วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การศึกษากระบวนการตกตะกอนของน้ำในโรงงานผลิตน้ำประปาต่อปริมาณการใช้พลังงาน

The Study on Clarified Procession of Water in Water Treatment Plant on Energy Consumption

วิวัฒน์ อ่อนนาคคล้ำ[1]* กิตติศักดิ์ คู่วรัญญู[1]

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73110

Wiwat Onnakklum[1]* Kittisak Khuwaranyou[1]

[1] Faculty of Engineering and Technology Industrial Silpakorn University, Muang, Nakorn Pathom 73110

* Corresponding author.

E-mail: wp_js38@hotmail.com; Telephone: 08 1432 2066

บทคัดย่อ

กระบวนการตกตะกอนเป็นกระบวนการกำจัดตะกอนและสารแขวนลอยที่ปะปนมากับน้ำดิบ บทความนี้จะศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงาน เพื่อนำไปกำหนดเป็นมาตรการประหยัดพลังงาน โดยปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงคือ ความขุ่นน้ำดิบในช่วง 26–40 NTU และอัตราการผลิตในช่วง 3.76–5.20 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ศึกษาถังตกตะกอน 2 ชนิดคือ ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนและชนิดหมุนเวียนตะกอน ผลการทดลองพบว่าความขุ่นน้ำดิบไม่ส่งผลต่อการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนอัตราการผลิตส่งผลต่อการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อัตราการผลิต 5.20 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีประหยัดพลังงานกว่าที่อัตราการผลิต 3.76 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนจะประหยัดพลังงานกว่าถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนร้อยละ 31–37 จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปปรับเปลี่ยนรูปแบบการอัตราการผลิตให้ใช้พลังงานน้อยที่สุด พบว่า สามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการตกตะกอนได้ประมาณร้อยละ 5.24 คิดเป็นมูลค่า 688,207 บาทต่อปี

คำสำคัญ

พลังงานจำเพาะ ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอน ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน กระบวนการผลิตน้ำประปา

Abstract

Clarification is the turbidity removal process of water treatment plant. The objective of this paper was to study the factors affecting on energy consumption in order to control energy saving strategy. These factors were raw water turbidity in the range of 26–40 NTU and production rate in the range of 3.76–5.20 m^3/sec. Clarifiers were sludge blanket and sludge recirculation clarifier. Experimental results found that the raw water turbidity was not significantly affect to energy consumption, while the production rate was significantly affect to energy consumption. Sludge blanket clarifier provided lower energy consumption than sludge recirculation clarifier about 31–37%. Subsequently, the operating pattern in

production rate can be arranged to decreased energy consumption. The results showed that it can be reduced about 5.24 % of energy saving of clarification process about 688,207 Baht per year.

Keywords

specific energy consumption, sludge blanket clarifier, sludge recirculation clarifier, water treatment process

1. บทนำ

การนำน้ำดิบจากธรรมชาติมาผ่านกระบวนปรับปรุงคุณภาพจนกระทั่งเป็นน้ำประปาที่สามารถนำมาใช้อุปโภคได้ตามบ้านเรือนได้นั้น ล้วนแล้วแต่ต้องใช้พลังงานเป็นตัวขับเคลื่อนให้กระบวนการสามารถดำเนินไปได้

กระบวนการผลิตน้ำประปา สามารถแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการสูบน้ำดิบ กระบวนการตกตะกอน กระบวนการกรองและกระบวนการสูบส่งน้ำ/สูบจ่ายน้ำได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับมาตรการประหยัดพลังงานเพื่อลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตน้ำประปาดังต่อไปนี้

กระบวนการสูบน้ำดิบ เป็นการใช้เครื่องสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำ สามารถประหยัดพลังงานได้โดยการใช้ระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เข้ามาควบคุมเพื่อปรับอัตราการสูบให้ได้เหมาะสมกับความต้องการ [1] และการเดินเครื่องสูบน้ำดิบในช่วง off peak ให้มีจำนวนเครื่องสูบน้ำและชั่วโมงการทำงานที่มากกว่า on peak โดยการใช้ถังเก็บน้ำใส เป็นตัวช่วยในการเก็บสะสมน้ำประปาในช่วง off peak ให้มีปริมาณมาก และจะเดินเครื่องสูบน้ำดิบให้น้อยลงในช่วง on peak ซึ่งสามารถช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าลงได้ [2]

กระบวนการตกตะกอน เป็นการผสมสารตกตะกอนเข้ากับน้ำดิบเพื่อให้ตะกอนเกิดการแยกชั้นออกจากน้ำใส โดยการควบคุม velocity gradient (G) เพื่อผสมน้ำดิบกับสารตกตะกอนให้มีความเหมาะสม จะสามารถควบคุมความขุ่นและลดการใช้พลังงานได้ [3]

กระบวนการกรองเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นสุดท้าย โดยการให้น้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนไหลผ่านชั้นของวัสดุ เพื่อดักจับตะกอนที่มีอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อวัสดุกรองถูกใช้งานเวลานาน จะต้องมีการล้างย้อน เพื่อทำความสะอาดวัสดุกรอง การใช้พลังงานจึงขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งในการล้างย้อนบ่อกรอง และวิธีในการล้างย้อนบ่อกรอง

