หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน เพื่อการนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่

นายเอกชัย อดุลยธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE COMBINATION OF ULTRAVIOLET LAMP AND NANOFILTRATION PROCESS FOR REUSE OF COOLING WATER

Mr. Ekachai Adulyatham

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

521011

หัวข้อวิทยานิพนธ์	หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเพื่อการนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่
โดย	นายเอกชัย อดุลยธรรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ตะวัน ลิมปิยากร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. ปธาน บรรจงปรุ)

เอกชัย อดุลยธรรม : หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเพื่อการนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่. (THE COMBINATION OF ULTRAVIOLET LAMP AND NANOFILTRATION PROCESS FOR REUSE OF COOLING WATER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 159 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับกระบวนการนาโนฟิลเตรชันเพื่อนำน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่ ปัจจัยที่พิจารณา ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัสกับน้ำของรังสีอัลตราไวโอเลตที่ 4, 6, 8 และ 10 วินาที ความดันในการเดินระบบที่ 3, 4, 5 และ 6 บาร์ และอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด (% recovery) ที่ร้อยละ 30, 40, 50 และ 60

จากการทดลองพบว่า อัตราการผลิตน้ำสะอาดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความดันในการเดินระบบ ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด(%recovery)ที่สูงกว่าร้อยละ50 ส่งผลให้น้ำสะอาดที่ผลิตได้และประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งเจือปนลดลง โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเดินระบบอยู่ที่ ระยะเวลาสัมผัสกับน้ำของรังสีอัลตราไวโอเลต 10 วินาที, ความดัน 5 บาร์ และอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดที่ร้อยละ 30 ซึ่งอัตราการผลิตน้ำสะอาดสูงที่สุด คือ 0.57×10^{-6} เมตรต่อวินาที และเมื่อเดินระบบระยะยาวพบว่าอัตราการผลิตน้ำสะอาดค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง 240 ชั่วโมง โดยที่น้ำสะอาดที่ผลิตได้จากระบบมีค่า pH ระหว่าง 8.2-8.7 ส่วนซีโอดีมีค่าระหว่าง 10.5-12.4 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดความกระด้างและความขุ่นได้เกือบทั้งหมด ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดความนำไฟฟ้า, ของแข็งละลาย, คลอไรด์, แบคทีเรียรวม ซัลเฟตและฟอสเฟตอยู่ที่ร้อยละ 93-96, 85-95, 69-79 และ 99-100 ตามลำดับ ซึ่งคุณภาพน้ำที่ผลิตได้นั้นสูงเพียงพอที่จะนำกลับมาใช้ในระบบหล่อเย็นได้

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต เอกชัย อดุลยธรรม
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

4970832221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : NANOFILTRATION / ULTRAVIOLET LAMP / COOLING WATER

EKACHAI ADULYATHAM : THE COMBINATION OF ULTRAVIOLET LAMP AND NANOFILTRATION PROCESS FOR REUSE OF COOLING WATER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 159 pp.

The research aims to study and evaluate optimum condition for the combination of ultraviolet lamp and nanofiltration process for reuse of cooling water. The parameters determined in the study were contact time of ultraviolet radiation at 4, 6, 8 and 10 s, operating pressure at 3, 4, 5 and 6 bar and recovery percentage at 30, 40, 50 and 60.

The results showed that when higher operating pressure were performed, higher fluxes were obtained. In contrast, an increase in recovery percentage higher than fifty percent, resulted in less fluxes and lower removal efficiencies of the system. The optimum operating condition found in this study is suggested to be with contact time 10 s, operating pressure 5 bar and recovery percentage at 30. The highest flux that was obtained was 0.57×10^{-6} m/s. The permeate flux for long run operation throughout 240 hours was almost constant. The permeate had pH value in the range of 8.2-8.7, COD value in the range of 10.5-12.4 mg/l. The removal efficiency percentages for conductivity, total dissolve solid, chloride, total hardness, turbidity, total bacteria, sulphate and phosphate were found to be in the range of 93-96, 85-95, 69-79 and 99-100 respectively. As a result, the permeate quality seems to be acceptable for reuse in cooling system.

Department Environmental Engineering
Field of Study Environmental Engineering
Academic Year 2009

Student's Signature Ekachai Adulyatham
Advisor's Signature Chavalit Rtt

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าในการช่วยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความรู้ และข้อคิดเห็นต่างๆในการศึกษา ตลอดจนคอยตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆและวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร. ตะวัน ลิมปิยากร และอาจารย์ ดร. ปธาน บรรจงปรุ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นรวมทั้งกรุณาสละเวลาอันมีค่าเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ฝ่ายบำบัดน้ำเสียของบริษัทไทยเบฟเวอเรสแคนทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือในหลายๆด้าน รวมทั้งได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลองนี้ ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ซึ่งเป็นผู้ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษา และเป็นผู้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้ คุณพ่อ คุณแม่ และครูบาอาจารย์ในสถาบันการศึกษาที่ผู้วิจัยได้ศึกษามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และหากวิทยานิพนธ์มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 กระบวนการแยกสารของเมมเบรน..... 5

2.1.1 เยื่อเมมเบรน..... 5

2.1.2 ประเภทของเมมเบรน..... 6

2.1.3 ลักษณะการใช้งานของเมมเบรนแต่ละชนิด..... 9

2.1.4 โมดูลชนิดต่างๆของเมมเบรน..... 11

2.2 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน..... 14

2.2.1 หลักการของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน..... 14

2.2.2 ลักษณะสมบัติของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน..... 15

2.2.3 กลไกในการทำงานของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน..... 15

2.2.4 ฟลักซ์และการต้านทานต่อการอุดตันของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน..... 17

2.2.5 โมเดลสำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำและสารละลายผ่าน NF เมมเบรน..... 17

2.2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการ NF..... 26

2.3 หอทำน้ำเย็น..... 35

2.3.1 หลักการของระบบหอทำน้ำเย็น..... 36

2.3.2 ชนิดของหอทำน้ำเย็น..... 37

2.3.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบหอทำน้ำเย็น..... 40

หน้า

2.3.4 น้ำหล่อเย็น..... 42
2.4 รังสีอัลตราไวโอเลต..... 43
2.4.1 หลอดรังสีอัลตราไวโอเลต..... 47
2.4.2 หน่วยที่ใช้ในการวัดปริมาณของแสงอัลตราไวโอเลตที่ให้กับน้ำ..... 47
2.4.3 ขีดจำกัดและข้อดีของการใช้รังสียูวีในการฆ่าเชื้อโรค..... 48
2.5 งานวิจัยที่ผ่านมา..... 49
บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย..... 54
3.1 แผนการทดลอง..... 54
3.2 การติดตั้งอุปกรณ์ ในการทดลอง..... 56
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับชุดขนาดทดสอบ..... 57
3.4 ขั้นตอนการทดลองและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง..... 61
3.5 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ..... 63
3.5.1 การเก็บตัวอย่างน้ำ..... 63
3.5.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ..... 64
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 66
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ใช้ในการวิจัย..... 66
4.1.1 สมบัติของน้ำทิ้งตลอดช่วงการทดลองในระดับทดสอบ..... 66
4.2 ผลของการใช้ระบบรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นระบบบำบัดขั้นต้นต่อการลดลงของ
ปริมาณแบคทีเรีย..... 71
4.3 ผลจากชุดการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบร่วมของรังสี
อัลตราไวโอเลตกับนาโนฟิลเตรชันที่มีระบบบำบัดขั้นต้นด้วยระบบรังสี
อัลตราไวโอเลตโดยชุด Pilot Scale ณ โรงงานตัวอย่าง..... 72
4.3.1 ผลของความดันต่อประสิทธิภาพของระบบ..... 73
4.3.1.1 ผลของความดันในการเดินระบบต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด..... 73
4.3.1.2 ผลของความดันในการเดินระบบต่อค่าพีเอช..... 74
4.3.1.3 ผลของความดันในการเดินระบบต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็ง
ละลาย..... 75
4.3.1.4 ผลของความดันในการเดินระบบต่อความขุ่น..... 75
4.3.1.5 ผลของความดันในการเดินระบบต่อความกระด้างทั้งหมด..... 77

หน้า

4.3.1.6 ผลของความดันในการเดินระบบต่อค่าซีโอดี..... 77
4.3.1.7 ผลของความดันในการเดินระบบต่อปริมาณแบคทีเรีย..... 79
4.3.1.8 ผลของความดันในการเดินระบบต่อคลอไรด์..... 79
4.3.1.9 ผลของความดันในการเดินระบบต่อซัลเฟตและฟอสเฟต..... 79
4.3.2 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดต่อประสิทธิภาพของระบบ..... 82
4.3.2.1 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดในการเดินระบบต่ออัตราการผลิตน้ำสะอาด..... 82
4.3.2.2 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดในการเดินระบบต่อค่าพีเอช..... 82
4.3.2.3 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดในการเดินระบบต่อค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย..... 83
4.3.2.4 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดในการเดินระบบต่อความขุ่น..... 83
4.3.2.5 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดในการเดินระบบต่อความกระด้างทั้งหมด..... 85
4.3.2.6 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดในการเดินระบบต่อค่าซีโอดี..... 85
4.3.2.7 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดในการเดินระบบต่อปริมาณแบคทีเรีย..... 86
4.3.2.8 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดในการเดินระบบต่อคลอไรด์..... 86
4.3.2.9 ผลของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดในการเดินระบบต่อซัลเฟตและฟอสเฟต..... 86
4.4 ผลการทดลองของการเดินระบบระยะยาวของหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับระบบนาโนฟิลเตรชันด้วยชุด Pilot Scale ณ โรงงานตัวอย่าง..... 89
4.4.1 อัตราการผลิตน้ำสะอาด..... 90
4.4.2 ผลของค่าพีเอช..... 90
4.4.3 ผลของค่าความนำไฟฟ้าและของแข็งละลาย..... 91
4.4.4 ผลของต่อความขุ่น..... 91
4.4.5 ผลของต่อความความกระด้างทั้งหมด..... 93
4.4.6 ผลของต่อซีโอดี..... 93
4.4.7 ผลของต่อปริมาณแบคทีเรีย..... 94
4.4.8 ผลของต่อค่าคลอไรด์..... 94

หน้า

4.4.9 ผลต่อซัลเฟตและฟอสเฟต..... 95
4.4.10 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าระบบ..... 96
4.4.11 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความดันที่มีต่อค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาด โดยใช้ Garba Model..... 99
4.5 ความเป็นไปได้ในการนำน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่ด้วยหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับระบบนาโนฟิลเตรชัน..... 101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะสำหรับงานที่จะทำต่อไป..... 104
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 104
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป..... 105
รายการอ้างอิง..... 107
ภาคผนวก..... 112
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์สมบัติของน้ำในส่วนต่างๆของแต่ละการทดลอง..... 113
ภาคผนวก ข อัตราการผลิตน้ำสะอาดของการทดลองแต่ละชุด..... 141
ภาคผนวก ค แสดงการหาค่า K_s..... 145
ภาคผนวก ง แสดงสมบัติของเมมเบรน..... 153
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 159

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้ทำเมมเบรน.....	8
2.2	ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการเมมเบรน.....	10
2.3	ข้อเปรียบเทียบของโมดูลชนิดต่างๆ.....	13
2.4	แสดงองค์ประกอบของน้ำที่ออกจากระบบหล่อเย็นในอุตสาหกรรมผลิตปุ๋ย.....	42
2.5	แสดงองค์ประกอบของน้ำที่ออกจากระบบหล่อเย็นในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า.	43
2.6	แสดงค่าพลังงานในแต่ละชนิดของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลต่างๆ.....	48
3.1	ลักษณะสมบัติของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	57
3.2	ลักษณะสมบัติของเครื่องนาโนฟิลเตรชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	57
3.3	ลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	59
3.4	ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการดำเนินการหาระยะเวลาสัมผัสกับน้ำทิ้งจากระบบหล่อเย็นของรังสีอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสม.....	61
3.5	ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการดำเนินการหาความดันที่เหมาะสมในการเดินระบบนาโนฟิลเตรชัน.....	61
3.6	ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการดำเนินการหาอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาด (% recovery) ที่เหมาะสมในการเดินระบบนาโนฟิลเตรชัน.....	62
3.7	ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการดำเนินการเดินระบบระยะยาวของระบบหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับนาโนฟิลเตรชัน.....	63
3.8	การเก็บน้ำตัวอย่าง.....	64
3.9	การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....	65
4.1	แสดงความสัมพันธ์ของสารแต่ละชนิดในน้ำที่ผลิตได้และน้ำที่เข้าสู่ระบบนาโนฟิลเตรชัน.....	97
4.2	สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และ ln (1-R).....	100
4.3	สรุปคุณภาพน้ำที่บำบัดได้จากการใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับระบบนาโนฟิลเตรชัน.....	101
4.4	คุณภาพน้ำสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นที่โรงงาน.....	101
4.5	คุณภาพน้ำสำหรับใช้ในระบบหล่อเย็นตามมาตรฐานอุตสาหกรรม.....	102

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	หลักการทำงานของกระบวนการเมมเบรน	5
2.2	Module with Hollow Fiber Membrane	6
2.3	การแบ่งประเภทของเมมเบรนตามโครงสร้างของเมมเบรน	8
2.4	ความสามารถในการกำจัดสารขนาดต่างๆของเมมเบรนแต่ละชนิด	10
2.5	Plate and Frame Module	11
2.6	Turbular Module	12
2.7	(ก) Hollow Fiber Module (ข) Hollow Fiber Membrane	12
2.8	Spiral Wound Module	13
2.9	ความสามารถในการแยกของนาโนฟิลเตรชั่นเมมเบรน	14
2.10	ออสโมซิส (ก) และ ออสโมซิสย้อนกลับ (ข)	16
2.11	ความต้านทานต่างๆตามแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน	23
2.12	Concentration Polarization ที่เกิดขึ้นในระบบ NF	26
2.13	ความสัมพันธ์ของฟลักซ์กับระยะเวลาเดินระบบ	27
2.14	ผลของแรงดันต่อค่าฟลักซ์ สำหรับเมมเบรนชนิด DS5	29
2.15	ผลของแรงดันที่ใช้และความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบกับเปอร์เซ็นต์การกำจัด โดย NF เมมเบรน	30
2.16	ผลของอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์	31
2.17	ผลของพีเอชกับ เปอร์เซ็นต์การกำจัดของกรดอะมิโน โดย NF เมมเบรน	32
2.18	ผลของสารอื่นๆ ในน้ำต่อ เปอร์เซ็นต์การกำจัด โดย NF เมมเบรน	32
2.19	ผลของสารแขวนลอยต่อค่าฟลักซ์ในการกำจัดกรดฮิวมิก แรงดันที่ใช้ 20 บาร์ MWCO 6000	33
2.20	การเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์กับเวลาในการดำเนินระบบของ NF	33
2.21	การเปลี่ยนแปลงของค่า K_w กับเวลาในการดำเนินระบบ	34
2.22	รูปแสดงการกรองตามปกติ (ซ้าย) และ Crossflow Filtration (ขวา)	34
2.23	หลักการทำงานของหอทำน้ำเย็น	36
2.24	ไดอะแกรมการทำงานของระบบหอทำน้ำเย็นโดยทั่วไป	36
2.25	หอทำน้ำเย็นชนิดอากาศไหลสวนทางกับน้ำ	37

ภาพที่		หน้า
2.26	หอทำน้ำเย็นชนิดอากาศไหลขวางทางกับน้ำ	38
2.27	หอทำน้ำเย็นชนิดพัดลมดูดอากาศไหลผ่านไส้ระบายความร้อน	38
2.28	หอทำน้ำเย็นชนิดพัดลมเป่าอากาศไหลผ่านไส้ระบายความร้อน	39
2.29	หอทำน้ำเย็นชนิดอากาศไหลตามธรรมชาติ	39
2.30	สเปคตรัมรังสีอัลตราไวโอเลต	44
2.31	ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของรังสีอัลตราไวโอเลต	46
2.32	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัตราไวโอเลตกับโอโซนและคลอรีน	46
3.1	สรุปแผนผังการดำเนินการวิจัย	54
3.2	แผนผังการดำเนินการทดลอง	55
3.3	แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในงานวิจัย	56
3.4	เครื่องนาโนฟิลเตรชัน ชุดขนาดทดสอบ	58
3.5	เครื่องกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตที่ใช้ในงานวิจัยนี้	59
3.6	การจัดชุดขนาดทดสอบที่โรงงานผลิตกระป๋องน้ำอัดลมอะลูมิเนียม	60
3.7	หอทำน้ำเย็นที่นำน้ำทิ้งมาวิจัย	60
4.1	ค่า pH ของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน	66
4.2	ค่าอุณหภูมิของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน	67
4.3	ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน	67
4.4	ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน	68
4.5	ค่าความขุ่นของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน	68
4.6	ค่าความกระด้างของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน	69

ภาพที่ หน้า

4.7 ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน..... 69
4.8 ปริมาณแบคทีเรียของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน..... 70
4.9 ค่าคลอไรด์ของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน..... 70
4.10 ค่าซัลเฟตของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน..... 71
4.11 ค่าฟอสเฟตของน้ำทิ้งที่เข้าระบบนาโนฟิลเตรชันตลอดระยะเวลาการเดินระบบที่โรงงาน..... 71
4.12 ผลของระยะเวลาสัมผัสของน้ำกับรังสีอัลตราไวโอเลตที่เวลาต่างๆ..... 72
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับเวลาในการเดินระบบที่ความดันต่างๆ..... 74
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์เฉลี่ยกับความดันในการเดินระบบค่าต่างๆ..... 74
4.15 ความสัมพันธ์ของความดันต่อค่าพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย และความขุ่นในน้ำส่วนต่างๆของระบบ..... 77
4.16 ความสัมพันธ์ของความดันต่อความกระด้างทั้งหมดและค่าซีโอดีในน้ำส่วนต่างๆของระบบ..... 78
4.17 ความสัมพันธ์ของความดันต่อปริมาณแบคทีเรีย คลอไรด์ ซัลเฟตและฟอสเฟตในน้ำส่วนต่างๆของระบบ..... 81
4.18 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดต่อค่าพีเอช ความนำไฟฟ้าของแข็งละลาย และความขุ่นในน้ำส่วนต่างๆของระบบ..... 85
4.19 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการผลิตน้ำสะอาดต่อความกระด้าง ซีโอดี ปริมาณแบคทีเรีย คลอไรด์ ซัลเฟต และฟอสเฟตในน้ำส่วนต่างๆของระบบ..... 89
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และเวลาในการเดินระบบระยะยาว..... 90
4.21 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอช ความนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย และความขุ่นในน้ำส่วนต่างๆ ของการเดินระบบระยะยาว ของชุดการทดลองที่โรงงาน..... 93
4.22 ความสัมพันธ์ของความกระด้างทั้งหมด และซีโอดีในน้ำส่วนต่างๆ ของการเดินระบบระยะยาว ของชุดการทดลองที่โรงงาน..... 94

ภาพที่		หน้า
4.23	ความสัมพันธ์ของปริมาณแบคทีเรีย คลอไรด์ ซัลเฟต และฟอสเฟตในน้ำส่วนต่างๆ ของการเดินระบบระยะยาวของชุดการทดลองที่โรงงาน.....	96
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่าง Flux กับร้อยละการกำจัดความนำไฟฟ้า ของแข็งละลาย ความกระด้าง และคลอไรด์ของชุดการทดลองที่โรงงานโดยเทียบค่าที่ได้จากสมการ.....	99
4.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flux และ ln (1-R) ของชุดการทดลอง (ก) ความนำไฟฟ้า (ข) ของแข็งละลาย (ค) ความกระด้าง (ง) คลอไรด์.....	100