วารสารวิศวกรรมศาสตร์

การเปรียบเทียบกระบวนการกรองตรง ระหว่างการแยกอนุภาคความขุ่น และการแยกอิมัลชันน้ำมันออกจากเฟสน้ำ

ศุภนุช ยังทรัพย์[a], **ธนากร อื้อมุกดากุล**[b], **รัฐพล เจียวิริยะบุญญา**[c], **และ พิสุทธิ์ เพียรมนกุล**[d,*]

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

อีเมล์: suphanuch_tu@hotmail.com[a], qthanakorn@gmail.com[b], rat_pct@hotmail.com[c], pisut.p@chula.ac.th[d,*]

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกลไกการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอนุภาคที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน คือ อนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมัน โดยศึกษาการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่ไม่มีและมีการเติมสารเคมี (สารส้ม) รวมถึงประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง (Filtration Efficiency Equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure Drop Equation) ในการอธิบายกลไกที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองพบว่าถังกรองทรายแบบกรองเร็วสามารถแยกอนุภาคความขุ่นได้ดีถึงร้อยละ 96.65 ในขณะที่สามารถแยกอิมัลชันของน้ำมันได้เพียงร้อยละ 45.52 เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคความขุ่น และมีเสถียรภาพสูง จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนเข้าสู่ถังกรอง ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันก่อนเข้าสู่ถังกรอง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม ประสิทธิภาพของถังกรองเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟล้อคของสารส้มจับตัวกับอนุภาคน้ำมัน และสะสมอยู่ด้านบนและภายในช่องว่างของชั้นกรอง ทำให้ความพรุนลดลง ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการชนและการเกาะติดของอนุภาคภายในชั้นกรอง อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลเสียต่อความดันลดภายในชั้นกรองที่เพิ่มขึ้น และอายุการใช้งาน รวมถึงรูปแบบการเดินระบบโดยรวม จึงได้มีการประยุกต์การเติมอากาศ เพื่อเพิ่มอายุการทำงานของถังกรอง พบว่าช่วยลดการสะสมของอนุภาคต่างๆ บริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ทำให้มีระยะเวลาการทำงานที่นานขึ้น แต่ต้องใช้พลังงานในการเติมอากาศค่อนข้างมาก และจากการประยุกต์การเติมอากาศแบบกะ (Batch) พบว่าสามารถช่วยลดการสะสมของอนุภาคต่างๆ ที่ผิวหน้าชั้นกรองได้ และยังทำให้สามารถใช้สารกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอีกด้วย

คำสืบค้น: อนุภาคความขุ่น, อิมัลชันของน้ำมัน, ถังกรองทราย, กระบวนการกรองตรง, กระบวนการสร้างและรวมตะกอน

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (ISSN: 1906-3636) ปีที่ 4 ฉบับที่ 4

วันที่ส่ง 4 ตุลาคม 2555

วันที่ตอบรับ 24 กรกฎาคม 2556

วันที่ตีพิมพ์ 20 กันยายน 2556

Online at http://www.ej.eng.chula.ac.th/

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

วารสารวิศวกรรมศาสตร์

Comparison of Direct Filtration between Turbidity Separation and Oily- Emulsion Separation from Aqueous Phase

Suphanuch Yangsap[a], Thanakorn Ermukdkul[b], Rattapon Jearviriyabunya[c], and Pisut Painmanakul[d,*]

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

E-mail: suphanuch_tu@hotmail.com[a], qthanakorn@gmail.com[b], rat_pct@hotmail.com[c], pisut.p@chula.ac.th[d,*]

Abstract. This study aims to compare direct filtration between turbid particles and oily-emulsion separation from aqueous phase. The experimental study was performed by using Jar Testing, Filtration equation and Pressure drop equation to evaluate the mechanism of direct filtration with and without chemical coagulant addition. By applying rapid sand filtration, the removal efficiencies (%Re) of turbid particles and oily emulsion were equal to 96.65 and 45.52, respectively. Droplet size and stability of oily emulsion were the key factors that limit the filtration mechanism occurring in filtration process: it is important to firstly improve the quality of influent phase. Adding the coagulant into the water (coagulation-flocculation) was chosen in this study in order to reduce the stability of oily particles, and increase the oil droplet size for enhancing the filtration process. The result showed that increase of alum concentration can increase the removal efficiency: this is because of the combination of generated chemical floc and oily particle attached within porosity of the filter bed. Therefore, the collision and attachment phenomena between oil droplets and filter media were thus improved, however, the pressure drop also increased. Direct filtration combined with aeration was applied in order to prolong the operation time and filtration depth. However, high energy consumption for aeration method was required. Therefore, batch aeration was introduced to decrease the particle deposits at the surface and increase the efficiency of sand filter.

Keywords: Turbid particle, oily-emulsion, sand filter, direct filtration, coagulation-flocculation.

Engineering Journal (ISSN: 1906-3636) Volume 4 Issue 4

Received 4 October 2012

Accepted 24 July 2013

Published 20 September 2013

Online at http://www.ej.eng.chula.ac.th/

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

1. บทนำ

ในปัจจุบันตะกอนของแข็งแขวนลอย คราบไขมันและน้ำมันต่างๆ สามารถพบได้โดยทั่วไปในน้ำดิบและน้ำเสีย โดยที่ ตะกอนของแข็งแขวนลอย หรือที่เรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particle) สามารถพบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์เหล่านี้เป็นปัญหาสำคัญในระบบการผลิตน้ำประปา เนื่องจากไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาที่จำกัด [1] ในขณะที่น้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันนั้น สามารถพบได้ทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรม รวมถึงมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันแบ่งออกได้ 4 รูปแบบ แต่ที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดคือ น้ำมันอยู่ในรูปอิมัลชันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว [2] เช่น น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting Oil) ซึ่งในอุตสาหกรรมนิยมนำน้ำมันตัดมาใช้งานในกระบวนการผลิตชิ้นงาน เมื่อน้ำมันตัดผสมกับน้ำจะเกิดเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water Emulsion) ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก และมีเสถียรภาพสูง ยากต่อการแยกด้วยกระบวนทางกายภาพทั่วไป [3]

สำหรับกระบวนการกรองตรง (Direct Filtration) คือ การกรองโดยไม่จำเป็นต้องกำจัดความขุ่นออกก่อนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและตกตะกอน สามารถแบ่งเป็น 2 แบบ คือการกรองตรงที่ไม่ใช้สารเคมี และการกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี ซึ่งกระบวนการกรองตรงมีข้อดี คือ ลดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี ค่าก่อสร้าง และขั้นตอนลงได้ แต่การกรองตรงทำให้ถังกรองต้องรับภาระในการกำจัดอนุภาคต่างๆ ในปริมาณมาก ซึ่งสะสมอยู่ภายในชั้นกรองและทำให้ถังกรองอุดตันอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถใช้ความหนาของชั้นกรองได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากการกรองส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นกรองทำให้ถังกรองอุดตันเร็ว [1] จึงได้มีการนำกระบวนการเติมอากาศเข้ากับกระบวนการกรอง เพื่อพัฒนาระบบการกรองตรงในการกำจัดอนุภาคของแข็งสังเคราะห์จากดินคาโอลิน โดยพบว่าการเติมอากาศภายในชั้นกรองจะทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว ส่งผลให้อนุภาคความขุ่นสามารถหลุดเข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น จึงลดการสะสมของอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ทำให้ถังกรองมีอายุการใช้งานนานขึ้น [4] อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาเป็นการศึกษาการกรองตรงในการบำบัดน้ำที่มีความขุ่น ซึ่งโดยทั่วไปน้ำเสียมีสารปนเปื้อนหลายชนิด เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ไขมัน ของแข็ง และสารแขวนลอยต่างๆ เป็นต้น ในการนี้ เพื่อเข้าใจถึงกลไกการทำงานที่เกิดขึ้นนั้น จึงควรทำการศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการกรองตรงในการกำจัดอนุภาคที่แตกต่างกัน คืออนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมัน จึงต้องทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารโคแอกกูแลนท์ และปริมาณของสารโคแอกกูแลนท์ ต่อประสิทธิภาพของถังกรอง และการบำรุงรักษาถังกรอง เพื่อเปรียบเทียบกลไกการทำงานของถังกรองทรายในการบำบัดน้ำที่มีสิ่งปนเปื้อนที่แตกต่างกัน สำหรับการทำนายประสิทธิภาพของถังกรองในการกำจัดอนุภาคต่างๆ พบว่าเมื่อเวลาในการกรองผ่านไป อัตราการกรองมีค่าลดลง อนุภาคความขุ่นจึงมีโอกาสติดค้างอยู่ในชั้นกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความพรุนของสารกรองมีค่าลดลง ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ [1] กล่าวได้ว่าเมื่อความพรุนลดลง จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมีค่าสูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม ค่าความดันลด (Pressure Drop) จะมีค่ามากขึ้น ซึ่งในทางทฤษฎีนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าความพรุนที่เวลาต่างๆ ในการกรอง ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคต่างๆ สะสมตัวที่สารกรอง ประสิทธิภาพและกลไกการกรองตรงได้ โดยประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง (Filtration Efficiency Equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure Drop Equation) [5] ทั้งนี้ องค์ความรู้ข้างต้นน่าจะส่งผลดีต่อการวิเคราะห์ภาพรวมการเดินระบบการกรองตรงทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัดสารปนเปื้อนที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ระยะเวลาการทำงานของถังกรอง รวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศภายในชั้นกรอง เป็นต้น

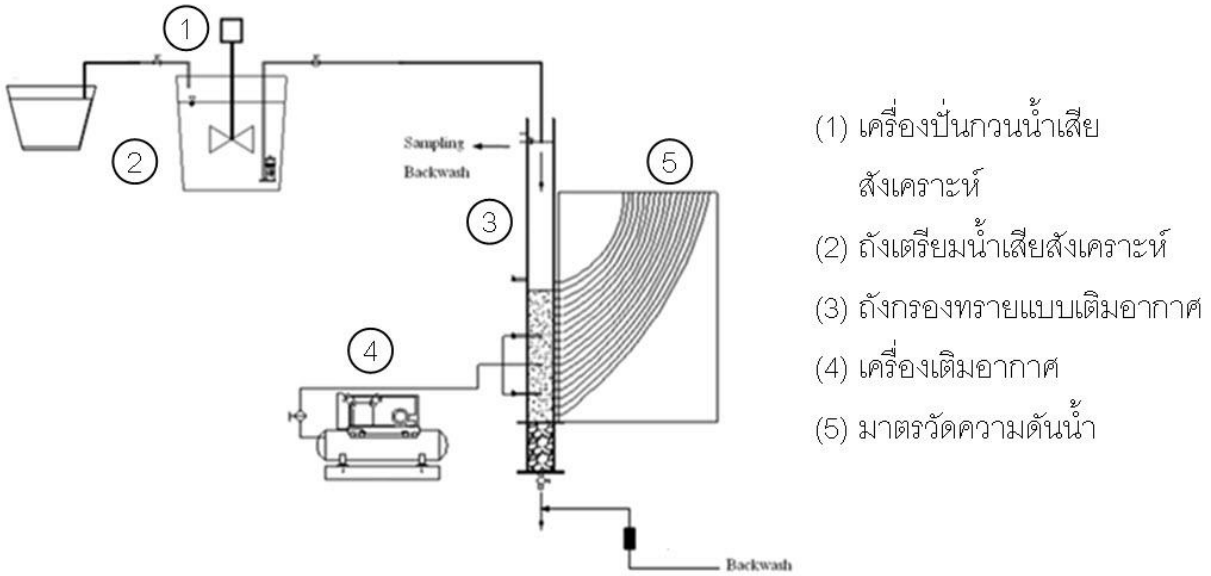
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างการกรองตรงที่ไม่ใช้สารเคมี และการกรองตรงที่ใช้สารเคมี เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมัน อายุการดำเนินงานของถังกรอง โดยการ

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

กรองตรงที่ใช้สารเคมีได้มีการศึกษาปริมาณของสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการทำจาร์เทสต์ รวมถึงได้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการเติมอากาศเข้ามาช่วยทำให้ชั้นสารกรองขยายตัว ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะทำให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นกรอง และทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น โดยที่การเติมอากาศยังช่วยลดระยะเวลาในการล้างย้อนได้น้อยลง นอกจากนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน ความดันลด และขนาดของสารกรองเมื่อเกิดการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น

2. อุปกรณ์และวิธีการ

ถังกรองทรายที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์การทดลอง

ถังกรองที่ใช้ในการทดลองทำด้วยวัสดุอะคริลิคใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร สูง 1.80 เมตร แบ่งเป็นชั้นพ้นน้ำ (Freeboard) 0.30 เมตร ชั้นเก็บกัก 0.50 เมตร ชั้นสารกรอง 0.70 เมตร [6] และชั้นระบายน้ำ 0.30 เมตร ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45-0.55 มิลลิเมตร สัมประสิทธิ์ของความไม่สม่ำเสมอในช่วง 1.4-1.7 โดยตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำที่มีความขุ่นโดยใช้ดินคาโอลิน (Kaolinite) ผสมกับน้ำประปาที่ความเข้มข้น 67 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าความขุ่นประมาณ 50 เอ็นทียู) [7] ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.3 ไมโครเมตร และอิมัลชันของน้ำมันตัด ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.3 ไมโครเมตร ค่าซีโอดี 2,846 มิลลิกรัม/ลิตร และความขุ่น 1,356 เอ็นทียู [8] มาตรวัดความดันน้ำ ทำการติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำทุกระยะ 5 ซม. ตามความสูงของถังกรองเพื่อวิเคราะห์ค่าความดันลดภายในชั้นกรองและจุดที่เกิดการอุดตัน

2.1. กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation Process)

ศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมันตัด คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) ที่มีสูตรทางเคมี Al2(SO4)3.18H2O โดยศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมด้วยจาร์เทสต์ (Jar Test) โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7 ทำการกวนเร็ว 150 รอบ/นาที นาน 1 นาทีและกวนช้า 30 รอบ/นาที นาน 30

นาทีและตั้งให้ตกตะกอน 30 นาที (นำส่วนใสวิเคราะห์ค่าความขุ่น ด้วยเครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) และค่าซีโอดีด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux) ตามลำดับ

2.2. กระบวนการกรองตรง (Direct Filtration)

เริ่มเดินระบบถังกรองทราย ทำการกวนน้ำตัวอย่างในถังเตรียมน้ำตัวอย่าง ด้วยความเร็ว 150 รอบ/นาที ตลอดการทดลอง จากนั้นสูบน้ำเข้าสู่ถังกรองทราย โดยการควบคุมระดับน้ำเหนือชั้นกรองเท่ากับ 0.50 เมตร (กรองที่ความดันคงที่) ตลอดการทดลอง จากนั้นทำการเดินระบบโดยเก็บตัวอย่างน้ำ เพื่อวิเคราะห์ความขุ่น ซีโอดี บันทึกค่าระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำทุกๆ 15 นาที และวัดปริมาตรน้ำที่กรองตามเวลา จนกระทั่งถังกรองทรายอุดตัน จึงหยุดเดินระบบ หลังจากนั้นล้างย้อนถังกรองทรายด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวที่ความเร็วของน้ำล้างย้อนเท่ากับ 0.75 เมตร/นาที [9] โดยใช้เวลาในการล้างย้อน 12 นาที และเก็บตัวอย่างน้ำล้างย้อนทุกๆ 1 นาที และเพื่อทำการวิเคราะห์กลไกการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรงในด้านต่างๆ ได้แก่ คุณภาพน้ำที่กรองได้ ระยะเวลาในการทำงานของถังกรอง การกระจายความดันภายในชั้นกรอง อัตราเร็วในการกรอง และประสิทธิภาพของถังกรอง เป็นต้น

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

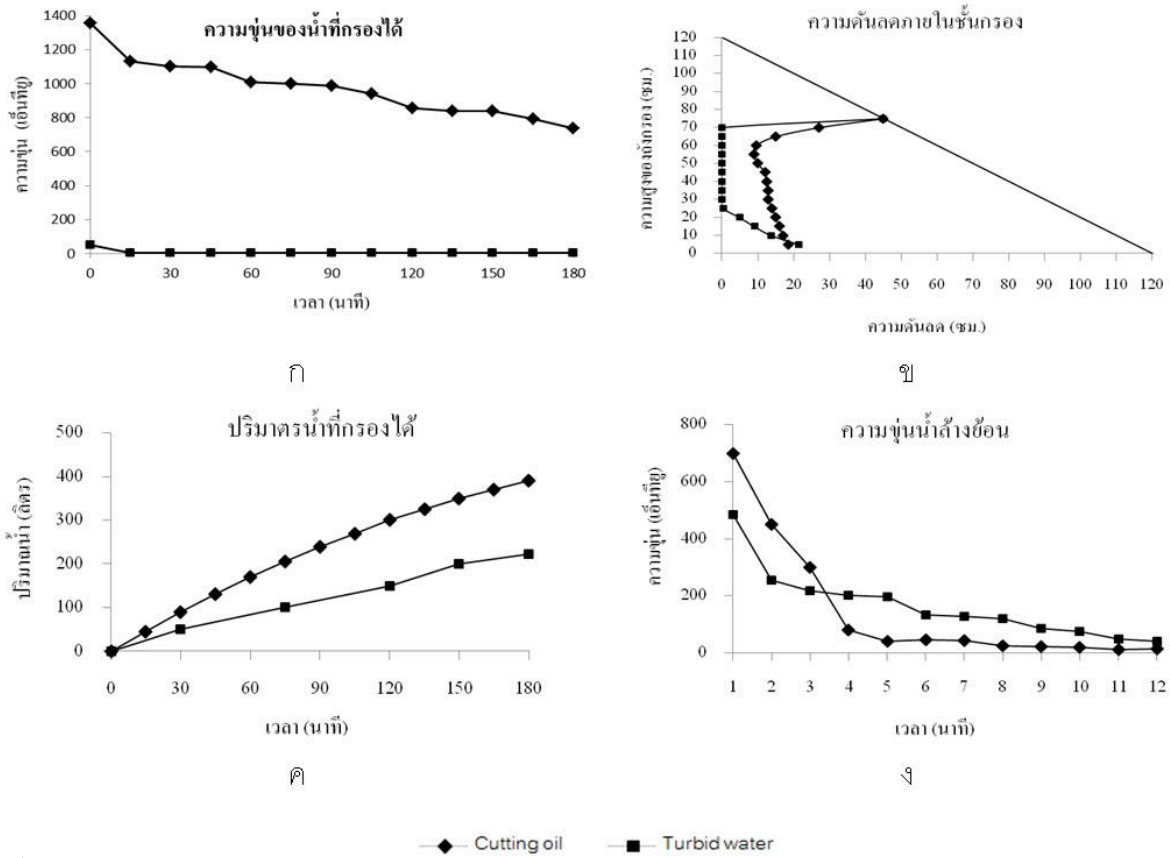
3.1. การเปรียบเทียบกลไกการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอนุภาคความขุ่น และการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ เพื่อเปรียบเทียบกลไก และประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย ในการอธิบายระยะเวลาการดำเนินงาน ลักษณะการอุดตัน การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง และการล้างย้อนเพื่อทำความสะอาดถังกรอง

จากผลการทดลองดังรูปที่ 2 ประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการแยกอนุภาคความขุ่น พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง 1.7-3.0 เอ็นทียู ซึ่งได้ค่าผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู [10] ในขณะที่ประสิทธิภาพในการแยกอิมัลชันของน้ำมัน พบว่าน้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง โดยในช่วงเริ่มต้นการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 1,250-1,300 เอ็นทียู และค่อยๆ ลดลง ตามเวลาในการกรอง โดยที่เวลาการกรองผ่านไปประมาณ 180 นาที น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 738-750 เอ็นทียู ค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในการกรองอนุภาคความขุ่นมีค่ามากกว่าการกรองอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากอนุภาคความขุ่นมีขนาดใหญ่ติดค้างบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ในขณะที่อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของชั้นกรองไปได้ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ถังกรองทรายแบบกรองตรงแบบธรรมดา สามารถแยกอนุภาคความขุ่นออกจากเฟสน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำได้ เนื่องจากอิมัลชันของน้ำมันมีขนาดเล็กประมาณ 1-1.3 ไมครอน และมีเสถียรภาพสูง [11] การทำความสะอาดสารกรอง พบว่า ถังกรองทรายในการแยกอนุภาคความขุ่น สามารถล้างทำความสะอาดสารกรองได้ดีกว่าการกรองอิมัลชันของน้ำมัน เนื่องจากอิมัลชันของน้ำมันอาจเกิดการสะสม และเคลือบสารกรองทำให้ล้างย้อนได้ยากด้วยเหตุนี้ หากต้องการแยกอิมัลชันออกจากเฟสน้ำด้วยถังกรองทราย จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงกระบวนการกรองตรง โดยอาจประยุกต์แนวทางการเติมสารเคมี (สารโคแอกกูแลนท์) เพื่อช่วยในการทำลายเสถียรภาพอิมัลชันของน้ำมันให้กับน้ำก่อนเข้าสู่

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

กระบวนการกรอง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ โดยทำการศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม



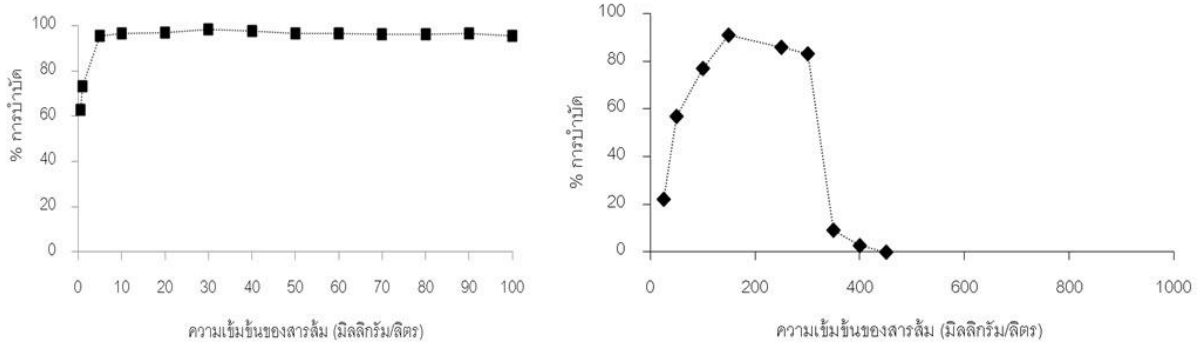
รูปที่ 2 การเปรียบเทียบกลไกการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอนุภาคความขุ่น และการแยกอิมัลชันของน้ำมัน ออกจากเฟสน้ำ

3.2. การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันน้ำมันตัด

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ (สารส้ม) ที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพที่มีความคงตัวของอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมันตัด ด้วยการทำจาร์เทสต์ ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมัน โดยทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารส้มสำหรับอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมันในช่วง 1-100 มิลลิกรัม/ลิตร และ 25-450 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงขึ้น ความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดอนุภาคความขุ่น เท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร และอิมัลชันของน้ำมันเท่ากับ 150 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีประสิทธิภาพในบำบัดเท่ากับ 98.35% และ 91.23 % ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม พบว่าการทำลายเสถียรภาพ ของอนุภาคความขุ่นให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่อนข้างคงที่และมีแนวโน้มที่จะลดลงเล็กน้อย ดังรูป 3 ก แสดงถึงกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบห่อหุ้มอนุภาค (Sweep Coagulation) ซึ่งเป็นกลไกหลักในการบำบัดอนุภาคความขุ่น ในขณะที่การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมาก ดังรูปที่ 3 ข แสดงว่าการเปลี่ยนประจุของอนุภาคน้ำมันให้เป็นประจุตรงกันข้ามเดิม

(Charge Reversal) มีผลกระทบค่อนข้างสูง ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันฟื้นคืนสภาพเดิม ประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับผลกระทบจากอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็ก (น้อยกว่า 1 ไมครอน) [12]



ก ข

รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคความขุ่นและการกำจัดอิมัลชันของน้ำมันตามปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม

โดยสรุปจากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่า การเติมสารโคแอกกูแลนท์ (สารส้ม) สามารถช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมันได้ จึงได้มีการปรับปรุงกระบวนการกรองแบบกรองตรง (Direct Filtration) ที่มีการเติมสารเคมี (สารส้ม) เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันก่อนเข้าสู่ถังกรอง เพื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือทำให้เกิดฟล้อคขนาดใหญ่ โดยการเลือกใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ (สารส้ม) และพีเอชที่เหมาะสมให้กับน้ำก่อนเข้าสู่ถังกรอง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของถังกรองให้ดีขึ้น และมีอายุการใช้งานที่เหมาะสม

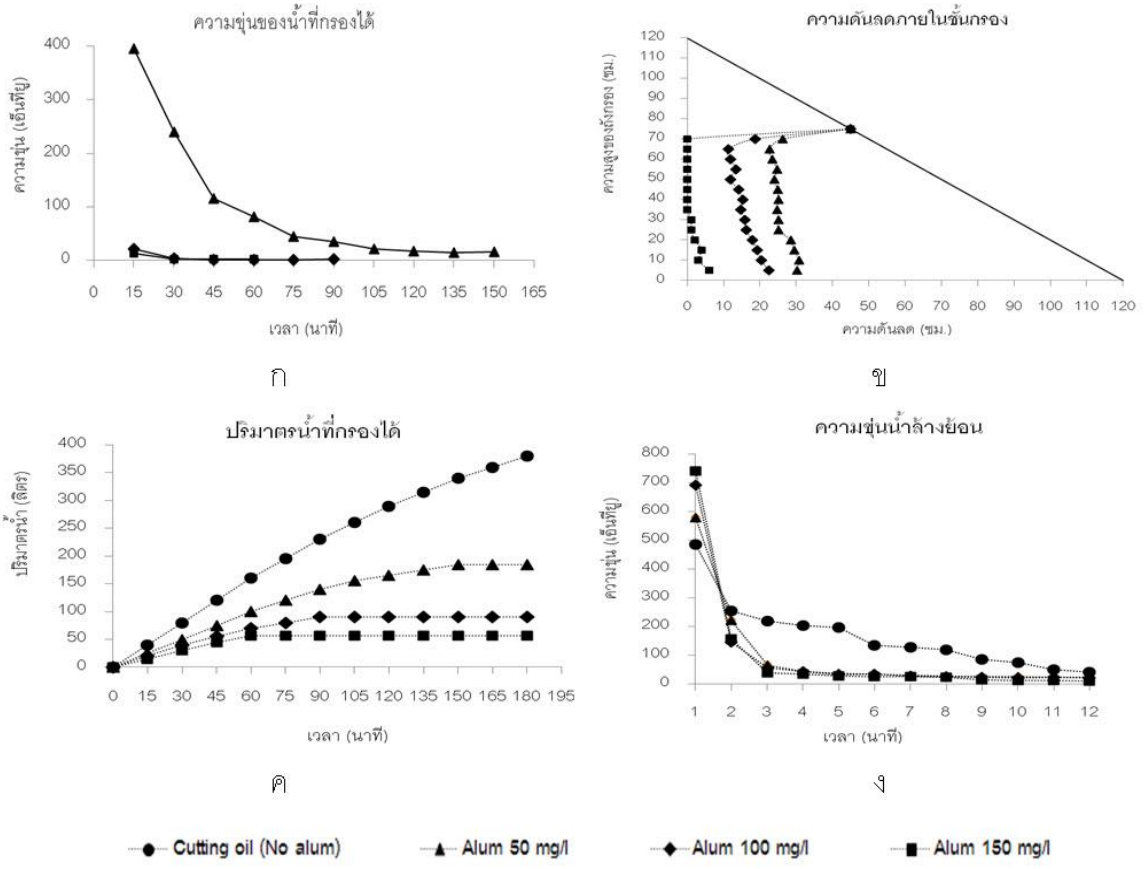
3.3. การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนท์ (สารส้ม) ให้กับน้ำก่อนเข้าสู่ถังกรอง เพื่อทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันของน้ำมัน โดยที่ความเข้มข้นของสารส้มเท่ากับ 150 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยวิธีการทำจาร์เทสต์ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงถึงร้อยละ 91.23 จึงได้มีการประยุกต์แนวทางการเติมสารส้มในการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันน้ำมันให้กับน้ำก่อนเข้าสู่ถังกรอง โดยศึกษาความเข้มข้นของสารส้มที่ 50 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อทดลองหาความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมกับถังกรองทรายแบบกรองตรง

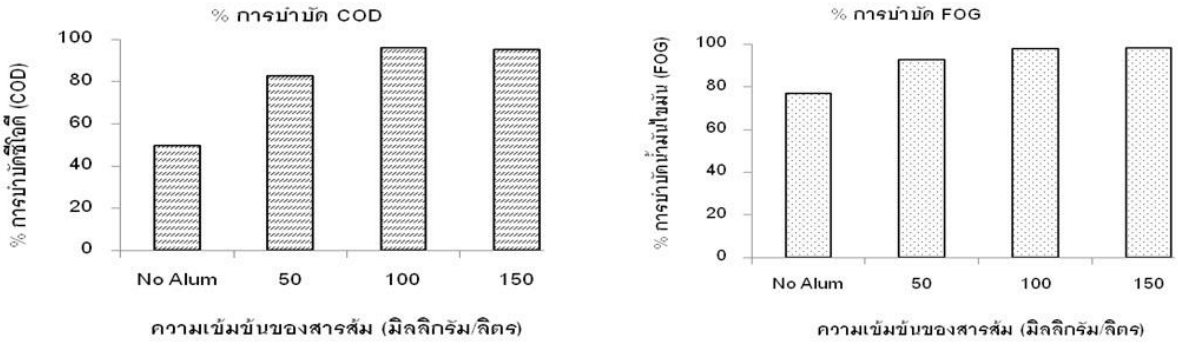
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4 การเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ ที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนท์ (สารส้ม) พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4 ก ซึ่งน้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 1.3-1.6 เอ็นทียู โดยค่าความขุ่นมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จากค่าความขุ่นเริ่มต้นที่ 1,351 เอ็นทียู เนื่องจากอนุภาคน้ำมันเกิดการสะสมที่ผิวหน้าและภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ค่าความพรุนของชั้นกรองมีค่าลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเติมสารส้มช่วยเพิ่มขนาดอนุภาคน้ำมัน ทำให้สะสมตัวภายในชั้นกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น ความดันลดเพิ่มมากขึ้น อัตราการกรองลดลง และเมื่อทดลองหาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี กำจัดน้ำมันและไขมัน พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี น้ำมันและไขมัน ร้อยละ 96.17 และ 97.98 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 และเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีด้วยวิธีการทำจาร์เทสต์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 91.23 ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการเติมสารส้ม

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

ที่ความเข้มข้น 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร เนื่องจากกระบวนการตกตะกอนเกิดขึ้นเหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน เนื่องจากกระบวนการตกตะกอนหลังจากการทำจาร์เทสต์อาศัยแรงโน้มถ่วงในการกำจัดสารแขวนลอยเพียงอย่างเดียว ขณะที่กระบวนการกรองมีหลายกลไกเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การเคลื่อนย้ายสารแขวนลอย (Transport) ในน้ำเข้าไปหาสารกรอง และวิธีการทำให้สารแขวนลอยเกาะจับอยู่กับสารกรองหรือสิ่งที่ติดอยู่กับสารกรองก่อนแล้ว (Attachment) เป็นต้น ทำให้มีกระบวนการกรองมีประสิทธิภาพสูงกว่า [13]



รูปที่ 4 การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD) น้ำมันและไขมัน (FOG) ของถังกรองทรายแบบกรองตรง

นอกจากนี้การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง สามารถบอกอายุการทำงานของถังกรองทรายได้ โดยที่ความเข้มข้นของสารส้มเท่ากับ 50 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ถังกรองทรายมีอายุการใช้งานเท่ากับ 150 90 และ 60 นาที ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงๆ ให้ประสิทธิภาพการกรองสูง แต่อายุการทำงานของถังกรองสั้นลง โดยที่ความเข้มข้นของสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคน้ำมันสูงใกล้เคียงกับที่ 150 มิลลิกรัม/ลิตร และให้อายุการทำงานของถังกรองสูงกว่า ดังนั้น จึงเลือกให้สารส้มที่ความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร และจากการศึกษาการล้างย้อนทำความสะอาดสารกรอง พบว่า การเติมสารโคแอกกูแลนท์ช่วยให้ประสิทธิภาพในการล้างย้อนเพิ่มสูงขึ้นได้อีกด้วย เนื่องจากฟล็อคของสารส้มสามารถจับตัวกับอนุภาคน้ำมันที่สะสมบริเวณผิวหน้าและภายในของชั้นกรอง โดยเมื่อทำการล้างย้อนชั้นกรองทำให้เกิดการขยับตัวจนมีช่องว่าง ซึ่งทำให้สิ่งสกปรกต่างๆที่ตกตะกอนบนชั้นกรองและสะสมภายในช่องว่างของชั้นกรองหลุดออกมาจากชั้นกรองด้วยแรงดันของน้ำ

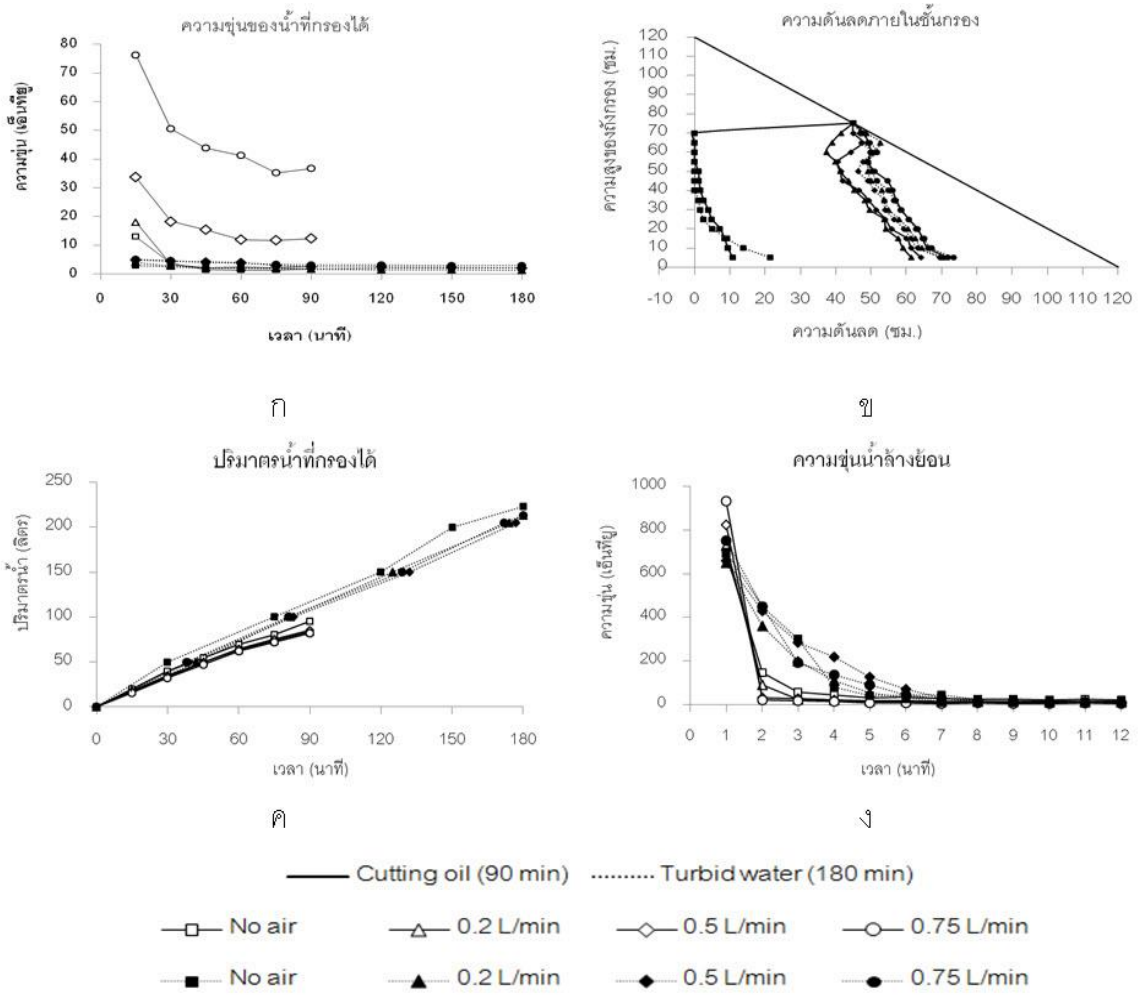
โดยสรุปการเติมสารโคแอคคูแลนท์ (สารส้ม) ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกรอง สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองได้ เนื่องจากอนุภาคน้ำมันจับตัวกันเป็นฟล้อคสะสมที่ผิวหน้าของชั้นกรองและภายในชั้นกรอง แต่ส่งผลทำให้อายุการทำงานของถังกรองสั้นลง จึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการทำงานของถังกรองทราย โดยการประยุกต์การเติมอากาศภายในชั้นกรอง

3.4. การเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรองทราย โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศ

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรอง เนื่องจากการเติมสารโคแอกกูแลนท์ (สารส้ม) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองให้ดีขึ้นได้ แต่ส่งผลให้อายุการทำงานของถังกรองสั้นลง จึงได้มีการประยุกต์ใช้การเติมอากาศร่วมกับกระบวนการกรองตรง โดยการติดตั้งหัวเติมอากาศรูปวงแหวนด้านบนที่ตำแหน่ง 25 เซนติเมตรจากผิวหน้าชั้นกรอง ซึ่งการเติมอากาศอาจทำให้ชั้นทรายกรองเกิดการขยับตัว ทำให้อนุภาคต่างๆ ที่สะสมที่ผิวหน้าชั้นกรองสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกรองได้มากขึ้น [4] โดยศึกษาอัตราการเติมอากาศ 0.2 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที เพื่อทดลองหาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมกับถังกรองทรายในการเพิ่มอายุการทำงาน และในขณะเดียวกันต้องไม่ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายด้วย

จากการผลการทดลองดังรูปที่ 6 ประสิทธิภาพของถังกรองในการแยกอนุภาคความขุ่นที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 1.1-4.0 1.8-4.8 และ 2.2-5.0 เอ็นทียู ตามลำดับ และประสิทธิภาพของถังกรองในการแยกอนุภาคน้ำมัน พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 2.0-3.1 11.7-12.3 และ 35.4-36.1 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองผ่านถังกรองมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง และค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาการกรอง โดยที่อัตราการเติมอากาศที่ 0.2 ลิตร/นาที ให้ประสิทธิภาพในการกรองได้ดีที่สุดทั้งในกรณีการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากอัตราการเติมอากาศที่มากเกินไปทำให้อนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกรองได้ง่ายและบางส่วนหลุดรอดผ่านชั้นกรองออกไปได้ ทำให้ความขุ่นมีค่ามากขึ้น โดยอัตราการเติมอากาศส่งผลให้ความพรุนของสารกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ เมื่อความพรุน (ε) มากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งสกปรกมีค่าลดลง จากการศึกษาค่าความดันลดภายในชั้นกรอง พบว่าการสูญเสียความดันลดเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชั้นกรอง เนื่องจากการเติมอากาศภายในชั้นกรอง ส่งผลให้สารกรองเกิดการขยับตัวอนุภาคต่างๆ สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นของสารกรองได้มากขึ้น และส่งผลให้อัตราเร็วในการกรองลดลงเพียงเล็กน้อย จากการศึกษาประสิทธิภาพการล้างย้อน พบว่าการเติมอากาศช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการล้างย้อนและลดเวลาในการล้างย้อนลงได้อีกด้วย

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

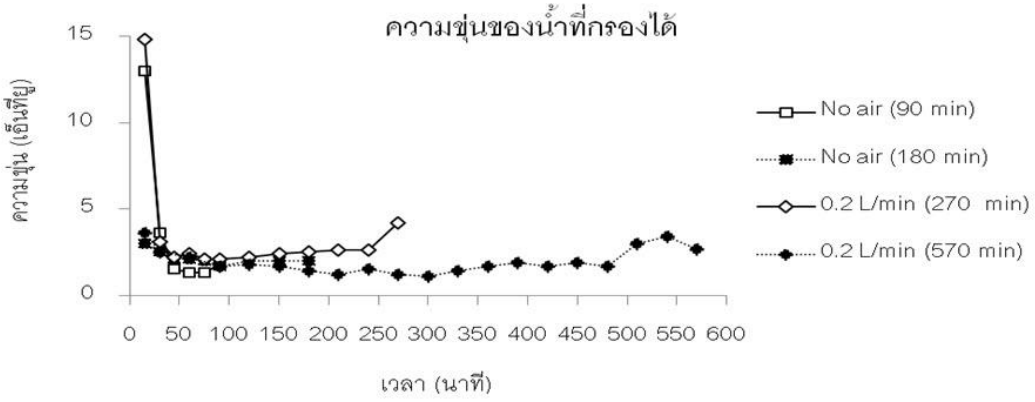


รูปที่ 6 การเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรองทราย โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศ ภายในชั้นกรอง

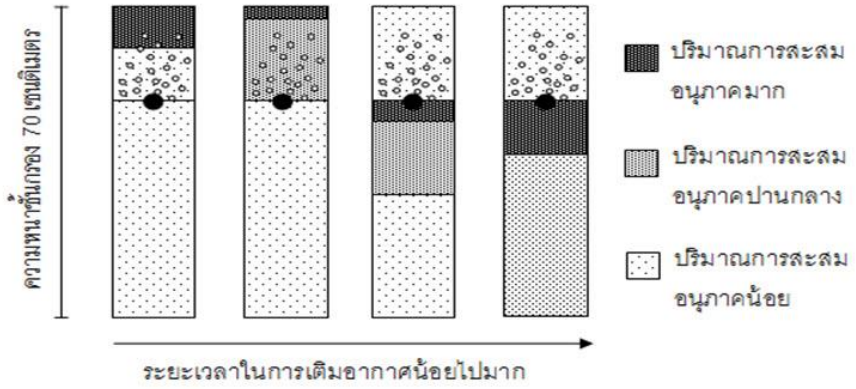
ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมในการเพิ่มอายุการทำงานของถังกรองเท่ากับ 0.2 ลิตร/นาที โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน อัตราเร็วในการกรอง การสูญเสียความดันลด และการล้างย้อนที่ดีที่สุด จากนั้นได้มีการออกแบบการกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีร่วมกับการเติมอากาศ โดยดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกรอง และระยะเวลาของถังกรอง

จากผลการทดลอง ดังรูปที่ 7 ความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 2.2-2.8 และ 0.6-2.4 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยน้ำที่ผ่านการกรองในช่วงเริ่มต้นมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง จากนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว และมีระยะเวลาในการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันนาน 570 นาที (3.2 เท่าของถังกรองแบบธรรมดา) และ270 นาที (3 เท่าของถังกรองแบบธรรมดา) ตามลำดับ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าการประยุกต์ถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศที่ 0.2 ลิตร/นาที สามารถช่วยทำให้ชั้นกรองด้านบนเหนือจุดเติมอากาศขยายตัว ส่งผลให้อนุภาคความความขุ่นและอนุภาคน้ำมันที่สะสมบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง สามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรอง และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านล่างของจุดเติมอากาศลงไปได้มากขึ้น ดังรูปที่ 8 ทำให้ถังกรองทรายมีอายุการใช้งานนานขึ้น และยังสามารถใช้สารกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยที่ไม่ส่งกระทบต่อประสิทธิภาพในการกรองของถังกรอง

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1



รูปที่ 7 ความขุ่นน้ำที่กรองได้ ที่อัตราการเติมอากาศที่ 0.2 ลิตร/นาที ขณะดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 8 ลักษณะการสะสมอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันภายในชั้นกรอง ของถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศ

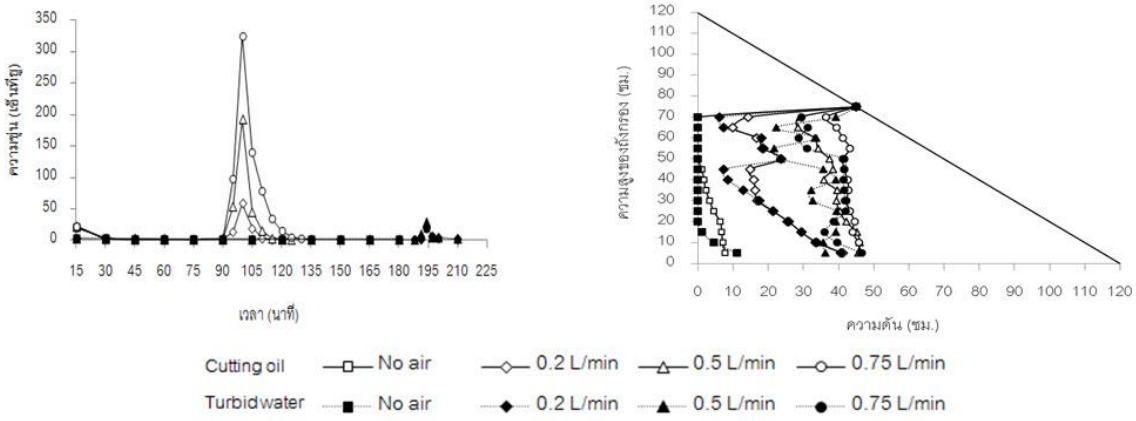
3.5. การดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ (Batch)

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อประยุกต์รูปแบบการเติมอากาศแบบกะ เนื่องจากที่ผ่านมาการเติมอากาศตลอดเวลาขณะทำการกรองทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการดำเนินงานสูง ดังนั้น จึงได้มีการประยุกต์ใช้การเติมอากาศเมื่อถังกรองอุดตัน เพื่อลดการสะสมของอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันที่ผิวหน้าชั้นกรอง โดยเติมอากาศนาน 10 นาที [4] โดยศึกษาอัตราการเติมอากาศ 0.2 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที เพื่อทดลองหาอัตราการเติมอากาศแบบกะที่เหมาะสมกับกระบวนการกรองแบบต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ระยะเวลาในการดำเนินระบบที่ยาวนาน ประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ และประสิทธิภาพของถังกรองยังคงเดิม

จากผลการทดลอง รูปที่ 9 การประยุกต์รูปแบบการเติมอากาศแบบกะ โดยการเติมอากาศเมื่อถังกรองอุดตันเท่านั้นเป็นระยะเวลานาน 10 นาที สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น พบว่า ที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที สามารถทำให้อนุภาคความขุ่นเคลื่อนที่เข้ามาภายในชั้นกรอง การสูญเสียความดันลดที่ผิวหน้าชั้นกรองมีค่าลดลง โดยค่าอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมกับการเติมอากาศแบบกะในกรณีการกรองอนุภาคความขุ่นมีค่าสูงกว่ากรณีการกรองอนุภาคน้ำมัน ซึ่งอาจมีผลมาจากอนุภาคความขุ่นมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคน้ำมันทำให้ใช้อัตราการเติมอากาศสูงกว่าเพื่อทำให้อนุภาคที่สะสม

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

ตัวอยู่เกิดการฟุ้งกระจายโดยทำให้ความพรุนของชั้นกรองเพิ่มขึ้น และอนุภาคสามารถเคลื่อนที่เข้ามาภายในชั้นกรองได้มากขึ้น สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน พบว่า ที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที ฟองอากาศสามารถทำให้อนุภาคน้ำมันที่ตกตะกอนและสะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองนั้นเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นสารกรอง ทำให้ความดันลดบริเวณผิวหน้าชั้นกรองมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราการเติมอากาศต่ำเกินไปฟองอากาศไม่สามารถทำให้อนุภาคต่างๆ ที่สะสมอยู่ที่ผิวหน้าเกิดการฟุ้งกระจายและเคลื่อนที่เข้ามาภายในชั้นกรองได้มาก ในทางกลับกันที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที ฟองอากาศทำให้อนุภาคต่างๆ ชั้นกรองขยายตัวมากเกินไปทำให้อนุภาคต่างๆ เคลื่อนที่เข้าภายในชั้นกรองและบางส่วนทะลุผ่านชั้นกรองออกไปได้ ทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลง

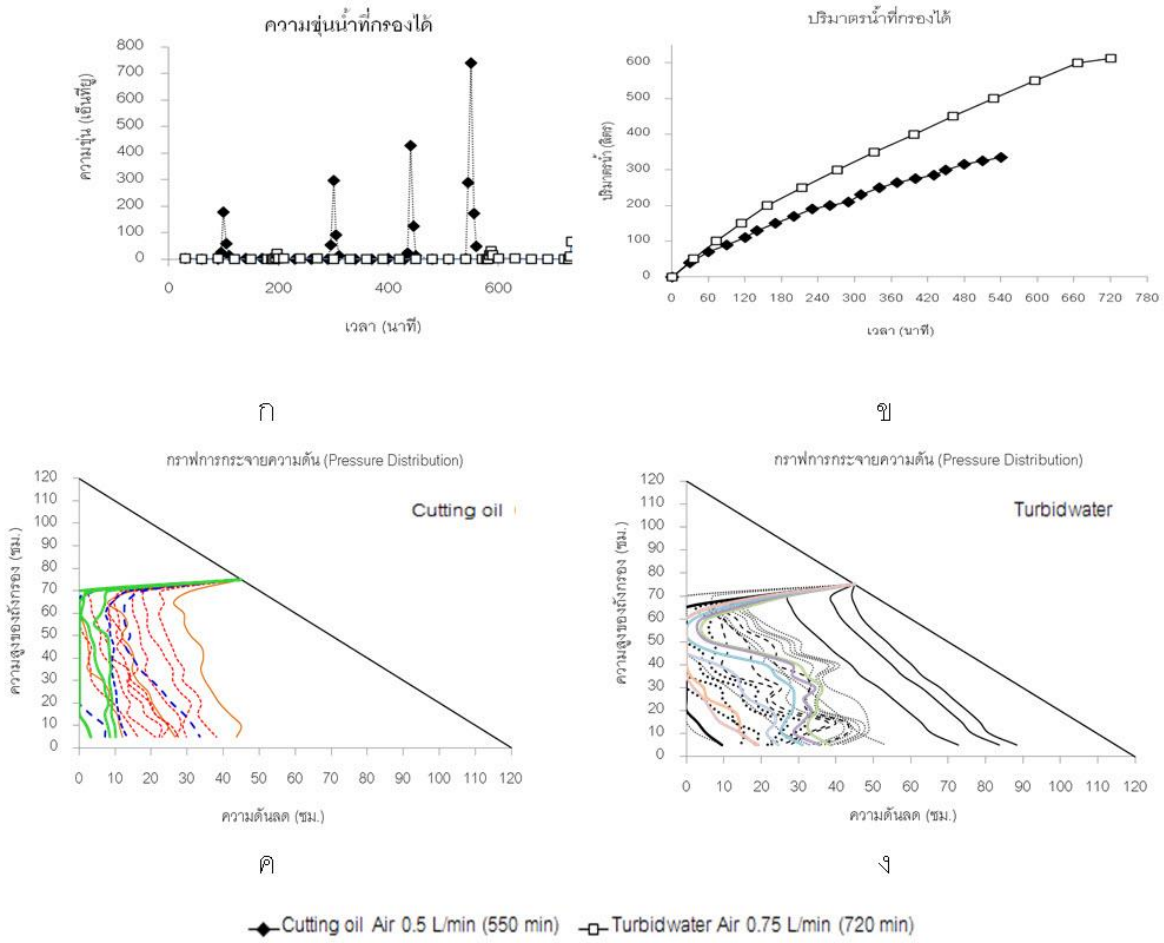


รูปที่ 9 ถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

โดยสรุปการกรองอนุภาคความขุ่น และการกรองอนุภาคน้ำมัน จะต้องใช้อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมเท่ากับ 0.75 และ 0.5 ลิตร/นาที ตามลำดับ และเพื่อให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรงร่วมกับการเติมอากาศแบบกะ จึงทำการทดลองโดยดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและระยะเวลาในการทำงานของถังกรองทราย

จากผลการทดลองดังรูปที่ 10 ถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ในการกรองอนุภาคความขุ่น และอนุภาคน้ำมัน พบว่าอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสม สามารถช่วยเพิ่มระยะเวลาในการกรอง และประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ อีกทั้งยังไม่ส่งกระทบต่อประสิทธิภาพของถังกรอง โดยในการเปรียบเทียบกลไกการกรองของถังกรองในการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน พบว่าการกรองอนุภาคความขุ่นสามารถดำเนินการกรองได้นานถึง 720 นาที โดยในแต่ละรอบของการเติมอากาศ ถังกรองสามารถดำเนินการกรองอนุภาคความขุ่นได้ยาวนานกว่าการกรองอนุภาคน้ำมันมาก เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจับตัวกันเป็นฟล้อค ทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้เกิดการตกตะกอนบนผิวหน้าชั้นกรองและสมสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ระยะเวลาในการดำเนินระบบสั้นกว่า จากนั้นเมื่อทำการเติมอากาศเมื่อถังกรองอุดตัน ชั้นกรองจึงขยายตัวอนุภาคน้ำมันจึงสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น ทำให้การกรองอนุภาคน้ำมันต้องทำการเติมอากาศถึง 4 รอบ ภายในระยะเวลาการดำเนินระบบ 550 นาที ในขณะที่การกรองอนุภาคความขุ่นต้องทำการเติมอากาศ 3 รอบ ภายในระยะเวลาในการดำเนินระบบนานถึง 720 นาที โดยประสิทธิภาพในการกรองลดลงในแต่ละรอบของการเติมอากาศ เนื่องจากอนุภาคความขุ่นและน้ำมันเกิดการสะสมตัวภายในชั้นของสารกรองเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการกรอง และความขุ่นน้ำที่กรองได้สำหรับการกรองอนุภาคความน้ำมันมีค่าสูงกว่าการกรองอนุภาคความขุ่น เนื่องจากในช่วงระหว่างการเติมอากาศ ฟล็อคของน้ำมันเกิดการแตกตัวมีอนุภาคเล็กลงและเกิดหลุดลอดผ่านชั้นกรองมาปนน้ำกับน้ำที่ออกทำให้ความขุ่นที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1



รูปที่ 10 การดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที และ 0.5 ลิตร/นาที

ดังนั้น แนวทางดำเนินการกรองแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) มีความเป็นไปได้ในการลดพลังงานและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการเติมอากาศ เมื่อเลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสม สามารถดำเนินการกรองได้ยาวนานขึ้น และให้ประสิทธิภาพในการกรองที่ดี โดยในการกรองอนุภาคน้ำมัน เลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่ 0.5 ลิตร/นาที สามารถดำเนินการกรองได้นาน 540 นาที ซึ่งยาวนานกว่าการกรองแบบไม่มีการเติมอากาศถึง 6 เท่า ในการกรองอนุภาคความขุ่นเลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่ 720 ลิตร/นาที สามารถดำเนินการกรองได้ยาวนานถึง 720 นาที ซึ่งยาวนานกว่าการกรองแบบไม่มีการเติมอากาศถึง 4 เท่า

ดังนั้นการกรองแบบเติมอากาศแบบกะ สามารถใช้เป็นทางเลือกใหม่ในการปรับปรุงกระบวนการกรองแบบธรรมดาได้ โดยสรุปสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคความขุ่นและการแยกอิมัลชันน้ำมันออกจากน้ำด้วยกระบวนการกรองตรง (Direct filtration) ดังตารางที่ 1

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

ตารางที่ 1 สรุปสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันน้ำมัน ด้วยกระบวนการกรอง (Direct Filtration)

รูปแบบของถังกรอง	อนุภาคความขุ่น	อนุภาคน้ำมัน
ความเข้มข้นของสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)	-	100
อัตราการเติมอากาศแบบกะนาน 10 นาที (ลิตร/นาที)	0.75	0.5
อัตราการเติมอากาศขณะล้างย้อน (ลิตร/นาที)	0.75	0.75
ปริมาตรน้ำที่กรองได้ (ลิตร)	587	300
ระยะเวลาการทำงานของถังกรอง (นาที)	720	540

3.6. ประสิทธิภาพ และกลไกการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง

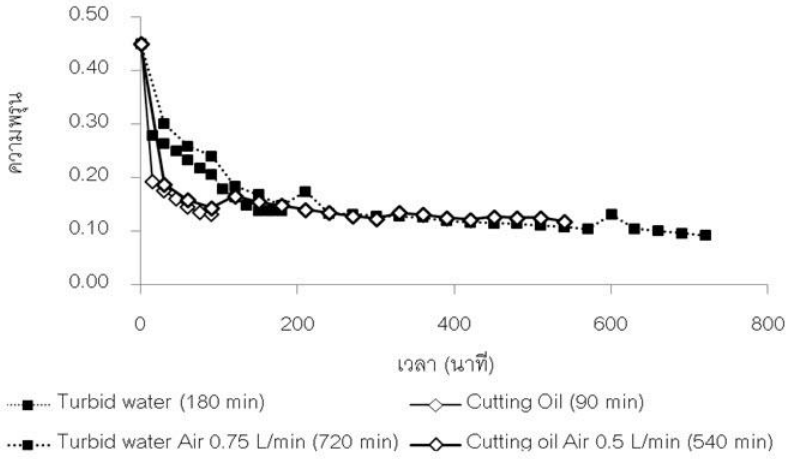
การประเมินประสิทธิภาพในการทำงานของถังกรองทรายแบบการกรองตรง (Direct Filtration) โดยประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง (Filtration Efficiency Equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure Drop Equation) ในการอธิบายและทำนายประสิทธิภาพในการกรองน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ อนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมัน ในรูปแบบการกรองต่างๆ

ในส่วนนี้จะอธิบายประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอย สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ เมื่อความพรุนของสารกรองมีค่าลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น ความดันลด (ΔP) เพิ่มขึ้น และความเร็วในการกรอง (V_S) มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความดันลดใช้สมการของ Kozeny-Carman Equation [5]

$$\frac{\Delta P}{L} = K_0 \frac{(1-\varepsilon)^{4/3}}{\varepsilon^3} \bar{V}_s$$

$$K_0 = \frac{150\upsilon(1-\varepsilon)^{2/3}}{\phi_s D_{po}^2}$$

เมื่อพิจารณาสมการคำนวณหาการสูญเสียความดันของชั้นกรอง กล่าวได้ว่า ตัวแปรค่าคงที่ในสภาวะเริ่มต้นของการทดลองถูกจัดให้เป็นตัวแปรในกลุ่มเดียวกัน คือ K_0 ได้แก่ ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ (D_P = 0.55 มิลลิเมตร) ความพรุน (ε) ของทรายกรองเริ่มต้นประมาณ 0.45 อุณหภูมิของน้ำขณะทำการทดลองมีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดเชิงจลน์ของน้ำ (υ) เท่ากับ 1.003 X 10^{-6} ตารางเมตร/วินาที ค่าความหนืดเชิงจลน์ของน้ำมัน (υ) เท่ากับ 1.006 X 10^{-6} ตารางเมตร/วินาที และดรรชนีความกลม (Φ) ของทรายกรองมีค่าเท่ากับ 0.85 โดยที่ค่าความดันลด (ΔP) ความเร็วในการกรอง (V_S) และความพรุน (ε) และจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการกรอง ทั้งนี้ ค่าความดันลดและความเร็วในการกรองสามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าความพรุนที่สภาวะการกรองต่างๆ ได้



รูปที่ 11 ความพรุนที่ผิวหน้าชั้นกรอง ตามระยะเวลาในการกรอง สำหรับการกรองแบบต่อเนื่อง

จากผลการคำนวณความพรุนดังรูปที่ 11 พบว่า การเติมอากาศในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตันทำให้ถังกรองกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากอากาศทำให้ชั้นสารกรองบริเวณด้านบนเหนือจุดเติมอากาศเกิดการขยายตัว ส่งผลทำให้อนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันจำนวนมากที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองกระจายออกและเคลื่อนที่เข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นสารกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้ความพรุนและอัตราการกรองมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ถังกรองสามารถเดินระบบต่อไปได้ โดยหลังการเติมอากาศในทุกๆ รอบ ความพรุนของสารกรองจะมีค่าลดลงต่อเนื่องอย่างช้าๆ (ลดลงตามเวลาการกรอง) โดยมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น เนื่องจากอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของชั้นสารกรองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้ความหนาของชั้นกรองที่เพิ่มขึ้น และเพื่ออธิบายความพรุนที่มีค่าลดลง เนื่องจากการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง จึงได้ทำการศึกษาอัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง สำหรับการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการดังนี้

$$\sigma . L . \rho_s = \int_0^t C_o \bar{V} dt - \int_0^t C \bar{V} \, dt$$

ตารางที่ 2 ความพรุนที่ผิวหน้าชั้นกรอง ตามระยะเวลาในการกรอง สำหรับการกรองแบบต่อเนื่อง

การกรอง	**ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)**	**ระยะเวลาในการกรอง (นาที)**	**อัตราการสะสมของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง (σ)** (m^3 soild / m^3 of bed)
อนุภาคความขุ่น	-	180	0.000085
	-	720	0.000198
อนุภาคน้ำมัน	100	90	0.001768
	100	540	0.003529

จากผลการคำนวณดังตารางที่ 2 พบว่า อัตราการสะสมของอนุภาคความขุ่น และอนุภาคน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับกระบวนการกรองตรงแบบธรรมดาที่ไม่มีการเติมอากาศ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการสะสมของอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันจริง โดยการสะสมของอนุภาคน้ำมันภายในชั้นกรองเกิดขึ้นประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการดำเนินการ

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

กรองที่เพิ่มขึ้นถึง 6 เท่า ในขณะที่การกรองอนุภาคความขุ่นพบว่า เกิดการสะสมของอนุภาคความขุ่นภายในชั้นกรองมากขึ้นประมาณ 2.5 เท่า โดยมีระยะเวลาในการดำเนินการกรองที่เพิ่มขึ้น 4 เท่า เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่สะสมตัวนั้นหลุดออกจากชั้นของสารกรองขณะทำการเติมอากาศทำให้ค่าความขุ่นขณะนั้นสูงขึ้นประมาณ 15-20 นาที และทุกๆ รอบของการเติมอากาศ ส่งผลให้การสะสมของอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้นในปริมาณน้อยกกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคความขุ่น

ในส่วนนี้จะอธิบายกลไกการทำงานของถังกรองทราย จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกรองน้ำ $In(C/C_0)=1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$ พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายขึ้นกับปัจจัยต่างๆ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่เกี่ยวกับถังกรอง คือ ขนาดสารกรอง (d) ความหนาสารกรอง (L) และความพรุนของสารกรอง (ε) และปัจจัยที่สอง คือ อนุภาคแขวนลอยที่อยู่ในเฟสน้ำที่ต้องการกำจัด โดยการกรองเป็นการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำไปไว้บนสารกรอง หรือช่องว่างระหว่างสารกรอง ซึ่งสามารถอธิบายในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การชน (Collision Efficiency, η) และค่าสัมประสิทธิ์เกาะติด (Attachment Efficiency, α) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$\eta_T=\frac{\Delta P g d_e^2}{18\mu}+\frac{3}{2}\left(\frac{d_e}{d_p}\right)^2+0.9\left(\frac{KT}{\mu d_e d_p V}\right)^{2/3}$$

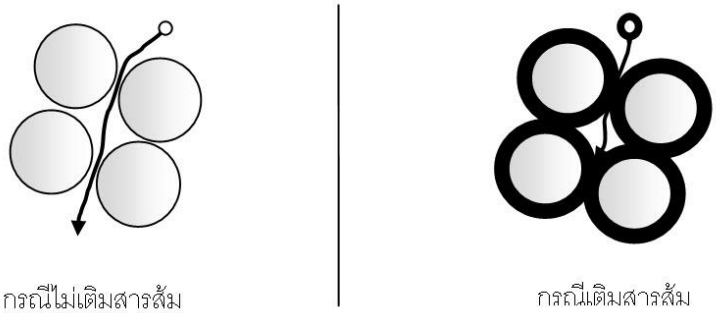
จากผลการคำนวณ ค่าสัมประสิทธิการชน (Collision Efficiency, η) ดังตารางที่ 3 สามารถอธิบายได้ว่า อนุภาคความขุ่นมีโอกาสในการกระทบกับสารกรองที่อยู่นิ่งได้มากกว่าอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากอนุภาคความขุ่นมีขนาดที่ใหญ่ทำให้กลไกการดักจับเป็นแบบการตกตะกอน หรือติดค้างภายในช่องว่างของสารกรอง ในขณะที่อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก กลไกการดักจับเป็นแบบการแพร่กระจาย (Diffusion Force) ซึ่งทำให้มีโอกาสในการกระทบกับสารกรองน้อยกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคน้ำมันของถังกรองทรายต่ำกว่าการกำจัดอนุภาคความขุ่น และสำหรับกระบวนการกรองตรงที่มีการเติมสาร โคแอกกูแลนท์ (สารส้ม) เพื่อช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน ให้เคลื่อนที่มาสัมผัสและเกาะติดกับชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพเกาะติด (Collision Efficiency, α) ของอนุภาคน้ำมันและชั้นทรายกรองเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิการชน สำหรับอนุภาคความขุ่น และอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าสัมประสิทธิ์การชน (η)	ค่าสัมประสิทธิ์เกาะติด (α)
อนุภาคความขุ่น	-	0.047186	1
อนุภาคน้ำมัน	-	0.015217	1
	50	0.022112	1
	100	0.025523	1
	150	0.030740	1

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การชน (η) ในการกรองอนุภาคน้ำมันที่มีการเติมสารส้ม พบว่าการเติมสารส้มทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคสารกรองกับอนุภาคน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสารส้มทำให้อนุภาคน้ำมันจับตัวกันเป็นฟล้อค อีกทั้งยังทำให้อนุภาคทรายกรอง (D_p) มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 12 ซึ่งเกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคน้ำมันบนอนุภาคของทรายกรอง และที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การชนสูงขึ้นด้วย และสามารถเกาะติดกับอนุภาคของทรายกรองได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพของถังกรองเพิ่มสูงมากขึ้น

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1



รูปที่ 12 ลักษณะการชนระหว่างอนุภาคสารกรองและอนุภาคน้ำมัน

4. สรุป

การเปรียบเทียบการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรงธรรมดา ในการแยกอนุภาคความขุ่น และการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ พบว่าสามารถแยกอนุภาคความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพถึงร้อยละ 96.65 ในขณะที่การแยกอิมัลชันของน้ำมันได้เพียงร้อยละ 45.52 เท่านั้น เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กประมาณ 1 ไมครอนเท่านั้น และมีเสถียรภาพสูง ทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของชั้นกรองออกไปได้ การเติมสารโคแอกกูแลนท์เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันที่มีความคงตัวให้กับน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการกรอง สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากเฟสน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสม เท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงถึงร้อยละ 96.17 กำจัดไขมันและน้ำมันเท่ากับร้อยละ 97.98 สามารถดำเนินการกรองได้เพียง 60 นาทีเท่ากัน เนื่องจากความดันลดที่ผิวหน้าชั้นกรองเพิ่มสูงขึ้น ถังกรองจึงอุดตันเร็วกว่าปกติ ทำให้มีแนวคิดในการเพิ่มอายุการทำงานของถังกรองทราย โดยการเติมอากาศ ซึ่งพบว่าสามารถช่วยทำให้ถังกรองมีอายุการทำงานที่ยาวนานขึ้น โดยในสภาวะการเติมอากาศที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคน้ำมัน คือ ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที สามารถดำเนินการกรองได้ยาวนานถึง 270 นาที แต่ต้องใช้พลังงานในการเติมอากาศเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงได้ทำการประยุกต์การเติมอากาศแบบกะ (Batch) ซึ่งสามารถช่วยประหยัดพลังงานในการเติมอากาศลงได้ รวมถึงลดความถี่ในการล้างย้อนถังกรองได้อีกด้วย และจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ (Filtration Equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure Drop Equation) ในการอธิบายประสิทธิภาพในการกรองน้ำที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าการเติมสารส้มสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการชน (Collision Efficiency, η) ให้มากขึ้น เนื่องจากอนุภาคทรายกรอง (D_p) มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคน้ำมันบนอนุภาคของทรายกรอง ทำให้อนุภาคสารแขวนลอยเคลื่อนที่เข้ามาชนกับอนุภาคสารกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของถังกรองในการกำจัดอนุภาคต่างๆ เพิ่มสูงขึ้น และอีกทั้งการเติมสารส้มนั้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะติด (Attachment Efficiency, α) ระหว่างสารกรองกับอนุภาคน้ำมันให้มากขึ้น เนื่องจากสารกรองมีฟล้อคของสารส้มเคลือบอยู่และเมื่อฟล้อคของสารส้มเคลื่อนที่เข้าหาสารกรอง สามารถช่วยให้เกิดการเกาะติดกับสารกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย สอดคล้องกับค่าความพรุน อัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรองและขนาดของสารกรองที่เกิดการการสะสมตัว รวมถึงความเร็ว แกรเดียนท์ภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองเพิ่มสูงขึ้น โดยความพรุนของชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ทำให้ขนาดของสารกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนภายในชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น

DOI:10.4186/ejth.2012.4.4.1

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา ภายใต้รหัสโครงการ FW1017A ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU56-FW14) และกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (RES560530068) โดยขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้พื้นที่ทำการทดลองและตลอดจนวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในการทดลอง

บรรณานุกรม

[1] มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, *วิศวกรรมประปา*, เล่ม 2, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

[2] Y. Aurelle, *Treatment of Oil-Containing Wastewater*. Bangkok: Chulalongkorn University, Department of Sanitary Engineering, 1985.

[3] M. J. Rosen, *Surfactants and Interfacial Phenomena*. New York: John Wiley, 1989.

[4] รัฐพล เจียวิริยะบุญญา, "การพัฒนาถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศของระบบการผลิตน้ำประปา," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย, 2552.

[5] C. J. Chuang and K. Y. Li, "Effect of coagulant dosage and grain size on the performance of direct filtration," *Separation and Purification Technology*, vol. 12, pp. 229-241, 1997.

[6] W. Viessman and M. J. Hammer, *Water Supply and Pollution Control*, 7th ed. Pearson Education, 2005.

[7] กันตพงศ์ ผิวเหลือง, "การศึกษาถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกเพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำ," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย, 2552.

[8] ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, "การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและโซโน-เฟนตัน," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา), บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย, 2552.

[9] S. Kawamura, *Integrated design and operation of water treatment facilities*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.

[10] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water Quality*, vol. 1. Geneva: WHO Library Cataloguing in Publication Data, 2006.

[11] G. Rios, C. Pazos, and J. Coca, "Destabilization of cutting oil emulsions using inorganic salts as coagulants," *Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 138, pp. 383-389, 1998.

[12] F. Renault, B. Sancey, P.M. Badot, and G. Crini, "Chitosan for coagulation/flocculation processes - An eco-friendly approach," *European Polymer Journal*, vol. 45, pp. 1337-1348, 2009.

[13] T. D. Reynolds and P. A. Richards, *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, 2nd ed. Boston: PWS Publishing, 1996.