

การพัฒนาถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศของระบบการผลิตน้ำประปา

นายรัฐพล เจียวิริยะบุญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE DEVELOPMENT OF SAND FILTER COMBINING WITH AERATION IN WATER
SUPPLY TREATMENT SYSTEM



Mr. Rattapon Jearviriyabunya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศของระบบ
การผลิตน้ำประปา

โดย

นายรัฐพล เจียวิริยะบุญญา

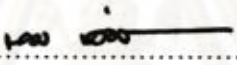
สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้ให้นักศึกษานี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศhirัตวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ ไอสดาพันธ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พิเชฐ ชัยวิวัฒน์วรกุล)

ศูนย์วิศวกรรมทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รัฐพล เจียวิริยะบุญญา : การพัฒนาดังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศของระบบการผลิตน้ำประปา. (The development of sand filter combining with aeration in water supply treatment system) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 183 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการรวมกระบวนการเติมอากาศเข้ากับการกรองโดยตรง (Direct Filtration) เพื่อช่วยให้ชั้นกรองขยายตัว และช่วยให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาชั้นกรอง จากผลการทดลองพบว่าน้ำที่กรองผ่านดังกรองทรายแบบเติมอากาศมีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปา (ไม่เกิน 5 เอนทิยู) โดยการเติมอากาศช่วยลดการสะสมของอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ทำให้มีระยะเวลาการทำงานยาวนานกว่าดังกรองทรายแบบกรองเร็ว (270 เปอร์เซ็นต์) แต่อัตราการกรองจะมีค่าลดลงเล็กน้อย (5 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้การเติมอากาศยังช่วยทำให้เกิดการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันทำให้เวลาในการล้างย้อนลดลงได้ การเติมอากาศที่เหมาะสมด้วยอุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่นที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที มีระยะเวลาการทำงาน 570 และ 390 นาที ตามลำดับ ในขณะที่อุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นช่วยให้ความขุ่นของน้ำที่กรองได้มีค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้นในการทดลองการเติมอากาศแบบกะจึงเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง โดยที่เวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที ทำให้ระยะเวลาการทำงานยาวนาน 720 นาที (มากกว่าดังกรองทรายแบบกรองเร็ว 4 เท่า) และช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศ แต่ระหว่างการกรองมีน้ำที่กรองได้บางส่วนไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา ในทางปฏิบัติควรมีระบบแยกน้ำดังกล่าวกลับไปทำการกรองอีกครั้ง เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานผลิตน้ำประปา ปริมาตร 5,000 ลูกบาศก์เมตร ระบบประปาต้องเสียค่าใช้จ่าย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านสารเคมี) 1,630 บาทต่อวัน ระบบผลิตน้ำประปาโดยดังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ จะมีค่าใช้จ่ายเพียง 337 บาทต่อวัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

ปีการศึกษา...2552

ลายมือชื่อนิสิต.....*รัฐพล เจียวิริยะบุญญา*.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....*[Signature]*.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4970532021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : AERATED SAND FILTER / CLASSICAL SAND FILTER / PIEZOMETER / AIR BACKWASH

RATTAPON JEARVIRIYABUNYA : THE DEVELOPMENT OF SAND FILTER COMBINING WITH AERATION IN WATER SUPPLY TREATMENT SYSTEM.

ADVISOR : PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 183 pp.

The objective of this work is to study the process of direct filtration combined with aeration in order to prolong the operation time and filtration depth. The result has shown that the effluent obtained with the different type of aerated sand filter were passed the standard water supply quality (Less than 5 NTU). The aeration can reduce the accumulation of particle on filter bed surface and the operation time were longer than conventional direct sand filter (270%) with slightly lower value of filter rate (5%). Moreover, the aeration can provide backwash process with water and air, so the backwash time can be reduced. The using of ring-type rigid and the flexible aerator at the top and middle position with 0.2 LPM of suitable air flow rate have 570 and 390 minutes operation time, respectively. The turbidity of filtered water obtained with flexible-type aerator was more constant. For the batch aeration experiment, The ring-type rigid aerator at top position with 0.75 LPM air flow rate and 10 minutes aeration time was chosen and provided 720 minutes operation time, which longer than the conventional filter about 4 times: more energy saving due to the short-period aeration time can be obtained. However, the filtered water were out of standard for the short period (9 - 12 minutes) due to the turbulent condition occurred: some modification of the filtration system should be considered. Finally, the daily operation cost of the aerated direct filtration system (337 Baht) are significant lower than that of the conventional one (1,630 Baht) for producing 5,000 m³ of water.

Department : Environmental Engineering

Field of Study : Environmental Engineering

Academic Year : 2009

Student's Signature P. P.

Advisor's Signature P. P.

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้โอกาส คำแนะนำและมุมมองความคิดแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนุ์ และ ดร. พิเชฐ ชัยวิวัฒน์วรกุล ที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ดิชม แก่ไข่ในงานวิจัยนี้เป็นในแนวทางที่ดีที่สุด รวมทั้งคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความรู้ในวิชาต่างๆ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือ จนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย ที่สนับสนุนและให้โอกาสในการศึกษามาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การผลิตน้ำประปา.....	5
2.2 ตำแหน่งของเครื่องกรองน้ำในโรงงานประปา.....	6
2.2.1 ระบบประปาแบบธรรมดา.....	7
2.2.2 ระบบประปาแบบกรองโดยตรง.....	7
2.2.3 ระบบประปาที่มีถังตกตะกอน (Solids Contact).....	7
2.3 หลักการทำงานของถังกรองแบบเติมอากาศ.....	8
2.4 ชนิดของการกรอง.....	9
2.4.1 เครื่องกรองทรายแบบช้า (Slow Sand Filter).....	10
2.4.2 เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว (Rapid Sand Filter).....	10
2.5 ทฤษฎีของการกรอง.....	12
2.5.1 กลไกของการกรอง.....	12
2.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ.....	14
2.5.3 ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวกับระบบการกรอง.....	15
2.6 การล้างย้อน (Backwash).....	16

2.7 การไหลของน้ำในการกรอง	17
2.7.1 การไหลของน้ำผ่านชั้นกรองและชั้นกรวด.....	17
2.8 มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer).....	19
2.8.1 ระบบมาตรวัดความดันน้ำ.....	19
2.8.2 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลและการสร้างกราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution).....	21
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.2 น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.3 ตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์.....	42
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.4.1 ขั้นตอนโดยรวมของการทดลอง.....	43
3.4.2 การเปรียบเทียบถึงกรองทรายแบบกรองเร็วกับถึงกรองทรายแบบเติม อากาศ.....	44
3.4.3 ศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ.....	47
3.4.4 ศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น.....	49
3.4.5 ศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch).....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	54
4.1 การเปรียบเทียบถึงกรองทรายแบบกรองเร็วกับถึงกรองทรายแบบเติม อากาศ.....	54
4.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	54
4.1.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง.....	56
4.1.3 ปริมาตรและอัตราการกรอง.....	58
4.1.4 การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน.....	59
4.2 ศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ.....	61
4.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	62
4.2.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง.....	64
4.2.3 ปริมาตรและอัตราการกรอง.....	66

4.2.4 การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน.....	68
4.2.5 ดำเนินการทดลองระยะยาว.....	72
4.3 ศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น.....	81
4.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	81
4.3.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง.....	85
4.3.3 ปริมาตรและอัตราการกรอง.....	86
4.3.4 การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน.....	88
4.3.5 ดำเนินการทดลองระยะยาว.....	92
4.4 ศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch).....	105
4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	105
4.4.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง.....	109
4.4.3 ปริมาตรและอัตราการกรอง.....	112
4.4.4 ดำเนินการทดลองระยะยาว.....	114
4.5 สมการการกรอง.....	123
4.6 การออกแบบและวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย.....	128
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	136
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	136
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	139
รายการอ้างอิง.....	140
ภาคผนวก	142
ภาคผนวก ก ผลการเปรียบเทียบถึงกรองทรายแบบกรองเร็วกับถึงกรองทราย แบบเติมอากาศ.....	143
ภาคผนวก ข การเปรียบเทียบค่าความพรุนของสารกรองในรูปแบบการกรอง ต่างๆ.....	178
ภาคผนวก ข ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่อวันของระบบ ประปาในรูปแบบต่างๆ.....	180
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	183

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อเปรียบเทียบระหว่างการกรองเร็วและช้า.....	11
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างตารางบันทึกค่าระดับน้ำที่ลดลงในมาตรวัดความดันน้ำ.....	22
ตารางที่ 2.3	ตัวอย่างตารางการคำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ (1).....	24
ตารางที่ 2.4	ตัวอย่างตารางการคำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ (2).....	25
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.2.....	47
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.3.....	49
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.4.....	51
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.5.....	53
ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบเติมอากาศในรูปแบบต่างๆ.....	80
ตารางที่ 4.2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ในรูปแบบต่างๆ.....	103
ตารางที่ 4.3	ข้อมูลความขุ่นสูงสุดของน้ำที่กรองได้ในช่วงที่มีการเติมอากาศและระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา.....	107
ตารางที่ 4.4	การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปา 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน.....	131
ตารางที่ 4.5	การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการล้างย้อนถังกรองต่อวัน.....	131
ตารางที่ 4.6	สรุปค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (ค่าสารเคมีและค่าไฟฟ้า).....	132
ตารางที่ 4.7	การเปรียบเทียบขนาดพื้นที่ก่อสร้างโรงประปา.....	132

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ขั้นตอนในการผลิตน้ำประปา 5
รูปที่ 2.2	ระบบประปาแบบธรรมดา..... 7
รูปที่ 2.3	ระบบประปาแบบกรองโดยตรง..... 7
รูปที่ 2.4	ระบบประปาแบบใช้ถังตกตะกอน (Solids Contact Clarifier)..... 8
รูปที่ 2.5	ถังกรองแบบเติมอากาศ..... 9
รูปที่ 2.6	การเคลื่อนที่ของตะกอน 13
รูปที่ 2.7	มาตรวัดความดันน้ำแบบใช้แรงดันน้ำ 19
รูปที่ 2.8	มาตรวัดความดันน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้..... 20
รูปที่ 2.9	แสดงหลักการทำงานของมาตรวัดความดันน้ำ..... 21
รูปที่ 2.10	การจذبน้ำที่ก่ระดับน้ำที่ลดลงในมาตรวัดความดันน้ำ..... 22
รูปที่ 2.11	ขั้นตอนการสร้างกราฟการกระจายความดัน (1)..... 24
รูปที่ 2.12	ขั้นตอนการสร้างกราฟการกระจายความดัน (2)..... 24
รูปที่ 2.13	กราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution)..... 26
รูปที่ 2.14	วงจรการทำงานของสารกรองทั้งสองชนิดเมื่อกรองน้ำที่ผ่านกระบวนการ สร้างและรวมตะกอน 28
รูปที่ 2.15	ข้อมูลความสูงของน้ำที่กรองผ่านทรายกรองโดยระบบการกรองตรง..... 28
รูปที่ 2.16	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 29
รูปที่ 2.17	ความเร็วของน้ำล่างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อน้ำ น้ำล่างย้อนอย่างเดียว..... 30
รูปที่ 2.18	ความเร็วของน้ำล่างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อน้ำ และอากาศล่างย้อนพร้อมกัน ความเร็วของอากาศที่ 50 ม./ชม. 30
รูปที่ 2.19	ความเร็วของน้ำล่างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อน้ำ น้ำและอากาศล่างย้อนพร้อมกัน ความเร็วของอากาศที่ 30 ม./ชม..... 30
รูปที่ 2.20	ประสิทธิภาพการกำจัดความสูงสารกรองไฟเบอร์ (a) ที่ความหนาแน่น 50,65 และ 80 กก./ลบ.ม. ความเร็วในการกรอง 40 ม./ชม. (b) ที่ความเร็ว ในการกรอง 20,40 และ 80 ม./ชม. ความหนาแน่น 80 กก./ลบ.ม..... 32
รูปที่ 2.21	ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบทรายกรองเร็วในระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3 33

รูปที่ 2.22	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ควรล้างสารกรองเมื่อใช้สารกรอง 3 ชนิด และ 1 ชนิด.....	34
รูปที่ 2.23	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระดับความลึกที่เกิดการกรองตะกอน เมื่อใช้ สารกรอง 3 ชนิด และ 1 ชนิด	34
รูปที่ 2.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตและความเข้มข้นสารส้ม เมื่อ อัตราน้ำล้นผิวเป็น 30 ซม./นาที่.....	35
รูปที่ 2.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตและความเข้มข้นสารส้ม เมื่อ อัตราน้ำล้นผิวเป็น 60 ซม./นาที่.....	36
รูปที่ 2.26	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและค่าการะบรทุก สารอินทรีย์ต่างๆ ที่อัตราการหมุนเวียนล้างสารกรองเท่ากับ 2 วัน	37
รูปที่ 2.27	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและอัตราการหมุนเวียน ล้างตัวกลางต่างๆที่ค่าการะบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.- วัน.....	37
รูปที่ 3.1	การติดตั้งชุดการทดลอง.....	39
รูปที่ 3.2	ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ.....	40
รูปที่ 3.3	หัวเติมอากาศทั้งสองรูปแบบ.....	41
รูปที่ 3.4	มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer).....	42
รูปที่ 3.5	แผนภาพขั้นตอนการทดลอง.....	43
รูปที่ 3.6	ขั้นตอนการเปรียบเทียบถังกรองทรายแบบกรองเร็วกับถังกรองทรายแบบ เติมอากาศ.....	45
รูปที่ 3.7	ขั้นตอนการศึกษาลักษณะจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ.....	48
รูปที่ 3.8	ขั้นตอนการศึกษาลักษณะจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น	50
รูปที่ 3.9	ขั้นตอนการศึกษาลักษณะจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch)	52
รูปที่ 4.1	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรอง ทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที.....	55
รูปที่ 4.2	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบกรองเร็วที่เวลา ต่างๆ.....	56

รูปที่ 4.3	การกระจายความดันภายในชั้นกรงของถังกรงทรายแบบกรงเร็วและถังกรงทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ที่เวลาการกรง 180 นาที.....	57
รูปที่ 4.4	อัตราการกรงของถังกรงทรายแบบกรงเร็วและถังกรงทรายแบบเติมอากาศ.....	58
รูปที่ 4.5	ประสิทธิภาพการล้างยอนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวและการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน.....	59
รูปที่ 4.6	ประสิทธิภาพการล้างยอนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวและการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่เวลาการล้างยอน 5 – 12 นาที.....	60
รูปที่ 4.7	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรงทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรงที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	62
รูปที่ 4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรงทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรงที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	63
รูปที่ 4.9	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรงทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรงที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	64
รูปที่ 4.10	การกระจายความดันภายในชั้นกรงของถังกรงทรายแบบเติมอากาศที่เวลาการกรง 180 นาที.....	65
รูปที่ 4.11	อัตราการกรงของถังกรงทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรงที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่เวลาการกรง 180 นาที.....	67
รูปที่ 4.12	ประสิทธิภาพการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันโดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรง.....	69
รูปที่ 4.13	ประสิทธิภาพการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่เวลาการล้างยอน 5 – 12 นาที.....	70
รูปที่ 4.14	อัตราการเติมอากาศที่ดีที่สุดในแต่ละตำแหน่งการเติมอากาศ.....	72
รูปที่ 4.15	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรง ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว.....	73
รูปที่ 4.16	การกระจายความดันภายในชั้นกรงของถังกรงแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรง ที่เวลาการกรงสุดท้าย.....	75

รูปที่ 4.17	ลักษณะการสะสมอนุภาคความชื้นภายในชั้นกรอง ที่ตำแหน่งการเติม อากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง	77
รูปที่ 4.18	อัตราการกรองของถังกรองแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและ ด้านล่างของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ขณะดำเนินการทดลอง ระยะยาว.....	77
รูปที่ 4.19	ประสิทธิภาพการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ตำแหน่งการเติม อากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองขณะดำเนินการทดลอง ระยะยาว.....	78
รูปที่ 4.20	ประสิทธิภาพการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่เวลาการล้างยอน 5 – 12 นาที ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว.....	79
รูปที่ 4.21	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่ง ด้านบนของชั้นกรองด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่อัตราการเติมอากาศ ต่างๆ.....	82
รูปที่ 4.22	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่ง ตรงกลางของชั้นกรองด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่อัตราการเติมอากาศ ต่างๆ.....	83
รูปที่ 4.23	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่ง ด้านล่างของชั้นกรองด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่อัตราการเติมอากาศ ต่างๆ.....	84
รูปที่ 4.24	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วย หัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่เวลาการกรอง 180 นาที.....	85
รูปที่ 4.25	อัตราการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งและอัตราการ เติมอากาศต่างๆ ด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่เวลาการกรอง 180 นาที	87
รูปที่ 4.26	ประสิทธิภาพการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันโดยการเติมอากาศที่ ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง ด้วยหัวเติมอากาศแบบ ยืดหยุ่น.....	89
รูปที่ 4.27	ประสิทธิภาพการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่เวลาการล้างยอน 5 – 12 นาที.....	90
รูปที่ 4.28	อัตราการเติมอากาศที่ดีที่สุดในแต่ละตำแหน่งการเติมอากาศ.....	93

รูปที่ 4.29	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นที่ตำแหน่งการเติมอากาศต่างๆ ด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว.....	93
รูปที่ 4.30	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่เวลาการกรองสุดท้าย.....	95
รูปที่ 4.31	ลักษณะการสะสมอนุภาคความชื้นภายในชั้นกรอง ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง ด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น.....	98
รูปที่ 4.32	อัตราการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งและอัตราการเติมอากาศต่างๆ ด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว.....	99
รูปที่ 4.33	ประสิทธิภาพการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นขณะดำเนินการทดลองระยะยาว.....	101
รูปที่ 4.34	ประสิทธิภาพการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่เวลาการล้างย้อน 5 – 12 นาที ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว.....	102
รูปที่ 4.35	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ที่เวลาในการเติมอากาศและอัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	106
รูปที่ 4.36	ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคความชื้นเมื่อทำการเติมอากาศแบบกะ (Batch).....	109
รูปที่ 4.37	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะที่เวลาการกรอง 180 นาที ที่เวลาในการเติมอากาศและอัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	110
รูปที่ 4.38	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะหลังทำการเติมอากาศ ที่เวลาในการเติมอากาศและอัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	111
รูปที่ 4.39	อัตราการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ที่เวลาในการเติมอากาศและอัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	112

รูปที่ 4.40	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นเมื่อทำการเติมอากาศแบบกะ ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว.....	116
รูปที่ 4.41	ระบบเวียนน้ำที่ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา.....	117
รูปที่ 4.42	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ขณะทำการทดลองระยะยาว.....	120
รูปที่ 4.43	อัตราการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ขณะทำการทดลองระยะยาว.....	121
รูปที่ 4.44	ความพรุนของชั้นกรองที่เวลาการกรองต่างๆ.....	124
รูปที่ 4.45	ลักษณะการเคลื่อนของอนุภาคความชื้นในช่วง ก่อน - หลัง ทำการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ในรอบการทำงานต่างๆ.....	126
รูปที่ 4.46	ความพรุนที่เวลาการกรองสุดท้ายของถังกรองรูปแบบต่างๆ.....	127
รูปที่ 4.47	แผนภาพขั้นตอนการผลิตน้ำประปาในรูปแบบต่างๆ.....	129
รูปที่ 4.48	ค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปา 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันในระบบการผลิตน้ำประปาต่างๆ.....	130
รูปที่ 4.49	ขั้นตอนการผลิตน้ำประปาโดยถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ.....	135

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตน้ำประปาในปัจจุบันเริ่มจากการนำน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินมาผ่านขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยการให้น้ำดิบตกตะกอนด้วยกระบวนการทางเคมี (เติมสารละลาย สารส้มและปูนขาว) หลังจากผ่านกระบวนการตกตะกอนน้ำจะไหลเข้าสู่ระบบการกรองและไหล เข้าเก็บในถังน้ำใส ทำการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารละลายคลอรีน จากนั้นทำการสูบน้ำจากถังน้ำใสขึ้น หอดึงสูง เพื่อจ่ายน้ำสะอาดสู่ท่อจ่ายน้ำประปาต่อไป (การประปาส่วนภูมิภาค, 2550) ทุกขั้นตอน ในการผลิตน้ำประปาต้องการพื้นที่ในการก่อสร้าง ทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน หากโรง ประปามีขั้นตอนในการผลิตมากปัญหาเรื่องพื้นที่และค่าใช้จ่ายจะเกิดขึ้นมากตามไปด้วย

การกรองเป็นกระบวนการสุดท้ายที่ทำให้ได้น้ำใสก่อนจะเข้าสู่กระบวนการฆ่าเชื้อโรค คุณสมบัติของเครื่องกรองน้ำที่ดี จะต้องกรองน้ำได้คุณภาพตามมาตรฐานและใช้งานได้นาน การ กรองเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะ คือ การกรองแบบติดผิวชั้นกรอง (Surface Filtration) เป็นแบบที่ ตะกอนแขวนลอยหรือความขุ่นถูกดักจับและติดค้างอยู่บนผิวของสารกรอง และการกรองแบบติด ค้างในชั้นกรอง (In-Depth Filtration) เป็นแบบที่ตะกอนแขวนลอยหรือความขุ่นถูกดักจับและติด ค้างอยู่ภายในชั้นความหนาของสารกรอง เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว (Rapid Sand Filter) จัดเป็นการกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง แต่ในความเป็นจริงเครื่องกรองทรายแบบกรองเร็วมักเกิด การกรองขึ้นที่บริเวณส่วนบนของสารกรองเท่านั้น การสูญเสียความดันส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ระดับ ประมาณ 3 นิ้ว ลึกจากผิวชั้นทราย (มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2539) จึงใช้ประโยชน์จากความหนาของ ชั้นกรองได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการอุดตันเร็ว เนื่องจากสิ่งสกปรกเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้า ของชั้นสารกรองจึงมีความจำเป็นต้องทำการล้างไล่ตะกอนออกไปโดยการล้างย้อน (Back Wash) จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและน้ำเป็นอย่างมาก รวมไปถึงทำให้เกิดการเรียงตัวของสารกรองเป็น แบบ ละเอียด - หยาบ เมื่อเริ่มทำการกรองใหม่จะทำให้ระดับความลึกที่เกิดการกรองลดน้อยลง จนอาจกลายเป็นการกรองแบบติดผิวชั้นกรอง (Surface Filtration) ทำให้เวลาการใช้งานถึงกรอง ลดลงได้อีกทางหนึ่ง โดยทั่วไป เครื่องมือที่สามารถวัดระดับความลึกที่เกิดการกรองและเวลาการ ใช้งานของถังกรองได้คือ มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) (วรากร ไม้เรียง, 2542) โดยทำการ ติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำทุกๆระยะ 5 ซม. ตามความลึกของชั้นสารกรอง ข้อมูลระดับน้ำในมาตร วัดความดันน้ำในแต่ละช่วงเวลาสามารถสร้างกราฟการกระจายความดัน (Pressure

Distribution) เพื่อใช้ในการหาจุดที่เกิดการอุดตันและระยะเวลาการใช้งานถึงกรองได้ ซึ่งจัดเป็นอุปกรณ์หรือแนวคิดที่น่าสนใจนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อเข้าใจกลไกและลักษณะกระบวนการกรองในเชิงรายละเอียด

ในส่วนของการผลิตน้ำประปา โดยทั่วไปน้ำที่เข้าสู่ถังกรองจะต้องผ่านกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation and Sedimentation) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ในก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอนแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้การกรองโดยตรง (Direct Filtration) ในการผลิตน้ำประปา แต่ปัญหาที่ตามมาของการกรองโดยตรงคือถังกรองจะมีอายุการใช้งานสั้นลงเนื่องจากกลไกการกรองเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ โดยในงานวิจัยถังกรองชีวภาพที่มีการใช้กลไกการกรองและการเติมอากาศร่วมกันเพื่อใช้บำบัดน้ำเสีย พบว่าการเพิ่มอัตราการเติมอากาศช่วยให้ถังกรองที่เกิดการอุดตันกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากอากาศทำให้ชั้นกรองมีความพรุนมากขึ้น น้ำจึงสามารถไหลผ่านไปได้ จากงานวิจัยดังกล่าวจึงทำให้เกิดแนวคิดในการรวมกระบวนการเติมอากาศเข้ากับกระบวนการกรองน้ำ โดยคาดว่าจะการเติมอากาศภายในชั้นกรองจะทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว ส่งผลให้อุณหภูมิความชื้นสามารถหลุดเข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น ลดการสะสมอุณหภูมิความชื้นบริเวณผิวหน้าชั้นกรองและส่งผลต่อความเป็นไปได้ในการเลือกใช้รูปแบบการกรองโดยตรงในการผลิตน้ำประปา

การวิจัยนี้ทำการศึกษาคำอธิบายการใช้กระบวนการเติมอากาศเข้ามาช่วยทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวโดยการนำหัวเติมอากาศฝังไว้ในชั้นสารกรองเป็นระยะๆ ตามความหนาของชั้นสารกรองซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นกรอง ทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น นอกจากนี้หัวเติมอากาศยังช่วยในเรื่องการล้างย้อนสารกรองได้ดีขึ้น โดยใช้น้ำและเวลาในการล้างย้อนน้อยลง ดังนั้นการรวมกระบวนการเติมอากาศเข้าไปในระบบการกรองจึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจเพื่อพัฒนาระบบการกรองให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้การเติมอากาศในกระบวนการกรอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของถังกรองในระบบผลิตน้ำประปาแบบการกรองโดยตรง (Direct Filtration)
- 1.2.2 ศึกษาระดับความลึกที่เกิดการอุดตันและประสิทธิภาพการให้ความหนาของชั้นสารกรองโดยการประยุกต์ใช้มาตรวัดความดันน้ำ

- 1.2.3 ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งของหัวเติมอากาศ ชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศ อัตราการเติมอากาศและรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่มีผลต่อกระบวนการกรองร่วมกับการเติมอากาศ โดยการกรองโดยตรง (Direct Filtration)
- 1.2.4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและความคุ้มค่าของระบบผลิตน้ำประปาแบบกรองโดยตรงด้วยถังกรองแบบเติมอากาศกับระบบผลิตน้ำประปา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการวิจัยระบบห้องปฏิบัติการที่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 เปรียบเทียบการทำงานระหว่างถังกรองทรายระบบกรองโดยตรง (Direct Filtration) แบบกรองเร็วกับถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ทำการติดตั้งหัวเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่ออนาที โดยใช้น้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 50 เอน์ทียู เป็นน้ำตัวอย่างในการทดลอง
- 1.3.2 ประยุกต์ใช้มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) ในการศึกษาค่าความดันลด อายุการใช้งาน และจุดที่เกิดการอุดตันของถังกรอง โดยติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำจำนวน 15 จุดตามความลึกของชั้นสารกรองทุกๆ ระยะ 5 ซม. พร้อมทั้งเก็บข้อมูลระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำเพื่อสร้างกราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution) ในการศึกษาประสิทธิภาพถังกรองแบบเติมอากาศ
- 1.3.3 ศึกษาผลกระทบของ ตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ ชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น รูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา

1.3.3.1 ตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ

เลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวน

- ที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง
อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่ออนาที
- ที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง
อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่ออนาที
- ที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง
อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่ออนาที

1.3.3.2 ชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยี่ดหยุ่น

เลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศแบบยี่ดหยุ่น

- ที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง
อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่ออนาที
- ที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง
อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่ออนาที
- ที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง
อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่ออนาที

1.3.3.3 รูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch)

เลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศและตำแหน่งการเติมอากาศที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ผ่านมา

- ระยะเวลาในการเติมอากาศ 10, 5 และ 1 นาที
- อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75, 1 และ 1.3 ลิตรต่ออนาที

1.3.4 เสนอแนวทางและออกแบบระบบกรองร่วมกับการเติมอากาศ เพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของระบบกรองร่วมกับการเติมอากาศกับระบบผลิตน้ำประปา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจกลไกและตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการทำงานของถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

1.4.2 ช่วยให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นสารกรอง ทำให้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศสามารถใช้งานได้นานขึ้นและมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปา (World Health Organization, 2006)

1.4.3 จุดเติมอากาศในชั้นกรองช่วยทำให้เกิดการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศ ทำให้ประหยัดน้ำและเวลาในการล้างย้อนสารกรอง

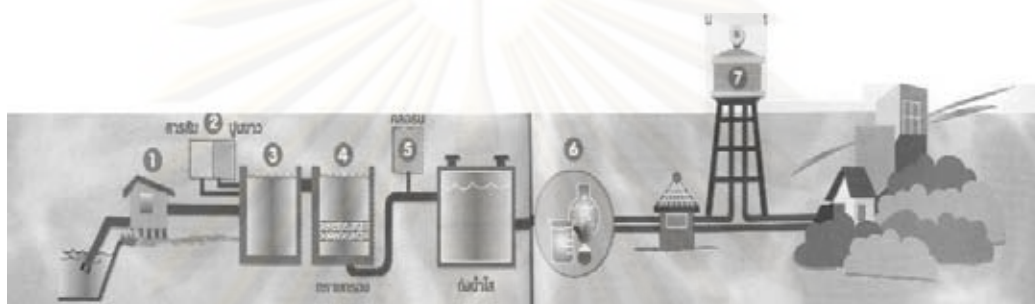
1.4.4 พัฒนาระบบการกรองน้ำ แนวทางการใช้งานและรูปแบบถังกรองทรายแบบเติมอากาศ เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตน้ำประปา

ขั้นตอนในการผลิตน้ำประปาแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังนี้ (การประปาส่วนภูมิภาค, 2550)



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนในการผลิตน้ำประปา (การประปาส่วนภูมิภาค, 2550)

1. การสูบน้ำ การผลิตน้ำประปา เริ่มจาก "โรงสูบน้ำแรงต่ำ" ทำการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบผลิต ซึ่งน้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นต้องเป็นน้ำที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีสิ่งสกปรกโสโครกปนเปื้อนเกินกว่าที่กำหนด ซึ่งได้ผ่านการวิเคราะห์ตรวจสอบแล้วว่าสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นน้ำประปาได้ และต้องมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำมาผลิตน้ำประปาได้อย่างต่อเนื่อง

2. การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ น้ำดิบที่สูบเข้ามาแล้วจะถูกผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้มและปูนขาว เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation) โดยสารละลายสารส้มจะช่วยให้การตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น และสารละลายปูนขาวจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ หรือบางครั้งจะมีการเติมคลอรีน เพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนมากับน้ำในขั้นต้นนี้ก่อน

3. การตกตะกอน ขั้นตอนนี้จะปล่อยน้ำที่ผสมสารส้มและปูนขาวแล้ว ทำให้เกิดการหมุนวนเวียนเพื่อให้ น้ำกับสารเคมีรวมตัวกันจะช่วยให้มีการจับตัวของตะกอนได้ดียิ่งขึ้น และจะนำน้ำ

เหล่านั้ันเข้าสู่ถึงตะกอนที่มีขนาดใหญ่ เพื่อทำให้เกิดน้ำนิ่ง ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก จะตกลงสู่กั้ันถึง และถูกดูดทึ่่ง น้ำใสด้านบนจะไหลตามรางรับน้ำเข้าสู่ชั้นตอนต่อไป

4. การกรอง ในการกรองจะใช้ทรายหยาบและทรายละเอียดเพื่อกกรองตะกอนขนาดเล็กมากในน้ำ และให้มีความใสสะอาดมากขึ้น ซึ่งในชั้นตอนนี้น้ำที่ผ่านการกรองจะมีความใ้ใสมาก แต่จะมีความขุ่นหลงเหลืออยู่ประมาณ 0.2 - 2.0 หน่วยความขุ่น และทรายกรองจะมีการล้างทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอเพื่อกกรองมีประสิทธิภาพ

5. การฆ่าเชื้อโรค น้ำที่ผ่านการกรองมาแล้วจะมีความใ้ แต่อาจจะมีเชื้อโรคเจือปนมากับน้ำ ฉะนั้นจึงจะต้องทำการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน ซึ่งคลอรีนนั้สามารถฆ่าเชื้อโรคได้เป็นอย่างดี น้ำที่ได้รับการผสมคลอรีนแล้วเรียกกันว่า "น้ำประปา" สามารถนำมาใช้เพื่อกการอุปโภคบริโภคได้ และจะทำการจัดเก็บไว้ในถังขนาดใหญ่เรียกว่า ถังน้ำใ้ เพื่อจัดการบริการต่อไป

6. การควบคุมคุณภาพน้ำประปา ชั้นตอนนี้เป็นชั้นตอนที่สำคัญ เพราะน้ำประปาที่ทำการผลิตมาแล้วนั้น จะต้องวิเคราะห์ตรวจสอบอีกครั้งจากนักวิทยาศาสตร์ และการตรวจสอบนี้จะดำเนินการอย่างสม่ำเสมอ เพื่อกให้น้ำประปาที่สะอาด ปลอดภัย สำหรับการอุปโภคบริโภค

7. การสูบจ่าย น้ำประปาที่ผลิตมาแล้วนั้น จะต้องให้บริการถึงบ้านเรือนของผู้ใช้น้ำโดยส่งผ่านไปตามเส้นท่อ ดังนั้นการสูบจ่ายจึงมีความจำเป็น ด้วยการส่งจากหอถังสูงที่สามารถบริการได้ในพื้นที่ใกล้เคียง และในพื้นที่ที่ไกลออกไปหรือมีความสูงมากจำเป็นต้องใช้เครื่องอัดแรงดันน้ำเพื่อกให้น้ำประปาสามารถบริการได้อย่างทั่วถึง

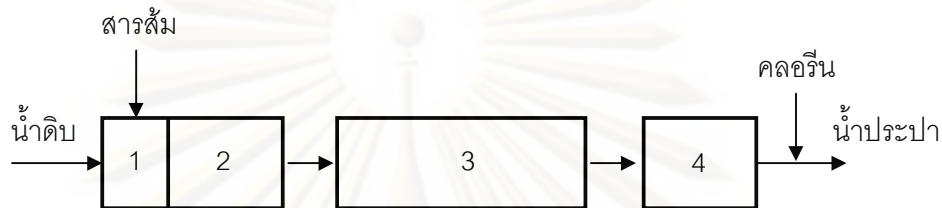
2.2 ตำแหน่งของเครื่องกรองน้ำในโรงงานประปา (มันสิน ตั้ณจุลเวศน์, 2539)

เครื่องกรองน้ำเป็นส่วนประกอบรวม ที่มีความสำคัญสำหรับโรงประปาส่วนใหญ่ ระบบประปาที่ใช้เครื่องกรองอาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.1 ระบบประปาแบบธรรมดา

ระบบประปาประเภทนี้เป็นแบบที่ใช้กันมากที่สุด ประกอบด้วยถังกวนเร็ว ถังกวนช้า ถังกรองเร็ว และถังเติมคลอรีน น้ำดิบมีความขุ่นปานกลางหรือสูง แสดงดังรูปที่ 2.2



1 = ถังกวนเร็ว 3. ถังตกตะกอน
2 = ถังกวนช้า 4. ถังกรอง

รูปที่ 2.2 ระบบประปาแบบธรรมดา

2.2.2 ระบบประปาแบบกรองโดยตรง

ระบบนี้เหมาะสำหรับใช้กับแหล่งน้ำดิบ ที่มีความขุ่นต่ำตลอดทั้งปี กระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation and Sedimentation) ไม่จำเป็นต้องมี ดังนั้นส่วนประกอบของระบบนี้จึงมีเฉพาะถังกรองและถังเติมคลอรีน แสดงดังรูปที่ 2.3

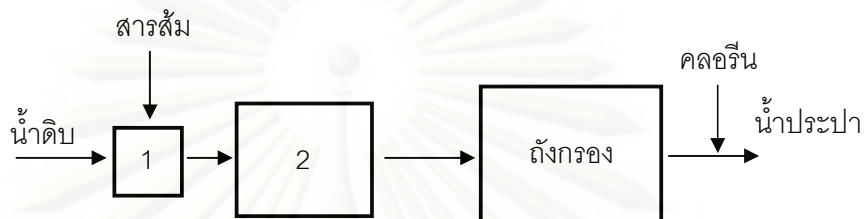


1 = ถังกวนเร็ว (อาจไม่ต้องมี)

รูปที่ 2.3 ระบบประปาแบบกรองโดยตรง

2.2.3 ระบบประปาที่มีถังตกตะกอน (Solids Contact)

ระบบนี้เหมาะสำหรับน้ำดิบที่มีความกระด้างสูงเกินไป และจำเป็นต้องกำจัดออกด้วยสารเคมี (เช่น ปูนขาว โซดาไฟ) ส่วนประกอบของระบบนี้โดยหลักการแล้ว คล้ายคลึงกับระบบประปาแบบธรรมดา เพียงแต่ว่า ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า และ ถังตกตะกอน ถูกออกแบบเป็นพิเศษ ให้รวมอยู่ในถังเดียวกันหมด (Solids Contact Clarifier) แสดงดังรูปที่ 2.4



1 = ถังกวนเร็ว (อาจไม่ต้องมี) 2 = ถังตกตะกอน (Solids Contact Clarifier)

รูปที่ 2.4 ระบบประปาแบบใช้ถังตกตะกอน (Solids Contact Clarifier)

ระบบประปาแบบกรองโดยตรง คือการส่งน้ำดิบเข้าสู่ถังกรองโดยไม่มีการกำจัดความขุ่นออกก่อนด้วยกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation and Sedimentation) (มันลิน ตันทูลเวศน์, 2539) โดยการกรองลักษณะนี้ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอนลงได้ แต่ระบบประปาแบบกรองโดยตรงทำให้ถังกรองต้องรับภาระในการกำจัดอนุภาคความขุ่นในปริมาณมาก อนุภาคความขุ่นจึงสะสมอยู่ภายในชั้นกรองและทำให้เกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่าลดลงอย่างมากและไม่สามารถใช้ความหนาของชั้นกรองได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากการกรองส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นกรอง

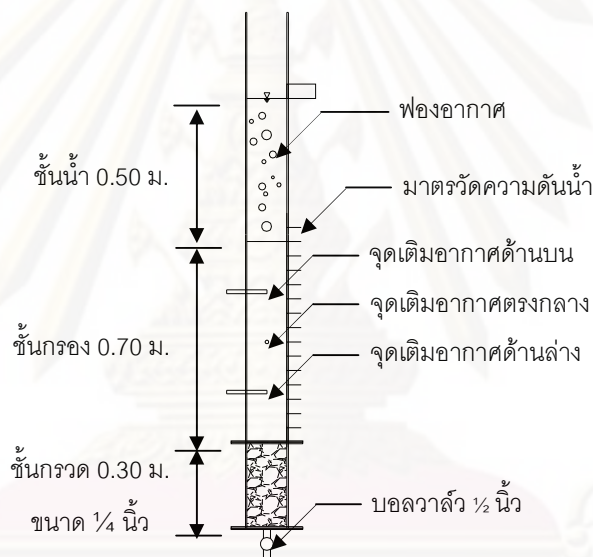
ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการรวมกระบวนการเติมอากาศเข้ากับกระบวนการกรอง เพื่อพัฒนาระบบประปาแบบกรองโดยตรง โดยคาดว่า การเติมอากาศภายในชั้นกรองจะทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว ส่งผลให้อนุภาคความขุ่นสามารถหลุดเข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น จึงลดการสะสมของอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ทำให้ถังกรองมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ซึ่งมีความเหมาะสมเมื่อนำถังกรองดังกล่าวไปใช้ในระบบประปาแบบกรองโดยตรง

2.3 หลักการทำงานของถังกรองแบบเติมอากาศ

การออกแบบถังกรองแบบเติมอากาศได้แนวคิดจากข้อจำกัดในการใช้งานของถังกรองแบบเดิม เช่น การใช้ความลึกของชั้นสารกรองได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ส่วนใหญ่ความลึกที่เกิดการ

กรองจะอยู่ที่ประมาณ 3 นิ้ว (มันสิน ตันทุลเวศน์, 2539) ทั้งที่ความลึกของสารกรองทั้งหมดมีมากถึง 60 - 70 เซนติเมตร และเมื่อทำการล้างย้อน ชั้นสารกรองจะถูกล้างย้อนทั้งหมด แต่ส่วนที่เกิดการอุดตันมีเพียงด้านบนเท่านั้น จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายอย่างมาก

หลักการทำงานของถังกรองแบบเติมอากาศ คือ การฝังหัวเติมอากาศไว้ในชั้นสารกรอง เพื่อใช้ประโยชน์จากฟองอากาศทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวและสามารถควบคุมการขยายตัวของชั้นสารกรองได้จากการปรับอัตราการเติมอากาศ คาดว่าทำให้ความลึกที่เกิดการกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขั้นตอนการล้างย้อนหัวเติมอากาศที่ฝังอยู่ในชั้นสารกรองจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการล้างย้อน ทำให้เกิดการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างย้อนได้ ถังกรองแบบเติมอากาศแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ถังกรองแบบเติมอากาศ

2.4 ชนิดของการกรอง

ถังกรองทรายสามารถแบ่งตามอัตราการกรองได้เป็น 2 แบบ คือแบบทรายกรองช้า (Slow Sand Filter) และแบบทรายกรองเร็ว (Rapid Sand Filter)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.1 เครื่องกรองทรายแบบช้า (Slow Sand Filter) (มันลิน ตันทูลเวศน์, 2539)

เครื่องกรองสามารถกรองน้ำได้ดีก็ต่อเมื่อน้ำดิบมีความขุ่นไม่มากนัก การกรองน้ำด้วยอัตราต่ำ สามารถกำจัดความขุ่นได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีช่วยในการรวมตะกอน เพื่อให้เป็นก้อนตะกอน (Floc) และไม่จำเป็นต้องใช้ถังตกตะกอนในการกำจัดความขุ่นหรือก้อนตะกอน ถังกรองช้าอาจเรียกว่าถังกรองชีวะ (Biofilter) โดยที่ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ประกอบไปด้วย

- สารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กซึ่งไม่ถูกกำจัดในถังตกตะกอน
- แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์และกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)
- สาหร่าย (Algae) เป็นแหล่งให้ออกซิเจนสำหรับแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน และปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กและแมงกานีส

โดยในระหว่างการดำเนินการกรอง ค่าความดันลด (Headloss) มีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเกิดขึ้นของฟิล์มชีวภาพ ในขณะที่อัตราการกรองมีค่าคงที่ (4 - 8 ม./วัน) โดยที่มีการควบคุมจากฝาย (Weir) ที่สามารถปรับได้ ระบบการกรองชนิดนี้จะต้องมีการตักส่วนผิวบนของทรายออกประมาณ 1 ซม. ทุกๆ 20 - 60 วัน

ระบบการกรองช้าควรมี 3 ชั้นตอน

- ชั้นกรองหยาบด้วยอัตรากรอง 20-30 ม. / วัน
- ชั้นกรองขั้นต้น (Prefilter) ด้วยอัตรากรอง 10-20 ม. / วัน
- ชั้นกรองช้าด้วยอัตรากรอง 3-7 ม. / วัน

2.4.2 เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว (Rapid Sand Filter) (มันลิน ตันทูลเวศน์, 2539)

เครื่องกรองเร็วสามารถกรองน้ำได้เร็วกว่าเครื่องกรองช้าหลายสิบเท่า แต่ต้องทำความสะอาดทรายกรองบ่อยกว่า วิธีการล้างเครื่องกรองเร็วกระทำได้โดยปล่อยให้ น้ำไหล

ย้อนทิศทางการกรอง (Backwash) ทำให้ชั้นกรองขยับตัว ทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มขึ้น ความชุ่มชื้นที่จับอยู่ภายในสามารถหลุดออกไป วิธีกรองเร็วมี 2 ลักษณะ คือ

- การกรองโดยตรง (Direct Filtration) ไม่ต้องมีการกำจัดความชุ่มชื้นออกก่อนด้วยกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation and Sedimentation) การกรองโดยตรงอาจมีการเติมสารเคมีให้กับน้ำก่อนเข้าเครื่องกรอง หรือไม่ได้
- การกรองน้ำที่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation and Sedimentation) มาแล้ว

ตารางที่ 2.1 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการกรองเร็วและช้า (Fair, Geyer และ Okun, 1968)

หัวข้อ	การกรองช้า	การกรองเร็ว
อัตราการกรอง	4-8 ม./วัน	120-150 ม./วัน
พื้นที่กรอง	น้อยกว่า 5000 ม. ²	150 ม. ² หรือน้อยกว่า
องค์ประกอบของชั้นทราย	ทราย 90-120 ซม. กรวด 40-60 ซม.	ทราย 60-70 ซม. กรวด 45 ซม. หรือน้อยกว่า
ขนาดของทราย	Effective size: d(10%): 0.3-0.45 ซม. uniform coefficient: d(60%)/d(10%):2.5	Effective size: d(10%): 0.45 - 0.7 ซม. uniform coefficient: d(60%)/d(10%): 1.7 หรือน้อยกว่า
การกระจายของทราย	ไม่เป็นชั้น	แบ่งชั้นเป็นทรายขนาดเล็กชั้นบนส่วนขนาดใหญ่ชั้นล่าง
กลไกการกรอง	หลักชีวภาพที่ชั้นบน (Surface Filtration)	เกิดขึ้นชั้นในของทราย (Deep Filtration)
ความดันดล (Headloss)	6 ซม. เริ่มต้น ถึง 1.1-1.5 เมตรสุดท้าย	30 ซม. เริ่มต้น ถึง 2-3 เมตรสุดท้าย
ใช้งานก่อนทำความสะอาด	20 ถึง 60 วัน	12 ถึง 48 ชม.
วิธีการทำความสะอาด	ตักผิวบนที่สกปรกออกและล้าง	การใช้น้ำย้อนกลับ
น้ำที่ใช้ล้าง	0.2-0.6% ของน้ำที่กรอง	1-5% ของน้ำที่กรอง
ระบบก่อนกรอง	การตกตะกอน	การสร้างตะกอน รวมตะกอน ตกตะกอน
ระบบหลังกรอง	การฆ่าเชื้อ	การฆ่าเชื้อ การดูดซับหรือโอโซน
การดำเนินงาน	ง่าย	ต้องมีความรู้
ราคาค่าก่อสร้าง	ต่ำกว่า	สูงกว่า
ราคาการดำเนินงาน	ต่ำกว่า	สูงกว่า

2.5 ทฤษฎีของการกรอง

การกรองน้ำเป็นการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำมาไว้บนสารกรอง หรือมาไว้ที่ช่องว่างระหว่างสารกรอง (Porosity) ดังนั้นกลไกในการกรองน้ำ จึงเกี่ยวกับวิธีการเคลื่อนย้าย (Transport) สารแขวนลอยในน้ำ ให้เข้าไปหาสารกรอง ซึ่งอยู่หนึ่งๆ และวิธีการทำให้สารแขวนลอยเกาะจับอยู่กับสารกรอง หรือสิ่งที่ติดอยู่บนสารกรองก่อนแล้ว (Attachment)

การกรองสารแขวนลอยขนาดเล็กและขนาดใหญ่ออกจากน้ำ อาศัยกลไก 2 ชุด ซึ่งแตกต่างกัน สารแขวนลอยขนาดใหญ่ หรือก้อนตะกอน (Floc) ที่แข็งแรงสามารถตกตะกอนบนสารกรอง หรือติดค้างในช่องว่างระหว่างสารกรองซึ่งแยกออกจากน้ำได้ ส่วนสารแขวนลอยขนาดเล็กต้องอาศัยแรงที่เกิดจากการแพร่กระจาย และมีกลไกดูดติดผิว ซึ่งมีการทำลายประจุลบให้เป็นกลาง และ/หรือเปลี่ยนประจุลบให้เป็นประจุบวก ทฤษฎีของการกรองอธิบายได้เป็น 3 หัวข้อดังนี้

2.5.1 กลไกของการกรอง (Tchobanoglous และ Burton, 1991)

กลไกของการกรองคือ วิธีการเคลื่อนที่ของตะกอนต่างๆ ในน้ำผ่านเข้าไปหาสารกรอง และวิธีการจับตะกอนต่างๆในน้ำให้เกาะติดอยู่บนสารกรอง กลไกของการกรองมีอยู่ 3 กลไกด้วยกันคือ

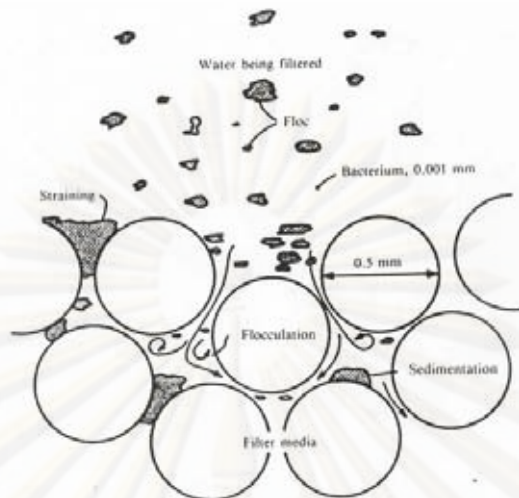
1. กลไกทางกายภาพ

1.1 การติดค้างอยู่บนสารกรอง (Straining) คือ การที่ขนาดของตะกอนใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างสารกรองจึงติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างสารกรอง

1.2 การตกตะกอน (Sedimentation) คือ ตะกอนได้ตกลงบนสารกรองภายในชั้นกรอง

1.3 การเบียดเข้าหาสารกรอง (Interception) คือ ตะกอนได้เคลื่อนที่ไปในทิศทางแนวเดียวกับกระแส น้ำ และตะกอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปพบกับผิวของสารกรอง

1.4 การชน (Inertial Impaction) คือตะกอนที่มีน้ำหนักมากเกินไป จนไม่สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางแนวเดียวกับกระแส น้ำ ดังนั้นตะกอนหนักเหล่านี้จะตกลงบนสารกรองเสียก่อน



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของตะกอน (Raju, 1995)

2. กลไกทางกายภาพและเคมี

กลไกทางกายภาพและเคมีเป็นกลไกของการกรองที่เกิดจากทั้งกายภาพและเคมี จะมีการทำงานได้ดีกว่ากลไกของการกรองที่เกิดจากทางกายภาพเพียงอย่างเดียว เพราะการกรองนี้เกิดขึ้นได้เกือบทั่วทั้งชั้นกรองทำให้ประสิทธิภาพในการใช้สารกรองมีมาก กลไกของการกรองแบบนี้ต้องอาศัยหลักฟิสิกส์และเคมีมาอธิบาย มี 4 แบบ คือ

2.1 การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption) คือ การดูดติดผิวที่อาศัยการยึดเหนี่ยวทางเคมีโดยจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในการดูดติดผิวระหว่างตะกอนกับสารกรอง การดูดติดผิวแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิสูง เพราะว่าปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดได้เร็วขึ้น เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น

2.2 การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) คือการดูดติดผิวที่อาศัยแรงต่าง ๆ ยึดเหนี่ยวไม่ให้เกิดหลุดออกจากกันระหว่างตะกอนกับสารกรอง การดูดติดผิวแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับการดูดติดผิวทางเคมี

2.3 แรงติดแน่น (Adhesion Forces) คือ แรงติดแน่นกับผิวของสารกรองที่ตะกอนนี้ไหลผ่านมาพบ แต่เนื่องจากแรงเสียดน้ำที่เกิดจากการไหลของน้ำผ่านชั้นกรอง ได้เสียดพวกตะกอนบางส่วนก่อนที่ตะกอนส่วนนี้จะเกาะติดแน่นบนผิวสารกรอง ซึ่งทำให้น้ำได้ไหลพาตะกอนนี้เคลื่อนผ่านชั้นกรองลงไปลึกขึ้นจนอาจจะหลุดออกจากชั้นกรอง และไหลไปปนกับน้ำที่ผ่านระบบการกรองแล้ว (Effluent) มีปริมาณตะกอนมากขึ้น

2.4 การสร้างและรวมตะกอน (Coagulation – Flocculation) คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้ตะกอนต่างๆ ในน้ำได้มีโอกาสเกาะตัวซึ่งกันและกัน ทำให้ตะกอนเหล่านี้มีขนาดใหญ่ขึ้น และจะมีผลให้เกิดการดักตะกอนโดยสารกรองในชั้นกรองได้ ซึ่งจะอาศัยกลไกของการกรองแบบต่างๆ

3. กลไกทางชีวเคมี

กลไกทางชีวเคมีเป็นกลไกของการกรองที่เกิดจากพวกจุลชีพต่างๆ ได้เติบโตอยู่ภายในชั้นกรอง ซึ่งจะลดขนาดช่องว่างที่อยู่ภายในชั้นกรอง และทำให้เกิดการดักตะกอนโดยสารกรองในชั้นกรองได้ ซึ่งจะอาศัยกลไกของการกรองแบบต่างๆ เช่นกัน

2.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ (มันดิน ตันซูลเวสน์, 2539)

จากการวิเคราะห์กลไกของการกรองน้ำ ปรากฏว่า ประสิทธิภาพในการกรองน้ำเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1 - \varepsilon)L/d \quad (2.1)$$

- โดยที่ $\ln(C/C_0)$ = ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยของเครื่องกรอง
- α = ตัวแปรที่บอกว่าเมื่อสารแขวนลอยกระทบถูกสารกรอง จะมีโอกาสเกาะติดกันได้มากน้อยเพียงใด ค่าสูงสุดคือ 100% หรือ 1 จะขอเรียกตัวแปรนี้ว่า ประสิทธิภาพในการเกาะติด (Collision Efficiency or Attachment)
- η = ตัวแปรนี้บอกว่า สารแขวนลอยมีโอกาสไปกระทบกับสารกรองได้มากน้อยเพียงใด ค่าสูงสุดคือ 1 ตัวแปรนี้เรียกว่าประสิทธิภาพของการกระทบ (Single Collector Efficiency)
- ε = ความพรุนของชั้นกรอง (Porosity)
- L = ความหนาหรือความลึกของชั้นกรอง (Filter bed height)
- d = ขนาดของสารกรอง (Filter media size)

การเตรียมน้ำก่อนกรองให้เหมาะสม เท่ากับเป็นการปรับปรุงเพิ่มค่าตัวแปร α นั้นเอง ยกตัวอย่างเช่น การเติมสารส้มหรือโพลีเมอร์ ช่วยทำให้การเกาะจับระหว่างสารแขวนลอยและสารกรองมีโอกาสมากขึ้น ซึ่งเท่ากับการเพิ่มค่าตัวแปร α ตัวแปร α อาจมีความหมายคลุมถึงเคมีของการกรองก็ได้ ตัวแปร η มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างจำนวนสารแขวนลอยที่กระทบถูกสารกรองต่อจำนวนสารแขวนลอยทั้งหมดที่เข้าสู่สารกรอง ส่วน $(1-\varepsilon)L/d$ นั้นสามารถพิสูจน์ได้ว่าเป็นพื้นที่ผิวทั้งหมดของสารกรอง ดังนั้นทั้ง η และ $(1-\varepsilon)L/d$ จึงหมายถึงโอกาสของการกระทบระหว่างสารแขวนลอยและสารกรองนั่นเอง

2.5.3 ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวกับระบบการกรอง (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

ระบบการกรองจำเป็นต้องพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกรอง ดังนี้

- 1) ประจุของชั้นสารกรอง
- 2) ขนาด รูปร่างและความหนาแน่นของสารกรอง
- 3) ความพรุนของสารกรอง
- 4) ค่าสูญเสียความดัน (Headloss) เนื่องจากสารกรอง
- 5) ประสิทธิภาพของสารกรอง
- 6) คุณลักษณะของน้ำที่ไหลเข้าสู่สารกรอง เช่น ความแข็งแรงของตะกอน ประจุในน้ำ ฯลฯ
- 7) อัตราการกรอง
- 8) ความลึกของชั้นสารกรอง
- 9) ค่าสูญเสียความดันที่ยอมให้มีได้ในระบบการกรอง

จากการพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำและตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวกับระบบการกรองพบว่า เมื่อความพรุนของชั้นสารกรองที่มีค่าน้อยจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยของเครื่องกรองเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าหากความพรุนของชั้นสารกรองมีค่าน้อยเกินไปอาจทำให้ระยะเวลาในการทำงานถึงกรองสั้นลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ความพรุนของสารกรองเป็นตัวแปรที่ใช้ในการพัฒนาถึงกรองแบบเดิมอากาศ เนื่องจากฟองอากาศสามารถทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวและสามารถควบคุมการขยายตัวของชั้นสารกรองได้จากการปรับอัตราการ

เต็มอากาศ จึงสามารถกำหนดความพูนที่เหมาะสมที่ทำให้ถังกรองสามารถใช้งานได้นาน ความลึกที่เกิดการกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้นและน้ำที่ผ่านการกรองมีคุณภาพได้มาตรฐาน

2.6 การล้างย้อน (Backwash) (มงคล สุทธิวัฒนกุล, 2549)

การล้างถังกรองทรายจะต้องใช้น้ำในการล้างย้อนเพื่อนำเอาสิ่งสกปรกที่อุดตันอยู่ในชั้นทรายออกไปก่อนที่จะทำการกรองใหม่ในครั้งต่อไป ดังนั้น น้ำที่ใช้ล้างย้อนนั้นจึงต้องทำหน้าที่ 3 อย่างด้วยกันคือ

1. ล้างสิ่งสกปรกออกจากทราย แต่การล้างเอาสิ่งสกปรกออกจากทรายแล้ว สิ่งสกปรกนั้นก็ยังคงลอยอยู่ในน้ำซึ่งยังอยู่ในถังกรองนั้น
2. น้ำที่ไหลย้อนนั้นต้องพาสิ่งสกปรกที่ลอยอยู่ในน้ำนั้นออกไปจากถังโดยผ่านทางช่องทางออก
3. น้ำที่ใช้ล้างย้อนนั้นจะต้องทำหน้าที่กวทรายไปพร้อมๆกันด้วย เพราะถ้าทรายไม่ถูกกวสิ่งสกปรกที่อยู่ในทรายก็ไม่สามารถหลุดออกมาได้ตามที่ต้องการ

น้ำล้างย้อนนี้จะต้องทำหน้าที่ 3 อย่างนี้ในเวลาเดียวกันให้ได้ ถ้าการล้างไม่ดีหรือไม่เพียงพอก็จะทำให้เกิดการอุดตันถาวรขึ้นในชั้นทรายบางส่วนได้เพราะตะกอนอาจจะจับตัวกันและจับตัวกับทรายเป็นก้อนแข็งคล้ายคอนกรีต ซึ่งจะมีผลทำให้พื้นที่ในการกรองลดลง ทำให้เกิดความต้านทานหรือความดันลดเพิ่มเร็วขึ้น และทำให้เวลาการทำงานต่อรอบของถังกรองทรายเป็นลดลงหรือต้องล้างบ่อยขึ้น ซึ่งจะทำให้เสียเวลา เสียแรงงานและใช้น้ำมากขึ้น

การล้างถังกรองทรายมีอยู่ 3 วิธี คือ

1. ล้างด้วยแรงน้ำอย่างเดียว เมื่อต้องการล้างด้วยน้ำอย่างเดียวเพื่อให้ชั้นกรองทรายมีการขยายตัว ความเร็วของกระแสจะต้งมากเพียงพอที่จะทำให้สารกรองหรือทรายมีการขยายตัวอย่างน้อย 15% เพื่อให้สิ่งสกปรกสามารถหลุดออกจากชั้นกรองทรายได้ วิธีการนี้มักเกิดก้อนตะกอนดิน (Mud Ball) เนื่องจากเกิดกระแสไหลวน (Eddy Current)

2. ล้างด้วยน้ำและลมพร้อมกัน วิธีการนี้ใช้น้ำน้อยกว่าและไม่ทำให้ชั้นทรายขยายตัว ทรายถูกกวาดด้วยลมแรงดันสูงโดยที่ชั้นกรองจะทรงตัว ชั้นผิวหน้าหรือเค้กจะแตกออกด้วยลม ไม่ทำให้เกิดก้อนตะกอนดิน (Mud Ball) มักใช้กับสารกรองชนิดเดียวที่ทำด้วยทราย

3. ล้างด้วยลมและน้ำตามลำดับ วิธีการนี้ใช้กับถังกรองทรายที่ใช้น้ำและลมพร้อมกันไม่ได้ เช่น สารกรองสองชั้นด้วยแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) กับทราย เพราะจะทำให้ตัวกลางเบาหลุดออก ขั้นตอนแรกเปิดลมให้สิ่งสกปรกหลุดจากการเกาะกับตัวกลาง ขั้นตอนที่สองปิดลมและเปิดน้ำให้แรงพอที่จะเกิดการขยายตัวของชั้นกรองให้สิ่งสกปรกจากขั้นตอนแรกหลุดออกไปจากถัง การล้างย้อนด้วยลมกับน้ำจะสามารถลดปริมาณน้ำล้างได้ 20-30% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำล้างย้อนอย่างเดียว

2.7 การไหลของน้ำในการกรอง (มันลิน ตันทูลเวสส์, 2539)

2.7.1 การไหลของน้ำผ่านชั้นกรองและชั้นกรวด

ชั้นสารกรองในที่นี้หมายถึงชั้นทราย ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.4 – 2 มม. การไหลของน้ำผ่านชั้นกรองดังกล่าว มักเป็นแบบไหลเอื้อย (Laminar Flow) และน้ำมีอุณหภูมิไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส ลักษณะนี้ทำให้เกิดการสูญเสียความดันมีค่าแปรผันโดยตรงกับอัตราการกรอง สมการที่ใช้คำนวณหาการสูญเสียความดันของชั้นกรองที่ยังสะอาด คือ

Carman-Kozeny Equation (Laminar Flow)

$$H/L = (5vV/g)[(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3](6/\psi)^2 \sum(X_i/d_i^2) \quad (2.2)$$

โดยที่	X_i	= ปริมาณของอนุภาคสารกรองที่มีขนาด d_i ต่อปริมาณของสารกรองทั้งหมด
	ν	= ความหนืดเชิงจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity) หน่วยคือ มม. ² /วท.
	V	= อัตราเร็วในการกรอง
	ε	= สัมประสิทธิ์ความพรุน %
	ψ	= ดรรชนีของความกลม
	L	= ความหนาของชั้นสารกรอง

เนื่องจากการไหลผ่านชั้นกรวดเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent) การคำนวณหาการสูญเสียความดันจึงใช้สมการใหม่ ดังนี้

Carman-Kozeny Equation (Turbulent)

$$\begin{aligned} H/L = & (150\nu V/g)[(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^2](1/\psi)^2 \sum(X_i/d_i^2) \\ & + (1.75V^2/g)(1-\varepsilon/\varepsilon^3)(1/\psi) \sum(X_i/d_i) \end{aligned} \quad (2.3)$$

ในกรณีของการล้างเครื่องกรองซึ่งชั้นกรวดมีการลอยตัว การสูญเสียความดันไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของสารกรองและสามารถคำนวณได้ ดังนี้

Headloss = Buoyant Weight (Steel และ McGhee, 1979)

$$\rho \cdot g \cdot H_L = (\rho_s - \rho) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot g \cdot L_0 \quad (2.4)$$

$$H_L = (S.G. - 1)(1 - \varepsilon) \cdot L_0 \quad (2.5)$$

โดยที่	H_L	=	ความดันลด
	ρ_s	=	ความหนาแน่นของทรายกรอง
	ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	ε	=	ความพรุนของสารกรอง
	L_0	=	ความหนาของสารกรอง
	$S.G.$	=	ความถ่วงจำเพาะของทรายกรอง

ทั้งนี้เนื่องจากชั้นกรวดไม่ได้ขยายตัวในระหว่างการล้างย้อน การคำนวณการสูญเสียความดันของชั้นกรวดจึงยังคงใช้สมการที่ (2.3) เช่นเดิม

2.8 มาตรฐานวัดความดันน้ำ (Piezometer) (วรากร ไม้เรียง, 2542)

เครื่องมือที่ใช้วัดความดันน้ำในมวลดิน (Pore Pressure) หรืออาจจะเรียกชื่อว่ามาตรฐานวัดความดันน้ำ ในระบบเครื่องมือวัดความดันไม่ว่าชนิดใด ๆ ก็ตาม จะต้องการปริมาณน้ำส่วนหนึ่งที่ต้องไหลเข้าไปในหัววัดเพื่อจะให้เกิดการอ่านค่าได้ ดังนั้นประสิทธิภาพการวัดของมาตรฐานวัดความดันน้ำขึ้นกับอิทธิพล 2 ปัจจัย คือ

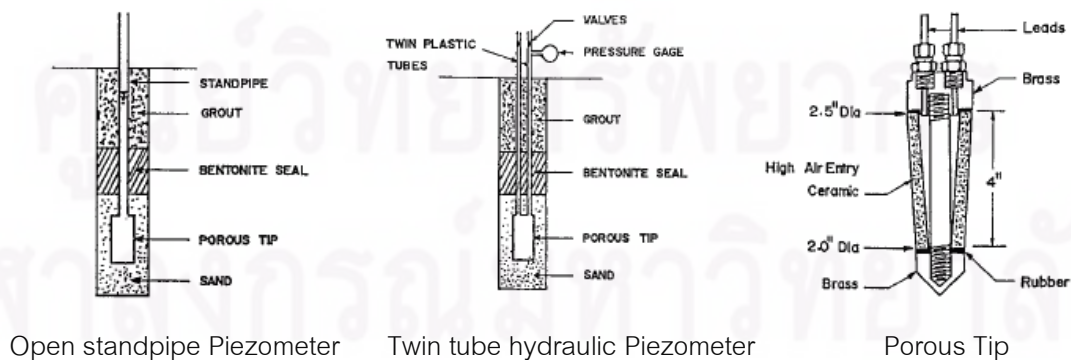
1) Volume Factor (V) ซึ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่ต้องการให้เข้าสู่หัวมาตรฐานวัดความดันน้ำ ถ้าต้องการปริมาณน้ำที่ต้องไหลเข้ามาจากมวลดินน้อย ความสามารถในการอ่านค่าความดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงได้เร็ว ความไวจะสูง

2) Shape Factor (F) ซึ่งบอกถึงพื้นที่รับน้ำเข้าสู่หัวมาตรฐานวัดความดันน้ำ ถ้ามีพื้นที่รับน้ำมากปริมาณน้ำก็จะไหลเข้าได้เร็ว ความไวจะสูง

ดังนั้น เหตุผลประกอบการเลือกมาตรฐานวัดความดันน้ำที่ดียิ่งหนึ่งก็คือความไวในการวัด ซึ่งสามารถบอกได้ด้วยอัตราส่วนของ V/F ต้องให้มีค่าน้อย เวลาที่จะอ่านค่าได้จึงจะเร็วใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำจริงมากที่สุด

2.8.1 ระบบมาตรฐานวัดความดันน้ำ

1) แบบใช้แรงดันน้ำ (Hydraulic Type) เป็นแบบที่ความดันน้ำสามารถวัดได้จากความสูงของระดับน้ำในท่อ (Standpipe) ซึ่งอาจเรียกว่า "ระบบเปิด" หรืออ่านจากมาตรฐานวัดความดัน (Pressure Gage) และอ่านจากระดับปรอทที่แตกต่างกันในหลอดแก้วตัว "U" (Manometer) ซึ่งอาจจะเรียกว่า "ระบบปิด" เพราะน้ำซึ่งเป็นตัวกลางในการวัดค่า ถูกปิดกั้นไว้ด้วยระบบการวัดที่ปลายทางดังแสดงในรูปที่ 2.7

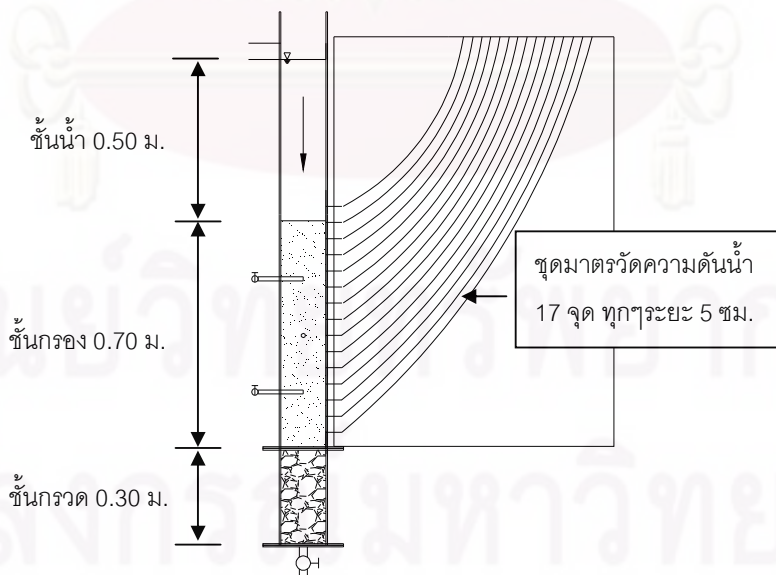


รูปที่ 2.7 มาตรฐานวัดความดันน้ำแบบใช้แรงดันน้ำ (วรากร, 2542)

2) แบบใช้แรงดันลม (Pneumatic type) เป็นระบบมาตรวัดความดันน้ำที่อาศัยความดันลมในการวัดค่าโดยความดันของน้ำในมวลดินจะเข้ามาสู่หัววัดผ่านแผ่นยางบาง ๆ (Diaphragm) ซึ่งจะรับแรงดันน้ำด้านหนึ่งและจะถูกดันกลับด้วยอากาศที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องวัด เมื่อความดันของอากาศหรือลมเท่ากับแรงดันน้ำ จะมีวาล์วปล่อยให้ลมส่วนหนึ่งผ่านออกไปยังระบบวัดด้านบนเพื่อเป็นสัญญาณให้ทำการอ่านค่าความดันลมที่สมดุลกับความดันน้ำที่หัวมาตรวัดความดันน้ำ

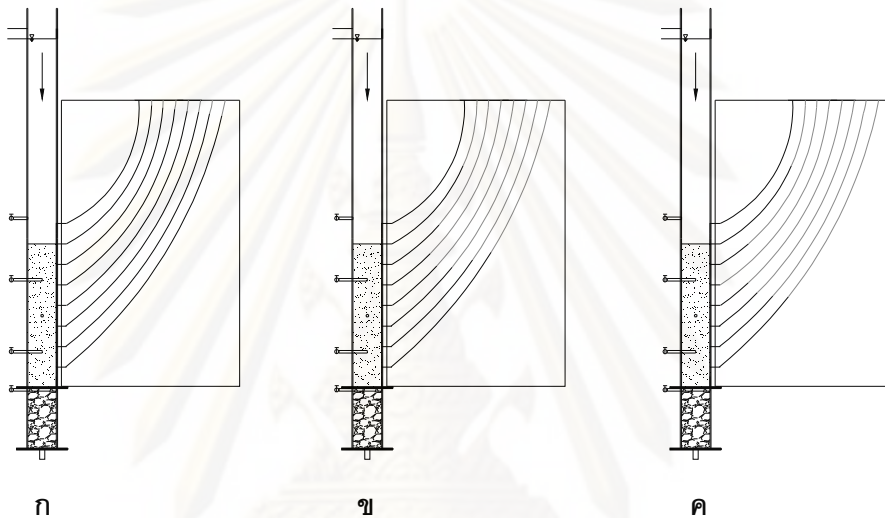
3) แบบใช้แรงดันไฟฟ้า (Electric Type) ในระบบนี้ ความดันน้ำจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าใน 2 รูปแบบคือแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ของสเตรนเกจ (Strain Gage) ที่ติดไว้ที่แผ่นโลหะบาง ซึ่งจะแอ่นตัวไปเป็นสัดส่วนกับแรงดันน้ำที่มากกระทำ ในขณะที่อีกแบบหนึ่งจะใช้วัดด้วยความถี่ในการสั่นของเส้นลวดที่ขึงตึงระหว่างแผ่นโลหะรับแรงได้และจุดคงที่ (Vibrating Wire) ในระบบนี้ เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นเส้นลวดจะหย่อนลงทำให้ความถี่ลดลง ในแบบหลังนี้จะมีข้อดีตรงค่าที่วัดได้ไม่ต้องมีการปรับแก้ความยาวของสายจากหัววัดไปยังเครื่องวัด เพราะไม่ได้นำเอาความต้านทานของเส้นลวดในสายมาคิด

ในการวิจัยนี้ได้นำมาตราวัดความดันน้ำแบบใช้แรงดันน้ำที่สามารถวัดได้จากความสูงของระดับน้ำในท่อมาประยุกต์ใช้ในการบันทึกค่าความดันลวดที่เกิดขึ้นในชั้นสารกรอง โดยทำการติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำทุกระยะ 5 ซม. ตามความสูงของชั้นสารกรอง รวมทั้งหมด 15 จุด ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 มาตรวัดความดันน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้

หลักการทํางานจะใช้ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำแต่ละจุดแสดงค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในชั้นสารกรอง เมื่อเริ่มกรองระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการไหลของน้ำที่ไหลผ่านชั้นกรองและชั้นกรวด ดังรูปที่ 2.9 ก เมื่อเวลาผ่านไปถึงกรองเริ่มเกิดการอุดตัน ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำจะลดระดับลงเรื่อยๆ (ความดันน้ำลดลง) ดังรูปที่ 2.9 ข จนในที่สุดถึงกรองเกิดการอุดตัน มาตรวัดความดันน้ำในจุดที่เกิดการอุดตันจะอ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ (ไม่มีน้ำอยู่ในสายยาง) ดังรูปที่ 2.9 ค



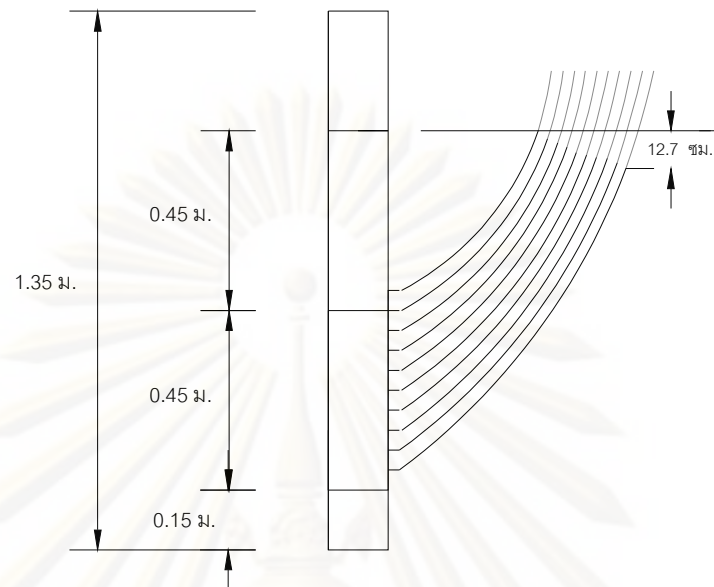
รูปที่ 2.9 แสดงหลักการทํางานของมาตรวัดความดันน้ำ

ข้อมูลระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำแต่ละจุดที่ทำการบันทึกไว้สามารถบอกระยะเวลาการใช้งานถึงกรองและนำไปใช้ในการสร้างกราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution) ซึ่งจะสามารถบอกถึงความลึกที่เกิดการกรองและจุดที่เกิดการอุดตันได้

2.8.2 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลและการสร้างกราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution)

2.8.2.1 การบันทึกข้อมูล

จดบันทึกค่าระดับน้ำที่ลดลงในมาตรวัดความดันน้ำแต่ละจุด ดังรูปที่ 2.10 ตามช่วงเวลาที่กำหนด (12 ชั่วโมง) จนวัดระดับน้ำที่ลดลงในมาตรวัดความดันน้ำตัวที่ 10 ได้เท่ากับ 85 ซม. (ไม่มีน้ำในสายยาง) จึงจบการทดลอง



รูปที่ 2.10 การจัดชั้นที่ก่อดำระดับน้ำที่ลดลงในมาตรฐานความดันน้ำ

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างตารางบันทึกค่าระดับน้ำที่ลดลงในมาตรฐานความดันน้ำ

เวลา (นาทึ)	ระดับน้ำที่ลดลงในมาตรฐานความดันน้ำ (ซม.)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0.5	1.3	2.6	3.1	5.4	7.2	9.8	11.5	12.7
720	0	14.1	14.3	20.4	21.3	21.5	22.6	24.1	26	26.9
1440	0	23.4	42.4	51	51.6	52.5	54	54.7	55.5	56.3
2160	0	37.7	-	-	-	-	-	-	79.1	79.6
2430	0	38.4	-	-	-	-	-	-	-	84.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8.2.2 การสร้างกราฟการกระจายความดัน

คำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ
 ระดับน้ำเหนือชั้นสารกรองถึงมาตรวัดความดันน้ำ – ระดับน้ำที่ลดลง = ระดับน้ำที่เหลืออยู่

ตัวอย่างคำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ

ที่เวลา 720 นาที

ระดับน้ำเหนือชั้นสารกรองถึงมาตรวัดความดันน้ำที่ 2 = 45.0 ซม.

ระดับน้ำที่ลดลง = 14.1 ซม.

ระดับน้ำที่เหลืออยู่ = $45.0 - 14.1 = 30.9$ ซม.

ที่เวลา 1440 นาที

ระดับน้ำเหนือชั้นสารกรองถึงมาตรวัดความดันน้ำตัวที่ 2 = 45.0 ซม.

ระดับน้ำที่ลดลง = 23.4 ซม.

ระดับน้ำที่เหลืออยู่ = $45.0 - 23.4 = 21.6$ ซม.

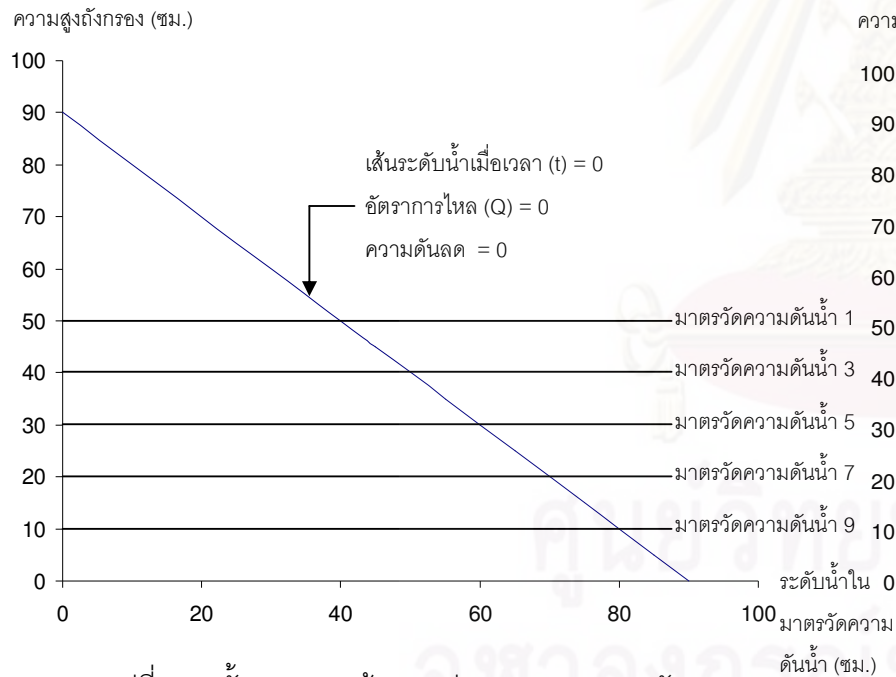
กราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution)

1. แกน Y คือตำแหน่งของมาตรวัดความดันน้ำ (ซม.)
2. แกน X คือระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำแต่ละตัว (ซม.)
3. ลากเส้นระดับน้ำที่เวลาเท่ากับ 0 โดยลากเส้นตรงตัดแกน Y ที่ระดับน้ำสูงสุดเหนือสารกรอง ตัดแกน X ที่ระดับน้ำเริ่มต้นในมาตรวัดความดันน้ำ
4. พล็อตกราฟระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำแต่ละจุดตามช่วงเวลา

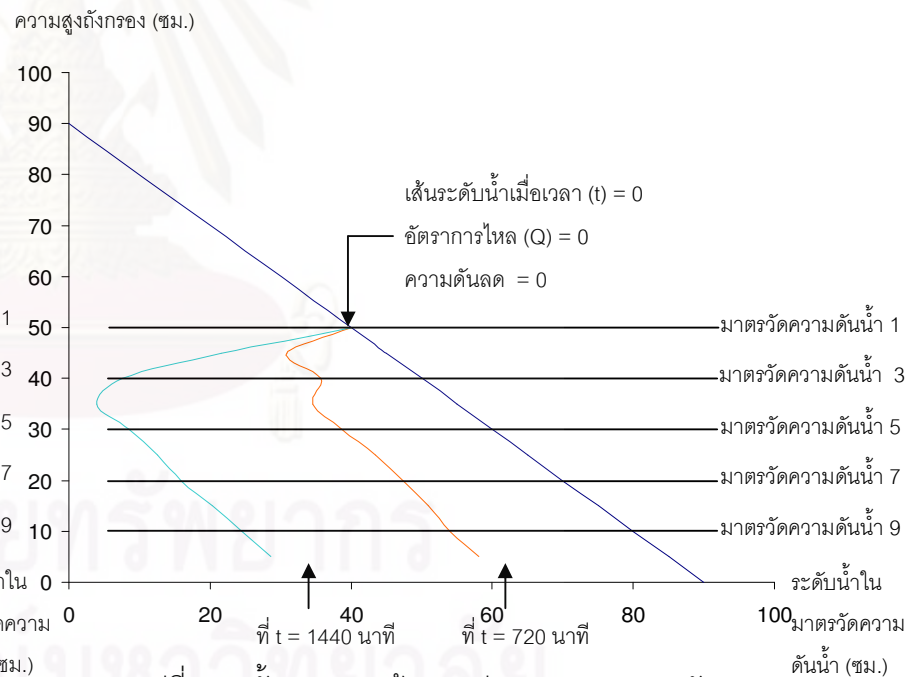
ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างตารางการคำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ (1)

เวลา (นาที)	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (ซม.)																			
	1	40-(1)	2	45-(2)	3	50-(3)	4	55-(4)	5	60-(5)	6	65-(6)	7	70-(7)	8	75-(8)	9	80-(9)	10	85-(10)
720	0	40	14.1	30.9	14.3	35.7	20.4	34.6	21.3	38.7	21.5	43.5	22.6	47.4	24.1	50.9	26	54	26.9	58.1
1440	0	40	23.4	21.6	42.4	7.6	51	4	51.6	8.4	52.5	12.5	54	16	54.7	20.3	55.5	24.5	56.3	28.7



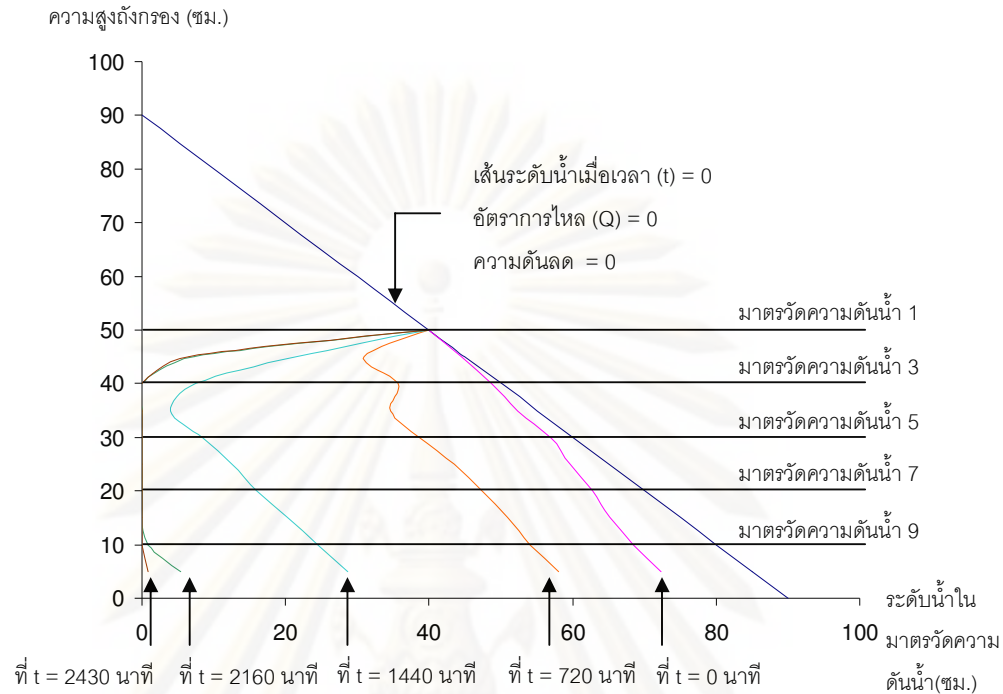
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการสร้างกราฟการกระจายความดัน (1)



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการสร้างกราฟการกระจายความดัน (2)

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างตารางการคำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ (2) (ไทรภพ ถึงแสง และวิษณุ บุญทองอ่อน, 2547)

เวลา (นาที)	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (ซม.)																			
	1	40-(1)	2	45-(2)	3	50-(3)	4	55-(4)	5	60-(5)	6	65-(6)	7	70-(7)	8	75-(8)	9	80-(9)	10	85-(10)
0	0	40	0.5	44.5	1.3	48.7	2.6	52.4	3.1	56.9	5.4	59.6	7.2	62.8	9.8	65.2	11.5	68.5	12.7	72.3
720	0	40	14.1	30.9	14.3	35.7	20.4	34.6	21.3	38.7	21.5	43.5	22.6	47.4	24.1	50.9	26	54	26.9	58.1
1440	0	40	23.4	21.6	42.4	7.6	51	4	51.6	8.4	52.5	12.5	54	16	54.7	20.3	55.5	24.5	56.3	28.7
2160	0	40	37.7	7.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79.1	0.9	79.6	5.4
2430	0	40	38.4	6.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	84.1	0.9



รูปที่ 2.13 กราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution) (ไกรภพ ถึงแสง และวิษณุ บุญทองอ่อน, 2547)

2.8.2.3 วิธีการอ่านกราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution)

ระยะเวลาการทำงานของถังกรอง

เริ่มนับเวลาที่ $t = 0$ (เวลาเริ่มต้น) ไปจนถึงเวลาที่มากที่สุดที่ไม่ทำให้เกิด Negative Pressure (Negative Pressure คือเส้นกราฟที่เลยไปทางแกน $-X$) จะได้ระยะเวลาการทำงานของถังกรอง

วิธีการหาค่าระดับความลึกที่เกิดการกรอง

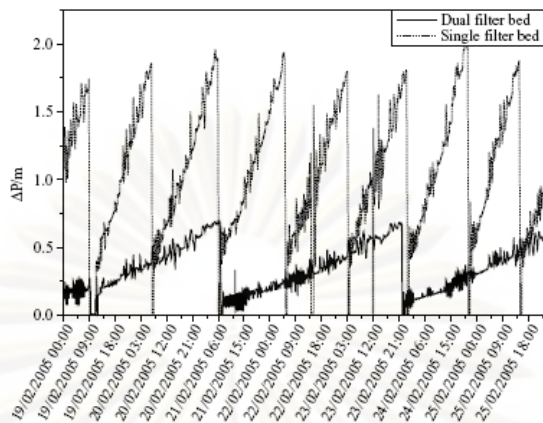
วัดระดับความลึกจากมาตรวัดความดันน้ำตัวที่ 2 (ผิวน้ำสารกรอง) ลงมาถึง มาตรวัดความดันน้ำตัวที่อ่านระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ (ไม่มีน้ำอยู่ในสายยาง) จะได้ระดับความลึกที่มีเกิดการอุดตัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

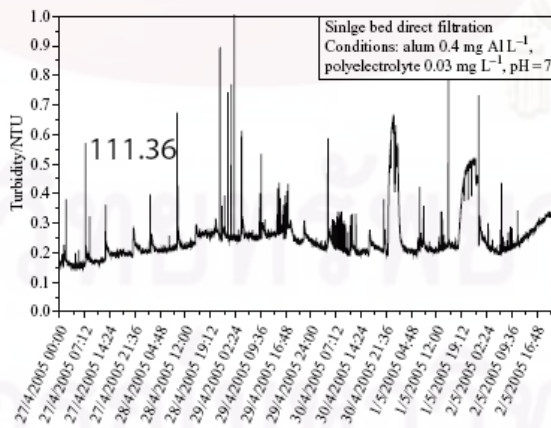
Zouboulis, Traskas และ Samaras (2007) ศึกษาการทำงานของสารกรองชั้นเดียวและสารกรองสองชั้นในโรงผลิตน้ำดื่ม Thessaloniki ทำการทดลองโดยแบ่งถึงกรองขนาดพื้นที่หน้าตัด 80 ตร.ม. ออกเป็น 2 ดังเท่าๆกัน (40 ตร.ม.) ความเร็วในการกรอง 9.4 ม./ชม. ถึงที่ 1 บรรจุทรายกรองลึก 1 เมตร ถึงที่ 2 บรรจุทรายกรองลึก 60 ซม. (ด้านล่าง) และแอนทราไซท์ลึก 40 ซม. (ด้านบน) ใช้ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ (D_{10}) เท่ากับ 0.64 มม. สัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอ (UC) ในช่วง 1.75 - 1.79 แอนทราไซท์หยาบขนาดสัมฤทธิ์ (D_{10}) เท่ากับ 1.00 - 1.10 มม. สัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอ (UC) ในช่วง 1.30 - 1.80 ใช้เครื่องมือวัดที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ (On-line Meters) เพื่อวัดค่าตัวแปรที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย ความขุ่น, ปริมาณสารส้มตกค้างและความดันลด จดบันทึกและควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนดังนี้

การทดลองที่ 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของทรายกรองและสารกรองสองชั้น โดยการกรองน้ำที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ผลการทดลอง น้ำที่กรองผ่านสารกรองทั้งสองรูปแบบมีคุณภาพที่ดีใกล้เคียงกัน ความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองเฉลี่ยเท่ากับ 0.1 เอ็นทียู ความเข้มข้นของสารส้มตกค้างเฉลี่ยเท่ากับ 25 ไมโครกรัมของสารส้ม/ลิตร ค่ามาตรฐานความขุ่นและความเข้มข้นของสารส้มตกค้างเท่ากับ 1 เอ็นทียู และ 200 ไมโครกรัมของสารส้ม/ลิตร ตามลำดับ วงจรการทำงานของสารกรองสองชั้นเฉลี่ยเท่ากับ 74 ชม. และทรายกรองเฉลี่ยเท่ากับ 18 ชม. สารกรองสองชั้นจึงทำงานได้นานกว่าทรายกรอง 3-4 เท่า ดังรูปที่ 2.14 เป็นผลให้ผลิตน้ำได้มากกว่าประมาณ 10 % ทั้งยังประหยัดพลังงานเนื่องจากใช้ปั๊มน้อยลงระหว่างการล้างย้อนสารกรองสองชั้น



รูปที่ 2.14 วงจรการทำงานของสารกรองทั้งสองชนิดเมื่อกรองน้ำที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Zouboulis, Traskas และ Samaras, 2007)

การทดลองที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของทรายกรองและสารกรองสองชั้น โดยการกรองตรง (ไม่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน) และการผสมสารเคมีและกวนเร็วอยู่ในรูปแบบการกวนผสมในเส้นท่อ (In-line) ยาว 80 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. ผลการทดลองในกรณีของทรายกรอง การใช้สารส้มปริมาณ 0.1 - 0.3 ไมโครกรัมของสารส้ม/ลิตร ทำให้วงจรการทำงานเป็นที่น่าพอใจ แต่ความชันค่อนข้างสูงคือ 0.5 - 1 เอ็นทียู หากใช้สารส้มปริมาณ 0.4 -0.5 ไมโครกรัมของสารส้ม/ลิตร ความชันอยู่ในช่วง 0.1 - 0.3 เอ็นทียู แต่วงจรการทำงานจะสั้นลงอยู่ที่ประมาณ 4.5 - 6 ชม. ดังรูปที่ 2.15 ในกรณีของสารกรองสองชั้นวงจรการทำงานของสารกรองเป็นที่น่าพอใจคือ 10 - 15 ชม. ความชันเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2-0.3 เอ็นทียู



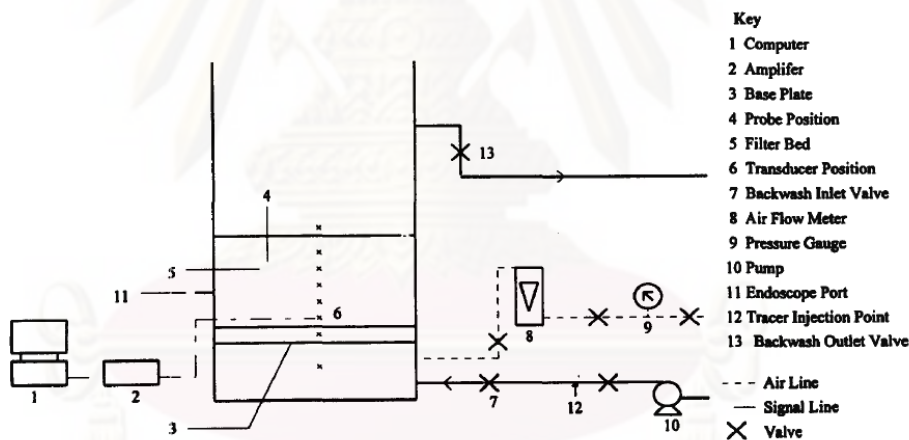
รูปที่ 2.15 ข้อมูลความขุ่นของน้ำที่กรองผ่านทรายกรองโดยระบบการกรองตรง (Zouboulis, Traskas และ Samaras, 2007)

จากการวิจัยนี้พบว่าสารกรองสองชั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรการทำงาน ความชุ่มชื้นและความเข้มข้นของสารสัมตกค้างผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำดื่ม ทั้งในการกรองน้ำที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนและการกรองตรง

Hemmings และ Fitzpatrick (1997) ศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการล้างย้อนสารกรองด้วยน้ำและอากาศพร้อมโดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์หัตถ์สัญญาณคลื่นความดัน ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือความเร็วของน้ำล้างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) ดังนี้

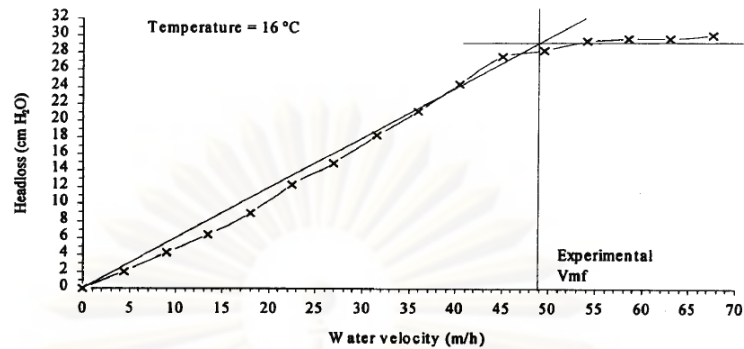
1. ใช้น้ำล้างย้อนอย่างเดียว
2. ใช้น้ำและอากาศพร้อมกัน ความเร็วของอากาศเท่ากับ 50 ม./ชม.
3. ใช้น้ำและอากาศพร้อมกัน ความเร็วของอากาศเท่ากับ 30 ม./ชม.

ถังกรองที่ใช้ในการทดลองขนาด 1 ตร.ม. สูง 3 เมตร ด้านข้างสองด้านทำจากวัสดุใสเพื่อให้มองเห็นการทำงานด้านใน ใช้ทรายกรองขนาด 1.00 - 2.00 มม. สูง 800 มม. เป็นสารกรอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.16

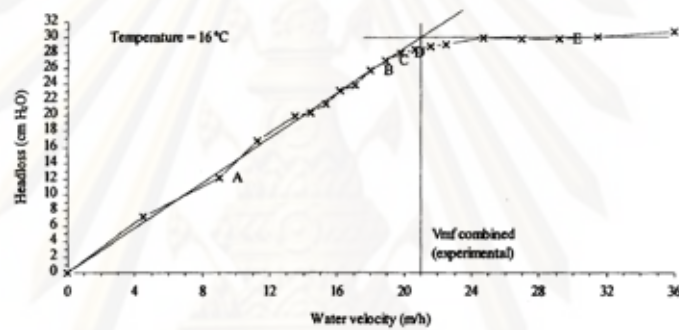


รูปที่ 2.16 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ (Hemmings และ Fitzpatrick, 1997)

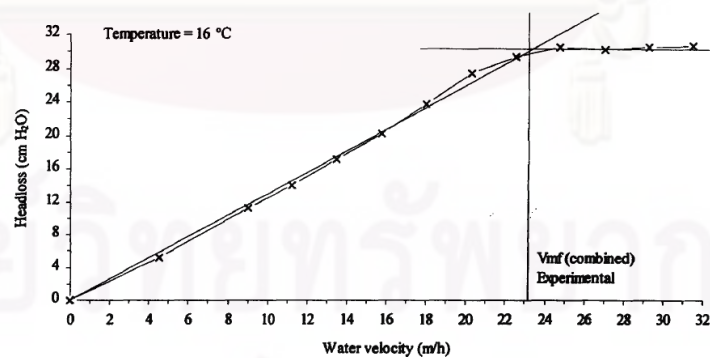
ผลการทดลองการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันทำให้ความเร็วของน้ำล้างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) มีค่าน้อยลง โดยการทดลองใช้น้ำล้างย้อนอย่างเดียว ความเร็ว (V_{mf}) เท่ากับ 49 ม./ชม. ดังรูปที่ 2.17 และการทดลองเมื่อใช้น้ำและอากาศล้างย้อนพร้อมกัน ความเร็วของอากาศที่ 50 และ 30 ม./ชม. ต้องใช้ความเร็วของน้ำล้างย้อน (V_{mf}) เท่ากับ 21 และ 23 ม./ชม. ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 ความเร็วของน้ำล้างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อใช้น้ำล้างย้อนอย่างเดียว (Hemmings และ Fitzpatrick, 1997)



รูปที่ 2.18 ความเร็วของน้ำล้างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อน้ำและอากาศล้างย้อนพร้อมกัน ความเร็วของอากาศที่ 50 ม./ชม. (Hemmings และ Fitzpatrick, 1997)



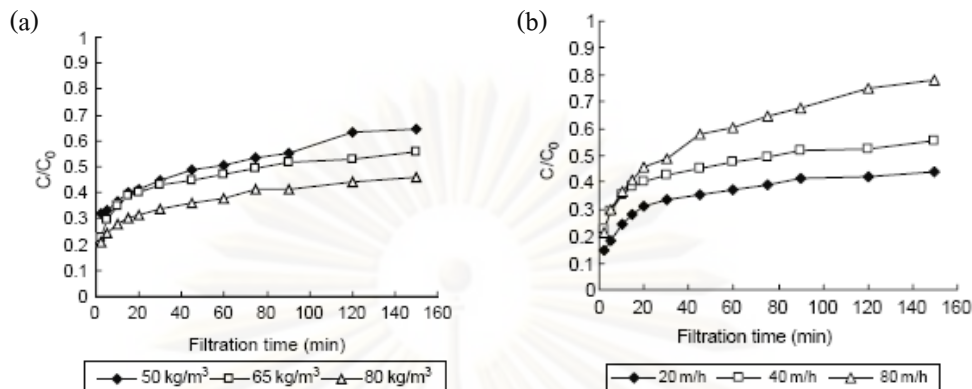
รูปที่ 2.19 ความเร็วของน้ำล้างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อน้ำและอากาศล้างย้อนพร้อมกัน ความเร็วของอากาศที่ 30 ม./ชม. (Hemmings และ Fitzpatrick, 1997)

จากงานวิจัยนี้พบว่าการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการล้างย้อนให้ดียิ่งขึ้น โดยช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างย้อน ดังนั้นเครื่องกรองแบบเติมอากาศจึงสามารถใช้ประโยชน์จากหัวเติมอากาศที่ฝังอยู่ในชั้นสารกรอง เพิ่มประสิทธิภาพในการล้างย้อนสารกรองได้เช่นเดียวกัน

Lee และคณะ (2007) ศึกษาการกักเก็บอนุภาคและลักษณะเฉพาะของสารกรองไฟเบอร์ (Flexible Fibre Filter Module) เมื่อใช้กรองน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สอง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเนื่องจากความสูงของถังกรอง ความหนาแน่นและความเร็วในการกรอง ทำการทดลองโดยใช้ถังกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มม. จำนวน 4 ถัง ที่ความสูงแตกต่างกันคือ 400, 600, 800 และ 1,000 มม. ตามลำดับ ตัวกลางสารกรองคือสารกรองไฟเบอร์ (3FM) ความหนาแน่น 50, 65 และ 80 กก./ลบ.ม. และความเร็วในการกรอง 20, 40 และ 80 ม./ชม. น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเตรียมขึ้นจากเบนโทไนต์ที่ความขุ่น 20 เอ็นทียู ขนาดเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1.62 กรัม/มิลลิลิตร การไหลของน้ำเสียเป็นแบบไหลขึ้น (Upflow) อัตราการไหลควบคุมด้วยปั๊มดูด – จ่ายของเหลว (Peristaltic Pump) วัดความดันลดยที่เกิดขึ้นในชั้นกรองด้วยมาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer)

จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของสารกรองสูงมีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงตามไปด้วย ในทางกลับกันความเร็วในการกรองที่สูงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ดังรูปที่ 2.20 (a) และ 2.20 (b) ตามลำดับ ความหนาแน่นและความเร็วในการกรองส่งผลกระทบต่อความดันลดยเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นข้อดีของสารกรองไฟเบอร์ (3FM) การกำจัดความขุ่นส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ส่วนล่างของถังกรอง (0 - 400 มม.) เมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการกรองกับการกักเก็บอนุภาคพบว่าความเร็วในการกรองมีผลต่อการกักเก็บอนุภาคน้อยมากเมื่อกรองน้ำที่มีปริมาณและองค์ประกอบในน้ำแบบเดียวกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



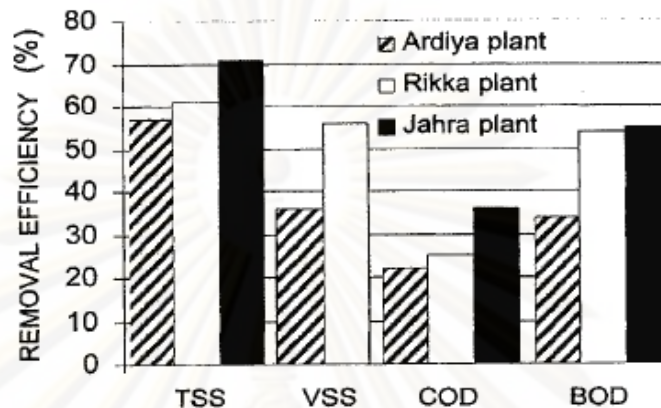
รูปที่ 2.20 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสารกรองไฟเบอร์ (a) ที่ความหนาแน่น 50,65 และ 80 กก./ลบ.ม. ความเร็วในการกรอง 40 ม./ชม. (b) ที่ความเร็วในการกรอง 20,40 และ 80 ม./ชม. ความหนาแน่น 80 กก./ลบ.ม. (Lee และคณะ, 2007)

จากการทดลองนี้พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่น เป็นผลจากความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความพรุนของสารกรองลดลงจึงสามารถกรองอนุภาคขนาดเล็กได้ดี แต่อายุการใช้งานถังกรองจะสั้นลง

Hamoda, Al-Ghusain และ Al-Mutairi (2004) งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพระบบทรายกรองเร็วในระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3 ประเทศคูเวต ในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในเขต Ardiya, Rikka และ Jahra ซึ่งรองรับน้ำเสียที่มีอัตราการไหล 220,000 , 95,000 และ 42,000 ลบ.ม./วัน ตามลำดับ โดยระบบบำบัดน้ำเสีย Ardiya ใช้ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (AS) ในการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 ส่วน Rikka และ Jahra นั้นได้เพิ่มกระบวนการเติมอากาศเพิ่มเติมจากระบบใน Ardiya มีการเก็บข้อมูลจากโรงบำบัดทั้ง 3 แห่งในทุกวัน เป็นเวลามากกว่า 1 ปี โดยทำการพิจารณาประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการบำบัดขั้นที่ 3 จากประสิทธิภาพในการลดปริมาณของแข็งแขวนลอย, สารอินทรีย์แขวนลอย, บีโอดีและซีโอดี

ในงานวิจัยนี้ข้อมูลจะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม ANOVA จากผลการวิเคราะห์พบว่ากระบวนการกรองทรายสามารถกำจัดปริมาณของแข็ง (SS,VSS) และสารอินทรีย์ (BOD,COD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และ 99 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกรองในระบบบำบัดขั้นที่ 3 นั้นมีบทบาทสำคัญในการรักษาคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดและลดความแปรปรวนของคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่ 2 โดยน้ำเสียที่ได้จากการบำบัดขั้นที่

3 จะเพิ่มความมั่นใจในคุณภาพของน้ำเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ รูปที่ 2.21 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของระบบทรายกรองเร็วในระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3



รูปที่ 2.21 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบทรายกรองเร็วในระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3 (Hamoda, Ghusain และ Al-Mutairi, 2004)

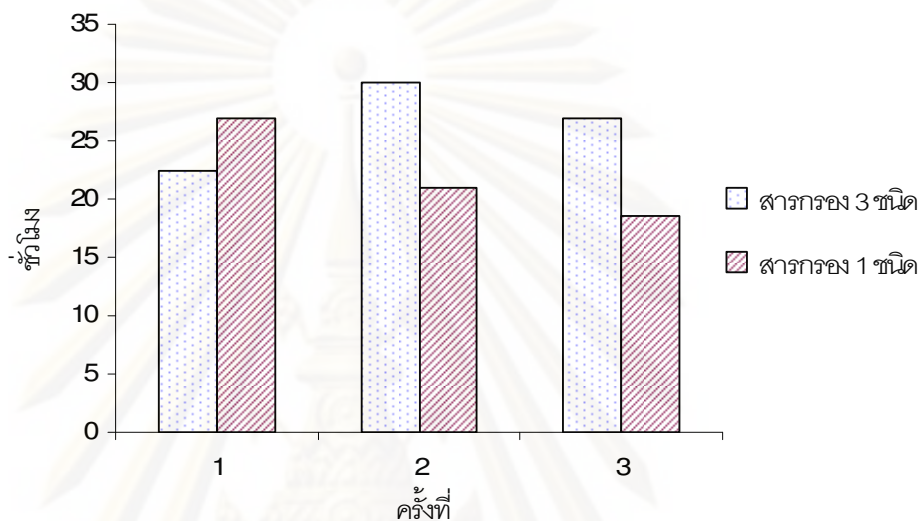
จากงานวิจัยนี้พบว่า ถังกรองทรายถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการบำบัดน้ำเสียและพบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด หากมีการพัฒนาคุณภาพของถังกรองทรายให้ดีขึ้น ถังกรองทรายอาจมีส่วนช่วยในการพัฒนาระบบผลิตน้ำประปา เช่น การรวมขั้นตอนการกวนช้า การกวนเร็ว และการตกตะกอนไว้ในถังกรองเพียงขั้นตอนเดียว

ไกรภพ ถึงแสง และวิษณุ บุญทองอ่อน (2547) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองระหว่างถังกรองทรายและถังกรองแบบ 3 ชั้นกรองโดยใช้ถังกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 นิ้ว สูง 1.20 ม. เปรียบเทียบระยะเวลาที่ควรล้างสารกรอง (Filter Run) และประสิทธิภาพในการกรองตะกอน สารกรองทั้งสองรูปแบบมีรายละเอียดดังนี้

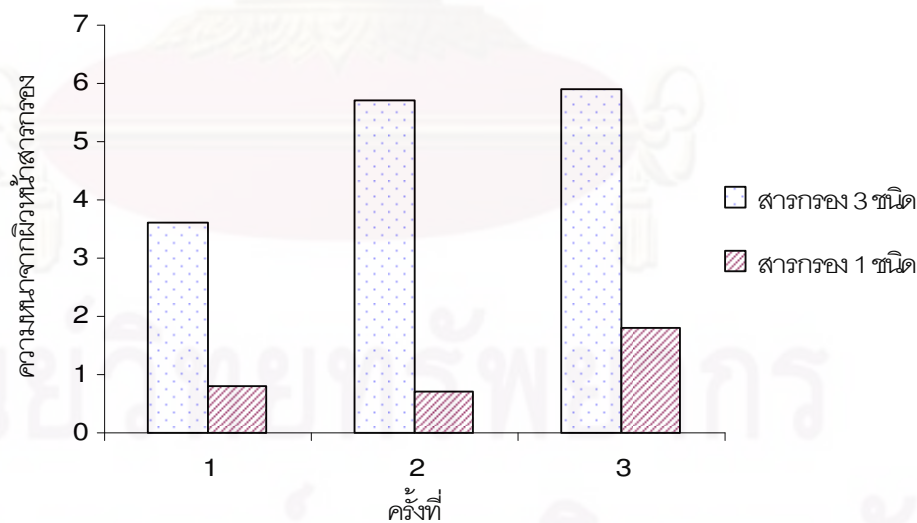
1. ถังกรองทรายใช้ทรายกรองความถ่วงจำเพาะ 2.35 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.85 มม. ความสูงของชั้นสารกรองเท่ากับ 45 ซม.
2. ถังกรองแบบ 3 ชั้นกรองประกอบด้วยแอนทราไซต์ความถ่วงจำเพาะ 1.53 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.00 มม. ทรายกรองความถ่วงจำเพาะ 2.35 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.85 มม. และแบไรท์ความถ่วงจำเพาะ 5.15 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.50 มม. ความสูงของแต่ละชั้นเท่ากับ 15 ซม. รวมเป็น 45 ซม. เรียงลำดับจากแอนทราไซต์, ทรายกรองและแบไรท์ (บน – ล่าง)

ผลการทดลอง เมื่อใช้สารกรอง 3 ชนิด คือ แอนทราไซต์, ทรายและแบไรท์ระยะเวลาที่ควรล้างสารกรองเฉลี่ยประมาณ 25.5 ชม. ประสิทธิภาพในการกรองตะกอนเล็กเฉลี่ยประมาณ 5.1 ซม.

