ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา | **ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่เสถียรด้วยกระบวนการตกตะกอนเคมีและการกรอง

Investigation of Optimum Condition for the Treatment of Stabilized Leachate by Chemical Coagulation and Filtration

นามผู้วิจัย นางสาวภัทรมาศ เทียมเงิน

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ชาติ เจียมไชยศรี, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์วิไล เจียมไชยศรี, D.Tech.Sc.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่เสถียรด้วยกระบวนการตกตะกอนเคมีและการกรอง

Investigation of Optimum Condition for the Treatment of Stabilized Leachate by Chemical Coagulation and Filtration

โดย

นางสาวภัทรมาศ เทียมเงิน

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภัทรมาศ เทียมเงิน 2553: การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่เสถียรด้วยกระบวนการตกตะกอนเคมีและการกรอง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ชาติ เจียมไชยศรี, D.Eng. 77 หน้า

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่เสถียรด้วยการตกตะกอนเคมีร่วมกับการกรอง การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาค่าพีเอช ปริมาณสารสร้างตะกอนได้แก่ เฟอริคคลอไรด์ และปริมาณสารโพลิเมอร์ชนิดประจุลบ ที่เหมาะสมในการตกตะกอนเคมี พบว่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนการตกตะกอนเท่ากับ 6 ปริมาณสารเฟอริคคลอไรด์เท่ากับ 1.5 กรัมต่อลิตร ปริมาณสารโพลิเมอร์เท่ากับ 0.01 กรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ความขุ่น ของแข็งแขวนลอย และสี สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 84, 99, 97 และ 95 ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอนเคมีร่วมกับการกรองทราย พบว่าการเติมสารเฟอริคคลอไรด์และสารโพลิเมอร์ในเส้นท่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการกรองทราย โดยสภาวะที่เหมาะสมคือการเติมสารเฟอริคคลอไรด์ 1.2 กรัมต่อลิตรในถังตกตะกอน และเติมสารเฟอริคคลอไรด์ 0.3 กรัมต่อลิตร กับสารโพลิเมอร์ 0.01 กรัมต่อลิตรในเส้นท่อ เนื่องจากทำให้อนุภาคที่ถูกจับในชั้นกรองมีขนาดใหญ่กว่าการตกตะกอนในถังตกตะกอนอย่างเดียว และชั้นกรองสามารถจับอนุภาคตามความลึกได้ดีขึ้น การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยการตกตะกอนเคมี การกรองทรายโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองร่วมกับการกรองผ่านเยื่อกรอง พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ความขุ่น ของแข็งแขวนลอย และสีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 74, 93, 99 และ93 ตามลำดับ โดยการบำบัดขั้นต้นช่วยลดการอุดตันของเมมแบรนชนิดไมโครฟิลเตรชันได้ด้วย

_____ _____ __ / ___ / __

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Phattharamas Thiemngeon 2010: Investigation of Optimum Condition for the Treatment of Stabilized Leachate by Chemical Coagulation and Filtration. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Chart Chiemchaisri, D.Eng. 77 pages.

This research aim to investigate appropriate operating condition for stabilized leachate treatment by coagulation and sand filtration. In the study was divided into 2 parts. In the first part, appropriate pH, ferric chloride and polymer dose in chemical coagulation were investigated. It was found that pH of 6 was optimum for coagulation, whereas 1.5 g/L $FeCl_3$ and 0.01 g/L polymer (anionic) were effective to eliminate suspended solids, turbidity, COD and color by 97%, 99%, 84%, and 95% respectively. The second part, optimum condition for chemical coagulation coupled with sand filtration was studied. The results show that in-line coagulation by adding $FeCl_3$ and polymer before sand filtration improved the efficiency of sand filter. Optimum dosage of 1.2 g/L $FeCl_3$ in sedimentation tank followed by in-line coagulation using 0.3 g/L $FeCl_3$ and 0.01 g/L polymer was found. This condition provided a better result because the entrapped particles in sand filter is larger than those in sedimentation tank and sand filter could trap the particles better along the depth of filter. The stabilized leachate pretreatment by coagulation and filtration under optimum condition followed by membrane filtration gave highest removal efficiencies of COD, turbidity, suspended solid and color at 74%, 93%, 99% and 93% respectively. The chemical pre-treatment also reduce the clogging on microfiltration membrane.

_____ _____ __ / __ / __

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจียมไชยศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิไล เจียมไชยศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำแนวคิด ข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาระหว่างการทำวิจัย และคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัย และขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก ที่กรุณาให้คำแนะนำแนวคิดเพื่อตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จด้วยดี

ขอขอบคุณองค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำและอำนวยความสะดวกทุกประการในระหว่างการทำวิจัยและขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้กำลังใจ ข้อคิดเห็น ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่ให้กำลังใจ ความห่วงใย ความช่วยเหลือ และคอยสนับสนุนในการศึกษาตลอดมา

ภัทรมาศ เทียมเงิน

เมษายน 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	55
สรุป	55
ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	56
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยผ่านการตกตะกอนเคมีเพื่อหาปริมาณโพลิเมอร์ที่เหมาะสม	61
ภาคผนวก ข ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยผ่านการกรองทรายที่สภาวะต่างๆ	67
ภาคผนวก ค เวลาและปริมาตรน้ำที่กรองได้จากการตกตะกอนโดยตรงและในเส้นท่อ	75
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	77

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบใหม่และเก่า	6
2	ประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากกระบวนการต่างๆ	7
3	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนเคมี	8
4	คุณลักษณะของกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองที่ใช้ความดันเป็นแรงขับ	17
5	ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำชะมูลฝอย	31
6	สภาวะที่ใช้ในการทดลองระบบการกรองทราย	33
7	ค่าพีเอชก่อนและหลังการตกตะกอน ลักษณะตะกอนและสีของน้ำในการหาค่าพีเอชที่เหมาะสม	37
8	ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสม	38
9	ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีเพื่อหาปริมาณเฟอริคคลอไรด์ที่เหมาะสม	40
10	ค่าการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ และขนาดอนุภาคในน้ำ	50
11	การคำนวณเปรียบเทียบความต้านทานของการกรองผ่านเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชันจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยการตกตะกอนโดยตรง และการตกตะกอนในเส้นท่อ	53

ตารางผนวกที่

ก1	ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีกรณีพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนตกตะกอนเท่ากับ 6	62
ก2	ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีกรณีพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนตกตะกอนเท่ากับ 7	63
ก3	ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีกรณีพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนตกตะกอนเท่ากับ 8	64
ก4	ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีกรณีพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนตกตะกอนเท่ากับ 9	65

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ก5	ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีกรณีพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนตกตะกอนเท่ากับ 10	66
ข1	ลักษณะสมบัติน้ำชะมูลฝอยที่เสถียรก่อนการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกรองทราย	68
ข2	ลักษณะสมบัติน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการกรองทรายโดยตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล.	69
ข3	ลักษณะสมบัติน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการกรองทรายโดยตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. ในถังตกตะกอน และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ	70
ข4	ลักษณะสมบัติน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการกรองทรายโดยตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน และเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ	71
ข5	ลักษณะสมบัติน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการกรองทรายโดยตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในถังตกตะกอน และเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในเส้นท่อ	73
ค1	เวลาและปริมาตรน้ำที่กรองได้จากการตกตะกอนโดยตรง	76
ค2	เวลาและปริมาตรน้ำที่กรองได้จากการตกตะกอนในเส้นท่อ	76

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเกิดน้ำชะมูลฝอย	5
2	กลไกของกระบวนการเยื่อกรอง	15
3	การกรองแบบ Dead-end และ Cross flow	16
4	เยื่อกรองอินทรีย์	18
5	เยื่อกรองแบบไม่มีรูพรุนหรือแบบแผ่น	19
6	กระบวนการเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชั่น	20
7	ลักษณะโมดูลแบบม้วน	21
8	ลักษณะโมดูลแบบแผ่นและกรอบ	22
9	ลักษณะโมดูลแบบท่อ	23
10	เยื่อกรองแบบเส้นใยกลวง	23
11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/V กับ V	27
12	ระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอย พื้นที่ฝังกลบอ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี	30
13	การไหลของน้ำเข้าคอลัมน์กรองทราย	33
14	ขั้นตอนการศึกษาโดยรวม	34
15	ประสิทธิภาพการบำบัดที่ค่าพีเอชต่างๆ	37
16	สีของน้ำหลังตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ	38
17	ประสิทธิภาพการบำบัดที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์ต่างๆ	39
18	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและขนาดตะกอนที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์ต่างๆ	39
19	ขนาดอนุภาคของตะกอนที่พีเอช 6 โดยแปรผันปริมาณเฟอริคคลอไรด์และโพลิเมอร์	41
20	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และสีในการหาสารรวมตะกอนที่เหมาะสม	42
21	ลักษณะของตะกอนฟุ้งเมื่อปริมาณโพลิเมอร์มากเกินไป	43
22	ประสิทธิภาพการเดินระบบเมื่อทำการตกตะกอนในถังตกตะกอนโดยตรง	44
23	ประสิทธิภาพการเดินระบบเมื่อทำการตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. ในถังตกตะกอน และเติมโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ	45

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ประสิทธิภาพการเดินระบบเมื่อทำการตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน และเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. เติมโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ	46
25	ประสิทธิภาพการเดินระบบเมื่อตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล.ในถังตกตะกอน เติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล.และโพลิเมอร์ 0.005 ก./ล.ในเส้นท่อ	46
26	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ของแข็งแขวนลอย ซีโอดี และสีที่สภาวะต่างๆ	47
27	เปรียบเทียบปริมาณตะกอนตามความลึกชั้นกรอง	48
28	ขนาดอนุภาคตามความลึกชั้นกรองเมื่อทำการตกตะกอนเคมีในถังตกตะกอนโดยตรง (สภาวะที่ 1)	48
29	ขนาดอนุภาคตามความลึกชั้นกรองเมื่อทำการตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน เติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ (สภาวะที่ 3)	49
30	ขนาดอนุภาคตามความลึกชั้นกรองเมื่อโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในถังตกตะกอน เติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในเส้นท่อ (สภาวะที่ 4)	49
31	ประสิทธิภาพการบำบัดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในแต่ละกระบวนการ	51
32	สีของน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการบำบัดในแต่ละขั้นตอน	51
33	กราฟพล็อตระหว่างค่า t/V กับค่า V ของการตกตะกอนโดยตรง	52
34	กราฟพล็อตระหว่างค่า t/V กับค่า V ของการตกตะกอนในเส้นท่อ	53

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

SS	=	Suspended Solids
TOC	=	Total Organic Carbon
BOD	=	Biochemical Oxygen Demand
COD	=	Chemical Oxygen Demand
VFA	=	Volatile Fatty Acids
μm	=	micrometer
RO	=	Reverse Osmosis
MF	=	Micro filtration
UF	=	Ultra filtration
NF	=	Nano filtration
$FeCl_3$	=	Ferricchloride
HCl	=	Hydrochloric
NaOH	=	Sodium Hydroxide
$Al_2(SO_4)_3$	=	Aluminium Sulphate

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่เสถียรด้วยกระบวนการตกตะกอนเคมีและการกรอง

Investigation of Optimum Condition for the Treatment of Stabilized Leachate by Chemical Coagulation and Filtration

คำนำ

น้ำชะมูลฝอยเกิดจากน้ำฝนที่ตกในบริเวณพื้นที่ฝังกลบมูลฝอย รวมถึงน้ำใต้ดินที่อาจซึมผ่านเข้ามาในพื้นที่ฝังกลบ หรือความชื้นที่มีอยู่ในองค์ประกอบของมูลฝอยไหลซึมออกมา ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมากและอาจก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบจากการปนเปื้อนลงสู่น้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน(Foo *et al.*, 2009)โดยทั่วไปน้ำชะมูลฝอยสามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางชีววิทยา ฟิสิกส์ และเคมี หรือการผสมผสานกันของวิธีต่างๆ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดี ข้อเสียต่างกัน รวมถึงให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่แตกต่างกัน การบำบัดน้ำชะมูลฝอยทางเคมีมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกำจัดตะกอนแขวนลอย โลหะหนัก และสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก เป็นหลัก ซึ่งเหมาะสำหรับน้ำชะมูลฝอยที่เสถียร ข้อดีคือการเริ่มเดินระบบทำได้ง่าย ปรับสภาวะการควบคุมระบบให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยได้รวดเร็ว โดยกระบวนการตกตะกอนเคมีที่ใช้ทั่วไปมักใช้ในการบำบัดขั้นแรกเพื่อลดภาระของสารมลพิษในน้ำชะมูลฝอยก่อนการบำบัดขั้นหลัง เช่น การกรองทราย การดูดติดผิวด้วยถ่าน การกรองด้วยเยื่อกรองออสโมซิสผันกลับ เป็นต้น (Chuang *et al*., 1997 และRenou *et al.,* 2008) โดยใช้สารสร้างตะกอนเช่น อลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม เฟอร์รัสซัลเฟต เฟอร์ริคคลอไรด์ เป็นต้น(Aziz *et al*., 2007)

พื้นที่ฝังกลบมูลฝอย อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี เป็นสถานที่รองรับขยะมูลฝอยจากบ้านเรือนในเขตพื้นที่จังหวัดนนทบุรี มีพื้นที่รวมทั้งสิ้นประมาณ 186 ไร่ ตั้งอยู่หมู่ที่ 8 ต.คลองขวาง อ.ไทรน้อย จ. นนทบุรี ปัจจุบันรองรับมูลฝอย 292 ตัน/วัน นำไปกำจัดโดยวิธีเทกองกลางแจ้ง (Open Dumping) บริเวณบ่อขยะอยู่ในความดูแลขององค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ภายในมีระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยซึ่งมีกำลังการบำบัดวันละ 1,000 ลบ.ม./วัน ประกอบด้วยระบบตกตะกอนเคมี ระบบถังกรองทราย ระบบเยื่อกรอง ระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับ จากการดำเนินการที่ผ่านมาพบว่า ระบบตกตะกอนเคมีและถังกรองทรายมีประสิทธิภาพในการทำงานไม่ดีเท่าที่ควรส่งผลให้น้ำที่ออกจากระบบมีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงมากก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันต่อระบบเยื่อกรองแบบออสโมซิสผันกลับเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชะมูลฝอยที่เสถียรด้วยกระบวนการตกตะกอนเคมีและการกรองเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการตกตะกอนทางเคมีน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีจาร์เทสต์

2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการตกตะกอนเคมีร่วมกับการกรองทราย

3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและการอุดตันของอนุภาคที่ส่งผลต่อการกรองผ่านระบบเยื่อกรอง 5 μm

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

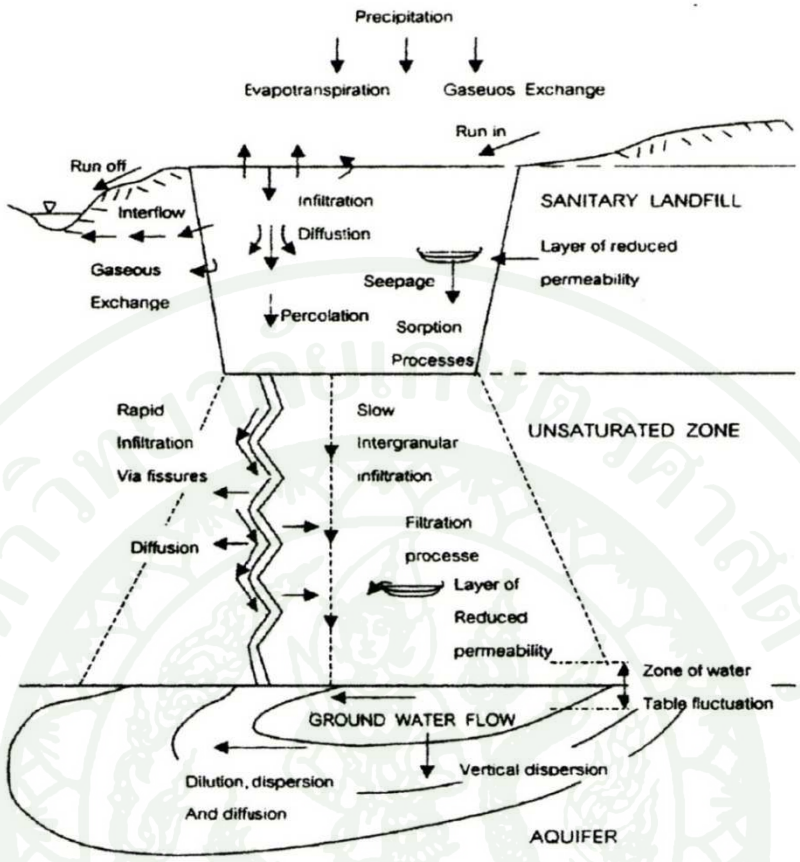
1. ความหมายและแหล่งกำเนิดน้ำชะมูลฝอย

น้ำชะมูลฝอยหมายถึง ของเหลวที่ไหลชะล้างผ่าน หรือออกมาจากมูลฝอยซึ่งอาจประกอบด้วยสารละลาย หรือสารแขวนลอยผสมอยู่ (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) ซึ่งน้ำที่ไหลผ่านชั้นมูลฝอยอาจเกิดจากน้ำที่เป็นส่วนประกอบของมูลฝอย น้ำฝนที่ตกในหลุมบริเวณพื้นที่ฝังกลบ(Farquhar, 1989) ส่วนหนึ่งจะกลายเป็นน้ำบนผิวดิน ส่วนที่เหลือจะถูกเก็บกักไว้ในชั้นดินจนกระทั่งความชื้นที่สะสมในชั้นดินเกิดความจุภาคสนาม(field capacity)ของดิน น้ำจะซึมลงสู่ชั้นของมูลฝอย ของเหลวที่ซึมลงมานี้จะสะสมอยู่ในชั้นของมูลฝอย จนกระทั่งถึงค่าความจุภาคสนามของมูลฝอย น้ำเหล่านี้จะชะละลายสารต่างๆ ออกจากมูลฝอย และซึมลงไปสะสมที่พื้นหลุมฝังกลบ เรียกว่า น้ำชะมูลฝอย (leachate) นอกจากนี้ที่มาของของเหลวที่ทำให้เกิดน้ำชะมูลฝอยยังมาจากแหล่งอื่นๆ ได้อีกเช่นน้ำใต้ดินที่ไหลซึมเข้ามาจากภายนอกหลุมฝังกลบและของเหลวที่ถูกผลิตขึ้นจากการย่อยสลายของมูลฝอย (จักริน, 2549) ดังภาพที่ 1

2. องค์ประกอบของน้ำชะมูลฝอย

ปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำชะมูลฝอย เช่น อายุของหลุมฝังกลบ ปริมาณน้ำฝน ฤดูกาล ชนิดและองค์ประกอบของของเสีย การบดอัด ความชื้นของมูลฝอย อุณหภูมิเป็นต้น น้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบที่มีอายุน้อยกว่า 5 ปี จะสามารถบำบัดได้ง่ายโดยสารอินทรีย์ที่พบในน้ำชะมูลฝอยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกรดไขมันระเหยอิสระ(free volatile fatty acids) มากถึง 95% ของสารอินทรีย์ทั้งหมด (Harsem, 1983) ซึ่งจะถูกย่อยสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะที่มีอากาศ ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้พีเอชลดลง และความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อนจะสูงขึ้น และจุลินทรีย์กลุ่ม methanogenic จะเปลี่ยน VFA เป็น biogas (CH_4,CO_2) ต่อมาเป็นสารที่มีลักษณะคล้ายฟลวิคซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม Carboxyl และ Aromatic Hydroxyl เป็นจำนวนมาก สารอินทรีย์ที่เหลือประกอบด้วยสารเชิงซ้อนฮิวมิคที่มีลักษณะเหมือนคาร์โบไฮเดรตและมีมวลโมเลกุลสูง โดยทั่วไปลักษณะของน้ำชะมูลฝอยมักมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำและไอออนของสารอินทรีย์ในปริมาณที่สูง นอกจากนี้จะพบโลหะหลายชนิด เช่น เหล็ก โซเดียม แคลเซียม โปแตสเซียม แมงกานีส และสังกะสี (จักริน, 2549)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 การเกิดน้ำชะมูลฝอย

ที่มา: Christensen *et al*., (1992)

ส่วนในน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบที่มีอายุมากองค์ประกอบของน้ำเสียเป็นสารที่ย่อยสลายยากเป็นส่วนใหญ่เช่นกรดฮิวมิค และกรดฟัลวิค (Tchobanoglous *et al.,*1993) ได้สรุปลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยโดยเปรียบเทียบระหว่างสถานที่ฝังกลบมูลฝอยใหม่กับสถานที่ฝังกลบมูลฝอยเก่า ดังรายละเอียดในตารางที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบใหม่และสถานที่ฝังกลบเก่า

พารามิเตอร์	สถานที่ฝังกลบใหม่ (น้อยกว่า 2 ปี)		สถานที่ฝังกลบเก่า (มากกว่า 10 ปี)
	ช่วงที่พบ (มก./ล.)	ค่าทั่วไป (มก./ล.)	(มก./ล.)
BOD_5	2,000-30,000	10,000	100-200
TOC	1,500-20,000	6,000	80-160
COD	3,000-60,000	18,000	100-500
Total suspened solids	200-2,000	500	100-400
Organic nitrogen	10-800	200	80-120
Ammonia nitrogen	10-800	200	20-40
Nitrate	5-40	25	5-10
Total phosphorus	5-100	30	5-10
Ortho phosphorus	4-80	20	4-8
Alkalinity as $CaCO_3$	1,000-10,000	3,000	200-1,000
pH	4.5-7.5	6.0	6.6-7.5
Total hardness as	300-10,000	3,500	200-500
$CaCO_3$ Calcium	200-3,000	1,000	100-400
Magnesium	50-1,500	250	50-200
Chloride	200-3,000	500	100-400
Sulfate	50-1,000	300	20-50
Total iron	50-1,200	60	20-200

ที่มา: Tchobanoglous *et al*., (1993)

3. การบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยการสร้างและรวมตะกอน

โดยทั่วไปน้ำชะมูลฝอยสามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางชีววิทยา ฟิสิกส์ และเคมี หรือการผสมผสานกันของวิธีต่างๆ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดี ข้อเสียต่างกันและให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันซึ่งแสดงดังตารางที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากกระบวนการต่างๆ (Amokrane *et.al*., 1997)

อายุหลุมฝังกลบ(ปี)	< 5 (young)	5-10(medium)	>10 (old)
ชนิดของน้ำชะมูลฝอย	I (biodegradable)	II (intermediate)	III (stabilized)
pH	< 6.5	6.5 – 7.5	> 7.5
COD (g./L)	> 10	< 10	< 5
COD/TOC	< 2.7	2.0 – 2.7	> 2.0
BOD5/COD	< 0.5	0.1 – 0.5	< 0.1
VFA*(% TOC)	> 70	5 – 30	< 5
กระบวนการบำบัด		ประสิทธิภาพการบำบัด	
การบำบัดทางชีววิทยาออกซิเดชั่น	ดี	พอใช้	ไม่ดี
การตกตะกอนทางเคมี	พอใช้-ไม่ดี	พอใช้	พอใช้
แอคติเวเตดคาร์บอน	พอใช้-ไม่ดี	พอใช้	ไม่ดี
การสร้างตะกอน-รวมตะกอน	พอใช้-ไม่ดี	ดี-พอใช้	ดี
ออสโมซิสผันกลับ	พอใช้	ดี	ดี

การบำบัดทางชีววิทยามีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ (BOD) มักใช้บำบัดน้ำชะมูลฝอยใหม่ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันระเหยมากกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่า (Amokrane *et al*.,1997) วิธีการบำบัดทางชีววิทยานั้นไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของน้ำเสีย โลหะ ความเค็ม การเปลี่ยนแปลงพีเอช และประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากได้ต่ำ ใช้เนื้อที่ในการก่อสร้างระบบสูง (จิรวัฒน์, 2544) ส่วนการบำบัดทางฟิสิกส์/เคมีมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณตะกอนแขวนลอย โลหะหนัก สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก และฟอสเฟต ข้อดีคือการเริ่มเดินระบบทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำกว่าการบำบัดทางชีววิทยา เหมาะสำหรับน้ำชะมูลฝอยเก่า

กระบวนการตกตะกอนเคมี มีประสิทธิภาพในการใช้บำบัดน้ำชะมูลฝอยที่คงตัว (stabilized leachate) และน้ำชะมูลฝอยเก่า จากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่านที่ทำการทดลองเกี่ยวกับกระบวนการตกตะกอนเคมีสรุปได้ดังตารางที่ 3 โดยทั่วไปใช้ในการบำบัดขั้นแรกก่อนการบำบัดทางชีววิทยา กระบวนการออสโมติกแบบผันกลับ หรือการบำบัดขั้นสุดท้ายซึ่งไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีววิทยาได้ โดยทั่วไปใช้สารสร้างตะกอนเช่น อลูมิเนียมซัลเฟตเฟอร์รัสซัลเฟต เฟอร์ริคคลอไรด์ และเฟอร์ริคคลอโรซัลเฟต (Renou *et al*., 2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนเคมี

Author	BOD_5/ COD	Chemical precipitation	Condition Dosing pH	Dose	% Removal Turbidity	COD	Color
Tatsi *et al.,* 2002	0.20	$FeCl_3$	9-12	1-5ก./ล.	N/A	75	Almost 100
		Al_2SO_4	7-10	0.5-1.5ก./ล.	N/A	67	95
	0.38	$FeCl_3$	9-12	1-5ก./ล.	N/A	30	90
		Al_2SO_4	7-10	0.5-1.5ก./ล.	N/A	38	Almost 100
		$FeCl_3$+ Al_2SO_4	-	0.05-1ก./ล.	N/A	70	N/A
Marañón *et al*., 2008	0.59	$FeCl_3$	3.3-8.3	0.2-0.6ก./ล.	90.2	28.1	78.4
		Al_2SO_4	5.3-8.3	0.3-0.6ก./ล.	93.2	27.1	74.3
		Aluminium Polychloride	6.2-8.3	0.1-7ก./ล.	97.7	36.8	91.2
Amokrane *et al*., 1997	0.05	$FeCl_3$	4.9	0.035 mol/L	94	55	N/A
		Al_2SO_4	5.5	0.035 mol/L	87	42	N/A
Aziz *et al*., 2005	0.31	Alum	4-12	1.2-2.2ก./ล.	N/A	N/A	82
		$FeCl_3$	4-12	0.8-2.5ก./ล.	N/A	N/A	97
		$FeSO_4$	4-12	1.2-5.5ก./ล.	N/A	N/A	77
		$Fe_2(SO_4)_3$	4-12	1-5ก./ล.	N/A	N/A	91
Ramirez *et al*., 2004	<0.01	$Fe_2(SO_4)_3$	-	1.8-3ก./ล.	N/A	67	N/A
		Al_2O_3		1-2 ก./ล.	N/A		N/A
Yoo *et al.,* 2001	0.04	$FeCl_3$	6.8-7.5	0.2-1.2 ก./ล.	N/A	39	N/A
Silva *et al.,*2004	0.05-0.06	$FeCl_3$	8.5-9	0.01 M	N/A	40-90	N/A
Loizidou *et al.,* 1992	0.15	$Ca(HO)_2$	8.3	0.5-4 ก./ล.	N/A	39	N/A
		$Fe_2(SO_4)_3$		0-0.2 ก./ล.	N/A		N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง Not available

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การกำจัดอนุภาคแขวนลอยในน้ำประกอบด้วย 2 กระบวนการได้แก่

1) กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นการเติมสารสร้างตะกอนและทำการกวนเร็ว เพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยละเอียด รวมถึงการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค

2) กระบวนการฟลอคกูเลชันเป็นการกวนช้าอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพให้รวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่เพื่อให้ตกตะกอนเร็วขึ้น

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน เรียกว่า โคแอกกูแลนท์ (Coagulant) และสารเคมีที่ช่วยทำให้โคแอกกูแลนท์มีปะสิทธิภาพดียิ่งขึ้นเรียกว่า โคแอกกูแลนท์เอด (Coagulant Aid) ซึ่งสารเคมีประเภทนี้ใช้เพียงลำพังไม่ได้ โคแอกกูแลนท์ที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ สารส้ม ซึ่งเป็นสารประกอบของอะลูมิเนียม ที่มีสูตรเคมีดังนี้ $Al_2(SO_4)_3 14.3H_2O$ (Aluminium Sulfate) และสารเคมีที่ได้รับความนิยมรองลงมาได้แก่ สารประกอบของเหล็กเช่น $FeCl_3$ เป็นต้น ส่วนโคแอกกู-แลนท์เอดที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันได้แก่ สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆที่เรียกว่า โพลีอิเล็กโตรไลต์ (polyelectrolyte) หรือบางครั้งเรียกสั้นๆว่า โพลิเมอร์ (polymer) เมื่อเติมสารโคแอกกูแลนท์ลงไปในน้ำ จะแตกตัวกลายเป็นอิออนบวกและลบที่มีวาเลนซ์ (valence)สูง อิออนบวกสามารถทำปฏิกิริยากับ OH^- ทำให้เกิดคอลลอยด์ของสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมีประจุบวก สารไฮดรอกไซด์นี้สามารถจับตัวกับอนุภาคความขุ่นซึ่งมีประจุลบทำให้ความขุ่นกลายเป็นกลางซึ่งเท่ากับเป็นการทำลายเสถียรภาพความขุ่นนั่นเอง (มั่นสิน, 2542)

Tatsi *et al.,* 2003 ได้นำกระบวนการสร้างและรวมตะกอนมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำดิบและน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีจาร์เทสเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีทดสอบสารรวมตะกอนที่นิยมใช้เช่น $FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$ และปูนขาว เทียบกับโพลิอิเล็กโทรไลต์ทางการค้า 4 ชนิด สามารถบำบัดค่าซีโอดีได้สูงถึง 80% วัดระหว่างการเติม $FeCl_3$ ในน้ำชะมูลฝอยที่มีคุณสมบัติคงที่ ขณะที่ลดค่าซีโอดีได้ต่ำ(< 35%)วัดระหว่างเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำตัวอย่าง การเติมโพลิอิเล็กโทรไลท์และการปรับพีเอชเป็นด่าง พบว่ามีผลน้อยต่อการกำจัดมลพิษ น้ำชะมูลฝอยใหม่มีค่าพีเอชต่ำ ค่าซีโอดีสูง ส่วนน้ำชะมูลฝอยเก่าค่าพีเอชและค่าซีโอดีต่ำจากการเติม $FeCl_3$ เท่ากับ 1.5 ก./ล. โดยไม่ทำการปรับค่าพีเอชน้ำชะมูลฝอยเก่ามีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 75% เมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเป็น 10 ปริมาณ $FeCl_3$ ที่เหมาะสมเท่ากับ 2 ก./ล. จึงได้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีดีที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้สารสร้างตะกอนที่นำมาใช้คือ เฟอรร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_3$) ซึ่งสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จนเกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยกลไกหลัก 2 ประการ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของโคแอกกูแลนท์และพีเอชของน้ำกลไกดังกล่าวคือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ และกลไกแบบห่อหุ้มคอลลอยด์ด้วยผลึก (Sweep Coagulation) (มั่นสิน, 2542)

กลไกโคแอกกูเลชันแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption/Charge Neutralization) เฟอริคคลอไรด์สร้างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุโดยการแตกตัวเป็นอิออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้สูญเสียเสถียรภาพและพร้อมที่จะรวมตัวกันหลายๆ อนุภาคจนกลายเป็นฟลอค แต่ในทางปฏิบัติการควบคุมกลไกนี้มักไม่สามารถทำได้เนื่องจากต้องเกิดขึ้นและเสร็จสิ้นภายในเวลา 10^{-4}-1 วินาที อิออนคอมเพล็กซ์จะไฮโดรไลซ์ต่อไปจนเกิดผลึก $Fe(OH)_3$ ทำให้เกิด Sweep Coagulation

กลไกโคแอกกูเลชันแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก หรือ Sweep Coagulation โดยเมื่อ $FeCl_3$ ทำปฏิกิริยากับด่างในน้ำดังสมการที่ (1) และ (2) เกิดการสร้างผลึก $Fe(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นปุย เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึก $Fe(OH)_3$ ก็จะเกาะตัวจับอยู่บนผลึกนั้นเมื่อเกิดขึ้นมากๆ จะได้ฟลอคขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย

$$2FeCl_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 2Fe(OH)_3 + 3CaCl_2 + 6CO_2 \quad (1)$$

$$2FeCl_3 + 3Ca(OH)_2 \longrightarrow 2Fe(OH)_3 + 3CaCl_2 \quad (2)$$

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างตะกอนมีดังนี้

1) ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ เนื่องจากคอลลอยด์ในน้ำเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีสภาพเป็นบวก ลบ หรือเป็นคอลลอยด์ประเภทไม่ชอบน้ำ สามารถถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายกว่าประเภทที่ชอบน้ำ หากทราบชนิดของคอลลอยด์จะช่วยในการตัดสินใจเลือกสารสร้างตะกอนได้อย่างเหมาะสม

2) อุณหภูมิ มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิลดลงทำให้ความหนืดของน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการตกตะกอนของฟลอคช้าลงเพราะมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดของน้ำเพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3) ค่าความเป็นด่างของน้ำ ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่า pH เพื่อให้ปฏิกิริยาในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

4) ค่า pH สารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ค่า pH ที่แตกต่างกัน การเติมสารสร้างตะกอนที่ไม่อยู่ในช่วง pH ที่เหมาะสมนอกจากจะทำให้เปลืองสารเคมีที่ใช้แล้วยังทำให้คุณภาพน้ำไม่ดีเท่าที่ควรและกระบวนการตกตะกอนเกิดขึ้นได้ไม่ดี

5) ชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอน สารสร้างตะกอนแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการทำลายอนุภาคคอลลอยด์ได้แตกต่างกัน รวมทั้งต้องคำนึงถึงปริมาณที่ใช้ ลักษณะของกลุ่มตะกอนที่เกิดขึ้น ความเร็วในการตกตะกอน ความยากง่ายในการใช้งานและราคา

6) เกลือของสารอนินทรีย์ในน้ำเสียส่วนใหญ่พบเกลืออนินทรีย์ละลายอยู่ซึ่งมีผลต่อค่า pH ที่เหมาะสม กล่าวคือทำให้ช่วงค่า pH กว้างขึ้น ระยะเวลาที่จับตัวเป็นตะกอนนานขึ้นและใช้ปริมาณสารช่วยสร้างตะกอนมากขึ้น

7) ระดับความขุ่นในน้ำ หมายถึง ปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์แขวนลอยอยู่เป็นจำนวนมากจะใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณที่น้อยกว่าและสามารถสร้างตะกอนได้ดีกว่า

8) เวลาสัมผัสและความเร็วมวลน้ำ การทำให้สารเคมีละลายน้ำได้อย่างทั่วถึงเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอนจำเป็นต้องกวนน้ำ เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนอย่างรวดเร็วในเวลาสั้นๆ รวมทั้งสารเคมีกระจายตัวออกไปทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ได้อย่างทั่วถึงและเป็นการช่วยประหยัดเวลา

รัตนวลี (2549) ทำศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งผลการทดลองการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนเคมีโดยใช้สารสร้างตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ $FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$, โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดสี ความขุ่น ของแข็งแขวนลอยและซีโอดีอยู่ในช่วง 90.55-95.02%, 91.65-93.63%, 90.22-91.61% และ 51.42-63.75% ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการบำบัดของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงเลือกใช้อลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีราคาในการบำบัดถูกที่สุดAmuda *et al.,* 2006 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประเทศไนจีเรีย เปรียบเทียบปริมาณสารสร้างตะกอน โพลีอิเล็กโทรไลต์ และค่าพีเอชที่แตกต่างกันในกระบวนการสร้างตะกอน พบว่าค่าพีเอชต่ำ(3-8)เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้ดี ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับร้อยละ78, 74 และ75 ตามลำดับ การเติม $Fe_2(SO_4)_3$ $3H_2O$ ในปริมาณ 500 มก./ล. ร่วมกับการเติมโพลิอีเล็กโทรไลต์ 25 มก./ล. สามารถบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 93, 94 และ96 ตามลำดับ เกิดสลัดจ์มากเมื่อใช้สารสร้างตะกอนเพียงอย่างเดียวเทียบกับการใช้โพลิอีเล็กโทรไลต์ร่วมกับ $Fe_2(SO_4)_3$ $3H_2O$

Aziz *et al*.,(2007) ศึกษาประสิทธิภาพของการสร้างตะกอนและรวมตกตะกอนในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบแบบกึ่งใช้อากาศแห่งหนึ่งในมาเลเซีย ใช้สารสร้างตะกอน 4 ชนิดคือ $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$, $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$ โดยใช้จาร์เทส ผลคือ $FeCl_3$ ดีกว่าสารสร้างตะกอนอื่นๆ กำจัดสีได้ 94% ที่ปริมาณสารที่เหมาะสมเท่ากับ 800 มก./ล. ที่ pH 4 ผลของปริมาณสารสร้างตะกอนในการกำจัดสีแนวโน้มค่าซีโอดี ความขุ่น ของแข็งแขวนลอย สีของน้ำชะขยะส่วนใหญ่เกิดจากสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายบางตัวแสดงในรูปความขุ่นและของแข็งแขวนลอย

พีรกานต์ (2539) ศึกษาพิจารณาคัดเลือกสารเคมี 3 ตัวเป็นสารสร้างตะกอน คือ สารส้ม (อลูมิเนียมซัลเฟต) เฟอริคคลอไรด์ และโพลิอลูมิเนียมคลอไรด์ ผลจากการทดลองพบว่า เฟอริคคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียจากกองขยะอ่อนนุช โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดดังนี้ กำจัดสีได้ 92.17% กำจัดความขุ่นได้ 84.5% กำจัดซีโอดีได้ 37.44% กำจัดบีโอดีได้ 33.09% กำจัดไนโตรเจนได้ 14.93% และกำจัดฟอสฟอรัสได้ 65.12% ซึ่งปริมาณเฟอริคคลอไรด์ที่เหมาะสม 800-1200 มก./ล. และค่าใช้จ่ายของสารเคมีต่อการบำบัดเท่ากับ 3.28-4.92 บาท/ลบ.ม. ของน้ำเสียจากกองขยะ

4. การกรอง

การกรองเป็นการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยหรืออนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วมาติดค้างในช่องว่างหรือติดไว้บนผิวของตัวกลางหรือสารกรอง ในการบำบัดน้ำเสียการกรองถูกนำมาใช้เพื่อ 1. กรองน้ำที่ผ่านจากระบบบำบัดขั้นที่ 2

2. กรองน้ำที่ผ่านจากการบำบัดทางเคมี

3. บำบัดน้ำเสียทางเคมี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้น้ำที่ออกจากระบบมีคุณภาพสูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

O'Melia and Stumm (1969) เสนอว่าการกำจัดสารแขวนลอยในตัวกลางจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของสารแขวนลอย ตัวกลาง ลักษณะทางเคมีของน้ำ และอัตราการกรอง การกำจัดสารแขวนลอยจะเกิดขึ้นภายในตัวกลางเมื่อมีการทำงานที่ต่อเนื่องกัน 2 กลไก คือ กลไกการเคลื่อนย้าย (transport mechanism) ของสารแขวนลอยในน้ำให้เข้าไปหาสารกรองซึ่งอยู่นิ่งๆ และกลไกการทำให้สารแขวนลอยเกาะจับอยู่กับตัวกลาง หรือสิ่งที่ติดบนตัวกลางอยู่ก่อนแล้ว (attachment mechanism)

1) กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาตัวกลาง (transport mechanism) การกำจัดสารแขวนลอยออกจากเส้นทางการไหลของน้ำ (streamline) โดยทำให้อนุภาคแขวนลอยเข้ามาใกล้ชิดกับตัวกลาง การกระทำดังกล่าวขึ้นกับปัจจัยทางกายภาพชลศาสตร์ (physico-hydraulic factor) การเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในชั้นของตัวกลางตามขนาดของอนุภาคแขวนลอย แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1.1) การเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 μm ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (Brownian Diffusion)

1.2) การเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 μm ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในหลายลักษณะ ได้แก่

- การติดค้าง (interception) เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยเบียดเข้าหาตัวกลางในขณะที่ผ่านช่องว่างของตัวกลางและติดค้างอยู่ในช่องว่างของตัวกลางนั้น
- แรงกระทำทางชลพลศาสตร์ (hydrodynamic action) เป็นแรงที่ทำให้อนุภาคแขวนลอยเคลื่อนที่เข้าปะทะกับตัวกลาง
- แรงเฉื่อย (inertia) อนุภาคแขวนลอยจะเคลื่อนที่เข้าหาตัวกลางโดยอาศัยแรงเฉื่อยในอนุภาค
- การตกตะกอน(sedimentation) อนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่จะตกตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาตัวกลาง ซึ่งการตกตะกอนเป็นผลมาจากแรงดึงดูดของโลก ทำให้อนุภาคมีความเร็วในการตกตะกอนมากจนสามารถแยกตัวออกจากเส้นทางการไหลของน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2) กลไกการจับสารแขวนลอย (attachment mechanism) เป็นการเกาะติดของอนุภาคแขวนลอยบนพื้นผิวของตัวกลางหรือสิ่งอื่นที่ติดอยู่บนตัวกลางแล้ว การจับอนุภาคแขวนลอยอาศัยกลไกการเคลื่อนย้ายนำเอาอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กจากเส้นทางน้ำพาเข้าใกล้ผิวหน้าของตัวกลาง เมื่ออนุภาคเข้าใกล้ผิวหน้าตัวกลางมากขึ้น หมายถึงอนุภาคแขวนลอยได้ถูกจับเข้ากับตัวกลางแล้ว

ในระหว่างการกรองน้ำ หากตัวกลางมีความฝืดหรือเกิดการอุดตันมากขึ้น แรงที่เกิดจากการไหลของน้ำจะมีค่าสูงขึ้นตามด้วย เป็นผลทำให้อนุภาคแขวนลอยที่ติดอยู่บนตัวกลางบางส่วนหลุดออกมาจากตัวกลางด้วยกลไกที่เรียกว่า Detachment Mechanism นอกจากนั้น กลไกดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้หากมีการเพิ่มอัตราการกรองอย่างกะทันหัน ทำให้น้ำที่กรองได้มีตะกอนขุ่นติดออกมา หรืออาจเกิดเนื่องจากพื้นที่ว่างบนตัวกลางถูกใช้ไปจนเกือบหมด ทำให้อนุภาคแขวนลอยมีโอกาสเกาะติดบนผิวตัวกลางได้น้อย จึงมีการหลุดของอนุภาคแขวนลอยออกมาจากตัวกลางเพิ่มขึ้น

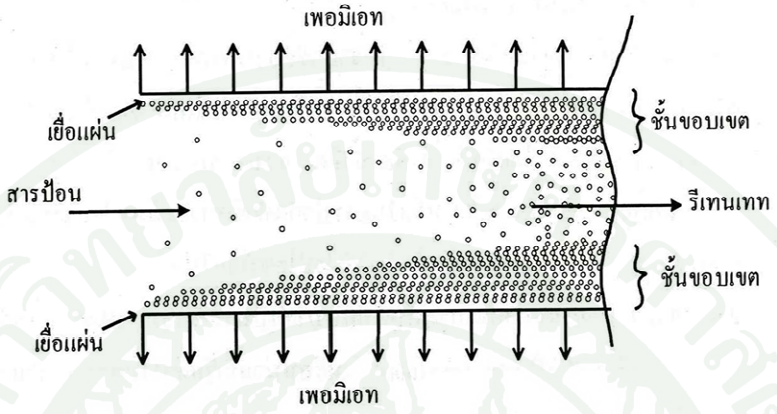
โดยทั่วไปแล้วข้อแตกต่างของการกรองในการบำบัดน้ำและน้ำเสีย คือ ขนาดของสารกรอง ในน้ำเสียขนาดของสารกรองต้องใหญ่กว่า เนื่องจากการกรองมีอัตราการไหลและต้องการปริมาตรสำหรับเก็บกักเพื่อดักจับตะกอน ในการกรองมีหลายตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง โดย 2 ตัวแปรที่สำคัญคือ floc strength (ความสามารถในการเกาะติดทรายด้วยแรง shear) และความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย โดยฟลอคที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีของสารส้มและเกลือของเหล็กมักซึมลงสู่ชั้นกรอง ดังนั้น หลักการกรองคือ การกำจัดอนุภาคตามความลึกของชั้นกรอง

5. กระบวนการเยื่อกรอง (Membrane Process)

กระบวนการเยื่อกรอง (membrane process) เป็นกระบวนการแยกสารผสมที่อยู่ในรูปของเหลวหรือแก๊สที่ประกอบด้วย ตัวถูกละลายและตัวทำละลาย โดยใช้เยื่อกรองซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ที่มีคุณสมบัติที่สามารถเลือกผ่านสาร (semi-permeable) เป็นตัวขวางกั้น (barrier) และคัดแยกโดยอาศัยแรงขับดันในรูปต่างๆ ทำให้ตัวทำละลายและตัวถูกละลายบางชนิดเคลื่อนที่ ผ่านเยื่อกรอง ขณะที่บางชนิดถูกกักไว้ กลไกของกระบวนการเยื่อกรองอย่างง่ายแสดงดังภาพที่ 2 เมื่อสารผสมซึ่งเป็นสารป้อน (feed) ผ่านกระบวนการเยื่อกรองจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่สามารถผ่านเยื่อกรองไปได้เรียกว่า เพอมิเอท (permeate) และส่วนที่ถูกกักกันเรียกว่า รีเทนเทท (retentate) สมรรถนะของกระบวนการเยื่อกรองโดยทั่วไปสามารถบ่งชี้ด้วยค่าฟลักซ์ (flux) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของเพอมิเอทต่อพื้นที่เยื่อกรองและค่าการกักกัน (retention/rejection) ซึ่งบ่งบอกความสามารถในการแยกสารของกระบวนการ (selectivity) ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเยื่อกรอง เช่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คุณสมบัติด้านต่างๆ ของเยื่อกรอง เช่น ขนาดรูพรุน ประจุ คุณสมบัติของสารป้อนหรือสารที่ต้องการแยก เช่น ขนาด ประจุของอนุภาคหรือตัวถูกละลาย และสภาวะการดำเนินงานของกระบวนการ เช่น ระดับของแรงขับดัน ความเร็ว ความเข้มข้น



ภาพที่ 2 กลไกของกระบวนการเยื่อกรอง

การกรองด้วยเยื่อกรองแบ่งออกได้ 4 แบบ คือ ไมโครฟิลเตรชั่น (MF) อัลตราฟิลเตรชั่น (UF) นาโนฟิลเตรชั่น (NF) และออสโมซิสย้อนกลับ (RO) เป็นกระบวนการแยกอนุภาคในเฟสของเหลวด้วยความดัน แต่มีความสามารถแยกขนาดของอนุภาคได้ต่างๆกัน คุณลักษณะของแต่ละแบบดังตารางที่ 4

1) ลักษณะการกรอง

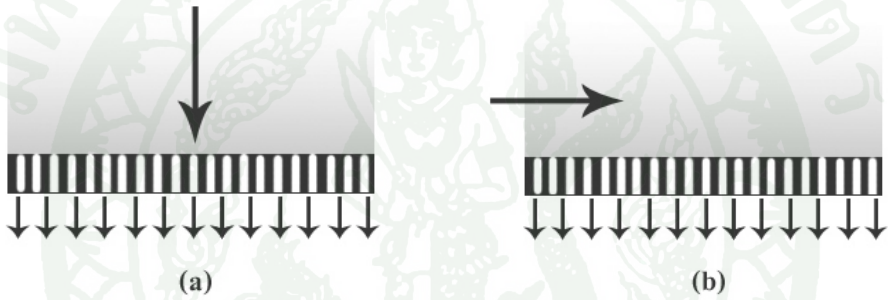
กระบวนการกรองของเยื่อกรองมีเส้นทางการไหลของของเหลว 3 ทางคือ ของเหลวที่เข้าสู่เยื่อกรอง (feed) ของเหลวที่ผ่านการกรอง (permeate) และของเหลวที่ถูกกักกัน (retentate) หากในกระบวนการกรองไม่มีของเหลวที่ถูกกักไว้เรียกว่าการกรองแบบปิดตาย (dead-end) หรือฟลูโฟลว์(full flow) หากการกรองมีเส้นทางการไหลของของเหลวทั้ง 3 ทางเรียกว่าการกรองแบบครอสโฟลว์ (cross-flow)

1.1) การกรองแบบปิดตาย (Dead-end) เป็นการใช้ความดันป้อนสารละลายให้ไหลในทิศทางที่ตั้งฉากกับเยื่อกรอง ดังภาพที่ 3 (a) สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองจะถูกกักไว้บนผิวหน้าของเยื่อกรอง หรืออยู่ในรูพรุนของเยื่อกรอง ทำให้เกิดการอุดตันของอนุภาคบนผิวหน้าของเยื่อกรองและเกิดการสะสมอย่างต่อเนื่องเรียกว่าเค้ก (Cake) ปริมาณ Permeate ที่ได้จะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลดลงอย่างมาก ในทางปฏิบัติอาจต้องทำการล้างเยื่อกรองบ่อยหรือต้องเปลี่ยนเยื่อกรองใหม่ก่อนทำการกรองต่อไป ระบบนี้เหมาะสำหรับใช้เมื่อสารละลายประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กและมีความเข้มข้นต่ำ

1.2) การกรองแบบครอสโฟลว์ (Cross-flow) เป็นการใช้ความดันป้อนสารละลายให้ไหลในแนวขนานกับเยื่อกรอง หรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของ Permeate ดังภาพที่ 3 (b) ซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของเยื่อกรอง กวาดอนุภาคที่เกาะบริเวณนั้นให้กลับเข้าไปในสารละลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถควบคุมการอุดตันของเยื่อกรองได้ดี ปริมาณ Permeate ที่ได้จึงมีค่าสูงกว่าการกรองแบบแรก



ภาพที่ 3 การกรองแบบ Dead-end (a) และ Cross-flow (b)

ที่มา: วิโรจน์ (2553)

2) ชนิดของเยื่อกรอง

เยื่อกรองสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเยื่อกรองที่ใช้ความดันเป็นแรงขับดันสามารถแบ่งออกได้ตามกลุ่มของวัสดุที่ใช้ทำดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 คุณลักษณะของกระบวนการแยกด้วยเยื่อกรองที่ใช้ความดันเป็นแรงขับ

กระบวนการ	เป้าหมายของการแยก	ลักษณะขององค์ประกอบที่ถูกเก็บกักด้วยเยื่อกรอง	องค์ประกอบที่ถูกขนถ่ายผ่านเยื่อกรอง	ระดับความดัน (bar)	กลไกการแยก
ออสโมซิสผันกลับ	ได้ตัวทำละลายที่ปราศจากตัวถูกละลายทุกชนิด	อาจเป็น อิออน หรือ สารระเหย สารโมเลกุลใหญ่ สารแขวนลอย	ตัวทำละลาย	30 -100	การแพร่ละลาย/การไหลผ่านรูพรุน
นาโนฟิลเตรชัน	ได้ตัวทำละลายที่มีอิอนหรือสารโมเลกุลเล็กบางชนิด	สารโมเลกุลเล็ก/ใหญ่สารแขวนลอย	ตัวทำละลาย/อิออนบางชนิด	<40	การแพร่ละลาย/การไหลผ่านรูพรุน
อัลตราฟิลเตรชัน	ได้สารละลายที่ไม่มีสารโมเลกุลใหญ่	สารโมเลกุลใหญ่/สารแขวนลอย	ตัวทำละลาย สารโมเลกุลเล็ก	<14	การคัดขนาด
ไมโครฟิลเตรชัน	สารละลายที่ปราศจากอนุภาค	สารโมเลกุลใหญ่บางชนิด อนุภาค	สารโมเลุลใหญ่บางชนิด/สารโมเลกุลเล็ก อิออนตัวทำละลาย	0.5 - 5	การคัดขนาด

2.1) เยื่อกรองอินทรีย์

เยื่อกรองชนิดนี้มักทำจากพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น nylon, polyvinylidene fluoride, polysulfone สำหรับทำเป็นเยื่อกรองชนิด RO NF UF และ MF โดยทั่วไปมักจะเป็นเยื่อกรองชนิด polysulfone เนื่องจากทนอุณหภูมิสูงถึง 75°C และช่วงพีเอชการทำงานกว้างคือ 1-13 ตัวอย่างเยื่อกรองอินทรีย์ดังภาพที่ 4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 4 เยื่อกรองอินทรีย์

2.2) เยื่อกรองอนินทรีย์

เยื่อกรองกลุ่มนี้ทำจากวัสดุอนินทรีย์ประเภทโลหะ/เซรามิก เช่น α-Aluminar (ceramic), stainless steel, zirconium เยื่อกรองกลุ่มนี้ทนต่ออุณหภูมิได้สูงถึง 300°C ทนต่อพีเอชในช่วงกว้าง ทนต่อความดัน ดังนั้นจึงสามารถใช้ทำงานช่วงที่กว้าง และมีช่วงอายุการใช้งานที่นาน นอกจากนี้เราอาจแบ่งชนิดของเยื่อกรองตามลักษณะโครงสร้างของเยื่อกรองได้ดังนี้

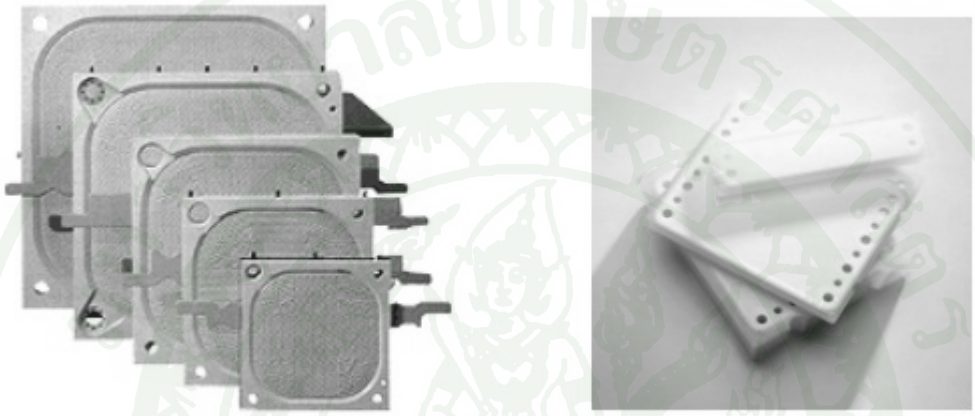
- เยื่อกรองแบบไม่มีรูพรุนหรือแบบแผ่น

เยื่อกรองประเภทนี้มักทำจากวัสดุโพลิเมอร์หรือวัสดุโลหะบางชนิด เป็นเยื่อกรองที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนที่มีขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า 2 นาโนเมตร) มีโครงสร้าง 2 ลักษณะคือ เยื่อกรองสมมาตร (symmetric membrane) และไม่สมมาตร (asymmetric membrane) เยื่อกรองสมมาตร มีคุณสมบัติทั้งทางเคมีและกายภาพสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นเยื่อกรอง ส่วนเยื่อกรองไม่สมมาตรจะประกอบด้วยชั้นผิว(skin layer) ซึ่งทำหน้าที่ แยกสารและชั้นที่รองรับชั้นผิว (supported layer) เพื่อเสริมความแข็งแรงเยื่อกรอง เรียกเยื่อกรองที่ชั้นผิวกับชั้นรองรับที่ทำจากวัสดุ ชนิดเดียวกันว่าเยื่อกรองชั้นผิว (skinned membrane) และที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกันว่าเยื่อกรองเชิงประกอบ (composite membrane) เยื่อกรองชนิดนี้ใช้กับกระบวนการออสโมซิสผันกลับและกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ดังภาพที่ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- เยื่อกรองชนิดมีรูพรุน

เยื่อกรองประเภทนี้มีลักษณะเป็นรูพรุนอาจทำจากโพลิเมอร์หรือวัสดุโลหะบางชนิด มีทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร แต่ส่วนใหญ่เป็นแบบไม่สมมาตร ใช้กับกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

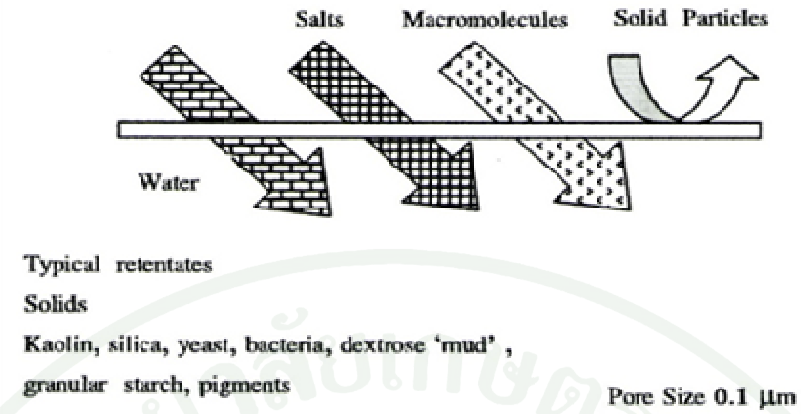


ภาพที่ 5 เยื่อกรองแบบไม่มีรูพรุนหรือแบบแผ่น

3) ไมโครฟิลเตรชั่น (MF)

หลักการทำงานของระบบเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน คือ การแยกตัวถูกละลายออกจากตัวทำละลาย สารละลายจะผ่านเข้าสู่เยื่อกรองซึ่งรักษาค่าความแตกต่างของความดันไว้ โดยที่น้ำเกลือ และโมเลกุลขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อกรองไปสู่ด้านที่มีความดันต่ำกว่า ในขณะที่ Solid Particles จะค้างอยู่บนเยื่อกรอง ดังภาพที่ 6 กระบวนการไมโครฟิลเตรชั่น โดยทั่วไปเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารแขวนลอย สารอนุภาคขนาดเล็กออกจากสารป้อนเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันขับต่ำเมื่อเทียบกับการกรองที่ใช้ความดันขับชนิดอื่นๆ คือประมาณ 0.1-5.0 บาร์ ทั้งนี้เนื่องจากเยื่อกรองที่ใช้มีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ คืออยู่ในช่วง 0.05-0.8 มม. กลไกการแยกสารอาศัยหลักการคัดขนาดเช่นเดียวกับกระบวนการ UF

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 กระบวนการเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชั่น

ที่มา: Ben Aim (2001)

3.1) รูปแบบของเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชั่น

โมดูลของเยื่อกรองที่ใช้ในกระบวนการ MF มี 4 แบบ คือ แบบม้วน (spiral wound) แบบแผ่น (plate and flame) แบบท่อ (tubular) และแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber) โดยโมดูลแบบม้วนและแบบเส้นใยกลวงเหมาะสำหรับการทดลองในระดับ pilot scale และ industrial scale ในขณะที่โมดูลแบบแผ่นใช้สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ อัตราการกรองที่ใช้สำหรับโมดูลแบบม้วนมีค่ามากกว่าที่ได้จากแบบเส้นใยกลวง แต่ข้อได้เปรียบที่สำคัญของโมดูลแบบเส้นใยกลวงคือ ประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูง ในขณะที่มีความต้องการบำบัดขั้นต้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบน้อยกว่า (Laine *et al*., 1987)

- โมดูลแบบม้วน (spiral wound)

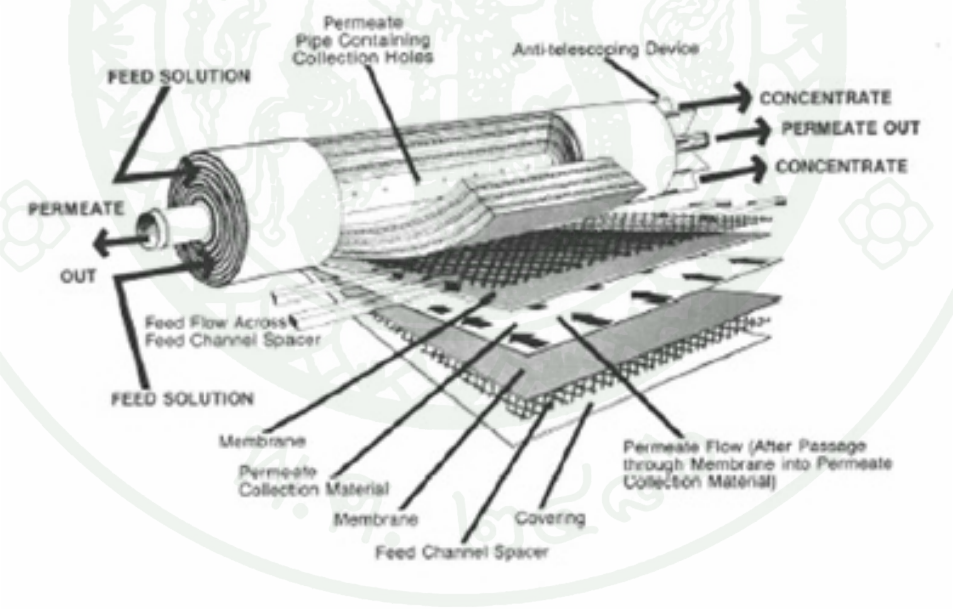
โมดูลแบบม้วนมีลักษณะดังภาพที่ 7 ทำจากการนำเยื่อกรองแบบแผ่นและแผ่นกั้นมาม้วนรอบแกนที่เป็นท่อของเพอมิเอท แผ่นกั้น เพอมิเอทเชื่อมกับท่อเพอมิเอท แผ่นกั้นของสารป้อนอยู่ระหว่างแผ่นเยื่อกรองทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดความกว้างของช่องสารป้อน และช่วยให้ สารป้อนมีการไหลที่ปั่นป่วน แผ่นเยื่อกรองที่ใช้อาจมีหลายแผ่นตามพื้นที่ที่ต้องการ โมดูลเยื่อกรอง 1 โมดูล ประกอบจากเยื่อกรอง 1 แผ่นหรือมากกว่า โดยจะบรรจุอยู่ในท่อทรงกระบอก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(housing) โมดูลแบบท่อม้วนส่วนใหญ่ ใช้กับกระบวนการ UF NF และ RO (ขนาดเล็กถึงใหญ่) ขนาดมาตรฐานของโมดูลคือ 2.5, 4 และ 8 นิ้ว โมดูลแบบท่อม้วนมีพื้นที่เยื่อกรองต่อปริมาตรประมาณ 300 ถึง 1000 $ม^2/ม^3$ ซึ่งสูงกว่าโมดูลแบบแผ่นและกรอบ และแบบท่อ

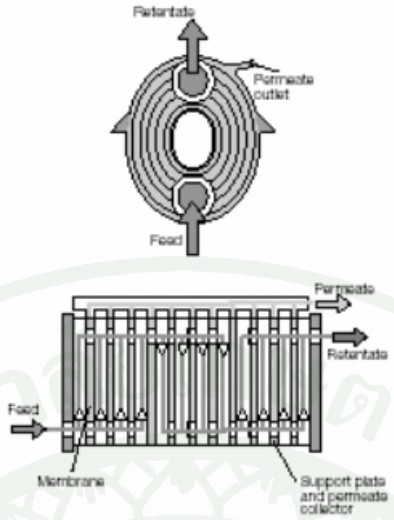
- โมดูลแบบแผ่นและกรอบ (plate and frame module)

โมดูลแบบแผ่นและกรอบประกอบด้วยเยื่อกรอง แผ่นกั้นสารป้อน อุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางการไหลของสารป้อน รีเทนเททและเพอมิเอท และอุปกรณ์ปิดกั้นไม่ให้มีการรั่วซึม มีลักษณะดังภาพที่ 8 โมดูลแบบนี้มีพื้นที่เยื่อกรองต่อหน่วยปริมาตร ประมาณ 100-400 $ม^2/ม^3$ มีราคาแพงเมื่อเทียบกับโมดูลแบบอื่นและมักมีปัญหาการรั่วซึม โมดูลแบบนี้เหมาะกับสารป้อนที่มีปัญหาการเกิดฟาวลิ่งสูง มีช่องว่างระหว่าง แผ่นเยื่อกรองประมาณ 1-3 มม. เป็นโมดูลเยื่อกรองที่ใช้กับกระบวนการ RO NF UF และ MF ที่มีขนาดเล็กถึงปานกลาง เยื่อกรองที่ใช้ ประกอบเป็นโมดูลแบบนี้ มีทั้งที่ทำจากพอลิเมอร์และเซรามิก



ภาพที่ 7 ลักษณะโมดูลแบบม้วน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

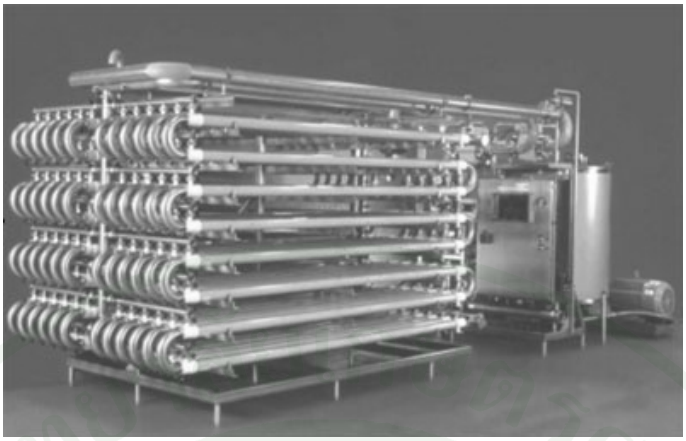


ภาพที่ 8 โมดูลแบบแผ่นและกรอบ

- โมดูลแบบท่อ (tubular module)

โมดูลแบบท่อมีรูปร่างและลักษณะคล้ายกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell and tube) ใช้กับกระบวนการ MF UF NF และ RO (ขนาดเล็กถึงปานกลาง) เหมาะกับสารป้อนที่เกิดการอุดตันได้ง่ายและสกปรก โมดูลประกอบด้วยเยื่อกรองชนิดท่อที่ชั้นพื้นผิว ซึ่งทำหน้าที่แยกสารอยู่ภายในและชั้นรองรับอยู่ภายนอก มีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 2.5 ซม. จะบรรจุอยู่ในตัวบรรจุ (housing) ซึ่งประกอบด้วยเยื่อกรองหลายๆ ท่อ ดังภาพที่ 9 เยื่อกรองที่ทำจากพอลิเมอร์มักบรรจุอยู่ในท่อสเตนเลสซึ่งทำหน้าที่เป็น ตัวรองรับ ส่วนเยื่อกรองที่ทำจากเซรามิก มีทั้งแบบท่อเดี่ยวและท่อแบบรังผึ้ง ไม่ต้องการท่อรองรับ สารป้อนไหลเข้าด้านในของท่อ และส่วนรีเทนเททจะไหลออกด้านปลายท่ออีกข้างหนึ่ง ส่วนเพอมิเอทจะไหลออกทางด้านข้างของท่อและถูกรวบรวมอยู่ในตัวบรรจุ และไหลออกจากท่อบรรจุไปกับทางท่อเพอมิเอท โมดูลแบบนี้มีพื้นที่เยื่อกรองต่อปริมาตรต่ำกว่าโมดูลแบบแผ่นและกรอบ วัสดุที่ใช้ทำเยื่อกรองมีทั้งเซรามิกและโพลิเมอร์

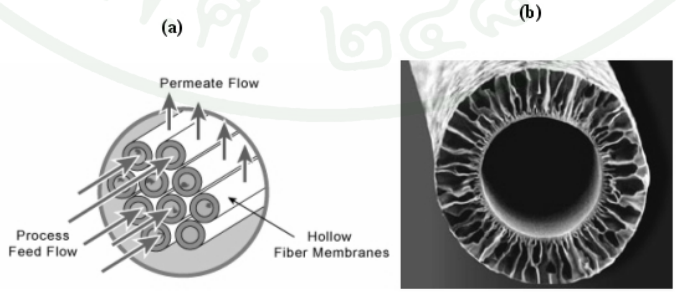
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 โมดูลแบบท่อ

- โมดูลแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber module)

โมดูลแบบเส้นใยกลวง ประกอบด้วยเยื่อกรองที่เป็นท่อขนาดเล็กแบบมีชั้นรองรับในตัว บรรจุอยู่ในท่อบรรจุซึ่งอาจทำจากวัสดุพอลิเมอร์ หรือสเตนเลส ดังภาพที่ 10 เยื่อกรองที่ขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นเส้นใยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.1-0.5 มม. ส่วนเยื่อกรองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ขึ้นประมาณ 0.5-10 มม. เรียกว่าเยื่อกรองเส้นใยกลวงแบบแคปิลลารี (capillary) โมดูล 1 โมดูล อาจจะประกอบด้วยเส้นใยกลวงหลายพันเส้นบรรจุใน bundle และ potted ด้วย epoxy ในท่อที่มีลักษณะจัดเรียงแบบ shell and tube สำหรับกระบวนการ MF และ RO สารป้อนมักเข้าทางผิวด้านนอกเส้นใย (outside in) ส่วนกระบวนการ UF และ NF สารป้อนมักเข้าทางท่อของเส้นใยกลวง (inside out) โมดูลแบบเส้นใยกลวงมีพื้นที่กรองต่อปริมาตรสูงสุดเมื่อเทียบกับโมดูลแบบอื่นๆ โดยอาจสูงถึง 30000 $ม^2/ม^3$



ภาพที่ 10 เยื่อกรองแบบเส้นใยกลวง a) การไหลของสารป้อนและเพอมมิเอท b) เส้นใยกลวง

การอุดตันของเยื่อกรอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2) การอุดตันคือการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคที่ต้องการกำจัดไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้และไม่สามารถย้อนกลับไปในกระแสน้ำได้ด้วย เป็นผลทำให้สารละลาย สารแขวนลอยและสิ่งมีชีวิตสะสมอยู่ที่ผิวหน้าเยื่อกรอง กระบวนการทำให้เกิดการอุดตันคือ

- การอุดตันเนื่องจากอนุภาคหรือสารแขวนลอย อนุภาคหรือสารแขวนลอยที่ทำให้เกิดการอุดตันของเยื่อกรอง ส่วนใหญ่คือ clay, silt และเหล็กซึ่งมากับน้ำดิบ เหล็กที่ก่อให้เกิดการอุดตันอยู่ในรูปของ $Fe(OH)_3$ ซึ่งเป็นตะกอนและจับอยู่บนผิวเยื่อกรอง การจะกำจัดเหล็กในสภาพของตะกอน(Fe^{3+}) ให้อยู่ในสภาพที่ละลายน้ำ Fe^{2+} โดยการลดพีเอชของน้ำ

- การอุดตันเนื่องจากสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ในน้ำบางส่วนจะก่อตัวและเกิดเป็นชั้น gel layer บริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง สารละลายบางส่วนจะถูกติดอยู่ภายในช่องเยื่อกรอง ทำให้เยื่อกรองอุดตัน Chang and Benjamin (1996) ได้ทำการเติมอนุภาคของธาตุเหล็กลงในน้ำดิบ และพบว่าระบบ MF และ UF สามารถกำจัดสารละลายอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ Powdered Activated Carbon(PAC) เติมลงในน้ำดิบก่อนผ่าน MF และ UF ระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้เพิ่มเช่นกัน แต่การใช้ออกไซด์ของเหล็กจะดีกว่า PAC เนื่องจาก PAC ต้องมีค่าใช้จ่ายในการฟื้นสภาพ และต้องมีการกำจัด PAC ที่หมดสภาพแล้ว ในส่วนของเหล็กออกไซด์สามารถเอาสารละลายที่เกาะอยู่กับเหล็กออกไซด์ออกได้ง่ายโดยการปรับ pH ของน้ำ

Renou *et al*.,(2008) ศึกษากระบวนการบำบัดประกอบด้วยการตกตะกอนเคมีด้วยน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ปูนขาวที่ปริมาณ 0-10 ก./ล. ตามด้วยการกรองแยกส่วนตะกอนออกจากของเหลวก่อนเข้า RO โดย 1) ลดความเค็มของน้ำออก 15-30% เมื่อผ่านการตกตะกอนโลหะและคาร์บอเนต ทำให้การควบคุมการทำงานของ RO ง่ายขึ้นโดยลดความดันออสโมติก 2) กำจัดกรดอินทรีย์เพื่อลดการอุดตันของเยื่อกรอง 3) ทำการสลัดจ์ให้คงตัวโดยเติมเคมีและทำให้แห้งง่ายต่อการจัดเก็บ

- การอุดตันเนื่องจากสารอนินทรีย์ โดยทั่วไปการอุดตันเนื่องจากสารอนินทรีย์เป็นปัญหาสำหรับ RO และ NF เนื่องจากสารอนินทรีย์สามารถผ่าน MF และ UF ไปได้ ยกเว้นแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) และเหล็กออกไซด์ สารอนินทรีย์ที่มักพบในน้ำ เช่น การตกผลึกของ $CaCO_3$ หรือ $CaSO_4$, SiO_2, Strantium Sulifate, $BaSO_4$ และ CaF_2 ผลึกของสารต่างๆ เหล่านี้ทำให้เกิดการอุดตันของเยื่อกรอง มั่นสิน (2538) ระบุว่า การป้องกันการเกิดผลึกของ $CaCO_3$ ทำได้โดย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การเติมกรดและถ้าต้องการป้องกันการตกผลึกของ $CaSO_4$ ควรใช้สารห้ามตะกรัน เช่น Sodium Hexametaphosphate

- การอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์และสาหร่ายที่อยู่ในน้ำดิบสามารถเจริญเติบโตได้บนเยื่อกรอง ซึ่งหากปล่อยให้เกิดขึ้นจะเกิดปัญหาทำให้เยื่อกรองถูกทำลายและรั่วเสียหายได้

Amokrane *et al.,* (1997) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนระหว่าง $FeCl_3$ และ Al_4PO_3 สามารถลดความขุ่นได้มากถึง 97% แต่ปริมาณเหล็กที่ลอยบนผิวน้ำสามารถทำให้เกิดการอุดตันของ RO ได้ (มากกว่า 15/นาที) จึงต้องทำการควบคุมค่าพีเอชโดยการเติมปูนขาว ทำให้ปริมาณเหล็กและดัชนีการอุดตันของสารแขวนลอยบนผิวน้ำต่ำกว่า 2 มก./ล. และ 5/นาที ดังนั้นสารที่แขวนลอยบนผิวน้ำจะถูกบำบัดโดย RO โดยไม่อุดตันเยื่อกรอง

4) ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการกรองของเยื่อกรอง

4.1) คุณภาพน้ำดิบ กลไกของอนุภาคจะถูกกำหนดโดยความสามารถในการบีบอัดของอนุภาค ความหนาแน่น และการกระจายของขนาด โดยพบว่าอนุภาคที่มีขนาดสม่ำเสมอและใหญ่พอที่จะไม่เข้าไปอุดตันในรูพรุนของเยื่อกรองจะมี Flux สูงกว่าอนุภาคที่มีลักษณะเป็นวุ้น (Gelatinous) นอกจากนี้คุณสมบัติของการดูดติดผิวของอนุภาคหรือสารละลายในของเหลวก็เป็นปัจจัยสำคัญ โดยสารที่มีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำจะมีความสามารถในการแพร่สูง ทำให้อนุภาคสามารถอุดตันในรูพรุนของเยื่อกรองมากขึ้นส่งผลให้อัตราการกรองของเยื่อกรองลดลง

4.2) การเตรียมน้ำก่อนกรองเนื่องจากสารละลายอินทรีย์ Dissolved Organic Carbon (DOC) ในน้ำดิบเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตัน จึงควรบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนก่อนผ่านน้ำเข้าเยื่อกรองเพื่อลดปัญหาการอุดตันของเยื่อกรอง โดยประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับลักษณะของการสร้างตะกอน ชนิดของสารปนเปื้อน พีเอช และลักษณะพื้นผิวของเยื่อกรอง

Wang (1995) พบว่าการบำบัดน้ำเบื้องต้นด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน โดยมีโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองของเยื่อกรองให้สูงขึ้น ในขณะที่กระบวนการถูกดูดซับด้วย Powder Activated Carbon (PAC) ไม่สามารถเพิ่มอัตราการกรองของเยื่อกรองในการกรองระยะยาวได้ เนื่องจากสารละลายที่ผ่าน PAC จะเข้าไปอุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตันในช่องเยื่อกรอง ซึ่งสารละลายเหล่านั้นสามารถถูกกำจัดได้ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

4.3) คุณสมบัติของเยื่อกรอง ความสามารถในการแพร่ผ่านตัวกลาง ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้จะเป็น symmetric polymer เช่น Polyolefine Fluoropolymer และ Nylons โดยทั่วไปกลไกในการแยกอนุภาคโดยใช้เยื่อกรองมีลักษณะเหมือนการแยกอนุภาคด้วยตะแกรง โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของช่องเยื่อกรองจะถูกกักไว้ น้ำที่มีอนุภาคลักษณะนี้เป็นสารแขวนลอยจะไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ ทำให้อัตราการกรองจะต่ำในช่วงแรกส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของช่องเยื่อกรอง เช่น สารละลาย สามารถผ่านเยื่อกรองได้และอัตราการกรองก็จะสูงด้วย

4.4) แรงดันผ่านเยื่อกรองอัตราการกรองจะเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มความแตกต่างของแรงดันระหว่างหน้าเยื่อกรองกับหลังเยื่อกรอง แต่หากเพิ่มแรงดันมากเกินกว่าที่เยื่อกรองสามารถรับได้จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อเยื่อกรอง

4.5) ความเร็วของของไหลความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านเยื่อกรอง ทำให้เกิดแรงเฉือนติดชั้น polarization ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการสะสมของอนุภาคบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง เมื่อของไหลมีความเร็วสูงขึ้นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยลดการอุดตันบริเวณผิวหน้าเยื่อกรอง

5) ทฤษฎีการวิเคราะห์การกรอง (theory for analysis of filtration)

เมื่อสารแขวนลอยของอนุภาคต่างๆ ผ่านตัวกรอง อนุภาคแรกจะจับอยู่ที่ตัวกรองทำให้พื้นที่ที่ของเหลวสามารถไหลผ่านได้ลดลง ซึ่งทำให้ความต้านทานต่อการไหลของของไหลเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของเค้กเพิ่มขึ้น ดังนั้น การไหลของฟิลเตรทจะลดลงเมื่อเวลาของการกรองผ่านไป ถ้าต้องการรักษาอัตราการไหลของฟิลเตรท ความแตกต่างความดันที่ใช้ต้องสูงขึ้น สมการของอัตราการกรองเขียนได้ดังนี้

สมการที่ใช้ในการกรอง แบ่งเป็น 2 กรณี

- กรณีใช้ความดันคงที่ ในกระบวนการกรองส่วนใหญ่ เมื่อเค้กเริ่มเกิดขึ้น การไหลจะเกิดขึ้นภายใต้การกรองที่ความดันลด (pressure drop) คงที่ ซึ่งมีสมการดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \alpha Cs}{2A^2 \Delta P} V + \frac{\mu Rm}{A \Delta P} \qquad (1)$$

เมื่อ V = ปริมาตรของของเหลวใส (m^3)

t = เวลาในการกรอง (s)

c = มวลของของแข็งที่กรองได้/ ปริมาตรของของเหลวใส (kg/ m^3)

μ = ความหนืดของของเหลวใส (kg /m .s)

A = พื้นที่ทั้งหมดที่ใช้ในการกรอง (m^2)

ΔP = ความดันลดที่ใช้ในการกรอง (kg / m.s^2)

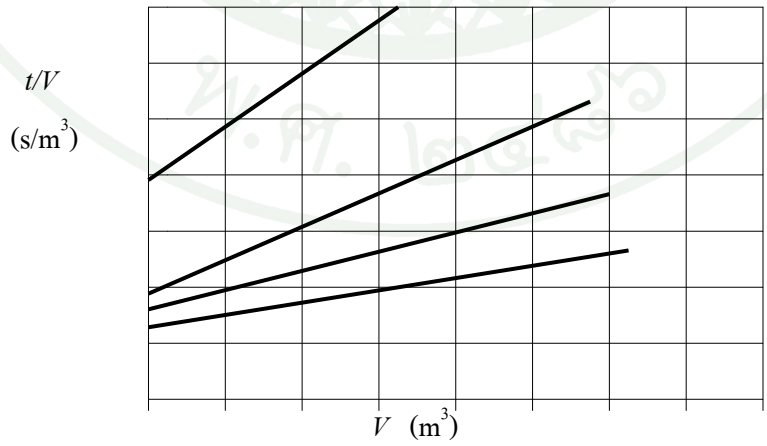
R_m = ความต้านทานของตัวกลางกรอง (m^{-1})

ค่า α และ R_m เป็นค่าเฉพาะของแต่ละการทดลอง และหาค่าได้จากการทดลองเท่านั้น จากสมการ (1) ถ้าเขียนกราฟระหว่าง $\frac{t}{V}$ และ V (รูปที่ 4) จะได้กราฟเส้นตรงที่มี

$$\text{ความชัน} = \frac{\mu \alpha Cs}{A^2 \Delta P} \qquad (2)$$

$$\text{และ จุดตัดแกน y} = \frac{\mu Rm}{A \Delta P} \qquad (3)$$

ดังนั้นเมื่อทราบค่าความชันและค่าจุดตัดแกน y จากภาพที่ 11 ก็สามารถหาค่า α และ R_m ได้จากสมการ (2) และ (3) ตามลำดับ



ภาพที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/V และ V

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- กรณีใช้อัตราการกรองคงที่ ในวงจรของการกรองช่วงแรกที่เกิดขึ้น มักพบว่าความต้านทานของตัวกรองนั้นมีค่าสูงมากเมื่อเทียบความต้านทานของฟิลเตอร์เค้ก เนื่องจากความหนาของเค้กยังบางอยู่ ภายใต้สภาวะเช่นนี้ ความต้านทานต่อการไหลจะคงที่และการกรองจะดำเนินต่อไปด้วยอัตราเกือบคงที่ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\Delta P = \left(\frac{\mu \alpha Cs}{A^2}\frac{dV}{dt}\right)V + \left(\frac{\mu Rm}{A}\frac{dV}{dt}\right) \quad (4)$$

โดยจากสมการ (4) ถ้าเขียนกราฟระหว่าง ΔP และ V จะได้กราฟเส้นตรงที่มี

$$\text{ความชัน} = \left(\frac{\mu \alpha Cs}{A^2}\frac{dV}{dt}\right) \quad (5)$$

$$\text{และ จุดตัดแกน } y = \left(\frac{\mu Rm}{A}\frac{dV}{dt}\right) \quad (6)$$

ดังนั้นเมื่อทราบค่าความชันและค่าจุดตัดแกน y จากกราฟ ก็สามารถหาค่า α และ R_m ได้จากสมการ (5) และ (6) ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

1. ระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยในพื้นที่ศึกษา

ระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยของพื้นที่ฝังกลบมูลฝอย อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี (ภาพที่ 12) ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

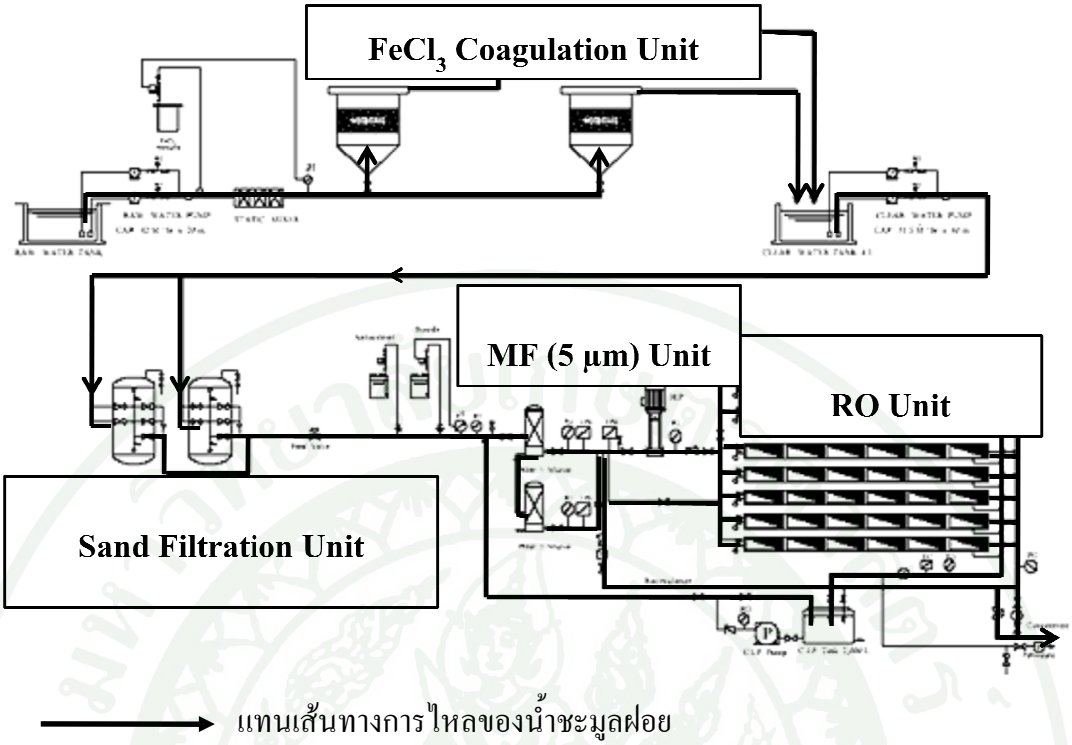
- ระบบตกตะกอนเคมี ประกอบด้วยถังตกตะกอนชนิด Open Jet Clarifier ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เมตร จำนวน 2 ถัง ออกแบบให้สามารถรองรับอัตราการไหลที่ 1,000 ลบ.ม./วัน (หรือคิดเทียบเท่ากับ 42 ลบ.ม./ชม. ที่ระยะเวลาการทำงานของระบบ 24 ชม./วัน) สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนเคมีได้แก่ เฟอร์ริคคลอไรด์ร่วมกับโพลิเมอร์โดยการผสมสารเคมีกับน้ำเสียใช้อุปกรณ์กวนผสมในเส้นท่อ (Static Mixer) ส่วนตะกอนที่เกิดขึ้นจะระบายออกจากระบบนำไปกำจัดในบ่อเก็บกักตะกอนเพื่อตากแห้งต่อไป

- ระบบกรองทราย เป็นแบบใช้แรงดัน (Pressure Type) เพื่อกำจัดอนุภาคที่เหลืออยู่หลังการตกตะกอน ก่อนจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบออสโมซิสผันกลับ ระบบประกอบด้วยถังกรองทรายจำนวน 2 ถัง เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 เมตร พื้นที่หน้าตัดถัง 6.6 ตารางเมตร มีอัตราการกรอง 5-12.5 ม./ชม.

- ระบบกรองไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) เป็นระบบกรองที่ใช้ป้องกันอนุภาคก่อนเข้าสู่ระบบออสโมซิสผันกลับ ประกอบด้วยถังบรรจุเยื่อกรอง MF แบบแท่งขนาดช่องเปิด 5 μm จำนวน 2 ถัง โดยรับน้ำที่ผ่านถังกรองทราย และอาศัยการกรองแบบปิดตาย (Dead end) และเปลี่ยนเยื่อกรองใหม่เมื่อเกิดการอุดตัน

- ระบบออสโมซิสผันกลับ ประกอบด้วยท่อแรงดันบรรจุเยื่อกรองจำนวน 7 แถว แต่ละแถวบรรจุเยื่อกรองออสโมซิสผันกลับยี่ห้อ Hydronautics รุ่น LFC 3LD ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว จำนวน 6 ท่อน เดินระบบโดยมีอัตราการผลิตน้ำผ่านเยื่อกรอง 50 % (อัตราการไหลเข้า 42 ลบ.ม./ชม. อัตราการไหลน้ำผ่านการบำบัด 21 ลบ.ม./ชม.)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 ระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอย พื้นที่ฝังกลบ อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี

2. ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยที่นำมาใช้ในการทดลอง

น้ำชะมูลฝอยที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นน้ำชะมูลฝอยที่เสถียรจากบ่อรวบรวมน้ำชะมูลฝอยของพื้นที่ฝังกลบขยะ อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี จากการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำชะมูลฝอยที่ทำการเก็บตัวอย่างจำนวน 5 ครั้ง ในช่วงเดือน มีนาคม 2552 ถึงเดือนธันวาคม 2552 แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 5

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยในสภาวะการเดินระบบต่างๆในห้องปฏิบัติการจึงกำหนดขั้นตอนการศึกษาเป็น 3 การทดลองได้แก่ การศึกษาประสิทธิภาพของระบบตกตะกอนเคมี การศึกษาประสิทธิภาพของระบบกรองทราย และศึกษาการอุดตันของเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชั่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำชะมูลฝอย

ครั้งที่	pH	Suspended Solid (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	Color (Pt.Co)	COD (มก./ล.)
1	8.4	345.0	85	23.0	2545.0
2	7.9	276.7	64.6	19.0	2132.0
3	8.1	635.0	69.1	17.0	2154.7
4	7.9	229.0	76	24.0	2107.0
5	8.0	264.0	434	32.0	2283.0
ช่วงค่า	7.9-8.4	229.0-635.0	64.6-434	17.0-32.0	2107.0-2545.0
เฉลี่ย	8.1	349.9	145.5	23.0	2244.4

3. อุปกรณ์/สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1 การตกตะกอนเคมีโดยใช้เฟอริคคลอไรด์ ($FeCl_3$) 40% เป็นสารสร้างตะกอนร่วมกับโพลิเมอร์ชนิดประจุลบเป็นสารรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์ของ Phipp & Bird รุ่น PB-70™

3.2 การกรองทรายประกอบด้วยคอลัมน์สแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 150 ซม.มีความลึกของทรายกรอง 100 ซม. มีจุดเก็บ 5 จุด ติดตั้งปั๊มสำหรับเติมเฟอร์ริคคลอไรด์และโพลิเมอร์บริเวณทางน้ำเข้าก่อนเข้าสู่คอลัมน์กรองทราย ดังภาพที่ 4 น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะถูกเก็บในถังพักแล้วทำการสูบน้ำเข้าถังกรองทรายโดยใช้ปั๊มขนาด 0.75 แรงม้า ปรับอัตราการไหลเท่ากับ 0.2 ล./นาที กำหนดอัตราการกรองคงที่เท่ากับ 5.45 ม./ชม. ซึ่งเป็นอัตราการกรองของถังกรองทรายที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยหลุมฝังกลบ อ.ไทรน้อย จ.นนทบุรี

3.3 ระบบเยื่อกรองทำการศึกษาโดยใช้กระดาษกรอง 5 μm ต่อกับชุดกรองสุญญากาศ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ขั้นตอนการทดลอง

4.1 การตกตะกอน

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนเคมีโดยวิธีจาร์เทสต์ทำการแปรผันค่า pH ช่วง 6-10 โดยใช้เฟอร์ริคคลอไรด์40% แปรผันปริมาณในช่วง 1.5-3 ก./ล. และแปรผันปริมาณโพลิเมอร์ชนิดประจุลบในช่วง 0.001-0.02 ก./ล. เป็นสารสร้างตะกอน กวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที กวนช้าที่ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงนำน้ำส่วนใสมาทำการวิเคราะห์ค่าพีเอช ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น สีตาม Standard Methods for the examination of Water and Wastewater 21th ed. และวัดขนาดอนุภาคของตะกอนโดยวิธี Wet Mount Technique

4.2 การกรองทราย

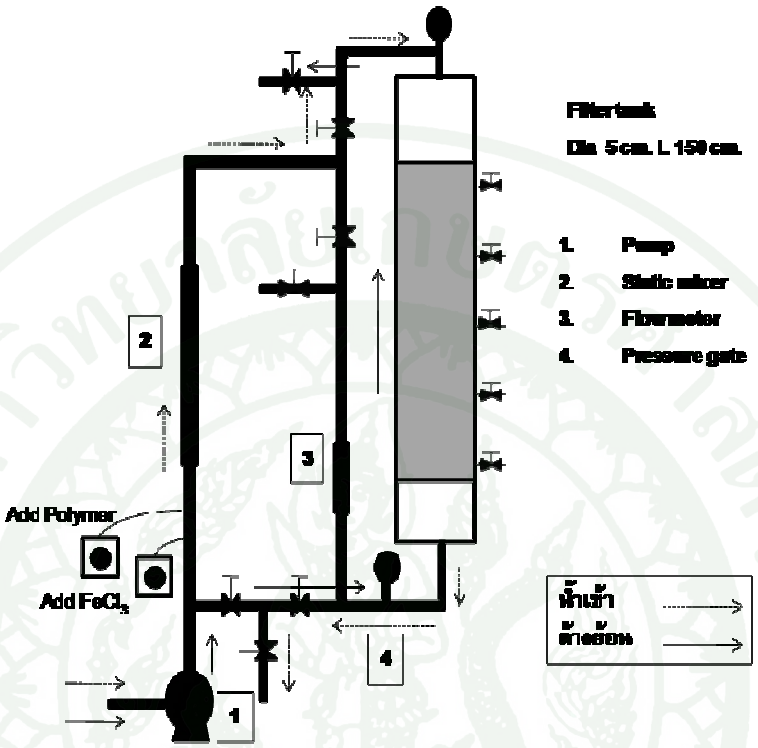
ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกรองทรายโดยใช้คอลัมน์ดังภาพที่ 13 ทำการเปรียบเทียบการกรองน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมี กับการกรองโดยมีการเติมสารสร้างตะกอนในเส้นท่อ (In-line coagulation) มีสภาวะการทดลองแสดงดังตารางที่ 6 เดินระบบด้วยอัตราการกรอง 5.45 ม./ชม. และทำการเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยตามระดับความลึกชั้นกรองทรายที่ความลึกต่างๆ ได้แก่ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ0.9 ม. และน้ำที่ออกจากคอลัมน์กรองทรายในแต่ละชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ค่าพีเอช ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น สีและขนาดของอนุภาคตะกอน

4.3 การกรองด้วยเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชั่น

นำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีและการกรองจากสภาวะที่ 3 มาผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรอง 5 μm (Cellulose Nitrate Membrane Filters) ยี่ห้อ Whatman แล้วน้ำที่ผ่านการกรองมาทำการวิเคราะห์ตาม Standard Methods for the examination of Water and Wastewater 21th ed. และวัดขนาดอนุภาคของตะกอนโดยวิธี Wet Mount Technique และทำการศึกษาการอุดตันของเยื่อกรอง 5 μm โดยทำการตกตะกอนเคมีและกรองเปรียบเทียบระหว่างการตกตะกอนเคมีในถังตกตะกอนโดยตรง(สภาวะที่ 1) กับการตกตะกอนในเส้นท่อ(สภาวะที่ 3) โดยนำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีและการกรองทรายมากรองผ่านกระดาษกรอง 5 μm ทำการจับเวลาและจดปริมาตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

น้ำที่ผ่านกระดาษกรองแล้วจึงนำไปพล็อตกราฟและคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของเค้ก (α) และค่าความต้านทานของตัวกลางกรอง (R_m)

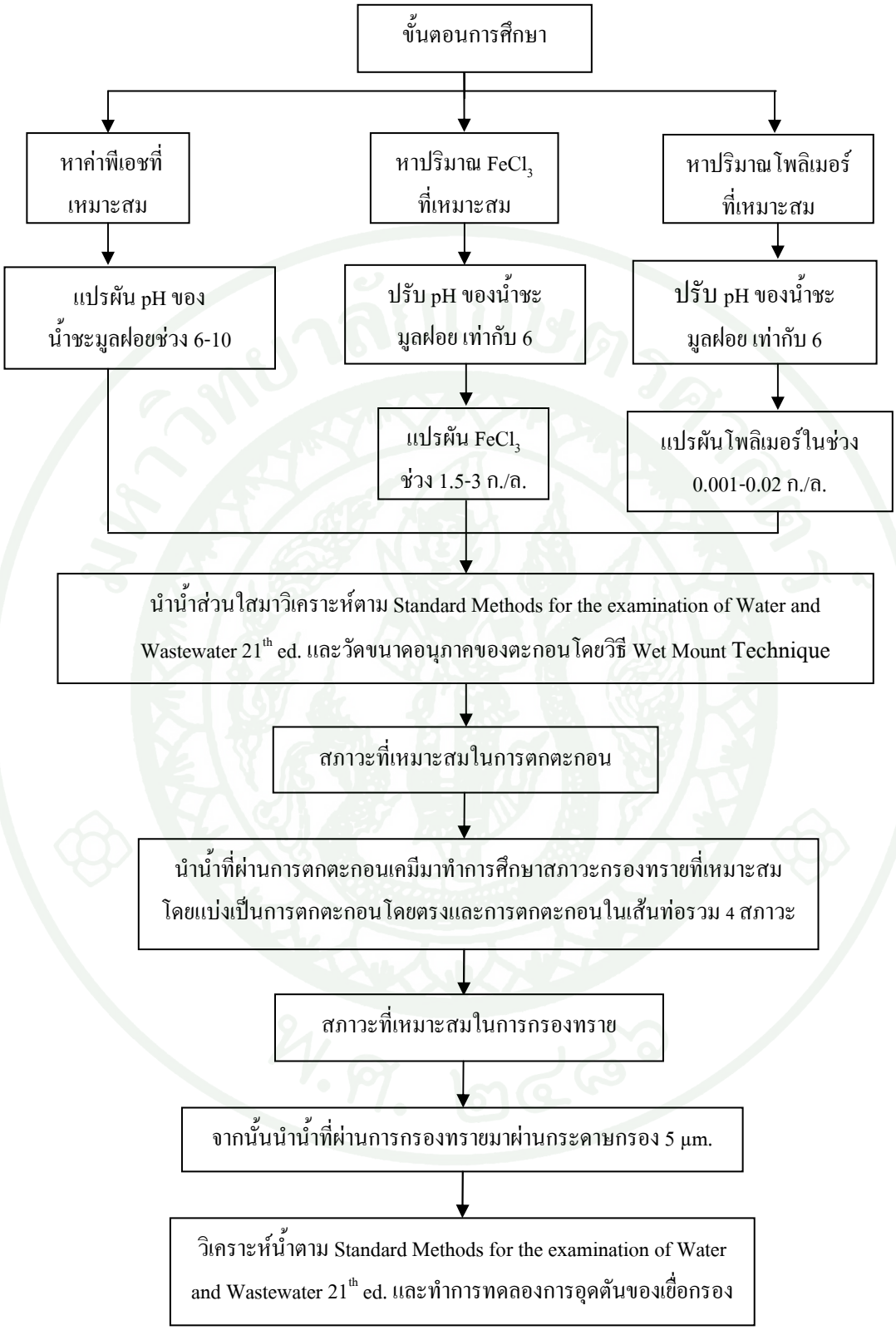


ภาพที่ 13 การไหลของน้ำเข้าคอลัมน์กรองทราย

ตารางที่ 6 สภาวะที่ใช้ในการทดลองระบบกรองทราย

การทดลอง	ปริมาณที่เติมในการตกตะกอนเคมี		ปริมาณที่เติมเส้นท่อ	
	$FeCl_3$ (ก./ล.)	Polymer (ก./ล.)	$FeCl_3$ (ก./ล.)	Polymer (ก./ล.)
การตกตะกอนโดยตรง (สภาวะที่ 1)	1.5	0.01	-	-
การตกตะกอนในเส้นท่อ (สภาวะที่ 2)	1.5	-	-	0.01
การตกตะกอนในเส้นท่อ (สภาวะที่ 3)	1.2	-	0.3	0.01
การตกตะกอนในเส้นท่อ (สภาวะที่ 4)	1.2	0.005	0.3	0.005

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 14 ขั้นตอนการศึกษาโดยรวม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. การวัดขนาดอนุภาค

การเตรียมสไลด์ด้วยวิธี Wet Mount Technique วิธีนี้ตัวอย่างจะแขวนลอยอยู่ในหยดน้ำหรือของเหลวที่เกาะบน Slide และปิดทับด้วย cover slip (แผ่นกระจกบางๆ ที่ปิดทับตัวอย่างบน slide)

- เตรียมสไลด์ สไลด์ที่ใช้เตรียมอาจเป็นสไลด์ใหม่หรือที่ใช้แล้วก็ได้ แต่ต้องล้างให้สะอาด ไม่มีฝุ่นหรือไขมันเกาะ การล้างสไลด์อาจล้างด้วยน้ำยาซักล้างทั่วๆไปก็ได้ และล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วเช็ดให้แห้ง จากนั้นนำไปแช่ใน 95 % ethyl alcohol นาน แล้วจึงเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสะอาด เก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท การจับสไลด์ควรจับที่ขอบเพื่อไม่ให้คราบไขมันจากมือเปื้อนแผ่นสไลด์

- นำอนุภาคที่ต้องการวัดขนาดป้ายลงบนแผ่นสไลด์โดยใช้ลูป (loop) หรือหลอดหยดหยดบนลงสไลด์ แล้วปิดทับด้วย cover slip

- ทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์และวัดขนาดอนุภาค

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

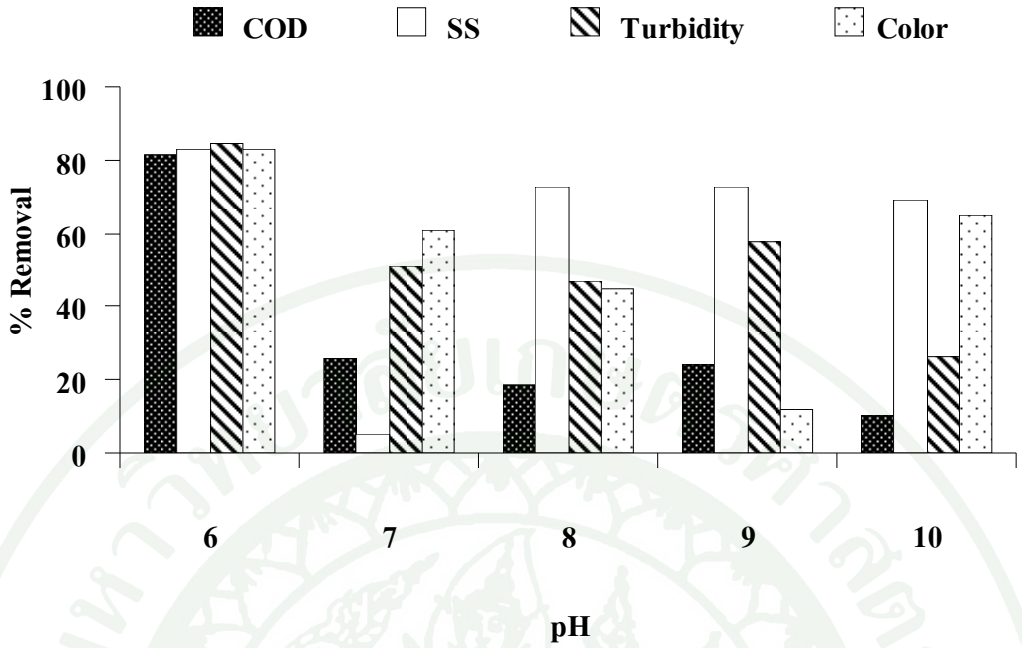
ผลและวิจารณ์

1. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนเคมี

1.1 อิทธิพลของพีเอชของน้ำชะมูลฝอยต่อการตกตะกอนเคมี

จากการทดลองทำการปรับค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนการตกตะกอนที่พีเอช 6-10 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 6 นอร์มัล ปรับให้เป็นกรด และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล ปรับให้เป็นด่าง กำหนดปริมาณเฟอร์ริคคลอไรด์ที่ 2 ก./ล. เท่ากันทุกบีกเกอร์ กวนเร็วด้วยอัตรา 200 รอบ/นาที นาน 3 นาที กวนช้าด้วยอัตราเร็ว 40 รอบ/นาที นาน 15 นาที แล้วทิ้งให้ตกตะกอน จากภาพที่ 15 พบว่าที่พีเอช 6 มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยทุกพารามิเตอร์มากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งเป็นพีเอชที่ดีที่สุด เมื่อตกตะกอนน้ำชะมูลฝอยที่พีเอช 6 ค่าพีเอชหลังตกตะกอนเท่ากับ 3 การลดลงของค่าพีเอชเนื่องจาก Fe^{3+} ทำปฏิกิริยากับประจุ OH^- ในน้ำชะมูลฝอย และเกิดตะกอนในรูปของ $Fe(OH)_3$ (O'melia, 1969) ค่าพีเอชหลังทำการตกตะกอนน้ำชะมูลฝอยดังตารางที่ 7 โดยน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วมีค่าพีเอช 7-9 ไอออนของเหล็กจะละลายได้น้อยมาก (Metcalf and Eddy, 2004) จึงทำการจับตัวกับสารแขวนลอยในน้ำได้ไม่ดีทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยจึงน้อยกว่าที่พีเอช 6 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นลดลงเมื่อเป็นด่างเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของ A. Amokrane *et al.,* 1997 พีเอชมีส่วนเกี่ยวข้องกับการบำบัดสีของน้ำหลังจากตกตะกอนพบว่าที่พีเอช 6 น้ำส่วนใสมีสีน้ำตาลใสกว่าที่พีเอช 7-10 ซึ่งน้ำส่วนใสมีสีน้ำตาลเข้มดังภาพที่ 16 จากการทดลองของ พบว่าการเพิ่มปริมาณโคแอกกูแลนท์ ทำให้เกิดสีน้ำตาลเข้มของน้ำชะมูลฝอย เมื่อทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นของตะกอนจะได้สีน้ำตาล เมื่อใกล้จุดที่มีปริมาณโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมน้ำที่ผ่านการตกตะกอนจะมีสีเหลือง ลักษณะตะกอนเป็นโคลนเนื่องจากการศึกษาหาปริมาณพีเอชที่เหมาะสมเบื้องต้นไม่มีการเติมโพลิเมอร์ทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นรวมตัวไม่ดีเท่าที่ควร ส่วนขนาดตะกอนเฉลี่ยของพีเอชช่วง 6-8 มีขนาดใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 76-82 μm และที่พีเอช 9-10 มีขนาดเฉลี่ยใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 108-110 μm ดังข้อมูลในตารางที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ค่าพีเอชต่างๆ

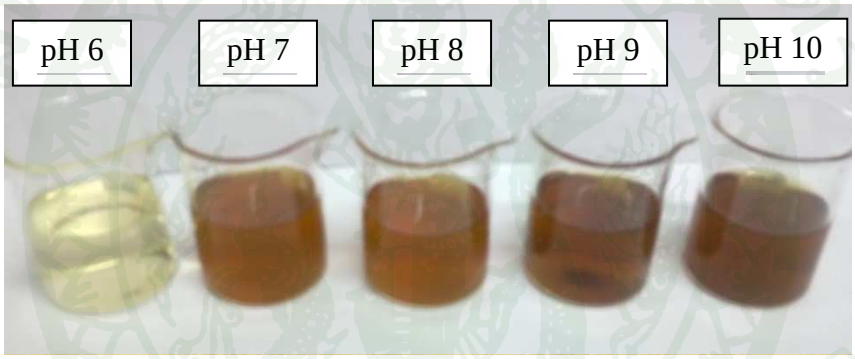
ตารางที่ 7 ค่าพีเอชก่อนและหลังการตกตะกอน ลักษณะตะกอนและสีของน้ำในการหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

ค่าพีเอชก่อนการตกตะกอน	ค่าพีเอชหลังการตกตะกอน	ลักษณะตะกอนและสีของน้ำ
6	3.03	น้ำมีสีเหลืองอ่อน ขุ่น
7	6.3	ตะกอนลักษณะคล้ายโคลน น้ำใสมีสีน้ำตาลเข้ม
8	6.8	ตะกอนลักษณะคล้ายโคลน น้ำมีสีน้ำตาล
9	7.27	ตะกอนไม่รวมกันเป็น floc น้ำมีสีน้ำตาลเข้ม
10	8.48	ตะกอนไม่รวมกันเป็น floc น้ำมีสีน้ำตาลเข้ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

pH	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.Co)	Floc size เฉลี่ย(μm)
6	39	39.1	372	4.32	79
7	262.2	143	1600	5.69	82
8	75	145	1752.2	12.65	76
9	75	120	1593.1	20.02	110
10	77.5	50.8	1885.7	7.9	108



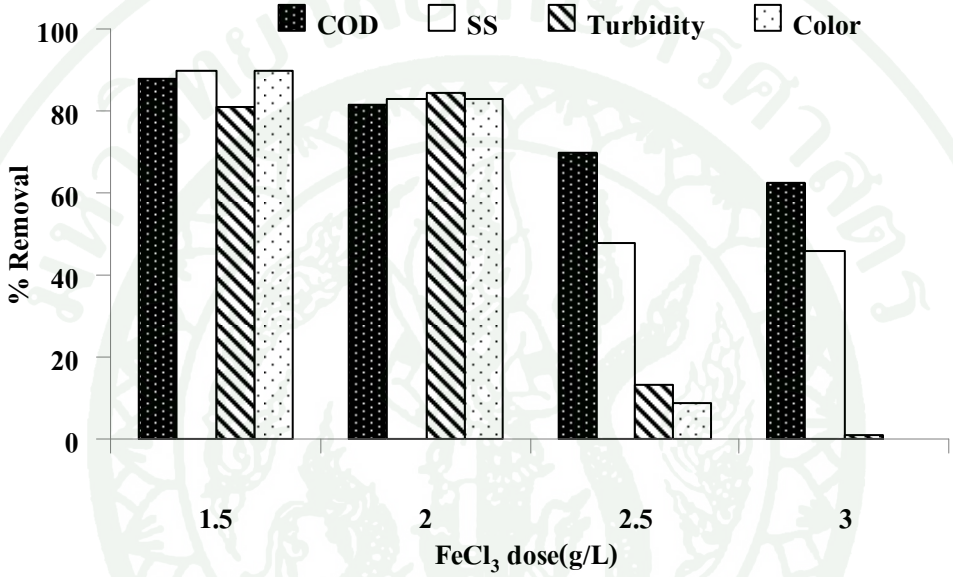
ภาพที่ 16 สีของน้ำหลังตกตะกอนที่พีเอชต่างๆ

1.2 การศึกษาปริมาณสารเฟอร์ริคคลอไรด์ที่เหมาะสมในการตกตะกอนเคมี

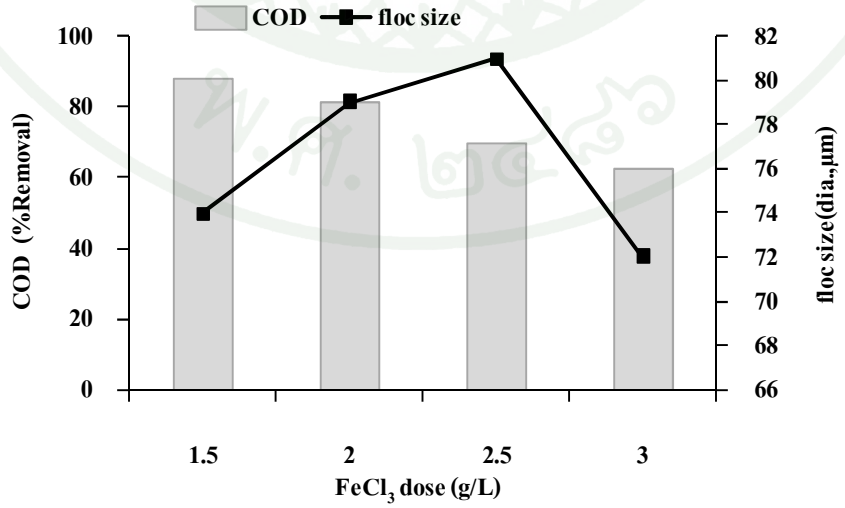
ทำการปรับค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยเท่ากับ 6 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 6 นอร์มัล ก่อนทำการตกตะกอนเคมี แล้วจึงแปรผันการเติมปริมาณเฟอริคคลอไรด์ในช่วง 1.5-3 ก./ล. กวนเร็วด้วยอัตรา 200 รอบ/นาที นาน 3 นาที กวนช้าด้วยอัตราเร็ว 40 รอบ/นาที นาน 15 นาที แล้วทิ้งให้ตกตะกอน จากภาพที่ 17 พบว่าที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์เท่ากับ 1.5 ก./ล. มีประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมดีที่สุด โดยสามารถบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความขุ่นและสีได้ร้อยละ 88, 90, 81 และ 90 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tatsi et al., 2003 โดยสามารถบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ75 เมื่อใช้เฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. เป็นสารสร้างตะกอนในน้ำชะมูลฝอยเก่า สีของน้ำส่วนใส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หลังตกตะกอนที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์เท่ากับ 1.5 ก./ล. ใสที่สุด ส่วนที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์ 2-3 ก./ล. น้ำส่วนใสมีที่น้ำตาลเข้มกว่าที่ปริมาณ 1.5 ก./ล. ขนาดตะกอนใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 74-81 μm ดังตารางที่ 9 โดยตะกอนลักษณะคล้ายโคลนค่อยๆ ตกตะกอนเมื่อตั้งทิ้งไว้ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีกับขนาดตะกอนพบว่าขนาดตะกอนไม่มีผลกับการบำบัดซีโอดี แสดงว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีขึ้นกับปริมาณเฟอริคคลอไรด์โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเฟอริคคลอไรด์ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีลดลงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 17 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ปริมาณเฟอร์ริคคลอไรด์ต่างๆ



ภาพที่ 18 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและขนาดตะกอนที่ปริมาณเฟอร์ริคคลอไรด์ต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีเพื่อหาปริมาณเฟอร์ริคคลอไรด์ที่เหมาะสม

Dose $FeCl_3$ (ก./ล.)	pH หลังตกตะกอน	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.Co)	Floc size เฉลี่ย (μm)
1.5	3.26	24	48.9	240	2.63	73.8
2	3.03	39	39.1	372	4.32	79
2.5	2.91	120	220	600	23.18	81
3	2.38	124	252	744	25.47	72

1.3 ศึกษาปริมาณสารรวมตะกอนที่เหมาะสมในการตกตะกอนเคมีร่วมกับเฟอร์ริคคลอไรด์

ทำการปรับค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนตกตะกอนเคมีเท่ากับ 6 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 6 นอร์มัล และเติมเฟอร์ริคคลอไรด์เท่ากับ 1.5 ก./ล. ทำการแปรผันปริมาณโพลิเมอร์ในช่วง 0.001-0.02 ก./ล. พบว่า ปริมาณโพลิเมอร์ที่เหมาะสมในการตกตะกอนเคมีเท่ากับ 0.01 ก./ล. มีประสิทธิภาพการบำบัดของพารามิเตอร์โดยรวมดีที่สุด สามารถบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความขุ่นและสีได้ร้อยละ 84, 99, 97 และ 95 ตามลำดับ (ดังภาพที่ 20) ขนาดตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 124 μm สอดคล้องกับการศึกษาของ Tatsi *et al*., 2003 โดยสามารถบำบัดซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 80 เมื่อใช้เฟอร์ริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. เป็นสารสร้างตะกอนและเติมโพลิอิเล็กโทรไลต์ในน้ำชะมูลฝอยเก่า โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีร้อยละ 75

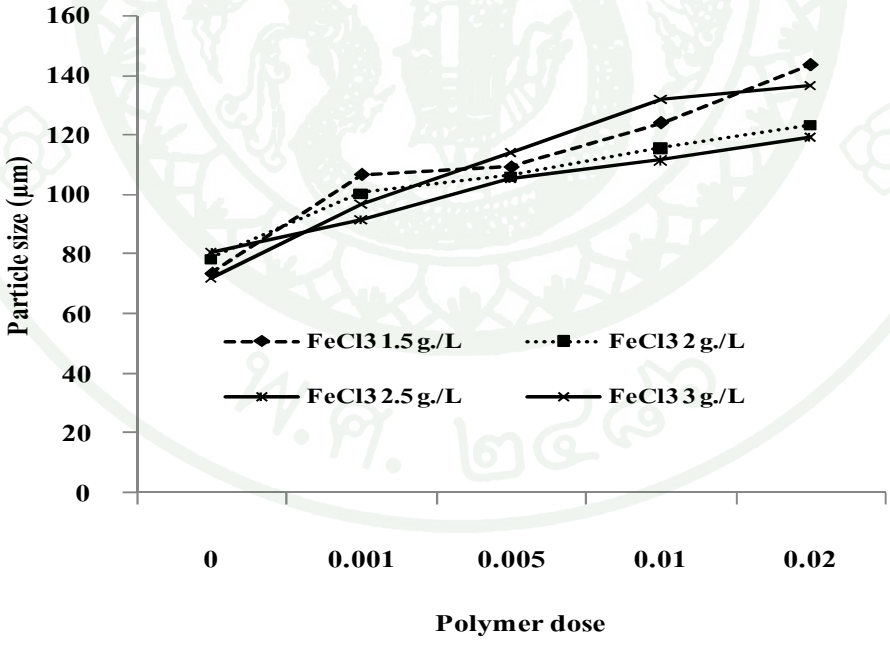
จากภาพที่ 20 (a) พบว่าที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์และโพลิเมอร์ต่างๆ ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีมีค่ามากกว่าร้อยละ 60 ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกันมาก โดยที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 88

จากภาพที่ 20 (b) และ (c) ปริมาณเฟอริคคลอไรด์มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย และสี มากกว่าปริมาณโพลิเมอร์ โดยปริมาณเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงกว่าที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์ 3 ก./ล. จากการศึกษาพบว่าที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยสูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

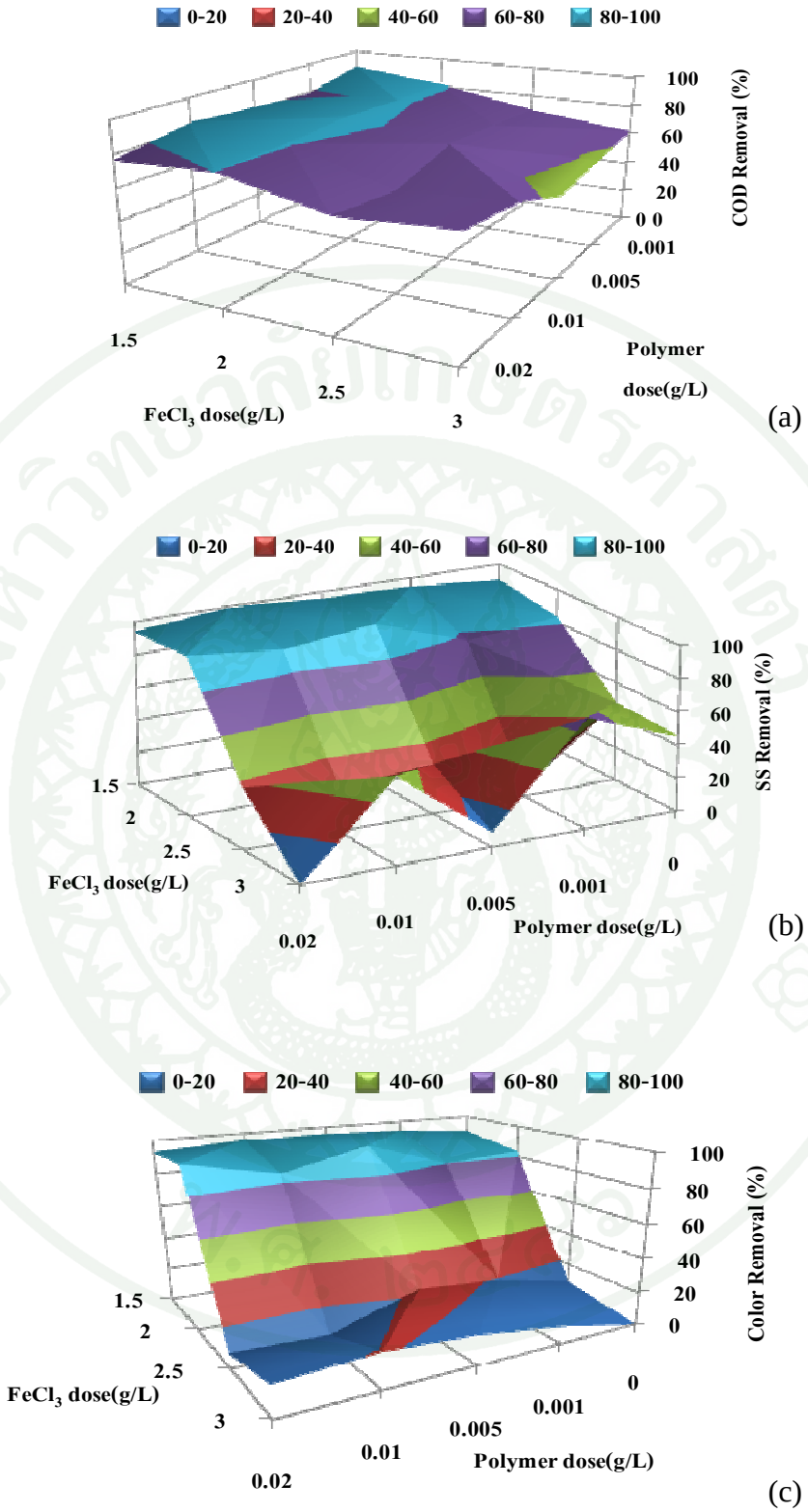
ที่สุดเท่ากับร้อยละ 99 ส่วนที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์ 2 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. มีประสิทธิภาพการบำบัดสีดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 96 เมื่อทำการพิจารณาทุกพารามิเตอร์ร่วมกันพบว่าที่ปริมาณเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. มีประสิทธิภาพการบำบัดรวมดีที่สุด

จากภาพที่ 19 ขนาดตะกอนแปรผันตามปริมาณโพลิเมอร์เมื่อเพิ่มปริมาณโพลิเมอร์ขนาดตะกอนจะใหญ่ขึ้น ขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณโพลิเมอร์เป็น 0.02 ก./ล. ที่ปริมาณเฟอร์ริคคลอไรด์เท่ากับ 1.5 และ 2 ก./ล. ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่มีความหนาแน่นต่ำ ตะกอนจะฟุ้งขึ้นดังภาพที่ 21 เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน (Amokrane *et al.,* 1997) การเพิ่มปริมาณเฟอร์ริคคลอไรด์มีผลต่อการตกตะกอนเช่นกัน ที่ปริมาณเฟอร์ริคคลอไรด์เท่ากับ 1.5 และ 2 ก./ล. ตะกอนจะมีขนาดไม่ใหญ่มาก สีของน้ำส่วนใสหลังตกตะกอนสีเหลืองใส และตกตะกอนได้ดีกว่าที่ปริมาณเฟอร์ริคคลอไรด์เท่ากับ 2.5 และ 3 ก./ล. ซึ่งจะค่อยๆตกตะกอนและน้ำส่วนใสมีสีน้ำตาลเข้มและเมื่อเปรียบเทียบสีของน้ำใสหลังตกตะกอนที่พีเอช 6 และมีการเติมปริมาณเฟอร์ริคคลอไรด์เท่ากับ 1.5 ก./ล. โดยแปรผันปริมาณโพลิเมอร์ที่เติมพบว่าที่ 0.01 ก./ล. น้ำใสหลังตกตะกอนใสที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณโพลิเมอร์เป็น 0.02 ก./ล. น้ำมีสีเข้มขึ้น



ภาพที่ 19 ขนาดอนุภาคของตะกอนที่พีเอช 6 โดยแปรผันปริมาณเฟอร์ริคคลอไรด์และโพลิเมอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 20 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (a) ของแข็งแขวนลอย (b) และสี (c)ในการหาสารรวมตะกอนที่เหมาะสม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

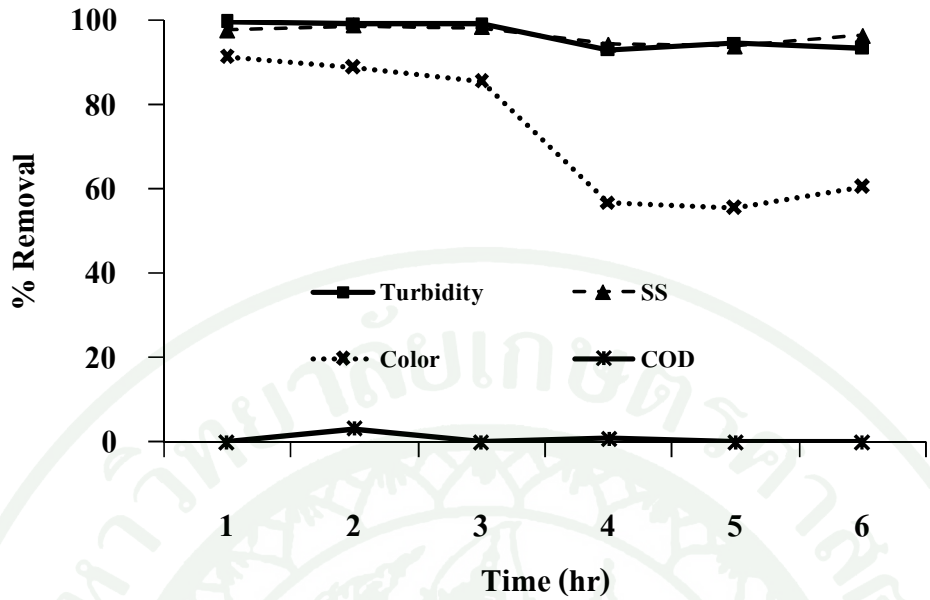
ภาพที่ 21 ลักษณะของตะกอนฟุ้งเมื่อปริมาณโพลิเมอร์มากเกินไป

2. การศึกษาประสิทธิภาพและขนาดของอนุภาคของน้ำที่ออกจากระบบถังกรองทราย

2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนเคมีร่วมกับการกรองทราย

การทดลองในสภาวะที่ 1 ทำการศึกษาโดยตกตะกอนเคมีน้ำชะมูลฝอย ทำการปรับพีเอชของน้ำเป็น 6 โดยใช้ HCl 6 นอร์มัล เติมเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ทำการกวนเร็วและกวนช้าตามลำดับ ทิ้งให้ตกตะกอนแล้วนำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีมาบำบัดต่อโดยคอลัมน์กรองทราย กำหนดอัตราการกรองคงที่เท่ากับ 5.45 ม./ชม. เก็บตัวอย่างทุกชั่วโมง ตามความลึกของคอลัมน์ที่ระดับความลึกของชั้นทรายเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 ม. และน้ำที่ออกจากคอลัมน์กรองทราย เมื่อนำตัวอย่างมาวิเคราะห์พบว่าสามารถบำบัดความขุ่น และของแข็งแขวนลอยได้ดีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่าร้อยละ 90 ดังภาพที่ 22 และบำบัดสีได้ดีใน 3 ชั่วโมงแรกของการเดินระบบจากนั้นประสิทธิภาพจะเริ่มลดลงโดยสีของน้ำชะมูลฝอยที่เสถียรเกิดจากสารที่ย่อยสลายยากเป็นส่วนใหญ่เช่นกรดฮิวมิค และกรดฟัลวิค (Tchobanoglous *et al.,*1993) ที่ทำให้น้ำเกิดสีเหลือง น้ำตาล และดำ (Zouboulis *et al*., 2004) ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีต่ำเนื่องจากสารอินทรีย์ส่วนมากถูกบำบัดในขั้นตอนของการตกตะกอน ซึ่งสภาวะนี้เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการตกตะกอนจากการทดลองเบื้องต้นทำให้น้ำที่ผ่านการกรองมีสารอินทรีย์น้อย

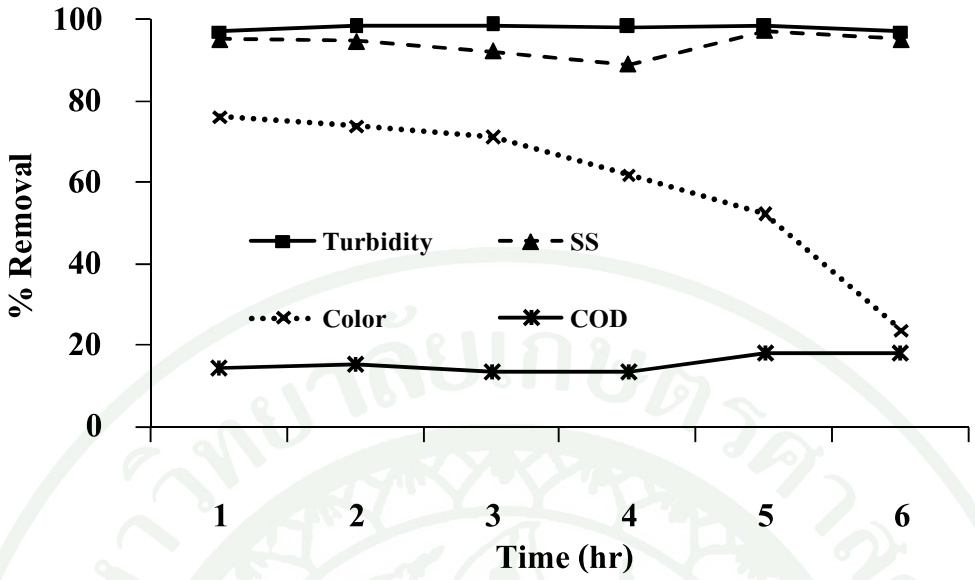
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 22 ประสิทธิภาพการเดินระบบเมื่อทำการตกตะกอนเคมีในถังตกตะกอนโดยตรง

ในการทดลองสภาวะที่ 2 ทำการศึกษาโดยตกตะกอนเคมีน้ำชะมูลฝอย ปรับค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 6 ด้วย HCl 6 นอร์มัล และเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. ในถังตกตะกอนจากนั้นนำน้ำส่วนใสที่ผ่านการตกตะกอนเข้าสู่ถังพัก แล้วจึงเดินระบบถังกรองทรายโดยเติมโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่นมากกว่าร้อยละ 80 จากภาพที่ 23 เมื่อเดินระบบ ชม.ที่ 1-4 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยลดลงเนื่องจากในระหว่างการกรองน้ำหากตัวกลางมีความฝืดหรืออุดตันมากขึ้น แรงที่เกิดจากการไหลของน้ำจะมีค่าสูงขึ้นตาม ทำให้อนุภาคแขวนลอยที่ติดอยู่บนตัวกลางบางส่วนหลุดออกมาจากตัวกลางด้วยกลไกที่เรียกว่า Detachment Mechanism กลไกดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้หากมีการเพิ่มอัตราการกรองอย่างกะทันหัน ทำให้น้ำที่กรองได้มีตะกอนขุ่นติดออกมา ประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลงตามเวลา ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการเดินระบบแต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าสภาวะที่ 1 เนื่องจากการทดลองนี้เติมเฟอริคคลอไรด์ในถังตกตะกอนเพียงอย่างเดียว ส่วนโพลิเมอร์เติมในเส้นท่อทำให้สารอินทรีย์ที่เหลือในน้ำมีปริมาณมากกว่าการตกตะกอนโดยตรงในสภาวะที่ 1 ที่มีการเติมทั้งเฟอริคคลอไรด์และโพลิเมอร์ในถังตกตะกอน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



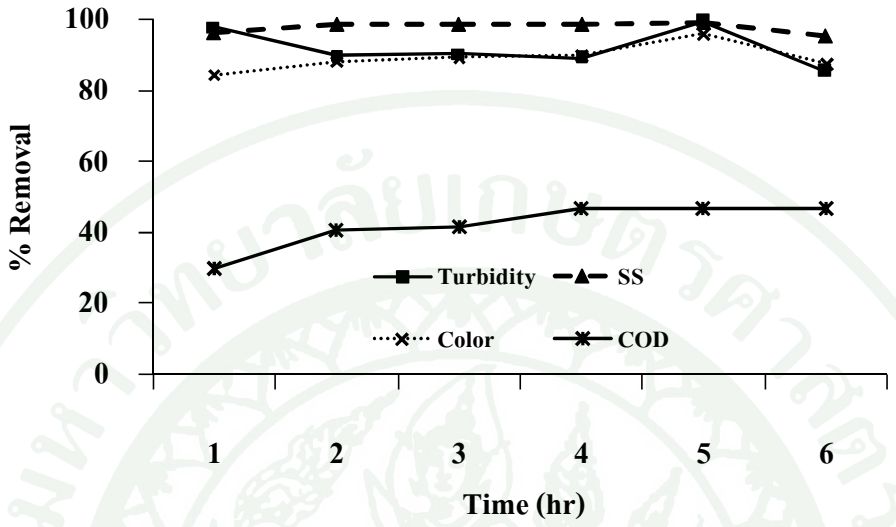
ภาพที่ 23 ประสิทธิภาพการเดินระบบเมื่อตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. ในถังตกตะกอนและเติมโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ

ในการทดลองสภาวะที่ 3 ทำการศึกษาโดยตกตะกอนเคมีน้ำชะมูลฝอยปรับค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 6 ด้วย HCl 6 นอร์มัล และเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอนจากนั้นนำน้ำส่วนใสที่ผ่านการตกตะกอนเข้าสู่ถังพัก แล้วจึงเดินระบบถังกรองทรายโดยเติมตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และสีมากกว่าร้อยละ 80 เมื่อครบชั่วโมงที่ 6 ประสิทธิภาพลดลง ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ในช่วง 30-50% ใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการเดินระบบ ดังภาพที่ 24

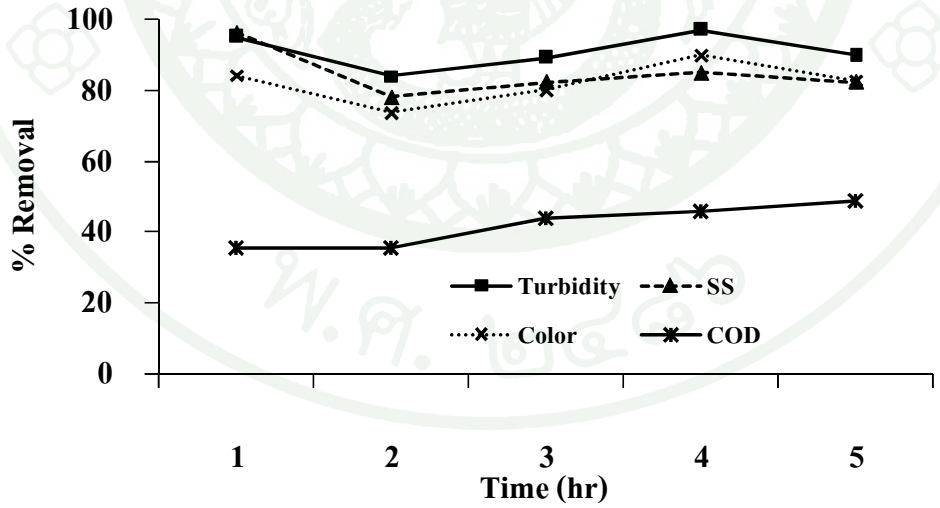
ในการทดลองสภาวะที่ 4 ทำการศึกษาโดยตกตะกอนเคมีน้ำชะมูลฝอย ปรับค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 6 ด้วย HCl 6 นอร์มัล และเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในถังตกตะกอนจากนั้นนำน้ำส่วนใสที่ผ่านการตกตะกอนเข้าสู่ถังพัก แล้วจึงเดินระบบถังกรองทรายโดยเติมตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในเส้นท่อพบว่า เดินระบบได้ต่อเนื่องเพียง 5 ชม. เกิดการอุดตันของชั้นกรองทรายจนไม่สามารถเดินระบบต่อได้ เนื่องจากเกิดการอุดตันจนน้ำไม่สามารถไหลผ่านชั้นกรองได้และแรงดันของปั๊มสูบน้ำไม่พอ ผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย ความขุ่นและสีอยู่ในช่วง 75-95% ใกล้เคียง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กันเมื่อผ่านเดินระบบผ่านไปเป็นเวลา 5 ชม.ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเล็กน้อย ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีใกล้เคียงกับสภาวะที่ 3 อยู่ในช่วงร้อยละ 30-50 ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 24 ประสิทธิภาพการเดินระบบเมื่อตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน เติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ



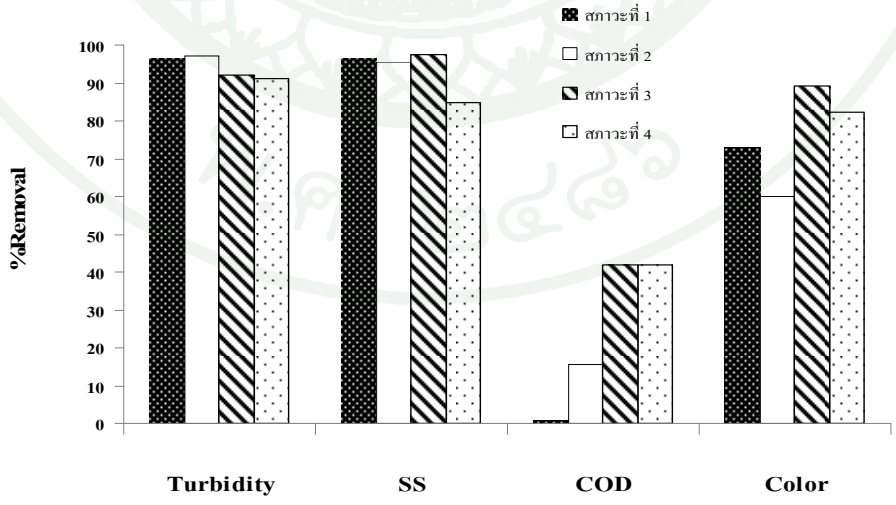
ภาพที่ 25 ประสิทธิภาพการเดินระบบเมื่อตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล.ในถังตกตะกอน เติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล.และโพลิเมอร์ 0.005 ก./ล.ในเส้นท่อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 ประสิทธิภาพและขนาดอนุภาคแขวนลอยของน้ำที่ผ่านคอลัมน์กรองทราย

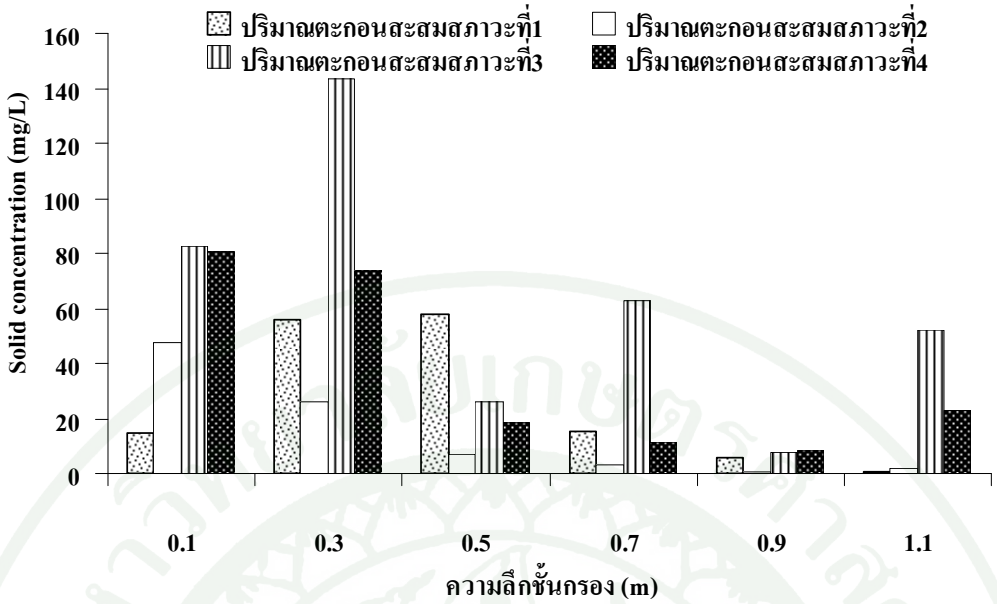
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะต่างๆ พบว่าการเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน และเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ(สภาวะที่ 3) มีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 92 บำบัดของแข็งแขวนลอย ซีโอดี และสีได้มากที่สุดร้อยละ 97, 42 และ 89 ตามลำดับ ดังภาพที่ 26 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีเพิ่มขึ้นในสภาวะที่ 3 และ 4 แสดงว่าการเติมสารสร้างตะกอนในเส้นท่อมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดซีโอดีและสี

ปริมาณตะกอนสะสมของการตกตะกอนในถังตกตะกอนโดยตรง(สภาวะที่ 1) และการเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. ในถังตกตะกอนและเติมโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ(สภาวะที่ 2) พบว่า ความเข้มข้นของตะกอนที่สะสมในชั้นกรองมีความเข้มข้นน้อยกว่า (ดังภาพที่ 27) เมื่อเปรียบเทียบกับการตกตะกอนเคมีโดยการเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน และการเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ(สภาวะที่ 3) และตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในถังตกตะกอน และเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในเส้นท่อ(สภาวะที่ 4) โดยการเติมสารสร้างตะกอน($FeCl_3$)ในเส้นท่อทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคในชั้นกรองส่งผลให้อนุภาคในชั้นกรองมีปริมาณตะกอนสะสมเพิ่มขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับการตกตะกอนในถังตกตะกอนโดยตรง ดังภาพที่ 28, 29 และ 30 ชั้นกรองสามารถจับอนุภาคตามความลึกได้ดีขึ้น

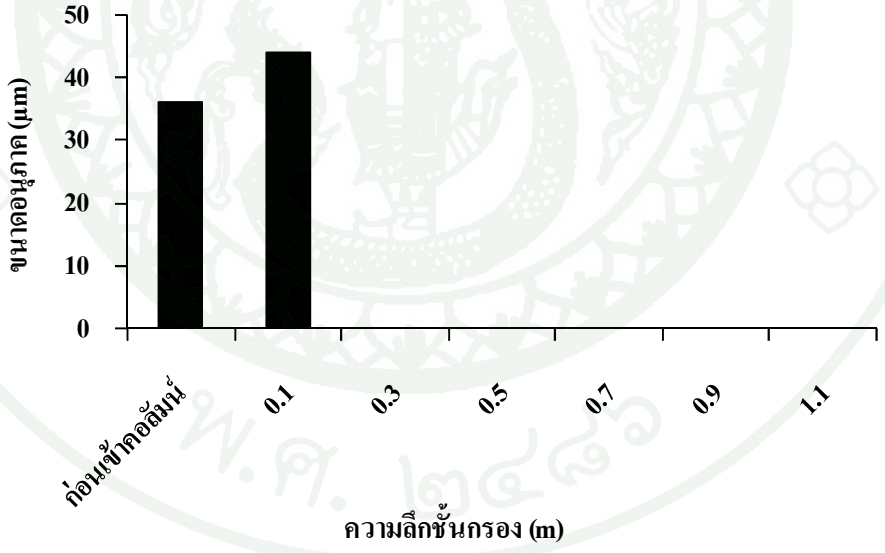


ภาพที่ 26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น ของแข็งแขวนลอย ซีโอดี และสีที่สภาวะต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

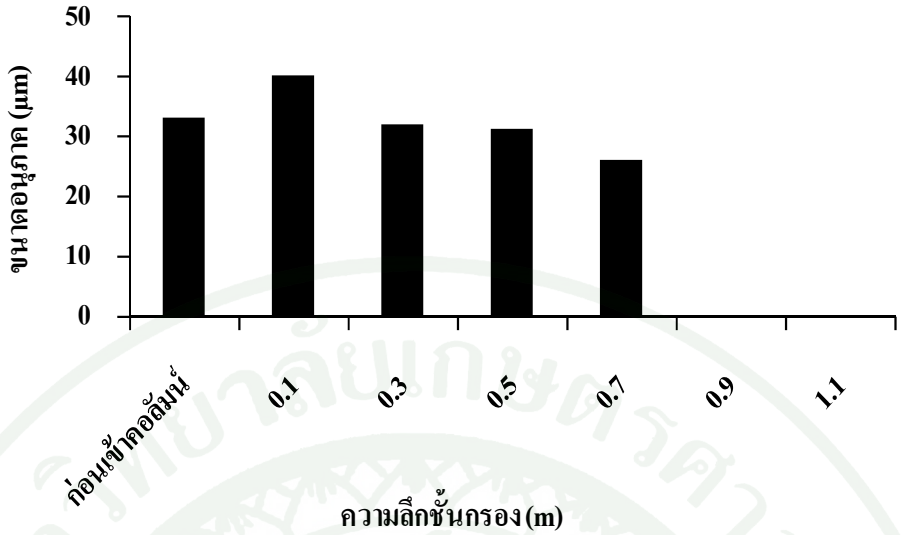


ภาพที่ 27 เปรียบเทียบปริมาณตะกอนตามความลึกชั้นกรอง

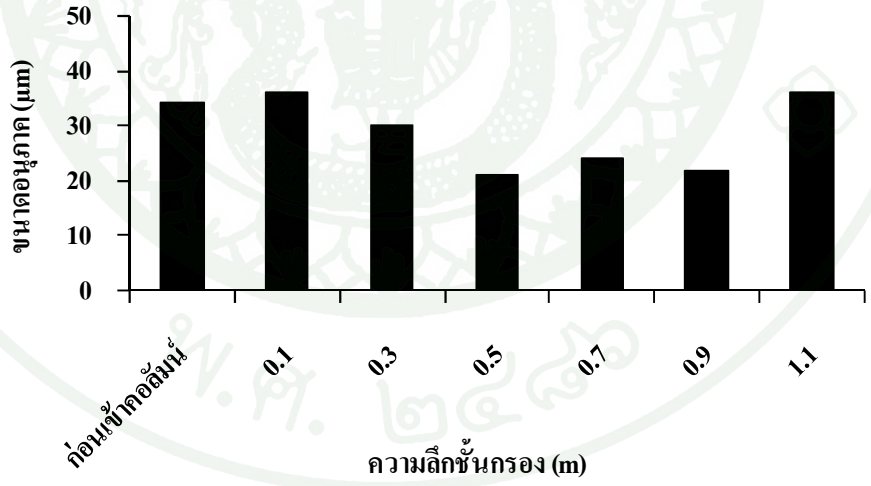


ภาพที่ 28 ขนาดอนุภาคตามความลึกชั้นกรองเมื่อทำการตกตะกอนเคมีในถังตกตะกอนโดยตรง (สภาวะที่ 1)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 29 ขนาดอนุภาคตามความลึกชั้นกรองเมื่อทำการตกตะกอนเคมีโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน เติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ (สภาวะที่ 3)



ภาพที่ 30 ขนาดอนุภาคตามความลึกชั้นกรองเมื่อโดยเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในถังตกตะกอน เติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในเส้นท่อ (สภาวะที่ 4)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การศึกษาประสิทธิภาพและขนาดอนุภาคของน้ำที่ส่งผลต่อการกรองผ่านระบบเยื่อกรอง

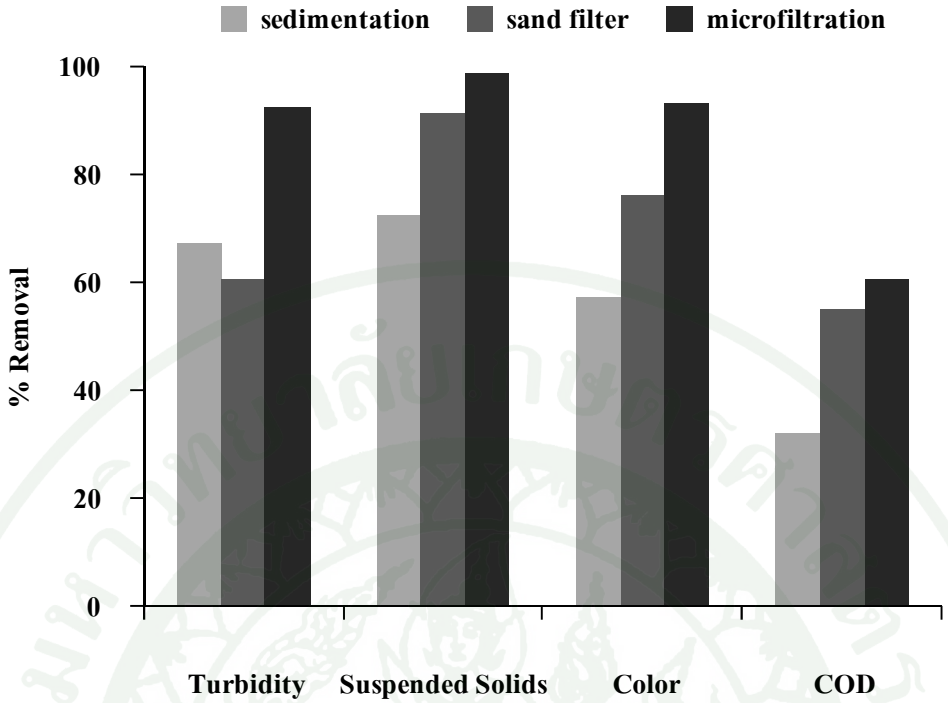
เมื่อทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกรองทรายพบว่าการเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน และเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ เป็นสภาวะที่ได้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด จึงทำการศึกษาต่อโดยนำน้ำที่ผ่านการกรองทรายเข้าสู่ระบบเยื่อกรองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดต่อไป

ตารางที่ 10 ค่าการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ และขนาดอนุภาคในน้ำ

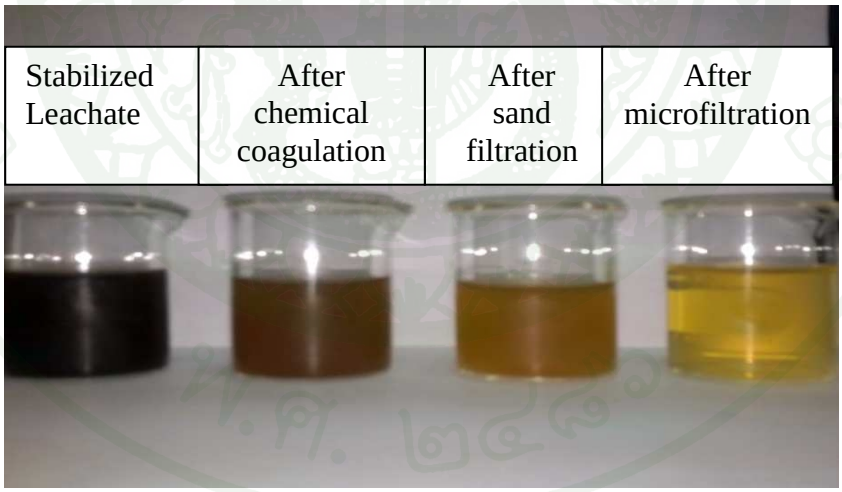
Sample	COD (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	SS (มก./ล.)	Color (Pt.Co)	Floc size (dia.,μm)
Raw leachate	3,181	515	1,170	43.38	29.64
Sedimentation	2,163	168	320	18.44	38.01
Sand filter	1,424	203	100	10.33	30.36
Microfiltration	1,248	38	16	2.95	16.52

จากตารางที่ 10 ค่าซีโอดี ความขุ่น ของแข็งแขวนลอยและสี มีค่าลดลงตามกระบวนการบำบัดต่างๆ ของแข็งแขวนลอยและขนาดของอนุภาคในน้ำที่เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการตกตะกอนเป็นผลจากการเติมเฟอร์ริคคลอไรด์ โดยเฟอร์ริคไอออนทำปฏิกิริยากับไอออนประจุลบในน้ำชะมูลฝอยทำให้เกิดตะกอนแขวนลอยมากขึ้นดังที่กล่าวไปแล้วในผลการทดลอง 1.1 และเมื่อผ่านการกรองทรายและระบบเยื่อกรองของแข็งแขวนลอยและขนาดอนุภาคลดลง รวมถึงความขุ่น ซีโอดี และสี โดยเมื่อผ่านระบบเยื่อกรองแล้วประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความขุ่นและสี เท่ากับร้อยละ 74, 99, 96 และ 95 ตามลำดับดังภาพที่ 31 เมื่อสังเกตสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดแต่ละกระบวนการพบว่าสีของน้ำชะมูลฝอยจางลงเมื่อผ่านระบบเยื่อกรองน้ำชะมูลฝอยมีสีเหลืองใสดังภาพที่ 32 โดยอนุภาคที่อุดตันในชั้นกรองทรายจะมีขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากการตกตะกอนเคมี ส่วนอนุภาคที่อุดตันระบบเยื่อกรองจะมีขนาดเล็กกว่าเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ถูกดักจับไว้ในชั้นกรองทรายและการอุดตันเกิดที่ผิวหน้าของเยื่อกรอง จากการสังเกตพบว่าที่ผิวของเยื่อกรองจะมีอนุภาคของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กเคลือบอยู่จนน้ำไม่สามารถผ่านไปได้ทำให้เกิดการอุดตันของเยื่อกรองในเวลาต่อมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพการบำบัดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในแต่ละกระบวนการ



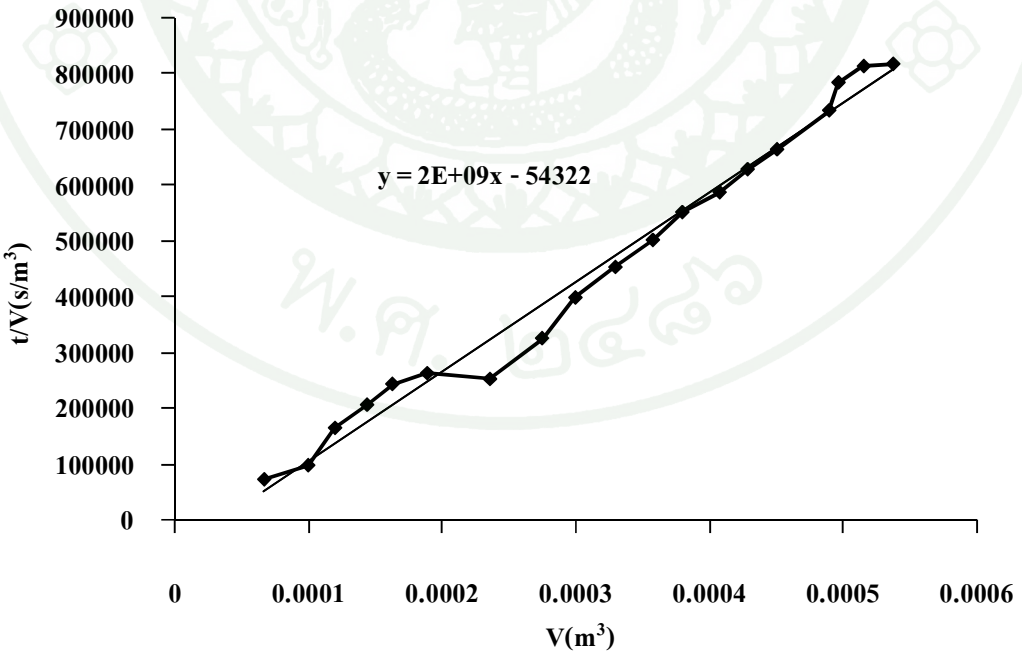
ภาพที่ 32 สีของน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการบำบัดในแต่ละขั้นตอน

จากการทดลองหาการอุดตันของเยื่อกรองพบว่า เมื่อนำน้ำชะมูลฝอยที่ตกตะกอนเคมีในถังตกตะกอนโดยตรงด้วยเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. และเติมโพลิเมอร์ 0.001 ก./ล. กับน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการตกตะกอนในเส้นท่อโดยสภาวะที่นำมาทำการเปรียบเทียบคือตกตะกอนน้ำชะมูลฝอยด้วยเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน เติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. และเติมโพลิเมอร์ 0.001 ก./ล.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

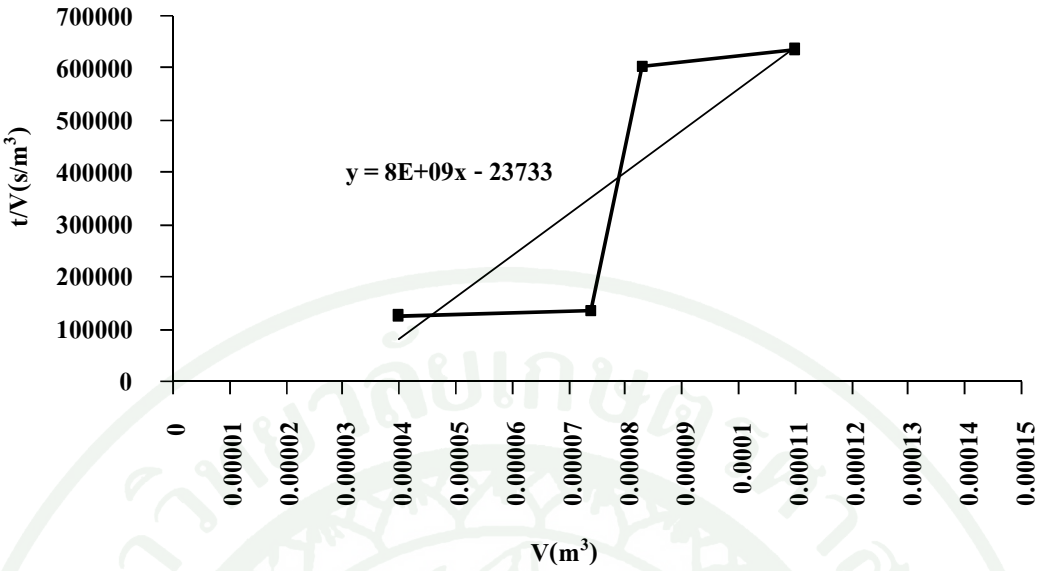
ในเส้นท่อ แล้วจึงนำน้ำที่ได้จากคอลัมน์กรองทรายมาผ่านกระดาษกรอง 5 μm เพื่อทดสอบการอุดตัน เมื่อนำค่า t/V กับค่า V มาทำการพล็อตกราฟ โดยให้ t/V เป็นแกน Y และค่า V เป็นแกน X จะได้กราฟเปรียบเทียบดังภาพที่ 33

จากภาพที่ 33 และ34 เมื่อสร้างเส้นแนวโน้มจะได้จุดตัดแกน y และค่าความชันดังตารางที่ 11 นำไปแทนในสมการการกรองเพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานของตัวกลางกรองและค่าความต้านทานของชั้นเค้ก พบว่าค่าความต้านทานของตัวกลางกรองในการตกตะกอนน้ำชะมูลฝอยโดยตรงเท่ากับ 3.43×10^{8} m^{-1} มีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานของตัวกลางกรองในการตกตะกอนในเส้นท่อซึ่งมีค่าเท่ากับ 5×10^{8} m^{-1} การคำนวณหาค่าความต้านทานของชั้นเค้กของการตกตะกอนน้ำชะมูลฝอยโดยตรงเท่ากับ 1.356×10^{11} m/kg มีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานของชั้นเค้กของการตกตะกอนในเส้นท่อซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.9×10^{11} m/kg แสดงว่าการตกตะกอนโดยตรงเกิดการอุดตันน้อยกว่าการตกตะกอนในเส้นท่อ และจากผลของปริมาณการสะสมของของแข็งแขวนลอยพบว่าการตกตะกอนในเส้นท่อมีปริมาณของแข็งแขวนลอยสะสมในทุกความลึกของชั้นทรายกรอง ในขณะที่การตกตะกอนโดยตรงการสะสมของของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้นบริเวณด้านบนของชั้นทรายกรองเท่านั้น จึงคาดว่าการตกตะกอนในเส้นท่อมีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากคอลัมน์กรองทรายมากกว่าจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันเร็วกว่าการตกตะกอนโดยตรง



ภาพที่ 33 กราฟพล็อตระหว่างค่า t/V กับค่า V ของการตกตะกอนโดยตรง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 34 กราฟพล็อตระหว่างค่า t/V กับค่า V ของการตกตะกอนในเส้นท่อ

ตารางที่ 11 การคำนวณเปรียบเทียบความต้านทานของการกรองผ่านเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน จากการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยการตกตะกอนโดยตรง และการตกตะกอนในเส้นท่อ

รายการ	การตกตะกอนโดยตรง	การตกตะกอนในเส้นท่อ
Y intercept	-54,322	-23,733
Slope	2×10^{9}	8×10^{9}
Cs (kg/m^3)	0. 123	0. 117
ΔP ($kg/m.s^2$)	3,999.66	1,333.22
R_m (m^{-1})	3.43×10^{8}	5×10^{8}
α (m/kg)	1.356×10^{11}	1.9×10^{11}

หมายเหตุ พื้นที่กรอง 1.32×10^{-3} ตารางเมตร อุณหภูมิ 28°C ค่า μ (28°C) = $0.836*10^{-3}$ kg/m•s

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การนำไปประยุกต์ใช้งาน

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนเคมีและการกรอง พบว่าน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการตกตะกอนในเส้นท่อมีคุณภาพดีกว่าการตกตะกอนภายในถังตกตะกอนโดยตรง และเกิดการรวมตัวของกลุ่มอนุภาคในชั้นกรองทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคตามความลึกของชั้นกรองเพิ่มขึ้น สามารถนำมาปรับใช้กับระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยของพื้นที่ฝังกลบ จ.นนทบุรี ได้ โดยทำการติดตั้ง/ดัดแปลงอุปกรณ์เพิ่มเติมสำหรับการตกตะกอนในเส้นท่อ ซึ่งจะทำให้ชั้นกรองทรายมีประสิทธิภาพในการกรองสูงขึ้น คุณภาพน้ำที่ผ่านไปยังระบบเยื่อกรองสูงขึ้นทำให้เมมแบรนอุดตันน้อยลง ส่งผลให้สามารถเดินระบบได้นานขึ้น ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนเมมแบรนลดลง จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณของเฟอริคคลอไรด์ที่ใช้ลดลง แต่เนื่องจากต้องเพิ่มปริมาณโพลิเมอร์เพื่อรวมตะกอน และทำการปรับพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนเข้าระบบจึงมีการใช้สารเคมีเพิ่มขึ้น จึงควรศึกษาค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับสารเคมีและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าก่อนทำการปรับปรุงระบบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. จากการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนเคมีด้วยวิธีจาร์เทสต์ พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 6 ปริมาณสารสร้างตะกอน ($FeCl_3$ 40%) ที่เหมาะสมเท่ากับ 1.5 ก./ล. ปริมาณสารรวมตะกอน (polymer) เท่ากับ 0.01 ก./ล. โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และสี เท่ากับร้อยละ 84, 99, 97 และ 95 ตามลำดับ โดยวัดขนาดตะกอนเฉลี่ยได้ 124 μm

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยการตกตะกอนเคมีร่วมกับการกรองทรายโดยทำการปรับค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยให้เท่ากับ 6 ก่อนทำการตกตะกอนเคมี พบว่าการเติมเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน เติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และสี เท่ากับร้อยละ 42, 97, 92 และ 89 ตามลำดับ โดยการเติมสารสร้างตะกอนในเส้นท่อส่งผลให้เกิดการสะสมของตะกอนในชั้นกรองตามความลึกได้ดีขึ้น และอนุภาคที่ถูกดักจับมีขนาดใหญ่

3. การศึกษากรองผ่านระบบเยื่อกรองให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และสี เท่ากับร้อยละ 74, 99, 96 และ 95 ตามลำดับ โดยวัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยได้ 16.52 μm และพบว่าค่าความต้านทานของชั้นเค้กในการตกตะกอนโดยตรงมีค่าน้อยกว่าการตกตะกอนในเส้นท่อ แสดงว่าการตกตะกอนโดยตรงเกิดการอุดตันได้ช้ากว่าการตกตะกอนในเส้นท่อ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาสภาวะในการกรองทรายด้วยอัตราและตำแหน่งการเติมเฟอร์ริคคลอไรด์และโพลิเมอร์ที่แตกต่างจากการศึกษานี้

2. ควรมีการศึกษาผลของระยะห่างของช่วงเวลาในการเติมเฟอร์ริคคลอไรด์และโพลิเมอร์ในเส้นท่อเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

3. ควรใช้วิธีการศึกษาขนาดอนุภาคตะกอนโดยอาศัยเครื่องมือที่มีความละเอียดมากขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **เกณฑ์มาตรฐานและแนวทางจัดการขยะมูลฝอยชุมชน.** โรงพิมพ์คุรุสภา ลาดพร้าว, กรุงเทพ

จักริน นักไร่. 2549. **การกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม.** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จิรวัฒน์ ศุภโกศล. 2544. **การศึกษาเกณฑ์การออกแบบระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีโปรยกรองและวิธีเติมอากาศแบบเติมเข้าถ่ายออก.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พีรกานต์ บรรเจิดกิจ. 2539. **การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำเสียจากกองขยะอ่อนนุช.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รัตนวลี เลิศธนกิจ. 2549. **การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มั่นสิน ตัลฑุลเวศม์. 2538. **วิศวกรรมประปา เล่ม 2.** ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Amakrane A., C. Comel and J. Veroนอร์มัล 1997. Landfill Leachates Pretreatment by Coagulation-Flocculatioนอร์มัล **Wat. Res.** 1997 (31): 2775-2782.

Amuda O.S. , I.A. Amoo and O.O. Ajayi. 2006. Performance optimization of coagulant/flocculant in the treatment of wastewater from a beverage industry. **Journal of Hazadous Materials** (B129): 69-72.

APHA, AWWA and WAF. 2005. **Standard methods of examination of water and wastewater.** 21th ed. American Pubic Health Association, Washington, DC.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Aziz Hamidi Abdul, Salina Alias, Mohd. Nordin Adlan, Faridah, A.H. Asasri and Mohd. Shahrir Zahari. 2007. Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation process. **Bioresource Technology** (98): 218-220.

Ben A. R. 2001. Membranes and membrane bioreactors: Introduction and scope. **Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment and Reuse,Thailand Membrane Researcher Group,Bangkok** : 1-20.

Chang Y.J. and M.M. Benjamiนอร์มัล 1996. Iron oxide adsorption and UF to remove NOM and control fouling. **AWWA** 88 (12): 74-88.

Christensen, T.H., R. Cossu and R. Stegmanนอร์มัล 1992. **Landfilling of waste: Leachate.** Elsevier Science Publishers Ltd., England.

Chuang, C. and K. Li. 1997. Effect of coaglulant dosage and grain size on the performance of direct filtratioนอร์มัล **Separation and Purification Technology** 12: 229-241.

Maranon E., L. Castrillon, Y. Fernandez-Nava, A. Fernandez-Mendez. 2008. Coagulation-flocculation as a pretreatment process at a landfill leachate nitrification-denitrification plant. **Journal of Hazadous Meterials** (156): 538-544.

Farquhar, G.J. 1997. **Leachate treatment by Soil Methods p17 Cited by Ou, Wen-Chieh 1989. Soil Column Process for Landfill Leachate Treatment.** Ph.D. thesis, Asian Tnstitute of Technology,Bangkok.

Foo, K.Y., B.H. Hameed, 2009. An Overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. **Journal of Hazardous Materials** (171): 54-60.

Harmsen, J. 1983. Identification of organic compounds in leachate from a waste tip. **water res** 17 (6): 699-705.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Ho, W.S. and K.K. Sirkar. 1992. **Membrane Handbook.** Van Nostrand Reinhold, New York.

Johir, A.H., C. Khorshed, S. Vigneswaran and H.K. Shoนอร์มัล 2009. In-line flocculation-filtration as pre-treatment to reverse osmosis desalinatioนอร์มัล **Desalination** (249): 85-93.

Laine, J.M., M.M. Clark and J. Mallevialle. 1990. Ultrafiltration of lake water: effects of pretreatment on organic partitioning,THM formation potential and flux. **J. AWWA** 82 (12): 74-88.

Loizdou, M., N Vithoulkas and E. Kapetanios. 1992. Physico-chemical treatment of leachate from landfill. **Journal Environmental Science Health** A27: 1059.

Metcalf and Eddy. 2004. **Wastewater Engineering Treatment and Reuse.** Mc Graw Hill, New York.

O'Melia C.R. 1969. Review of coagulation process. **J.Am.Wat. Works Assoc.** (61): 87-89.

Renou S., S. Poulain, J.G. Givaudan and P. Mouliนอร์มัล 2008. Treatment process adapted to stabilized leachates: Lime precipitation-prefiltration-reverse osmosis. **Journal of membrane science** (313): 9-22.

Rivas F. Javier, Fernondo Beltran, Fatima Carvalho, Benito Acedo and Olga Gimeno. 2004. Stabilized leachate: sequential coagulation-flocculation+chemical oxidation process. **Journal of Hazardous Meterials** (B116): 95-102.

Tatsi, A.A., A.I. Zouboulis, K.A. Matis and P. Samaras. 2003. Coagulation-flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. **Chemosphere** (53): 737-744.

Tchobanoglous, G.H. Theisen and S. Vigil. 1993. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issue.** McGraw-Hill Inc, Singapore.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Wang, Y. 1995. **Water Treatment by Membrane Filtratioนอร์มัล** วิทยานิพนธ์ M.S. thesis, Asian Institute of Technology.

Yoo, H., S. Cho and S. Ko. 2001. Modification of coagulation and Fenton oxidation processes for cost-effective leachate organics. **J. Enviroนอร์มัล Sci.Health** (A36): 39.

Zouboulis Anastasios I., Xiao-Li Chai, Ioannis A. and A. Katsoyiannis. 2004. The application of bioflocculant for the removal of humic acids from stabilized landfill leachates. **Journal of Environmental Management** (70): 35-41.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีเพื่อหาปริมาณโพลิเมอร์เหมาะสม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก1 ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีกรณีพีเอชของน้ำชะมูลฝอย ก่อนตกตะกอนเท่ากับ 6

Dose $FeCl_3$ (ก./ล.)	Dose Polymer (ก./ล.)	pH หลังตกตะกอน	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	floc size(µm)
1.5	0	3.26	24.00	48.90	240.00	2.63	73.75
	0.001	5.44	17.00	39.00	420.00	1.58	112.00
	0.005	5.41	20.00	42.80	372.00	1.16	117.00
	0.01	4.58	2.00	8.20	312.00	1.16	124.10
	0.02	5.40	14.00	19.30	468.00	1.90	143.50
2	0	3.03	39.00	39.10	372.00	4.32	78.63
	0.001	2.91	51.67	45.30	372.00	5.06	100.56
	0.005	3.42	6.67	8.30	336.00	1.11	106.28
	0.01	2.91	21.14	36.00	384.00	3.95	115.80
	0.02	3.39	7.50	9.90	396.00	1.26	123.40
2.5	0	2.42	120.00	220.00	600.00	23.18	80.50
	0.001	2.52	215.00	237.00	552.00	20.55	91.33
	0.005	2.48	160.00	212.00	504.00	19.50	105.51
	0.01	2.44	170.00	225.00	744.00	23.71	112.00
	0.02	2.42	143.33	227.00	648.00	23.18	119.20
3	0	2.35	124.00	252.00	744.00	25.47	72.12
	0.001	2.39	76.00	195.00	840.00	22.83	91.00
	0.005	2.35	208.00	192.00	936.00	21.08	114.00
	0.01	2.43	108.00	126.00	648.00	20.20	131.99
	0.02	2.54	228.00	175.00	552.00	21.08	136.50

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก2 ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีกรณีพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนตกตะกอนเท่ากับ 7

Dose $FeCl_3$ (ก./ล.)	Dose Polymer (ก./ล.)	pH หลังตกตะกอน	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	floc size(µm)
1.5	0	6.56	227.00	266.00	1930.00	11.59	91.00
	0.001	6.53	140.00	194.00	2008.70	8.43	101.00
	0.005	6.53	160.00	158.00	1982.61	7.38	130.20
	0.01	6.58	172.00	175.00	2008.70	7.80	151.60
	0.02	6.60	180.00	115.00	2000.00	12.65	181.00
2	0	6.35	262.50	143.00	1600.00	5.69	82.27
	0.001	6.33	235.00	93.10	1350.00	4.74	93.00
	0.005	6.44	76.00	106.00	1275.00	6.32	122.06
	0.01	6.44	44.00	96.30	1275.00	6.64	159.10
	0.02	6.47	140.00	116.00	1409.69	9.13	175.30
2.5	0	6.44	52.50	72.70	1150.00	5.27	106.15
	0.001	6.44	46.34	61.70	925.00	2.32	108.01
	0.005	6.37	37.25	46.10	950.00	2.95	112.29
	0.01	6.35	42.00	53.40	1075.00	3.37	132.70
	0.02	6.35	50.00	56.10	1508.57	4.00	173.00
3	0	6.09	6.67	17.00	900.00	2.85	81.00
	0.001	6.01	9.00	12.20	775.00	2.53	83.92
	0.005	6.02	14.00	14.40	862.50	3.16	96.30
	0.01	6.00	36.26	15.30	887.50	3.32	116.70
	0.02	6.03	45.00	87.70	1508.57	4.53	130.20

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก3 ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีกรณีพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนตกตะกอนเท่ากับ 8

Dose $FeCl_3$ (ก./ล.)	Dose Polymer (ก./ล.)	pH หลังตกตะกอน	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	floc size(µm)
1.5	0	6.90	115.00	179.00	1939.39	17.12	63.75
	0.001	6.91	130.00	143.00	1627.71	15.81	87.47
	0.005	6.95	156.00	131.00	1835.50	16.07	100.78
	0.01	6.95	68.00	120.00	1662.34	14.75	141.63
	0.02	6.89	235.00	120.00	1731.60	14.75	188.70
2	0	6.80	75.00	145.00	1752.21	12.65	75.58
	0.001	6.75	86.67	113.00	1699.12	10.54	94.42
	0.005	6.76	146.67	118.00	1752.21	11.86	113.11
	0.01	6.76	153.33	109.00	1592.92	11.06	115.84
	0.02	6.60	90.00	104.00	1646.02	8.43	152.70
2.5	0	6.54	20.00	74.90	1246.75	6.64	78.82
	0.001	6.50	26.67	48.90	1246.75	5.59	95.52
	0.005	6.58	173.33	53.20	1309.09	5.90	112.35
	0.01	6.60	53.33	67.60	1309.09	6.43	127.70
	0.02	6.60	60.00	74.40	1288.31	5.59	151.90
3	0	6.48	22.00	42.30	1038.96	4.43	83.20
	0.001	6.49	14.00	39.30	1163.64	4.32	113.29
	0.005	6.37	18.00	39.80	1122.08	3.69	125.22
	0.01	6.36	90.00	54.90	1205.19	4.85	151.70
	0.02	6.41	93.33	61.60	1122.08	5.37	154.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก4 ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีกรณีพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนตกตะกอนเท่ากับ 9

Dose $FeCl_3$ (ก./ล.)	Dose Polymer (ก./ล.)	pH หลังตกตะกอน	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	floc size(µm)
1.5	0	7.47	135.00	164.00	2077.92	19.32	65.99
	0.001	7.39	175.00	103.00	1731.60	16.86	80.25
	0.005	7.46	130.00	88.60	1731.60	13.35	95.19
	0.01	7.44	195.00	131.00	2047.00	14.05	119.94
	0.02	7.42	185.00	90.60	1939.39	13.70	166.00
2	0	7.27	75.00	120.00	1593.07	20.02	110.13
	0.001	7.21	85.00	92.50	1731.60	17.56	116.66
	0.005	7.25	185.00	79.60	1696.97	17.91	142.00
	0.01	7.40	105.00	85.00	1731.60	18.97	164.50
	0.02	7.35	140.00	113.00	1385.28	21.08	185.00
2.5	0	7.31	56.67	70.50	1246.75	7.90	102.78
	0.001	7.27	55.88	58.10	1371.43	6.80	108.87
	0.005	7.24	90.00	68.10	1412.99	8.06	147.00
	0.01	7.13	116.67	59.20	1350.65	7.43	142.50
	0.02	7.08	115.00	67.20	1246.75	7.43	192.70
3	0	7.14	40.00	51.60	1579.22	5.37	85.96
	0.001	7.12	27.50	34.80	1205.19	4.43	105.14
	0.005	7.00	32.50	35.90	1309.09	4.53	126.43
	0.01	7.00	100.00	53.00	1309.09	5.27	153.00
	0.02	6.90	117.50	48.20	1309.09	5.16	207.00

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ก5 ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนเคมีกรณีพีเอชของน้ำชะมูลฝอยก่อนตกตะกอนเท่ากับ 10

Dose $FeCl_3$ (ก./ล.)	Dose Polymer (ก./ล.)	pH หลังตกตะกอน	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	floc size(µm)
1.5	0	9.12	235.00	26.90	2000.00	10.54	88.62
	0.001	9.14	140.00	31.30	1942.86	12.65	90.02
	0.005	9.12	140.00	31.50	1942.86	11.38	90.05
	0.01	9.12	215.00	29.50	1900.00	11.38	99.84
	0.02	9.11	235.00	37.60	1885.71	12.65	119.08
2	0	8.48	77.50	50.80	1885.71	7.90	107.80
	0.001	8.38	52.00	34.10	1542.86	6.64	103.34
	0.005	8.35	40.00	34.10	1428.57	6.32	127.23
	0.01	7.95	48.00	21.90	1600.00	4.43	133.40
	0.02	8.13	96.00	44.00	1714.29	7.27	142.80
2.5	0	7.54	80.00	43.00	1165.71	4.00	95.70
	0.001	7.56	56.00	34.40	1371.43	5.06	97.36
	0.005	7.58	80.00	26.30	1165.71	4.22	132.30
	0.01	7.42	96.00	24.10	1165.71	3.79	134.80
	0.02	7.54	72.00	38.50	1268.57	5.90	165.10
3	0	7.50	40.00	20.80	1268.57	2.95	75.10
	0.001	7.49	26.00	13.80	1028.57	1.48	77.32
	0.005	7.44	22.00	18.40	1942.86	2.11	114.21
	0.01	7.47	24.00	16.30	2057.14	2.53	117.40
	0.02	7.51	88.00	40.40	2000.00	3.58	147.10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยผ่านการกรองทรายที่สภาวะต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ลักษณะสมบัติน้ำชะมูลฝอยที่เสถียรก่อนการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกรองทราย

ครั้งที่	pH	Suspended Solid (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	Color (Pt.Co)	COD (มก./ล.)
1	8.01	92.0	81.9	18.7	2283.0
2	7.9	74.0	54.5	17.2	2256.0
3	8.1	110.0	76	23.2	2891.6
4	8.39	1065.0	434	34.3	4469.0
ช่วงค่า	7.9-8.39	74.0-1065.0	54.5-434	17.2 -34.3	2256.0-4469.0
เฉลี่ย	8.1	335.25	161.6	23.0	2963.6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการกรองทรายโดยตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ 1.5 ก./ล. และโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล.

Time(h)/ depth(m)	pH	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	Floc size(μm)
1/0.1	3.76	96.00	108.00	760.98	5.22	19.4±4
1/0.3	3.73	5.00	6.18	731.71	0.71	-
1/0.5	3.73	5.33	0.86	658.54	0.54	-
1/0.7	3.74	1.76	0.61	717.07	0.53	-
1/0.9	3.74	2.00	0.38	643.90	0.50	-
effluent	3.85	2.50	0.41	614.63	0.50	-
2/0.1	4.24	85.00	96.70	717.07	3.74	22.2±2.87
2/0.3	4.19	17.00	25.30	629.27	2.00	-
2/0.5	4.15	5.00	2.11	629.27	0.67	-
2/0.7	4.11	0.59	1.52	570.73	0.62	-
2/0.9	4.09	3.67	0.91	556.10	0.60	-
effluent	4.13	1.43	0.80	585.37	0.64	-
3/0.1	4.42	64.00	101.00	643.90	6.43	19.58±4.58
3/0.3	4.43	23.75	27.60	614.63	2.43	-
3/0.5	4.46	12.00	3.76	643.90	1.68	-
3/0.7	4.4	0.00	1.83	673.17	0.95	-
3/0.9	4.38	4.00	1.96	585.37	0.88	-
effluent	4.39	2.00	0.79	614.63	0.82	-
4/0.1	5.04	122.50	164.00	775.61	9.13	62±12.4
4/0.3	4.92	108.00	126.00	717.07	8.17	-
4/0.5	4.87	19.33	41.10	673.17	4.13	-
4/0.7	4.83	3.33	12.60	614.63	2.81	-
4/0.9	4.79	6.50	5.55	526.83	2.63	-
Effluent	4.73	6.50	9.47	600.00	2.4	
5/0.3	4.69	52.86	93.40	687.80	5.88	-
5/0.5	4.71	8.00	20.10	673.17	1.67	-
5/0.7	4.72	16.67	7.16	673.17	2.37	-
5/0.9	4.72	4.50	5.42	643.90	2.63	-
effluent	4.69	7.00	7.00	658.54	2.55	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Time(h)/ depth(m)	pH	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	Floc size(μm)
6/0.1	4.72	120.00	214.00	658.54	10.80	44±5.56
6/0.3	4.74	83.33	133.00	643.90	7.11	-
6/0.5	4.75	28.75	31.40	673.17	3.16	-
6/0.7	4.76	6.00	4.68	673.17	2.37	-
6/0.9	4.76	0.00	1.23	629.27	2.11	-
effluent	4.74	4.00	9.15	629.27	2.25	-

ตารางผนวกที่ ข3 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการกรองทรายโดยตกตะกอนด้วย $FeCl_3$ 1.5 ก./ล. ในถังตกตะกอนและโพลิเมอร์ 0.01 ก./ล.ในเส้นท่อ

Time(h)/ depth(m)	pH	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)
1/0.1	4.04	10.00	5.07	768	0.79
1/0.3	4	0.00	0.82	752	0.63
1/0.5	4	0.00	0.70	648	0.58
1/0.7	4.03	0.00	0.61	784	0.58
1/0.9	4.04	3.67	0.60	776	0.53
effluent	4.06	7.00	0.53	760	0.53
2/0.1	4.12	12.00	7.26	744	0.90
2/0.3	4.13	14.00	1.10	712	0.63
2/0.5	4.1	8.00	1.06	696	0.58
2/0.7	4.11	7.00	1.02	688	0.63
2/0.9	4.11	2.67	0.83	720	0.58
effluent	4.15	3.33	0.75	752	0.58
3/0.1	4.25	14.00	18.30	792	1.37
3/0.3	4.3	7.33	2.07	688	0.79
3/0.5	4.31	1.33	1.02	696	0.79
3/0.7	4.31	3.00	0.83	712	0.74
3/0.9	4.31	8.00	0.67	752	0.63
effluent	4.36	5.00	0.59	768	0.63

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Time(h)/ depth(m)	pH	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)
5/0.1	4.68	30.00	22.10	776	2.21
5/0.3	4.69	17.00	2.32	736	1.63
5/0.5	4.71	0.00	1.47	704	1.26
5/0.7	4.71	5.00	1.00	744	1.21
5/0.9	4.71	5.67	0.81	728	0.95
effluent	4.71	1.67	0.75	728	1.05
6/0.1	4.87	48.00	30.30	728	3.16
6/0.3	4.89	3.00	3.30	728	2.37
6/0.5	4.9	8.67	1.64	712	2.05
6/0.7	4.91	1.00	1.32	712	1.74
6/0.9	4.91	1.67	1.35	696	1.37
effluent	4.89	3.00	1.29	728	1.69

ตารางผนวกที่ ข4 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการกรองทรายโดยตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. ในถังตกตะกอน และเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.01 ก./ล. ในเส้นท่อ

Time(h)/ depth(m)	pH	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	Floc size (μm)
1/0.1	5.87	230.00	314	1069.16	12.01	-
1/0.3	5.81	96.67	111	1054.21	5.22	-
1/0.5	5.85	16.25	53.8	1016.82	3.16	-
1/0.7	5.83	10.00	41.4	957.01	2.85	-
1/0.9	5.83	2.50	27	732.71	2.21	-
effluent	5.9	7.60	41.4	986.92	2.55	-
2/0.1	5.62	156.67	202	867.29	9.91	57±11
2/0.3	5.7	55.00	73.4	957.01	3.06	26±6
2/0.5	5.71	24.00	36.8	957.01	2.11	-
2/0.7	5.74	8.00	25.7	912.15	1.82	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Time(h)/ depth(m)	pH	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	Floc size (µm)
2/0.9	5.75	4.50	17.7	957.01	1.34	-
effluent	5.81	3.20	27.3	837.38	1.92	-
3/0.1	5.62	195.00	228	942.06	10.54	66±13
3/0.3	5.6	80.00	95.4	852.34	4.53	28±13
3/0.5	5.58	60.00	70.4	747.66	3.48	-
3/0.7	5.6	36.00	46	747.66	2.29	-
3/0.9	5.61	68.00	72.4	867.29	3.48	-
effluent	5.69	3.43	26.1	822.43	1.76	-
4/0.1	5.31	123.33	174	889.72	6.85	44±7
4/0.3	5.31	53.33	69.9	874.77	4.00	21±6
4/0.5	5.31	42.00	70	822.43	3.90	23±4
4/0.7	5.29	50.00	64.1	882.24	2.95	21±5
4/0.9	5.26	50.00	62.7	762.62	2.53	21±4
effluent	5.39	3.50	29.5	762.62	1.65	-
5/0.1	4.8	205.00	191	837.38	8.64	44±12
5/0.3	4.8	70.00	77.4	672.90	4.53	25±6
5/0.5	4.81	198.00	136	732.71	6.11	25±3
5/0.7	4.84	50.00	44.3	635.51	2.29	18±4
5/0.9	5.05	28.00	9.29	717.76	2.02	24±7
effluent	4.84	2.20	1.83	747.66	0.65	-
6/0.1	4.74	240.00	225	642.99	4.85	40±6
6/0.3	4.45	113.33	107	702.80	5.27	32±6
6/0.5	4.44	82.50	85.2	672.90	3.56	31±9
6/0.7	4.73	50.00	50.8	710.28	2.53	26±9
6/0.9	4.55	72.00	77.7	800.00	3.27	-
effluent	4.64	12.00	39.3	747.66	2.04	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการกรองทรายโดยตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ 1.2 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในถังตกตะกอน และเติมเฟอริคคลอไรด์ 0.3 ก./ล. โพลิเมอร์ 0.005 ก./ล. ในเส้นท่อ

Time(h)/ depth(m)	pH	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	Floc size (μm)
1/0.1	6.5	210.00	161.00	1365.52	13.07	19.4±4
1/0.3	6.55	125.00	87.50	1189.66	6.32	-
1/0.5	6.55	30.00	13.40	1251.72	3.37	-
1/0.7	6.66	3.75	8.84	1189.66	2.32	-
1/0.9	6.61	18.00	18.10	1189.66	2.74	-
effluent	6.45	9.37	11.00	1189.66	2.32	-
2/0.1	6.51	280.00	158.00	1220.69	10.96	22.2±2.87
2/0.3	6.5	130.00	78.60	1189.66	6.53	-
2/0.5	6.47	140.00	74.10	1127.59	6.32	-
2/0.7	6.49	112.00	62.50	1231.03	5.90	-
2/0.9	6.5	164.00	84.50	1272.41	6.11	-
effluent	6.44	54.00	35.20	1189.66	3.90	-
3/0.1	6.51	110.00	78.20	1427.59	6.53	19.58±4.58
3/0.3	6.46	70.00	41.60	1024.14	4.22	-
3/0.5	6.46	53.33	31.8	1086.21	3.79	-
3/0.7	6.46	40.00	24.90	1086.21	3.16	-
3/0.9	6.49	66.67	39.90	1044.83	3.58	-
effluent	6.35	44.00	23.90	1034.48	2.95	-
4/0.1	6.46	110.00	63.30	1200.00	6.32	62±12.4
4/0.3	6.51	38.00	20.90	982.76	2.53	-
4/0.5	6.5	26.00	13.70	982.76	2.21	-
4/0.7	6.49	8.00	12.20	1024.14	1.90	-
4/0.9	6.49	22.00	12.80	962.07	1.84	-
effluent	6.39	37.00	6.49	1003.45	1.48	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

Time(h)/ depth(m)	pH	SS (มก./ล.)	Turbidity (NTU)	COD (มก./ล.)	Color (Pt.CO)	Floc size (µm)
5/0.1	6.42	170.00	92.80	1220.69	7.27	27.35±8.12
5/0.3	6.43	83.33	44.60	951.72	7.69	-
5/0.5	6.4	60.00	29.90	931.03	2.69	-
5/0.7	6.41	80.00	38.50	982.76	3.00	-
5/0.9	6.45	52.00	31.50	920.69	2.79	-
effluent	6.36	44.00	22.40	941.38	2.53	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

เวลาและปริมาตรน้ำที่กรองได้จากการตกตะกอนโดยตรง และในเส้นท่อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ค1 เวลาและปริมาตรน้ำที่กรองได้จากการตกตะกอนโดยตรง

time(s)	v(ml)	V(m^3)	t/v
5	67	0.000067	74626.87
10	100	0.0001	100000.00
20	120	0.00012	166666.67
30	144	0.000144	208333.33
40	163	0.000163	245398.77
50	189	0.000189	264550.26
60	236	0.000236	254237.29
90	275	0.000275	327272.73
120	300	0.0003	400000.00
150	330	0.00033	454545.45
180	358	0.000358	502793.30
210	380	0.00038	552631.58
240	408	0.000408	588235.29
270	429	0.000429	629370.63
300	451	0.000451	665188.47
360	490	0.00049	734693.88
390	497	0.000497	784708.25
420	516	0.000516	813953.49
440	538	0.000538	817843.87

ตารางผนวกที่ ค2 เวลาและปริมาตรน้ำที่กรองได้จากการตกตะกอนในเส้นท่อ

time(s)	v(ml)	V(m^3)	t/v
5	40	0.00004	125000.00
10	74	0.000074	135135.14
50	83	0.000083	602409.64
70	110	0.00011	636363.64

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวภัทรมาศ เทียมเงิน
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 10 พฤศจิกายน 2524
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์