using a fatty acid methyl ester method (MIS Operating Manual, 1991). The fatty acids of the bacteria present in the sample were extracted, converted to fatty acid methyl esters, and directly correlated to dry weight of bacterial biomass and total cell numbers (Haack *et al.*, 1994). The method was tested by adding a known amount of bacterial biomass to different amounts of sand. The recovery rates of fatty acids were

Table 1. Average water quality of DAF/F treated wastewater

Parameter (mg/l unless otherwise specified)	Values
Ammonia (as N)	0.2–0.3
Nitrate + nitrite (as N)	6–10
Total Kjeldahl nitrogen (TKN)	2.5–3.5
Assimilable organic carbon (mg acetate-C equiv/l)	0.18
Biological oxygen demand	2.0–3.0
Chemical oxygen demand	165–170
Total organic carbon	18–20
Dissolved organic carbon	18–19
<i>E. coli</i> (cells/100 ml)	15–290
Total bacterial count (cells/ml)	10^3 – 10^6
Suspended solids	3–4
Alkalinity (as calcium carbonate)	140–150
Phosphorus (as P)	0.2–0.3
Iron (total)	0.01–0.02
Calcium	44.5
Sodium	340–350
Potassium	46–48
Chloride	475–480
Bicarbonate	180–190
pH	7.3
EC (mS/cm)	2.5

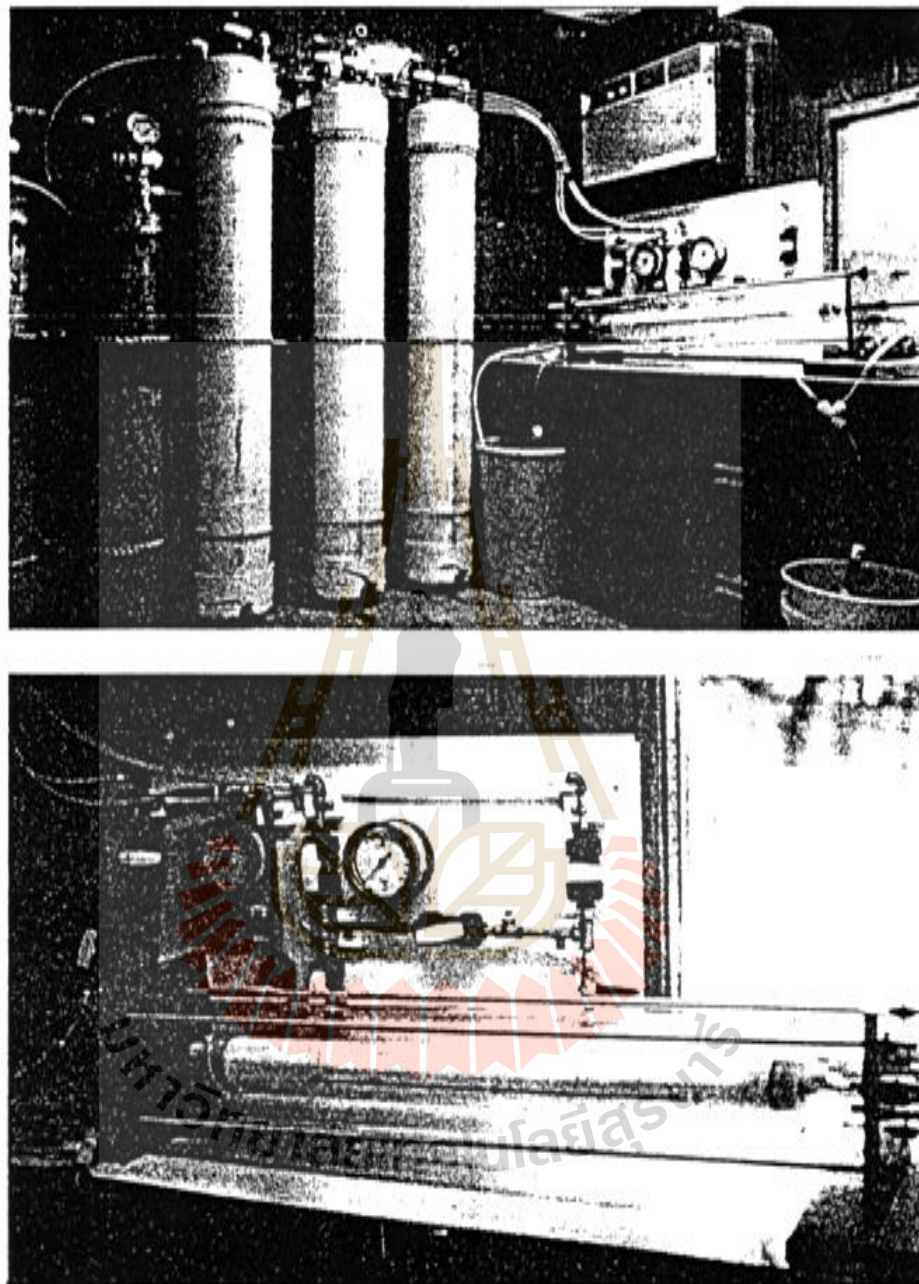


Figure 5.17 Column testing apparatus.

flushed with oxygenated water with a pH of 8.27 to evaluate the effect upon iron concentrations and plugging associated with recharge of treated drinking water adjusted to this pH. In another core test from this site, acidification of the aquifer around the well with deoxygenated, low pH water (2.79) was simulated, demonstrating an increase in permeability and

บทที่ 3

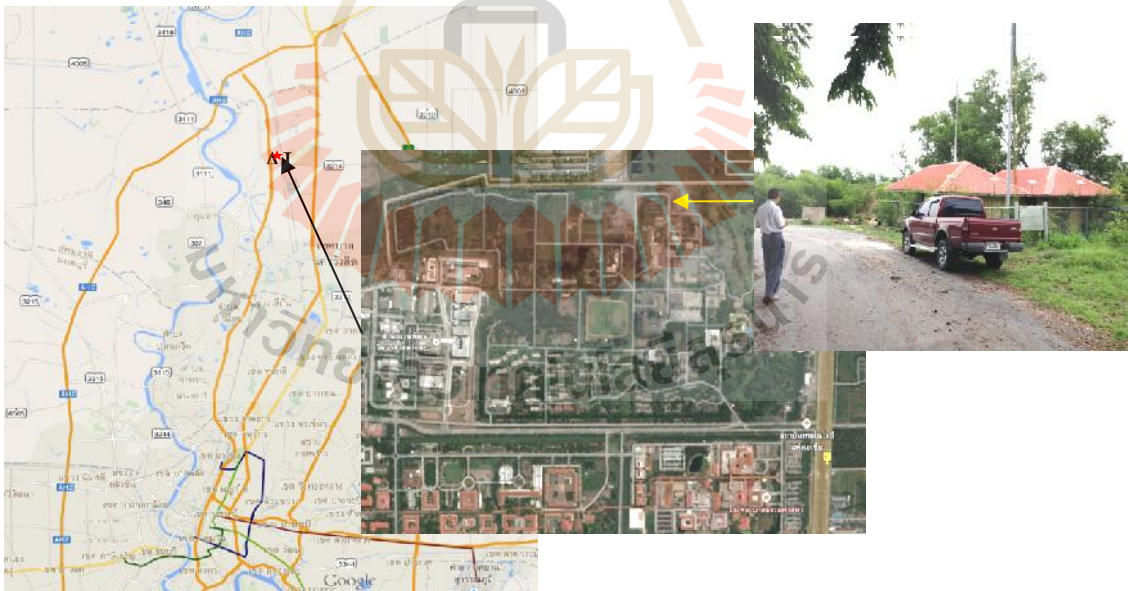
วิธีและขั้นตอนการดำเนินงาน

การทดลองการดูดตันของขบวนการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาลด้วยหลอดทรายทดลองที่มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างและความขุ่นของน้ำที่ใช้เดิม จะแบ่งการทดลองออกเป็น 1) การทดสอบด้วยชุดหลอดทรายทดลองดำเนินการที่สถานีบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ตั้งอยู่ภายในบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology, AIT) (รูปที่ 3.1) 2) การวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพของทรายและน้ำทดสอบ

วิธีและขั้นตอนการดำเนินงาน สรุปได้ดังนี้

3.1 ตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2 วิธีและขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 สถานีและสถานีบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลที่ใช้ดำเนินการทดลอง

3.1 ตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ตัวแปร

แบ่งตัวแปรออกเป็น 1) ทราย 2) น้ำ

3.1.1.1 ทรายที่ใช้ในการทดลอง มี 3 ขนาด คือ 1) ทรายละเอียด (fine sand, S1) 2) ทรายหยาบ (coarse sand, S2) และ 3) ทรายละเอียดมาก (very fine sand, S3) ทรายละเอียด (S1) และ ทรายหยาบ (S2) เป็นทรายของชั้นน้ำบาดาลบางกอก จากบ่อดูทราย อำเภอบางบาล จังหวัด พระนครศรีอยุธยา ส่วนทรายละเอียดมาก (S3) ได้จากอำเภอบางเลน จังหวัดนนทบุรี เนื่องจากไม่สามารถหาทรายขนาดละเอียดมากได้จากบ่อดูทรายที่อำเภอบางบาล

ทรายทั้งสามประเภทนี้มีช่วงขนาดของเม็ดทรายที่ต่างกัน โดยตั้งสมมติฐานว่า เมื่อใช้น้ำที่มีสภาพเดียวกันเดิมผ่านทรายทั้งสามประเภท การอุดตันที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน

3.1.1.2 น้ำที่ใช้ทดลอง มี 3 ประเภท คือ 1) น้ำบาดาล 2) น้ำประปา และ 3) น้ำแม่น้ำ ตามรายละเอียดของแต่ละประเภท ดังนี้

1) น้ำบาดาล เป็นน้ำบาดาลที่สูบจากบ่อดักเหตุการณ์ ความลึก 47.69 เมตร ระดับน้ำคงที่ในบ่อ (Static Water Level, SWL) 4.26 เมตร และคุณภาพน้ำมีสภาพเป็นน้ำกร่อยเค็ม

2) น้ำประปา เป็นน้ำประปาจากการประปาส่วนภูมิภาค จังหวัดปทุมธานี ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0 – 8.5 และค่าความขุ่น <1 NTU เพื่อใช้เป็นน้ำเดิมในหลอดทดลอง

3) น้ำแม่น้ำ ใช้สำหรับปรับค่าความขุ่น (turbidity) ของน้ำประปาที่ใช้เดิม โดยเก็บจากแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณข้างสถานีสูบน้ำสำแล การประปานครหลวง จังหวัดปทุมธานี มีความขุ่นอยู่ในช่วงระหว่าง 20 – 70 NTU เก็บน้ำแม่น้ำและกวนให้ตกตะกอนเพื่อให้ความขุ่นเพิ่มขึ้นมากกว่า 100 NTU นำมาผสมปรับค่าความขุ่นในน้ำเดิมให้ได้ตามต้องการสำหรับการทดลอง

ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำประปาที่ใช้เดิม จะปรับด้วยการเติมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนการนำเชื้อจะใช้สารโซเดียมไฮโปคลอไรด์

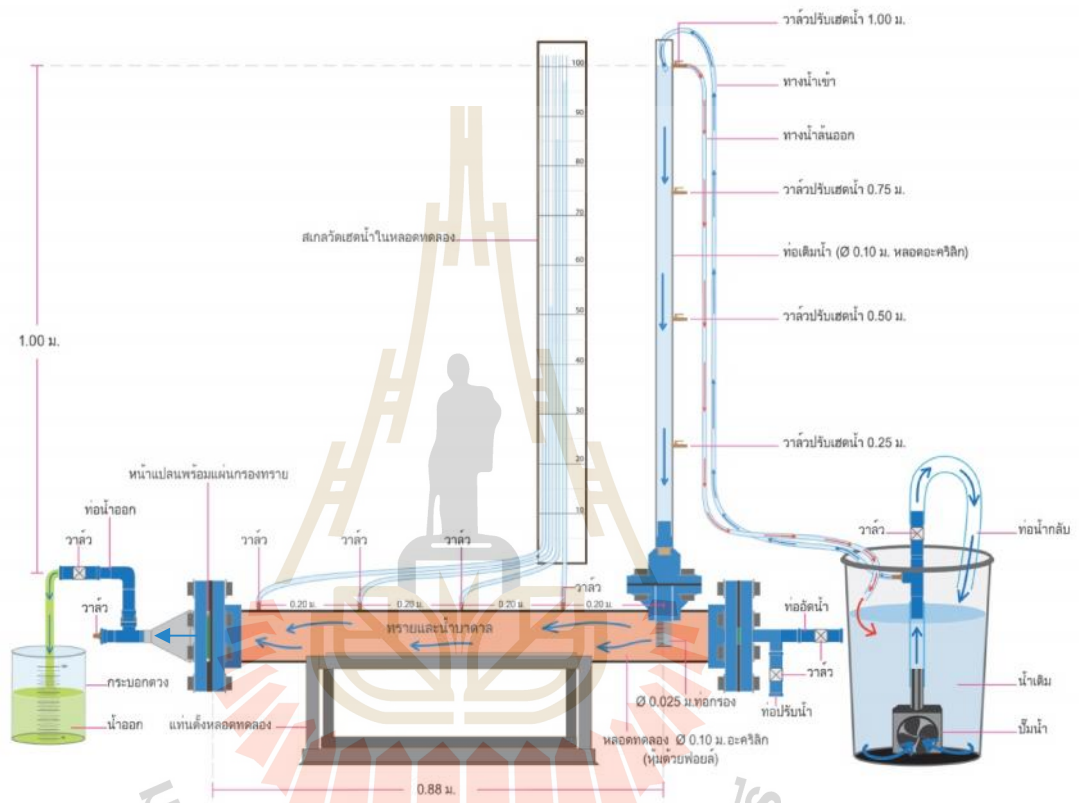
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

แบ่งออกเป็น 1) ชุดหลอดทดลอง 2) อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

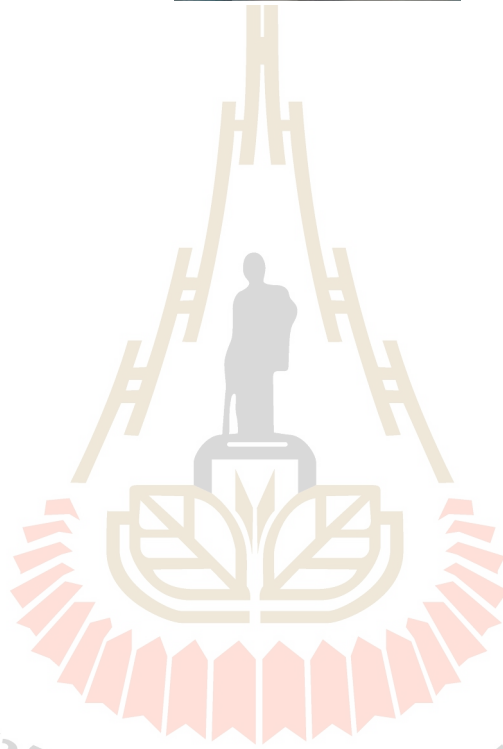
3.1.2.1 ชุดหลอดทดลอง

ชุดหลอดทดลอง (Test Column) ประกอบด้วย

1) หลอดทดลองอะคริลิก (รูปที่ 3-2) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว (0.10 เมตร) ยาวประมาณ 1 เมตร วางตัวในแนวนอน ด้านหลังบนของหลอดทดลองถูกเจาะรูและติดตั้งประตุน้ำทองเหลืองขนาด $\phi 1/4$ นิ้ว จำนวน 4 จุด จุดแรกห่างจากจุดศูนย์กลางของท่อกรอง 20 ซม. ตามแนวยาวหลอด จุดถัดไปห่างจากกันจุดละ 20 ซม. ประตุน้ำที่แต่ละจุดจะติดตั้งสายยางอ่อนเพื่อวัดระดับเสถียรของน้ำในขณะทดสอบ ส่วนหัวของหลอดทดลองเป็นทางน้ำสำหรับเติมน้ำตัวอย่าง (ที่เป็น



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Temperature



pH



Electric
Conductivity



Oxidation Reduction
Potential



Turbidity



6) อุปกรณ์ประกอบการทดลองอื่นๆ คือ เครื่องวัดระดับน้ำในป้อบาดาล สารเคมีที่ใช้ปรับคุณภาพน้ำที่จะใช้เดิม ขวดเก็บตัวอย่างน้ำพร้อมสารเคมีรักษาสภาพน้ำและตรวจทานเครื่องมือ ภาชนะเก็บตัวอย่างตะกอน กระบอกตวง นาฬิกาจับเวลา กล้องบันทึกภาพ ฟอรัมบันทึกข้อมูล และอื่นๆ ที่จำเป็น

3.1.2.2 อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

1) ห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วิเคราะห์ค่าช่วงขนาดของทราย (grain size distribution analysis) ทดลองค่าการซึมผ่าน (permeability test) ค่าความพรุนในชั้นทราย (void ratio) ตรวจสอบขนาด ชนิด และสารประกอบตะกอนแร่ตัวอย่างที่ได้จากการทดลองในสนาม ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-Ray Diffraction (XRD)

2) ห้องปฏิบัติการบริษัท ดีเทอร์มิเนชั่น กรู๊ป จำกัด วิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างน้ำที่เก็บได้จากการทดลองในสนาม

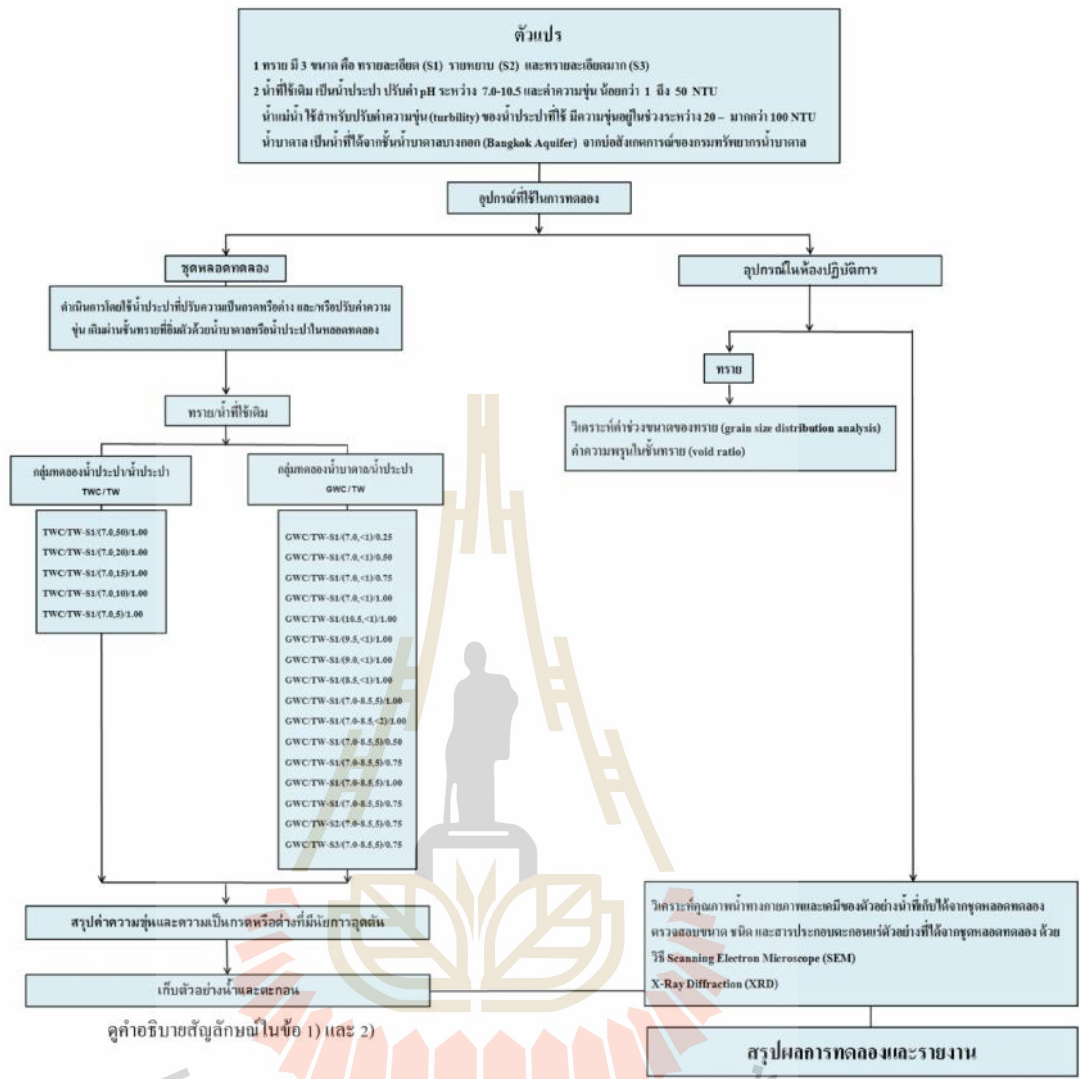
3.2 วิธีและขั้นตอนการทดลอง

การทดลองการอุดตันจากการเติมน้ำ ดำเนินการโดยใช้น้ำประปาที่ปรับความเป็นกรด-ด่างและ/หรือปรับค่าความขุ่น เติมน้ำผ่านชั้นทรายที่อัดตัวด้วยน้ำบาดาลหรือน้ำประปาในหลอดทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีการและขั้นตอน ดังนี้

3.2.1 การเตรียมหลอดทรายทดลอง

ตั้งหลอดทดลองให้อยู่ในแนวตั้ง ให้ส่วนกรวยอยู่ด้านล่างและวางบนฐานที่ทำจากเหล็กฉาก กรอกทรายขนาดที่ต้องการลงในหลอดทดลอง โดยใช้น้ำประปาเป็นตัวพาให้ทรายตกตะกอน (ระวังไม่ให้ทรายเกิดการตกตะกอนแยกขนาดชั้น) ขณะเดียวกันทำการเขย่าสั่นหลอดทดลองเพื่อให้ทรายอัดตัวแน่น จากนั้นบรรจุน้ำประปาหรือน้ำบาดาลที่ต้องการทดลองเข้าไปแทนที่น้ำประปาเดิมที่ค้างในช่วงระหว่างการกรอกทราย โดยกำหนดให้น้ำประปาหรือน้ำบาดาลที่บรรจุมีปริมาตรไหลผ่านหลอดทดลอง ประมาณ 30 ลิตร หรือประมาณ 10 เท่าของปริมาตรน้ำที่อยู่ในช่องว่างของหลอดทราย หลอดทดลองถูกหุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ และพันท่อน้ำเข้าด้วยเทปพลาสติกดำ เพื่อคงสภาพของน้ำบาดาลที่สุบบรรจุไว้ในหลอดทดลองให้ใกล้เคียงกับน้ำบาดาลในธรรมชาติที่สุด (รูปที่ 3-5) และป้องกันการเกิดตะไคร่น้ำจากการทดลองที่ใช้เวลาต่อเนื่องหลายวัน





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค) $TWC/TW-S1/(7.0,15)/1.00$

ง) $TWC/TW-S1/(7.0,10)/1.00$

จ) $TWC/TW-S1/(7.0,5)/1.00$

ตัวอย่างคำอธิบายสัญลักษณ์ เช่น $TWC/TW-S1/(7.0,50)/1.00$ หมายถึง การทดลองโดยเติมน้ำประปาผ่านทรายละเอียดที่อิมตัวด้วยน้ำประปา ที่มีค่า pH เท่ากับ 7.0 และความขุ่น 50 NTU ด้วยเฮดเท่ากับ 1.00 เมตร

TWC = ทรายอิมตัวด้วยน้ำประปา

TW = น้ำเดิมที่เป็นน้ำประปา

S1 = ทรายละเอียด

7.0 = ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0

50 = ค่าความขุ่น 50 NTU

1.00 = เฮดน้ำเดิมสูง 1.00 เมตร

แต่ละแบบทดลองในแต่ละครั้งของแต่ละหลอดทรายทดลองมีวิธีการทดลองตามรายละเอียดดังนี้

ก) แบบทดลอง $TWC/TW-S1/(7.0,50)/1.00$

ดำเนินการ โดยใช้หลอดทดลองที่บรรจุด้วยทรายละเอียดและอิมตัวด้วยน้ำประปา ที่มีค่า pH ประมาณ 7.0 ค่าความขุ่น <1 NTU น้ำเดิมเป็นน้ำประปาที่มีค่า pH เดียวกัน แต่มีความขุ่นประมาณ 50 NTU เฮดของน้ำในท่อเติมน้ำกำหนดให้คงที่เท่ากับ 1.00 เมตร จากจุดศูนย์กลางของท่อทางน้ำออก

การทดลองเริ่มจากการเติมน้ำโดยเปิดวาล์วน้ำออกที่ปลายท่อหลอดทดลอง วัดอัตราการไหลของน้ำพร้อมเก็บตัวอย่างน้ำออก และวัดเฮดของน้ำบนหลังหลอดทดลองทั้ง 4 จุด ในนาที่ที่ 5 และนาที่ที่ 30 หลังเติมน้ำ จากนั้นทำการวัดแบบเดียวกันและเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาที จนครบ 7 ชั่วโมง หรือมีค่าอัตราการไหลออกของน้ำคงที่ที่ต่ำกว่า 1 ลิตร/ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ ผู้วิจัยเก็บตัวอย่างตะกอนและทราย เพื่อนำไปวิเคราะห์สารประกอบและขนาดของตะกอนในห้องปฏิบัติการ

ข) แบบทดลอง $TWC/TW-S1/(7.0,20)/1.00$

ดำเนินการเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนความขุ่นของน้ำเดิมเป็น 20 NTU แล้วทดลองจนครบ 8 ชั่วโมง

ค) แบบทดลอง TWC/TW-S1/(7.0,15)/1.00

ดำเนินการเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนความขุ่นของน้ำเดิมเป็น 15 NTU แล้วทดลองจนครบ 13 ชั่วโมง

ง) แบบทดลอง TWC/TW-S1/(7.0,10)/1.00

ดำเนินการเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนความขุ่นของน้ำเดิมเป็น 10 NTU แล้วทดลองจนครบ 35 ชั่วโมง 30 นาที

จ) แบบทดลอง TWC/TW-S1/(7.0,5)/1.00

ดำเนินการเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนความขุ่นของน้ำเดิมเป็น 5 NTU ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำพร้อมเก็บตัวอย่างน้ำออก ในนาที่ที่ 5 และ นาที่ที่ 30 หลังเติมน้ำ จากนั้นทำการวัดแบบเดียวกันและเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาที จนครบ 3 ชั่วโมง และเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง แล้วทดลองจนครบ 36 ชั่วโมง

2) กลุ่มทดลองทรายอิมตัวด้วยน้ำบาดาล (GWC)/น้ำเดิมเป็นน้ำประปา (TW)

แบ่งเป็นจำนวน 16 แบบทดลอง ตามตัวแปรดังนี้

(1) ทดลองในหลอดทรายละเอียด (S1) อิมตัวด้วยน้ำบาดาล และเติมด้วยน้ำประปา ที่มีค่า pH ประมาณ 7 และความขุ่น <1 NTU ภายใต้ระดับเฮดต่างกัน 4 ระดับ คือ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 เมตร ผู้ทดลองจะเรียกทั้ง 4 แบบนี้ว่า

ก) GWC/TW-S1/(7.0,<1)/0.25

ข) GWC/TW-S1/(7.0,<1)/0.50

ค) GWC/TW-S1/(7.0,<1)/0.75

ง) GWC/TW-S1/(7.0,<1)/1.00

ยกตัวอย่างเช่น GWC/TW-S1/(7.0,<1)/0.25 หมายถึง การทดลองโดยเติมน้ำประปาผ่านทรายละเอียดที่อิมตัวด้วยน้ำบาดาล ด้วยน้ำเดิมที่มีค่า pH เท่ากับ 7.0 และความขุ่นน้อยกว่า 1 NTU ที่เฮดเท่ากับ 0.25 เมตร

GWC = ทรายอิมตัวด้วยน้ำบาดาล

TW = น้ำเดิมที่เป็นน้ำประปา

S1 = ทรายละเอียด

7.0 = ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.0

<1 = ค่าความขุ่น <1 NTU

0.25 = เสดน้ำเต็มสูง 0.25 เมตร

แต่ละแบบทดลองในแต่ละครั้งของแต่ละหลอดทดลอง มีวิธีการทดลองตามรายละเอียด ดังนี้

ก) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(7.0,<1)/0.25

ดำเนินการโดยใช้หลอดทดลองที่บรรจุด้วยทรายละเอียดและอิมตัวด้วยน้ำประปาที่มีค่า pH ประมาณ 7.0 และค่าความขุ่น <1 NTU และสูบน้ำเต็มที่เป็นน้ำประปาที่มีค่า pH และความขุ่นเดียวกัน ลงในท่อเติมน้ำ ด้วยเสดของน้ำในท่อเติมน้ำให้คงที่เท่ากับ 0.25 เมตร

จากนั้นเริ่มทำการเติมน้ำโดยเปิดวาล์วน้ำออกที่ปลายท่อหลอดทดลอง วัดอัตราการไหลของน้ำพร้อมเก็บตัวอย่างน้ำออก ในนาที่ที่ 5 และ นาที่ที่ 30 หลังเติมน้ำ จากนั้นทำการวัดแบบเดียวกัน และเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาที่ จนครบ 3 ชั่วโมง และเปลี่ยนเป็นทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งครบ 21 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ เก็บตัวอย่างตะกอนและทราย เพื่อนำไปวิเคราะห์สารประกอบและขนาดของตะกอนในห้องปฏิบัติการ

ข) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(7.0,<1)/0.50

ดำเนินการแบบเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนเสดของน้ำในท่อเติมน้ำให้เท่ากับ 0.50 เมตร เมื่อวัดอัตราการไหลของน้ำพร้อมเก็บตัวอย่างน้ำออก ทุก 30 นาที่ ครบ 3 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง

ค) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(7.0,<1)/0.75

ดำเนินการแบบเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนเสดของน้ำในท่อเติมน้ำให้เท่ากับ 0.75 เมตร

ง) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(7.0,<1)/1.00

ดำเนินการแบบเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนเสดของน้ำในท่อเติมน้ำให้เท่ากับ 1.00 เมตร

(2) ทดลองในหลอดทรายละเอียด (S1) ที่อิมตัวด้วยน้ำบาดาล และเติมด้วยน้ำประปาที่มีค่าความขุ่น <1 NTU ด้วยเสดคงที่เท่ากับ 1.00 เมตร แต่ค่า pH ต่างกันที่ 10.5, 9.5, 9.0 และ 8.5 ผู้วิจัยจะเรียกทั้ง 4 แบบนี้ว่า

ก) GWC/TW-S1/(10.5,<1)/1.00

ข) GWC/TW-S1/(9.5,<1)/1.00

ค) GWC/TW-S1/(9.0,<1)/1.00

ง) GWC/TW-S1/(8.5,<1)/1.00

ซึ่งแต่ละแบบทดลองในแต่ละครั้งของแต่ละหลอดทดลอง มีวิธีการทดลองตามรายละเอียด ดังนี้

ก) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(10.5,<1)/1.00

ดำเนินการโดยใช้หลอดทดลองที่บรรจุด้วยทรายละเอียดและอิมตัวด้วยน้ำน้ำบาดาล และสูบเติมด้วยน้ำประปาที่มีความขุ่น < 1 NTU และค่า pH เท่ากับ 10.5 ลงในท่อเติมน้ำ ภายใต้เฮดน้ำคงที่เท่ากับ 1.00 เมตร จากนั้นเปิดวาล์วน้ำออกที่ปลายท่อหลอดทดลองให้มีอัตราการไหลออก ประมาณ 2.5 ลิตร/ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำบาดาลและน้ำเติมมีเวลาเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอย่างสมบูรณ์ เป็นระยะเวลา 60 นาที (1 ชั่วโมงแรก) พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 5 นาที หลังจากนั้น ปรับวาล์วน้ำออกให้เปิดเต็ม ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำพร้อมเก็บตัวอย่างน้ำออก ในนาทีที่ 65 และนาทีที่ 90 หลังเติมน้ำ และทุกๆ 30 นาที จนครบ 20 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งอัตราการไหลออกของน้ำมีค่าน้อยกว่า 2 ลิตร/ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ เก็บตัวอย่างตะกอนและทราย เพื่อนำไปวิเคราะห์สารประกอบและขนาดของตะกอนในห้องปฏิบัติการ

ข) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(9.5,<1)/1.00

ดำเนินการเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนค่า pH ของน้ำเติมเป็น 9.5 วัดอัตราการไหลของน้ำพร้อมเก็บตัวอย่างน้ำออก ในนาทีที่ 65 และนาทีที่ 90 หลังเติมน้ำ และทุกๆ 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง และเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง แล้วทดลองจนครบ 26 ชั่วโมง

ค) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(9.0,<1)/1.00

ดำเนินการเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ข) แต่เปลี่ยนค่า pH ของน้ำเติมเป็น 9.0 และทดลองจนครบ 21 ชั่วโมง

ง) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(8.5,<1)/1.00

ดำเนินการเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ข) แต่เปลี่ยนค่า pH ของน้ำเติมเป็น 8.5 และทดลองจนครบ 22 ชั่วโมง

(3) ทดลองในหลอดทรายละเอียด (S1) อิมตัวด้วยน้ำน้ำบาดาล และเติมด้วยน้ำประปา ที่มีค่า pH 7.0 - 8.5 ด้วยเฮดคงที่เท่ากับ 1.00 เมตร แต่ค่าความขุ่นต่างกันที่ 5 และ <2 NTU ผู้วิจัยจะเรียกทั้ง 2 แบบนี้ว่า

ก) GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/1.00

ข) GWC/TW-S1/(7.0-8.5,<2)/1.00

ซึ่งแต่ละแบบทดลองในแต่ละครั้งของแต่ละหลอดทดลอง มีวิธีการทดลองตามรายละเอียด ดังนี้

ก) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/1.00

ดำเนินการโดยใช้หลอดทดลองที่บรรจุด้วยทรายละเอียดและอิมตัวด้วยน้ำบาดาล และสูบเติมด้วยน้ำประปาที่มีค่า pH ระหว่าง 7.0 และ 8.5 และความขุ่น 5 NTU ลงในท่อเติมน้ำ ด้วยเสคน้ำคงที่เท่ากับ 1.00 เมตร การเติมน้ำทำโดยเปิดวาล์วน้ำออกที่ปลายท่อหลอดทดลองให้มีอัตราการไหลออก ประมาณ 2.5 ลิตร/ชั่วโมง เพื่อให้ให้น้ำบาดาลและน้ำเติมมีเวลาเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอย่างสมบูรณ์ เป็นระยะเวลา 60 นาที (1 ชั่วโมงแรก) พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 5 นาที หลังจากนั้น ปรับวาล์วน้ำออกให้เปิดเต็ม วัดอัตราการไหลของน้ำพร้อมเก็บตัวอย่างน้ำออก ในนาที่ที่ 65 และนาที่ที่ 90 หลังเติมน้ำ และจากนั้นทุกๆ 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 49 ชั่วโมง และเป็นทุกๆ 2 ชั่วโมง ทดลองจนครบ 55 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นการทดลอง เก็บตัวอย่างตะกอนและทราย เพื่อคัดเลือกนำไปวิเคราะห์สารประกอบและขนาดของตะกอนในห้องปฏิบัติการ

ข) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(7.0-8.5,<2)/1.00

ดำเนินการเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนความขุ่นของน้ำเติมเป็น <2 NTU การวัดอัตราการไหลของน้ำและการเก็บตัวอย่างน้ำออกดำเนินการในนาที่ที่ 65 และนาที่ที่ 90 หลังเติมน้ำ และจากนั้นทุกๆ 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 49 ชั่วโมง ทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 65 ชั่วโมง และทุกๆ 3 ชั่วโมง ทดลองจนครบ 91 ชั่วโมง

(4) ทดลองในหลอดทรายละเอียด (S1) อิมตัวด้วยน้ำบาดาล เติมน้ำด้วยน้ำประปา ที่มีค่า pH ระหว่าง 7.0 - 8.5 และความขุ่น 5 NTU โดยเติมน้ำด้วยเสคน้ำคงที่ 0.50, 0.75 และ 1.00 เมตร ผู้วิจัยจะเรียกทั้ง 3 แบบนี้ว่า

ก) GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/0.50

ข) GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/0.75

ค) GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/1.00

ซึ่งแต่ละแบบทดลองในแต่ละครั้งของแต่ละหลอดทดลอง มีวิธีการทดลองตามรายละเอียด ดังนี้

ก) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/0.50

ดำเนินการโดยใช้หลอดทดลองที่บรรจุด้วยทรายละเอียดและอิมด้วยน้ำน้ำบาดาล และสูบเติมน้ำประปาที่มีค่า pH เท่ากับ 7.0 – 8.5 และความขุ่น 5 NTU ลงในท่อเติมน้ำ ด้วยเสคน้ำคงที่เท่ากับ 0.50 เมตร ระหว่างทดสอบ ผู้วิจัยวัดเสคน้ำบนหลังหลอดทดลองทั้ง 4 จุด

การเติมน้ำทำโดยเปิดวาล์วน้ำออกที่ปลายท่อหลอดทดลองให้มีอัตราการไหลออก ประมาณ 2.5 ลิตร/ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำบาดาลและน้ำเติมมีเวลาเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอย่างสมบูรณ์ เป็นระยะเวลา 60 นาที (1 ชั่วโมงแรก) ตัวอย่างน้ำถูกเก็บทุกๆ 5 นาที หลังการเติมน้ำ เมื่อครบ 60 นาทีแล้ว ผู้วิจัยปรับวาล์วน้ำออกให้เต็ม และวัดอัตราการไหลของน้ำพร้อมเก็บตัวอย่างน้ำออกและวัดเสคน้ำบนหลังหลอดทดลองทั้ง 4 จุด ในนาที่ที่ 65 และ นาที่ที่ 90 จากนั้น ดำเนินการทุกๆ 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 49 ชั่วโมง และเป็นทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 98 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นการทดลอง ผู้วิจัยเก็บตัวอย่างตะกอนและทราย เพื่อคัดเลือกนำไปวิเคราะห์สารประกอบและขนาดของตะกอนในห้องปฏิบัติการ

ข) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/0.75

ดำเนินการเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนเสคน้ำในท่อเติมน้ำเป็น 0.75 เมตร การวัดอัตราการไหลของน้ำ การเก็บตัวอย่างน้ำออก และการวัดเสคน้ำบนหลังหลอดทดลองทั้ง 4 จุด ดำเนินการในนาที่ที่ 65 และนาที่ที่ 90 หลังเติมน้ำ จากนั้น ดำเนินการทุกๆ 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 49 ชั่วโมง ทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 65 ชั่วโมง และทุกๆ 3 ชั่วโมง จนครบ 95 ชั่วโมง

ค) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/1.00

ดำเนินการแบบเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนเสคน้ำในท่อเติมน้ำเป็น 1.00 เมตร การวัดอัตราการไหลของน้ำ การเก็บตัวอย่างน้ำออก และการวัดเสคน้ำบนหลังหลอดทดลองทั้ง 4 จุด ดำเนินการในนาที่ที่ 65 และนาที่ที่ 90 หลังเติมน้ำ จากนั้น ดำเนินการทุกๆ 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 49 ชั่วโมง และทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 55 ชั่วโมง

(5) ทดลองในหลอดโดยใช้ทรายขนาดต่างกัน คือ ทรายละเอียด (S1) ทรายหยาบ (S2) และทรายละเอียดมาก (S3) อิมด้วยน้ำบาดาล และเติมด้วยน้ำประปา ที่มีค่า pH เท่ากับ 7.0 - 8.5 และค่าความขุ่นเท่ากับ 5 NTU ด้วยเสคน้ำคงที่เท่ากับ 0.75 เมตร ผู้ทดลองจะเรียกทั้ง 3 แบบนี้ว่า

ก) GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/0.75

ข) GWC/TW-S2/(7.0-8.5,5)/0.75

ค) GWC/TW-S3/(7.0-8.5,5)/0.75

ซึ่งแต่ละแบบทดลองในแต่ละครั้งของแต่ละหลอดทดลอง มีวิธีการทดลองตามรายละเอียด ดังนี้

ก) แบบทดลอง GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/0.75

ดำเนินการโดยใช้หลอดทดลองที่บรรจุด้วยทรายละเอียดและอิมตัวด้วยน้ำบาดาล และสูบเติมด้วยน้ำประปาที่มีค่า pH เท่ากับ 7.0 – 8.5 และความขุ่น 5 NTU ลงในท่อเติมน้ำ ปรับให้ระดับของน้ำในท่อเติมน้ำให้คงที่ที่ความสูง 0.75

การเติมน้ำทำโดยเปิดวาล์วน้ำออกที่ปลายท่อหลอดทดลองให้มีอัตราการไหลออก ประมาณ 2.5 ลิตร/ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำบาดาลและน้ำเติมมีเวลาเกิดปฏิกิริยาทางเคมีอย่างสมบูรณ์ เป็นระยะเวลา 60 นาที (1 ชั่วโมงแรก) พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 5 นาที หลังจากนั้น ผู้วิจัยปรับวาล์วน้ำออกให้เต็ม และวัดอัตราการไหลของน้ำพร้อมเก็บตัวอย่างน้ำออก ในนาที่ที่ 65 และ นาที่ที่ 90 หลังเติมน้ำ จากนั้นดำเนินการทุกๆ 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 49 ชั่วโมง และเป็นทุกๆ 2 ชั่วโมง ทดลองจนครบ 95 ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง ผู้วิจัยทำการเก็บตัวอย่างตะกอนและทราย เพื่อคัดเลือกลำไปวิเคราะห์สารประกอบและขนาดของตะกอนในห้องปฏิบัติการ

ข) แบบทดลอง GWC/TW-S2/(7.0-8.5,5)/0.75

ดำเนินการแบบเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนทรายละเอียดเป็นทรายหยาบ การวัดอัตราการไหลของน้ำและเก็บตัวอย่างน้ำออกทำในนาที่ที่ 65 และ นาที่ที่ 90 หลังเติมน้ำ จากนั้นดำเนินการทุกๆ 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 49 ชั่วโมง ทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 73 ชั่วโมง และทุกๆ 3 ชั่วโมง จนครบ 97 ชั่วโมง

ค) แบบทดลอง GWC/TW-S3/(7.0-8.5,5)/0.75

ดำเนินการแบบเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ ก) แต่เปลี่ยนทรายละเอียดเป็นทรายละเอียดมาก การเติมน้ำโดยเปิดวาล์วน้ำออกที่ปลายท่อหลอดทดลองและการเก็บตัวอย่างน้ำทำทุกๆ 5 นาที จากนั้นปรับวาล์วน้ำออกให้เปิดเต็ม และทำวัดอัตราการไหลของน้ำ พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำออก ในนาที่ที่ 5 และ นาที่ที่ 30 หลังเติมน้ำ จากนั้นดำเนินการทุกๆ 30 นาที จนครบ 3 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 48 ชั่วโมง เป็นทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 72 ชั่วโมง และเป็นทุกๆ 3 ชั่วโมง ทดลองจนครบ 168 ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง ผู้วิจัยเก็บตัวอย่างตะกอนและทราย เพื่อคัดเลือกลำไปวิเคราะห์สารประกอบและขนาดของตะกอนในห้องปฏิบัติการ

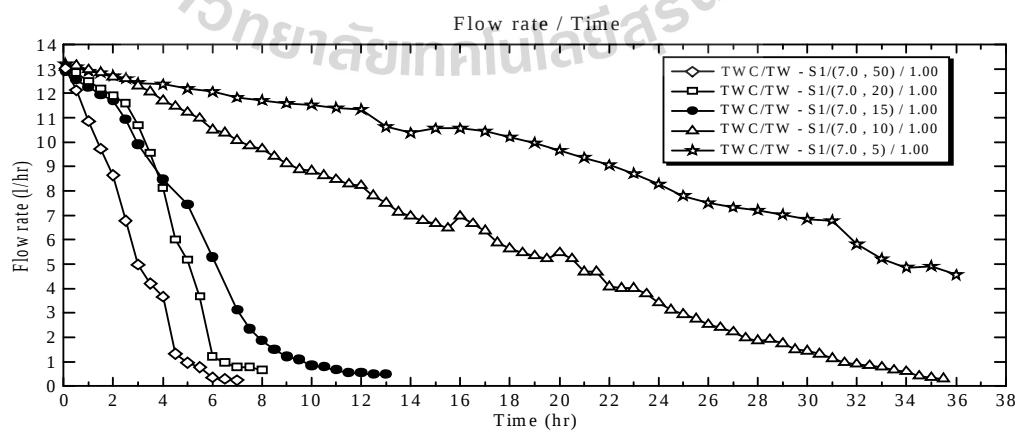
3.2.1.4 การเก็บตัวอย่างน้ำและวัดคุณภาพน้ำ

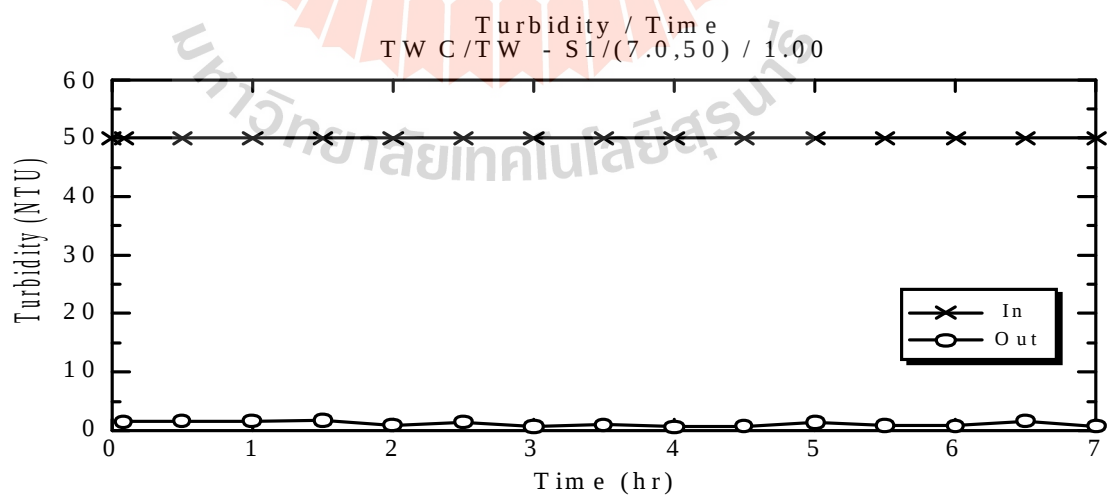
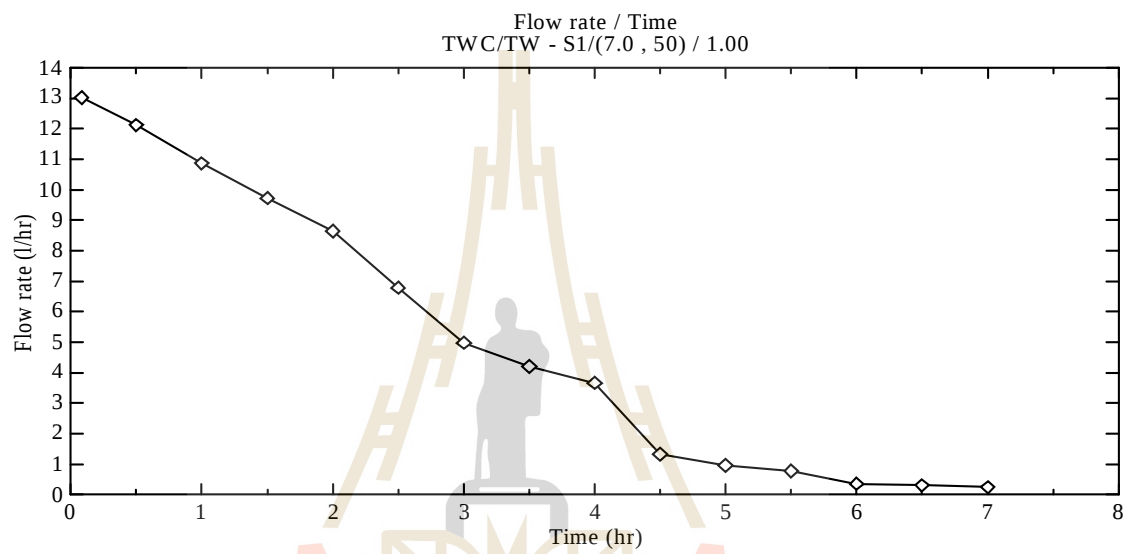
ในขณะดำเนินการทดลอง ผู้วิจัยวัดคุณภาพน้ำของน้ำเดิมและน้ำที่ผ่านหลอดทดลองที่เก็บได้เป็นระยะๆ โดยวัดค่าอุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง การนำไฟฟ้าจำเพาะ (Electric Conductivity) ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation Reduction Potential, ORP) สารรวมละลายได้ในน้ำ (Total Dissolved Solids) ความขุ่น (Turbidity) และออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen)

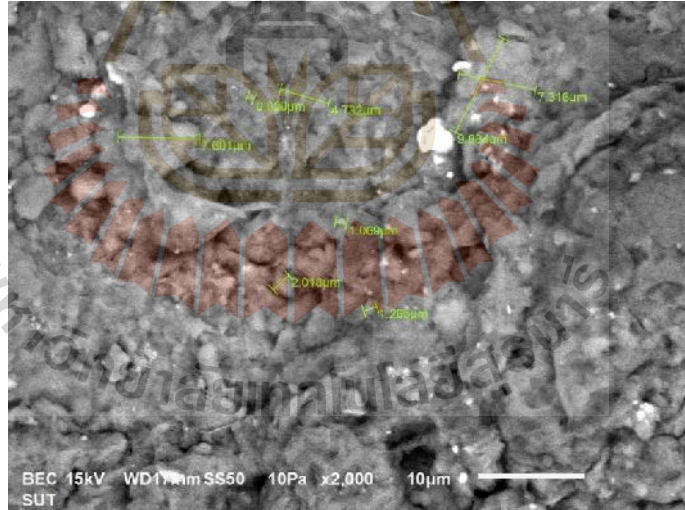
นอกจากนี้ ผู้วิจัยเก็บตัวอย่างน้ำประปา น้ำแม่น้ำ น้ำบาดาล และน้ำที่ผ่านหลอดทดลองไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างน้ำบาดาลเก็บเป็น 2 ขวด และเติมกรดไนตริก (HNO₃) 1:1 จำนวน 4 มล. ในขวดน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร ที่ต้องการวิเคราะห์ธาตุโลหะ เช่น เหล็ก แมงกานีส เพื่อรักษาสภาพไม่ให้เกิดการตกตะกอน

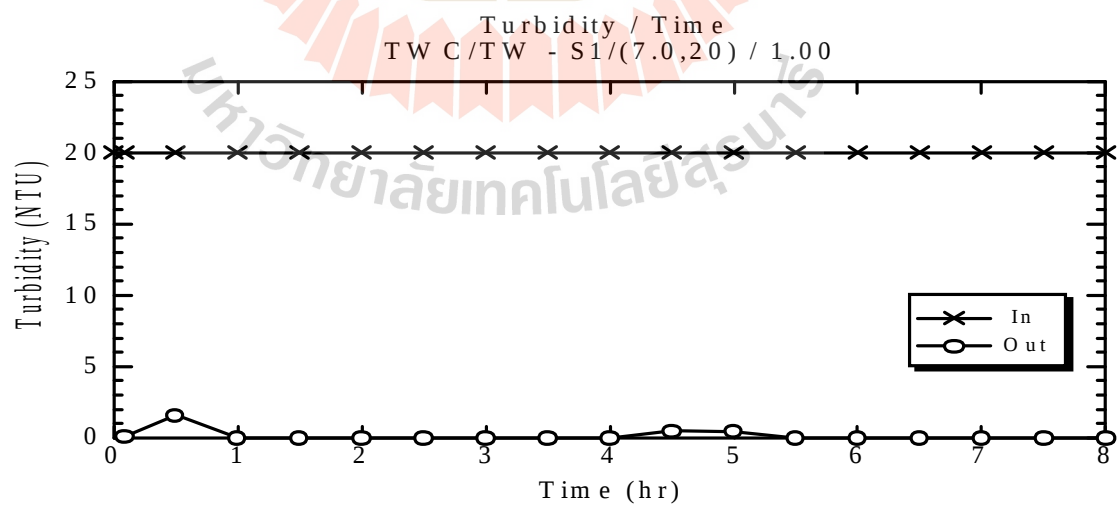
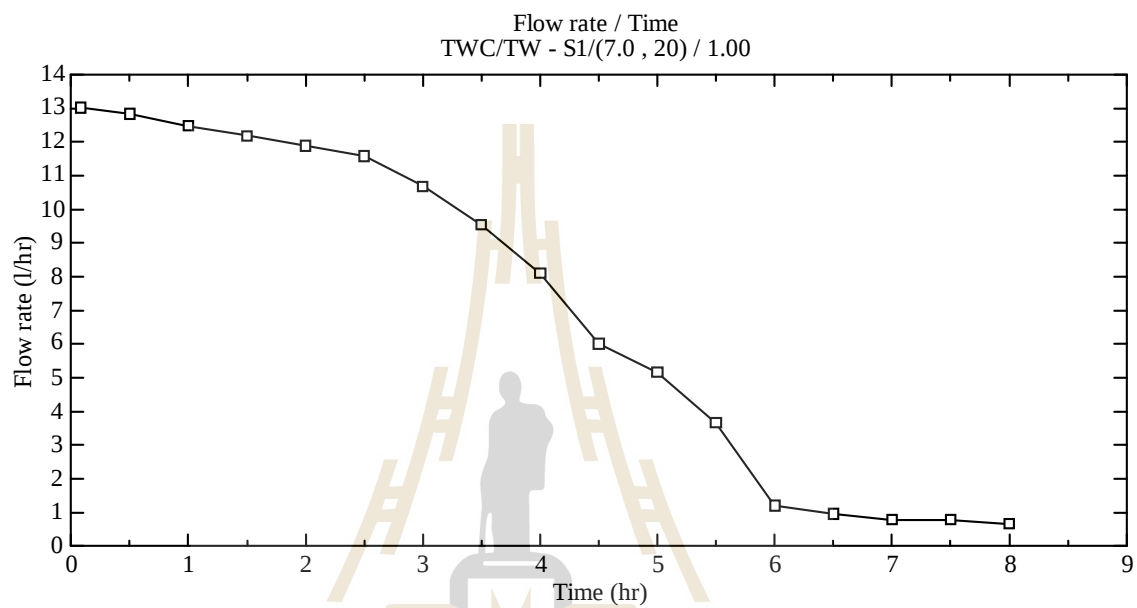
3.2.1.5 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ตะกอน

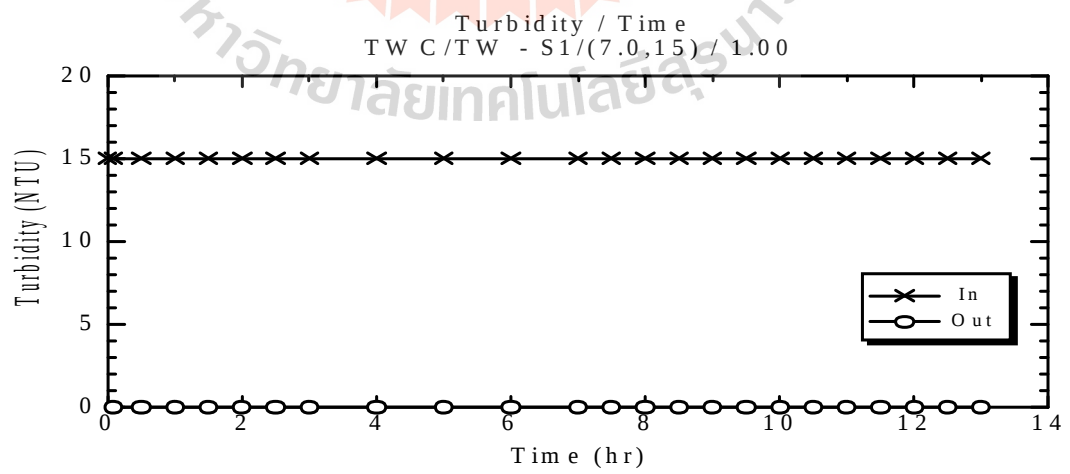
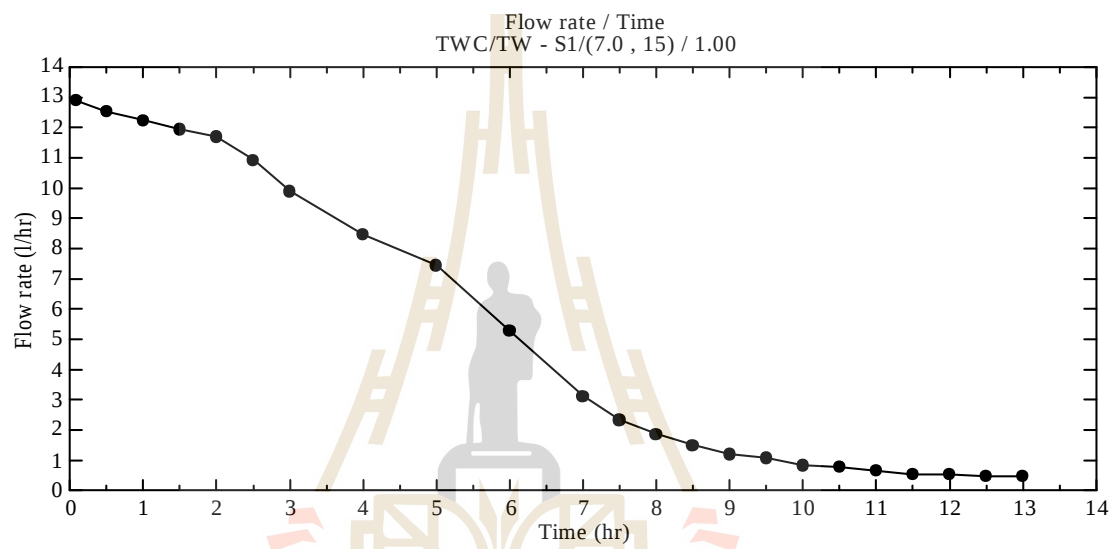
หลังจากเสร็จสิ้นการทดลองของแต่ละแบบทดลอง ผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างทรายและตะกอนในแต่ละช่วง 10 ซม. ตามความยาวของหลอดทดลองเพื่อคัดเลือกไปวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี รูปแบบที่ประกอบเป็นแร่ (XRD) และประมาณขนาดด้วยวิธี SEM ขณะเดียวกัน ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ช่วงขนาดทราย S1, S2 และ S3 ด้วยวิธี sieve analysis พร้อมทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient test) และค่าความพรุน (void ratio)

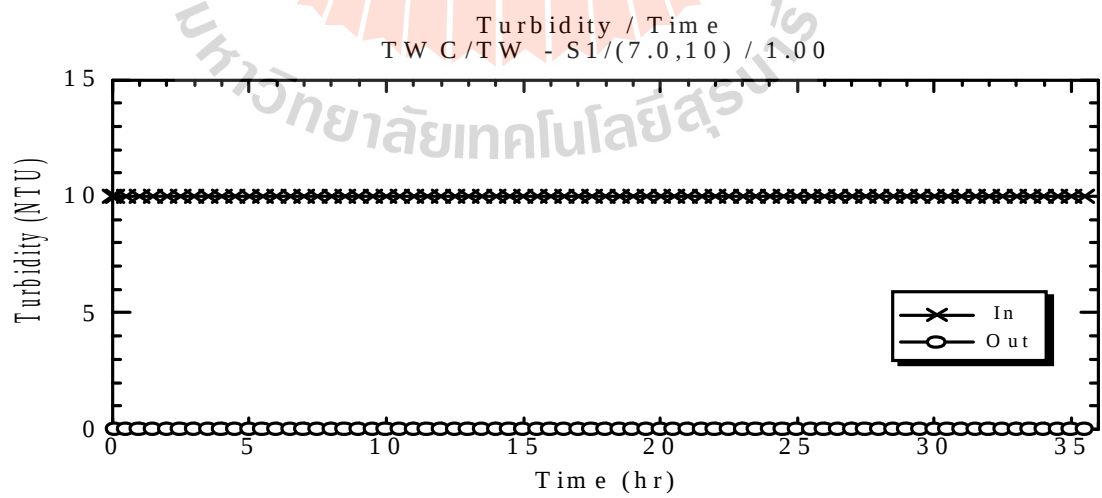
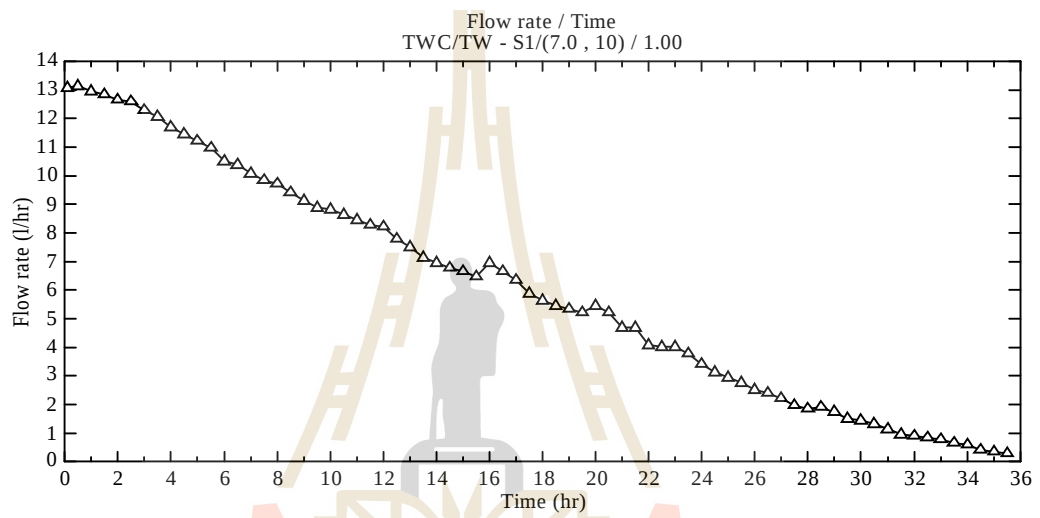


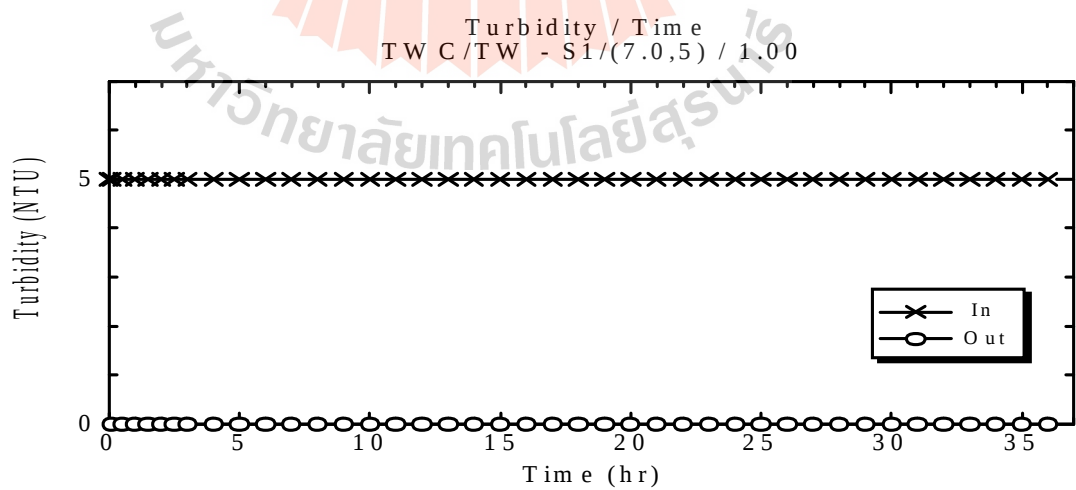
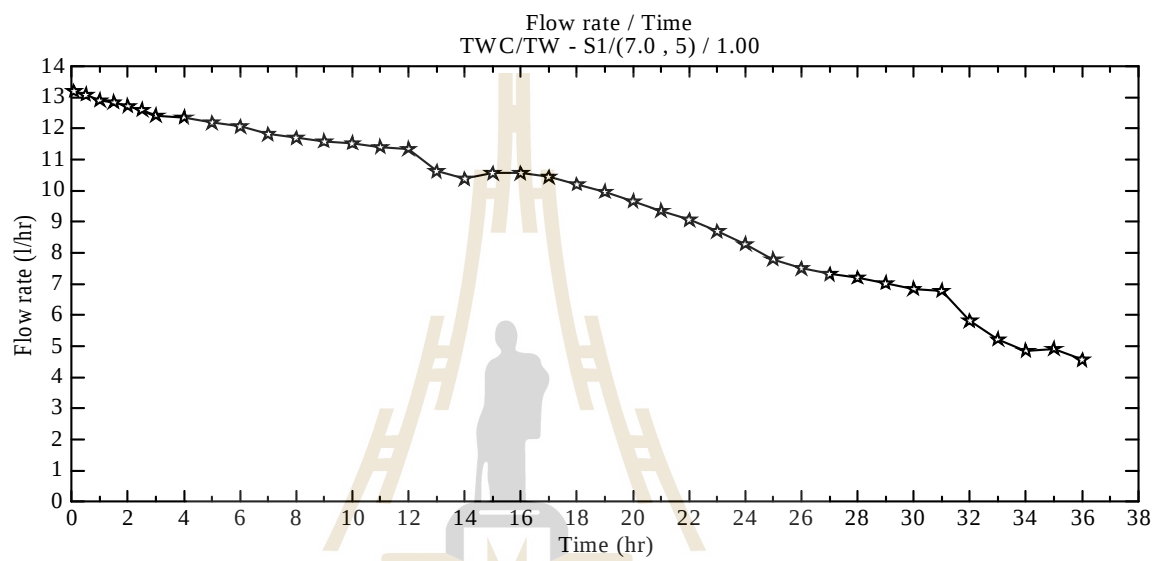












ผลการเติมน้ำที่มีค่า pH ประมาณ 7.0 และมีค่าความขุ่นแปรเปลี่ยนที่ 50, 20, 15, 10 และ 5 NTU ผ่านหลอดทรายละเอียดที่เฮด 1.00 เมตร สรุปได้ดังตารางที่ 4-1 ดังนี้ ที่ระยะเวลา 5.0 ชั่วโมง หลังการเติมน้ำ อัตราการไหลมีค่าลดลงเหลือ 1.0, 5.2, 7.4, 11.3 และ 12.2 ลิตร/ชั่วโมง สำหรับความขุ่น 50, 20, 15, 10 และ 5 NTU ตามลำดับ และระยะเวลาที่อัตราการไหลลดลงเหลือที่ 1 ลิตร/ชั่วโมง เท่ากับ 4.7, 6.1, 9.5, 33.0 และ > 36 ชั่วโมง สำหรับความขุ่น 50, 20, 15, 10 และ 5 NTU ตามลำดับ การเติมน้ำที่มีความขุ่นประมาณ 5 NTU ที่เฮด 1.00 เมตร สามารถดำเนินการได้นานกว่า 36 ชั่วโมง ดังนั้น งานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลอื่นๆ ภายใต้เงื่อนไขของความขุ่นไม่เกิน 5 NTU

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพการไหลผ่านของทั้ง 5 แบบทดลอง

ความขุ่น (NTU)	50	20	15	10	5
อัตราการไหลชั่วโมงที่ 5.0 (ลิตร/ชั่วโมง)	1.0	5.2	7.4	11.3	12.2
รวมชั่วโมงที่เต็มได้เมื่อลดลงเหลือ 1 ลิตร/ชั่วโมง	4.7	6.1	9.5	33.0	>36

4.2 กลุ่มทดลองน้ำบาดาล/น้ำประปา (GWC/TW)

4.2.1 การทดลองในหลอดทรายละเอียด (S1) อิ่มตัวด้วยน้ำบาดาล และเติมด้วยน้ำประปา ที่มีค่า pH ประมาณ 7 และค่าความขุ่น <1 NTU ภายใต้ระดับเฮดต่างกัน 4 ระดับ คือ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 เมตร

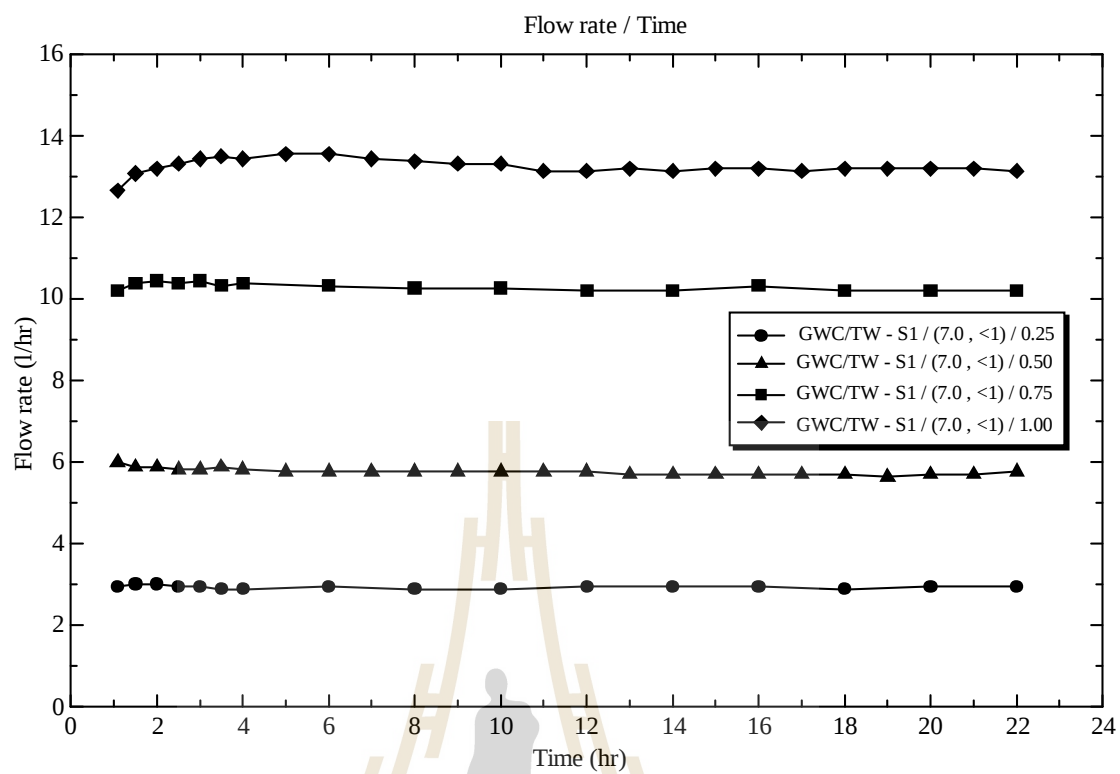
4.2.1.1 GWC/TW-S1/(7.0,<1)/0.25

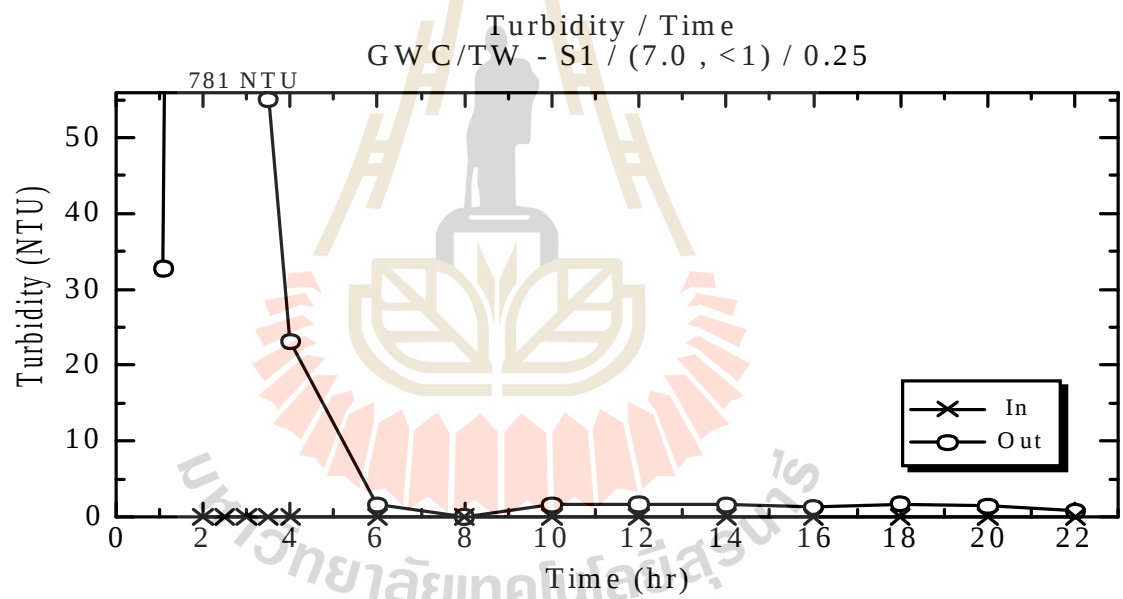
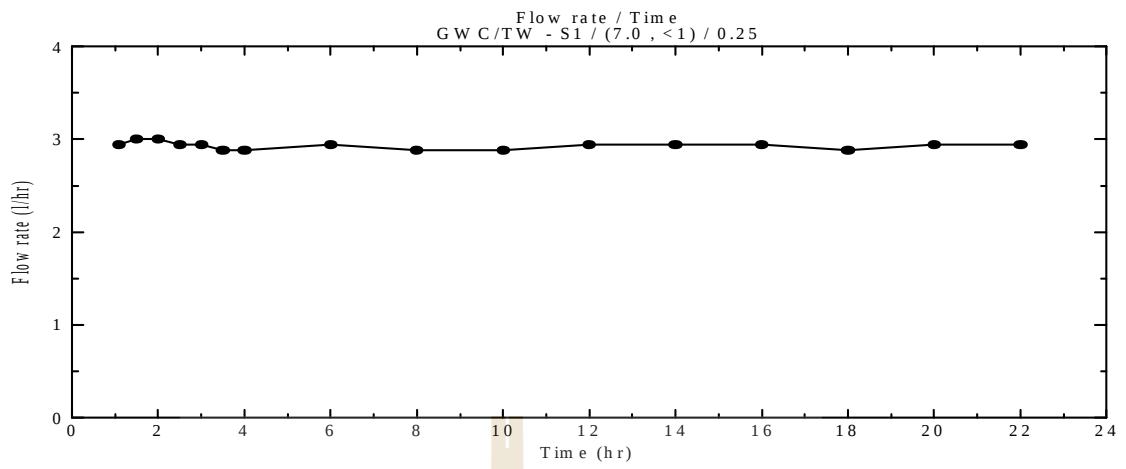
4.2.1.2 GWC/TW-S1/(7.0,<1)/0.50

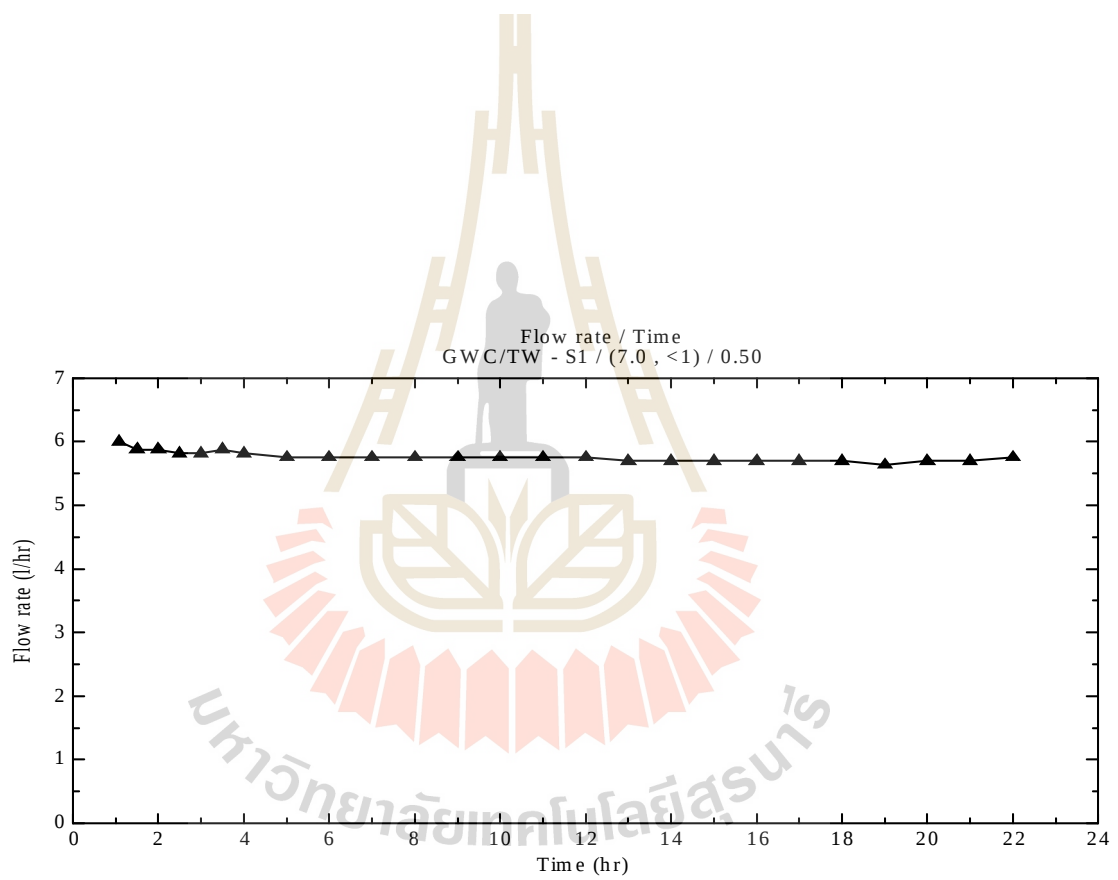
4.2.1.3 GWC/TW-S1/(7.0,<1)/0.75

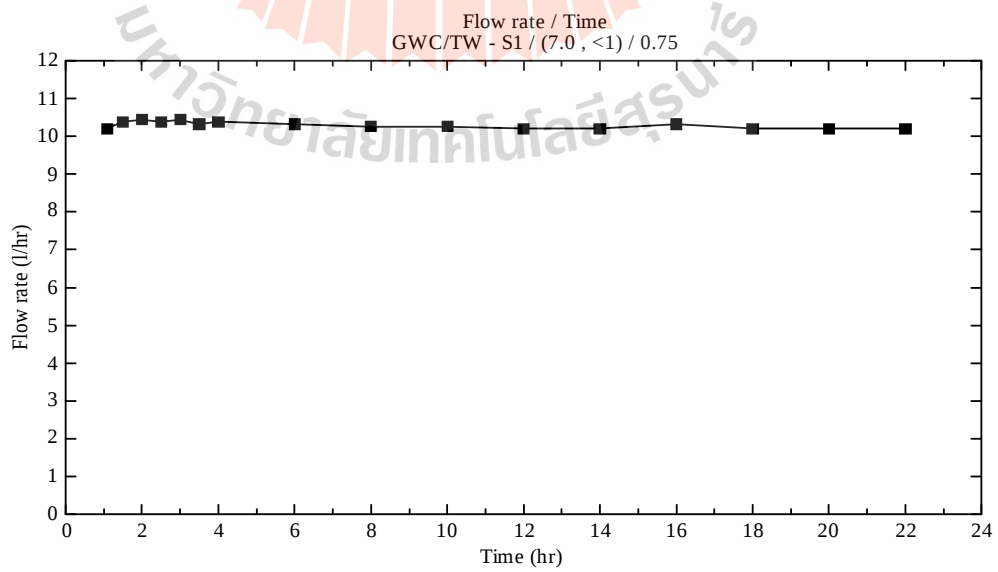
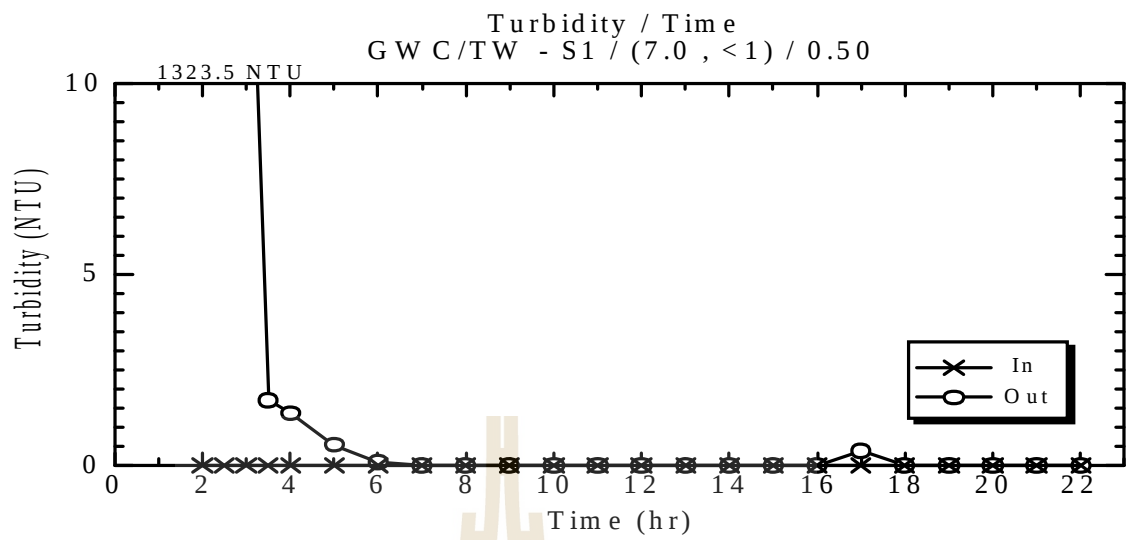
4.2.1.4 GWC/TW-S1/(7.0,<1)/1.00

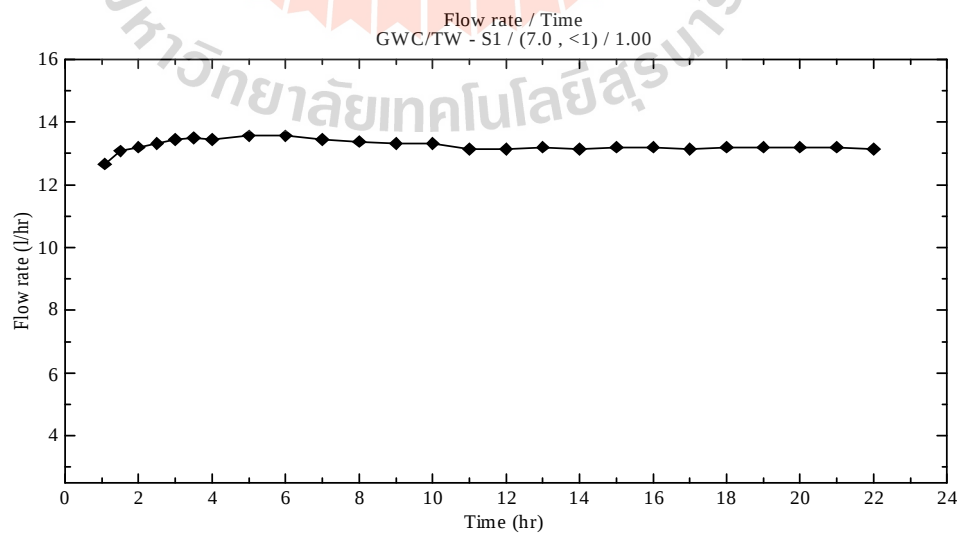
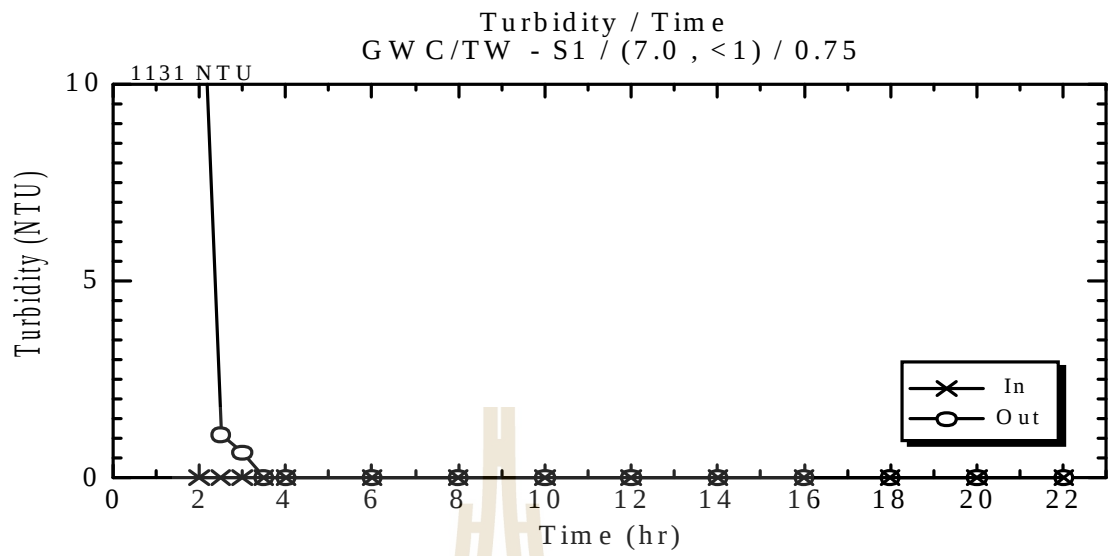
รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบของการทดสอบที่เฮดระดับน้ำต่างกัน 4 ค่า ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

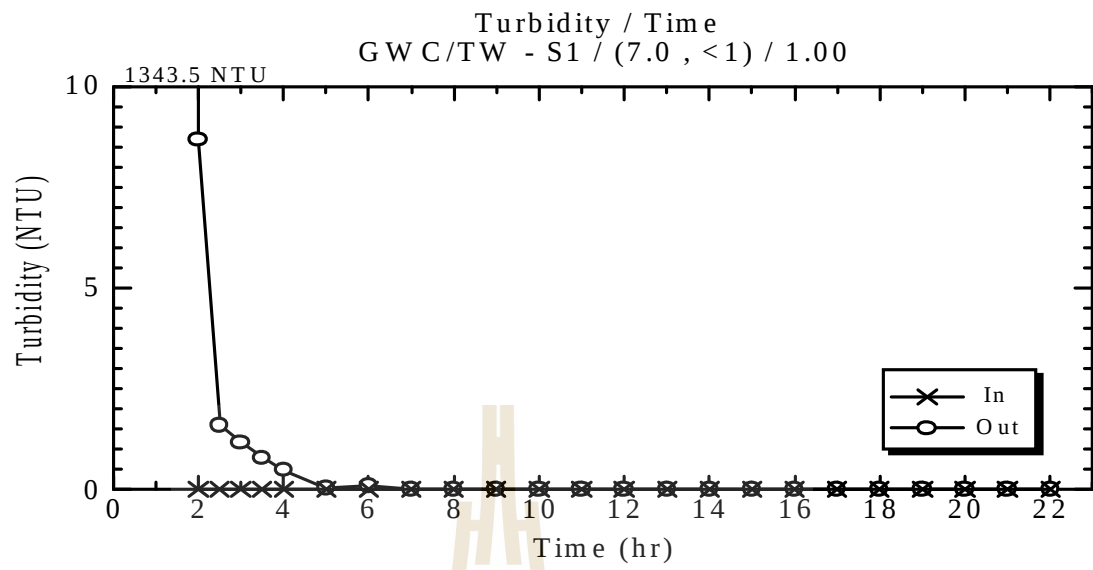




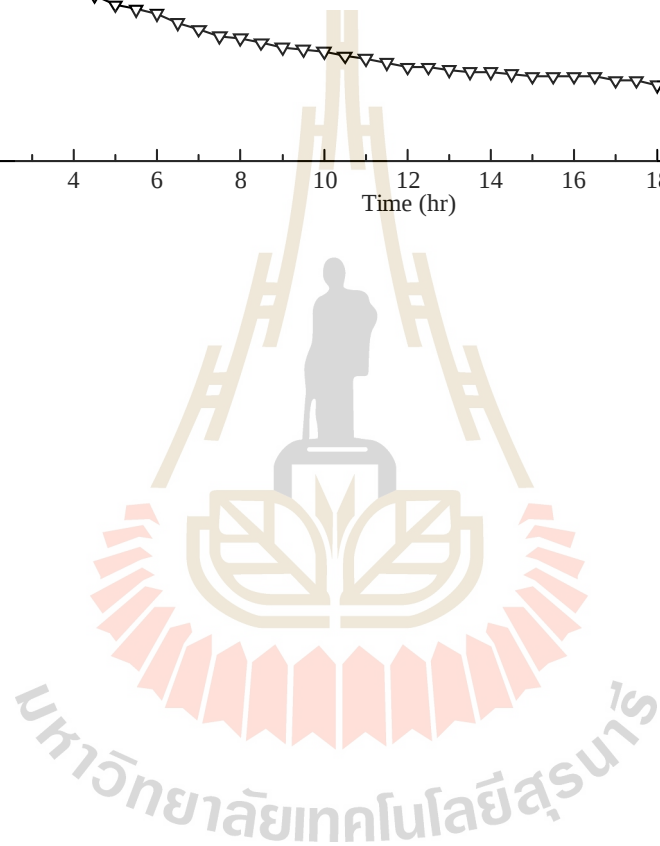
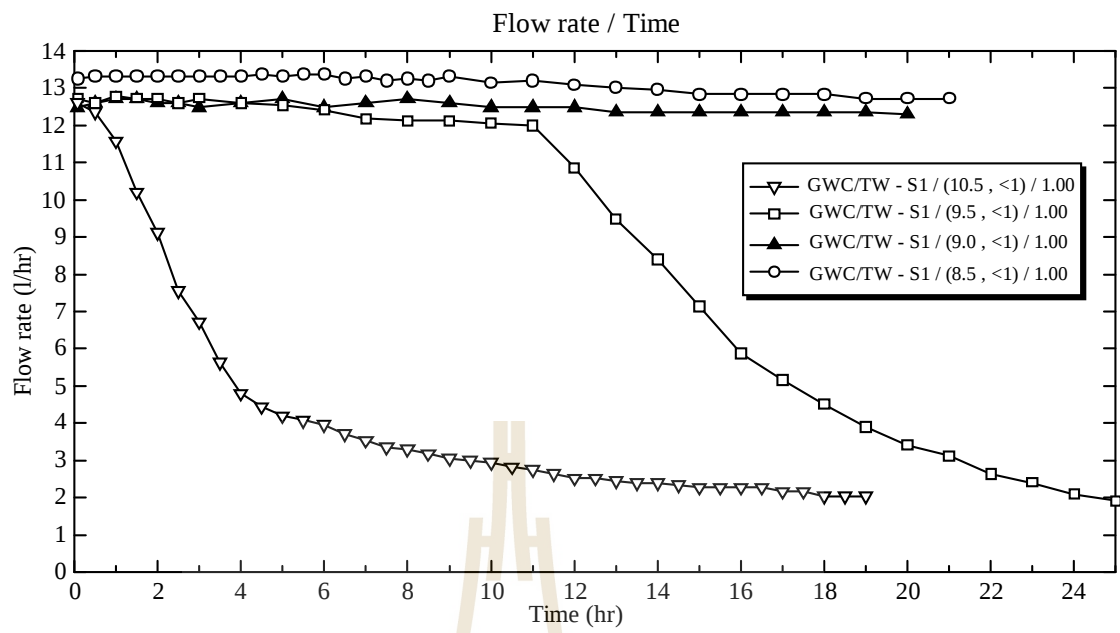


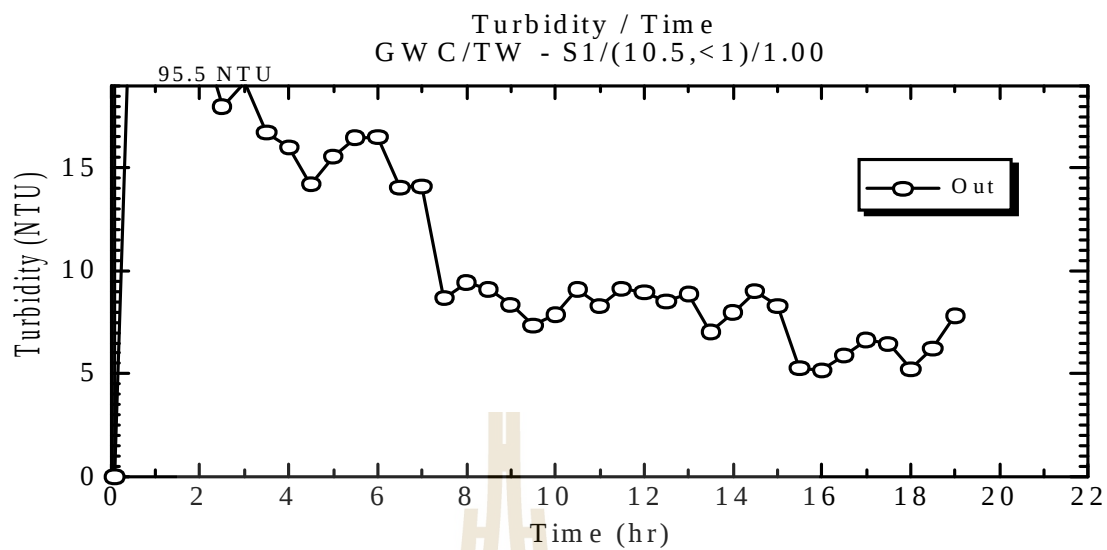






	เขต 0.25 ม.	เขต 0.50 ม.	เขต 0.75 ม.	เขต 1.00 ม.	K เฉลี่ย
K (ชม/วินาที)	0.038	0.036	0.042	0.041	0.039



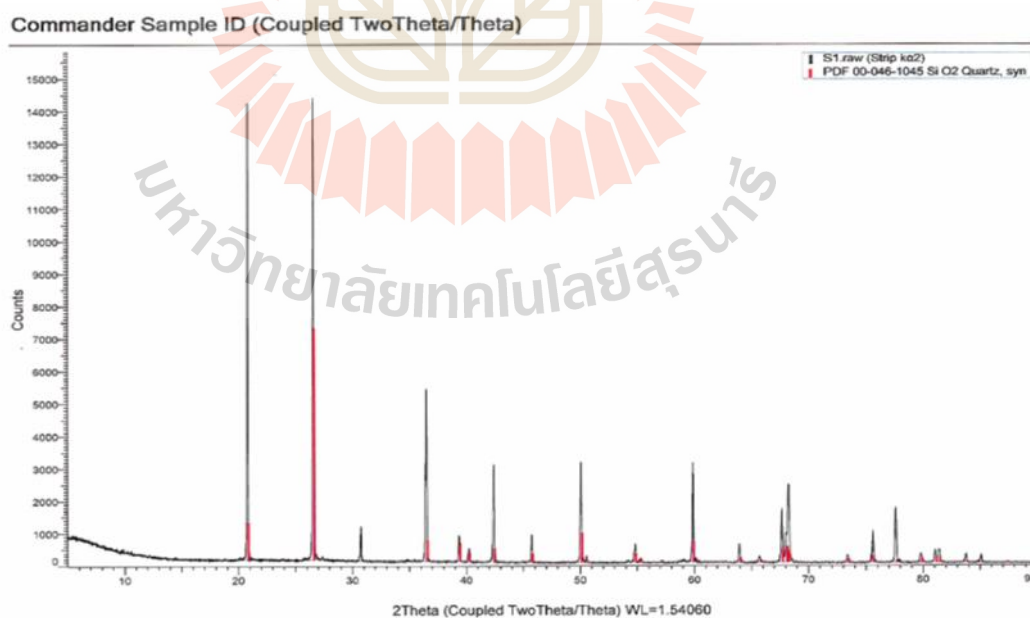


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.25 การดูดซับจากสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต(ตะกอนสีขาว)ในน้ำเดิม

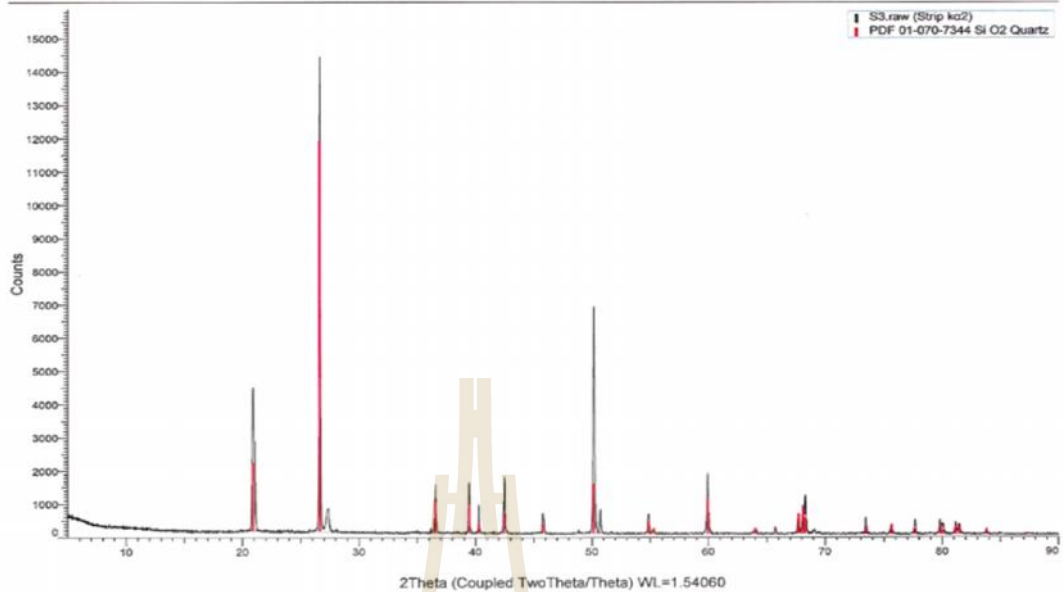
ดำเนินการวิเคราะห์ XRD ในตัวอย่างทราย S1 และ S3 พบว่าประกอบด้วยแร่ควอตซ์ (SiO_2) ทั้งหมด ไม่มีแร่ชนิดอื่นปะปน (รูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27) ทั้งนี้ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ทราย S2 เพราะเป็นทรายจากแหล่งเดียวกันกับทราย S1 ซึ่งประกอบด้วยชนิดแร่แบบเดียวกัน



รูปที่ 4.26 ผลวิเคราะห์ XRD ทราย S1

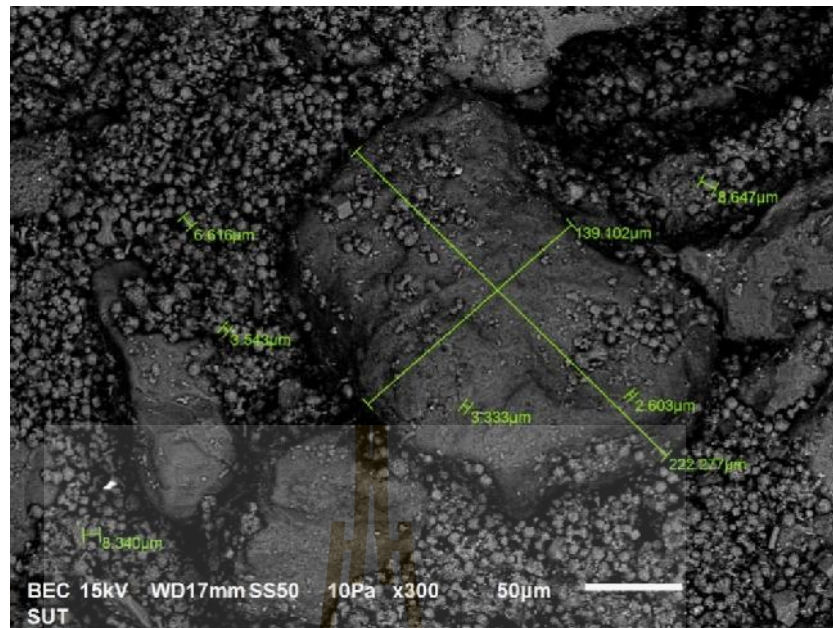
รูปที่ 4.26 ผลวิเคราะห์ XRD ทราย S1

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

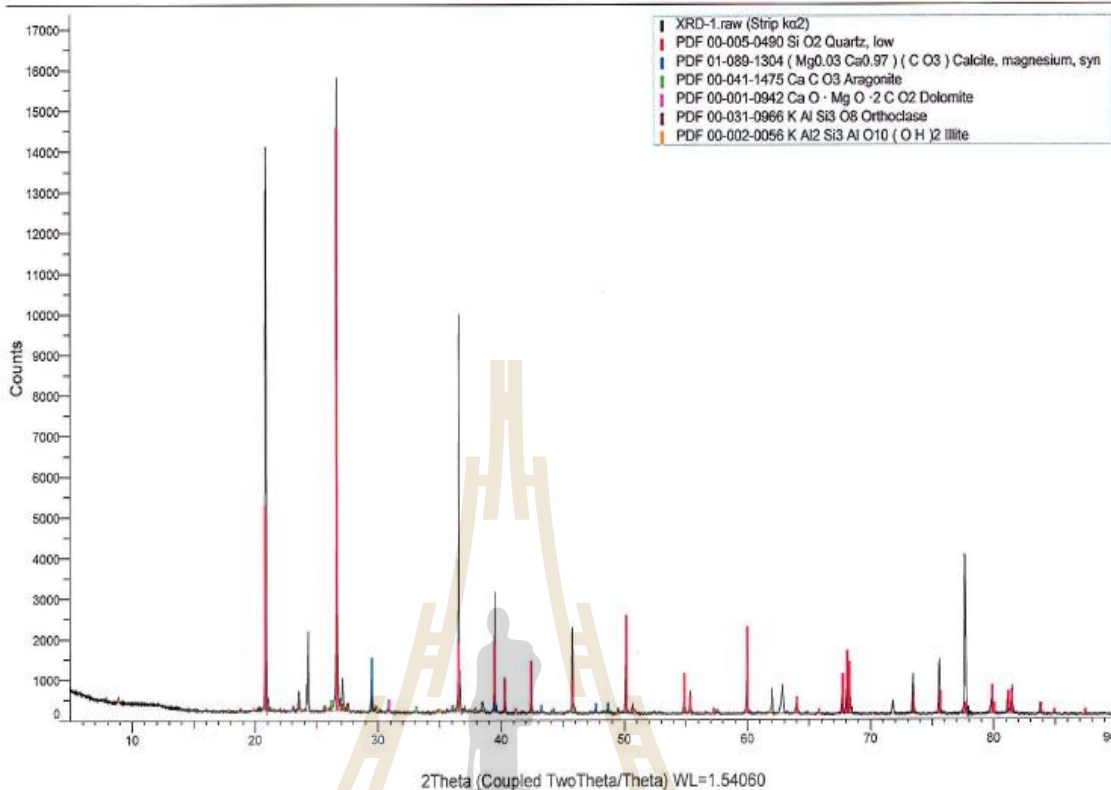


ผู้จัดทำ: ศศินา ๐๖๐๖๖

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



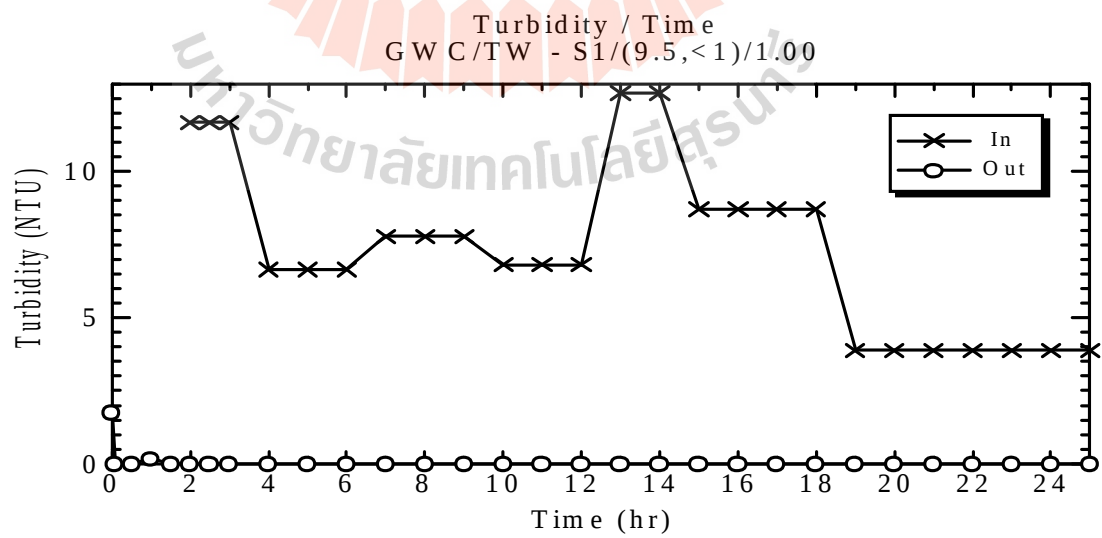
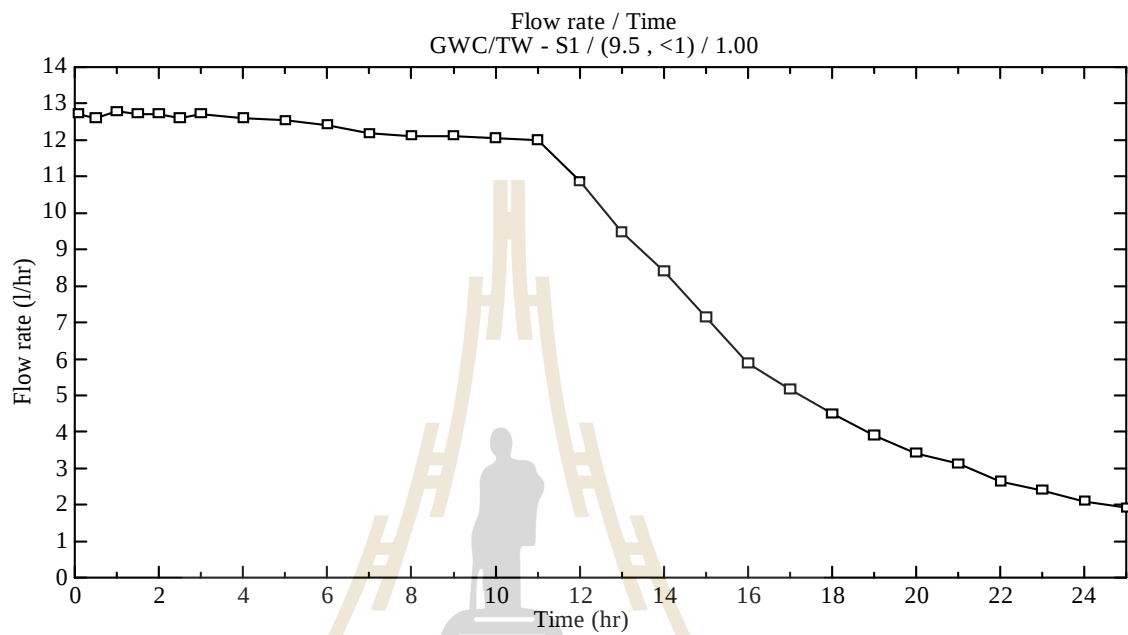
Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

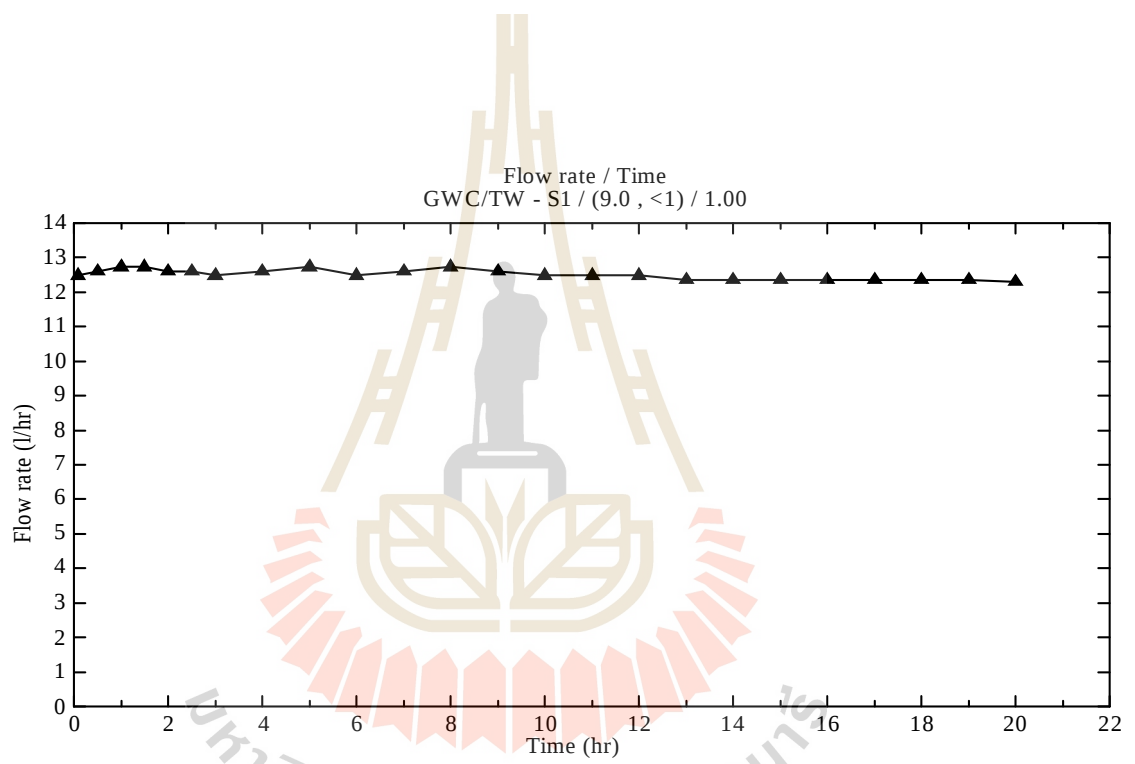


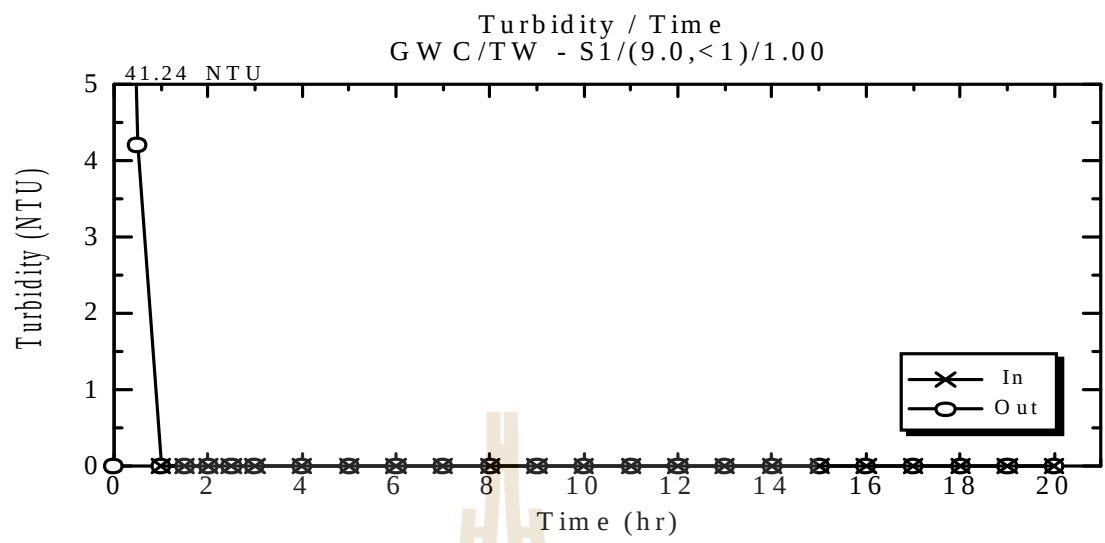
รูปที่ 4.30 ผลวิเคราะห์ตะกอนแร่ ด้วยวิธี XRD

ผลวิเคราะห์น้ำทางเคมีพบว่าน้ำประปาที่ใช้เดิมหลังจากปรับค่า pH เป็น 10.5 แล้ว ปริมาณแคลเซียมลดลงจาก 32 มก./ลิตร เหลือ 0.8 มก./ลิตร และไบคาร์บอเนตลดลงจาก 101 มก./ลิตร เหลือ 0 มก./ลิตร (ตารางที่ 4-3) ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าตะกอนส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารแคลเซียมคาร์บอเนต

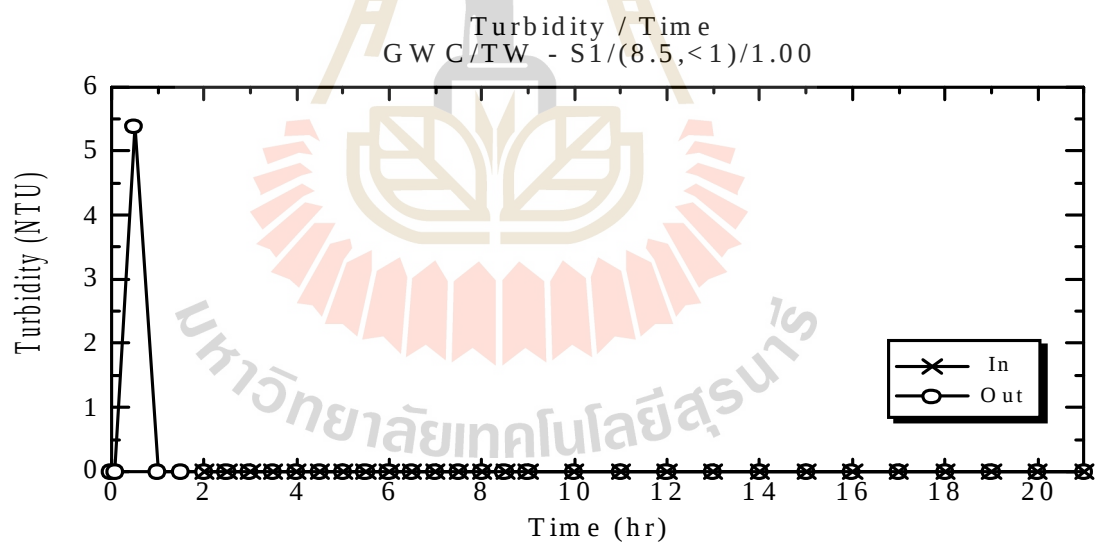
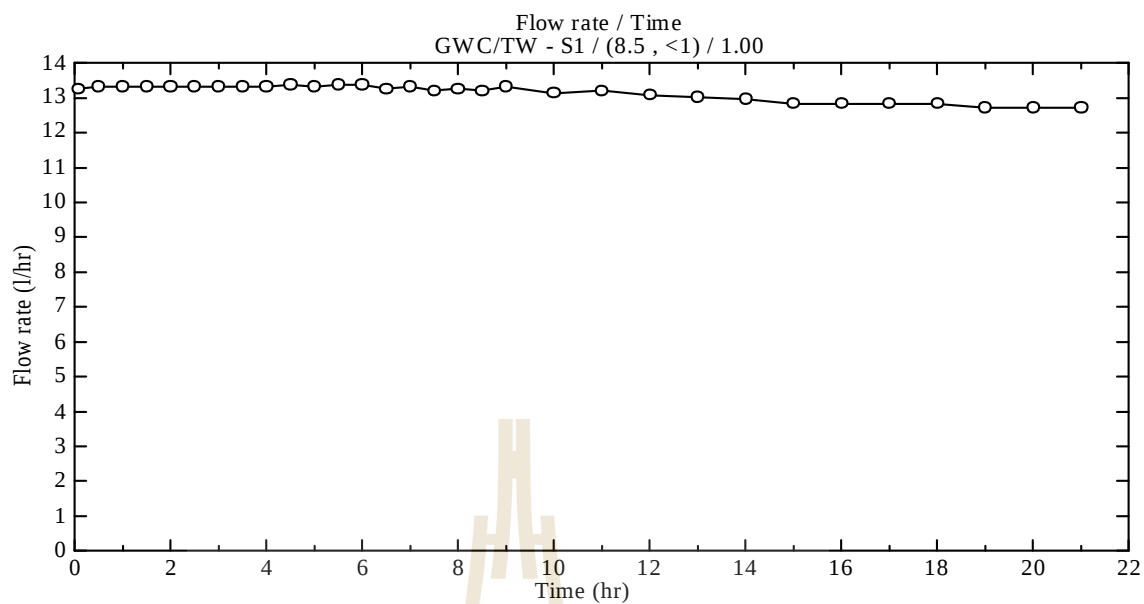
หมายเลขวิเคราะห์/ชื่อตัวอย่าง	57270/1	57270/2	57281				เกณฑ์ที่กำหนด	
คุณลักษณะทางฟิสิกส์	น้ำประปา	น้ำประปาปรับ pH	น้ำบาดาลBKK-Aq				เหมาะสม	อนุโลมสูงสุด
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	7.04	10.36	6.73				7.0 - 8.5	6.5 - 9.2
ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Electrical Conductivity)**	344	479	19,540				-	-
ความขุ่น (Turbidity) หน่วยความขุ่น,NTU.	0.65	3.0	0.60				5	20
สี (Color) หน่วย: แพลทินัม-โคบอลต์	5	5	120				5	15
คุณลักษณะทางเคมี	ผลวิเคราะห์ หน่วย มิลลิกรัม/ลิตร (mg/L)*						เกณฑ์ที่กำหนด	
							เหมาะสม	อนุโลมสูงสุด
แคลเซียม (Calcium,Ca)	32	0.8	328				-	-
แมกนีเซียม (Magnesium,Mg)	7.8	7.3	433				-	-
โซเดียม (Sodium,Na)	26	56	3,565				-	-
โพแทสเซียม (Potassium,K)	3.7	4.0	36.8				-	-
เหล็ก (Iron,Fe)	0.06	0.02	80				0.5	1.0
แมงกานีส (Manganese,Mn)	0.00	0.00	5.8				0.3	0.5
ทองแดง (Copper,Cu)	0.00	0.01	0.00				1.0	1.5
ซิลิกา (Silica,SiO ₂)	8.9	9.4	4.3				-	-
คลอไรด์ (Chloride,Cl)	27	28	6,571				250	600
ซัลเฟต (Sulfate, SO ₄)	48	47	933				200	250
ไฮดรอกไซด์ (Hydroxide,OH ⁻)	0	17	0				-	-
คาร์บอเนต (Carbonate, CO ₃) p-Alkalini	0	9	0				-	-
ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate, HCO ₃) m-A	101	0	190				-	-
ไนไตรท์ (Nitrite,NO ₂)	0.02	0.01	0.03				3	3*
ไนเตรต (Nitrate,NO ₃)	1.8	3.2	2.1				45	45
ฟลูออไรด์ (Fluoride,F)	0.23	0.26	0.66				0.7(1.5*)	1.0
ปริมาณสารละลายทั้งหมด (Total Dissolved Solids, TDS)	205	183	12,100				600	1,200
ความกระด้างทั้งหมด (หินปูน) (Total Hardness as CaCO ₃)	112	32	2,600				300	500
ความกระด้างถาวร (Non Carbonate Hardness as CaCO ₃)	29	32	2,440				200	250
องค์ประกอบของน้ำ Water Type	Calcium Bicarbonate Sodium Hydroxide Sodium Chloride							
Total Cation (meq/L)	3.461	3.193	208.064					
Total Anion (meq/L)	3.457	3.163	207.994					
วันที่ตรวจวิเคราะห์	4 ส.ค. 57	4 ส.ค. 57	14 ส.ค. 57					







มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ประสิทธิภาพการไหลผ่านลดลง ของทั้ง 4 แบบทดลอง สรุปได้ตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการไหลผ่านลดลงอย่างมีนัย เมื่อน้ำเดิมมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 9.5

	pH 10.5	pH 9.5	pH 9.0	pH 8.5
K_a (ชม/วินาที)	0.006	0.014	0.038	0.040
$[(K_0-K_a)/K_0] \times 100$	84.62 %	64.10 %	2.56 %	-2.56 %

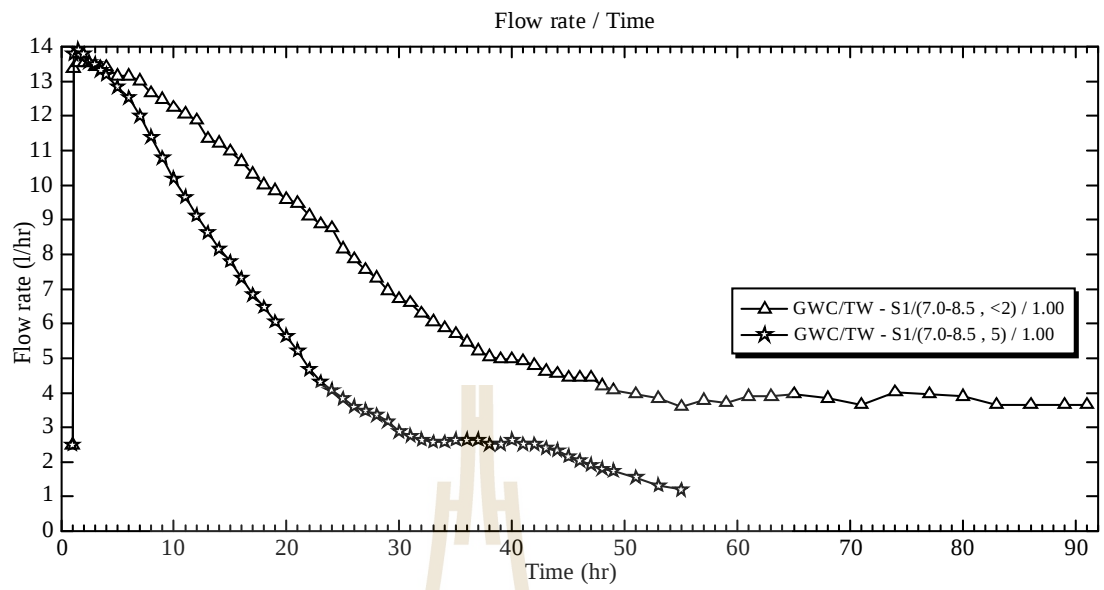
ผลทดสอบสรุปได้ว่าน้ำประปาที่มีค่าความขุ่น <1 NTU โดยมีค่า pH ในช่วง 10.5 และ 9.5 เดิมผ่านหลอดทรายละเอียดอิมตัวด้วยน้ำบาดาลที่เฮด 1.00 เมตร เป็นระยะเวลา 19.0 ชั่วโมง จะมีอัตราการไหลลดลงเหลือ 2.0 และ 4.5 ลิตร/ชั่วโมง และประสิทธิภาพการไหลผ่านลดลงร้อยละ 84.62 และ 64.10 ตามลำดับ ส่วนน้ำเดิมที่มีค่า pH น้อยกว่า 9.0 เมื่อทดสอบเป็นระยะเวลา 21.0 ชั่วโมง ไม่พบการอุดตันอย่างมีนัย แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของน้ำเดิมที่มีค่า pH เท่ากับ 9.0 และ 8.5 พบว่าการใช้น้ำเดิมที่มีค่า pH เท่ากับ 8.5 มีประสิทธิภาพสูงกว่า ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบต่อ โดยกำหนดค่า pH ระหว่าง 7 ถึง 8.5 ในหัวข้อถัดไป

4.2.3 ทดลองในหลอดทรายละเอียด (S1) ที่อิมตัวด้วยน้ำบาดาล และเดิมด้วยน้ำประปา ที่มีค่า pH เท่ากับ 7.0 - 8.5 และค่าความขุ่นเท่ากับ 5 และ <2 NTU ภายใต้เฮดคงที่ที่ 1.00 เมตร

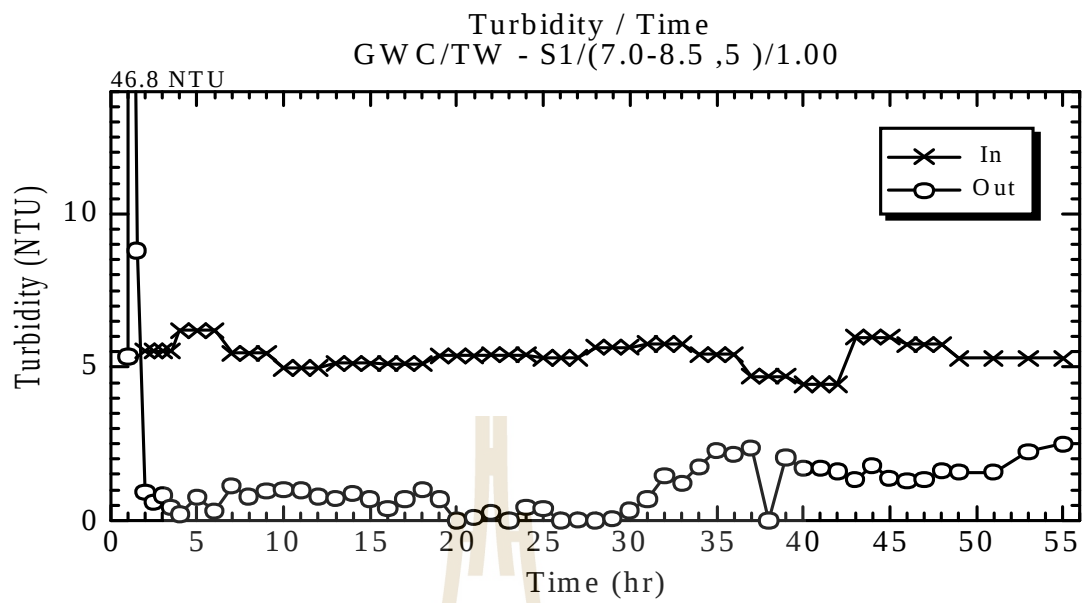
4.2.3.1 GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/1.00

4.2.3.2 GWC/TW-S1/(7.0-8.5,<2)/1.00

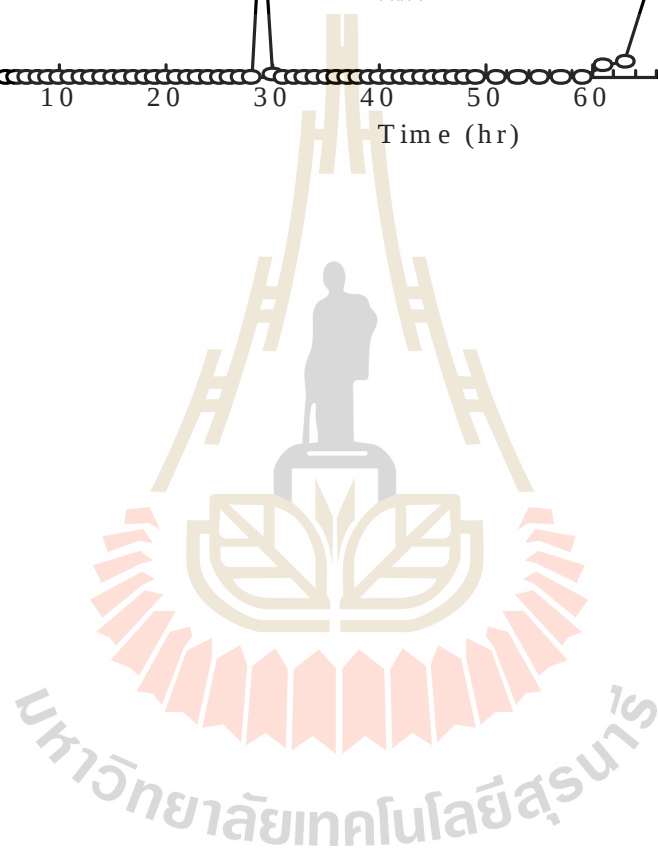
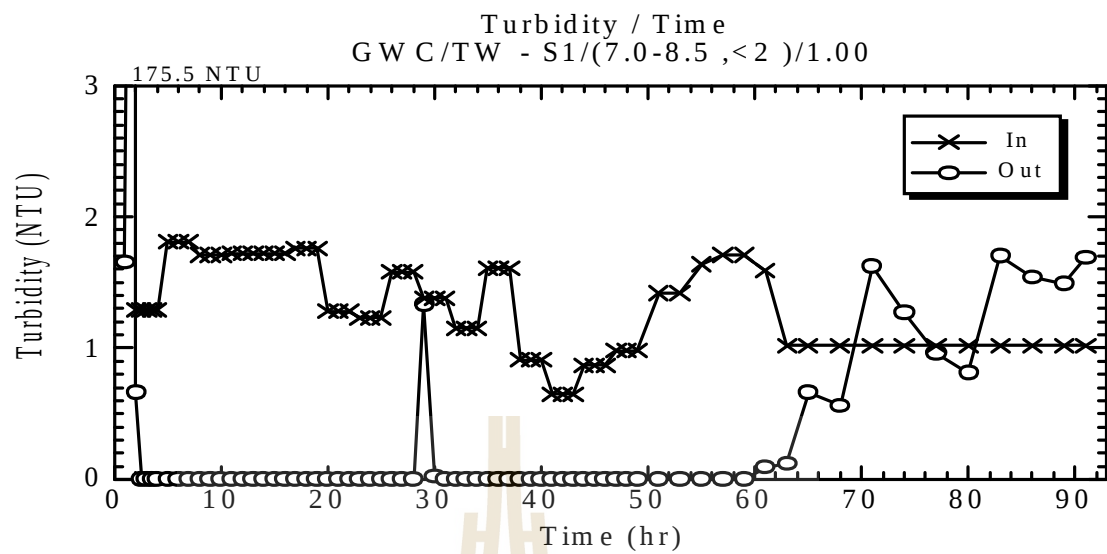
รูปที่ 4.37 แสดงผลทดลองของแต่ละแบบทดลองซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้



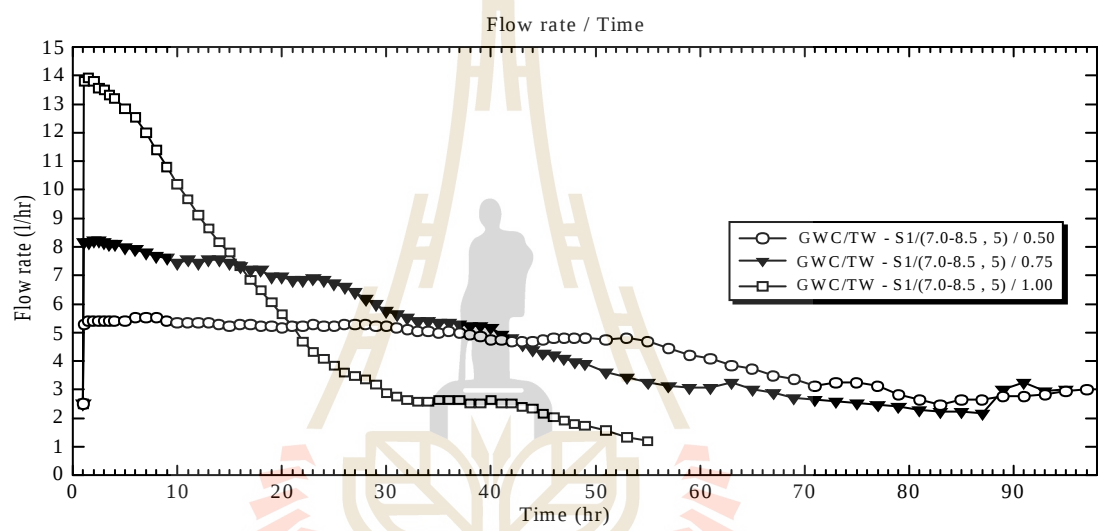
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



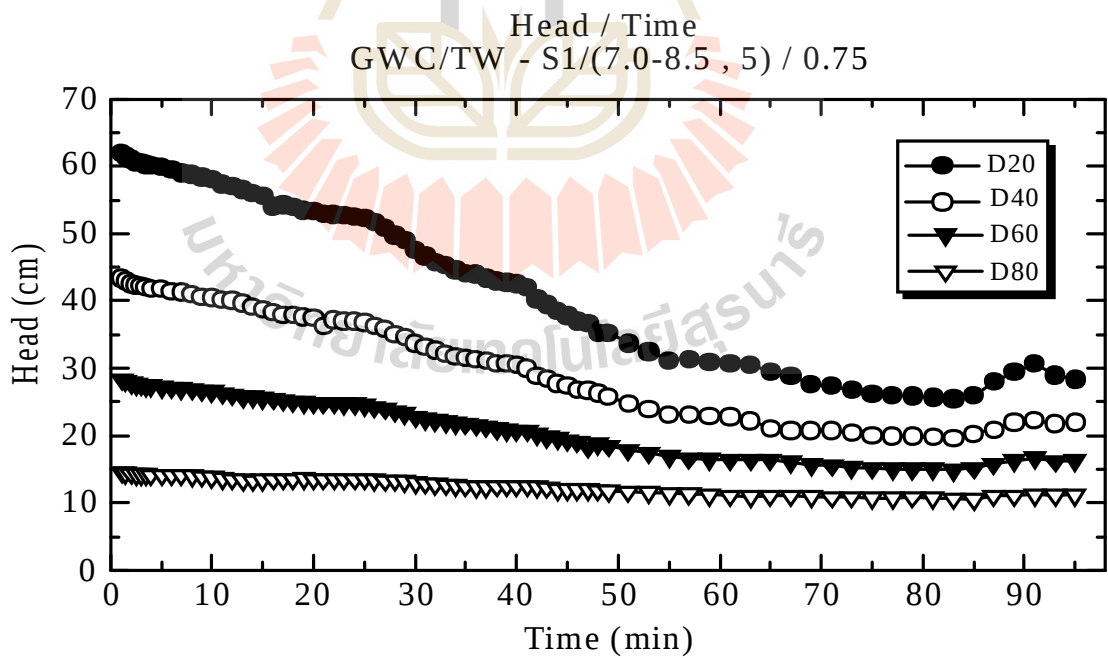
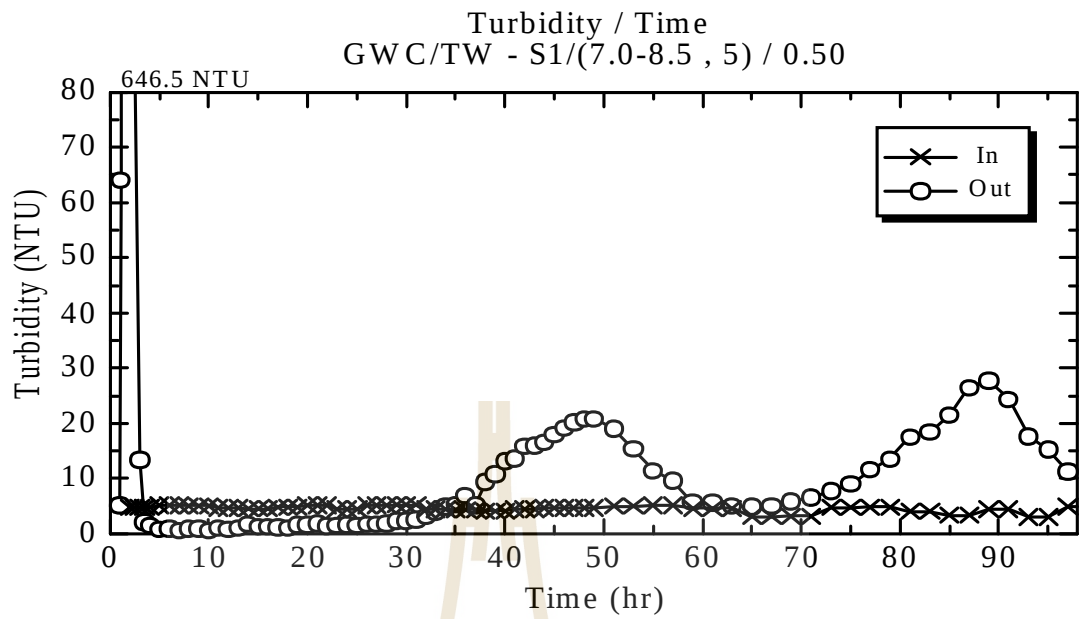
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

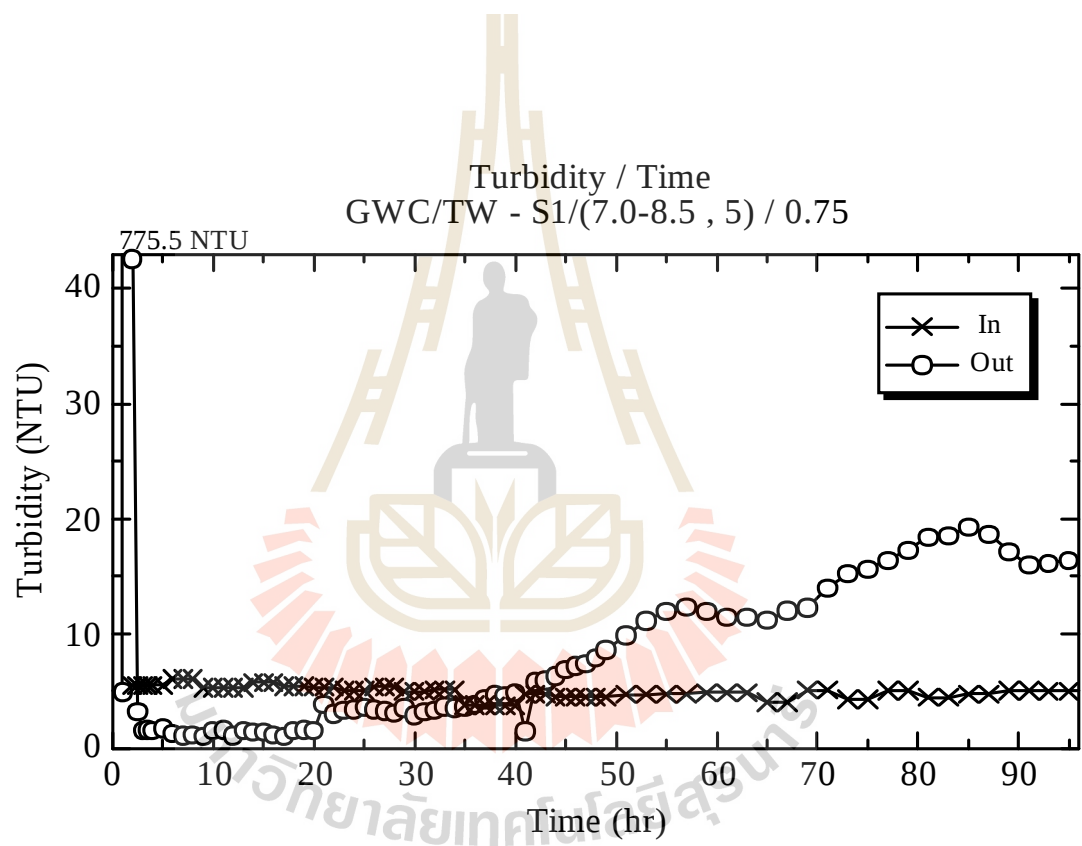


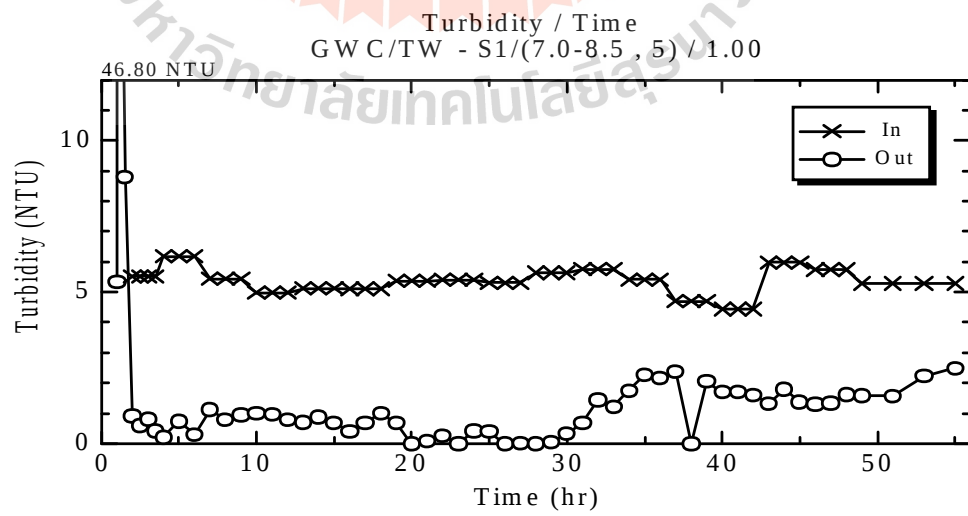
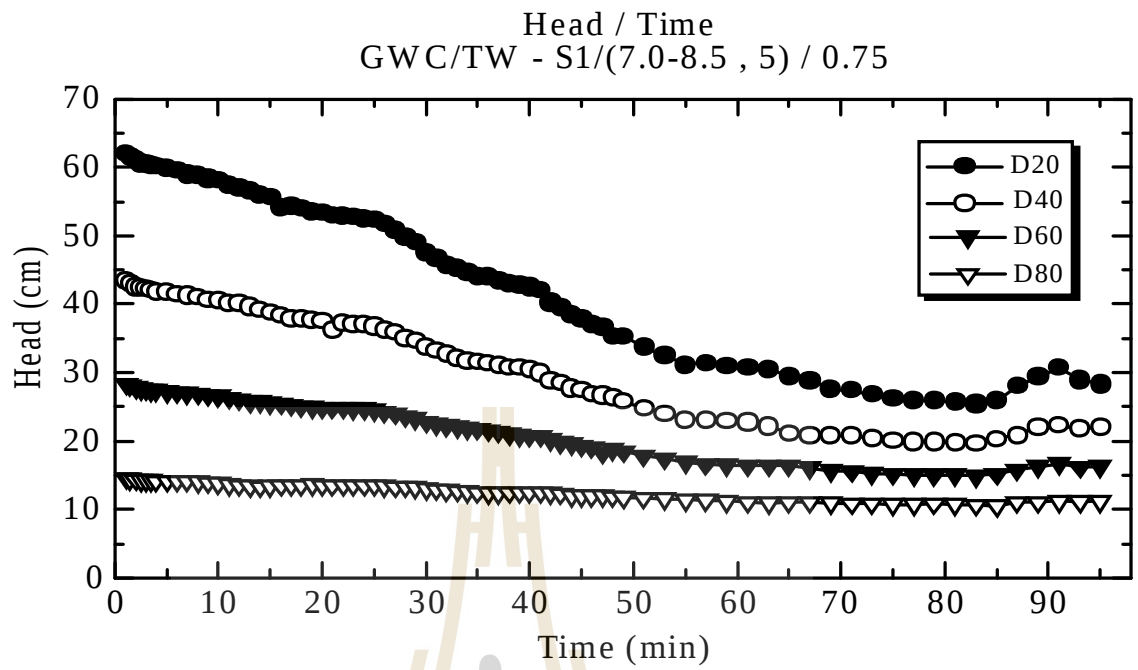
ความขุ่น (NTU)	5	<2
K_a (ชม/วินาที)	0.004	0.011
$[(K_0-K_a)/K_0] \times 100$	89.74 %	71.80 %
ปริมาณน้ำเดิมรวมที่ 55 ชั่วโมง (ลิตร)	278.76	422.28

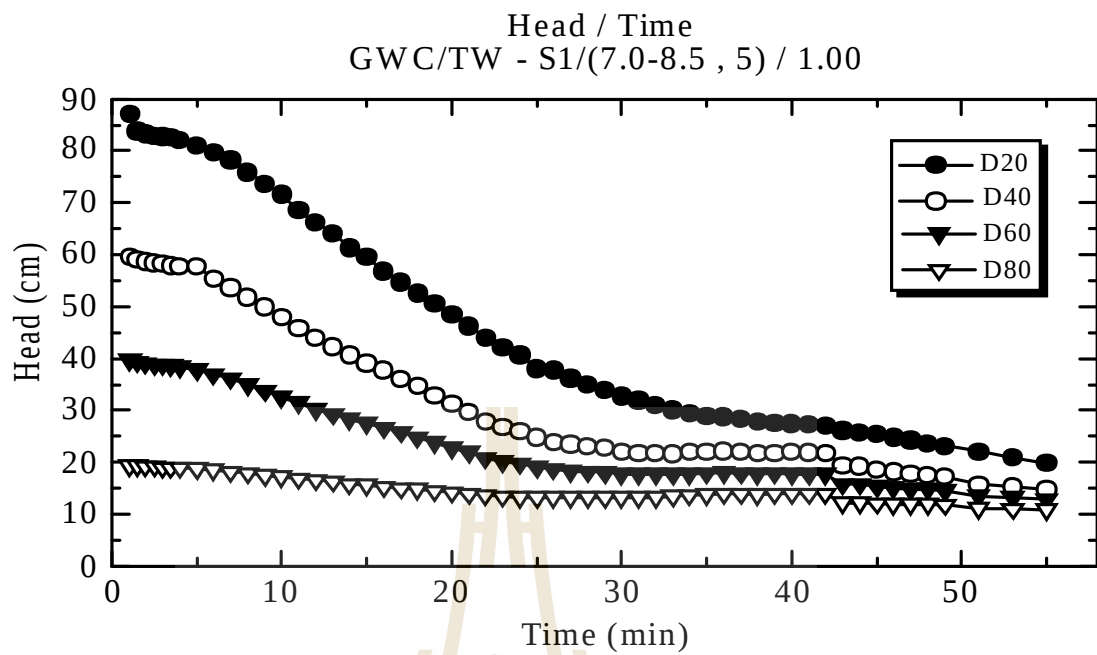


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี









เฮด (ม)	0.50	0.75	1.00
Ka (ซม/วินาที)	0.015	0.010	0.004
$[(K_0 - K_a)/K_0] \times 100$	61.54%	74.36 %	89.74 %
ระยะเวลาเติมน้ำต่อเนื่อง (ชม.)	97	95	56
ปริมาณน้ำเติมรวม (ลิตร)	410.7	432.34	278.76

L = ความยาวของหลอดทรายที่น้ำไหลผ่าน
 ดังนั้น ค่า hydraulic gradient ของแต่ละชุดการเติม สรุปได้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่า hydraulic gradient ของชุด 0.50, 0.75 และ 1.00 เมตร

ชุด (ม)	0.50	0.75	1.00
hydraulic gradient	0.57	0.85	1.14

บทสรุปของผลทดลองแสดงดังนี้ น้ำประปาที่มีค่า pH ระหว่าง 7.0-8.5 ความขุ่น 5 NTU เติมผ่านหลอดทรายละเอียดอิมตัวด้วยน้ำบาดาลที่ชุด 1.00 เมตร พบว่าระยะเวลาการเติมน้ำอย่างต่อเนื่องได้เพียง 56 ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่าระยะเวลาการเติมน้ำของ ชุด 0.50 และ 0.75 เมตร เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำเติมรวมระหว่างการเติมน้ำที่ชุด 0.50 กับ 0.75 เมตร แล้วการเติมน้ำของชุดที่ 0.75 เมตร จะมีปริมาณรวมมากกว่า

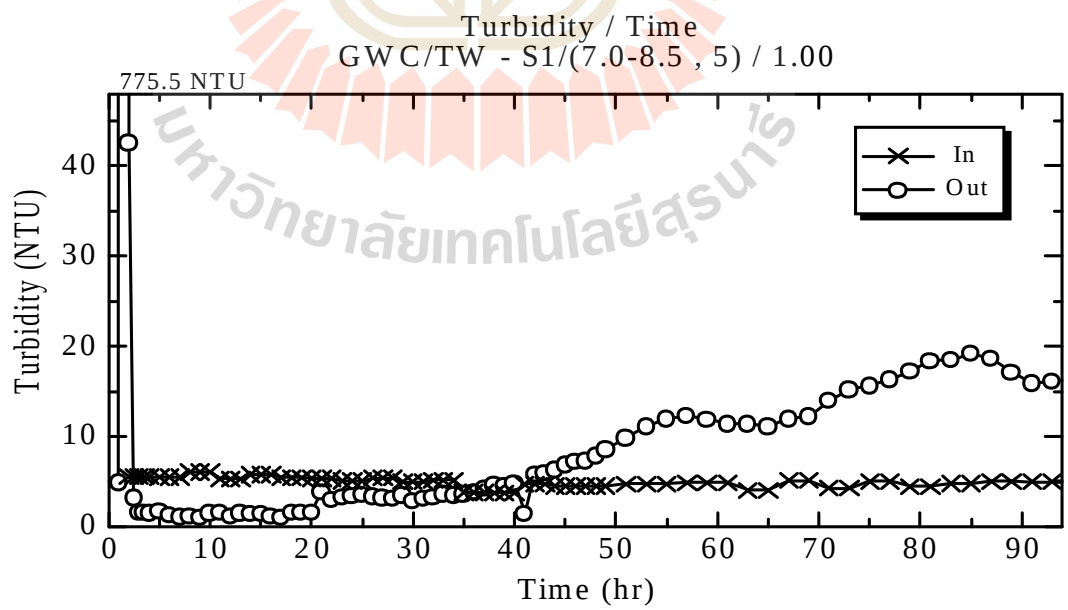
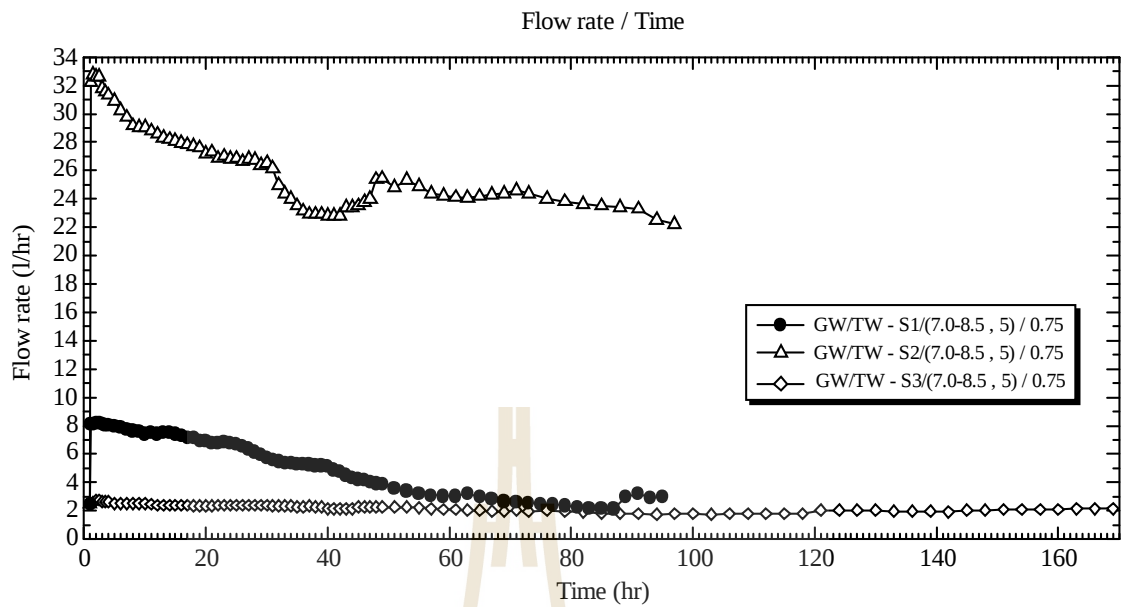
4.2.5 การทดลองในหลอดโดยใช้ทรายขนาดต่างๆ สามขนาด ได้แก่ ทรายละเอียด (S1) ทรายหยาบ (S2) และทรายละเอียดมาก (S3) ซึ่งอิมตัวด้วยน้ำบาดาล และเติมด้วยน้ำประปา ที่มีค่า pH ระหว่าง 7.0 - 8.5 และค่าความขุ่นเท่ากับ 5 NTU ภายใต้ระดับเฮดคงที่เท่ากับ 0.75 เมตร

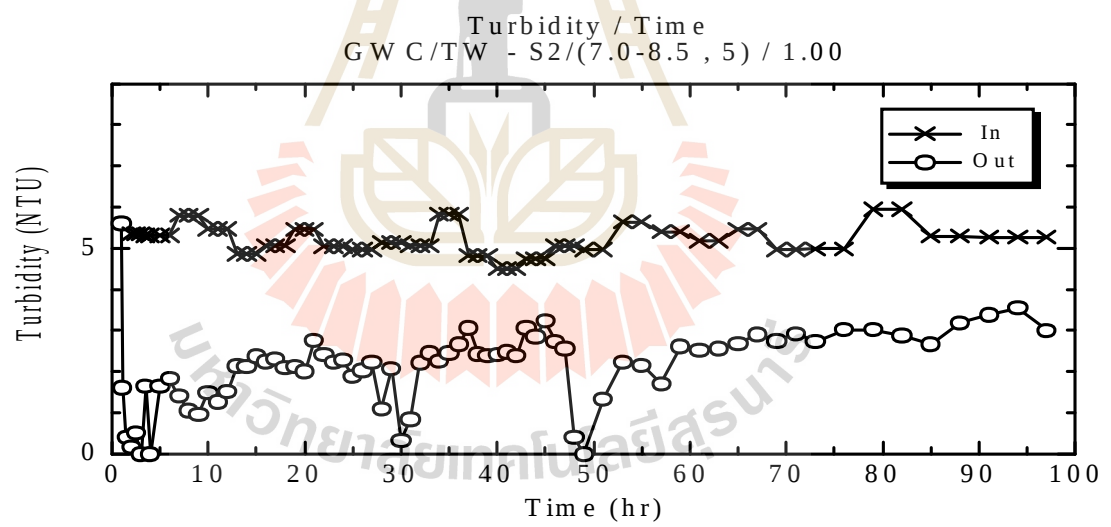
4.2.5.1 GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/0.75

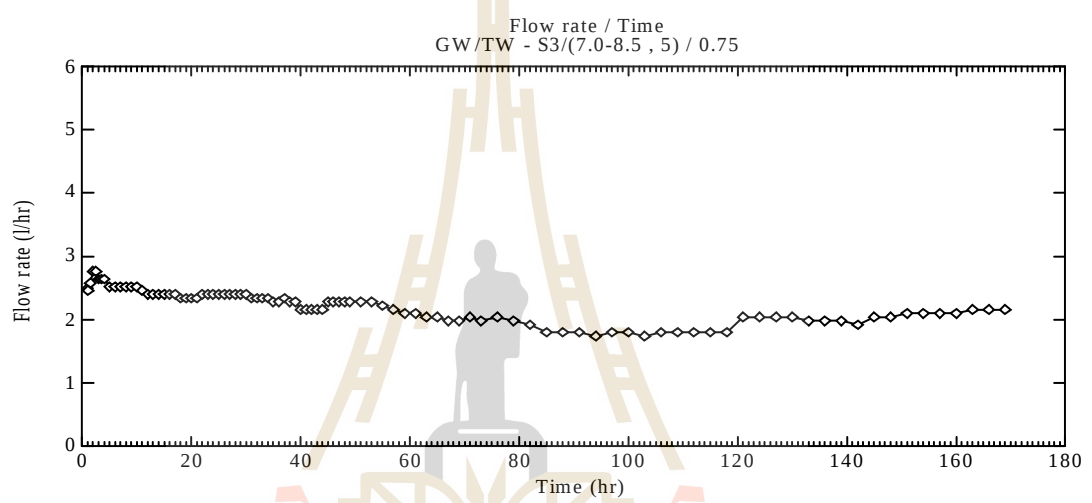
4.2.5.2 GWC/TW-S2/(7.0-8.5,5)/0.75

4.2.5.3 GWC/TW-S3/(7.0-8.5,5)/0.75

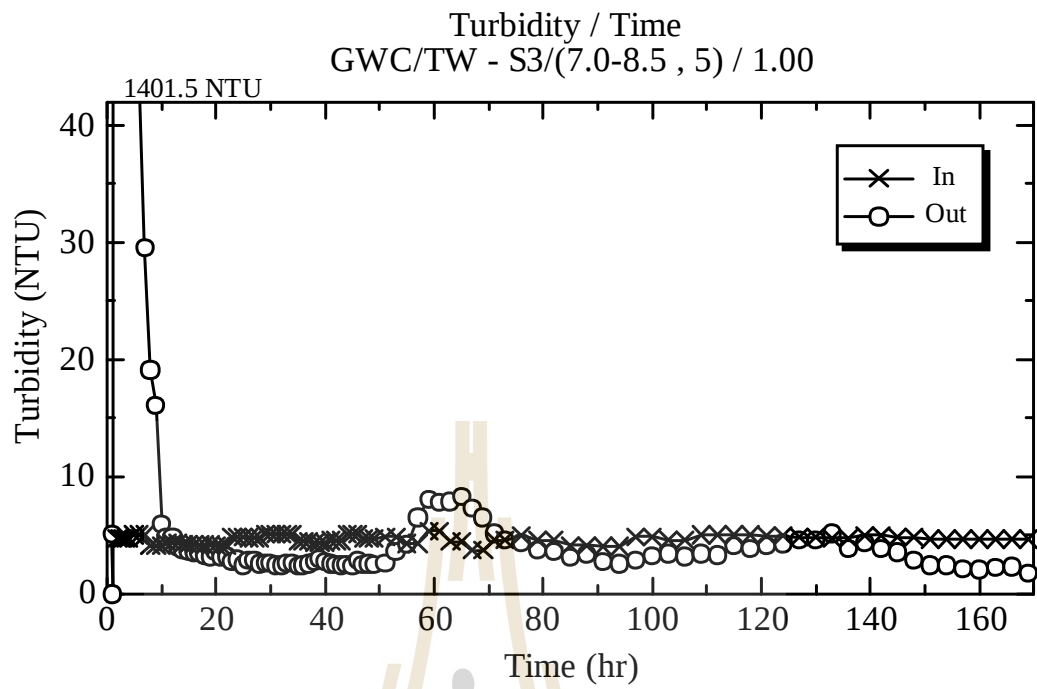
ผลทดลองของแต่ละแบบทดลองได้แสดงในรูปที่ 4-47 และการวิเคราะห์ผลมีรายละเอียดดังนี้



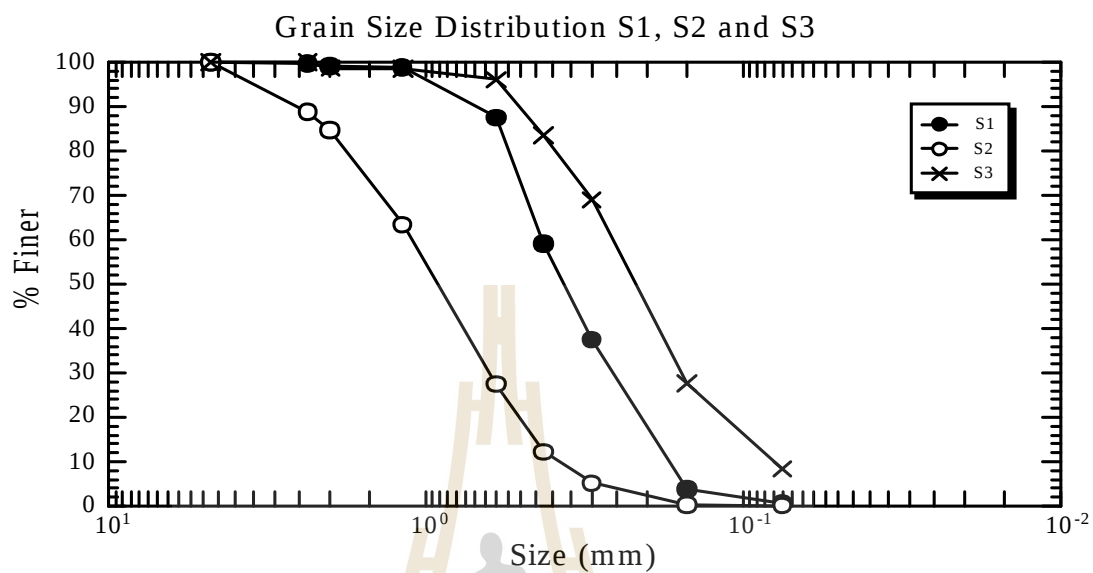




มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ขนาดทราย	S1	S2	S3
ปริมาณน้ำเต็มรวม (ลิตร)	432	2,380	206
อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	3.1	22.2	1.75
ประสิทธิภาพการเติมน้ำโดยเปรียบเทียบ	สูงกว่า S3	สูงสุด	ต่ำสุด



	D ₁₀₀	D ₉₀	D ₈₀	D ₇₀	D ₆₀	D ₅₀	D ₄₀	D ₃₀	D ₂₀	D ₁₀
S1		0.65	0.52	0.47	0.43	0.37	0.31	0.265	0.225	0.18
S2		2.58	1.77	1.37	1.1	0.92	0.78	0.635	0.51	0.39
S3		0.49	0.38	0.31	0.26	0.225	0.19	0.16	0.12	0.08

ขนาดทราย

S1

S2

S3

C_u

2.39

2.82

3.25

ค่าความเร็ววิกฤต (Critical velocity, V_p) คำนวณได้จาก จากสมการ Ohno et. al., $V_p = 2.25d^{1.94}$

เมื่อ V_p = ความเร็ววิกฤต (ชม./วินาที)

d = ขนาดเม็ดดิน (มม) ที่ D_{25}

จากกราฟในรูปที่ 4.52 ค่า D_{25} ของ S1 = 0.24 มม. S2 = 0.55 มม. และ S3 = 0.15 มม. ดังนั้น ค่าความเร็ววิกฤตของทรายแต่ละขนาด สรุปได้ตามในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณค่าความเร็ววิกฤตของทราย S1, S2 และ S3

ขนาดทราย	S1	S2	S3
V_p (ชม./วินาที)	0.142	0.707	0.056

อัตราการไหลตั้งต้นที่ 65 นาที ของการทดลอง S1, S2 และ S3 เท่ากับ 8.2, 32.2 และ 2.4

จากสมการ $V = Q/A$

V = ค่าความเร็วเฉลี่ย

Q = อัตราการไหลเฉลี่ย

A = พื้นที่หน้าตัดของหลอดทราย = 78.57 ซม^2

ดังนั้น ค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำเดิมที่ผ่านทรายแต่ละขนาด สรุปได้ตามในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำเดิมผ่านทราย S1, S2 และ S3

ขนาดทราย	S1	S2	S3
ความเร็วเฉลี่ย (ชม./วินาที)	0.029	0.114	0.008

น้ำเดิมผ่านทรายที่อัดแน่นในหลอดทดลองมีค่าความเร็วเฉลี่ยไหลผ่านทรายน้อยกว่าความเร็ววิกฤต ประมาณ 5 ถึง 7 เท่า ซึ่งไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของทราย

ค่า size pore constriction คำนวณได้จากจากสมการ $d_{con} = d_{grain}/6.49$

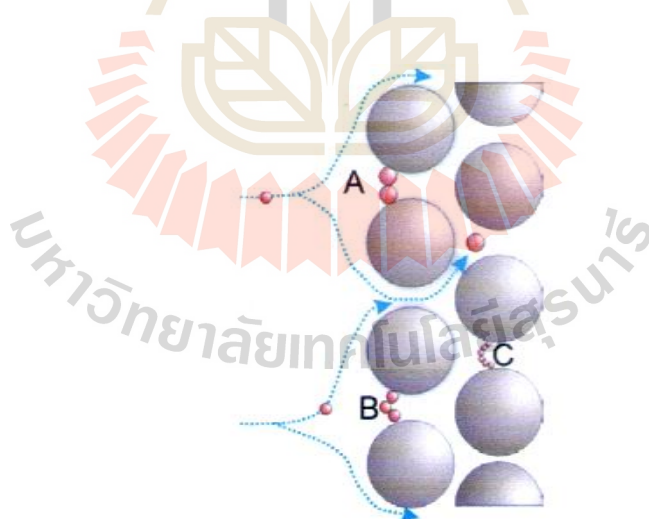
d_{grain} = ขนาดโดยเฉลี่ยของทราย = D_{50}

จากข้อมูลในตารางที่ 4.9 ค่า D_{50} ของ S1 = 0.37 มม. S2 = 0.92 มม. และ S3 = 0.225 มม. ดังนั้น ค่า size pore constriction ของทรายแต่ละขนาด สรุปได้ตามในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการคำนวณค่า size pore constriction ของทราย S1, S2 และ S3

ขนาดทราย	S1	S2	S3
size pore constriction (มม.)	0.057	0.142	0.035
ขนาดตะกอนของสารแขวนลอยจาก SEM (มม.)	0.6 - 10 μm		

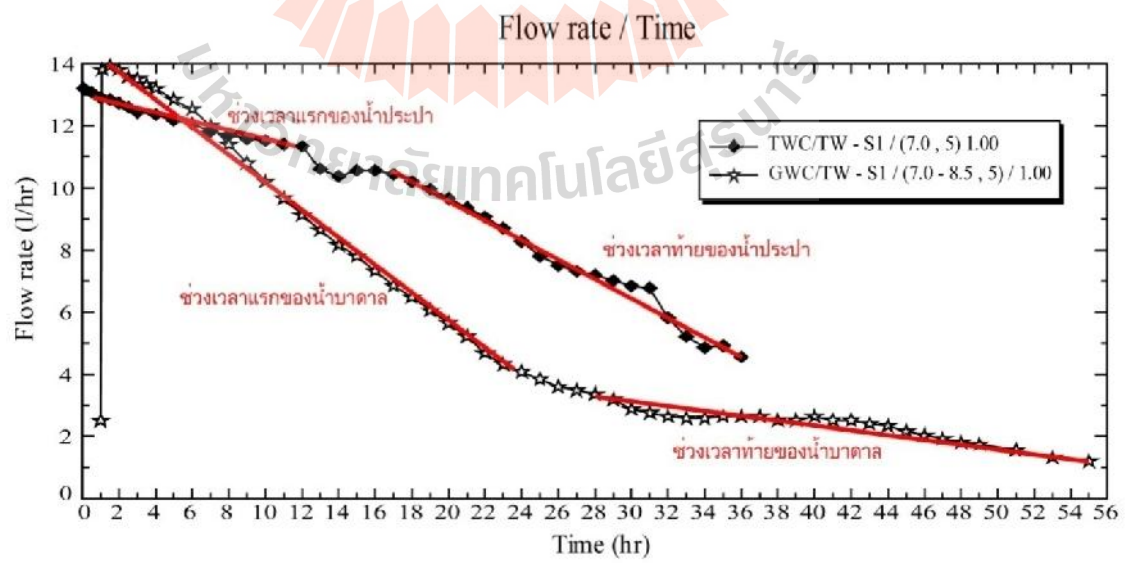
ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.11 และ 4.13 แสดงให้เห็นได้ว่า ถึงแม้ค่าความเร็วเฉลี่ยที่ไหลผ่านทราย S1, S2 และ S3 จะน้อยกว่าค่าความเร็ววิกฤต และขนาด size pore constriction โตกว่าขนาดตะกอนของสารแขวนลอยในน้ำเดิม แต่การอุดตันก็ยังเกิดขึ้น ซึ่งน่าจะเกิดการอุดตันทางกายภาพที่เรียกว่าการเกิด straining และ bridging (Albert Hendrik DE ZWART, 2007) การอุดตันแบบ bridging เกิดจากน้ำที่มีความเร็วสูงพาตะกอนที่มีปริมาณพอเหมาะผ่านช่องว่างเม็ดทรายในเวลาที่ยาวนาน ตะกอนเกิดการรวมกลุ่มและบีบอัดตัวในช่องว่างเม็ดทรายเกิดสภาพการอุดตัน (Ramachandran et al. 2000) ตามลักษณะของการเกิด bridging ในรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 ตัวอย่างการอุดตันแบบ bridging (Albert Hendrik DE ZWART, 2007)

ทรายที่มีค่า effective size ระหว่าง 0.3 – 0.5 มม. ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ <4 และมีส่วนที่ขนาดเล็กกว่า 0.15 มม. ร้อยละไม่เกิน 4 แล้ว จะเป็นช่วงขนาดทรายที่ได้ตามข้อกำหนดของ John

ทราย	D ₁₀ (mm)	C _u	% passing 100 sieve
S1	0.18	2.39	3.82
S2	0.39	2.82	0.33
S3	0.08	3.25	27.66



จากกราฟ TWC/TW-S1(7.0,5)/1.00 เป็นการเติมน้ำผ่านทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำประปา ในช่วงเวลาแรก เริ่มต้นอัตราการไหลที่ 13.0 ลิตร/ชั่วโมง ผ่านไปถึงชั่วโมงที่ 17.0 อัตราการไหลลดลงเหลือ 10.6 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งมีค่าลดลงเฉลี่ย 0.14 ลิตร/ชั่วโมง และช่วงเวลาท้าย คือ ช่วงชั่วโมงที่ 17.0 ถึง 36.0 อัตราการไหล 10.6 ลิตร/ชั่วโมง ลดลงเหลือ 4.6 ลิตร/ชั่วโมง มีค่าลดลงเฉลี่ย 0.32 ลิตร/ชั่วโมง แสดงผลการอุดตันของการเติมน้ำในช่วงเวลาแรกน้อยกว่าในช่วงเวลาท้าย

ส่วน GWC/TW-S1(7.0-8.5,5)/1.00 เป็นการเติมน้ำผ่านทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำบาดาล ในช่วงเวลาแรก เริ่มวัดนาฬิกาที่ 65 อัตราการไหล 13.7 ลิตร/ชั่วโมง ถึงชั่วโมง 55.0 อัตราการไหลลดลงเหลือ 4.0 ลิตร/ชั่วโมง หรือลดลงเฉลี่ย 0.43 ลิตร/ชั่วโมง และช่วงเวลาท้ายของชั่วโมงที่ 24.0 ถึง 55.0 อัตราการไหล 4.0 ลิตร/ชั่วโมง ลดลงเหลือ 1.2 ลิตร/ชั่วโมง อัตราการไหลลดลงเฉลี่ย 0.09 ลิตร/ชั่วโมง แสดงผลการอุดตันของการเติมน้ำในช่วงเวลาแรกมากกว่าในช่วงเวลาท้าย

อัตราการไหลลดลงเฉลี่ยในช่วงเวลาแรกและท้ายของการเติมน้ำของแต่ละแบบทดสอบ ได้สรุปแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 สรุปค่าอัตราการไหลและอัตราการไหลลดลงเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละแบบทดสอบ

แบบทดสอบ	อัตราการไหลในช่วงเวลาแรก (ลิตร/ชั่วโมง)	ลดลงเฉลี่ย (ลิตร/ชั่วโมง)	อัตราการไหลในช่วงเวลาท้าย (ลิตร/ชั่วโมง)	ลดลงเฉลี่ย (ลิตร/ชั่วโมง)
TWC/TW-S1 (7.0,5)/1.00	13.0 ลดลงเหลือ 10.6	0.14	10.6 ลดลงเหลือ 4.6	0.32
GWC/TW-S1 (7.0-8.5,5)/1.00	13.7 ลดลงเหลือ 4.0	0.43	4.0 ลดลงเหลือ 1.2	0.09

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำเติมผ่านทราย S1 ที่อิ่มตัวด้วยน้ำบาดาล

$$\text{ความพรุนของทราย S1} = 0.4$$

$$\text{ความยาวหลอดทรายที่มีผลต่อการไหลของน้ำ} = 88 \text{ ซม.}$$

$$\text{และพื้นที่หน้าตัดหลอดทราย} = 78.57 \text{ ซม}^2$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรน้ำบาดาลที่อิ่มตัวในทราย S1} &= 88 \times 78.57 \times 0.4 \text{ ซม}^3 \\ &= 2,766 \text{ ซม}^3 \end{aligned}$$

$$\text{อัตราการไหลที่กำหนดในช่วง 60 นาทีแรก} = 2.5 \text{ มล./ชั่วโมง}$$

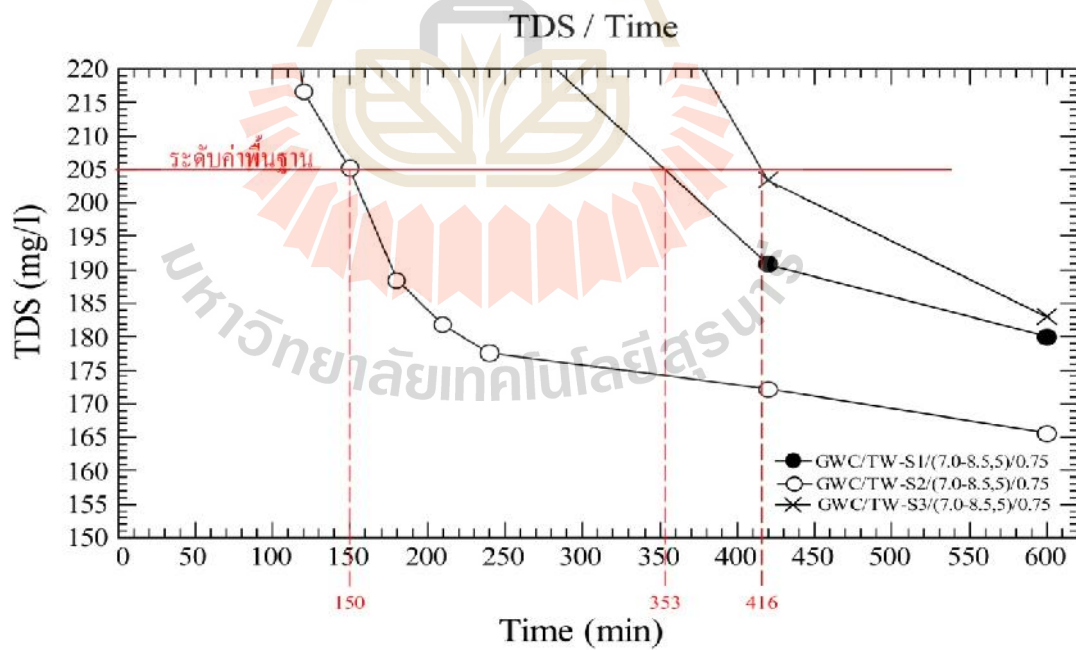
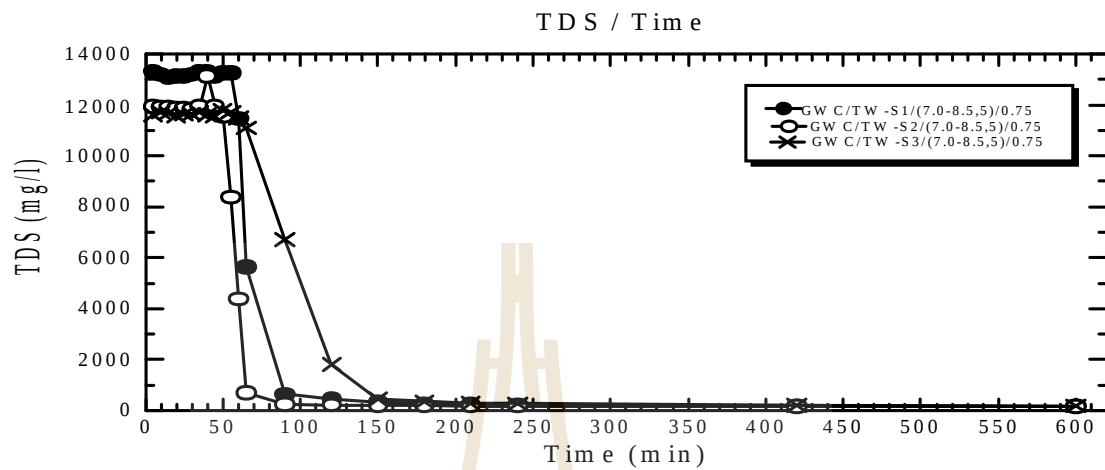
$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น เวลาที่น้ำบาดาลถูกทดแทนด้วยน้ำเดิม} &= 2,766/2.5 \text{ ชั่วโมง} \\ &= 1.11 \text{ ชั่วโมง}\end{aligned}$$

$$\text{หรือ} = 67 \text{ นาที}$$

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำพื้นฐานของน้ำประปาและน้ำบาดาลก่อนทำการเติม ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่าสารละลายทั้งหมดในน้ำประปา มีค่า 205 มก./ลิตร และในน้ำบาดาล มีค่า 12,100 มก./ลิตร และผลการวิเคราะห์ TDS ในตัวอย่างน้ำออกที่เก็บได้ในช่วง 60 นาทีแรก ของการเติมน้ำแบบทดสอบ GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/0.75, GWC/TW-S2/(7.0-8.5,5)/0.75 และ GWC/TW-S3/(7.0-8.5,5)/0.75 สรุปได้ตามตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ TDS ในตัวอย่างน้ำออกที่เก็บได้ในช่วง 60 นาทีแรก ของการเติมน้ำแบบทดสอบ GWC/TW-S1/(7.0-8.5,5)/0.75, GWC/TW-S2/(7.0-8.5,5)/0.75 และ GWC/TW-S3/(7.0-8.5,5)/0.75

Time	TDS		
	S1	S2	S3
5	13320	11940	11616
10	13200	11916	11700
15	13080	11928	11670
20	13140	11886	11574
25	13140	11880	11640
30	13200	11838	11640
35	13320	11958	11718
40	13320	13140	11604
45	13140	11958	11550
50	13260	11550	11796
55	13260	8394	11706
60	11472	4398	11484
65	5640	708	11082
90	651	254	6714
120	458	217	1812
150	349	205	453
180	283	188	356
210	252	182	296
240	229	178	274
420	191	172	203
600	180	166	183



จากกราฟในรูปที่ 4.55 พบว่าค่า TDS ของการเติมน้ำผ่านทราย S1 ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วง 55 นาทีแรก ลดจาก 13,320 มก./ลิตร เหลือ 13,260 มก./ลิตร และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงนาทีที่ 55 ถึง 90 ลดจาก 13,260 มก./ลิตร เหลือ 651 มก./ลิตร และเข้าสู่สภาพคุณภาพน้ำปกติหลังจากนาทีที่ 353 (รูปที่ 4.56) เนื่องจากน้ำเดิมเข้าแทนที่และผลักดันน้ำบาดาลออกหมด

ทำนองเดียวกันกับการเติมน้ำผ่าน S2 ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วง 50 นาทีแรกลดจาก 11,940 มก./ลิตร เหลือ 11,550 มก./ลิตร และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงนาทีที่ 50 ถึง 90 ลดจาก 11,550 มก./ลิตร เหลือ 254 มก./ลิตร เข้าสู่สภาพคุณภาพน้ำปกติหลังจากนาทีที่ 150

และการเติมน้ำผ่าน S3 ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วง 65 นาทีแรกลดจาก 11,616 มก./ลิตร เหลือ 11,082 มก./ลิตร และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงนาทีที่ 65 ถึง 150 ลดจาก 11,082 มก./ลิตร เหลือ 453 มก./ลิตร เข้าสู่สภาพคุณภาพน้ำปกติหลังจากนาทีที่ 416

น้ำบาดาลในช่องว่างของทราย S1, S2 และ S3 ถูกดันออกจากด้วยเวลา 55, 50 และ 65 นาทีตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับเวลาที่คำนวณไว้ คือ 67 นาที ส่วนช่วงที่อัตราการไหลที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงนาทีที่ 55 ถึง 90, 50 ถึง 90 และ 65 ถึง 150 ตามลำดับนั้น เป็นช่วงที่เกิดการผสมกันระหว่างน้ำบาดาลและน้ำเดิม ตะกอนที่อาจจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมี เคลื่อนตัวตามแรงดันน้ำเดิม ทราย S2 มีขนาดใหญ่กว่าและการละขนาดไม่ดีมีผลให้น้ำเดิมและตะกอนจะเคลื่อนตัวได้เร็วกว่า



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการอุดตันจากการเติมน้ำในหลอดทรายทดลอง ซึ่งใช้ทรายละเอียด (S1) และแยกการทดลองออกเป็น 2 กลุ่มทดลอง กลุ่มแรกประกอบด้วย 5 แบบทดสอบ เพื่อหานัยการอุดตันเนื่องจากการแปรเปลี่ยนค่าความขุ่นของน้ำเดิม ส่วนกลุ่มที่สองประกอบด้วย 16 แบบทดสอบ เพื่อหานัยการอุดตันเนื่องจากการแปรเปลี่ยนของค่าความขุ่น ความเป็นกรด-ด่าง และเฮด ของน้ำเดิม ที่ผ่านน้ำบาดาลที่อัดตัวใน S1 พร้อมเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมน้ำกับทรายหยาบ (S2) และทรายละเอียดมาก (S3) ผลงานวิจัยสรุปได้ ดังนี้

1) ทราย S1, S2 และ S3 มีค่า effective size เท่ากับ 0.18, 0.39 และ 0.08 มม. ค่าเฉลี่ยขนาดทราย เท่ากับ 0.37, 0.92 และ 0.23 มม. และค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ เท่ากับ 2.39, 2.82 และ 3.25 ตามลำดับ

2) ความเร็วเฉลี่ยของน้ำเดิมในหลอดทรายทดลองไม่เป็นนัยต่อการเกิดวิกฤติการเคลื่อนตัวของทรายที่อัดแน่นในหลอดทดลอง

3) การเติมน้ำด้วยค่าความขุ่นสูงจะมีนัยสำคัญต่อการอุดตัน การเติมน้ำที่มีความขุ่น 5 NTU ใน S1 สามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่องและนานกว่า 36 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ SEM แสดงให้เห็นถึงการอุดตันของตะกอนในทรายละเอียด S1 เมื่อเติมน้ำที่ค่าความขุ่น 50 NTU โดยพบการอุดตันของตะกอนขนาดประมาณ 0.6 - 10 μm ในช่วงรอยต่อระหว่างท่อกรองและทราย

4) น้ำเดิมที่มีค่า pH สูงกว่า 9 มีผลต่อการอุดตัน เนื่องจากค่า pH ที่สูงก่อให้เกิดสารประกอบตะกอนแคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนตในน้ำเดิมที่มีขนาดประมาณ 2 - 9 μm การอุดตันเห็นได้ชัดในช่วงรอยต่อระหว่างท่อกรองและทราย

5) ค่า size pore constriction ของทรายทั้งสามขนาดไม่เป็นผลเกิดการอุดตันโดยตรงจากขนาดตะกอนของความขุ่นหรือแร่แคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต

6) น้ำเดิมที่มีค่า pH ระหว่าง 7.0-8.5 ความขุ่น 5 NTU และความลาดเชิงชลศาสตร์ = 0.85 ผ่านหลอดทราย S2 ที่อัดตัวด้วยน้ำบาดาล มีความสามารถไหลผ่านด้วยปริมาณน้ำรวม 2,380 ลิตร ในเวลา 95.0 ชั่วโมง และยังคงมีอัตราการไหลเท่ากับ 22.2 ลิตร/ชั่วโมง ทราย S2 จัดเป็นทรายที่ขนาดเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับการเติมน้ำถึงแม้ว่าน้ำเดิมมีความขุ่น 5 NTU

- 7) ทราย S1 ถึงแม้มีขนาดเล็กกว่าทราย S2 แต่ยังคงให้น้ำเดิมที่มีความขุ่น 5 NTU, pH 7.0-8.5 และความลาดเชิงชลศาสตร์ = 0.85 ผ่านได้ดีในระดับหนึ่ง
- 8) ทราย S3 เป็นทรายขนาดเล็กสุดเมื่อเทียบกับทราย S1 และ S2 และโดยเงื่อนไขเดียวกันกับในข้อ 7) สามารถเติมน้ำได้ แต่อัตราการเติมน้ำและปริมาณน้ำที่กักเก็บได้จะน้อยกว่า
- 9) ข้อสังเกตจากการทดลองพบว่าการอุดตันเกิดขึ้นได้ในทราย S2 น่าจะเกิดทางกายภาพที่เรียกว่า bridging

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยที่ต่อเนื่องต่อไป

- 1) งานทดลองนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงสาเหตุการอุดตันจากความขุ่นและความเป็นกรด-ด่าง รวมถึงขนาดทรายและเสถียรของน้ำเดิม ที่มีอิทธิพลต่อขบวนการเติมน้ำ โดยทดสอบในหลอดทดลองที่มีตัวอย่างทรายอัดแน่น ซึ่งมีข้อควรระวัง คือ หากทรายในหลอดทดลองไม่มีความแน่นพอ จะเกิดการเคลื่อนตัวของเม็ดทรายจากแรงดันของน้ำเดิม ทำให้ทรายหลุดตัวและน้ำที่เดิมจะไหลไปยังด้านบนและไปตามรอยต่อระหว่างทรายและผิวของหลอดทดลอง ค่าความเร็วเฉลี่ยของน้ำเดิมที่ได้จะสูงกว่าความเป็นจริง ถ้าเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวต้องยกเลิกหลอดทรายทดลองนั้นเพื่อคงไว้ซึ่งการได้ข้อมูลทดลองที่ถูกต้อง
- 2) ควรดำเนินการศึกษาขั้นรายละเอียดในขั้นตอนต่อไป โดยพัฒนาและประยุกต์ระบบการทดลองและติดตามผลในสนาม ให้ได้ข้อมูลทดลองที่นานและแม่นยำขึ้น เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปเกี่ยวข้องบูรณาการกับงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 3) ควรดำเนินการศึกษาเติมน้ำลงในบ่อบาดาลจริงในสนาม เป็นโครงการนำร่องเพื่อนำผลที่ได้ไปพัฒนาใช้แก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำอย่างเป็นรูปธรรม พร้อมถ่ายทอดเทคโนโลยีการเติมน้ำสู่ชั้นน้ำบาดาลและสืบทอดให้กับประชาชนหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดหาต่อไป

รายการอ้างอิง

- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. โครงการศึกษา ออกแบบและก่อสร้างระบบเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำบาดาล พื้นที่
ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก. กรุงเทพฯ: 2550.
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. โครงการศึกษาทดลองการเติมน้ำลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินผ่านระบบสระน้ำ พื้นที่ลุ่ม
ภาคเหนือตอนล่าง จังหวัดพิษณุโลก สุโขทัย และพิจิตร. กรุงเทพฯ: 2554. หน้า 2-2 ถึง 2-4
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. โครงการศึกษาและแก้ไขภัยแล้งและบรรเทาน้ำท่วม โดยการเติมน้ำลงสู่ชั้น
น้ำบาดาล พื้นที่แอ่งเจ้าพระยาตอนบน (ระยะที่ 2). กรุงเทพฯ: 2555.
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งลาวัลย์ ราชัน. ปฐพีกลศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล: 2548.
- Albert Hendrik DE ZWART. **Investigation of Clogging Processes in Unconsolidated Aquifers
near Water Supply Wells. Ph.D. Delft University of Technology. 2007: Ponsen & Looyen
BV; 2007. p.9-58.**
- C. Hartwig, M. Nissigaki, T. Takuya and R.U Ruemenapp. **CLOGGING STUDIES
LABORATORY COLUMN EXPERIMENTS. Laboratory Experiments in Porous Media
in Order to Predict Particle Remobilization [serial online]. p.65-75. Available from: [http://
recharge.iah.org/recharge/documents/clogging-MAR-column.pdf](http://recharge.iah.org/recharge/documents/clogging-MAR-column.pdf). Accessed August 18, 2013.**
- Jackson, Sjoberg, McCarthy & Wilson, LLP. **Texas Water Development Board. An Assessment
of Aquifer Storage and Recovery in Texas [serial online] 2001 Feb;Report#0904830940.
Accessed March 20, 2013.**
- John Eliasson. **RULE DEVELOPMENT COMMITTEE ISSUE RESEARCH REPORT
DRAFT. SAND / MEDIA SPECIFICATIONS [serial online] 2002 Aug-Nov;T10A:[10
screens]. Available from: [http://www .doh.wa.gov/Portals/1/Documents/Pubs/337-104.pdf](http://www.doh.wa.gov/Portals/1/Documents/Pubs/337-104.pdf).
Accessed March 20, 2013.**
- R. David G. Pyne. **GROUNDWATER RECHARGE and WELLS: A Guide to Aquifer Storage
Recovery. USA: CRC Press; 1995.**
- Stephanie Rinck-Pfeiffer, Santo Ragusa, Pascale Sztajn bok and Thierry Vandeveld. **WATER
RESEARCH. INTERRELATIONSHIPS BETWEEN BIOLOGICAL, CHEMICAL,
AND PHYSICAL PROCESSES AS AN ANALOG TO CLOGGING IN AQIFER
STORAGE AND RECOVERY (ASR) WELLS. Wat. Res. Vol. 34, No. 7, pp. 2112, 2000.**
- Vachi Ramnarong. Proceeding of the International Symposium on Artificial Recharge of Ground
Water, Anaheim, California. **Subsurface Injection of Strom Water Runoff into an
Underground Storage of Bangkok. 1988 Aug 23-27: American Society of Civil Engineer,
New York.**

ประวัติผู้เขียน

นายธีรศักดิ์ ตั้งสุทนต์เกิดเมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2496 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอานวยศิลป์ชลบุรี เมื่อปีการศึกษา 2515 และระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ธรณีวิทยา) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2520 ทำงานด้านอุทกธรณีวิทยาและธรณีเทคนิค เข้าศึกษาต่อในระดับ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2555

ปัจจุบันทำงานอิสระในตำแหน่งผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกธรณีวิทยาร่วมกับภาคเอกชน ให้กับกรมทรัพยากรน้ำบาดาล กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และตำแหน่งนักวิจัยด้านธรณีเทคนิคร่วมกับ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข และคณะ

ผู้เขียนมีผลงานด้านอุทกธรณีวิทยาทั้งในภาครัฐและเอกชน มากกว่า 10 โครงการ ด้านธรณีเทคนิค มากกว่า 10 โครงการ ร่วมวารสารวิชาการระดับนานาชาติด้านอุทกธรณีวิทยาและด้านธรณีเทคนิค รวมเป็นจำนวน 4 บทความ และอนุสิทธิบัตร จำนวน 1 ผลงาน