สำหรับทรายกรองระยะเวลาที่ควรล้างสารกรองเฉลี่ยประมาณ 22.5 ชม. ประสิทธิภาพในการกรองตะกอนเล็กเฉลี่ยประมาณ 1.3 ชม. แสดงให้เห็นว่าสารกรอง 3 ชนิด มีระยะเวลาที่ควรล้างสารกรองและระดับความลึกในการการกรองมากกว่า การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ควรล้างสารกรองและระดับความลึกที่เกิดการกรองตะกอนแสดงดังรูปที่ 2.22 และ 2.23 ตามลำดับ



รูปที่ 2.22 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ควรล้างสารกรองเมื่อใช้สารกรอง 3 ชนิด และ 1 ชนิด (ไกรภพ ถึงแสง และวิษณุ บุญทองอ่อน, 2547)

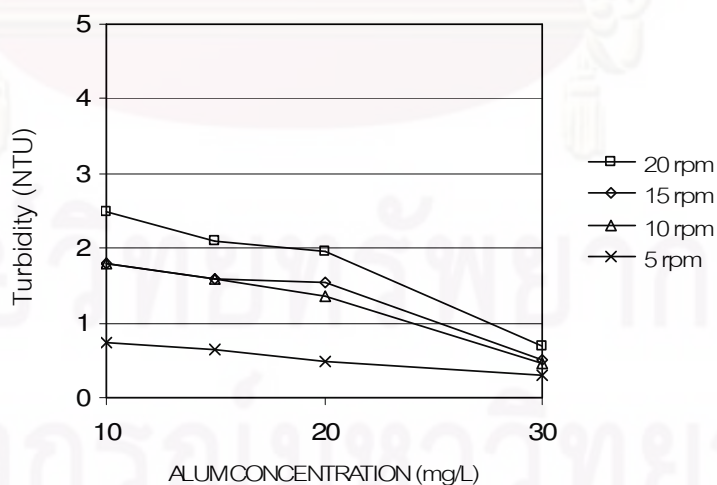


รูปที่ 2.23 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระดับความลึกที่เกิดการกรองตะกอน เมื่อใช้สารกรอง 3 ชนิด และ 1 ชนิด (ไกรภพ ถึงแสง และวิษณุ บุญทองอ่อน, 2547)

จากงานวิจัยนี้พบว่าการกรองเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นสารกรองเป็นส่วนใหญ่ จึงไม่สามารถใช้ความหนาของชั้นสารกรองได้เต็มประสิทธิภาพ ข้อมูลดังกล่าวได้จากการติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำเพื่อบันทึกค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในชั้นสารกรอง ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นการกรองไปจนถึงเวลาที่ถึงกรองอุดตัน

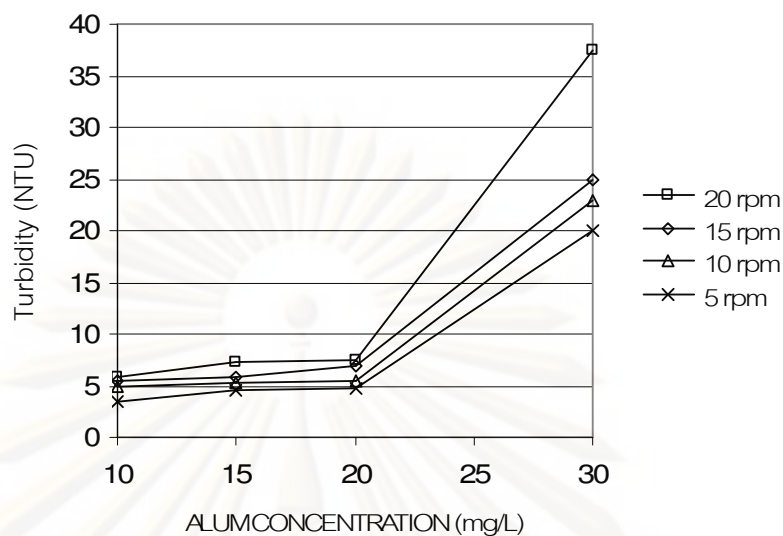
วิจารณ์ ตันติธรรม (2536) ศึกษาการกำจัดความขุ่นโดยถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียน ตะกอน กระทำโดยใช้แบบจำลองพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 300 ซม. น้ำขุ่นสังเคราะห์ที่เตรียมจากดินคาโอลิน (Kaolinite) ผสมน้ำประปาให้มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน (Coagulant) และใช้โพลิเมอร์ประจุลบความเข้มข้น 0.3 มก./ล. เป็นสารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant Aid) ตัวแปรที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารส้มในช่วง 10 - 30 มก./ล. ความเร็วรอบใบกวนในช่วง 5 - 20 รอบ/นาที และ อัตราน้ำล้นผิวในช่วง 30 - 60 ซม./นาที

ผลการวิจัยพบว่า ค่าความขุ่นของน้ำผลิตขึ้นอยู่กับทั้งอัตราน้ำล้นผิว และความเข้มข้นของสารส้ม ในช่วงอัตราน้ำล้นผิว 30 - 45 ซม./นาที ค่าความขุ่นของน้ำผลิตจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารส้มเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงอัตราน้ำล้นผิว 45 - 60 ซม./นาที ค่าความขุ่นของน้ำผลิตจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารส้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.24 และ 2.25 ตามลำดับ การเพิ่มอัตราน้ำล้นผิว และ/หรือ การเพิ่มความเร็วยรอบใบกวน นอกจากจะทำให้ค่าความขุ่นของน้ำผลิตเพิ่มขึ้น ยังจะทำให้ความเข้มข้นโดยปริมาตรของตะกอน และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในถังทำน้ำใสลดลง



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตและความเข้มข้นสารส้ม เมื่ออัตราน้ำล้นผิว

เป็น 30 ซม./นาที (วิจารณ์ ตันติธรรม, 2536)



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตและความเข้มข้นสารส้ม เมื่ออัตราน้ำล้นผิว เป็น 60 ซม./นาที่ (วิจารณ์ ตันติธรรม, 2536)

จากการทดลองนี้พบว่าการกวนผสมที่ปั่นป่วนมากเกินไปทำให้ตะกอนที่จับตัวรวมกันดี แล้วแยกออกจากกันอีกครั้งหนึ่ง ทำให้น้ำที่ได้มีความขุ่นสูงขึ้น การกวนผสมจึงเป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องพิจารณาเมื่อใช้การกวนผสมด้วยฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นจากการเติมอากาศร่วมกับกระบวนการกรอง ในงานวิจัยนี้

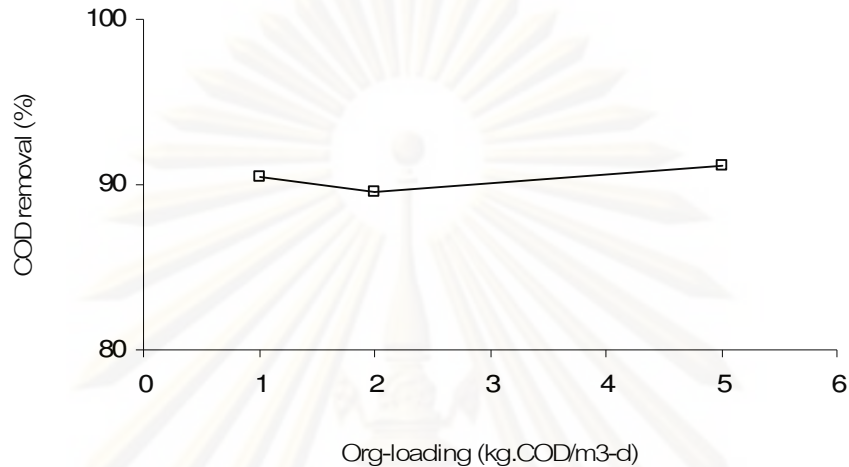
วิระพันธ์ วัฒนวิโรเดช (2539) ศึกษาความเป็นไปได้และออกแบบถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่สำหรับบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยใช้ถังปฏิกริยาเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ใช้สารกรองสองชนิดคือ 1. ทราบขนาด 2 – 4 มม. 2. ถ่านแอนทราไซท์ขนาด 0.8 – 2 มม. เป็นตัวกลางสารกรองเพื่อให้จุลินทรีย์ใช้สำหรับเกาะยึด ตัวกลางมีปริมาตร 30 ลิตร เติมอากาศผ่านหัวจ่ายลมละเอียด อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 2 ม./ชม. ทดลองโดยใช้

1. น้ำเสียสังเคราะห์ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 1,2,5 และ 10 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ที่อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง 2 วัน

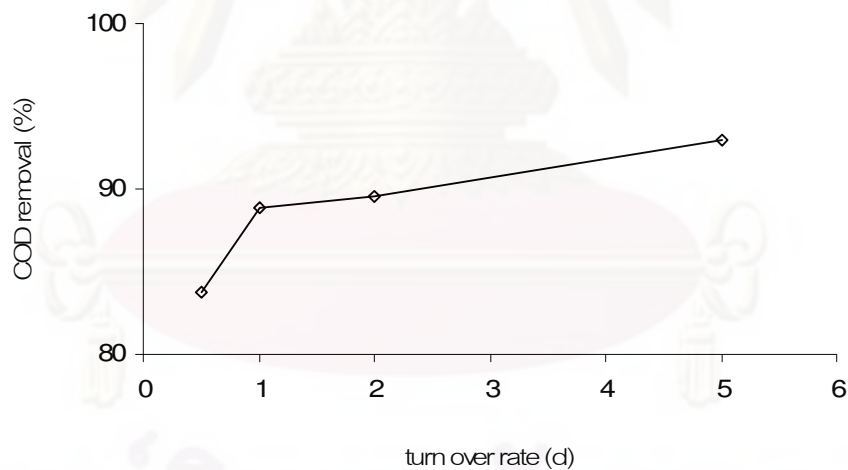
2. อัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง 0.5,1,2 และ 5 วัน ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

พบว่าถังกรองที่ใช้ถ่านแอนทราไซท์เป็นตัวกลางควบคุมอัตราการหมุนเวียนล้างตัวกลาง 2 วัน ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 5 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี 91 % ตะกอนแขวนลอยน้ำทิ้งไม่เกิน 14 มก./ล. เมื่อภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 2 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน สามารถใช้

อัตราการหมวนเวียนล้างตัวกลาง 5 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 92 % ดังรูปที่ 2.26 และ 2.27 ตะกอนแขวนลอยน้ำทิ้ง 5.33 มก./ล ระบบไม่ต้องมีถังตกตะกอน



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อัตราการหมวนเวียนล้างสารกรองเท่ากับ 2 วัน (วีระพันธ์ วัฒนวีระเดช, 2539)



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและอัตราการหมวนเวียนล้างตัวกลางต่างๆที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน (วีระพันธ์ วัฒนวีระเดช, 2539)

จากการทดลองนี้ขณะที่ใช้ทรายเป็นตัวกลางสารกรอง เมื่อระบบเกิดการอุดตันไม่สามารถกรองน้ำต่อไปได้ การเพิ่มอัตราการเติมอากาศช่วยให้ระบบกลับมาทำงานได้อีกครั้ง แต่เนื่องจากมี

จุดเติมอากาศอยู่ด้านล่างของถังกรองเพียงจุดเดียว เมื่ออัตราการเติมอากาศเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้สารกรองฟุ้งกระจาย และไม่สามารถเดินระบบต่อไปได้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ระบบการกรองน้ำมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน โดยในปัจจุบันการกรองเป็นขั้นตอนหนึ่งในการผลิตน้ำประปาและถูกจัดอยู่ในระบบบำบัดขั้นที่ 3 ในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการลดความแปรปรวนของคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่ 2 (Hamoda, Ghusain และ Al-Mutairi, 2004) ในส่วนของการผลิตน้ำประปา โดยทั่วไปน้ำที่เข้าสู่ถังกรองจะต้องผ่านกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation and Sedimentation) เพื่อลดภาระการกำจัดความขุ่นของถังกรอง ทำให้ถังกรองมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น แต่ปัญหาที่ตามมาคือการสิ้นเปลืองพื้นที่ในก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน แนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้การกรองโดยตรง (Direct Filtration) ในการผลิตน้ำประปา แต่ปัญหาที่ตามมาของการกรองโดยตรงคือถังกรองจะมีอายุการใช้งานสั้นลง เนื่องจากกลไกการกรองเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ไม่สามารถใช้ความหนาของชั้นกรองได้เต็มประสิทธิภาพ โดยความลึกที่เกิดการกรองอยู่ที่ระดับประมาณ 6 ซม. จากระดับผิวหน้าสารกรอง ทั้งนี้การวัดระดับความลึกที่เกิดการกรองสามารถทำได้โดยใช้มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) เพื่อติดตามการกระจายความดันภายในชั้นกรองและอายุการใช้งานของถังกรอง

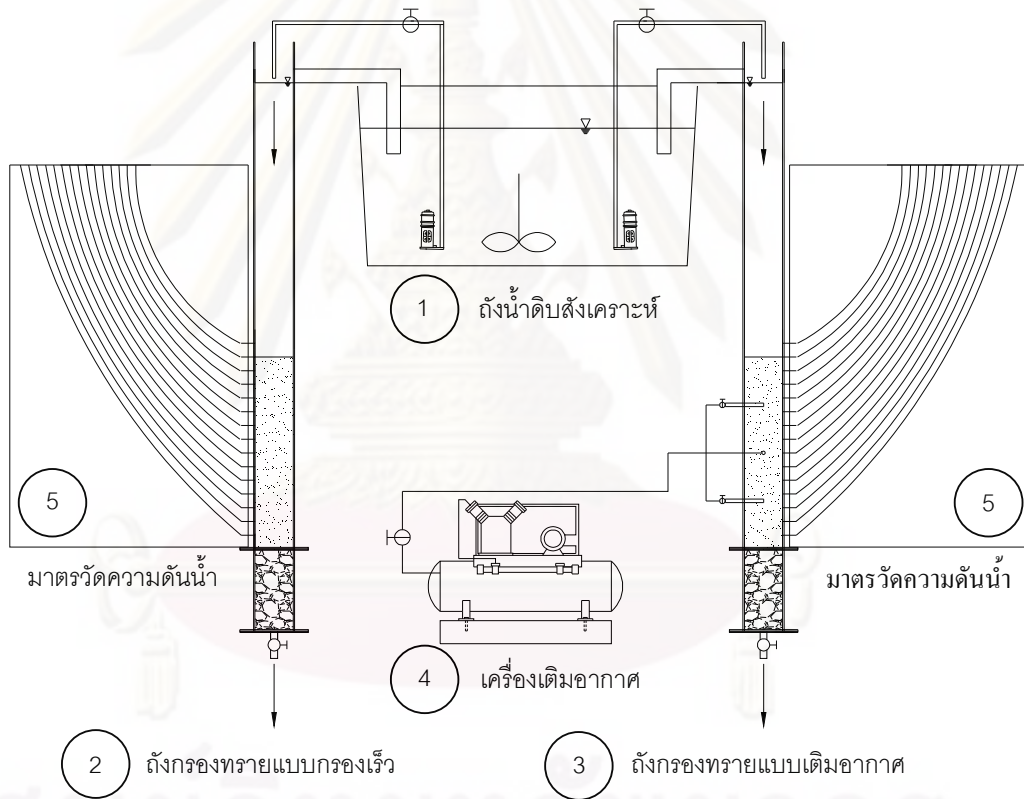
ในงานวิจัยถังกรองชีวภาพที่มีการใช้กลไกการกรองและการเติมอากาศร่วมกันเพื่อใช้บำบัดน้ำเสีย พบว่าขณะที่ถังกรองชีวภาพเริ่มเกิดการอุดตัน การเพิ่มอัตราการเติมอากาศช่วยให้ถังกรองกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากอากาศทำให้ชั้นกรองมีความพรุนมากขึ้น น้ำจึงสามารถไหลผ่านไปได้ จากงานวิจัยดังกล่าวจึงทำให้เกิดแนวคิดในการรวมกระบวนการเติมอากาศเข้ากับกระบวนการกรองน้ำ โดยคาดว่า การเติมอากาศภายในชั้นกรองจะทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว ส่งผลให้อนุภาคความขุ่นสามารถหลุดเข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น ลดการสะสมอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ทำให้ถังกรองมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น การเลือกใช้รูปแบบการกรองโดยตรงในการผลิตน้ำประปาจึงมีความเป็นไปได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเติมอากาศร่วมกับการบวกรอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของถังกรอง โดยการเติมอากาศภายในชั้นกรองยังสามารถใช้งานในรูปแบบของการล้างย้อนสารกรองด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนลดลง จึงช่วยประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายลงได้อีกทางหนึ่ง

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย และอุปกรณ์ต่างๆ โดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 การติดตั้งชุดการทดลอง



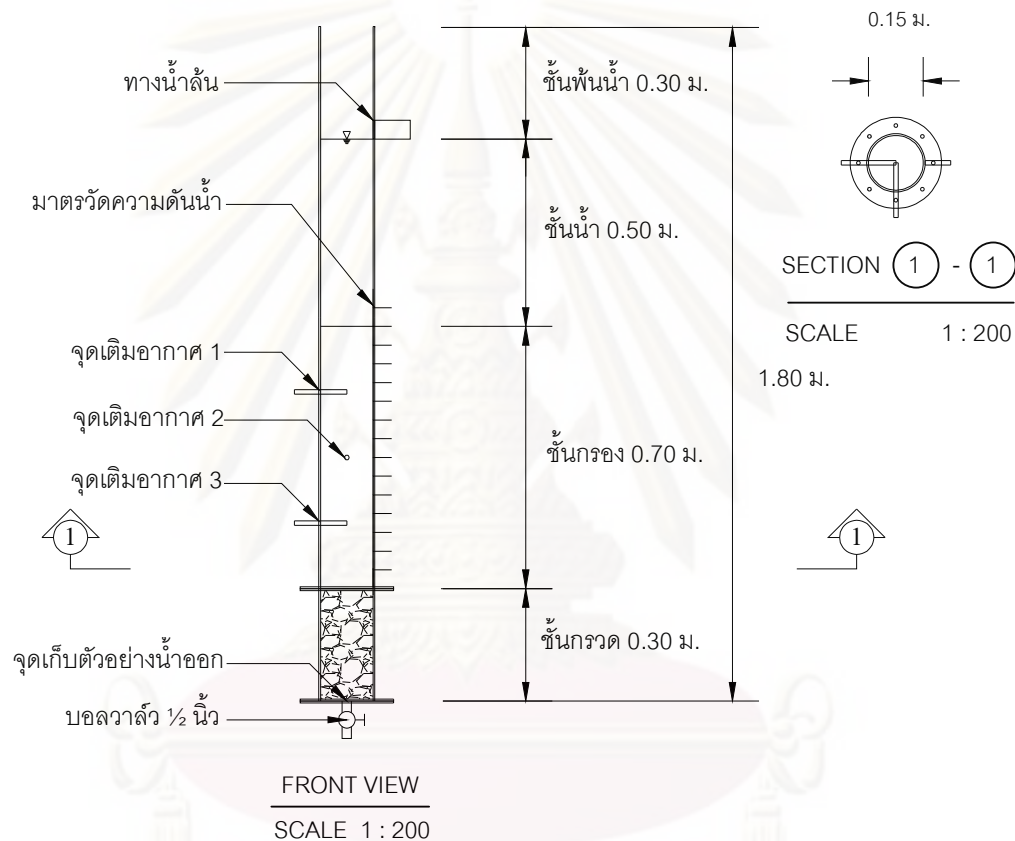
รูปที่ 3.1 การติดตั้งชุดการทดลอง

การติดตั้งชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยประกอบด้วย

1. ถังน้ำดิบสังเคราะห์
 2. ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว
 3. ถังกรองทรายแบบเต็มอากาศ
 4. เครื่องเติมอากาศ
 5. มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer)
- จำนวน 15 จุด

3.1.2 ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

ถังกรองที่ใช้ในการทดลองทำด้วยวัสดุอะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. สูง 1.80 ม. แบ่งเป็นชั้นพื้นน้ำ (Freeboard) 0.30 ม. ชั้นเก็บกัก 0.50 ม. ชั้นกรอง 0.70 ม. และชั้นระบายน้ำกรอง 0.30 ม. ติดตั้งหัวเติมอากาศ 3 จุด โดยเว้นระยะห่างในแต่ละจุดเท่าๆกัน ตามความสูงของชั้นสารกรอง รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของถังกรองแบบเติมอากาศ



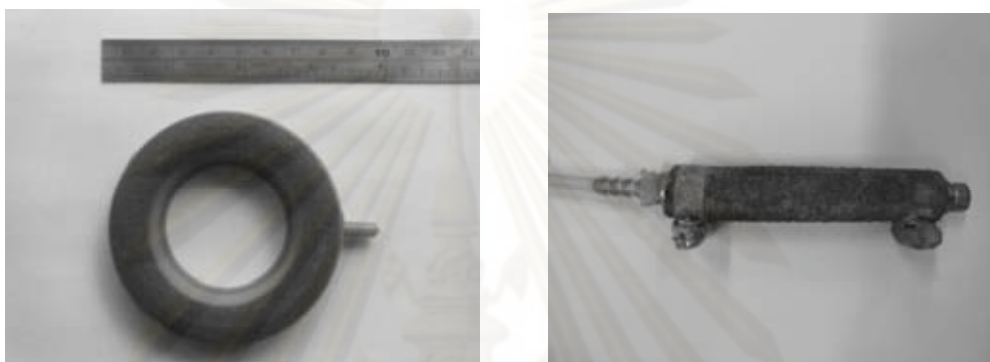
รูปที่ 3.2 ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

3.1.3 ตัวกลางสารกรอง

เลือกใช้ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45 – 0.65 มม. สัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอในช่วง 1.4 – 1.7 ความหนาชั้นกรอง 70 ซม. เป็นสารกรอง รูปแบบของสารกรองดังกล่าวใช้ตามข้อมูลการออกแบบระบบกรองน้ำ (Viessman และ Hammer, 2005)

3.1.4 หัวเติมอากาศ

ใช้หัวทรายเติมอากาศ 2 รูปแบบ ดังนี้ 1. หัวเติมอากาศรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 ซม. 2. หัวเติมอากาศแบบยึดหยุ่นขนาดความยาว 8.5 ซม. รูปที่ 3.3 แสดงหัวเติมอากาศทั้งสองรูปแบบ



รูปที่ 3.3 หัวเติมอากาศทั้งสองรูปแบบ

3.1.5 เครื่องเติมอากาศ

เครื่องเติมอากาศใช้เครื่องอัดอากาศ (Air Pump) ยี่ห้อ RESUN รุ่น AP-80

3.1.6 ถังเก็บน้ำดิบสังเคราะห์เข้มข้น

ถังเก็บน้ำดิบสังเคราะห์เข้มข้นมีความจุ 200 ลิตร การเตรียมน้ำตัวอย่างจะเตรียมให้เพียงพอสำหรับวันต่อวันและกวนผสมตลอดเวลา

3.1.7 เครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มใต้น้ำ (Submersible Pump)

การป้อนน้ำดิบสังเคราะห์เข้มข้นเข้าสู่ถังกรอง จะใช้เครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มใต้น้ำ (Submersible Pump)

3.2 น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษานี้จะทำการทดลองโดยใช้น้ำดิบสังเคราะห์ เตรียมขึ้นโดยใช้ดินคาโอลิน (Kaolinite) ผสมกับน้ำประปาที่ความเข้มข้น 0.067 กรัมต่อลิตร (ค่าความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ประมาณ 50 เอ็นทียู) ทำการปั่นจนตลอดเวลา ค่าความขุ่นที่เลือกใช้ในการทดลองได้จากค่าความขุ่นโดยเฉลี่ยของน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา (วิจารณ์ ตันติธรรม, 2536) ถูกนำมาผ่านกระบวนการกรองโดยตรง (Direct Filtration)

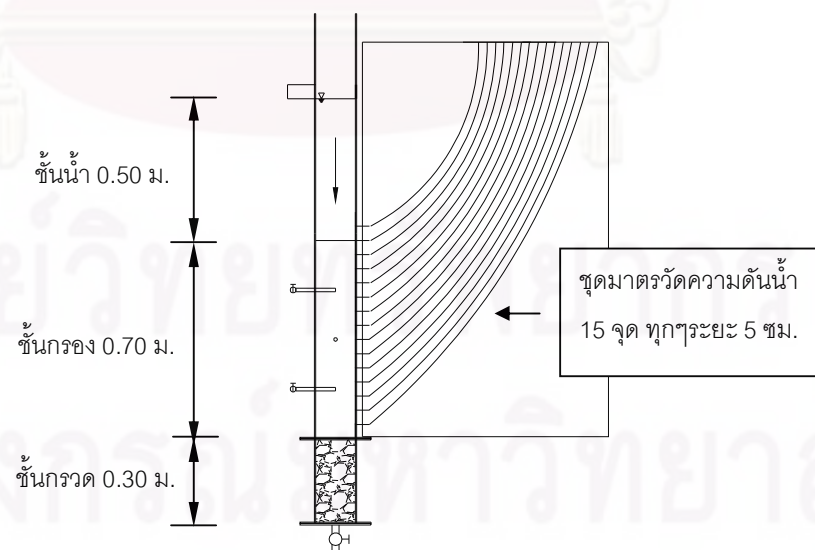
3.3 ตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์

3.3.1 ความขุ่น (Turbidity)

เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100A

3.3.2 การกระจายความดันลดยในชั้นกรอง (Pressure Distribution)

มาตรวัดความดันน้ำแบบใช้แรงดันน้ำ (Piezometer Hydraulic Type) จำนวน 15 จุด โดยทำการติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำทุกระยะ 5 ซม. ตามความสูงของชั้นสารกรอง รวมทั้งหมด 15 จุด



รูปที่ 3.4 มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer)

3.3.3 อัตราการไหลของอากาศ

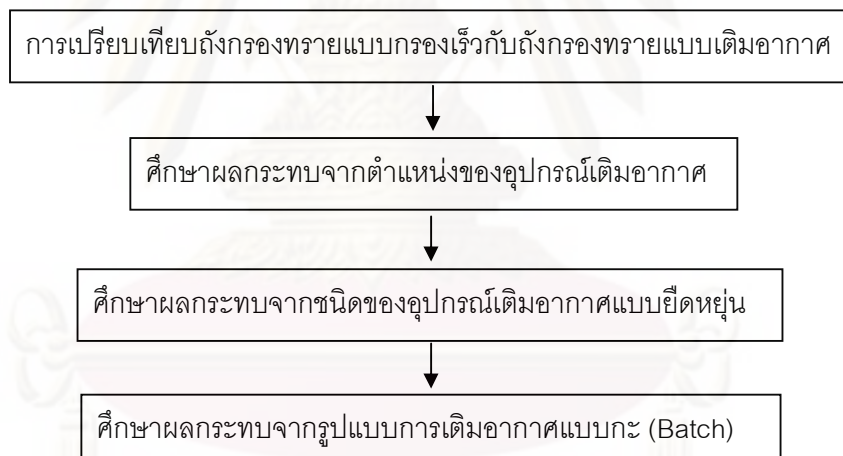
เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Air Flow Meter) ยี่ห้อ NEW FLOW รุ่น FBC-4-P-AIR

3.3.4 ปริมาณน้ำที่กรองได้

ถังวัดปริมาตรน้ำความจุ 50 ลิตร สามารถวัดปริมาณน้ำที่กรองได้ที่ระดับ 10 - 50 ลิตร

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 ขั้นตอนโดยรวมของการทดลอง



รูปที่ 3.5 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง

3.4.2 การเปรียบเทียบถังกรองทรายแบบกรองเร็วกับถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

ทำการทดลองเปรียบเทียบการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็วกับถังกรองทรายแบบเติมอากาศ โดยการทดลองนี้ใช้ถังกรองทั้งหมด 2 ถัง ประกอบด้วยถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศ โดยน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองคือน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ใช้ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45 – 0.65 มม. สัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอในช่วง 1.4 – 1.7 ความหนา 70 ซม. เป็นสสารกรองและเลือกใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 ซม. ความคุมระดับน้ำเหนือสสารกรองเท่ากับ 50 ซม. ตามลำดับการทดลองในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 3.6

3.4.2 การเปรียบเทียบถังกรองทรายแบบกรองเร็วกับถังกรองทรายแบบเต็มอากาศ



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเปรียบเทียบถังกรองทรายแบบกรองเร็วกับถังกรองทรายแบบเต็มอากาศ

ขั้นตอนในการเดินระบบ

1. เริ่มเดินระบบพร้อมกับถังกรองทรายแบบกรองเร็ว โดยควบคุมระดับน้ำเหนือสารกรองเท่ากับ 50 ซม. (ทำการกรองที่ความดันคงที่) ความชุ่มน้ำตัวอย่างเท่ากับ 50 เอ็นทียู
2. เติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที
3. ทำการเดินระบบโดยเก็บตัวอย่างน้ำ บันทึกราคาระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำและปริมาตรน้ำที่กรองได้ทุก 15 นาที วิเคราะห์ค่าตัวแปรตาม จนกระทั่งถังกรองทรายแบบกรองเร็วเกิดการอุดตันจึงหยุดเดินระบบ
4. ทำการล้างย้อนถังกรองทรายแบบกรองเร็วด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวที่ความเร็วของน้ำล้างย้อนเท่ากับ 0.7 เมตรต่อนาที และถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ความเร็วของน้ำล้างย้อนเท่ากับ 0.7 เมตรต่อนาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการล้างย้อน 12 นาที เก็บตัวอย่างน้ำล้างย้อนทุก 1 นาที
5. รวบรวมข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่กรองได้ ระยะเวลาการทำงาน ของถังกรอง การกระจายความดันภายในชั้นกรอง อัตราการกรอง ปริมาตรน้ำที่กรองได้และระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนถังกรองของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.2

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ขนาดของถังกรอง	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. สูง 1.80 ม.
2. สารกรอง	ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45 – 0.65 มม. สัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอในช่วง 1.4 – 1.7
3. ความหนาของสารกรอง	หนา 0.70 ม.
4. จำนวนหัวเติมอากาศ	1 หัว
5. ชนิดของหัวเติมอากาศ	รูปวงแหวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 ซม.
6. ตำแหน่งของจุดเติมอากาศ	ด้านบนของชั้นกรอง (0.175 เมตรของความหนาชั้นกรอง)
7. อัตราการเติมอากาศ	0.2 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. รูปแบบการกรอง	1. ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว 2. ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ
2. รูปแบบการล้างย้อนถังกรอง	1. ล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว 2. ล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน
ตัวแปรตาม	อุปกรณ์ที่ทำการวัด
1. ความขุ่น (Turbidity) <ul style="list-style-type: none"> ● น้ำที่กรองได้ ● น้ำล้างย้อน 	เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter)
2. ความดันลด (Headloss)	มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer)
3. ปริมาณน้ำที่กรองได้	ถังวัดปริมาณน้ำ

3.4.3 ศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ

การทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.7 ทำการทดลองโดยใช้ตำแหน่งการเติมอากาศที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่ง (ด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง) อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน 4 ค่า (0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที) โดยทำการเดินระบบเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.2

3.4.3 ศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.3

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ขนาดของถังกรอง 2. สารกรอง 3. ความหนาของสารกรอง 4. จำนวนหัวเติมอากาศ 5. ชนิดของหัวเติมอากาศ	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. สูง 1.80 ม. ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45 – 0.65 มม. สัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอในช่วง 1.4 – 1.7 หนา 0.70 ม. 1 หัว รูปวงแหวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 ซม.
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ตำแหน่งของจุดเติมอากาศ 2. อัตราการเติมอากาศ	1. ด้านบนของชั้นกรอง 2. ตรงกลางของชั้นกรอง 3. ด้านล่างของชั้นกรอง 1. 0.2 ลิตรต่อนาที 2. 0.5 ลิตรต่อนาที 3. 0.75 ลิตรต่อนาที 4. 1 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	อุปกรณ์ที่ทำการวัด
1. ความขุ่น (Turbidity) <ul style="list-style-type: none"> ● น้ำที่กรองได้ ● น้ำล้างย็อน 2. ความดันลด (Headloss) 3. ปริมาณน้ำที่กรองได้	เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) ถังวัดปริมาตรน้ำ

3.4.4 ศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยี่ดหยุ่น

การทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยี่ดหยุ่น โดยใช้ตำแหน่งการเติมอากาศที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่ง (ด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง) อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน 4 ค่า (0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที) เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์การเติมอากาศที่แตกต่างกัน

3.4.4 ศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยี่ดยุ่น



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยี่ดยุ่น

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.4

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ขนาดของถังกรอง 2. สารกรอง 3. ความหนาของสารกรอง 4. จำนวนหัวเติมอากาศ 5. ชนิดของหัวเติมอากาศ	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. สูง 1.80 ม. ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45 – 0.65 มม. สัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอในช่วง 1.4 – 1.7 หนา 0.70 ม. 1 หัว แบบยึดหยุ่นขนาดความยาว 8.5 ซม.
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ตำแหน่งของจุดเติมอากาศ 2. อัตราการเติมอากาศ	1. ด้านบนของชั้นกรอง 2. ตรงกลางของชั้นกรอง 3. ด้านล่างของชั้นกรอง 1. 0.2 ลิตรต่อนาที 2. 0.5 ลิตรต่อนาที 3. 0.75 ลิตรต่อนาที 4. 1 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	อุปกรณ์ที่ทำการวัด
1. ความขุ่น (Turbidity) <ul style="list-style-type: none"> ● น้ำที่กรองได้ ● น้ำล้างย้อน 2. ความดันลด (Headloss) 3. ปริมาณน้ำที่กรองได้	เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) ถังวัดปริมาณน้ำ

3.4.5 ศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch)

การทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.9 ทำการทดลองโดยเลือกใช้รูปแบบการเติมอากาศที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ผ่านมา (ตำแหน่งและอุปกรณ์เติมอากาศ) โดยในการทดลองนี้จะทำการเติมอากาศเมื่อถังกรองเกิดการอุดตัน โดยใช้ระยะเวลาในการเติมอากาศ 10, 5 และ 1 นาที ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75, 1 และ 1.3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ

3.4.5 ศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch)



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch)

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.5

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> 1. ขนาดของถังกรอง 2. สารกรอง 3. ความหนาของสารกรอง 4. จำนวนหัวเติมอากาศ 5. ชนิดของหัวเติมอากาศ 6. ตำแหน่งของจุดเติมอากาศ 	<p>เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. สูง 1.80 ม.</p> <p>ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45 – 0.65 มม.</p> <p>สัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอในช่วง 1.4 – 1.7</p> <p>หนา 0.70 ม.</p> <p>1 หัว</p> <p>ดีที่สุดจากการทดลองที่ผ่านมา</p> <p>ดีที่สุดจากการทดลองที่ผ่านมา</p>
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ol style="list-style-type: none"> 1. ระยะเวลาการเติมอากาศ 2. อัตราการเติมอากาศ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 10 นาที 2. 5 นาที 3. 1 นาที <ol style="list-style-type: none"> 1. 0.2 ลิตรต่อนาที 2. 0.5 ลิตรต่อนาที 3. 0.75 ลิตรต่อนาที 4. 1 ลิตรต่อนาที 5. 1.3 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	อุปกรณ์ที่ทำการวัด
<ol style="list-style-type: none"> 1. ความขุ่น (Turbidity) <ul style="list-style-type: none"> ● น้ำที่กรองได้ ● น้ำล้างย้อน 2. ความดันลด (Headloss) 3. ปริมาณน้ำที่กรองได้ 	<p>เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter)</p> <p>มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer)</p> <p>ถังวัดปริมาตรน้ำ</p>

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การเปรียบเทียบถึงกรองทรายแบบกรองเร็วกับถึงกรองทรายแบบเติมอากาศ

การกรองโดยตรง (Direct Filtration) คือการกรองโดยไม่มีการกำจัดความขุ่นออกก่อน ด้วยกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation and Sedimentation) (มันสิ้น ตันทุลเวศน์, 2539) โดยการกรองลักษณะนี้ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอนลงได้ จึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้ในระบบการผลิตน้ำประปา แต่การกรองโดยตรงทำให้ถึงกรองต้องรับภาระในการกำจัดอนุภาคความขุ่นในปริมาณมาก (ไม่มีกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน) อนุภาคความขุ่นจึงสะสมอยู่ในชั้นกรองและทำให้เกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระยะเวลาการทำงานของถึงกรองมีค่าลดลงอย่างมากและไม่สามารถใช้ความหนาของชั้นกรองได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากการกรองส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นกรอง

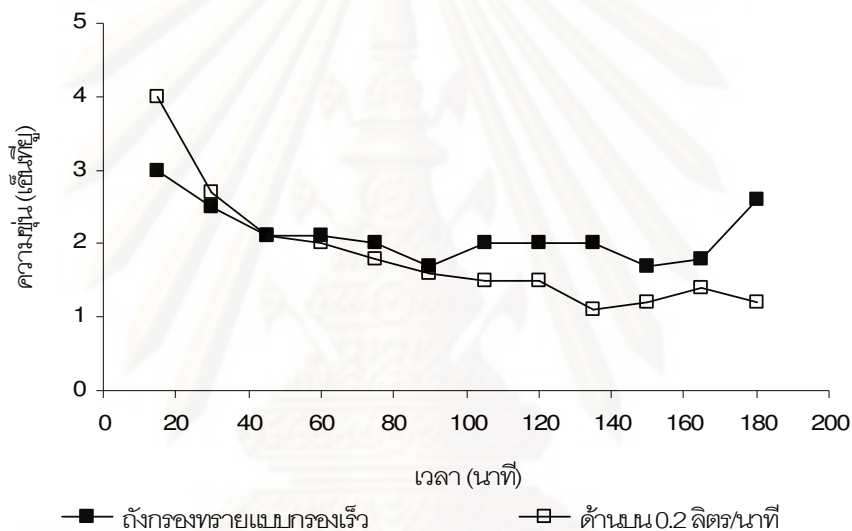
ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้การเติมอากาศเข้ามาช่วยทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวโดยการนำหัวเติมอากาศฝังไว้ในชั้นสารกรองเป็นระยะๆ ตามความหนาของชั้นสารกรอง ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นกรอง ทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น โดยคาดว่าถึงกรองแบบเติมอากาศจะสามารถใช้งานในลักษณะการกรองโดยตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ทำการทดลองโดยเริ่มเดินระบบถึงกรองทรายแบบกรองเร็วพร้อมกับถึงกรองทรายแบบเติมอากาศ โดยใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่ออนาที โดยควบคุมระดับน้ำเหนือสารกรองเท่ากับ 50 เซนติเมตร (ทำการกรองที่ความดันคงที่) เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรอง ปริมาตรน้ำที่กรองได้และจุดบันทึกค่าระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำทุก 15 นาที เดินระบบจนกระทั่งถึงกรองทรายแบบกรองเร็วเกิดการอุดตัน การเปรียบเทียบการล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวและการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ทำการทดลองโดยการล้างย้อนถึงกรองทรายแบบกรองเร็วด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวที่ความเร็ว น้ำล้างย้อน 0.7 เมตรต่ออนาที และถึงกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่

ความเร็วน้ำล้างย้อน 0.7 เมตรต่อนาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที ทำการล้างย้อนนาน 12 นาที โดยเก็บตัวอย่างน้ำล้างย้อนทุก 1 นาที

ความขุ่นของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบกรองเร็วกับถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที มีค่าอยู่ในช่วง 1.7 – 3.0 และ 1.1 – 4.0 เอนทิยู ตามลำดับ โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองผ่านถังกรองทั้งสองรูปแบบมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูงและค่อยๆ มีค่าลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 45 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงเริ่มมีค่าคงที่ในช่วง 1.0 – 2.5 เอนทิยู แสดงดังรูปที่ 4.1

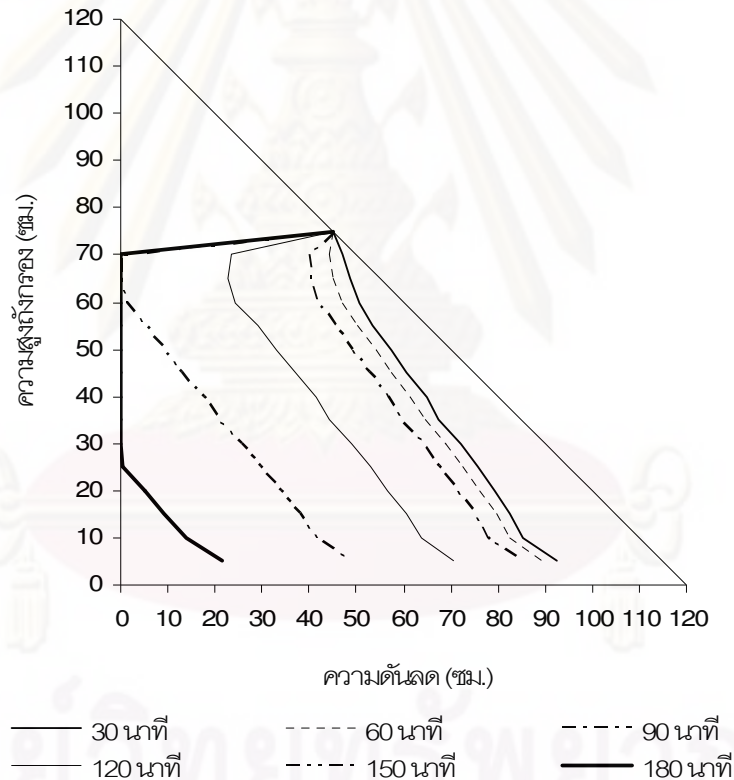


รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทั้งสองรูปแบบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยคุณภาพของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทั้งสองรูปแบบมีค่าได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอนทิยู (World Health Organization, 2006) ดังนั้นการเติมอากาศภายในชั้นกรองจึงไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองแบบเติมอากาศ

4.1.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองในแต่ละช่วงเวลาของถังกรองทรายแบบกรองเร็วสามารถแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองมีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของถังกรอง โดยที่เวลาการกรอง 150 นาที มาตรฐานวัดความดันน้ำจุดที่ 2 (ลึกจากระดับผิวน้ำ 50 เซนติเมตร) อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้นกรองที่ระดับความสูงดังกล่าว ส่งผลให้อัตราการกรองเริ่มมีค่าลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไป 180 นาที ความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าลดลงอย่างมาก (มาตรฐานวัดความดันน้ำจุดที่ 2 – 10 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์) จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองต่อไปได้ ถังกรองทรายแบบกรองเร็วจึงเกิดการอุดตันและต้องทำการล้างย้อนที่เวลาประมาณ 180 นาที

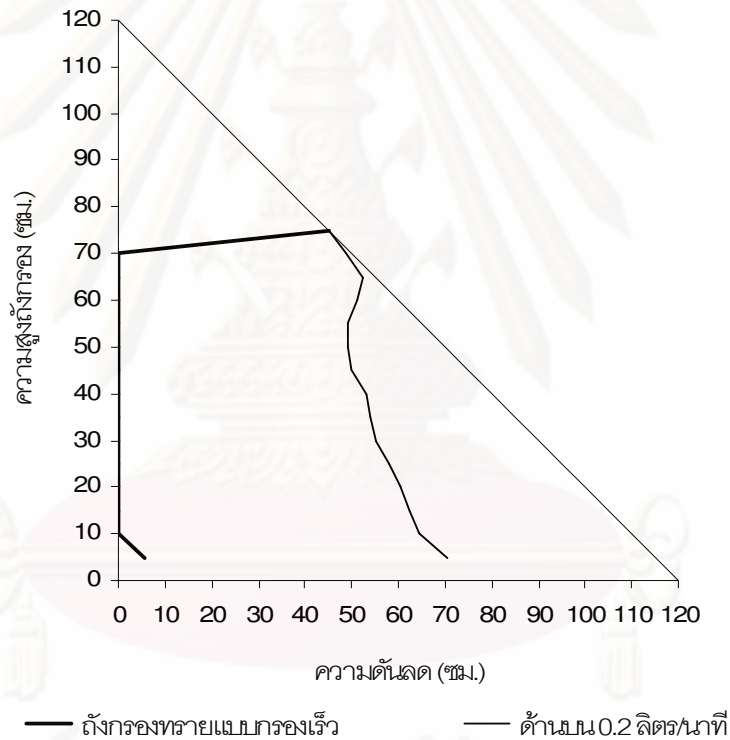


รูปที่ 4.2 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบกรองเร็วที่เวลาต่างๆ

การเติมอากาศภายในชั้นกรองส่งผลกระทบต่อการบันทึกค่าระดับน้ำในมาตรฐานวัดความดันน้ำ เนื่องจากมีอากาศเข้าไปแทนที่น้ำภายในมาตรฐานวัดความดันน้ำ จึงทำให้ข้อมูลความดันลดภายในชั้นกรองที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ มีค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้นการบันทึกค่าระดับน้ำในมาตรฐานวัดความดันน้ำของถังกรองทรายแบบเติมอากาศจึงทำได้เฉพาะช่วง

ที่มีการหยุดการเติมอากาศและปล่อยให้อากาศภายในชั้นกรองลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองจนหมด (หยุดเดินระบบประมาณ 10 นาที) จึงสามารถบันทึกค่าระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำได้อย่างถูกต้อง โดยจะหยุดเดินระบบถังกรองแบบเติมอากาศที่เวลา 180 นาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ถังกรองทรายแบบกรองเร็วเกิดการอุดตัน เพื่อใช้ข้อมูลการกระจายความดันในช่วงเวลาดังกล่าว เปรียบเทียบความดันลดภายในชั้นกรองของถังกรองทั้งสองชนิด

ความดันลดภายในชั้นกรองที่เวลาการกรอง 180 นาที (หยุดเดินระบบ) ของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยที่เวลาดังกล่าวไม่มีมาตรวัดความดันน้ำที่จุดใดอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์ (ยังไม่เกิดการอุดตัน) การกระจายความดันมีลักษณะกระจายไปทั่วทั้งชั้นกรอง ไม่สะสมอยู่ตรงจุดใดจุดหนึ่ง ถังกรองทรายแบบเติมอากาศจึงสามารถทำงานต่อไปได้



รูปที่ 4.3 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ที่เวลาการกรอง 180 นาที

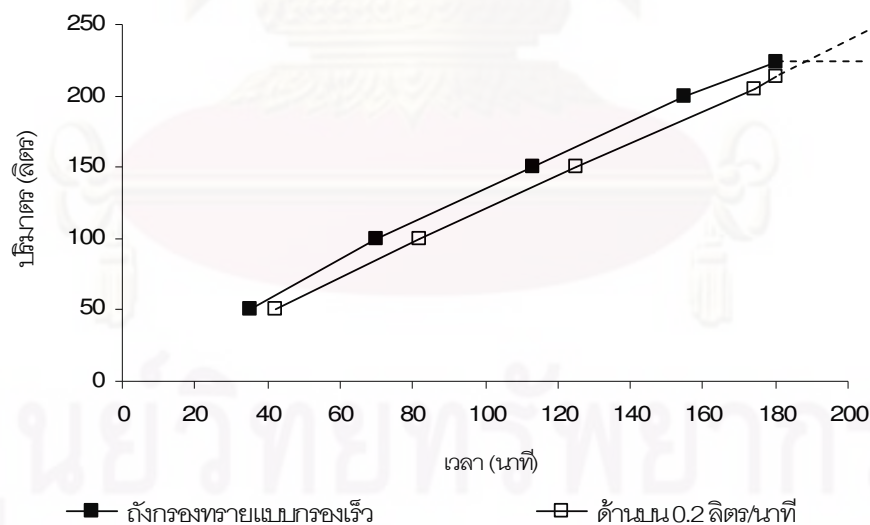
จากผลการทดลองพบว่าถังกรองทรายแบบกรองเร็วเกิดการสะสมของอนุภาคความขุ่นที่บริเวณด้านบนเป็นส่วนใหญ่ (ลึกจากผิวหน้าชั้นกรองประมาณ 1.5 เซนติเมตร) (ไกรภพ ถึงแสง และวิษณุ บุญทองอ่อน, 2547) จึงไม่สามารถใช้ความหนาของชั้นกรองได้เต็มประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ถังกรองทรายแบบเติมอากาศการสะสม

ของอนุภาคความชื้นสามารถกระจายไปได้ทั่วทั้งความหนาของชั้นสารกรอง ไม่สะสมอยู่ที่บริเวณด้านบนของชั้นกรอง ทำให้ถังกรองสามารถทำงานได้ต่อไป การเติมอากาศภายในชั้นกรองจึงมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความหนาของชั้นกรอง ทำให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานขึ้น

4.1.3 ปริมาตรและอัตราการกรอง

ถังกรองทรายแบบกรองเร็วมีระยะเวลาการทำงานประมาณ 180 นาที สามารถกรองน้ำได้ปริมาตรรวมประมาณ 223 ลิตร อัตราการกรองเฉลี่ย 4 เมตรต่อชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยที่อัตราการกรองมีค่าค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไป 150 นาทีอัตราการกรองจึงเริ่มมีค่าลดลง และที่เวลาการกรอง 180 นาที ถังกรองจึงเกิดการอุดตัน ไม่สามารถทำการกรองต่อไปได้

ในส่วนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่เวลาการกรอง 180 นาที (หยุดเดินระบบ) สามารถกรองน้ำได้ปริมาตรรวมประมาณ 213 ลิตร อัตราการกรองเฉลี่ย 3.9 เมตรต่อชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยอัตราการกรองมีค่าค่อนข้างคงที่และถังกรองยังไม่เกิดการอุดตัน จึงสามารถทำการกรองด้วยอัตราการกรองคงที่ดังกล่าวต่อไปได้



รูปที่ 4.4 อัตราการกรองของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

จากผลการทดลองพบว่า การเติมอากาศภายในชั้นกรองทำให้อัตราการกรองมีค่าลดลง โดยที่ถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีอัตราการกรองเฉลี่ยต่ำกว่าถังกรองทราย

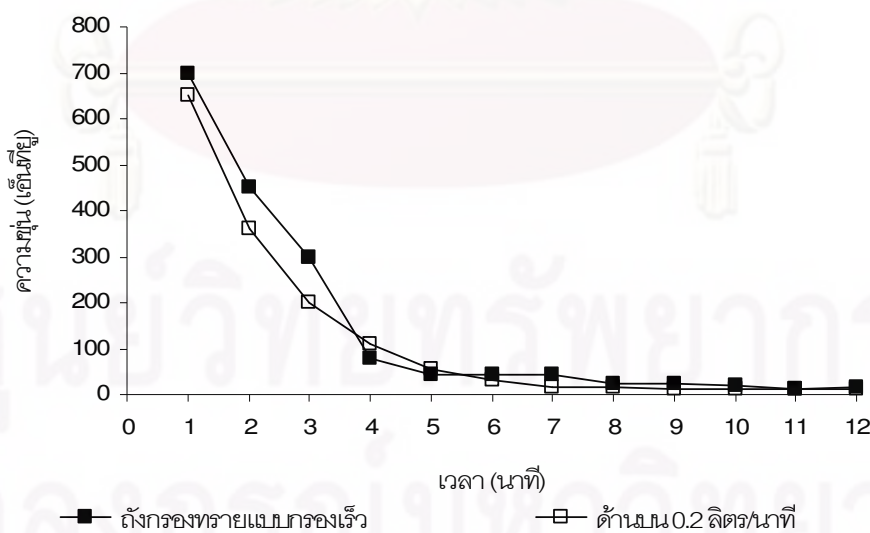
แบบกรองเร็วเล็กน้อย ทำให้ปริมาณน้ำที่กรองได้ที่เวลาการกรอง 180 มีค่าลดลงประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามถ้ากรองทรายแบบเต็มอากาศยังไม่เกิดการอุดตันที่เวลาดังกล่าว เมื่อทำการกรองต่อไปจนกระทั่งถึงกรองเกิดการอุดตันคาดว่าปริมาณน้ำที่กรองได้จะมีความมากกว่า เนื่องจากมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานกว่า

4.1.4 การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน

ถังกรองทรายแบบเต็มอากาศมีการติดตั้งหัวเต็มอากาศไว้ภายในชั้นกรองจึงสามารถทำการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันได้โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์การเติมอากาศเพิ่มเติม โดยการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันจะทำให้ประสิทธิภาพการล้างย้อนถังกรองมีค่าเพิ่มขึ้น (Hemmings และ Fitzpatrick, 1997)

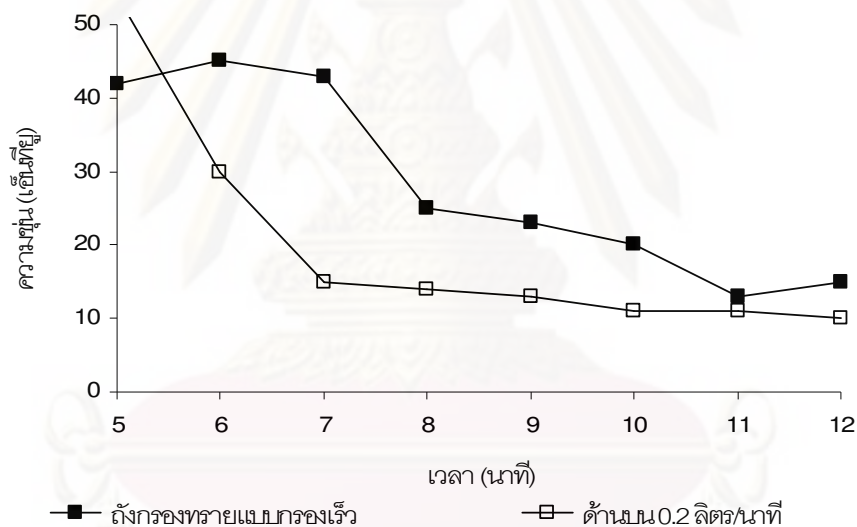
ถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเต็มอากาศทำการล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวที่ความเร็วในการล้างย้อน 0.7 เมตรต่ออนาที (Viessman และ Hammer, 2005) และทำการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ความเร็วของน้ำล้างย้อน 0.7 เมตรต่ออนาที ร่วมกับการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่ออนาที ตามลำดับ ระยะเวลาในการล้างย้อน 12 นาที โดยในช่วงแรกน้ำล้างย้อนของถังกรองทั้งสองรูปแบบมีความขุ่นสูงอยู่ในช่วง 650 – 700 เอน์ทียู และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะเวลาการล้างย้อน แสดงดังรูปที่

4.5



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวและการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน

จนกระทั่งที่เวลาการล้างย่อน 5 นาที น้ำล้างย่อนของถังกรองทั้งสองรูปแบบจึงมีค่าความขุ่นลดลงอยู่ในช่วง 40 – 55 เอ็นทียู โดยในช่วงเวลาการล้างย่อน 5 – 12 นาที น้ำล้างย่อนของถังกรองทรายแบบกรองเร็วยังคงมีค่าความขุ่นลดลงอย่างช้าๆ ต่อเนื่องไป จนกระทั่งหยุดการล้างย่อน ในขณะที่น้ำล้างย่อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีค่าความขุ่นลดลงอย่างรวดเร็วต่อเนื่องไปจนถึงที่เวลาการล้างย่อน 7 นาที หลังจากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ไป จนกระทั่งหยุดการล้างย่อน เนื่องจากฟองอากาศที่ลอยตัวขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองทำให้เกิดแรงเฉือนภายในชั้นกรองขณะทำการล้างย่อน โดยแรงเฉือนดังกล่าวช่วยทำให้เกิดการขัดสีของสารกรอง ทำให้อนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองหลุดปนมากับน้ำล้างย่อนอย่างรวดเร็ว (Hemmings และ Fitzpatrick, 1997) โดยที่เวลาการล้างย่อน 12 นาที น้ำล้างย่อนของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีค่าความขุ่นเท่ากับ 15 และ 10 เอ็นทียู ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการล้างย่อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวและการล้างย่อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่เวลาการล้างย่อน 5 – 12 นาที

จากผลการทดลองพบว่าการล้างย่อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย่อนลงได้ โดยการเปรียบเทียบค่าความขุ่นของน้ำล้างย่อนที่เวลาการล้างย่อน 10 นาที (Viessman และ Hammer, 2005) พบว่าน้ำล้างย่อนของถังกรองทรายแบบกรองเร็วที่ใช้การล้างย่อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวและน้ำล้างย่อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ใช้การล้างย่อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันมีค่าความขุ่นเท่ากับ 20 และ 11 เอ็นทียู ตามลำดับ และการล้างย่อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันเพื่อให้ค่าความขุ่นของน้ำล้างย่อนมีค่า

เท่ากับ 20 เอ็นทียู (ค่าความชุ่มของน้ำล้างย้อมที่ใช้การล้างย้อมด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว ที่เวลาการกรองย้อม 10 นาที) จะใช้เวลาเพียง 6.5 นาที การล้างย้อมด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันจึงช่วยลดเวลาในการล้างย้อมลงได้

โดยสรุปจากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าการเติมอากาศภายในชั้นกรองไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความชุ่ม แต่กลับช่วยให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานขึ้น เนื่องจากอากาศทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวค่าความพรุนของชั้นสารกรองจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น อนุภาคความชุ่มจึงสะสมอยู่ในชั้นกรองได้มากกว่าถังกรองทรายแบบกรองเร็วซึ่งอนุภาคความชุ่มสะสมอยู่ที่บริเวณด้านบนของชั้นสารกรองเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามการเติมอากาศภายในชั้นกรองส่งผลกระทบต่ออัตราการกรอง เนื่องจากอากาศที่ลอยขึ้นสู่ด้านบนมีทิศทางเคลื่อนที่ด้านหน้าต่อการไหลของน้ำ อัตราการกรองจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย ในการล้างย้อมด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน อากาศมีส่วนช่วยทำให้เกิดการขัดสีกันของสารกรอง ทำให้เวลาที่ใช้ในการล้างย้อมมีค่าลดลง โดยสามารถใช้หัวเติมอากาศอันเดียวกันกับที่ใช้ในการเติมอากาศระหว่างที่ทำการกรอง จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศสำหรับการล้างย้อมเพิ่มเติม ทำให้ประสิทธิภาพการล้างย้อมเพิ่มสูงขึ้น โดยสรุปการเติมอากาศภายในชั้นกรองจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองและมีความน่าสนใจที่จะศึกษารูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมต่อไป

