

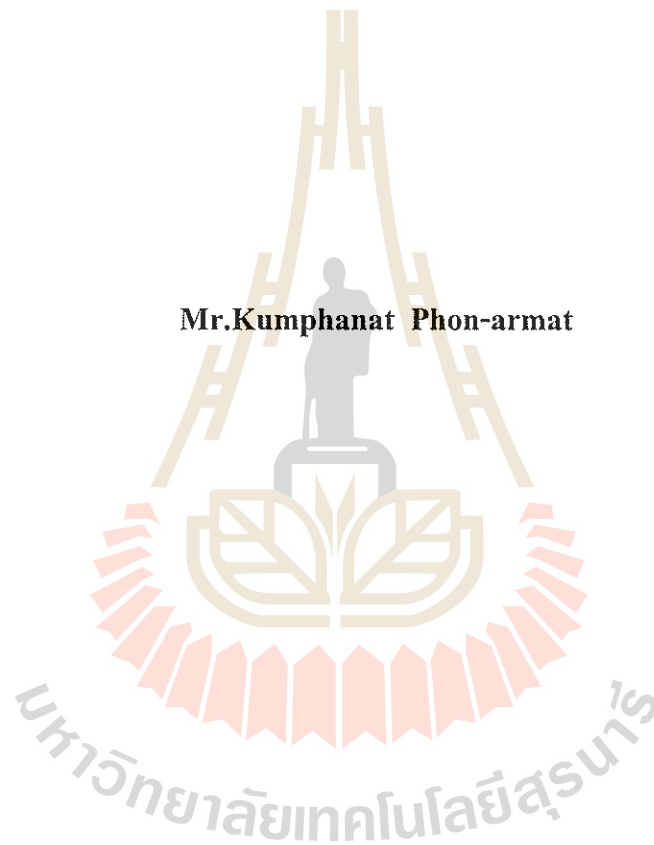
การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบในสถานะที่มีแบคทีเรียเกินมาตรฐาน
สำหรับกระบวนการทรายกรองช้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2544
ISBN 974-7359-80-4

**WATER QUALITY IMPROVEMENT OF RAW WATER
OVER BACTERIAL POLLUTED FOR SLOW SAND FILTER**

Mr.Kumphanat Phon-armat



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2001

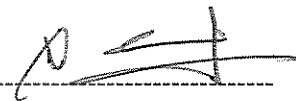
ISBN 974-7359-80-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบในสถานะที่มีแบคทีเรียเกินมาตรฐานสำหรับกระบวนการทรายกรองช้า

สภามหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ.ดร.จางจินต์ ผลประเสริฐ)

ประธานกรรมการ



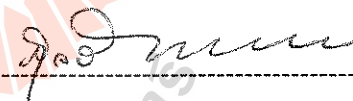
(ผศ.ดร.หนึ่ง เตียอำรุง)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ.ดร.อุทัย มีคำ)

กรรมการ



(รศ.สุวดี จันทร์กระจ่าง)

กรรมการ



(ดร.ปิยะรัตน์ ศรีจรูณรัตน์)

กรรมการ



(รศ.ดร.เกษม ปราบริปุตลุง)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(ผศ.ดร.ทวี เลิศปัญญาวิทย์)

คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กัมปนาท พลอามาตย์: การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบในสถานะที่มีแบคทีเรียเกินมาตรฐานสำหรับ
กระบวนการทรายกรองช้า

(Water Quality Improvement of Raw Water Over Bacterial Polluted for Slow Sand Filter)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.หนึ่ง เตียอำรุง, 102 หน้า

ISBN 974-7359-80-4

การศึกษา และการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบในสถานะที่มีแบคทีเรียเกินมาตรฐานสำหรับกระบวนการ
การทรายกรองช้า โดยที่การทดลองพบว่าสารโคโทแซนมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นและ
แบคทีเรียก่อโรคได้ดีกว่าสารส้ม ในการบำบัดน้ำตัวอย่างจะต้องใช้ปริมาณความเข้มข้นโคโทแซนใน
การก่อดตะกอน 10 มก./ล. ในขณะที่ใช้สารส้มในปริมาณถึง 100 มก./ล. จึงได้ประสิทธิภาพการลดความ
ขุ่นทัดเทียมกัน โดยที่ประสิทธิภาพการลดความขุ่น และในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย คิดเป็น
เปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 4.5-7.3% และ 1.7-3.1% ตามลำดับ จากผลการวิจัยยังพบว่ากระบวนการก่อด
ตะกอนด้วยโคโทแซนสามารถลดปริมาณโลหะหนัก เช่น เหล็ก แมงกานีส แคดเมียม ทองแดง สังกะสี
และ ตะกั่ว ได้ถึง 79.8%, >99%, 85.7%, 40%, 80.5% และ 29% จากปริมาณเริ่มต้นตามลำดับ สำหรับ
ระบบถังทรายกรองช้า น้ำตัวอย่างที่ผ่านระบบถังทรายกรองช้าพบว่าสามารถลดความขุ่น คิดเป็น
เปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 4.1% และในการกำจัด โคลิฟอร์ม และ *Escherichia coli* สามารถกำจัดได้คิดเป็น
เปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 1.2-3.1% และ 5.7-14% ตามลำดับ เมื่อตกตะกอนน้ำด้วยโคโทแซนแล้วจากนั้น
ผ่านระบบถังทรายกรองช้าพบว่าสามารถลดความขุ่น และกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียคิดเป็นเปอร์เซ็นต์
การคงเหลือเทียบกับปริมาณเริ่มต้นเป็น 9-19.2% และ 10-20.6% ตามลำดับ เมื่อศึกษาจลนศาสตร์การ
ตายเนื่องจากความเข้มข้นของสารก่อดตะกอนสารส้ม และ สารโคโทแซน โดยวิเคราะห์ตามสมการ
Chick-Watson พบว่าสารส้มมีค่า k' ก่อนข้างคงที่ และค่า k' ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารส้ม
กล่าวคือเมื่อเริ่มต้นด้วยปริมาณของโคลิฟอร์ม และ *E. coli* เป็น 1,000, 5,000, 10,000 และ 50,000
เซลล์/100มล. ค่า k' ที่คำนวณได้มีค่าเป็น 0.021, 0.011, 0.018, 0.023 และ 0.027 ล./มก.-ชม. ตามลำดับ
ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สำหรับสารโคโทแซนค่า k' ของโคลิฟอร์ม และ *E.coli* เปลี่ยน
แปลงตามความเข้มข้นของสารโคโทแซนคือ การเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้ค่า k' เพิ่มขึ้นด้วย

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา กัญญา น พงษ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา หนึ่ง เตียอำรุง

KUMPHANAT PHON-ARMAT : WATER QUALITY IMPROVEMENT OF RAW
WATER OVER BACTERIAL POLLUTED FOR SLOW SAND FILTER

THESIS ADVISOR: ASSIST.PROF. Dr. NEUNG TEAUMROONG, 102 PP.

ISBN 974-7359-80-4

CHITOSAN/ALUM/SLOW SAND-FILTER//COAGULATION/WATER TREATMENT

Development of slow sand process was conducted for improving the raw water quality. The results indicated that chitosan performed the higher efficiency for reducing turbidity and number of coliform than using alum. The concentration of chitosan was used only 10 mg/L while the amount of alum was 100 mg/L to reduce the turbidity and coliform, the remaining percent were 4.5-7.3% and 1.7-3.1%, respectively. Moreover, using chitosan was able to reduce the heavy metals in raw water such as Fe, Mg, Cd, Cu, Zn and Pb with efficiency 79.8%, >99%, 85.7%, 40%, 80.5% and 29%, respectively. When using slow sand process without coagulants supplementation, the remaining percent of turbidity, coliform and *Escherichia coli*, were 4.1%, 1.2-3.1% and 7.7-14%, respectively. When chitosan was applied before slow sand filter treatment, the efficiencies for removing turbidity and coliform were 9-19.2% and 10-20.6%, respectively. The kinetics-die-off of bacteria when it was treated with alum and chitosan, the results suggested that k' of alum was not corresponded to its own concentration when analyzed with Chick-Watson equation. The alum k' values of coliform and *E. coli* at initial population number 1,000, 5,000, 10,000 and 50,000 cells/100ml. were 0.021, 0.011, 0.018, 0.023 and 0.027 liters/mg-hr, respectively. For k' values of chitosan demonstrated that k' is depending on concentration of chitosan.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนักศึกษา กิมโปง นอน

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา เนื้อง เตามรุ่ง

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หนึ่ง เตียอำรุง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจนตรวจสอบแก้ไขจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จงจินต์ ผลประเสริฐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทัย มีคำ รองศาสตราจารย์ สุวดี จันทร์กระจ่าง อาจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ ศรีจรูณรัตน์ และอาจารย์สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ขอขอบคุณ คุณธัญวดี สุขสงวน คุณประพล พลเยี่ยม คุณวิชาญ ผิวคำ คุณอำนาจ รื่นเรือง พันตรีกิตติพงษ์ พุทธิมณี และคุณสุทธิดา เกรียงเกษม อีกทั้งทุกท่านที่ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพ ที่ให้กำลังใจ และคำปรึกษาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ๆ ที่ให้การเลี้ยงดูอบรมจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

กัมปนาท พลอามาตย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
คำย่อ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และ ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 วรรณกรรม และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประวัติความเป็นมา	4
2.2 การผลิตน้ำประปา	5
2.3 ทฤษฎีกระบวนการสร้างตะกอน	9
2.4 การตกตะกอน	10
2.5 สารตกตะกอน	11
2.6 สารช่วยตกตะกอน	14
2.7 ผลกระทบต่อสุขภาพซึ่งอาจเกิดจากการใช้สารส้ม และ โพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์	18
2.8 กลไกการกรองของถังทรายกรองช้า	19
2.9 ส่วนประกอบของถังทรายกรองช้า	23
2.10 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณภาพการกรอง	25
2.11 ข้อดี และข้อเสียของระบบถังทรายกรองช้า	26

บทที่	หน้า
3 วัสดุ และ วิธีการทดลอง	28
3.1 บทนำ	28
3.2 วัสดุ และ อุปกรณ์การทดลอง	28
3.3 การเตรียมสารเคมี	30
3.4 วิธีการทดลอง	31
3.5 วิธีการวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำดิบ	34
4 ผลการทดลอง และ อภิปรายผล	35
4.1 ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณของสารส้ม และสารโคโทแซนที่เหมาะสม ในการตกตะกอนความขุ่น และจำนวนแบคทีเรียก่อโรค	35
4.2 ศึกษาขีดความสามารถในการลดความขุ่น และแบคทีเรียก่อโรคในสถานะ ที่เกินมาตรฐานของสารส้มและสารโคโทแซน	40
4.3 ศึกษาประสิทธิภาพของระบบถังทรายกรองช้า	48
4.4 จลนศาสตร์การตายของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย	67
4.5 ปริมาณความเข้มข้นสารโคโทแซนคงเหลือในน้ำ	85
4.6 ผลการตรวจคุณภาพน้ำ	86
5 สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลวิจัย	89
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาเพิ่มเติม	91
5.3 ข้อเสนอแนะการออกแบบระบบบำบัดน้ำดิบโดยใช้สารโคโทแซน	91
ภาคผนวก	95
ประวัติผู้เขียน	99
เอกสารอ้างอิง	101

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	มาตรฐานน้ำประปาของการประปานครหลวง	6
2-2	มาตรฐานน้ำดิบของการประปาส่วนภูมิภาค	7
3-1	ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง	31
4-1	ค่าของแข็งในน้ำตามความหนาชั้นกรอง	53
4-2	ค่าจำนวนโคลิฟอร์มตามความหนาชั้นกรอง	62
4-3	ผลข้อมูลทีวิเคราะห์ตามสมการ Chick-Watson	73
4-4	ผลของข้อมูลค่าคงที่ของการฆ่าเชื้อ (n)	81
4-5	ผลของข้อมูลค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k')	83
4-6	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาของสารฆ่าเชื้อชนิดต่างๆ	84
4-7	รายงานผลตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	86
1-ก	รายละเอียดลักษณะสมบัติของโคโทแซน	98

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	แผนภาพความเสถียรของสารส้มในน้ำที่ไม่มีความขุ่น	13
2-2	โครงสร้างของไคติน และไคโทแซน	16
2-3	กลไกในการสร้างตะกอนแบบเชื่อมต่อกด้วยสารพอลิเมอร์	17
2-4	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสารกรอง และช่องว่างระหว่างสารกรองที่เกิดขึ้น	20
2-5	กลไกแบบตกตะกอน	21
2-6	ส่วนประกอบของถังทรายกรองช้า	24
3-1	เครื่องจาร์ทดสอบ	29
3-2	แผนภาพถังทรายกรองช้า	29
3-3	รายละเอียดของชุดโปรยน้ำ	30
4-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารไคโทแซน	36
4-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับปริมาณความเข้มข้นของสารส้มและ สารไคโทแซน	37
4-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Alkalinity กับปริมาณความเข้มข้นของสารส้มและ สารไคโทแซน	38
4-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน โคลิฟอร์มกับปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารไคโทแซน	39
4-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน <i>E. coli</i> กับปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารไคโทแซน	42
4-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารไคโทแซน	46
4-7	กราฟแสดงความขุ่นของน้ำตัวอย่างที่เข้าระบบถังทรายกรองช้า	48
4-8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับเวลาการกรอง	50
4-9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับเวลาการกรอง	52
4-10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของแข็งในน้ำกับระยะเวลาการกรอง	55
4-11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียความดันน้ำกับระยะเวลาการกรอง	58
4-12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระยะเวลาการกรอง	58

ภาพที่		หน้า
4-13	กราฟแสดงความสัมพันธ์การสูญเสียความดันกับความหนาชั้นกรอง	60
4-14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโคลิฟอร์มแบคทีเรียกับระยะเวลาการกรอง	65
4-15	กราฟแสดงความสัมพันธ์เปอร์เซ็นต์การมีชีวิตของโคลิฟอร์ม และ <i>E. coli</i> กับเวลา (ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง)	69
4-16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารส้ม กับเวลาการกำจัดจุลชีพของโคลิฟอร์ม และ <i>E. coli</i> กับเวลา	77
4-17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารไดโทแซมกับเวลาการกำจัดจุลชีพของโคลิฟอร์ม และ <i>E. coli</i> กับเวลา	80
4-18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารไดโทแซมและสารไดโทแซม	82



คำย่อ

Cd	=	แคดเมียม
Cr	=	โครเมียม
Cu	=	ทองแดง
d	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค, เมตร
EMB	=	Eosin-Methylene Blue
Fe	=	เหล็ก
g	=	อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, เมตร/วินาที ²
Mg	=	แมกนีเซียม
MPN	=	Most Probable Number
NTU	=	Nephelometric Turbidity Unit
Pb	=	ตะกั่ว
PCA	=	Plate Count Agar
pH	=	ค่าความเป็นกรดและด่าง
V_s	=	ความเร็วในการจมตัวแบบอิสระของอนุภาค, เมตร/วินาที
R^2	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
SS	=	ของแข็งแขวนลอย, มก./ล.
TDS	=	ของแข็งละลายน้ำ, มก./ล.
TS	=	ของแข็งทั้งหมด, มก./ล.
Zn	=	สังกะสี
ρ_s	=	ความหนาแน่นของอนุภาค, กก. (มวล)/ลบ.ม.
ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ, กก. (มวล)/ลบ.ม.
μ	=	ความหนืด, นิวตัน-วินาที/เมตร ²
μm	=	ไมโครเมตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และ ความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาแหล่งน้ำสะอาดเพื่อการอุปโภค และบริโภคให้กับชุมชน เป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญทางเศรษฐกิจและสังคมในการพัฒนาประเทศเพราะน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการดำรงชีวิต และมีส่วนเกี่ยวข้องกับเราอยู่ตลอดเวลา ความต้องการใช้น้ำเพื่ออุปโภค บริโภคของประชาชนที่มีมากขึ้นทุกขณะ เนื่องจากอัตราการเพิ่มของประชากรเพิ่มสูงขึ้น การที่จะให้หน่วยงานของรัฐรับผิดชอบสำหรับการผลิตและแจกจ่ายน้ำให้ได้ทั่วถึงเพียงพอแก่ทุกคนรอบคร้วมเป็นไปไม่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชนบทที่ห่างไกลความเจริญซึ่งระบบประปาเข้าถึงไม่ถึง ฉะนั้นการศึกษาค้นคว้าหา ระบบที่จะได้น้ำสะอาดถูกสุขลักษณะ ดำเนินการก่อสร้างง่าย ประหยัดค่าใช้จ่าย และไม่ยุ่งยากในการบำรุงรักษา โดยใช้แหล่งน้ำตามธรรมชาติเป็นแหล่งน้ำดิบจึงเป็นวิธีที่ควรให้ความสนใจ

ในบรรดาแหล่งน้ำซึ่งเป็นต้นกำเนิดของน้ำใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคของชาวชนบทซึ่งได้แก่น้ำฝน น้ำผิวดิน น้ำใต้ดินดังกล่าวแล้วนั้น จะเห็นได้ว่าแหล่งน้ำผิวดินจะมีความสำคัญต่อชาวชนบท ส่วนใหญ่เพราะแม่น้ำ ลำธาร ห้วย คลอง หนอง บึงทั้งหลายมีปรากฏอยู่ทั่วไปทุกภาคตามหมู่บ้านในชนบทซึ่งพอจะมีน้ำไหลหรือเก็บกักไว้ตลอดปี ประกอบกับน้ำบาดาลก็ไม่สามารถหาได้ง่ายนักหรือถ้ามีอาจจะอยู่ลึกหรือคุณภาพไม่ได้มาตรฐานประกอบกับฝนที่ไม่มีทุกฤดูกาล เมื่อชาวชนบทต้องการนำน้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดินมาใช้มักจะคำนึงถึงความสะอาดเฉพาะที่มองเห็นด้วยตาเปล่าเท่านั้น คือคุณลักษณะทางกายภาพ เช่น สีไม่ขุ่นเกิน ไปก็นำไปใช้และบริโภคเลยโดยไม่คำนึงถึงคุณสมบัติทางเคมีหรือทางชีววะว่าน้ำนั้นจะมีสารที่เป็นพิษต่อร่างกายเจ็บปหรือมีเชื้อโรคระบาดปะปนอยู่หรือไม่ ส่วนใหญ่แล้วน้ำผิวดินมักมีสีและความขุ่นสูง นอกจากนี้อาจมีสารประกอบละลายปะปนและเป็นแหล่งแพร่เชื้อโรคได้ง่ายด้วยเพราะน้ำผิวดินเกิดจากน้ำฝนที่ไหลลงที่ต่ำประกอบกับส่วนที่ล้นจากใต้ดินสมทบด้วยจึงมีโอกาสดัมผัสผสมผสานกับดินหินและสิ่งมีชีวิตแวดล้อมในบริเวณนั้นมาก่อน เช่น ถ้าเป็นแม่น้ำลำคลองหรือบึงในภาคกลางก็มักมีความขุ่นเนื่องจากเศษดิน หิน มีสีเขียวของสาหร่าย ใบไม้ และมีเชื้อแบคทีเรียเจ็บป ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือน้ำมักมีสีออกน้ำตาลแดง เพราะผ่านดินลูกรังมาสู่ลำธาร ในภาคใต้มักมีแร่ธาตุละลายอยู่ ซึ่งน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินเหล่านี้ถูกนำมาใช้โดยชาวชนบทโดยพิจารณาเฉพาะสี และความขุ่นโดยสายตาเท่านั้น กรรมวิธีที่ใช้ในการทำ ความสะอาดอย่างง่าย ๆ ก็เพียงตั้งทิ้งไว้ตกตะกอนและการต้มเท่านั้น แต่ถ้าเห็นว่าใสดีก็จะนำมา

บริโภคโดยไม่คำนึงว่าน้ำนั้นอาจเป็นพาหนะนำเชื้อโรคได้ สำหรับชนบทบางส่วนที่ความรู้ความเจริญเริ่มเข้าไปถึงแล้วและรู้จักใช้เทคโนโลยีใหม่ๆ สำหรับการผลิตน้ำสะอาดให้แก่หมู่บ้าน เช่น การใช้ระบบทรายกรองก็นับว่าคุ้มค่าได้ผลดี ซึ่งกรรมวิธีการกรองน้ำ โดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ คือ ระบบถังทรายกรองเร็ว (Rapid Sand Filtration) ซึ่งเป็นที่แพร่หลายและนิยมกันมากโดยทั่วไปทั้งในประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศที่กำลังพัฒนา ระบบประปาแบบถังทรายกรองเร็วนี้ จะประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบ คือ ระบบน้ำดิบ ระบบการตกตะกอน การกรอง และการฆ่าเชื้อโรค กล่าวคือ เป็นระบบที่สมบูรณ์แบบต้องอาศัยเครื่องสูบน้ำ อุปกรณ์และสารเคมีครบถ้วนตามกระบวนการ(มันสิน, 2537)

สำหรับระบบประปาพื้นฐานอีกแบบหนึ่งคือ ระบบถังทรายกรองช้า (Slow Sand Filtration) ประกอบด้วยระบบน้ำดิบ การกรอง และอาจมีระบบบำบัดขั้นต้นตามความจำเป็นของแหล่งน้ำดิบ ในการผลิตน้ำประปาโดยใช้น้ำผิวดินจากสระขนาดย่อมโดยการวิจัยของธานินทร์ นิรมานสกุล (2529) ได้ใช้การกรองขั้นต้นร่วมกับระบบถังทรายกรองช้า โดยใช้วัสดุการกรองขั้นต้นเป็นกรวดขนาดต่างๆปล่อยให้ไหลผ่านทางแนวราบ ปรากฏผลว่า ประสิทธิภาพของการลดความขุ่นเฉลี่ยประมาณ 70% ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟอร์มเฉลี่ยประมาณ 40% นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของต่างประเทศอีกมาก และได้ผลสรุปไปในทำนองเดียวกัน จึงพอยืนยันได้ว่าระบบนี้สามารถลดความขุ่นและจุดสีพต่างๆได้ ระบบประปาแบบนี้อาจอาศัยหลักธรรมชาติเข้ามาช่วยลดความยุ่งยากทางด้านเทคนิคของการก่อสร้าง การบำรุงรักษาเครื่องยนต์กลไกต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี ไม่จำเป็นต้องมีวิทยากรและระบบควบคุมที่ซับซ้อน อีกทั้งคุณภาพน้ำที่ผลิตได้ก็อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย นับได้ว่าระบบถังทรายกรองช้าเป็นระบบที่ใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม

จากที่กล่าวมาเห็นได้ว่าระบบประปาแบบถังทรายกรองช้าเป็นกระบวนการผลิตน้ำซึ่งมีความสำคัญและเริ่มมีบทบาทในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนำกลับมาเข้าระบบถังทรายกรองช้าเพื่อนำน้ำที่ได้ไปใช้ในกิจกรรมต่างๆ สำหรับปัญหาในอนาคตที่จะเกี่ยวกับแหล่งน้ำดิบที่จะนำมาใช้ในการผลิตน้ำประปา คือแหล่งน้ำดิบจะมีการปนเปื้อนของสารเคมีหรือแบคทีเรียก่อโรคปนอยู่เป็นจำนวนมาก อันเนื่องมาจากความรุนแรงของความเสื่อมโทรมคุณภาพสิ่งแวดล้อมทางน้ำนั้นนับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น และ ความจำเป็นที่ต้องนำน้ำดิบนั้นมาใช้ในการผลิตน้ำประปา จึงทำให้เราต้องมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำประปาที่สามารถกำจัดแบคทีเรียก่อโรค โดยใช้ระบบถังทรายกรองช้า และอีกเหตุผลหนึ่งในการศึกษาครั้งนี้เพราะระบบทรายกรองช้ายังมีใช้อยู่ในประเทศไทย โดยเฉพาะชนบทซึ่งไม่มีระบบผลิตน้ำประปาที่ทันสมัยเนื่องจากมีราคาแพง ฉะนั้นรูปแบบระบบถังทรายกรองช้านี้จะต้องมีการปรับปรุงให้เป็นระบบน้ำประปาที่สมบูรณ์มากขึ้น คือมีกระบวนการก่อกอง การรวมตะกอน และการตกตะกอน แล้วจึงนำน้ำเข้าสู่ระบบถังทรายกรองช้า

ต่อไป การวิจัยในครั้งนี้จะเน้นการศึกษาถึงการกำจัดความขุ่นและแบคทีเรียก่อโรคของน้ำดิบที่เกิดขึ้นก่อนเข้าสู่ระบบถังทรายกรองช้า เพื่อให้ได้วิธีที่เหมาะสมนำไปพัฒนาแก่ระบบประปาชนบทต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างรูปแบบระบบบำบัดน้ำดิบร่วมกับการใช้สารตกตะกอนเพื่อให้ น้ำที่ผ่านกระบวนการถังทรายกรองช้ามีมาตรฐานใกล้เคียงหรือทัดเทียมกับน้ำประปา โดยเน้นให้ระบบมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่น และกำจัดแบคทีเรียก่อโรคให้มากที่สุด

1.2.2 เพื่อศึกษาขีดความสามารถของระบบถังทรายกรองช้าในการกำจัดความขุ่นและแบคทีเรียก่อโรค ในสภาวะที่มีเกินมาตรฐาน โดยใช้สารตกตะกอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาลักษณะสมบัติของแหล่งน้ำดิบจากบ่อเก็บน้ำของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.2 สร้างรูปแบบระบบผลิตน้ำประปาโดยมีกระบวนการผลิตอยู่ 4 ขั้นตอนคือ การสร้างแกนตะกอน การรวมตะกอน การตกตะกอนและการกรองซึ่งในการสร้างแกนตะกอนจะใช้สารส้ม (Alum) เปรียบเทียบกับการใช้สารไคโทแซน (Chitosan) เป็นสารตกตะกอน ส่วนระบบการกรองใช้ระบบถังทรายกรองช้าในการศึกษา

1.3.3 วิเคราะห์ถึงความสามารถในการลดความขุ่น (Turbidity) ของการตกตะกอนด้วยสารตกตะกอน และระบบถังทรายกรองช้า

1.3.4 วิเคราะห์ถึงความสามารถในการกำจัดโคลิฟอร์ม (Coliform) ของการตกตะกอนด้วยสารตกตะกอน และระบบถังทรายกรองช้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ระบบผลิตน้ำประปาที่เหมาะสมและประหยัดในการลดความขุ่นและแบคทีเรียก่อโรคในการผลิตน้ำที่มีคุณภาพใกล้เคียงหรือทัดเทียมกับน้ำประปา

1.4.2 เป็นแนวทางที่จะถ่ายทอดเทคโนโลยีของระบบผลิตน้ำประปาที่พัฒนาขึ้นไปสู่ชนบทต่อไป

บทที่ 2

ปริทัศน์ วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมา

ระบบประปาแบบถังทรายกรองช้าเริ่มถูกนำมาเข้ามาใช้ในกระบวนการการผลิตน้ำสะอาดเป็นครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1804 ที่เมืองเพลส์ลีย์ (Paisley) ประเทศสกอตแลนด์ และในปี ค.ศ. 1829 โดยเจมส์ ซิมป์สัน (James Simpson) เป็นผู้นำเข้ามาใช้ในระบบการประปาของเมืองเซดซีในกรุงลอนดอน (London) ในช่วงศตวรรษที่ 19 จากนั้นกระบวนการการผลิตน้ำแบบระบบถังทรายกรองช้าก็ได้ใช้แพร่หลายไปทั่วโลก และ หลักการของระบบถังทรายกรองช้า หรือระบบถังกรองแบบชีวภาพ (Biological Filter) ก็ได้รับการยอมรับให้เป็นกระบวนการการผลิตน้ำที่มีมาตรฐานอีกกระบวนการหนึ่ง โดยที่ในปี ค.ศ. 1892 ได้มีปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบถังทรายกรองช้าสามารถกำจัดเชื้อโรคได้ กล่าวคือช่วงระหว่างเกิดโรคอหิวาห์ระบาดในเมืองฮัมบูร์ก (Hamburg) ประเทศสาธารณรัฐเยอรมัน และ ที่ริมฝั่งแม่น้ำเอลเบ (Elbe) โดยมีสองเมืองที่อยู่ติดต่อกันคือ เมืองฮัมบูร์ก ซึ่งอยู่เหนือน้ำ และเมืองอัลโทนา (Altona) ซึ่งอยู่ปลายน้ำ ต่างก็ใช้น้ำจากแม่น้ำเอลเบ เป็นแหล่งน้ำดิบมาผลิตน้ำประปาจ่ายให้แก่ประชาชน โดยที่ท่อสูบน้ำดิบของระบบการประปาในเมืองอัลโทนาที่ตั้งอยู่ทางปลายน้ำของแม่น้ำเอลเบด้วย เพราะฉะนั้นเมื่อเมืองฮัมบูร์กเกิดโรคอหิวาห์ระบาดทางเมืองอัลโทนาก็ควรจะเกิดการระบาดของโรคนี้เกิดขึ้นด้วย แต่ปรากฏว่าน้ำประปาที่ผลิตจ่ายให้กับประชาชนในเมืองอัลโทนานั้นผลิตด้วยระบบถังทรายกรองช้า ส่วนน้ำประปาที่จ่ายให้กับประชาชนในเมืองฮัมบูร์กนั้นไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำเลย ดังนั้นเมื่อเกิดโรคอหิวาห์ระบาดจึงทำให้ประชาชนในเมืองฮัมบูร์กเสียชีวิตถึง 8,000 คน และอีก 10,000 คนต้องป่วยเป็นโรคนี้ ส่วนประชาชนในเมืองอัลโทนาซึ่งอยู่ทางด้านใต้ของแม่น้ำไม่พบการระบาดของโรคเลย ในปี ค.ศ. 1925 ได้มีการประดิษฐ์เครื่องกรองแบบตกตะกอนขึ้นเป็นครั้งแรก และเริ่มใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา ต่อมาได้มีการดัดแปลงแก้ไขให้ดีขึ้น และใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งในปัจจุบันระบบดังกล่าวที่พัฒนามาเรื่อยๆ ก็คือระบบถังทรายกรองเร็ว (Rapid Sand Filter) นั่นเอง และได้มีการจดทะเบียนลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1971 (ASCE, AWWA, CSSE, 1971)

2.2 การผลิตน้ำประปา

น้ำประปา หมายถึงน้ำที่มีคุณภาพเหมาะสมที่จะใช้ดื่มได้อย่างปลอดภัย สำหรับน้ำประปาในเมืองไทยควรมีมาตรฐานขั้นต่ำตามมาตรฐานน้ำประปาของการประปานครหลวงดังแสดงในตารางที่ 2-1 การผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปแล้วประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญต่างๆ ดังนี้คือ (มันสิน, 2537)

2.2.1 แหล่งน้ำดิบ (Source of raw water)

น้ำดิบที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นน้ำประปา จะต้องได้มาจากแหล่งน้ำที่ได้พิจารณาเห็นว่าเหมาะสมแล้ว โดยจะต้องไม่มีปริมาณของสารเคมีละลายปะปนอยู่มากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดความยากลำบากในการกำจัดออก ทั้งจะเกิดการสิ้นเปลืองมากเกินไปอีกด้วย โดยเฉพาะแหล่งน้ำดิบนั้นจะต้องได้รับการป้องกันอย่างดีไม่ให้มีการเพิ่มความสกปรกลงในน้ำได้อีก โดยที่ความสกปรกอาจจะเกิดจากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือของเสียจากอาคารที่พักอาศัย ดังนั้นจึงไม่ควรอนุญาตให้มีการสร้างอาคารใดๆ ใกล้แหล่งน้ำนั้นภายในระยะ 30 เมตร ถ้าเป็นอ่างเก็บน้ำควรจะต้องดูแลรักษาบริเวณรอบ ๆ อ่างเก็บน้ำไม่ให้มีแหล่งโสโครกเกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อที่จะรักษาคุณภาพของน้ำดิบที่จะนำมาใช้เพื่อการผลิตน้ำประปาให้มีคุณภาพดีนั่นเอง ตารางที่ 2-2 แสดงมาตรฐานขั้นต่ำน้ำดิบของการประปาส่วนภูมิภาค

2.2.2 การปรับปรุงคุณภาพของน้ำขั้นต้น (Pretreatment)

น้ำจากแหล่งน้ำดิบแต่ละแหล่งมักจะมีคุณภาพแตกต่างกัน ก่อนที่จะนำไปใช้ผลิตเป็นน้ำประปาจะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพขั้นต้นเสียก่อน เช่น การทำให้น้ำเกิดการสัมผัสกับอากาศเป็นวิธีการที่จะช่วยทำให้ปริมาณของเหล็กและแมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำลดปริมาณลง โดยเปลี่ยนสภาพกลายเป็นตะกอนในน้ำ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของออกซิเจน การเติมปูนขาว สำหรับน้ำที่มี pH ต่ำเกินไป ควรใช้น้ำปูนขาวเติมลงไปเพื่อทำให้น้ำมี pH สูงขึ้น pH ที่เหมาะสมสำหรับน้ำดิบผลิตน้ำประปาคือ pH ในช่วงค่า 6.5-8.5 การเติมคลอรีนลงไปเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำให้ลดจำนวนลงครึ่งหนึ่งก่อน เพื่อที่จะได้ไม่เกิดเป็นปัญหาในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำที่ผลิตในขั้นสุดท้ายก่อนจ่ายให้ประชาชนใช้ และ การเติมสารส้ม เพื่อที่จะช่วยทำให้สิ่งสกปรกที่มีปะปนอยู่ในน้ำรวมตัวเป็นตะกอน และ เกิดการตกตะกอน การเติมสารส้มนอกจากจะทำให้ก่อตะกอน และ ความขุ่นลดลงได้แล้ว ยังจะช่วยทำให้จุลินทรีย์ที่ปะปนอยู่ในน้ำลดจำนวนลงได้จำนวนหนึ่งด้วย

ตารางที่ 2-1 มาตรฐานน้ำประปาการประปานครหลวง

	ค่าที่ยอมให้มีในน้ำ มก./ล. (ppm)
1. สารที่เป็นพิษ ถ้ามีเกินจำนวนทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ คือ	
ตะกั่ว	0.05
เซเลเนียม	0.01
โครเมียม	0.05
ไซยาไนด์	0.01 – 0.2
อาซินิก	0.01 - 0.05
2. สารบางจำพวกที่เกี่ยวกับสุขภาพ ถ้ามีมากเกินจำนวนที่กำหนดอาจทำให้เกิดโรคได้ คือ	
ฟลูออไรด์	1.2 (ยอมรับได้)
ไนเตรต (ไนโตรเจน)	10
3. สารบางจำพวกที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของน้ำดื่ม	
สารพวกนี้ถ้ามีมากเกินกำหนดทำให้น้ำไม่น่าดื่ม	
กลิ่น และ รส	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
สี	20 หน่วย
ความขุ่น	5 NTU
ความเป็นกรดหรือค่าของแข็งทั้งหมด	6.8 – 8.2
ความกระด้าง	500
เหล็ก	300
แมงกานีส	0.5
ทองแดง	0.3
สังกะสี	1.0
แมกนีเซียม	5
ซัลเฟต	50
คลอไรด์	200
ฟีนอล	250
	0.001 – 0.00

ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

	ค่าที่ยอมให้มีในน้ำ มก./ล. (ppm)
4. แบคทีเรียที่อาจทำให้เกิดโรคต่อมนุษย์ได้	
แอสตนคาร์ด เฟลตแคนด์	500
(โคโลนี / ลูกบาศก์มิลลิเมตร)	
เอ็มพีเอ็น	< 2.2
(โคลิฟอร์มอร์แกนีสซัม / 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร)	
<i>E.coli</i>	ไม่มี

ที่มา: การประปานครหลวง บางเขน กรุงเทพมหานคร

ตารางที่ 2-2 มาตรฐานน้ำดิบของการประปาส่วนภูมิภาค

	ค่าที่ยอมให้มีในน้ำ มก./ล. (ppm)
1. คุณสมบัติทางกายภาพ	
สี (แพลทตินัม โคบอลท์สเกล "Platinum Cobalt Unit")	300
2. คุณสมบัติทางเคมี	
ของแข็งละลาย	1,500
เหล็ก	50
แมงกานีส	5
ทองแดง	1.5
สังกะสี	1.5
ฟลูออไรด์	1.5
แอมโมเนีย	0.5
ไนโตรเจนทั้งหมด	11
ไนเตรต	45
ความต้องการออกซิเจนทางชีววิทยา (BOD)	6
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD)	10

ตารางที่ 2-2 (ต่อ)

	ค่าที่ยอมรับได้ในน้ำ มก./ล. (ppm)
3. แบคทีเรีย (กลุ่มของแบคทีเรีย)	โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (MPN/100 มล.)
1. ยอมรับให้มีการฆ่าเชื้ออย่างเดียว	0 - 50
2. ต้องมีกระบวนการตกตะกอน กรอง และ ฆ่าเชื้อ	50 - 5,000
3. ต้องมีการบำบัดก่อน 2 ขั้นตอน	5,000 - 50,000
4. ไม่สมควรนำมาทำน้ำประปา	>50,000

ที่มา: การประปาส่วนภูมิภาค

2.2.3 การทำให้ตกตะกอน (Sedimentation)

การตกตะกอนทำได้โดยใช้ถังตกตะกอนถ้าเป็นถังตกตะกอนชนิดธรรมดาที่ควบคุมให้เกิดการตกตะกอน โดยอาศัยการควบคุมสถานะของน้ำในถังตกตะกอนให้อยู่ในสถานะสงบนิ่ง พวกตะกอนที่เกิดขึ้นก็จะตกลงสู่ก้นถัง น้ำใสตอนบนของถังก็จะผ่านไปยังถังกรอง ส่วนการตกตะกอนที่นิยมใช้ในกิจการประปาขนาดใหญ่มักจะจัดทำ โดยใช้ถังตกตะกอนพิเศษที่มีเครื่องมือกลช่วย ซึ่งจะมีความสามารถทำให้ตะกอนจับกลุ่มกันและตกลงสู่ก้นได้ในเวลาที่รวดเร็วขึ้น

2.2.4 การกรอง (Filtration)

การประปาทั่วไป การกรองน้ำก็เพื่อที่จะกำจัดตะกอนความขุ่นและจุลินทรีย์ต่างๆ ที่ติดค้างอยู่ในน้ำให้หมดไปหรือเหลืออยู่น้อยที่สุด นิยมใช้วิธีการกรองด้วยทรายถ้าเป็นการประปาขนาดใหญ่จะนิยมใช้ถังทรายกรองเร็ว (Rapid Sand Filters) ซึ่งทำให้สามารถผลิตน้ำให้มีปริมาณมากเพียงพอแก่การใช้ของชุมชน นอกจากนี้ยังสามารถทำการล้างชั้นกรองของทรายได้อย่างรวดเร็วโดยวิธีการล้างย้อน (Back Washing)

2.2.5 การเก็บน้ำใส (Clear well storage)

น้ำที่ผ่านการกรองมาแล้วมักจะนำมาเก็บไว้ในถังเก็บน้ำขนาดใหญ่ ก่อนที่จะมีการเติมคลอรีนลงไปเพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำ เพื่อจ่ายให้ประชาชนใช้ต่อไป การพักน้ำในถังเก็บน้ำใสนี้จะช่วยทำให้น้ำมีการปรับสภาพดีขึ้นอีกด้วย

2.2.6 การทำลายเชื้อจุลินทรีย์ (Disinfection)

การทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำ นิยมใช้สารเคมี เช่น คลอรีน ใส่ลงไปลงในน้ำ เพื่อใช้ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ยังมีหลงเหลืออยู่ในน้ำให้หมดไป เพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค การกระป๋องบางแห่งนิยมเติมคลอรีนก่อนที่น้ำจะถูกนำไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำใสเพื่อให้คลอรีนได้ทำปฏิกิริยานานพอที่จะทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำ และมักจะมีการเติมคลอรีนอีกครั้งหนึ่ง ในขณะที่จะจ่ายน้ำไปตามเส้นท่อ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของคลอรีนที่ตกค้างอยู่ในน้ำว่ามีมากพอเพียงหรือไม่ สำหรับกิจการประปาทั่ว ๆ ไป มักจะเติมคลอรีนลงในน้ำก่อนที่จ่ายน้ำไปตามเส้นท่อเพียงครั้งเดียว ซึ่งก็จะทำให้มีปริมาณของคลอรีนตกค้างอยู่พอเพียงแก่ความต้องการแล้ว

2.2.7 ระบบการจ่ายน้ำ (Distribution system)

ระบบการจ่ายน้ำประปาจะต้องวางระบบเส้นท่อเพื่อจ่ายน้ำไปยังผู้ใช้อย่างทั่วถึงตามปกติแล้วระบบจ่ายน้ำจะประกอบด้วยท่อน้ำขนาดต่าง ๆ ตามความเหมาะสม เช่น ท่อประธานท่อแยก การจ่ายน้ำไปตามเส้นท่อจะต้องมีแรงดันในเส้นท่อเพียงพอที่จะส่งน้ำไปยังผู้ใช้ปลายทางที่มีการใช้ในระดับความสูงที่แตกต่าง ๆ กันได้

การใช้น้ำประปาของประชาชนในชุมชนจะมีปริมาณที่แตกต่างกันไป เช่น กลางวันใช้มากกว่ากลางคืน เพราะภาระกิจในตอนกลางวันมีมากกว่าตอนกลางคืน ดังนั้นระบบจ่ายน้ำจึงควรจัดให้มีหอดึงสูงสำหรับเก็บน้ำที่เหลือใช้ในขณะที่มีปริมาณการใช้ลดน้อยลงและสามารถช่วยให้การจ่ายน้ำเป็นไปได้อย่างพอเพียงในขณะที่มีปริมาณการใช้น้ำมากขึ้น

2.3 ทฤษฎีกระบวนการสร้างตะกอน

กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation process) เป็นกระบวนการทางเคมีและกายภาพ ที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ (ความขุ่น) ต่างๆ รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้ตกตะกอนได้ง่าย และในที่สุดถูกกำจัดออกจากระบบด้วยการกรอง (โคมล, 2527) การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ รวมตัวและจับกันเป็นกลุ่มก้อนประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ เช่น การลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่ง เป็นต้น และ การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ ซึ่งถูกทำลายเสถียรภาพ เคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด และ รวมตัวกัน ทำให้ตะกอนรวมตัวมีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักพอเพียงที่จะตกตะกอนได้ง่ายขึ้น ปรัชญาการทำให้เกิดกลไกการรวมตัวของตะกอนนี้มี 2 ขบวนการได้แก่

2.3.1 เพอร์ไคเนติกฟล็อกคูเลชัน (Perikinetic flocculation)

เพอร์ไคเนติกฟล็อกคูเลชันเป็นการรวมตะกอนที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคคอลลอยด์ถูกรบกวนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำด้วยความร้อน ซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว และชนอนุภาคความขุ่นที่กระจายอยู่ในน้ำ ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่เกิดการสัมผัส และรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอุณหภูมิของน้ำจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคในระดับโมเลกุล ทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า $0.1-1 \mu\text{m}$. สามารถสัมผัสกันจนอนุภาคใหญ่ขึ้น และ เมื่ออนุภาคความขุ่นรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่กว่า $1 \mu\text{m}$. แล้ว การรวมตัวแบบนี้จะมีบทบาทน้อยลงมาก

2.3.2 ออร์โธไคเนติกฟล็อกคูเลชัน (Orthokinetic flocculation)

ออร์โธไคเนติกฟล็อกคูเลชันเป็นการรวมตะกอนอีกรูปแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำอยู่ในสถานะของการกวนน้ำ ความเร็วในการเคลื่อนที่ไหลแตกต่างกัน เป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆ มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน จึงมีการสัมผัสกันและรวมตัวกันในที่สุด อนุภาคคอลลอยด์ที่มีการรวมตะกอนแบบออร์โธไคเนติกจะต้องมีขนาดอนุภาคคอลลอยด์ใหญ่กว่า $0.1-1 \mu\text{m}$. และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล.

2.4 การตกตะกอน

การตกตะกอน คือขบวนการแยกอนุภาคของแข็งออกจากน้ำ (ยงยุทธ, 2536) โดยลดความเร็วของน้ำลงจนกระทั่งของแข็งแขวนลอยในน้ำนั้นสามารถตกตะกอนได้ อันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของโลก (Gravity force) ซึ่งที่มีค่ามากกว่าแรงเฉื่อย (Inertial force) และแรงตึงผิว (Viscous force) ที่กระทำต่อของแข็งนั้น ผลจากการตกตะกอน ทำให้ได้ส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ น้ำใสและตะกอนเหลว หรือ สลัดจ์ (Sludge) โดยถ้าเป็นการตกตะกอนที่ได้สลัดจ์ที่มีความเข้มข้นสูง หรือที่เรียกส่วนของตะกอนเหลวว่าการทำขึ้น (Thickening) การตกตะกอนจะแบ่งออกได้เป็น 4 แบบใหญ่ๆ คือ

2.4.1 การตกตะกอนแบบ โดด (Discrete setting)

เป็นการตกตะกอนของของแข็งที่มีปริมาณความเข้มข้นน้อยที่เป็นอิสระ ไม่ขึ้นแก่กันและไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความหนาแน่นของตะกอน ฯลฯ ในขณะที่ตกตะกอน เช่น การตกตะกอนของทราย กรวด หิน เป็นต้น

2.4.2 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculant setting)

เป็นลักษณะของการตกตะกอนของตะกอนที่รวมตัวกันซึ่งอาจเป็นสารแขวนลอยของอินทรีย์สาร หรือ อนินทรีย์สารที่มีอยู่ในน้ำ การตกตะกอนแบบนี้ตะกอนจะจับรวมตัวซึ่งกันและกัน ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น ตัวอย่างการตกตะกอนแบบนี้ได้แก่ การตกตะกอนของน้ำเสีย การตกตะกอนของฟล็อกสารส้ม หรือ ฟล็อกจากสารตกตะกอนอื่น ๆ

2.4.3 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone setting)

เป็นลักษณะการตกตะกอนของตะกอนเคมีที่รวมตัวกัน และมีความเข้มข้นมากกว่า 500 มก./ล. โดยจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกันเป็นชั้น และแยกตะกอนออกจากส่วนน้ำใส เช่น การตกตะกอนในขบวนการกำจัดความกระด้างด้วยสารเคมี

2.4.4 การตกตะกอนแบบอัดตัว (Compression setting)

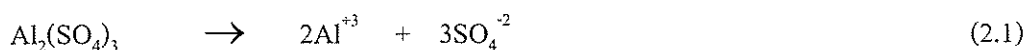
เป็นลักษณะการตกตะกอนที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำมีตะกอนแขวนลอยอยู่ในระดับสูงมาก มักเกิดขึ้นที่ก้นถังตกตะกอน โดยเกิดหลังจากที่การตกตะกอนแบบอื่นได้เกิดขึ้นแล้ว การอัดตัวเกิดเนื่องจากอนุภาคต่างๆ วางซ้อนกันในขณะที่มีการถ่ายเทน้ำหนักให้กับอนุภาคที่อยู่ข้างล่างในช่วงเวลาแรก สารต่าง ๆ จะตกตะกอนด้วยความเร็วคงที่ เนื่องจากมีความเข้มข้นของของแข็งคงที่ แต่เมื่อตะกอนทับถมกันจนความเข้มข้นสูงขึ้น ความเร็วในการตกตะกอนจะลดลง เรียกว่า “Transition zone” โดยที่ตะกอนจะรวมกัน และแยกออกไปเป็นชั้นของส่วนตะกอนอัดแน่นและส่วนน้ำใส

2.5 สารตกตะกอน

สารตกตะกอน (Coagulant) คือสารที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์หลายๆ อนุภาคจับตัวกันเป็นฟล็อก (Floc) ตัวอย่างของสารตกตะกอนได้แก่ สารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) เฟอริกคลอไรด์ (FeCl_3) เฟอริกซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) แมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) และ ปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งสารตกตะกอนที่นิยมใช้กันแพร่หลายที่สุด คือ สารส้ม และ สารประกอบของเหล็ก (โกมล, 2527) เช่น FeCl_3 และ $(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3)$ สำหรับในประเทศไทยสารส้มจะนิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆ และสามารถหาได้ง่ายในราคาพอสมควร ในวิทยานิพนธ์นี้จึงขอก้าวเฉพาะกลไกการทำงานของสารส้มเท่านั้น

2.5.1 เคมีของสารส้มในน้ำ

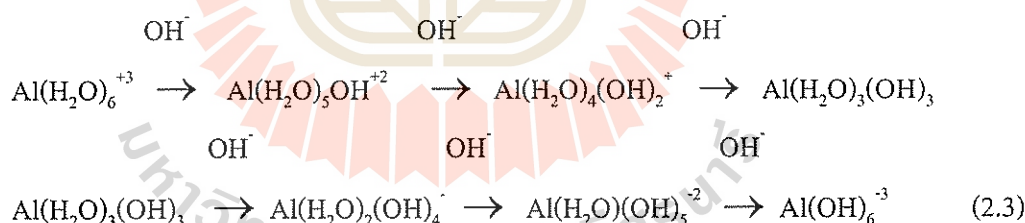
เมื่อสารส้มละลายน้ำจะมีการแตกตัวให้อิออนบวกและลบดังสมการ 2.1



จากสมการ 2.1 ไอออนของอลูมิเนียมไม่สามารถดำรงอยู่ในรูปของไอออนอิสระแต่จะรวมตัวอยู่กับน้ำ 6 โมเลกุล ดังนั้นที่ถูกจึงควรเขียนเป็น $\text{Al}_2(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ แต่ในการเขียนโดยทั่วไปจะไว้ในฐานที่เข้าใจ โดยเขียนเพียง Al^{+3} เนื่องจาก Al^{+3} มีคุณสมบัติเป็นกรด ซึ่งสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จึงพร้อมที่จะสลายตัว (Hydrolyze) ให้เป็นไอออนเชิงซ้อนของอลูมิเนียมชนิด “Monomeric Hydroxo Complex” ดังแสดงในสมการ 2.2



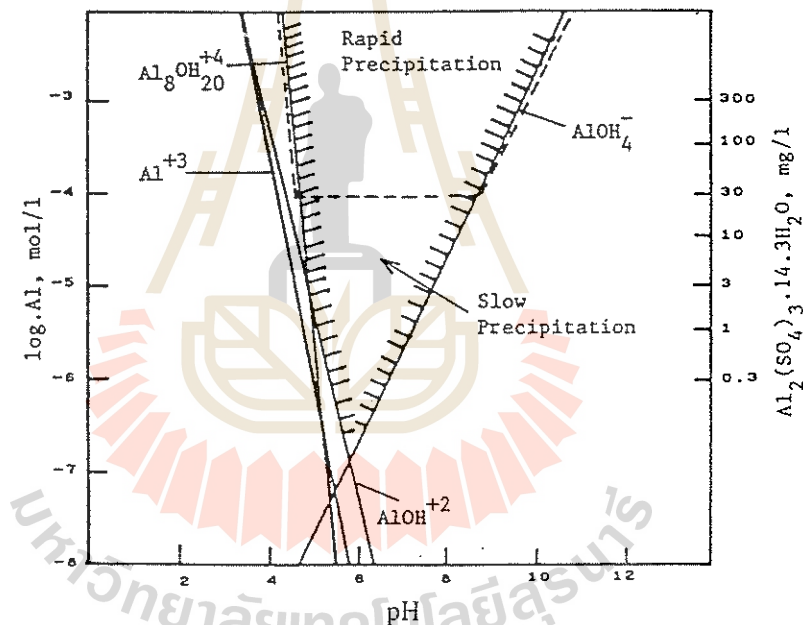
จากสมการ 2.2 จะเห็นว่าในขั้นตอนแรกน้ำ 1 โมเลกุลของ $\text{Al}_2(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) 1 หมู่ ปฏิกิริยาสามารถเกิดต่อไปได้อีกทำให้โมเลกุลของน้ำถูกแทนที่มากขึ้น และประจุบวกของ Al^{+3} จะลดลงเรื่อยๆ จนหมด และ ในที่สุดกลายเป็นประจุลบตามลำดับดังนี้



ไอออนต่างๆ เหล่านี้ สามารถทำปฏิกิริยา และรวมตัวกันเป็นสารเชิงซ้อนที่มีอลูมิเนียมมากกว่าหนึ่งอะตอมได้ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารเชิงซ้อนของอลูมิเนียมที่มีอยู่ในน้ำภายใต้สภาวะปกติมี 4 ชนิดคือ Al^{+3} , $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{+4}$ และ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ นอกจากนี้ค่า pH จะเป็นตัวที่กำหนดค่าความเข้มข้น และ ชนิดของไอออนเชิงซ้อนซึ่งมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ ค่าความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อนชนิดต่างๆ แสดงได้โดยแผนภาพความเสถียร (Stability Diagram) ดังแสดงในภาพที่ 2-1 จากแผนภาพความเสถียรแสดงให้เห็นว่าน้ำที่มีค่า pH ต่ำจะมีปริมาณความเข้มข้นของ Al^{+3} มากที่สุด เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจะได้ไอออนเชิงซ้อนที่

มีประจุบวกลดน้อยลงตามลำดับ และเมื่อค่า pH เข้าใกล้ความเป็นกลางความเข้มข้นของ $Al(OH)_3$ จะมากกว่าไอออนอื่นๆ แต่เมื่อค่า pH อยู่ในช่วงที่เป็นด่างไอออนเชิงซ้อนจะมีประจุลบ นอกจากนี้แผนภาพความเสถียรยังแสดงให้เห็นขอบเขตของการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ อีกด้วย อย่างไรก็ตามการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ อาจเกิดในอัตราที่ช้ามาก ถ้ามีการใช้สารส้มในปริมาณที่น้อย เนื่องจากไม่มีสารชักนำ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องใช้ปริมาณสารส้มไม่น้อยกว่า 20 มก./ล. จึงจะมี $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นในอัตราที่เร็วพอสมควร พื้นที่ในเส้นประจะแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ (มั่นสิน, 2537)

ในการตกตะกอนด้วยสารส้มควรมีค่า pH ที่เป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อยแต่ไม่ควรมีค่า pH ต่ำเนื่องจาก Al^{+3} จะไม่ดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ และไม่ควรมีค่า pH สูงเกินไป เนื่องจากจะทำให้ได้ไอออนเชิงซ้อนที่มีประจุลบไปทำให้เสียประโยชน์ในการก่อตะกอนกับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.1 แผนภาพความเสถียรของสารส้มในน้ำที่ไม่มีมีความขุ่น (Weber, 1972)

2.5.2 กลไกการสร้างตะกอนของสารส้ม

สารส้มที่เติมลงในน้ำทำให้เกิดกลไกในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกหลักดังต่อไปนี้

ก. กลไกดูดติด และ ทำลายเสถียรภาพของประจุ (Adsorption and Destabilization)

ในกลไกดังกล่าวสารเชิงซ้อนของสารส้มที่มีประจุบวก จะไปทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

(Colloid destabilization) ซึ่งมักมีประจุเป็นลบให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นการเพิ่มโอกาสทำให้อนุภาคสัมผัสกัน และรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่จนสามารถตกตะกอนด้วยน้ำหนักของอนุภาคได้ตามลำพัง กลไกนี้มีช่วงความเหมาะสมที่แคบ ซึ่งทำให้ควบคุมการทำงานได้ดีนั้นยากเพราะสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะต้องพอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณสารเชิงซ้อนต่ำไป การตกตะกอนจะไม่เกิด แต่ถ้ามีสูงเกินไปสารเชิงซ้อนจะดูดติดผิวอนุภาคมาก ทำให้อนุภาคเปลี่ยนไปเป็นประจุบวก และเกิดเสถียรเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย (มันสิน, 2537)

ข. กลไกแบบกวาดกวาด (Sweep Coagulation) เกิดขึ้นในกรณีที่ความเข้มข้นของสารส้มมากเกินไปจนปฏิกิริยาดำเนินจนได้ผลึกของ $Al(OH)_3$ กลไกแบบนี้จะเกิดได้ดีที่สุดเมื่อใช้ปริมาณสารส้มมากพอ จนทำให้ผลคูณของความเข้มข้นของ Al^{+3} และ $(OH)^{-3}$ มีค่าเกินกว่าค่า K_{sp} และค่า pH ของน้ำควรอยู่ในช่วง 4.5-6.0 ซึ่งทำให้ผลึก $Al(OH)_3$ มีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ และทำให้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์มีความเหนียว ไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้า ในลักษณะดังกล่าวโมเลกุลของ $Al(OH)_3$ และ อนุภาคคอลลอยด์ จะรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง กระบวนการสร้างตะกอนด้วยกลไกดังกล่าวนี้ พบเสมอในระบบการผลิตน้ำประปา เพราะเป็นกลไกที่เกิดขึ้นได้ง่ายเพียงแต่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารส้มที่สูงพอ และค่า Alkalinity ของน้ำที่พอเหมาะ แต่ตะกอนจะเกิดขึ้นมาก และยากแก่การแยกน้ำออกจากตะกอน

ค. กลไกสร้างตะกอนแบบรวม (Combination Coagulation) เป็นการสร้างตะกอนโดยการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ร่วมกัน ระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุกับกลไกแบบกวาดกวาด โดยที่ความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่มากนัก สภาพะดังกล่าวจึงจัดเป็นกลไกแบบรวม ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณสารส้มเพิ่มสูงขึ้นกว่ากลไกการทำลายเสถียรภาพแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ แต่จะใช้ปริมาณสารส้มต่ำกว่ากลไกแบบกวาดกวาด

2.6 สารช่วยตกตะกอน

สารช่วยตกตะกอน (Coagulation Aids) หมายถึง สารเคมีที่เติมร่วมกับสารตกตะกอนเพื่อมีส่วนช่วยทำให้การตกตะกอนดียิ่งขึ้น ทำให้ได้ตะกอนแข็งแรงขึ้น และเพิ่มความสามารถในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาในการตกตะกอนได้ด้วย สารเคมีที่ใช้เป็นสารช่วยตกตะกอนมีหลายชนิดแต่ที่นิยมได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่างๆ และ สารอินทรีย์พอลิเมอร์

สารพอลิเมอร์ (Polymer) หรือสารพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (Polymer electrolyte) เป็นสารที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ พอลิเมอร์เป็น โมเลกุลที่เกิดจากมอนอเมอร์ (monomer) ซึ่งเป็นหน่วยเล็กๆ จำนวนมากตัวมาจับเรียงกัน ให้ได้สายโซ่พอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น ขนาดและรูปร่างของสารพอลิเมอร์ในสารละลายมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพ การเป็นสารช่วยตกตะกอนของสารพอลิเมอร์ เนื่องจากขนาด และ รูปร่างมีอิทธิพลต่อความแรงประจุ จำนวนประจุ ไอออน และค่า pH สารพอลิเมอร์มีโครงสร้างโมเลกุลชนิดเกลียว (Helical) ประกอบด้วยสารคาร์บอนต่อกับกลุ่มไอออนที่แตกตัวได้ (Ionizing groups) ซึ่งจะแตกตัวให้ประจุไอออนในสารละลาย แรงผลักรันของประจุไอออนทำให้รูปร่างของสายพอลิเมอร์ยืดขยายออกมา

2.6.1 ชนิดของสารพอลิเมอร์

ถ้าแบ่งชนิดของพอลิเมอร์ตามลักษณะของประจุที่อยู่บนสายพอลิเมอร์ (Polymer chain) (ศิริพร, 2535) จะสามารถแบ่งชนิดของพอลิเมอร์ช่วยตกตะกอนออกได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่

ก. โซ่พอลิเมอร์ที่มีประจุเป็นบวก (Cationic polymer) พอลิเมอร์ดังกล่าวจะมีทั้งชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่มาก และมีน้ำหนักโมเลกุลมาก ซึ่งชนิดหลังจะช่วยให้เกิดการรวมตัวของฟล็อกคูลิ่งขึ้น ตัวอย่างของพอลิเมอร์ชนิดประจุบวก เช่น Polydiallyldimethyl ammonium (PDADMA) และ ไคโทแซน เป็นต้น

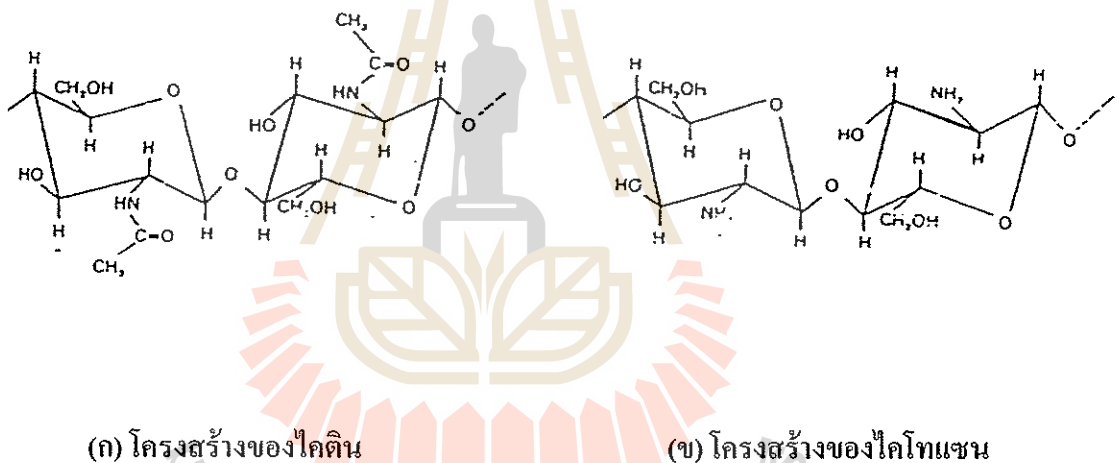
ข. โซ่พอลิเมอร์ที่มีประจุเป็นลบ (Anionic polymer) พอลิเมอร์ชนิดประจุลบชนิดที่มีค่าโมเลกุลสูงได้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นสารช่วยตกตะกอน (Schwoyer WLK, 1986) ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่มีประจุลบ และที่นิยมใช้เป็นสารช่วยตกตะกอนได้แก่ Polyacrylic (PAA) และ Polystyrene Sulphonate (PSS)

ค. โซ่พอลิเมอร์ที่ไม่มีประจุ (Nonionic polymer) โซ่พอลิเมอร์ที่ไม่มีประจุที่ใช้ในระบบประปาจะเป็นชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเท่านั้น ตัวอย่างพอลิเมอร์ดังกล่าวคือ Polyacrylamide (PAM)

ง. โซ่พอลิเมอร์ที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Amphoteric polymer) พอลิเมอร์ชนิดดังกล่าวมีใช้น้อยมากในระบบการผลิตน้ำประปา

พอลิเมอร์ที่กล่าวมาส่วนใหญ่ได้มาจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี นอกจากจะแบ่งตามประจุแล้ว สารช่วยตกตะกอนพอลิเมอร์ยังสามารถแบ่งตามเงื่อนไขอื่นอีกมากมาย เช่น แบ่งตามแหล่งกำเนิด (Origin) และ แบ่งตามโครงสร้างการจัดเรียงตัว (Molecular Structure) เป็นต้น โดยในรายละเอียดจะไม่นำมากล่าวในที่นี้ ซึ่งในการทำวิทยานิพนธ์นี้จะใช้สารไคโทแซนเป็นสารตกตะกอน จึงขอกล่าวเฉพาะสารไคโทแซนเท่านั้น

สารไคโทแซนมีประจุบวกผลิตมาจากเปลือกกุ้ง ปู ซึ่งเป็นไบโอฟอลิเมอร์ที่มีกลุ่มอะมิโนพอลิแซคคาไรด์เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล เรียกว่า ไคติน (Chitin) ซึ่งประกอบอยู่เป็นสารหลักประมาณ 14-27% ดังแสดงในภาพที่ 2-2(ก) ไคตินเป็นสารโมเลกุลยาวที่ไม่มีประจุทำให้ละลายได้ยากในสารละลายทั่วไป การใช้ประโยชน์จึงไม่ค่อยแพร่หลาย แต่เมื่อแปรสภาพเป็นไคโทแซนโดยการแยกหมู่อะเซทิลออก (Kawamura, 1991) ซึ่งสูตรโครงสร้างของไคโทแซน ดังแสดงในภาพที่ 2-2(ข) ทำให้มีคุณลักษณะพิเศษหลายประการ เช่น สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ การอุ้มน้ำและทำให้ชุ่มชื้น การดูดซับโลหะหนัก ตลอดจนการมีคุณสมบัติในการป้องกันเชื้อจุลินทรีย์ และไวรัสบางชนิด จึงทำให้มีศักยภาพสูงในการใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมยา เคมี อาหาร เครื่องดื่ม กระดาษ และการกำจัดน้ำเสีย เป็นต้น



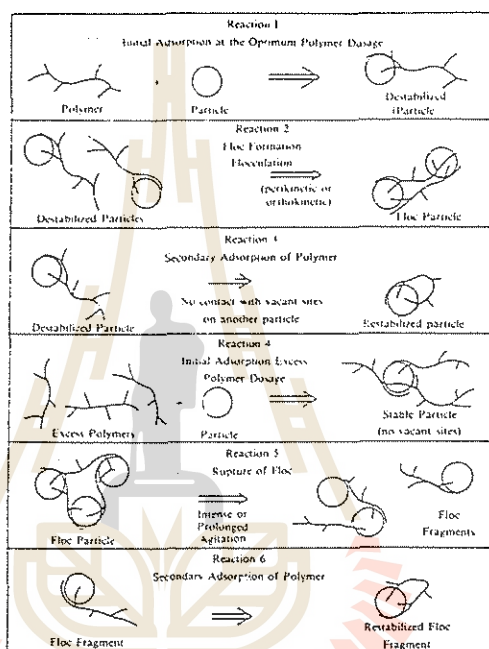
ภาพที่ 2-2 โครงสร้างของไคตินและไคโทแซน

2.6.2 กลไกการสร้างตะกอนของสารพอลิเมอร์

พอลิเมอร์สร้างตะกอนกับอนุภาคคอลลอยด์ได้ 2 วิธี ซึ่งล้วนเป็นกลไกการสร้างตะกอนที่อาศัยคุณสมบัติในการจับเกาะอนุภาคคอลลอยด์ทั้งสิ้น กล่าวคือ

ก. เป็นการทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยสารตกตะกอนพอลิเมอร์ชนิดประจุบวก ทำให้เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์หมดได้ กรณีนี้อาจใช้พอลิเมอร์ที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำก็ได้ เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลไม่ได้เป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการสร้างตะกอน

ข. เป็นการสร้างตะกอนโดยมีพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคคอลลอยด์หลายๆ ตัว ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ประจุไฟฟ้าบนโซ่พอลิเมอร์ในกรณีนี้ไม่ใช่สิ่งสำคัญเพราะกลไกดังกล่าวไม่จำเป็นต้องให้ประจุของคอลลอยด์เป็นกลาง แต่สิ่งที่สำคัญคือโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ เพื่อให้พอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคความขุ่นต่างๆ หรือ อนุภาคตะกอนได้อย่างกว้างขวาง สะพานดังกล่าวต้องแข็งแรงสามารถต้านทานแรงผลักระหว่างอนุภาค และ ความปั่นป่วนที่เกิดจากการกวนได้



ภาพที่ 2-3 กลไกในการสร้างตะกอนแบบสะพานเชื่อมต่อด้วยสารพอลิเมอร์ (Weber, 1972)

สารพอลิเมอร์อาจนำมาใช้เป็นสารตกตะกอนโดยตรงเลยก็ได้ แต่เนื่องจากมีราคาค่อนข้างแพง โดยทั่วไปจึงใช้สารพอลิเมอร์เป็นตัวช่วย หรือ สนับสนุนสารส้ม หรือ สารอื่นในกระบวนการสร้างตะกอน สารพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารตกตะกอนต้องมีความสามารถในการเกาะติดผิวของอนุภาคความขุ่น ดังนั้นในการใช้สารพอลิเมอร์ช่วยตกตะกอนจะต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารแขวนลอยกับปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้ในการสร้างตะกอน กล่าวคือ ถ้าปริมาณความขุ่นสูงจะต้องใช้ปริมาณสารพอลิเมอร์มาก แต่ถ้าความขุ่นต่ำก็ใช้สารพอลิเมอร์น้อยลงตามลำดับ การใช้สารพอลิเมอร์เป็นสารช่วยตกตะกอนร่วมกับสารส้มนั้น ลำดับก่อนหลังของการเติมสารเคมีมีความสำคัญมาก ต้องไม่เติมสารช่วยตกตะกอนปริมาณน้อย กับสารส้ม เนื่องจากสารทั้งสอง

ชนิดสามารถทำปฏิกิริยากันจนเป็นกลาง และ ทำให้เสียคุณสมบัติในด้านการสร้างตะกอน ดังนั้นสารที่ทำหน้าที่เป็นเป่าส้มผัสดควรต้องเติมก่อนการเติมสารส้ม เพื่อช่วยลดปริมาณสารส้มที่ต้องใช้ นอกจากนี้ยังทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นมีน้ำหนักมากขึ้น และ ตกตะกอนได้ง่าย ส่วนสารพอลิเมอร์ชนิดที่ใช้ทำลายเสถียรภาพของฟล็อกที่เกิดจากสารส้มควรเติมภายหลังการเติมสารส้มไปแล้ว โดยทั่วไปฟล็อกสารส้มจะมีประจุบวกเล็กน้อยที่ระดับค่า pH ต่ำกว่า 7.0 ดังนั้นการเติมสารช่วยตกตะกอนพอลิเมอร์ลงไปจะช่วยทำให้ฟล็อกมีขนาดใหญ่มากขึ้น น้ำหนักมากขึ้น และทำให้ตกตะกอนได้ง่าย (วรภรณ์, 2532)

2.7 ผลกระทบทางสุขภาพที่อาจเกิดจากการใช้สารส้ม และ โพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์

2.7.1 ผลกระทบที่อาจเกิดจากการใช้สารส้ม

จากการรวบรวมผลของการสัมมนาที่จัดขึ้นในประเทศฮ่องกงในหัวข้อ “อลูมิเนียมในน้ำดื่ม” (โกมล, 2527) โดยความร่วมมือระหว่าง The International Water Supply Association และ The Water Supplies Department ของรัฐบาลฮ่องกง ได้มีการเสนอผลงานที่เกี่ยวข้องถึงความสัมพันธ์ระหว่าง อลูมิเนียมกับการเกิดโรคเกี่ยวกับระบบประสาทในมนุษย์ และ โรคอื่น ๆ ที่พบในปลา และ แพลงก์ตอน จากการรายงานพบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์มีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากส่วนใหญ่จะถูกขับถ่ายออกไปกับปัสสาวะ ปริมาณอลูมิเนียมในน้ำดื่มจะมีเพียงร้อยละ 2 ของปริมาณที่ร่างกายได้รับจากอาหารทั้งหมด แต่เป็นที่น่าแปลกใจว่าในปริมาณเพียงเท่านี้ อาจมีความเกี่ยวข้องกันระหว่างปริมาณอลูมิเนียมในน้ำดื่ม และ โรค Alzheimer (โรคเกี่ยวกับความผิดปกติของระบบประสาท) ซึ่งข้อสมมุติฐานของสาเหตุการเกิดโรคอาจจะเนื่องมาจากอลูมิเนียมในน้ำถูกย่อยสลายและถูกดูดซึมได้ดีกว่าอลูมิเนียมในอาหาร แม้จะยังไม่ได้มีการพิจารณายกเลิกการใช้สารประกอบของอลูมิเนียมในการผลิตน้ำประปา อันเนื่องจากผลกระทบต่อสุขภาพซึ่งยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่ก็ควรที่จะมีการระมัดระวังในการใช้ให้มากขึ้น เพื่อลดโอกาสเสี่ยงในการเกิดอันตราย และ ควรจะศึกษาเพื่อที่จะหาสารตกตะกอนอื่นเพื่อทดแทนการใช้สารส้ม เป็นต้น

2.7.2 ผลกระทบที่อาจเกิดจากการใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์

แม้การใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์ในการผลิตน้ำประปามีข้อได้เปรียบมากมาย แต่ก็ไม่ใช่ว่าจะไม่มีข้อเสียอยู่เลย โพลีอิเล็กโทรไลต์อาจมีการปนเปื้อนจากสารมอนอเมอร์ หรือ สารอื่น ในกระบวนการผลิต หรือ อาจเกิดจากการทำปฏิกิริยากับ สารเคมีอื่นที่ใช้ในระหว่างการผลิตน้ำประปา

และ ทำให้เกิดสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ จากผลกระทบที่อาจมีต่อสุขภาพในระยะยาว ซึ่งยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดนั้น ทำให้ในบางประเทศ เช่น ญี่ปุ่น มีการห้ามใช้โพลิเอทิลีนโพรไพลีนสังเคราะห์ในการผลิตน้ำดื่ม (วารสาร, 2535 และ มั่นสิน, 2537)

2.8 กลไกการกรองของถังทรายกรองช้า

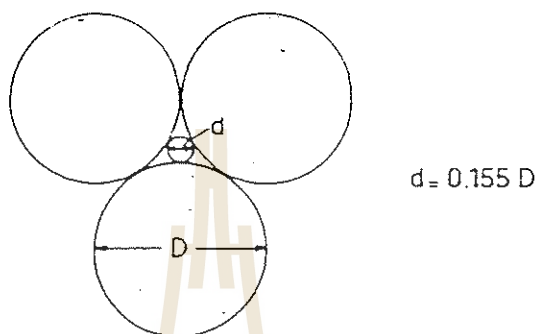
ระบบถังทรายกรองช้าเป็นกระบวนการผลิตน้ำสะอาดโดยการปล่อยน้ำดิบให้ไหลผ่านชั้นกรอง (Filter medium) ระหว่างที่น้ำดิบไหลผ่านชั้นกรองจะมีการลดปริมาณของแบคทีเรีย สารแขวนลอย และความขุ่นของน้ำดิบ นอกจากนี้ จะเกิดกระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical process) ขึ้นที่บริเวณผิวของชั้นกรอง โดยที่หลังจากการใช้งานของระบบถังทรายกรองช้าผ่านไปเป็นระยะเวลาพอสมควร จะเกิดชั้นบาง ๆ ของจุลินทรีย์ที่ขึ้นที่ผิวของชั้นกรองเรียกว่า “Schmutzdecke” ชั้นบางของจุลินทรีย์นี้จะประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่ยังคงมีกิจกรรม และ มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ โดยกระบวนการเกิดผิวของชั้นกรอง “Schmutzdecke” เป็นจุดที่ใช้บอกความแตกต่างระหว่างระบบถังทรายกรองช้า กับระบบถังทรายกรองเร็ว เนื่องจากระบบถังทรายกรองเร็วนี้ระบบการกรองถือว่าเป็นกระบวนการทางฟิสิกส์ และ ใช้วิธีล้างย้อน (Back wash) ในการทำความสะอาดถังกรองที่อุดตัน แต่สำหรับระบบถังทรายกรองช้าการทำความสะอาดชั้นกรองจะทำแบบง่าย ๆ โดยใช้แรงงานคนทำความสะอาดเฉพาะชั้นผิวทรายกรอง โดยที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อนมาก

จากรายงานศึกษาที่ผ่านมา (Huisman, 1982) ได้รายงานกลไกการกรองของถังทรายกรองช้าว่าเป็นการทำงานแบบผสมผสานระหว่างกลไกต่างๆ หลายกลไก โดยมีกลไกที่สำคัญประกอบด้วย 5 กลไกหลักคือ

2.8.1 กลไกการกรองแบบกรองเชิงกล (Mechanical straining)

จะเป็นกลไกการกรองอนุภาคแขวนลอยซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างสารกรอง เพื่อให้สารแขวนลอยติดค้างอยู่ภายในชั้นกรองระหว่างการไหลผ่าน โดยปกติชั้นของทรายกรองที่มีขนาดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.15 มม. ซึ่งจะสามารถกำจัดสารแขวนลอยซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 20 μm ได้ดังแสดงในภาพที่ 2-4 หลังจากการกรองผ่านไประยะหนึ่งจะมีการติดค้างของสารแขวนลอยจนทำให้ช่องว่างระหว่างทรายกรองมีขนาดเล็กลงจากเดิม ทำให้สารแขวนลอยขนาด 5-10 μm บางส่วนติดค้างอยู่ระหว่างทรายกรองได้ อย่างไรก็ตามสาร

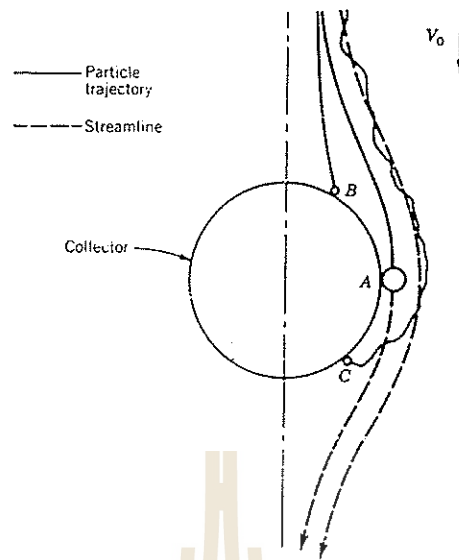
แขวนลอย เช่น คอลลอยด์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $0.001-1\mu\text{m}$ ก็ยังไม่สามารถถูกกำจัดออกด้วย กลไกแบบกรองแบบนี้ได้



ภาพที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสารกรอง และ ช่องว่างระหว่างสารกรองที่เกิดขึ้น (Huisman, 1982)

2.8.2 กลไกการกรองแบบตกตะกอน (Sedimentation)

เป็นกลไกการกำจัดอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็ก และสามารถตกตะกอนที่ผิวของสารกรอง การกำจัดอนุภาคแขวนลอยด้วยกลไกนี้จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของมวลสารกับพื้นที่ของผิวของสารกรอง กล่าวคือหากใช้สารกรองที่เป็นทรายมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 มม. และ มีความหนาของชั้นทรายกรองเป็น 0.8 ม. ชั้นของทรายกรองนี้จะมีพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดกลไกการกรองแบบนี้ประมาณ $1,000$ ตร.ม. ต่อ 1 ตร. ม. ของพื้นที่ผิวด้านบนของชั้นกรอง (Huisman, 1982) ประสิทธิภาพของการกำจัดสารแขวนลอยของกลไกแบบตกตะกอนนี้ จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของมวลของสารแขวนลอย โดยที่สารแขวนลอยส่วนใหญ่จะถูกกำจัดที่ผิวบนของชั้นทรายกรอง และจะมีสารแขวนลอยอินทรีย์บางส่วนที่มีความหนาแน่นของมวลต่ำ (Low mass density) จะตกค้างที่ผิวทรายกรองในชั้นที่ลึกลงไป ดังแสดงในภาพที่ 2-5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของกลไกการกรองแบบตกตะกอนของสารแขวนลอยที่มีความหนาแน่นของมวลสูง



ภาพที่ 2-5 กลไกแบบตกตะกอน (Huisman, 1982)

2.8.3 กลไกการกรองแบบการชน (Impaction)

เป็นกลไกการกำจัดอนุภาคแขวนลอยที่สามารถตกตะกอนได้ที่ผิวของสารกรอง ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่อนุภาคริ่งเข้าชนสารกรองแล้วติดที่ผิวของสารกรอง การกำจัดด้วยกลไกนี้จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารแขวนลอยกับระยะเวลาการชน

2.8.4 กลไกการกรองแบบดูดติดผิว (Adsorption)

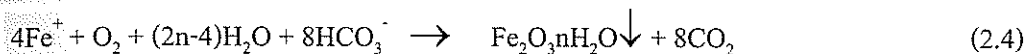
เป็นกลไกที่มีความสำคัญในระบบการกรอง เนื่องจากสามารถกำจัดสารแขวนลอยขนาดเล็กๆ เช่น สารคอลลอยด์ ได้ กลไกแบบดูดติดผิวนี้อาจเกิดขึ้นได้หลายลักษณะกล่าวคือ เมื่อน้ำดิบไหลผ่านชั้นกรองสารแขวนลอยขนาดเล็กๆ ที่สัมผัสกับผิวของเม็ดทรายกรอง จะเกาะติดเป็นเมือกเหนียวรอบอนุภาคของทรายกรอง กระบวนการยึดติดผิวของอนุภาคจะอาศัยแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (London-vander Waals forces) และ แรงดึงดูดเนื่องจากประจุไฟฟ้า (Coulomb forces) โดยปกติทรายกรองที่สะอาดจะมีประจุบวกที่ผิวของเม็ดทรายซึ่งพร้อมที่จะดูดติดกับคอลลอยด์ที่ประจุลบได้ (Huisman 1980,1982)

2.8.5 กลไกการกรองทางชีวเคมี

สารแขวนลอยต่างๆ ที่สะสมอยู่ภายในชั้นกรองจนเป็นเหตุให้เกิดการอุดตันของชั้นกรองนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีอยู่ตลอดเวลา โดยสารละลายเหล็ก และ แมงกานีสจะมีการ

เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปไปเป็นเหล็ก และ แมงกานีสออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ (Huisman, 1982) ดังสมการ

การ 2.4-2.5



สารที่เกิดขึ้นนี้จะเกาะติดผิวของทรายกรองเป็นชั้นบางๆ ส่วนสารตกค้างที่เป็นสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์เพื่อเป็นแหล่งพลังงานของแบคทีเรียในรูปของ NO_3^- (Huisman, 1982) ดังสมการ

การ 2.6



ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเป็นปัจจัยที่จำกัดการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย การเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีนี้จะเกิดขึ้น และ ดำเนินไปอย่างช้าๆ จะเห็นได้ว่าสารแขวนลอยส่วนใหญ่มีการตกค้างอยู่บริเวณผิวบนของชั้นกรอง ด้วยเหตุผลนี้เองทำให้สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำดิบมีความเข้มข้นสูงเฉพาะบริเวณผิวบนของชั้นกรอง ทำให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียต่างๆ เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวบนของชั้นกรองเป็นส่วนใหญ่ และจะค่อยๆ ลดลงตามความลึกของชั้นกรอง เนื่องจากชั้นกรองที่ลึกลงไปจะมีสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยมีสภาพขาดออกซิเจนและเป็นผลทำให้ขาดสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นอาหารในการเจริญเติบโต จะทำให้แบคทีเรียบางส่วนที่อยู่ในชั้นกรองลึกลงไปค่อยๆ ตาย และ ลดลงจำนวนลง นอกเหนือจากนั้นแบคทีเรียที่ตายลงเนื่องจากสภาวะขาดอาหารนี้ยังมีการสร้างสารพิษขึ้นเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอื่นๆ อีกด้วย ลักษณะของการเกิดกลไกการกรองทางชีวเคมี ดังกล่าวนี้ทำให้ถังทรายกรองซ้ำมีความสามารถในการกำจัดแบคทีเรีย และ เชื้อโรคต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และน้ำใสที่ผ่านการกรองแล้วก็มีคุณภาพดีด้วย

โดยทั่วไปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากกลไกทางชีวเคมีนี้ จะเกิดขึ้นภายในช่วงความลึกของชั้นกรองลงไป ประมาณ 0.6 ม. ดังนั้นหากคำนึงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคในการออกแบบถังทรายกรองซ้ำจึงควรออกแบบให้มีความหนาไม่น้อยกว่า 0.7 ม. และ ควรมีส่วนเพิ่มสำหรับการทำความสะอาดชั้นกรองอีกประมาณ 0.3 – 0.5 ม. ฉะนั้นชั้นกรองจะมีความหนาไม่น้อยกว่า 1.00 ม. นั่นเอง (Huisman, 1982)

2.9 ส่วนประกอบของถังทรายกรองช้า

เพื่อให้การกรองด้วยระบบถังทรายกรองช้ามีประสิทธิภาพการกรองดีที่สุด โดยทั่วไปถังทรายกรองช้า จะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังต่อไปนี้ คือ

2.9.1 ชั้นน้ำดิบเหนือทรายกรอง

ชั้นน้ำดิบเหนือทรายกรองนี้จะทำหน้าที่ 2 อย่างพร้อมๆ กันคือ ประการแรกจะทำให้ น้ำดิบมีแรงดันเพียงพอในการไหลผ่านชั้นทรายกรอง และประการที่สองเป็นการเพิ่มระยะเวลาพักน้ำ สำหรับน้ำดิบอีกหลายชั่วโมง ระหว่างนี้สารแขวนลอยส่วนหนึ่งจะตกตะกอนสะสมอยู่บนผิวของชั้น ทรายกรอง ถ้าหากน้ำดิบมีสารแขวนลอยมากจะทำให้มีการอุดตันของถังกรองได้เร็ว ในการแก้ปัญหา ดังกล่าวควรสร้างระบบบำบัดของน้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบกรอง

จากการศึกษาที่ผ่านมา (Huisman, 1982) พบว่าระดับน้ำที่เหมาะสมของชั้นน้ำดิบนี้ ควรมีค่าอยู่ในช่วง 1.0-1.5 ม. และ ระยะเหนือน้ำ (Free board) ที่เหมาะสมควรมีอยู่ในช่วง 0.2 –0.3 เมตร นอกจากนั้นควรมีอุปกรณ์อำนวยความสะดวกสำหรับการล้างชั้นตะกอนที่ตกค้างตามความเหมาะสม

2.9.2 ชั้นของสารกรอง

ชั้นของสารกรองควรใช้สารกรองที่มีความคงทน และไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี ต่างๆ โดยปกติจะใช้ทรายที่ผ่านการล้าง และคัดขนาดแล้ว คุณสมบัติของทรายที่ใช้ควรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสารกรองเท่ากับ 0.15 – 0.35 มม. และ ค่าความคละ (Uniformity) อยู่ระหว่าง 2-5 นอกจากนั้นชั้นของทรายกรองนี้ควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 1.0 ม. ช่วงความหนาระหว่าง 1.0-1.4 ม. เป็นช่วงที่เหมาะสม (O'Melia, 1980)

2.9.3 ระบบรับน้ำกรอง

ระบบรับน้ำกรองทำหน้าที่ 2 ประการพร้อมกันคือ ทำหน้าที่รับน้ำที่ผ่านการกรอง แล้ว และเป็นชั้นรองรับชั้นทรายกรอง ชั้นรับน้ำกรองต้องมีความคงทน และไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ โดยปกตินิยมใช้ทราย และ กรวด ซึ่งความหนาของชั้นนี้ควรมีความหนาอยู่ในช่วง 0.3-0.6 ม. (O'Melia and Stumn, 1967)

2.9.4 ส่วนควบคุมการกรอง และ อุปกรณ์

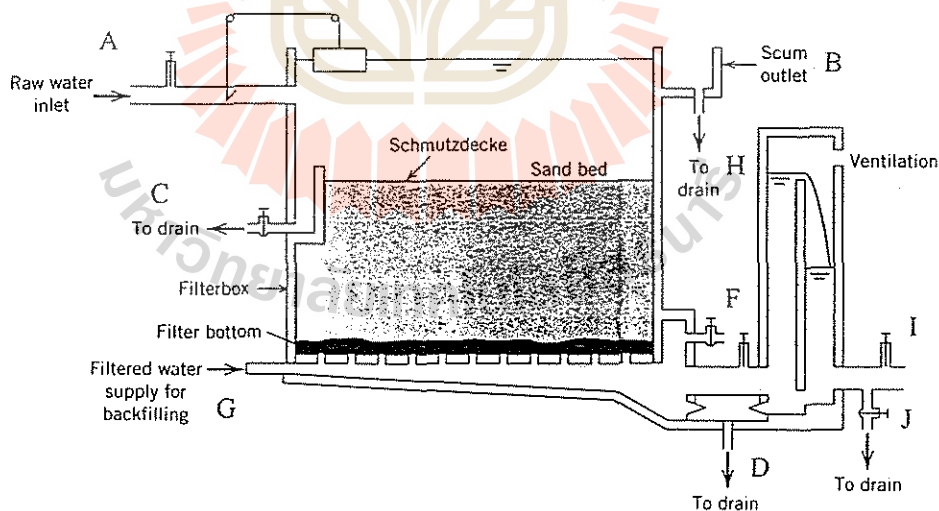
อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการควบคุมการกรองประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงใน

ภาพที่ 2-6

- ก. ระบบปรับน้ำคิบของถังกรอง (แสดงให้เห็นเป็นส่วน A)
- ข. ระบบระบายน้ำล้นและของเสียแขวนลอย (แสดงให้เห็นเป็นส่วน B)
- ค. ระบบระบายน้ำเหนือชั้นกรองสำหรับการล้างทราย(แสดงให้เห็นเป็นส่วน C)
- ง. ระบบระบายน้ำของถังกรอง (แสดงให้เห็นเป็นส่วน D)
- จ. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ (แสดงให้เห็นเป็นส่วน E)
- ฉ. ระบบควบคุมอัตราการกรองของถังกรอง (แสดงให้เห็นเป็นส่วน F)
- ช. ระบบเติมน้ำสะอาดเข้าชั้นกรองภายหลังการล้าง (แสดงให้เห็นเป็นส่วน G)
- ณ. อุปกรณ์ควบคุมการส่งน้ำสะอาดลงถึงน้ำใสและระบายน้ำทิ้ง (แสดงให้เห็น

ส่วน H)

เป็นส่วน I และ J)



ภาพที่ 2-6 ส่วนประกอบของถังทรายกรองช้า (Huisman, 1982)

2.10 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณภาพการกรอง

การกรองโดยวิธีระบบถังทรายกรองชานี้มีปัจจัยสำคัญ ที่มีผลต่อคุณภาพน้ำที่ได้จากการกรอง จากผลการการศึกษาที่ผ่านมา พอสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

2.10.1 คุณลักษณะของน้ำดิบ

จากการศึกษาของ Ives ในปี ค.ศ. 1969 แสดงให้เห็นว่า ขนาดของอนุภาคแขวนลอยในน้ำมีอิทธิพลต่อความสามารถในการดักตะกอนไว้ที่ผิวของตัวกรอง ขนาดอนุภาคที่ใหญ่จะทำให้การกรองดี เช่นเดียวกันอุณหภูมิของน้ำที่สูงขึ้นจะทำให้การกรองดียิ่งขึ้นด้วย และจากผลการศึกษาของ Huisman et al ในปี ค.ศ. 1974 สรุปว่าการกรองด้วยอัตราช้าๆ ควรจะใช้กับน้ำดิบที่มีค่าความขุ่นไม่เกิน 10 NTU นอกจากนี้ Low ในปี ค.ศ.1973 และ Fan ในปี ค.ศ. 1974 พบว่าค่า Alkalinity ค่าความกระด้าง และ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดิบไม่มีส่วนสำคัญมากนักต่อประสิทธิภาพการกรอง

2.10.2 อัตราเร็วการกรอง

จากการศึกษาของ Baylis ในปี ค.ศ. 1956 พบว่าการกรองด้วยอัตราเร็วจะสามารถลดความขุ่นได้น้อยกว่าการกรองอัตราช้า ส่วน Segall and Okun ในปี ค.ศ. 1966 ได้รายงานผลจากการศึกษาของอัตราเร็วการกรองต่อคุณภาพน้ำว่าจะเป็นฟังก์ชันของขนาดทรายกรอง และค่าความพรุนซึ่ง จากการการศึกษาของ Ives ในปี ค.ศ. 1969 ได้ชี้ให้เห็นว่า อัตราเร็วในการกรองที่ช้า ให้ผลการกรองดีกว่าอัตราการกรองเร็ว และ Huisman (1980) พบว่าระบบถังทรายกรองช้าสามารถกำจัดไวรัส และจะกำจัดไวรัสได้ดีขึ้นที่อัตราการกรองต่ำ ส่วนของ Jaksirinont (1972) เสนอแนะว่าการกรองที่อัตรา 1.25 ม³/ม²-ชม. เป็นอัตราเหมาะสมที่สุดในการกำจัดความขุ่น สี และ โคลิฟอร์ม ด้วยเครื่องกรองแบบแนวตั้งที่มีบรรจุกรวด และ ฟางข้าวสูง 1 เมตร

2.10.3 รูปร่าง ขนาดของตัวกรอง และ ชนิดของตัวกรอง

สารกรองที่ละเอียด และความพรุน (porosity) ที่มีขนาดเหมาะสมย่อมสามารถกรองน้ำได้คุณภาพที่ดีกว่า แต่ก็อาจทำให้อายุของสารกรองสั้นลงได้ ฉะนั้นในการเลือกขนาดที่เหมาะสมปานกลางจะได้ผลดีทั้งด้านคุณภาพของน้ำ และ อายุของสารกรองได้ระยะเวลานาน เช่น ทรายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มม. สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีเป็น 2 เท่าของทรายกรองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.77 มม. แต่อายุใช้งานสั้นกว่าประมาณ 1.5 เท่า สภาวะที่เหมาะสมเช่นนี้ก็ควรเลือก

ขนาดทรายกรองเป็น 0.5 มม. เป็นตัวกรอง ชนิดของสารกรองที่ใช้ก็มีความสำคัญ เช่น กาบมะพร้าว หรือ ฟางข้าว อาจเป็นสารกรองที่กำจัดสิ่งสกปรกในน้ำได้ดีกว่ากรวด แต่จะต้องเปลี่ยนทิ้งบ่อย หรือ จัดหาได้ยาก ก็ไม่ควรใช้เป็นสารกรอง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพที่เหมาะสมแต่ละท้องถิ่นในการจัดหาสารกรองได้ (Visscher et al, 1987)

2.10.4 ความลึกของชั้นกรอง

ประสิทธิภาพการกรองมักจะเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความลึกของชั้นกรองที่เพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนความสัมพันธ์นี้อาจจะลดลงได้ที่มีความลึกมากๆ ดังนั้นจึงต้องเลือกความลึกที่เหมาะสมเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย และมีประสิทธิภาพการกรองที่พอเพียง จากการศึกษาของ Hudson ในปี ค.ศ. 1958 เสนอแนะว่าที่ระดับความลึกมากขึ้น ผลของกลไกการกรองแบบดูดติดผิว และ กลไกการกรองแบบตกตะกอน ในช่องว่างระหว่างตัวกรองจะยิ่งเพิ่มขึ้น จึงทำให้น้ำที่กรองได้มีคุณภาพดี

2.11 ข้อดี และข้อเสียของระบบถังทรายกรองช้า

เมื่อพิจารณาคุณภาพของน้ำที่กรองได้พบว่า ระบบถังทรายกรองช้าสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำทั้งทางด้านกายภาพ ทางเคมี และ ทางชีวภาพ โดยถ้าใช้ขบวนการกรองเพียงอย่างเดียว น้ำที่ผ่านการกรองแล้ว ไม่จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นตอนการเติมสารเคมีเพื่อฆ่าเชื้อโรค ซึ่งอาจจะทำให้เกิดกลิ่น และ รส ที่ไม่พึงประสงค์ อีกทั้งการก่อสร้าง และ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบถังทรายกรองช้าโดยใช้วัสดุท้องถิ่น และ แรงงานของชาวบ้าน ภายในท้องถิ่นนั้นๆ ได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักร และ วัสดุที่จัดหาจากภายนอกท้องถิ่น ระบบถังทรายกรองช้าจะไม่มีงานระบบการวางท่อที่ซับซ้อน อุปกรณ์ที่ใช้ในการก่อสร้าง และ ใช้เป็นตัวชั้นกรอง ก็ไม่พิเศษมากนัก ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และการควบคุมงานก็จะต่ำลง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งหมดเฉพาะของถังทรายกรองช้า จะอยู่ที่ค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดชั้นทรายกรองเท่านั้น ซึ่งในการทำความสะอาดชั้นทรายนั้น เราอาจจะใช้เครื่องมืออย่างง่ายเข้าช่วยหรือ ใช้คนงานล้างก็ได้ ในประเทศที่กำลังพัฒนามักจะนิยมใช้วิธีการหลังมากกว่า เพราะแรงงานราคาถูก นอกจากนั้นในตัวถังทรายกรองช้าไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีอื่นๆ เข้าช่วย และ รวมทั้งน้ำมันเชื้อเพลิง อุปกรณ์ หรือ วัสดุอื่น ๆ ผู้ควบคุมการทำงานของระบบถังทรายกรองช้าไม่จำเป็นต้องมีความรู้และความชำนาญทางด้านวิศวกรรมมากนัก ซึ่งไม่เหมือนกับผู้ควบคุมการทำงานของถังทรายกรองเร็ว เพราะผู้ควบคุมจะต้องมีความรู้ทางด้านวิศวกรรมพอสมควร และ การควบคุมการทำงานของระบบถังทรายกรองช้านั้นก็ไม่ต้องดูแลตรวจตราอย่างใกล้ชิด ด้วย

เหตุที่ระบบการกรองของถังทรายกรองช้า นั้น มีคุณสมบัติยึดหยุ่นในตัวเองได้ ดังนั้น จึงสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะเล็ก ๆ น้อย ๆ ของน้ำดิบต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ สภาพภูมิอากาศ และความขุ่นที่มากขึ้นในช่วงสั้นๆ ได้ โดยที่ระบบในการกรองของมันยังคงใช้งานได้เหมือนเดิม สำหรับในบริเวณที่มีปริมาณน้ำใช้อย่างจำกัด ระบบถังกรองทรายช้าจะมีข้อได้เปรียบกว่าระบบถังทรายกรองเร็ว เพราะเหตุว่าเมื่อถึงจุดที่จะต้องทำการล้างถังทรายกรองแล้ว จะใช้ปริมาณน้ำที่ล้างทรายช้า น้อยมาก และจำนวนน้อยครั้งกว่าเมื่อเทียบกับระบบถังทรายกรองเร็วซึ่งจะต้องล้างทรายทุกๆ 2-3 วัน สิ้นเปลืองน้ำประมาณ 2-3 % ของปริมาณของน้ำที่กรองได้

ในส่วนของข้อจำกัดของระบบถังทรายกรองช้าก็คือต้องการพื้นที่ในการก่อสร้างมาก จนทำให้ในบางประเทศที่ปัจจัยในการก่อสร้าง เช่น แรงงาน และ วัสดุ มีผลต่อราคาการก่อสร้างระบบถังทรายกรองช้าที่มีราคาสูงกว่าถังทรายกรองเร็ว เช่น ในประเทศเนเธอร์แลนด์ราคาค่าก่อสร้างถังทรายกรองช้าสูงกว่าถังทรายกรองเร็วถึง 3 เท่าตัว สำหรับระบบที่มีขนาดกำลังผลิตที่เท่ากัน และ ในกรณีที่ค่าแรงงานในท้องถิ่นมีราคาสูง ถังทรายกรองเร็วสามารถนำอุปกรณ์อัตโนมัติมาลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการได้ อีกทั้งคุณภาพน้ำดิบหากมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่าง ๆ ของน้ำโดยทันที หรือ การเกิดมลภาวะทางน้ำ อันเนื่องมาจากอุตสาหกรรม จะทำให้ระบบถังทรายกรองช้าเกิดการล้มเหลวในการทำงานได้ง่าย และ การแก้ปัญหาการเกิดสาหร่ายในถังทรายกรองช้า กระทำได้ยากและต้องใช้จ่ายลงทุนสูงกว่าถังทรายกรองเร็ว



บทที่ 3

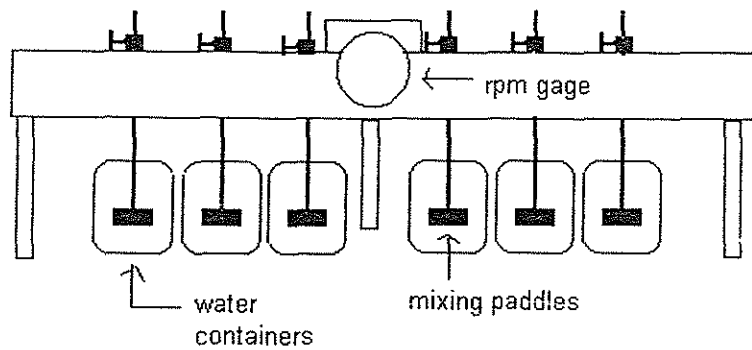
วัสดุ และ วิธีการทดลอง

3.1 บทนำ

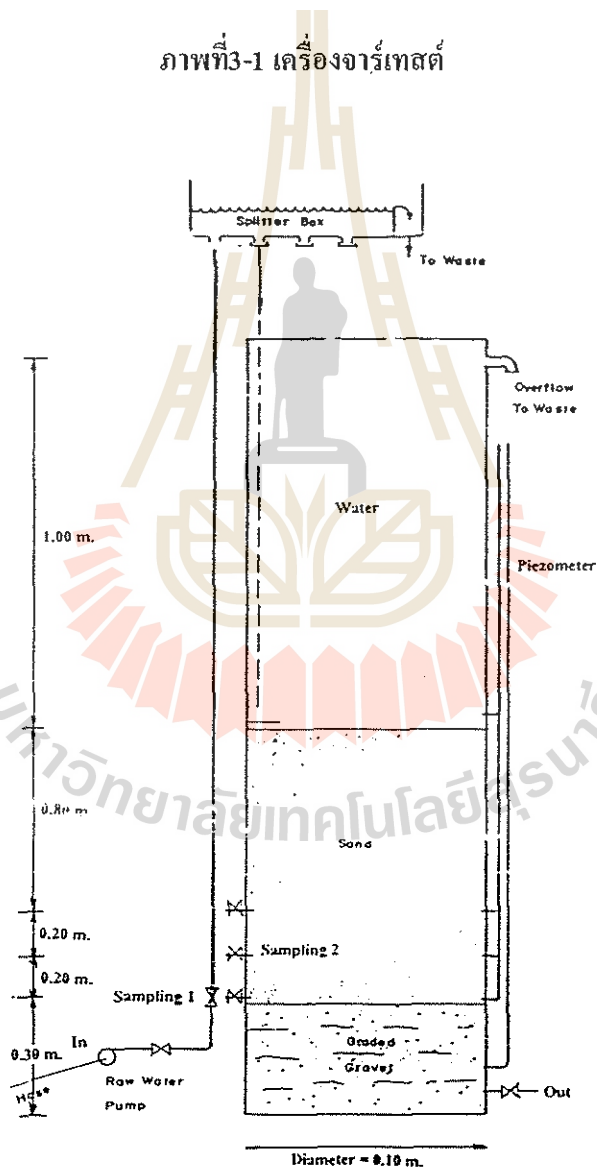
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แบ่งการศึกษาทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้ม และ สารโคโทแซน ในการตกตะกอนน้ำตัวอย่างให้มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่น และ กำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ส่วนที่ 2 ศึกษาทดลองหาประสิทธิภาพของสารส้ม และสารโคโทแซนในการลดความขุ่นในสภาวะที่มีในน้ำตัวอย่างเกินมาตรฐาน และ ศึกษาทดลองหาจลนศาสตร์การตายของแบคทีเรียก่อโรคในน้ำตัวอย่าง และ ส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาทดลองหาประสิทธิภาพของระบบถังทรายกรองซ้ำในการลดความขุ่น และ กำจัดแบคทีเรียก่อโรค ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ได้ใช้น้ำตัวอย่างจากอ่างสระ 2 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งทำการศึกษาทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ของศูนย์เครื่องมือ 5 และห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพ ของศูนย์เครื่องมือ 3

3.2 วัสดุ และ อุปกรณ์การทดลอง

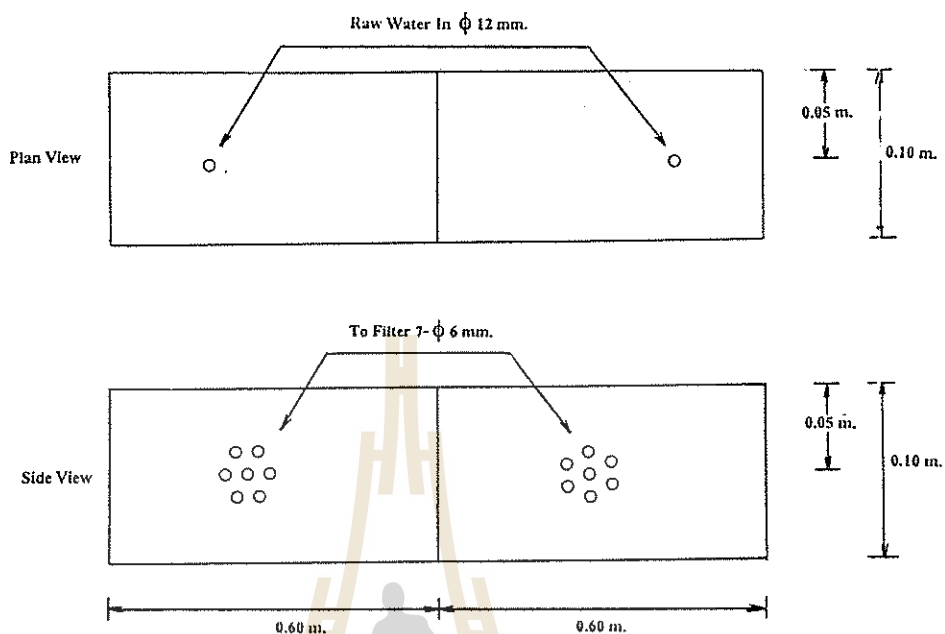
ในการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของสารตกตะกอน โดยใช้สารส้มและสารโคโทแซนมีอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องจาร์เทสต์ (Jar Test) โดยเครื่องจาร์เทสต์ที่ใช้ในการทดลองผลิตจากบริษัท Phipps & Bird รุ่น Model 7790-402 มอเตอร์สามารถปรับความเร็วรอบตั้ง แต่ 0-600 ซึ่งใบกวนประกอบด้วยใบพาย (paddle) ขนาด 2.5-7.5 ซม. จำนวน 6 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 3-1 สำหรับอุปกรณ์กวนเร็ว กวนช้า ประยุกต์ใช้มอเตอร์ปรับน้ำฝนกระจกรถยนต์ของ โตโยต้า ซึ่งสามารถปรับความเร็วได้ 2 จังหวะคือ ความเร็วรอบ 40-60 รอบ/นาที และ 100-120 รอบ/นาที มีใบพายกวนขนาด 10x30 ซม. และถังตกตะกอนมีขนาด 500 ลิตร จำนวน 2 ชุด ส่วนระบบการกรองโดยใช้ระบบถังทรายกรองซ้ำ ซึ่งถังทรายกรองซ้ำ และ ชุดโปรยกรอง สร้างจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 3-2 และ 3-3



ภาพที่ 3-1 เครื่องจาร์ทดสอบ



ภาพที่ 3-2 แผนภาพถังทรายกรองช้า



ภาพที่ 3-3 รายละเอียดของชุดปฏิกิริยา

3.3 การเตรียมสารเคมี

ในการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของการใช้สารส้ม และ สารโคโทแซนเป็นสารตกตะกอน โดยสารส้มที่ใช้เป็นชนิดผงประเภท Commercial Grade ของ บริษัท ไชยเจริญทรัพย์ จำกัด และสารโคโทแซนที่ใช้เป็นชนิด Food Grade ของ Seafresh Chitosan (Lab) Co.Ltd. ซึ่งเป็นชนิดที่มีความหนืดต่ำ คือเมื่อละลายในสารละลายที่มีความเข้มข้น 1% ในกรดอะซิติก 1% จะมีค่าความหนืด 152 เซนติพอยส์ (cps) เปอร์เซ็นต์การละลาย 99.41% และ เปอร์เซ็นต์ดีเอคเซททิวิตเลชัน (%DAC) 86% ส่วนรายละเอียดที่เหลือแสดงในภาคผนวก ตารางที่ 1-ก

การเตรียมสารละลายของสารส้มที่มีความเข้มข้น 1 % (โดยน้ำหนัก) โดยละลายสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) นหนัก 10 กรัม ในน้ำกลั่นก่อนในขวดปริมาตรขนาด 1 ลิตร และทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 1 ลิตร ในส่วนของสารละลายโคโทแซนก็เตรียมที่ความเข้มข้นเดียวกัน โดยละลายสารโคโทแซนหนัก 1 กรัม ในน้ำกลั่นก่อนในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมกรดอะซิติก 1 มิลลิลิตร

สำหรับอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ใช้คือ Eosin Methylene Blue (EMB) Agar, Lactose Broth (LB), Plate Count Agar (PCA) และ Peptone Water (0.1%) เมื่อเตรียมอาหารตามสูตรเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัดไอ ที่ความดัน 15 ปอนด์/ตารางนิ้ว (121 °ซ) เป็นเวลา 20 นาที ในส่วนของวิธีการตรวจนับจำนวน โคลิฟอร์ม และ *E.coli* ได้ใช้วิธีเอ็มพีเอ็น (Most Probable Number (MPN) Technique) ในระบบ 5 หลอด และใช้วิธีนับจากจานเพาะเชื้อมาตรฐาน (Standard Plate Count) (สุรสิทธิ์, 2540)

3.4 วิธีการทดลอง

ในขั้นตอนแรกเก็บน้ำตัวอย่าง มาตรวจวิเคราะห์หาคอนสเมกซ์ของน้ำดิบเพื่อที่จะใช้ในการหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็นในการตรวจวิเคราะห์ในการทดลองนี้ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3-1 จากค่าการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ได้ในตารางพบว่า ค่าของแข็งทั้งหมด (Total Solids) ของน้ำตัวอย่างมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ที่กำหนดโดยการประปานครหลวงส่วนค่าตัวแปรอื่นๆ อยู่ภายใต้ค่ามาตรฐานที่กำหนด ทำให้การศึกษานี้จึงไม่นำตัวแปรคุณภาพของน้ำในลำดับที่ 4-6 มาวิเคราะห์ติดตามผลประสิทธิภาพของสารตกตะกอน ซึ่งในการศึกษานี้ได้แบ่งหัวข้อของการศึกษาวิจัยออกเป็น 3 หัวข้อย่อยตามลำดับดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3-1 ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง

ค่าตัวแปร	ผลการตรวจ	วิธีการ/เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์
1. pH	7.58	pH Meter
2. Turbidity (NTU)	48.5	Turbidimeter
3. Total Alkalinity (mg/L)	178	Titration
4. Suspended Solids (mg/L)	38	Dried at 103-105 °C
5. Total Dissolved Solids (mg/L)	256	Dried at 103-105 °C
6. Total Solids (mg/L)	301	Dried at 103-105 °C
7. Coliform Bacteria (MPN/100 m)	94	MPN Method
8. <i>E. coli</i>	Positive	MPN Method

3.4.1 ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้ม และ สารโคโทแซน

การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้ม และสารโคโทแซน โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของความขุ่น และเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์ม ภายหลังจากตกตะกอนด้วยสารส้ม และโคโทแซนตามลำดับ โดยในการศึกษาได้นำน้ำตัวอย่างปริมาตร 20 ลิตร มาทำการตกตะกอนน้ำด้วยสารละลายของสารส้มที่ความเข้มข้น 11 ระดับ คือ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 และ 120 มก./ล. ตามลำดับ แล้วจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของความขุ่น และเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์ม เทียบกับชุดควบคุมซึ่งเป็นน้ำที่ไม่ได้ใส่สารตกตะกอน โดยในการศึกษามีชุดการทดลองออกเป็นแบ่งเป็น 2 ชุด การทดลอง ชุดแรกประกอบด้วยการใช้สารตกตะกอนที่ระดับความเข้มข้น 20, 30, 40, 50 และ 60 มก./ล. ส่วนชุดที่สองใช้ความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่ระดับความเข้มข้น 70, 80, 90, 100, 110 และ 120 มก./ล. ตามลำดับ สำหรับการตกตะกอนน้ำตัวอย่างด้วยสารโคโทแซนจะใช้ความเข้มข้นของสารละลายโคโทแซนที่ความเข้มข้น 9 ระดับคือ 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40 และ 50 มก./ล ตามลำดับ แล้วจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของความขุ่น และ เปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์ม เทียบกับชุดควบคุมซึ่งเป็นน้ำที่ไม่ได้ใส่สารตกตะกอน

ในการทดลองจะทำการทดลองในเครื่องจาร์เจสต์ ซึ่งกวนด้วยความเร็วรอบของใบพัด 100 รอบ/นาที ใช้เวลากวนเร็ว 1 นาที หลังจากนั้นลดความเร็วรอบลงเหลือ 50 รอบ/นาที กวนนาน 20 นาที แล้วทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 20 นาที หลังจากนั้นถ่ายน้ำออก โดยใช้ปิเปตดูดน้ำ นำตัวอย่างน้ำวิเคราะห์ค่า pH ความขุ่น Alkalinity และจำนวน โคลิฟอร์ม

3.4.2 ศึกษาจลนศาสตร์การตายของแบคทีเรียก่อโรค และศึกษาการลดความขุ่นในสภาวะที่เกินมาตรฐาน

การศึกษาจลนศาสตร์การตายของแบคทีเรียก่อโรคในสภาวะที่เกินมาตรฐาน โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของความขุ่น และเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์ม ภายหลังจากการตกตะกอนด้วยสารส้ม และโคโทแซนตามลำดับ โดยในการศึกษาได้นำน้ำตัวอย่างปริมาตร 20 ลิตร มาทำการเพิ่มแบคทีเรียก่อโรค (*Escherichia coli*) โดยในการศึกษากำหนดระดับจำนวน *E.coli* ที่ 50,000 10,000, 5,000 และ 1,000 เซลล์/100 มล. ตามลำดับ มาทำการตกตะกอนน้ำด้วยสารละลายของสารส้มที่ความเข้มข้น 10 ระดับ คือ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 และ 110 มก./ล. ตามลำดับ แล้วจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์ม เทียบกับชุดควบคุมซึ่งเป็นน้ำที่ไม่ได้ใส่สารตกตะกอน โดยในการศึกษาจะแบ่งชุดการทดลองเป็น 2 ชุด การทดลอง ชุดแรกประกอบด้วยการใช้สารตกตะกอนที่ระดับความเข้มข้น 20, 30, 40, 50 และ 60 มก./ล. ส่วนชุดที่สองใช้ความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่ระดับความเข้มข้น 70, 80, 90, 100 และ 110 มก./ล. ตามลำดับ สำหรับการตก

ตะกอนน้ำตัวอย่างด้วยสารโคโทแซนจะใช้ระดับความเข้มข้นของสารละลายโคโทแซนที่ความเข้มข้น 5 ระดับ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 มก./ล. ตามลำดับ แล้วจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์ม เทียบกับชุดควบคุมซึ่งเป็นน้ำที่ไม่ได้ใส่สารตะกอน

สำหรับการศึกษาความขุ่นในสถานะที่เกินมาตรฐาน โดยนำน้ำตัวอย่างมาปรับความขุ่นให้อยู่ในระดับ 80, 120 และ 150 NTU ทำการตกตะกอนด้วยสารส้มที่ความเข้มข้นของสารละลายเดียวกันกับการทดลองข้างต้น สำหรับสารโคโทแซนจะใช้ความเข้มข้นของสารละลายโคโทแซนที่ความเข้มข้น 9 ระดับคือ 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40 และ 50 มก./ล ตามลำดับ จากนั้นนำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ค่า pH ความขุ่น และ Alkalinity แล้วนำผลคุณภาพน้ำที่ผ่านการตกตะกอนมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของความขุ่นเทียบกับชุดควบคุมซึ่งเป็นน้ำที่ไม่ได้ใส่สารตะกอน ในการทดลองจะทำการทดลองในเครื่องจาร์เทสต์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ค่า pH , Alkalinity และจำนวนโคลิฟอร์ม

3.4.3 ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบถังทรายกรองช้า

การศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบถังทรายกรองช้า โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของความขุ่น และเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์ม โดยในการศึกษาได้นำน้ำตัวอย่าง และน้ำตัวอย่างที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารละลายของสารโคโทแซน ผ่านระบบถังทรายกรองช้า อย่างละ 1 ชุด โดยผ่านการกรองที่ระดับความหนาของชั้นกรอง 3 ระดับคือ 80, 100 และ 120 ซม. ซึ่งทรายกรองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 – 0.30 มม. และ ความคละอยู่ระหว่าง 2-5 ถึงทรายกรองช้าสร้างจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. โดยระบบวัดความดันใช้สายยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. ในการวัดระดับน้ำ และ ระบบถังทรายกรองช้ามีอัตราการกรอง 0.1-0.4 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ดังแสดงในภาพที่3-2 สำหรับชุดโปรยกรองสร้างจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. ดังแสดงในภาพที่3-3

จากการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่าง จำนวน 2 จุด คือ ทางน้ำเข้า และทางน้ำออก แล้วนำน้ำตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ค่า pH และ ความขุ่น ทุกวัน สำหรับค่า Alkalinity โคลิฟอร์ม และ ของแข็งในน้ำ เก็บตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ทุก 5 วัน แล้วจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของความขุ่น เปอร์เซ็นต์การคงเหลือของของแข็งในน้ำ และ เปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์ม โดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำที่ออกจากระบบถังทรายกรองช้ากับน้ำที่เข้าระบบถังทรายกรองช้า ในส่วนของการสูญเสียความดัน และ อัตราการกรอง วิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์เทียบกับระยะเวลาการกรอง

เมื่อระบบถังทรายกรองช้าสามารถกำจัดโคลิฟอร์มได้มากกว่า80% จึงทำการถ่ายเชื้อ *E.coli* เพิ่มเติมลงในน้ำตัวอย่าง โดยกำหนดระดับความเข้มข้นของจำนวน *E.coli* เป็น 50,000 เซลล์/100 มล. และทำการตกตะกอนด้วยสารละลายของสารไคโทแซน จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการตกตะกอน และ น้ำตัวอย่าง ผ่านระบบถังกรองทรายกรองช้า แล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แล้วจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของความขุ่น เปอร์เซ็นต์การคงเหลือของของแข็งในน้ำ และ เปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์ม โดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำที่ออกจากระบบถังกรองช้ากับน้ำที่เข้าระบบถังกรองช้า ในส่วนของการสูญเสียความดัน และอัตราการกรอง วิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์เทียบกับระยะเวลาการกรอง

3.5 วิธีการวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำดิบ

การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำดิบจะใช้วิธีการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)) ในการวิเคราะห์ โดยจะทำการฉีดพ่นฝอยตัวอย่างน้ำเข้าไปในเปลวไฟ ซึ่งโลหะจะถูกอะตอมไมซ์ (Atomize) ให้อยู่ในรูปของอะตอม และเมื่อให้แสงความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic Light) ผ่านอะตอมเหล่านี้ อะตอมจะดูดกลืนแสงไปบางส่วน โดยจะมีเครื่องตรวจจับ (Detector) วัดความเข้มแสงที่ถูกดูดซับไว้ (Absorb) ซึ่งถ้ามีอะตอมมาก (ความเข้มข้นของโลหะมาก) การดูดกลืนแสงก็จะมาก นั่นคือการดูดกลืนแสงจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของโลหะ ซึ่งโลหะหนักที่ตรวจวิเคราะห์คือ แคดเมียม ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และ โครเมียม จะใช้แสงความยาวคลื่นที่ 228.8, 324.8, 213.9, 283.3 และ 357.9 nm ตามลำดับ (APHA, AWWA and WPCF, 1992)

บทที่ 4

ผลการทดลอง และ อภิปรายผล

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองหาปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารโคโทแซนที่เหมาะสมในการตกตะกอนความขุ่น และประสิทธิภาพในการลดจำนวนแบคทีเรียก่อโรค ส่วนที่ 2 ศึกษาขีดความสามารถในการกำจัดความขุ่น และแบคทีเรียก่อโรคในสถานะที่มีเกินมาตรฐานโดยใช้สารส้ม และสารโคโทแซนในน้ำดิบ ส่วนที่ 3 ศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบถังทรายกรองซ้ำในการลดความขุ่นและแบคทีเรีย ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะได้นำมาแสดงในหัวข้อต่อไป

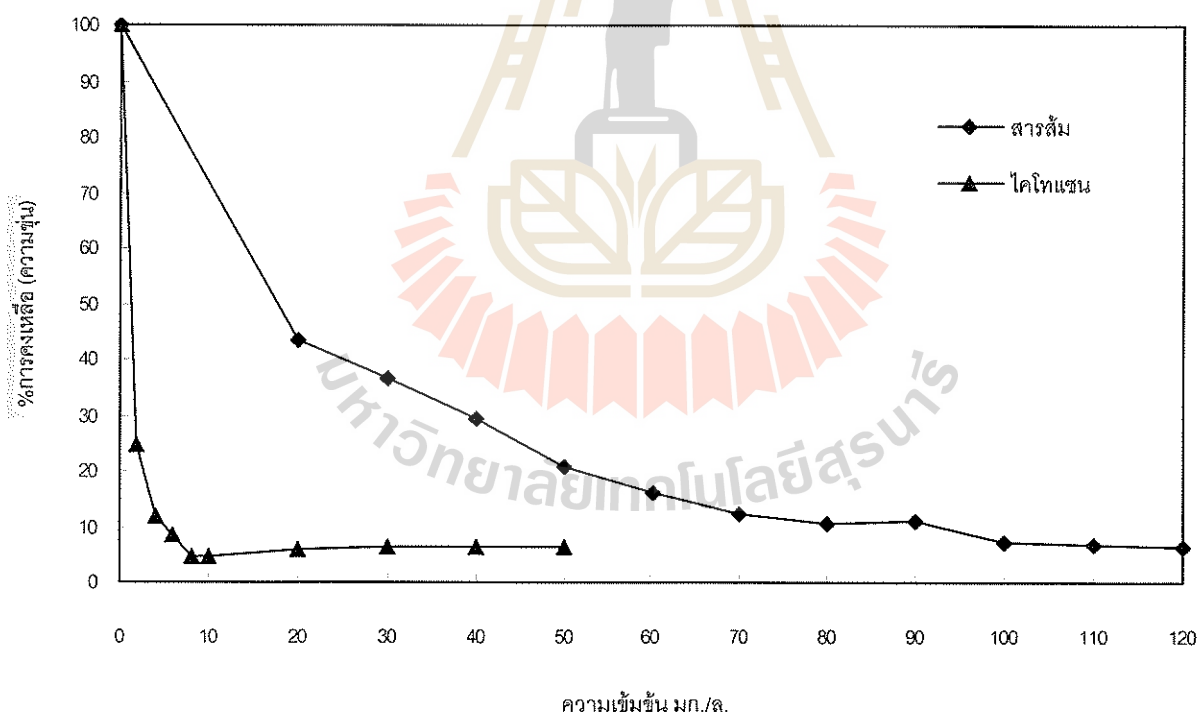
4.1 การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณของสารส้ม และโคโทแซนที่เหมาะสมในการตกตะกอนความขุ่น และลดจำนวนแบคทีเรียก่อโรค

4.1.1 เปรียบเทียบความขุ่นที่เหลือกับปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และโคโทแซน

เมื่อใช้สารส้มในการตกตะกอนน้ำในระดับความเข้มข้นของสารส้ม 0-120 มก./ล. และความเข้มข้นของสารโคโทแซน 0-50 มก./ล. นำข้อมูลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่าง เปอร์เซ็นต์การคงเหลือความขุ่นกับความเข้มข้นของสารส้มและสารโคโทแซนในรูปของกราฟ ดังภาพที่ 4-1 พบว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มจะเพิ่มความสามารถในการตกตะกอนจนถึงความเข้มข้น 100 มก./ล. สามารถลดความขุ่นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 7.3% และที่ความเข้มข้น 110 และ 120 มก./ล. เปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 7.2% และ 7.3% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงน้อย ในส่วนของสารโคโทแซนการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นจะเพิ่มความสามารถในการตกตะกอนจนถึงความเข้มข้น 8 มก./ล. สามารถกำจัดความขุ่นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 4.4% และที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มก./ล. เปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 4.5%, 5.8%, 6.5%, 7.4% และ 7.3% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยเช่นกัน

ได้มีการศึกษาในทำนองเดียวกันถึงความสามารถในการตกตะกอนของสารแอกกูแลนต์ 2 ชนิดคือ สารเฟอร์ริกซัลเฟตกับสารโคโทแซนพบว่า สารเฟอร์ริกซัลเฟตที่ปริมาณความเข้มข้น 500 มก./ล. สามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดในน้ำได้ 93-98% และกำจัดความขุ่น 93-98% สำหรับสารโคโทแซนผลิตจากเปลือกปู ที่ปริมาณความเข้มข้น 30 มก./ล. สามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดในน้ำได้ 98% และกำจัดความขุ่น 96% และสารโคโทแซนผลิตจากเปลือกกุ้งที่ปริมาณความเข้มข้น 30

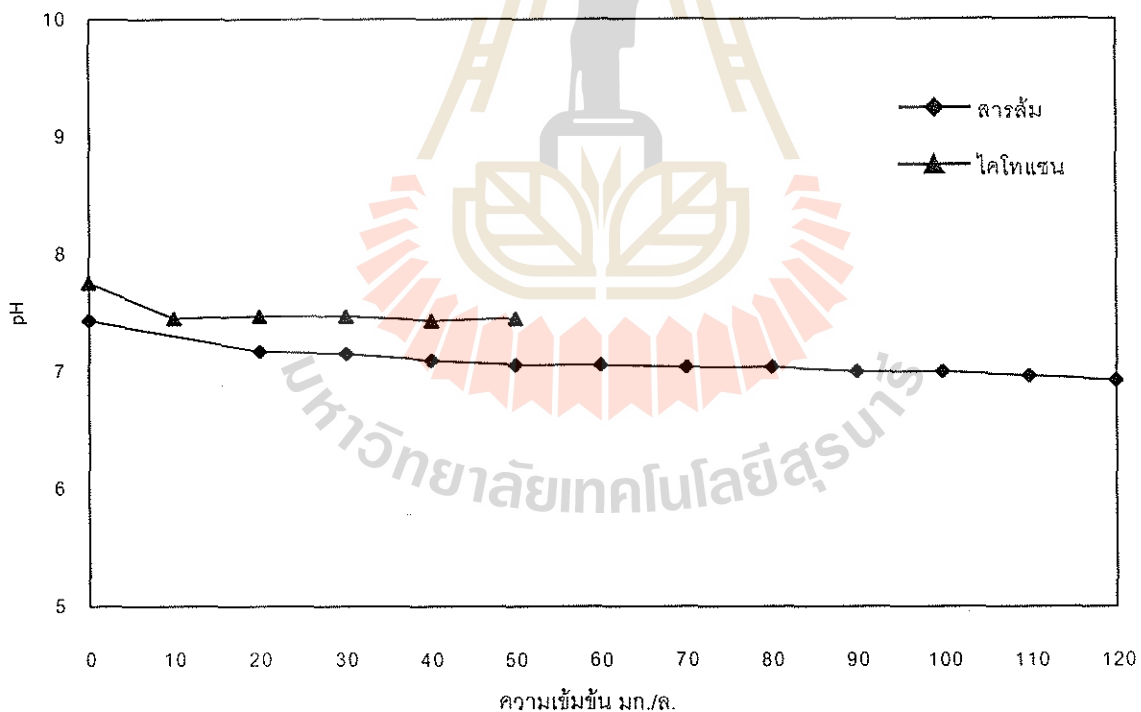
มก./ล. สามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดในน้ำได้ 98% และกำจัดความขุ่น 98% (Johnson and Gallanger, 1984) อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาความสามารถในการตกตะกอนของสารส้ม และสารเฟอร์ริกซัลเฟต สามารถใช้เป็นสารตกตะกอนตามลำพังได้ โดยใช้กลไกเปลี่ยนประจุของอนุภาคให้เป็นกลาง เพิ่มปริมาณคอลลอยด์ในน้ำและเหนี่ยวนำการรวมตะกอน ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณมาก น้ำหนักเบาและมีน้ำในตะกอนสูงไม่เหมาะที่จะนำไปบำบัดด้วยวิธีฝั้งกลบ (Beardsley, 1973) สำหรับสารโคโทแซนได้มีการศึกษาทดลองเปรียบเทียบการใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์จากธรรมชาติและโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ โดยใช้สารโคโทแซนซึ่งเป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ประจุบวกที่ได้จากไคตินที่มีอยู่ในเปลือกของสัตว์จำพวก กุ้ง ปู และ Sodium alginate ซึ่งเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล พบว่าการใช้โคโทแซนเป็นสารโคแอกกูแลนต์มีประสิทธิภาพดีกว่าและสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอดได้เช่นเดียวกับกับโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์และสามารถใช้ได้ในช่วงความขุ่นที่กว้างกว่าและใช้ได้ดีกว่าน้ำคิบที่มีความขุ่นสูงแต่มีราคาสูงกว่า Sodium alginate (Kawamura, 1991)



ภาพที่4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และโคโทแซน

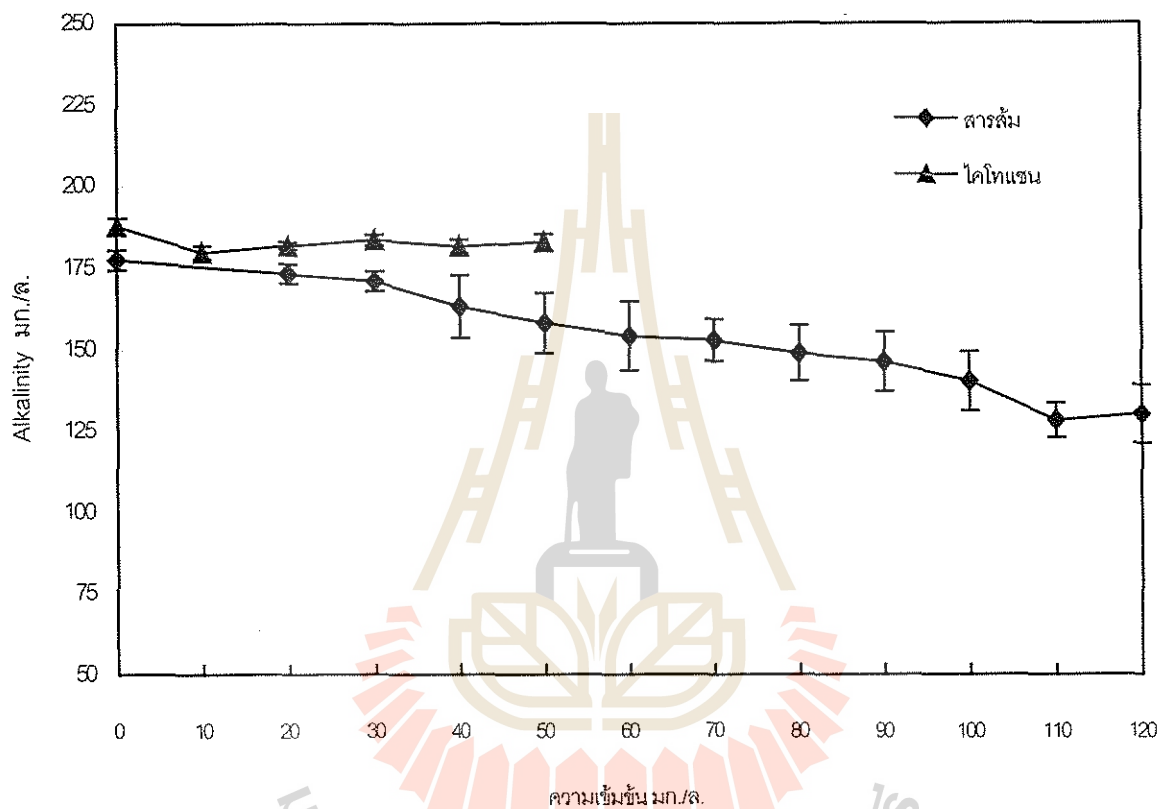
4.1.2 การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่า pH และ ค่า Alkalinity เมื่อใช้สารส้ม และ สารไคโทแซน

การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำตัวอย่างเนื่องจากการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มและสารไคโทแซนนำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับความเข้มข้นของสารส้มและสารไคโทแซนในรูปของกราฟ ดังภาพที่4-2 พบว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มจะทำให้ค่า pH ของน้ำตัวอย่างลดลง ในส่วนของสารไคโทแซนการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นไม่ทำให้ pH ของน้ำตัวอย่างลดลง สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่า Alkalinity ของน้ำตัวอย่างเนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารไคโทแซน นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง Alkalinity กับความเข้มข้นของสารส้มและสารไคโทแซนในรูปของกราฟ ดังภาพที่4-3 พบว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มจะทำให้ค่า Alkalinity ของน้ำตัวอย่างลดลง ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 110 มก./ล. ทำให้ค่า Alkalinity ของน้ำตัวอย่างลดลงถึง 47.76 มก./ล. ในส่วนของสารไคโทแซนไม่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดปริมาณค่า Alkalinity ของน้ำตัวอย่าง ซึ่งค่าอยู่ในช่วง 187.5-182 มก./ล.



ภาพที่4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และ ไคโทแซน

จากการศึกษาของ Beardsley ในปี ค.ศ. 1973 พบว่าการใช้สารพอลิเมอร์ประจุบวก ในการตกตะกอนน้ำตัวอย่างไม่ทำให้ค่า pH ของน้ำลดลงเหมือนกับการใช้สารส้ม จึงทำให้เหมาะที่จะนำไปใช้กับน้ำที่มีค่า Alkalinity ต่ำและมีความขุ่นสูงซึ่งถ้าใช้สารส้มเป็นสารตกตะกอนจะต้องใช้ปริมาณสารส้มสูง จึงจำเป็นต้องมีการเติมปูนขาวเข้าไปเพื่อควบคุมระดับค่า pH ของน้ำ (Beardsley, 1973)

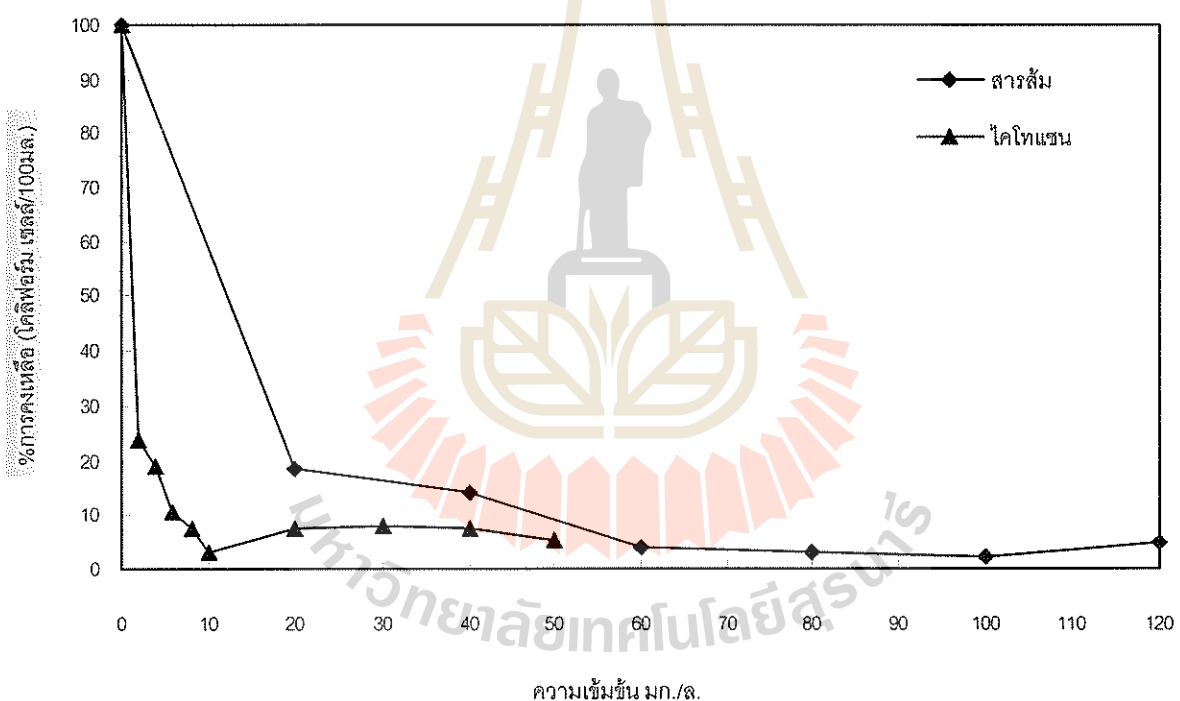


ภาพที่4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Alkalinity กับปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารโคโตน

4.1.3 เปรียบเทียบจำนวนโคลิฟอร์มที่เหลือต่อปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารโคโตนที่ใช้

เมื่อใช้สารส้มและสารโคโตนในการตกตะกอนน้ำ นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การคงเหลือโคลิฟอร์มกับความเข้มข้นของสารส้ม และสารโคโตน ในรูปของกราฟ ดังภาพที่4-4 พบว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มจะเพิ่มความสามารถในการลดจำนวนโคลิฟอร์ม จนถึงความเข้มข้น 60 มก./ล. สามารถลดจำนวนโคลิฟอร์มคิดเป็น

เปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 4% และที่ความเข้มข้น 80, 100 และ 120 มก./ล. เปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 3.4%, 1.7% และ 4.7% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงน้อย ในส่วนของสารโคโทแซนการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นจะเพิ่มความสามารถในการลดจำนวนโคลิฟอร์ม จนถึงความเข้มข้น 8 มก./ล. สามารถลดจำนวนโคลิฟอร์มคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 7.3% และที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มก./ล. เปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 3.1%, 7.5%, 8%, 7.6% และ 5.2% ตามลำดับ ซึ่งจัดว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยเช่นเดียวกัน ซึ่งขบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม และสารพอลิเมอร์สามารถลดจำนวนโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำตัวอย่างได้ 60-95% (มันสิน, 2537) อีกทั้งสารโคโทแซนยังมีกลไกการยับยั้งแบคทีเรียโดยที่โพลีแคตไอออนของโคโทแซนจะทำปฏิกิริยากับประจุลบบนผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการซึมผ่านที่เยื่อหุ้มเซลล์ของ *E. coli* ทำให้ *E. coli* ตายได้ (Tsai and Su, 1998)



ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโคลิฟอร์มกับปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารโคโทแซน

4.2 การศึกษาขีดความสามารถในการลดความขุ่นและแบคทีเรียก่อโรคในสภาวะที่มีเกินมาตรฐานโดยใช้สารส้ม และสารโคโทแซน

4.2.1 ผลของปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารโคโทแซนต่อจำนวนเซลล์ของ *E. coli*

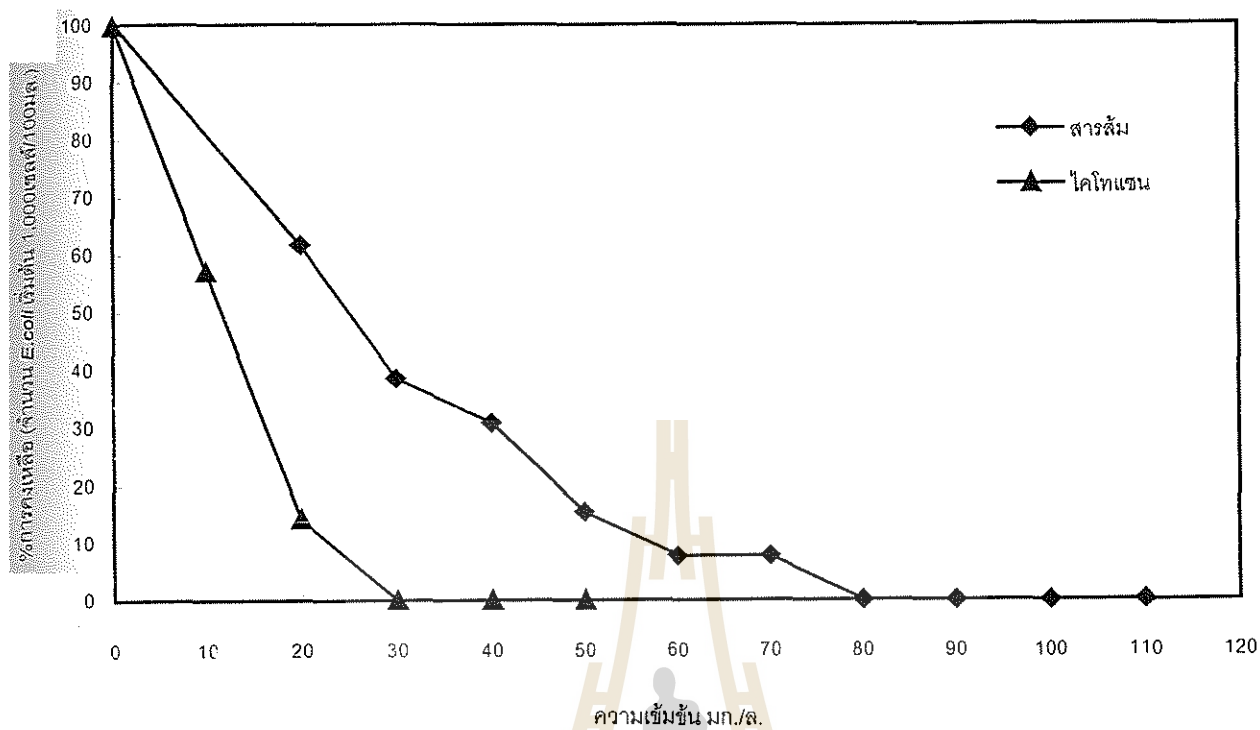
เมื่อทำการปลูกเชื้อ *E. coli* เริ่มต้นด้วยจำนวน 1,000 เซลล์/100มล. จากนั้นทำการตกตะกอนน้ำตัวอย่างในระดับความเข้มข้นของสารส้ม 0-110 มก./ล. และใช้ระดับความเข้มข้นของสารโคโทแซน 0-50 มก./ล. นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ *E. coli* กับความเข้มข้นของสารส้มและสารโคโทแซนในรูปของกราฟดังภาพที่4-5(ก) พบว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มจะเพิ่มความสามารถในการลดจำนวน *E. coli* จนถึงความเข้มข้นที่ 70 มก./ล. โดยจำนวน *E. coli* ลดลง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 7.6% ในขณะเดียวกันที่ความเข้มข้นของสารส้มมากกว่า 80 มก./ล. พบว่าไม่ปรากฏว่ามี *E. coli* เหลืออยู่ในส่วนของสารโคโทแซนที่ความเข้มข้น 20 มก./ล. สามารถลดจำนวน *E. coli* คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 14% ในขณะเดียวกันที่ความเข้มข้นของสารโคโทแซนมากกว่า 30 มก./ล. ปรากฏว่าไม่พบ *E. coli* เหลืออยู่

ในกรณีที่ทำการปลูกเชื้อจำนวน *E. coli* เริ่มต้นเป็น 5,000 เซลล์/100มล. ใช้สารส้มและสารโคโทแซนที่ระดับความเข้มข้นเท่าเดิม นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ *E. coli* กับความเข้มข้นของสารส้มและสารโคโทแซนในรูปของกราฟดังภาพที่4-5(ข) พบว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มจะเพิ่มความสามารถในการลดจำนวน *E. coli* จนถึงความเข้มข้น 90 มก./ล. จำนวน *E. coli* ลดลง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 2.3% ในขณะเดียวกันที่ความเข้มข้นของสารส้มมากกว่า 100 มก./ล. ไม่ปรากฏว่ามี *E. coli* เหลืออยู่ในส่วนของสารโคโทแซนที่ความเข้มข้น 20 มก./ล. สามารถลดจำนวน *E. coli* คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 5.7% ในขณะเดียวกันที่ความเข้มข้นของสารโคโทแซนมากกว่า 30 มก./ล. ไม่ปรากฏว่ามี *E. coli* เหลืออยู่

ในกรณีที่ทำการปลูกเชื้อจำนวน *E. coli* เริ่มต้น 10,000 เซลล์/100มล. ใช้สารส้มและสารโคโทแซนที่ระดับความเข้มข้นเท่าเดิม นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ *E. coli* กับความเข้มข้นของสารส้มและสารโคโทแซนในรูปของกราฟดังภาพที่4-5(ค) พบว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มจะเพิ่มความสามารถในการลดจำนวน *E. coli* จนถึงความเข้มข้น 90 มก./ล. จำนวน *E. coli* ลดลง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 3.8% ในขณะเดียวกันที่ความเข้มข้นมากกว่า 100 มก./ล. เปอร์เซ็นต์การคงเหลือมีค่าอยู่ในช่วง 3-4.5% ในส่วนของสารโคโทแซนที่ความเข้มข้น 20 มก./ล. สามารถลดจำนวน *E. coli* คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 5.7% ในขณะเดียวกันที่ความเข้มข้นของสารโคโทแซนมากกว่า 30 มก./ล. ไม่ปรากฏว่ามี *E. coli* เหลืออยู่

ในกรณีที่ทำการปลูกเชื้อจำนวน *E. coli* เริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล. ใช้สารส้มและสารไคโทแซนที่ระดับความเข้มข้นเท่าเดิม นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ *E. coli* กับความเข้มข้นของสารส้มและสารไคโทแซนในรูปของกราฟตามภาพที่4-5(ง) พบว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มจะเพิ่มความสามารถในการลดจำนวน *E. coli* จนถึงความเข้มข้น 100 มก./ล. จำนวน *E. coli* ลดลง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 4.6% ในขณะเดียวกันที่ความเข้มข้นสารส้มมากกว่า 110 มก./ล.เปอร์เซ็นต์การคงเหลือมีค่าในช่วง 3.3-4.6% ในส่วนของสารไคโทแซนที่ความเข้มข้น 40 มก./ล. สามารถลดจำนวน *E. coli* คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 0.3% ในขณะเดียวกันที่ความเข้มข้นสารไคโทแซนมากกว่า 50 มก./ล. ไม่ปรากฏว่ามี *E. coli* เหลืออยู่เช่นเดียวกัน ซึ่งก็ให้ผลทำนองเดียวกัน

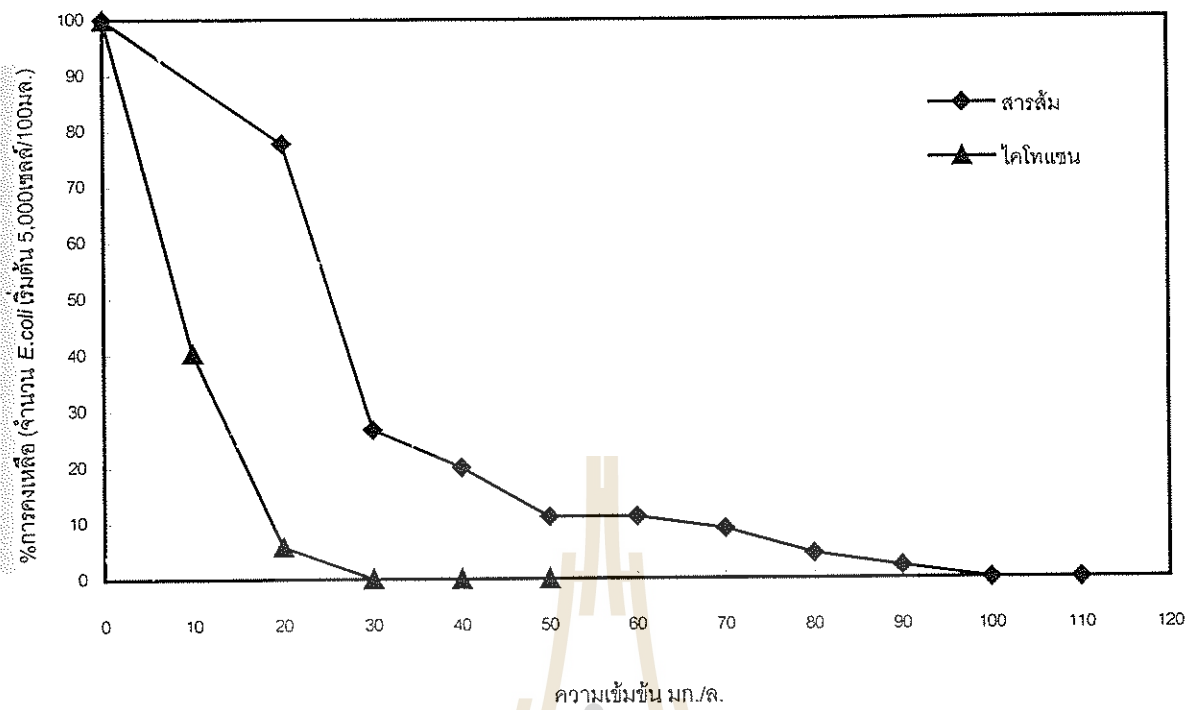
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัด *E. coli* ของสารไคโทแซนดีกว่าสารส้มเมื่อพิจารณาในเชิงปริมาณของสารที่ใช้ สำหรับจำนวน *E. coli* ที่เพิ่มขึ้นต้องใช้สารส้มในปริมาณที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และสารไคโทแซนก็ให้ผลเช่นเดียวกัน จากเหตุผลข้างต้นได้มีการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลในการยับยั้ง *E. coli* โดยใช้สารไคโทแซนที่ผลิตจากเปลือกกุ้ง (98% Deacetylated) (Tsai and Su,1998) พบว่าสถานะที่เป็นกรดเล็กน้อยจะทำให้เชื้อแบคทีเรียมีจำนวนเพิ่มขึ้น โดยโซเดียมไอออน (100 มิลลิโมล โซเดียม) จะจับอยู่กับสารไคโทแซน และทำให้สารไคโทแซนลดความสามารถในการยับยั้ง *E. coli* และประจุบวกของโซเดียมที่ความเข้มข้น 10 และ 25 มิลลิโมล จะลดความสามารถในการยับยั้ง *E. coli* ของสารไคโทแซน และสารไคโทแซนมีผลให้เกิดช่องว่างบนผนังเซลล์โดยเฉพาะทำให้ส่วนของเอ็นไซม์ของกลูโคสดีไฮโดรจีเนส และเอ็นไซม์แลคโตสดีไฮโดรจีเนสถูกปล่อยออกจากเซลล์ของ *E. coli* นอกจากนี้บางรายงานได้กล่าวว่าสารไคโทแซนมีกลไกการยับยั้งแบคทีเรียโดยที่โพลีแคตไอออนของไคโทแซนจะทำปฏิกิริยากับประจุลบบนผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการซึมผ่านที่เยื่อหุ้มเซลล์ของ *E. coli* ทำให้ *E. coli* ตายได้ นอกจากนี้ Wang (1992) ได้ทำการศึกษการยับยั้ง และการทำให้เชื้อของเชื้อที่ก่อให้เกิดโรค 5 ชนิด คือ *Staphylococcus aureus*, *E. coli*, *Yersinia enterocolitica*, *Listeria monocytogenes* และ *Salmonella typhimurium* โดยเพิ่มปริมาณไคโทแซนลงในอาหารเหลว 0%, 0.5%, 1%, 2% และ 2.5% มี pH ที่ 6.5 และ 5.5 โดยเติม 2% กรดอะเซติกพร้อมเก็บที่อุณหภูมิ 30 °ซ จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าที่ pH 6.5 เชื้อทั้ง 5 ชนิดจะถูกยับยั้งโดยสารไคโทแซนค่อนข้างน้อย และผลของไคโทแซนต่อ *S. aureus* ต่ำมาก ตามมาด้วย *S. typhimurium*, *E. coli* และ *Y. enterocolitica* โดยที่ปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมีผลต่อการยับยั้งเชื้อทั้ง 4 ชนิดยกเว้น *L. monocytogenes* ที่ไม่พบการยับยั้งเลย แต่ที่ค่า pH 5.5 ความเข้มข้นสารไคโทแซน 0.5% ไม่มีผลต่อการเจริญของ *S. typhimurium* อย่างไรก็ตามที่ค่า pH 5.5 พบว่าให้ผลในการยับยั้งได้ดีกว่าที่ pH 6.5



ภาพที่4-5 (ก)

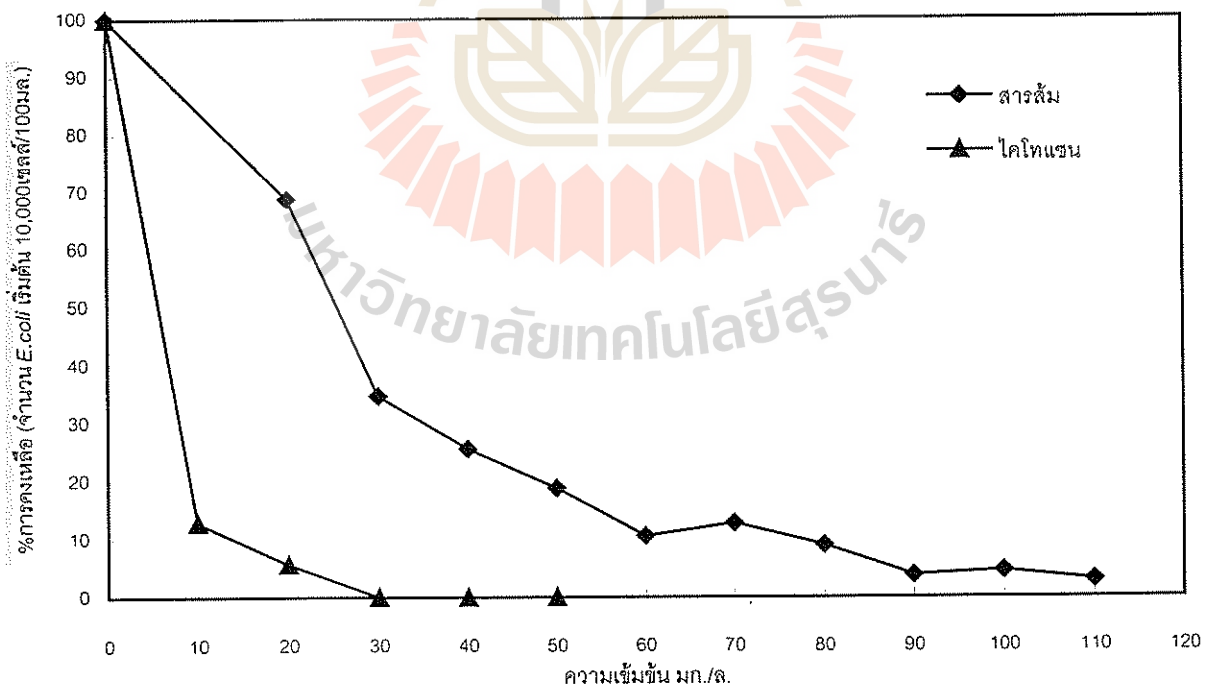
ภาพที่4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน *E.coli* เริ่มต้น กับปริมาณความเข้มข้นของสาร

- (ก) ปริมาณเซลล์ *E.coli* เริ่มต้น 1,000 เซลล์/100มล.,
- (ข) ปริมาณเซลล์ *E.coli* เริ่มต้น 5,000 เซลล์/100มล.,
- (ค) ปริมาณเซลล์ *E.coli* เริ่มต้น 10,000 เซลล์/100มล. และ
- (ง) ปริมาณเซลล์ *E.coli* เริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล.



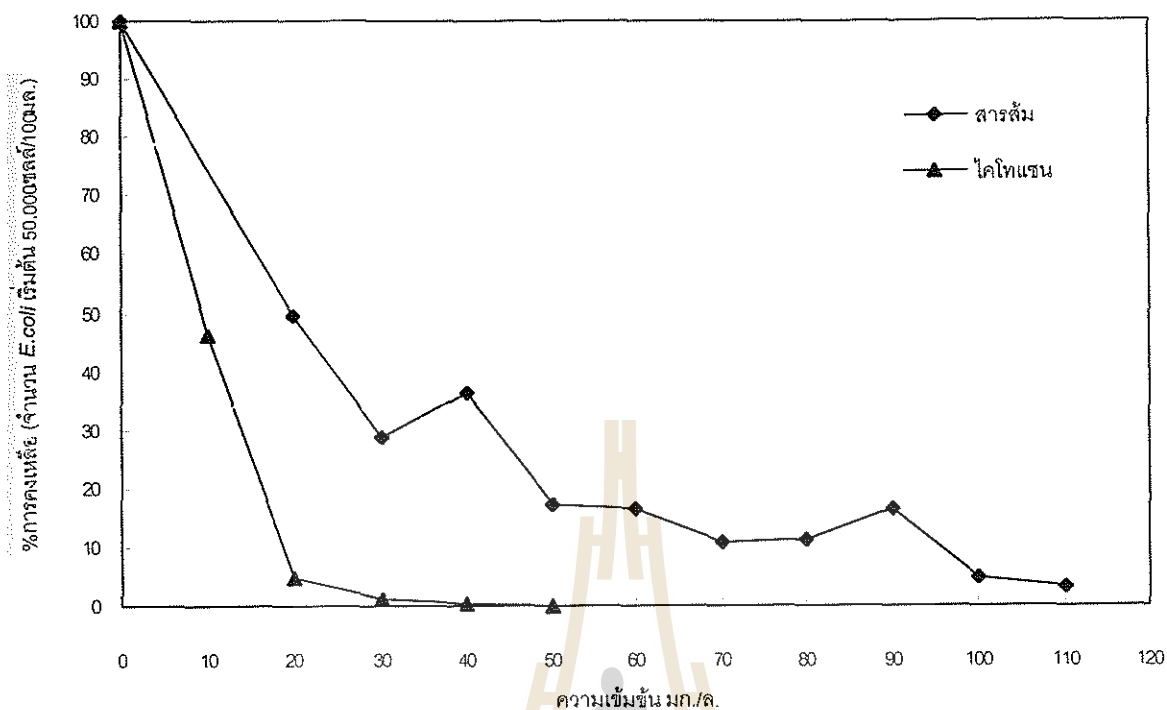
ความเข้มข้น มก./ล.

ภาพที่ 4-5 (ข)



ความเข้มข้น มก./ล.

ภาพที่ 4-5 (ค)



ภาพที่ 4-5 (ง)

4.2.2 เปรียบเทียบความขุ่นที่เหลือกับปริมาณความเข้มข้นของสารส้มและสารโคโทแชน

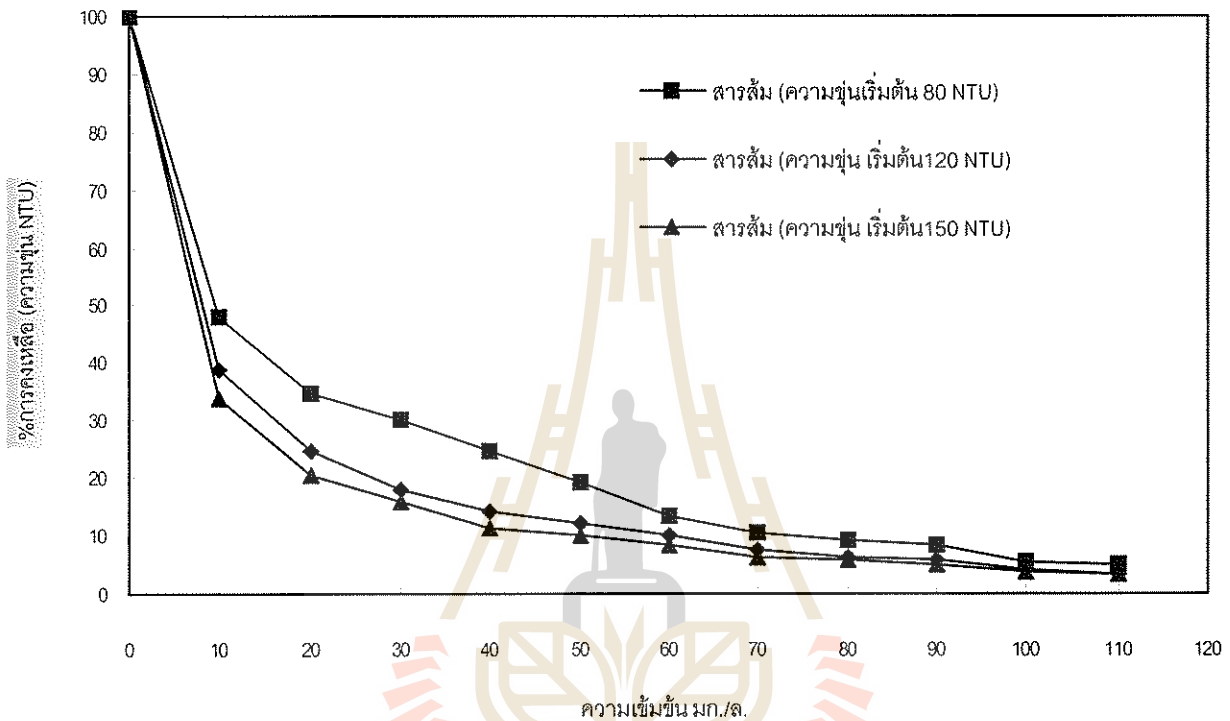
เมื่อใช้สารส้มในการตกตะกอนกับน้ำที่ปรับค่าความขุ่น 150, 120 และ 80 NTU โดยที่ระดับความเข้มข้นของสารส้มที่ใช้ 0-110 มก./ล. นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือความขุ่นกับความเข้มข้นของสารส้มและสารโคโทแชนในรูปของกราฟ ดังภาพที่ 4-6(ก) พบว่าที่ระดับความขุ่น 150 NTU การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มจะเพิ่มความสามารถในการตกตะกอนความขุ่นจนถึงความเข้มข้น 110 มก./ล. สามารถลดความขุ่น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 3.5% สำหรับระดับความขุ่นที่ 120 และ 80 NTU ก็ให้ผลทำนองเดียวกัน ที่ใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 100 มก./ล. สามารถลดความขุ่น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 4.1% และ 5.5% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การคงเหลือความขุ่น ในสถานะความขุ่นมีเริ่มต้น 150, 120 และ 80 NTU ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารส้มในการตกตะกอนเท่ากัน พบว่าประสิทธิภาพในการลดความขุ่นที่ความขุ่นเริ่มต้น 150 NTU สามารถความขุ่นได้ดีกว่าที่ความขุ่นเริ่มต้น 120 และ 80 NTU ตามลำดับ เพราะการเพิ่มคอลลอยด์ลงในน้ำ ทำให้คอลลอยด์มีเป้าสัมผัสมากขึ้น จึงทำให้เกิดการรวมตะกอนได้ดี

ซึ่งได้มีการศึกษาในทำนองเดียวกันถึงความสามารถในการตกตะกอนน้ำด้วยสารส้มที่ความขุ่น 80 NTU ที่ pH 7.5 ปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารส้มคือ 70 มก./ล. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 9% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากกว่า 80 มก./ล. ความขุ่นมีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงความเข้มข้น 110 มก./ล. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 18.7% ซึ่งผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับการทดลองครั้งนี้ (เจริญสุข, 2536) อาจเป็นเพราะน้ำตัวอย่างที่ใช้มีคุณสมบัติต่างกัน ซึ่งกระบวนการตกตะกอนยังมีข้อจำกัดอีกมาก เช่น ปริมาณประจุลบ หรือลักษณะการกวนไม่สมบูรณ์ ก็จะทำให้สารแอกกูแลนต์ทำสะเทินกับประจุลบผิวอนุภาคคอลลอยด์ไม่สมบูรณ์ด้วยเช่นกัน (มันสิน, 2537) สำหรับความขุ่นเริ่มต้น 120 NTU ที่ pH 7.5 ปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารส้มคือ 100 มก./ล. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 14.2% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นความขุ่นไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองครั้งนี้(เจริญสุข, 2536) เพราะสารส้มสร้างกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก โดยการสร้างผลึก $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นปุย เมื่ออนุภาคสัมผัสกับผลึก $Al(OH)_3$ ก็จะเกาะตัวอยู่กับผลึกนั้น เมื่อเกิดขึ้นมากๆ จะได้ขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนง่าย ซึ่งกลไกนี้ต้องใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารส้มมากพอ

ในส่วนสารโคโทแซนใช้ระดับความเข้มข้น 0-50 มก./ล. นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ในรูปของกราฟดังภาพที่4-6(ข) พบว่าที่ระดับความขุ่น 150 NTU การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารโคโทแซนจะเพิ่มความสามารถในการตกตะกอนความขุ่นจนถึงปริมาณความเข้มข้น 20 มก./ล. ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ดีที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 0.7% หลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารโคโทแซนจะทำให้ความขุ่นเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้น 50 มก./ล. ความขุ่นเพิ่มขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 5.3% สำหรับระดับความขุ่น 120 และ 80 NTU ปริมาณความเข้มข้นของโคโทแซนที่ 10 มก./ล. สามารถตกตะกอนได้ดีที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 1.3% และ 1.6% ตามลำดับ หลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นจะทำให้ความขุ่นเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้น 50 มก./ล. ความขุ่นเพิ่มขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 2.9% และ 3.9% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ ในสภาวะความขุ่นมีเริ่มต้น 150, 120 และ 80 NTU ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารโคโทแซนในการตกตะกอนเท่ากัน พบว่าประสิทธิภาพในการลดความขุ่นมีเปอร์เซ็นต์การคงเหลือไม่แตกต่างกัน

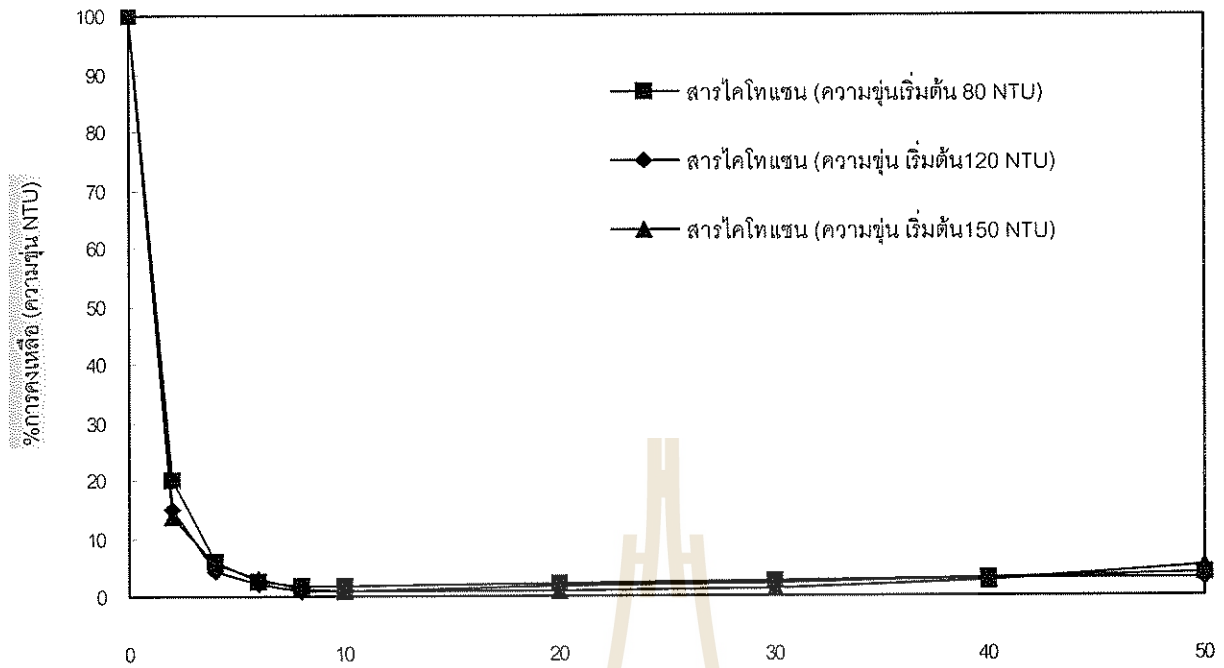
สำหรับสารโคโทแซนการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นจะเพิ่มความสามารถในการกำจัดความขุ่น เนื่องจากสารโคโทแซนไปเกาะติดอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพ และสามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นๆ โดยมีสารโคโทแซนเป็นสะพานเชื่อมทำให้อนุภาคใหญ่ขึ้นและตกตะกอนง่าย อีกทั้งปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมยังขึ้นกับความขุ่นเริ่มต้นของน้ำตัวอย่างด้วย นั่นคือความเข้มข้นของสารโคโทแซนที่เหมาะสม 10 มก./ล. สำหรับความขุ่นเริ่มต้น 80

และ 120 NTU และความขุ่นเริ่มต้น 150 NTU ใช้ถึง 20 มก./ล. ในการตกตะกอนเมื่อความเข้มข้นของสารโคโตนเจนมากกว่านี้จะทำให้ความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจมาจากอนุภาคเกิดการกลับคืนเสถียรภาพขึ้นมาใหม่เนื่องจากปริมาณไอออนบวกมากเกินไป



ภาพที่ 4-6 (ก)

ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นเริ่มต้นกับปริมาณความเข้มข้นของสาร
ก) สารส้ม และ ข) สารโคโตนเจน



ความเข้มข้น มก./ล.

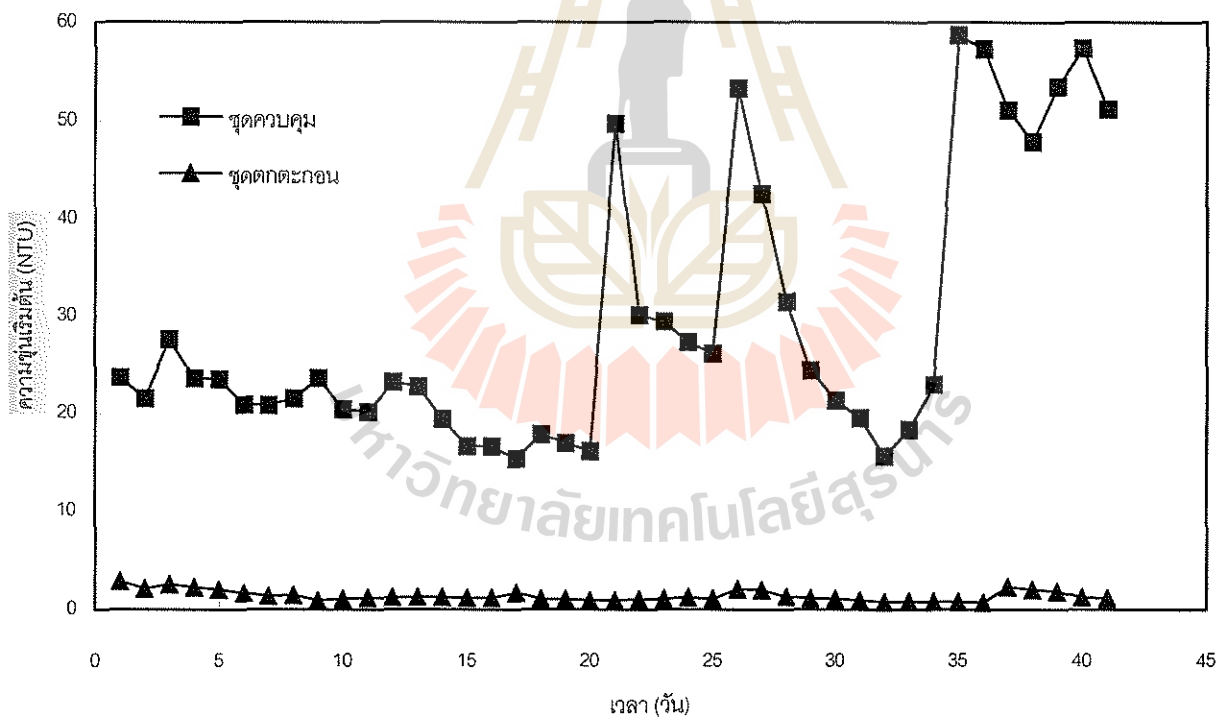
ภาพที่ 4-6 (ข)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบถังทรายกรองช้า

4.3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นกับของระบบทรายกรองช้า

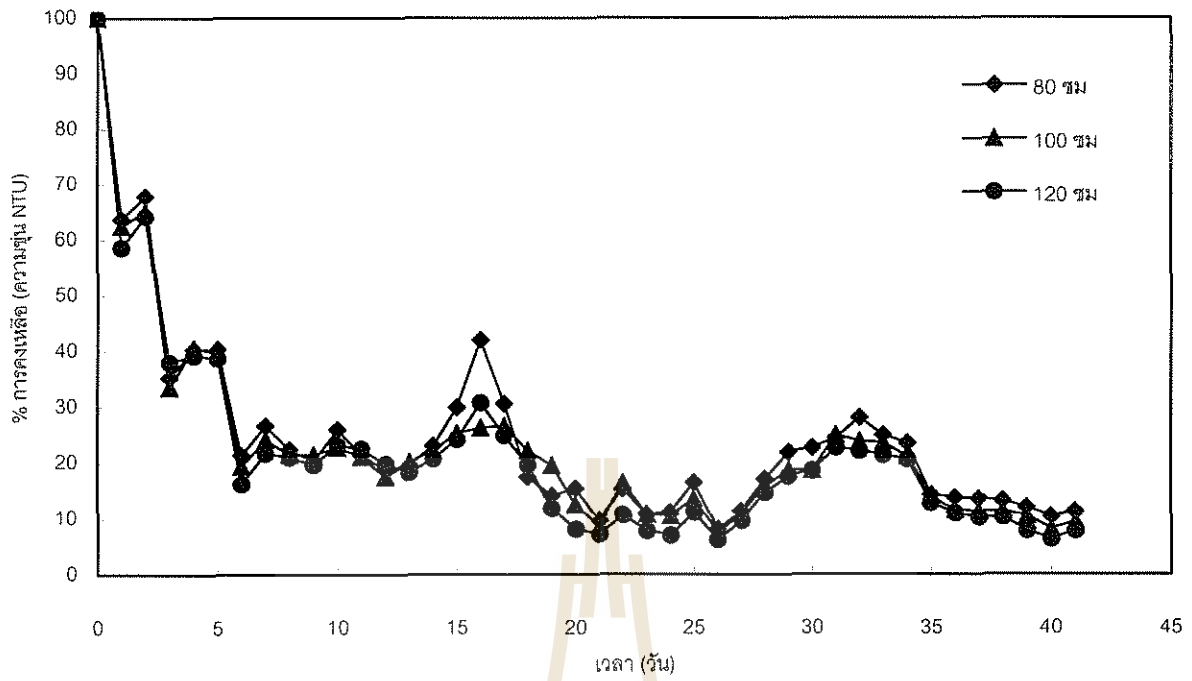
เมื่อนำน้ำตัวอย่าง (ชุดควบคุม) และน้ำตัวอย่างผ่านการตกตะกอน (ชุดตกตะกอน) ด้วยสารโคโทแซนที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. เพื่อหาความขุ่นเริ่มต้น นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับเวลาที่กรองในรูปของกราฟ ดังภาพที่4-7 พบว่าชุดควบคุมมีความขุ่นเริ่มต้นมีค่าระหว่าง 15.3-58.7 NTU ช่วง 20 วันแรกปริมาณความขุ่นเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก หลังจากนั้นความขุ่นเปลี่ยนแปลงมากเพราะการทดลองอยู่ในช่วงต้นฤดูฝนความขุ่นจะมีค่าสูงในวันที่มีฝนตกเพราะฝนจะชะล้างดินลงไปและสาเหตุหนึ่งมาจากมีการทำงานชุดบ่อน้ำอยู่ใกล้ๆ กับบ่อน้ำตัวอย่างเป็นเหตุให้ฝุ่นละอองต่างๆ ถูกลมพัดมาตกที่บ่อได้ สำหรับชุดตกตะกอนความขุ่นเริ่มต้นมีค่าอยู่ที่ 0.75-2.87 ซึ่งได้มาตรฐานของการประปาฯ ครบถ้วนแล้ว



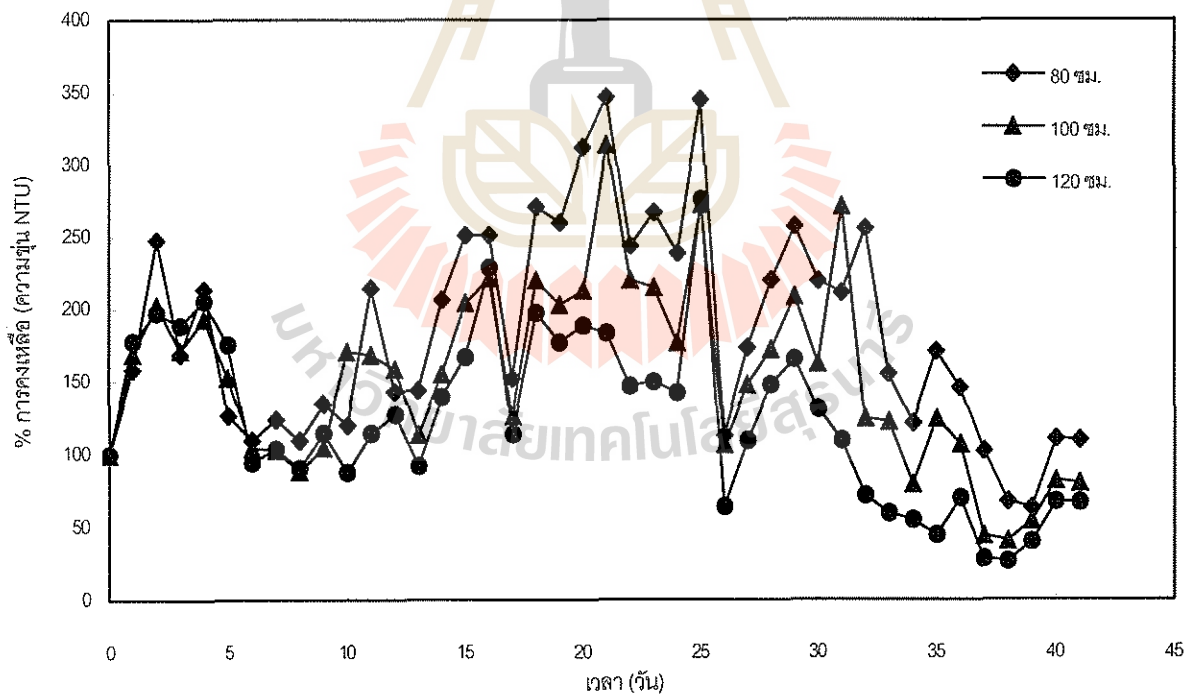
ภาพที่4-7 กราฟแสดงความขุ่นของน้ำตัวอย่างที่เข้าระบบถังทรายกรองช้า

เมื่อนำน้ำตัวอย่างผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดควบคุม) ที่ความหนาชั้นกรอง 3 ระดับคือ 80, 100 และ 120 ซม. นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือความขุ่นกับเวลาที่กรองในรูปของกราฟ ดังภาพที่ 4-8(ก) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ความหนาชั้นกรอง 80 ซม. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 16-21.4% สำหรับความหนาชั้นกรอง 100 ซม. ประสิทธิภาพจะดีกว่า (ความหนา 80 ซม.) ประมาณ 1-2% และที่ความหนาชั้นกรอง 120 ซม. ประสิทธิภาพดีกว่า (ความหนา 80 ซม.) ประมาณ 2.2-6% ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความยาวของชั้นกรองเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่มีผลต่อการลดความขุ่นและที่ความหนาชั้นกรองมากขึ้นผลของกลไกแบบดูดติดผิว และแบบตกตะกอน ในช่วงว่างจะยิ่งเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีกว่าสำหรับช่วง 5 วัน แรกของการกรองประสิทธิภาพในการลดความขุ่นมีค่าน้อย หลังจากนั้นจะเริ่มสูงขึ้นเพราะในระยะแรกการเรียงตัวของเม็ดทรายยังไม่ดีพอเมื่อนานเข้าการไหลของน้ำจะช่วยให้การจัดเรียงตัวดีขึ้นอีกส่วนหนึ่งมาจากผิวชั้นทรายสามารถก่อเกิดเป็นชั้นเมือกจุลินทรีย์ปกคลุมซึ่งช่วยลดความขุ่นและขนาดอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ได้ (Huisman, 1980, 1982)

นำน้ำตัวอย่างมาผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโคแทนที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. แล้วผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดตกตะกอน) ที่ความหนาชั้นกรอง 3 ระดับนำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือความขุ่นกับเวลาที่กรองในรูปของกราฟ ดังภาพที่ 4-8(ข) พบว่าที่ความหนาชั้นกรอง 80 ซม. นำผ่านระบบถังทรายกรองช้ามีความขุ่นเพิ่มขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 75-324% ซึ่งเปอร์เซ็นต์การคงเหลือสูงสุดในวันที่ 25 และต่ำสุดในวันที่ 38 ของการกรองสำหรับความหนาชั้นกรอง 100 และ 120 ซม. ก็ได้ผลเช่นกัน แต่น้ำที่ออกจากระบบก็ยังสามารถมาตรฐานการประปานครหลวง (<5NTU) สาเหตุน่าจะมาจากทรายที่ใช้เป็นสารกรองยังมีความสกปรกหลงเหลืออยู่ และความขุ่นของน้ำตัวอย่างที่เข้าระบบมีค่าอยู่ที่ 0.75-2.87 NTU ซึ่งน้อยมากเมื่อน้ำที่มีความขุ่นน้อยผ่านระบบถังทรายกรองช้าทำให้เกิดการชะล้างสิ่งที่ดีติดอยู่กับสารกรองออกมาด้วย ซึ่งสามารถบอกได้ว่าระบบถังทรายกรองช้ามีข้อจำกัดของระบบคือน้ำที่เข้าระบบที่มีความขุ่นน้อยกว่า 5 NTU ระบบไม่สามารถที่จะกรองให้มีความขุ่นน้อยกว่านี้ได้อีก ฉะนั้นน้ำที่เข้าระบบถังทรายกรองช้าควรจะมีค่าความขุ่นมากกว่า 5 NTU



ภาพที่4-8 (ก)

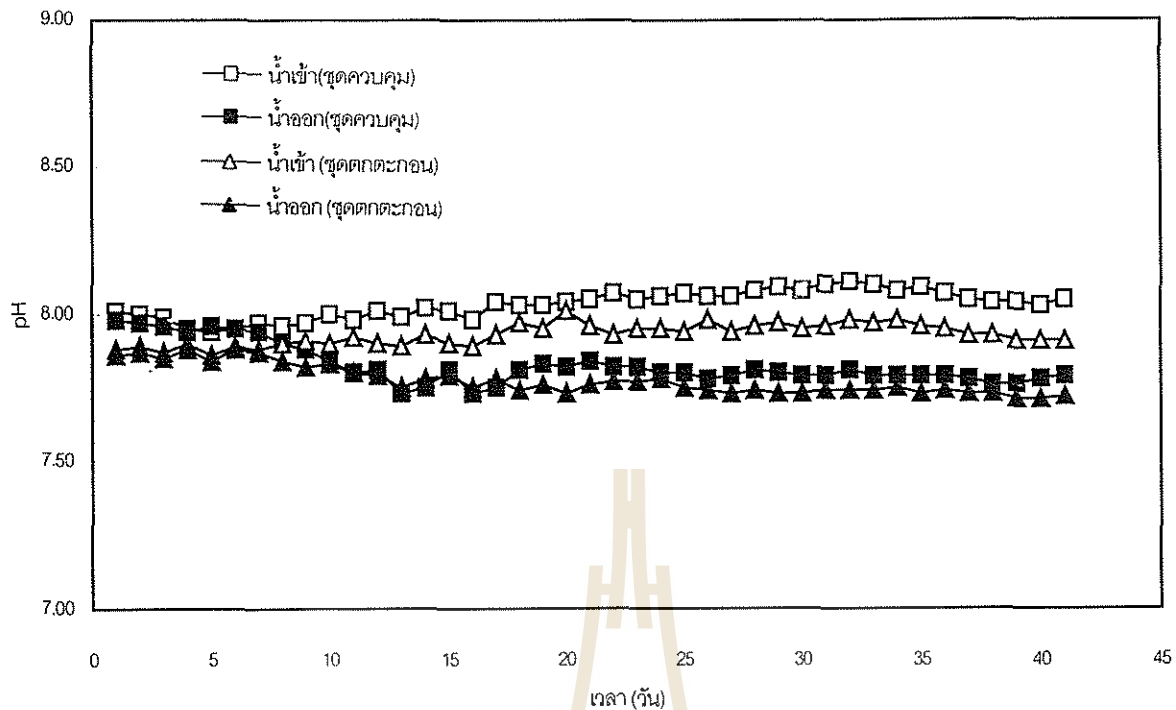


ภาพที่4-8 (ข)

ภาพที่4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชุ่มชื้นกับเวลาการกรอง (ก) ชุดควบคุมที่ความหนา 3 ระดับ และ (ข) ชุดตกตะกอนที่ความหนา 3 ระดับ

4.3.2 เปรียบเทียบค่า pH กับระยะเวลาของการกรอง

น้ำตัวอย่างผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดควบคุม) และน้ำตัวอย่างผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนแล้วผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดตกตะกอน) มาศึกษาการเปลี่ยนแปลงช่วงค่า pH ต่อเวลาโดย นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับเวลาที่กรองในรูปของกราฟ ดังภาพที่ 4-9 พบว่า pH ของน้ำชุดควบคุมที่เข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 7.78-8.01 และเมื่อผ่านระบบถังทรายกรองช้า ในช่วง 7 วันแรก ค่า pH ที่เข้าและออกระบบมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง หลังจากนั้นค่า pH ที่ออกจากระบบมีค่าน้อยกว่าน้ำที่เข้าระบบเล็กน้อย โดยค่า pH อยู่ในช่วง 7.73-7.77 สามารถอธิบายได้ว่าหลังจาก 7 วันนั้นได้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์ ซึ่งสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นแหล่งพลังงานของแบคทีเรียในรูปของ NO_3^- และจุลินทรีย์ในชั้นนี้ได้ใช้แหล่งอาหารนี้แล้วให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ H^+ ออกมาซึ่งมีสภาพเป็นกรดจึงทำให้น้ำที่ออกมามี pH ลดลง (Huisman, 1980) ในส่วนของชุดตกตะกอน pH ของน้ำที่เข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 7.81-8.10 เมื่อผ่านระบบถังทรายกรองช้า ในช่วง 7 วันแรกค่า pH ที่เข้าและออกระบบมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเช่นกัน หลังจากนั้นค่า pH ที่ออกจากระบบมีค่าน้อยกว่าน้ำที่เข้าระบบเล็กน้อยโดยค่า pH อยู่ในช่วง 7.78-7.84 เหตุผลเช่นเดียวกับชุดควบคุม และเมื่อเปรียบเทียบชุดควบคุมกับชุดตกตะกอนแล้วค่า pH ที่เข้าและออกระบบของชุดควบคุมน้อยกว่าชุดตกตะกอนเล็กน้อย ซึ่งน้ำตัวอย่างที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนแล้วมี pH สูงขึ้นนั้นน่าจะมาจากน้ำที่ตกตะกอนแล้วจะถูกเก็บไว้ในถัง 500 ลิตร เพื่อที่จะนำเข้าระบบถังทรายกรองช้า ทำให้มีกระบวนการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้น (ธีระ, 2539) จากสาหร่ายภายในถังเก็บน้ำของชุดตกตะกอนมากกว่าชุดควบคุมเพราะสารไนโตรเจนที่ตกค้างเนื่องจากการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซน จากกระบวนการสังเคราะห์แสงต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปของอัลคาไลน์ดีในน้ำ (จงจินต์, 2541) และให้ออกซิเจนออกมาจึงทำให้น้ำมีสภาพเป็นด่าง ถ้าสังเกตจากถังเก็บน้ำจะมีสิ่งมีชีวิตสีเขียวคล้ายสาหร่ายเกิดขึ้นด้วยของชุดตกตะกอนมากกว่าชุดควบคุม



ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับเวลาการกรอง

4.3.4 เปรียบเทียบค่าของแข็งในน้ำกับระยะเวลาการกรอง

น้ำตัวอย่างผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดควบคุม) และน้ำตัวอย่างผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนแล้วผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดตกตะกอน) มาทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งในน้ำต่อระยะเวลาการกรอง นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของแข็งละลายน้ำกับเวลาที่กรองในรูปของกราฟดังภาพที่ 4-10(ก) พบว่าชุดควบคุมเมื่อผ่านระบบถังทรายกรองช้าสามารถลดของแข็งละลายน้ำ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 91-98% ซึ่งน้อยมากในส่วนของน้ำตัวอย่างชุดตกตะกอน เมื่อผ่านระบบถังทรายกรองช้า ค่าที่ได้สูงขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 98-105% จากตารางที่ 4-1 ชุดควบคุม มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งละลายน้ำที่ความหนาชั้นกรอง 3 ระดับค่าไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับชุดตกตะกอนประสิทธิภาพในการกำจัดก็ไม่เปลี่ยนแปลงเช่นกัน จากภาพที่ 4-10(ข) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของแข็งแขวนลอยกับเวลาที่กรอง พบว่าชุดควบคุมเมื่อผ่านระบบถังทรายกรองช้าสามารถลดของแข็งแขวนลอย คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 36.4-71.8% ในส่วนของน้ำตัวอย่างชุดตกตะกอน เมื่อผ่านระบบถังทรายกรองช้าค่าที่ได้สูงขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 100-138% จากตารางที่ 4-1 ชุดควบคุมมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ความหนาชั้นกรอง 80 ซม. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 49% ที่ 100 ซม. ประสิทธิภาพดีกว่า 5%

(ความหนาชั้นกรอง 80 ซม.) และที่ 120 ซม. ประสิทธิภาพดีกว่า 9.4% (ความหนาชั้นกรอง 80 ซม.) สำหรับชุดตกตะกอนประสิทธิภาพในการกำจัดที่ความหนาชั้นกรอง 3 ระดับไม่เปลี่ยนแปลง จากภาพที่4-10(ค) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของแข็งทั้งหมดกับเวลาที่กรอง พบว่าชุดควบคุมเมื่อผ่านระบบถังทรายกรองช้า สามารถลดของแข็งทั้งหมด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 83.8-96% ในส่วนของน้ำตัวอย่างชุดตกตะกอนผ่านระบบถังทรายกรองช้าค่าที่ได้สูงขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 100-104% สาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดน้อยเพราะในน้ำดิบมีของแข็งแขวนลอยน้อยและมีของแข็งละลายน้ำมากกว่าถึง 5-8 เท่า ซึ่งความสามารถของระบบถังทรายกรองช้าในการกำจัดของแข็งแขวนลอยได้สูง และมากกว่าของแข็งละลายน้ำ จากตารางที่4-1 ชุดควบคุม มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่ความหนาชั้นกรอง 80 ซม. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 91.3% ที่ 100 ซม. ประสิทธิภาพดีกว่า 2% (ความหนาชั้นกรอง 80 ซม.) และที่ 120 ซม. ประสิทธิภาพดีกว่า 6.7% (ความหนาชั้นกรอง 80 ซม.) สำหรับชุดตกตะกอนประสิทธิภาพในการกำจัดไม่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่4-1 ค่าของแข็งในน้ำตามความหนาชั้นกรอง

ความหนา ชั้นกรอง ซม.	ชุดควบคุม					
	TDS มก./ล.		SS มก./ล.		TS มก./ล.	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
80	282	278	53	26	340	307
100	282	273	53	23	340	301
120	282	262	53	21	340	284
ความหนา ชั้นกรอง ซม.	ชุดตกตะกอน					
	TDS มก./ล.		SS มก./ล.		TS มก./ล.	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
80	241	243	10	11	256	258
100	241	245	10	11	256	261
120	241	247	10	10	256	263

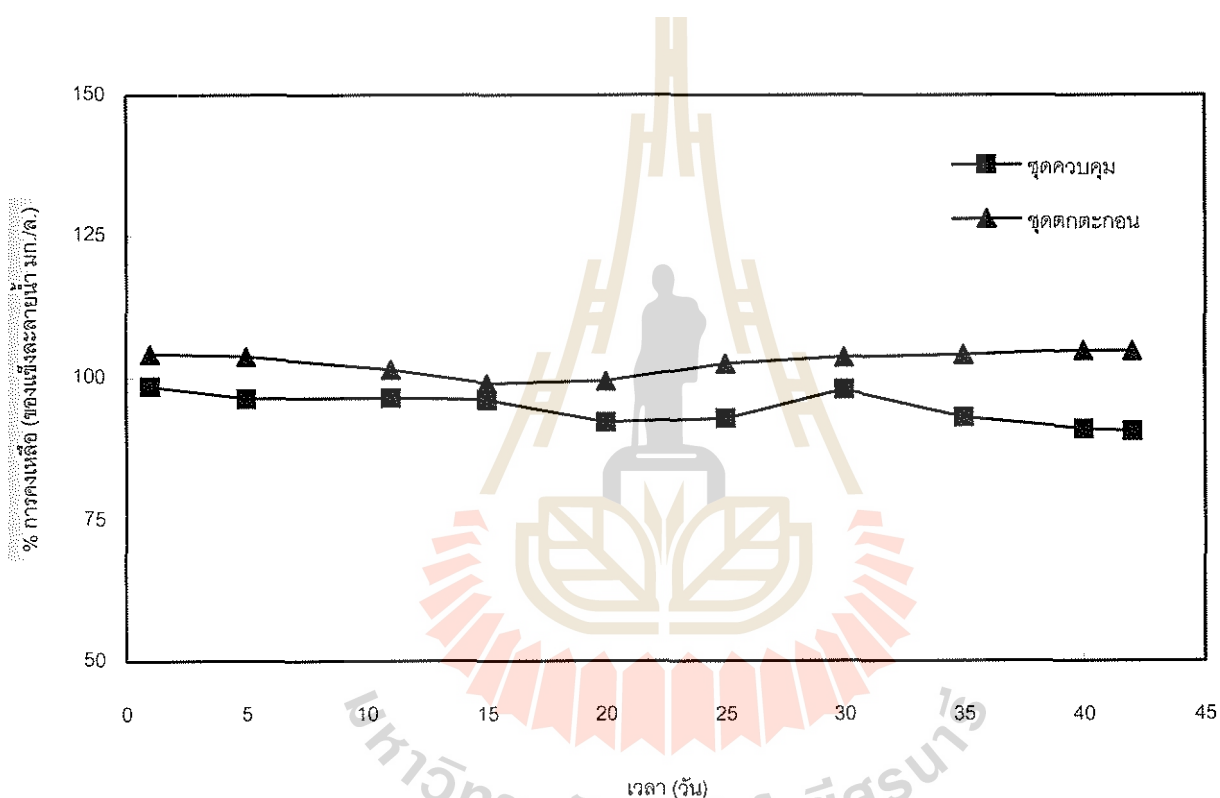
เมื่อพิจารณาจากการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนพบว่า สามารถลดของแข็งละลายน้ำได้ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 74.2-88.3% ของแข็งแขวนลอยได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 20.5-53.9% และ ของแข็งทั้งหมดในน้ำได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 66.8-85.4% ทำให้น้ำตัวอย่างที่เข้าระบบถังทรายกรองช้าชุดตกตะกอนมีปริมาณของแข็งในน้ำน้อย ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การคงเหลือสูงกว่าน้ำที่เข้าระบบ สาเหตุน่าจะมาจากทรายกรองยังมีความสกปรกหลงเหลืออยู่ และขีดความสามารถของระบบที่ไม่สามารถกำจัดของแข็งในน้ำได้น้อยกว่านี้ได้อีก เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแข็งในน้ำของชุดตกตะกอนกับชุดควบคุมหลังจากผ่านระบบถังทรายกรองช้า พบว่าค่าของแข็งในน้ำของชุดตกตะกอนยังคงน้อยกว่าชุดควบคุม สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงกว่าของแข็งละลายน้ำ เนื่องจากกลไกการกรองของถังทรายกรองช้ามีกลไกที่สำคัญคือ กลไกแบบกรอง กลไกแบบตกตะกอน กลไกแบบการชน และ กลไกแบบดูดติดผิว (Huisman, 1982)

กลไกแบบกรองเป็นกลไกการกรองอนุภาคแขวนลอยซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างสารกรอง เพื่อให้สารแขวนลอยติดค้างอยู่ภายในชั้นกรองระหว่างการไหลผ่าน โดยปกติทรายกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 มม. จะสามารถกำจัดสารแขวนลอยซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 20 μm หลังจากการกรองผ่านไประยะหนึ่งจะมีการติดค้างของสารแขวนลอยจนทำให้ช่องว่างระหว่างทรายกรองมีขนาดเล็กลงจากเดิม ทำให้สารแขวนลอยขนาด 5-10 μm บางส่วนติดค้างอยู่ระหว่างทรายกรองได้โดยกลไกแบบนี้ อย่างไรก็ตาม สารแขวนลอย เช่น คอลลอยด์ (ขนาด 0.001-1 μm) ยังไม่สามารถถูกกำจัดออกด้วยกลไกแบบ "Mechanical Straining" นี้ได้

กลไกแบบตกตะกอนเป็นกลไกการกำจัดอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็กและสามารถตกตะกอนที่ผิวของสารกรอง การกำจัดด้วยกลไกนี้จะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของสารกรอง กล่าวคือ หากใช้สารกรองที่เป็นทรายมีขนาด 0.2 มม. และมีความหนาของชั้นทรายกรอง 0.8 ม. ทรายกรองนี้จะมีพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดกลไกนี้ประมาณ 1,000 ตร.ม. ต่อ 1 ตร. ม. ของพื้นที่ผิวบนของชั้นกรอง ประสิทธิภาพของการกำจัดของกลไกแบบตกตะกอนนี้ จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของมวลของสารแขวนลอยโดยสารแขวนลอยส่วนใหญ่จะถูกกำจัดที่ผิวบนของชั้นทรายกรองจะมีสารแขวนลอยอินทรีย์บางส่วนที่มีความหนาแน่นของมวลต่ำ (Low mass density) จะตกค้างที่ผิวทรายกรองในชั้นที่ลึกลง

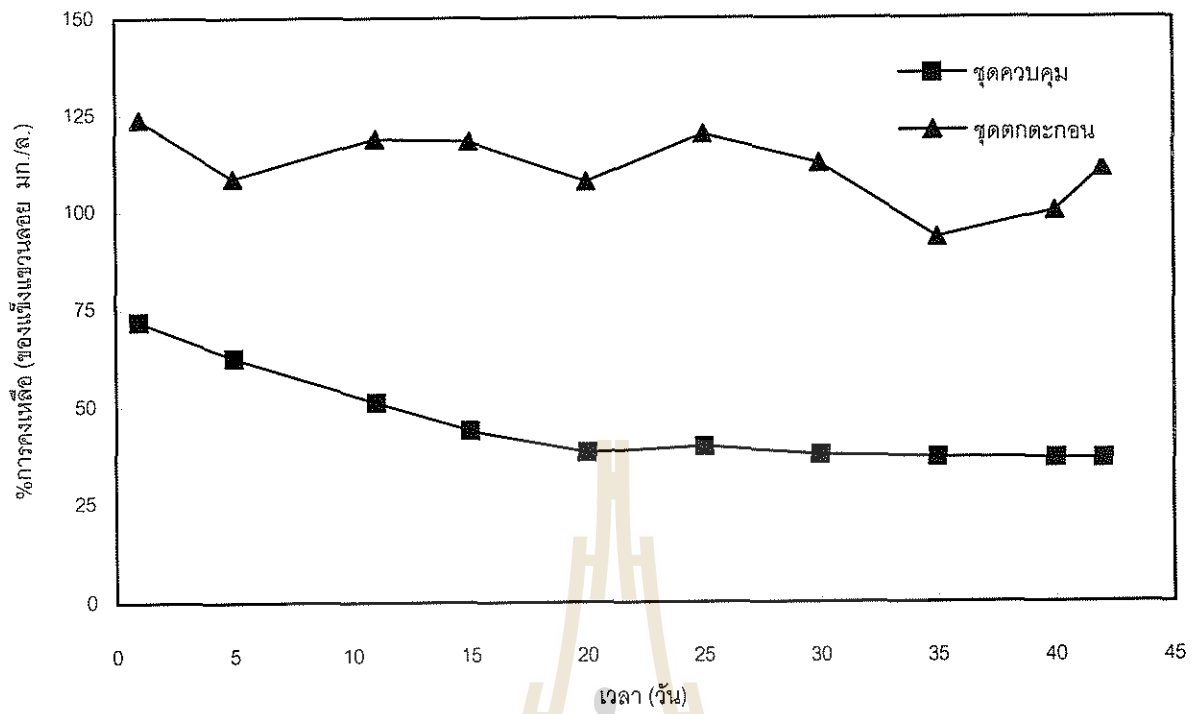
กลไกแบบการชนเป็นกลไกการกำจัดอนุภาคแขวนลอยสามารถตกตะกอนที่ผิวของสารกรอง ในอนุภาควิ่งเข้าชนสารกรอง แล้วติดที่ตัวของสารกรอง การกำจัดด้วยกลไกนี้ จะมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาสำหรับการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

กลไกแบบดูดติดผิวเป็นกลไกที่มีความสำคัญในการกรอง เนื่องจากสามารถกำจัดสารแขวนลอยขนาดเล็กๆ เช่น คอลลอยด์ได้ กลไกแบบดูดติดผิวนี้อาจเกิดขึ้นได้หลายแบบ กล่าวคือเมื่อน้ำดิบไหลผ่านชั้นกรองสารแขวนลอยขนาดเล็กๆ ที่สัมผัสกับผิวของเม็ดทรายกรองจะเกาะติดเป็นเมือกเหนียวรอบทรายกรอง สารแขวนลอยที่เกาะติดอยู่นี้จะอาศัยแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (London-vander Waals forces) และแรงดึงดูดเนื่องจากประจุไฟฟ้า (Coulomb forces) ทั้งนี้ ทรายกรองที่สะอาดจะมีประจุบวกที่ผิวของเม็ดทรายซึ่งพร้อมที่จะดูดติดกับคอลลอยด์ที่ประจุลบได้ (Husiman, 1980,1982)

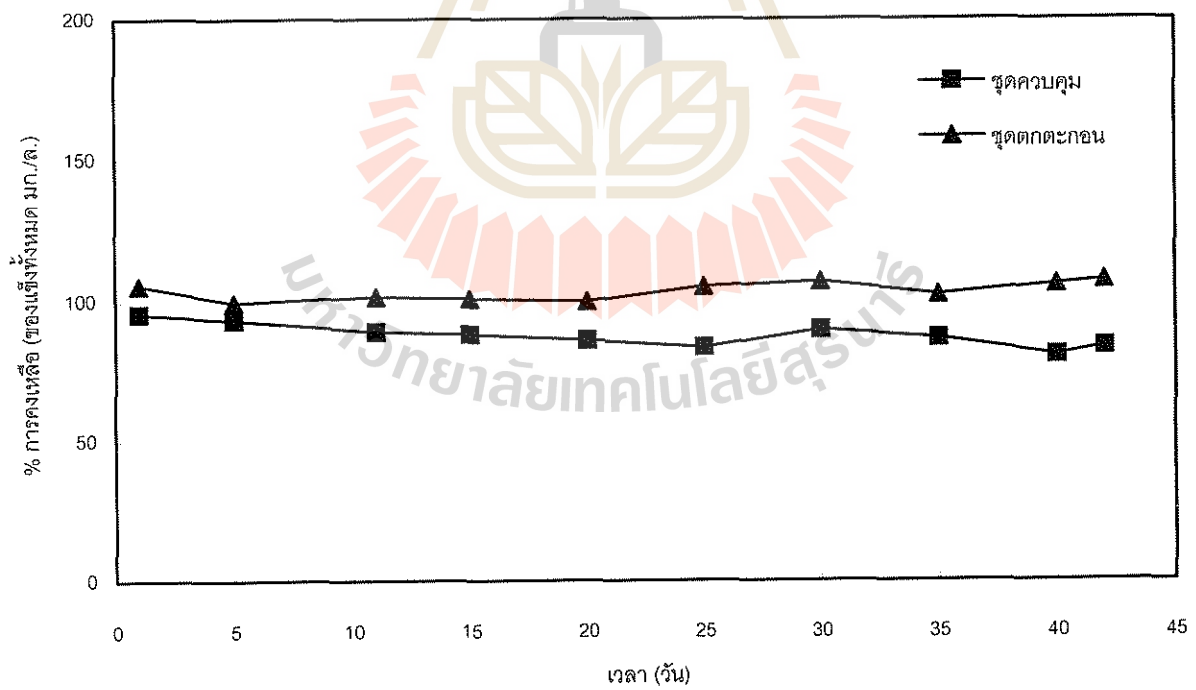


ภาพที่ 4-10 (ก)

ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของแข็งในน้ำกับระยะเวลาการกรอง (ก) ของแข็งละลายน้ำ, (ข) ของแข็งแขวนลอย และ (ค) ของแข็งทั้งหมด



ภาพที่ 4-10 (ข)

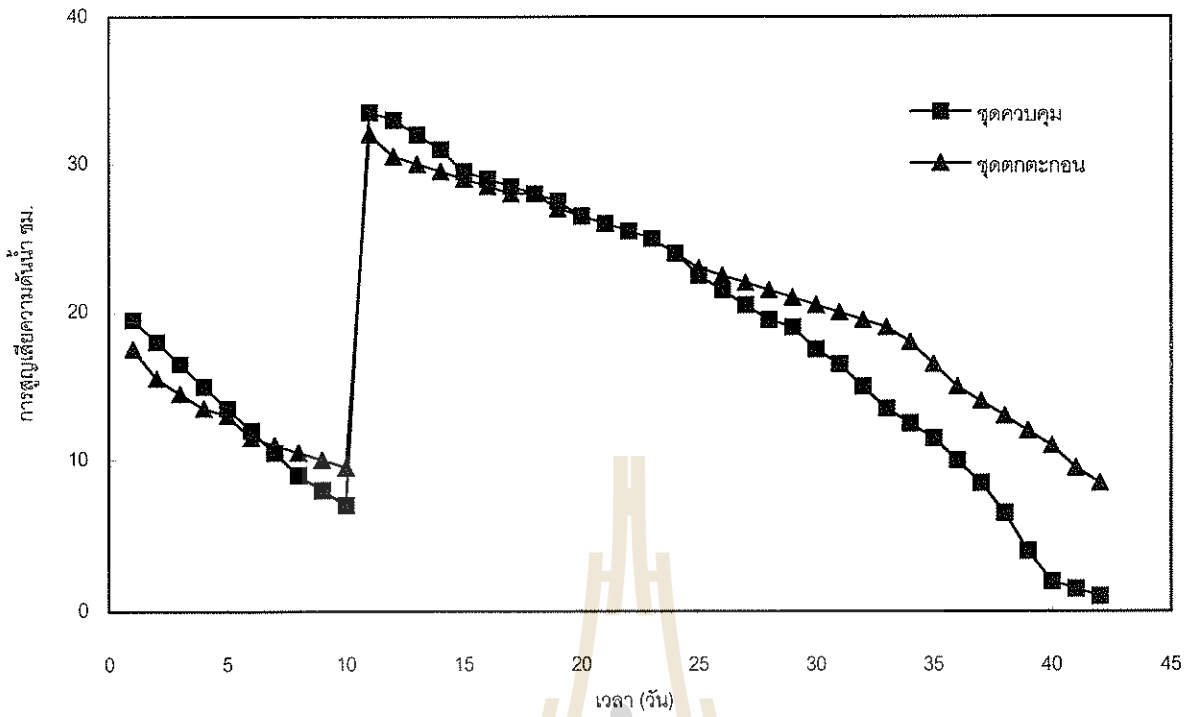


ภาพที่ 4-10 (ค)

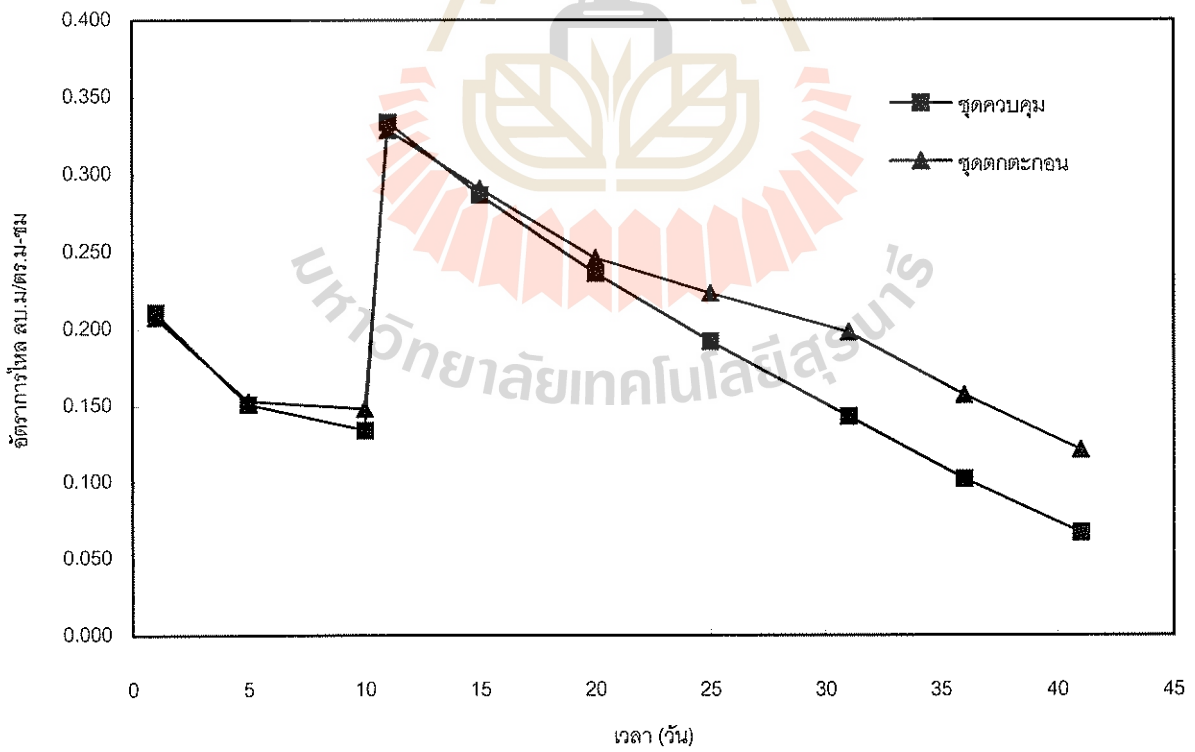
4.3.5 เปรียบเทียบการสูญเสียความดัน และอัตราการไหลกับระยะเวลาการกรอง

น้ำตัวอย่างผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดควบคุม) และน้ำตัวอย่างผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโคแซนแล้วผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดตกตะกอน) นำผลที่ได้มาศึกษาการสูญเสียความดันและอัตราการไหลกับระยะเวลาการกรอง โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียความดันของระบบกับเวลาที่กรองในรูปของกราฟ ดังภาพที่4-11 และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของระบบกับเวลาที่กรองในรูปของกราฟ ดังภาพที่4-12 เริ่มต้นระบบทรายกรองช้ามีการสูญเสียความดันและอัตราการไหลของชุดควบคุมและชุดตกตะกอนคือ 21 และ 23 ซม. มีอัตราการไหล 0.211 และ 0.208 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.ตามลำดับ เมื่อผ่านการกรองได้ 10 วัน พบว่าการสูญเสียความดันลดลงเหลือ 8.5 และ 11.5 ซม. ซึ่งมีอัตราการไหลเท่ากับ 0.134 และ 0.148 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.ตามลำดับ เมื่อผ่านการกรองได้ 10 วันระบบถังทรายกรองช้ามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแล้ว จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของระบบถังทรายกรองช้า โดยชุดควบคุมและชุดตกตะกอนมีอัตราการไหลให้เพิ่มขึ้นคือ 0.334 และ 0.329 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ทำให้มีการสูญเสียความดันเพิ่มขึ้นเป็น 38 และ 37 ซม. ตามลำดับ จากภาพที่4-11 และ 4-12 จะเห็นได้ชัดเจนว่าชุดควบคุมมีการสูญเสียความดันลดลงอย่างช้าๆ จนถึงวันที่ 13 ของวันที่ปรับอัตราไหล มีการสูญเสียความดัน 19 ซม. และมีอัตราการไหล 0.157 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. หลังจากนั้นมีการลดลงของการสูญเสียความดันอย่างรวดเร็ว สำหรับชุดตกตะกอนมีการสูญเสียความดันลดลงอย่างช้าๆ จนถึงวันที่ 25 ของวันที่ปรับอัตราไหลมีการสูญเสียความดัน 26 ซม. และมีอัตราการไหล 0.192 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. หลังจากนั้นมีการลดลงของการสูญเสียความดันอย่างรวดเร็ว สามารถบอกได้ว่าการสูญเสียความดันแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของน้ำคือ การสูญเสียความดันลดลง ทำให้อัตราการไหลของน้ำลดลงด้วย สาเหตุที่ชุดควบคุมมีการลดลงของอัตราการไหลมากกว่าชุดตกตะกอนเพราะชุดควบคุมมีความขุ่นมากกว่าทำให้เกิดการอุดตันของสารแขวนลอยในช่องว่างตัวกรองมากกว่าและเร็วกว่าชุดตกตะกอน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเมื่อพิจารณาจากสมการของ Karmen Cozeny และ Rose ก็ให้ผลทำนองเดียวกัน (Metcalf and Eddy, 1991)

จากภาพที่4-12 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการทำงานของระบบถังทรายกรองช้าจากอัตราการไหลระหว่าง 0.15-0.35 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. พบว่าระยะเวลาที่ใช้งานของชุดควบคุมและชุดตกตะกอนคือ 21 และ 28 วัน ตามลำดับ และสามารถผลิตน้ำได้เฉลี่ย 943 และ 1,322 ล./ครั้งการใช้งาน ตามลำดับ ซึ่งน้ำที่ผลิตได้ของชุดตกตะกอนผลิตได้มากกว่าชุดควบคุมประมาณ 1.4 เท่า

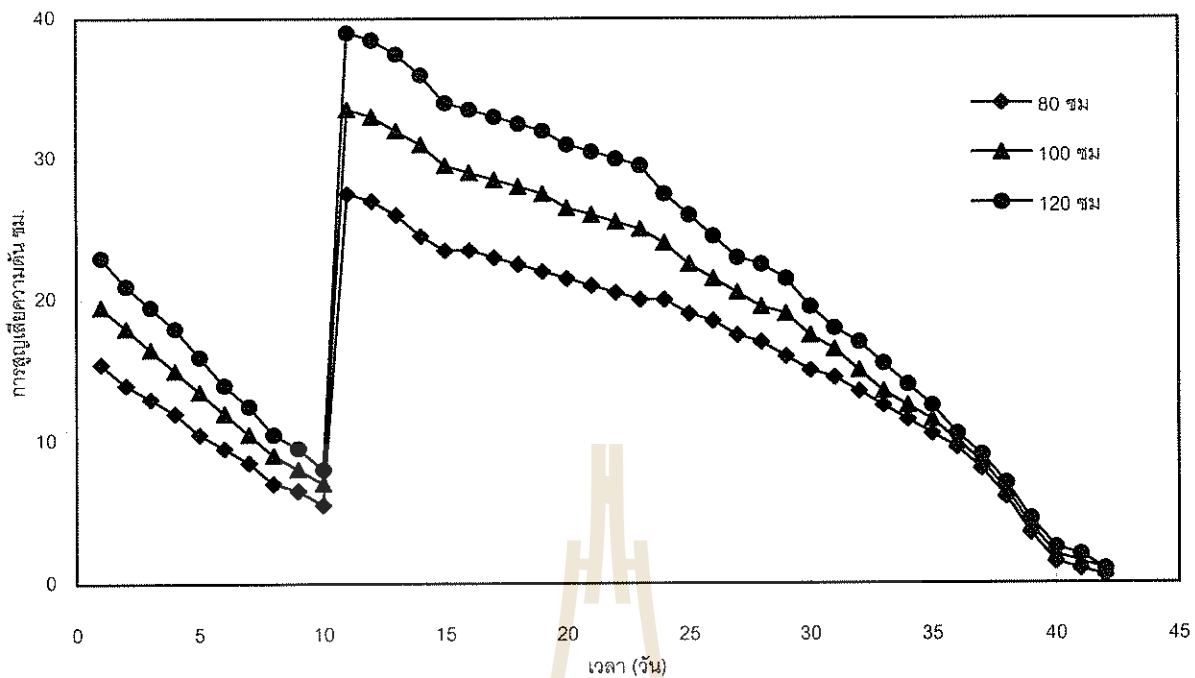


ภาพที่4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การสูญเสียความดันกับระยะเวลาการกรอง

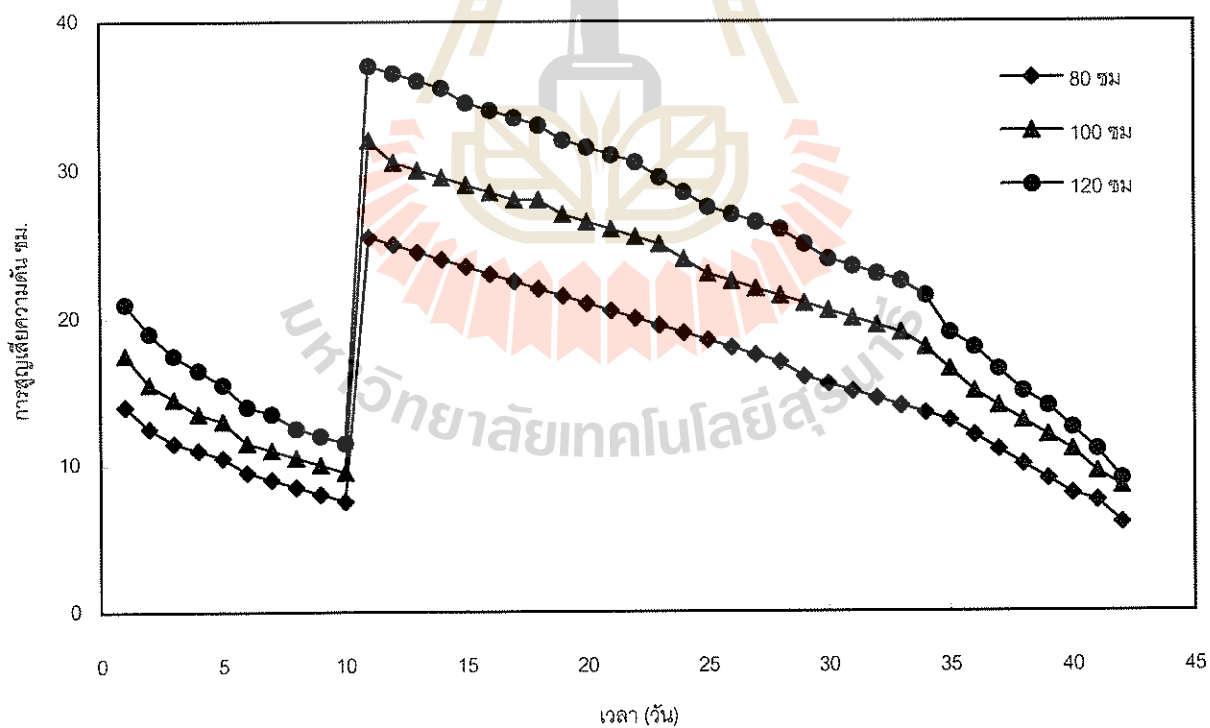


ภาพที่4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล กับระยะเวลาการกรอง

เมื่อเปรียบเทียบการสูญเสียความดันกับความหนาของชั้นกรองของชุดควบคุมและชุดตกตะกอน นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียความดันที่ความหนาของชั้นกรองกับเวลาที่กรองในรูปของกราฟดังภาพที่4-13(ก) พบว่าหลังจากปรับอัตราการไหลเป็น 0.334 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ในวันที่ 10 ของการกรอง การสูญเสียความดันของชุดควบคุมที่ความหนาของชั้นกรอง 80, 100 และ 120 ซม. คือ 27.5, 33.5 และ 39 ซม. ตามลำดับ หลังจากนั้นการสูญเสียความดันที่ความหนาชั้นกรอง 3 ระดับมีอัตราการลดลงใกล้เคียงกัน จนถึงวันที่ 25 ของการกรองที่ความหนาชั้นกรอง 100 และ 120 มีการสูญเสียความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งความหนาชั้นกรอง 120 ซม. มีการลดลงมากกว่าความหนาชั้นกรอง 100 ซม. สำหรับความหนาชั้นกรอง 80 ซม. อัตราการลดลงไม่เปลี่ยนแปลง จนถึงวันที่ 38 ของการกรอง ค่าการสูญเสียความดันที่ความหนาชั้นกรอง 3 ระดับมีค่าใกล้เคียงกันคือ 8 ซม. ในส่วนของชุดตกตะกอนจากภาพที่4-13(ข) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียความดันที่ความหนาชั้นกรองกับเวลาที่กรอง พบว่าที่ความหนาของชั้นกรอง 80, 100 และ 120 ซม. คือ 25, 30.5 และ 36.5 ซม. ตามลำดับ จนถึงวันที่ 34 ของการกรองที่ความหนาชั้นกรอง 100 และ 120 มีการสูญเสียความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งความหนาชั้นกรอง 120 ซม. มีการลดลงมากกว่าความหนาชั้นกรอง 100 ซม. สำหรับความหนาชั้นกรอง 80 ซม. อัตราการลดลงไม่เปลี่ยนแปลง จนกระทั่งวันที่ 41 ของการกรอง ค่าการสูญเสียความดันที่ความหนาชั้นกรอง 80, 100 และ 120 ซม. คือ 6, 8.5 และ 9 ซม. จากการที่การสูญเสียความดันของชุดควบคุมลดลงในระยะเวลาที่เร็วกว่าชุดตกตะกอนเพราะน้ำตัวอย่างของชุดควบคุมมีความขุ่นมากกว่าชุดตกตะกอน ทำให้การอุดตันทับถมในช่องว่างตัวกรองมากกว่าและการอุดตันทับถมมากยิ่งขึ้นทำให้อัตราการไหลลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้การสูญเสียความดันลดลงอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน



ภาพที่4-13 (ก)



ภาพที่4-13 (ข)

ภาพที่4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์การสูญเสียความชื้นกับความหนาชั้นกรอง

(ก) ชุดควบคุม และ (ข) ชุดตกตะกอน

4.3.6 เปรียบเทียบจำนวน โคลิฟอร์มแบคทีเรียกับระยะเวลาการกรอง

น้ำตัวอย่างผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดควบคุม) และน้ำตัวอย่างผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนแล้วผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดตกตะกอน) มาศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย โดยนำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือโคลิฟอร์มกับเวลาที่กรองในรูปของกราฟตามภาพที่ 4-14(ก) พบว่าระบบถังทรายกรองช้าของชุดควบคุมที่ระยะเวลาการกรอง 10 วันแรก มีประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟอร์ม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 25.8-56% หลังจากนั้นวันที่ 10-25 ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 9.4-17.9% เมื่อเพิ่มเชื้อ *E. coli* ในปริมาณ 50,000 เซลล์/100มล. ลงในวันที่ 26 ของการกรอง ซึ่งระบบถังทรายกรองช้าสามารถกำจัดโคลิฟอร์มได้มากกว่า 80% แล้ว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 15.3-17% ทำให้มีจำนวนโคลิฟอร์มมากกว่ามาตรฐานการประปาครหลวงอยู่ เนื่องจากจำนวนโคลิฟอร์มของน้ำตัวอย่างมีค่าสูง การลดจำนวนโคลิฟอร์มให้ได้มาตรฐานจึงทำได้ยากเพราะประสิทธิภาพการกำจัดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำตัวอย่างเป็นอย่างมาก เนื่องจากเราใช้การกรองช้าในการกำจัดโคลิฟอร์มและใช้การตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนในการกำจัดโคลิฟอร์มเท่านั้น สำหรับชุดตกตะกอนที่ระยะเวลาการกรอง 10 วันแรก มีประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟอร์ม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 25.5-95.7% หลังจากนั้นช่วงวันที่ 10-25 ผ่านไปประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 3.8-12.5% ซึ่งยังคงมีโคลิฟอร์มมากกว่ามาตรฐานเช่นกัน เมื่อเพิ่มเชื้อ *E. coli* 50,000 เซลล์/100มล. ในวันที่ 26 ของการกรอง ลง ซึ่งระบบถังทรายกรองช้าสามารถกำจัดโคลิฟอร์มได้มากกว่า 80% แล้ว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 39.3-46.9% สาเหตุที่หลังจากวันที่ 10 ผ่านไปประสิทธิภาพดีขึ้นนั้นเกิดจากชั้นเมือกจุลินทรีย์ซึ่งย่อยสลายสารอินทรีย์ และกรองโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้บริเวณผิวหน้าของชั้นทราย (Huisman, 1980) อีกทั้งยังพบว่าประสิทธิภาพของระบบถังทรายกรองช้าชุดควบคุมสามารถกำจัดโคลิฟอร์มได้ดีกว่าชุดตกตะกอน สาเหตุน่าจะมาจากสารโคโทแซนมีคุณสมบัติเป็นอาหารของโคลิฟอร์มบางชนิด จึงทำให้มีโคลิฟอร์มที่ออกจากชุดตกตะกอนมากกว่าชุดควบคุมก็เป็นได้

จากการเพิ่มเชื้อ *E. coli* 50,000 เซลล์/100มล. ของชุดควบคุมพบว่าเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์มเพิ่มจาก 12.5% เป็น 46.9 % และเมื่อระยะเวลาการกรองผ่านไป 10 วัน ประสิทธิภาพในการกรองของระบบไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วนของชุดตกตะกอนการเพิ่มเชื้อ *E. coli* 50,000 เซลล์/100มล. พบว่า เปอร์เซ็นต์การคงเหลือของโคลิฟอร์ม ไม่มีผลต่อระบบ เพราะขบวนการตกตะกอนสามารถลดโคลิฟอร์มจากน้ำตัวอย่างก่อนเข้าระบบทรายกรองช้า คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 17-31.5% จากตารางที่ 4-2 ความหนาชั้นกรองที่ 80 ซม. ของชุดควบคุมมีประสิทธิภาพใน

การกำจัดโคลิฟอร์ม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 21.9% และที่ความหนาชั้นกรอง 100 และ 120 ซม. มีประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่า 3.6% และ 11.6% เมื่อเทียบกับความหนาชั้นกรอง 80 ซม. ในส่วนชุดตกตะกอนความหนาชั้นกรองที่ 80 ซม. ของชุดควบคุมมีประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟอร์มคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 17% และที่ความหนาชั้นกรอง 100 และ 120 ซม. มีประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่า 6% และ 4.5% เมื่อเทียบกับความหนาชั้นกรอง 80 ซม.

ตารางที่ 4-2 ค่าจำนวนโคลิฟอร์มตามความหนาของชั้นกรอง

รายละเอียด (ชุดตกตะกอน)	ความหนา ชั้นกรอง ซม.	จำนวน ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ค่าความเบี่ยงเบน มาตรฐาน
โคลิฟอร์ม (น้ำเข้า) เซลล์/100มล.	80	10	3.84×10^4	10.67
	100	10	3.84×10^4	10.67
	120	10	3.84×10^4	10.67
โคลิฟอร์ม(ออก) เซลล์/100มล.	80	8	6.30×10^3	1.25
	100	9	5.40×10^3	0.85
	120	10	4.8×10^3	2.86
<i>E.coli</i> (น้ำเข้า) เซลล์/100มล.	80	10	0.30×10^3	3.74
	100	10	0.30×10^3	3.74
	120	10	0.30×10^3	3.74
<i>E.coli</i> (น้ำออก) เซลล์/100มล.	80	8	0.125×10^3	0.55
	100	10	0	0
	120	10	0	0
โคลิฟอร์มทั้งหมด (น้ำเข้า) เซลล์/100มล.	80	10	7.00×10^4	0.94
	100	10	7.00×10^4	0.94
	120	10	7.00×10^4	0.94
โคลิฟอร์มทั้งหมด (น้ำออก) เซลล์/100มล.	80	8	3.50×10^3	0.90
	100	10	2.60×10^3	1.20
	120	10	1.40×10^3	1.05

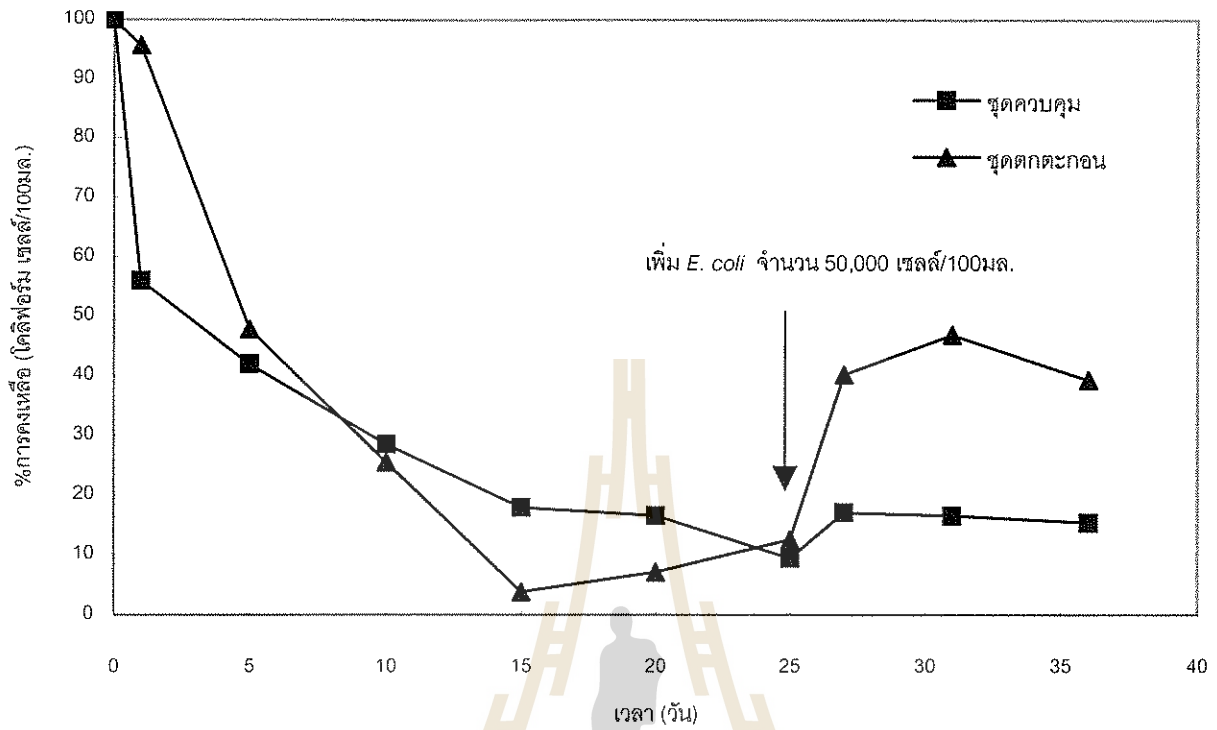
ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

รายละเอียด (ชุดควบคุม)	ความหนา ชั้นกรอง (ซม.)	จำนวน ตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย	ค่าความเบี่ยงเบน มาตรฐาน
โคลิฟอร์ม (น้ำเข้า) เซลล์/100มล.	80	10	6.71×10^4	9.88
	100	10	6.71×10^4	9.88
	120	10	6.71×10^4	9.88
โคลิฟอร์ม(ออก) เซลล์/100มล.	80	8	1.35×10^4	2.75
	100	9	1.13×10^4	2.65
	120	10	6.30×10^3	3.47
<i>E.coli</i> (น้ำเข้า) เซลล์/100มล.	80	10	1.00×10^4	3.74
	100	10	1.00×10^4	3.74
	120	10	1.00×10^3	3.74
<i>E.coli</i> (น้ำออก) เซลล์/100มล.	80	8	3.33×10^3	1.55
	100	10	1.67×10^3	1.21
	120	10	1.20×10^3	1.03
โคลิฟอร์มทั้งหมด (น้ำเข้า) เซลล์/100มล.	80	10	6.60×10^7	4.27
	100	10	6.60×10^7	4.27
	120	10	6.60×10^7	4.27
โคลิฟอร์มทั้งหมด (น้ำออก) เซลล์/100มล.	80	8	1.40×10^4	1.36
	100	10	1.33×10^4	0.95
	120	10	9.00×10^3	0.74

สำหรับ *E. coli* จากภาพที่ 4-14(ข) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ *E. coli* กับเวลาที่กรอง พบว่าระบบดักทรายกรองช้าของชุดควบคุมที่ระยะเวลาการกรอง 10 วันแรกมีประสิทธิภาพในการกำจัด *E. coli* คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 12-51% หลังจากนั้นช่วงวันที่ 10-25 ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 9.5-21.2% ซึ่งยังมี *E. coli* มากกว่ามาตรฐานการประปาฯ หลงอยู่ เมื่อเพิ่มเชื้อ *E. coli* 50,000 เซลล์/100มล. ในวันที่

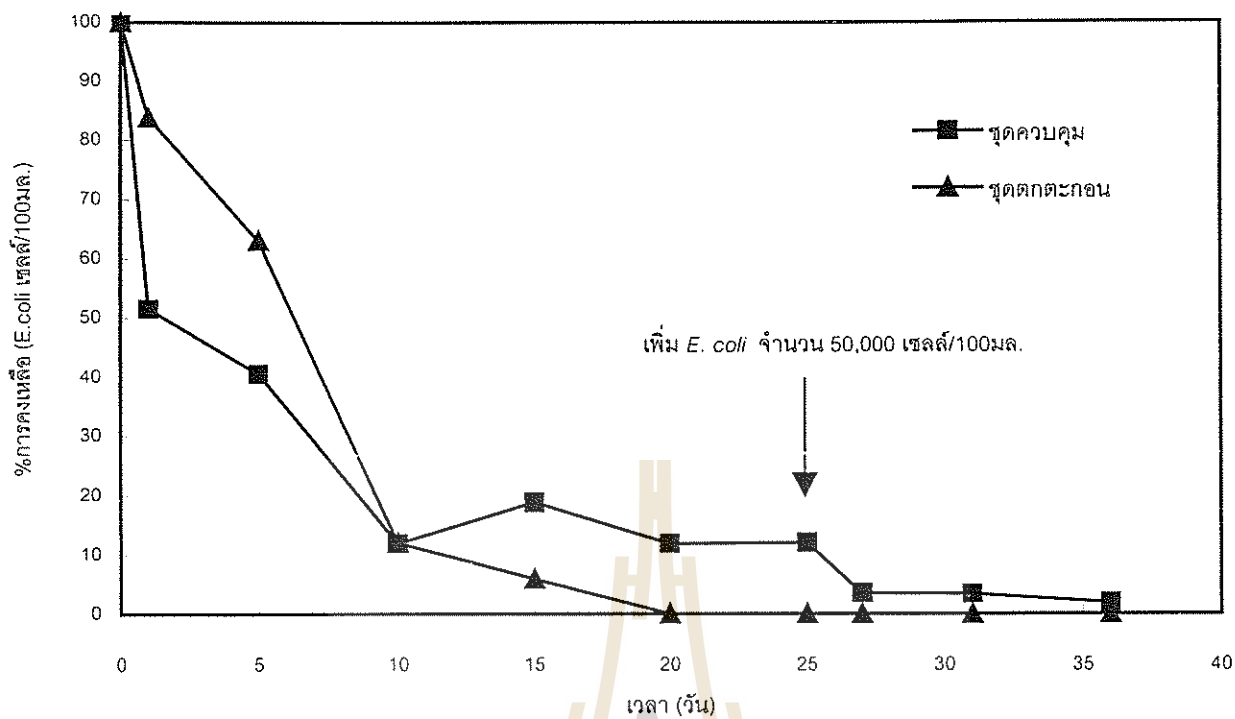
26 ของการกรอง ลงในน้ำตัวอย่างทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 1.9-3.5% เนื่องจากจำนวน *E. coli* ที่เข้าระบบถึงทรายกรองช้ามีมาก และจำนวน *E. coli* ที่ออกมีเท่าเดิมจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่ม อีกเหตุผลหนึ่งคือระยะเวลาการกรองผ่านไปหลายวันชั้นเมือกจุลทรีย์ระยะหลังนี้มีการทับถมของชั้นเมือกมากทำให้มีความหนามากขึ้น สำหรับชุดตกตะกอนที่ระยะเวลาการกรอง 10 วันแรกมีประสิทธิภาพในการกำจัด *E. coli* คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 12-63% หลังจากนั้นวันที่ 10-25 ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 11% จนไม่สามารถตรวจพบได้ เมื่อเพิ่มเชื้อ *E. coli* 50,000 เซลล์/100มล. ในวันที่ 26 ของการกรองลงในน้ำตัวอย่าง ไม่ปรากฏว่ามี *E. coli* เหลืออยู่เลยเช่นกัน น้ำตัวอย่างที่ผ่านการตกตะกอนและการกรองสามารถ ลดจำนวน *E. coli* ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการประปานครหลวงได้ จากการเพิ่มเชื้อ *E. coli* 50,000 เซลล์/100มล. ของชุดควบคุมพบว่าเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของ *E. coli* ลดลงจาก 12% เป็น 1.9 % และเมื่อระยะเวลาการกรองผ่านไป 10 วัน ประสิทธิภาพในการกรองของระบบไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วนของชุดตกตะกอน การเพิ่มเชื้อ *E. coli* 50,000 เซลล์/100มล. พบว่าไม่มีผลต่อระบบ จากตารางที่ 4-2 ความหนาชั้นกรองที่ 80 ซม. ชุดควบคุมมีประสิทธิภาพในการกำจัด *E. coli* คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 24.39% และที่ความหนาชั้นกรอง 100 และ 120 ซม. มีประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่า 16.9% และ 13.3% เมื่อเทียบกับความหนาชั้นกรอง 80 ซม. ในส่วนของชุดตกตะกอน ที่ความหนาชั้นกรอง 80 ซม. มีประสิทธิภาพในการกำจัด *E. coli* คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 41.7% และที่ความหนาชั้นกรอง 100 และ 120 ซม. มีประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่า 58.3% และ 58.3% เมื่อเทียบกับความหนาชั้นกรอง 80 ซม.

ในส่วนของโคลิฟอร์มทั้งหมด จากภาพที่ 4-14(ค) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโคลิฟอร์มทั้งหมดกับเวลาที่กรอง พบว่าปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำตัวอย่าง (ชุดควบคุม) มีค่าในช่วง $9 \times 10^8 - 1.16 \times 10^{10}$ เซลล์/100มล. ระยะแรกกำจัดโคลิฟอร์มทั้งหมดเหลือ $4 \times 10^6 - 9.9 \times 10^6$ เซลล์/100มล. แต่หลังจากวันที่ 10 ผ่านไปประสิทธิภาพดีขึ้นสามารถกำจัดเหลือ $5 \times 10^5 - 1.2 \times 10^6$ เซลล์/100มล. สำหรับน้ำที่ผ่านการตกตะกอน และผ่านระบบทรายกรองช้า(ชุดตกตะกอน) สามารถลดจำนวนโคลิฟอร์มทั้งหมดเหลือ $7 \times 10^6 - 3.6 \times 10^7$ เซลล์/100มล. ระยะแรกกำจัดโคลิฟอร์มทั้งหมดเหลือ $6.2 \times 10^5 - 2.1 \times 10^6$ เซลล์/100มล. แต่หลังจากวันที่ 10 ผ่านไปประสิทธิภาพดีขึ้นสามารถกำจัดเหลือ $3 \times 10^4 - 1.6 \times 10^5$ เซลล์/100มล.

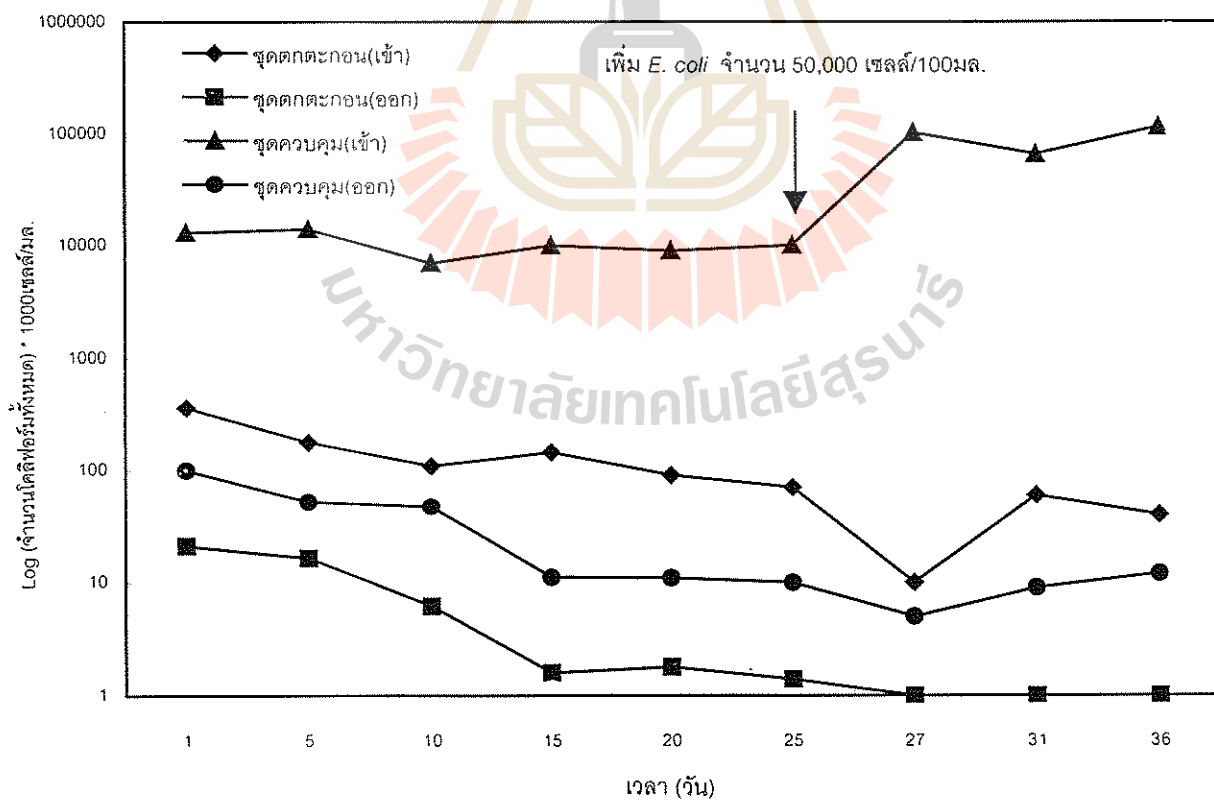


ภาพที่4-14 (ก)

ภาพที่4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียกับระยะเวลาการกรอง
(ก) โคลิฟอร์ม, (ข) *E. coli* และ (ค) โคลิฟอร์มทั้งหมด



ภาพที่4-14 (ข)



ภาพที่4-14 (ค)

4.4 จลนศาสตร์การตายของโคลิฟอร์ม

ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ของ โคลิฟอร์ม และ *E. coli* ในระบบถังทราयरองช้า เมื่อน้ำตัวอย่างผ่านระบบถังทราयरองช้า (ชุดควบคุม) และน้ำตัวอย่างผ่านการตกตะกอนด้วยสารไลโทแซนแล้วผ่านระบบถังทราयरองช้า (ชุดตกตะกอน) นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) โดยวิเคราะห์แบบ t -test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เทียบกับข้อมูลที่อยู่ในรูปของสมการปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์ หนึ่ง และ สอง ตามสมการที่ 4.1 จนถึง 4.3 (Metcalf & Eddy, 1991)

ก. ปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์

$$Y = Y_0 - kt \quad (4.1)$$

โดยที่ Y คือ เปอร์เซ็นต์การมีชีวิตที่เวลา t

Y_0 คือ เปอร์เซ็นต์การมีชีวิตที่เวลา $t=0$

k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา

t คือ เวลา

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ t ซึ่งค่าความชันที่ได้คือค่า k

ข. ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง

$$\ln(Y) = \ln(Y_0) - kt \quad (4.2)$$

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(Y)$ และ t ซึ่งค่าความชันที่ได้คือค่า k

ค. ปฏิกิริยาอันดับที่สอง

$$1/(Y) = 1/(Y_0) + kt \quad (4.3)$$

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/(Y)$ และ t ซึ่งค่าความชันที่ได้คือค่า k

เมื่อผ่านการวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว พบว่าการลดลงของโคลิฟอร์ม และ *E. coli* สามารถยอมรับได้ว่าเป็นการลดลงตามอันดับปฏิกิริยาที่หนึ่ง ที่ความเชื่อมั่น 95% (กัลยา, 2539) ซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎี เพราะในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ตามสม

การที่ 4.4 นอกจากจะถูกนำมาใช้ในกระบวนการย่อยสลายของสารแล้ว ยังถูกนำไปใช้ในกระบวนการอื่นๆ ด้วย อาทิเช่น การเติมอากาศในน้ำและการกำจัดแก๊สออกจากรู้น้ำเป็นต้น ในบางกรณีอาจนำปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งมาใช้อธิบายได้ ถึงแม้ว่าปฏิกิริยานั้นไม่ใช่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งจริงๆ เช่น อัตราการตายของจุลินทรีย์ ซึ่งเราถือว่ามันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือจำนวนของจุลินทรีย์ที่ยังมีชีวิตอยู่ (จางจินต์, 2541)

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (4.4)$$

โดยที่ C คือ จำนวนโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่เวลา t , เซลล์/100มล.

C_0 คือ จำนวนโคลิฟอร์มแบคทีเรียเริ่มต้น $t = 0$, เซลล์/100มล.

T คือ เวลา, ชม.

k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา, ชม.⁻¹

จากข้อมูลของอันดับปฏิกิริยาที่หนึ่งนำมาแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การมีชีวิต ดังภาพที่ 4-15 ซึ่งภาพที่ 4-15(ก) หาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของ โคลิฟอร์มพบว่า สมการเส้นตรงของน้ำตัวอย่างที่ผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดควบคุม) คือ

$$Y = -0.0029X + 4.0338, \text{ ให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) คือ } 0.0029 \text{ ชม.}^{-1}$$

สมการเส้นตรงของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการตกตะกอนแล้วผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดตกตะกอน) คือ

$$Y = -0.0044X + 4.199, \text{ ให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) คือ } 0.0044 \text{ ชม.}^{-1}$$

จากภาพที่ 4-15(ข) หาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของ *E. coli* พบว่า

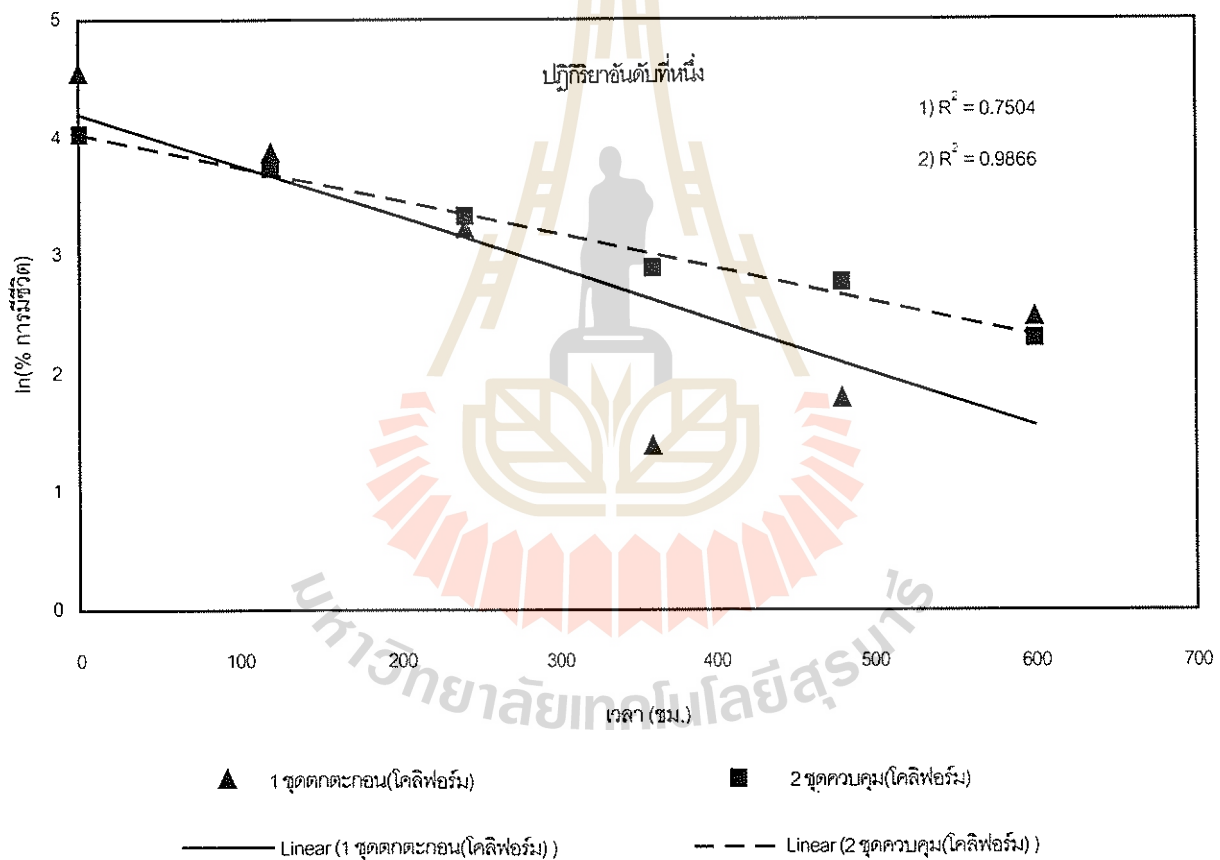
สมการเส้นตรงของน้ำตัวอย่างที่ผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดควบคุม) คือ

$$Y = -0.0025X + 3.75, \text{ ให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) คือ } 0.0025 \text{ ชม.}^{-1}$$

สมการเส้นตรงของน้ำตัวอย่างที่การตกตะกอนแล้วผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดตกตะกอน) คือ

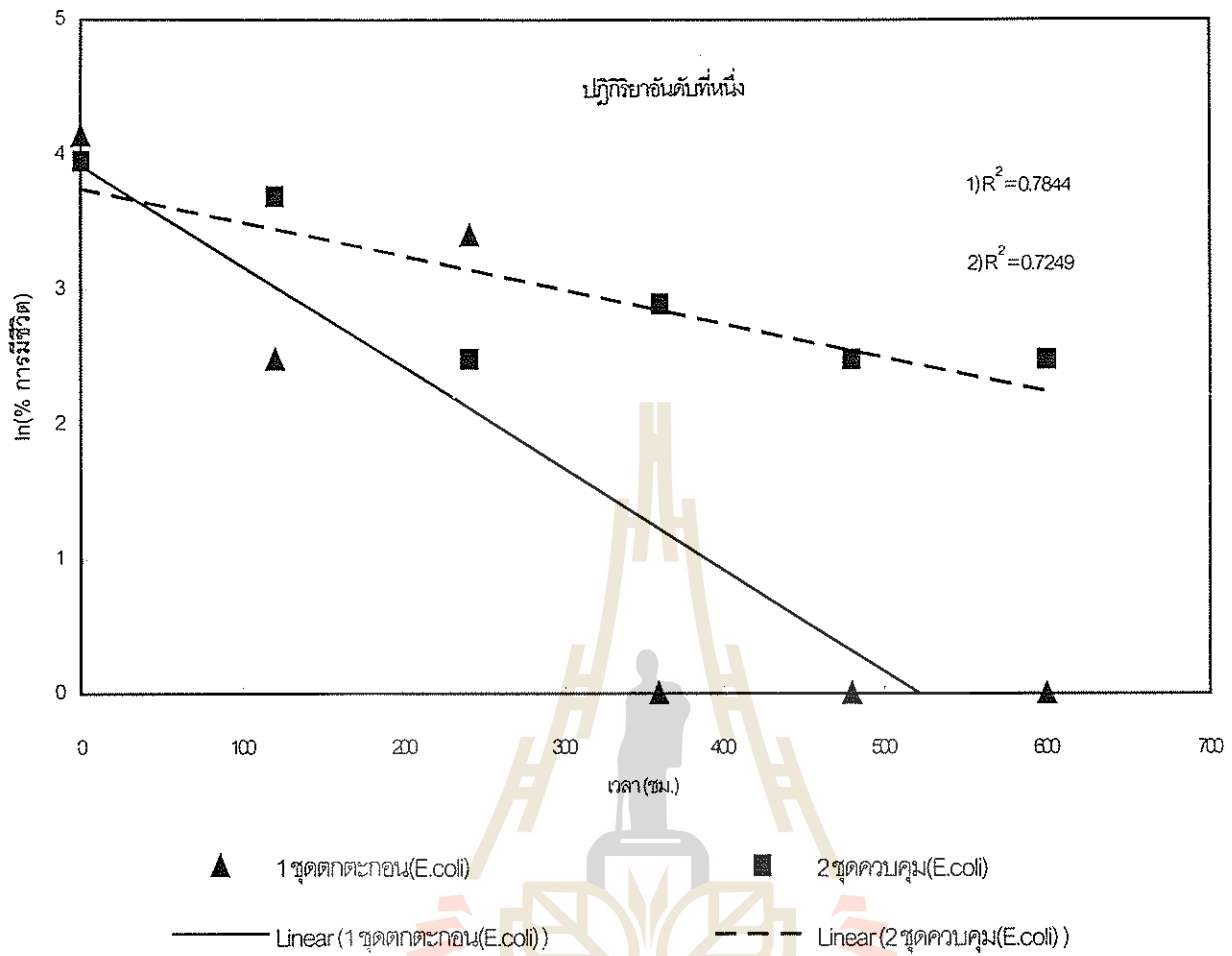
$$Y = -0.0075X + 3.992, \text{ ให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) คือ } 0.0075 \text{ ชม.}^{-1}$$

จากค่า k ที่ได้ พบว่า ค่า k ของน้ำตัวอย่างที่การตกตะกอนแล้วผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดตกตะกอน) มีค่า k ของโคลิฟอร์ม และ *E. coli* มากกว่าน้ำตัวอย่างที่ผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดควบคุม) 1.5 และ 3 เท่าตัว ตามลำดับ จึงบอกได้ว่าระบบถังทรายกรองช้าของน้ำตัวอย่างที่การตกตะกอนแล้วผ่านระบบถังทรายกรองช้า (ชุดตกตะกอน) สามารถกำจัดโคลิฟอร์ม และ *E. coli* ได้ดีกว่าน้ำตัวอย่างที่ผ่านระบบถังทรายกรองช้าแต่ไม่ได้ผ่านการตกตะกอนด้วยสารตกตะกอน



ภาพที่4-15 (ก)

ภาพที่4-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การมีชีวิตกับเวลา ของปฏิกิริยา
อันดับที่หนึ่ง (ก) โคลิฟอร์ม และ (ข) *E.coli*



ภาพที่ 4-15 (ข)

ในการศึกษาจลศาสตร์การตายของโคลิฟอร์มแบคทีเรียจากปริมาณความเข้มข้นของสารสัมผัสและสารโคโทเซน โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสมการของ Chick โดยอัตราการตายของจุลชีพสัมพันธ์กันกับปฏิริยาอันดับที่หนึ่ง ดังแสดงในสมการที่4.5 จากการวิเคราะห์สมการดังกล่าว จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุลชีพกับระยะเวลา ซึ่งแสดงในสมการที่4.6 (James M. Montgomery, 1985)

$$dN / dt = -kt \quad (4.5)$$

โดยที่ N คือ จำนวนจุลชีพที่เวลา t
 k คือ ค่าคงที่ของปฏิริยา (ชม.⁻¹)
 t คือ ระยะเวลาสัมผัสจุลชีพ (ชม.)

จากการอินทิเกรตสมการที่4.5 เพื่อนำมาหาค่า N/N_0 ระยะเวลาใดๆ ได้ว่า

$$\ln(N/N_0) = -kt \quad (4.6)$$

จากนั้น Watson ได้ใช้สมการของ Chick เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุลชีพกับเวลาที่ใช้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารฆ่าเชื้อ ดังแสดงในสมการที่4.7

$$-k' C^n = -k \quad (4.7)$$

เมื่อนำสมการที่4.7มาแทนในสมการที่4.6 จะได้ดังสมการที่4.8 เรียกว่า สมการ Chick-Watson

$$\ln(N/N_0) = -k' C^n t \quad (4.8)$$

โดยที่ k' คือ ค่าคงที่ของปฏิริยา (ล./มก.-ชม.)
 n คือ ค่าคงที่ของสารฆ่าเชื้อ
 C คือ ความเข้มข้นของสารฆ่าเชื้อ (มก./ล.)
 t คือ ระยะเวลาสัมผัสจุลชีพ (ชม.)

จากการทดลองนำข้อมูลมาวิเคราะห์ตามสมการที่ 4.8 เพื่อหาค่า k' โดยเริ่มต้นกำหนดให้ค่า $n = 1$ และปริมาณความเข้มข้นของสารส้มที่ 20-110 มก./ล. และสารโคโทแซนที่ 10-50 มก./ล. ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4-3

จากการวิเคราะห์เบื้องต้นตามสมการที่ 4.8 ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4-3 จากนั้นจะทำการนำค่า k' ของโคลิฟอร์ม และ *E. coli* มาวิเคราะห์ ยกเว้น ค่า k' ของ *E. coli* ที่ใช้สารโคโทแซนในสถานะ *E. coli* เริ่มต้น 1,000, 5,000 และ 10,000 เซลล์/100มล. เพราะไม่สามารถตรวจพบจำนวน *E. coli* ได้ที่ความเข้มข้นของสารโคโทแซนมากกว่า 20 มก./ล. จึงทำให้มีค่า k' ในการวิเคราะห์เพียง 2 จุดเท่านั้น จากนั้นนำค่า k' ทั้งหมดที่ได้ไปหาค่าคงที่ของสารฆ่าเชื้อ (n)

จากสมการที่ 4.8 ให้ระยะเวลาในการกำจัดจุลชีพมีประสิทธิภาพคงที่ โดยให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดจุลชีพ 99% และค่า k' มีค่าคงที่ ฉะนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ 4.9

$$C^n t_p = \text{ค่าคงที่} \quad (4.9)$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของสารฆ่าเชื้อ (มก./ล.)

n คือ ค่าคงที่ของสารฆ่าเชื้อ

t_p คือ ระยะเวลาการกำจัดจุลชีพให้มีประสิทธิภาพคงที่

จากสมการที่ 4.9 นำมาวิเคราะห์ในรูป Log ได้

$$n \text{Log}(C) + \text{Log}(t_p) = \text{ค่าคงที่} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ 4.10 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารฆ่าเชื้อ กับระยะเวลาการกำจัดจุลชีพให้มีประสิทธิภาพคงที่ในรูปของกราฟ Log-Log ดังแสดงในภาพที่ 4-16 และ 4-17 เพื่อที่จะหาค่า n หลังจากทำการทดลองแบบวิธีซ้ำกลับไปกลับมาหลายครั้ง (Trial & Error) จนค่า n ซึ่งได้จากความชันของกราฟ ที่ได้จากสมการ 4.8 และ ค่า n ซึ่งได้จากความชันของกราฟแบบ Log-Log มีค่าเท่ากัน จึงสรุปได้ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่4-3 ผลของข้อมูลทีวีเคราะห์ตามสมการ Chick-Watson

รายละเอียด	N/N_0	C (มก./ล.)	n = 1	t (ชม.)	k' (ล./มก.-ชม.)
สารส้ม					
โคลิฟอร์ม	0.775	20	1	0.683	-0.01865
เริ่มต้น100,000 เซลล์/100มล.	0.636	30	1	0.683	-0.02208
	0.348	40	1	0.683	-0.03862
	0.298	50	1	0.683	-0.03543
	0.269	60	1	0.683	-0.03203
	0.267	70	1	0.683	-0.02761
	0.26	80	1	0.683	-0.02464
	0.233	90	1	0.683	-0.02369
	0.22	100	1	0.683	-0.02216
	0.127	110	1	0.683	-0.02745
สารส้ม					
<i>E. coli</i>	0.618	20	1	0.683	-0.03521
เริ่มต้น1,000 เซลล์/100มล.	0.389	30	1	0.683	-0.04606
	0.306	40	1	0.683	-0.04332
	0.153	50	1	0.683	-0.05495
	0.076	60	1	0.683	-0.06285
	0.076	70	1	0.683	-0.05388
สารส้ม					
<i>E. coli</i>	0.614	20	1	0.683	-0.03569
เริ่มต้น5,000 เซลล์/100มล.	0.378	30	1	0.683	-0.04746
	0.209	40	1	0.683	-0.05727
	0.134	50	1	0.683	-0.05883
	0.117	60	1	0.683	-0.05233
	0.092	70	1	0.683	-0.04988
	0.042	80	1	0.683	-0.05799
	0.023	90	1	0.683	-0.06134

ตารางที่4-3 (ต่อ)

รายละเอียด	N/N_0	C (มก./ล.)	n = 1	t (ชม.)	k' (ล./มก.-ชม.)
สารส้ม					
<i>E. coli</i>					
เริ่มต้น10,000 เซลล์/100มล.	0.689	20	1	0.683	-0.02726
	0.348	30	1	0.683	-0.05149
	0.258	40	1	0.683	-0.04957
	0.189	50	1	0.683	-0.04876
	0.106	60	1	0.683	-0.05474
	0.129	70	1	0.683	-0.04281
	0.091	80	1	0.683	-0.04385
	0.038	90	1	0.683	-0.05317
	0.045	100	1	0.683	-0.04538
	0.03	110	1	0.683	-0.04665
สารส้ม					
<i>E. coli</i>					
เริ่มต้น50,000 เซลล์/100มล.	0.672	20	1	0.683	-0.02909
	0.389	30	1	0.683	-0.04606
	0.263	40	1	0.683	-0.04886
	0.173	50	1	0.683	-0.05135
	0.162	60	1	0.683	-0.04439
	0.046	70	1	0.683	-0.06437
	0.048	80	1	0.683	-0.05555
	0.165	90	1	0.683	-0.02930
	0.046	100	1	0.683	-0.04506
	0.033	110	1	0.683	-0.04538

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

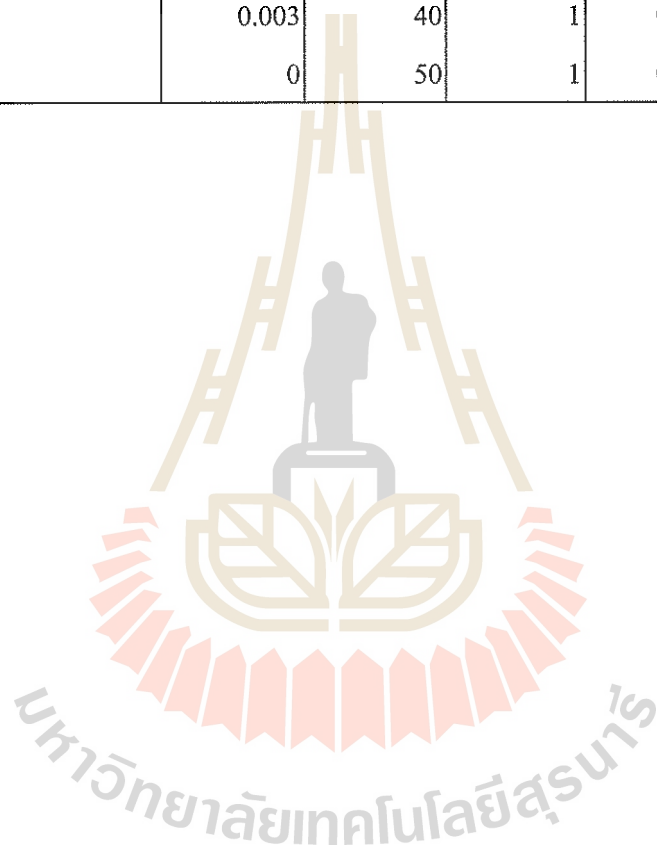
รายละเอียด	N/N_0	C (มก./ล.)	n = 1	t (ชม.)	k' (ล./มก.-ชม.)
โคลิฟอร์ม	0.422	10	1	0.683	-0.12626
เริ่มต้น 100,000 เซลล์/100มล.	0.21	20	1	0.683	-0.11419
	0.112	30	1	0.683	-0.10679
	0.06	40	1	0.683	-0.10293
	0.034	50	1	0.683	-0.09897
โคลิฟอร์ม	0.564	10	1	0.683	-0.08381
<i>E. coli</i>	0.141	20	1	0.683	-0.14334
เริ่มต้น 1,000 เซลล์/100มล.	0	30	1	0.683	*
	0	40	1	0.683	*
	0	50	1	0.683	*
โคลิฟอร์ม	0.403	10	1	0.683	-0.13300
<i>E. coli</i>	0.057	20	1	0.683	-0.20961
เริ่มต้น 5,000 เซลล์/100มล.	0	30	1	0.683	*
	0	40	1	0.683	*
	0	50	1	0.683	*
โคลิฟอร์ม	0.343	10	1	0.683	-0.15659
<i>E. coli</i>	0.056	20	1	0.683	-0.21091
เริ่มต้น 10,000 เซลล์/100มล.	0	30	1	0.683	*
	0	40	1	0.683	*
	0	50	1	0.683	*

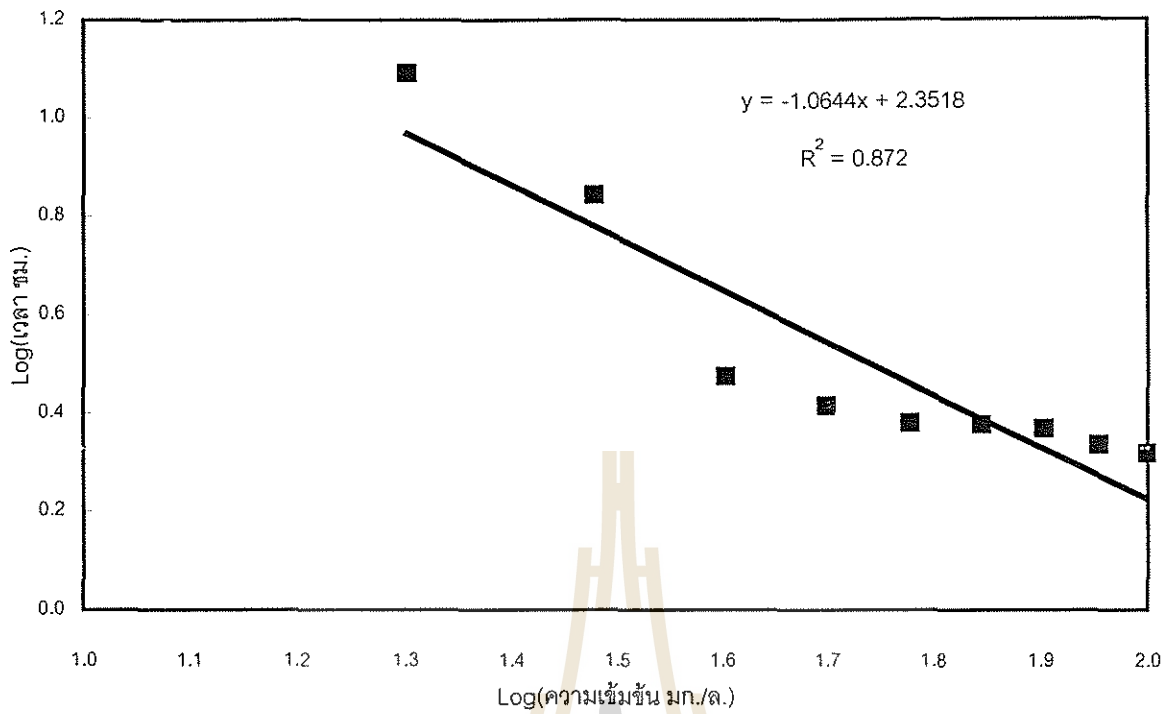
* หาค่าไม่ได้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

รายละเอียด	N/N_0	C (มก./ล.)	n = 1	t (ชม.)	k' (ล./มก.-ชม.)
โคโทเซน					
<i>E. coli</i>	0.242	10	1	0.683	-0.20763
เริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล.	0.046	20	1	0.683	-0.22530
	0.012	30	1	0.683	-0.21575
	0.003	40	1	0.683	-0.21253
	0	50	1	0.683	*

* หาค่าไม่ได้

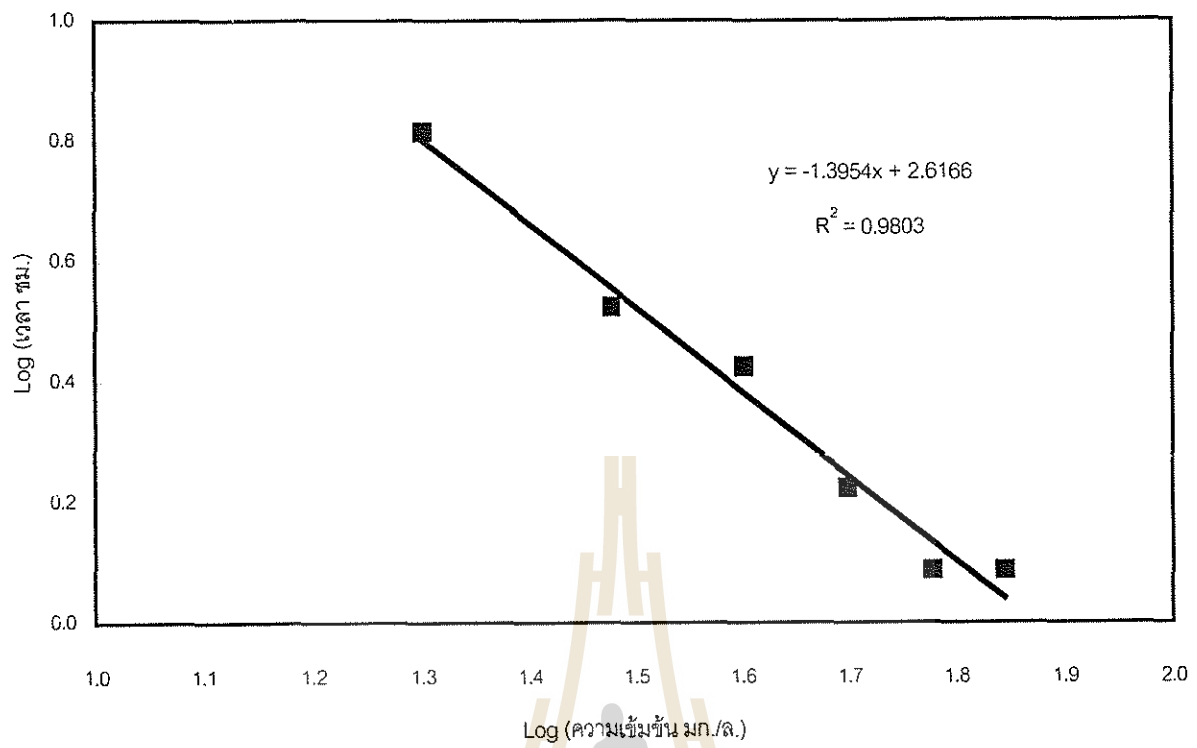




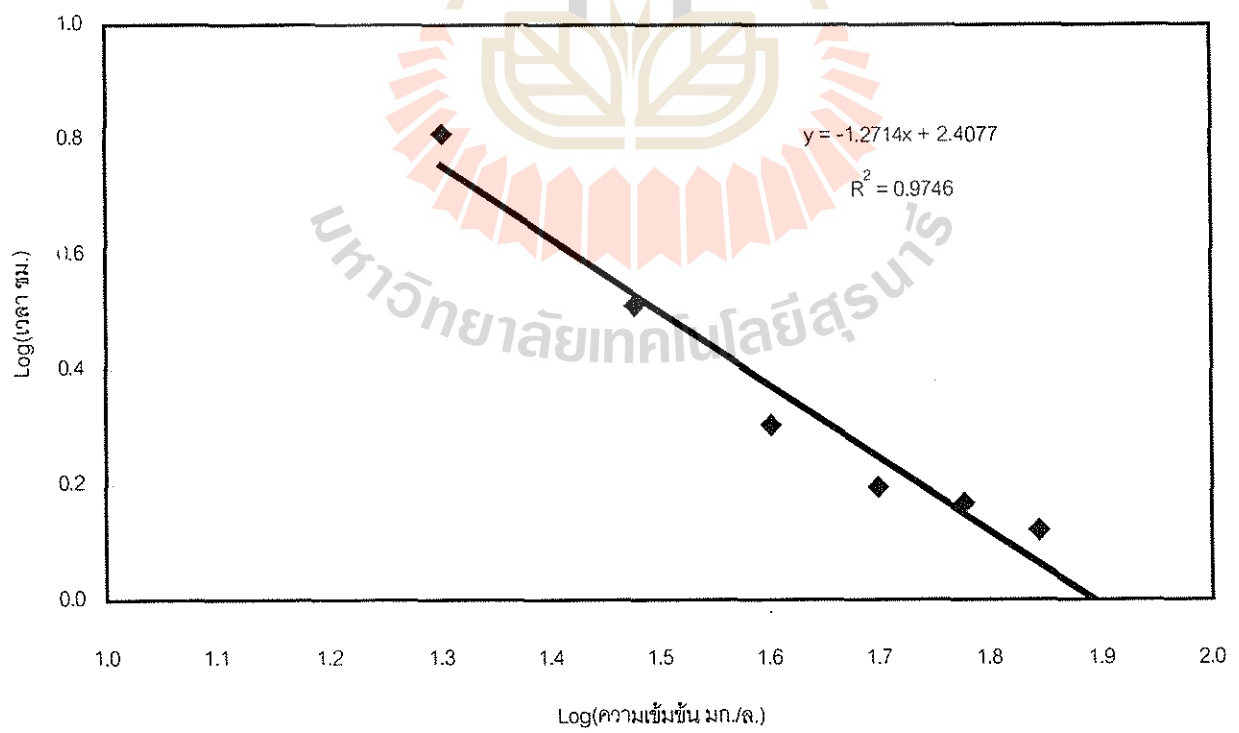
ภาพที่4-16 (ก)

ภาพที่4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับระยะเวลาการกำจัดจุลชีพให้มีประสิทธิภาพคงที่

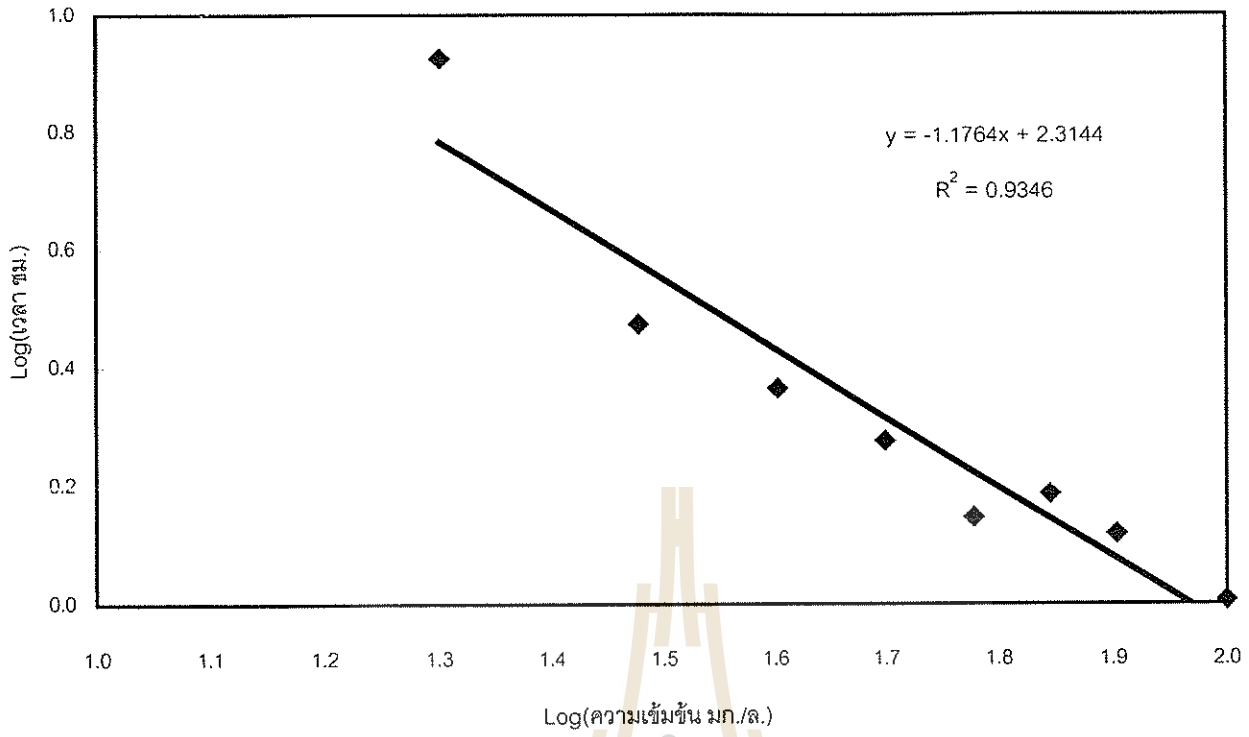
- (ก) สารส้ม (โคลิฟอร์มเริ่มต้น 100,000 เซลล์/100มล.)
- (ข) สารส้ม (*E. coli* เริ่มต้น 1,000 เซลล์/100มล.)
- (ค) สารส้ม (*E. coli* เริ่มต้น 5,000 เซลล์/100มล.)
- (ง) สารส้ม (*E. coli* เริ่มต้น 10,000 เซลล์/100มล.) และ
- (จ) สารส้ม (*E. coli* เริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล.)



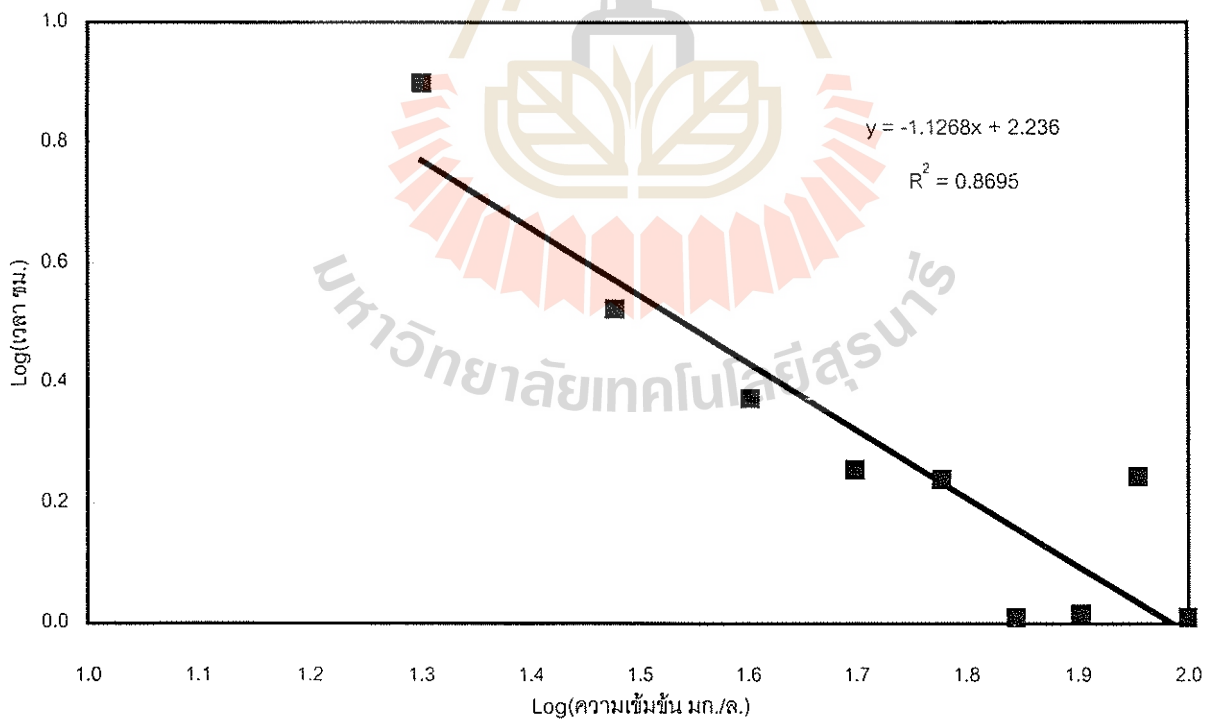
ภาพที่4-16 (บ)



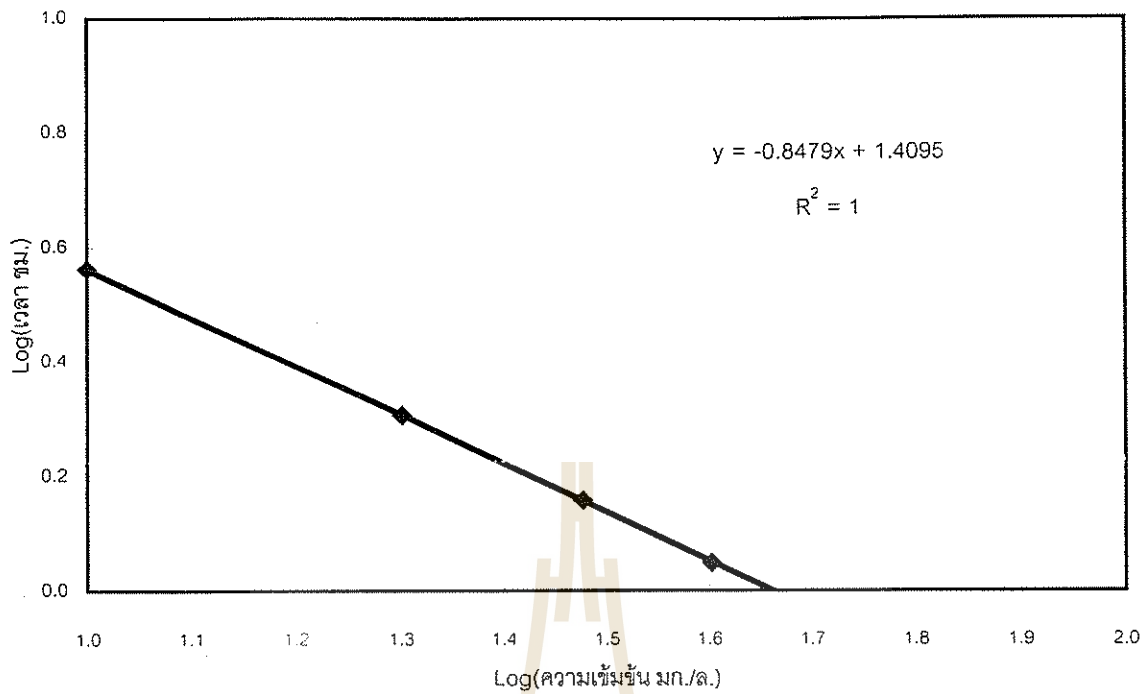
ภาพที่4-16 (ค)



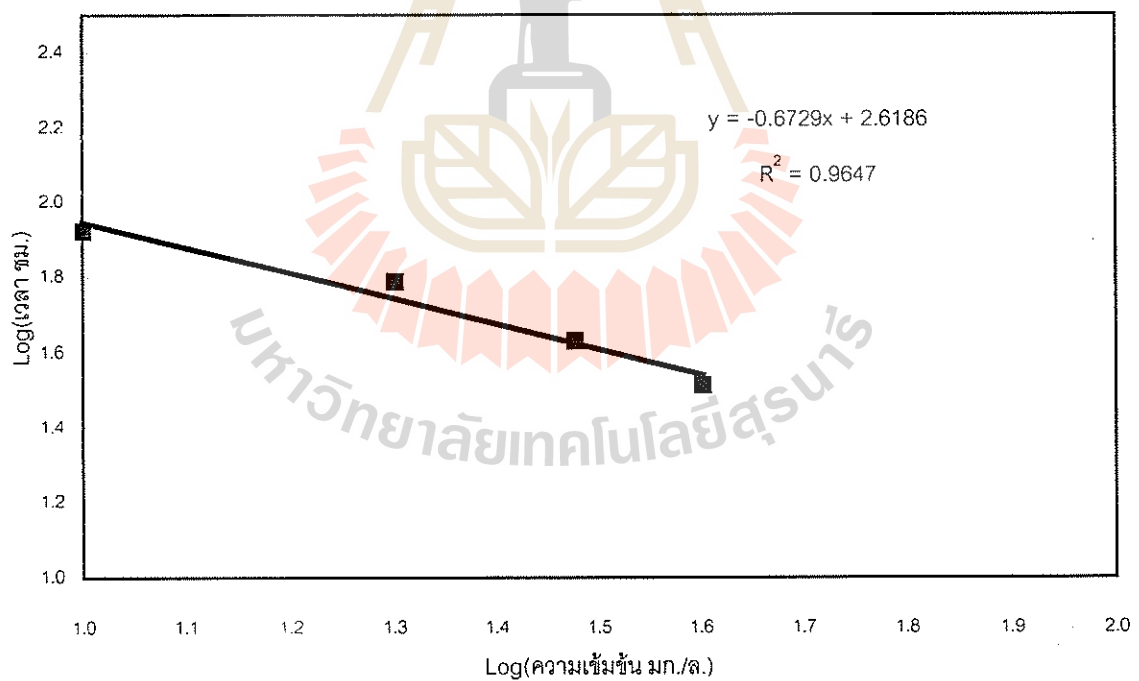
ภาพที่ 4-16 (ง)



ภาพที่ 4-16 (จ)



ภาพที่4-17 (ก)



ภาพที่4-17 (ข)

ภาพที่4-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับระยะเวลาการกำจัดจุดชีพให้มีประสิทธิภาพคงที่ (ก) สารไลโทแซน (โคลิฟอร์มเริ่มต้น 100,000 เซลล์/100มล.) และ (ข) สารไลโทแซน (*E. coli* เริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล.)

ตารางที่4-4 ผลของข้อมูลค่าคงที่ของการฆ่าเชื้อ (n)

รายละเอียด	สมการเส้นตรง	n	R ²
สารส้ม			
โคลิฟอร์ม เริ่มต้น 100,000 เซลล์/100มล.	$y = -1.0644x + 2.3518$	1.0644	0.8720
<i>E.coli</i> เริ่มต้น 1,000 เซลล์/100มล.	$y = -1.3954x + 2.6166$	1.3954	0.9803
<i>E.coli</i> เริ่มต้น 5,000 เซลล์/100มล.	$y = -1.2714x + 2.4077$	1.2714	0.9746
<i>E.coli</i> เริ่มต้น 10,000 เซลล์/100มล.	$y = -1.1764x + 2.3144$	1.1764	0.9346
<i>E.coli</i> เริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล.	$y = -1.1268x + 2.2360$	1.1268	0.8695
สารไคโทแซน			
โคลิฟอร์ม เริ่มต้น 100,000 เซลล์/100มล.	$y = -0.8479x + 1.4090$	0.8479	0.9989
<i>E.coli</i> เริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล.	$y = -0.6729x + 2.6186$	0.6729	0.9647

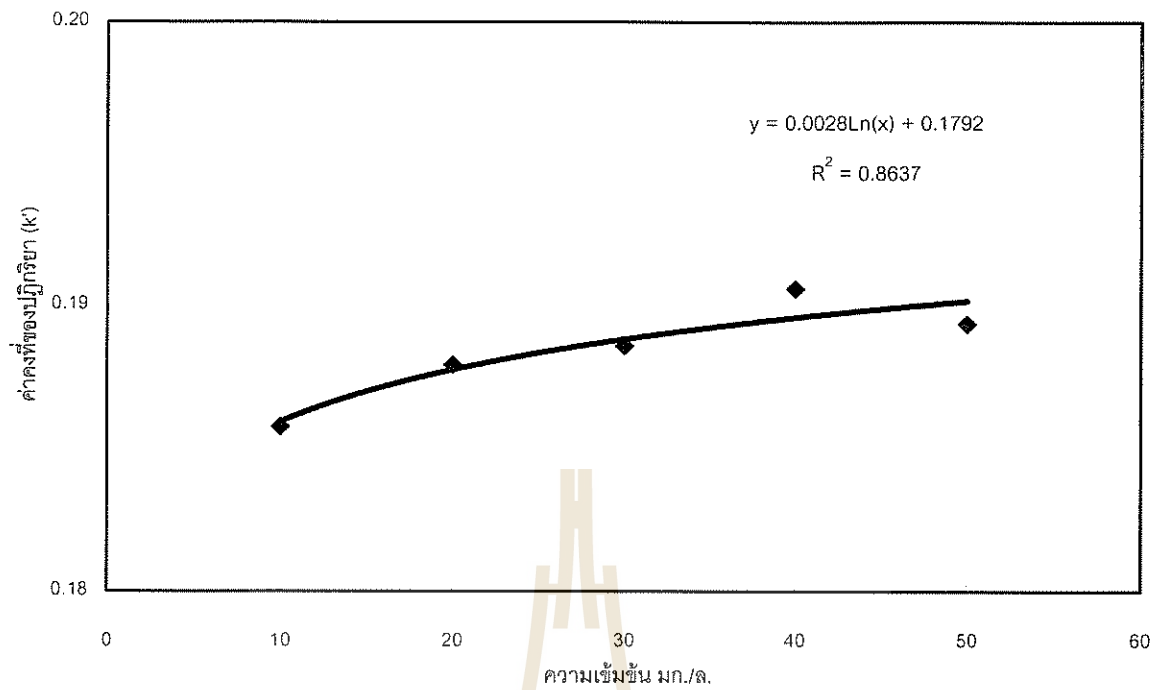
คุณสมบัติของค่าคงที่ (n) จากสมการคือ (James M. Montgomery, 1985)

ถ้า $n > 1$ แสดงว่าเวลาที่มีความสำคัญในการตายมากกว่าความเข้มข้นของสารฆ่าเชื้อ

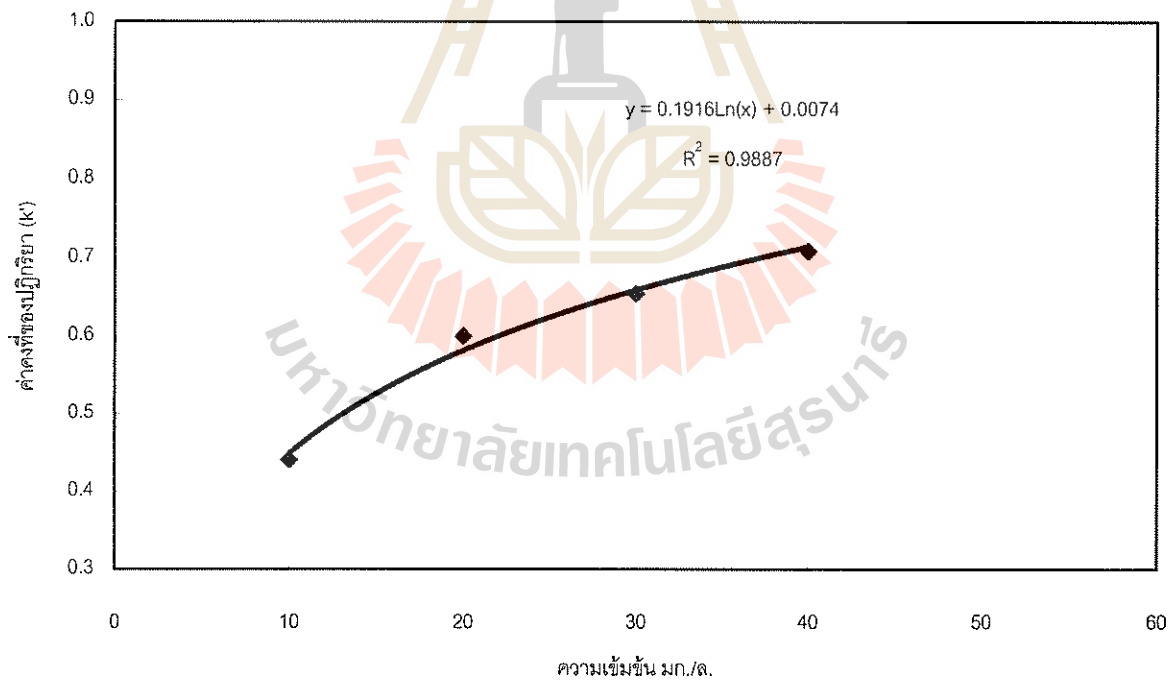
ถ้า $n = 1$ แสดงว่าเวลาที่มีความสำคัญในการตายเท่ากับความเข้มข้นของสารฆ่าเชื้อ

จากตารางที่4-4 พบว่าค่า n สารส้ม ของโคลิฟอร์ม และ *E. coli* ให้ค่า $n > 1$ แสดงว่าการตายของโคลิฟอร์ม และ *E. coli* จะขึ้นกับระยะเวลาการสัมผัสจุลชีพมากกว่าความเข้มข้นของสารส้ม ในส่วนของสารไคโทแซนค่า $n < 1$ แสดงว่าความเข้มข้นของสารไคโทแซนมีผลต่อการตายของจุลชีพมากกว่าระยะเวลาสัมผัสจุลชีพ

เมื่อได้ค่าคงที่ (n) จากตารางที่4-4 แล้วย้อนกลับมาวิเคราะห์ในสมการที่4.8 เพื่อหาค่าคงที่ของ ปฏิกริยา k' ที่ความเข้มข้นใดๆ หลังจากนั้นนำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ในรูปของกราฟระหว่างค่าคงที่ของปฏิกริยา k' กับความเข้มข้นดังภาพที่4-18 เพื่อประยุกต์หาค่าคงที่ของปฏิกริยา k' ของสารส้ม และสารไคโทแซนที่ปริมาณความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง สรุปได้ดังตารางที่4-5



ภาพที่4-18 (ก)



ภาพที่4-18 (ข)

ภาพที่4-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยากับความเข้มข้น

(ก) สารไลโทแซน (โคลิฟอร์มเริ่มต้น 100,000 เซลล์/100มล.) และ

(ข) สารไลโทแซน (*E.coli* เริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล.)

ตารางที่4-5 ผลของข้อมูลค่าคงที่ของปฏิกิริยา k'

รายละเอียด	สมการ	k'	R^2
สารส้ม			
โคลิฟอร์ม เริ่มต้น 100,000 เซลล์/100มล.	$y = 0.0005\ln(x) - 0.023$	*-0.021	0.0030
<i>E.coli</i> เริ่มต้น 1,000 เซลล์/100มล.	$y = -0.00004\ln(x) - 0.011$	*-0.011	0.0003
<i>E.coli</i> เริ่มต้น 5,000 เซลล์/100มล.	$y = -0.00007\ln(x) - 0.0184$	*-0.018	0.0004
<i>E.coli</i> เริ่มต้น 10,000 เซลล์/100มล.	$y = 0.0005\ln(x) - 0.0248$	*-0.023	0.0060
<i>E.coli</i> เริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล.	$y = -0.0001\ln(x) - 0.269$	*-0.027	0.0001
สารไอโทแซน			
โคลิฟอร์ม เริ่มต้น 100,000 เซลล์/100มล.	$y = 0.0028\ln(x) + 0.1792$	-	0.8637
<i>E.coli</i> เริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล.	$y = 0.1916\ln(x) + 0.0074$	-	0.9887

* ค่าที่ได้เฉลี่ยคงที่

จากตารางที่4-5 เมื่อนำค่า k' ของสารส้มที่ได้ มาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า k' กับความเข้มข้นของสารส้มของโคลิฟอร์ม และ *E. coli* พบว่าค่าที่ได้ไม่มีความสัมพันธ์ในรูปสมการใดๆ ซึ่งดูจากค่า R^2 ที่มีค่าไม่เข้าใกล้ 1 ทำให้ค่า k' มีค่าค่อนข้างคงที่ และที่สภาวะจำนวน *E. coli* เริ่มต้นเพิ่มขึ้น ค่า k' ของสารส้มที่ได้เพิ่มขึ้นด้วย ในส่วนของสารไอโทแซน พบว่าค่า k' ของโคลิฟอร์ม และ *E. coli* มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารไอโทแซน ซึ่งเป็นไปตามสมการข้างต้น ดังแสดงในตารางที่4-5 และจากภาพที่4-18 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารไอโทแซนทำให้ค่า k' ของโคลิฟอร์ม และ *E. coli* เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งค่า k' ของ *E. coli* มีค่ามากกว่าของโคลิฟอร์ม บอกได้ว่าที่ความเข้มข้นของสารไอโทแซนเท่ากัน สามารถกำจัด *E. coli* ได้ดีกว่าโคลิฟอร์ม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสารฆ่าเชื้อตัวอื่นดังตารางที่4-6

ตารางที่4-6 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาของสารฆ่าเชื้อชนิดต่างๆ

สารฆ่าเชื้อ	<i>E. coli</i>
O ₃	2300
HOCl	120
ClO ₂	16
OCI ⁻	5
NHCl ₂	0.84
NH ₂ Cl	0.12

ที่มา NAS(1980): ประสิทธิภาพการกำจัด > 99% ในสภาวะ pH = 7.0 อุณหภูมิ 20°C

จากตารางที่ 4-6 พบว่าค่า k' ของสารฆ่าเชื้อที่น้อยที่สุดคือ NH₂Cl นำมาเปรียบเทียบกับค่า k' ของสารส้มที่กำจัด *E.coli* ซึ่งได้จากการทดลองพบว่า มีค่าน้อยกว่าประมาณ 10 เท่าของ NH₂Cl ซึ่งหมายความว่าสารส้มมีประสิทธิภาพในการกำจัด *E.coli* ได้น้อยมาก หรือ น่าจะบอกได้ว่าสารส้ม "ไม่มีความสามารถในการฆ่าเชื้อ *E.coli* ได้" สำหรับสารไคโทแซนเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไคโทแซน 10-60 มก./ล. ให้ค่า k' ของโคลิฟอร์มและ *E.coli* เป็น 0.189-0.191 และ 0.451-0.789 ล./มก.-ชม. ตามลำดับ พบว่าค่า k' ของ *E.coli* มากกว่าของโคลิฟอร์มประมาณ 4-8 เท่าที่ความเข้มข้นของสารละลายไคโทแซนเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบค่า k' ที่ได้จากการทดลองของสารไคโทแซนที่กำจัด *E.coli* ที่ความเข้มข้นของสารละลายไคโทแซน 10-60 มก./ล. ให้ค่า k' เป็น 0.451-0.789 ล./มก.-ชม. ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างค่า k' ของ NH₂Cl กับ NHCl₂ ดังแสดงในตารางที่4-6 จึงสามารถบอกได้ว่าสารไคโทแซนมีประสิทธิภาพในการกำจัด *E.coli* ได้ดีกว่าสาร NH₂Cl แต่ประสิทธิภาพการกำจัดน้อยกว่าสาร NHCl₂

4.5 ปริมาณความเข้มข้นสารโคโทแซนคองเกลือในน้ำ

เนื่องจากไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของสารโคโทแซน ฉะนั้นสามารถหาปริมาณโคโทแซนคองเกลือในน้ำได้จากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นในน้ำ โดยไม่คำนึงว่ามีกลไกอื่นๆ ที่สามารถก่อให้เกิดปริมาณไนโตรเจนในน้ำได้ ฉะนั้นสามารถประมาณได้ว่าค่าปริมาณโคโทแซนคองเกลือในน้ำเป็นไปตามสมการที่ 4.11

กำหนดให้

$$C = (Ni \times Mn) / Mc \quad (4.11)$$

โดยที่ C คือ สารละลายโคโทแซนคองเกลือในน้ำ มก./ล.

Ni คือ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น มก./ล.

Mn คือ น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจนที่มีในโคโทแซน ก./โมล

Mc คือ น้ำหนักโมเลกุลของโคโทแซน ก./โมล

มอนอเมอร์ของสารโคโทแซนมีสูตรโมเลกุลคือ $C_6H_{11}O_4N$ (Kawamura, 1991) มีน้ำหนักโมเลกุลคือ 161 ก./โมล มีน้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน 14 ก./โมล ซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ 8.7% จากตารางที่ 4-7 ผลการตรวจคุณภาพน้ำตัวอย่าง พบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำตัวอย่างคือ 1.96 มก./ล. หลังจากน้ำตัวอย่างผ่านระบบถังทรายกรองซ้ำปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดลดลงเหลือ 1.12 มก./ล. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 57.1% เมื่อนำน้ำตัวอย่างผ่านการตกตะกอนด้วยสารละลายโคโทแซน และผ่านระบบถังทรายกรองซ้ำ พบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดลดลงจาก 2.24 มก./ล. เหลือ 1.40 มก./ล. ซึ่งปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ระบบถังทรายกรองซ้ำสามารถกำจัดได้เมื่อเทียบกับปริมาณเริ่มต้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 57.1% ฉะนั้นปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดควรจะลดลงจาก 2.24 มก./ล. เป็น 1.28 มก./ล. แต่ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนและผ่านระบบถังทรายกรองซ้ำมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดคือ 1.40 มก./ล. ซึ่งประมาณว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มากกว่า 1.28 มก./ล. มาจากสารโคโทแซน นั่นคือมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่คงเหลือในน้ำ 0.12 มก./ล. และที่ความเข้มข้นของสารละลายโคโทแซนเริ่มต้น 10 มก./ล. สามารถประมาณได้ว่าเปอร์เซ็นต์การคงเหลือสารละลายโคโทแซนในน้ำที่ผ่านระบบถังทรายกรองซ้ำตามสมการที่ 4.11 คือ 1%

4.6 ผลการตรวจคุณภาพน้ำ

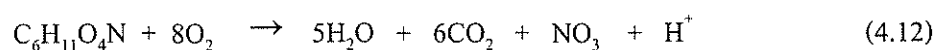
เมื่อระบบถังทรายกรองชำมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นและโคลิฟอร์มคั่งที่ จึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และ ชีวภาพ ของน้ำที่เข้าและออกระบบถังทรายกรองซ้ำของชุดควบคุมและชุดตกตะกอน ซึ่งได้ทำการเก็บน้ำตัวอย่างในวันที่ 29 เมษายน 2543 ได้ผลดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 รายงานผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

รายการที่ตรวจวิเคราะห์	ผลการตรวจวิเคราะห์				มาตรฐาน น้ำประปา	วิธีการ/เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจ วิเคราะห์
	ชุดควบคุม		ชุดตกตะกอน			
	เข้า	ออก	เข้า	ออก		
ความขุ่น NTU	26.1	2.91	1.09	3.01	5	Turbidimeter
pH	7.94	7.75	8.07	7.8	6.5-8.5	PH Meter
ของแข็งละลายน้ำ มก./ล.	282	262	241	247	-	Dried 103-105 °C
ของแข็งแขวนลอย มก./ล.	53	21	10	10	-	Dried 103-105 °C
ของแข็งทั้งหมด มก./ล.	340	284	256	263	500	Dried 103-105 °C
เหล็ก มก./ล.	0.367	0.162	0.074	0.132	0.5	Phenanthroline Method
แมงกานีส มก./ล.	0.349	0.03	0	0	0.3	Persulfate Method
ครอไรด์ มก./ล.	13.5	13.5	42.25	13.5	250	Argentometric Method
ไนเตรด-ไนโตรเจน มก./ล.	0.03	0.02	0.06	0.04	10	Cadmium Reduction Method
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน มก./ล.	0.56	0.28	1.12	0.28	0.05-0.1	Total Kjeldahl Nitrogen
ไนโตรเจนทั้งหมด มก./ล.	1.96	1.12	2.24	1.4	-	Total Kjeldahl Nitrogen
แคลเซียม มก./ล.	0.063	0.158	0.009	0.013	0.01	Atomic Absorption Spectrophotometer
ทองแดง มก./ล.	0.005	0.004	0.003	0.002	1	Atomic Absorption Spectrophotometer
สังกะสี มก./ล.	0.036	0.028	0.007	0.005	5	Atomic Absorption Spectrophotometer
ตะกั่ว มก./ล.	0.088	0.108	0.0628	0.0825	0.05	Atomic Absorption Spectrophotometer
โครเมียม มก./ล.	0.005	0.005	0.005	0.005	0.05	Atomic Absorption Spectrophotometer
โคลิฟอร์มแบคทีเรีย เซลล์/100มล.	6.6×10^7	9×10^3	7×10^4	1.4×10^3	5.0×10^2	Standard Plate Count
ฟีคัล โคลิฟอร์ม เซลล์/100มล. (<i>E. coli</i>)	10,000	1,200	300	0	0	Standard Plate Count

จากตารางที่4-7 พบว่าน้ำตัวอย่างที่เข้าระบบถังทรายกรองซ้ำมีไนเตรท-ไนโตรเจน แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และ ไนโตรเจนทั้งหมดคือ 0.03, 0.56 และ 1.96 มก./ล. ตามลำดับ ประสิทธิภาพของระบบถังทรายกรองซ้ำในการกำจัดคือ 33%, 75% และ 43.2% ตามลำดับ และน้ำตัวอย่างผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนที่ปริมาณความเข้มข้น 10 มก./ล. ทำให้ค่าไนเตรท-ไนโตรเจน แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และ ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นคือ 0.06, 1.12 และ 2.24 มก./ล. ตามลำดับ และเมื่อผ่านระบบถังทรายกรองซ้ำสามารถกำจัดได้ 33%, 75% และ 37.5% ตามลำดับ สำหรับน้ำตัวอย่างที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนแล้ว ค่าไนโตรเจนในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นสาเหตุมาจากสารโคโทแซนซึ่งเป็นสารโพลีแซคคาไรด์ซึ่งอยู่ในเปลือกกุ้งเป็นไบโอโพลิเมอร์ที่เรียกว่าไคตินอยู่เป็นสารหลักประมาณ 14-27% ไคตินเป็นสารโมเลกุลยาวมีมอนอเมอร์คือ N-acetylglucosamine (Kawamura, 1991) และไม่มีประจุทำให้ไม่ละลายน้ำ และละลายได้ยากในสารละลายทั่วไปแต่เมื่อแปรสภาพเป็นโคโทแซนโดยการแยกหมู่อะซีทิลออก ซึ่งจะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบมากกว่า 7% (Knorr, 1986) และไนโตรเจนอยู่ในรูปของแอมโมเนีย ซึ่งเปอร์เซ็นต์การตกค้างที่อยู่ในรูปไนเตรท-ไนโตรเจน แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และ ไนโตรเจนทั้งหมดคือ 50%, 50% และ 12.5% ตามลำดับ ผลที่ได้ไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการประปานครหลวงซึ่งยอมให้มีแอมโมเนีย-ไนโตรเจนได้ไม่เกิน 1.20 มก./ล. แต่น้ำที่ไม่ผ่านการตกตะกอนและเข้าระบบทรายกรองซ้ำมีแอมโมเนีย-ไนโตรเจนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงปลา โดยใช้ระบบทรายกรองใช้อัตราการกรอง 0.24 ลบ.ม/ตร.ม-ชม. พบว่าสามารถกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 60%, กำจัดไนเตรท-ไนโตรเจน 0.03มก/ล และแอมโมเนีย-ไนโตรเจนสามารถลดลง 10% ของไนโตรเจนทั้งหมด ภายหลังจาก 1 เดือน และเพิ่มขึ้นเป็น 65% ของเดือนที่2 และ 3 ตามลำดับ (Kristiansen and Cripps, 1996) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองในครั้งนี้ด้วย

การละลายของสารละลายโคโทแซนในน้ำยังส่งผลต่อค่า O_2 ในน้ำด้วย ซึ่งสารละลายโคโทแซนจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นแหล่งพลังงานของแบคทีเรียในรูปของไนเตรท-ไนโตรเจน (NO_3^-) ดังสมการที่4.12



จากสมการที่ 4.12 สามารถบอกได้ว่าปริมาณสารละลายโคโทแซน 1 มก./ล. จะทำให้ปริมาณ O_2 ในน้ำลดลง 0.8 มก./ล. ด้วยเช่นกัน

ส่วนค่าตัวแปรอื่นๆ น้ำตัวอย่างมีการปนเปื้อนของโลหะหนักคือ เหล็ก แคดเมียม ทองแดง สังกะสี และ ตะกั่ว เมื่อผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนที่ปริมาณความเข้มข้น 10 มก./ล. สามารถลดปริมาณโลหะหนักในน้ำได้คือ 79.8%, 85.7%, 40%, 80.5% และ 29% ตามลำดับ เมื่อน้ำตัวอย่างผ่านระบบถึงทรายกรองช้า ไม่ปรากฏว่าลดปริมาณโลหะหนักในน้ำได้เลย ยกเว้น สังกะสี สามารถลดได้ 28.5% ในส่วนของโครเมียมพบในน้ำตัวอย่างน้อยมาก การลดปริมาณโลหะหนักในน้ำเนื่องจากการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนนั้นเป็นเพราะสารโคโทแซนมีส่วนประกอบของเอมีนฟังก์ชัน และมีประจุบวก ในธรรมชาติของสารพอลิเมอร์ชนิดนี้ทำให้กลุ่มประจุโลหะมายึดติดได้เช่นแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว ปรอท และ โครเมียม (Eiden et al., 1980; Coughlin et al., 1990; Arguelles-Monal and Peniche-Covas, 1993)



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารโคโทแซนมาพิจารณาในการเลือกชนิด และความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยให้มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่น และกำจัดแบคทีเรียก่อโรคก่อนเข้าสู่ระบบถังทรายกรองซ้ำให้มากที่สุด สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้ม และสารโคโทแซนในการตกตะกอนของน้ำตัวอย่าง โดยพิจารณาจากความขุ่นและจำนวนโคลิฟอร์มที่เหลือ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ สารส้มที่ปริมาณความเข้มข้น 100 มก./ล. และสารโคโทแซน 10 มก./ล. โดยที่ประสิทธิภาพการลดความขุ่น และ โคลิฟอร์มแบคทีเรีย คิคเปอร์เซ็นต์การคงเหลือเทียบกับปริมาณเริ่มต้นเป็น 4.5-7.3% และ 1.7-3.1% ตามลำดับ เมื่อศึกษาขีดความสามารถในการกำจัดแบคทีเรียก่อโรค และความขุ่นในสถานะที่เกินมาตรฐานของสารส้ม และสารโคโทแซน ซึ่งพิจารณาจากจำนวนโคลิฟอร์ม และความขุ่นที่เหลือ สำหรับการตกตะกอนน้ำตัวอย่างที่มี *E.coli* จำนวน 1,000, 5,000, 10,000 และ 50,000 เซลล์/100มล. พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารส้มที่ 70, 90, 100 และ 100 มก./ล. ตามลำดับ สามารถที่จะลดจำนวน *E.coli* คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 6.2 % ในส่วนของสารโคโทแซน พบว่าปริมาณความเข้มข้นที่ 10, 10, 20 และ 40 มก./ล. ตามลำดับ สามารถที่จะลดจำนวน *E.coli* คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 5.8 % และความสามารถในการตกตะกอนของน้ำตัวอย่างที่มีความขุ่น 80, 120 และ 50 NTU ปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารส้มคือ 100, 100 และ 110 มก./ล. ตามลำดับ ในส่วนของสารโคโทแซนปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 10, 10 และ 20 มก./ล. ตามลำดับ จึงได้ประสิทธิภาพที่ดัดเทียมกันในการตกตะกอนน้ำดิบ

ในการศึกษาการตายของโคลิฟอร์ม และ *E.coli* ของระบบถังทรายกรองซ้ำ พบว่าการตายของโคลิฟอร์ม และ *E.coli* ของชุดควบคุม เป็นไปตามอันดับปฏิกิริยาที่หนึ่ง ซึ่งมีค่า k คือ 0.0029 และ 0.0025 ชม⁻¹ ตามลำดับ สำหรับชุดตกตะกอนการตายของโคลิฟอร์ม และ *E.coli* ก็เป็นไปตามอันดับปฏิกิริยาที่หนึ่งเช่นกัน ซึ่งมีค่า k คือ 0.0044 และ 0.0075 ชม⁻¹ ตามลำดับ ในส่วนงานจลนศาสตร์การตายเนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และสารโคโทแซน โดยการเปรียบเทียบกับสมการของ Chick-Watson พบว่าสารส้มมีค่า k ของโคลิฟอร์ม และ *E.coli* ในสถานะมีเริ่มต้น 1,000, 5,000, 10,000 และ 50,000 เซลล์/100มล. คือ 0.021, 0.011, 0.018, 0.023 และ 0.027 ล./มก.-ชม. ตามลำดับ

ซึ่งมีค่าคงที่ แสดงว่าค่า k' ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารส้มที่เพิ่มเข้าไป สำหรับสารโคโทแซนมีค่า k' ของโคลิฟอร์ม และ *E.coli*. ในสถานะมีเริ่มต้น 50,000 เซลล์/100มล. พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารโคโทแซนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าที่ได้เป็นไปตามสมการ $y = 0.0028\ln(x) + 0.1792$ และ $y = 0.1916\ln(x) - 0.0074$ (โดยที่ $y = k'$ และ $x =$ ความเข้มข้นสารฆ่าเชื้อ) ตามลำดับ

สำหรับศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบถังทรายกรองช้าโดยพิจารณาจากความขุ่น จำนวนโคลิฟอร์ม และ การสูญเสียความดัน จากการทดลองนี้ประกอบด้วยถังทรายกรองจำนวน 2 ชุด คือ ชุดควบคุม และ ชุดตกตะกอน ซึ่งชุดควบคุมใช้น้ำตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการตกตะกอน ความสามารถในการกรองที่ความหนาชั้นกรอง 80 ซม. มีประสิทธิภาพในการลดความขุ่น และโคลิฟอร์มคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 15-21.5% และ <19.55% สำหรับความหนาชั้นกรอง 100 ซม. มีประสิทธิภาพดีกว่า (ชั้นกรองหนา 80 ซม.) ประมาณ 1.5% และ 4% ตามลำดับ และระยะเวลาในการใช้งานของระบบน้อยกว่า 2 วัน สำหรับความหนาชั้นกรอง 120 ซม. มีประสิทธิภาพดีกว่า (ชั้นกรองหนา 80 ซม.) ประมาณ 3-6%, 8-10% ตามลำดับ และระยะเวลาในการใช้งานของระบบน้อยกว่า 7 วัน สำหรับชุดตกตะกอนน้ำตัวอย่างที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนที่ปริมาณความเข้มข้น 10 มก./ล. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือความขุ่นเทียบกับปริมาณเริ่มต้นเป็น 4.5-7.3% เมื่อผ่านถังทรายกรองช้าที่ความหนาของชั้นกรอง 80, 100 และ 120 ซม. พบว่าไม่สามารถลดความขุ่นได้อีก สำหรับความสามารถในการลดโคลิฟอร์มที่ความหนาชั้นกรอง 80 ซม. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 17.3% และความหนาชั้นกรอง 100 และ 120 ซม. มีประสิทธิภาพดีกว่า (ชั้นกรองหนา 80 ซม.) ประมาณ 3% และ 4.5% ตามลำดับ อีกทั้งระยะเวลาในการใช้งานของระบบถังทรายกรองช้าที่ความหนาชั้นกรอง 80 ซม. นานกว่าความหนาชั้นกรอง 100 และ 120 ซม. เป็นเวลา 2 และ 3 วันเท่านั้น สรุปได้ว่าระบบถังทรายกรองช้า สำหรับน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วความหนาชั้นกรองไม่มีผลในการลดความขุ่นและระยะเวลาในการใช้งานของระบบถังทรายกรองช้าใช้ได้นานกว่าระบบถังทรายกรองช้าที่น้ำตัวอย่างไม่ได้ผ่านการตกตะกอน แต่มีประสิทธิภาพในการลดโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ทัดเทียมกัน

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาเพิ่มเติม

จากผลของการศึกษาครั้งนี้ ขอเสนอแนะหัวข้อเรื่องต่าง ๆ ที่น่าจะศึกษาได้ต่อไป

5.2.1 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารโคโทแซนที่มีเปอร์เซ็นต์ดีออกเซททิวเลชันแตกต่างกัน ในการตกตะกอนความขุ่นและกำจัดโคลิฟอร์ม และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการคงเหลือของสารโคโทแซนในน้ำ

5.2.2 ศึกษาการเกิดสารก่อมะเร็ง คลอโรฟอร์มในน้ำเนื่องจากการเติมคลอรีนและโคโทแซน

5.2.3 ศึกษาลักษณะสมบัติของโคโทแซนทั้งทางบวก และทางลบที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่างๆ

5.3 ข้อเสนอแนะการออกแบบระบบบำบัดน้ำดิบโดยใช้สารโคโทแซน

จากผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ สามารถนำผลที่ได้คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k') ของสารโคโทแซน ในการกำจัดโคลิฟอร์ม และ *E. coli* อีกทั้งประสิทธิภาพในการลดความขุ่นของกระบวนการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซน มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำดิบ ก่อนเข้าระบบถังทรายกรองช้า และค่าลักษณะสมบัติของน้ำดิบที่นำมาใช้ในการออกแบบนี้ จะใช้ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำดิบของการประปาส่วนภูมิภาค ซึ่งลักษณะสมบัติของน้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปาที่มีจำนวนโคลิฟอร์มแบคทีเรียอยู่ระหว่าง 1,000-5,000 เซลล์/100มล. จำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำดิบก่อนอย่างน้อย 2 ขั้นตอนคือ การตกตะกอน การกรอง และการฆ่าเชื้อ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ลักษณะของน้ำดิบ

pH	6.5-8.5
ความขุ่น (ความขุ่นสูงสุดจากการทดลอง)	150 NTU
ของแข็งทั้งหมดในน้ำ	1,500 มก./ล.
โคลิฟอร์ม	5,000 เซลล์/100มล.
<i>E. coli</i>	1,000 เซลล์/100มล.

กำหนดให้

ชุมชนมีปริมาณการใช้น้ำสูงสุด	100 ม. ³ /วัน
ระบบบำบัดน้ำดิบทำงาน	12 ชม./วัน

5.3.1 การออกแบบระบบบำบัดขั้นต้น

จากการออกแบบถังกวนเร็ว ถังกวนช้า และถังตกตะกอน (Reynolds and Richards, 1995) สามารถสรุปได้ดังนี้

ก) ถังกวนเร็ว

- ออกแบบถังเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดความลึกของถังเป็น 1.25 เท่าของความกว้าง และระยะเวลาในการกวนเร็ว 60 วินาที สามารถหาขนาดถังได้คือ

$$1.25 w^3 = (100 \text{ ม.}^3/\text{วัน}) / (12 \text{ ชม./วัน}) \times (10^6 \text{ ซม.}^3/\text{ม.}^3) \times (1 \text{ ชม./60 นาที}) \times (1 \text{ นาที})$$

$w = 49.5$ ซม. ($w =$ ความกว้าง)

$H = 12.5$ ซม. ($H =$ ความสูง)

เลือกใช้ถังกวนเร็วขนาด $0.50 \times 0.50 \times 0.80$ ม. (กว้าง \times ยาว \times ลึก) จำนวน 1 ถัง

- กำลังของมอเตอร์ออกแบบโดยกำหนดให้น้ำมีอุณหภูมิ 25°C มีแกรเดียนต์(G) 500 วินาที⁻¹

จากสมการ $P = G^2 \mu V$

P คือ กำลังของมอเตอร์ นิวตัน-ม./วินาที-ม.³

G คือ แกรเดียนต์ วินาที⁻¹

μ คือ ความหนืด นิวตัน-วินาที/ม.²

V คือ ปริมาตรของถังกวนเร็ว ม.³

แทนค่าจะได้ขนาดกำลังมอเตอร์ 65.5 นิวตัน-ม./วินาที-ม.³

เลือกกำลังมอเตอร์ขนาด 68 นิวตัน-ม./วินาที-ม.³

- กำหนดให้ใบกวนเป็นแบบใบพาย (Paddle) มีจำนวนรอบ 100 รอบ/นาที

จากสมการ $P = K_T n^3 D_i^5 \rho$

K_T คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของใบพาย 5.75

n คือจำนวนรอบ รอบ/นาที

D_i คือ ความกว้างของใบพาย ม.

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ กก./ม.³

แทนค่าจะได้ความกว้างใบพัด 0.33 ม.

เลือกใช้ใบพัดแบบใบพายขนาด 0.36×0.36 ม.

ข) ถังกวนช้า

- กำหนดระยะเวลาการกวน 45 นาที มีแกรเดียนต์ 20 วินาที⁻¹ ให้ความยาวของถังเป็น 3 เท่าของความกว้าง และความลึก 1.50 ม.

$$\begin{aligned} \text{ขนาดถัง} &= (100\text{ม.}^3) / (12 \text{ ซม.}) \times (1 \text{ ซม.} / 60\text{นาที}) \times (45\text{นาที}) \\ &= 6.25 \text{ ม.}^3 \end{aligned}$$

เลือกขนาดถังได้ $1.20 \times 5.00 \times 1.20$ (กว้าง \times ยาว \times ลึก) จำนวน 1 ถัง

- กำลังของมอเตอร์

จากสมการ $P = G^2 \mu V$

เลือกมอเตอร์ขนาด 8 นิวตัน-เมตร/วินาที จำนวน 2 ชุด

- ใบพัดแบบใบพายวงกลม (Paddle Wheel) ขนาดใบพาย 0.20×3.00 ม.

ตรวจสอบเปอร์เซ็นต์พื้นที่การกวน $= (0.2 \times 3.0) / (1.2 \times 3.5) \times 100 = 14\%$ (ยอมรับได้)

ค) ถังตกตะกอน

- กำหนดออกแบบถังตกตะกอนจำนวน 2 ถัง มีอัตราการน้ำล้น $36 \text{ ม.}^3 / \text{ม.}^2 \cdot \text{ชม.}$ ความลึกต่ำสุด 2.50 ม. ให้ด้านยาวของถังเป็น 4 เท่าของด้านกว้าง และระยะเวลาที่ใช้ตกตะกอน 90 นาที

ขนาดพื้นที่ถังตกตะกอน

$$4W^2 = (100 \text{ ม.}^3 / 2) \times (1 \text{ ม.}^2 \cdot \text{ชม.} / 36 \text{ ม.}^3) \\ = 1.38 \text{ ม.}^2$$

จะได้ $W = 0.59 \text{ ม.}$ ($W =$ ความกว้าง)

$L = 2.36 \text{ ม.}$ ($L =$ ความยาว)

$H = 2.50 \text{ ม.}$ ($H =$ ความสูง)

เลือกใช้ถังตกตะกอนขนาด $0.80 \times 2.40 \times 2.50$ (กว้าง \times ยาว \times ลึก) จำนวน 2 ถัง

5.3.2 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำดิบชั้นต้น

จากการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบบำบัดน้ำดิบชั้นต้น โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซน ในการลดความขุ่น และกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย สามารถสรุปได้ดังนี้

ก) การกำจัดความขุ่น และของแข็งทั้งหมดในน้ำ

สารตกตะกอนที่ใช้คือสารโคโทแซน ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโคโทแซนที่เหมาะสมในการตกตะกอนอยู่ระหว่าง 8-10 มก./ล. สามารถลดความขุ่น และของแข็งทั้งหมดในน้ำได้ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การคงเหลือ 1.8% และ 20.5% เมื่อเทียบกับปริมาณที่มีเริ่มต้น ฉะนั้นกระบวนการตกตะกอนด้วยสารโคโทแซนสามารถลดความขุ่นในน้ำได้ คงเหลือ 2.7 NTU และของแข็งทั้งหมดในน้ำได้ คงเหลือ 307.5 มก./ล.

ข) การกำจัดโคลิฟอร์มในน้ำ

โคลิฟอร์มในน้ำที่มีเริ่มต้น ($t=0$) มีจำนวน 5,000 เซลล์/100มล. และการทำงานของระบบบำบัดน้ำดิบใช้เวลาทั้งหมด 136 นาที จากการทดลองสารโคโทแซนมีค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k') ที่ปริมาณความเข้มข้น 10 มก./ล. เป็น 0.19 ล./มก.-ชม. และมีค่าคงที่ของสารฆ่าเชื้อ (n) คือ 0.8479 เมื่อแทนค่าลงในสมการของ Chick-Watson พบว่าจำนวนโคลิฟอร์มคงเหลือในน้ำคือ 240 เซลล์/100 มล.

ค) การกำจัด *E. coli* ในน้ำ

E. coli ในน้ำที่มีเริ่มต้น ($t=0$) มีจำนวน 1,000 เซลล์/100มล. และการทำงานของระบบบำบัดน้ำดิบใช้เวลาทั้งหมด 136 นาที จากการทดลองสารโคโทแซนมีค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k')

ที่ปริมาณความเข้มข้น 10 มก./ล. เป็น 0.43 ล./มก.-ชม. และมีค่าคงที่ของสารฆ่าเชื้อ (n) คือ 0.6729 เมื่อแทนค่าลงในสมการของ Chick-Watson พบว่าจำนวน *E. coli* คงเหลือในน้ำคือ 10 เซลล์/100มล.

สรุปได้ว่าน้ำที่เข้าระบบถึงทรายกรองช้าจะมี ความขุ่น ของแข็งทั้งหมดในน้ำ โคลิฟอร์ม และ *E. coli* คือ 2.7 NTU 307.5 มก./ล. 240 เซลล์/100มล. และ 10 เซลล์/100มล. ตามลำดับ

5.3.3 การออกแบบระบบถึงทรายกรองช้า

ข้อมูลการออกแบบระบบถึงทรายกรองช้า (Visscher et al,1987 และ Fox et al ,1984) สามารถสรุปได้ดังนี้

- ความหนาของชั้นทรายกรองคือ 80 ซม.
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทรายกรอง 0.15-0.30 มม. และขนาดความคละ 2-5
- ชั้นน้ำสูง 1.00 ม.
- อัตราการกรอง $0.2-0.4 \text{ ม}^3/\text{ม}^2\text{-ชม.}$

คำนวณหาขนาดพื้นที่กรองน้ำ

ปริมาณน้ำที่ใช้ $100 \text{ ม}^3/\text{วัน} (4.167 \text{ ม}^3/\text{ชม.})$

พื้นที่สำหรับการกรอง = $4.167 \text{ ม}^3/\text{ชม.}$

$0.2 \text{ ม}^3/\text{ม}^2\text{-ชม.}$

20.8 ม^2

สรุปได้ว่าใช้ถังทรายกรองช้ารูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 4.5x4.5 ม. ความลึก 2.0 ม.



การหาทวิอินทิเกรตของปฏิกิริยา (Metcalf & Eddy, 1991)

1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero-order-reaction)

$$-\frac{dC_A}{dt} = kd$$

อินทิเกรตเพื่อหา C_A ระยะเวลาใดๆ ได้ว่า
สมการเส้นตรง

$$C_A = C_{A0} - K_0 t$$

C_{A0} = ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ $t = 0$

C_A = ความเข้มข้นของ C ที่เวลาใดๆ

K = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับศูนย์ หนึ่ง และสอง

t = เวลา

2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order-reaction)

$$-\frac{dC_A}{dt} = K_0 C_A$$

อินทิเกรตเพื่อหา C_A ระยะเวลาใดๆ ได้ว่า

$$\frac{\ln C_{A0}}{C_A} = K_0 t$$

สมการเส้นตรง

$$\ln C_A = \ln C_{A0} - K_0 t$$

3 ปฏิกริยาอันดับสอง (Second-order-reaction)

$$-\frac{dC_A}{dt} = K_0 C_A^2$$

อินทิเกรตเพื่อหา C_A ระยะเวลาใดๆ ได้ว่า
สมการเส้นตรง

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = K_0 t$$

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination)

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หมายถึง สัดส่วนตัวแปร x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงตัวแปร y ได้ ดังนั้นถ้า R^2 (R square, r^2) มีค่ามากกว่า แสดงว่า y และ x มีความสัมพันธ์กันมาก หรือ x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า y ได้มาก โดยมี

$$r^2 = \frac{\text{ความแปรปรวนของ } y \text{ ที่เกิดจาก } x}{\text{ความแปรปรวนของ } y \text{ ทั้งหมด}}$$

ดังนั้น $0 \leq r^2 \leq 1$

คุณสมบัติของ r^2

1. r^2 จะไม่มีหน่วย
2. ถ้า r^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่าเปอร์เซ็นต์ที่ x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ y มีค่ามาก หรือ x และ y มีความสัมพันธ์กันมาก
3. ถ้า r^2 มีค่าใกล้ 0 แสดงว่าเปอร์เซ็นต์ที่ x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ y มีค่าน้อย หรือ x และ y มีความสัมพันธ์กันน้อย

ประวัติ

ชื่อผู้วิจัย นายกัมปนาท พลอามาตย์

วัน/เดือน/ปีเกิด 25 สิงหาคม 2519

การศึกษา -มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม พ.ศ. 2534
 -มัธยมศึกษาตอนปลาย การศึกษานอกโรงเรียนจังหวัดบุรีรัมย์ (กศน.) พ.ศ. 2536
 -วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (โยธา) สำนักวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2540

การทำงาน พ.ศ. 2540 วิศวกรโครงสร้าง บริษัทแม็คโคร คอนกรีต จำกัด เวลา 2 ปี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2539). การวิเคราะห์สถิติ: สถิติเพื่อการตัดสินใจ. พิมพ์ครั้งที่2, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. (2536). วิศวกรรมการประปา. พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์
- โกมล ศิวะบวร, เชาวยุทธ พรพิมลเทพ และ ชุมนุม ศิริวัฒน์. (2527). การประปาเบื้องต้น . พิมพ์ครั้งที่3, กรุงเทพฯ: หจก.ชนะการพิมพ์
- จงจินต์ ผลประเสริฐ. (2541). เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมีวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- เจริญสุข อ่อนจับ. (2536). การใช้สารพอลิเมอร์เป็นสารช่วยตกตะกอน เพื่อลดปริมาณตะกอนในกระบวนการสร้างตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยมหิดล
- มันติน ตันกุลเวศม์. (2537). วิศวกรรมการประปา. เล่มที่1. พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ไพโรจน์ สัยสัณห์สกุล. (2529). การใช้ประโยชน์และประสิทธิผลของถังทรายกรองช้าในท้องถิ่นชนบทภาคกลางของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ยงยุทธ บุญจันทร์. (2536). การนำตะกอนสารส้มจากโรงงานผลิตน้ำประปาคลับมาใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมย้อมผ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยมหิดล
- สุรสิทธิ์ รอดทอง. (2540). ปฏิบัติการจุดชีวสิ่งแวดล้อม เอกสารประกอบการสอนวิชาชีววิทยาสิ่งแวดล้อม (ภาคปฏิบัติ). สาขาวิชาชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ศิริพร ขวัญบุญ. (2535). การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองของตะกอนสารส้ม เมื่อใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ปรับปรุงลักษณะตะกอนสารส้มของโรงงานผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยมหิดล
- สุภฤกษ์ สีนสุพรรณ. (2539). การออกแบบวิศวกรรมสุขาภิบาล เล่มที่1 วิศวกรรมการประปา. พิมพ์ครั้งที่6: ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ชานินทร์ นิรมานสกุล. (2529). ระบบผลิตน้ำประปาขนาดเล็กสำหรับครัวเรือนในชนบท. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ธีระ เกรอต. (2539). วิศวกรรมน้ำเสีย การบำบัดทางชีวภาพ. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- วรניתย์ ขาววิวัฒน์นางศ์. (2525). การศึกษาวิจัยและประเมินผลระบบทรายกรองซ้ำสำหรับการประปา
 อุตสาหกรรมหนองโถ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วรารกรณ์ ชัยสนธิ. (2532). การศึกษาการใช้ค่าครุณีของการกรองเพื่อหาชนิดและปริมาณของสารช่วย
 ตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยมหิดล
- APHA, AWWA and WEF, C.S.L. (1992). **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 18th ed., U.S.A.: EPS Group.
- Arguelles-Monal, W. and Peniche-Covas, C.(1993). Preparation and Characterization of a mercaptan derivative of Chitosan for Removal of Mercury from Brines. **Makramol. Chem.** 207:1-8
- ASCE, AWWA, CSSE. (1971). **Water Treatment Plants Design**. American Water Work Association. New York.
- Baylis , J.R. (1956). Seven Years of High-Rate Filtration. **J. AWWA**. 48: 253-261
- Beardsley, J.A. (1973). Use of Polymers in Munciple Water Treatment. **J.AWWA**. 65 (1): 85-90
- Coughlin, R.W., Deshaies T.R. and Davis, E.M. (1990). Chitosan in Crab Shell Waste Purifies Electro planing Wastewater. **Environ. Prog.** 9: 35-39
- Eiden, C.A, Jewell, C.A. and Wightman, J.P. (1980). Interaction of lead and Chromium with Chitin and Chitosan. **J.Appl.Polym.Sci.** 25: 1587-1599
- Fair, G.M. Geyer and Okun. (1971). **Elementary of Water Supply and Wastewater Disposal**. Wiley , New York .
- Fan. (1974). **Operational Experience of Two-Stages Water Filter in Thailand**. M.S. Thesis, AIT , Bangkok, Thailand .
- Fox, K.R., Miltner, R.J., Logsdon, D.L., Dicks and Drolet L.F. (1984). Efficeicy of Slow Sand Systems. **J. AWWA**. 76(12): 62-68
- Hudson, H.E. (1958). Factors Affecting Filtration Rates. **J. AWWA**. 50(2): 48-56
- Huisman, L. (1980). Slow Sand Filtration. Background Paper, No.27. **WHO**, Geneva.
- Huisman, L. , Wood W.E. and Fice. (1974). **Slow Sand Filtration**. World Health Organization , Geneva .
- Huisman, L. (1982). **Slow Sand Filtration**. Deft University of Technology ,The Netherlands
- Ives, K.J. (1969). Theory of Filtration. Special Subject No. 7. **International Water Supply Congress**, Vienna .
- Jaksirinont, N. (1972). **Development of Series Filtration Water Treatment Method for Small Community of Asia**. M.S.Thesis, AIT, Bangkok, Thailand .
- Jame, C.R. and O'Melia, C.R. (1982). Considering Sludge Production the Selection of Coagulants. **J.AWWA**. 74(3): 148-151
- James M. Montgomery. (1985). **Water Treatment Principles and Design**. John Wiley & Sons, New York.
- Jay, L.D. (1995). **Probability and Statistics for Engineering and the Sciences**. 4th ed., Wadsworth Publishing Company. United States of America
- Johnson, R.A. and Gallanger, S.M. (1984). Use of Coagulants to Treat Seafood Processing Wastewater. **J. WPCF**. 56(8): 970-976
- Knorr, D. (1986). Nutritional Quality, Food Processing and Biotechnology Aspects of Chitin and Chitosan : A Review. **J. Process Biochemistry**. 21(3) : 90-92
- Kristiansen, R. and Cripps, S.J. (1996). Treatment of Fish Farm Wastewater Using Sand Filtration. **J.Environ.Qual.** 25: 545-551

- Kawamura, S. (1991). Effectiveness of Natural Polyelectrolytes in Water Treatment .**J. AWWA.** 103(3): 88-91
- Low, B.P. (1973). **Operation Testing of a Two stages Water Treatment Filter.** M.S. Thesis, AIT, Bangkok, Thailand.
- Metcalf & Eddy. (1991). **Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse.** 3rd ed., Singapore : Mcgraw-Hill
- National Academy of Science. (1980). **Drinking Water and Health.** Vol.2, National Academy Press, Washington, DC.
- O'Melia, C.R. (1980). Aquasols the Behavior of Small Particles in Aquatic System. **J. Environmental Science & Technology.** 14(9): 1052-1060
- O'Melia, C.R. and Stumm, N. (1967). Theory of Water Filtration. **J. AWWA.** 59(11): 254-268
- Reynolds, Tom D. and Richards, Paul A. (1995). **Unit Operations and Processes in Environmental Engineering.** 2nd ed., PWS publishing Company., Boston.
- Sank, C. (1980). **Water Treatment Plant Design For the Practicing Engineer.** Ann Arbor Science, 3rd ed.
- Segall, B.A. and Okun, D.A. (1966). Effect of Filtration Rate of Filtrate Quality. **J. AWWA.** 58(3): 157-169
- Schwoyer, WLK. (1986). **Polyelectrolytes for Water and Wastewater Treatment.** 2nd ed., CRC Press, Florida
- Thanh, N.C. and Pescod. (1976). **Application of Slow Sand Filtration for Surface Water Treatment in Tropical Developing Countries.** AIT, Bangkok, Thailand.
- Tsai, G.J. and Su.W.H. (1998). Antibacterial Activity of Shrimp Chitosan against Escherichia Coli. **J. of Food Protection.** 62(3): 239-243
- Visscher, J.T., Paramasivam, R., Raman, A. and Heijnen, H.A. (1987). Slow Sand Filtration for Community Water Supply, Planning, Design, Construction, Operation and Maintenance, Technical paper No.24. **IRC**
- Vlnod, Tare and Venkobachar, C. (1985). New Conceptual Formulation for Predicting Filter Performance. **J. Environmental Science & Technology.** 19(6): 497-499
- Wang, G.H. (1992). Inhibition and Inactivation of Five Species of Foodborne Pothogens by Chitosan. **J. of Food Protection.** 55(11): 916-919
- Weber, W.J., Jr. (1972). **Physicochemical Process for Water Quality Control.** 1st ed., Wiley, New York.