กระบวนการสูบส่ง/สูบจ่ายน้ำ เป็นการใช้เครื่องสูบน้ำประปาที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วส่งผ่านท่อน้ำไปยังผู้ใช้น้ำและสถานีสูบจ่ายน้ำในแต่ละพื้นที่ สามารถประหยัดพลังงานได้โดยการใช้ระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เข้ามาปรับอัตราการจ่ายน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการ [4,5] และโปรแกรม EPANET เข้ามาควบคุมเพื่อปรับอัตราการสูบให้ได้เหมาะสมกับความต้องการในแต่ช่วงเวลาสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าได้ [6–8]

จากข้อมูลข้างต้นจะพบว่า กระบวนการสูบส่งน้ำ/สูบจ่ายน้ำ/สูบน้ำดิบ นั้นมีงานวิจัยด้านมาตรการประหยัดพลังงานออกมาหลายงาน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีการใช้พลังงานคิดเป็นร้อยละ 70–80 ของการใช้พลังงานทั้งโรงงาน หากควบคุมกระบวนนี้จะสามารถประหยัดพลังงานได้มาก จึงทำให้ไม่มีงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการตกตะกอนและการกรองออกมามากนัก ทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่า กระบวนการตกตะกอนเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพกระบวนการแรกที่จะต้องรองรับต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำดิบที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล [9] อีกทั้งยังต้องรองรับต่ออัตราการผลิตที่เปลี่ยนแปลงให้สอดคล้องกับความต้องการใช้ประปาอีกด้วย

ถังตกตะกอน เป็นเครื่องจักรสำหรับตกตะกอนสิ่งเจือปนที่มากับน้ำดิบ โดยการเติมสารตกตะกอนเข้ากับน้ำดิบ และทำการผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยการควบคุมค่า G (velocity gradient) ให้มีความเหมาะสมเพื่อควบคุมความขุ่นน้ำหลังตกตะกอน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาถึงกระบวนการทำงานและการใช้พลังงานของถังตกตะกอน ชนิดชั้นตะกอนและชนิดหมุนเวียนตะกอน เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลความแตกต่างในการใช้พลังงานรวมไปถึงกำหนดเป็นมาตรการในการจัดการด้านพลังงาน เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า

2. วิธีการวิจัย

2.1 น้ำดิบ

น้ำดิบจากเขื่อนแม่กลอง ส่งผ่านคลองประปาท่าม่วง ส่งผ่านประตูน้ำบางเลน เข้าสู่คลองประปาฝั่งตะวันตกมาถึงจุดรับน้ำดิบ หน้าโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ เป็นระยะทาง 106 กิโลเมตร ความขุ่นน้ำดิบเมื่อมาถึงหน้าจุดรับน้ำดิบจะมีค่าอยู่ในช่วง 20–100 Nephelometric turbidity unit (NTU) (NTU คือ หน่วยวัดความขุ่นด้วยวิธี Nephelometric)

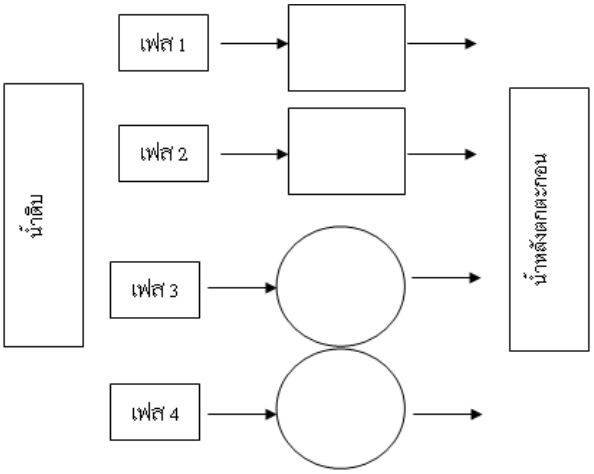
2.2 การผลิตน้ำประปา

การประปานครหลวงเป็นรัฐวิสาหกิจที่มีหน้าที่ในการผลิตน้ำประปา เพื่อรองรับต่อความต้องการใช้น้ำประปาของประชาชนในพื้นที่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ โดยโรงงานผลิตน้ำประปาจำนวน 4 โรงงาน โดยมีโรงงานที่สำคัญคือ โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ ซึ่งมีกำลังการผลิตสูงสุด 1.8 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน แบ่งการผลิตออกเป็น 4 เฟส แต่ละเฟสสามารถรองรับอัตราการผลิตได้สูงสุด 5.20 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (m^3/sec.) แต่ละเฟสจะประกอบไปด้วยถังตกตะกอนจำนวน 2 ถัง โดยเฟส 1 และ 2 จะใช้ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอน ส่วนเฟส 3 และ 4 จะใช้ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 1

2.3 ถังตกตะกอน

ถังตกตะกอน เป็นเครื่องจักรสำหรับควบคุมความขุ่น

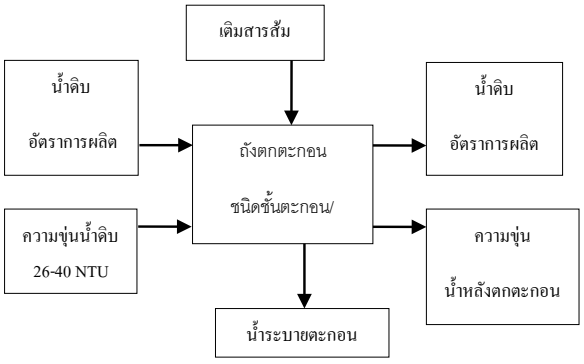
น้ำหลังตกตะกอนให้ไม่เกิน 10 NTU [10] โดยการเติมสารส้มและควบคุมค่า velocity gradient (G) และจะต้องทำงานภายใต้ความขุ่นน้ำดิบและอัตราการผลิตที่มีการ



รูปที่ 1 การผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์

☐ ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอน

○ ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน



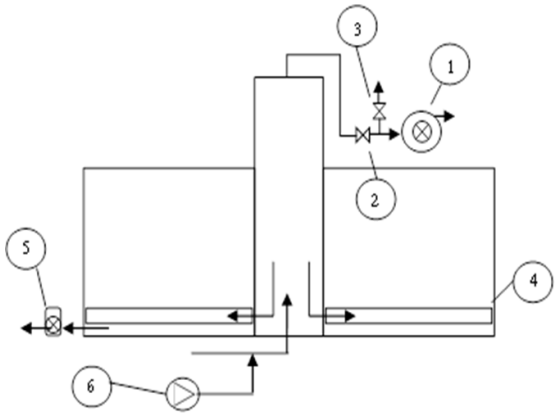
รูปที่ 2 การทำงานของถังตกตะกอน

เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2

สำหรับกระบวนการตกตะกอน ในโรงงานผลิตน้ำประปาในประเทศไทยจะนิยมใช้ ถังตกตะกอนชนิด solid contact ซึ่งมีใช้งานอยู่ 2 ประเภทคือ ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนและถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน

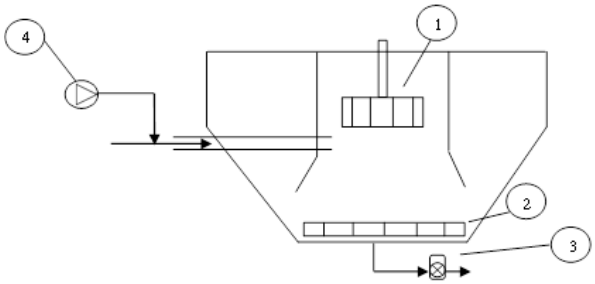
ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอน เป็นถังทรงสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) น้ำดิบที่ผสมสารส้มแล้วจะไหลเข้าสู่แกนกลางถังตกตะกอนบริเวณห้อง vacuum chamber โดยมี vacuum fan จะทำหน้าที่ยกมวลน้ำขึ้นไปตาม vacuum chamber โดยควบคุมระยะความสูงในการ



1. Vacuum fan 22 Kw
2. Butterfly valve
3. Actuator Butterfly valve
4. ท่อกระจายน้ำ
5. Submersible pump 22 Kw
6. Metering pump 1.5 kW

รูปที่ 3 อุปกรณ์ของถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอน



1. ใบกวน 22 kW
2. ใบกวาดตะกอน 2.2 kW
3. Submersible pump 22 kW
4. Metering pump 1.5 kW

รูปที่ 4 อุปกรณ์ของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน

ยก มวลน้ำและเวลาในการยกมวลน้ำด้วยวาล์วหมายเลข (2)

2) ปล่อยมวลน้ำลงมาโดยควบคุมเวลาในการปล่อยด้วยวาล์วหมายเลข (3)
3) น้ำดิบและสารส้มจะคลุกเคล้ากันและกระจายตัวไปตามท่อหมายเลข (4)
4) ตะกอนจะสะสมตัวเป็นชั้นของตะกอนขึ้นและทำหน้าที่เป็นชั้นสำหรับดักจับตะกอน จะมีแค่ส่วนที่เป็นน้ำใสเท่านั้นที่สามารถผ่านชั้นตะกอนได้ ส่วนที่เป็นตะกอนจะถูกระบายออกไป

ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน มีพื้นที่หน้าตัดรูปวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) น้ำดิบที่ผสมสารส้มแล้วจะไหลเข้าสู่แกนกลางถังตกตะกอนโดยมีใบกวนเป็นอุปกรณ์สำหรับผสมคลุกเคล้าจนน้ำส่วนที่ใสกับตะกอนแยกชั้นออกจากกัน
2) ส่วนให้น้ำใส ค่อย ๆ ไหลขึ้นมาอย่างช้า ๆ เพื่อให้มีเวลานานพอให้ตะกอนตกลงสู่ก้นถังตกตะกอน
3) ส่วนที่เป็นตะกอนจะถูกกวาด และระบายออกเพื่อกำจัดต่อไป

2.4 การเก็บข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาถึงผลของอัตราการผลิต ความขุ่นน้ำดิบ และชนิดของถังตกตะกอน เพื่อนำไปสร้างสมการพยากรณ์ปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอน โดยจะทำการเก็บข้อมูลในช่วงเดือน กรกฎาคม–ธันวาคม 2559 ซึ่งเป็นช่วงที่ความขุ่นน้ำดิบจะมีค่าอยู่ในช่วง 26–40 NTU โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

1) วัดค่าความขุ่นน้ำดิบจากแหล่งน้ำดิบ โดยใช้เครื่องวัดความขุ่นชนิด Nephelometric ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100AN ความละเอียด 1 NTU และมีความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 2 ในช่วงการใช้งาน 0 ถึง 1000 NTU
2) ปรับอัตราการผลิตในแต่ละเฟสในช่วง 3.76–5.20 m3/sec โดยอัตราการผลิตรวมทั้ง 4 เฟสจะต้องเท่ากับความต้องการน้ำใน 1 วัน
3) วัดปริมาณน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนในแต่ละเฟสใน 1 วัน โดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิค Prosonic S FMU 90 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลที่สามารถวัดอัตราการไหลในช่องเปิดได้ โดยมีความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 0.2 และมีความละเอียด 1 m3
4) วัดปริมาณพลังงานที่ใช้ในแต่ละเฟสใน 1 วัน โดยใช้เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ายี่ห้อ Multilin รุ่น 350 ความละเอียด 0.001 MWh

5) นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างสมการประมาณค่าปริมาณพลังงานของถังตกตะกอนแต่ละชนิด เมื่อความขุ่นน้ำดิบและอัตราการผลิตมีการเปลี่ยนแปลง
6) นำสมการที่ได้จากข้างต้น มาสร้างเป็นสมการประมาณค่าการใช้พลังงานรวมของทั้ง 4 เฟส เมื่ออัตราการผลิตและความขุ่นน้ำดิบใน เฟส 1 2 3 และ 4 มีค่าเปลี่ยนแปลง

2.5 การวิเคราะห์ผลการวิจัย

ค่าพลังงานจำเพาะสามารถใช้เป็นตัวเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานในเครื่องจักรประเภทเดียวกัน สามารถใช้บ่งชี้ถึงปริมาณพลังงานที่ใช้มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ในการเปรียบเทียบปริมาณพลังงานที่ใช้จะใช้ปริมาณน้ำดิบ เป็นตัวเปรียบเทียบ [11,12] ดังสมการ

$$\text{พลังงานจำเพาะ} = \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้}}{\text{ปริมาณน้ำดิบ}} \ (\text{kWh/m}^3) \qquad (1)$$

2.6 มาตรการประหยัดพลังงาน

นำผลการวิจัยที่ได้ไปทำการกำหนดเป็นมาตรการประหยัดพลังงานของโรงงานผลิตน้ำประปา ซึ่งจะพิจารณาให้มีการใช้พลังงานในกระบวนการตกตะกอนต่ำที่สุดโดยการควบคุมผลของตัวแปรที่ได้จากการทดลองให้ได้จุดที่ดีที่สุด โดยที่การจะนำไปกำหนดเป็นมาตรการประหยัดพลังงาน จะต้องไม่กระทบกับความต้องการน้ำประปาของผู้ใช้น้ำและคุณภาพน้ำที่ได้ออกมาจะต้องได้ตามมาตรฐาน คือความขุ่นน้ำออกจากถังตกตะกอนจะต้องไม่เกิน 10 NTU

3. ผลการวิจัย

ในการศึกษาผลของอัตราการผลิต และความขุ่นน้ำดิบที่มีผลต่อการใช้พลังงาน โดยใช้ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนและชนิดหมุนเวียนตะกอนเป็นเครื่องมือในการควบคุมความขุ่นของน้ำหลังตกตะกอน

ตารางที่ 1 สมการเชิงเส้นแสดงพลังงานในถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนเมื่อความขุ่นน้ำดิบมีการเปลี่ยนแปลง

ลำดับ	อัตราการผลิต (m^3/sec)	สมการเส้นตรง	R^2
1	3.76 - 4.05	-0.0074T + 4.4087	0.0523
2	4.05 - 4.34	-0.0064T + 4.5804	0.0202
3	4.34 - 4.63	0.0042T + 4.147	0.0119
4	4.63 - 4.92	-0.0099T + 4.8963	0.048
5	4.92 - 5.20	-0.0082T + 4.9854	0.0356

ตารางที่ 2 สมการเชิงเส้นแสดงพลังงานในถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนเมื่อความขุ่นน้ำดิบมีการเปลี่ยนแปลง

ลำดับ	อัตราการผลิต (m^3/sec)	สมการเส้นตรง	R^2
1	3.76 - 4.05	-0.0033T + 5.7008	0.0063
2	4.05 - 4.34	0.0066T + 5.731	0.0127
3	4.34 - 4.63	-0.0067T + 6.4489	0.0531
4	4.63 - 4.92	-0.0188T + 6.7546	0.1271
5	4.92 - 5.20	0.0044T + 6.2658	0.0101

3.1 ผลของความขุ่นน้ำดิบ

การศึกษาผลของความขุ่นน้ำดิบจะควบคุมอัตราการผลิตให้อยู่ในช่วงที่แคบลง โดยจะแบ่งอัตราการผลิตออกเป็น 5 ช่วง ดังนี้ 3.76–4.05 4.05–4.34 4.34–4.63 4.63–4.92 และ 4.92–5.20 m^3/sec ตารางที่ 1 และ 2 พบว่า ค่า R^2 จากสมการเส้นตรงด้วยวิธี regression มีค่าน้อยกว่า 0.15 ทั้งในถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนและชนิดหมุนเวียนตะกอน พบว่าเมื่อความขุ่นน้ำดิบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่พลังงานที่ใช้กลับมีค่าไม่เพิ่มขึ้น แสดงว่าความขุ่นน้ำดิบไม่ส่งผลต่อการใช้พลังงาน เนื่องจากความขุ่นน้ำดิบในช่วง 26–40 NTU เป็นช่วงที่ตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และเล็กกว่า 5 ไมครอน มีจำนวนใกล้เคียงกัน และมีสัดส่วนที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงทำให้คุณสมบัติของน้ำดิบไม่แตกต่างกัน [13] ส่วนอัตราการผลิตส่งผลต่อพลังงานจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญในถังตกตะกอนทั้ง 2 ชนิด

3.2 ผลของอัตราการผลิต

การศึกษาผลของอัตราการผลิตโดยการเก็บข้อมูลปริมาณพลังงานที่ใช้ในช่วงอัตราการผลิต 3.76–5.20 m^3/sec ของถังตกตะกอนทั้ง 2 ชนิด แล้วนำมาวิเคราะห์โดยใช้ regression เพื่อหาสมการประมาณปริมาณพลังงานที่ใช้เมื่ออัตราการผลิตที่ค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 5 และ 6 จะพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการผลิต จะส่งผลให้การใช้พลังงานมีค่าที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ดังสมการ (2) และ (3) สำหรับถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนและหมุนเวียนตะกอน ตามลำดับ

กรณีถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอน

$$E_a = 1.157151 + 0.233364V_a \quad \text{โดยที่ } R^2 = 0.92 \qquad (2)$$

กรณีถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน

$$E_b = 1.185506 + 0.397939V_b \quad \text{โดยที่ } R^2 = 0.96 \qquad (3)$$

เมื่อ E_a, E_b คือ พลังงานที่ใช้ในกระบวนตกตะกอนของถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนและหมุนเวียนตะกอน ตามลำดับ (MWh)

V_a, V_b คือ อัตราการผลิตในถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนและหมุนเวียนตะกอน ตามลำดับ (m^3/sec)

จากสมการ (2) และ (3) พบว่าอัตราการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นจะมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามสมการ

$$P = \mu V G^2 \qquad (4)$$

$$V = Qt \qquad (5)$$

เมื่อ P คือ กำลังในการผสม (W)

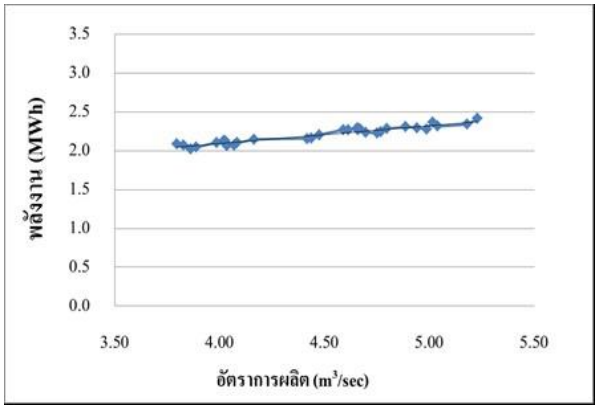
μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (Pa.s)

G คือ velocity gradient (s^{-1})

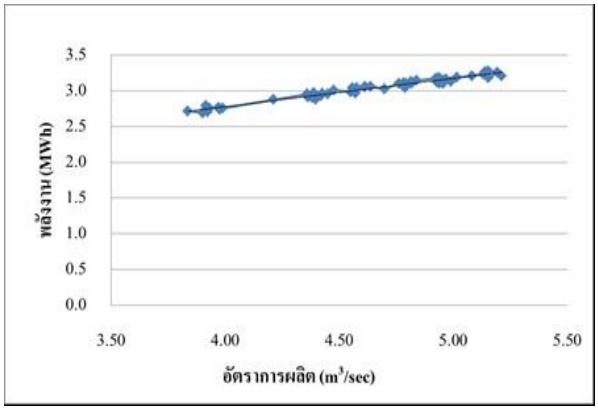
V คือ ปริมาตรของถังตกตะกอน (m^3)

Q คือ อัตราการผลิต (m^3/s)

t คือ ระยะเวลาที่น้ำอยู่ในถังตกตะกอน (s)



รูปที่ 5 ผลของอัตราการผลิตต่อพลังงานในกระบวนการตกตะกอน กรณีถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอน



รูปที่ 6 ผลของอัตราการผลิตต่อพลังงานในกระบวนการตกตะกอน กรณีถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน

จะเห็นได้ว่ากำลังในการผสม จะขึ้นอยู่กับปริมาตรของถังตกตะกอนอัตราการผลิต ซึ่งกำลังที่สูงจะส่งผลให้พลังงานใน/กระบวนการตกตะกอนสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

จากสมการ (2) และ (3) จะเห็นว่ามีค่า R^2 มากกว่า 0.9 บ่งชี้ได้ว่าสมการที่นั้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ มากสามารถกล่าวได้ว่า อัตราการผลิตส่งผลต่อการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

3.3 ผลของชนิดถังตกตะกอน

จากสมการที่ (2) และ (3) สามารถนำมาใช้ประมาณปริมาณพลังงานในกระบวนการตกตะกอนของถังตกตะกอน

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนของถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนและชนิดหมุนเวียนตะกอน

อัตราการผลิต (m^3/sec.)	พลังงาน (MWh)		% แตกต่าง
	ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอน	ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน	
3.76	2.03	2.68	31.81
4.00	2.09	2.78	32.84
4.24	2.15	2.87	33.83
4.48	2.20	2.97	34.76
4.72	2.26	3.06	35.65
4.96	2.31	3.16	36.49
5.20	2.37	3.25	37.30

ชนิดชั้นตะกอนและชนิดหมุนเวียนตะกอนที่อัตราการผลิต 3.76-5.20 m^3/sec ดังแสดงในรูปที่ 7 จะพบว่า ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนจะใช้พลังงานน้อยกว่าถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนร้อยละ 31–37 ดังแสดงในตารางที่ 3 เนื่องจากถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนมีขนาดปริมาตรของส่วนผสม เล็กกว่าของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน จึงทำให้มีการใช้พลังงานที่น้อยกว่า

จากผลการทดลองที่ได้ข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ ได้โดยพลังงานรวมของกระบวนการตกตะกอนจะเท่ากับพลังงานรวมของกระบวนการตกตะกอนในแต่ละเฟส

พลังงานรวม = พลังงานในเฟส 1 + พลังงานในเฟส 2 + พลังงานในเฟส 3 + พลังงานในเฟส 4

$$E = (1.157151 + 0.233364V_1)U_1 + (1.157151 + 0.233364V_2)U_2 + (1.185506 + 0.397939V_3)U_3 + (1.185506 + 0.397939V_4)U_4 \quad (6)$$

โดยที่ $V_1 + V_2 + V_3 + V_4$ = ความต้องการน้ำในแต่ละวัน (7)

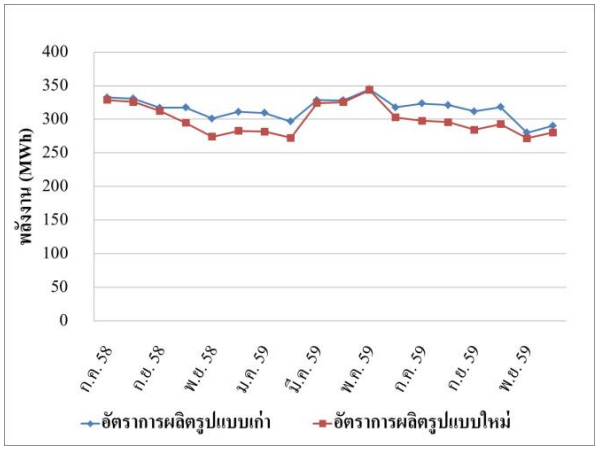
E คือ พลังงานรวมในกระบวนการตกตะกอน (MWh)

V_1, V_2, V_3, V_4 คือ อัตราการผลิตในเฟส 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ

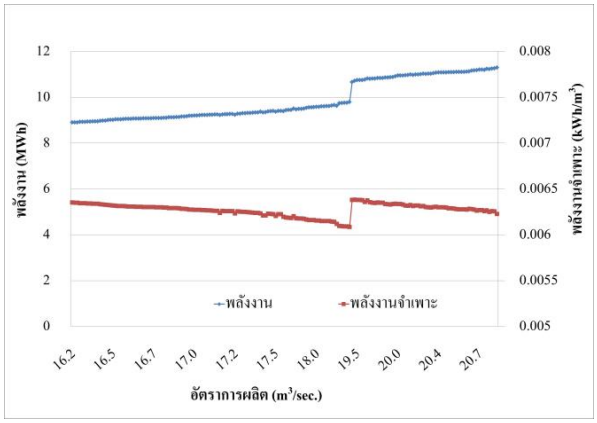
U_1, U_2, U_3, U_4 คือ ตัวบ่งชี้การใช้งานเฟส 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ กรณีมีการผลิต $U = 1$ กรณีไม่มีการผลิต $U = 0$

จากสมการ (6) และ (7) สามารถนำไปปรับเปลี่ยนอัตราการผลิตในแต่ละเฟส ให้ใช้พลังงานรวมในกระบวนการตกตะกอนได้ต่ำที่สุด โดยการให้เฟส 1 และ 2 ซึ่งใช้ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอน เดินเครื่องในอัตราการผลิตที่สูงเป็น base load ที่อัตราการผลิต 5.0–5.2 m^3/sec ส่วนเฟส 3–4 จะรับความต้องการน้ำที่มีความผันแปร โดยกรณีอัตราการผลิตรวมทั้ง 4 เฟสไม่เกิน 18.4 m^3/sec จะหยุดเดินเครื่องของถังตกตะกอนเฟส 4 ลง 1 เครื่องเพื่อลดการใช้พลังงาน จะพบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบอัตราการผลิตจะสามารถลดการใช้พลังงานลงได้เฉลี่ยร้อยละ 5.24 ดังรูปที่ 7

โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์มีความต้องการน้ำดิบ 1.4–1.8 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันคิดเป็นอัตราการผลิต 16.2–20.8 m^3/sec ในปี 2559 มีการใช้พลังงานในกระบวนการตกตะกอน 3,770.59 MWh โดยมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นร้อยละ 27 จากปี 2557 หากพิจารณาถึงมาตรการการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเดินเครื่องจักรในแต่ละเฟส ว่าสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ร้อยละ 5.24 สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ 197.45 MWh (197,454 kWh)



รูปที่ 7 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนเมื่อได้ปรับเปลี่ยนอัตราการผลิตให้มีการใช้พลังงานที่น้อยลง



รูปที่ 8 เปรียบเทียบพลังงานและพลังงานจำเพาะที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนที่อัตราการผลิต 14.7–20.8 m^3/sec.

การประปานครหลวงมีการคิดค่าพลังงานไฟฟ้า แบบ time of uses (TOU) โดยคิดค่าพลังงานตามช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงาน จะแบ่งช่วงเวลาออกเป็น 2 ช่วงคือ on peak และ off peak โดยที่ on peak คือ ช่วงเวลา 09.00–22.00 น. ของวันทำงานปกติ และ off peak คือ ช่วงเวลา 22.00–09.00 น. ของวันทำงานปกติ และช่วงเวลา 00.00–24.00 น. ของวันหยุดราชการและนักขัตฤกษ์ โดยคิดอัตราค่าพลังงานไฟฟ้า

ในช่วง on peak 4.2097 บาท/kWh

ในช่วง off peak 2.6295 บาท/kWh

กระบวนการทำงานของการผลิตน้ำประปาจะเดินเครื่องตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการน้ำ ดังนั้นกระบวนการตกตะกอนจึงต้องเดินเครื่องทั้งในช่วงเวลา on peak และ off peak จึงได้พิจาณาเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยทั้งในช่วง on peak และ off peak ดังนี้

ช่วงเวลา on peak ตั้งแต่ 09.00–22.00 น. คิดเป็นเวลาทำงานใช้งาน 13 ชั่วโมง

ช่วงเวลา off peak ตั้งแต่ 22.00–09.00 น. คิดเป็นเวลาทำงานใช้งาน 11 ชั่วโมง

พิจารณาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักจะได้ว่า

ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย = (4.2097x13 + 2.6292x11)/24

= 3.4854 บาท/kWh

ผลประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากผลคูณของปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้กับค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย จะได้

ผลประหยัดค่าใช้จ่าย = 197,454 x 3.4854

= 688,207 บาทต่อปี

จากรูปที่ 8 ทำการเปรียบเทียบพลังงานและพลังงานจำเพาะที่อัตราการผลิต 16.2–20.8 m^3/sec. จะพบว่าเมื่ออัตราการผลิตเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย จึงจำเป็นต้องใช้ค่าพลังงานจำเพาะเข้ามาใช้ในการเปรียบเทียบ โดยอัตราการผลิตที่ประหยัดพลังงานมากที่สุดคือ 17.2–18.4 m^3/sec โดยมีค่าพลังงานจำเพาะ 0.0061–0.0062 kWh/m^3 ดังนั้นในการผลิตน้ำประปาจึงควรมีการวางแผนการผลิตให้มีอัตราการผลิตอยู่ในช่วงที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด เพื่อเป็นการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า

4. สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิจัย

กระบวนการตกตะกอนเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ในกระบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งกระบวนการนี้จะต้องปรับตั้งให้สามารถรองรับต่อค่าความขุ่นในทุก ๆ ช่วงค่า และควบคุมความขุ่นที่ออกจากกระบวนการให้ได้ตามมาตรฐาน โดยถังตกตะกอนจะเป็นเครื่องจักรหลักสำหรับกระบวนการนี้ จากการทดลองจะสามารถสรุปได้ว่า

1) ความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ในช่วงความขุ่น 26-40 NTU ไม่ส่งผลต่อการใช้พลังงานของกระบวนการตกตะกอนทั้งในถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนและชนิดหมุนเวียนตะกอน เนื่องจากในช่วงความขุ่น 26-40 NTU พบว่ามีปริมาณการกระจายของตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอนมีสัดส่วนที่ไม่แตกต่างกัน จึงทำให้มีการใช้พลังงานที่ใช้ไม่แตกต่างกันด้วย

2) อัตราการผลิตส่งผลต่อพลังงานจำเพาะ อย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการผลิตที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ดังสมการ

กรณีถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอน

$E_a = 1.157151 + 0.233364V_a$ โดยที่ $R^2 = 0.92$

กรณีถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน

$E_b = 1.185506 + 0.397939V_b$ โดยที่ $R^2 = 0.96$

3) ถังตะกอนชนิดชั้นตะกอนจะใช้พลังงานในการเดินเครื่องน้อยกว่าถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนเนื่องจากปริมาตรในส่วนของถังผสมของถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนมีขนาดถังตกตะกอนที่เล็กกว่าจึงใช้พลังงานน้อยกว่าจึงทำให้ถังตกตะกอนชนิดชั้นตะกอนประหยัดพลังงานกว่าถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนประมาณร้อยละ 31–37

4) สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างสมการประมาณค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนดังสมการ

$$E = (1.157151 + 0.233364V_1)U_1 + (1.157151 + 0.233364V_2)U_2 + (1.185506 + 0.397939V_3)U_3 + (1.185506 + 0.397939V_4)U_4$$

สามารถนำไปปรับเปลี่ยนรูปแบบการผลิตและลดการใช้พลังงานได้ร้อยละ 5.24 คิดเป็นมูลค่าพลังงานไฟฟ้า 197.45 MWh คิดเป็นเงิน 688,207 บาทต่อปี

5) อัตราการผลิตที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด คือ อัตราการผลิตในช่วง 17.2–18.4 m^3/sec ดังนั้นในการผลิตน้ำประปาจึงควรมีการวางแผนการผลิตให้มีอัตราการผลิตอยู่ในช่วงที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด เพื่อเป็นการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า

6) สำหรับโรงงานใหม่หรือการขยายกำลังการผลิตสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาเลือกชนิดถังตกตะกอนที่จะใช้ในโรงงานใหม่เพื่อให้สามารถประหยัดพลังงานในการเดินเครื่องได้

4.2 ข้อเสนอแนะ

ในการปรับเปลี่ยนรูปแบบอัตราการผลิตในแต่ละเฟส ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของกระบวนก่อนและหลังกระบวนการตกตะกอนด้วย เนื่องจากปรับเปลี่ยนอัตราการผลิตในแต่ละเฟส อาจทำให้กระบวนการก่อนหรือหลังมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เพื่อให้มาตรการประหยัดพลังงานที่ออกมาสามารถลดการใช้พลังงานได้ตลอดทั้งกระบวนการผลิตน้ำประปา จึงควรทำการศึกษาให้ตลอดทั้งกระบวนการ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ การประปานครหลวง สำหรับข้อมูลในวิจัยอันเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย และขอขอบพระคุณคณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ชนกนันท์ สุขกำเนิดและคณะ. การอนุรักษ์พลังงานของปั๊มน้ำดิบโรงไฟฟ้าน้ำพองโดยการใช้ระบบปรับความเร็วรอบ. *การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4*. 2551: 444–448.

[2] ศราภรณ์ อัษฎกช. การจัดการพลังงานในโรงงานผลิตน้ำบางเขน. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2545.

[3] Vadasarukkai YS, Gagnon GA. Application of low-mixing energy input for the coagulation process. *Water Research*. 2015; 84: 333–341.

[4] ทิวาภรณ์ มีธะระ. การศึกษาระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าของโรงงานผลิตน้ำประปา กรณีศึกษา การประปาส่วนภูมิภาคสาขาชลบุรี. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตรอุตสาหกรรมและ

เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2556.

[5] Benedicts, A. et al. Operational energy-efficiency improvement of municipal water pumping in California. *Energy*. 2013; 53: 237–243.

[6] ศุทธิวัต ปฏิภาณวัฒน์. การจัดทำแผนที่สัญจรเทคโนโลยีในกระบวนการผลิตน้ำประปา โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554.

[7] Bohorquez J, Saldarriaga J, Vallejo D. Pumping pattern optimization in order to reduce WDS operation. *Procedia Engineering*. 2015; 119: 1069–1077.

[8] Scarpa F, Lobba A, Becciu G. Experditious pump rescheduling in multisource water distribution network. *Procedia engineering*. 2015; 119: 1078–1087.

[9] Mo W, Wang H, Jacobs JM. Understanding the influence of climate change on the embodied energy of water supply. *Water Research*. 2016; 95: 220–229.

[10] ทวีศักดิ์ วังไพศาล. *วิศวกรรมการประปา. พิมพ์ครั้งที่ 2*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2557.

[11] วัชระ มั่งวิทิตกุล. *กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงาน สำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ: เรียล ยูพาวเวอร์; 2554.

[12] Plappally AK, Lienhard JH. Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012; 16: 4818–4848.

[13] Yao M, Nan J, Chen T. Effect of particle size distribution on turbidity under various water quality levels during flocculation process. *Desalination*. 2014; 354: 116–124.

[14] American Water Works Association (AWWA), American Society of Civil Engineers (ASCE). *Water treatment plant design. 4th ed*. New York: McGRAW-Hill; 2005.