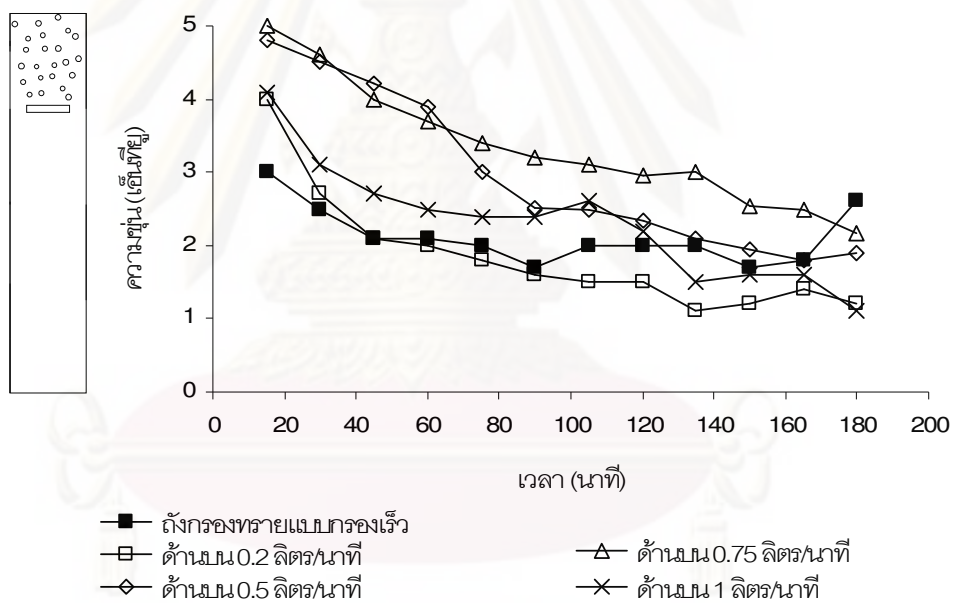
4.2 ศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ

ทำการทดลองโดยเริ่มเดินระบบถังกรองทรายแบบเติมอากาศ โดยใช้หัวเติมอากาศรูวงแหวนที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที โดยควบคุมระดับน้ำเหนือสารกรองเท่ากับ 50 เซนติเมตร (ทำการกรองที่ความดันคงที่) เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรอง ปริมาตรน้ำที่กรองได้และจุดบันทึกค่าระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำทุก 15 นาที การเปรียบเทียบการล้างย้อมด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ทำการทดลองโดยการล้างย้อมถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ความเร็วน้ำล้างย้อม 0.7 เมตรต่อนาที อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที ทำการล้างย้อมนาน 12 นาที โดยเก็บตัวอย่างน้ำล้างย้อมทุก 1 นาที

4.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

4.2.1.1 การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง

ความขุ่นของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที มีค่าอยู่ในช่วง 1.1 – 4.0, 1.8 – 4.8, 2.2 – 5.0 และ 1.1 – 4.1 เอ็นทียู ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.7 ในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ข้างต้นมีความขุ่นค่อนข้างสูง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4 – 5 เอ็นทียู และค่อยๆ มีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 180 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงมีค่าอยู่ในช่วง 1.0 – 2.5 เอ็นทียู และมีแนวโน้มจะมีค่าคงที่เมื่อทำการกรองต่อไป

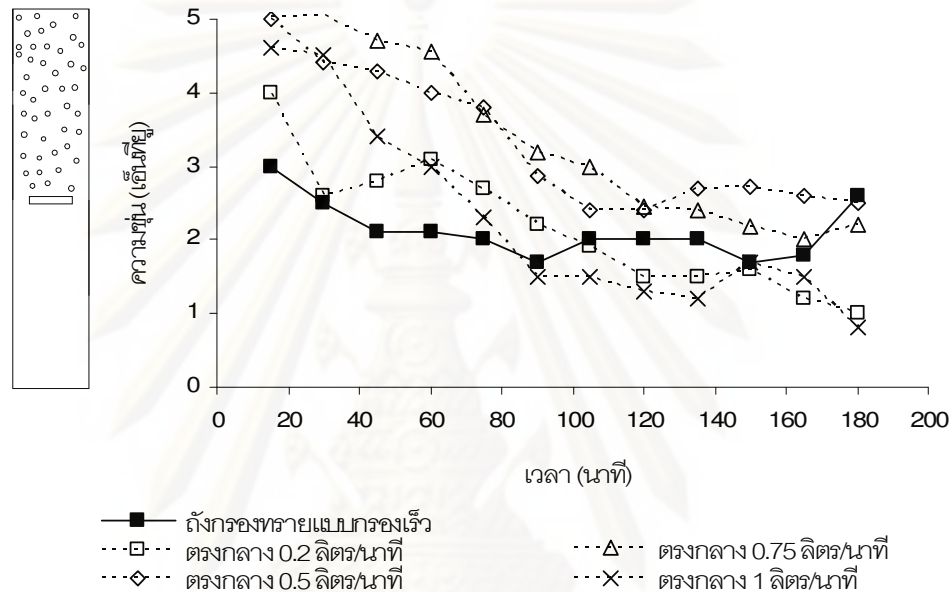


รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

4.2.1.2 การเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง

ความขุ่นของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที มีค่าอยู่ในช่วง 1.0 – 4.0, 2.4 – 5.0, 2.0 – 5.0 และ 0.8 – 4.6 เอ็นทียู ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองผ่านถัง

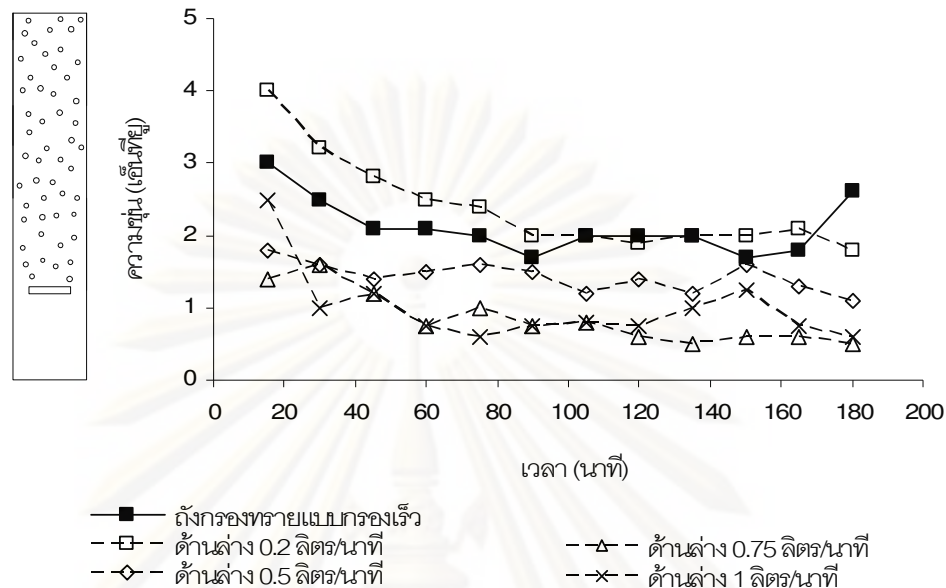
กรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ขึ้นต้นในค่าความขุ่นค่อนข้างสูง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4 – 5 เอ็นทียู และค่อยๆ มีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 180 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงมีค่าอยู่ในช่วง 0.8 – 2.5 เอ็นทียู และมีแนวโน้มว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะมีค่าคงที่เมื่อทำการกรองต่อไปเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

4.2.1.3 การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง

ความขุ่นของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่ออนาที มีค่าอยู่ในช่วง 1.8 – 4.0, 1.1 – 1.8, 0.5 – 1.6 และ 0.6 – 2.5 เอ็นทียู ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นแปรผันตามอัตราการเติมอากาศ โดยความขุ่นของน้ำที่กรองได้มีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง 0.5 – 2.0 เอ็นทียู ต่อเนื่องไปจนกระทั่งหยุดเดินระบบ และมีแนวโน้มจะมีค่าคงที่เมื่อทำการกรองต่อไปเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา



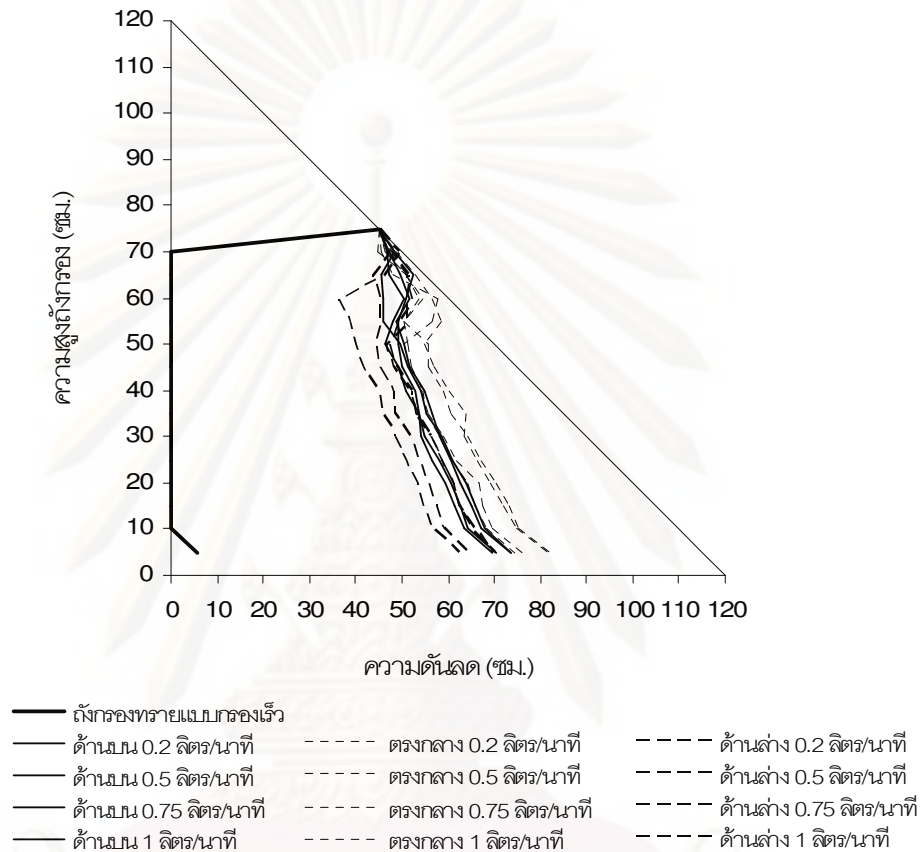
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเมื่อทำการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ความขุ่นของน้ำที่กรองได้จะมีค่าสูงในช่วงแรกของการกรองและมีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง ผลกระทบจากการเติมอากาศทำให้ความขุ่นของน้ำที่กรองได้เข้าสู่สภาวะคงที่ จะต้องใช้เวลาานมากขึ้น (ที่เวลาการกรองประมาณ 180 นาที) ในขณะที่การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของถังกรอง พบว่าผลจากการเติมอากาศทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมอากาศ เนื่องจากอัตราการกรองมีค่าลดลงตามอัตราการเติมอากาศ ทำให้น้ำไหลผ่านชั้นกรองได้ช้าลง อนุภาคความขุ่นจึงโอกาสติดค้างอยู่ภายในชั้นกรองได้มากขึ้น โดยความขุ่นของน้ำที่กรองได้จะเริ่มมีค่าคงที่ เมื่อเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 45 นาที คุณภาพน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศต่างๆ มีค่าได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู (World Health Organization, 2006)

4.2.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

ความดันลดภายในชั้นกรองที่เวลาการกรอง 180 นาที (หยุดเดินระบบ) ของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งและอัตราการเติมอากาศต่างๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 4.10

โดยที่เวลาดังกล่าวถึงกรวยแบบเติมอากาศทั้งหมด (ทุกรูปแบบของการเติมอากาศ) ยังไม่เกิดการอุดตันและการกระจายความดันมีลักษณะกระจายไปทั่วทั้งชั้นกรวย ไม่สะสมอยู่บริเวณด้านบนของชั้นกรวย



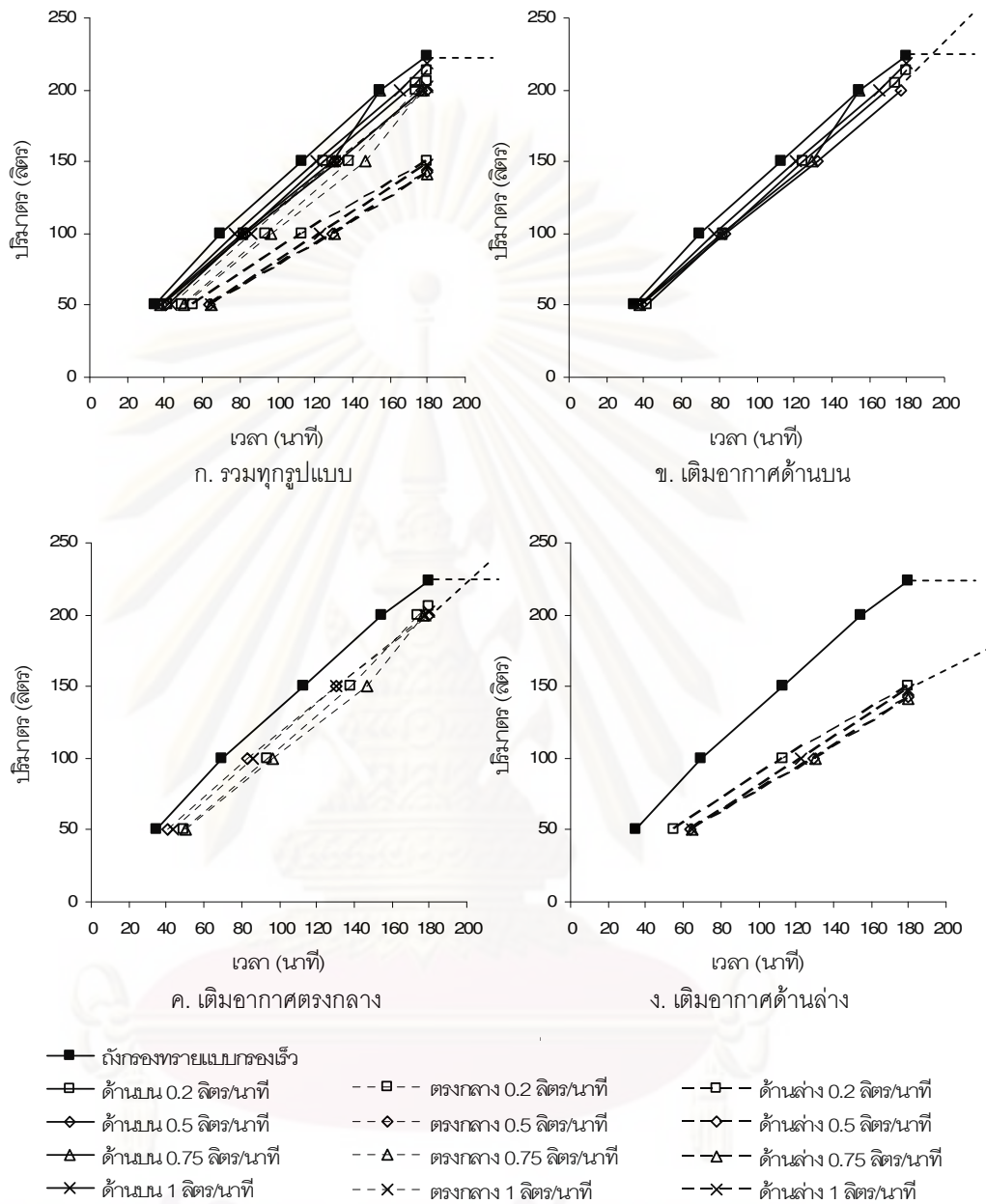
รูปที่ 4.10 การกระจายความดันภายในชั้นกรวยของถังกรวยทรายแบบเติมอากาศ
ที่เวลาการกรวย 180 นาที

จากผลการทดลองพบว่าการเติมอากาศช่วยเพิ่มระยะเวลาการทำงานของถังกรวยให้ยาวนานขึ้น โดยที่ตำแหน่งของจุดเติมอากาศมีความสัมพันธ์กับความดันในลดภายในชั้นกรวยอย่างชัดเจน การเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรวยทำให้เกิดการสูญเสียความดันในลดภายในชั้นกรวยน้อยที่สุด และที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของชั้นกรวยมีค่ารองลงมาตามลำดับ เนื่องจากการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรวยทำให้ชั้นกรวยบริเวณเหนือจุดเติมอากาศ (ลึกจากผิวชั้นกรวย 35 เซนติเมตร) เกิดการขยายตัว อนุภาคความขุ่นจึงหลุดลงเข้าไปภายในชั้นสารกรองได้มากกว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน (ลึกจากผิวชั้นกรวย 17.5 เซนติเมตร) ในขณะที่การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรวยทำให้ชั้นกรวยขยายตัวได้

เพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีแรงดันอากาศไม่เพียงพอที่จะทำให้ชั้นกรองบริเวณเหนือจุดเติมอากาศ (ลึกจากผิวชั้นกรอง 52.5 เซนติเมตร) ขยายตัวได้เท่ากับการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรอง อนุภาคความขุ่นจึงสะสมอยู่บริเวณด้านบนของชั้นกรองทำให้การกระจายความดันภายในชั้นกรองมีลักษณะใกล้เคียงกับการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง นอกจากนี้อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันมีผลต่อความดันลดภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่มีค่าต่ำเพื่อประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายในการกำจัดความขุ่น

4.2.3 ปริมาตรและอัตราการกรอง

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลาง และด้านล่างของชั้นกรองที่เวลาการกรอง 180 นาที (หยุดการเดินระบบ) สามารถกรองน้ำได้ ปริมาตรรวมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 210, 198.5 และ 145.75 ลิตร ตามลำดับ ตำแหน่งของจุดเติมอากาศมีความสัมพันธ์กับปริมาตรและอัตราการกรองอย่างชัดเจน โดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองส่งผลให้อัตราการกรองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.93, 3.85 และ 2.76 เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันมีผลต่ออัตราการกรองเพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4.11 อัตราการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศทั้งหมด (ทุกรูปแบบการเติมอากาศ) มีค่าค่อนข้างคงที่และยังไม่เกิดการอุดตัน จึงสามารถทำการกรองด้วยอัตราการกรองคงที่ดังกล่าวต่อไปได้

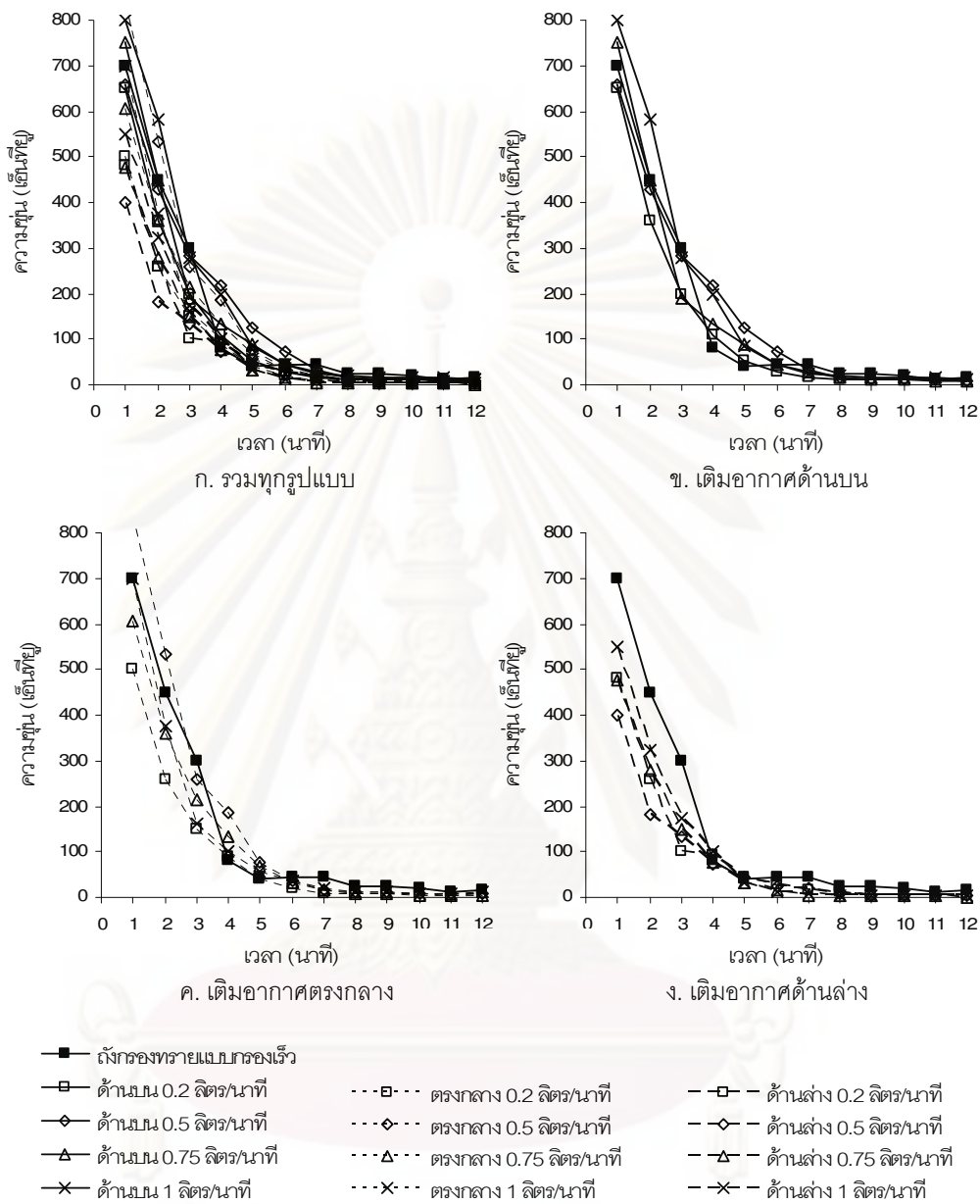


รูปที่ 4.11 อัตราการกรอของดังกรอกรายแบบเต็มอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอที่อัตราการเต็มอากาศต่างๆ ที่เวลาการกรอ 180 นาที

จากผลการทดลองพบว่าตำแหน่งของการเติมอากาศมีผลกระทบต่ออัตราการกรอง โดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองจะทำให้เกิดการสะสมของอากาศภายในชั้นกรองมากที่สุด โดยที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านบนของชั้นกรองมีค่ารองลงมา ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอากาศที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองจะทำให้อัตราการกรองมีค่าลดลง เนื่องจากฟองอากาศที่เคลื่อนที่ขึ้นสู่อากาศเหนือชั้นกรองมีทิศทางเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศทางการไหลของน้ำ ทำให้น้ำไหลผ่านชั้นกรองได้ช้าลง ส่งผลให้ปริมาตรน้ำที่กรองได้มีค่าลดลงตามไปด้วย

4.2.4 การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน

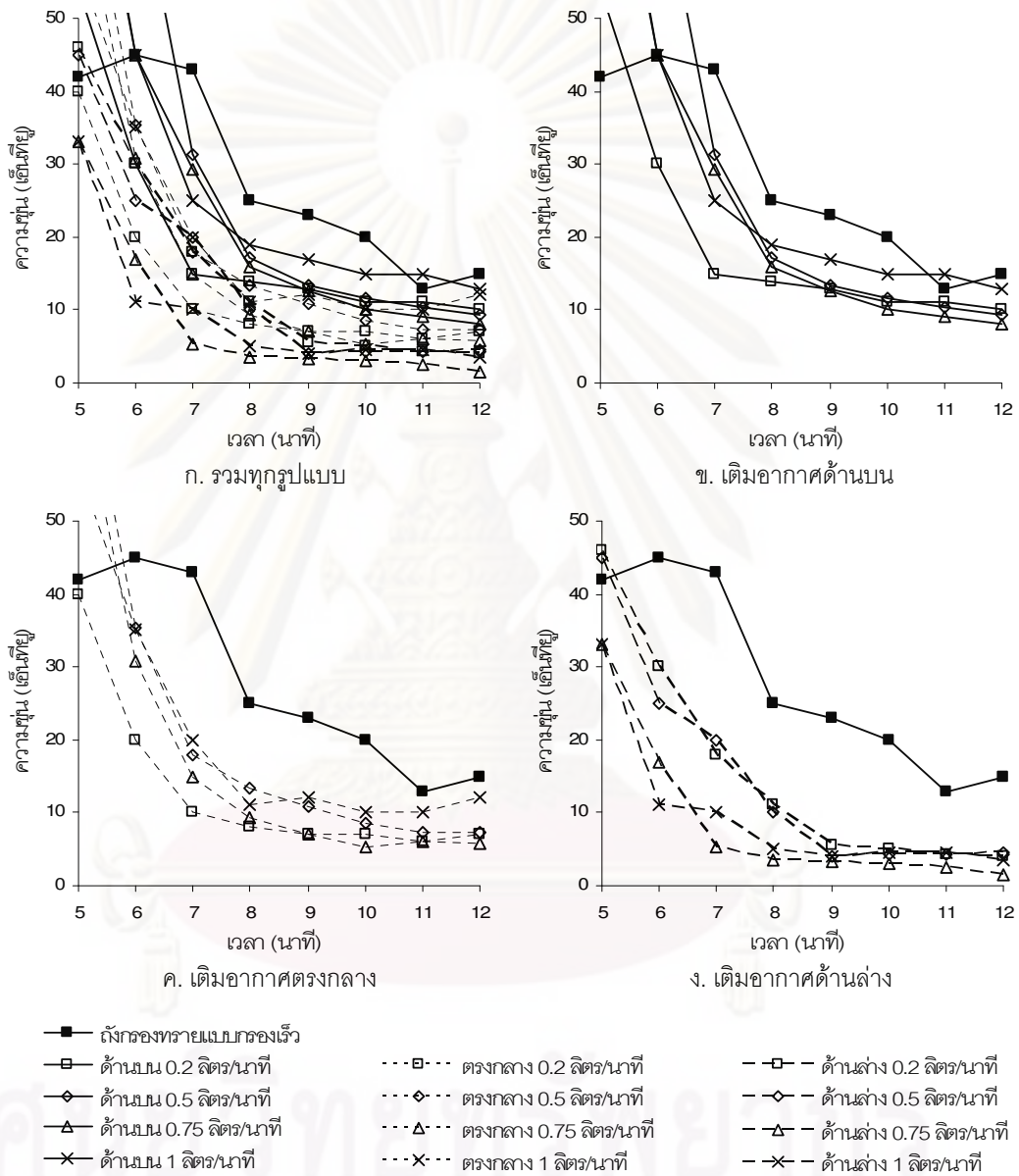
การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ความเร็วของน้ำล้างย้อน 0.7 เมตรต่อวินาที ร่วมกับการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อวินาที ในช่วงเวลาการล้างย้อน 0 – 5 นาที ค่าความขุ่นของน้ำล้างย้อนที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบนตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองมีค่าอยู่ในช่วง 50 - 800, 40 - 850 และ 30 - 550 เอ็นทียู ตามลำดับ และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยความขุ่นของน้ำล้างย้อนที่เวลาการล้างย้อน 1 นาที มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากถังกรองแบบเติมอากาศในแต่ละรูปแบบการเติมอากาศมีอัตราการกรองที่แตกต่างกัน ทำให้การสะสมอนุภาคความขุ่นภายในชั้นกรองมีค่าแตกต่างกัน โดยที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบนและตรงกลางของชั้นกรองความขุ่นของน้ำล้างย้อนที่เวลาการล้างย้อน 1 นาที มีค่าสูงใกล้เคียงกัน และที่ตำแหน่งการด้านล่างของชั้นกรองรองลงมา



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการล้างย่อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันโดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง

จนกระทั่งช่วงเวลากการล้างย่อน 5 - 12 นาที ค่าความชุ่มชื้นของน้ำล้างย่อนที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองจึงมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 8 - 72, 6 -35 และ 1.5 - 30 เชนทียู ตามลำดับ โดยค่าความชุ่มชื้นน้ำล้างย่อนยังคงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วต่อเนื่องไปจนถึงที่เวลากการล้างย่อน 8 นาที หลังจากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนกระทั่งหยุดการ

ล้างย้อน ที่เวลาการล้างย้อน 12 นาที ค่าความขุ่นน้ำล้างย้อนที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองมีค่าอยู่ในช่วง 10 - 15, 6 - 12 และ 1.5 - 4.5 เอ็นทียู ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.13



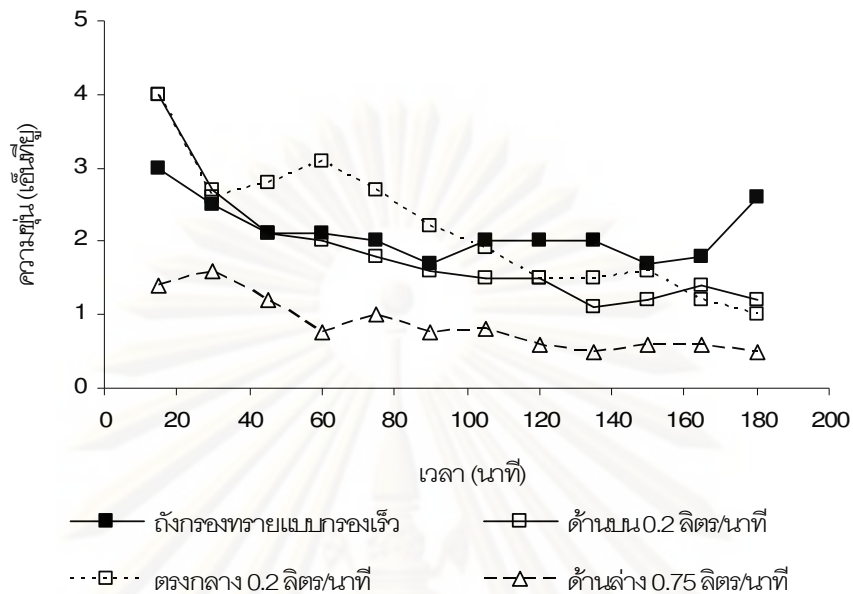
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่เวลาการล้างย้อน 5 - 12 นาที

จากผลการทดลองพบว่า การล้างย้อนน้ำและอากาศพร้อมกันที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านล่างของชั้นกรองช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนลงได้มากที่สุด และที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านบนของชั้นกรองมีค่ารองลงมาตามลำดับ อัตราการเติมอากาศที่

แตกต่างกันมีผลกระทบต่อการลดลงของระยะเวลาการล้างย่อนเพียงเล็กน้อยเหมือนกับผลการทดลองความดันลดภายในชั้นกรอง ปริมาตรและอัตราการกรอง (ดังแสดงข้างต้น) โดยระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย่อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองที่ทำให้ความชุ่มของน้ำล้างย่อนมีค่าลดลงเหลือ 20 เอ็นทียู มีค่าเท่ากับ 7.4, 6.6 และ 6.1 นาที ตามลำดับ เนื่องจากการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองทำให้เกิดแรงเฉือนและการขัดสีของสารกรองในขณะที่อากาศลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองได้มากกว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรอง โดยแรงเฉือนของน้ำและอากาศขณะทำการล้างย่อนทำให้เกิดการขัดสีของสารกรองมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการล้างย่อนจึงมีค่าลดลง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งของการเติมอากาศเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของถังกรองทรายแบบเติมอากาศ ค่าตัวแปรที่ทำการศึกษามีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของการเติมอากาศมากกว่าอัตราการเติมอากาศ โดยที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านล่างของชั้นกรองมีประสิทธิภาพการกำจัดความชุ่มดีที่สุดเนื่องจากเกิดการสะสมของอากาศภายในชั้นกรองมากที่สุดทำให้อัตราการกรองมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นอนุภาคความชุ่มจึงมีโอกาสติดค้างอยู่ในชั้นกรองได้มากขึ้น แต่ก็ส่งผลต่ออัตราการกรองที่มีค่าต่ำทำให้ปริมาตรน้ำที่กรองได้มีค่าลดลง และเกิดการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองมากที่สุดเนื่องจากมีการสะสมอนุภาคความชุ่มไว้ภายในชั้นสารกรองจำนวนมาก ในส่วนของการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่อัตราการกรองและปริมาตรน้ำที่กรองได้มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง แต่ประสิทธิภาพการกำจัดความชุ่มจะมีค่าลดลงเล็กน้อยและเกิดการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองน้อยกว่า การล้างย่อนน้ำด้วยและอากาศพร้อมกันโดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย่อนลงได้มากที่สุด ที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านบนของชั้นกรองมีค่ารองลงมาตามลำดับ

การเติมอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ส่งผลกระทบต่อตัวแปรที่ทำการศึกษาแตกต่างกัน ดังนั้นข้อมูลจากการทดลองที่ระยะเวลาการกรอง 180 นาที จึงไม่สามารถระบุได้ว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งใดเหมาะสมที่สุดในการดำเนินการทดลองระยะยาวจึงจำเป็นต้องทำการทดลองในทุกตำแหน่งของการเติมอากาศ โดยเลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่ดีที่สุดในแต่ละตำแหน่งดังนี้ ที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรองเลือกใช้อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที และที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองเลือกใช้อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.14 เพื่อดำเนินการทดลองระยะยาวต่อไป



รูปที่ 4.14 อัตราการเติมอากาศที่ดีที่สุดในแต่ละตำแหน่งการเติมอากาศ

4.2.5 ดำเนินการทดลองระยะยาว

4.2.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น

4.2.5.1.1 การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง

ความชื้นของน้ำที่กรองผ่านถังกรอทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที มีค่าอยู่ในช่วง 1.1 – 3.6 เอ็นทียู แสดงดังรูปที่ 4.15 ในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองได้มีความชื้นค่อนข้างสูงและค่อยๆ มีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง เมื่อเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 90 นาที ความชื้นของน้ำที่กรองได้จึงเริ่มมีค่าคงที่ในช่วง 1.0 – 2.0 เอ็นทียู จนกระทั่งระยะเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 510 นาที ความชื้นของน้ำที่กรองได้กลับมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง โดยมีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 2.5 – 3.5 เอ็นทียู ไปจนกระทั่งถังกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 570 นาที

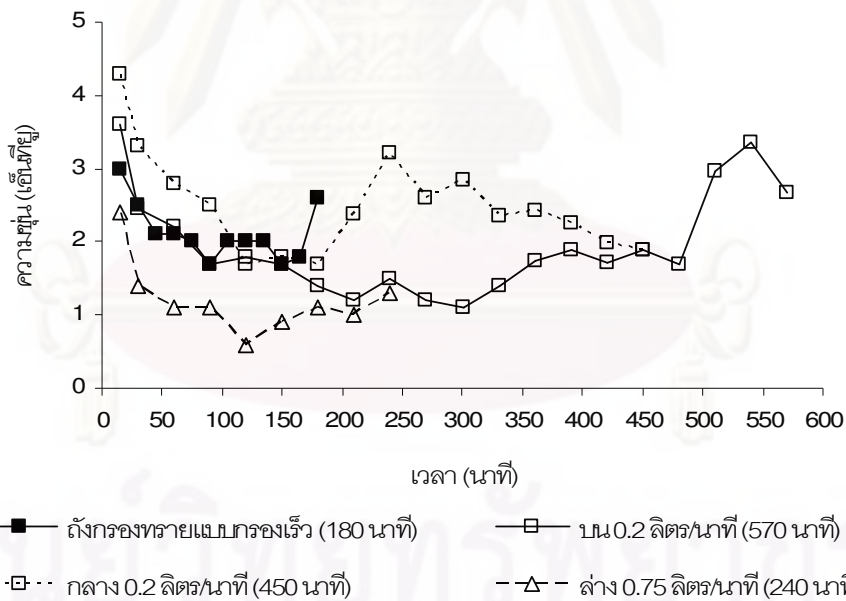
4.2.5.1.2 การเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง

ความชื้นของน้ำที่กรองผ่านถังกรอทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที มีค่าอยู่ในช่วง 1.7

- 4.3 เอนทียู แสดงดังรูปที่ 4.15 ในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองได้มีความขุ่นค่อนข้างสูง และค่อยๆ มีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง เมื่อระยะเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 90 นาที ความขุ่นของน้ำที่กรองได้จึงเริ่มมีค่าคงที่ในช่วง 1.0 – 2.5 เอนทียู จนกระทั่งระยะเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 240 นาที ความขุ่นของน้ำที่กรองได้กลับมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง โดยมีค่าความขุ่นเท่ากับ 3.2 เอนทียู และมีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรองอีกครั้ง ไปจนกระทั่งถังกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 450 นาที

4.2.5.1.3 การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง

ความขุ่นของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที มีค่าอยู่ในช่วง 0.6 – 2.4 เอนทียู แสดงดังรูปที่ 4.15 ความขุ่นของน้ำที่กรองได้มีค่าสูงในช่วง 30 นาทีแรก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 -2.5 เอนทียู หลังจากนั้นจึงมีค่าคงที่ในช่วง 0.5 – 1.5 เอนทียู ไปจนกระทั่งถังกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 240 นาที



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว

จากผลการทดลองพบว่า การเติมอากาศภายในชั้นกรองส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้ 2 รูปแบบ

รูปแบบที่ 1 เมื่อทำการเติมอากาศจนกระทั่งมีอากาศสะสมอยู่ในชั้นกรองจำนวนมากจนทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าลดลงในช่วงที่ชั้นกรองเกิดความปั่นป่วน แสดงได้จากผลการทดลองการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรอง

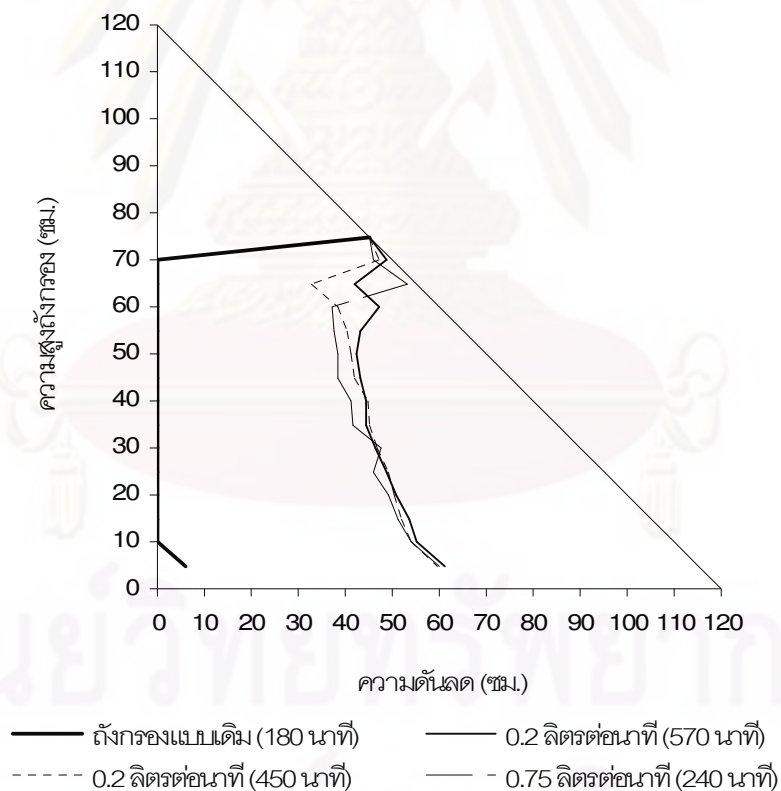
รูปแบบที่ 2 การเติมอากาศทำให้อัตราการกรองมีค่าลดลง อนุภาคความขุ่นจึงมีโอกาสติดค้างอยู่ในชั้นกรองได้มากขึ้น สอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ $\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$ (มันสิน ตันทุลเวศน์, 2539) โดยการเติมอากาศภายในชั้นกรองทำให้ช่องว่างระหว่างสารกรองถูกแทนที่ด้วยอากาศ ความพรุนของชั้นกรอง (ε) จึงมีค่าลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยของเครื่องกรอง ($\ln(C/C_0)$) มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงได้จากผลการทดลองการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองที่มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงกว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรอง

อย่างไรก็ตามคุณภาพของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งเติมอากาศต่างๆ มีค่าได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู (World Health Organization, 2006) ดังนั้นการกระจายความดันภายในชั้นกรอง ระยะเวลาการทำงานของถังกรอง ปริมาตรของน้ำที่กรองได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานจึงน่าจะเป็นประเด็นสำคัญในการพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบถังกรองทรายแบบเติมอากาศแต่ละประเภท

4.2.5.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

ที่เวลาสุดท้ายของการกรองพบว่าภายในชั้นกรองมีอากาศสะสมอยู่จำนวนมากและไม่สามารถระบายอากาศออกทางด้านบนของชั้นกรอง เนื่องจากมีอนุภาคความขุ่นสะสมอยู่ที่บริเวณด้านบนของชั้นกรอง อากาศภายในชั้นกรองจึงไหลออกทางด้านล่างของถังกรอง อัตราการกรองจึงลดลงอย่างมากซึ่งเป็นผลกระทบจากอากาศที่สะสมอยู่ในชั้นกรองจึงทำให้ถังกรองไม่สามารถทำการกรองต่อไปได้ โดยหลังจากทำการหยุดเดินระบบ (ปิดวาล์วน้ำออก) ทำให้อากาศไม่สามารถไหลออกทางด้านล่างปนออกมากับน้ำที่กรองได้เหมือนในช่วงที่มีการเดินระบบ ภายในชั้นกรองจึงมีอากาศสะสมอยู่จำนวนมากและมีแรงดันเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณด้านบนของชั้นกรองกระจายออก อากาศที่สะสมอยู่ในชั้นกรองจึงลอยขึ้นสู่ด้านบนทำให้ภายในชั้นกรองมีน้ำไหลเข้ามาแทนที่

โดยเมื่อทำการเดินระบบอีกครั้งพบว่าถังกรองยังสามารถทำการกรองต่อไปได้ โดยไม่มีมาตรวัดความดันน้ำที่จุดใดอ่านค่าความดันลดได้เท่ากับศูนย์ เนื่องจากการหยุดเดินระบบข้างต้นไม่ได้เกิดจากการอุดตันของถังกรอง แต่เป็นผลจากอากาศที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองทำให้อัตราการกรองลดลงอย่างมาก (ไม่สามารถทำการกรองต่อไปได้) หลังจากทำการไล่อากาศออกจากชั้นกรองจนหมด ช่องว่างที่เคยมีอากาศสะสมอยู่จึงถูกแทนที่ด้วยน้ำทำให้ถังกรองกลับมาทำงานได้อีกครั้ง แต่น้ำที่กรองได้จะมีค่าความขุ่นสูงอยู่ในช่วง 50 – 100 เอ็นทียู น้ำที่กรองได้จึงมีคุณภาพไม่ได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปา เนื่องจากชั้นกรองเกิดความบวมจากอากาศที่ลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองขณะทำการหยุดเดินระบบ เมื่อทำการเดินระบบใหม่อีกครั้งอนุภาคความขุ่นจึงหลุดปนมากับน้ำที่กรองได้ โดยความดันลดภายในชั้นกรองเมื่อทำการเดินระบบถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศต่างๆ อีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าการกระจายความดันยังคงมีลักษณะกระจายไปทั่วทั้งชั้นกรอง การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยตรงช่วงด้านบนของชั้นกรอง



รูปที่ 4.16 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง ที่เวลาการกรองสุดท้าย

จากผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

- หลังจากอากาศภายในชั้นกรงอุทระบายออกจนหมดส่งผลให้การสูญเสียความดันลดบริเวณผิวหน้าของชั้นกรงมีค่าน้อย เนื่องจากอนุภาคความชื้นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรงหลุดเข้ามาภายในชั้นกรงสะสมอยู่ที่บริเวณลึกจากผิวหน้าของชั้นกรงลงไปประมาณ 5 – 15 เซนติเมตร โดยที่บริเวณดังกล่าวมีการสะสมของอากาศจำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายความดันภายในชั้นกรงที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนบริเวณลึกจากผิวหน้าของชั้นกรงลงไปประมาณ 5 – 15 เซนติเมตร

- เมื่อทำการปล่อยอากาศออกไปจนหมดอนุภาคความชื้นจึงหลุดลงไปสะสมแทนที่ โดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรงมีการสูญเสียความดันภายในชั้นกรงน้อยที่สุดถึงแม้จะมีระยะเวลาการทำงานของถังกรงมากที่สุด โดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรงมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ (รูปที่ 4.16)

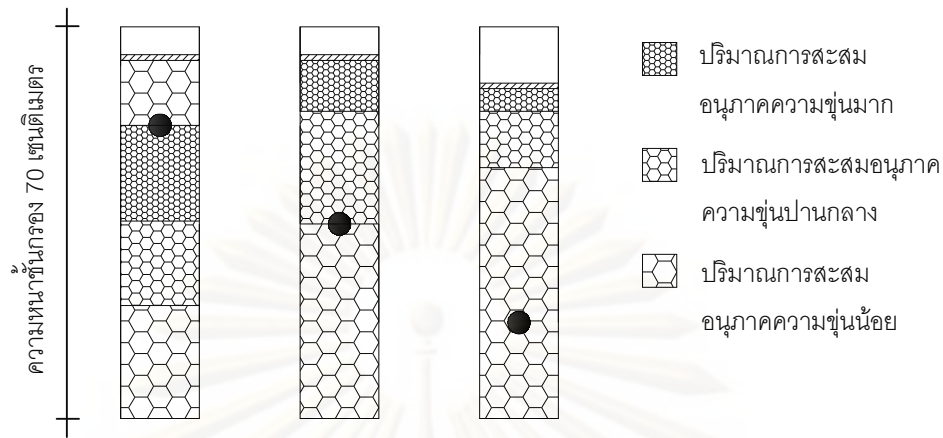
- การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรงทำให้ชั้นกรงบริเวณด้านบนเหนือจุดเติมอากาศมีการขยายตัวสูง อนุภาคความชื้นจึงหลุดเข้ามาภายในชั้นกรงและกระจายตัวสะสมอยู่ที่บริเวณด้านล่างของจุดเติมอากาศลงไป จนกระทั่งเริ่มเกิดการอุดตันที่บริเวณดังกล่าว (อนุภาคความชื้น + อากาศภายในชั้นกรง) อนุภาคความชื้นจึงเกิดการสะสมที่บริเวณด้านบนเหนือจุดเติมอากาศและที่ผิวหน้าของชั้นกรงมากขึ้นจนเกิดการอุดตันในที่สุด

- ในขณะที่การเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรงการขยายตัวของชั้นกรงมีลดลงตามลำดับ อนุภาคความชื้นจึงหลุดลงมาสะสมอยู่ภายในชั้นกรงได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรงที่เติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรง

- อนุภาคความชื้นที่กระจายตัวสะสมไปทั่วทั้งชั้นกรง ทำให้การอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรงลดน้อยลง โดยเฉพาะกรณีการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรง โดยส่งผลดีต่อการกระจายความดันภายในชั้นกรง ทำให้การใช้ความหนาของชั้นสารกรงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น (การสูญเสียความดันภายในชั้นกรงน้อยที่สุด) แสดงดังรูปที่

4.17

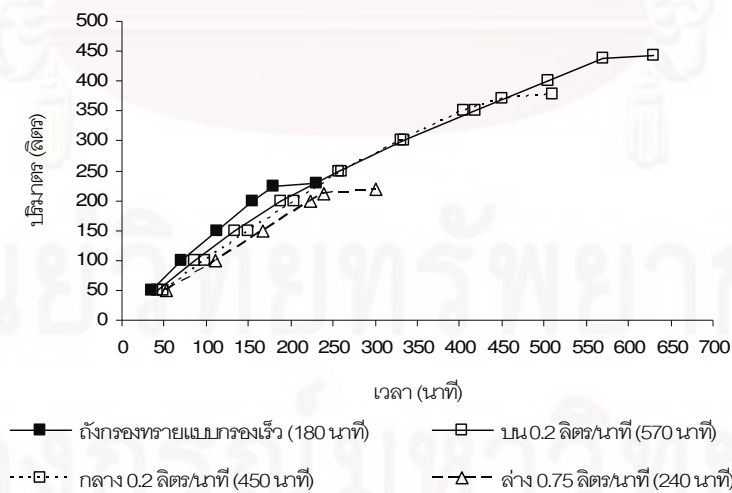
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 ลักษณะการสะสมอนุภาคความชุ่มชื้นภายในชั้นกรอง ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง

4.2.5.3 ปริมาตรและอัตราการกรอง

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรง กลางและด้านล่างของชั้นกรองสามารถกรองน้ำได้ปริมาตรรวมเท่ากับ 437, 370 และ 212 ลิตร ตามลำดับ โดยมีอัตราการกรองอยู่ในช่วง 1.15 – 3.93, 0.87 – 3.85 และ 0.68 – 2.76 เมตรต่อ ชั่วโมง ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.18 อัตราการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีค่าคงที่ใน ช่วงแรกของการกรอง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไป 180 นาที อัตราการกรองจึงมีค่าลดลงตาม ระยะเวลาการทำงานของถังกรองและมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้ายของการกรอง

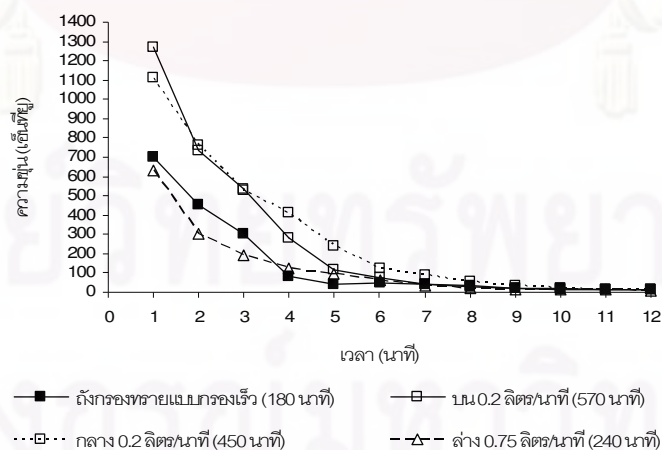


รูปที่ 4.18 อัตราการกรองของถังกรองแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่าง ของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว

จากผลการทดลองพบว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองช่วยให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองเพิ่มขึ้นมากที่สุด เนื่องจากอนุภาคความขุ่นสามารถหลุดเข้าไปและกระจายตัวอยู่ในชั้นกรอง ทำให้สามารถใช้ประสิทธิภาพความหนาของชั้นกรองได้มากขึ้น (รูปที่ 4.17) จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและการล้างย้อนลงได้ โดยอัตราการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับถังกรองทรายแบบกรองเร็ว อย่างไรก็ตามในช่วงสุดท้ายของการกรอง อากาศที่สะสมอยู่ในชั้นกรองส่งผลเสียต่อการไหลผ่านของน้ำ ทำให้อัตราการกรองลดลงอย่างมากจนไม่สามารถทำการกรองต่อไปได้ ที่ตำแหน่งการเติมอากาศตรงกลางของชั้นกรองมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองลดลงมา เนื่องจากอนุภาคความขุ่นส่วนใหญ่สะสมอยู่บริเวณเหนือจุดเติมอากาศ (ลึกจากผิวชั้นกรอง 35 เซนติเมตร) เมื่ออนุภาคความขุ่นสะสมที่บริเวณดังกล่าวมากขึ้น จึงเกิดการอุดตันที่บริเวณด้านบนของชั้นกรอง ทำให้ไม่สามารถใช้ประสิทธิภาพความหนาของชั้นกรองได้เท่ากับการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านล่างของชั้นกรองมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองน้อยที่สุด เนื่องจากมีอากาศสะสมอยู่ในชั้นกรองจำนวนมากอนุภาคความขุ่นจึงสะสมอยู่บริเวณด้านบนและผิวหน้าชั้นกรองจนทำให้เกิดการอุดตันในที่สุด

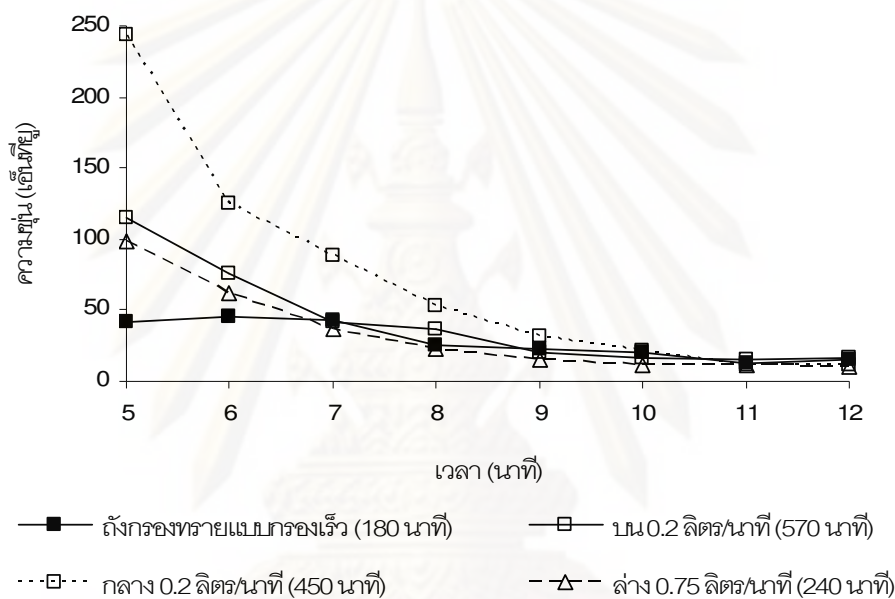
4.2.5.4 การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน

ในช่วงเวลาการล้างย้อนที่ 0 – 5 นาที ค่าความขุ่นของน้ำล้างย้อนที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองมีค่าอยู่ในช่วง 115 – 1270, 240 – 1120 และ 98 – 640 เอ็นทียู ตามลำดับ และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองขณะดำเนินการทดลองระยะยาว

จนกระทั่งช่วงเวลากาล้างย็อน 5 – 12 นาที ค่าความชุ่มชื้นของน้ำล้างย็อนที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองจึงมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 16 – 75, 12 – 125 และ 10 – 62 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยค่าความชุ่มชื้นน้ำล้างย็อนยังคงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วต่อเนื่องไปจนถึงที่เวลากาล้างย็อน 11 นาที หลังจากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนกระทั่งหยุดการล้างย็อน ที่เวลากาล้างย็อน 12 นาที ค่าความชุ่มชื้นน้ำล้างย็อนที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองมีค่าเท่ากับ 16, 12 และ 10 เอ็นทียู ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการล้างย็อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่เวลากาล้างย็อน 5 – 12 นาที ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว

จากผลการทดลองพบว่าระยะเวลาการทำงานของถังกรองแปรผันตรงกับระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย็อนถังกรอง โดยการดำเนินการระยะยาวที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองต้องการเวลาที่ใช้ในการล้างย็อนประมาณ 9.3, 10.1 และ 8.4 นาที ตามลำดับ เนื่องจากถังกรองทรายแบบเติมอากาศสามารถทำการกรองได้ยาวนานจึงสะสมอนุภาคความชุ่มชื้นไว้ภายในชั้นสารกรองจำนวนมาก ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย็อนจึงมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

4.2.5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน

ตารางที่ 4.1 ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบเติมอากาศในรูปแบบต่างๆ โดยแบ่งตามหัวข้อที่ทำการศึกษา (A = ประสิทธิภาพดี มาก, B = ประสิทธิภาพดี, C = ประสิทธิภาพปานกลาง และ D = ประสิทธิภาพพอใช้) พบว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาทีที่มีประสิทธิภาพการใช้งานโดยรวมดีที่สุด ที่ตำแหน่งตรงกลางอัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาทีและที่ตำแหน่งด้านล่างอัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาทีที่มีประสิทธิภาพการใช้งานโดยรวมรองลงมาตามลำดับ นอกจากนี้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศยังมีระยะเวลาการทำงานที่ยาวนานและยังช่วยประหยัดน้ำและเวลาที่ใช้ในการล้างย้อน

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบเติมอากาศในรูปแบบต่างๆ

รูปแบบถังกรอง	อัตราการเติมอากาศ (ลิตร/นาท.)	ความสูงของน้ำที่กรองได้ (เซ็นติเมตร)	ปริมาตรน้ำที่กรองได้ (ลิตร)	อัตรา การกรอง (ม./ชม.)	ระยะเวลา การทำงาน ของถังกรอง (นาท.)	ระยะเวลา ที่ใช้ในการ ล้างย้อน (นาท.)	ประสิทธิภาพ การใช้งาน โดยรวม
แบบเติมอากาศ ด้านบน	0.20	1.1 – 3.6	437	1.1 – 3.9	570	9.3	A
แบบเติมอากาศ ตรงกลาง	0.20	1.7 – 4.3	370	0.8 – 3.8	450	10.1	B
แบบเติมอากาศ ด้านล่าง	0.75	0.6 – 2.4	212	0.6 – 2.7	240	8.4	C
ถังกรองทราย แบบกรองเร็ว	-	1.7 – 3.0	223	4.0	180	10.0	D

ผลการศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศพบว่า

- ถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมอากาศทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวจึงสามารถใช้ประโยชน์จากความหนาของชั้นกรองได้มากขึ้น โดยในสภาวะการเติมอากาศที่เหมาะสม ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบนของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที ถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 570 นาที

- คุณภาพน้ำที่กรองได้ในช่วงแรกจะมีค่าความขุ่นสูงและมีค่าคลอโรเจนเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 90 นาที อย่างไรก็ตามคุณภาพน้ำที่กรองผ่านถึงกรองแบบเติมอากาศนั้นได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู (World Health Organization, 2006) โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าแปรผันกับอัตราการกรอง

- การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันโดยการเติมอากาศที่หัวเติมอากาศด้านล่างของชั้นกรองช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนลงได้ เนื่องจากอากาศที่เคลื่อนตัวผ่านชั้นกรองช่วยให้เกิดแรงฉีกและการขัดสีของสารกรอง ตะกอนต่างๆ จึงหลุดออกมา กับน้ำล้างย้อนได้รวดเร็วขึ้น โดยระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนถึงกรองแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของถังกรอง

- แนวความคิดในการใช้กระบวนการเติมอากาศเข้ามาช่วยทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของถังกรองจึงมีความเป็นไปได้เมื่อเลือกใช้รูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสม ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงทำการศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานและการเลือกใช้หัวเติมอากาศที่เหมาะสมต่อไป

4.3 ศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น

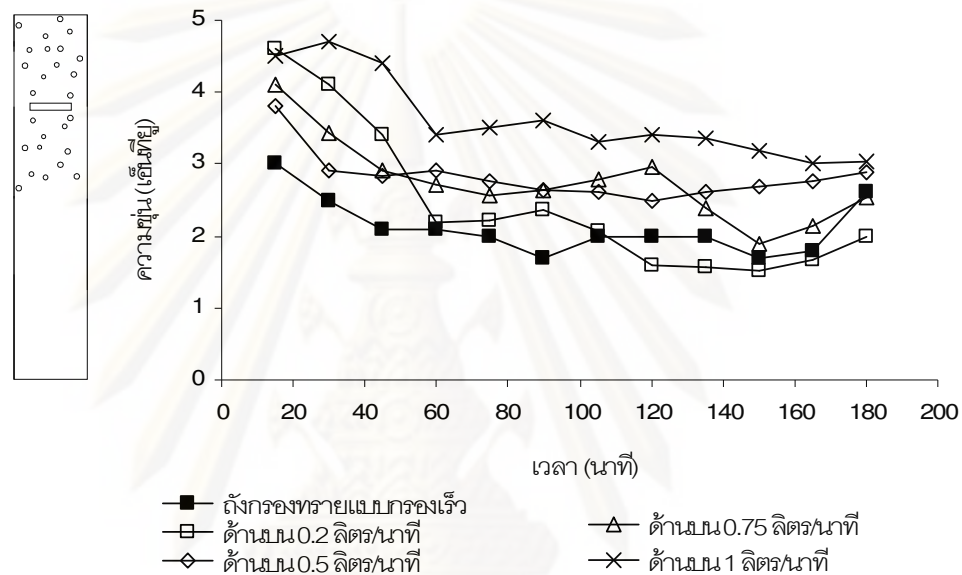
ทำการทดลองโดยเริ่มเดินระบบถังกรองทรายแบบเติมอากาศ โดยใช้หัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที โดยควบคุมระดับน้ำเหนือสารกรองเท่ากับ 50 เซนติเมตร (ทำการกรองที่ความดันคงที่) เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรอง ปริมาณน้ำที่กรองได้และจดบันทึกค่าระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำทุก 15 นาที การเปรียบเทียบการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา

4.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

4.3.1.1 การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง

ความขุ่นของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 – 4.6, 2.5 – 3.8, 1.9 – 4.1 และ 3.0 – 4.7 เอ็นทียู ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.21 ในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองผ่านถึงกรอง

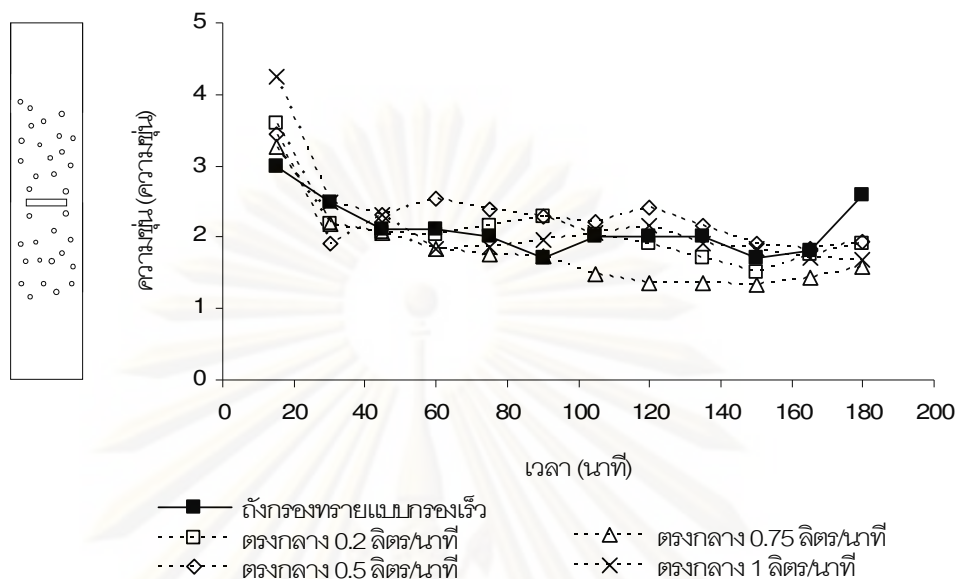
ทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ข้างต้นมีความชุ่มชื้นค่อนข้างสูง (มีค่าอยู่ในช่วง 3.5 – 5.0 เอ็นทียู) โดยที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 และ 1 ลิตรต่อนาที ความชุ่มชื้นของน้ำที่กรองได้จะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 30 และ 60 นาที ตามลำดับ และมีค่าค่อนข้างคงที่ต่อไปจนกระทั่งหยุดเดินระบบ ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 และ 0.75 ลิตรต่อนาที หลังจากเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 60 นาที ความชุ่มชื้นของน้ำที่กรองได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและลดลงสลับกันไปจนกระทั่งหยุดเดินระบบ



รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดความชุ่มชื้นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

4.3.1.2 การเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง

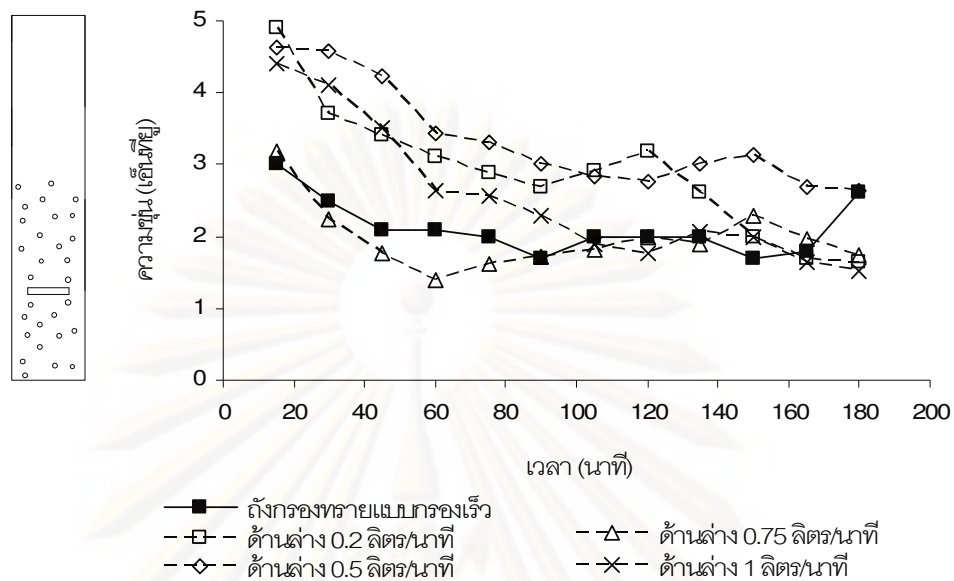
ความชุ่มชื้นของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 – 3.6, 1.8 – 3.4, 1.3 – 3.3 และ 1.7 – 4.2 เอ็นทียู ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.22 โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ข้างต้นมีค่าความชุ่มชื้นค่อนข้างสูง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.0 – 4.5 เอ็นทียู เมื่อเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 30 นาที ความชุ่มชื้นของน้ำที่กรองได้จึงมีค่าค่อนข้างคงที่ที่อยู่ในช่วง 1.0 – 2.5 เอ็นทียู ต่อเนื่องไปจนกระทั่งหยุดเดินระบบ และมีแนวโน้มจะมีค่าคงที่เมื่อทำการกรองต่อไป



รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถึงกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

4.3.1.3 การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง

ความขุ่นของน้ำที่กรองผ่านถึงกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที มีค่าอยู่ในช่วง 1.6 – 4.9, 2.6 – 4.6, 1.4 – 3.2 และ 1.5 – 4.4 เอ็นทียู ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.23 ในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองผ่านถึงกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ข้างต้นมีความขุ่นค่อนข้างสูง (มีค่าอยู่ในช่วง 3.0 – 5.0 เอ็นทียู) โดยที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5 และ 1 ลิตรต่อนาที ความขุ่นของน้ำที่กรองได้ค่อยๆ มีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถึงกรอง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 180 นาที ความขุ่นของน้ำที่กรองได้จึงมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 – 2.5 เอ็นทียู และที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที หลังจากเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 60 นาที ความขุ่นของน้ำที่กรองได้กลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งและมีค่าลดลงในช่วงท้ายของการกรอง

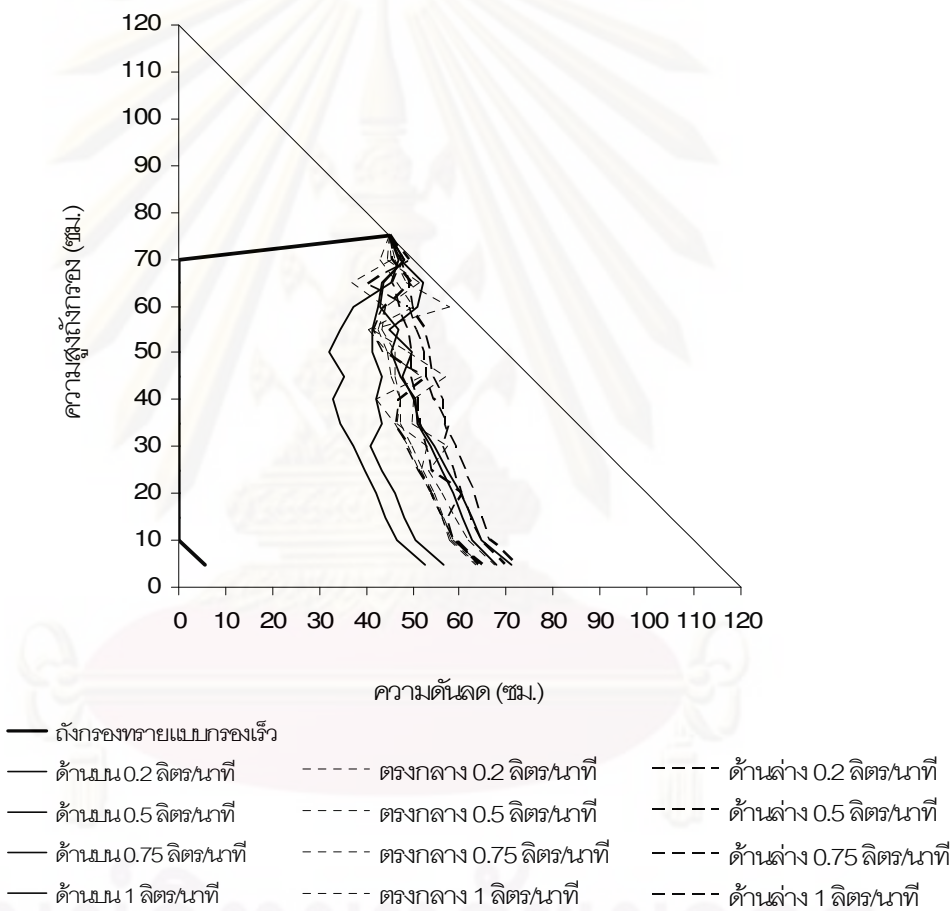


รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่ามากที่สุด เนื่องจากหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นมีลักษณะการกระจายฟองอากาศแบบรอบทิศทาง เมื่อวางหัวเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองจึงเป็นจุดที่เหมาะสม โดยทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวและเกิดความปั่นป่วนภายในชั้นกรองน้อยที่สุด การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองทำให้ชั้นกรองบริเวณด้านบนเกิดการขยายตัวและและสร้างความปั่นป่วนภายในชั้นกรอง เนื่องจากมีอากาศบางส่วนพุ่งออกทางด้านล่างของหัวเติมอากาศ บริเวณดังกล่าวจึงมีอากาศสะสมอยู่ ชั้นกรองจึงเกิดความปั่นป่วนส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าลดลง ในขณะที่การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวเพียงเล็กน้อย โดยที่อากาศสะสมอยู่ภายในชั้นกรองและมีอากาศบางส่วนไหลออกทางด้านล่างปนออกมากับน้ำที่กรองได้ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าลดลง โดยน้ำที่กรองได้จะมีความขุ่นสูงในช่วงเริ่มต้นการกรอง และมีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย คุณภาพน้ำที่กรองผ่านถังกรองแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศต่างๆ มีค่าได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู (World Health Organization, 2006)

4.3.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

ความดันลดภายในชั้นกรองที่เวลาการกรอง 180 นาที (หยุดเดินระบบ) ของ ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งและอัตราการเติมอากาศต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.24 โดยที่เวลาดังกล่าวถังกรองทรายแบบเติมอากาศทั้งหมด (ทุกรูปแบบของการเติมอากาศ) ยังไม่เกิดการอุดตันและการกระจายความดันมีลักษณะกระจายลงไปภายในชั้นกรอง ไม่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรอง



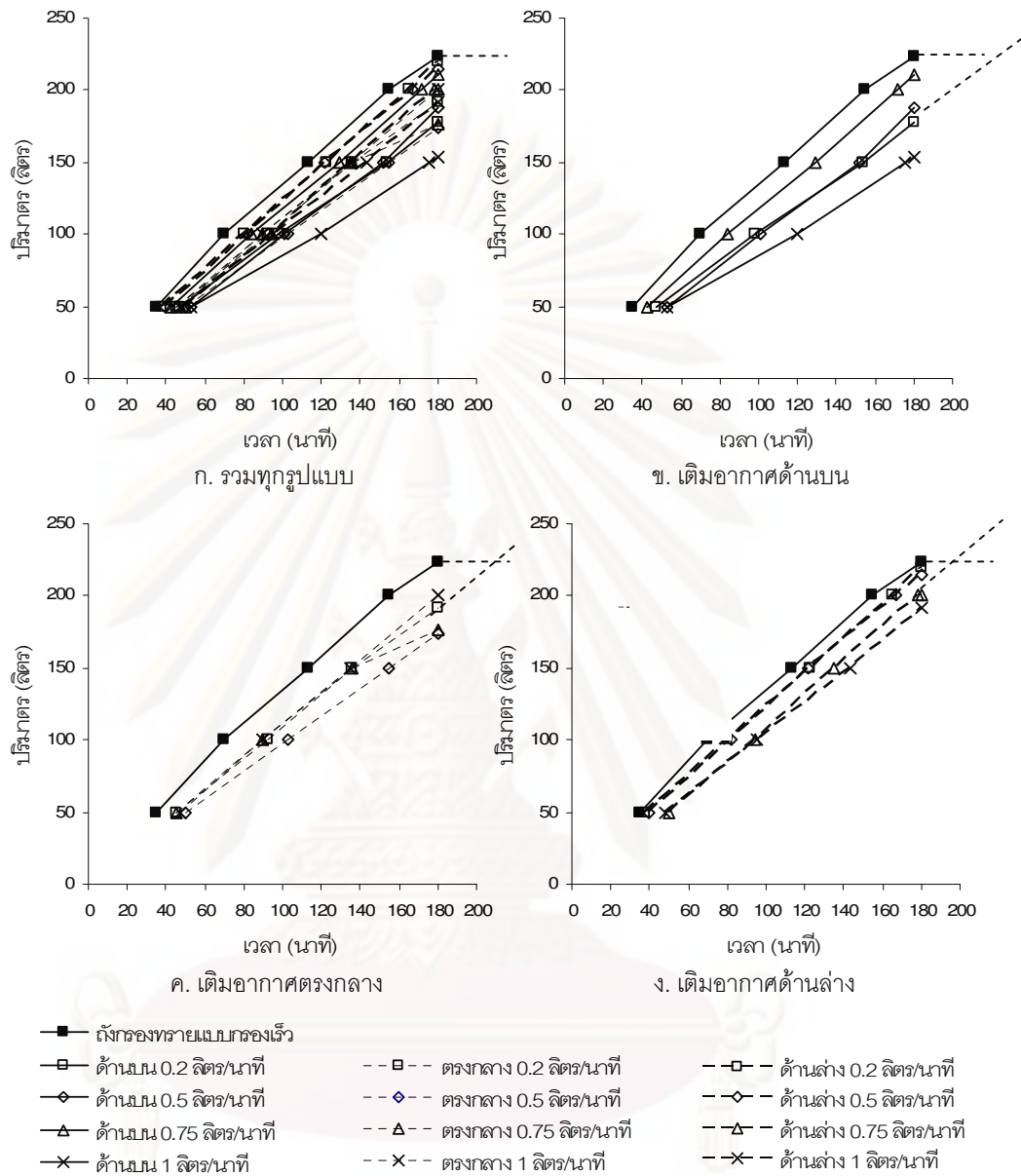
รูปที่ 4.24 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่เวลาการกรอง 180 นาที

จากผลการทดลองพบว่าการเติมอากาศช่วยเพิ่มระยะเวลาการทำงานของถังกรองให้ยาวนานขึ้น โดยที่ตำแหน่งของจุดเติมอากาศมีความสัมพันธ์กับความดันลดภายในชั้นกรอง การเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองทำให้เกิดการสูญเสียความดัน

ลดภายในชั้นกรองใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเติมอากาศที่ตำแหน่งดังกล่าวมีความเหมาะสมเมื่อทำการเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นที่มีลักษณะการกระจายอากาศแบบรอบทิศทาง ทำให้ขอบเขตการขยายตัวของชั้นสารกรองมีค่ามาก อนุภาคความขุ่นจึงกระจายไปสะสมอยู่ภายในชั้นสารกรองได้มากขึ้น โดยที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองมีค่ารองลงมา เนื่องจากขอบเขตการขยายตัวของชั้นกรองมีค่าน้อยกว่า โดยอยู่ที่บริเวณด้านบนของชั้นกรองอนุภาคความขุ่นจึงหลุดเข้าไปและกระจายตัวอยู่ภายในชั้นกรองได้น้อย โดยอัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันมีผลต่อความดันลดภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองที่ตำแหน่งการเติมอากาศต่างๆ มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในขั้นตอนดำเนินการทดลองระยะยาวจึงควรทำการทดลองในทุกตำแหน่งการเติมอากาศ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานต่อไป

4.3.3 ปริมาตรและอัตราการกรอง

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลาง และด้านล่างของชั้นกรองที่เวลาการกรอง 180 นาที (หยุดการเดินระบบ) สามารถกรองน้ำได้ปริมาตรรวมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 183, 186 และ 207 ลิตร ตามลำดับ โดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองส่งผลให้อัตราการกรองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.38, 3.48 และ 3.91 เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันมีผลต่ออัตราการกรองเพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4.25 อัตราการกรองของถังกรองแบบเติมอากาศทั้งหมด (ทุกรูปแบบการเติมอากาศ) มีค่าค่อนข้างคงที่และยังไม่เกิดการอุดตัน จึงสามารถทำการกรองด้วยอัตราการกรองคงที่ดังกล่าวต่อไปได้



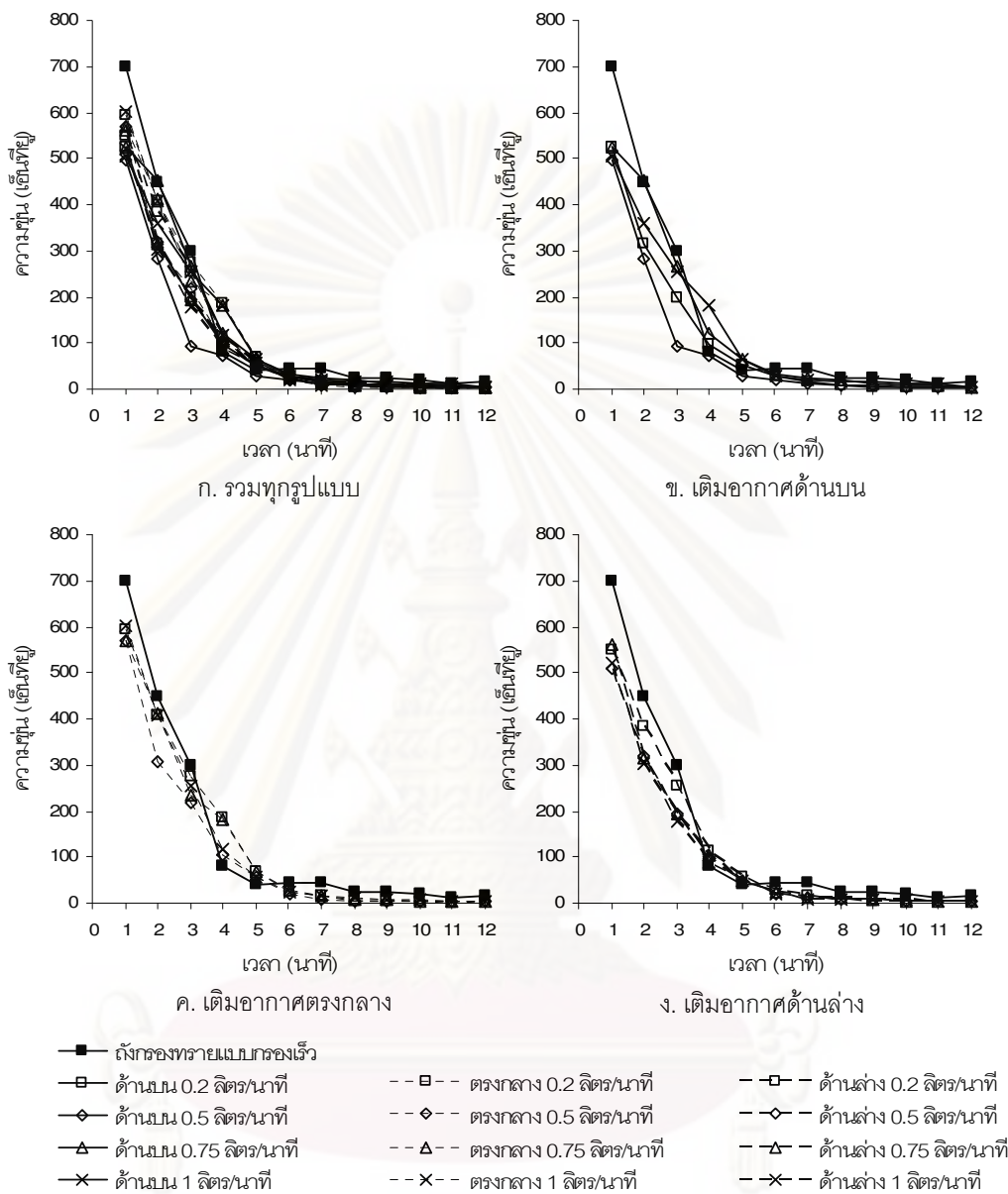
รูปที่ 4.25 อัตราการกรองของถ่านกรอบหยาบแบบเต็มอากาศที่ตำแหน่งและอัตราการเต็มอากาศต่างๆ ด้วยหัวเต็มอากาศแบบยืดหยุ่น ที่เวลาการกรอง 180 นาที

จากผลการทดลองพบว่าการเต็มอากาศส่งผลให้อัตราการกรองมีค่าลดลง โดยอัตราการกรองที่ตำแหน่งการเต็มอากาศด้านล่างของชั้นกรองมีค่ามากที่สุด เนื่องจากมีอากาศสะสมอยู่ภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อยและมีอากาศบางส่วนไหลปนออกมากับน้ำที่กรองได้ ผลกระทบจากการสะสมของอากาศภายในชั้นกรองที่ตำแหน่งการไหลของน้ำจึงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย อัตราการกรองที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองมีค่ารองลงมา เนื่องจากมีอากาศสะสมอยู่

ภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง แต่ฟองอากาศมีทิศทางการลอยขึ้นสู่บริเวณชั้นน้ำเหนือสารกรองเพียงทิศทางเดียว (ด้านทานการไหลของน้ำ) จึงทำให้อัตราการกรองมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกับการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของสารกรองทำให้เกิดการสะสมของอากาศภายในชั้นกรองมากที่สุด เนื่องจากมีอากาศบางส่วนพุ่งออกทางด้านล่างของจุดเติมอากาศ ทำให้มีอากาศสะสมที่บริเวณดังกล่าวส่งผลให้อัตราการกรองลดลงอย่างมาก โดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที มีความน่าสนใจ เนื่องจากทำให้เกิดการขยายตัวได้ทั่วทั้งชั้นกรอง อนุภาคความขุ่นจึงสามารถหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นกรองมากขึ้น โดยมีอากาศสะสมอยู่ภายในชั้นกรองลดลงทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้น้ำที่กรองได้มีคุณภาพค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.22

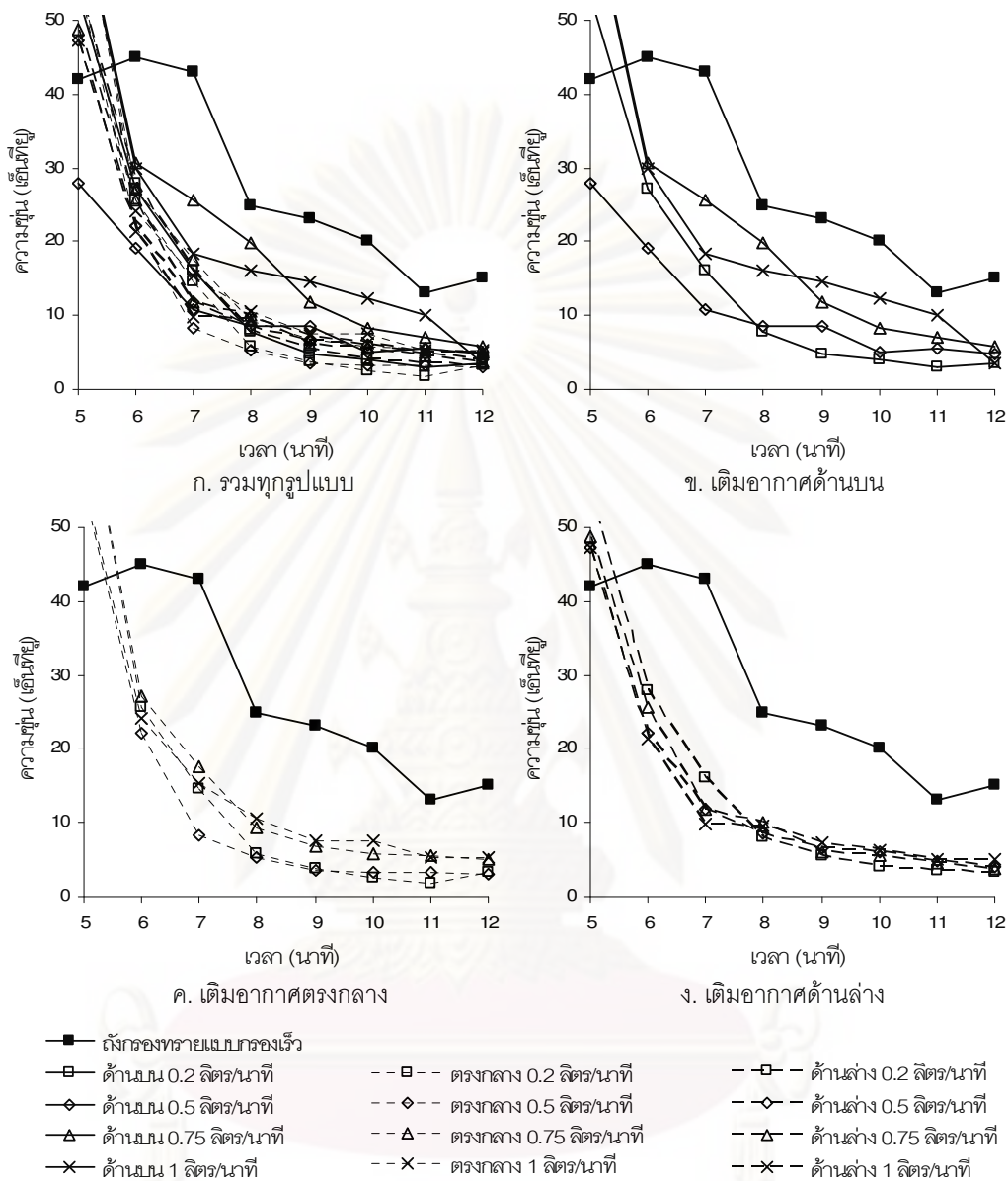
4.3.4 การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน

การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ความเร็วของน้ำล้างย้อน 0.7 เมตรต่อนาที ร่วมกับการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที ในช่วงเวลาการล้างย้อน 0 – 5 นาที ค่าความขุ่นของน้ำล้างย้อนที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบนตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองมีค่าอยู่ในช่วง 28 - 526, 55 - 610 และ 47 - 562 เอ็นทียู ตามลำดับ และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันโดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง ด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น

จนกระทั่งช่วงเวลาการล้างย้อน 5 - 12 นาที ค่าความชื้นของน้ำล้างย้อนที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองจึงมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 3 - 36, 3 - 27 และ 3 - 28 เซ็นทีเย ตามลำดับ โดยค่าความชื้นน้ำล้างย้อนยังคงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วต่อเนื่องไปจนถึงที่เวลาการล้างย้อน 8 นาที หลังจากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนกระทั่งหยุดการล้างย้อน แสดงดังรูปที่ 4.27



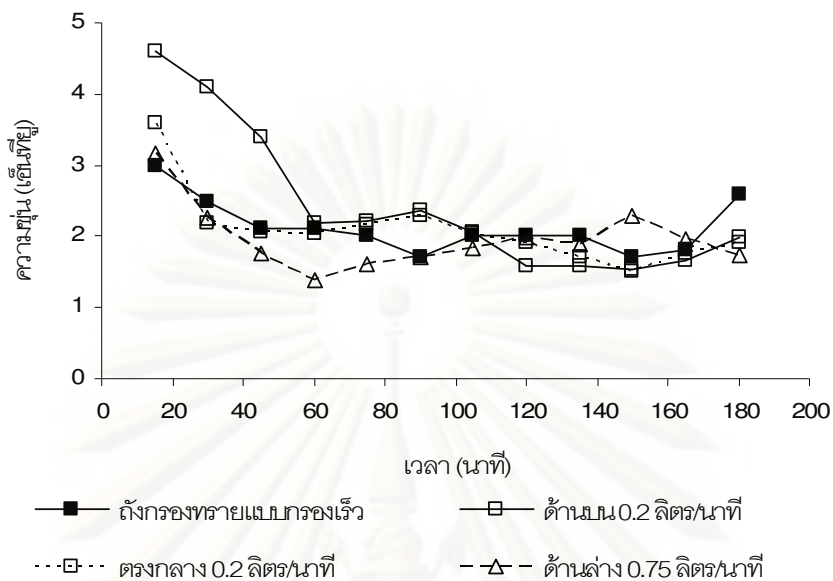
รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่เวลาการล้างยอน 5 - 12 นาที

จากผลการทดลองพบว่า การล้างยอนน้ำและอากาศพร้อมกันที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านล่างของชั้นกรองช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างยอนลงได้มากที่สุด ที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านบนของชั้นกรองมีค่ารองลงมาตามลำดับ อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันมีผลกระทบต่ออัตราการลดลงของระยะเวลาการล้างยอนเพียงเล็กน้อย โดยระยะเวลาที่ใช้ในการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเทียบกับการเติมอากาศด้วยอุปกรณ์แบบแรกโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ

6.8, 6.5 และ 6.4 นาที ตามลำดับ โดยอาจอธิบายได้จากการที่ห้วงอากาศแบบยืดหยุ่นสามารถปล่อยอากาศได้รอบทิศทาง ทำให้อากาศสร้างแรงเฉือนและการขัดสีของสารกรองในขณะลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองได้ใกล้เคียงกันในทุกตำแหน่งของการเติมอากาศ เวลาที่ใช้ในการล้างย้อนจึงมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ การเติมอากาศด้วยห้วงอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง (7.4, 6.6 และ 6.1 นาที) โดยอาจกล่าวได้ว่า เวลาที่ใช้ในการล้างย้อนมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากฟองอากาศจากห้วงอากาศทั้งสองรูปแบบขณะทำการล้างย้อนจะมีทิศทางการเคลื่อนที่เหมือนกัน โดยจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือชั้นกรองด้วยแรงเฉือนจากน้ำล้างย้อน ดังนั้นลักษณะการปล่อยอากาศที่แตกต่างกันจึงไม่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อน

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าห้วงอากาศแบบยืดหยุ่นซึ่งมีทิศทางการปล่อยอากาศแบบรอบทิศทาง ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเข้าสู่ภาวะคงที่ได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น เนื่องจากแรงดันอากาศถูกกระจายไปทั่วทุกทิศทางรอบห้วงอากาศ จึงทำให้ชั้นกรองเกิดความปั่นป่วนน้อย โดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าสูงที่สุด ที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของชั้นกรองมีค่ารองลงมาและมีค่าใกล้เคียงกัน ตำแหน่งและอัตราการเติมอากาศมีผลกระทบบกับการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อย อัตราการกรองที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านล่างของชั้นกรองมีค่ามากที่สุด ที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านบนมีค่ารองลงมา โดยที่ลักษณะการปล่อยอากาศแบบรอบทิศทางส่งผลต่อการล้างย้อนถึงกรอง โดยทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ตำแหน่งการเติมอากาศใดๆ มีค่าลดลงใกล้เคียงกัน เนื่องจากลักษณะของห้วงอากาศดังกล่าวสามารถกระจายอากาศไปได้ทั่วทั้งชั้นกรอง ตำแหน่งของการเติมอากาศจึงมีผลกระทบบกับการล้างย้อนถึงกรองเพียงเล็กน้อย

การเติมอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ส่งผลกระทบต่อตัวแปรที่ทำการศึกษากใกล้เคียงกัน จึงไม่สามารถระบุได้ว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งใดเหมาะสมที่สุด ในการดำเนินการทดลองระยะยาวจึงจำเป็นต้องทำการทดลองในทุกตำแหน่งของการเติมอากาศ โดยเลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่ดีที่สุดในแต่ละตำแหน่งดังนี้ ที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรองเลือกใช้อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที และที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองเลือกใช้อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.28 เพื่อดำเนินการทดลองระยะยาวต่อไป

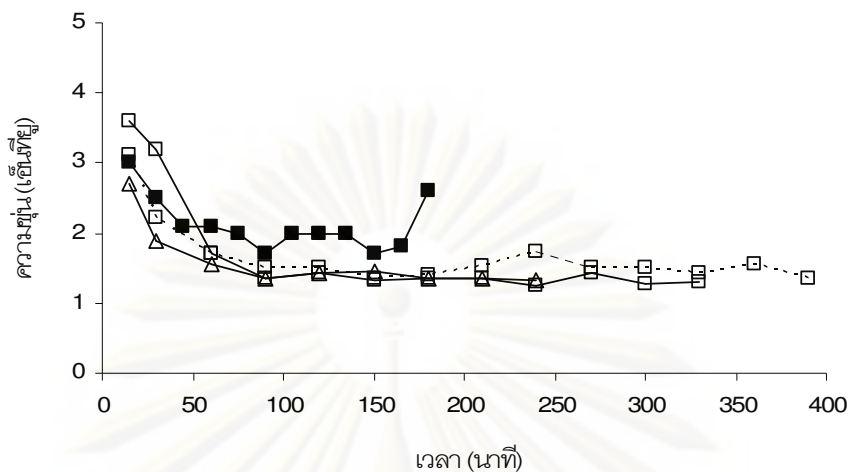


รูปที่ 4.28 อัตราการเติมอากาศที่ดีที่สุดในแต่ละตำแหน่งการเติมอากาศ

4.3.5 ดำเนินการทดลองระยะยาว

4.3.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ความขุ่นของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที และที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที มีค่าอยู่ในช่วง 1.2 – 3.6 เอ็นทียู แสดงดังรูปที่ 4.29 โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองได้มีความขุ่นค่อนข้างสูงและค่อยๆ มีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง เมื่อเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 60 นาที ความขุ่นของน้ำที่กรองได้จึงเริ่มมีค่าคงที่ในช่วง 1.2 – 1.7 เอ็นทียู และมีค่าคงที่ไปจนกระทั่งถังกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 330, 390 และ 240 นาที ตามลำดับ



■— ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว (180 นาที) □— ด้านบน 0.2 ลิตร/นาที (330 นาที)
 □····· ตรงกลาง 0.2 ลิตร/นาที (390 นาที) △— ด้านล่าง 0.75 ลิตร/นาที (240 นาที)

รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นที่ตำแหน่งการเติมอากาศต่างๆ ด้วยหัวเติมอากาศแบบยี่ดหยุ่น ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว

จากผลการทดลองพบว่า การเติมอากาศภายในชั้นกรองด้วยหัวเติมอากาศแบบยี่ดหยุ่นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกันในทุกตำแหน่งของการเติมอากาศ เนื่องจากหัวเติมอากาศแบบยี่ดหยุ่นสามารถกระจายอากาศไปได้ทั่วทั้งชั้นกรอง ทำให้ช่องว่างระหว่างสารกรองถูกแทนที่ด้วยอากาศ ความพรุนของชั้นกรอง (ϵ) และอัตราการกรองมีค่าลดลง อนุภาคความชื้นจึงมีโอกาสติดค้างอยู่ในชั้นกรองได้มากขึ้น สอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ $\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\epsilon)L/d$ (มันสิน ตันจุลเวศน์, 2539) เช่นเดียวกับการศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ หัวเติมอากาศแบบยี่ดหยุ่นทำให้ชั้นกรองเกิดความปั่นป่วนเพียงเล็กน้อย โดยทำให้ความชื้นของน้ำที่กรองได้เข้าสู่สภาวะคงที่ได้อย่างรวดเร็วและค่อนข้างมีค่าคงที่ไปจนกระทั่งถึงกรองเกิดการอุดตันเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากอุปกรณ์ชนิดแรก (รูปที่ 4.15) โดยคุณภาพของน้ำที่กรองผ่านถึงกรองแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งเติมอากาศต่างๆ ยังคงได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความชื้นไม่เกิน 5 เอน์ทียู (World Health Organization, 2006) นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานของถังกรองด้วยการใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวนและหัวเติมอากาศแบบยี่ดหยุ่น พบว่า

- ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบนของชั้นกรองการใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวน (570 นาที) ทำให้ระยะเวลาการใช้งานของถังกรองยาวนานกว่าการใช้หัวเติม

อากาศแบบยี่ดหุ่่น (330 นาที) เนื่องจากอนุภาคความชุ่มมีการสะสมที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองมากขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง แรงดันของฟองอากาศจะทำหน้าที่กระจายอนุภาคความชุ่มดังกล่าว เพื่อไม่ให้เกิดการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรอง ดังนั้นหัวเติมอากาศรูปวงแหวนที่มีลักษณะการปล่อยฟองอากาศแบบพุ่งขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองเพียงทิศทางเดียวจึงทำหน้าที่กระจายอนุภาคความชุ่มที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าสารกรองได้ดีกว่าหัวเติมอากาศแบบยี่ดหุ่่นที่มีลักษณะการปล่อยฟองอากาศแบบรอบทิศทาง

- ที่ตำแหน่งการเติมอากาศตรงกลางของชั้นกรองหัวเติมอากาศรูปวงแหวน (450 นาที) ทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวได้มากกว่า เนื่องจากลักษณะการปล่อยฟองอากาศมีทิศทางพุ่งขึ้นสู่ด้านบนเพียงทิศทางเดียวชั้นกรองบริเวณเหนือจุดเติมอากาศจึงมีการขยายตัวมากกว่า ทำให้มีระยะเวลาการทำงานของถังกรองมากกว่าการใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวน (390 นาที)

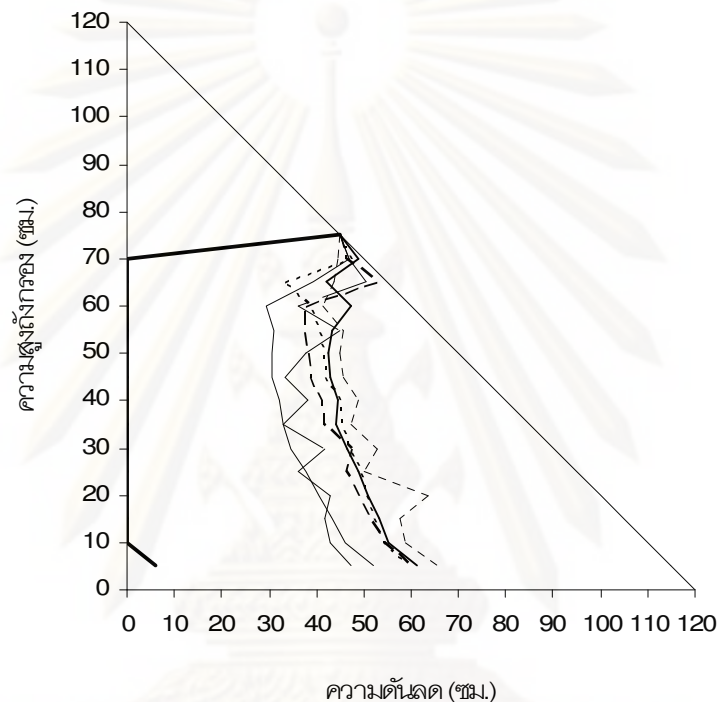
- ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านล่างของชั้นกรองหัวเติมอากาศทั้งสองรูปแบบทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวเพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีแรงดันของฟองอากาศไม่เพียงพอ โดยลักษณะการปล่อยฟองอากาศที่แตกต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการทำงานของถังกรอง (240 ~ 240 นาที)

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับถังกรองทรายแบบกรองเร็ว พบว่าถังกรองทรายแบบเติมอากาศทั้งสองรูปแบบของหัวเติมอากาศยังคงมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ยาวนานกว่า ในส่วนของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความชุ่มของหัวเติมอากาศทั้งสองรูปแบบ พบว่าหัวเติมอากาศแบบยี่ดหุ่่นสร้างความปั่นป่วนให้เกิดขึ้นภายในชั้นกรองน้อยกว่า เนื่องจากมีลักษณะการปล่อยฟองอากาศแบบรอบทิศทาง ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความชุ่มจึงมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับหัวเติมอากาศรูปวงแหวน

4.3.5.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

ที่เวลาสุดท้ายของการกรองพบว่าภายในชั้นกรองมีอากาศสะสมอยู่จำนวนมากและไม่สามารถระบายอากาศออกจากด้านบนของชั้นกรอง เนื่องจากมีอนุภาคความชุ่มสะสมอยู่ที่บริเวณด้านบนของชั้นกรองทำให้อัตราการกรองลดลงอย่างมาก ถังกรองจึงไม่สามารถทำการกรองต่อไปได้ โดยหลังจากทำการหยุดเดินระบบ (ปิดวาล์วน้ำออก) ทำให้อากาศที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองลอยขึ้นสู่ด้านบนทำให้ภายในชั้นกรองมีน้ำไหลเข้ามาแทนที่ เมื่อทำการ

เดินระบบอีกครั้งพบว่าถังกรองยังสามารถทำการกรองต่อไปได้ แต่น้ำที่กรองได้จะมีค่าความขุ่นสูง อยู่ในช่วง 50 – 100 เอ็นทียู น้ำที่กรองได้จึงมีคุณภาพไม่ได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู (World Health Organization, 2006) เช่นเดียวกับการศึกษาผลกระทบจาก ตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ โดยความดันลดภายในชั้นกรองเมื่อทำการเดินระบบถังกรอง ทรายนแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศต่างๆ อีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.1



- | | | | |
|-------|--|------|---|
| — | ถังกรองแบบเต็ม (180 นาที) | — | ยี่ตหยุ่นบน 0.2 ลิตรต่อนาที (330 นาที) |
| — | วงแหวนบน 0.2 ลิตรต่อนาที (570 นาที) | — | ยี่ตหยุ่นกลาง 0.2 ลิตรต่อนาที (390 นาที) |
| | วงแหวนกลาง 0.2 ลิตรต่อนาที (450 นาที) | ---- | ยี่ตหยุ่นล่าง 0.75 ลิตรต่อนาที (240 นาที) |
| ---- | วงแหวนล่าง 0.75 ลิตรต่อนาที (240 นาที) | — | ยี่ตหยุ่นล่าง 0.75 ลิตรต่อนาที (240 นาที) |

รูปที่ 4.30 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายนแบบเติมอากาศด้วยหัวเติม

อากาศแบบยี่ตหยุ่น ที่เวลาการกรองสุดท้าย

จากผลการทดลองการหาค่าความดันลดภายในชั้นกรองกรณี อุปกรณ์เติมอากาศแบบยี่ตหยุ่นพบว่า

- หลังจากอากาศภายในชั้นกรองถูกระบายออกจนหมดส่งผลให้การสูญเสียความดันลดบริเวณผิวหน้าของชั้นกรองมีค่าน้อย เนื่องจากอนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองหลุดเข้ามาภายในชั้นกรองสะสมอยู่ที่บริเวณลึกจากผิวหน้าของชั้นกรองลงไปประมาณ 5 – 10 เซนติเมตร โดยที่บริเวณดังกล่าวมีการสะสมของอากาศจำนวนมาก

เมื่อทำการปล่อยอากาศออกไปจนหมดอนุภาคความชื้นจึงหลุดลงไปสะสมแทนที่เช่นเดียวกับการศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ

- โดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองมีการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองน้อยที่สุด ถึงแม้จะมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองมากที่สุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งการเติมอากาศที่เหมาะสมเมื่อทำการเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นที่มีลักษณะการกระจายอากาศแบบรอบทิศทาง โดยทำให้ขอบเขตการขยายตัวของสารกรองเกิดขึ้นมากที่สุด อนุภาคความชื้นหลุดเข้าไปสะสมและกระจายตัวอยู่ภายในชั้นสารกรอง การสูญเสียความดันภายในชั้นกรองจึงไม่เกิดขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งมากจนเกินไป

- ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบนของชั้นกรองการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองมีค่ารองลงมา โดยที่อนุภาคความชื้นส่วนใหญ่เกิดการสะสมอยู่ที่บริเวณลึกจากระดับผิวหน้าชั้นกรอง 15 – 25 เซนติเมตร การสูญเสียความดันลดที่บริเวณดังกล่าวจึงมีค่าสูง เนื่องจากฟองอากาศส่วนหนึ่งมีทิศทางพุ่งออกทางด้านล่างของหัวเติมอากาศ ทำให้ฟองอากาศที่มีทิศทางพุ่งขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองมีแรงดันของฟองอากาศลดลง ส่งผลให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวที่บริเวณด้านบนเหนือจุดเติมอากาศเป็นส่วนใหญ่ อนุภาคความชื้นหลุดลงมาสะสมอยู่ที่บริเวณดังกล่าวมากขึ้นจนกระทั่งเกิดการอุดตันในที่สุด

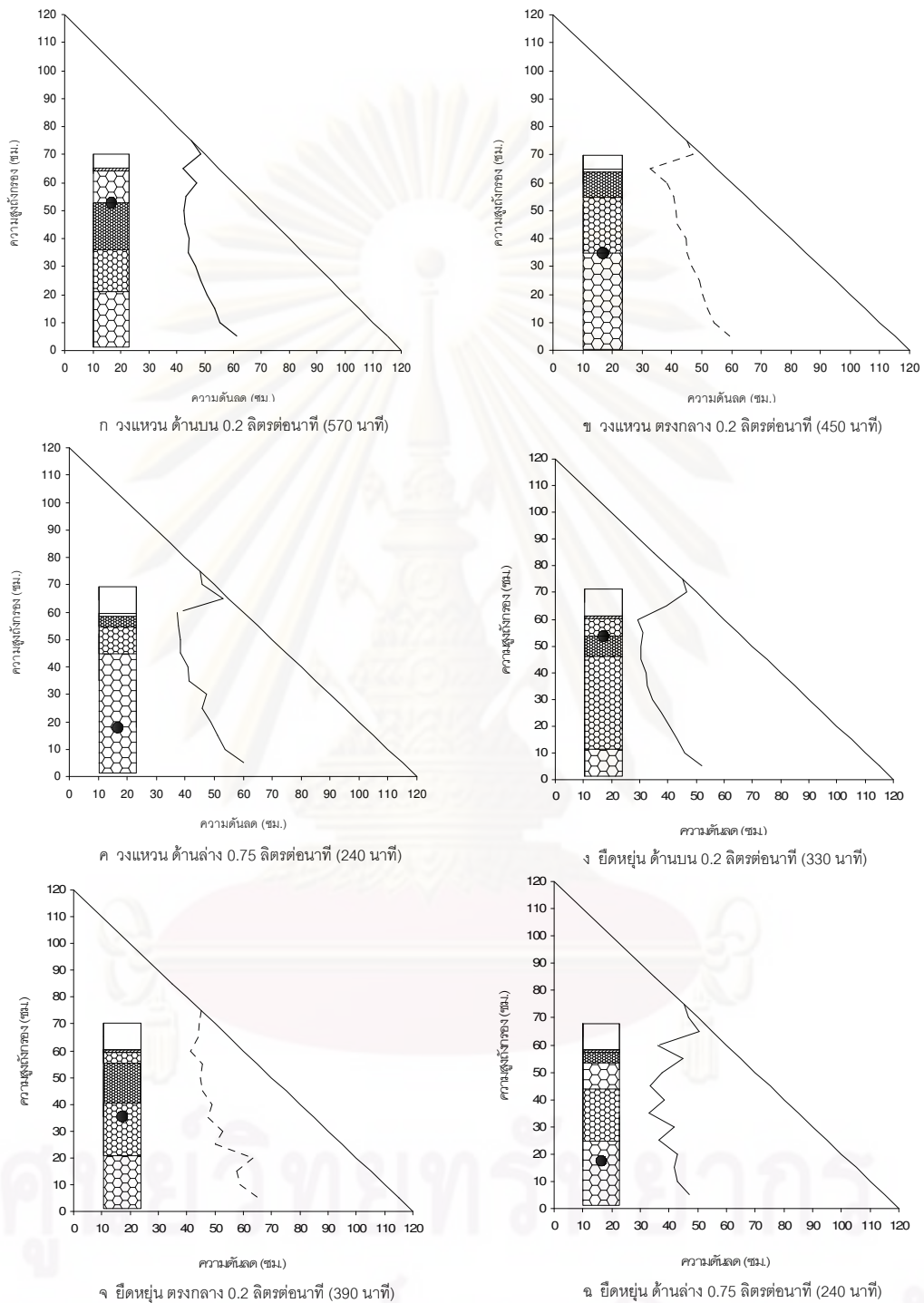
- ที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองอนุภาคความชื้นส่วนใหญ่เกิดการสะสมอยู่ที่บริเวณลึกจากระดับผิวหน้าชั้นกรอง 15 – 25 เซนติเมตร เนื่องจากการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวเพียงเล็กน้อย เมื่ออนุภาคความชื้นที่สะสมอยู่ที่ผิวหน้าชั้นกรองมีค่ามากขึ้น การเติมอากาศที่ตำแหน่งดังกล่าวจึงมีแรงดันไม่เพียงพอที่จะลอยผ่านขึ้นไปได้ อากาศจึงสะสมอยู่ภายในชั้นกรองทำให้มีระยะเวลาการทำงานของถังกรองสั้นที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.31

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับหัวเติมอากาศรูปวงแหวนดังแสดงในรูปที่ 4.31 พบว่า

- การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองพบว่ารูปแบบของหัวเติมอากาศที่แตกต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อผลกระทบจากความดันภายในชั้นกรอง เนื่องจากการเติมอากาศที่ตำแหน่งดังกล่าวด้วยหัวเติมอากาศทั้งสองรูปแบบทำให้มีอากาศสะสมอยู่ภายในชั้นกรองจำนวนมาก ซึ่งไม่ส่งผลดีต่อการขยายตัวของชั้นกรอง ประสิทธิภาพการใช้ความหนาของชั้นกรอง อัตราการกรองและระยะเวลาการทำงานของถังกรอง

- การเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองพบว่า รูปแบบของหัวเติมอากาศส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกระจายความดันภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการกักเก็บอนุภาคความชุ่มภายในชั้นกรองมีค่าใกล้เคียงกัน (ระยะเวลาการทำงานของถังกรองแตกต่างกันเล็กน้อย) โดยน่าจะมีบริเวณที่มีอนุภาคความชุ่มสะสมอยู่ภายในชั้นกรองมีลักษณะแตกต่างกัน โดยที่หัวเติมอากาศรูปวงแหวนมีลักษณะการกระจายฟองอากาศพุ่งขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองเพียงทิศทางเดียว การขยายตัวของชั้นกรองบริเวณเหนือจุดเติมอากาศจึงมีค่าสูงกว่าหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น การกักเก็บอนุภาคความชุ่มภายในชั้นกรองจึงเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนเหนือจุดเติมอากาศเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่หัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นทำให้ชั้นกรองบริเวณเหนือจุดเติมอากาศขยายตัวได้น้อยกว่า แต่ลักษณะการกระจายฟองอากาศแบบรอบทิศทางทำให้อนุภาคความชุ่มสามารถกระจายไปได้ทั่วทั้งชั้นกรอง เมื่อเปรียบเทียบการกักเก็บอนุภาคความชุ่มภายในชั้นกรองจึงพบว่าใกล้เคียงกัน

- การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง รูปแบบของหัวเติมอากาศส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกระจายความดันภายในชั้นกรองอย่างมาก เนื่องจากหัวเติมอากาศรูปวงแหวนมีลักษณะการกระจายฟองอากาศพุ่งขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองเพียงทิศทางเดียวทำให้การสะสมของอนุภาคความชุ่มที่บริเวณผิวน้ำชั้นกรองเกิดขึ้นช้ากว่า ทำให้การกักเก็บอนุภาคความชุ่มภายในชั้นกรองและระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่ามากกว่าถังกรองที่ใช้อุปกรณ์เติมอากาศชนิดยืดหยุ่น



สะสมอนุภาคความชื้นมาก

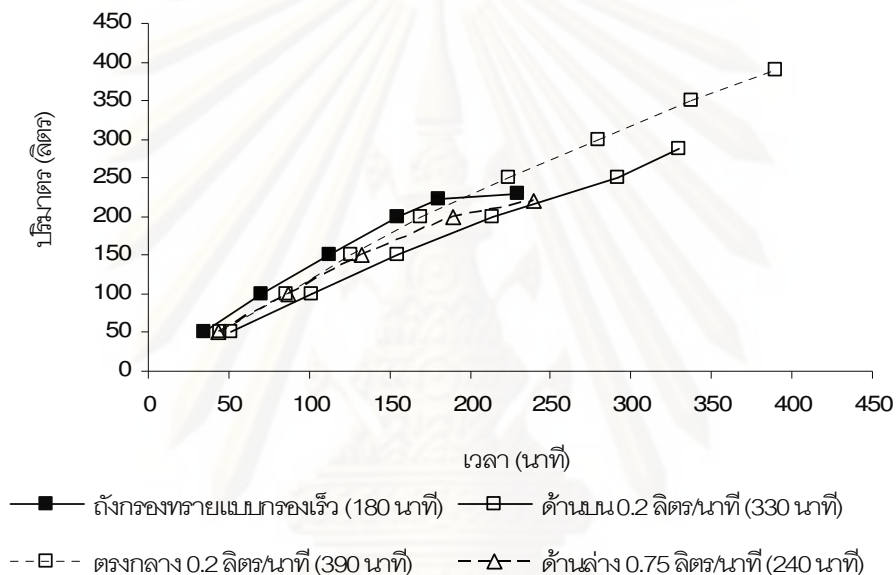
 สะสมอนุภาคความชื้นปานกลาง

 สะสมอนุภาคความชื้นน้อย

รูปที่ 4.31 ลักษณะการสะสมอนุภาคความชื้นภายในชั้นกรอง ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง ด้วยหัวเติมอากาศแบบยึดหยุ่น

4.3.5.3 ปริมาตรและอัตราการกรอง

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองสามารถกรองน้ำได้ปริมาตรรวมเท่ากับ 288, 389 และ 220 ลิตร ตามลำดับ โดยมีอัตราการกรองอยู่ในช่วง 1.24 – 3.38, 1.40 – 3.48 และ 0.88 – 3.91 เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.32 โดยที่อัตราการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรองและมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้ายของการกรอง



รูปที่ 4.32 อัตราการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งและอัตราการเติมอากาศต่างๆ ด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.32 พบว่า

- การเติมอากาศส่งผลให้อัตราการกรองมีค่าลดลง โดยอัตราการกรองเฉลี่ยที่ตำแหน่งการเติมอากาศตรงกลางของชั้นกรองมีค่ามากที่สุด เนื่องจากอากาศสามารถระบายออกทางด้านบนและด้านล่างของถังกรองได้พร้อมกัน ทำให้มีอากาศสะสมอยู่ภายในชั้นกรองลดลง อัตราการกรองจึงมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย โดยที่อัตราการกรองเฉลี่ยที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองมีค่ารองลงมา เนื่องจากการเติมอากาศที่ตำแหน่งดังกล่าวในช่วงแรก อากาศสามารถระบายออกได้ทั้งด้านบนและด้านล่างของถังกรอง อัตราการกรองในช่วงแรกจึงมีค่าใกล้เคียงกับการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง แต่การสะสมของอนุภาคความขุ่นที่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองมีปริมาณมากขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง

ทำให้ฟองอากาศไม่สามารถลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองได้ จนกระทั่งเกิดการอุดตันที่บริเวณดังกล่าว อากาศจึงสะสมอยู่ภายในชั้นกรองจำนวนมากส่งผลให้ไม่สามารถทำการกรองต่อไปได้ (ระยะเวลาการทำงานของถังกรองน้อยที่สุด)

- การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของสารกรองทำให้เกิดการสะสมของอากาศภายในชั้นกรองมากที่สุด เนื่องจากมีอากาศบางส่วนพุ่งออกทางด้านล่างของจุดเติมอากาศ ทำให้มีอากาศสะสมที่บริเวณดังกล่าวส่งผลให้อัตราการกรองลดลงอย่างมาก แต่แรงดันของฟองอากาศที่ลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองส่งผลให้การสะสมของอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรองเกิดขึ้นช้าลง ระยะเวลาการทำงานของถังกรองจึงมีค่าใกล้เคียงกับการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง แต่ปริมาณน้ำที่กรองได้มีค่าน้อยกว่า (อัตราการกรองเฉลี่ยน้อยกว่า)

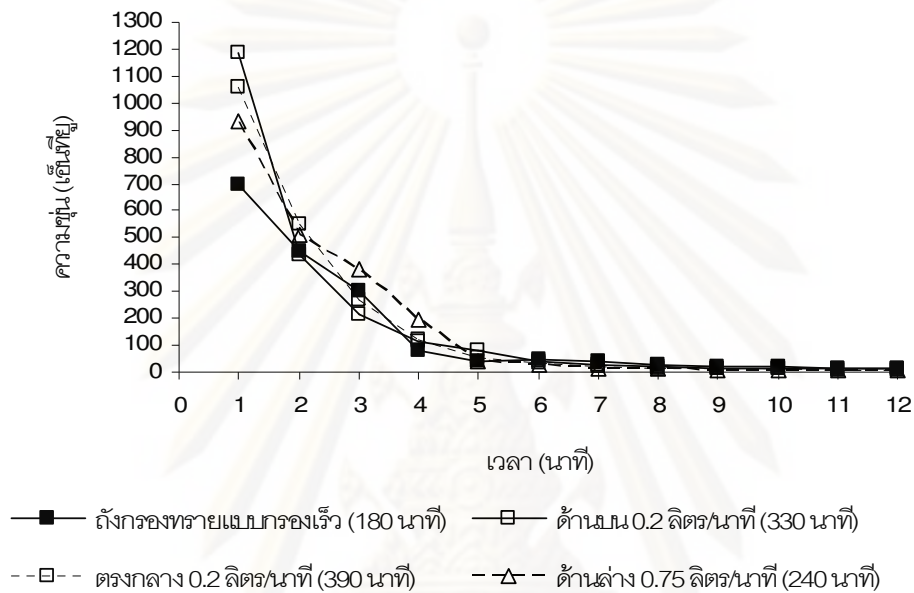
- เมื่อทำการเปรียบเทียบกับหัวเติมอากาศรูปวงแหวน โดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง พบว่าปริมาณน้ำที่กรองได้และอัตราการกรองที่ได้จากการเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศรูปวงแหวนมีค่ามากกว่า เนื่องจากมีทิศทางการปล่อยฟองอากาศแบบพุ่งขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองเพียงทิศทางเดียวทำให้ไม่เกิดการสะสมของอากาศภายในชั้นกรอง อีกทั้งยังมีแรงดันของฟองอากาศมากกว่าจึงช่วยลดการสะสมของอนุภาคความขุ่นที่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองได้ดีกว่า ทำให้มีระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ยาวนานขึ้น

- แต่การเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นทำให้อนุภาคความขุ่นสามารถหลุดเข้าไปกระจายสะสมอยู่ที่ทั้งชั้นกรอง ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่กรองได้และอัตราการกรองมีค่าสูงกว่าการเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศรูปวงแหวน โดยที่ระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่าลดลงเล็กน้อย

- ถึงแม้ว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นจะมีทำให้อัตราการกรองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวน แต่หัวเติมอากาศทั้งสองรูปแบบยังคงทำให้เกิดปัญหาอากาศสะสมอยู่ภายในชั้นกรองและไม่สามารถกระจายอนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองได้ ทำให้มีระยะเวลาการทำงานของถังกรองน้อยที่สุด

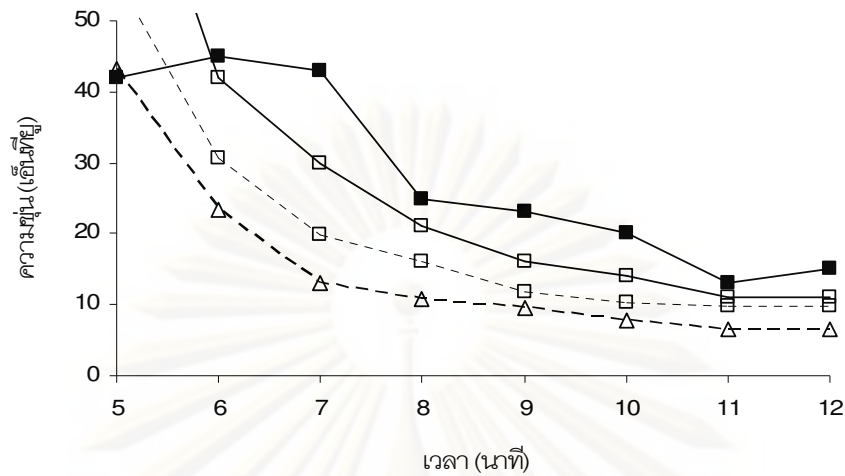
4.3.5.4 การล้างย่อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน

ในช่วงเวลาการล้างย่อนที่ 0 – 5 นาที ค่าความชื้นของน้ำล้างย่อนที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองมีค่าอยู่ในช่วง 84 – 1187, 56 – 1061 และ 43 – 934 เอ็นทียู ตามลำดับ และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ประสิทธิภาพการล้างย่อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันด้วยหัวเติมอากาศแบบยี่ตหยุ่น ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว

จนกระทั่งช่วงเวลาการล้างย่อน 5 – 12 นาที ค่าความชื้นของน้ำล้างย่อนที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองจึงมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 14 – 42, 10 – 31 และ 7 – 23 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยค่าความชื้นน้ำล้างย่อนยังคงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วต่อเนื่องไปจนถึงที่เวลาการล้างย่อน 9 นาที หลังจากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนกระทั่งหยุดการล้างย่อน แสดงดังรูปที่ 4.34



—■— ดังกรองทรายแบบกรองเร็ว (180 นาที) —□— ด้านบน 0.2 ลิตร/นาที (330 นาที)
 --□-- ตรงกลาง 0.2 ลิตร/นาที (390 นาที) --△-- ด้านล่าง 0.75 ลิตร/นาที (240 นาที)

รูปที่ 4.34 ประสิทธิภาพการล้างย้อมด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ที่เวลาการล้างย้อม 5 – 12 นาที ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว

จากผลการทดลองพบว่าระยะเวลาการทำงานของดังกรองแปรผันตรงกับระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อมดังกรอง โดยที่การดำเนินการระยะยาวที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองต้องการเวลาที่ใช้ในการล้างย้อมประมาณ 8.2, 7.0 และ 6.4 นาที ตามลำดับ โดยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นสามารถกระจายอากาศไปได้ทั่วทั้งชั้นกรอง จึงช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อมลงได้เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา

4.3.5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน

ตารางที่ 4.2 ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของดังกรองทรายแบบเติมอากาศในรูปแบบต่างๆ โดยแบ่งตามหัวข้อที่ทำการศึกษา (A = ประสิทธิภาพดี, B = ประสิทธิภาพดี, C = ประสิทธิภาพปานกลาง และ D = ประสิทธิภาพพอใช้) พบว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาทีที่มีประสิทธิภาพการใช้งานโดยรวมดีที่สุด ที่ตำแหน่งด้านบนอัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาทีและที่ตำแหน่งด้านล่างอัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาทีที่มีประสิทธิภาพการใช้งานโดยรวมรองลงมาตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับหัวเติมอากาศรูปวงแหวนและดังกรอง

ทรายแบบกรองเร็วสามารถจัดอันดับประสิทธิภาพการใช้งานโดยรวม (อันดับที่ 1 - 7) เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้รูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมต่อไป ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น ในรูปแบบต่างๆ

รูปแบบถังกรอง	อัตราการเติมอากาศ (ลิตร/นาท)	ความขุ่นของน้ำที่กรองได้ (เอ็นทียู)	ปริมาตรน้ำที่กรองได้ (ลิตร)	อัตราการกรอง (ม./ชม.)	ระยะเวลาการทำงานของถังกรอง (นาท)	ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อน (นาท)	ประสิทธิภาพการใช้งานโดยรวม	อันดับ
แบบยืดหยุ่น ด้านบน	0.20	1.2 – 3.6	288	1.2 – 3.3	330	8.2	C	4
แบบยืดหยุ่น ตรงกลาง	0.20	1.2 – 3.6	389	1.4 – 3.4	390	7.0	A	3
แบบยืดหยุ่น ด้านล่าง	0.75	1.2 – 3.6	220	0.8 – 3.9	240	6.4	B	5
วงแหวน ด้านบน	0.20	1.1 – 3.6	437	1.1 – 3.9	570	9.3	A	1
วงแหวน ตรงกลาง	0.20	1.7 – 4.3	370	0.8 – 3.8	450	10.1	B	2
วงแหวน ด้านล่าง	0.75	0.6 – 2.4	212	0.6 – 2.7	240	8.4	C	6
ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว	-	1.7 – 3.0	223	4.0	180	10.0	D	7

การศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นสามารถสรุปได้ว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองด้วยอัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที ทำให้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีระยะเวลาการทำงานที่ยาวนานถึง 390 นาที โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเข้าสู่สภาวะคงที่ได้อย่างรวดเร็วและมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนกระทั่งถังกรองเกิดการอุดตัน เนื่องจากหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว อนุภาคความขุ่นจึงหลุดเข้าไปสะสมอยู่ภายในชั้นสารกรองได้มากขึ้น การกระจายอากาศแบบรอบทิศทางทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อย โดยน้ำที่กรองได้มีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู การเติมอากาศทำให้อัตราการกรองมีค่าลดลงเช่นเดียวกับการศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ นอกจากนี้การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันในทุกตำแหน่งการเติมอากาศสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนลงได้ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการกระจายอากาศแบบรอบทิศทางทำให้อากาศเคลื่อนตัวผ่านไปทั่วทั้งชั้นกรองไม่ว่าจะทำการเติมอากาศที่ตำแหน่งใด อากาศจึงทำให้เกิดแรง

เขื่อนและเกิดการขัดสีของสารกรอง ตะกอนต่างๆ จึงหลุดออกมากับน้ำล้างย้อนได้รวดเร็วขึ้น โดยระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนถึงกรองแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของถังกรอง

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศ รูปวงแหวน พบว่าลักษณะการปล่อยอากาศที่แตกต่างกันทำให้ประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแตกต่างกัน โดยหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในชั้นกรองน้อยกว่า เนื่องจากฟองอากาศถูกแบ่งให้กระจายออกรอบหัวเติมอากาศ แรงดันของฟองอากาศจึงมีค่าน้อย ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่แรงดันของฟองอากาศที่มีค่าน้อยกลับทำให้ประสิทธิภาพการกระจายอนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าชั้นสารกรองมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับหัวเติมอากาศรูปวงแหวนที่แรงดันของฟองอากาศมีทิศทางพุ่งขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองเพียงทิศทางเดียว ทำให้การเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศรูปวงแหวนมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานกว่า

ในส่วนของความดันลดภายในชั้นกรอง หัวเติมอากาศทั้งสองรูปแบบทำให้อนุภาคความขุ่นหลุดเข้าไปกระจายสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้ใกล้เคียงกัน โดยอัตราการกรองเฉลี่ยของหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากลักษณะการปล่อยอากาศแบบรอบทิศทาง ทำให้มีโอกาสที่ฟองอากาศจะติดค้างอยู่ภายในชั้นกรองได้มากกว่า ส่งผลให้ปริมาตรน้ำที่กรองได้ลดลงตามไปด้วย โดยถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ยาวนาน อนุภาคความขุ่นจึงสะสมอยู่ภายในชั้นกรองจำนวนมาก โดยระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันด้วยหัวเติมอากาศทั้งสองรูปแบบจึงแปรผันตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง โดยลักษณะการปล่อยอากาศที่แตกต่างกันส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากฟองอากาศจากหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นบางส่วนที่พุ่งออกทางด้านล่างของหัวเติมอากาศจึงถูกแรงเฉือนของน้ำล้างย้อนพาให้ลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรอง ทำให้ลักษณะการกระจายฟองอากาศมีลักษณะเดียวกับการเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศรูปวงแหวน แนวความคิดในการใช้กระบวนการเติมอากาศเข้ามาช่วยทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของถังกรองจึงมีความเป็นไปได้ แต่การเติมอากาศตลอดเวลาขณะทำการกรองทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะทำถังกรองแบบเติมอากาศมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง

ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงทำการศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะลดระยะเวลาการเติมอากาศ ซึ่งจะช่วยให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานลดลง โดยเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวน ติดตั้งที่ตำแหน่ง

ด้านบนของชั้นกรอง เนื่องจากรูปแบบการเติมอากาศดังกล่าวทำให้อุณหภูมิความชื้นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองกระจายออกและหลุดเข้าไปภายในชั้นสารกรองได้มากที่สุด โดยแสดงได้จากการกระจายความดันภายในชั้นกรองในการทดลองการเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง (รูปที่ 4.16) ตามการจัดอันดับดังตารางที่ 4.2

4.4 ศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch)

จากการทดลองที่ผ่านมาการเติมอากาศตลอดเวลาขณะทำการกรองทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าอย่างมาก ซึ่งจะทำให้ถึงกรองแบบเติมอากาศมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง ดังนั้นในการทดลองนี้จะทำการเติมอากาศเมื่อถึงกรองเกิดการอุดตันเพื่อให้อุณหภูมิความชื้นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของสารกรองกระจายตัวออกและสามารถเคลื่อนตัวลงไปสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มากขึ้นและช่วยลดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า โดยในช่วงที่ทำการเติมอากาศถึงกรองจะมีความทำงานเหมือนกับการล้างย้อนพร้อมกับการกรอง ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวนและทำการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง เนื่องจากเป็นรูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสม โดยแรงดันของฟองอากาศสามารถทำให้อุณหภูมิความชื้นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองกระจายตัวออกได้มากที่สุด โดยใช้ระยะเวลาในการเติมอากาศ 10, 5 และ 1 นาที ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75, 1 และ 1.3 ลิตรต่ออนาที ตามลำดับ

4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น

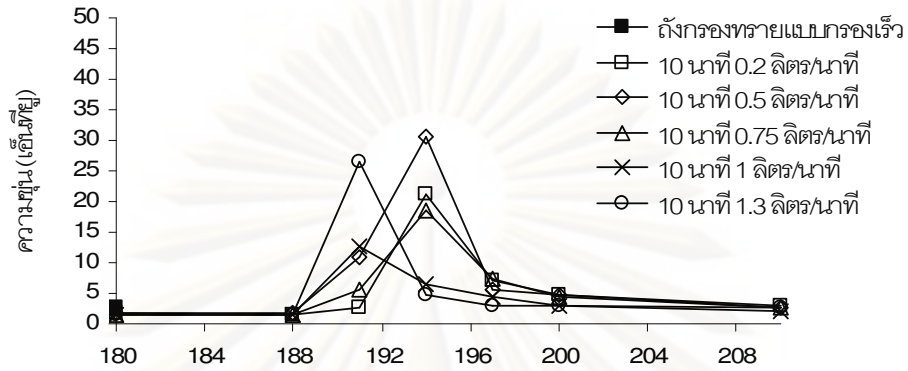
ก่อนการเติมอากาศ

ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบการกรองไปจนกระทั่งถึงกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 180 นาที น้ำที่กรองได้มีค่าความชื้นค่อนข้างสูง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.7 – 3.0 เอ็นทียู และค่อยๆ มีค่าลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 45 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นจึงเริ่มมีค่าคงที่ในช่วง 1.0 – 2.0 เอ็นทียู เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถึงกรองทรายแบบกรองเร็วในการทดลองที่ 4.1.1 (รูปที่ 4.1)

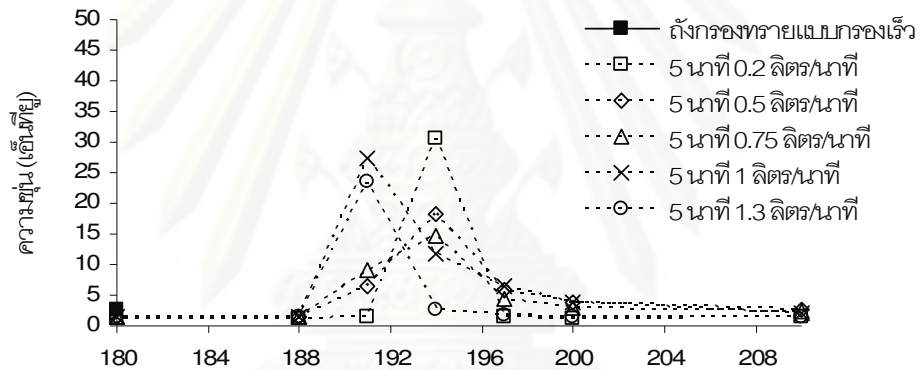
ขณะทำการเติมอากาศหลังจากอุดตัน (ที่เวลา 180 นาที)

หลังจากทำการเติมอากาศความชื้นของน้ำที่กรองได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 1 – 35 เอ็นทียู โดยมีค่าความชื้นสูงสุดที่เวลาประมาณ 8 – 10 นาที หลังจากทำการเติมอากาศ จากนั้นความชื้นของน้ำที่กรองได้จึงมีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะคงที่อีกครั้ง โดยที่

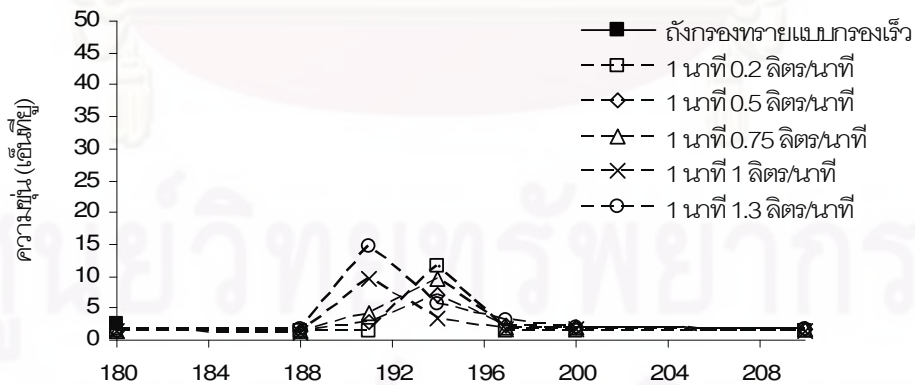
ระยะเวลาในการเติมอากาศ 10 และ 5 นาที ความขุ่นของน้ำที่กรองได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด และที่ระยะเวลาในการเติมอากาศ 1 นาที มีค่ารองลงมา แสดงดังรูปที่ 4.35



เวลา (นาที)
ก. เติมอากาศ 10 นาที



เวลา (นาที)
ข. เติมอากาศ 5 นาที



เวลา (นาที)
ค. เติมอากาศ 1 นาที

รูปที่ 4.35 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ที่เวลาในการเติมอากาศและอัตราการเติมอากาศต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าหลังจากทำการเติมอากาศประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าลดลง เนื่องจากอากาศทำให้ชั้นกรองขยายตัวทำให้อุณหภูมิความขุ่นที่ติดข้างตะกอนอยู่ที่บริเวณผิวหน้าและภายในชั้นกรองหลุดปะปนมากับกับน้ำที่กรองได้ โดยที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 และ 5 นาที ทำให้น้ำที่กรองได้มีค่าความขุ่นเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาทีมีค่ารองลงมา เนื่องจากเวลาการเติมอากาศที่ยาวนานทำให้ชั้นสารกรองเกิดความบั่นป่วนมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิความขุ่นภายในชั้นกรองหลุดปนออกมากับน้ำที่กรองได้เป็นจำนวนมาก โดยอัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย น้ำที่กรองได้ในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มเติมอากาศจนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที จะค่าความขุ่นเกินกว่าที่มาตรฐานการผลิตน้ำประปាកำหนด (5 เอ็นทียู) หลังจากเวลาดังกล่าวความขุ่นของน้ำที่กรองได้จึงกลับมามีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปាកำหนด (5 เอ็นทียู) อีกครั้ง

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลความขุ่นสูงสุดของน้ำที่กรองได้ในช่วงที่มีการเติมอากาศและระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา

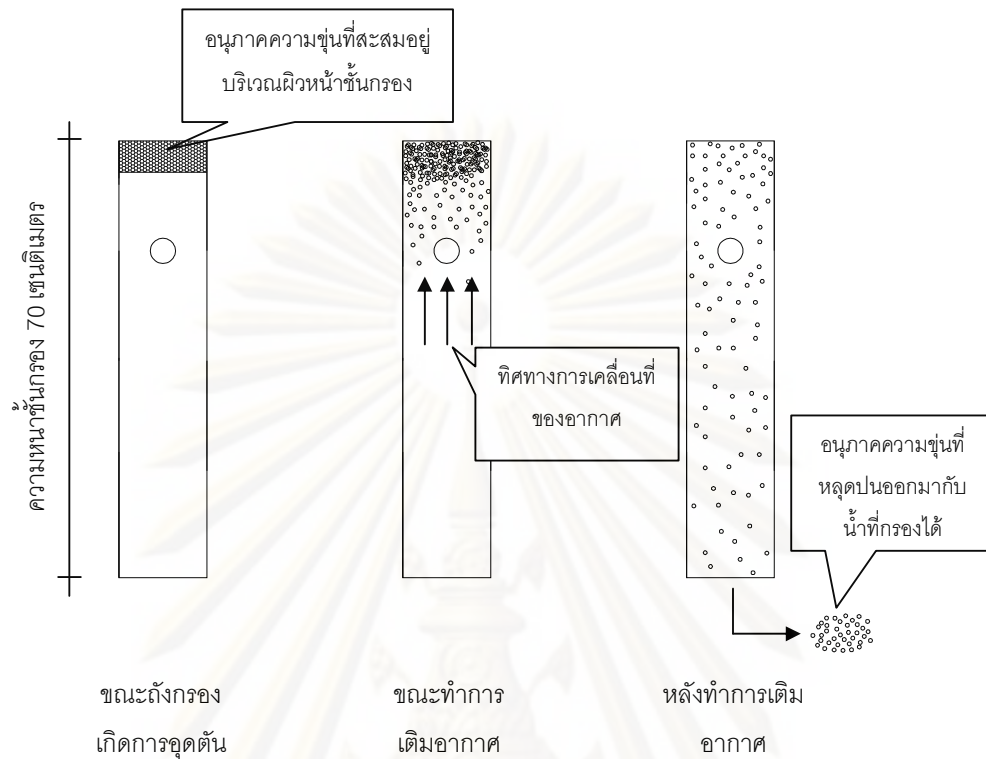
ระยะเวลาการเติมอากาศ (นาที)	อัตราการเติมอากาศ (ลิตร/นาที)	ความขุ่นสูงสุด (เอ็นทียู)	ระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้ไม่ผ่าน มาตรฐานการผลิตน้ำประปา (นาที)
10	0.20	21.30	15
	0.50	30.60	15
	0.75	18.50	15
	1.00	12.70	12
	1.30	26.30	9
5	0.20	30.60	12
	0.50	18.20	15
	0.75	14.70	12
	1.00	27.20	15
	1.30	23.50	9
1	0.20	11.60	12
	0.50	7.10	9
	0.75	9.60	12
	1.00	9.60	9
	1.30	14.80	12

จากข้อมูลความชื้นสูงสุดและระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาสามารถสรุปได้ว่า

- ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที ฟองอากาศสามารถกระจายอนุภาคความชื้นที่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากระยะเวลาการเติมอากาศมีค่าน้อยเกินไปทำให้อนุภาคความชื้นที่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองกระจายออกและหลุดเข้ามาสะสมภายในชั้นกรองได้เพียงเล็กน้อย (อนุภาคความชื้นส่วนใหญ่ยังคงสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าชั้นกรอง) โดยมีอนุภาคความชื้นบางส่วนหลุดปนออกมากับน้ำที่กรองได้ทำให้ความชื้นของน้ำที่กรองได้ในช่วงที่มีการเติมอากาศมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 7 – 15 เอ็นทียู

- ในขณะที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 และ 10 นาที ฟองอากาศสามารถกระจายอนุภาคความชื้นที่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองได้มากขึ้น เนื่องจากมีระยะเวลาการเติมอากาศที่ยาวนานทำให้อนุภาคความชื้นที่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองกระจายออกและหลุดเข้าไปภายในชั้นกรองได้เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามระยะเวลาการเติมอากาศที่ยาวนานส่งผลต่อความชื้นของน้ำที่กรองได้ในช่วงที่มีการเติมอากาศ โดยทำให้ความชื้นของน้ำที่กรองได้ในช่วงที่มีการเติมอากาศมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 12 – 31 เอ็นทียู

ทั้งนี้ระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปามีค่าใกล้เคียงกันในทุกระยะเวลาการเติมอากาศ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 9 – 15 นาที หลังจากทำการเติมอากาศ เนื่องจากเมื่อทำการเติมอากาศทำให้อัตราการกรองที่มีค่าลดลงอย่างมากในช่วงที่ถึงกรองเกิดการอุดตันกลับมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าชั้นกรองบริเวณด้านล่างมีอนุภาคความชื้นสะสมอยู่เพียงเล็กน้อย เมื่อทำการเติมอากาศเพื่อกระจายอนุภาคความชื้นที่สะสมอยู่บริเวณด้านบนของสารกรองออกไป อัตราการกรองจึงมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับอัตราการกรองก่อนหน้าที่จะเกิดการอุดตัน (ประมาณ 4 เมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งสอดคล้องกับการที่อนุภาคความชื้นบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง (ส่วนที่หลุดปนมากับน้ำที่กรองได้) จะใช้เวลาในการไหลผ่านชั้นกรองหนา 70 เซนติเมตร ปนออกมากับน้ำที่กรองได้ภายในช่วง 9 – 15 นาที (ความเร็วการกรอง 4 เมตรต่อชั่วโมง \times ระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา 10.5 นาที = ระยะทางที่น้ำไหลผ่านชั้นกรอง 0.7 เมตร) แสดงดังรูปที่ 4.36 ดังนั้นเราจึงสามารถทำนายระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบประปาแบบกรองโดยตรง และเป็นแนวทางในการใช้งานถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch)

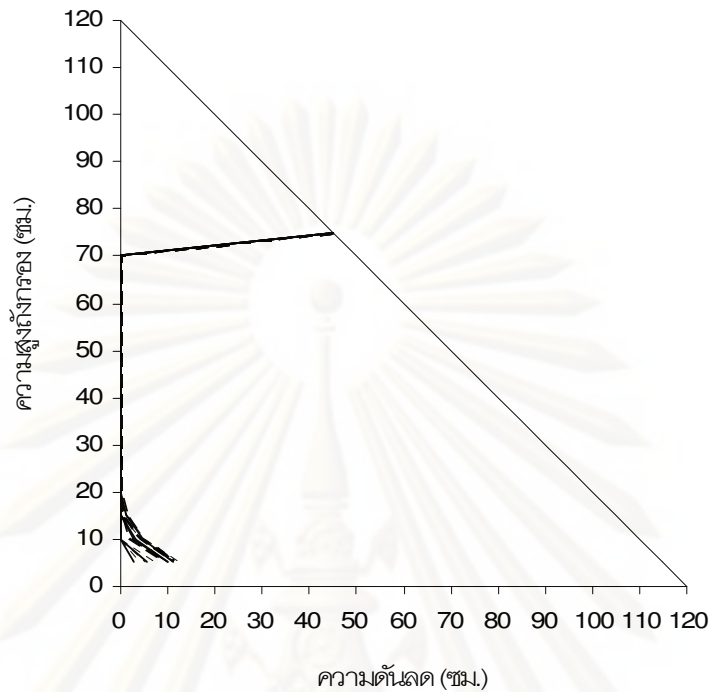


รูปที่ 4.36 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิความชื้นเมื่อทำการเติมอากาศแบบกะ (Batch)

4.4.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

ในช่วงก่อนการเติมอากาศการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองมีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของถังกรอง โดยการสูญเสียความดันส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรอง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไป 180 นาที (เวลาที่ถังกรองเริ่มเกิดการอุดตัน) ความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าลดลงอย่างมาก จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองต่อไป ได้ แสดงดังรูปที่ 4.37

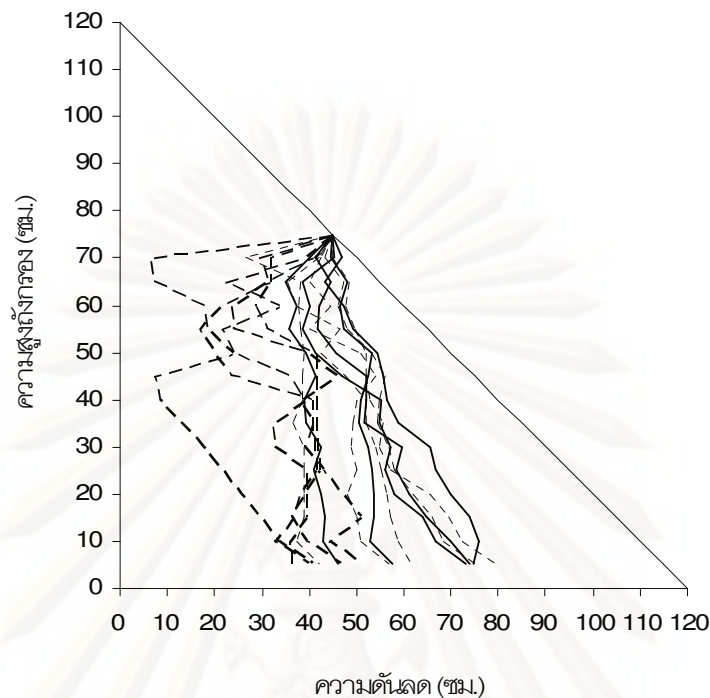
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- | | | |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| — 10 นาที 0.2 ลิตร/นาที | ----- 5 นาที 0.2 ลิตร/นาที | ----- 1 นาที 0.2 ลิตร/นาที |
| — 10 นาที 0.5 ลิตร/นาที | ----- 5 นาที 0.5 ลิตร/นาที | ----- 1 นาที 0.5 ลิตร/นาที |
| — 10 นาที 0.75 ลิตร/นาที | ----- 5 นาที 0.75 ลิตร/นาที | ----- 1 นาที 0.75 ลิตร/นาที |
| — 10 นาที 1 ลิตร/นาที | ----- 5 นาที 1 ลิตร/นาที | ----- 1 นาที 1 ลิตร/นาที |
| — 10 นาที 1.3 ลิตร/นาที | ----- 5 นาที 1.3 ลิตร/นาที | ----- 1 นาที 1.3 ลิตร/นาที |

รูปที่ 4.37 การกระจายความดันภายในชั้นกรงของถังกรงทรายแบบเติมอากาศแบบกะที่เวลาการกรง 180 นาที ที่เวลาในการเติมอากาศและอัตราการเติมอากาศต่างๆ

ดังนั้นจึงต้องทำการเติมอากาศในช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อให้อนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณด้านบนของชั้นกรงกระจายตัวออกและเคลื่อนตัวลงไปสะสมอยู่ภายในชั้นกรง ทำให้ถังกรงกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง โดยที่อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันมีผลกระทบต่อความดันลดภายในชั้นกรงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลกระทบจากระยะเวลาการเติมอากาศ ดังรูปที่ 4.38



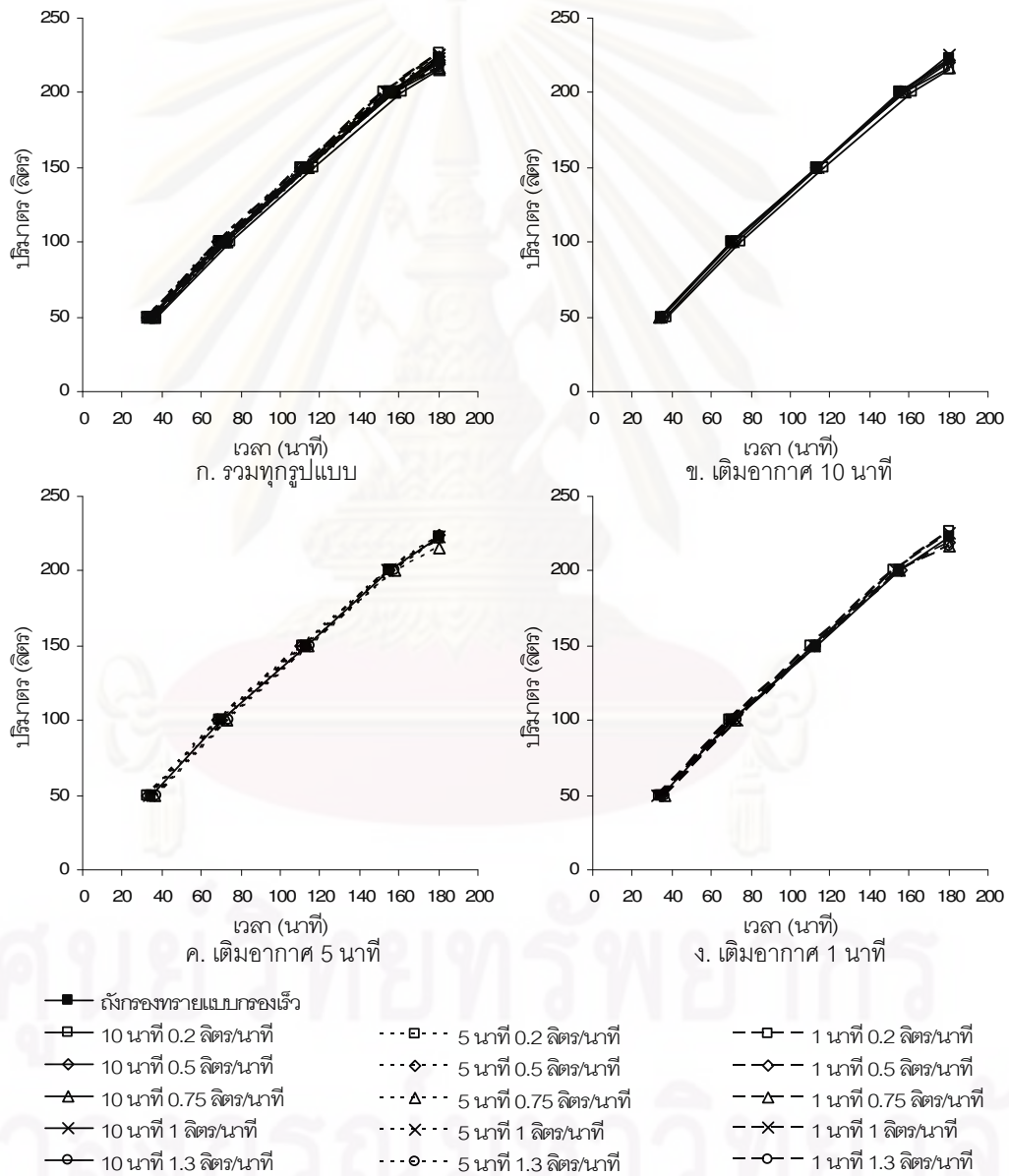
ความเข้มข้น (ซม.)		
— 10 นาที 0.2 ลิตร/นาที	----- 5 นาที 0.2 ลิตร/นาที	----- 1 นาที 0.2 ลิตร/นาที
— 10 นาที 0.5 ลิตร/นาที	----- 5 นาที 0.5 ลิตร/นาที	----- 1 นาที 0.5 ลิตร/นาที
— 10 นาที 0.75 ลิตร/นาที	----- 5 นาที 0.75 ลิตร/นาที	----- 1 นาที 0.75 ลิตร/นาที
— 10 นาที 1 ลิตร/นาที	----- 5 นาที 1 ลิตร/นาที	----- 1 นาที 1 ลิตร/นาที
— 10 นาที 1.3 ลิตร/นาที	----- 5 นาที 1.3 ลิตร/นาที	----- 1 นาที 1.3 ลิตร/นาที

รูปที่ 4.38 การกระจายความเข้มข้นภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะหลังทำการเติมอากาศ ที่เวลาในการเติมอากาศและอัตราการเติมอากาศต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าการเติมอากาศทำให้ถังกรองที่เกิดการอุดตันจากการสะสมของอนุภาคความขุ่นที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองกลับมาทำงานได้อีกครั้ง โดยระยะเวลาการเติมอากาศ 10 และ 5 นาที ทำให้ความดันในการกรองมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน ในขณะที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที มีค่ารองลงมา เนื่องจากการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ต้องการระยะเวลาการเติมอากาศที่เหมาะสม (นานเพียงพอ) จึงจะทำให้ชั้นสารกรองเกิดการขยายตัว อนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าสารกรองจึงกระจายออกและเคลื่อนตัวลงไปภายในชั้นกรองได้มากที่สุด โดยระยะเวลาการเติมอากาศที่แตกต่างกันส่งผลกระทบกับการกระจายความเข้มข้นภายในชั้นกรองหลังการเติมอากาศมากกว่าอัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกัน เนื่องจากเมื่อแรงดันของฟองอากาศสามารถกระจายอนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองได้แล้ว อนุภาคความขุ่นจึงหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นกรอง โดยระยะเวลาการเติมอากาศ

ที่ยาวนานเพียงพอ จะส่งผลให้อุณหภูมิความชื้นมีเวลาในการเคลื่อนตัวเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นกรงได้มากขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นตัวกำหนดลักษณะการกระจายความดันในชั้นกรงได้มากกว่าอัตราการเติมอากาศ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงควรเลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่มีค่าต่ำและใช้ระยะเวลาการเติมอากาศที่ยาวนาน

4.4.3 ปริมาตรและอัตราการกรง



รูปที่ 4.39 อัตราการกรงของถังกรงทรงแบบเติมอากาศแบบกะ ที่เวลาในการเติมอากาศและอัตราการเติมอากาศต่างๆ

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ทำการเติมอากาศที่เวลาการกรอง 180 นาที (ถังกรองเกิดการอุดตัน) โดยสามารถกรองน้ำได้ปริมาตรรวมเฉลี่ยเท่ากับ 220 ลิตร อัตราการกรองเฉลี่ย 4 เมตรต่อชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.39 โดยอัตราการกรองในแต่ละการทดลองมีค่าต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากหลังการล้างย้อนยังคงมีอนุภาคความขุ่นหลงเหลือติดค้างอยู่ภายในชั้นกรอง ซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันส่งผลต่ออัตราการกรองเมื่อเริ่มทำการกรองใหม่อีกครั้ง

จากผลการทดลองพบว่าอัตราการกรองมีค่าค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งถังกรองเริ่มเกิดการอุดตันอัตราการกรองจึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับอัตราการกรองของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว เนื่องจากการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ทำการเติมอากาศในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตัน อากาศจึงไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการกรองที่วิเคราะห์ได้หรืออาจกล่าวได้ว่า ถังกรองดังกล่าวทำงานได้เหมือนกับถังกรองทรายแบบกรองเร็วนั่นเอง (ระยะเวลาการทำงานของถังกรอง, อัตราการกรองและปริมาตรน้ำที่กรองได้มีค่าใกล้เคียงกัน)

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

- การเติมอากาศแบบกะ (Batch) ทำให้ความขุ่นของน้ำที่กรองได้ในช่วงตั้งแต่เริ่มทำการเติมอากาศไปจนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที มีคุณภาพไม่ได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู แสดงดังรูปที่ 4.35
- น้ำที่กรองได้จะเริ่มมีค่าความขุ่นสูงขึ้นหลังจากทำการเติมอากาศและมีค่าความขุ่นสูงที่สุดในช่วงหลังจากทำการเติมอากาศ 8 – 12 นาที จากนั้นค่าความขุ่นจึงเริ่มมีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะคงที่อีกครั้ง เนื่องจากการเติมอากาศทำให้ชั้นกรองขยายตัวและเกิดความปั่นป่วน อนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองจึงหลุดปนมากับน้ำที่กรองได้ในช่วงเวลาดังกล่าว
- การสูญเสียความดันภายในชั้นกรองหลังจากการเติมอากาศจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการเติมอากาศและอัตราการเติมอากาศ เนื่องจากการขยายตัวของชั้นสารกรองมีค่าแปรผันตามอัตราการเติมอากาศและเวลาในการเติมอากาศที่นานเพียงพอจะทำให้อนุภาคความขุ่นสามารถหลุดลงมาสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มากขึ้น
- การเติมอากาศเพียงเล็กน้อยในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตันทำให้ถังกรองกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง โดยมีอัตราการกรองลดลงเล็กน้อย

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการเติมอากาศแบบต่อเนื่อง พบว่าการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ช่วยลดระยะเวลาในการเติมอากาศลงได้อย่างมาก โดยทำการเติมอากาศในช่วงที่ถัง

กรองเกิดการอุดตันเท่านั้น แต่น้ำที่กรองได้ตั้งแต่เริ่มทำการเติมอากาศจนกระทั่งเวลาผ่านไป 15 นาที มีคุณภาพไม่ได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาจึงต้องทำการเวียนน้ำที่กรองได้ในช่วงเวลาดังกล่าวกลับไปที่ตั้งเก็บน้ำดิบ แตกต่างกับการเติมอากาศแบบต่อเนื่องที่สามารถทำการกรองน้ำได้ต่อเนื่องไปจนกระทั่งถึงกรองเกิดการอุดตัน

โดยสรุปรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่เหมาะสมควรมีระยะเวลาในการเติมอากาศ 10 นาที ที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที เนื่องจากเป็นอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมและมีระยะเวลาการเติมอากาศนานเพียงพอ โดยทำให้ออกซิเจนความเข้มข้นที่ละลายอยู่ในบริเวณผิวหน้าชั้นกรองกระจายออกและหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นกรอง โดยมีการกระจายตัวสะสมอยู่ที่บริเวณเหนือจุดเติมอากาศ (ไม่สะสมอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่ง) ทำให้การสูญเสียความดันลดบริเวณผิวหน้าชั้นกรองมีค่าลดลง แตกต่างกับการเติมอากาศที่อัตรา 1 และ 1.3 ลิตรต่อนาที ที่ทำให้ชั้นเกิดการขยายตัวมากเกินไป ออกซิเจนความเข้มข้นที่ละลายอยู่ในบริเวณผิวหน้าชั้นกรองจึงกระจายออกและหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นกรองบริเวณด้านล่างของจุดเติมอากาศเป็นส่วนใหญ่ ทำให้การสูญเสียความดันลดที่บริเวณดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น เมื่อทำการกรองต่อไปอาจทำให้เกิดการอุดตันที่บริเวณดังกล่าวได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่การเติมอากาศที่อัตรา 0.2 และ 0.5 ลิตรต่อนาที ทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวได้ไม่ดีเท่ากับที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที ออกซิเจนความเข้มข้นจึงหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้น้อยกว่า (รูปที่ 4.38) ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที ที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที เพื่อดำเนินการทดลองระยะยาวต่อไป

4.4.4 ดำเนินการทดลองระยะยาว

4.4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

รอบการทำงานที่ 1 (ที่เวลาการกรอง 0 – 200 นาที)

ในการทดลองระยะยาวรอบการทำงานที่ 1 น้ำที่กรองได้มีค่าความขุ่นค่อนข้างสูงในช่วงเริ่มต้นการกรองและค่อยๆ มีค่าลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 45 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงเริ่มมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 1.0 – 2.5 เอ็นทียู จนกระทั่งถึงกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 180 นาที ดังรูปที่ 4.40 (ก และ ข)

เมื่อถึงกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรองประมาณ 180 นาที จึงทำการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที เป็นเวลานาน 10 นาที โดยความขุ่นของน้ำที่กรองได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 1 – 50 เอ็นทียู โดยมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 10 – 12 นาที

หลังจากทำการเติมอากาศ จากนั้นความขุ่นของน้ำที่กรองได้จึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเวลาผ่านไป 15 นาที ความขุ่นของน้ำที่กรองได้จึงมีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาอีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.40 (ก และ ข)

รอบการทำงานที่ 2 (ที่เวลาการกรอง 200 – 590 นาที)

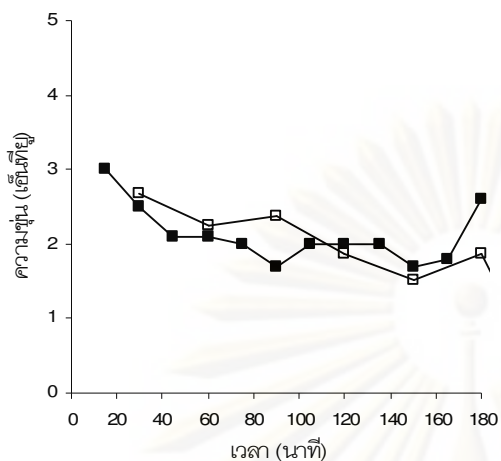
ในการทดลองระยะยาวรอบการทำงานที่ 2 น้ำที่กรองได้มีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง โดยมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากการเติมอากาศในรอบการทำงานที่ 1 โดยที่เวลาการกรองที่ 330 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงเริ่มมีค่าคงที่อยู่ที่ 1.0 – 1.5 เอ็นทียู จนกระทั่งถึงกรองเกิดการอุดตันอีกครั้งที่เวลาการกรอง 570 นาที แสดงดังรูปที่ 4.40 (ค และ ง)

เมื่อถึงกรองเกิดการอุดตันครั้งที่ 2 ที่เวลาการกรองประมาณ 570 นาทีจึงทำการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที เป็นเวลานาน 10 นาที อีกครั้ง โดยความขุ่นของน้ำที่กรองได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 1 – 35 เอ็นทียู โดยมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 10 – 12 นาที จากนั้นความขุ่นของน้ำที่กรองได้จึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเวลาผ่านไป 30 นาที ความขุ่นของน้ำที่กรองได้จึงมีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาอีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.40 (ค และ ง)

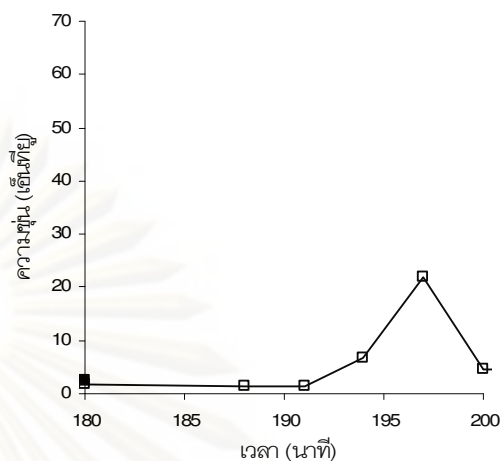
รอบการทำงานที่ 3 (ที่เวลาการกรอง 590 – 734 นาที)

ในการทดลองระยะยาวรอบการทำงานที่ 3 น้ำที่กรองได้มีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง โดยมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากการเติมอากาศเช่นเดียวกับรอบการทำงานที่ 2 โดยที่เวลาการกรองที่ 660 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงเริ่มมีค่าคงที่อยู่ที่ 1.5 – 2.0 เอ็นทียู จนกระทั่งถึงกรองเกิดการอุดตันอีกครั้งที่เวลาการกรอง 720 นาที แสดงดังรูปที่ 4.40 (จ + ฉ)

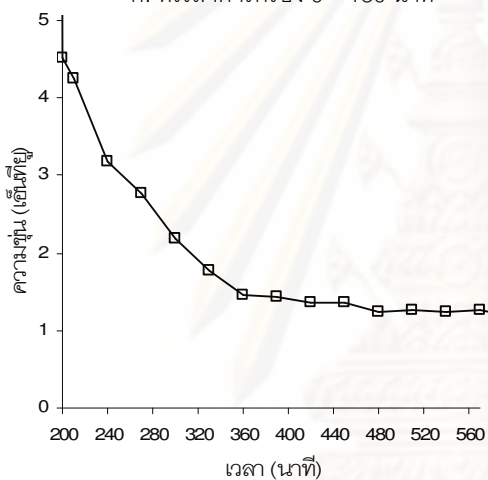
เมื่อถึงกรองเกิดการอุดตันครั้งที่ 3 ที่เวลาการกรองประมาณ 720 นาทีจึงทำการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที เป็นเวลานาน 10 นาที อีกครั้ง โดยความขุ่นของน้ำที่กรองได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 1 – 70 เอ็นทียู โดยมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 8 – 10 นาที หลังจากทำการเติมอากาศ โดยที่การเติมอากาศในรอบการทำงานที่ 3 ไม่สามารถทำให้อนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณด้านบนของชั้นกรองกระจายออกไปได้ ทำให้มีอากาศสะสมอยู่ภายในชั้นกรองและไม่สามารถทำการกรองได้อีกต่อไป ถึงกรองแบบเติมอากาศจึงเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 734 นาที แสดงดังรูปที่ 4.40 (จ + ฉ)



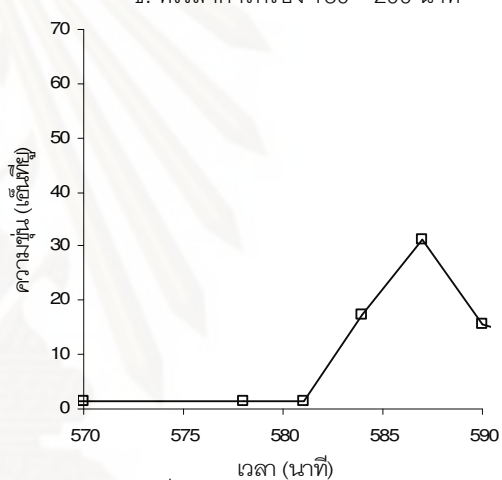
ก. ที่เวลาการกรอง 0 – 180 นาที



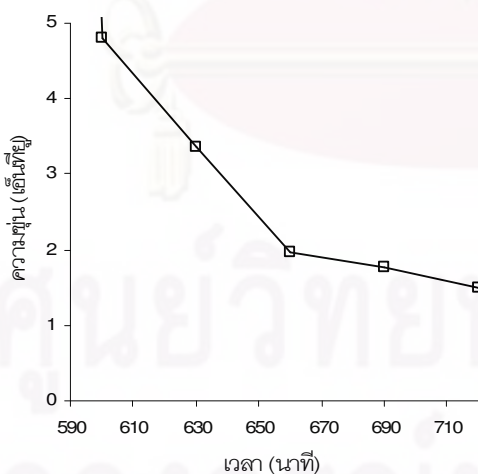
ข. ที่เวลาการกรอง 180 – 200 นาที



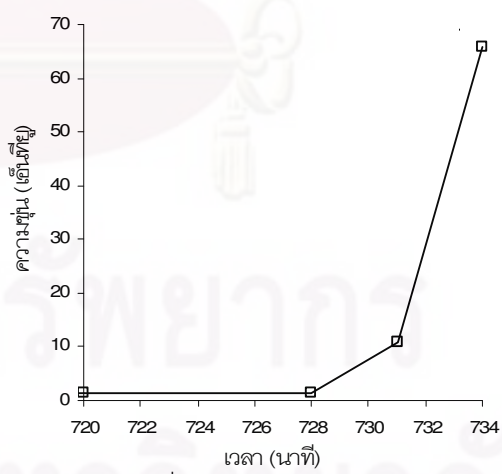
ค. ที่เวลาการกรอง 200 – 560 นาที



ง. ที่เวลาการกรอง 570 – 590 นาที



จ. ที่เวลาการกรอง 590 – 710 นาที



ฉ. ที่เวลาการกรอง 720 – 732 นาที

—■— ถึงกรองทรายแบบกรองเร็ว (180 นาที)

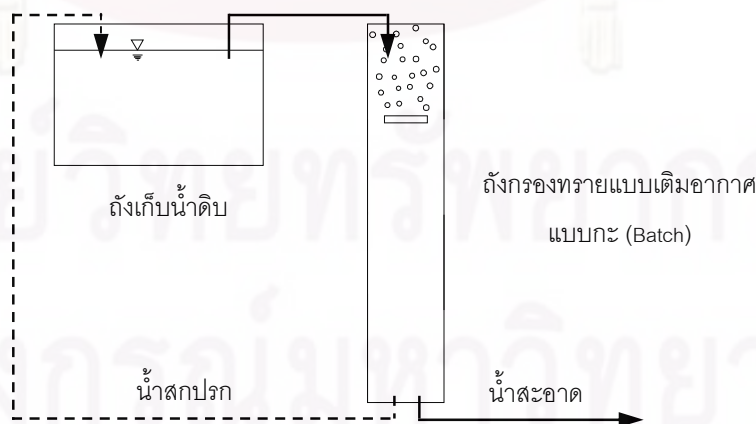
—□— 10 นาที 0.75 ลิตร/นาที (720 นาที)

รูปที่ 4.40 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเมื่อทำการเติมอากาศแบบกะ ขณะดำเนินการทดลอง

ระยะยาว

จากผลการทดลองพบว่าในช่วงเริ่มต้นการกรองจนกระทั่งถึงกรองเกิดการอุดตันในรอบการทำงานที่ 1 น้ำที่กรองได้มีความขุ่นค่อนข้างสูงและค่อยๆ มีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง โดยหลังจากทำการเติมอากาศในทุกรอบการทำงานประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะมีค่าลดลง เนื่องจากอากาศทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวทำให้อนุภาคความขุ่นที่ติดข้างสะสมอยู่ที่บริเวณด้านบนและภายในชั้นกรองหลุดปะปนมากับกับน้ำที่กรองได้ โดยในรอบการทำงานที่ 1 และ 2 ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มเติมอากาศจนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 15 และ 30 นาที ตามลำดับ น้ำที่กรองได้จะมีค่าความขุ่นเกินกว่าที่มาตรฐานการผลิตน้ำประปាកำหนด (5 เอ็นทียู) หลังจากเวลาดังกล่าวความขุ่นของน้ำที่กรองได้จึงกลับมามีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาอีกครั้ง จนกระทั่งในการเติมอากาศครั้งที่ 3 อากาศไม่สามารถลอยขึ้นสู่ด้านบนชั้นกรองได้ เนื่องจากอนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองมีจำนวนมากทำให้ฟองอากาศมีแรงดันไม่เพียงพอที่จะลอยขึ้นสู่ด้านบนของชั้นกรอง ภายในชั้นกรองจึงมีอากาศสะสมอยู่จำนวนมาก ทำให้ถังกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 720 นาที

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับถังกรองทรายแบบกรองเร็ว พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน (ในช่วงที่ไม่มีการเติมอากาศ) เนื่องจากมีการเติมอากาศเพียงเล็กน้อยในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตัน การเติมอากาศจึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในช่วงตั้งแต่เริ่มทำการเติมอากาศจนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 15 – 30 นาที เท่านั้น โดยที่ถังกรองแบบเติมอากาศแบบกะมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ยาวนานกว่า จึงสามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างย้อนลงได้ ในส่วนของน้ำที่ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาควรมีระบบเวียนน้ำที่กรองได้ในช่วงเวลาดังกล่าว (15 นาที) กลับไปยังถังเก็บน้ำดิบเพื่อทำการกรองใหม่อีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 ระบบเวียนน้ำที่ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา

4.4.4.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

รอบการทำงานที่ 1 (ที่เวลาการกรอง 0 – 200 นาที)

การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองที่เวลาการกรอง 0 – 180 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.42 โดยการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองมีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของถังกรอง โดยที่เวลาการกรอง 150 นาที มาตรฐานวัดความดันน้ำจุดที่ 2 - 7 (ลึกจากระดับผิวน้ำ 50 - 75 เซนติเมตร) อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้นกรองที่ระดับความสูงดังกล่าว ส่งผลให้อัตราการกรองเริ่มมีค่าลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไป 180 นาที ความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าลดลงอย่างมาก (มาตรฐานวัดความดันน้ำจุดที่ 2 - 13 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์) จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองต่อไปได้ ถึงกรองแบบเต็มอากาศจึงเกิดการอุดตันครั้งแรกที่เวลาการกรองประมาณ 180 นาที

เมื่อถังกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 180 นาทีจึงทำการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที เป็นเวลานาน 10 นาที ทำให้ถังกรองกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง (รอบการทำงานที่ 2)

รอบการทำงานที่ 2 (ที่เวลาการกรอง 200 – 590 นาที)

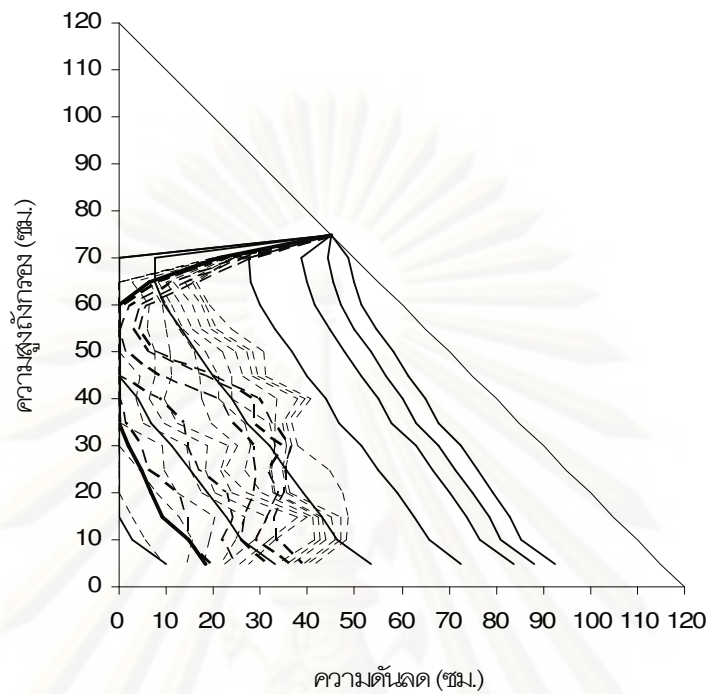
ในการทดลองระยะยาวรอบการทำงานที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองที่เวลาการกรอง 210 – 570 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.42 โดยการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองยังคงมีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของถังกรองเช่นเดียวกับรอบการทดลองที่ 1 โดยที่เวลาการกรอง 480 นาที มาตรฐานวัดความดันน้ำจุดที่ 3 - 6 (ลึกจากระดับผิวน้ำ 55 - 70 เซนติเมตร) อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้นกรองที่ระดับความสูงดังกล่าว ส่งผลให้อัตราการกรองเริ่มมีค่าลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไป 570 นาที ความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าลดลงอย่างมาก (มาตรฐานวัดความดันน้ำจุดที่ 3 - 12 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์) จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองต่อไปได้ ถึงกรองแบบเต็มอากาศจึงเกิดการอุดตันอีกครั้ง ที่เวลาการกรองประมาณ 570 นาที

เมื่อถังกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 570 นาทีจึงทำการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที เป็นเวลานาน 10 นาที ทำให้ถังกรองกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง (รอบการทำงานที่ 3)

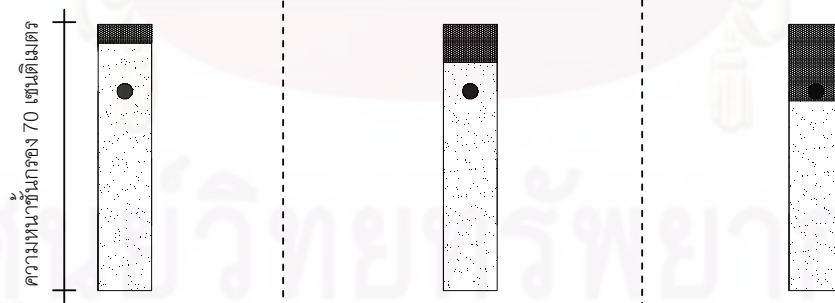
รอบการทำงานที่ 3 (ที่เวลาการกรอง 590 – 734 นาที)

ในการทดลองระยะยาวรอบการทำงานที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองที่เวลาการกรอง 600 – 734 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.42 โดยการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองยังคงมีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของถังกรองเช่นเดียวกับรอบการทดลองที่ผ่านมา จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไป 720 นาที ความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าลดลงอย่างมาก (มาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 4 – 8 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์) จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองต่อไปได้ ถังกรองแบบเต็มอากาศจึงเกิดการอุดตันอีกครั้ง ที่เวลาการกรองประมาณ 720 นาที

เมื่อถังกรองเกิดการอุดตันที่เวลาการกรอง 720 นาทีจึงทำการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที เป็นเวลานาน 10 นาที แต่การเติมอากาศในครั้งนี้องค์ประกอบอากาศไม่สามารถกระจายอนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณด้านบนเหนือจุดเติมอากาศได้ ทำให้มีอากาศสะสมอยู่ภายในชั้นกรองเป็นจำนวนมากและไม่สามารถทำการกรองต่อไปได้ ถังกรองแบบเต็มอากาศแบบกะจึงมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองรวม 734 นาที



รอบการทำงานที่ 1		รอบการทำงานที่ 2		รอบการทำงานที่ 3	
— 0 นาที	— 30 นาที	----- 210 นาที	----- 240 นาที	----- 600 นาที	----- 630 นาที
— 60 นาที	— 90 นาที	----- 270 นาที	----- 300 นาที	----- 660 นาที	----- 690 นาที
— 120 นาที	— 150 นาที	----- 330 นาที	----- 360 นาที	----- 720 นาที	— 734 นาที
— 180 นาที		----- 390 นาที	----- 420 นาที		
		----- 450 นาที	----- 480 นาที		
		----- 510 นาที	----- 540 นาที		
		----- 570 นาที			



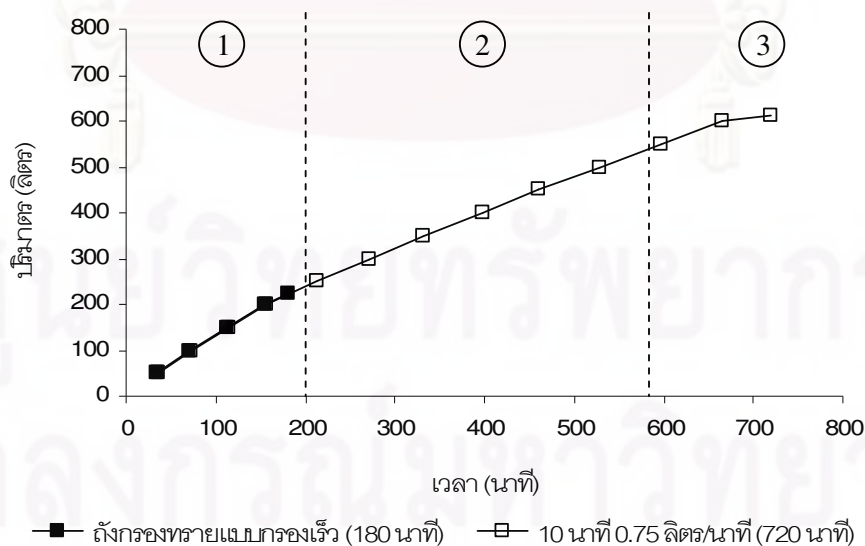
■ ปริมาณการสะสมอนุภาคความขุ่น

รูปที่ 4.42 การกระจายความดันภายในชั้นกรงของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ขณะทำการทดลองระยะยาว

จากผลการทดลองพบว่า การเติมอากาศแบบกะ (Batch) ทำให้ประสิทธิภาพการใช้ความหนาของชั้นกรองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถังกรองทรายแบบกรองเร็ว โดยการเติมอากาศในทุกรอบการทำงานช่วยให้ถังกรองที่เกิดการอุดตันกลับมาทำงานได้อีกครั้ง เนื่องจากอากาศทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวอนุภาคความขุ่นจึงเคลื่อนตัวลงไปสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มากขึ้น โดยที่อนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองมีจำนวนมากขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง จนกระทั่งการเติมอากาศในรอบการทำงานที่ 3 ไม่สามารถทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวได้ เนื่องจากอนุภาคความขุ่นเคลื่อนตัวลงมาสะสมอยู่บริเวณเหนือจุดเติมอากาศด้านบนจนเต็ม อากาศจึงสะสมอยู่ภายในชั้นกรองจนไม่สามารถทำการกรองต่อไปได้ โดยมีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคความขุ่นจะสามารถเคลื่อนตัวลงมาได้มากขึ้นเมื่อมีการเติมอากาศเพิ่มที่บริเวณตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง

4.4.4.3 ปริมาตรและอัตราการกรอง

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศสามารถกรองได้น้ำปริมาตรรวมเท่ากับ 587 ลิตร โดยในรอบการทำงานที่ 1 ที่เวลาการกรอง 0 – 200 นาที, รอบการทำงานที่ 2 ที่เวลาการกรอง 200 – 590 นาที และ รอบการทำงานที่ 3 ที่เวลาการกรอง 590 – 734 นาที สามารถกรองน้ำได้ปริมาตรประมาณ 265, 280 และ 67 ลิตร อัตราการกรองเฉลี่ย 3.85, 2.69 และ 2.05 เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.43 โดยที่อัตราการกรองของถังกรองแบบเติมอากาศมีค่ามีค่าค่อนข้างคงที่และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ถังกรองเริ่มเกิดการอุดตัน



รูปที่ 4.43 อัตราการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ขณะทำการทดลองระยะยาว

จากผลการทดลองพบว่า การเติมอากาศในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตันทำให้อัตราการกรองมีค่าเพิ่มขึ้น ถังกรองจึงยังคงทำการกรองต่อไปได้ โดยอัตราการกรองมีค่าแปรผันผกผันกับระยะเวลาการทำงานของถังกรอง เนื่องจากมีอนุภาคความขุ่นสะสมอยู่ภายในชั้นกรองจำนวนมากทำให้ความหนาแน่นของชั้นกรองมีค่าเพิ่มขึ้น น้ำจึงไหลผ่านชั้นกรองได้ช้าลง โดยการสะสมของอนุภาคความขุ่นที่อยู่ภายในชั้นกรองจำนวนมากทำให้อัตราการกรองลดลงอย่างรวดเร็วและเกิดการอุดตันในที่สุด

การศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) พบว่าการเติมอากาศทำให้ถังกรองที่เกิดการอุดตันสามารถกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง โดยทำให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 720 นาที ปริมาณน้ำที่กรองได้รวม 587 ลิตร โดยน้ำที่กรองได้ในช่วงที่ไม่มีการเติมอากาศจะมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูงในช่วงแรกและมีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง น้ำที่กรองได้ในช่วงเวลาดังกล่าวมีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู แต่ในส่วนของน้ำที่กรองได้ในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มเติมอากาศจนกระทั่งเวลาผ่านไป 15 นาที กลับมีความขุ่นเกินกว่าที่มาตรฐานการผลิตน้ำประปากำหนด เนื่องจากการเติมอากาศทำให้ชั้นกรองขยายตัวและเกิดความปั่นป่วนภายในชั้นกรอง อนุภาคความขุ่นจึงหลุดปนออกมากับน้ำที่กรองได้ โดยที่การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าลดลงเมื่อทำการเติมอากาศ เนื่องจากชั้นกรองเกิดการขยายตัวอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรองจึงหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นกรอง ทำให้ถังกรองสามารถทำงานต่อไปได้ อัตราการกรองมีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรองเนื่องจากอนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง น้ำจึงไหลผ่านชั้นสารกรองได้ช้าลง เมื่อทำการเปรียบเทียบกับถังกรองทรายแบบกรองเร็ว พบว่าการเติมอากาศแบบกะช่วยให้ถังกรองมีระยะเวลาการทำงานและประสิทธิภาพการขึ้นความหนาแน่นของชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้อัตราการกรองจะลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรองและมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในส่วนของ การเติมอากาศ แต่จุดเด่นของถังกรองแบบเติมอากาศแบบกะคือมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ยาวนานจึงไม่ต้องทำการล้างบ่อยๆ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานลดลงได้

แนวความคิดในการเติมอากาศแบบกะ (Batch) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะลดค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศ เมื่อเลือกใช้รูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสม ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจึงทำการเลือกรูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมจากการศึกษาในหัวข้อต่างๆ ที่ผ่านมา เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมและรวบรวมข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ งานถังกรองแบบเติมอากาศอย่างเหมาะสมต่อไป

4.5 สมการการกรอง

การวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าการใช้กระบวนการเติมอากาศเข้ามาช่วยทำให้ชั้นสารกรองขยายตัว โดยคาดว่า การเติมอากาศจะทำให้ความพรุนของชั้นกรองมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นกรอง โดยที่ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว มักมีความพรุน (ε) เท่ากับ 0.45 (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2539) เมื่อทำการกรองความพรุนจะมีค่าลดลงตามเวลาการกรอง เนื่องจากเกิดการสะสมของอนุภาคความขุ่นภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ความดันลด (Δp) และ ความเร็วการกรอง (V_0) มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ใช้คำนวณหาการสูญเสียความดันของชั้นกรอง คือ

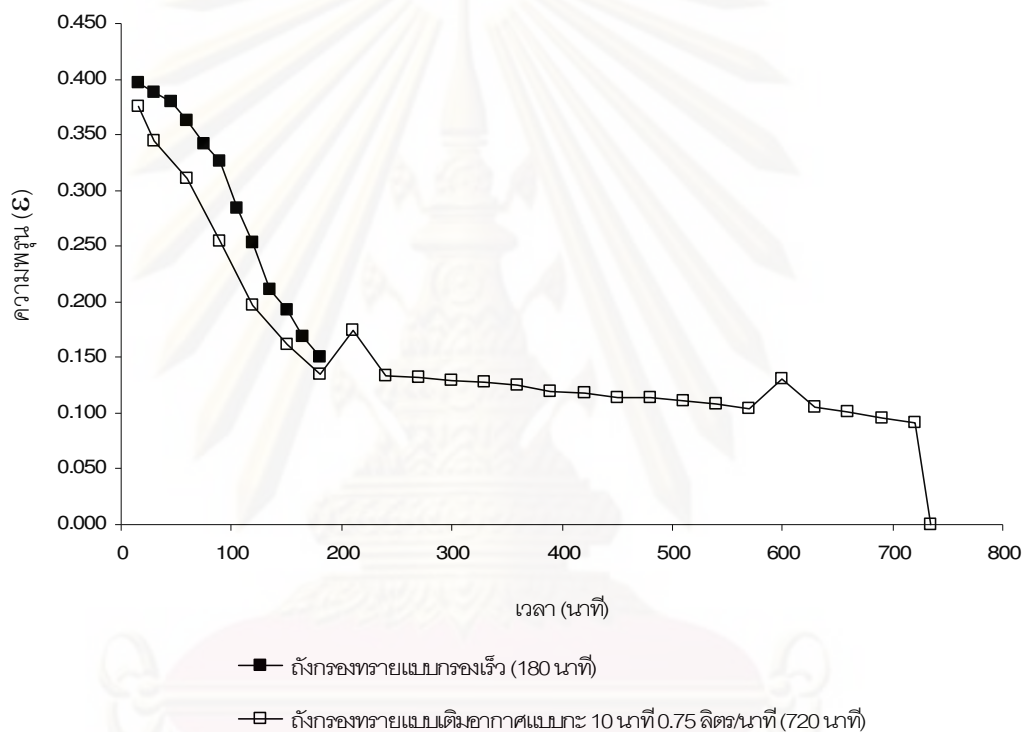
Ergun's equation (McCabe, Smith และ Harriott, 2005)

$$\frac{\Delta p \phi^2 D_p^2 \varepsilon^3}{LV_0 \mu (1 - \varepsilon)^2} = 150$$

โดยที่	Δp	=	ความดันลด
	ϕ	=	ดรรชนีของความกลม (Sphericity)
	D_p	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดสารกรอง
	ε	=	ความพรุนของสารกรอง
	L	=	ความหนาของสารกรอง
	V_0	=	ความเร็วการกรอง
	μ	=	ความหนืด

เมื่อพิจารณาสมการคำนวณหาการสูญเสียความดันของชั้นกรองพบว่า ตัวแปรที่มีค่าคงที่ในงานวิจัยนี้คือความหนาของชั้นกรอง 70 เซนติเมตร ($L = 70$ เซนติเมตร) ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45 – 0.65 มิลลิเมตร (เลือกใช้ค่าเฉลี่ย $D_p \approx 0.55$ มิลลิเมตร) อุณหภูมิของน้ำดิบสังเคราะห์ขณะทำการกรองมีค่าประมาณ 30 องศาเซลเซียส ค่าความหนืด (μ) จึงมีค่าประมาณ 0.798×10^{-3} นิวตัน-วินาที/ตารางเมตร ดรรชนีของความกลม (ϕ) ของถังกรองทรายมีค่าเท่ากับ 0.7 (McCabe, Smith และ Harriott, 2005) โดยที่ความดันลด (Δp) ความพรุน (ε) และ ความเร็วการกรอง (V_0) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการกรอง (จากการทดลอง) เนื่องจากการสะสมของอนุภาคความขุ่นภายในชั้นกรองมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของ

ถังกรอง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวที่เวลาการกรองต่างๆ โดยใช้ข้อมูลผลการดำเนินการระยะยาวของรูปแบบการกรองที่ดีที่สุดในการศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ ผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยี่ตยูนและผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ดังกล่าวถึงหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับถังกรองทรายแบบเติมอากาศในรูปแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 ความขุ่นของชั้นกรองที่เวลาการกรองต่างๆ

ทั้งนี้เนื่องจากการเติมอากาศภายในชั้นกรองส่งผลกระทบกับการอ่านค่าระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ ทำให้ไม่สามารถบันทึกค่าความดันลดระหว่างกรองของถังกรองแบบเติมอากาศโดยใช้อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยี่ตยูน (มีการเติมอากาศตลอดเวลา) ดังนั้นในการเปรียบเทียบความขุ่นของชั้นกรองที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.44 จึงสามารถแสดงข้อมูลของการดำเนินการระยะยาวของถังกรองแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) และถังกรองทรายแบบกรองเร็ว โดยพบว่า

- ความพรุนของชั้นกรองของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) รอบการทำงานที่ 1 เมื่อเริ่มต้นการกรองมีค่าประมาณ 0.4 ซึ่งใกล้เคียงกัน โดยที่ความพรุนจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง จนกระทั่งเกิดการอุดตันที่เวลาการกรองประมาณ 180 นาที จึงหยุดเดินระบบถังกรองทรายแบบกรองเร็วและทำการเติมอากาศให้กับถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch)

- หลังจากทำการเติมอากาศทำให้ถังกรองกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง (เข้าสู่รอบการทำงานที่ 2) โดยความพรุนของชั้นกรองหลังการเติมอากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย (ความพรุน = 0.174) ในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นความพรุนของชั้นกรองจึงมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง จนกระทั่งเกิดการอุดตันที่เวลาการกรองประมาณ 570 นาที จึงทำการเติมอากาศให้กับถังกรองอีกครั้ง

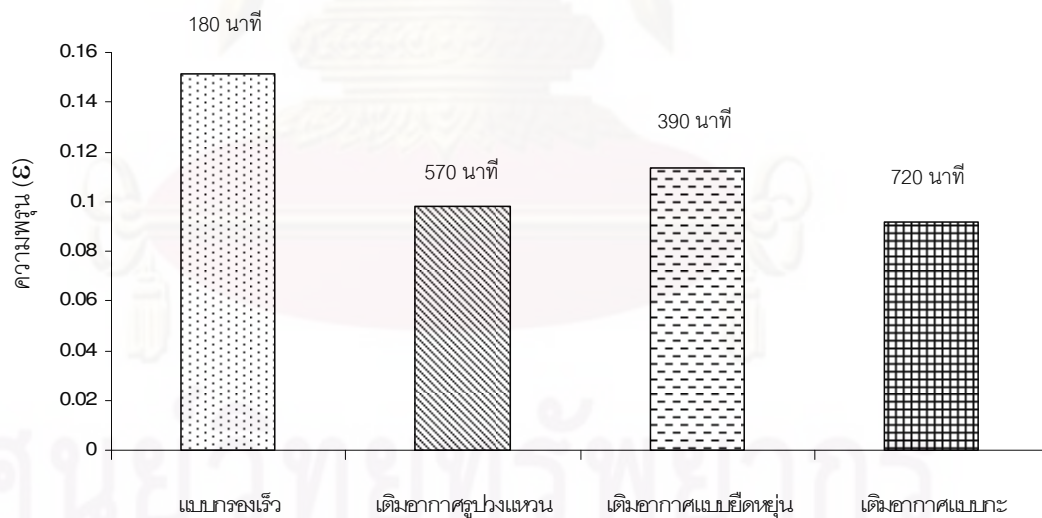
- หลังจากทำการเติมอากาศทำให้ถังกรองกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง (เข้าสู่รอบการทำงานที่ 3) โดยความพรุนของชั้นกรองหลังการเติมอากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย (ความพรุน = 0.131) ในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นความพรุนของชั้นกรองจึงมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ตามระยะเวลาการทำงานของถังกรองเช่นเดียวกับรอบการทำงานที่ 2 จนกระทั่งเกิดการอุดตันที่เวลาการกรองประมาณ 720 นาที จึงทำการเติมอากาศให้กับถังกรองอีกครั้ง แต่การเติมอากาศในครั้งนี้อาจไม่สามารถทำให้อุณหภูมิความชื้นที่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองกระจายออกได้ ซึ่งสอดคล้องกับการสะสมของอากาศภายในชั้นกรองจำนวนมาก (ความพรุน = 0) โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณด้านบนอุปกรณ์เติมอากาศ จนต้องทำการหยุดเดินระบบ

จากข้อมูลความพรุนของชั้นกรองสามารถสรุปได้ว่า

- การเติมอากาศในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตันทำให้ถังกรองกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากการเติมอากาศทำให้ชั้นสารกรองบริเวณด้านบนเกิดการขยายตัว อุณหภูมิความชื้นจำนวนมากที่สะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองจึงสามารถกระจายออกและหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นสารกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้สามารถเดินระบบถังกรองและอัตราการกรองมีค่าเพิ่มขึ้น

- หลังการเติมอากาศในรอบการทำงานที่ 1 และ 2 ความพรุนของสารกรองจะมีค่าลดลงต่อเนื่องอย่างช้าๆ (ลดลงตามเวลาการกรอง) โดยมีค่าลดลงเข้าใกล้ 0 มากขึ้น (ไม่มีความพรุนภายในชั้นกรอง) เนื่องจากอุณหภูมิความชื้นสามารถสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของชั้นสารกรองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้ความหนาแน่นของชั้นกรองที่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.45

ของการกรองมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ทำให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่างานานที่สุด อนุภาคความขุ่นจึงถูกกับเก็บไว้ภายในชั้นกรองเป็นจำนวนมาก ทำให้ชั้นกรองมีความหนาแน่นมากขึ้นและความพรุนของสารกรองจึงมีค่าลดลงมากที่สุด โดยความพรุนของสารกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยึดหยุ่น และถังกรองทรายแบบกรองเร็วมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการใช้อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนทำให้เกิดการสะสมของอากาศภายในชั้นกรองน้อยกว่าการใช้ อุปกรณ์เติมอากาศแบบยึดหยุ่น เมื่อทำการไล่อากาศออกจนหมดช่องว่างที่เคยมีฟองอากาศสะสมอยู่จึงกลายเป็นช่องว่างภายในชั้นกรอง ทำให้ความพรุนภายในชั้นกรองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ถังกรองทรายแบบกรองเร็วมีความพรุนภายในชั้นกรองที่เวลาการกรองสุดท้ายมากที่สุดแต่ไม่สามารถทำการกรองน้ำต่อไปได้ เนื่องจากอนุภาคความขุ่นสะสมอยู่ที่ผิวหน้าชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ทำให้ภายในชั้นกรองมีอนุภาคความขุ่นสะสมอยู่เพียงเล็กน้อย โดยผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ลดลงทำให้การกับเก็บอนุภาคความขุ่นภายในชั้นกรองมีค่าลดลง ความพรุนของชั้นกรองจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง โดยความพรุนที่มีค่าลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2539)



รูปที่ 4.46 ความพรุนที่เวลาการกรองสุดท้ายของถังกรองรูปแบบต่างๆ

โดยสรุปการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ช่วยให้ประสิทธิภาพการใช้ความหนาของชั้นกรองและระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่าเพิ่มขึ้น ประหยัดพลังงานในการเติมอากาศและช่วยลดจำนวนการล้างย้อนต่อวันลงได้ ดังนั้นถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) จึงมี

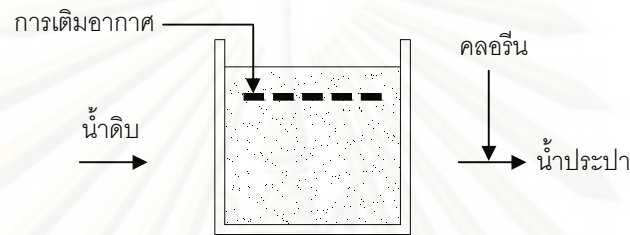
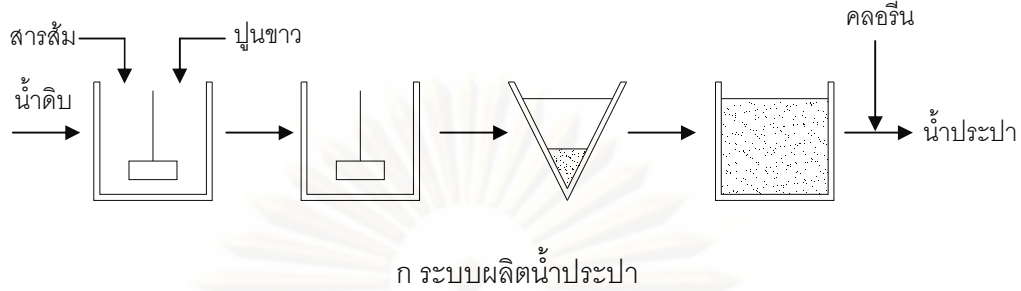
ความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานกับระบบผลิตน้ำประปาแบบการกรองโดยตรง (Direct Filtration) โดยต้องมีระบบเวียนน้ำที่ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาลับไปยังถังเก็บน้ำดิบ เพื่อทำการกรองใหม่อีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.41

4.6 การออกแบบและวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย

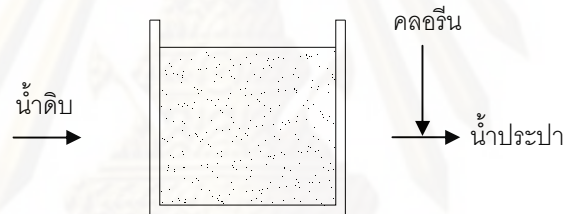
การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation) คือขั้นตอนหนึ่งในการผลิตน้ำประปา โดยขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ จะต้องมีค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง หากทำการผลิตน้ำประปาโดยการส่งน้ำดิบเข้าสู่ถังกรองโดยตรง (Direct Filtration) จะทำให้ถังกรองเกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว ความถี่ในการล้างย้อนถังกรองต่อวันจึงมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและน้ำล้างย้อนเป็นอย่างมาก แนวคิดในการนำถังกรองทรายแบบเติมอากาศเข้ามาใช้ในการผลิตน้ำประปาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงมีความเป็นไปได้ เนื่องจากถังกรองทรายแบบเติมอากาศทำการทดลองศึกษาความขุ่นของน้ำดิบที่ 50 เอ็นทียู ซึ่งเป็นความขุ่นของน้ำดิบทั่วไป ลักษณะการกรองโดยตรง (Direct Filtration) จึงน่าจะ สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนและยังสามารถใช้งาน ได้ยาวนานจึงลดการสิ้นเปลืองพลังงานและน้ำล้างย้อนลงได้

ในหัวข้อนี้จึงทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ ของระบบผลิตน้ำประปา (การประปานครหลวง, 2552) กับการผลิตน้ำประปาโดยการกรอง โดยตรง (Direct Filtration) โดยใช้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศในรูปแบบที่ดีที่สุดในแต่ละการทดลอง โดยกำหนดอัตราการผลิตน้ำประปา 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อเปรียบเทียบ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานในการก่อสร้างและเดินระบบโรงประปา แผนภาพขั้นตอนการผลิต น้ำประปาในรูปแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.47

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข การผลิตน้ำประปาโดยการกรองโดยตรง (Direct Filtration) โดยใช้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ



ค การผลิตน้ำประปาโดยการกรองโดยตรง (Direct Filtration) โดยใช้ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว

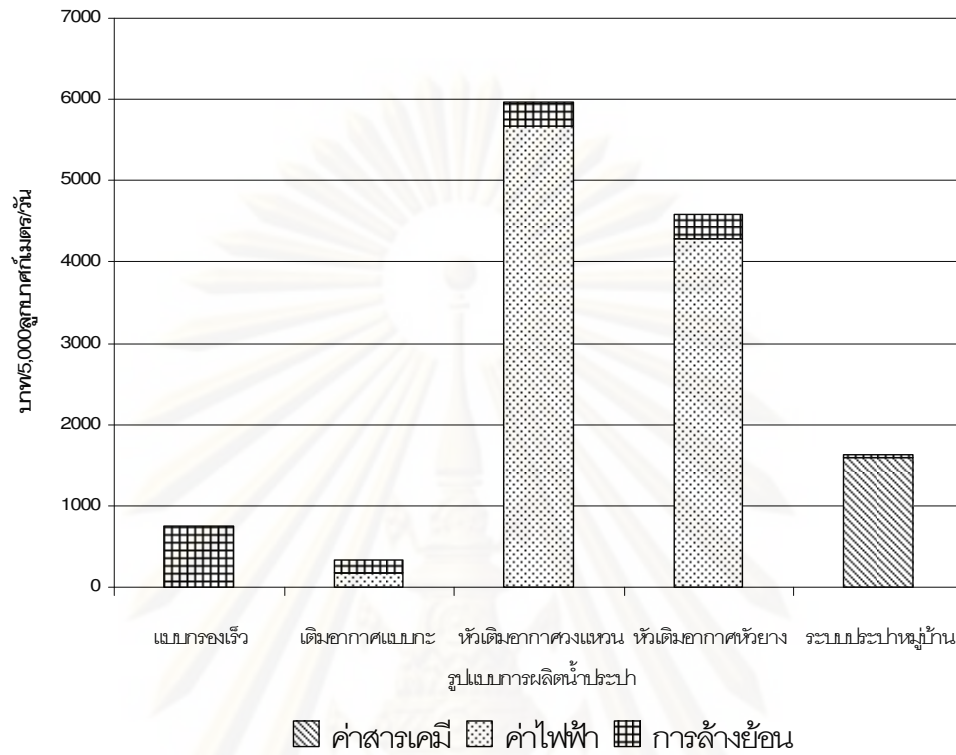
รูปที่ 4.47 แผนภาพขั้นตอนการผลิตน้ำประปาในรูปแบบต่างๆ

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของระบบการผลิตน้ำประปาในรูปแบบต่างๆ แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้

- ค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปา 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
- ค่าใช้จ่ายในการล้างย้อนถังกรองต่อวัน
- ขนาดพื้นที่ก่อสร้างโรงประปา

โดยข้อมูลค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของระบบการผลิตน้ำประปาในรูปแบบต่างๆ ตามหัวข้อดังกล่าวข้างต้น แสดงดัง ตารางที่ 4.4 – 4.7 ตามลำดับ และสามารถสรุปราคาการผลิตน้ำประปา 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ของระบบการผลิตน้ำประปาในรูปแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่

4.48



รูปที่ 4.48 ค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปา 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันในระบบการผลิตน้ำประปาต่างๆ

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปา 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

รูปแบบถังกรอง	อัตรา การกรอง (ม./ชม.)	พื้นที่ผิวกรอง ทั้งหมด (ตร.ม.)	ปริมาณน้ำที่จำเป็น ต้องกรองได้ทั้งหมด * (ลบ.ม./วัน)	ปริมาณน้ำที่ไม่ผ่าน มาตรฐาน (> 5 เอ็นทียู) (ลบ.ม./วัน)	ปริมาตร น้ำล้างย้อน (ลบ.ม./วัน)	ปริมาณน้ำ ที่กรองได้สุทธิ (ลบ.ม./วัน)	ค่าสารเคมี (บาท/วัน)	ค่าไฟฟ้า (บาท/วัน)	ค่าใช้จ่ายใน การดำเนินการ (บาท/ลบ.ม.)
แบบกรองเร็ว	4.00	126	12096	-	7056	5040	-	-	0.00
เติมอากาศแบบกะ	2.79	105	7031	439	1470	5121	-	174	0.02
หัวเติมอากาศรูปวงแหวน	2.52	128	7741	-	2688	5053	-	5676	0.73
หัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น	3.32	98	7809	-	2744	5065	-	4284	0.55
ระบบผลิตน้ำประปา	5.54	40	5320	-	320	5000	1596	-	0.30

* (เพียงพอสำหรับการผลิตน้ำ 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน + การล้างย้อน + ปริมาณน้ำที่ไม่ผ่านมาตรฐาน)

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการล้างย้อนถังกรองต่อวัน

รูปแบบถังกรอง	อัตราการ ล้างย้อน (ม./นาที)	อัตราการ เติมอากาศ (ม./นาที)	พื้นที่ถังกรอง ทั้งหมด (ตร.ม.)	ระยะเวลา การล้างย้อน (นาที/ครั้ง)	จำนวน การล้างย้อน (ครั้ง/วัน)	ค่าไฟฟ้า (บาท/ครั้ง)	ค่าใช้จ่าย การล้างย้อน (บาท/วัน)
แบบกรองเร็ว	0.7	-	126	10	8	94	749
เติมอากาศแบบกะ	0.7	0.0113	105	10	2	81	162
หัวเติมอากาศรูปวงแหวน	0.7	0.0113	128	10	3	100	300
หัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น	0.7	0.0113	98	10	4	77	306
ระบบผลิตน้ำประปา	0.8	-	40	10	1	34	34

** (ค่าไฟฟ้างวดดังกล่าวไม่รวมค่าบริการและค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%)

ตารางที่ 4.6 สรุปค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (ค่าสารเคมีและค่าไฟฟ้า)

รูปแบบถังกรอง	ค่าสารเคมี (บาท/วัน)	ค่าไฟฟ้า (บาท/วัน)	ค่าใช้จ่าย การล้างย้อน (บาท/วัน)	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (ค่าสารเคมีและค่าไฟฟ้า) (บาท/วัน)
แบบกรองเร็ว	-	-	749	749
เติมอากาศแบบกะ	-	174	162	337
หัวเติมอากาศรูปวงแหวน	-	5676	300	5976
หัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น	-	4284	306	4590
ระบบผลิตน้ำประปา	1596	-	34	1630

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบขนาดพื้นที่ก่อสร้างโรงประปา

รูปแบบถังกรอง	ถังกวนเร็ว			ถังกวนช้า			ถังตกตะกอน			ถังกรอง			พื้นที่ก่อสร้าง รวม (ตร.ม.)
	พื้นที่	จำนวน	พื้นที่รวม	พื้นที่	จำนวน	พื้นที่รวม	พื้นที่	จำนวน	พื้นที่รวม	พื้นที่	จำนวน	พื้นที่รวม	
	(ตร.ม.)	(ถัง)	(ตร.ม.)	(ตร.ม.)	(ถัง)	(ตร.ม.)	(ตร.ม.)	(ถัง)	(ตร.ม.)	(ตร.ม.)	(ถัง)	(ตร.ม.)	
แบบกรองเร็ว	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.00	9	126	126
เติมอากาศแบบกะ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.50	10	105	105
หัวเติมอากาศรูปวงแหวน	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.00	8	128	128
หัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.25	8	98	98
ระบบผลิตน้ำประปา	0.81	2	1.62	24	2	48	36	4	144	10	4	40	256

จากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปา 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันพบว่า

- การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (ค่าไฟฟ้าและค่าสารเคมี) น้อยที่สุด (337 บาทต่อวัน) การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบกรองเร็ว (749 บาทต่อวัน) ระบบผลิตน้ำประปา (1,630 บาทต่อวัน) การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ติดตั้งหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น (4,590 บาทต่อวัน) การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ติดตั้งหัวเติมอากาศรูปวงแหวน (5,976 บาทต่อวัน) มีค่ารองลงมาตามลำดับ

- พื้นที่ผิวกรองในระบบการการผลิตน้ำประปาโดยการกรองโดยตรงจะมีค่ามากกว่าพื้นที่ผิวกรองในระบบผลิตน้ำประปา เนื่องจากมีอัตราการกรองน้อยกว่าจึงต้องเพิ่มพื้นที่ผิวกรองให้มากขึ้นเพื่อที่จะผลิตน้ำให้ได้ 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน อย่างไรก็ตามพื้นที่ที่ใช้ในการก่อสร้างระบบผลิตน้ำประปายังคงมีขนาดใหญ่กว่าระบบการการผลิตน้ำประปาโดยการกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศประมาณ 2 – 2.5 เท่า เนื่องจากระบบผลิตน้ำประปาต้องการพื้นที่เพื่อก่อสร้างถังกวนช้า ถังกวนเร็ว ถังตกตะกอนและถังกรอง แตกต่างกับระบบการการผลิตน้ำประปาโดยการกรองโดยตรงที่ต้องการเพียงถังกรองเท่านั้น

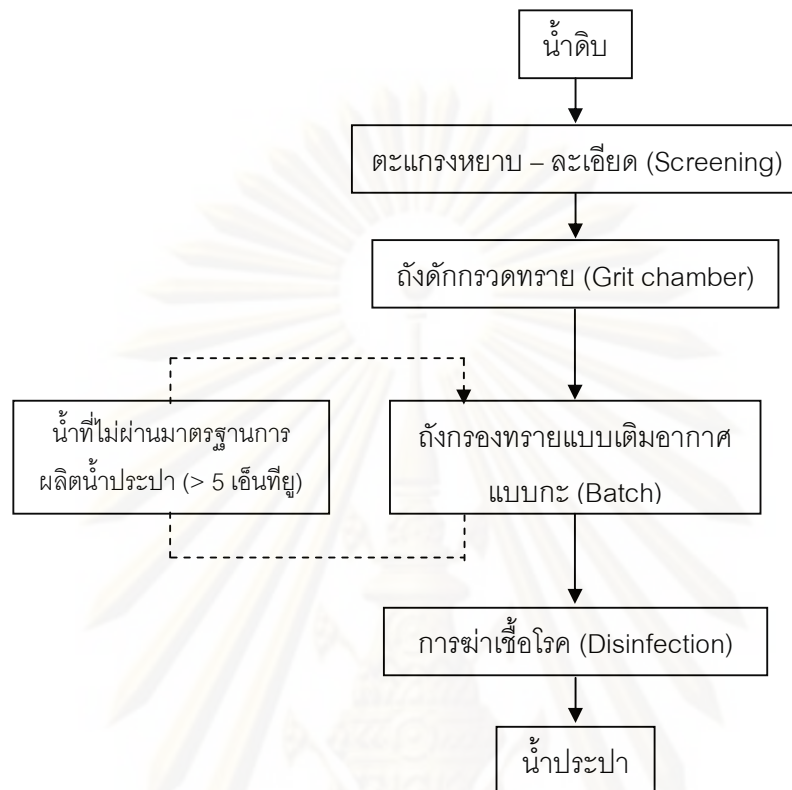
- การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ติดตั้งหัวเติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่น ทำให้มีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 5,976 และ 4,590 บาทต่อวันตามลำดับ เนื่องจากการเติมอากาศให้กับถังกรองตลอดเวลาและระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่าน้อย (8 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ) จึงต้องทำการล้างย้อนถังกรอง 3 และ 4 ครั้งต่อวันตามลำดับ โดยการใช้น้ำเติมอากาศรูปวงแหวนมีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าเนื่องจากมีพื้นที่ผิวกรองมากกว่าการใช้หัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่น (ต้องการจำนวนหัวเติมอากาศมากกว่า) ถึงแม้จะไม่มีค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเนื่องจากการกรองโดยตรง แต่ปัญหาด้านค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าทำให้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศตลอดเวลาไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตน้ำประปา

- การผลิตน้ำประปาโดยการใช้ระบบผลิตน้ำประปามีค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนสูง (1,596 บาทต่อวัน) เนื่องจากอนุภาคความขุ่นส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกด้วยกระบวนการสร้างตะกอน การรวมตะกอนและการตกตะกอน ค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการผลิตน้ำประปา โดยทำให้ถังกรองทรายแบบกรองเร็วในระบบผลิตน้ำประปาปรับภาระในการกำจัดอนุภาคความขุ่นน้อยลง จึงต้องการการล้างย้อนถังกรองเพียงวันละ 1 ครั้ง ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ามีค่าต่ำ (34 บาทต่อวัน)

- การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบกรองเร็วไม่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ำยในด้านพลังงานไฟฟ้าและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน จึงสามารถลดค่าใช้จ่ำยในด้านพลังงานไฟฟ้าขณะทำการกรองและสารเคมีลงได้ แต่ระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่าน้อย (3 ชั่วโมง) เนื่องจากการกรองโดยตรงและการกรองส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองจึงทำให้ถังกรองเกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว โดยจะต้องทำการล้างย้อนถังกรอง 8 ครั้งต่อวัน ทำให้เกิดค่าใช้จ่ำยในการล้างย้อนสูง (749 บาท/วัน) โดยอาจจะต้องการค่าแรงงานและเวลาในการล้างย้อนถังกรองเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ำยในการดำเนินงานมีค่าสูงขึ้น

- การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบเต็มอากาศแบบกะมีค่าใช้จ่ำยในด้านพลังงานไฟฟ้าต่ำและไม่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ำยในด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน เนื่องจากการกรองโดยตรงและมีการเติมอากาศในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตันเท่านั้น โดยมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ยาวนานถึง 12 ชั่วโมง จึงทำการล้างย้อนถังกรองเพียง 2 ครั้งต่อวัน โดยมีค่าใช้จ่ำยในด้านพลังงานไฟฟ้าเพียง 337 บาทต่อวัน ดังนั้นถังกรองทรายแบบเต็มอากาศแบบกะจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการผลิตน้ำประปามากที่สุด

เพื่อให้ถังกรองทรายแบบเต็มอากาศแบบกะมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด ในการออกแบบระบบผลิตน้ำประปาจึงควรมีขั้นตอนในการกำจัดเศษวัสดุขนาดใหญ่และสารแขวนลอยหนัก (กรวดและทรายที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 – 0.2 มิลลิเมตร) ด้วยตะแกรงหยาบ – ละเอียด (Screening) และถังดักกรวดทราย (Grit chamber) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.49 โดยเศษวัสดุขนาดใหญ่และสารแขวนลอยหนักสามารถกำจัดออกได้ง่าย จึงควรมีขั้นตอนการกำจัดออกก่อนที่น้ำดิบจะเข้าสู่ถังกรอง โดยจะช่วยลดภาระการกำจัดอนุภาคความขุ่นให้กับถังกรองและช่วยให้ถังกรองสามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น ในส่วนของน้ำที่ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาควรมีระบบเวียนน้ำกลับไปยังถังเก็บน้ำดิบเพื่อทำการกรองใหม่อีกครั้ง (รูปที่ 4.41) ถังกรองทรายแบบเต็มอากาศแบบกะสามารถจัดการความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองให้มีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาแต่ไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคที่อยู่ในน้ำได้ ดังนั้นจึงควรมีขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคให้กับน้ำที่กรองได้โดยการเติมคลอรีนก่อนที่จะสูบน้ำประปาไปสู่ผู้ใช้น้ำต่อไป



รูปที่ 4.49 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปาโดยถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการรวมกระบวนการเติมอากาศเข้ากับการกรองโดยตรง (Direct Filtration) เพื่อช่วยให้ชั้นกรองขยายตัว และเกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาชั้นกรอง โดยทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรอง ระยะเวลาการทำงาน จุดที่เกิดการอุดตัน รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ถังกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 1.8 ม. ใช้ทรายกรองความหนา 70 ซม. เป็นสารกรอง โดยติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำทุกๆระยะ 5 ซม. ตามความหนาชั้นกรอง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การเปรียบเทียบการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็วกับถังกรองทรายแบบเติมอากาศพบว่า การเติมอากาศภายในชั้นกรองไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น แต่กลับช่วยให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมอากาศภายในชั้นกรองส่งผลกระทบต่ออัตราการกรองทำให้อัตราการกรองมีค่าลดลงเล็กน้อย การฝังอุปกรณ์เติมอากาศทำให้สะดวกในการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน อากาศมีส่วนช่วยทำให้เกิดการขัดสีกันของสารกรองทำให้ประสิทธิภาพการล้างย้อนเพิ่มสูงขึ้น การเติมอากาศภายในชั้นกรองจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของถังกรองและมีความน่าสนใจที่จะศึกษารูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมต่อไป

5.1.2 การศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศพบว่า

- ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองเพิ่มขึ้น โดยในสภาวะการเติมอากาศที่เหมาะสม ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบนของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที ถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 570 นาที
- คุณภาพน้ำที่กรองได้ในช่วงแรกจะมีค่าความขุ่นสูงและมีค่าลดลงจนเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 90 นาที อย่างไรก็ตามคุณภาพน้ำที่กรองผ่านถังกรองแบบเติมอากาศนั้นได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู (World Health Organization, 2006) โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าแปรผกผันกับอัตราการกรอง

- การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันโดยการเติมอากาศที่หัวเติมอากาศด้านล่างของชั้นกรองช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนลงได้ โดยระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนถึงกรองแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของถังกรอง

5.1.3 การศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นพบว่า

- การเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองด้วยอัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่ออนาที ทำให้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีระยะเวลาการทำงานที่ยาวนานถึง 390 นาที โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเข้าสู่สภาวะคงที่ได้อย่างรวดเร็วและมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนกระทั่งถังกรองเกิดการอุดตันเนื่องจากอุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นมีลักษณะการปล่อยฟองอากาศแบบรอบทิศทางทำให้แรงดันของฟองอากาศค่าน้อย จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพียงเล็กน้อย

- การกระจายอากาศแบบรอบทิศทางทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อย โดยน้ำที่กรองได้มีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู (World Health Organization, 2006) โดยการเติมอากาศทำให้อัตราการกรองมีค่าลดลงเช่นเดียวกับการศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันในทุกตำแหน่งการเติมอากาศสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนลงได้ใกล้เคียงกัน

5.1.4 การศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) พบว่า

- การเติมอากาศด้วยอุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองช่วยทำให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่าสูงที่สุด ที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรองมีค่ารองลงมาตามลำดับ ในขณะที่อุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นช่วยให้ความขุ่นของน้ำที่กรองได้มีค่าค่อนข้างคงที่แต่ระยะเวลาการทำงานของถังกรองกลับมีค่าน้อยกว่าอุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวน ดังนั้นในการทดลองการเติมอากาศแบบกะจึงเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง

- การเติมอากาศแบบกะทำงาน 2 ครั้ง ทำให้ถังกรองที่เกิดการอุดตันสามารถกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง โดยทำให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 720 นาที ปริมาณน้ำที่กรองได้รวม 587 ลิตร

- น้ำที่กรองได้ในช่วงที่ไม่มีเติมอากาศจะมีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู ในขณะที่ในส่วนของน้ำที่กรองได้ในช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มเติม

อากาศจนกระทั่งเวลาผ่านไป 15 นาที กลับมีความชุ่มเกินกว่าที่มาตรฐานการผลิตน้ำประปา กำหนด

- การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าลดลงเมื่อทำการเติมอากาศ เนื่องจากชั้นกรองเกิดการขยายตัวอนุภาคความชุ่มบริเวณผิวหน้าชั้นกรองจึงหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นกรอง ทำให้ถังกรองสามารถทำงานต่อไปได้ โดยน้ำที่กรองได้ในช่วงเวลาดังกล่าวไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาเนื่องจากมีอนุภาคความชุ่มหลุดปนออกมาจำนวนมาก

- การเปรียบเทียบกับถังกรองทรายแบบกรองเร็วพบว่า การเติมอากาศแบบกะช่วยให้ถังกรองมีระยะเวลาการทำงานและประสิทธิภาพการขึ้นความหนาของชั้นกรองเพิ่มขึ้น ถึงแม้อัตราการกรองจะลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรองเนื่องจากอนุภาคความชุ่มที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง น้ำจึงไหลผ่านชั้นสารกรองได้ช้าลงและมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในส่วนของการเติมอากาศ

- จุดเด่นของถังกรองแบบเติมอากาศแบบกะคือมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ยาวนานจึงไม่ต้องทำการล้างบ่อยๆ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานลงได้ โดยในทางปฏิบัติในส่วนของน้ำที่ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาควรมีระบบเวียนน้ำที่กรองได้ในช่วงเวลาดังกล่าว (15 นาที) กลับไปยังถังเก็บน้ำดิบเพื่อทำการกรองใหม่อีกครั้ง

5.1.5 สมการการกรองและการวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย พบว่า

- การเติมอากาศแบบกะ (Batch) ในรอบการทำงานที่ 1 และ 2 ความพรุนของสารกรองจะมีค่าลดลงต่อเนื่องอย่างช้าๆ (ลดลงตามเวลาการกรอง) โดยมีค่าลดลงเข้าใกล้ 0 มากขึ้น (ไม่มีความพรุนภายในชั้นกรอง) เนื่องจากอนุภาคความชุ่มสามารถสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของชั้นสารกรองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้ความหนาของชั้นกรองที่เพิ่มขึ้น

- การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะมีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าต่ำและไม่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน เนื่องจากเป็นการกรองโดยตรงและมีการเติมอากาศในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตันเท่านั้น โดยมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ยาวนานถึง 12 ชั่วโมง จึงทำการล้างถังกรองเพียง 2 ครั้งต่อวัน โดยมีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าเพียง 337 บาทต่อวัน ดังนั้นถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการผลิตน้ำประปามากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ศึกษารูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) โดยเพิ่มตำแหน่งการเติมอากาศที่ด้านล่างของถังกรอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคความขุ่น การใช้ความหนาของถังกรองและช่วยลดเวลาที่ใช้ในการล้างย้อน โดยใช้รูปแบบการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน

ศึกษาการทำงานและออกแบบถังดักกรวดทราย (Grit chamber) เพื่อใช้ในระบบผลิตน้ำประปาแบบกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอายุการใช้งานของถังกรอง

ศึกษาการประยุกต์ใช้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ในระบบผลิตน้ำประปาแบบกรองโดยตรง เพื่อผลิตน้ำประปาสำหรับชุมชน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การประปาส่วนภูมิภาค. ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา[Online]. 2550. แหล่งที่มา :

http://www.geocities.com/pwa2saraburi/palit_num.htm[2550, ธันวาคม 6]

การประปานครหลวง รายการคำนวณออกแบบระบบผลิตน้ำประปา[Online]. 2552. แหล่งที่มา :

http://www.mwa.co.th/download/prd01/water_technology/pdf_Water_Treatment_Plant_Design2/wat_0011.pdf [2552, มกราคม 16]

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมกรรทำจัดน้ำเสีย. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มิตรนรา
การพิมพ์, 2539.

ไกรภพ ถึงแสง และวิษณุ บุญทองอ่อน. การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง. ปริญญา
นิพนธ์ วิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2547.

มงคล สุทธิวัฒน์กุล. ความรู้ด้านเทคโนโลยีน้ำอุตสาหกรรม ตอนที่ 3 เรื่องถังกรองทราย
[Online]. 2549. แหล่งที่มา <http://www.diw.go.th>[2550, สิงหาคม 20]

มันลิน ตัณฑุลเวศน์. วิศวกรรมประปา. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2539.

วรากร ไม้เรียง. วิศวกรรมเขื่อนดิน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: รุ่งแสงการพิมพ์, 2542.

วิจารณ์ ตันติธรรม. การกำจัดความขุ่นโดยถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน. วิทยานิพนธ์
ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2536.

วีระพันธ์ วัฒนวีรเดช. การศึกษาถังกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่เพื่อบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ภาษาอังกฤษ

Fair, G.M., Geyer, J.C., and Okun, D.A. Water and Wastewater Engineering. vol. 2.

Japan: John Wiley & Sons, 1968.

- Hamoda, M. F., Al-Ghusain, I., and Al-Mutairi, N. Z. Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse. Desalination 164 (2004): 203-211.
- Hemmings, D.G., and Fitzpatrick, C.S.B. Pressure signal analysis of combined water and air backwash of rapid gravity filters. Wat. Res. 31 (1997): 356-361.
- Lee, J.J., Im, J.H., BenAim, R., Kim, J.R., Kim, Y.J., Poo, K.M., and Kim, C.W. Better understanding of the filtration characteristics in the flexible fibre filter module (3FM). Water Science & Technology 55 (2007): 77-83.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriott, P. Unit operations of chemical engineering. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2005.
- McGhee, T. J. Water Supply and Sewerage. 6th ed. Singapore: McGraw-Hill, 1991.
- Raju, B.S.N. Water Supply and Wastewater Engineering. McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1995.
- Steel, E.W., and McGhee, T.J. Water Supply and Sewerage. 4th ed. McGraw-Hill, 1979.
- Tchobanoglous, G., and Burton, F.L. Wastewater Engineering Treatment, Disposal, and Reuse. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill, 1991.
- Viessman, W., and Hammer, M. J. Water Supply and Pollution Control. 7th ed. Pearson Education, 2005.
- World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. vol. 1. Geneva: WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 2006.
- Zouboulis, A., Traskas, G., and Samaras, P. Comparison of single and dual media filtration in a full-scale drinking water treatment plant. Desalination 213 (2007): 334-342.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-1 ผลการเปรียบเทียบถึงกรองทรายแบบกรองเร็วกับถึงกรองทรายแบบเดิมอากาศ ตารางที่ ก-1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย้อนของ ถึงกรองทรายแบบกรองเร็ว

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	
	ความขุ่น	เข้า	48	51	52	54	52	50	51	48	50	53	50	55	55
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.0	2.5	2.1	2.1	2.0	1.7	2.0	2.0	2.0	1.7	1.8	2.6
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	35	70	113	155	180								
	ปริมาณน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	223								
การล้างย้อน	เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	-	700	450	300	80	42	45	43	25	23	20	13	15	

ตารางที่ ก-1.2 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถึงกรองทรายแบบกรองเร็วที่เวลาต่างๆ

ถึงกรองทราย แบบกรองเร็ว เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
15 นาที	45.0	48.3	49.7	53.0	54.7	58.8	61.7	66.0	68.5	73.3	76.7	80.2	83.5	86.2	93.1
30 นาที	45.0	47.2	48.5	50.5	53.5	57.5	60.6	64.8	67.4	72.2	75.8	79.2	81.6	85.4	92.3
45 นาที	45.0	46.0	47.2	49.2	52.4	56.3	59.5	63.7	66.3	71.1	74.7	78.1	81.6	84.3	91.4
60 นาที	45.0	44.2	45.2	47.1	50.4	54.2	57.5	61.5	64.4	69.1	72.6	76.1	79.6	82.4	89.5
75 นาที	45.0	41.8	42.5	44.8	47.5	50.7	53.6	57.9	61.7	66.4	68.5	73.3	76.9	79.8	87.0
90 นาที	45.0	39.7	40.1	42.0	45.4	49.2	52.5	56.5	59.5	64.2	67.5	71.3	74.9	77.7	84.8
105 นาที	45.0	36.3	30.8	33.0	36.5	40.5	43.9	48.5	51.2	56.2	60.4	63.5	67.2	70.5	77.5
120 นาที	45.0	23.5	22.7	24.5	29.0	33.1	37.0	41.3	44.2	49.0	52.9	56.5	60.4	63.7	70.5
135 นาที	45.0	13.0	11.5	13.6	17.2	20.8	23.7	28.3	31.0	35.5	39.3	42.9	46.5	50.0	57.0
150 นาที	45.0	0.0	0.0	1.2	5.0	9.3	12.6	17.5	20.6	25.5	29.6	33.7	37.7	41.4	48.7
165 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	6.5	11.1	15.3	19.6	23.5	27.5	35.2
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	5.0	9.1	13.8	21.5
195 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8
197 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-1.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	51	48	50	52	47	48	48	50	48	52	53	48	50
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.0	2.7	2.1	2.0	1.8	1.6	1.5	1.5	1.1	1.2	1.4	1.2
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	42	82	125	174	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	205	213							
การล้างย่อน	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	650	360	200	110	54	30	15	14	13	11	11	10

ตารางที่ ก-1.4 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่ง
ด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ รูปแบบ	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำที่เวลาการกรอง 180 นาที (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
บน 0.20 ลิตร/นาที	45.0	48.6	52.5	51.0	49.2	49.2	50.0	53.0	53.8	55.0	58.0	60.5	62.5	64.4	70.3

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-2 การศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ

ตารางที่ ก-2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยั้งของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น	เข้า	51	48	50	52	47	48	48	50	48	52	53	48	50
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.0	2.7	2.1	2.0	1.8	1.6	1.5	1.5	1.1	1.2	1.4	1.2
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	42	82	125	174	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	205	213							
การล้างยั้ง	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)		-	650	360	200	110	54	30	15	14	13	11	11	10

ตารางที่ ก-2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยั้งของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น	เข้า	51	50	48	50	50	51	48	47	51	50	47	52	53
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.8	4.5	4.2	3.9	3.0	2.5	2.5	2.3	2.1	2.0	1.8	1.9
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	50	100	150	200	204							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	39	83	132	177	180							
การล้างยั้ง	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)		-	659	428	285	217	125	72	31	17	13	12	10	9

ตารางที่ ก-2.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยั้งของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น	เข้า	51	48	53	53	50	50	51	53	50	48	48	51	53
	(เอ็นทียู)	ออก	-	5.0	4.6	4.0	3.7	3.4	3.2	3.1	2.9	3.0	2.5	2.5	2.2
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	38	81	129	172	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	213							
การล้างยั้ง	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)		-	751	449	192	135	89	45	29	16	13	10	9	8

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-2.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	50	48	52	47	50	50	49	53	50	48	51	50	47
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.1	3.1	2.7	2.5	2.4	2.4	2.6	2.2	1.5	1.6	1.6	1.1
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	38	77	121	165	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	218.5							
การล้างย่อน	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	800	580	280	200	86	45	25	19	17	15	15	13

ตารางที่ ก-2.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	50	54	51	50	50	49	51	52	51	54	53	51	52
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.0	2.6	2.8	3.1	2.7	2.2	1.9	1.5	1.5	1.6	1.2	1.0
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	49	94	138	174	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	206							
การล้างย่อน	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	500	260	150	90	40	20	10	8	7	7	6	7

ตารางที่ ก-2.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	50	48	50	52	50	53	50	48	47	51	50	54	51
	(เอ็นทียู)	ออก	-	5.0	4.4	4.3	4.0	3.8	2.9	2.4	2.4	2.7	2.7	2.6	2.5
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	48	95	141	175	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	205							
การล้างย่อน	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	840	533	260	186	77	35	18	13	11	9	7	7

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-2.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/
นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	50	52	54	49	48	51	48	47	51	53	50	50	52
	(เอ็นทียู)	ออก	-	5.0	5.0	4.7	4.6	3.7	3.2	3.0	2.5	2.4	2.2	2.0	2.2
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	50	97	147	177	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	208							
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	604	358	215	134	69	31	15	9	7	5	6	6

ตารางที่ ก-2.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	52	54	50	51	48	49	51	53	52	50	51	54	51
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.6	4.5	3.4	3.0	2.3	1.5	1.5	1.3	1.2	1.7	1.5	0.8
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	43	86	130	178	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	202							
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	700	375	160	100	57	35	20	11	12	10	10	12

ตารางที่ ก-2.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	51	50	52	50	48	48	51	50	47	52	51	50	54
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.0	3.2	2.8	2.5	2.4	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	2.1	1.8
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	55	113	180									
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150									
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	480	260	100	92	46	30	18	11	5.5	5	4.4	4

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-2.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	49	50	51	53	50	50	48	48	53	51	54	52	51
	(เอ็นทียู)	ออก	-	1.8	1.6	1.4	1.5	1.6	1.5	1.2	1.4	1.2	1.6	1.3	1.1
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	64	129	180									
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	143									
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	400	180	132	74	45	25	20	10	4	4.3	4.2	4.5

ตารางที่ ก-2.11 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	51	50	49	48	50	51	47	48	48	51	53	50	50
	(เอ็นทียู)	ออก	-	1.4	1.6	1.2	0.8	1.0	0.8	0.8	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	65	130	180									
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	142									
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	475	280	150	75	33	17	5.25	3.6	3.2	3.1	2.5	1.5

ตารางที่ ก-2.12 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	50	53	54	51	48	48	50	50	52	51	50	52	53
	(เอ็นทียู)	ออก	-	2.5	1.0	1.2	0.8	0.6	0.8	0.8	0.8	1.0	1.3	0.8	0.6
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	65	123	180									
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	148									
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	550	325	175	100	33	11	10	5	4	4.5	4.5	3.5

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-2.13 การกระจายความดันภายในชั้นกรงของถังกรงทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่ง
และอัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่เวลาการกรง 180 นาที

ถังกรงทราย แบบเติมอากาศ รูปแบบ	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำที่เวลาการกรง 180 นาที (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
บน 0.20 ลิตร/นาที	45.0	48.6	52.5	51.0	49.2	49.2	50.0	53.0	53.8	55.0	58.0	60.5	62.5	64.4	70.3
บน 0.50 ลิตร/นาที	45.0	46.9	47.3	50.3	47.8	46.4	49.2	50.9	53.7	54.0	56.6	59.3	61.3	63.3	69.5
บน 0.75 ลิตร/นาที	45.0	47.2	49.7	51.6	48.9	50.3	51.6	55.0	56.6	58.3	60.7	62.8	65.1	67.2	73.5
บน 1.00 ลิตร/นาที	45.0	48.3	45.5	46.0	45.8	49.5	51.2	54.0	55.4	58.7	61.2	63.9	66.1	67.9	73.8
กลาง 0.20 ลิตร/นาที	45.0	45.4	48.0	57.6	56.5	50.4	51.5	53.9	55.6	59.1	62.0	66.7	67.5	69.6	76.0
กลาง 0.50 ลิตร/นาที	45.0	46.5	50.7	53.9	50.6	51.4	52.0	54.6	55.4	58.4	61.1	64.2	66.0	68.2	74.4
กลาง 0.75 ลิตร/นาที	45.0	44.7	50.7	54.6	50.3	55.9	55.8	58.8	60.5	64.1	67.3	70.5	73.1	75.4	82.3
กลาง 1.00 ลิตร/นาที	45.0	48.8	52.8	56.7	58.5	55.0	56.8	60.0	63.7	63.5	66.5	69.3	72.0	74.7	81.8
ล่าง 0.20 ลิตร/นาที	45.0	49.2	46.0	36.0	38.6	39.9	41.4	44.7	45.8	48.5	51.0	53.3	54.7	56.5	62.3
ล่าง 0.50 ลิตร/นาที	45.0	47.5	51.3	51.0	51.0	46.5	48.2	51.5	52.9	56.0	58.4	60.9	62.4	64.9	70.1
ล่าง 0.75 ลิตร/นาที	45.0	47.2	43.7	45.3	45.0	44.3	45.3	48.0	48.3	51.5	53.5	55.9	57.2	58.8	64.2
ล่าง 1.00 ลิตร/นาที	45.0	46.8	51.0	51.9	49.2	47.2	49.0	52.2	53.0	56.3	58.5	61.0	62.3	65.4	69.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-2.14 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่ (ดำเนินการระยะยาว 570 นาที)

การกรอง	เวลา (นาที่)	0	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	510	540	570	
	ความชื้น	เข้า	50	49	51	150	50	260	50	404	450	54	0	51	0	48	48	0	51	0	49	54	0
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.6	2.5	2.2	1.7	1.8	1.7	1.4	1.2	1.5	1.2	1.1	1.4	1.7	1.9	1.7	1.9	1.7	3.0	3.4	2.7
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)	0	43	86	134	189	257	334	418	505	570	630											
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	437	442											
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12									
	ความชื้น (เอ็นทียู)	-	1268	737	535	282	115	75	42	37	21	16	15	16									

ตารางที่ ก-2.15 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่ (ดำเนินการระยะยาว 450 นาที)

การกรอง	เวลา (นาที่)	0	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450					
	ความชื้น	เข้า	52	51	48	167	50	52	50	0	0	48	51	50	0	51	0	0	50				
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.3	3.3	2.8	2.5	1.7	1.8	1.7	2.4	3.2	2.6	2.8	2.4	2.4	2.2	2.0	1.9				
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)	0	50	99	150	204	260	331	404	450	510												
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	250	300	350	370	378												
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12									
	ความชื้น (เอ็นทียู)	-	1113	759	530	410	243	125	88	53	31	22	12	12									

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-2.16 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที่ (ดำเนินการระยะยาว 240 นาที)

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	60	90	120	150	180	210	240			
	ความชื้น	เข้า	48	52	52	50	49	50	48	51	55	54			
	(เอ็นทียู)	ออก	-	2.4	1.4	1.1	1.1	0.6	0.9	1.1	1.0	1.3			
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	53	110	167	224	240	300						
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	212	218						
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	635	304	191	125	98	62	36	23	15	12	12	10

ตารางที่ ก-2.17 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งและอัตราการเติมอากาศต่างๆ (ดำเนินการระยะยาว)

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ รูปแบบ	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
บน 0.20 ลิตร/นาที่ (570 นาที)	45.0	48.7	42.0	47.2	43.2	42.4	43.0	44.5	44.2	46.5	48.7	50.8	53.4	55.3	61.3
กลาง 0.20 ลิตร/นาที่ (450 นาที)	45.0	47.2	32.8	38.5	40.5	41.2	41.8	44.8	45.3	46.7	49.2	50.3	52.1	54.0	59.4
ล่าง 0.75 ลิตร/นาที่ (240 นาที)	45.0	46.0	53.0	37.3	37.5	38.3	38.5	41.0	41.5	47.4	46.0	49.0	51.3	53.9	60.0

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-3 ศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยี่ดหุ่่น

ตารางที่ ก-3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยี่ดหุ่่นของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น	เข้า	47	50	54	54	51	50	48	49	54	52	52	48	50
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.6	4.1	3.4	2.2	2.2	2.4	2.1	1.6	1.6	1.5	1.7	2.0
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	47	98	154	180								
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	178								
การล้างยี่ดหุ่่น	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)		-	523	317	198	98	53	27	16	8	5	4	3	4

ตารางที่ ก-3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยี่ดหุ่่นของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น	เข้า	47	51	49	51	55	48	52	49	49	47	53	50	51
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.8	2.9	2.8	2.9	2.8	2.6	2.6	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	53	101	152	180								
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	188								
การล้างยี่ดหุ่่น	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)		-	496	282	93	74	28	19	11	8	8	5	6	5

ตารางที่ ก-3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยี่ดหุ่่นของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น	เข้า	48	51	55	53	47	51	53	51	51	53	51	52	50
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.1	3.4	2.9	2.7	2.6	2.6	2.8	3.0	2.4	1.9	2.2	2.5
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	42	84	129	172	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	211							
การล้างยี่ดหุ่่น	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)		-	526	455	267	121	66	31	26	20	12	8	7	6

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	50	50	100	52	50	54	50	48	47	49	47	51	50
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.5	4.7	4.4	3.4	3.5	3.6	3.3	3.4	3.4	3.2	3.0	3.0
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	53	120	175	180								
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	153								
การล้างย่อน	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	507	358	256	183	66	30	18	16	15	12	10	3

ตารางที่ ก-3.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	50	50	47	52	48	51	50	52	47	50	50	52	51
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.6	2.2	2.1	2.0	2.2	2.3	2.0	1.9	1.7	1.5	1.8	1.9
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	45	92	136	180								
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	192								
การล้างย่อน	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	594	406	273	187	68	26	15	6	4	2	2	3

ตารางที่ ก-3.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	48	51	50	50	52	48	51	53	50	52	50	49	48
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.4	1.9	2.3	2.5	2.4	2.3	2.2	2.4	2.2	1.9	1.8	1.9
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	50	103	155	180								
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	174								
การล้างย่อน	เวลา (นาที)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	571	309	218	104	55	22	8	5	4	3	3	3

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/
นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	50	50	49	51	49	49	54	48	51	52	48	50	51
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.3	2.2	2.1	1.8	1.8	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3	1.4	1.6
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	45	90	136	180								
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	177								
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	568	411	235	183	68	27	18	9	7	6	5	5

ตารางที่ ก-3.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	52	52	51	51	51	50	49	50	50	51	50	53	51
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.2	2.5	2.3	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	1.9	1.8	1.7	1.7
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	47	90	135	180								
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200								
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	601	408	256	116	56	24	15	11	7	8	5	5

ตารางที่ ก-3.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	51	49	52	49	50	50	51	48	50	52	51	50	49
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.9	3.7	3.4	3.1	2.9	2.7	2.9	3.2	2.6	2.0	1.7	1.6
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	38	80	123	165	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	219							
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	548	383	255	115	55	28	16	8	6	4	4	3

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	51	51	49	51	50	50	50	48	50	49	48	49	53
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.6	4.6	4.2	3.4	3.3	3.0	2.8	2.8	3.0	3.1	2.7	2.6
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	40	82	122	167	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	214							
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	510	319	193	97	47	22	12	8	7	6	5	4

ตารางที่ ก-3.11 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	53	50	47	49	49	53	50	50	49	47	50	59	51
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.2	2.2	1.8	1.4	1.6	1.7	1.8	2.0	1.9	2.3	2.0	1.7
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	50	94	135	178	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	201							
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	562	315	194	106	49	26	12	10	6	6	5	4

ตารางที่ ก-3.12 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของ
ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที่

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความชื้น	เข้า	50	50	49	53	51	52	49	51	48	53	50	49	50
	(เอ็นทียู)	ออก	-	4.4	4.1	3.5	2.6	2.6	2.3	1.9	1.8	2.1	2.0	1.6	1.5
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	48	95	143	180								
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	192								
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	522	304	177	90	47	21	10	9	7	6	5	5

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.13 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งและอัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ รูปแบบ	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำที่เวลาการกรอง 180 นาที (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
บน 0.20 ลิตร/นาที	45.0	48.3	43.4	42.5	41.3	41.2	43.5	42.3	43.3	40.9	43.5	46.1	48.1	50.6	56.7
บน 0.50 ลิตร/นาที	45.0	48.0	43.7	43.0	47.0	45.5	47.5	50.5	50.8	53.8	56.3	58.5	60.5	62.6	67.7
บน 0.75 ลิตร/นาที	45.0	47.2	52.2	50.8	45.0	49.7	47.8	50.3	51.4	54.4	57.2	60.1	62.6	64.8	71.0
บน 1.00 ลิตร/นาที	45.0	46.9	45.2	37.4	34.4	32.0	35.3	33.1	34.4	37.3	39.9	42.3	44.3	46.6	52.5
กลาง 0.20 ลิตร/นาที	45.0	46.3	48.5	57.9	41.5	49.0	56.8	50.0	49.6	57.4	53.4	56.3	58.9	61.9	67.5
กลาง 0.50 ลิตร/นาที	45.0	45.5	37.0	44.0	42.5	44.5	51.7	42.3	46.0	48.8	51.3	53.7	56.2	57.9	63.6
กลาง 0.75 ลิตร/นาที	45.0	43.0	46.6	50.0	40.5	44.5	45.3	47.2	47.5	49.9	52.0	54.5	56.6	58.7	64.6
กลาง 1.00 ลิตร/นาที	45.0	44.7	51.5	44.0	43.3	46.0	46.0	47.4	46.5	53.1	51.7	54.2	56.3	58.3	64.0
ล่าง 0.20 ลิตร/นาที	45.0	47.4	49.0	49.8	52.0	53.3	54.3	56.2	56.7	58.8	60.9	63.2	64.6	66.1	71.7
ล่าง 0.50 ลิตร/นาที	45.0	45.2	49.5	43.3	41.2	43.5	52.0	46.4	46.3	48.5	51.1	53.8	56.3	58.5	64.6
ล่าง 0.75 ลิตร/นาที	45.0	47.9	45.5	47.0	48.4	49.4	49.4	51.0	51.2	52.4	53.9	60.0	57.0	58.5	63.8
ล่าง 1.00 ลิตร/นาที	45.0	49.0	39.7	49.0	50.7	52.0	52.4	54.0	57.2	56.3	58.4	60.2	62.3	64.1	69.5

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.14 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่ (ดำเนินการระยะยาว 330 นาที)

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
	ความชื้น	เข้า	50	52	48	53	52	54	51	51	50	49	50	50	51
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.6	3.2	1.7	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.2	1.4	1.3	1.3
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	51	101	155	214	292	330						
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	250	288						
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	1187	438	214	111	84	42	30	21	16	14	11	11

ตารางที่ ก-3.15 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่ (ดำเนินการระยะยาว 390 นาที)

การกรอง	เวลา (นาที่)		0	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390
	ความชื้น	เข้า	50	48	47	48	51	51	49	50	50	50	51	53	54	50	51
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.1	2.2	1.7	1.5	1.5	1.4	1.4	1.5	1.7	1.5	1.5	1.4	1.5	1.4
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)		0	45	86	126	169	224	280	338	390						
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	250	300	350	389						
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
	ความชื้น (เอ็นทียู)		-	1061	552	270	123	56	31	20	16	12	10	10	10		

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.16 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที่ (ดำเนินการระยะยาว 240 นาที)

การกรอง	เวลา (นาที่)	0	15	30	60	90	120	150	180	210	240			
	ความชื้น	เข้า	50	49	50	49	51	47	51	50	50	52		
	(เอ็นทียู)	ออก	-	2.7	1.9	1.5	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.3		
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)	0	43	87	133	189	240							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	220							
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)	-	934	512	379	196	43	23	13	11	10	8	7	7

ตารางที่ ก-3.17 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งและอัตราการเติมอากาศต่างๆ (ดำเนินการระยะยาว)

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ														
	รูปแบบ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
บน 0.20 ลิตร/นาที่ (330 นาที)	45.0	46.8	39.5	29.3	31.0	30.5	30.5	32.2	32.8	34.6	37.7	40.7	43.4	46.0	52.0
กลาง 0.20 ลิตร/นาที่ (390 นาที)	45.0	44.5	43.9	41.5	45.5	44.9	45.5	49.0	47.3	52.9	50.2	63.4	57.8	59.0	65.5
ล่าง 0.75 ลิตร/นาที่ (240 นาที)	45.0	46.8	50.5	36.0	44.8	37.7	33.3	38.3	33.0	41.7	36.3	42.8	41.8	43.1	47.2

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-4 การศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch)

ตารางที่ ก-4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210
	ความขุ่น	เข้า	50	51	49	49	54	51	52	48	50	50	51	48	50	49	48	52	50	52	50
	(เซ็นทียู)	ออก	-	3.6	3.0	2.8	2.4	2.2	1.9	2.1	2.0	2.0	1.8	1.7	1.8	1.6	2.5	21.3	7.1	4.8	3.0
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	37	75	117	162	180													
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	215													

ตารางที่ ก-4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210
	ความขุ่น	เข้า	50	50	51	50	53	52	50	50	48	49	50	52	51	49	47	51	50	50	52
	(เซ็นทียู)	ออก	-	3.8	3.5	3.1	2.9	2.6	2.7	2.3	2.2	2.0	2.0	2.1	1.9	1.8	10.8	30.6	5.6	4.6	2.8
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	35	71	113	158	180													
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	220													

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-4 การศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch)

ตารางที่ ก-4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210
	ความขุ่น	เข้า	50	51	49	49	54	51	52	48	50	50	51	48	50	49	48	52	50	52	50
	(เซ็นทียู)	ออก	-	3.6	3.0	2.8	2.4	2.2	1.9	2.1	2.0	2.0	1.8	1.7	1.8	1.6	2.5	21.3	7.1	4.8	3.0
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	37	75	117	162	180													
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	215													

ตารางที่ ก-4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210
	ความขุ่น	เข้า	50	50	51	50	53	52	50	50	48	49	50	52	51	49	47	51	50	50	52
	(เซ็นทียู)	ออก	-	3.8	3.5	3.1	2.9	2.6	2.7	2.3	2.2	2.0	2.0	2.1	1.9	1.8	10.8	30.6	5.6	4.6	2.8
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	35	71	113	158	180													
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	220													

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	(เข็นที่อยู่)	เข้า	52	49	50	50	53	52	51	54	51	50	51	53	50	50	50	50	54	53	50	50
		ออก	-	3.2	2.7	2.5	2.2	2.0	2.0	2.2	2.0	1.6	1.7	1.7	1.5	1.5	5.6	18.5	7.3	4.3	2.5	
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	34	70	113	158	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	217														

ตารางที่ ก-4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210
	(เข็นที่อยู่)	เข้า	51	49	52	51	53	50	47	48	49	51	50	50	49	51	49	51	53	48	48
		ออก	-	3.3	3.1	2.6	2.3	1.8	1.7	1.7	1.6	1.6	1.4	1.4	1.3	1.4	12.7	6.4	4.3	2.8	2.1
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	35	71	114	157	180													
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	225													

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 1.3 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	(เข็นที่อยู่)	ความขุ่น	เข้า	52	47	51	50	52	51	53	49	49	50	47	51	50	53	54	50	50	50	51
		ออก	-	3.3	3.0	2.6	2.5	2.1	2.2	2.0	1.7	1.7	1.4	1.5	1.4	1.3	26.3	4.8	3.0	2.8	2.6	
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	36	73	114	156	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	221														

ตารางที่ ก-4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	(เข็นที่อยู่)	ความขุ่น	เข้า	50	52	48	50	50	53	52	49	51	48	47	48	53	50	52	51	50	50	50
		ออก	-	3.0	2.9	2.5	2.2	2.0	2.0	1.5	1.6	1.7	1.5	1.4	1.2	1.2	1.5	30.6	1.5	1.2	1.2	1.5
อัตราการไหล	เวลา (นาที)		0	33	69	111	155	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)		0	50	100	150	200	221														

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	ความขุ่น	เข้า	50	51	53	48	50	51	51	50	49	50	53	50	49	51	51	50	50	51	48
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.2	2.7	2.5	2.2	2.0	1.6	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	6.5	18.2	5.9	3.7	2.6
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	33	68	110	155	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	224														

ตารางที่ ก-4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	ความขุ่น	เข้า	50	52	49	51	50	48	49	53	52	50	50	53	52	48	49	50	51	49	50
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.1	2.8	2.5	2.1	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.5	1.5	9.1	14.7	4.3	2.9	2.5
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	36	73	114	158	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	215														

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 นาที อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	ความชื้น	เข้า	50	51	53	50	54	54	50	51	50	50	53	53	52	49	54	50	50	48	48
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.8	3.5	3.2	2.6	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.4	1.4	1.5	1.4	27.2	11.7	6.4	3.8	2.1
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	34	71	112	154	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	223														

ตารางที่ ก-4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 นาที อัตราการเติมอากาศ 1.3 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	ความชื้น	เข้า	50	48	48	49	50	52	54	51	49	49	50	48	51	53	53	49	48	52	50
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.6	3.1	2.8	2.4	2.3	1.8	1.8	1.6	1.6	1.6	1.4	1.4	1.4	23.5	2.6	1.8	1.5	1.4
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	37	74	115	158	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	221														

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	ความขุ่น	เข้า	50	50	50	49	50	52	50	50	51	50	48	49	49	50	50	52	53	50	54
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.9	3.1	2.8	2.9	2.3	2.2	1.6	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	11.6	1.5	1.4	1.4
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	34	69	110	152	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	226														

ตารางที่ ก-4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	ความขุ่น	เข้า	52	50	49	54	50	50	50	49	53	51	49	51	52	49	49	50	50	52	49
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.4	3.2	2.1	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.4	1.4	2.8	7.1	2.3	2.0	1.7
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	35	70	112	156	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	219														

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	ความขุ่น	เข้า	50	49	50	50	51	51	50	50	49	51	47	47	49	49	50	54	49	51	52
	(เอ็นทียู)	ออก	-	2.9	2.8	2.5	2.1	1.6	1.9	1.5	1.5	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	4.2	9.6	2.1	1.9	1.6
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	36	72	112	155	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	217														

ตารางที่ ก-4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	ความขุ่น	เข้า	50	51	47	50	50	49	53	49	47	49	49	51	50	50	50	50	53	53	52
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.3	3.0	2.4	2.0	1.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	9.6	3.5	1.8	1.7	1.5
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	33	73	112	153	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	225														

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210	
	ความชื้น	เข้า	52	54	50	51	48	52	52	53	52	50	47	51	48	52	53	53	49	50	50
	(เอ็นทียู)	ออก	-	3.6	3.2	3.0	2.8	2.3	2.2	1.9	1.8	1.8	1.7	1.9	1.7	1.6	14.8	5.6	3.1	2.1	1.8
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	36	73	113	155	180														
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	216														

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.16 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	44.5	45.9	49.2	51.0	54.7	57.7	61.2	64.0	68.7	72.2	75.9	79.5	82.3	89.5
60 นาที	45.0	41.3	42.7	45.9	47.8	51.5	54.5	57.9	60.9	65.5	69.0	72.6	76.3	79.2	86.4
90 นาที	45.0	36.7	37.9	40.9	43.2	47.0	50.0	53.5	56.5	61.0	64.7	68.3	72.0	75.0	82.3
120 นาที	45.0	22.7	23.8	27.3	29.2	33.0	36.0	39.5	42.6	47.3	50.6	54.8	58.7	61.8	69.0
150 นาที	45.0	0.0	0.0	2.5	4.4	8.1	11.2	14.5	18.2	22.8	26.7	30.3	34.2	37.5	44.5
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	4.6	11.0
หลังเติมอากาศ	45.0	6.2	7.3	18.0	18.3	23.7	7.3	8.5	12.9	17.4	21.5	25.5	29.4	33.4	40.6

ตารางที่ ก-4.17 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	44.2	45.9	47.0	50.0	53.9	57.0	60.8	63.9	68.6	72.3	76.0	79.5	82.4	89.4
60 นาที	45.0	39.0	41.2	42.0	45.2	49.0	52.2	55.8	59.0	63.9	69.2	72.1	75.0	77.9	85.2
90 นาที	45.0	33.7	36.4	36.9	40.3	43.6	47.4	51.2	54.5	59.5	63.2	67.0	70.8	74.0	81.2
120 นาที	45.0	21.5	24.2	24.9	28.4	32.3	35.7	39.5	42.9	47.8	51.7	55.3	59.4	62.7	69.7
150 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	2.0	6.5	9.8	13.6	17.5	22.3	26.2	30.0	34.0	37.4	44.5
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	9.9
หลังเติมอากาศ	45.0	39.1	22.3	33.7	21.6	23.7	35.6	39.1	32.3	32.6	39.3	39.2	39.2	35.7	36.3

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.18 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	46.1	49.7	50.2	53.4	58.2	60.5	64.5	67.3	72.2	75.7	79.5	83.0	85.9	93.0
60 นาที	45.0	41.5	43.5	45.0	48.7	52.7	56.7	60.7	63.5	68.4	72.0	75.8	79.4	82.3	89.5
90 นาที	45.0	34.5	36.2	38.2	42.0	45.9	49.2	52.9	56.2	61.0	64.7	69.9	72.1	75.0	82.4
120 นาที	45.0	19.3	21.2	23.0	27.0	30.8	34.2	38.0	41.2	46.0	49.8	53.4	57.3	61.0	67.6
150 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	2.4	6.3	9.5	13.1	16.5	21.5	25.3	29.0	32.9	36.0	43.2
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	9.8
หลังเติมอากาศ	45.0	29.5	31.2	28.7	31.0	41.5	41.5	41.3	41.5	41.8	42.0	38.7	36.0	39.5	46.5

ตารางที่ ก-4.19 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	42.5	44.5	46.8	50.7	54.5	57.5	61.5	64.5	69.6	73.0	76.8	80.3	83.4	90.6
60 นาที	45.0	37.5	39.9	42.0	46.9	49.9	53.4	57.1	60.5	65.5	69.2	72.9	76.5	79.8	87.1
90 นาที	45.0	25.2	27.8	29.9	35.0	38.1	41.5	45.2	49.1	54.2	57.8	61.6	65.5	69.0	76.0
120 นาที	45.0	7.2	10.4	12.9	17.2	21.5	25.0	28.8	33.4	38.4	42.3	45.7	49.9	53.5	60.6
150 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	7.8	12.8	17.5	22.0	25.7	29.5	33.5	41.0
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7
หลังเติมอากาศ	45.0	31.8	31.8	11.0	6.5	20.0	23.4	40.7	40.5	40.8	41.5	37.7	36.5	32.5	39.7

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.20 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 1.3 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	45.6	47.3	49.9	52.4	56.7	59.8	63.9	66.5	71.5	75.0	78.7	82.2	85.1	92.2
60 นาที	45.0	41.4	42.7	44.5	48.6	52.8	56.0	59.9	62.7	67.6	71.2	74.8	78.4	81.3	88.4
90 นาที	45.0	34.9	36.3	38.0	41.5	45.7	48.8	52.5	55.5	60.4	64.0	67.7	71.3	74.1	81.4
120 นาที	45.0	21.5	22.8	24.5	28.0	32.0	35.3	38.9	42.0	46.7	50.5	54.2	57.8	60.8	68.0
150 นาที	45.0	0.0	0.0	1.0	4.8	8.7	12.0	15.7	18.8	23.6	27.3	31.0	34.5	37.8	45.0
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7
หลังเติมอากาศ	45.0	41.0	38.5	40.0	38.5	41.5	46.8	48.1	50.7	49.0	43.1	46.9	50.8	54.3	61.0

ตารางที่ ก-4.21 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	45.3	46.8	48.3	50.8	54.8	57.3	62.0	64.3	69.3	72.9	76.7	80.3	83.3	90.5
60 นาที	45.0	41.8	43.2	44.7	47.3	49.7	54.2	58.2	60.9	65.7	69.5	73.2	77.0	79.9	87.1
90 นาที	45.0	30.4	31.8	33.3	36.2	39.8	43.2	46.7	50.0	54.8	58.5	62.2	66.1	69.2	76.5
120 นาที	45.0	14.8	16.0	17.5	20.5	24.3	27.5	31.0	34.3	39.2	43.0	46.8	50.7	53.8	61.0
150 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	6.3	10.1	13.5	18.2	22.0	26.0	30.0	33.3	40.3
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2
หลังเติมอากาศ	45.0	26.5	38.2	37.9	38.0	39.0	38.5	38.5	36.5	39.0	38.9	38.9	38.8	37.4	42.0

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.22 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	47.2	48.5	52.7	54.7	57.8	60.6	64.5	67.0	71.8	75.2	78.7	82.1	85.0	92.0
60 นาที	45.0	44.5	44.9	47.5	52.0	55.2	58.2	61.8	64.6	69.4	72.9	76.4	79.9	82.8	89.8
90 นาที	45.0	38.9	40.0	42.3	46.4	49.7	52.6	56.4	59.2	63.9	67.5	71.0	74.6	77.5	84.6
120 นาที	45.0	22.9	23.9	26.2	30.3	33.5	36.6	40.0	43.1	48.0	51.5	55.0	58.8	61.9	69.0
150 นาที	45.0	0.0	0.0	1.5	5.5	8.8	12.0	15.5	18.5	23.3	26.9	30.5	34.2	37.4	44.5
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	5.2	12.2
หลังเติมอากาศ	45.0	42.6	40.3	44.5	40.0	50.7	54.1	50.2	49.1	49.0	50.1	48.2	50.0	50.8	57.0

ตารางที่ ก-4.23 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	47.4	48.7	50.7	53.4	57.3	60.0	63.7	66.4	71.1	74.6	78.2	81.8	84.5	91.5
60 นาที	45.0	44.7	45.9	48.0	51.0	54.5	57.5	61.3	64.0	68.7	72.2	75.8	79.3	82.1	89.3
90 นาที	45.0	40.3	41.5	43.7	46.7	50.4	53.3	57.1	59.8	64.7	68.2	71.8	75.4	78.2	85.5
120 นาที	45.0	22.2	23.3	25.5	28.7	32.2	35.2	38.7	41.8	46.6	50.2	53.8	57.5	60.4	67.7
150 นาที	45.0	0.0	0.0	2.2	5.5	9.0	12.0	15.5	18.7	23.5	27.1	30.7	34.3	37.4	44.5
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8
หลังเติมอากาศ	45.0	45.0	48.3	47.7	49.5	52.0	52.2	52.8	55.5	55.0	57.3	65.7	69.5	72.5	79.6

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.24 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 นาที อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	47.6	48.3	50.3	53.0	56.4	58.9	62.4	64.7	69.4	72.9	76.5	80.2	83.1	90.3
60 นาที	45.0	44.5	45.0	47.3	50.0	53.3	55.9	59.3	61.8	66.3	69.9	73.5	77.2	80.1	87.4
90 นาที	45.0	40.0	40.5	42.8	45.7	49.0	51.7	55.2	57.7	62.3	66.0	69.7	73.3	76.3	83.6
120 นาที	45.0	22.5	23.0	25.3	28.2	31.5	34.2	37.8	40.2	44.9	48.5	52.2	55.9	59.0	66.2
150 นาที	45.0	0.5	0.9	3.3	6.3	9.5	12.3	15.8	18.3	22.9	26.6	30.3	34.0	37.1	44.5
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	11.3
หลังเติมอากาศ	45.0	43.4	47.4	46.0	48.0	53.2	56.2	54.8	54.4	57.0	58.0	62.0	65.9	68.3	75.0

ตารางที่ ก-4.25 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 5 นาที อัตราการเติมอากาศ 1.3 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	45.2	46.7	48.5	51.2	54.8	57.9	61.9	64.9	69.8	73.4	77.1	80.8	83.9	91.1
60 นาที	45.0	41.3	43.0	44.7	47.5	51.0	54.1	57.8	60.6	66.0	69.7	73.4	77.2	80.2	87.5
90 นาที	45.0	34.4	36.0	37.8	41.0	44.2	47.5	51.4	54.6	59.5	63.4	67.0	70.9	74.2	81.5
120 นาที	45.0	17.3	19.2	21.0	24.4	28.0	31.0	34.9	38.6	43.5	47.4	51.3	55.2	58.7	65.6
150 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	1.6	5.5	9.0	11.7	16.4	21.2	25.3	29.0	33.0	36.8	44.0
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0
หลังเติมอากาศ	45.0	42.2	35.2	37.5	46.5	42.5	47.6	52.1	52.1	54.2	55.2	56.3	57.4	58.9	61.4

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.26 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	47.4	50.3	53.0	52.9	56.9	59.4	63.3	65.8	70.5	74.0	77.5	81.1	83.7	90.7
60 นาที	45.0	44.5	50.0	50.0	49.0	54.0	56.5	60.2	63.0	67.6	71.1	74.7	78.3	81.0	88.1
90 นาที	45.0	35.3	36.5	41.8	41.8	45.1	48.0	51.3	54.5	59.3	62.9	66.5	70.3	73.3	80.3
120 นาที	45.0	21.0	21.9	24.0	27.5	30.9	33.6	37.3	40.9	45.6	49.3	52.9	56.8	60.0	67.2
150 นาที	45.0	0.0	0.0	0.5	4.0	7.7	10.5	13.7	17.7	22.4	26.3	29.9	33.8	37.3	44.1
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	4.0	11.0
หลังเติมอากาศ	45.0	40.0	34.8	37.5	35.7	39.5	41.4	39.0	39.5	42.4	41.0	42.6	43.4	42.9	46.0

ตารางที่ ก-4.27 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	45.4	46.9	48.8	52.3	57.8	60.4	65.4	66.7	70.5	73.7	77.4	81.0	83.8	90.9
60 นาที	45.0	41.9	43.5	45.5	49.2	52.8	55.9	59.3	62.3	67.0	70.7	74.3	78.0	80.9	88.1
90 นาที	45.0	35.0	36.9	38.8	42.6	46.2	49.3	52.8	55.9	60.8	64.4	68.0	72.3	74.9	81.9
120 นาที	45.0	19.9	21.5	23.5	26.7	30.0	32.9	36.3	40.0	44.6	48.3	52.0	56.1	59.5	66.4
150 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	2.0	5.3	8.3	11.5	15.5	20.0	24.0	27.8	31.7	32.2	42.2
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	8.9
หลังเติมอากาศ	45.0	44.5	47.9	46.5	47.3	53.1	52.5	50.8	50.5	52.5	53.3	53.6	53.5	53.0	57.6

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.28 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	46.3	47.5	50.0	53.6	57.5	60.6	64.4	67.3	72.0	75.5	79.0	82.4	85.2	92.3
60 นาที	45.0	42.5	43.7	46.2	49.9	53.7	57.0	60.2	63.5	68.3	71.8	75.3	78.9	81.2	88.9
90 นาที	45.0	36.2	38.2	40.2	43.3	46.6	49.5	53.0	56.5	61.2	65.0	68.7	72.5	75.9	82.9
120 นาที	45.0	21.3	22.9	24.9	27.0	31.5	34.5	37.7	41.6	46.1	50.0	53.6	57.6	61.0	68.0
150 นาที	45.0	0.0	0.0	0.6	4.0	7.5	10.8	13.7	18.0	22.6	26.5	30.3	34.3	37.9	44.9
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	4.4	11.3
หลังเติมอากาศ	45.0	46.8	43.3	47.2	49.2	54.6	55.7	56.4	58.7	65.5	66.7	70.0	74.0	76.0	74.8

ตารางที่ ก-4.29 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที อัตราการเติมอากาศ 1 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	46.4	47.4	49.7	52.7	56.3	59.0	62.7	65.2	69.7	73.1	76.6	80.0	82.7	89.7
60 นาที	45.0	43.2	44.2	46.5	49.5	53.3	56.2	59.7	62.5	67.0	70.5	74.0	77.4	80.1	87.4
90 นาที	45.0	38.6	39.9	42.3	45.5	49.0	52.0	55.4	58.3	62.9	66.4	69.9	73.4	76.4	83.5
120 นาที	45.0	21.2	23.0	25.5	28.8	32.3	35.3	39.8	41.8	46.4	50.0	53.5	57.2	60.2	67.2
150 นาที	45.0	0.0	0.0	1.9	5.5	9.1	12.1	16.2	18.7	23.3	27.0	30.5	34.2	37.4	44.2
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	11.0
หลังเติมอากาศ	45.0	44.6	39.7	22.5	20.0	23.8	30.2	52.0	51.8	58.8	57.6	60.4	64.0	69.2	73.9

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.30 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 1 นาที อัตราการเติมอากาศ 1.3 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	44.7	45.1	47.3	50.5	53.7	56.6	60.0	62.9	67.3	70.8	74.1	77.5	80.2	87.4
60 นาที	45.0	42.2	42.3	44.7	48.0	51.0	54.1	57.4	60.5	65.0	68.5	71.9	75.4	78.4	85.5
90 นาที	45.0	36.8	36.7	39.0	42.7	45.4	48.7	52.0	55.1	59.6	63.2	66.6	70.3	73.3	80.3
120 นาที	45.0	24.0	23.7	26.0	29.9	32.7	35.9	39.5	42.5	47.0	50.6	54.2	57.8	61.0	68.0
150 นาที	45.0	2.3	1.8	4.0	8.0	11.0	14.1	17.5	21.0	25.5	29.2	32.7	36.5	39.8	46.7
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	9.0
หลังเติมอากาศ	45.0	45.4	30.4	47.3	24.0	39.5	45.6	55.3	54.7	57.2	56.0	57.9	64.0	66.6	73.3

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.31 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที (ดำเนินการระยะยาว 720 นาที)

การกรอง	เวลา (นาที)	0	30	60	90	120	150	180	188	191	194	197	200	210	240	270	300	330	360	390	
	ความขุ่น	เข้า	50	48	51	48	52	50	52	53	48	51	48	49	41	52	50	53	50	49	49
	(เอ็นทียู)	ออก	-	2.7	2.2	2.4	1.9	1.5	1.9	1.4	1.3	6.7	22.0	4.5	4.2	3.2	2.8	2.2	1.8	1.5	1.4
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	36	73	114	157	213	271	332	397	461	528	596	666	720						
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	612						

ตารางที่ ก-4.32 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที (ดำเนินการระยะยาว 720 นาที) (ต่อ)

การกรอง	เวลา (นาที)	420	450	480	510	540	570	578	581	584	587	590	600	630	660	690	720	728	731	734	
	ความขุ่น	เข้า	50	51	50	52	49	49	52	53	53	50	48	49	53	51	50	50	50	51	48
	(เอ็นทียู)	ออก	1.4	1.4	1.2	1.3	1.2	1.3	1.2	1.4	17.4	31.4	15.6	4.8	3.4	2.0	1.8	1.5	1.4	10.8	65.8
อัตราการไหล	เวลา (นาที)																				
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)																				

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-4.33 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที (ดำเนินการระยะยาว 720 นาที)

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	44.2	45.3	47.0	49.9	53.5	56.6	60.2	63.1	67.8	71.3	75.0	78.4	81.0	88.3
60 นาที	45.0	38.8	39.7	41.5	44.5	48.0	51.4	54.9	58.0	62.8	66.5	70.0	73.6	76.5	83.7
90 นาที	45.0	27.4	28.0	29.8	33.0	36.5	39.8	43.9	46.7	51.5	55.2	58.9	62.6	65.7	72.7
120 นาที	45.0	7.4	7.5	9.5	13.0	16.5	19.9	23.8	27.1	31.7	35.5	39.2	43.1	46.4	53.3
150 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	6.8	11.1	15.0	18.7	22.7	26.0	33.0
180 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	10.0
หลังเติมอากาศรอบที่ 1	45.0	24.5	16.5	19.0	24.0	30.5	31.0	40.8	36.5	38.0	44.7	47.5	48.5	48.2	41.5
240 นาที	45.0	24.3	15.4	18.2	20.8	28.5	29.7	39.5	35.5	36.5	35.2	36.2	46.9	47.2	40.0
270 นาที	45.0	24.0	14.0	17.4	19.6	27.3	28.5	38.0	34.8	35.6	34.5	35.3	45.1	46.0	39.0
300 นาที	45.0	23.2	11.7	15.7	17.4	24.9	26.5	33.5	33.0	33.2	32.2	33.1	42.9	43.7	36.7
330 นาที	45.0	22.8	10.0	13.3	15.7	22.0	24.0	23.9	31.7	32.9	31.7	32.5	42.4	42.8	35.5
360 นาที	45.0	22.8	8.2	11.1	13.5	18.3	21.0	21.1	26.7	27.9	26.7	30.3	41.1	41.5	33.5
390 นาที	45.0	22.7	7.5	10.0	12.7	16.0	17.2	17.4	19.7	25.3	22.5	27.2	39.8	33.2	27.6
420 นาที	45.0	22.7	6.5	9.0	9.8	10.7	11.0	9.5	12.4	23.0	21.5	23.8	37.7	32.0	25.5
450 นาที	45.0	21.9	2.9	6.3	5.8	7.4	7.6	6.2	9.7	18.7	18.3	20.5	31.5	28.6	22.3
480 นาที	45.0	21.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	3.5	5.3	14.4	15.0	17.7	26.8	24.8	21.6
510 นาที	45.0	21.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	9.0	9.7	12.3	12.9	19.2	17.9
540 นาที	45.0	19.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	8.0	12.9	15.4	14.5
570 นาที	45.0	19.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	5.4	9.5
หลังเติมอากาศรอบที่ 2	45.0	27.5	15.9	5.7	3.9	7.0	20.0	29.7	32.2	36.2	35.0	34.7	32.5	33.2	38.5
630 นาที	45.0	25.9	13.4	4.1	2.9	6.0	18.4	28.2	28.4	34.4	31.3	33.4	31.0	28.8	35.7
660 นาที	45.0	24.6	10.4	2.1	0.0	1.3	8.3	21.1	24.0	28.2	28.8	28.3	26.3	25.6	31.0
690 นาที	45.0	21.7	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	13.5	14.4	16.7	22.7	23.8	21.5	24.6
720 นาที	45.0	21.7	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	4.5	5.8	12.4	14.2	14.4	19.2
หลังเติมอากาศรอบที่ 3	45.0	21.2	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	4.7	6.7	9.0	14.7	18.5

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข การเปรียบเทียบค่าความพรุนของสารกรองในรูปแบบการกรองต่างๆ
ตารางที่ ข-1 รายการคำนวณค่าความพรุนของสารกรองในรูปแบบการกรองต่างๆ

รูปแบบการกรอง	เวลาการกรอง (นาที)	Δ ความดันลด (ปาสคาล)	ครรขนี้ ความกลม (Φ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดสารกรอง (เมตร)	ความพรุน (ϵ)	ความหนา ชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็ว การกรอง (เมตร/วินาที)	ความหนืด (μ) (ปาสคาล/วินาที)
ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว	15	2144	0.6	0.00045	0.397	0.7	0.001111	0.00089
	30	2222	0.6	0.00045	0.389	0.7	0.001111	0.00089
	45	2311	0.6	0.00045	0.380	0.7	0.001111	0.00089
	60	2497	0.6	0.00045	0.362	0.7	0.001111	0.00089
	75	2741	0.6	0.00045	0.342	0.7	0.001111	0.00089
	90	2957	0.6	0.00045	0.326	0.7	0.001111	0.00089
	105	3671	0.6	0.00045	0.284	0.7	0.001111	0.00089
	120	4357	0.6	0.00045	0.253	0.7	0.001111	0.00089
	135	5678	0.6	0.00045	0.211	0.7	0.001111	0.00089
	150	6491	0.6	0.00045	0.193	0.7	0.001111	0.00089
	165	7813	0.6	0.00045	0.169	0.7	0.001111	0.00089
180	9154	0.6	0.00045	0.151	0.7	0.001111	0.00089	
รูปวงแหวน	570	5257	0.6	0.00045	0.098	0.7	0.000347	0.00089
แบบยืดหยุ่น	390	4797	0.6	0.00045	0.113	0.7	0.000389	0.00089

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)

ภาคผนวก ข การเปรียบเทียบค่าความพรุนของสารกรองในรูปแบบการกรองต่างๆ

ตารางที่ ข-1 รายการคำนวณค่าความพรุนของสารกรองในรูปแบบการกรองต่างๆ (ต่อ)

รูปแบบการกรอง	เวลาการกรอง (นาที)	Δ ความดันลด (ปาสคาล)	ดรรชนีความกลม (Φ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดสารกรอง (เมตร)	ความพรุน (ϵ)	ความหนาชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็วการกรอง (เมตร/วินาที)	ความหนืด (μ) (ปาสคาล/วินาที)
เติมอากาศแบบกะ (Batch)	30	2614	0.6	0.00045	0.344	0.7	0.001069	0.00089
	60	3064	0.6	0.00045	0.311	0.7	0.001069	0.00089
	90	4141	0.6	0.00045	0.255	0.7	0.001069	0.00089
	120	6041	0.6	0.00045	0.197	0.7	0.001069	0.00089
	150	8028	0.6	0.00045	0.161	0.7	0.001069	0.00089
	180	10280	0.6	0.00045	0.135	0.7	0.001069	0.00089
	210	7196	0.6	0.00045	0.174	0.7	0.001069	0.00089
	240	7343	0.6	0.00045	0.133	0.7	0.000747	0.00089
	270	7441	0.6	0.00045	0.132	0.7	0.000747	0.00089
	300	7666	0.6	0.00045	0.129	0.7	0.000747	0.00089
	330	7783	0.6	0.00045	0.128	0.7	0.000747	0.00089
	360	7979	0.6	0.00045	0.126	0.7	0.000747	0.00089
	390	8557	0.6	0.00045	0.119	0.7	0.000747	0.00089
	420	8762	0.6	0.00045	0.117	0.7	0.000747	0.00089
	450	9076	0.6	0.00045	0.115	0.7	0.000747	0.00089
	480	9144	0.6	0.00045	0.114	0.7	0.000747	0.00089
	510	9506	0.6	0.00045	0.111	0.7	0.000747	0.00089
	540	9839	0.6	0.00045	0.108	0.7	0.000747	0.00089
	570	10329	0.6	0.00045	0.104	0.7	0.000747	0.00089
	600	7490	0.6	0.00045	0.131	0.7	0.000747	0.00089
630	7764	0.6	0.00045	0.105	0.7	0.000569	0.00089	
660	8224	0.6	0.00045	0.101	0.7	0.000569	0.00089	
690	8851	0.6	0.00045	0.096	0.7	0.000569	0.00089	
720	9379	0.6	0.00045	0.092	0.7	0.000569	0.00089	
734	9448	0.6	0.00045	0.000	0.7	0.000000	0.00089	

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1 รายการคำนวณออกแบบและเปรียบเทียบระบบประปาในรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

รูปแบบถังกรอง	ระยะเวลาที่น้ำไม่ผ่าน มาตรฐาน รอบการ ทำงานที่ 1 (ชั่วโมง)	ระยะเวลาที่น้ำไม่ผ่าน มาตรฐาน รอบการ ทำงานที่ 2 (ชั่วโมง)	การเดินระบบ ต่อวัน (ครั้ง)	ปริมาตรน้ำที่กรองได้ ที่ไม่ผ่านมาตรฐานต่อวัน (ม3)	จำนวนปั้มน้ำกลับ ถึงน้ำดิบขนาด 0.8 ม3/นาที(ตัว)	เวลาการสูบ น้ำกลับถึง น้ำดิบ (ชม.)	พลังงานปั้มน้ำ กลับถึงน้ำดิบ ต่อตัว (วัตต์)	ค่าไฟฟ้า ปั้มน้ำกลับถึงน้ำดิบ ต่อวัน (หน่วย)
แบบกรองเร็ว	-	-	8	0.00	-	-	-	-
เติมอากาศแบบกะ	0.25	0.5	2	439.43	50	0.18	1500	13.73
หัวเติมอากาศรูปร่างวงแหวน	-	-	3	0.00	-	-	-	-
หัวเติมอากาศแบบยึดหยุ่น	-	-	4	0.00	-	-	-	-
ระบบผลิตน้ำประปา	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ค-1 รายการคำนวณออกแบบและเปรียบเทียบระบบประปาในรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

รูปแบบถังกรอง	อัตราการ ล้างย้อนด้วยน้ำ (ม./นาที)	อัตราการ เติมอากาศ (ลิตร/นาที)	ระยะเวลาการ ล้างย้อน (นาที)	ปริมาตร น้ำล้างย้อน ต่อครั้ง (ม3)	จำนวน การล้างย้อน ต่อวัน (ครั้ง)	ปริมาตร น้ำล้างย้อน ต่อวัน (ม3)
แบบกรองเร็ว	0.7	-	10	882.00	8	7056.0
เติมอากาศแบบกะ	0.7	0.2	10	735.00	2	1470.0
หัวเติมอากาศรูปร่างวงแหวน	0.7	0.2	10	896.00	3	2688.0
หัวเติมอากาศแบบยึดหยุ่น	0.7	0.2	10	686.00	4	2744.0
ระบบผลิตน้ำประปา	0.8	-	10	320.00	1	320.0

ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1 รายการคำนวณออกแบบและเปรียบเทียบระบบประปาในรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

รูปแบบถังกรอง	อัตราการไหล บิมน้ำล้างยอน (ม3/นาที่)	จำนวนบิมน้ำ ล้างยอนขนาด 0.8 ม3/นาที่(ตัว)	พลังงาน บิมน้ำล้างยอน ต่อตัว (วัตต์)	ค่าไฟฟ้า บิมน้ำต่อครั้ง (หน่วย)	ค่าไฟฟ้า บิมน้ำต่อ วัน (หน่วย)	จำนวน บิมน (ตัว)	พลังงาน บิมน (วัตต์)	ค่าไฟฟ้า บิมนต่อ ครั้ง (หน่วย)	ค่าไฟฟ้า บิมนต่อ วัน (หน่วย)	ค่าไฟฟ้า รวม (หน่วย)
แบบกรองเร็ว	88.200	110	1500	27.62	220.94	-	-	-	-	220.94
เติมอากาศแบบกะ	73.500	92	1500	23.01	46.03	30	187.5	0.94	1.88	47.91
หัวเติมอากาศรูปวงแหวน	89.600	112	1500	28.06	84.17	47	187.5	1.46	4.37	88.54
หัวเติมอากาศแบบยึดหยุ่น	68.600	86	1500	21.48	85.92	35	187.5	1.10	4.40	90.32
ระบบผลิตน้ำประปา	32.000	40	1500	10.02	10.02	-	-	-	-	10.02

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัฐพล เจียวิริยะบุญญา เกิดวันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2525 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย