



รายงานการวิจัย

การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทางด้าน
วิศวกรรมและการยอมรับของชุมชน โดยผ่านกระบวนการการมีส่วนร่วมของ
ชุมชน

Evaluation alternative of wastewater reclamation in engineering
purpose and public acceptance via public participation

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลการวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมและ
การยอมรับของชุมชน โดยผ่านกระบวนการการมีส่วนร่วมของชุมชน
Evaluation alternative of wastewater reclamation in engineering
purpose and public acceptance via public participation

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรียา ยิ้มรัตนบวร

ผู้ร่วมวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลการวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2560 คณะผู้ศึกษาวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย สถานที่ในการทำวิจัย น้ำทิ้ง เครื่องมือ-อุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ นางสาวอรณี รุ่งเรือง นายวัชรพล วงศ์เลิศอารักษ์ นางสาวธาริกา แก่นจันทร์ นางสาวดุจฤดี สมปัญญา นายคณิตกรณ์ คำภูแสน และนางสาวสุวิมลรัตน์ เรืองเวหา ผู้ช่วยในการวิจัย ที่ทำให้การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จรียา ยัมรัตน์บวร
(หัวหน้าโครงการวิจัย)
20 มกราคม 2562



บทคัดย่อ

ปัญหาการขาดแคลนน้ำเกิดจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และจำนวนประชากร ดังนั้น การหมุนเวียนน้ำที่กลับมาใช้ใหม่จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ระบบหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสมควรเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพทางด้านวิศวกรรม มีประสิทธิภาพในการบำบัด มีค่าใช้จ่ายต่ำ และเป็นที่ยอมรับของชุมชน การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการประเมินทางเลือกของระบบหมุนเวียนน้ำ 3 ทางเลือก ได้แก่ ระบบ Coagulation-Flocculation (CF) ระบบ Ultrafiltration (UF) และระบบรวม (CF+UF) โดยการประเมินความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ จากการนำน้ำทิ้งของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมาผ่านทั้ง 3 ทางเลือก เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัด และประเมินทางเลือกโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) ผลการศึกษาพบว่า ระบบรวม CF+UF มีประสิทธิภาพในการบำบัด ความขุ่น สี COD DOC Total Coliform และ Fecal Coliform สูงที่สุดเฉลี่ยร้อยละ 66.60, 38.92, 38.25, 25.52 และ 21.21 ตามลำดับ รองลงมา ได้แก่ ระบบ CF และ UF และคุณภาพน้ำที่ผ่านระบบหมุนเวียนน้ำจากระบบรวม CF+UF มีคุณภาพน้ำผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทั้ง 5 ด้าน คือน้ำประปา น้ำใช้ในการซักโครก น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม ระบบ CF และ UF มีคุณภาพน้ำผ่านมาตรฐาน 4 ด้าน ยกเว้นการนำไปใช้ด้านน้ำประปา จากผลการประเมินทางเลือกทางวิศวกรรม พบว่าระบบรวม CF+UF (0.40) มีความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมมากที่สุด รองลงมาได้แก่ ระบบ CF (0.35) และ UF (0.26) ตามลำดับ ระบบ CF และ UF มีค่าความเสี่ยงสำหรับสารที่ไม่ก่อมะเร็งน้อยที่สุด ขณะที่ระบบรวม CF+UF มีค่าความเสี่ยงสำหรับสารที่ก่อมะเร็งและความเสี่ยงจากการสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ E. coli น้อยที่สุด เมื่อนำ AHP มาใช้ในการประเมินทางเลือกทั้งด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ พบว่าระบบรวม CF+UF (0.51) มีค่าความสำคัญมากที่สุด รองลงมาได้แก่ ระบบ CF (0.33) และระบบ UF (0.16) ตามลำดับ ดังนั้น ระบบรวม CF+UF เป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมที่สุดในการหมุนเวียนน้ำจากการทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงทางสุขภาพ และผลการศึกษาการมีส่วนร่วมของชุมชน พบว่า ประชาชนยอมรับการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้ระบบรวม CF+UF และควรมีการนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ผสมที่สัดส่วนร้อยละ 30 ผสมกับน้ำประปา เนื่องจากมีความเสี่ยงทางสุขภาพต่ำ แม้ค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบอื่นแต่สามารถยอมรับได้

Abstract

The water scarcity problem is becoming serious problem as a result of the accelerated industrial and agricultural and an increased population. Therefore, reclaimed water offers prospects as an interesting alternative water resource. The suitable technology of reclaimed water should has high removal efficiency, minimizing system costs, health security and was accepted by people in community. The aim of this study is to evaluate three alternative process of water reclamation include the coagulation-flocculation process (CF) ultrafiltration process (UF) and combine process: coagulation-flocculation and ultrafiltration (CF+UF) by consideration of engineering purposes and health risk assessment. The effluent of Suranaree University of Technology was supplied through all three alternative processes. The suitable operation conditions and removal efficiency of three processes were investigated. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to evaluate the suitable water reclamation process. The results showed CF+UF process had higher removal efficiency of turbidity, color, COD, DOC, total coliform and fecal coliform are 66.60, 38.92, 38.25, 25.52 and 21.21% respectively, CF and UF process was the latter. The water quality of CF+UF process had met the standard for five purposes water supply, toilet flushing, urban landscaping, vehicle washing and agricultural irrigation, the CF and UF process could be used for four purposes except water supply. The AHP process was used to evaluate for engineering purpose and found that CF+UF process had a higher importance value than CF and UF with importance value 0.40 0.35 and 0.26 respectively. The results showed the CF and UF process had lowest Hazard Index for the non-carcinogenic risk. Whereas, The CF+UF process had lowest Cancer Risk for carcinogenic risk and E. coli exposure risk. The evaluation of water reclamation alternative in engineering purposes and health risk assessment by AHP was CF+UF process with the importance value 0.51 and CF and UF process was the next with the importance value 0.33 and 0.16 respectively. It was concluded that the CF+UF process is appropriate technology for water reclamation according to engineering purposes and health risk assessment. And the results of public acceptance via public participation found that people could accepted the CF+UF process as suitable water reclamation technology and mixing ratio of 30% reclaimed water and water supply. Because it has low health risk even though higher cost.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่	5
2.2 มาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับการใช้ประโยชน์	5
2.2.1 การนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการปรับภูมิทัศน์	5
2.2.2 การนำมาใช้ประโยชน์ในชลประทานเพื่อการเกษตรกรรม	6
2.2.3 การนำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรม	6
2.2.4 การนำมาใช้ประโยชน์ในการสันทนาการ	7
2.2.5 การนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเติมน้ำลงใต้ดิน	7
2.2.6 การนำมาใช้ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม	7
2.2.7 การนำมาใช้ประโยชน์ในการอุปโภค	7
2.2.8 การนำมาใช้ประโยชน์ในการอุปโภค-บริโภค	8
2.3 ระบบการหมุนเวียนน้ำ	12
2.3.1 กระบวนการสร้างและรวมตะกอน	12
2.3.2 Activated Carbon	12
2.3.3 ไมโครฟิลเตรชัน	12
2.3.4 อัลตราฟิลเตรชัน	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5	นาโนฟิลเตรชัน..... 14
2.3.6	ออสโมซิสผันกลับ..... 14
2.4	กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation)..... 15
2.4.1	หลักการสร้างและรวมตะกอน..... 16
2.4.2	สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน..... 17
2.4.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างและรวมตะกอน..... 20
2.5	เทคโนโลยีเมมเบรน..... 22
2.5.1	หลักการของกระบวนการเมมเบรน..... 22
2.5.2	ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน..... 24
2.5.3	การลดการอุดตันสำหรับกระบวนการเมมเบรน..... 26
2.6	ผลกระทบต่อสุขภาพจากการใช้น้ำหมุนเวียน..... 27
2.6.1	อันตรายทางชีวภาพ..... 27
2.6.2	อันตรายทางเคมี..... 27
2.7	การประเมินความเสี่ยงสุขภาพ..... 28
2.7.1	การระบุลักษณะของสิ่งคุกคามสุขภาพ..... 29
2.7.2	การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากสิ่งคุกคาม..... 29
2.7.3	การประเมินการสัมผัส..... 31
2.7.4	การอธิบายลักษณะความเสี่ยง..... 32
2.8	กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP)..... 36
2.9	การใช้น้ำและการหมุนเวียนน้ำของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 38
2.9.1	แหล่งน้ำดิบ..... 39
2.9.2	ระบบผลิตน้ำประปา..... 40
2.9.3	ระบบการส่งจ่ายน้ำประปา..... 41
2.9.4	ระบบบำบัดน้ำเสีย..... 42
2.9.5	ระบบหมุนเวียนน้ำ..... 43
2.9.6	สรุปข้อมูลสมดุลน้ำของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 44
2.10	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 48
3	วิธีการดำเนินการ..... 53
3.1	สถานที่ทำการศึกษาวิจัย..... 53
3.2	ระยะเวลาในการศึกษาวิจัย..... 53
3.3	วิธีดำเนินการวิจัย..... 53
3.3.1	การศึกษาลักษณะคุณภาพน้ำทิ้ง..... 55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบของแต่ละทางเลือก.....	55
3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบในแต่ละทางเลือก.....	57
3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	60
3.3.5 การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ.....	60
3.3.6 การเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ.....	69
3.3.7 กรณีศึกษาการเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ.....	69
3.3.8 การมีส่วนร่วมของชุมชน.....	70
4 ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา.....	72
4.1 คุณลักษณะน้ำทิ้ง.....	72
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการเดินระบบ.....	75
4.2.1 ทางเลือกที่ 1 ระบบ CF.....	75
4.2.2 ทางเลือกที่ 2 ระบบ UF.....	82
4.2.3 ทางเลือกที่ 3 ระบบร่วมระหว่าง CF+UF.....	85
4.3 การเปรียบเทียบทางเลือกการบำบัดน้ำทิ้งของทั้ง 3 ทางเลือก.....	89
4.3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ.....	89
4.3.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของระบบ.....	91
4.3.3 การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำของทั้ง 3 ทางเลือก.....	92
4.4 การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ.....	93
4.4.1 ประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรม.....	93
4.4.2 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพ.....	100
4.5 สรุปผลการเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ.....	108
4.6 การประยุกต์ใช้ในการประเมินทางเลือกน้ำหมุนเวียน.....	109
4.6.1 การประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรม.....	109
4.6.2 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพ.....	110
4.6.3 สรุปผลการประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ.....	118
4.7 การมีส่วนร่วมของชุมชนภายในพื้นที่การศึกษา.....	119
4.7.1 การมีส่วนร่วมของชุมชนก่อนทำการศึกษาวิจัย.....	119
4.7.2 การรับฟังความคิดเห็นของชุมชนต่อผลการศึกษาวิจัย.....	120
5 สรุปผลการศึกษา.....	133
5.1 การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำเพื่อกลับมาใช้ใหม่.....	133
5.1.1 สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละทางเลือก.....	133
5.1.2 ประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละทางเลือก.....	133

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.3 การประเมินทางเลือกในการนำน้ำกลับไปใช้ประโยชน์.....	134
5.2 การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่.....	134
5.2.1 การประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรม.....	134
5.2.2 การประเมินทางเลือกโดยการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ.....	134
5.2.3 สรุปผลการเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ.....	135
5.3 สรุปผลกระบวนการรับฟังความคิดเห็นของชุมชน.....	135
รายการอ้างอิง.....	136
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาลักษณะน้ำทิ้ง.....	148
ภาคผนวก ข ผลการศึกษาระบบ CF.....	154
ภาคผนวก ค ผลการประเมินความเสี่ยง.....	158
ภาคผนวก ง แบบสอบถาม.....	168
ภาคผนวก จ เอกสารนำเสนอ.....	172
ภาคผนวก ฉ ผลงานตีพิมพ์.....	183

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ.....	8
2.2 มาตรฐานคุณภาพน้ำหมุนเวียนในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ.....	9
2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำหมุนเวียนด้านอุปโภค-บริโภค และเกษตรกรรม.....	10
2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบหมุนเวียนน้ำประเภทต่าง ๆ.....	13
2.5 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของสารสร้างตะกอน.....	19
2.6 ช่วง pH ที่เหมาะสมสำหรับสารสร้างตะกอนชนิดต่าง ๆ.....	21
2.7 การเปรียบเทียบชนิดของเยื่อกรองเมมเบรน.....	24
2.8 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่เข้าสู่ร่างกาย.....	33
2.9 ค่า RfD และ SF ของสารเคมีแต่ละชนิด.....	34
2.10 ระดับความเสี่ยงตามค่าประเมิน Hazard quotient หรือ Hazard index.....	35
2.11 ระดับความเสี่ยงตามค่าประเมินค่าความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง.....	35
2.12 ค่าที่ใช้หาความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วยจากการสัมผัสเชื้อก่อโรค.....	35
2.13 เกณฑ์การเปรียบเทียบเป็นคู่.....	37
2.14 ค่าดัชนีความสอดคล้องตามขนาดของเมตริกซ์.....	37
2.15 แหล่งเก็บน้ำดิบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	39
2.16 ค่าการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	42
2.17 ปริมาณการใช้น้ำและปริมาณการเกิดน้ำเสีย.....	42
2.18 อัตราการผลิตน้ำรีไซเคิล พ.ศ. 2554-2557.....	44
2.19 สมการที่ใช้คำนวณค่าใช้จ่ายของระบบหมุนเวียนน้ำ.....	52
3.1 สภาวะที่กำหนดสำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของทางเลือกที่ 1 ระบบ CF.....	55
3.2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำ.....	57
3.3 รายละเอียดของเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้.....	58
3.4 จำนวนตัวอย่างและความถี่ในการเก็บตัวอย่าง.....	59
3.5 ค่าดัชนีความสอดคล้องตามขนาดของเมตริกซ์.....	63
3.6 มาตรฐานคุณภาพน้ำในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ.....	63
3.7 เกณฑ์การจัดลำดับความสำคัญของประสิทธิภาพในการบำบัด.....	63
3.8 สมการที่ใช้สำหรับประเมินค่าใช้จ่ายของระบบหมุนเวียนน้ำ.....	64
3.9 ค่าที่ใช้หาความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วยจากการสัมผัส <i>E-coli</i>	65
3.10 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่เข้าสู่ร่างกาย.....	67
3.11 ระดับความเสี่ยงตามค่าประเมิน HI.....	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.12 ระดับความเสี่ยงตามค่าประเมิน CR.....	68
3.13 จำนวนในการเก็บตัวอย่างแบบสอบถามความคิดเห็นของผู้ใช้น้ำหมุนเวียนของ มทส.....	71
3.14 จำนวนผู้เข้าร่วมประชุมกลุ่มย่อยในแต่ละกลุ่มประชากร.....	71
4.1 ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำที่ย้อนหลัง 5 ปี และผลการศึกษาคั้งนี้.....	73
4.2 สภาพที่เหมาะสมของการทดสอบ Jar Test.....	77
4.3 ผลการทดสอบทางสถิติค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสี.....	79
4.4 ผลของกระบวนการ CF ต่อคุณลักษณะน้ำ.....	81
4.5 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเข้าและออกจากระบบ.....	81
4.6 ผลของระบบ UF ต่อคุณลักษณะน้ำ.....	84
4.7 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเข้าและออกจากระบบ UF.....	84
4.8 คุณลักษณะน้ำที่ผ่านระบบรวม CF+UF.....	88
4.9 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเข้าและออกจากระบบ CF+UF.....	88
4.10 ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบหมุนเวียนน้ำทั้ง 3 ทางเลือก.....	90
4.11 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่และมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ของทั้ง 3 ทางเลือก.....	93
4.12 คุณภาพน้ำที่ผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ของทั้ง 3 ทางเลือก.....	93
4.13 เกณฑ์การเปรียบเทียบเป็นคู่.....	94
4.14 การเปรียบเทียบเป็นคู่ของเกณฑ์หลัก.....	95
4.15 น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์หลัก.....	95
4.16 การคำนวณหาค่า C.R.....	95
4.17 การคูณเมตริกซ์ของค่าที่เปรียบเทียบกับน้ำหนักสำคัญ.....	95
4.18 ผลลัพธ์จากการคูณเมตริกซ์.....	95
4.19 ผลหารในแนวนอนกับน้ำหนักสำคัญ.....	95
4.20 ค่าดัชนีความสอดคล้องตามขนาดของเมตริกซ์.....	96
4.21 เปรียบเทียบน้ำหนักสำคัญของเกณฑ์รองของคุณภาพน้ำสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์.....	97
4.22 เกณฑ์การจัดลำดับความสำคัญของประสิทธิภาพในการบำบัด.....	98
4.23 ค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือกในการกำจัดความขุ่น.....	98
4.24 ค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือกในการกำจัดสี.....	98
4.25 ค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือกในการกำจัด COD.....	98
4.26 ค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือกในการกำจัด Total Coliform.....	98
4.27 ค่าความสำคัญเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการบำบัดแต่ละทางเลือก.....	99
4.28 ค่าความสำคัญของค่าใช้จ่ายแต่ละทางเลือก.....	99
4.29 ผลการเปรียบเทียบความสำคัญในแต่ละทางเลือกของเกณฑ์รอง.....	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.30	สรุปผลลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือก.....	100
4.31	ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่เข้าสู่ร่างกาย.....	102
4.32	การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีด้านที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งและก่อให้เกิดมะเร็ง.....	103
4.33	การจัดลำดับความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีด้านที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งและก่อให้เกิดมะเร็ง.....	104
4.34	ปริมาณเชื้อ <i>E-coli</i> ที่ตรวจพบจากน้ำที่ผ่านการหมუნเวียนทั้ง 3 ทางเลือก.....	105
4.35	ค่าที่ใช้หาความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วยจากการสัมผัส <i>E-coli</i>	106
4.36	ความเสี่ยงทางสุขภาพจากการสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ <i>E-coli</i>	108
4.37	สรุปผลความเสี่ยงทั้ง 3 ทางเลือก.....	108
4.38	การเปรียบเทียบความเสี่ยงทางสุขภาพโดยใช้ AHP.....	109
4.39	สรุปผลการเปรียบเทียบความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ.....	109
4.40	สรุปผลลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือกในการประเมินทางด้านวิศวกรรม.....	110
4.41	การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีของนักศึกษาชาย.....	111
4.42	การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีของนักศึกษาหญิง.....	112
4.43	การจัดลำดับความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีด้านที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งและก่อให้เกิดมะเร็ง.....	112
4.44	ความเสี่ยงสุขภาพจากการสัมผัสสารไม่ก่อมะเร็งที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนแตกต่างกัน.....	115
4.45	ความเสี่ยงสุขภาพจากการสัมผัสสารก่อมะเร็งที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนแตกต่างกัน.....	115
4.46	ความเสี่ยงทางสุขภาพจากการสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ <i>E-coli</i>	118
4.47	การเปรียบเทียบความเสี่ยงทางสุขภาพของหอพักชายโดยใช้ AHP.....	118
4.48	การเปรียบเทียบความเสี่ยงทางสุขภาพของหอพักหญิงโดยใช้ AHP.....	118
4.49	การเปรียบเทียบความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพหอพักชาย.....	119
4.50	การเปรียบเทียบความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพหอพักหญิง.....	119
4.51	ผลการสำรวจสภาพปัญหาการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่.....	120
4.52	ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม.....	121
4.53	ผลความคิดเห็นสภาพปัญหาน้ำใช้ในปัจจุบัน.....	123
4.54	ผลสำรวจความความรู้เข้าใจเกี่ยวกับการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่.....	124
4.55	การยอมรับการหมุนเวียนน้ำ.....	125
4.56	ความวิตกกังวลเกี่ยวกับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่.....	127
4.57	ผลสำรวจความคิดเห็นการยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ภายในมทส.....	128
ก.1	ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำทั้งย้อนหลังปี 2556.....	149
ก.2	ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำทั้งย้อนหลังปี 2557.....	150
ก.3	ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำทั้งย้อนหลังปี 2558.....	151
ก.4	ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำทั้งย้อนหลังปี 2559.....	152

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.5 ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำทิ้งย้อนหลังปี 2560.....	153
ข.1 สภาวะที่เหมาะสมจากการทดสอบ Jar Test.....	155
ข.2 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ความเข้มข้นของ PACl ในช่วง 60-70 mg/L ด้วย One Way ANOVA.....	156
ข.3 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ความเข้มข้นของ PACl ในช่วง 60-70 mg/L ด้วย One Way ANOVA.....	156
ข.4 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ความเข้มข้นของ Cation Polymer ในช่วง 1-8 mg/L ด้วย One Way ANOVA.....	156
ข.5 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ความเข้มข้นของ Cation Polymer ในช่วง 1-8 mg/L ด้วย One Way ANOVA.....	156
ข.6 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่า pH ในช่วง 7-9 ด้วย One Way ANOVA.....	157
ข.7 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ค่า pH ในช่วง 7-9 ด้วย One Way ANOVA.....	157
ค.1 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบ CF.....	159
ค.2 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบ UF.....	160
ค.3 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบ CF+UF.....	161
ค.4 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางชีวภาพจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนที่ปนเปื้อนเชื้อ <i>E-coli</i>	162
ค.5 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบ CF กรณีศึกษามทส. (ชาย).....	162
ค.6 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบ UF กรณีศึกษามทส. (ชาย).....	163
ค.7 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบรวม CF+UF กรณีศึกษามทส. (ชาย).....	164
ค.8 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบ CF กรณีศึกษามทส. (หญิง).....	165
ค.9 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบ UF กรณีศึกษามทส. (หญิง).....	166
ค.10 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบ CF+UF กรณีศึกษามทส. (หญิง).....	167

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	สถานการณ์ปริมาณน้ำกักเก็บในอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552-2557.....3
2.1	การจำแนกขนาดของสารต่าง ๆ ในน้ำ..... 15
2.2	โครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACI และ Alum..... 18
2.3	ความสามารถในการกรองของเมมเบรนแต่ละชนิด..... 23
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันต่อเพอมีเอทพลักซ์..... 25
2.5	การคำนวณค่า Cancer slope factor..... 31
2.6	แผนผังการใช้ประโยชน์ที่ดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 38
2.7	อ่างเก็บน้ำภายใน มทส..... 39
2.8	ระบบผลิตน้ำประปามทส..... 40
2.9	ปริมาณการใช้น้ำแยกตามโซนในมหาวิทยาลัย..... 41
2.10	กระบวนการบำบัดน้ำเสียน้ำเสียทางชีวภาพแบบบ่อผึ่ง..... 43
2.11	กระบวนการผลิตน้ำหมุนเวียน..... 43
2.12	ข้อมูลการใช้น้ำประปาและน้ำหมุนเวียน..... 44
2.13	สมดุลมวลน้ำการใช้น้ำของมทส..... 45
2.14	ค่าใช้จ่ายที่อัตราการผลิตต่าง ๆ ของระบบ CF..... 51
2.15	ค่าใช้จ่ายที่อัตราการผลิตต่าง ๆ ของระบบ UF..... 51
3.1	ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย..... 54
3.2	ขั้นตอนการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของทางเลือกที่ 1 ระบบ CF..... 56
3.3	จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งเพื่อนำมาใช้ในการศึกษา..... 58
3.4	ทางเลือกที่ 1 ระบบ Coagulation-Flocculation..... 59
3.5	ทางเลือกที่ 2 ระบบ Ultrafiltration..... 59
3.6	ทางเลือกที่ 3 ระบบร่วม CF+UF..... 60
3.7	ขั้นตอนการประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ..... 61
3.8	เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินทางเลือกด้านวิศวกรรม..... 62
3.9	ขั้นตอนในการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ..... 66
4.1	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสีที่ปริมาณของ PACI แตกต่างกัน..... 76
4.2	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสีที่ปริมาณของ Polymer แตกต่างกัน..... 77
4.3	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสีที่ pH แตกต่างกัน..... 78
4.4	ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำทิ้งของระบบ CF..... 82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ค่าความขุ่น สี และ COD ของน้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านระบบรวม UF.....	83
4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ UF.....	85
4.7 ค่าความขุ่น สี และ COD ของน้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านระบบรวม CF+UF.....	87
4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบรวม CF+UF.....	89
4.9 ประสิทธิภาพในการบำบัดของทั้ง 3 ทางเลือก.....	90
4.10 ค่าความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักของทั้ง 3 ทางเลือก.....	104
4.11 ความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักที่ก่อกัมเริงของทั้ง 3 ทางเลือก.....	105
4.12 ปริมาณเชื้อ <i>E-coli</i> ที่ตรวจพบจากน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก.....	105
4.13 ความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ <i>E-coli</i> ของทั้ง 3 ทางเลือก.....	107
4.14 ความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักทั้ง 3 ทางเลือก ของนักศึกษาชายและนักศึกษาหญิง.....	113
4.15 ความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักที่ก่อกัมเริง (CR) ทั้ง 3 ทางเลือก ของนักศึกษาชายและนักศึกษาหญิง.....	113
4.16 ความเสี่ยงสุขภาพจากการสัมผัสสารไม่ก่อกัมเริงที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนแตกต่างกัน	116
4.17 ความเสี่ยงสุขภาพจากการสัมผัสสารก่อกัมเริงที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนแตกต่างกัน	117

บทที่ 1

บทนำ

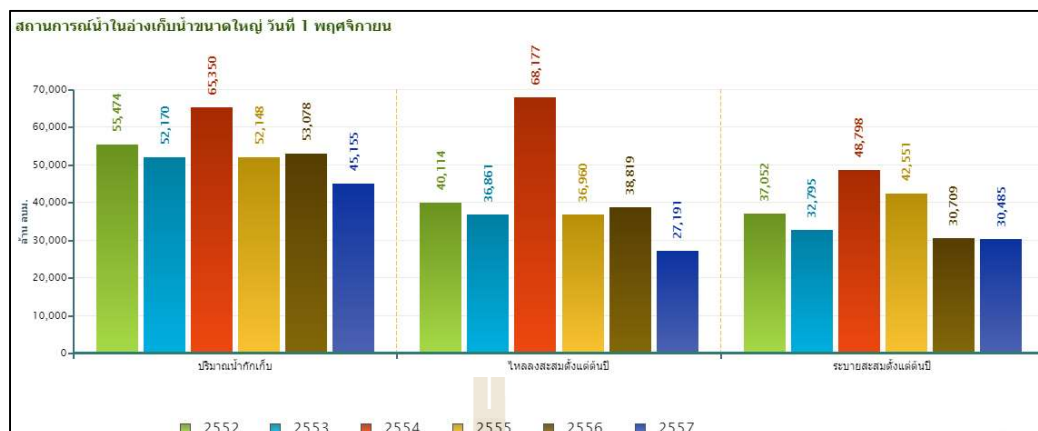
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยในปัจจุบันความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภคมีมากยิ่งขึ้นไม่ว่าจะเป็นการใช้สำหรับการอุปโภค-บริโภค ภายในบ้านเรือน เกษตรกรรม การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การผลิตสินค้าและการอุตสาหกรรม เป็นต้น แหล่งน้ำดิบที่นำมาใช้เพื่อผลิตน้ำในการอุปโภค-บริโภคส่วนใหญ่เป็นแหล่งน้ำที่ได้มาจากแหล่งน้ำผิวดินซึ่งมีน้ำอยู่ในปริมาณที่จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูแล้ง จะก่อให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำ ดังจะเห็นได้ว่า ในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยประสบปัญหาภัยแล้งอย่างรุนแรง มีการประกาศภัยแล้งจำนวน 58 จังหวัด ความรุนแรงของสถานการณ์ภัยแล้งในปี พ.ศ. 2558 มีความรุนแรงมาก ทางรัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการน้ำ ได้รายงานว่ สถานการณ์เขื่อนภูมิพลอยู่ในภาวะน้ำน้อยวิกฤต ณ วันที่ 30 เมษายน 2558 ซึ่งเป็นวันสิ้นสุดฤดูแล้ง มีปริมาณน้ำคงเหลือเพียง 5,241 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็น 39% ของความจุอ่าง และมีน้ำใช้การได้จริงเพียง 1,411 ล้านลูกบาศก์เมตร ส่วนเขื่อนสิริกิติ์มีปริมาณน้ำเหลือ 4,794 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็น 50% ของความจุอ่าง มีน้ำใช้การได้จริง 1,944 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์น้ำค่อนข้างน้อย สำหรับเขื่อนศรีนครินทร์ปีนี้มีปริมาณน้ำกักเก็บคงเหลือ 12,348 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็น 70% ซึ่งเป็นปริมาณน้ำกักเก็บน้อยที่สุดในรอบ 15 ปี และมีน้ำใช้การได้จริงเหลือเพียง 2,083 ล้านลูกบาศก์เมตร เท่านั้น (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร, 2558) จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำกักเก็บในอ่างขนาดใหญ่ของประเทศไทย มีปริมาณลดลงตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2552 จนถึงปี พ.ศ. 2557 และในปี พ.ศ. 2558 อย่างเห็นได้ชัด (ปี พ.ศ. 2554 เกิดภาวะน้ำท่วมรุนแรง) จากการรายงานข่าวของผู้จัดการออนไลน์, 7 กรกฎาคม 2558 14:31 น. รายงานว่า ทอมสัน รอยเตอร์ ฟาวเดชันเปิดเผยข้อมูลภัยแล้งที่กระทบถึงการใช้ชีวิตของประชาชนในกรุงเทพมหานครจากการให้สัมภาษณ์ของธนศักดิ์ วัฒนฐานะ ผู้ว่าการประปานครหลวงระบุว่า “หากยังไม่มีฝนตกลงมาเพิ่ม ประชาชนในกรุงเทพฯจะมีน้ำประปาไว้ใช้สอยต่อไปได้เพียงแค่ 30 วันเท่านั้น” พร้อมกับประกาศให้ผู้น้ำกักตุนน้ำดื่มจำนวน 60 ลิตรไว้ในยามฉุกเฉิน หลังสถานการณ์รอบนอกวิกฤต รวมไปถึงระดับน้ำในเขื่อนพลังานภูมิพล จ.ตาก ที่อยู่ในขั้นวิกฤตระดับ 2 แล้ว ยังไม่รวมถึงถนนทรุดตัวก่อนหน้า และในระดับภูมิภาคของประเทศก็ประสบปัญหาภัยแล้งเช่นเดียวกัน จากข่าวกรุงเทพธุรกิจออนไลน์ ณ วันที่ 14 พฤษภาคม 2558 รายงานข่าวว่า นายธงชัย ลือดุษย์ ผู้ว่าราชการจังหวัดนครราชสีมา ขณะที่ยังจังหวัดประกาศพื้นที่ประสบภัยแล้ง 24 อำเภอ จากทั้งหมด 32 อำเภอ รวม 164 ตำบล 1,760 หมู่บ้าน 1 เทศบาล 16 ชุมชน ราษฎรได้รับความเดือดร้อน จำนวน 785,906 คน 278,866 ครัวเรือน จะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีแนวโน้มในการเกิดภาวะภัยแล้งเนื่องจากการขาดแคลนน้ำดิบ ในการนำมาผลิตน้ำประปา ดังนั้น การหมุนเวียนน้ำกลับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ จึงเป็น

ทางเลือกที่น่าสนใจเพื่อบรรเทาภาวะปัญหาภัยแล้ง ให้มีน้ำใช้แม้ในสภาวะที่ขาดแคลนน้ำดิบในการผลิตน้ำประปา

ในหลายๆประเทศที่ประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำ ได้มีการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น เช่น ในประเทศอิหร่าน ซึ่งอยู่ในพื้นที่แห้งแล้ง และกึ่งแห้งแล้ง ปัญหาการขาดแคลนน้ำอยู่ในระดับวิกฤต การจัดการน้ำเป็นปัญหาที่สำคัญในระดับประเทศ ดังนั้น การหมุนเวียนน้ำเสียเพื่อนำกลับมาใช้ (recycling of treated wastewater) หรือการนำน้ำเสียมาใช้ซ้ำ (reuse of treated wastewater) เป็นวิธีการแก้ไขปัญหาก็สามารถนำมาใช้ได้จริง โดยร้อยละ 20 ของปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นถูกนำมาใช้เพื่อการเกษตรกรรม และ ร้อยละ 0.81 ใช้สำหรับการอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (Piadeh et al, 2014) เช่นเดียวกับในเมืองปักกิ่ง ประเทศจีน ได้มีการนำน้ำกลับมาใช้เป็นแหล่งน้ำใช้ ตั้งแต่ในปี 2003 เพื่อแก้ไขปัญหาคารกเก็บน้ำใช้ เพื่อใช้ในการเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม (Chang and Ma, 2012) ส่วนในเมืองซิดนีย์ (Sydney) ประเทศออสเตรเลีย รัฐบาลได้มีการวางแผนการใช้น้ำของเมือง จะเพิ่มโอกาสในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ร่วมกับน้ำประปาที่ผลิตให้มากยิ่งขึ้น (Anderson., J.M., 2006) และในเมืองโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น สำหรับอาคารบางอาคาร และแหล่งสาธารณะ ได้มีการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ในวัตถุประสงค์ต่าง ๆ กัน ในปริมาณที่มาก เช่น เพื่อการล้างทำความสะอาด น้ำหล่อเย็น น้ำล้างชักโครก และน้ำพุในสวนสาธารณะต่าง ๆ (Hiroaki Furumai, 2008)

แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ ยังคงมีปัญหาในเรื่องคุณภาพน้ำที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ประเภทต่าง ๆ และการยอมรับของประชาชน การศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษา การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมและการยอมรับของชุมชน โดยจะเลือกทำการศึกษาคณาการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่กรณีศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา เปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ โดยวิธีต่าง ๆ อย่างน้อย 3 ทางเลือก นำมาประเมินศักยภาพการหมุนเวียนน้ำทางด้านวิศวกรรม ในแง่ ประสิทธิภาพการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดูแล ประกอบกับข้อมูลการสำรวจความคิดเห็นของชุมชน เกี่ยวกับการยอมรับของชุมชน ในแง่คุณภาพน้ำ และความเหมาะสมการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ ความวิตกกังวลต่าง ๆ ในประเด็นการหมุนเวียนน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นต้นแบบในประเมินการศึกษาทางเลือกการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้รับการยอมรับของประชาชน ในระดับชุมชน ระดับอำเภอ และระดับประเทศต่อไป และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาทางเลือกในการบรรเทาปัญหาการขาดแคลนน้ำใช้ในระดับนโยบายของประเทศต่อไป ผลการศึกษาวิจัยสามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบวิธีการเลือกระบบหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ โดยผ่านกระบวนการมีส่วนร่วมของชุมชน เป็นการลดความขัดแย้งและความเข้าใจที่ไม่ถูกต้องของชุมชน เพื่อทำให้เกิดการยอมรับจากประชาชน นำไปสู่กระบวนการในการดูแลรักษาระบบ และสามารถขยายประโยชน์ของการใช้น้ำให้เพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยชุมชนเป็นผู้ตระหนักถึงความสำคัญของการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้เอง



รูปที่ 1.1 สถานการณ์ปริมาณน้ำกักเก็บในอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552-2557 (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร, 2558)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรม ภูมิศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา

1.2.2 การสำรวจความคิดเห็นของชุมชนในประเด็นการยอมรับ การใช้น้ำที่ผ่านการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ ภูมิศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาวิจัยทางเลือกในการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ โดยการประเมินทางด้าน วิศวกรรมและสำรวจความคิดเห็นของชุมชนในการยอมรับ การหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่มีขอบเขต งานวิจัยดังนี้

1.3.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา เช่น ข้อมูลทั่วไปของ ชุมชนมหาวิทยาลัย เช่น จำนวนประชากร อายุ เพศ การศึกษา รายได้ ข้อมูลน้ำใช้น้ำเสีย และระบบการบำบัดน้ำที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 เก็บข้อมูลคุณภาพน้ำทั้ง น้ำเข้า-ออกในระบบหมุนเวียนน้ำใช้ ข้อมูลที่สำคัญทางด้าน วิศวกรรมระบบ เช่น ประสิทธิภาพ ความสามารถในการรองรับของระบบ เพื่อนำมาใช้ในการประเมิน ทางเลือกระบบที่จะนำมาเปรียบเทียบ

1.3.3 ทำการเลือกระบบการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ ที่เหมาะสมกับคุณภาพน้ำทิ้ง และ ลักษณะของชุมชน อย่างน้อย 3 ทางเลือก เพื่อนำไปเปรียบเทียบในการทดลองเดินระบบ ในแง่ ประสิทธิภาพ คุณภาพน้ำ และค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

1.3.4 ทำการสำรวจความคิดเห็นเกี่ยวกับการยอมรับของชุมชน ปัญหาการหมุนเวียนน้ำ กลับมาใช้ใหม่ ความวิตกกังวลในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้

1.3.5 จำลองระบบการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ และทำการทดลองเดินระบบ

1.3.6 เก็บตัวอย่างน้ำเข้า-ออก จากระบบการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในแต่ละทางเลือก เพื่อนำมาเปรียบเทียบในแง่ประสิทธิภาพ คุณภาพน้ำ และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

1.3.7 นำผลการศึกษาศึกษาการเปรียบเทียบทางเลือกการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ ทางด้านวิศวกรรม เสนอต่อชุมชนผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง เพื่อรับฟังความคิดเห็นต่าง ๆ ของชุมชน โดยการจัดประชุมกลุ่มย่อย

1.3.8 รวบรวมข้อมูลที่ได้จากผลการศึกษาทงเลือกการหมุนเวียนน้ำ ในการประเมินทางด้านวิศวกรรม และการยอมรับของชุมชน รวมทั้งรวบรวมข้อเสนอแนะของชุมชน เพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษาศึกษาการมีส่วนร่วมของชุมชนในการประเมินทางเลือกการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น ด้านวิชาการ ด้านนโยบาย ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ อุตสาหกรรม ด้านสังคมและชุมชน รวมถึงการเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ มีรายละเอียดดังนี้

1.4.1 การพัฒนาศักยภาพในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในเชิงวิศวกรรม และเป็นที่ยอมรับของชุมชน ทำให้เกิดการพัฒนาย่างยั่งยืน

กลุ่มเป้าหมาย : นักศึกษาและบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ชุมชนใกล้เคียง และหน่วยงานท้องถิ่นในพื้นที่ศึกษา

1.4.2 การสร้างความตระหนักในเรื่องความสำคัญการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ เพื่อบรรเทาภาวะภัยแล้ง และเห็นความสำคัญของการมีส่วนร่วมในการดูแลและรักษาทรัพยากรทางน้ำ

กลุ่มเป้าหมาย : ประชาชนในเขตอำเภอ ภายในจังหวัดนครราชสีมา และหน่วยงานท้องถิ่นในพื้นที่ศึกษา

1.4.3 การถ่ายทอดความรู้ในด้านการศึกษาศึกษาการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับชุมชนขนาดเล็ก

กลุ่มเป้าหมาย : ประชาชนและหน่วยงานท้องถิ่นในพื้นที่ศึกษา

1.4.4 การใช้ผลการศึกษาเป็นต้นแบบสำหรับชุมชนขนาดเล็ก เพื่อนำไปขยายผลการนำไปใช้ในพื้นที่อื่นต่อไป

กลุ่มเป้าหมาย : หน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง อาทิ เช่น องค์การบริหารส่วนตำบล สำนักงาน

1.4.5 การใช้ผลการศึกษาเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อเนื่อง

กลุ่มเป้าหมาย : สถาบันการศึกษา และหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง

1.4.6 การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารหรือการประชุมวิชาการระดับประเทศ อย่างน้อย 1 ผลงาน

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

การหมุนเวียนน้ำ เป็นการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำน้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์จากภาคอุตสาหกรรม คริวเรือน เกษตรกรรมหรือกิจกรรมอื่น ๆ มาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีคุณภาพ ซึ่งนำกระบวนการทางกายภาพ เคมี หรือชีวภาพ มาช่วยในการบำบัดเพื่อให้ได้น้ำที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในลักษณะต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย ซึ่งในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่นั้น มีการใช้คำศัพท์ที่หลากหลาย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Water Reclamation หมายถึง การนำน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์ โดยผ่านกระบวนการบำบัดเพื่อให้มีคุณภาพน้ำตามมาตรฐานในการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งมีความหมายเหมือนกับน้ำรีไซเคิล (Recycled Water) (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2548; NRC, 2012)

Water Reuse หมายถึง การนำน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งมีความหมายเหมือนกับคำว่า Wastewater Reuse (NRC, 2012)

Grey Water หมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้งานจาก อ่างอาบน้ำ อ่างล้างมือ การซักผ้า อาบน้ำ ซึ่งไม่รวมน้ำโสโครก (Black Water) จากโถสุขภัณฑ์หรือจากการทำครัว (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2548; NRC, 2012)

ในงานวิจัยนี้จะใช้คำว่า Water Reclamation ซึ่งเป็นการหมุนเวียนน้ำทั้งกลับมาใช้ประโยชน์ โดยผ่านกระบวนการในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ จนได้น้ำที่มีคุณภาพน้ำตามมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

2.2 มาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับการใช้ประโยชน์

น้ำที่ผ่านกระบวนการหมุนเวียนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ โดยประเภทของการนำไปใช้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัด ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ประโยชน์ โดยต้องคำนึงถึงสุขภาพอนามัยของผู้ใช้น้ำด้วย (ธรรมธร นรพลภ, 2557) ในปัจจุบันหลายประเทศให้ความสำคัญกับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ และมีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มีรายละเอียดและข้อจำกัดดังต่อไปนี้

2.2.1 การนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการปรับภูมิทัศน์ (Landscape Irrigation) เป็นการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ได้แก่ การนำมาใช้ประโยชน์ในการรดน้ำต้นไม้, สวนสาธารณะ, สนามกอล์ฟ, บริเวณโรงเรียน, เกาะกลางถนน และสนามหญ้า บริเวณที่อยู่อาศัย ซึ่งข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์ในด้านนี้ คือ ค่าใช้จ่ายในการวางระบบเพื่อกระจายน้ำ, ฤดูกาลที่ต่างกันทำให้ปริมาณความต้องการน้ำต่างกัน และน้ำหมุนเวียนที่มีปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) สูงจะมีผลกระทบต่อพืช (NRC, 2012) เมือง Tianjin ประเทศจีน

นำน้ำที่ขุ่นมาผ่านกระบวนการ Coagulation -Microfiltration จากนั้นฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนและคลอรีน เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ในการปรับภูมิทัศน์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งกระบวนการนี้สามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ปริมาณ Trihalomethanes ค่อนข้างสูง และจากการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ พบว่า การสัมผัสสาร Trihalomethanes ของคนงานมีความเสี่ยงของการเกิดมะเร็งสูงกว่าประชาชนทั่วไป (Wang et al., 2013) ประเทศสหรัฐอเมริกาบริบทเมือง นำน้ำที่ร้อยละ 85 ของระบบบำบัดน้ำเสียในเมืองดาบูดาบี (อัตราบำบัด 115,000 ลบ.ม./วัน) ใช้ไปในการรดสนามหญ้า และพื้นที่สีเขียวในเมือง อีกร้อยละ 15 ใช้รดเส้นทางสัญจรของอูฐ (คณะอนุกรรมการมาตรฐานการประกอบวิชาชีพ, 2560) เป็นต้น

2.2.2 การนำมาใช้ประโยชน์ในชลประทานเพื่อการเกษตรกรรม (Agricultural Irrigation) เป็นการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำในการทำเกษตร ปัจจุบันทั่วโลกมีการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ในทางเกษตรกรรมมากที่สุด (Jimenez and Asano, 2008) เนื่องจากน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ซึ่งเป็นธาตุที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของพืช เมื่อนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้จึงลดการใช้ปุ๋ยและประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ปริมาณไนโตรเจนที่มากเกินไปจะกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ทำให้คุณภาพของพืชและปริมาณผลผลิตลดลง โดยทั่วไปนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ทั้งในพืชที่ใช้เป็นอาหาร (Food Crops), พืชที่ไม่ใช่อาหาร (Non-Food Crops) และการปศุสัตว์ (Livestock) ซึ่งข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์ในด้านนี้ คือ แหล่งน้ำหมุนเวียนและพื้นที่ในการนำไปใช้ประโยชน์อยู่ห่างไกลกัน, ค่าใช้จ่ายในการวางระบบเพื่อกระจายน้ำ, ฤดูกาลที่ต่างกันทำให้ปริมาณความต้องการน้ำต่างกัน และน้ำหมุนเวียนที่มีปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) สูงจะมีผลกระทบต่อพืช (NRC, 2012) ในรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา มีการส่งเสริมให้มีการนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ประโยชน์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2509 ขณะนี้ มี 63 จาก 67 เขตที่มีการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ โดยมีการนำกลับมาใช้ในการปลูกฝ้าย, ข้าวฟ่าง และข้าวสาลี ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ต่อมา มีการขยายไปยังรัฐต่าง ๆ เช่น Arizona, California, Colorado, Florida, Idaho, North Carolina, Nevada, Texas, Utah, Washington และ Wyoming โดยรัฐที่นำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ปริมาณมากที่สุด คือ California (270 MGD) รองลงมา คือ Florida (256 MGD) (Bryk et al., 2011) และประเทศออสเตรเลีย ได้จัดทำโครงการ Werribee Farm รวมน้ำทิ้งและน้ำเสียจากเทศบาลต่าง ๆ 50 แห่ง ปริมาณ 440,000 ลบ.ม./วัน ทำการบำบัดแบบบ่อฝิ่ง และ Overland Flow นำน้ำเหล่านี้ไปใช้ในการปลูกหญ้าเพื่อเลี้ยงวัวและแกะ ประเทศเม็กซิโกนำน้ำทิ้งจากเมืองเม็กซิโกซิตีปริมาณ 3,800,000 ลบ.ม./วัน ผ่านการบำบัดขั้นต้น (Coagulation-Flocculation) มาใช้ในการเกษตร พื้นที่ประมาณ 560,000 ไร่ ที่หุบเขา Mezquital ปลูกข้าวโพด ข้าวโอ๊ต ถั่ว ฯลฯ (คณะอนุกรรมการมาตรฐานการประกอบวิชาชีพ, 2560) เป็นต้น

2.2.3 การนำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรม (Industrial Uses) น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานโดยทั่วไปคุณภาพน้ำมีความเหมาะสมกับงานอุตสาหกรรมอยู่แล้ว โดยทั่วไปนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวกับหอหล่อเย็น (Cooling Towers), หม้อไอน้ำ (Boiler), การล้าง, การเคลื่อนย้ายวัตถุดิบหรือกระบวนการต่าง ๆ ที่มีการใช้น้ำ (MCES, 2007) ซึ่งข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์ในด้านนี้ คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งน้ำหมุนเวียนและพื้นที่ในการนำไปใช้ประโยชน์,

ค่าใช้จ่ายในการวางระบบส่งน้ำ และคุณภาพของน้ำที่ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ประโยชน์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 มีการนำมาใช้ประโยชน์ในหอหล่อเย็นในโรงงานอุตสาหกรรม และโรงฟ้านิวเคลียร์ ในปี 2004 โรงงานอุตสาหกรรม ประเทศสหรัฐอเมริกา มีกระบวนการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ปริมาณ 1,565 MGD โดยไม่มีการปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (NRC, 2012) เป็นต้น

2.2.4 การนำมาใช้ประโยชน์ในการสันหนากการ (Impoundments) เป็นการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อการสันหนากการ 2 ด้าน คือ น้ำหมุนเวียนที่ต้องสัมผัสกับร่างกาย (Body Contact) เช่น การว่ายน้ำ การดำน้ำและการดูปะการัง เป็นต้น และกรณีที่ไม่สัมผัสร่างกาย (Non-Body Contact) เช่น การตกปลา พายเรือ เป็นต้น ซึ่งข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์ในด้านนี้คือ ค่าใช้จ่ายในการวางระบบส่งน้ำ, ต้องกำจัดสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายและผลกระทบทางนิเวศวิทยาที่ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำหมุนเวียนและความไวในการตอบสนองของสิ่งมีชีวิตแต่ละสายพันธุ์ (NRC, 2012) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา มีการนำน้ำที่มาจากกระบวนการ Coagulation-Flocculation และฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน และนำน้ำหมุนเวียนประมาณ 1.9 MGD ปล่อยลงสู่ทะเลสาบ 7 แห่ง มาใช้ประโยชน์เพื่อสันหนากการ เป็นแหล่งพักผ่อนหย่อนใจ ปิกนิก และพายเรือ (Asano et al., 2007)

2.2.5 การนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเติมน้ำลงใต้ดิน (Groundwater Recharge) น้ำประมาณหนึ่งส่วนสามของน้ำดื่มในประเทศสหรัฐอเมริกามาจากแหล่งน้ำใต้ดิน (Hutson et al., 2000) และเมื่อมีปริมาณความต้องการใช้น้ำสูง แต่ปริมาณฝนต่ำทำให้เกิดการบุกรุกน้ำใต้ดิน จึงเกิดการทรุดตัวของดิน (NRC, 2008) ดังนั้น จึงมีการนำน้ำหมุนเวียนเติมลงใต้ดิน เพื่อป้องกันการทรุดตัวและลดการรุกคืบของน้ำทะเลในพื้นที่ติดทะเล ซึ่งข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์ในด้านนี้คือ ต้องมีความเหมาะสมทางธรณีวิทยา และอาจต้องใช้กระบวนการบำบัดขั้นสูง (NRC, 2012) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 มีการนำน้ำหมุนเวียนมาเติมลงใต้ดิน โดยใช้น้ำทิ้ง 70 MGD ที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นสูง (Microfiltration, Reverse Osmosis และ Advanced oxidation) เพื่อป้องกันการรุกคืบของน้ำทะเลในรัฐแคลิฟอร์เนีย (Crook, 2007)

2.2.6 การนำมาใช้ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Uses) เป็นการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในการสร้างพื้นที่ชุ่มน้ำ, บ่อ สำหรับสัตว์และการประมง ซึ่งข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์ในด้านนี้คือ ต้องกำจัดแอมโมเนียและสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายและผลกระทบทางนิเวศวิทยาที่ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำหมุนเวียนและความไวในการตอบสนองของสิ่งมีชีวิตแต่ละสายพันธุ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการสร้างพื้นที่ชุ่มน้ำ และบ่อสำหรับสัตว์ ของรัฐฟลอริดา รองรับน้ำทิ้งประมาณ 20-35 MGD เป็นที่อยู่อาศัยสำหรับนกที่ใกล้สูญพันธุ์ และสัตว์หลายชนิด สัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ และสัตว์เลื้อยคลาน จึงกลายเป็นแหล่งเรียนรู้ของโรงเรียนในท้องถิ่นและนักดูนก (NRC, 2012)

2.2.7 การนำมาใช้ประโยชน์ในการอุปโภค (Non-Potable Reuse) เป็นการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในห้องน้ำ, ระบบดับเพลิง, ชักผ้า, ล้างรถ, ล้างถนน และน้ำพุ เป็นต้น ซึ่งมีข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์ในด้านนี้คือ ค่าใช้จ่ายสูงในการวางระบบส่งน้ำเพื่อนำไปใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ในปี 2009 รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกานำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในการอุปโภค 33 MDG มีการนำมาใช้ประโยชน์ใน ห้องน้ำ ชักกรีด และ ล้างถนน (NRC, 2012)

ตารางที่ 2.1 การนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

ประเภท	ประเทศ	การใช้ประโยชน์	อ้างอิง
ปรับภูมิทัศน์	USA, China	สนามกอล์ฟ, สวนสาธารณะ, โรงเรียน	Crook (2005), FDEP (2011), Wang et al (2013)
เกษตรกรรม	USA, Greece, Italy, India	ด้านเกษตรกรรม เช่น ฝ้าย, ข้าวฟ่าง, ข้าวสาลี, มะเขือเทศ, ถั่วฝักยาว, ข้าวโพด และมะกอก	FDEP (2006), Marella (2009), Bryk et al (2011), Petousi et al (2015), Aiello et al (2007), Khamisi et al (2013)
อุตสาหกรรม	USA	หอหล่อเย็นในโรงงานอุตสาหกรรม, โรงไฟฟ้านิวเคลียร์	Veil (2007)
สันตนาการ	USA	นำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ในกรณีที่ไม่สัมผัสร่างกาย เช่น การตกปลา พายเรือ	Bryk, et al (2011)
เติมน้ำใต้ดิน	USA	การเติมน้ำใต้ดิน	FDEP (2006), Marella (2009)
สิ่งแวดล้อม	USA	สร้างพื้นที่ชุ่มน้ำ, บ่อสำหรับสัตว์	Bryk, et al (2011)
อุปโภค	USA, China	น้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ในห้องน้ำ, ล้างถนน, ซักรีด	USEPA (2012), FDEP (2011)
บริโภค	USA, Mexico	น้ำประปา	Livingston (2008), FDEP (2006), Marella (2009)

2.2.8 การนำมาใช้ประโยชน์ในการอุปโภค-บริโภค (Potable Reuse) ในประเทศสหรัฐอเมริกา มีการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ในการบริโภคมาเกือบ 50 ปี โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ทางตรง (Direct Potable Reuse) เป็นการส่งน้ำหมุนเวียนเข้าสู่เส้นท่อประปาและนำไปใช้ และทางอ้อม (Indirect Potable Reuse) เป็นการส่งน้ำหมุนเวียนเข้าสู่แหล่งน้ำดิบของประปาหรืออ่างเก็บน้ำที่จะใช้ผลิตน้ำประปา ซึ่งข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์ในด้านนี้ คือ ต้องใช้กระบวนการบำบัดขั้นสูง และต้องการแหล่งเก็บน้ำหลังผ่านกระบวนการบำบัด เป็นต้น ในรัฐเท็กซัส ประเทศสหรัฐอเมริกา มีการปล่อยน้ำหมุนเวียนลงสู่แม่น้ำประมาณ 500 MGD แล้วนำมาผลิตน้ำประปา (NRC, 2012)

ในการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ คุณภาพน้ำต้องมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ในแต่ละด้าน เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำและสิ่งแวดล้อม ซึ่งมาตรฐานการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในแต่ละด้าน แสดงดังตารางที่ 2.2-2.3 โดยมาตรฐานในการนำน้ำมาใช้ประโยชน์ในห้องน้ำ, ล้างถนน, ดับเพลิง, รถน้ำต้นไม้, ล้างรถ และใช้ในงานก่อสร้าง มีมาตรฐานคุณภาพน้ำที่ใกล้เคียงกัน แต่สำหรับการนำมาใช้ประโยชน์ในห้องน้ำและล้างรถมีการกำหนดปริมาณของเหล็กและแมงกานีส เนื่องจากน้ำที่มีเหล็กและแมงกานีสสูงจะทำให้เกิดสีกับเครื่องสุขภัณฑ์ และส่งกลิ่นเหม็นทำให้ไม่เป็นที่พึงพอใจของผู้ใช้น้ำ และส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เช่นเดียวกันกับการนำไปใช้ประโยชน์ด้านเกษตรกรรมที่มีการกำหนดปริมาณโลหะหนัก และจุลชีพ เป็นต้น เนื่องจากเมื่อร่างกายได้รับสัมผัสสิ่งเหล่านี้ อาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพตามมา

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานคุณภาพน้ำหมุนเวียนในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ (Rodrigues, 2002)

Parameters	Units	Toilet Flushing	Road sweeping / Fire control	Urban landscaping	Vehicle washing	Construction
pH	-	6.0-9	6.0-9	6.0-9	6.0-9	6.0-9
Odor	-	No odor				
Turbidity	NTU	5	10	10	5	20
TDS	mg/L	1500	1500	1000	1000	-
BOD ₅	mg/L	10	15	20	10	15
Ammonia-N	mg/L	10	10	20	10	20
Fe	mg/L	0.3	-	-	0.3	-
Mn	mg/L	0.1	-	-	0.3	-
DO	mg/L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Residual Cl ₂	mg/L	Contact 30 min later ≥ 1.0, The endpoint of pipe network ≥ 0.2				
Total coliform	CFU /L	3	3	3	3	3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำหมุนเวียนในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ด้านอุปโภค-บริโภค และด้านเกษตรกรรม (Norton-Brandao, 2013)

Parameters	Units	Water supply	Agricultural Irrigation			
		WHO (2011)	US EPA (2004)	ANZECC (2000)	Spanish Royal Decree (2007)	Italian Decree (2003)
Physical quality						
Conductivity	dS/m	-	-	<0.65; 0.65-1.3; 2.9-5.2 ⁱ	3	-
Sodium (Na)	mg/L	200	-	115-230	-	-
Color	Pt-Co	15	-	-	-	-
Turbidity	NTU	4	-	-	-	-
TDS	mg/L	1000	500-2000	-	-	-
TSS	mg/L	-	-	-	20	10
pH	-	6.5-8.5	6	-	-	6-9.5
Pathogenicity						
<i>E.coli</i>	CFU/100 mL	Not found	-	-	100	100
Fecal coliforms	CFU/100 mL	-	-	-	-	-
Total coliforms	CFU/100 mL	-	0-1000 ^{d,c}	-	-	-
Heavy metals						
Aluminium (Al)	mg/L	0.9	5; 20 ^h	5; 20 ^h	-	1
Arsenic (As)	mg/L	0.01	0.1; 2 ^h	0.1; 2 ^h	0.1	0.02
Cadmium (Cd)	mg/L	0.003	0.01; 0.05 ^h	0.01; 0.05 ^h	0.01	0.005
Chromium (Cr)	mg/L	0.05	0.1; 1 ^h	0.1; 1 ^h	0.1	0.005
Copper (Cu)	mg/L	2	0.2; 5 ^h	0.2; 5 ^h	0.2	1

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำหมุนเวียนในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ด้านอุปโภค-บริโภค และด้านเกษตรกรรม (Norton-Brandao, 2013) (ต่อ)

Parameters	Units	Water supply	Agricultural Irrigation			
		WHO (2011)	US EPA (2004)	ANZECC (2000)	Spanish Royal Decree (2007)	Italian Decree (2003)
Heavy metals						
Chromium (Cr)	mg/L	0.05	0.1; 1 ^h	0.1; 1 ^h	0.1	0.005
Copper (Cu)	mg/L	2	0.2; 5 ^h	0.2; 5 ^h	0.2	1
Iron (Fe)	mg/L	0.3	5; 20 ^h	0.2; 10 ^h	-	2
Manganese (Mn)	mg/L	0.1	0.2; 10 ^h	0.2; 10 ^h	0.2	0.2
Mercury	mg/L	0.006	-	-	-	-
Nickel (Ni)	mg/L	-	0.2; 2 ^h	0.2; 2 ^h	0.2	0.2
Lead (Pb)	mg/L	0.01	5; 10 ^h	2; 5 ^h	-	0.1
Selenium (Se)	mg/L	0.04	0.02; 0.02 ^h	0.02; 0.05 ^h	0.02	0.001
Vanadium (V)	mg/L	-	0.1; 1 ^h	0.1; 0.5 ^h	0.1	0.1
Zinc (Zn)	mg/L	3	2; 10 ^h	2; 5 ^h	-	0.5

หมายเหตุ: a = สำหรับการบริโภคในระดับเล็กน้อยถึงปานกลาง; b = สำหรับการชลประทานบนผิวดินและสปริงเกอร์ตามลำดับ; c = ชลประทานของพืชที่กินดิบ, ธัญพืช และพืชอุตสาหกรรม; d = พืชเศรษฐกิจที่เป็นอาหาร; e = ค่าขึ้นอยู่กับระดับการบำบัดน้ำและชนิดของพืช (กินดิบ) ประเทศสหรัฐอเมริกา; f = ค่าเฉพาะรัฐ New Jersey; g = กำหนดเฉพาะรัฐมิชิแกน; h = การชลประทานในระยะยาวและระยะสั้น; i = พืชที่มีความไวในการตอบสนองสูง ปานกลาง และต่ำ ตามลำดับ; j = พืชกินดิบที่มี และไม่มีการสัมผัส โดยตรงกับน้ำหมุนเวียน ตามลำดับ; k = ความเข้มข้นสูงสุด (mg/L) ซึ่งสามารถทนได้ในระยะเวลา 20 และ 100 ปี; l = การชลประทานเกษตรกรรมจากน้ำหมุนเวียนสัมผัสโดยตรงกับพืชที่กินดิบ

2.3 ระบบการหมุนเวียนน้ำ

การหมุนเวียนน้ำเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งให้มีคุณภาพดีขึ้นจนสามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ใหม่ กระบวนการหมุนเวียนน้ำมีหลายกระบวนการ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นในการเลือกกระบวนการที่เหมาะสม กระบวนการที่นำมาใช้ได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำจนได้น้ำที่สามารถนำมาใช้ใหม่ในลักษณะต่าง ๆ อย่างเหมาะสมและปลอดภัย (ธรรมธร นรพัลลภ, 2557) การเลือกกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำนั้น ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของระบบ, ราคา และการควบคุมระบบ (ทงศักดิ์ วัฒนา, 2555) โดยกระบวนการที่มีการนำมาใช้ในการหมุนเวียนน้ำ มีดังต่อไปนี้

2.3.1 กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation) เป็นกระบวนการลดความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ หรือความขุ่นของน้ำ ทำให้อนุภาคเหล่านี้รวมตัวกันเป็นของแข็งที่มีขนาดใหญ่และหนักขึ้น โดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพร่วมด้วย คือ การกวนเร็วและกวนช้า ข้อดีของระบบ คือ สามารถแยกตะกอนและสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียได้หลายชนิด ปฏิกริยาเกิดขึ้นได้รวดเร็ว การควบคุมดูแลไม่ยุ่งยาก ราคาถูก และสามารถลดการอุดตันของเยื่อกรองได้เมื่อนำมาใช้เป็น Pre-treatment ร่วมกับกระบวนการเมมเบรน แต่สามารถกำจัด Biopolymers เช่น Polysaccharides และ proteins ได้น้อย อาจจะทำให้ pH ของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 จากการศึกษาการนำกระบวนการสร้างและรวมตะกอนมาใช้ในการหมุนเวียนน้ำเสียชุมชนที่มีปริมาณ TSS ต่ำ (การละลายน้ำได้สูง) และปริมาณวัตถุอินทรีย์ละลายน้ำสูง (DOM) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโปรตีน พบว่า สามารถกำจัด DOC และ TSS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดเนื่องจากปริมาณของโปรตีน และ Polysaccharide ยังคงสูงถึง 1.6 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (Cui et al., 2016)

2.3.2 Activated Carbon เป็นกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้หลักการดูดซับ (Adsorption) และดูดซึม (Absorption) โดยยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ส่วนกระบวนการดูดซับนั้น จะอาศัยหลักการแพร่ของก๊าซหรือสารประกอบเข้าไปในร่างแหรูพรุนภายในเม็ดถ่าน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ, เคมี, หนัง, ยา และอุตสาหกรรมอาหาร แต่มีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อขยายขนาดไปใช้จริง และมีการนำกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มาใช้ร่วมกับกระบวนการ Ultrafiltration เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ขนาดเล็กในการหมุนเวียนน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ สิ่งปนเปื้อนจากน้ำทิ้งโรงงาน (DOC 8.8 ± 1.2 มิลลิกรัม/ลิตร) ใช้ถ่านกัมมันต์แบบผง 20 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถกำจัดได้ร้อยละ 60-95 และใช้ถ่านกัมมันต์แบบผง 13 มิลลิกรัม/ลิตร (DOC 7.3 ± 1.9 มิลลิกรัม/ลิตร) สามารถกำจัดได้ร้อยละ 70 และสามารถลดการอุดตันของเมมเบรนได้ (Shanmuganathan, 2017)

2.3.3 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration: MF) เป็นกระบวนการแยกสารละลายโดยใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนในช่วง 0.1-10 ไมโครเมตร โดยใช้ความดันอยู่ในช่วง 100-500 kPa โดยทั่วไปใช้แยกสารละลายที่มีโมเลกุลใหญ่ ๆ เช่น คอลลอยด์ และสารแขวนลอย หรือสารที่มีอนุภาคเล็ก ๆ ออกจากของเหลว เป็นต้น ประเทศตุรกี ได้มีการนำน้ำทิ้งที่ผ่านการกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัส มาผ่านกระบวนการเมมเบรน (MF หรือ UF ตามด้วย RO) และฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวี น้ำที่ผ่านการหมุนเวียนแล้วที่มีคุณภาพสูงสามารถนำไปใช้งานได้ทั้งด้านอุตสาหกรรม และครัวเรือน

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบการหมุนเวียนน้ำประเภทต่าง ๆ

ระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
Coagulation-Flocculation	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถแยกตะกอนและสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียได้หลายชนิด - การควบคุมดูแลไม่ยุ่งยาก - สามารถลดการอุดตันของเยื่อกรองได้เมื่อนำมาใช้เป็น Pre-treatment - ราคาถูก 	<ul style="list-style-type: none"> - ทำให้ pH ของน้ำเปลี่ยนแปลง - บางกรณีใช้สารส้มสูงจึงจะตกตะกอน 	<p>Yu et al (2016) Huang et al (2007) Laabs et al (2006) Listiarini et al (2009)</p>
Activated Carbon	<ul style="list-style-type: none"> - การควบคุมและบำรุงรักษาง่าย สามารถดูดซับสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นได้ - มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ 	การนำกลับมาใช้ใหม่ต้องมีการฟื้นฟู	ETPC (2009)
Membrane Filtration	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถกำจัดเชื้อโรค สารที่มีประจุ และโลหะหนักได้พร้อม ๆ กัน - มีขนาดกะทัดรัดไม่เปลืองเนื้อที่ ไม่ต้องใช้สารเคมีในการแยกสารละลาย ใช้เวลาสั้น มีประสิทธิภาพในการกำจัด ดังนี้ -MF แบบที่เรียย คอลลอยด์ โปรโตซัว -UF แบบที่เรียย คอลลอยด์ โปรโตซัว ไวรัส สารละลายน้ำขนาด 10-500 kDa -NF แบบที่เรียย คอลลอยด์ โปรโตซัว ไวรัส สารละลายน้ำขนาด 200-200 kDa และเกลือประจุบวกสอง -RO แบบที่เรียย คอลลอยด์ โปรโตซัว ไวรัส เกลือประจุบวกสอง และไอออนละลายน้ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้นทุนในการลงทุนสูง, ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง -MF ไม่สามารถกำจัดไวรัสที่มีผลกระทบต่อสุขภาพได้ 	<p>Oron et al (2008) Chang et al (2005) Lazarova et al (1999) Matsushita et al (2005)</p>

2.3.4 อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration: UF) เป็นกระบวนการแยกสารละลาย โดยใช้เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนในช่วง 2-200 นาโนเมตร โดยใช้ความดันอยู่ในช่วง 100-800 kPa ปัจจุบันมีการประยุกต์ในงานที่หลากหลาย เช่น กระบวนการผลิตน้ำประปา กระบวนการบำบัดน้ำทิ้ง การทำน้ำผลไม้ให้ใส การแยกสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน เอนไซม์ แป้ง ออกจากน้ำ เป็นต้น กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันถูกนำมาใช้ในการหมุนเวียนน้ำทิ้ง เพื่อกำจัดจุลชีพที่มีผลกระทบต่อสุขภาพ ซึ่งสามารถกำจัดไวรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อใช้ร่วมกับกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Lee et al., 2017)

2.3.5 นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration: NF) เป็นกระบวนการที่ใช้แยกตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 1000 ดาร์ตัน ออกจากสารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยช่วงความดันที่ใช้คือ 1-2 MPa ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น การเก็บเกี่ยวโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharides) จากน้ำทิ้งโรงงานถั่วเหลือง การเก็บเกี่ยวสีย้อมผ้าจากน้ำทิ้ง การผลิตน้ำดื่มจากน้ำกร่อย หรือระบบบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรม เป็นต้น นาโนฟิลเตรชันเป็นกระบวนการเมมเบรนที่นำมาใช้ เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนที่เป็นพิษ เช่น ไอออนโลหะหนัก จากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (Dasgupta et al., 2015)

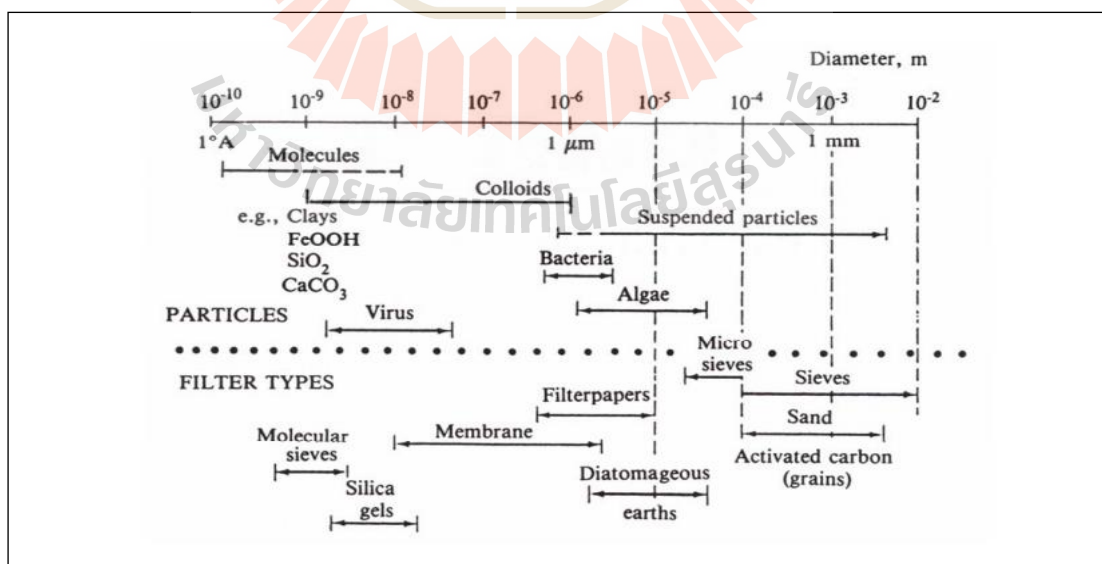
2.3.6 ออสโมซิสผันทกลับ (Reverse Osmosis: RO) เป็นกระบวนการกรองแยกน้ำและสารละลายบางชนิดออกจากสารละลายเข้มข้น โดยอาศัยแผ่นเยื่อบางมีโครงสร้างแบบแน่น หรือไม่มีรูพรุน โดยใช้ความดันสูงในการทำงานประมาณ 1-10 MPa ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานในการผลิตน้ำให้บริสุทธิ์ เช่น การผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเล โดยการแยกน้ำออกจากสารละลายเกลือ ระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์จากน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อนำน้ำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิต เป็นต้น กระบวนการ RO มีประสิทธิภาพในการแยกสารอินทรีย์ที่มีขี้และไม่มีขี้ เกลือ เชื้อโรค และสารอาหารพร้อม ๆ กัน ดังนั้นสารอาหารที่มีคุณค่าสำหรับพืชจะถูกกำจัดออกจากน้ำทิ้ง แต่สามารถลดปริมาณการนำไฟฟ้า (EC) จากน้ำหมุนเวียนได้ ซึ่งเป็นการลดหรือหลีกเลี่ยงความเสียหายต่อพืช (Norton-Brandao., 2013)

ในแต่ละระบบของการหมุนเวียนน้ำจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป โดยในการเลือกระบบในการหมุนเวียนน้ำจำเป็นต้องคำนึงถึงจุดนี้ด้วย เพื่อให้สามารถเลือกใช้ระบบที่มีความเหมาะสมกับความต้องการทั้งด้านคุณภาพน้ำ ราคา พื้นที่ในการสร้างระบบ รวมถึงความรู้ความสามารถของบุคลากรในการควบคุมระบบ ซึ่งข้อดีข้อเสียของแต่ละระบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาระบบหมุนเวียนน้ำ 3 ระบบ คือ Coagulation-Flocculation เนื่องจากเป็นระบบที่ง่าย การควบคุมดูแลไม่ยุ่งยาก และราคาถูก แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดที่ไม่สามารถกำจัดเชื้อไวรัสที่มีผลกระทบต่อสุขภาพได้ทำให้น้ำหมุนเวียนจากระบบนี้ไม่ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง จึงมีการศึกษาระบบการหมุนเวียนน้ำด้วยระบบ Ultrafiltration เนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถกำจัดเชื้อจุลชีพที่มีผลกระทบต่อสุขภาพได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย แต่เป็นระบบที่มีราคาแพง มีปัญหาในเรื่องของการอุดตัน ดังนั้น จึงนำระบบ Coagulation-Flocculation มาเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบ Ultrafiltration เพื่อลดปัญหาของการอุดตันและเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการล้างทำความสะอาด นอกจากนี้การใช้ระบบ Coagulation-Flocculation ร่วมกับระบบ MF และ UF เพื่อกำจัดไวรัสในการผลิตน้ำดื่ม พบว่า มีประสิทธิภาพ ในการลดสี และ

ไวรัส ในน้ำดื่มได้ (Fiksdal and Leiknes, 2006) แต่เนื่องด้วยค่าใช้จ่าย ประสิทธิภาพ และคุณภาพ น้ำที่นำไปใช้ประโยชน์ของแต่ละระบบแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีการประเมินทางเลือกในการ หมุนเวียนน้ำ เพื่อให้สามารถนำน้ำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม

2.4 กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation)

โดยทั่วไปน้ำทิ้งมีลักษณะบางประการที่ไม่พึงประสงค์ ได้แก่ ความขุ่นหรือสารแขวนลอย ถ้าสามารถกำจัดออกไปได้จะทำให้น้ำมีความน่าใช้มากขึ้น ความขุ่นของน้ำสามารถกำจัดได้ง่ายหรือ ยากนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค เช่น ความขุ่นที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่จะสามารถกำจัดออกไป ได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กเรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particle) โดยทั่วไปความขุ่นจะมีขนาดอนุภาคต่าง ๆ อยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เช่น ไวรัสมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร ถึง 0.1 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กจนไม่สามารถ ตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาที่จำกัด และอนุภาคคอลลอยด์ยังสามารถแบ่งตาม ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำได้ ตัวอย่างอนุภาคที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น ดินเหนียว ทอง และโลหะอื่น ๆ อนุภาคที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เช่น โปรตีน สบู่ และผงซักฟอก เป็นต้น ซึ่งอนุภาค ที่ไม่ชอบน้ำสามารถแยกตัวออกจากน้ำได้ง่ายกว่าอนุภาคที่ชอบน้ำ เนื่องจากอนุภาคที่ชอบน้ำมี โมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่เป็นเหมือนสิ่งกีดขวางที่ป้องกันไม่ให้อนุภาคต่าง ๆ เข้าใกล้และจับตัวกัน ซึ่ง ในน้ำผิวดินความขุ่นที่เกิดขึ้น เกิดจากอนุภาคของดินเหนียว ซึ่งเป็นอนุภาคแบบไม่ชอบน้ำที่มีประจุ ลบ อนุภาคประจุบวกมักเป็นสารอินทรีย์ซึ่งเป็นอนุภาคแบบชอบน้ำ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ด้วย เหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องอาศัยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเพื่อช่วยในการตกตะกอน ซึ่งมี รายละเอียดของกระบวนการดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 การจำแนกขนาดของสารต่าง ๆ ในน้ำ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.4.1 หลักการสร้างและรวมตะกอน

กระบวนการสร้างและรวมตะกอน คือ การทำให้คอลลอยด์หรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารแขวนลอยมีประจุเป็นลบ จึงเกิดการผลักกัน ไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นจึงต้องสะเทินประจุของอนุภาคเหล่านั้น ขั้นตอนในการสร้างและรวมตะกอน มีดังนี้

-การสร้างตะกอน (Coagulation) เป็นกระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ (Destabilization) เพื่อให้คอลลอยด์รวมตัวและจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อก (Floc) ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดแรงผลักระหว่างอนุภาค โดยการเติมสารเคมี เช่น สารส้ม สารประกอบเหล็กบางตัว เพื่อสะเทินประจุหรือยึดจับกับอนุภาคในน้ำ พร้อมกับการกวนผสมอย่างรวดเร็วเพื่อกระจายสารสร้างตะกอนให้ทั่วถึงการสร้างตะกอนเกิดขึ้นได้ด้วยการเติมสารเคมีที่ เรียกว่า สารสร้างตะกอน (Coagulant) การเติมสารสร้างตะกอนด้วยความเข้มข้นและปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ดังนั้น จำเป็นต้องทำการทดสอบเพื่อหาชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม ซึ่งเรียกการทดลองนี้ว่า Jar Test (เกรียงศักดิ์ อุตมสินโรจน์, 2541)

-การรวมตะกอน (Flocculation) เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจากกระบวนการสร้างตะกอน เคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกัน เพื่อรวมตัวเป็นกลุ่มตะกอนขนาดใหญ่ที่สามารถตกตะกอนได้ง่าย แต่หากมีการสัมผัสระหว่างอนุภาคแต่ไม่จับตัวกันไม่ถือว่าเป็นการรวมตะกอน

กลไกของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ที่ทำให้คอลลอยด์หรือสารแขวนลอยรวมตัวกัน และตกตะกอนออกจากน้ำ คือ

1) ทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์

การเติมสารเคมีที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค ทำให้ความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) ลดลง และทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิวบนสุดของอนุภาคลดลง อนุภาคคอลลอยด์เกิดการรวมตัว และแยกตัวออกจากน้ำได้

2) กลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization)

สารเคมีบางชนิดสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุไฟฟ้าที่ตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในการลดค่าศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ซึ่งแตกต่างจากกลไกแรกเนื่องจากกลไกแรกจะไม่เกิดการดูดติดผิวที่อนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งกลไกการดูดติดผิวต้องการประจุที่ต่างจากอนุภาคคอลลอยด์น้อยกว่าแบบแรก เนื่องจากประจุสามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้ การลดค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคจึงได้ผลดีกว่าประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้ กลไกการดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิม ซึ่งเกิดจากการให้สารตกตะกอนมากเกินไป ทำให้คอลลอยด์กลับมามีเสถียรภาพ

3) กลไกการสร้างผลึกเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation)

เมื่อเติมสารประกอบเกลือของโลหะไปในน้ำในปริมาณที่เพียงพอจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวเพื่อให้ผลึกมีขนาดใหญ่ หรืออาจจับตัวรวมกับผลึก ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้ถือเป็นการเพิ่มขนาดและน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ส่งผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้

เนื่องจากกลไกนี้ต้องอาศัยปริมาณของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม ซึ่งแปรผกผันกับปริมาณของคอลลอยด์ คือ น้ำที่มีปริมาณความขุ่นน้อยต้องใช้สารสร้างตะกอนปริมาณมากจึงจะตกตะกอนได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้สารตกตะกอนน้อยกว่า สาเหตุเกิดจากน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้น แม้จะมีการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แล้วแต่การตกตะกอนอาจเกิดขึ้นได้ไม่ดี จึงต้องให้สารตกตะกอนในปริมาณมากเพื่อสร้างผลึกจำนวนมาก ในการเป็นเป่าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูงโอกาสในการสัมผัสกันของอนุภาคมีสูง จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยสารตกตะกอนในปริมาณมาก

กลไกนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การตกตะกอนจึงไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นในขณะที่ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุด แต่สำหรับกลไกนี้ค่า pH มีความสำคัญมาก เนื่องจากมีความสัมพันธ์ระหว่าง pH และความสามารถในการตกผลึกของสารชนิดต่าง ๆ สารสร้างตะกอนแต่ละตัวจะมีค่า pH ที่เหมาะสมแตกต่างกัน ซึ่งในการผลิตน้ำประปามักทำให้เกิดกลไก Sweep Coagulation

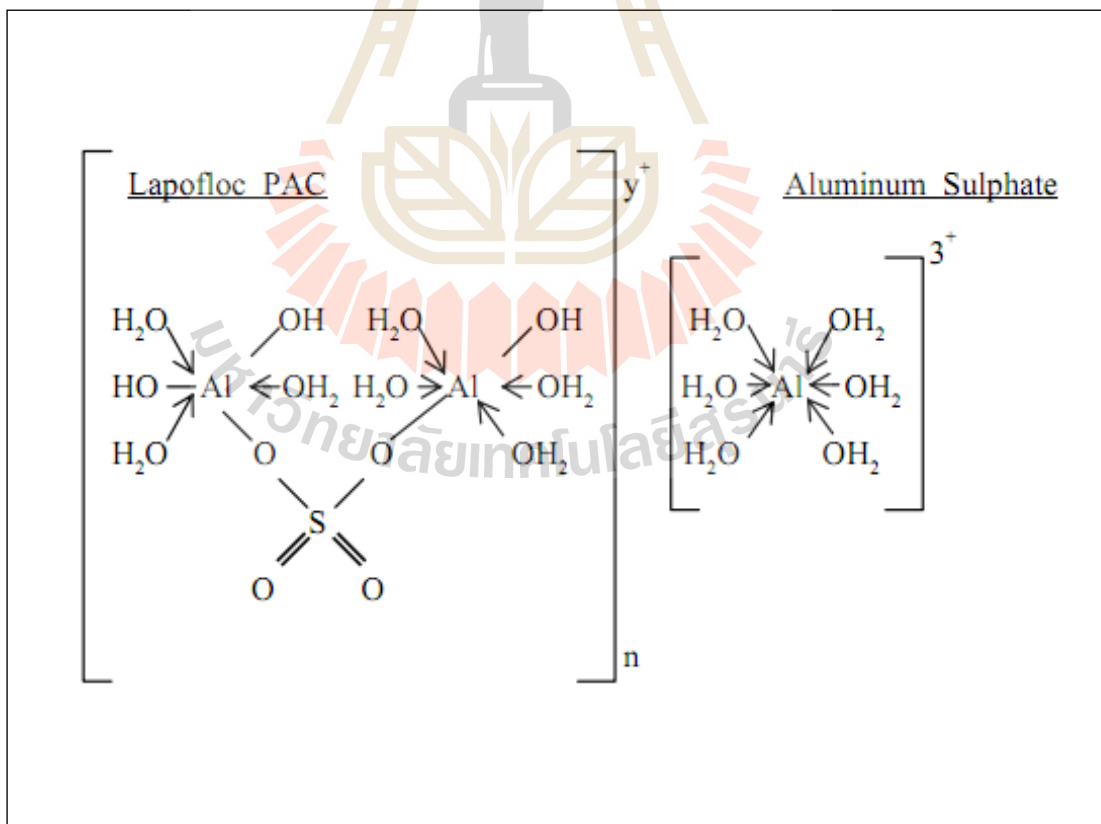
4) กลไกสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)

สารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิด เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาลและโปรตีนบางชนิดรวมทั้งสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถใช้เป็นสารในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ได้ สารเหล่านี้มีอนุภาคขนาดใหญ่มาก ประจุไฟฟ้าอาจเป็นได้ทั้งประจุบวก ลบ หรือไม่มีประจุก็ได้ซึ่งโมเลกุลของโพลีเมอร์จะเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกัน อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่นถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว อนุภาคดังกล่าวที่สามารถจับกับอนุภาคอื่น ๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมจะเกิดขึ้นได้ตลอดหากยังมีโพลีเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค หากใช้โพลีเมอร์ในปริมาณมากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะที่อนุภาคของคอลลอยด์ จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคคอลลอยด์ในการจับกับโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคคอลลอยด์อื่น ๆ อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบที่มีเสถียรภาพ การกวนน้ำแรงหรือนานเกินไปอาจทำให้ Floc ที่เกิดขึ้นแตกออกและทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิม เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับมาอีก (มันสิน ตันตุลเวศม์, 2542)

2.4.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

1) สารสร้างตะกอน ในปัจจุบันสารสร้างตะกอน แบ่งเป็นหลายกลุ่มด้วยกัน แต่ที่นิยมนำมาใช้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Aluminium Sulphate [$\text{Al}(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$] หรือ สารส้ม (Alum), Sodium Aluminium , Polyaluminium Chloride (PACl) เป็นต้น และ กลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Ferric Sulphate (FeSO_4), Ferric Sulphate [$\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$], Ferric Chloride (FeCl_3) เป็นต้น สารสร้างตะกอนกลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ทำให้การจับตัวของ Floc แน่น และทำงานได้ดีที่ pH สูง จึงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการปรับ pH ส่วนสารสร้างตะกอนกลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสามารถทำงานได้ดีในช่วง pH 5.5-8.0 แต่มีการจับตัวกันของ Floc ไม่แน่น ซึ่ง PACl มีความสามารถในการสร้าง Floc, ตกตะกอน และประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นดีกว่า Alum ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ดังนั้น ในการเลือกใช้สาร

สร้างตะกอนต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมตามลักษณะคุณภาพน้ำ ในการศึกษาเลือกใช้ PACl เนื่องจากเป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา และลักษณะคุณภาพน้ำที่นำมาผ่านกระบวนการหมุนเวียนอยู่ในช่วง pH ที่เหมาะสมในการทำงานของ PACl ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพื่อปรับสภาพน้ำให้มีความเหมาะสม โดย PACl เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้ในประเทศญี่ปุ่นและบางประเทศในทวีปยุโรปตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมา PACl ถูกเตรียมขึ้น โดยอลูมิเนียมที่เป็น Al_2O_3 ทำปฏิกิริยากับ HCl ที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดเป็น $AlCl_3$ แล้วทำปฏิกิริยาต่อดัวย่างที่อุณหภูมิและความดันสูงเพื่อให้รวมตัวกันเป็นอลูมิเนียมโพลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ซึ่งเมื่อเติมสารส้มลงไปในการละลายนี้ สารส้มจะไปลดความเข้มข้นของ Al_2O_3 ให้เหลือ 10-11% และเติมซัลเฟตลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอลูมิเนียม 2 อะตอม สูตรโดยทั่วไป คือ $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$ ดังรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACl (Hundt and O' Melia, 1988; Virarahavan and Wimmer, 1988) จากการศึกษา พบว่าประสิทธิภาพของการกำจัดสารหนูของ PACl > Polyaluminum Sulfate > Aluminum Chloride > Aluminum Sulfate (Bratby, 2006) พบว่า PACl มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ดีกว่า Aluminum Chloride (Cui et al., 2016) และจากการศึกษาของ Rizzo et al. (2005) พบว่า PACl สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีกว่า Alum และ $FeCl_3$



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACl และ Alum

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของสารสร้างตะกอน (สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ, 2554)

สารสร้างตะกอน	ข้อดี	ข้อเสีย
กลุ่มที่มีลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ		
Alum	-ราคาไม่แพง -มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดความขุ่น -การกัดกร่อนน้อย	-การรวมตัวของ Floc ไม่แน่น -pH > 8 ไม่มีประสิทธิภาพ
PACl	-การสร้าง Floc และตกตะกอนดีกว่า Alum -ใช้ได้กับน้ำที่ pH กว้างกว่า Alum โดยเฉพาะที่ pH น้อยกว่า 5.5 หรือมากกว่า 7 -ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นดีกว่า - pH หลังการบำบัดไม่ต่ำเหมือนใช้ Alum	- pH > 8 ไม่มีประสิทธิภาพ
กลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ		
Ferrous Sulphate	-ราคาไม่แพง -การรวมตัวของ Floc แน่น	-ต้องปรับ pH ด้วยปูนขาว ให้ช่วง pH เหมาะสม ทำให้มีประสิทธิภาพ
Ferric Sulphate	-การจับตัวของ Floc แน่น -ทำงานได้ดีในช่วง pH ที่เป็นด่าง	-ต้องมีการปรับ pH ด้วยปูนขาว -มีฤทธิ์กัดกร่อนและแพง
Ferric Chloride	-การจับตัวของ Floc แน่น -ทำงานได้ดีในช่วง pH ที่เป็นด่าง	-ต้องมีการปรับ pH ด้วยปูนขาว -มีฤทธิ์กัดกร่อนและแพง

2) สารเคมีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน (Coagulant Aids or Polyelectrolytes) ในปัจจุบันสารช่วยสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ สารโพลีเมอร์ โดยสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ โพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Polymer) เช่น เซลลูโลส, เจลาติน, แป้ง เป็นต้น และโพลีเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ (Synthetic Polymer) โดยการนำ โมโนเมอร์หนึ่งหรือสองชนิดมารวมกันซึ่งสามารถจัดสารสังเคราะห์ขึ้นได้ตามต้องการ โดยสามารถทำให้มีขนาดแตกต่างกันทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่าง และยังสามารถจัดการเกี่ยวกับโครงสร้างของ โพลีเมอร์ให้เป็นเส้นตรงหรือกิ่งสาขาได้ โพลีเมอร์บางครั้งเรียกว่า โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolytes) เมื่อพิจารณาถึงประจุที่มีอยู่บนสายโพลีเมอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

- Anionic Polymer เป็นโพลีเมอร์ที่มีประจุเป็นลบ เช่น Polyacryamide
- Cationic Polymer เป็นโพลีเมอร์ที่มีประจุเป็นบวก เช่น Polyamide
- Nonionic Polymer เป็นโพลีเมอร์ที่ไม่มีประจุ เช่น แป้ง

โพลีเมอร์เป็นสารเคมีที่นำมาใช้ได้หลายวัตถุประสงค์ แต่ที่สำคัญคือใช้เป็นสารช่วยเร่งให้สร้างตะกอน ซึ่งโพลีเมอร์มีโครงสร้างเป็นสายยาวเมื่อเติมลงไปในระบบการสร้างตะกอน โพลีเมอร์จะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมให้กลุ่มตะกอนเคลื่อนที่มาสัมผัสและรวมกันตกตะกอนลงมาเร็วขึ้น แต่หากเติมในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์กลับคืนมาสู่สถานะเสถียรอีกครั้ง (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2556; วาลิกา ภาณุพินทุ, 2557) โพลีเมอร์เป็นสารช่วยสร้างตะกอนที่นิยมใช้เนื่องจากช่วยลดปริมาตรตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบการบำบัดได้ ทำให้ได้กลุ่มตะกอนที่มีขนาดเล็กและแน่น ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบน้อย (Oladoja, 2016)

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างและรวมตะกอน

ในระบบการสร้างและรวมตะกอนจะดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้ (วาลิกา ภาณุพินทุ, 2557; Bratby, 2006)

1) อุณหภูมิ มีผลต่อความหนืดของน้ำ คือ อุณหภูมิต่ำความหนืดสูง ทำให้อัตราการตกตะกอนช้าลงเพราะการรวมตัวเกิดกลุ่มก้อนช้า และอุณหภูมิสูงความหนืดต่ำ ทำให้อัตราการตกตะกอนได้ดีเพราะการรวมตัวเกิดกลุ่มก้อนเร็ว จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการรวมตัวกันของตะกอนดินเหนียวในการผลิตน้ำประปา โดยใช้ Alum, Ferric Sulphate และ PACl เป็นสารสร้างตะกอน ที่อุณหภูมิระหว่าง 6-29 องศาเซลเซียส พบว่า Floc เกิดขึ้นได้ช้าที่อุณหภูมิต่ำ ในทุกอุณหภูมิการใช้ PACl เป็นสารสร้างตะกอนจะทำให้เกิด Floc ใหญ่สุด รองลงมา คือ Ferric Sulphate และ Alum (Fitzpatrick et al., 2004) และจากการศึกษาอุณหภูมิในช่วง 4-18 องศาเซลเซียส ของ Guan และคณะ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Guan et al., 2011)

2) คุณสมบัติและชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีสภาพเป็นประจุบวกหรือประจุลบหรือเป็นคอลลอยด์ประเภทที่ไม่ชอบน้ำ จะมีโอกาสถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายกว่าประเภทที่ชอบน้ำ หากทราบชนิดของคอลลอยด์ จะช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้สารที่ช่วยในการตกตะกอนได้อย่างเหมาะสม โดยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ประมาณร้อยละ 30-60 โดยเฉพาะสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Ghernaout, 2014)

3) ปริมาณของคอลลอยด์ในน้ำ ถ้าน้ำมีปริมาณคอลลอยด์มากจะตกตะกอนได้ดีกว่าและใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณที่น้อยกว่าน้ำที่มีปริมาณคอลลอยด์น้อย เพราะน้ำที่มีความเข้มข้นสูงอนุภาคจะมีโอกาสสัมผัสกันได้ง่าย (วาลิกา ภาณุพินทุ, 2557)

4) ค่า pH ของน้ำที่เหมาะสม เนื่องจากการสร้างตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่ pH ต่างกัน ดังนั้น จึงต้องมีการหาค่า pH ของน้ำก่อนเพื่อปรับสภาพการตกตะกอน ถ้าปฏิกิริยาไม่เกิดใน pH ที่เหมาะสมจะทำให้ผลการตกตะกอนที่เกิดขึ้นไม่ดีและเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมี อีกทั้งยังทำให้คุณภาพน้ำไม่ดีเท่าที่ควร โดยทั่วไปการใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน จะให้ผลดีในน้ำที่มี pH อยู่ในช่วง 6-7 , $FeCl_3$ ให้ผลดีในช่วง pH อยู่ในช่วง 5-7 และอลูมิเนียมซัลเฟตให้ผลดีในช่วง 5.0-5.5 และจากการศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสารหนูโดยใช้ PACl เป็นสารสร้างตะกอน พบว่า ที่ pH 5.5 มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ ร้อยละ 59-99 (Bratby, 2006) และช่วง pH มีค่าอยู่ระหว่าง 6.0 - 9.0 สามารถกำจัดความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Guan et al., 2011)

จากการศึกษาผลของ pH ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) โดยใช้ Alum เป็นสารสร้างตะกอน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด NOM เพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่า pH เท่ากับ 5.2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 45 หลังจากนั้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 7.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเป็นร้อยละ 35 (Qin et al., 2006) และพบว่าที่ pH 6.0 สามารถบำบัด NOM ได้ดีที่สุด (Kabsch-Korbutowicz, 2005) จากงานวิจัยของ Wei et al. (2015) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PACl จะแตกตัวมีผลทำให้ pH ของน้ำลดลงเรื่อย ๆ ซึ่ง pH ของน้ำเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการแตกตัวของ PACl โดยเมื่อ pH ลดลงส่งผลให้ไม่สามารถเกิดตะกอน $Al(OH)_3$ ที่จะทำให้เกิดกลไก Sweep Coagulation ในการตกตะกอนคอลลอยด์และเมื่อมีการเติม PACl ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่า pH ของน้ำลดลงเท่ากับ 4.5 PACl จะไม่สามารถแตกตัวได้อนุภาคคอลลอยด์จึงตกตะกอนได้ไม่ดีทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ ช่วง pH ที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนของสารสร้างตะกอนแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.6

5) ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำ ปฏิกริยาเคมีที่เกิดในกระบวนการสร้างตะกอนจะสมบูรณ์ได้นั้นต้องอาศัยส่วนประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในน้ำที่สำคัญ ได้แก่ สภาพความเป็นต่างในน้ำ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ต้านทานการเปลี่ยนแปลงของ pH สำหรับสารสร้างตะกอนบางตัวเพื่อให้ปฏิกริยาในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น กระบวนการสร้างและรวมตะกอน จำเป็นต้องมีสภาวะการทำงานที่เหมาะสม สารสร้างตะกอนกลุ่มที่มีเหล็กหรืออลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ ไม่สามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่เป็นต่าง (Amundsen et al., 2013)

6) คุณสมบัติและชนิดของสารที่ใช้ในการสร้างตะกอน ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับคอลลอยด์แต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ตลอดจนคุณสมบัติของการตกตะกอนและปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นในน้ำ ลักษณะของกลุ่มก้อน ความเร็วของการตกตะกอน ราคา ความยากง่ายในการใช้งาน การเลือกชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีมาเป็นสารสร้างตะกอนพิจารณาได้จากคุณสมบัติของน้ำ เสีย ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกใช้งานให้เหมาะสมระหว่างชนิดของคอลลอยด์และสารสร้างตะกอน จากการศึกษา Coagulation-Flocculation+Microfiltration พบว่า ปริมาณสารสร้างตะกอนที่สูงสามารถกำจัดไวรัสได้มากขึ้น (Matsushita et al., 2004) ประสิทธิภาพของการกำจัดสารหนูของ PACl > Polyaluminum Sulfate > Aluminum Chloride > Aluminum Sulfate (Bratby, 2006) และ PACl มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ในขณะที่ Aluminum Chloride มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส (Cui et al., 2016) จากการศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำของประเทศอิตาลี พบว่า PACl สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีกว่า Alum และ $FeCl_3$ (Rizzo et al., 2005)

ตารางที่ 2.6 ช่วง pH ที่เหมาะสมสำหรับสารสร้างตะกอนชนิดต่าง ๆ (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2556)

สารสร้างตะกอน	ช่วง pH ที่เหมาะสม
Alum	4.0-7.0
PACl	5.5-8.0
Ferrous sulphate	8.5 และ สูงกว่า
Ferric chloride	3.5-6.5 และสูงกว่า 8.5
Ferric sulphate	3.5-7.0 และสูงกว่า 9.0

7) เวลาและการกวนผสมเพื่อให้สารเคมีมีการกระจายตัว ทำให้เกิดการปั่นป่วนขึ้นในน้ำ ในช่วงแรกต้องทำการกวนเร็ว ในขณะที่มีการเติมสารเคมีช่วยในการตกตะกอน เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวในน้ำได้อย่างทั่วถึงและยังเป็นการเพิ่มอัตราการชนกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับสารเคมีให้มากขึ้น โอกาสที่อนุภาคคอลลอยด์จะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนก็จะเพิ่มขึ้น ส่วนการกวนช้ามีวัตถุประสงค์เพื่อให้กลุ่มก้อนเล็ก ๆ จากการกวนเร็วมีโอกาสที่จะสัมผัสกันและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Matsushita et al., 2005) จากการศึกษาผลของความเร็วในการสร้างและรวมตะกอน โดยเปรียบเทียบความเร็วรอบ 2 สภาวะ คือ กวนเร็ว-กวนช้า 100-30 และ 80-20 รอบต่อ นาที พบว่า การกวนเร็ว-กวนช้า ที่ 100-30 รอบต่อนาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ดีกว่า (Saritha et al., 2017)

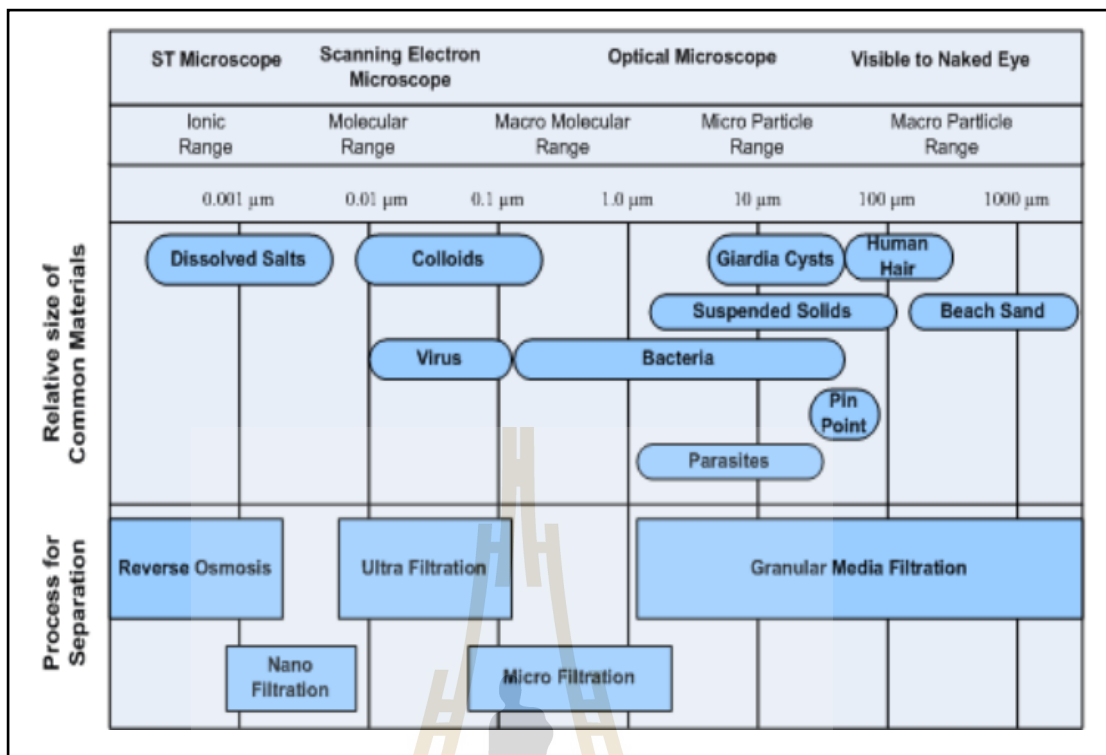
2.5 เทคโนโลยีเมมเบรน

ในปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการเมมเบรนเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมมากมาย รวมทั้งใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย หลักการพื้นฐานในระบบการแยกความแตกต่างขึ้นอยู่กับขนาดของเมมเบรน และขนาดของอนุภาคที่จะถูกแยก การแบ่งประเภทขึ้นอยู่กับขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่สามารถแยกได้ ความสามารถในการแยกสารของเมมเบรนขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุน (Pore size) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ความสามารถในการกรองของเมมเบรนชนิดต่าง ๆ หรือการคัดสรรด้วยน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Cut-off) ของเมมเบรน โดยอาศัยกลไก 2 ชนิด คือ การกรองติดค้าง (Sieve Effect) และการแพร่ผ่าน (Diffusion Effect) ซึ่งสามารถนำไปใช้เพิ่มความเข้มข้นหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น หลักการทำงานของกระบวนการเมมเบรน จะต้องมีความเข้มข้นที่ทำให้สารละลายไหลผ่านและเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้น ผลต่างของความดัน ซึ่งมีรายละเอียดของกระบวนการดังต่อไปนี้

2.5.1 หลักการของกระบวนการเมมเบรน

กระบวนการเมมเบรนจะต้องมีความเข้มข้นที่ทำให้สารละลายไหลผ่านแผ่นเมมเบรนและเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้น หรือผลต่างของความดัน ซึ่งใช้เมมเบรนนี้จะแตกต่างจากการกรองแบบธรรมดาโดยมีทิศทางไหลที่ต่างกัน ทำให้การกรองแบบธรรมดามีการอุดตันของอนุภาคเร็วกว่าการกรองผ่านเมมเบรน ซึ่งลักษณะที่สำคัญของแผ่นเมมเบรน คือ มีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมี หรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากการมีความตึงเครียดระหว่างแผ่นเมมเบรนกับสารนั้น ๆ หรือจากขนาดของรูพรุน หรือจากการมีประจุของเมมเบรน เป็นต้น ในการประยุกต์ใช้เมมเบรนสำหรับการแยกอนุภาคและโมเลกุลนั้น จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมและตรงตามคุณสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 โดยสามารถแบ่งประเภทของเมมเบรนได้ดังนี้

1) ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration: MF) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองที่มีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ขนาด 50-1000 nm เพื่อแยกอนุภาคขนาดไมครอนหรือเล็กกว่าไมครอน ซึ่งสามารถแยกอนุภาคแขวนลอยและจุลชีพออกจากของเหลว น้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 300,000 ดาร์ตัน แรงขับเคลื่อนที่ใช้อยู่ระหว่าง 100-500 kPa (1-5 atm) ใช้สำหรับกำจัดสารแขวนลอยที่เป็นสาเหตุความขุ่นของน้ำแบบที่เรียกทั่วไป แต่ไม่สามารถกำจัดไวรัสและสารละลายน้ำได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ชนิดของเยื่อ



รูปที่ 2.3 ความสามารถในการกรองของเมมเบรนแต่ละชนิด (นิตพันธ์ ณ พัทลุง, 2552)

กรองที่ใช้โดยทั่วไป เช่น Cellulose Acetate, Polysulfone และ Polystyrene เป็นต้น การใช้งานเหมาะสำหรับใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม และเทคโนโลยีชีวภาพ อาจร่วมกับกระบวนการหมักเพื่อแยกเซลล์จากผลิตภัณฑ์

2) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration: UF) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองรูพรุนขนาดเล็กประมาณ 2-200 nm แรงขับเคลื่อนที่ใช้อยู่ระหว่าง 100-800 kPa (1-8 atm) ใช้สำหรับแยกอนุภาคคอลลอยด์ แบคทีเรีย ไวรัส และสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 1,000- 300,000 ดาร์ตัน ออกจากน้ำ แต่ไม่สามารถแยกไอออนละลายน้ำและเกลือประจุบวกสองได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ชนิดของเยื่อกรองที่ใช้โดยทั่วไป เช่น Cellulose acetate, Polyacrylonitrile และ Polyester เป็นต้น การใช้งานเหมาะสำหรับการแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีน การกำจัดคอลลอยด์ การบำบัดน้ำทิ้ง ทำน้ำให้บริสุทธิ์ การทำน้ำผลไม้ให้ใส เป็นต้น

3) นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration: NF) เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อกรองรูพรุนขนาดเล็กประมาณ 2-5 nm ซึ่งใกล้เคียงกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับมาก คือ มีผลต่างของความดันเป็นตัวขับเคลื่อนในการแยกตัวถูกละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 1000 ดาร์ตัน ออกจากสารละลายตัวอย่าง เช่น น้ำตาล สารอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลายอยู่ระหว่าง 1-2 MPa (10-20 atm) มีความสามารถในการแยกไอออนบางชนิด และสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ชนิดของเยื่อกรองที่ใช้โดยทั่วไป เช่น Polymer Organic Compounds, Atomic Polyimide และ Polyvinyl Alcohol เป็นต้น

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบชนิดของเยื่อกรองเมมเบรน (ทงศักดิ์ วัฒนา, 2555; สุกุลยา ทับอุไร, 2554; Ehara, 1998; Korbutowicz, 2008)

เมมเบรน	ขนาดรูพรุน (nm)	น้ำหนักโมเลกุล (Da)	ความสามารถในการกำจัด
ไมโครฟิลเตรชัน	50-5,000	> 300,000	- แบคทีเรีย - คอลลอยด์ - โปรโตซัว
อัลตราฟิลเตรชัน	5-100	1,000-300,000	- แบคทีเรีย - ไวรัส - สารที่ละลายน้ำขนาด 10-500 kDa
นาโนฟิลเตรชัน	~ 1	100-1,000	- สารที่มีขนาด 200-300 Da - เกลือประจุบวกสอง
ออสโมซิสผันกลับ	< 1	10-100	- ไอออนละลายน้ำ

4) ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis: RO) กระบวนการนี้เรียกว่า Hyper Filtration เป็นการแยกสารละลายโดยผลต่างความดันระหว่างเยื่อแผ่นเป็นแรงขับเคลื่อน เยื่อกรองออสโมซิสผันกลับมีความสามารถในการกักกันโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เกลือ น้ำตาล (น้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 ดาร์ตัน หรือมีขนาดประมาณ 0.1-1 nm) แต่ยอมให้น้ำผ่านได้ และเป็นเยื่อแผ่นที่มีโครงสร้างแน่นหรือไม่มีรูพรุน การผ่านเยื่อกรองเกิดจากความสามารถในการละลายและการแพร่ (Solution-diffusion) ในเยื่อแผ่น ความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลายอยู่ระหว่าง 1-10 MPa (10-100 atm) ดังแสดงในตารางที่ 2.7 การใช้งานที่สำคัญของกระบวนการนี้ คือ การแยกเกลือจากน้ำกร่อย น้ำทะเล เพื่อผลิตน้ำจืด การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ การเพิ่มน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง ตลอดจนการบำบัดน้ำทิ้งที่มีโลหะเจือปน เช่น อุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ (สุกุลยา ทับอุไร, 2554; นรารัตน์พันธ์, 2552)

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน

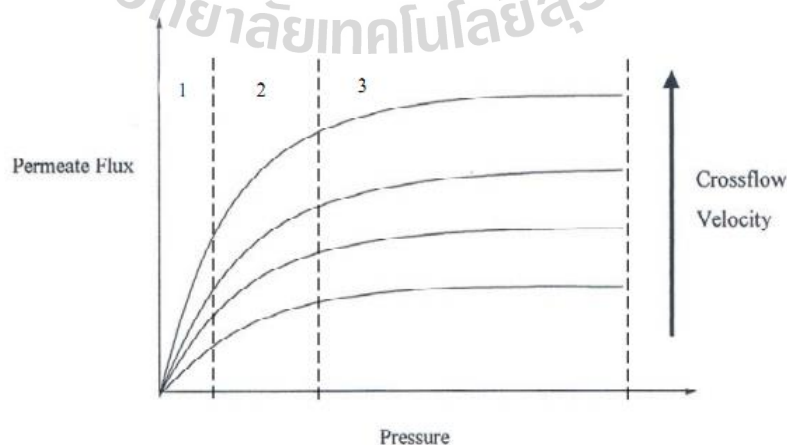
การอุดตันจะขึ้นอยู่กับประเภทของกระบวนการเมมเบรนที่ใช้และลักษณะน้ำเข้า การลดลงของฟลักซ์ส่วนใหญ่จะเกิดมากในเมมเบรน MF และ UF องค์ประกอบของสารละลายที่เป็นสาเหตุของการอุดตัน คือ สารประกอบอนินทรีย์ที่สามารถละลายได้ สารแขวนลอย สารละลายอินทรีย์ สารเคมีที่ทำปฏิกิริยา และจุลชีพต่าง ๆ เมื่อเกิดการอุดตันขึ้นจะต้องมีการทำความสะอาดเมมเบรน เพื่อให้คุณสมบัติของเมมเบรนกลับคืนมา ซึ่งการอุดตันของเมมเบรนนั้นจะพิจารณาจากความถี่ที่ทำความสะอาด อายุการใช้งานของเมมเบรนและพื้นที่เมมเบรนที่ต้องการ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อราคา การออกแบบ และการเดินระบบจริง ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการอุดตันมีดังต่อไปนี้

1) การเกิด Concentration Polarization (CP) เกิดจากการสะสมของโมเลกุล/อนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ เป็นปรากฏการณ์ที่พบอยู่ทั่วไปในกระบวนการกรอง โดยใช้เยื่อกรองตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองจะสะสมอยู่ผิวหน้าเยื่อแผ่น ทำให้ความเข้มข้นบริเวณนั้นสูงกว่าในสารละลาย ทำให้ตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ การเกิด CP ซึ่งจะนำไปสู่การอุดตันของเยื่อกรอง ทำให้สมรรถภาพของเยื่อกรองลดลง การแก้ไขทำได้โดยการเพิ่มความเร็วน้ำผ่านผิวหน้าเมมเบรนให้เพิ่มขึ้น และสร้างสภาพปั่นป่วนที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนเพื่อไปรบกวนการสะสมของอนุภาคให้เกิดการแพร่กระจายกลับมาสู่สารละลายอีกครั้ง

2) การเกิด Fouling เป็นการสะสม/อุดตัน ของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าเยื่อแผ่นและภายในรูพรุนทำให้ฟลักซ์ลดลง และการกักกันโมเลกุลเปลี่ยนไป มีผลทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนลดลง สิ่งสะสมและอุดตันจะไม่สามารถล้างออกได้ด้วยน้ำต้องทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการอุดตันที่เกิดจากสารอินทรีย์ (Organic Compound)

3) การเกิดตะกรัน (Scaling) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดการอุดตันที่เกิดจากสารอนินทรีย์ (Inorganic Compound) โดยเกิดการตกผลึกบริเวณผิวเมมเบรน มีผลทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรน ลดลง ผลึกบางชนิดต้องเติมน้ำยาป้องกัน (Anti-scaling) เช่น โซเดียมไบซัลเฟต (NaHSO_3) ป้องกันเหล็กไม่ให้เปลี่ยนรูป เป็นต้น

4) Transmembrane Pressure สำหรับการเดินระบบด้วยการไหลแบบ Cross Flow พบว่า อัตราการไหลผ่านเยื่อกรอง (Flux) ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเยื่อกรอง แสดงดังรูปที่ 2.4 เมื่อทำการเดินระบบในช่วงที่หนึ่ง (เริ่มต้น) อัตราการไหลผ่านเยื่อกรอง (Flux) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กราฟที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ในช่วงที่สองอัตราการไหลผ่านเยื่อกรองเป็นแบบเอกโพเนนเชียลและในช่วงที่สามพบว่า อัตราการไหลผ่านเยื่อกรองเริ่มคงที่ค่าความดันสูง ๆ สำหรับความเข้มข้นต่ำและค่าความดันการเดินระบบที่พอดี อัตราการไหลผ่านเยื่อกรองและความดันจะมีความสัมพันธ์กันในลักษณะแปรผันตรง ที่ความดันในการเดินระบบสูง ๆ การลดลงของอัตราการไหลผ่านเยื่อกรองเริ่มต้นจะคงที่และในที่สุดก็สม่ำเสมอ (สุกุลยา ทับอุไร, 2554; นรา รัตนพันธ์, 2552; Metcalfe and Eddy, 1991)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันต่อเพอมีเอทฟลักซ์ (Herath, 1984)

2.5.3 การลดการอุดตันสำหรับกระบวนการเมมเบรน

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันจะทำการกรองแบบต่อเนื่อง จนกระทั่งเกิดการอุดตันจากอนุภาคที่ปนเปื้อนมากับน้ำดิบ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นต้น หรือการล้างทำความสะอาดเยื่อกรอง เพื่อลดการอุดตันให้เยื่อกรองมีสภาพที่ใกล้เคียงกับเยื่อกรองใหม่มากที่สุด และสามารถยืดอายุการใช้งานออกไปได้ โดยการลดการอุดตันมีรายละเอียดดังนี้

1) การบำบัดขั้นต้น เพื่อกำจัดหรือเปลี่ยนคุณสมบัติของตัวอุดตัน โดยวิธีการ เช่น การฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนหรือโอโซน, การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์, การสร้างและรวมตะกอน (Diaz et al., 2012) และ การกรองเบื้องต้น (Yu et al., 2016) เป็นต้น

2) การล้างทำความสะอาดเยื่อกรอง มี 2 วิธี คือ

วิธีทางกายภาพ ใช้หลักการในการล้างกลับทางหรือล้างย้อน (Backwash) เพื่อให้สารที่อยู่บนผิวหน้าของเยื่อกรองเมมเบรนหลุดออกไป เช่น การเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งจะเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น แต่จะลดการสะสมและการอุดตันได้ระดับหนึ่งเท่านั้น การล้างย้อนอาจทำระหว่างการกรองหรืออาจทำเมื่อเสร็จสิ้นการกรองได้ แต่ไม่สามารถกำจัดสารที่สะสมอยู่ในเยื่อกรองเมมเบรนได้หมด จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมีต่อไป

วิธีทางเคมี สารเคมีอาจช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยอาจทำให้สารอุดตันพองตัว หดตัว ละลาย เกิดการหลุดออก (Desorption) หรือสารเคมีที่ใช้อาจทำปฏิกิริยากับสารอุดตัน เช่น การเกิดไฮโดรไลซิส การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ กรด ต่าง และสารฆ่าเชื้อ เป็นต้น การเลือกสารเคมีนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อกรองเมมเบรนว่ามีความสามารถในการทนต่อสารเคมีนั้นได้มากน้อยเพียงใด สารทำความสะอาดที่เป็นกรด ส่วนใหญ่มีหน้าที่กำจัดตะกอนที่เกิดจากเกลือต่าง ๆ เช่น เกลือของสารประกอบแคลเซียม และโลหะออกไซด์ โดยกรดเข้าไปทำการละลายตะกอนให้อยู่ในรูปของสารละลายเกลือ เช่น การเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมคลอไรด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ สารที่ใช้ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก ซัลฟูริก ไนตริก และฟอสฟอริก เป็นต้น สารทำความสะอาดที่เป็นด่าง ใช้ในการกำจัดฟาวลิงจำพวกสารอินทรีย์ คอลลอยด์ ซิลิกา และสารอนินทรีย์ สารที่นิยมใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไตรฟอสเฟต โซเดียมไฮโปคลอไรด์ เป็นต้น สารฆ่าเชื้อ เป็นสารสำหรับฆ่าเชื้อเมมเบรน โดยเฉพาะกับเมมเบรนที่ไม่ทนความร้อนซึ่งไม่สามารถฆ่าเชื้อด้วยน้ำร้อนหรือน้ำ สารที่นิยมใช้กันมาก คือ ไฮเปอร์คลอไรท์

ความถี่ในการล้างขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ โดยปกติแล้วการล้างทำความสะอาดประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะทำการล้างด้วยสารละลายต่างและคลอรีน เพื่อล้างการอุดตันจากสารอินทรีย์ออกก่อน แล้วตามด้วยการล้างโดยสารละลายกรด เพื่อล้างการอุดตันจากรั้วธาตุต่าง ๆ จากการศึกษาการล้างทำความสะอาดเยื่อกรองของน้ำดิบที่มีการปนเปื้อนสาหร่ายพบว่า NaOH 0.02 N และ NaOCl 100 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายออกมากที่สุด (Liang et al., 2008) และน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสาหร่ายและแบคทีเรียเมื่อนำสาร 2 ชนิดนี้มาใช้ในการล้างทำความสะอาด พบว่าสามารถลดการอุดตันที่เกิดขึ้นได้ทำให้สามารถนำเยื่อกรองกลับมาเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ (สุกุลยา ทับอุไร, 2554)

2.6 ผลกระทบทางสุขภาพจากการใช้น้ำหมุนเวียน

การอุปโภคบริโภคน้ำที่มีสิ่งเจือปนทั้งทางด้านกายภาพ เคมี หรือชีวภาพ อันเนื่องมาจากกระบวนการที่ใช้ในการหมุนเวียนน้ำไม่มีประสิทธิภาพนั้น ล้วนก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องของสุขภาพดังต่อไปนี้

2.6.1 อันตรายทางชีวภาพ

1) ไวรัส (Virus) เป็นจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าและกล้องจุลทรรศน์ทั่วไปต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายพิเศษที่เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) ไวรัสที่อาจพบการแพร่กระจายในน้ำแล้วทำให้เกิดโรคในมนุษย์ เช่น ไวรัสที่ทำให้เกิดโรคตับอักเสบชนิดเอ (Infectious Hepatitis type A) ไวรัสที่ทำให้เกิดอาการท้องร่วงอย่างรุนแรงในเด็ก (Gastroenteritis Viral) เป็นต้น

2) แบคทีเรีย (Bacteria) เป็นจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่กว่าไวรัส สามารถมองเห็นได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โรคที่เกิดจากแบคทีเรีย เช่น อหิวาตกโรคซึ่งเกิดจาก Vibrio Cholera โรคบิดซึ่งเกิดจากแบคทีเรีย พวก Shigella Flexneri หรือ Shigella Dysenteriae โรคไข้รากสาดหรือไข้ไทฟอยด์ซึ่งเกิดจาก Samonella Paratyphoid A B หรือ C เป็นต้น

3) โปรโตซัว (Protozoa) ทำให้เกิดโรค เช่น โรคบิดอะมีบ่าซึ่งเกิดจากโปรโตซัวชนิด Entamoeba Histolytica โรคจิอาร์เดียซึ่งเกิดจากโปรโตซัวชนิด Giardia Lambia เป็นต้น

4) หนอนพยาธิ (Helminth) เป็นพวกปรสิต (Parasite) เพราะต้องอาศัยอยู่บนหรือในร่างกายสิ่งมีชีวิตอื่น พยาธิที่ทำให้เกิดโรคมืดงนี้ โรคพยาธิไส้เดือนกลม (Ascariasis) ซึ่งเกิดจากพยาธิตัวกลมชนิด Ascaris Lambricoides เป็นต้น (ปราโมช เชี่ยวชาญ, 2552)

2.6.2 อันตรายทางเคมี

1) ฟลูออไรด์ การดื่มน้ำที่มีปริมาณฟลูออไรด์เหมาะสมจะช่วยป้องกันฟันผุ แต่ถ้าดื่มน้ำมีฟลูออไรด์ในปริมาณสูงจะทำให้เกิดแร่ฟลูออไรด์เป็นพิษ

2) สารหนู การรับสารหนูเข้าสู่ร่างกายส่วนใหญ่มักเกิดจากการดื่มน้ำที่ปนเปื้อนสารหนูเป็นระยะเวลานาน การรับสัมผัสสารหนูอย่างต่อเนื่อง จะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอย่างรุนแรง โดยเกิดอาการเฉียบพลัน เช่น อาเจียน ท้องเสีย ปวดท้อง กล้ามเนื้อเกร็ง การทำงานของหัวใจผิดปกติ และเสียชีวิตได้จากการทำงานล้มเหลวของหัวใจ รวมไปถึงการเกิดอาการเรื้อรัง เช่น มีความผิดปกติที่ระบบทางเดินอาหาร ผิวหนังเปลี่ยนสีที่เป็นลักษณะเฉพาะของโรค ผื่นหรือตุ่มตามฝ่ามือฝ่าเท้า พบความผิดปกติที่โลหิต ระบบประสาท ระบบเลือด โรคความดันโลหิตสูง เบาหวาน โรคหัวใจ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดมะเร็งในอวัยวะภายในได้

3) ตะกั่ว การรับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งการหายใจ การกิน และการสัมผัส เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด และถูกลำเลียงไปยังอวัยวะต่าง ๆ เมื่อสะสมมากขึ้นอาจทำให้มีภาวะผิดปกติ เช่น ความผิดปกติทางระบบประสาท โดยเป็นพิษต่อสมอง ไต ระบบทางเดินอาหาร ระบบเลือด และยังขัดขวางการสร้างวิตามินดี ทำให้เด็กเติบโตช้าและอาจปัญญาอ่อนได้

4) แคดเมียม เข้าสู่ร่างกายได้ 2 ทาง คือ ทางการกินและการหายใจ พิษเฉียบพลันเกิดจากการหายใจสูดไอแคดเมียมเข้าไปในร่างกาย อาการที่พบ คือ อาการคล้ายโรคไข้หวัดใหญ่และอาการของโรคไขควันโลหะ ได้แก่ อาการไอ แน่นหน้าอก หายใจไม่สะดวก ไข้ หนาวสั่น ปวดเมื่อย

ตามร่างกาย หากอาการรุนแรงมากขึ้นอาจพบภาวะปอดอักเสบและปอดบวม น้ำ แคลเซียมเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะจับกับเม็ดเลือด อาการพิษที่เด่นที่สุด คือ อันตรายต่อไต โดยเฉพาะท่อไตส่วนต้น (Proximal Tube) โรคที่เกิดจากพิษแคลเซียม เรียกว่า โรคพิษแคลเซียม หรือโรคไฮโดไต แคลเซียมอาจปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้จากการหลอมโลหะบางชนิด จากอุตสาหกรรมอื่น เช่น ในฟุมโลหะเกลือแคลเซียม ในน้ำทิ้งซึ่งกระจายสู่แหล่งน้ำสาธารณะ และทะเล ทำให้ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

5) พรอท เป็นโลหะชนิดเดียวที่เป็นของเหลว รับเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ การกิน และการสัมผัส เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด และเมื่อมีการสะสมมากขึ้น จะทำให้เกิดความผิดปกติทางร่างกายในระบบต่าง ๆ เช่น ระบบประสาท ไตและลำไส้ถูกทำลาย เนื้อเยื่อในช่องปากเน่า ฟันโยกหลุดง่าย ตา ริมฝีปาก แขนขากระดูก เศร้าซึม ความจำเสื่อม ปอดอักเสบ และโรคมีนามาตา

6) ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane: THM) เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคลอรีนอิสระกับสารอินทรีย์ในน้ำเกิดเป็นสารประกอบฮาโลเจนที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เป็นองค์ประกอบ สารไตรฮาโลมีเทน ประกอบด้วย คลอโรฟอร์ม (Chloroform: CHCl_3), โบรโมไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethane: CHCl_2Br), ไดโบรโมคลอโรมีเทน (Dibromochloromethane: CHClBr_2) และโบรโมฟอร์ม (Bromoform: CHBr_3) โดยปกติปกติมนุษย์จะได้รับคลอโรฟอร์มจากอาหาร อากาศ และน้ำ และจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น การรับรู้ของประสาทส่วนกลางลดลง เกิดอาการมึนจนถึงขั้นสลบได้ และมีผลต่อสุขภาพในระยะยาว คือ เป็นพิษต่อตับ ไต และก่อให้เกิดมะเร็ง นอกจากนี้คลอโรฟอร์มยังละลายได้ดีในไขมันทำให้แพร่ผ่านรกเข้าสู่ตัวอ่อน จึงอาจเป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์ (จรรยา บริวิชยาวิสุทธิ, 2552; สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2557)

2.7 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพ

ปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจและสังคมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีผลกระทบสูงต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะสุขภาพ ดังนั้น การป้องกันผลกระทบจากสิ่งคุกคามสุขภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง โดยมีการพัฒนาและประยุกต์การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพมาเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการคาดการณ์ความเสี่ยงที่มีโอกาสเกิดขึ้น เพื่อเป็นข้อมูลช่วยในการกำหนดกลยุทธ์ในการป้องกันผลกระทบจากสิ่งคุกคามสุขภาพ ซึ่งความเสี่ยงทางสุขภาพ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งคุกคามสุขภาพ (Health Hazard) และการได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามนั้น ๆ (Exposure) การประเมินความเสี่ยงจะดำเนินการภายใต้ความสัมพันธ์ระหว่าง Host-Agent-Media เพื่อประเมินว่าผลของความสัมพันธ์นั้นก่อให้เกิดอะไร (Consequence) ด้วยระดับความรุนแรงแค่ไหน (Severity) มีโอกาสของการเกิดมากน้อยเพียงใด (Likelihood)

หน่วยงานหลักที่ทำการศึกษาการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพสำหรับสารเคมี คือ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (US EPA) ต่อมาองค์การอนามัยโลก (WHO) ร่วมกับองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ได้พัฒนาแนวคิดการประเมินความเสี่ยงสำหรับจุลินทรีย์ โดยแบ่งขั้นตอนในการประเมินความเสี่ยงสุขภาพทั้งด้านเคมีและชีวภาพเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- การระบุคุณลักษณะของสิ่งคุกคาม (Hazard Identification)
- การประเมินผลกระทบจากสิ่งคุกคาม (Dose-Response Relationship)
- การประเมินการได้รับสัมผัส (Exposure Assessment)
- การอธิบายลักษณะความเสี่ยง (Risk Characterization)

2.7.1 การระบุลักษณะของสิ่งคุกคามสุขภาพ เป็นขั้นตอนแรกในการประเมินความเสี่ยง ขั้นตอนนี้จะรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการปนเปื้อนหรือสิ่งคุกคามสุขภาพ และวิเคราะห์ข้อมูลว่าการได้รับสิ่งคุกคามนั้นมีผลกระทบต่อสุขภาพหรือไม่ (Zhai et al., 2017) ลักษณะของสิ่งคุกคามแบ่งออกเป็น 3 ด้าน ดังนี้ (นันทิกา สุนทรไชยกุล และคณะ, 2552)

1.1) สิ่งคุกคามทางกายภาพ (Physical Hazard) ได้แก่ สารที่สามารถทำให้เกิดการระเบิดหรือไฟไหม้ แก้ว โลหะ ก้อนหิน ต้นไม้ กิ่งไม้ หรือของแข็งอื่น ที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายในเชิงกายภาพได้

1.2) สิ่งคุกคามทางสารเคมี (Chemical Hazard) ได้แก่ สารเคมีที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ทั้งที่ก่อให้เกิดมะเร็งและไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง นอกจากนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับดิน น้ำ และ อากาศ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

1.3) สิ่งคุกคามทางชีวภาพ (Biological Hazard) ได้แก่ จุลชีพที่ก่อโรค (แบคทีเรีย ไวรัส เชื้อรา ปรสิต) รวมถึงสารพิษที่สร้างโดยจุลชีพ หากมีการนำน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนจุลชีพมาใช้กับพืชผัก โดยเฉพาะพืชที่กินดิบจะทำให้มีความเสี่ยงต่อสุขภาพสูง (Moazeni et al., 2017)

2.7.2 การประเมินผลกระทบจากสิ่งคุกคาม เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการได้รับสิ่งคุกคามและการตอบสนอง ซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่ได้จากการศึกษาในสัตว์ทดลอง และอาจมีบางส่วนที่ได้จากการศึกษาในมนุษย์ การประเมินความเสี่ยงจากการได้รับสารเคมีจะทำได้นั้น ต้องทราบความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างปริมาณสารที่ได้รับและการตอบสนอง (Dose-Response Relationship) โดยการประเมินปริมาณสารที่ร่างกายได้รับเข้าไปและเกิดการตอบสนองต้องอาศัยค่า Reference Dose (RfD) ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ (Zhai et al., 2017) โดยทั่วไปจำแนกความเป็นพิษของสารเคมีได้เป็น 2 ประเภท คือ สารที่ไม่ก่อมะเร็งและสารที่ก่อมะเร็ง สำหรับความเสี่ยงทางชีวภาพสามารถคำนวณหา ค่าอ้างอิงหรือความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วยจากการสัมผัสจุลินทรีย์ก่อโรคได้ มีรายละเอียดดังนี้

2.1) สารไม่ก่อมะเร็ง (Non-Carcinogen) รวมถึงสารก่อมะเร็งที่ไม่มีผลต่อยีน และความเป็นพิษอย่างอื่นที่ไม่ใช่การเกิดมะเร็งจากสารก่อมะเร็ง การเกิดผลกระทบต่อสุขภาพส่วนใหญ่เป็นความผิดปกติแบบมี Threshold Limit ค่าที่นิยมใช้เป็นค่าอ้างอิงในการประเมิน ได้แก่ Reference Dose (RfD), Acceptable Daily Intake (ADI), Tolerable Daily Intake (TDI) และ Provisional Tolerable Weekly Intake (PTWI) (Rapant et al., 2011; Yu et al., 2017; นันทิกา สุนทรไชยกุล และคณะ, 2552) ค่าเหล่านี้คำนวณได้จาก

-การหาค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่ก่อให้เกิดผลไม่พึงประสงค์ (No-Observed-Adverse-Effect Level: NOAEL) เมื่อได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามที่ต้องการทดสอบ หรือถ้าไม่สามารถหาค่า NOAEL ได้ สามารถใช้ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เริ่มทำให้เกิดผลไม่พึงประสงค์ (Lowest-Observed-Adverse-

Effect Level: LOAEL)

-การขยายผลไปใช้สำหรับมนุษย์ด้วยการลดค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty Factor: UF) จากความแตกต่างระหว่างสายพันธุ์ (จากสัตว์ทดลองสู่มนุษย์) และความแตกต่างภายในสายพันธุ์ อาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าความปลอดภัยต่อมนุษย์ (Safety factor)

-ค่ามาตรฐาน Reference dose (RfD) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2-1

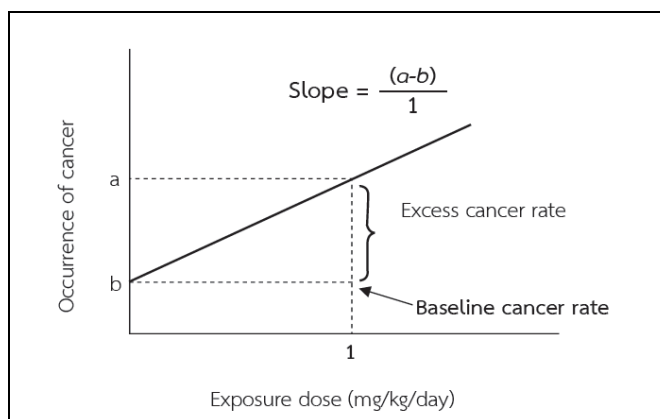
$$RfD = NOAEL / (UF_H \times UF_S \times UF_L \times UF_C \times MF) \quad (2-1)$$

โดยที่ $UF_H = 10$ เมื่อมีการขยายผลจากสัตว์สู่มนุษย์
 $UF_S = 10$ เมื่อเป็นค่าที่มีไว้สำหรับคนที่มีความไวในการตอบสนองสูง เช่น เด็ก หญิงมีครรภ์ ผู้สูงอายุ หรือผู้ป่วยเฉพาะโรค
 $UF_L = 10$ เมื่อใช้ค่า LOAEL แทน NOAEL
 $UF_C = 10$ เมื่อมีการขยายผลจากการทดลองที่ทำระยะสั้นไปสู่ผลในระยะยาว
 $MF =$ Modifying Factor ซึ่งดูจากคุณภาพของข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่นำมาใช้ในการประเมินความเสี่ยง โดย $MF = 1-10$ แทนคุณภาพของข้อมูลจากมากไปน้อย

2.2) สารก่อมะเร็งที่มีผลต่อยีน (Genetic Carcinogen) สำหรับสารก่อมะเร็งจะใช้แนวความคิดที่ว่าสารกลุ่มนี้ไม่มี Threshold Limit ซึ่งหมายความว่า ไม่ว่าจะได้รับสารก่อมะเร็งปริมาณมากน้อยเพียงใด ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดมะเร็งได้ โดยการคำนวณความเสี่ยงของการเกิดมะเร็งอาศัยค่า Cancer Slope Factor หรือ Cancer Potency Factor (Rapant et al., 2011) ในกรณีที่เป็นมลพิษทางอากาศหรือทางน้ำ การคำนวณค่า ความเสี่ยงของการเกิดมะเร็งสามารถคำนวณโดยใช้ค่า Unit risk factor (URF) แทนค่า Cancer slope factor (CSF) ได้อีกด้วย

-ค่า Cancer Slope Factor หรือ Cancer Potency Factor เป็นค่าที่แนะนำโดย US EPA ซึ่งสัมพันธ์กับหนึ่งหน่วยความเข้มข้นของสารก่อมะเร็ง โดยความลาดชันดังกล่าวได้จากการศึกษา Dose-Response Relationship ระหว่างความเข้มข้นของสารก่อมะเร็งที่ได้รับสัมผัสและการเกิดมะเร็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 หน่วยของ CSF คือ ความเสี่ยงต่อ $mg/kg/day$ หรือ Risk ($mg/kg/day^{-1}$)

-ค่า Unit Risk Factor (URF) เป็นค่าที่ได้จากการศึกษาของหน่วยงาน US EPA ในการอธิบายความเสี่ยงของการเกิดมะเร็ง ซึ่งสัมพันธ์กับหนึ่งหน่วยความเข้มข้นของสารก่อมะเร็งที่ปนเปื้อนในน้ำและอากาศ ค่านี้สามารถใช้คำนวณความเสี่ยงของการเกิดมะเร็งโดยตรงจากค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่เป็นสารก่อมะเร็ง สามารถคำนวณจากค่าการตรวจวัดโดยตรง ไม่จำเป็นต้องนำไปคำนวณค่า Chronic Exposure (ค่า CDI) หน่วยของ URF สำหรับมลสารในอากาศ คือ $\mu g/m^3$ และ $\mu g/L$ สำหรับมลสารในน้ำ



รูปที่ 2.5 การคำนวณค่า Cancer slope factor

2.3) การคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วยจากการสัมผัสเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค ซึ่งจะประมาณจำนวนผู้เจ็บป่วยจากชนิดของเชื้อก่อโรค ดังสมการที่ 2-2 และค่าที่ใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 2.12

$$P_{ill} = 1 - [1 + (\text{Dose}/\beta)]^{-\alpha} \quad (2-2)$$

โดยที่ P_{ill} = ความน่าจะเป็นหรือจำนวนผู้ป่วยจากการสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรค
 α, β = ค่าอ้างอิงจากการสัมผัสเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคชนิดต่าง ๆ
 Dose = จำนวนเชื้อก่อโรคที่เข้าสู่ร่างกาย

2.7.3 การประเมินการรับสัมผัส เป็นการประมวลผลความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่น่าจะเป็นปัจจัยร่วมในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ การประเมินการได้รับสัมผัสจะประเมิน 3 ทาง คือ การกิน หายใจ และการดูดซึมผ่านผิวหนัง (Tepanosyan et al., 2017) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นวิธีที่ใช้มากในการประเมินที่ต้องการความหนักแน่นของคำตอบ เช่น งานทางด้านสิ่งแวดล้อม อนามัยสิ่งแวดล้อม และอาชีวอนามัย โดยเฉพาะสิ่งคุกคามทางสารเคมีและชีวภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การได้รับสัมผัสสารเคมี (Chemical Exposure) การคำนวณค่าการได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามทางสารเคมี มีขั้นตอนดังนี้

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง

การได้รับสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งในแต่ละวัน (Average daily intake; ADI) ดังแสดงในสมการที่ 2-3 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2.8 และคำนวณค่าความเสี่ยง (Hazard quotient: HQ) ดังแสดงในสมการที่ 2-4 โดยค่า RfD ของสารแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.9 กรณีที่มีสารเคมีมากกว่า 1 ชนิด ให้รวม HQ ของสารเคมีแต่ละชนิด ดังแสดงในสมการที่ 2-5 จากนั้นนำค่าความเสี่ยง (Hazard index: HI) ที่ได้มาจัดลำดับความเสี่ยงดังแสดงในตารางที่ 2-10

$$ADI = (C \times IR \times EF \times ED) / (BW \times LT) \quad (2-3)$$

$$HQ = ADI / RfD \quad (2-4)$$

$$HI = \sum HQ \quad (2-5)$$

ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง

คำนวณการได้รับสัมผัสสารที่ก่อมะเร็งในแต่ละวัน (ADI) ดังแสดงในสมการที่ 2-3 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2.8 และคำนวณค่าความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Cancer risk: CR) ดังสมการที่ 2-6 จากนั้นนำค่าความเสี่ยง (CR) ที่ได้มาจัดลำดับความเสี่ยงดังแสดงในตารางที่ 2.11

$$CR = ADI \times SF \quad (2-6)$$

2) การได้รับสัมผัสสารทางชีวภาพ ทำการคำนวณการได้รับสัมผัสเชื้อก่อโรคผ่านทางกรกิน โดยคำนวณความน่าจะเป็นในการสัมผัสกับเชื้อก่อโรค (Probability of Exposure) จากสมการที่ 2-7 จากนั้นหาระดับความเสี่ยงจากการคำนวณจำนวนผู้ป่วยจากการสัมผัสเชื้อก่อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำ ดังสมการที่ 2-8 โดยค่าที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 2.12

$$P_E = P \times (1 - e^{-Dose}) \quad (2-7)$$

$$Risk = PE \times P_{ill} \quad (2-8)$$

2.7.4 การอธิบายลักษณะความเสี่ยง (risk characterization)

เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้ง 3 ขั้นตอนก่อนหน้าเพื่อนำมาประเมินว่าการสัมผัสสิ่งคุกคามเป็นความเสี่ยงต่อสุขภาพหรือไม่ และระดับของความเสี่ยงมีมากน้อยแค่ไหน ในการประเมินความเสี่ยงทางเคมีทั้งสารที่ไม่ก่อมะเร็งและก่อมะเร็ง เป็นการนำผลลัพธ์จากสมการที่ 2-5 และ 2-6 มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ระดับความเสี่ยงตามตารางที่ 2.10 และ 2.11 และการประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพเป็นการนำผลลัพธ์จากสมการที่ 2-8 มาแปลผลประมาณจำนวนผู้เจ็บป่วยจากการสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนจุลินทรีย์ก่อโรค

ตารางที่ 2.8 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่เข้าสู่ร่างกาย

พารามิเตอร์		หน่วย	WHO (2008)	Bai et al (2016)	เพ็ญศรี วัฒนฉนวน (2554)
ADI	การได้รับสารในแต่ละวัน	mg/kg.day	ค่าที่ได้จากการคำนวณ		
C	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำ	mg/L	ค่าที่ได้จากการศึกษา		
EF	ความถี่ของการได้รับสัมผัส (Exposure Frequency)	days/year	-	350	365
ED	ระยะเวลาของการได้รับสัมผัส (Exposure Duration)	years	-	-	65
LT	เวลาเฉลี่ยตามระยะเวลาของการได้รับสัมผัส (Lifetime Exposure)	days	-	ED×350	ED×365
BW	น้ำหนักตัว (Body Weight)	kg	60	60	60
RfD	Reference dose	mg/kg.day	ค่าอ้างอิงจาก IRIS (2009)		
HQ	ค่าความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง	-	ค่าที่ได้จากการคำนวณ		
HI	ผลรวมของ HQ	-	ค่าที่ได้จากการคำนวณ		
CR	ค่าความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง	-	ค่าที่ได้จากการคำนวณ		
SF	Cancer Slope Factor	mg/kg-day ⁻¹	ค่าอ้างอิงจาก IRIS (2009)		

ตารางที่ 2.9 ค่า RfD และ SF ของสารเคมีแต่ละชนิด (IRIS, 2009)

สาร	RfD		Critical effect	CSF (mg/kg-day) ⁻¹		Tumor type
	Ingestion (mg/kg-day)	Inhalation (mg/m ³)		Oral	Inhalation	
Ag	0.005	-	Argyria	-	-	-
As	0.0003	-	Hyperpigmentation, keratosis	1.5	15	Skin cancer
Be	0.002	2 x 10 ⁻⁵	Small intestinal lesions	-	-	Lung cancer
Cd	0.0005	-	Significant proteinuria	-	6.1	Lung, trachea, bronchus cancer
Cu	0.04	-	-	-	-	-
Cr	0.003	8 x 10 ⁻⁶	Nasal septum atrophy	-	42	Lung cancer
Fe	0.3	-	-	-	-	-
Hg	-	3 x 10 ⁻⁴	Increases in memory disturbances	-	-	-
Mn	0.14	5 x 10 ⁻⁵	Central nervous system	-	-	-
Mo	0.005	-	Increased uric acid levels	-	-	-
Ni	0.02	-	Decreased body and organ weights	-	-	-
Pb	0.0036	-	Nervous system	-	-	-
Se	0.005	-	Clinical selenosis	-	-	-
Zn	0.3	-	Decrease in erythrocyte Cu	-	-	-

ตารางที่ 2.10 ระดับความเสี่ยงตามค่าประเมิน Hazard quotient หรือ Hazard index

Risk level	US EPA (1999)		Hallenbeck and Springs (1993)	
	ค่า HQ/HI	ระดับความเสี่ยง	ค่า HQ/HI	ระดับความเสี่ยง
1	< 0.1	Negligible	< 0.1	No hazard
2	$\geq 0.1 < 1$	Low	0.1 - 1	Low
3	$\geq 1 < 4$	Medium	1.1 < 10	Medium
4	≥ 4	High	> 10	High

ตารางที่ 2.11 ระดับความเสี่ยงตามค่าประเมินค่าความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Rapant et al., 2011; Tepanosyan et al., 2017)

Risk level	Calculated cases of cancer occurrence	ระดับความเสี่ยง
1	< 1 per 1,000,000 inhabitants	Very low
2	> 1 per 1,000,000 inhabitants < 1 per 100,000 inhabitants	Low
3	> 1 per 100,000 inhabitants < 1 per 10,000 inhabitants	Medium
4	> 1 per 10,000 inhabitants < 1 per 1,000 inhabitants	High
5	> 1 per 1,000 inhabitants	Very high

ตารางที่ 2.12 ค่าที่ใช้หาความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วยจากการสัมผัสเชื้อก่อโรค

	พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ใช้
C	ปริมาณเชื้อก่อโรคในน้ำ	log CFU/mL	ค่าจากการศึกษา
R	อัตราการรับสัมผัสเชื้อก่อโรค	mL/day	ค่าอ้างอิง
P	ความชุกของการเจอเชื้อ <i>E-coli</i> (สัดส่วนตัวอย่างน้ำที่ตรวจพบต่อจำนวนตัวอย่างน้ำทั้งหมด)	-	ค่าจากการศึกษา
α	ค่าอ้างอิงตามชนิดของเชื้อก่อโรค	-	ค่าอ้างอิง
β	ค่าอ้างอิงตามชนิดของเชื้อก่อโรค	-	ค่าอ้างอิง
Dose	ปริมาณเชื้อที่เข้าสู่ร่างกาย	-	C x R

2.8 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP)

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์พัฒนาขึ้นโดย Thomas L. Saaty ในปี 1980 ซึ่งเป็นกระบวนการของการตัดสินใจเลือกหรือการเรียงลำดับความสำคัญของทางเลือก ที่มีหลายเกณฑ์ตัดสินใจ (Multiple Criteria Decision Making) มีการนำ AHP มาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ได้แก่ ด้านการเงิน การศึกษา วิศวกรรม การตัดสินใจของรัฐบาล ด้านอุตสาหกรรมการผลิตและกระบวนการทำงานในโรงงาน ด้านการจัดการ การตัดสินใจส่วนบุคคล การเมืองและสังคม และด้านการกีฬา เป็นต้น เนื่องจากความง่าย ความสะดวกในการใช้งาน และความยืดหยุ่นได้ (Vaidya and Kumar, 2006) และพบว่า 20 ปีที่ผ่านมา มีการใช้ AHP กับงานวิจัยจำนวนมากกว่า 150 บทความที่ใช้ AHP เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจร่วมกับเครื่องมืออื่น ๆ เช่น การโปรแกรมเชิงเส้นที่ต้องการวิเคราะห์ทั้งปัจจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ซึ่งทำให้สามารถหาผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสภาพปัญหาจริง และการนำ AHP มาใช้ร่วมกับเครื่องมืออื่น ๆ ช่วยให้สามารถตัดสินใจได้อย่างชัดเจนกว่าการใช้ AHP หรือเครื่องมืออื่น ๆ เพียงเครื่องมือเดียว (Ho et al., 2008)

นอกจากนำ AHP มาช่วยในการตัดสินใจเลือกทางเลือกต่าง ๆ แล้ว ยังนำมาใช้ในการหาความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ เพื่อให้ความสำคัญของปัจจัยที่ได้มีความเชื่อมั่นสูง เนื่องจากต้องมีค่าอัตราส่วนความสอดคล้องที่เป็นไปตามที่กำหนด กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การกำหนดเป้าหมายของปัญหา การพิจารณาเปรียบเทียบ และการสังเคราะห์ข้อมูล (Korpela and Lehmusvaara, 1999)

1) การกำหนดเป้าหมายของปัญหา คือ การกระจายความซับซ้อนของปัญหาให้อยู่ในรูปของลำดับชั้นโครงสร้าง ปัญหาพื้นฐานประกอบด้วย 3 ลำดับหลัก คือ เป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ เกณฑ์ตัดสินใจ และทางเลือกต่าง ๆ

2) การพิจารณาเปรียบเทียบความสำคัญเป็นคู่ ๆ เพื่อจัดลำดับความสำคัญ หลังจากมีการจัดโครงสร้างปัญหาเรียบร้อยแล้วต้องมีการประเมินความสำคัญ โดยเปรียบเทียบทางเลือกเป็นคู่ของแต่ละเกณฑ์ โดยอ้างอิงเกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.13 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสรุปหาน้ำหนักความสำคัญ

3) การสังเคราะห์ข้อมูล คือ การหาน้ำหนักความสำคัญจากเกณฑ์การเปรียบเทียบทั้งหมด และประเมินทางเลือกที่ดีที่สุด

จุดเด่นของกระบวนการ AHP คือ สามารถนำปัจจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจร่วมกันได้ นอกจากนี้การเปรียบเทียบความสำคัญเป็นคู่ (Pairwise Comparison) ทำให้ผู้ตัดสินใจมั่นใจว่าน้ำหนักความสำคัญที่ได้จากการเปรียบเทียบมีความน่าเชื่อถือสูง (วรพจน์ มีถม, 2553) โดยกระบวนการ AHP มีรายละเอียดขั้นตอนในการประเมินดังนี้

1) คำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์หลัก โดยการสร้างตารางเมตริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเป็นคู่

2) ขั้นตอนการหาค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (Concurrency Reasonable; C.R.) เป็นการตรวจสอบว่าผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความถูกต้องและสอดคล้องกันของเหตุผลหรือไม่ ในการคำนวณหาค่า C.R. ต้องคำนวณหาค่า λ_{\max} ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากการนำค่าเปรียบเทียบในแต่ละ

ตารางที่ 2.13 เกณฑ์การเปรียบเทียบเป็นคู่ (Saaty, 1996)

เกณฑ์	ความหมาย	คำอธิบาย
1	ความสำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 เกณฑ์มีความสำคัญเท่ากัน
3	ความสำคัญกว่าปานกลาง	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งในระดับปานกลาง
5	ความสำคัญกว่ามาก	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งในระดับมาก
7	ความสำคัญกว่ามากที่สุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งในระดับมากที่สุด
9	ความสำคัญกว่าสูงสุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งในระดับสูงสุด
2, 4, 6, 8	อยู่ระหว่างเกณฑ์	อยู่ระหว่างเกณฑ์ที่กล่าวมาข้างต้น

เกณฑ์คูณกับค่าความสำคัญ ผลลัพธ์ที่ได้นำมาหารด้วยค่าความสำคัญ จากนั้นนำผลหารมารวมกัน และหารด้วยจำนวนเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาให้ความสำคัญ (n) ดังสมการที่ 2-9 จากนั้นคำนวณหา ค่าดัชนีชี้วัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) ดังสมการที่ 2-10 และคำนวณหาค่า C.R. ดังสมการที่ 2-11 โดยอาศัยค่าดัชนีชี้วัดความสอดคล้องตามขนาดของเมตริกซ์ (Random Consistency Index: R.I.) ดังแสดงในตารางที่ 2.14

$$\lambda_{\max} = \text{ผลรวมของผลหาร/จำนวนเกณฑ์} \quad (2-9)$$

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n) / (n-1) \quad (2-10)$$

$$C.R. = C.I./R.I. \quad (2-11)$$

การแปลผล ถ้า $C.R. < 0.1$ แสดงว่าค่าของแต่ละเกณฑ์มีความสอดคล้องกันสามารถนำค่านำหนักสำคัญไปใช้ได้ ถ้า $C.R. > 0.1$ แสดงว่าค่าของแต่ละเกณฑ์ไม่มีความสอดคล้องกัน ต้องปรับค่าหรือให้ค่าแต่ละเกณฑ์ใหม่

3) คำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์รอง ซึ่งคำนวณเช่นเดียวกับเกณฑ์หลัก

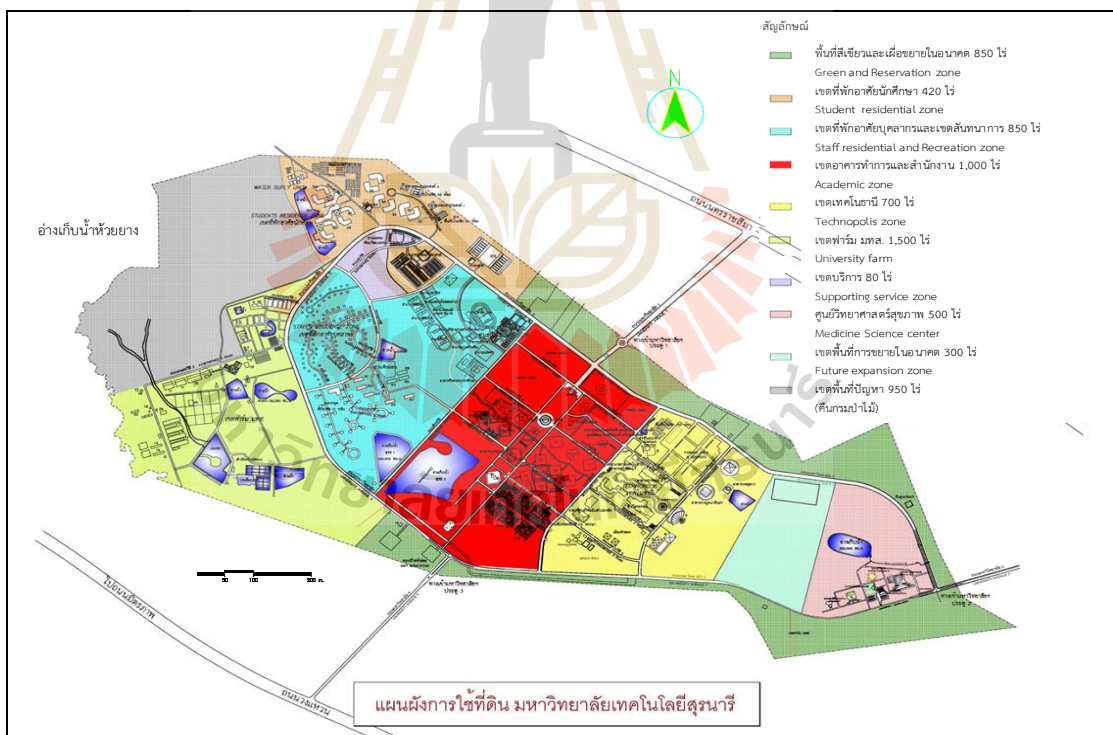
4) เปรียบเทียบทางเลือกที่กำหนดไว้ โดยเปรียบเทียบผ่านเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจที่ละเกณฑ์ เพื่อจัดลำดับความสำคัญของทางเลือก และสรุปผลทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดจากค่าลำดับความสำคัญ

ตารางที่ 2.14 ค่าดัชนีความสอดคล้องตามขนาดของเมตริกซ์ (R.I.)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2.9 การใช้น้ำและการหมุนเวียนน้ำของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) เป็นมหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐ ตั้งขึ้นตามพระราชบัญญัติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2533 ตั้งอยู่เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ในเขตพื้นที่ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา มีเนื้อที่ประมาณ 7,000 ไร่ ในปัจจุบันการเรียนการสอนของมหาวิทยาลัยฯ ประกอบไปด้วยสำนักวิชาต่าง ๆ 7 สำนักวิชา ได้แก่ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ สำนักวิชาเทคโนโลยี-สังคม สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร สำนักวิชาแพทยศาสตร์ สำนักวิชาพยาบาลศาสตร์ สำนักวิชาทันตแพทยศาสตร์ และสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ในปัจจุบันมีนักศึกษาจากทั่วประเทศเข้าศึกษาในมหาวิทยาลัยฯ กว่า 10,000 คน นอกจากนี้โดยรอบพื้นที่ของมหาวิทยาลัยฯ ยังมีอาณาบริเวณติดต่อกับหมู่บ้าน หรือชุมชนอีกเป็นจำนวนหนึ่ง เช่น บ้านโกรกเดือนห้า บ้านสะพานหิน บ้านยางใหญ่ บ้านมาบเอื้อง และบ้านหนองบง เป็นต้น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แบ่งพื้นที่การใช้ประโยชน์ของมหาวิทยาลัยออกตามลักษณะตัวอาคาร เช่น โซนอาคารที่พักอาศัย อาคารเรียน อาคารสันทนาการ และอาคารสาธารณูปโภคต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 มหาวิทยาลัยแจกจ่ายน้ำประปาไปตามโซนพื้นที่ต่าง ๆ และรวบรวมน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดก่อนนำไปผลิตเป็นน้ำหมุนเวียนเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.6 แผนผังการใช้ประโยชน์ที่ดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.9.1 แหล่งน้ำดิบ

ในปัจจุบันมหาวิทยาลัยมีแหล่งน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาทั้งแหล่งน้ำดิบภายนอกมหาวิทยาลัยและแหล่งน้ำดิบภายในมหาวิทยาลัย ได้แก่

1) แหล่งน้ำภายนอกมหาวิทยาลัย เป็นการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำลำตะคองที่โรงสูบน้ำดิบบ้านมะขามเต่า จังหวัดนครราชสีมา มากักเก็บในแหล่งสำรองน้ำดิบของมหาวิทยาลัยซึ่งมีระยะทางจากโรงสูบน้ำถึงมหาวิทยาลัยประมาณ 18 กิโลเมตร ซึ่งทางกรมชลประทานอนุญาตให้มหาวิทยาลัยสูบน้ำได้ในช่วงเดือน กันยายน ถึง ธันวาคม โดยในหนึ่งวันอนุญาตให้สูบน้ำดิบได้ไม่เกิน 2700 ลบ.ม./วัน

2) แหล่งน้ำภายในมหาวิทยาลัย เป็นแหล่งสำรองน้ำดิบที่ได้น้ำจากการสูบน้ำมากักเก็บและรวบรวมในระหว่างช่วงที่มีฝนตก ซึ่งมีปริมาตรทั้งหมด 1.4 ล้าน ลบ.ม.ทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.15 และพื้นที่เก็บน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.7

ตารางที่ 2.15 แหล่งเก็บน้ำดิบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ข้อมูล ณ เดือน พ.ค. 2558

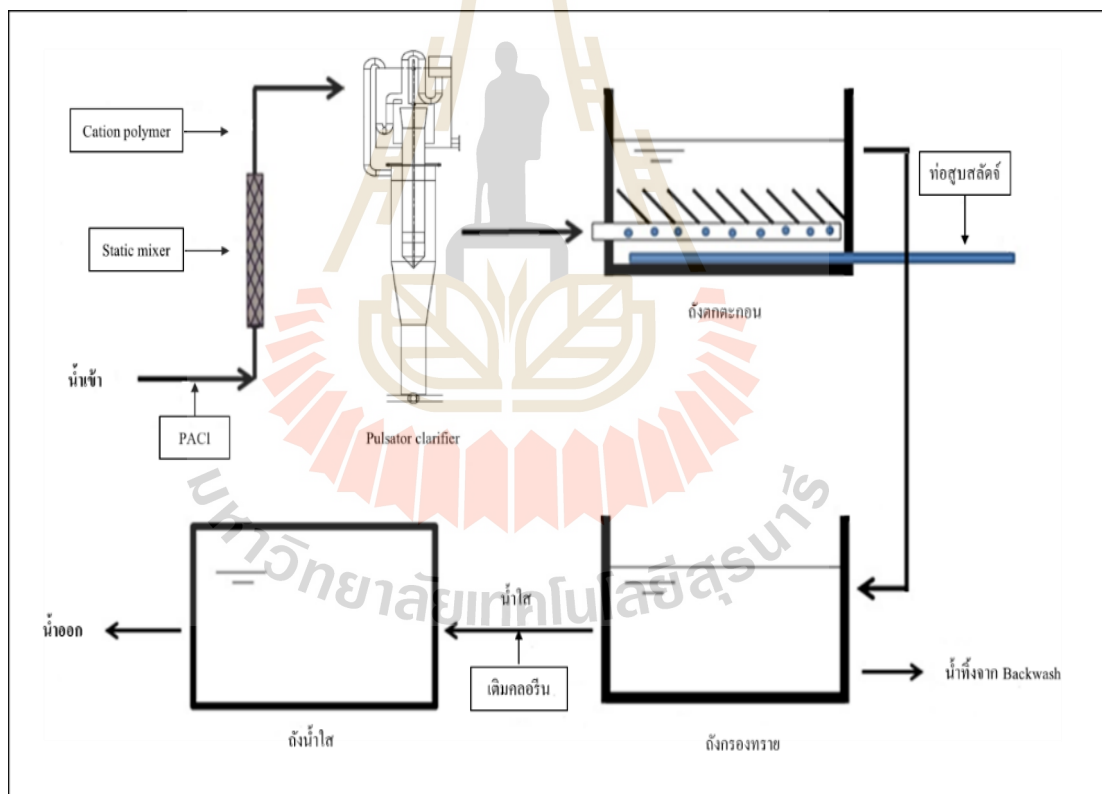
แหล่งน้ำดิบ	ปริมาตร (ลบ.ม.)
1. อ่างสระนิเวศ 10	200,000
2. อ่างสระนิเวศ 11	200,000
3. อ่างสระนิเวศ 1	250,000
4. อ่างสระนิเวศ 2	750,000
รวม	1,400,000



รูปที่ 2.7 อ่างเก็บน้ำภายใน มทส.

2.9.2 ระบบผลิตน้ำประปา

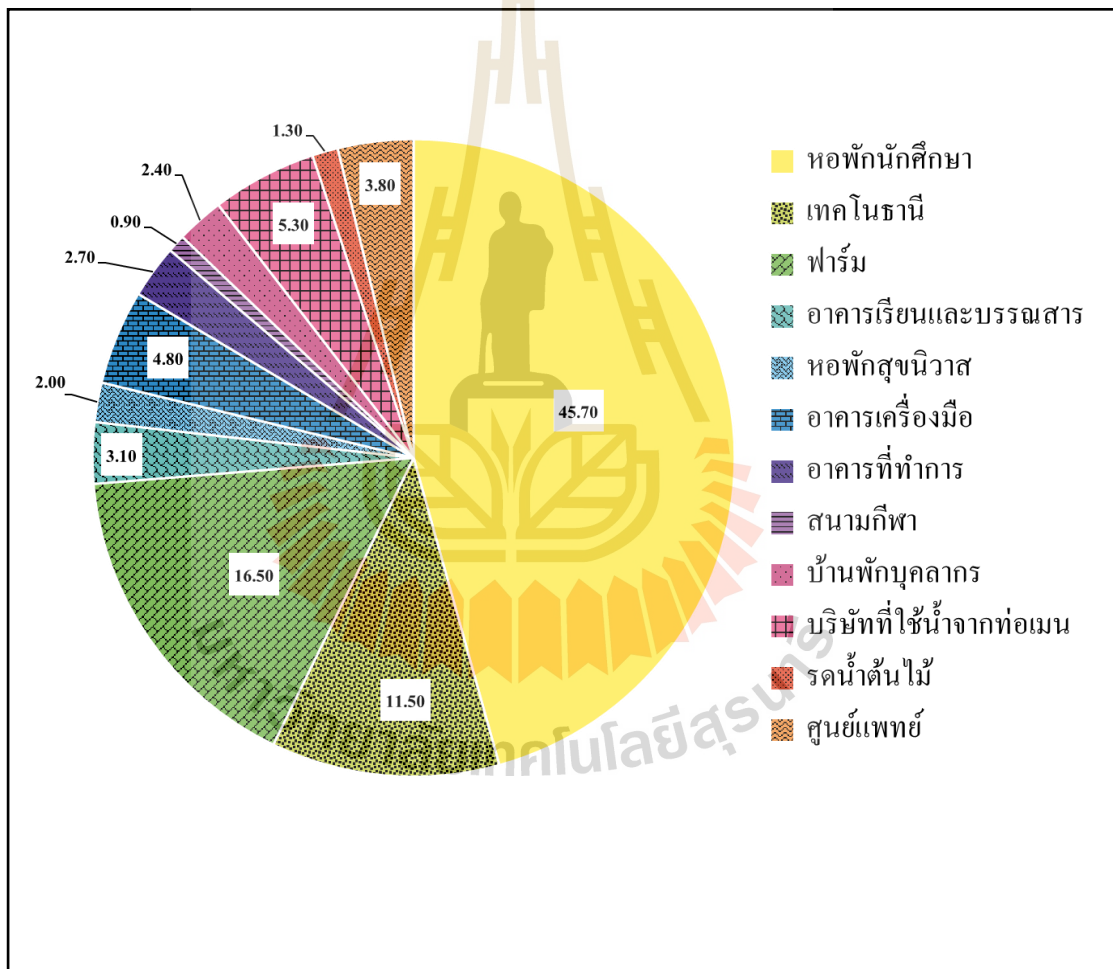
ระบบผลิตน้ำประปาของมทส. มีอัตราการผลิตน้ำประปาที่ 4,800 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้ในการล้างทราย 200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้ระบายตะกอน 80 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และทำการส่งจ่ายน้ำประปา 4,520 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยกระบวนการผลิตน้ำประปาจะนำน้ำดิบเข้าระบบและเติมสารสร้างตะกอน คือ Polyaluminum Chloride (PACl) ทำการผสมแบบ Static mixer เพื่อทำให้เกิดการป็นป่วนภายในเส้นท่อทำให้เกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ระหว่าง PACl กับน้ำดิบ จากนั้นเติมสารช่วยสร้างตะกอน คือ Cation Polymer และผ่าน Pulsator clarifier ซึ่งทำงานคล้ายถังกวนช้า เพื่อให้ Cation Polymer ที่เติมลงไปจับกับอนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรด้วย PACl ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนออกจากน้ำในถังตกตะกอน จากนั้นกรองอนุภาคขนาดเล็กที่ไม่สามารถตกตะกอนได้ในถังตกตะกอน โดยนำน้ำมาผ่านถังกรองทรายทำให้ได้น้ำส่วนใส ทำการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อและพักน้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อในถังพักน้ำใสเพื่อรอการส่งจ่ายต่อไป รายละเอียดกระบวนการผลิตน้ำประปาดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบผลิตน้ำประปามทส.

2.9.3 ระบบการส่งจ่ายน้ำประปา

ระบบการส่งจ่ายน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีการส่งจ่าย 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 การส่งจ่ายแบบใช้แรงโน้มถ่วง และแบบที่ 2 การส่งจ่ายแบบปั๊มแรงดัน หอสูงที่ใช้ในส่งจ่ายน้ำประปาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีตำแหน่งที่ตั้งใกล้กับโรงพยาบาลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้ทำการส่งจ่ายน้ำประปาให้ทั้งมหาวิทยาลัยโดยทำการส่งจ่ายตามโซนต่าง ๆ ของมหาวิทยาลัย โดยมีอัตราการส่งจ่ายน้ำประปาประมาณ 4,520 ลบ.ม.ต่อวัน โดยร้อยละ 45 ของการใช้น้ำสูงสุดอยู่ที่โซนหอพักนักศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ปริมาณการใช้น้ำแยกตามโซนในมหาวิทยาลัย

2.9.4 ระบบบำบัดน้ำเสีย

ระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยเริ่มก่อสร้างระบบเมื่อปี พ.ศ. 2538 เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Stabilization pond เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกระบวนการธรรมชาติในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย มีจำนวนบ่อในการบำบัดทั้งหมด 9 บ่อ เป็นระบบที่ใช้พื้นที่มากและน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบน้ำเสียชุมชน จึงมีความเหมาะสมต่อการใช้ระบบบำบัดแบบนี้ อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ น้ำเสียส่วนใหญ่จะเป็นน้ำเสียที่ถูกรวบรวมมาจากหอพักนักศึกษา อาคารต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัย ซึ่งในแต่ละวันมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นประมาณ 2,070 ลบ.ม./วัน รายละเอียดการออกแบบของระบบบำบัด ดังแสดงในตารางที่ 2.16 แผนผังการเดินระบบบำบัดน้ำเสีย ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และจากข้อมูลในตารางที่ 2.17 แสดงข้อมูลการใช้น้ำและอัตราการเกิดน้ำเสียของมหาวิทยาลัย ย้อนหลัง 5 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554-2558 จะเห็นว่าอัตราการเกิดน้ำเสียคิดเป็นประมาณร้อยละ 60 ของปริมาณน้ำใช้

ตารางที่ 2.16 ค่าการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

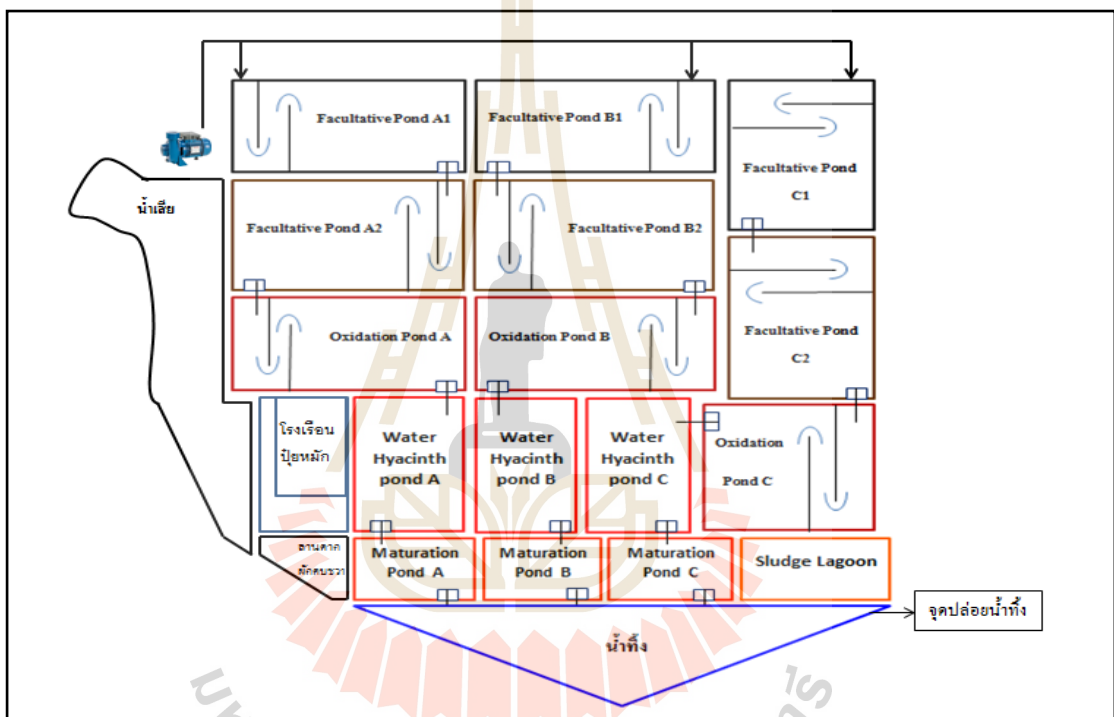
ชนิดบ่อ	จำนวนบ่อ	OLR (kg/d)	HRT (day)	ขนาดบ่อ (W x L x D)	ปริมาตรบ่อ (ลบ.ม.)
บ่อรวมน้ำเสีย	1	375	-	4x5x1.5	36
Facultative pond	6	375	20	55 x 95 x 2	8,929
Oxidation pond	3	150	9	45 x 95 x 1.5	6,250
Water hyacinth pond	3	45	2	25 x 55 x 1.3	1,625
Maturation pond	3	13.5	1	32 x 32 x 1	833
Sludge lagoon	3	354.75	90	27 x 27 x 2	1,330

ตารางที่ 2.17 ปริมาณการใช้น้ำและปริมาณการเกิดน้ำเสีย

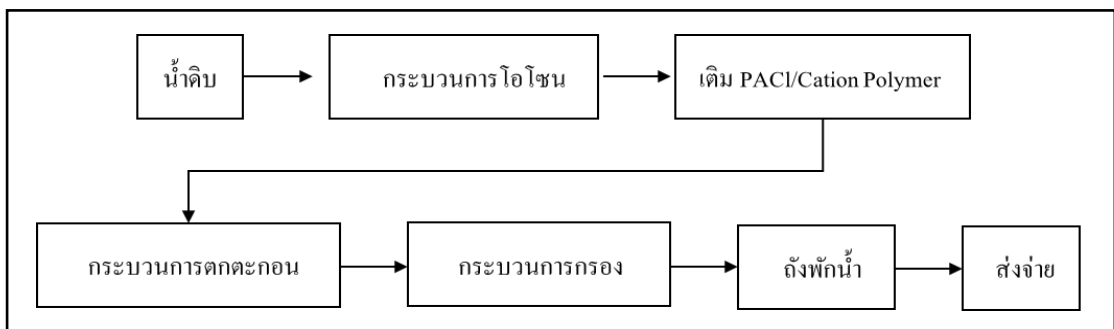
พ.ศ.	ปริมาณการใช้น้ำ (m ³ /day)			ปริมาณน้ำเสีย (m ³ /day)			การเกิดน้ำเสีย (%)
	Avg.	Min-Max	SD.	Avg.	Min-Max	SD.	
2554	2,015.65	1,356-2,699	391.13	1,222.55	840-1,569	222.28	60.79
2555	1,926.83	1431-2573	329.40	1,167.44	845-1,578	207.39	60.53
2556	2,315.32	1431-2634	358.30	1,402.80	916-1,681	212.70	60.60
2557	2,248.06	1,483-2,937	481.07	1,490.00	921-1,883	278.27	61.71
2558	2,783.67	2,500-3,306	453.31	1,731.63	1,531-2,069	298.01	61.94

2.9.5 ระบบหมุนเวียนน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้เริ่มเดินระบบการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่รายละเอียดแผนผังการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 มีจำนวนประมาณ 900 ลบ.ม./วัน คิดเป็นร้อยละ 19 ของปริมาณน้ำใช้ โดยมีประสิทธิภาพการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ ร้อยละ 40 ของปริมาณน้ำเสีย (ตารางที่ 2.18) โดยนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำซักโครกให้กับกับหอพักสุรนิตเวศ 7, หอพักสุรนิตเวศ 8, หอพักสุรนิตเวศ 9, หอพักสุรนิตเวศ 10, หอพักสุรนิตเวศ 11, หอพักสุรนิตเวศ 12, หอพักสุรนิตเวศ 13, หอพักสุรนิตเวศ 15 และ หอพักสุรนิตเวศ 16 โดยทำการส่งจ่ายน้ำรีไซเคิลตั้งแต่ พ.ศ. 2554



รูปที่ 2.10 กระบวนการบำบัดน้ำเสียน้ำเสียทางชีวภาพแบบบ่อผึ่ง



รูปที่ 2.11 กระบวนการผลิตน้ำหมุนเวียน

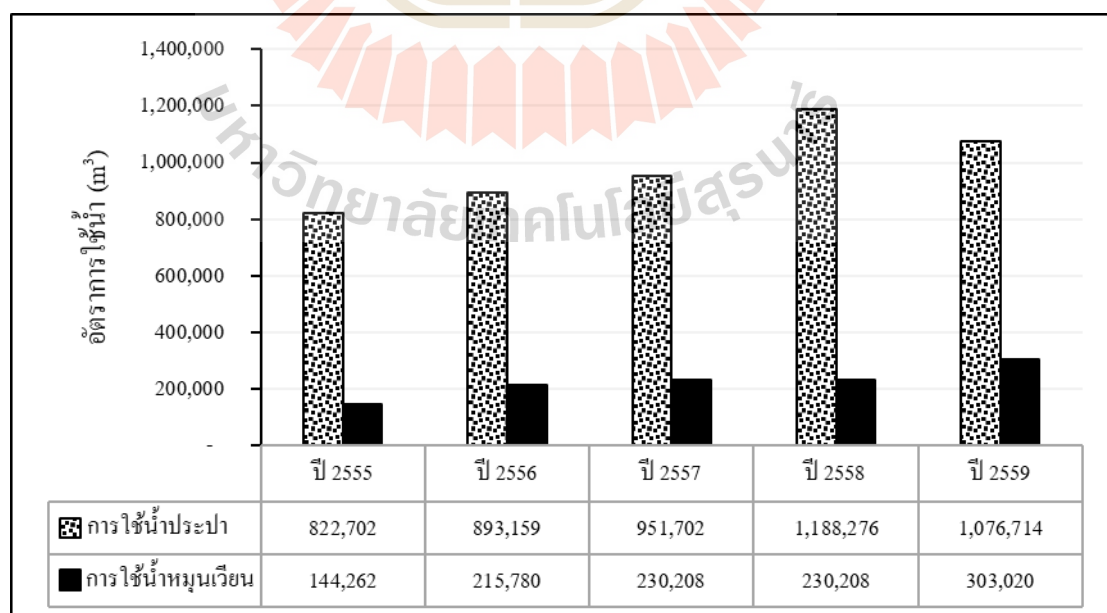
2.9.6 สรุปข้อมูลสมมูลน้ำของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากข้อมูลปริมาณการใช้น้ำประปาแสดงในรูปที่ 2.12-2.13 พบว่าในการผลิตน้ำประปาจำนวน 4,520 ลบ.ม.ต่อวัน จะทำการแจกจ่ายน้ำไปตามโซนพื้นที่ต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัย โดยปริมาณน้ำประปาส่วนใหญ่ร้อยละ 46 นำมาใช้ประโยชน์ในโซนหอพักนักศึกษา เมื่อมีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์จึงหมุนเวียนกลับมาใช้ในโซนหอพักนักศึกษาเป็นบริเวณแรก เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำประปา โดยมีอัตราการหมุนเวียนน้ำประมาณร้อยละ 20 ของปริมาณน้ำประปาทั้งหมด ซึ่งมีปริมาตรน้ำประมาณ 800 ลบ.ม./วัน นำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำซักโครกในหอพักนักศึกษา และจากข้อมูลการใช้น้ำประปาในช่วงปี พ.ศ. 2558-2559 พบว่ามีแนวโน้มการใช้น้ำประปาลดลง เนื่องจากมีอัตราการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำมาใช้ทดแทนน้ำประปาเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จากร้อยละ 17 ในปีพ.ศ. 2558 เป็นร้อยละ 28 ในปีพ.ศ. 2559

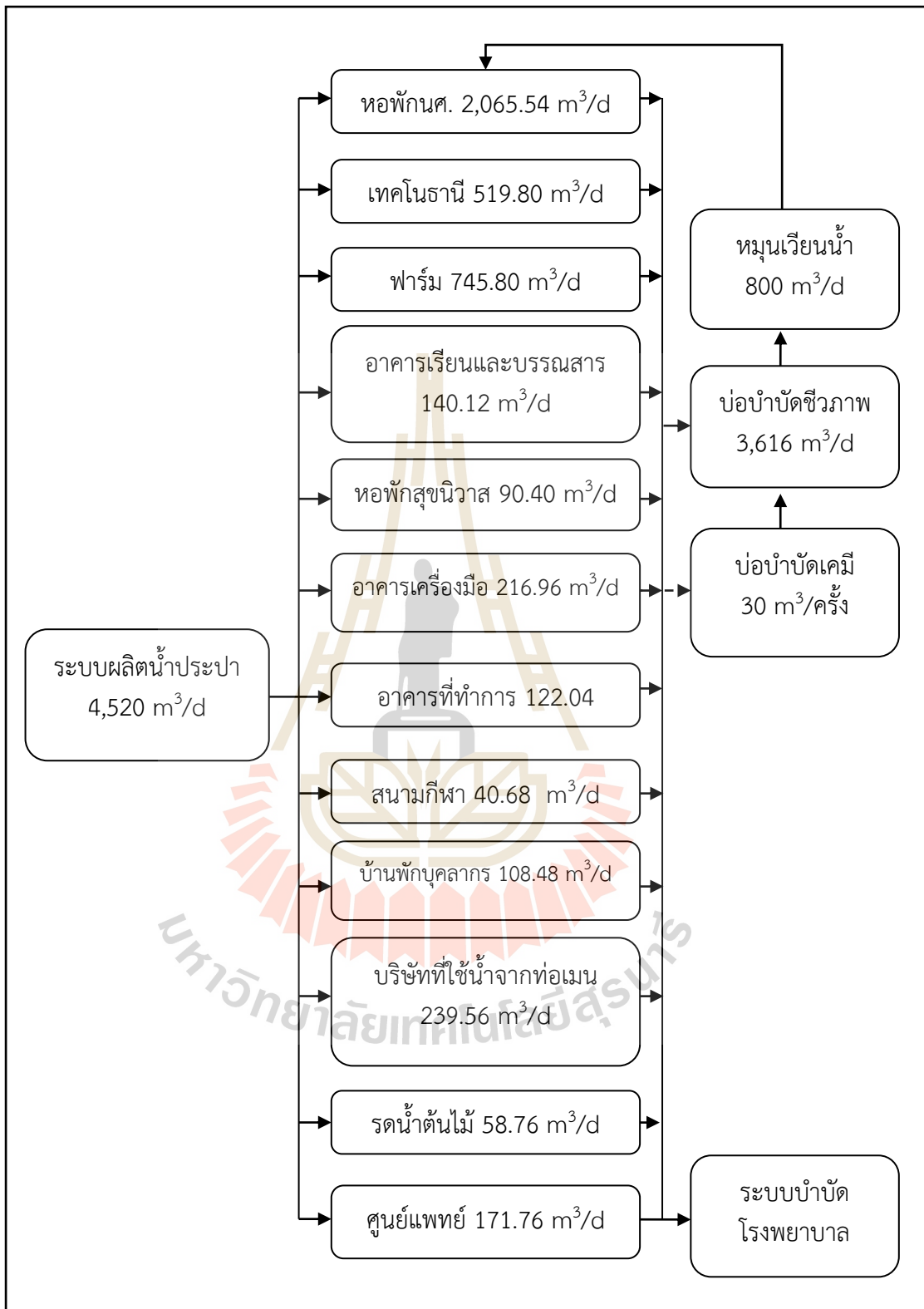
ตารางที่ 2.18 อัตราการผลิตน้ำรีไซเคิล พ.ศ. 2554-2557

พ.ศ.	ปริมาณการใช้น้ำ (m ³ /day)			ร้อยละการหมุนเวียน (%)
	Avg.	Min-Max	SD.	
2554	382.65	281-469	83.22	31.30
2555	409.95	225-575	96.11	35.12
2556	695.25	396-862	139.94	46.66
2557	561.43	178-893	251	32.42

หมายเหตุ : ร้อยละปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.12 ข้อมูลการใช้น้ำประปาและน้ำหมุนเวียน



รูปที่ 2.13 สมดุลมวลน้ำการใช้ของมทส.

2.10 การมีส่วนร่วมของประชาชน (กรมชลประทาน, 2552)

2.10.1 ความหมายและความสำคัญ

การมีส่วนร่วมของประชาชน หมายถึง กระบวนการที่ประชาชนและผู้ที่เกี่ยวข้องมีโอกาสได้เข้าร่วมในการรับรู้ เรียนรู้ ทำความเข้าใจ ร่วมแสดงทัศนะ ร่วมเสนอปัญหา/ประเด็นที่สำคัญที่เกี่ยวข้อง ร่วมคิดแนวทาง ร่วมการแก้ปัญหา ร่วมในกระบวนการตัดสินใจ และร่วมกระบวนการพัฒนาในฐานะหุ้นส่วนการพัฒนา

การเปิดโอกาสให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมในการบริหารราชการ หมายถึง กิจกรรมที่หน่วยงานภาครัฐสนับสนุนให้ประชาชนเข้ามามีส่วนร่วมในขั้นตอนการบริหารราชการต่าง ๆ ตั้งแต่ร่วมคิด ร่วมตัดสินใจ ร่วมดำเนินการ ร่วมรับผลประโยชน์ และร่วมประเมินผล

ความสำคัญของการมีส่วนร่วมของประชาชน

- 1) เพื่อต้องการให้ประชาชนเกิดความผูกพัน รู้สึกรัก และมีจิตสำนึกเป็นเจ้าของท้องถิ่นของตนเอง
- 2) เพื่อให้หน่วยงานของรัฐต่าง ๆ บริหารงานด้วยความโปร่งใส ตรงกับความต้องการของประชาชน และรับผิดชอบต่อประชาชนมากที่สุด
- 3) เพื่อให้มีการตรวจสอบการบริหารงานของหน่วยงานของรัฐทุกขั้นตอน

2.10.2 กลุ่มเทคนิคการมีส่วนร่วมในการรับฟังความคิดเห็น

ประกอบด้วย 6 เทคนิค ดังนี้

1) การสัมภาษณ์รายบุคคล (Community Interview)

เพื่อให้ได้ข้อมูล ความเป็นจริง ความคิดเห็นในเรื่องใดหรือหลายเรื่องอย่างลึกซึ้ง และตรงกับความเป็นจริงของสถานการณ์ เหตุการณ์ หรือโครงการที่จะดำเนินการในพื้นที่ ทำให้รับรู้ลักษณะทั่วไปของบุคลิกภาพ ทัศนคติ ค่านิยม และอื่น ๆ จากการแสดงอารมณ์หรือพฤติกรรมออกมาระหว่างการสัมภาษณ์ ลักษณะของการสัมภาษณ์ที่ดี ควรต้องคำนึงถึงในเรื่องต่อไปนี้

- ผู้สัมภาษณ์ คือ ผู้ศึกษา หรือผู้สัมภาษณ์ ต้องได้รับการฝึกฝนวิธีการสัมภาษณ์ เข้าใจวัตถุประสงค์ของเรื่องที่จะทำการศึกษาอย่างละเอียด
- ผู้ให้สัมภาษณ์ คือ บุคคลสำคัญในการให้ข้อมูลที่แท้จริง ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม วัฒนธรรมและประเพณีของผู้ให้สัมภาษณ์ ส่งผลต่อการแสดงออกในการตอบคำถามหรือไม่กล้าตอบคำถาม

2) การสนทนากลุ่ม (Focus Group)

เพื่อใช้สร้างหรือทดสอบข้อมูลความจริงในเรื่องต่าง ๆ ที่เกิดข้อสงสัยและต้องการได้รับคำตอบจากกลุ่มคนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง สัมภาษณ์ความคิด ทัศนคติของกลุ่มคนว่ามีความคิดเห็นเรื่องหนึ่ง ๆ อย่างไรบ้าง และประมวลความคิดเห็นประกอบการตัดสินใจดำเนินการในเรื่องนั้น ๆ และค้นหาคำตอบที่คลุมเครือ โดยอาศัยกลุ่มคนต่าง ๆ ในการแลกเปลี่ยนคำตอบที่ยังไม่ชัดเจน เทคนิคการสนทนากลุ่มย่อยเป็นการสนทนาแบบหลายคน มีผู้ดำเนินการสนทนา ผู้จัดบันทึก ผู้เอื้ออำนวยความสะดวกต่าง ๆ และวัสดุอุปกรณ์ มีบรรยากาศที่เป็นกันเอง สถานที่ร่มรื่น นั่งล้อมกันเป็นวงกลม เพื่อเห็นสีหน้าท่าทาง คำพูดของกันและกัน การสนทนามีจุดรวมศูนย์ของประเด็นเนื้อหา ร่วมกัน

3) การแสดงความคิดเห็นผ่านเว็บไซต์ (Interactive Website)

ประชาชนสามารถแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับโครงการหรือกิจกรรมได้ อาจจัดให้เป็นเครื่องมือรับฟังความคิดเห็นของประชาชนแบบทางเดียว หรือแบบสองทางก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับนโยบายของหน่วยงานบุคคล หรือองค์กรอื่นที่ประสงค์ได้รับความความคิดเห็นของประชาชน อาจดำเนินการได้ด้วยการนำข้อมูลและข่าวสารที่จัดให้บริการแก่ประชาชนไว้ที่ศูนย์ข้อมูลข่าวสารในรูปเอกสาร (Hard Copy) บรรจุไว้ที่เว็บไซต์ในรูปเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (Soft Copy or Electronic Document) ในระบบฐานข้อมูล (Database System) และดำเนินการเผยแพร่ผ่านระบบอินเทอร์เน็ต ประชาชนสามารถแสดงและส่งความคิดเห็นของตนไปยังหน่วยงาน บุคคลหรือองค์กรอื่นที่ดำเนินการได้ แต่เป็นการส่งหรือแสดงความคิดเห็นผ่านเว็บไซต์ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตและคอมพิวเตอร์ การจัดให้ประชาชนแสดงความคิดเห็นผ่านเว็บไซต์อาจดำเนินการโดยหน่วยงานที่รับผิดชอบโครงการหรืออาจดำเนินการโดยบุคคลหรือองค์กรอื่นที่สนใจก็ได้

4) การสำรวจความคิดเห็น (Surveys and Telephone Polls)

เป็นการสำรวจความคิดเห็นทั่วไปหรือเจาะจงประเด็น โดยใช้แบบสอบถาม (การพบปะหรือส่งไปรษณีย์) ด้วยการเขียนตอบหรือการถามตอบด้วยปากเปล่า (ทั้งพบปะตัวต่อตัวและทางโทรศัพท์) เป็นเทคนิคที่ใช้วัดปริมาณได้ซึ่งจะทำให้เห็นรูปธรรมที่เทคนิคอื่นไม่สามารถทำได้ กลุ่มเป้าหมายที่ใช้สำรวจ ถ้าเป็นกลุ่มเล็กก็จะสอบถามทั้งหมด หรือหากเป็นกลุ่มใหญ่ก็จะสอบถามบางคนโดยใช้วิธีสุ่มตัวอย่าง ต้องใช้วิธีการทางสถิติเพื่อเลือกกลุ่มตัวอย่างและการวิเคราะห์ผล ประเมินผลอย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือ ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการตั้งคำถามและการบริหารจัดการ ดำเนินการตลอดกระบวนการ ผลที่ได้จะคลาดเคลื่อนได้ง่าย ถ้าผู้ปฏิบัติงานไม่ได้รับการฝึกฝนที่ดี หรือมีอคติในเรื่องนั้นเป็นส่วนประกอบของการสัมภาษณ์ชุมชนโดยตรง

5) สายด่วนสายตรง (Hot line)

เป็นเครื่องมือที่ใช้รับฟังความคิดเห็นของประชาชน/ชุมชนทางโทรศัพท์ โดยที่ผู้โทรศัพท์เข้ามาจะโทรฟรีโทรได้ตลอดเวลาทันทีที่ต้องการ เป็นการสื่อสารได้ทั้งทางเดียว และสองทาง คือให้ประชาชนโทรศัพท์เข้ามาสอบถามข้อมูล หรือเสนอข้อมูลหรือความคิดเห็นก็ได้ เป็นการเตรียมข้อมูลที่ชัดเจน (ไม่ใช้ความคิดเห็น) โดยการบันทึกเทปไว้ เพื่อให้ประชาชนสามารถเลือกฟังรายละเอียดที่เขาสนใจ โดยกดหมายเลขตามคำแนะนำในเทปได้ตลอดเวลา ประชาชนที่โทรศัพท์เข้ามาเพื่อเสนอข้อมูลหรือความคิดเห็นที่จะได้รับการบันทึกเทปไว้โดยอัตโนมัติตลอดเวลา ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนข้อคิดเห็นจะมีเจ้าหน้าที่ประจำ

6) การรับฟังความคิดเห็นอย่างเป็นทางการ (Public Hearing)

เป็นกิจการที่ต้องจัดขึ้นก่อนการตัดสินใจ จึงอาจจัดในช่วงการร่างใบอนุญาต หรือช่วงที่หน่วยงานภาครัฐทำการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงข้อเสนอก่อนที่เคาะจัดทำขึ้น หรือในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งที่เหมาะสม แต่ต้องเป็นก่อนทำการตัดสินใจขั้นสุดท้าย มีลักษณะเป็นทางการ กล่าวคือประชาชนจะเสนอความคิดเห็น และจะต้องมีการจัดทำการบันทึกคำให้การ เป็นการสื่อสารทางเดียว กล่าวคือเป็นการให้ข้อมูลเพียงด้านเดียวจากประชาชนหรือผู้แทนกลุ่มที่สนใจได้เสีย ผู้จัดรับฟังความคิดเห็นจะนั่ง

ฟังและทำการบันทึก เนื่องจากเป็นเวทีการรับฟังความคิดเห็นของประชาชน มิใช่เวทีการสนทนาโต้ตอบแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับภาครัฐ ผลการรับฟังความคิดเห็น แม้จะไม่มีผลผูกพันให้หน่วยงานทางปกครองต้องปฏิบัติตาม แต่หน่วยงานจำเป็นต้องนำข้อคิดเห็นทั้งด้านบวกและด้านลบ รวมทั้งประเด็นสำคัญไปประกอบการพิจารณา

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 กระบวนการสร้างและรวมตะกอน

จากศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) ซึ่งพบในแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่เกิดจากการเจริญเติบโตหรือการเน่าเปื่อยของพืช และเกิดจากกระบวนการสลายตัวของจุลชีพต่าง ๆ (Dilling and Kaiser, 2002) ซึ่งมีโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่สามารถผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูเปิด 0.45 ไมครอนได้ ทำให้กำจัดได้ยากด้วยกระบวนการผลิตน้ำประปาทั่วไป (Crozes et al., 1995) โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นฮิวมิก (Humic Substance) และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิก (Non-humic Substance) ส่วนที่เป็นฮิวมิกมีสมบัติเป็นสารอินทรีย์กลุ่ม Hydrophobic (HPO) ประกอบด้วย กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก และฮิวมิน เป็นต้น ส่วนสารอินทรีย์ที่ไม่ใช่สารฮิวมิกมีสมบัติเป็นสารอินทรีย์กลุ่ม Hydrophilic (HPI) ประกอบด้วย Hydrophilic acids โปรตีน กรดอะมิโน และคาร์โบไฮเดรต (Newcombe et al., 1997) เมื่อทดลองใช้ความเข้มข้น PACl 40 mg/L ที่ค่า pH เท่ากับ 7 พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ร้อยละ 54 และกำจัด DOC ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPI และ HPO ได้ร้อยละ 49 และ 59 ตามลำดับ (กมลนาวัน อินทนูจิตร์, 2552) และการควบคุมสภาวะในการเดินระบบที่เหมาะสม นอกจากทำให้อนุภาคคอลลอยด์เกิดการตกตะกอน และแยกตัวออกจากน้ำได้ดีแล้ว ยังมีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยเฉพาะสารอินทรีย์กลุ่ม Humic ซึ่งเป็นสารกลุ่มไม่ชอบน้ำ ทำให้มีความสามารถในการตกตะกอนได้ง่ายและเร็วกว่าสารอินทรีย์กลุ่ม Non-humic ที่มีขนาดเล็กและมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้ม จึงเป็นเสมือนสิ่งขัดขวางป้องกันไม่ให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกัน (มันสิน ตันฑูลเวศม์, 2542) สารอินทรีย์ดังกล่าวจึงถูกกำจัดได้ยากส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด DOC ต่ำ ดังนั้น กระบวนการสร้างและรวมตะกอน โดยการใช้ PACl เป็นสารสร้างตะกอน สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม Humic ได้ดีกว่าสารอินทรีย์กลุ่ม Non-humic (ทัศนาก่อเส้ง, 2553)

การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยการใช้ PACl เป็นสารสร้างตะกอน ที่ค่า pH เท่ากับ 6 ในการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในน้ำดิบเพื่อผลิตน้ำประปา พบว่า PACl สามารถกำจัดความขุ่นและ DOC ได้ดีกว่า $FeCl_3$ และสารส้ม ($PACl > FeCl_3 >$ สารส้ม) มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น และ DOC ร้อยละ 84 และ 50 ตามลำดับ (Rizzo et al., 2005) ในน้ำดิบที่มีค่า DOC ค่อนข้างต่ำ (2.1-2.4 mg/L) พบว่าการใช้ PACl เป็นสารสร้างตะกอน มีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ได้ดีกว่าการใช้สารส้ม โดยการใช้ PACl 40 mg/L ที่ค่า pH เท่ากับ 6 มีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ร้อยละ 31 (Velasco et al., 2007) และจากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสาร Humic โดยการใช้ PACl พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสาร Humic ในน้ำดิบร้อยละ 94 และ 65 ตามลำดับ (Nagare et al., 2008) การใช้ PACl เป็น

สารสร้างตะกอน และควบคุมค่า pH ให้เท่ากับ 7 พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น UV-254 และ DOC ในน้ำดิบได้สูงสุด (Yan et al., 2008)

2.11.2 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) และสภาวะการเดินระบบอัลตราฟิลเตรชันในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียจะถูกนำมาผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนและกรองผ่านคาร์ทริก 100 ไมครอน ก่อนเข้าสู่ระบบกรองอัลตราฟิลเตรชัน โดยแปรผันเพอมีเอทฟลักซ์เท่ากับ 60 80 และ 100 L/m².h ตามลำดับ เมื่อได้เพอมีเอทฟลักซ์ที่เหมาะสมนำมาแปรผันสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเททเท่ากับ 25:75 50:50 และ 75:25 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าเพอมีเอทฟลักซ์เท่ากับ 80 L/m².h และสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเทท 25:75 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ความขุ่น สารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) และสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 32 67 17 และ 16 ตามลำดับ และทำการล้างระบบด้วย NaOH 0.02 N และ NaOCl 100 mg/L เนื่องจากน้ำทิ้งประกอบไปด้วยแบคทีเรียและสาหร่าย ดังนั้น การล้างทำความสะอาดด้วยดังกล่าวสามารถลดความต้านทานของเมมเบรนและลดการอุดตันที่เกิดขึ้นให้สามารถนำเยื่อกรองกลับมาเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ (สุกุลยา ทับอุไร, 2554)

2.11.3 กระบวนการสร้างและรวมตะกอนร่วมกับอัลตราฟิลเตรชัน

Leiknes et al. (2004) ได้ประยุกต์ใช้กระบวนการไมโครฟิลเตรชันร่วมกับกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้ PACl เป็นสารสร้างตะกอน ในการผลิตน้ำดื่มเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ พบว่าสามารถลดความขุ่นให้เหลือน้อยกว่า 0.2 NTU มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้มากกว่าร้อยละ 95 และมีประสิทธิภาพในการกำจัด UV-254 ร้อยละ 85 และจากศึกษาของ Kabsch-Korbutowicz (2005) ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำผิวดินด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน และระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยทดสอบกับสารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ Al₂(SO₄)₃ NaAlO₂ และ PACl ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด คือ ชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอน ค่า pH ของน้ำ ผลการศึกษาพบว่า Al₂(SO₄)₃ NaAlO₂ และ PACl มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) ได้ดีที่สุดในช่วงร้อยละ 45-62 เมื่อใช้กระบวนการสร้างและรวมตะกอน ร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชันที่ช่วง pH 6-8 สามารถบำบัด NOM ได้ดีที่สุดในช่วงร้อยละ 60-70 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารสร้างตะกอน Al₂(SO₄)₃ และ PACl ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนร่วมกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น แต่ NaAlO₂ มีประสิทธิภาพในการบำบัด

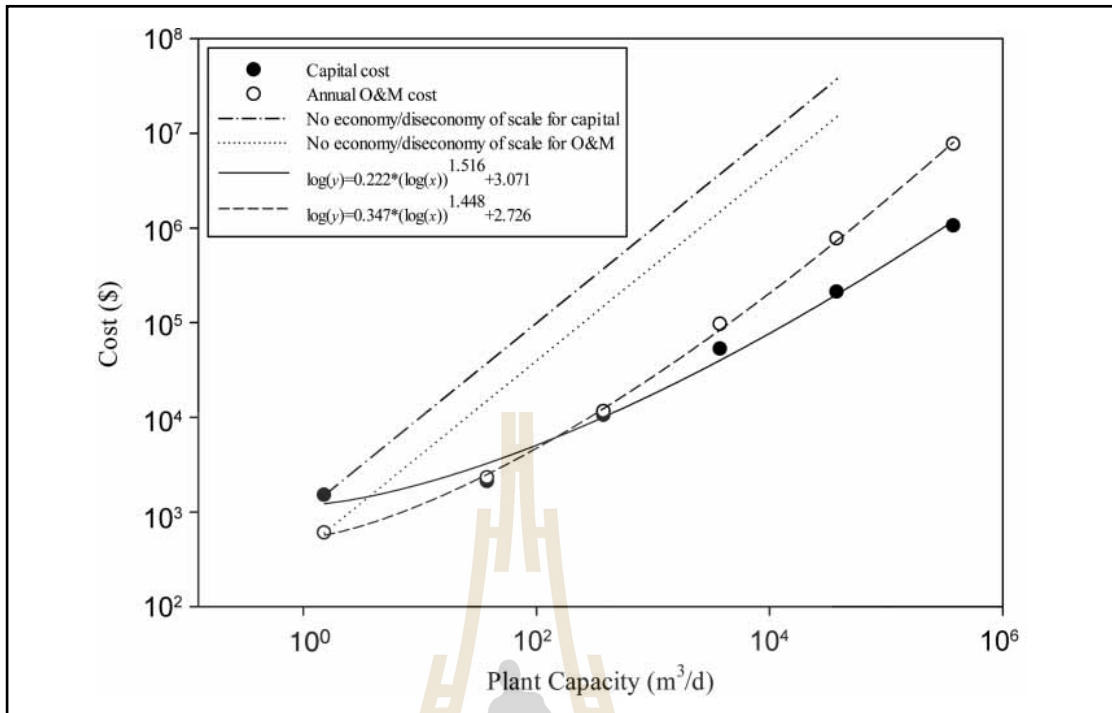
2.11.4 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพ

จากการศึกษาคุณภาพน้ำดื่มและการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพในพื้นที่ภาคเหนือของปากีสถาน พบว่าปริมาณโลหะหนักที่ร่างกายได้รับสัมผัสในแต่ละวัน (ADI) ของ Cr > Fe > Ni > Cu > Mn > Zn > Co > Pb > Cd และ HQ ของ Ni > Cd > Cu > Mn > Pb > Zn > Cr น้ำที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักเหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโรค เช่น โรคมะเร็งจางระร่วง ไวรัสตับอักเสบ ปวดศีรษะ ความดันโลหิตสูง ปวดท้อง มีปัญหาเกี่ยวกับตับ และไต เป็นต้นดังนั้นจึง

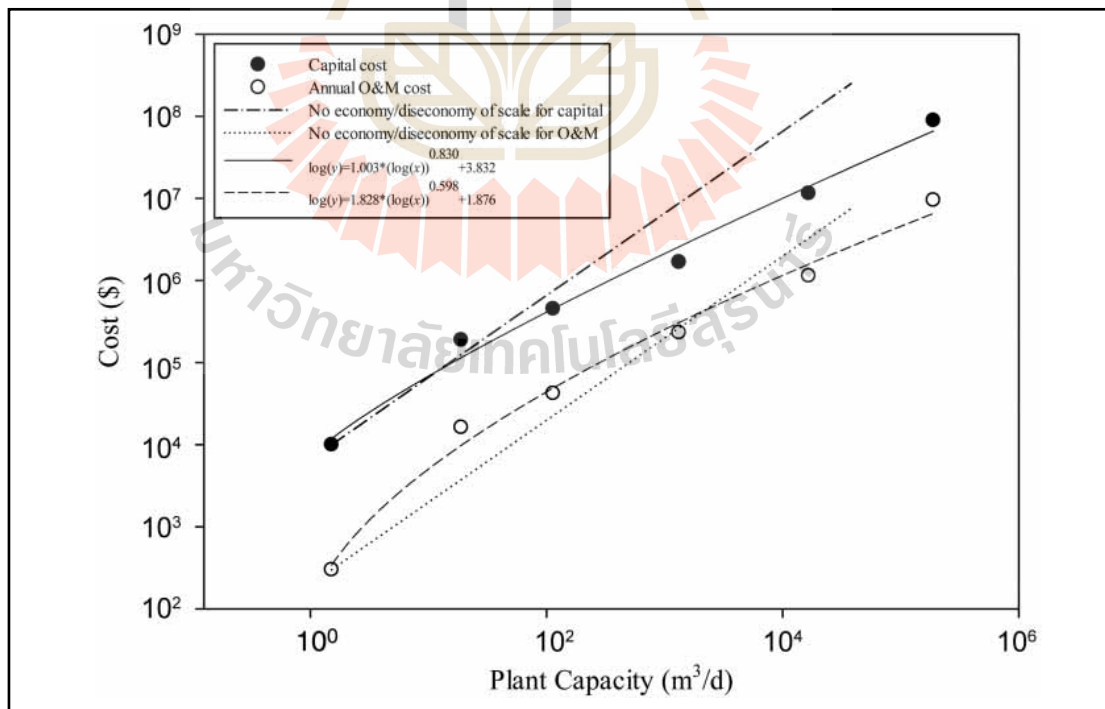
ต้องหาแนวทางในการหยุดการปนเปื้อนของแหล่งน้ำดื่มทันที และควรจัดหาน้ำดื่มที่สะอาดให้กับผู้อยู่อาศัยเพื่อลดความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Shah et al., 2012) และจากการประเมินความเสี่ยงสุขภาพในการสัมผัสสัมผัสโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน ได้แก่ As B Ba Be Cd Cu F Hg Mn Mo Ni Pb Sb Se และ Zn ผ่านทางการกิน พบว่าระดับความเสี่ยงสุขภาพด้านที่ไม่ก่อมะเร็งเฉื่อยของประเทศในยุโรปคือ HI เท่ากับ 0.11 และความเสี่ยงสูงสุดพบในฝรั่งเศส กรีซ สเปน และสวีเดน มีค่า HI อยู่ในช่วง 0.15-0.20 ในการประเมินความเสี่ยงสุขภาพที่ก่อให้เกิดมะเร็งจะประเมิน Pb และ Ni เป็นหลัก เนื่องจากเป็นสารพิษสำคัญที่ปนเปื้อนในยุโรป พบว่าระดับความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็งของ As ในฟินแลนด์มีความเสี่ยงต่ำที่สุด (CR เท่ากับ $9.3E-07$) และเดนมาร์ก (CR เท่ากับ $9.9E-07$) พบความเสี่ยงสูงสุดในฝรั่งเศส (CR เท่ากับ $8.6E-06$) สเปน (CR เท่ากับ $6.2E-06$) และกรีซ (CR เท่ากับ $6.0E-06$) โดยระดับความเสี่ยงสุขภาพจะเพิ่มขึ้นในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนในดินสูง เช่น พื้นที่ท่าเหมืองแร่ (Rapant et al., 2011)

2.11.5 ค่าใช้จ่ายในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์

Guo et al. (2014) ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายของระบบหมุนเวียนน้ำสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ทางตรง (Direct Potable Reuse) โดยพิจารณาจากขนาดของระบบหมุนเวียนน้ำที่อัตราการผลิต 37.85, 378.5, 3,785, 37,850, 378,500 m^3/d ซึ่งแบ่งค่าใช้จ่ายออกเป็น 2 ส่วน คือ ค่าลงทุนในการก่อสร้างระบบ และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุง สำหรับระบบ Coagulation-Flocculation ค่าลงทุนก่อสร้างระบบประกอบด้วย ระบบป้อนสารเคมี ท่อ วาล์ว ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการดูแลและควบคุมระบบประกอบด้วย ค่าสารเคมี ค่าพลังงาน ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ซ่อมบำรุง และค่าจ้างแรงงาน เป็นต้น ค่าใช้จ่ายที่อัตราการผลิตต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 สำหรับระบบ Ultrafiltration ค่าลงทุนในการก่อสร้างระบบจะไม่รวมระบบ Pre-treatment ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุงประกอบด้วย ค่าไฟฟ้า ค่าซ่อมบำรุง ค่าสารเคมีในการล้างทำความสะอาดเมมเบรน ค่าจ้างแรงงาน เป็นต้น ค่าใช้จ่ายที่อัตราการผลิตต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และสามารถสรุปสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าใช้จ่ายของแต่ละระบบได้ดังตารางที่ 2.19



รูปที่ 2.14 ค่าใช้จ่ายที่อัตราการผลิตต่าง ๆ ของระบบ CF (Guo et al.,2014)

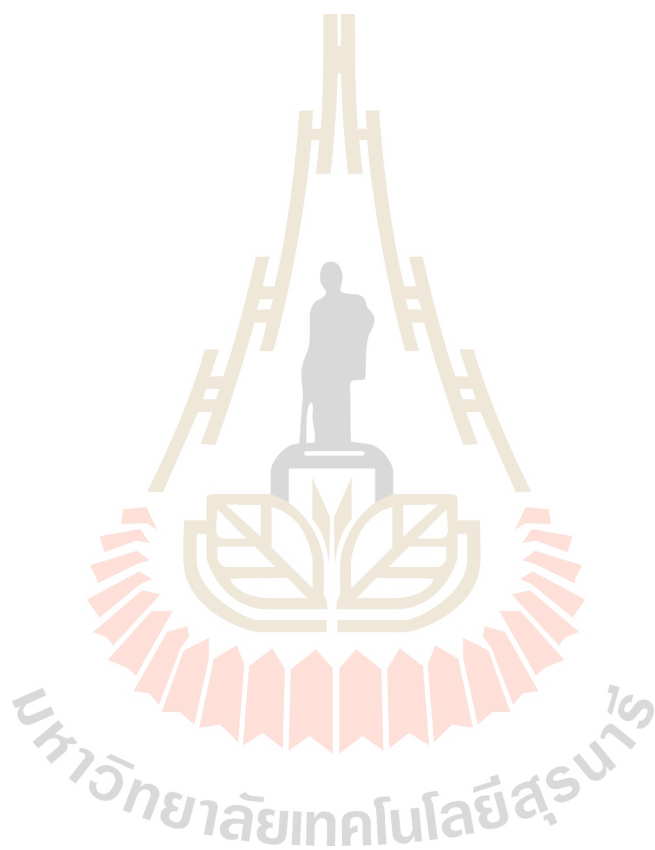


รูปที่ 2.15 ค่าใช้จ่ายที่อัตราการผลิตต่าง ๆ ของระบบ UF (Guo et al.,2014)

ตารางที่ 2.19 สมการที่ใช้คำนวณค่าใช้จ่ายของระบบหมุนเวียนน้ำ

ระบบ	ค่าลงทุน	ค่าซ่อมบำรุงและเดินระบบ
CF	$\log (y) = 0.222 * (\log (x))^{1.516} * 3.071$	$\log (y) = 0.347 * (\log (x))^{1.448} * 2.726$
UF	$\log (y) = 1.003 * (\log (x))^{0.830} * 3.832$	$\log (y) = 1.828 * (\log (x))^{0.598} * 1.876$

หมายเหตุ: y คือ ค่าใช้จ่ายที่ได้จากการคำนวณ
x คือ อัตราการผลิตน้ำหมุนเวียน



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ โดยการประเมินทางเลือกด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงทางด้านสุขภาพ รวมถึงการสำรวจความคิดเห็นของชุมชนในการยอมรับ การนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ รายละเอียดวิธีการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

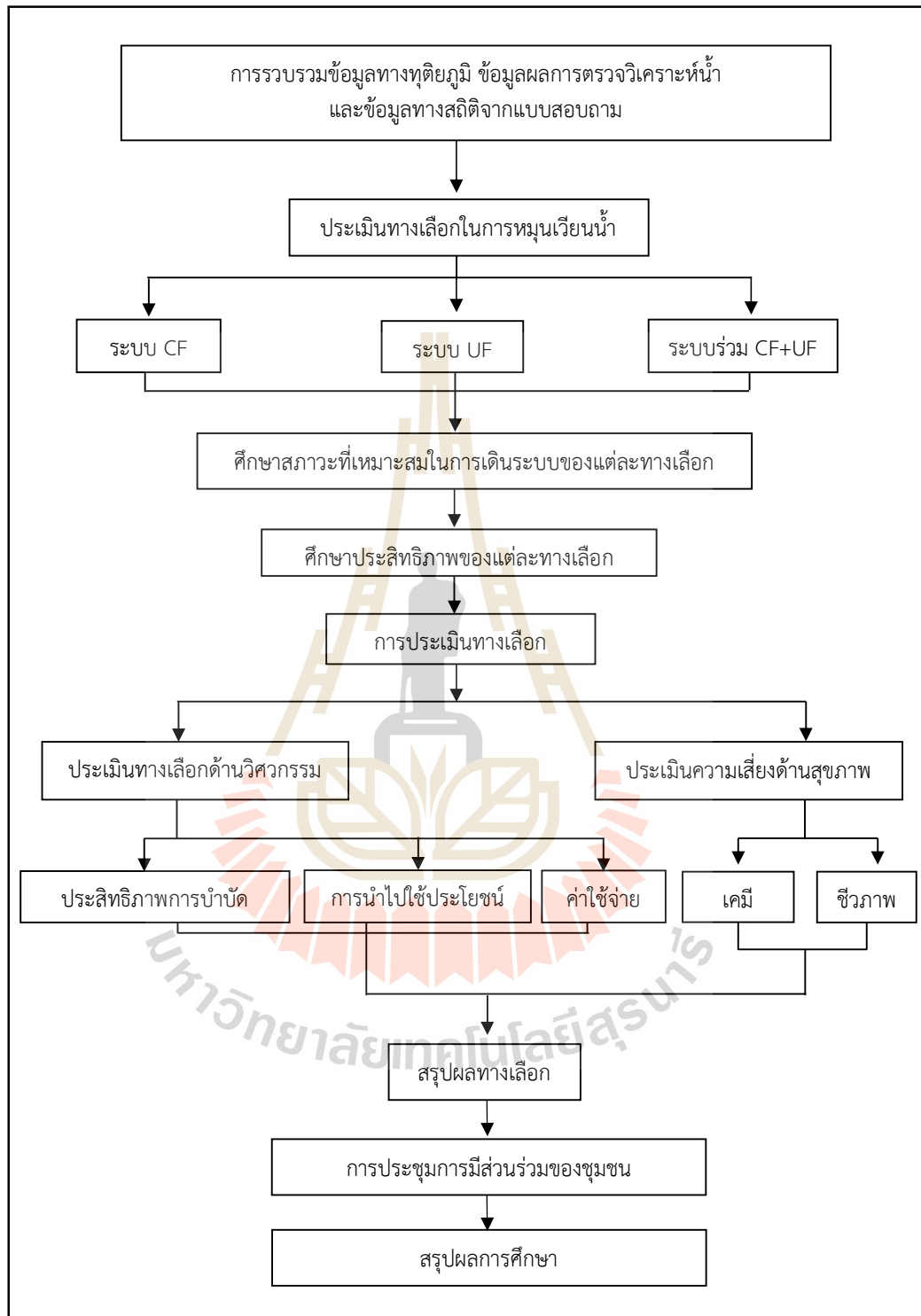
ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 4 และ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

3.2 ระยะเวลาในการศึกษาวิจัย

ระยะเวลาที่ทำการทดลอง ตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2559 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมและการยอมรับของชุมชน โดยผ่านกระบวนการมีส่วนร่วมของชุมชน โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบ 3 ทางเลือก ได้แก่ ระบบสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation: CF), ระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration: UF) และ ระบบร่วมระหว่างระบบสร้างและรวมตะกอน และระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Combination of Coagulation-Flocculation and Ultrafiltration: CF+UF) โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของระบบการหมุนเวียนน้ำ เพื่อใช้ในการประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรม และการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพ จากนั้นจะนำผลการศึกษาดังกล่าวมานำเสนอต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในเขตพื้นที่การศึกษาเพื่อนำมาประเมินการมีส่วนร่วมของชุมชนต่อไปรายละเอียดขั้นตอนการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การศึกษาลักษณะคุณภาพน้ำทิ้ง

ศึกษาลักษณะน้ำทิ้งของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการทบทวนข้อมูลคุณภาพน้ำทิ้งย้อนหลังเป็นระยะเวลา 5 ปี และเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งในช่วงระยะเวลาทำการศึกษ เพื่อทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำในปัจจุบัน นำข้อมูลคุณภาพน้ำทิ้งทั้งหมดมาพิจารณาเลือกระบบการหมุนเวียนเวียนน้ำ โดยระบบที่เลือกในการศึกษาคั้งนี้ ได้แก่

ทางเลือกที่ 1 ระบบ CF (Coagulation-Flocculation) เนื่องด้วยสามารถแยกตะกอนและสารแขวนลอยออกจากน้ำทิ้งได้หลายชนิด การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ราคาถูก และการควบคุมดูแลระบบไม่ยุ่งยาก (Yu et al., 2016)

ทางเลือกที่ 2 ระบบ UF (Ultrafiltration) เนื่องด้วยเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรค สารอินทรีย์ และโลหะหนักได้พร้อม ๆ กัน มีขนาดกะทัดรัดไม่เปลืองเนื้อที่ ใช้เวลาในการบำบัดสั้น (Bergamasco et al., 2011)

ทางเลือกที่ 3 ระบบร่วม CF+UF (Coagulation-Flocculation and Ultrafiltration) เนื่องด้วยจากการทบทวนข้อดี-ข้อเสีย ของระบบหมุนเวียนน้ำมาใช้ร่วมกันจะทำให้มีความสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ สารแขวนลอย เชื้อโรค ปริมาณโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น และสามารถลดการอุดตันของเยื่อกรองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดเยื่อกรอง หรือการเปลี่ยนเยื่อกรองใหม่ (Touffet et al, 2015; Uyak et al., 2008)

การทบทวนข้อมูลคุณภาพน้ำย้อนหลัง เพื่อพิจารณาค่าคุณภาพน้ำที่เป็นสิ่งคุกคามที่อาจมีผลต่อสุขภาพ ใช้เป็นข้อมูลในการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพต่อไป

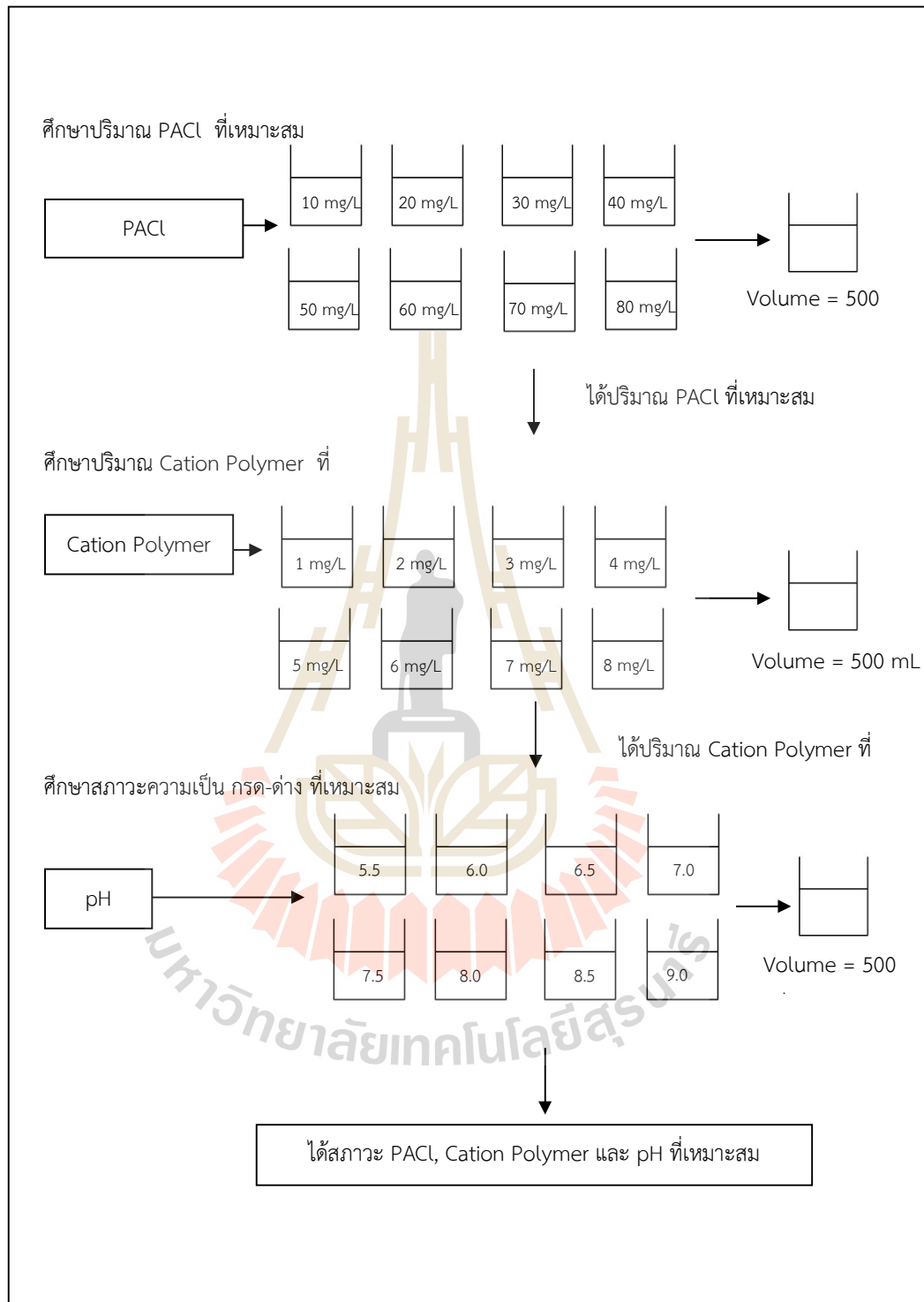
3.3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบของแต่ละทางเลือก

3.3.2.1 ทางเลือกที่ 1 ระบบ CF

ในการศึกษาระบบ CF จะใช้ Polyaluminum Chloride (PACl) เป็นสารสร้างตะกอน (Coagulant) สูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$ และ Cation Polymer เป็นสารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant Aids) โดยทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณ PACl , Cation Polymer และ pH เป็นต้น ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมจะใช้เครื่อง Jar Test โดยกำหนดค่าสภาวะในการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.1 และปริมาตรน้ำที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 500 มิลลิลิตร รายละเอียดขั้นตอนการศึกษหาสภาวะที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 3.2 รายละเอียดวิธีการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ และเครื่องมือที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่กำหนดสำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของทางเลือกที่ 1 ระบบ CF (Sher et al., 2013)

สภาวะ	หน่วย	กวนเร็ว	กวนช้า	การตกตะกอน
ความเร็วรอบ	รอบ/นาที	200	40	-
ระยะเวลา	นาที	5	15	15
ปริมาตรน้ำ	mL	500	500	500



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของทางเลือกที่ 1 ระบบ CF

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำ (APHA et al., 2005)

พารามิเตอร์	เครื่องมือ	วิธีการวิเคราะห์
pH	pH Meter	Standard Method 4500-H+ B
ความขุ่น	Turbidity Meter	Standard Method 2130 B
สี	Spectrophotometer	Standard Method 2120 B.
ของแข็งละลายน้ำ (TDS)	-	Gravimetric method
ของแข็งแขวนลอย (TSS)	-	Gravimetric method
สภาพการนำไฟฟ้า	Conductivity/TDS Meter	Standard Method v 2510B
COD	-	Close Reflux
โลหะหนัก	ICP-MS	-
Total Coliform	-	Membrane Filter Method
Fecal Coliform		

3.3.2.2 ทางเลือกที่ 2 ระบบ UF

ในการศึกษาระบบ UF จะทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ โดยเลือกจากการศึกษาของสุกุลยา ทัชอุไร (2554) พบว่าการเดินระบบที่เพอมีเอทฟลักซ์เท่ากับ 80 L/m².h และสัดส่วนน้ำเพอมีเอทต่อรีเทนเททเท่ากับ 25:75 มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สี สารอินทรีย์ธรรมชาติ และสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียดีที่สุดในระยะเวลาในการเดินระบบจะทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง เพื่อนำมาประเมินประสิทธิภาพของระบบ สำหรับรายละเอียดเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.3 จากผลการศึกษาของสุกุลยา ทัชอุไร (2554) พบว่าทุกครั้งที่เปลี่ยนสภาวะการเดินระบบจะทำการล้างระบบด้วย NaOH 0.02 N และ NaOCl 100 mg/L เนื่องจากน้ำทิ้งประกอบไปด้วยแบคทีเรียและสาหร่าย ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จะทำการล้างทำความสะอาดด้วยด่างกล้าวเพื่อลดความต้านทานของเมมเบรน และลดการอุดตันที่เกิดขึ้นให้สามารถนำเยื่อกรองกลับมาเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3.2.3 ทางเลือกที่ 3 ระบบร่วม CF+UF

ในการศึกษาระบบร่วม CF+UF จะนำสภาวะที่เหมาะสมของระบบ CF และระบบ UF มาใช้ในการเดินระบบร่วม โดยนำน้ำทิ้งผ่านระบบ CF ก่อน หลังจากนั้นจึงนำน้ำเข้าสู่ระบบ UF

3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบในแต่ละทางเลือก

การศึกษาประสิทธิภาพของแต่ละทางเลือก จะเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบการบำบัดน้ำเสียของมทส. มาทำการหมนเวียนน้ำผ่านทั้ง 3 ทางเลือก โดยจุดเก็บน้ำทิ้งดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งครั้งละ 3 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 3 ครั้งต่อสัปดาห์ และทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของทั้ง 3 ทางเลือก โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ได้แก่ ความขุ่น, สี และ COD และนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัด เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ รายละเอียดและวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างและความถี่ในการเก็บตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.4 ค่าโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Cd และ Pb เป็นต้น

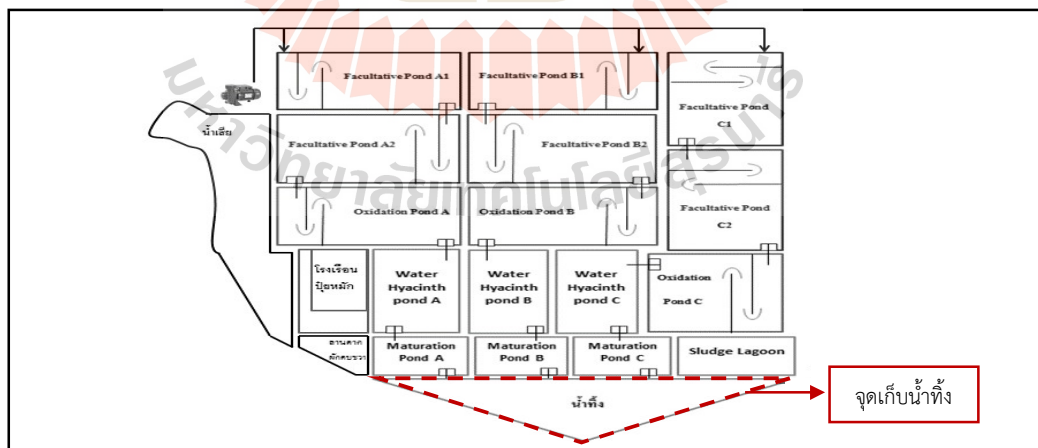
ทางเลือกที่ 1 ระบบ CF เก็บตัวอย่างที่จุด A1 และ B1 ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ทางเลือกที่ 2 ระบบ UF เก็บตัวอย่างน้ำที่จุด A2 และ B2 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยกำหนดให้ระบบ UF หมายถึง น้ำเข้าสู่ชุดกรองคาร์บอน 100 ไมครอน และส่งต่อไปยังเมมเบรน UF

ทางเลือกที่ 3 ระบบรวม CF+UF เก็บตัวอย่างน้ำที่จุด A3, B3 และ C3 ดังแสดงในรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ลักษณะของเยื่อกรอง	คุณสมบัติ
โมเดล	VF (SP)-0912
ความเร็วสารป้อนเข้า (ลิตร/นาที่)	6-12
ลักษณะการกรอง	จากข้างในออกข้างนอก
ชนิดของเมมเบรน	โพลีซัลโฟน
พื้นที่เมมเบรน (ตารางเมตร)	6
ช่วงน้ำหนักโมเลกุลที่กักกันสาร (MWCO) (ดาร์ตัน)	20,000
ช่วงค่าพีเอชที่ใช้งาน	2-13
ช่วงแรงดันในการเดินระบบ	2-3 บาร์ (30-45 ปอนด์/ตารางนิ้ว)
แรงดันล้างย้อน	2 บาร์ (30 ปอนด์/ตารางนิ้ว)
รูปแบบการเดินระบบ	แบบไหลขวาง (Cross Flow)

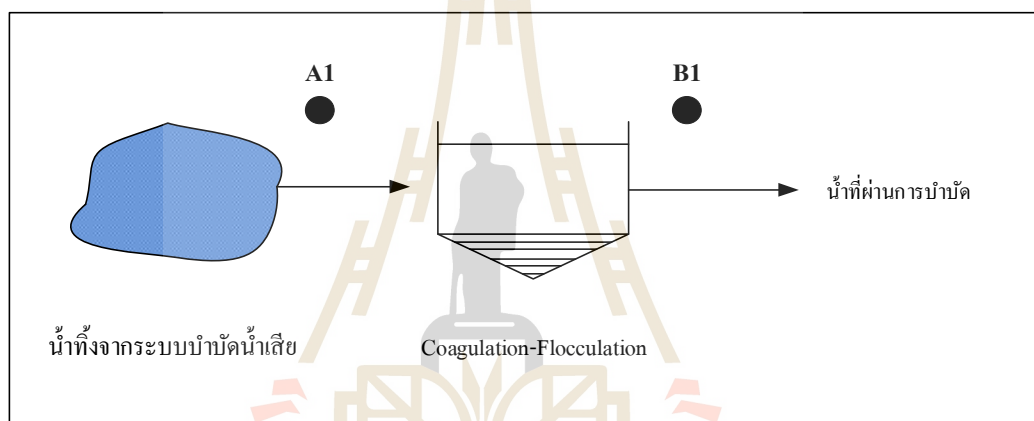


รูปที่ 3.3 จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งเพื่อนำมาใช้ในการศึกษา

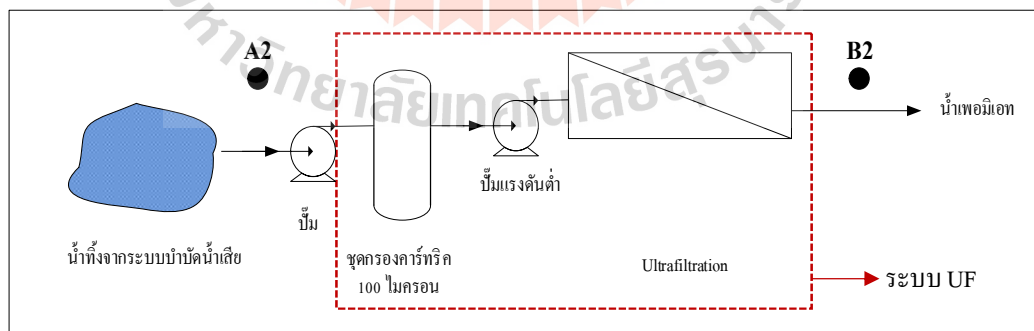
ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างและความถี่ในการเก็บตัวอย่าง

พารามิเตอร์	ศึกษาสถานะที่เหมาะสม	ศึกษาประสิทธิภาพ	
	CF	CF, UF และ CF+UF	
	n	ความถี่ในการเก็บตัวอย่าง	n
pH	22	ทุก ๆ 1 ชม.	30
ความขุ่น	22	ทุก ๆ 1 ชม.	30
สี	22	ทุก ๆ 1 ชม.	30
COD	22	ทุก ๆ 1 ชม.	30

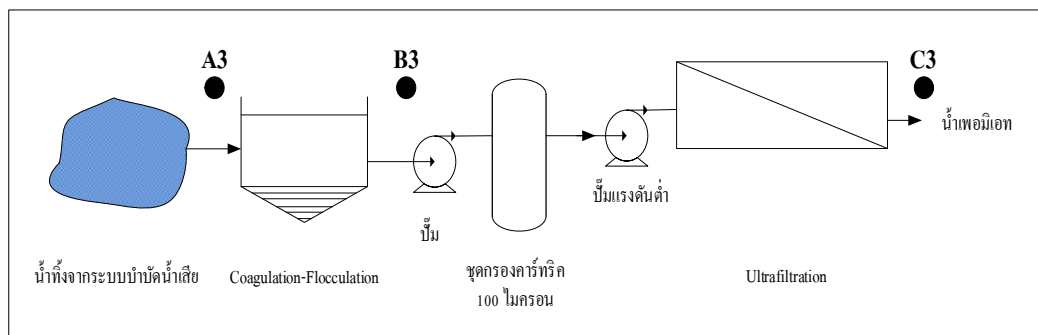
หมายเหตุ: n คือ จำนวนตัวอย่าง



รูปที่ 3.4 ทางเลือกที่ 1 ระบบ Coagulation-Flocculation



รูปที่ 3.5 ทางเลือกที่ 2 ระบบ Ultrafiltration



รูปที่ 3.6 ทางเลือกที่ 3 ระบบร่วม CF+UF

3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การหาสถานะที่เหมาะสมจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ เพื่อเป็นข้อมูลช่วยในการตัดสินใจเลือกสถานะที่เหมาะสม ซึ่งจะพิจารณาจากประสิทธิภาพในการบำบัด โดยใช้สถิติในการทดสอบความแตกต่าง คือ One Way ANOVA และ Paired Sample T-Test (SPSS version 23) โดยมีสมมติฐานในการทดสอบดังนี้

ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป จะใช้สถิติทดสอบ คือ One Way ANOVA ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) โดยจะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อค่า p-value < 0.05 ซึ่งสมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของทุกกลุ่มมีค่าไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพอย่างน้อยหนึ่งกลุ่มมีค่าแตกต่างกัน

เมื่อทดสอบความแตกต่างโดยใช้ One Way ANOVA แล้วพบว่า ยอมรับ H_1 คือ ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพอย่างน้อยหนึ่งกลุ่มมีค่าแตกต่างกัน จึงทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของ 2 กลุ่มที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน จะใช้สถิติทดสอบ คือ Paired Sample T-Test ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) โดยจะปฏิเสธ H_0 หรือยอมรับ H_1 เมื่อค่า p-value < 0.05 ซึ่งสมมติฐานที่ทำการทดสอบ คือ

H_0 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสองกลุ่มมีค่าไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสองกลุ่มมีค่าแตกต่างกัน

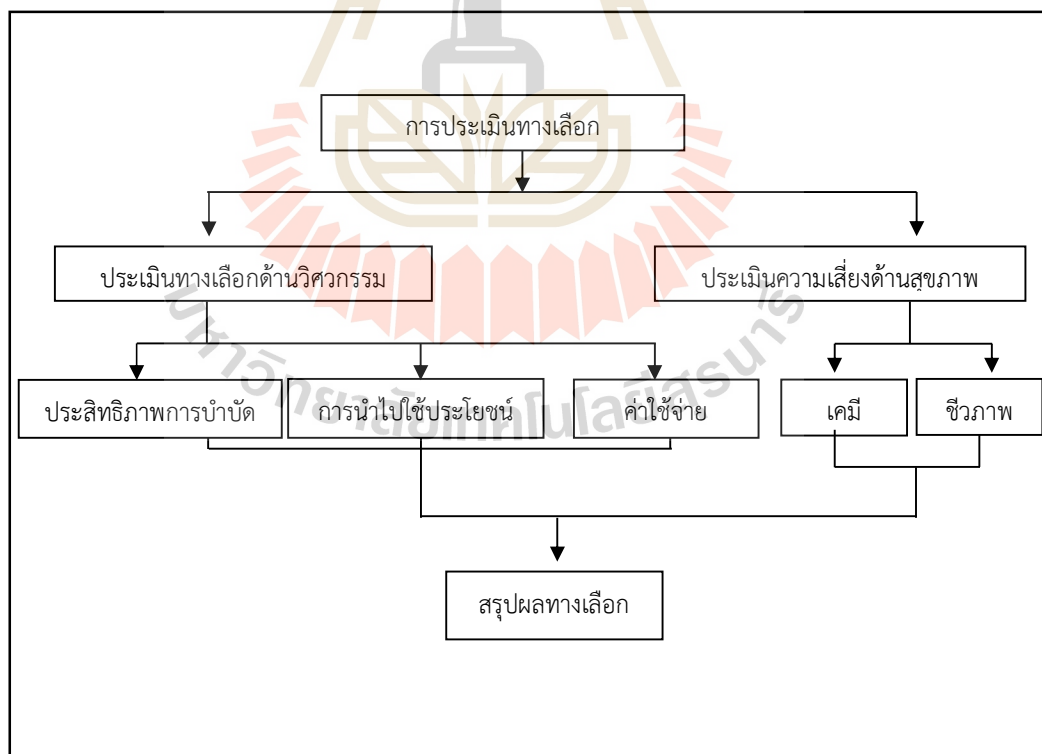
3.3.5 การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ

การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ จะพิจารณาโดยใช้การประเมินทางด้านวิศวกรรมร่วมกับการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพ ซึ่งขั้นตอนการประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ แสดงดังรูปที่ 3.7 มีรายละเอียดและเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินแต่ละด้านดังต่อไปนี้

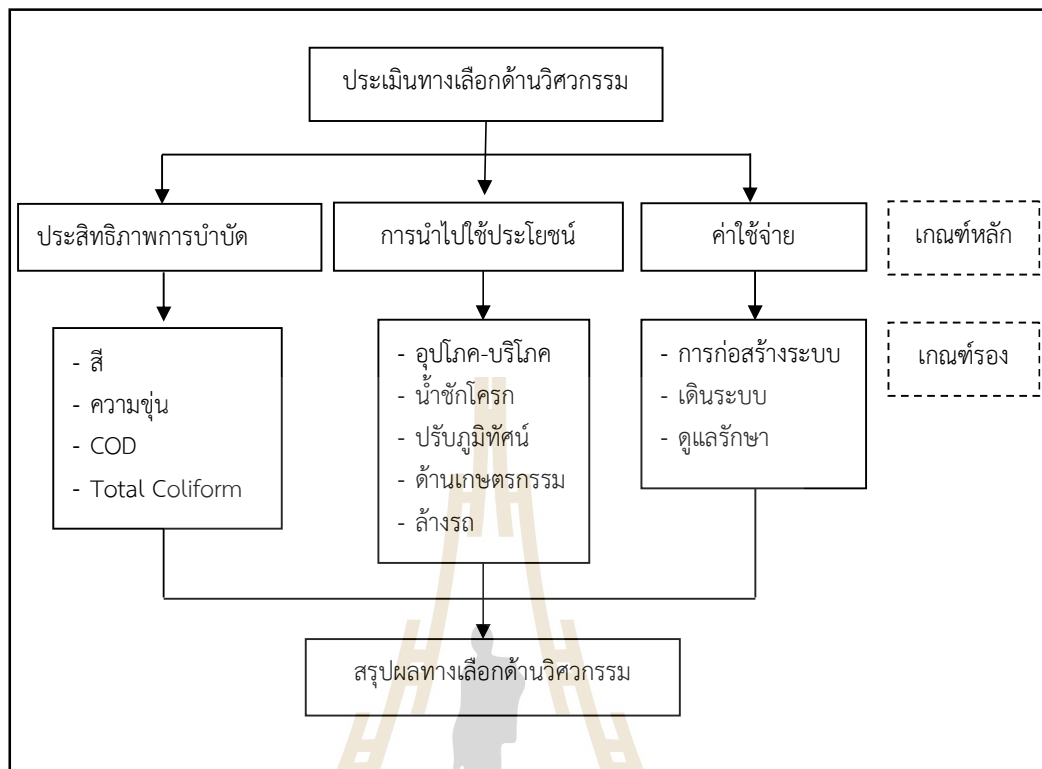
3.3.5.1 การประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรม

ในการประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรมจะใช้ข้อมูลประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำของแต่ละทางเลือกของระบบหมุนเวียนน้ำ, ค่าคุณภาพน้ำออกจากระบบ (ใช้ในการพิจารณาการนำไปใช้ประโยชน์) และค่าใช้จ่าย (ค่าก่อสร้าง, ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ และค่าดูแลรักษาระบบ) แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยการประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำจะใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) ช่วยในการตัดสินใจ เนื่องจากเป็นกระบวนการตัดสินใจจากเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการประเมินอย่างเป็นระบบ และให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่าวิธีอื่น ๆ เนื่องจากมีการเปรียบเทียบเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ละคู่ก่อนการตัดสินใจ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินเป็นปริมาณตัวเลข ทำให้ง่ายต่อการจัดลำดับความสำคัญ (สุธรรม อรุณ, 2554) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงนำกระบวนการ AHP มาช่วยในการตัดสินใจเลือกทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zeng et al. (2007) และ Girish et al. (2011) ศึกษาการประเมินทางเลือกของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยพิจารณาค่าใช้จ่ายของระบบ ประสิทธิภาพของระบบ และการบริหารจัดการระบบ ขั้นตอนในการประเมินมีรายละเอียดดังนี้

- 1) คำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์หลักที่ใช้ในการประเมินทางเลือกด้านวิศวกรรม คือ ประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำ, การนำไปใช้ประโยชน์ และค่าใช้จ่ายของระบบ โดยการสร้างตารางเมตริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเป็นคู่



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ



รูปที่ 3.8 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินทางเลือกด้านวิศวกรรม

2) ขั้นตอนการหาค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล

การคำนวณความสอดคล้องกันของเหตุผล (Concurrency Reasonable; C.R.) เป็นการตรวจสอบว่าผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความถูกต้องและสอดคล้องกันของเหตุผลหรือไม่ ในการคำนวณหาค่า C.R. ต้องคำนวณหาค่า λ_{\max} ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากการนำค่าเปรียบเทียบในแต่ละเกณฑ์คูณกับค่าความสำคัญ ผลลัพธ์ที่ได้นำมาหารด้วยค่าความสำคัญ จากนั้นนำผลหารมารวมกันและหารด้วยจำนวนเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาให้ความสำคัญ (n) ดังสมการที่ 3-1 จากนั้นคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) ดังสมการที่ 3-2 และคำนวณหาค่า C.R. ดังสมการที่ 3-3 โดยอาศัยค่าดัชนีชี้วัดความสอดคล้องตามขนาดของเมตริกซ์ (Random Consistency Index: R.I.) ดังแสดงในตารางที่ 3.5

การแปลผล ถ้า C.R. \leq 0.1 แสดงว่าค่าของแต่ละเกณฑ์มีความสอดคล้องกันสามารถนำค่านำหนักสำคัญไปใช้ได้ ถ้า C.R. $>$ 0.1 แสดงว่าค่าของแต่ละเกณฑ์ไม่มีความสอดคล้องกัน ต้องปรับค่าหรือให้ค่าแต่ละเกณฑ์ใหม่

$$\lambda_{\max} = \text{ผลรวมของผลหาร/จำนวนเกณฑ์} \quad (3-1)$$

$$\text{C.I.} = (\lambda_{\max} - n) / (n-1) \quad (3-2)$$

C.R. = C.I./R.I.

(3-3)

3) คำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์รอง รายละเอียดดังต่อไปนี้

เกณฑ์หลักเรื่องคุณภาพน้ำ มีเกณฑ์รองที่นำมาพิจารณา คือ ค่าคุณภาพน้ำหมุนเวียนจากทั้ง 3 ทางเลือก ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านน้ำประปา น้ำใช้ในการชักโครก น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ น้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม และน้ำล้างรถ เกณฑ์มาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.6

เกณฑ์หลักเรื่องประสิทธิภาพ มีเกณฑ์รองที่นำมาพิจารณา คือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น สี COD และ Total Coliform จากการศึกษาประสิทธิภาพทั้ง 3 ทางเลือก ในการเปรียบเทียบความสำคัญของประสิทธิภาพต้องมีการจัดลำดับของประสิทธิภาพให้อยู่ใน 5 เกณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 3.7

เกณฑ์หลักเรื่องค่าใช้จ่าย มีเกณฑ์รองที่นำมาพิจารณา คือ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและการเดินระบบ เป็นต้น จากการศึกษาของ Guo et al. (2014) ทำการศึกษาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและการเดินระบบหมุนเวียนน้ำ โดยหาความสัมพันธ์ของอัตราการผลิตน้ำของระบบและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น โดยแบ่งสมการในการคำนวณเป็น 2 สมการ คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและการเดินระบบดังตารางที่ 3.8

4) นำทางเลือกที่กำหนดไว้ในตอนแรก คือ ระบบ CF, ระบบ UF และ ระบบรวม CF+UF มาเปรียบเทียบผ่านเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจที่ละเกณฑ์ เพื่อจัดลำดับความสำคัญของทางเลือก

ตารางที่ 3.5 ค่าดัชนีความสอดคล้องตามขนาดของเมตริกซ์ (R.I.)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

ตารางที่ 3.6 มาตรฐานคุณภาพน้ำในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ

พารามิเตอร์	หน่วย	มาตรฐาน				
		ประปา	ชักโครก	การเกษตร	ภูมิทัศน์	ล้างรถ
pH	-	6.5-8.5	6-9	6-9	6-9	6-9
Turbidity	NTU	4	5	-	10	5
Color	Pt-Co	15	-	-	-	-
TSS	mg/L	-	-	-	-	-
TDS	mg/L	1000	-	1500	1000	1000

ตารางที่ 3.7 เกณฑ์การจัดลำดับความสำคัญของประสิทธิภาพในการบำบัด

เกณฑ์	1	2	3	4	5
ช่วงประสิทธิภาพ	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100

ตารางที่ 3.8 สมการที่ใช้สำหรับประเมินค่าใช้จ่ายของระบบหมุนเวียนน้ำ (Guo et al., 2014)

ระบบ	ค่าลงทุน	ค่าซ่อมบำรุงและเดินระบบ
CF	$\log(y) = 0.222 * (\log(x))^{1.516} * 3.071$	$\log(y) = 0.347 * (\log(x))^{1.448} * 2.726$
UF	$\log(y) = 1.003 * (\log(x))^{0.830} * 3.832$	$\log(y) = 1.828 * (\log(x))^{0.598} * 1.876$

หมายเหตุ: y คือ ค่าใช้จ่ายที่ได้จากการคำนวณ
x คือ อัตราการผลิตน้ำหมุนเวียน

3.3.5.2 การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพ

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาช่องทางการสัมผัสผ่านทางกรกิน ขณะอาบน้ำ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเขตร้อนบ้านเรือนมีการระบายอากาศได้ดี โอกาสที่จะได้รับสารผ่านทางเดินหายใจจึงต่ำมาก (มัลลิกา ปัญญาคะโป และผ่องศรี เผ่าภูรี, 2550) และการประเมินการรับสัมผัสผ่านทางผิวหนังมีข้อจำกัดของค่าอ้างอิง (Reference dose) จากฐานข้อมูลของ IRIS (2009) ที่ใช้สำหรับการประเมินความเสี่ยงที่เกิดขึ้น ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงจำกัดขอบเขตการประเมินเฉพาะการประเมินความเสี่ยงผ่านทางกรกินจากการใช้น้ำประปาขณะอาบน้ำเท่านั้น โดยพิจารณาสิ่งคุกคามสุขภาพ 2 ด้าน คือ เคมีและชีวภาพ โดยสิ่งคุกคามสุขภาพทางเคมีที่พิจารณา คือ โลหะหนักที่ไม่ก่อมะเร็งและก่อมะเร็ง ได้แก่ Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Cd และ Pb ซึ่งเป็นสารกลุ่มโลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และสิ่งคุกคามสุขภาพทางชีวภาพ คือ เชื้อ *E.coli* ซึ่งเป็นเชื้อก่อโรคที่มีน้ำเป็นสื่อ โดยขั้นตอนในการประเมินความเสี่ยง แสดงดังรูปที่ 3.9 และมีรายละเอียดขั้นตอนการประเมินดังนี้

1) ระบุคุณลักษณะของสิ่งคุกคาม ศึกษาลักษณะน้ำทิ้งของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการทบทวนข้อมูลคุณภาพน้ำทิ้งย้อนหลังเป็นระยะเวลา 5 ปี เพื่อนำข้อมูลมาพิจารณาค่าคุณภาพน้ำที่เป็นสิ่งคุกคามที่อาจมีผลต่อสุขภาพ โดยพิจารณาสิ่งคุกคามสุขภาพ 2 ด้าน คือ เคมีและชีวภาพ โดยสิ่งคุกคามสุขภาพทางเคมีที่พิจารณา ได้แก่ Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Cd และ Pb ซึ่งเป็นสารกลุ่มโลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และสิ่งคุกคามสุขภาพทางชีวภาพ คือ เชื้อ *E.coli* ซึ่งเป็นเชื้อก่อโรค จากนั้นนำน้ำที่ผ่านกระบวนการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 3 ทางเลือก มาวิเคราะห์คุณภาพน้ำเพื่อหาปริมาณของสิ่งคุกคามสุขภาพ

2) การประเมินผลกระทบจากสิ่งคุกคาม ศึกษาการประเมินปริมาณสารที่ร่างกายได้รับเข้าไป และเกิดการตอบสนองต่ออาศัยค่าอ้างอิงในการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ โดยทั่วไปจำแนกความเป็นพิษของสารเคมีได้เป็น 2 ประเภท คือ สารที่ไม่ก่อมะเร็งและสารที่ก่อมะเร็ง (Gevorgyan et al., 2017; Rapant et al., 2011) สำหรับความเสี่ยงทางชีวภาพสามารถคำนวณหาค่าอ้างอิงหรือความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วยจากการสัมผัสจุลินทรีย์ก่อโรคได้ มีรายละเอียดดังนี้

(2.1) สารไม่ก่อมะเร็ง การเกิดผลกระทบต่อสุขภาพส่วนใหญ่ เป็นความผิดปกติแบบมี Threshold Limit ค่าที่ใช้เป็นค่าอ้างอิงในการประเมิน คือ Reference Dose (RfD) ของโลหะหนัก ได้แก่ Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Cd และ Pb โดยค่าอ้างอิงแสดงในตารางที่ 2.9

(2.2) สารก่อมะเร็งที่มีผลต่อยีน เป็นสารกลุ่มที่ไม่มี Threshold Limit หมายความว่าไม่ว่าจะได้รับสารก่อมะเร็งปริมาณมากน้อยเพียงใด ทำให้มีโอกาสในการเกิดมะเร็งได้ ค่าที่ใช้เป็นค่าอ้างอิงในการประเมิน คือ Cancer Slope Factor (SF) ของ As แสดงในตารางที่ 2.9

(2.3) การคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วยจากการสัมผัสเชื้อ *E.coli* ซึ่งจะประมาณจำนวนผู้เจ็บป่วยจากเชื้อ *E.coli* ดังสมการที่ 3-4 และค่าที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 3.9

$$P_{ill} = 1 - [1 + (\text{Dose}/\beta)]^{-\alpha} \quad (3-4)$$

3) การประเมินการรับสัมผัส เป็นการประมวลผลความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่เป็นปัจจัยร่วมในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสสารผ่านการกินขณะอาบน้ำมีรายละเอียดดังนี้

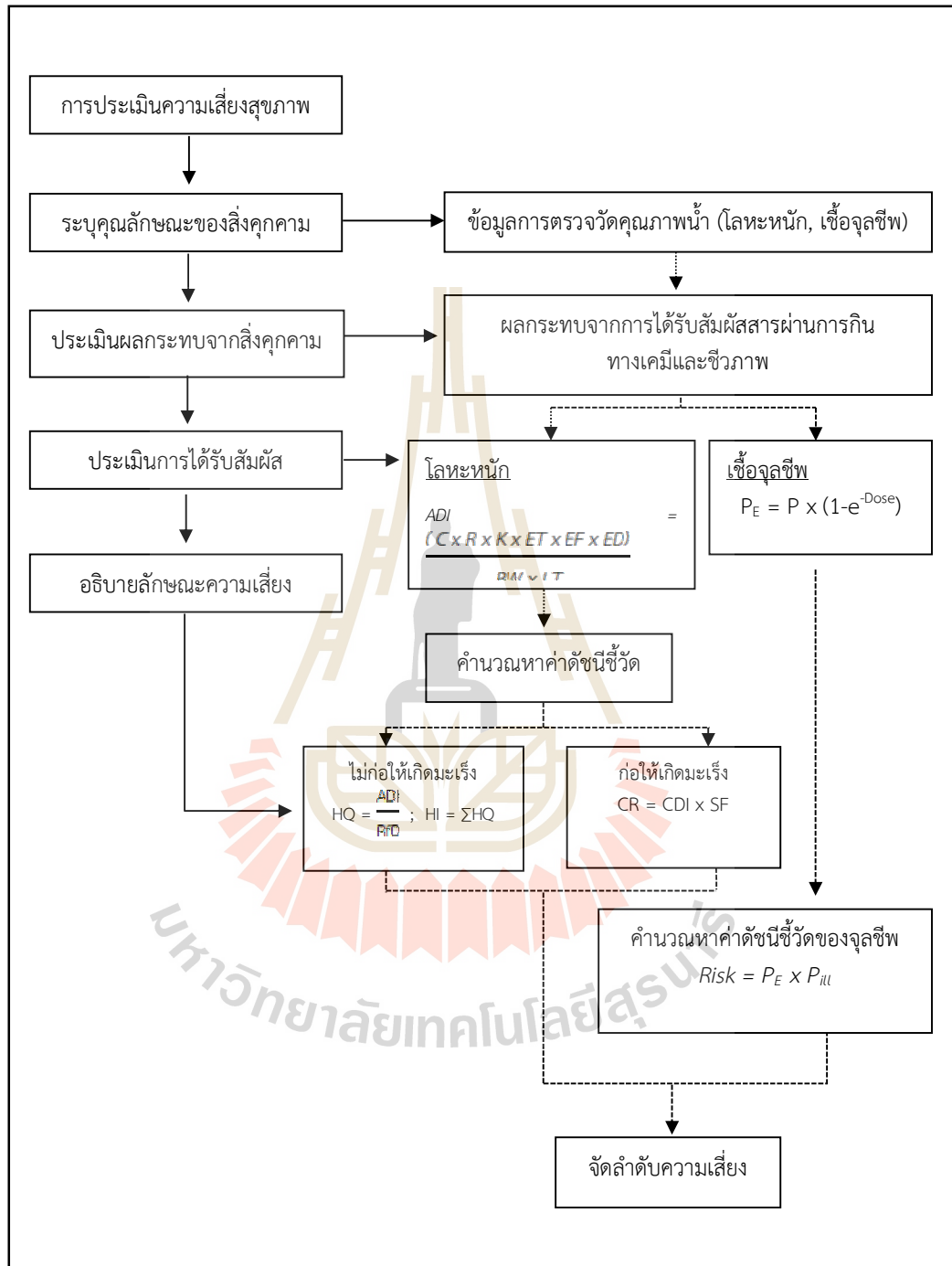
(3.1) การได้รับสัมผัสสารเคมี การคำนวณค่าการได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามทางเคมีแบ่งออกเป็นความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งและความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็งมีขั้นตอนดังนี้

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง

คำนวณการได้รับสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งในแต่ละวัน (Average daily intake; ADI) ดังแสดงในสมการที่ 3-5 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3.10 และคำนวณค่าความเสี่ยง (Hazard quotient: HQ) ดังแสดงในสมการที่ 3-6 กรณีที่มีสารเคมีมากกว่า 1 ชนิด ให้รวม HQ ของสารเคมีแต่ละชนิดเข้าด้วยกัน ดังแสดงในสมการที่ 3-7 จากนั้นนำค่าความเสี่ยง (Hazard index: HI) ที่ได้มาจัดลำดับความเสี่ยงดังแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.9 ค่าที่ใช้หาความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วยจากการสัมผัส *E.coli*

	พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ใช้	อ้างอิง
C	ปริมาณเชื้อก่อโรคในน้ำ	log CFU/mL	ค่าอ้างอิง	จรรยา ยิ้มรัตนบวร (2561)-
R	อัตราการรับสัมผัสขณะอาบน้ำ	mL/hr	20	กรมควบคุมมลพิษ(2556)
	อัตราการรับสัมผัสน้ำต่อวัน (วันละ 2 ครั้ง, ครั้งละ 12 นาที)	mL/day	8	-
P	ความชุกของการเจอเชื้อ <i>E.coli</i> (สัดส่วนตัวอย่างน้ำที่ตรวจพบต่อ จำนวนตัวอย่างน้ำทั้งหมด)	-	0.1	ค่าจากการศึกษา
α	ค่าอ้างอิง	-	0.248	Teunis et al. (2008)
β	ค่าอ้างอิง	-	48.8	Teunis et al. (2008)
Dose	ปริมาณเชื้อที่เข้าสู่ร่างกาย	-	C x R	-



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนในการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ

ตารางที่ 3.10 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่เข้าสู่ร่างกายผ่านทางเดินอาหารขณะอาบน้ำ

พารามิเตอร์		หน่วย	ค่าที่ใช้	อ้างอิง
C	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำ	mg/L	ค่าอ้างอิง	จรียา ยัมรัตน์บวร (2561)
EF	ความถี่ของการได้รับสัมผัส (Exposure Frequency)	days/year	365	USEPA (2011)
ED	ระยะเวลาของการได้รับสัมผัส (Exposure Duration)	years	65	เพ็ญศรี วิจลละญาณ (2554)
LT	เวลาเฉลี่ยตามระยะเวลาของการได้รับสัมผัส (Lifetime Exposure)	days	ED×365	นันทิกา สุนทรไชยกุล (2552)
BW	น้ำหนักตัว (Body Weight)	kg	60	USEPA (2011)
ET	ระยะเวลาที่สัมผัสขณะอาบน้ำ (วันละ 2 ครั้ง, ครั้งละ 12 นาที)	hr/day	0.4	USEPA (1989)
R	อัตราการรับสัมผัสขณะอาบน้ำ	mL/hr	20	กรมควบคุมมลพิษ (2556)
K	แฟคเตอร์ที่ใช้แปลงค่าปริมาตร	-	1 L/1000 mL	-
HQ	ค่าความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง	-	-	-
ADI	การได้รับสารในแต่ละวัน	mg/kg.day	-	-
RfD	Reference dose	mg/kg.day	-	-
CR	ค่าความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง	-	-	-
SF	Cancer Slope Factor	mg/kg-day ⁻¹	-	-
HI	ผลรวมของ HQ	-	-	-

$$ADI = (C \times R \times K \times ET \times EF \times ED) / (BW \times LT) \quad (3-5)$$

$$HQ = ADI / RfD \quad (3-6)$$

$$HI = \sum HQ \quad (3-7)$$

ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง

คำนวณการได้รับสัมผัสสารที่ก่อมะเร็งในแต่ละวัน (ADI) ดังแสดงในสมการที่ 3-5 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3.10 และคำนวณค่าความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Cancer risk: CR) ดังสมการที่ 3-8 จากนั้นนำค่าความเสี่ยง (CR) ที่ได้มาจัดลำดับความเสี่ยง ดังแสดงในตารางที่ 3.12

$$CR = ADI \times SF \quad (3-8)$$

ตารางที่ 3.11 ระดับความเสี่ยงตามค่าประเมิน HI

Risk level	Hallenbeck and Springs (1993)	
	ค่า HI	ระดับความเสี่ยง
1	< 0.1	No hazard
2	0.1 - 1	Low
3	1.1 < 10	Medium
4	> 10	High

ตารางที่ 3.12 ระดับความเสี่ยงตามค่าประเมิน CR (Rapant et al., 2011; Tepanosyan et al., 2017)

Risk level	Calculated cases of cancer occurrence	ระดับความเสี่ยง
1	< 1 per 1,000,000 inhabitants	Very low
2	> 1 per 1,000,000 inhabitants < 1 per 100,000 inhabitants	Low
3	> 1 per 100,000 inhabitants < 1 per 10,000 inhabitants	Medium
4	> 1 per 10,000 inhabitants < 1 per 1,000 inhabitants	High
5	> 1 per 1,000 inhabitants	Very high

(3.2) การได้รับสัมผัสสารทางชีวภาพ ทำการคำนวณการได้รับสัมผัสเชื้อ *E.coli* ผ่านทางการกิน โดยคำนวณความน่าจะเป็นในการสัมผัสกับเชื้อ *E.coli* (Probability of Exposure) จากสมการที่ 3-9 จากนั้นหารระดับความเสี่ยงจากการคำนวณจำนวนผู้ป่วยจากการสัมผัสเชื้อ *E.coli* ที่ปนเปื้อนในน้ำ ดังสมการที่ 3-10 โดยค่าที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 3.11

$$P_E = P \times (1 - e^{-Dose}) \quad (3-9)$$

$$Risk = P_E \times P_{ill} \quad (3-10)$$

4) การอธิบายลักษณะความเสี่ยง (Risk Characterization)

เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้ง 3 ขั้นตอนก่อนหน้าเพื่อนำมาประเมินว่าการสัมผัสสิ่งคุกคามทางเคมีและชีวภาพเป็นความเสี่ยงต่อสุขภาพหรือไม่ และระดับของความเสี่ยงมีมากน้อยแค่ไหน ในการประเมินความเสี่ยงทางเคมีทั้งสารที่ไม่ก่อมะเร็งและก่อมะเร็ง เป็นการนำผลลัพธ์จากสมการที่ 3-7 และ 3-8 มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ระดับความเสี่ยงตามตารางที่ 3.13 และ 3.14 และการประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพเป็นการนำผลลัพธ์จากสมการที่ 3-10 มาแปลผลประมาณจำนวนผู้เจ็บป่วยจากการสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ *E.coli* เมื่อทราบความเสี่ยงที่เกิดขึ้นทั้งทางด้านเคมีและชีวภาพจะนำมาพิจารณาประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสม โดยอาศัย AHP เข้ามาช่วยในการตัดสินใจ

3.3.6 การเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ

การเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำจากข้อมูลการประเมินทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงทางสุขภาพ ซึ่งผ่านการจัดลำดับความสำคัญโดย AHP เมื่อทราบค่าความสำคัญในแต่ละด้านจะนำมาประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสมที่สุด และสรุปผลทางเลือกกว่าระบบใดที่เหมาะสมในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ

3.3.7 กรณีศึกษาการเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ

ศึกษาการใช้ประโยชน์จากการประเมินทางเลือกน้ำหมุนเวียนทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ กรณีศึกษาการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในหอพักนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรม จะพิจารณาค่าประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ ค่าคุณภาพน้ำในการนำไปใช้ประโยชน์ และค่าใช้จ่ายของทั้ง 3 ทางเลือก การประเมินทางเลือกทางด้านความเสี่ยงสุขภาพ จะพิจารณาความเสี่ยงจากการสัมผัสสิ่งคุกคามทางเคมีและชีวภาพทางการกินจากการนำน้ำหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก มาใช้ประโยชน์เป็นน้ำประปาในหอพักนักศึกษา โดยแยกออกเป็นหอพักนักศึกษาชายและหญิง โดยสิ่งคุกคามสุขภาพทางเคมีที่พิจารณาคือโลหะหนักที่ไม่ก่อมะเร็งและก่อมะเร็ง ได้แก่ Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Cd และ Pb และสิ่งคุกคามสุขภาพทางชีวภาพ คือ เชื้อ *E.coli* ซึ่งเป็นเชื้อก่อโรคที่มีน้ำเป็นสื่อ และใช้ AHP เป็นเครื่องมือช่วยหาทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสม โดยการจัดลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือกทั้งการประเมินทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ

3.3.8 การมีส่วนร่วมของชุมชน

ในการศึกษาคั้งนี้ได้มีการจัดทำกระบวนการการมีส่วนร่วมของชุมชน เพื่อสำรวจความคิดเห็นของชุมชนซึ่งเป็นกลุ่มที่มีส่วนได้ส่วนเสียประโยชน์ เพื่อให้การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ เป็นที่ยอมรับของชุมชน ลดความขัดแย้งและความเข้าใจข้อมูลที่ไม่ถูกต้องนำไปสู่กระบวนการในการดูแลรักษาระบบ และสามารถขยายประโยชน์การใช้น้ำให้เพิ่มมากยิ่งขึ้น เนื่องจากชุมชนมีความเข้าใจที่ถูกต้องและตระหนักถึงความสำคัญของการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีขั้นตอนในการศึกษาการมีส่วนร่วม ดังต่อไปนี้

3.3.8.1 การสำรวจปัญหาของการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

เนื่องจาก มทส ได้มีโครงการในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยนำกลับมาใช้ในส่วนเป็นน้ำใช้ในการซักโครกและการรดน้ำต้นไม้ในเฉพาะบางพื้นที่ ดังนั้น ในเบื้องต้นทีมผู้วิจัยจึงทำการศึกษาปัญหาการหมุนเวียนน้ำในสภาพปัจจุบันของ มทส โดยทำการสำรวจเฉพาะในพื้นที่ที่มีการใช้น้ำหมุนเวียน มีรายละเอียดวิธีการศึกษา ดังต่อไปนี้

1) เทคนิคในการสำรวจความคิดเห็น ในการศึกษาคั้งนี้ ใช้วิธีการสำรวจแบบการสัมภาษณ์รายบุคคล (Community interview) โดยทำการสำรวจความคิดเห็นของประชาชนในชุมชน โดยใช้แบบสอบถาม (questionnaire) รายละเอียดแบบสอบถามดังแสดงในภาคผนวก ง เพื่อศึกษาลักษณะทั่วไปของชุมชน ความคิดเห็นต่อประเด็นในเรื่องการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ และทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2) ขนาดของตัวอย่างที่ทำการสำรวจของประชากรภายในพื้นที่การศึกษา คำนวณจากสูตรของทาโร ยามาเน (Taro Yamane) (หนังสือ Statistic : An Introductory Analysis ของ Taro Yamane:1970) ที่ระดับความเชื่อมั่น 90% และความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาด 5% โดยมีสมการในการคำนวณดังแสดงในสมการที่ (3.1) จำนวนตัวอย่างที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 104 ตัวอย่าง และในการศึกษาคั้งนี้ทำการเก็บตัวอย่างจริง 150 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.13

$$n = N / (1 + Ne^2) \quad (3.11)$$

โดยที่ N = จำนวนหน่วยประชากร

n = ขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ระดับความเชื่อมั่น 90%

e = ความคลาดเคลื่อน = 0.10

3) แบบสอบถาม ในการสำรวจความคิดเห็นเกี่ยวกับปัญหาการใช้น้ำหมุนเวียน

ตารางที่ 3.13 จำนวนในการเก็บตัวอย่างแบบสอบถามความคิดเห็นของผู้ใช้น้ำหมุนเวียนของ มทส

หอพักสุรนิเวศ	จำนวนนักศึกษา	จำนวนตัวอย่างที่ต้องเก็บ	จำนวนตัวอย่างที่เก็บจริง
S-7	388	7	12
S-8	373	7	12
S-9	376	7	12
S-10	378	7	12
S-11	365	7	12
S-12	375	7	13
S-13	1,320	23	28
S-15	995	18	23
S-16	1,185	21	26
รวม	5,755	104	150

3.3.8.2 การรับฟังความคิดเห็นของการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

หลังจากทำการศึกษาการประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ทั้งรเพื่อนำเสนอผลการศึกษาวิจัย และรับฟังความคิดเห็นของผู้เข้าร่วมประชุม มีรายละเอียดวิธีการศึกษา ดังต่อไปนี้

- 1) เทคนิคในการสำรวจความคิดเห็น ใช้วิธีการ การจัดประชุมกลุ่มย่อย (Focus Group) จัดประชุมกลุ่มย่อย เป็นการจัดสนทนากลุ่มต่างๆ เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าความคิดเห็นและทัศนคติของแต่ละกลุ่ม ในประเด็นเรื่องทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และทำการรวบรวมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 2) จำนวนตัวอย่าง ในการประชุมกลุ่มย่อยได้ทำการแบ่งกลุ่มประชากร เพื่อจัดการประชุมกลุ่มย่อยออกเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 3.14
- 3) เอกสารในการประชุมกลุ่มย่อย ได้ชี้แจงที่มาของโครงการและความสำคัญของปัญหา และอธิบายวิธีการศึกษาวิจัย พร้อมทั้งนำเสนอผลการศึกษาวิจัยให้ผู้เข้าร่วมประชุมรับฟัง และสอบถามความคิดเห็นของผู้เข้าร่วมประชุมเพื่อเป็นตัวแทนของกลุ่มต่าง ๆ รายละเอียดเอกสารนำเสนอ ดังแสดงในภาคผนวก จ

ตารางที่ 3.14 จำนวนผู้เข้าร่วมประชุมกลุ่มย่อยในแต่ละกลุ่มประชากร

ประเภทกลุ่มประชากร	จำนวนที่เข้าร่วมประชุม	วันที่ในการจัดประชุม
บุคลากร มทส	19	22 พฤศจิกายน 2561
นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา	15	21 พฤศจิกายน 2561
นักศึกษาระดับปริญญาตรี	36	13 ธันวาคม 2561
	36	14 ธันวาคม 2561

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

4.1 คุณลักษณะน้ำทิ้ง

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการศึกษาคุณลักษณะน้ำทิ้ง จากระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการทบทวนข้อมูลคุณภาพน้ำทิ้งย้อนหลังเป็นระยะเวลา 5 ปี (พ.ศ. 2556-2560) ของมทส. และเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง เพื่อทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งระหว่างทำการศึกษานำข้อมูลคุณภาพน้ำทิ้งทั้งหมดมาใช้ประกอบการพิจารณาทางเลือกระบบการหมุนเวียนน้ำให้เหมาะสมกับลักษณะน้ำ ผลการศึกษาลักษณะน้ำทิ้งแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าคุณภาพน้ำทิ้งจากการทบทวนย้อนหลัง 5 ปี และในระหว่างช่วงทำการศึกษามีลักษณะสมบัติไม่แตกต่างกัน ยกเว้นค่าของสีและ COD ซึ่งจะเห็นได้ว่าในระหว่างการศึกษา ค่ามากกว่าค่าคุณภาพน้ำทิ้งย้อนหลัง เนื่องจากค่าที่ได้จากการทบทวนน้ำทิ้งย้อนหลังมีการเก็บข้อมูลเพียงครั้งเดียว (รายละเอียดผลการศึกษาแสดงในภาคผนวก ก.) โดยช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลเป็นช่วงปิดเทอมที่ปริมาณน้ำเสียน้อย มีการปนเปื้อนต่ำ ทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดมีคุณภาพน้ำดีกว่าช่วงเปิดเทอมที่มีปริมาณการใช้น้ำและการปนเปื้อนสูง และจากข้อมูลคุณภาพน้ำทิ้ง พบว่ามีค่าผ่านมาตรฐานน้ำผิวดินเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ประเภทที่ 3 ซึ่งเป็นแหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคและกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อน และสามารถใช้ประโยชน์ด้านการเกษตรได้เช่นเดียวกัน จากงานวิจัยของ Yimrattanabavorn et al. (2018) ทำการสำรวจแหล่งน้ำผิวดินที่นำไปใช้ในการผลิตน้ำประปาในเขตจังหวัดนครชัยบุรีรินทร์ (นครราชสีมา, ชัยภูมิ, บุรีรัมย์ และสุรินทร์) พบว่าคุณภาพน้ำผิวดินที่นำไปใช้ในการผลิตน้ำประปาจัดอยู่ในแหล่งน้ำประเภทที่ 3 สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำประปาได้ มีค่า BOD และ Total Coliform ผ่านมาตรฐานเพียงร้อยละ 50 และ 80 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณภาพของแหล่งน้ำผิวดินที่นำไปผลิตน้ำประปามีลักษณะใกล้เคียงไม่แตกต่างกับคุณภาพน้ำทิ้งที่ตรวจพบในการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้น คุณภาพน้ำทิ้งที่ตรวจวัดได้ของมทส. จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปเพื่อหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อย่างไรก็ตามระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้จำเป็นต้องเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สี TSS จุลชีพ และโลหะหนัก เพื่อให้ได้น้ำที่มีคุณภาพผ่านมาตรฐานและมีความปลอดภัยในการนำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้น ระบบการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation - Flocculation; CF) จึงเป็นระบบหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและ TSS ซึ่งเป็นสารแขวนลอยในน้ำ และสารแขวนลอยในน้ำเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดสีในน้ำ นอกจากนี้ระบบการสร้างและรวมตะกอนยังเป็นระบบที่มีการควบคุมดูแลไม่ยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายถูก (Yu et al, 2016) ส่วนระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration; UF) เป็นระบบที่สามารถกำจัดจุลชีพได้อย่างมีประสิทธิภาพ และระบบมีขนาดกะทัดรัดไม่เปลืองเนื้อที่ ใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้น (Ferrer et al, 2015) แต่เนื่องจากระบบ CF มีข้อจำกัดในเรื่องการกำจัด

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำที่ย้อนหลัง 5 ปี และผลการศึกษาค้างนี้

Parameter	Units	คุณภาพน้ำที่ย้อนหลังเป็นระยะเวลา 5 ปี (2556-2560)							ผลการศึกษาค้างนี้ (ร.ค. 2560-ก.ค. 2561)		ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด	มาตรฐาน น้ำผิวดิน
		2556	2557	2558	2559	2560	Min-Max	Mean±SD	Min-Max	Mean±SD		
จำนวนข้อมูล (n)	ตัวอย่าง	9	10	7	9	5	-	-	210	-	-	-
pH	-	7.60	8.39	7.86	8.36	7.78	7.00-9.20	8.00±0.36	7.07-8.99	7.63±0.10	7.82	5-9
Color	Pt-Co	-	24*	-	-	-	-	24	46-248	130±43.68	77	300
Turbidity	NTU	-	-	-	-	-	-	-	1.79-22.03	8.54±3.91	8.54	-
TSS	mg/L	9.00	27.80	20.29	23.33	24.60	2.00-84.00	21.00±7.23	19.00-58.67	36.63±14.77	28.82	-
TDS	mg/L	358	386	401	428	338	150-542	382±35.47	144-593	399±145.40	391	1500
TKN	mg/L	5.44	10.55	13.00	11.44	19.60	1.00-26.00	12.01±5.10	-	-	12.01	-
Sulfide	mg/L	1.58	0.002	0.01	0.01	0.01	ND-11.00	0.32±0.70	-	-	0.32	-
BOD	mg/L	7.29	18.40	11.57	14.78	14.20	2.00-45.00	13.25±4.13	-	-	13.25	<2
Grease & Oil	mg/L	1.91	2.78	6.86	5.22	7.80	ND-21.00	4.91±2.54	-	-	4.91	-
COD	mg/L	-	18*	-	-	-	-	18	16.70-83.00	43.09±12.25**	30.55	-
Total Coliform Bacteria	CFU/100 mL	-	-	-	-	-	-	-	-	223,500***	253,400	-
Fecal Coliform Bacteria	CFU/100 mL	-	-	-	-	-	-	-	-	15,728***	15,728	-

หมายเหตุ: *n = 1, ** n = 105, ***n = 10



ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำที่ย้อนหลัง 5 ปี และผลการศึกษาครั้งนี้ (ต่อ)

Parameter	Units	คุณภาพน้ำที่ย้อนหลังเป็นระยะเวลา 5 ปี (2556-2560)							ผลการศึกษานี้ (ร.ค. 2560-ก.ค. 2561)		ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด	มาตรฐานน้ำ ผิวดิน
		2556	2557	2558	2559	2560	Min-Max	Mean±SD	Min-Max	Mean±SD		
จำนวนข้อมูล (n)	ตัวอย่าง	9	12	12	9	5	-	-	10	-	-	-
Cr	mg/L	0.028	0.037	0.064	0.024	0.028	ND-0.090	0.036±0.02	0.053-0.096	0.065±0.01	0.051	<0.05
As	mg/L	0.001	0.0003	0.000	ND	ND	ND-0.002	0.001±0.00	0.014-0.023	0.019±0.00	0.010	<0.01
Ba	mg/L	0.339	0.089	0.174	0.142	0.089	0.029-1.260	0.166±0.10	3.333-4.561	3.947±0.43	2.057	-
Cd	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.001-0.029	0.006±0.01	0.006	<0.005
Cu	mg/L	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	ND-0.017	0.001±0.00	0.012-0.233	0.045±0.07	0.023	<0.1
Pb	mg/L	ND	0.003	ND	ND	ND	ND-0.003	0.003	0.057-0.400	0.132±0.10	0.068	<0.05
Hg	mg/L	ND	0.001	ND	ND	ND	ND-0.001	0.001	-	-	0.001	<0.002
Mn	mg/L	0.327	0.023	0.022	0.033	0.006	0.001-2.442	0.082±0.14	1.383-3.344	2.260±0.68	1.171	<1.0
Ni	mg/L	0.004	0.003	0.002	0.001	0.004	ND-0.014	0.003±0.00	0.011-0.025	0.015±0.01	0.009	<0.1
Se	mg/L	ND	0.002	ND	ND	ND	ND-0.002	0.002	0.0003-0.001	0.001±0.00	0.002	-
Zn	mg/L	0.082	0.004	0.045	0.018	0.010	ND-0.346	0.032±0.03	0.516-0.791	0.706±0.08	0.369	<1.0



จุลชีพและระบบ UF มีข้อจำกัดเรื่องการอุดตัน ในการศึกษาครั้งนี้จึงนำทั้งสองระบบมาใช้ร่วมกัน โดยใช้ระบบ CF เป็น Pre-treatment และตามด้วยระบบ UF ระบบ CF ใช้ในการกำจัดความขุ่น และ TSS เพื่อลดปัญหาการอุดตันของเมมเบรน ลดค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาดเมมเบรนหรือการเปลี่ยนเมมเบรน (Touffet et al, 2015; Uyak et al., 2008) จากนั้นจึงใช้ระบบ UF ในการกำจัดจุลชีพเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำ และจากงานวิจัยของ Du et al. (2014) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักจากแหล่งน้ำผิวดิน พบว่าเมื่อใช้ระบบร่วมระหว่าง CF และ UF จะสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าร้อยละ 90 ในการศึกษาวิจัยนี้จึงทำการศึกษเปรียบเทียบการหมุนเวียนน้ำ 3 ทางเลือก ได้แก่ ทางเลือกที่ 1 CF ทางเลือกที่ 2 UF และทางเลือกที่ 3 ระบบร่วม CF+UF

4.2 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการเดินระบบ

ศึกษาสถานะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการเดินระบบ 3 ระบบ คือ กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation; CF) กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration; UF) และระบบร่วมระหว่างการสร้างและรวมตะกอนร่วมกับอัลตราฟิลเตรชัน (Coagulation-Flocculation and Ultrafiltration; CF+UF) มีรายละเอียดดังนี้

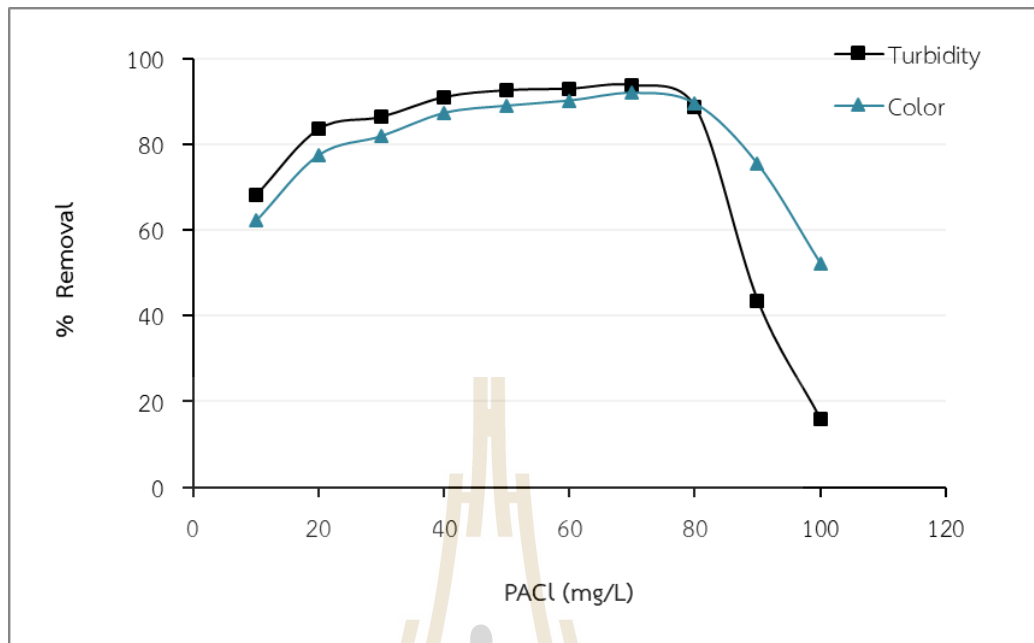
4.2.1 ทางเลือกที่ 1 ระบบ CF

การศึกษาสถานะที่เหมาะสมของระบบ CF จะทำการทดสอบ Jar Test เพื่อศึกษาปริมาณสารสร้างตะกอน สารช่วยสร้างตะกอน และ pH ที่เหมาะสม เพื่อนำไปประเมินประสิทธิภาพการบำบัดของระบบต่อไป มีดังนี้

4.2.1.1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมของระบบ CF

ระบบ CF ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ Polyaluminum choride (PACl) เป็นสารสร้างตะกอน (Coagulant) และ Cation Polymer เป็นสารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant Aids) โดยมีสถานะในการทดสอบ Jar Test ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ในการศึกษาเพื่อหาค่าสถานะที่เหมาะสมได้ทำการศึกษาปริมาณ PACl, Cation Polymer และ pH รายละเอียดผลการศึกษาแสดงในตารางภาคผนวก ข.

จากผลการศึกษาปริมาณ PACl ที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาความเข้มข้นของ PACl ในช่วง 10-100 mg/L ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PACl จาก 10 mg/L ไปเป็น 70 mg/L โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสีอยู่ในช่วงร้อยละ 68.09-93.82 และ 62.19-91.95 ตามลำดับ เนื่องมาจากเมื่อเติม PACl ลงในน้ำจะแตกตัวกลายเป็นไอออนบวก ทำให้เกิดคอลลอยด์ของสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมีประจุบวกสามารถจับตัวกับอนุภาคความขุ่นที่มีประจุลบได้ ซึ่ง PACl เป็นสารสร้างตะกอนที่แตกตัวให้ประจุบวกสูงทำให้ง่ายต่อการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่มีประจุลบให้กลายเป็นกลาง (Neutralization) และเกิดการดูดติดทำให้อนุภาคของคอลลอยด์รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และตกตะกอนแยกตัวออกจากน้ำได้ (มันสิน ตัญฑุลเวศม์, 2542) โดยความเข้มข้นของ PACl มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสี เมื่อความเข้มข้นของ PACl เพิ่มขึ้นทำให้มีประจุบวกเพิ่มขึ้น และมีปริมาณสารเพียงพอในการตกตะกอนคอลลอยด์ออกจากน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการ



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสีที่ปริมาณของ PACl ต่างกัน

กำจัดความขุ่นและสีสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PACl จาก 70-100 mg/L พบว่าเริ่มมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีลดลง โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสีอยู่ในช่วงร้อยละ 15.83-88.71 และ 52.26-89.51 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อ PACl มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นจะแตกตัวมีผลทำให้ pH ของน้ำลดลงเรื่อย ๆ ซึ่ง pH ของน้ำเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการแตกตัวของ PACl โดยเมื่อ pH ลดลงส่งผลให้ไม่สามารถเกิดตะกอน $Al(OH)_3$ ที่จะทำให้เกิดกลไก Sweep coagulation ในการตกตะกอนคอลลอยด์ และเมื่อมีการเติม PACl ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง pH ของน้ำลดลงเท่ากับ 4.5 PACl จะไม่สามารถแตกตัวได้ อนุภาคคอลลอยด์จึงตกตะกอนไม่ได้ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีต่ำ (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2556; Wei et al, 2015)

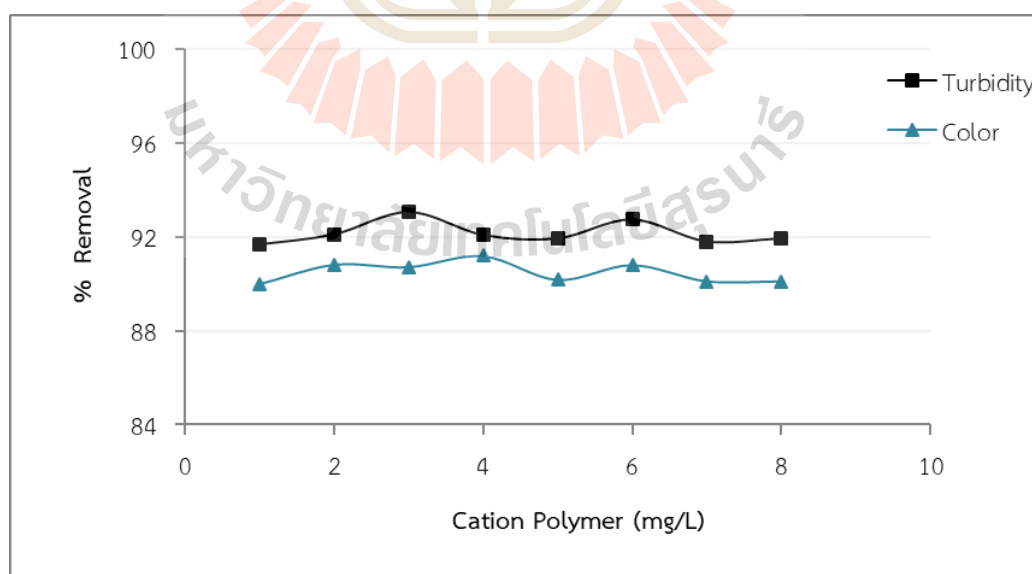
จากผลการศึกษา พบว่าที่ความเข้มข้นของ PACl ในช่วง 60-70 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีมากกว่าร้อยละ 90 และเมื่อนำข้อมูลไปทดสอบทางสถิติด้วย One Way ANOVA พบว่าที่ความเข้มข้นของ PACl ในช่วง 60-70 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value > 0.05) (รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในภาคผนวก ข.) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าปริมาณของ PACl ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการศึกษาเท่ากับ 70 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีเฉลี่ยร้อยละ 93.82 และ 91.95 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

จากผลการศึกษาปริมาณ Cation Polymer ที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาความเข้มข้นของ Cation Polymer ในช่วง 1-8 mg/L ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีไม่แตกต่างกัน โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Cation Polymer ในช่วง 1-3 mg/L

มีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสีอยู่ในช่วงร้อยละ 91.66-93.06 และ 89.98-90.82 ตามลำดับ และเมื่อยิ่งเพิ่มความเข้มข้นของ Cation Polymer มากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย และเมื่อนำข้อมูลไปทดสอบทางสถิติด้วย One Way ANOVA พบว่าในแต่ละช่วงความเข้มข้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$) (รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในภาคผนวก ข.) เนื่องจาก Cation Polymer ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ให้ตะกอนมีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ดีขึ้น โดยอนุภาคคอลลอยด์จะเกาะติดกับสายโพลีเมอร์ซึ่งมีประจุแตกต่างกัน ดังนั้น Cation Polymer จะส่งผลต่อขนาดและความสามารถในการรวมตัวของ Floc ซึ่งจากงานวิจัยของ Mao et al. (2013) พบว่าเมื่อใช้ Cation Polymer เป็นสารช่วยสร้างตะกอนส่งผลให้ขนาดของ Floc มีขนาดใหญ่ และเกิดการรวมตัวของ Floc แน่นขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า Cation Polymer เป็นสายโพลีเมอร์ที่มีประจุบวกสูงทำให้ส่งผลต่อการ Neutralization ของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำด้วย ทำให้ใช้ปริมาณของสารสร้างตะกอนน้อยลง จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณของ Polymer ที่เหมาะสม คือ 3 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีสูงสุดเฉลี่ยร้อยละ 92.73 และ 90.80 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

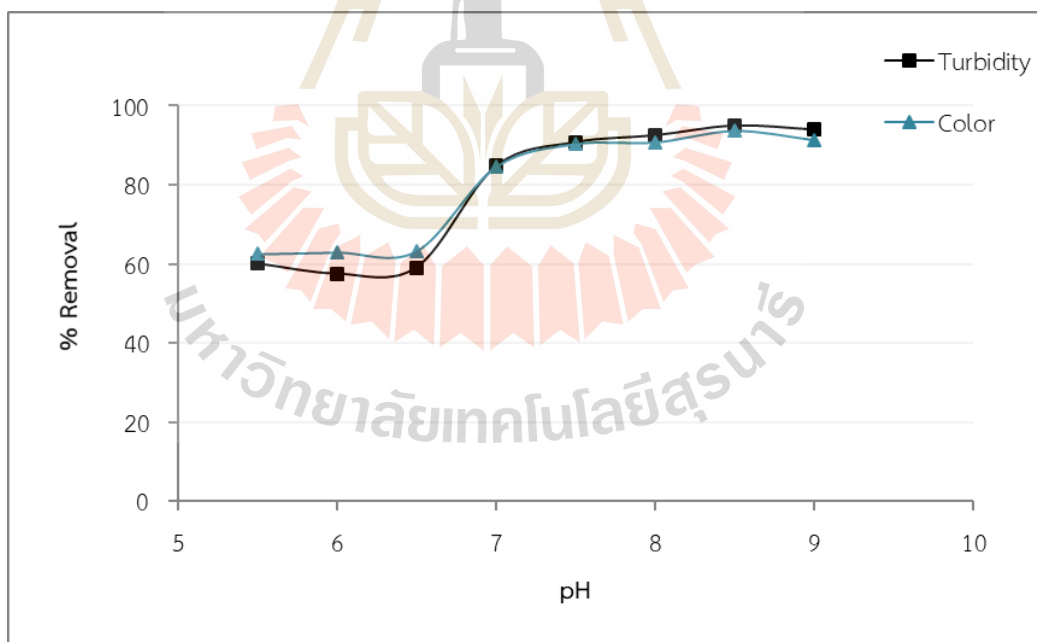
ตารางที่ 4.2 สภาวะที่เหมาะสมของการทดสอบ Jar Test

ปัจจัย	สภาวะที่เหมาะสม		ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัด (Mean±SD)	
	ค่า	หน่วย	ความขุ่น	สี
PACl	70	mg/L	93.82±1.88	91.95±3.10
Cation Polymer	3	mg/L	92.73±3.83	90.80±4.53
pH	8.5	-	94.99±1.77	93.67±2.37



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสีที่ปริมาณของ Polymer ต่างกัน

จากผลการศึกษาการหาค่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าที่ pH 5.5-6.5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีอยู่ในช่วงร้อยละ 58-60 และ 62-63 ตามลำดับ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มค่า pH จาก 7-9 พบว่าค่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 85-95 และ 85-94 ตามลำดับ เนื่องจากที่ค่า pH ประมาณ 4.5 หรือน้อยกว่า 6 การแตกตัวของ PACl จะเกิดขึ้นได้ไม่ดี (Wei et al., 2015) ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีค่อนข้างต่ำ และเมื่อ pH เพิ่มสูงขึ้น PACl จะแตกตัวอยู่ในรูปอลูมิเนียมเชิงซ้อนมากมาย โดยตัวที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ $[Al_{13}O_4(OH)_{24}]^{7+}$ หรือ Al^{13+} และ $Al(OH)_3$ จึงทำให้เกิดกลไกการดูดติดผิว และ Sweep coagulation จึงจะสามารถทำให้คอลลอยด์ตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ดี โดยช่วง pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอน คือ 6.0-9.5 ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดกลไกการตกตะกอนจากการสะเทินประจุที่ผิวคอลลอยด์ การดูดซับบนผิวคอลลอยด์และการเกิดกลไก Sweep Coagulation จึงจะสามารถทำให้คอลลอยด์ตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ดี (Wei et al, 2015; Yang, 2010) จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอน คือ อยู่ในช่วง 7-9 โดยพบว่าที่ pH เท่ากับ 8.5 จะมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีเฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 94.99 และ 93.67 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ดังนั้น ในระบบ CF การเติมสารสร้างและรวมตะกอนต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม และต้องมีการควบคุม pH ให้อยู่ในช่วง 7-9 เพื่อทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสีที่ pH ต่างกัน

4.2.1.2 สภาวะที่เหมาะสมของระบบ CF โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จากผลการศึกษาหาปริมาณ PACl ที่เหมาะสมในการตกตะกอนน้ำทิ้ง พบว่าที่ความเข้มข้นของ PACl แตกต่างกัน ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของ PACl ในช่วง 60-70 mg/L พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีสูงสุดคือมากกว่าร้อยละ 90 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และเมื่อนำข้อมูลไปทดสอบทางสถิติด้วย One Way ANOVA พบว่าปริมาณ PACl ที่ใช้ในช่วงนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ดังนั้นในการพิจารณาปริมาณของ PACl ที่เหมาะสมที่ใช้ในการตกตะกอนน้ำทิ้งจึงใช้ค่าเท่ากับ 70 mg/L เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบ Jar Test ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 68.64 mg/L

จากผลการศึกษาการหาปริมาณของ Cation Polymer ที่เหมาะสม พบว่าช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีมากกว่าร้อยละ 90 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และเมื่อทดสอบทางสถิติด้วย One Way ANOVA พบว่าปริมาณ Cation Polymer ที่ใช้ในช่วงการศึกษามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ดังนั้น ในการพิจารณาปริมาณของ Cation Polymer ที่เหมาะสมใช้ค่าเท่ากับ 3 mg/L เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบ Jar Test ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.18 mg/L

จากผลการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสม พบว่าช่วง pH อยู่ในช่วงเท่ากับ 7-9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและความขุ่นมากกว่าร้อยละ 80 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อทดสอบทางสถิติด้วย One Way ANOVA พบว่าช่วง pH เท่ากับ 7-9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และจากการทบทวนคุณภาพน้ำย้อนหลัง พบว่า pH ของน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 7-9 ดังนั้น ในการศึกษารั้งนี้จึงใช้ช่วง pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนอยู่ในช่วง 7-9 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ดังนั้น ในการศึกษาประสิทธิภาพของระบบ CF จึงเลือกใช้ปริมาณของ PACl และ Cation Polymer ที่เหมาะสมเท่ากับ 70 และ 3 mg/L ตามลำดับ และกำหนดช่วงค่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนอยู่ในช่วง 7-9

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบทางสถิติค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีด้วย One Way ANOVA

ปัจจัย	หน่วย	ช่วงความเข้มข้น	p-value		การแปลผล
			ความขุ่น	สี	
PACl	mg/L	60-70	0.262	0.078	ไม่พบความแตกต่างกัน
Cation Polymer	mg/L	1-8	0.992	0.979	ไม่พบความแตกต่างกัน
pH	-	7-9	0.232	0.052	ไม่พบความแตกต่างกัน

4.2.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบ CF

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบ CF พบว่าลักษณะน้ำเข้าระบบในช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษามีค่า pH อยู่ในช่วง 6.81-7.40 ค่าความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 5.55 NTU 100 Pt-Co และ 40.59 mg/L ตามลำดับ ปริมาณ Total Coliform และ Fecal Coliform มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 253,400 และ 15,873 CFU/100 mL ตามลำดับ และลักษณะน้ำออกจากระบบ CF มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.10-7.39 ค่าความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 1.51 NTU 17 Pt-Co และ 18.01 mg/L ตามลำดับ ปริมาณ Total Coliform และ Fecal Coliform มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 35,333 และ 129 CFU/100 mL ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสี พบว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีเฉลี่ยร้อยละ 71.28±9.65 และ 77.06±11.91 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีมากกว่าร้อยละ 70 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เนื่องจากระบบ CF เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนสารแขวนลอยในน้ำ ดังนั้น อนุภาคคอลลอยด์และสารอินทรีย์ที่มีสีกลุ่ม Humic จึงสามารถตกตะกอนได้ดี

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด COD พบว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD เฉลี่ยร้อยละ 54.40±15.77 จะเห็นได้ว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ต่ำกว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสี เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำที่ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่ม Non-humic ที่กำจัดได้ยากด้วยระบบ CF เพราะสารกลุ่ม Non-humic มีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ ซึ่งป้องกันไม่ให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกัน (Julie et al., 2004; มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ทำให้ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยกระบวนการ CF จากการศึกษาของ Ji et al. (2008) พบว่าระบบ CF สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่ม Humic ที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่และมีโครงสร้างเป็น Aromatic ทำให้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายและถูกกำจัดได้ดีด้วยระบบ CF ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากยังมีสารอินทรีย์กลุ่ม Non-humic เหลืออยู่ในน้ำ

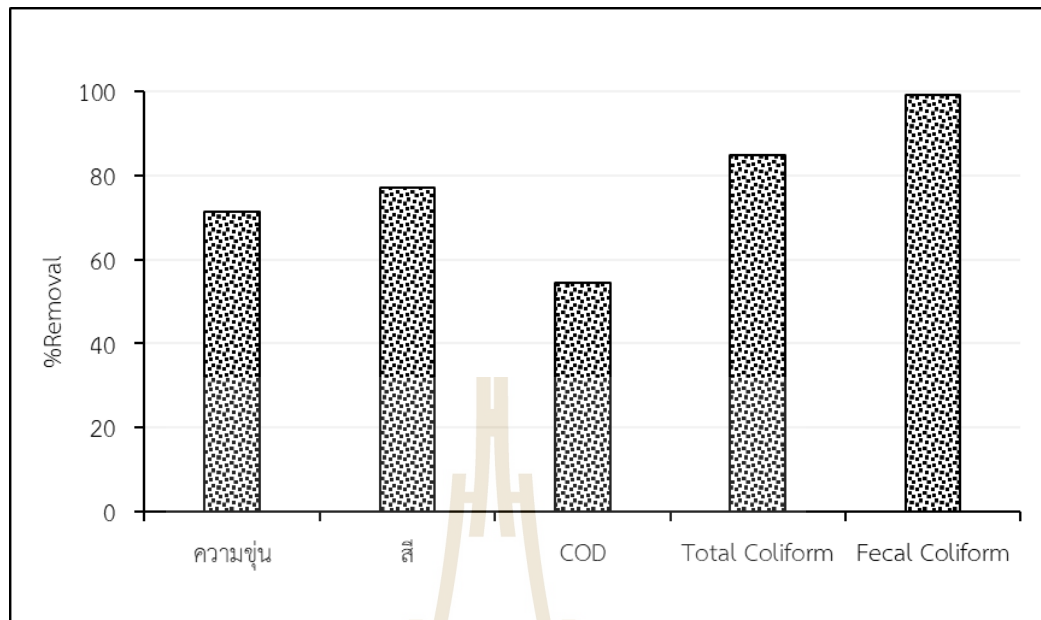
จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด Total Coliform และ Fecal Coliform พบว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการกำจัด Total Coliform และ Fecal Coliform เฉลี่ยร้อยละ 84.73 และ 99.15 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์สูงมากกว่าร้อยละ 84 เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์จะเกาะติดกับอนุภาคคอลลอยด์ที่รวมตัวกันจากกลไกการทำงานของระบบ CF และตกตะกอนออกจากรู้น้ำ (Lee et al., 2017) ทำให้มีมีประสิทธิภาพในการกำจัด Total Coliform และ Fecal Coliform สูง และจากผลการศึกษาปริมาณโลหะหนัก 9 ชนิดในน้ำออกดังตารางที่ 4.5 พบว่าน้ำออกจากระบบ CF มีปริมาณของ Cr, Mn, Fe และ Pb เกินค่ามาตรฐานในการนำไปใช้เป็นน้ำประปา และน้ำที่นำไปใช้ในการชักโครก แต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำที่ใช้ในการเกษตรและน้ำใช้สำหรับปรับภูมิทัศน์ได้ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าระบบ CF ที่ใช้ PACl เป็นสารสร้างตะกอน และ Cation polymer เป็นสารช่วยสร้างตะกอนมีประสิทธิภาพในการกำจัด Total Coliform และ Fecal Coliform มากกว่าร้อยละ 80 ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีมากกว่าร้อยละ 70 และมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ร้อยละ 50 ดังแสดงในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลของกระบวนการ CF ต่อคุณลักษณะน้ำ

Parameters	Units	Influence		Effluence		Efficiency	
		Min-Max	Mean ± SD	Min-Max	Mean ± SD	Min-Max	Mean ± SD
pH	-	6.81-7.40	7.11±0.20	6.10-7.39	6.90±0.37	-	-
Conductivity	µS/cm	587-646	623±18	336-794	720±14	-	-
Turbidity	NTU	3.47-6.91	5.55±1.10	0.98-2.17	1.51±0.50	55.94-85.53	71.28±9.65
Color	Pt-Co	73-133	100±22.07	11-25	17±6.53	52.76-91.00	77.06±11.91
COD	mg/L	36.92-50.09	40.59±5.48	11.71-33.39	18.01±6.72	30.00-75.00	54.40±15.77
Total Coliform	CFU/100 mL	1.5×10 ⁵ -3.8×10 ⁵	2.5×10 ⁵ ±1.1×10 ⁵	2.7×10 ⁴ ×4.1×10 ⁴	3.5×10 ⁴ ±7.4×10 ³	71.85-92.26	84.73±11.20
Fecal Coliform	CFU/100 mL	7.5×10 ³ -2.9×10 ⁴	1.6×10 ⁴ ±8.8×10 ³	40-410	129±158	97.57-99.74	99.15±0.89

ตารางที่ 4.5 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเข้าและออกจากระบบ

ธาตุ	Units	Influence		Effluence	
		Min-Max	Mean ± SD	Min-Max	Mean ± SD
Cr	mg/L	0.0527 - 0.0557	0.0514 ± 0.00	0.0527 - 0.0564	0.0549 ± 0.00
Mn	mg/L	2.0288 - 3.3438	2.3874 ± 0.71	1.3449 - 2.6967	2.6110 ± 0.70
Fe	mg/L	0.8895 - 3.5307	1.6613 ± 1.07	0.4671 - 1.1322	0.6761 ± 0.28
Cu	mg/L	0.0168 - 0.2334	0.0763 ± 0.09	0.0122 - 0.0180	0.0138 ± 0.00
Zn	mg/L	0.5160 - 0.7593	0.6795 ± 0.10	0.4787 - 0.6691	0.5995 ± 0.07
As	mg/L	0.0143 - 0.0182	0.0161 ± 0.00	0.0125 - 0.0157	0.0143 ± 0.00
Se	mg/L	0.0003 - 0.0003	0.0003 ± 0.00	0.0002 - 0.0003	0.0004 ± 0.00
Cd	mg/L	0.0010 - 0.0011	0.0011 ± 0.00	0.0011 - 0.0020	0.0015 ± 0.00
Pb	mg/L	0.0858 - 0.2047	0.1177 ± 0.05	0.0856 - 0.1673	0.1327 ± 0.03



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำทิ้งของระบบ CF

4.2.2 ทางเลือกที่ 2 ระบบ UF

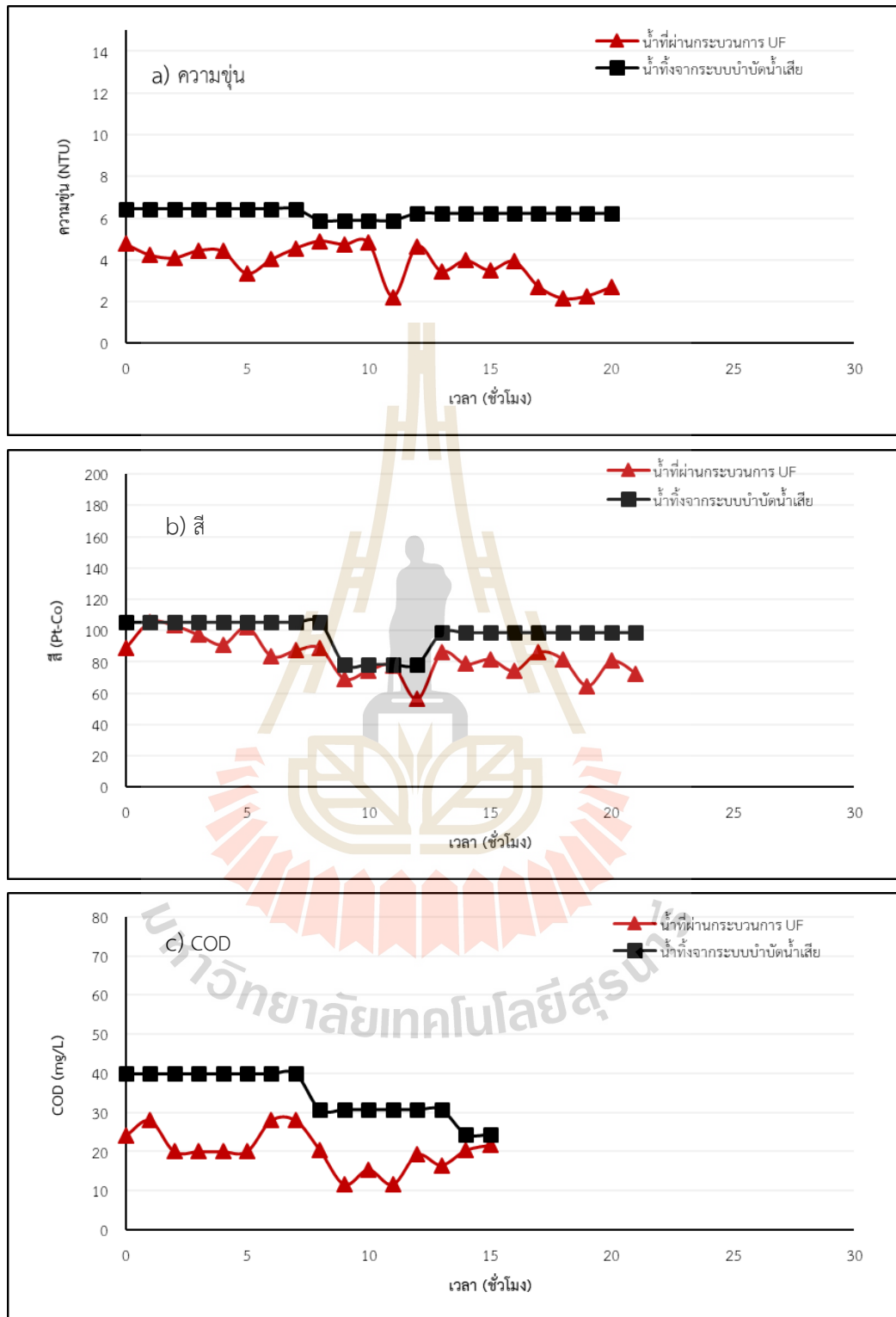
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบ UF โดยการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเดินระบบ UF ได้แก่ เอมิเอสฟลักซ์และสัดส่วนเอมิเอสต่อรีเทนเททที่เหมาะสม เพื่อนำไปประเมินประสิทธิภาพการบำบัดของระบบต่อไปมีดังนี้

4.2.2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบ UF

ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบ UF จะศึกษาการแปรผันเอมิเอสฟลักซ์และสัดส่วนเอมิเอสต่อรีเทนเททที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเลือกใช้เอมิเอสฟลักซ์ 80 L/m².h และสัดส่วนเอมิเอสต่อรีเทนเททเท่ากับ 25:75 มาทำการเดินระบบ เนื่องจากการศึกษาของปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์ และสกุลยา หับอุไร พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสี, ความขุ่น, สารอินทรีย์ธรรมชาติ และสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียอยู่ในช่วงร้อยละ 16-67 โดยเดินระบบเป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.5

4.2.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบ UF

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบ UF พบว่าลักษณะน้ำเข้าระบบมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.88-7.40 ค่าความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 6.18 NTU 95 Pt-Co และ 31.82 mg/L ตามลำดับ ปริมาณ Total Coliform และ Fecal Coliform มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 229,555 และ 14,533 CFU/100 mL และลักษณะน้ำออกจากระบบมีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 7.1 ปริมาณความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 4.51 NTU 75 Pt-Co และ 24.81 mg/L ตามลำดับ ปริมาณ Total Coliform และ Fecal Coliform มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 170,222 และ 3,337 CFU/100 mL ดังแสดงในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ค่าความขุ่น สี และ COD ของน้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านระบบรวม UF

ตารางที่ 4.6 ผลของระบบ UF ต่อคุณลักษณะน้ำ

Parameters	Units	Influence		Effluence		Efficiency	
		Min-Max	Mean±SD	Min-Max	Mean±SD	Min-Max	Mean±SD
pH	-	6.88-7.40	7.21±0.24	6.53-7.66	7.10±0.38	-	-
Conductivity	µS/cm	544-591	573±13	521-575	563±12	-	-
Turbidity	NTU	5.88-6.44	6.18±0.24	2.14-12.33	4.51±1.96	16.60-65.60	38.92±15.15
Color	Pt-Co	78-105	95±11.45	56-95	75±12.71	8.08-43.02	21.21±8.87
COD	mg/L	24.38-40.00	31.82±6.94	12.00-35.22	24.81±5.76	13.33-62.50	38.25±14.19
Total Coliform	CFU/100 mL	193333-269333	229555±38124	148000-190667	170222±21389	23.45-29.21	25.52±3.20
Fecal Coliform	CFU/100 mL	4833-32667	14533±13089	2200-5233	3337±1471	53.59-85.84	66.60±14.69

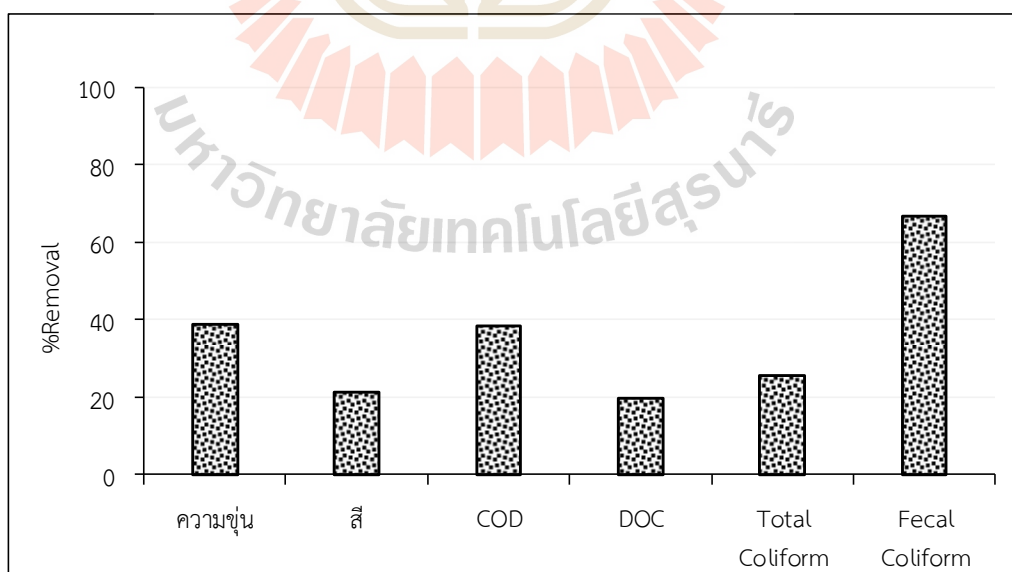
ตารางที่ 4.7 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเข้าและออกจากระบบ UF

ธาตุ	Units	Influence		Effluence	
		Min-Max	Mean± SD	Min-Max	Mean± SD
Cr	mg/L	0.0627 - 0.0962	0.0720 ± 0.01	0.0621 - 0.0719	0.0678 ± 0.00
Mn	mg/L	1.3831 - 2.3424	1.9140 ± 0.39	0.5267 - 0.8365	0.6666 ± 0.13
Fe	mg/L	1.2876 - 3.3977	1.9685 ± 0.84	0.6908 - 1.1347	0.8784 ± 0.18
Cu	mg/L	0.0118 - 0.0162	0.0135 ± 0.00	0.0196 - 0.0280	0.0221 ± 0.00
Zn	mg/L	0.6680 - 0.7906	0.7334 ± 0.05	0.5953 - 0.7165	0.6359 ± 0.05
As	mg/L	0.0213 - 0.0227	0.0220 ± 0.00	0.0179 - 0.0220	0.0202 ± 0.00
Se	mg/L	0.0005 - 0.0012	0.0007 ± 0.00	0.0004 - 0.0011	0.0007 ± 0.00
Cd	mg/L	0.0023 - 0.0288	0.0106 ± 0.01	0.0014 - 0.0049	0.0031 ± 0.00
Pb	mg/L	0.0572 - 0.3996	0.1469 ± 0.14	0.0661 - 0.1740	0.1037 ± 0.04

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น, สี, COD, Total Coliform และ Fecal Coliform พบว่าระบบ UF มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น, สี, COD, Total Coliform และ Fecal Coliform เฉลี่ยเท่ากับ 38.92 ± 15.15 , 21.21 ± 8.87 , 38.25 ± 14.19 , 25.52 ± 3.20 และ 66.60 ± 14.69 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6 ระบบ UF เป็นระบบที่มีความสามารถในการแยกสารของเมมเบรนขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านเมมเบรนออกมาได้ ดังนั้น เชื้อจุลินทรีย์และอนุภาคแขวนลอยต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดความขุ่น ซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนจึงติดอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ส่งผลให้ระบบ UF มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ ความขุ่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bergamasco et al. (2011) พบว่าระบบ UF มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ และความขุ่นได้ดีกว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD จากผลการศึกษานี้พบว่าระบบ UF มีประสิทธิภาพการกำจัด COD ร้อยละ 38.25 และจากผลการศึกษาของ Tiehm et al. (1999) พบว่าน้ำทิ้งชุมชนมีขนาดอนุภาคของ COD น้อยกว่า 0.1 ไมโครเมตรถึงร้อยละ 86 ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำจึงสามารถผ่านเมมเบรนออกมาได้ และจากผลการศึกษาปริมาณโลหะหนัก 9 ชนิดในน้ำออกดั่งแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าน้ำออกจากระบบ UF มีปริมาณของ Cr, Mn, Fe, As และ Pb เกินค่ามาตรฐานในการนำไปใช้ป็นน้ำประปา และน้ำที่ใช้ในการซักโครก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ CF พบว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น, สี, COD, Total Coliform และ Fecal Coliform สูงกว่าระบบ UF

4.2.3 ทางเลือกที่ 3 ระบบร่วมระหว่าง CF+UF

ในการศึกษาระบบร่วมระหว่าง CF+UF โดยนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อ 4.2.1.1 ของระบบ CF และ หัวข้อ 4.2.2.1 ของระบบ UF มาใช้ในการเดินระบบร่วม และทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบร่วม CF+UF



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ UF

4.2.3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบร่วม CF+UF

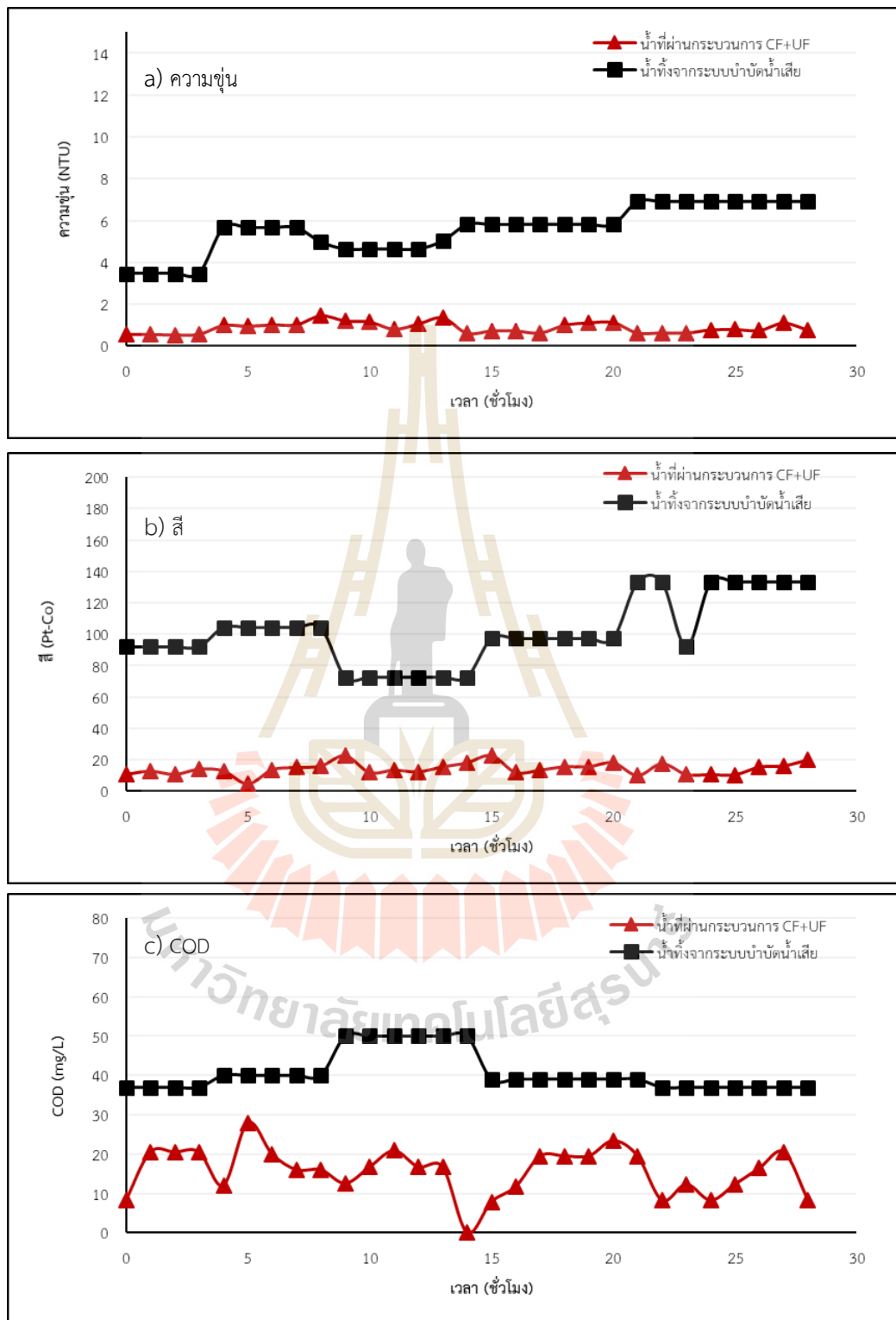
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบร่วม CF+UF จะนำน้ำทิ้งมาผ่านระบบ CF ก่อน หลังจากนั้นจึงนำมาผ่านระบบ UF ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมของระบบ CF คือ ใช้ PACI และ Cation Polymer ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 70 mg/L และ 3 mg/L และสภาวะที่เหมาะสมของระบบ UF คือ ใช้เพอมีเอทฟลักซ์ 80 L/m².h ที่สัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเททเท่ากับ 25:75 โดยเดินระบบเป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.7

4.2.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบร่วม CF+UF

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบร่วม CF+UF พบว่าลักษณะน้ำเข้าระบบมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.81-7.40 ค่าความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 5.55 NTU 100 Pt-Co และ 40.59 mg/L ตามลำดับ ปริมาณ Total Coliform และ Fecal Coliform มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 253,400 และ 15,873 CFU/100 mL และลักษณะน้ำออกจากระบบมี pH อยู่ในช่วง 6.05-7.41 ค่าความขุ่น สี และ COD เฉลี่ยเท่ากับ 0.87 NTU 14 Pt-Co และ 15.60 mg/L ตามลำดับ ปริมาณ Total Coliform และ Fecal Coliform มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 83 และ 33 CFU/100 mL ดังแสดงในตารางที่ 4.8

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบร่วม CF+UF พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น, สี, COD, Total Coliform และ Fecal Coliform เฉลี่ยเท่ากับ 82.66±7.21, 84.80±5.10, 60.30±13.90, 99.96±0.04 และ 99.68±0.25 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบร่วม CF+UF มีประสิทธิภาพในการกำจัด Total Coliform สูงสุด รองลงมาได้แก่ Fecal Coliform, สี, ความขุ่น และ COD ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.8

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าระบบร่วม CF+UF มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ ความขุ่น และสีสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bergamasco et al. (2011) เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์ที่ทำให้เกิดความขุ่นและสีสามารถตกตะกอนได้ดีด้วยระบบ CF และเชื้อจุลินทรีย์จะเกาะติดกับกลุ่มของตะกอนคอลลอยด์และแยกตัวออกจากรูปร่างน้ำทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง และเมื่อนำมาผ่านระบบ UF อนุภาคส่วนที่ตกตะกอนได้ไม่ดี และมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนจะติดอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สี และเชื้อจุลินทรีย์สูงกว่าระบบ UF และ CF ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัด COD มีค่าต่ำกว่าพารามิเตอร์อื่น ๆ เนื่องจากมีสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ตกตะกอนได้ยากเหลืออยู่ในน้ำหลังผ่านระบบ CF และเมื่อนำมาผ่านระบบ UF สารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนหนึ่งจะสามารถผ่านเมมเบรนออกมาได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ยังคงต่ำ และจากผลการศึกษาปริมาณโลหะหนัก 9 ชนิดในน้ำออก ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าน้ำออกจากระบบร่วม CF+UF มีปริมาณของ Cr, Mn, Fe และ Pb เกินค่ามาตรฐานในการนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำประปา และการนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำที่ใช้ในการซักโครก ดังนั้น ระบบร่วม CF+UF มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น, สี, COD, Total Coliform และ Fecal Coliform สูงกว่าระบบ CF และ UF เพียงแบบเดียว



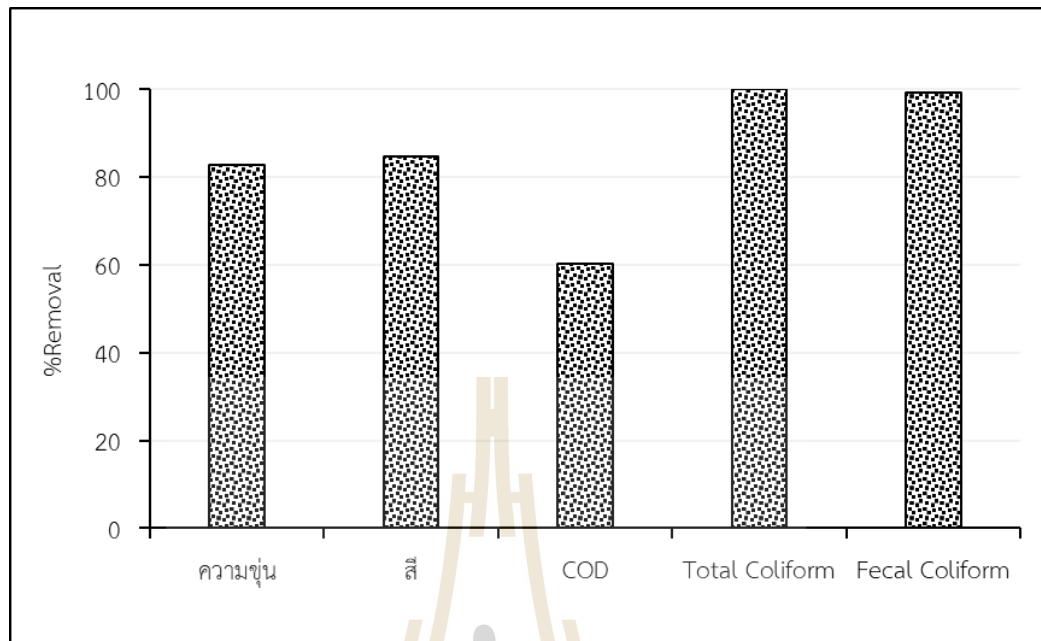
รูปที่ 4.7 ค่าความขุ่น สี และ COD ของน้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านระบบรวม CF+UF

ตารางที่ 4.8 คุณลักษณะน้ำที่ผ่านระบบรวม CF+UF

Parameters	Units	Influence		Effluence		Efficiency	
		Min-Max	Mean±SD	Min-Max	Mean±SD	Min-Max	Mean±SD
pH	-	6.81-7.40	7.11±0.20	6.05-7.41	6.77±0.34	-	-
Conductivity	µS/cm	587-646	623±18	715-796	769±22	-	-
Turbidity	NTU	3.47-6.91	5.55±1.10	0.54-1.46	0.87±0.30	60.69-92.19	82.66±7.21
Color	Pt-Co	73-133	100±22.07	5-23	14±3.93	68.80-92.50	84.80±5.10
COD	mg/L	36.92-50.09	40.59±5.48	0.00-28.00	15.60±6.00	30.00-80.01	60.30±13.90
Total Coliform	CFU/100 mL	145667-382667	253400±106533	13-223	83±90.20	99.90-99.99	99.96±0.04
Fecal Coliform	CFU/100 mL	7533-29133	15873±8834	23-43	33±9.81	99.42-99.91	99.68±0.25

ตารางที่ 4.9 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเข้าและออกจากระบบ CF+UF

ธาตุ	Units	Influence		Effluence	
		Min-Max	Mean± SD	Min-Max	Mean± SD
Cr	mg/L	0.0527 - 0.0557	0.0514 ± 0.00	0.0534 - 0.0552	0.0543 ± 0.00
Mn	mg/L	2.0288 - 3.3438	2.3874 ± 0.71	2.0069 - 2.7302	2.8740 ± 0.36
Fe	mg/L	0.8895 - 3.5307	1.6613 ± 1.07	0.3859 - 0.8988	0.5147 ± 0.22
Cu	mg/L	0.0168 - 0.2334	0.0763 ± 0.09	0.0151 - 0.0246	0.0191 ± 0.00
Zn	mg/L	0.5160 - 0.7593	0.6795 ± 0.10	0.6200 - 0.9594	0.8134 ± 0.12
As	mg/L	0.0143 - 0.0182	0.0161 ± 0.00	0.0125 - 0.0148	0.0138 ± 0.00
Se	mg/L	0.0003 - 0.0003	0.0003 ± 0.00	0.0002 - 0.0003	0.0003 ± 0.00
Cd	mg/L	0.0010 - 0.0011	0.0011 ± 0.00	0.0019 - 0.0024	0.0021 ± 0.00
Pb	mg/L	0.0858 - 0.2047	0.1177 ± 0.05	0.0859 - 0.3499	0.1752 ± 0.11



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบรวม CF+UF

4.3 การเปรียบเทียบทางเลือกการบำบัดน้ำทิ้งของทั้ง 3 ทางเลือก

ในการเปรียบเทียบทางเลือกของทั้ง 3 ระบบ จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ และคุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัด เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการประเมินทางเลือกด้านวิศวกรรม

4.3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ

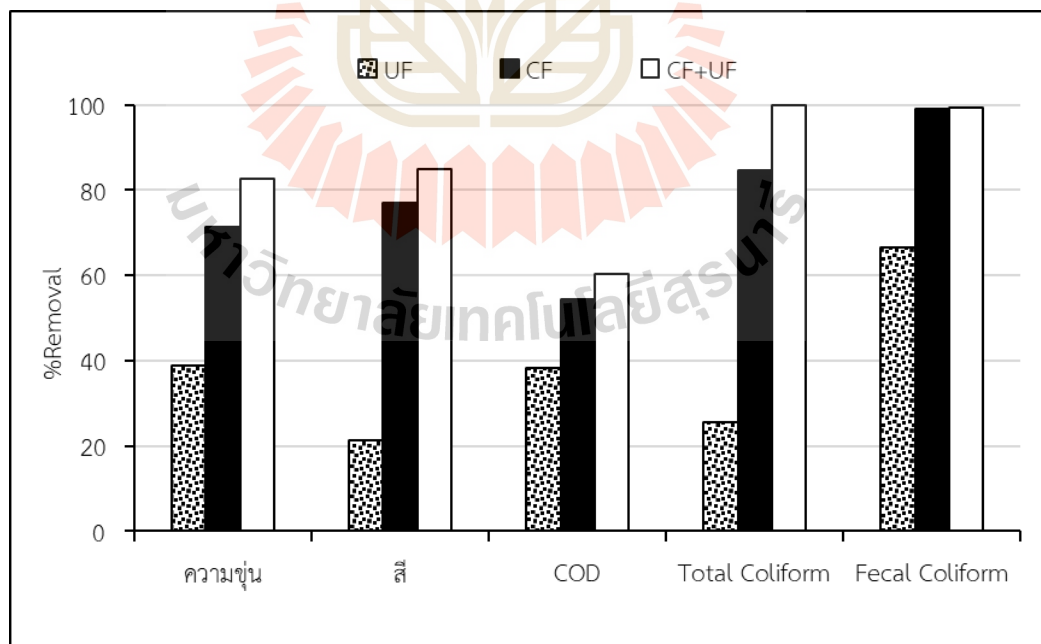
จากการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดของทั้ง 3 ทางเลือก พบว่าระบบรวม CF+UF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบ CF และ UF ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลไปทดสอบทางสถิติด้วย One Way ANOVA พบว่ามีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.9

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสี พบว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีเฉลี่ยร้อยละ 71.28 และ 77.06 ตามลำดับ ระบบ UF มีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 38.92 และ 21.21 ตามลำดับ ระบบรวม CF+UF มีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 82.66 และ 84.80 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ CF และ UF จะเห็นได้ว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าระบบ UF เนื่องจากระบบ CF เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนสารแขวนลอยในน้ำ โดยอาศัยการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย ทำให้สามารถรวมกลุ่มกันและตกตะกอนออกจากน้ำได้ ดังนั้น อนุภาคคอลลอยด์และสารอินทรีย์มีสีกลุ่ม Humic ที่เป็นสารกลุ่มไม่ชอบน้ำจะถูกทำลายเสถียรภาพได้ง่าย จึงสามารถตกตะกอนออกจากน้ำได้ดี ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสูง (Julie et al., 2004; มั่นสิน

ต้นทุลเวศม์, 2542) ส่วนระบบ UF เป็นระบบที่ความสามารถในการแยกสารของเมมเบรนขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านเมมเบรนออกมาได้ ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนขนาด 2-20 นาโนเมตร และอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำมีขนาด 1 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร (มันสิน ต้นทุลเวศม์, 2542) อนุภาคบางส่วนมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนทำให้สามารถหลุดลอดผ่านเมมเบรนออกมาได้ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าระบบ CF ส่วนระบบร่วม CF+UF มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสีมากกว่าร้อยละ 80 เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์ที่ทำให้เกิดความขุ่นและสีสามารถตกตะกอนได้ดีด้วยระบบ CF และเมื่อนำมาผ่านระบบ UF อนุภาคส่วนที่ตกตะกอนได้ไม่ดี และมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนจะติดอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้นและสูงกว่าการใช้ระบบ UF และ CF เพียงแบบเดียว

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบหมุนเวียนน้ำทั้ง 3 ทางเลือก

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			p-value
	UF	CF	CF+UF	
ความขุ่น	38.92	71.28	82.66	0.000
สี	21.21	77.06	84.80	0.000
COD	38.25	54.40	60.30	0.000
Total Coliform	25.52	84.73	99.96	0.000
Fecal Coliform	66.60	99.15	99.68	0.000



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการบำบัดของทั้ง 3 ทางเลือก

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด COD พบว่าระบบ CF ระบบ UF และระบบร่วม CF+UF มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD เฉลี่ยร้อยละ 54.40 38.25 และ 60.30 ตามลำดับ ระบบร่วม CF+UF มีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 74.39 และ 45.73 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ CF และ UF จะเห็นได้ว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าระบบ UF เนื่องจากในน้ำทิ้งชุมชนมีขนาดอนุภาคของ COD น้อยกว่า 0.1 ไมโครเมตรถึงร้อยละ 86 ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำจึงสามารถผ่านเมมเบรนออกมาได้ (Tiehm et al., 1999) จากคุณสมบัติของเมมเบรนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีช่วงน้ำหนักโมเลกุลที่กักกันสาร (MWCO) 20,000 ดาร์ตัน ซึ่งสารอินทรีย์มี MWCO 30-500 ดาร์ตัน และมีขนาด 0.3-0.8 นาโนเมตร (Mulder et al., 1996) ทำให้สามารถหลุดลอดผ่านเมมเบรนออกมาได้ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ ส่วนระบบร่วม CF+UF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการใช้ระบบ UF และ CF เพียงแบบเดียว เนื่องจากสารอินทรีย์บางส่วนถูกตกตะกอนด้วยระบบ CF และเมื่อนำมาผ่านระบบ UF สารอินทรีย์ส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนและมี MWCO สูงกว่า 20,000 ดาร์ตัน จะติดอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด Total Coliform และ Fecal Coliform พบว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 84.73 และ 99.15 ตามลำดับ ระบบ UF มีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 25.52 และ 66.60 ตามลำดับ ระบบร่วม CF+UF มีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 99.96 และ 99.68ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ CF และ UF จะเห็นได้ว่าระบบ CF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าระบบ UF เนื่องจากเมื่อมีการตกตะกอนคอลลอยด์ในน้ำ เชื้อจุลินทรีย์จะเกาะติดกับอนุภาคคอลลอยด์ที่รวมตัวกันจากกลไกการทำงานระบบ CF และตกตะกอนออกจากน้ำ (Lee et al., 2017) ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัด Total Coliform และ Fecal Coliform สูง ส่วนระบบ UF เมื่อทำการเดินระบบเป็นระยะเวลาสั้น และปล่อยให้เกิดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ จะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของเมมเบรนและเชื้อจุลินทรีย์สามารถหลุดลอดผ่านเมมเบรนออกไปได้ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ประสิทธิภาพการบำบัดจึงต่ำกว่าระบบร่วม CF+UF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์จะตกตะกอนออกจากน้ำด้วยระบบ CF และส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรนจะติดอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรนทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าระบบ UF และ CF เพียงแบบเดียว

4.3.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของระบบ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการหมุนเวียนน้ำทิ้งของมทส. ซึ่งมีอัตราการหมุนเวียนน้ำประมาณร้อยละ 20 ของปริมาณน้ำใช้ทั้งหมด คิดเป็นปริมาณน้ำหมุนเวียนอยู่ในช่วง 700-1000 m³/d ดังนั้น ในการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายครั้งนี้จึงใช้เป็นเกณฑ์ปริมาณการหมุนเวียนน้ำ จากการคำนวณค่าใช้จ่ายของระบบ CF และ UF โดยใช้สมการในตารางที่ 3.10

จากการศึกษาของ Guo et al. (2014) ได้ทำการศึกษาข้อมูลค่าใช้จ่ายของระบบ CF ในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ โดยแบ่งค่าใช้จ่ายออกเป็น 2 ส่วน คือ ค่าลงทุนในการก่อสร้างระบบ และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุง ค่าลงทุนในการก่อสร้างประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับท่อ วาล์ว ระบบจ่ายสารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ในการควบคุมระบบ เป็นต้น ค่าเดินระบบและค่าซ่อมบำรุงประกอบไปด้วย ค่าสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ค่าไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง และ

ค่าแรงงาน เป็นต้น การประเมินค่าใช้จ่ายสำหรับการลงทุนก่อสร้างระบบ และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุง สามารถคำนวณได้ดังสมการในตารางที่ 3.10 พบว่าระบบ CF มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบเท่ากับ 0.31 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุงเท่ากับ 0.48 บาทต่อลูกบาศก์เมตร รวมค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบ CF และ ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุงเท่ากับ 0.79 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

จากการศึกษาของ Guo et al. (2014) ได้ทำการศึกษาข้อมูลค่าใช้จ่ายของระบบ UF ในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ โดยแบ่งค่าใช้จ่ายออกเป็น 2 ส่วน คือ ค่าลงทุนในการก่อสร้างระบบ และ ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุงประกอบด้วยค่าลงทุนในการก่อสร้างระบบ ค่าไฟฟ้า ค่าซ่อมบำรุง ค่าสารเคมีในการล้างทำความสะอาดเมมเบรน ค่าจ้างแรงงาน เป็นต้น สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายได้ดังสมการในตารางที่ 3.10 พบว่าระบบ UF มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบเท่ากับ 38.08 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุงเท่ากับ 4.50 บาทต่อลูกบาศก์เมตร รวมค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบ UF และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุงเท่ากับ 42.58 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

สำหรับระบบร่วม CF+UF โดยมีระบบ CF เป็น Pre-treatment ในการบำบัดน้ำก่อนเข้าสู่ระบบ UF ในการศึกษาครั้งนี้จึงคิดค่าใช้จ่ายโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้นดังนี้ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบ และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุง คือ ค่าใช้จ่ายของระบบ CF รวมกับระบบ UF โดยมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบเท่ากับ 38.39 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุงเท่ากับ 4.98 บาทต่อลูกบาศก์เมตร รวมค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบร่วม CF+UF และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุงเท่ากับ 43.37 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้น จะเห็นได้ว่าระบบร่วม CF+UF มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบ ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุงสูงสุด รองลงมาได้แก่ระบบ UF และ CF ตามลำดับ

4.3.3 การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำของทั้ง 3 ทางเลือกเพื่อนำไปใช้ประโยชน์

เมื่อนำคุณภาพน้ำออกจากระบบต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานในการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ 5 ด้าน คือ น้ำประปา น้ำใช้ในการซักโครก น้ำใช้ล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม พบว่าระบบร่วม CF+UF มีคุณภาพน้ำผ่านมาตรฐานทั้ง 5 ด้าน คือ มาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านน้ำประปา น้ำใช้ในการซักโครก น้ำใช้ล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม ระบบ CF ผ่านมาตรฐาน 4 ด้าน เนื่องจากมีค่าสีเกินค่ามาตรฐานสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำประปา ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ดังนั้นระบบ CF มีค่าคุณภาพน้ำผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำใช้ในการซักโครก น้ำใช้ล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม และระบบ UF ผ่านมาตรฐาน 4 ด้าน เนื่องจากมีค่าสีเกินค่ามาตรฐานในการนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำประปา ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระบบ UF มีค่าคุณภาพน้ำผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านน้ำใช้ในการซักโครก น้ำใช้ล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม ดังสรุปในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่และมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ของทั้ง 3 ทางเลือก

พารามิเตอร์	หน่วย	คุณภาพน้ำทั้ง 3 ทางเลือก			มาตรฐาน				
		CF	UF	CF+UF	ประปา WHO (2011)	ชักโครก Rodrigues (2002)	การเกษตร US EPA (2004)	ภูมิทัศน์ Rodrigues (2002)	ล้างรถ Rodrigues (2002)
pH	-	6.90	7.10	6.77	6.5-8.5	6-9	6-9	6-9	6-9
Turbidity	NTU	1.51	4.51	0.87	4	5	-	10	5
Color	Pt-Co	17	75	14	15	-	-	-	-
TSS	mg/L	64.96	25.33	37.88	-	-	-	-	-
TDS	mg/L	708	449	678	1000	-	1500	1000	1000

ตารางที่ 4.12 คุณภาพน้ำที่ผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ของทั้ง 3 ทางเลือก

การนำไปใช้ประโยชน์	น้ำประปา	น้ำชักโครก	ล้างรถ	ปรับภูมิทัศน์	การเกษตร
UF	x	/	/	/	/
CF	x	/	/	/	/
CF+UF	/	/	/	/	/

4.4 การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ

การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำจะพิจารณาโดยใช้การประเมินทางด้านวิศวกรรม ร่วมกับการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพ เพื่อให้การประเมินครอบคลุมปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำมากยิ่งขึ้น

4.4.1 ประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรม

การประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรมจะใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) เข้ามาช่วยในการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่เหมาะสม โดยในการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่เหมาะสมต้องมีการกำหนดค่าความสำคัญในแต่ละเกณฑ์ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกทางเลือกที่เหมาะสมในการหมุนเวียนน้ำ ซึ่งมี 3 ทางเลือก คือ ทางเลือกที่ 1 ระบบ CF, ทางเลือกที่ 2 ระบบ UF และทางเลือกที่ 3 ระบบร่วม CF+UF โดยกำหนดเกณฑ์หลักที่ใช้ในการพิจารณา คือ ประโยชน์ในการนำน้ำไปใช้ ประสิทธิภาพในการบำบัด และค่าใช้จ่ายของแต่ละทางเลือก ซึ่งในแต่ละเกณฑ์หลักจะประกอบไปด้วยเกณฑ์รองที่นำมาใช้ประกอบในการประเมินเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 3.8

4.4.1.1 ขั้นตอนการหาค่าความสำคัญของเกณฑ์หลัก

การหาค่าความสำคัญต้องมีการเปรียบเทียบเป็นคู่โดยใช้เกณฑ์การเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.13 ซึ่งการศึกษานี้จะใช้เกณฑ์การเปรียบเทียบ 1-5 จากนั้นเปรียบเทียบความสำคัญที่ละคู่ โดยการศึกษาครั้งนี้ให้ความสำคัญของคุณภาพน้ำในการนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด รองลงมาได้แก่ ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ และค่าใช้จ่าย เนื่องจากว่าคุณภาพน้ำส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้น้ำ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Yimrattanabavorn et al. (2018) ได้กำหนดให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของการนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด ดังนั้น จึงให้ความสำคัญกับคุณภาพน้ำในการนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด ในการหาค่าความสำคัญต้องหาทั้งเกณฑ์

หลักและเกณฑ์รอง โดยจะยกตัวอย่างการคำนวณหาค่าความสำคัญของเกณฑ์หลักอย่างละเอียด ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน

1. สร้างตารางเมตริกซ์เปรียบเทียบเกณฑ์หลักที่ใช้ในการตัดสินใจเป็นคู่ จากผลการเปรียบเทียบเป็นคู่ดังแสดงในตารางที่ 4.14 จะเห็นว่าในแนวเส้นทแยงมุมประกอบไปด้วยเลข 1 เท่านั้น เนื่องจากเป็นจุดที่เกณฑ์แต่ละเกณฑ์เปรียบเทียบกับตนเองจึงมีความสำคัญเท่ากัน ส่วนพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ประกอบเป็นตาราง 2 เกณฑ์ที่แตกต่างกัน

-แถวที่ 2 คอลัมน์ที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบความสำคัญของคุณภาพน้ำและประสิทธิภาพจะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากับ 3 หมายความว่าคุณภาพน้ำมีความสำคัญกว่าประสิทธิภาพในระดับปานกลาง

-แถวที่ 2 คอลัมน์ที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบความสำคัญของคุณภาพน้ำและค่าใช้จ่ายจะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากับ 5 หมายความว่าคุณภาพน้ำมีความสำคัญกว่าค่าใช้จ่ายในระดับมาก

-แถวที่ 3 คอลัมน์ที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบความสำคัญของประสิทธิภาพการบำบัดและค่าใช้จ่ายจะเห็นได้ว่ามีค่าเท่ากับ 3 หมายความว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีความสำคัญกว่าค่าใช้จ่ายในระดับปานกลาง (พื้นที่ที่อยู่ใต้เส้นทแยงมุมค่าจะเป็นส่วนกลับของเกณฑ์ที่จับคู่เหมือนกัน)

2. คำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การประเมิน โดยทำการปรับผลรวมของแต่ละคอลัมน์ในตารางที่ 4.14 ให้เท่ากับ 1

-โดยนำค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบในตารางที่ 4.14 หารด้วยผลรวมของการเปรียบเทียบ เช่น การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำและคุณภาพน้ำมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อนำไปหารด้วยผลรวมที่มีค่าเท่ากับ 1.53 ได้เท่ากับ 0.65 ดังแสดงตารางที่ 4.15

-จากนั้นรวมผลลัพธ์ในแนวตั้งจะมีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมด

-แถบสีเทาเป็นหาค่าเฉลี่ยในแนวนอนจะได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์

4.4.1.2 ขั้นตอนการหาค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล

การคำนวณความสอดคล้องกันของเหตุผล (Concurrency Reasonable; C.R.) เป็นการตรวจสอบว่าผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 4.15 นั้นมีความถูกต้องและสอดคล้องกันของเหตุผลหรือไม่ขั้นตอนในการคำนวณค่า C.R. มีดังนี้

-นำค่าที่เปรียบเทียบในแต่ละเกณฑ์ (ตารางที่ 4.14) มารวมกับผลลัพธ์ของตารางที่ 4.15 จะได้ตารางที่ 4.16

-ทำการคูณเมตริกซ์ดังแสดงในตารางที่ 4.17 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.18

-จากนั้นนำผลรวมในแนวนอนหารด้วยค่าน้ำหนักสำคัญดังแสดงในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.13 เกณฑ์การเปรียบเทียบเป็นคู่ (Saaty, 2003)

เกณฑ์	ความหมาย	คำอธิบาย
1	ความสำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 เกณฑ์มีความสำคัญเท่ากัน
3	ความสำคัญกว่าปานกลาง	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับปานกลาง
5	ความสำคัญกว่ามาก	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมาก
7	ความสำคัญกว่ามากที่สุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด
9	ความสำคัญกว่าสูงสุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับสูงสุด
2, 4, 6, 8	ระหว่างเกณฑ์ข้างต้น	อยู่ระหว่างเกณฑ์ที่กล่าวมาข้างต้น

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบเป็นคู่ของเกณฑ์หลัก

เกณฑ์	คุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพ	ค่าใช้จ่าย
คุณภาพน้ำ	1	3	5
ประสิทธิภาพ	1/3	1	3
ค่าใช้จ่าย	1/5	1/3	1
รวม	1.53	4.33	9.00

ตารางที่ 4.15 น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์หลัก

เกณฑ์	คุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพ	ค่าใช้จ่าย	ค่าความสำคัญ
คุณภาพน้ำ	0.65	0.69	0.56	0.63
ประสิทธิภาพ	0.22	0.23	0.33	0.26
ค่าใช้จ่าย	0.13	0.08	0.11	0.11
รวม	1	1	1	1

ตารางที่ 4.16 การคำนวณหาค่า C.R.

เกณฑ์	คุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพ	ค่าใช้จ่าย	ค่าความสำคัญ
คุณภาพน้ำ	1	3	5	0.63
ประสิทธิภาพ	1/3	1	3	0.26
ค่าใช้จ่าย	1/5	1/3	1	0.11

ตารางที่ 4.17 การคูณเมตริกซ์ของค่าที่เปรียบเทียบกับน้ำหนักสำคัญ

เกณฑ์	คุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพ	ค่าใช้จ่าย	ค่าความสำคัญ
คุณภาพน้ำ	1×0.63	3×0.26	5×0.11	0.63
ประสิทธิภาพ	$1/3 \times 0.63$	1×0.26	3×0.11	0.26
ค่าใช้จ่าย	$1/5 \times 0.63$	$1/3 \times 0.26$	1×0.11	0.11

ตารางที่ 4.18 ผลลัพธ์จากการคูณเมตริกซ์

เกณฑ์	คุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพ	ค่าใช้จ่าย	ค่าความสำคัญ
คุณภาพน้ำ	0.63	0.78	0.55	0.63
ประสิทธิภาพ	0.21	0.26	0.33	0.26
ค่าใช้จ่าย	0.13	0.09	0.11	0.11

ตารางที่ 4.19 ผลหารในแนวนอนกับน้ำหนักสำคัญ

เกณฑ์	ผลรวมในแนวนอน	น้ำหนักความสำคัญ	ผลหาร
คุณภาพน้ำ	1.96	0.63	3.11
ประสิทธิภาพ	0.80	0.26	3.08
ค่าใช้จ่าย	0.33	0.11	3.00

-การคำนวณหาค่า λ_{max} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการนำผลรวมของผลหารในตารางที่ 4.19 หารด้วยจำนวนเกณฑ์ทั้งหมด ($n = 3$)

$$\begin{aligned} \lambda_{max} &= \text{ผลรวมของผลหาร/จำนวนเกณฑ์} \\ \lambda_{max} &= (3.11+3.08+3.00) / 3 \\ &= 3.06 \end{aligned}$$

-คำนวณหาค่า C.I. เมื่อ $n = 3$ จากสมการ

$$\begin{aligned} C.I. &= (\lambda_{max} - n) / (n-1) \\ &= (3.06 - 3) / (3-1) \\ &= 0.03 \end{aligned}$$

-คำนวณหาค่า C.R. จาก $C.R. = C.I./R.I.$ (ค่า R.I. ดังแสดงในตารางที่ 4.20)

$$\begin{aligned} C.R. &= 0.03/0.58 \\ &= 0.05 \end{aligned}$$

-การแปลผล ถ้า $C.R. \leq 0.1$ แสดงว่าค่าของแต่ละเกณฑ์มีความสอดคล้องกันสามารถนำค่านำหนักสำคัญไปใช้ได้ ถ้า $C.R. > 0.1$ แสดงว่าค่าของแต่ละเกณฑ์ไม่มีความสอดคล้องกัน ต้องปรับค่าหรือให้ค่าแต่ละเกณฑ์ใหม่ เมื่อคำนวณค่า $C.R. \leq 0.1$ จึงสามารถนำค่านำหนักสำคัญไปใช้งานได้

จากการกำหนดค่านำหนักสำคัญของเกณฑ์หลักที่ใช้ในการศึกษารั้งนี้ นำมาคำนวณหาค่า C.R. ดังแสดงรายละเอียดการคำนวณในหัวข้อที่ 4.4.1.2 ได้ค่า C.R. เท่ากับ 0.05 ซึ่งค่านำหนักสำคัญมีความสอดคล้องกัน ($C.R. \leq 0.1$) สามารถนำไปใช้ในการประเมินหาทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสมได้ ดังนั้น จึงกำหนดให้ค่าคุณภาพน้ำมีความสำคัญสูงสุด (0.63) รองลงมาได้แก่ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ (0.26) และค่าใช้จ่ายของระบบ (0.11) ตามลำดับ

4.4.1.3 ขั้นตอนการหาค่าความสำคัญของเกณฑ์รอง

การคำนวณหาค่าความสำคัญของเกณฑ์รอง แบ่งออกเป็น 3 ด้าน ตามเกณฑ์หลัก คือ ค่าคุณภาพน้ำสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ ประสิทธิภาพการบำบัด และค่าใช้จ่ายของระบบ นำไปคำนวณค่าความสำคัญโดยแยกตามเกณฑ์หลักได้ดังนี้

1. เกณฑ์หลักเรื่องคุณภาพน้ำ มีเกณฑ์รองที่นำมาพิจารณา คือ คุณภาพน้ำหมุนเวียนจากทั้ง 3 ทางเลือก ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านน้ำประปา น้ำใช้ในการชักโครก น้ำใช้ล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม จากการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำออกของทั้ง 3 ทางเลือกกับมาตรฐานในการนำไปใช้ประโยชน์ พบว่าระบบรวม CF+UF มีคุณภาพน้ำผ่านมาตรฐานทั้ง 5 ด้าน คือ มาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านน้ำประปา น้ำใช้ในการชักโครก น้ำใช้ล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม ระบบ CF ผ่านมาตรฐาน 4 ด้าน คือ

ตารางที่ 4.20 ค่าดัชนีความสอดคล้องตามขนาดของเมตริกซ์ (Random Consistency Index; R.I.)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

มาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านน้ำใช้ในการชักโครก น้ำใช้ล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม และระบบ UF ผ่านมาตรฐาน 4 ด้าน คือ มาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านน้ำใช้ในการชักโครก น้ำใช้ล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม ดังแสดงในตารางที่ 4.21 เมื่อทราบว่าในแต่ละทางเลือกสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านใดได้บ้าง จากนั้นรวมจำนวนการนำไปใช้ประโยชน์ในแนวนอน ดังแสดงในตารางที่ 4.21 ในแต่ละทางเลือกใส่จำนวนการนำไปใช้ประโยชน์ลงในคอลัมน์ที่ 6 เช่น ระบบรวม CF+UF สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้ง 5 ด้าน ดังนั้น จะเท่ากับ 5 ระบบ CF และ UF เท่ากับ 4 นำผลรวมในแนวนอนของแต่ละทางเลือกหารด้วยผลรวมในแนวตั้งของคอลัมน์ที่ 6 เช่น ระบบรวม CF+UF มีค่าเท่ากับ $5/13$ มีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.38 ระบบ CF และ UF มีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.31 และเมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักสำคัญของทั้ง 3 ทางเลือก พบว่าระบบรวม CF+UF มีน้ำหนักสำคัญมากที่สุด (0.38) รองลงได้แก่ ระบบ CF (0.31) และ UF (0.31)

2. เกณฑ์หลักเรื่องประสิทธิภาพ มีเกณฑ์รองที่นำมาพิจารณา คือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น สี COD และ Total Coliform จากการศึกษาประสิทธิภาพทั้ง 3 ทางเลือก พบว่าระบบรวม CF+UF มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สี COD และ Total Coliform สูงที่สุด รองลงมา คือ ระบบ CF และ UF ตามลำดับ (ดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1) ในการเปรียบเทียบความสำคัญของประสิทธิภาพต้องมีการจัดลำดับของประสิทธิภาพให้อยู่ใน 5 เกณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.22 เช่น ประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในช่วงร้อยละ 81-100 ให้เกณฑ์ลำดับความสำคัญเท่ากับ 5 และประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 61-80, 41-60, 21-40 และ 0-20 มีเกณฑ์ลำดับความสำคัญ 4, 3, 2 และ 1 ตามลำดับ ยกตัวอย่างการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของระบบรวม CF+UF, CF และ UF มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 82.66, 71.28 และ 38.92 ตามลำดับ จัดให้อยู่ในเกณฑ์ได้เท่ากับ 5, 4 และ 2 ตามลำดับ นำมาเปรียบเทียบความสำคัญดังแสดงในตารางที่ 4.23 เปรียบเทียบทางเลือกระบบรวม CF+UF และ CF มีค่าเท่ากับ 2 เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของระบบรวม CF+UF อยู่ในช่วงร้อยละ 81-100 ระบบรวม CF อยู่ในช่วงร้อยละ 61-80 ระบบรวม CF+UF มีค่าห่างจากระบบ CF 2 ช่วง ดังนั้นระบบรวม CF+UF จึงมีความสำคัญมากกว่า จากนั้นคำนวณหาค่าความสำคัญเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.4.1.1 ได้ค่าความสำคัญของระบบรวม CF+UF, CF และ UF เท่ากับ 0.56, 0.32 และ 0.12 ตามลำดับ ผลการหาค่าน้ำหนักสำคัญของประสิทธิภาพในการกำจัดสี COD และ Total Coliform ดังแสดงในตารางที่ 4.24-4.26

ตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบน้ำหนักสำคัญของเกณฑ์รองของคุณภาพน้ำสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์

การนำไปใช้	น้ำประปา	น้ำชักโครก	ล้างรถ	ภูมิทัศน์	การเกษตร	รวม	ความสำคัญ
CF+UF	/	/	/	/	/	5	0.38
CF	x	/	/	/	/	4	0.31
UF	x	/	/	/	/	4	0.31
รวม	1	3	3	3	3	13	1

ตารางที่ 4.22 เกณฑ์การจัดลำดับความสำคัญของประสิทธิภาพในการบำบัด

เกณฑ์	1	2	3	4	5
ช่วงประสิทธิภาพ	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100

ตารางที่ 4.23 ค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือกในการกำจัดความขุ่น

ระบบ	CF+UF	CF	UF	ค่าความสำคัญ
CF+UF	1	2	4	0.56
CF	1/2	1	3	0.32
UF	1/4	1/3	1	0.12

ตารางที่ 4.24 ค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือกในการกำจัดสี

ระบบ	CF+UF	CF	UF	ค่าความสำคัญ
CF+UF	1	2	4	0.56
CF	1/2	1	3	0.32
UF	1/4	1/3	1	0.12

ตารางที่ 4.25 ค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือกในการกำจัด COD

ระบบ	CF+UF	CF	UF	ค่าความสำคัญ
CF+UF	1	2	3	0.54
CF	1/2	1	2	0.30
UF	1/3	1/2	1	0.16

ตารางที่ 4.26 ค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือกในการกำจัด Total Coliform

ระบบ	CF+UF	CF	UF	ค่าความสำคัญ
CF+UF	1	1	4	0.44
CF	1	1	4	0.44
UF	1/4	1/4	1	0.11

จากผลการหาค่าความสำคัญของเกณฑ์รองทั้ง 4 ด้าน เมื่อนำมาเฉลี่ยเป็นค่าความสำคัญของประสิทธิภาพ พบว่าระบบรวม CF+UF มีน้ำหนักสำคัญมากที่สุด (0.52) รองลงมาได้แก่ระบบ CF (0.35) และ UF (0.13) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.27

3. เกณฑ์หลักเรื่องค่าใช้จ่าย มีเกณฑ์รองที่นำมาพิจารณา คือ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และการเดินระบบ ซึ่งค่าใช้จ่ายของระบบรวม CF+UF มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดเท่ากับ 10.45 บาทต่อลูกบาศก์เมตร รองลงมาได้แก่ ระบบ UF และ CF มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 7.19 และ 3.26 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาค่าความสำคัญเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.4.1.ผลการ

เปรียบเทียบค่าความสำคัญ พบว่าระบบ CF มีค่าความสำคัญมากที่สุด (0.63) รองลงมาได้แก่ ระบบ UF (0.26) และ CF+UF (0.11) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.28

4.4.1.4 สรุปผลทางเลือกทางด้านวิศวกรรม

จากการประเมินทางเลือกของเกณฑ์รองสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบค่าความสำคัญในแต่ละทางเลือกได้ดังตารางที่ 4.29 เมื่อนำค่าความสำคัญที่ได้จากเกณฑ์รองมาคิดเทียบกับน้ำหนักสำคัญของเกณฑ์หลัก 3 ด้าน คือ คุณภาพน้ำในการนำไปใช้ประโยชน์ ประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายระบบจากการหาน้ำหนักสำคัญในหัวข้อที่ 4.4.1.1 มีค่าเท่ากับ 0.63, 0.26 และ 0.11 ตามลำดับ จะได้ค่าความสำคัญของเกณฑ์หลักในแต่ละทางเลือกดังแสดงในตารางที่ 4.30 จากนั้นรวมผลค่าความสำคัญของทั้ง 3 ด้าน พบว่าระบบรวม CF+UF มีน้ำหนักสำคัญมากที่สุด (0.39) รองลงมาได้แก่ ระบบ CF (0.35) และ UF (0.25) ตามลำดับ ดังนั้น ในการประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรมของทั้ง 3 ทางเลือก โดยคำนึงถึงคุณภาพน้ำในการนำไปใช้ประโยชน์ ประสิทธิภาพการบำบัดและค่าใช้จ่ายของระบบ พบว่าระบบรวม CF+UF มีความเหมาะสมที่สุดในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์

ตารางที่ 4.27 ค่าความสำคัญเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการบำบัดแต่ละทางเลือก

ระบบ	ค่าความสำคัญ				ค่าความสำคัญเฉลี่ย
	ความขุ่น	สี	COD	Total Coliform	
CF+UF	0.56	0.56	0.54	0.44	0.52
CF	0.32	0.32	0.30	0.44	0.35
UF	0.12	0.12	0.16	0.11	0.13

ตารางที่ 4.28 ค่าความสำคัญของค่าใช้จ่ายแต่ละทางเลือก

ระบบ	CF+UF	CF	UF	ค่าความสำคัญ
CF+UF	1	1/5	1/3	0.11
CF	5	1	3	0.63
UF	3	1/3	1	0.26

ตารางที่ 4.29 ผลการเปรียบเทียบความสำคัญในแต่ละทางเลือกของเกณฑ์รอง

ระบบ	คุณภาพน้ำ	ประสิทธิภาพ	ค่าใช้จ่าย
CF+UF	0.38	0.52	0.11
CF	0.31	0.35	0.63
UF	0.31	0.13	0.26
รวม	1	1	1

ตารางที่ 4.30 สรุปผลลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือก

ระบบ	คุณภาพน้ำ (0.63)	ประสิทธิภาพ (0.26)	ค่าใช้จ่าย (0.11)	ลำดับความสำคัญ
CF+UF	0.24	0.14	0.01	0.39
CF	0.19	0.09	0.07	0.35
UF	0.19	0.03	0.03	0.25

4.4.2 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพ

การประเมินความเสี่ยงสุขภาพจะประเมินการสัมผัสน้ำที่ผ่านระบบหมุนเวียนน้ำทั้ง 3 ทางเลือก จากการนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำประปา โดยพิจารณาสิ่งคุกคามสุขภาพ 2 ด้าน คือ สิ่งคุกคามทางเคมี เป็นการประเมินความเสี่ยงจากสารกลุ่มโลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง และสิ่งคุกคามทางชีวภาพ เป็นการประเมินความเสี่ยงจากการรับสัมผัสจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรครายละเอียดการประเมินมีดังต่อไปนี้

4.4.2.1 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมี

การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีแบ่งความเสี่ยงออกเป็น 2 ด้าน คือ ด้านที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Non-Carcinogen) และด้านที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Carcinogen) โดยสารโลหะหนักที่ประเมินด้านไม่ก่อมะเร็ง ได้แก่ Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Cd และ Pb อ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปา (WHO, 2011) และประเมินเฉพาะโลหะหนักที่มีค่าอ้างอิงในการประเมินส่วนสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ได้แก่ As อ้างอิงตามแนวทางการประเมินความเสี่ยงของ USEPA (1999) การประเมินความเสี่ยงจากการอุปโภค-บริโภคน้ำประปา โดยจะประเมินช่องทางการได้รับสัมผัสสารผ่าน 3 ช่องทาง คือ ผ่านทางการกิน ผ่านผิวหนัง และการหายใจจากสารที่สามารถระเหยได้ในอากาศ ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาระบบการสัมผัสผ่านทางการกินขณะอาบน้ำ เนื่องจากการรับสัมผัสผ่านการหายใจมีโอกาสการได้รับสัมผัสสารต่ำมาก สำหรับประเทศที่มีอากาศหนาวบ้านเรือนมีการระบายอากาศไม่ดี ส่วนใหญ่จะปิดประตูหน้าต่างอย่างมิดชิด ทำให้สารในน้ำประปาระเหยสู่อากาศและสะสมอยู่ภายนอก จึงมีโอกาสที่สารระเหยจะเข้าสู่ร่างกายได้มาก แต่สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเขตร้อนบ้านเรือนมีการระบายอากาศได้ดี โอกาสที่จะได้รับสารผ่านทางเดินหายใจจึงต่ำมาก (มัลลิกา ปัญญาคะโป และผ่องศรี เฝ้าภูรี, 2550) และการประเมินการรับสัมผัสผ่านทางผิวหนังมีข้อจำกัดของค่าอ้างอิง (Reference dose) ที่ใช้สำหรับการประเมินความเสี่ยงที่เกิดขึ้น ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงจำกัดขอบเขตการประเมินเฉพาะการประเมินความเสี่ยงผ่านทางการกินจากการใช้น้ำประปาขณะอาบน้ำเท่านั้น

จากผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักของน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก พบว่าค่าโลหะหนักส่วนใหญ่ผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทั้ง 4 ด้าน และมีโลหะหนักบางชนิดที่ไม่ผ่านมาตรฐานน้ำประปา ได้แก่ Cr, Mn, Fe, As และ Pb รายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3.1 และไม่ผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำใช้ในการซักโครก ได้แก่ Mn และ Fe ในการประเมินปริมาณสารแต่ละชนิดที่ร่างกายได้รับสัมผัสในแต่ละวัน (Average daily intake; ADI) โดยการคำนวณค่า ADI จากการรับสัมผัสผ่านทางเดินอาหารดังสมการที่ 4-1 และค่าอ้างอิงที่ใช้ในการประเมินแสดงในตารางที่ 4.31 จากนั้นจึงคำนวณค่าความเสี่ยงของสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Hazard Quotient; HQ)

ดังสมการที่ 4-2 และคำนวณผลรวมของสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Hazard index; HI) ดังสมการที่ 4-3 ในการคำนวณค่าความเสี่ยงของสารที่ก่อมะเร็ง (Cancer risk; CR) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4-4

$$ADI = (C \times R \times K \times ET \times EF \times ED) / (BW \times LT) \quad (4-1)$$

$$HQ = ADI / RfD \quad (4-2)$$

$$HI = \text{ผลรวมของ HQ ทั้งหมด} \quad (4-3)$$

$$CR = ADI \times SF \quad (4-4)$$

ตัวอย่างการคำนวณสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งจากการรับสัมผัสโลหะหนักขณะอาบน้ำ โลหะหนักที่นำมาเป็นตัวอย่างในการคำนวณ คือ As ซึ่งมีความเข้มข้นเฉลี่ยในน้ำที่ผ่านระบบรวม CF+UF เท่ากับ 0.014 mg/L สามารถคำนวณ ค่า ADI ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} ADI &= (C \times R \times K \times ET \times EF \times ED) / (BW \times LT) \\ ADI \text{ (mg/kg.day)} &= [(0.014 \text{ mg/L})(20 \text{ mL/h})(1 \text{ L}/1000 \text{ mL})(0.4 \text{ h/day}) \\ &\quad (365 \text{ days})(65 \text{ years})] / [(60 \text{ kg})(65 \text{ years})(365 \text{ days/year})] \\ &= 1.8 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

คำนวณค่า HQ โดยค่าอ้างอิง (Reference dose; RfD) การรับสัมผัส As ผ่านทางเดินอาหารมีค่า เท่ากับ 0.0003 mg/kg.day สามารถคำนวณค่า HQ ได้ดังนี้ (รายละเอียดการคำนวณ แสดงในภาคผนวก ค.) โลหะหนักมีหลายชนิดจะต้องหาค่า HI เพื่อแสดงค่าความเสี่ยงของโลหะทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.32

$$\begin{aligned} HQ &= ADI / RfD \\ HQ &= (1.8 \times 10^{-6} \text{ mg/kg.day}) / (0.0003 \text{ mg/kg.day}) \\ &= 0.006 \\ HI &= (2.41 \times 10^{-3} + 2.74 \times 10^{-3} + 2.29 \times 10^{-4} + 6.36 \times 10^{-5} + 3.62 \times 10^{-4} + \\ &\quad 6.15 \times 10^{-3} + 6.77 \times 10^{-6} + 6.38 \times 10^{-4} + 8.11 \times 10^{-3}) \\ &= 0.0023 \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง โลหะหนักที่นำมาเป็นตัวอย่างในการคำนวณ คือ As ในน้ำที่ผ่านระบบรวม CF+UF เช่นเดียวกัน เมื่อทราบค่า ADI เท่ากับ 1.8×10^{-6} mg/kg.day และค่า SF การรับสัมผัส As ผ่านทางเดินอาหารมีค่าเท่ากับ $1.5 \text{ (mg/kg.day)}^{-1}$ สามารถคำนวณค่า CR ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} CR &= ADI \times SF \\ CR &= [1.8 \times 10^{-6} \text{ mg/kg.day}] [1.5 \text{ (mg/kg.day)}^{-1}] \\ &= 2.768 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.31 ค่าอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่เข้าสู่ร่างกายผ่านทางเดินอาหารขณะอาบน้ำ

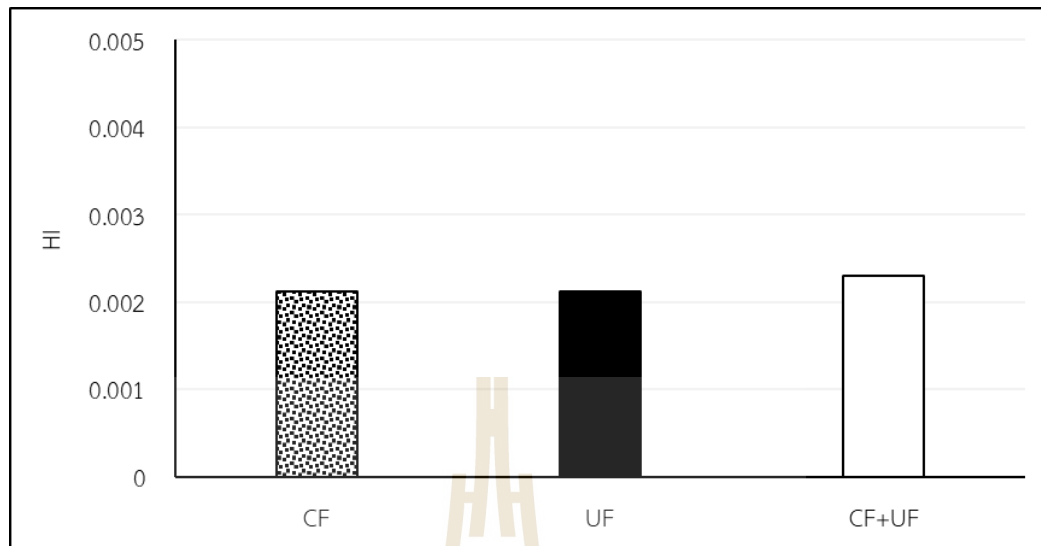
พารามิเตอร์		หน่วย	ค่าที่ใช้	อ้างอิง
C	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำ	mg/L	ผลการศึกษา	-
EF	ความถี่ของการได้รับสัมผัส (Exposure Frequency)	days/year	365	USEPA (2011)
ED	ระยะเวลาของการได้รับสัมผัส (Exposure Duration)	years	65	เพ็ญศรี วิจารณ์ญาณ (2554)
LT	เวลาเฉลี่ยตามระยะเวลาของการได้รับสัมผัส (Lifetime Exposure)	days	ED×365	นันทิกา สุนทรไชยกุล (2552)
BW	น้ำหนักตัว (Body Weight)	kg	60	USEPA (2011)
ET	ระยะเวลาที่สัมผัสขณะอาบน้ำ (วันละ 2 ครั้ง, ครั้งละ 12 นาที)	hr/day	0.4	USEPA (1989)
R	อัตราการรับสัมผัสขณะอาบน้ำ	mL/hr	20	กรมควบคุมมลพิษ (2556)
K	แฟคเตอร์ที่ใช้แปลงค่าปริมาตร	-	1 L/1000 mL	-
HQ	ค่าความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง	-	-	-
ADI	การได้รับสารในแต่ละวัน	mg/kg.day	-	-
RfD	Reference dose	mg/kg.day	-	-
CR	ค่าความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง	-	-	-
SF	Cancer slope factor	mg/kg-day ⁻¹	-	-
HI	ผลรวมของ HQ	-	-	-

จากผลการประเมินความเสี่ยงของสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งของน้ำที่ผ่านระบบหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือกแสดงผลในตารางที่ 4.32 (รายละเอียดการประเมินแสดงในภาคผนวก ค.) จากผลการศึกษาพบว่า การสัมผัสน้ำที่ผ่านระบบ CF และ UF มีความเสี่ยงต่ำสุดโดยมีค่า HI เท่ากับ 0.0021 และระบบร่วม CF+UF มีค่า HI เท่ากับ 0.0023 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ระดับความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งในตารางที่ 3.13 พบว่าน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือกไม่มีความเสี่ยงจากโลหะหนักที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง โดยมีความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ($HI < 1$) ดังแสดงในตารางที่ 4.33

จากผลการประเมินความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็งดังแสดงในตารางที่ 4.32 (ผลการประเมินอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ค.) พบว่าการสัมผัสน้ำที่ผ่านระบบ UF มีความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็งสูงสุดเท่ากับ 4.04×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 4-5 คน) รองลงมาได้แก่ระบบ CF มีความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง 2.86×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 2-3 คน) และความเสี่ยงต่ำสุด คือ ระบบร่วม CF+UF มีความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง 2.77×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 2-3 คน) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ระดับความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็งในตารางที่ 3.14 พบว่าน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือกมีความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดมะเร็งในระดับความเสี่ยงต่ำ แต่มีค่าเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (1×10^{-6})

ตารางที่ 4.32 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีด้านที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งและก่อให้เกิดมะเร็ง

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง						
ระบบ	UF		CF		CF+UF	
	ADI	HQ= ADI/RfD	ADI	HQ= ADI/RfD	ADI	HQ= ADI/RfD
Cr	9.03E-06	3.01E-03	8.72E-06	2.91E-03	7.24E-06	2.41E-03
Mn	8.89E-05	6.35E-04	3.48E-04	2.49E-03	3.83E-04	2.74E-03
Fe	1.17E-04	3.90E-04	9.01E-05	3.00E-04	6.86E-05	2.29E-04
Cu	2.94E-06	7.36E-05	1.83E-06	4.58E-05	2.54E-06	6.36E-05
Zn	8.48E-05	2.83E-04	7.99E-05	2.66E-04	1.08E-04	3.62E-04
As	2.69E-06	8.97E-03	1.91E-06	6.36E-03	1.85E-06	6.15E-03
Se	9.16E-08	1.83E-05	5.34E-08	1.07E-05	3.38E-08	6.77E-06
Cd	4.72E-07	9.44E-04	3.04E-07	6.08E-04	3.19E-07	6.38E-04
Pb	1.73E-05	4.80E-03	2.21E-05	6.14E-03	2.92E-05	8.11E-03
HI	HI	0.0021	HI	0.0021	HI	0.0023
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง						
ธาตุ	ADI	CR= ADI×SF	ADI	CR= ADI×SF	ADI	CR= ADI×SF
As	2.69E-06	4.04E-06	1.90E-06	2.86E-06	1.85E-06	2.77E-06



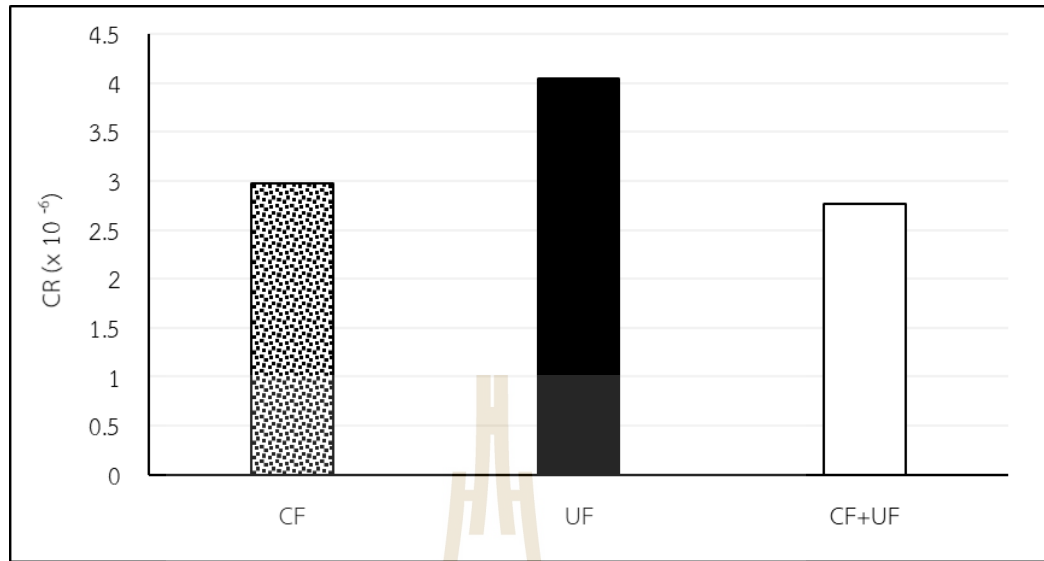
รูปที่ 4.10 ค่าความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสโลหะหนัก (HI) ในน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนของทั้ง 3 ทางเลือก

ตารางที่ 4.33 การจัดลำดับความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีด้านที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งและก่อให้เกิดมะเร็ง

Systems	Non-Carcinogen		Carcinogen	
	HI	Risk Level	CR	Risk Level
CF	0.0021	No Hazard	2.86×10^{-6}	Low
UF	0.0021	No Hazard	4.04×10^{-6}	Low
CF+UF	0.0023	No Hazard	2.77×10^{-6}	Low

4.4.2.2 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางชีวภาพ

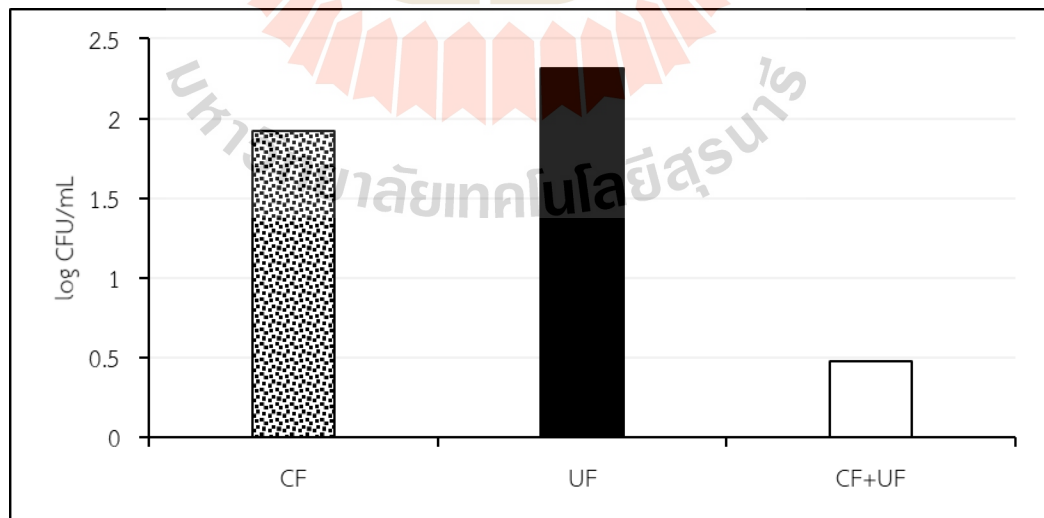
การประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการระบาดของโรคที่มีน้ำเป็นสื่อ โดยเฉพาะโรกระบบทางเดินอาหาร สำหรับแบคทีเรียที่นิยมใช้เป็นดัชนีในการประเมินการปนเปื้อนสิ่งปนื้อกในน้ำ คือ แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม (Coliform Bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มฟีคอลลีฟอร์ม (Fecal Coliform) รวมถึง *Escherichia Coli* (*E.coli*) เนื่องจากแบคทีเรียในกลุ่มดังกล่าวนี้มักพบในทางเดินอาหารของคนและสัตว์ จึงมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการตรวจพบเชื้อก่อโรคในระบบทางเดินอาหารด้วย การประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพจึงทำการศึกษาความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากเชื้อ *E.coli* ของน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก ซึ่งปริมาณเชื้อ *E.coli* เฉลี่ยที่ตรวจพบในน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนดังแสดงในตารางที่ 4.34 ปริมาณเชื้อ *E.coli* ในน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนของระบบ UF มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาได้แก่ระบบ CF และ CF+UF ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยมีปริมาณเชื้อ *E.coli* เท่ากับ 2.31 log CFU/mL, 1.92 log CFU/mL และ 0.48 log CFU/mL ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักที่ก่อมะเร็ง (CR) ในน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก

ตารางที่ 4.34 ปริมาณเชื้อ *E.coli* ที่ตรวจพบจากน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก

ระบบ	หน่วย	CF	UF	CF+UF
ปริมาณเชื้อ <i>E.coli</i>	CFU/mL	83	205	3
	log CFU/mL	1.92	2.31	0.48



รูปที่ 4.12 ปริมาณเชื้อ *E.coli* ที่ตรวจพบจากน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก

ในการประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพจะทำการประเมินความน่าจะเป็นหรือจำนวนผู้ป่วยจากการสัมผัสกับจุลินทรีย์ก่อโรค (P_{ill}) ขั้นตอนนี้จะอาศัยแบบจำลองในรูปของสมการคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์เรียกว่า Dose Response Model ซึ่งจะประมาณจำนวนผู้เจ็บป่วยจากชนิดของเชื้อก่อโรคในการศึกษาครั้งนี้ใช้แบบจำลอง Beta Poisson ดังสมการที่ 4-5 และค่าที่ใช้ในการประเมินดังแสดงในตารางที่ 4.35

$$P_{ill} = 1 - [1 + (\text{Dose}/\beta)]^{-\alpha} \quad (4-5)$$

การประเมินการรับสัมผัส เป็นขั้นตอนในการคำนวณโอกาสในการสัมผัสน้ำที่มีการปนเปื้อนเชื้อ *E.coli* โดยอาศัยค่าความชุกและจำนวนเชื้อ *E.coli* ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก และนำมาใช้ประโยชน์เป็นน้ำประปา สามารถคำนวณความน่าจะเป็นในการสัมผัสกับ *E.coli* (Probability of Exposure) โดยอาศัยสมการ 4-6 จากนั้นหาระดับความเสี่ยงจากการคำนวณจำนวนผู้ป่วยจากการสัมผัสเชื้อ *E.coli* ที่ปนเปื้อนในน้ำ ดังสมการที่ 4-7

$$P_E = P \times (1 - e^{-\text{Dose}}) \quad (4-6)$$

$$\text{Risk} = P_E \times P_{ill} \quad (4-7)$$

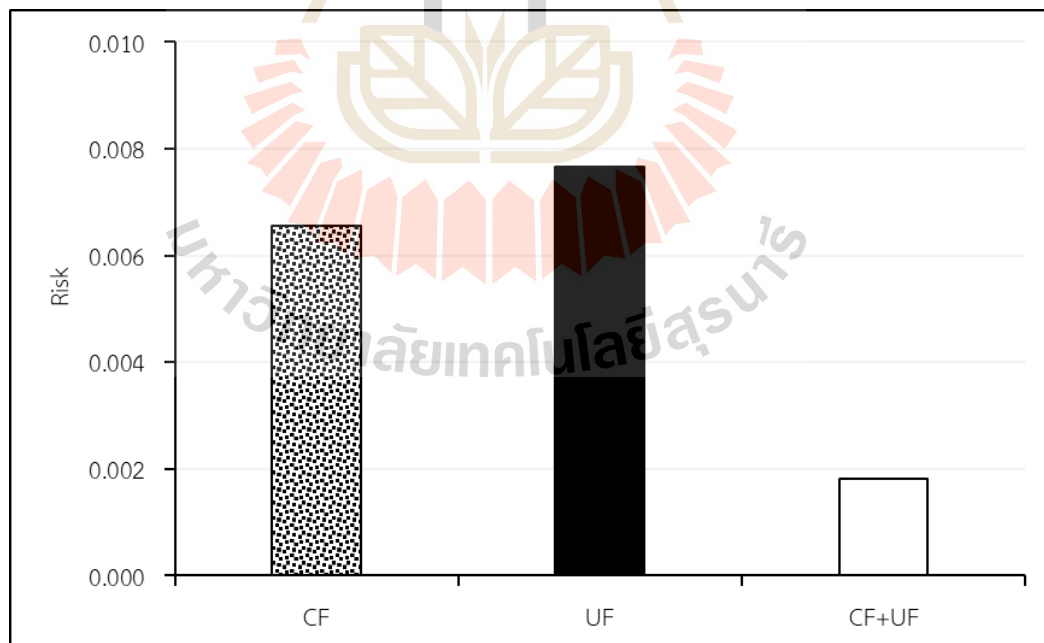
ตัวอย่างการคำนวณหาระดับความเสี่ยงของเชื้อ *E.coli* ที่ปนเปื้อนในน้ำหมุนเวียนของระบบ CF พบปริมาณเชื้อ *E.coli* เท่ากับ 1.92 log CFU/mL หาค่าประมาณจำนวนผู้เจ็บป่วยจากชนิดของเชื้อก่อโรคจาก (P_{ill}) ค่าความน่าจะเป็นในการสัมผัสกับเชื้อ *E.coli* (P_E) และคำนวณหาระดับความเสี่ยงจากการสัมผัสเชื้อ *E.coli* ที่ปนเปื้อนในน้ำ (Risk)

ตารางที่ 4.35 ค่าที่ใช้หาความน่าจะเป็นในการเจ็บป่วยจากการสัมผัส *E.coli*

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ใช้	อ้างอิง	
C	ปริมาณเชื้อก่อโรคในน้ำ	log CFU/mL	ผลการศึกษา	
R	อัตราการรับสัมผัสขณะอาบน้ำ	mL/hr	กรมควบคุมมลพิษ (2556)	
	อัตราการรับสัมผัสน้ำต่อวัน (วันละ 2 ครั้ง, ครั้งละ 12 นาที)	mL/day	-	
P	ความชุกของการเจอเชื้อ <i>E.coli</i> (สัดส่วนตัวอย่างน้ำที่ตรวจพบต่อ จำนวนตัวอย่างน้ำทั้งหมด)	-	ผลการศึกษา	
α	ค่าอ้างอิง	-	0.248	Teunis et al. (2008)
β	ค่าอ้างอิง	-	48.8	Teunis et al. (2008)
Dose	ปริมาณเชื้อที่เข้าสู่ร่างกาย	-	C x R	-

$$\begin{aligned}
 P_{ill} &= 1 - [1 + (\text{Dose}/\beta)]^{-\alpha} \\
 &= 1 - [1 + (1.92 \log \text{CFU/mL}) (8 \text{ mL/day}) / 48.8]^{-0.248} \\
 &= 0.067 \\
 P_E &= P \times (1 - e^{-\text{Dose}}) \\
 &= 0.1 \times (1 - e^{-(1.92 \times 8)}) \\
 &= 0.099 \\
 \text{Risk} &= P_E \times P_{ill} \\
 &= 0.067 \times 0.099 \\
 &= 0.0067
 \end{aligned}$$

จากผลการศึกษาการประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพจากการสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ *E.coli* พบว่าการสัมผัสน้ำที่ผ่านระบบ UF มีความเสี่ยงสูงสุด รองลงมาได้แก่ระบบ CF และ CF+UF ตามลำดับ (รูปที่ 4.13) โดยมีค่าความเสี่ยงเท่ากับ 0.0077 (ประชากรที่สัมผัสน้ำ 1000 คน มีโอกาสเจ็บป่วย 7-8 คน) 0.0066 (ประชากรที่สัมผัสน้ำ 1000 คน มีโอกาสเจ็บป่วย 6-7 คน) และ 0.0018 (ประชากรที่สัมผัสน้ำ 1000 คน มีโอกาสเจ็บป่วย 1-2 คน) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.36 และรายละเอียดการประเมินแสดงในภาคผนวก ค. เมื่อพิจารณาค่าความเสี่ยงจากการสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ *E.coli* พบว่ามีค่าเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (1×10^{-4})



รูปที่ 4.13 ความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ *E.coli* ในน้ำที่ผ่านการหมวนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก

4.4.2.3 การประเมินทางเลือกของความเสี่ยงสุขภาพโดยใช้ AHP

จากผลการประเมินความเสี่ยงทางด้านเคมีและชีวภาพสามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.37 เมื่อใช้ AHP จัดลำดับความสำคัญจากการประเมินทางเลือกด้านสุขภาพของทั้ง 3 ทางเลือก โดยการประเมินดังหัวข้อที่ 4.4.1.2 พบว่าระบบรวม CF+UF มีความเหมาะสมที่สุดในการหมุนเวียนน้ำ รองลงมาได้แก่ระบบ CF และ UF ดังแสดงในตารางที่ 4.38 โดยระบบรวม CF+UF มีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.47 ระบบ CF และ UF มีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.27

4.5 สรุปผลการเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ

การเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ จากการใช้ AHP ช่วยในการจัดลำดับความสำคัญของการประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ โดยการประเมินทางด้านวิศวกรรมเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา คือ ค่าคุณภาพน้ำในการนำไปใช้ประโยชน์ ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ และค่าใช้จ่ายของระบบ การประเมินทางด้านความเสี่ยงสุขภาพเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา คือ ค่าความเสี่ยงจากการสัมผัสสารที่ไม่ก่อมะเร็ง ค่าความเสี่ยงจากการสัมผัสสารที่ก่อมะเร็ง ค่าความเสี่ยงจากการสัมผัสเชื้อจุลชีพก่อโรค จากผลการศึกษาการประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ พบว่าผลการประเมินทั้ง 2 ด้านมีความสอดคล้องคือ ระบบรวม CF+UF มีความเหมาะสมที่สุด รองลงมาได้แก่ระบบ CF และ UF ตามลำดับ และเมื่อนำผลการประเมินของทั้ง 3 ทางเลือก มาหาค่าความสำคัญโดยให้น้ำหนักความสำคัญของด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพเท่ากัน คือ 0.5 พบว่าระบบรวม CF+UF มีความเหมาะสมที่สุดในการหมุนเวียนน้ำกลับไปใช้ประโยชน์ รองลงมาได้แก่ระบบ CF และ UF ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.39 มีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.43 0.31 และ 0.26 ตามลำดับ จากข้อมูลการประเมินเรื่องค่าใช้จ่ายของระบบรวม CF+UF จะสูงกว่าระบบ UF และระบบ CF แต่เนื่องจากระบบรวม CF+UF มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดความขุ่น สี COD Total Coliform และคุณภาพน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการนำไปใช้ประโยชน์ทั้ง 5 ด้าน รวมถึงการนำน้ำไปใช้ประโยชน์จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพต่ำทำให้ระบบรวม CF+UF มีความเหมาะสมในการหมุนเวียนน้ำมากกว่าระบบ CF และ UF

ตารางที่ 4.36 ความเสี่ยงทางสุขภาพจากการสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ *E.coli*

Systems	<i>E.coli</i> (log CFU/mL)	Risk
CF	1.92	0.0066
UF	2.31	0.0077
CF+UF	0.48	0.0018

ตารางที่ 4.37 สรุปผลความเสี่ยงทั้ง 3 ทางเลือก

Systems	Non-Carcinogen	Carcinogen	<i>E.coli</i> Risk
	HI	CR	
CF	0.0021	2.86×10^{-6}	0.0066
UF	0.0021	4.04×10^{-6}	0.0077
CF+UF	0.0023	2.77×10^{-6}	0.0018

ตารางที่ 4.38 การเปรียบเทียบความเสี่ยงทางสุขภาพโดยใช้ AHP

ระบบ	ค่าความสำคัญ			ลำดับความสำคัญ
	Non-Carcinogen	Carcinogen	Microbial	
CF+UF	0.11	0.63	0.63	0.47
CF	0.44	0.11	0.26	0.27
UF	0.44	0.26	0.11	0.27

ตารางที่ 4.39 สรุปผลการเปรียบเทียบความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ

ระบบ	ค่าความสำคัญ		ลำดับความสำคัญ
	ด้านวิศวกรรม (0.5)	ด้านความเสี่ยงสุขภาพ (0.5)	
CF+UF	0.39	0.47	0.43
CF	0.35	0.27	0.31
UF	0.25	0.27	0.26

4.6 การประยุกต์ใช้ในการประเมินทางเลือกน้ำหมุนเวียน

จากผลการศึกษาการประเมินทางเลือกน้ำหมุนเวียนทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ นำมาประยุกต์ใช้ตัวอย่างกรณีศึกษาหอพักนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความต้องการจะหมุนเวียนน้ำทิ้งกลับมาใช้ ได้นำวิธีการและผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ มาประเมินระบบหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ มีรายละเอียดการประเมินดังนี้

4.6.1 การประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรม

การศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสมมติให้มีทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ 3 ทางเลือก ได้แก่ CF, UF และระบบรวม CF+UF ดังนั้นการประเมินทางเลือกน้ำหมุนเวียนทางด้านวิศวกรรม สำหรับการนำมาใช้ในหอพักนักศึกษาจึงมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ ค่าคุณภาพน้ำและค่าใช้จ่ายของทั้ง 3 ทางเลือกเป็นค่าเดียวกัน (จากรายงานประจำปีงานประปาและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2555-2559 ส่วนงานประปาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่าปริมาณน้ำใช้ของหอพักเท่ากับ 2,066 m³/d และจากข้อมูลสถิติหอพักนักศึกษาพ.ศ. 2555-2560 จากหอพัก 17 หอ มีจำนวนห้องพัก 2,472 ห้องแบ่งเป็นหอนักศึกษาหญิง 10 หอ นักศึกษาชาย 7 หอ มีจำนวนนักศึกษาผู้ใช้น้ำเท่ากับ 5,589 คน ปริมาณน้ำหมุนเวียนคิดเป็นร้อยละ 20 และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้คิดค่าใช้จ่ายของระบบที่มีปริมาณน้ำหมุนเวียนร้อยละ 50 มีปริมาตรน้ำหมุนเวียนเท่ากับ 1,000 m³/d เมื่อนำมาจัดลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือก พบว่าระบบรวม CF+UF มีความเหมาะสมที่สุดในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ รองลงมาได้แก่ ระบบ CF และ UF ตามลำดับ โดยมีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.39 0.35 และ 0.25 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.40 รายละเอียดการประเมินแสดงในหัวข้อที่ 4.4.1

ตารางที่ 4.40 สรุปผลลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือกในการประเมินทางด้านวิศวกรรม

ระบบ	คุณภาพน้ำ (0.63)	ประสิทธิภาพ (0.26)	ค่าใช้จ่าย (0.11)	ลำดับความสำคัญ
CF+UF	0.24	0.14	0.01	0.39
CF	0.19	0.09	0.07	0.35
UF	0.19	0.03	0.03	0.25

4.6.2 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพ

การประเมินความเสี่ยงสุขภาพจะประเมินการสัมผัสน้ำที่ผ่านระบบหมุนเวียนน้ำทั้ง 3 ทางเลือก จากการนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำประปา โดยพิจารณาสิ่งคุกคามสุขภาพ 2 ด้าน คือ สิ่งคุกคามทางเคมีและชีวภาพ รายละเอียดการประเมินมีดังต่อไปนี้

4.6.2.1 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมี

การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมี ด้านที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง สารที่นำมาประเมิน ได้แก่ Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Se, Cd, และ Pb ด้านที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ได้แก่ As การประเมินการรับสัมผัสจะประเมินผ่านทางกรกินจากการใช้น้ำประปาขณะอาบน้ำ โดยค่าอ้างอิงที่ใช้แสดงในตารางที่ 4.31 (ยกเว้นน้ำหนักตัวและระยะของการได้รับสัมผัส) ในการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ กรณีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในหอพักนักศึกษา ซึ่งแยกเป็นหอพักชายและหอพักหญิงจะใช้น้ำหนักตัวเฉลี่ยจากข้อมูลการตรวจสุขภาพของนักศึกษาใหม่ปี 2561 พบว่าน้ำหนักตัวเฉลี่ยของนักศึกษาชายมีค่าเท่ากับ 68 กิโลกรัม และนักศึกษาหญิงมีน้ำหนักตัวเฉลี่ยเท่ากับ 56 กิโลกรัม ระยะเวลากการได้รับสัมผัสสารปนเปื้อนในน้ำเป็นระยะเวลา 4 ปี ทำการประเมินความเสี่ยงของสารที่ไม่ก่อมะเร็งและสารที่ก่อมะเร็งเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.4.2.1 ผลการประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีของนักศึกษาชายแสดงในตารางที่ 4.41 และนักศึกษาหญิงแสดงในตารางที่ 4.42

จากผลการประเมินความเสี่ยงสุขภาพของสารที่ไม่ก่อมะเร็งจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก พบว่ามีความเสี่ยงจากการสัมผัสสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง (HI) ในน้ำหมุนเวียนของระบบ CF, UF และระบบรวม CF+UF ใกล้เคียงกัน โดยนักศึกษาชายมีค่าความเสี่ยงเท่ากับ 0.0019, 0.0019 และ 0.0020 ตามลำดับ และค่าความเสี่ยงของนักศึกษาหญิงเท่ากับ 0.0023, 0.0023 และ 0.0025 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.43 โดยนักศึกษาชายมีความเสี่ยงจากการสัมผัสสารที่ไม่ก่อมะเร็งน้อยกว่านักศึกษาหญิงดังแสดงในรูปที่ 4.14 เมื่อพิจารณาค่าความเสี่ยง พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณโลหะหนักที่ร่างกายของนักศึกษาชายและหญิงได้รับอยู่ในเกณฑ์ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ และปลอดภัยต่อผู้ได้รับสัมผัสน้ำหมุนเวียนขณะอาบน้ำ จากการนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ประโยชน์เป็นน้ำประปา

จากผลการประเมินความเสี่ยงสุขภาพของสารที่ก่อมะเร็งจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก พบว่าการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบรวม CF+UF มีความเสี่ยงต่ำที่สุด รองลงมาได้แก่ระบบ CF และ UF ตามลำดับ ค่าความเสี่ยงจากการสัมผัสสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (CR) ของนักศึกษาชายเท่ากับ 2.44×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 2-3 คน), 2.52×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 2-3 คน) และ 3.56×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 3-4 คน)

ตามลำดับ และค่าความเสี่ยงของนักศึกษาหญิงเท่ากับ 2.99×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 2-3 คน), 3.08×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 3-4 คน) และ 4.36×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 4-5 คน) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.43 โดยนักศึกษาชายมีความเสี่ยงจากการสัมผัสสารที่ก่อมะเร็งน้อยกว่านักศึกษาหญิงดังแสดงในรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาค่าความเสี่ยง จะเห็นได้ว่าปริมาณสารก่อมะเร็งที่ร่างกายของนักศึกษาชายและหญิงได้รับสัมผัสน้ำหมุนเวียนขณะอาบน้ำ มีค่ามากกว่า 1×10^{-6} ซึ่งเป็นค่าความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ ดังนั้น ในการหมุนเวียนน้ำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำประปาจึงไม่สามารถใช้ในสัดส่วนร้อยละ 100 ได้ ซึ่งจำเป็นต้องลดความเสี่ยงของสารก่อมะเร็งให้น้อยกว่า 1×10^{-6} (ยอมรับให้ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 คน มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 1 คน) แนวทางหนึ่งในการลดความเสี่ยง คือ การใช้สัดส่วนน้ำหมุนเวียนให้น้อยลงโดยทำการผสมกับน้ำประปา

ตารางที่ 4.41 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีของนักศึกษาชาย

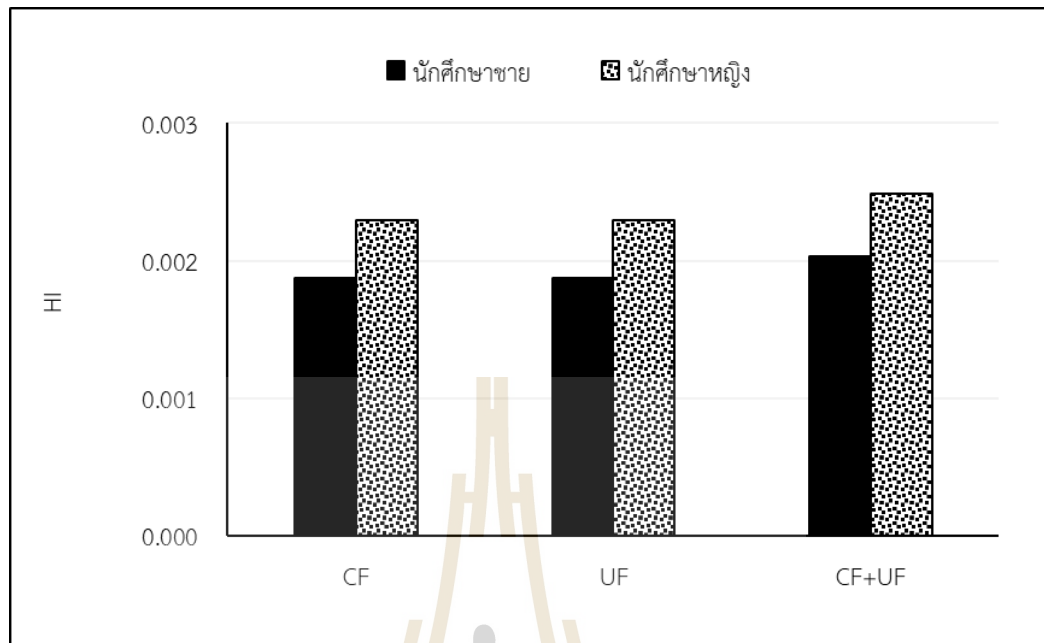
ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง						
ระบบ	UF		CF		CF+UF	
ธาตุ	ADI	HQ= ADI/RfD	ADI	HQ= ADI/RfD	ADI	HQ= ADI/RfD
Cr	7.97E-06	2.66E-03	7.69E-06	2.56E-03	6.39E-06	2.13E-03
Mn	7.84E-05	5.60E-04	3.07E-04	2.19E-03	3.38E-04	2.42E-03
Fe	1.03E-04	3.44E-04	7.95E-05	2.65E-04	6.05E-05	2.02E-04
Cu	2.60E-06	6.50E-05	1.62E-06	4.05E-05	2.24E-06	5.61E-05
Zn	7.48E-05	2.49E-04	7.05E-05	2.35E-04	9.57E-05	3.19E-04
As	2.38E-06	7.92E-03	1.68E-06	5.60E-03	1.63E-06	5.43E-03
Se	8.09E-08	1.62E-05	4.71E-08	9.42E-06	2.99E-08	5.97E-06
Cd	4.17E-07	8.33E-04	2.68E-07	5.36E-04	2.81E-07	5.63E-04
Pb	1.52E-05	4.24E-03	1.95E-05	5.42E-03	2.58E-05	7.16E-03
HI	HI	0.0019	HI	0.0019	HI	0.0020
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง						
ธาตุ	ADI	CR= ADI×SF	ADI	CR= ADI×SF	ADI	CR= ADI×SF
As	2.38E-06	3.56E-06	1.68E-06	2.52E-06	1.63E-06	2.44E-06

ตารางที่ 4.42 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีของนักศึกษาหญิง

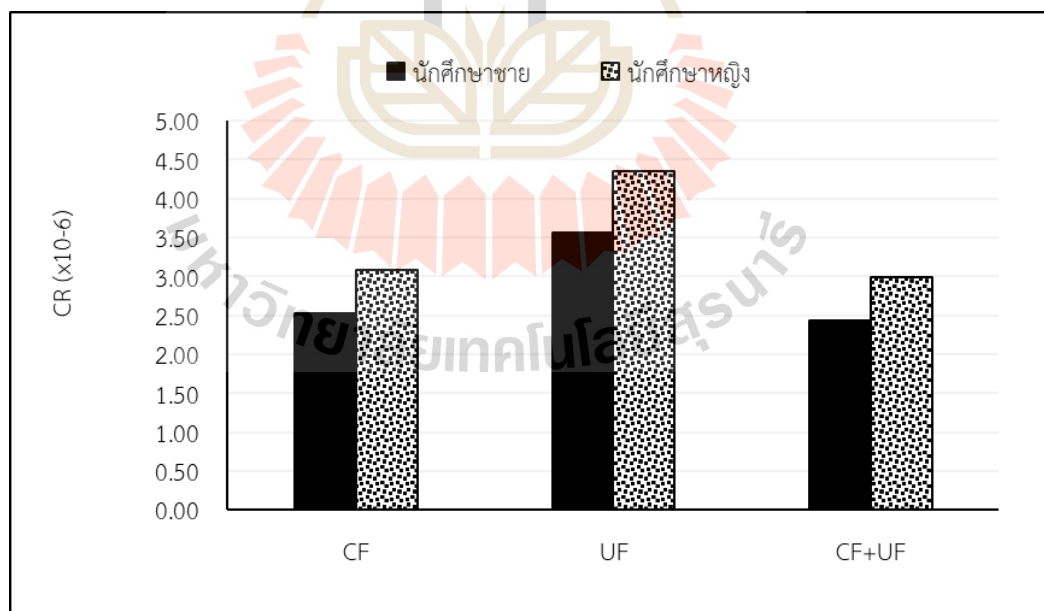
ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง						
ระบบ	UF		CF		CF+UF	
ธาตุ	ADI	HQ= ADI/RfD	ADI	HQ= ADI/RfD	ADI	HQ= ADI/RfD
Cr	9.75E-06	3.25E-03	9.42E-06	3.14E-03	7.81E-06	2.60E-03
Mn	9.60E-05	6.85E-04	3.76E-04	2.68E-03	4.14E-04	2.96E-03
Fe	1.26E-04	4.21E-04	9.73E-05	3.24E-04	7.41E-05	2.47E-04
Cu	3.18E-06	7.95E-05	1.98E-06	4.95E-05	2.75E-06	6.87E-05
Zn	9.15E-05	3.05E-04	8.63E-05	2.88E-04	1.17E-04	3.90E-04
As	2.91E-06	9.69E-03	2.06E-06	6.85E-03	1.99E-06	6.64E-03
Se	9.89E-08	1.98E-05	5.76E-08	1.15E-05	3.65E-08	7.31E-06
Cd	5.10E-07	1.02E-03	3.28E-07	6.56E-04	3.44E-07	6.88E-04
Pb	1.87E-05	5.18E-03	2.39E-05	6.63E-03	3.15E-05	8.76E-03
HI	HI	0.0023	HI	0.0023	HI	0.0025
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง						
ธาตุ	ADI	CR= ADI×SF	ADI	CR= ADI×SF	ADI	CR= ADI×SF
As	2.91E-06	4.36E-06	2.06E-06	3.08E-06	1.99E-06	2.99E-06

ตารางที่ 4.43 การจัดลำดับความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีด้านที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งและก่อให้เกิดมะเร็ง

Systems	ชาย		หญิง		Non-Carcinogen	Carcinogen
	HI	CR	HI	CR	Risk Level	Risk Level
CF	0.0019	2.52E-06	0.0023	3.08E-06	No Hazard	Low
UF	0.0019	3.56E-06	0.0023	4.36E-06	No Hazard	Low
CF+UF	0.0020	2.44E-06	0.0025	2.99E-06	No Hazard	Low



รูปที่ 4.14 ความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสโลหะหนัก (HI) ในน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือกของนักศึกษาชายและนักศึกษาหญิง



รูปที่ 4.15 ความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสโลหะหนักที่ก่อมะเร็ง (CR) ในน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือกของนักศึกษาชายและนักศึกษาหญิง

จากการศึกษาการลดความเสี่ยงโดยการนำน้ำหมุนเวียนผสมกับน้ำประปาที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนร้อยละ 100, 50, 40, 30 และ 20 พบว่าเมื่อลดสัดส่วนของน้ำหมุนเวียนส่งผลให้ความเสี่ยงจากการสัมผัสสารที่ไม่ก่อมะเร็งและสารที่ก่อมะเร็งลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.44-4.45 และรูปที่ 4.16-4.17 เมื่อพิจารณาความเสี่ยงจากการสัมผัสสารที่ไม่ก่อมะเร็งของน้ำหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก พบว่ามีความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทุกสัดส่วนน้ำหมุนเวียน ($HI < 1$) และความเสี่ยงจากการสัมผัสสารก่อมะเร็งในน้ำหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก มีความเสี่ยงแตกต่างกัน ในหอพักชายสามารถใช้สัดส่วนน้ำหมุนเวียนได้มากที่สุดเท่ากับร้อยละ 40 จากการหมุนเวียนน้ำผ่านระบบรวม CF+UF โดยมีค่าความเสี่ยงของสารก่อมะเร็งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ($CR < 1 \times 10^{-6}$) และน้ำหมุนเวียนที่ผ่านระบบ CF และ UF สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนร้อยละ 30 ในหอพักหญิงน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนด้วยระบบ CF และระบบรวม CF+UF สามารถใช้สัดส่วนน้ำหมุนเวียนได้มากที่สุดเท่ากับร้อยละ 30 น้ำหมุนเวียนที่ผ่านระบบ UF สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ที่สัดส่วนร้อยละ 20 ดังนั้น หากต้องการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้ปริมาณมากที่สุดและมีความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ ใช้สัดส่วนน้ำหมุนเวียนร้อยละ 30 และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งหอพักชายและหอพักหญิง โดยใช้น้ำหมุนเวียนที่ผ่านระบบรวม CF+UF จะมีค่าความเสี่ยงต่ำที่สุด

4.6.2.2 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางชีวภาพ

การประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการระบาดของโรคที่มีน้ำเป็นสื่อ โดยทำการศึกษาความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากเชื้อ *E.coli* ของน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก ซึ่งปริมาณเชื้อ *E.coli* เฉลี่ยที่ตรวจพบในน้ำที่ผ่านการหมุนเวียนมีลักษณะเหมือนกันกับผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.4.2.2 เนื่องจากแหล่งน้ำทั้งที่นำมาใช้ในการหมุนเวียนเป็นแหล่งน้ำเดียวกัน และค่าที่นำมาใช้ในการประเมินเป็นค่าอ้างอิงทั้งหมด ดังนั้น ผลการประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพที่ได้จึงมีลักษณะเหมือนกัน คือ การสัมผัสน้ำที่ผ่านระบบ UF มีความเสี่ยงสูงสุด รองลงมาได้แก่ระบบ CF และ CF+UF ตามลำดับ โดยมีค่าความเสี่ยงเท่ากับ 0.0077 (ประชากรที่สัมผัสน้ำ 1000 คน มีโอกาสเจ็บป่วย 7-8 คน) 0.0066 (ประชากรที่สัมผัสน้ำ 1000 คน มีโอกาสเจ็บป่วย 6-7 คน) และ 0.0018 (ประชากรที่สัมผัสน้ำ 1000 คน มีโอกาสเจ็บป่วย 1-2 คน) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.46 เมื่อพิจารณาค่าความเสี่ยง จะเห็นได้ว่าความเสี่ยงมีค่ามากกว่า 1×10^{-4} ซึ่งเป็นค่าความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ และเมื่อลดความเสี่ยงด้วยการนำน้ำหมุนเวียนผสมกับน้ำประปา พบว่า การหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้ปริมาณมากที่สุดและมีความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ ใช้สัดส่วนน้ำหมุนเวียนร้อยละ 30 โดยใช้น้ำหมุนเวียนที่ผ่านระบบรวม CF+UF

4.6.2.3 การประเมินทางเลือกของความเสี่ยงสุขภาพโดยใช้ AHP

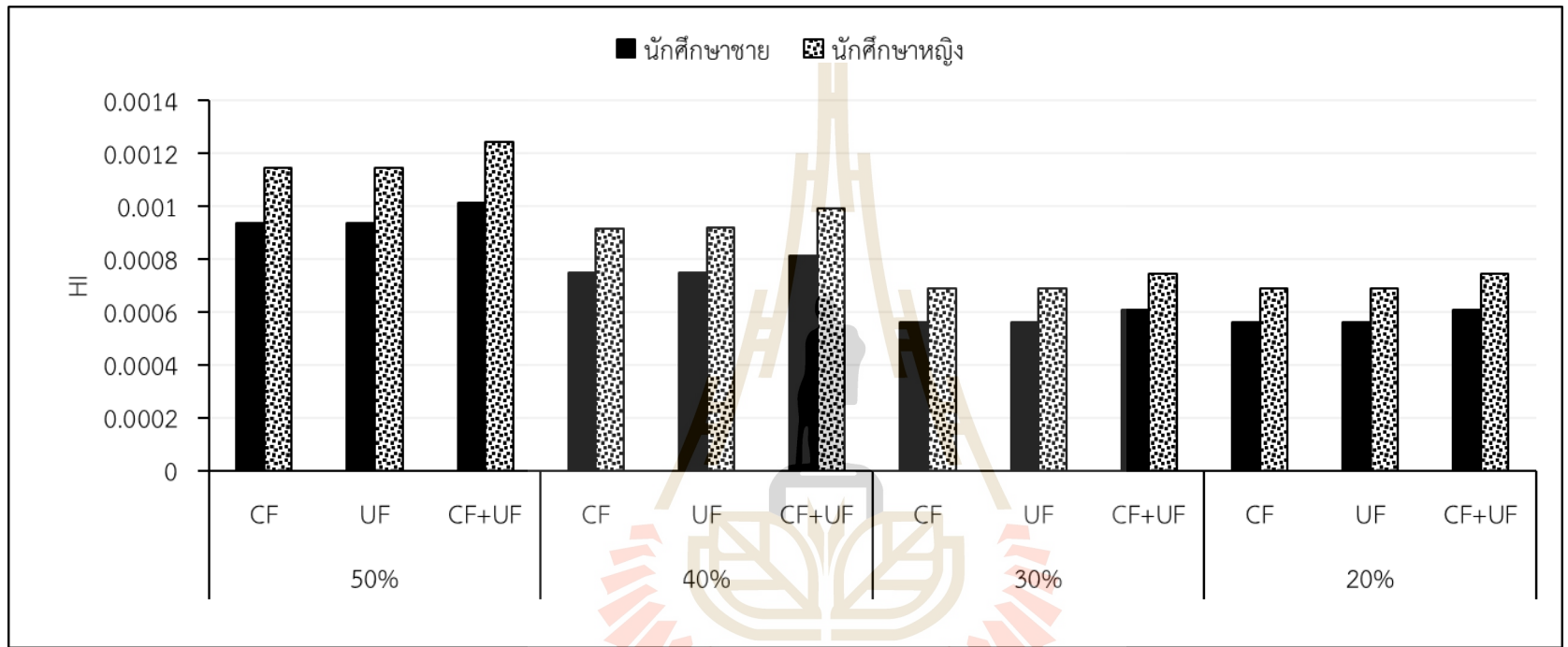
จากผลการประเมินความเสี่ยงทางด้านเคมีและชีวภาพ สามารถใช้ AHP จัดลำดับความสำคัญจากการประเมินทางเลือกด้านสุขภาพของทั้ง 3 ทางเลือก โดยขั้นตอนการประเมินดังหัวข้อที่ 4.4.1.1 พบว่าการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ทั้งหอพักชายและหอพักหญิงมีระบบหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสม คือ ระบบรวม CF+UF รองลงมาได้แก่ระบบ CF และ UF ดังแสดงในตารางที่ 4.47 และ 4.48 โดยมีค่าความสำคัญของระบบรวม CF+UF, CF และ UF ของหอพักชายและหญิงเท่ากับ 0.47 0.27 และ 0.27 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.44 ความเสี่ยงสุขภาพจากการสัมผัสสารไม่ก่อมะเร็งที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนแตกต่างกัน

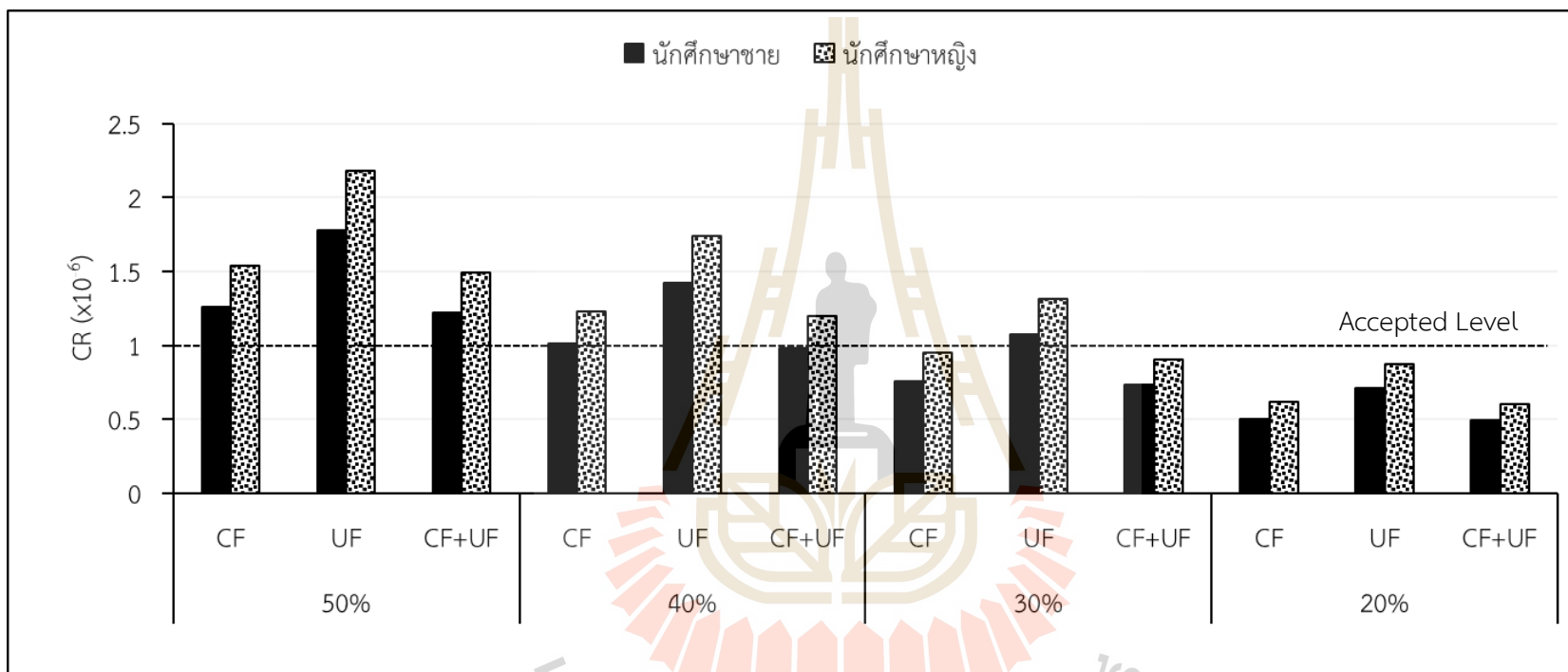
สัดส่วนน้ำหมุนเวียน ต่อน้ำประปา	นักศึกษาชาย					นักศึกษาหญิง				
	100%	50%	40%	30%	20%	100%	50%	40%	30%	20%
CF	0.0019	0.0009	0.0007	0.0006	0.0006	0.0023	0.0011	0.0009	0.0007	0.0007
UF	0.0019	0.0009	0.0008	0.0006	0.0006	0.0023	0.0011	0.0009	0.0007	0.0007
CF+UF	0.0020	0.0010	0.0008	0.0006	0.0006	0.0025	0.0012	0.0010	0.0007	0.0007

ตารางที่ 4.45 ความเสี่ยงสุขภาพจากการสัมผัสสารก่อมะเร็งที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนแตกต่างกัน

สัดส่วนน้ำหมุนเวียน ต่อน้ำประปา	นักศึกษาชาย					นักศึกษาหญิง				
	100%	50%	40%	30%	20%	100%	50%	40%	30%	20%
CF	2.52E-06	1.26E-06	1.01E-06	7.56E-07	5.04E-07	3.08E-06	1.54E-06	1.23E-06	9.25E-07	6.17E-07
UF	3.56E-06	1.78E-06	1.43E-06	1.07E-06	7.13E-07	4.36E-06	2.18E-06	1.74E-06	1.31E-06	8.72E-07
CF+UF	2.44E-06	1.22E-06	9.77E-07	7.33E-07	4.88E-07	2.99E-06	1.49E-06	1.20E-06	8.97E-07	5.98E-07



รูปที่ 4.16 ความเสี่ยงสุขภาพจากการสัมผัสสารไม่ก่อมะเร็งที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนแตกต่างกัน



รูปที่ 4.17 ความเสี่ยงสุขภาพจากการสัมผัสสารก่อมะเร็งที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.46 ความเสี่ยงทางสุขภาพจากการสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ *E.coli*

Systems	100%	50%	40%	30%	20%
CF	0.0066	0.0057	0.0054	0.0050	0.0044
UF	0.0077	0.0068	0.0065	0.0062	0.0057
CF+UF	0.0018	0.0005	0.0001	0.0000	0.0000

ตารางที่ 4.47 การเปรียบเทียบความเสี่ยงทางสุขภาพของหอพักชายโดยใช้ AHP

ระบบ	ค่าความสำคัญ			ลำดับความสำคัญ
	Non-Carcinogen	Carcinogen	Microbial	
CF+UF	0.11	0.63	0.63	0.47
CF	0.44	0.11	0.26	0.27
UF	0.44	0.26	0.11	0.27

ตารางที่ 4.48 การเปรียบเทียบความเสี่ยงทางสุขภาพของหอพักหญิงโดยใช้ AHP

ระบบ	ค่าความสำคัญ			ลำดับความสำคัญ
	Non-Carcinogen	Carcinogen	Microbial	
CF+UF	0.11	0.63	0.63	0.47
CF	0.44	0.11	0.26	0.27
UF	0.44	0.26	0.11	0.27

4.6.3 สรุปผลการประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ

การเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ในหอพักนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการใช้ AHP ช่วยในการจัดลำดับความสำคัญของการประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ เมื่อนำผลการประเมินของทั้ง 3 ทางเลือก มาหาค่าความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพของการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ในหอพักชายและหอพักหญิง พบว่าระบบรวม CF+UF มีค่าความสำคัญสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบ CF และระบบ UF ตามลำดับ โดยมีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.43 0.31 และ 0.26 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.49-4.50 ดังนั้น ระบบรวม CF+UF มีความเหมาะสมในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในหอพักนักศึกษามากกว่าระบบ CF และ UF

ตารางที่ 4.49 การเปรียบเทียบความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพหอพักชาย

ระบบ	ค่าความสำคัญ		ลำดับความสำคัญ
	ด้านวิศวกรรม (0.5)	ด้านความเสี่ยงสุขภาพ (0.5)	
CF+UF	0.39	0.47	0.43
CF	0.35	0.27	0.31
UF	0.25	0.27	0.26

ตารางที่ 4.50 การเปรียบเทียบความสำคัญทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพหอพักหญิง

ระบบ	ค่าความสำคัญ		ลำดับความสำคัญ
	ด้านวิศวกรรม (0.5)	ด้านความเสี่ยงสุขภาพ (0.5)	
CF+UF	0.39	0.47	0.43
CF	0.35	0.27	0.31
UF	0.25	0.27	0.26

4.7 การมีส่วนร่วมของชุมชนภายในพื้นที่การศึกษา

ในการรวบรวมข้อมูลการมีส่วนร่วมของชุมชน จะจัดประชุมรับฟังความคิดเห็นโดยการใช้แบบสอบถาม และจัดประชุมย่อยเพื่อสอบถามความคิดเห็นของชุมชน โดยทำการสุ่มตัวอย่างให้มีการกระจายตัวอย่างทั่วพื้นที่การศึกษา ผลการศึกษาความคิดเห็นของชุมชนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.7.1 การมีส่วนร่วมของชุมชนก่อนทำการศึกษาวิจัย

ก่อนการวางแผนการวิจัยผู้วิจัยได้ทำการสำรวจความคิดเห็นเกี่ยวกับปัญหาการใช้น้ำหมุนเวียนของประชากร มทส เพื่อรวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้น ผลการสำรวจสภาพปัญหาการใช้น้ำหมุนเวียนของประชากร มทส โดยใช้การสัมภาษณ์ส่วนบุคคล จำนวน 150 คน เฉพาะผู้ที่อาศัยอยู่ในหอพักที่มีการใช้น้ำหมุนเวียนเพื่อใช้ในการซักโครก โดยใช้แบบสอบถาม รายละเอียดผลการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.51 จากผลการศึกษาจะพบว่าปัญหาของการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ของ มทส ได้แก่ สี ความขุ่น และกลิ่น ร้อยละ 73.33, 50.67 และ 40 ตามลำดับ มีผลต่อการนำไปใช้ มีปัญหาต่อเครื่องสูบน้ำ และผลต่อความรู้สึกในการนำไปใช้ประโยชน์

ตารางที่ 4.51 ผลการสำรวจสภาพปัญหาการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

ข้อมูลทั่วไป	จำนวน	ร้อยละ
สถานภาพ		
นักศึกษาระดับปริญญาตรี	150	100
รวม	150	100
เพศ		
ชาย	100	67.33
หญิง	50	32.67
รวม	150	100
ช่วงอายุ		
ต่ำกว่า 20 ปี	109	72.67
21-30 ปี	41	21.33
31-40 ปี	-	0
รวม	150	100
ปัญหาการใช้น้ำประปา		
กลิ่น	73	48.68
สี	82	54.67
ความขุ่น	73	48
อื่นๆ	-	-
ปัญหาการใช้น้ำหมุนเวียน		
กลิ่น	60	40
สี	110	73.33
ความขุ่น	76	50.67
อื่นๆ	-	-

4.7.2 การรับฟังความคิดเห็นของชุมชนต่อผลการศึกษาวิจัย

หลังจากการศึกษาวิจัยและทำการประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงทางสุขภาพ ผู้วิจัยได้นำผลการศึกษาวิจัยถ่ายทอดให้กับประชากรภายในพื้นที่ มทส เพื่อรับฟังความคิดเห็นและรวบรวมข้อคิดเห็นต่างๆที่เกิดขึ้น ได้แก่ การสัมภาษณ์ส่วนบุคคลผ่านแบบสอบถาม และการประชุมกลุ่มย่อย เพื่อรวบรวมความคิดเห็นของประชากร ประชากรที่แสดงความคิดเห็นจะได้รับการชี้แจงโครงการวิจัยและผลการศึกษา ก่อนแสดงความคิดเห็น รายละเอียดผลการศึกษา มีดังนี้

4.7.2.1 การรับฟังความคิดเห็นโดยการสัมภาษณ์ส่วนบุคคลผ่านแบบสอบถาม

การสัมภาษณ์ส่วนบุคคลผ่านแบบสอบถาม รายละเอียดแบบสอบถาม (ภาคผนวก ข) มีทั้งหมด 5 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

ส่วนที่ 2 ความคิดเห็นเกี่ยวกับสภาพปัญหาน้ำใช้ในปัจจุบันของ มทส

ส่วนที่ 3 ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

ส่วนที่ 4 ความคิดเห็นเกี่ยวกับการยอมรับการหมุนเวียนน้ำ

ส่วนที่ 5 ความคิดเห็นเกี่ยวกับความวิตกกังวลเกี่ยวกับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

โดยผู้ตอบแบบสอบถามจะทำในส่วนที่ 1-3 ก่อนการชี้แจงผลการศึกษาวิจัย หลังจากรับฟังผลการศึกษาวิจัยจึงตอบแบบสอบถามในส่วนที่ 4-5 โดยมีผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมดจำนวน 106 คน รายละเอียดผลสำรวจความคิดเห็นของชุมชนในประเด็นต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.52-4.57 มีดังต่อไปนี้

1) ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.52 พบว่าเป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรีร้อยละ 68.9 นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาร้อยละ 14.2 อาจารย์ร้อยละ 1.9 และบุคลากรร้อยละ 15.1 มีเพศชายร้อยละ 29.2 และเพศหญิงร้อยละ 70.8 ส่วนใหญ่ช่วงอายุของผู้ตอบแบบสอบถามร้อยละ 73.6 มีอายุอยู่ในช่วง 21-30 ปี และผู้ตอบแบบสอบถามพักอาศัยอยู่ภายในมทส.ร้อยละ 49.1 โดยส่วนใหญ่พักที่หอพักนักศึกษาร้อยละ 31.1 ระยะเวลาที่อาศัยอยู่ภายในมทส.น้อยกว่า 5 ปีร้อยละ 71.7 เนื่องจากผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่กำลังศึกษาระดับปริญญาตรีซึ่งมีระยะเวลาในการศึกษา 4 ปี

2) ผลสำรวจสภาพปัญหาน้ำใช้ในปัจจุบันของมทส.

ผลการสำรวจความคิดเห็นของชุมชนโดยใช้แบบสอบถามในการสัมภาษณ์เกี่ยวกับสภาพปัญหาน้ำใช้ในปัจจุบันของ มทส. แสดงดังตารางที่ 4.53 พบว่าปัญหาเรื่องน้ำไม่เพียงพอมีปัญหาปานกลางร้อยละ 40.6 รองลงมา คือ มีปัญหาเล็กน้อย ร้อยละ 24.5 ปัญหาเรื่องกลิ่นและสีของน้ำมีปัญหาปานกลางร้อยละ 37.7 รองลงมาคือมีปัญหามากร้อยละ 34.0 ส่วนปัญหาเรื่องความสะดวกและปลอดภัยของน้ำใช้ พบว่ามีปัญหาปานกลางร้อยละ 40.6 รองลงมา คือ มีปัญหาน้อยร้อยละ 26.4 ซึ่งส่วนใหญ่ปัญหาการใช้น้ำมีปัญหามากทั้งในเรื่องของปริมาณน้ำและลักษณะน้ำ โดยน้ำใช้ขุ่น มีตะกอน มีสี ทำให้น้ำไม่น่าใช้ และเกิดคราบหินปูนเกาะที่ภาชนะ รวมถึงมีปัญหาเรื่องน้ำไม่ไหล น้ำมีแรงดันต่ำ และมีกลิ่นคลอรีนแรง

ตารางที่ 4.52 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ข้อมูลทั่วไป	จำนวน	ร้อยละ
สถานภาพ		
นักศึกษาระดับปริญญาตรี	73	68.9
นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา	15	14.2
อาจารย์	2	1.9
บุคลากร	16	15.1
รวม	106	100

ตารางที่ 4.52 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม (ต่อ)

ข้อมูลทั่วไป	จำนวน	ร้อยละ
เพศ		
ชาย	31	29.2
หญิง	75	70.8
รวม	106	100
ช่วงอายุ		
ต่ำกว่า 20 ปี	11	10.4
21-30 ปี	78	73.6
31-40 ปี	4	3.8
41-50 ปี	11	10.4
มากกว่า 60 ปี	2	1.9
ระดับการศึกษา		
มัธยมศึกษาตอนต้น	1	0.9
มัธยมศึกษาตอนปลาย	58	54.7
ระดับปริญญาตรี	40	37.7
ระดับปริญญาโท	5	4.7
ระดับปริญญาเอกและสูงกว่า	1	0.9
สถานที่พักอาศัย		
อาศัยอยู่ภายในมทส.	52	49.1
ไม่ได้อาศัยอยู่ภายในมทส.	54	50.9
กรณีอาศัยอยู่ในมทส.		
บ้านพัก	12	11.3
เรือนพักบุคลากร	7	6.6
หอพักนักศึกษา	33	31.1
ระยะเวลาที่อาศัยอยู่ในมทส.		
น้อยกว่า 5 ปี	76	71.7
5-10 ปี	16	15.1
10-15 ปี	4	3.8
มากกว่า 15 ปี	10	9.4

ตารางที่ 4.53 ผลความคิดเห็นสภาพปัญหาน้ำใช้ในปัจจุบัน

ปัญหาน้ำใช้	จำนวน	ร้อยละ
มีปัญหาน้ำไม่เพียงพอ		
ไม่มีปัญหา	18	17.0
มีปัญหาล็กน้อย	26	24.5
มีปัญหปานกลาง	43	40.6
มีปัญหามาก	16	15.1
มีปัญหามากอย่างยิ่ง	3	2.8
มีปัญหาในเรื่องกลิ่น และสี		
ไม่มีปัญหา	1	0.9
มีปัญหาล็กน้อย	25	23.6
มีปัญหปานกลาง	40	37.7
มีปัญหามาก	36	34.0
มีปัญหามากอย่างยิ่ง	4	3.8
มีปัญหาในเรื่องความสะอาดปลอดภัย		
ไม่มีปัญหา	12	11.3
มีปัญหาล็กน้อย	28	26.4
มีปัญหปานกลาง	43	40.6
มีปัญหามาก	22	20.8
มีปัญหามากอย่างยิ่ง	1	0.9

3) ผลสำรวจความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

ผลการสำรวจความคิดเห็นของชุมชนเรื่องความเข้าใจเกี่ยวกับการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ดังแสดงในตารางที่ 4.54 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามมีความเข้าใจว่าน้ำหมุนเวียนมีความหมายเดียวกันกับน้ำเสียร้อยละ 23.6 และเข้าใจว่าน้ำหมุนเวียนคือน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแล้วนำกลับมาใช้ โดยไม่ผ่านระบบบำบัดใด ๆ ร้อยละ 22.6 ซึ่งส่วนใหญ่ผู้ตอบแบบสอบถามมีความเข้าใจว่าน้ำหมุนเวียนคือน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย แล้วต้องนำมาเข้าสู่ระบบหมุนเวียนน้ำก่อน แล้วจึงนำไปใช้ประโยชน์ร้อยละ 84.9 ผู้ตอบแบบสอบถามมีความเข้าใจว่ามทส.มีระบบหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ร้อยละ 98.1 โดยเข้าใจว่านำมาใช้เป็นน้ำประปาร้อยละ 25.5 นำมาใช้เป็นน้ำซักโครกในห้องน้ำร้อยละ 94.3 นำมาใช้เป็นน้ำรดน้ำต้นไม้ร้อยละ 95.3 จะเห็นได้ว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีความรู้ความเข้าใจความหมายของน้ำหมุนเวียน และระบบหมุนเวียนน้ำของมทส. รวมถึงการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 4.54 ผลสำรวจความเข้าใจเกี่ยวกับการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

น้ำหมุนเวียน	จำนวน	ร้อยละ
มีความหมายเดียวกันกับ น้ำเสีย		
ใช่	25	23.6
ไม่ใช่	81	76.4
น้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย แล้วนำกลับมาใช้เลย โดยไม่ผ่านระบบบำบัดใด ๆ		
ใช่	24	22.6
ไม่ใช่	82	77.4
น้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย แล้วต้องนำมาเข้าสู่ระบบหมุนเวียนน้ำก่อน แล้วจึงนำไปใช้		
ใช่	90	84.9
ไม่ใช่	16	15.1
มทส. มีระบบหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่		
ใช่	104	98.1
ไม่ใช่	2	1.9
มทส. เอนำน้ำที่หมุนเวียนมาใช้เป็นประปา		
ใช่	27	25.5
ไม่ใช่	79	74.5
มทส. เอนำน้ำที่หมุนเวียนมาใช้เป็นน้ำซักโครกในห้องน้ำ		
ใช่	100	94.3
ไม่ใช่	6	5.7
มทส. เอนำน้ำที่หมุนเวียนมาใช้รดน้ำต้นไม้		
ใช่	101	95.3
ไม่ใช่	5	4.7

4) การยอมรับน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์

ผลการสำรวจความคิดเห็นของชุมชนเกี่ยวกับการยอมรับการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ดังแสดงในตารางที่ 4.55 พบว่าหากนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้เป็นน้ำในชักโครกสามารถยอมรับได้อย่างยิ่งร้อยละ 46.2 รองลงมาคือยอมรับได้ร้อยละ 41.5 หากนำมาใช้ในการล้างรถสามารถยอมรับได้ร้อยละ 48.1 รองลงมาคือยอมรับได้อย่างยิ่ง 28.3 หากนำมาใช้ในการรดต้นไม้ในถนนสามารถยอมรับได้อย่างยิ่งร้อยละ 48.1 รองลงมาคือยอมรับได้ร้อยละ 35.8 หากนำมาใช้ในการรดน้ำต้นไม้สามารถยอมรับได้อย่างยิ่งร้อยละ 55.7 รองลงมาคือยอมรับได้ร้อยละ 34.0 หากนำมาใช้ในการล้างพื้นทำความสะอาดสามารถยอมรับได้ร้อยละ 41.5 รองลงมาคือยอมรับได้อย่างยิ่ง 36.8 หากนำมาใช้เป็นน้ำดับเพลิงสามารถยอมรับได้อย่างยิ่งร้อยละ 44.3 รองลงมาคือยอมรับได้ร้อยละ 39.6 หากนำมาใช้ในการเกษตรกรรมสามารถยอมรับได้อย่างยิ่งร้อยละ 45.3 รองลงมาคือยอมรับได้ร้อยละ 35.8 หากนำมาใช้อาบต้นไม้ไม่สามารถยอมรับได้ร้อยละ 32.1 รองลงมาคือไม่สามารถยอมรับได้อย่างยิ่งร้อยละ 23.6 หากนำมาใช้เป็นน้ำอุปโภคแทนน้ำประปาไม่สามารถยอมรับได้และไม่สามารถ

ยอมรับได้อย่างยิ่งร้อยละ 25.5 รองลงมาคือยอมรับและไม่มีความคิดเห็นร้อยละ 20.8 หากนำมาใช้เป็นน้ำบริโภคแทนน้ำประปาไม่สามารถยอมรับได้อย่างยิ่งร้อยละ 53.8 รองลงมาคือไม่ยอมรับร้อยละ 18.9 จะเห็นได้ว่าหากนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้เป็นน้ำซักโครก ล้างรถ ลดฝุ่นในถนน รดน้ำต้นไม้ ล้างพื้นทำความสะอาด ดับเพลิง และการเกษตรกรรมชุมชนส่วนใหญ่สามารถยอมรับได้ หากนำมาใช้เป็นน้ำอุปโภค-บริโภคแทนน้ำประปาส่วนใหญ่ไม่สามารถยอมรับได้ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าประชากรส่วนใหญ่ยอมรับการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ในส่วนต่างๆ ได้ระดับปานกลางประมาณร้อยละ 50 แต่ไม่ยอมรับในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้การอุปโภค-บริโภค ซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับร่างกายของคน มากกว่าร้อยละ 50

ตารางที่ 4.55 การยอมรับการหมุนเวียนน้ำ

การยอมรับนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้	จำนวน	ร้อยละ
นำมาใช้ในซักโครก		
ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง	4	3.8
ไม่ยอมรับ	2	1.9
ไม่มีความคิดเห็น	7	6.6
ยอมรับ	44	41.5
ยอมรับอย่างยิ่ง	49	46.2
นำมาใช้ในการล้างรถ		
ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง	1	0.9
ไม่ยอมรับ	8	7.5
ไม่มีความคิดเห็น	16	15.1
ยอมรับ	51	48.1
ยอมรับอย่างยิ่ง	30	2.3
นำมาใช้ในการลดฝุ่นในถนน		
ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง	6	5.7
ไม่ยอมรับ	8	7.5
ไม่มีความคิดเห็น	3	2.8
ยอมรับ	38	35.8
ยอมรับอย่างยิ่ง	51	48.1
นำมาใช้ในการรดน้ำต้นไม้		
ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง	1	0.9
ไม่ยอมรับ	6	5.7
ไม่มีความคิดเห็น	4	3.8
ยอมรับ	36	34.0
ยอมรับอย่างยิ่ง	59	55.7

ตารางที่ 4.55 การยอมรับการหมุนเวียนน้ำ (ต่อ)

การยอมรับนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้	จำนวน	ร้อยละ
นำมาใช้ในการล้างพื้นทำความสะอาด		
ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง	1	0.9
ไม่ยอมรับ	15	14.2
ไม่มีความคิดเห็น	7	6.6
ยอมรับ	44	41.5
ยอมรับอย่างยิ่ง	39	36.8
นำมาใช้เป็นน้ำดับเพลิง		
ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง	2	1.9
ไม่ยอมรับ	6	5.7
ไม่มีความคิดเห็น	9	8.5
ยอมรับ	42	39.6
ยอมรับอย่างยิ่ง	47	44.3
นำมาใช้ในการเกษตรกรรม		
ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง	5	4.7
ไม่ยอมรับ	6	5.7
ไม่มีความคิดเห็น	9	8.5
ยอมรับ	38	35.8
ยอมรับอย่างยิ่ง	48	45.3
นำมาใช้อาบน้ำ		
ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง	25	23.6
ไม่ยอมรับ	34	32.1
ไม่มีความคิดเห็น	20	18.9
ยอมรับ	17	16
ยอมรับอย่างยิ่ง	10	9.4
นำมาใช้เป็นน้ำอุปโภคแทนน้ำประปา		
ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง	27	25.5
ไม่ยอมรับ	27	25.5
ไม่มีความคิดเห็น	22	20.8
ยอมรับ	22	20.8
ยอมรับอย่างยิ่ง	8	7.5
นำมาใช้เป็นน้ำบริโภคแทนน้ำประปา		
ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง	57	53.8
ไม่ยอมรับ	20	18.9
ไม่มีความคิดเห็น	19	17.9
ยอมรับ	6	5.7
ยอมรับอย่างยิ่ง	4	3.8

5) ผลสำรวจความวิตกกังวลเกี่ยวกับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

ผลการสำรวจความคิดเห็นของชุมชนเกี่ยวกับความวิตกกังวลเกี่ยวกับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ดังแสดงในตารางที่ 4.56 พบว่า ลักษณะทางกายภาพของน้ำ กลิ่น สี น้ำ ความขุ่น ความใส มีความกังวลมากอย่างยิ่งและกังวลมากร้อยละ 35.8 รองลงมา คือ กังวลปานกลาง ร้อยละ 18.9 สารเคมีที่ละลายในน้ำหมุนเวียน ได้แก่ โลหะหนัก มีความกังวลมาก 36.8 รองลงมาคือ กังวลมากอย่างยิ่งร้อยละ 34.9 เชื้อโรคในน้ำมีความกังวลมากอย่างยิ่ง 38.7 รองลงมาคือกังวลมาก ร้อยละ 29.2 ค่าใช้จ่ายในการหมุนเวียนน้ำมีความกังวลปานกลาง 33.0 รองลงมาคือกังวลเล็กน้อย ร้อยละ 30.2 ผลกระทบทางสุขภาพที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการนำน้ำไปใช้มีความกังวลมากอย่างยิ่ง 43.4 รองลงมาคือกังวลมากร้อยละ 27.4 จะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่ชุมชนมีความกังวลมากถึงมากที่สุดอย่างยิ่งเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของน้ำ สารเคมี เชื้อโรค และผลกระทบทางสุขภาพ

ตารางที่ 4.56 ความวิตกกังวลเกี่ยวกับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

ความกังวลเกี่ยวกับน้ำหมุนเวียน	จำนวน	ร้อยละ
ลักษณะทางกายภาพของน้ำ กลิ่น สี น้ำ ความขุ่น ความใส เป็นต้น		
ไม่กังวลเลย	3	2.8
กังวลเล็กน้อย	7	6.6
กังวลปานกลาง	20	18.9
กังวลมาก	38	35.8
กังวลมากอย่างยิ่ง	38	35.8
สารเคมีที่ละลายในน้ำหมุนเวียน ได้แก่ สารเคมีต่าง ๆ เช่น โลหะหนัก		
ไม่กังวลเลย	2	1.9
กังวลเล็กน้อย	10	9.4
กังวลปานกลาง	18	17
กังวลมาก	39	36.8
กังวลมากอย่างยิ่ง	37	34.9
เชื้อโรคในน้ำ		
ไม่กังวลเลย	2	1.9
กังวลเล็กน้อย	11	10.4
กังวลปานกลาง	21	19.8
กังวลมาก	31	29.2
กังวลมากอย่างยิ่ง	41	38.7

ตารางที่ 4.56 ความวิตกกังวลเกี่ยวกับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

ความกังวลเกี่ยวกับน้ำหมุนเวียน	จำนวน	ร้อยละ
ค่าใช้จ่ายในการหมุนเวียนน้ำ		
ไม่กังวลเลย	7	6.6
กังวลเล็กน้อย	32	30.2
กังวลปานกลาง	35	33.0
กังวลมาก	23	21.7
กังวลมากอย่างยิ่ง	9	8.5
ผลกระทบต่อสุขภาพที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการนำน้ำไปใช้		
ไม่กังวลเลย	3	2.8
กังวลเล็กน้อย	8	7.5
กังวลปานกลาง	20	18.9
กังวลมาก	29	27.4
กังวลมากอย่างยิ่ง	46	43.4

6) ผลสำรวจการยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

ผลการสำรวจความคิดเห็นของชุมชนเกี่ยวกับการยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ดังแสดงในตารางที่ 4.57 พบว่า ชุมชนส่วนใหญ่คิดว่ามทส.ควรมีระบบหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ร้อยละ 97.2 (ดังแสดงในตารางที่ 4.57) เนื่องจากปริมาณความต้องการใช้น้ำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ การหมุนเวียนน้ำจึงเป็นทางเลือกในการลดปัญหาขาดแคลนน้ำ ลดต้นทุนและน้ำดิบในการผลิตน้ำประปา ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และเป็นทางเลือกที่สามารถนำน้ำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า และเกิดประโยชน์สูงสุด แต่การนำน้ำหมุนเวียนมาใช้คุณภาพน้ำต้องผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ และควรชี้แจงข้อมูลคุณภาพแก่ผู้ใช้น้ำ

ตารางที่ 4.57 ผลสำรวจความคิดเห็นการยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ภายในมทส.


หัวข้อ	จำนวน	ร้อยละ
มทส. ควรหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้หรือไม่		
ควร	103	97.2
ไม่ควร	3	2.8

4.7.2.2 การรับฟังความคิดเห็นของชุมชนโดยวิธีการประชุมกลุ่มย่อย

ในการประชุมกลุ่มย่อยเพื่อทำการชี้แจงโครงการวิจัยและผลการศึกษาวิจัย และรับฟังความคิดเห็นของผู้มีส่วนได้เสียของชุมชน โดยในการจัดประชุมกลุ่มย่อยได้จัดประชุมกลุ่มย่อยออกตามประเภทกลุ่ม เพื่อความสะดวกในการแสดงความคิดเห็นของผู้เข้าร่วมประชุม ได้แก่ กลุ่มนักศึกษาระดับปริญญาตรี นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และบุคลากร ผลการศึกษามีรายละเอียดดังแสดงในสรุปผลการประชุมของกลุ่มต่างๆ จากผลการประชุมกลุ่มย่อย พบว่า ผลสรุปการประชุมมีความเห็นว่าทางเลือกของระบบหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสม คือ ระบบร่วม CF+UF เนื่องจากความเสี่ยงทางสุขภาพต่ำ แม้ค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบอื่นแต่ยอมรับได้ และหากจะนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ควรเลือกที่สัดส่วนน้ำหมุนเวียนร้อยละ 30 ผสมกับน้ำประปา เนื่องจากความเสี่ยงต่อสุขภาพต่ำ ทำให้มีความปลอดภัยและยังได้ปริมาณน้ำใช้เยอะกว่าที่สัดส่วนการผสมร้อยละ 20 แต่ทำให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพ ลักษณะทางกายภาพของน้ำ เช่น สี กลิ่น เป็นต้น การเกิดคราบที่สุขภัณฑ์ และคุณภาพน้ำ โดยสามารถนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ประโยชน์ได้ทุกด้าน หากเกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำและน้ำหมุนเวียนผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์สามารถนำมาใช้เป็นน้ำประปาได้ การทำให้ชุมชนยอมรับการใช้น้ำหมุนเวียน ควรมีประชาสัมพันธ์ว่าน้ำหมุนเวียนมีข้อดีอย่างไร แสดงค่าคุณภาพน้ำให้ผู้ใช้น้ำเห็นว่าน้ำผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ รายละเอียดผลการประชุมของแต่ละกลุ่มย่อยสรุปได้ดังต่อไปนี้

การประชุมกลุ่มย่อย	
นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 21 พฤศจิกายน 2561	
สรุปผลการประชุม	
<p>1.ทางเลือกของระบบหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสม</p> <p>ระบบ CF เนื่องจากมีราคาถูก ความเสี่ยงทางสุขภาพต่ำ และคุณภาพภาพน้ำ ประสิทธิภาพการบำบัดเหมือนกับระบบรวม CF+UF ที่มีราคาแพงกว่า</p> <p>2.ความคิดเห็นเกี่ยวกับสัดส่วนน้ำหมุนเวียนที่ควรนำกลับมาใช้</p> <p>ร้อยละ 20 เนื่องจากมีความเสี่ยงทางสุขภาพต่ำทำให้รู้สึกปลอดภัย หากนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ สามารถใช้สัดส่วนร้อยละ 100 ได้ยกเว้นการนำมาใช้เป็นน้ำประปา</p> <p>3.ความกังวลเกี่ยวกับการนำน้ำมาหมุนเวียนมาใช้ใหม่</p> <ul style="list-style-type: none"> -ผลกระทบต่อสุขภาพ -ลักษณะทางกายภาพของน้ำ เช่น สี กลิ่น <p>4.การนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ประโยชน์</p> <p>นำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกด้านยกเว้นน้ำประปา</p> <p>5.ความคิดเห็นเกี่ยวกับการยอมรับน้ำหมุนเวียน</p> <ul style="list-style-type: none"> -แสดงค่าคุณภาพน้ำให้ผู้ใช้น้ำเห็นว่าผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ -การใช้น้ำหมุนเวียนต้องมีความเสี่ยงสุขภาพต่ำ -หากขาดแคลนน้ำและน้ำหมุนเวียนผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ ก็สามารถนำมาใช้เป็นน้ำประปาได้ 	
	
<p>รูปภาพ การประชุมกลุ่มย่อยของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา</p>	

การประชุมกลุ่มย่อยบุคลากร	
บุคลากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 22 พฤศจิกายน 2561	
สรุปผลการประชุม	
<p>1.ทางเลือกของระบบหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสม</p> <p>ระบบร่วม CF+UF เนื่องจากความเสี่ยงทางสุขภาพต่ำ แม้อาจใช้จ่ายสูงกว่าระบบอื่นแต่ยอมรับได้</p> <p>2.ความคิดเห็นเกี่ยวกับสัดส่วนน้ำหมุนเวียนที่ควรนำกลับมาใช้</p> <p>ร้อยละ 50 โดยนำมาใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ยกเว้นน้ำประปา</p> <p>3.ความกังวลเกี่ยวกับการนำน้ำมาหมุนเวียนมาใช้ใหม่</p> <ul style="list-style-type: none"> -ผลกระทบต่อสุขภาพ -ลักษณะทางกายภาพของน้ำ เช่น สี กลิ่น -การเกิดคราบที่สุขภัณฑ์ -คุณภาพน้ำ <p>4.การนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ประโยชน์</p> <p>นำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกด้านยกเว้นน้ำประปา</p> <p>5.ความคิดเห็นเกี่ยวกับการยอมรับน้ำหมุนเวียน</p> <ul style="list-style-type: none"> -ประชาสัมพันธ์ว่าน้ำหมุนเวียนมีข้อดีอย่างไร -แสดงค่าคุณภาพน้ำให้ผู้ใช้น้ำเห็นว่าผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ -หากเป็นไปได้ให้ทำท่อใสเพื่อดูว่าน้ำมีความสะอาด 	
	
<p>รูปภาพ การประชุมกลุ่มย่อยของบุคลากร</p>	

การประชุมกลุ่มย่อยระดับปริญญาตรี	
นักศึกษาระดับปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
วันที่ 13 และ 14 ธันวาคม 2561	
สรุปผลการประชุม	
<p>1. ทางเลือกของระบบหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสม</p> <p>ระบบร่วม CF+UF เนื่องจากมีความปลอดภัยต่อสุขภาพมากที่สุด แม้ค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบอื่นแต่ยอมรับได้</p> <p>2. ความคิดเห็นเกี่ยวกับสัดส่วนน้ำหมุนเวียนที่ควรนำกลับมาใช้</p> <p>ร้อยละ 30 เนื่องจากความเสี่ยงต่อสุขภาพต่ำ ทำให้มีความปลอดภัยและยังได้ปริมาณน้ำใช้เยอะกว่าที่สัดส่วนร้อยละ 20</p> <p>3. ความกังวลเกี่ยวกับการนำน้ำมาหมุนเวียนมาใช้ใหม่</p> <ul style="list-style-type: none"> -ผลกระทบต่อสุขภาพ -ลักษณะทางกายภาพของน้ำ เช่น สี กลิ่น -คุณภาพน้ำ <p>4. การนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ประโยชน์</p> <p>นำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกด้าน หากขาดแคลนน้ำและน้ำหมุนเวียนผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ ก็สามารถนำมาใช้เป็นน้ำประปาได้</p> <p>5. ความคิดเห็นเกี่ยวกับการยอมรับน้ำหมุนเวียน</p> <ul style="list-style-type: none"> -ประชาสัมพันธ์ว่าน้ำหมุนเวียนมีข้อดีอย่างไร -แสดงค่าคุณภาพน้ำให้ผู้ใช้น้ำเห็นว่าผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ -หากมีการนำน้ำหมุนเวียนไปใช้ รัฐบาลควรมีนโยบายเกี่ยวกับด้านสุขภาพ 	
	
<p>รูปภาพ การประชุมกลุ่มย่อยของนักศึกษาระดับปริญญาตรี</p>	

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ทางด้านวิศวกรรมและการยอมรับของชุมชน โดยผ่านกระบวนการการมีส่วนร่วมของชุมชน ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบ 3 ทางเลือก ได้แก่ ระบบสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation: CF), ระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration: UF) และระบบร่วมระหว่างระบบสร้างและรวมตะกอนและระบบอัลตราฟิลเตรชัน (Combination of Coagulation-Flocculation and Ultrafiltration: CF+UF) ได้ทำการศึกษาสถานะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบการหมุนเวียนน้ำแต่ละระบบ เพื่อใช้ในการประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรม และการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพ และนำเสนอผลการศึกษาให้กับชุมชนผ่านกระบวนการการมีส่วนร่วมของชุมชน สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1 การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

5.1.1 สถานะที่เหมาะสมของแต่ละทางเลือก

ทางเลือกที่ 1 ระบบ CF สถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ คือ ใช้ปริมาณของ PACl และ Cation Polymer เท่ากับ 70 และ 3 mg/L ตามลำดับ และค่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนอยู่ในช่วง 7-9

ทางเลือกที่ 2 ระบบ UF สถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ คือ เดินระบบที่เพอมีเอท ฟลักซ์เท่ากับ 80 L/m².h ที่สัดส่วนน้ำเพอมีเอทต่อรีเทนเททเท่ากับ 25:75

ทางเลือกที่ 3 ระบบร่วม CF+UF สถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ คือ ใช้ PACl และ Cation Polymer ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 70 mg/L และ 3 mg/L และใช้เพอมีเอทฟลักซ์ 80 L/m².h และสัดส่วนเพอมีเอทต่อรีเทนเททเท่ากับ 25:75

5.1.2 ประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละทางเลือก

จากผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของแต่ละระบบ นำมาเดินระบบเพื่อศึกษาค่าประสิทธิภาพในการบำบัดสามารถสรุปได้ดังนี้

ทางเลือกที่ 1 ระบบ CF มีประสิทธิภาพในการบำบัด Fecal Coliform สูงสุด รองลงมาได้แก่ Total Coliform สี ความขุ่น COD มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.15, 84.73, 77.06, 71.28 และ 54.40 ตามลำดับ

ทางเลือกที่ 2 ระบบ UF ประสิทธิภาพในการบำบัด Fecal Coliform สูงสุด รองลงมาได้แก่ ความขุ่น COD Total Coliform และสี มีค่าเท่ากับร้อยละ 66.60, 38.92, 38.25, 25.52 และ 21.21 ตามลำดับ

ทางเลือกที่ 3 ระบบ CF+UF ประสิทธิภาพในการบำบัด Total Coliform สูงสุด รองลงมาได้แก่ Fecal Coliform สี ความขุ่น และ COD มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.96, 99.68, 84.80, 82.66, และ 60.30 ตามลำดับ

การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ พบว่าระบบรวม CF+UF มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด รองลงมาได้แก่ ระบบ CF และ UF ตามลำดับ

5.1.3 การประเมินทางเลือกในการนำน้ำกลับไปใช้ประโยชน์

จากผลการศึกษาคูณภาพน้ำหมุนเวียนจากทั้ง 3 ทางเลือก พบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัด โดยระบบรวม CF+UF มีคุณภาพน้ำผ่านมาตรฐานทั้ง 5 ด้าน คือ มาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ ทางด้านน้ำประปา น้ำใช้ในการซักโครก น้ำใช้ในการล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้าน เกษตรกรรม ระบบ CF ผ่านมาตรฐาน 4 ด้าน คือ มาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านน้ำใช้ในการ ซักโครก น้ำใช้ในการล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม และระบบ UF ผ่านมาตรฐาน 4 ด้าน คือ มาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านน้ำใช้ในการซักโครก น้ำใช้ในการ ล้างรถ น้ำใช้ปรับภูมิทัศน์ และน้ำใช้ในด้านเกษตรกรรม

5.2 การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

5.2.1 การประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรม

จากผลการศึกษาการประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรมของทั้ง 3 ทางเลือก โดยใช้ กระบวนการ AHP พิจารณาเกณฑ์จากค่าคุณภาพน้ำในการนำไปใช้ประโยชน์ ประสิทธิภาพการบำบัด และค่าใช้จ่ายของระบบ พบว่าระบบรวม CF+UF มีความเหมาะสมที่สุดในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ ประโยชน์ รองลงมาได้แก่ ระบบ CF และ UF ตามลำดับ โดยมีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.39 0.35 และ 0.25 ตามลำดับ

5.2.2 การประเมินทางเลือกโดยการประเมินความเสี่ยงสุขภาพ

จากผลการประเมินความเสี่ยงของสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งของน้ำที่ผ่านระบบ หมุนเวียนทั้ง 3 ทางเลือก พบว่าการสัมผัสน้ำที่ผ่านระบบ CF และ UF มีความเสี่ยงต่ำสุดโดยมีค่า HI เท่ากับ 0.0021 และระบบรวม CF+UF มีค่า HI เท่ากับ 0.0023 เมื่อพิจารณาค่าความเสี่ยง พบว่ามี ค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณโลหะหนักที่ร่างกายได้รับอยู่ในเกณฑ์ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ และปลอดภัยต่อผู้ได้รับสัมผัสน้ำหมุนเวียนขณะอาบน้ำ จากการนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ประโยชน์เป็น น้ำประปา

จากผลการประเมินความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง พบว่าการสัมผัสน้ำที่ผ่านระบบ UF มีความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็งสูงสุด รองลงมาได้แก่ระบบ CF และระบบรวม CF+UF ตามลำดับ โดยมีค่าความเสี่ยงเท่ากับ 4.04×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็น มะเร็ง 4-5 คน) 2.86×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 2-3 คน) และ 2.77×10^{-6} (ประชากรที่ได้รับสัมผัสน้ำจำนวน 1,000,000 มีโอกาสที่จะเป็นมะเร็ง 2-3 คน) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความเสี่ยง จะเห็นได้ว่าปริมาณสารก่อมะเร็งที่ร่างกายได้รับสัมผัส

น้ำหมุนเวียนขณะอาบน้ำจากการนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ประโยชน์เป็นน้ำประปาอยู่ในเกณฑ์ระดับความเสี่ยงต่ำ

จากผลการประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพจากการสัมผัสน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ *E.coli* พบว่าการสัมผัสน้ำที่ผ่านระบบ UF มีความเสี่ยงสูงสุด รองลงมาได้แก่ระบบ CF และ CF+UF ตามลำดับ โดยมีค่าความเสี่ยงเท่ากับ 0.0077 (ประชากรที่สัมผัสน้ำ 1000 คน มีโอกาสเจ็บป่วย 7-8 คน) 0.0066 (ประชากรที่สัมผัสน้ำ 1000 คน มีโอกาสเจ็บป่วย 6-7 คน) 0.0018 (ประชากรที่สัมผัสน้ำ 1000 คน มีโอกาสเจ็บป่วย 1-2 คน) ตามลำดับ

5.2.3 สรุปผลการเปรียบเทียบทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ

จากผลการประเมินทางเลือกทางด้านวิศวกรรมและความเสี่ยงสุขภาพ พบว่าระบบร่วม CF+UF มีความเหมาะสมที่สุดในการหมุนเวียนน้ำ รองลงมาได้แก่ระบบ CF และ UF ตามลำดับ โดยมีค่าความสำคัญเท่ากับ 0.43 0.31 และ 0.26 ตามลำดับ

5.3 สรุปผลกระบวนการรับฟังความคิดเห็นของชุมชน

ผลสรุปความคิดเห็นจากกระบวนการรับฟังความคิดเห็นของชุมชน พบว่า ทางเลือกของระบบหมุนเวียนน้ำที่ชุมชนให้การยอมรับว่ามีความเหมาะสม คือ ระบบร่วม CF+UF เนื่องจากมีความเสี่ยงทางสุขภาพต่ำ แม้ค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบอื่นแต่สามารถยอมรับได้ และควรมีการนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ที่สัดส่วนร้อยละ 30 ผสมกับน้ำประปา เนื่องจากมีความปลอดภัยต่อสุขภาพและยังได้ปริมาณน้ำใช้ในปริมาณที่พอเหมาะ และหากมีการนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ประชากรยังคงมีความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพ ลักษณะทางกายภาพของน้ำและคุณภาพน้ำ แต่ถ้าหากเกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำ ประชากรสามารถยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนมาใช้ประโยชน์ได้ทุกด้าน โดยน้ำหมุนเวียนนั้นต้องผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์และจึงจะสามารถยอมรับให้นำมาใช้เป็นน้ำประปาได้ และหากต้องการให้ชุมชนยอมรับการใช้น้ำหมุนเวียน ควรมีประชาสัมพันธ์ว่าน้ำหมุนเวียนมีข้อดีอย่างไร แสดงค่าคุณภาพน้ำให้ชุมชนเห็นว่าน้ำผ่านมาตรฐานการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน

รายการอ้างอิง

- กฤษดา ทองนาค. (2553). การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน กรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- กมลนาวัน อินทนูจิตร. (2552). การกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มขบ่น้ำและไม่ขบ่น้ำในน้ำดิบประปา จากคลองอู่ตะเภา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2556). โครงการกำหนดแนวทางการฟื้นฟูลำห้วยคลิตี้จากการปนเปื้อนสารตะกั่ว.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2541). **วิศวกรรมประปา, Water supply engineering**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์.
- คณะอนุกรรมการมาตรฐานการประกอบวิชาชีพ. (2560). **ระบบการนำน้ำที่กลับมาใช้ใหม่** [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.coe.or.th>
- จริยา ยัมรัตน์บวร. (2561). การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมและการยอมรับของชุมชน โดยผ่านกระบวนการมีส่วนร่วมของชุมชน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- จรรยา บริวิชชาวิสุทธิ. (2552). **การประเมินความเสี่ยงของการได้รับสารไตรฮาโลมีเทนจากสระว่ายน้ำที่ฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน**. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ฐปนีย์ ฤทธิไพโรจน์. (2548). ปัจจัยที่มีผลต่อฟลักซ์ ค่าการกักเก็บ และฟาวลิ่งระหว่างกระบวนการกรองน้ำตาลโดนดด้วยเมมเบรน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- ทองศักดิ์ วัฒนา. (2555). เรียนรู้การรีไซเคิลน้ำ เพื่อการใช้น้ำที่ยั่งยืน (Wastewater reclamation and reuse). **Technology Knowledge**. 39: 71-74.
- ทัศนีย์ เกื้อแสง. (2553). การลดปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบประปาจากอ่างเก็บน้ำศรีตรัง ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการโอโซนเนชัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- ธรรมธร นรพัลลภ. (2557). **การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Water Reuse)**. สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ
- นรา รัตน์พันธ์. (2552). การบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- นันทิกา สุนทรไชยกุล และคณะ. (2552). การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางสุขภาพ สำหรับเจ้าหน้าที่สาธารณสุข. ศูนย์ปฏิบัติการเตรียมพร้อมตอบโต้ภาวะฉุกเฉินด้านการแพทย์และสาธารณสุข กรมควบคุมโรค.
- นิติพันธ์ ณ พัทลุง. (2552). Proposal Reverse Osmosis System Prepared for Thai Ceramic Co., Ltd.
- ปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์. (2552). การแยกจุลสารหายจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเครื่องกรองชนิดไหลตามขวาง. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 1-8.
- ปราโมช เขียวชาญ. (2552). น้ำดื่มในสถานประกอบการ/โรงงานอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.stou.ac.th/Schools/Shs/booklet/2552_3/OcupationHealth452.html
- เพ็ญศรี วัจฉลญาณ. 2554. การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการปนเปื้อนมลพิษในดินและน้ำใต้ดิน. คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- มันสิน ตันฑุลเวศน์. (2542). วิศวกรรมการประปา. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป. (2556). การบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีการทางกายภาพและเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป และ ผ่องศรี เผ่าภูรี. (2550). รายงานการวิจัยเรื่องการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน กรณีตัวอย่างระบบประปาของเทศบาลนครปฐม. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วรพจน์ มีถม. (2553). กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process). วารสารบริหารธุรกิจเทคโนโลยีมหานคร. 7 (3): 56-69.
- วาลิกา ภาณุพินทุ. (2557). การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานข้าวแคบด้วยกระบวนการสร้างตะกอนร่วมกับระบบหมุนเวียนน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (2558) <http://www.thaiwater.net/current/drought58/drought58.html>
- สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ. (2554). เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการบำบัดทางเคมี. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต.
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2548). ศัพท์บัญญัติและนิยามสิ่งแวดล้อม. กทม.
- สุกุลยา ทับอุไร. (2554). การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุธรรม อรุณ. (2554). การตัดสินใจโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analysis Hierarchy Process: AHP). สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร วิทยาเขตสารสนเทศพะเยา

- สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม. (2557). **นิยามโรคจากการประกอบอาชีพ** [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://envocc.ddc.moph.go.th/index>
- อรทัย ขวาลภทธี. (2545). **คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย**.
- Aiello, R., Cirelli, G.L., and Consoli, S. (2007). Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy) . **Agricultural Water Management**. 93: 65-72.
- Amundsen, T.D., Zastrow, D.J., and Wagner, A.L. (2013). **Coagulation and ultrafiltration of high-alkalinity graywater** [On-line]. Available: <https://www.aiche.org>
- Anderson., J.M. (2006). Integrating recycled water into urban water supply solutions, *Desalination*. 187; 1-9.
- APHA, AWWA, and WEF. (2005). **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. 21st ed. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- APHA, AWWA, and WEF. (2012). **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. 22nd ed. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H. L., Tsuchihashi, R., and Tchobanoglous, G. (2007). **Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications**. New York: McGraw-Hill.
- Australian and New Zealand Environment and Conservation Council. (2000). **Australian and New Zealand Guidelines for fresh and marine water quality: Volume 3-Primary industries**. Australia.
- Bai, L., et al. (2016). Health risk assessment research on heavy metals ingestion through groundwater drinking pathway for the residents in Baotou, China. **Journal of Environmental Health**. 78: 84-90.
- Bergamasco, R., Konradt-Moraes, L.C., Vieira, M.F., Fagundes-Klen, M.R., and Vieira, A.M. (2011). Performance of a coagulation–ultrafiltration hybrid process for water supply treatment. **Chemical Engineering Journal**. 166: 483-489.
- Blanky, M., Sharaby, Y., Rodriguez-Martinez, S., Halpern, M., and Friedler, E. (2017). Greywater reuse - Assessment of the health risk induced by *Legionella pneumophila*. **Water Research**. 125: 410-417.
- Bratby, J. (2006). **Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment**. London: IWA Publishing.
- Bryk, J., Prasad, R., Lindley, T., Davis, S., and Carpenter, G. (2011). **National Database of Water Reuse Facilities: Summary Report**. WateReuse Foundation. United State of America.
- Chang D., Ma Z.(2012). Wastewater reclamation and reuse in Beijing: Influence factors and policy implications. *Desalination*. 297: 72–78.

- Chang, I-S., Lee, E-W., Oh, S., and Kim, Y. (2005). Comparison of SAR (sodium adsorption ratio) between RO and NF processes for the reclamation of secondary effluent. **Water Science and Technology**. 51: 313-318.
- Chon, K., Cho, J., Kim, S.J., and Jang, A. (2014). The role of a combined coagulation and disk filtration process as a pre-treatment to microfiltration and reverse osmosis membranes in a municipal wastewater pilot plant. **Chemosphere**. 117: 20-26.
- Crook, J. (2005). **Irrigation of Parks, Playgrounds, and Schoolyards with Reclaimed Water: Extent and Safety**. Alexandria, Virginia: WaterReuse Association.
- Crook, J. (2007). **Innovative Applications in Water Reuse and Desalination 2: Ten Case Studies**. Alexandria, Virginia: WaterReuse Association.
- Crozes, G., White, P. and Marshall, M. (1995). Enhanced coagulation: its effect on NOM removal and chemical costs. **Journal American Water Works Association**. 87: 78-89.
- Cui, X., et al. (2016). The effectiveness of coagulation for water reclamation from a wastewater treatment plant that has a long hydraulic and sludge retention times: A case study. **Chemosphere**. 157: 224-231.
- Dasgupta, J., Mondal, D., Chakraborty, S., Sikder, J., Curcio, S., and Arafat H.A. (2015). Nanofiltration based water reclamation from tannery effluent following coagulation pretreatment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 121: 22-30.
- Diaz, S.D., Pena, L.V., Cabrera, E.G., Soto, M.M., Cabezas, L.V., and Sanchez, L.B. (2012). Effect of previous coagulation in direct ultrafiltration of primary settled municipal wastewater. **Desalination**. 304: 41-48.
- Dilling, J. and Kaiser, K. (2002). Estimation of the hydrophobic fraction of dissolved organic matter in water samples using UV photometry. **Water Research**. 36: 5037-5044.
- Du, X., Qu, F., Liang, H., Li, K., Yu, H., Bai, L. and Li, G. (2014). Removal of antimony (III) from polluted surface water using a hybrid coagulation–flocculation–ultrafiltration (CF–UF) process. **Chemical Engineering Journal**. 254: 293-301.
- Ehara, Y. (1998). The Final Report of Feasibility Study for Introduction of Membrane Systems. **NWTTI-Project Phase II**. Thailand.
- ETPC. (2009). **Water Treatment** [On-line]. Available: <http://www.etpcwater.com>
- Fiksdal, L., and Leiknes, T. (2006). The effect of coagulation with MF/UF membrane filtration for the removal of virus in drinking water. **Journal of Membrane Science**. 279 (1-2): 364-371.

- Fitzpatrick, C.S., Fradin, E., and Gregory, J. (2004). Temperature effects on flocculation, using different coagulants. **Water Science Technology**. 50 (12): 171-175.
- Florida Department of Environmental Protection. (2006). **2005 Reuse Inventory: Tallahassee: FDEP, Water Reuse Program**, [On- line] . Available: <https://floridadep.gov>
- Florida Department of Environmental Protection. (2011). **2010 Reuse Inventory. Tallahassee: FDEP, Water Reuse Program** [On- line] . Available: <https://floridadep.gov>
- Furumai, Hiroaki. (2008) Reuse and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Phys. Chem. Earth*. 39; 340-346.
- Gevorgyan¹, G.A., Ghazaryan, K.A., Movsesyan, H.S., and Zhamharyan, H.G. (2017). Human health assessment of heavy metal pollution in soils around Kapan mining area, Armenia. **Journal of Natural Sciences**. 29 (2): 29-33.
- Ghernaout, D. (2014). The hydrophilic/hydrophobic ratio vs. dissolved organics removal by coagulation – A review. **Journal of King Saud University – Science**. 26 (3): 169-180.
- Girish, R.P., Asha, B.C. and Rita, S.D. (2011). Optimal selection of full scale tannery effluent treatment alternative using integrated AHP and GRA approach. **Expert Systems with Applications**. 38: 10889-10895.
- Guan, D., Zhang, Z., Li, X., and Liu, H. (2011). Effect of pH and temperature on coagulation efficiency in a North-China water treatment plant. **Advanced Materials Research**. 243-249: 4835-4838.
- Guo, T., Englehardt, J. and Wu, T. (2014). Review of cost versus scale: water and wastewater treatment and reuse processes. **Water Science & Technology**. 223-234.
- Hallenbeck, W. H. , and Springs, W. (1993). **Quantitative risk assessment for environmental and occupational health**. New York: CRC Press.
- Herath, G. B. B. (1984). **Coupling of Crossflow Microfiltration and Dissolved Air Flotation for Algae Removal**. M.Eng. Thesis No. EV-94-11, AIT, Bangkok, Thailand.
- Ho, W. (2008). Decision Support: Integrated analytic hierarchy process and its applications-A literature review. **European Journal of Operational Research**. 186: 211-228.
- Huang, H., Lee, N., Young, T., Gary, A., Lozier, J.C., and Jacangelo, J.G. (2007). Natural organic matter fouling of low-pressure, hollow-fiber membranes: Effects of NOM source and hydrodynamic conditions. **ScienceDirect**. 41: 3823-3832.

- Hundt, T., and O'Melia, C. (1988). Aluminum-fulvic acid interaction: mechanisms and applications. **Journal-American Water Works Association**. 80 (4): 176-186.
- Hutson, S.S., Barber, N.L., Kenny, J.F., Linsey, K.S., Lumia, D.S., and Maupin, M.A. (2000). **Estimated Water Use in the United States in 2000**. United State of America.
- IRIS. (2009). Integrated risk information system. United States Environmental Protection Agency [On-line]. Available: <http://www.epa.gov/iris>
- Italian Decree. (2003). **Regulating Technical Standards for Wastewater Reuse**. Italy.
- Ji, Q., Liu, H., Hu, C., Wang, D. and Li, J. (2008). Removal of disinfection by-products precursors by polyaluminum chloride coagulation coupled with chlorination. **Separation and Purification Technology**. 62: 464-469.
- Jimenez, B., and Asano, T. (2008). **Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues and Needs**. London: IWA Publishing.
- Julie, C., Minhan, D., Robert, F., and Xiaolin, L. 2004. Distribution of dissolved organic matter in the Peal River Estuary. **China Marine Chemistry**. 211-224.
- Kabsch-Korbutowicz, M. (2005). Effect of Al coagulant type on natural organic matter removal efficiency in coagulation/ultrafiltration process. **Desalination**. 185 (1-3): 327-333.
- Korpela, J., and Lehmusvaara, A., (1999). A customer oriented approach to warehouse network evaluation and design. **International Journal of Production Economics**. 59: 135-146.
- Laabs, C.N., Amy, G.L., and Jekel, M. (2006). Understanding the size and character of fouling-causing substances from effluent organic matter (EfOM) in low-pressure membrane filtration. **Environmental Science & Technology**. 40 (14): 4495-4499.
- Lazarova, V., Savoye, P., Janex, M.L., Blatchley, E.R., and Pommepuy, M. (1999). Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives. **Water Science and Technology**. 40 (4): 203-213.
- Leiknes, T., Odegaard, H., and Myklebust, H. (2004). Removal of natural organic matter (NOM) in drinking water treatment by coagulation-microfiltration using metal membranes. **Journal of Membrane Science**. 242: 47-55.
- Listiarini, K., Sun, D.D., and Leckie, J.O. (2009). Organic fouling of nanofiltration membranes: Evaluating the effects of humic acid, calcium, alum coagulant and their combinations on the specific cake resistance. **Journal of Membrane Science**. 332: 56-62.

- Khamisi, S.A., Prathapar, S.A., and Ahmed, M. (2013). Conjunctive use of reclaimed water and groundwater in crop rotations. **Agricultural Water Management**. 116: 228-234.
- Korbutowicz, M.K. (2008). Ultrafiltration as a method of separation of natural organic matter from water. **Material Science-Poland**. 26 (2): 459-467.
- Lee, S., Ihara, M., Yamashita, N., and Tanaka, H. (2017). Improvement of virus removal by pilot-scale coagulation-ultrafiltration process for wastewater reclamation: Effect of optimization of pH in secondary effluent. **Water Research**. 114: 23-30.
- Liang, H., Gong, W., Chen, J., and Li, G. (2008). Cleaning of fouled ultrafiltration (UF) membrane by algae during reservoir water treatment. **Desalination**. 220 (1-3): 267-272.
- Livingston, E. (2008). Presentation at 2008 Water Smart Innovations Conference and Exposition [On-line]. Available: <http://www.watersmartinnovations.com>
- Mao, R., Wang, Y., Zhao, Y., Gao, B. and Dong, M. (2013). Impact of various coagulation technologies on membrane fouling in coagulation/ultrafiltration process. **Chemical Engineering Journal**. 225: 387-393.
- Marella, R.L. (2009). **Water Withdrawals, Use, and Trends in Florida, 2005** [On-line]. Available: <http://pubs.usgs.gov/sir/2009/5125>
- Maryam, B. and Buyukgungor, H. (2017). Wastewater reclamation and reuse trends in Turkey: Opportunities and challenges. **Journal of Water Process Engineering**.
- Matsushita, T., Matsui, Y., and Inoue T. (2004). Irreversible and reversible adhesion between virus particles and hydrolyzing-precipitating aluminum: a function of coagulation. **Water Science Technology**. 39 (1): 147-163.
- Matsushita, T., Matsui, Y., Shirasaki, N., and Kato, Y. (2005). Effect of membrane pore size, coagulation time, and coagulant dose on virus removal by a coagulation-ceramic microfiltration hybrid system. **Desalination**. 178: 21-26.
- Metcalf and Eddy. (1991). **Wastewater Engineering Treatment: Treatment, Disposal and Reuse**. 3rd Edition. Singapore: McGraw-Hill.
- Metropolitan Council of Environmental Services. (2007). **Recycling Treated Municipal Wastewater for Industrial Water Use** [On- line] . Available: <http://www.metrocouncil.org>
- Moazeni, M., et al. (2017). Estimation of health risks caused by exposure to enteroviruses from agricultural application of wastewater effluents. **Water Research**. 125: 104-113.

- Mulder, M. (1996). *Basic Principles of Membrane Technology*. **Kluwer Academic Publishers**.
314: 157-183.
- Nagare, H., Aso, T., Ebie, Y. and Ebie, K. (2008). Removal of humic substances by repeated mixing with PACl. **In proceedings international water association (IWA) specialist conference on: natural organic matter**. 2-4 September 2008. Bath, UK.
- National Research Council of the National Academics. (2008). **Prospects for Managed Underground Storage of Recoverable Water**. Washington, DC
- National Research Council of the National Academics. (2012). **Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply Through Reuse of Municipal Wastewater**. Washington, DC: National Academies Press.
- Newcombe, G., Drikas, M., Assem, S. and Becketi, R. (1997). Influence of characterised natural organic material on activated carbon adsorption: I characterization of concentrated reservoir water. **Water Research**. 31: 965-972.
- Norton-Brandao, D., Scherrenberg, S.M., and Lier, J.B. (2013). Reclamation of used urban waters for irrigation purposes: A review of treatment technologies. **Journal of Environmental Management**. 122: 85-98.
- Oladoja, N.A. (2016). Advances in the quest for substitute for synthetic organic polyelectrolytes as coagulant aid in water and wastewater treatment operations. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**. 3: 47-58.
- Oron, G., and et al. (2008). Membrane technology for advanced wastewater reclamation for sustainable agriculture production. **Desalination**. 218 (1-3): 170-180.
- Owen, D.M., Amy, G.L. and Chowdhury, Z.K. 1995. Characterization of natural organic matter and its relationship to treatability. **Journal American Water Works Association**. 87: 5-6.
- Owen, D.M., Amy, G.L., Chowdhury, Z.K., Paode, R., McCoy, G. and Viscosill, K. 1995. NOM characterization and treatability. **Journal of the American Water Works Association**. 87 (1): 46-63.
- Petousi, I., et al. (2015). Effects of reclaimed wastewater irrigation on olive (*Olea europaea* L.cv. 'Koroneiki') trees. **Agricultural Water Management**. 160: 33-40.
- Piadeh F., Mohamad Reza Alavi Moghaddam., Mardan S.(2014). Present situation of wastewater treatment in the Iranian industrialestates: Recycle and reuse as a solution for achieving goals ofeco-industrial parks. *Resources, Conservation and Recycling*.92: 172–178.

- Qin, J.J., Oo, M.H., Kekre, K.A., Knops, F., and Miller, P. (2006). Impact of coagulation pH on enhanced removal of natural organic matter in treatment of reservoir water. **Separation and Purification Technology**. 49: 295-298.
- Rapant, S., Fajcikova, K., Khun, M., and Cveckova, V. (2011). Application of health risk assessment method for geological environment at national and regional scales. **Environmental Earth Sciences**. 64: 513-521.
- Rizzo, L., Gallo, M., Meriç, S., and Belgiorno, V. (2005). Removal of THM precursors from a high-alkaline surface water by enhanced coagulation and behavior of THMFP toxicity on *D. magna*. **Desalination**. 176: 177-188.
- Rodrigues, S. (2002). **China Reclaimed Water Reuse Regulations**. International Water Association. United Kingdom.
- Saaty, R.W. (2003). Decision Making in Complex Environments: **The Analytic Hierarchy Process (AHP) for Decision Making and the Analytic Network Process (ANP) for Decision Making with Dependence and Feedback**. RWS Publications, Pittsburgh.
- Saritha, V., Srinivas, N., and Srikanth, N.V. (2017). Analysis and optimization of coagulation and flocculation process. **Applied Water Science**. 7: 451-460.
- Shah, M.T., Ara, J., Muhammad, S., Khan, S., and Tariq, S. (2012). Health risk assessment via surface water and sub-surface water consumption in the mafic and ultramafic terrain, Mohmand agency, northern Pakistan. **Journal of Geochemical Exploration**. 118: 60-67.
- Shanmuganathan, S., Loganathan, P., Kazner, C., Johir, M.A.H., and Vigneswaran, S. (2017). Submerged membrane filtration adsorption hybrid system for the removal of organic micropollutants from a water reclamation plant reverse osmosis concentrate. **Desalination**. 401: 134-141.
- Sher, F., Malik, A., and Liu, H. (2013). Industrial polymer effluent treatment by chemical coagulation and flocculation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 1: 684-689.
- Spanish Royal Decree. (2007). **Spanish Regulations for Water Reuse**. Spain.
- Tepanosyan, G., Sahakyan, L., Belyaeva, O., Maghakyan, N., and Saghatelyan, A. (2017). Human health risk assessment and riskiest heavy metal origin identification in urban soils of Yerevan, Armenia. **Chemosphere**. 184: 1230-1240.
- Teunis, P.F.M., Ogden, I.D. and Strachan, N.J.C. (2008). Hierarchical dose response of *E.coli* O157:H7 from human outbreaks incorporating heterogeneity in exposure. **Epidemiol. Infect.** 136: 761-770.

- The International Programs on Chemical Safety. (1994). **Assessing human health risks of chemicals: Derivation of guidance values for health-based exposure limits**. Geneva.
- Tiehm, A., Herwig, V. and Neis, U. (1999). Particle size analysis for improved Sedimentation and filtration in Waste water treatment. **Water Science and Technology**. 39 (8): 99-106.
- Touffet, A., Baron, J., Welte, B., Joyeux, M., Teychene, B. and Gallard, H. (2015) Impact of pretreatment conditions and chemical ageing on ultrafiltration membrane performances. Diagnostic of a coagulation/ adsorption/ filtration process. **Journal of Membrane Science**. 489: 284-291.
- USEPA. (1989). **Risk assessment: guidance for superfund**. In: **Human Health Evaluation Manual**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- USEPA. (1999). **A risk assessment–multiway exposure spreadsheet calculation tool**. **United States Environmental Protection Agency**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- USEPA. (2004). **Guidelines for Water Reuse**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- USEPA. (2011). **Exposure Factors Handbook**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- USEPA. (2012). **2012 Guidelines for Water Use, Office of Research and Development**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- Uyak, V., Koyuncu, I., Oktem, I., Cakmakci, M. and Toroz, I. (2008) Removal of trihalomethanes from drinking water by nanofiltration membranes. **Journal of Hazardous Materials**. 152 (2): 789-794.
- Vaidya, O.S., Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of Operational Research**. 169 (1): 1–29.
- Veil, J.A. (2007). **Use of Reclaimed Water for Power Plant Cooling**. United States.
- Velasco, U.I., Alvarez-Uriarte, J.I. and Gonzalez-Velasco, J.R. (2007). Enhanced coagulation under changing alkalinity-hardness conditions and its implications on trihalomethane precursors removal and relationship with UV absorbance. **Separation and Purification Technology**. 55: 368-380.
- Velasco, U.I., Alvarez-Uriarte, J.I. and Gonzalez-Velasco, J.R. (2007). Removal and structural changes in natural organic matter in a Spanish water treatment plant using nascent chlorine. **Separation and Purification Technology**. 57: 152-160.
- Virarahavan, T., and Wimmer, C.H. (1988). Polyaluminium Chloride as an Alternative to Alum Coagulation a Case Study. **J. Agua**. 6: 316-321.

- Wang, C-C., Niu, Z-G., and Zhang, Y. (2013). Health risk assessment of inhalation exposure of irrigation worker and the public to trihalomethanes from reclaimed water in landscape irrigation in Tianjin, North China. **Journal of Hazardous Materials**. 262: 179-188.
- Wang, L., Wang, W., Fukushi, K.I. (2008). Effects of operational factors on ultrafiltration membrane fouling. **Desalination**. 229: 181-191.
- Wang, X., Sato, T., Xing, B., and Tao, S. (2005). Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish. **Science of the Total Environment**. 350: 28-37.
- Wei, N., Zhang, Z., Liu, D., Wu, Y., Wang, J. and Wang, Q. (2015). Coagulation behavior of polyaluminum chloride: Effects of pH and coagulant dosage. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. 23: 1041-1046.
- Westcot, D.W., and Ayers, R.S. (1985). **Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater a Guidance Manual**. Chelsea: Lewis Publishers, Inc.
- World Health Organization. (1989). **Guidelines for the Use of Wastewater and Excreta in Agriculture and Aquaculture: Measures for Public Health Protection**. Italy.
- World Health Organization. (2008). **Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure**. Geneva, Switzerland.
- World Health Organization. (2011). **Guidelines for Drinking-Water Quality**. Fourth edition. English.
- Yan, M., Wang, D., Ni, J., Qu, J., Chow, C. and Liu, H. (2008). Mechanism of natural organic matter removal by polyaluminum chloride: Effect of coagulant particle size and hydrolysis kinetics. **Water Research**. 42: 3361-3370.
- Yang, Z.L., Gao, B.Y., Yue, Q.Y. and Wang, Y. (2010). Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid-kaolin synthetic water. **Journal of Hazardous Materials**. 178: 596-603.
- Yimratanabovorn, J., Rungrueang, O., Karuchit, S. and Wirikitkul, P. (2018). Assessing urban water supply system in northeastern Thailand: water quality and authority organization. **International Journal of GEOMATE**. 15 (48): 187-194.
- Yimratanabovorn, J., Rungrueang, O., Wonglertarak, W. and Wichitsathein, B. (2018). Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) for the Assessment of Water Reclamation Alternative. **In proceedings international water association (IWA) water reuse 2018**. 30 October - 2 November 2018. Thailand.

- Yimratanabovorn, J., Wonglertarak, W., Rungrueang, O., Hirunteeyakul, C. and Wichitsathein, B. (2018). Performance Comparison of Coagulation, Ultrafiltration and Combined Coagulation and Ultrafiltration for Water Reclamation. **International Journal of Environmental Science and Development**.
- Yu, W., Yang, Y., and Graham, N. (2016). Evaluation of ferrate as a coagulant aid/oxidant pretreatment for mitigating submerged ultrafiltration membrane fouling in drinking water treatment. **Chemical Engineering Journal**. 298: 234-242.
- Yu, G., et al. (2017). Health risk assessment of Chinese consumers to Cadmium via dietary intake. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**. 44: 137-145.
- Zeng, G., Jiang, R., Huang, G., Xu, M. and Li, J. (2007). Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. **Journal of Environmental Management**. 82: 250-259.
- Zhai, Y., et al. (2017). Groundwater nitrate pollution and human health risk assessment by using HHRA model in an agricultural area, NE China. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 137: 130-142.



ภาคผนวก ก
ผลการศึกษาลักษณะน้ำทิ้ง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำที่ย้อนหลังปี 2556

Parameter	Units	วัน/เดือน									ค่าเฉลี่ย
		15/11/55	1/2/56	21/2/56	21/3/56	4/4/56	31/5/56	27/6/56	31/7/56	27/9/56	
pH	-	7.3	7.6	7.3	8.1	7.2	7.3	7	8.6	8	7.60
Color	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TSS	mg/L	6	8	8	12	4	8	13	14	8	9.00
TDS	mg/L	298	324	439	355	335	234	412	373	456	358.44
TKN	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sulfide	mg/L	0.001	0.003	0.02	0.02	-	ND	-	11	0.003	1.84
BOD	mg/L	12	8	6	3	-	2	-	13	7	7.29
COD	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	mg/L	0.01	0.004	0.02	0.02	0.02	0.09	0.03	0.03	0.03	0.028
As	mg/L	ND	0.001	0.002	ND	0.002	0.001	ND	ND	0.001	0.001
Ba	mg/L	0.13	0.149	0.106	1.26	0.998	0.133	0.125	0.072	0.079	0.339
Cd	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	mg/L	ND	ND	0.001	ND	0.005	0.002	0.01	ND	0.001	0.004
Pb	mg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hg	mg/L	ND	ND	0.001	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.001
Mn	mg/L	0.09	0.085	0.013	2.442	0.019	0.107	0.101	0.035	0.05	0.327
Ni	mg/L	ND	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.014	0.003	0.001	0.004
Se	mg/L	ND	ND	0.001	ND	0.001	ND	ND	ND	ND	0.001
Zn	mg/L	0.05	0.03	0.027	0.085	0.012	0.131	0.346	ND	0.058	0.092

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการตรวจคุณภาพน้ำที่ย้อนหลังปี 2557

Parameter	Units	วัน/เดือน												ค่าเฉลี่ย
		16/1	13 /2	6 /3	4 /4	2 /5	15 /5	6 /6	3 /7	14 /8	5/9	29 /10	2/12	
pH	-	8.1	9	9.2	8.1	7.9	8.5	8.8	-	8.1	8.6	7.6	-	8.39
Color	-	-	-	-	-	24	-	-	-	-	-	-	-	24.00
TSS	mg/L	22	40	84	17	16	13	18	-	54	2	12	-	27.80
TDS	mg/L	364	406	398	442	234	384	317	-	380	542	392	-	385.90
Sulfide	mg/L	ไม่พบ	0.02	0.03	ไม่พบ	ไม่พบ	0.01	ไม่พบ	-	0.01	0.01	0.005	-	0.01
BOD	mg/L	11	28	45	21	5	10	14	-	18	12	20	-	18.40
Grease & Oil	mg/L	2	5	6	ไม่พบ	4	5	3	-	2	2	ไม่พบ	-	3.63
COD	mg/L	-	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	18.00
Cr	mg/L	0.02	-	0.02	0.03	0.04	0.05	0.02	0.04	0.03	0.05	0.05	0.06	0.037
As	mg/L	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.001	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.001	0.001	0.001
Ba	mg/L	0.029	-	0.11	0.11	0.086	0.074	0.059	0.098	0.112	0.112	0.084	0.102	0.089
Cd	mg/L	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Cu	mg/L	ไม่พบ	-	ไม่พบ	0.017	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.001	0.004	ไม่พบ	0.004	ไม่พบ	0.007
Pb	mg/L	0.002	-	ไม่พบ	0.002	0.004	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.003	ไม่พบ	0.003
Hg	mg/L	ไม่พบ	-	ไม่พบ	0.001	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.001
Mn	mg/L	0.002	-	0.009	0.026	0.022	0.001	0.003	0.01	0.048	0.026	0.014	0.09	0.023
Ni	mg/L	ไม่พบ	-	0.006	0.004	0.002	0.001	0.001	0.004	0.004	0.001	0.005	0.002	0.003
Se	mg/L	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.002	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.002
Zn	mg/L	0.01	-	0.01	0.012	0.01	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.008	0.017	0.011

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการตรวจคุณภาพน้ำที่ย้อนหลังปี 2558

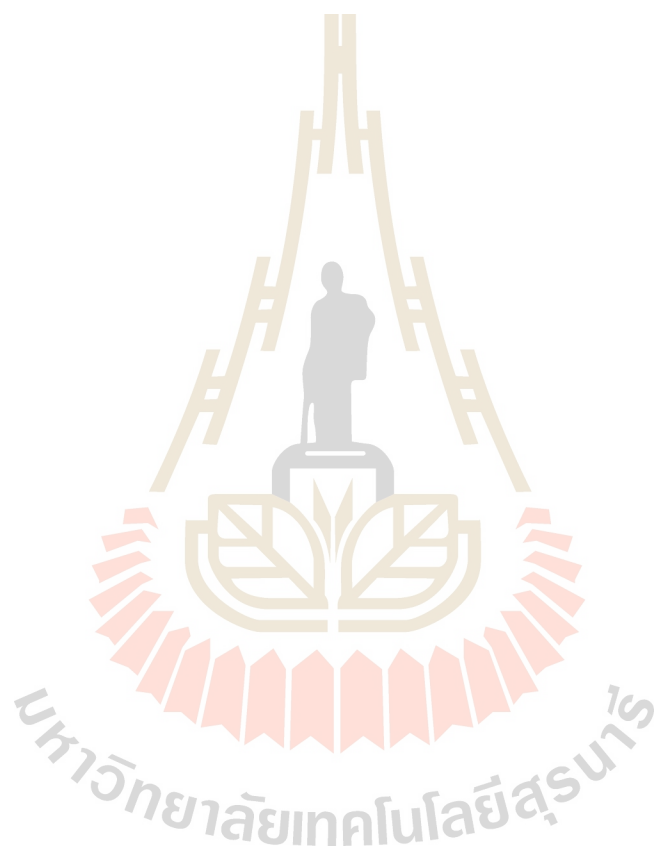
Parameter	Units	วัน/เดือน												ค่าเฉลี่ย
		14//1	11/1	10/3	21/4	19/5	16/6	14/7	25/8	23/9	7/10	4/11	22/12	
pH	-	-	-	8.10	-	-	7.60	-	8.00	7.70	8.10	7.70	7.80	7.86
TSS	mg/L	-	-	16.00	-	-	8.00	-	22.00	26.00	16.00	35.00	19.00	20.29
TDS	mg/L	-	-	434.00	-	-	440.00	-	414.00	378.00	343.00	353.00	447.00	401.29
TKN	mg/L	-	-	18.00	-	-	8.00	-	9.00	14.00	ไม่พบ	26.00	3.00	13.00
Sulfide	mg/L	-	-	0.009	-	-	0.005	-	0.004	0.006	0.005	0.013	0.01	0.01
BOD	mg/L	-	-	11.00	-	-	2.00	-	13.00	10.00	20.00	16.00	9.00	11.57
Grease & Oil	mg/L	-	-	6.00	-	-	7.00	-	7.00	5.00	15.00	4.00	4.00	6.86
Cr	mg/L	0.060	0.050	0.050	0.060	0.060	0.052	0.071	0.048	0.056	0.089	0.083	0.086	0.064
As	mg/L	0.0010	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.0020	ไม่พบ	0.0010	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.0003
Ba	mg/L	0.087	0.085	0.085	0.077	0.083	0.088	0.089	0.075	0.075	0.689	0.578	0.074	0.174
Cd	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Cu	mg/L	0.004	ไม่พบ	0.004	0.002	0.003	0.002	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.001
Pb	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Hg	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Mn	mg/L	0.011	0.001	0.017	0.006	0.016	0.046	0.040	0.022	0.031	0.052	0.001	0.016	0.022
Ni	mg/L	0.006	ไม่พบ	0.004	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	ไม่พบ	0.001	0.001	0.002
Se	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Zn	mg/L	0.197	ไม่พบ	0.223	0.010	0.018	0.026	0.046	0.005	0.017	ไม่พบ	0.01	0.003	0.045

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำที่ย้อนหลังปี 2559

Parameter	Units	วัน/เดือน									ค่าเฉลี่ย
		24/2	16/3	27/4	17/5	15/6	28/9	26/10	9/11	14/12	
pH	-	7.30	9.00	8.90	8.70	8.80	8.00	7.80	9.00	7.70	8.36
TSS	mg/L	27.00	62.00	6.00	2.00	17.00	6.00	16.00	35.00	39.00	23.33
TDS	mg/L	411.00	452.00	475.00	479.00	531.00	370.00	328.00	365.00	443.00	428.22
TKN	mg/L	9.00	12.00	9.00	13.00	7.00	20.00	10.00	14.00	9.00	11.44
Sulfide	mg/L	0.005	0.006	0.005	0.009	0.005	0.005	0.006	0.008	0.009	0.01
BOD	mg/L	18.00	19.00	16.00	10.00	12.00	11.00	19.00	14.00	14.00	14.78
Grease & Oil	mg/L	5.00	2.00	5.00	2.00	13.00	5.00	3.00	8.00	4.00	5.22
Cr	mg/L	<0.01	0.014	0.024	0.021	-	0.033	0.044	0.029	0.025	0.02
As	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Ba	mg/L	0.092	0.578	0.090	0.096	-	0.064	0.062	0.081	0.071	0.14
Cd	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Cu	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.002	-	0.002	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.001
Pb	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Hg	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Mn	mg/L	0.031	0.015	0.004	0.064	0.016	0.026	0.026	0.101	0.010	0.03
Ni	mg/L	0.002	0.002	0.001	0.003	ไม่พบ	0.001	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	0.001
Se	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Zn	mg/L	ไม่พบ	0.002	ไม่พบ	0.051	0.007	0.033	<0.010	0.067	<0.010	0.02

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการทบทวนคุณภาพน้ำที่ย้อนหลังปี 2560

Parameter	Units	วัน/เดือน					ค่าเฉลี่ย
		21/2	14/3	25/4	21/6	12/7	
pH	-	8.20	8.20	8.00	7.20	7.30	7.78
Suspended Solids	mg/L	14.00	28.00	16.00	27.00	38.00	24.60
Total Dissolved Solid	mg/L	507.00	452.00	150.00	270.00	310.00	337.80
Total Kjeldahl Nitrogen	mg/L	23.00	21.00	9.00	21.00	24.00	19.60
Sulfide	mg/L	0.01	0.024	0.008	0.005	0.011	0.01
BOD	mg/L	12.00	15.00	12.00	17.00	15.00	14.20
Grease & Oil	mg/L	11.00	2.00	21.00	1.00	4.00	7.80
Cr	mg/L	0.025	0.033	0.025	-	-	0.03
As	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Ba	mg/L	0.093	0.092	0.081	-	-	0.09
Cd	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Cu	mg/L	ไม่พบ	0.002	0.002	ไม่พบ	ไม่พบ	0.001
Pb	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Hg	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Mn	mg/L	0.010	0.002	0.006	-	-	0.01
Ni	mg/L	0.005	0.004	0.002	-	-	0.004
Se	mg/L	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
Zn	mg/L	0.014	0.014	0.003	-	-	0.010





ภาคผนวก ข

ผลการศึกษาระบบ CF

ตารางที่ ข.1 สภาวะที่เหมาะสมจากการทดสอบ Jar Test

RUN	PACl (mg/L)	Cation Polymer (mg/L)	pH
1	60.00	2.00	7.50
2	60.00	2.00	7.50
3	60.00	2.00	7.50
4	70.00	1.00	7.50
5	70.00	6.00	7.50
6	70.00	2.00	7.50
7	70.00	1.00	7.50
8	80.00	8.00	8.00
9	70.00	1.00	8.00
10	70.00	3.00	-
11	60.00	4.00	7.01
12	80.00	4.00	7.50
13	80.00	2.00	8.00
14	60.00	5.00	8.00
15	50.00	2.00	6.70
16	70.00	3.00	8.00
17	70.00	3.00	7.50
18	80.00	8.00	8.00
19	70.00	3.00	8.50
20	70.00	3.00	8.50
21	80.00	3.00	8.00
22	60.00	2.00	7.50
Mean	68.64	3.18	7.70
Max	80.00	8.00	8.50
Min	50.00	1.00	6.70
SD	8.34	1.99	0.44

ตารางที่ ข.2 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ความเข้มข้นของ PACl ในช่วง 60-70 mg/L ด้วย One Way ANOVA

Groups	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.	แปลผล
Between Groups	7.724	1	7.724	1.292	0.262	ไม่แตกต่างกัน
Within Groups	263.056	44	5.979			
Total	270.781	45				

ตารางที่ ข.3 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ความเข้มข้นของ PACl ในช่วง 60-70 mg/L ด้วย One Way ANOVA

Groups	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.	แปลผล
Between Groups	36.081	1	36.081	3.266	0.078	ไม่แตกต่างกัน
Within Groups	486.125	44	11.048			
Total	522.207	45				

ตารางที่ ข.4 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ความเข้มข้นของ Cation Polymer ในช่วง 1-8 mg/L ด้วย One Way ANOVA

Groups	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.	แปลผล
Between Groups	37.910	7	5.416	0.163	0.992	ไม่แตกต่างกัน
Within Groups	5843.623	176	33.202			
Total	5881.533	183				

ตารางที่ ข.5 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ความเข้มข้นของ Cation Polymer ในช่วง 1-8 mg/L ด้วย One Way ANOVA

Groups	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.	แปลผล
Between Groups	32.830	7	4.690	0.224	0.979	ไม่แตกต่างกัน
Within Groups	3685.692	176	20.941			
Total	3718.522	183				

ตารางที่ ข.6 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่า pH ในช่วง 7-9 ด้วย

One Way ANOVA

Groups	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.	แปลผล
Between Groups	225.176	4	56.294	1.434	0.232	ไม่แตกต่างกัน
Within Groups	2630.728	67	39.265			
Total	2855.904	71				

ตารางที่ ข.7 ทดสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ค่า pH ในช่วง 7-9 ด้วย One Way

ANOVA

Groups	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.	แปลผล
Between Groups	674.257	4	168.564	2.466	0.052	ไม่แตกต่างกัน
Within Groups	4921.919	72	68.360			
Total	5596.176	76				



ภาคผนวก ค

ผลการประเมินความเสี่ยง

ตารางที่ ค.1 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบ CF

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	HQ= ADI/RfD
	mg/kg.day	mg/L	mL/h	-	hr/day	day/year	year	kg	day	mg	kg.day	mg/kg.day	-
Cr	0.0030	0.0654	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	12.4135	1423500	8.72E-06	2.91E-03
Mn	0.1400	2.6110	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	495.5719	1423500	3.48E-04	2.49E-03
Fe	0.3000	0.6761	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	128.3147	1423500	9.01E-05	3.00E-04
Cu	0.0400	0.0138	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	2.6105	1423500	1.83E-06	4.58E-05
Zn	0.3000	0.5995	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	113.7770	1423500	7.99E-05	2.66E-04
As	0.0003	0.0143	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	2.7141	1423500	1.91E-06	6.36E-03
Se	0.0050	0.0004	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	0.0760	1423500	5.34E-08	1.07E-05
Cd	0.0005	0.0020	23	0.001	0.4	365	65	60	23725	0.4327	1423500	3.04E-07	6.08E-04
Pb	0.0036	0.1327	25	0.001	0.4	365	65	60	23725	31.4819	1423500	2.21E-05	6.14E-03
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	CR= ADI x SF
As	0.0003	0.0143	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	2.7141	1423500	1.91E-06	2.86E-06

ตารางที่ ค.2 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบ UF

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	HQ= ADI/RfD
	mg/kg.day	mg/L	mL/h	-	hr/day	day/year	year	kg	day	mg	kg.day	mg/kg.day	-
Cr	0.0030	0.0678	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	12.8602	1423500	9.03E-06	3.01E-03
Mn	0.1400	0.6666	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	126.5291	1423500	8.89E-05	6.35E-04
Fe	0.3000	0.8784	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	166.7172	1423500	1.17E-04	3.90E-04
Cu	0.0400	0.0221	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	4.1914	1423500	2.94E-06	7.36E-05
Zn	0.3000	0.6359	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	120.6918	1423500	8.48E-05	2.83E-04
As	0.0003	0.0202	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	3.8325	1423500	2.69E-06	8.97E-03
Se	0.0050	0.0007	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	0.1305	1423500	9.16E-08	1.83E-05
Cd	0.0005	0.0031	23	0.001	0.4	365	65	60	23725	0.6721	1423500	4.72E-07	9.44E-04
Pb	0.0036	0.1037	25	0.001	0.4	365	65	60	23725	24.5981	1423500	1.73E-05	4.80E-03
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	CR= ADI x SF
As	0.0003	0.0202	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	3.8325	1423500	2.69E-06	4.04E-06

ตารางที่ ค.3 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนจากระบบรวม CF+UF

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	HQ= ADI/RfD
	mg/kg.day	mg/L	mL/h	-	hr/day	day/year	year	kg	day	mg	kg.day	mg/kg.day	-
Cr	0.0030	0.0543	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	10.3035	1423500	7.24E-06	2.41E-03
Mn	0.1400	2.8740	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	545.4773	1423500	3.83E-04	2.74E-03
Fe	0.3000	0.5147	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	97.6811	1423500	6.86E-05	2.29E-04
Cu	0.0400	0.0191	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	3.6207	1423500	2.54E-06	6.36E-05
Zn	0.3000	0.8134	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	154.3799	1423500	1.08E-04	3.62E-04
As	0.0003	0.0138	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	2.6270	1423500	1.85E-06	6.15E-03
Se	0.0050	0.0003	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	0.0482	1423500	3.38E-08	6.77E-06
Cd	0.0005	0.0021	23	0.001	0.4	365	65	60	23725	0.4538	1423500	3.19E-07	6.38E-04
Pb	0.0036	0.1752	25	0.001	0.4	365	65	60	23725	41.5639	1423500	2.92E-05	8.11E-03
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	CR= ADI x SF
As	0.0003	0.0138	20	0.001	0.4	365	65	60	23725	2.6270	1423500	1.85E-06	2.77E-06

ตารางที่ ค.4 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางชีวภาพจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนที่ปนเปื้อนเชื้อ *E-coli*

ระบบ	ปริมาณ <i>E-coli</i>	C	R	Dose	α	β	P	P_{ill}	PE	Risk
	CFU/mL	log CFU/mL	mL/day	C x R				$1 - [1 + (Dose/\beta)]^{-\alpha}$	$P \times (1 - e^{-Dose})$	$P_E \times P_{ill}$
CF	83	1.9191	8	15.3526	0.248	48.8	0.1	0.065586859	0.1000	0.0066
UF	205	2.3118	8	18.4940	0.248	48.8	0.1	0.076599866	0.1000	0.0077
CF+UF	3	0.4771	8	3.8170	0.248	48.8	0.1	0.018503153	0.0978	0.0018

ตารางที่ ค.5 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนที่สัดส่วนร้อยละ 100 จากระบบ CF กรณีศึกษาทส. (ชาย)

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	HQ= ADI/RfD
	mg/kg.day	mg/L	mL/h	-	hr/day	day/year	year	kg	day	mg	kg.day	mg/kg.day	-
Cr	0.0030	0.0654	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.7639	99280	7.69E-06	2.56E-03
Mn	0.1400	2.6110	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	30.4967	99280	3.07E-04	2.19E-03
Fe	0.3000	0.6761	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	7.8963	99280	7.95E-05	2.65E-04
Cu	0.0400	0.0138	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.1606	99280	1.62E-06	4.05E-05
Zn	0.3000	0.5995	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	7.0017	99280	7.05E-05	2.35E-04
As	0.0003	0.0143	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.1668	99280	1.68E-06	5.60E-03
Se	0.0050	0.0004	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.0047	99280	4.71E-08	9.42E-06
Cd	0.0005	0.0020	23	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.0266	99280	2.68E-07	5.36E-04
Pb	0.0036	0.1327	25	0.001	0.4	365	4	68	1460	1.9373	99280	1.95E-05	5.42E-03
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	CR= ADI x SF
As	1.5	0.0143	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.1668	99280	1.68E-06	2.52E-06

ตารางที่ ค.6 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนที่สัดส่วนร้อยละ 100 จากระบบ UF กรณีศึกษามทส. (ชาย)

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	HQ= ADI/RfD
	mg/kg.day	mg/L	mL/h	-	hr/day	day/year	year	kg	day	mg	kg.day	mg/kg.day	-
Cr	0.0030	0.0678	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.7914	99280	7.97E-06	2.66E-03
Mn	0.1400	0.6666	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	7.7864	99280	7.84E-05	5.60E-04
Fe	0.3000	0.8784	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	10.2595	99280	1.03E-04	3.44E-04
Cu	0.0400	0.0221	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.2579	99280	2.60E-06	6.50E-05
Zn	0.3000	0.6359	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	7.4272	99280	7.48E-05	2.49E-04
As	0.0003	0.0202	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.2358	99280	2.38E-06	7.92E-03
Se	0.0050	0.0007	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.0080	99280	8.09E-08	1.62E-05
Cd	0.0005	0.0031	23	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.0414	99280	4.17E-07	8.33E-04
Pb	0.0036	0.1037	25	0.001	0.4	365	4	68	1460	1.5137	99280	1.52E-05	4.24E-03
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	CR= ADI x SF
As	1.5	0.0202	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.2358	99280	2.38E-06	3.56E-06

ตารางที่ ค.7 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนที่สัดส่วนร้อยละ 100 จากระบบรวม CF+UF กรณีศึกษามทส. (ชาย)

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	HQ= ADI/RfD
	mg/kg.day	mg/L	mL/h	-	hr/day	day/year	year	kg	day	mg	kg.day	mg/kg.day	-
Cr	0.0030	0.0543	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.6341	99280	6.39E-06	2.13E-03
Mn	0.1400	2.8740	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	33.5678	99280	3.38E-04	2.42E-03
Fe	0.3000	0.5147	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	6.0111	99280	6.05E-05	2.02E-04
Cu	0.0400	0.0191	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.2228	99280	2.24E-06	5.61E-05
Zn	0.3000	0.8134	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	9.5003	99280	9.57E-05	3.19E-04
As	0.0003	0.0138	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.1617	99280	1.63E-06	5.43E-03
Se	0.0050	0.0003	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.0030	99280	2.99E-08	5.97E-06
Cd	0.0005	0.0021	23	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.0279	99280	2.81E-07	5.63E-04
Pb	0.0036	0.1752	25	0.001	0.4	365	4	68	1460	2.5578	99280	2.58E-05	7.16E-03
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	CR= ADI x SF
As	1.5	0.0138	20	0.001	0.4	365	4	68	1460	0.1617	99280	1.63E-06	2.44E-06

ตารางที่ ค.8 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนที่สัดส่วนร้อยละ 100 จากระบบ CF กรณีศึกษามทส. (หญิง)

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	HQ= ADI/RfD
	mg/kg.day	mg/L	mL/h	-	hr/day	day/year	year	kg	day	mg	kg.day	mg/kg.day	-
Cr	0.0030	0.0654	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.7639	81136	9.42E-06	3.14E-03
Mn	0.1400	2.6110	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	30.4967	81136	3.76E-04	2.68E-03
Fe	0.3000	0.6761	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	7.8963	81136	9.73E-05	3.24E-04
Cu	0.0400	0.0138	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.1606	81136	1.98E-06	4.95E-05
Zn	0.3000	0.5995	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	7.0017	81136	8.63E-05	2.88E-04
As	0.0003	0.0143	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.1668	81136	2.06E-06	6.85E-03
Se	0.0050	0.0004	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.0047	81136	5.76E-08	1.15E-05
Cd	0.0005	0.0020	23	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.0266	81136	3.28E-07	6.56E-04
Pb	0.0036	0.1327	25	0.001	0.4	365	4	56	1460	1.9373	81136	2.39E-05	6.63E-03
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	CR= ADI x SF
As	1.5	0.0143	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.1668	81136	2.06E-06	3.08E-06

ตารางที่ ค.9 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนที่สัดส่วนร้อยละ 100 จากระบบ UF ภาณศึกษาทส. (หญิง)

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	HQ= ADI/RfD
	mg/kg.day	mg/L	mL/h	-	hr/day	day/year	year	kg	day	mg	kg.day	mg/kg.day	-
Cr	0.0030	0.0678	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.7914	81136	9.75E-06	3.25E-03
Mn	0.1400	0.6666	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	7.7864	81136	9.60E-05	6.85E-04
Fe	0.3000	0.8784	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	10.2595	81136	1.26E-04	4.21E-04
Cu	0.0400	0.0221	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.2579	81136	3.18E-06	7.95E-05
Zn	0.3000	0.6359	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	7.4272	81136	9.15E-05	3.05E-04
As	0.0003	0.0202	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.2358	81136	2.91E-06	9.69E-03
Se	0.0050	0.0007	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.0080	81136	9.89E-08	1.98E-05
Cd	0.0005	0.0031	23	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.0414	81136	5.10E-07	1.02E-03
Pb	0.0036	0.1037	25	0.001	0.4	365	4	56	1460	1.5137	81136	1.87E-05	5.18E-03
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	CR= ADI x SF
As	1.5	0.0202	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.2358	81136	2.91E-06	4.36E-06

ตารางที่ ค.10 การประเมินความเสี่ยงสุขภาพทางเคมีจากการสัมผัสน้ำหมุนเวียนที่สัดส่วนร้อยละ 100 จากระบบรวม CF+UF วิทยาลัยศึกษามทส. (หญิง)

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	HQ= ADI/RfD
	mg/kg.day	mg/L	mL/h	-	hr/day	day/year	year	kg	day	mg	kg.day	mg/kg.day	-
Cr	0.0030	0.0543	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.6341	81136	7.81E-06	2.60E-03
Mn	0.1400	2.8740	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	33.5678	81136	4.14E-04	2.96E-03
Fe	0.3000	0.5147	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	6.0111	81136	7.41E-05	2.47E-04
Cu	0.0400	0.0191	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.2228	81136	2.75E-06	6.87E-05
Zn	0.3000	0.8134	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	9.5003	81136	1.17E-04	3.90E-04
As	0.0003	0.0138	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.1617	81136	1.99E-06	6.64E-03
Se	0.0050	0.0003	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.0030	81136	3.65E-08	7.31E-06
Cd	0.0005	0.0021	23	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.0279	81136	3.44E-07	6.88E-04
Pb	0.0036	0.1752	25	0.001	0.4	365	4	56	1460	2.5578	81136	3.15E-05	8.76E-03
ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง													
ธาตุ	RfD	C	R _c	K	ET	EF	ED	BW	LT	C x R x K x ET x EF x ED	BW x LT	ADI	CR= ADI x SF
As	1.5	0.0138	20	0.001	0.4	365	4	56	1460	0.1617	81136	1.99E-06	2.99E-06



ภาคผนวก ง

แบบสอบถาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หมายเลขแบบสอบถาม _____

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ.2561

แบบสอบถาม ความคิดเห็น บุคลากร พนักงาน และนักศึกษา ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.)

โครงการวิจัย การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมและการยอมรับของชุมชน โดยผ่านกระบวนการการมีส่วนร่วมของชุมชน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
งบประมาณประจำปี 2560

คำชี้แจง

แบบสอบถามชุดนี้ใช้รวบรวมข้อมูลเบื้องต้นและความคิดเห็นของบุคลากรและนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้เฉพาะในโครงการวิจัยนี้เท่านั้น และข้อมูลของท่านเป็นส่วนบุคคลตามกฎหมาย ผู้วิจัยจะวิเคราะห์และรายงานผลวิจัยโดยภาพรวมเท่านั้น การเปิดเผยข้อมูลจะต้องได้รับการยินยอมจากท่านผู้เป็นเจ้าของข้อมูลแล้วเท่านั้น และที่ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลวิจัยมา ณ ที่นี้ (ผู้ให้ข้อมูลจะต้องได้รับการชี้แจงข้อมูลความเป็นมาเบื้องต้นของโครงการมาก่อนแล้ว)

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

1.1 ชื่อผู้ถูกสัมภาษณ์.....

1.2 สถานภาพ

1. นักศึกษาระดับปริญญาตรี 2. นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา
 3. อาจารย์ 4. บุคลากร 5. อื่น ๆ ระบุ.....

1.3 เพศ 1. ชาย 2. หญิง1.4 อายุ (1) น้อยกว่า 20 ปี (2) 21-30 ปี (3) 31-40 ปี (4) 41-50 ปี (5) 51-60 ปี (6) > 60 ปี

1.5 การศึกษาสูงสุด

1. ประถมศึกษาหรือต่ำกว่า 2. มัธยมศึกษาตอนต้น 3. มัธยมศึกษาตอนปลาย
 4. ระดับปริญญาตรี 5. ระดับปริญญาโท 6. ระดับปริญญาเอกและสูงกว่า

1.6 ท่านพักอาศัยอยู่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยหรือไม่

- (1) อาศัย 1.1 บ้านพัก จำนวนผู้พักอาศัยอยู่ด้วย 1. มี คน 2. ไม่มี
1.2 เรือนพักบุคลากร R..... จำนวนผู้พักอาศัยอยู่ด้วย 1. มี คน 2. ไม่มี
1.3 หอพักนักศึกษา...S.....
 (2) ไม่ได้อาศัยอยู่ภายในบริเวณ มทส.

1.7 ท่านเรียน ทำงาน หรือพักอาศัยอยู่ที่ มทส. มาแล้วเป็นระยะเวลา

- (1) น้อยกว่า 5 ปี (2) 5-10 ปี (3) 10-15 ปี (4) มากกว่า 15 ปี

หมายเลขแบบสอบถาม _____

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ.2561

ส่วนที่ 2 ความคิดเห็นเกี่ยวกับสภาพปัญหาน้ำใช้ในปัจจุบันของ มทส

ท่านคิดว่าระดับปัญหาน้ำใช้ในปัจจุบันของ มทส ในข้อต่อไปนี้ มีความรุนแรงมาก-น้อยเพียงใด

1: ไม่มีปัญหา, 2: มีปัญหาเล็กน้อย, 3: มีปัญหาปานกลาง, 4: มีปัญหามาก, 5: มีปัญหาอย่างมากอย่างยิ่ง

ปัญหาที่ใช้	ระดับความรุนแรง				
	1	2	3	4	5
1. มีปัญหาไม่เพียงพอ					
2. มีปัญหาในเรื่องกลิ่น และสี					
3. มีปัญหาในเรื่องความสะอาดปลอดภัย					

ปัญหาอื่นๆ _____

ส่วนที่ 3 ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่

ข้อที่	น้ำหมุนเวียน หมายถึง	ใช่	ไม่ใช่
1	มีความหมายเดียวกับ น้ำเสีย		
2	น้ำที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย แล้วนำกลับมาใช้เลย โดยไม่ผ่านระบบบำบัดใดๆ		
3	น้ำที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย แล้วต้องนำมาเข้าสู่ระบบหมุนเวียนน้ำก่อน แล้วจึงนำไปใช้		
ความรู้เกี่ยวกับระบบน้ำหมุนเวียนของ มทส			
4	มทส. มีระบบหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่		
5	มทส. เอาน้ำที่หมุนเวียนมา มาใช้เป็นประปา		
6	มทส. เอาน้ำที่หมุนเวียนมา มาใช้เป็นน้ำซักโครกในห้องน้ำ		
7	มทส. เอาน้ำที่หมุนเวียนมา มาใช้รดน้ำต้นไม้		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หมายเลขแบบสอบถาม _____

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ.2561

ส่วนที่ 4 ความคิดเห็นเกี่ยวกับการยอมรับการหมุนเวียนน้ำ

ระดับการยอมรับน้ำหมุนเวียน

1: ไม่ยอมรับอย่างยิ่ง, 2: ไม่ยอมรับ, 3: ไม่มีความคิดเห็น, 4: ยอมรับ, 5: ยอมรับอย่างยิ่ง

ประเด็นความคิดเห็น	ระดับความคิดเห็น				
	1	2	3	4	5
4. ท่านยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใน ชักโครก หรือไม่					
5. ท่านยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ ล้างรถ หรือไม่					
6. ท่านยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ ในการรดต้นไม้ในถนน หรือไม่					
7. ท่านยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ ในการรดน้ำต้นไม้ หรือไม่					
8. ท่านยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ ในการล้างพื้นทำความสะอาด หรือไม่					
9. ท่านยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ เป็นน้ำดับเพลิง หรือไม่					
10. ท่านยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ ในการเกษตรกรรม หรือไม่					
11. ท่านยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ อาบน้ำ หรือไม่					
12. ท่านยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ เป็นน้ำอุปโภคหรือน้ำประปา หรือไม่					
13. ท่านยอมรับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ เป็นน้ำบริโภคหรือน้ำประปา หรือไม่					

ส่วนที่ 5 ความคิดเห็นเกี่ยวกับความวิตกกังวลเกี่ยวกับการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

1: ไม่กังวลเลย, 2: กังวลเล็กน้อย, 3: กังวลปานกลาง, 4: กังวลมาก 5: กังวลมากอย่างยิ่ง

ประเด็นความกังวลน้ำหมุนเวียน	ระดับความคิดเห็น				
	1	2	3	4	5
1. กังวลในเรื่องลักษณะทางกายภาพของน้ำ กลิ่น สีน้ำ ความขุ่น ความใส เป็นต้น					
2. กังวลเกี่ยวกับสารเคมีที่ละลายในน้ำหมุนเวียน ได้แก่ สารเคมีต่างๆ เช่น โลหะหนัก					
3. กังวลเกี่ยวกับเชื้อโรคในน้ำ					
4. กังวลในเรื่องค่าใช้จ่ายในการหมุนเวียนน้ำ					
5. กังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการนำน้ำไปใช้					

- สรุปท่านคิดว่า มทส. ควรหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้หรือไม่ ควร ไม่ควร
 เพราะ.....



ภาคผนวก จ

เอกสารนำเสนอ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมและการยอมรับของชุมชน โดยผ่านกระบวนการการมีส่วนร่วมของชุมชน



1

การประชุมการมีส่วนร่วม การประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทางด้านวิศวกรรมและการยอมรับของชุมชน โดยผ่านกระบวนการการมีส่วนร่วมของชุมชน

ทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2560

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร
ผู้ร่วมงานวิจัย รศ.ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร

สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2

ที่มาและความสำคัญ



การหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ประโยชน์

3

ที่มาและความสำคัญ

การนำน้ำหมุนเวียนไปใช้ประโยชน์



4

ที่มาและความสำคัญ

- ระบบไม่ซับซ้อน การควบคุมดูแลไม่ยุ่งยาก
- แยกตะกอนและสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียได้หลายชนิด
- ลดการอุดตันของเมมเบรนได้

CF Coagulation-Flocculation



Ultrafiltration

- มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ
- มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์
- มีขนาดกะทัดรัดไม่เปลืองเนื้อที่
- ไม่ต้องใช้สารเคมีในการแยกสารละลายชั่วคราวในการบำบัดน้ำ

UF



- เพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด โดยเฉพาะด้านจุลินทรีย์
- ลดการอุดตันของเมมเบรน
- ยืดอายุเมมเบรนที่ใช้งานได้นานขึ้น

CF+UF

5

ที่มาและความสำคัญ



Health Risk Assessment

AHP

มีการประเมินอย่างเป็นระบบ
เป็นกระบวนการตัดสินใจจากหลาย ๆ เกณฑ์



6

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อประเมินทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ทางด้านวิศวกรรมเคมีศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา
- การสำรวจความคิดเห็นของชุมชนในประเด็นการยอมรับ การใช้งานที่ผ่านการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ ธรณีศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา



7

ที่มาและความสำคัญ

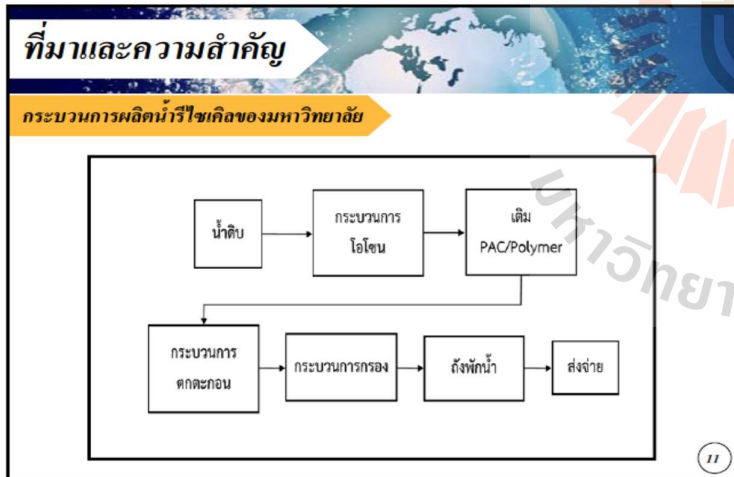
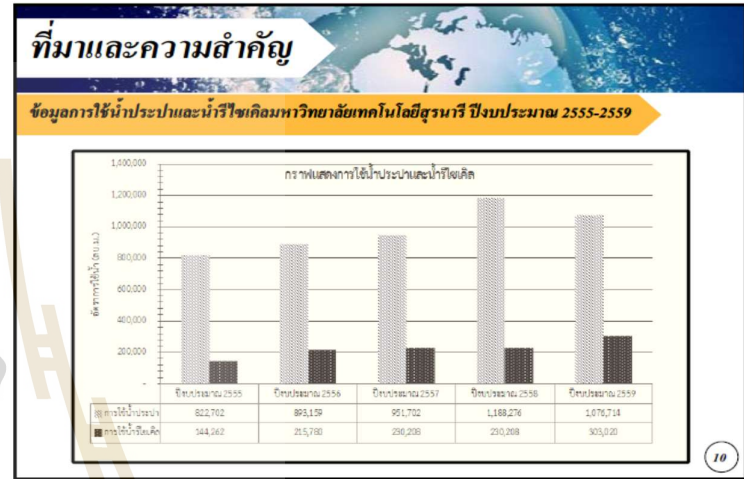
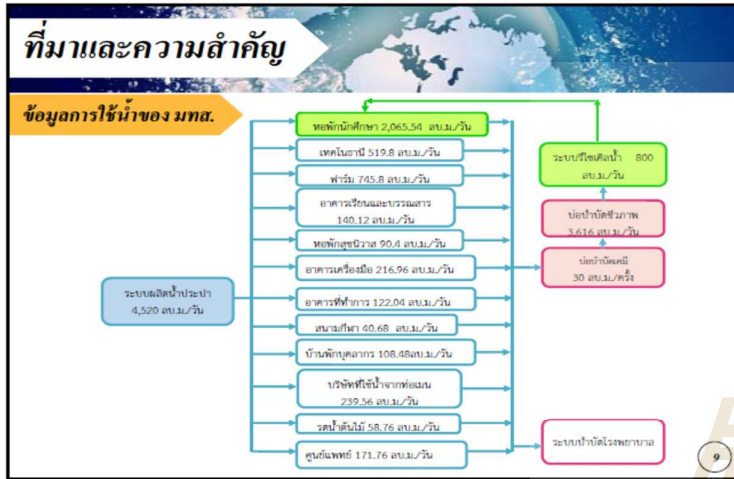
จำนวนประชากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีการศึกษา 2554-2559

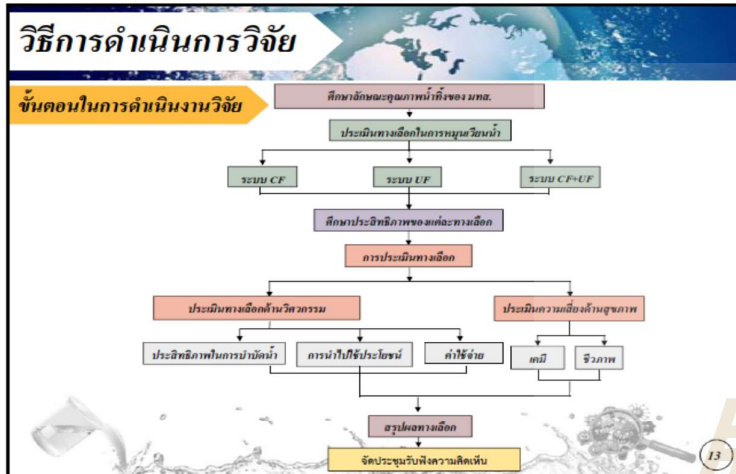
การแจกแจงจำนวนนักศึกษาปีการศึกษา 2554-2559



ปีการศึกษา	2554	2555	2556	2557	2558	2559
• วิทยาลัยฯ	9,100	9,593	10,390	11,392	13,020	15,900
• วิทยาลัยฯ	889	880	807	721	875	704
• วิทยาลัยฯ	434	458	476	528	523	531
• วิทยาลัยฯ	1,113	1,156	1,178	1,205	1,215	1,215
• วิทยาลัยฯ	408	467		523	833	

8





ข้อดีและข้อเสียของระบบหมุนเวียนน้ำ

Coagulation-Flocculation

ข้อดี

- สามารถแยกตะกอนและสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียได้หลายชนิด
- การควบคุมดูแลไม่ยุ่งยาก, ราคาถูก
- สามารถลดการอุดตันของเครื่องกรองได้เมื่อนำมาใช้เป็น Pre-treatment

ข้อเสีย

- ทำให้ pH ของน้ำเปลี่ยนแปลง
- เกิดการอุดตัน

14

ข้อดีและข้อเสียของระบบหมุนเวียนน้ำ

Ultrafiltration

ข้อดี

- มีประสิทธิภาพในการกำจัด คอลลอยด์ แบคทีเรีย และไวรัสได้พร้อม ๆ กัน
- มีขนาดกระทัดรัดไม่เปลืองเนื้อที่
- ไม่ต้องใช้สารเคมีในการแยกสารละลาย
- ใช้เวลาในการบำบัดสั้น

ระบบ Ultra filtration (UF)

ข้อเสีย

- ต้นทุนในการลงทุนสูง
- ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง
- การอุดตัน

15

ข้อดีและข้อเสียของระบบหมุนเวียนน้ำ

ระบบร่วมระหว่างกระบวนการ Coagulation-Flocculation กับ Ultrafiltration (CF + UF)

ข้อดี

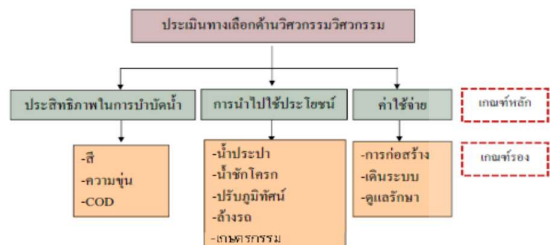
- เพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในด้านต่างๆ โดยเฉพาะด้านจุลินทรีย์
- ลดการอุดตันของเครื่องกรอง
- ยืดอายุตัวเครื่องกรองให้ใช้ได้นานมากขึ้น

ข้อเสีย

- เพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำบัด
- มีความยุ่งยากในการดำเนินการมากยิ่งขึ้น

16

เกณฑ์ในการเลือกวิธีการผลิตน้ำ Recycle

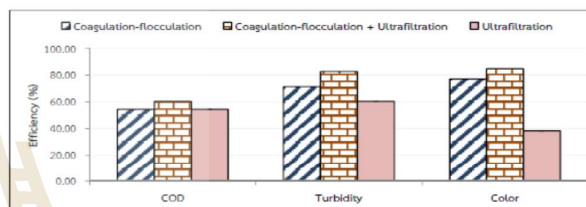


17

ผลการศึกษาวิจัย

ประสิทธิภาพในการบำบัดของแต่ละทางเลือก

ระบบ	Mean±SD		
	COD	Turbidity	Color
CF+UF	60.30±13.90	82.66±7.21	84.80±5.10
CF	54.40±15.77	71.28±9.65	77.06±11.91
UF	38.25±14.19	38.97±15.15	21.21±8.87



18

ผลการศึกษาวิจัย

ตัวอย่างการนำน้ำหมุนเวียนไปใช้ประโยชน์



19

ผลการศึกษาวิจัย

มาตรฐานคุณภาพน้ำหมุนเวียนในการนำกลับมาใช้ประโยชน์

Parameters	Units	Toilet Flushing	Road sweeping/ Fire control	Urban landscaping	Vehicle washing	Construction
pH		6.0-9	6.0-9	6.0-9	6.0-9	6.0-9
Color		20	20	20	20	20
Odor		No odor	No odor	No odor	No odor	No odor
Turbidity	NTU	5	10	10	5	20
TSS	mg/L	1500	1500	1000	1000	-
BOD ₅	mg/L	10	15	20	10	15
Ammonia-N	mg/L	10	10	20	10	20
LAS (Linear aliphatic sulfonic acids)	mg/L	1.0	10	1.0	0.5	1.0
Fe	mg/L	0.3	-	-	0.3	-
Mn	mg/L	0.1	-	-	0.3	-
DO	mg/L	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Residual Cl ₂	mg/L	Contact 10 min later ≥ 1.0, The endpoint of pipe network ≥ 0.2				
Total coliform	CFU/L	3	3	3	3	3

20

ผลการศึกษาวิจัย

มาตรฐานคุณภาพน้ำด้านอุปโภค-บริโภค และด้านเกษตรกรรม

Parameters	Units	Water supply		Agricultural Irrigation				
		WHO (2011)	WHO and Ayn (1985)	WHO (1988)	US EPA (2006)	ANZECC (2000)	Spanish Royal Decree (2007)	Italian Decree (2001)
Physical quality								
Sodium (Na)	mg/L	200	3-9; >3 ^a	-	-	115-230	-	-
Color	Pt-Co	15	-	-	-	-	-	-
Turbidity	NTU	4	-	-	-	-	-	-
TDS	mg/L	1000	250-2000 ^a	-	500-2000	-	-	-
TSS	mg/L	-	-	-	-	-	20	10
pH	-	6.5-8.5	6.5-8	-	6	-	-	6-8.5
Pathogenicity								
E. coli	CFU/100 mL	Not found	-	-	-	-	100	100
Faecal coliforms	CFU/100 mL	-	-	≤1000 ^a	-	-	-	-
Total coliforms (TC)	CFU/100 mL	-	-	-	0-1000 ^a	-	-	-

21

ผลการศึกษาวิจัย

คุณภาพน้ำกับการนำไปใช้ประโยชน์ของแต่ละทางเลือก

ระบบ	น้ำประปา	ล้างรด	ภูมิทัศน์	เกษตรกรรม	ซักโครก	รวม	ลำดับความสำคัญ
CF+UF	✓	✓	✓	✓	✓	5	0.38
CF	✗	✓	✓	✓	✓	4	0.31
UF	✗	✓	✓	✓	✓	4	0.31
รวม	1	3	3	3	3	13	1

22

ผลการศึกษาวิจัย

ค่าใช้จ่ายของแต่ละทางเลือก



ระบบ	ค่าใช้จ่าย (บาท/ลูกบาศก์เมตร)
CF+UF	43.37
CF	0.79
UF	42.58

23

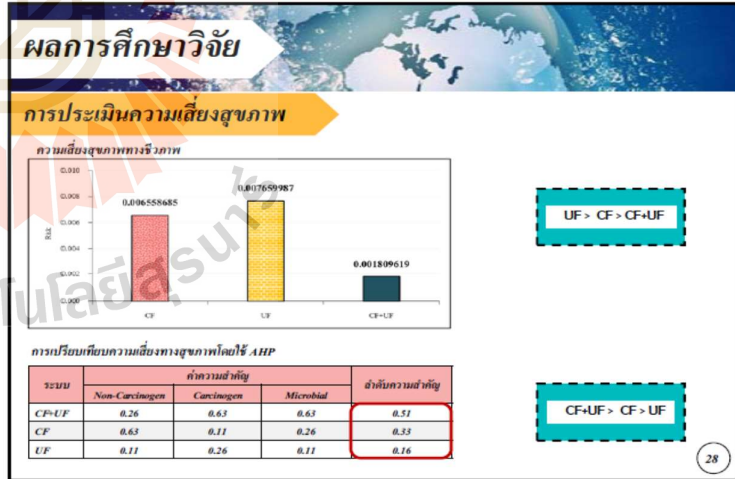
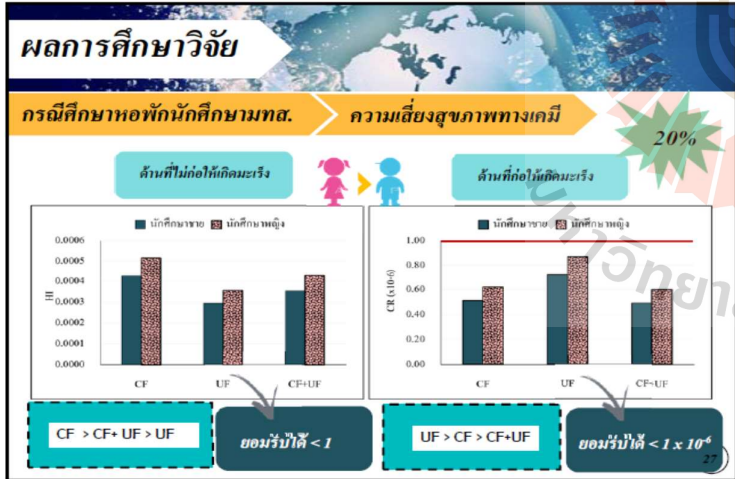
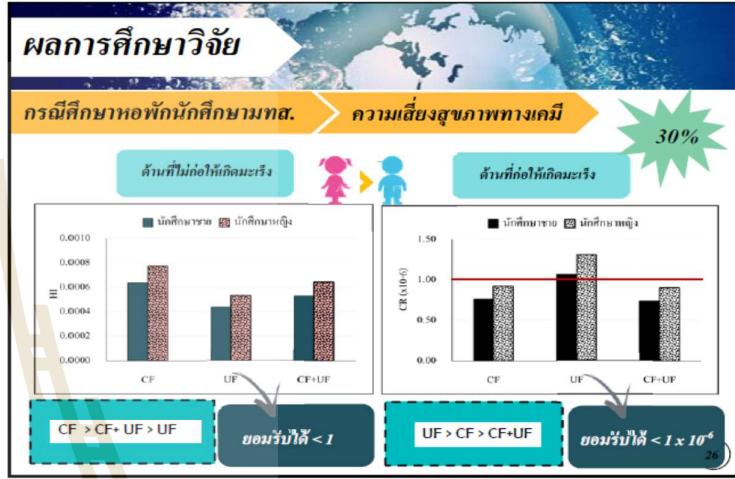
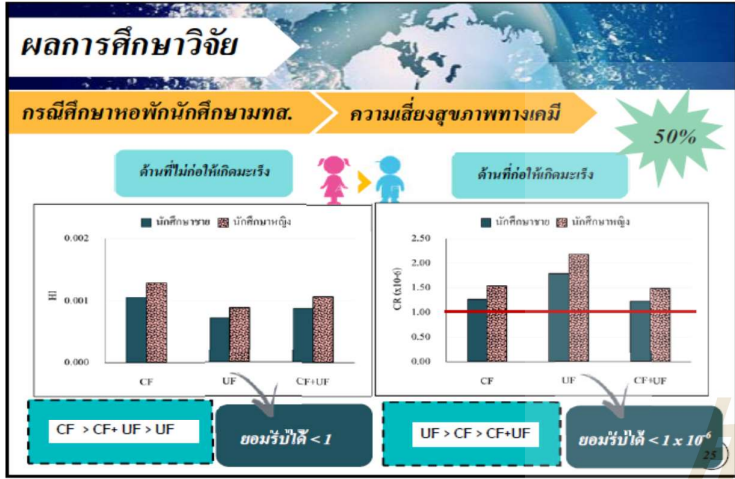
ผลการศึกษาวิจัย

การประเมินทางด้านวิศวกรรม

ระบบ	คุณภาพน้ำ (0.63)	ประสิทธิภาพ (0.26)	ค่าใช้จ่าย (0.11)	ลำดับความสำคัญ
CF+UF	0.24	0.14	0.01	0.40
CF	0.20	0.08	0.07	0.35
UF	0.20	0.04	0.03	0.26

CF+UF > CF > UF

24



ผลการศึกษาวิจัย

สรุปผลการประเมินทางเลือก

ระบบ	ค่าความสำคัญ		ลำดับความสำคัญ
	ด้านวิศวกรรม (0.5)	ด้านความพึงพอใจ (0.5)	
CF+UF	0.40	0.51	0.45
CF	0.35	0.33	0.34
UF	0.26	0.16	0.21

$$CF+UF > CF > UF$$

29

ความคิดเห็นเกี่ยวกับ ผลการศึกษาโครงการวิจัย



30

จากผลการศึกษาของโครงการวิจัย



31

ทางเลือกในการหมุนเวียนน้ำ

ทางเลือกที่ 1 CF
ระบบการตกตะกอนด้วยเคมี

ทางเลือกที่ 2 UF
ระบบเยื่อกรอง

ทางเลือกที่ 1 CF+UF
ระบบร่วมของทั้งสองแบบ

32

จากผลการศึกษาของโครงการวิจัย

ท่านคิดว่าทางเลือกหาก มทส จะนำน้ำ
หมุนเวียนกลับมาใช้ ควรนำมาใช้ในสัดส่วน
เท่าไร

100% 75% 50%

33

จากผลการศึกษาของโครงการวิจัย

หากนำน้ำมาหมุนเวียนใช้ใหม่
ท่านมีความกังวลเรื่องอะไรบ้าง

ค่าใช้จ่าย
ผลกระทบต่อ
ทางด้านสุขภาพ
คุณภาพน้ำ
สี กลิ่น

34

จากผลการศึกษาของโครงการวิจัย

หากนำน้ำมาหมุนเวียนใช้ใหม่
ท่านคิดว่าควรนำมาใช้ทางด้านใด

35

การนำน้ำหมุนเวียนไปใช้ประโยชน์

- ❖ น้ำประปา
- ❖ รถน้ำต้นไม้
- ❖ ใช้เป็นน้ำซักโครก
- ❖ น้ำลดฝุ่นบนถนน
- ❖ น้ำล้างรถ
- ❖ การเกษตรกรรม

36

การนำน้ำหมุนเวียนไปใช้ประโยชน์

ทำอย่างไรท่านจะยอมรับ
การนำน้ำหมุนเวียนไปใช้ประโยชน์



37



จบการนำเสนอ



38



ภาคผนวก จ

ผลงานตีพิมพ์

J. Yimratanabovorn, O. Rungrueang, W. Wonglertarak and W. Boonchai. (2018). Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) for the Assessment of Water Reclamation Alternative. The IWA Regional Conference on Opportunity for Water Reuse in Southeast Asia, October 30 - November 02, 2018, Phuket, Thailand

J. Yimratanabovorn, W. Wonglertarak, O. Rungrueang, C. Hirunteeyakul and B. Wichitsathein. (2018). Performance Comparison of Coagulation, Ultrafiltration and Combined Coagulation and Ultrafiltration for Water Reclamation. International Journal of Environmental Science and Development, vol.9, No.8, 200-203.



IWA Water Reuse 2018

IWA Regional Conference on Opportunities
for Water Reuse in Southeast Asia



ABSTRACT & PROCEEDING BOOK

October 30 – November 2, 2018
Phuket, Thailand

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



The Regional IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse
October 30 – November 2, 2018
Phuket Graceland Resort & Spa, Phuket, Thailand

WR-A19

Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) for the Assessment of Water Reclamation Alternative

Y. Jareeya^{a,*}, O. Oranee^a, W. Watcharapol^a and W. Boonchai^a

^a*School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand.*

*Corresponding Author's E-mail: chareeya@sut.ac.th

Abstract

The water scarcity problem is becoming serious problem as a result of the accelerated industrial and agricultural and an increased population. Reclaimed water offers prospects as an alternative water resource. The selection of suitable water reclamation alternative involves multiple objectives or criteria. This study uses analytical hierarchy process (AHP) for select suitable water reclamation process. The objective hierarchy criterion is considered based on three factors: optional usages, removal efficiency and capital investment. The results obtained that the integration of CF+UF is the most suitable alternative for water reclamation. The study indicates that the AHP are powerful tools which can be used for implementation of appropriate water reclamation process considering the multiple objective-decisions. By doing laboratory scale studies, optional usages, removal efficiencies and capital investment criteria for full scale process can be worked out based on the engineering design and expert analysis and an appropriate water reclamation alternative can be recommended for implementation

Keywords: Water reclamation; Analytic hierarchy process; AHP; Ultrafiltration; Coagulation-flocculation; integration process

1. Introduction

Water is the source of life and one of the most important parts of the global ecological system. The water scarcity problem is becoming serious problem as a result of the accelerated industrial and agricultural and an increased population. Therefore, it is extremely urgent to alleviate the water scarcity by studies on water reclamation technology. Reclaimed water offers prospects as an alternative water resources (Pedro-Monzonis et al., 2015; Hess et al., 2015). It is one of the effective ways to reduce sources of pollution and solve the issue of water scarcity as an effective method of saving water resources. Water reclamation is very demanding in terms of water quality and health security. Coagulation-flocculation (CF) is popular for using as water reclamation process. It is well known to be inexpensive process and easy operation for water reclamation process (Yu et al. 2016). Ultrafiltration (UF) become an interesting alternative process for water reclamation because of relatively low-energy and high efficiency filtration process can effective removing microorganisms and successfully employed in water reuse applications (Ferrer et al, 2015). Recently, the integration of coagulation-flocculation and ultrafiltration process (CF+UF) is interesting alternative for water reclamation technology in order to improve the NOM and microorganism removal efficiency (Kabsch-Korbutowicz, 2005) and to increase the flux of water and reduce the fouling effects (Yu et al, 2016). The selection of the suitable water reclamation alternative is usually uncertain and complex. Many factors may be important for the decision-making process. Therefore, in decision making to select appropriate process is necessary to consider the efficiency of process, cost of construction and control system and the water quality for optional usages. Analytic Hierarchy Process (AHP) is useful for handling multiple criteria and objectives in the decision-making process. The advantage of the AHP technique is that it provides a systematic approach for consolidating information about alternatives using multiple-criteria. It can be applied for complicated multicriteria decision-making to obtain scientific and reasonable results. It has been accepted by the international scientific community as a robust and flexible multicriteria decision-making tool to deal with complex decision problem (Chang et al, 2009). The objective of this study is to apply the AHP using the previous results of Yinrattanaovorn et al. (2018) for optimum selection of water reclamation alternative. The AHP is used to construct the hierarchy of criteria are based on three factors viz. optional usages, removal efficiencies and capital investment. This study is intended to utilize AHP for facilitating the related environmental decision-making process and it will then be applied to actual water treatment alternative for verification and demonstration.

2. Materials and method

2.1 The Analytical Hierarchy Process (AHP)

The Analytical Hierarchy Process (AHP) is designed to structure a decision process in a scenario affected by multiple independent factors. In the analysis, a complex problem can be divided into several sub-problems that are organized according to hierarchical levels, where each level denotes a set of criteria or attributes related to each sub-problem. The top level of the hierarchy denotes the factors of the respective upper levels. The analysis is based on three fundamental principles: breaking down the problem; pairwise comparison of the various alternatives; synthesis of the preferences (Bottero et al, 2011). It is an objective weighing technique for setting the weighing scale for qualitative and quantitative data. A general description of the AHP process would be helpful and the steps described below.

Step 1 Development of the structure of the decision-making process: The decision-making structure must be defined through the main objective. Such an objective should later be divided into groups that are made up of various elements.

Step 2 Pairwise comparison: Pairwise comparisons are made to establish the relative importance of the different elements. The comparisons are made with the Saaty's Fundamental Scale. The numerical judgements established at each level of the network make up pair matrices. The weighted priority is calculated through pairwise comparisons between elements. (Saaty, 2003). The comparisons are generally made on the scale of 1-9. A matrix such as "A" can be formed based on these pairwise comparison. The result of pairwise comparison is a_{ij} if $a_{ij}=1$ and $a_{ji}=1/a_{ij}$. The following criteria in assigning the preferences to factors.

- 1 Equally important: two decision factors equally influence the parent decision factor
- 3 Moderately more important: one decision factor is moderately more influential than the other
- 5 Strongly more important: one decision factor has stronger influence than the other
- 7 Very strongly more important: one decision factor has significantly more influence over the other
- 9 Extremely more important: the difference between influences of the two decision factors is extremely significant
- 2, 4, 6, 8 intermediate judgment values: judgment values between equally, moderately, strongly, very strongly, and extremely

The consistency index (CI) is normally used to check the consistency of matrix 'A' as;

$$CI = \frac{1}{n-1} (\lambda_{max} - n)$$

Where λ_{max} is the maximum eigenvalue and n is the number of factors in the judgement matrix. Accordingly, Saaty (1980) defined the consistency ratio CR as

$$CR = CI/RI$$

Where RI is the consistency index of a randomly generated reciprocal matrix from 9 point scale, with forced reciprocals. The consistency ratio CR is a measure of how a given matrix compares to a purely random matrix in terms of the consistency index. A value of the consistency ratio $CR \leq 0.1$ is considered acceptable. The RI has been purposed for various n , which is al shown below for the sake of continuity.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Step 3 Final priorities: The priority weight is synthesized to obtain the overall ranking of the alternatives and find appropriate process. The real example of AHP process in this case study make it more understanding.

2.2 Application to the study case

In the case study, alternatives of water reclamation include alternative 1 Integrate of coagulation-flocculation and ultrafiltration (CF+UF), alternative 2 Coagulation-flocculation (CF), and alternative 3 Ultrafiltration (UF). The selection of water reclamation alternative is associated with distinct multi-criteria. Fig. 1 illustrates the hierarchical levels criteria. The main objective is select suitable water reclamation alternative. The criteria are optional usages, removal efficiency and capital investment. The sub-criteria of optional usages consider water

The Regional IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse
 October 30 – November 2, 2018
 Phuket Graceland Resort & Spa, Phuket, Thailand

quality that meet water quality standard in purpose of water supply, toilet flushing, urban landscaping and vehicle washing. The sub-criteria of removal efficiency are including removal efficiency in terms of chemical oxygen demand (COD) turbidity and color. The sub-criteria of capital investment considering in terms of capital cost, operation and maintenance cost. The weighted priority is calculated through pairwise comparisons between elements in level to finding the total priority weight are obtain the overall ranking of all criteria and select the suitable alternative.

To determine the relative importance of the criteria. A total number of three pairwise comparisons were made to calculate the priority weights and these are shown in Table 1. The weight of optional usages criterion is 0.63 as compared to 0.26 for removal efficiency and 0.11 for the capital investment criteria, indicating that the importance of the optional usage is more than removal efficiency and capital investment. The optional usages are highest criteria weight because of they are affect to human health.

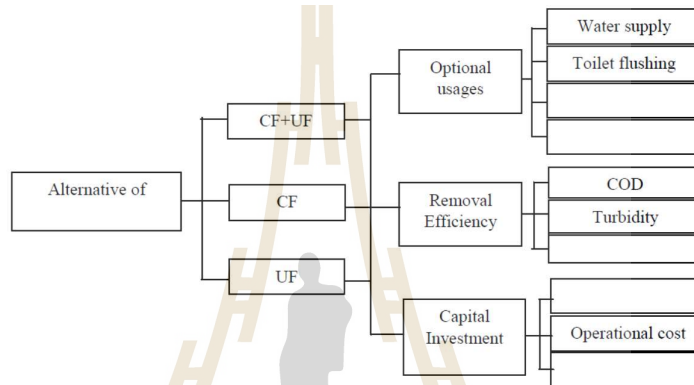


Fig. 1. The hierarchal levels criteria of water reclamation alternative

Table 1 The pairwise comparison of objective criteria

Criteria	Optional usages	Removal efficiency	Capital investment	Priority Weights
Optional usages	1	3	5	0.63
Removal efficiency	1/3	1	3	0.26
Capital investment	1/5	1/3	1	0.11
Total	1.53	4.33	9.00	1

3. Results and discussion

Determine the relative importance of the sub-criteria. The optional usages consider water quality that meet water quality standard in purpose of water supply, toilet flushing, urban landscaping and vehicle washing. The water quality were compared with water quality standard of water supply (WHO, 2011), toilet flushing, urban landscaping and vehicle washing (Rodrigues, 2002). The priority weights results as shown in Table 2, that the optional usages for CF+UF (0.4) higher than CF (0.3) and UF (0.3), indicating that the importance of CF+UF is more than single CF and UF. This implies that the CF+UF has positive features in term of optional usages.

Table 2 The water quality that meet water quality standard of three alternatives

System	Water supply	Vehicle washing	Urban landscaping	Toilet flushing	Total	Priority Weights
CF+UF	✓	✓	✓	✓	4	0.4
CF	✗	✓	✓	✓	3	0.3
UF	✗	✓	✓	✓	3	0.3
Total	1	3	3	3	10	1

The Regional IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse
 October 30 – November 2, 2018
 Phuket Graceland Resort & Spa, Phuket, Thailand

Determine the relative importance of the sub-criteria. The removal efficiency in terms of COD, turbidity and color by using data from the previous research of Yimratanabovorn et al (2018). The result of removal efficiency of CF+UF, CF and UF processes are shown in Table 3 illustrates the mean removal efficiency of CF+UF CF, and UF. As shown Fig. 2, the removal efficiency of three alternatives were compared. It shown that the CF+UF process had higher removal efficiency of COD, Turbidity and color than the single CF and UF process. A total number of three pairwise comparisons were made to calculate the priority weights and these are shown in Table 4. The weight of COD, turbidity and color removal efficiency for UF+CF (0.63) higher than CF (0.26), and UF (0.11) indicating that the importance of UF+CF is more than single CF and UF for removal efficiency. This implies that the CF+UF has positive features in term of removal efficiency.

Table 3 The COD, Turbidity and color removal efficiency of three alternative (Yimratanabovorn et al, 2018).

Criteria	Mean ± SD		
	COD	Turbidity	Color
CF+UF	60.30 ± 13.90	82.66 ± 7.21	84.80 ± 5.10
CF	54.40 ± 15.77	71.28 ± 9.65	77.06 ± 11.91
UF	38.25 ± 14.19	38.92 ± 15.15	21.21 ± 8.87

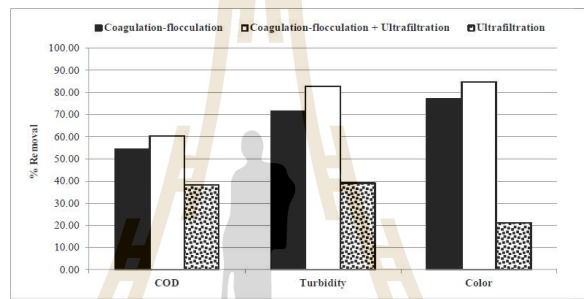


Fig. 2. Comparison removal efficiency of three alternatives water reclamation processes

Table 4 The pairwise comparison of COD turbidity and color of three alternatives

System	Pairwise Comparisons									Priority Weights		
	COD			Turbidity			Color			COD	Turbidity	Color
	CF+UF	CF	UF	CF+UF	CF	UF	CF+UF	CF	UF			
CF+UF	1	3	5	1	3	5	1	3	5	0.63	0.63	0.63
CF	1/3	1	3	1/3	1	3	1/3	1	3	0.26	0.26	0.26
UF	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	0.11	0.11	0.11
Total	1.53	4.33	9.00	1.53	4.33	9.00	1.53	4.33	9.00	1	1	1

Determine the relative importance of the sub-criteria. The capital investment in terms of capital cost, operation and maintenance cost. The capital investment of CF+UF is \$0.39/m³, CF is \$0.10/m³ (Ni et al, 2003) and UF is \$0.29/m³ (Drouiche et al, 2001). A total number of three pairwise comparisons were made to calculate the priority weights and these are shown in Table 5 capital investment for CF (0.63) higher than UF (0.26) and CF+UF (0.11), indicated that the importance of CF is more than UF and CF+UF. This implies that the CF+UF has positive features in term of capital investment.

Table 5 The pairwise comparison of capital investment of three alternatives

System	Pairwise Comparisons			Priority Weights
	CF	UF	CF+UF	
CF	1	3	5	0.63
UF	1/3	1	3	0.26
CF+UF	1/5	1/3	1	0.11
Total	1.53	4.33	9.00	1

The Regional IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse
October 30 – November 2, 2018
Phuket Graceland Resort & Spa, Phuket, Thailand

The total priority weight of all criteria was summarized as shown in Table 6 the total priority weights of CF+UF (0.49) is higher than single CF (0.29) and UF (0.23). Thus, CF+UF is the suitable process for water reclamation in this study. The study indicates that AHP is powerful tools which can be used for implementation of appropriate water reclamation process considering the multiple objective-decisions.

Table 6 The summary of weight priority of all criteria for water reclamation alternatives assessment

System	Priority Weights of sub-criteria			Priority Weights of criteria			Total Priority Weights
	Optional Usages	Removal Efficiency	Capital Investment	Optional Usages (0.2)	Removal Efficiency (0.6)	Capital Investment (0.2)	
CF+UF	0.40	0.63	0.63	0.25	0.16	0.07	0.49
CF	0.30	0.26	0.26	0.19	0.07	0.03	0.29
UF	0.30	0.11	0.11	0.19	0.03	0.01	0.23
Total	1	1	1	0.63	0.26	0.11	1.00

4. Conclusion

The paper illustrates a comparison of three water reclamation alternative (the integration of CF+UF, single CF and single UF) have been considered with multicriteria analysis; optional usages, removal efficiencies and capital investment. The results obtained that the integration of CF+UF is the most suitable alternative for water reclamation. The study indicates that the AHP are powerful tools which can be used for implementation of appropriate water reclamation process considering the multiple objective-decisions. By doing laboratory scale studies, optional usages, removal efficiencies and capital investment criteria for full scale process can be worked out based on the engineering design and expert analysis and an appropriate water reclamation alternative can be recommended for implementation.

Acknowledgement

This research was supported by Suranaree University of Technology, Thailand.

References

- [1] Bottero, M., Comino, E. and Riggio, V. Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environmental Modelling & Software*, 26 (2011) 1211-1224.
- [2] Chang, N., Chang, Y. and Chen, H. Fair fund distribution for a municipal incinerator using GIS-based fuzzy analytic hierarchy process. *Journal of Environmental Management*, 90 (1) (2009) 441-454.
- [3] Drouiche, M., Lounici, H., Belhocine, D., Grib, H., Piron, D. and Nameri, N. Economic study of the treatment of surface water by small ultrafiltration units. *Water SA*, 27 (2) (2001) 199-204.
- [4] Ferrer, O., Casas, S., Galvan, C., Lucena, F., Bosch, A., Galofre, B., Mesa, J., Jofre, J. and Bernat, X. Direct ultrafiltration performance and membrane integrity monitoring by microbiological analysis. *Water Res.*, 83 (2015) 121-131.
- [5] Pedro-Monzonis, M., Solera, A., Ferrer, J., Estrela, T., and Paredes-Arquiola, J. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology*, 527 (2015) 482-493.
- [6] Hess, T.M., Lennard, A.T., and Daccache, A. Comparing local and global water scarcity information in determining the water scarcity footprint of potato cultivation in Great Britain. *Journal of Cleaner Production*, 87 (2015) 666-674.
- [7] Kabsch-Korbutovicz, M. Application of ultrafiltration integrated with coagulation for improved NOM removal. *Desalination*, 174 (2005) 13-22.
- [8] Ni, C.H., Chen, J.N., Tsai, Y.C., Chen, T.K., Chen, W.B. and Chen, C.H. Recycling and reuse of wastewater from a new developed community using sand filtration, ultrafiltration, and ozone. *J. Environ. Sci. Health A*, 38 (10) (2003) 2339-2348.
- [9] Pophali, G.R., Chelani, A.B. and Dhodapkar, R.S. Optimal selection of full scale tannery effluent treatment alternative using integrated AHP and GRA approach. *Expert Systems with Applications*, 38 (2011) 10889-10895.
- [10] Rodrigues, S. *China Reclaimed Water Reuse Regulations*. International Water Association, United Kingdom (2002).
- [11] Saaty, R.W. (2003). *Decision Making in Complex Environments: the Analytic Hierarchy Process (AHP) for Decision Making and the Analytic Network Process (ANP) for Decision Making with Dependence and Feedback*. RWS Publications, Pittsburgh.
- [12] WHO. *Guidelines for Drinking Water Quality*, 4th ed. (2011).
- [13] Saaty, T.L. *The analytical hierarchy process*. New York: McGraw-Hill (1980).
- [14] Yimratanoovorn, J., Wonglerarak, W., Rungmeang, O. and Wichitsathien, B. Performance comparison of coagulation, ultrafiltration and combined coagulation and ultrafiltration for water reclamation. *International Journal of Environmental Science and Development* (2018).
- [15] Yu, W., Yang, Y. and Graham, N. Evaluation of ferrate as a coagulant aid/oxidant pretreatment for mitigating submerged ultrafiltration membrane fouling in drinking water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 298 (2016): 234-242.
- [16] Zahi, A.S. Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) In the Evaluation and Selection of an Information System Reengineering Projects. *Journal of Computer Science and Network Security*, 11 (1) (2011) 172-177.
- [17] Zeng, G., Jiang, R., Huang, G., Xu, M. and Li, G. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *Journal of Environmental Management*, 82 (2007) 250-259.

International Journal of Environmental Science and Development

CONTENTS

Volume 9, Number 8, August 2018

Regime Shift Analysis and Numerical Simulation for Effective Ecosystem Management	192
<i>Hock Lye Koh, Wai Kiat Tan, and Su Yean Teh</i>	
Performance Comparison of Coagulation, Ultrafiltration and Combined Coagulation and Ultrafiltration for Water Reclamation	200
<i>J. Yimranabovorn, W. Wonglertarak, O. Rungruang, C. Hirunteeyakul, and B. Wichitsathien</i>	
Evaluation of Efficiency and Biodegradability of Lubricant Oil Treated by Sequencing Batch Reactor (SBR)	204
<i>Boonchai Wichitsathian and Watcharapol Wonglertarak</i>	
The Assessment of the Environmental and Economic Performances for Improving Existing Educational Building: A Case Study of Bangkok, Thailand	208
<i>Athitinnon Phupadtong, Nantamol Limphitakphong, Premrudee Kanchanapiya, Thanapol Tantisattayakul, and Orathai Chavalparit</i>	
Comparative Life Cycle Assessment of Clinker Production with Conventional and Alternative Fuels Usage in Turkey	213
<i>S. Çankaya and B. Pekey</i>	
Optimisation of Electrochemical Treatment of Artificial Wastewater using Cyclic Voltammetry	218
<i>Anirudh B. T. Nelabhotla and Carlos Dinamarca</i>	
Assessing Potential of Rainwater Harvesting: Case Study Building in Bangkok	222
<i>Paron Monjaiang, Nantamol Limphitakphong, Premrudee Kanchanapiya, Thanapol Tantisattayakul, and Orathai Chavalparit</i>	
Review on Combined Methods for Sustainability Assessment and Development of Criteria-Set for a Systematization and Comparison Framework	226
<i>Jan Bitter, Daniela Janssen, René Vossen, and Frank Hees</i>	

Performance Comparison of Coagulation, Ultrafiltration and Combined Coagulation and Ultrafiltration for Water Reclamation

J. Yinratanabovorn, W. Wonglertarak, O. Rungrueang, C. Hirunteeyakul, and B. Wichitsathein

Abstract—Reclaimed water offers prospects as an alternative water resource. Many technologies have been developed to treat reclaimed wastewater technologies. The membrane technology is considered one of the most effective water treatment technologies for water reclamation. Ultrafiltration membranes are particularly effective at removing microorganisms in wastewater, particularly protozoa. Coagulation-flocculation is a feasible process to reclaim water and widely used as a pre-treatment. The aim of this study is to investigate the performance of water reclamation processes: the single coagulation-flocculation, the single ultrafiltration and the combined coagulation-flocculation and ultrafiltration. The pilot scale laboratories of each process was operated and have been characterized in order to evaluate the performance. The results of combined CF+UF process had the highest performance of COD, turbidity and color removal efficiencies than the single CF process and the single UF process. The combination of CF+UF helps to improve the process performance and enhanced COD, turbidity and color removal efficiencies of combined processes. The reclaimed water from combined CF+UF process can be used for vehicle washing, urban landscaping and toilet flushing purposes. In addition, can be used as water supply. However, to use instead of water supply should be evaluated the bacteria indicators, hygienic safety and economic feasibility.

Index Terms—Reclaimed water, ultrafiltration, coagulation-flocculation.

I. INTRODUCTION

Reclaiming and reusing wastewater has been implemented as an important strategy to ensure sustainable development and alleviate water shortage. Even though reclaimed wastewater has been a stable source of water supplies but in fact, reclaimed wastewater cannot be substituted for the diverse applications of water, mainly because of the difficulty to complete satisfy the supplied water quality standards. There is no doubt that effective and efficient wastewater reclamation process will be one important consideration. Many technologies have been developed to treat reclaimed wastewater technologies to fulfill the satisfying water user. Reclaimed wastewater should fulfill following criteria: hygienic safety, aesthetics, environmental tolerance and technical and economic feasibility [1]. The membrane technology is considered one of the most effective water

treatment technology for water reclamation because it is able to tally remove various contaminants, including bacteria, suspended solids, and organic particle bigger than the pore size, however, there are restrictions that arise because of high capital, exploitation cost and membrane fouling [2], [3]. Ultrafiltration membranes (UF) are particularly effective at removing microorganisms in wastewater, particularly protozoa such as *Cryptosporidium* and bacteria such as *Escherichia coli* [4]. Coagulation-flocculation is a feasible process to reclaim municipal wastewater and widely used as a pre-treatment. Moreover, coagulation is the most commonly employed advanced wastewater treatment process for economic reasons [5]. The aim of this study is to investigate the performance of water reclamation processes: the single coagulation-flocculation, the single ultrafiltration and the combined coagulation-flocculation and ultrafiltration. The pilot scale laboratories of each process was operated and have been characterized in order to evaluate the performance. In addition, the water quality of each process has been considered for varied purposes such as toilet flushing, car wash, agricultural irrigation and water supply.

II. MATERIALS AND METHOD

The study was carried out to reclaim effluent from wastewater treatment system of Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima province, Thailand.

A. The Pilot-Scale Water Reclamation Plants

The three alternatives of water reclamation processes were set as pilot scale in laboratory; 1) single coagulation-flocculation (CF) 2) single Ultrafiltration (UF) and 3) combined coagulation-flocculation and Ultrafiltration (CF+UF). Schematic of three alternatives were shown in Fig. 1, 2 and 3 respectively.

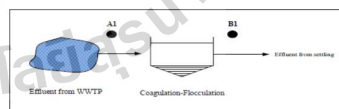


Fig. 1. Schematic of alternatives I single coagulation-flocculation process (CF).

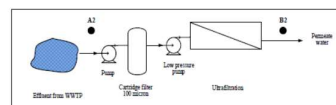


Fig. 2. Schematic of alternative II single ultrafiltration process (UF).

Manuscript received April 12, 2018; revised June 26, 2018.

The authors are with Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand (e-mail: chareeya@sut.ac.th, w_watcharapol@hotmail.com, oraneer@gmail.com, boonchai@sut.ac.th, chow@sut.ac.th).

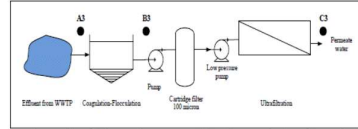


Fig. 3. Schematic of alternative III combined coagulation-flocculation and ultrafiltration process (CF+UF).

B. The Pilot-Scale of Single CF Process

The coagulation-flocculation studies were carried out using the jar test method to determine the optimum pH range, suitable dose of polyaluminium chloride (Al₂(OH)₃Cl₃) or PAC and polymer for each sampling wastewater.

C. The Performance of Single CF Laboratory Scale

The coagulation studies were carried out by use the optimum pH range, volume of PAC and polymer from chemical of coagulation study. Water samples were collected at point A1 and B1 to calculate removal efficiencies by using Eq. (1).

$$\% \text{Removal Efficiency} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

D. The Pilot-Scale of Single UF Laboratory Scale

In this study, the UF process was operated at permeate flux 80 L/m².hr and ratio of permeate and retentate was 25:75. Water samples were collected at A2 and B2 to calculate removal efficiencies by using Eq. (1).

E. The Pilot-Scale of Combined CF+UF Laboratory Scale

The wastewater was feed to combined CF+UF pilot scale and water samples were collected at A3 B3 and C3 to calculate removal efficiencies by using Eq. (1).

F. Water Sampling

Water samples were analyzed for various parameters by analytical methods as shown in Table I.

TABLE I: PARAMETER AND ANALYTICAL METHODS

Parameters	Analytical methods
Physical and Chemical quality	
Turbidity	2130 B. Nephelometric Method
Color	2120 D. Spectrophotometric Method
BOD	5210 B. 5-day BOD Test Method
Iron	3500-Fe B. Phenanthroline Method
Manganese	3500-Mn B. Persulfate Method
TSS	2540 D. Gravimetric Method
TDS	2540 C. Gravimetric Method

III. RESULTS AND DISCUSSION

The influent of water reclamation pilot scales that were taken from effluent of wastewater treatment system (WWS) of SUT, were characterized during the experiment and the values indicate that the influent correspond to the typical low COD and turbidity as can be shown in Table II.

A. The Optimal Conditions for Coagulation-Flocculation Test

The results of jar test were carried out to determine the chemicals and optimum pH for coagulation-flocculation

process. They were found the optimum pH were in range of 6.5-8.5 and the volume of PAC and polymer were 3.41ml/L and 1.45 ml/L respectively.

TABLE II: THE INFLUENT CHARACTERISTICS OF WATER RECLAMATION LABORATORY SCALES

Parameter	Unit	Min-Max	Mean±SD
COD	mg/L	17.40-41.50	28.99±7.99
Color	Pt-Co	63-134	98±23.71
Turbidity	NTU	1.83-8.90	5.34±1.91
TSS	mg/L	19.00-58.67	36.81±16.04
TDS	mg/L	278.67-593.33	399.19±89.91
pH	-	7.2-9.1	7.74±0.54

B. The Performance of Single Coagulation-Flocculation (CF)

The results of optimum conditions for single coagulation process as summarized in A were carried out to treated effluent from WWS of SUT for measuring the performance of CF process. The water samples before and after treated by CF process were analyzed and calculated the removal efficiencies. The results of COD turbidity and color removal efficiencies of coagulation process were presented in Fig. 4. They showed CF process had COD, turbidity and color removal efficiencies were in range of 30-75 %, 55.94-85.53% and 52.76-91.0 % respectively. The results indicated that CF had good removal efficiencies for all parameters over than 50%.

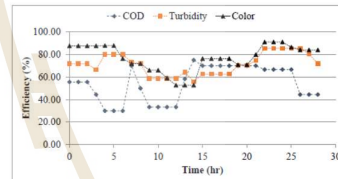


Fig. 4. The performance of single coagulation-flocculation pilot scale in COD, turbidity and color removal efficiencies.

C. The Performance of Single Ultrafiltration Process (UF)

The water samples before and after treated by UF process were analysed and calculated the removal efficiencies. The water samples before and after treated by UF process were analysed and calculated the removal efficiencies. The results of COD turbidity and color removal efficiencies of coagulation process were presented in Fig. 5. They showed UF process had COD, turbidity and color removal efficiencies were in range of 13.33-62.50 %, 16.60-65.60% and 8.08-43.02 % respectively. The results indicated that CF process were not good removal efficiencies especially for color.

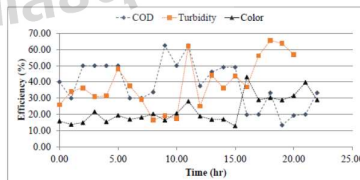


Fig. 5. The performance of ultrafiltration process (UF) laboratory scale in COD, turbidity and color removal efficiencies.

D. The Performance of Combined Coagulation-Flocculation and Ultrafiltration Process (CF+UF)

The water samples before and after treated by CF+UF process were analysed and calculated the removal efficiencies. The water samples before and after treated by CF+UF process were analysed and calculated the removal efficiencies. The results of COD turbidity and color removal efficiencies of coagulation process were presented in Fig. 6. They showed CF+UF process had COD, turbidity and color removal efficiencies were in range of 30.0-80.0%, 60.69-92.19% and 68.80-92.50% respectively. The results indicated that CF+UF had high removal efficiencies for all parameters.

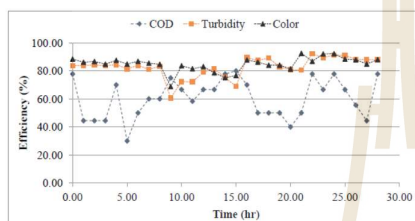


Fig. 6. The performance of combined coagulation-flocculation and ultrafiltration laboratory scale (CF+UF) in COD, turbidity and color removal efficiencies.

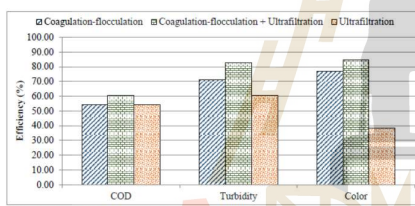


Fig. 7. Comparison performance of three alternatives water reclamation processes.

E. Comparison Performance of Three Alternatives Water Reclamation Processes

The performance of COD, turbidity and color removal efficiencies for three alternatives water reclamation processes are presented in Fig. 7. The results showed the combined CF+UF processes had the overall COD, turbidity and color removal efficiencies higher than the CF process and UF process. These results indicated that combination of two processes help to improve the process performance and adding coagulation process as pre-treatment for ultrafiltration enhanced COD, turbidity and color removal efficiencies of combined processes. These results probably because pollutants was adsorbed on or trapped in the aluminium floc particles, which were trapped by UF [6]. Water qualities of effluents from each process were assessed to utilize purposes by using water quality standard as shown in [7]. In previous study [8], found that combined ozonation, coagulation and membrane filtration process improved operational performance and produced reclaimed water with reduce public health risks associated with virus and N-nitrosodimethylamine. The results showed the reclaimed

water of single CF and combined CF+UF process can be used for vehicle washing, urban landscaping and toilet flushing purposes. Moreover, the reclaimed water of combined CF+UF process can be used as water supply. The other hand, the reclaimed water of single UF can be used as road sweeping and construction purposes.

Acceptance of the use of recycled water for other uses and applications, such as food crop irrigation and watering of residential lawns may increase as public knowledge and general understanding of the associate benefits of water reuse [9]. However, the public risk perceptions and trust have been shown to be important key factors in acceptance of potable recycled water [10].

IV. CONCLUSIONS

The combined CF+UF process had the highest performance of COD, turbidity and color removal efficiencies than the single CF process and the single UF process. The combination of CF+UF helps to improve the process performance and enhanced COD, turbidity and color removal efficiencies of combined processes. The reclaimed water from combined CF+UF process can be used for vehicle washing, urban landscaping and toilet flushing purposes. In addition, can be used as water supply. However, to use instead of water supply should be evaluated the bacteria indicators, hygienic safety and economic feasibility.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by Suranaree University of Technology and Thailand Institute of Scientific and Technological Research

REFERENCES

- [1] H. Al-Hamaiedeh and M. Bino, "Effect of treated grey water reuse in irrigation on soil and plants," *Desalination*, pp. 115-119, vol. 256, 2010.
- [2] C. Jarusuthirak, G. Amy, and J. P. Croué, "Fouling characteristics of wastewater effluent organic matter (EfOM) isolates on NF and UF membranes," *Desalination*, pp. 247-255, vol. 145, 2002.
- [3] H. K. Shon, S. I. Vigneswaran, S. Kim, J. Cho, and H. H. Ngo, "Fouling of ultrafiltration membrane by effluent organic matter: A detailed characterization using different organic fractions in wastewater," *J. Membr. Sci.*, pp. 232-238, vol. 278, 2006.
- [4] O. Ferrer, S. Casas, C. Galva-n, F. Lucena, A. Bosch, B. Galofr, J. Mesa, J. Jofre, and X. Bemat, "Direct ultrafiltration performance and membrane integrity monitoring by microbiological analysis," *Water Res.*, pp. 121-131, vol. 83, 2015.
- [5] C. Xiaochun, Z. Dandan, F. Wei, H. Mingxin, C. John, C. Crittenden, Y. Zhisen, J. Pengfei, and W. Yang, "The effectiveness of coagulation for water reclamation from a wastewater treatment plant that has a long hydraulic and sludge retention times: A case study," *Chemosphere*, pp. 224-231, vol. 157, 2016.
- [6] S. Lee, M. Ihara, N. Yamashita, and H. Tanaka, "Improvement of virus removal by pilot-scale coagulation-ultrafiltration process for wastewater reclamation: Effect of optimization of pH in secondary effluent," *Water Research*, pp. 23-30, vol. 114, 2017.
- [7] S. Rodrigues, "China reclaimed water reuse regulations," International Water Association, United Kingdom, 2002.
- [8] D. Im, N. Nakada, Y. Fukuma, Y. Kato, and H. Tanaka, "Performance of combined ozonation, coagulation and ceramic membrane process for water reclamation: Effects and mechanism of ozonation on virus coagulation," *Separation and Purification Technology*, pp. 429-434, vol. 192, 2018.
- [9] L. Garcia-Cuerva, E. Z. Berghund, and A. R. Binder, "Public perceptions of water shortages, conservation behaviors, and support for

water reuse in the U.S.," Resources, Conservation and Recycling, pp. 106-115, vol. 113, 2016.

- [10] V. C. Ross, K. S. Fielding, and W. R. Louis, "Social trust, risk perceptions and public acceptance of recycled water: testing a social-psychological model." Journal of Environmental Management, pp. 61-68, vol.137, 2014.



J. Yimrattanabovorn is an assistant professor at the School of Environmental Engineering, Suranaree University of Technology. She obtains her Ph.D. degree from Ehime University, Japan. Her research includes water quality, tertiary wastewater treatment and adsorption



W. Wonglertarak is a doctoral student in the School of Environmental Engineering, Suranaree University of Technology (SUT). He obtains a master degree from SUT. His research includes water treatment and anaerobic digestion.



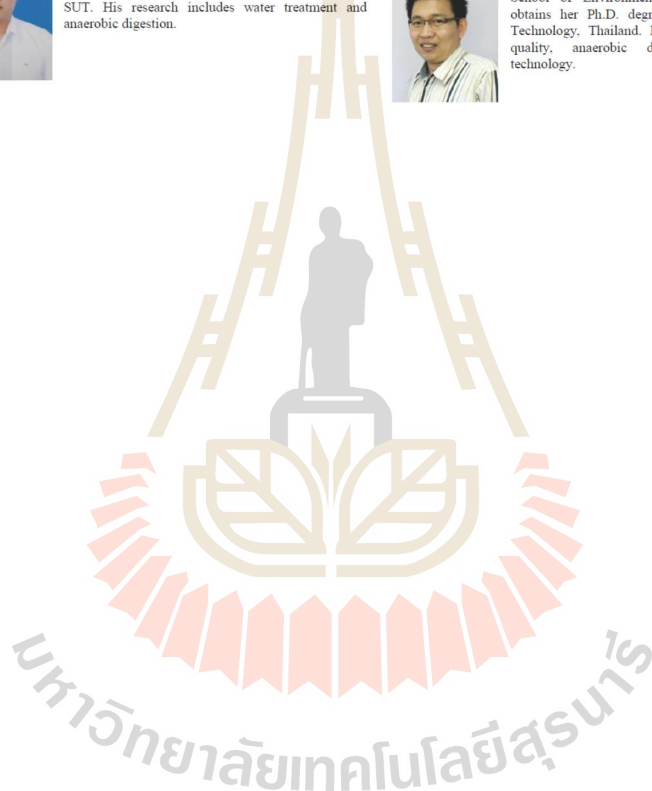
O. Rungrueang is a master student in the School of Environmental Engineering, Suranaree University of Technology (SUT). She obtains a bachelor degree from SUT. Her research includes water reclamation and Health Impact Assessment.



C. Hirunteeyakul is an assistant professor at the School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology. He obtains a master degree from Khon Kaen University. His research includes water and ground water resources engineering.



B. Wichitsathian is an associate professor at the School of Environmental Engineering, SUT. He obtains her Ph.D. degree from Asian Institute of Technology, Thailand. His research includes water quality, anaerobic digestion and membrane technology.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นางสาวจรียา ยิ้มรัตน์บวร
ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ที่อยู่ปัจจุบัน 79/2 ถนนนคร ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์
สถานที่ทำงาน สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 044-224-4551

ประวัติการศึกษา
2003 Ph.D.(Environmental Technology) Ehime University, Japan



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี