

ผลกระทบของความชื้นต่อการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำโดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยไฟฟ้าเคมี

นาย ศรัญญู เอี่ยมระหงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF TURBIDITY ON *ESCHERICHIA COLI* REMOVAL FROM WATER BY
ELECTROCHEMICAL DISINFECTION

Mr. Saranyu Aiemrahong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของความชื้นต่อการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำ
โดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยไฟฟ้าเคมี

โดย

นาย ศรัญญู เอี่ยมระหงษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเอี่ยม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธิกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. พรพรรณวดี สุวัฒน์ิกะ)

ศรัญญู เอี่ยมระหงษ์ : ผลกระทบของความขุ่นต่อการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำโดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยไฟฟ้าเคมี. (EFFECT OF TURBIDITY ON *ESCHERICHIA COLI* REMOVAL FROM WATER BY ELECTROCHEMICAL DISINFECTION.)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ , 151 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำโดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยไฟฟ้าเคมี โดยเปรียบเทียบขั้วอิเล็กโทรด 2 ชนิด คือ ขั้วแกรไฟต์ – แกรไฟต์ และขั้วแกรไฟต์ – ไทเทเนียม โดยใช้ถังปฏิกริยาปริมาตร 2 ลิตร ทำการทดลองแบบที่ละเทและแบบไหลต่อเนื่อง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำ ในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของเชื้ออีโคไล 4 ค่า ได้แก่ 2,000 4,000 6,000 และ 14,000 cfu/ml ปรับเปลี่ยนค่าความขุ่น 5 ค่า ได้แก่ 5 50 75 100 และ 150 NTU ปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่า คือ 15 20 และ 25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 3 ค่า คือ 15 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการศึกษาพบว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิด แกรไฟต์ – แกรไฟต์สามารถกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำได้ประสิทธิภาพสูงกว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม โดยประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยสภาวะเหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ คือน้ำที่มีโซเดียมคลอไรด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ใช้ระยะเวลาในการเดินระบบเท่ากับ 7 นาทีจะสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 6,000 cfu/ml และค่าความขุ่นไม่เกิน 75 NTU สำหรับการทดลองแบบที่ละเท หลังจากนั้นจึงนำสภาวะดังกล่าวไปทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที จะสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำได้

ภาควิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา..2553.....

5270515021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : *ESCHERICHIA COLI* / ELECTROCHEMICAL / RESIDUAL CHLORINE / DISINFECTION / TURBIDITY

SARANYU AIEMRAHONG : EFFECT OF TURBIDITY ON *ESCHERICHIA COLI* REMOVAL FROM WATER BY ELECTROCHEMICAL DISINFECTION. ADVISOR : ASSOC.PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 151 pp.

This research was aimed to study the *E.coli* removal from water by electrochemical disinfection. The experiment were conducted in 2-L batch and continuous reactor. Two pairs of electrodes namely: graphite- graphite and graphite-titanium were used to compare the *E.coli* removal efficiency. The *E.Coli* to a density was tested at 2,000 4,000 6,000 and 14,000 cfu/ml. The turbidity was varied from 5 to 150 NTU. The current density was varied from 15 to 25 mAmp/cm² while NaCl was varied from 15 to 50 mg/l.

The result showed that electrochemical system using graphite-graphite electrodes can achieved highest removal efficiency. At complete *E.coli* removal efficiency, such condition was using NaCl 50 mg/l, current density of 20 mAmp/cm² and reaction time of 7 minutes, such condition can completely remove *E.Coli* density of 6,000 cfu/ml at turbidity of 75 NTU. For the electrochemical system that feed continuously with synthesis water contained *E.Coli* density of 6,000 cfu/ml was also tested at current density of 20 mAmp/cm², detention time at 14 minutes. The result showed that at detention time of 14 minutes, *E.Coli* could be removed completely.

Department : ..Environmental Engineering..

Student's Signature.....

Field of Study : Environmental Engineering..

Advisor's Signature.....

Academic Year : .2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาแนะแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล และ ดร.พรธนาดี สุวัฒน์กิจ ที่ได้ให้คำชี้แนะ ปรึกษา และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในช่วงการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แหล่งน้ำดิบในการผลิตน้ำประปา.....	4
2.2 กระบวนการผลิตน้ำประปา	5
2.3 การผลิตน้ำประปา	7
2.4 การฆ่าเชื้อโรคในระบบผลิตน้ำสะอาด	9
2.5 ชนิดของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคในน้ำ.....	10
2.6 <i>Escherichia coli</i>	12
2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของ <i>E. coli</i>	13
2.6.2 อัตราการเจริญเติบโตของ <i>E. coli</i>	14
2.6.3 ลักษณะการเจริญเติบโตของ <i>E. coli</i>	16
2.6.4 ลักษณะการเจริญของอีโคไลในอาหารเลี้ยงเชื้อ.....	17
2.6.5 วิธีการวัดการเจริญเติบโตของอีโคไล.....	17
2.6.6 ความสำคัญของอีโคไล.....	20
2.7 กระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	21
2.7.1 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	23
2.7.2 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน.....	26

	หน้า
2.7.3 ค่าการนำไฟฟ้า.....	27
2.7.4 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ.....	28
2.7.5 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี.....	29
2.8 การประยุกต์ใช้หลักการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย.....	30
2.8.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า.....	31
2.8.2 การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	32
2.8.3 ชนิดขั้วไฟฟ้า.....	35
2.9 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	36
2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
2.10.1 การกำจัดอีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	37
2.10.2 การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	39
2.10.3 การกำจัดอีโคไลโดยกระบวนการอื่นๆ.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1 แผนการวิจัย.....	42
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.2.1 ระบบฆ่าเชื้ออีโคไลด้วยไฟฟ้าเคมี.....	44
3.2.1.1 ขั้วไฟฟ้า.....	45
3.3 การเตรียมการทดลอง.....	46
3.3.1 การเตรียมน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไล.....	46
3.3.2 เตรียมความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไล.....	49
3.4 การดำเนินการทดลอง.....	50
3.4.1 น้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	50
3.4.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	50
3.4.2.1 การทดลองที่ 1.....	50
3.4.2.2 การทดลองที่ 2.....	54
3.4.2.3 การทดลองที่ 3.....	58
3.4.2.4 การทดลองที่ 4.....	62
3.5 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์น้ำ.....	66
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	67

4.1	การทดลองที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีน คงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	68
4.2	การทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบของชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อการกำจัดเชื้ออีโคไล โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม ในการทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร	74
4.3	การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำสังเคราะห์เชื้อ อีโคไลที่มีค่าความขุ่นแตกต่างกัน โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งสามารถกำจัดเชื้อ อีโคไลได้ร้อยละ 100 จากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง ได้แก่ชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	88
4.4	การทดลองที่ 4 ศึกษาการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้สภาวะที่เหมาะสม จากการทดลองที่ 3 มาใช้ในการทดลองที่สามารถกำจัดเชื้ออีโคไลได้ร้อยละ 100 เพื่อศึกษาสมรรถภาพของระบบที่มีการป้อนน้ำต่อเนื่อง	90
4.5	ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบไฟฟ้าเคมี.....	98
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	99
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	99
5.2	ข้อเสนอแนะ	100
	รายการอ้างอิง	101
	ภาคผนวก	104
	ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง	105
	ภาคผนวก ข. วิธีการคำนวณ	145
	ภาคผนวก ค. วิธีการเลี้ยงเชื้ออีโคไลและวิธีการหาค่ากราฟแสดงการเจริญเติบโตของ อีโคไล.....	149
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	151

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การเปรียบเทียบศักยภาพของตัวออกซีไดส์ตามสารตั้งต้น.....	32
2.2	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด <i>Escherichia coli</i>	38
3.1	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1.....	53
3.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.....	57
3.3	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.....	61
3.4	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.....	65
3.5	พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำ.....	66
4.1	สรุปสภาวะที่ทำให้เกิดปริมาณคลอรีนคงเหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้ คุณสมบัติของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ของการทดลองที่ 1.....	74
4.2	สภาวะที่ใช้ทำการทดลองที่ 2.....	75
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้ออีโคไลที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาเพาะเลี้ยง 9 นาที.....	76
4.4	สรุปสภาวะที่กำจัดเชื้ออีโคไลได้หมดจากการทดลองที่ 3.....	86

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา8
2.2	ลักษณะเชื้อ <i>E. COLI</i> 13
2.3	กราฟแสดงการเจริญเติบโต (growth curve).....15
2.4	แสดงขั้นตอนการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย 16
2.5	วิธีวัดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ 19
2.6	องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี21
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....24
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....25
2.9	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน..... 33
2.10	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม..... 34
2.11	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์..... 34
3.1	ระบบแยกด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองแบบทีละเท44
3.2	ระบบแยกด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง45
3.3	การจัดวางขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 4 แผ่นในถังปฏิกิริยา..... 46
3.4	อัตราการเจริญเติบโตของเชื้ออีโคไล.....47
3.5	ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่เกิดขึ้นบนจาร์เพาะเชื้อ 2,000 cfu/ml.....47
3.6	ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่เกิดขึ้นบนจาร์เพาะเชื้อ 4,000 cfu/ml.....48
3.7	ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่เกิดขึ้นบนจาร์เพาะเชื้อ 6,000 cfu/ml.....48
3.8	ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่เกิดขึ้นบนจาร์เพาะเชื้อ 14,000 cfu/ml.....48
3.9	ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 5,000 เท่า..49
3.10	ผังการทดลองที่ 1 51
3.11	ผังการทดลองที่ 2 55
3.12	ผังการทดลองที่ 3 59
3.13	ผังการทดลองที่ 4 63
4.1	ปริมาณคลอรีนคงเหลือเทียบกับเวลาของระบบไฟฟ้าเคมี ที่เติมโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 mg/l.....69
4.2	ปริมาณคลอรีนคงเหลือเทียบกับเวลาของระบบไฟฟ้าเคมี ที่เติมโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 mg/l.....71

ภาพที่	หน้า
4.3 ปริมาณคลอรีนคงเหลือเทียบกับเวลาของระบบไฟฟ้าเคมี ที่เติมโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 mg/l.....	72
4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 2,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 15 mg/l.....	77
4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 2,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 25 mg/l.....	77
4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 2,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 50 mg/l.....	78
4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 4,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 15 mg/l.....	79
4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 4,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 25 mg/l.....	80
4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 4,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 50 mg/l.....	80
4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 6,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 15 mg/l.....	81
4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 6,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 25 mg/l.....	82
4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 6,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 50 mg/l.....	82
4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 14,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 15 mg/l.....	84
4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 14,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 25 mg/l.....	84
4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 14,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 50 mg/l.....	85
4.16 พลังงานที่ระบบไฟฟ้าเคมีใช้ในการกำจัดเชื้ออีโคไลเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ได้หมด.....	87
4.17 การกำจัดเชื้ออีโคไลด้วยระบบไฟฟ้าเคมีขั้วแกรไฟต์-แกรไฟต์ ที่ค่าความขุ่นต่างๆ.....	89
4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลด้วยระบบไฟฟ้าเคมีขั้วแกรไฟต์-แกรไฟต์ ที่ค่าความขุ่นต่างๆ	89
4.19 การกำจัดเชื้ออีโคไลโดยระบบไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm ² มีระยะเวลาเก็บกัก 7 นาที.....	91
4.20 พีเอชในระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm ² โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 7 นาที.....	92
4.21 การกำจัดเชื้ออีโคไลโดยระบบไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm ² มีระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที.....	93
4.22 พีเอชและความต่างศักย์ในระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm ² โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที.....	94
4.23 การกำจัดเชื้ออีโคไลโดยระบบไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm ² มีระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที.....	96
4.24 พีเอชและค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm ² โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที.....	96

ภาพที่	หน้า
4.25	
ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่ผ่านระบบไฟฟ้าเคมี ที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 10,000 เท่า.....	98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และเป็นสิ่งซึ่งไม่อาจขาดได้ การเพิ่มขึ้นของประชากรและการพัฒนาอุตสาหกรรมทำให้ความต้องการน้ำเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย การจัดการหาน้ำสะอาดให้กับชุมชนจึงเป็นเรื่องสำคัญ ระบบผลิตน้ำสะอาดที่มีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญมาก

แหล่งน้ำที่นำมาผลิตน้ำประปาที่สำคัญคือแหล่งน้ำผิวดิน ระบบทำความสะอาดน้ำประปาส่วนใหญ่ในปัจจุบันที่ใช้ คือกระบวนการตกตะกอนทางเคมี กระบวนการตกตะกอน และกระบวนการกรอง น้ำที่ผ่านถึงกรองแล้วจะมีความใสและสะอาด แต่จำเป็นต้องนำมาเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคเสียก่อน ระบบกำจัดเชื้อโรคเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตน้ำประปาเพราะในน้ำธรรมชาติมีจุลินทรีย์ปนเปื้อนอยู่มาก ซึ่งขั้นตอนในการบำบัดน้ำโดยทั่วไปไม่สามารถทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ลดลงได้ สารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในระบบการผลิตน้ำประปาได้แก่คลอรีน โดยทั่วไปจะเติมคลอรีนลงในน้ำประปาด้วยปริมาณที่ให้มีความเข้มข้นคลอรีนคงค้างในท่อประมาณ 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร

Escherichia coli หรือ อีโคไล (นิยมใช้ชื่อย่อ *E. coli*) เป็นแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์มที่ใช้เป็นดัชนีชี้การปนเปื้อนของอุจจาระในน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เนื่องจากอีโคไลอาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ของสัตว์และมนุษย์ อีโคไลทำให้เกิดอาการท้องเสีย ทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ ทำให้ถ่ายอุจจาระเหลว หรือเป็นน้ำแต่อาการมักไม่รุนแรง เพราะทั้งเด็ก และผู้ใหญ่มักมีภูมิคุ้มกันอยู่บ้างแล้ว เนื่องจากได้รับเชื้อนี้เข้าไปทีละน้อยอยู่เรื่อยๆ เชื้อนี้มักปนเปื้อนมากับอาหาร น้ำหรือมือของผู้ประกอบอาหาร ปกติเชื้อเหล่านี้อาจพบในอุจจาระได้อยู่แล้วแม้จะไม่มีอาการอะไร ดังนั้นในน้ำประปาที่สะอาดจึงไม่ควรตรวจวัดพบเชื้ออีโคไลดังกล่าว

กระบวนการไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการใหม่ที่น่าสนใจ ซึ่งสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำได้ สะดวกและปลอดภัยในการใช้งาน และบำรุงรักษาง่ายโดยมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้าไปในกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะสามารถเกิดเป็นก๊าซคลอรีนซึ่งมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคและยังเป็นคลอรีนคงเหลือได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาผลของชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี
- 2) ศึกษาผลของความขุ่นในน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำประปาและน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไล โดยทดลองแปรผันปริมาณเชื้ออีโคไลและความขุ่นของน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไล
2. การทดลองกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี ระดับห้องปฏิบัติการเป็นการทดลองแบบที่ละเท (Batch) และแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) โดยใช้ถังปฏิกิริยาปริมาตร 2 ลิตร
3. ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือขั้วแกรไฟต์และขั้วไทเทเนียม
4. จัดวางขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน โดยให้มีระยะห่างระหว่างขั้ว

1.5 เซนติเมตร

5. ศึกษาตัวแปรต่างๆ ตามที่กำหนด ดังนี้

5.1 การทดลองแบบที่ละเท

- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมี 3 ค่า ได้แก่ 15 20 และ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
- ความเข้มข้นของอีโคไลเริ่มต้น 4 ค่า ได้แก่ 2,000 4,000 6,000 และ 14,000 cfu/ml
- ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 3 ค่า ได้แก่ 15 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ความขุ่น 5 ค่า ได้แก่ 5 50 75 100 และ 150 NTU
- เวลาที่ใช้ในการเดินระบบ 5 ค่า ได้แก่ 1 3 5 7 และ 9 นาที

5.2 การทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

- ใช้ค่าความหนาแน่นกระแส และสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบที่ละเท
- ระยะเวลาเก็บกัก 2 ค่า คือ 7 และ 14 นาที

6. พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณเชื้ออโคไล ปริมาณคลอรีนในน้ำ ค่าพีเอช อุณหภูมิ ปริมาณไทเทเนียม ค่าการนำไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า และสารTrihalomethane (THMFP)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออโคไลของน้ำส้มเคระห์โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี
- 2) ทราบถึงผลของความขุ่นที่มีต่อการกำจัดเชื้ออโคไลของน้ำส้มเคระห์โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี
- 3) เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบกำจัดเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำสะอาดและน้ำเสีย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งน้ำดิบในการผลิตน้ำประปา (สาวิตรี ตาสุดิน, 2552)

ในการผลิตน้ำประปาให้ได้คุณภาพสูง แหล่งน้ำดิบเป็นสิ่งที่สำคัญ การเลือกแหล่งน้ำดิบที่มีความสกปรกหรือมลทินน้อยที่สุดจะทำให้สามารถผลิตน้ำประปาได้ในราคาประหยัด สำหรับแหล่งน้ำดิบในการผลิตประปาแบ่งเป็น 2 แหล่งคือ

1) น้ำผิวดิน เป็นแหล่งน้ำดิบที่สำคัญมากในการผลิตน้ำประปา เพราะมักมีปริมาณมากกว่าแหล่งน้ำดิบอื่นและสะดวกต่อการนำมาใช้ประโยชน์

น้ำผิวดิน หมายถึงน้ำจากแม่น้ำ คลอง อ่างเก็บน้ำ หนองและบึง เนื่องจากน้ำผิวดินมักมีแหล่งกำเนิดจากน้ำใต้ดิน ดังนั้นคุณสมบัติของน้ำจึงขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำเดิม การไหลนองบนพื้นดินทำให้น้ำผิวดินได้รับความสกปรกจากสิ่งแวดล้อม อาจมีความขุ่นและสารอินทรีย์ในระดับสูง ปริมาณเกลือแร่ในน้ำอาจสูงหรือต่ำ นอกจากนี้น้ำผิวยังชะล้างสารพิษต่างๆ จากบริเวณเกษตรกรรม สารพิษเหล่านี้ ได้แก่ โลหะหนัก ไนเตรต ฟอสฟอรัส ยาฆ่าแมลง ฯลฯ มารวมกับน้ำผิวดิน

2) น้ำบาดาล หมายถึง น้ำที่ไหลซึมลงไปใต้ดินจะซึมผ่านชั้นต่างๆ ของดินจนถึงชั้นหินซึ่งซึมผ่านไม่ได้ ระดับของน้ำบาดาลขึ้นกับลักษณะภูมิประเทศและดินฟ้าอากาศ น้ำบาดาลจะเกิดอยู่ในชั้นหินที่เป็นหินอิมตัวด้วยน้ำ ซึ่งประกอบด้วยชั้นกรวด ชั้นทราย ชั้นหินเนื้อพรุน ในที่ว่างรอยแตกหรือโพรงในชั้นหินอย่างใดอย่างหนึ่งและชั้นน้ำบาดาลเหล่านี้จะรองรับด้วยหินเนื้อแน่นไม่ยอมให้น้ำไหลซึมผ่านลงไป อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าน้ำบาดาลจะไม่ไหลซึมลงไปด้านล่าง แต่น้ำบาดาลจะมีการเคลื่อนไหวและไหลอยู่ตลอดเวลา

น้ำบาดาลมักมีความขุ่นต่ำ ปราศจากสีและสารอินทรีย์ ปริมาณสารละลาย (TDS) จะมีปริมาณสูง น้ำบาดาลมักไม่มีออกซิเจนละลายน้ำ แต่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงมากทั้งนี้เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันใต้ดิน ทำให้มีการใช้ออกซิเจนและผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ เหล็กและแมงกานีสพบได้ง่ายในน้ำใต้ดิน ซึ่งอิมตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อสูบน้ำบาดาลขึ้นมาข้างบนและสัมผัสอากาศ เหล็กและแมงกานีสจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในอากาศ ทำให้เกิดตกผลึกซึ่งการตกผลึกอาจเกิดขึ้นรวดเร็วมากถ้าพีเอชของน้ำสูงเพียงพอ ทำให้น้ำบาดาลเมื่อแรกสูบน้ำขึ้นมาใสมากกลายเป็นน้ำขุ่นภายใน 10 นาที

2.2 กระบวนการผลิตน้ำประปา (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

1) การตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) เป็นกระบวนการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ช้า คอลลอยด์มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1-1 นาโนเมตร ซึ่งไม่สามารถแยกตัวออกจากน้ำได้โดยวิธีตกตะกอนตามธรรมชาติ เนื่องจากอนุภาคของคอลลอยด์มีขนาดเล็กเกินไป หลักการของกระบวนการตกตะกอนทางเคมีคือ การเติมสารสร้างตะกอน (Coagulant) ลงไปในน้ำ เพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์จับตัวกันเป็นกลุ่มเรียกว่าฟล็อก (Floc) จนมีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนลงมาได้รวดเร็ว สารสร้างตะกอนจะทำหน้าที่เหมือนตัวประสานให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมตัวกันเป็นฟล็อก

ส่วนประกอบสำคัญของกระบวนการตกตะกอนทางเคมี มี 2 ส่วนคือ ถังกวนเร็วและถังกวนช้า ถังกวนเร็วเป็นที่เติมสารเคมี สารเคมีและน้ำจะผสมกันทันทีอย่างรวดเร็ว ส่วนถังกวนช้าเป็นที่สำหรับกระบวนการสร้างฟล็อก (Flocculation) ที่เกิดจากการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์เพื่อส่งไปตกตะกอนในถังตกตะกอน นอกจากนี้ยังสามารถเติมสารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant aid) เป็นสารเคมีประเภทโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ซึ่งเป็นสารโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคหรือฟล็อก ให้เกิดเป็นฟล็อกขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ง่าย สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี มี 3 ประเภท ได้แก่ โพลีเมอร์ประจุบวก (Cationic polymer) โพลีเมอร์ประจุลบ (Anionic polymer) และโพลีเมอร์ที่ไม่มีประจุ (Nonionic polymer)

2) การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นกระบวนการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวด้วยแรงดึงดูดของโลก ผลจากการตกตะกอน ทำให้ได้ส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนน้ำใสและตะกอนเหลวหรือสลัดจ์ (Sludge) ถ้าจุดมุ่งหมายของการตกตะกอนเป็นเพื่อให้ได้น้ำใส การตกตะกอนจะเป็นแบบที่เรียกว่า Clarification แต่ถ้าจุดมุ่งหมายเป็นไปเพื่อให้ได้สลัดจ์ที่มีความเข้มข้นมากที่สุด การตกตะกอนจะเป็นแบบที่เรียกว่า Thickening การตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา มักมีความมุ่งหมายเพื่อให้ได้น้ำใสมากกว่าเพื่อทำให้สลัดจ์เข้มข้น

การตกตะกอนอาจจำแนกได้เป็น 4 ประเภท ตามแต่ระดับความเข้มข้น และลักษณะสมบัติของของแข็งที่อยู่ในน้ำ ดังนี้

1. การตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling)
2. การตกตะกอนแบบกลุ่ม (Flocculent settling)
3. การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone settling)
4. การตกตะกอนแบบอัดตัว (Compression settling)

น้ำที่มีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยต่ำ อาจตกตะกอนเป็นแบบโคต หรือรวมกลุ่มก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของตะกอนหรืออนุภาค ถ้าตะกอนแขวนลอย ไม่สามารถจับตัวเป็นกลุ่ม การตกตะกอนจะเป็นแบบโคต ถ้าตะกอนแขวนลอยมีแนวโน้มในการจับตัวกันเป็นกลุ่ม หรือเป็นก้อน การตกตะกอนจะเป็นแบบรวมกลุ่ม

น้ำที่มีตะกอนแขวนลอยอยู่ในระดับปานกลางหรือสูง (มีความเข้มข้นสูงกว่า 1000-2000 มก./ล.) มักมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคแต่ละเม็ดอยู่ติดกัน และเคลื่อนที่ลงด้วยอัตราเร็วเดียวกันทำให้เห็นเป็นชั้นแยกระหว่างน้ำใสและอนุภาค สำหรับการตกตะกอนแบบอัดตัว เกิดขึ้นเมื่อน้ำมีตะกอนแขวนลอยอยู่ในระดับสูงมาก และมักเกิดขึ้นที่ก้นถังตกตะกอน การตกตะกอนแบบอัดตัวอาจถือได้ว่าเกิดขึ้นหลังจากที่การตกตะกอนแบบอื่นได้เกิดขึ้นแล้ว การอัดตัวเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคต่างๆวางซ้อนกัน ในลักษณะที่มีการถ่ายเทน้ำหนักให้กับอนุภาคที่อยู่ข้างล่าง

3) การกรอง (Filtration) การกรองน้ำเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ การกรองแบบติดผิวชั้นกรอง (Surface Filtration) และการกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (In-Depth Filtration)

การกรองแบบติดผิว เป็นแบบที่ตะกอนแขวนลอยหรือความขุ่น ถูกดักจับและติดค้างอยู่บนผิวของสารกรองซึ่งอาจเป็น ผ้าแผ่นใยสังเคราะห์ แท่งกรอง เครื่องกรองที่อาศัยหลักการกรองแบบติดผิว อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. เครื่องกรองแบบใช้แผ่นกรอง แผ่นกรองอาจเป็นผ้า แผ่นโลหะ หรือแผ่นใยสังเคราะห์ก็ได้
2. เครื่องกรองแบบใช้แท่งกรอง แท่งกรองมักเป็นแท่งวัสดุที่มีรูพรุนเล็กเต็มไปหมด ซึ่งยอมให้น้ำผ่านเท่านั้น ตะกอนความขุ่นต่างๆ จะติดค้างอยู่บนผิวของแท่งกรอง
3. เครื่องกรองแบบที่มีสารกรองชั่วคราว เป็นเครื่องกรองที่ใช้สารกรองที่เตรียมขึ้นมาจากสารบางชนิด ซึ่งเมื่อใช้จนหมดประสิทธิภาพแล้วก็จะทิ้งสารกรองไปเลย

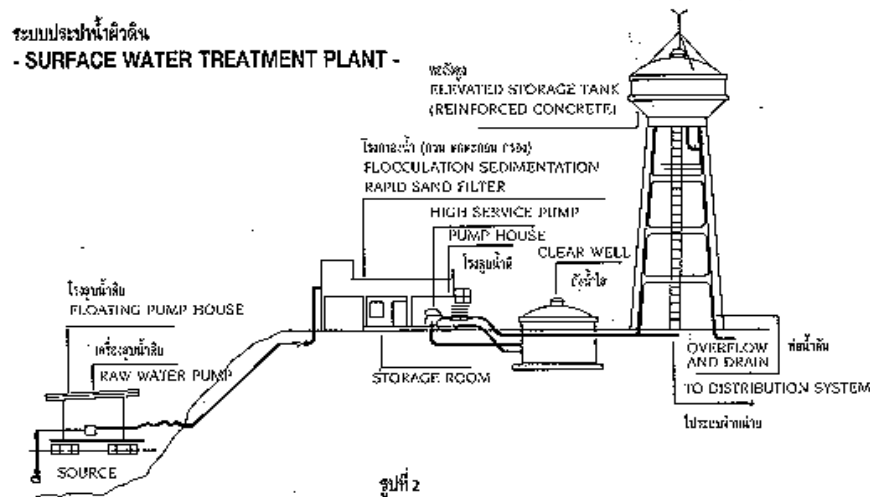
การกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง เป็นการกรองน้ำแบบธรรมดาที่ใช้กันในโรงงานผลิตน้ำประปา สารกรองที่นิยมใช้มากที่สุดคือ หวาย เนื่องจากขนาดของสารกรองมักมีขนาดใหญ่กว่าของการกรองแบบติดผิว ตะกอนความขุ่นจึงมีโอกาสเข้าไปในชั้นกรองได้ เครื่องกรองแบบติดค้างในชั้นกรองมีหลายชนิด อาจจำแนกได้ดังนี้ คือ

1. เครื่องกรองทรายแบบกรองช้า ใช้ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นต่ำ ไม่ต้องใช้สารเคมีช่วยในการรวมตะกอน ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าน้อยจึงเหมาะสำหรับใช้ในชนบท
2. เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว สามารถกรองน้ำได้สูงกว่าเครื่องกรองช้าหลายสิบเท่า แต่ต้องทำความสะอาดบ่อยกว่า วิธีล้างเครื่องกรองจะใช้วิธีการล้างย้อน

4) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เป็นกระบวนการขั้นสุดท้ายในการผลิตน้ำประปา การฆ่าเชื้อโรคในการผลิตน้ำประปา ซึ่งมี 2 วิธี คือ Disinfection และ Sterilization Disinfection หมายถึงการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งเป็นต้นเหตุของโรคต่างๆ ส่วน Sterilization นั้นหมายถึงการทำลายจุลินทรีย์ทุกชนิดที่อยู่ในน้ำ น้ำประปาควรผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยวิธี Disinfection เป็นอย่างน้อย การทำ Sterilization ให้กับน้ำประปานั้น ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงมากจนเป็นไปได้ ในทางปฏิบัติระบบประปาทั้งหลายจึงทำการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยวิธี Disinfection ทั้งสิ้น สารที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคเรียกว่า Disinfectant ได้แก่ ก๊าซคลอรีน หรือ สารประกอบคลอรีนอื่นๆ โอโซน โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต เงิน และอื่นๆ นอกจากนี้ การฆ่าเชื้อโรคด้วยความร้อนและแสงอุลตราไวโอเล็ต ก็จัดอยู่ในแบบ Disinfection ด้วย

2.3 การผลิตน้ำประปา

ขั้นตอนและกรรมวิธีในการผลิตน้ำประปาดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปเป็นไปตามหลักเกณฑ์การผลิตน้ำของการประปานครหลวงคือ การใช้สารเคมีเป็นตัวปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ การกำจัดตะกอนผ่านกระบวนการกรองน้ำ และการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน เพื่อให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่ม โดยแบ่งขั้นตอนในการผลิตที่สำคัญออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา (การประปานครหลวง, 2552)

1) การสูบน้ำ การผลิตน้ำประปาเริ่มจากโรงสูบน้ำแรงต่ำทำการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลำเลียงเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งน้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นต้องเป็นน้ำที่ไม่มีสี กลิ่น รส และสิ่งสกปรกใดโครกปนเปื้อนเกินกว่าที่กำหนด ซึ่งต้องผ่านการวิเคราะห์ตรวจสอบก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ภายหลังจากสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำ น้ำดิบที่ไหลมาตามคลองประปาจะสัมผัสอากาศและแสงแดด และจะตกตะกอนตามธรรมชาติทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น และระหว่างนั้นจะมีการกำจัดสวะ เศษไม้ สาหร่าย ถุงพลาสติก และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ที่ลอยมากับน้ำดิบโดยที่หน้าโรงสูบน้ำดิบจะมีตะแกรงหยาบ (Trash rack) และตะแกรงละเอียด (Fine screen) ดักเก็บและป้องกันไม่ให้อันตรายที่ไม่ต้องการเหล่านี้ เข้าไปเป็นอันตรายหรืออุดตันเครื่องสูบน้ำและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตน้ำ

2) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ น้ำดิบที่สูบน้ำเข้ามาจะถูกผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้ม และปูนขาว เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สารละลายสารส้มจะช่วยให้มีการตกตะกอนได้ดีขึ้นและสารละลายปูนขาวจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ บางครั้งจะมีการเติมคลอรีน เพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนมากับน้ำในขั้นต้นนี้ก่อน

3) การตกตะกอน เมื่อเติมสารเคมีในน้ำดิบแล้ว ตะกอนในน้ำดิบจะทำปฏิกิริยากับสารเคมีรวมตัวกันเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นไหลเข้าถังตกตะกอน ทำให้ตะกอนหนักตกสู่พื้นล่างของถังตกตะกอนและน้ำส่วนบนจะไหลเข้ารางรับน้ำไปยังบ่อกรองน้ำ ส่วนตะกอนหนักที่อยู่พื้นล่างจะถูกระบายออกไปเก็บไว้ในบ่อพักตะกอน เพื่อรอการกำจัดต่อไป

4) การกรอง น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วยังคงมีตะกอนละเอียดแขวนลอยอยู่บางส่วน (ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู) จะไหลเข้าบ่อกรองน้ำซึ่งมีทรายเป็นสารกรองเพื่อกำจัดตะกอนที่

ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง น้ำที่ผ่านการกรองขั้นตอนนี้จะมีความใสมากโดยมีความขุ่นไม่เกิน 2 เอ็นทียู แต่เนื่องจากบ่อกรองที่ใช้เป็นชนิดอัตราการกรองเร็วเมื่อใช้งานไปได้ประมาณ 24 ชั่วโมง จะต้องมีการล้างโดยการพ่นลมและน้ำย้อนขึ้นมาจากใต้บ่อกรองเพื่อให้ทรายขยายตัว (Back wash) และให้ตะกอนที่ตกค้างอยู่บนผิวหน้าทรายไหลตามน้ำออกไปกลับสู่กระบวนการผลิตอีกครั้ง

5) การฆ่าเชื้อโรคและควบคุมความเป็นกรด-ด่าง น้ำที่ออกจากบ่อกรองน้ำก่อนที่จะนำไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำใส อาจยังมีแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการฆ่าเชื้อโรคเพื่อให้เกิดความปลอดภัยสามารถอุปโภคและบริโภคได้ โดยจะใช้คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคและเติมน้ำปูนขาวเพื่อปรับสภาพสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก

6) การควบคุมคุณภาพน้ำประปา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะน้ำประปาที่ทำการผลิตมาแล้วนั้นจะต้องวิเคราะห์ตรวจสอบอีกครั้งจากนักวิทยาศาสตร์ และการตรวจสอบนี้จะดำเนินการอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาด ปลอดภัย สำหรับการอุปโภคบริโภค

7) การสูบน้ำประปา น้ำประปาที่ได้ผ่านกรรมวิธีการผลิตข้างต้น ซึ่งจะมีการเก็บตัวอย่างน้ำไปตรวจสอบวิเคราะห์อยู่ตลอดเวลา เพื่อประกันว่าจะได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก สามารถบริโภคได้อย่างปลอดภัยและจะถูกสูบน้ำจากถังเก็บน้ำใสเข้าระบบท่อประปา เพื่อจ่ายให้กับประชาชนในเขตบริการของการประปานครหลวงต่อไป

2.4 การฆ่าเชื้อโรคในระบบผลิตน้ำสะอาด

กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ เพื่อใช้ในการบริโภคจะต้องกำจัดเชื้อโรคจุลินทรีย์พวกแบคทีเรียและไวรัสให้ได้ร้อยละร้อยเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ เพราะหากมีเชื้อโรคเหลืออยู่ในน้ำแม้เพียงเล็กน้อยก็จะมีโอกาสแพร่กระจายขยายตัวมากขึ้นได้ กระบวนการฆ่าเชื้อโรคมีได้หลายวิธี เช่น การใช้สารคลอรีนฆ่าเชื้อโรค การใช้แก๊สโอโซน การใช้แสงอุลตราไวโอเล็ต ตลอดจนการต้มน้ำก็เป็นการฆ่าเชื้อโรคได้เหมือนกัน การที่จะเลือกใช้วิธีไหนขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและความสะดวกในการนำแต่ละวิธีมาปฏิบัติ

1. การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน การใช้คลอรีนเป็นกระบวนการฆ่าเชื้อโรคที่ใช้กันมากที่สุด เรียกว่า chlorination โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน การเติมคลอรีนลงในน้ำนั้นได้ทั้งในลักษณะแก๊สและในลักษณะปูนคลอรีน วิธีการนี้เชื่อถือได้ ไม่ยุ่งยาก และราคาถูก คลอรีนเมื่อปนกับน้ำจะทำปฏิกิริยาให้สารกรดไฮโปคลอรัส ไฮโปคลอริกไฮออน และโมเลกุลของคลอรีน ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาฆ่าเชื้อโรคได้ สิ่งที่สำคัญที่สุดไม่ใช่ปริมาณของคลอรีนที่เติมลงไป น้ำ หากแต่เป็นปริมาณของคลอรีนคงเหลือในน้ำ (Residual chlorine) ซึ่งวัดได้หลังจากช่วงเวลาสัมผัสหนึ่ง ซึ่งจากคุณสมบัติหนึ่งของคลอรีนคือ เป็นสารออกซิไดซิงอย่างแรง ดังนั้นเมื่อเติมลงไป

ในน้ำ คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับสารต่างๆได้อย่างรวดเร็ว ถ้าเติมคลอรีนน้อยเกินไปก็จะมีคลอรีนตกค้าง แต่ถ้าเติมมากเกินไปก็จะเป็นการสิ้นเปลือง และทำให้น้ำมีกลิ่นไม่พึงประสงค์และอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้ ฉะนั้นจึงควรควบคุมให้มีปริมาณที่เหมาะสมเพื่อจะได้มีคลอรีนอิสระหรือคลอรีนคงเหลืออยู่ในน้ำหลังจากการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆแล้ว ซึ่งจะทำให้สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ ส่วนระดับคลอรีนตกค้างนั้นขึ้นอยู่กับมาตรฐานน้ำประปาที่กำหนดขึ้น โดยปกติระบบจ่ายน้ำประปาสำหรับชุมชนควรมีคลอรีนคงเหลือ (Residual chlorine) ที่เวลาสัมผัส 20 นาที ซึ่งวัดได้ที่ปลายท่อเมนจ่ายน้ำในจุดที่ไกลจากระบบผลิตมากที่สุด จะต้องมีความเข้มข้นประมาณ 0.2 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (กองสุขภาพิบาลอาหารและน้ำ, 2549)

2. การฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซน โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรงที่มีสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคได้เหมือนคลอรีน กระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ดีกว่าคลอรีน โอโซนไม่เป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคอย่างแพร่หลาย เนื่องจากราคาแพง ต้องใช้เครื่องมือพิเศษและไม่สามารถทำปฏิกิริยาฆ่าเชื้อในภายหลัง (วีระวัฒน์ สัตยานุรักษ์, 2551)

3. การฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต การฉายแสงอุลตราไวโอเล็ต ultraviolet radiation เป็นกระบวนการฆ่าเชื้อโรคที่มีประสิทธิภาพ แสงอุลตราไวโอเล็ตที่ใช้ในการฆ่าเชื้อมีความยาวคลื่นระหว่าง 250-270 นาโนเมตร แสงแดดตามธรรมชาติจะมีแสงอุลตราไวโอเล็ตเหลืออยู่บ้าง ซึ่งถ้านำน้ำถูกนำมาผึ่งแดดมากาก็สามารถจะฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้มากเหมือนกัน แต่อย่างไรก็ตามวิธีการฆ่าเชื้อโรคโดยฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก เพราะวิธีนี้มีราคาแพงและบางส่วนของอนุภาคของแข็งในน้ำอาจจะไม่สัมผัสกับแสงอุลตราไวโอเล็ตทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อน้อยลง นอกจากนี้เชื้อจุลินทรีย์ในน้ำบางตัวสามารถทนทานต่อการถูกทำลายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ตได้ดี (วีระวัฒน์ สัตยานุรักษ์, 2551)

2.5 ชนิดของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคในน้ำ (จุฑามาศ เทพชัยศรี, 2542)

การมีจุลินทรีย์อาศัยอยู่ในร่างกาย เมื่อได้รับสารอาหารจากร่างกาย จึงเจริญเติบโต เพิ่มจำนวนขึ้น โดยผู้ที่ให้จุลินทรีย์อยู่อาศัยเสียประโยชน์ แล้วเจ็บป่วย เรียกได้ว่า มีการติดเชื้อ (infection) เกิดขึ้น แบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคมีหลายชนิด เช่น

Streptococcus เป็นแบคทีเรียแกรมบวกรูปกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 0.5-1 ไมครอน เรียงเป็นสายโซ่หรือเป็นคู่ไม่เคลือบที่ไม่สร้างสปอร์บางพวกเป็น Facultative Anaerobic เจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 35-37 °C จัดอยู่ใน *Streptococcaceae* ขนาดของโคไลนีค่อนข้างเล็กใสจนถึงสีขาวบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผสมเลือด บางเชื้อสายสามารถย่อยสลายเม็ดเลือดแดงได้ เป็นเชื้อที่พบได้ทั่วไปทั้งในสิ่งแวดล้อม อาหาร น้ำ ฟุนละออง ในลำคอหรือทางเดินหายใจ

ลำไส้คนและสัตว์ บางชนิดก่อโรคซึ่งทำให้เกิดโรคโดยตรงจากการติดเชื้อนั้น บางชนิดก่อโรคที่มีอันตรายภายหลังการติดเชื้อครั้งแรกสงบ โรคที่เกิด *Streptococcus* spp. เช่น คออักเสบ ทอนซิลอักเสบ หูชั้นกลางอักเสบ ซึ่งเกิดจากการติดเชื้อปฏิมภูมิ นอกจากนี้การติดเชื้อ *Streptococcus* อาจก่อให้เกิดพยาธิสภาพภายหลังการติดเชื้อระยะแรกสงบแล้ว ได้แก่ ไข้รูมาติกเฉียบพลัน และหน่วยไตอักเสบเฉียบพลัน

Bacillus เป็นแบคทีเรียรูปร่างท่อน ปลายตัดตรง สปอร์อยู่ตรงกลางเซลล์ แต่เมื่ออยู่ในร่างกายคนและสัตว์ไม่เคลื่อนที่เนื่องจากไม่มีแฟลกเจลลา ไม่สร้างสปอร์ เจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อธรรมดา ไม่สลายในเม็ดเลือดแดง โคโลนีมีสีขาว ขนาดค่อนข้างโตในสกุล *Bacillus* มีอยู่มากมายทั่วไปทุกหนทุกแห่งในโลก ส่วนมากดำรงชีวิตแบบอิสระไม่ต้องพึ่งพาอาศัยสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ต้องการใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโต แต่สารอาหารมีความต้องการแตกต่างกันไปในแต่ละเชื้อสายถิ่นที่อยู่อาศัยอยู่ตามธรรมชาติ คือ ในดิน สปอร์ถูกสร้างขึ้นในดินมักไปปนกับฝุ่นละออง และฟุ้งกระจายอยู่ทั่วไป ติดตามร่างกายคนและสัตว์หรือปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ มีเพียง 2 เชื้อที่ทำให้เกิดโรค คือ *B.anthraxis* ทำให้เกิดโรคแอนแทรกซ์ และ *B.creus* ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ

Clostridium เป็นแบคทีเรียแกรมบวกรูปร่างท่อน เชื้อในสกุลนี้มีประมาณเกือบ 100 เชื้อสายพบอยู่ตามดิน กองขยะ มูลสัตว์ พืชผัก ในลำไส้คนและสัตว์ *Clostridium* มีรูปร่างเป็นท่อนสร้างสปอร์ได้ สปอร์มีรูปร่างและตำแหน่งแตกต่างกันไปตามเชื้อสาย การทำให้เกิดโรคเนื่องจากสารพิษโรคที่เกิดจาก *Clostridium* แบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ โรคติดเชื้อที่ผิวหนัง ได้แก่ โรคแผลเน่ามีแก๊ส โรคอาหารเป็นพิษ โรคติดเชื้อในลำไส้ซึ่งเป็นผลมาจากการได้รับยาปฏิชีวนะติดต่อกันเป็นเวลานาน

Klebsiella ทำให้เกิดโรคติดเชื้อในโรงพยาบาล ซึ่งได้แก่ โรคปอดบวม โรคเยื่อหุ้มสมองอักเสบ แผลติดเชื้อทางเดินปัสสาวะอักเสบ เป็นต้นโดยปกติอาศัยอยู่ในลำไส้ของคนและสัตว์ก็พบว่า เป็นสาเหตุของโรคติดเชื้อในทางเดินหายใจและปอด เชื้อมีแคปซูลขนาดใหญ่ ซึ่งป้องกันการเก็บกินทำลายโดยเซลล์เม็ดเลือดขาว และบางสายพันธุ์ยังสร้างสารพิษด้วย

Yersinia เป็นแบคทีเรียที่พบในลำไส้ของสัตว์หลายชนิด เช่น หมู แพะ แกะ วัว แมว สุนัข เชื้อเข้าสู่ร่างกายโดยปนกับอาหารและน้ำดื่มระยะฟักตัว 4 - 10 วัน เกิดอาการลำไส้อักเสบอย่างเฉียบพลัน อุจจาระร่วง เป็นไข้ ปวดศีรษะ

Vibrio cholera เป็นแบคทีเรียที่พบได้ทั่วไปในน้ำจืดธรรมชาติ แต่มักไม่พบในน้ำโสโครกที่มีสภาพเป็นกรด *V. cholerae* เป็นสาเหตุของโรคอหิวาต์ (cholera) ซึ่งเป็นโรคอุจจาระร่วงอย่างแรงของคน โดยมากคนติดเชื้อจากการกินอาหาร ดื่มน้ำ หรือเครื่องดื่มที่มีเชื้ออหิวาต์ที่มีชีวิตเข้าไป ระยะฟักตัวของโรคอาจเพียงไม่กี่ชั่วโมง หรือประมาณ 1 - 5 วัน

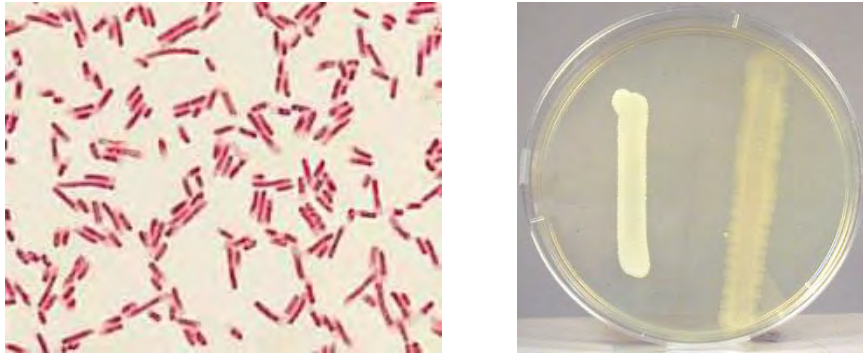
Campylobacter เป็นแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคอุจจาระร่วง แหล่งเก็บโรคคือ สัตว์หลายชนิด เช่น วัว ควาย แพะ แกะ หนู ไก่ เชื้อออกมากับอุจจาระสัตว์ ปนเปื้อนไปกับอาหารและน้ำเข้าสู่ร่างกายโดยการกิน ระยะฟักตัวของโรค 1 – 10 วัน ทำให้เกิดอาการอุจจาระร่วงคล้ายโรคอหิวาต์ มีไข้สูง ถ่ายอุจจาระเป็นเลือด เนื่องจากลำไส้เป็นแผล แต่ถ้าผู้ป่วยมีสุขภาพดี โรคมักหายได้เองใน 5 – 8 วัน โดยเชื้อสายที่สำคัญทำให้เกิดโรคในคนคือ *C. jejuni*

Escherichia coli เป็นแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในดิน น้ำ สิ่งเน่าเปื่อยผุพัง พบได้เสมอในลำไส้ใหญ่ของคนและสัตว์เป็นแท่งขนาดเล็ก ไม่มีสปอร์ เจริญเติบโตได้ดีในที่มือออกซิเจน โรคที่เกิดจาก *E. coli* มีหลายโรค ได้แก่

1. โรคอุจจาระร่วง จะพบในกลุ่มคน 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นเด็กเล็ก เรียกโรคที่เกิดขึ้นว่า infantile diarrhea ส่วนใหญ่เกิดจากเชื้อ Enteropathogenic เด็กได้รับเชื้อปนมากับน้ำนม อาหาร อีกกลุ่มหนึ่งเป็นโรคอุจจาระร่วงจาก *E. coli* คือ ผู้ใหญ่ที่เดินทางไปต่างถิ่น เรียกโรคนี้ว่า traveler's diarrhea เกิดจากเชื้อ Enteropathogenic *E. coli* ระยะฟักตัว 5 - 15 วัน อาการ ถ่ายอุจจาระเป็นน้ำมีไข้ต่ำ ๆ คลื่นไส้ อาเจียน
2. โรคติดเชื้อในทางเดินปัสสาวะ มักมีสาเหตุมาจากเชื้อที่อาศัยอยู่ในลำไส้ของผู้ป่วยเอง การติดเชื้อพบบ่อยในผู้หญิง เนื่องจากท่อปัสสาวะค่อนข้างจะสั้นและตรง เข้าสู่กระเพาะปัสสาวะ จึงทำให้เกิดโรคการติดเชื้อที่ กระเพาะปัสสาวะ เกิดกระเพาะปัสสาวะอักเสบ ซึ่งอาจจะลุกลามไปยังไตได้ด้วย
3. โรคติดเชื้ออื่น ๆ ที่เกิดจากเชื้อ *E. coli* เช่น เยื่อหุ้มสมองอักเสบในเด็กเกิดใหม่ ปอดบวม แผลติดเชื้อและโลหิตเป็นพิษ มักเกิดเนื่องจากการผ่าตัด การใช้เครื่องช่วยหายใจ การใช้สายสวนท่อปัสสาวะ

2.6 *Escherichia coli* (จุฬามาศ เทพชัยศรี, 2542)

E. coli เป็นแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในดิน น้ำ สิ่งเน่าเปื่อยผุพัง พบได้เสมอในลำไส้ใหญ่ของคนและสัตว์เป็นแท่งขนาดเล็ก ไม่มีสปอร์ เจริญเติบโตได้ดีในที่มือออกซิเจน



รูปที่ 2.2 ลักษณะเชื้อ *E. coli* (จุฬามาศ เทพชัยศรี, 2542)

2.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของ *E. coli* (ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, 2546)

การเจริญ (growth) เป็นการตอบสนองที่สำคัญที่สุดที่เซลล์มีต่อสภาพแวดล้อม ในสิ่งมีชีวิตชั้นสูงการเจริญมักหมายถึงการขยายขนาดพร้อมกับการพัฒนาของเซลล์ให้ดำเนินกิจกรรมเฉพาะอย่างแต่สำหรับจุลชีพซึ่งมีขนาดเล็กมาก การเพิ่มจำนวนประชากรเป็นสิ่งสำคัญที่สุด

จุลชีพเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความหลากหลาย สามารถเจริญได้ในทุกสภาวะแวดล้อม ตามแต่ชนิดและสายพันธุ์ ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เซลล์จะรับสารอาหารเข้าไปภายใน เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานและสังเคราะห์ biological molecule ต่างๆที่เซลล์ต้องการเพื่อดำรงชีวิตอยู่และสร้างเซลล์ใหม่ และเนื่องจากจุลชีพมีขนาดเล็ก จึงมักติดตามการเจริญด้วยการหาน้ำหนักแทนการนับจำนวน โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อผลการเจริญของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ สารอาหาร แหล่งพลังงาน อุณหภูมิ ความชื้น Oxygen pH รวมทั้งสารที่เป็นพิษต่อเซลล์ คือ

1. อุณหภูมิ เนื่องจากกระบวนการทางชีวเคมีที่ดำเนินในเซลล์เป็นกระบวนการที่ควบคุมโดย enzyme อุณหภูมิ จึงมีผลต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของเซลล์ จุลินทรีย์จะเจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิแคบๆที่เหมาะสมสำหรับสายพันธุ์นั้นๆ ในช่วง 5-35 องศาเซลเซียส ทุกๆช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น 10 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเพิ่มเป็น 2 เท่า แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกิน 40 องศาเซลเซียส โปรตีนจะเสียสภาพทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไป มีผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีลดลง ทำให้อัตราการเจริญของเซลล์ลดลง หรือ อาจมีผลทำให้เซลล์หยุดทำงานได้ อย่างไรก็ตามมีจุลินทรีย์บางสายพันธุ์ที่สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ หรือ สูงมากๆ

2. สารอาหาร ความต้องการพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตเพื่อการเจริญ คือ พลังงาน และ คาร์บอน ซึ่งจุลชีพบางกลุ่มได้จากสารอินทรีย์ (heterotrophs) ในขณะที่บางกลุ่มได้จากสารอนินทรีย์ (autotroph) นอกจากนี้เซลล์ต้องการธาตุอาหารอื่นด้วย คือ nitrogen sulfur phosphorus และ

inorganic ion สิ่งมีชีวิตต่างชนิดกันจะมีความต้องการสารอาหารต่างกัน ทั้งในแง่ของชนิด และ ปริมาณ

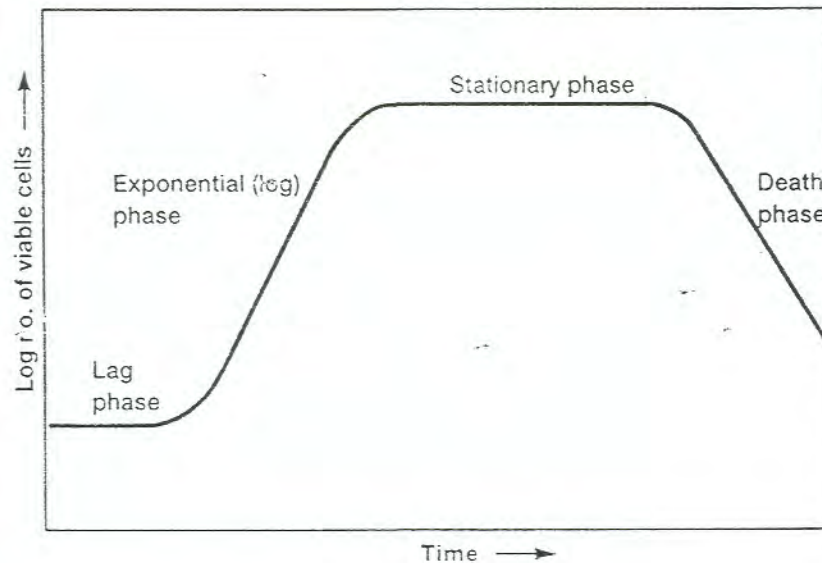
3.Oxygen ในกระบวนการย่อยสลายสารอาหาร (oxidation) ต้องมีตัวรับ electron ที่เหมาะสมจึงจะได้พลังงานสำหรับดำเนินกิจกรรมอื่นๆต่อไป สิ่งมีชีวิตต่างชนิดกันใช้ตัวรับ electron ต่างกัน

4.pH H^+ มีผลโดยตรงต่อระบบบำบัดทางชีวภาพที่ดำเนินในสภาวะที่เป็นกลาง pH ช่วงปกติ คือ 6.5 – 8.5 ที่ pH สูงกว่าช่วงนี้แบคทีเรียจะไม่เจริญ ที่ pH<6.5 fungi จะเจริญได้ดีกว่าแบคทีเรีย

5.สารที่เป็นพิษต่อเซลล์ สารพวกนี้มักมีผลยับยั้งการเจริญของเซลล์ หรือ ทำให้เซลล์เสื่อมสภาพ อัตราการเจริญลดลง หรือ บางที่ metabolism จะเปลี่ยนไป

2.6.2 อัตราการเจริญเติบโตของ *E. coli* (Growth curve)

เมื่อกล่าวถึงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยเฉพาะจุลินทรีย์เซลล์เดี่ยว เช่น แบคทีเรียและยีสต์ ตลอดจนโปรโตซัวและสาหร่ายบางชนิดที่อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว การเจริญเติบโตของแบคทีเรียและยีสต์นั้นไม่ได้หมายความว่าขนาดของเซลล์ใหญ่ขึ้น ถึงแม้ว่าบางทีดูเหมือนเป็นเช่นนั้น แต่หมายถึงการเพิ่มจำนวนเซลล์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์ภายในเซลล์ การเจริญเติบโตเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งในการดำรงชีวิต เซลล์แต่ละเซลล์มีช่วงอายุที่จำเพาะเจาะจงสำหรับ species หนึ่งๆ การเจริญเติบโตของประชากรนั้นสามารถที่จะตรวจสอบได้โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเซลล์หรือมวลชีวภาพ (biomass) ของประชากรต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งเรียกว่า “อัตราการเจริญเติบโต” (growth rate) เวลาที่ใช้ในการเพิ่มจำนวนประชากรจากเดิมเป็น 2 เท่า เรียกว่า generation time (doubling time) จะแตกต่างกันไปในแต่ละ species ในสภาวะแวดล้อมหนึ่งๆ การเติบโตของจุลินทรีย์สามารถบอกได้โดยการวัดความขุ่น (turbidity) ของจุลินทรีย์ในอาหารเหลว การเพิ่มขนาดของโคโลนีบนอาหารแข็ง หรือการเพิ่มของจำนวนเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ทั้งนี้การวัดนั้นต้องเทียบกับหน่วยเวลา ถ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงประชากรในช่วงเวลาต่างๆ แล้วนำมา plot โดยใช้น้ำหนัก (biomass) หรือจำนวนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยคิดรวมทั้งการเพิ่มและการสูญเสียประชากรด้วย จะสามารถสร้าง growth curve ที่แบ่งช่วงของการเจริญได้เป็น 4 ช่วง



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงการเจริญเติบโต (growth curve) (จุฬามาศ เทพชัยศรี, 2542)

1. Lag phase เป็นช่วงแรกของการเพาะเลี้ยงซึ่งดูเหมือนไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆเกิดขึ้น น้ำหนักเซลล์อาจเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยไม่มีการเพิ่มจำนวนเซลล์ เนื่องจากเชื้อพยายามปรับตัวเพื่อให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไป อาจมีการสังเคราะห์ enzyme ชนิดใหม่ขึ้นสำหรับย่อยสารอาหารที่มีอยู่ในสภาวะใหม่ หรือ หยุดสังเคราะห์สารที่เซลล์ไม่ต้องการใช้ ความยาวของช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอายุ และ สภาพของเชื้อด้วย (ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, 2546)

2. Log phase เมื่อเซลล์ปรับตัวเข้ากับสภาพใหม่ได้แล้ว เซลล์จะอยู่ภายใต้สภาวะที่มีอาหารอุดมสมบูรณ์ จะพบการเพิ่มทั้งในด้านของน้ำหนักและจำนวน (cell mass และ cell number) อย่างรวดเร็ว โดยการแบ่งตัวแบบ binary fission ทำให้ประชากรเพิ่มจำนวนแบบ Exponential ความยาวของช่วงนี้ขึ้นกับความอุดมสมบูรณ์ของอาหาร สารอาหารชนิดที่หมดก่อน และมีผลให้การเจริญหยุดลง จัดว่าเป็นปัจจัยจำกัด (limiting factor) (ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, 2546)

3. Stationary phase เมื่อปัจจัยจำกัดให้หมดอัตราการเจริญจะลดลงจนเป็นศูนย์แต่กระบวนการทางชีวภาพส่วนใหญ่จะยังดำเนินอยู่เพื่อคงความมีชีวิตเซลล์ยังต้องการอาหารอาจดึงมาจากแหล่งสะสมในเซลล์ เป็นช่วงที่ประชากรเข้าสู่สภาวะหยุดนิ่งโดยอาจอยู่ได้เป็นเวลานานพอควรโดยไม่ตายและถ้ามีการเติมอาหารให้ ประชากรก็สามารถแบ่งตัวเพิ่มจำนวนได้อีก อย่างไรก็ตามสภาวะหยุดนิ่งนี้จะมีช่วงจำกัด (ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, 2546)

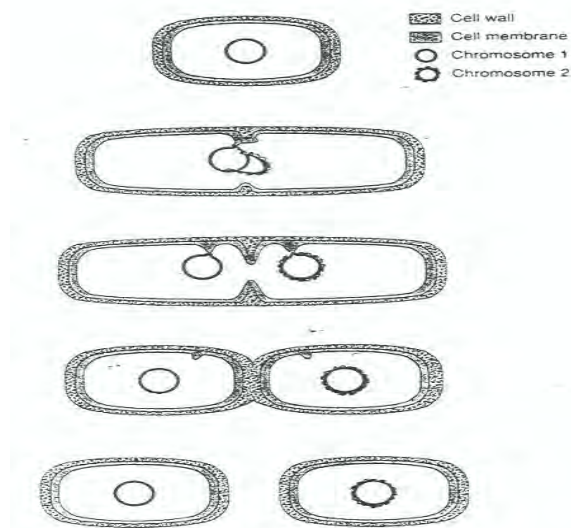
4. Death phase หลังจาก Stationary phase แล้วเซลล์อยู่ในสภาพไม่แข็งแรง มี activity ต่ำ และอาจมีเซลล์ที่มีความผิดปกติทางโครงสร้าง เซลล์แตกตายโดยกระบวนการ lysis โดยอัตรา

การตายของเซลล์จะสูงกว่าอัตราการเกิด เซลล์จะลดจำนวนลงแบบ Exponential ซึ่งตรงกันข้ามกับในช่วง Log phase (ภัษราภรณ์ สุวรรณวิทยา, 2546)

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เหตุผลประการหนึ่งคือ ความแตกต่างในด้านความต้องการธาตุอาหารของจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน จุลินทรีย์บางชนิดต้องการเพียงแร่ธาตุพื้นฐานที่จำเป็นเท่านั้นและไม่ต้องการสารอินทรีย์เลยก็สามารถเติบโตได้ดี เรียกจุลินทรีย์กลุ่มนี้ว่า phototrophs ในขณะที่ จุลินทรีย์บางชนิดต้องการสารอินทรีย์ในการเจริญเติบโต และไม่สามารถใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ได้ เรียกว่า chemotrophs จุลินทรีย์ที่ต้องการสารอาหารอย่างอุดมสมบูรณ์ในการเจริญเติบโตเรียกว่า fastidious microorganisms

2.6.3 ลักษณะการเจริญเติบโตของ *E. coli*

การเจริญ (growth) ในทางจุลชีววิทยาหมายถึงทวิจำนวนของจุลินทรีย์ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณ มากกว่าการเพิ่มขนาดของเซลล์ ถ้านำแบคทีเรียมาเลี้ยงในอาหารและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแบคทีเรียจะสร้างเอนไซม์ออกมาย่อยสารอาหารเหล่านี้และดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างพลังงานและส่วนประกอบของเซลล์เพื่อการทวิจำนวน ดังนั้นถ้านำเซลล์ไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะพบเซลล์ในระยะแตกต่างกันไป



รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย (จุฑามาศ เทพชัยศรี, 2542)

จากรูปเป็นการแสดงระยะแบ่งเซลล์แบบ binary fission ของแบคทีเรียและผนังเซลล์ที่สร้างขึ้นนี้จะคอดเข้าจนกระทั่งแบ่งเซลล์ออกเป็นสองส่วน แยกออกจากกันเป็นเซลล์อิสระ แต่ละเซลล์ที่ได้ใหม่นี้จะมีการเจริญและทวีจำนวน กระบวนการสืบพันธุ์ของแบคทีเรียเรียกว่า ไบนารี ฟิสชัน (binary fission) เป็นการแบ่งเซลล์จากหนึ่งเป็นสอง จากสองเป็นสี่ ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียเพิ่มจำนวนมากขึ้นอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นกลุ่มเซลล์เรียกว่า โคลินี(colony) สามารถมองเห็นด้วยสายตาได้ ในโคลินีหนึ่งอาจประกอบด้วยเซลล์เป็นล้านเซลล์ โคลินีของเซลล์ของแบคทีเรียแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัว อาจคล้ายกันหรือแตกต่างกัน เมื่อแบคทีเรียต้องการแบ่งตัว เซลล์เจริญและยาวขึ้น ผนังเซลล์จะเจริญตามขวางแบ่งแบคทีเรียออกเป็น 2 เซลล์ เซลล์ที่เกิดขึ้นใหม่ทั้ง 2 ก็ จะเจริญเติบโตขึ้น ช่วงเวลาที่แบคทีเรียใช้ในการแบ่งเซลล์แต่ละครั้งเรียกว่า เจเนอเรชันไทม์ (generation time) บางครั้งอาจใช้เวลาสั้นเพียง 10 – 12 นาที

2.6.4 ลักษณะการเจริญของอิโคไลในอาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในการศึกษาพอจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

- 1) อาหารแข็ง (agar media) โดยทำการศึกษาลักษณะการเจริญเป็นโคลินีของเชื้อในอาหารแข็งในงานอาหารเลี้ยงเชื้อ และลักษณะการเจริญของเชื้อตรงผิวหน้าของ agar slant
- 2) อาหารเหลว เพื่อศึกษาลักษณะการสร้างที่ผิวของอาหารเหลว รวมถึงความขุ่นที่เกิดขึ้นในอาหารเลี้ยงเชื้อ
- 3) อาหารกึ่งแข็งกึ่งเหลว โดยศึกษาการเจริญของเชื้อภายใต้เนื้อวุ้น (agar หรือ gelatin stab) นอกจากนี้สิ่งที่จะต้องคำนึงถึง คือ ความจำเพาะของอาหารเลี้ยงเชื้อกับเชื้อแบคทีเรียนั้น อย่างไรก็ตามการเจริญของแบคทีเรียในอาหารหรือบนผิวของอาหารจะก่อให้เกิดผลเสียต่ออาหารชนิดนั้น โดยอาจทำให้มีลักษณะที่ไม่น่าดู ไม่น่าบริโภคหรืออาจจำเป็นต้องทิ้งอาหารชนิดนั้นไป ตัวอย่างของแบคทีเรียที่กล่าวถึงนี้ได้แก่ แบคทีเรียที่สามารถสร้างสี (pigmented bacteria) ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสีที่ผิวของอาหาร หรือแบคทีเรียที่สร้างเมือกก็จะกระทบต่อผิวของอาหารเช่นกัน เป็นต้น

2.6.5 วิธีการวัดการเจริญเติบโตของอิโคไล

วิธีการวัดการเจริญของแบคทีเรียมีหลายวิธีด้วยกัน คือ

1. Counting chamber method เป็นการนับจำนวนเซลล์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งใช้สไลด์ที่เรียกว่า Petroff Hausser ที่ทำเป็นร่อง ซึ่งทราบขนาดของความกว้างและความลึก เมื่อหยด suspension ของแบคทีเรียแล้วปิดด้วย cover slide นำไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ

compound microscope หรือแบบ phase microscope นับจำนวนแบคทีเรียที่พบแล้วคำนวณหาจำนวนแบคทีเรียต่อมิลลิลิตรใน suspension ได้ ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถทราบจำนวนแบคทีเรียได้อย่างรวดเร็ว และสามารถสังเกตลักษณะของแบคทีเรียที่นับได้ด้วย ข้อเสียคือ เป็นการนับเซลล์แบคทีเรียทั้งหมด ซึ่งไม่สามารถแยกได้ว่าแบคทีเรียนั้นมีชีวิตหรือไม่ และไม่เหมาะที่จะนับจำนวนแบคทีเรียใน suspension ที่มีปริมาณมากหรือน้อยเกินไป

2. Plate count technique เป็นการนับจำนวนเซลล์แบคทีเรียที่เจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อ มี 2 วิธีคือ วิธีแรกเรียก pour plate โดยการนำ suspension ของแบคทีเรียจำนวนหนึ่งใส่จานเพาะเชื้อแล้วใส่อาหารเลี้ยงเชื้อที่หลอมเหลวลงไป เขย่าให้เชื้อแพร่กระจาย ทิ้งไว้ให้แข็งนำไปบ่มเชื้อ ส่วนวิธีที่สองเรียกว่า spread plate โดยนำ จานเพาะเชื้อที่เทอาหารทิ้งไว้จนแข็งหยด suspension ของแบคทีเรียลงไป แล้วใช้แท่งแก้วรูปตัว L กลี่ยให้เชื้อแพร่กระจาย นำ ไปบ่มเชื้อที่อุณหภูมิเหมาะสม ประมาณ 48 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีที่ได้ โดยถือว่าแบคทีเรียแต่ละกลุ่มเซลล์ได้มาจากการเจริญแบ่งเซลล์ของแบคทีเรียหนึ่งเซลล์เท่านั้น จำนวนกลุ่มเซลล์ในแต่ละจานเพาะเชื้อควรจะมีประมาณ 30-300 เท่านั้น ถ้ามีมากกว่านี้ต้องนำ suspension มาทำให้เจือจางเสียก่อน ข้อดีของวิธีนี้เป็นการนับจำนวนแบคทีเรียที่ถูกต้อง เพราะนับเฉพาะแบคทีเรียที่มีชีวิตเท่านั้น นอกจากนี้ยังทำได้ง่าย รวดเร็ว ส่วนข้อเสียคือ แต่ละกลุ่มเซลล์ของแบคทีเรียที่เจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อนั้น บางครั้งอาจไม่ได้เกิดจากเซลล์เดียว แต่เกิดจากหลายๆเซลล์ที่อยู่ใกล้กัน มีการเจริญและทวีจำนวนจนเกิดเป็นกลุ่มเซลล์เดียวกันได้ ดังนั้นจำนวนแบคทีเรียที่ได้จึงน้อยกว่าจำนวนที่เป็นจริง

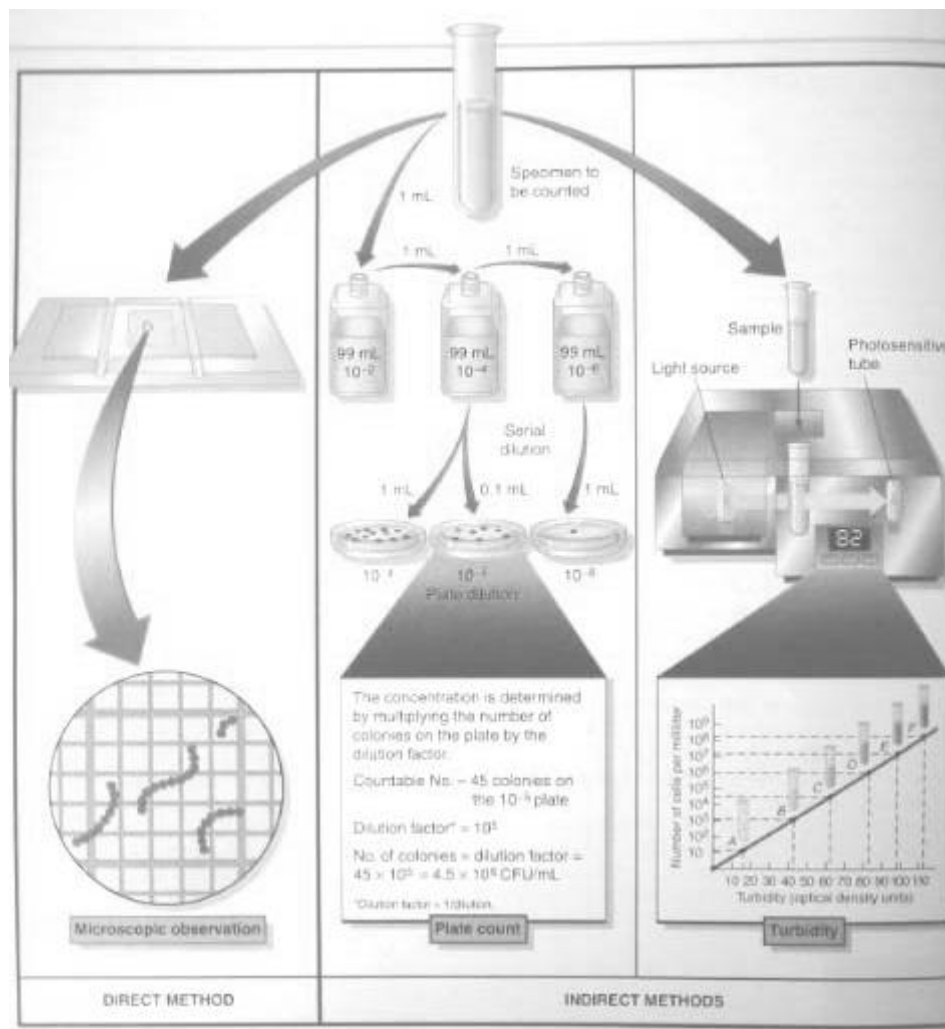
3. การวัดความหนาแน่นของเซลล์แบคทีเรียใน suspension โดยใช้เครื่องวัดที่เรียกว่า spectrophotometer ซึ่งใช้หลักการฉายแสงผ่าน suspension ของแบคทีเรีย แสงส่วนหนึ่งจะถูกเซลล์แบคทีเรียดูดซับไว้ ซึ่งปริมาณแสงที่ถูกดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของเซลล์หรือจำนวนแบคทีเรีย กล่าวคือ เซลล์แบคทีเรียที่มีขนาดใหญ่จะดูดซับแสงไว้ได้มากกว่าเซลล์ที่มีขนาดเล็กกว่า หรือ suspension ที่มีแบคทีเรียจำนวนมากจะดูดซับแสงไว้ได้มากกว่า suspension ที่มีจำนวนเซลล์น้อยกว่า การวัดปริมาณการเจริญของแบคทีเรียวิธีนี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นการดูความขุ่นของ suspension นั้นเอง ข้อดีของวิธีนี้คือ ทำ ได้สะดวก รวดเร็ว ส่วนข้อเสียคือเป็นการนับเซลล์แบคทีเรียทั้งหมดซึ่งไม่สามารถแยกได้ว่าแบคทีเรียนั้นมีชีวิตหรือไม่

4. วัดหาน้ำหนักแห้งของเซลล์ วิธีนี้เป็นการวัดการเจริญของแบคทีเรียจากน้ำหนักของเซลล์ที่เพิ่มขึ้นโดยนำ suspension ของแบคทีเรียไปทำ ให้แห้งและต้องไม่ให้มีสารอื่นๆเจือปนมา ด้วย suspension ที่จะนำมาหาน้ำหนักของเซลล์นั้นจะต้องมีเซลล์แบคทีเรียอยู่เป็นจำนวนมาก วิธีนี้นิยมใช้มากในงานวิจัยทางจุลชีววิทยา

5. วัดปริมาณสารที่แบคทีเรียผลิตออกมา เมื่อนำแบคทีเรียบางชนิดไปเลี้ยงในอาหารที่มีน้ำตาลแลคโตส จะ ferment น้ำตาลให้ผลิตผลออกมาเป็นกรดหรือบางชนิด ferment น้ำตาล

แล้วให้ก๊าซซึ่งก๊าซหรือกรดที่ได้นี้จะเป็นส่วนโดยตรงกับปริมาณของแบคทีเรีย กล่าวคือถ้ามีปริมาณก๊าซหรือกรดมากจะมีแบคทีเรียจำนวนมากด้วย

6. การวัดการเจริญจากปริมาณธาตุไนโตรเจนของเซลล์ ธาตุไนโตรเจนเป็นส่วนที่สำคัญของเซลล์เพราะพบเป็นส่วนประกอบของโปรตีนและกรดนิวคลีอิก ดังนั้น เมื่อเซลล์มีปริมาณมากก็จะมีธาตุไนโตรเจนมากด้วย โดยทั่วไปแบคทีเรียมีธาตุไนโตรเจนประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง การวัดหาการเจริญของแบคทีเรียด้วยวิธีนี้ จะต้องล้างเซลล์ในน้ำที่ไม่มีไนโตรเจนปะปน แล้ววัดหาปริมาณธาตุไนโตรเจนด้วยวิธีทางเคมี นิยมใช้ในงานวิจัยส่วนใหญ่



รูปที่ 2.5 วิธีวัดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (จุฬามาศ เทพชัยศรี, 2542)

2.6.6 ความสำคัญของอีโคไล (มันซิน ตันซูลเวคม์, 2542)

Escherichia coli หรือ อีโคไล (นิยมใช้ชื่อย่อ *E. coli*) เป็นแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์มแบคทีเรีย เป็นตัวชี้การปนเปื้อนของอุจจาระในน้ำ มีอยู่ตามธรรมชาติในลำไส้ใหญ่ของสัตว์และมนุษย์ ในอุจจาระปกติของคน 1 กรัม จะมีโคลิฟอร์มแบคทีเรียประมาณ 100,000 ถึง 1,000,000,000 ตัว โดยปกติแล้วแบคทีเรียพวกนี้ไม่ก่อให้เกิดโรค แต่เมื่อถ่ายออกมากับอุจจาระลงไปปนเปื้อนอยู่ในน้ำ มันจะสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำได้นานกว่าพวกแรก การตรวจวิเคราะห์ก็ง่ายกว่าพวกแรก ดังนั้น จึงนิยมใช้โคลิฟอร์มแบคทีเรียเป็นดัชนี (Index) ที่ถึงคุณภาพทางแบคทีเรียของน้ำ เหตุที่เลือกเอาโคลิฟอร์มแบคทีเรียเป็นดัชนีในการตรวจคุณภาพของน้ำ มีดังนี้

1. การตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำทำได้ง่ายกว่าการตรวจหาพวกเอนเทอริค พโทเจน ตัวอื่นๆ เพราะโคลิฟอร์มแบคทีเรียสามารถย่อยน้ำตาลแลคโตส (Lactose) ได้กรดกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแบคทีเรียอื่นๆ ที่ย่อยสลายน้ำตาลแลคโตสได้ก็มีเหมือนกันแต่จำนวนน้อยมาก

2. เนื่องจากโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ปกติจะมีอยู่ในอุจจาระคนและสัตว์ 95% แต่อยู่ในดินเพียง 5% ดังนั้นน้ำที่มีอุจจาระปนอยู่จึงมีโอกาสตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

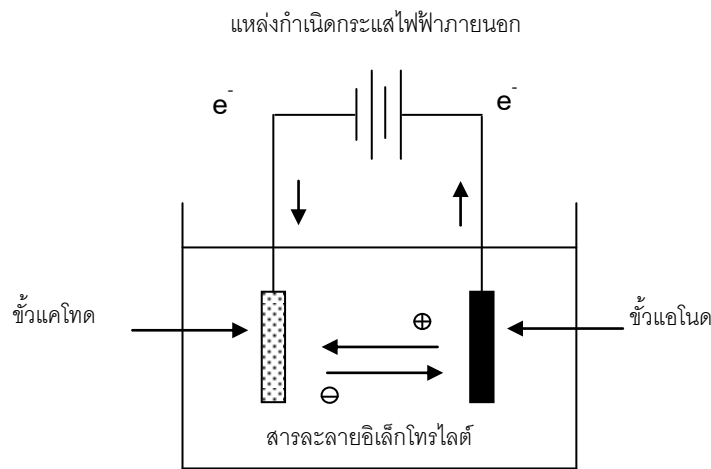
3. ในสภาวะอย่างเดียวกัน คือน้ำชนิดเดียวกัน อุณหภูมิเท่ากัน โคลิฟอร์มแบคทีเรียจะมีความทนทานได้ดีกว่าแบคทีเรียเอนเทอริค พโทเจน ตัวอื่นๆ

4. การตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำ จึงเป็นเครื่องชี้ให้ทราบว่า น้ำนั้นมีความสกปรกมากน้อยเพียงใด ไม่เหมาะสมที่จะใช้ กล่าวคือ ถ้าตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียมากแสดงว่าน้ำนั้นสกปรกมาก ถ้าสกปรกน้อยก็พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียน้อย หรืออาจจะไม่พบเลย

5. เมื่อตรวจสอบพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำ ก็พอจะลงความเห็นได้ว่า น้ำนั้นมีอุจจาระของคนหรือสัตว์ปนอยู่ด้วยแน่ และอาจคาดการณ์ได้ว่า อาจจะมีเชื้อโรคของระบบทางเดินอาหารปนอยู่ด้วย ทั้งนี้เพราะโรคที่อาศัยน้ำเป็นสื่อ นั้น ส่วนใหญ่ เป็นโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินอาหาร ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วจะปนออกมาพร้อมกับอุจจาระเสมอ

2.7 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (เอกรัฐ มีวาสนา,2552)

กระบวนการไฟฟ้าเคมีจะใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย เครื่องเซลล์ไฟฟ้าสองเครื่องเซลล์หนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน และอีกเครื่องเซลล์หนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน โดยเครื่องเซลล์อันหนึ่งๆจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายของไอออนโลหะนั้น เมื่อนำเครื่องเซลล์ไฟฟ้าสองชนิดมาประกอบกันเป็นเซลล์ไฟฟ้า โดยต่อสารละลายทั้งสองด้วยสะพานเกลือ (Salt bridge) นอกจากนี้เซลล์เคมีไฟฟ้าอาจไม่ใช้สะพานเกลือได้ โดยให้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วจุ่มในสารละลายเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยเซลล์เคมีไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ



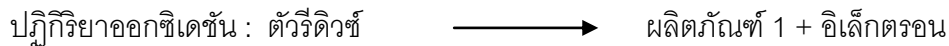
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (เอกรัฐ มีวาสนา,2552)

เซลล์กัลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก เป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า อันเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ตัวอย่างของเซลล์ไฟฟ้ากัลวานิกในทางการค้า คือ แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

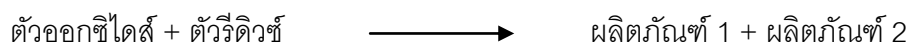
เซลล์อิเล็กโทรไลติก เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลติกในทางการค้าเป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ เช่น การสังเคราะห์โลหะอะลูมิเนียม การแยกของโลหะเงินหรือทอง การชุบโลหะ เป็นต้น

ในการใช้กระบวนการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจะใช้เคมีไฟฟ้าแบบเซลล์อิเล็กโทรไลติก ปฏิกิริยาในกระบวนการเคมีไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโดยจะเกี่ยวข้องกับ

กับการถ่ายโอนมวลสารและอิเล็กตรอน โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน จะมีสารหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเรียกสารนี้ว่าเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) หากแบ่งปฏิกิริยารีดอกซ์ออกเป็นสองส่วน จะได้ครึ่งปฏิกิริยา (Half reaction) สองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยารีดักชัน (ปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน) และ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ปฏิกิริยาที่มีการจ่ายอิเล็กตรอน) ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้



ถ้ารวมครึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเข้าด้วยกันโดยดุลจำนวนอิเล็กตรอนที่ให้และรับเท่ากันจะได้ปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังนี้



เนื่องจากอิเล็กโตรไลติกเซลล์ เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานจากแหล่งภายนอก ความยากง่ายในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนที่อยู่ในสารละลายนั้น ซึ่งดูได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้า และค่า E^0 ถ้าสารละลายอยู่ในสภาวะมาตรฐาน ในกรณีของสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะเกิดการแข่งขันในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนต่างๆ ในสารละลายและโมเลกุลของน้ำด้วย ในการพิจารณาจะแยกอธิบายการแข่งขันในการเกิดปฏิกิริยาที่แคโทดและแอโนดออกจากกันดังนี้

ปฏิกิริยาที่แคโทด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโตรไลต์แล้วปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดได้ 2 กรณี

- ไอออนบวกถูกรีดิวซ์เกิดเป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น ไอออนโลหะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะ
 - โมเลกุลของน้ำอาจถูกรีดิวซ์ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน
- ปฏิกิริยาที่แอโนด ในทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาที่แคโทด ปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจเกิดขึ้นในสารละลายจากโมเลกุลของน้ำหรือไอออนลบ
- ไอออนลบถูกออกซิไดส์เกิดเป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น คลอไรด์ไอออนเป็นก๊าซคลอรีน
 - โมเลกุลของน้ำอาจถูกออกซิไดส์ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของออกซิเจน และไฮโดรเจนไอออน

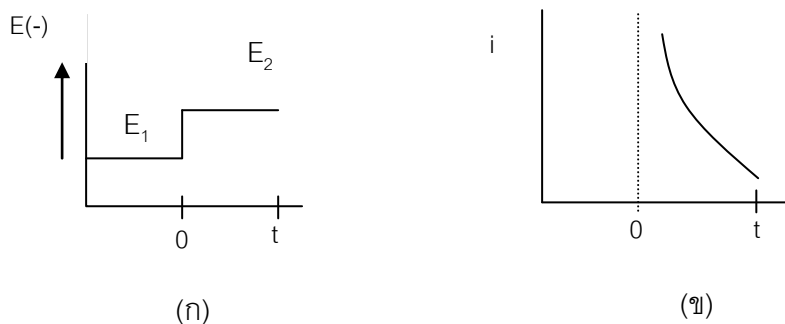
ในการทำนายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์อิเล็กโทรไลติกนั้น อาจแยกพิจารณาเป็นปฏิกิริยาที่แอโนดและที่แคโทด หรือพิจารณาปฏิกิริยารวมของทั้งสองครึ่งปฏิกิริยานั้นว่า คูัดที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยที่สุดปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นก่อนซึ่งการพิจารณาทั้งสองแบบนี้ มีความจำเป็นต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยา และหากทราบค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจะทำให้การทำนายมีความแม่นยำยิ่งขึ้น ตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามีดังนี้

- ชนิดของขั้วไฟฟ้า
- ลักษณะรูปร่างและสภาวะพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า
- ลักษณะการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) ไปยังขั้วไฟฟ้า
- ความเข้มข้นของไอออนที่ผิว
- ชนิดและความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- สารอื่นๆ ที่ปนอยู่ในสารละลาย เช่น ตัวทำละลาย
- ค่าการนำไฟฟ้า
- ความเร็วจำกัดของไอออนในสารละลาย (Mobility)
- ค่าศักย์ไฟฟ้า
- กระแสไฟฟ้า
- อุณหภูมิ
- ความดัน
- เวลา

2.7.1 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

1.การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode) เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด

E_1 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดส์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังภาพ (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($I = kC$)

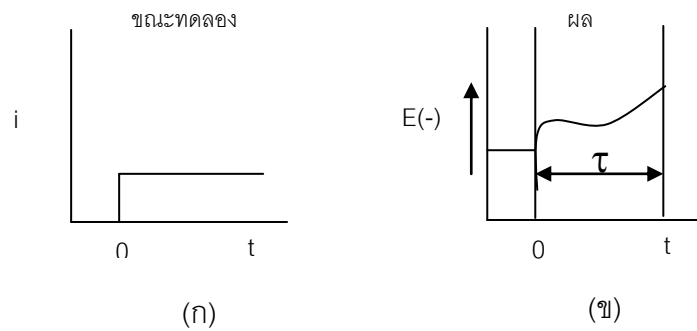


รูปที่ 2.7 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(Friedrich, 1962)

2. การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode) รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique โดยเป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดส์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้างี้จะลดลงเช่นกันตามสมการของเนินส์ ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้นี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (Friedrich, 1962)

ค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์สามารถแสดงได้ตามสมการของเนิร์นส์ (Nerns's equation)

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Ox}]}{[\text{Red}]} \quad (2-2)$$

เมื่อ

- E = ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ณ สภาวะใดๆ (โวลต์)
 E^0 = ค่าความต่างศักย์มาตรฐานระหว่างขั้วแคโทดและสารละลาย (โวลต์)
 R = ค่าคงที่ของก๊าซเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลต่อเคลวิน)
 T = อุณหภูมิ (เคลวิน)
 n = จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา (ประจุต่อโมล)
 F = ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,500 (แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ)
 $[\text{Ox}], [\text{Red}]$ = ความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์และตัวรีดิวซ์ตามลำดับ (โมลต่อลิตร)

เพื่อให้ได้อัตราในการกำจัดสูงสุด การรบกวนของไอออนโลหะควรเป็นการควบคุมแบบถ่ายโอนมวลสาร (mass transport control) สมการแสดงอัตราในการนำกลับโลหะออกจากสารละลาย เขียนได้ดังนี้

$$-V \frac{d_c}{d_t} = \frac{-I_L}{nF} = k_m A_e \quad (2-3)$$

เมื่อ

V	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
C	=	ความเข้มข้นของไอออนโลหะ (โมลต่อลิตร)
t	=	เวลา (วินาที)
I_L	=	กระแสจำกัด (limiting current) (แอมแปร์)
k_m	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer coefficient)
A_e	=	พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า (ตารางเมตร)

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2-3) เทียบกับเวลาจะได้สมการดังนี้

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp\left(\frac{-k_m A_e t}{V}\right) \quad (2-4)$$

เมื่อ

$C(0)$	=	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)
$C(t)$	=	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อเวลาเปลี่ยนไป (โมลต่อลิตร)

จากสมการกล่าวได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนโลหะ ขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญ คือ

1. การถ่ายโอนมวลสารจากสารละลายสู่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ขึ้นกับสมบัติของอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้า การกวนจะช่วยให้เพิ่มการถ่ายโอนมวลสาร
2. พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า

2.7.2 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือ ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด ในทางปฏิบัติไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรง แต่ต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ดังนั้นจึงต้องกำหนดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมาตรฐานขึ้น คือ กำหนดให้อิเล็กโทรดไฮโดรเจนเมื่ออยู่ที่สภาวะมาตรฐาน เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของ

อิเล็กโทรดอื่น เช่น $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$ เป็นต้น ต้องนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนที่มีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับศูนย์ และวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E°_{cell}) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว (E°_{cell}) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการทำให้เช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ

ศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้วอิเล็กโทรดที่จะรับอิเล็กตรอนว่า มีความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่า เป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดส์ (หรือตัวรีดิวซ์) เช่น MnO_4^- กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรดพบว่า ค่า E° ของระบบ $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+} = +0.77$ โวลต์ และค่า E° ของ $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+} = +1.52$ โวลต์ แสดงว่าระบบ $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$ มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$ จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่า จากสูตรการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$E^{\circ}_{\text{cell}} = E^{\circ}(\text{ขั้วบวก}) - E^{\circ}(\text{ขั้วลบ}) \quad (2-5)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะใดๆ จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการที่ (2-5) คือ

$$E_{\text{cell}} = E(\text{ขั้วบวก}) - E(\text{ขั้วลบ}) \quad (2-6)$$

2.7.3 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ ของประจุที่ผ่านเข้าวงจร จะชะอะลูมิเนียมออกมาจากขั้วไฟฟ้า 9 กรัม ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้นก็จะทำให้มีอะลูมิเนียมหรือเหล็กหลุดออกมาจากอิเล็กโทรดเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น จากกฎของโอห์ม ซึ่งกล่าวว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้จะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสไฟฟ้า และความต้านทานกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (2-7)

$$V = IR \quad (2-7)$$

โดยที่

V	=	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
I	=	ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
R	=	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)

และมีความสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (2 – 8)

$$\text{งานไฟฟ้าสุทธิ (W}_{\text{elect}}) = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} = nE \times 96,487 \quad (2 - 8)$$

ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามสมการที่ (2 – 9)

$$R = \frac{l}{CA} \quad (2 - 9)$$

เมื่อ

R	=	เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโอห์ม
l	=	เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ในหน่วยเซนติเมตร
C	=	เป็นค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโอห์มหรือซีเมน
A	=	เป็นพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยตารางเซนติเมตร

2.7.4 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (Ampere) จำนวนกระแสไฟฟ้าที่ผ่านไปที่หนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดจะถูกวัดในรูปของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current intensity, I) การวัดปริมาณของกระแสซึ่งผ่านเข้าไปในวัสดุเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) ในโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม ซึ่งสามารถเขียนเป็นรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า (E_p) มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเซนติเมตรได้ คือ

$$I = \sigma E_f \quad (2-10)$$

$$E_f = \frac{I}{\sigma} = \frac{V}{R\sigma} \quad (2-11)$$

โดย

σ	=	เป็นค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโอมห์ต่อเซนติเมตร
V	=	เป็นความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็นโวลต์
R	=	เป็นความต้านทานระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็นโอห์ม
I	=	เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็นแอมแปร์

2.7.5 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไปในสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลติก เพื่อให้อิเล็กตรอนหนึ่งโมลทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือคือ ผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$\begin{aligned} 1 \text{ F (Faraday)} &= eN = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C})(6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ &= 96,487 \text{ C mol}^{-1} \quad (\text{C} = \text{coulomb}) \\ \text{จะได้ } X \text{ coulomb} &= I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)} \end{aligned}$$

หรือ 1 ฟาราเดย์ คือ ไฟฟ้าฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 1 โมลเท่ากัน เช่น

$$\begin{aligned} \text{-ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน } \text{Al}^{+3} \text{ จะได้ } \text{Al}_{(s)} \text{ 1 โมล} &= \text{น.น.กรัมโมลต่อประจุ} \\ &= 26.98/3 = 9 \text{ กรัม} \\ \text{-ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน } \text{Fe}^{+2} \text{ จะได้ } \text{Fe}_{(s)} \text{ 1 โมล} &= \text{น.น.กรัมโมลต่อประจุ} \\ &= 55.85/2 = 27.9 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎฟาราเดย์ ดังต่อไปนี้

$$W = \frac{ItM}{ZF} \quad (2 - 12)$$

โดยที่

W	=	เป็นปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ (กรัม)
I	=	เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง
M	=	เป็นน้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด
t	=	เป็นเวลาที่ใช้ (วินาที)
Z	=	เป็นจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
F	=	เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487

มวลของสารที่คำนวณได้จากกฎฟาราเดย์ คือ มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตาม ทฤษฎีหมายความว่า กระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ให้แก่ระบบถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ ไอออนโลหะทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบไม่ได้ถูกใช้ในการ เกิดปฏิกิริยาทั้งหมด เนื่องจากการสูญเสียไปในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดปฏิกิริยา รีดักชันของน้ำเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำเป็นก๊าซออกซิเจน ที่ขั้วแอโนด หรืออาจเกิดจากความต้านทานต่างๆเนื่องจากมีตัวออกซิไดส์หลายชนิดละลายอยู่ รวมกันในสารละลาย ดังนั้นจึงต้องมีการวัดประสิทธิภาพเชิงกระแส

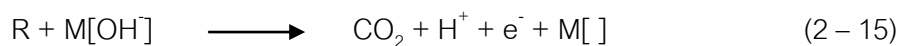
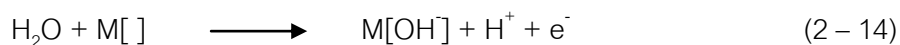
$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2 - 13)$$

2.8 การประยุกต์ใช้หลักการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการไฟฟ้าเคมีได้รับความสนใจมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็น กระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี หลักการของกระบวนการเคมีไฟฟ้าคือการถ่ายโอน อิเล็กตรอนระหว่างสารละลายกับผิวของขั้วไฟฟ้าแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยอาศัยแหล่งกำเนิด ไฟฟ้าภายนอก

2.8.1 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Electro-oxidation: EO) (Israilides et. al, 1997)

กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์ และสารมลพิษในน้ำเสียได้ โดยสารอินทรีย์และสารมลพิษจะถูกทำลายด้วยอนุพันธ์ของ OH° (Hydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง (Strong oxidizing agent) เรียกกระบวนการนี้ว่า Direct anodic process โดยสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์โดยอนุพันธ์ของ OH° (Hydroxyl radicals) ทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยา (2 – 14) และ (2 – 15) และศักยภาพของตัวออกซิไดส์แสดงตามตารางที่ 2.1



เมื่อ $\text{M}[]$ คือ พื้นที่ผิวของขั้วแอโนดที่เกิดปฏิกิริยา

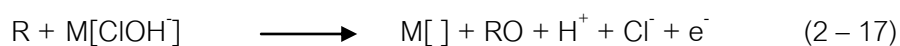
$\text{M}[\text{OH}]$ คือ OH° ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด

R คือ สารอินทรีย์

ถ้าในสารละลายมีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ผสมอยู่คลอไรด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับโลหะของขั้วไฟฟ้าเกิด ClOH° (Chlorohydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Indirect oxidation ดังปฏิกิริยา (2 – 16)



เมื่อ $\text{M}[\text{ClOH}]$ คือ ClOH° ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด ซึ่งสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ ตามปฏิกิริยา (2 – 17)

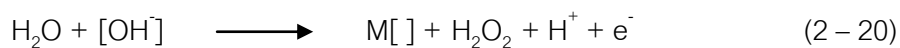
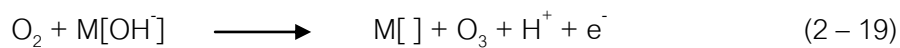


เมื่อ RO คือ ผลิตภัณฑ์ของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดส์

และ ClOH° สามารถทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดก๊าซคลอรีน (Cl_2) ตามปฏิกิริยา (2 – 18) ซึ่งช่วยลดปริมาณของเชื้อโรคในน้ำเสียได้



นอกจากนี้อนุพันธ์ของ OH^\bullet จะสลายตัวเป็นโอโซน (O_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ได้เช่นกัน ตามปฏิกิริยา (2 – 19) และ (2 – 20) ประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สารอินทรีย์จะขึ้นกับชนิดของขั้วแอโนดและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบศักยภาพของตัวออกซิไดส์ตามสารตั้งต้น

Oxidants	Formation potential
$\text{H}_2\text{O}/\bullet\text{OH}$ (hydroxyl radical)	2.80
O_2/O_3 (ozone)	2.07
$\text{SO}_4^{2-}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ (peroxodisulfate)	2.01
$\text{MnO}_2/\text{MnO}_4^{2-}$ (permanganate ion)	1.77
$\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2$ (hydrogen peroxide)	1.77
$\text{Cl}^-/\text{ClO}_2^-$ (chlorine dioxide)	1.57
$\text{Ag}^+/\text{Ag}^{2+}$ (silver(II) ion)	1.5
Cl^-/Cl_2 (chlorine)	1.36
$\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (dichromate)	1.23
$\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ (oxygen)	1.23

จะเห็นได้ว่าค่าอนุพันธ์ของ OH^\bullet จะมีศักยภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวออกซิไดส์อื่นๆ และสามารถเตรียมได้โดยใช้น้ำเป็นสารตั้งต้น (Chen, 2004)

2.8.2 การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

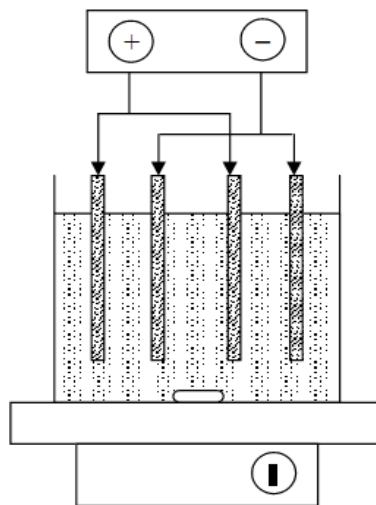
การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์มี 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้นแต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง (Mollah et al., 2004)

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทด ซึ่งการวางขั้วในรูปแบบนี้ไม่เป็นที่ยอมรับ เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องใช้ขนาดใหญ่เพื่อให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก ทำให้ต้องมีการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้ารูปแบบต่างๆขึ้น สำหรับกรณีที่ต้องใช้ขั้วไฟฟ้ามากกว่า 1 คู่ สามารถเลือกวิธีต่อทางไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ

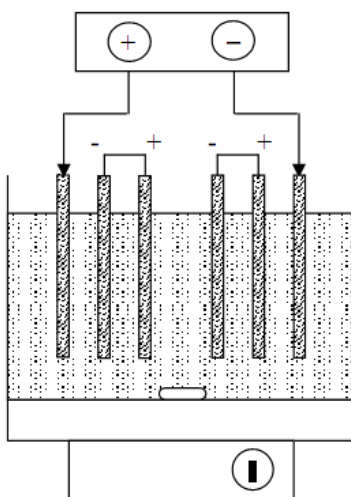
1. แบบโมโนโพลาร์ (Monopolar electrode) การวางขั้วแบบนี้จะมีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าแต่ละแผ่นทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ซึ่งวางสลับกัน โดยที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าแผ่นเดียวกันจะมีประจุชนิดเดียวกัน ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะสามารถจัดเรียงเซลล์ได้ 2 แบบ คือ

- แบบขนาน (Parallel connections) กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งให้แต่ละเซลล์โดยขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในของเซลล์นั้นๆ ซึ่งค่าความต่างศักย์ของระบบจะมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่

- แบบอนุกรม (Series connections) มีการจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้างดรูปที่

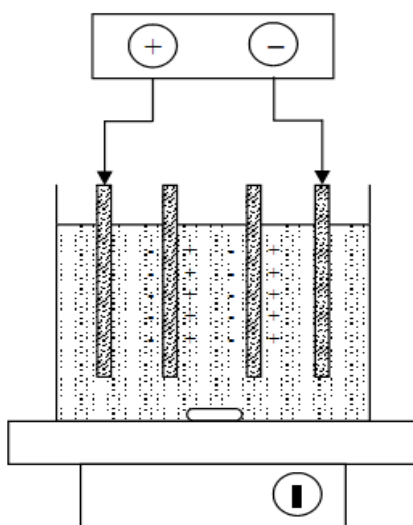


รูปที่ 2.9 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน (Chen, 2004)



รูปที่ 2.10 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Chen, 2004)

2. ไบโพลาร์ (bipolar electrode) เป็นการต่อขั้วแบบที่มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้นซึ่งจะอยู่บริเวณอยู่ปลายนอกสุดดังรูปที่ 2.11 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้าจะมีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านเป็นขั้วบวกซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากมีความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ที่ต่อแบบอนุกรม แต่อย่างไรก็ตามระบบจะมีกระแสไฟฟ้าเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะที่ใช้งาน



รูปที่ 2.11 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์ (Chen, 2004)

2.8.3 ชนิดขั้วไฟฟ้า (Electrodes) (เอกรัฐ มีวาสนา, 2552)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า โดยวัสดุที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น

1. อะลูมิเนียม (Aluminum) มีลักษณะสีขาวเหมือนเงิน เนื้อเป็นมันเงาไม่หมอง มีน้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี ไม่สึกกร่อนได้ง่าย ทำปฏิกิริยากับกรดและด่างบางชนิดเท่านั้น แข็งมากไม่ค่อยมีรอยแตกร้าวสามารถทำให้มีรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ โดยอะลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 มักจะเป็นสารประกอบโคเวเลนต์ การใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสขึ้นทำให้อะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนและจะละลายในสารละลาย ซึ่งไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมจะไม่ละลายน้ำ ดังนั้นในสารละลายอาจจะมีคอลลอยด์อยู่มาก

2. เหล็กกล้า (Steels) เป็นโลหะหนัก มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปานกลาง สารประกอบของเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้าง แต่ไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่เรียกว่าสนิมเหล็ก เหล็กทำปฏิกิริยารวมกับโลหะทั้งหลายได้เกือบทั้งหมด เมื่อทำให้ร้อนเล็กน้อยแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ปนกัน เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นเสถียรมากและสามารถเกิดเกลือต่างๆ กับแอนไอออนที่เสถียรได้ สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ Fe^{2+} ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไฮดรอน $(Fe(H_2O)_6)^{2+}$ สารละลาย Fe^{2+} นี้ถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศกลายเป็น Fe^{3+} ได้ Fe^{3+} อยู่ในสารละลายของน้ำเป็น hydrated ion เนื่องจาก Fe^{3+} มีขนาดไอออนเล็กและมีประจุมากจึงแสดงสมบัติเป็นกรด ทั้ง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้

การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสขึ้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนด จะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาพร้อมเหล็กในรูป Fe^{2+} ที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ทำให้ค่า pH ของน้ำสูงขึ้นได้ ทำให้เหล็กที่มาจากแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนดสามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เช่น $Fe(OH)_2$ ได้ ปริมาณการตกตะกอนของเหล็กจึงขึ้นกับปริมาณไฮดรอกไซด์ที่ได้จากขั้วแคโทดและค่า pH ของน้ำเสีย ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแผ่นเหล็กในอิเล็กโทรไลต์เซลล์ เมื่อใช้ไประยะหนึ่ง โดยมากแผ่นเหล็กจะหาซื้อง่ายและราคาถูกยิ่งไปกว่านั้นมันมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายไอออนโลหะหนักได้ดี จึงเป็นที่นิยม

3.เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นเหล็กกล้าที่นำมาผสมกับธาตุ ผสมที่สำคัญ คือ โครเมียมซึ่งจะมีตั้งแต่ร้อยละ 11 ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้าจะ ก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้า ฟิล์มอันนี้มี ความเงางามและป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิม ให้คุณสมบัติ ทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความเงาแวววาว

4.ไทเทเนียม (Titanium) มีลักษณะขาวเทาคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็ง และเหนียว สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจน ไทเทเนียมมีเลข ออกซิเดชัน 2+, +3 และจะเสถียรที่ +4 ไทเทเนียมชาวถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลติก เซลล์และไม่ทำให้โลหะตัวอื่นกัดกร่อนในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส ยิ่งไปกว่านั้นที่ขั้วลบ พบว่าจะมีโลหะหนักเกิดขึ้นมาก สารละลายไม่มีตะกอน ที่อุณหภูมิปกติไทเทเนียมจะไม่ว่องไว ในการทำปฏิกิริยา แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมจะทำปฏิกิริยารุนแรง ขั้วเสีย คือ ไทเทเนียมมีราคาสูงและหาซื้อได้ยาก

5.แพลตินัม (Platinum) เป็นธาตุที่มีสีขาวและอ่อน มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 มีความแข็งแรงของพันธะโลหะและไม่ว่องไวต่อ ปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของแพลตินัมมักไม่ค่อยเสถียร โดยเมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะ สลายตัวเป็นโลหะ แพลตินัมหายากและมีราคาแพง สามารถนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาจึงมีประโยชน์ในการทำอิเล็กโทรด เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่ อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง

6.แกรไฟต์ (Graphite) เป็นอีกรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอนซึ่งเกิดตามธรรมชาติ มีชื่อ สามัญเรียกว่า พลัมเบโก (Plumbago) หรือแร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปผลึกเป็นแผ่น บาง ๆ ทึบแสงและเป็นเงามันเหมือนโลหะเล็กน้อย สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อน และไฟฟ้าได้มากในทิศทางที่ขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของ อะตอมจะนำไฟฟ้าได้น้อย อะตอมของแกรไฟต์ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ มีระยะห่างระหว่าง อะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม ซึ่งสั้นพอที่จะทำให้เชื่อว่าอะตอม คาร์บอน น่าจะยึดกับอะตอมข้างเคียงด้วยพันธะแกรไฟต์มักใช้ทำไส้ดินสอดำ เบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ไส้ไฟอาร์ก ใช้เป็นตัวลดความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวน อนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

2.9 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมธ เจริญนพคุณ, 2545)

ทิศทางของอิออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้

1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
2. การเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอน ความสามารถของอิเล็กตรอนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับประจุบนอิเล็กตรอนและขนาดอิเล็กตรอน
3. อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
4. พื้นที่สัมผัสของขั้วกระแสไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเท และรับอิเล็กตรอนโดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
5. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าจำนวนกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่างน้อยกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มมากขึ้น
6. จำนวนประจุของอิเล็กตรอนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น
7. ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้าได้ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น

2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การกำจัดอีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

Ghernaout และคณะ (2008) ศึกษาการกำจัด *Escherichia coli* โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี และกำจัดสาหร่ายจากแหล่งน้ำดิบโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ในการทดลองทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก และเหล็กกล้าไร้สนิม มีพื้นที่ทำปฏิกิริยา 49.5 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 5 ซม. จากการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอลูมิเนียมมีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้งาน ฟลักซ์ของอลูมิเนียมที่เกิดขึ้นยังมีน้ำหนักเบากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก และจากการศึกษาการกำจัดสาหร่ายจากแหล่งน้ำดิบ Keddara ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบที่มีปริมาณสาหร่ายอยู่หนาแน่นพบว่า ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์ จะต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 35 นาที เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายร้อยละ 100 และจากการทดลองโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี พบว่าที่ 1 แอมแปร์ สามารถกำจัด *Escherichia coli* ได้ถึง 98.16% ภายในระยะเวลา 10 นาที

Diao และคณะ (2004) ศึกษาการกำจัด *Escherichia coli* จากน้ำสังเคราะห์เชื้อ *Escherichia coli* ที่มีความหนาแน่นของเชื้อ *Escherichia coli* 10^9 - 10^{10} ml⁻¹ โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ในการทดลองใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ความยาว 5 เซนติเมตร ความกว้าง 4 เซนติเมตร เป็นขั้วไฟฟ้า จากการทดลอง เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้า และใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 16 mA/cm² ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 2 นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัด *Escherichia coli* ได้ 99.98% และเมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้า ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 mA/cm² ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 0.5 นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัด *Escherichia coli* ได้ 100% และทางคณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด *Escherichia coli* โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีกับกระบวนการอื่นๆ ดังแสดงตามตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด *Escherichia coli* (Diao ,2004)

Disinfection method	Testing condition	Killing efficiency (%)
EC disinfection	16 mA/cm ² , 2 min	99.98
	25 mA/cm ² , 0.5 min	100
Chlorination	5 mg/l, 30 min	99.94
	5 mg/l, 60 min	99.98
Ozonation	10 mg/l, 2.5 min	99.9
	10 mg/l, 5 min	100
Fenton reaction	8.5 mg/l H ₂ O ₂ , 0.85 mg/l Fe ²⁺ , pH 4, 10 min	99.4
	8.5 mg/l H ₂ O ₂ , 0.85 mg/l Fe ²⁺ , pH 4, 30 min	99.8

Kerwick และคณะ (2004) ศึกษาการกำจัด *Escherichia coli* โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ในการทดลองใช้ Pt-Nb (platinum clad niobium) เป็นขั้วแอโนด และใช้เหล็กเป็นขั้วแคโทด จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 V จะได้ความหนาแน่นกระแส 4 mA/cm² ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัด *Escherichia coli* ได้ 100% และทางคณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองการผลิตคลอรีนจากการเติมโซเดียมคลอไรด์โดยกระบวนการ

ไฟฟ้าเคมี ในการทดลองใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมล จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 V จะได้ความหนาแน่นกระแส 4 mA/cm² ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 นาที ให้ประสิทธิภาพการผลิตคลอรีนได้ 1.6 mg/L แต่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที จะให้ประสิทธิภาพการผลิตคลอรีนตกค้างในน้ำให้ได้ 0.6 mg/L ซึ่งเป็นปริมาณคลอรีนที่เพียงพอสำหรับการผลิตน้ำประปา

2.10.2 การกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

Poleman และคณะ (1997) ศึกษาการกำจัดสาหร่ายจากน้ำล้างแผ่นกรองไมโครสเตรนเนอร์ (Micro strainer) จากโรงผลิตน้ำดื่ม Kluzen โดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า น้ำล้างมีความเข้มข้นของสาหร่าย 1–50 มิลลิกรัม/น้ำหนึ่งแก้ว/ลิตร ในการทดลองใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.2 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร และใช้ตะกั่วเป็นขั้วแคโทดมีขนาด 50 x 10 x 0.1 เซนติเมตร จากการทดลอง เมื่อใช้ขั้วแอโนด 3 แท่ง และขั้วแคโทด 6 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 26.5 เซนติเมตร และใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 1 แอมแปร์ พบว่าเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายจากน้ำเหมาะสมที่สุด หากพิจารณาในด้านของราคาการก่อสร้างและค่าพลังงานที่ต้องการใช้ระหว่างการเดินระบบ ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 75 นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายถึงร้อยละ 96.3 ต้องการค่าพลังงานไฟฟ้า 0.33 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ลิตร ในการสร้างระบบกำจัดสาหร่ายที่มีอัตราการกำจัดน้ำสาหร่าย 15 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง จะมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างประมาณ 25,000 ดอลลาร์สหรัฐ

Azarian และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดสาหร่ายจากน้ำจากบ่อปรับเสถียรของโรงงาน Bu-ali โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ในการทดลองใช้ถึงปฏิกิริยาแบบไหลต่อเนื่องขนาดรวม 24 ลิตร ใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าขนาด 14 x 24 ตารางเซนติเมตร จำนวน 5 แผ่น ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจากน้ำและระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในการทดลองใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ 550 วัตต์ ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 15 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและปริมาณของแข็งแขวนลอยเป็นร้อยละ 100 และ 99.5 ตามลำดับ สำหรับในกรณีที่ใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ 100 วัตต์ จะต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 30 นาที เพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายและปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากัน

Alfafara และคณะ (2002) ศึกษาการกำจัดสาหร่ายจากน้ำทะเลสาบ Senba ในช่วงฤดูร้อนที่เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน มีช่วงความเข้มข้นของสาหร่ายที่ 300–1500 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม ไทเทเนียม และแกรไฟต์ แผ่นอะลูมิเนียมและไทเทเนียมมีขนาด 8.2×18.6 ตารางเซนติเมตร แท่งแกรไฟต์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 เซนติเมตร สูง 14.8 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1.5 เซนติเมตร จากการทดลองโดยใช้ลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดและใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดพบว่า ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 วัตต์/ลิตร ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 10 นาที สามารถกำจัดสาหร่ายได้ร้อยละ 85.7 และในการทดลองเปรียบเทียบชนิดของขั้วแอโนด 2 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมและแกรไฟต์ พบว่าการใช้ขั้วแอโนดที่ทำจากแกรไฟต์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วแอโนดที่ทำจากอะลูมิเนียม โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสูงสุดเพียงร้อยละ 50

2.10.3 การกำจัดอีโคไลโดยกระบวนการอื่นๆ

Dadjour และคณะ (2005) ศึกษาการกำจัด *Escherichia coli* จากน้ำสังเคราะห์เชื้อ *Escherichia coli* ที่มีความหนาแน่นของเชื้อ *Escherichia coli* 10^3 - 10^7 CFU/ml โดยกระบวนการฉายคลื่นอุลตราโซนิก โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองเมื่อไม่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัด *Escherichia coli* ได้เพียง 13% แต่ถ้าใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัด *Escherichia coli* จะได้สูงถึง 98%

Christensen และคณะ (2002) ศึกษาการกำจัด *Escherichia coli* จากน้ำสังเคราะห์เชื้อ *Escherichia coli* ที่มีความหนาแน่นของเชื้อ *Escherichia coli* 10^7 CFU/ml โดยกระบวนการฉายคลื่นอุลตราโซนิก โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองเมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 10 นาที ประสิทธิภาพการกำจัด *Escherichia coli* จะได้ 90% เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 15 นาที ประสิทธิภาพการกำจัด *Escherichia coli* จะได้ 98% และเมื่อใช้ไทเทเนียม

ไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที ประสิทธิภาพการกำจัด *Escherichia coli* จะได้ 100%

Jacangelo และคณะ (1991) ศึกษากำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียจากแหล่งน้ำดิบธรรมชาติ 4 แหล่ง ซึ่งประกอบด้วยแหล่งน้ำจาก Northern California 2 แห่ง จากเมือง Boise และจากมลรัฐ Idaho เพื่อให้ผ่านมาตรฐานของ Surface Water Treatment Rule (SWTR) โดยกระบวนการ Low-pressure hollow-fiber UF ขนาด 0.1 ไมครอน ซึ่งทำงานโดยอาศัยความดันในช่วง 10-40 psi หรือ 0.7-2.8 บาร์ จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของ UF สามารถกำจัดโคลิฟอร์มได้ผ่านมาตรฐานของ SWTR น้ำกรองที่ได้ตรวจได้ผลตรวจว่าไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

Urase และคณะ (1993) ศึกษากำจัดโคลิฟาจ ชนิด Q β ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.025 ไมครอน ออกจากน้ำที่ผ่านระบบ AS และน้ำจากระบบบ่อ โดยน้ำจะถูกเตรียมให้มีความเข้มข้นของโคลิฟาจประมาณ 10 พีเอฟยู/มล โดยกระบวนการเมมเบรน UF จากการทดลองพบว่าในกรณีของน้ำจากระบบบ่อประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจของเมมเบรนมากกว่า 99% ส่วนในกรณีของน้ำที่ผ่านระบบ AS ประสิทธิภาพในการกำจัดโคลิฟาจของเมมเบรนอยู่ที่ 99.9%

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำโดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยไฟฟ้าเคมี ที่มีการต่อขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนานในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเป็นการทดลองแบบทีละเท (Batch) และแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous) ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลอง ดังนี้

1) ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไล โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ ค่าพีเอช อุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณเชื้ออีโคไล

2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไล โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยมีลำดับในการทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นและปริมาณคลอรีนคงเหลือที่เกิดขึ้น โดยใช้ขั้วแกรไฟต์-แกรไฟต์ และขั้วแกรไฟต์-ไทเทเนียม

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบของชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาการเกิดปฏิกิริยา ที่มีต่อการกำจัดเชื้ออีโคไล โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียสจากการทดลองที่ 1 มาใช้ในการทดลอง

การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่มีค่าความขุ่นแตกต่างกัน นำชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง

การทดลองที่ 4 ศึกษาการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียสจากการทดลองที่ 3 มาใช้ในการทดลอง

3) วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดเชื้ออีโคไลด้วยระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยไฟฟ้าเคมี

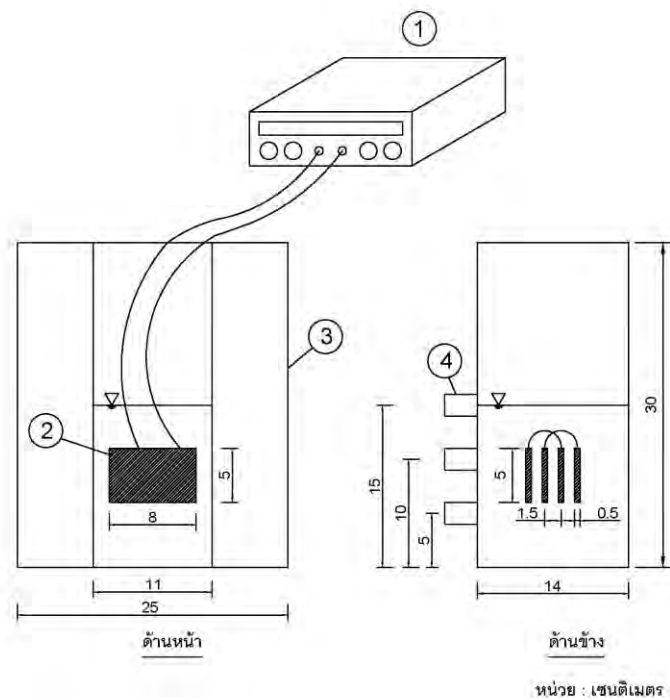
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นระบบไฟฟ้าเคมี และส่วนของอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการทดลอง

1. ระบบไฟฟ้าเคมี
 - 1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ยี่ห้อ GW รุ่น GRP-6060D
 - 2) ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ในการทดลองนี้จะใช้ 2 ชนิดคือ ขั้วแกรไฟต์และขั้วไทเทเนียม ขนาด $8 \times 5 \times 0.5$ เซนติเมตร (กว้าง x ยาว x หนา)
 - 3) บั๊มน้ำที่ปรับอัตราการไหลของน้ำได้
 - 4) ถังปฏิกริยาขนาด 3.6 ลิตร โดยจะใช้น้ำเสียในการเดินระบบ 2 ลิตร
2. อุปกรณ์อื่นๆ
 - 1) เชื้ออีโคไล (*Escherichia coli*) จากห้องปฏิบัติการคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
 - 2) เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ของ Orion 2 – Starbenchttop pH meter
 - 3) เครื่องชั่งไฟฟ้า (Analytical balance) ของ Sartorius รุ่น ED2245
 - 4) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
 - 5) เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า
 - 6) เข็มเขี่ยเชื้อ (Inoculating loop)
 - 7) ปิเปต (Pipette)
 - 8) จานเลี้ยงเชื้อ (Petri-dish)
 - 9) อาหารเลี้ยงเชื้อ M-Endo Broth
 - 10) หม้อนึ่งความดัน (Autoclave)
 - 11) ตู้อบฆ่าเชื้อ (Hot air oven)
 - 12) ตู้บ่มเพาะเชื้อ (Incubator)
 - 13) เครื่องแก้ว (Laboratory glassware)
 - 14) สารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

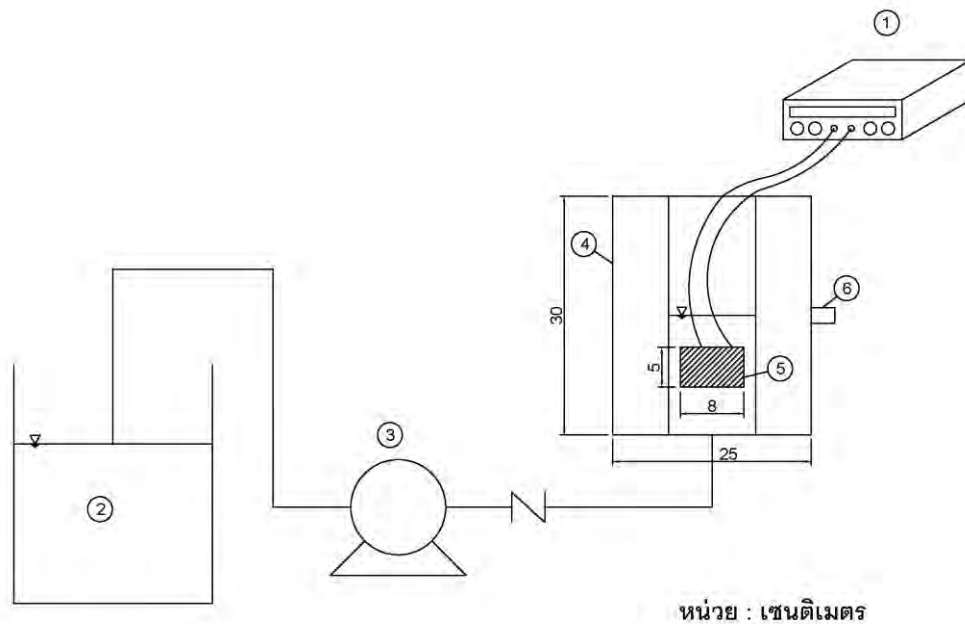
3.2.1 ระบบฆ่าเชื้ออโคไลด้วยไฟฟ้าเคมี

ระบบฆ่าเชื้ออโคไลด้วยไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นถังปฏิกริยาขนาด 3.6 ลิตร ผลิตจากวัสดุประเภทอะครีลิก โดยมีปริมาตรที่ใช้งานจริง 2 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ถังปฏิกริยา มีขนาดกว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร โดยจะมีวาล์วสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกำจัดเชื้ออโคไลอยู่บริเวณด้านหน้าของถังปฏิกริยา ซึ่งมี 3 ระดับ คือสูงจากระดับก้นถังปฏิกริยา 5 10 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ระบบแยกด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองแบบที่ละเท

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| 1. เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า | 3. ถังปฏิกรณ์ |
| 2. ขั้วอิเล็กโทรด | 4. วาล์วเก็บน้ำตัวอย่าง |



รูปที่ 3.2 ระบบแยกด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. เครื่องกำเนิดกระแส | 4. ถังปฏิกริยา |
| 2. ถังน้ำเสีย | 5. แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ |
| 3. ปั๊ม | 6. วาล์วเก็บน้ำออก |

3.2.1.1 ขั้วไฟฟ้า

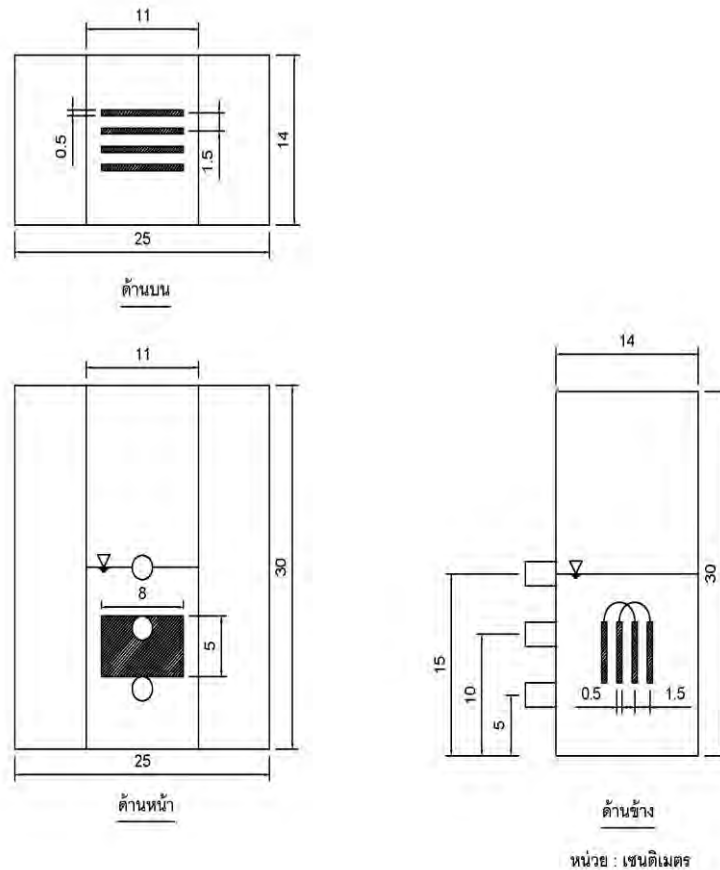
ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดคือขั้วแกรไฟต์และขั้วไทเทเนียม โดยในการทดลองแบบที่ละเทจะใช้ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ ดังนี้

1. ขั้วแกรไฟต์ – แกรไฟต์ขนาด $8 \times 5 \times 0.5$ เซนติเมตร (กว้าง x ยาว x หนา)
2. ขั้วแกรไฟต์ – ไทเทเนียมขนาด $8 \times 5 \times 0.5$ เซนติเมตร

สำหรับการทดลองแบบไหลต่อเนื่องจะใช้ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่เหมาะสมจากการทดลองแบบที่ละเท ดังนี้

1. ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมขนาด $8 \times 5 \times 0.5$ เซนติเมตร

โดยรูปแบบการจัดวางขั้วอิเล็กโทรดแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนานของขั้วทั้ง 2 ชนิดในระบบฆ่าเชื้ออโคไลด้วยไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3

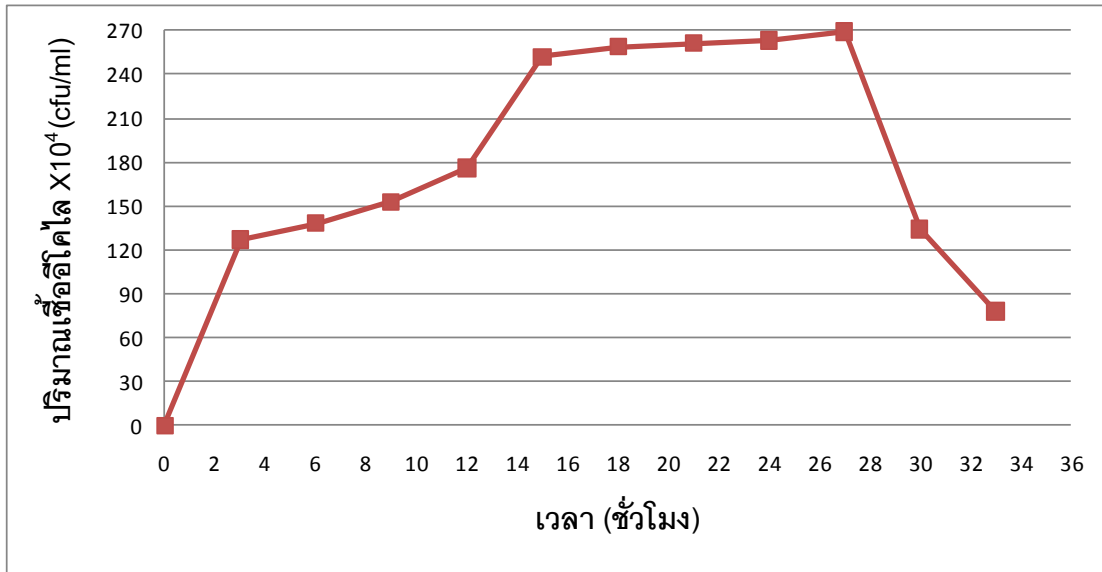


รูปที่ 3.3 การจัดวางขั้วอิเล็กโทรดจำนวน 4 แผ่นในถังปฏิกรณ์

3.3 การเตรียมการทดลอง

3.3.1 การเตรียมน้ำสังเคราะห์เชื้ออโคไล มีวิธีการดังนี้

- 1) ศึกษาลักษณะการเจริญเติบโตของเชื้ออโคไลในอาหารเลี้ยงเชื้อ เชื้อ M-Endo Broth โดยเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณเชื้ออโคไลตามเวลา แล้วนำมาทำกราฟอัตราการเจริญเติบโต
- 2) ทำการเลี้ยงเชื้ออโคไลในอาหารเลี้ยงเชื้อ M-Endo Broth จนเชื้ออโคไลเจริญเติบโตอยู่ในช่วง Stationary phase เพื่อนำมาใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง



รูปที่ 3.4 อัตราการเจริญเติบโตของเชื้ออีโคไล

จากรูปที่ 3.4 เชื้ออีโคไลจะเจริญเติบโตอยู่ในช่วง Stationary phase ที่ระยะเวลา 15 ชั่วโมง ถึง ระยะเวลา 27 ชั่วโมง

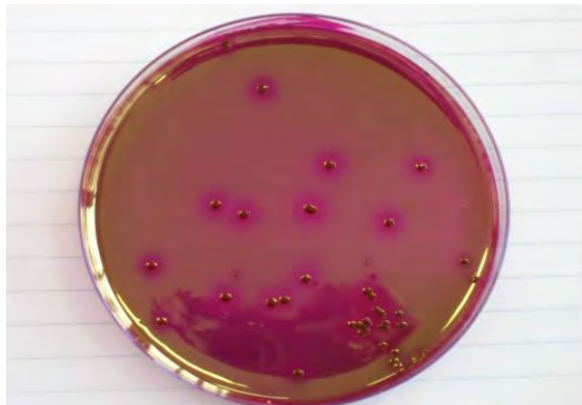
3) นำน้ำประปามาตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้คลอรีนคงเหลือในน้ำระเหยจนหมดก่อนใช้การทดลอง

4) นำเชื้ออีโคไลที่เจริญเติบโตอยู่ในช่วง Stationary phase ผสมกับน้ำประปาให้เข้ากัน เป็นน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลความเข้มข้น 14,000 cfu/ml

5) นำน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลความเข้มข้น 14,000 cfu/ml มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเท่ากับ 2,000 4,000 และ 6,000 cfu/ml แล้วปรับปริมาตรให้เท่ากับ 2 ลิตร



รูปที่ 3.5 ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่เกิดขึ้นบนจานเพาะเชื้อ 2,000 cfu/ml



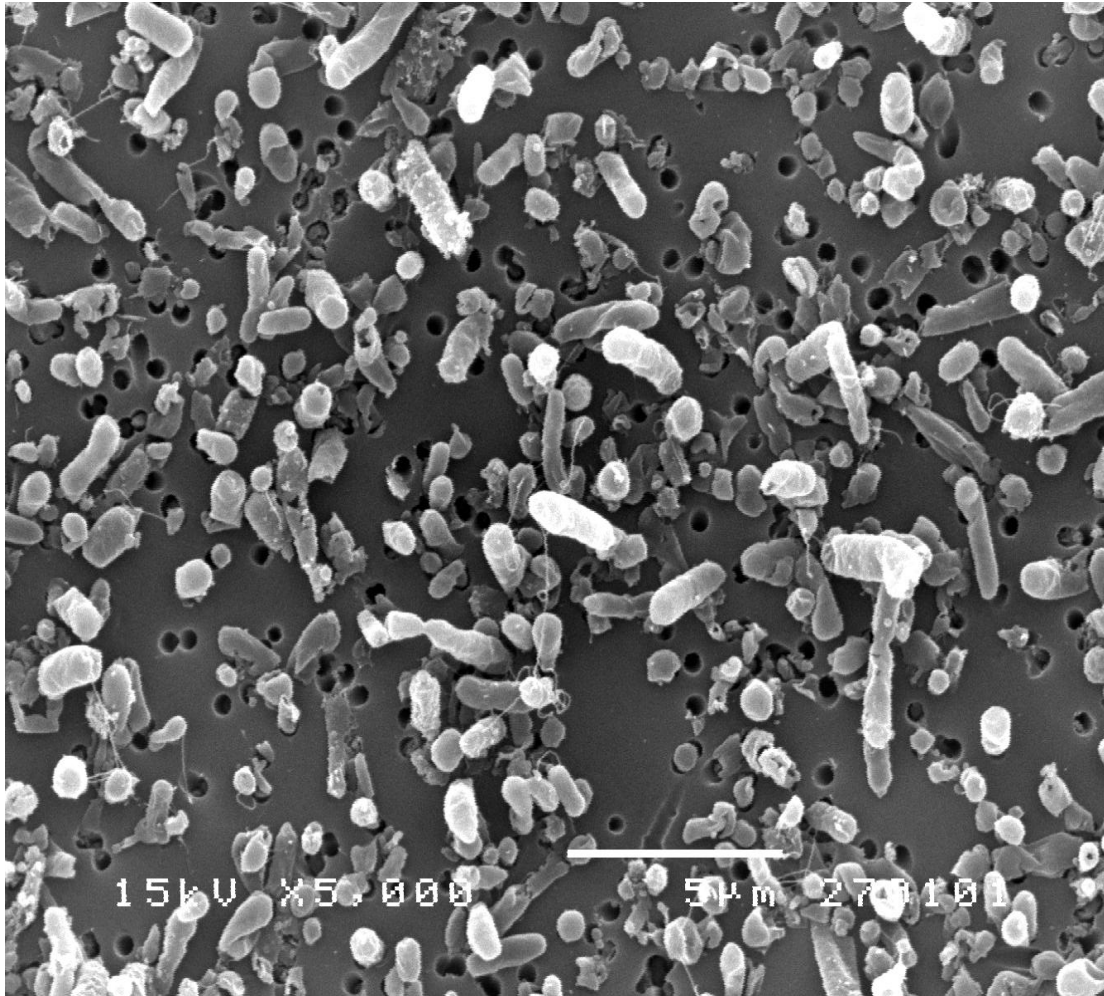
รูปที่ 3.6 ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่เกิดขึ้นบนจานเพาะเชื้อ 4,000 cfu/ml



รูปที่ 3.7 ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่เกิดขึ้นบนจานเพาะเชื้อ 6,000 cfu/ml



รูปที่ 3.8 ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่เกิดขึ้นบนจานเพาะเชื้อ 14,000 cfu/ml



รูปที่ 3.9 ลักษณะของเชื้ออีโคไลที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 5,000 เท่า
ถ่ายที่ : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2 เตรียมความขุ่นของน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไล มีวิธีการดังนี้

- 1) นำน้ำประปามาตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้คลอรีนคงเหลือในน้ำระเหยจนหมดก่อนใช้การทดลอง
- 2) นำดิน Kaolin มาผสมกับประปาและผสมกับน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ที่ทราบจากการทดลองที่ 2 จากนั้นกวนผสมให้เข้ากัน
- 3) ทำการปรับน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ผสมดิน Kaolin ให้ได้ความขุ่น 5 50 75 100 และ 150 NTU

3.4 การดำเนินการทดลอง

การทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองแบบทีละเท (Batch) และส่วนที่ 2 เป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) โดยในส่วนที่ 1 จะเป็นการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี เช่น ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ปริมาณของโซเดียมคลอไรด์ ค่าความขุ่น และเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ สำหรับการทดลองส่วนที่ 2 นั้นจะเป็นการเดินระบบโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในส่วนที่ 1 โดยมีรายละเอียดในการทดลอง ดังนี้

3.4.1 น้ำที่ใช้ในการทดลอง

วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำประปาและน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไล โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าพีเอช อุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณคลอรีนในน้ำ และปริมาณเชื้ออีโคไล

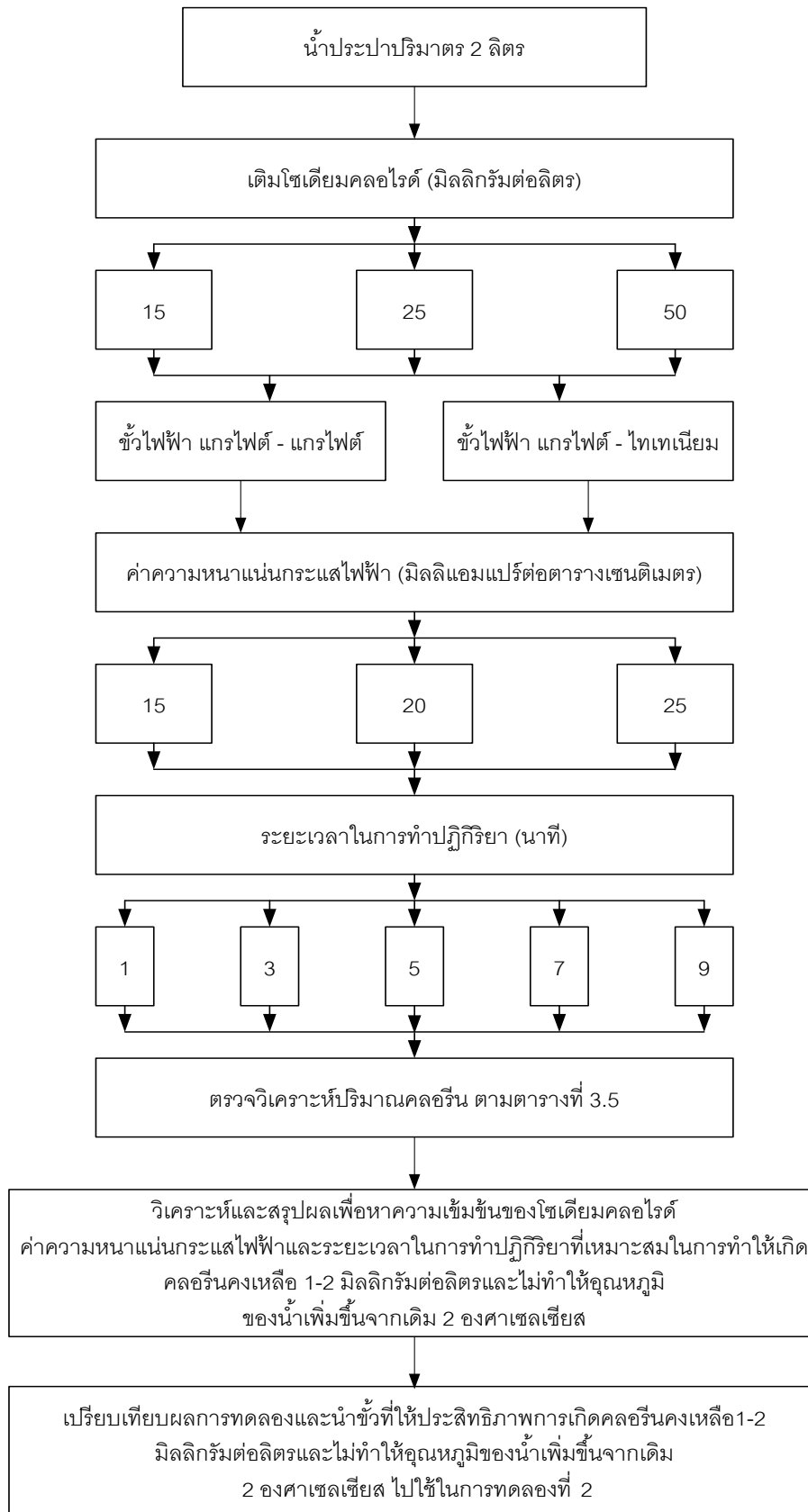
3.4.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.4.2.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

เป็นการทดลองแบบทีละเทเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะใช้จำนวนแผ่นอิเล็กโทรดจำนวน 4 แผ่น คือขั้วแอโนดจำนวน 2 แผ่น และขั้วแคโทดจำนวน 2 แผ่น โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปริมาณคลอรีนคงเหลือ ดังนี้

- ชนิดขั้วอิเล็กโทรด 2 ชนิด คือ แกรไฟต์ – แกรไฟต์ และ แกรไฟต์ – โทเทเนียม ขนาด $8 \times 5 \times 0.5$ เซนติเมตร
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 15 20 และ 25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
- ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 15 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง 5 ค่า คือ 1 3 5 7 และ 9 นาที

โดยแผนผังการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ผังการทดลองที่ 1

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำประปาปริมาตร 2 ลิตร ใส่ลงในถังปฏิกิริยา
2. เติมโซเดียมคลอไรด์ใส่ลงในถังปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดแบบแกรไฟต์ – แกรไฟต์
4. เดินระบบโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
5. ควบคุมระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 9 นาที
6. เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัด ณ เวลาต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ค่าพีเอช อุณหภูมิ และปริมาณคลอรีนคงเหลือ
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 6 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เป็น 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 7 โดยทำการเปลี่ยนแปลงการควบคุมระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 1 3 5 7 และ 9 นาที ตามลำดับ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 8 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 20 และ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ
10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 9 โดยทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของขั้วอิเล็กโทรดเป็นแกรไฟต์ – ไทเทเนียม
11. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส

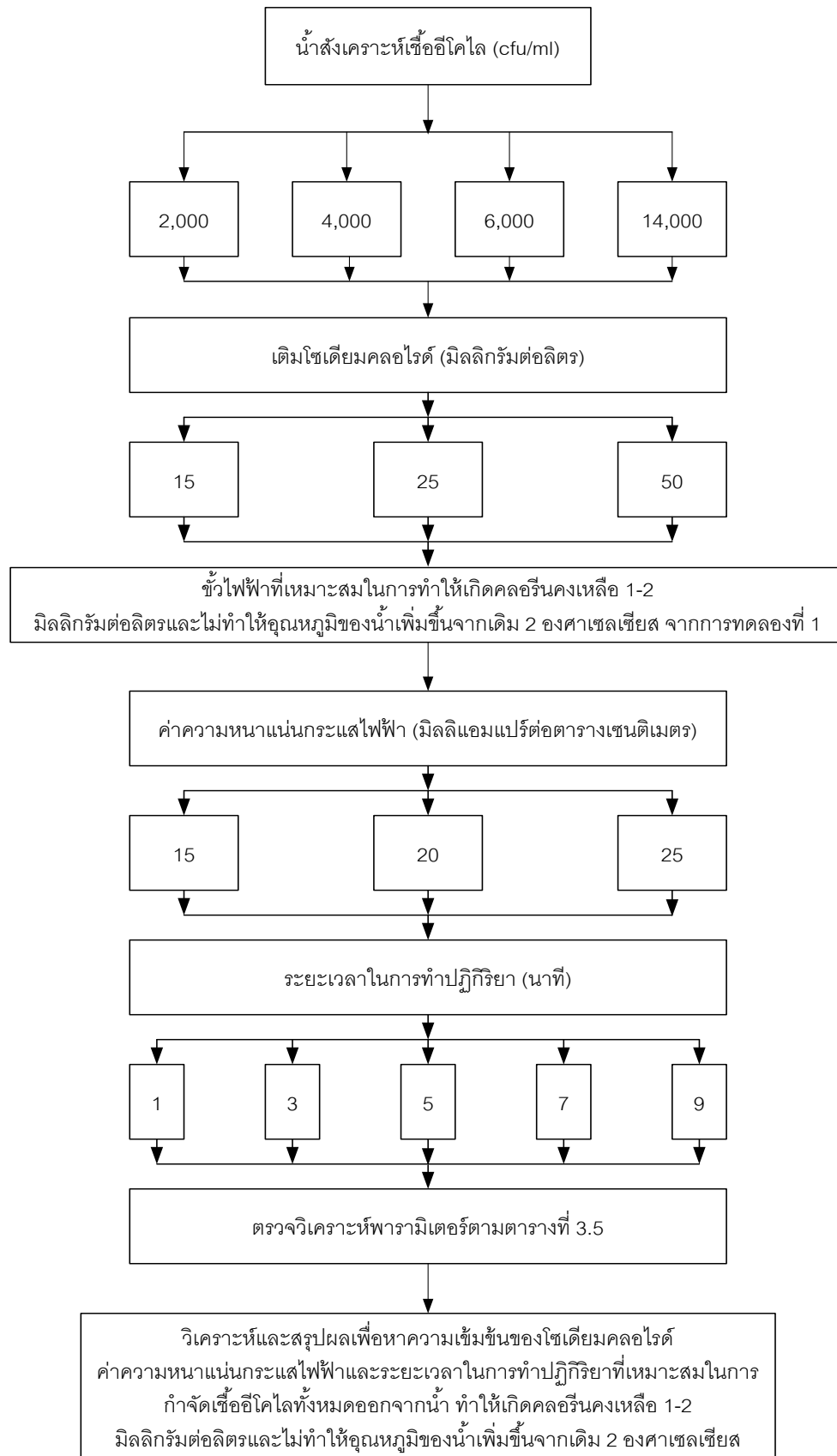
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1

การทดลอง	ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างไซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วแกรไฟต์ – แกรไฟต์ และขั้วแกรไฟต์ – ไทเทเนียม
ตัวแปรอิสระ	<ol style="list-style-type: none"> 1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า ขั้วแกรไฟต์ – แกรไฟต์ และขั้วแกรไฟต์ – ไทเทเนียม 2. ความเข้มข้นของไซเดียมคลอไรด์ 15 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 3. ระดับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 20 และ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร 4. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 3 5 7 และ 9 นาที
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ปริมาตรน้ำ 2. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1.5 เซนติเมตร 3. จำนวนขั้ว
ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าพีเอช 2. อุณหภูมิ 3. ค่าการนำไฟฟ้า 4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5. ปริมาณคลอรีนคงเหลือในน้ำ

3.4.2.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบของชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาการเกิดปฏิกิริยา ที่มีต่อการกำจัดเชื้ออีโคไล โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่ 1 มาใช้ในการทดลอง

เป็นการทดลองแบบทีละเท เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อการกำจัดเชื้ออีโคไล โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาใช้ในการทดลอง โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดเชื้ออีโคไล ดังนี้

- ความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง 4 ค่า คือ 2,000 4,000 6,000 และ 14,000 cfu/ml
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 15 20 และ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
- ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลอง 3 ค่า ได้แก่ 15 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง 5 ค่า คือ 1 3 5 7 และ 9 นาที โดยแผนผังการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ผังการทดลองที่ 2

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 cfu/ml ปริมาตร 2 ลิตร ใส่ลงในถังปฏิกรณ์
2. เติมโซเดียมคลอไรด์ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดแบบที่เหมาะสมในการทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการทดลองที่ 1
4. เดินระบบโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
5. ควบคุมระยะเวลาในการทำปฏิกรณ์ 9 นาที
6. เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัด ณ เวลาต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ค่าพีเอช อุณหภูมิ ปริมาณเชื้ออีโคไล และปริมาณคลอรีนคงเหลือ
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 6 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เป็น 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 7 โดยทำการเปลี่ยนแปลงการควบคุมระยะเวลาในการทำปฏิกรณ์เป็น 1 3 5 7 และ 9 นาที ตามลำดับ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 8 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 20 และ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ
10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 10 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 4,000 6,000 และ 14,000 cfu/ml ตามลำดับ
11. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการทำปฏิกรณ์ที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากรูน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2

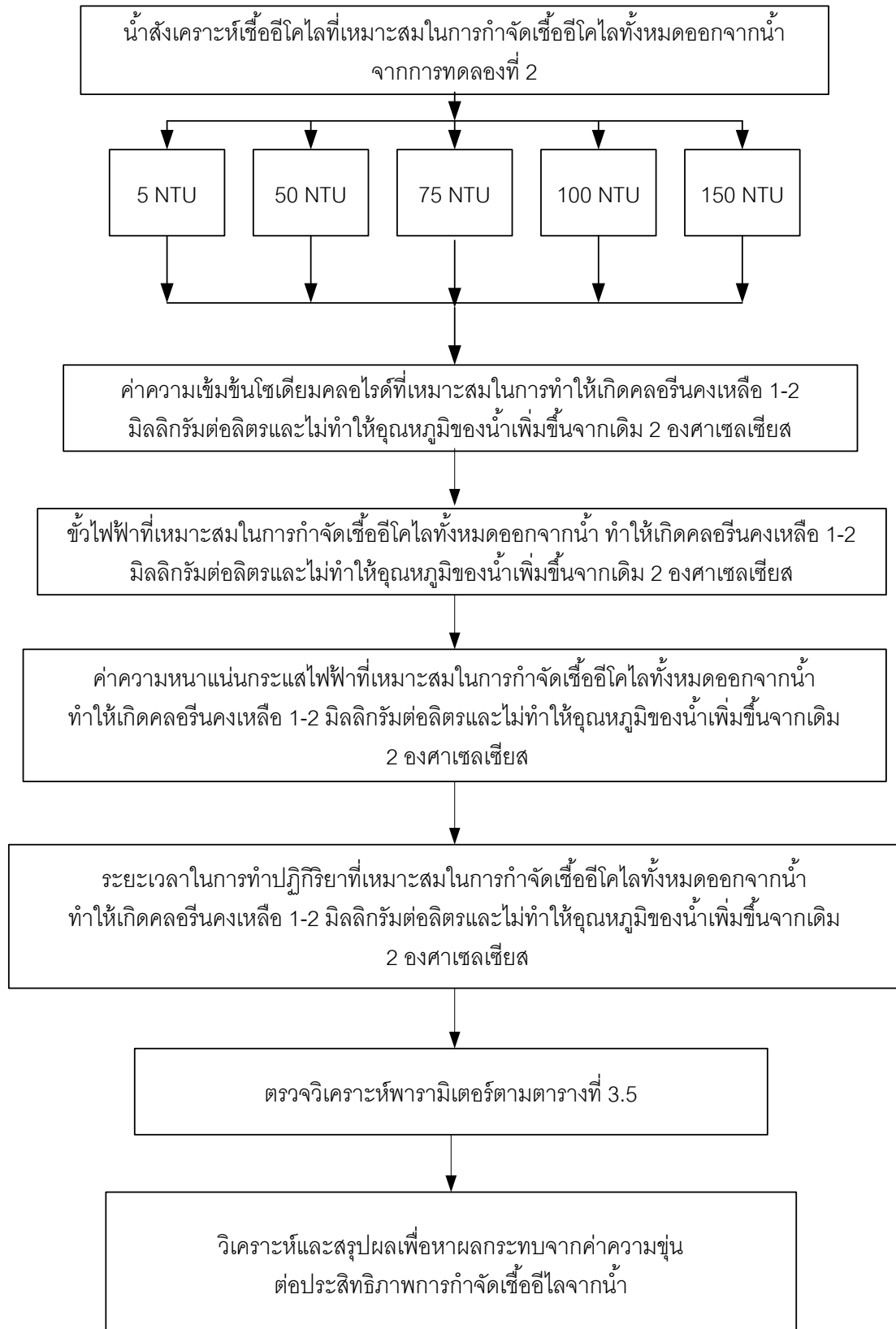
การทดลอง	ศึกษาผลกระทบของชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาการเกิดปฏิกิริยา ที่มีต่อการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำให้เกิดคลอรีนคองเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่ 1 มาใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความเข้มข้นของเชื้ออีโคไล 2,000 4,000 6,000 และ 14,000 cfu/ml 2. ความเข้มข้นของไฮเดียมคลอไรด์ 15 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 3. ระดับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 20 และ 25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร 4. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 3 5 7 และ 9 นาที
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำให้เกิดคลอรีนคองเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่ 1 2. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1.5 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าพีเอช 2. อุณหภูมิ 3. ค่าการนำไฟฟ้า 4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5. ปริมาณคลอรีนคองเหลือในน้ำ 6. ปริมาณเชื้ออีโคไล

3.4.2.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่มีค่าความขุ่นแตกต่างกัน นำชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง

เป็นการทดลองแบบทีละเทเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่มีค่าความขุ่นแตกต่างกัน โดยใช้ชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดเชื้ออีโคไล ดังนี้

- ความขุ่น 5 ค่าที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ 5 50 75 100 และ 150 NTU

โดยแผนผังการทดลองแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ผังการทดลองที่ 3

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ที่ทราบจากการทดลองที่ 2 ปริมาตร 2 ลิตร ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ ปรับความขุ่น 5 NTU
2. เลือกเดิมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ที่ทราบจากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง
3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดแบบที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง
4. เดินระบบโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ที่ทราบจากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง
5. ควบคุมระยะเวลาในการทำปฏิกรณ์ที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ที่ทราบจากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง
6. เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัด ณ เวลาต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ค่าพีเอช คุณสมบัติ ปริมาณเชื้ออีโคไล และปริมาณคลอรีนคงเหลือ
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 6 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่นของน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลเป็น 50 75 100 และ 150 NTU ตามลำดับ
8. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล หาผลกระทบจากค่าความขุ่นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3

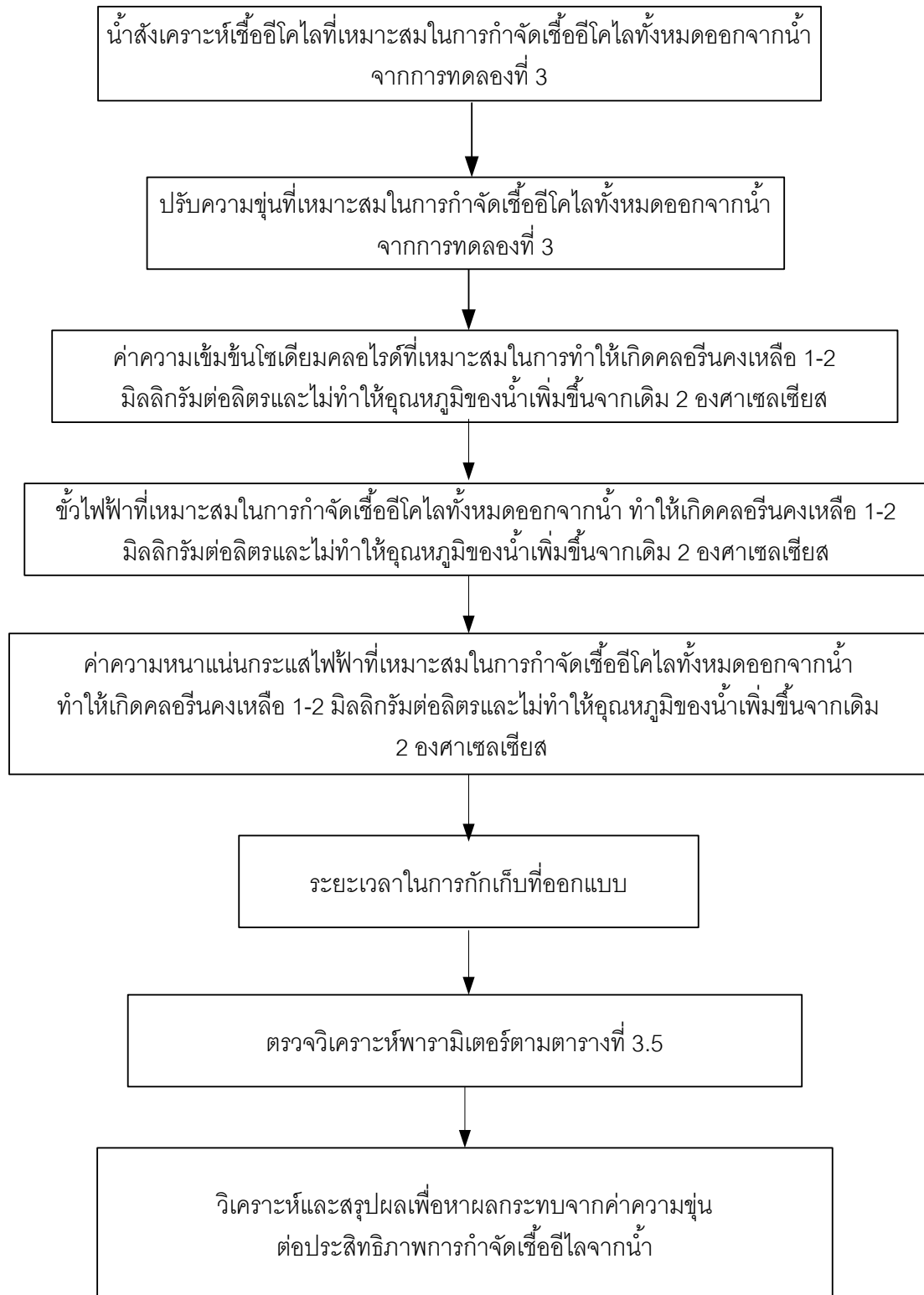
การทดลอง	ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่มีค่าความขุ่นและปริมาณเชื้ออีโคไลที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี นำชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	1. ค่าความขุ่น 5 50 75 100 และ 100 NTU
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสม 2. ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม 3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1.5 เซนติเมตร 4. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม 5. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม
ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าพีเอช 2. อุณหภูมิ 3. ค่าการนำไฟฟ้า 4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5. ปริมาณคลอรีนคงเหลือในน้ำ 6. ปริมาณเชื้ออีโคไล

3.4.2.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียสจากการทดลองที่ 3 มาใช้ในการทดลอง

เป็นการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องโดยการนำสภาวะที่เหมาะสมได้แก่ ชนิดขั้ว อิเล็กโทรด ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารโซเดียมคลอไรด์และความขุ่น ที่ได้จากการทดลองแบบทีละเทในการทดลองก่อนหน้า โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดเชื้ออีโคไล ดังนี้

- ระยะเวลาเก็บกักในถังปฏิกิริยา 2 ค่า คือ 7 และ 14 นาที

โดยแผนผังการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ผังการทดลองที่ 4

วิธีการทดลอง

1. นำน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) จากการทดลองที่ 3 ปริมาตร 2 ลิตร ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ฯ ปรับความขุ่นที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ที่ได้จากการทดลองที่ 3 มาใช้ในการทดลอง
2. เลือกเติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการทดลองที่ 3 มาใช้ในการทดลอง
3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดแบบที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการทดลองที่ 3 มาใช้ในการทดลอง
4. เดินระบบโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ที่ทราบจากการทดลองที่ 3 มาใช้ในการทดลอง
5. เดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 7 นาที
6. เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัด ณ เวลาต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ค่าพีเอช คุณสมบัติ ปริมาณเชื้ออีโคไล และปริมาณคลอรีนคงเหลือ
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 – 7 โดยทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาเก็บกัก เป็น 14 นาที ตามลำดับ
8. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล หาผลกระทบจากค่าความขุ่นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำ ในการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4

การทดลอง	ศึกษาการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียสจากการทดลองที่ 3 มาใช้ในการทดลอง การกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี
ตัวแปรอิสระ	1. ระยะเวลาเก็บกักที่ออกแบบ
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสม 2. ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม 3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1.5 เซนติเมตร 4. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม 5. ค่าความขุ่นเหมาะสม
ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าพีเอช 2. อุณหภูมิ 3. ค่าการนำไฟฟ้า 4. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5. ปริมาณคลอรีนคงเหลือในน้ำ 6. ปริมาณเชื้ออีโคไล 7. ปริมาณสารTrihalomethane (THMFP) 8. ปริมาณไทเทเนียม

3.5 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์น้ำ

การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่เกิดขึ้นใช้วิธีการวิเคราะห์ดัง
แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ก่อนทดลอง	หลังการทดลอง	
			ทุกครั้ง	ชุดที่ เหมาะสม
1. พีเอช	เครื่องวัดพีเอช	✓	✓	
2. อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์	✓	✓	
3. ค่าการนำไฟฟ้า	Conductivity meter	✓	✓	
4. ความต่างศักย์ไฟฟ้า	เครื่อง DC Power Supply	✓	✓	
5. ปริมาณคลอรีนคงเหลือ	ไฮโดรเมตริก	✓	✓	
6. ปริมาณเชื้ออีโคไล	Spread plate method	✓	✓	
7. ปริมาณสาร Trihalomethane	Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatography method			✓
8. ปริมาณไทเทเนียม	Atomis Absorption Spectroscopy , AAS			✓

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของความขุ่นในน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำโดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยไฟฟ้าเคมี การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การทดลองแบบที่ละเท และการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง การทดลองแบบที่ละเทแบ่งได้เป็น 3 การทดลองย่อย ดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างไซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบของชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาการเกิดปฏิกิริยา ที่มีต่อการกำจัดเชื้ออีโคไล โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองที่ 1 มาใช้ในการทดลอง

การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่มีค่าความขุ่นแตกต่างกัน โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ จากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง ได้แก่ชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

การทดลองที่ 4 ศึกษาการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 มาใช้ในการทดลองที่สามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ เพื่อศึกษาสมรรถภาพของระบบที่มีการป้อนน้ำต่อเนื่อง

4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างไซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคองเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ทำการทดลองโดยใช้น้ำประปามาผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยทำการปรับเปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรด 2 ชุด คือ ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ (ขั้วแอโนด และขั้วแคโทดตามลำดับ) และขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม โดยปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่าคือ 15 20 และ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณไซเดียมคลอไรด์ 3 ค่าคือ 15 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 3 5 7 และ 9 นาที ซึ่งสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลองดังนี้

ชุดที่ 1 ทำการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ความเข้มข้นไซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

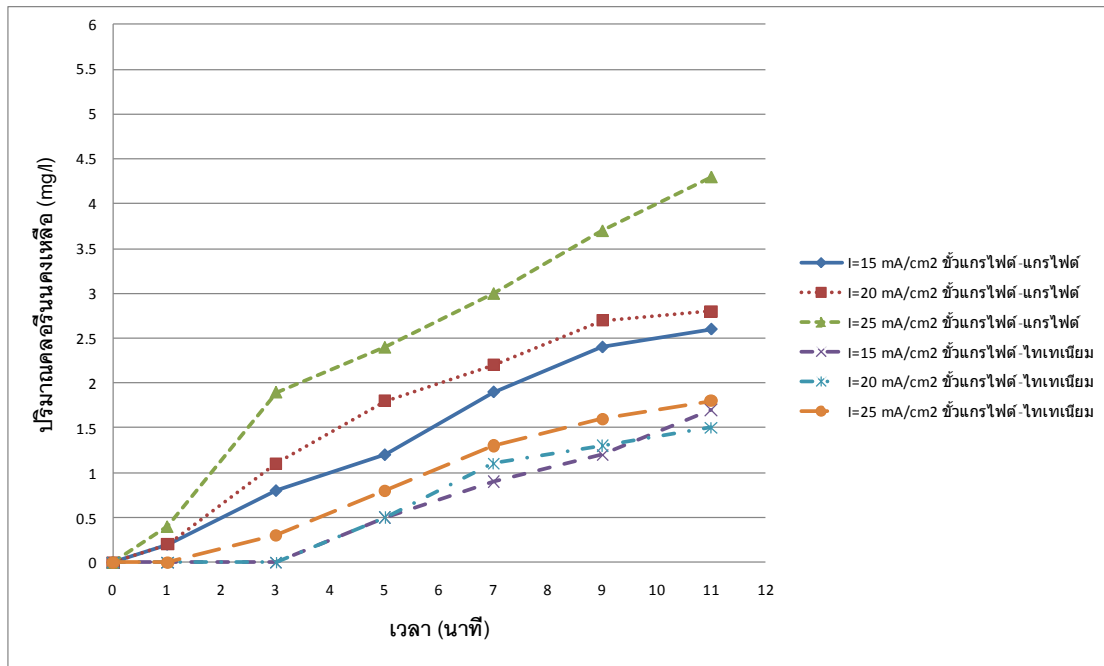
ชุดที่ 2 ทำการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ความเข้มข้นไซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดที่ 3 ทำการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ความเข้มข้นไซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลเพื่อหาความเข้มข้นของไซเดียมคลอไรด์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทำให้เกิดคลอรีนคองเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผลการทดลองของแต่ละชุดการทดลองมีดังนี้

4.1.1 การทดลองชุดที่ 1 การเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ความเข้มข้นไซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ความเข้มข้นไซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ปริมาณคลอรีนคงเหลือเทียบกับเวลาของระบบไฟฟ้าเคมี
ที่เติมโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 mg/L

จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการเกิดคลอรีนคงเหลือก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ และขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียมนั้น จะทำให้เกิดเป็นคลอรีนคงเหลือขึ้นดังปฏิกิริยา (Israilides, 1997)

ในสารละลายมีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) จะทำปฏิกิริยากับขั้วไฟฟ้าเกิด ClOH^- :



และ ClOH^- สามารถทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดก๊าซคลอรีน (Cl_2) :



โดยเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบ ถ้าในสารละลายมีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ผสมอยู่ที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คลอไรด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับโลหะของขั้วไฟฟ้าเกิด ClOH^- ตามสมการที่ (4-1) และ ClOH^- สามารถทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดก๊าซคลอรีน (Cl_2) ตามสมการที่ (4-2)

นอกจากนี้เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการเกิดคลอรีนคองเกลือมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ ดังสมการที่ (4-3) กล่าวคือเมื่อกระแสไฟฟ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยาก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้ที่ขั้วแอโนดเกิด ClOH^- ปริมาณมาก จึงทำให้เกิดก๊าซคลอรีน (Cl_2) ได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้คลอรีนคองเกลือเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการพิจารณาเลือกขั้วอิเล็กโทรด ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลจากน้ำโดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยไฟฟ้าเคมีนั้นจะต้องคำนึงถึงปริมาณคลอรีนคองเกลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส โดยค่าปริมาณคลอรีนคองเกลือแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 โดยค่าอุณหภูมิของน้ำของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้ง 6 ค่าแสดงไว้ในภาคผนวก

$$W = \frac{ItM}{ZF} \quad (4-3)$$

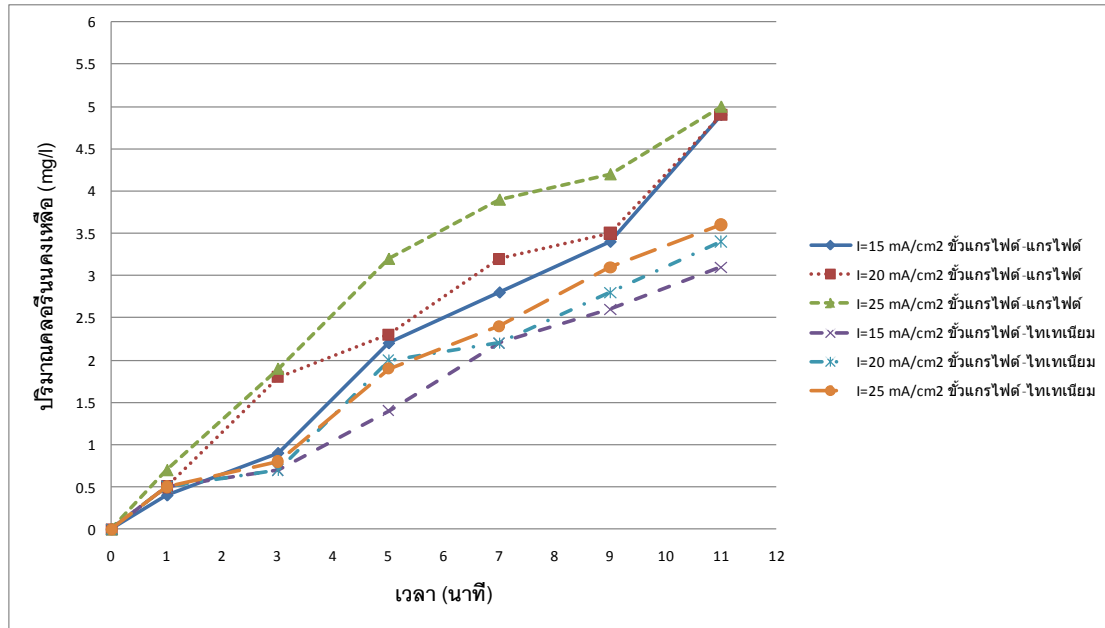
โดยที่

W	คือ	ปริมาณอิเล็กตรอนของขั้วแอโนด
I	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้า
M	คือ	น้ำหนักโมเลกุลที่ขั้วแอโนด
t	คือ	ระยะเวลาในการเดินระบบ
Z	คือ	จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยา
F	คือ	ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487

จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร การใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์สามารถผลิตคลอรีนคองเกลือสูงกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตรในทุกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า การใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียมไม่สามารถผลิตคลอรีนคองเกลือได้สูงถึง 2 มิลลิกรัมต่อลิตรในทุกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะตอมในแกรไฟต์เกิดขึ้นเป็นระนาบแบบชั้นๆ ทำให้การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดได้มากในทิศทางขนานกับระนาบของอะตอม และอะตอมของแกรไฟต์ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงที่สามารถทำลายได้ง่าย ส่วนไทเทเนียมนั้นที่อุณหภูมิปกติไทเทเนียมจะไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา จึงมีผลทำให้ปริมาณการเกิดคลอรีนคองเกลือของขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์มีปริมาณสูงกว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม (เอกรัฐ มีวาสนา, 2552)

4.1.2 การทดลองชุดที่ 2 การเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ความเข้มข้นไซเตียมคลอไรด์ เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ความเข้มข้นไซเตียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นเทียบกับเวลาของระบบไฟฟ้าเคมี ที่เติมไซเตียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 mg/L

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการเกิดคลอไรด์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เช่นเดียวกับของการทดลองชุดที่ 1 โดยปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดคลอไรด์จะเป็นดังสมการ (4-1) และ (4-2) เช่นเดียวกับของการทดลองชุดที่ 1

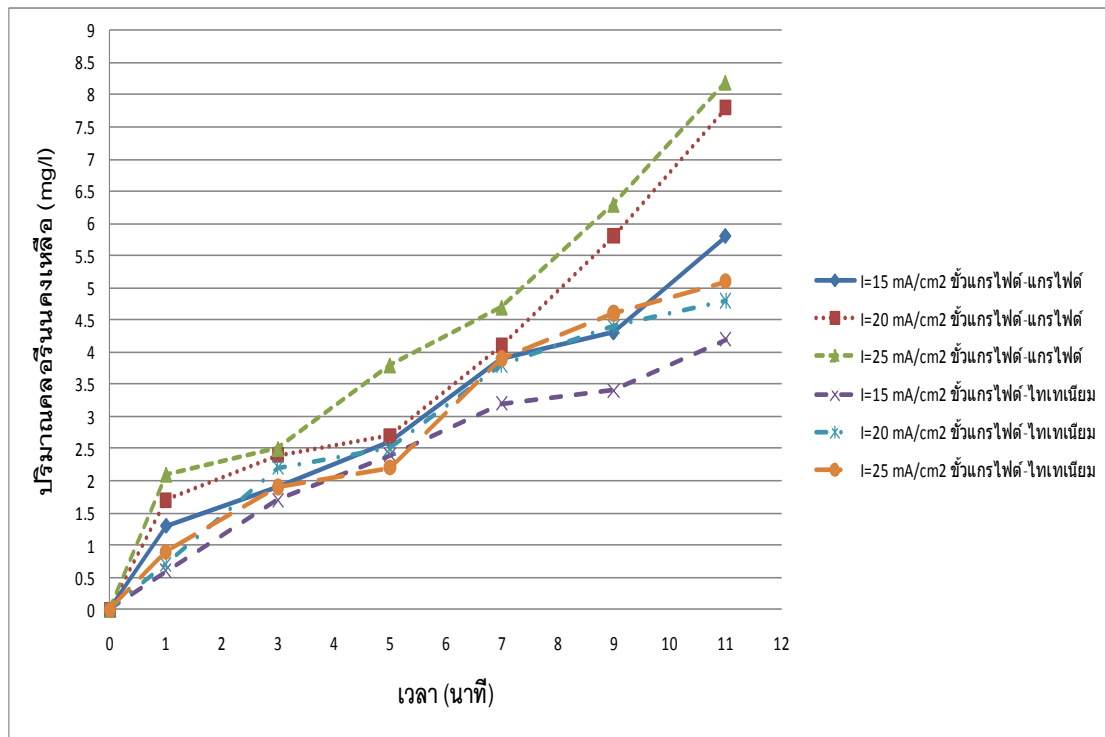
นอกจากนี้เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการเกิดคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ ดังสมการที่ (4-3) เช่นเดียวกับของการทดลองชุดที่ 1 โดยค่าปริมาณคลอไรด์แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 โดยค่าอุณหภูมิของน้ำของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้ง 6 ค่าแสดงไว้ในภาคผนวก

จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นไซเตียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร การใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ - แกรไฟต์ใช้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเพียง 3-5 นาทีเพื่อให้มีปริมาณคลอไรด์สูงกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตรในทุกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แต่ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ - ไทเทเนียมใช้ระยะเวลาทำปฏิกิริยานานกว่า 5-7 นาที จึงจะผลิตคลอไรด์

คงเหลือสูงกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นชนิดของขั้วอิเล็กโทรดมีผลต่อระยะเวลาทำปฏิกิริยา เพื่อให้มีปริมาณคลอรีนคงเหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์จะใช้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเร็วกว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – โทเทเนียม

4.1.3 การทดลองชุดที่ 3 การเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการทดลองการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ปริมาณคลอรีนคงเหลือเทียบกับเวลาของระบบไฟฟ้าเคมีที่เติมโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 mg/L

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการเกิดคลอรีนคงเหลือก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เช่นเดียวกับของการทดลองชุดที่ 1 โดยปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ จะเป็นดังสมการ (4 – 1) และ (4 – 2) เช่นเดียวกับของการทดลองชุดที่ 1 และการทดลองชุดที่ 2

จากการทดลองชุดที่ 1 การทดลองชุดที่ 2 และการทดลองชุดที่ 3 จะพบว่าเมื่อปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการเกิดคลอรีนคองเกลือมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากในสารละลายมีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ละลายอยู่มากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ทำปฏิกิริยากับขั้วไฟฟ้าเกิด ClOH^- เพิ่มขึ้น และ ClOH^- ที่เกิดเพิ่มขึ้นนั้นก็ยังสามารถทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดก๊าซคลอรีน (Cl_2) ได้เพิ่มขึ้นด้วย โดยปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดคลอรีนคองเกลือ จะเป็นดังสมการ (4 – 1) และ (4 – 2)

จากการทดลองชุดที่ 1 การทดลองชุดที่ 2 และการทดลองชุดที่ 3 จะพบว่าเมื่อปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เวลาทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดปริมาณคลอรีนคองเกลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรลดลง เนื่องจากในสารละลายมีคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ละลายอยู่มากขึ้นจึงส่งผลให้ความต้องการระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดปริมาณคลอรีนคองเกลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้นลดลง

นอกจากนี้จากการทดลองชุดที่ 1 ถึง 3 จะพบว่าขั้วอิเล็กโทรด ค่าความหนากระแสไฟฟ้าและปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น ที่ทำให้เกิดปริมาณคลอรีนคองเกลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส คือ

1) ปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 ค่าคือ 15 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

2) ปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่าคือ 15 20 และ 25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

3) ปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 ค่าคือ 15 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

4) ปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่าคือ 15 20 และ 25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

5) ปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่าคือ 15 20 และ 25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4.1 สรุปสภาวะที่ทำให้เกิดปริมาณคลอรีนคงเหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและไม่ทำให้
 อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 องศาเซลเซียส ของการทดลองที่ 1 (คือ
 สภาวะที่เหมาะสมของการทดลองที่ 1)

ปริมาณโซเดียมคลอไรด์	15 mg/L	25 mg/L	50 mg/L
ขั้วอิเล็กโทรดและ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า			
ขั้วแกรไฟต์ – แกรไฟต์ , $I = 15 \text{ mA/cm}^2$			
ขั้วแกรไฟต์ – แกรไฟต์ , $I = 20 \text{ mA/cm}^2$			
ขั้วแกรไฟต์ – แกรไฟต์ , $I = 25 \text{ mA/cm}^2$			
ขั้วแกรไฟต์ – ไทเทเนียม , $I = 15 \text{ mA/cm}^2$			
ขั้วแกรไฟต์ – ไทเทเนียม , $I = 20 \text{ mA/cm}^2$			
ขั้วแกรไฟต์ – ไทเทเนียม , $I = 25 \text{ mA/cm}^2$			

4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบของชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
 และเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อการกำจัดเชื้ออีโคไล โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมใน
 การทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

ทำการทดลองโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 4 ค่าคือ 2,000
 4,000 6,000 และ 14,000 cfu/ml มาผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสม
 จากการทดลองที่ 1 มาใช้ในการทดลอง โดยจะใช้ขั้วอิเล็กโทรด 2 ชุด คือ ขั้วอิเล็กโทรดชนิด
 แกรไฟต์ – แกรไฟต์ (ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ตามลำดับ) และขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ –
 ไทเทเนียม โดยปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่าคือ 15 20 และ 25 มิลลิแอมแปร์
 ต่อตารางเซนติเมตร ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 3 ค่าคือ 15 25 และ 50 มิลลิกรัม
 ต่อลิตร และทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา
 1 3 5 7 และ 9 นาที ซึ่งสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลองดังนี้

ชุดที่ 1 การเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลความเข้มข้น 2,000
 cfu/ml

ชุดที่ 2 การเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลความเข้มข้น 4,000 cfu/ml

ชุดที่ 3 การเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลความเข้มข้น 6,000 cfu/ml

ชุดที่ 4 การเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลความเข้มข้น 14,000 cfu/ml

ตารางที่ 4.2 สภาวะที่ใช้ทำการทดลองที่ 2 (คือ สภาวะที่ใช้ทำการทดลองที่ 2)

	เชื้ออีโคไล 2,000 cfu/mL			เชื้ออีโคไล 4,000 cfu/mL			เชื้ออีโคไล 6,000 cfu/mL			เชื้ออีโคไล 14,000 cfu/mL		
	15	25	50	15	25	50	15	25	50	15	25	50
ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ (mg/L)												
ขั้วอิเล็กโทรด และความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า												
แกรไฟต์ - แกรไฟต์ , $I = 15 \text{ mA/cm}^2$												
แกรไฟต์ - แกรไฟต์ , $I = 20 \text{ mA/cm}^2$												
แกรไฟต์ - แกรไฟต์ , $I = 25 \text{ mA/cm}^2$												
แกรไฟต์ - ไทเทเนียม , $I = 15 \text{ mA/cm}^2$												
แกรไฟต์ - ไทเทเนียม , $I = 20 \text{ mA/cm}^2$												
แกรไฟต์ - ไทเทเนียม , $I = 25 \text{ mA/cm}^2$												

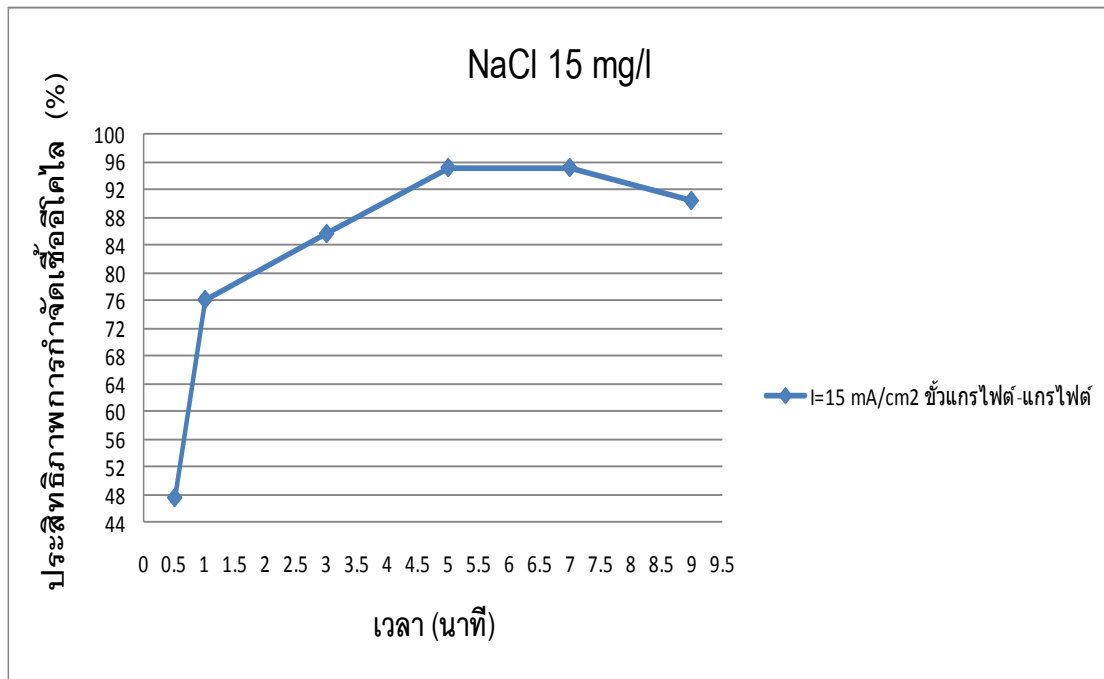
ในการทดลองได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเพิ่มจำนวนเชื้ออีโคไลซึ่งอาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลเนื่องจากการเดินระบบไฟฟ้าเคมีที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงจะทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น จากผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้ออีโคไลเริ่มต้นเท่ากับ 1,000 cfu/ml ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยให้เชื้ออีโคไลเจริญเติบโตเป็นเวลา 9 นาที ดังตารางที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อปริมาณเชื้ออีโคไล และที่อุณหภูมิ 36 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเพิ่มจำนวนเชื้ออีโคไลอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการทดลองเดินระบบไฟฟ้าเคมีจึงควบคุมการใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำสูงกว่า 34 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้ออีโคไลที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาเพาะเลี้ยง 9 นาที

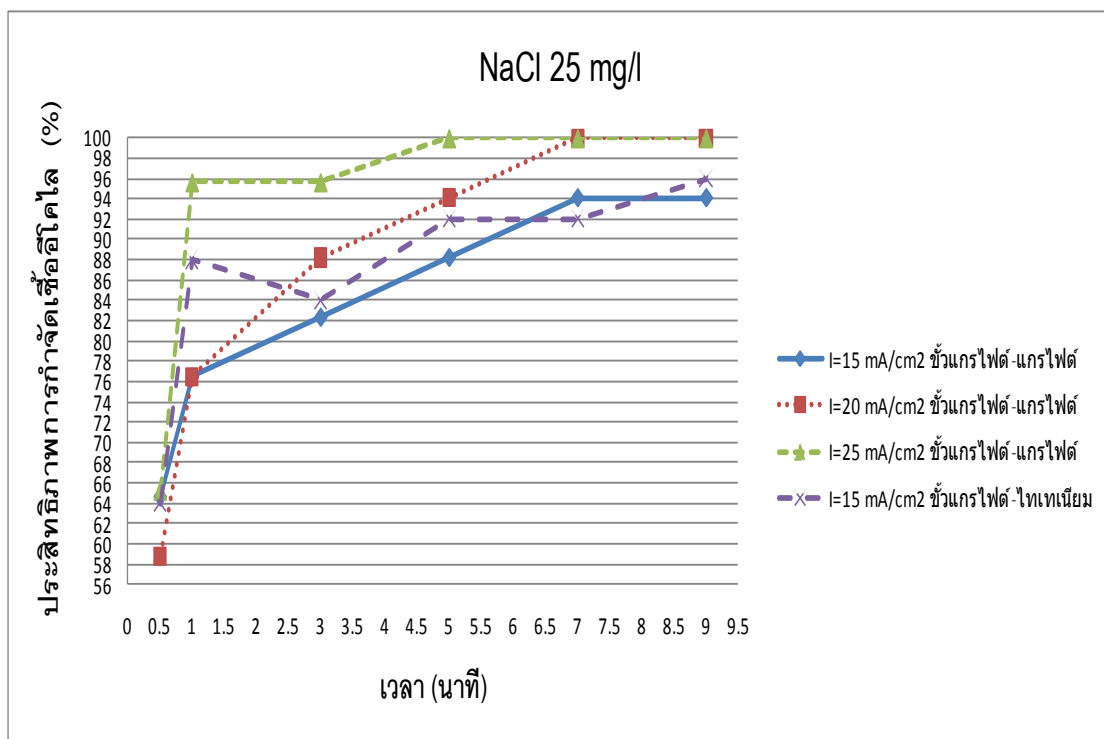
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
28.6	1,000
30	1,000
32	1,000
34	1,000
36	2,000
38	2,000
40	3,000

4.2.1 การเดินระบบโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 cfu/ml

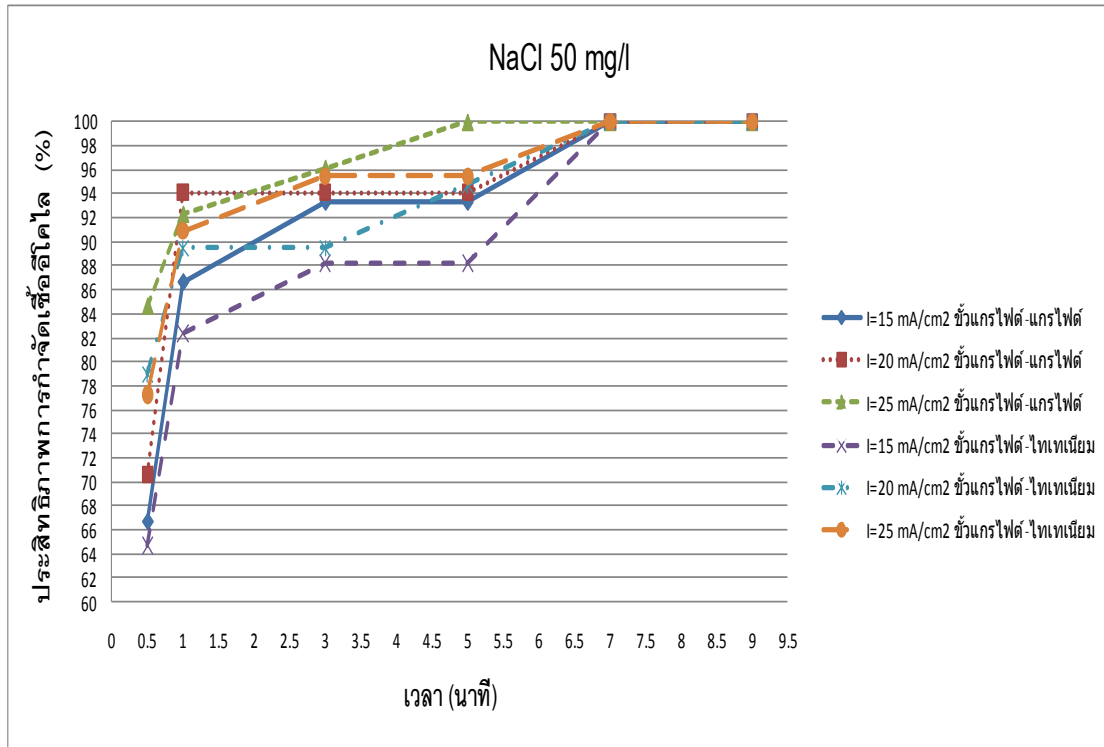
ผลการทดลองการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 cfu/ml ดังรูปที่ 4.4 ถึง รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 2,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 15 mg/l



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 2,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 25 mg/l



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 2,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 50 mg/l

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 ถึง รูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ

จากผลการทดลองเดินระบบที่ปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้น 2,000 cfu/ml พบว่าสภาวะที่สามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) คือที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 ค่าคือ 20 และ 25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่าคือ 15 20 และ 25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 3 ค่าคือ 15 20 และ 25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

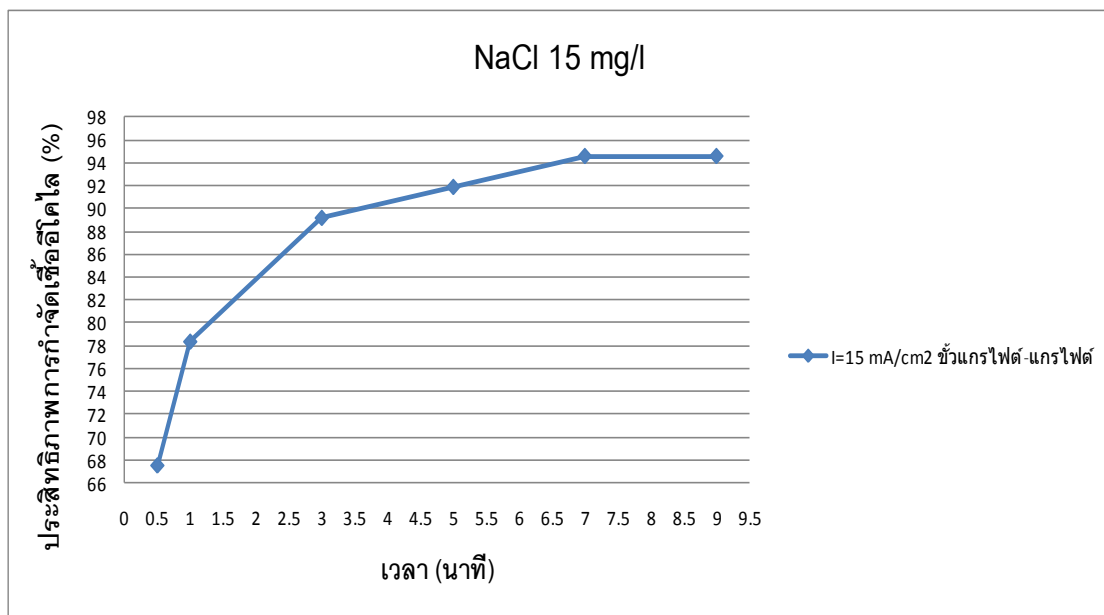
นอกจากนี้เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลก็มีค่าเพิ่ม เนื่องจากปริมาณการเกิดคลอรีนคงเหลือมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ กล่าวคือเมื่อกระแสไฟฟ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนที่เข้าทำปฏิกิริยาก็จะ

เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้ที่ขั้วแอโนดเกิด ClOH^- ปริมาณมาก จึงทำให้มีการสร้างเกิดก๊าซคลอรีน (Cl_2) ได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้คลอรีนคงเหลือเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

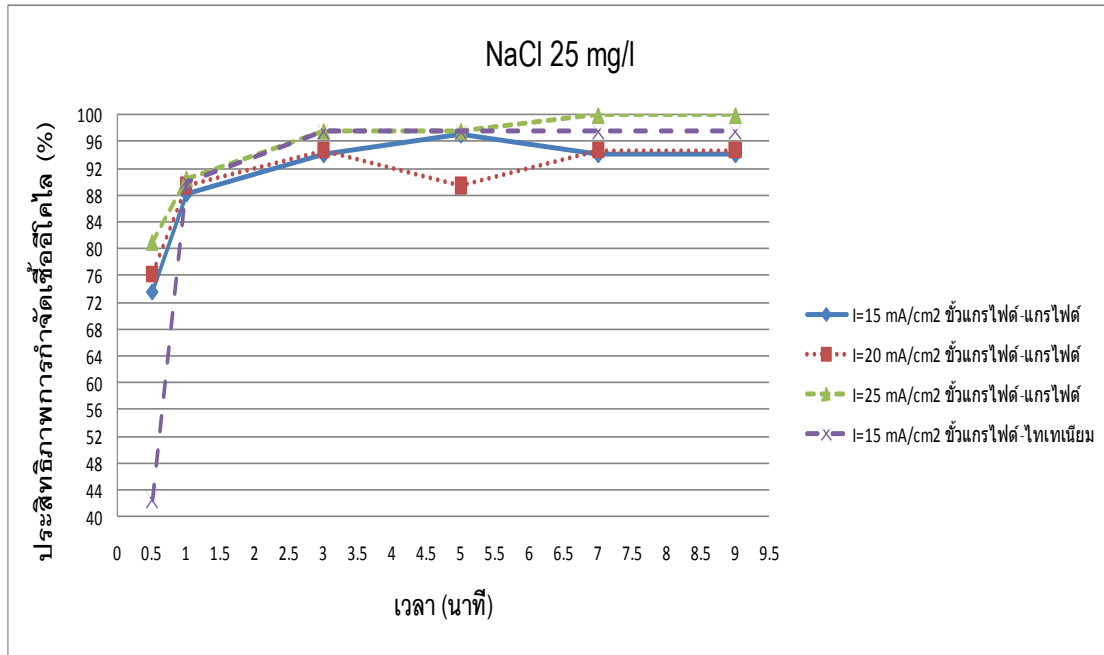
น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 cfu/ml ดังจากผลการทดลอง รูป 4.4 – 4.6 สรุปได้ว่าสถานะที่สามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับปริมาณคลอรีนคงเหลือในน้ำ (กราฟรูปที่ 4.1 – 4.3) พบว่าระบบสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) เมื่อมีคลอรีนคงเหลือมากกว่า 3 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป

4.2.2 การเดินระบบโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 4,000 cfu/ml

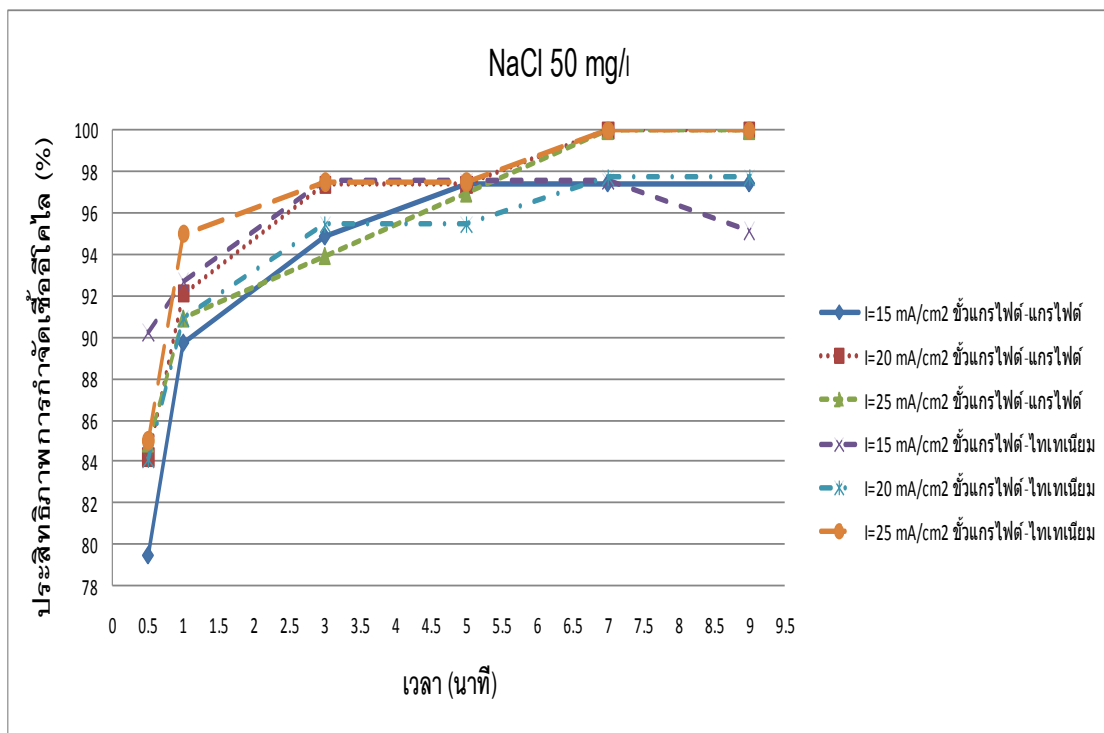
ผลการทดลองการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 4,000 cfu/ml แสดงดังรูปที่ 4.7 ถึง รูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 4,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 15 mg/l



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 4,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 25 mg/l



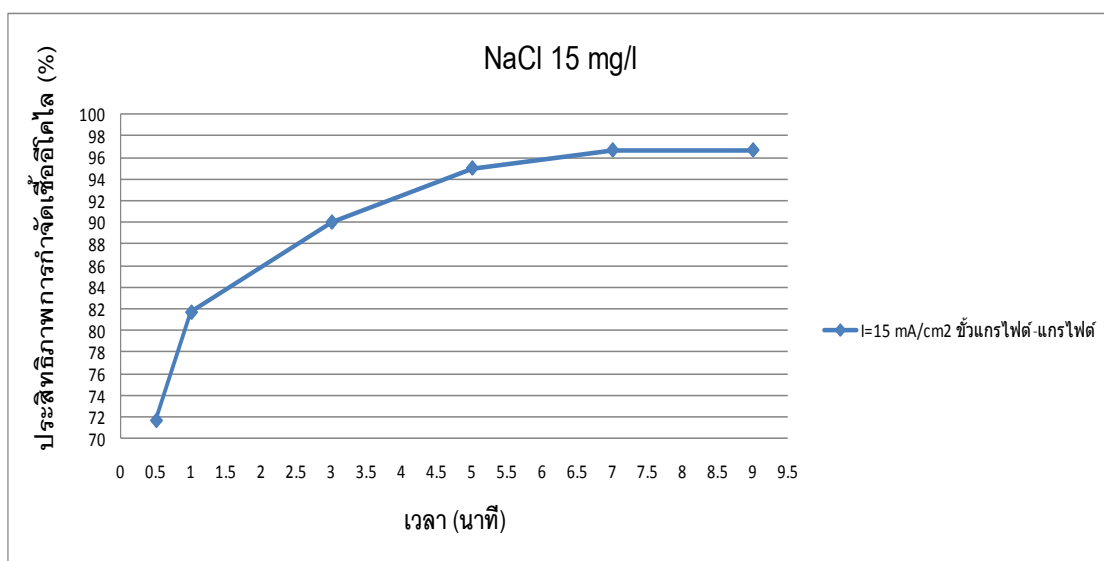
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 4,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 50 mg/l

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.7 ถึง รูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ

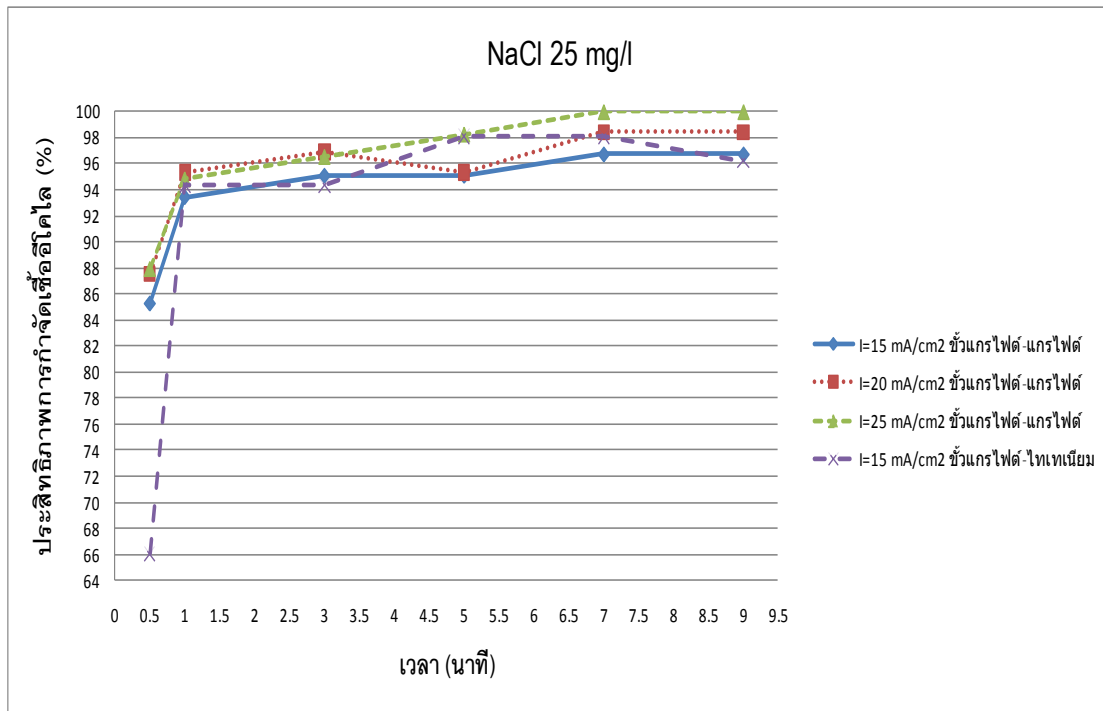
จากผลการทดลองเดินระบบที่ปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้น 4,000 cfu/ml พบว่าสภาวะที่สามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) คือที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 ค่าคือ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 ค่าคือ 20 และ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 ค่าคือ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวพบว่ามีปริมาณคลอรีนคงเหลือสูงกว่า 3.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลในน้ำจะต้องเพิ่มปริมาณคลอรีนคงเหลือในระบบให้สูงขึ้นด้วยจึงจะสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method)

4.2.3 การเดินระบบโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml

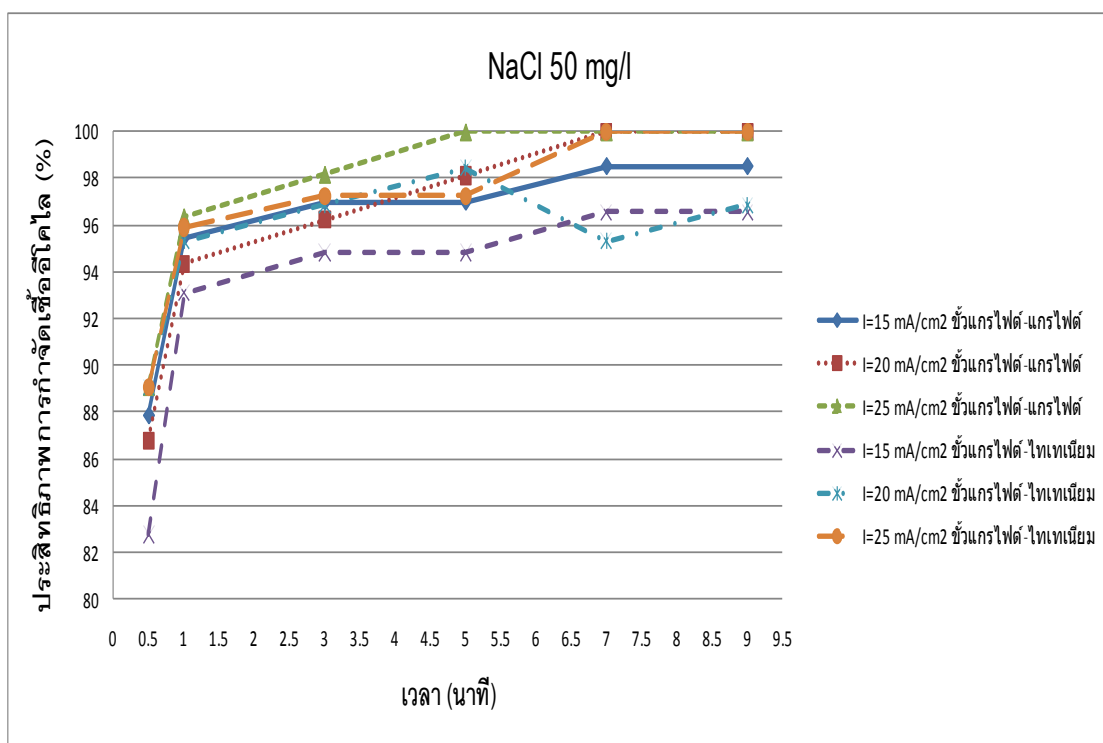
ผลการทดลองการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml แสดงดังรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.12



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 6,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 15 mg/l



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 6,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 25 mg/l



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 6,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 50 mg/l

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.7 ถึง รูปที่ 4.9 การเดินระบบที่ปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้น 6,000 cfu/ml พบว่าสภาวะที่สามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) คือที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 ค่าคือ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 ค่าคือ 20 และ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 ค่าคือ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

จากการทดลองชุดที่ 1 การทดลองชุดที่ 2 และการทดลองชุดที่ 3 จะพบว่าเมื่อปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ต่อสมรรถภาพของระบบไฟฟ้าเคมีในการกำจัดเชื้ออีโคไล โดยจะพบว่า

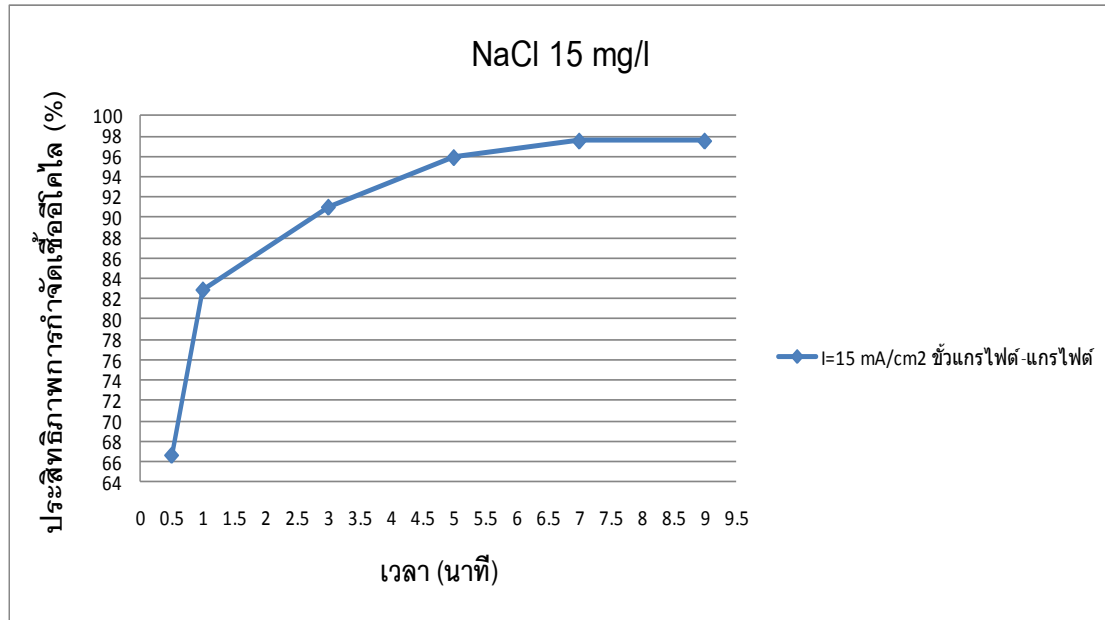
1. เมื่อปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้นเพิ่มขึ้น จะต้องใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) โดยที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม คือที่ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการเดินระบบ 5 นาทีขึ้นไป

2. เมื่อปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้นเพิ่มขึ้น จะต้องใช้ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้นเพิ่มขึ้น เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ซึ่งพบว่าจะต้องใช้ปริมาณโซเดียมคลอไรด์มากกว่า 25 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงจะสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

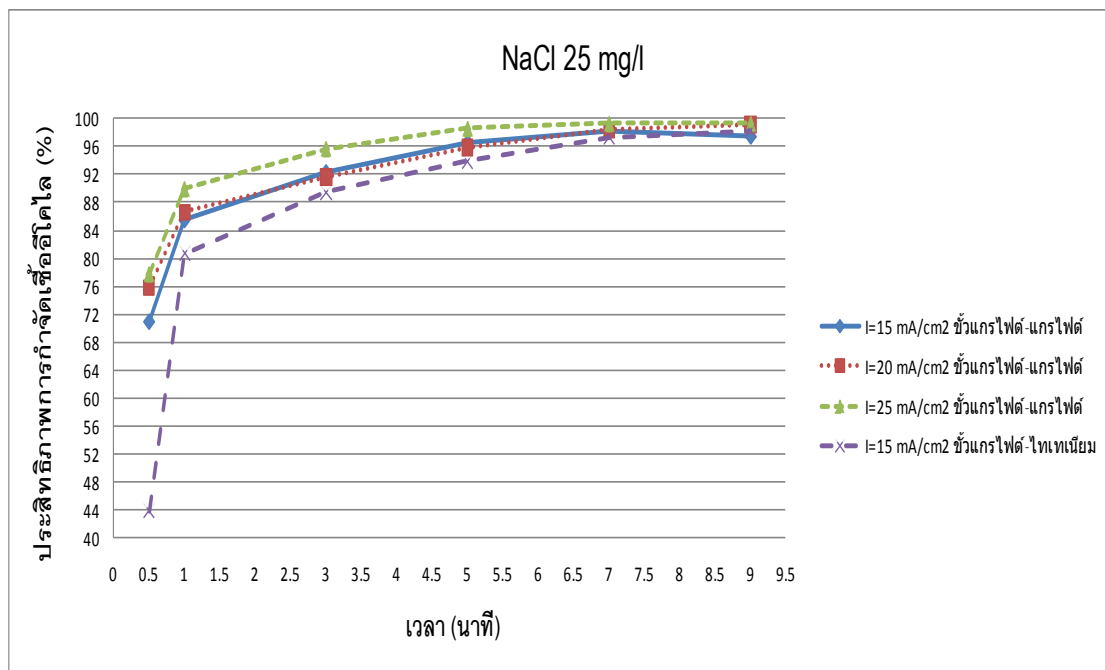
3. เมื่อปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้นเพิ่มขึ้น จะต้องใช้ระยะเวลาในการเดินระบบไฟฟ้าเคมีเพิ่มขึ้น เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ซึ่งที่ระยะเวลาเกิดปฏิกิริยา 7 นาทีที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระบบจะสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทุกความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์

4.2.4 การเดินระบบโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 14,000 cfu/ml

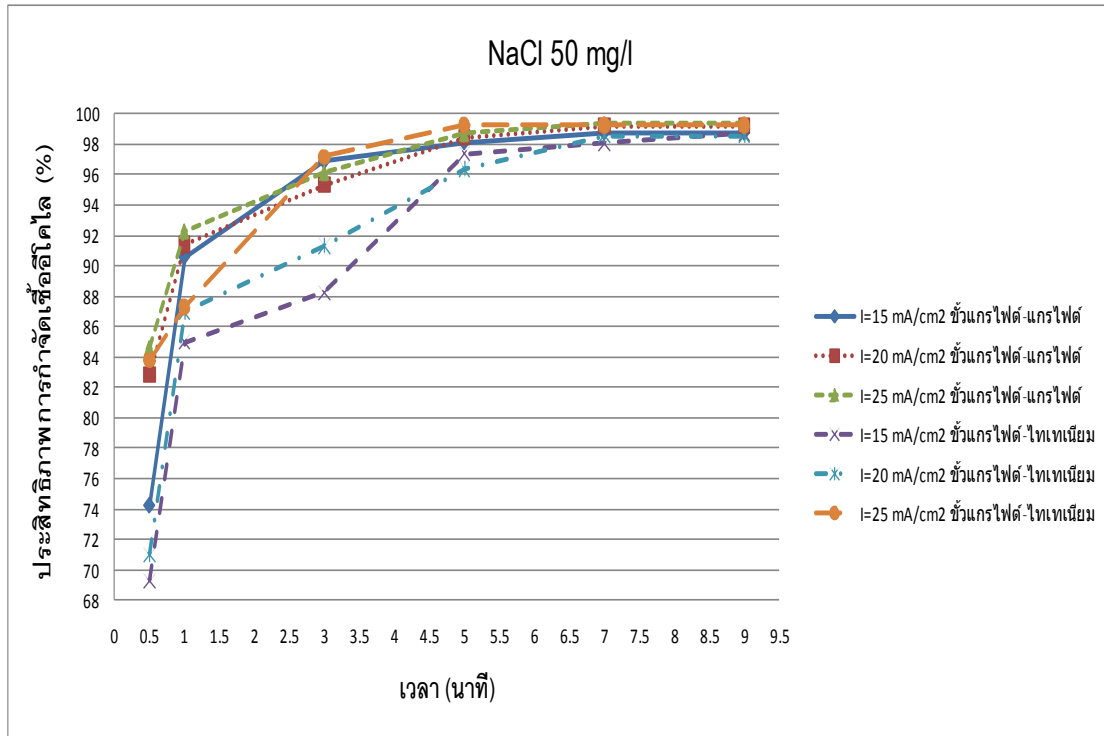
ผลการทดลองการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 14,000 cfu/ml แสดงดังรูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 14,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 15 mg/l



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 14,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 25 mg/l



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลที่ 14,000 cfu/ml และโซเดียมคลอไรด์ 50 mg/l

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.7 ถึง รูปที่ 4.9 พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้น 14,000 cfu/ml จะพบว่าไม่มีสภาวะใดเลยที่จะสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) คาดว่าเนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้น 14,000 cfu/ml เป็นปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลที่สูงเกินกว่าระบบไฟฟ้าเคมีที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ และใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 9 นาที จะสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method)

ตารางที่ 4.4 สรุปสถานะที่กำจัดเชื้ออีโคไลได้หมดจากการทดลองที่ 3 (คือ สถานะที่กำจัดเชื้ออีโคไลได้หมดจากการทดลองที่ 3)

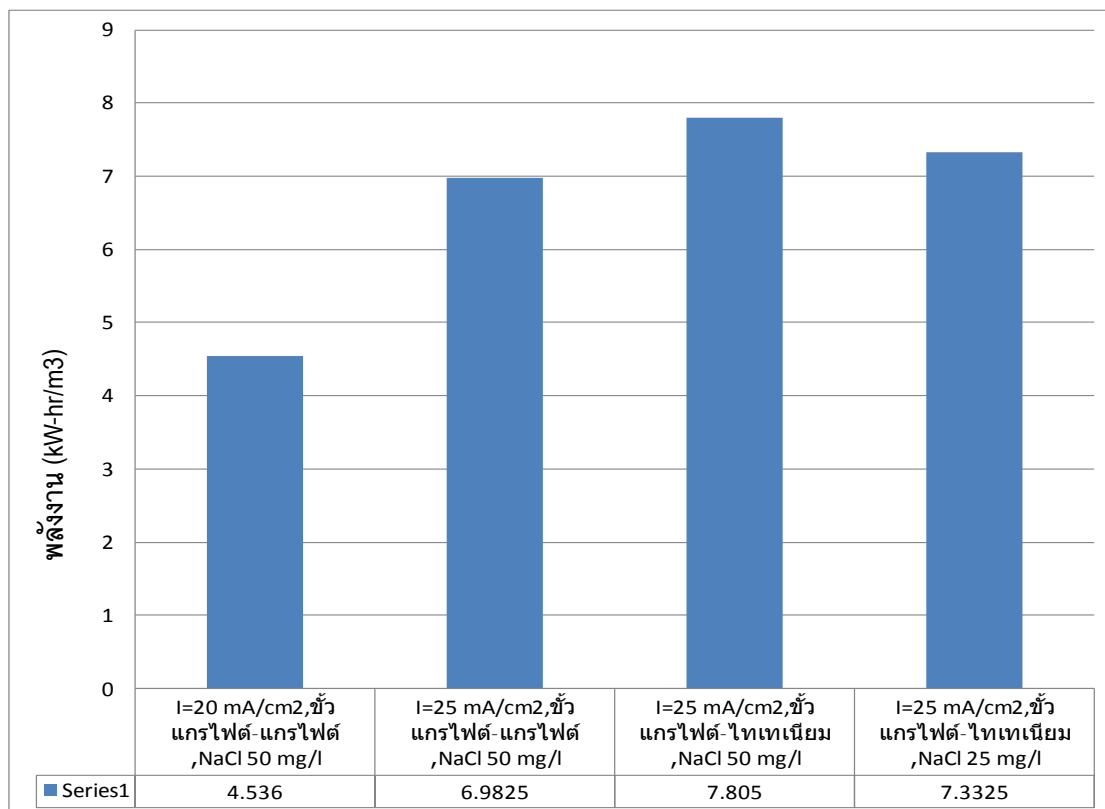
	เชื้ออีโคไล 2,000 cfu/mL			เชื้ออีโคไล 4,000 cfu/mL			เชื้ออีโคไล 6,000 cfu/mL			เชื้ออีโคไล 14,000 cfu/mL		
	15	25	50	15	25	50	15	25	50	15	25	50
ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ (mg/L) ขั้วอิเล็กโทรด และความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า												
แกรไฟต์ - แกรไฟต์ , $I = 15 \text{ mA/cm}^2$												
แกรไฟต์ - แกรไฟต์ , $I = 20 \text{ mA/cm}^2$												
แกรไฟต์ - แกรไฟต์ , $I = 25 \text{ mA/cm}^2$												
แกรไฟต์ - ไทเทเนียม , $I = 15 \text{ mA/cm}^2$												
แกรไฟต์ - ไทเทเนียม , $I = 20 \text{ mA/cm}^2$												
แกรไฟต์ - ไทเทเนียม , $I = 25 \text{ mA/cm}^2$												

ดังนั้นในการพิจารณาเลือกค่าสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยไฟฟ้าเคมี จึงเลือกค่าปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้น 6,000 cfu/ml และในการพิจารณาเลือกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้นจะต้องคำนึงถึงปริมาณของพลังงานที่ใช้ในการกำจัดเชื้ออีโคไล เพื่อให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ โดยค่าพลังงานที่ใช้ในการกำจัดเชื้ออีโคไล สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-4) โดย

พลังงานที่ใช้ในการกำจัดเชื้ออีโคไลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้ง 4 ค่าดังรูปที่ 4.16

$$W = \frac{U_v \times I}{V} \quad (4-4)$$

โดยที่ W คือ งานทางไฟฟ้า (วัตต์)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
 U_v คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)
 V คือ ปริมาตรของน้ำในถังปฏิกรณ์



รูปที่ 4.16 พลังงานที่ระบบไฟฟ้าเคมีใช้ในการกำจัดเชื้ออีโคไลเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ได้หมด

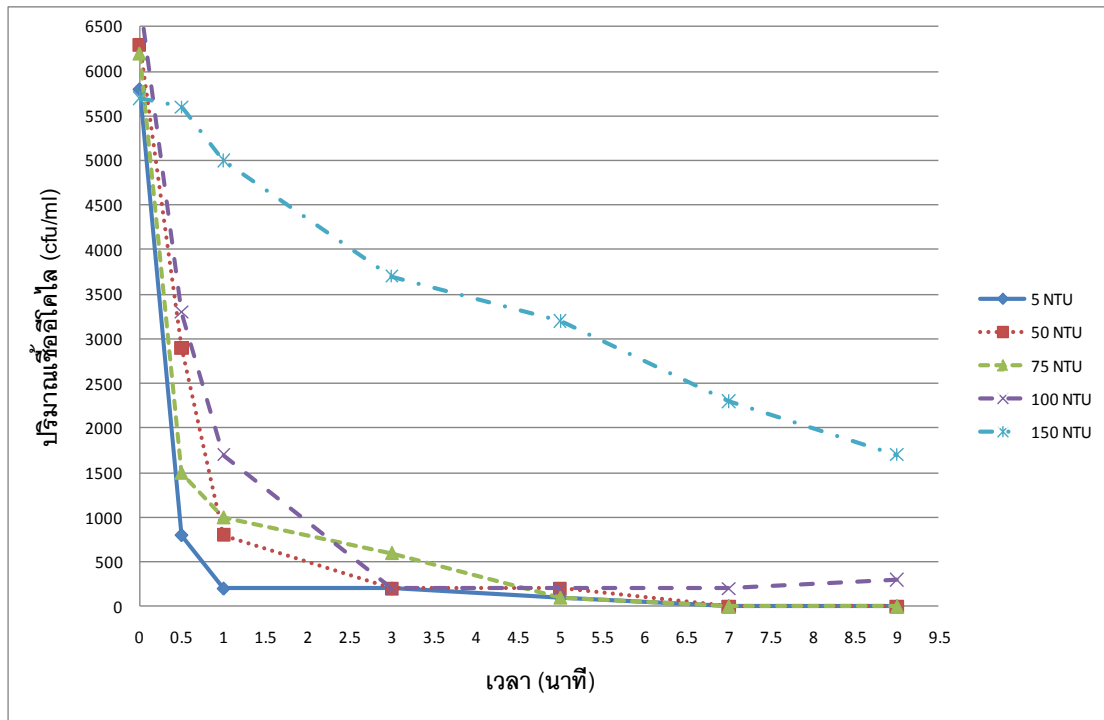
จากรูปที่ 4.16 พบว่าที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการเดินระบบ 7 นาที คิดเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการกำจัดเชื้ออีโคไลได้เท่ากับ 4.536 kW – hr/m³ ที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา

ในการเดินระบบ 7 นาที คิดเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการกำจัดเชื้ออีโคไลได้เท่ากับ $6.9825 \text{ kW} - \text{hr}/\text{m}^3$ ที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ - โทเทเนียม ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการเดินระบบ 7 นาที คิดเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการกำจัดเชื้ออีโคไลได้เท่ากับ $7.805 \text{ kW} - \text{hr}/\text{m}^3$ และที่ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ - แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการเดินระบบ 7 นาที คิดเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการกำจัดเชื้ออีโคไลได้เท่ากับ $7.3325 \text{ kW} - \text{hr}/\text{m}^3$ ดังนั้นค่าปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น ชนิดขั้วอิเล็กโทรด ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดเชื้ออีโคไล คือ ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ - แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการเดินระบบ 7 นาที

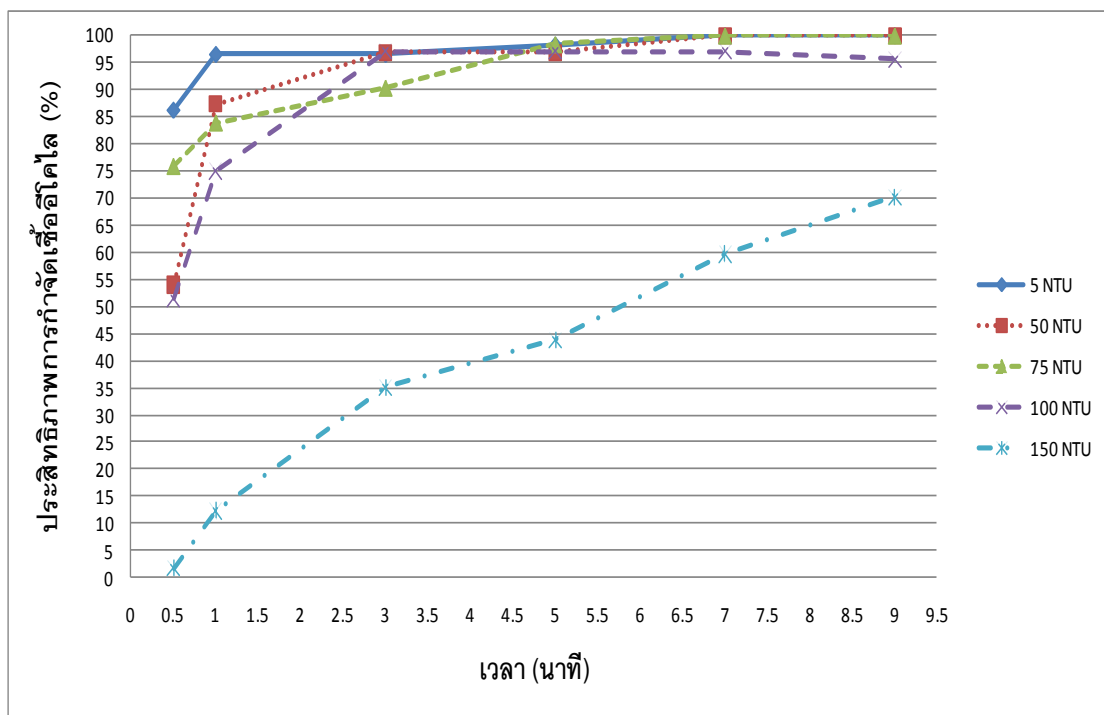
4.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่มีค่าความขุ่นแตกต่างกัน โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากรู้น้ำ จากการทดลองที่ 2 มาใช้ในการทดลอง ได้แก่ ชนิดขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดคลอรีนคงเหลือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่มีค่าความขุ่นแตกต่างกัน 5 ค่า คือ 5 50 75 100 และ 150 NTU และทำการเดินระบบโดยใช้ค่าปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้น ค่าปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น ชนิดขั้วอิเล็กโทรด ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการเดินระบบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2 โดยจะใช้ค่าปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ - แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการเดินระบบ 7 นาที

ผลการทดลองการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml โดยปรับความขุ่นเท่ากับ 5 50 75 100 และ 150 NTU แสดงดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 การกำจัดเชื้ออีโคไลด้วยระบบไฟฟ้าเคมีขั้วแกรไฟต์-แกรไฟต์ ที่ค่าความขุ่นต่างๆ



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลด้วยระบบไฟฟ้าเคมีขั้วแกรไฟต์-แกรไฟต์ ที่ค่าความขุ่นต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 สรุปว่าความขุ่นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลด้วยระบบไฟฟ้าเคมี โดยเมื่อเพิ่มความขุ่นของน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไล ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลก็จะมีค่าลดลง ที่ค่าความขุ่นต่ำกว่า 75 NTU ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ส่วนที่ค่าความขุ่น 100 และ 150 NTU นั้นประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลลดลงเท่ากับ 95.59% และ 70.17% ตามลำดับ

ความขุ่นมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไล เนื่องจากจากอนุภาคของความขุ่นอาจเป็นเกราะกำบังให้กับเชื้ออีโคไลได้ ทำให้ ClOH^- และก๊าซคลอรีน (Cl_2) ไม่สามารถเข้าไปสัมผัสกับเชื้ออีโคไลได้ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลมีค่าลดลง ซึ่งอาจแก้ไขโดยการเพิ่มปริมาณคลอรีนคงเหลือในน้ำซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะเวลาการทำปฏิกิริยา หรือเพิ่มไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

4.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 มาใช้ในการทดลอง ที่สามารถกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ เพื่อศึกษาสมรรถภาพของระบบที่มีการป้อนน้ำต่อเนื่อง

การทดลองนี้เป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่องเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไล ซึ่งทำการเดินระบบโดยใช้ค่าปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้น ค่าปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น ชนิดขั้วอิเล็กโทรด ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการเดินระบบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3 โดยจะใช้ค่าปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ที่มีค่าความขุ่น 75 NTU ปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 7 และ 14 นาที ซึ่งสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลองดังนี้

การทดลองชุดที่ 1 ทำการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ปรับความขุ่นเท่ากับ 75 NTU ปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 7 นาที

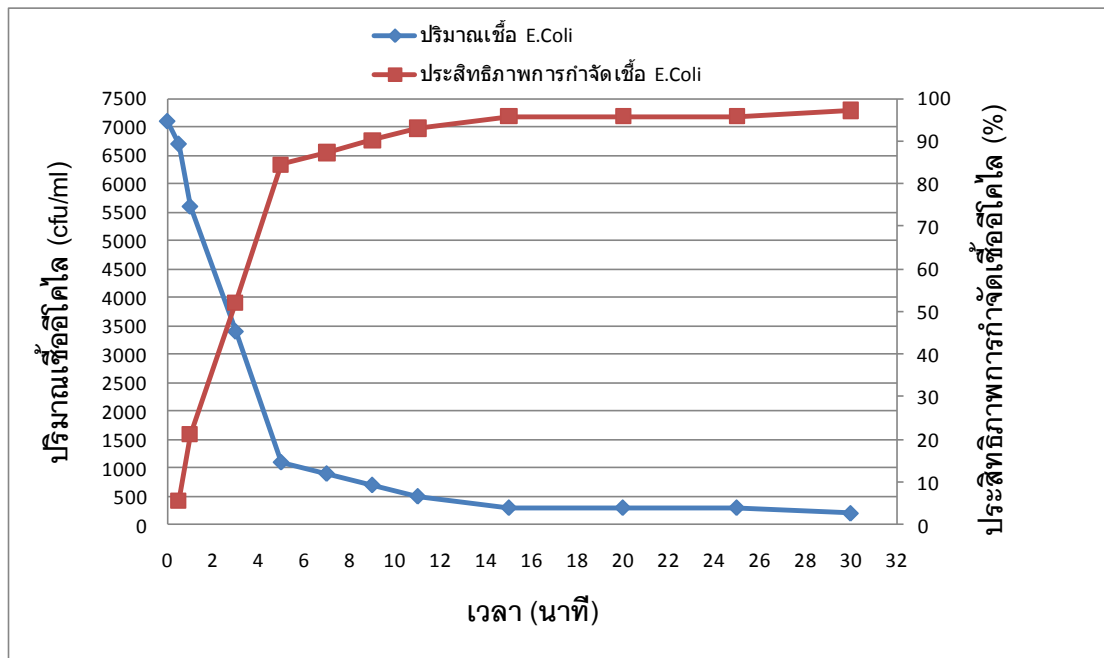
การทดลองชุดที่ 2 ทำการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ปรับความขุ่นเท่ากับ 75 NTU ปริมาณไฮเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความ

หนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 14 นาที

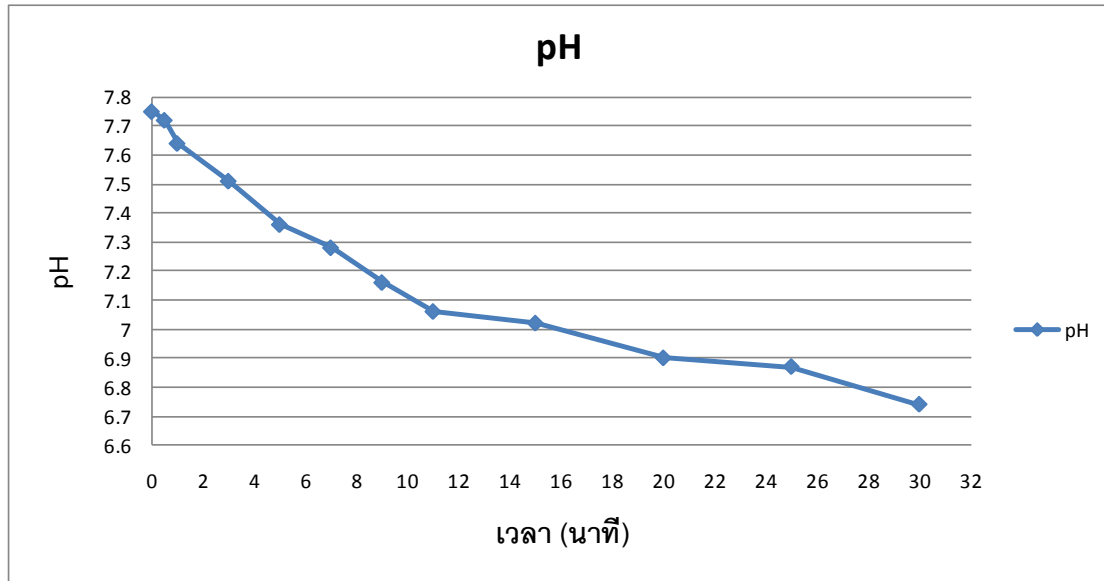
การทดลองชุดที่ 3 ทำการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ปรับความขุ่นเท่ากับ 75 NTU ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 14 นาที

4.4.1 การเดินระบบต่อเนื่องโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 7 นาที

ผลการทดลองการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml โดยปรับความขุ่นเท่ากับ 75 NTU ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 7 นาทีตลอดการทดลอง ดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 การกำจัดเชื้ออีโคไลโดยระบบไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm² มีระยะเวลาเก็บกัก 7 นาที



รูปที่ 4.20 พีเอชในระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง
ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm^2 โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 7 นาที

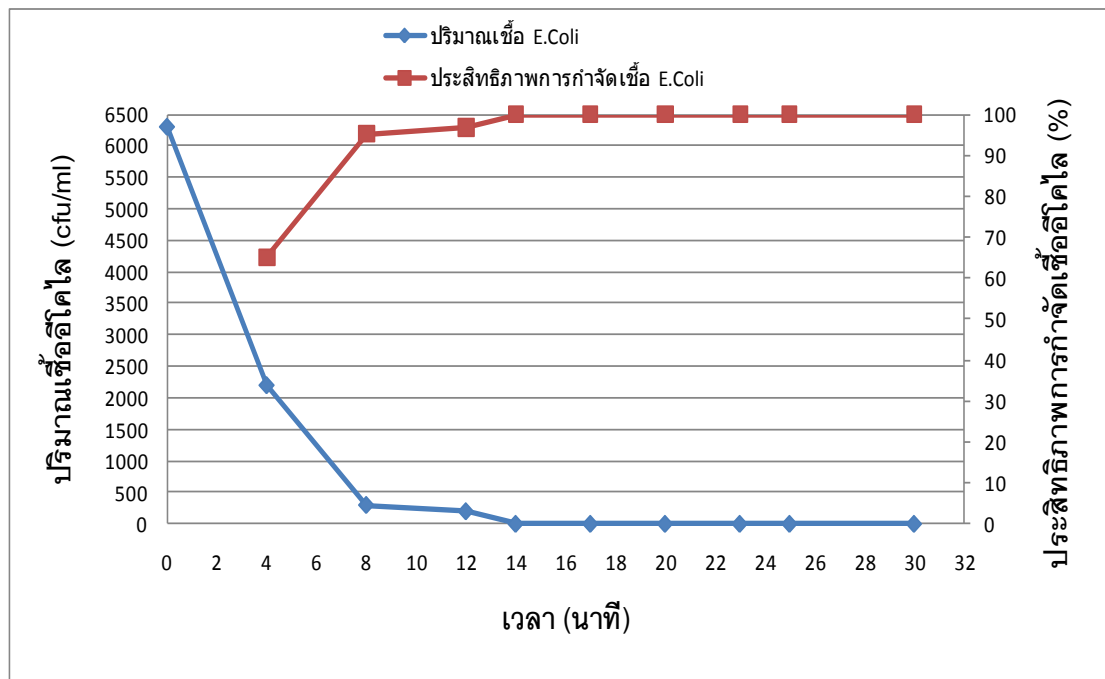
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 พบว่า การเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะเวลาเก็บกัก 7 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลได้ 87.32% ทั้งนี้ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ทั้งหมด (ตรวจวิเคราะห์โดยวิธี Spread plate method) คาดว่าเนื่องมาจากระยะเวลาเก็บกักในการทำปฏิกิริยามีระยะเวลาเก็บกักไม่เพียงพอในการกำจัดเชื้ออีโคไล

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพีเอชในระหว่างการเดินระบบมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาที่แสดงไว้ในสมการที่ (4 - 1) และ สมการที่ (4 - 2) คือที่ขั้วแอโนดจะทำให้เกิด H^+ จึงส่งผลให้ค่าพีเอชในระหว่างการเดินระบบมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.20

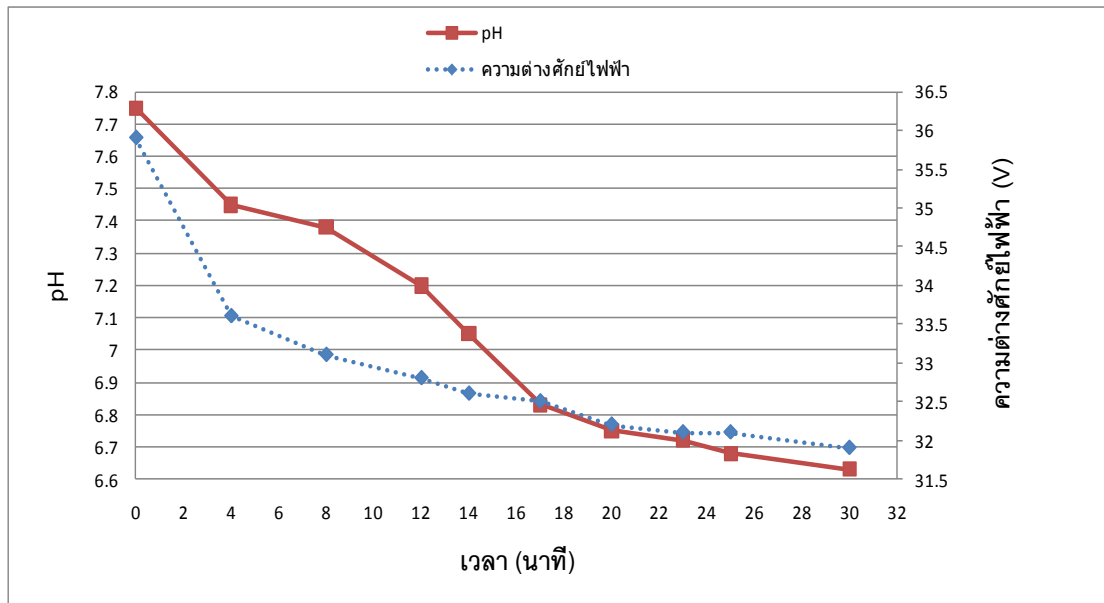
จากผลการทดลองยังพบว่าปริมาณสาร Trihalomethane (Chloroform , CHCl_3) มีค่าลดลง คือ น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลเริ่มต้นเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องมีปริมาณสาร Trihalomethane (Chloroform , CHCl_3) 12.07 ppb และน้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ผ่านการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องมีปริมาณสาร Trihalomethane (Chloroform , CHCl_3) 1.64 ppb

4.4.2 การเดินระบบต่อเนื่องโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 14 นาที

ผลการทดลองการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml โดยปรับความขุ่นเท่ากับ 75 NTU ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 14 นาที ดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 การกำจัดเชื้ออีโคไลโดยระบบไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm² มีระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที



รูปที่ 4.22 พีเอชและความต่างศักย์ไฟฟ้าในระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm^2 โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 พบว่า การเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องที่ ระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) เนื่องจากระยะเวลาเก็บกักในการทำปฏิกิริยามี ระยะเวลาเก็บกักเพียงพอในการกำจัดเชื้ออีโคไล

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในระหว่างการเดินระบบมีค่าลดลงเมื่อ ระยะเวลาในการเดินระบบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในระหว่างการเดินระบบมีค่า ลดลงดังรูปที่ 4.22 เนื่องจากการเดินระบบด้วยไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบควบคุม กระแสไฟฟ้าคงที่ โดยเป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ค่า ความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกันตามสมการของเนินส์ (Friedrich, 1962)

ค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปกับความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์สามารถแสดงได้ตามสมการของเนิร์นส์ (Nerns's equation) (เอกรัฐ มีวาสนา,2552)

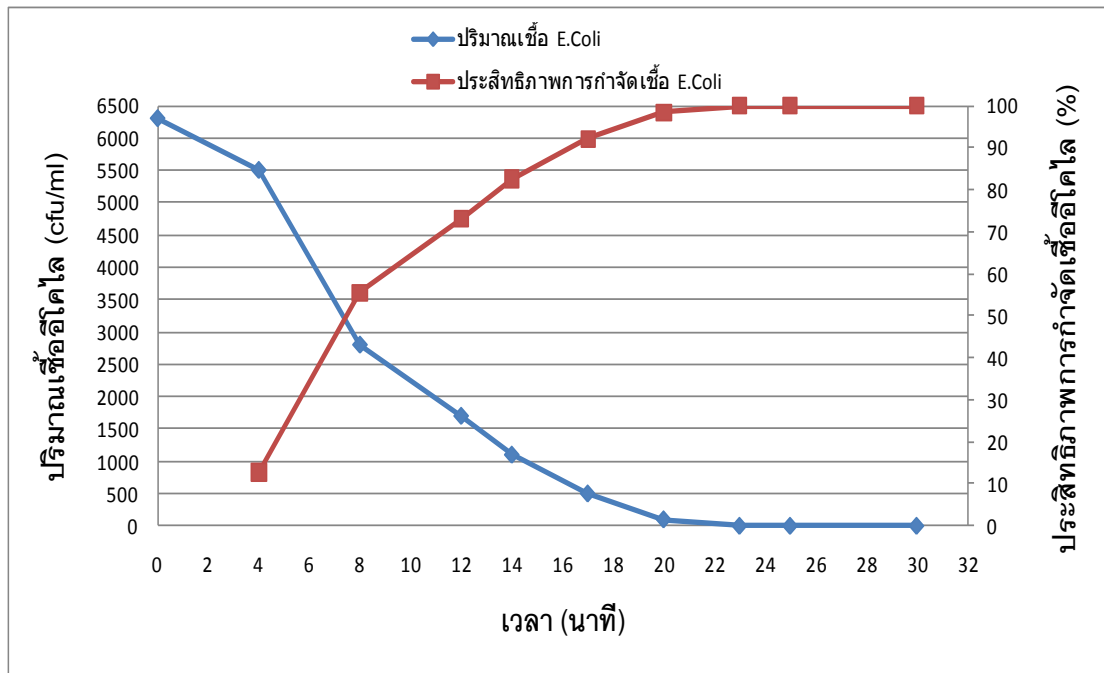
$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox]}{[Red]} \quad (4 - 4)$$

เมื่อ

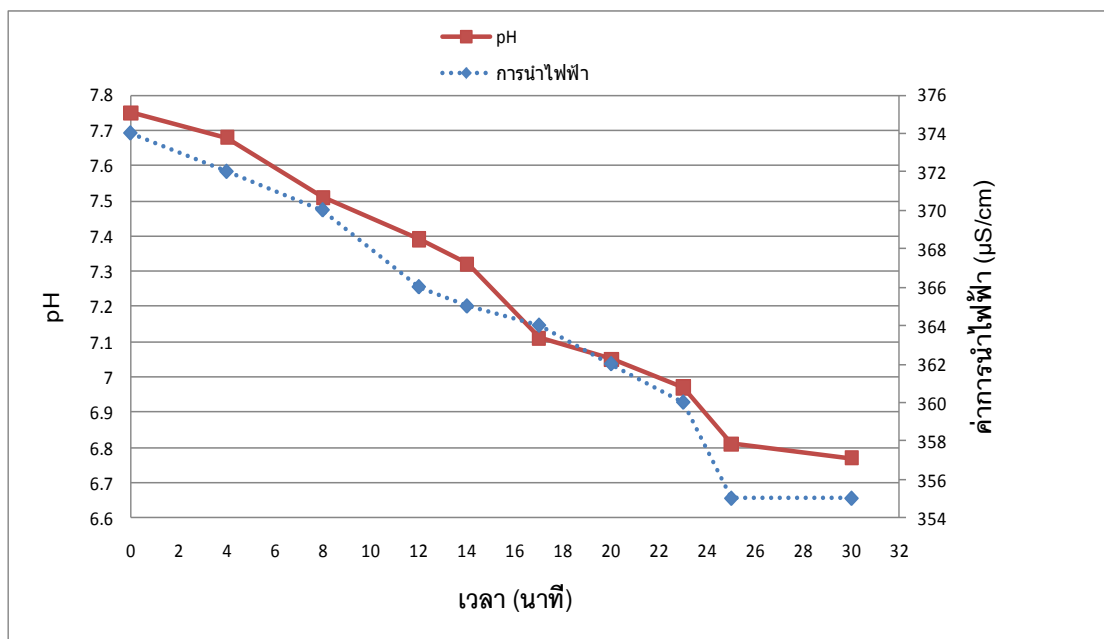
E	=	ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ณ สภาวะใดๆ (โวลต์)
E^0	=	ค่าความต่างศักย์มาตรฐานระหว่างขั้วแคโทดและสารละลาย (โวลต์)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลต่อเคลวิน)
T	=	อุณหภูมิ (เคลวิน)
n	=	จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา (ประจุต่อโมล)
F	=	ค่าคงที่ฟาราเดย์เท่ากับ 96,500 (แอมแปร์.วินาทีต่อประจุ)
[Ox],[Red]	=	ความเข้มข้นของตัวออกซิไดส์และตัวรีดิวซ์ตามลำดับ(โมลต่อลิตร)

4.4.3 การเดินระบบโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 14 นาที

ผลการทดลองการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้น้ำสังเคราะห์เชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml โดยปรับความขุ่นเท่ากับ 75 NTU ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที ดังรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 การกำจัดเชื้ออีโคไลโดยระบบไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm^2 มีระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที



รูปที่ 4.24 พีเอชและค่าการนำไฟฟ้าในระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm^2 โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที

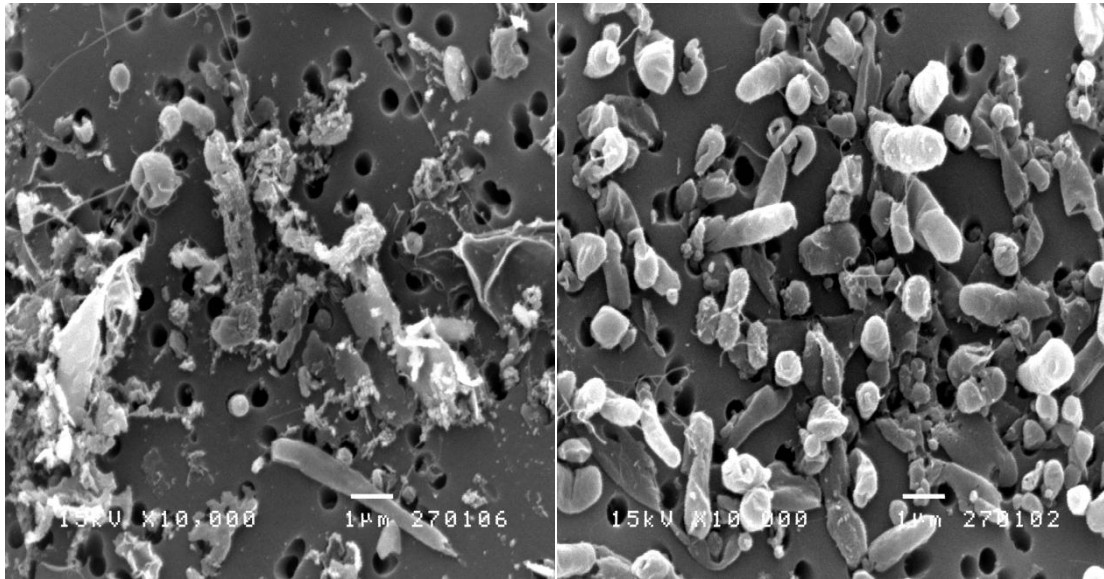
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 พบว่า การเดินระบบแบบไหลต่อเนื่องที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm^2 ระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลได้ 82.54% ทั้งนี้ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลไม่สามารถกำจัดออกจากรน้ำได้ทั้งหมด (ตรวจวิเคราะห์โดยวิธี Spread plate method) คาดว่าเนื่องมาจากระยะเวลาเก็บกักในการทำปฏิกริยามีระยะเวลาเก็บกักไม่เพียงพอในการกำจัดเชื้ออีโคไล แต่ที่ระยะเวลาเก็บน้ำที่ 23-25 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากรน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) ทั้งนี้ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากรน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) คาดว่าเนื่องมาจากระยะเวลาในการทำปฏิกริยามีระยะเวลามากเพียงพอในการกำจัดเชื้ออีโคไล

จากการทดลองสามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำ ได้ดังนี้

1) การเดินระบบแบบทีละเท สภาวะที่เหมาะสม คือการใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการเดินระบบ 7 นาที ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากรน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) เมื่อปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้นต่ำกว่า 6,000 cfu/ml และค่าความขุ่นต่ำกว่า 75 NTU

2) การเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง สภาวะที่เหมาะสม คือการใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ปริมาณโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลาเก็บกัก 14 นาที ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลทั้งหมดออกจากรน้ำ (ตรวจวิเคราะห์ไม่พบโดยวิธี Spread plate method) เมื่อปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้นต่ำกว่า 6,000 cfu/ml และค่าความขุ่นต่ำกว่า 75 NTU ซึ่งพบว่าการเดินระบบแบบที่มีการไหลแบบต่อเนื่องจะต้องใช้เวลาเก็บกักน้ำนานกว่าแบบทีละเทประมาณ 2 เท่า

4.5 ลักษณะของเชื้ออโคไลที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 4.25 ลักษณะของเชื้ออโคไลที่ผ่านระบบไฟฟ้าเคมี
 ที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 10,000 เท่า
 ถ่ายที่ : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลักษณะของเชื้ออโคไลที่ผ่านระบบไฟฟ้าเคมีจากการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านระบบไฟฟ้าเคมีที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 14 นาที

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของความชุ่มต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การทดลองแบบที่ละเท และการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

5.1.1 การทดลองระบบไฟฟ้าเคมีแบบที่ละเทที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ และใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม มีประสิทธิภาพในการผลิตคลอรีนคองเหลือ โดยขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์จะผลิตคลอรีนคองเหลือที่มีความเข้มข้นสูงกว่าใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม ซึ่งคลอรีนคองเหลือสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้ออีโคไลสูงกว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – ไทเทเนียม

5.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลด้วยระบบไฟฟ้าเคมีแบบที่ละเท ได้แก่ ปริมาณเชื้ออีโคไลเริ่มต้น ค่าความชุ่ม ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด ค่าปริมาณโซเดียมคลอไรด์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการเดินระบบไฟฟ้าเคมี

5.1.3 การทดลองระบบไฟฟ้าเคมีแบบที่ละเท สภาวะที่เหมาะสมของระบบไฟฟ้าเคมี คือการใช้โซเดียมคลอไรด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ ระบบสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลได้หมดภายในเวลา 7 นาที เมื่อน้ำมีปริมาณความเข้มข้นของเชื้ออีโคไลเริ่มต้นต่ำกว่า 6,000 cfu/ml ค่าความชุ่มต่ำกว่า 75 NTU

5.1.4 ความขุ่นในน้ำมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเคมีในการกำจัดเชื้ออีโคไล โดยน้ำที่มีความขุ่นต่ำกว่า 75 NTU จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไล คือที่ความขุ่น 100 และ 150 NTU ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้ออีโคไลจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเท่ากับร้อยละ 95.59 และร้อยละ 70.17 ตามลำดับ

5.1.5 การเดินระบบระบบไฟฟ้าเคมีแบบไหลต่อเนื่องที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดแกรไฟต์ – แกรไฟต์ สามารถกำจัดเชื้ออีโคไลในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 14 นาทีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 และ 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรสามารถกำจัดเชื้ออีโคไลได้หมดเมื่อเดินระบบที่เวลาเก็บกักน้ำเท่ากับ 23 และ 14 นาที เมื่อใช้น้ำที่มีความหนาแน่นเชื้ออีโคไล 6,000 cfu/l และค่าความขุ่นเท่ากับ 75 NTU ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยไฟฟ้าเคมีในระดับห้องปฏิบัติการนี้ไปขยายผลเพื่อทำการทดสอบจริงกับน้ำจากแหล่งน้ำดิบที่ผลิตทำน้ำประปา น้ำสะอาด น้ำเสียจากอาคาร
2. เสนอให้ศึกษาการกำจัดเชื้ออีโคไลพร้อมกับการกำจัดซีโอดีโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ในกรณีที่ทำทดลองกับน้ำเสีย
3. เสนอให้ศึกษาการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยเพิ่มจำนวนแผ่นอิเล็กโทรด
4. ปริมาณคลอรีนคงเหลือที่วิเคราะห์โดยวิธีไอโอโดเมตริกเป็นคลอรีนตกค้างรวม (Combined chlorine residuals) ไม่ใช่คลอรีนตกค้างอิสระ (Free chlorine residuals) จึงควรระวังในการวิเคราะห์ปริมาณคลอรีน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- การประปาส่วนภูมิภาค. 2552. ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา. [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: <http://www.pwa.co.th/service/treatment.html> [2552, พฤศจิกายน 1].
- กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ. 2549. คู่มือ Food Inspector. กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.
- จุฬาราชมนตรี. 2542. เอกสารคำสอนวิชา สข 214 จุลชีวะวิทยาในทางสาธารณสุข. กรุงเทพฯ : ภาควิชาสุขศึกษา คณะพลศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- จุฬาราชมนตรี. 2542. คู่มือปฏิบัติการวิชา สข 214 จุลชีวะวิทยาในทางสาธารณสุข. กรุงเทพฯ : ภาควิชาสุขศึกษา คณะพลศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ปริเมธ เจริญนพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำที่ชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- ปทุมทิพย์ เสมอภาค. 2550. การขจัดนิเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจางโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบผ้าคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา. 2546. เอกสารคำสอนวิชา 210311 จุลชีพในน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ:ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มันสิน ตันฑุลเวศน์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- มันสิน ตันฑุลเวศน์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจาก โรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วีระวัฒน์ สัตยานุรักษ์ และคณะ. 2551. การควบคุมการติดเชื้อทางทันตกรรม. กรุงเทพฯ: บริษัท อมรินทร์พ รินติ้งและพับลิชชิ่ง จำกัด.
- สาวิตรี ตาสุดิน. 2552. การกำจัดความขุ่นจากน้ำผิวดินด้วยอะลูมิเนียมคลอไรด์. วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- เอกรัฐ มีวาสนา. 2552. การกำจัดไขมันและน้ำมันจากน้ำเสียโรงงานผลิตเครื่องสำอางด้วยระบบแยกด้วย ไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Alfafara, C. G., Nakano, K., Nomura, K, Igarashi, T., and Matsumura, M. 2002. Operating and scale-up factors for the electrolytic removal of algae from eutrophied lakewater. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 77: 871-876.
- Azarian, G. H., Mesdaghinia, A. R., Vaezi, F., Nabizadeh, R., and Nematollahi, D. 2007. Algae removal by electro-coagulation process, application for treatment of the effluent from an industrial wastewater treatment plant. Iranian J Publ Health. 36: 57-64.
- Chen, G. 2004. Electrocoagulation technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology. 38: 11-44.
- Christensen, P. A., Curtis, T.P., Egerton, T.A., Kosa, S.A.M., and Tinlin, J.R. 2002. Photoelectrocatalytic and photocatalytic disinfection of *E. coli* suspensions by titanium dioxide. Applied Catalysis B: Environmental. 41: 371–386.
- Dadjour, M. F., Ogino, C., Matsumura. S., and Shimizu, N. 2005. Kinetics of disinfection of *Escherichia coli* by catalytic ultrasonic irradiation with TiO₂. Biochemical Engineering Journal. 25 : 243–248.
- Diao, F., Li, X., Gu, J., Shi, H., and Xie, Z., 2004. Electron microscopic investigation of the bactericidal action of electrochemical disinfection in comparison with chlorination, ozonation and Fenton reaction. Process Biochemistry. 39 : 1421 - 1426.
- Friedrich, H., 1962. Ion Exchange. New York: MaGraw-Hill.
- Ghernaout, D., Badis, A., Kellil, A., and Ghernaout, B. 2008. Application of electrocoagulation in *Escherichia coli* culture and two surface waters. Desalination. 219: 118-215.
- Israilides, C.J., Vlyssides, A.G., Mourafeti, V.N., and Karvouni, G. 1997. Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system. Bioresource Technology. 61 : 163 - 170.
- Jacangelo, J.G., Laine, J.M., Carns, K.E., Cummings, E.W., and Mallevalle, J. 1991. Low-pressure membrane filtration for removing Giardia and microbial indicator. Jour. AWWA. 83: 97-106.
- Kerwick, M.I., Reddy, S.M., Chamberlain, A.H.L., and Holt, D.M. 2004. Electrochemical disinfection an environmentally acceptable method of drinking water disinfection. Electrochimica Acta. 50: 5270–5277.
- Mollah, M.Y.A., et. al, 2004. Fundamentals present and future perspective of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. B114: 189-199.

- Poleman, E., Pauw, N. E., and Jeurissen, B. 1997. Potential of electrolytic flocculation for recovery of micro-algae. Resources, conservation and recycling. 19: 1-10.
- Urase, T., Yamamoto, K., and Ohgaki, S. 1993. Evaluation of virus removal in membrane separation processes using coliphage Qbeta. Water Sci. Technol. (United Kingdom). 28: 9-15.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณคลอรีนคงเหลือ (mg/l)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	46.2	7.74	29.4	0
		1	45.2	7.63	29.5	0.2
		3	44.4	7.58	29.6	0.8
		5	44.2	7.49	30.7	1.2
		7	43.7	7.13	31.3	1.9
		9	41.8	6.99	31.9	2.4
		11	41.2	6.66	32.5	2.6
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	44.5	7.76	30.2	0
		1	43.7	7.71	30.5	0
		3	43.0	7.50	30.8	0
		5	42.5	7.19	31.6	0.5
		7	41.8	6.84	32.5	0.9
		9	41.4	6.57	33.7	1.2
		11	40.7	6.33	34.9	1.7

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณคลอรีนคงเหลือ (mg/l)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	58.3	7.74	29.4	0
		1	57.2	7.55	30.1	0.2
		3	55.5	7.53	31.3	1.1
		5	54.7	7.09	32.5	1.8
		7	53.3	6.77	33.3	2.2
		9	53.1	6.34	34.6	2.7
		11	52.9	6.22	36.8	2.8
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	57.5	7.78	30.8	0
		1	55.8	7.38	31.0	0
		3	54.3	7.15	31.4	0
		5	53.4	6.98	32.6	0.5
		7	52.5	6.73	34.4	1.1
		9	51.6	6.34	36.4	1.3
		11	50.8	6.23	38.3	1.5

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณคลอรีนคงเหลือ (mg/l)
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	61.6	7.81	29.7	0
		1	59.0	7.03	30.6	0.4
		3	58.2	6.91	32.2	1.9
		5	56.5	6.64	34.0	2.4
		7	54.3	6.42	36.0	3
		9	52.2	6.14	38.3	3.7
		11	51.2	6.02	40.5	4.3
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	63.2	7.78	30.8	0
		1	61.9	6.98	31.5	0
		3	60.7	6.77	33.1	0.3
		5	58.3	6.56	35.8	0.8
		7	56.7	6.38	38.7	1.3
		9	55.5	6.14	40.9	1.6
		11	53.9	5.94	47.3	1.8

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณคลอรีนคงเหลือ (mg/l)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	34.5	7.74	29.4	0
		1	33.6	7.66	29.5	0.4
		3	32.6	7.65	29.6	0.9
		5	32.4	7.58	30.1	2.2
		7	32.0	7.25	30.5	2.8
		9	30.8	7.08	31.1	3.4
		11	30.2	6.68	32.0	4.9
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	40.8	7.76	30.8	0
		1	39.7	7.45	31.0	0.5
		3	38.8	7.32	31.5	0.7
		5	37.7	7.15	31.9	1.4
		7	36.5	6.83	32.8	2.2
		9	36.1	6.51	34.2	2.6
		11	35.8	6.28	35.4	3.1

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณคลอรีนคงเหลือ (mg/l)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	50.4	7.74	29.4	0
		1	46.1	7.58	30.1	0.5
		3	45.7	7.52	31.1	1.8
		5	45.3	7.15	32.2	2.3
		7	44.2	6.78	33.4	3.2
		9	43.8	6.37	34.8	3.5
		11	43.3	6.20	36.3	4.9
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	55.6	7.78	30.2	0
		1	54.5	7.45	31.0	0.5
		3	52.8	7.29	31.5	0.7
		5	52.1	7.04	32.6	2
		7	51.2	6.72	33.9	2.2
		9	50.4	6.34	35.4	2.8
		11	49.1	6.23	37.5	3.4

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณคลอรีนคงเหลือ (mg/l)
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	57.8	7.81	29.7	0
		1	55.2	7.20	29.9	0.7
		3	54.5	6.98	31.3	1.9
		5	53.3	6.70	33.1	3.2
		7	51.2	6.51	35.2	3.9
		9	49.4	6.30	37.0	4.2
		11	48.3	6.11	39.1	5
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	63.2	7.78	30.2	0
		1	61.2	7.25	31.2	0.5
		3	60.0	7.01	32.6	0.8
		5	57.5	6.69	35.5	1.9
		7	55.3	6.34	36.6	2.4
		9	53.8	6.18	39.5	3.1
		11	52.7	6.01	43.5	3.6

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

กระแส (แอมป์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณคลอรีนคงเหลือ (mg/l)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	30.3	7.74	29.4	0
		1	29.1	7.69	29.5	1.3
		3	28.8	7.61	29.6	1.9
		5	28.6	7.51	30.1	2.6
		7	28.4	7.30	30.7	3.9
		9	28.3	7.11	31.3	4.3
		11	28.1	6.81	32.2	5.8
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	34.2	7.76	30.2	0
		1	33.7	7.68	30.6	0.6
		3	33.0	7.58	31.5	1.7
		5	32.8	7.24	32.3	2.4
		7	32.4	7.03	33.0	3.2
		9	32.1	6.63	33.9	3.4
		11	31.9	6.47	35.3	4.2

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณคลอรีนคงเหลือ (mg/l)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	48.8	7.74	29.4	0
		1	46.8	7.65	30.1	1.7
		3	45.6	7.61	31.3	2.4
		5	44.4	7.53	32.1	2.7
		7	43.8	6.98	33.2	4.1
		9	42.5	6.41	34.5	5.8
		11	41.3	6.32	36.8	7.8
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	45.1	7.78	30.8	0
		1	44.3	7.52	31.0	0.7
		3	43.3	7.34	31.5	2.2
		5	42.8	7.01	33.0	2.5
		7	41.9	6.78	34.0	3.8
		9	41.4	6.47	35.3	4.4
		11	40.8	6.26	37.3	4.8

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโซเดียมคลอไรด์และปริมาณคลอรีนคงเหลือโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณคลอรีนคงเหลือ (mg/l)
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	49.3	7.81	29.7	0
		1	46.9	7.21	30.5	2.1
		3	46.1	7.12	31.6	2.5
		5	45.3	6.90	32.9	3.8
		7	43.3	6.72	43.5	4.7
		9	41.2	6.53	36.3	6.3
		11	40.3	6.21	38.3	8.2
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	58.7	7.78	30.8	0
		1	55.8	7.34	31.3	0.9
		3	54.2	7.10	32.0	1.9
		5	52.6	6.81	34.1	2.2
		7	51.5	6.44	36.0	3.9
		9	50.7	6.34	38.1	4.6
		11	49.2	6.10	40.7	5.1

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า (μ S/cm)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	38.5	7.28	30.2	277	2,100
		0.5	37.5	7.01	30.4	275	1,100
		1	37.1	6.92	30.6	270	500
		3	36.4	6.81	31.1	268	300
		5	35.7	6.63	31.7	268	100
		7	35.1	6.41	32.3	266	100
		9	34.7	6.22	33.9	265	200

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	36.1	7.33	30.2	302	1,700
		0.5	35.2	7.28	30.4	299	600
		1	34.6	7.21	30.6	297	400
		3	33.0	7.16	31.0	295	300
		5	32.6	6.92	31.5	291	200
		7	31.7	6.66	32.3	288	100
		9	31.1	6.37	33.6	290	100
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	38.5	7.41	31.3	303	2,500
		0.5	37.8	7.15	31.6	301	900
		1	36.6	6.97	31.9	300	300
		3	35.5	6.77	32.4	296	400
		5	34.0	6.25	33.2	295	200
		7	33.3	6.02	34.6	292	200
		9	32.9	6.00	36.1	295	100

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	46.0	7.28	30.2	305	1,700
		0.5	43.5	7.13	30.5	300	700
		1	42.0	6.89	30.8	298	400
		3	40.8	6.80	31.6	295	200
		5	40.0	6.52	33.3	292	100
		7	39.5	6.13	34.6	291	0
		9	39.0	6.01	36.6	290	0
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	46.5	7.28	30.2	304	2,300
		0.5	45.1	6.75	31.0	300	800
		1	43.4	6.63	31.4	298	100
		3	42.7	6.51	31.9	294	100
		5	42.0	6.17	34.7	290	0
		7	41.6	6.02	37.3	291	0
		9	40.0	5.88	39.7	290	0

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	31.2	7.28	30.2	360	1,500
		0.5	30.8	7.01	30.4	356	500
		1	30.6	6.92	30.6	353	200
		3	29.9	6.85	31.0	350	100
		5	28.5	6.64	31.4	346	100
		7	27.9	6.32	32.2	344	0
		9	27.2	6.22	33.6	345	0
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	33.1	7.41	31.3	365	1,700
		0.5	32.6	7.21	31.5	363	600
		1	32.0	6.93	31.7	361	300
		3	33.3	6.77	32.0	357	200
		5	30.2	6.29	33.3	355	200
		7	29.7	5.99	34.1	354	0
		9	29.1	6.07	35.0	355	0

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	36.4	7.28	30.2	361	1,700
		0.5	36.0	7.15	30.6	357	500
		1	34.1	6.95	31.0	355	100
		3	33.5	6.83	31.9	356	100
		5	33.0	6.60	33.0	351	100
		7	32.7	6.11	33.9	350	0
		9	32.2	6.00	36.1	348	0
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	41.5	7.41	31.3	360	1,900
		0.5	40.5	7.33	31.8	361	400
		1	40.0	7.02	32.5	355	200
		3	39.5	6.82	33.2	354	200
		5	39.0	6.63	34.1	350	100
		7	38.5	6.35	35.8	348	0
		9	38.1	6.21	36.9	348	0

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	45.7	7.28	30.2	360	2,600
		0.5	43.1	6.73	30.8	357	400
		1	42.0	6.63	31.1	355	200
		3	42.2	6.49	32.2	353	100
		5	40.5	6.15	33.5	350	0
		7	40.1	6.03	35.3	349	0
		9	39.7	5.83	38.8	350	0
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	50.5	7.41	31.3	363	2,200
		0.5	49.0	6.96	32.3	361	500
		1	47.5	6.83	32.5	360	200
		3	46.2	6.51	33.7	357	100
		5	45.8	6.43	36.6	356	100
		7	44.6	6.09	38.7	354	0
		9	44.2	6.01	40.2	355	0

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 4,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	38.5	7.35	31.1	282	3,700
		0.5	37.6	7.09	31.4	280	1,200
		1	36.8	6.98	31.7	286	800
		3	35.8	6.91	32.1	281	400
		5	35.0	6.73	33.3	278	300
		7	34.3	6.51	34.2	275	200
		9	33.8	6.45	35.3	276	200

ตารางที่ ก.17 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 4,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า (μS/cm)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	35.8	7.35	31.1	310	3,400
		0.5	35.0	7.09	31.3	306	900
		1	34.4	6.67	31.6	302	400
		3	33.2	6.61	32.1	300	200
		5	32.5	6.42	32.5	295	100
		7	31.8	6.21	33.3	293	200
		9	31.2	6.16	34.7	292	200
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	38.1	7.55	30.3	311	4,000
		0.5	37.7	7.26	30.5	306	2,300
		1	37.0	7.17	30.8	302	400
		3	35.4	7.09	31.2	299	100
		5	33.9	6.90	31.7	298	100
		7	33.1	6.61	32.1	296	100
		9	32.7	6.50	33.3	293	100

ตารางที่ ก.18 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 4,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	46.1	7.35	31.1	308	3,800
		0.5	43.3	7.30	31.4	305	900
		1	42.2	7.24	31.7	301	400
		3	41.3	7.03	32.5	296	200
		5	40.4	6.88	34.4	293	400
		7	40.0	6.65	35.5	291	200
		9	39.5	6.42	36.1	292	200
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	46.8	7.35	31.1	309	4,200
		0.5	45.6	6.74	31.9	303	800
		1	44.9	6.70	32.3	298	400
		3	43.8	6.66	32.8	292	100
		5	43.0	6.51	35.9	287	100
		7	42.5	6.45	38.1	285	0
		9	41.9	6.26	39.8	285	0

ตารางที่ ก.19 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 4,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	31.5	7.35	31.1	370	3,900
		0.5	31.1	7.06	31.3	366	800
		1	30.4	6.99	31.5	365	400
		3	29.8	6.90	32.0	361	200
		5	29.6	6.67	32.5	358	100
		7	29.0	6.33	33.0	355	100
		9	28.6	6.21	34.4	354	100
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	33.2	7.55	30.3	369	4,100
		0.5	32.7	7.33	31.0	366	400
		1	31.9	6.93	31.5	362	300
		3	31.0	6.75	32.0	360	100
		5	30.7	6.27	33.3	358	100
		7	29.8	6.14	34.1	356	100
		9	29.5	6.01	35.4	358	200

ตารางที่ ก.20 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 4,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	36.3	7.35	31.1	366	3,800
		0.5	36.1	7.20	31.5	362	600
		1	34.1	6.98	31.9	358	300
		3	33.0	6.86	32.8	355	100
		5	32.6	6.58	33.9	351	100
		7	32.5	6.15	34.7	352	0
		9	32.3	6.07	36.3	354	0
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	41.0	7.55	30.3	367	4,400
		0.5	40.2	7.42	31.1	365	700
		1	39.7	7.23	31.6	362	400
		3	39.0	7.09	32.3	358	200
		5	38.2	6.85	33.2	356	200
		7	37.8	6.47	34.3	355	100
		9	37.2	6.07	36.7	357	100

ตารางที่ ก.21 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 4,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	46.2	7.35	31.1	368	3,300
		0.5	43.5	6.69	31.7	360	500
		1	42.1	6.65	32.0	358	300
		3	40.9	6.54	33.1	352	200
		5	40.5	6.23	34.4	350	100
		7	39.8	6.06	36.3	349	0
		9	39.3	5.94	38.1	346	0
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	50.3	7.55	30.3	368	4,000
		0.5	49.0	7.02	31.3	364	600
		1	47.8	6.95	32.0	360	200
		3	46.5	6.68	33.1	377	100
		5	45.6	6.62	35.7	370	100
		7	44.9	6.31	38.1	370	0
		9	44.4	6.02	40.2	371	0

ตารางที่ ก.22 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า (μ S/cm)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	38.2	7.76	29.3	299	6,000
		0.5	37.5	7.50	29.7	296	1,700
		1	36.7	7.41	30.0	291	1,100
		3	36.0	7.33	30.4	285	600
		5	35.2	7.15	31.6	283	300
		7	34.5	6.91	32.5	281	200
		9	34.0	6.87	33.7	282	200

ตารางที่ ก.23 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	36.0	7.73	29.7	316	6,100
		0.5	35.1	7.47	29.9	311	900
		1	34.5	7.35	30.1	308	400
		3	33.4	7.30	30.6	305	300
		5	32.6	7.08	31.1	298	300
		7	31.6	6.82	31.9	298	200
		9	31.2	6.70	33.3	297	200
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	38.2	7.76	29.3	319	5,300
		0.5	37.8	7.47	29.5	312	1,800
		1	36.9	7.36	29.8	308	300
		3	35.5	7.27	30.1	305	300
		5	33.7	7.07	30.6	300	100
		7	33.0	6.72	31.1	300	100
		9	32.6	6.66	32.4	301	200

ตารางที่ ก.24 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า (μS/cm)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	46.2	7.76	29.3	320	6,400
		0.5	43.5	7.70	29.6	317	800
		1	42.0	7.54	29.8	315	300
		3	41.1	7.33	30.8	310	200
		5	40.3	7.20	32.7	306	300
		7	39.9	6.97	34.0	301	100
		9	39.2	6.77	36.1	301	100
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	46.5	7.76	29.3	324	5,800
		0.5	45.2	7.15	30.1	317	700
		1	43.4	7.10	30.4	313	300
		3	42.7	6.99	30.9	306	200
		5	42.2	6.65	34.0	300	100
		7	41.9	6.49	36.6	299	0
		9	41.7	6.31	38.7	297	0

ตารางที่ ก.25 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	31.7	7.73	29.7	368	6,600
		0.5	31.2	7.44	29.9	360	800
		1	30.6	7.35	30.1	358	300
		3	30.1	7.26	30.5	354	200
		5	29.6	7.03	31.0	350	200
		7	28.9	6.68	31.6	348	100
		9	28.6	6.61	32.5	345	100
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	33.3	7.76	29.3	385	5,800
		0.5	32.5	7.52	30.1	381	1,000
		1	32.0	7.26	30.4	378	400
		3	31.2	7.10	30.8	375	300
		5	30.2	6.61	32.1	371	300
		7	29.6	6.32	33.0	370	200
		9	29.3	6.22	34.3	370	200

ตารางที่ ก.26 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	36.5	7.73	29.7	372	5,300
		0.5	36.1	7.58	30.1	367	700
		1	34.2	7.36	30.4	363	300
		3	33.1	7.24	31.4	360	200
		5	32.8	6.96	32.6	356	100
		7	32.4	6.48	33.4	355	0
		9	32.0	6.32	34.5	353	0
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	41.2	7.76	29.3	382	6,400
		0.5	40.5	7.65	30.2	380	700
		1	40.0	7.23	30.7	378	300
		3	39.4	7.00	31.4	363	200
		5	38.7	6.83	32.4	360	100
		7	38.1	6.58	34.2	355	300
		9	37.4	6.42	36.8	358	200

ตารางที่ ก.27 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า (μS/cm)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	46.1	7.73	29.7	365	5,500
		0.5	43.5	7.07	30.4	354	600
		1	42.0	7.04	30.5	356	200
		3	41.1	6.93	31.7	351	100
		5	40.7	6.60	33.0	347	0
		7	39.9	6.41	34.9	343	0
		9	39.6	6.08	38.1	341	0
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	50.1	7.76	29.3	376	7,300
		0.5	48.7	7.21	30.5	373	800
		1	47.5	7.14	31.2	370	300
		3	46.1	6.85	32.2	366	200
		5	45.2	6.79	35.0	355	200
		7	44.6	6.45	37.3	353	0
		9	44.4	6.20	39.6	351	0

ตารางที่ ก.28 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 14,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	38.4	7.12	29.2	311	12,300
		0.5	37.6	6.85	29.4	309	4,100
		1	37.0	6.76	29.6	305	2,100
		3	36.1	6.66	30.1	299	1,100
		5	35.5	6.38	30.8	298	500
		7	34.8	6.25	31.5	298	300
		9	34.5	6.11	33.1	297	300

ตารางที่ ก.29 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 14,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	36.3	7.12	29.2	340	11,700
		0.5	35.3	6.85	29.4	336	3,400
		1	34.7	6.74	29.5	334	1,700
		3	33.1	6.69	30.0	331	900
		5	32.9	6.47	30.6	324	400
		7	31.8	6.23	31.5	323	200
		9	31.5	6.17	32.4	321	300
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	38.3	7.53	29.7	340	11,400
		0.5	37.7	7.27	30.1	340	6,400
		1	36.8	7.03	30.2	338	2,200
		3	35.3	6.85	30.8	336	1,200
		5	33.8	6.33	31.9	335	700
		7	33.1	6.04	33.3	331	300
		9	32.7	5.93	34.2	332	200

ตารางที่ ก.30 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 14,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	45.9	7.70	29.5	339	12,000
		0.5	43.2	7.55	29.8	332	2,900
		1	41.9	7.30	30.0	331	1,600
		3	40.8	7.22	31.1	327	1,000
		5	40.1	6.95	32.8	326	500
		7	39.8	6.51	34.2	317	200
		9	39.2	6.33	36.4	313	100
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	46.2	7.53	29.8	335	13,900
		0.5	44.8	6.90	30.6	328	3,100
		1	43.1	6.86	30.9	325	1,400
		3	42.4	6.74	31.4	319	600
		5	42.1	6.40	34.4	311	200
		7	41.7	6.25	37.1	309	100
		9	41.2	6.09	39.7	308	100

ตารางที่ ก.31 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 14,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า (μS/cm)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	31.1	7.12	29.2	387	15,900
		0.5	30.8	6.82	29.4	380	4,100
		1	30.5	6.73	29.6	378	1,500
		3	29.8	6.65	29.9	372	500
		5	28.8	6.44	30.4	367	300
		7	28.0	6.10	31.3	363	200
		9	27.8	6.03	32.8	361	200
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	33.1	7.53	29.7	406	15,300
		0.5	32.4	7.29	30.1	403	4,700
		1	31.9	7.01	30.2	400	2,300
		3	31.1	6.83	30.6	396	1,800
		5	30.3	6.31	31.9	393	400
		7	29.5	5.95	32.9	392	300
		9	29.3	5.83	33.5	391	200

ตารางที่ ก.32 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 14,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	36.3	7.70	29.5	399	12,800
		0.5	35.9	7.56	29.9	395	2,200
		1	33.8	7.34	30.2	391	1,100
		3	33.3	7.21	31.3	390	600
		5	33.0	6.97	32.4	382	200
		7	32.5	6.45	33.3	378	100
		9	32.1	6.41	34.1	375	100
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	41.5	7.63	29.8	391	13,800
		0.5	40.8	7.52	30.7	389	4,000
		1	40.2	7.10	31.0	389	1,800
		3	39.5	6.88	31.7	374	1,200
		5	38.8	6.70	32.8	372	500
		7	38.0	6.42	34.7	367	200
		9	37.6	6.32	36.3	365	200

ตารางที่ ก.33 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 14,000 cfu/ml

กระแส (แอมแปร์)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
3	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	45.9	7.70	29.5	408	15,600
		0.5	43.2	7.05	30.2	396	2,400
		1	41.9	7.03	30.3	396	1,200
		3	40.8	6.89	31.4	394	600
		5	40.1	6.55	32.7	390	200
		7	39.8	6.39	34.5	387	100
		9	39.5	6.33	36.7	387	100
	แกรไฟต์ - ไทเทเนียม	0	50.3	7.63	29.8	389	14,200
		0.5	48.9	7.08	31.0	389	2,300
		1	47.4	7.03	31.1	387	1,800
		3	46.3	6.71	32.2	371	400
		5	45.6	6.65	35.1	369	100
		7	44.8	6.29	37.4	362	100
		9	44.2	6.02	39.8	362	100

ตารางที่ ก.34 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ความขุ่น 5 NTU และความขุ่น 50 NTU

กระแส (แอมแปร์)	ความขุ่น (NTU)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	5	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	36.5	7.83	28.7	418	5,800
			0.5	35.6	7.78	29.0	395	800
			1	34.7	7.42	29.3	391	200
			3	33.4	7.09	29.9	383	200
			5	32.8	6.92	30.8	379	100
			7	32.4	6.87	31.7	375	0
			9	32.1	6.66	33.4	375	0
	50	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	36.0	7.90	28.8	393	6,300
			0.5	35.7	7.82	29.0	399	2,900
			1	35.5	7.65	29.2	396	800
			3	34.7	7.54	29.9	391	200
			5	34.3	7.38	30.7	385	200
			7	34.0	7.18	31.6	380	0
			9	33.6	6.99	33.3	384	0

ตารางที่ ก.35 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ความขุ่น 75 NTU และความขุ่น 100 NTU

กระแส (แอมแปร์)	ความขุ่น (NTU)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า (μS/cm)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	75	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	37.3	7.35	27.7	371	6,200
			0.5	36.7	7.22	27.9	396	1,500
			1	36.3	7.08	28.1	401	1,000
			3	34.8	6.94	29.1	405	600
			5	34.2	6.83	29.8	401	100
			7	33.6	6.76	31.2	409	0
			9	33.1	6.52	33.5	410	0
	100	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	35.3	7.33	28.8	395	6,800
			0.5	35.1	7.20	29.0	427	3,300
			1	34.8	7.13	29.2	408	1,700
			3	34.1	7.07	30.1	399	200
			5	33.9	6.96	30.9	395	200
			7	33.6	6.84	31.8	378	200
			9	33.1	6.70	33.6	380	300

ตารางที่ ก.36 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ความขุ่น 150 NTU

กระแส (แอมแปร์)	ความขุ่น (NTU)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	150	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	33.5	7.57	27.7	374	5,700
			0.5	33.1	7.46	27.9	440	5,600
			1	32.4	7.38	28.2	436	5,000
			3	31.8	7.13	29.2	436	3,700
			5	31.3	6.92	29.9	428	3,200
			7	30.8	6.65	31.1	424	2,300
			9	30.5	6.44	33.2	425	1,700

ตารางที่ ก.37 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบไหลต่อเนื่อง โดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ความขุ่น 75 NTU ระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 7 นาที

กระแส (แอมแปร์)	ความขุ่น (NTU)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	75	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	36.5	7.75	27.2	374	7,100
			0.5	35.9	7.72	27.4	362	6,700
			1	35.8	7.64	27.8	365	5,600
			3	35.7	7.51	28.8	363	3,400
			5	35.5	7.36	29.1	361	1,100
			7	35.2	7.28	29.8	360	900
			9	35.1	7.16	30.4	362	700
			11	35.1	7.06	30.4	359	500
			15	35.0	7.02	30.5	358	300
			20	34.7	6.90	31.2	352	300
			25	34.5	6.87	31.3	358	300
30	34.4	6.74	32.0	358	200			

ตารางที่ ก.38 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบไหลต่อเนื่อง โดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ความขุ่น 75 NTU ระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 14 นาที

กระแส (แอมแปร์)	ความขุ่น (NTU)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
2.4	75	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	35.9	7.75	27.2	374	6,300
			4	33.6	7.45	30.0	360	2,200
			8	33.1	7.38	30.6	358	300
			12	32.8	7.20	32.0	367	200
			14	32.6	7.05	32.3	358	0
			17	32.5	6.83	32.8	357	0
			20	32.2	6.75	33.0	355	0
			23	32.1	6.72	33.3	355	0
			25	32.1	6.68	33.7	352	0
			30	31.9	6.63	34.5	350	0

ตารางที่ ก.39 ผลการทดลองการกำจัดเชื้ออีโคไลโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบไหลต่อเนื่อง โดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณเชื้ออีโคไลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 6,000 cfu/ml ความขุ่น 75 NTU ระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 14 นาที

กระแส (แอมแปร์)	ความขุ่น (NTU)	ชนิดขั้ว	เวลา (นาที)	ความต่างศักย์ (โวลต์)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า (μS/cm)	ปริมาณเชื้ออีโคไล (cfu/ml)
1.8	75	แกรไฟต์ - แกรไฟต์	0	32.1	7.75	27.2	374	6,300
			4	31.7	7.68	27.8	372	5,500
			8	31.2	7.51	28.4	370	2,800
			12	30.7	7.39	28.6	366	1,700
			14	30.5	7.32	28.9	365	1,100
			17	30.2	7.11	29.3	364	500
			20	29.9	7.05	29.5	362	100
			23	29.8	6.97	29.7	360	0
			25	29.6	6.81	30.1	355	0
			30	29.1	6.77	30.8	355	0

ภาคผนวก ข
วิธีการคำนวณ

ข.1 ค่าใช้จ่ายในการทดลอง

การคำนวณค่าไฟฟ้า จะคำนวณเฉพาะราคาค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ โดยราคาค่าไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= I \text{ (A)} \times V \text{ (volt)} \times \text{time (hr)} / V \text{ (m}^3\text{)} \\
 &= \frac{(2.4) \text{ ampere} \times 32.4 \text{ volt} \times (7/60) \text{ hours}}{((2/1000) \times 1000)} \\
 &= 4.53 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

ข.2 วิธีคำนวณผลการทดลอง

ข.2.1 ร้อยละการกำจัด

$$\% \text{ Remove} = \frac{(W_i - W_f) \times 100\%}{W_i}$$

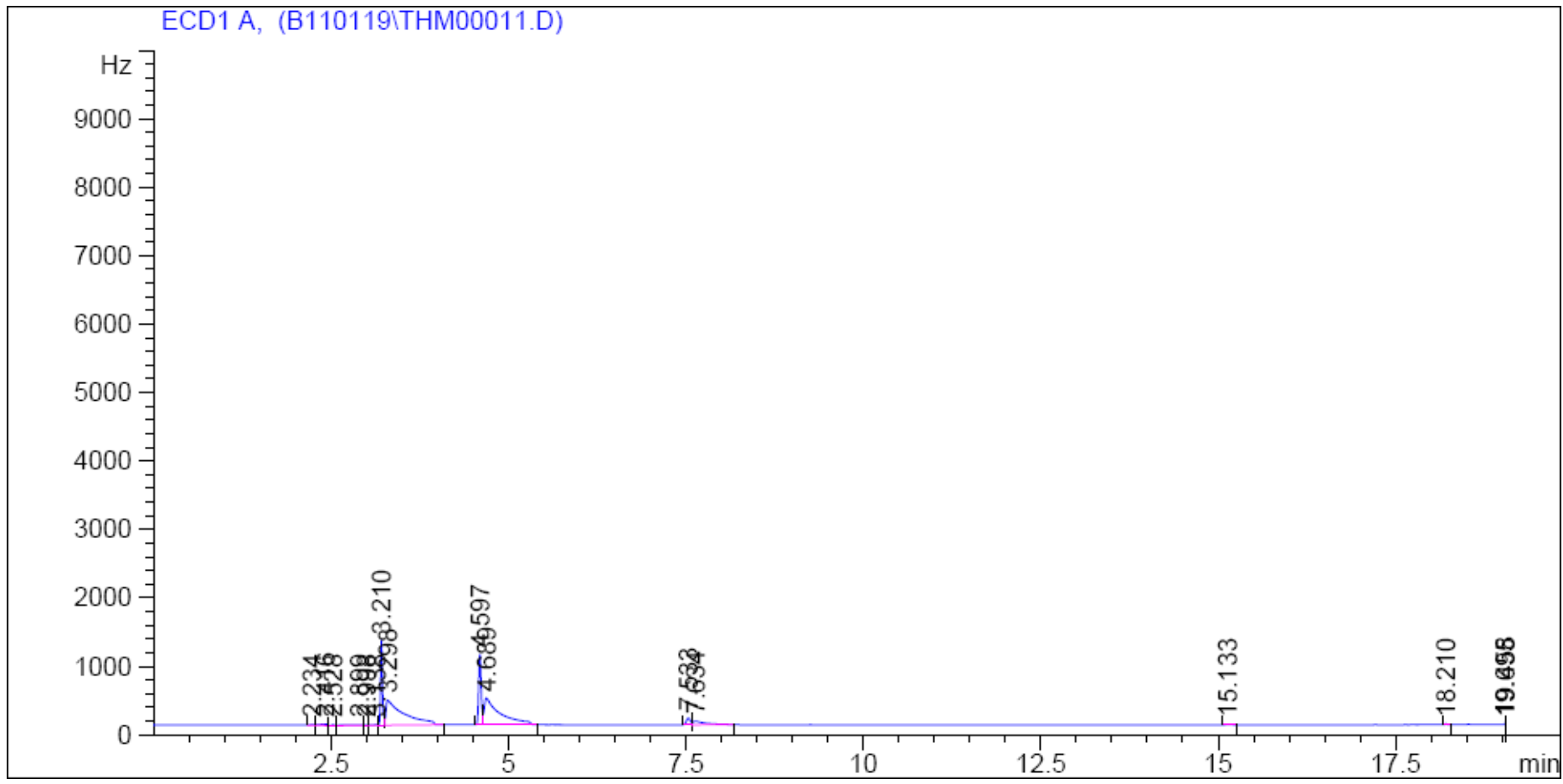
W_i = ปริมาณเชื้ออีโคไลเริ่มต้น (cfu/ml)

W_f = ปริมาณเชื้ออีโคไล ณ เวลาใดๆ (cfu/ml)

ข.2.2 ปริมาณเชื้ออีโคไล

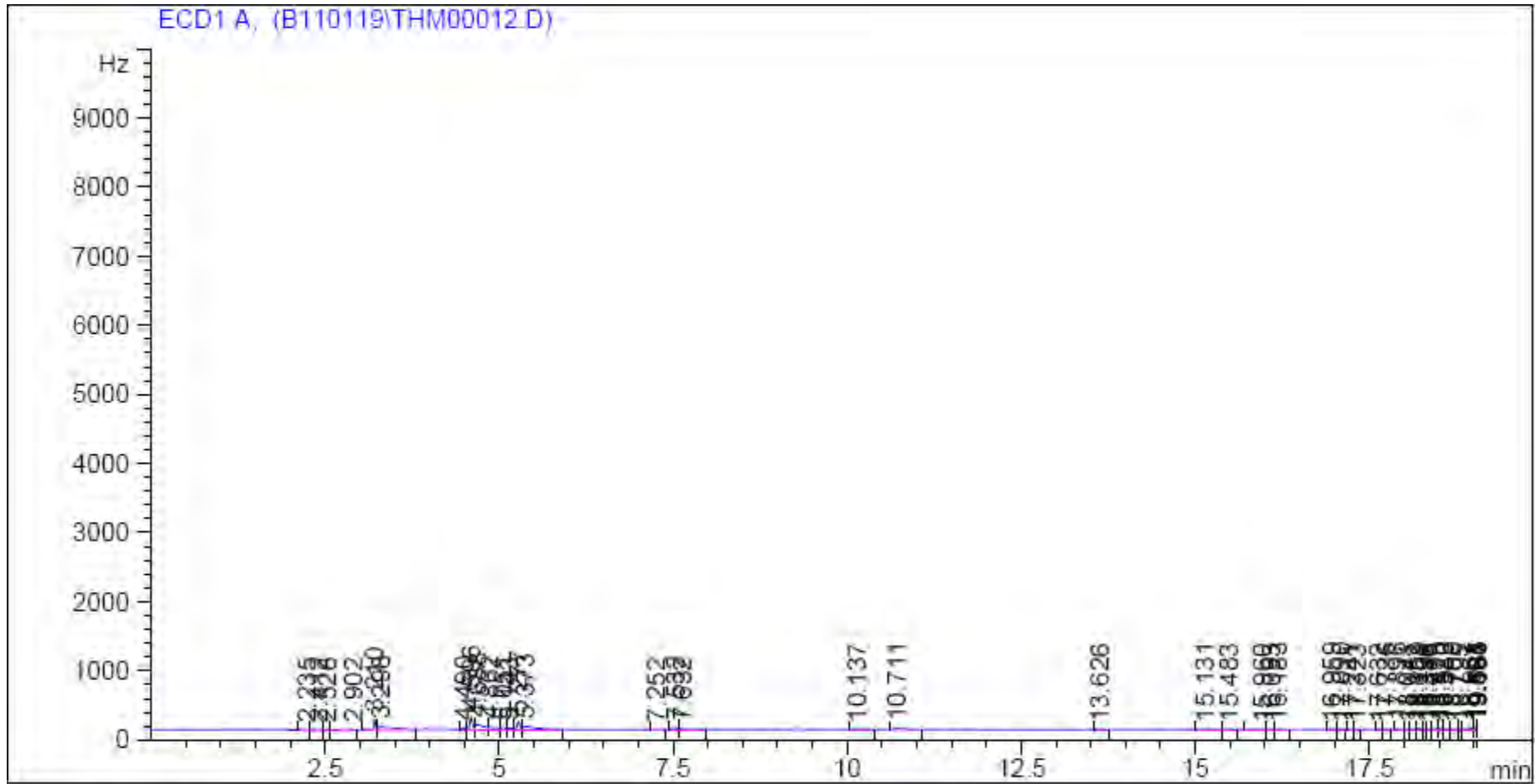
$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณเชื้ออีโคไล} &= \frac{\text{จำนวนโคโลนี} \times \text{อัตราการเจือจางของน้ำตัวอย่าง}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}} \\
 \text{(cfu/ml)} &
 \end{aligned}$$

ท.3



ผลการคำนวณ ในน้ำตัวอย่างที่ใช้ทดลองแบบไหลต่อเนื่อง มี CHCl_3 เข้มข้น 12.07 ppb

ท.4



ผลการคำนวณ ในน้ำตัวอย่างหลังการทดลองแบบไหลต่อเนื่องใช้ทดลอง มี CHCl_3 เข้มข้น 1.64 ppb

ภาคผนวก ค

วิธีการเลี้ยงเชื้ออีโคไลและวิธีการหากราฟแสดงการเจริญเติบโตของอีโคไล

ค.1 วิธีการเลี้ยงเชื้ออีโคไล

1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ M-Endo Broth 100 มล./ขวด ปิดฝาขวด แล้วนำไปเข้า autoclave เพื่อฆ่าเชื้อ
2. ใช้เข็มเขี่ยเชื้อที่ฆ่าเชื้อ ถ่ายเชื้ออีโคไลจำนวน 1 loop ลงไปในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้
3. นำขวดอาหารเลี้ยงเชื้อไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. สังเกตการณ์เจริญของเชื้ออีโคไลในอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยดูจากความขุ่นที่เกิดในขวดเลี้ยงเชื้อ เทียบกับหลอดควบคุม หรือนับจำนวนเชื้ออีโคไลด้วยวิธี Spread plate method

ค.2 วิธีการหากราฟแสดงการเจริญเติบโตของอีโคไลในช่วง Stationary phase

1. เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ M-Endo Broth 100 มล./ขวด ปิดฝาขวด แล้วนำไปเข้า autoclave เพื่อฆ่าเชื้อ
2. ใช้เข็มเขี่ยเชื้อที่ฆ่าเชื้อ ถ่ายเชื้ออีโคไลจำนวน 1 loop ลงไปในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้
3. นำขวดอาหารเลี้ยงเชื้อไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 - 48 ชั่วโมง โดยจะทำการตรวจนับจำนวนเชื้ออีโคไล ทุกๆ 3 ชั่วโมง ด้วยวิธี Spread plate method
4. เขียนกราฟการเจริญเติบโตของอีโคไล โดยให้แกน y คือ จำนวนเชื้ออีโคไล ส่วนแกน x คือ เวลาในการเลี้ยงเชื้ออีโคไล
5. ทำการวิเคราะห์กราฟการเจริญเติบโตของอีโคไล โดยเลือกช่วงเวลาที่จำนวนเชื้ออีโคไลมีจำนวนคงที่ ซึ่งช่วงเวลาที่จำนวนเชื้ออีโคไลมีจำนวนคงที่ คือการเจริญเติบโตของอีโคไลในช่วง Stationary phase

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศรัญญู เขียมระหงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 17 เดือนมีนาคม พ.ศ.2528 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จาก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2552