

การเปรียบเทียบกระบวนการกรองตรง ระหว่างการแยกอนุภาค
ความขุ่น และการแยกอิมัลชันน้ำมันออกจากเฟสน้ำ



นางสาวศุภนุช ยิ่งทรัพย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON OF DIRECT FILTRATION BETWEEN TURBIDITY SEPARATION AND
OILY-EMULSION SEPARATION FROM AQUEOUS PHASE



Miss Suphanuch Yangsap

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบกระบวนการกรองตรง ระหว่างการแยก
อนุภาคความขุ่น และการแยกอิมัลชันน้ำมันออกจากเฟสน้ำ

โดย

นางสาวศุภนุช ยังทรัพย์


สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

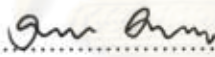
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

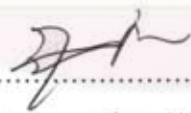
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงค์)

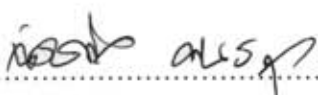
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนี)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิรมา ปัญญาเมธิกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ฉัตรแก้ว ตันสกุล)

ศุภนุช ยังทรัพย์ : การเปรียบเทียบกระบวนการกรองตรง ระหว่างการแยกอนุภาค ความขุ่น และการแยกอิมัลชันน้ำมันออกจากเฟสน้ำ. (COMPARISON OF DIRECT FILTRATION BETWEEN TURBIDITY SEPARATION AND OILY-EMULSION SEPARATION FROM AQUEOUS PHASE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 176 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกลไกการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอนุภาคที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน คือ อนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมัน โดยศึกษาการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่ไม่มีและมีการเติมสารเคมี (สารส้ม) รวมถึงประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง (Filtration efficiency equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure drop equation) ในการอธิบายกลไกที่เกิดขึ้น จากผลการทดลอง พบว่าถังกรอง ทรายแบบกรองเร็วสามารถแยกอนุภาคความขุ่นได้ดีถึงร้อยละ 96.65 ในขณะที่สามารถแยกอิมัลชัน ของน้ำมันได้เพียงร้อยละ 45.52 เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคความขุ่น และมี เสถียรภาพสูงทำให้ยากต่อการแยกด้วยถังกรองทรายแบบธรรมดา จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ก่อนเข้าสู่ถังกรอง ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน ก่อนเข้าสู่ถังกรอง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม ประสิทธิภาพของถังกรองเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟล็อกของสารส้มจับตัวกับอนุภาคน้ำมัน และสะสมอยู่ด้านบนและภายในช่องว่างของชั้น กรอง ทำให้ความพรุนลดลง ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการชนและการเกาะติดของอนุภาคภายในชั้นกรอง อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลเสียต่อความดันลดภายในชั้นกรองที่เพิ่มขึ้น และอายุการ ใช้งาน รวมถึงรูปแบบการเดินระบบโดยรวม จึงได้มีการประยุกต์การเติมอากาศ เพื่อเพิ่มอายุการ ทำงานของถังกรอง พบว่าช่วยลดการสะสมของอนุภาคต่างๆ บริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ทำให้มี ระยะเวลาการทำงานที่นานขึ้น แต่ต้องใช้พลังงานในการเติมอากาศค่อนข้างมาก และจากการ ประยุกต์การเติมอากาศแบบกะ (Batch) พบว่าสามารถช่วยลดการสะสมของอนุภาคต่างๆ ที่ผิวหน้า ชั้นกรองได้ และยังทำให้สามารถใช้สารกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอีกด้วย จากการประยุกต์ใช้ สมการทางคณิตศาสตร์ของการกรองพบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย สอดคล้องกับ ค่าความพรุนของชั้นกรอง การสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ขนาดของสารกรองที่เกิด จากการสะสมตัว และความปั่นป่วนภายในชั้นกรองที่เกิดขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต..... ศุภนุช ยังทรัพย์
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2553.....

5170716721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : TURBID PARTICLE / OILY-EMULSION / SAND FILTRATION / DIRECT
FILTRATION / COAGULATION-FLOCCULATION

SUPHANUCH YANGSAP : COMPARISON OF DIRECT FILTRATION
BETWEEN TURBIDITY SEPARATION AND OILY- EMULSION SEPARATION
FROM AQUEOUS PHASE. ADVISOR : ASST. PROF. PISUT PAINMANAKUL,
Ph.D., 176 pp.

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. By using the filtration model, the increase filtration efficiency is related to the porosity of the deposited layer, grain size, and turbulence.

Department : Environmental Engineering...

Student's Signature

Suphanuch Yangsap

Field of Study : Environmental Engineering

Advisor's Signature

Pisut P.

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาส คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัย มาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธิกุล และดร. ฉัตรแก้ว ตันสกุล ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ ดิชม แก่ไขในงานวิจัยนี้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชา

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และให้คำแนะนำในการใช้งาน ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้องทุกคน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือ งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว ที่สนับสนุนและให้โอกาสในการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ลักษณะของอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมัน.....	6
2.2 แนวทางการแยกสารปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำหรือน้ำเสีย.....	11
2.3 หลักการทำงานของถังกรองทราย.....	15
2.4 หลักการทำงานของถังกรองแบบเติมอากาศ.....	16
2.5 ทฤษฎีของการกรอง.....	17
2.6 การไหลของน้ำในการกรอง.....	22
2.7 อัตราการไหลในการล้างย้อนและการขยายตัวของสารกรอง.....	26
2.8 การกรองตรงโดยการเติมสารเคมี.....	28
2.9 มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer).....	29
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37

บทที่	หน้า
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	50
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	50
3.2 การติดตั้งชุดการทดลอง.....	54
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	55
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	69
4.1 อนุภาคความชุ่ม อิมัลชันของน้ำมัน และการประยุกต์ใช้ถังกรองทราย.....	69
4.2 กลไกการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรง.....	73
4.3 การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความชุ่ม และอิมัลชันของน้ำมันตัด.....	81
4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย.....	84
4.5 ความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรองทราย.....	94
4.6 การดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยการประยุกต์ใช้การเติม อากาศแบบกะ (Batch).....	106
4.7 ประสิทธิภาพและกลไกการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง.....	121
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	136
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	136
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	140
รายการอ้างอิง.....	142
ภาคผนวก.....	145
ภาคผนวก ก.....	146
ภาคผนวก ข.....	168
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	176

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย.....	12
2.2	ตัวอย่างการบันทึกค่าระดับน้ำที่ลดลงในมาตรวัดความดันน้ำ.....	32
2.3	ตัวอย่างการคำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ (1).....	34
2.4	ตัวอย่างการคำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ (2).....	35
3.1	คุณสมบัติของน้ำมันตัด.....	53
3.2	สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์.....	56
3.3	ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว....	58
3.4	ตัวแปรในการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นด้วยวิธีจาร์เทสต์.....	59
3.5	ตัวแปรในการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยจาร์เทสต์.....	60
3.6	ตัวแปรในการศึกษาปรับปรุงประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรง.....	62
3.7	ตัวแปรในการศึกษาปรับปรุงประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบเติมอากาศ.....	64
3.8	ตัวแปรในการศึกษาการกรองแบบต่อเนื่องโดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ.....	66
4.1	ลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์.....	70
4.2	ลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์.....	70
4.3	ค่าตัวแปรสำหรับการคำนวณความดันลดภายในชั้นกรอง.....	72
4.4	ข้อมูลความขุ่นสูงสุดของน้ำที่กรองได้ในช่วงที่มีการเติมอากาศและระยะเวลาที่ความขุ่นกลับสู่สภาวะปกติ.....	108
4.5	สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันด้วยกระบวนการกรองตรง.....	121
4.6	อัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ของถังกรองทรายแบบกรองตรง.....	126
4.7	อัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ของถังกรองทรายแบบกรองตรงร่วมกับการเติมอากาศแบบกะ (Batch).....	127
4.8	ค่าสัมประสิทธิ์การชน สำหรับอนุภาคความขุ่น และอนุภาคน้ำมัน.....	135

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ silicon tetrahedral sheet วงกลมสีดำ คือ อะตอมซิลิกอนและวงกลมสีขาว คืออะตอมออกซิเจน.....	6
2.2	ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ aluminum hydroxide sheet และ magnesium hydroxide sheet.....	6
2.3	ก. โครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลิน.....	7
	ข. โครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลิน.....	7
2.4	รูปถ่ายอนุภาคดินคาโอลิน.....	8
2.5	การลดลงของค่า Interfacial tensions เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เพิ่มขึ้น.....	10
2.6	การละลายของสารลดแรงตึงผิวบนอนุภาคน้ำมัน.....	10
2.7	การผลึกกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากประจุไฟฟ้าบนพื้นผิว.....	10
2.8	การลอยของหยดน้ำมันเหนือผิวน้ำในรูปของฟิล์ม.....	11
2.9	ถังกรองแบบเติมอากาศ.....	17
2.10	การเคลื่อนที่ของตะกอน.....	18
2.11	มาตรวัดความดันน้ำแบบใช้แรงดันน้ำ.....	30
2.12	มาตรวัดความดันน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	31
2.13	หลักการทํางานของมาตรวัดความดันน้ำ.....	31
2.14	การจดบันทึกค่าระดับน้ำที่ลดลงในมาตรวัดความดันน้ำ.....	32
2.15	ขั้นตอนการสร้างกราฟการกระจายความดัน.....	34
2.16	กราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution).....	36
2.17	การสะสมตัวที่ผิวของสารกรอง.....	38
2.18	การติดตั้งชุดการทดลอง.....	39
2.19	ผลกระทบของปริมาณสารสัมผัสต่อขนาดของฟล็อก ค่าความดันลด และค่าความ ขุ่น.....	40
2.20	ผลกระทบของปริมาณสารสัมผัสและอัตราเร็วในการกรองต่อค่าความพรุนที่เกิด จากการสะสมตัวของอนุภาค.....	40
2.21	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41

ภาพที่		หน้า
2.22	ความเร็วของน้ำลี้ยงย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อน้ำลี้ยงย้อนอย่างเดียว.....	41
2.23	ความเร็วของน้ำลี้ยงย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อน้ำและอากาศลี้ยงย้อนพร้อมกัน ความเร็วของอากาศที่ 50 ม./ชม.....	42
2.24	ความเร็วของน้ำลี้ยงย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อน้ำและอากาศลี้ยงย้อนพร้อมกัน ความเร็วของอากาศที่ 30 เมตร/ชั่วโมง.....	42
2.25	ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบทรายกรองเร็วในระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3.....	43
2.26	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	44
2.27	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสารกรองไฟเบอร์.....	45
2.28	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที.....	46
2.29	ประสิทธิภาพการลี้ยงย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวและการลี้ยงย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่เวลาการลี้ยงย้อน 5-12 นาที.....	47
2.30	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน กลางและด้านล่างของชั้นกรองขณะดำเนินการทดลองแบบต่อเนื่อง.....	47
2.31	ความพรุนของชั้นกรองที่เวลาการกรองต่างๆ.....	48
3.1	ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ.....	50
3.2	หัวเติมอากาศ.....	51
3.3	มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer).....	52
3.4	การติดตั้งชุดการทดลอง.....	54
3.5	แผนผังการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว.....	57
3.6	แผนผังการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น.....	59
3.7	แผนผังการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน.....	60
3.8	แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองโดยตรงที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนต์.....	61
3.9	แผนผังการทำงานของถังกรองทรายโดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศ.....	63

ภาพที่		หน้า
3.10	แผนผังการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่องโดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ.....	65
4.1	รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น.....	71
4.2	การเปลี่ยนแปลงความดันตกภายในชั้นกรองกับอัตราเร็วในการกรอง ของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในกรณีสารกรองสะอาด.....	72
4.3	ค่าความชุ่มน้ำที่กรองได้ของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอนุภาคความชุ่มน้ำออกจากเฟสน้ำ.....	74
4.4	ค่าความชุ่มน้ำที่กรองได้ของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ.....	74
4.5	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่เวลาการกรอง 180 นาที.....	76
4.6	อัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่เวลาการกรอง 180 นาที.....	78
4.7	ความชุ่มน้ำล้างย้อนของถังกรอง ที่เวลาการล้างย้อนนาน 12 นาที.....	79
4.8	ความชุ่มน้ำล้างย้อนของถังกรอง ที่เวลาการล้างย้อน 5-12 นาที.....	80
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคความชุ่มน้ำและความเข้มข้นของสารส้ม.....	82
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดอิมัลชันของน้ำมันและความเข้มข้นของสารส้ม.....	83
4.11	ค่าความชุ่มน้ำที่กรองได้ของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ.....	85
4.12	ค่าความชุ่มน้ำที่กรองได้ของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร.....	86
4.13	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (COD) ของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ.....	87
4.14	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน (FOG) ของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ.....	88
4.15	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ เมื่อถังกรองอุดตัน.....	90
4.16	ปริมาตรน้ำของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ.....	91

ภาพที่	หน้า	
4.17	ความชุ่มน้ำล่างย่อนของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม ด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว ที่เวลาการล้างย่อน 12 นาที.....	92
4.18	ความชุ่มน้ำล่างย่อนของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว ที่เวลาการล้างย่อน 5-12 นาที.....	93
4.19	ความชุ่มน้ำที่กรองได้ของถังกรองทรายแบบเติมอากาศ ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	95
4.20	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์ของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	97
4.21	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	98
4.22	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่เวลาการกรอง 90 และ 180 นาที.....	99
4.23	อัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ	100
4.24	ความชุ่มน้ำล่างย่อน สำหรับการล้างย่อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	101
4.25	ความชุ่มน้ำที่กรองได้ ที่อัตราการเติมอากาศที่ 0.2 ลิตร/นาที ขณะดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง.....	103
4.26	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ที่เวลาการกรองสุดท้าย.....	104
4.27	ลักษณะการสะสมอนุภาคความชุ่มและอนุภาคน้ำมันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศ.....	105
4.28	ความชุ่มน้ำที่กรองได้ ของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	107
4.29	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ที่เวลาการกรอง 90 และ 180 นาที ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ.....	109
4.30	ความชุ่มน้ำที่กรองได้ ของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ขณะดำเนินการทดลองแบบต่อเนื่อง.....	113

ภาพที่	หน้า
4.31	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ขณะดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง ในการกรองอนุภาคน้ำมัน..... 117
4.32	การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ขณะดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง ในการกรองอนุภาคความขุ่น..... 118
4.33	อัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ขณะดำเนินการ กรองแบบต่อเนื่อง..... 119
4.34	ความพรุนของสารกรองตามความลึกของถังกรองทราย..... 122
4.35	ความพรุนที่ผิวหน้าชั้นกรอง ตามระยะเวลาในการกรอง..... 123
4.36	ความพรุนที่ผิวหน้าชั้นกรอง ตามระยะเวลาในการกรอง สำหรับการกรอง แบบต่อเนื่อง..... 124
4.37	ขนาดของสารกรองที่เกิดจากการสะสมตัวตามระยะเวลาในการกรอง..... 129
4.38	ขนาดของสารกรองของถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศแบบกะตาม ระยะเวลาในการกรอง..... 130
4.39	ความเร็วแกรเดียนท์ของถังกรองทราย ตามระยะเวลาในการกรอง..... 131
4.40	ความเร็วแกรเดียนท์ของถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศแบบกะตาม ระยะเวลาในการกรอง..... 132
4.41	ลักษณะการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ในการดำเนินการกรอง แบบต่อเนื่อง..... 133
4.42	ลักษณะการชนระหว่างอนุภาคสารกรองและอนุภาคน้ำมัน..... 135
5.1	ระบบเวียนน้ำที่ไม่ผ่านมาตรฐานในขณะทำการเติมอากาศ..... 140

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปรับปรุงคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสีย (Water and wastewater treatment) มีขั้นตอนหรือหน่วยกระบวนการที่ประยุกต์ใช้หลายระบบและหลายขั้นตอน อาทิ กระบวนการทางกายภาพ (Physical treatment processes) ทางชีวภาพ (Biological treatment processes) และทางเคมี (Chemical treatment processes) ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของเฟสน้ำที่เกี่ยวข้องเป็นสำคัญ สำหรับกระบวนการบำบัดทางกายภาพจัดเป็นขั้นตอนในการดักสิ่งเจือปนในเฟสน้ำ เช่น ตะกอนของแข็งแขวนลอย คราบไขมันและน้ำมันต่างๆ ออกจากน้ำเสียในขั้นเริ่มต้นของกระบวนการ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น การตกตะกอน (sedimentation) การลอยตัวด้วยอากาศ (dissolved air floatation; DAF) และการกรอง (filtration) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) โดยทั่วไป ตะกอนของแข็งแขวนลอย คราบไขมันและน้ำมันต่างๆ สามารถพบได้โดยทั่วไปในน้ำดิบและน้ำเสียในปัจจุบัน เช่น ตะกอนของแข็งแขวนลอย หรือสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็ก ที่เรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particle) สามารถพบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์เหล่านี้ทำให้น้ำเป็นขุ่นและไม่น่าใช้ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในระบบการผลิตน้ำประปา เนื่องจากไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัดของการผลิตน้ำประปา (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2539) ในขณะที่น้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันนั้นสามารถพบได้ทั้งน้ำเสียชุมชน และน้ำเสียอุตสาหกรรม ที่เกิดจากกระบวนการผลิตต่างๆ รวมถึงมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น โดยน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันอยู่หลายรูปแบบ แต่ที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดคือ น้ำมันอยู่ในรูปอิมัลชันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว เช่น น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oil) ซึ่งในอุตสาหกรรมนิยมนำน้ำมันตัดมาใช้งานในกระบวนการผลิตชิ้นงาน เนื่องจากสามารถใช้ความเร็วสูงในการตัดกลึงโลหะและมีราคาต่อหน่วยต่ำ การใช้งานเมื่อน้ำมันตัดผสมกับน้ำจะเกิดเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water Emulsion) ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก และมีเสถียรภาพสูง ยากต่อการแยกด้วยกระบวนการทางกายภาพทั่วไป (Rosen, 1989) นอกจากนี้ในน้ำมันตัดยังมีสารเคมีที่ก่อให้เกิดอันตราย ซึ่งประกอบด้วยน้ำมันแร่ สารอิมัลซิไฟเออร์ สารป้องกันการกัดกร่อน สารต้านทาน การเปลี่ยนแปลงกรด-เบส สารป้องกันการเกิดฟอง และสารป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เป็นต้น (Anderson และคณะ, 2003)

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดคอลลอยด์ และอนุภาคต่างๆ ที่สารแขวนลอยในน้ำ มีด้วยกัน 3 กระบวนการที่ต่อเนื่องกัน คือกระบวนการรวมตะกอนและสร้างตะกอน (Coagulation-Flocculation) กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) และกระบวนการกรอง (Filtration) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ล้วนเป็นการทำให้สารที่เป็นของแข็งจับรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และถูกกำจัดออก ซึ่งโดยปกติแล้วถังกรองทรายจะถูกนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยต่างๆ หลังจากการตกตะกอน อย่างไรก็ตามคุณภาพของน้ำดิบก็มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพในการแยก สำหรับกระบวนการกรองตรง (Direct Filtration) คือ การกรองโดยไม่จำเป็นต้องกำจัดความขุ่นออกก่อนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและตกตะกอน สามารถแบ่งเป็น 2 แบบ คือการกรองตรงที่ไม่ใช้สารเคมี และการกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี ซึ่งกระบวนการกรองตรงมีข้อดี คือ ลดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี ค่าก่อสร้าง และขั้นตอนลงได้ แต่การกรองตรงทำให้ถังกรองต้องรับภาระในการกำจัดอนุภาคต่างๆ ในปริมาณมาก อนุภาคต่างๆ จึงสะสมอยู่ภายในชั้นกรองและทำให้ถังกรองอุดตันอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่าลดลงอย่างมาก และไม่สามารถใช้ความหนาของชั้นกรองได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากการกรองส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นกรองทำให้ถังกรองอุดตันเร็ว (มันส์สิน ตันทุลเวศน์, 2539) จึงได้มีการนำกระบวนการเติมอากาศเข้ากับกระบวนการกรอง เพื่อพัฒนาระบบการกรองตรงในการกำจัดอนุภาคของแข็งสังเคราะห์จากดินคาโอไลน์ โดยพบว่า การเติมอากาศภายในชั้นกรองจะทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว ส่งผลให้อนุภาคความขุ่นสามารถหลุดเข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น จึงลดการสะสมของอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ทำให้ถังกรองมีอายุการใช้งานนานขึ้น (รัฐพล เจียวิริยะบุญญา, 2552) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาเป็นการศึกษาการกรองตรงในการบำบัดน้ำที่มีความขุ่น ซึ่งโดยทั่วไปน้ำเสียมีสารปนเปื้อนหลายชนิด เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ไขมัน ของแข็ง และสารแขวนลอยต่างๆ เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ซึ่งงานวิจัยนี้มีความสนใจในการประยุกต์ใช้การกรองตรงในการบำบัดน้ำที่มีสารปนเปื้อนที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่าง คืออนุภาคของแข็ง และอิมัลชันของน้ำมัน ซึ่งมีผิวสัมผัสของอนุภาคที่ยืดหยุ่น และจากความแตกต่างดังกล่าวอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของถังกรอง ลักษณะการอุดตันที่เกิดขึ้น ชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้ รวมถึงการล้างย้อนเพื่อทำความสะอาดสารกรองด้วย

ในการนี้ เพื่อเข้าใจถึงกลไกการทำงานที่เกิดขึ้นนั้น จึงควรทำการศึกษากการประยุกต์ใช้กระบวนการกรองตรงในการกำจัดอนุภาคที่แตกต่างกัน คืออนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมัน จึงต้องทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารโคแอกกูแลนต์ และปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ ต่อการกำจัดอนุภาคต่างๆ รวมถึงประสิทธิภาพของถังกรอง และการบำรุงรักษาถังกรอง

เพื่อเปรียบเทียบกลไกการทำงานของถังกรองทรายในการบำบัดน้ำที่มีสิ่งปนเปื้อนที่แตกต่างกัน สำหรับการทำนายประสิทธิภาพของถังกรองในการกำจัดอนุภาคต่างๆ พบว่าเมื่อเวลาในการกรองผ่านไป อัตราการกรองมีค่าลดลง อนุภาคความขุ่นจึงมีโอกาสติดค้างอยู่ในชั้นกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความพรุนของสารกรองมีค่าลดลง ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ $\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$ (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2539) กล่าวได้ว่าเมื่อความพรุนลดลง จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมีค่าสูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม ค่าความดันลด (Pressure drop) จะมีค่ามากขึ้น ซึ่งในทางทฤษฎีนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าความพรุนที่เวลาต่างๆ ในการกรอง ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคต่างๆ สะสมตัวที่สารกรองได้ ในทางทฤษฎีสามารถศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการกรองตรง โดยประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง (Filtration efficiency equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure drop equation) (Chuang และ Li, 1997) ทั้งนี้ องค์ความรู้ข้างต้นน่าจะส่งผลดีต่อการวิเคราะห์ภาพรวมการเดินระบบการกรองตรง ทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัดสารปนเปื้อนที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ระยะเวลาการทำงาน การล้างย้อนทำความสะอาด รวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศภายในชั้นกรอง เป็นต้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างการกรองตรงที่ไม่ใช้สารเคมี และการกรองตรงที่ใช้สารเคมี เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด อายุการดำเนินงานของถังกรอง โดยการกรองตรงที่ใช้สารเคมีได้มีการศึกษาปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการทำจาร์เทสต์ รวมถึงได้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการเติมอากาศเข้ามาช่วยทำให้ชั้นสารกรองขยายตัว ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะทำให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นกรอง และทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น โดยที่การเติมอากาศยังช่วยในเรื่องการล้างย้อนสารกรองได้ดีขึ้น โดยทำให้สามารถใช้น้ำและเวลาในการล้างย้อนได้น้อยลง นอกจากนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุน ค่าความดันลด และค่าขนาดของสารกรองเมื่อเกิดการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกในการทำงานและประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการกรองน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาถังกรองให้มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ถังกรองทรายแบบกรองตรง (Direct Filtration) สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีลักษณะทางกายภาพของอนุภาคปนเปื้อนแตกต่างกัน 2 ชนิด คือ อนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมัน
- 1.2.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oil) และน้ำที่มีความขุ่นสังเคราะห์จากดินคาโอลิน (Kaolin) ของถังกรองทราย โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) และรวมตะกอน (Flocculation)
- 1.2.3 ศึกษาแนวทางในการเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรองทรายแบบกรองตรง โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศในกระบวนการกรอง สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดและการเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรอง
- 1.2.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพและกลไกการกรองของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว โดยประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง (Filtration efficiency equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure drop equation) ในการอธิบายประสิทธิภาพในการกรองน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการวิจัยระบบห้องปฏิบัติการ ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับการทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด รุ่น 3810150 บริษัท BP-Castrol (ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) และน้ำที่มีความขุ่นโดยใช้ดินคาโอลินเป็นตัวสร้างความขุ่นที่มีค่าความเข้มข้นของดินคาโอลิน 67 มิลลิกรัมต่อลิตร (50 เอ็นทียู)
- 1.3.2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคที่มีความคงตัว ด้วยวิธีการทดลองจาร์เทสต์ โดยสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) ที่มีสูตรทางเคมี $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$
- 1.3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด และน้ำที่มีความขุ่น ด้วยกระบวนการกรองต่างๆ ดังนี้

- การกรองตรง ที่ไม่มีการเติมสารเคมี
- การกรองตรง โดยมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์
- การกรองตรง โดยมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ ร่วมกับการเติมอากาศ

- 1.3.4 ประยุกต์ใช้มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) ในการศึกษาค่าความดันลด อายุการใช้งานและจุดที่เกิดการอุดตันของถังกรอง โดยติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำจำนวน 15 จุดตามความลึกของชั้นสารกรองทุกๆระยะ 5 ซม. พร้อมทั้งเก็บข้อมูลระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำเพื่อสร้างกราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution) ในการศึกษาประสิทธิภาพถังกรอง
- 1.3.5 ประยุกต์ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายและทำนายประสิทธิภาพในการกรองน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน 2 ชนิด เพื่ออธิบายกลไกการกรองที่เวลาต่างๆ ตัวแปรที่มีผลต่อการกรอง รวมถึงแนวทางการล้างย้อนทำความสะอาดที่เหมาะสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เข้าใจถึงกลไก และตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรงในการบำบัดน้ำเสียที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน
- 1.4.2 รูปแบบการเติมสารเคมีร่วมกับกระบวนการกรองตรงที่เหมาะสมกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด และน้ำที่มีความขุ่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด
- 1.4.3 การเติมอากาศสามารถช่วยให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นกรอง ทำให้ถังกรองทรายแบบกรองตรง สามารถใช้งานได้นานขึ้นและมีประสิทธิภาพการบำบัดที่เหมาะสม

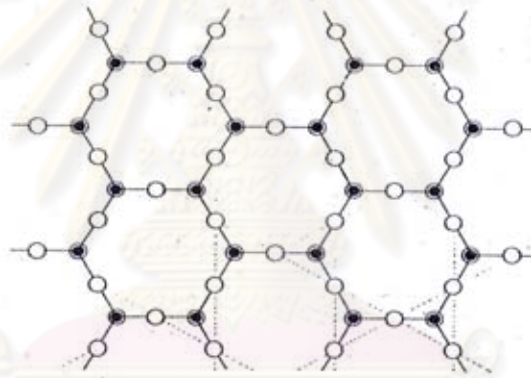
ศูนย์วิจัยทรัพยากรน้ำ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

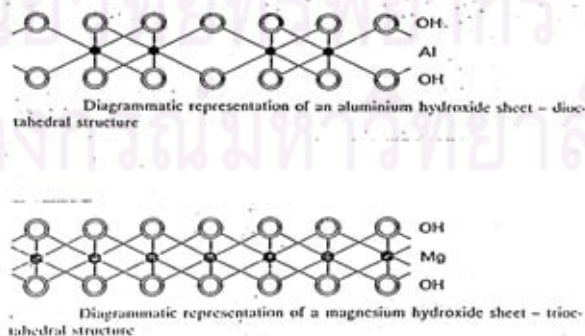
2.1 ลักษณะของอนุภาคความชุ่มและอิมัลชันของน้ำมัน

2.1.1 ลักษณะของอนุภาคความชุ่ม (กันตพงศ์ ผิวเหลือง, 2552)

ความชุ่มที่พบทั่วไปในน้ำผิวดิน มักเกิดจากการมีสารแขวนลอย เช่นอนุภาคดินเหนียวอยู่ในน้ำ อนุภาคดินเหนียวเหล่านี้มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นโมเลกุลประเภทหนึ่งของ Sheet silicates ซึ่งประกอบด้วยการรวมตัวในหลายรูปแบบของ silicon tetrahedral sheet กับ aluminum hydroxide sheet และ magnesium hydroxide sheet โมเลกุลซึ่งเป็นองค์ประกอบของอนุภาคดินเหนียว มีลักษณะโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2

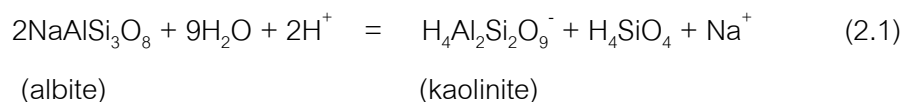


รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ silicon tetrahedral sheet วงกลมสีดำ คืออะตอมซิลิกอน และวงกลมสีขาว คืออะตอมออกซิเจน

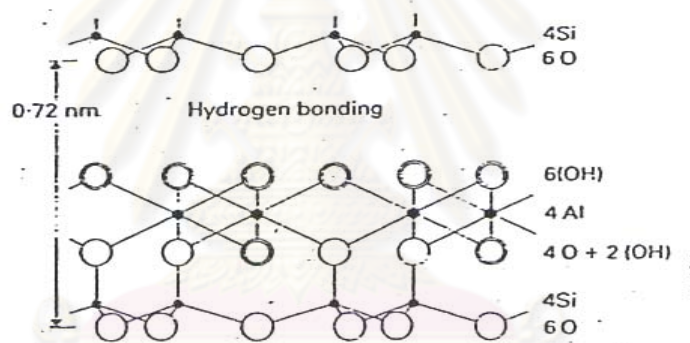


รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ aluminum hydroxide sheet และ magnesium hydroxide sheet

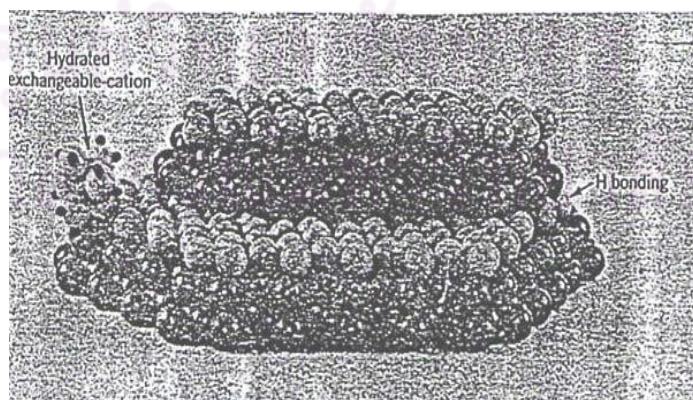
ดินคาโอลินเป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วย silicon tetrahedral sheet และ aluminum hydroxide sheet ดินคาโอลินมีกำเนิดมาจากกลไกการพอง (Weathering) ของ albite ในสภาพที่เป็นกรด ทำให้ได้ผลึกของดินคาโอลินจากสารละลาย ดังสมการที่ 2.1



นอกจากนั้นดินคาโอลินยังสามารถเกิดได้จากกลไกการแยกตัวบางส่วน (Partial disintegration) ในสภาพกรดของดินเหนียวที่มีสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาเท่ากับ 2:1 เช่น montmorillonite กลไกนี้เป็นกลไกการพองอีกแบบหนึ่งที่ silicon tetrahedral sheet แยกตัวออกทำให้โครงสร้างสัดส่วน ซิลิกาต่ออลูมินาเป็น 1:1 ซึ่งคือโมเลกุลของดินคาโอลินดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ก โครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลิน



รูปที่ 2.3 ข โมเดลโครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลิน

แรงเชื่อมระหว่างโมเลกุล แต่ละชุดของดินคาโอลินเป็นแรงเชื่อมของไฮโดรเจนบอนด์ ไฮโดรเจนบอนด์นี้เป็นแรงดึงดูดระหว่างออกซิเจนอะตอมของโมเลกุลหนึ่ง และจากสมบัตินี้เองทำให้ดินคาโอลินเป็นดินเหนียวประเภทไม่พองน้ำ (Nonexpanding clay) โครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลินสามารถประกอบกันเป็นโครงสร้างผลึกหรืออนุภาคแบบ pseudo-hexagonal crystal ได้ มีขนาดตั้งแต่ 0.2-2 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.4

จากโครงสร้างของอนุภาคดินคาโอลินที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าดินคาโอลินมีสมบัติพิเศษคือพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กและมีรูปร่างเป็นแผ่นยาว (Sheet) นอกจากนี้ซิลิเกตไอออนซึ่งมีประจุบวก 4 ใน tetrahedral sheet ยังสามารถถูกแทนที่โดยอลูมิเนียมไอออนซึ่งมีประจุบวก 3 ได้ (Isomorphous replacement) การแทนที่ของไอออนนี้จะเกิดขึ้นเป็นบางจุดมากกว่าจะเกิดการแทนที่แบบกระจายสม่ำเสมอ ลักษณะเช่นนี้ทำให้ดินคาโอลินมีความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้าและมักมีประจุเป็นลบ

อนุภาคดินคาโอลินซึ่งมีประจุลบเหมือนกันที่เคลื่อนเข้ามาใกล้กันจะเกิดแรงผลักรังกันและกัน ดังนั้นปัจจัยหลักที่ทำให้อนุภาคดินคาโอลินสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างมีเสถียรภาพคือแรงผลักรังกันของอนุภาค นอกจากนั้นหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลดินคาโอลินบางส่วนจะมีโมเลกุลน้ำเกาะอยู่ และโมเลกุลน้ำนี้เองจะเป็นสิ่งขวางกั้นไม่ให้อนุภาคเข้ามาสัมผัสกันโดยตรงซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำให้อนุภาคสามารถแขวนลอยได้อย่างมีเสถียรภาพอีกด้วย



รูปที่ 2.4 รูปถ่ายอนุภาคดินคาโอลิน

2.1.2 ลักษณะอิมัลชันของน้ำมัน

โดยทั่วไป น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสามารถแบ่งได้ 4 รูปแบบ (Aurelle, 1985) ได้แก่

1) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปที่ละลายน้ำ

ความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) และความสามารถในการระเหย (Volatility) ของน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลง เพราะฉะนั้นน้ำมันเบา (Light oil) จึงมีความสามารถในการละลายน้ำ และระเหยได้ดีกว่าน้ำมันหนัก (Heavy oil) และความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้นตามความไม่อิ่มตัว (Unsaturation) และลักษณะขั้ว (Polarity) ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะน้ำมันที่อยู่ในรูปของสารประกอบ cyclic compound เป็นรูปของสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูงสุด ปัญหาของน้ำมันที่ละลายน้ำคือตรวจสอบได้ยากด้วยสายตา

2) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปที่เป็นอิมัลชันไม่มีสารลดแรงตึงผิวผสม

สาเหตุเกิดจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulence) เช่น เครื่องสูบน้ำ วาล์ว ใบพัด จุดเปลี่ยนขนาดของท่อ ฯลฯ จากกระบวนการอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการกระจายของน้ำมันในน้ำจนเกิดเป็นอิมัลชันที่มีหยดน้ำมันขนาดเล็ก โดยพลังงานที่ทำให้เกิดการปั่นป่วน และแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ (Oil-water interfacial tension) ที่มีผลต่อขนาดของหยดน้ำมัน สามารถทำนายการแพร่กระจายของน้ำมันได้จากสมการที่ 2.2

$$W_A = A_{OW} \times Y_{OW} \quad (2.2)$$

โดย W_A = พลังงานที่ใช้ (นิวตัน-ม./วินาที)

A_{OW} = พื้นที่ผิวสัมผัส (ม.²)

Y_{OW} = แรงตึงผิว (นิวตัน/ม.)

พบว่าค่า A_{OW} จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Y_{OW} มีค่าลดลงส่งผลทำให้เกิดการกระจายของน้ำมันสูงขึ้น แต่เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเมื่อหยุดเขย่าหยดน้ำมันจะพยายามกลับมารวมตัวแล้วแยกชั้นดังเดิม

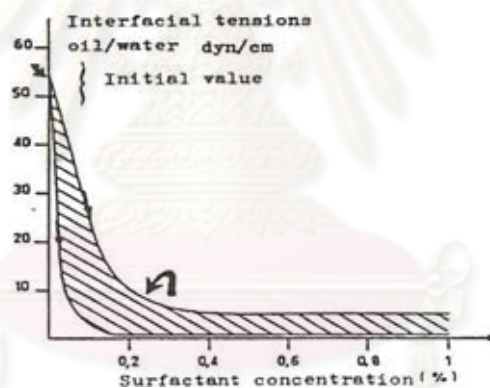
3) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปที่เป็นอิมัลชันและมีสารลดแรงตึงผิวผสม

ในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ส่งผลทำให้แรงตึงผิว (Surface tension) ระหว่างน้ำมันกับน้ำลดลง และแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำจะลดลงมากขึ้นเมื่อ

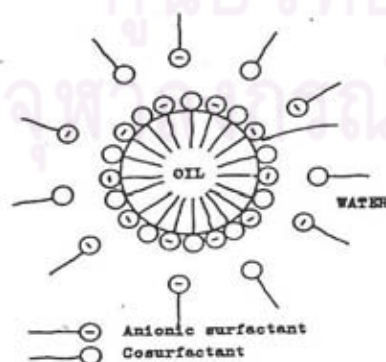
ปริมาณสารลดแรงตึงผิวเพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 2.5 ถ้าใช้พลังงานทำให้เกิดการปั่นป่วนเท่ากับสถานะที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว จะพบว่าในกรณีนี้จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับหยดน้ำมันเพิ่มมากขึ้นขนาดของหยดน้ำมันมีขนาดเล็กลงมากกว่าสถานะที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิวผสม โดยขนาดของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปที่เป็นอิมัลชันมีสารลดแรงตึงผิวผสมสามารถทำการแบ่งได้ 3 ระดับคือ

- Primary emulsion มีขนาดของหยดน้ำมันมากกว่า 100 ไมโครเมตร
- Secondary emulsion มีขนาดของหยดน้ำมันน้อยกว่า 20 ไมโครเมตร
- Microemulsions มีขนาดของหยดน้ำมันอยู่ระหว่าง 100 ถึง 600 อังสตรอม

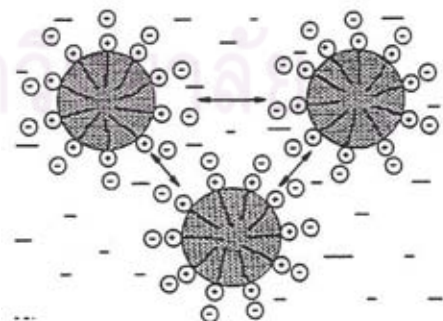
โดยส่วนที่เป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ของสารลดแรงตึงผิวทำให้มีประจุไฟฟ้าที่ผิวของหยดน้ำมันเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการขัดขวางการชน และรวมตัวของอนุภาคน้ำมันระหว่างการเคลื่อนที่เป็นผลให้มีความเสถียรของหยดน้ำมันเพิ่มขึ้น และยากต่อการบำบัดด้วยวิธีทั่วไป ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.5 การลดลงของค่า Interfacial tensions เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น (Aurelle, 1985)



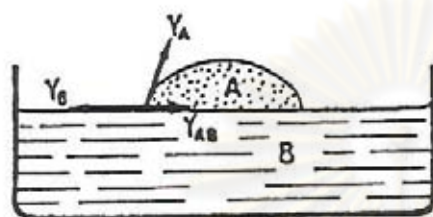
รูปที่ 2.6 การละลายของสารลดแรงตึงผิวบนอนุภาคน้ำมัน (Aurelle, 1985)



รูปที่ 2.7 การผลักรันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากประจุไฟฟ้าบนพื้นผิว (Aurelle, 1985)

4) น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปที่ลอยบนผิวน้ำ

เนื่องจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงทำให้น้ำมันลอยอยู่บนผิวน้ำเป็นฟอง หรือเป็นฟิล์มมักเป็นโมเลกุลเดี่ยวโดยเฉพาะน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ ปัญหาของน้ำมันชนิดนี้พบว่าปริมาณน้ำมันเพียงเล็กน้อย จะมีประสิทธิภาพทำให้เกิดพื้นที่ผิวของฟิล์มขนาดใหญ่ และแพร่กระจายเป็นวงกว้างได้ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งทำให้เกิดการขวางกั้นการละลายของก๊าซออกซิเจนสู่น้ำได้



$\gamma_{A/B}$ = Interfacial tension A/B

γ_A = Surface tension A

γ_B = Surface tension B

รูปที่ 2.8 การลอยของหยดน้ำมันเหนือผิวน้ำในรูปของฟิล์ม (Aurelle, 1985)

การแพร่กระจายของหยดน้ำมัน A บนพื้นผิวของของเหลว B จะเกิดขึ้นได้เมื่อมุมสัมผัส (Contact angle) มีค่าน้อยกว่า 90° แสดงได้ดังสมการที่ 2.3

$$\gamma_B \geq \gamma_{A/B} + \gamma_A \quad (\text{Young's equation}) \quad (2.3)$$

2.2 แนวทางการแยกสารปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำหรือน้ำเสีย

2.2.1 การแยกความขุ่นออกจากน้ำ

กระบวนการแยกความขุ่นออกจากน้ำ มีหลายกระบวนการที่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการเลือกกระบวนการแยกหรือกำจัดความขุ่นอาจทำได้ง่ายหรือยากขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเป็นสำคัญ เช่น ความขุ่นที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่ย่อมสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดเล็ก เป็นต้น โดยความขุ่นมักจะทำให้เกิดปัญหาให้กับโรงงานผลิตน้ำประปา มักเกิดขึ้นจากอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particle) ซึ่งมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10^6 มิลลิเมตร จนถึง 10^{-3} มิลลิเมตร (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2539)

กระบวนการบำบัดน้ำที่มีความขุ่นมีหลายวิธี ได้แก่

- การสร้างและรวมตะกอน
- การกรอง
- การดูดติดผิว
- การแลกเปลี่ยนประจุ
- ระบบบำบัดทางชีวภาพ เป็นต้น

2.2.2 การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย

การแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย มีหลายกระบวนการที่สามารถทำได้โดยมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเลือกเทคนิคที่จะใช้ในการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพการผสมกันของน้ำมันและน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาคุณลักษณะของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียก่อนที่จะตัดสินใจเลือกกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมต่อไป

หลักการพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการแยกน้ำมันกับน้ำเสียมีดังนี้

- ปริมาณน้ำมันในน้ำเสีย
- ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำเสีย
- การใช้สารลดแรงตึงผิวหรืออิมัลซิฟายเออร์
- ความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน
- ความถ่วงจำเพาะของน้ำเสีย
- อุณหภูมิของน้ำเสีย
- ความเข้มข้นของสารแขวนลอย

โดยทั่วไปกระบวนการในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย มีด้วยกันหลากหลาย กระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยแต่ละกระบวนการนั้นก็จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียเป็นหลัก ซึ่งรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (Arizona Department of Environmental Quality, 1996)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Gravity separation	API, CPI, TPS, PPI	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - กำจัดน้ำมันอิสระและน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำได้ - ใช้งานง่าย และประหยัด 	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดอนุภาคน้ำมันที่เล็กกว่า 20 ไมครอนหรือน้ำมันที่ละลายน้ำไม่ได้ - มีข้อจำกัดในการกำจัดอิมัลชัน - ต้องใช้ความเร็วการไหลต่ำ - ต้องการถังแยกขนาดใหญ่ - ต้องการระยะเวลา

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (Arizona Department of Environmental Quality, 1996) (ต่อ)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Air Flotation	DAF, IAF	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำและอิมัลชันได้ เมื่อมีการเติมสารเคมีช่วย - รองรับสภาวะ shock load ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น ถ้าใช้สารเคมีช่วยสร้างตะกอน
Biological processes	Activated sludge	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีการบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มก./ล.
Membrane processes	Reverse osmosis, Ultrafiltration, hyper filtration	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่ายและอายุการใช้งานจำกัด - ต้องมีการบำบัดขั้นต้น - อัตราการบำบัดต่ำ - ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบ full-scale
Carbon adsorption	GAC และ PAC	<ul style="list-style-type: none"> - กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีการบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มก./ล - ค่าใช้จ่ายสูง - ต้องมีการฟื้นฟูหรือเปลี่ยนคาร์บอน - ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบ full-scale

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (Arizona Department of Environmental Quality, 1996) (ต่อ)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Chemical flocculation	ใช้ร่วมกับ gravity separation และ air flotation	- ใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงได้	- ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น
Filtration	Sand, anthracite, multimedia, crushed graphite, coated ceramic	- กำจัดของแข็งแขวนลอยได้ - กำจัดน้ำมันอิสระ อิมัลชัน และน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำได้	- ต้องทำการล้างย้อน ซึ่งต้องบำบัดน้ำล้างย้อนต่อไป - เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย - อายุการใช้งานจำกัด
Coalescence	Fibrous membrane	- กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท ยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำ	- ต้องมีการบำบัดขั้นต้น - เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย - ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบ full-scale

จากการพิจารณาแนวทางการแยกสารปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำหรือน้ำเสีย พบว่ากระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาก็มีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งสำหรับกระบวนการกรองสามารถกำจัดสารแขวนลอยและสารคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำ ความสกปรกหลายประเภทที่อยู่ในน้ำจะถูกกำจัดออกไป เช่น ความขุ่น น้ำมัน สี สหรัย และจุลินทรีย์อื่นๆ โดยการกรองน้ำเป็นวิธีที่จัดเป็นประเภทกายภาพและเคมีเป็นผลให้ประสิทธิภาพการกรองน้ำอยู่ภายใต้อิทธิพลของตัวแปรหลายตัว ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ ส่วนหนึ่งเป็นของน้ำที่เข้าเครื่องกรอง และอีกส่วนหนึ่งเป็นของเครื่องกรองด้วย แต่โดยทั่วไปประสิทธิภาพการกรองมักอยู่ในระดับสูง และดำเนินการได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก โดยในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจนำกระบวนการกรอง มาประยุกต์ใช้ในการแยกอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันน้ำมันออกจากเฟสน้ำเสีย

2.3 หลักการทำงานของถังกรองทราย

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

2.3.1 เครื่องกรองทรายแบบช้า (Slow Sand Filter) (มันลิน ตันทุลเวศน์, 2539)

เครื่องกรองสามารถกรองน้ำได้ดีก็ต่อเมื่อน้ำดิบมีความขุ่นไม่มากนัก การกรองน้ำด้วยอัตราต่ำ สามารถกำจัดความขุ่นได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีช่วยในการรวมตะกอน เพื่อให้เป็นก้อนตะกอน (floc) และไม่จำเป็นต้องใช้ถังตกตะกอนในการกำจัดความขุ่นหรือก้อนตะกอน ถังกรองช้าอาจเรียกว่าถังกรองชีวะ (Biofilter) โดยที่ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ประกอบไปด้วย

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

โดยในระหว่างการดำเนินการกรอง ค่าความดันลด (Headloss) มีค่ามากขึ้นเนื่องจากการเกิดขึ้นของฟิล์มชีวภาพ ค่าความดันลดมีค่ามากขึ้นในขณะที่อัตราการกรองมีค่าคงที่ (4-8 เมตร/วัน) โดยที่มีการควบคุมจากฝาย (Weir) ที่สามารถปรับได้ ระบบการกรองชนิดนี้จะต้องมีการตักส่วนผิวบนของทรายออกประมาณ 1 เซนติเมตร ทุกๆ 20-60 วัน

2.3.2 เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว (Rapid Sand Filter) (มันลิน ตันทุลเวศน์, 2539)

เครื่องกรองเร็วสามารถกรองน้ำได้เร็วกว่าเครื่องกรองช้าหลายสิบเท่า แต่ต้องทำความสะอาดทรายกรองบ่อยกว่า วิธีการล้างเครื่องกรองเร็วกระทำโดยปล่อยให้ น้ำไหลย้อนทิศทางกรอง (Backwash) ทำให้ชั้นกรองขยับตัว ทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มขึ้น ความขุ่นที่จับอยู่ภายในสามารถหลุดออกไป วิธีการเร็วมี 2 ลักษณะ คือ

- การกรองตรง (Direct Filtration) ไม่ต้องการกำจัดความขุ่นออกก่อนด้วยกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation and Sedimentation) การกรองตรงอาจมีการเติมสารเคมีให้กับน้ำก่อนเข้าเครื่องกรอง หรือไม่ก็ได้ โดยจำเป็นต้องให้แน่ใจว่าคุณภาพ

น้ำไม่แปรปรวนและต้องไม่ขุ่นจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วจะเกิดปัญหาอุดตันเร็ว และได้น้ำที่มีคุณภาพ เลว อัตรากรองอาจสูงได้ตั้งแต่ 4-25 เมตร/ชั่วโมง

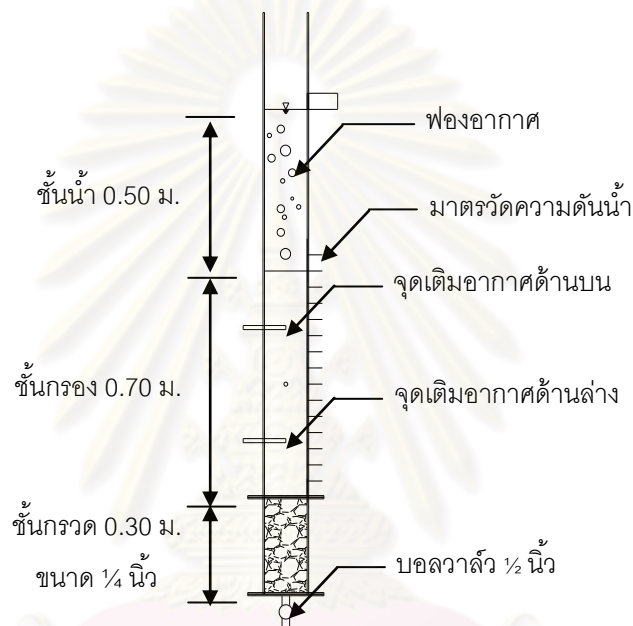
- การกรองน้ำที่ผ่านกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation and Sedimentation) มาแล้ว โดยการใส่สารเคมีกับน้ำก่อนการกรองและต้องให้แน่ใจว่าเกิดการกวนเร็ว (Rapid Mixing) ก่อนการกรองเกิดขึ้น ทั้งนี้เพราะการเติมสารเคมีก็เพื่อทำลายความคงตัว (Destabilization) ของความขุ่นเป็นผลให้เกิดการดูดติดผิวระหว่างความขุ่นกับสารกรอง หรือความขุ่นกับความขุ่นเกิดขึ้นได้อย่างแน่นอน โดยปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ที่ต้องเหมาะสม ไม่มากเกินไป เพราะจะทำให้ชั้นทรายเหนียวและจับตัวกันมากเกินไป จนเป็นเหตุให้อุดตันเร็ว และล้างเครื่องกรองได้ยากขึ้น

ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำกระบวนการกรองแบบการกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี เนื่องจากกระบวนการกรองตรงไม่จำเป็นต้องมีการกำจัดความขุ่นออกก่อนด้วยกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน โดยการกรองลักษณะนี้ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีและค่าก่อสร้าง สำหรับกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอนลงได้ แต่การกรองตรงทำให้ถังกรองต้องรับภาระในการกำจัดอนุภาคต่างๆ ในปริมาณมาก อนุภาคต่างๆ จึงสะสมอยู่ภายในชั้นกรองและทำให้เกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองมีค่าลดลงอย่างมาก และไม่สามารถใช้ความหนาของชั้นกรองได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากการกรองส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นกรองทำให้ถังกรองอุดตันเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในรวมกระบวนการเติมอากาศเข้ากับกระบวนการกรอง เพื่อพัฒนาระบบการกรองตรง โดยคาดว่า การเติมอากาศภายในชั้นกรองจะทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว ส่งผลให้อนุภาคความขุ่นสามารถหลุดเข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น จึงลดการสะสมของอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ทำให้ถังกรองมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ซึ่งมีความเหมาะสมเมื่อนำถังกรองดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการกำจัด/บำบัดน้ำที่มีอนุภาคความขุ่นและน้ำมัน

2.4 หลักการทำงานของถังกรองแบบเติมอากาศ

การออกแบบถังกรองแบบเติมอากาศได้แนวคิดจากข้อจำกัดในการใช้งานของถังกรองแบบเดิม เช่น การใช้ความลึกของชั้นสารกรองได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ส่วนใหญ่ความลึกที่เกิดการกรองจะอยู่ที่ประมาณ 3 นิ้ว (มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2539) ทั้งที่มีความลึกของสารกรองทั้งหมดมากถึง 70 เซนติเมตร และเมื่อทำการล้างย้อน ชั้นสารกรองจะถูกล้างย้อนทั้งหมด แต่ส่วนที่เกิดการอุดตันมีเพียงด้านบนเท่านั้น จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายอย่างมาก

หลักการดำเนินงานของถังกรองแบบเติมอากาศ (รัฐพล เจียวิริยะบุญญา, 2552) คือ การฝังหัวเติมอากาศไว้ในชั้นสารกรองเพื่อใช้ประโยชน์จากฟองอากาศทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวและสามารถควบคุมการขยายตัวของชั้นสารกรองได้จากการปรับอัตราการเติมอากาศ คาดว่าทำให้ความลึกที่เกิดการกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขั้นตอนการล้างย้อนหัวเติมอากาศที่ฝังอยู่ในชั้นสารกรองจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการล้างย้อน ทำให้เกิดการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างย้อนได้ ถังกรองแบบเติมอากาศแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ถังกรองแบบเติมอากาศ

2.5 ทฤษฎีของการกรอง

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

การกรองสารแขวนลอยขนาดเล็กและขนาดใหญ่ออกจากน้ำ อาศัยกลไก 2 ชุด ซึ่งแตกต่างกัน สารแขวนลอยขนาดใหญ่ หรือก้อนตะกอน (floc) ที่แข็งแรงสามารถตกตะกอนบนสารกรอง หรือติดค้างในช่องว่างระหว่างสารกรองซึ่งแยกออกจากน้ำได้ ส่วนสารแขวนลอยขนาดเล็ก

ต้องอาศัยแรงที่เกิดจากการแพร่กระจาย และมีกลไกดูดติดผิว ซึ่งมีการทำลายประจุลบให้เป็นกลาง และ/หรือเปลี่ยนประจุลบให้เป็นประจุบวก ทฤษฎีของการกรองอธิบายได้เป็น 3 หัวข้อดังนี้

2.5.1 กลไกของการกรอง (Tchobanoglous และ Burton, 1991)

กลไกของการกรอง คือ วิธีการเคลื่อนที่ของตะกอนต่างๆ ในน้ำผ่านเข้าไปหาสารกรอง และวิธีการจับตะกอนต่างๆในน้ำให้เกาะติดอยู่บนสารกรอง กลไกของการกรองมีอยู่ด้วยกัน 3 กลไก ดังนี้

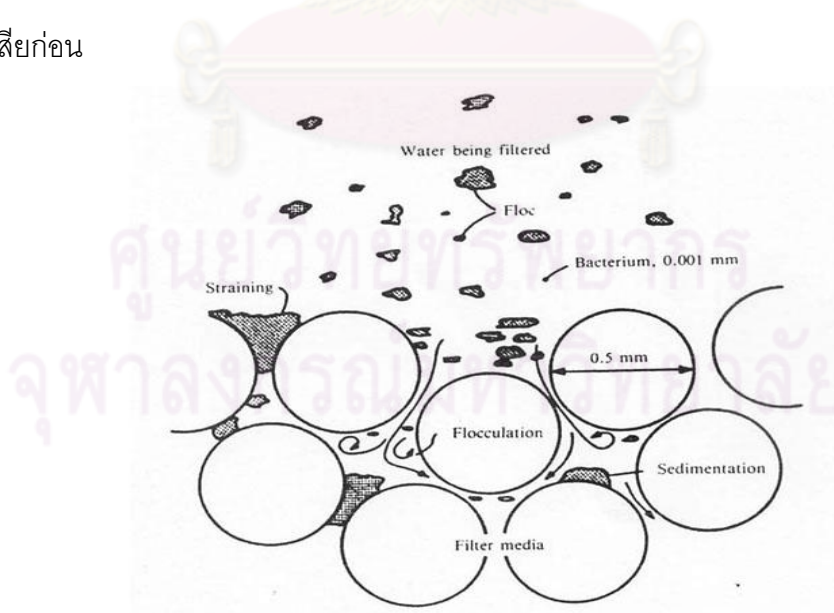
1. กลไกทางกายภาพ

1.1 การติดค้างอยู่บนสารกรอง (Straining) คือ การที่ขนาดของตะกอนใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างสารกรองจึงติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างสารกรอง

1.2 การตกตะกอน (Sedimentation) คือ ตะกอนตกลงบนสารกรองภายในชั้นกรอง

1.3 การเบียดเข้าหาสารกรอง (Interception) คือ ตะกอนได้เคลื่อนที่ไปในทิศทางแนวเดียวกับกระแส น้ำ และตะกอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปพบกับผิวของสารกรอง

1.4 การชน (Inertial Impaction) คือ ตะกอนที่มีน้ำหนักมากเกินไป จนไม่สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางแนวเดียวกับกระแส น้ำ ดังนั้นตะกอนหนักเหล่านี้จะตกลงบนสารกรองเสียก่อน



รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของตะกอน (Raju, 1995)

2. กลไกทางกายภาพและเคมี

กลไกทางกายภาพและเคมีเป็นกลไกของการกรองที่เกิดจากทั้งกายภาพและเคมี จะมีการทำงานได้ดีกว่ากลไกของการกรองที่เกิดจากทางกายภาพเพียงอย่างเดียว เพราะการกรองนี้เกิดขึ้นได้เกือบทั่วทั้งชั้นกรองทำให้ประสิทธิภาพในการใช้สารกรองมีมาก กลไกของการกรองแบบนี้ต้องอาศัยหลักฟิสิกส์และเคมีมาอธิบาย มี 4 แบบ คือ

2.1 การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption) คือ การดูดติดผิวที่อาศัยการยึดเหนี่ยวทางเคมีโดยจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในการดูดติดผิวระหว่างตะกอนกับสารกรอง การดูดติดผิวแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิสูง เพราะว่าปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดได้เร็วขึ้น

2.2 การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) คือการดูดติดผิวที่อาศัยแรงต่าง ๆ ยึดเหนี่ยวไม่ให้ออกจากกันระหว่างตะกอนกับสารกรอง การดูดติดผิวแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับการดูดติดผิวทางเคมี

2.3 แรงติดแน่น (Adhesion Forces) คือ แรงติดแน่นกับผิวของสารกรองที่ตะกอนนี้ไหลผ่านมาพบ แต่เนื่องจากแรงเข้าน้ำที่เกิดจากการไหลของน้ำผ่านชั้นกรอง ได้เข้เข้าไปกั้นตะกอนบางส่วนก่อนที่ตะกอนส่วนนี้จะเกาะติดแน่นบนผิวสารกรอง ซึ่งทำให้น้ำได้ไหลพาตะกอนนี้เคลื่อนผ่านชั้นกรองลงไปลึกขึ้นจนอาจจะหลุดออกจากชั้นกรอง และไหลไปปนกับน้ำที่ผ่านระบบการกรองแล้ว (Effluent) มีปริมาณตะกอนมากขึ้น

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

3. กลไกทางชีวเคมี

กลไกทางชีวเคมีเป็นกลไกของการกรองที่เกิดจากพวกจุลินทรีย์ต่างๆ ได้เติบโตอยู่ภายในชั้นกรอง ซึ่งจะลดขนาดช่องว่างที่อยู่ภายในชั้นกรอง และทำให้เกิดการดักตะกอนโดยสารกรองในชั้นกรองได้ ซึ่งจะอาศัยกลไกของการกรองแบบต่างๆ เช่นกัน

2.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ

จากการวิเคราะห์กลไกของการกรองน้ำ ปรากฏว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยต่างๆ ออกด้วยกระบวนการกรอง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วถึงกรองไม่สามารถกำจัดสารแขวนลอยออกได้ทั้งหมด จึงทำให้มีสารแขวนลอยบางส่วนหลุดลอดออกมาได้

โดยประสิทธิภาพทั้งหมดในการกำจัดสารแขวนลอยสำหรับถังกรองทราย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรอง (d_p) และชั้นสารกรองหนา (H)

พื้นที่หน้าตัดของถังกรองมีค่าเท่ากับ $\frac{\pi d_p^2}{4}$ ดังนั้นปริมาณสารแขวนลอยที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของถังกรองต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งเรียกว่า Particle flux (F) จึงเท่ากับ

$$\text{Particle flux} = \frac{V_0 \pi d_p^2 C}{4}$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นของสารแขวนลอย

เมื่อน้ำเสียไหลผ่านชั้นสารกรอง จะมีอนุภาคของสารแขวนลอยบางส่วนเท่านั้นที่มีโอกาสไปกระทบกับสารกรอง ดังนั้นปริมาณของสารแขวนลอยที่ตกกระทบสารกรอง จึงมีค่าเท่ากับ

$$X = \eta_T \cdot F = \eta_T \cdot \frac{V_0 \pi d_p^2 C}{4}$$

โดยที่ η_T เป็นพารามิเตอร์ที่บอกว่าสารแขวนลอยมีโอกาสไปกระทบกับสารกรองได้มากน้อยเพียงใด

พิจารณาชั้นสารกรองหนา (H) ถ้าอัตราส่วนช่องว่างของตัวกลางเท่ากับ ϵ จะได้ว่าจำนวนของสารกรองจะเท่ากับ

$$N_{Media} = \frac{A_0 dH (1 - \epsilon)}{\pi d_p^3 / 6}$$

เพราะฉะนั้น ปริมาณของสารแขวนลอยทั้งหมดที่ตกกระทบสารกรอง จึงเท่ากับผลคูณระหว่างค่าปริมาณของสารแขวนลอยที่ตกกระทบสารกรอง (X) กับจำนวนของสารกรอง (N) และประสิทธิภาพในการเกาะติดของสารแขวนลอยและสารกรอง (α) ซึ่งจะได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแขวนลอยของถังกรองเท่ากับ

$$\text{Removed} = X \cdot \alpha \cdot \frac{A_0 dH (1 - \epsilon)}{\pi d_p^3 / 6} = -V_0 \cdot A_0 \cdot dC$$

หรืออาจจะกล่าวได้ว่า ปริมาณสารแขวนลอยที่ตกกระทบและเกาะติดกับสารกรอง จะเท่ากับปริมาณของสารแขวนลอยที่ถูกกำจัดออกจากเฟสน้ำ

$$-V_0 \cdot A_0 \cdot dC = 3 \alpha \eta_T \cdot A_0 \frac{V_0 \cdot C \cdot (1 - \epsilon) \cdot dH}{2 d_p}$$

โดยที่ dC = ความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่ลดลงหลังจากผ่านถังกรอง

$$\text{นั่นคือ} \quad \frac{dC}{C} = -3 \sigma \eta_T (1 - \epsilon) \cdot \frac{dH}{2 d_p}$$

อินทิเกรตสมการข้างต้น จะได้

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\frac{3}{2}\alpha\eta_T(1-\varepsilon)\frac{H}{d_p} \quad (3.4)$$

- โดยที่ $\ln(C/C_0) =$ ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยของถังกรอง
- $\alpha =$ ตัวแปรที่บอกว่าเมื่อสารแขวนลอยกระทบถูกสารกรอง จะมีโอกาสเกาะติดกันได้มากน้อยเพียงใด ค่าสูงสุดคือ 100% หรือ 1 จะขอเรียกตัวแปรนี้ว่า ประสิทธิภาพในการเกาะติด (Collision Efficiency)
- $\eta =$ ตัวแปรที่บอกว่า สารแขวนลอยมีโอกาสไปกระทบกับสารกรองได้มากน้อยเพียงใด ค่าสูงสุดคือ 1 ตัวแปรนี้เรียกว่าประสิทธิภาพของการกระทบ (Single Collector Efficiency)
- $\varepsilon =$ ความพรุนของสารกรอง
- $H =$ ความหนาของสารกรอง
- $d_p =$ ขนาดของสารกรอง

การเตรียมน้ำก่อนกรองให้เหมาะสม เท่ากับเป็นการปรับปรุงเพิ่มค่าตัวแปร α นั้นเอง ยกตัวอย่างเช่น การเติมสารส้มหรือโพลีเมอร์ ช่วยทำให้การเกาะจับระหว่างสารแขวนลอยและสารกรองมีโอกาสมากขึ้น ซึ่งเท่ากับการเพิ่มค่าตัวแปร α ตัวแปร α อาจมีความหมายคลุมถึงเคมีของการกรองก็ได้ ตัวแปร η มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างจำนวนสารแขวนลอยที่กระทบถูกสารกรองต่อจำนวนสารแขวนลอยทั้งหมดที่เข้าสู่สารกรอง ส่วน $(1-\varepsilon)H/d_p$ นั้นสามารถพิสูจน์ได้ว่าเป็นพื้นที่ผิวทั้งหมดของสารกรอง ดังนั้นทั้ง η และ $(1-\varepsilon)H/d_p$ จึงหมายถึงโอกาสของการกระทบระหว่างสารแขวนลอยและสารกรองนั่นเอง ดังนั้นสำหรับการกรองน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน เช่นอุณหภูมิความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมัน มีค่าตัวแปร η และ α ที่แตกต่างกัน และในกรณีการกรองที่มีการเติม/ไม่เติมสารเคมี ก็ทำให้ค่าตัวแปร η และ α ที่แตกต่างกันและมีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอย ค่าความพรุนของสารกรองที่เวลาต่างๆ และค่าความดันลด มีความแตกต่างกัน รวมถึงยังส่งผลต่อการทำความสะอาดสารกรองอีกด้วย

2.5.3 ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวกับระบบการกรอง (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

ระบบการกรองจำเป็นต้องพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกรอง ดังนี้

1. ประจุของชั้นสารกรอง
2. ขนาด รูปร่างและความหนาแน่นของสารกรอง
3. ความพรุนของสารกรอง
4. ค่าสูญเสียความดันลด (Headloss) เนื่องจากสารกรอง
5. ประสิทธิภาพของสารกรอง
6. คุณสมบัติของน้ำที่ไหลเข้าสู่สารกรอง
7. อัตราการกรอง
8. ความลึกของชั้นสารกรอง

จากการพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำและตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวกับระบบการกรองพบว่า เมื่อความพรุนของชั้นสารกรองที่มีค่าน้อยจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยของเครื่องกรองเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าหากความพรุนของชั้นสารกรองมีค่าน้อยเกินไปอาจทำให้ระยะเวลาในการใช้งานถึงกรองสั้นลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ความพรุนของสารกรองเป็นตัวแปรที่ใช้ในการพัฒนาถังกรองแบบเติมอากาศ เนื่องจากฟองอากาศสามารถทำให้ชั้นสารกรองขยายตัวและสามารถควบคุมการขยายตัวของชั้นสารกรองได้จากการปรับอัตราการเติมอากาศ จึงสามารถกำหนดความพรุนที่เหมาะสมที่ทำให้ถังกรองสามารถใช้งานได้นาน ความลึกที่เกิดการกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้นและน้ำที่ผ่านการกรองมีคุณภาพได้มาตรฐาน

2.6 การไหลของน้ำในการกรอง

2.6.1 การไหลของน้ำผ่านชั้นกรองและชั้นกรวด (มันลิน ตันกุลเวศน์, 2539)

ชั้นสารกรองในที่นี้หมายถึงชั้นทราย ซึ่งมีขนาดสัมฤทธิ์อยู่ในช่วงระหว่าง 0.4-2 มิลลิเมตร การไหลของน้ำผ่านชั้นกรองดังกล่าวมักเป็นแบบไหลเอื้อย (Laminar Flow) ส่วนการไหลผ่านชั้นกรวดมักเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) และน้ำมีอุณหภูมิไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส ลักษณะนี้ทำให้เกิดการสูญเสียความดันมีค่าแปรผันโดยตรงกับอัตราการกรอง สมการที่ใช้คำนวณหาการสูญเสียความดันของชั้นกรองที่ยังสะอาด คือ

Carman-Kozeny Equation (Reynolds และ Richards, 1996)

- สำหรับการไหลในท่อ (Flow in pipe)

$$(Re < 2100) \quad \text{Laminar} \quad \frac{\Delta P}{L} = \frac{32 \mu v}{D^2}$$

$$(Re > 4000) \quad \text{Turbulent} \quad \frac{\Delta P}{L} = \frac{4 \cdot f \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot D}$$

- ปรับค่าอัตราเร็วในการไหลของน้ำ (v) และขนาดของช่องที่น้ำไหลผ่าน (D)

$$\text{โดยที่} \quad v = \frac{v'}{\varepsilon} = \frac{Q/A}{\varepsilon}$$

$$\text{และ} \quad D = 4 r_H = 4 \frac{\varepsilon}{a}$$

สำหรับวัสดุรูปทรงกลม ทำการหาค่า a (พื้นที่ผิวส่วนที่เปียกต่อปริมาตรสารกรอง)

$$\text{ส่วนของตัวกลางที่เปียก} = (1 - \varepsilon)$$

$$\frac{\text{พื้นที่ผิวทั้งหมด}}{\text{ปริมาตรสารกรอง}} = \frac{S_P}{V_P} = \frac{\pi D_p^2}{\frac{\pi}{6} \cdot D_p^3} = \frac{6}{D_p}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad a = \frac{6(1-\varepsilon)}{D_p}$$

$$\text{แทนค่า} \quad D = 4 \frac{\varepsilon}{a} = \frac{4 \varepsilon}{\frac{6(1-\varepsilon)}{D_p}}$$

$$\text{จะได้} \quad D = \frac{4 \varepsilon D_p}{6(1-\varepsilon)}$$

จากนั้นนำค่าการปรับแก้แทนลงไปในการคำนวณหาการสูญเสียความดันทั้งในกรณีการไหลของน้ำเป็นแบบไหลเอื่อย (Laminar Flow) และแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ได้ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[\frac{32 \mu v}{D^2} \right]_{\text{Laminar}} + \left[\frac{4 \cdot f \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot D} \right]_{\text{Turbulent}}$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \mu v'(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 D_p^2} + \frac{1.75 \rho v'^2(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3}$$

โดยในการคำนวณการสูญเสียความดันของชั้นกรอง ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากรูปร่างของสารกรองที่เรียกว่า Shape factor (\emptyset) และการประยุกต์ใช้การคำนวณการสูญเสียความดันในการไหลของน้ำผ่านชั้นกรองสำหรับกระบวนการกรอง (ΔP) ซึ่งสามารถคำนวณค่าความดันลด (Head loss, ΔH) ได้ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{150}{g \emptyset^2 \varepsilon^3 D_p^2} \frac{v'(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1.75}{g \emptyset D_p \varepsilon^3} \frac{v'^2(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.5)$$

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{150}{g \emptyset^2 \varepsilon^3} \left[\sum \frac{X_i}{D_p^2} \right] + \frac{1.75}{g \emptyset \varepsilon^3} \left[\sum \frac{X_i}{D_p} \right] \quad (2.6)$$

โดยที่ ΔH = ความดันลด (Head loss)
 v' = อัตราเร็วในการกรอง
 ε = ความพรุนของสารกรอง
 \emptyset = ดรรชนีความกลม

	=	ความหนืดเชิงจลนศาสตร์ kinematic viscosity (μ/ρ)
X_i	=	ปริมาณของอนุภาคสารกรองที่มีขนาด D_p ต่อปริมาณของสารกรองทั้งหมด
D_p	=	ขนาดอนุภาคสารกรอง
L	=	ความหนาของสารกรอง
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

Rose Equation (Metcalf และ Eddy, 2004)

$$H_L = \frac{1.067 C_D}{\phi} L \frac{V^2}{\varepsilon^4} \frac{1}{d_m} \quad (2.7)$$

โดยที่	H_L	=	ความดันลด (Head loss)
	C_D	=	ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient of drag)
	L	=	ความหนาของสารกรอง
	V	=	อัตราเร็วในการกรอง
	ε	=	ความพรุนของสารกรอง
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	d_m	=	ขนาดอนุภาคสารกรอง

2.6.2 การไหลของน้ำจากการล้างย้อน

สำหรับการคำนวณการสูญเสียความดันของชั้นกรองจากการล้างย้อนถึงกรอง โดยการสูญเสียความดันไม่ได้ขึ้นกับขนาดของสารกรอง แต่ขึ้นกับลักษณะของสารกรอง น้ำหนัก และความพรุน ตามสมการที่ 2.8

Headloss = Buoyant weight (Steel และ McGhee, 1979)

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

$$H_L = (S.G. - 1)(1 - \varepsilon) \cdot L_0 \quad (2.8)$$

โดยที่	H_L	=	ความดันลด
	ρ_s	=	ความหนาแน่นของทรายกรอง
	ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	ε	=	ความพรุนของสารกรอง

L_0	=	ความหนาของสารกรอง
S.G.	=	ความถ่วงจำเพาะของทรายกรอง

2.6.3 การไหลของน้ำผ่านชั้นกรองและชั้นกรวดในกรณีที่สารกรองสกปรก

จากที่กล่าวมาจะเป็นการคำนวณในกรณีที่สารกรองสะอาด ส่วนในกรณีการคำนวณหาการสูญเสียความดันสำหรับชั้นกรองที่สกปรก สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.9 ซึ่งการสูญเสียความดันของชั้นกรองจะมีค่าสูงขึ้น ค่าความพรุนมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ในสารกรองทำให้สารกรองสกปรก

Headloss as a function of solid deposit

$$\frac{H_L}{H_{L0}} = 1 + k \cdot \sigma^\beta \quad (2.9)$$

โดยที่	H_L	=	ความดันลด
	H_{L0}	=	ความดันลดเมื่อสารกรองสะอาด
	k	=	ค่าคงที่ k
	β	=	ค่าคงที่ β
	σ	=	สัมประสิทธิ์การสะสมตัว

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะสมตัว คำนวณได้ตามสมการที่ 2.10

$$\sigma \cdot L \cdot \rho_s = \int_0^1 C_0 \bar{V} dt - \int_0^1 C \bar{V} dt \quad (2.10)$$

โดยที่	σ	=	ค่าสัมประสิทธิ์การสะสมตัว
	L	=	ความหนาสารกรอง
	ρ_s	=	ความหนาแน่นของอนุภาค
	C_0, C	=	ความเข้มข้นของสารแขวนลอยก่อน-หลัง
	\bar{V}	=	อัตราเร็วในการกรอง
	t	=	เวลาในการกรอง

ดังนั้น จากสมการสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะสมตัว ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถใช้อธิบายอัตราการสะสมตัวของสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นในชั้นกรอง โดยการกรองน้ำที่มีสิ่งปนเปื้อนที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลต่ออัตราการสะสมตัวของสิ่งสกปรกที่ต่างกัน ซึ่งเราสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอธิบายกลไกการกรองน้ำที่มีอนุภาคความขุ่น และอนุภาคน้ำมันได้

2.7 อัตราการไหลในการล้างย้อนและการขยายตัวของสารกรอง

การล้างย้อนถังกรอง เป็นการปล่อยน้ำให้ไหลจากกันถังกรอง ผ่านชั้นกรองขึ้นข้างบน ถ้าอัตราการไหลต่ำสารกรองไม่ถูกรบกวน และชั้นกรองยังคงสภาพเดิม เมื่ออัตราไหลของน้ำสูงขึ้นถึงระดับหนึ่ง สารกรองบางเม็ดเริ่มขยับและลอยตัวเนื่องจากแรงพยุงของน้ำ การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำให้สูงขึ้นอีกทำให้จำนวนเม็ดสารกรองที่ลอยตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ช่องว่างระหว่างสารกรองเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนในที่สุดชั้นกรองทั้งชั้น (ไม่รวมชั้นกรวด) ก็ขยายตัวอยู่ได้ เนื่องจากแรงพยุงของน้ำ สารกรองแต่ละเม็ดเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ อัตราการไหลในการล้างย้อนนี้มีค่าประมาณเท่ากับการตกตะกอนอย่างอิสระ (ไม่มีอุปสรรค) ของเม็ดสารกรองในน้ำ (มันลิน ตัณฑุลเวศน์, 2539)

ความสกปรกต่างๆ ที่อยู่บนและในชั้นกรอง เช่นสารแขวนลอย ฟล็อกสารส้ม เป็นต้น มักมีน้ำหนักร้อยกว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อชั้นกรองขยับตัวจนมีช่องว่าง สิ่งสกปรกต่างๆ จึงหลุดออกมา และถูกน้ำดันออกจากชั้นกรอง ปัจจัยที่สิ่งสกปรกซึ่งค้างอยู่ในช่องว่างของสารกรองหรือเกาะอยู่บนอนุภาคสารกรองหลุดออกมามี 2 อย่างคือ แรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของน้ำ และการขัดสีระหว่างอนุภาคหรือเม็ดสารกรอง ซึ่งปัจจัยใดเป็นตัวสำคัญในการทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากชั้นกรอง Amirtharajar และ Cleasby เห็นว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไหลของน้ำ พลังงานส่วนใหญ่ใช้พุงให้สารกรองลอยตัว จึงไม่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดการขัดสี ส่วน Kawamura มีความเห็นตรงข้ามและสามารถพิสูจน์ว่าอัตราการไหลที่ใช้ล้างสูงไม่มากพอที่จะทำให้เกิดแรงเฉียด แต่พอเพียงที่จะทำให้มีการขัดสีระหว่างสารกรอง จนทำให้สิ่งสกปรกหลุด แนวความคิดที่ต่างกัน ทำให้มีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน แต่ Amirtharajar สามารถคำนวณได้ทั้งอัตราการล้างย้อนและการขยายตัวของชั้นกรอง (มันลิน ตัณฑุลเวศน์, 2539)

สำหรับการคำนวณการขยายตัวของชั้นกรอง เนื่องจากการล้างย้อน ทำให้ความพรุนของสารกรองเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งสามารถคำนวณความพรุนได้ตามสมการที่ 2.11 (Reynolds และ Richards, 1996)

$$\varepsilon_e = \left(\frac{V_b}{V_s}\right)^{0.22} \quad (2.11)$$

โดยที่ ε_e = ความพรุนของสารกรองที่ขยายตัว
 V_b = อัตราเร็วในการล้างย้อน
 V_s = อัตราเร็วในการตกตะกอน

ซึ่งความเร็วในการตกตะกอนสามารถหาได้จากสมการที่ 2.12

$$V_s = \left(\frac{4 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d_p}{3 \cdot \rho \cdot C_D}\right)^{0.5} \quad (2.12)$$

จากนั้น คำนวณหาความหนาสารกรองที่ขยายตัวเนื่องจากการล้างย้อน ได้ดังสมการที่

2.13

$$L_e = \left(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_e} \right) \cdot L_0 \quad (2.13)$$

โดยที่ L_e = ความหนาสารกรองที่ขยายตัว
 L_0 = ความหนาสารกรอง
 ε = ความพรุนของสารกรองขณะยังไม่ขยายตัว
 ε_e = ความพรุนของสารกรองที่ขยายตัว

การคำนวณการสูญเสียความดันของชั้นกรองจากการล้างย้อนชั้นกรอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการทำสมดุลระหว่างค่าความดันลด แรงโน้มถ่วง และแรงลอยตัว ตามสมการที่ 2.14

$$\Delta P \cdot A = (\rho_P - \rho) \cdot g \cdot L_{mf} \cdot A (1 - \varepsilon_{mf}) \quad (2.14)$$

โดยที่ L_{mf} = ความหนาสารกรองที่ขยายตัวน้อยที่สุด
 ε_{mf} = ความพรุนของสารกรองที่ขยายตัวน้อยที่สุด

สำหรับการสูญเสียความดันของชั้นกรองจากการล้างย้อนชั้นกรองที่ทำให้สารกรองขยายตัวน้อยที่สุด สามารถคำนวณได้โดยนำค่าการสูญเสียความดันของชั้นกรองจากการล้างย้อนชั้นกรอง มาเท่ากับค่าการสูญเสียความดันของชั้นกรองของ Carman-Kozeny ทำให้ได้สมการดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (\rho_P - \rho) g (1 - \varepsilon_{mf}) = \frac{150 \mu v'(1-\varepsilon)^2}{\phi D_p^2} + \frac{1.75 \rho v'^2(1-\varepsilon)}{\phi D_p \varepsilon^3}$$

$$0 = \frac{1.75 D_p^2 (v'_{mf})^2 \rho^2}{\phi \varepsilon_{mf}^3 \mu^2} + \frac{150 (1-\varepsilon_{mf}) D_p v'_{mf}}{\phi \varepsilon_{mf}^3 \mu} - \frac{D_p^3 \rho (\rho_P - \rho) g}{\mu^2}$$

$$\text{โดยที่ } \phi \varepsilon_{mf}^3 = 1/14$$

$$\frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \cong 11$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณความเร็วของน้ำล้างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัวน้อยที่สุด (V_{mf}) และความเร็วของน้ำล้างย้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สำหรับการล้างย้อนถังกรองเบื้องต้นได้

2.8 การกรองตรงโดยการเติมสารเคมี

2.8.1 ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเคมี (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2539)

การใส่สารเคมีให้กับน้ำก่อนเข้าถังกรอง ต้องให้แน่ใจว่าเกิด การกวนเร็ว (Rapid Mixing) ก่อนที่การกรองจะเกิดขึ้น ทั้งนี้เพราะการเติมสารเคมีก็เพื่อทำลายความคงตัว (Destabilization) ทำให้อนุภาคต่างๆ เคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันให้มากขึ้น และจับตัวกับเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อก (floc) ซึ่งสามารถทำกระบวนการโคแอกกูเลชันในถังกรองทรายได้โดยตรง เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ถังกรองทรายในการกำจัดสารแขวนลอยขนาดเล็กๆ โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำเพื่อเข้าถังกรองตรง ควรมีฟล็อกที่สามารถทะลุผ่านชั้นทรายได้ดีสักๆ แต่ไม่หลุดออกไปจากชั้นกรอง ด้วยเหตุนี้เป้าหมายของกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำเพื่อเข้าถังกรองตรง ควรเป็นแบบเกาะติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption/Charge Neutralization) ซึ่งจะให้ฟล็อกที่ไม่แข็งแรงเท่า Sweep floc และมีปริมาณน้อยกว่า เพื่อลดปัญหาการอุดตันเร็วและล้างย้อนที่ยาก

2.8.2 ความเร็วเกรเดียนท์ (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2539)

ความเร็วเกรเดียนท์ (G) หมายถึงความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยเฉพาะกลไกการดูดติดผิว และทำลายประจุความปั่นป่วนของน้ำในถังกวนเร็วจะต้องมีระดับสูง กล่าวคือไม่น้อยกว่า 300 วินาที⁻¹ เพื่อให้การกระจายของสารสัมผัสเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอ แต่ในถังกวนช้าจะมีความปั่นป่วนต่ำมีค่าไม่เกิน 60-100 วินาที⁻¹ เพื่อให้อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วสัมผัสกันและจับตัวเป็นก้อนใหญ่ พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วนสามารถคำนวณได้จากสมการของแคมท์ และสไตน์ดังสมการที่ 2.15

$$G = \left(\frac{P}{uV} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

โดยที่

G	=	ความเร็วเกรเดียนท์ (วินาที ⁻¹)
P	=	พลังงานที่ใช้ (ปอนด์-ฟุต/วินาที)
u	=	ความหนืดของน้ำ (ปอนด์-วินาที/(ฟุต ²))
v	=	ปริมาตรของน้ำในถังกวนเร็ว (ฟุต ³)

จะเห็นได้ว่า กรองตรงโดยการเติมสารเคมีจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณของสารเคมี ชนิดของน้ำเสีย และการกวนผสม (Mixing) เป็นสำคัญ ทั้งนี้เพราะการเติมสารเคมีก็เพื่อทำลายเสถียรภาพของสิ่งสกปรก เป็นผลให้เกิดการดูดติดผิวระหว่างสิ่งสกปรกและสารกรอง ช่วยทำให้การกรองมีประสิทธิภาพสูง และมีต้นทุนการดำเนินงานที่ต่ำ จึงต้องทำการศึกษาปริมาณสารเคมี

ด้วยวิธีการทำจารุเทสต์ให้เหมาะสมสำหรับน้ำเสียแต่ละชนิด และการกวนผสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสิ่งสกปรกต่างๆ

2.9 มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) (วารสาร ไม้เรียง, 2542)

เครื่องมือที่ใช้วัดความดันน้ำในมวลดิน (Pore Pressure) หรืออาจจะเรียกชื่อว่มาตรวัดความดันน้ำ ในระบบเครื่องมือวัดความดันไม่ว่าชนิดใด ๆ ก็ตาม จะต้องการปริมาณน้ำส่วนหนึ่งที่ต้องไหลเข้าไปในหัววัดเพื่อจะให้เกิดการอ่านค่าได้ ดังนั้นประสิทธิภาพการวัดของมาตรวัดความดันน้ำขึ้นกับอิทธิพล 2 ปัจจัย คือ

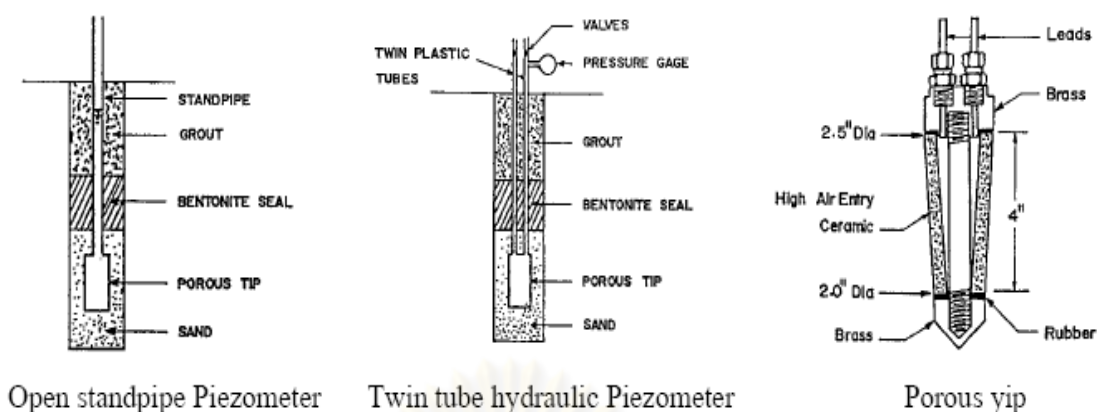
1. Volume Factor (V) ซึ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่ต้องการให้เข้าสู่หัวมาตรวัดความดันน้ำ ถ้าต้องการปริมาณน้ำที่ต้องไหลเข้ามาจากมวลดินน้อย ความสามารถในการอ่านค่าความดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงได้เร็ว ความไวจะสูง

2. Shape Factor (F) ซึ่งบอกถึงพื้นที่รับน้ำเข้าสู่หัวมาตรวัดความดันน้ำ ถ้ามีพื้นที่รับน้ำมากปริมาณน้ำก็จะไหลเข้าได้เร็ว ความไวจะสูง

ดังนั้น เหตุผลประกอบการเลือกมาตรวัดความดันน้ำที่ดีอย่างหนึ่งก็คือความไวในการวัด ซึ่งสามารถบอกได้ด้วยอัตราส่วนของ V/F ต้องให้มีค่าน้อย เวลาที่จะอ่านค่าได้จึงจะเร็วใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำจริงมากที่สุด

2.9.1 ระบบมาตรวัดความดันน้ำ

1. แบบใช้แรงดันน้ำ (Hydraulic Type) เป็นแบบที่ความดันน้ำสามารถวัดได้จากความสูงของระดับน้ำในท่อ (Standpipe) ซึ่งอาจเรียกว่า "ระบบเปิด" หรืออ่านจากมาตรวัดความดัน (Pressure Gage) และอ่านจากระดับปรอทที่แตกต่างกันในหลอดแก้วตัว "U" (Manometer) ซึ่งอาจจะเรียกว่า "ระบบปิด" เพราะน้ำซึ่งเป็นตัวกลางในการวัดค่า ถูกปิดกั้นไว้ด้วยระบบการวัดที่ปลายทางดังแสดงในรูปที่ 2.11



Open standpipe Piezometer

Twin tube hydraulic Piezometer

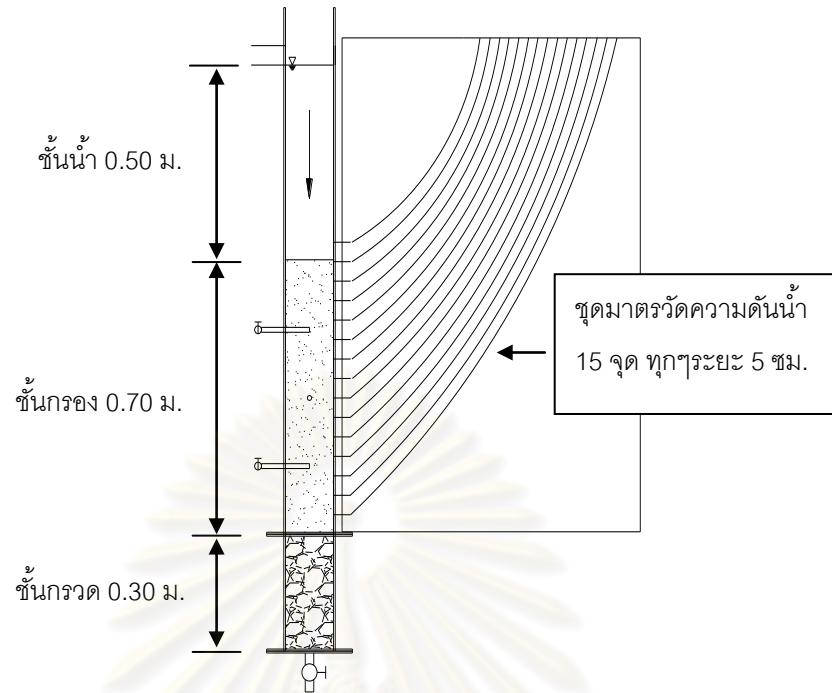
Porous tip

รูปที่ 2.11 มาตรฐานวัดความดันน้ำแบบใช้แรงดันน้ำ (วารสาร ไม้เรียง, 2542)

2. แบบใช้แรงดันลม (Pneumatic type) เป็นระบบมาตรฐานวัดความดันน้ำที่อาศัยความดันลมในการวัดค่าโดยความดันของน้ำในมวลดินจะเข้ามาสู่หัววัดผ่านแผ่นยางบาง ๆ (Diaphragm) ซึ่งจะรับแรงดันน้ำด้านหนึ่งและจะถูกดันกลับด้วยอากาศที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องวัด เมื่อความดันของอากาศหรือลมเท่ากับแรงดันน้ำ จะมีวาล์วปล่อยให้ลมส่วนหนึ่งผ่านออกไปยังระบบวัดด้านบนเพื่อเป็นสัญญาณให้ทำการอ่านค่าความดันลมที่สมดุลกับความดันน้ำที่หัวมาตรฐานวัดความดันน้ำ

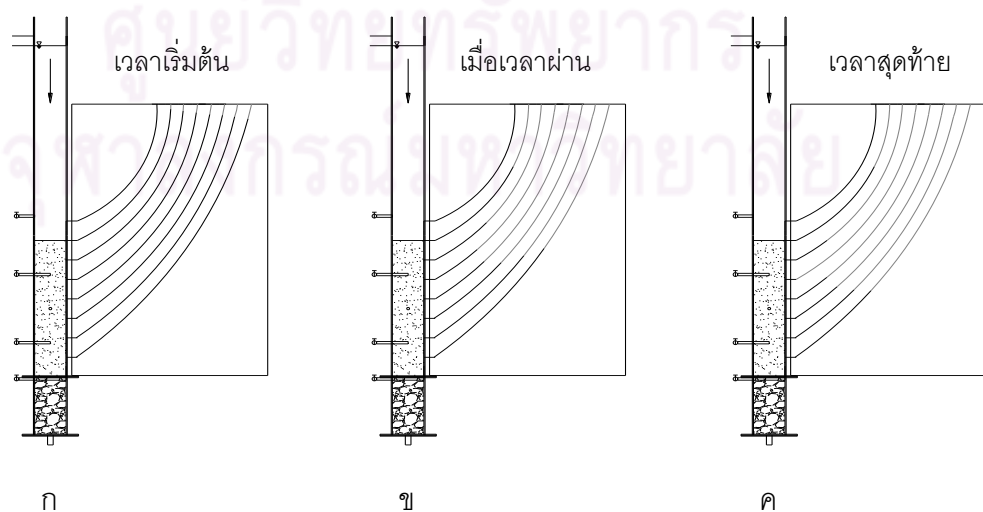
3. แบบใช้แรงดันไฟฟ้า (Electric Type) ในระบบนี้ ความดันน้ำจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าใน 2 รูปแบบคือแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ของสเตรนเกจ (Strain Gage) ที่ติดไว้ที่แผ่นโลหะบาง ซึ่งจะแอ่นตัวไปเป็นสัดส่วนกับแรงดันน้ำที่มากกระทำ ในขณะที่อีกแบบหนึ่งจะใช้วัดด้วยความถี่ในการสั่นของเส้นลวดที่ขึงตึงระหว่างแผ่นโลหะรับแรงได้และจุดคงที่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

ในการวิจัยนี้ได้นำมาตราวัดความดันน้ำแบบใช้แรงดันน้ำที่สามารถวัดได้จากความสูงของระดับน้ำในท่อมาประยุกต์ใช้ในการบันทึกค่าความดันลวดที่เกิดขึ้นในชั้นสารกรอง โดยทำการติดตั้งมาตรฐานวัดความดันน้ำทุกระยะ 5 ซม. ตามความสูงของชั้นสารกรอง รวมทั้งหมด 15 จุด ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 มาตรฐานวัดความดันน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้

หลักการทางานจะใช้ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำแต่ละจุดแสดงค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในชั้นสารกรอง เมื่อเริ่มกรองระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการไหลของน้ำที่ไหลผ่านชั้นกรวดและชั้นกรวด ดังรูปที่ 2.13 ก เมื่อเวลาผ่านไปถึงกรองเริ่มเกิดการอุดตัน ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำจะลดระดับลงเรื่อยๆ (ความดันน้ำลดลง) ดังรูปที่ 2.13 ข จนในที่สุดถึงกรองเกิดการอุดตัน มาตรวัดความดันน้ำในจุดที่เกิดการอุดตันจะอ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ (ไม่มีน้ำอยู่ในสายยาง) ดังรูปที่ 2.13 ค



รูปที่ 2.13 หลักการทางานของมาตรวัดความดันน้ำ

2. สร้างกราฟการกระจายความดัน

คำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ เท่ากับ ระดับน้ำเหนือ
ชั้นสารกรองถึงมาตรวัดความดันน้ำ – ระดับน้ำที่ลดลง

ตัวอย่างคำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ

ที่เวลา 720 นาที

$$\text{ระดับน้ำเหนือชั้นสารกรองถึงมาตรวัดความดันน้ำที่ 2} = 45.0 \text{ ซม.}$$

$$\text{ระดับน้ำที่ลดลง} = 14.1 \text{ ซม.}$$

$$\text{ระดับน้ำที่เหลืออยู่} = 45.0 - 14.1 = 30.9 \text{ ซม.}$$

ที่เวลา 1440 นาที

$$\text{ระดับน้ำเหนือชั้นสารกรองถึงมาตรวัดความดันน้ำตัวที่ 2} = 45.0 \text{ ซม.}$$

$$\text{ระดับน้ำที่ลดลง} = 23.4 \text{ ซม.}$$

$$\text{ระดับน้ำที่เหลืออยู่} = 45.0 - 23.4 = 21.6 \text{ ซม.}$$

กราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution)

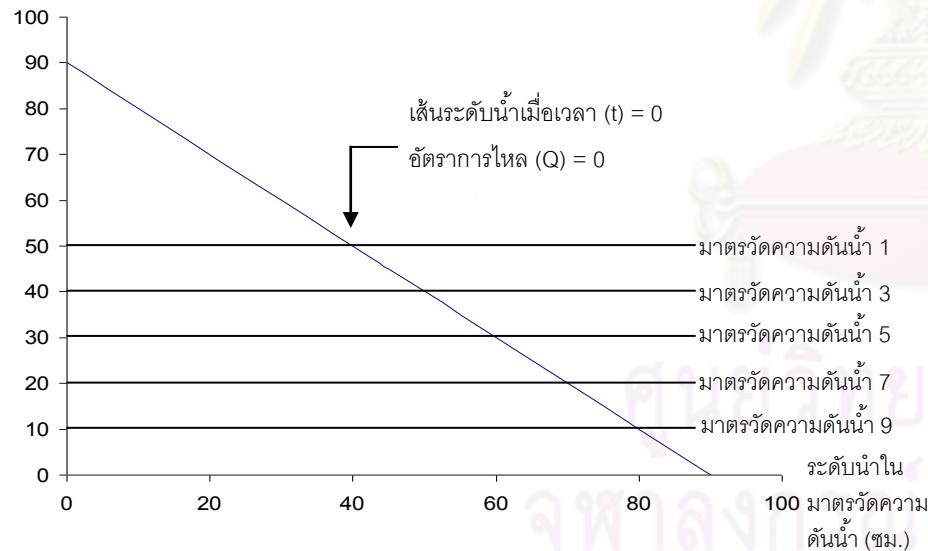
1. แกน Y คือตำแหน่งของมาตรวัดความดันน้ำ (ซม.)
2. แกน X คือระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำแต่ละตัว (ซม.)
3. ลากเส้นระดับน้ำที่เวลาเท่ากับ 0 โดยลากเส้นตรงตัดแกน Y ที่ระดับน้ำสูงสุดเหนือสารกรอง ตัดแกน X ที่ระดับน้ำเริ่มต้นในมาตรวัดความดันน้ำ
4. พล็อตกราฟระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำแต่ละจุดตามช่วงเวลา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

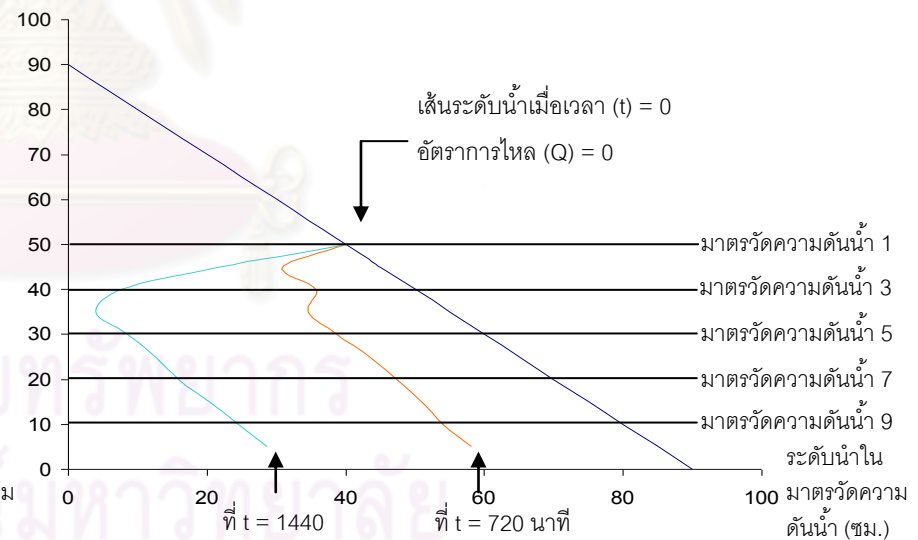
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ (1) (ไกรภพ ถึงแสง และวิษณุ บุญทองอ่อน, 2547)

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

ความสูงถังกรอง (ซม.)



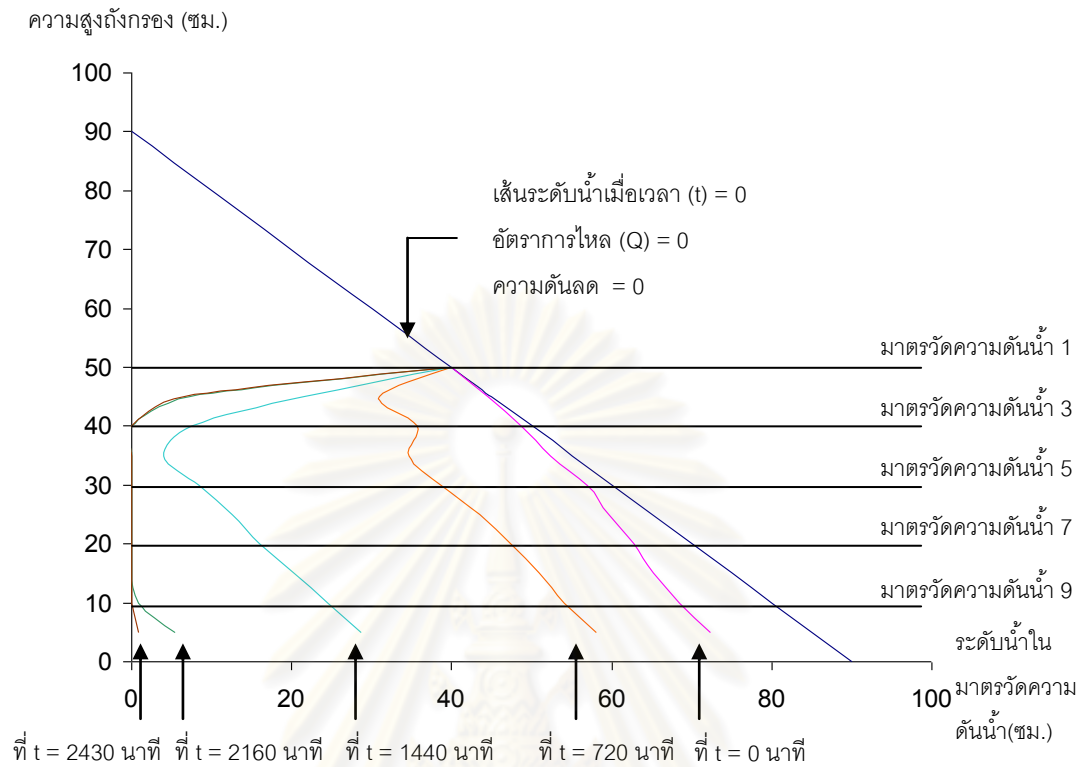
ความสูงถังกรอง (ซม.)



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการสร้างกราฟการกระจายความดัน

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าระดับน้ำที่เหลืออยู่ในมาตรวัดความดันน้ำ (2) (ไกรภพ ถึงแสง และวิษณุ บุญทองอ่อน, 2547)

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



รูปที่ 2.16 กราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution)

3. วิธีการอ่านกราฟการกระจายความดัน (Pressure Distribution)

ระยะเวลาการทำงานของถังกรอง

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

วิธีการหาค่าระดับความลึกที่เกิดการกรอง

วัดระดับความลึกจากมาตรวัดความดันน้ำตัวที่ 2 (ผิวหน้าสารกรอง) ลงมาถึง มาตรวัดความดันน้ำตัวที่อ่านระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ (ไม่มีน้ำอยู่ในสายยาง) จะได้ระดับความลึกที่มีเกิดการอุดตัน

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chuang และ Li (1997) ศึกษาผลกระทบของปริมาณสารรวมตะกอน และขนาดของอนุภาคต่อประสิทธิภาพการกรองโดยกรองเพื่อให้เข้าใจกลไกการกรองตรงให้ดีขึ้น โดยการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลด และค่าเฉลี่ยความเร็วเกรเดียนท์ (G) ในรูปของค่าความพรุน อัตราเร็วในการกรอง ปริมาณการใช้สารส้ม และขนาดของสารกรอง เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของขนาดของฟล็อก และค่าความพรุนที่เกิดจากการสะสมของสารกรองที่เกิดขึ้นในการกรอง

โดยการคำนวณค่าความดันลดใช้สมการของ Kozeny-Carman equation ตามสมการที่ 2.16

$$\frac{\Delta P}{L} = K_0 \frac{(1-\varepsilon)^{4/3}}{\varepsilon^3} \bar{V}_s \quad (2.16)$$

โดยที่

$$\Delta P = \text{ความดันลด}$$

$$L = \text{ความหนาของสารกรอง}$$

$$\bar{V}_s = \text{อัตราเร็วในการกรอง}$$

$$\varepsilon = \text{ความพรุนของสารกรอง}$$

$$K_0 = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^{2/3}}{\Phi_s D_p^2}$$

และการคำนวณค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) ผลคูณของค่าความเร็วเกรเดียนท์และระยะเวลาสัมผัส (G.t) และค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่ไหลผ่านผนังของถังกรอง (G_w) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16, 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ

$$G = K_1 \frac{(1-\varepsilon)^{2/3}}{\varepsilon^3} \bar{V}_s \quad (2.17)$$

$$G \cdot \bar{t} = K_2 \frac{(1-\varepsilon)^{1/3}}{\varepsilon^3} \bar{V}_s \quad (2.18)$$

$$G_w = K_3 \frac{(1-\varepsilon)^{2/3}}{\varepsilon^2} \bar{V}_s \quad (2.19)$$

โดยที่

$$G = \text{ความเร็วเกรเดียนท์}$$

$$\varepsilon = \text{ความพรุนของสารกรอง}$$

$$\bar{V}_s = \text{อัตราเร็วในการกรอง}$$

$$K_1 = \frac{40(1-\varepsilon_0)^{1/3}}{3 \Phi_s D_{po}}$$

$$K_2 = \frac{40(1-\varepsilon_0)^{1/3} L}{3 \Phi_s D_{po}}$$

$$K_3 = \frac{25(1-\varepsilon_0)^{1/3}}{\Phi_s D_{po}}$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะสมตัว ค่าความพรุนของสารกรองที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ และขนาดของสารกรองที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการสะสมตัว ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\sigma \cdot L \cdot \rho_s = \int_0^1 C_0 \bar{V} dt - \int_0^1 C \bar{V} dt \quad (2.20)$$

- โดยที่ σ = ค่าสัมประสิทธิ์การสะสมตัว
 L = ความหนาสารกรอง
 ρ_s = ความหนาแน่นของอนุภาค
 C_0, C = ความเข้มข้นของสารแขวนลอยก่อน-หลัง
 \bar{V} = อัตราเร็วในการกรอง
 t = เวลาในการกรอง

การคำนวณความพรุนของสารกรอง และค่าความพรุนของสารกรองที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ที่เวลาต่างๆ

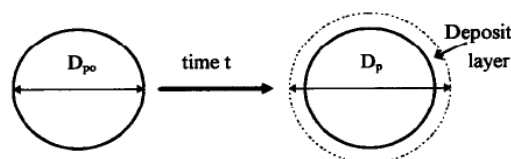
$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{\sigma}{1 - \varepsilon_d} \quad (2.21)$$

- โดยที่ ε = ความพรุนที่เกิดขึ้นในชั้นสารกรอง
 ε_0 = ความพรุนของสารกรองที่สะอาด (เริ่มต้น)
 ε_d = ความพรุนที่เกิดขึ้นจากการสะสมตัว
 σ = สัมประสิทธิ์การสะสมตัว

หลังจากนั้นนำค่าความพรุนที่ได้ มาคำนวณขนาดของสารกรองที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการสะสมตัวที่เกิดขึ้นในถังกรอง

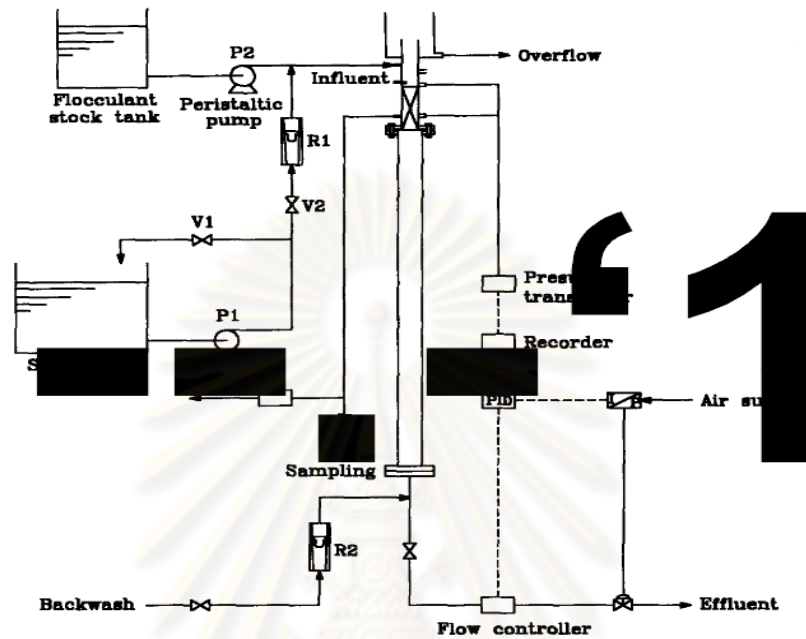
$$D_p = D_{po} \left(\frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon_0} \right)^{1/3} \quad (2.22)$$

- โดยที่ D_p = ขนาดของสารกรองที่เกิดขึ้นในถังกรอง
 D_{po} = ขนาดของสารกรองที่สะอาด
 ε = ความพรุนที่เกิดขึ้นในชั้นของสารกรอง
 ε_0 = ความพรุนของสารกรองที่สะอาด (เริ่มต้น)



รูปที่ 2.17 การสะสมตัวที่ผิวของสารกรอง

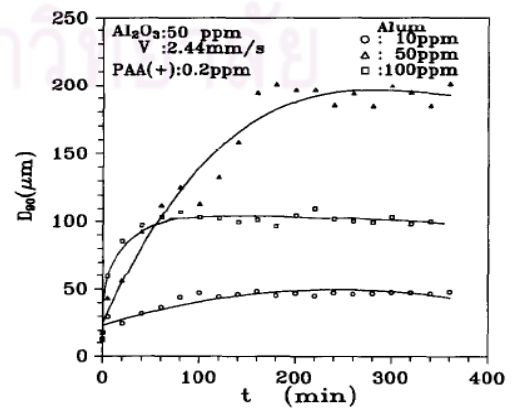
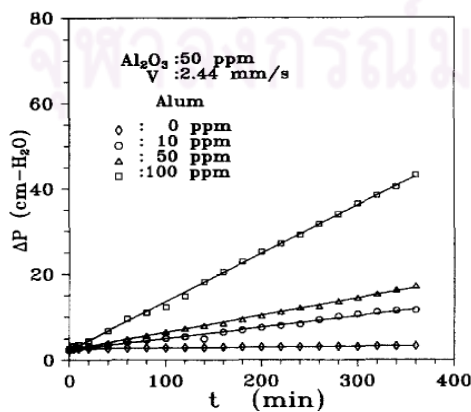
โดยการทดลองใช้ถังกรองขนาด 4 เซนติเมตร สารกรองหนา 12.6 เซนติเมตร โดยใช้สารกรอง 2 ขนาด คือ ขนาดเล็ก 0.71-0.85 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่ 1.00-1.19 มิลลิเมตร สารกรองมีค่าความพรุนเท่ากับ 0.405 และ 0.400 ตามลำดับ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.18

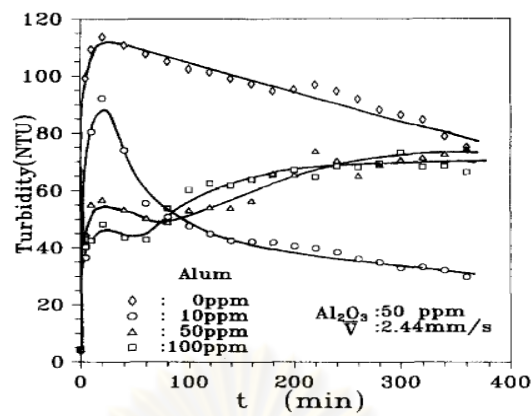


รูปที่ 2.18 การติดตั้งชุดการทดลอง (Chuang และ Li, 1997)

ผลการศึกษาพบว่า

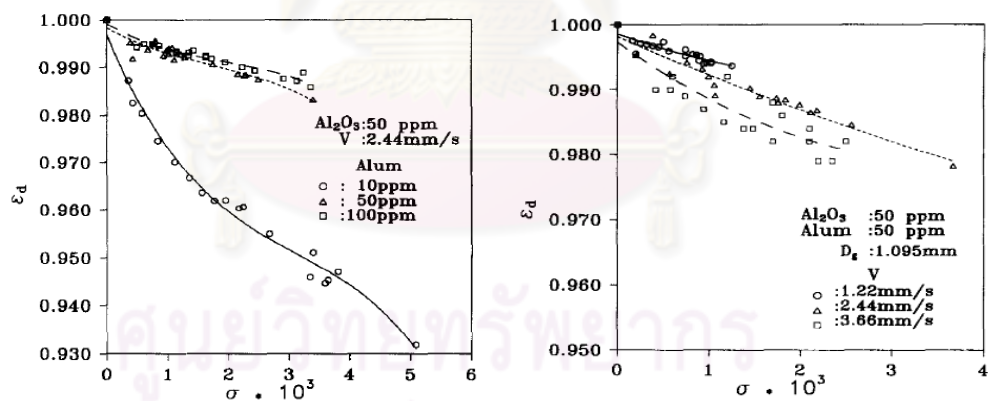
1. ผลกระทบจากปริมาณสารส้ม จากการศึกษากำหนดปริมาณของสารส้มตั้งแต่ 0-100 ppm พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารส้ม ขนาดของฟลอคก็มามีค่ามากขึ้น และจากการศึกษาค่าความดันลด พบว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการกรองเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของฟลอคมีผลต่อค่าความดันลด และที่ปริมาณสารส้มเท่ากับ 10 ppm พบว่าค่าความดันมีค่าลดลงมากที่สุด





รูปที่ 2.19 ผลกระทบของปริมาณสารส้มต่อขนาดของฟล็อก
ค่าความดินลด และค่าความขุ่น

2. ค่าความพรุนที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ต่อการกรองตรง มีค่าสูงมากอยู่ในช่วง 0.93 – 0.99 และเมื่อเวลาผ่านไปค่าความพรุนมีค่าลดลง ตามอัตราเร็ว ระยะเวลาในการกรอง และปริมาณของสารส้ม



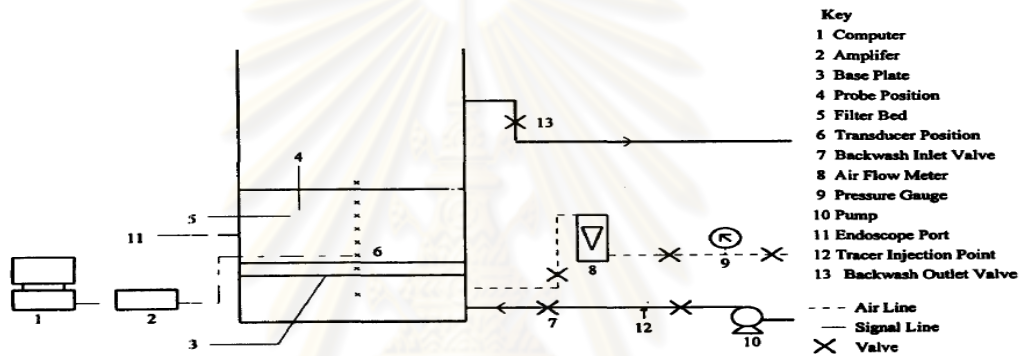
รูปที่ 2.20 ผลกระทบของปริมาณสารส้มและอัตราเร็วในการกรองต่อค่าความพรุน

จากงานวิจัยนี้พบว่าสามารถหาความสัมพันธ์ของขนาดของฟล็อกในถังกรอง ค่าความดินลด และค่าความขุ่นได้ เพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณสารเคมี และขนาดของสารกรองต่อประสิทธิภาพในการกรองตรง และยังสามารถหาค่าความพรุนที่เกิดจากการสะสมตัวหลังจากที่ทำการกรองผ่านไปแล้วได้

Hemmings และ Fitzpatrick (1997) ศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการล้างยอนสารกรองด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันโดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นความดันตัวแปรที่ทำการศึกษาคือความเร็วของน้ำล้างยอนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) ดังนี้

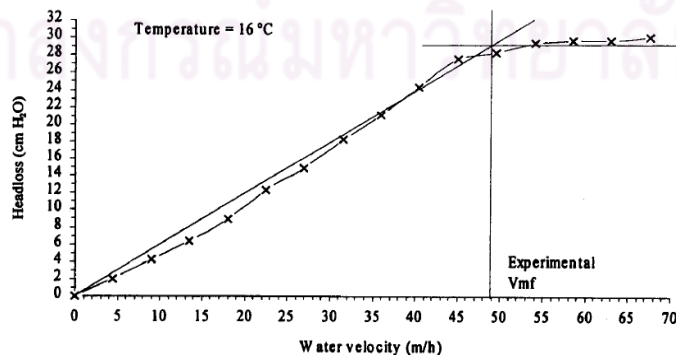
1. ใช้น้ำล้างยอนอย่างเดียว
2. ใช้น้ำและอากาศพร้อมกัน ความเร็วของอากาศเท่ากับ 50 เมตร/ชั่วโมง
3. ใช้น้ำและอากาศพร้อมกัน ความเร็วของอากาศเท่ากับ 30 เมตร/ชั่วโมง

ถังกรองที่ใช้ในการทดลองขนาด 1 ตารางเมตร สูง 3 เมตร ด้านข้างสองด้านทำจากวัสดุใสเพื่อให้มองเห็นการทำงานด้านใน ใช้ทรายกรองขนาด 1.00-2.00 มิลลิเมตร สูง 0.8 เมตร อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.21

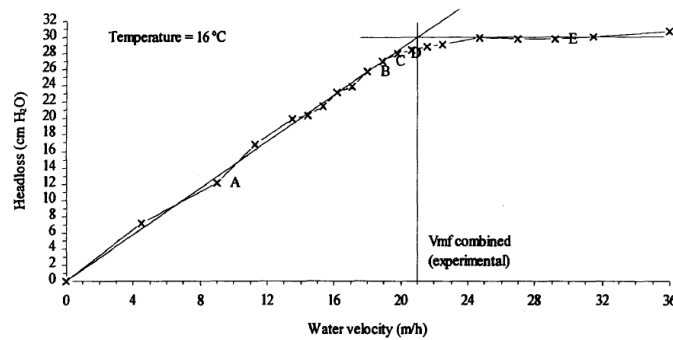


รูปที่ 2.21 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (Hemmings และ Fitzpatrick, 1997)

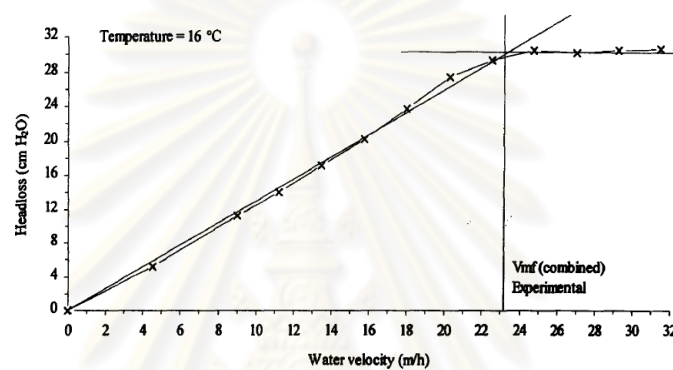
ผลการทดลองการล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันทำให้ความเร็วของน้ำล้างยอนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) มีค่าน้อยลง โดยการทดลองใช้น้ำล้างยอนอย่างเดียวความเร็ว (V_{mf}) เท่ากับ 49 เมตร/ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.22 และการทดลองเมื่อน้ำและอากาศล้างยอนพร้อมกัน ความเร็วของอากาศที่ 50 และ 30 เมตร/ชั่วโมง ต้องใช้ความเร็วของน้ำล้างยอน (V_{mf}) เท่ากับ 21 และ 23 เมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ



รูปที่ 2.22 ความเร็วของน้ำล้างยอนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อน้ำล้างยอนอย่างเดียว (Hemmings และ Fitzpatrick, 1997)



รูปที่ 2.23 ความเร็วของน้ำล้างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อน้ำและอากาศล้างย้อนพร้อมกัน ความเร็วของอากาศที่ 50 ม./ชม. (Hemmings และ Fitzpatrick, 1997)

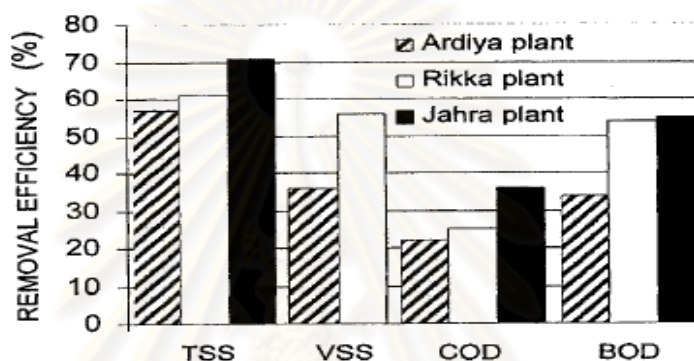


รูปที่ 2.24 ความเร็วของน้ำล้างย้อนที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารกรองขยายตัว (V_{mf}) เมื่อใช้น้ำและอากาศล้างย้อนพร้อมกัน ความเร็วของอากาศที่ 30 เมตร/ชั่วโมง (Hemmings และ Fitzpatrick, 1997)

จากงานวิจัยนี้พบว่าการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการล้างย้อนให้ดียิ่งขึ้น โดยช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างย้อน ดังนั้นเครื่องกรองแบบเติมอากาศจึงสามารถใช้ประโยชน์จากหัวเติมอากาศที่ฝังอยู่ในชั้นสารกรอง เพิ่มประสิทธิภาพในการล้างย้อนสารกรองได้เช่นเดียวกัน

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

ในงานวิจัยนี้ข้อมูลจะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม ANOVA จากผลการวิเคราะห์พบว่ากระบวนการการกรองทรายสามารถกำจัดปริมาณของแข็ง (SS และ VSS) และสารอินทรีย์ (BOD และ COD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ 99% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกรองในระบบบำบัดขั้นที่ 3 นั้นมีบทบาทสำคัญในการรักษาคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัด และลดความแปรปรวนของคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่ 2 โดยน้ำเสียที่ได้จากการบำบัดขั้นที่ 3 จะเพิ่มความมั่นใจในคุณภาพของน้ำเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ รูปที่ 2.25 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของระบบทรายกรองเร็วในระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3



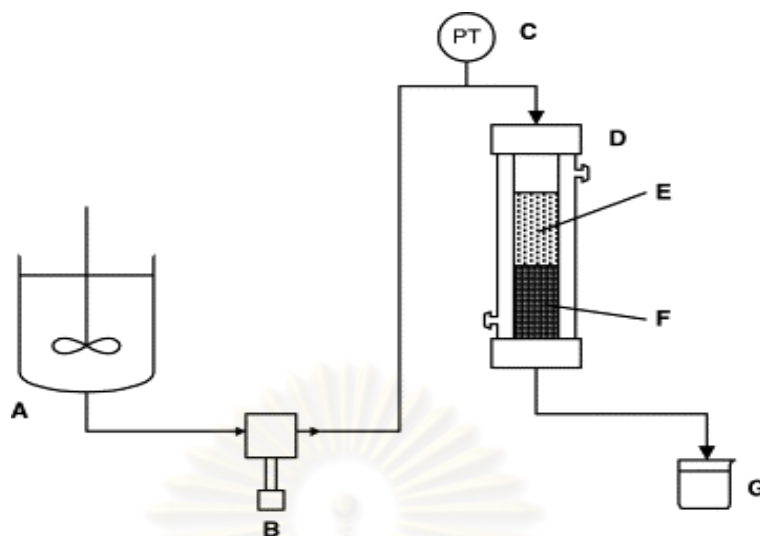
รูปที่ 2.25 ประสิทธิภาพการกำจัดของระบบทรายกรองเร็วในระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3

(Hamoda, Al-Ghusain และ Al-Mutairi, 2004)

จากงานวิจัยนี้พบว่า ถังกรองทรายถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการบำบัดน้ำเสีย และพบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด หากมีการพัฒนาคุณภาพของถังกรองทรายให้ดีขึ้น ถังกรองทรายอาจมีส่วนช่วยในการบำบัดน้ำได้ เช่น การรวมขั้นตอนการกวนช้า การกวนเร็ว และการตกตะกอนไว้ในกระบวนการเพียงขั้นตอนเดียว

Cambiella และคณะ (2006) ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของถังกรอง ซึ่งใช้ซีลี้อย (Sawdust) เป็นสารกรอง ในการบำบัดอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water Emulsion) โดยซีลี้อยเป็นทั้งสารกรอง และวัสดุดูดซับ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ อัตราเร็วในการกรอง ความสูงของสารกรอง และอุณหภูมิ

ถังกรองที่ใช้ในการทดลองขนาด 0.2 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 26 มิลลิเมตร ใช้ทรายกรองขนาด 1.00-2.00 มิลลิเมตร ความสูงของชั้นสารกรองอยู่ในช่วง 30-55 มิลลิเมตร และวัดค่าความดันลดในชั้นของสารกรอง ด้วยเครื่อง Piezoelectric DS Europe รุ่น LP634, 1-10 บาร์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (Cambiella และคณะ, 2006)

โดยที่ A: Stirred reservoir (feed); B: piston pump; C: pressure transducer; D: column; E: mixed salt/sawdust bed; F: single sawdust bed; G: beaker (treated effluent)

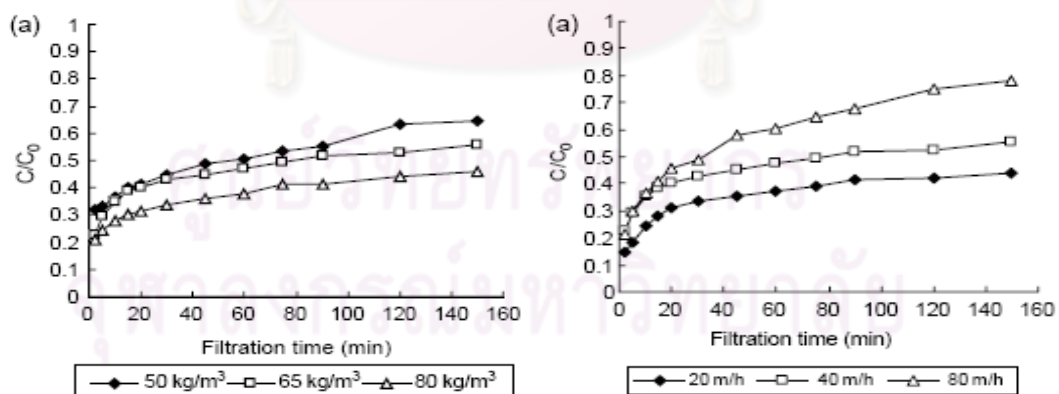
จากผลการทดลองพบว่า

1. การกำจัดน้ำมัน ด้วยกระบวนการกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (Depth ded filtration) ภายใต้สภาวะต่างๆ ในการทดลองการกรอง เช่น อุณหภูมิ อัตราเร็วในการกรอง ความสูงของชั้นสารกรอง หรือปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ แสดงให้เห็นถึงกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในถังกรอง เช่น กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) โคอะเลสเซอร์ (Coalescence) และการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งอย่างไรก็ตามสภาวะต่างๆ ในการทดลองก็เป็นตัวกำหนดกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้น เนื่องจากในแต่ละกลไกจะทำงานได้ในสภาวะที่แตกต่างกัน
2. สำหรับการกำจัดน้ำมันในน้ำ พบว่า สามารถกำจัดน้ำมันได้มากกว่าร้อยละ 99 ภายใต้สภาวะการทดลองที่ดีที่สุด และค่าความดันลดที่เกิดขึ้นต่ำกว่า 5 บาร์ และสามารถลดค่าซีโอดี (COD) ลงได้มากกว่าร้อยละ 95 ซึ่งสามารถนำกระบวนการกรองมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้
3. ซีลี้อย (Sawdust) สามารถนำมาใช้เป็นสารกรอง และวัสดุดูดซับได้เนื่องจาก เป็นวัสดุที่มีราคาถูก และหาได้ง่าย ซึ่งจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันตัดออกจากน้ำ สูงขึ้นเมื่อมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ลงในชั้นสารกรอง

จากงานวิจัยนี้พบว่า กระบวนการกรองสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ชนิดอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (Oil-in water emulsion) ได้ และการเติมสารโคแอกกูแลนต์ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดให้สูงมากขึ้นอีกด้วย

Lee และคณะ (2007) ศึกษาการกักเก็บอนุภาคและลักษณะเฉพาะของสารกรองไฟเบอร์ (Flexible Fibre Filter Module) เมื่อใช้กรองน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สอง เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเนื่องจากความสูงของถังกรอง ความหนาแน่นและความเร็วในการกรอง ทำการทดลองโดยใช้ถังกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร จำนวน 4 ถัง ที่ความสูงแตกต่างกันคือ 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิเมตร ตามลำดับ ตัวกลางสารกรองคือสารกรองไฟเบอร์ (3FM) ความหนาแน่น 50, 65 และ 80 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และความเร็วในการกรอง 20, 40 และ 80 เมตร/ชั่วโมง น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเตรียมขึ้นจากเบนโทไนต์ที่ความขุ่น 20 เอ็นทียู ขนาดเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1.62 กรัม/มิลลิลิตร การไหลของน้ำเสียเป็นแบบไหลขึ้น (Upflow) อัตราการไหลควบคุมด้วยปั๊มดูด - จ่ายของเหลว (Peristaltic Pump) วัดความดันที่เกิดขึ้นในชั้นกรองด้วยมาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer)

จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของสารกรองสูงมีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงตามไปด้วย ในทางกลับกันความเร็วในการกรองที่สูงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ดังรูปที่ 2.27 (a) และ 2.27 (b) ตามลำดับ ความหนาแน่นและความเร็วในการกรองส่งผลกระทบต่อความดันตกเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นข้อดีของสารกรองไฟเบอร์ (3FM) การกำจัดความขุ่นส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ส่วนล่างของถังกรอง (0 - 400 มิลลิเมตร) เมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการกรองกับการกักเก็บอนุภาคพบว่าความเร็วในการกรองมีผลต่อการกักเก็บอนุภาคน้อยมากเมื่อกรองน้ำที่มีปริมาตรและองค์ประกอบในน้ำแบบเดียวกัน



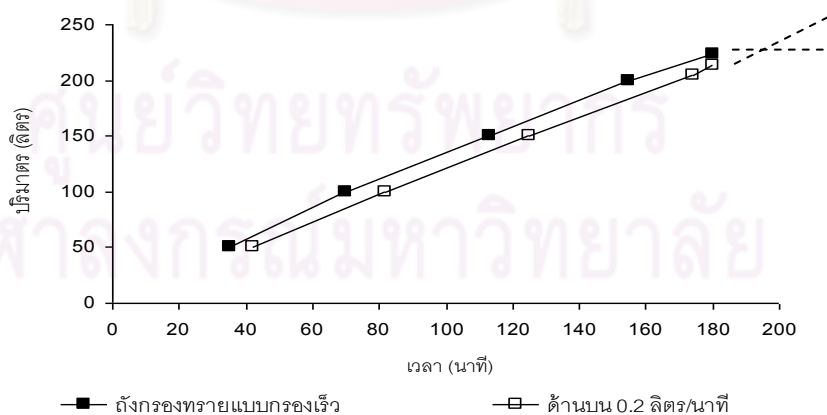
- (a) ที่ความหนาแน่น 50, 65 และ 80 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ความเร็วในการกรอง 40 เมตร/ชั่วโมง
 (b) ที่ความเร็วในการกรอง 20, 40 และ 80 เมตร/ชั่วโมง ความหนาแน่น 80 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
 รูปที่ 2.27 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสารกรองไฟเบอร์ (Lee และคณะ, 2007)

จากงานวิจัยนี้พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่น เป็นผลจากความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความพรุนของสารกรองลดลงจึงสามารถกรองอนุภาคขนาดเล็กได้ดี แต่อายุการใช้งานถังกรองจะสั้นลง

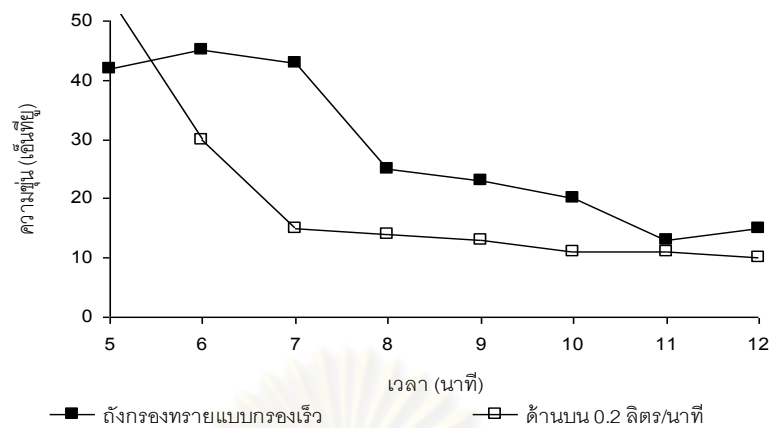
รัฐพล เจียวิริยะบุญญา (2552) การพัฒนาถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศของระบบการผลิตน้ำประปา โดยศึกษาการรวมกระบวนกรเติมอากาศเข้ากับการกรองตรง (Direct Filtration) เพื่อช่วยให้ชั้นกรองขยายตัว และช่วยให้เกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาแน่นกรอง โดยศึกษาผลกระทบของตำแหน่งของหัวเติมอากาศ ชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศ อัตราการเติมอากาศและรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่มีผลต่อกระบวนการกรองร่วมกับการเติมอากาศ โดยการกรองตรง (Direct Filtration)

ถังกรองที่ใช้ในการทดลองนี้ทำด้วยวัสดุอะคริลิกใส 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 2 จุด ด้านบนที่ร้อยละ 25 และด้านล่างที่ร้อยละ 75 ของความสูงชั้นสารกรอง และสารกรองที่ใช้ คือ ทราย

จากผลการทดลองพบว่ากรเติมอากาศช่วยลดการสะสมของอนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง ทำให้มีระยะเวลาการทำงานยาวนานกว่าถังกรองทรายแบบกรองเร็ว (270 เปอร์เซ็นต์) แต่อัตราการกรองจะมีค่าลดลงเล็กน้อย (5 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้การเติมอากาศยังช่วยทำให้เกิดการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันทำให้เวลาในการล้างย้อนลดลงได้

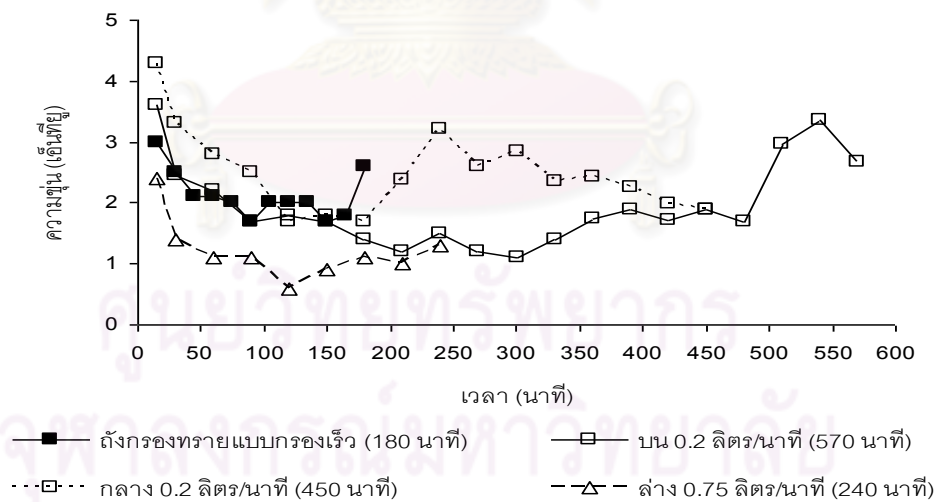


รูปที่ 2.28 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบกรองเร็วและถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที

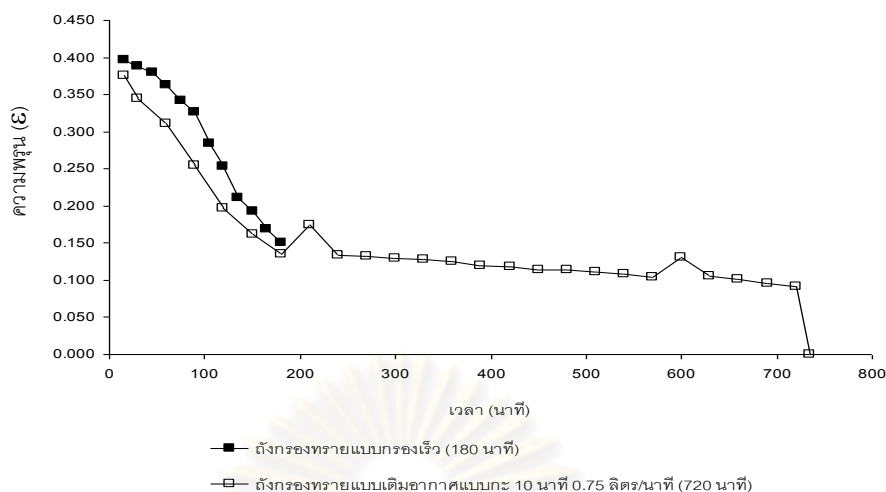


รูปที่ 2.29 ประสิทธิภาพการล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวและการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่เวลาการล้างย้อน 5-12 นาที

การเติมอากาศที่เหมาะสมด้วยอุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนและแบบยืดหยุ่นที่ตำแหน่งด้านบน อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่อนาที มีระยะเวลาการทำงาน 570 และการทดลองการเติมอากาศแบบกะจึงเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง โดยที่เวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที ทำให้ระยะเวลาการทำงานยาวนาน 720 นาที (มากกว่าถังกรองทรายแบบกรองเร็ว 4 เท่า)



รูปที่ 2.30 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบนตรงกลางและด้านล่างของชั้นกรอง ขณะดำเนินการทดลองระยะยาว



รูปที่ 2.31 ความพุนของชั้นกรองที่เวลาการกรองต่างๆ

จากงานวิจัยนี้พบว่า การเติมอากาศช่วยให้ระยะเวลาในการทำงานของถังกรองเพิ่มมากขึ้น โดยเติมอากาศที่ด้านบนของถังกรอง และอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.2 ลิตรต่อนาที ถังกรองทรายสามารถทำงานได้นาน และน้ำที่กรองได้มีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปา (ไม่เกิน 5 เอ็นทียู) และรูปแบบการเติมอากาศแบบกะ สามารถทำให้ถังกรองทรายทำงานได้นานกว่าถังกรองเร็วถึง 4 เท่า และช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าในการเติมอากาศลงอีกด้วย

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นพบว่า กระบวนการกรองมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน โดยในปัจจุบันการกรองเป็นขั้นตอนหนึ่งในการผลิตน้ำประปา และถูกจัดอยู่ในระบบบำบัดขั้นที่ 3 ในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการลดความแปรปรวนของคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่ 2 (Hamoda, Al-Ghusain และ Al-Mutairi, 2004) ซึ่งโดยทั่วไปน้ำที่เข้าสู่ถังกรองจะต้องผ่านกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation and Sedimentation) เพื่อลดภาระการกำจัดความขุ่น และค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ทำให้ถังกรองมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น แต่ปัญหาที่ตามมาคือการสิ้นเปลืองพื้นที่ในก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างตะกอนและการตกตะกอน แนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้การกรองตรง (Direct Filtration) แต่ปัญหาที่ตามมาของการกรองตรงคือถังกรองจะมีอายุการใช้งานสั้นลง เนื่องจากกลไกการกรองเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ไม่สามารถใช้ความหนาของชั้นกรองได้เต็มประสิทธิภาพ โดยความลึกที่เกิดการกรองอยู่ที่ระดับประมาณ 6 ซม. จากระดับผิวหน้าสารกรอง ทั้งนี้ การวัดระดับความลึกที่เกิดการกรองสามารถทำได้โดยใช้มาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) เพื่อติดตาม

การกระจายความดันภายในชั้นกรองและอายุการใช้งานของถังกรอง นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Chuang และ Li (1997) ยังพบว่าปริมาณสารเคมีและขนาดของสารกรองมีผลต่อประสิทธิภาพของการกรองตรง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วเกรเดียนท์ ขนาดของฟล็อกในถังกรอง ค่าความดันลด และค่าความพรุนที่เกิดจากการสะสมตัวหลังจากที่ทำการกรองผ่านไป แล้ว เพื่ออธิบายประสิทธิภาพและกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการกรองตรง ซึ่งจากที่กล่าวมาส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการกรองตรงสำหรับการแยกอนุภาคความขุ่นของจากเฟสน้ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการประยุกต์ใช้การกรองตรงในการบำบัดน้ำที่มีสารปนเปื้อนในลักษณะทางกายภาพแตกต่าง คืออนุภาคของแข็ง และอิมัลชันของน้ำมันซึ่งมีความยืดหยุ่น และจากความแตกต่างดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อกลไกการทำงานและประสิทธิภาพของถังกรอง ลักษณะการอุดตันที่เกิดขึ้น ชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้ รวมถึงการล้างย้อนเพื่อทำความสะอาดสารกรองด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำกระบวนการกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี โดยศึกษาปริมาณของสารเคมีที่เหมาะสมด้วยวิธีการทำจาร์เทสต์ มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุน ค่าความดันลด สัมประสิทธิ์การสะสมตัว และค่าขนาดของสารกรองเมื่อเกิดการสะสมตัว โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น เพื่อให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพและกลไกการกรองตรง นอกจากนี้ยังมีการเติมอากาศภายในชั้นกรองซึ่งทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว ลดการสะสมอนุภาคสิ่งสกปรกบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง และการเติมอากาศยังช่วยในเรื่องการล้างย้อนสารกรองได้อีกด้วย โดยศึกษาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ถังกรองที่มีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานได้นานขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

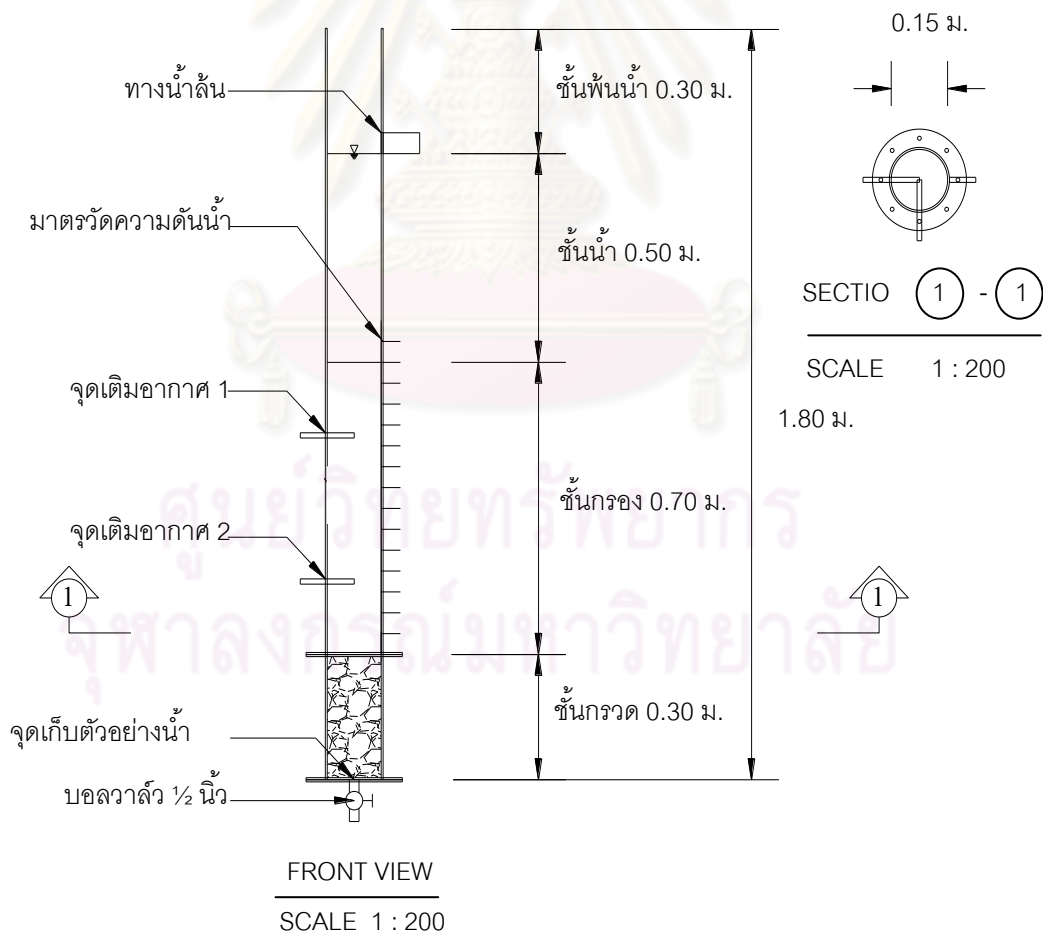
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

ถังกรองที่ใช้ในการทดลองทำด้วยวัสดุอะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร สูง 1.80 เมตร แบ่งเป็นชั้นพื้นน้ำ (Freeboard) 0.30 เมตร ชั้นเก็บกัก 0.50 เมตร ชั้นกรอง 0.70 เมตร และชั้นระบายน้ำกรอง 0.30 เมตร ติดตั้งหัวเติมอากาศ 2 จุด ด้านบนที่ร้อยละ 25 และด้านล่างที่ร้อยละ 75 ของความสูงชั้นสารกรอง โดยรายละเอียดของถังกรองแบบเติมอากาศดังรูปที่ 3.1



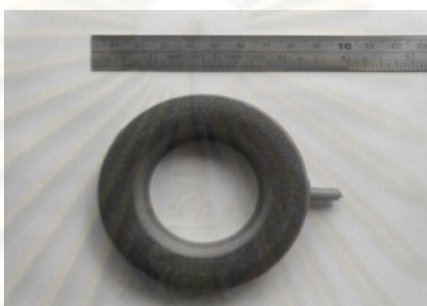
รูปที่ 3.1 ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

2. ตัวกลางสารกรอง

เลือกใช้ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ (d_{10}) อยู่ในช่วง 0.45-0.55 มิลลิเมตร สัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอในช่วง 1.4-1.7 ความหนาชั้นทรายกรอง 0.70 เมตร เป็นสารกรอง รูปแบบของสารกรองดังกล่าวใช้ตามข้อมูลการออกแบบระบบกรองน้ำ (Viessman และ Hammer, 2005)

3. หัวเติมอากาศ

หัวเติมอากาศแบบรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 ซม. (รัฐพล เจียวิริยะ บุญญา, 2552) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หัวเติมอากาศ

4. เครื่องเติมอากาศ

เครื่องเติมอากาศใช้เครื่องอัดอากาศ (Air Pump) ยี่ห้อ RESUN รุ่น AP-80

5. อัตราการไหลของอากาศ

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

6. เครื่องปั่นกววนเพื่อเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วย

- ถังพลาสติกทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 ม. สูง 1.5 ม.
- ใบพัดกววนแบบ Flat blade ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. สูง 6 ซม.
- มอเตอร์ขนาด 15,000 วัตต์

7. เครื่องปั่นกววนเพื่อเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ กรณีที่มีการเติมสารเคมี ซึ่งประกอบด้วย

- ถังสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 ม. สูง 0.30 ม.
- ใบพัดกววนแบบ Flat blade ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. สูง 2 ซม.

- มอเตอร์ขนาด 150 รอบ/นาที

8. เครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มใต้น้ำ (Submersible Pump)

การป้อนน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์เข้าสู่ถังกรอง จะใช้เครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มใต้น้ำ (Submersible Pump)

9. ชุดทดสอบจาร์เทสต์ (Jar Test)

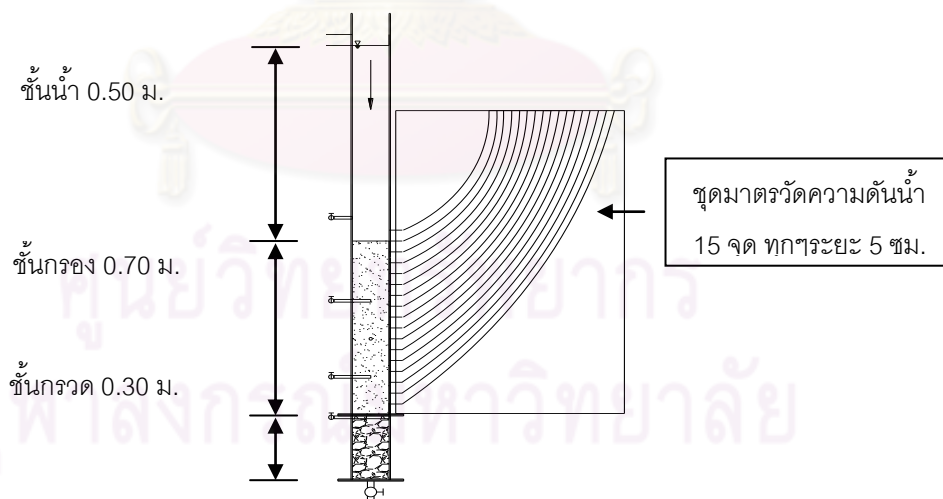
ชุดทดสอบจาร์เทสต์ (Jar Test) ยี่ห้อ วอเตอร์เทสต์ รุ่น WT-JT2

10. เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter)

เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100A

11. มาตรการวัดความดันน้ำ (Piezometer)

มาตรการวัดความดันน้ำแบบใช้แรงดันน้ำ จำนวน 15 จุด โดยทำการติดตั้งมาตรการวัดความดันน้ำทุกกระยะ 5 เซนติเมตร ตามความสูงชั้นสารกรอง โดยมาตรการวัดความดันน้ำ (Piezometer) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 มาตรการวัดความดันน้ำ (Piezometer)

12. อุปกรณ์วัดค่าซีไอดี

- หลอดทดสอบวัดค่าซีไอดี ขนาด 16x150 มิลลิเมตร พร้อมฝาจุกเกลียว
- ตู้อบ (Hot air oven) บริษัท Memmert รุ่น 600

- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 200, 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- ปิเปต (Pipet) ขนาด 1, 5, 10 และ 25 มิลลิลิตร

3.1.2 สารเคมี

1. น้ำมันตัด (Cutting Oil)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของน้ำมันตัด รุ่น 3810150 บริษัท BP-Castrol (ประเทศไทย จำกัด)

ชนิดของน้ำมัน	น้ำมันตัด
ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	~1 - 1.3
ความหนืด (cps)	9.16
แรงตึงผิว (mN/m)	47.02
ความขุ่น (NTU)	1,356

2. ดินคาโอลิน (Kaolin)

3. สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) ที่มีสูตรทางเคมี $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ของบริษัท Carlo Erba

4. สารละลายมาตรฐาน Potassium Dichromate Digestion ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ของบริษัท Carlo Erba

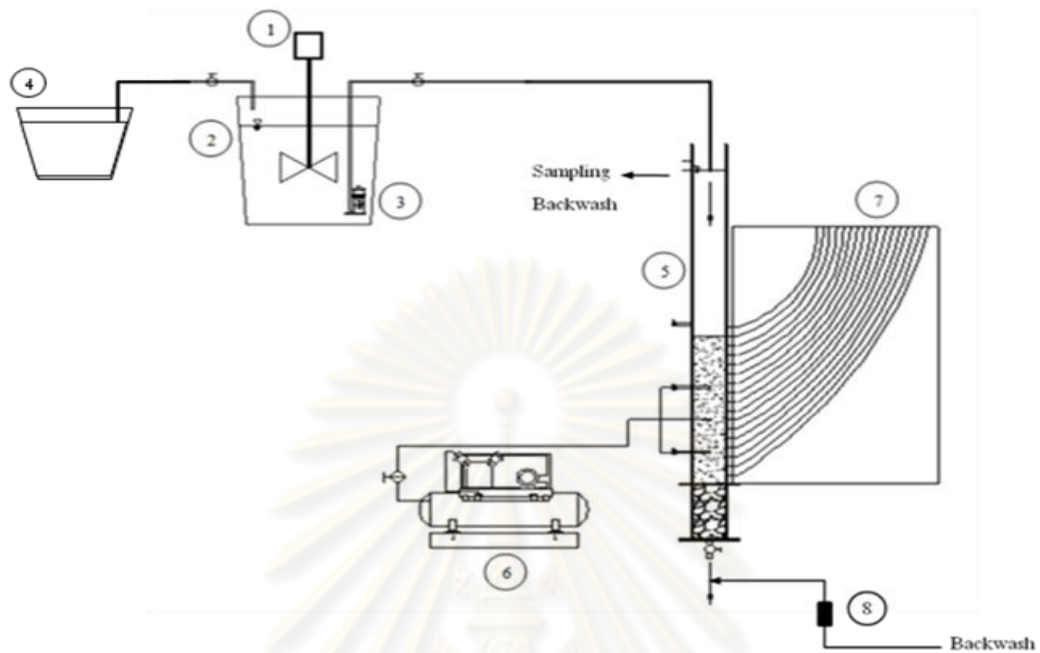
5. กรดไฮโดรคลอริก ความบริสุทธิ์ 93 % (Hydrochloric Acid, HCl) บริษัท J.T. Baker

6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความบริสุทธิ์ 93 % (Sodium Hydroxide, NaOH) บริษัท J.T. Baker

7. สารละลายมาตรฐาน Ferrous Ammonium Sulfate ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

8. น้ำกลั่น

3.2 การติดตั้งชุดการทดลอง



รูปที่ 3.4 การติดตั้งชุดการทดลอง

การติดตั้งชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.4 โดยประกอบด้วย

- (1) เครื่องปั่นกวนน้ำเสียสังเคราะห์
- (2) ถังเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์
- (3) เครื่องสูบน้ำ
- (4) ถังเตรียมสารเคมี
- (5) ถังกรองทรายแบบเติมอากาศ
- (6) เครื่องเติมอากาศ
- (7) มาตรวัดความดันน้ำ (พิโซมิเตอร์)
- (8) เครื่องวัดอัตราการไหล

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้จะทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร (ธนนท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) และน้ำขุ่นสังเคราะห์โดยใช้นินคาโอลินเป็นตัวสร้างความขุ่นผสมกับน้ำประปาที่มีความเข้มข้น 67 มิลลิกรัม/ลิตร โดยให้ค่าความขุ่นประมาณ 50 เอ็นทียู ซึ่งค่าความขุ่นที่เลือกใช้ได้มาจากค่าความขุ่นโดยเฉลี่ยของน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา (รัฐพล เจียวิริยะบุญญา, 2552) แล้วปั่นกวนผสมให้เข้ากันด้วยความเร็ว 150 รอบ/นาที ตลอดเวลาการทดลอง

ในการศึกษานี้จะดำเนินการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 6 ส่วนหลักๆ ได้แก่

การทดลองที่ 1 ศึกษากระบวนการกรองแบบกรองตรง ที่ไม่มีการเติมสารเคมีใดๆ ด้วยถังกรองทรายแบบกรองเร็ว (Rapid Sand Filtration) เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ซีไอดี ปริมาณน้ำที่กรองได้ และระยะเวลาในการดำเนินงาน รวมถึงการวัดค่าความดันลด (Headloss) ของถังกรองจนกระทั่งถังกรองเกิดการอุดตัน และศึกษาประสิทธิภาพในการล้างย้อน และการขยายตัวของชั้นกรองเนื่องจากการล้างย้อน

การทดลองที่ 2 ศึกษาการทำลายเสถียรภาพโดยใช้วิธีการทำจาร์เทสต์ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคความขุ่น และอนุภาคน้ำมันคงตัวที่แขวนลอยในน้ำเสีย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับถังกรองทรายแบบกรองตรง

การทดลองที่ 3 ศึกษาการปรับปรุงกระบวนการกรองแบบกรองตรง ที่มีการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำมันตัดและความขุ่น ด้วยการเติมสารโคแอกกูแลนต์ให้กับน้ำก่อนเข้าถังกรองทราย โดยใช้ปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์จากผลการทำจาร์เทสต์ เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพตามการทดลองที่ 1 และศึกษาประสิทธิภาพในการล้างย้อน

การทดลองที่ 4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรอง แบบการกรองตรง ที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ และประยุกต์ใช้การเติมอากาศ (Aeration) โดยใช้ปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม และอัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกัน 3 ค่า เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพตามการทดลองที่ 1 และศึกษาประสิทธิภาพในการล้างย้อนร่วมกับการเติมอากาศ

การทดลองที่ 5 ศึกษาการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยนำสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดจากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกรอง และประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ (Batch)

การทดลองที่ 6 ศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการกรองของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว โดยประยุกต์ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายและทำนายประสิทธิภาพในการกรองน้ำที่มี

คุณสมบัติที่แตกต่างกันทั้ง 2 ชนิด เพื่ออธิบายความพูน ขนาดของสารกรอง ความขุ่น และความดันลดเมื่อเวลาต่างๆ ในการกรอง

ขั้นตอนในการเดินระบบ

1. เริ่มเดินระบบถังกรองทรายแบบกรองเร็ว ทำการกวนน้ำตัวอย่างในถังเตรียมน้ำตัวอย่างตลอดการทดลองจากนั้นสูบน้ำเข้าสู่ถังกรองทราย ทำการควบคุมระดับน้ำเหนือสารกรองเท่ากับ 0.50 เมตร (ทำการกรองที่ความดันคงที่) ตลอดการทดลอง
2. เต็มอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรองที่ร้อยละ 25 จากผิวสารกรองเมื่อดำเนินการกรอง ที่อัตราการเติมอากาศตามค่าตัวแปรอิสระ
3. ทำการเดินระบบโดยเก็บตัวอย่างน้ำ บันทึกค่าระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำทุกๆ 15 นาที และวัดปริมาตรน้ำที่กรองตามเวลา และวิเคราะห์ค่าตัวแปรตาม จนกระทั่งถังกรองทรายแบบกรองเร็วเกิดการอุดตัน จึงทำการหยุดเดินระบบ
4. หลังจากนั้นทำการล้างย้อนถังกรองทรายแบบกรองเร็วด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวที่ความเร็วของน้ำล้างย้อนเท่ากับ 0.75 เมตร/นาที (Kawamura, 2000) และถังกรองทรายแบบเติมอากาศด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันที่ความเร็วของน้ำล้างย้อนเท่ากับ 0.75 เมตร/นาที และเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านล่างของชั้นกรองที่ร้อยละ 75 จากผิวสารกรอง ด้วยอัตราการเติมอากาศตามค่าตัวแปรอิสระ โดยใช้เวลาในการล้างย้อน 12 นาที และเก็บตัวอย่างน้ำล้างย้อนทุกๆ 1 นาที และวิเคราะห์ค่าตัวแปรตาม
5. รวบรวมข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่กรองได้ ระยะเวลาในการทำงานของถังกรองการกระจายความดันภายในชั้นกรอง และประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว

ตารางที่ 4.2 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย	เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
อัตราการไหลของอากาศ	เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ
ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์	วิธีจาร์เทสต์
ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ	ไม้บรรทัด
ค่าซีไอดี (COD)	Dichromate Close Reflux Method (AWWA 508 A.)
ค่าน้ำมันและไขมัน (FOG)	การสกัดด้วยเฮกเซน
ค่าความขุ่น	เครื่องวัดความขุ่น
ปริมาตรน้ำที่กรองได้	ถังวัดปริมาตรน้ำขนาด 10 - 50 ลิตร

3.3.1 ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว

การทดลองที่ 1: ศึกษาประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว ในการกรองน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด และน้ำขุ่น โดยใช้ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45-0.55 มิลลิเมตร สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 1.5 และชั้นทรายกรองหนา 0.70 เมตร ควบคุมระดับน้ำเหนือสกรกกรอง เท่ากับ 0.50 เมตร ตามลำดับ ดำเนินการกรองจนกระทั่งถังกรองเกิดการอุดตัน โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.3 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองเร็ว

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ขนาดของถังกรอง	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. สูง 1.80 ม.
2. สารกรอง	ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45-0.55 มม. และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 1.5
3. ความหนาของสารกรอง	0.70 เมตร
4. รูปแบบการกรอง	ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว
5. รูปแบบการล้างย้อนถังกรอง	ล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว
6. ความเร็วของน้ำล้างย้อน	0.75 เมตร/นาที
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของตัวอย่างน้ำ	1. น้ำขุ่น 2. น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	ความขุ่น (Turbidity) - น้ำที่กรองได้ - น้ำล้างย้อน ค่าซีโอดี (COD)
2. ความดันลด (Headloss)	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer)
3. อัตราเร็วในการกรอง	ปริมาตรน้ำที่กรองได้และระยะเวลาในการกรอง

3.3.2 ศึกษาการทำลายเสถียรภาพของความชุ่มชื้น และน้ำมันตัด

การทดลองที่ 2.1: ศึกษาผลของปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับน้ำชุ่มชื้น โดยนำน้ำชุ่มชื้นใส่ลงในปิแกเกอร์ปริมาณ 1 ลิตร ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 โดยทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์ ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการกวนเร็ว 150 รอบ/นาที นาน 1 นาทีและกวนช้า 30 รอบ/นาที นาน 30 นาทีและตั้งให้ตกตะกอน 30 นาที นำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าความชุ่มชื้น โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.4 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.6

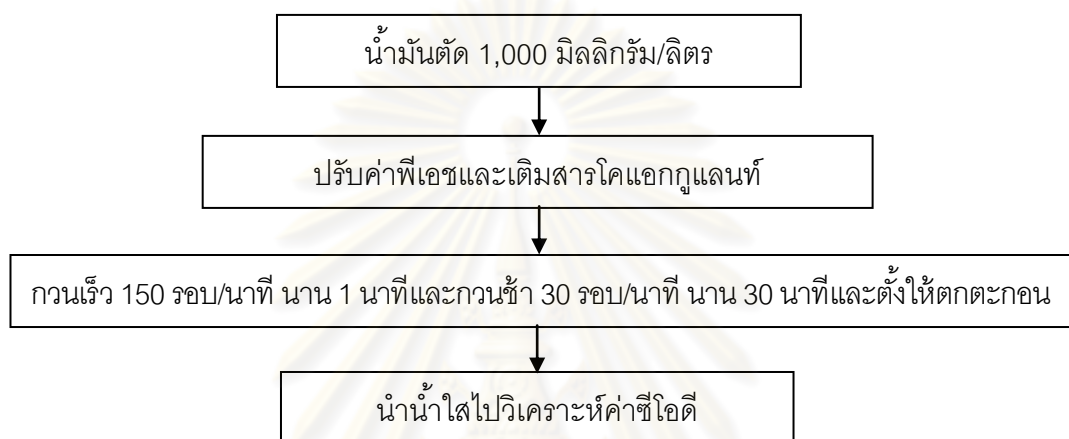


รูปที่ 3.6 แผนผังการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพน้ำชุ่ม

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความชุ่มชื้นด้วยวิธีจาร์เทสต์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ	น้ำประปา
2. ชนิดของน้ำมัน	ดินคาโอลิน
3. ความเข้มข้นของน้ำมัน	67 มิลลิกรัม/ลิตร
4. ค่าพีเอช	7
5. ชนิดโคแอกกูแลนต์	สารส้ม
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์	10, 20, 30, 40 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	อุปกรณ์ที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	ค่าความชุ่มชื้น

การทดลองที่ 2.2: ศึกษาผลของปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยการนำน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดใส่ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 1 ลิตร ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 โดยทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์ ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการกวนเร็ว 150 รอบ/นาที นาน 1 นาที และกวนช้า 30 รอบ/นาที นาน 30 นาทีและตั้งให้ตกตะกอน 30 นาที นำน้ำเสียส่วนใสวิเคราะห์ค่าซีไอดี โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.5 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.7



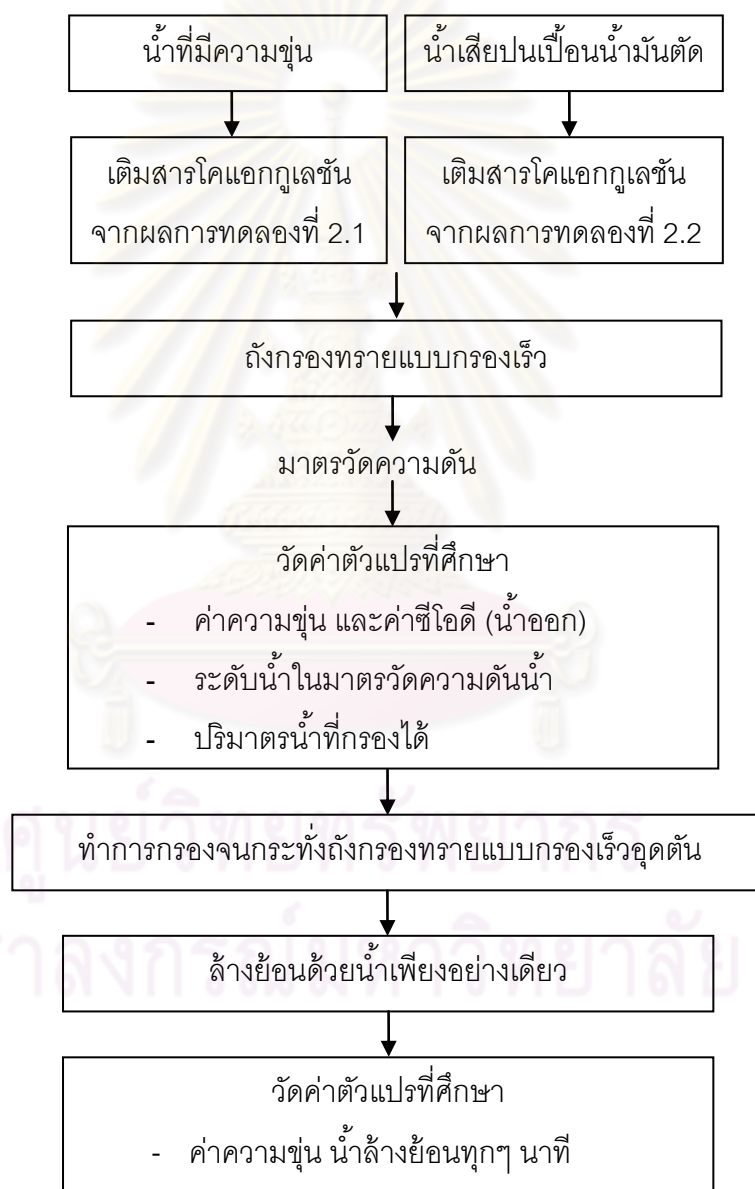
รูปที่ 3.7 แผนผังการหาปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำละลายเอี๋ยรภาพน้ำมัน

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาการทำลายเสี๋ยรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยวิธีจาร์เทสต์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ	น้ำประปา
2. ชนิดของน้ำมัน	น้ำมันตัด
3. ความเข้มข้นของน้ำมัน	1,000 มิลลิกรัม/ลิตร
4. ค่าพีเอช	7
5. ชนิดโคแอกกูแลนต์	สารส้ม
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์	50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง	ค่าซีไอดี

3.3.3 ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรง

การทดลองที่ 3: ศึกษาประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด และน้ำขุ่น โดยมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ก่อนเข้าสู่ถังกรอง ในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ค่า และดำเนินการกรองจนกระทั่งถังกรองเกิดการอุดตัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.6 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรง
ที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนต์

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ขนาดของถังกรอง 2. สารกรอง 3. ความหนาของสารกรอง 4. รูปแบบการกรอง 5. รูปแบบการล้างย้อนถังกรอง 6. ความเร็วของน้ำล้างย้อน	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. สูง 1.80 ม. ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45-0.55 มม. และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 1.5 0.70 เมตร ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว ล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว 0.75 เมตร/นาที
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของตัวอย่างน้ำ 2. ปริมาณสารโคแอกกูเลชัน	1. น้ำขุ่น 2. น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 1. จากการทดลองที่ 2 2. ร้อยละ 75 ของจากการทดลองที่ 2 3. ร้อยละ 50 ของจากการทดลองที่ 2
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง 2. ความดันลด (Headloss) 3. อัตราเร็วในการกรอง	ความขุ่น (Turbidity) - น้ำที่กรองได้ - น้ำล้างย้อน ค่าซีโอดี (COD) ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) ปริมาตรน้ำที่กรองได้และระยะเวลาในการกรอง

3.3.4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรองทราย โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศ

การทดลองที่ 4: ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรอง โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศ เพื่อให้ชั้นทรายเกิดการขยายตัวในระหว่างการกรอง สำหรับการศึกษการเติมอากาศใช้อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกัน 3 ค่า (รัฐพล เจียวิริยะบุญญา,

2552) และดำเนินการกรองจนกระทั่งถึงกรองเกิดการอุดตัน เพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการดำเนินระบบ โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.7 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.9



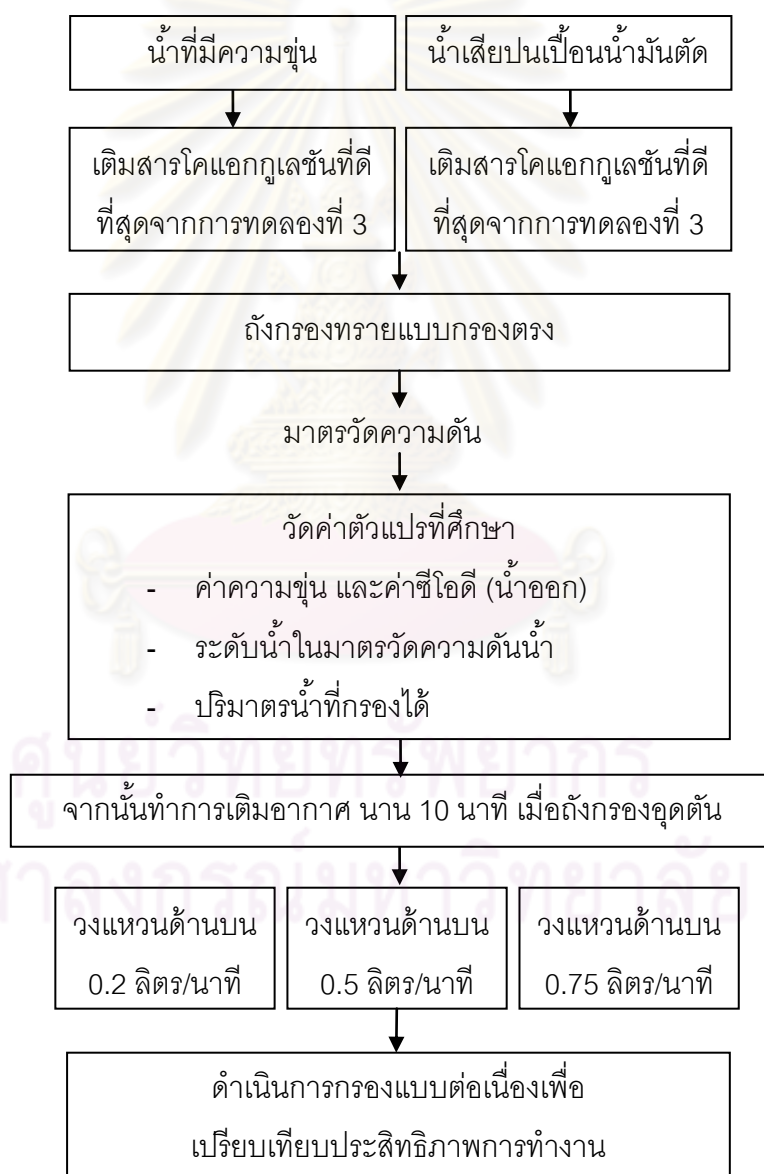
รูปที่ 3.9 แผนผังการทำงานของถึงกรองทรายโดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศ

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ขนาดของถังกรอง 2. สารกรอง 3. ความหนาของสารกรอง 4. รูปแบบการกรอง 5. รูปแบบการล้างย้อนถังกรอง 6. ความเร็วของน้ำล้างย้อน 7. ชนิดของหัวเติมอากาศ 8. จำนวนหัวเติมอากาศ 9. ตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ 10. ปริมาณสารโคแอกกูเลชัน	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. สูง 1.80 ม. ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45-0.55 มม. และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 1.5 0.70 เมตร ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว ล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน 0.75 เมตร/นาที รูปวงแหวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 ซม. 2 หัว ด้านบนของชั้นกรองสำหรับการกรอง และ ด้านล่างของชั้นกรองสำหรับการล้างย้อน ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของตัวอย่างน้ำ 2. อัตราการเติมอากาศ	1. น้ำขุ่น 2. น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 1. 0.2 ลิตร/นาที 2. 0.5 ลิตร/นาที 3. 0.75 ลิตร/นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง 2. ความดันลด (Headloss) 3. อัตราเร็วในการกรอง	ความขุ่น (Turbidity) - น้ำที่กรองได้ - น้ำล้างย้อน ค่าซีโอดี (COD) ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) ปริมาณน้ำที่กรองได้และระยะเวลาในการกรอง

3.3.5 ศึกษาการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ (Batch)

การทดลองที่ 5: ศึกษาการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยนำสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดจากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกรอง และประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ (Batch) โดยทำการเติมอากาศเมื่อถึงกรองเกิดการอุดตันด้วยอัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกัน 3 ค่า เป็นเวลานาน 10 นาที โดยตัวแปรในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.8 และแผนผังการทำงานดังรูปที่ 3.10



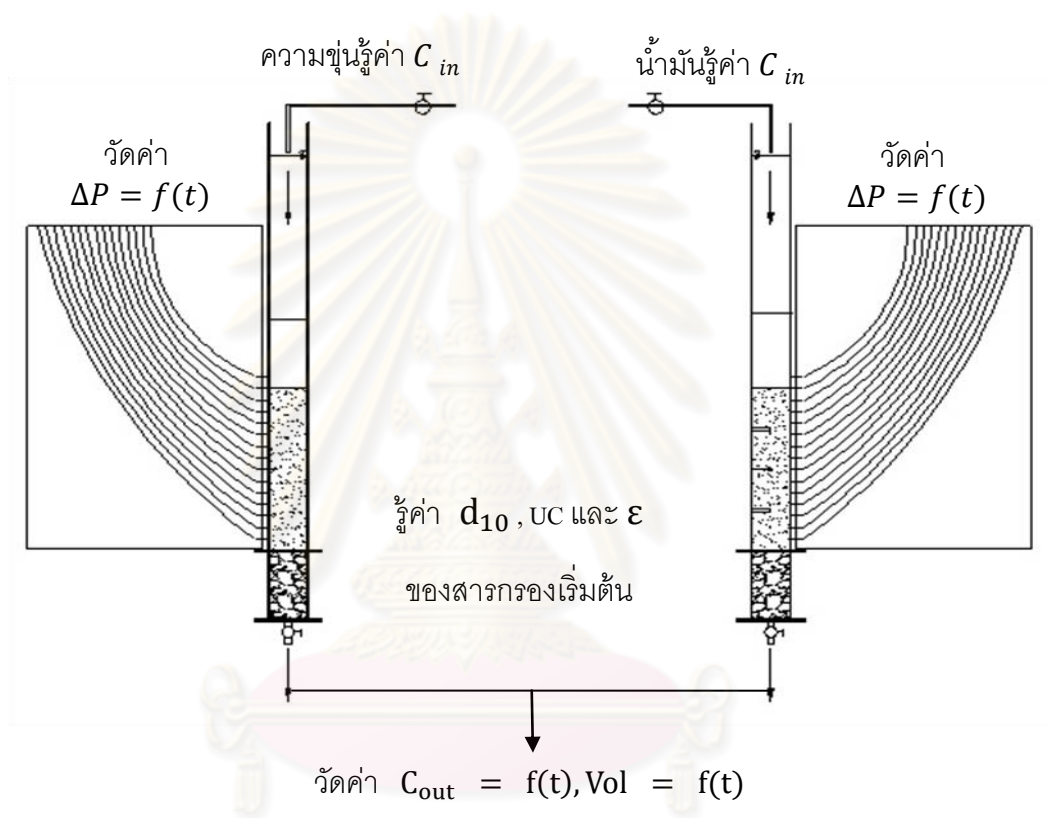
รูปที่ 3.10 แผนผังการทำงานของถังกรองทรายโดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศ โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรในการศึกษาการทำงานของถังกรองทรายโดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศ
โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ขนาดของถังกรอง 2. สารกรอง 3. ความหนาของสารกรอง 4. รูปแบบการกรอง 5. ชนิดของหัวเติมอากาศ 6. จำนวนหัวเติมอากาศ 7. ตำแหน่งของอุปกรณ์เติมอากาศ 8. ปริมาณสารโคแอกกูเลชัน 9. ระยะเวลาในการเติมอากาศ	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. สูง 1.80 ม. ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ในช่วง 0.45-0.55 มม. และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 1.5 0.70 เมตร ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว รูปวงแหวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 ซม. 1 หัว ด้านบนของชั้นกรองสำหรับการกรอง ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3 10 นาที
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของตัวอย่างน้ำ 2. อัตราการเติมอากาศ	1. น้ำขุ่น 2. น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด 1. 0.2 ลิตร/นาที 2. 0.5 ลิตร/นาที 3. 0.7 ลิตร/นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. คุณภาพของน้ำทิ้ง 2. ความดันลด (Headloss) 3. อัตราเร็วในการกรอง	ความขุ่น (Turbidity) - น้ำที่กรองได้ - น้ำล้างย้อน ค่าซีโอดี (COD) ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) ปริมาตรน้ำที่กรองได้และระยะเวลาในการกรอง

3.3.6 ศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง

การประเมินประสิทธิภาพในการทำงานของถังกรองทราย แบบการกรองตรง (Direct filtration) โดยประยุกต์ใช้โมเดลการกรอง (Filtration equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure drop equation) ในการอธิบายและทำนายประสิทธิภาพในการกรองน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน 2 ชนิด



จากการทดลอง เมื่อรู้ค่าตัวแปรตามต่างๆ ที่ทำการตรวจวัด พบว่าสามารถนำมาใช้ในการหาค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อใช้ในการอธิบายประสิทธิภาพและกลไกการกรองได้ ดังนี้

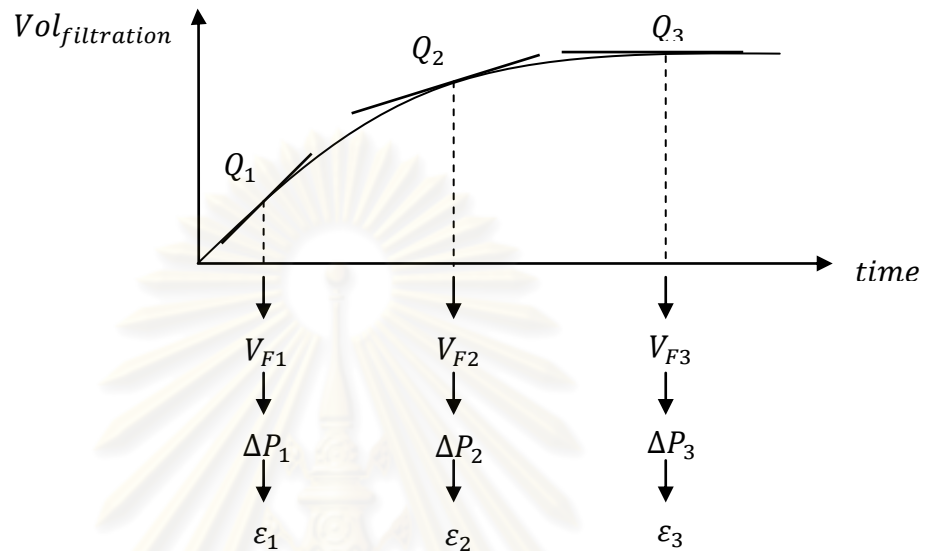
- คำนวณหาค่าความดันลด (H_L) ของสารกรองที่สะอาด และจากการทดลองสามารถหาค่า H_L ที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ ในการกรองได้ เพื่อใช้ในการอธิบายค่าตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา เช่น ปริมาณสารส้ม และชนิดของน้ำเสีย

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{150}{g \phi^2 \epsilon^3 D_p^2} v'(1 - \epsilon)^2 + \frac{1.75}{g \phi D_p \epsilon^3} v'^2(1 - \epsilon)$$

- คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะสมตัวของอนุภาคหรือสิ่งสกปรกต่างๆ (σ) ซึ่งก็คือ ปริมาตรของสิ่งสกปรกที่เกิดการสะสมตัวต่อปริมาตรของสารกรอง เพื่อใช้ในการอธิบายค่าตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา

$$\sigma.L.\rho_s = \int_0^1 C_0 \bar{V} dt - \int_0^1 C \bar{V} dt$$

- การคำนวณหาค่า ε ที่เวลาต่างๆ ของชั้นกรอง เพื่อใช้ในการอธิบายค่าตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา โดยที่รู้ค่า ε_0 ที่เริ่มต้นการทดลอง



- การคำนวณหาค่าขนาดของสารกรองที่เกิดขึ้นจากการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ในถังกรอง (D_p) เมื่อรู้ค่าขนาดของสารกรอง และค่าความพรุนเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง และค่าความพรุนที่เวลาต่างๆ เพื่อใช้อธิบายค่าตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษา

$$D_p = D_{po} \left(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_0} \right)^{1/3}$$

- การคำนวณหาค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) เพื่อใช้ในการอธิบายค่าความปั่นป่วนของน้ำ ในการผสมระหว่างสารเคมีและน้ำ และเป็นตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมกลไกการกวนเร็วที่เกิดขึ้นกับน้ำก่อนเข้าถังกรอง และภายในถังกรอง

$$G_F = K_1 \frac{(1-\varepsilon)^{2/3}}{\varepsilon^3} \bar{V}_s$$

โดยที่ \bar{V}_s = อัตราเร็วในการกรอง

$$K_1 = \frac{40 (1-\varepsilon_0)^{1/3}}{3 \Phi_s D_{po}}$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การเปรียบเทียบกลไกและประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอนุภาค ความขุ่นจากดินคาโอลิน และการแยกอิมัลชันของน้ำมันตัดออกจากเฟสน้ำ ซึ่งอนุภาคทั้งสองชนิด มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรงในการแยกอนุภาคดังกล่าว จากนั้นทำการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายโดยการเติมสารโคแอกกูแลนต์ที่ช่วยในการทำลายเสถียรภาพให้กับน้ำก่อนการกรอง และศึกษาการเพิ่มอายุการทำงานของถังกรองทรายโดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศภายในชั้น สารกรอง จากนั้นประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง (Filtration efficiency equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure drop equation) ในการอธิบายกลไกการกรองที่เกิดขึ้น

4.1 การศึกษาอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมัน และการประยุกต์ใช้ถังกรองทราย

ในส่วนนี้ เป็นการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของอนุภาคความขุ่นจากผงดินคาโอลิน (Kaolin) และอิมัลชันของน้ำมันตัด (Cutting oil) เพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะโดยทั่วไปของอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมันตัด และศึกษาค่าความดันลดของถังกรองทรายเริ่มต้นที่มีขนาดอนุภาค ทรายกรองเท่ากับ 0.55 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการออกแบบการทำงานของถังกรองทราย

4.1.1 การศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของอนุภาคความขุ่นจากดินคาโอลิน

ในส่วนนี้ จะเป็นการศึกษาคุณลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์ โดยใช้ดินคาโอลิน (Kaolin) ผสมกับน้ำประปาที่ความเข้มข้น 0.067 กรัมต่อลิตร (ค่าความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ ประมาณ 50 เอ็นทียู) ทำการบันทึกวนตลอดเวลา ค่าความขุ่นที่เลือกใช้ในการทดลองได้จากค่าความขุ่นโดยเฉลี่ยของน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา (รัฐพล เจียวิริยะบุญญา, 2552) ถูกนำมาผ่านกระบวนการกรองโดยตรง (Direct Filtration) โดยการศึกษาขนาดของอนุภาคดินคาโอลิน (Kaolinite size) ค่าความขุ่น (Turbidity) และค่าความหนืด (Viscosity) ของอนุภาคความขุ่น

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์ผสมดินคาโอลิน (กันทพงศ์ ผิวเหลือง, 2552)

Parameters		Dilution ratio		
		0.067%	0.1%	1%
Droplet size	μm	~8.2	~8.2	~8.2
pH	-	7.0	7.0	7.0
Turbidity	NTU	50	120	1200
Viscosity	Cps	~1.026	~1.026	~1.026
Surface tension	mN/m	-	72.2	-

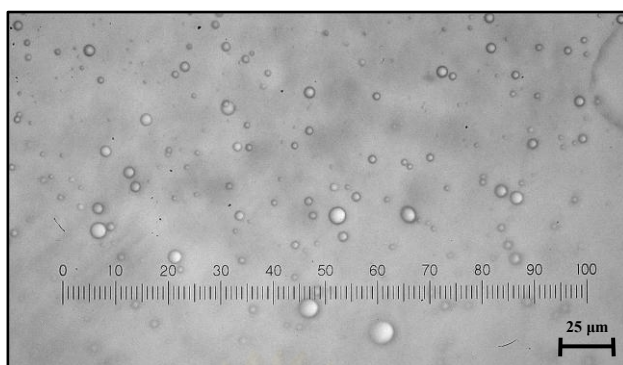
4.1.2 การศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oil)

ศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นของน้ำมันตัด 0.1% ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเมื่อผสมน้ำมันตัดกับน้ำประปาจะเกิดเป็นอิมัลชันของน้ำมันตัดที่มีความคงตัว (Stabilized oily emulsion) โดยการศึกษาขนาดของอนุภาคน้ำมันตัด (Droplet size) ค่าความขุ่น (Turbidity) ค่าความหนืด (Viscosity) และแรงตึงผิว (Surface tension) ของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดสังเคราะห์ (ธนันท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552)

Parameters		Dilution ratio		
		0.1%	0.5%	1%
Droplet size	μm	~1	~1	~1
pH	-	7.4	7.8	7.6
Turbidity	NTU	1,356	7,420	12,200
Viscosity	cps	9.16	-	-
Surface tension	mN/m	47.02	-	-
Initial COD	mg O ₂ /L	3,051 ± 120	15,531 ± 1,271	31,000 ± 5,000

จากขนาดอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าน้ำเสียนี้อิมัลชันเป็นอิมัลชันขั้นสอง (Secondary emulsion) คือ มีขนาดของอนุภาคน้ำมันเล็กกว่า 20 ไมครอน (Aurelle, 1985) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงและถูกกำจัดโดยแรงโน้มถ่วงของโลกได้ยาก



รูปที่ 4.1 รูปถ่ายอนุภาคน้ำมันตัดในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น

จากผลการศึกษารูปร่างของอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน พบว่า มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (น้อยกว่า 10 ไมครอน) ซึ่งส่งผลให้อนุภาคดังกล่าวแขวนลอยอยู่ในน้ำ และยากต่อการแยกด้วยกระบวนการทางกายภาพทั่วไป เช่น การตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกในระยะเวลาที่จำกัด ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกกระบวนการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง ซึ่งถังกรองทรายสามารถกำจัดอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ที่ไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยตัวเอง (น้อยกว่า 10 ไมครอน) ได้เป็นอย่างดี และการกรองตรง ไม่ต้องมีการกำจัดสารแขวนลอยต่างๆ ออกก่อนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและตกตะกอน

4.1.3 การวิเคราะห์ระดับน้ำเหนือชั้นกรองเพื่อเดินระบบถังกรองทราย

ความดันลดภายในชั้นกรองของถังกรองทราย โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคทรายกรองเท่ากับ 0.55 มิลลิเมตร ความสูงชั้นสารกรองเท่ากับ 70 เซนติเมตร โดยคำนวณความดันลดภายในชั้นกรอง สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นจากดินคาโอลิน และอิมัลชันของน้ำมันตัด เพื่อใช้ในการออกแบบถังกรองทราย โดยใช้สมการของ Carman-Kozeny Equation (Reynolds และ Richards, 1996)

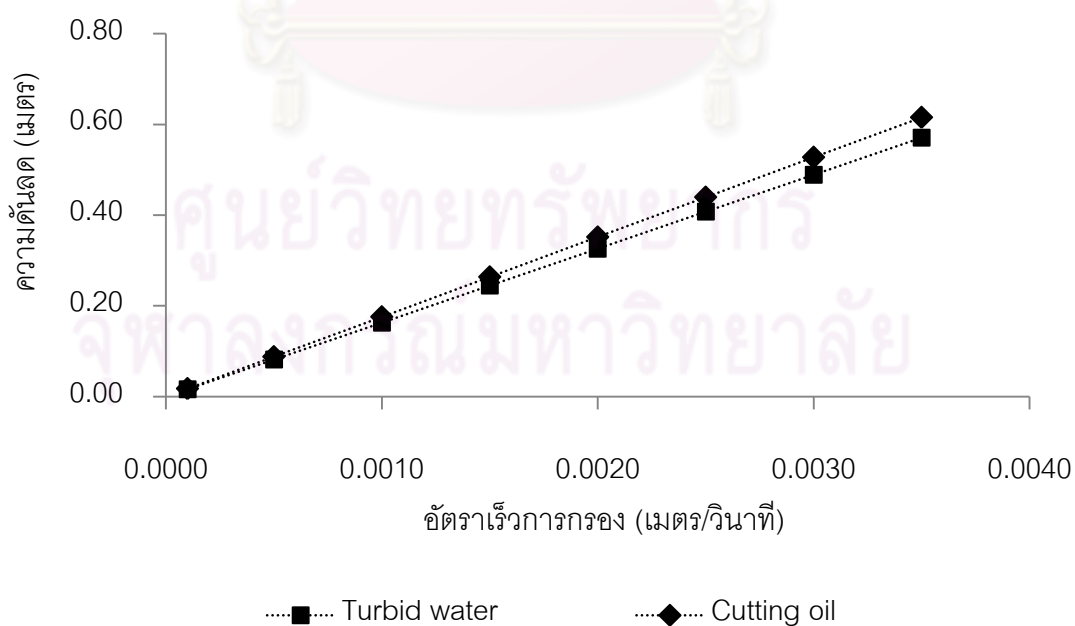
$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{150}{g \phi^2 \varepsilon^3 D_p^2} v' + \frac{1.75}{g \phi D_p \varepsilon^3} v'^2 (1-\varepsilon) \quad (4.1)$$

- โดยที่ ΔH = ความดันลด (Head loss)
 v' = อัตราเร็วในการกรอง
 ν = ความหนืดเชิงจลนศาสตร์ kinematic viscosity (μ/ρ)
 D_p = ขนาดอนุภาคสารกรอง
 L = ความหนาของชั้นสารกรอง

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรสำหรับการคำนวณความดันลดภายในชั้นกรอง

พารามิเตอร์	ค่าตัวแปร	หน่วย
ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ (D_p)	0.55	มิลลิเมตร
ความสูงชั้นสารกรอง (L)	0.70	เมตร
ความพรุน (ϵ)	0.45	-
ดรรชนีความกลมของทรายกรอง (Φ)	0.85	-
ความหนืดของน้ำ (ν) 25 °C	1.003×10^{-6}	ตารางเมตร/วินาที
ความหนืดของน้ำมันตัด (ν) 25 °C	1.06×10^{-6}	ตารางเมตร/วินาที

จากผลการคำนวณค่าความดันลดภายในชั้นกรองตามอัตราเร็วในการกรองของถังกรองทราย ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่า ค่าความดันเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วในการกรอง และค่าความดันสำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งขึ้นกับค่าความหนืดของเฟสน้ำ เป็นสำคัญ สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมัน พบว่า อัตราเร็วในการกรองสูงสุดอยู่ในช่วง 0.0020-0.0025 เมตร/วินาที ทำให้ค่าความดันลดสูงสุดมีค่าไม่เกิน 0.50 เมตร จึงได้ทำการออกแบบการกรอง โดยการควบคุมระดับน้ำเหนือชั้นกรองที่ 50 เซนติเมตร ซึ่งพบว่าที่ระดับน้ำดังกล่าวมีแรงดันน้ำมากพอที่จะสามารถดำเนินการกรองได้



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองกับอัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในกรณีสารกรองสะอาด

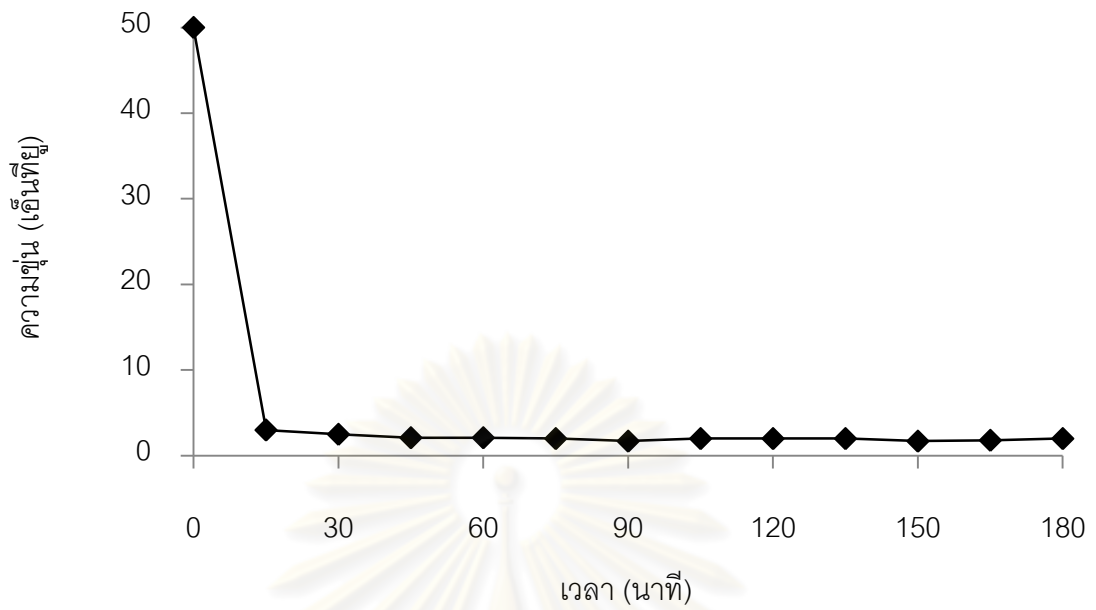
4.2 การเปรียบเทียบกลไกการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอนุภาค ความขุ่น และการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ เพื่อเปรียบเทียบกลไก และประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย ในการอธิบายระยะเวลาการดำเนินงาน ลักษณะการอุดตัน การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง และการล้างย้อนเพื่อทำความสะอาดถังกรอง โดยการใช้ค่าความขุ่นของน้ำที่กรองได้และน้ำล้างย้อนถึงกรอง ปริมาณน้ำที่กรองได้ และค่าความดันลดภายในชั้นกรองที่เกิดขึ้น เป็นตัวแปรในการศึกษา

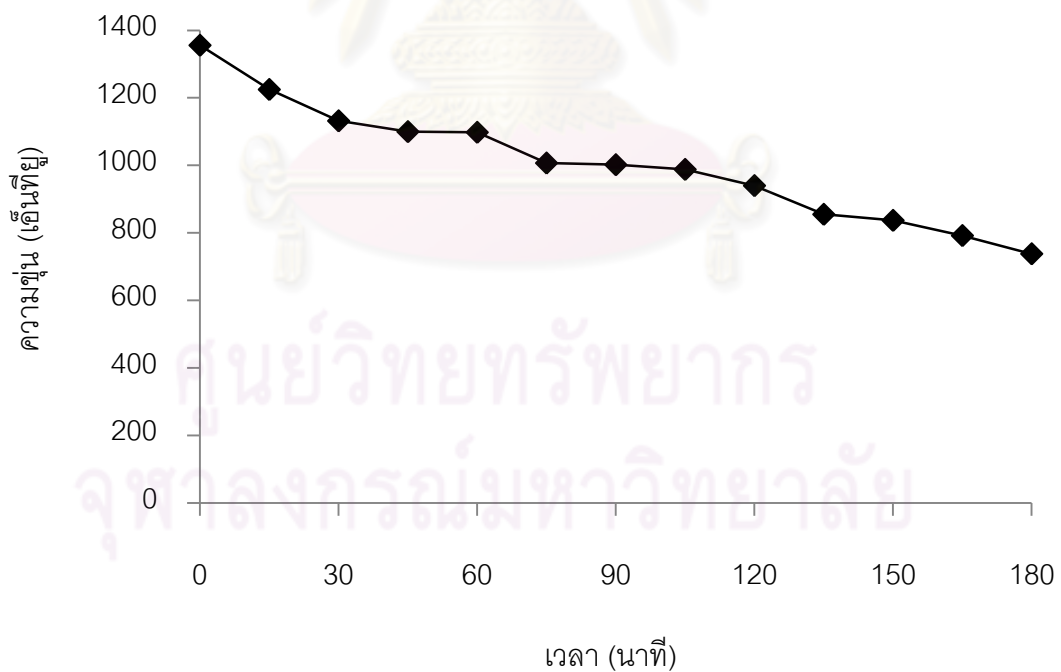
4.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

เริ่มเดินระบบถังกรองทรายแบบกรองตรง โดยทำการกวนน้ำตัวอย่างในถังเตรียมน้ำ ตัวอย่าง ด้วยความเร็ว 150 รอบ/นาที ตลอดการทดลอง จากนั้นสูบน้ำเข้าสู่ถังกรองทราย ทำการควบคุมระดับน้ำเหนือชั้นกรองเท่ากับ 0.50 เมตร (กรองที่ความดันคงที่) ตลอดการทดลอง จากนั้นดำเนินการกรองจนกระทั่งถังกรองทรายอุดตัน จึงหยุดเดินระบบ หลังจากนั้นล้างย้อนถังกรองทรายด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวที่ความเร็วของน้ำล้างย้อนเท่ากับ 0.75 เมตร/นาที โดยใช้เวลาในการล้างย้อนนาน 12 นาที ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการแยกอนุภาคความขุ่น พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 1.7-3.0 เอ็นทียู ซึ่งได้ค่าผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู (World Health Organization, 2006) โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง และค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 45 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงเริ่มมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 1.0-2.5 เอ็นทียู ในขณะที่ประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการแยกอิมัลชันของน้ำมัน พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง โดยในช่วงเริ่มต้นการกรองมีค่าอยู่ในช่วง 1,250-1,300 เอ็นทียู และมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาในการกรอง โดยที่เวลาการกรองผ่านไปประมาณ 180 นาที น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 738-750 เอ็นทียู ดังรูปที่ 4.4 โดยค่าความขุ่นมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการกรอง



รูปที่ 4.3 ค่าความชื้นน้ำที่กรองได้ของถังกรองทรายแบบกรองตรง
ในการแยกอนุภาคความชื้นออกจากเฟสน้ำ



รูปที่ 4.4 ค่าความชื้นน้ำที่กรองได้ ของถังกรองทรายแบบกรองตรง
ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ

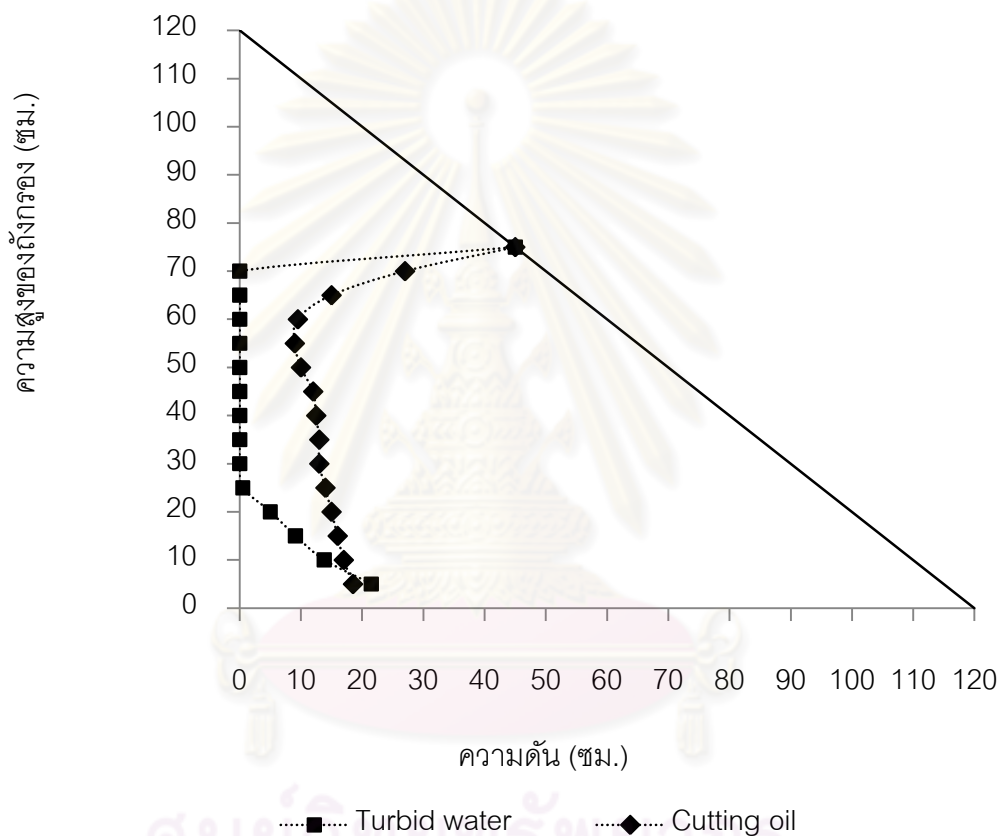
จากผลการทดลองประสิทธิภาพของถังกรองทราย พบว่า ที่ระยะเวลาการกรองเท่ากัน ถังกรองทรายสามารถกำจัดอนุภาคความขุ่นได้ดีกว่าอิมัลชันของน้ำมัน เนื่องจากอนุภาคความขุ่นของดินคาโอลิน มีขนาดใหญ่ประมาณ 8.2 ไมโครเมตร ทำให้อนุภาคเกิดการตกตะกอนที่ผิวหน้าของชั้นกรองและติดค้างอยู่ภายในช่องว่างของชั้นกรองและถูกแยกออกจากเฟสน้ำ รวมถึงส่งผลให้ความพรุนของชั้นกรองมีค่าลดลง ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ $\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$ เมื่อความพรุน (Porosity, ε) มีค่าลดลงตามระยะเวลาการเดินระบบนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยของเครื่องกรอง ($\ln(C/C_0)$) มีค่าสูงขึ้น แต่ในขณะที่การกรองอิมัลชันของน้ำมัน พบว่าน้ำที่ผ่านการกรองมีความขุ่นค่อนข้างสูง และมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการกรอง เนื่องจากอนุภาคของน้ำมันมีขนาดเล็กประมาณ 1-1.3 ไมโครเมตร และมีเสถียรภาพสูง (Rios และคณะ, 1998) ทำให้อนุภาคส่วนใหญ่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของชั้นกรองไปได้ และมีอนุภาคบางส่วนเท่านั้นสะสมและติดค้างอยู่ในชั้นกรอง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการประมาณค่าผลคูณของสัมประสิทธิ์การชน (Collision Efficiency, η) และค่าสัมประสิทธิ์เกาะติด (Attachment Efficiency, α) ของอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมัน ซึ่งพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.267 และ 0.058 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคความขุ่นสามารถเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองที่อยู่เบื้อง และสามารถเกาะติดกับสารกรองได้ดีกว่าอิมัลชันของน้ำมัน ด้วยกลไกการตกตะกอน (Sedimentation) การปะทะโดยตรง (Interception) หรือการติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างสารกรอง (Interception) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการกำจัดอนุภาคความขุ่นสูงกว่าอิมัลชันของน้ำมัน

4.2.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง โดยการติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำ (Piezometer) ทุกๆ 5 เซนติเมตร ตามความสูงของถังกรอง และวัดค่าความดันลดภายในชั้นกรองทุกๆ 15 นาที พบว่า การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของถังกรอง

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองที่เกิดขึ้นจากการกรองน้ำที่มีความขุ่นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยพบว่าที่เวลาการกรอง 150 นาที มาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 2 (ลึกจากระดับผิวชั้นกรอง 5 เซนติเมตร) อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้นกรองที่ระดับความสูงดังกล่าว ส่งผลให้อัตราเร็วในการกรองมีค่าลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองที่ 180 นาที ความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าลดลงอย่างมาก พบว่ามาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 2-10 อ่าน

ค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองต่อไปได้ ส่งผลให้ถึงกรองทวาย เกิดการอุดตันที่เวลา 180 นาที เนื่องจากอนุภาคความขุ่นของดินคาโอลินมีขนาดใหญ่ ทำให้กลไกการกรองเป็นแบบตตะกะกอนและติดค้างภายในช่องว่างของสสารกรอง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการกรองที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองที่มีความลึกประมาณ 5-10 เซนติเมตรเท่านั้น จึงไม่สามารถใช้สสารกรองได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว (ไกรภพ ถึงแสง และวิษณุ บุญทองอ่อน, 2547)



รูปที่ 4.5 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถึงกรองทวายแบบกรองตรง
ที่เวลาการกรอง 180 นาที

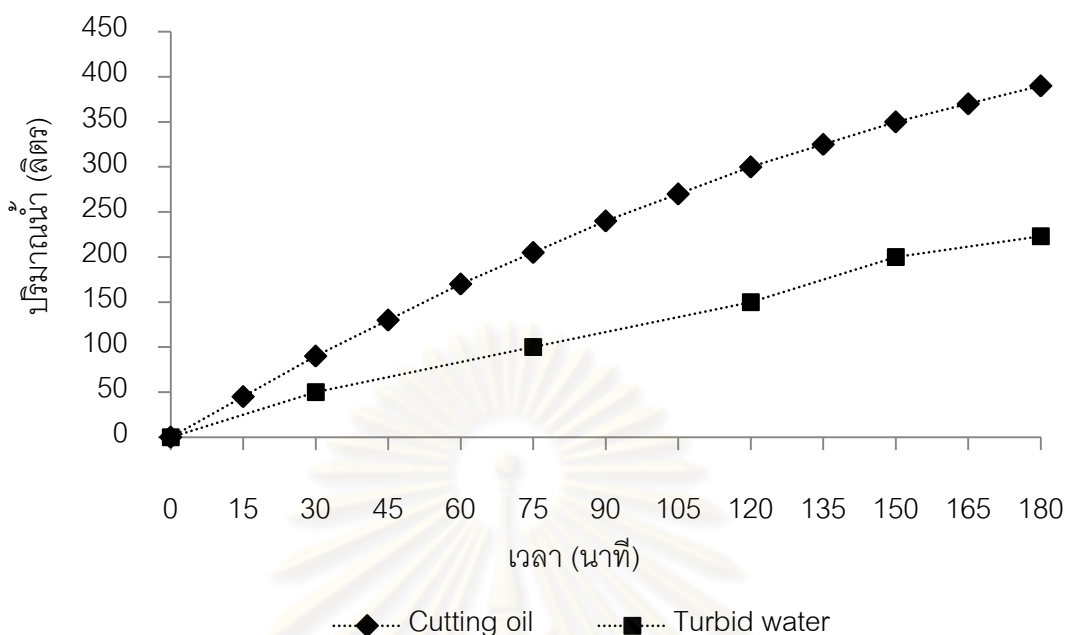
แต่ในขณะที่การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองที่เกิดขึ้นจากการกรองอิมัลชันของน้ำมันเกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.5 โดยจุดที่ 1 เหนือสสารกรอง 5 เซนติเมตร จุดที่ 2 ระดับผิวหน้าชั้นกรอง จุดที่ 3 ลึกลงจากผิวหน้าสสารกรอง 5 เซนติเมตร จุดที่ 4 ลึกลงจากจุดที่ 3 ลงมา 5 เซนติเมตร และจุดถัดๆ ไปติดตั้งลึกลงมาทุกๆ 5 เซนติเมตร โดยจากผลการทดลองความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำไม่เท่ากับศูนย์ ถึงกรองทวายสามารถดำเนินการกรองต่อไปได้โดยไม่เกิดการอุดตัน แต่การสูญเสียความดันลดมีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการกรอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอนุภาคน้ำมันสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกรองมากกว่าอนุภาคความขุ่น โดยอนุภาคบางส่วนเกิดการสะสมอยู่ในชั้นกรองและบางส่วนสามารถทะลุผ่านชั้นกรองไปได้ ส่งผลให้ค่าความพรุนของชั้นกรองมีค่าลดลง ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ $\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$ เมื่อความพรุน (Porosity, ε) มีค่าลดลงตามระยะเวลาการเดินระบบนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอย ($\ln(C/C_0)$) มีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาในการกรองด้วยเช่นกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของถังกรองในการกรองอิมัลชันของน้ำมันมีค่าเพิ่มมากขึ้น

4.2.3 ปริมาตรและอัตราเร็วในการกรอง

ปริมาตรน้ำและอัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง ในการแยกอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมัน โดยทำการวัดปริมาตรน้ำได้ผ่านถังกรองตามระยะเวลาในการกรอง เพื่อศึกษาอัตราเร็วในการกรองที่ได้ โดยทำการวัดปริมาตรน้ำทุกๆ 15 นาที ตลอดการทดลอง

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 ปริมาตรน้ำและอัตราเร็วในการกรองน้ำ ของถังกรองทรายในการแยกอนุภาคความขุ่น พบว่า สามารถกรองน้ำได้ปริมาตรรวมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 223 ลิตร ซึ่งมีอัตราเร็วในการกรองเท่ากับ 4 เมตร/ชั่วโมง โดยอัตราเร็วในการกรองมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 180 นาที อัตราเร็วในการกรองมีค่าลดลง ส่งผลให้ถังกรองเกิดการอุดตัน และไม่สามารถดำเนินการกรองต่อไปได้ ในขณะที่ปริมาตรน้ำและอัตราเร็วในการกรองน้ำ ของถังกรองทรายในการแยกอิมัลชันของน้ำมัน พบว่า สามารถกรองน้ำได้ปริมาตรรวมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 390 ลิตร ซึ่งมีอัตราเร็วในการกรอง 7 เมตร/ชั่วโมง โดยอัตราเร็วในการกรองมีค่าค่อนข้างคงที่ และที่เวลาการกรองผ่านไปประมาณ 180 นาที ถังกรองทรายยังสามารถดำเนินการกรองต่อไปได้ และยังไม่เกิดการอุดตัน ซึ่งจากการศึกษาอัตราเร็วในการกรองเทียบกับสภาวะเริ่มต้นเมื่อสารกรองสะอาด พบว่า อัตราเร็วในการกรองอนุภาคน้ำมันมีค่าลดลงไม่มากนัก จาก 0.0028 เมตร/วินาที เป็น 0.0020 เมตร/วินาที เมื่อเทียบกับอนุภาคความขุ่น ซึ่งมีอัตราเร็วในการกรองลดลงอย่างมาก จาก 0.0030 เมตร/วินาที เป็น 0.0011 เมตร/วินาที เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ทำให้อัตรากรองและความเร็วในการกรองมีค่าลดลง



รูปที่ 4.6 อัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่เวลาการกรอง 180 นาที

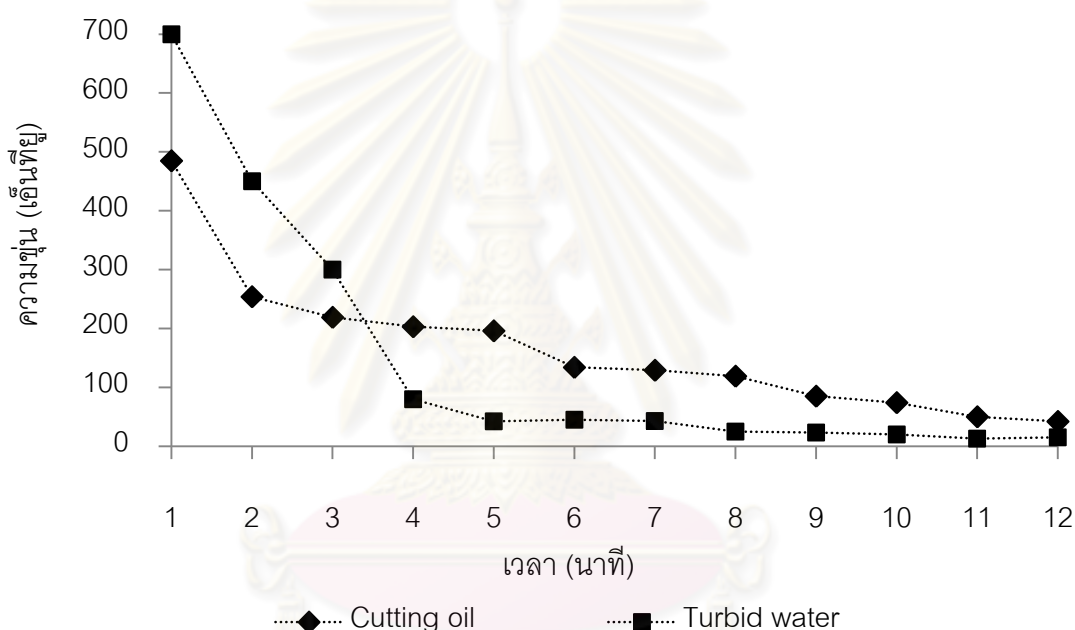
จากผลการทดลองอัตราเร็วในการกรองน้ำที่มีอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมัน ที่เวลาการกรองเดียวกัน (180 นาที) พบว่าอัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายในการแยกอนุภาคของน้ำมัน มีค่ามากกว่าการแยกอนุภาคความขุ่น เนื่องจากอนุภาคน้ำมันสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างชั้นกรองไปได้มากกว่าอนุภาคความขุ่น และสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทาง การไหลของน้ำไปได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของถังกรองในการกำจัดอิมัลชันของน้ำมันต่ำ ในขณะที่สามารถกำจัดอนุภาคความขุ่นได้สูง และจากการศึกษาความดันลดภายในชั้นกรอง พบว่าการกรองน้ำที่มีอนุภาคความขุ่นมีค่าความดันลดมากกว่าการกรองอิมัลชันของน้ำมัน

4.2.4 การล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว

การล้างย้อนถังกรอง คือ การปล่อยน้ำให้ไหลจากก้นของถังกรอง ผ่านชั้นสารกรอง ขึ้นไปด้านบน (ย้อนทางของการกรอง) โดยทำการล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวที่ความเร็วในการล้างย้อน 0.75 เมตร/นาที (Viessman และ Hammer, 2005) ระยะเวลาในการล้างย้อนนาน 12 นาที เพื่อทำความสะอาดชั้นกรองเมื่อถังกรองเกิดการอุดตัน

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 การล้างย้อนถังกรองทรายด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวในการกรองน้ำที่มีอนุภาคความขุ่น พบว่า น้ำล้างย้อนมีค่าความขุ่นเริ่มต้นสูงถึง 700-650 เอ็นทียู หลังจากนั้นความขุ่นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ในขณะที่การล้างย้อนถึง

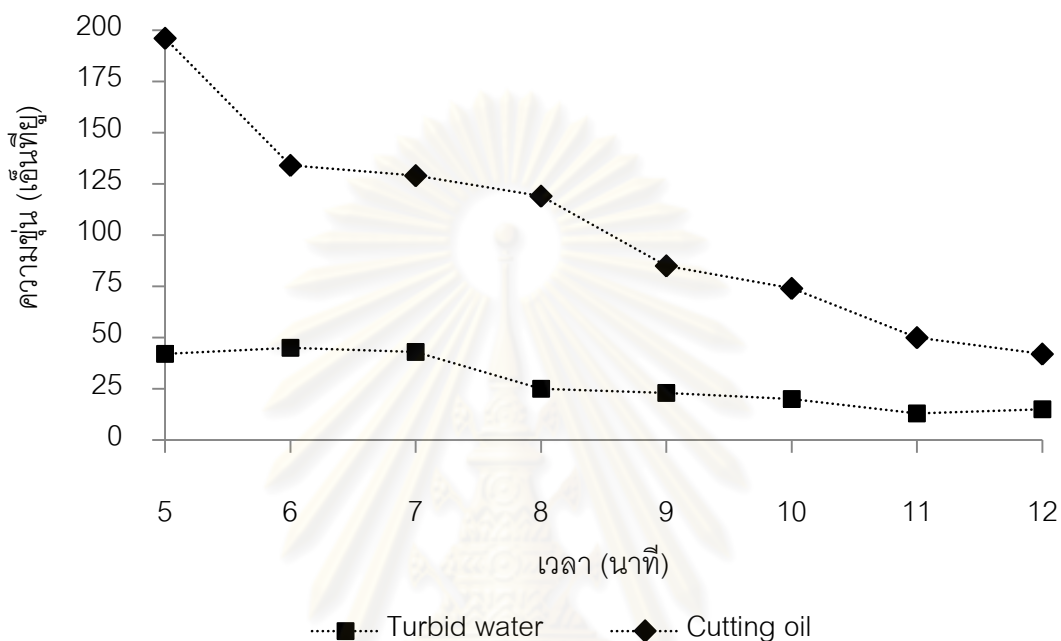
กรองในการกรองอิมัลชันของน้ำมัน พบว่าน้ำล้างย้อมมีค่าความขุ่นเริ่มต้นเท่ากับ 500-450 เ็นทียู และค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลา เนื่องจากอนุภาคความขุ่น และอนุภาคน้ำมันที่ตกตะกอนบนชั้นกรองและสะสมตัวอยู่ภายในชั้นกรอง เมื่อทำการล้างย้อมชั้นกรองเกิดการขยับตัวจนมีช่องว่างระหว่างสารกรองเพิ่มมากขึ้น ทำให้สิ่งสกปรกต่างๆ จึงหลุดออกมาและถูกน้ำดันออกจากชั้นสารกรอง โดยปัจจัยที่ทำให้สิ่งสกปรกติดค้างอยู่ในช่องว่างของสารกรองหรือเกาะอยู่บนอนุภาคสารกรองหลุดออกมาในทางทฤษฎีมี 2 อย่าง คือ แรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของน้ำ และการขัดสีระหว่างอนุภาคหรือเม็ดสารกรอง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการทำให้สิ่งสกปรกต่างๆ หลุดออกจากชั้นกรอง (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2539)



รูปที่ 4.7 ความขุ่นน้ำล้างย้อมของถังกรอง ที่เวลาการล้างย้อมนาน 12 นาที

จนกระทั่งที่เวลาการล้างย้อม 5 นาที พบว่า ความขุ่นน้ำล้างย้อมถังกรองทรายในการกรองอนุภาคความขุ่น มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 40-55 เ็นทียู หลังจากนั้นค่าลดลงอย่างรวดเร็ว จนถึงเวลาการล้างย้อมที่ 7 นาที ความขุ่นมีค่าค่อนข้างคงที่ไปจนกระทั่งหยุดการล้างย้อม โดยที่เวลาการล้างย้อม 12 นาที พบว่า มีค่าความขุ่นเท่ากับ 15 เ็นทียู ในขณะที่การล้างย้อมถังกรองทรายในการกรองอิมัลชันของน้ำมันที่เวลา 5 นาที พบว่า ความขุ่นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยยังไม่มีแนวโน้มที่จะคงที่ และที่เวลาการล้างย้อม 12 นาที พบว่า มีค่าความขุ่นเท่ากับ 42 เ็นทียู ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าประสิทธิภาพการล้างย้อมถังกรองในการกรองน้ำที่มีความขุ่นสูงกว่าการกรองอิมัลชันน้ำมัน เนื่องจากอนุภาคของน้ำมัน ตกตะกอนและสะสมภายในชั้นสารกรอง

ได้น้อยกว่าอนุภาคความขุ่นที่เกิดจากดินคาโอลิน ทำให้ค่าความขุ่นช่วงแรกมีค่าต่ำกว่า และอนุภาคอิมัลชันของน้ำมันอาจเกิดการสะสมตัวในชั้นสารกรอง และเกิดการเคลือบผิวของสารกรอง ทำให้ค่าความขุ่นน้ำล้างย้อนมีค่าต่ำ ส่งผลให้การล้างย้อนถึงกรองทำได้ยากกว่า นอกจากนี้ความไม่ชอบน้ำของน้ำมัน (ไม่มีขี้วัว) ยังส่งผลทำให้การล้างย้อนเป็นไปได้ช้า และประสิทธิภาพต่ำ



รูปที่ 4.8 ความขุ่นน้ำล้างย้อนของถังกรอง ที่เวลาการล้างย้อน 5-12 นาที

โดยสรุปจากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่า ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่ไม่มี การเติมสารเคมีใดๆ สามารถใช้ในการแยกอนุภาคความขุ่นออกจากเฟสน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถใช้ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำได้ เนื่องจากอิมัลชันของน้ำมันมีขนาดเล็กและมีเสถียรภาพสูง ทำให้ยากต่อการแยกด้วยถังกรองทรายแบบกรองตรงธรรมดา และจากการศึกษาการล้างย้อน เพื่อทำความสะอาดสารกรอง พบว่า ถังกรองทรายในการแยกอนุภาค ความขุ่น สามารถล้างทำความสะอาดสารกรองได้ดีกว่าการกรองอิมัลชันของน้ำมัน เนื่องจาก อิมัลชันของน้ำมันอาจเกิดการสะสม และเคลือบสารกรองทำให้ล้างย้อนได้ยาก ด้วยเหตุนี้ หาก ต้องการแยกอิมัลชันออกจากเฟสน้ำด้วยถังกรองทราย จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงกระบวนการ กรองตรง โดยอาจประยุกต์แนวทางการเติมสารเคมี (สารโคแอกกูแลนต์) เพื่อช่วยในการทำลาย เสถียรภาพอิมัลชันของน้ำมันให้กับน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการกรอง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการ ทำงานของถังกรองทราย ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ ซึ่งจะได้ทำการศึกษา สภาวะการทำงานที่เหมาะสมในหัวข้อถัดไป

4.3 ศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมันตัด

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) ที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพที่มีความคงตัวของอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมันตัด ด้วยการทำการทดสอบที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น (กันตพงศ์ ผิวเหลือง, 2552) และอิมัลชันของน้ำมัน (ธนนท์ เฉลิมสินสุวรรณ, 2552) โดยทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารส้มสำหรับอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมันในช่วง 1-100 มิลลิกรัม/ลิตร และ 25-450 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

4.3.1 ศึกษาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น

วิธีจาร์เทสต์ถูกประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ ที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคความขุ่น และอนุภาคน้ำมันที่มีความคงตัว ประกอบด้วยสองกลไกหลักคือ ส่วนแรกเป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคด้วยการเติมสารเคมีลงในถังกวนเร็วซึ่งจะช่วยให้การกระจายตัวของสารเคมีและการสัมผัสกับอนุภาคที่มีความคงตัว ส่วนที่สองจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงโดยการกวนช้า ซึ่งตะกอนจะรวมกันเป็นฟล็อกและตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้

ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากผลของการทำลายเสถียรภาพโดยการเติมโคแอกกูแลนต์ ซึ่งจะต้องอาศัยกลไก 4 แบบ (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2539) ดังนี้

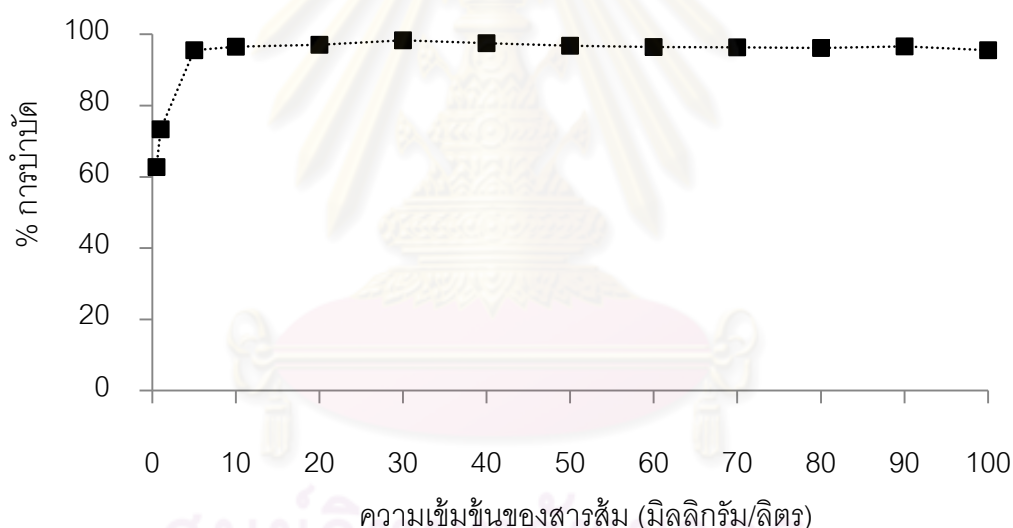
- การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) เป็นการเพิ่มจำนวนอิมัลชันที่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลง และทำให้ค่าซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย แต่มีข้อเสีย คืออิมัลชันจะอยู่ที่ชั้นกระจายเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น จึงไม่สามารถทำลายประจุลบของคอลลอยด์ได้ดีเท่าที่ควร

- กลไกการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า (Charge neutralization) การดูดติดผิวจะมีผลในการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ซึ่งกลไกนี้สามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามได้ (Charge Reversal) เนื่องจากการเติมสารโคแอกกูแลนต์ที่มากเกินไป

- การห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบ (Sweep Flocc Coagulation) เป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ทำให้สูญเสียสภาพและตกตะกอนได้ โดยคอลลอยด์เป็นแกนกลางในผลึกดังกล่าว

- การใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer Bridging) เนื่องจากโมเลกุลโพลีเมอร์สามารถเกาะติดกับอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่งจึงอาจเกิดควมมีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized Particle) ดังนั้นการเติมมากเกินไปก็ก่อให้เกิดผลเสียได้

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดอนุภาคความขุ่น เท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น เท่ากับ 98.35% ทั้งนี้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม พบว่า การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่อนข้างคงที่และมีแนวโน้มที่จะลดลงเล็กน้อยประมาณ 1% เท่านั้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบห่อหุ้มอนุภาค (Sweep Flocc Coagulation) ซึ่งถือว่าเป็นกลไกหลักในการบำบัดอนุภาคความขุ่น

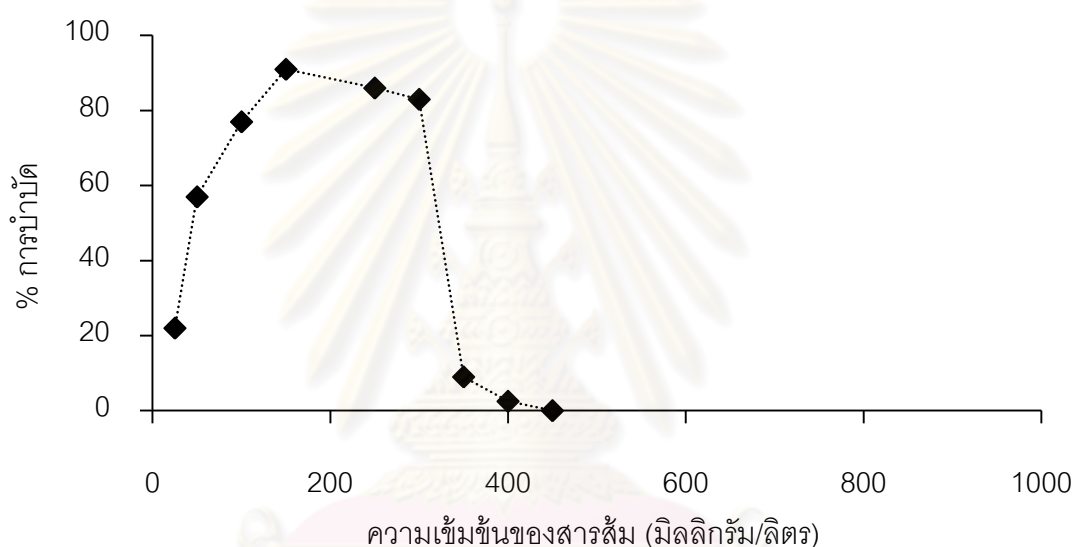


รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคความขุ่นและความเข้มข้นของสารส้ม

4.3.2 ศึกษาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม ในการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันของน้ำมันตัด

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดอิมัลชันของน้ำมัน เท่ากับ 150 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี เท่ากับ 91.23 % โดยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าลดลงอย่างมาก แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงประจุของอนุภาค

น้ำมันให้เป็นตรงกันข้าม (Charge Reversal) มีผลกระทบต่อค่าน้ำสูง ส่งผลให้น้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วถูกฟื้นฟูใหม่ ประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็ก (น้อยกว่า 1 ไมครอน) การเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มที่มากเกินไป นอกจากจะทำให้อนุภาคน้ำมันบางส่วนที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจะกลับมาอยู่ในสภาวะเสถียร (Restabilization) แล้ว อาจกล่าวได้ว่ายังเป็นการสิ้นเปลืองปริมาณสารส้มในการบำบัดโดยไม่จำเป็นอีกทางหนึ่งด้วย ในขณะที่ เมื่อความเข้มข้นของสารส้มต่ำเกินไป พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าต่ำ เนื่องจากการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันเกิดขึ้นได้โดยไม่สมบูรณ์ (มันลิน ตันทุลเวศน์, 2539) ดังนั้น การเลือกใช้ปริมาณที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดอิมัลชันของน้ำมันและความเข้มข้นของสารส้ม

โดยสรุปจากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่าการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) สามารถช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมันได้ จึงได้มีการประยุกต์การเติมสารเคมีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายในการกรองอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ โดยปรับปรุงกระบวนการกรองแบบกรองตรง (Direct filtration) ที่มีการเติมสารเคมี (สารส้ม) เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองแบบกรองเร็วในการกรองอิมัลชันของน้ำมันต่ำกว่าการกรองอนุภาคความขุ่นมาก จึงมีความจำเป็นต้องมีการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันก่อนเข้าสู่ถังกรอง เพื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือทำให้เกิดฟlocsขนาดใหญ่ โดยการเลือกใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) และพีเอชที่เหมาะสมให้กับน้ำก่อนเข้าสู่ถังกรอง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของถังกรองให้ดีขึ้น และมีอายุการใช้งานที่เหมาะสม

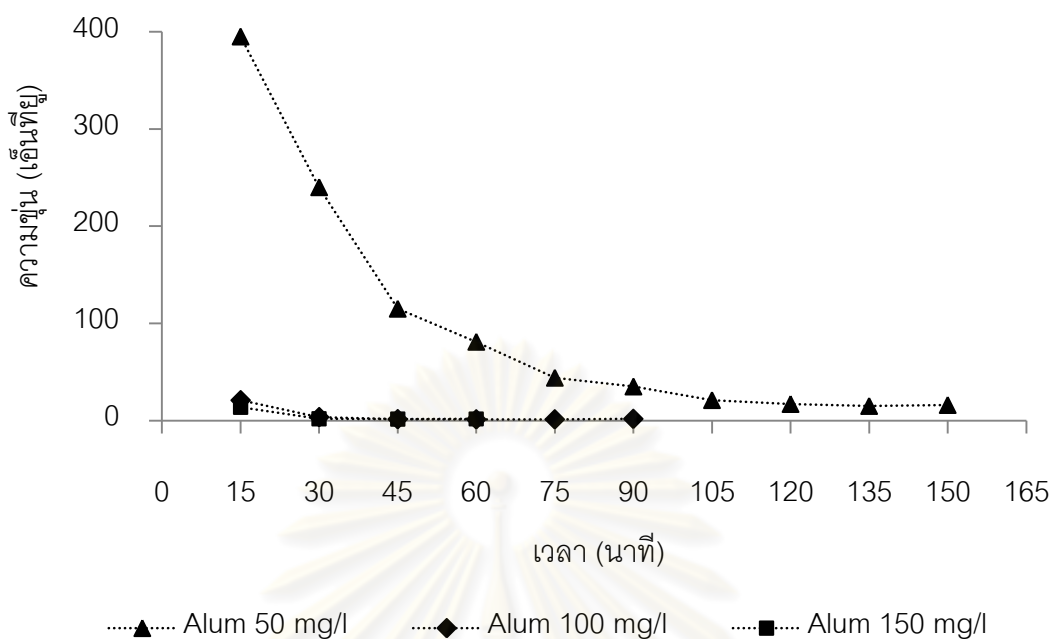
4.4 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย ในการแยกอิมัลชันของ น้ำมันออกจากเฟสน้ำ

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) ให้กับน้ำก่อนเข้าสู่ถังกรอง เพื่อทำลายเสถียรภาพของ อิมัลชันของน้ำมัน โดยการทดลองที่ผ่านมาซึ่งทำการศึกษาความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมใน การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันด้วยวิธีการทำจาร์เจสต์ พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารส้ม เท่ากับ 150 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงถึงร้อยละ 91.23 จึงได้มีการประยุกต์ แนวทางการเติมสารส้มในการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันน้ำมันให้กับน้ำก่อนเข้าสู่ถังกรอง โดย ศึกษาความเข้มข้นของสารส้มที่ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อทดลองหาความเข้มข้นของ สารส้มที่เหมาะสมกับถังกรองทรายแบบกรองตรง

4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ซีไอดี น้ำมันและไขมัน

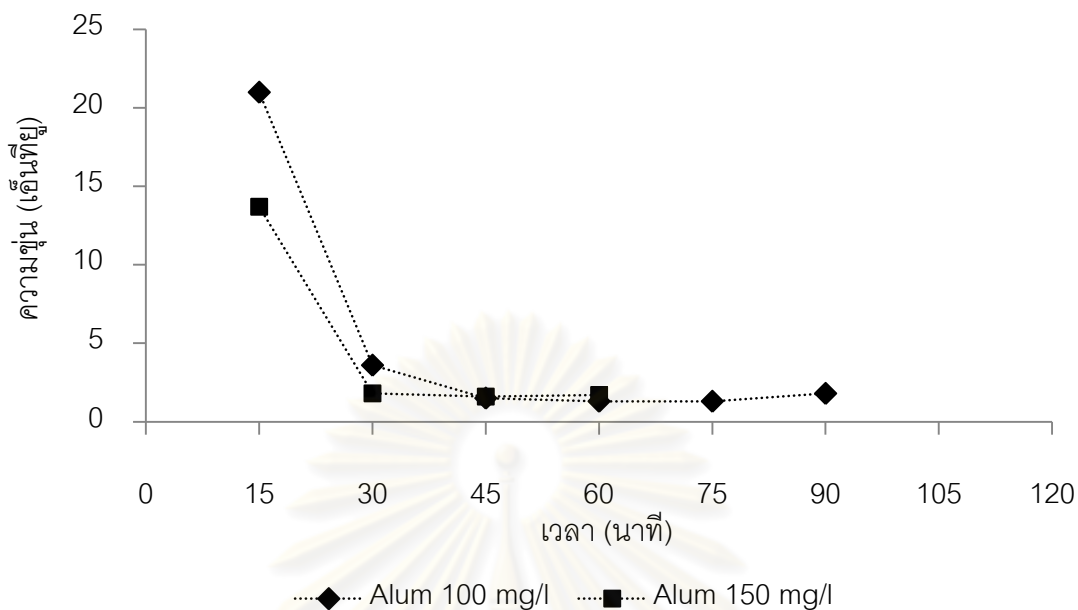
4.4.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของถัง กรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ ที่ความ เข้มข้นของสารส้ม 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 16.2-18.7, 1.3- 1.6 และ 1.6-1.8 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยค่าความขุ่นมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จากค่าความขุ่นเริ่มต้น 1,351 เอ็นทียู ตามระยะเวลาในการทำงานการกรอง เนื่องจากอนุภาคน้ำมันเกิดการสะสมที่ผิว และ ภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ค่าความพรุนของชั้นกรองมีค่าลดลง ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ การกรองน้ำ $\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$ กล่าวได้ว่าเมื่อความพรุน (ε) มีค่าลดลง ส่งผลให้ ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเติมสารส้มช่วยเพิ่มขนาดอนุภาค น้ำมัน ทำให้สะสมตัวภายในชั้นกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ รูปแบบการ ไหลที่เกิดขึ้นภายในสารกรองยังมีความเป็นไปได้และเหมาะสมกับการสร้างโอกาสสัมผัสระหว่าง อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพ ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการกวนช้าเพื่อสร้างฟลอค (Flocculation) ใน กระบวนการทางเคมีทั่วไป



รูปที่ 4.11 ค่าความขุ่นน้ำที่กรองได้ของถังกรองทรายแบบกรองตรง
ที่ความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ

โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรองที่ความเข้มข้นของสารส้ม 50 มิลลิกรัม/ลิตร น้ำที่กรองผ่านถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 395-240 เอ็นทียู และค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาในการทำงานของถังกรอง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 150 นาที ค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 15.4-16.2 เอ็นทียู อาจกล่าวได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของสารส้มไม่เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมันที่มีความคงตัวสูง ทำให้อนุภาคน้ำมันบางส่วนหลุดรอดออกไปได้ และอนุภาคบางส่วนค่อยๆ สะสมภายในชั้นกรอง ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงแรกต่ำ และค่อยๆ สูงขึ้นตามระยะเวลาในการดำเนินการกรอง ในขณะที่ ความเข้มข้นของสารส้ม 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพของถังกรองในการกำจัดอนุภาคความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.12 โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองผ่านถังกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 13.2-17.3 เอ็นทียู และความขุ่นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยอนุภาคน้ำมันเกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าของชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 90 นาที สำหรับความเข้มข้นของสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอยู่ในช่วง 1.3-1.6 เอ็นทียู และที่เวลาการกรองผ่านไปประมาณ 60 นาที สำหรับความเข้มข้นของสารส้ม 150 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอยู่ในช่วง 1.7-1.8 เอ็นทียู ตามลำดับ

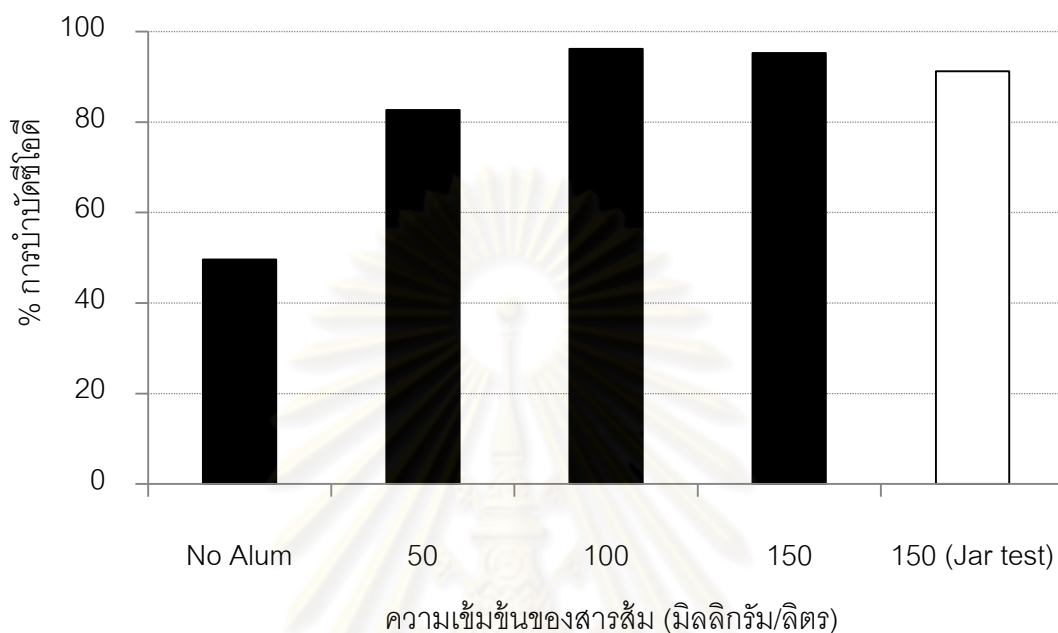


รูปที่ 4.12 ค่าความขุ่นน้ำที่กรองได้ของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร

4.4.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี (COD) ของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี เท่ากับ ร้อยละ 82.68, 96.17 และ 95.24 ตามลำดับ ซึ่งถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมากกว่าถังกรองทรายแบบกรองตรงที่ไม่มีการเติมสารเคมีใดๆ เนื่องจาก สารส้มช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน ทำให้เกิดการสัมผัสและเกาะติดกันเป็นฟlocs และทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ สามารถตกตะกอนพบชั้นกรองหรือเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกรองและเกิดการติดค้างภายในชั้นกรองได้มากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของถังกรองในการกำจัดซีไอดีเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ด้วยวิธีการทำจาร์เทสต์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเท่ากับร้อยละ 91.23 ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร เนื่องจากกระบวนการตกตะกอนเกิดขึ้นเหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน (Reynolds และ Richards, 1996)

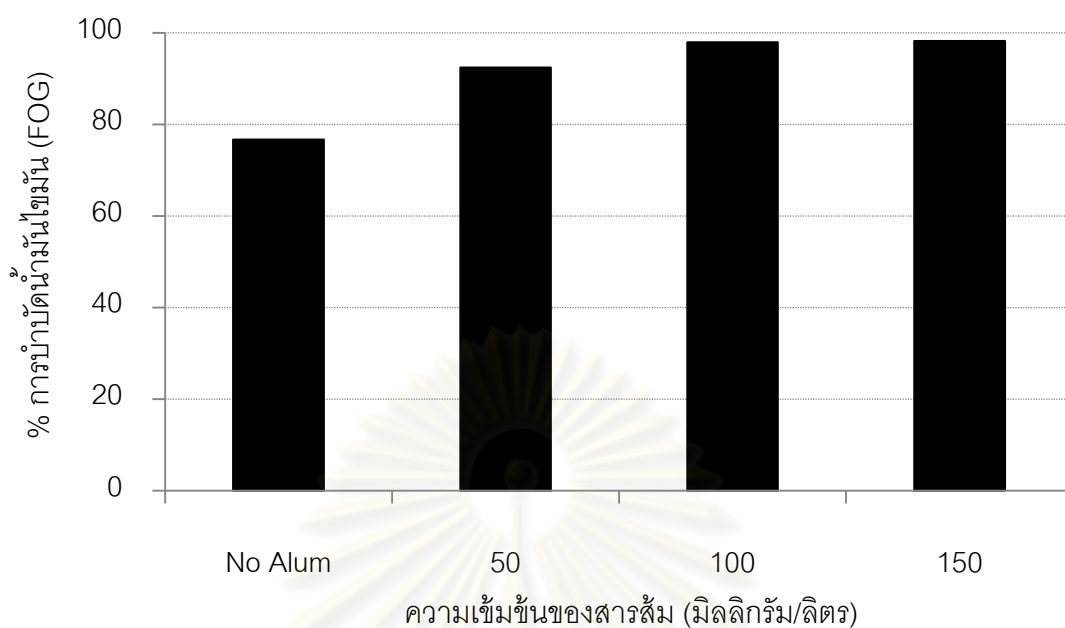
และสำหรับกระบวนการกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD) ของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ

4.4.1.3 ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน (FOG) ของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน เท่ากับ ร้อยละ 92.47, 97.98 และ 98.28 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันใกล้เคียงกันและมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันมีค่าสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี เนื่องจากสารส้มช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน ทำให้เกิดการอนุภาคน้ำมันสัมผัสและเกาะติดกันเป็นฟlocs สามารถตกตะกอนพบชั้นกรองหรือเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกรองและเกิดการติดค้างภายในชั้นกรองได้มากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน (FOG) ของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ

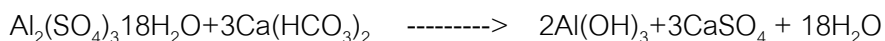
ดังนั้น ความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของถังกรองทราย คือ 100 มิลลิกรัม/ลิตร เนื่องจากเป็นความเข้มข้นของสารส้มที่เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายที่ค่าสูงขึ้น

4.4.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

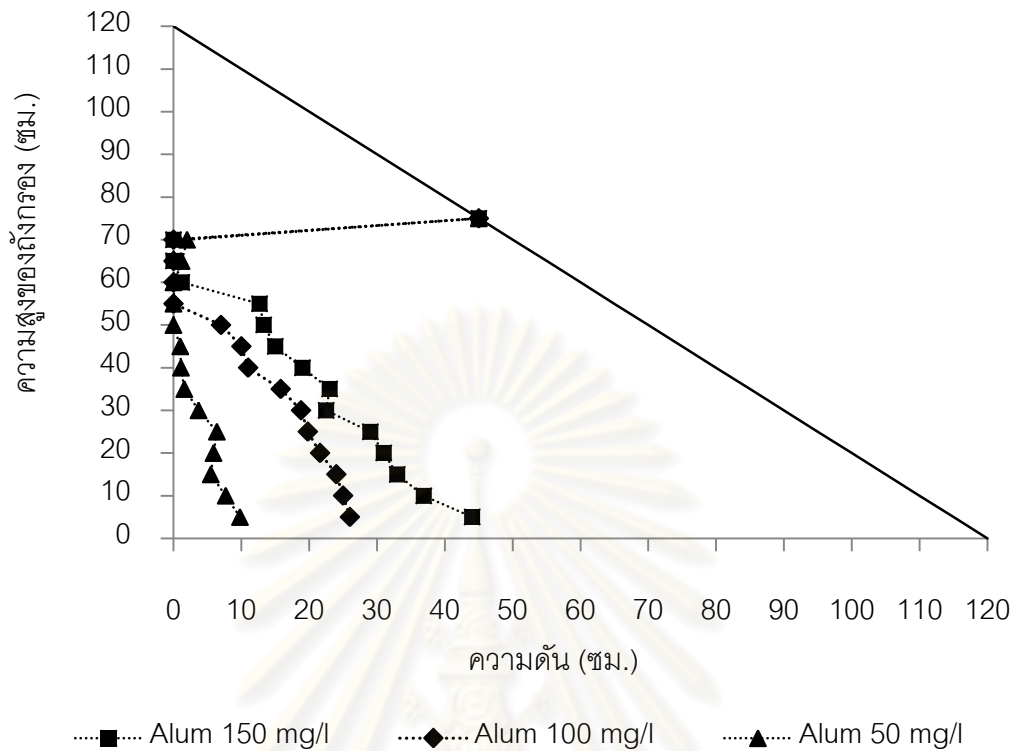
การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง เมื่อทำการกรองอิมัลชันของน้ำมันด้วยกระบวนการกรองตรงที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า การสูญเสียความดันลดมีค่าแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารส้ม โดยการสูญเสียความดันลดอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 การสูญเสียความดันลด เมื่อถังกรองทรายเกิดการอุดตัน พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 150 มิลลิกรัม/ลิตร อนุภาคน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพ ทำให้จับตัวกันเป็นฟlocsขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักโดยรวมที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ละลายน้ำจะมีการแตกตัวของอิออนบวกและอิออนลบ จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์

(Hydrolyzed) ให้เป็นอิออนต่างๆ ซึ่งในขั้นตอนนี้ระบบต้องการความเป็นด่าง (Alkalinity) จนได้เป็น $\text{Al}(\text{OH})_3$ ตามสมการต่อไปนี้



ซึ่งจากสมการ พบว่าการเติมสารส้ม ทำให้เกิดฟลอคของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ขึ้น ซึ่งจากสมการต้องการความเป็นด่างเพื่อให้เกิดฟลอคที่สมบูรณ์ โดยความเป็นด่างของน้ำ ประมาณ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเพียงพอต่อการเกิดฟลอคคูเลชันได้อย่างสมบูรณ์ โดยที่ความเข้มข้นของสารส้ม 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้เกิดฟลอคของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.05, 2.11 และ 2.00 กรัม ตามลำดับ ในกรณีถ้าการเกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบ ห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบ (Sweep Flocculation) สำหรับความเข้มข้นของสารส้ม ที่ 150 มิลลิกรัม/ลิตร เกิดฟลอคในปริมาณมากเมื่อเทียบกับระยะเวลาในการกรองเพียง 60 นาที เท่านั้น ฟลอคดังกล่าวตกตะกอนบนชั้นกรอง และสะสมที่ผิวหน้าของชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ที่ ความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เนื่องจากมาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 2-4 อ่านค่าระดับน้ำได้ เท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้นกรองที่ระดับความสูงดังกล่าว ส่งผลให้อัตราเร็วในการ กรองลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองประมาณ 60 นาที ถึงกรองทรายอุดตัน ซึ่งพบว่า ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากสารกรองได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และความดันลดยุติขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ ความเข้มข้นของสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร อนุภาคน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพและจับตัวเป็นฟ ลอคขนาดเล็กไม่ใหญ่นัก (หรือมีปริมาณตะกอน $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่เกิดขึ้นน้อยกว่า) ทำให้สามารถเคลื่อนที่เข้าไป สะสมภายในชั้นกรองได้มากขึ้นที่ความลึกประมาณ 20 เซนติเมตร เนื่องจากมาตรวัดความดัน น้ำจุดที่ 2-6 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้นกรองที่ระดับความสูง ดังกล่าว ส่งผลให้อัตราเร็วในการกรองลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองประมาณ 90 นาที ถึงกรอง ทรายอุดตัน แต่ในขณะที่ความเข้มข้นของสารส้ม 50 มิลลิกรัม/ลิตร กล่าวได้ว่าปริมาณสารส้มไม่ เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพ ทำให้มีอนุภาคน้ำมันบางส่วนไม่รวมตัวกับฟลอคของสารส้ม โดยอนุภาคเหล่านี้สามารถหลุดรอดผ่านชั้นกรองออกไปได้ และอนุภาคน้ำมันบางส่วนถูกทำลาย เสถียรภาพจับตัวกันเป็นฟลอค และค่อยๆ สะสมภายในชั้นของสารกรอง ทำให้ความดันลดยุติที่ เกิดขึ้นภายในชั้นกรองค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยสามารถใช้สารกรองที่ได้ลึกประมาณ 30 เซนติเมตร เนื่องจากมาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 2-8 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้น กรองที่ระดับความสูงดังกล่าว ส่งผลให้อัตราเร็วในการกรองลดลง จนกระทั่งเวลาการกรอง ประมาณ 150 นาที ถึงกรองทรายอุดตัน

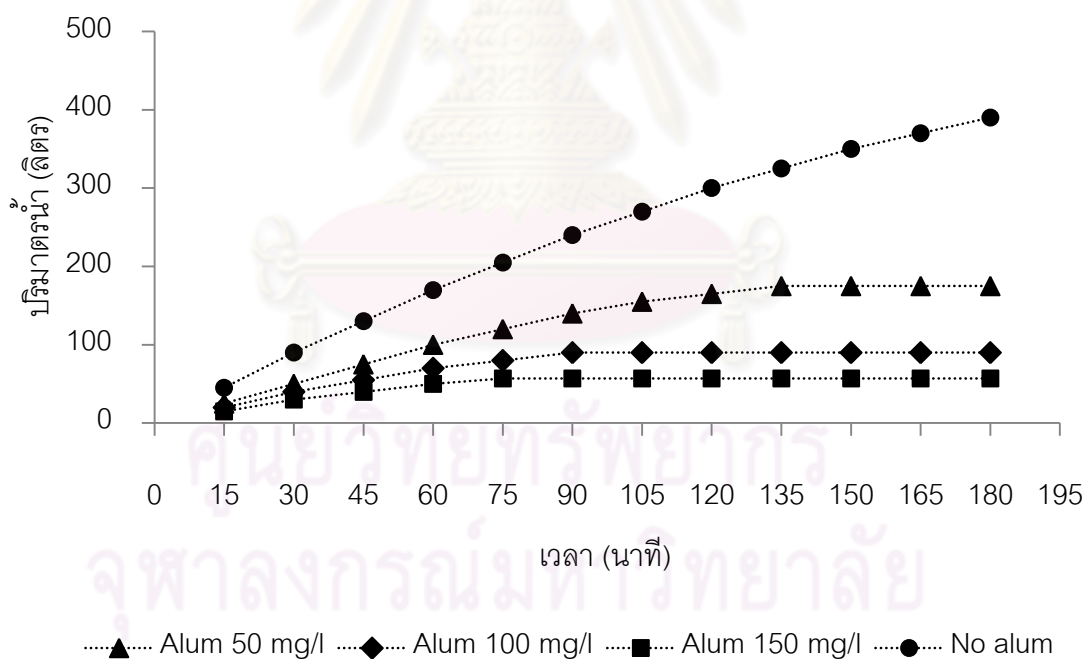


รูปที่ 4.15 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถึงกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ เมื่อถึงกรองอุดตัน

จากผลการทดลองการสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง ทำให้สามารถบอกอายุการทำงานของถึงกรองทรายได้ สำหรับกระบวนการกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีที่ช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน ที่ความเข้มข้นของสารส้มเท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าถึงกรองทรายมีอายุการใช้งานเท่ากับ 150, 90 และ 60 นาที ตามลำดับ พบว่าที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงๆ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงแต่อายุการทำงานของถึงกรองจะสั้น โดยที่ความเข้มข้นของสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคน้ำมันสูงใกล้เคียงกับที่ 150 มิลลิกรัม/ลิตร และให้อายุการทำงานของถึงกรองสูงกว่า ดังนั้น จึงเลือกให้สารส้มที่ความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร

4.4.3 ปริมาตรและอัตราเร็วในการกรอง

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.16 ปริมาณน้ำและอัตราเร็วในการกรองน้ำ ของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถกรองน้ำได้ปริมาณรวมโดยเฉลี่ย เท่ากับ 175, 90 และ 57 ลิตร ตามลำดับ และมีอัตราเร็วในการกรอง เท่ากับ 3.9, 3.4 และ 3.2 เมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ โดยอัตราเร็วในการกรองมีค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไป 150, 90 และ 60 นาที ตามลำดับ อัตราเร็วในการกรองมีค่าลดลง ส่งผลให้ถังกรองทรายอุดตัน และไม่สามารถดำเนินการกรองต่อไปได้ จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่า อัตราเร็วในการกรองมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของสารส้มที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพจับตัวกันเป็นฟlocs ที่มีขนาดและน้ำหนักที่มากขึ้น ทำให้ฟlocs เหล่านี้ตกตะกอนที่ผิวของสารกรอง หรือสะสมอยู่ภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ความพรุนของสารกรองที่ลดลง น้ำไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นกรองออกมาได้ อัตราเร็วในการกรองจึงมีค่าลดลง (รัฐพล เจียวิริยะบุญญา, 2552)

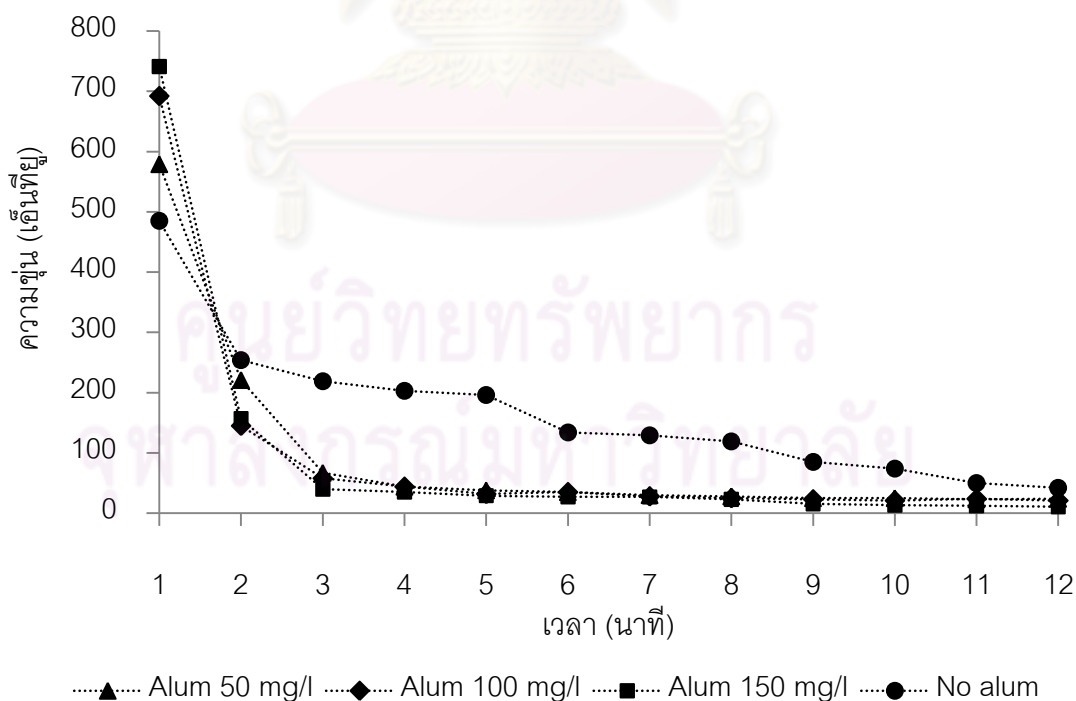


รูปที่ 4.16 ปริมาณน้ำของถังกรองทรายแบบกรองตรง ที่ความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ

4.4.4 การล้างยอนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว

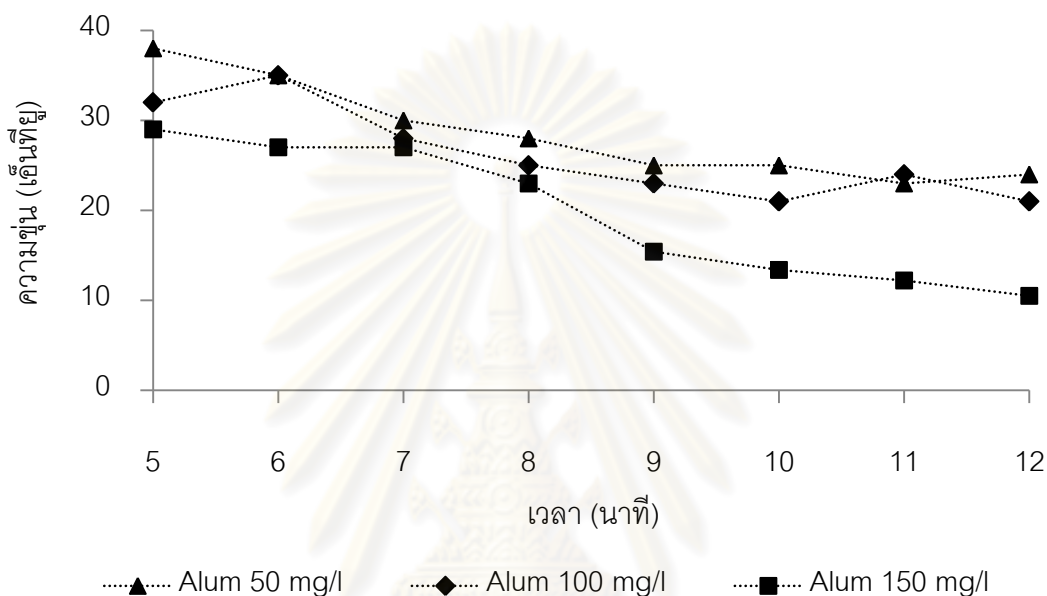
การล้างยอนถึงกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีในการแยกอิมัลชันของน้ำมันด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว เมื่อถึงกรองเกิดการอุดตัน ด้วยความเร็วน้ำล้างยอน 0.75 เมตร/นาที่ เป็นระยะเวลา 12 นาที่ เพื่อทำความสะอาดชั้นกรองเมื่อถึงกรองเกิดการอุดตัน

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.17 พบว่า ความขุ่นน้ำล้างยอนในกรณีการกรองตรงที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) เท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ มีค่าความขุ่นเริ่มต้นสูงถึง 579-580, 692-700 และ 741-750 เอ็นทียู ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าความขุ่นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะเวลาในการกรอง และมีค่าความขุ่นค่อนข้างคงที่ เนื่องจากประสิทธิภาพการล้างยอนแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารส้ม โดยที่ความเข้มข้นของสารส้ม 150 มิลลิกรัม/ลิตร ความขุ่นของน้ำเมื่อเริ่มต้นการล้างยอนที่ออกมามีค่ามากที่สุด หลังจากนั้นความขุ่นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงๆ อนุภาคน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพ ตกตะกอนและสะสมภายในชั้นกรองได้มากกว่าที่ความเข้มข้นของสารส้มที่ต่ำกว่า ซึ่งอนุภาคน้ำมันอาจหลุดรอดออกจากชั้นกรองไปได้ ทำให้ค่าความขุ่นน้ำล้างยอนมีค่าต่ำกว่า และที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงๆ จะทำให้เกิดฟลอคของสารส้มในปริมาณที่มากกว่าอีกด้วย



รูปที่ 4.17 ความขุ่นน้ำล้างยอนของถึงกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้มด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว ที่เวลาการล้างยอน 12 นาที่

หลังจากทำการล้างย้อนผ่านไปประมาณ 5 นาที พบว่า ความขุ่นมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยที่ความเข้มข้นของสารส้ม เท่ากับ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า มีค่าความขุ่น เท่ากับ 35-40, 30-35 และ 25-30 เอ็นทียู ตามลำดับ จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 7 นาที ความขุ่นมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งหยุดการล้างย้อน โดยที่เวลาการล้างย้อน 12 นาที พบว่า มีค่าความขุ่น เท่ากับ 20.2-24.7, 19.3-21.7 และ 10.5-12.2 เอ็นทียู ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความขุ่นน้ำล้างย้อน ของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี ด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว ที่เวลาการล้างย้อน 5-12 นาที

จากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพในการล้างย้อนถังกรองเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารส้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากฟล็อกของสารส้มจับตัวกับอนุภาคน้ำมัน สะสมที่ผิวหน้าและภายในของชั้นกรอง ทำให้เมื่อทำการล้างย้อนชั้นกรองจึงเกิดการขยับตัวจนมี ช่องว่าง สิ่งสกปรกต่างๆ ที่ตกตะกอนบนชั้นกรองและสะสมภายในช่องว่างของชั้นกรอง จึงหลุด ออกมาและถูกน้ำดันออกจากชั้นสารกรอง ปัจจัยที่สิ่งสกปรกซึ่งค้างอยู่ในช่องว่างของสารกรอง หรือเกาะอยู่บนอนุภาคสารกรองหลุดออกมามี 2 อย่างคือ แรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของน้ำ และการขัดสีระหว่างอนุภาคหรือเม็ดสารกรอง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวเป็นตัวสำคัญในการทำให้สิ่งสกปรก หลุดออกจากชั้นกรอง (มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2539) และจากการศึกษาพบว่าการขัดสีน้ำจะเป็น ปัจจัยหลัก เนื่องจากการเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัม/ลิตร เกิดตะกอนปริมาณมาก และเคลือบที่ผิวชั้นสารกรองนั้นหลุดออกได้ง่าย ในขณะที่แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระบบไม่น่าจะ แตกต่างกัน เนื่องจากความเร็วล้างย้อนมีค่าเท่ากันในทุกๆ การทดลอง

โดยสรุปจากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่า การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรงในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากเฟสน้ำ โดยการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) ให้กับน้ำก่อนเข้าสู่ถังกรอง เพื่อทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันของน้ำมัน พบว่า สารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากเฟสน้ำได้ โดยความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายได้ เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารส้มที่น้อยเกินไปอาจไม่เพียงพอต่อการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน และที่ความเข้มข้นของสารส้มมากเกินไปอาจทำให้ถังกรองมีอายุการทำงานที่สั้น เนื่องจากเกิดฟลอคขนาดใหญ่ตกตะกอนที่ผิวชั้นกรอง ซึ่งจากการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสม เท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคน้ำมันที่ดี และให้ระยะเวลาในการดำเนินการกรองเท่ากับ 90 นาที และจากการศึกษาการล้างย้อนทำความสะอาดสารกรอง พบว่า การเติมสารโคแอกกูแลนต์ช่วยให้ประสิทธิภาพในการล้างย้อนเพิ่มสูงขึ้นได้อีกด้วย

ดังนั้นการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกรองสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองได้ แต่การเติมสารส้มส่งผลทำให้อายุการทำงานของถังกรองสั้นลง จึงได้ประยุกต์การเติมอากาศภายในชั้นกรอง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการทำงานของถังกรองทราย ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

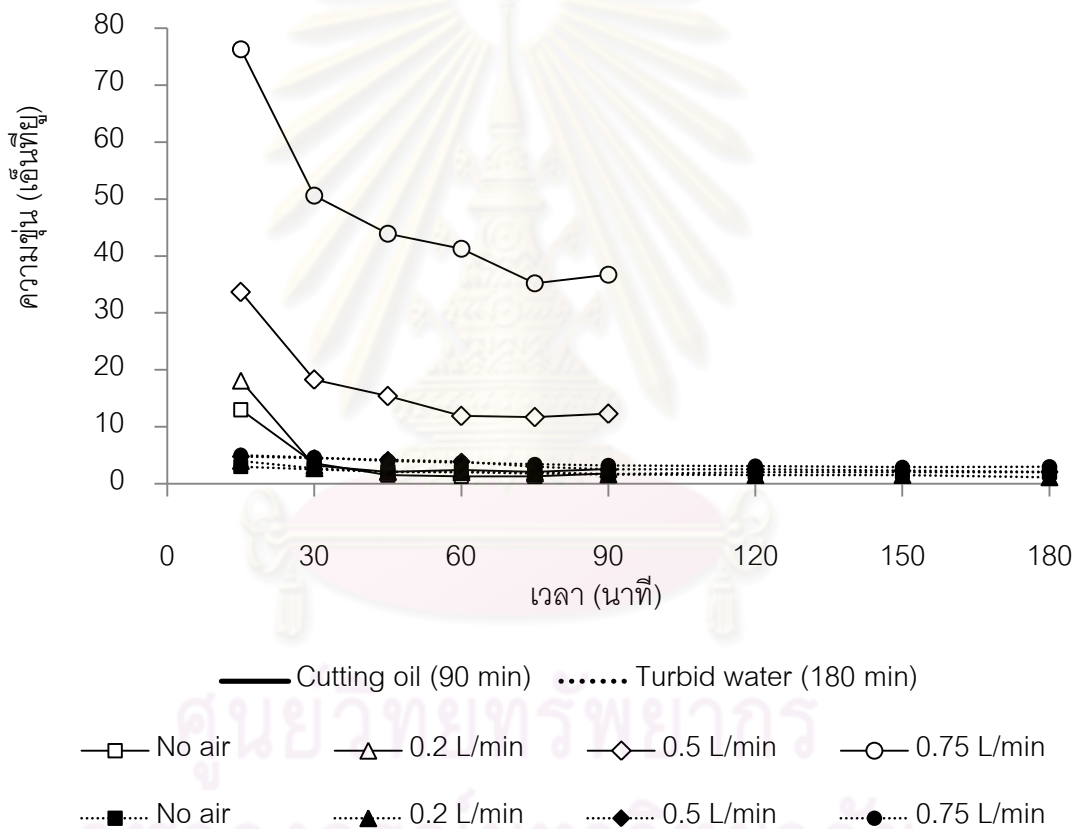
4.5 ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรองทราย โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศ

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรอง เนื่องจากกระบวนการกรองตรงที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองให้ดีขึ้นได้ แต่ส่งผลให้อายุการทำงานของถังกรองสั้นลง จึงได้มีการประยุกต์ใช้การเติมอากาศร่วมกับกระบวนการกรองตรง โดยการติดตั้งหัวเติมอากาศรูปร่างวงแหวนบนที่ตำแหน่ง 25 เซนติเมตรจากผิวหน้าชั้นกรอง เพื่อเพิ่มอายุการทำงานของถังกรองทราย เนื่องจากการเติมอากาศอาจทำให้ชั้นทรายกรองเกิดการขยับตัว ทำให้อนุภาคต่างๆ สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกรองได้มากขึ้น (รัฐพล เจียวิริยะบุญญา, 2552) โดยศึกษาอัตราการเติมอากาศ 0.2 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที เพื่อทดลองหาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมกับถังกรองทรายในการเพิ่มอายุการทำงาน และในขณะเดียวกันต้องไม่ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของถังกรองทราย

4.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ซีไอดี น้ำมันและไขมัน

4.5.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี ร่วมกับการเติมอากาศ โดยการติดตั้งหัวเติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งของจุดเติมอากาศด้านบน (ลึกจากผิวหน้าชั้นกรอง 25 เซนติเมตร) และศึกษาอัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.2, 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที



รูปที่ 4.19 ความขุ่นน้ำที่กรองได้ของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

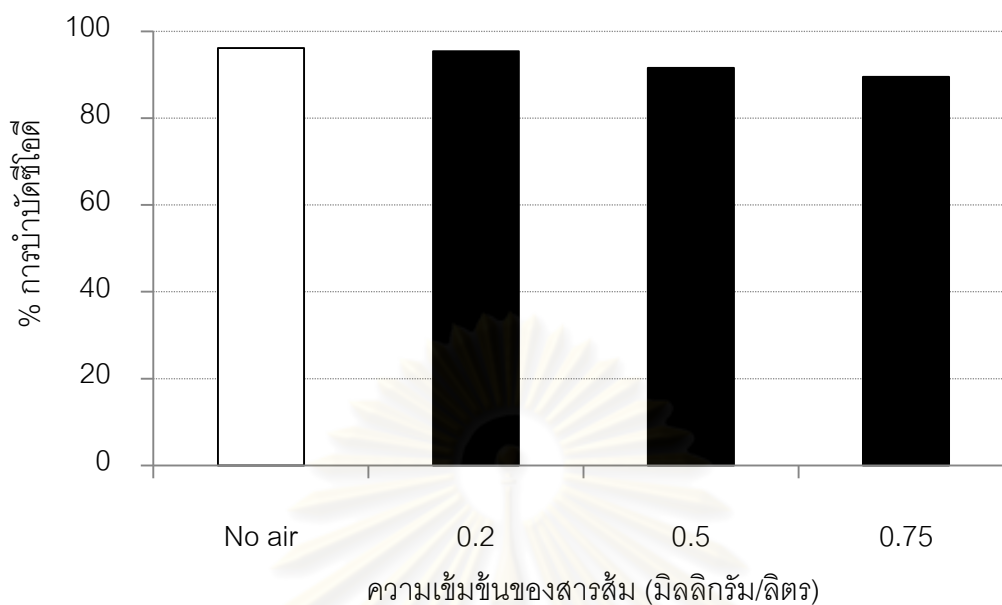
จากการผลการทดลองดังรูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพของถังกรองในการแยกอนุภาคความขุ่นที่อัตราการกรอง 0.2, 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 1.1-4.0, 1.8-4.8 และ 2.2-5.0 เอ็นทียู ตามลำดับ และประสิทธิภาพของถังกรองในการแยกอนุภาคน้ำมัน พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 2.0-3.1, 11.7-

12.3 และ 35.4-36.1 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่กรองผ่านถังกรองแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ข้างต้นมีความขุ่นค่อนข้างสูง และค่อยๆ มีค่าลดลงตามระยะเวลาการกรอง โดยที่อัตราการเติมอากาศที่ 0.2 ลิตร/นาที่ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้มากที่สุดทั้งในกรณีการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน เนื่องจาก อัตราการเติมอากาศที่มากเกินไปทำให้อนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกรองได้ง่าย และบางส่วนหลุดรอดผ่านชั้นกรองออกไปได้ ทำให้ความขุ่นมีค่ามากขึ้น (รัฐพล เจียวิริยะบุญญา, 2552) โดยอัตราการเติมอากาศส่งผลให้ความพรุนของสารกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ $\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$ เมื่อความพรุน (ε) มากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งสกปรกมีค่าลดลง

จากผลการทดลองการเติมอากาศภายในชั้นกรองสำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น พบว่า อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นไม่มากนัก เมื่อเทียบกับการกรองอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพด้วยสารส้ม เกิดเป็นฟlocs การเติมอากาศที่มากเกินไปอาจทำให้ฟlocsที่มีขนาดใหญ่ แตกตัวทำให้มีขนาดเล็กลงและเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรอง ติดค้างภายในช่องว่างของสารกรอง นอกจากนี้การเติมอากาศมากเกินไปส่งผลให้ความพรุนของชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคน้ำมันจึงมีค่าต่ำลง

4.5.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี

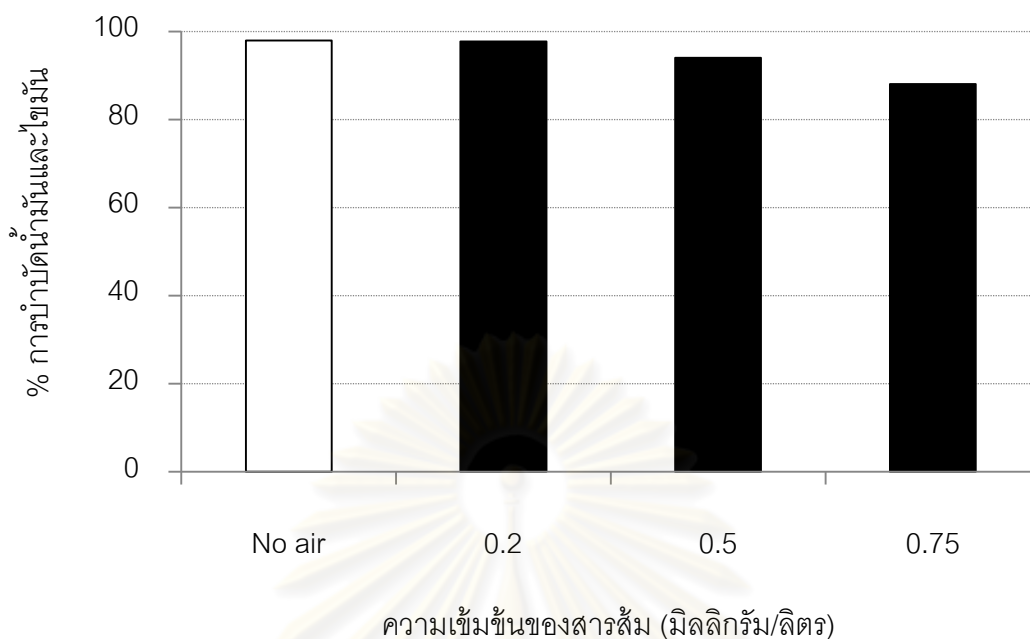
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีร่วมกับการเติมอากาศ ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ ที่อัตราการเติมอากาศ เท่ากับ 0.2, 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที่ พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี เท่ากับ ร้อยละ 95.43, 91.59 และ 89.48 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรองที่ไม่มีเติมอากาศพบว่าสามารถกำจัดซีไอดีได้เท่ากับร้อยละ 96.17 ซึ่งพบว่าการถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีร่วมกับการเติมอากาศ ที่อัตราการเติมอากาศที่ 0.2 ลิตร/นาที่ สามารถกำจัดซีไอดีได้ดีใกล้เคียงกับการกรองที่ไม่มีเติมอากาศ



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

4.5.1.3 ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีร่วมกับการเติมอากาศ ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ ที่อัตราการเติมอากาศ เท่ากับ 0.2, 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที่ พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมัน เท่ากับ ร้อยละ 97.75, 94.03 และ 88.08 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับการกรองที่ไม่มีการเติมอากาศพบว่าสามารถกำจัดน้ำมันและไขมันได้เท่ากับร้อยละ 97.98 ซึ่งพบว่าการถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีร่วมกับการเติมอากาศ ที่อัตราการเติมอากาศที่ 0.2 ลิตร/นาที่ สามารถกำจัดน้ำมันและไขมันได้ดีใกล้เคียงกับการกรองที่ไม่มีการเติมอากาศมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น และซีไอดี



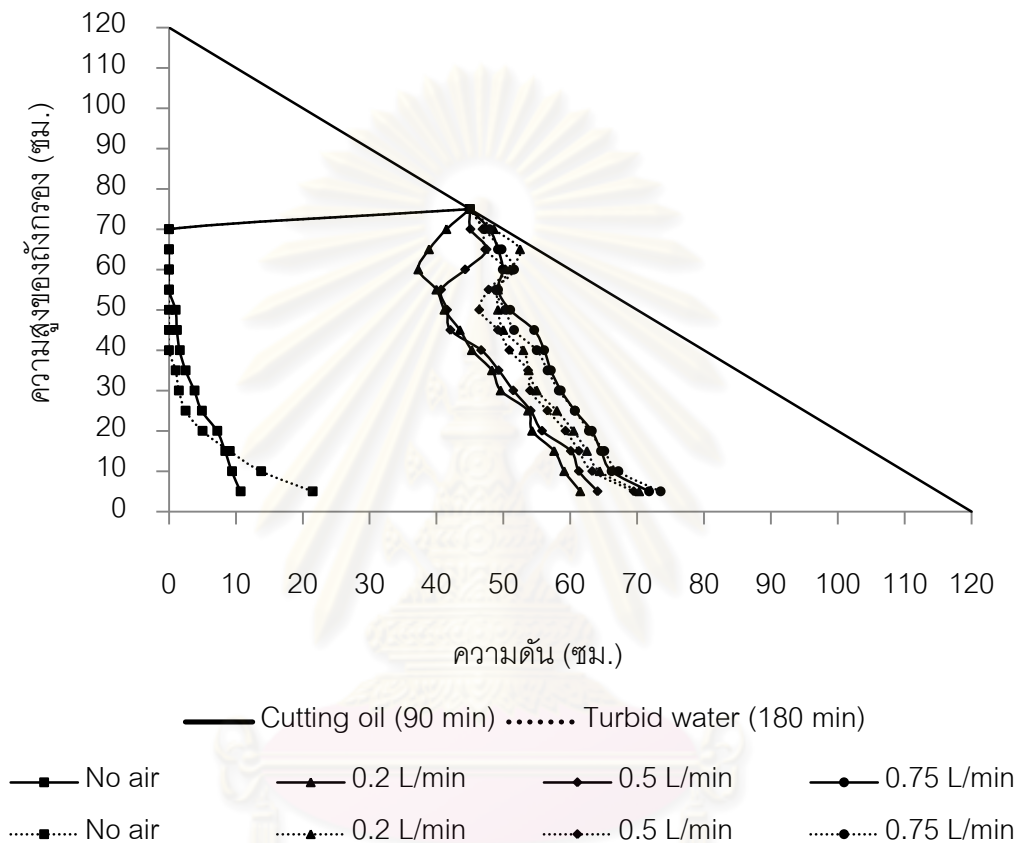
รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไอน้ำของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

4.5.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง เมื่อทำการกรองอนุภาคความขุ่นและอิมัลชันของน้ำมัน ด้วยกระบวนการกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีร่วมกับกระบวนการเติมอากาศภายในชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ โดยศึกษาการสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองที่เวลา 90 และ 180 นาที ซึ่งเป็นเวลาเดียวกับการกรองตรงที่มีและไม่มีสารเคมีในการแยกอนุภาคน้ำมันและอนุภาคความขุ่นอุดตัน โดยที่เวลาดังกล่าวถังกรองทรายแบบเติมอากาศทั้งหมด (ทุกอัตราการเติมอากาศ) ยังไม่อุดตัน และความดันลดที่เกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งชั้นกรอง ไม่เกิดการสะสมที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรอง

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.22 ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีร่วมกับการเติมอากาศ พบว่า การเติมอากาศช่วยเพิ่มระยะเวลาการทำงานของถังกรองให้ยาวนานขึ้น โดยที่ตำแหน่งของจุดเติมอากาศด้านบน (ลึกจากผิวหน้าชั้นกรอง 25 เซนติเมตร) ช่วยให้ผิวหน้าชั้นกรองเกิดการขยายตัว อนุภาคความขุ่นสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกรองได้มากกว่าในกรณีการกรองที่ไม่มีสารเติมอากาศ ซึ่งจะเกิดการอุดตันที่ผิวหน้าของชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ไม่สามารถใช้สารกรองได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และจากการศึกษาอัตราการเติมอากาศที่ 0.2,

0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน พบว่า อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองไม่มากนัก โดยที่อัตราการเติมอากาศต่ำๆ ช่วยให้ประสิทธิภาพในการกรองดีกว่าอัตราการเติมอากาศที่สูงกว่า และช่วยในการประหยัดพลังงานได้มากกว่าอีกด้วย

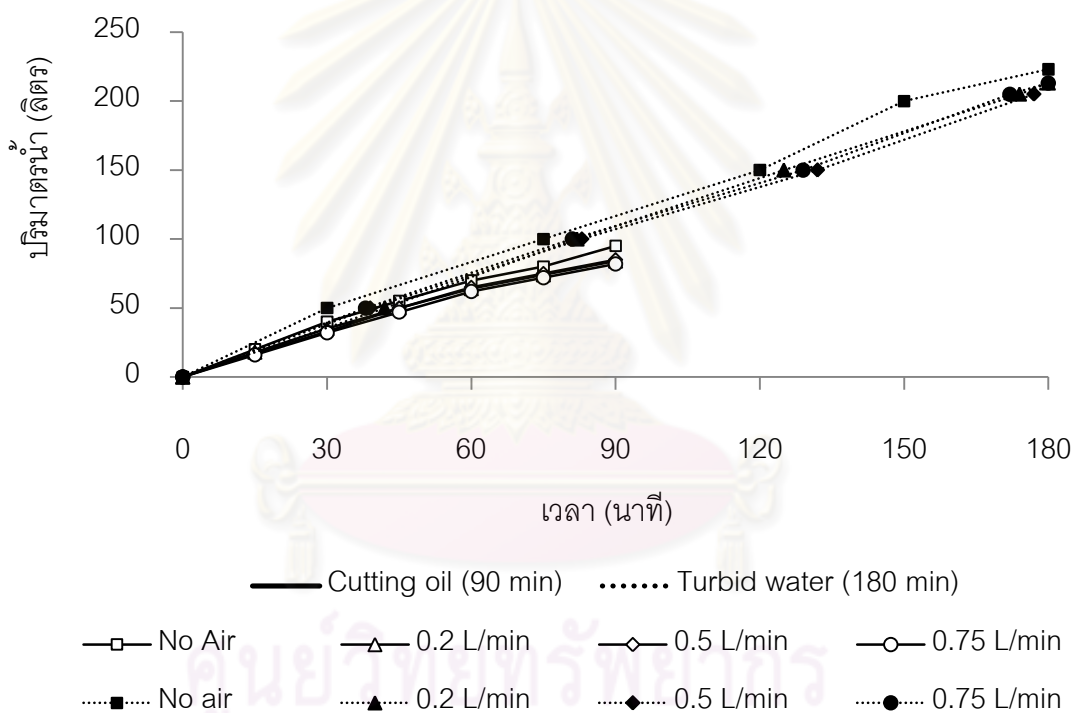


รูปที่ 4.22 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศ
ที่เวลาการกรอง 90 และ 180 นาที

4.5.3 ปริมาตรและอัตราเร็วในการกรอง

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.23 ถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งของการเติมอากาศด้านบนของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.2, 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันและอนุภาคความขุ่น พบว่า อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาตรและอัตราเร็วในการกรองน้ำไม่มากนัก และเวลาการกรองอนุภาคน้ำมันและอนุภาคความขุ่นที่ 90 และ 180 นาที สามารถกรองน้ำได้ปริมาตรรวมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 85 และ 210 ลิตรตามลำดับ ซึ่งมีอัตราเร็วในการกรองโดยเฉลี่ย เท่ากับ 3.2 และ 3.9 เมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ และ

เมื่อเปรียบเทียบกับถังกรองทรายแบบกรองที่มีการเติมเคมีและไม่มีการเติมอากาศ สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน พบว่าอัตราเร็วในการกรองลดลงจาก 3.9 เมตร/ชั่วโมง เป็น 3.2 เมตร/ชั่วโมง และในการกรองอนุภาคความขุ่น พบว่าอัตราเร็วในการกรองลดลงจาก 4 เมตร/ชั่วโมง เป็น 3.9 เมตร/ชั่วโมง เนื่องจากฟองอากาศเคลื่อนที่ขึ้นสู่ชั้นน้ำเหนือสารกรอง ซึ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศทางการไหลของน้ำ ทำให้น้ำไหลผ่านชั้นกรองได้ช้าลง และการเติมอากาศสามารถช่วยให้อนุภาคต่างเคลื่อนที่เข้ามาสะสมในชั้นกรองได้ดีมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรและอัตราเร็วในการกรองน้ำมีค่าลดลง โดยอัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศทั้งหมด มีค่าค่อนข้างคงที่ และยังไม่ก่อให้เกิดการอุดตัน จึงสามารถกรองน้ำด้วยอัตราเร็วในการกรองคงที่ดังกล่าวต่อไปได้



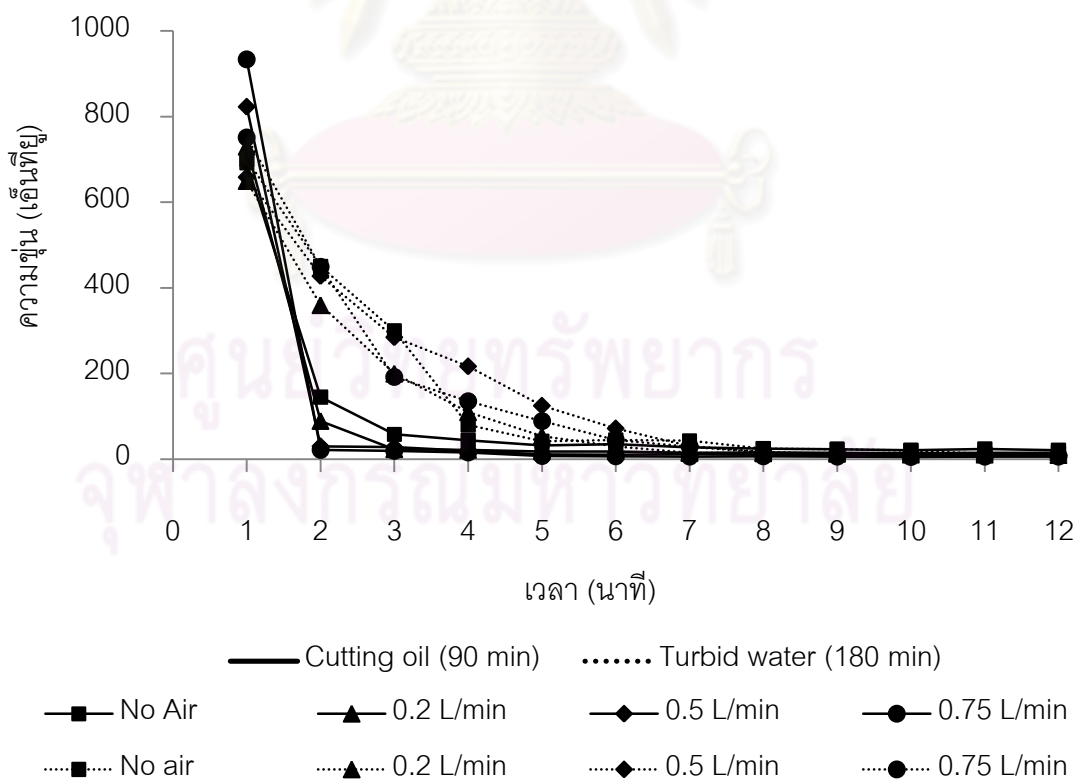
รูปที่ 4.23 อัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

4.5.4 การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน

การล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่ความเร็วของน้ำล้างย้อนเท่ากับ 0.75 เมตร/นาที ร่วมกับการเติมอากาศ โดยการติดตั้งหัวเติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านล่าง (ลึกจากผิวหน้าชั้นกรอง 50 เซนติเมตร) เนื่องจากที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านล่างของชั้นกรองทำให้

เกิดแรงเฉือนและการขัดสีของสารกรองขณะที่อากาศลอยขึ้นสู่ผิวน้ำเหนือสารกรองได้มากกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ จึงช่วยลดระยะเวลาในการล้างย้อนลงได้มากที่สุด (รัฐพล เจียวิริยะบุญญา, 2552)

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.24 การล้างย้อนถึงกรองทรายด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน โดยการฉีดอากาศเสริมอากาศ 0.2, 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที สำหรับการล้างย้อนถึงกรองทรายในการแยกอนุภาคความขุ่น และอนุภาคน้ำมัน พบว่า น้ำล้างย้อนมีค่าความขุ่นเริ่มต้นในช่วง 1 นาทีแรกสูงถึง 730-735, 820-823 และ 980-985 เอ็นทียู ตามลำดับ สำหรับอนุภาคน้ำมัน และ มีค่า 645-650, 655-560 และ 750-755 เอ็นทียู ตามลำดับ สำหรับอนุภาคความขุ่น หลังจากนั้น ความขุ่นน้ำล้างย้อนมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน ความขุ่นน้ำล้างย้อนเริ่มคงที่ที่เวลาผ่านไปประมาณ 2-3 นาที จนที่เวลาการล้างย้อน 12 นาที พบว่า มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 14.5-15.8, 9.5-10.2 เอ็นทียู ตามลำดับ ในขณะที่การกรองอนุภาคความขุ่น พบว่า ความขุ่นเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 8 นาที จนที่เวลาการล้างย้อน 12 นาที พบว่า มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 14.5-15.8, 9.5-10.2 และ 5.8-6.3 เอ็นทียู ตามลำดับ ซึ่งค่าความขุ่นมีค่าแตกต่างกันไปตามอัตราการเติมอากาศ โดยที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.75 ลิตร/นาที ให้ค่าความขุ่นน้ำล้างย้อนเริ่มต้นค่อนข้างสูง และลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ลดระยะเวลาในการล้างย้อนลงได้



รูปที่ 4.24 ความขุ่นน้ำล้างย้อน สำหรับการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

นอกจากนี้ ยังกล่าวได้ว่าล้างย้อนถังกรองด้วยน้ำและอากาศพร้อมกันให้ประสิทธิภาพในการล้างย้อนดีกว่าการล้างย้อนด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว เนื่องจาก ค่าความขุ่นในช่วงเริ่มต้นการล้างย้อนสูงกว่า และลดลงอย่างรวดเร็วจนค่าความขุ่นมีค่าค่อนข้างคงที่ ทำให้ช่วยลดระยะเวลาในการล้างย้อนลงได้ เนื่องจากอากาศช่วยทำให้เกิดการขัดสีกันของสารกรอง ทำให้เวลาที่ใช้ในการล้างย้อนมีค่าลดลง (มันลิน ตันฑุลเวศน์, 2539) โดยความขุ่นน้ำล้างย้อนของถังกรองในการกรองอนุภาคน้ำมัน ลดลงอย่างรวดเร็วกว่าการกรองอนุภาคความขุ่น เนื่องจากการกรองอนุภาคความขุ่นมีระยะเวลาในการกรองที่ยาวนานกว่า ส่งผลให้เกิดการสะสมตัวของอนุภาคความขุ่นมากกว่าการสะสมอนุภาคน้ำมัน และจากการศึกษาอัตราการเติมอากาศ พบว่าอัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพในการล้างย้อนไม่มากนัก

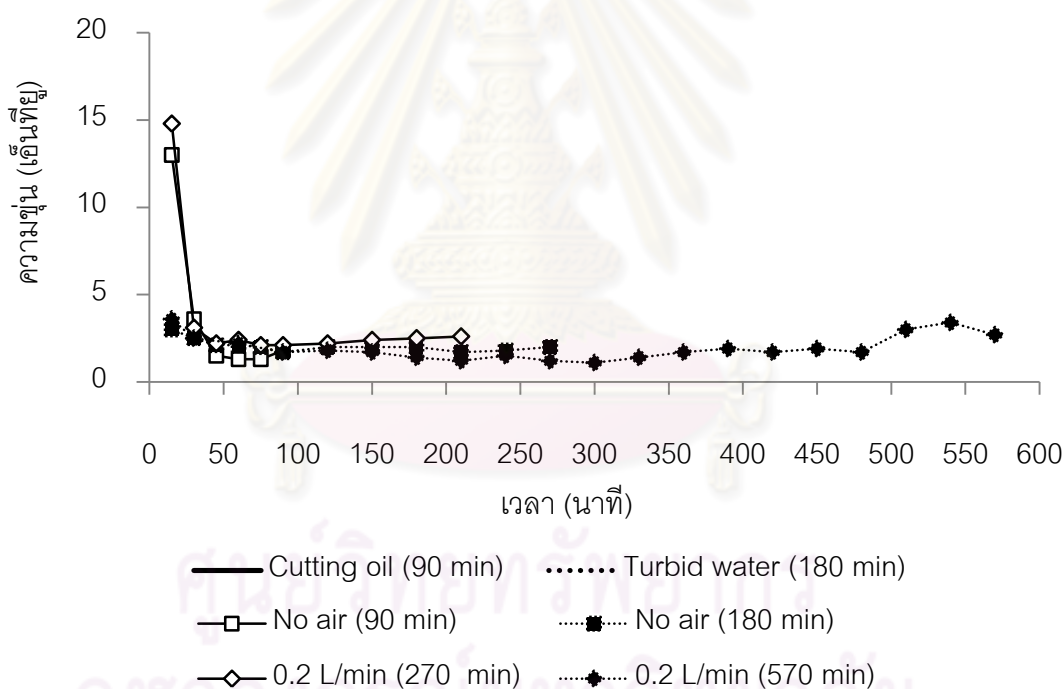
โดยสรุปจากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่า การเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรองทรายแบบกรองตรง โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศภายในชั้นกรอง โดยการติดตั้งหัวเติมอากาศรูปวงแหวนด้านบนที่ตำแหน่ง 25 เซนติเมตรจากผิวชั้นกรอง จากการทดลองพบว่า การเติมอากาศภายในชั้นกรองสามารถเพิ่มระยะเวลาในการดำเนินการกรองได้ โดยจากการศึกษาความดันลดภายในชั้นกรองที่เวลาเดียวกับการกรองที่ไม่มีการเติมอากาศ พบว่า การสูญเสียความดันลดเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชั้นกรอง เนื่องจากการเติมอากาศภายในชั้นกรอง ส่งผลให้สารกรองเกิดการขยับตัวอนุภาคต่างๆ สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นของสารกรองได้มากขึ้น และจากการศึกษาประสิทธิภาพของถังกรองทราย พบว่า ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกรอง เนื่องจากการเติมอากาศส่งผลให้ค่าความพรุนของชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น และจากสมการการกรอง
$$In(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$$
 พบว่าเมื่อความพรุน (ε) มากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งสกปรกลดลง ดังนั้น จากผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่ ให้ประสิทธิภาพการกรองใกล้เคียงกับการกรองที่ไม่มีการเติมอากาศ และสำหรับอัตราการเติมอากาศที่มากเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองลดลง สำหรับการศึกษ้อัตราเร็วในการกรองพบว่า การเติมอากาศส่งผลให้อัตราเร็วในการกรองลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และในการศึกษาการล้างย้อนพบว่า การเติมอากาศช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการล้างย้อนและลดเวลาในการล้างย้อนลงได้อีกด้วย

ดังนั้น อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน โดยที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน อัตราเร็วในการกรอง การสูญเสียความดันลด และการล้างย้อนที่ดีที่สุด จึงได้ออกแบบการกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีร่วมกับการเติมอากาศด้วยอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสม โดยดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกรอง และระยะเวลาในการกรอง

4.5.5 การกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous)

4.5.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ซีโอดี น้ำมันและไขมัน

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.25 ความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศ ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที ในการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 2.2-2.8 และ 0.6-2.4 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยน้ำที่ผ่านการกรองในช่วงเริ่มต้นมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง และค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาในการกรอง จนกระทั่งที่เวลาการกรอง 570 นาที และ 270 นาที ถึงกรองทรายทั้งสองจึงเกิดการอุดตัน โดยการเติมอากาศสามารถช่วยเพิ่มระยะเวลาในการดำเนินงานได้นานกว่าแบบธรรมดาที่ไม่มีการเติมอากาศประมาณ 3 เท่าสำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน และ 3.2 เท่าของการกรองอนุภาคความขุ่น



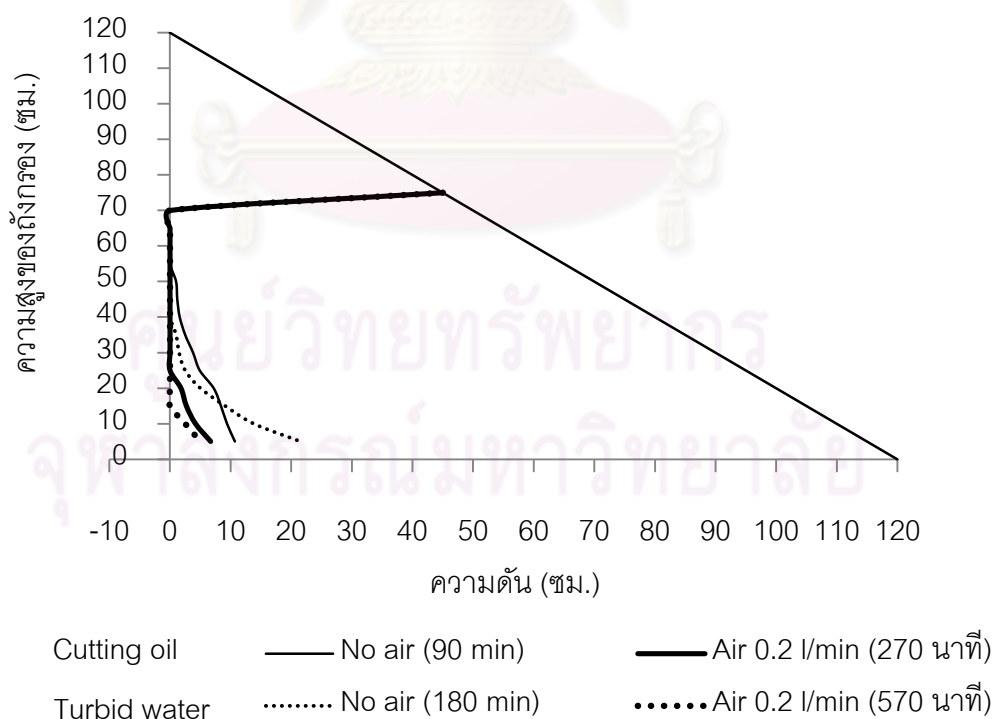
รูปที่ 4.25 ความขุ่นน้ำที่กรองได้ที่อัตราการเติมอากาศที่ 0.2 ลิตร/นาที ขณะดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง

จากนั้นทำการศึกษาค่าซีโอดี (COD) และค่าน้ำมันและไขมัน (FOG) ของน้ำที่ผ่านการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศ ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที พบว่าถังกรองทรายมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี เท่ากับร้อยละ 96.12 และค่าน้ำมันและไขมัน เท่ากับ

ร้อยละ 98.03 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่ไม่มีการเติมอากาศ

4.5.5.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.26 การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง เมื่อถังกรองอุดตัน สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน พบว่า ความดันลดของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงที่ผิวหน้าของชั้นกรอง เนื่องจากฟลอคของอนุภาคน้ำมันตกตะกอนและสะสมที่ผิวหน้าของชั้นกรองที่มีความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เป็นส่วนใหญ่ ทำให้มาตรวัดความดันจุดที่ 2-4 อ่านค่าระดับน้ำเท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้นกรองดังกล่าว ถังกรองทรายจึงอุดตันที่เวลาประมาณ 90 นาที และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันลดของถังกรองที่มีการเติมสารเคมีร่วมกับการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที พบว่า ความดันลดค่อนข้างสม่ำเสมอส่งผลให้ระยะเวลาในการกรองที่ยาวนานกว่า เนื่องจากอนุภาคน้ำมันสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในสารกรองได้มาก โดยมาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 2- 11 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้นกรองดังกล่าว ถังกรองจึงอุดตันที่เวลาประมาณ 270 นาที

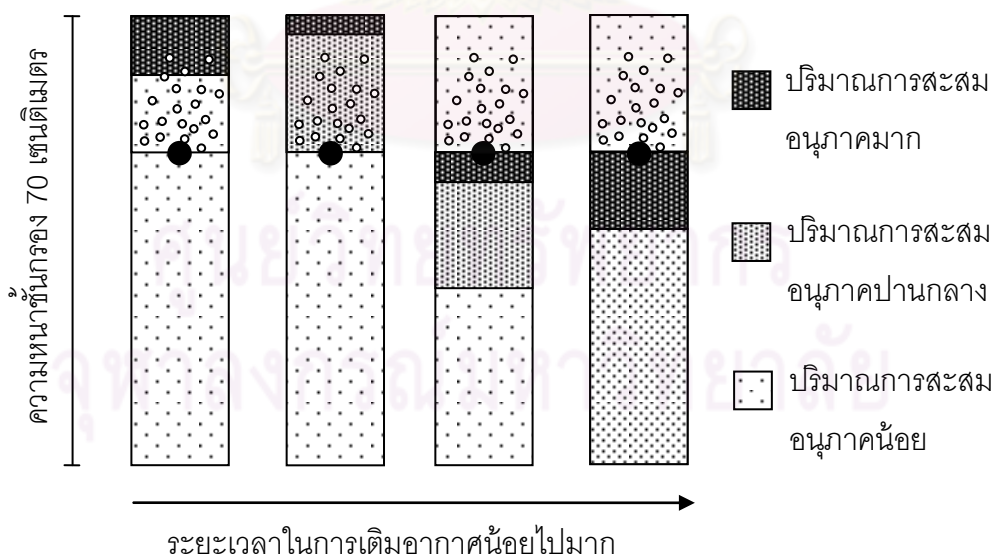


รูปที่ 4.26 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศ

ที่ตำแหน่งการเติมอากาศด้านบน ที่เวลาการกรองสุดท้าย

สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น พบว่า ความดันลดของถังกรองทราย ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการกรอง โดยมาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 2- 8 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้นกรองดังกล่าว ถังกรองทรายจึงอุดตันที่เวลาประมาณ 180 นาที และเมื่อเปรียบเทียบกับกรองที่มีการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที พบว่า ความดันลดค่อนข้างสม่ำเสมอส่งผลให้ระยะเวลาในการกรองเพิ่มขึ้น โดยมาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 2- 13 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำภายในชั้นกรองดังกล่าว ถังกรองทรายจึงอุดตันที่เวลาประมาณ 570 นาที ดังรูปที่ 4.26

โดยสรุปจากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่าการประยุกต์ถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศที่ 0.2 ลิตร/นาที สามารถช่วยทำให้ชั้นกรองด้านบนเหนือจุดเติมอากาศขยายตัว ส่งผลให้อนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันที่สะสมบริเวณผิวหน้าชั้นกรอง สามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรอง และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านล่างของจุดเติมอากาศลงไปได้มากขึ้น ดังรูปที่ 4.27 ทำให้ถังกรองทรายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นประมาณ 3 เท่าของการกรองแบบธรรมดาที่ไม่มีการเติมอากาศร่วมด้วย สามารถใช้สารกรองได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากขึ้น และประสิทธิภาพในการของถังกรองยังคงดีเหมือนเดิม



รูปที่ 4.27 ลักษณะการสะสมอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศ

4.6 ศึกษาการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ (Batch)

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อประยุกต์รูปแบบการเติมอากาศแบบกะ เนื่องจากที่ผ่านมามีการเติมอากาศตลอดเวลาขณะทำการกรองทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการดำเนินงานสูง ดังนั้น จึงได้มีการประยุกต์การเติมอากาศเมื่อถึงกรองอุดตันเพื่อลดการอุดตันของอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันที่สะสมที่ผิวหน้าของสารกรอง เนื่องจากการเติมอากาศที่ผิวหน้า (ที่ความลึก 25 เซนติเมตรจากผิวชั้นกรอง) ทำให้ชั้นกรองขยายตัวอนุภาคสามารถเคลื่อนที่ลงไปชั้นกรองได้มากขึ้น โดยเติมอากาศนาน 10 นาที เนื่องจากระยะเวลาการเติมอากาศที่ยาวนานทำให้ชั้นกรองขยายตัวอนุภาคต่างๆ สามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาการเติมอากาศที่นานเกินไปส่งผลต่อความขุ่นของน้ำที่กรองได้ในขณะที่ทำการเติมอากาศ (รัฐพล เจียวิริยะ บุญญา, 2552) โดยศึกษาอัตราการเติมอากาศ 0.2 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที เพื่อทดลองหาอัตราการเติมอากาศแบบกะที่เหมาะสมกับกระบวนการกรองแบบต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ระยะเวลาในการดำเนินการที่ยาวนาน ประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ และประสิทธิภาพของถังกรองยังคงเดิม

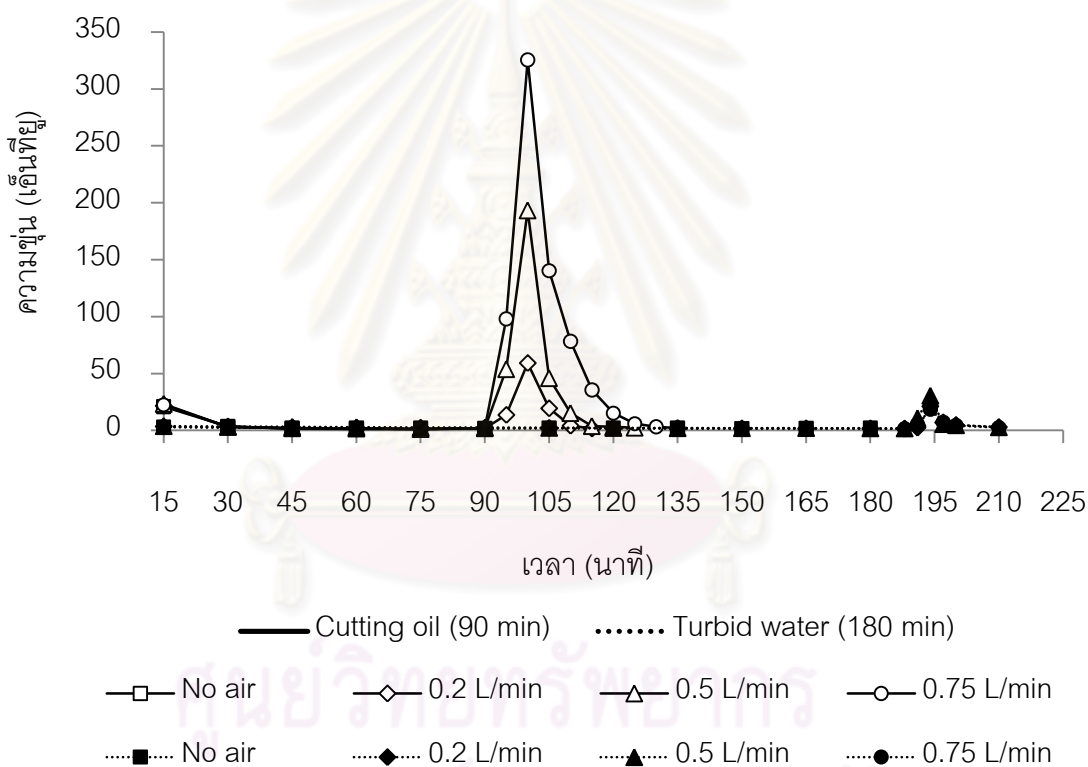
4.6.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ก่อนถึงกรองทรายอุดตัน

ประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการแยกอนุภาคความขุ่น พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 1.7-3.0 เอ็นทียู โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรอง น้ำที่ผ่านการกรองมีความขุ่นค่อนข้างสูง และค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 45 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงเริ่มมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 1.0-2.5 เอ็นทียู ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้มที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ พบว่า มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 1.6-1.8 เอ็นทียู โดยค่าความขุ่นมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการทำงานการกรอง เนื่องจาก อนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันเกิดการสะสมที่ผิว และภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ค่าความพรุนของชั้นกรองมีค่าลดลง ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ
$$\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$$
 เมื่อความพรุน (ε) มีค่าลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอย ($\ln(C/C_0)$) เพิ่มสูงขึ้น ดังผลการทดลองที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.2 ที่ผ่านมา

การเติมอากาศหลังจากถังกรองอดตัน

ในขณะที่เติมอากาศถังกรองทรายยังดำเนินการกรองต่อไปเรื่อยๆ หลังการเติมอากาศ ความขุ่นของน้ำที่กรองได้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.28 โดยที่อัตราการเติมอากาศเท่ากับ 0.2, 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที นาน 10 นาที ในขณะที่เติมอากาศถังกรองทรายยังดำเนินการกรองต่อไปเรื่อยๆ สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน พบว่า ในช่วงเริ่มต้นของการเติมอากาศน้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเติมอากาศ เมื่อเติมอากาศไปประมาณ 10 นาที พบว่าน้ำที่กรองได้มีค่าความขุ่นมีค่ามากที่สุด และหลังจากนั้นความขุ่นของน้ำที่กรองได้มีค่าลดลงกลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.28 ความขุ่นน้ำที่กรองได้ ของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเริ่มเดินระบบการเติมอากาศภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ความขุ่นของน้ำที่กรองได้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก ฟองอากาศทำให้ชั้นกรองขยับตัว อนุภาคสิ่งสกปรกต่างๆ จึงเคลื่อนที่เข้าสู่สารกรองได้มากขึ้น ลดการสะสมตัวที่ผิวหน้าสารกรอง โดยระยะเวลาในการทำให้ความขุ่นกลับสู่สภาวะปกตินั้นขึ้นอยู่กับอัตราการเติมอากาศที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลความชุ่มสูงสุดของน้ำที่กรองได้ในช่วงที่มีการเติมอากาศและระยะเวลาที่ความชุ่มกลับสู่สภาวะปกติ (ที่ค่าความชุ่มไม่เกิน 5 เอ็นทียู)

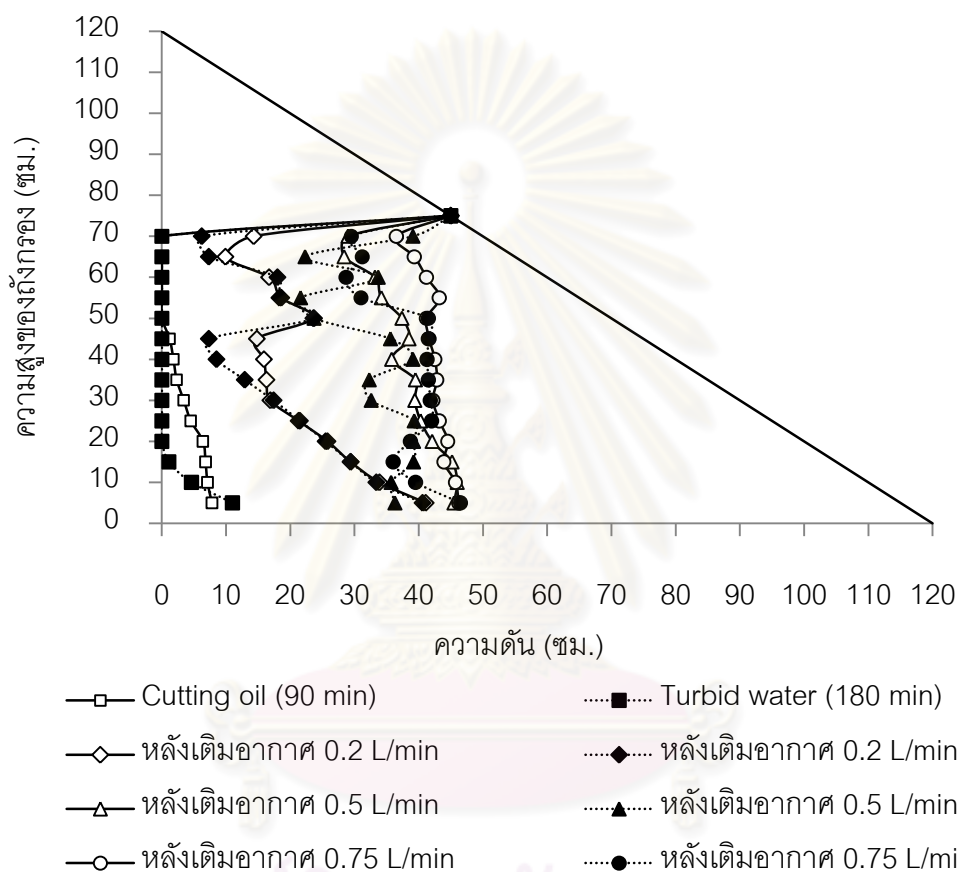
ชนิดของ อนุภาค	อัตราการเติมอากาศ (ลิตร/นาทีก)	ความชุ่มสูงสุด (เอ็นทียู)	ระยะเวลาที่น้ำที่กรองกลับสู่สภาวะปกติ (นาทีก)
อนุภาค ความชุ่ม	0.20	21.30	15
	0.50	30.60	15
	0.75	58.50	15
อนุภาค น้ำมัน	0.20	59.3	15
	0.50	193.2	20
	0.75	325.4	30

ทั้งนี้ สำหรับการกรองอนุภาคความชุ่ม ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2, 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาทีก พบว่า ระยะเวลาที่ทำให้น้ำที่ผ่านการกรองกลับคืนสู่สภาวะปกติมีค่าเท่ากัน (ประมาณ 15 นาทีก) และความชุ่มของน้ำที่กรองได้มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่การกรองอนุภาคน้ำมันตื้นนั้น พบว่า มีค่าความชุ่มแตกต่างกันค่อนข้างมาก และระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้กลับคืนสู่สภาวะปกติก็แตกต่างกัน โดยระยะเวลาจะนานขึ้นเมื่ออัตราการเติมอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการเติมอากาศที่สูงเกินไปอาจทำให้ชั้นสารกรองเกิดการขยายตัวมากไป ทำให้ความพรุนของสารกรองเพิ่มขึ้น อนุภาคน้ำมันบางส่วนจึงเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นสารกรอง และเคลื่อนที่ผ่านชั้นกรองสารกรองไปได้ หรือการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศมากเกินไปทำให้ฟลอคของอนุภาคน้ำมันแตกตัว ทำให้อนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นสารกรอง และทะลุผ่านชั้นกรองออกไปได้ ดังนั้น อัตราการเติมอากาศสำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันจึงมีความสำคัญค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกรองอนุภาคความชุ่ม และยังส่งผลต่อระยะเวลาที่น้ำที่กรองได้กลับสู่สภาวะปกติอีกด้วย

4.6.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองที่เวลาการกรองต่างๆ ทุกๆ 15 นาทีก พบว่า การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง มีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของกรองที่เพิ่มขึ้น โดยการสูญเสียความดันลดส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าชั้นกรอง เนื่องจากระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำด้านบนของถังกรองลดลงอย่างรวดเร็วจนเท่ากับศูนย์ จึงไม่มีแรงดันน้ำที่

เพียงพอสู่การกรองอีกต่อไป ส่งผลให้ถังกรองทรายอุดตัน ที่เวลาประมาณ 90 นาทีสำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน และ 180 นาทีสำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น หลังจากนั้นทำการเติมอากาศในช่วงเวลาดังกล่าวที่ระยะเวลาการเติมอากาศนาน 10 นาที เพื่อให้อนุภาคต่างๆ ที่สะสมที่ผิวหน้าของชั้นกรองสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น ทำให้ถังกรองสามารถกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง ด้วยอัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.29 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ ที่เวลา การกรอง 90 และ 180 นาที ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.29 การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองภายหลังการเติมอากาศ สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน ด้วยอัตราการเติมอากาศที่ 0.2, 0.5 และ 0.75 ลิตร/นาที พบว่า ความดันลดภายในชั้นกรองลดลง โดยระดับในมาตรวัดความดันน้ำจากที่ศูนย์ กลับขึ้นมาอีกครั้งหนึ่งหลังเติมอากาศ เนื่องจากชั้นกรองขยายตัว ส่งผลให้ความพรุนของสารกรองเพิ่มขึ้น ถังกรองทรายจึงสามารถกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง อนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันต่างๆ ที่สะสมอยู่บริเวณผิวหน้าชั้นกรองกระจายตัวออกและเคลื่อนที่เข้ามาภายในชั้นกรองได้มากขึ้น โดยที่อัตราการเติมอากาศที่มากที่สุดสามารถทำให้การสูญเสียความดัน

ลดภายในชั้นกรองลดลงมากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติการทำงานของถังกรองทรายขึ้นกับประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยอีกด้วย ดังนั้น ที่อัตราการเติมอากาศที่สูงอาจส่งผลดีต่อความดันลดภายในชั้นกรอง แต่อาจทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยลดลงเนื่องจากฟล็อกเกิดการแตกตัว เพราะฉะนั้น ในการเลือกอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ อย่าง รวมถึงการสิ้นเปลืองพลังงานอีกด้วย

โดยสรุปจากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่าการประยุกต์รูปแบบการเติมอากาศแบบกะ คือ การเติมอากาศเมื่อถังกรองอุดตันเท่านั้นเป็นระยะเวลา 10 นาที สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน พบว่า ที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที ฟองอากาศสามารถทำให้อนุภาคน้ำมันที่ตกตะกอนและสะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองนั้นเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นสารกรอง ทำให้ความดันลดบริเวณผิวหน้าชั้นกรองมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราการเติมอากาศต่ำเกินไปฟองอากาศไม่สามารถทำให้อนุภาคต่างๆ ที่สะสมอยู่ที่ผิวหน้าเกิดการฟุ้งกระจายและเคลื่อนที่เข้ามาภายในชั้นกรองได้มากพอ ทำให้ความดันลดที่ผิวหน้าชั้นกรองลดลงไม่มากนัก หรือถ้าอัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที ฟองอากาศทำให้อนุภาคต่างๆ ชั้นกรองขยายตัวมากเกินไปทำให้อนุภาคต่างๆ เคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรองและบางส่วนทะลุออกชั้นกรองออกไปได้ ทำให้ประสิทธิภาพลดลง สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น พบว่า ที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที สามารถทำให้อนุภาคความขุ่นเคลื่อนที่เข้ามาภายในชั้นกรอง การสูญเสียความดันลดที่ผิวหน้าชั้นกรองมีค่าลดลง โดยค่าอัตราการเติมอากาศที่สูงขึ้นนั้น อาจเป็นผลมาจากการที่อนุภาคความขุ่นมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดอนุภาคน้ำมันจึงต้องใช้อัตราการเติมอากาศที่สูงกว่าในการทำให้อนุภาคที่สะสมตัวอยู่เกิดการฟุ้งกระจายตัวส่งผลให้ความพรุนของชั้นกรองเพิ่มขึ้น และอนุภาคสามารถเคลื่อนที่เข้ามาภายในชั้นกรองได้มากขึ้น

ดังนั้น สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมเท่ากับ 0.75 ลิตร/นาที และสำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 ลิตร/นาที เพื่อดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาในการเติมอากาศนาน 10 นาที เนื่องจากอากาศหลังจากถังกรองอุดตันสามารถช่วยประหยัดพลังงานในการเติมอากาศลงได้ และเพื่อให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพของถังกรองทรายแบบกรองตรงร่วมกับการเติมอากาศแบบกะ จึงต้องดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและระยะเวลาในการทำงานของถังกรองทรายต่อไป

4.6.3 ดำเนินการทดลองแบบต่อเนื่อง

4.6.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

รอบการทำงานที่ 1

สำหรับการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่องรอบการทำงานที่ 1 ประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการแยกอนุภาคความขุ่น พบว่า น้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 1.0-2.5 เอ็นทียู ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ในการแยกอนุภาคน้ำมัน พบว่า มีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 1.6-1.8 เอ็นทียู โดยในช่วงเริ่มต้นของการกรองน้ำที่ผ่านการกรองมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง และค่อยๆ ลดลง ดังผลการทดลองที่ 4.2

ทำการเติมอากาศเมื่อถังกรองอุดตัน สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นที่เวลา 180 นาที ด้วยอัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที เป็นเวลานาน 10 นาที พบว่าความขุ่นเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการเติมอากาศประมาณ 10-12 นาที โดยมีค่าสูงประมาณ 22 เอ็นทียู จากนั้นความขุ่นของน้ำที่กรองได้ลดลงอย่างรวดเร็ว และกลับเข้าสู่สภาวะปกติ สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน เติมอากาศด้วยอัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที เป็นเวลานาน 10 นาที พบว่าความขุ่นน้ำที่กรองได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมอากาศได้ 5 นาที และสูงที่สุดเติมอากาศได้ 10 นาที โดยมีค่าความขุ่นสูงถึง 179.3 เอ็นทียู จากนั้นความขุ่นของน้ำที่กรองได้ลดลงอย่างรวดเร็ว และกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ดังรูปที่ 4.30

รอบการทำงานที่ 2

สำหรับการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่องรอบการทำงานที่ 2 น้ำที่กรองได้มีค่าความขุ่นลดลงกลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งหนึ่ง ภายหลังการเติมอากาศครั้งที่ 1 จากนั้นดำเนินการกรองต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถังกรองทรายอุดตัน

ทำการเติมอากาศครั้งที่ 2 เมื่อถังกรองอุดตันสำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นที่เวลา 570 นาที ด้วยอัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที เป็นเวลานาน 10 นาที โดยความขุ่นน้ำที่กรองได้มีค่าสูงประมาณ 35 เอ็นทียู จากนั้นความขุ่นของน้ำที่กรองได้ลดลงอย่างรวดเร็ว และกลับเข้าสู่สภาวะปกติ และสำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน เติมอากาศด้วยอัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที เป็นเวลานาน 10 นาที โดยความขุ่นน้ำที่กรองได้มีค่าสูงประมาณ 298 เอ็นทียู จากนั้นความขุ่นของน้ำที่กรองได้ลดลงอย่างรวดเร็วภายในเวลา 20 นาที และกลับเข้าสู่สภาวะปกติ ดังรูปที่ 4.30

รอบการทำงานที่ 3

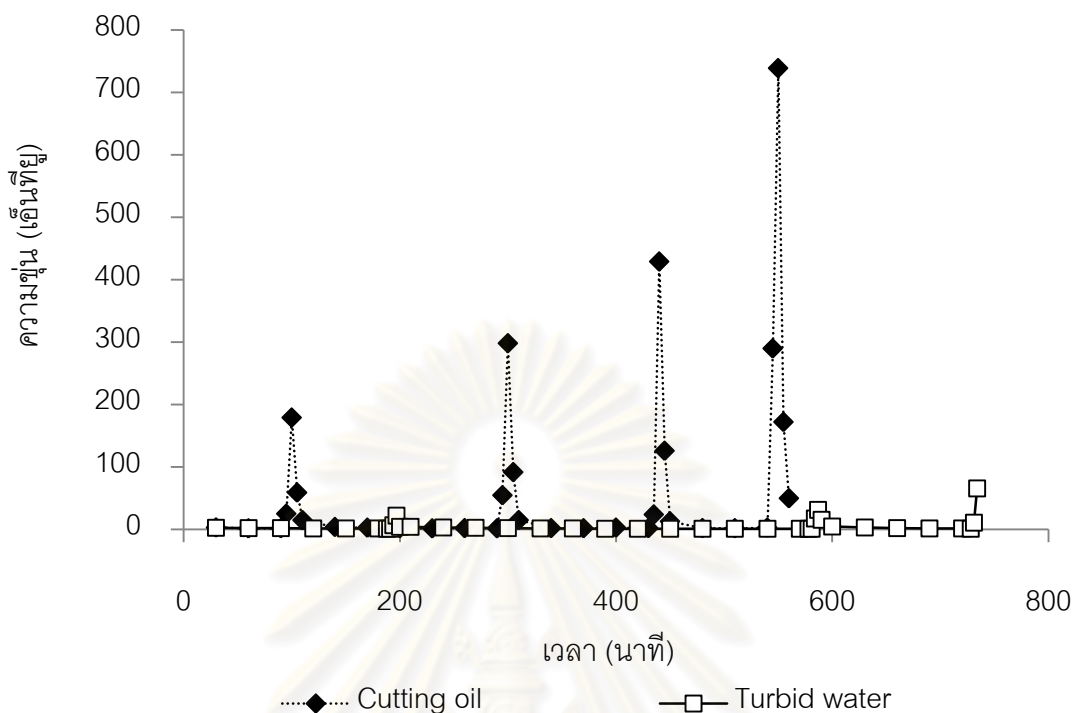
สำหรับการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่องรอบการทำงานที่ 3 น้ำที่กรองได้มีค่าความขุ่นลดลงกลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งหนึ่ง ภายหลังจากเติมอากาศครั้งที่ 2 จากนั้นดำเนินการกรองต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงกรองทรายจุดตัน

ทำการเติมอากาศครั้งที่ 3 เมื่อถึงกรองจุดตันสำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นที่เวลา 720 นาที ด้วยอัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที เป็นเวลานาน 10 นาที โดยความขุ่นน้ำที่กรองได้มีค่าสูงประมาณ 70 เอ็นทียู โดยมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 8-10 นาที หลังจากทำการเติมอากาศในรอบที่ 3 พบว่าไม่สามารถทำให้อนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่บริเวณด้านบนชั้นกรองกระจายออกได้ ทำให้ไม่สามารถดำเนินการกรองได้อีกต่อไป ถึงกรองทรายแบบเติมอากาศจึงจุดตันที่เวลาในการกรอง 734 นาที แต่สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน เติมอากาศด้วยอัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที เป็นเวลานาน 10 นาที โดยความขุ่นน้ำที่กรองได้มีค่าสูงประมาณ 430 เอ็นทียู จากนั้นความขุ่นของน้ำที่กรองได้ลดลงภายในระยะเวลา 20 นาที จนมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 2-3 เอ็นทียู และกลับเข้าสู่สภาวะปกติ สามารถดำเนินการกรองต่อไปได้ ดังรูปที่ 4.30

รอบการทำงานที่ 4

สำหรับการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่องรอบการทำงานที่ 4 น้ำที่กรองได้มีค่าความขุ่นลดลงกลับเข้าสู่สภาวะปกติอีกครั้งหนึ่ง ภายหลังจากเติมอากาศครั้งที่ 3 จากนั้นดำเนินการกรองต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงกรองทรายจุดตัน

ทำการเติมอากาศครั้งที่ 4 เมื่อถึงกรองจุดตันที่เวลา 540 นาที สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน ด้วยอัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที เป็นเวลานาน 10 นาที โดยความขุ่นน้ำที่กรองได้มีค่าสูงประมาณ 739 เอ็นทียู โดยมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 15 นาที หลังจากทำการเติมอากาศในรอบที่ 4 พบว่าการเติมอากาศไม่สามารถทำให้อนุภาคน้ำมันที่สะสมอยู่บริเวณด้านบนชั้นกรองกระจายออกได้ ทำให้ไม่สามารถดำเนินการกรองได้อีกต่อไป ถึงกรองทรายแบบเติมอากาศจึงจุดตันที่เวลาในการกรอง 550 นาที ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ความชุ่มน้ำที่กรองได้ ของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ
ขณะดำเนินการทดลองแบบต่อเนื่อง

จากผลการทดลอง ถังกรองทรายแบบการเติมอากาศแบบกะสำหรับการกรองอนุภาคความชุ่มและอนุภาคน้ำมัน พบว่า การเติมอากาศด้วยอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มระยะเวลาในการดำเนินระบบ และประหยัดพลังงานในการเติมอากาศได้อีกด้วย รวมถึงประสิทธิภาพของถังกรองยังคงดีเหมือนเดิม

การเปรียบเทียบกลไกการกรองของถังกรองในการกรองอนุภาคความชุ่มและอนุภาคน้ำมัน พบว่า การกรองอนุภาคความชุ่มสามารถดำเนินการกรองได้นานถึง 734 นาที โดยในแต่ละรอบของการเติมอากาศถังกรองสามารถดำเนินการกรองอนุภาคความชุ่มได้ยาวนานกว่าการกรองอนุภาคน้ำมันมาก เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจับตัวกันเป็นฟlocs ทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนบนผิวหน้าชั้นกรองและผสมตัวอยู่บริเวณผิวหน้าเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ระยะเวลาในการดำเนินระบบสั้นกว่า จากนั้นเมื่อทำการเติมอากาศเมื่อถังกรองอุดตัน ชั้นกรองจึงขยายตัวอนุภาคน้ำมันจึงสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรองได้มากขึ้น ทำให้การกรองอนุภาคน้ำมันต้องทำการเติมอากาศถึง 4 รอบ ภายในระยะเวลาการดำเนินระบบ 550 นาที ในขณะที่การกรองอนุภาคความชุ่มต้องทำการเติมอากาศ 3 รอบ ภายในระยะเวลาในการดำเนินระบบนานถึง 734 นาที โดยความชุ่มของน้ำที่กรองได้มีค่าเพิ่มมากขึ้นในแต่ละ

ละรอบของการเติมอากาศ เนื่องจากอนุภาคความขุ่นและน้ำมันเกิดการสะสมตัวภายในชั้นของสารกรองเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการกรอง และความขุ่นน้ำที่กรองได้สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นน้ำมันมีค่าสูงกว่าการกรองอนุภาคความขุ่น เนื่องจากอนุภาคความขุ่นเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นของสารกรองได้มากกว่าอนุภาคน้ำมัน ที่มีสะสมอยู่ที่ผิวหน้าของสารกรองเป็นส่วนใหญ่

4.6.3.2 ความดันลดภายในชั้นกรอง

รอบการทำงานที่ 1

สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองในช่วง 90 นาที พบว่า การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง มีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของกรอง โดยที่เวลาการกรอง 90 นาที มาตรฐานความดันน้ำจุดที่ 2-4 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองอีกต่อไป ส่งผลให้ถังกรองอุดตัน ดังรูปที่ 4.31 สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองในช่วง 180 นาที พบว่า การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง มีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของกรอง โดยที่เวลาการกรอง 180 นาที มาตรฐานความดันน้ำจุดที่ 2-13 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองอีกต่อไป ส่งผลให้ถังกรองอุดตัน ดังรูปที่ 4.32

เมื่อถังกรองทรายอุดตันที่เวลาการกรองประมาณ 90 และ 180 นาที สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันและอนุภาคความขุ่น จึงทำการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที และ 0.75 ลิตร/นาที ตามลำดับ เป็นเวลานาน 10 ทำให้ถังกรองกลับมาใช้งานได้อีกครั้งหนึ่ง และความดันลดที่ผิวหน้าชั้นกรองลดลง (รอบการทำงานที่ 2)

รอบการทำงานที่ 2

สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองในหลังจากเติมอากาศครั้งที่ 1 จนกระทั่งถึงเวลาการกรองที่ 290 นาที การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง มีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของกรองเช่นเดียวกับรอบการทำงานที่ 1 โดยการสูญเสียความดันลดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการกรอง และที่เวลา 290 นาที พบว่า ระดับน้ำในมาตรฐานความดันน้ำจุดที่ 2-6 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองอีกต่อไป ส่งผลให้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศอุดตันอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 4.31 และ

สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองในหลังจากเติมอากาศครั้งที่ 1 จนกระทั่งถึงเวลาการกรองที่ 570 นาที การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง มีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของกรองเช่นเดียวกับรอบการทำงานที่ 1 และที่เวลา 570 นาที พบว่าระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 3-12 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองอีกต่อไป ส่งผลให้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศอุดตันอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 4.32

เมื่อถึงกรองทรายอุดตันที่เวลาการกรองประมาณ 290 และ 570 นาที สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันและอนุภาคความขุ่น จึงทำการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที และ 0.75 ลิตร/นาที ตามลำดับ เป็นเวลานาน 10 ทำให้ถังกรองกลับมาใช้งานได้อีกครั้งหนึ่ง และความดันลดที่ผิวหน้าชั้นกรองลดลง (รอบการทำงานที่ 3)

รอบการทำงานที่ 3

สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองในหลังจากเติมอากาศครั้งที่ 2 จนกระทั่งถึงเวลาการกรองที่ 430 นาที การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง มีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของกรองเช่นเดียวกับรอบการทำงานที่ผ่านมา โดยการสูญเสียความดันลดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการกรอง และที่เวลา 430 นาที พบว่า ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 3-12 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองอีกต่อไป ส่งผลให้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศอุดตันอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 4.31 และสำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรองในหลังจากเติมอากาศครั้งที่ 2 จนกระทั่งถึงเวลาการกรองที่ 720 นาที การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรอง มีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของกรองเช่นเดียวกับรอบการทำงานที่ผ่านมา และที่เวลา 720 นาที พบว่าระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 4-8 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองอีกต่อไป ส่งผลให้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศอุดตันอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 4.32

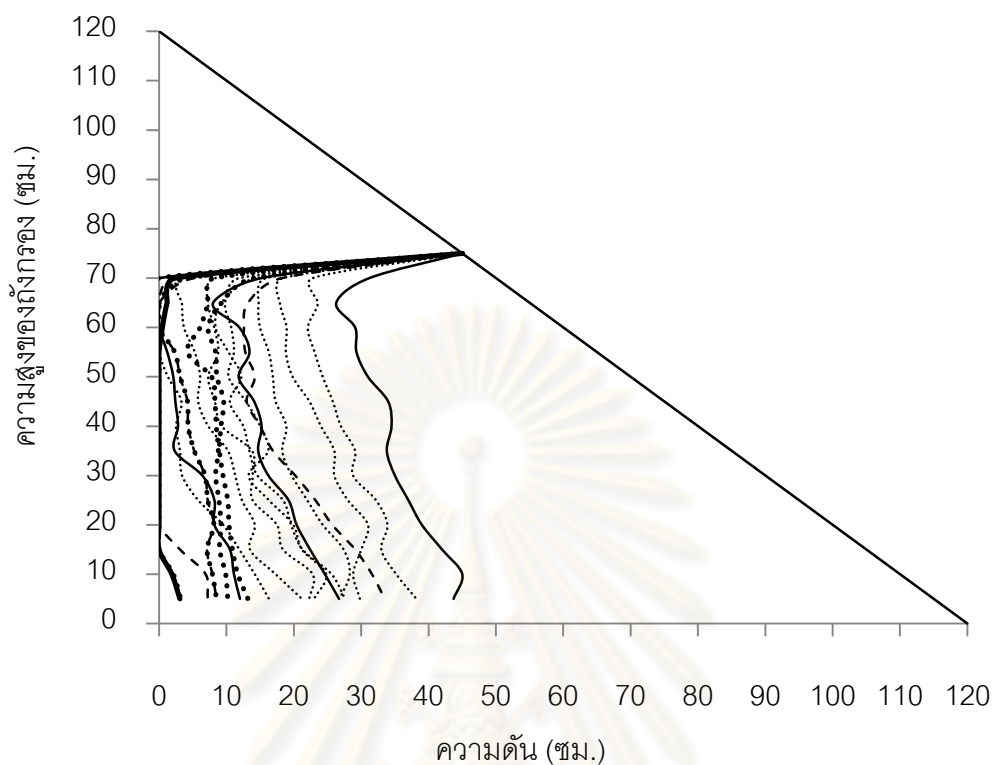
เมื่อถึงกรองทรายอุดตันที่เวลาการกรองประมาณ 430 และ 720 นาที สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันและอนุภาคความขุ่น จึงทำการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที และ 0.75 ลิตร/นาที ตามลำดับ เป็นเวลานาน 10 สำหรับถังกรองทรายในการกรองอนุภาคความขุ่น พบว่า ฟองอากาศไม่สามารถทำให้อนุภาคที่ผิวหน้าของชั้นกรองเหนือจุดเติมอากาศฟุ้งกระจายตัวออกมาได้ ทำให้ไม่สามารถดำเนินการกรองต่อไปได้ ถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะจึงมีระยะเวลาในการทำงานรวม 734 นาที ในขณะที่การกรองอนุภาคน้ำมัน ถังกรองกลับมาใช้งานได้อีกครั้งหนึ่ง และความดันลดที่ผิวหน้าชั้นกรองลดลง (รอบการทำงานที่ 4)

รอบการทำงานที่ 4

สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน การเปลี่ยนแปลงความดันลดภายในชั้นกรอง ในหลังจากเติมอากาศครั้งที่ 3 จนกระทั่งถึงเวลาการกรองที่ 540 นาที การสูญเสียความดันลด ภายในชั้นกรอง มีค่าแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของกรองเช่นเดียวกับรอบการทำงานที่ ผ่านมา โดยการสูญเสียความดันลดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการกรอง และที่เวลา 540 นาที พบว่า ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำจุดที่ 5-13 อ่านค่าระดับน้ำได้เท่ากับศูนย์ จึงมีแรงดันน้ำไม่เพียงพอที่จะทำการกรองอีกต่อไป ส่งผลให้ถังกรองทรายแบบเติมอากาศอุดตันอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 4.31

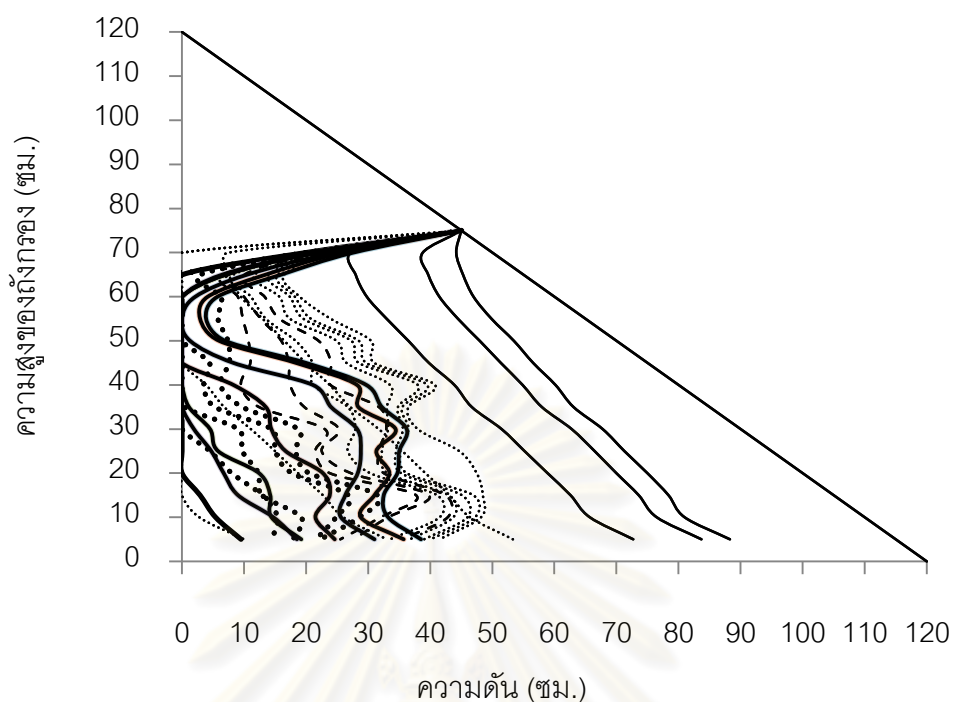
เมื่อถังกรองทรายอุดตันที่เวลาการกรองประมาณ 540 นาที จึงทำการเติม อากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที และ 0.75 ลิตร/นาที ตามลำดับ เป็นเวลานาน 10 นาที พบว่าฟองอากาศไม่สามารถทำให้อนุภาคน้ำมันที่ผิวหน้าของชั้นกรองเหนือจุดเติมอากาศฟุ้ง กระจายตัวออกมาได้ ทำให้ไม่สามารถดำเนินการกรองต่อไปได้ ถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบ กะจึงมีระยะเวลาในการทำงานรวม 550 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รอบการทำงานที่ 1	รอบการทำงานที่ 2	รอบการทำงานที่ 3	รอบการทำงานที่ 4
— 30 นาที	..... 150 นาที	----- 360 นาที	..... 480 นาที
— 60 นาที	..... 180 นาที	----- 400 นาที	..... 510 นาที
— 90 นาที	..... 210 นาที	----- 430 นาที	..... 540 นาที
	..... 240 นาที		
	..... 270 นาที		
	..... 290 นาที		

รูปที่ 4.31 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถึงกรองทรายแบบเต็มอากาศแบบกะ
ขณะทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ในการกรองอนุภาคน้ำมัน



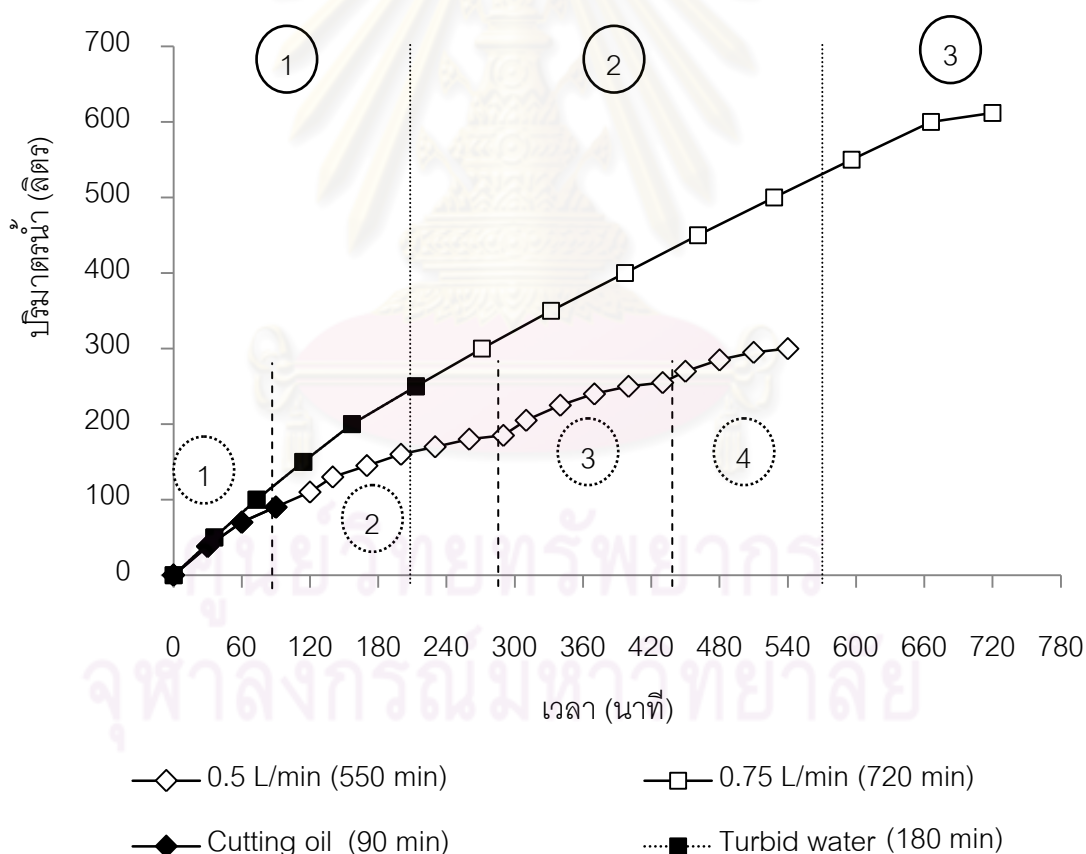
รอบการทำงานที่ 1	รอบการทำงานที่ 2	รอบการทำงานที่ 3
— 30 นาที	-----210 นาที----- 240 นาที	— 600 นาที — 630 นาที
— 60 นาที	-----270 นาที----- 300 นาที	— 660 นาที — 690 นาที
— 90 นาที	-----330 นาที----- 360 นาที	— 720 นาที — 734 นาที
— 120 นาที	-----390 นาที----- 420 นาที	
— 150 นาที	-----450 นาที-----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

รูปที่ 4.32 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะขณะทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ในการกรองอนุภาคความขุ่น

4.6.3.3 ปริมาตรและอัตราเร็วในการกรอง

ถังกรองทรายแบบเติมอากาศสำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น ดังรูปที่ 4.33 สามารถกรองได้น้ำปริมาตรรวม เท่ากับ 587 ลิตร โดยในรอบการทำงานที่ 1 ที่เวลาการกรอง 0-200 นาที รอบการทำงานที่ 2 ที่เวลาการกรอง 200-590 นาที และรอบการทำงานที่ 3 ที่เวลาการ

กรอง 590-734 นาที สามารถกรองน้ำได้ปริมาณ เท่ากับ 265, 280 และ 67 ลิตร อัตราเร็วในการกรองเฉลี่ย 4.5, 2.44 และ 1.75 เมตร/ชั่วโมง สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน สามารถกรองได้น้ำปริมาณรวม เท่ากับ 300 ลิตร โดยในรอบการทำงานที่ 1 ที่เวลาการกรอง 0-90 นาที รอบการทำงานที่ 2 ที่เวลาการกรอง 90-290 นาที รอบการทำงานที่ 3 ที่เวลาการกรอง 290-430 นาที และรอบการทำงานที่ 4 ที่เวลาการกรอง 430-540 นาที สามารถกรองน้ำได้ปริมาณ เท่ากับ 90, 120, 75 และ 50 ลิตร อัตราเร็วในการกรองเฉลี่ย 3.40, 2.04, 1.82 และ 1.54 ลิตร/นาที ดังรูปที่ 4.30 โดยที่อัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ถังกรองเริ่มอุดตัน โดยอัตราเร็วในการกรองอนุภาคน้ำมันมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการกรองอนุภาคความขุ่น เนื่องจากอนุภาคความขุ่นสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรองได้มากกว่าอนุภาคน้ำมัน ซึ่งมักสะสมที่ผิวหน้าของชั้นสารกรองเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในส่วนของการประสิทธิภาพการบำบัดและความดันลด ที่กล่าวถึงข้างต้น



รูปที่ 4.33 อัตราเร็วในการกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ
ขณะทำการทดลองแบบต่อเนื่อง

โดยสรุปจากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่า การเติมอากาศแบบกะสามารถช่วยให้ระยะเวลาในการทำงานของถังกรองเพิ่มมากขึ้น และยังเป็นการประหยัดพลังงานในการเติมอากาศลงได้อีกด้วย โดยในการศึกษาประสิทธิภาพของถังกรอง พบว่าประสิทธิภาพลดลงในขณะทำการเติมอากาศจนกระทั่งเวลาการกรองผ่านไปประมาณ 10-20 นาทีเท่านั้น โดยถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะมีระยะเวลาในการทำงานที่ยาวนานมาก จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการล้างย้อนถังกรองลงได้ ในส่วนของน้ำที่มีประสิทธิภาพลดลง อาจมีการทำระบบเวียนน้ำที่กรองได้ในช่วงเวลาดังกล่าว (ประมาณ 10-20 นาที) กลับไปยังถังเตรียมน้ำก่อนเข้าสู่การกรองอีกครั้งหนึ่ง จากการศึกษาความดันลดภายในชั้นกรอง พบว่า การเติมอากาศแบบกะสามารถช่วยให้สารกรองถูกใช้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะการกรองอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากอนุภาคน้ำมันสะสมที่ผิวหน้าของชั้นสารกรองเป็นส่วนใหญ่ที่มีความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร ทำให้อนุภาคน้ำมันไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกรองได้ ความดันลดที่ผิวหน้าชั้นกรองเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ถังกรองอุดตันเร็ว ภายหลังจากทำการเติมอากาศแบบกะ พบว่าถังกรองสามารถกลับมาทำงานได้อีกครั้ง เนื่องจากฟองอากาศทำให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว อนุภาคน้ำมันสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรองและสะสมอยู่ภายในชั้นกรองได้มากขึ้น โดยที่รอบการทำงานที่ 4 อนุภาคความขุ่นสามารถเคลื่อนที่เข้าไปสะสมได้ที่ระดับความลึกประมาณ 50-65 เซนติเมตรจากผิวสารกรอง ทำให้สารกรองถูกใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากขึ้น และจากการศึกษาอัตราเร็วในการกรอง พบว่า อัตราเร็วในการกรองมีค่าลดลงมีค่าลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง เนื่องจากอนุภาคต่างๆ ที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง น้ำจึงไหลผ่านชั้นกรองได้ช้าลง แต่อย่างไรก็ตามจุดเด่นของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ คือ มีระยะเวลาการทำงานที่ยาวนาน ทำให้ลดความถี่ในการล้างย้อนถังกรองและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานลงได้

ดังนั้น แนวทางดำเนินการกรองแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะลดพลังงานและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการเติมอากาศ เมื่อเลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมสามารถดำเนินการกรองได้ยาวนานขึ้น และให้ประสิทธิภาพในการกรองที่ดี โดยในการกรองอนุภาคน้ำมัน เลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่ 0.5 ลิตร/นาที สามารถดำเนินการกรองได้นาน 540 นาที ซึ่งยาวนานกว่าการกรองแบบไม่มีการเติมอากาศถึง 6 เท่า ในการกรองอนุภาคความขุ่นเลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่ 0.75 ลิตร/นาที สามารถดำเนินการกรองได้ยาวนานถึง 720 นาที ซึ่งพบว่ายาวนานกว่าการกรองแบบไม่มีการเติมอากาศถึง 4 เท่า ดังตารางที่ 4.5 ดังนั้นการกรองแบบเติมอากาศแบบกะจึงเป็นทางเลือกใหม่เพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการกรองแบบธรรมดาได้

ตารางที่ 4.5 สรุปสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคความขุ่นและการแยกอิมัลชันน้ำมันออกจากน้ำด้วยกระบวนการกรองตรง (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

4.7 ศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรง

การประเมินประสิทธิภาพในการทำงานของถังกรองทราย แบบการกรองตรง (Direct filtration) โดยประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพการกรอง (Filtration efficiency equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure drop equation) ในการอธิบายและทำนายประสิทธิภาพในการกรองน้ำที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ อนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมัน ในรูปแบบการกรองต่างๆ

4.7.1 ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย

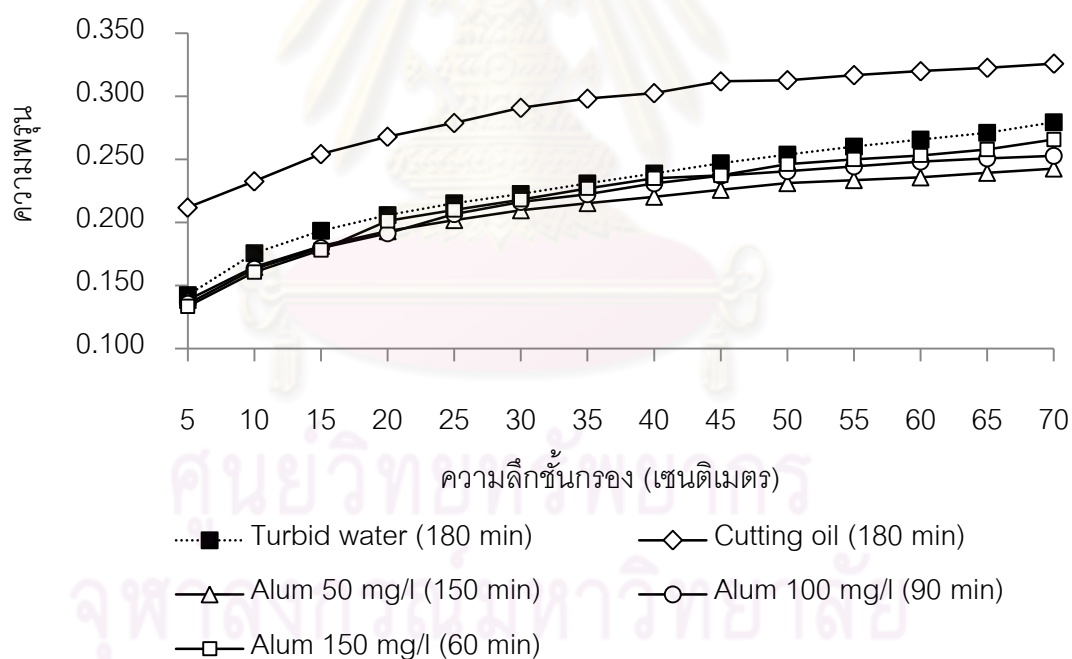
4.7.1.1 การศึกษาความพรุนของชั้นกรองในกรณีต่างๆ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยเพิ่มขึ้น เมื่อความพรุนของสารกรองมีค่าลดลงตามเวลาในการกรอง เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของอนุภาคความขุ่นหรืออนุภาคน้ำมันภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้น ความดันลด (ΔP) เพิ่มขึ้นและความเร็วในการกรอง (V_g) มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความดันลดใช้สมการของ Kozeny-Carman equation

$$\frac{\Delta P}{L} = K_0 \frac{(1-\varepsilon)^{4/3}}{\varepsilon^3} \bar{V}_s \quad (4.2)$$

$$K_0 = \frac{150\nu(1-\varepsilon)^{2/3}}{\phi_s D_{po}^2} \quad (4.3)$$

เมื่อพิจารณาสมการคำนวณหาการสูญเสียความดันของชั้นกรอง กล่าวได้ว่า ตัวแปรค่าคงที่ในสภาวะเริ่มต้นของการทดลองถูกจัดให้เป็นตัวแปรในกลุ่มเดียวกัน คือ K_0 ได้แก่ ทรัยกรองขนาดสัมฤทธิ์ ($D_p = 0.55$ มิลลิเมตร) ความพรุน (ε) ของทรัยกรองเริ่มต้นประมาณ 0.45 อุณหภูมิของน้ำขณะทำการทดลองมีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดเชิงจลน์ของน้ำ (ν) เท่ากับ 1.003×10^{-6} ตารางเมตร/วินาที ค่าความหนืดเชิงจลน์ของน้ำ (ν) เท่ากับ 1.006×10^{-6} ตารางเมตร/วินาที และดรรชนีความกลม (Φ) ของทรัยกรองมีค่าเท่ากับ 0.85 โดยที่ค่าความดันลด (ΔP) ความเร็วในการกรอง (V_s) และความพรุน (ε) และจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการกรอง ทั้งนี้ ค่าความดันลดและความเร็วในการกรองสามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าความพรุนที่สภาวะการกรองต่างๆ ได้

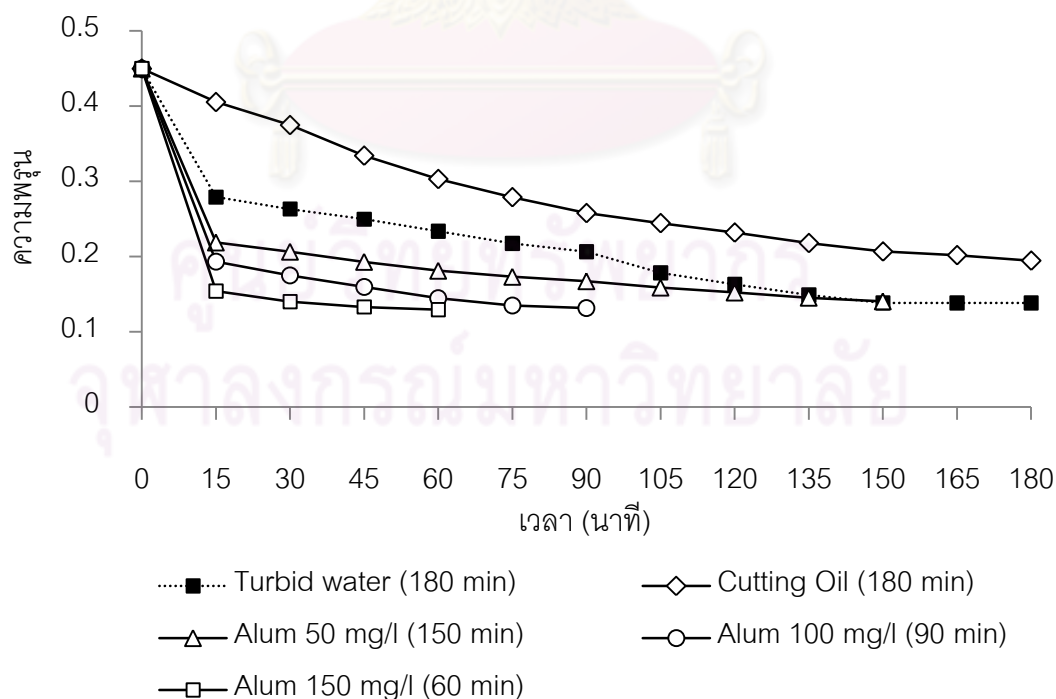


รูปที่ 4.34 ความพรุนของสารกรองตามความลึกของถังกรองทรัย

จากผลการคำนวณความพรุนของชั้นสารกรองเมื่อถังกรองเริ่มอุดตันตามความสูงของถังกรอง ดังรูปที่ 4.34 พบว่า ความพรุนมีค่าน้อยที่สุดที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรอง ในทุกๆ รูปแบบของการกรอง และความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกของชั้นสารกรอง โดยค่าความพรุนในการกรองอนุภาคน้ำมันมีค่าน้อยกว่าอนุภาคความขุ่น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ฟลักซ์ของ

อนุภาคของน้ำมันเกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าของสารกรองเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ค่าความพรุนที่ผิวหน้า (ความลึกประมาณ 5 เซนติเมตร) มีค่าน้อยที่สุด และความพรุนค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความลึกของชั้นกรอง สำหรับความเข้มข้นของสารส้ม พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารส้มสูงๆ ส่งผลให้ความพรุนที่ผิวหน้ามีค่ามากขึ้น เนื่องจากเกิดฟลอคที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมาก ทำให้เกิดการสะสมที่ผิวหน้าชั้นกรอง และไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกรองได้มากนัก ทำให้ความพรุนความพรุนภายในชั้นกรองมีค่าสูงขึ้น และส่งผลให้อายุการทำงานของถังกรองสั้นลง ไม่สามารถใช้สารกรองได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

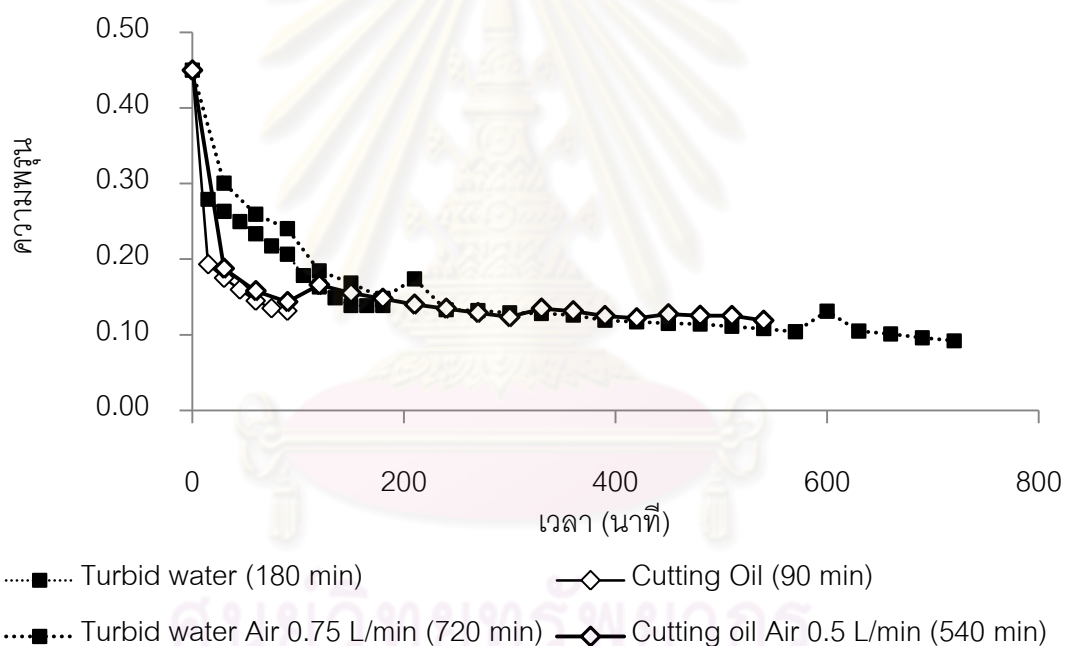
ในการนี้ เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากการสะสมตัวที่เกิดขึ้นในช่วงความหนาชั้นกรองดังกล่าว จึงได้ทำการคำนวณค่าความพรุนที่ระยะ 5 เซนติเมตรจากผิวชั้นกรองที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการกรอง (t) ดังรูปที่ 4.35 โดยพบว่าความพรุนของชั้นกรองมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการกรอง และที่ความเข้มข้นของสารส้ม 150 มิลลิกรัม/ลิตร ฟลอคของสารส้มจะสะสมตัวที่ผิวหน้าชั้นกรองเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการกรองอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าความพรุนของผิวหน้าชั้นกรองต่ำที่สุด สอดคล้องกับผลการทดลองที่กล่าวถึงข้างต้น ในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.4 สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ $\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$ เมื่อความพรุน (Porosity, ε) มีค่าลดลงตามระยะเวลาการเดินระบบนั้น ประสิทธิภาพของถังกรอง ($\ln(C/C_0)$) มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.35 ความพรุนที่ผิวหน้าชั้นกรอง ตามระยะเวลาในการกรอง

ดังนั้น กระบวนการกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้สูงขึ้นได้ แต่การเติมสารส้ม ส่งผลให้อายุของถังกรองสั้นลง เนื่องจากฟlocsของสารส้มเกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าของชั้นกรอง ทำให้ความพรุนที่ผิวหน้าชั้นกรองลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะเวลาในการกรอง จึงได้มีการปรับปรุงรูปแบบการกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ (Batch) ภายในถังกรองอุดตัน เพื่อเพิ่มอายุการทำงานของถังกรอง และลดความถี่ในการล้างย้อนถังกรองได้อีกด้วย

ในส่วนนี้ เพื่อให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ จึงได้ทำการศึกษาความพรุนที่ผิวหน้าชั้นกรองที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาในการกรอง ดังรูปที่ 4.36 สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน ซึ่งสามารถแบ่งระยะเวลาในการกรองออกได้เป็น 3 และ 4 รอบ ตามลำดับ โดยพบว่า



รูปที่ 4.36 ความพรุนที่ผิวหน้าชั้นกรอง ตามระยะเวลาในการกรอง สำหรับการกรองแบบต่อเนื่อง

รอบการทำงานที่ 1

ความพรุนที่ผิวหน้าชั้นกรอง สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน เมื่อเริ่มต้นการกรองมีค่าประมาณ 0.45 จากนั้น พบว่าความพรุนมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะเวลาในการทำงานของถังกรอง จนกระทั่งถังกรองอุดตันที่เวลาประมาณ 180 และ 90 นาที ตามลำดับ จึงหยุดเดินระบบ จากนั้นทำการเติมอากาศให้กับถังกรองทรายแบบกะ (Batch) เป็นเวลานาน 10 นาที

รอบการทำงานที่ 2

หลังจากทำการเติมอากาศทำให้ถังกรองสามารถกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง (เข้าสู่การทำงานรอบที่ 2) สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน โดยความพรุนของชั้นกรองหลังการเติมอากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นไม่มากนัก ประมาณ 0.174 และ 0.168 ตามลำดับ หลังจากนั้นความพรุนมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการกรองจนกระทั่งถังกรองทรายอุดตันอีกครั้งหนึ่งที่เวลา 570 และ 300 นาที ตามลำดับ จึงทำการเติมอากาศให้กับถังกรองอีกครั้งหนึ่ง

รอบการทำงานที่ 3

หลังจากทำการเติมอากาศทำให้ถังกรองสามารถกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง (เข้าสู่การทำงานรอบที่ 3) สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน โดยความพรุนของชั้นกรองหลังการเติมอากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นไม่มากนัก ประมาณ 0.131 และ 0.136 ตามลำดับ หลังจากนั้นความพรุนมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการกรองจนกระทั่งถังกรองทรายอุดตันอีกครั้งหนึ่งที่เวลา 720 และ 450 นาที ตามลำดับ จึงทำการเติมอากาศให้กับถังกรองอีกครั้งหนึ่ง แต่การเติมอากาศในครั้งนี้อาจไม่สามารถทำให้อนุภาคความขุ่นที่สะสมที่ผิวหน้าชั้นกรองกระจายตัวออกเนื่องจากอนุภาคความขุ่นสะสมภายในชั้นกรองเต็มแล้ว อนุภาคความขุ่นไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปสะสมได้อีก ส่งผลให้ความดันลดภายในชั้นกรองสูงมากขึ้น ทำให้ต้องหยุดเดินระบบ แต่สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันพบว่า ยังสามารถกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง

รอบการทำงานที่ 4

หลังจากทำการเติมอากาศทำให้ถังกรองสามารถกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง (เข้าสู่การทำงานรอบที่ 4) สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน โดยความพรุนของชั้นกรองหลังการเติมอากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นไม่มากนัก ประมาณ 0.127 หลังจากนั้นความพรุนมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการกรองจนกระทั่งถังกรองทรายอุดตันอีกครั้งหนึ่งที่เวลา 540 นาที ตามลำดับ จึงทำการเติมอากาศให้กับถังกรองอีกครั้งหนึ่ง แต่การพบว่าการเติมอากาศไม่สามารถทำให้ถังกรองกลับมาใช้งานได้อีกเนื่องจากอนุภาคน้ำมันสะสมภายในชั้นกรองจนเต็ม ส่งผลให้ความดันลดมีค่าสูง จึงหยุดเดินระบบ

จากข้อมูลความพรุนที่ผิวหน้าชั้นกรอง สามารถสรุปได้ว่า

- การเติมอากาศในช่วงที่ถังกรองเกิดการอุดตันทำให้ถังกรองกลับมาทำงานได้อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากการเติมอากาศทำให้ชั้นสารกรองบริเวณด้านบน เนื้อจุดเติมอากาศเกิดการขยายตัว อนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันจำนวนมากที่สะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองจึงสามารถกระจายออกและหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นสารกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้สามารถเดินระบบถังกรองและอัตราการกรองมีค่าเพิ่มขึ้น

- หลังการเติมอากาศในรอบการทำงานในทุกๆ รอบ ความพรุนของสารกรองจะมีค่าลดลงต่อเนื่องอย่างช้าๆ (ลดลงตามเวลาการกรอง) โดยมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น เนื่องจากอนุภาคความขุ่นสามารถสะสมอยู่ในชั้นกรองได้มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของชั้นสารกรองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการไ้ความหนาของชั้นกรองที่เพิ่มขึ้น
- จำนวนรอบการทำงาน สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันมากกว่าอนุภาคความขุ่น แต่มีระยะเวลาในการทำงานระบบรวมน้อยกว่า เนื่องจาก อนุภาคความขุ่นสามารถเคลื่อนที่เข้าสะสมตัวภายในชั้นกรองภายหลังการเติมอากาศมากกว่าอนุภาคน้ำมัน รวมถึงการเติมสารส้มทำให้เกิดฟlocsขนาดใหญ่ มีน้ำหนักมากจะติดค้างที่ผิวของสารกรองเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ต้องทำการเติมอากาศบ่อยกว่า

4.7.1.2 การศึกษาอัตราการสะสมของอนุภาคภายในชั้นกรอง

จากการศึกษาความพรุนของชั้นกรอง พบว่าความพรุนมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการกรอง เนื่องจากการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง และเพื่ออธิบายการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ จึงได้ทำการศึกษาอัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 4.5 โดยประสิทธิภาพการกรองและความเร็วในการกรองสามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง ซึ่งทำให้สามารถคำนวณอัตราการสะสมของสิ่งสกปรกต่างๆ ที่สภาวะการกรองต่างๆ ได้

$$\sigma \cdot L \cdot \rho_s = \int_0^t C_o \bar{V} dt - \int_0^t C \bar{V} dt \quad (4.5)$$

ตารางที่ 4.6 อัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ของถังกรองทรายแบบกรองตรง

การกรอง	ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)	ระยะเวลา ในการกรอง (นาที)	อัตราการสะสมของอนุภาค ต่างๆ ภายในชั้นกรอง (σ) (m^3 soild / m^3 of bed)
อนุภาคความขุ่น	-	180	0.000085
อนุภาคน้ำมัน	-	180	0.001618
	50	150	0.002179
	100	90	0.001768
	150	60	0.001326

จากผลการคำนวณดังตารางที่ 4.6 สำหรับการกรองตรงที่ไม่มีการเติมสารเคมี พบว่า มีอัตราการสะสมของอนุภาคความขุ่นต่ำกว่าอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากอนุภาคความขุ่นเริ่มต้นก่อนเข้าสู่ถังกรองเท่ากับ 50 เอ็นทียู ในขณะที่อนุภาคน้ำมันมีค่าความขุ่นเริ่มต้นของการกรองเท่ากับ 1,365 เอ็นทียู และอนุภาคความขุ่นเกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าชั้นกรอง ในขณะที่อนุภาคน้ำมันที่สามารถเคลื่อนที่เข้ามาในชั้นกรองได้มากกว่า ส่งผลให้อัตราการสะสมตัวของอนุภาคความขุ่นมีค่าน้อยกว่า และสำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันที่มีการเติมสารเคมี พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 50 มิลลิกรัม/ลิตร ชั้นสารกรองจะเกิดการสะสมตัวของอนุภาคน้ำมันเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากฟล็อกของสารส้มมีขนาดเล็กกว่าสามารถเคลื่อนที่เข้าไปและสะสมภายในชั้นกรองได้มากกว่า และมีระยะเวลาในการเดินระบบที่นานกว่า ขณะที่ความเข้มข้นของสารส้มที่ 100 และ 150 มิลลิกรัม/ลิตร อัตราการสะสมของอนุภาคน้อยกว่า เนื่องจากฟล็อกของอนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่กว่าทำให้ตกตะกอนและติดค้างที่ผิวหน้าชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ และมีอนุภาคบางส่วนเท่านั้นที่เข้าไปสะสมภายในชั้นกรอง ส่งผลให้อัตราการสะสมของสิ่งสกปรกมีค่าน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการแยกอนุภาคน้ำมัน ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม

สำหรับการคำนวณอัตราการสะสมตัวของอนุภาคสิ่งสกปรกต่างๆ ของถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศแบบกะ (Batch) โดยเติมอากาศภายหลังถังกรองทรายชุดต้น พบว่า สามารถเพิ่มอายุการทำงานของถังกรองได้ และจากการศึกษาความดันลดภายในชั้นกรองพบว่า สามารถใช้สารกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ได้ผลการคำนวณค่าอัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 อัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ของถังกรองทรายแบบกรองตรงร่วมกับการเติมอากาศแบบกะ (Batch)

การกรอง	ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)	ระยะเวลา ในการกรอง (นาที)	อัตราการสะสมของอนุภาค ต่างๆ 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 4.7 พบว่า อัตราการสะสมของอนุภาคความชื้น และอนุภาคน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับกระบวนการกรองตรงแบบธรรมดาที่ไม่มีการเติมอากาศ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการสะสมของอนุภาคความชื้นและอนุภาคน้ำมันขึ้นจริง และในการกรองอนุภาคน้ำมัน พบว่าเกิดการสะสมของอนุภาคน้ำมันภายในชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าความพรุนภายในชั้นกรอง ที่ลดลงตามระยะเวลาในการกรอง โดยความพรุนของชั้นกรองมีค่าสัมพันธ์กับสมการดังนี้

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{\sigma}{(1 - \varepsilon_d)} \quad (4.6)$$

โดยที่ความพรุน (ε) มีค่าสัมพันธ์กับความพรุนของชั้นการสะสมตัวของสิ่งสกปรกต่างๆ (ε_d) และอัตราการสะสมตัวของอนุภาคภายในชั้นกรอง (σ) โดยการสะสมของอนุภาคน้ำมันภายในชั้นกรองเกิดขึ้นไม่มากนักประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการดำเนินการกรองที่เพิ่มขึ้นถึง 6 เท่า ในขณะที่การกรองอนุภาคความชื้นพบว่า เกิดการสะสมของอนุภาคความชื้นภายในชั้นกรองมากขึ้นประมาณ 2.5 เท่า โดยมีระยะเวลาในการดำเนินการกรองที่เพิ่มขึ้น 4 เท่า เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่สะสมตัวนั้นหลุดออกจากชั้นของสารกรองขณะทำการเติมอากาศทำให้ค่าความชื้นขณะนั้นสูงขึ้นประมาณ 15-20 นาที และทุกๆ รอบของการเติมอากาศดังรูปที่ 4.30 ดังนั้นอนุภาคน้ำมันที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองจะหลุดออกมา ทำให้การสะสมของอนุภาคน้ำมันเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับอนุภาคความชื้น

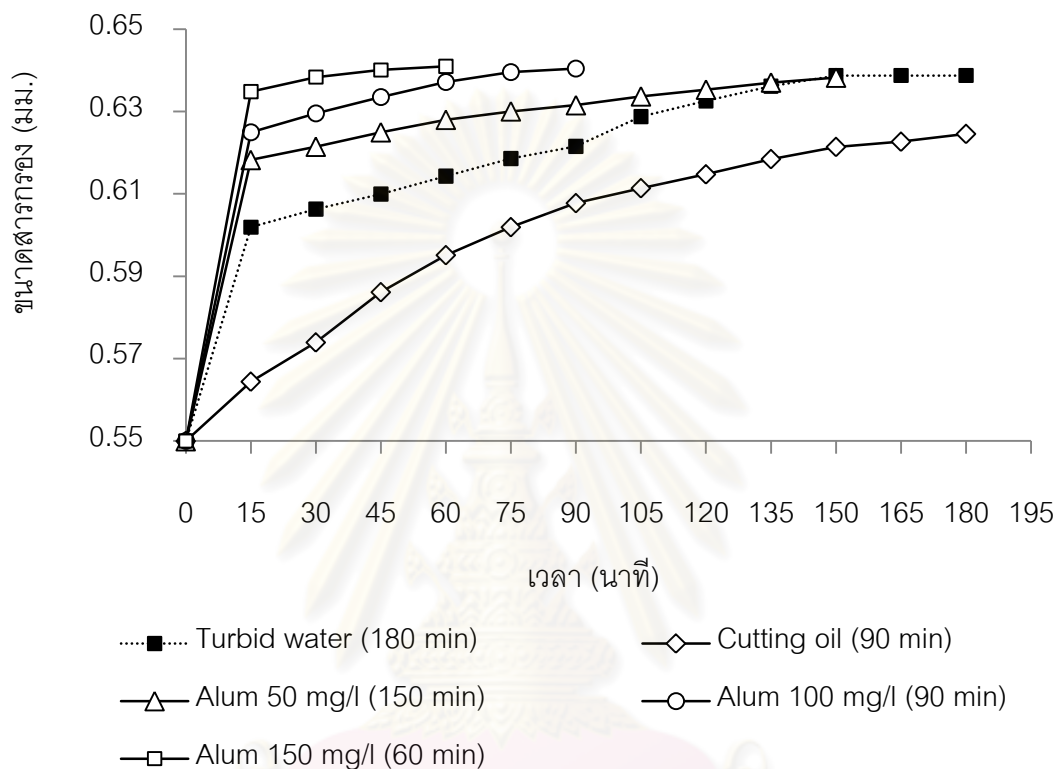
4.7.1.3 การศึกษาขนาดของสารกรอง

จากการศึกษาความพรุนของสารกรองมีค่าลดลงตามเวลาในการกรอง เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของอนุภาคความชื้นหรืออนุภาคน้ำมันภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ขนาดของสารกรองเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการกรอง ซึ่งสามารถคำนวณขนาดของสารกรองที่เกิดจากการอุดตันได้ดังสมการดังนี้

$$D_p = D_{po} \left(\frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon_0} \right)^{1/3} \quad (4.7)$$

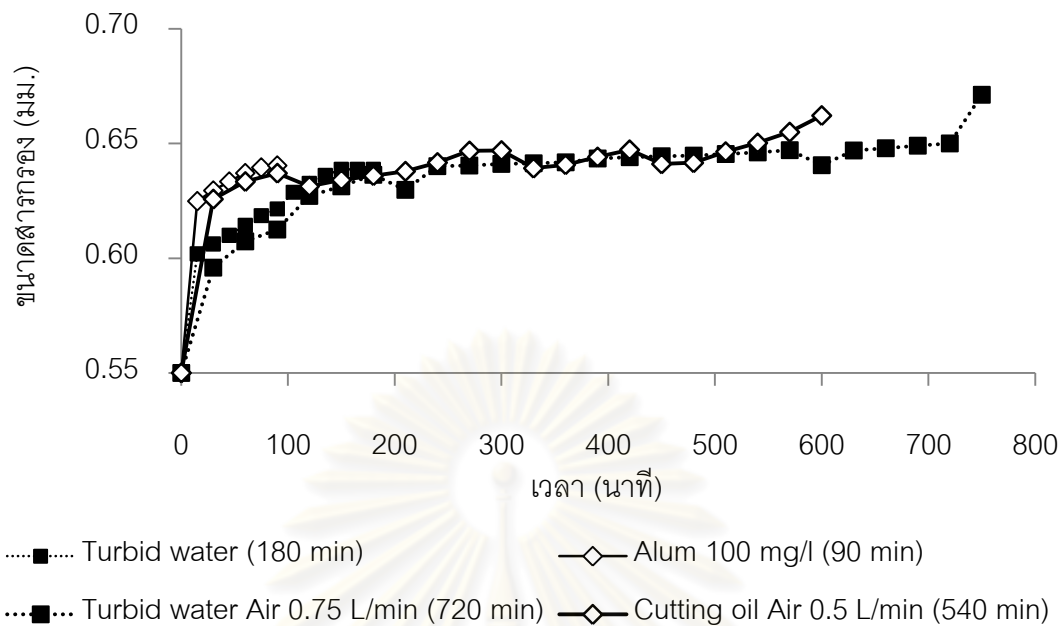
จากผลการคำนวณ ดังรูปที่ 4.37 ขนาดของสารกรองในการกรองทุกรูปแบบ พบว่า ขนาดของสารกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ตามระยะเวลาในการกรอง และสำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันที่มีการเติมสารเคมี พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงๆ เกิดฟล็อกของสารส้มในปริมาณมาก ส่งผลให้ขนาดของสารกรองที่เกิดการจากสะสมตัวของฟล็อกของสารส้มมีค่าเพิ่ม

มากขึ้น ทำให้ความพรุนของสารกรองมีค่าลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น และขนาดของสารกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ยังส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การชน (Collision Efficiency, η) ระหว่างอนุภาคสารกรองและอนุภาคสารแขวนลอยให้เพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองเพิ่มขึ้นอีก



รูปที่ 4.37 ขนาดของสารกรองที่เกิดการจากสะสมของอนุภาคต่างๆ ตามระยะเวลาในการกรอง

จากผลการคำนวณ ดังรูปที่ 4.38 ขนาดของสารกรอง สำหรับการกรองตรง ร่วมกับการเติมอากาศแบบกะ พบว่า ขนาดของสารกรองมีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการกรอง ซึ่ง สอดคล้องกับค่าความพรุนภายในชั้นกรอง และประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคความขุ่น และ อนุภาคน้ำมัน ขนาดของสารกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น และลดลงขณะที่มีการเติมอากาศภายในชั้น กรอง เนื่องจากฟองอากาศทำให้อนุภาคต่างๆ ที่สะสมและเคลือบผิวชั้นกรองเกิดการขัดสีและหลุด ออกมา ทำให้ขนาดของสารกรองในช่วงเวลาดังกล่าวลดลง ทำให้ความพรุนของชั้นกรองเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงลดลงในช่วงของการเติมอากาศ หลังจากนั้นขนาดของสารกรองจะ เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเกิดการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ส่งผลให้ความพรุนภายในชั้น กรองลดลง ประสิทธิภาพการบำบัดกลับคืนสู่สภาวะปกติอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.38 ขนาดของสารกรองของถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศแบบกะตามระยะเวลาในการกรอง

4.7.1.4 การศึกษาความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient)

ความเร็วเกรเดียนท์ หมายถึงความปั่นป่วนของน้ำ โดยในการศึกษาความเร็วเกรเดียนท์คือ ความปั่นป่วนของน้ำภายในชั้นกรองของถังกรองทราย สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน ซึ่งความเร็วเกรเดียนท์เปลี่ยนแปลงไปตามค่าอัตราเร็วในการกรอง และความพรุนภายในชั้นกรองที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการกรอง ส่งผลให้ความเร็วเกรเดียนท์เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมการความเร็วเกรเดียนท์ภายในชั้นกรองดังต่อไปนี้ (Chuang และ Li, 1997)

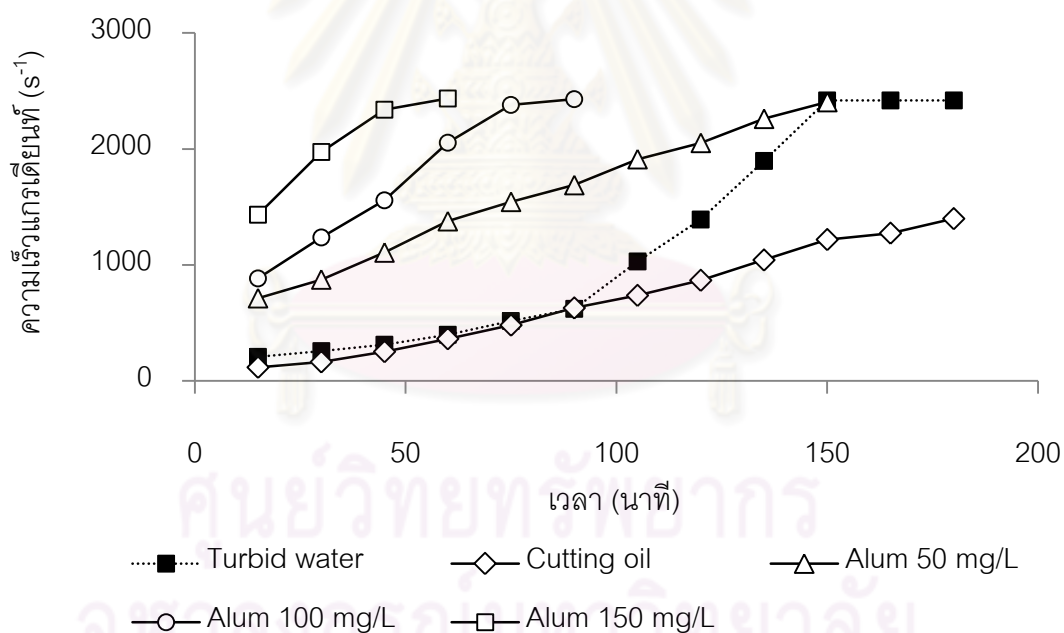
$$G = K_1 \frac{(1-\varepsilon)^{2/3}}{\varepsilon^2} V_s \quad (4.8)$$

$$K_1 = \frac{40}{3} \frac{(1-\varepsilon)^{1/3}}{\phi_s \cdot D_{po}} \quad (4.9)$$

เมื่อพิจารณาสมการความเร็วเกรเดียนท์ของถังกรอง ซึ่งตัวแปรคงที่ในสภาวะเริ่มต้นการทดลองถูกจัดอยู่ในกลุ่มตัวแปรเดียวกัน คือ K_1 ได้แก่ ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ ($D_p = 0.55$ มิลลิเมตร) ความพรุน (ε) ของทรายกรองเริ่มต้นประมาณ 0.45 คุณสมบัติของน้ำขณะทำการทดลองมีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียส ค่าความหนืดเชิงจลน์ของน้ำ (ν) เท่ากับ $1.003 \times$

10^{-6} ตารางเมตร/วินาที ค่าความหนืดเชิงจลน์ของน้ำ (ν) เท่ากับ 1.006×10^{-6} ตารางเมตร/วินาที และดรรชนีความกลม (Φ) ของทรายกรอมีค่าเท่ากับ 0.85 โดยที่ความเร็วเกรเดียนท์ (G) ความเร็วในการกรอ (V_G) และความพรุน (ϵ) และจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการกรอ ทั้งนี้ ความพรุนและความเร็วในการกรอสามารถวิเคราะห์ได้จากการทดลอง ซึ่งทำให้สามารถคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ที่สภาวะการกรอต่างๆ ได้

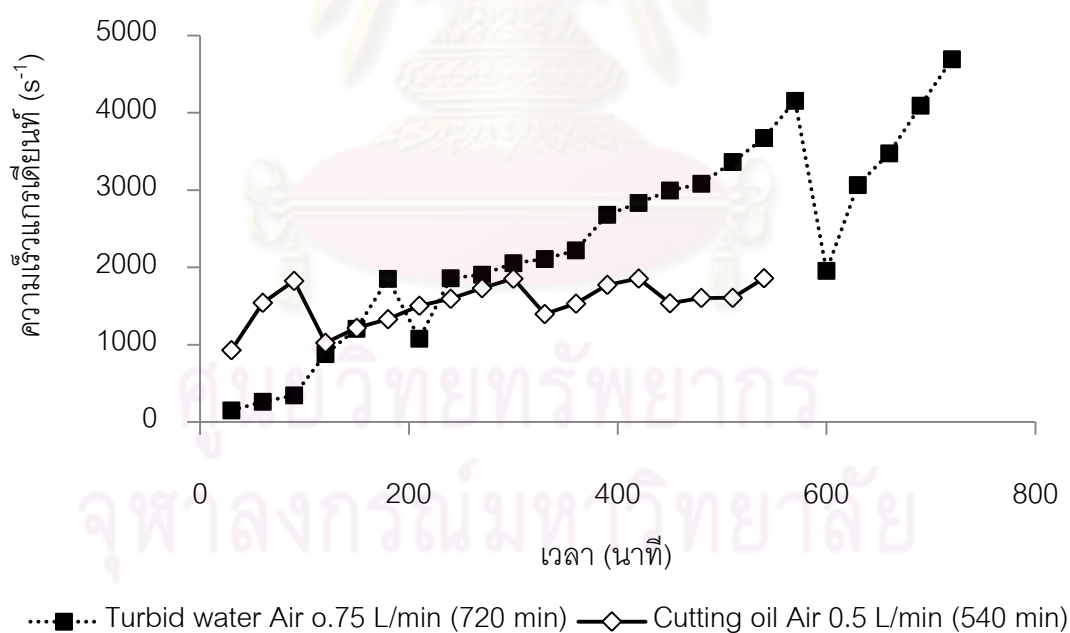
จากผลการศึกษา พบว่าในทุกรูปแบบการกรอ ความเร็วเกรเดียนท์ของถังกรอเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการกรอ โดยในการกรออนุภาคน้ำมันที่มีการเติมสารส้มพบว่าที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงๆ ความเร็วเกรเดียนท์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ชั้นกรอเกิดการปั่นป่วนมากขึ้น เนื่องจากฟลอคของอนุภาคน้ำมันเกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าของชั้นกรอจนทำให้ถังกรออุดตันเร็ว สำหรับการกรออนุภาคความขุ่น พบว่าความเร็วเกรเดียนท์ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการกรอ เนื่องจากอนุภาคความขุ่นค่อยๆ สะสมตัวภายในชั้นกรอเรื่อยๆ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความพรุนของชั้นกรอ ที่ค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาในการกรอ ดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 ความเร็วเกรเดียนท์ของถังกรอทราย ตามระยะเวลาในการกรอ

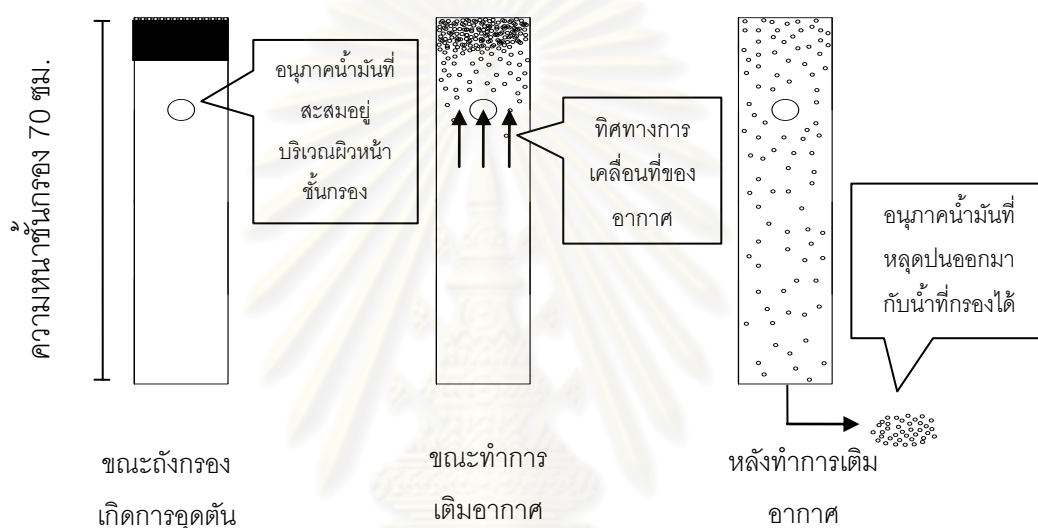
จากการศึกษาความเร็วเกรเดียนท์ภายในชั้นกรอของถังกรอทรายแบบการเติมอากาศแบบกะ หลังชั้นกรออุดตันเป็นเวลา 10 นาที ดังรูปที่ 4.40 พบว่าความเร็วเกรเดียนท์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการกรอ โดยในการกรออนุภาคความขุ่น พบว่าความเร็วเกรเดียนท์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้ชั้นกรอจึงเกิดการปั่นป่วนมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคความขุ่นสามารถสะสมภายในชั้นกรอเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการกรอ ซึ่งสอดคล้องกับค่า

ความพรุนของชั้นกรองที่ลดลงตามระยะเวลาในการกรอง สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันที่มีการเติมสารส้ม พบว่า ความเร็วเกรเดียนต์มีค่าสูงขึ้นในช่วงเริ่มแรก หลังจากนั้นก็มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ส่งผลให้ความปั่นป่วนภายในชั้นกรองเกิดขึ้นไม่มากนัก เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพมีขนาดใหญ่สะสมตัวที่ผิวหน้าของชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ในช่วงเริ่มต้นของการกรอง ความเร็วเกรเดียนต์มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงกรองอุดตันจึงเติมอากาศ หลังการเติมอากาศพบว่า ความเร็วเกรเดียนต์มีค่าลดลง เนื่องจากฟองอากาศทำให้ชั้นกรองขยายตัวอนุภาคน้ำมันที่สะสมที่ผิวหน้า จึงเคลื่อนที่เข้าไปภายในชั้นกรองได้ แต่อนุภาคน้ำมันส่วนใหญ่เหล่านี้ไม่สามารถสะสมตัวภายในชั้นกรองได้มากนัก เนื่องจากฟองอากาศส่งผลให้ฟลอคของสารส้มแตกตัวและเคลื่อนที่หลุดลอดผ่านชั้นกรองออกไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพของถังกรองในการบำบัดอนุภาคน้ำมัน ดังรูปที่ 4.30 ในขณะที่เติมอากาศความขุ่นของน้ำที่กรองได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ภายในการเติมอากาศเป็นเวลา 10 นาที พบว่า ความเร็วเกรเดียนต์ภายในชั้นกรองมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของอนุภาคความขุ่นขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แต่ยังคงเป็นการสะสมที่บริเวณผิวหน้าสารกรองเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความดันลดภายในชั้นกรองและค่าความพรุน ที่มักจะเพิ่มขึ้นและลดลงที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ ดังที่กล่าวข้างต้น

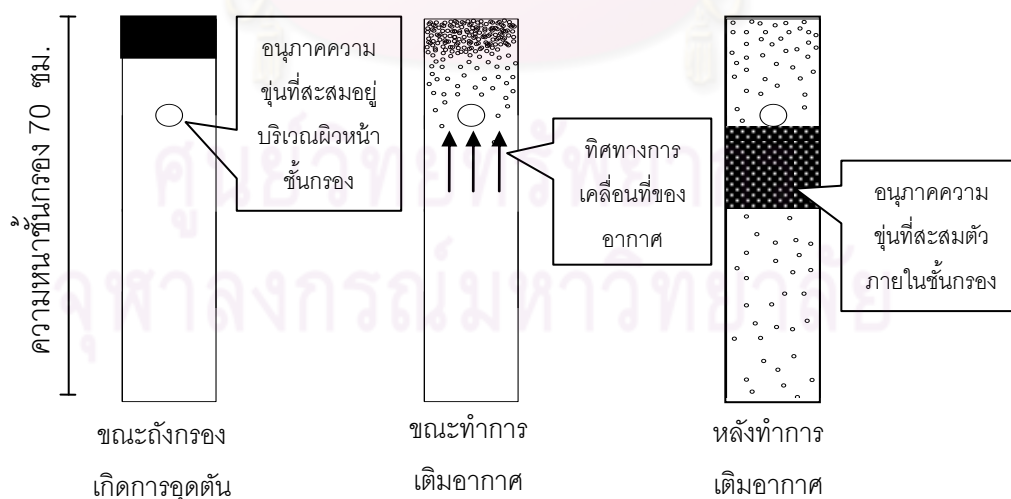


รูปที่ 4.40 ความเร็วเกรเดียนต์ของถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศแบบกะตามระยะเวลาในการกรอง

จากผลการทดลอง สามารถเปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค ความชุ่ม และอนุภาคน้ำมัน ที่เกิดขึ้นภายในชั้นกรองได้ ดังรูปที่ 4.41 ซึ่งพบว่า การเติมอากาศแบบกะ สามารถช่วยให้ชั้นสารกรองขยายตัว ส่งผลให้อนุภาคความชุ่มสามารถเคลื่อนที่เข้ามาภายในชั้นกรองได้เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการกรอง สำหรับอนุภาคน้ำมัน พบว่าการเติมอากาศทำให้อนุภาคน้ำมันหลุดออกจากชั้นของสารกรองออกไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับปัจจัยต่างๆ เช่น ความพรุนของชั้นกรอง ขนาดของสารกรอง และความปั่นป่วนภายในชั้นกรอง และจากปัจจัยดังกล่าว ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายโดยตรง



(ก) การสะสมของอนุภาคน้ำมันภายในชั้นกรอง



(ข) การสะสมของอนุภาคความชุ่มภายในชั้นกรอง

รูปที่ 4.41 ลักษณะการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ในการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง

4.7.2 กลไกการทำงานของถังกรองทราย

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ $\ln(C/C_0) = 1.5\alpha\eta(1-\varepsilon)L/d$ พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายขึ้นกับปัจจัยต่างๆ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่เกี่ยวกับถังกรอง เช่น ขนาดสารกรอง (d) ความหนาสารกรอง (L) และความพรุนของสารกรอง (ε) และปัจจัยที่สอง คือ อนุภาคแขวนลอยที่อยู่ในเฟสน้ำที่ต้องการกำจัด โดยการกรองเป็นการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำไปไว้บนสารกรอง หรือช่องว่างระหว่างสารกรอง ซึ่งสามารถอธิบายในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การชน (Collision Efficiency, η) และค่าสัมประสิทธิ์เกาะติด (Attachment Efficiency, α)

สำหรับกระบวนการกรองตรงในการแยกอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมัน โดยที่ไม่มีการเติมสารเคมีใดๆ เพื่อศึกษากลไกการกรองและประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการแยกอนุภาคดังกล่าวที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การชน (Collision Efficiency, η) เพื่อใช้อธิบายกลไกการกรองที่เกิดขึ้นของอนุภาคทั้งสองชนิด ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

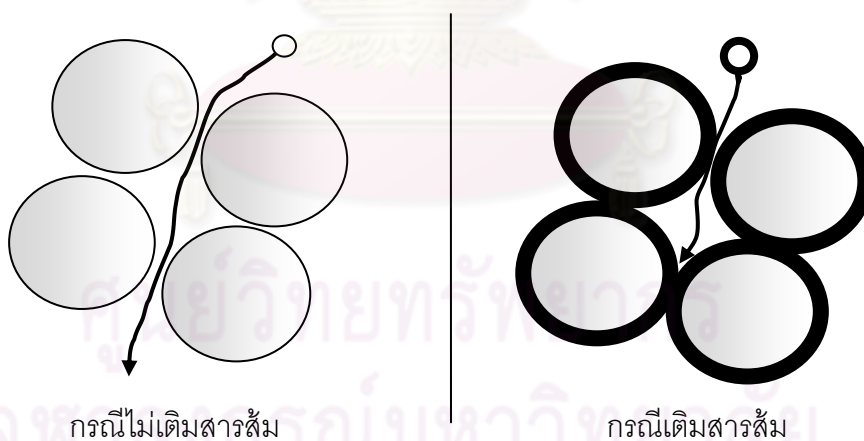
$$\eta_T = \frac{\Delta P g d_e^2}{18\mu} + \frac{3}{2} \left(\frac{d_e}{d_p} \right)^2 + 0.9 \left(\frac{KT}{\mu d_e d_p V} \right)^{2/3} \quad (4.10)$$

จากผลการคำนวณ ค่าสัมประสิทธิ์การชน (Collision Efficiency, η) ดังตารางที่ 4.8 สามารถอธิบายได้ว่า อนุภาคความขุ่นมีโอกาสในการกระทบกับสารกรองที่อยู่หนึ่งได้มากกว่าอนุภาคน้ำมัน เนื่องจากอนุภาคความขุ่นมีขนาดใหญ่ทำให้กลไกการดักจับเป็นแบบการตกตะกอน หรือติดค้างภายในช่องว่างของสารกรอง ในขณะที่อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก กลไกการดักจับจะเป็นแบบการแพร่กระจาย (Diffusion Force) ซึ่งทำให้มีโอกาสในการกระทบกับสารกรองน้อยกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคน้ำมันของถังกรองทรายต่ำกว่าการกำจัดอนุภาคความขุ่น และสำหรับกระบวนการกรองตรงที่มีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) เพื่อช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน ให้เคลื่อนที่มาสัมผัสกันและเกาะติดกับชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพเกาะติด (Collision Efficiency, α) ของอนุภาคน้ำมันและชั้นทรายกรองเพิ่มสูงขึ้นมาก

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การชน สำหรับอนุภาคความชุ่ม และอนุภาคน้ำมัน

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

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การชน (η) สำหรับการกรองอนุภาคน้ำมันที่มีการเติมสารส้ม พบว่า การเติมสารส้มทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคทรายกรองกับอนุภาคน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคทรายกรอง (Dp) มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคน้ำมันบนอนุภาคของทรายกรอง และที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงๆ ค่าสัมประสิทธิ์การชนยิ่งเพิ่มมากขึ้น และสารส้มสามารถเกาะติดกับอนุภาคของทรายกรองได้เป็นอย่างดี ทำให้ประสิทธิภาพของถังกรองเพิ่มสูงมากขึ้น



รูปที่ 4.42 ลักษณะการชนระหว่างอนุภาคทรายกรองและอนุภาคน้ำมัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษากระบวนการกรองตรง (Direct Filtration) ในการแยกอนุภาคความขุ่น และการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ ร่วมกับการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) เพื่อช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคดังกล่าวก่อนนำน้ำเข้าสู่กระบวนการกรอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทรายในการกำจัดอนุภาคน้ำมัน แต่ส่งผลต่อระยะเวลาในการทำงานของถังกรองทรายที่สั้นลง จึงได้มีการประยุกต์การเติมอากาศร่วมกับกระบวนการกรอง โดยการติดตั้งหัวเติมอากาศเพื่อให้ชั้นกรองขยายตัว และเกิดการกรองได้ตลอดทั้งความหนาของชั้นกรอง โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการกรอง รวมถึงระยะเวลาการทำงานของถังกรอง และจุดที่เกิดการอุดตันอีกด้วย ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ถังกรองทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 1.8 เมตร ใช้ทรายกรองความหนา 70 เซนติเมตร เป็นสารกรอง และติดตั้งมาตรวัดความดันน้ำทุกๆ 5 เซนติเมตร ตามความหนาของชั้นกรอง ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การเปรียบเทียบการทำงานของถังกรองทรายแบบกรองตรงแบบธรรมดาที่ไม่มีเติมสารเคมีใดๆ ในการแยกอนุภาคความขุ่น และการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ พบว่า สามารถแยกอนุภาคความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพถึงร้อยละ 96.65 ในขณะที่การแยกอิมัลชันของน้ำมัน สามารถแยกได้เพียงร้อยละ 45.52 เท่านั้น เนื่องจากถังกรองทรายสามารถจัดการกับอนุภาคสารแขวนลอยที่มีขนาดน้อยกว่า 10 ไมครอนได้เป็นอย่างดี โดยอนุภาคความขุ่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8.2 ไมครอน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของถังกรองทรายในการกำจัดอนุภาคความขุ่นสูง ในขณะที่ไม่สามารถกำจัดอิมัลชันของน้ำมันได้มากนัก เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กประมาณ 1 ไมครอนเท่านั้น และมีเสถียรภาพสูง ทำให้อนุภาคน้ำมันสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของชั้นกรองออกไปได้ ทำให้ประสิทธิภาพการกรองต่ำ ในการนี้ จึงจำเป็นต้องทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันของน้ำมันที่มีความคงตัวด้วยการเติมสารโคแอกกูแลนต์

5.1.2 ศึกษาปริมาณโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นและอนุภาคน้ำมันที่มีความคงตัว ด้วยวิธีการทำจาร์เทส พบว่า ความเข้มข้นของ

สารส้มที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น เท่ากับ 30 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคความขุ่น เท่ากับร้อยละ 98.35 และความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน เท่ากับ 150 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี เท่ากับร้อยละ 91.23 โดยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าลดลงอย่างมาก แสดงว่าการเปลี่ยนประจุของอนุภาคน้ำมันให้เป็นตรงกันข้าม (Charge Reversal) มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วถูกฟุ้งขึ้นใหม่ ประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดเล็ก (น้อยกว่า 1 ไมครอน)

5.1.3 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย ในการแยกอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ ด้วยการเติมสารโคแอกกูแลนต์เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันที่มีความคงตัวให้กับน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการกรอง พบว่า สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากเฟสน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- การเพิ่มความเข้มข้นสารส้ม ส่งผลให้ประสิทธิภาพของถังกรองจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟล็อกของสารส้มจับตัวกับอนุภาคน้ำมัน ทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดและน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ทำให้ติดค้างและสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ โดยที่อนุภาคน้ำมันดังกล่าวไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นกรองออกไปได้ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ความดันลดยที่เกิดขึ้นภายในชั้นกรองเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการสะสมของอนุภาคต่างๆ ตามระยะเวลาในการกรอง

- ความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสม สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย เท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีสูงถึงร้อยละ 96.17 ประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันเท่ากับร้อยละ 97.98 เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการกรองสูงใกล้เคียงกับความเข้มข้นของสารส้ม 150 มิลลิกรัม/ลิตร และให้ระยะเวลาการดำเนินการกรองที่นานกว่า โดยสามารถดำเนินการกรองได้เป็นเวลา 90 นาที ในขณะที่ความเข้มข้นของสารส้ม 150 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถดำเนินการกรองได้เพียง 60 นาทีเท่านั้น เนื่องจากการเติมสารส้มทำให้เกิดฟล็อกของสารส้มที่มีขนาดใหญ่และสะสมที่ผิวของชั้นกรอง ทำให้ความดันลดยที่ผิวหน้าชั้นกรองเพิ่มสูงขึ้น ถังกรองจึงอุดตันเร็ว จึงได้มีแนวคิดในการเพิ่มอายุการทำงานของถังกรองทรายแบบตรงกรองที่มีการเติมสารเคมี โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศร่วมด้วย

- การล้างย้อนถังกรอง พบว่า การเติมสารส้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการล้างย้อนถังกรองทราย เนื่องจากการเติมสารส้มทำให้เกิดฟล็อกขนาดใหญ่ขึ้น การล้างย้อนทำให้เกิด

การขัดสีกันระหว่างอนุภาคสารกรองทำให้ฟลัดของสารส้มที่เคลือบที่ผิวชั้นสารกรองนั้นหลุดออกได้ง่าย ประสิทธิภาพการล้างยอนจึงเพิ่มสูงขึ้น

5.1.4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรองทราย โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศภายในชั้นกรอง โดยการติดตั้งหัวเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของถังกรอง ที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตรจากผิวชั้นกรอง ในการแยกอนุภาคความขุ่น และอิมัลชันของน้ำมันออกจากเฟสน้ำ พบว่า

- การเติมอากาศภายในชั้นกรอง สามารถช่วยทำให้ถังกรองมีอายุการทำงานที่ยาวนานขึ้น โดยในสภาวะการเติมอากาศที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคความขุ่น คือ ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่ออนาที ถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 570 นาที และในการแยกอนุภาคน้ำมัน คือ ที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่ออนาที ถังกรองทรายแบบเติมอากาศมีระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 270 นาที

- คุณภาพน้ำที่กรองได้ในช่วงแรกจะมีค่าความขุ่นสูงและมีค่าลดลงจนมีค่าความขุ่นคงที่ อย่างไรก็ตามคุณภาพน้ำที่กรองผ่านถังกรองแบบเติมอากาศนั้นได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู (World Health Organization, 2006) โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าแปรผกผันกับอัตราการเติมอากาศ

- การล้างยอนด้วยน้ำและอากาศพร้อมกัน โดยการติดตั้งหัวเติมอากาศรูปวงแหวนที่ตำแหน่งด้านล่าง (ลึกจากผิวหน้าชั้นกรอง 50 เซนติเมตร) ช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการล้างยอนลงได้ เนื่องจากอากาศช่วยทำให้เกิดการขัดสีกันของสารกรองเพิ่มมากขึ้น โดยระยะเวลาที่ใช้ในการล้างยอนถังกรองแปรผันตรงกับระยะเวลาการทำงานของถังกรอง

5.1.5 ศึกษาการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยการประยุกต์ใช้การเติมอากาศแบบกะ (Batch) โดยการเติมอากาศหลังจากถังกรองทรายอุดตัน เป็นระยะเวลา 10 นาที โดยพบว่า การเติมอากาศแบบกะสามารถช่วยให้ระยะเวลาในการทำงานของถังกรองเพิ่มมากขึ้น และยังเป็นการประหยัดพลังงานในการเติมอากาศลงได้ รวมถึงลดความถี่ในการล้างยอนถังกรองได้อีกด้วย

- การเติมอากาศแบบกะ ที่ระยะเวลาการเติมอากาศนาน 10 นาที สำหรับการกรองอนุภาคความขุ่น ที่อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที สามารถทำให้การกรองได้ถึง 3 ครั้ง ทำให้ถังกรองที่เกิดการอุดตันสามารถกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง โดยทำให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 720 นาที ปริมาณน้ำที่กรองได้รวม 587 ลิตร และสำหรับการกรองอนุภาคน้ำมัน ที่

อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที่ พบว่าสามารถทำให้การได้ถึง 4 ครั้ง ทำให้ถังกรองที่เกิดการอุดตันสามารถกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง โดยทำให้ระยะเวลาการทำงานของถังกรองยาวนานถึง 540 นาที ปริมาณน้ำที่กรองได้รวม 300 ลิตร

- คุณภาพของน้ำที่การกรองได้ ในช่วงที่ไม่มีเติมอากาศจะมีคุณภาพได้มาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู ขณะทำการเติมอากาศ พบว่าคุณภาพน้ำที่กรองได้ในเริ่มต้นการเติมอากาศจนกระทั่งเวลาผ่านไป 15-20 นาที คุณภาพน้ำที่กรองได้ต่ำจากนั้นคุณภาพน้ำที่กรองได้กลับสู่สภาวะปกติอีกครั้งหนึ่งหลังจากหยุดเติมอากาศ

- การสูญเสียความดันลดภายในชั้นกรองมีค่าลดลงเมื่อทำการเติมอากาศ เนื่องจากชั้นกรองเกิดการขยายตัว ความพรุนมากขึ้น อนุภาคความขุ่นบริเวณผิวหน้าชั้นกรองจึงหลุดเข้ามาสะสมอยู่ภายในชั้นกรอง ทำให้ถังกรองสามารถทำงานต่อไปได้ ส่งผลให้สามารถใช้สารกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น แต่อาจส่งผลต่ออัตราการกรองที่ลดลงตามระยะเวลาการทำงานของถังกรองเนื่องจากอนุภาคความขุ่นที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาการทำงานของถังกรอง น้ำจึงไหลผ่านชั้นสารกรองได้ช้าลง

5.1.6 ศึกษากลไก และประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย แบบการกรองตรง (Direct filtration) โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ (Filtration equation) และสมการคำนวณความดันลด (Pressure drop equation) ในการอธิบายประสิทธิภาพในการกรองน้ำที่เกิดขึ้น พบว่า

- ค่าสัมประสิทธิ์การชน (Collision Efficiency, η) ระหว่างอนุภาคสารแขวนลอยกับสารกรองที่อยู่นิ่ง ซึ่งพบว่าการเติมสารส้มสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการชนให้มากขึ้นได้ เนื่องจากอนุภาคทรายกรอง (Dp) มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคน้ำมันบนอนุภาคของทรายกรอง ทำให้อนุภาคสารแขวนลอยเคลื่อนที่เข้ามาชนกับอนุภาคสารกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของถังกรองในการกำจัดอนุภาคต่างๆ เพิ่มสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์เกาะติด (Attachment Efficiency, α) ในการกรองอนุภาคน้ำมัน พบว่าการเติมสารส้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะติดระหว่างสารกรองกับอนุภาคน้ำมันให้มากขึ้น เนื่องจากสารกรองมีฟลอคของสารส้มเคลือบอยู่และเมื่อฟลอคของสารส้มเคลื่อนที่เข้าอีก ก็สามารถเกาะติดกับสารกรองได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น

- ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองทราย สอดคล้องกับค่าความพรุน อัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง และขนาดของสารกรองที่เกิดการการสะสมตัว รวมถึงความเร็วแกระเดียนท์ภายในชั้นกรอง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองเพิ่มสูงขึ้น โดย

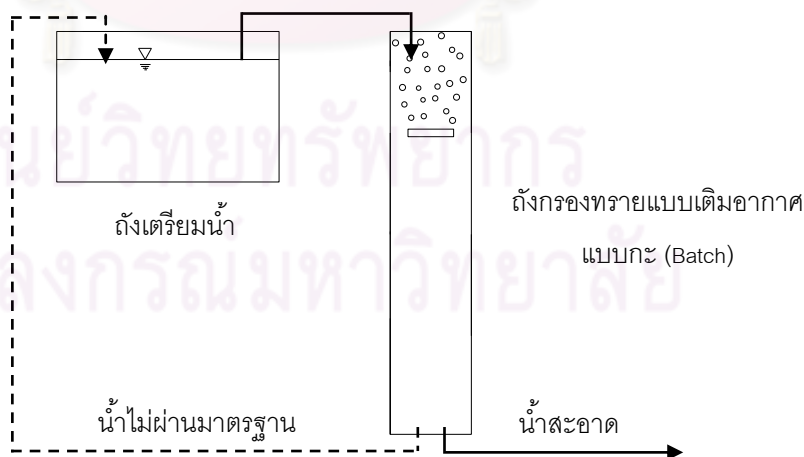
ความพรุนของชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรอง ทำให้ขนาดของสารกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความบั่นป่วนภายในชั้นกรองเพิ่มมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอนแนะ

การประยุกต์รูปแบบการเติมอากาศแบบกะ (Batch) สามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของถังกรองให้มากขึ้นได้ โดยสามารถประหยัดพลังงานในการเติมอากาศและลดความถี่ในการล้างย้อนถังกรองลงได้ และสามารถใส่สารกรองได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ขณะเติมอากาศอาจทำให้ ประสิทธิภาพของถังกรองมีค่าลดลงในช่วงเวลาประมาณ 15-20 นาที จึงควรปรับปรุงรูปแบบของถังกรอง ให้มีความเหมาะสมมากขึ้นโดย

- ปรับปรุงขนาดของสารกรอง ให้มีขนาดสารกรองเล็กกลง โดยในการวิจัยนี้ใช้ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ (d_{10}) อยู่ในช่วง 0.55 มิลลิเมตร สัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอในช่วง 1.5 เนื่องจากการเติมอากาศทำให้ชั้นกรองขยายตัว ความพรุนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้อนุภาคต่างๆ สามารถเคลื่อนที่หลุดลอดชั้นกรองออกมาได้ ประสิทธิภาพจึงลดลง การลดขนาดสารกรอง อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองขึ้นได้

- ออกแบบรูปแบบการกรอง ให้มีระบบเวียนน้ำที่ผ่านการกรอง ที่ไม่ผ่านค่ามาตรฐานในขณะที่เติมอากาศ ประมาณ 15-20 นาที กลับไปยังถังเตรียมน้ำ เพื่อทำการกรองใหม่อีกครั้ง ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบเวียนน้ำที่ไม่ผ่านมาตรฐานในขณะที่ทำการเติมอากาศ

สำหรับกรณี การกรองอนุภาคน้ำมันที่มีการเติมสารเคมีที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า อาจมีการปรับปรุงปริมาณความเข้มข้นของสารส้มให้น้อยลง ภายหลังจากเติมอากาศครั้งที่หนึ่ง เนื่องจาก การกรองครั้งที่หนึ่งมีการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ที่ผิวหน้าและภายในชั้นกรองจนกระทั่งถึงกรองอุดตัน ส่งผลให้อัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ มากขึ้น ขนาดของสารกรองที่เกิดจากการสะสมตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น และทำให้ความพรุนภายในชั้นกรองมีค่าลดลงจนกระทั่งถึงกรองอุดตัน จึงทำการเติมอากาศ ซึ่งพบว่า การเติมอากาศทำให้ชั้นกรองขยายตัว เกิดการขัดสีกันขึ้นทำให้ขนาดของสารกรองที่เกิดจากการสะสมตัวมีขนาดเล็กลง อัตราการสะสมตัวของอนุภาคต่างๆ ภายในชั้นกรองลดลง และความพรุนมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเทียบกับสภาวะเริ่มต้นก่อนการกรอง ความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ก็ไม่มากนักเมื่อเทียบกับกรณีสารกรองสะอาด โดยมีค่าความพรุนประมาณ 0.15-0.2 ในขณะที่เริ่มต้นมีค่าความพรุน 0.45 ดังนั้น การกรองรอบถัดไปอาจมีการลดปริมาณความเข้มข้นของสารส้มลงได้ เพื่อลดการติดค้างและสะสมที่ผิวหน้าของชั้นกรอง ให้สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นกรองเข้ามาได้มากขึ้น ทำให้ระบบมีอายุการดำเนินงานที่นานขึ้นในแต่ละรอบ และยังสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านปริมาณสารส้มลงได้อีกด้วย ในขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดยังคงเดิม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย. เล่ม 2, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์.
- ไกรภพ ถึงแสง และวิชญ์ บุญทองอ่อน. 2547. การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- กรมควบคุมมลพิษ, กองจัดการคุณภาพน้ำ. 2545. น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ครุสภาลาดพร้าว.
- กันตพงศ์ ผิวเหลือง. 2552. การศึกษาถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกเพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนนท์ เฉลิมสินสุวรรณ. 2552. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและไซโน-เฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันตุลเวศน์. 2539. วิศวกรรมประปา. เล่ม 2, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัฐพล เจียวิริยะบุญญา. 2552. การพัฒนาถังกรองทรายร่วมกับการเติมอากาศของระบบการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรกร ไม้เรียง. 2542. วิศวกรรมเขื่อนดิน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: รุ่งแสงการพิมพ์.
- วิจารณ์ ตันติธรรม. 2536. การกำจัดความขุ่นโดยถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Anderson, J.E., Kim, B.R., Mueller, S.A., and Lofton, T.V. 2003. Composition and analysis of Mineral Oils and Other Organic Compounds in Metalworking and Hydraulic Fluids. Environmental Science and Technology 33: 73-109.
- Aurelle, Y. 1985. Treatment of Oil-Containing Wastewater. Bangkok: Chulalongkorn University, Department of Sanitary Engineering.
- Cambiella, A., Ortea, E., Ríos, G., Benito, J.M., Pazos, C. and Coca. J. 2006. Treatment of oil-in-water emulsions: Performance of a sawdust bed filter. Hazardous Materials 131: 195-199.
- Chuang, C.J., and Li, K.Y. 1997. Effect of coagulant dosage and grain size on the performance of direct filtration. Separation and Purification Technology 12: 229-241.
- Hamoda, M.F., Al-Ghusain, I., and Al-Mutairi, N.Z. 2004. Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse. Desalination 164: 203-211.
- Hemmings, D.G., and Fitzpatrick, C.S.B. 1997. Pressure signal analysis of combined water and air backwash of rapid gravity filters. Water Resource 31: 356-361.
- Kawamura, S. 2000. Integrated design and operation of water treatment facilities. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Lee, J.J., Im, J.H., BenAim, R., Kim, J.R., Kim, Y.J., Poo, K.M., and Kim, C.W. 2007. Better understanding of the filtration characteristics in the flexible fiber filter module (3FM). Water Science & Technology 55: 77-83.
- Metcalf and Eddy, Inc. 2004. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4th ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Raju, B.S.N. 1995. Water Supply and Wastewater Engineering. McGraw-Hill.
- Reynolds, T.D., and Richards, P.A. 1996. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering. 2nd ed. Boston: PWS Publishing.
- Rosen, M.J. 1989. Surfactants and Interfacial Phenomena. John Wiley, New York.
- Steel, E.W., and McGhee, T.J. 1979. Water Supply and Sewerage. 4th ed. McGraw-Hill.

Tchobanoglous, G., and Burton, F.L. 1991. Wastewater Engineering Treatment, Disposal, and Reuse. 3rded. Singapore: McGraw-Hill.

Viessman, W., and Hammer, M.J. 2005. Water Supply and Pollution Control. 7thed. Pearson Education.

Water Quality Division Aquifer Protection Program. 1996. BADCT Guidance document for Pretreatment with oil/water separators draft. Arizona: Arizona Department of Environmental Quality.

World Health Organization. 2006. Guidelines for drinking-water quality. vol. 1. Geneva: WHO Library Cataloguing in Publication Data.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-1 ผลการเปรียบเทียบถึงกรองทรายแบบกรองตรงในการแยกอนุภาคความขุ่นและการแยกอิมัลชันน้ำมันออกจากน้ำ

ตารางที่ ก-1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย้อนของถึงกรองทราย ในการแยกอนุภาคความขุ่น

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	50	3.0	2.5	2.1	2.1	2.0	1.7	2.0	2.0	2.0	1.7	1.8	2.6
อัตรา การไหล	เวลา (นาที)	0	35	70	113	155	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	223							
การล้าง ย้อน	เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	-	700	450	300	80	42	45	43	25	23	20	13	15

ตารางที่ ก-1.2 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถึงกรองทรายแบบตรงที่เวลาต่างๆ

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

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยื้อนของ
ถังกรองทราย ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	135	113	110	109	100	100	988	940	855	837	837	792	738
อัตรา	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	45	90	135	180	220	260	300	340	375	410	445	475	45
การล้างยื้อน	เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)		485	254	219	203	196	134	129	119	85	74	50	42

ตารางที่ ก-1.4 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่เวลาต่างๆ

ถังกรองทราย แบบกรองเร็ว	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
15 นาที	45.0	46.6	49.9	47.8	48.7	48.7	52.57	51.6	53.8	55.5	55.6	59.7	58.7	60.7	63.8
30 นาที	45.0	43.5	41.6	39.3	38.1	37.5	39	40.2	41.9	43	43.9	41	46	48	49.5
45 นาที	45.0	43.2	39.7	41.1	35.7	36.2	36.8	39.8	37	40.8	42.7	41	43.6	46	45.9
60 นาที	45.0	40.5	36.7	33.8	32.5	33.1	34.9	35.8	36	38	38.1	37.9	39.2	42	44
75 นาที	45.0	37.7	32.7	30.1	30.6	32	31.8	35.2	33.6	37	35.2	33	35.9	39	39.8
90 นาที	45.0	37.7	29.8	26.1	27.7	30	30.3	30.8	31.1	33	32	32	32.3	33	34.6
105 นาที	45.0	31.7	31.6	22.8	25.5	26.7	26.6	29.2	26.7	30.2	34.8	30.9	33.7	35.5	33.1
120 นาที	45.0	31.7	23.7	20.8	20.9	21.7	23	24.9	24.9	27	26	27	27	27	28
135 นาที	45.0	28	19.9	17.3	19.3	19.3	18.3	21.3	20.3	24	24.9	26.9	24.7	26.7	26.9
150 นาที	45.0	24.7	19.1	14.8	13.9	15.5	17.6	19.7	18.5	19.7	20	20.3	20.6	21.1	22.9
165 นาที	45.0	20.3	15.3	13.2	11.3	13.5	11	14	14.9	17.4	19.4	19.3	18.9	19.8	21.3
180 นาที	45.0	16.7	10	9.5	9	10	12	12.7	12	13	14	15	16	16	18

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-2 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น และอนุภาคน้ำมัน
ตารางที่ ก-2.1 ปริมาณความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ความเข้มข้นของสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการ กำจัดความขุ่น (%)
1	73.38
5	95.56
10	96.49
20	97.05
30	98.35
40	97.54
50	96.79
60	96.46
70	96.33
80	96.15
90	96.59
100	95.5

ตารางที่ ก-2.2 ปริมาณความเข้มข้นของสารส้มต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

ความเข้มข้นของสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการ กำจัดซีโอดี (%)
25	22.3
50	57.9
100	77.2
150	91.23
250	86.39
300	83.18
350	9.23
400	2.53

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-3 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกรองแบบกรองตรง ที่มีการเติมสารเคมี

ตารางที่ ก-3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย้อนของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150		
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	1356	395	240	115	81	44	35	21	17	15	16		
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150		
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	25	50	75	100	20	140	155	165	175	185		
การล้างย้อน	เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	-	579	221	67	44	38	35	30	28	25	25	23	24

ตารางที่ ก-3.2 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่เวลาต่างๆ

ถังกรองทรายแบบกรองเร็ว เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
15 นาที	45.0	41.9	37.7	35.6	37.9	36.7	38.9	39.5	39.7	40	41	42.8	46	46.4	47.5
30 นาที	45.0	37	34	32.1	32	32.1	33.1	32.8	33.1	35.8	36.7	36.7	36.4	36.8	37.9
45 นาที	45.0	31.8	28.7	26.9	28.1	29.9	29.8	30.6	28.9	29.9	30.8	31.8	30.8	33.1	33.8
60 นาที	45.0	26.2	22.6	23.5	24.7	24	24.9	25.1	24.7	25.1	25.2	28.5	29.4	30.7	30.3
75 นาที	45.0	21.7	18.9	20.3	19.9	19.7	18.9	19.8	19.9	19.9	21.1	21.8	22.1	23.2	25.8
90 นาที	45.0	17.9	15.7	14.8	15.8	14.6	15.8	16.9	15.7	16.6	17	16.8	17.6	17.3	18.2
105 นาที	45.0	12.1	10.8	11.8	11.8	10.7	10.8	10.8	11.2	11.8	12.8	13.8	13.7	14.8	16.7
120 นาที	45.0	8	7.8	8	6.7	6.1	6.6	6.8	6.7	8.8	9.7	10.8	10.2	12.7	15.1
135 นาที	45.0	5	3.3	3.8	2.3	3.7	3.3	4.4	4.9	6.4	8.1	8.8	9.1	8.7	9.7
150 นาที	45.0	2	1.2	0	0	0	1	1.1	1.6	3.7	6.4	5.9	5.5	7.7	9.8

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยื้อนของ ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ในการแยก อณูภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150		
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	1356	21	3.6	1.5	1.3	1.3	1.8						
อัตรา การไหล	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90						
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	20	40	55	70	80	90						
การล้าง ยื้อน	เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	-	692	145	58	44	32	35	28	25	23	21	24	21

ตารางที่ ก-3.4 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่เวลาต่างๆ

ถังกรองทราย แบบกรองเร็ว	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
15 นาที	45.0	35	34	35	38	42	44	43	46	48	52	52	56	58	59
30 นาที	45.0	31	26	29	29	31	34	34	33.8	35	37	39	42	45	43.7
45 นาที	45.0	25	19	21	18	19	21	24	26	26	28	31	30	33	34
60 นาที	45.0	15.2	8	11.9	13.4	11.8	14.1	15.2	19.7	15.9	16.2	29	27	28.7	31
75 นาที	45.0	6.8	3	3.7	3.7	10.7	13.7	13.7	17.1	17.6	20.8	25.8	25.7	25.8	28
90 นาที	45.0	0	0	0	0	7	10	11	15.8	18.8	19.8	21.6	24	25	26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-3.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยื้อนของ ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัม/ลิตร ในการแยก อณูภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150			
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	1356	4.1	1.8	1.6	1.7									
อัตรา การไหล	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60									
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	15	30	45	57									
การล้าง ยื้อน	เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	-	741	157	40	35	29	27	27	23	15	13	12	10	

ตารางที่ ก-3.6 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่เวลาต่างๆ

ถังกรองทราย แบบกรองเร็ว	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	เวลาการกรอง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15 นาที	45.0	29	22	19	22	22	26	28	31	31	36	42.8	51.1	59.8	61.9
30 นาที	45.0	18	10	10	14	17	16.7	21	26.7	26.8	35.8	38.7	41.8	41.7	48.8
45 นาที	45.0	0	4	5	7	16.1	17.1	19.6	23.7	26.1	34	32.8	36.6	38.6	46.1
60 นาที	45.0	0	0	1.2	12.7	13.3	15	19	23	22.5	29	31	33	36.9	44

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-3.7 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD) ของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

ความเข้มข้นของสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี	
	มิลลิกรัม/ลิตร	% การบำบัด
-	1536.0	49.66
50	190.0	93.77
100	90.7	97.03
150	103.0	96.62

ตารางที่ ก-3.8 ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน (FOG) ของถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

ความเข้มข้นของสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน	
	มิลลิกรัม/ลิตร	% การบำบัด
-	48.35	76.75
50	15.67	92.47
100	4.21	97.98
150	3.57	98.28

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-4 การศึกษาการเพิ่มอายุของกระบวนการกรองแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี และประยุกต์ใช้การเติมอากาศ (Aeration)

ตารางที่ ก-4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย้อนของ ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และเติมอากาศที่ตำแหน่ง ด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่ ในการแยกอนุภาคความขุ่น

การกรอง	เวลา (นาที่)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	50	3.0	2.5	2.1	2.1	2.0	1.7	2.0	2.0	2.0	1.7	1.8	2.6
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)	0	42	82	125	174	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	205	213							
การล้างย้อน	เวลา (นาที่)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	-	650	360	200	110	54	30	15	14	13	11	11	10

ตารางที่ ก-4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย้อนของ ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และเติมอากาศที่ตำแหน่ง ด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที่ ในการแยกอนุภาคความขุ่น

การกรอง	เวลา (นาที่)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	50	3.0	2.5	2.1	2.1	2.0	1.7	2.0	2.0	2.0	1.7	1.8	2.6
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)	0	50	100	150	200	204							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	39	83	132	177	180							
การล้างย้อน	เวลา (นาที่)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	-	659	428	285	217	125	72	31	17	13	12	10	9

ตารางที่ ก-4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย้อนของ ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และเติมอากาศที่ตำแหน่ง ด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที่ ในการแยกอนุภาคความขุ่น

การกรอง	เวลา (นาที่)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	50	3.0	2.5	2.1	2.1	2.0	1.7	2.0	2.0	2.0	1.7	1.8	2.6
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)	0	38	81	129	172	180							
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	39	83	132	177	180							

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยื้อนของ
ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และเติมอากาศที่ตำแหน่ง
ด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที่ ในการแยกอนุภาคความชื้น (ต่อ)

การล้างยื้อน	เวลา (นาที่)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)	-	751	449	192	135	89	45	29	16	13	10	9	8

ตารางที่ ก-4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยื้อนของ
ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และเติมอากาศที่ตำแหน่ง
ด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่ ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที่)	0	15	30	45	60	75	90						
	ความชื้น (เอ็นทียู)	13 56	25. 2	5.2	3.8	3.3	3.1	2.9						
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)	0	15	30	45	60	75	90						
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	-	18	35	50	64	74	84						
การล้างยื้อน	เวลา (นาที่)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)	-	73 0	89. 2	23. 3	21. 9	18. 3	18. 1	16. 1	15. 8	15. 3	15. 4	15. 7	15. 2

ตารางที่ ก-4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยื้อนของ
ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และเติมอากาศที่ตำแหน่ง
ด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที่ ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที่)	0	15	30	45	60	75	90						
	ความชื้น (เอ็นทียู)	13 56	33. 7	18. 3	15. 4	13. 8	12. 3	9.2						
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)	0	15	30	45	60	75	90						
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	-	17	33	50	65	75	85						
การล้างยื้อน	เวลา (นาที่)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)	-	82 3	30. 1	28. 4	19. 4	11. 3	11. 1	10. 3	10. 6	10. 4	10. 3	9.8	10. 1

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างยื้อนของ
ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และเติมอากาศที่ตำแหน่ง
ด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที่ ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที่)	0	15	30	45	60	75	90						
	ความชื้น (เอ็นทียู)	13 56	76. 3	50. 6	43. 9	41. 3	35. 2	31. 7						
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)	0	15	30	45	60	75	90						
	ปริมาณน้ำ (ลิตร)	-	16	31	47	62	72	82						
การล้างยื้อน	เวลา (นาที่)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	ความชื้น (เอ็นทียู)	-	93 4	21	19	15	7.2	6.4	6	6.5	6.7	6.3	6.2	6.3

ตารางที่ ก-4.7 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่ง
และอัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่เวลาการกรอง 180 นาที่ ในการแยกอนุภาคความชื้น

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ รูปแบบ	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำที่เวลาการกรอง 180 นาที่ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
บน 0.20 ลิตร/นาที่	45.0	48.6	52.5	51.0	49.2	49.2	50.0	53.0	53.8	55.0	58.0	60.5	62.5	64.4	70.3
บน 0.50 ลิตร/นาที่	45.0	46.9	47.3	50.3	47.8	46.4	49.2	50.9	53.7	54.0	56.6	59.3	61.3	63.3	69.5
บน 0.75 ลิตร/นาที่	45.0	47.2	49.7	51.6	48.9	50.3	51.6	55.0	56.6	58.3	60.7	62.8	65.1	67.2	73.5

ตารางที่ ก-4.8 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่ง
และอัตราการเติมอากาศต่างๆ ที่เวลาการกรอง 90 นาที่ ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ รูปแบบ	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำที่เวลาการกรอง 90 นาที่ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
บน 0.20 ลิตร/นาที่	45.0	41.5	38.9	37.3	40	41.2	43.5	45.3	48.3	49.6	53.7	54.3	57.6	59.1	61.5
บน 0.50 ลิตร/นาที่	45.0	45.1	47.5	44.3	40.7	41.6	42.1	46.7	49.3	51.5	54.1	55.8	60.1	61.3	64.1
บน 0.75 ลิตร/นาที่	45.0	47.9	49.2	49.9	49.2	51	54.6	56.1	57.1	58.6	60.7	63.2	64.6	66.2	71.8

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่ (ดำเนินการระยะเวลา 570 นาที) ในการแยกอนุภาคความชื้น

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

ตารางที่ ก-4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น อัตราการไหลและประสิทธิภาพการล้างย่อนของถังกรองทรายแบบเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที่ (ดำเนินการระยะเวลา 180 นาที) ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที่)	0	15	30	60	90	120	150														
	ความชื้น (เอ็นทียู)	1356	26.7	4.8	3.7	3.1	2.7	2.8														
อัตราการไหล	เวลา (นาที่)	0	15	30	45	60	75	90	15													
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	30	60	90	120	150	180	30													
การล้างย่อน	เวลา (นาที่)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12								
	ความชื้น (เอ็นทียู)	-	730	112	21.1	19.8	18.2	17.9	14.9	13.6	13.7	11.7	9.2	7.3								

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (COD) ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศต่างๆ ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

อัตราการเติมอากาศ ลิตร/นาที่	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี	
	มิลลิกรัม/ลิตร	% การบำบัด
-	125.67	95.88
0.2	139.34	95.43
0.5	256.67	91.59
0.7	381.84	87.48

ตารางที่ ก-4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมัน (FOG) ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารส้ม 100 มิลลิกรัม/ลิตร และเติมอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของชั้นกรอง อัตราการเติมอากาศต่างๆ ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

อัตราการเติมอากาศ ลิตร/นาที่	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี	
	มิลลิกรัม/ลิตร	% การบำบัด
-	4.21	97.98
0.2	4.67	97.75
0.5	12.42	94.03
0.7	24.8	88.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-5 คือศึกษารูปแบบการเติมอากาศแบบกะ และการดำเนินการกรองแบบต่อเนื่อง (Continuous)

ตารางที่ ก-5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาฬิกา ในการแยกอนุภาคความขุ่น

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

ตารางที่ ก-5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาฬิกา ในการแยกอนุภาคความขุ่น

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

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-5.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที ในการแยกอนุภาคความชื้น

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	188	191	194	197	200	210
	ความชื้น (เซ็นทียู)	50	3.2	2.7	2.5	2.2	2.0	2.0	2.2	2.0	1.6	1.7	1.7	1.5	1.5	5.6	58.5	7.3	4.3	2.5
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	34	70	113	158	180													
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	50	100	150	200	217													

ตารางที่ ก-5.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	95	100	105	110	115	120	125					
	ความชื้น (เซ็นทียู)	1356	22.3	3.4	1.7	1.5	1.3	1.9	13.7	59.3	19.5	4.2	1.7	2	1.8					
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90												
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	30	55	80	100	115	120												

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-5.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที่ ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	95	100	105	110	115	120	125					
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	1356	23.3	3.1	1.9	1.7	1.2	1.9	53.8	193.2	45.9	15.2	6.8	3.1	2.4					
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90												
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	30	55	80	100	115	120												

ตารางที่ ก-5.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที่ ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90	95	100	105	110	115	120	125					
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	1356	22.3	2.9	2.1	1.7	1.3	2	97.9	325.4	140.3	78.3	35.6	15.2	5.9					
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	15	30	45	60	75	90												
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	30	55	80	100	115	120												

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-5.7 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที ในการแยกอนุภาคความขุ่น

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

ตารางที่ ก-5.8 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที ในการแยกอนุภาคความขุ่น

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

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-5.9 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 180 นาที ในการแยกอนุภาคความขุ่น

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

ตารางที่ ก-5.10 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 90 นาที ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	31.4	26.4	28.3	29.2	31.8	34.0	34	33.8	35.3	37	45.4	49.3	52.3	55.3
60 นาที	45.0	15.2	8	11.9	13.4	11.8	14.1	15.2	19.7	25.3	27.3	36	42.3	49.6	53.4
90 นาที	45.0	0	0	0	0	7.2	10.2	11.3	15.8	18.8	19.8	21.6	24	28.3	49.4
หลังเติมอากาศ	45.0	41.5	38.9	37.3	40	41.2	43.5	45.3	48.3	49.6	53.7	54.3	57.6	59.1	61.5

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-5.11 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 90 นาที ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	31.6	26.6	29.0	29.2	32.4	35.4	34.2	33.8	35.2	37.6	45.4	49.3	52.3	55.3
60 นาที	45.0	15.2	8	11.9	13.4	11.8	14.1	15.2	19.7	25.3	27.3	36	42.3	49.6	53.4
90 นาที	45.0	0	0	0	0	7.6	11.5	112.1	15.8	18.8	19.8	21.6	24	28.3	49.4
หลังเติมอากาศ	45.0	45.1	47.5	44.3	40.7	41.6	42.1	46.7	49.3	51.5	54.1	55.8	60.1	61.3	64.1

ตารางที่ ก-5.12 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที ที่เวลาการกรอง 90 นาที ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	30.3	25.3	29.5	29.2	32.2	34.4	35.5	33.8	35.6	37	45.4	49.3	52.3	55.3
60 นาที	45.0	15.2	8	11.9	13.4	11.8	14.1	15.2	19.7	25.3	27.3	36	42.3	49.6	53.4
90 นาที	45.0	0	0	0	0	6.9	10	11	15.8	18.8	19.8	21.6	24	28.3	49.4
หลังเติมอากาศ	45.0	47.9	49.2	49.9	49.2	51	54.6	56.1	57.1	58.6	60.7	63.2	64.6	66.2	71.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-5.13 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที (ดำเนินการระยะยาว 720 นาที) ในการแยกอนุภาคความชื้น

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

ตารางที่ ก-5.13 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที (ดำเนินการระยะยาว 720 นาที) ในการแยกอนุภาคความชื้น (ต่อ)

การกรอง	เวลา (นาที)	420	450	480	510	540	570	578	581	584	587	590	600	630	660	690	720	728	731	734
	ความชื้น (เซ็นทียู)	1.4	1.4	1.2	1.3	1.2	1.3	1.2	1.4	17.4	31.4	15.6	4.8	3.4	2.0	1.8	1.5	1.4	10.8	65.8
อัตราการไหล	เวลา (นาที)																			
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)																			

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-5.14 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที (ดำเนินการระยะเวลา 430 นาที) ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

การกรอง	เวลา (นาที)	30	60	90	95	100	105	110	140	170	200	230	260	290	320	325	330	335	340	370
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	3.1	1.7	1.9	54.8	189	45.1	14.9	3.9	2.8	2.1	1.7	1.9	2.8	2.6	35.2	103	28.9	9.2	2.9
อัตราการไหล	เวลา (นาที)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420				
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	0	45	90	115	150	185	220	255	290	325	355	385	410	435	455				

ตารางที่ ก-5.14 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราการไหลของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที (ดำเนินการระยะเวลา 430 นาที) ในการแยกอนุภาคน้ำมัน (ต่อ)

การกรอง	เวลา (นาที)	400	430	435	440	445	450	480	510	540	545	550	550	560						
	ความขุ่น (เอ็นทียู)	2.4	3.3	23.9	60.8	39.2	49.2	2.1	1.9	2.9	290	739	172.2	50						
อัตราการไหล	เวลา (นาที)																			
	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)																			

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-5.15 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตร/นาที (ดำเนินการระยะยาว 720 นาที) ในการแยกอนุภาคความขุ่น

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

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-5.16 การกระจายความดันภายในชั้นกรองของถังกรองทรายแบบเติมอากาศแบบกะ (Batch) ที่ระยะเวลาการเติมอากาศ 10 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.5 ลิตร/นาที (ดำเนินการระยะยาว 430 นาที) ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

ถังกรองทราย แบบเติมอากาศ แบบกะ (Batch) เวลาการกรอง	ระดับน้ำในมาตรวัดความดันน้ำ (เซนติเมตร)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30 นาที	45.0	31.2	26.3	29.1	29.3	31.0	34.0	34.5	33.8	35.0	37.0	39.0	42.0	45.0	43.7
60 นาที	45.0	15.2	8.0	11.9	13.4	11.8	14.1	15.2	14.7	16.2	19.2	20.4	22.4	24.6	26.7
90 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	1.2	2.1	2.4	2.8	2.3	6.4	8.2	8.2	10.5	11.1	12.0
หลังเติมอากาศ รอบที่ 1	45.0	22.8	23.6	22.1	23.1	24.3	25.8	27.0	29.1	28.8	32.2	33.9	33.0	35.2	38.2
150 นาที	45.0	18.3	17.9	18.9	18.8	19.8	22.3	24.0	26.0	26.0	28.0	31.0	30.0	28.8	29.8
180 นาที	45.0	15.9	14.8	15.0	16.3	16.9	17.3	18.9	18.3	19.7	22.0	24.3	27.4	28.3	26.8
210 นาที	45.0	11.9	9.8	10.7	11.1	10.3	12.9	15.0	16.2	13.3	16.3	19.9	21.2	24.8	23.0
240 นาที	45.0	8.3	7.3	8.2	8.8	7.3	8.3	9.3	13.8	13.9	13.9	17.5	18.4	22.8	22.3
270 นาที	45.0	3.2	3.4	3.7	5.3	6.1	5.8	7.3	10.2	11.3	12.3	14.2	13.5	17.3	21.2
290 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	3.3	2.5	3.1	3.4	5.8	9.5	11.9	14.2	16.3
หลังเติมอากาศ รอบที่ 2	45.0	18.2	13.2	12.6	12.8	14.2	13.0	15.0	16.9	20.2	23.2	25.7	29.1	31.6	33.5
360 นาที	45.0	14.4	9.3	8.4	10.3	12.2	10.5	12.5	13.4	14.6	18.4	19.6	21.3	25.6	27.6
400 นาที	45.0	5.2	0.0	0.0	2.3	3.1	4.2	4.3	5.2	6.8	7.2	8.1	7.1	7.9	8.5
430 นาที	45.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	6.9	7.2
หลังเติมอากาศ รอบที่ 3	45.0	14.1	9.3	7.3	8.4	8.6	9.6	9.2	9	9.5	10.2	10.4	10.9	11.7	13.2
480 นาที	45.0	8.2	7.3	6.1	4.2	7.8	8.3	8.5	8.8	8.4	8.9	9.2	9.0	9.9	10.2
510 นาที	45.0	4.1	0.0	0.0	2.3	3.1	4.2	4.3	5.2	6.8	7.2	8.1	7.1	7.9	8.5
540 นาที	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	3.2
หลังเติมอากาศ รอบที่ 4	45.0	2.4	1.2	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.9	3.1

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข การเปรียบเทียบค่าความพรุนของสารกรองในรูปแบบการกรองต่างๆ
 ตารางที่ ข-1 รายการคำนวณค่าความพรุนตามความหนาของชั้นกรองเมื่อถึงกรองเริ่มอุดตัน ใน
 การแยกอนุภาคความขุ่น

รูปแบบการกรอง	ตำแหน่งความตันลด (เมตร)	ความตันลด (เมตร)	ดรรชนีความกลม (Φ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดสารกรอง (เมตร)	ความพรุน (ϵ)	ความหนาชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็วการกรอง (เมตร/วินาที)	ความหนืด (μ) (ตารางเมตร/วินาที)
ถึงกรอง ทราย แบบ กรองตรง	0.05	0.053	0.85	0.00055	0.142	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.10	0.065	0.85	0.00055	0.176	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.15	0.078	0.85	0.00055	0.193	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.20	0.098	0.85	0.00055	0.206	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.25	0.125	0.85	0.00055	0.215	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.30	0.149	0.85	0.00055	0.222	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.35	0.242	0.85	0.00055	0.231	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.40	0.323	0.85	0.00055	0.239	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.45	0.435	0.85	0.00055	0.247	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.50	0.550	0.85	0.00055	0.254	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.55	0.550	0.85	0.00055	0.260	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.60	0.550	0.85	0.00055	0.266	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.65		0.85	0.00055	0.271	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	0.70		0.85	0.00055	0.279	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-2 รายการคำนวณค่าความพรุนตามความหนาของชั้นกรองเมื่อถึงกรองเริ่มอุดตัน ใน การแยกอนุภาคน้ำมัน

รูปแบบ	ตำแหน่ง	ความดันลด	ดรรชนี	เส้นผ่าน	ความ	ความ	ความเร็ว	ความหนืด (μ)
การกรอง	ความดันลด		ความกลม	ศูนย์กลาง	พรุน	หนา	การกรอง	
	(เมตร)	(เมตร)	(Φ)	เม็ด	(ϵ)	ชั้นกรอง	(เมตร/วินาที)	(ตารางเมตร/วินาที)
				สารกรอง		(เมตร)		
ถึงกรอง ทราย แบบ กรองตรง	0.05	0.313	0.85	0.00055	0.212	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.10	0.457	0.85	0.00055	0.233	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.15	0.505	0.85	0.00055	0.254	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.20	0.560	0.85	0.00055	0.268	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.25	0.610	0.85	0.00055	0.279	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.30	0.630	0.85	0.00055	0.291	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.35	0.673	0.85	0.00055	0.298	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.40	0.730	0.85	0.00055	0.303	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.45	0.770	0.85	0.00055	0.312	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.50	0.810	0.85	0.00055	0.313	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.55	0.850	0.85	0.00055	0.317	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.60	0.890	0.85	0.00055	0.320	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.65	0.940	0.85	0.00055	0.323	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}
	0.70	0.970	0.85	0.00055	0.326	0.7	0.0020	1.06×10^{-6}

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-3 รายการคำนวณค่าความพูนที่ผิวหน้าสารกรอง ในการแยกอนุภาคความขุ่น

รูปแบบการกรอง	เวลาการกรอง (นาที)	ความดันลด (เมตร)	ดรรชนีความกลม (Φ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดสารกรอง (เมตร)	ความพูน (ϵ)	ความหนาชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็วการกรอง (เมตร/วินาที)	ความหนืด (μ) (ตารางเมตร/วินาที)
ถึงกรองทรายแบบกรองตรง	15	0.053	0.85	0.00055	0.142	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	30	0.065	0.85	0.00055	0.176	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	45	0.078	0.85	0.00055	0.193	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	60	0.098	0.85	0.00055	0.206	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	75	0.125	0.85	0.00055	0.215	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	90	0.149	0.85	0.00055	0.222	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	105	0.242	0.85	0.00055	0.231	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	120	0.323	0.85	0.00055	0.239	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	135	0.435	0.85	0.00055	0.247	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	150	0.550	0.85	0.00055	0.254	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
	165	0.550	0.85	0.00055	0.260	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}
180	0.550	0.85	0.00055	0.266	0.7	0.001111	1.003×10^{-6}	

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-4 รายการคำนวณค่าความพูนที่ผิวหน้าสารกรอง ในการแยกอนุภาคน้ำมัน

รูปแบบการกรอง	เวลาการกรอง (นาที)	ความดันลด (เมตร)	ดรรชนีความกลม (Φ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดสารกรอง (เมตร)	ความพูน (ϵ)	ความหนาชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็วการกรอง (เมตร/วินาที)	ความหนืด (μ) (ตารางเมตร/วินาที)
ถึงกรองทรายแบบกรองตรง	15	0.053	0.85	0.00055	0.142	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
	30	0.065	0.85	0.00055	0.176	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
	45	0.078	0.85	0.00055	0.193	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
	60	0.098	0.85	0.00055	0.206	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
	75	0.125	0.85	0.00055	0.215	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
	90	0.149	0.85	0.00055	0.222	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
	105	0.242	0.85	0.00055	0.231	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
	120	0.323	0.85	0.00055	0.239	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
	135	0.435	0.85	0.00055	0.247	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
	150	0.550	0.85	0.00055	0.254	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
	165	0.550	0.85	0.00055	0.260	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}
180	0.550	0.85	0.00055	0.266	0.7	0.001111	1.06×10^{-6}	

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-5 รายการคำนวณค่าความพรุนที่ผิวหน้าสารกรอง ในการแยกอนุภาคน้ำมันด้วย กระบวนการกรองที่มีการเติมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร

รูปแบบการกรอง	เวลาการกรอง (นาที)	ความดันลด (เมตร)	ดรรชนีความกลม (Φ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดสารกรอง (เมตร)	ความพรุน (ϵ)	ความหนาชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็วการกรอง (เมตร/วินาที)	ความหนืด (μ) (ตารางเมตร/วินาที)
ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี	15	0.173	0.85	0.00055	0.219	0.7	0.00157	1.06×10^{-6}
	30	0.21	0.85	0.00055	0.207	0.7	0.00157	1.06×10^{-6}
	45	0.263	0.85	0.00055	0.193	0.7	0.00157	1.06×10^{-6}
	60	0.324	0.85	0.00055	0.181	0.7	0.00157	1.06×10^{-6}
	75	0.361	0.85	0.00055	0.173	0.7	0.00151	1.06×10^{-6}
	90	0.393	0.85	0.00055	0.167	0.7	0.00147	1.06×10^{-6}
	105	0.442	0.85	0.00055	0.159	0.7	0.00139	1.06×10^{-6}
	120	0.472	0.85	0.00055	0.152	0.7	0.00130	1.06×10^{-6}
	135	0.517	0.85	0.00055	0.145	0.7	0.00122	1.06×10^{-6}
150	0.548	0.85	0.00055	0.141	0.7	0.00116	1.06×10^{-6}	

ตารางที่ ข-6 รายการคำนวณค่าความพรุนที่ผิวหน้าสารกรอง ในการแยกอนุภาคน้ำมันด้วย กระบวนการกรองที่มีการเติมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร

รูปแบบการกรอง	เวลาการกรอง (นาที)	ความดันลด (เมตร)	ดรรชนีความกลม (Φ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดสารกรอง (เมตร)	ความพรุน (ϵ)	ความหนาชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็วการกรอง (เมตร/วินาที)	ความหนืด (μ) (ตารางเมตร/วินาที)
ถังกรองทรายแบบกรองตรงที่มีการเติมสารเคมี	15	0.21	0.85	0.00055	0.193	0.7	0.00126	1.06×10^{-6}
	30	0.29	0.85	0.00055	0.175	0.7	0.00126	1.06×10^{-6}
	45	0.36	0.85	0.00055	0.160	0.7	0.00115	1.06×10^{-6}
	60	0.47	0.85	0.00055	0.145	0.7	0.00110	1.06×10^{-6}
	75	0.54	0.85	0.00055	0.135	0.7	0.00101	1.06×10^{-6}
	90	0.55	0.85	0.00055	0.132	0.7	0.00094	1.06×10^{-6}

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-6 รายการคำนวณค่าความพูนที่ผิวหน้าสารกรอง ในการแยกอนุภาคน้ำมันด้วย กระบวนการกรองที่มีการเติมสารส้ม ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัม/ลิตร

รูปแบบการกรอง	เวลาการกรอง (นาที)	ความดันลด (เมตร)	ดรรชนีความกลม (Φ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดสารกรอง (เมตร)	ความพูน (ϵ)	ความหนาชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็วการกรอง (เมตร/วินาที)	ความหนืด (μ) (ตารางเมตร/วินาที)
ถังกรองทราย	15	0.33	0.85	0.00055	0.154	0.7	0.00094	1.06×10^{-6}
แบบกรองตรง	30	0.45	0.85	0.00055	0.140	0.7	0.00094	1.06×10^{-6}
ที่มีการเติมสารเคมี	45	0.53	0.85	0.00055	0.133	0.7	0.00094	1.06×10^{-6}
	60	0.55	0.85	0.00055	0.130	0.7	0.00090	1.06×10^{-6}

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)

ตารางที่ ข-7 รายการคำนวณค่าความพูนที่ผิวหน้าของสารกรอง ในการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการกรองร่วมกับการเติมอากาศแบบกะ

รูปแบบการกรอง	เวลาการกรอง (นาที)	ความดันลด (เมตร)	ดรรชนีความกลม (Φ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดสารกรอง (เมตร)	ความพูน (ϵ)	ความหนาชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็วการกรอง (เมตร/วินาที)	ความหนืด (μ) (ตารางเมตร/วินาที)
เติมอากาศแบบกะ (Batch)	30	0.053	0.85	0.00055	0.344	0.7	0.001069	1.003×10^{-6}
	60	0.15	0.85	0.00055	0.311	0.7	0.001069	1.003×10^{-6}
	90	0.27	0.85	0.00055	0.255	0.7	0.001069	1.003×10^{-6}
	120	0.475	0.85	0.00055	0.197	0.7	0.001069	1.003×10^{-6}
	150	0.55	0.85	0.00055	0.161	0.7	0.001069	1.003×10^{-6}
	180	0.55	0.85	0.00055	0.135	0.7	0.001069	1.003×10^{-6}
	210	0.385	0.85	0.00055	0.174	0.7	0.001069	1.003×10^{-6}
	240	0.396	0.85	0.00055	0.133	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	270	0.41	0.85	0.00055	0.132	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	300	0.433	0.85	0.00055	0.129	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	330	0.45	0.85	0.00055	0.128	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	360	0.468	0.85	0.00055	0.126	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	390	0.475	0.85	0.00055	0.119	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	420	0.485	0.85	0.00055	0.117	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	450	0.521	0.85	0.00055	0.115	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	480	0.55	0.85	0.00055	0.114	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	510	0.55	0.85	0.00055	0.111	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	540	0.55	0.85	0.00055	0.108	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	570	0.55	0.85	0.00055	0.104	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
	600	0.391	0.85	0.00055	0.131	0.7	0.000747	1.003×10^{-6}
630	0.416	0.85	0.00055	0.105	0.7	0.000569	1.003×10^{-6}	
660	0.446	0.85	0.00055	0.101	0.7	0.000569	1.003×10^{-6}	
690	0.48	0.85	0.00055	0.096	0.7	0.000569	1.003×10^{-6}	
720	0.48	0.85	0.00055	0.092	0.7	0.000569	1.003×10^{-6}	
734	0.486	0.85	0.00055	0.000	0.7	0.000000	1.003×10^{-6}	

ภาคผนวก ข (ต่อ)

ตารางที่ ข-7 รายการคำนวณค่าความพรุนที่ผิวหน้าของสารกรอง ในการแยกอนุภาคน้ำมันด้วย
กระบวนการกรองที่มีการเติมสารเคมี ร่วมกับการเติมอากาศแบบกะ

รูปแบบการกรอง	เวลาการกรอง (นาที)	ความดันลด (เมตร)	ดรรชนีความกลม (Φ)	เส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดสารกรอง (เมตร)	ความพรุน (ϵ)	ความหนาชั้นกรอง (เมตร)	ความเร็วการกรอง (เมตร/วินาที)	ความหนืด (μ) (ตารางเมตร/วินาที)
เติมอากาศแบบกะ (Batch)	30	0.29	0.85	0.00055	0.19	0.7	0.00119	1.06×10^{-6}
	60	0.47	0.85	0.00055	0.160	0.7	0.00110	1.06×10^{-6}
	90	0.55	0.85	0.00055	0.145	0.7	0.00094	1.06×10^{-6}
	120	0.31	0.85	0.00055	0.168	0.7	0.00086	1.06×10^{-6}
	150	0.37	0.85	0.00055	0.157	0.7	0.00082	1.06×10^{-6}
	180	0.40	0.85	0.00055	0.150	0.7	0.00076	1.06×10^{-6}
	210	0.45	0.85	0.00055	0.142	0.7	0.00072	1.06×10^{-6}
	240	0.48	0.85	0.00055	0.126	0.7	0.00067	1.06×10^{-6}
	270	0.52	0.85	0.00055	0.106	0.7	0.00063	1.06×10^{-6}
	300	0.55	0.85	0.00055	0.105	0.7	0.00058	1.06×10^{-6}
	330	0.418	0.85	0.00055	0.136	0.7	0.00059	1.06×10^{-6}
	360	0.457	0.85	0.00055	0.130	0.7	0.00059	1.06×10^{-6}
	390	0.527	0.85	0.00055	0.116	0.7	0.00058	1.06×10^{-6}
	420	0.55	0.85	0.00055	0.104	0.7	0.00056	1.06×10^{-6}
	450	0.457	0.85	0.00055	0.129	0.7	0.00053	1.06×10^{-6}
	480	0.477	0.85	0.00055	0.127	0.7	0.00053	1.06×10^{-6}
	510	0.477	0.85	0.00055	0.107	0.7	0.00053	1.06×10^{-6}
540	0.55	0.85	0.00055	0.091	0.7	0.00052	1.06×10^{-6}	
570	0.55	0.85	0.00055	0.051	0.7	0.00000	1.06×10^{-6}	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศุภนุช ยังทรัพย์ เกิดวันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2549 หลังจากนั้นทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่สิ่งแวดล้อม บริษัทเบตเตอร์เวิลด์กรีน เป็นระยะเวลา 1 ปี ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย