

การพัฒนาถังกรองทรายร่วมกับ การเติมอากาศของระบบการผลิต น้ำประปา

รัฐพล เจียวิริยะบุญญา และ พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

E-mail : rat_pct@hotmail.com, pisut.p@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการรวมกระบวนการเติมอากาศเข้ากับการกรองโดยตรง (Direct Filtration) โดยใช้ น้ำดิบ
สังเคราะห์ที่มีความขุ่นประมาณ 50 เอ็นทียู เพื่อช่วยให้ชั้นกรองขยายตัว และช่วยให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้ง
ความหนาชั้นกรอง จากผลการทดลองพบว่าน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีคุณภาพได้มาตรฐาน
การผลิตน้ำประปา (ไม่เกิน 5 เอ็นทียู) โดยการเติมอากาศช่วยลดการสะสมของอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้น
กรอง ทำให้มีระยะเวลาการทำงานยาวนานกว่าถังกรองทรายแบบกรองเร็ว (270 เปอร์เซ็นต์) แต่อัตราการกรอง
จะมีค่าลดลงเล็กน้อย (5 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้การเติมอากาศยังง่ายต่อการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อม
กันและทำให้เวลาในการล้างย้อนลดลงได้ โดยแนวทางการเติมอากาศที่เหมาะสมด้วยอุปกรณ์เติมอากาศรูปวง
แหวนและแบบยืดหยุ่นที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที มี
ระยะเวลาการทำงาน 570 และ 390 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้ จากการศึกษาทดลองการเติมอากาศแบบกะเพื่อ
ประหยัดพลังงานด้วยอุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่เวลาการเติมอากาศ 10
นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที ทำให้ระยะเวลาการทำงานยาวนาน 720 นาที (มากกว่าถังกรอง
ทรายแบบกรองเร็ว 4 เท่า) เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานผลิตน้ำประปาปริมาตร 5,000 ลูกบาศก์
เมตร ระบบประปาต้องเสียค่าใช้จ่าย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านสารเคมี) 1,630 บาทต่อวัน ในขณะที่ระบบผลิต
น้ำประปาโดยถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ จะมีค่าใช้จ่ายเพียง 337 บาทต่อวัน

คำสืบค้น

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ ถังกรองทราย มาตรวัดความดันน้ำ การล้างย้อนด้วยอากาศ

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

Rattapon Jearviriyabunya and Pisut Painmanakul*

Department of Environmental Engineering,
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok, Thailand 10330
E-mail : rat_pct@hotmail.com, pisut.p@chula.ac.th*

ABSTRACT

The objective of this work is to study the process of direct filtration of 50 NTU synthetic water combined with aeration in order to prolong the filter's lifetime and filtration depth. The result has shown that the effluents obtained with the different types of aerated sand filter were passed the standard of 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 facilitate the backwash process with water and air: backwash time can be thus reduced. For the suitable operating conditions, the using of ring-type rigid and the flexible aerator at the top and middle position with 0.2 LPM of air flow rate can provide 570 and 390 minutes operation time, respectively. Due to the issue of aeration energy cutback, the batch aeration experiment was studied. 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. 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.

KEYWORDS

aerated sand filter, classical sand filter, piezometer, air backwash

I. บทนำ

โดยทั่วไป การกรองเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะ คือ การกรองแบบติดผิวชั้นกรองและการกรองแบบติดค้ำในชั้นกรอง โดยเครื่องกรองทรายแบบกรองเร็วซึ่งใช้ในระบบผลิตน้ำประปาจัดเป็นการกรองแบบติดค้ำในชั้นกรอง แต่ในความเป็นจริงเครื่องกรองทรายแบบกรองเร็วมักเกิดการกรองขึ้นที่บริเวณส่วนบนของสารกรองเท่านั้น [1] จึงใช้ประโยชน์จากความหนาของชั้นกรองได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากเกิดการอุดตันเร็วในกรณีที่เฟสน้ำมีความขุ่นสูงหรือเดินระบบแบบกรองตรง (direct filtration) ในกรณีนี้ เครื่องมือที่สามารถวัดระดับความลึกที่เกิดการกรองและเวลาการใช้งานของถังกรองได้คือ มาตรวัดความดันน้ำ [2] โดยสามารถสร้างกราฟการกระจายความดันเพื่อใช้ในการหาจุดที่เกิดการอุดตันและระยะเวลาการใช้งานถังกรองในสภาพทำงานต่างๆ

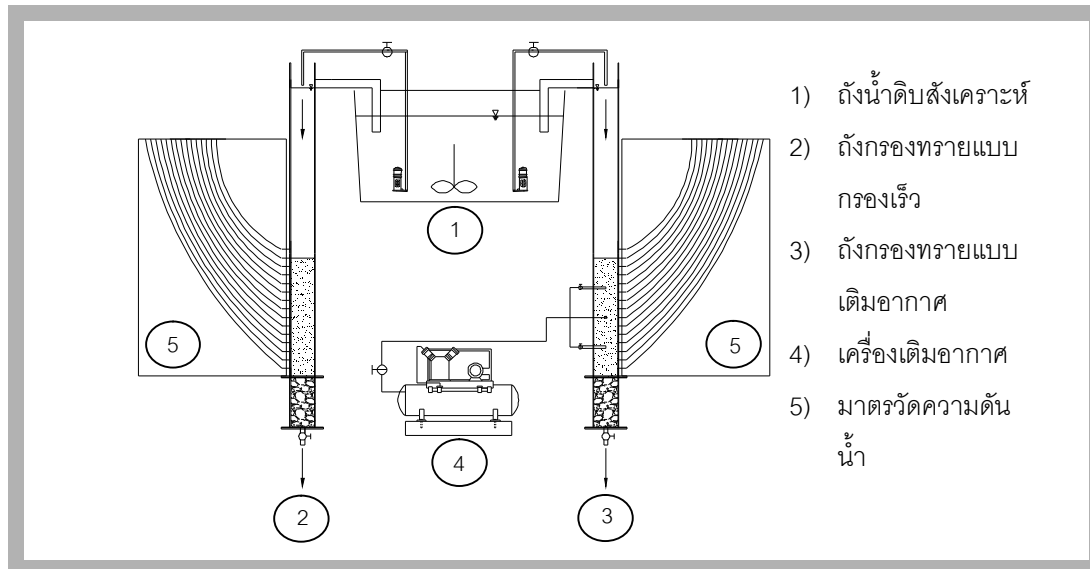
โดยเมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ ($\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยของเครื่องกรอง ($\ln(C/C_0)$) แปรผันตรงกับ ความหนาของชั้นกรอง (L) และแปรผกผันกับความพรุนของชั้นกรอง (ε) และขนาดของสารกรอง (d) [1] โดยงานวิจัยที่ผ่านมาจะทำการศึกษากการกักเก็บอนุภาคและลักษณะเฉพาะของสารกรองไฟเบอร์เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเนื่องจากความหนาแน่นของสารกรอง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของสารกรอง เนื่องจากความหนาแน่นแปรผกผันกับความพรุนของสารกรองส่งผลดีต่อประสิทธิภาพในการเกาะติด (α) และประสิทธิภาพของการกระทบ (η) ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ แต่ปัญหาที่ตามมาเมื่อสารกรองมีความหนาแน่นมากคืออายุการใช้งานถังกรองจะสั้นลง [3] นอกจากนี้ การศึกษาการทำงานของทรายกรองและสารกรองสองชั้นเพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานของถังกรอง พบว่าสารกรองสองชั้นสามารถเพิ่มระยะเวลาการทำงานของถังกรองให้ยาวนานขึ้น เนื่องจากการเรียงตัวของสารกรองเป็นแบบ หยาบ – ตะเอยด ทำให้ความลึกที่เกิดการกรองมีค่ามากขึ้น [4] แต่ในการศึกษาระดับความลึกที่เกิดการกรองโดยการเปรียบเทียบทรายกรองและสารกรองสามชั้นพบว่าสารกรองสามชั้นไม่สามารถทำให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นกรอง โดยความลึกที่เกิดการกรองอยู่ที่ระดับประมาณ 6 ซม. จากระดับผิวหน้าสารกรอง [5] ดังนั้น ความลึกที่เกิดการกรองจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อระยะเวลาการใช้งานของถังกรอง นอกจากนี้เกี่ยวข้องกับระบบบำบัดน้ำเสีย การกรองถูกจัดอยู่ในระบบบำบัดขั้นที่ 3 ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการลดความแปรปรวนของคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่ 2 [6] รวมถึงถังกรองชีวภาพที่มีการใช้กลไกการกรองและการเติมอากาศร่วมกันเพื่อให้บำบัดน้ำเสีย โดยพบว่าขณะที่ถังกรองชีวภาพเริ่มเกิดการอุดตัน การเพิ่มอัตราการเติมอากาศช่วยให้ถังกรองกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากอากาศทำให้ชั้นกรองมีความพรุนมากขึ้น น้ำจึงสามารถไหลผ่านไปได้ [7] ในส่วนของระบบประปาการเติมอากาศในชั้นกรองถูกใช้งานในรูปแบบของการล้างย้อนสารกรองด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน พบว่าการเติมอากาศทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนลดลง [8] จึงช่วยประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย โดยการศึกษากระบวนการกรองร่วมกับการเติมอากาศในต่างประเทศมีการประยุกต์เพื่อการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ Biological Aeration Filter [9] และ การกำจัดเหล็กและแมงกานีส [10] ดังนั้นการรวมกระบวนการเติมอากาศเข้ากับระบบกรองเพื่อใช้ในการผลิตน้ำประปาจึงมีความเป็นไปได้ โดยประเด็นที่น่าสนใจคือการนำเอาการเติมอากาศเข้ามาช่วยทำให้ถังกรองมีระยะเวลาการทำงานที่ยาวนานขึ้น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้กระบวนการเติมอากาศเข้ามาช่วยทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวโดยการนำหัวเติมอากาศฝังไว้ในชั้นสารกรองเป็นระยะๆ ตามความหนาของชั้นสารกรอง ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นกรอง ทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น การรวมกระบวนการ

เติมอากาศเข้าไว้ในระบบการกรองจึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจเพื่อพัฒนาระบบการกรองตรงให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นทั้งในด้านการกำจัดความขุ่น และด้านเศรษฐศาสตร์

II. อุปกรณ์และวิธีการ

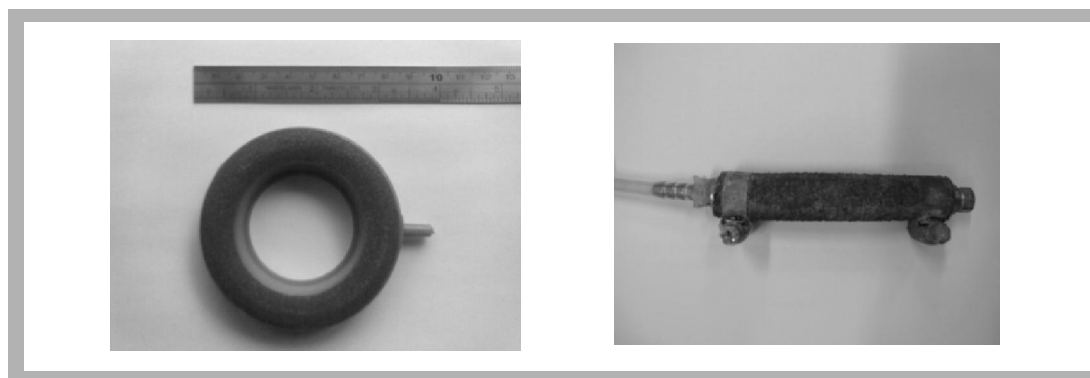
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1

แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์การทดลอง

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ใช้ในการทดลองทำด้วยวัสดุอะคริลิกใส 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 ตัวกลางสารกรองเลือกใช้ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45 – 0.65 มม. สัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอในช่วง 1.4 – 1.7 ความหนาชั้นกรอง 70 ซม. เป็นสารกรอง [11] หัวเติมอากาศใช้หัวทรายเติมอากาศ 2 รูปแบบ ดังนี้ 1. หัวเติมอากาศรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 ซม. 2. หัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นขนาดความยาว 8.5 ซม. แสดงดังรูปที่ 2 ก และ ข ตามลำดับ โดยน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเตรียมขึ้นโดยใช้ดินคาโอลิน (kaolinite) ผสมกับน้ำประปาที่ความเข้มข้น 0.067 กรัมต่อลิตร (ค่าความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ประมาณ 50 เอ็นทียู) [12]



รูปที่ 2

อุปกรณ์เติมอากาศที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย ความขุ่น (turbidity) การกระจายความดันลดภายในชั้นกรอง (pressure distribution) อัตราการไหลของอากาศและปริมาณน้ำที่กรองได้ โดยอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ได้แก่ เครื่องวัดความขุ่น (turbidity meter) มาตรวัดความดันน้ำ ทำการติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำทุกระยะ 5 ซม. ตามความสูงของ

ชั้นสารกรอง รวมทั้งหมด 15 จุด) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Air Flow Meter) และถังวัดปริมาตรน้ำ ความจุ 50 ลิตร สามารถวัดปริมาตรน้ำที่กรองได้ที่ระดับ 10 - 50 ลิตร

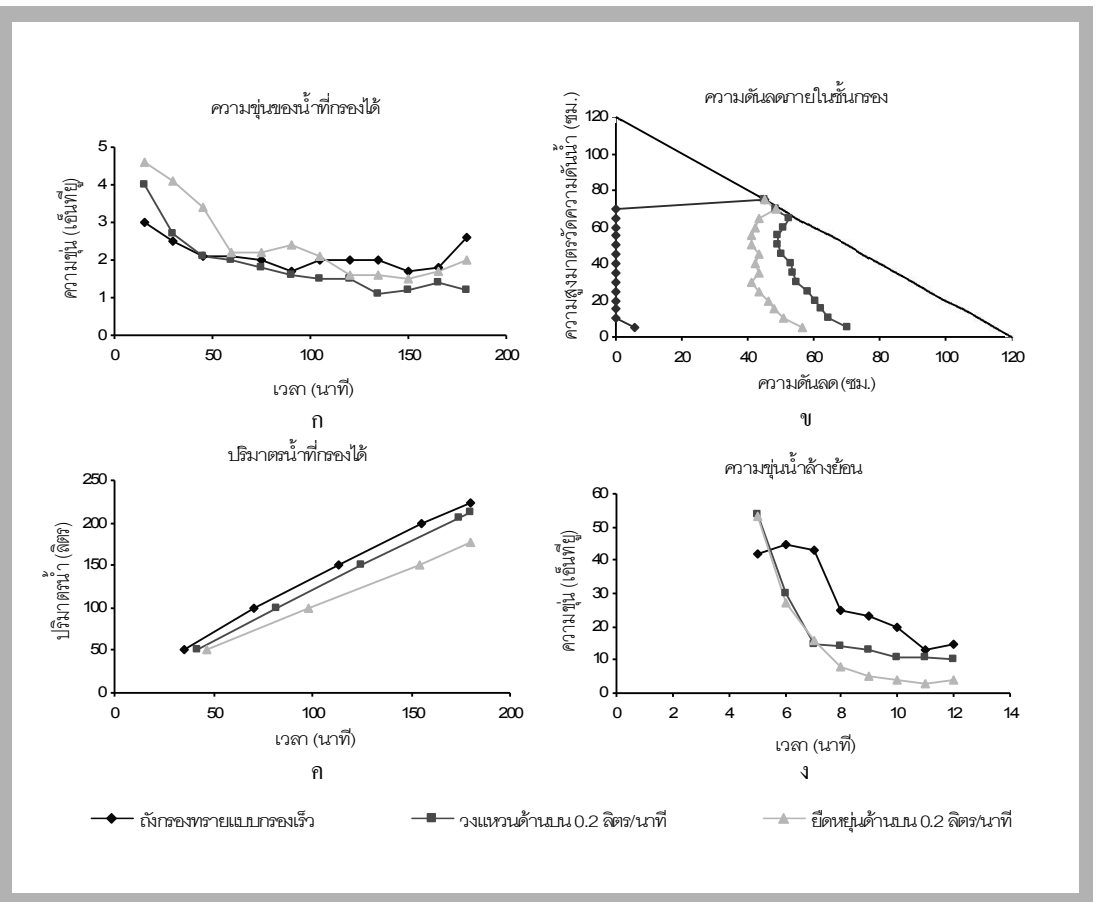
III. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศ โดยเริ่มเดินระบบถังกรองทรายแบบกรองเร็วพร้อมกับถังกรองทรายแบบเติมอากาศ โดยใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่นที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นสารกรอง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที โดยควบคุมระดับน้ำเหนือสารกรองเท่ากับ 50 ซม. (ทำการกรองที่ความดันคงที่) เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรอง ปริมาตรน้ำที่กรองได้และจุดบันทึกค่าระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำทุก 15 นาที เดินระบบจนกระทั่งถังกรองทรายแบบกรองเร็วเกิดการอุดตัน การเปรียบเทียบการล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวและการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ทำการทดลองโดยการล้างย้อนถังกรองทรายแบบกรองเร็วด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวที่ความเร็วน้ำล้างย้อน 0.7 เมตรต่อนาที และถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ความเร็วน้ำล้างย้อน 0.7 เมตรต่อนาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที ทำการล้างย้อนนาน 12 นาที โดยเก็บตัวอย่างน้ำล้างย้อนทุก 1 นาที

รูปที่ 3

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็วกับถังกรองทรายแบบเติมอากาศ



จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าความดันของน้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบกรองเร็วกว่าถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่น มีค่าอยู่ในช่วง 1.7 - 3.0, 1.1

– 4.0 และ 1.5 – 3.6 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองผ่านถึงกรองทั้งสามรูปแบบมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูงและค่อยๆ มีค่าลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 30 - 45 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงเริ่มมีค่าคงที่อยู่ที่ในช่วง 1.0 – 2.5 เอ็นทียู แสดงดังรูปที่ 3 ก

ความขุ่นของน้ำที่กรองได้ (เอ็นทียู)						อัตราการกรอง (รูปที่ 3 ค)	
รูปแบบ	Average	SD	Max	Min	P-value*	Slope (L/min)	R ²
รวม	2.1	0.80792	2.9	1.3	0.00902	-	-
กรองเร็ว	2.1	0.38876	2.5	1.7		1.1921	0.9967
วงแหวน	1.8	0.81738	2.7	1.0		1.1708	0.9996
ยืดหยุ่น	2.5	1.02735	3.5	1.4		0.9509	0.9992

Anova: Two-Factor Without Replication $\alpha = 0.05$ (P-value < α = ความขุ่นของน้ำที่กรองได้ แตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่)

ตารางที่ 1

เปรียบเทียบข้อมูล ทางสถิติ
(การทดลองที่ 3.1)

นอกจากนี้ คุณภาพของน้ำที่กรองผ่านถึงกรองทั้งสามรูปแบบมีค่าได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู [13] และสามารถกล่าวได้ว่าการเติมอากาศภายในชั้นกรองไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (ตารางที่ 1) แต่กลับช่วยให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานขึ้น เนื่องจากอากาศทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัวค่าความขุ่นของชั้นสารกรองจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น อนุภาคความขุ่นจึงสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มากกว่าถังกรองทรายแบบกรองเร็วซึ่งอนุภาคความขุ่นสะสมอยู่ที่บริเวณด้านบนของชั้นสารกรองเป็นส่วนใหญ่ แสดงดังรูปที่ 3 ข

การเติมอากาศภายในชั้นกรองส่งผลกระทบต่ออัตราการกรอง เนื่องจากอากาศที่ลอยขึ้นสู่ด้านบนมีทิศทางการเคลื่อนที่ด้านทวนต่อการไหลของน้ำ อัตราการกรองจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 3 ค และตารางที่ 1 การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน อากาศมีส่วนช่วยให้เกิดการขัดสีกันของสารกรอง ทำให้เวลาที่ใช้ในการล้างย้อนมีค่าลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความขุ่นของน้ำล้างย้อนที่เวลาการล้างย้อน 10 นาที [14] พบว่าน้ำล้างย้อนของถังกรองทรายแบบกรองเร็วที่ใช้การล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 20 เอ็นทียู สำหรับน้ำล้างย้อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่นที่ใช้การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันมีค่าเท่ากับ 20 เอ็นทียู จะใช้เวลาเพียง 11 และ 4 นาที ตามลำดับ โดยสามารถใช้หัวเติมอากาศอันเดียวกันกับที่ใช้ในการเติมอากาศระหว่างที่ทำการกรอง จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศสำหรับการล้างย้อนเพิ่มเติม ทำให้ประสิทธิภาพการล้างย้อนเพิ่มสูงขึ้น [8] แสดงดังรูปที่ 3 ง โดยสรุป การเติมอากาศภายในชั้นกรองจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองและมีความน่าสนใจที่จะศึกษารูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมต่อไป

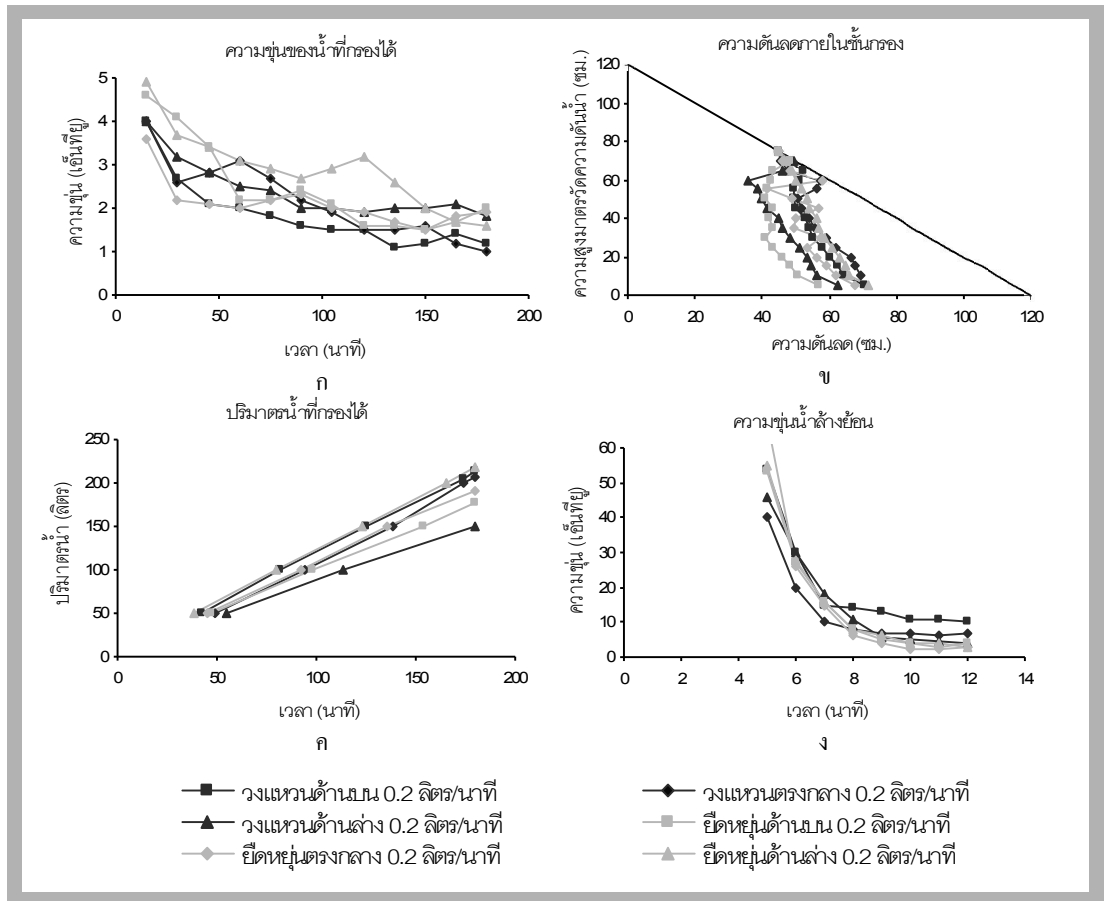
3.2 ศึกษาผลกระทบจากตำแหน่งการเติมอากาศ

รูปที่ 4 แสดงการศึกษผลกระทบจากตำแหน่งการเติมอากาศ โดยเริ่มเดินระบบถังกรองทรายแบบเติมอากาศ โดยใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่นที่ตำแหน่งด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อวินาที โดยควบคุมระดับน้ำเหนือสารกรอง เก็บข้อมูลตัวแปรที่

ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา

รูปที่ 4

การศึกษาผลกระทบจาก
ตำแหน่งของอุปกรณ์เติม
อากาศ



จากผลการทดลองในรูปที่ 4 ที่มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนกล่าวได้ว่าตำแหน่งของการเติมอากาศเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของถังกรองทรายแบบเติมอากาศ โดยการเลือกใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นดีที่สุดเนื่องจากเกิดการสะสมของอากาศภายในชั้นกรองมากที่สุดทำให้อัตราการกรองมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นอนุภาคความขุ่นจึงมีโอกาสติดค้างอยู่ในชั้นกรองได้มากขึ้น แต่ก็ส่งผลต่ออัตราการกรองที่มีค่าต่ำทำให้ปริมาตรน้ำที่กรองได้มีค่าลดลง และเกิดการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองมากที่สุดเนื่องจากการสะสมอนุภาคความขุ่นและอากาศไว้ภายในชั้นสารกรองจำนวนมาก การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่อัตราการกรองและปริมาตรน้ำที่กรองได้มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรอง แต่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยและเกิดการสูญเสียความดันภายในชั้นกรองน้อยกว่าเนื่องจากการสะสมของอากาศภายในชั้นกรองน้อยกว่า (รูปที่ 4 ก-ค และตารางที่ 2)

ความชื้นของน้ำที่กรองได้ (เอ็นทียู)						อัตราการกรอง (รูปที่ 4 ค)	
รูปแบบ	Average	SD	Max	Min	P-value*	Slope (L/min)	R ²
รวม	2.3	0.857568	3.2	1.5	2.96381E-08	-	-
วงแหวน(บน)	1.8	0.817378	2.7	1.0		1.1708	0.9996
วงแหวน(กลาง)	2.2	0.888436	3.1	1.3		1.1995	0.998
วงแหวน(ล่าง)	2.4	0.654298	3.0	1.7		0.7986	0.9983
ยืดหยุ่น(บน)	2.5	1.027353	3.5	1.4		0.9509	0.9992
ยืดหยุ่น(กลาง)	2.1	0.523971	2.6	1.6		1.0603	0.9989
ยืดหยุ่น(ล่าง)	2.9	0.909004	3.8	2.0		1.1857	0.9999

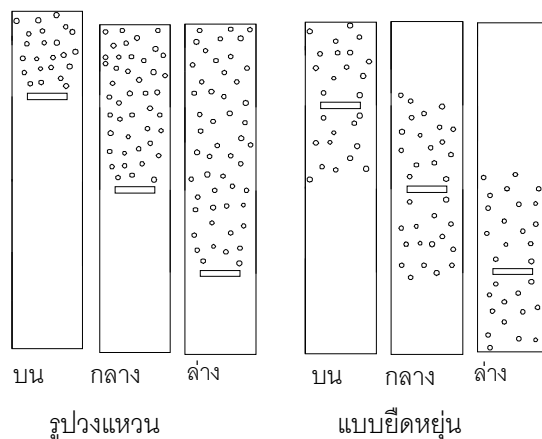
* Anova: Two-Factor Without Replication $\alpha = 0.05$ (P-value < α = ความชื้นของน้ำที่กรองได้ แตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่)

ตารางที่ 2

เปรียบเทียบข้อมูลทางสถิติ
(การทดลองที่ 3.2)

เมื่อพิจารณาผลจากการล้างย้อนน้ำด้วยและอากาศพร้อมกัน พบว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนลงได้มากที่สุด ที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านบนของชั้นกรองมีค่ารองลงมาตามลำดับ เนื่องจากการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองทำให้เกิดแรงเฉือนและการขัดสีของสารกรองในขณะที่อากาศลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองได้มากกว่าการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรอง โดยแรงเฉือนของน้ำและอากาศขณะทำการล้างย้อนทำให้เกิดการขัดสีของสารกรองมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการล้างย้อนจึงมีค่าลดลงแสดงดังรูปที่ 4 ง

สำหรับการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นพบว่า อุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่นซึ่งมีทิศทางการปล่อยอากาศแบบรอบทิศทางซึ่งแตกต่างจากอุปกรณ์เติมอากาศแบบวงแหวนที่กล่าวถึงข้างต้น แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5

ลักษณะการปล่อย อากาศที่
แตกต่างกันของหัวเติม
อากาศทั้งสองรูปแบบ

ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นเข้าสู่สภาวะคงที่ได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น เนื่องจากแรงดันอากาศถูกกระจายไปทั่วทุกทิศทางรอบหัวเติมอากาศ จึงทำให้ชั้นกรองเกิดความปั่นป่วนน้อย โดยการเติมอากาศที่ตำแหน่งตรงกลางของชั้นกรองทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นมีค่าสูงที่สุด ที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของชั้นกรองมีค่ารองลงมาและมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4 ก และตารางที่ 2 นอกจากนี้ ตำแหน่งการเติมอากาศมีผลกระทบกับการสูญเสียความดัน

ภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อย โดยที่อัตราการกรองที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านล่างของชั้นกรองมีค่ามากที่สุด เนื่องจากมีอากาศสะสมอยู่ภายในชั้นกรองเพียงเล็กน้อยและมีอากาศบางส่วนไหล วนออกมา กับน้ำที่กรองได้ ที่ตำแหน่งตรงกลางและด้านบนมีค่ารองลงมา แสดงดังรูปที่ 4 ข – ค และตารางที่ 2

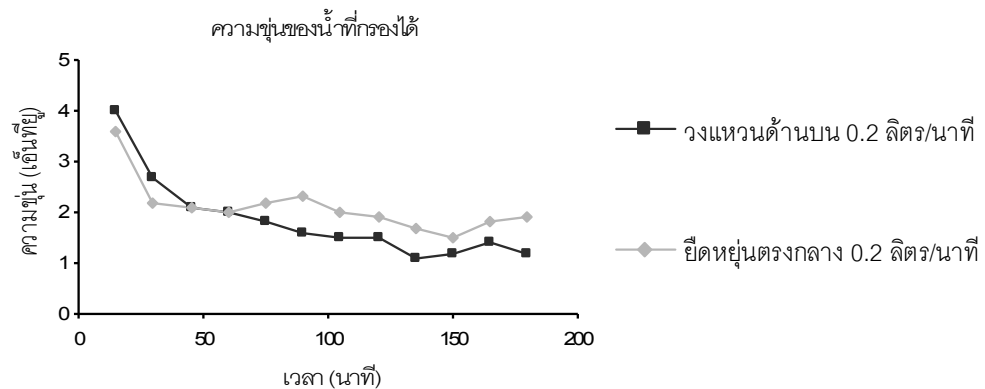
นอกจากนี้ ลักษณะการปล่อยอากาศแบบรอบทิศทางส่งผลต่อการล้างย้อนถึงกรอง โดยทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ตำแหน่งการเติมอากาศใดๆ มีค่าลดลงใกล้เคียงกัน (โดยเฉลี่ย 7.2 นาที ที่ความชุ่มน้ำล้างย้อน 20 เอ็นทียู) เนื่องจากลักษณะของหัวเติมอากาศดังกล่าว สามารถกระจายอากาศไปได้ทั่วทั้งชั้นกรอง ตำแหน่งของการเติมอากาศจึงมีผลกระทบกับการล้างย้อน ถึงกรองเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอุปกรณ์แบบวงแหวน (โดยเฉลี่ย 9.2 นาที ที่ความชุ่มน้ำล้างย้อน 20 เอ็นทียู) แสดงดังรูปที่ 4 ง

3.3 ศึกษาผลกระทบจากอัตราการเติมอากาศ

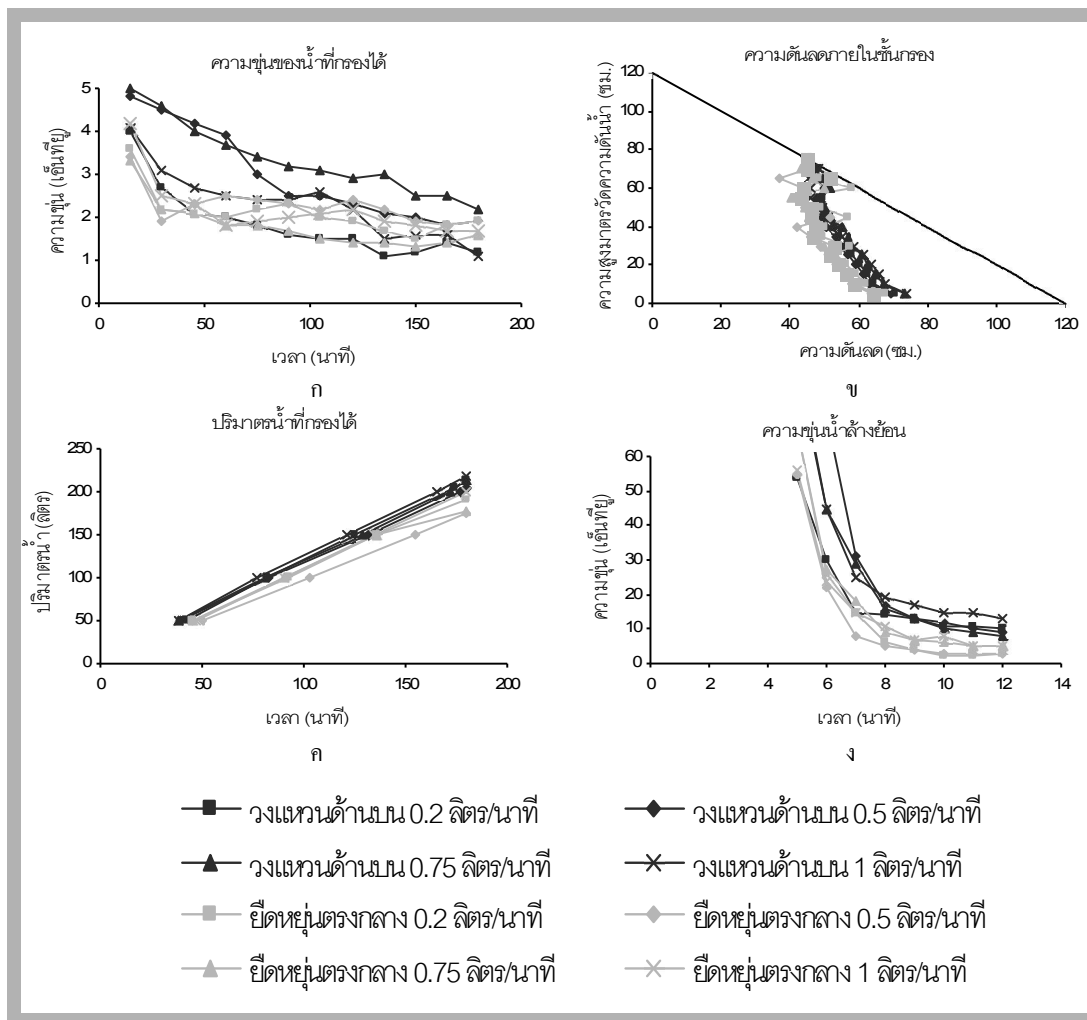
รูปที่ 6 แสดงความชุ่มของน้ำที่กรองได้จากถังกรองแบบเติมอากาศ โดยรูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมจะพิจารณาจากคุณภาพน้ำที่ถังกรองผลิตได้และอัตราการเติมอากาศที่น้อยที่สุด ดังนั้นการ เลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่นจึงควรติดตั้งที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลาง ของชั้นกรองตามลำดับ

รูปที่ 6

รูปแบบการเติม อากาศที่ เหมาะสมเมื่อเลือกใช้ อุปกรณ์เติมอากาศรูปวง แหวนและแบบยืดหยุ่น



รูปที่ 7 แสดงการศึกษผลกระทบจากอัตราการเติมอากาศ โดยเริ่มเดินระบบถังกรองทรายแบบเติม อากาศ โดยใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่นที่ตำแหน่งการเติมอากาศที่เหมาะสมจากการ ทดลองที่ผ่านมา ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที โดยควบคุมระดับน้ำเหนือ สารกรอง เก็บข้อมูลตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา



รูปที่ 7

การศึกษาผลกระทบจาก
อัตราการเติมอากาศ

จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนอัตราการเติมอากาศพบว่า ค่าที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อตัวแปรที่ทำการศึกษาเพียงเล็กน้อย ในขณะที่เป็นลักษณะการปล่อยอากาศที่แตกต่างกันจากหัวเติมอากาศทั้งสองรูปแบบ (รูปวงแหวนและแบบยึดหยุ่น) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแตกต่างกัน โดยหัวเติมอากาศแบบยึดหยุ่นทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในชั้นกรองน้อยกว่า เนื่องจากฟองอากาศถูกแบ่งให้กระจายออกรอบหัวเติมอากาศแสดงดังรูปที่ 5 แรงดันของฟองอากาศจึงมีค่าน้อย ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นมีค่าค่อนข้างคงที่ อย่างไรก็ตาม แรงดันของฟองอากาศที่มีค่าน้อยกลับทำให้ประสิทธิภาพการกระจายอนุภาคความชื้นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าชั้นสารกรองมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับหัวเติมอากาศรูปวงแหวนที่แรงดันของฟองอากาศมีทิศทางพุ่งขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรองเพียงทิศทางเดียว

ตารางที่ 3

เปรียบเทียบข้อมูลทางสถิติ (การทดลองที่ 3.3)

ความชื้นของน้ำที่กรองได้ (เอ็นทียู)						อัตราการกรอง (รูปที่ 7 ค)	
รูปแบบ	Average	SD	Max	Min	P-value*	Slope (L/min)	R ²
รวม	2.3	0.88031	3.2	1.5	1.18E-18	-	-
วงแหวน (0.2)	1.8	0.817378	2.7	1		1.1708	0.9996
วงแหวน (0.5)	3	1.094165	4.1	1.9		1.0834	0.9997
วงแหวน (0.75)	3.3	0.853291	4.2	2.5		1.1299	0.999
วงแหวน (1)	2.3	0.812217	3.1	1.5		1.1744	0.9995
ยี่ดหุ่ย่น (0.2)	2.1	0.523971	2.6	1.6		1.0603	0.9989
ยี่ดหุ่ย่น (0.5)	2.3	0.427112	2.7	1.8		0.9544	1
ยี่ดหุ่ย่น (0.75)	1.8	0.553433	2.3	1.2		0.9565	0.985
ยี่ดหุ่ย่น (1)	2.2	0.68374	2.9	1.5		1.126	0.9999

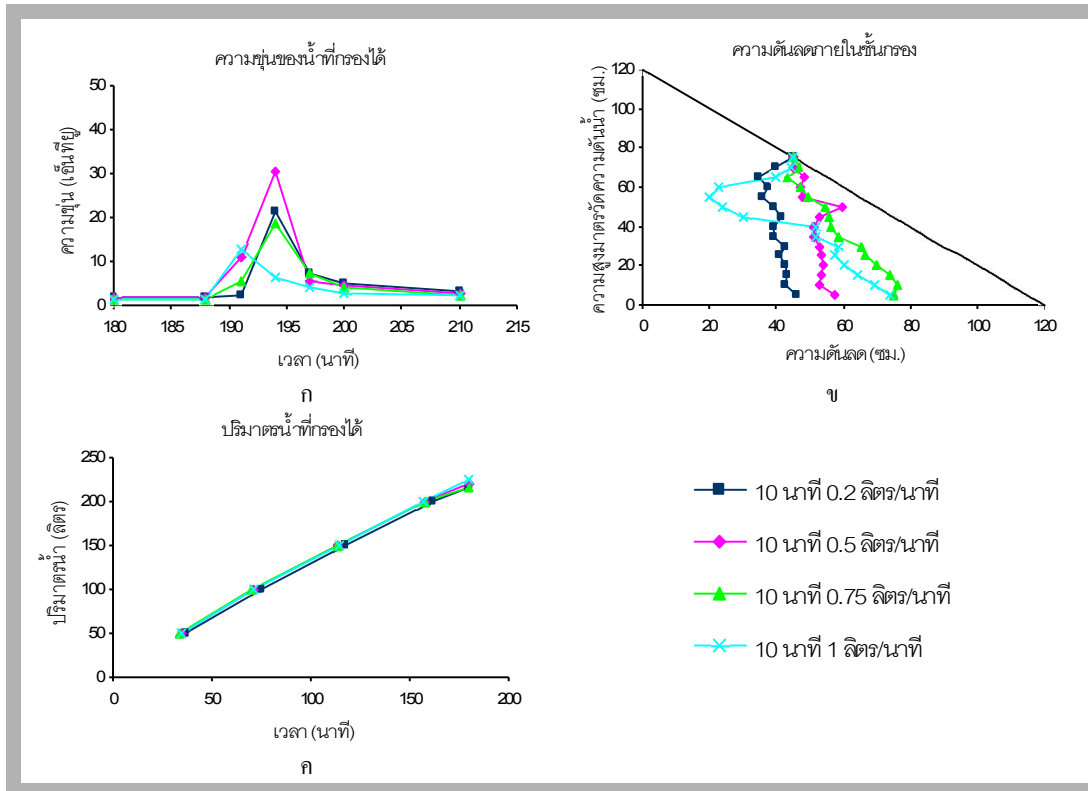
* Anova: Two-Factor Without Replication $\alpha = 0.05$ (P-value < α = ความชื้นของน้ำที่กรองได้ แตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่)

นอกจากนี้ หัวเดิมอากาศแบบยี่ดหุ่ย่นทำให้อัตราการกรองเฉลี่ยและอนุภาคความชื้นหลุดเข้าไปกระจายสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มีค่าน้อยกว่าหัวเดิมอากาศรูปวงแหวน เนื่องจากลักษณะการปล่อยอากาศแบบรอบทิศทาง ทำให้มีโอกาสที่ฟองอากาศจะติดค้างอยู่ภายในชั้นกรองได้มากกว่า ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่กรองได้ลดลงตามไปด้วย โดยลักษณะการปล่อยอากาศที่แตกต่างกันส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน เนื่องจากฟองอากาศจากหัวเดิมอากาศแบบยี่ดหุ่ย่นบางส่วนที่พุ่งออกทางด้านล่างของหัวเดิมอากาศช่วยให้เกิดการขัดสีกันของสารกรองบริเวณด้านล่างของหัวเดิมอากาศมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้หัวเดิมอากาศรูปวงแหวน แสดงดังรูปที่ 7 ก – ง และตารางที่ 3

3.4 ศึกษาผลกระทบจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch)

จากการทดลองที่ผ่านมาข้างต้น การเติมอากาศตลอดเวลาขณะทำการกรองมีข้อเสียประการสำคัญคือ ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าอย่างมาก ซึ่งจะทำให้ถังกรองแบบเติมอากาศมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง ดังนั้นในส่วนนี้จะทำการศึกษาแนวทางการเติมอากาศแบบกะเมื่อถังกรองเกิดการอุดตันเพื่อทำให้อนุภาคความชื้นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของสารกรองกระจายตัวออกและสามารถเคลื่อนตัวลงไปสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มากขึ้น และช่วยลดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศในท้ายที่สุด โดยในช่วงที่ทำการเติมอากาศถังกรองจะมีการทำงานเหมือนกับการล้างย้อนพร้อมกับการกรอง ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้หัวเดิมอากาศรูปวงแหวนและทำการเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง เนื่องจากเป็นรูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสม โดยแรงดันของฟองอากาศสามารถทำให้อนุภาคความชื้นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองกระจายตัวออกได้มากที่สุด โดยใช้ระยะเวลาในการเติมอากาศ 10 นาที ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5, 0.75 และ 1 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ เก็บข้อมูลตัว

แปรที่ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา



รูปที่ 8

การศึกษาลักษณะของ
รูปแบบการเติมอากาศ
แบบกะ (Batch)

จากผลการทดลองพบว่า การเติมอากาศแบบกะ (batch aeration) ภายในถังกรองแบบกรองตรง ทำให้ความเข้มข้นของน้ำที่กรองได้ในช่วงตั้งแต่เริ่มทำการเติมอากาศไปจนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที มีคุณภาพไม่ได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความเข้มข้นไม่เกิน 5 เอ็นทียู โดยหลังจากเวลาดังกล่าวน้ำที่กรองได้จึงมีค่าความเข้มข้นมาตรฐานการผลิตน้ำประปาอีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 8 ก และตารางที่ 4 โดยเป็นที่น่าสนใจว่าช่วงเวลาคุณภาพน้ำไม่ผ่านมาตรฐานจะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกระยะเวลาการเติมอากาศ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 9 – 15 นาที หลังจากทำการเติมอากาศ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจอธิบายได้โดยเมื่อเริ่มทำการเติมอากาศทำให้อัตราการกรองที่มีค่าลดลงอย่างมากในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตันกลับมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าชั้นกรองบริเวณด้านล่างมีอนุภาคความเข้มข้นสะสมอยู่เพียงเล็กน้อย [7] ดังนั้นเมื่อทำการเติมอากาศเพื่อกระจายอนุภาคความเข้มข้นที่สะสมอยู่บริเวณด้านบนของสารกรองออกไป โดยที่อัตราการกรองที่เกิดขึ้นนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับอัตราการกรองก่อนหน้าที่จะเกิดการอุดตัน (ประมาณ 4 เมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งสอดคล้องกับการที่อนุภาคความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง (ส่วนที่หลุดปนมากับน้ำที่กรองได้) จะใช้เวลาในการไหลผ่านชั้นกรองหนา 70 เซนติเมตร ปนออกมาพร้อมกับน้ำที่กรองได้อยู่ในช่วง 9 – 15 นาที (ความเร็วการกรอง 4 เมตรต่อชั่วโมง \times ระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา 10.5 นาที = ระยะทางที่น้ำไหลผ่านชั้นกรอง 0.7 เมตร)

ตารางที่ 4

เปรียบเทียบข้อมูลทาง
สถิติ (การทดลองที่ 3.4)

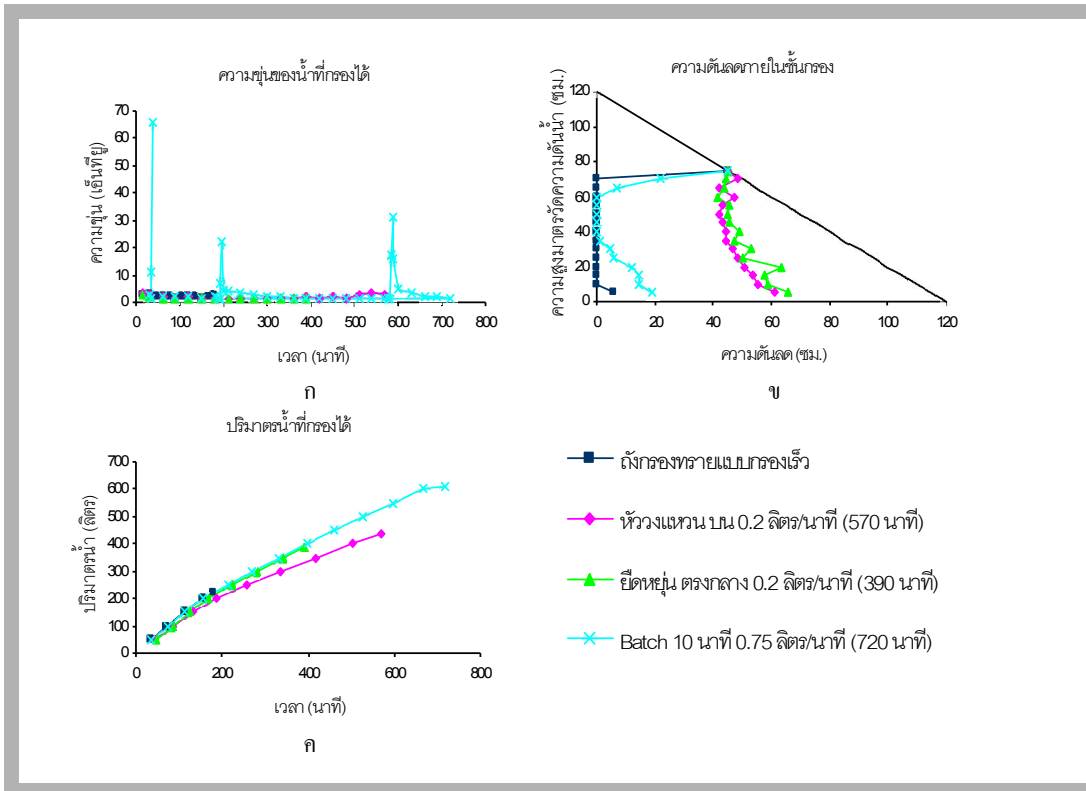
ความชื้นของน้ำที่กรองได้ (เอ็นทียู)									อัตราการกรอง (รูปที่ 8 ค)			
รูปแบบ	ไม่มีการเติมอากาศ				เติมอากาศ				P-value*	Slope (L/min)	R ²	
	Average	SD	Max	Min	Average	SD	Max	Min	4.99E-11			
รวม	2.2	0.62	2.9	1.6	6.9	7.23	14.1	-0.3			-	-
แบบกะ (0.2)	2.3	0.58	2.9	1.7	6.7	7.41	14.1	-0.7			1.1578	0.9972
แบบกะ (0.5)	2.6	0.63	3.2	2	9.4	10.86	20.2	-1.5			1.1702	0.9965
แบบกะ (0.75)	2.1	0.5	2.6	1.6	6.6	6.18	12.8	0.4			1.1467	0.995
แบบกะ (1)	2	0.68	2.7	1.3	5	4.19	9.1	0.8			1.198	0.9984

* Anova: Two-Factor Without Replication $\alpha = 0.05$ (P-value < α = ความชื้นของน้ำที่กรองได้ แตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่)

ดังนั้น เราจึงสามารถทำนายระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบประปาแบบกรองโดยตรงและเป็นแนวทางในการใช้งานถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (batch) ทั้งนี้ การสูญเสียความดันภายในชั้นกรองหลังจากการเติมอากาศจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการเติมอากาศและอัตราการเติมอากาศ เนื่องจากการขยายตัวของชั้นสารกรองมีค่าแปรผันตามอัตราการเติมอากาศและเวลาในการเติมอากาศที่นานเพียงพอจะทำให้อนุภาคความชื้นสามารถหลุดลงมาสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มากขึ้น [7] แสดงดังรูปที่ 8 ข โดยที่อัตราการกรองในช่วงที่ไม่มีการเติมอากาศมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการกรองของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวถังกรองทั้งสองรูปแบบมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 8 ค และตารางที่ 4

3.5 การดำเนินการระยะยาว

จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา ถังกรองทรายแบบเติมอากาศตลอดเวลาและแบบกะ (batch) มีระยะเวลาการทำงานของถังกรองเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมอากาศทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวจึงสามารถใช้ประโยชน์จากความหนาของชั้นกรองได้มากขึ้น โดยในสภาวะการเติมอากาศตลอดเวลาที่เหมาะสมเมื่อเลือกใช้หัวเติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่น ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบนและตรงกลางของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที และการเติมอากาศแบบกะ (batch) ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบนของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที สภาพการทำงานข้างต้นจะได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเดินระบบการกรองระยะยาวเพื่อหาระยะเวลาการทำงานของถังกรองและปริมาณน้ำที่กรองได้ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9

การศึกษาลักษณะการ
การดำเนินการระยะยาว

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ถังกรองทรายแบบเดิมอากาศตลอดเวลาด้วยหัวเดิมอากาศรูปวงแหวนและแบบยี่ตหยุ่นมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 570 และ 390 นาทีก ตามลำดับ และการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ทำให้ถังกรองที่เกิดการอุดตันสามารถกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง โดยทำให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 720 นาทีก ปริมาณน้ำที่กรองได้รวม 587 ลิตร แสดงดังรูปที่ 9 ก โดยที่คุณภาพน้ำที่กรองผ่านถังกรองแบบเดิมอากาศนั้นได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าแปรผกผันกับอัตราการกรอง ในขณะที่อัตราการกรองมีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรองเนื่องจากอนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง น้ำจึงไหลผ่านชั้นสารกรองได้ช้าลง แสดงดังรูปที่ 9 ค และตารางที่ 5

ความขุ่นของน้ำที่กรองได้ (เอ็นทียู)						อัตราการกรอง (รูปที่ 9 ค)	
รูปแบบ	Average	SD	Max	Min	P-value*	Slope (L/min)	R ²
รวม	2	0.739354	2.7	1.2	0.0408631	-	-
วงแหวน	2	0.71985	2.7	1.2		0.7133	0.985
ยี่ตหยุ่น	1.7	0.463444	2.1	1.2		0.9775	0.9923
กะ	2.1	0.961543	3.1	1.2		0.8203	0.9888
กรองเร็ว	2.1	0.388763	2.5	1.7		1.1921	0.9967

* Anova: Two-Factor Without Replication $\alpha = 0.05$ (P-value < α = ความขุ่นของน้ำที่กรองได้ แตกต่างกันอย่าง

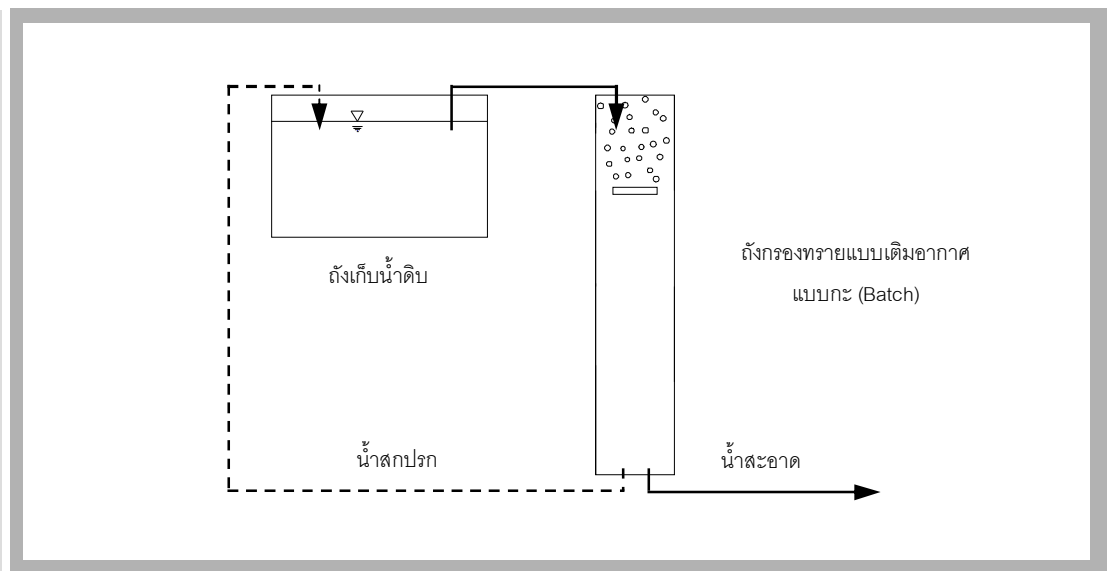
ตารางที่ 5

เปรียบเทียบข้อมูลทาง
สถิติ (การทดลองที่ 3.5)

การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองเมื่อทำการเติมอากาศตลอดเวลาด้วยหัวเติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่นทำให้อนุภาคความขุ่นหลุดเข้าไปกระจายสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้ใกล้เคียงกัน โดยอัตราการกรองเฉลี่ยของหัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นมีค่ามากกว่า เนื่องจากลักษณะการปล่อยอากาศแบบรอบทิศทาง ทำให้มีโอกาสที่ฟองอากาศจะติดค้างอยู่ภายในชั้นกรองได้มากกว่า แต่แรงดันของฟองอากาศที่มีค่าน้อยส่งผลให้ปริมาตรน้ำที่กรองได้มีค่าลดลงตามไปด้วย (เกิดการอุดตันเร็วกว่า) โดยที่การเติมอากาศแบบกะทำให้การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าลดลงเมื่อทำการเติมอากาศ เนื่องจากชั้นกรองเกิดการขยายตัวอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรองจึงหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นกรอง แสดงดังรูปที่ 9 ข ทำให้มีระยะเวลาการทำงานและประสิทธิภาพการขึ้นความหนาของชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น โดยสามารถทำการเติมอากาศแบบกะได้ทั้งหมด 3 รอบการทำงาน เนื่องจากในแต่ละรอบการทำงานอนุภาคความขุ่นสามารถหลุดเข้ามาสะสมภายในชั้นกรองได้มากขึ้น จนกระทั่งในรอบการทำงานที่ 3 อนุภาคความขุ่นสะสมจนเต็มบริเวณเหนือจุดเติมอากาศ การเติมอากาศในรอบการทำงานดังกล่าวจึงไม่สามารถทำให้อนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรองกระจายออกได้ (เกิดการอุดตัน) โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การเติมอากาศตลอดเวลา อย่างไรก็ตามการเติมอากาศแบบกะในช่วงตั้งแต่เริ่มทำการเติมอากาศจนกระทั่งเวลาผ่านไป 15 นาที น้ำที่กรองได้จะมีค่าความขุ่นเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด โดยหลังจากเวลาดังกล่าวน้ำที่กรองได้จึงกลับมามีคุณภาพได้มาตรฐานอีกครั้ง ดังนั้นในช่วงเวลาดังกล่าวจึงควรมีระบบเวียนน้ำที่ไม่ได้มาตรฐานกลับไปยังถังเก็บน้ำดิบเพื่อทำการกรองใหม่อีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 10

รูปที่ 10

ระบบการทำงานของถังกรองแบบเติมอากาศแบบกะ



3.6 ประสิทธิภาพการใช้ความหนาของชั้นกรอง

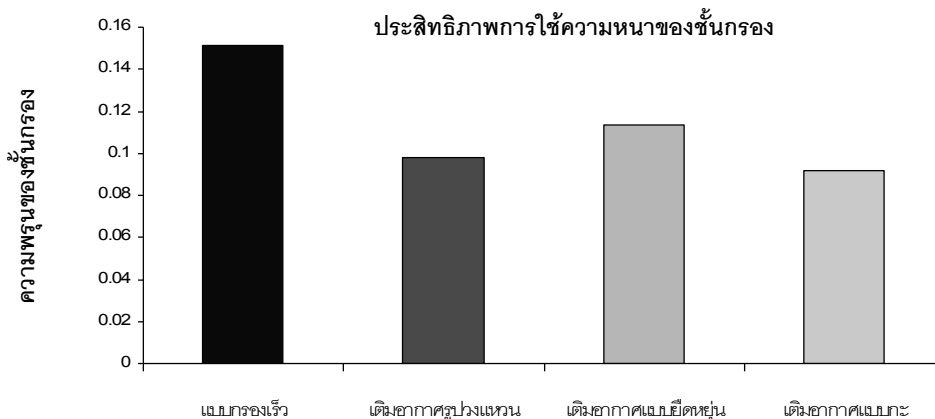
การวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้กระบวนการเติมอากาศเข้ามาช่วยทำให้ชั้นสารกรองขยายตัว โดยคาดว่า การเติมอากาศจะทำให้ความพรุนของชั้นกรองมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นกรอง โดยที่ถังกรองทรายแบบกรองเร็วมักมีความพรุน (ε) เท่ากับ 0.45 [1] เมื่อทำการกรองความพรุนจะมีค่าลดลงตามเวลาการกรอง เนื่องจากเกิดการสะสมของอนุภาคความขุ่นภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ความดันลด (Δp) และ ความเร็วการกรอง (V_0) มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ใช้คำนวณหาการสูญเสียความดันของชั้นกรอง คือ

Ergun's equation [13]

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

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

เมื่อพิจารณาสมการคำนวณหาการสูญเสียความดันของชั้นกรองพบว่า ตัวแปรที่มีค่าคงที่ในงานวิจัยนี้ คือความหนาของชั้นกรอง 70 เซนติเมตร ($L = 70$ เซนติเมตร) ทารายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 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 [13] โดยที่ความดันลด (Δp) ความพรุน (ε) และ ความเร็วการกรอง (V_0) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการกรอง (จากการทดลอง) เนื่องจากการสะสมของอนุภาคความขุ่นภายในชั้นกรองมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง โดยรูปที่ 11 แสดงการเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวที่เวลาการกรองต่างๆ โดยใช้ข้อมูลผลการดำเนินการระยะยาวของรูปแบบการกรองที่ดีที่สุดในห้องที่ผ่านมา เพื่อศึกษากลไกการกรองที่เกิดขึ้นกับถังกรองทรายแบบเติมอากาศในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 11

ประสิทธิภาพการใช้ความ
หนาของชั้นกรอง

จากการเปรียบเทียบความพรุนของสารกรองของถังกรองรูปแบบต่างๆ โดยใช้ข้อมูลความดันลดภายในชั้นกรอง (Δp) และความเร็วการกรอง (V_0) ที่เวลาสุดท้ายของการกรองเพื่อหาค่าความพรุน (ε) ตามสมการของ Ergun [13] แสดงดังสมการที่ (1) พบว่า ความพรุนของสารกรองของถังกรองทรายแบบเติม

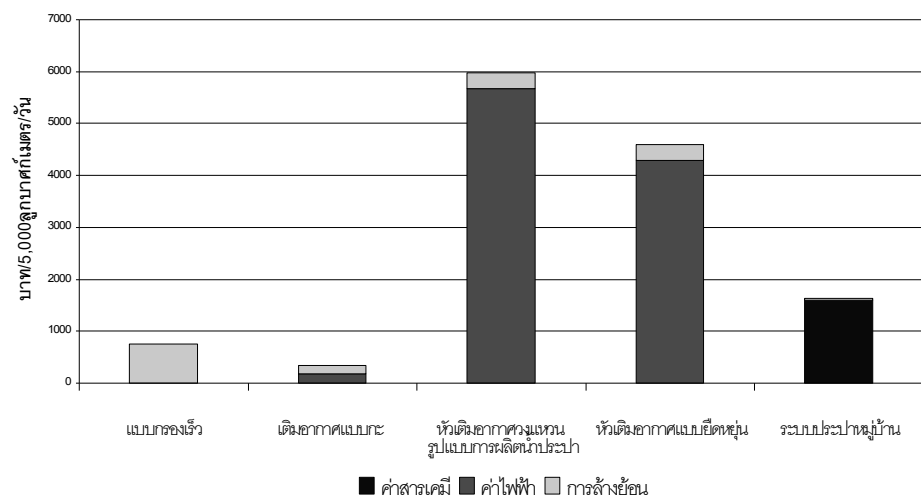
อากาศแบบกะ (batch) ที่เวลาสุดท้ายของการกรองมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (batch) ทำให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่านานที่สุด อนุภาคความขุ่นจึงถูกกับเก็บไว้ภายในชั้นกรองเป็นจำนวนมาก ทำให้ชั้นกรองมีความหนาแน่นมากขึ้นและความพรุนของสารกรองจึงมีค่าลดลงมากที่สุด [3] โดยความพรุนของสารกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่น และถังกรองทรายแบบกรองเร็วมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการใช้อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนทำให้เกิดการสะสมของอากาศภายในชั้นกรองน้อยกว่าการใช้อุปกรณ์เติมอากาศแบบยืดหยุ่น เมื่อทำการไล่อากาศออกจนหมดช่องว่างที่เคยมีฟองอากาศสะสมอยู่จึงกลายเป็นช่องว่างภายในชั้นกรอง ทำให้ความพรุนภายในชั้นกรองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ถังกรองทรายแบบกรองเร็วมีความพรุนภายในชั้นกรองที่เวลาการกรองสุดท้ายมากที่สุดแต่ไม่สามารถทำการกรองน้ำต่อไปได้ เนื่องจากอนุภาคความขุ่นสะสมอยู่ที่ผิวหน้าชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ทำให้ภายในชั้นกรองมีอนุภาคความขุ่นสะสมอยู่เพียงเล็กน้อย โดยผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ลดลงทำให้การกับเก็บอนุภาคความขุ่นภายในชั้นกรองมีค่าลดลง ความพรุนของชั้นกรองจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถัง แสดงดังรูปที่ 11

3.7 วิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย

รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบของระบบผลิตน้ำประปากับการผลิตน้ำประปาโดยการกรองโดยตรง (Direct Filtration) โดยใช้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศในรูปแบบที่ดีที่สุดในแต่ละการทดลอง โดยกำหนดอัตราการผลิตน้ำประปา 5,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน [15] เพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (Operational Cost เท่านั้น)

รูปที่ 12

วิเคราะห์และเปรียบเทียบ
ค่าใช้จ่ายการผลิต
น้ำประปา 5,000
ลูกบาศก์เมตรต่อวัน



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 แสดงดังรูปที่ 12
- การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ติดตั้งหัวเติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่น ทำให้มีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 5,976 และ 4,590 บาทต่อวัน ตามลำดับ เนื่องจากการเติมอากาศให้กับถังกรองตลอดเวลาและระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่าน้อย (8 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ) จึงต้องทำการล้างย้อนถังกรอง 3 และ 4 ครั้งต่อวันตามลำดับ ถึงแม้จะไม่มีค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน เนื่องจากการกรองโดยตรง แต่ปัญหาด้านค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าทำให้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศตลอดเวลาไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตน้ำประปา
- การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบกรองเร็วไม่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าขณะทำการกรองและสารเคมีได้ แต่ระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่าน้อย (3 ชั่วโมง) โดยจะต้องทำการล้างย้อนถังกรอง 8 ครั้งต่อวัน ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการล้างย้อนสูง (749 บาท/วัน) โดยอาจจะต้องการค่าแรงงานและเวลาในการล้างย้อนถังกรองเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานมีค่าสูงขึ้น
- การกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะมีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าต่ำและไม่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน เนื่องจากการกรองโดยตรงและการเติมอากาศในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตันเท่านั้น โดยมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองที่ยาวนานถึง 12 ชั่วโมง จึงทำการล้างย้อนถังกรองเพียง 2 ครั้งต่อวัน โดยมีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าเพียง 337 บาทต่อวัน ดังนั้นถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการผลิตน้ำประปามากที่สุด

IV. สรุป

การเปรียบเทียบการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็วกับถังกรองทรายแบบเติมอากาศพบว่าการเติมอากาศช่วยให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานขึ้น โดยที่อัตราการกรองมีค่าลดลงเล็กน้อยและน้ำที่กรองได้มีคุณภาพน้ำได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปา (ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู) การเติมอากาศภายในชั้นกรองจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มระยะเวลาการทำงานของถังกรองให้ยาวนานขึ้น โดยที่ประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของการเติมอากาศมากกว่าอัตราการเติมอากาศ โดยรูปแบบการทำงานที่เหมาะสมเมื่อทำการเติมอากาศตลอดเวลาด้วยอุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่น คือ การเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนและตรงกลางของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที ทำให้ให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 570 และ 390 นาที ตามลำดับ โดยการเลือกใช้หัวเติมอากาศแบบยืดหยุ่นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ อย่าง

รวดเร็ว เนื่องจากการกระจายฟองอากาศแบบรอบทิศทาง (ชั้นกรองเกิดความปั่นป่วนน้อย) แต่แรงดันของฟองอากาศที่มีค่าน้อยกลับทำให้ประสิทธิภาพการกระจายอนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าชั้นสารกรองมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับหัวเติมอากาศรูปวงแหวน การประยุกต์ใช้การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่หัวเติมอากาศด้านล่างช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างย้อนลงได้ โดยสามารถใช้หัวเติมอากาศอันเดียวกับการเติมอากาศขณะทำการกรอง การเติมอากาศแบบกะ (อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวน ที่ตำแหน่งบน) มีระยะเวลาการทำงานของถังกรอง 720 นาทีและช่วยให้ประสิทธิภาพการขึ้นความหนาของชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของน้ำที่ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาควรมีระบบเวียนน้ำกลับไปยังถังเก็บน้ำดิบเพื่อทำการกรองใหม่อีกครั้ง โดยที่ประสิทธิภาพการใช้ความหนาของชั้นกรอง การเติมอากาศแบบกะ (batch) ทำให้ความพรุนของสารกรองจะมีค่าลดลงเข้าไปใกล้ค่าศูนย์มากที่สุด การเติมอากาศตลอดเวลาด้วยหัวเติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่น และถังกรองทรายแบบกรองเร็วมีค่ารองลงมา ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้ความหนาของชั้นกรองที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมอากาศพร้อมกับการกรอง ดังนั้นการกรองโดยตรงด้วยถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะจึงมีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าต่ำและไม่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี โดยมีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้าเพียง 337 บาทต่อวัน ถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการผลิตน้ำประปา

V. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จากบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

บรรณานุกรม

- [1] มั่นสิน ตันทุลเวศน์, *วิศวกรรมการประปา*. เล่มที่ 2, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [2] วรากร ไฉ่เรียง, *วิศวกรรมเขื่อนดิน*. กรุงเทพฯ : รุ่งแสงการพิมพ์, 2542.
- [3] J. J. Lee, *et al.*, "Better understanding of the filtration characteristics in the flexible fibre filter module (3FM)," *Water Science & Technology*, vol. 55, no. 1-2, pp. 77-83, 2007.
- [4] A. Zouboulis, G. Traskas, and P. Samaras, "Comparison of single and dual media filtration in a full-scale drinking water treatment plant," *Desalination*, vol. 213, no. 1-3, pp. 334-342, 2007.
- [5] ไกรภพ ถึงแสง และวิชญ์ บุญทองอ่อน, *การศึกษากาการเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง*. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น : 2547.
- [6] M. F. Hamoda, I. Al-Ghusain, and N. Z. Al-Mutairi, "Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse," *Desalination*, vol. 164, no. 3, pp. 203-211, 2004.
- [7] วีระพันธ์ วัฒนวีรเดช, "การศึกษากาการกรองชนิดสารกรองเคลื่อนที่เพื่อบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ," *วิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2539.
- [8] D. G. Hemmings and C. S. B. Fitzpatrick, "Pressure signal analysis of combined water and air backwash of rapid gravity filters," *Water Research*, vol. 31, no. 2, pp. 356-361, 1997.
- [9] Western Virginia Water Authority Biological Aeration Filter, [Online]. Available: <http://www.roanokeva.gov/85256a8d0062af37/vwContentByKey/N2628V5C984PLESEN> [Accessed : Dec. 9, 2009]
- [10] Water Works Pump & Well, Inc. Aeration Filter, [Online]. Available: <http://www.waterworkspumpandwell.com/filters.html> [Accessed : Dec. 9, 2009]
- [11] W. L. McCabe, J. C. Smith, and P. Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [12] วิจารย์ ตันติธรรม, "การกำจัดความขุ่นโดยถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน," *วิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2536.
- [13] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water*. WHO Library Cataloguing-in-Publication, 2006.
- [14] G. M. Fair, J. C. Geyer, and A. D. Okun, *Water and Wastewater Engineering: Vol. 2, Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal*. New York: John Wiley & Sons, 1968.
- [15] การประปานครหลวง รายการคำนวณออกแบบระบบผลิตน้ำประปา, [Online]. Available: http://www.mwa.co.th/download/prd01/water_technology/pdf_Water_Treatment_Plant_Design2/wat_0011.pdf [Accessed : มกราคม 16, 2552]