

การพัฒนาระบบร่วมคลังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์
แบบเกล็ด สำหรับการนำน้ำเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF THE COMBINED SYSTEM OF ANAEROBIC
FILTER-CONDENSER AND Ze-GAC FILTER
FOR OFFICE BUILDING'S WASTEWATER RECYCLING

Mr. Chalearn Bouted



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนากระบวนการร่วมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น
และถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด สำหรับ
การนำน้ำเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่

โดย

นายเจริญ บัวเทศ

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุเนตร ชุตินธรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ญัฐยานัน พงศ์สถาปติ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

เจริญ บัวเทศ : การพัฒนาระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด สำหรับการนำน้ำเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่ (DEVELOPMENT OF THE COMBINED SYSTEM OF ANAEROBIC FILTER-CONDENSER AND Ze-GAC FILTER FOR OFFICE BUILDING'S WASTEWATER RECYCLING) อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 216 หน้า.

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาถึงปฏิกรณ์ชีวภาพในการนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้ผลการศึกษาจากห้องปฏิบัติการมาพัฒนาถึงกรองไร้อากาศให้ทำงานร่วมกับความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน คือการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ และการใช้งานในระดับต้นแบบ จากผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าถังกรองไร้อากาศขนาด 5.40 ลิตร ที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชั่วโมง อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดาร์ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด และพบแบคทีเรียที่ช่วยในการบำบัดน้ำเสียสายพันธุ์ *Flavobacterium sp.* และอาร์เคียสายพันธุ์ *Methanosaeta sp.* นำข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ มาใช้ออกแบบและสร้างถังกรองไร้อากาศขนาด 540 ลิตร และถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดขนาด 32.40 ลิตร เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดพื้นที่ผิว 0.36 ตารางเมตร โดยใช้เครื่องปรับอากาศขนาด 19,302 บีทียู/ชั่วโมงกำลังไฟฟ้า 1,580 วัตต์ สารทำความเย็นชนิดคลอโรไดฟลูออโรมีเทน (R-22) และบายพาสวาล์วมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

ผลการทดลอง พบว่าเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชั่วโมง นำเสียภายในถังกรองไร้อากาศมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 35.40 ± 1.81 องศาเซลเซียส สามารถนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ได้ 2.82 กิโลวัตต์ชั่วโมง/วัน เครื่องปรับอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมเฉลี่ย 4.65 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 30.25 ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงเฉลี่ย 2.65 กิโลวัตต์ชั่วโมง/วัน คิดเป็นร้อยละ 22.96 สามารถนำน้ำเสียกลับมาใช้ได้ 180 ลิตร/วัน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดาร์ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสรวม โคลิฟอร์มรวมและฟีคัลโคลิฟอร์ม ร้อยละ 69.11 29.98 19.28 42.75 และ 21.83 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยและซี ร้อยละ 66.69 และ 50.87 ตามลำดับ

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5487761020 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: ANAEROBIC FILTER-HEATER / ANAEROBIC FILTER-CONDENSER / PROTOTYPE THE COMBINED ANCO AND ZE-GAC / OFFICE WASTEWATER-COOLED AIR CONDITIONER / WASTEWATER RECYCLING / HEAT RECOVERY

CHALEARN BOUTED: DEVELOPMENT OF THE COMBINED SYSTEM OF ANAEROBIC FILTER-CONDENSER AND Ze-GAC FILTER FOR OFFICE BUILDING'S WASTEWATER RECYCLING. ADVISOR: ASSOC. PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 216 pp.

This research aims to develop a bioreactor for wastewater recycling and waste heat recovery from office buildings. The experiments on anaerobic filter (AF) with the waste heat recovery from air conditioner as a combined system was divided into 2 phases: laboratory-scale and pilot-scale experiments. The highest performance with the lowest energy consumption was obtained from the laboratory-scale AF with HRT of 27 hours and 35°C. The system favored the growth of *Flavobacterium sp.* and *Methanosaeta sp.*, that assisted in the treatment processes. In pilot-scale, the results from the laboratory-scale was used in designing pilot-scale AF with the size of 540 liters. The pilot-scale of 32.40 liters and a heat exchanger (condenser 1) with the surface area of 0.36 m². The anaerobic filter-condenser (ANCO) system, combined with Ze-GAC filter system. The air conditioner had capacity of 19,302 BTU/hr. with electrical power input of 1,580 W. The refrigerant was Chlorodifluoromethane (R-22).

The results from the prototype could yield wastewater recycling of 180 L/day and waste heat recovery about 2.82 kWh/day. The effluent had average temperature of 35.41±1.81 °C. The coefficient of performance of the air condition was 4.60, which was increased by 30.25% and could save electrical energy up to 2.65 kWh/day (or 22.96% saving). The performance of ANCO and Ze-GAC pilot-scale prototype achieved high removal efficiencies in terms of chemical oxygen demand, total kjeldahl nitrogen, total phosphorus, total coliforms and fecal coliforms about 69.11% 29.98% 19.28%, 42.45% and 21.83%, respectively. For suspended solid and color removal by the pilot-scale system, they were 66.69% and 50.87%, respectively.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2016

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะความช่วยเหลือแนะนำอย่างดียิ่ง จากหน่วยงาน และ บุคคลหลายฝ่าย ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหา จนส่งผลทำให้ การทำวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็น ประธานสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญาณกร รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์วันชัย ช่องดารากุล อาจารย์ศรัทธา สือสัจจา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยง ยุทธ จรรยาธิษั และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ครูผู้เป็นแนวความคิดและแรงบันดาลใจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พฤกษาสิริ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครพันธ์ วงศ์แกหา อาจารย์วรพงศ์ลักษณ์ ช่อนกลิ่น อาจารย์พงษ์ภัทร พุคะนัตต์ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ผ่านมา ที่ได้ ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ จนทำให้มีสติและปัญญาฝ่าฟันปัญหา สามารถสร้างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ เสร็จสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทางการเงินจากสภาวิจัยแห่งชาติแห่งประเทศไทย (วช) ทุน 90 ปี แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ทุนคณะบัณฑิตวิทยาลัยและหลักสูตรสห สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ครอบครั้ว “อุดมมณีสุวัฒน์” และครอบครั้ว “สือสัจจา”

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์ทดสอบวิศวกรรมโยธา (และสิ่งแวดล้อม) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและห้องปฏิบัติการทดสอบงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกกำลังใจจากบิดา มารดา ญาติ พี่ น้อง เพื่อนและพี่น้องนิตินิตภาควิชา วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และความอบอุ่นใจจากภรรยาอันเป็นที่รัก ที่เป็นพลังเสริมจิตใจให้ แข็งแกร่ง จนฝ่าฟันอุปสรรคอันนำพามาซึ่งความสำเร็จในการเรียน ณ สถาบันแห่งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฒ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 กรอบการวิจัย	4
1.4 สมมุติฐานการวิจัย	5
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบบำบัดน้ำเสีย	8
2.1.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย	8
2.1.2 น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater).....	9
2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้อากาศ	18
2.2.1 ชีวเคมีและจุลชีววิทยาของกระบวนการไร้อากาศ	18
2.2.2 ชนิดของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.2.3 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	21

2.2.4	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการไร้อากาศ.....	26
2.2.5	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ.....	29
2.3	ถังกรองซีโอไลท์ - ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Zeolite-Granular Activated Carbon).....	33
2.3.1	หลักการและทฤษฎีของกระบวนการดูดติดผิวที่ใช้ในระบบถังกรองซีโอไลท์- ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด	33
2.3.2	การออกแบบถังกรองซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ชนิดแรงดันต่ำ (ใช้การไหล แบบธรรมชาติคือจากที่สูงไปสู่ที่ต่ำกว่า) จะมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้.....	37
2.4	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศ (Cengel & Boles, 2002).....	45
2.4.1	กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์หรือกฎอนุรักษ์พลังงาน	45
2.4.2	พลังงานในรูปจุลภาค (Microscopic Form of Energy).....	46
2.4.3	พลังงานในรูปมหภาค (Macroscopic Forms of Energy)	47
2.4.4	กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบปิด	48
2.4.5	กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบเปิด	48
2.4.6	กระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว	49
2.4.7	กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์	51
2.4.9	อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio; EER).....	54
2.5	การประเมินผลตอบแทนการลงทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Brigham & Houston, 2012).....	54
2.5.1	ระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period).....	54
2.5.2	การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV).....	55
2.5.3	การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return; IRR).....	55
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	56
2.6.1	การศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยถังกรองไร้อากาศ.....	56

2.6.2 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยสารซีโอไลท์	59
2.6.3 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์.....	61
2.6.4 การศึกษาการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่	63
2.6.5 การศึกษาการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้งาน	63
2.6.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย	64
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	66
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	66
3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการต่อประสิทธิภาพการทำงานของ ถังกรองไร้อากาศ.....	66
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการประยุกต์ใช้ผลการศึกษาจากห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนา เครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น	69
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรอง สารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด	75
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาระบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น และถังกรองซี โอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด.....	77
3.2 เคมีภัณฑ์.....	82
3.2.1 สารซีโอไลท์ (Zeolite)	82
3.2.2 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon).....	83
3.3 แผนผังการศึกษา	84
3.4 วิธีการศึกษา.....	87
3.4.1 รูปแบบการศึกษา	87
3.4.2 วิธีการวัดและวิเคราะห์	87
3.5 การศึกษาส่วนที่ 1 ในระดับห้องปฏิบัติการต่อประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ.....	89

3.5.1 การวางแผนการทดลอง	89
3.5.2 การทดสอบเครื่องต้นแบบ	90
3.5.3 การเก็บข้อมูลจากทดลอง	90
3.5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงทฤษฎี.....	93
3.6 การศึกษาส่วนที่ 2 การประยุกต์ใช้ผลการศึกษาจากห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนา เครื่องต้นแบบระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น	93
3.6.1 การวางแผนการทดลอง	93
3.6.2 การทดสอบเครื่องต้นแบบ	94
3.6.3 การเก็บข้อมูลจากทดลอง	96
3.7 การศึกษาส่วนที่ 3 การพัฒนาระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรอง สารซีไอโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด	97
3.7.1 การวางแผนการทดลอง	97
3.7.2 การทดสอบเครื่องต้นแบบ	97
3.7.3 การเก็บข้อมูลจากทดลอง	98
3.8 การนำน้ำเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่	99
3.8.1 การประเมินคุณภาพน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่	99
3.8.2 การประเมินปริมาณน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่	99
3.9 การนำความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่	99
3.9.1 การประเมินความร้อนทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบพลังงานความร้อน	99
3.9.2 การประเมินความร้อนทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบพลังงานไฟฟ้า	99
3.10 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง	100
3.10.1 ระยะเวลาการคืนทุน	100
3.10.2 การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น	101
3.10.3 การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่อปี.....	101

บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา	102
4.1 การศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการต่อประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ....	102
4.1.1 ผลการบำบัดน้ำเสียของถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง.....	102
4.1.2 อภิปรายผลการทำงานของถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง	114
4.1.3 สรุปผลการบำบัดน้ำเสียของถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง.....	118
4.1.4 การพัฒนาแบบจำลองสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานของถังกรองไร้อากาศ- เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า.....	119
4.1.4 การวิเคราะห์ผลต่างค่าพลังงานที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนากับการค่าพลังงาน ไฟฟ้าจากการใช้งานจริง	121
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศรวมสูงสุดต่อการใช้ พลังงานต่ำสุด	123
4.1.6 ผลการพัฒนาดัชนีประสิทธิภาพ (Performance index).....	124
4.1.7 การวิเคราะห์ประชาคมของแบคทีเรียในระบบ.....	125
4.1.8 การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์จากแถบดีเอ็นเอเด่น	128
4.2 การประยุกต์ใช้การศึกษาจากห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรอง ไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น (การศึกษาส่วนที่ 2).....	132
4.2.1 การพัฒนาเครื่องต้นแบบ	132
4.2.2 ผลการใช้พลังงานของเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่อง ควบแน่น	137
4.2.3 สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมของเครื่องปรับอากาศในการนำความร้อนที่ กลับมาใช้ใหม่.....	138
4.2.4 ผลการบำบัดน้ำเสียของเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่อง ควบแน่น	140
4.2.5 ผลการเดินระบบเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น.....	145

4.3 การพัฒนาระบบร่วมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถึงกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (การศึกษาส่วนที่ 3).....	147
4.3.1 การออกแบบเครื่องต้นแบบถึงกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด	147
4.3.2 ผลการเดินระบบเครื่องต้นแบบถึงกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด	148
4.3.3 อภิปรายผลการทำงานเครื่องต้นแบบถึงกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด	155
4.3.4 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบระบบร่วมถึงกรองไร้อากาศ- เครื่องควบแน่นและถึงกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด	159
4.4 การนำน้ำเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่	165
4.4.1 การประเมินคุณภาพน้ำที่นำกลับมาใช้รดน้ำต้นไม้.....	165
4.4.2 ผลการประเมินปริมาณน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่.....	166
4.5 ผลการนำความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่.....	167
4.5.1 การประเมินความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศนำกลับมาใช้ใหม่	167
4.5.2 ผลการประเมินความร้อนทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า	167
4.5 ผลตอบแทนการลงทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ จากการได้น้ำเสียและความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่.....	168
4.5.1 การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น.....	169
4.5.2 การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่อปี.....	170
4.5.3 การประเมินระยะเวลาการคืนทุนจากเครื่องต้นแบบระบบร่วมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถึงกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด.....	170
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	172
5.1 สรุปผลการศึกษา	172
5.2 ข้อเสนอแนะ	173
รายการอ้างอิง	175

ภาคผนวก.....	182
ภาคผนวก ก รูปภาพ จากการศึกษาคส่วนที่ 1.....	183
ภาคผนวก ข ข้อมูลจากการศึกษาคส่วนที่ 1	186
ภาคผนวก ค ข้อมูลจากการศึกษาคส่วนที่ 2	200
ภาคผนวก ง ข้อมูลจากการศึกษาคส่วนที่ 2 และ 3	203
ภาคผนวก จ ข้อมูลจากการศึกษาคส่วนที่ 3	212
ภาคผนวก ฉ รายละเอียดคุณสมบัติน้ำและคุณสมบัติอากาศ	214
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	216



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	คุณลักษณะน้ำเสียชุมชน.....	12
ตารางที่ 2.2	ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด	14
ตารางที่ 2.3	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	15
ตารางที่ 2.4	ธาตุอาหารหลักที่มีความจำเป็นสำหรับกระบวนการไร้อากาศ	20
ตารางที่ 2.5	แบคทีเรียที่สร้างกรดอินทรีย์ (Organic acids producing bacteria)	22
ตารางที่ 2.6	การจำแนกชนิดของแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน.....	25
ตารางที่ 2.7	ชนิดของแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน	25
ตารางที่ 2.8	มาตรฐานและข้อเสนอแนะสำหรับคุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนำกลับไปใช้ใหม่ในการเกษตรกรรมโดย US.EPA.....	45
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดคุณสมบัติถังกรองไร้อากาศในการศึกษาส่วนที่ 3.....	93
ตารางที่ 4.1	แสดงคุณภาพน้ำเฉลี่ยก่อนและหลังการบำบัดแต่ละถังกรองไร้อากาศ รวมจำนวน 12 ถัง	110
ตารางที่ 4.2	แสดงประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยแต่ละถังกรองไร้อากาศ รวมจำนวน 12 ถัง ...	111
ตารางที่ 4.3	แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วย ขดลวดไฟฟ้า.....	121
ตารางที่ 4.4	แสดงค่าพลังงานที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนากับการค่าพลังงานไฟฟ้า จากการใช้งานจริง.....	123
ตารางที่ 4.5	ดัชนีประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศกลุ่มระยะกักพักน้ำ 27 ซม.	125
ตารางที่ 4.6	แสดงผลการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์	129
ตารางที่ 4.7	คุณสมบัติเครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น	133
ตารางที่ 4.8	แสดงตัวแปรคงที่สำหรับที่ใช้คำนวณระบบรวมถังกรองไร้อากาศ- เครื่องควบแน่น	136
ตารางที่ 4.9	ข้อมูลอุณหภูมิน้ำเสียและอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยที่ได้จากการวัด.....	137

ตารางที่ 4.10	ข้อมูลพลังงานแต่ละส่วนที่ใช้ในการเดินระบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น	138
ตารางที่ 4.11	แสดงคุณภาพน้ำเฉลี่ยก่อนและหลังการบำบัด และประสิทธิภาพการกำจัดของ เครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น.....	144
ตารางที่ 4.12	แสดงคุณภาพน้ำเฉลี่ยก่อนและหลังการบำบัด และประสิทธิภาพการกำจัดของ เครื่องต้นแบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด.....	154
ตารางที่ 4.13	มาตรฐานและข้อเสนอแนะสำหรับคุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนำกลับไป ใช้ใหม่ในการเกษตรกรรมโดย US.EPA	165
ตารางที่ 4.14	แสดงข้อมูลปริมาณน้ำทิ้งที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้	166
ตารางที่ 4.15	ข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้	167
ตารางที่ 4.16	การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น.....	169
ตารางที่ 4.17	การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่อปี.....	170

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนปฏิกิริยาไร้อากาศ	18
รูปที่ 2.2 ตัวกลางวงแหวนพลาสติก (Pall ring)	32
รูปที่ 2.3 ตัวกลางพลาสติกแบบ (Cross flow media)	32
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิว	35
รูปที่ 2.5 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$	39
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดผง	43
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	43
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด	44
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใย	44
รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปความร้อนและงานที่สามารถถ่ายโอนผ่าน ขอบเขตของระบบปิดได้	45
รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบลักษณะของระบบปิดกับระบบเปิด	48
รูปที่ 2.12 การไหลแบบคงตัวระหว่าง ปริมาตร มวล และพลังงานภายในระบบมีค่าคงที่.....	50
รูปที่ 2.13 การไหลแบบคงตัวระหว่าง คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ขอบเขตของระบบมีค่าคงที่.....	50
รูปที่ 2.14 เครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ	51
รูปที่ 2.15 วัฏจักรเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ.....	52
รูปที่ 3.1 ถังจ่ายน้ำเสีย.....	66
รูปที่ 3.2 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ	66
รูปที่ 3.3 ถังกรองไร้อากาศแบบไม่หุ้มฉนวน.....	67
รูปที่ 3.4 ถังกรองไร้อากาศแบบหุ้มฉนวน.....	67
รูปที่ 3.5 เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า.....	68
รูปที่ 3.6 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น	68

รูปที่ 3.7 ถังควบคุมระดับปริมาณน้ำเสีย	69
รูปที่ 3.8 เครื่องสูบน้ำเสีย.....	69
รูปที่ 3.9 ถังกรองไร้อากาศ.....	70
รูปที่ 3.10 เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน	72
รูปที่ 3.11 เครื่องควบแน่น 1.....	73
รูปที่ 3.12 บายพาสวาล์ว (Bypass valve).....	73
รูปที่ 3.13 ระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น	74
รูปที่ 3.14 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น-เครื่องควบคุมพลังงานไฟฟ้า.....	75
รูปที่ 3.15 ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์.....	76
รูปที่ 3.16 ถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ..	77
รูปที่ 3.17 ตัวกลางพลาสติก.....	78
รูปที่ 3.18 ฉนวนหุ้มกันความร้อน	78
รูปที่ 3.19 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น.....	79
รูปที่ 3.20 เครื่องวัดอุณหภูมิ.....	80
รูปที่ 3.21 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ.....	81
รูปที่ 3.22 เครื่องวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า	81
รูปที่ 3.23 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน	82
รูปที่ 3.24 สารซีโอไลท์.....	83
รูปที่ 3.25 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด.....	83
รูปที่ 3.26 แผนภาพการทดลองการศึกษาส่วนที่ 1	92
รูปที่ 3.27 แผนภาพการทดลองการศึกษาส่วนที่ 2.....	95
รูปที่ 3.28 แผนภาพการทดลองการศึกษาส่วนที่ 3.....	98

รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี (ค) เจดาลีไนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลา กักพักน้ำ 9 ชั่วโมง	104
รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี (ค) เจดาลีไนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลา กักพักน้ำ 18 ชั่วโมง.....	106
รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี (ค) เจดาลีไนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลา กักพักน้ำ 27 ชั่วโมง.....	108
รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง	112
รูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ (T31) ที่ระยะเวลา กักเก็บน้ำ 27 ชม. และอุณหภูมิ 35°C ในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดาลีไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม	118
รูปที่ 4.6 เครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า.....	119
รูปที่ 4.7 ขอบเขตการทำงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า	120
รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างจำนวนครั้งในการทำงานของเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า.....	122
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานต่ำสุด.....	124
รูปที่ 4.10 โครงสร้างประชาคมแบคทีเรียโดยวิธี DGGE	126
รูปที่ 4.11 โครงสร้างประชาคมอาร์เคียโดยวิธี DGGE.....	127
รูปที่ 4.12 แผนภาพเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น	132
รูปที่ 4.13 ขอบเขตการทำงานของระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น	135
รูปที่ 4.14 สมดุลพลังงานที่ใช้ในการเดินระบบเครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น	138
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะกับความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำเสีย .	139

รูปที่ 4.16 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดาล์ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส รวม.....	141
รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอ ดี (ค) เจดาล์ไนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองไร้อากาศ-เครื่อง ควบแน่น.....	142
รูปที่ 4.18 แผนภาพเครื่องต้นแบบถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด.....	147
รูปที่ 4.19 แสดงประสิทธิภาพถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการกำจัดของแข็ง แขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดาล์ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม	149
รูปที่ 4.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูป ซีไอดี (ค) เจดาล์ไนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองสารซีไอไลท์- ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด.....	150
รูปที่ 4.21 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการ กำจัดสี โคลิฟอร์มรวมและฟิคัลโคลิฟอร์ม	152
รูปที่ 4.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสีของของถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด....	152
รูปที่ 4.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า (ก) โคลิฟอร์มรวม และ (ข) ฟิคัลโคลิฟอร์ม ของถังกรองสาร ซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด.....	153
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโคลิฟอร์มรวม ฟิคัลโคลิฟอร์มและแบคทีเรียอีโคไลท์ที่ ปนเปื้อนในน้ำเสียทั่วไป (Vendrell & Atiles, 2003)	157
รูปที่ 4.25 แผนภาพเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรอง สาร ซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด.....	159
รูปที่ 4.26 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรอง สารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูป ซีไอดี เจดาล์ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม.....	160
รูปที่ 4.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าของแข็งแขวนลอยของถังกรองไร้อากาศ- เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด	162

- รูปที่ 4.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด 162
- รูปที่ 4.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าเจดาลีไนโตรเจน ของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด 163
- รูปที่ 4.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าฟอสฟอรัสรวมของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด 163
- รูปที่ 4.31 ภาพรวมการพัฒนากระบวนการบำบัดถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น และถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด สำหรับการนำน้ำทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่ 164
- รูปที่ 4.32 แผนภาพวงจรระบบการนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่ 168



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์		หน่วย
$C_{p_{air}}$	ความร้อนเฉพาะของอากาศ	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
$C_{p_{ww}}$	ความร้อนเฉพาะของน้ำเสีย	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
HRT	ระยะเวลาพักน้ำ	hr.
N	จำนวนครั้งในการทำงานของเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า	times
Q_{C1}	ความร้อนออกจากเครื่องควบแน่น 1	kJ
Q_{C2}	ความร้อนออกจากเครื่องส่งลมร้อน 2	kJ
Q_E	ความร้อนเข้าสู่เครื่องส่งลมเย็น	kJ
Q_H	พลังงานความร้อนจากเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า	kJ
Q_{ww}	พลังงานความร้อนในน้ำเสียของถังกรองไร้อากาศ	kJ
Q_{loss}	พลังงานความร้อนจากการสูญเสีย	kJ
t	ช่วงเวลาทำงาน	hr
T_{end}	อุณหภูมิสิ้นสุด	$^\circ\text{C}$
T_{start}	อุณหภูมิเริ่มต้น	$^\circ\text{C}$
$T_{C2 in}$	อุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องส่งลมร้อน	$^\circ\text{C}$
$T_{E in}$	อุณหภูมิอากาศขาเข้าเครื่องส่งลมเย็น	$^\circ\text{C}$
$T_{C2 out}$	อุณหภูมิอากาศขาออกเครื่องส่งลมร้อน	$^\circ\text{C}$
$T_{E out}$	อุณหภูมิอากาศขาออกเครื่องส่งลมเย็น	$^\circ\text{C}$
T_{inf}	อุณหภูมิของน้ำเสียที่ไหลเข้าถังกรองไร้อากาศ	$^\circ\text{C}$
T_{eff}	อุณหภูมิน้ำเสียที่ไหลออกจากถังกรองไร้อากาศ	$^\circ\text{C}$
W_C	กำลังไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์	kW
W_{FC}	กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลมที่เครื่องส่งลมร้อน	kW
W_{FE}	กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลมที่เครื่องส่งลมเย็น	kW
W_H	พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า	kWh

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V_{ww}	ปริมาณน้ำเสีย	m^3
$V_{E\ air}$	อัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องส่งลมเย็น	m^3/s
$V_{C2\ air}$	อัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องส่งลมร้อน	m^3/s
v_{ww}	อัตราการไหลของน้ำเสียผ่านถังกรองไร้อากาศ	m^3/s
ρ_{air}	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m^3
ρ_{ww}	ความหนาแน่นของน้ำทิ้ง	kg/m^3
ε	ความคลาดเคลื่อนและการสูญเสียจากการทดลอง	kJ



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำและพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ จากแผนพัฒนาเศรษฐกิจแห่งชาติของประเทศไทยฉบับที่ 1 ใช้ในช่วง พ.ศ. 2504-2509 มีการเปลี่ยนการคมนาคมทางน้ำมาเป็นถนน ดังนั้นจึงมีการถมดินเปลี่ยนลำคลองให้กลายเป็นถนน และเปลี่ยนพื้นรับน้ำหรือการเกษตรให้กลายเป็นโรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชนเมือง การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจส่งผลทำให้แหล่งน้ำตามธรรมชาติลดลง และเกิดการเคลื่อนย้ายของประชาชนจำนวนมากเดินทางเข้ามาทำงานภายในอาคารสำนักงาน โรงงาน สถานประกอบการต่าง ๆ ประชาชนบางส่วนเดินทางไปกลับวันต่อวัน และประชาชนบางส่วนอพยพย้ายถิ่นฐานเข้ามาพักอยู่อาศัยในชุมชนเมือง ซึ่งการรวมกลุ่มของประชาชนจำนวนมากในอาคารต่าง ๆ นั้น ได้มีการใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้า (เครื่องปรับอากาศ) ในการผลิตและกักตัวประจำวันเป็นจำนวนมาก ดังนั้นถ้าอาคารหลังใดขาดการจัดการระบบสิ่งแวดล้อมที่ดีแล้ว จะมีการลักลอบปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ กลายเป็นปัญหามลพิษทางน้ำในแม่น้ำ ลำคลอง และมีการปล่อยความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศ ออกสู่สิ่งแวดล้อมส่งผลทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ เนื่องจากอากาศร้อนที่ถูกปล่อยผ่านชุดระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศ จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศสิ่งแวดล้อมรอบอาคาร เพื่อการสื่อความหมายให้เข้าใจตรงกันในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงนิยามความหมายของคำว่า “ความร้อนทิ้ง” หมายถึง ความร้อนจากสารแลกเปลี่ยนความเย็นของเครื่องปรับอากาศที่ถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อม และส่วนคำว่า “นำกลับมาใช้ใหม่” หมายถึง การนำความร้อนจากสารแลกเปลี่ยนความเย็นมาใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำเสียในถังกรองไร้อากาศ โดยการถ่ายเทผ่านเครื่องควบแน่น

จากตัวอย่างปัญหาดังกล่าวข้างต้นที่ยกมานี้ การป้องกันปัญหาไม่ให้อาคารสำนักงานหรือที่พักอาศัย โรงงาน สถานประกอบการต่าง ๆ ปล่อยน้ำเสียและความร้อนทิ้งออกสู่ธรรมชาตินั้นก็คือการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ โดยการบูรณาการความรู้ทางด้านสถาปัตยกรรม วิศวกรรม พลังงานและสิ่งแวดล้อมมาผสมผสานกันจนเกิดองค์ความรู้ใหม่ขึ้นมา ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศและเครื่องปรับอากาศทำงานเกื้อกูลกัน จนสามารถนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ได้นี้ยังเป็นการช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำประปาลงมา ส่วนการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้นี้ เป็นการลดอุณหภูมิ

อากาศร้อนรอบอาคาร และถ้าบูรณาการความรู้ได้ถูกต้องจะเป็นการเพิ่มสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ และส่งผลทำให้ประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศลงมาได้เหมือนกัน

งานวิจัยนี้ต้องการสร้างถึงปฏิกรณ์ชีวภาพในการนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่ โดยการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter System; AF) ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ ให้สามารถทำงานร่วมกับความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศชนิดแยกส่วนแบบระบบอัดไอ (The split type air-conditioner type vapor-compression system) และถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Zeolite-Granular Activated Carbon Filter; Ze-GAC) ได้ สาเหตุที่เลือกระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศ และเครื่องปรับอากาศชนิดแยกส่วนมาทำการศึกษาวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอาคารสำนักงานหรือที่พักอาศัย โรงงาน สถานประกอบการต่าง ๆ และเป็นผลิตภัณฑ์สินค้าสำเร็จรูปที่มีราคาถูก สามารถซื้อหาได้ทุกภูมิภาคของประเทศไทย ดังนั้นผลของงานวิจัยนี้น่าจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้เป็นต้นแบบการออกแบบและก่อสร้างระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (The combined system of anaerobic filter-condenser and zeolite granular activated carbon; ANCO & Ze-GAC) ในการนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงาน ที่พักอาศัย โรงงานและสถานประกอบการต่าง ๆ กลับมาใช้ใหม่ และนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับอาคารอนุรักษ์พลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green Building) ที่สามารถนำไปสู่การลดการสำรองพลังงานไฟฟ้าของประเทศลงมาได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาผลกระทบจากความร้อนภายนอกต่อประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างระยะเวลาพักน้ำกับอุณหภูมิน้ำเสีย ที่มีผลทำให้ถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานต่ำสุด

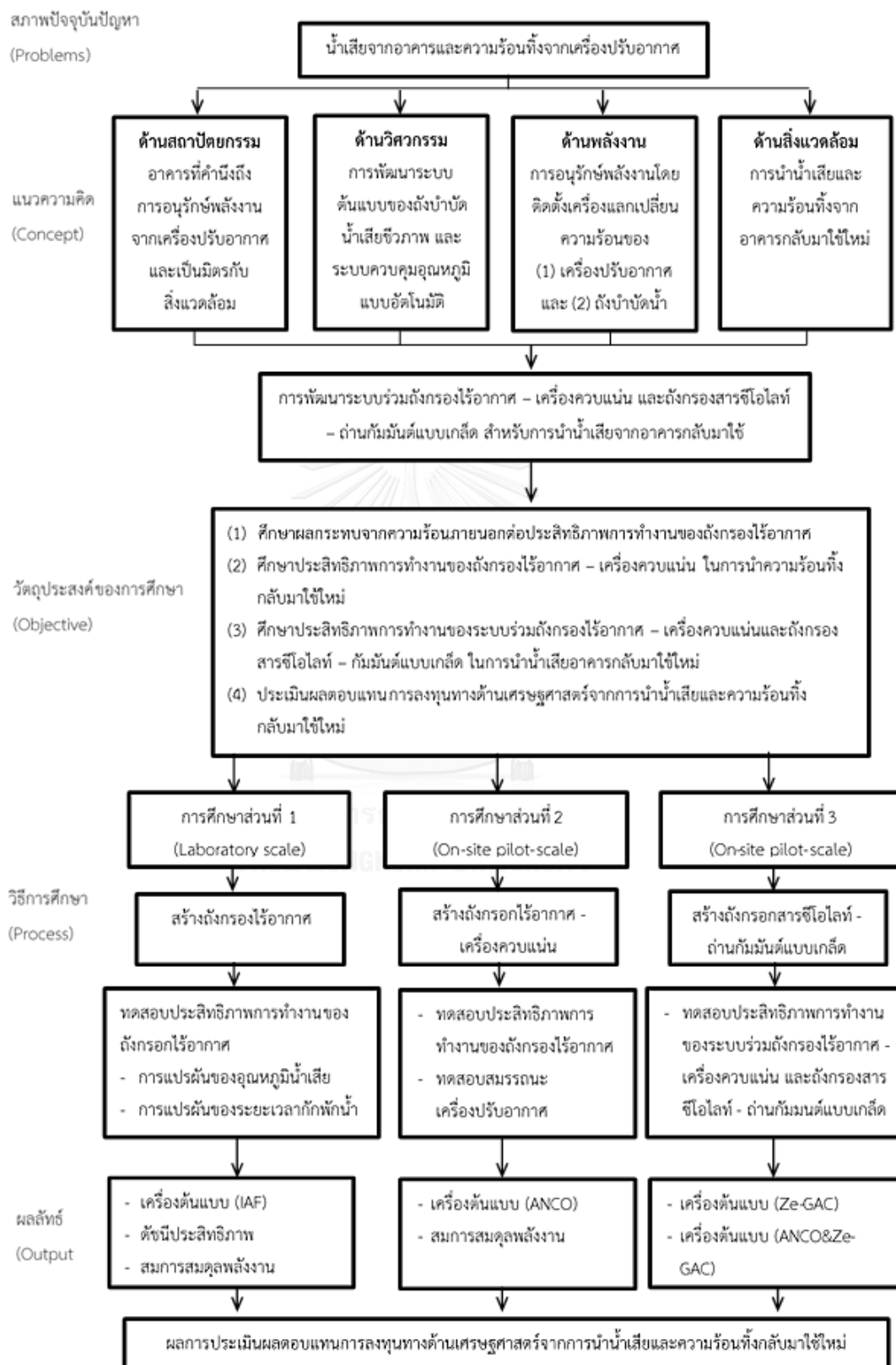
1.2.2 ศึกษาการทำงานจริงของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ และความสัมพันธ์ด้านพลังงาน (Energy Balance) ระหว่างถังกรองไร้อากาศกับเครื่องปรับอากาศในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

1.2.3 ศึกษาการใช้งานจริงของระบบร่วมถังกรองใรร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของระบบร่วมถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ในการนำน้ำเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่

1.2.4 เพื่อประเมินผลตอบแทนการลงทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ จากการได้น้ำเสียและความร้อนทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่



1.3 กรอบการวิจัย



1.4 สมมุติฐานการวิจัย

1.4.1 การใช้ความร้อนทิ้งจากเครื่องควบแน่นที่สร้างขึ้นเพิ่มจากเครื่องปรับอากาศมาตรฐานชนิดแยกส่วนแบบระบบอัดไอ มาเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำเสียในถังกรองไร้อากาศ สามารถช่วยทำให้แบคทีเรียในถังกรองไร้อากาศเจริญเติบโตได้เร็วขึ้น และสามารถลดระยะเวลาพักน้ำ (Hydraulic retention time; HRT) ในการเดินระบบถังกรองไร้อากาศลงมาได้

1.4.2 ระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ สามารถบำบัดน้ำเสียจากอาคารสำนักงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในการรดน้ำต้นไม้ ชักโครกในห้องน้ำ หรือเพื่อการอุปโภคอื่นๆ ได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 พื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา ใช้อาคารสำนักงานของห้างหุ้นส่วนจำกัดเซมดีไซน์ ตั้งอยู่ที่ 11/10 หมู่ 11 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าทอง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก

1.5.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง ใช้น้ำเสียจริงจากถังปรับเสมอของอาคารสำนักงานห้างหุ้นส่วนจำกัดเซมดีไซน์ และใช้แบคทีเรียที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในท้องถิ่น

1.5.3 การศึกษาส่วนที่ 1 สร้างถังกรองไร้อากาศด้วยคอนกรีตขึ้นมาจำนวน 12 ถัง แล้วจัดกลุ่มการทดสอบออกเป็นสามกลุ่ม (กลุ่มละสี่ถัง) โดยแบ่งตามระยะเวลาพักน้ำ 9 18 และ 27 ชม. ทุกกลุ่มจะถูกทดสอบแปรผันค่าอุณหภูมิน้ำเสียจำนวนสี่ค่า คือ 30°C ใช้ถังกรองไร้อากาศที่ไม่หุ้มฉนวนและใช้ความร้อนจากบรรยากาศในห้องทดสอบ (Anaerobic Filter; AF) และกำหนดให้เป็นถังควบคุม ส่วนอุณหภูมิ 35°C 40°C และ 45°C ใช้ถังกรองไร้อากาศหุ้มฉนวนและใช้ความร้อนจากขดลวดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (The Anaerobic Filter-Heater System; ANT) ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์น้ำและพารามิเตอร์ไฟฟ้า เพื่อนำผลมาประเมินหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างระยะเวลาพักน้ำ กับอุณหภูมิน้ำเสีย ที่มีผลทำให้ถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานต่ำสุด

1.5.4 การศึกษาส่วนที่ 2 นำข้อมูลการศึกษาส่วนที่ 1 มาออกแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น (The Anaerobic Filter-Condenser System; ANCO) และสร้างถังกรองไร้อากาศด้วยคอนกรีตและหุ้มฉนวนป้องกันความร้อนจำนวน 1 ถัง และสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ

ขดลวดทรงกระบอก (Coaxial heat exchanger) แล้วนำไปติดตั้งในถังกรองใรร้ออากาศจำนวน 1 เครื่อง ใช้เครื่องปรับอากาศขนาดมีขนาดการทำความเย็น 19,302 บีทียู/ชม. (5.660 กิโลวัตต์) พลังงานไฟฟ้า 1.583 กิโลวัตต์ สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมของระบบ (Coefficient of Performance; COPOverall) 3.57 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) 12.19 บีทียู/วัตต์ และใช้สารทำความเย็นชนิด คลอโรไดฟลูออโรมีเทน (Chlorodifluoromethane; CHClF₂ or R-22) ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์น้ำ เครื่องกลและไฟฟ้า เพื่อนำผลมาประเมินประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองใรร้ออากาศ สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมของเครื่องปรับอากาศ และความสามารถของถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่น ในการทำงานจริงและการนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่

1.5.5 การศึกษาส่วนที่ 3 นำข้อมูลการศึกษาส่วนที่ 2 มาออกแบบและสร้างถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (The Zeolite Granular Activated Carbon filter system; Ze-GAC) จำนวน 1 ถัง ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์น้ำ เพื่อนำผลมาประเมินประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด และระบบรวมถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ในการทำงานจริงและการนำน้ำเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่

1.5.6 ใช้ค่าพารามิเตอร์ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids; SS) ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demands; COD) เจตาท์ไนโตรเจน (Kjeldahl Nitrogens; TKN), และฟอสฟอรัสรวม (Total phosphorus; TP) เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองใรร้ออากาศ

1.5.7 ใช้ค่าพารามิเตอร์ ของแข็งแขวนลอย ความต้องการออกซิเจนทางเคมี เจตาท์ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสรวม สี (Color) โคลิฟอร์มรวม (Total Coliforms; TC) และ ฟีคัลโคลิฟอร์ม (Fecal Coliforms; FC) เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

1.5.8 ใช้มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากชุมชน คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน และมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด อาคารประเภท ก. โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากร ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงมาตรฐานและข้อเสนอแนะสำหรับคุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว นำกลับไปใช้ใหม่ในการเกษตรกรรมโดย US.EPA

1.5.9 ใช้ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรณะโดยรวมของเครื่องปรับอากาศ เป็นดัชนีชี้วัดการนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่

1.5.10 ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ณ ศูนย์ทดสอบวิศวกรรมโยธา (และสิ่งแวดล้อม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร โดยการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเป็นไปตามมาตรฐานสากล (Standard Methods of Examination of Water and Wastewater) ของ APHA, AWWA และ WPCF

1.5.11 ทำการวิเคราะห์โครงสร้างประชาคมแบคทีเรียด้วยวิธี PCR-DGGE (Microbiological analysis by Polymerase Chain Reaction - Denaturing Gradient Gel Electrophoresis; PCR-DGGE) และลำดับนิวคลีโอไทด์จากแถบดีเอ็นเอเด่น (DNA sequencing method) ที่ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้มีเครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า ข้อมูลความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างระยะเวลาที่กักน้ำกับอุณหภูมิที่เสียน้ำเสีย ที่ทำให้ถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานต่ำสุด

1.6.2 ทำให้มีเครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ข้อมูลประสิทธิภาพการทำงานจริงของถังกรองไร้อากาศ สัมประสิทธิ์เชิงสมรณะการทำงานจริงของเครื่องปรับอากาศ และรูปแบบสมการสมดุลพลังงาน (Energy Balance) ในการนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่

1.6.3 ทำให้มีเครื่องต้นแบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ข้อมูลประสิทธิภาพการทำงานจริงของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ในการนำน้ำเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่

1.6.4 ทำให้มีเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด และทราบจุดคุ้มทุนกับความเป็นไปได้ ในการนำเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ไปใช้ทำงานจริง

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบบำบัดน้ำเสีย

(อริยะ เตกษณานนท์, 2543)

2.1.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย

แหล่งกำเนิดของน้ำเสียสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ใหญ่ ๆ ได้แก่

- น้ำเสียจากชุมชน (Domestic Wastewater) ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของประชาชนที่อยู่อาศัยในชุมชนเช่น น้ำเสียจากบ้านเรือน โรงแรม โรงพยาบาล โรงเรียน ร้านค้า และอาคารสำนักงาน เป็นต้น องค์ประกอบที่สำคัญของน้ำเสียชุมชน ส่วนมากจะเป็นสิ่งสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (Organic Matters)

- น้ำเสียจากอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater) ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการอุตสาหกรรมทุกขั้นตอน ตั้งแต่การล้างวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การล้างวัสดุอุปกรณ์ เครื่องจักรกล การทำความสะอาดโรงงานและการซ่อมบำรุง องค์ประกอบที่สำคัญของน้ำเสียจากอุตสาหกรรม จะมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ในรูปสารอินทรีย์ (Organic Matters) และสารอนินทรีย์ (Inorganic Matters) ส่วนใหญ่เป็นสารเคมีและโลหะหนัก

- น้ำเสียเกษตรกรรม (Agricultural Wastewater) ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมทางการเกษตร แบ่งออกเป็นสองอย่างคือ การเลี้ยงสัตว์และการเพาะปลูก องค์ประกอบที่สำคัญของน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์ ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ (Organic Matters) องค์ประกอบที่สำคัญของน้ำเสียจากการเพาะปลูก อยู่ในรูปสารอินทรีย์ (Organic Matters) และสารอนินทรีย์ (Inorganic Matters) เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม สารพิษต่าง ๆ

- น้ำเสียที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิด (Nonpoint Source Wastewater) ได้แก่ น้ำฝน และน้ำหลากที่ไหลผ่านและชะล้างความสกปรกต่างๆ อาทิ กองขยะมูลฝอย แหล่งเก็บสารเคมี ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และคลองระบายน้ำเสียต่าง ๆ แม้ว่าน้ำเสียประเภทนี้จะมีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนไม่สูงเหมือนกับน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ ข้างต้น แต่มักจะเกิดขึ้นพร้อมกันในปริมาณครั้งละมากๆ โดยเฉพาะประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ในแถบศูนย์สูตร (Tropical Country) ซึ่งมีปริมาณฝนตกชุก

ลักษณะของน้ำเสียขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ไหลผ่าน ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อการปรับสภาพตามธรรมชาติของแหล่งน้ำแล้ว ยังอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนได้ ปัจจุบันน้ำเสียประเภทนี้ยังไม่ได้รับความสนใจและการจัดการเท่าที่ควร ดังนั้นจึงควรมีมาตรการจัดการที่เหมาะสมและถูกต้องตามหลักวิชาการต่อไป ลักษณะของน้ำเสียชุมชน

2.1.2 น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater)

น้ำเสียชุมชน หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน และกิจกรรมที่เป็นอาชีพ ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหารและชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลายภายในครัวเรือน และอาคารประเภทต่าง ๆ เป็นต้น สิ่งสกปรกต่างๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำและทำให้เกิดน้ำเสียนั้น เรียกว่า มลสาร (Pollutants) และสภาพการเปลี่ยนแปลงจากภาวะน้ำดีเป็นน้ำเสีย เรียกว่า ภาวะมลพิษ (Pollution) ดังนั้นการวิเคราะห์หาลักษณะของน้ำเสียทำให้ทราบถึงองค์ประกอบของน้ำเสียนั้น ทำให้สามารถหาวิธีการบำบัดและควบคุมได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม คุณลักษณะของน้ำเสียชุมชนสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 2.1

ลักษณะของน้ำเสียชุมชนมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- 1) สารอินทรีย์ หมายถึง สารซึ่งมาจากสิ่งมีชีวิต ทั้งสัตว์และพืช มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และอาจมีธาตุไฮโดรเจน และสารอนุพันธ์ของไฮโดรเจน-คาร์บอน ประกอบด้วย ตัวอย่างของสารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์
- 2) สารอนินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่าง ๆ ที่อาจจะไม่ทำให้น้ำเน่าเหม็น แต่อาจจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการบำบัด ได้แก่ ซัลไฟด์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เป็นต้น
- 3) โลหะหนักและสารพิษอื่น ๆ อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหาร จนเกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่นปรอท โครเมียม ทองแดง ปกติจะอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และสารเคมีกำจัดศัตรูพืชในการเกษตร สำหรับในเขตชุมชนอาจมีสารพิษ มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านชุบโลหะ ouchomrath เป็นต้น

4) ไขมัน น้ำมันและกรีส (Fat Oil and Grease) สารประกอบนี้เกิดจากการใช้น้ำมัน ไขมัน ขี้ผึ้ง จนกระทั่งถึงน้ำมันหล่อลื่น สารประกอบเหล่านี้เมื่อปนเปื้อนกับน้ำจะลอยตัวอยู่บนผิวน้ำ ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการถ่ายเทออกซิเจนลงสู่แหล่งน้ำและการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ

5) ความร้อนทำให้น้ำเกิดการแบ่งชั้น (Stratification) ทำให้เร่งปฏิกิริยาการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ทำให้ออกซิเจนในบรรยากาศละลายลงในน้ำได้ลดลงและทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็นขึ้นมาได้ อุณหภูมิของน้ำที่เหมาะสมสำหรับในกระบวนการบำบัดน้ำเสียควรอยู่ประมาณ 25 - 35 องศาเซลเซียส เพราะอุณหภูมิความร้อนของน้ำเสียที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิของน้ำเสียให้เหมาะสม ก่อนปล่อยออกสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย

6) ของแข็ง (Solids) หมายถึง สารที่เหลืออยู่เป็นตะกอนภายหลังจากที่ผ่านการระเหยด้วยไอน้ำ และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ตะกอนที่เกิดขึ้นมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ดังนั้นการตรวจวัดหาค่าของแข็งในน้ำดิบ น้ำทิ้งจากบ้านเรือนและจากแหล่งอื่น ๆ จึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของความต้องการการนำน้ำนั้นไปใช้ทำประโยชน์อะไร สำหรับการตรวจวัดหาค่าของแข็งในน้ำเสียนั้นแบ่งออกเป็น 3 อย่างดังต่อไปนี้

- ของแข็งตกตะกอน (Settleable Solids) หมายถึง ของแข็งซึ่งจะนอนก้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำเท่านั้น ค่าของแข็งตกตะกอนนี้นอกจากจะบอกค่าความสกปรกของน้ำแล้ว ยังใช้ประโยชน์ในการออกแบบถังตกตะกอน (Sedimentation Tank) ในระบบบำบัดน้ำเสียอีกด้วย

- ของแข็งทั้งหมด (Total Solids) สำหรับการวิเคราะห์น้ำเสียประเภทต่าง ๆ นั้นค่าของแข็งทั้งหมดมีความสำคัญน้อยมาก เพราะยากที่จะแปรผลให้ได้ค่าที่แน่นอน ดังนั้นจึงนิยมบอกค่าความสกปรกของ น้ำเสียด้วยค่า BOD และ COD อย่างไรก็ตาม ค่าของแข็งทั้งหมดสามารถใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสียที่มีผลต่อการตกตะกอนได้

- ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) หมายถึง สารแขวนลอยในของเหลวซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับการวิเคราะห์น้ำเสีย และเป็นค่าหนึ่งที่ยกถึงค่าความสกปรกของน้ำเสียนั้นตลอดจนบอกถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียต่าง ๆ

7) ความขุ่นและสี เกิดจากอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ กระดาษ ฟอกหนังและโรงฆ่าสัตว์ ความขุ่นและสีจะขัดขวางกระบวนการการสังเคราะห์แสงในน้ำ

- ความขุ่น (Turbidity) เกิดจากสิ่งแขวนลอยในน้ำ เช่น ตะกอนแขวนลอย แพลงก์ตอน (Plankton) แบคทีเรียบางชนิดและสิ่งมีชีวิตเล็กๆ หรือสารเคมีบางอย่างเมื่อสัมผัสกับอากาศ เช่น เหล็กหรือแมงกานีส โดยสารพวกนี้จะอยู่กันแบบกระจายกระจายจึงทำให้ปริมาณแสงทะลุผ่านลงไป ในน้ำได้ลดลง ส่งผลกระทบต่อขบวนการสังเคราะห์แสงของพืชในน้ำ

- สี (Color) สีของน้ำตามธรรมชาติเกิดจากสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น ใบไม้ ใบหญ้าและซากสัตว์ สีของน้ำเสียสามารถใช้วัดระยะเวลาของน้ำเสียที่อยู่ในบ่อบำบัดได้ โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นใหม่ ๆ จะมีสีเทาปนน้ำตาลอ่อน (Light Brownish Gray) แล้วจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีเทาแก่และสีดำในที่สุด

8) กรดและด่าง (pH) การอ่านค่าความเป็นกรด-ด่าง มีช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 14 โดยสารละลายที่มีค่า pH ต่ำกว่า 7 เรียกว่าสารละลายนี้เป็นกรด (Acidity solution) สารละลายมีค่า pH เท่ากับ 7 เรียกว่าสารละลายนี้เป็นกลาง (Neutral solution) และสารละลายมีค่า pH สูงกว่า 7 เรียกว่าสารละลายนี้เป็นด่าง (Alkalinity solution) การกำหนดค่าคุณภาพน้ำที่ดีจะต้องมีค่า pH เท่ากับหรือใกล้เคียงกับ 7 แต่ในทางปฏิบัติได้มีการกำหนดมาตรฐานค่า pH ของน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 5-9

9) จุลินทรีย์ (Microorganism) โดยทั่วไปสามารถแบ่งจุลินทรีย์ออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ จุลินทรีย์ในกลุ่ม Eucaryotes ที่มีบทบาทสำคัญ ได้แก่ รา (Fungi) โปรโตซัว (Protozoa) Rotifers และสาหร่าย (Algae) ชนิดต่าง ๆ จุลินทรีย์ในกลุ่ม Procaroyotic ประกอบด้วย Eubacteria และ Archaeobacteria

10) ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เมื่อมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำมากผิดปกติ ที่เรียกว่า Eutrophication เป็นผลให้ระดับของออกซิเจนในน้ำลดลงช่วงกลางคืน ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของวัชพืชน้ำ ก่อให้เกิดปัญหาด้านการสัญจรทางน้ำ และการนำน้ำไปใช้ประโยชน์

11) กลิ่น กลิ่นเหม็นของระบบบำบัดน้ำเสียเกิดจากการที่สารอินทรีย์ สารประกอบซัลเฟอร์ และไนโตรเจน ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน เป็นผลให้เกิดก๊าซซึ่งมีกลิ่นเหม็นที่สำคัญได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแอมโมเนีย การตรวจวัดปริมาณก๊าซที่ทำให้เกิดกลิ่นที่ให้ผลอย่างแม่นยำในปัจจุบันใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างอากาศแล้วตรวจวัดด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) Mass Spectrometry (MS) หรือ GC-MS เป็นต้น กลิ่นเป็นปัญหาสำคัญประการหนึ่งของการบำบัดน้ำเสีย หากไม่มีการควบคุมให้ดีอาจจะก่อให้เกิดกรณีร้องเรียนหรือการต่อต้านจากประชาชนได้

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะน้ำเสียชุมชน

ลำดับ ที่	ดัชนีชี้วัดคุณภาพ	หน่วย	ความเข้มข้น		
			น้อย	ปานกลาง	มาก
1	ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	มก/ล.	350	720	1200
2	ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids)	มก/ล.	250	500	850
3	ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	มก/ล.	100	220	350
4	ปริมาณตะกอนหนัก (Settleable Solids)	มล./ล	5	10	20
5	ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand;BOD)	มก/ล.	110	220	400
6	ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand;COD)	มก/ล.	250	500	1000
7	ไนโตรเจนทั้งหมด (Total as N)	มก/ล.	20	40	85
8	อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic)	มก/ล.	8	15	35
9	แอมโมเนีย (Free ammonia)	มก/ล.	12	25	50
10	ไนไตรท์ (Nitrites)	มก/ล.	0	0	0
11	ไนเตรท (Nitrate)	มก/ล.	0	0	0
12	ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total as P)	มก/ล.	4	8	15
13	สารอินทรีย์ (Organic)	มก/ล.	1	3	5
14	สารอนินทรีย์ (Inorganic)	มก/ล.	3	5	10
15	คลอไรด์ (Chloride) ⁽¹⁾	มก/ล.	30	50	100
16	ซัลเฟต (Sulfate) ⁽¹⁾	มก/ล.	20	30	50
17	สภาพด่าง (Alkalinity as CaCO ₃)	มก/ล.	50	100	200
18	ไขมัน (Grease)	มก/ล.	50	100	150
19	Total Coliform	MPN/100ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹

หมายเหตุ : (1) เป็นค่าที่เพิ่มจากค่าที่ตรวจพบในน้ำใช้ปกติ

ที่มา : Wastewater Engineering, Metcalf & Eddy 1991 (Tchobanoglous and Burton 1991)

น้ำเสียชุมชนนี้หากปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดจะก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมนั้น ดังนั้น จึงมีการกำหนดค่ามาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากอาคาร ดังตารางที่ 2.2 และ ค่ามาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ในกรณีที่ดัชนีคุณภาพน้ำบางดัชนี ไม่ได้กล่าวอ้างไว้ในมาตรฐานระบายน้ำทิ้งจากอาคาร ดังตารางที่ 2.3 ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม



ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำที่จากอาคารบางประเภทและบางขนาด

ลำดับที่	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุดตามประเภทมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำที่					วิธีวิเคราะห์
			ก	ข	ค	ง	จ	
1	ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	-	5 - 9	5 - 9	5 - 9	5 - 9	5 - 9	ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter)
2	บีโอดี (BOD)	มก./ล.	ไม่เกิน20	ไม่เกิน30	ไม่เกิน40	ไม่เกิน50	ไม่เกิน200	ใช้วิธีการ Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกัน หรือวิธีการอื่นที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษให้ความเห็นชอบ
3	ค่าสารแขวนลอย (Suspended)	มก./ล.	ไม่เกิน30	ไม่เกิน40	ไม่เกิน50	ไม่เกิน50	ไม่เกิน60	กรองผ่านกระดาษทรายกรองใยแก้ว (Glass Fibre Filter Disc)
4	ค่าตะกอนหนัก (Settleable)	มล./ล.	ไม่เกิน0.5	ไม่เกิน0.5	ไม่เกิน0.5	ไม่เกิน0.5	-	วิธีการกรวยอิมโฮฟฟ์ (Imhoff cone) ขนาดบรรจุ 1,000 ลบ.ซม. ในเวลา 1 ชั่วโมง
5	ค่าสารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total)	มก./ล.	ไม่เกิน500*	ไม่เกิน500*	ไม่เกิน500*	ไม่เกิน500*	-	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง
6	ค่าซัลไฟด์ (Sulfide)	มก./ล.	ไม่เกิน1.0	ไม่เกิน1.0	ไม่เกิน3.0 -	ไม่เกิน4.0	-	วิธีการไตเตรต (Titrate)
7	ไนโตรเจน (Nitrogen) ในรูปที่	มก./ล.	ไม่เกิน35	ไม่เกิน35	ไม่เกิน40	ไม่เกิน40	-	วิธีการเจลดาล์ล (kjeldahl)
8	น้ำมันและไขมัน (Fat , Oil and	มก./ล.	ไม่เกิน20	ไม่เกิน20	ไม่เกิน20	ไม่เกิน20	ไม่เกิน100	วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำมันและไขมัน

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ลำดับที่	ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1	ค่าความเป็นกรดและด่าง	5.5-9.0	pH Meter
2	ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total	ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. และน้ำทิ้งที่ระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก.ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ
3	สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่ง	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว
4	อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ไม่ได้กำหนด
5	สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	Titrate
6	ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลิ่นและตามตัววิธี Pyridine
7	ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ลำดับที่	ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
8	น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่สภาพของแหล่ง รองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยก น้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9	ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
10	สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามตัววิธี 4-Aminoantipyrine
11	คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12	สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืช	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13	ค่าบีโอดี (5 วัน) ที่อุณหภูมิ 20 °C	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่สภาพของแหล่ง รองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14	ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่สภาพของ แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl
15	ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่สภาพของแหล่ง รองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) มาตรฐานคุณภาพน้ำที่จากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

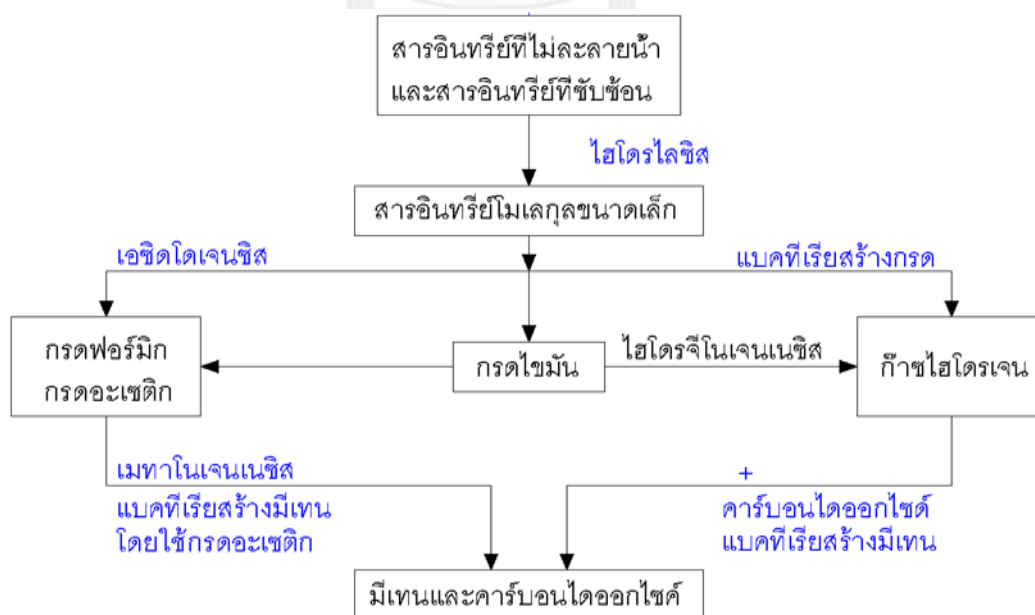
ลำดับที่	ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
16	โลหะหนัก (Heavy Metal)		
	1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	Atomic Absorption Spectro
	2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	Photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma
	3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	
	4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
	5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
	6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
	7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
	8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
	9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
	10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	Atomic Absorption
	11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	Spectrophotometry ชนิด
	12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	Atomic Absorption Cold Vapour Technique

2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้อากาศ

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้อากาศ เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยใช้จุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย ดูดซับ เปลี่ยนรูปของมวลสารต่าง ๆ ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง มวลสารในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์เปลี่ยนให้เป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไร้อากาศจะให้พลังงานน้อย เซลล์ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่จึงมีจำนวนไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการที่ใช้อากาศ (เชิดศักดิ์ อ่อนระยับ, 2548)

2.2.1 ชีวเคมีและจุลชีววิทยาของกระบวนการไร้อากาศ

ปฏิกิริยากระบวนการไร้อากาศมีกลไกพื้นฐาน คือ ปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชันรีดักชันหรือปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้อิเล็กตรอนและสารรับอิเล็กตรอน สารอินทรีย์หรือมวลสารในน้ำเสียทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอนและสารอื่นที่อยู่ในน้ำทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอน ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนเตรต หรือซัลเฟต การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้อากาศเป็นกระบวนการขั้นต้นที่ใช้ลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เหลือน้อยลง การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศ มีหลายขั้นตอน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนปฏิกิริยาไร้อากาศ (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2542)

ปฏิกิริยาที่ใช้ลดขนาดของสารอินทรีย์เพื่อให้สามารถนำเข้าไปในเซลล์ได้ ส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โดยจะใช้เอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารโมเลกุลขนาดเล็กที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ โดยผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation process) โดยผลสุดท้ายจะมีทั้งสารที่อยู่ในรูปรีดิวซ์และรูปออกซิไดซ์ผลิตผลส่วนใหญ่ที่เป็นรูปออกซิไดซ์ ได้แก่ กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Acids) ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม ปฏิกิริยาในการสร้างกรดอินทรีย์เหล่านี้เรียกว่า เอซิดโตเจนเนซิส (Acidogenesis) และแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ เรียกว่า แบคทีเรียสร้างกรด

ส่วนผลิตผลที่เป็นรูปรีดิวซ์สารอินทรีย์หลายประเภทที่มีปริมาณแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและสภาวะแวดล้อมของถังปฏิกิริยา ตัวอย่าง เช่น แบคทีเรียสร้างกรดบางชนิดสามารถใช้ไฮโดรเจนเป็นสารรีดิวซ์อิเล็กตรอน (แทนสารอินทรีย์) และเกิดเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจนเป็นผลสุดท้ายของปฏิกิริยา

2.2.2 ชนิดของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง

- แบคทีเรียสร้างกรด

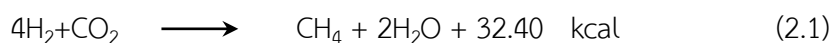
แบคทีเรียชนิดนี้มี 2 จำพวกคือแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Obligate Anaerobes) และแบคทีเรียที่อยู่ได้ทั้งในที่ที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ (Facultative Anaerobes) โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น คีโตน แอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย เป็นต้น จากกรดอินทรีย์ขนาดใหญ่คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันซึ่งจะถูกย่อยสลายผ่านกระบวนการ liquification ซึ่งผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายนี้ จะเป็นแหล่งอาหารและพลังงานแก่แบคทีเรียประเภทสร้างกรด

- แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน

แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจะเจริญเติบโตได้ช้าและไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ด้วยเหตุนี้การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนไม่อาจก้าวหน้าไปได้เท่าที่ควร แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนและสารอาหารที่ใช้ อ้างอิงจากตารางที่ 2.4 จะเห็นว่าสารอาหารที่กลุ่มแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนทุกกลุ่มใช้ได้ มีเพียงก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และกรดฟอร์มิกเท่านั้น เพียงกลุ่มเดียวที่ใช้อะเซติกและเมทานอลได้ และยังพบว่าแบคทีเรียที่สร้างกรดอินทรีย์หลายชนิดและจะสร้าง

สารอินทรีย์อื่น ๆ ด้วย แต่แบคทีเรีย ที่สร้างมีเทนต้องการสารอินทรีย์บางอย่างเฉพาะที่เจาะจง เป็นผลทำให้มีสารจำนวนมากตกค้างอยู่ในถังปฏิกรณ์ฯ จึงเป็นเหตุผลว่าโดยทั่วไประบบไร้อากาศไม่สามารถลดซีโอดีของน้ำเสียให้เหลือต่ำเท่าระบบใช้อากาศได้ แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

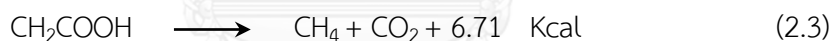
แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียชนิดนี้เรียกว่า Hydrogenotrophic Methanogen โดยได้คาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ และได้พลังงานจากไฮโดรเจนดังสมการ



แบคทีเรียชนิดนี้สามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นอาหารได้ เนื่องจากกรดฟอร์มิกสามารถเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการ



แบคทีเรียชนิดที่สอง สร้างมีเทนจากการแตกตัวของกรดอะซิติก แบคทีเรียชนิดนี้เรียกว่า Acetoclastic Methanogen ดังสมการ



ปฏิกิริยาดังกล่าว ให้พลังงานไม่เพียงพอในการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย แบคทีเรียจึงอาศัยพลังงานที่ได้จากการสร้าง ATP ในการดำรงชีวิต เกิดขึ้นโดยใช้พลังงานการเคลื่อนที่ของ H^+ (Proton Motive Force) ผ่านเซลล์เมมเบรน วิธีสร้างพลังงานแบบนี้เรียกว่า Chemoisomosis (เชิดส์คักต์ อ่อนระยับ, 2548)

ตารางที่ 2.4 ธาตุอาหารหลักที่มีความจำเป็นสำหรับกระบวนการไร้อากาศ (Speece, 1996)

ลำดับที่	ธาตุอาหารหลัก	ปริมาณที่ต้องการ (มก./กรัม ซีโอดี)	ปริมาณสูงสุด (มก./ลิตร)	ปริมาณที่ต้องการ (สารประกอบในระบบ)
1	ไนโตรเจน	5 - 15	50	$\text{NH}_2\text{NH}_4\text{Cl}$, $\text{NH}_4 \text{HCO}_3$
2	ฟอสฟอรัส	0.8 - 2.5	10	NaH_2PO_4
3	ซัลเฟอร์	1 - 3	5	MgSO_4 , $7\text{H}_2\text{O}$,

2.2.3 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะมีขึ้น 4 ขั้นตอน (ใน 4 ขั้นตอนนี้จะต้องอาศัยแบคทีเรียที่สร้างอะเซติก แบคทีเรียที่สร้างกรดและแบคทีเรียที่สร้างมีเทน) โดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการไฮโดรไลซิสเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน (amino acid) และกรดไขมัน (fatty acid) ตามลำดับ เพื่อให้จุลินทรีย์ดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้ โดยจุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลซิงแบคทีเรีย (hydrolyzing bacteria) จะผลิตเอนไซม์และปล่อยเอนไซม์ออกมาเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในกระบวนการย่อยสลายภายนอกเซลล์ ตัวอย่าง เช่น จุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ เซลลูเลส (cellulase) ย่อยสลายเซลลูโลส (cellulose) ไลเปส (lipase) ย่อยสลายไขมันให้กลายเป็นกรดไขมันระเหยสายสั้น (smaller chained fatty acids) โปรตีเอส (protease) ย่อยสลายโปรตีนให้กลายเป็นกรดอะมิโน (amino acids) ซึ่งกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างกรดอินทรีย์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.5 ในการย่อยสลายน้สารจำพวกโพลีเมอร์จะมีอัตราการไฮโดรไลซิสช้าลง เช่น โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) ถูกไฮโดรไลซิสได้ช้ากว่ากลูโคส ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราปฏิกิริยาของกระบวนการหมักคาร์โบไฮเดรต เช่นเดียวกับการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดในกระบวนการย่อยสลาย เพราะฉะนั้นการทำงานของแบคทีเรียในขั้นตอนนี้หนึ่งนี้จะช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนที่สองและสาม (Bajpai, 2017, Chawla, 1986, Mata-Alvarez, Macé et al., 2000)

ตารางที่ 2.5 แบคทีเรียที่สร้างกรดอินทรีย์ (Organic acids producing bacteria) (Chawla, 1986)

Item	Bacteria	pH	Temp	Products formed
			(°C)	
1	<i>Bacillus</i>	5.2	25-30	acetic, lactic
2	<i>B. knelfelkampii</i>	5.2-8.0	25-35	acetic, lactic
3	<i>B. megaterium</i>	5.2-7.5	28-35	acetic, lactic
4	<i>Bacteriodes succinogenes</i>	5.2-7.5	25-35	acetic, succinic
5	<i>Clostridium carnofoetidum</i>	5.2-8.5	25-37	
6	<i>C. cellobioparum</i>	5.2-8.5	36-38	formic, acetic, lactic,
7	<i>C. dissolvens</i>	5.2-8.5	35-51	formic, acetic, lactic,
8	<i>C. theymocellulaseum</i>	5.2-8.5	55-65	formic, acetic, lactic,
9	<i>Pseudomonas formicans</i>		33-42	formic, acetic, lactic,
10	<i>Ruminococcus flavifaciens</i>		33-38	formic, acetic, lactic,

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

กระบวนการสร้างกรด คือ ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็ก ด้วยกระบวนการหมัก (fermentation) โดยจุลินทรีย์สร้างกรด โดยการดูดซึมผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 เข้าไปภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid; VFA) เช่น อะซิติก (CH_3COOH) บิวทริก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) และโพรไพโอนิก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) เป็นต้น นอกจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่เป็นกรดอินทรีย์ แล้วยังสามารถพบผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ด้วย เช่น ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และสภาวะแวดล้อมของปฏิกิริยา ทั้งนี้มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 2 ประการ คือ ชนิดของสับสเตรทและความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจน (hydrogen partial pressure) ที่เกิดขึ้น เช่นกรดไขมันชนิดสายยาวถูกย่อยสลายกลายเป็นอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะย่อยสลายกลายเป็นบิวทริก (butyric acid) และกรดโพรไพโอนิก (propionic acid) เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ก๊าซไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

กระบวนการสร้างกรดอะซิติก คือ ปฏิกิริยาการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่เกิดจากกระบวนการสร้างกรด ให้กลายเป็นกรดอะซิติก โดยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนิค (acitogenics) หรือเรียกว่า จุลินทรีย์สร้างกรดอะซิติก ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน เนื่องจากการสร้างก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนนั้น ต้องการสับสเตรทที่มีความเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ อะซิติกฟอร์มิก (HCOOH) ก๊าซไฮโดรเจนเมทานอล (CH₂OH) และเมทิลามีน (CH₃NH₂) สับสเตรทที่เป็นกรดไขมันระเหยดังกล่าวจะต้องมีคาร์บอนไม่เกิน 2 อะตอม โดยต้องมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ อะซิโตเจนิค ซึ่งในขั้นตอนนี้ จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซียลต่ำเท่านั้น

จุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถสร้างก๊าซไฮโดรเจนได้ จะมีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหย ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ก๊าซไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซียลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศและต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดโพรไพโอนิก และกรดบิวทริก และตามลำดับ (Deublein & Steinhauser, 2011) ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)

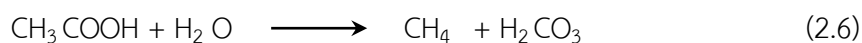


ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

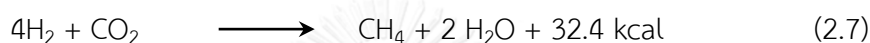
กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน คือ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจน ไปเป็นก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะที่ไร้อากาศอย่างเด็ดขาด โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทน จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้มีอัตราการเจริญเติบโตช้ามาก และมีความไวต่อสภาพแวดล้อมอย่างมาก จึงไม่อาจเจริญเติบโตได้ดีเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมช่วงค่าพีเอช (pH) 6.8-9.2 (สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548) สามารถใช้สารตั้งต้นเพียงบางชนิดที่มีคาร์บอนเพียง 1 หรือ 2 อะตอมเท่านั้น ดังนั้นจุลินทรีย์กลุ่มนี้จึงต้องอาศัยจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ เปลี่ยนกรดไขมันระเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจนก่อน จึงจะสามารถสร้างก๊าซมีเทนได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เมทานอล กรดฟอร์มิก เป็นสับสเตรทในการสร้างก๊าซมีเทนได้อีกด้วย

สามารถจำแนกจุลินทรีย์ทำหน้าที่สร้างก๊าซมีเทนได้เป็น 3 กลุ่ม ตามประเภทของสารตั้งต้น ดังต่อไปนี้

1) จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจากกรดอะซิติก (Obligate Acetoclastic Mcthanogen) โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถบริโภคอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอนได้เพียงอย่างเดียว แสดงดังสมการ



2) จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจน (Obligate hydrogenotrophic Mcthanogen หรือ H_2 Utilizer) โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานและใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแหล่งคาร์บอน แสดงดังสมการ



และจุลินทรีย์กลุ่มนี้ ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารตั้งต้นได้ เนื่องจากกรดฟอร์มิกสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ง่าย แสดงดังสมการ



3) จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจน หรืออะซิติก (Hydrogenotrophic / acetoclastic mcthanogen) จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถใช้ทั้ง กรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน เป็นสารตั้งต้นในการสร้างก๊าซมีเทน แต่จะชอบใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นมากกว่า ตัวอย่างการจำแนกจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน ดูตารางที่ 2.6 และตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 การจำแนกชนิดของแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน (Deublein & Steinhauser, 2011) (Bitton, 1994 อ้างถึงใน สุบัญญัติ นิรมรัตน์, 2548)

อันดับแบคทีเรียที่สร้าง	ตระกูลแบคทีเรียที่สร้าง	สกุลแบคทีเรียที่สร้าง	ชนิดแบคทีเรียที่สร้าง
ก๊าซมีเทน (Order)	ก๊าซมีเทน (Family)	ก๊าซมีเทน (Genus)	ก๊าซมีเทน (Species)
Methanobacteriales	Methanobacteriaceae	<i>Methanobacterium</i>	<i>M. formicicum</i>
			<i>M. bryanri</i>
			<i>M. thermoautotrophicum</i>
		<i>Methanobrevibacter</i>	<i>M. ruminantium</i>
			<i>M. arboriphilus</i>
			<i>M. smithii</i>
			<i>M. vannielli</i>
Methanococcales	Methanococcaceae	<i>Methanococcus</i>	<i>M. voltae</i>
		<i>Methanomicrobium</i>	<i>M. mobile</i>
Methanomicrobiales	Methanomicrobiaceae	<i>Methanogenium</i>	<i>M. cariaci</i>
			<i>M. marisnigri</i>
		<i>Methanosprillum</i>	<i>M. hungatei</i>
			<i>M. barkeri</i>
	Methanosarcinaceae	<i>Methanosarcina</i>	<i>M. mazi</i>

ตารางที่ 2.7 ชนิดของแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน

ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้น	ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้น
<i>Methanobacterium bryantii</i>	H ₂	<i>M. bryantii</i>	H ₂ , HCOOH
<i>M. formicicum</i>	H ₂ , HCOOH	<i>M. marisnigri</i>	H ₂ , HCOOH
<i>M. thermoautotrophicum</i>	H ₂	<i>M. tatii</i>	H ₂ , HCOOH
<i>M. alcaliphilum</i>	H ₂	<i>M. olentagyi</i>	H ₂
<i>Methanobrevibacter arboriphilus</i>	H ₂	<i>M. themophilicum</i>	H ₂ , HCOOH
<i>M. ruminantium</i>	H ₂ , HCOOH	<i>M. bourgense</i>	H ₂ , HCOOH
<i>M. smithii</i>	H ₂ , HCOOH	<i>M. aggregans</i>	H ₂ , HCOOH
<i>Methanococcus vanniellii</i>	H ₂ , HCOOH	<i>Methanococcoides</i>	CH ₃ , NH ₃
<i>M. voltae</i>	H ₂ , HCOOH	<i>Methylutens</i>	CH ₃ , OH
<i>M. deltae</i>	H ₂ , HCOOH	<i>Methanothrix soehngnii</i>	CH ₃ , COOH
<i>M. maripaludis</i>	H ₂ , HCOOH	<i>M. concilii</i>	CH ₃ , COOH

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการไร้อากาศ

1) ปัจจัยด้านอุณหภูมิ การย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศนั้นมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งเมื่อแบ่งจุลินทรีย์ตามความต้องการอุณหภูมิแล้วสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ

- แบคทีเรียที่ต้องการอุณหภูมิต่ำ (psychophilic Bacteria) ประมาณ 15 - 30 องศาเซลเซียส ในการเจริญเติบโต

- แบคทีเรียที่ต้องการอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic Bacteria) ประมาณ 30 - 45 องศาเซลเซียส ในการเจริญ เป็นแบคทีเรียที่มีบทบาทมากที่สุดต่อระบบบำบัดน้ำเสียในประเทศเขตร้อน

- แบคทีเรียที่ต้องการอุณหภูมิสูง (thermophilic Bacteria) ประมาณ 45 - 60 องศาเซลเซียส ในการเจริญ แบคทีเรียกลุ่มนี้มีบทบาทมากสำคัญสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ปล่อยน้ำเสียที่อุณหภูมิสูง เช่น โรงงานกลั่นสุรา โรงงานน้ำมันปาล์ม เป็นต้น

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ อุณหภูมิที่เหมาะสมมีอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic Bacteria) ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-40 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิสูง (themophilic Bacteria) ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 45 - 55 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมินั้นจะมีผลต่อการสร้างก๊าซของแบคทีเรีย โดยการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม้เพียง 2 - 3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงก๊าซมีเทนอย่างมาก (สิรินภา สิริธรรม, 2555)

กระบวนการสร้างก๊าซมีเทนสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิ 4-100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับชนิดแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic species) หลากหลายชนิด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถึงปฏิกิริยาแบบไร้อากาศจะเดินระบบในช่วงการทำงานแบบมีโซฟิลิก ที่อุณหภูมิ 30-37 องศาเซลเซียส แต่ถ้าการทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่านี้ จะต้องใช้ระยะสัมผัสนานขึ้น (longer contact times) และต้องการมวลชีวภาพมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงความเข้มข้นของกรดระเหย (volatile acid) มักจะเพิ่มขึ้นเพราะอัตราการเมแทบอลิซึม (metabolism rate) ของแบคทีเรียสร้างกรดได้ผลกระทบต่ำกว่าแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยจากกรณีนี้ มีความเป็นไปได้ที่ระบบจะต้องการความจุ้บฟเฟอร์ (buffer capacity) เพิ่มขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับการลดลงของค่าพีเอชอย่างรุนแรง ดังนั้นการลดลงของอุณหภูมิจึงทำให้เกิดผลสะท้อนรุนแรงมากในการเดินระบบแทบจะทุกค่าความจุ้บสูงสุด (maximum capacity) (Speece, 1996)

ช่วงอุณหภูมิของถังปฏิกริยาที่นิยมใช้สำหรับการเดินระบบอยู่ในช่วง 25 - 35 องศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยสนับสนุนให้เกิดปฏิกริยาทางชีวภาพสูงสุด และทำให้การบำบัดมีเสถียรภาพมากขึ้น (Tchobanoglous & Burton, 1991)(อ้างอิงใน จีรวรรณ ออตตะกุล, 2549)

2) ปัจจัยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าพีเอชเป็นปัจจัยชี้วัดสภาพความเป็นกรด-ด่าง ภายในของกระบวนการไร้อากาศได้ แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกรดระเหยจะเกิดขึ้นซ้ำ ดังนั้น ค่าพีเอชจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่แสดงผลออกมาได้ซ้ำสำหรับการแก้ไขสภาวะในระบบบำบัดแบบไร้อากาศเมื่อเปรียบ เทียบกับค่าความเข้มข้นของกรดระเหยง่าย (เชิดศักดิ์ อ่อนระยับ, 2548)

3) ปัจจัยสภาพความเป็นต่าง สภาพความเป็นต่างที่มีผลกระทบต่อกระบวนการไร้อากาศ คือ สภาพต่างไบคาร์บอเนต ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ เมื่อมีกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นในระบบ แต่ปัจจัยที่สำคัญที่ควรพิจารณามากกว่าสภาพต่างได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยต่อความเข้มข้นสภาพต่างไบคาร์บอเนต (VFA: HCO_3^-) ซึ่งถ้ามีอัตราส่วน VFA: HCO_3^- น้อยกว่า 0.4 ระบบจะมีบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่าระบบกำลังอยู่ในขั้นที่ค่าพีเอชจะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้ากรดไขมันระเหยมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

4) ปัจจัยสภาพกรดระเหย ได้แก่

- อะซิเตท (Acetate) สารประกอบมลภาวะอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซมีเทนซึ่งได้จากการใช้อะซิเตทเป็นสารตั้งต้นโดยตรง เนื่องจากอะซิเตทเป็นสารตั้งต้นหลัก ดังนั้นระบบไร้อากาศที่ทำงานได้ดี จึงต้องจัดการอะซิเตทได้อย่างมีประสิทธิภาพและกำจัดให้มีความเข้มข้นต่ำในน้ำออกจากระบบ

- โพรไพโอเนต (Propionate) โพรไพโอเนตเป็นสารตัวกลางพื้นฐานจากการเมแทบอลิซึมของน้ำตาล โปรตีน กรดระเหยโมเลกุลใหญ่และสารประกอบอินทรีย์ อาจมีมากกว่าร้อยละ 20 ที่เกิดการถ่ายเทของอิเล็กตรอนและเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนในที่สุด

5) ปัจจัยด้านสารอาหาร เนื่องจากกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศผลิตสลัดจ์น้อย ดังนั้นจึงมีความต้องการไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในการเจริญเติบโตของมวลชีวภาพน้อย แต่ในน้ำเสียบางประเภทขาดแคลนสารอาหารเหล่านี้ จึงต้องเติมเสริมเข้าไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของสับสเตรท

และอายุสลัดจ์ สารอาหารที่ต้องการ 100 มิลลิกรัมมวลชีวภาพ (mg of biomass) ได้แก่ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ อยู่ในช่วง 10-13, 2- 2.6 และ 1-2 มิลลิกรัมตามลำดับ

ระบบไร้อากาศจะนิยมควบคุมอัตราส่วนต่ำสุดของสารอาหารที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโต ฟอสฟอรัส : ไนโตรเจน : คาร์บอน = 1.6:100 (Crook & Surampalli, 1996)

ระบบไร้อากาศควรมีความเข้มข้นของไนโตรเจน ภายในถังปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 40-70 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อป้องกันการขาดแคลนไนโตรเจน และถ้าต้องการรักษาการทำงานสูงสุดของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน ระบบจะต้องการ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ เท่ากับ 500, 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

6) ปัจจัยด้านสารพิษ สารพิษ คือ สารที่ส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรีย ซึ่งไม่จำเป็นต้องทำให้มีการตายเกิดขึ้น และสารพิษนั้นจะหมายถึง องค์ประกอบในน้ำเสียที่เป็นสาเหตุให้เกิดผลกระทบดังกล่าว สารพิษที่มีผลกระทบต่อระบบไร้อากาศที่สำคัญ ได้แก่

- แอมโมเนีย ความเป็นพิษของแอมโมเนียมักจะพบในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงหรือมีสารตั้งต้นประเภทโปรตีน

การแตกตัวของแอมโมเนีย (NH_3 ionization) จะถูกควบคุมโดยค่าพีเอชและอุณหภูมิ ซึ่งมีการแตกตัว ดังสมการที่ (2.9) โดยแอมโมเนียมีความเป็นพิษมากกว่า (Speece, 1996)



$$\text{NH}_3 = \text{N}_{\text{Total}} / [1 + \text{H}^+ / \text{K}]$$

ค่าพีเอช เท่ากับ 7.2 หรือต่ำกว่า แอมโมเนีย เกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียไอออน ซึ่งมีความเป็นพิษน้อย

- ซัลไฟด์ สำหรับจุลินทรีย์ชนิดเม็ดที่เกิดขึ้นในระบบที่มีซัลเฟต จะถูกยับยั้งโดยไฮโดรเจน-ซัลไฟด์ซึ่งจะขึ้นอยู่ค่าพีเอชด้วย ถ้าค่าพีเอชมีค่าเป็นต่าง ผลการยับยั้งนั้นจะมากกว่าที่ค่าพีเอชเป็นกลางหรือเป็นกรด แต่ถ้าจุลินทรีย์เกิดขึ้นในระบบที่ไม่มีซัลเฟตการยับยั้งจะมีสาเหตุจากไฮโดรเจน-ซัลไฟด์อิสระที่ไม่ขึ้นอยู่ค่าพีเอช และผลกระทบจากความเป็นพิษของซัลไฟด์อยู่ในรูปความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่านั้น (Speece, 1996)

- ประจุบวกของโลหะ (cation) การเติมเบสเพื่อควบคุมพีเอชของระบบไร้อากาศ จะส่งผลให้ปริมาณของประจุบวกของโลหะเบาที่เกี่ยวข้องกับเบส ได้แก่ โซเดียม โปแทสเซียม แคลเซียม และแมงกานีส (Mn) ที่พบในระบบสูงขึ้นและสามารถทำให้เกิดความเป็นพิษได้

7) ปัจจัยศักยภาพในการให้และรับอิเล็กตรอน (Oxidation-Reduction Reaction)

ศักยภาพการให้และรับอิเล็กตรอน หรือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Reaction) คือ ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง โดยวัดความแตกต่างด้านความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอน ระหว่างปฏิกิริยาทั้งสองด้วยค่าออกซิเดชัน-รีดักชันโพเทนเชียล หรือ โออาร์พี (ORP) อาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ ถ้าวัดค่าโออาร์พี ได้ค่าบวกมาก แสดงว่าสารละลายมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี

โดยทั่วไปจะวัดโออาร์พีได้ค่าบวกในน้ำที่มีออกซิเจน หรือไนเตรตและวัดค่าโออาร์พี ได้ค่าลบในน้ำเสียที่ปราศจากออกซิเจน (มันสิน ตันจุลเวศน์, 2542)ซึ่งสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในระบบไร้อากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือกรดอะซิติกและเป็นตัวรับอิเล็กตรอน โดยถ้อยย่อไร้อากาศที่ดีจะต้องมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 มิลลิโวลต์ ถ้าค่าโออาร์พีมีค่าเป็นลบน้อยๆ หรือมีค่าเป็นบวกแสดงว่าปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไร้อากาศเกิดขึ้นน้อยหรือไม่เกิดขึ้น

2.2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ

1) ถังเกรอะ (Septic Tank) ถังเกรอะเป็นถังที่ใช้พักและตกตะกอนน้ำโสโครกที่มาจากส้วมและโถปัสสาวะโดยตรง ซึ่งกากของเสียมี่ลักษณะเป็นของแข็งที่ลอยน้ำได้ ของแข็งตะกอนหนัก และของแข็งแขวนลอย และเป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 1 (Primary Treatment) ที่ไม่ได้ใช้เครื่องจักรกลหรือพลังงานใด ๆ ถังเกรอะเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหนึ่ง ในหลายแบบของกระบวนการบำบัดไร้อากาศแบบแขวนลอย (Anaerobic Suspended Growth Treatment Processes) ที่ใช้จุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ

การออกแบบถังเกรอะควรมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำโสโครกไว้ประมาณ 1-3 วัน ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศของภูมิภาคหรือท้องถิ่น การใช้ร่วมกับถังซึมดินหรือถังบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการชีววิทยาในขณะที่น้ำโสโครกพักอยู่ในถังเกรอะนี้ จะเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้

ออกซิเจน จึงทำให้เกิดฝ้า (Scum) ลอยตัวเป็นชั้นหนาอยู่ด้านบนถังเกรอะ ส่งผลทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายของแข็งตกตะกอนในสภาวะไร้ออกซิเจน และทำให้เกิดการสะสมของกากตะกอน (Sludge) สูง ดังนั้นจึงควรออกแบบพื้นที่ในถังเกรอะไว้เก็บกากตะกอนร้อยละ 30 ของปริมาตรของการเก็บน้ำโสโครก และควรมีการสูบกากตะกอนออกในระยะเวลา 5-10 ปี

2) ถังดักไขมัน (Grease trap) ถังดักไขมันเป็นถังที่ใช้พักและตกตะกอนน้ำเสียที่มาจากครัวโดยตรง ซึ่งกากของเสียมักมีลักษณะเป็นของแข็งที่ลอยน้ำได้ ของแข็งตะกอนหนัก ของแข็งแขวนลอย และไขมัน และเป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 1 (Primary Treatment) ที่ไม่ได้ใช้เครื่องจักรกล หรือพลังงานใดๆ มีการใช้จุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน เหมือนกับถังเกรอะ

การออกแบบถังดักไขมันควรมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสียไว้ประมาณ 1 วัน เพื่อให้ตกตะกอน แล้วส่งต่อไปยังถังบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการชีววิทยาหรือถังซึมดิน ในขณะที่น้ำเสียพักอยู่ในถังดักไขมันนี้ จะเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน จึงทำให้เกิดฝ้า (Scum) และไขมันลอยตัวเป็นชั้นหนาอยู่ด้านบนถังดักไขมัน ส่งผลทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายของแข็งตกตะกอนและไขมันในสภาวะไร้ออกซิเจน และทำให้เกิดการสะสมของกากตะกอน (Sludge) สูง ดังนั้นจึงควรออกแบบพื้นที่ในถังเกรอะไว้เก็บกากตะกอนร้อยละ 30 ของปริมาตรของการเก็บน้ำโสโครก และควรมีการสูบกากตะกอนและดักไขมันออกในระยะเวลา 1 ปี

3) ถังรวบรวมน้ำเสีย (Wastewater Tank) ถังรวบรวมน้ำเสียเป็นถังที่ใช้พักและตกตะกอนน้ำเสียที่มาจากอาคารอาบน้ำ การซักผ้า การล้างพื้น อ่างล้างหน้า ถังเกรอะ และถังดักไขมัน การออกแบบถังรวบรวมน้ำเสียควรมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำโสโครกไว้ประมาณ 0.5 วัน แล้วส่งเข้าถังซึมดินหรือถังบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการชีววิทยา

4) ถังปรับเสมอ (Equalizing Tank) ถังปรับเสมอเป็นถังที่ใช้พัก ดักไขมันและปรับสภาพน้ำเสียให้เสถียร ของน้ำเสียที่มาจากถังรวบรวมน้ำเสีย การออกแบบถังปรับเสมอควรมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสียไว้ประมาณ 0.5 วัน แล้วส่งเข้าถังซึมดินหรือถังบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการชีววิทยา

5) ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter Tank)

ถังกรองไร้อากาศเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการชีววิทยาและเป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 (Secondary Treatment) ที่ไม่ได้ใช้เครื่องจักรกลหรือพลังงานใดๆ โดยรับน้ำเสียที่มีลักษณะ

เป็นของแข็งแขวนลอยจากการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 1 (Primary Treatment) และเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหนึ่ง ในหลายแบบของกระบวนการบำบัดไร้อากาศแบบแขวนลอย (Anaerobic Suspended Growth Treatment Processes) ที่อาศัยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์

การออกแบบถังกรองไร้อากาศควรมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสียไว้ประมาณ 3 เท่าของถังกรอง ขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำเสียที่รับมาจากการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 1 แล้วส่งต่อไปยังถังซึมดินหรือถังกรองน้ำเสียที่ใช้สารกรองชนิดต่างๆ (ขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำเสียที่ออกจากถังกรองไร้อากาศ) ในขณะที่ น้ำเสียพักอยู่ในถังกรองไร้อากาศ จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศจะทำหน้าที่ย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้ออกมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้ำและไฮโดรเจนซัลไฟด์ ถังกรองไร้อากาศมีลักษณะเป็นถังปิด ภายในถังติดตั้งตัวกลาง (Media) เพื่อให้จุลินทรีย์ได้อาศัย สามารถยึดเกาะอยู่บนผิวตัวกลาง ถังกรองไร้อากาศนี้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าภาระบรรทุกได้มากแต่มีการสะสมของกากตะกอน (Sludge) ต่ำ ดังนั้นจึงควรออกแบบพื้นที่ในถังกรองไร้อากาศไว้เก็บกากตะกอนร้อยละ 5-10 ของปริมาตรของการเก็บน้ำเสีย และควรมีการสูบกากตะกอนออกในระยะเวลา 10-15 ปี

ตัวกลางที่ให้จุลินทรีย์ได้อาศัยยึดเกาะเจริญเติบโตเป็นแผ่นเมือก (Biological Film) อยู่บนตัวกลาง เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ไหลมากับน้ำเสียและไม่ให้จุลินทรีย์หลุดออกจากระบบการกรอง และทำให้เพิ่มความเข้มข้นของปริมาณจุลินทรีย์ในระบบให้สูงขึ้น จึงทำให้เพิ่มปริมาณในการกำจัดสารอินทรีย์สูงขึ้นตามไปด้วย และตัวกลางที่ดีควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

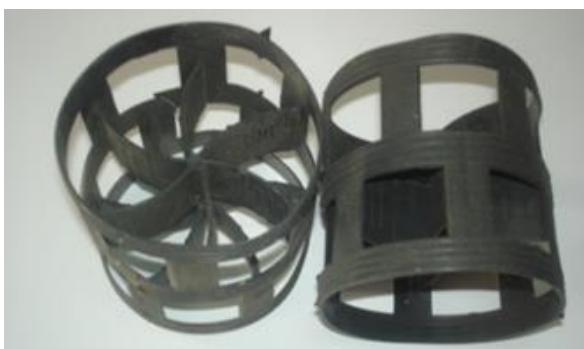
- ตัวกลางที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำเสียที่กลายเป็นสารพิษต่อจุลินทรีย์ หรือเสื่อมสภาพทางกายภาพ
- ตัวกลางที่มีพื้นที่ผิว (พื้นที่ที่ให้ตัวกลางสัมผัสน้ำเสียได้มากและทั่วถึง) / ปริมาตรสูง แต่ต้องไม่อุดตันด้วยเมือกจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโต
- มีน้ำหนักเบาและราคาถูก

รูปแบบของตัวกลาง ตัวกลางที่มีการใช้กันอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถแบ่งตามประเภทของวัสดุที่ใช้ทำได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

ก) ตัวกลางหิน เป็นกรวดหรือหินที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 5-10 เซนติเมตร ข้อดีคือเป็นวัสดุหาได้ง่ายในท้องถิ่น ราคาถูก คงสภาพทางกายภาพสูง ข้อเสีย

คือ มีพื้นที่ผิวสัมผัส/ปริมาตรต่ำ และมีการอุดตันด้วยเมือกจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตเพราะช่องว่างระหว่างตัวกลางหिनมีน้อย และมีน้ำหนักมากจึงต้องสร้างถังกรองที่มีความแข็งแรงมากทำให้ค่าก่อสร้างสูง

ข) ตัวกลางที่เป็นพลาสติก เป็นตัวกลางที่มีการพัฒนาให้เหมาะสมในการใช้เป็นตัวกลาง (แก้ไขข้อเสียที่เกิดขึ้นจากคุณสมบัติของตัวกลางหिन) คือมีความหนาแน่นต่ำ พื้นที่ผิว- สัมผัส/ปริมาตรสูง คงทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่างสูง ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำเสียที่ก่อให้เกิดสารพิษต่อจุลินทรีย์ หรือเสื่อมสภาพทางกายภาพ ดูรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ตัวกลางวงแหวนพลาสติก (Pall ring)

ที่มา: <http://www.aqua.co.th/product-category/อุปกรณ์และเครื่องจักร/>



รูปที่ 2.3 ตัวกลางพลาสติกแบบ (Cross flow media)

ที่มา: <http://www.aqua.co.th/product-category/อุปกรณ์และเครื่องจักร/>

2.3 ถังกรองซีโอไลท์ - ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Zeolite-Granular Activated Carbon)

ถังกรองซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมีร่วมกัน เป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง (Advanced Treatment) ที่ไม่ได้ใช้เครื่องจักรกลหรือพลังงานใดๆ โดยรับน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กมาก และของแข็งละลายน้ำ โลหะหนักหรือแร่ธาตุบางชนิด และเชื้อโรคที่หลงเหลืออยู่จากการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 การบำบัดนี้จะใช้กรวด ทราบ กรองของแข็งแขวนลอยขนาดเล็ก และใช้ซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์ในการแลกเปลี่ยนไอออน ส่วนเชื้อโรคก็จะถูกกำจัดโดยสารคลอรีนหรือต่างทับทิม

2.3.1 หลักการและทฤษฎีของกระบวนการดูดติดผิวที่ใช้ในระบบถังกรองซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสารที่บริเวณพื้นผิวกับพื้นผิวสัมผัสกระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ดูดติด เรียกว่า สารดูดติดผิว (adsorbent) สารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆ มาติดผิวได้ มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ (ปรมาภรณ์ โอจงเพียร, 2546)

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (bone char) Activated Silica เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนสารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก แต่มีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด

2) ถ่านกัมมันต์ อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งสารนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.3.1.1 กลไกการดูดติดผิว

เนื่องจากการดูดติดผิวเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวและของแข็งหรือก๊าซและของแข็ง ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีขั้นตอนการเกิดขึ้น 4 ขั้นตอน ดังนี้

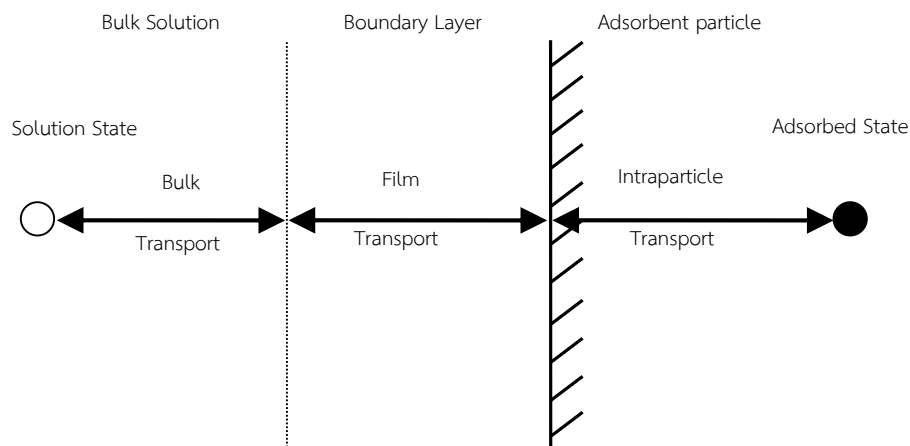
ขั้นตอนที่ 1 Bulk solution transport สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ด้านนอกของน้ำที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิว การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นโดยการแพร่

ขั้นตอนที่ 2 Film diffusion transport โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (hydrodynamic boundary layer) ที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิวเมื่อน้ำเคลื่อนที่ผ่านสารดูดติดผิว ระยะทางในการเคลื่อนที่และเวลาที่เกิดขึ้นของขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราไหล ถ้าอัตราไหลสูง ระยะทางสั้น

ขั้นตอนที่ 3 Pore transport หลังจากเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำ สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดติดผิวไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption หลังจากมีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่จะมีการดูดซับเกิดขึ้นและถูกดูดติดผิวทางกายภาพ

ขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด เรียกว่า rate-limiting step ซึ่งจะควบคุมอัตราการกำจัดในถังปฏิกรณ์ที่มีความปั่นป่วนสูง film diffusion และ pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด film diffusion จะควบคุมในขั้นต้น หลังจากนั้นเมื่อมีการสะสมของสารดูดติดผิวในช่องภายในสารดูดติดผิว pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด ขั้นตอนที่กำลังมาทั้งหมดดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิว (Eckenfelder, 1966)

2.3.1.2 ประเภทของการดูดติดผิว

การดูดติดผิวแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (physical adsorption) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่าง 2 โมเลกุล และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะทางเคมีระหว่าง 2 โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวกับผิวหน้าของสารดูดติดผิว ข้อแตกต่างของการดูดติดผิวทางกายภาพที่แตกต่างจากการดูดติดผิวทางเคมี มีดังต่อไปนี้

1) การดูดติดผิวทางกายภาพ ไม่เกี่ยวข้องกับการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน การดูดติดผิวทางกายภาพสามารถย้อนกลับได้ สารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ออกจากสารดูดซับ (desorption) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่วนการดูดติดผิวทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผันกลับไม่ได้

2) การดูดติดผิวทางเคมี ไม่มีความจำเพาะกับบริเวณโมเลกุลของสารดูดติดผิวสามารถดูดติดผิวได้ทั่วบริเวณผิวหน้าของสารดูดติดผิว ในทางตรงกันข้าม การดูดติดผิวทางเคมีมีความจำเพาะกับบริเวณที่สามารถดูดติดผิวได้

3) ความร้อนในการดูดติดผิวทางกายภาพน้อยกว่าการดูดติดผิวทางเคมี ความร้อนในการดูดติดผิวทางกายภาพประมาณ 20 กิโลแคลอรีต่อโมล สำหรับการดูดติดผิวที่มีโพรงภายในขนาดเล็ก ส่วนความร้อนของการดูดติดผิวทางเคมีอยู่ในช่วง 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมล

2.3.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

1) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนของระบบต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิวในทางตรงกันข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ความปั่นป่วนในถังดูดติดผิว คือความเร็วของน้ำที่ผ่านถังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีแล้วถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าสารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เช่น คาร์บอนผงมีอัตราเร็วในการดูดติดสูงกว่าคาร์บอนแบบเกล็ด

3) ขนาดและลักษณะของสารถูกดูดติดผิว ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือน้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดติดผิวได้ดี นอกจากนี้ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับการดูดติดผิวซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดติดผิว นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง

4) พีเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่ออัตราการดูดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถจะเกาะติดผิวของสารดูดติดผิวได้ดี

5) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคืออัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบ Exothermic

6) เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิวและอายุการใช้งานของถังดูดติดผิว โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้วก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

2.3.1.4 สมดุลของการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium)

การดูดติดผิวในสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดติดผิวบนผิวของสารดูดติดผิว ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกสู่อะไรก็ตาม เมื่อปริมาณของการดูดติดผิวและหลุดออกจากผิวมีจำนวนเท่ากัน อัตราการดูดติดผิวและการหลุดออกจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium state) หรือเรียกว่า สมดุลของการดูดติดผิว (Adsorption Equilibria) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดผิวในสารละลาย สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิวซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

ระบบการดูดติดได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปแบบของสมการอย่างง่าย แล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดติด โดยมีผู้เขียนสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดติดไว้หลายประการ แต่ที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ Freundlich Adsorption Isotherm และ Langmuir Adsorption Isotherm

2.3.2 การออกแบบถังกรองซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ชนิดแรงดันต่ำ (ใช้การไหลแบบธรรมชาติคือจากที่สูงไปสู่ที่ต่ำกว่า) จะมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

2.3.2.1 ถังกรอง

ถังกรองเป็นส่วนที่ใช้บรรจุน้ำเสียก่อนและหลังการกรอง ตะแกรงกรอง กรวดทรายและสารกรอง การออกแบบโครงสร้างถังกรองควรสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะถังกรองแรงดันต่ำจะต้องใช้พื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ เนื่องจากความเร็วของน้ำไม่สูง และฝังอยู่ใต้ดินเพื่อเพิ่มค่าระดับความสูงของ

น้ำต้นทุนที่ส่งมา (เพิ่มค่าแรงดันน้ำในระบบ) และเพื่อความแข็งแรงรับแรงกดดันของน้ำและหรือดิน ระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสียและปริมาตรถังกรอง ขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของน้ำเสีย

1) ตะแกรงกรอง ตะแกรงกรองเป็นส่วนที่ใช้รองรับกรวด ททรายและสารกรอง

การออกแบบโครงสร้างตะแกรงกรองควรสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูง ราคาถูกและทนค่าความแปรปรวนของกรด-ด่าง ในถังกรองได้สูง ขนาดของรูตะแกรงกรอง ต้องมีพื้นที่หน้าตัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรวมกันไม่น้อยกว่าปริมาณน้ำที่ต้องการกรอง ทารด้วยความเร็วน้ำที่ไหลในระบบกรอง คูสมการที่ 2.10

$$Q = AV \quad (2.10)$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่ต้องการกรอง (ลบ.ม./ชม.)

A = พื้นที่หน้าตัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูตะแกรงรวมกัน (ตร.ม.)

V = ความเร็วของน้ำที่ไหล (เมตร/ชั่วโมง)

2) กรวด

กรวดเป็นส่วนที่อยู่บนตะแกรงกรองชั้นแรก มีจุดประสงค์เพื่อลดการอุดตันและทำให้การไหลของน้ำที่ผ่านตะแกรงกรองกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ และใช้รองรับทราย สารกรอง และใช้กรองตะกอนหยาบ การออกแบบขนาดของกรวดควรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 3 –10 มิลลิเมตร

3) ทราย

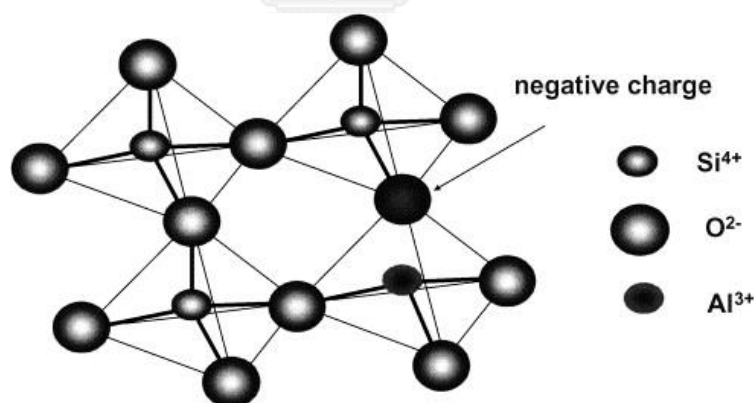
ทรายเป็นส่วนที่อยู่บนตะแกรงกรองชั้นที่สองรองจากกรวด มีจุดประสงค์เพื่อลดการอุดตันและทำให้การไหลของน้ำที่ผ่านกรวดกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ และใช้รองรับสารกรอง และใช้กรองตะกอนละเอียด การออกแบบขนาดของทรายควรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.7 –1.0 มิลลิเมตร

2.3.2.2 ซีโอไลต์ (Zeolite) (ยะโก๊ะ ขาเมดาเบะ, 2553)

ซีโอไลต์ คือ กลุ่มของหินเดือด หรือหินที่ผ่านความร้อนจนสูงและพองขยายตัวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ไม่ใช่หินที่ระเบิดออกมาจากภูเขา

1) โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของ ซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอนหรืออะลูมิเนียม หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 or AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิคอนหรืออะลูมิเนียม จะอยู่ตรงกลางและล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนทั้งสี่มุม ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะใช้ออกซิเจนร่วมกันเพื่อเชื่อมต่อกันที่มุม แล้วก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิตินี้มีขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอม เท่ากับ 1×10^{-10} เมตร)



รูปที่ 2.5 หน่วยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์ เตตระฮีดรอลสองหมู่ของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$ (Querol, Moreno et al. 2002)

2) คุณสมบัติของซีโอไลต์

เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์เป็นแบบเปิดและมีการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก ทำให้มีคุณสมบัติเป็น Ion exchange คือ แคตไอออนและโมเลกุลของน้ำที่เกาะอยู่ภายใน สามารถแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนอื่นได้ นอกจากนี้ยังสามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออนกับโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว พรอท แคดเมียม ซิลเวอร์ไอออนก็ได้เช่นเดียวกัน คุณสมบัตินี้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการ Water softening และ Water treatment และยังมีคุณสมบัติเป็น resersible dehydration ซึ่งเป็น Molecular sieve ที่ทำให้สามารถแยกแก๊สและไอของผสมของ แอมโมเนีย ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ด้วย

3) ชนิดของซีโอไลต์

ชนิดของซีโอไลต์มีอยู่สองชนิดคือ ซีโอไลต์ที่พบตามธรรมชาติ (Natural or mineral zeolite) กับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น (Synthetic zeolite) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Mineral zeolites or Naturally occurring zeolites) ส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ เป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของโมโนหรือไดวาเลนต์เบส (Mono and divalent bases) อาจมีการสูญเสียน้ำผลึกบางส่วนหรือทั้งหมด โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น faujasite erionite offretite chabazite clinoptilolite เป็นต้น ซีโอไลต์ธรรมชาติแยกตามความแตกต่างกันที่โครงสร้างมีมากกว่า 35 ชนิด เดิมนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง และใช้เป็น filter ในอุตสาหกรรมกระดาษ หลังจากได้ค้นพบคุณสมบัติการเป็น Molecular sieves และ Ion exchange จึงได้นำมาใช้เป็น molecular sieves adsorbent ในอุตสาหกรรมแยกก๊าซธรรมชาติ และแยกแอมโมเนียออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย

- ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (synthetic zeolite) โดยการทำปฏิกิริยาเบสิก ออกไซด์ต่างๆ ในระบบที่มีน้ำ แยกตามความแตกต่างกันที่โครงสร้างมีมากกว่า 100 ชนิด เช่น Al_3O_2 SiO_2 Na_2O และ K_2O เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ที่มีผลึกน้ำ และการสังเคราะห์นี้ทำให้เกิดเป็นเจล (gelatin) รูพรุน (porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (sandlike) ได้แก่ Zeolite A, Zeolite Y, Zeolite F, Zeolite M เป็นต้น

4) ประโยชน์ของซีโอไลต์

- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น Hydrogenation, Iskylation, Aromatization และ Isomerization เป็นต้น

- ใช้เป็น Sorption agent เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาดและโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด เช่น ใช้ในขบวนการ defying ของ natural gas แยก CO₂ และสารประกอบซัลเฟอร์จากแก๊สธรรมชาติ แยกสารที่ทำให้เกิดสาร มลภาวะ เช่น SO₂ NO₂ และ O₂ จากอากาศ เป็นต้น

- Water softeners ซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออนได้จึงช่วยลดความกระด้างของน้ำ

- ใช้เป็น Ion exchange resins จากคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของ ซีโอไลต์ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเรซิน เพื่อแลกเปลี่ยนกับไอออนบวก Univalent หรือ Divalent Selectivity ของซีโอไลต์ของไอออนบวกที่เป็น Univalent จากมากไปหาน้อย ดังนี้



สำหรับไอออนบวกที่เป็น Divalent มีดังนี้



โดยพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนไอออนบวกจะขึ้นอยู่กับ ธรรมชาติของไอออนบวก เช่น ขนาด ประจุ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลาย ชนิดของไอออนบวกที่รวมตัวกับไอออนบวกในสารละลาย ตัวทำละลาย (การแลกเปลี่ยนส่วนมากเกิดขึ้นได้ดีใน Aqueous solution) และลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์

- ใช้เป็น Detergent builder ซีโอไลต์เป็นที่นิยมในต่างประเทศที่เจริญแล้ว โดยใช้เป็นส่วนผสมของผงซักฟอกเนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับทำผงซักฟอก คือมีค่า Capacity และ Kinetics ซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนบวกเป็นไปได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วย ซึ่งฟอสเฟตทำให้ฟิซน้ำหรือพวกสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้มีปัญหาในการกำจัดและเมื่อมีการตายแล้วทับถมกันเข้าจึงทำให้ น้ำเน่าเสียและสัตว์น้ำที่จำเป็นลดจำนวนลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

2.3.2.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ activated charcoal) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติ หรืออินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธี ก่อกัมมันต์ (activation process) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีคุณสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับสูง เพราะมีรูพรุนขนาด 18-10,000 อัมสตรอง เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ตามผิวของรูพรุนยังมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุ และยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่างๆ ได้อย่างดี ถ่านกัมมันต์เมื่อใช้หมดแล้ว อาจทำให้กลับมา มีความสามารถในการดูดซับ ก๊าซ และก๊าซ และนำกลับมาใช้ได้อีก โดยการ Regenerate

1) หลักการทำงานของถ่านกัมมันต์

หลักการทำงานของถ่านกัมมันต์ เป็นการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยวิธีการดูดซับ (Adsorption) และดูดซึม (Absorption) การดูดซับจะเป็นการจับกันอย่างหลวมๆ ของสารอินทรีย์และ คาร์บอน ที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นชั้น ๆ

การดูดซึมนั้นจะอาศัยหลักการแพร่ของก๊าซ หรือสารประกอบเข้าไปในรูพรุนภายในเม็ดถ่าน แล้วเกิดปฏิกิริยา เคมี หรือเกิดการจับยึดเป็นร่างแหยึดเหนี่ยวไว้ ยกตัวอย่าง เช่น โอโซนถูกดูดซึมเข้าไป และถูกคาร์บอนรีดิวซ์เป็นออกซิเจน ซึ่งตัวโอโซนหรือออกซิเจนไม่ได้ไปสร้างหรือถูกจับไว้โดย ถ่านกัมมันต์แต่อย่างใด ส่วนกระบวนการดูดซึมอีกประเภท คือ การถูกดูดซึมเข้าไปแล้วเกิดปฏิกิริยาที่ ย้อนกลับไม่ได้ สร้างพันธะที่หนาแน่นกับคาร์บอนของถ่านกัมมันต์

2) การรีเจนเนอเรท (Regenerate) ถ่านกัมมันต์

การรีเจนเนอเรทถ่านกัมมันต์ คือ การปรับปรุงถ่านกัมมันต์ให้กลับคืนสภาพใช้งานให้ ไกล่เคียงหรือเหมือนเดิม โดยมีวิธีการดังนี้

- การอบด้วยไอน้ำ (Steam regeneration) คือ การใช้ไอน้ำที่เป็นไอดง (Super Heat) ทำการสารถระเหย (Volatile) ที่ปนเปื้อนในถ่านกัมมันต์เพียงเล็กน้อย
- การล้างด้วยสารเคมี (Chemical regeneration) คือ การใช้น้ำยาเคมีละลายสารต่าง ๆ ที่ถูกดูดซับในถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ ภายใต้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และสภาพ pH สูง

- การบำบัดด้วยจุลินทรีย์ (Biological regeneration) คือ การใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารต่าง ๆ ที่ถูกดูดติดไว้ในถ่านกัมมันต์

- การเผาด้วยเตาเผา (Thermal regeneration) คือ การใช้เตาเผาเผาถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อน (800-950 องศาเซลเซียส) เพื่อให้สารอินทรีย์ที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้ย่อยสลาย แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้ต้นทุนในการกำจัดสูง และมีการสูญเสียคาร์บอนจำนวนหนึ่งระหว่างเผา

3) ชนิดของถ่านกัมมันต์

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon:PAC) ขนาดเล็กกว่า 0.18 มม.



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดผง (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2560)

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular Activated Carbon:GAC) ขนาด 0.2 ถึง 5.0 มม.



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2560)

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Pelleted Activated Carbon) ขนาด 0.8 ถึง 5.0 มม.



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (สุวรรณา แจ็กมะดัน, 2554)

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใย (Cloth and fibres activated carbon)



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใย (สุวรรณา แจ็กมะดัน, 2554)

4) ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ ถูกนำไปใช้ในการกรองเอาสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่ไม่ต้องการออกจากของเหลวหรือก๊าซ เช่น การผลิตน้ำดื่มบริสุทธิ์ น้ำบริสุทธิ์ที่ใช้อุตสาหกรรมกระดาษ การบำบัดน้ำเสีย การฟอกเลือดและกำจัดพิษในทางการแพทย์ การกำจัดหรือการกรองกลิ่นและก๊าซที่ไม่ต้องการด้วยหน้ากากกรองสารพิษหรือเครื่องฟอกอากาศ

หลังจากที่น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วหากจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในการเกษตรกรรม ควรมีคุณภาพตามมาตรฐานดังตารางที่ 2.8 นี้

ตารางที่ 2.8 มาตรฐานและข้อเสนอแนะสำหรับคุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนำกลับไปใช้ใหม่ในการเกษตรกรรมโดย US.EPA (Crook & Surampalli, 1996)

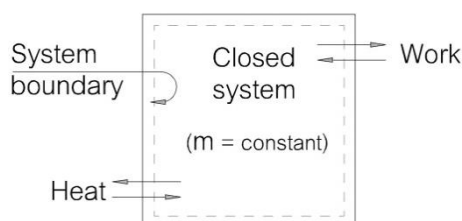
ดัชนีชี้วัดคุณภาพ	พืชอาหารที่นำมาทานโดยไม่ผ่านการแปรรูป	พืชอาหารที่นำมาทานโดยผ่านการแปรรูป	ไม่ใช่พืชอาหาร
ฟีคัลโคโลฟอร์ม(/100 มล.)	0.0 MPN	≤ 200 MPN	≤ 200 MPN
ความขุ่น (NTU)	≤ 2	-	-
ของแข็งแขวนลอย (มก/ล.)	-	≤ 30	≤ 30
สารอินทรีย์รูปบีโอดี (มก/ล.)	≤ 10	≤ 30	≤ 30
สารอินทรีย์รูปซีโอดี (มก/ล.)	-	-	-
กลิ่น	-	-	-
ไนโตรเจนรวม (มก/ล.)	-	-	-
ฟอสฟอรัสรวม (มก/ล.)	-	-	-
พีเอช	6.0 - 9.0	-	-

2.4 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศ (Cengel & Boles, 2002)

2.4.1 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์หรือกฎอนุรักษ์พลังงาน

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์หรือกฎอนุรักษ์พลังงานมีหลักการว่า “พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปหรือถูกถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายให้สูญสลายไปได้” โดยสามารถเขียนเป็นสมการแสดงการถ่ายโอนพลังงานของระบบได้ดังนี้

พลังงานรวมในระบบที่เปลี่ยนแปลงไป = พลังงานที่เข้าสู่ระบบ - พลังงานที่ออกจากระบบ (2.11)



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปความร้อนและงานที่สามารถถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบปิดได้
ที่มา: <http://machineryequipmentonline.com/hydraulics-and-pneumatics/energy-transfer-by-heatworkand-massheat-transfer/>

พลังงานรวมของระบบ คือ ผลรวมของพลังงานทั้งหมดซึ่งเรียกว่า พลังงานรวม (Total energy; E) ส่วนพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวล (Mass, m) กำหนดให้เป็นพลังงานรวมจำเพาะ (Specific total energy; e) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$e = \frac{E}{m} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.11) พลังงานรวมของระบบ ประกอบไปด้วยพลังงานที่อยู่ในรูปจุลภาค (Microscopic Form) และพลังงานที่อยู่ในรูปมหภาค (Macroscopic Form)

2.4.2 พลังงานในรูปจุลภาค (Microscopic Form of Energy)

เป็นพลังงานที่มีอยู่ในโมเลกุลมารวมกันเป็นระบบ โดยผลรวมของพลังงานภายในโมเลกุลทั้งหมดเรียกว่าพลังงานภายใน (internal energy; U) ประกอบด้วย

1) พลังงานสัมผัส (Sensible Energy) คือ พลังงานจลน์ของโมเลกุล เช่น การหมุน การสั่น และพลังงานสัมผัสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากระดับกิจกรรมของโมเลกุล (degree of activity of the molecules) สูงขึ้น

2) พลังงานแฝง (Latent Energy) คือพลังงานที่สะสมภายในโมเลกุลเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลง (เสริมหรือต่อต้าน) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล เช่น เมื่อของเหลวได้รับพลังงานแฝงจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอ (พลังงานภายในมากขึ้น) และในทางกลับกันเมื่อไอสูญเสียพลังงานแฝงจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว (พลังงานภายในน้อยลงขึ้น)

3) พลังงานเคมี (Chemical Energy) คือพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการสร้างหรือทำลายพันธะในโมเลกุลของสาร พลังงานชนิดนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

เอนทัลปี (Enthalpy, h) เป็นสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างหนึ่งที่ได้จากการรวมเทอมของพลังงานที่เป็นพลังงานภายในและพลังงานที่ได้จากผลคูณของความดันกับปริมาตร ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$H = U + P \quad (2.13)$$

การกำหนดสมบัติเอนทัลปีเกิดขึ้นเนื่องจากการคำนวณในทางเทอร์โมไดนามิกส์ เรามักจะพบกลุ่มสมบัติ $U + Pv$ เกี่ยวข้องในกระบวนการเสมอ ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงมีการกำหนดสมบัติใหม่คือ เอนทัลปีขึ้นมาใหม่เพื่อใช้เป็นตัวแทนของกลุ่มสมบัติดังกล่าว

เมื่อพิจารณาเอนทัลปีในรูปต่อหนึ่งหน่วยมวล จะเรียกว่าเป็นเอนทัลปีจำเพาะ (specific enthalpy; h) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$h = u + Pv \quad (2.14)$$

2.4.3 พลังงานในรูปมหภาค (Macroscopic Forms of Energy)

เป็นรูปของพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่และผลของแรงจากปัจจัยภายนอกประกอบด้วย

1) พลังงานจลน์ (Kinetics Energy; KE) เป็นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ทั้งระบบ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$KE = \frac{mV^2}{2} \quad (2.15)$$

เมื่อ m = มวลของระบบ

V = ความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบ

2) พลังงานศักย์ (Potential Energy; PE) เป็นพลังงานของระบบที่อยู่ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$PE = mgz \quad (2.16)$$

เมื่อ m = มวลของระบบ

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

z = ระดับเริ่มต้นเทียบกับระดับสุดท้าย

2.4.4 กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบปิด

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์หรือกฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบปิดมีหลักการว่า “พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปหรือถูกถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายให้สูญสลายไปได้” ดังนั้นหลักการโดยรวมของกฎอนุรักษ์พลังงานระบบปิดคือพลังงานรวมจะมีค่าคงที่ จากสมการ (2.11) ที่เกิดจากนิยามของกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$[\text{พลังงานรวมของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป}] = [\text{พลังงานที่ถูกโอนผ่านขอบเขตของระบบ}]$$

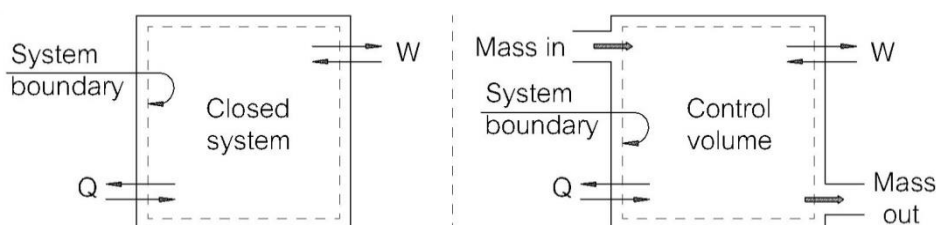
โดยพลังงานที่ถูกโอนผ่านขอบเขตของระบบปิดมี 2 รูป คือ พลังงานในรูปความร้อน (Q) และงาน (W) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q - W = \Delta E \quad (2.17)$$

เมื่อ	Q	= ความร้อนสุทธิที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ	=	$\sum Q_{in} - \sum Q_{out}$
	W	= งานสุทธิที่ถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ	=	$\sum W_{in} - \sum W_{out}$
	ΔE	= พลังงานรวมของระบบที่เปลี่ยนแปลง	=	$E_2 - E_1$

2.4.5 กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบเปิด

จากกฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบปิดพบว่า การเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบปิดเกิดจากผลของการถ่ายโอนพลังงานในรูปความร้อนและงาน ตามสมการ 2.17



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบลักษณะของระบบปิดกับระบบเปิด

จากรูปที่ 2.11 เมื่อพิจารณาความเหมือนพบว่าการถ่ายโอนพลังงานในรูปของความร้อนและงานจะเหมือนกันทั้งสองระบบ เมื่อพิจารณาความแตกต่างพบว่า ระบบเปิดมีมวลไหลเข้าและออกจากระบบและมวลที่ไหลเข้าจะนำเอาพลังงานส่วนหนึ่งเข้าสู่ระบบและมวลที่ไหลออกจะนำเอาพลังงานส่วนหนึ่งออกจากระบบไปด้วยเหมือนกัน เมื่อนำมาเขียนเป็นสมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบเปิดได้ดังต่อไปนี้

$$Q - W + \sum E_{fi} - \sum E_{fe} = \Delta E_{cv} \quad (2.18)$$

เมื่อ

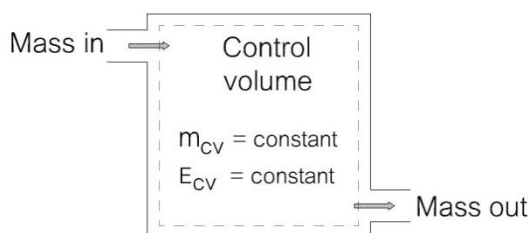
- $\sum E_{fi}$ = พลังงานที่ถูกถ่ายโอนโดยมวลที่เข้าสู่ระบบ
- $\sum E_{fe}$ = พลังงานที่ถูกถ่ายโอนโดยมวลที่ออกจากระบบ
- $\sum E_{cv}$ = พลังงานรวมในระบบเปิดที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบ

2.4.6 กระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว

จากกระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ที่มีการทำงาน โดยมีสถานะคงที่เป็นช่วงเวลายาวนาน เช่น กังหัน เครื่องอัด หัวฉีด เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ปัม เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ถูกจัดให้เป็นอุปกรณ์ที่มีการไหลแบบคงตัว (steady – flow devices) เงื่อนไขของกระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว มีดังต่อไปนี้

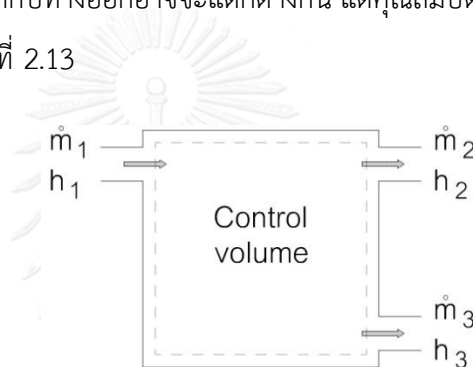
1) คุณสมบัติทุกอย่างภายในระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาประกอบด้วย ปริมาตร (V_{cv}) มวล (m_{cv}) และพลังงานรวมในระบบ (E_{cv}) ซึ่งจะมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 2.11 และสามารถระบุลักษณะของกระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัวได้ดังต่อไปนี้

- ปริมาตรภายในระบบคงที่ หมายถึง งานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขอบเขตของระบบ (Boundary work, W_b) จะเท่ากับศูนย์
- มวลภายในระบบคงที่ หมายถึง อัตราการไหลเข้าเชิงมวลเท่ากับอัตราการไหลออกเชิงมวล
- พลังงานของระบบคงที่ หมายถึง พลังงานที่เข้าสู่ระบบเท่ากับพลังงานที่ออกจากระบบ



รูปที่ 2.12 การไหลแบบคงตัวระหว่าง ปริมาตร มวล และพลังงานภายในระบบมีค่าคงที่

2) คุณสมบัติทุกอย่างที่ขอบเขตของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา คือคุณสมบัติที่ขอบเขตของระบบที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการ หมายความว่าคุณสมบัติที่ทางเข้ากับทางออกอาจจะแตกต่างกัน แต่คุณสมบัติของแต่ละตำแหน่งคงที่ตลอดกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การไหลแบบคงตัวระหว่าง คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ขอบเขตของระบบมีค่าคงที่

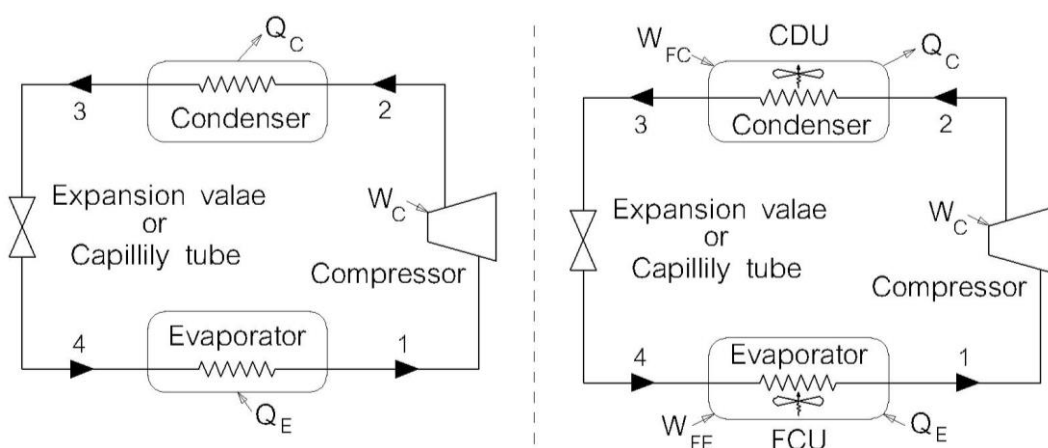
3) ความร้อนและงานที่เกิดจากการถ่ายโอนในระหว่างกระบวนการจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนและงานที่เกิดจากการถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบจะมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการ

4) กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลแบบคงตัว เนื่องจากในกระบวนการที่มีการไหลแบบคงตัว พลังงานในระบบมีค่าคงที่ ($\frac{dE_{cv}}{dt} = 0$) ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลแบบคงตัวจะเป็นดังต่อไปนี้

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = 0 \quad (2.19)$$

2.4.7 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

กระบวนการจะเกิดขึ้นในทิศทางที่แน่นอนและพลังงานจะเป็นค่าที่มีทั้งคุณภาพและปริมาณ กระบวนการจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าไม่เป็นไปตามทั้งกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ หรือหมายความว่า กระบวนการถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นตามธรรมชาติจากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ แต่กระบวนการย้อนกลับจะเกิดตามธรรมชาติไม่ได้จะต้องอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องทำความเย็น (Refrigerator) หรือ เครื่องปรับอากาศ (Air Conditioner) ดูรูปที่ 2.14



(ก) เครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ

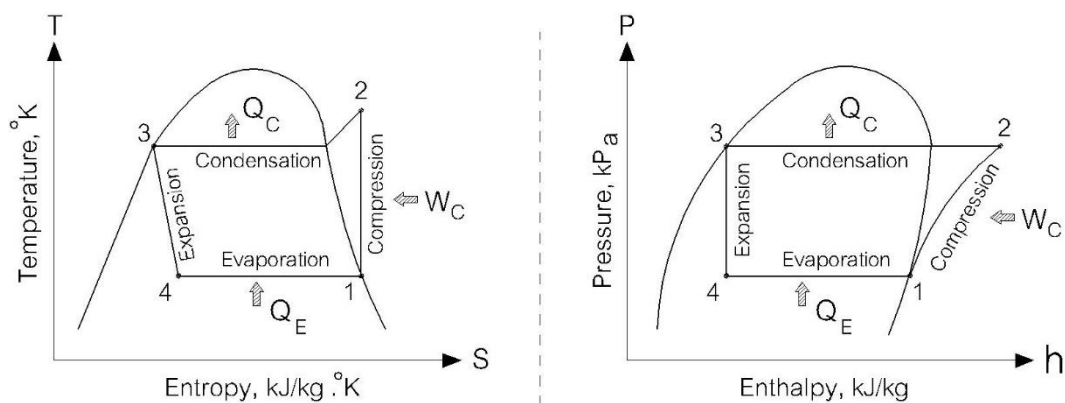
(ข) เครื่องปรับอากาศแบบอัดไอและ

รูปที่ 2.14 เครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ

2.4.8 วงจรเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor-compression refrigeration cycle)

จากรูปที่ 2.14 นำมาใช้อธิบายการทำงานวัฏจักรระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอได้ ดังนี้คือ ในสภาวะปกติ (สภาวะที่ 1) สารแลกเปลี่ยนความเย็นในระบบจะมีแรงดันต่ำและมีสถานะเป็นไออิ่มตัวสภาวะที่ 2 กระบวนการเริ่มจาก 1 ไป 2 (Isentropic Process) เริ่มเดินระบบโดยการใส่พลังงานให้เครื่องอัด (Compressor) สารแลกเปลี่ยนความเย็นถูกดูดเข้าสู่เครื่องอัดแล้วอัดให้ไหลเข้าเครื่องควบแน่น(Condenser) สารทำความเย็นจะมีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นและมีสถานะเป็นไอร้อนยวดยิ่ง สภาวะที่ 3 กระบวนการเริ่มจาก 2 ไป 3 (Isotropic Process) เมื่อสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องควบแน่น สารทำความเย็นจะถ่ายโอนความร้อนผ่านเครื่องควบแน่นให้กับสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ เครื่องควบแน่น มีผลทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิลดลงแต่ความดันคงที่และมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวสภาวะที่ 4 กระบวนการเริ่มจาก 3 ไป 4 (Throttling Valve) เมื่อสารทำความเย็นไหลผ่านวาล์วลดแรงดัน (Expansion valve or Capillary Tube) มีผลทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิและความดันลดลง และมีสถานะเป็นของเหลวผสมไอบางส่วนสภาวะที่ 1 กระบวนการเริ่มจาก 4 ไป 1 (Isobaric

process)เมื่อสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องระเหย(Evaporator) สารทำความเย็นจะระเหยดูดซับความร้อนออกจากเครื่องระเหย มีผลทำให้สารทำความเย็นจะมีอุณหภูมิลดลงแต่ความดันคงที่และมีสถานะเป็นไออิ่มตัว



(ก) แผนภาพ T-s

(ข) P-h ของวัฏจักรเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ

รูปที่ 2.15 วัฏจักรเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ

จากรูปที่ 2.15 วัฏจักรเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอสามารถเขียนสมการในการทำงานได้ดังต่อไปนี้

กระบวนการ 1-2 งานที่คอมเพรสเซอร์ใช้ (ค่าเอนโทรปีจะไม่เปลี่ยนแปลง)

$$W_C = \dot{m}_r(h_2 - h_1) \quad (2.20)$$

กระบวนการ 2-3 ความร้อนที่ถ่ายผ่านเครื่องควบแน่น

$$Q_C = \dot{m}_r(h_2 - h_3) \quad (2.21)$$

กระบวนการ 3-4 การไหลผ่านวาล์วลดแรงดัน

$$h_3 = h_4 \quad (2.22)$$

กระบวนการ 4-1 ความร้อนที่ถ่ายผ่านเครื่องระเหย

$$Q_E = \dot{m}_r(h_1 - h_4) \quad (2.23)$$

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ

$$COP = \frac{Q_E}{W_C} = \frac{\dot{m}_r(h_1-h_4)}{\dot{m}_r(h_2-h_1)} = \frac{(h_1-h_4)}{(h_2-h_1)} \quad (2.24)$$

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมของระบบ

$$COP_{Overall} = \frac{Q_E}{W_T} \quad (2.25)$$

ศัพท์บัญญัติ

W_C = กำลังงานที่ใส่ให้คอมเพรสเซอร์ (kW)

W_{FC} = กำลังงานที่ใส่ให้มอเตอร์พัดลมที่คอนเดนเซอร์ (kW)

W_{FE} = กำลังงานที่ใส่ให้มอเตอร์พัดลมที่อีวาโปเรเตอร์ (kW)

W_T = กำลังงานรวมที่ใส่ให้เครื่องปรับอากาศ (kW)

ประกอบด้วย ($W_C + W_{FC} + W_{FE}$)

Q_C = อัตราความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกจากคอนเดนเซอร์ (kW)

Q_E = อัตราความร้อนที่ถูกถ่ายเทเข้าอีวาโปเรเตอร์ (kW)

\dot{m}_r = อัตราการไหลของสารแลกเปลี่ยนการทำความเย็น (kg/s)

h_1 = เอนทัลปีจำเพาะของสารทำความเย็นที่เข้าคอมเพรสเซอร์ (kJ / kg)

h_2 = เอนทัลปีจำเพาะของสารทำความเย็นที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)

h_3 = เอนทัลปีจำเพาะของสารทำความเย็นที่ออกจากคอนเดนเซอร์ (kJ/kg)

h_4 = เอนทัลปีจำเพาะของสารทำความเย็นที่ออกจากวาล์วลดแรงดัน (kJ/kg)

COP = สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ (Coefficient of Performance; COP)

$COP_{Overall}$ = สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมของระบบ

(Coefficient of Performance; $COP_{Overall}$)

2.4.9 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio; EER)

ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานคือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่เครื่องทำความเย็นสามารถทำความเย็นได้สูงสุดต่อกำลังงานรวมที่เครื่องทำความเย็นใช้

$$\text{สมการ} \quad \text{EER} = \frac{Q_E}{W_T} \quad (2.26)$$

ศัพท์บัญญัติ

Q_E = พลังงานที่เครื่องปรับอากาศสามารถทำความเย็นได้สูงสุด (kW)

W_T = กำลังงานรวมที่เครื่องทำความเย็นใช้ (kW)

2.5 การประเมินผลตอบแทนการลงทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Brigham & Houston, 2012)

การประเมินความสามารถของโครงการว่ามีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมเพียงใดในการลงทุนโดยการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการผ่านเครื่องมือดังต่อไปนี้

- ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period : PB)
- มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV)
- อัตราผลตอบแทนคิดลด (Internal Rate of Return : IRR)
- อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C ratio)
-

2.5.1 ระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period)

ระยะเวลาการคืนทุน หมายถึง ระยะเวลาจำนวนเดือนหรือปีที่จะได้รับเงินลงทุนคืนจากการลงทุนในโครงการ เพื่อใช้ในการตัดสินใจลงทุนเบื้องต้นที่ยังไม่ได้วิเคราะห์ผลกำไรหรือขาดทุนและไม่คิดมูลค่าเงินเพื่อตามกาลเวลา ซึ่งการประเมินระยะเวลาการคืนทุนเบื้องต้นสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

ระยะเวลาการคืนทุน = จำนวนเงินในการลงทุนเริ่มต้น/จำนวนเงินที่ได้รับคืนตลอดช่วง ระยะเวลาจนมีผลรวมเท่ากับจำนวนเงินลงทุนเริ่มต้น (2.27)

โดยจำนวนเงินในการลงทุนเริ่มต้นประกอบด้วย เช่นค่าออกแบบ ค่าสิ่งปลูกสร้างถาวร ค่าวัสดุอุปกรณ์เครื่องจักร ค่าแรงงานและค่าดำเนินการเป็นต้น

2.5.2 การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิหมายถึง ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของรายรับกับมูลค่าของรายจ่ายตลอดอายุของโครงการ โดยการใช้อัตราส่วนลด (เงินเฟ้อ) และหรือ อัตราดอกเบี้ยมาปรับมูลค่าเงิน ทำให้ค่าเงินสดของรายรับ-รายจ่ายในอนาคตตลอดอายุของโครงการเป็นมูลค่าเงินสด ณ ปัจจุบัน ประเมินผลโครงการได้จากค่า NPV ถ้าค่า NPV มีค่าเป็นบวกแสดงว่าโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุนสูง แต่ถ้าค่า NPV มีค่าเป็นลบแสดงว่าโครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุนต่ำ

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I \quad (2.28)$$

ศัพท์บัญญัติ

NPV	=	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
CF_t	=	ผลตอบแทนสุทธิในปีที่ n
I	=	ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น
k	=	อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่พอใจ
n	=	อายุของโครงการ

2.5.3 การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return; IRR)

อัตราผลตอบแทนภายใน หมายถึง การหาอัตราผลตอบแทนหรืออัตราดอกเบี้ย (k%) ที่ทำให้มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของรายรับเท่ากับมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของรายจ่ายประเมินผลโครงการได้จากสมการที่ 2.27 ค่าผลตอบแทนภายใน (k%) ที่ทำให้มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับศูนย์

เมื่อ $k =$ อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยถังกรองไร้อากาศ

Puñal (2002) พบว่าข้อเสียหลักของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ คือ การใช้เวลาในการเริ่มเดินระบบนาน ดังนั้นการมีความเข้าใจในเรื่องของปัจจัยที่มีผลต่อการรวมตัวและการเกาะติดของจุลชีพ ซึ่งเป็นกลไกหลักของการเก็บกักจุลชีพจะสามารถช่วยให้การเริ่มต้นเดินระบบเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความรวดเร็ว

Elmitwallia (2002) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนขั้นต้น เพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส และเวลากักพักน้ำ 4 ชั่วโมง ทำการทดลองในถังกรองไร้อากาศและถังไร้อากาศแบบลูกผสม จุลชีพทั้งหมดในถังกรองไร้อากาศอยู่เพียงบริเวณที่มีการเกาะติดเพื่อหลีกเลี่ยงการอุดตันและการหลุดออกไปกับน้ำทิ้ง ผลการทดลองพบว่าถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งแบบซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีแขวนลอยได้ดีกว่าถังไร้อากาศแบบลูกผสมอย่างมีนัยสำคัญ โดยถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งหมดร้อยละ 55 และซีโอดีแขวนลอย ร้อยละ 82 ขณะที่ถังไร้อากาศแบบลูกผสมมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งหมด ร้อยละ 34 และซีโอดีแขวนลอยร้อยละ 53 และเนื่องจากว่าทำการเดินระบบในช่วงเวลากักพักน้ำสั้นๆ และอุณหภูมิต่ำ ค่าของการย่อยสลายสารอินทรีย์ (hydrolysis) การผลิตกรด (acidification) และการผลิตก๊าซมีเทน (methanogenesis) ที่อ้างอิงจากค่าซีโอดีในน้ำเข้า ถูกจำกัดไว้เพียง ร้อยละ 12 ร้อยละ 21 และร้อยละ 23 ตามลำดับ สำหรับถังกรองไร้อากาศ และเพียงร้อยละ 12 ร้อยละ 17 และร้อยละ 16 ตามลำดับ สำหรับถังไร้อากาศแบบลูกผสม แต่สล็อตจส่วนเกินจากถังไร้อากาศแบบลูกผสมมีความเสถียรกว่าและตกตะกอนได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม สล็อตจส่วนเกินจากถังทั้งสองแบบต้องมีการปรับเสถียร ดังนั้นจึงเลือกใช้ถังกรองไร้อากาศเพื่อการบำบัดน้ำเสียชุมชนขั้นต้นที่อุณหภูมิต่ำ

Omil, Garrido et al. (2003) ทดลองการบำบัดน้ำเสียเชิงซ้อนจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำานมดิบ ระดับเต็มรูปแบบ (full scale) ซึ่งประกอบด้วยถังกรองไร้อากาศปริมาตร 12 ลูกบาศก์เมตร และถัง SBR (sequential batch reactor) ปริมาตร 28 ลูกบาศก์เมตร หลังจากเดินระบบเป็นเวลา มากกว่า 2 ปี การบำบัดแบบไร้อากาศจึงสำเร็จ โดยปราศจากการกำจัดไขมันออกก่อนเข้าระบบ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีในถังกรองไร้อากาศเท่ากับ 5 - 6 kg COD/m³d ด้วยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่สูงกว่าร้อยละ 90 นอกจากนี้ยังไม่พบการหลุดของจุลชีพออกไปกับน้ำทิ้งและระบบสามารถลดไขมันส่วนใหญ่ที่มีในน้ำเสียได้ นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มสภาพต่างเพื่อรักษาค่าพีเอช

น้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศถูกบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพในถัง SBR และน้ำทิ้งสุดท้ายมีค่าซีโอดีต่ำกว่า 10 mg N/l

เจ็ดศักดิ์ อ่อนระยับ (2548) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กสำหรับบ้านพักอาศัยชุมชนริมน้ำเจ้าพระยา โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) เลือกใช้ตัวกลางกรอง 2 ชนิด คือ พลาสติกที่มีขายตามท้องตลาด (Commercial Media) และขวดยาकुลท์ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีเมื่อใช้ตัวกลางพลาสติกที่มีขายตามท้องตลาด อยู่ที่ร้อยละ 38.59 และอยู่ที่ร้อยละ 47.25 เมื่อใช้ขวดยาकुลท์

จิรวรรณ ออตยกุล (2549) ศึกษาการหาสภาวะไฮโดรไลซิสที่เหมาะสมเพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหย และการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นกรดไขมันระเหย โดยกระบวนการไร้อากาศสองขั้นตอน ใช้ถังปฏิกริยาระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยถังสร้างกรดแบบเอชยูเอสบี ปริมาตรใช้งาน 14 ลิตร เติมน้ำที่พีเอชเริ่มต้น 6 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 14 วัน และระบบยูเอเอสบีขนาด 3.139 ลิตร บำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่มีค่าซีโอดีประมาณ 101,333 - 137,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยถังปฏิกริยาทั้งสองเติมน้ำที่อุณหภูมิห้อง ในการทดลองไฮโดรไลซิส เมื่อป้อนของแข็งแขวนลอยระเหยความเข้มข้นประมาณ 63,300 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยร้อยละ 75.94 และมีประสิทธิภาพในการสร้างกรดไขมันระเหยร้อยละ 91.18 ± 6.98 ส่วนการเดินระบบถังปฏิกริยาเอชยูเอสบี เมื่อป้อนของแข็งแขวนลอยระเหยความเข้มข้นประมาณ $51,930.70 \pm 2,630.51$ มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยร้อยละ 58.21 ± 4.69 และมีประสิทธิภาพในการสร้างกรดไขมันระเหยร้อยละ 84.64 ± 2.87

สิรินภา สิทธิธรรม (2555) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบกรองไร้อากาศในกาบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทรายที่มีค่าซีโอดี 100-5,000 มก/ล. (เทียบเท่าเป็นอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.1 - 5.0 กก.-ซีโอดี/ลบ.ม./วัน) ป้อนน้ำเสียโดยเดินระบบแบบต่อเนื่อง 36 ล./วัน เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.20 ม. สูง 1.50 ม. คิดเป็นเวลาพักพักชลศาสตร์ 24 ชั่วโมง โดยใช้ตัวกลางพลาสติกกรุ่น R-190 ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตร.ม./ลบ.ม. เติมน้ำถังกรองไร้อากาศควบคุมพีเอช อยู่ในช่วง 6.80-7.20 และใส่หัวเชื้อจากการหมักมูลสุกรที่ผ่านการเลี้ยงให้ชินกับน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทรายเป็นระยะเวลา 203 วัน ประมาณ 40% ของปริมาณถัง ผลการทดลองพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.10, 0.20, 0.50, 1.0, 2.0 และ 5.0 กก.-ซีโอดี/ลบ.ม./วัน

มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีร้อยละ 90.0 ± 0.70 , 91.10 ± 1.20 , 95.40 ± 1.0 , 97.80 ± 0.40 และ 97.70 ± 0.30 ตามลำดับ และพบว่าค่าซีโอดีเกือบทั้งหมดลดลงที่ความสูงเพียง 0.25 ม.ของถังปฏิกริยา การศึกษาผลของพื้นที่ผิวตัวกลางตั้งแต่ 0-56,000 ตร.ซม. ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 0.10 และ 1.0 กก.-ซีโอดี/ลบ.ม./วัน มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในการบำบัดซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 83.0 ± 1.70 ถึง 92.30 ± 1.60 แสดงให้เห็นว่าการลดปริมาณตัวกลางลงไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ และพบว่าเวลากักพักกลศาสตร์ลดลงตามอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ โดยคิดเป็นร้อยละ 3.80, 9.80, 10.90, 15.80, 5.50 และ 18.00 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 0.10, 0.20, 0.50, 12.0 และ 5.0 กก.-ซีโอดี/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของน้ำเกลือแสดงถึงลักษณะการไหลในถังปฏิกริยาที่อาจอยู่ในสภาพระหว่าง ถังแบบกวนสมบูรณ์และถังแบบไหลตามกัน การวิเคราะห์หาค่าจลนพลศาสตร์พบว่า ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นอันดับที่หนึ่ง โดยมีค่าคงที่ k_1 เท่ากับ 68.98 ต่อวัน เมื่อนำไปสร้างแบบจำลองกับการบำบัดได้จริงมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทำการทดสอบความคลาดเคลื่อนค่าจลนพลศาสตร์พบว่าค่าที่ได้จากสมการส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 ของความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น แสดงว่าสามารถนำค่าจลนพลศาสตร์ไปใช้ในการออกแบบระบบกรองไร้อากาศได้

ภัทร วิวัฒน์สร (2555) ศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักน้ำ และอัตราการเวียนน้ำกลับต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลทรายที่มีความเข้มข้นซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้ออกซิเจนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.20 เซนติเมตร สูง 1.30 เซนติเมตร จำนวน 2 ถัง ต่อกันเป็นอนุกรมคิดเป็นปริมาตร 72.0 ลิตร ภายในบรรจุตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร เต็มถังปฏิกริยาคิดเป็นพื้นที่ผิวทั้งสิ้น 4,377.60 ตารางเมตร เตรียมหัวเชื้อจากการหมักตะกอนจากมูลสุกรด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ล่วงหน้า 60 วัน เติมน้ำระบบการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลาทั้งหมด 357 วัน ด้วยอัตราการไหลของน้ำคงที่ 1.44 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่ระดับความสูง 0.10, 0.30, 0.50, 1.0, 1.50 และ 2.0 เมตร เพื่อเป็นตัวแทนของระยะเวลาเก็บกักน้ำ 3.50 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าระบบใช้เวลาประมาณ 100 วัน ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว และระยะเวลาเก็บกักน้ำที่มากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงขึ้น โดยที่เวลากักเก็บน้ำ 3.0, 8.0, 13.0, 25.0, 38.0 และ 50.0 ชั่วโมง บำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 90.90 ± 1.20 , 93.30 ± 0.70 , 94.50 ± 0.60 , 94.60 ± 1.50 , 96.90 ± 0.40 และ 97.50 ± 0.50 หรือความเข้มข้นของซีโอดีของน้ำออกจากระบบเท่ากับ 86.0 ± 7.0 , 63.0 ± 5.0 , 52.0 ± 7.0 , 52.0 ± 16.0 , 29.0 ± 3.0 และ 23.0 ± 6.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่อัตราการเวียนน้ำกลับ 1, 2 และ 4 เท่า ไม่ส่งผลต่อการบำบัดซีโอดีแต่

สามารถช่วยในการลดปริมาณการใช้ต่างลงได้ร้อยละ 33.33, 50.0 และ 61.11 ตามลำดับ ในการประเมินค่าจลนพศาสตร์ ได้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (k_1) เท่ากับ 1.10 ± 0.31 ต่อชั่วโมง ซึ่งเมื่อนำไปสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม AQUASIM 2.1b พบว่าซีโอติน้ำออกสอดคล้องกับผลการทดลอง และเมื่อดำเนินระบบเป็นเวลา 249 วันพบว่า ระบบไม่เกิดการอุดตันเนื่องจากระยะเวลาเก็บกักน้ำไม่เปลี่ยนแปลง ทดสอบโดยใช้น้ำเกลือความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสารติดตามจากการวัดผลค่าความนำไฟฟ้าผลการทดลองพบว่า การกระจายตัวของน้ำในถังปฏิกิริยามีลักษณะใกล้เคียงกับถึงกวนสมบูรณ์มากกว่าถึงแบบไหลตามกัน

2.6.2 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยสารซีโอไลท์

Hlavay (1982) ศึกษาการใช้ซีโอไลท์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากภูเขา Tokaj ในประเทศฮังการี ในการกำจัดแอมโมเนียจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียชุมชน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการแลกเปลี่ยนประจุคือ ที่ขนาดอนุภาค 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร ที่อัตราภาระบรรทุก 5 ถึง 7 BV/h โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์บรรจุในคอลัมน์ขนาด 9.5 cm x 92 cm. ส่วนการรีเจเนอเรชันขึ้นของการแลกเปลี่ยนประจุ พบว่าที่ 10 ถึง 20 BV มีความจำเป็นเพื่อการจัดแอมโมเนียได้ร้อยละ 98 ถึง 99 ที่อัตรา 5 ถึง 7 BV/h

Booker (1996) พบว่ากระบวนการดูดซับอย่างรวดเร็วของซีโอไลท์ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ในออสเตรเลียถูกพัฒนาขึ้นเพื่อกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย โดยมีจุดประสงค์ของงานวิจัยเพื่อตระหนักถึงคุณค่าของทรัพยากรธรรมชาติที่มีในออสเตรเลียในฐานะทางเลือกที่มีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในกระบวนการบำบัด การเข้าใจถึงสมดุลและพฤติกรรมทางจลศาสตร์ของซีโอไลท์จะช่วยให้ตระหนักถึงความสามารถในการดูดซับ โดยทำการเดินระบบระดับโรงงานนำร่อง ซึ่งผลการวิจัยในการดูดซับของซีโอไลท์พิสูจน์ให้เห็นถึงศักยภาพในการลดปริมาณแอมโมเนียในน้ำเสียจากความเข้มข้นในช่วง 25 ถึง 50 mg NH₄-N / L เหลือเพียง 1 mg NH₄-N / L นอกจากนี้ยังพบว่า ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมต่อการเดินระบบความสามารถในการดูดซับของซีโอไลท์สำหรับความเข้มข้นแอมโมเนียในน้ำเข้าอยู่ที่ 4.5 mg NH₄-N/g ผลการทดลองนี้สรุปได้ว่าอัตราการบำบัดด้วยคอลัมน์ที่บรรจุซีโอไลท์ระดับโรงงาน นำร่อง เป็นตัวแทนในอุดมคติในกระบวนการบำบัดน้ำเสียอัตราสูงขั้นที่สอง สำหรับการกำจัดสารละลายที่มีแอมโมเนียเป็นองค์ประกอบ

Jorgensen (2003) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียมโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ จากน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมุ่งไปยังผลกระทบของสารอินทรีย์ต่อสมดุลการแลกเปลี่ยนแอมโมเนียมไอออน โดยเครื่องแลกเปลี่ยนประจุที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและตัวแลกเปลี่ยนแบบสังเคราะห์อีกสองตัว สารอินทรีย์เชิงซ้อนที่ศึกษาประกอบไปด้วยกรดซิตริกและโพรตีนหลายชนิด ผลการศึกษาพบว่าในหลายกรณีที่ทำการศึกษา การมีอยู่ของสารอินทรีย์เชิงซ้อนจะช่วยสนับสนุนการกำจัดแอมโมเนียมไอออนของตัวแลกเปลี่ยนประจุ

Satyawali & Balakrishnan (2008) ศึกษาการกำจัดรีเจเนอเรชันในน้ำเสีย โดยใช้ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากเขต Dogatepe ในประเทศตุรกี ทดลองทั้งแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง (แบบคอลัมน์) โดยในการทดลองแบบที่ละเทจะศึกษาผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการกวนผสม (5 - 120 นาที) และความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียม ($8.8 - 885 \text{ mg NH}_4\text{-N / L}$) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและไอโซเทอมของการดูดซับ ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์จะศึกษาผลของอัตราการไหล ค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียม การล้างด้วยกรด และการรีเจเนอเรชันต่อความสามารถในการดูดซับรีเจเนอเรชันของซีโอไลต์ ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียม จาก 5 ไปเป็น 12 mg/L จะช่วยเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนจาก 0.7 ไปเป็น 1.08 mg $\text{NH}_4\text{-N / g}$ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอัตราการไหลและพีเอชที่ทำให้เกิดการดูดซับได้สูงสุดคือ 0.5 ml/min (ณ 0.87 mg $\text{NH}_4\text{-N / g zeolite}$) และ 4 ตามลำดับ ส่วนค่าที่ได้ในการทดลองการล้างด้วยกรด และการรีเจเนอเรชันคือ 1.32 และ 0.73 mg $\text{NH}_4\text{-N / g}$ ตามลำดับ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์จากเขต Dogatepe คือ 164.62 meq. ต่อ 100 กรัม ผลการทดลองทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์จากเขต Dogatepe สามารถใช้ในการกำจัดแอมโมเนียมจากน้ำเสียได้

ศิโรชัย มณีชาติย์ (2552) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ด้วยแมงกานีสซีโอไลต์ ในแบบจำลองคลองวนเวียนขนาด 34,633 ลูกบาศก์เซนติเมตร การศึกษาพบว่าแมงกานีสซีโอไลต์สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้เฉลี่ยร้อยละ 59 ด้วยแมงกานีสซีโอไลต์คละขนาด 1.5-5.0 มิลลิเมตร ปริมาณที่ใช้ 25,225 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อปริมาณน้ำเสีย 12 ลิตร ที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อชั่วโมง และมีระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับซีโอไลต์ 120 นาที ค่าพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 7.9 ที่อุณหภูมิห้องและได้เฉลี่ยร้อยละ 78 ด้วยแมงกานีสซีโอไลต์กำหนดขนาด 1.5 มิลลิเมตร ปริมาณที่ใช้ 25,225 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อปริมาณน้ำเสีย 12 ลิตร ที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อชั่วโมง และมีระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับซีโอไลต์ 120 นาที ค่าพีเอชน้ำเสีย

เท่ากับ 8.6 ที่อุณหภูมิห้อง และแมงกานีสซีไอไลท์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว เมื่อนำมาเพื่อฟื้นฟูสภาพด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 25 กรัมต่อลิตร สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีก 2 ครั้ง ทดสอบ ไอโซเทอร์มในการดูดซับ พบว่า การดูดซับของแมงกานีสซีไอไลท์ในการศึกษานี้สอดคล้องกับสมการ ฟรอนดลิช

2.6.3 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์

ต่อพงศ์ กริธาชาติ (2544) ศึกษาการลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อกระดาษโดย กระบวนการดูดซับ โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของการดูดซับ การเลือกชนิดของสารดูดซับที่เหมาะสมโดยการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ รวมถึงการศึกษาสมดุลและการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้หลอดดูดซับ โดยน้ำเสียที่ใช้ทดลองมีความเข้มข้นสีเฉลี่ย 400.12 Pt-Co Unit มีค่า COD 251.61 mg/l และ TOC 71.14 mg/l ผลจากการศึกษาสมดุลและการทดสอบไอโซเทอร์มของ สารดูดซับสามชนิดพบว่า ด้วยแอคติเวเต็ดคาร์บอนจากไม้ยาง มีความสามารถในการดูดซับสี COD และ TOC จากน้ำทิ้งโรงงานเยื่อกระดาษได้ดีกว่าแอคติเวเต็ดคาร์บอนจากกะลามะพร้าวและถ่านลอย จึงเลือกใช้ด้วยแอคติเวเต็ดคาร์บอนจากไม้ยางในการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้หลอดดูดซับ ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว มีความสูง 2 เมตร เก็บข้อมูลที่ความลึกของชั้นสารดูดซับต่างๆ ได้แก่ 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 และ 1.5 เมตร ที่อัตราการบำบัด 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 gpm/ft² พบว่าที่ความลึก 1.5 เมตร และอัตราการบำบัด 0.5 gpm/ft² จะมีความสามารถในการดูดซับสีจากน้ำทิ้งโรงงานเยื่อกระดาษได้ดีที่สุด

ภัทรนถน บุขสาย (2547) การศึกษาผลของขนาดรูพรุนที่มีต่อความจุดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดรวมทั้งพิจารณาถึงคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานซักรีดที่ผ่านการติดด้วยถ่านกัมมันต์แล้ว ในด้านศักยภาพสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การศึกษานี้ใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่มีขนาดรูพรุน 4 ขนาด อย่างในช่วง 404 –26,640 อังสตรอม การทดลองในแบบกะ ผลการศึกษาพบว่า พีเอชในช่วง 5.0 ถึง 9.5 ไม่แสดงผลอย่างเด่นชัดต่อความจุดูดติด ทีโอซี ซีไอดี และสีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน โดยถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุน 1,781 อังสตรอม (พื้นที่ผิว 967 ตร.ม./ก.) ให้ความจุดูดติดผิว ในรูปของทีโอซีและซีไอดีสูงสุดที่สุด คือ 62.52 และ 80.69 มก./ก. ของถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์ที่มี ขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดคือ 26,640 อังสตรอมมีค่าความจุดูดติดผิวในรูปของสีสูงสุดคือ 16.10 เอดีเอ็ม ไอ/ก. ของถ่านกัมมันต์ ในการทดลองแบบคอลัมน์ที่กำหนดให้ทีโอซีที่ 6 มก/ล. เป็นเบรกทูล พารามิเตอร์พบว่า จุดูดติดผิวสูงสุด โดยมีปริมาตรเบรกทูลเท่ากับ 1,800 ปริมาณเบค ที่ระยะเวลา สัมผัส 60 นาที

ปัญญา มณีจักร (2555) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง โดยการเตรียมถ่านคาร์บอนซ์จากการเผาลูกหูกวางที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นถ่านคาร์บอนซ์ด้วยกรดซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของการดูดซับในถ่านสังเคราะห์ทั้งสองชนิดด้วยเครื่องบลูเนอร์เอลเมท เทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านคาร์บอนซ์มีขนาดเล็กกว่าถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษากลไกการดูดซับด้วยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดิชของการดูดซับของสารละลายไอโอดีน จากกลไกการดูดซับไอโอดีน พบว่าค่า R² ของถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง สอดคล้องกับไอโซเทอร์มฟรุนดิช ซึ่งแสดงกลไกการดูดซับไอโอดีนเป็นแบบหลายชั้น ส่วนถ่านคาร์บอนซ์และถ่านกัมมันต์การค้าจะมีค่า R² สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์ แสดงว่ากลไกการดูดซับไอโอดีนเป็นแบบชั้นเดียว



2.6.4 การศึกษาการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่

อริยะ เตกษณานนท์ (2543) ศึกษาการใช้ไมโครฟิลเทรชันเมมเบรนติดตั้งจุ่มตัวในถังปฏิกรณ์ระบบ เอ.เอส. เพื่อการนำกลับน้ำเสียจากอาคารสูงมาใช้ในกิจกรรมอุปโภค พบว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเฉลี่ยร้อยละ 94-98 รอบเวลาการเติมอากาศ 120 นาที ให้ผลในการกำจัดไนโตรเจนสูงกว่าที่ 90 นาที ดีไนตริฟิเคชัน 41-93 % แปรผันกับค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อที่เคเอ็นในน้ำเสีย 2.10-6.20 ระบบสามารถกำจัดความขุ่นและของแข็งแขวนลอยได้มากกว่า 99 % กำจัดซีโอดี 90 % และไนโตรเจน 40-90 % มีค่าเฉลี่ยในน้ำออก 0.90 SU. และไม่สามารถตรวจพบ พิคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ทำให้น้ำมีความปลอดภัย เข้าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำนำกลับมาใช้เพื่อการอุปโภคของหน่วยงานที่มีผลการการศึกษาที่น่าเชื่อถือของประเทศสหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น

ปรมาภรณ์ โอจงเพียร (2546) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์น้ำทิ้งจากบ้านเรือนที่มีการปรับความเข้มข้นโดยการเจือจางด้วยน้ำประปาเพื่อการปลูกได้ประดับ พบว่าลักษณะคุณสมบัติของน้ำทิ้งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งเพื่อการเกษตร เนื่องจากพบว่าน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจน (TKN) ค่อนข้างสูงโดยอยู่ในช่วง 549.50-723.50 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นภาระไนโตรเจนเท่ากับ 4.60-6.00 มิลลิกรัม/ตัน/วัน และฟอสฟอรัสเข้มข้นเท่ากับ 80.40-95.50 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นภาระฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.70-0.80 มิลลิกรัม/ตัน/วัน

2.6.5 การศึกษาการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้งาน

สมคิด ชัยรัตน์ (2542) ศึกษาการควบคุมความชื้นโดยใช้ความร้อนจากคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศเพื่อการประหยัดพลังงาน การวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำพลังงานความร้อนจากคอนเดนเซอร์ (Reheat Coil) มาลดความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องปรับอากาศ โดยใช้เครื่องปรับอากาศระบบไออัดชนิดแยกส่วนขนาด 30,000 Btu/hr. และใช้ Reheat Coil Unit ขนาดร้อยละ 30 ของคอนเดนเซอร์เดิม (Condensing Unit) ทำการติดตั้งไว้ที่ Fan Coil Unit โดยทำการทดลองที่ Room Sensible Heat Ratio ต่ำสุดเท่ากับ 0.05 ผลการวิจัยพบว่า พลังงานความร้อนที่ได้จากคอนเดนเซอร์ (Reheat Coil) สามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ลงมาได้ประมาณร้อยละ 10-15 RH และค่า COP สูงขึ้นจากระบบเดิมร้อยละ 5

ธนวรา ทองล้วน (2547) ศึกษาประสิทธิภาพในระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยอากาศโดยการพ่นน้ำ การวิจัยนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ และแบบระบายความร้อนด้วยการพ่นน้ำ โดยทำการทดลองที่สภาวะอากาศเดียวกัน พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศแบบระบายความร้อนโดยการพ่นน้ำดีกว่าแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ นอกจากนี้ผลของการศึกษาความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบพ่นน้ำไว้กับเครื่องปรับอากาศขนาด 15,000 และ 4,800 Btu/hr. พบว่าเครื่องปรับอากาศขนาด 15,000 Btu/hr. สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบได้ร้อยละ 15 และค่า COP เพิ่มขึ้นร้อยละ 18 ในขณะที่เครื่องปรับอากาศขนาด 48,000 Btu/hr. สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบได้ร้อยละ 16 และค่า COP เพิ่มขึ้นร้อยละ 20

2.6.6 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

Mohd (2016) ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพกากตะกอนจุลินทรีย์ (Aerobic Granular Sludge) ในการกำจัด COD ฟอสฟอรัส และแอมโมเนียในในระบบบำบัดน้ำเสีย ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สามารถกำจัด COD ได้มากที่สุด ในระยะเวลาที่เร็วที่สุดคือ กำจัดได้ร้อยละ 80 – 85.37 (95 -200 mg /L) ภายในระยะเวลาเพียง 27 วัน อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถกำจัด COD ได้ร้อยละ 90.39 – 98.17 (250-350 mg /L) ภายในระยะ 39 วัน และที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถกำจัด COD ได้ร้อยละ 91.46 – 95.37 (110-210 mg /L) ภายในระยะ 42 วัน ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตนั้น พบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 68.5 (11.8 mg /L) ที่ 40 องศาเซลเซียส กำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 72.46 (14.0 mg /L) และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 67.00 (17 mg /L) และพบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับร้อยละ 84.36 (17.1 mg /L) ที่ 40 องศาเซลเซียส กำจัดแอมโมเนียได้ร้อยละ 71.13 (18.3 mg /L) และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดแอมโมเนียได้ร้อยละ 93.1 (49.9 mg /L) ในการผลทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 50 องศาเซลเซียส ทำให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถกำจัด COD และแอมโมเนียได้มากขึ้น

Kai-li (2017) ทำการศึกษาบทบาทของอุณหภูมิต่อประชากรจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (PTA) โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ อุณหภูมิการทดลองที่ 37, 43 และ 52 องศาเซลเซียส พบว่าที่ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสสามารถกำจัด COD ได้สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 96.10 รองลงมาคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปที่ 43 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD ลดลงเหลือร้อยละ 90.42 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปที่ 52 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 70.08 จากผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับการกำจัด COD คือ 37 องศาเซลเซียส เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอุณหภูมิที่สูงกว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD มีแนวโน้มลดลง



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

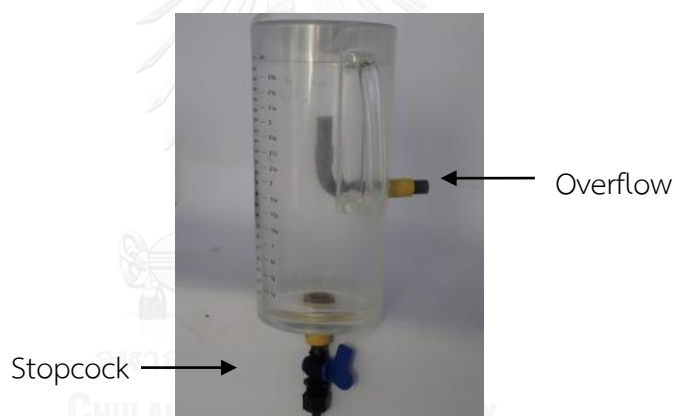
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการต่อประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ

3.1.1.1 ถังจ่ายน้ำเสีย (Feed tank; FT)

ถังจ่ายน้ำเสียดัดแปลงมาจากเหยือกตวงน้ำพลาสติก มีขนาดบรรจุปริมาณน้ำเสีย 1.80 ลิตร ประกอบด้วย วาล์วเปิด-ปิดน้ำ (Stopcock) ท่อน้ำล้น (Overflow) แสดงในรูปที่ 3.1

3.1.1.2 วาล์วควบคุม อัตราการไหลของน้ำ (Burette Stopcock) แสดงในรูปที่ 3.2



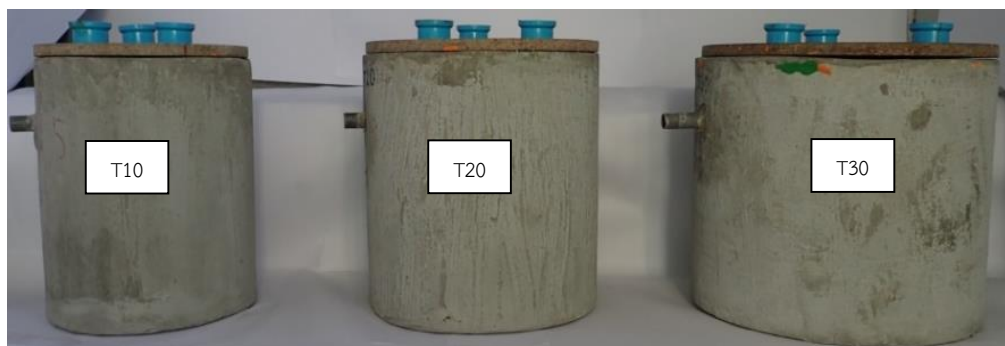
รูปที่ 3.1 ถังจ่ายน้ำเสีย



รูปที่ 3.2 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ

3.1.1.3 ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter, FT) แบบไม่หุ้มฉนวน

ถังกรองไร้อากาศรหัส T10 T20 และ T30 ขนาด 1.80 3.60 และ 5.40 ลิตรตามลำดับ แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ถังกรองไร้อากาศแบบไม่หุ้มฉนวน

3.1.1.4 ถังกรองไร้อากาศแบบหุ้มฉนวน (Insulated Anaerobic Filter; IAF)

ถังกรองไร้อากาศแบบหุ้มฉนวน รหัส T11 T12 และ T13 ขนาด 1.80 ลิตร รหัส T21 T22 และ T23 ขนาด 3.60 ลิตรรหัส T31 T32 และ T33 ขนาด 5.40 ลิตร แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ถังกรองไร้อากาศแบบหุ้มฉนวน

3.1.1.5 เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า (Heater)

เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ เป็นผลิตภัณฑ์ของ ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็น.เอส.แอล.อินเตอร์เทรด เซลล์ แอนด์ เซอร์วิส แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า

3.1.1.6 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Temperature Control Unit; TCU)

ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นประกอบด้วย เครื่องวัดอุณหภูมิน้ำเสีย เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ และเครื่องวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการประยุกต์ใช้ผลการศึกษาจากห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

3.1.2.1 ถังจ่ายน้ำเสีย (Feed tank; FT)

ถังจ่ายน้ำเสียดัดแปลงมาจากถังเก็บน้ำพลาสติกที่หุ้มฉนวนป้องกันความร้อน มีขนาดบรรจุน้ำเสีย 180 ลิตร แสดงในรูปที่ 3.7

3.1.2.2 เครื่องสูบน้ำเสีย (Peristaltic pump)

เครื่องสูบน้ำเสียเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท A.M.H. (THAILAND) CO., LTD รุ่น BT100N แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ถังควบคุมระดับปริมาณน้ำเสีย



รูปที่ 3.8 เครื่องสูบน้ำเสีย

3.1.2.3 ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter, AF)

ถังกรองไร้อากาศสร้างจากคอนกรีตสูง 200 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 80 ซม. หนา 6 ซม. และหุ้มฉนวนป้องกันความร้อน มีขนาดบรรจุปริมาณน้ำเสีย 540 ลิตร ระดับท่อน้ำไหลเข้าและไหลออก + 160 ซม. และท่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มม. แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ถังกรองไร้อากาศ

3.1.2.4 เครื่องปรับอากาศแบบระบบอัดไอ ชนิดแยกส่วน (Split Type Air-Conditioner type Vapor-Compression System)

เครื่องปรับอากาศแบบระบบอัดไอประกอบด้วยเครื่องส่งลมร้อนและเครื่องส่งลมเย็น เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท บีทไวย์ส์ (ประเทศไทยจำกัด) ภายใต้เครื่องหมายทางการค้า Tasaki รุ่น FUGE-A SERIES ชีตความสามารถทำความเย็นสุทธิ 19,302.03 บีทียู (5,660 วัตต์) พิกัดกำลังไฟฟ้า 1,583.60 วัตต์ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Coefficient of Performance; COP_{Overall}) 12.19 บีทียู/วัตต์ (3.57 วัตต์/วัตต์) ระบบไฟฟ้า 220-240 โวลต์ 1 เฟส 50 เฮิรตซ์ ใช้สารทำความเย็น คลอโรไดฟลูอโรมีเทน (CHLORODIFLUOROMETHANE; (CHCLF₂ or R-22) แสดงในรูปที่ 3.10

1) เครื่องส่งลมเย็น (Fan Coil Unit; FCU) รุ่น 3FUGAC0019AE1TK

ภายในเครื่องส่งลมเย็นประกอบด้วยอีวาโปเรเตอร์ (Evaporator) ซึ่งทำจากท่อทองแดงอัดแน่นกับครีบอลูมิเนียม (Plate aluminum fins slit type) ท่อรูเข็ม (Capillary tube) และมอเตอร์พัดลม แสดงในรูปที่ 3.10 (ก)

รายละเอียดมอเตอร์พัดลมรุ่น PM4120189

- Low speed fan	1,244 RPM, 787 CFM	Current 0.32 A
- Medium speed fan	1,310 RPM, 811 CFM	Current 0.40 A
- High speed fan	1,364 RPM, 848 CFM	Current 0.58 A

2) เครื่องส่งลมร้อน (Condensing Unit; CDU) รุ่น 3CUGAC0019AE1TK

ภายในเครื่องส่งลมร้อนประกอบด้วยเครื่องควบแน่น 2 (Condenser 2) ซึ่งทำจากท่อทองแดงอัดแน่นกับครีบอลูมิเนียม (Plate aluminum fins slit type) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) และมอเตอร์พัดลม แสดงในรูปที่ 3.10 (ข)

รายละเอียดคอมเพรสเซอร์รุ่น QP306PAA

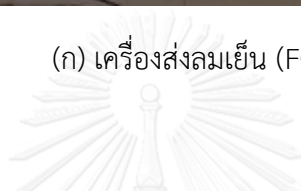
- Rotary compressor	Current 7.00 A
---------------------	----------------

รายละเอียดมอเตอร์พัดลมรุ่น B1-1/10-1W

- Speed fan	840 RPM, 2,999 CFM	Current 0.54 A
-------------	--------------------	----------------



(ก) เครื่องส่งลมเย็น (FCU)



(ข) เครื่องส่งลมร้อน (CDU)

รูปที่ 3.10 เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน

3.1.2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Coaxial heat exchanger) หรือเครื่องควบแน่น 1 (Condenser 1)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสร้างจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.50 มม. หนา 0.80 มม. มีพื้นที่ผิวระบายความร้อนรวม 0.36 ตรม. แสดงในรูปที่ 3.11

3.1.2.6 เครื่องควบคุมทิศทางการไหลของสารแลกเปลี่ยนความเย็น (Bypass valve)

เครื่องควบคุมทิศทางการไหลของสารแลกเปลี่ยนความเย็น ทำการตัดแปลงใช้ Solenoid รุ่น PS-31320 (ASC4) เป็นผลิตภัณฑ์ของ Emerson Electric Co., Ltd จำนวน 2 เครื่อง มาประกอบกันเป็น Bypass Valve แสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 เครื่องควบแน่น 1



รูปที่ 3.12 ขายพลาสติกวาล์ว (Bypass valve)

3.1.2.7 ถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น (The combined of Anaerobic Filter-Condenser system; ANCO)

ถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยถังกรองไร้อากาศ เครื่องปรับอากาศ เครื่องควบแน่น 1 และเครื่องควบคุมทิศทางการไหลของสารแลกเปลี่ยนความเย็น แสดงในรูปที่ 3.13



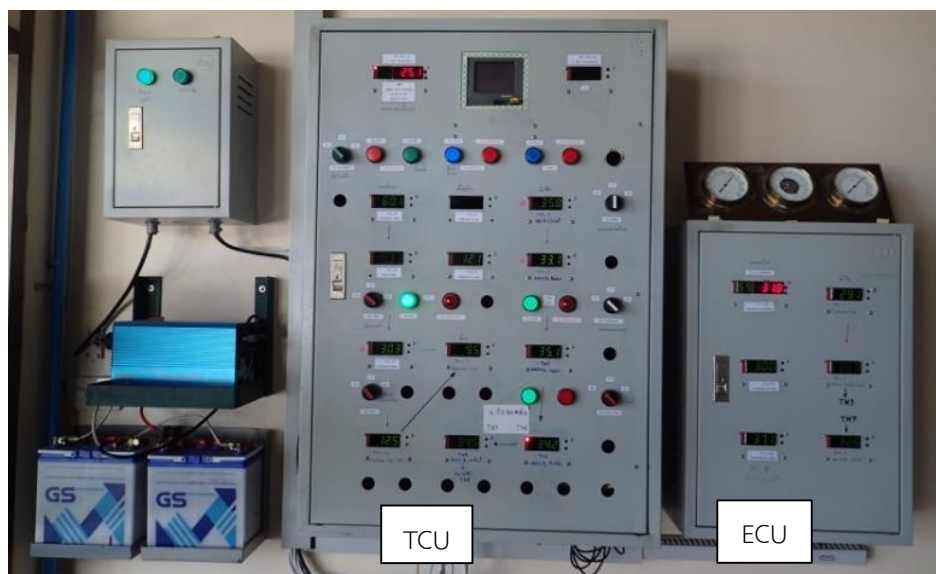
รูปที่ 3.13 ระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

3.1.2.8 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Temperature Control Unit)

ภายในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ประกอบด้วย เครื่องวัดอุณหภูมิน้ำเสีย เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ และเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ

3.1.2.9 เครื่องควบคุมพลังงานไฟฟ้า (Electric Energy Control Unit; ECU)

ภายในตู้ประกอบด้วย แมกเนตริกคอนแทกเตอร์ (Magnetic contactor) รีเลย์เสริมการทำงานแมกเนตริกคอนแทกเตอร์ (Auxiliary relay) สวิตช์เวลา (Timer) เครื่องวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า (Power quality analyzer) แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น-เครื่องควบคุมพลังงานไฟฟ้า

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

3.1.3.1 ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Zeolite-Granular Activated Carbon, Ze-GAC)

ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสร้างจากท่อพีวีซี สูง 2.30 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. ชั้น 8.5 ขนาด มีขนาดบรรจุปริมาณน้ำทิ้ง 32.40 ลิตร ระดับท่อน้ำไหลเข้า + 126 ซม. ไหลออก + 102 ซม. และท่อกว้างเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มม. แสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์

3.1.3.2 ระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (The combined system of Anaerobic Filter-Condenser and Zeolite-Granular Activated Carbon, ANCO & Ze-GAC) แสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาระบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น และถังกรองซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

3.1.4.1 ตัวกลางพลาสติก (Plastic Media)

ตัวกลางพลาสติกเป็นตัวกลางชนิด pall ring ประเภท Random flow configuration ทำจาก Polyethylene จำนวน 1 ลูกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร สูง 90 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวจำนวน 102 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ละ Void ratio 95% เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท อakwa นิชิฮาร่า คอร์ปอเรชั่น จำกัด รุ่น P-102 แสดงในรูปที่ 3.17

3.1.4.2 ฉนวนป้องกันความร้อน (Insulator)

ฉนวนป้องกันความร้อนเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท AEROFLEX ชนิด Closed cell แสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ตัวกลางพลาสติก

ที่มา: <http://www.aeroflex.co.th/Portals/1/products/AEROFLEX%20METRIC%208P.pdf>

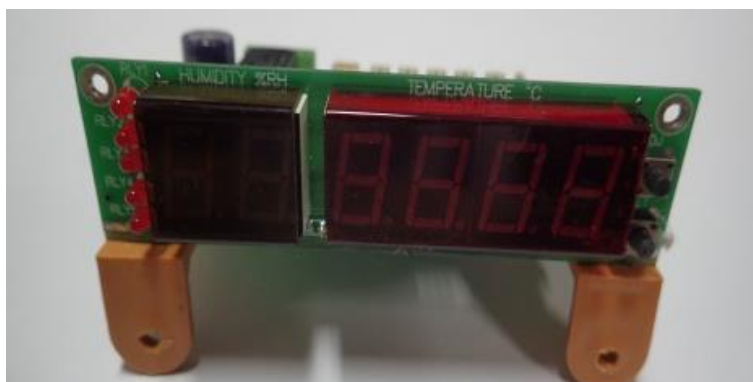


รูปที่ 3.18 ฉนวนหุ้มกันความร้อน

ที่มา: <http://www.aeroflex.co.th/Portals/1/products/AEROFLEX%20METRIC%208P.pdf>

3.1.4.3 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and Humidity Controller)

เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทศิลาเรีเสิร์ชจำกัด โดยใช้บอร์ดวัดอุณหภูมิรุ่น AP-105 Version 2.0 แสดงในรูปที่ 3.19 (ก) ส่วนหัววัดอุณหภูมิและความชื้นเป็นแบบดิจิตอลเบอร์ SHT15 แสดงในรูปที่ 3.19 (ข) มีย่านการวัดอุณหภูมิระหว่าง 10°C ถึง 40°C มีค่าความผิดพลาด $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ย่านการวัดความชื้นระหว่างร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 90 ค่าความผิดพลาดไม่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าร้อยละ 0.2



(ก) บอร์ดวัดอุณหภูมิ AP-105



(ข) หัววัดอุณหภูมิและความชื้น SHT15

รูปที่ 3.19 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น

3.1.4.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature Controller)

เครื่องวัดอุณหภูมิเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทซิลาร์เสิร์จจำกัด โดยใช้บอร์ดวัดอุณหภูมิรุ่น AP-101 Version 2.0 แสดงในรูปที่ 3.20 (ก) หัววัดอุณหภูมิเป็นแบบดิจิตอลเบอร์ DS18B20 แสดงในรูปที่ 3.20 (ข) ย่านวัดอุณหภูมิระหว่าง 55.0°C ถึง 125°C ค่าความผิดพลาดไม่ต่ำกว่าหรือสูงกว่า $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$



(ก) บอร์ดวัดอุณหภูมิ AP-101



(ข) หัววัดอุณหภูมิ DS18B20

รูปที่ 3.20 เครื่องวัดอุณหภูมิ

3.1.4.5 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger)

เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติเป็นเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทศิลาเรีเสิร์ชจำกัด รุ่น AP-LOG Version 1.0 แสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ

3.1.4.6 เครื่องวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า (Power quality analyzer)

เครื่องวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าเป็นผลิตภัณฑ์ของ Kyoritsu Electrical Instruments Works, LTD. รุ่น 6310 และแคลมป์เซนเซอร์วัดกำลังไฟฟ้า (Power clamp sensor) รุ่น 8127 แสดงในรูปที่ 3.22



(ก) เครื่องวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า



(ข) แคลมป์เซนเซอร์รุ่น 8127

รูปที่ 3.22 เครื่องวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า

3.1.4.7 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความต่างศักย์ออกซิเดชัน รีดักชัน (Oxidation reduction potential)

เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง และความต่างศักย์ออกซิเดชัน รีดักชัน เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท แสงชัยมิเตอร์ จำกัด โดยเครื่องวัดรุ่น PH-218 แสดงในรูปที่ 3.23 (ก) หัววัดความเป็นกรด-ด่างรุ่น PE-01 แสดงในรูปที่ 3.23 (ข) และ หัววัดความต่างศักย์ออกซิเดชัน รีดักชันรุ่น ORP-14 แสดงในรูปที่ 3.23 (ค)



(ก) เครื่องวัด pH & ORP



(ข) หัววัด pH



(ค) หัววัด ORP

รูปที่ 3.23 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน

3.2 เคมีภัณฑ์

3.2.1 สารซีโอไลต์ (Zeolite)

สารซีโอไลต์เป็นผลิตภัณฑ์ของ AAA Agritec & Aquaculture (Thailand) Co.,Ltd. มีขนาด 5-7 มิลลิเมตร โดยใช้สินแร่ภูเขาไฟจากประเทศอินโดนีเซีย ที่มีโครงสร้างประกอบด้วย SiO_2 71.10% Al_2O_3 13.12% Fe_2O_3 0.91% CaO 1.54% MgO 0.99% Na_2O 0.90% K_2O 2.40% TiO_2 0.01% LOI 8.72% แสดงในรูป 3.24

3.2.2 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดเป็นผลิตภัณฑ์ของ Carbokran Co.,Ltd.โดยผลิตจากกะลามะพร้าวเผา มีขนาด 1-3 มม. แสดงในรูป 3.25

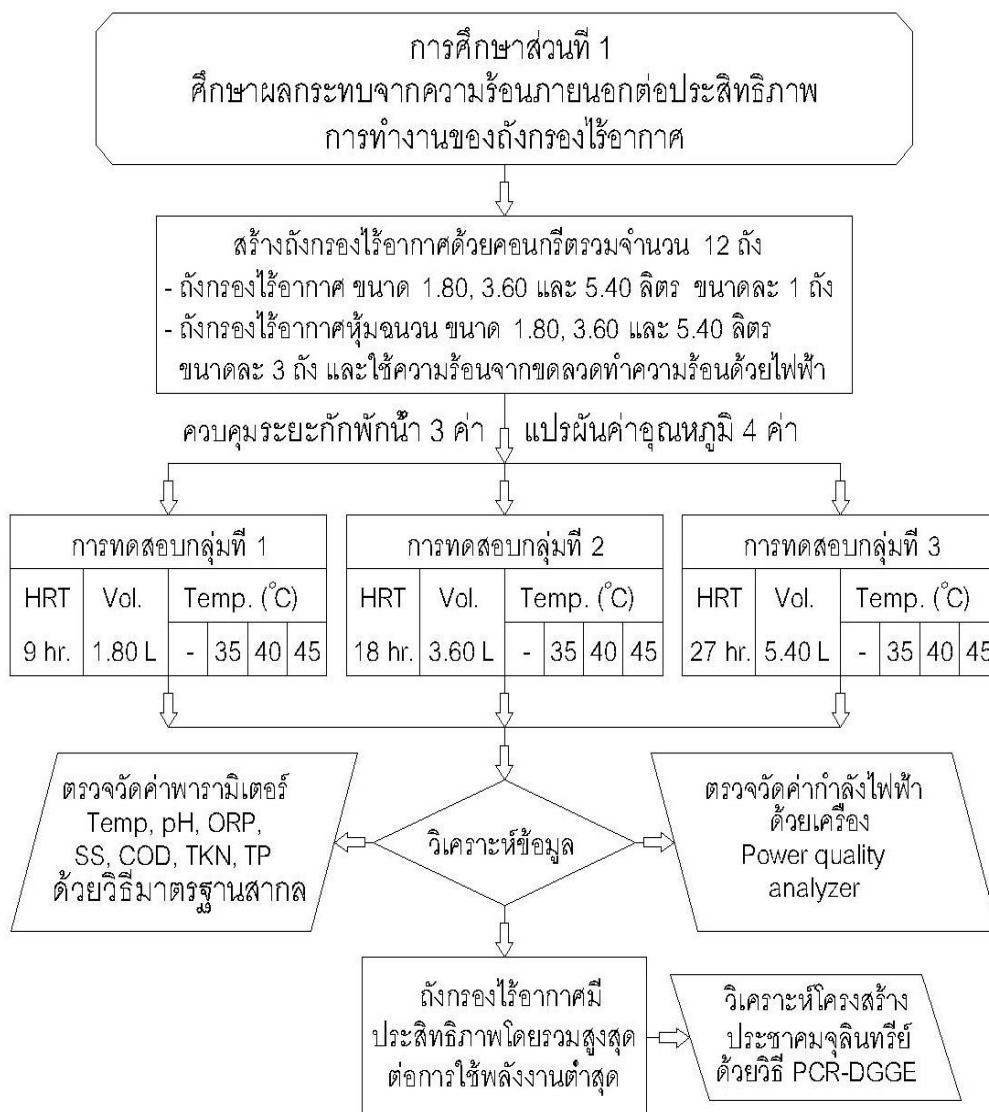


รูปที่ 3.24 สารซีโอไลท์



รูปที่ 3.25 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

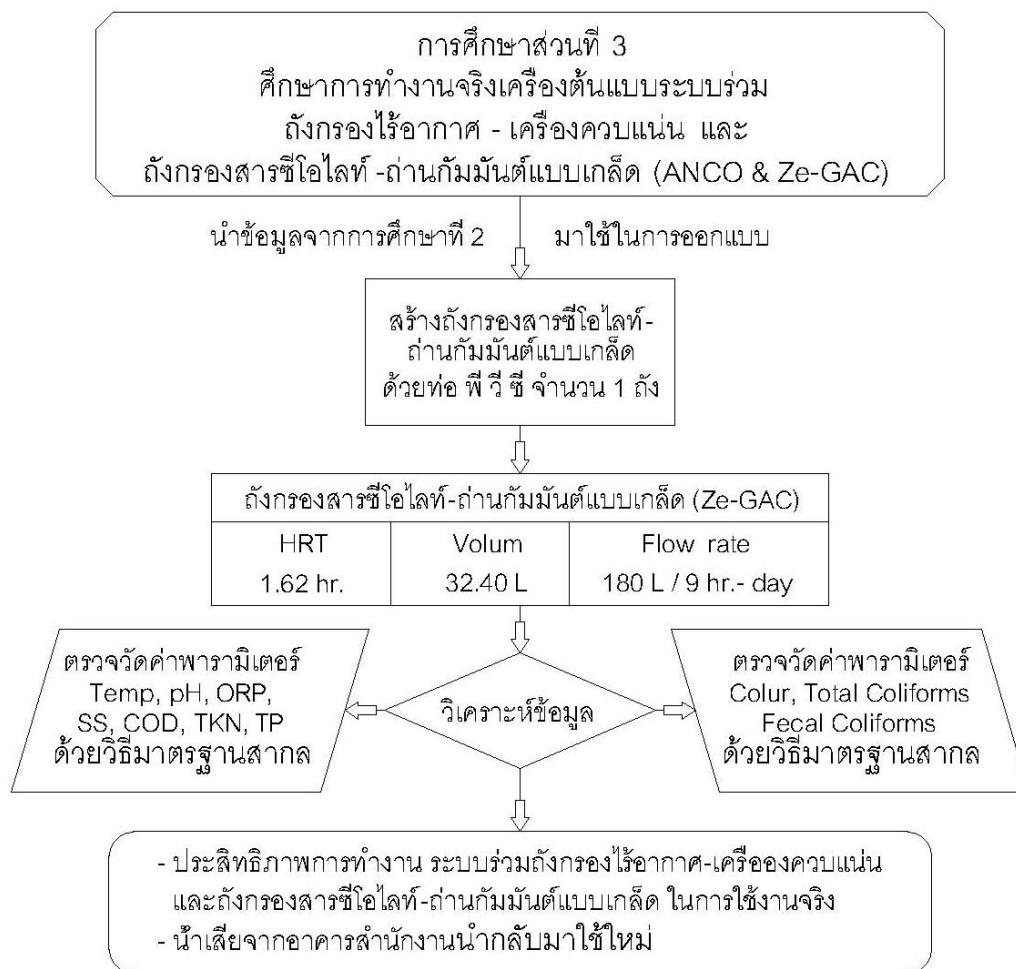
3.3 แผนผังการศึกษา



3.3 แผนผังการศึกษา (ต่อ)



3.3 แผนผังการศึกษา (ต่อ)



3.4 วิธีการศึกษา

3.4.1 รูปแบบการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental research) แบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ การศึกษาในห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) และ การศึกษาสำหรับการนำไปใช้งานจริง (On-site pilot-scale) โดยการศึกษาส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ส่วนการศึกษาที่ 2 และ 3 เป็นการศึกษาการนำผลการศึกษาส่วนที่ 1 ไปขยายผลใช้กับงานจริง ที่อาคารสำนักงาน ออกแบบ อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก

3.4.2 วิธีการวัดและวิเคราะห์

3.4.2.1 การทดสอบเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ไฟฟ้า

ใช้ห้องทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

3.4.2.2 การตรวจสอบเครื่องมือวัดแรงดันสารทำความเย็น (Pressure Gauge)

ทำการทดสอบโดยห้องทดสอบภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2.3 การทดสอบเครื่องปรับอากาศ

ทำการทดสอบเครื่องปรับอากาศตามมาตรฐานเลขที่ มอก. 3134-2553 โดยห้องทดสอบของบริษัท บีทีวีส (ประเทศไทย) จำกัด (บริษัทผู้ผลิตเครื่องปรับอากาศ)

3.4.2.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

1) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวันจันทร์ พุธและศุกร์ (ความถี่ 2 วันต่อครั้ง) เพื่อนำไปใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของแข็งแขวนลอย (Suspended; SS) สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี (Chemical Oxygen Demand; COD) เจตาท์ลไนโตรเจน (Total Kjeldahl Nitrogen; TKN) ฟอสฟอรัสรวม (Total Phosphorus; TP)

2) ใช้ตัวอย่างน้ำของวันพุธจากการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3 เพื่อนำไปใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์สี (Color) โคลิฟอร์มรวม (Total Coliforms; TC) และฟีคัลโคลิฟอร์ม (Fecal Coliforms; FC)

3) การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ 1 ตัวอย่างต่อ 1 ครั้ง โดยใช้ห้องปฏิบัติการทดสอบ ณ ศูนย์ทดสอบวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร โดยการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเป็นไปตามมาตรฐานสากล (Standard Methods of Examination of Water and Wastewater) ของ APHA, AWWA และ WPCF

3.4.2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างประชาคมแบคทีเรีย

โครงสร้างประชาคมแบคทีเรียวิเคราะห์จาก ตัวอย่างน้ำจากถังกรองไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุดจากการศึกษาส่วนที่ 1 ใช้วิธี PCR-DGGE (Microbiological analysis by Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis; PCR-DGGE) และลำดับนิวคลีโอไทด์จากแถบดีเอ็นเอเดรน (DNA sequencing method) ทำการวิเคราะห์โครงสร้างประชาคมแบคทีเรีย โดยภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2.6 การวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH Value; pH) ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (Oxidation Reduction Potential; ORP)

การวัดค่าความเป็นกรดต่างใช้เครื่องวัดความเป็นกรดต่างและความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (pH & ORP Meter)

3.4.2.7 การวัดและควบคุมอุณหภูมิ (Temperature) และความชื้น (Humidity)

การวัดและควบคุมอุณหภูมิใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (TCU) โดยทำการเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิและความชื้นแล้วบันทึกข้อมูลเก็บไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ

1) การศึกษาส่วนที่ 1 ทำการเก็บข้อมูลระยะเวลา 24 ชม. จำนวน 100 วันติดต่อกัน โดยเก็บข้อมูล 2 วินาทีต่อ 1 ข้อมูล

2) การศึกษาส่วนที่ 2 ทำการเก็บข้อมูลช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. จำนวน 90 วันติดต่อกัน โดยเก็บข้อมูล 10 วินาทีต่อ 1 ข้อมูล

3) การศึกษาส่วนที่ 3 ทำการเก็บข้อมูลช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. จำนวน 90 วัน ติดต่อกัน โดยเก็บข้อมูล 10 วินาทีต่อ 1 ข้อมูล

3.4.2.8 การวัดและควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า

การวัดและควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้านั้น ใช้เครื่องควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้า (ECU) โดยทำการเก็บข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าแล้วบันทึกข้อมูลเก็บไว้ในเครื่องวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า

1) การศึกษาส่วนที่ 1 ทำการเก็บข้อมูลระยะเวลา 24 ชม. จำนวน 10 วันติดต่อกัน โดยเก็บข้อมูล 2 วินาทีต่อ 1 ข้อมูล

2) การศึกษาส่วนที่ 2 ทำการเก็บข้อมูลช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. จำนวน 8 วัน ติดต่อกัน โดยเก็บข้อมูล 10 วินาทีต่อ 1 ข้อมูล

3) การศึกษาส่วนที่ 3 ทำการเก็บข้อมูลช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. จำนวน 8 วัน ติดต่อกัน โดยเก็บข้อมูล 10 วินาทีต่อ 1 ข้อมูล

3.5 การศึกษาส่วนที่ 1 ในระดับห้องปฏิบัติการต่อประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ

3.5.1 การวางแผนการทดลอง

การวิจัยเริ่มจากการสร้างถังกรองไร้อากาศที่ทำขึ้นจากคอนกรีตจำนวน 12 ถัง มีความสูง 20 ซม. ภายในถังกรองไร้อากาศทุกถังติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ (Sensor DS18B20) เพื่อใช้ตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิน้ำเสีย ตำแหน่งกึ่งกลางห้องทดลองติดตั้งหัววัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ (Sensor SHT15) ค่าอุณหภูมิจะถูกบันทึกไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger) ตลอดเวลา 24 ชม. ผู้วิจัยดำเนินการจัดกลุ่มการทดสอบถังกรองไร้อากาศออกเป็นสามกลุ่ม (กลุ่มละจำนวน สี่ถัง คือ A, B, C และ D) โดยแต่ละกลุ่มถูกควบคุมอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวตัวกลางพลาสติกต่อปริมาตรน้ำเสียมี่ค่า 0.032 ตรม.ต่อลิตร โดยกำหนดให้

- กลุ่มที่หนึ่ง ถังกรองไร้อากาศมีปริมาตรในการเก็บน้ำเสีย 1.80 ลิตร ภายในติดตั้งตัวกลางพลาสติกขนาด 0.058 ตรม.

- กลุ่มที่สอง ถังกรองไร้อากาศมีปริมาตรในการเก็บน้ำเสีย 3.60 ลิตร ภายในติดตั้งตัวกลางพลาสติกขนาด 0.116 ตรม.

- กลุ่มที่สาม ถังกรองไร้อากาศมีปริมาตรในการเก็บน้ำเสีย 5.40 ลิตร ภายในติดตั้งตัวกลางพลาสติกขนาด 0.174 ตรม. ซึ่งมีระยะเวลาเก็บน้ำเสีย 9 18 และ 27 ชม. ตามลำดับ

การแสดงผลในการทดลองนี้ผู้วิจัยจะใช้ตัวแปรที่ได้จากการคำนวณ คือ ระยะเวลาเก็บน้ำ 9 18 และ 27 ชั่วโมง เป็นตัวแทนกลุ่มการทดลองที่หนึ่ง สองและสามตามลำดับ ถังกรองไร้อากาศทุกกลุ่มจะถูกทดสอบแปรผันค่าอุณหภูมิน้ำเสียจำนวนสี่ค่า โดยกำหนดให้ ถังกรองไร้อากาศ A เป็นถังควบคุมและแปรผันอุณหภูมิตามความร้อนจากอุณหภูมิบรรยากาศภายในห้องทดสอบ ส่วนถังกรองไร้อากาศ B, C และ D ทำการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อน และใช้ความร้อนจากเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ $35^{\circ}\text{C} \pm 0.1$ $40^{\circ}\text{C} \pm 0.1$ และ $45^{\circ}\text{C} \pm 0.1$ ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 3.26 และตารางที่ 3.1 การทำงานของเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้านี้จะถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (TCU) และบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าเก็บไว้ในเครื่องวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าตลอด 24 ชม. ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำเสียวันจันทร์ พุธและศุกร์ไปทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์น้ำ

3.5.2 การทดสอบเครื่องต้นแบบ

การเดินระบบถังกรองไร้อากาศเริ่มจากการใช้มอเตอร์สูบน้ำ (Submersible pump) สูบน้ำเสียจากถังปรับเสมอ (Equalizing tank) ไปเก็บไว้ในถังจ่ายน้ำเสีย (feed tank) จำนวน 1.80 ลิตรต่อถังต่อวัน เริ่มเปิดวาล์ว (stopcock) เวลา 8.00 น. \pm 1 นาที ให้น้ำเสียไหลผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Burette stopcock) เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศด้วยแรงดึงดูดของโลกที่อัตราการไหล 1.80 ลิตรต่อ 9 ชม.-วัน ซึ่งน้ำเสียจะไหลหมดเวลา 17.00 น \pm 5 นาที กำหนดวิธีการไหลของน้ำเสียภายในถังกรองไร้อากาศเป็นแบบไหลย้อนกึ่งต่อเนื่องและใช้แบคทีเรียที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในท้องถิ่น

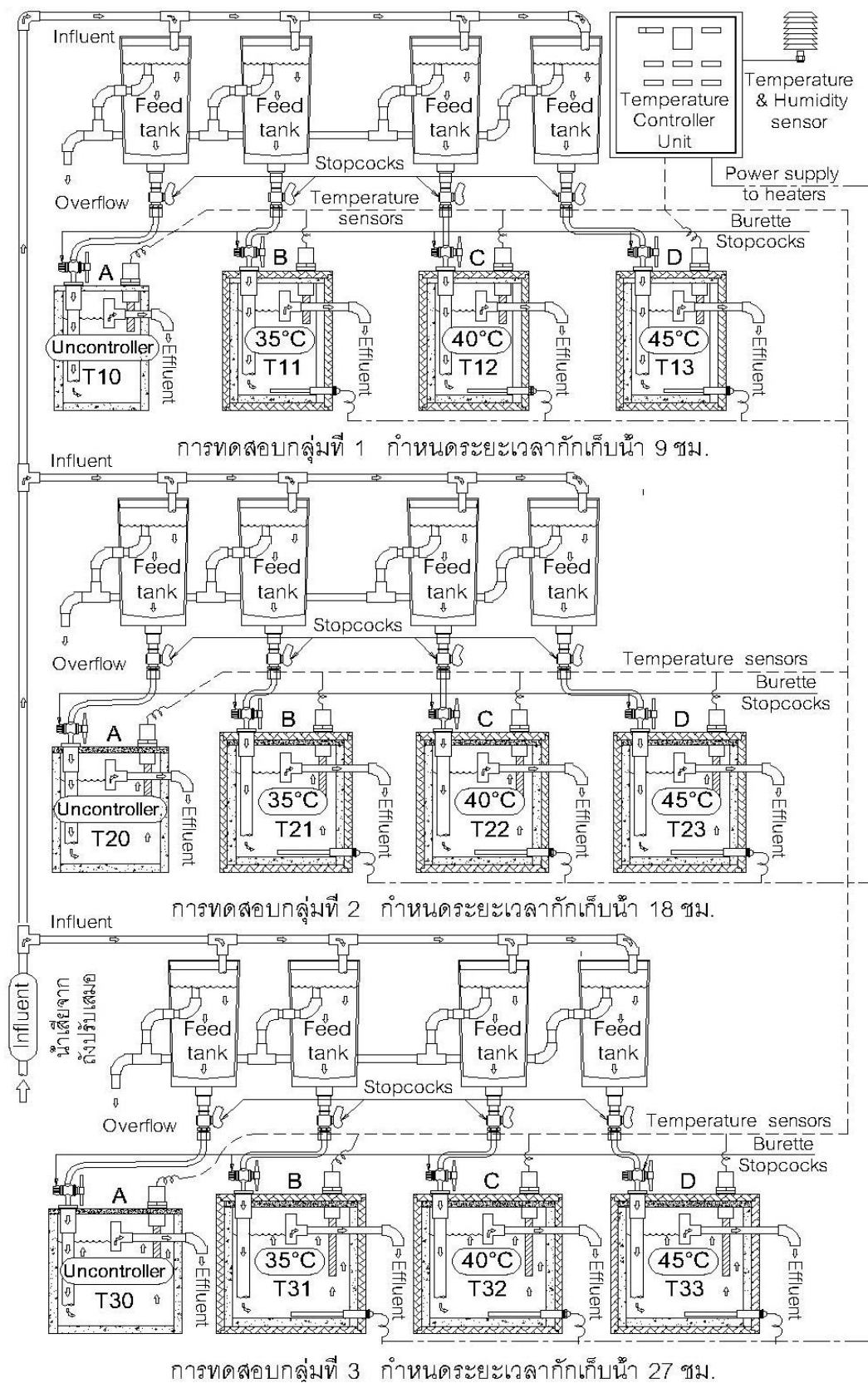
3.5.3 การเก็บข้อมูลจากทดลอง

การทดสอบระบบถังกรองไร้อากาศใช้เวลาต่อเนื่อง 220 วัน โดย 120 วันแรกเป็นการปรับสภาพการทำงานของถังไร้อากาศก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุล (ระบบมีความคงตัวด้านคุณภาพและปริมาณของแข็งแขวนลอยเปลี่ยนแปลงน้อย) หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วจึงเริ่มทำการทดสอบเป็น

เวลา 100 วัน โดยทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำเสีย ความเป็นกรด-ด่างและความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน ที่ตำแหน่งกึ่งกลางถัง แสดงข้อมูลในตารางที่ ข.1 2 และ 3 ตามลำดับ

การเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ตำแหน่งน้ำไหลเข้า (Influent) ถังจ่ายน้ำเสีย (เพื่อนำไปใช้เป็นตัวแทนน้ำเสียเข้าถังกรองไร้อากาศแต่ละถัง) และที่ตำแหน่งน้ำไหลออก (Effluent) เพื่อนำไปทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจตาห์ลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวม ดังแสดงในตารางที่ ข.4 5 6 และ 7 ตามลำดับ ส่วนค่าพลังงานไฟฟ้าที่เก็บได้แสดงในตารางที่ ข.8 9 และ 10 และค่าอุณหภูมิอากาศที่เก็บได้แสดงในตาราง ข.1





รูปที่ 3.26 แผนภาพการทดลองการศึกษาส่วนที่ 1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดคุณสมบัติถังกรองไร้อากาศในการศึกษาส่วนที่ 3

Description	Flow rate (L/9 hr.-day)	Volume (L)	HRT (hr.)	Plastic Media (m ²)	Heat source	Temperature Sensor (No)	Temperature Control (°C)	Thermal protection
First group								
A	1.80	1.80	9	0.058	N/A	1	Ambient	-
B	1.80	1.80	9	0.058	Heater	1	35	protect
C	1.80	1.80	9	0.058	Heater	1	40	protect
D	1.80	1.80	9	0.058	Heater	1	45	protect
Second group								
A	1.80	3.60	18	0.116	N/A	1	Ambient	-
B	1.80	3.60	18	0.116	Heater	1	35	protect
C	1.80	3.60	18	0.116	Heater	1	40	protect
D	1.80	3.60	18	0.116	Heater	1	45	protect
Final group								
A	1.80	5.40	27	0.174	N/A	1	Ambient	-
B	1.80	5.40	27	0.174	Heater	1	35	protect
C	1.80	5.40	27	0.174	Heater	1	40	protect
D	1.80	5.40	27	0.174	Heater	1	45	protect

3.5.4 การวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์

เมื่อได้กลุ่มถังกรองไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด น้ำเสียกลุ่มนี้จะถูกส่งไปวิเคราะห์โครงสร้างประชาคมแบคทีเรียด้วยวิธี PCR-Denaturing gradient gel electrophoresis และการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์จากแถบดีเอ็นเอเด่น (PCR-DGGE) ที่ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6 การศึกษาส่วนที่ 2 การประยุกต์ใช้ผลการศึกษาจากห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

3.6.1 การวางแผนการทดลอง

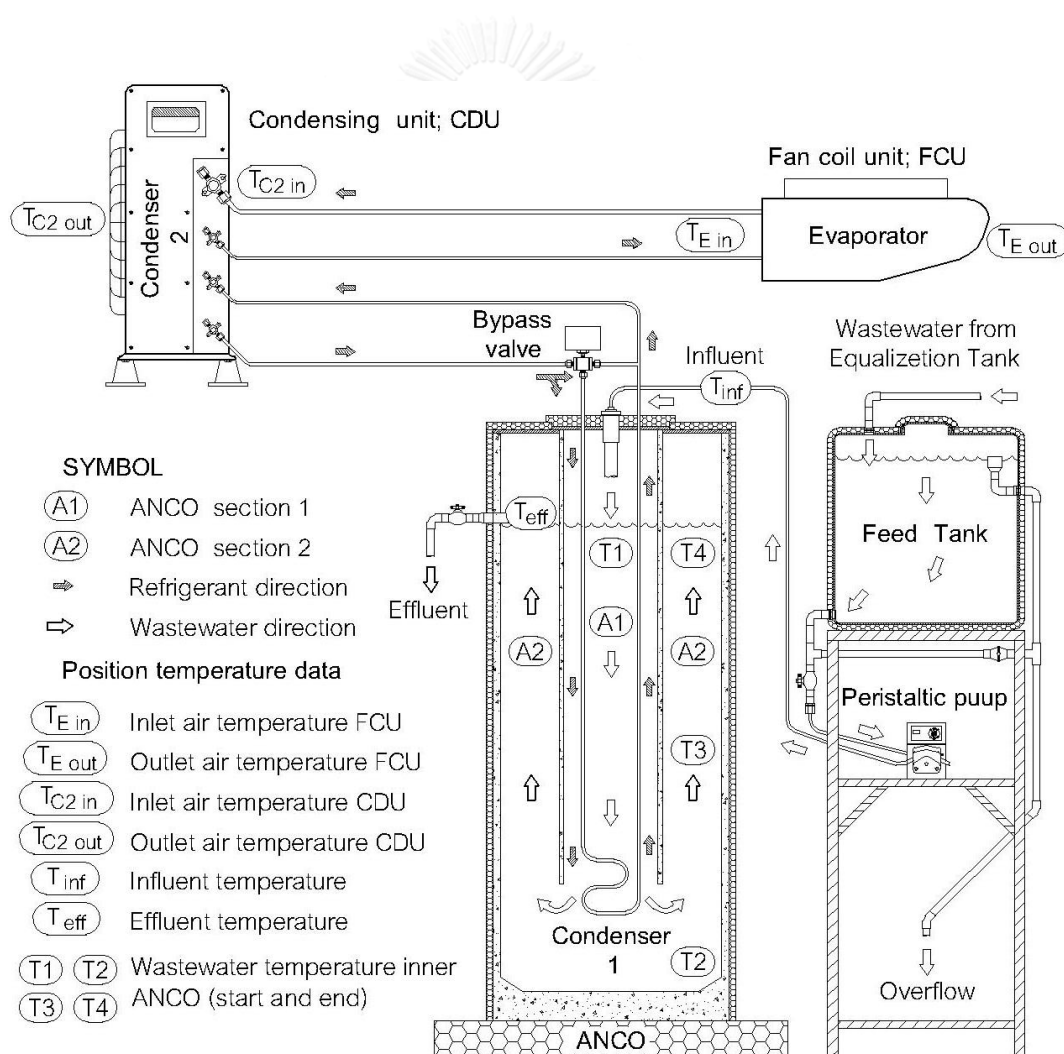
การวิจัยเริ่มจากการนำผลการทดลองจากการศึกษาส่วนที่ 1 ข้อมูลกลุ่มถังกรองไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดมาเป็นต้นแบบเพื่อใช้ในการออกแบบและสร้างถังกรองไร้อากาศและเครื่องควบแน่น จากนั้นจึงนำถังกรองไร้อากาศ - เครื่องควบแน่นไปติดตั้งพร้อมกับเครื่องปรับอากาศที่อาคารสำนักงานออกแบบในอำเภอเมืองจังหวัดพิษณุโลก สำนักงานแห่งนี้มีพนักงานทำงานประจำ 4 คน และเริ่มทำงานเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. (ทุกวันเฉพาะช่วงการทดลอง) ภายในอาคารห้องปรับอากาศมีพื้นที่ 48 ตารางเมตร

สูง 2.85 เมตร ที่ตำแหน่งกลางห้องปรับอากาศ (T_{Indoor}) ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิและความชื้น (Sensor SHT 15) จำนวน 1 หัว และที่เครื่องส่งลมเย็น (FCU) ตำแหน่งอากาศไหลเข้า ($T_{E \text{ in}}$) และไหลออก ($T_{E \text{ out}}$) ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ (Sensor DS18B20) อย่างละ 1 หัว ภายนอกอาคารติดตั้งเครื่องส่งลมร้อน (CDU) ถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น (ANCO) และที่ตำแหน่งใต้หลังคา กันสาดหน้าอาคาร (T_{Outdoor}) ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิและความชื้น (Sensor SHT 15) จำนวน 1 หัว โดยเครื่องส่งลมร้อนที่ตำแหน่งอากาศไหลเข้า ($T_{C2 \text{ in}}$) และไหลออก ($T_{C2 \text{ out}}$) ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ (Sensor DS18B20) อย่างละ 1 หัว ส่วนภายในถังกรองไร้อากาศที่ตำแหน่ง (T_1, T_2, T_3, T_4) ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ (Sensor DS18B20) อย่างละ 1 หัว ที่ตำแหน่งน้ำเสียไหลเข้า (T_{inf}) และไหลออก (T_{eff}) ถังกรองไร้อากาศ ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ (Sensor DS18B20) อย่างละ 1 หัว ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำเสียวันจันทร์ พุธและศุกร์ ที่ตำแหน่งน้ำเสียไหลเข้า (Influent) และไหลออก (Effluent) ถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น แสดงในรูปที่ 3.27 เพื่อนำไปใช้ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ความเป็นกรด-ด่างและความต่างศักย์ออกซิเดชันรี-ดักชัน ของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดาร์ลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวม ส่วนค่าอุณหภูมิของน้ำเสียที่ได้จะถูกบันทึกไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger) และค่าพลังงานไฟฟ้าจะถูกบันทึกข้อมูลเก็บไว้ในเครื่องวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า ในช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น.

3.6.2 การทดสอบเครื่องต้นแบบ

การเดินระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นจะเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ เริ่มจากเปิดเครื่องควบคุมพลังงาน (ECU) เวลา 7.30 น. Submersible pump จะสูบน้ำเสียจากถังปรับเสมอ (Equalizing tank) มาเตรียมเก็บไว้ในถังจ่ายน้ำเสีย (feed tank) จนเต็มจำนวน 180 ลิตร Submersible pump จะหยุดทำงาน ต่อมาเครื่องควบคุมพลังงานจะสั่งการให้ Peristaltic pump และเครื่องปรับอากาศทำงานเวลา 8.00 น. และหยุดทำงานเวลา 17.00 น. การทำงานของ Peristaltic pump จะสูบน้ำเสียจากถังจ่ายน้ำเสียเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศที่อัตราการไหล 180 ลิตรต่อ 9 ชม.-วัน กำหนดวิธีการไหลของน้ำเสียภายในถังกรองไร้อากาศเป็นแบบไหลย้อนกึ่งต่อเนื่องและใช้แบบที่เรียวที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ส่วนคอมเพรสเซอร์และมอเตอร์พัดลมที่เครื่องส่งลมร้อนจะทำงานเมื่อหัววัดอุณหภูมิและความชื้น (T_{Indoor}) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 26°C และหยุดทำงานเมื่อมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25°C

เพื่อเป็นการควบคุมระดับอุณหภูมิน้ำเสียภายในถังกรองไร้อากาศ จึงมีการใช้บายพาสวาล์ว (Bypass valve) มาควบคุมความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศที่จะถ่ายเทให้กับน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศ โดยบายพาสวาล์วจะทำงานเปลี่ยนทิศทางการไหลของสารแลกเปลี่ยนความร้อนจากวงจรอันดับระหว่างเครื่องควบแน่น 1 กับเครื่องควบแน่น 2 มาเป็นแบบกึ่งอันดับเมื่อหัววัดอุณหภูมิ (T_{eff}) มีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับ 37°C และเมื่อน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศมีอุณหภูมิลดลงจนหัววัดอุณหภูมิ (T_{eff}) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 35.50°C บายพาสวาล์วจะเปลี่ยนทิศทางการไหลของสารแลกเปลี่ยนความร้อนจากวงจรกึ่งอันดับระหว่างเครื่องควบแน่น 1 กับเครื่องควบแน่น 2 กลับไปเป็นวงจรแบบอันดับ



รูปที่ 3.27 แผนภาพการทดลองการศึกษาส่วนที่ 2

3.6.3 การเก็บข้อมูลจากทดลอง

การทดสอบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ใช้เวลาต่อเนื่อง 190 วัน โดย 100 วันแรกเป็นการปรับสภาพการทำงานของถังไร้อากาศก่อนเข้าสู่สภาพวะสมดุล และ 90 วันหลังดำเนินการเก็บข้อมูลดังต่อไปนี้

3.6.3.1 เก็บค่าพลังงานไฟฟ้ามอเตอร์พัดลมชุดเครื่องส่งลมเย็น คอมเพรสเซอร์และมอเตอร์พัดลมชุดเครื่องส่งลมร้อน แสดงข้อมูลในตาราง ค.1

3.6.3.2 เก็บค่าอุณหภูมิและความชื้นอากาศภายในอาคารที่ตำแหน่ง (T_{indoor}) และค่าอุณหภูมิอากาศจากเครื่องส่งลมเย็นที่ตำแหน่ง ($T_{\text{E in}}$) และไหลออก ($T_{\text{E out}}$) แสดงข้อมูลในตารางที่ ง.1

3.6.3.3 เก็บค่าอุณหภูมิและความชื้นอากาศภายนอกอาคารที่ตำแหน่ง (T_{Outdoor}) และค่าอุณหภูมิอากาศจากเครื่องส่งลมร้อนที่ตำแหน่ง ($T_{\text{C2 in}}$) และไหลออก ($T_{\text{C2 out}}$) แสดงข้อมูลในตารางที่ ง.1

3.6.3.4 เก็บค่าอุณหภูมิน้ำเสียจากถังกรองไร้อากาศที่ตำแหน่ง (T_{inf}) (T_{inner}) และ (T_{eff}) แสดงข้อมูลในตารางที่ ง.1 โดย (T_{inner}) คือผลรวมค่าอุณหภูมิเฉลี่ย T_1, T_2, T_3, T_4

3.6.3.5 เก็บค่าความเป็นกรด-ด่างและความต่างศักย์ออกซิเดชันรี-ดักชั่น ที่ตำแหน่งกึ่งกลางถัง แสดงข้อมูลในตารางที่ ง.2 และ ง.3 ตามลำดับ

3.6.3.6 เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ตำแหน่งน้ำเสียไหลเข้า (Influent) และน้ำเสียไหลออก (Effluent) เพื่อนำไปทดสอบหาพารามิเตอร์ของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจตาท์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวม แสดงข้อมูลในตาราง ง.4 ง.5 ง.6 และ ง.7 ตามลำดับ

3.7 การศึกษาส่วนที่ 3 การพัฒนาระบบร่วมถังกรองใ้ร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

3.7.1 การวางแผนการทดลอง

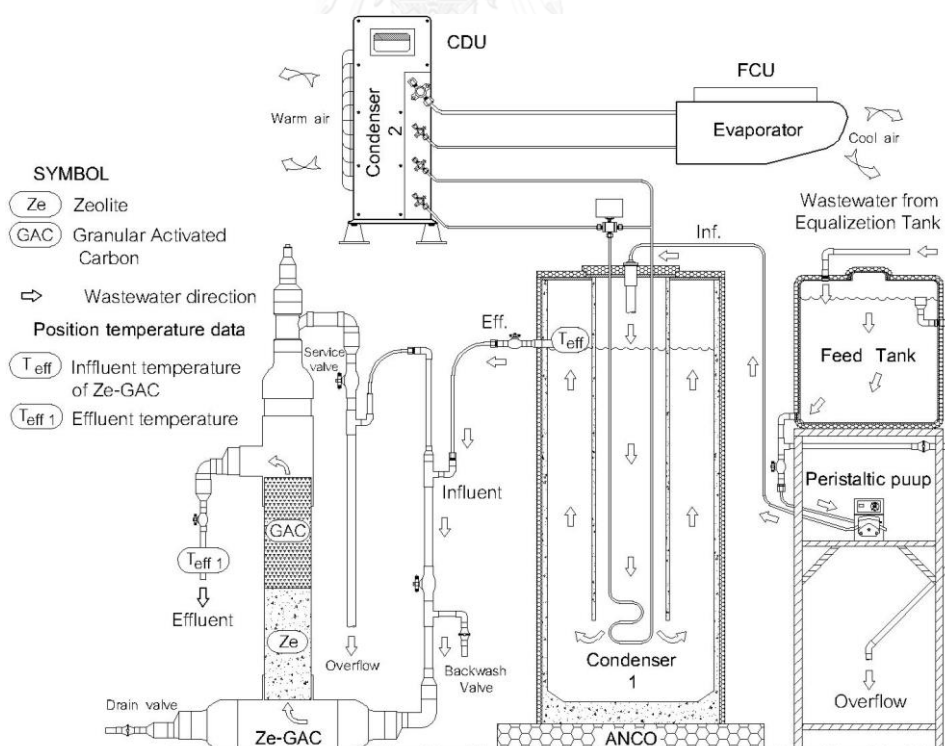
การวิจัยเริ่มจากการนำผลการทดลองจากการศึกษาส่วนที่ 2 และข้อมูลอัตราการไหลของน้ำเสียมาใช้ในการออกแบบและสร้างถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดเสร็จแล้วนำถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดไปติดตั้งร่วมกับถังกรองใ้ร้อากาศ-เครื่องควบแน่น โดยที่ตำแหน่งน้ำเสียไหลออก (T_{eff}) จากถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ (Sensor DS18B20) จำนวน 1 หัว ส่วนตำแหน่งน้ำเสียไหลเข้าถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ใช้ข้อมูล (T_{eff}) จากถังกรองใ้ร้อากาศ-เครื่องควบแน่นแสดงในรูปที่ 3.28 ค่าอุณหภูมิของน้ำเสียที่ได้จะถูกบันทึกไว้ในเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger) ช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ตำแหน่งน้ำเสียไหลเข้า (Influent) และไหลออก (Effluent) ถังกรองใ้ร้อากาศทุกวันจันทร์ พุธและศุกร์ เพื่อนำไปใช้ตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างและความต่างศักย์ออกซิเดชันรี-ดักชัน ของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจตาท์ไลโนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวม ส่วนวันพุธเพิ่มการตรวจวัดค่าสี โคลิฟอร์มรวมและพีคัลโคลิฟอร์ม โดยศูนย์ทดสอบวิศวกรรมโยธา (และสิ่งแวดล้อม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

3.7.2 การทดสอบเครื่องต้นแบบ

การเดินระบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดโดยการต่อท่อน้ำเสียที่ไหลออกจากถังกรองใ้ร้อากาศ-เครื่องควบแน่นเข้ากับท่อน้ำเสียไหลเข้าถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เพื่อให้ทั้งสองระบบทำงานร่วมกันเป็นระบบร่วมถังกรองใ้ร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด แสดงในรูปที่ 3.28 ดังนั้นระยะเวลาในการทำงาน อุณหภูมิน้ำเสียและอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดจะถูกควบคุมจากถังกรองใ้ร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

3.7.3 การเก็บข้อมูลจากทดลอง

การทดสอบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เพื่อการสื่อความหมายให้เข้าใจตรงกันผู้วิจัยจะให้คำว่่าน้ำทิ้งแทนคำว่่าน้ำเสีย ในการแทนความหมายน้ำไหลเข้าและไหลออกจากถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด โดยช่วงระยะเวลา 90 วัน (ตามเวลาการทำงานถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น) ดำเนินการเก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำทิ้งจากถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่ตำแหน่ง (T_{eff}) แสดงข้อมูลในตารางที่ ง.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ตำแหน่งน้ำทิ้งไหลออก (Effluent) แสดงข้อมูลในตารางที่ ง.2 ใช้ตัวอย่างน้ำเสียที่ไหลออกจากถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นที่ตำแหน่ง (Eff) เป็นตัวแทนตัวอย่างน้ำทิ้งไหลเข้า (Influent) และเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งไหลออกที่ตำแหน่ง (Effluent) ไปทดสอบหาพารามิเตอร์ของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจตาท์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวม แสดงข้อมูลในตาราง ง.4 ง.5 ง.6 และ ง.7 ตามลำดับ ใช้ตัวอย่างน้ำของวันพุธนำไปใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์สี (Color) โคลิฟอร์มรวม (Total Coliforms; TC) และฟีคัลโคลิฟอร์ม (Fecal Coliforms; FC) แสดงข้อมูลในตาราง ง.1



รูปที่ 3.28 แผนภาพการทดลองการศึกษาน้ำส่วนที่ 3

3.8 การนำน้ำเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่

3.8.1 การประเมินคุณภาพน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่

ใช้มาตรฐานมาตรฐานและข้อเสนอแนะสำหรับคุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนำกลับไปใช้ใหม่ในการเกษตรกรรมโดย US.EPA แสดงในตารางที่ 2.8

3.8.2 การประเมินปริมาณน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่

เนื่องจากการวิจัยจึงตั้งสมมุติฐานสามารถนำน้ำที่กลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมดจำนวน 180 ลิตรต่อวัน การทำงานของสำนักงาน 260 วัน/ปี (หยุดงานเฉพาะวันเสาร์และอาทิตย์) ใช้ค่าน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพิษณุโลก

3.9 การนำความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่

3.9.1 การประเมินความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ในรูปพลังงานความร้อน

ประเมินความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ในรูปพลังงานความร้อนโดยใช้ค่าความร้อนที่เครื่องควบแน่น 1 (Q_{C1}) ถ่ายเทออกสู่น้ำเสียในถังกรองไร้อากาศ การทำงานของสำนักงาน 260 วัน/ปี (หยุดงานเฉพาะวันเสาร์และอาทิตย์)

3.9.2 การประเมินความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ในรูปพลังงานไฟฟ้า

ใช้สมการที่ 3.1 มาประเมินความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า

$$\Delta \text{Electrical Energy} = \left(\frac{W_{com} Q_{ANCO}}{Q_{com}} \right) - W_{ANCO} \quad (3.1)$$

$\Delta \text{Electrical Energy}$ = ผลต่างค่าพลังงานไฟฟ้า

(W_{com}) = ความสามารถในการทำความเย็นของอีวาโปเรเตอร์ ตามมาตรฐานของบริษัท

ผู้ผลิตเครื่องปรับอากาศ (5,660 วัตต์)

(Q_{com}) = พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องปรับอากาศใช้ ตามมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต

เครื่องปรับอากาศ (1,580 วัตต์)

(W_{ANCO}) = ความสามารถในการทำความเย็นของอีวาโปเรเตอร์ จากการทดสอบ
เครื่องต้นแบบถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ในช่วงเวลา 9 ชม.
(8.00 น. ถึง 17.00 น.)

(Q_{ANCO}) = พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องปรับอากาศใช้ จากการทดสอบเครื่องต้นแบบ
ถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ในช่วงเวลา 9 ชม.
(8.00 น. ถึง 17.00 น.)

การทำงานของสำนักงาน 260 วัน/ปี (หยุดงานเฉพาะวันเสาร์และอาทิตย์) และใช้อัตราค่า
ไฟฟ้าประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย อัตราปกติ ใช้พลังงานไฟฟ้าเกิน 150 หน่วยต่อเดือน (หน่วยที่ 151
– 400) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มาคำนวณเป็นจำนวนเงินที่ใช้จ่ายและเงินที่ประหยัดลงได้

3.10 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง

จากการประเมินความสามารถของโครงการเบื้องต้นว่ามีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสม
เพียงใดในการลงทุน โดยการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการผ่านเครื่องมือระยะเวลา
การคืนทุน (Payback Period)

3.10.1 ระยะเวลาการคืนทุน

หมายถึง ระยะเวลาจำนวนเดือนหรือปีที่จะได้รับเงินลงทุนคืนจากการลงทุนในโครงการ
เพื่อใช้ในการตัดสินใจลงทุนเบื้องต้นที่ยังไม่ได้วิเคราะห์ผลกำไรหรือขาดทุนและไม่คิดมูลค่าเงินเพื่อ
ตามกาลเวลา ซึ่งการประเมินระยะเวลาคืนทุนเบื้องต้นใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนเงินที่ได้รับคืนต่อปี} &= \text{มูลค่าน้ำทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ต่อปี} + \text{มูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่} \\ &\text{ประหยัดได้ต่อปี} - \text{ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่อปี} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\text{ระยะเวลาการคืนทุน} = \text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น} / \text{จำนวนเงินที่ได้รับคืนต่อปี} \quad (3.3)$$

3.10.2 การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น

การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นโดยจะประเมินจากค่าใช้จ่ายค่าอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3 แบบนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

3.10.3 การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่อปี

การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง โดยจะประเมินจากค่าใช้จ่ายค่าซ่อมบำรุงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3 แบบนำไปประยุกต์ใช้งานจริง



บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

4.1 การศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการต่อประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ

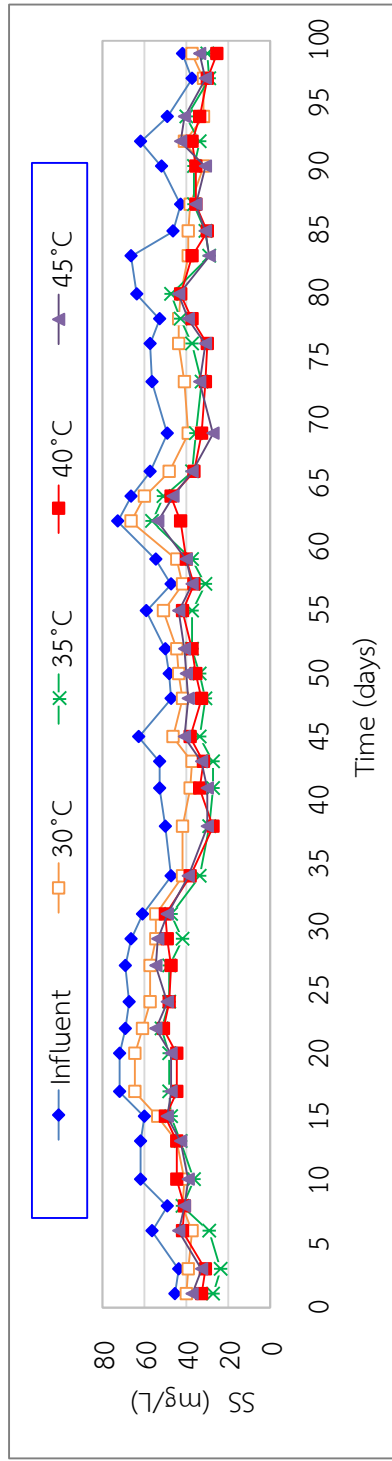
การจัดการทดลองถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถังในห้องปฏิบัติการ โดยจัดกลุ่มการทดลอง ออกเป็น 3 กลุ่ม คือระยะเวลาพักน้ำ 9 18 และ 27 ชั่วโมง (ทุกกลุ่มถูกควบคุมอัตราส่วนระหว่าง พื้นที่ผิวตัวกลางพลาสติกต่อปริมาณน้ำเสียอยู่ที่ 0.032 ตรม.ต่อลิตร) และแต่ละกลุ่มแปรผันค่า อุณหภูมิน้ำเสียจำนวน 4 ค่าคือ A ไม่หุ้มฉนวนป้องกันความร้อน ไม่ได้ใช้ความร้อนจากภายนอกมา เพิ่มอุณหภูมิให้น้ำเสีย อุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 30°C ส่วน B C และ D หุ้มฉนวนป้องกันความร้อนและ ใช้ความร้อนจากเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้ามาเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำเสีย โดยควบคุมอุณหภูมิ น้ำเสียอยู่ที่ 35°C 40°C และ 45°C ตามลำดับ โดยช่วงเริ่มต้นในการเดินระบบถังกรองไร้อากาศใช้ เวลา 120 วัน ถังกรองไร้อากาศเข้าสู่สภาวะสมดุล (ระบบมีความคงตัวด้านคุณภาพและปริมาณ ของแข็งแขวนลอยเปลี่ยนแปลงน้อย) เดินระบบต่อไปอีก 100 วัน เพื่อให้แน่ใจว่าระบบคงตัวแล้ว เก็บตัวอย่างน้ำที่เข้าออกจากระบบในช่วง 100 วัน ไปทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์น้ำ รายงานผล การทดลองออกเป็นสองส่วนคือ ผลการบำบัดน้ำเสียของถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง และผลการ บำบัดน้ำเสียของถังกรองไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า ต่ำสุด

4.1.1 ผลการบำบัดน้ำเสียของถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง

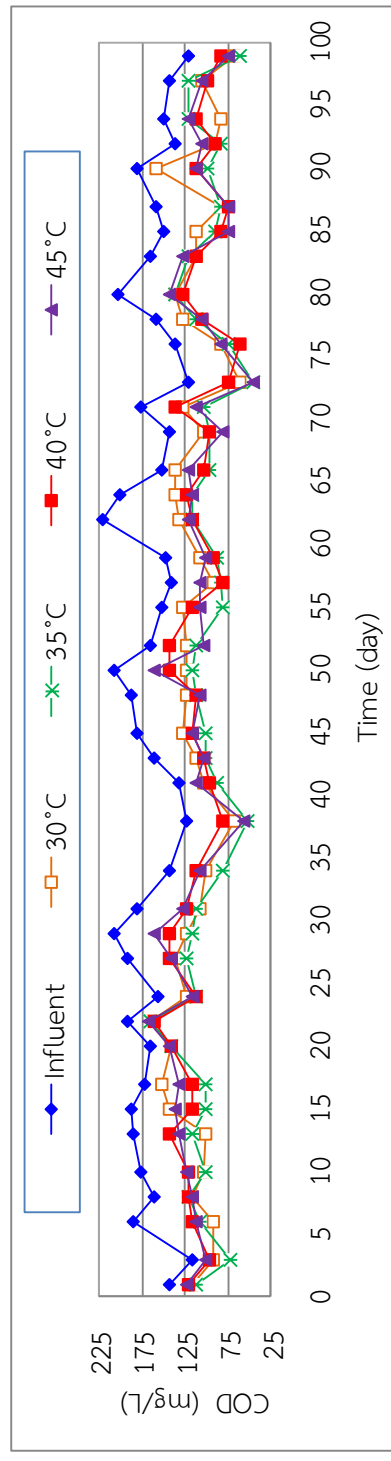
จากการวัดอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบตลอดระยะเวลาการทดลองมีค่าเฉลี่ย $30.69^{\circ}\text{C} \pm 0.79$ ส่งผลทำให้อุณหภูมิน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศ A ที่ควบคุมระยะเวลาพักน้ำ 9 18 และ 27 ชม. มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ $29.97^{\circ}\text{C} \pm 0.91$, $29.95^{\circ}\text{C} \pm 0.34$ และ $29.98^{\circ}\text{C} \pm 0.75$ ตามลำดับแสดง ข้อมูลในตาราง 4.1 แต่เพื่อความสะดวกในการแสดงข้อมูลผู้วิจัยจึงใช้ค่าอุณหภูมิ 30 °C เป็นตัวแทน ค่าอุณหภูมิน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศ A ทั้งสามกลุ่ม จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์น้ำใน ระยะเวลา 100 วัน พบว่าระบบถังกรองไร้อากาศที่อุณหภูมิและระยะพักน้ำที่แตกต่างกันมีคุณภาพ น้ำทิ้งของระบบหลังการบำบัดค่อนข้างคงที่ แสดงว่าระบบถังกรองไร้อากาศสามารถเดินระบบเข้าสู่ สภาวะคงตัว ค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีของน้ำทิ้งที่อุณหภูมิ 35°C และระยะพักน้ำ 27 ชม. มีค่าน้อยสุดอย่างเห็นได้ชัด โดยสามารถพิจารณาคุณภาพน้ำทิ้งหลังการ บำบัดได้จากตารางที่ 4.1 และประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยของแต่ละถังกรองไร้อากาศดังแสดงใน

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยและภูมิของสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำเสียในระบบมาเป็น 35°C อย่างไรก็ตาม ถ้าอุณหภูมิน้ำเสียในระบบสูงเกินกว่า 35°C ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีลดลงได้ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดเจตาท์ไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 45°C มีค่าน้อยสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆ ส่วนกรณีของฟอสฟอรัสพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระบบ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการใช้ความร้อนกับระบบ (ที่ 30°C)



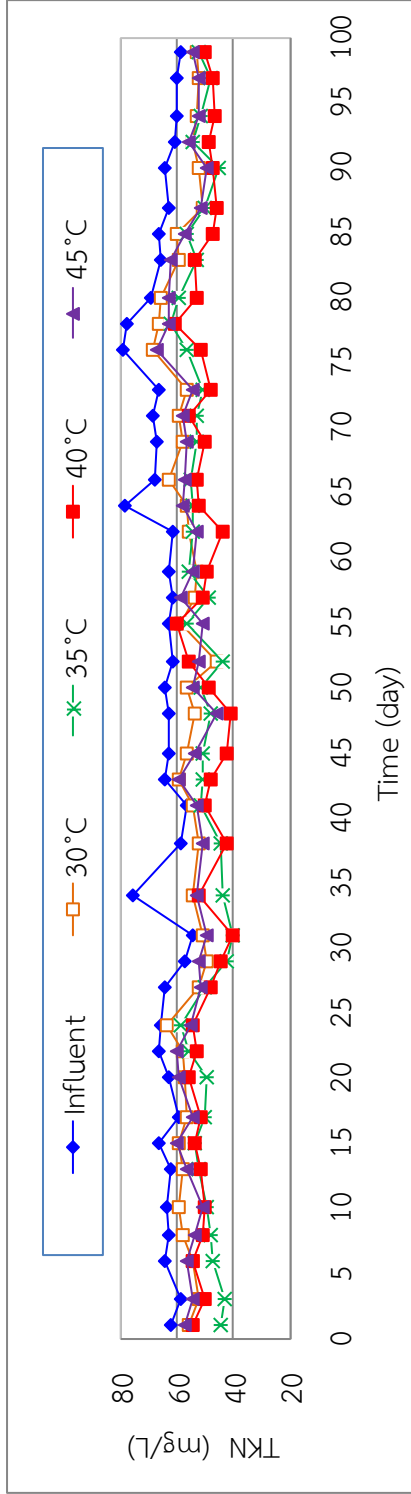


(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาที่พักน้ำ 9 ชม.

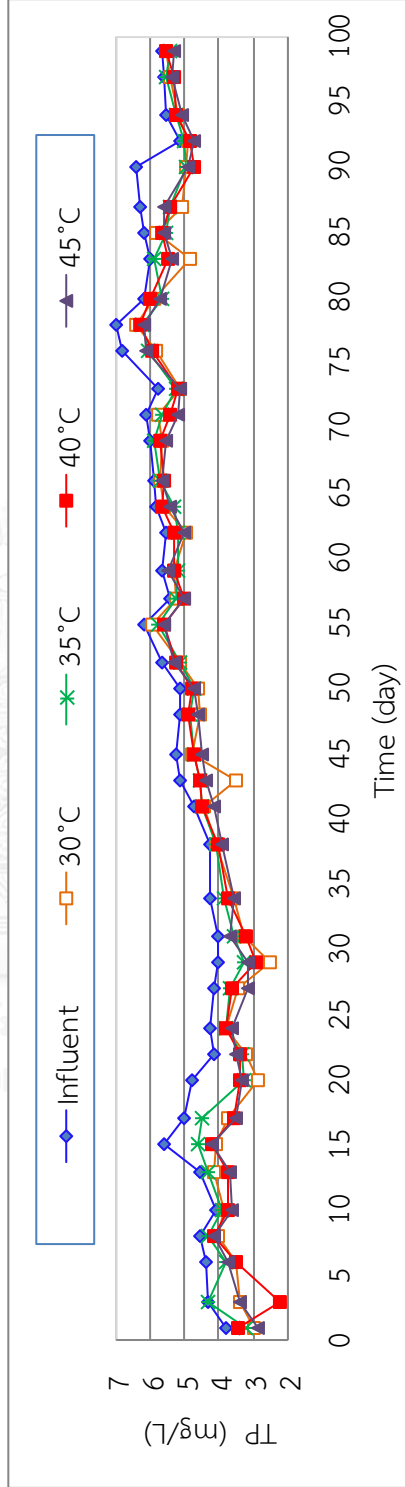


(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูปซูบิโอดีของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาที่พักน้ำ 9 ชม.

รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซูบิโอดี (ค) เจคาล์โนไตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาที่พักน้ำ 9 ชั่วโมง

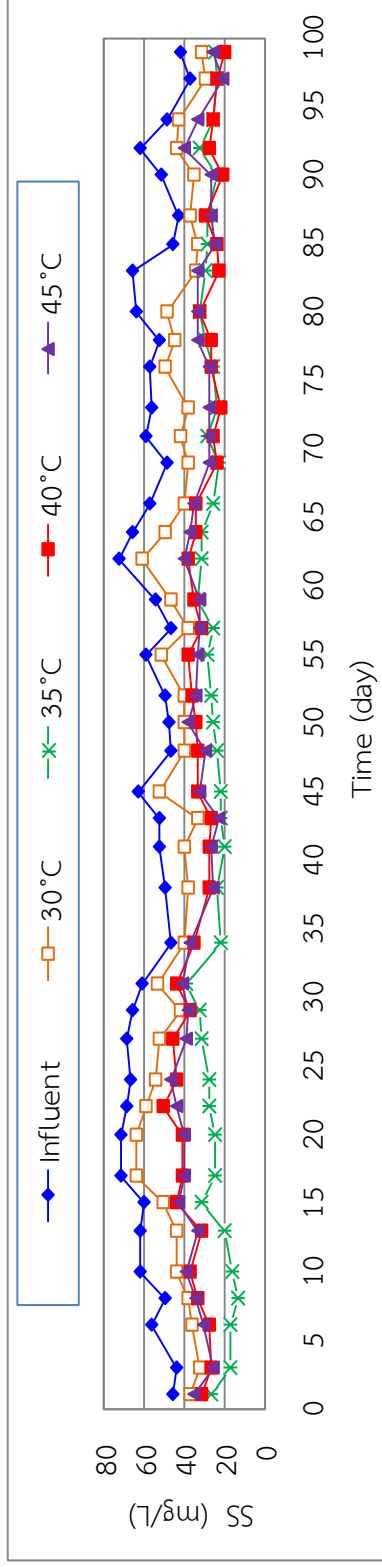


(ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าเจตาท์ไนโตรเจนของไร้อากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 9 ชม.

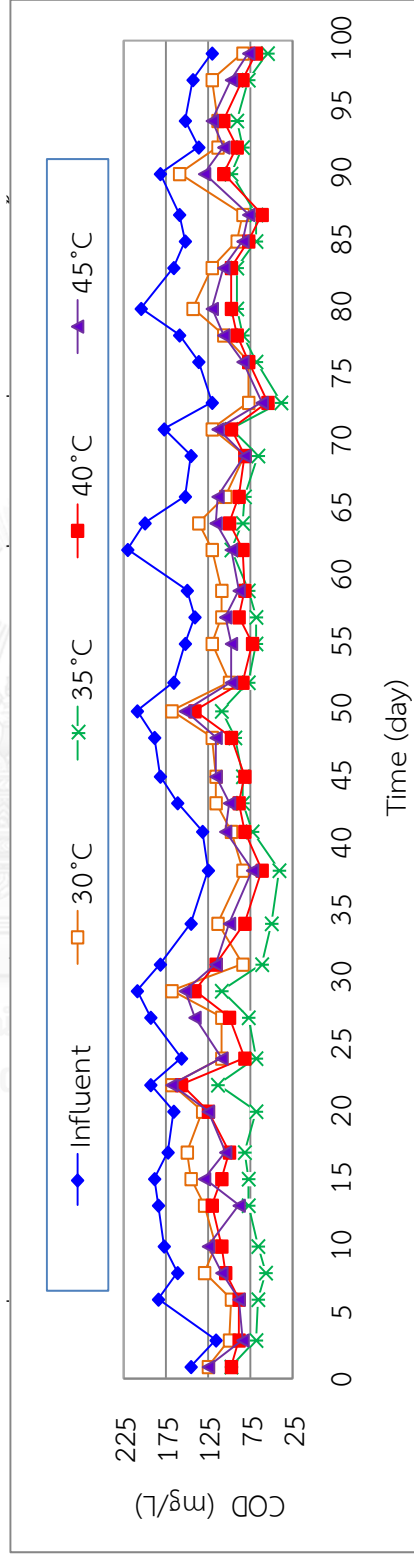


(ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าฟอสฟอรัสรวมของไร้อากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 9 ชม.

รูปที่ 4.1 (ต่อ) แสดงการเปลี่ยนแปลงการความเข้มข้น (ก) ของแฉะแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี (ค) เจตาท์ไนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 9 ชม.

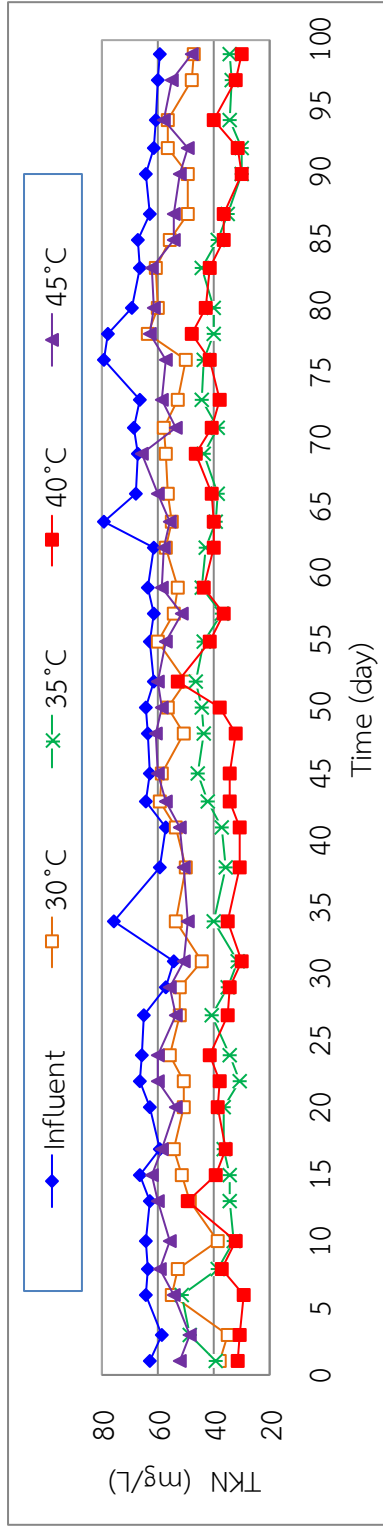


(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าของแข็งแขวนลอยของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 18 ชม.

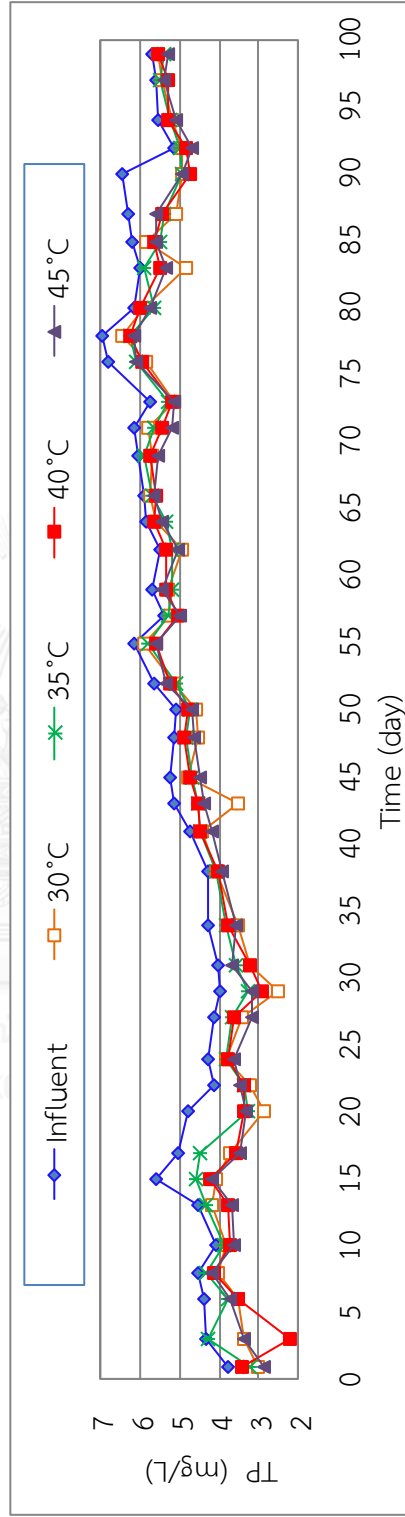


(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าสารอินทรีย์ในรูปซีโอไซด์ของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 18 ชม.

รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีโอไซด์ (ค) เจดาคีโนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 18 ชั่วโมง

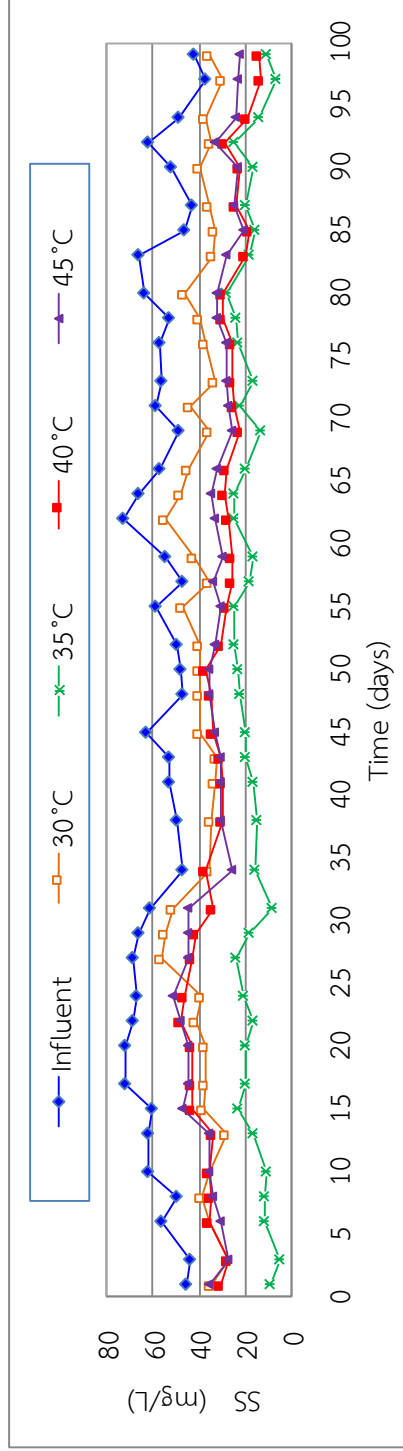


(ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าเจดาคาร์บอนไนโตรเจนของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาที่กักพักน้ำ 18 ชม.

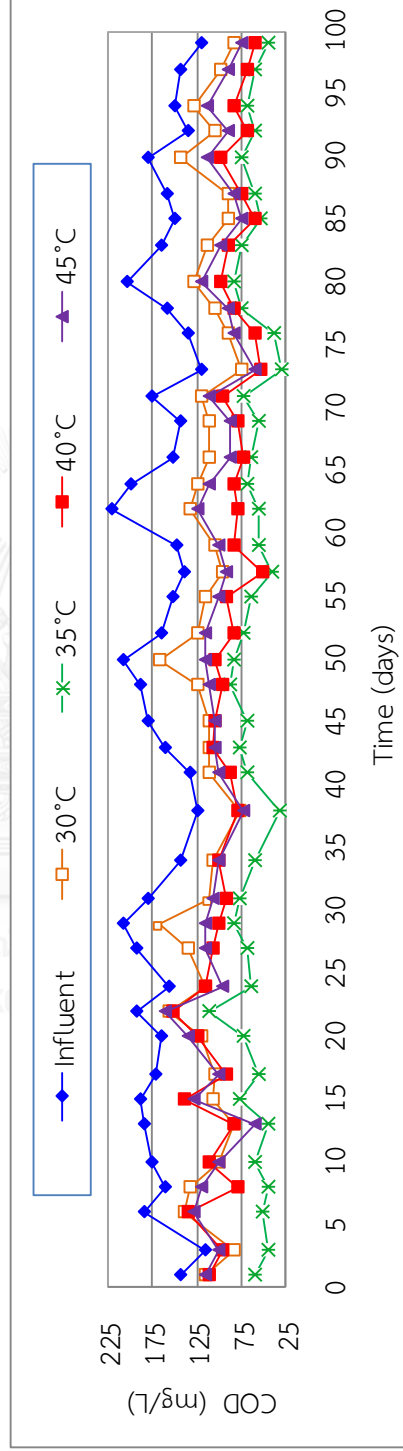


(ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าฟอสฟอรัสรวมของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาที่กักพักน้ำ 18 ชม.

รูปที่ 4.2 (ต่อ) แสดงการเปลี่ยนแปลงการความเข้มข้น (ก) ของแฉียงแฉวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี (ค) เจดาคาร์บอนไนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาที่กักพักน้ำ 18 ชม.

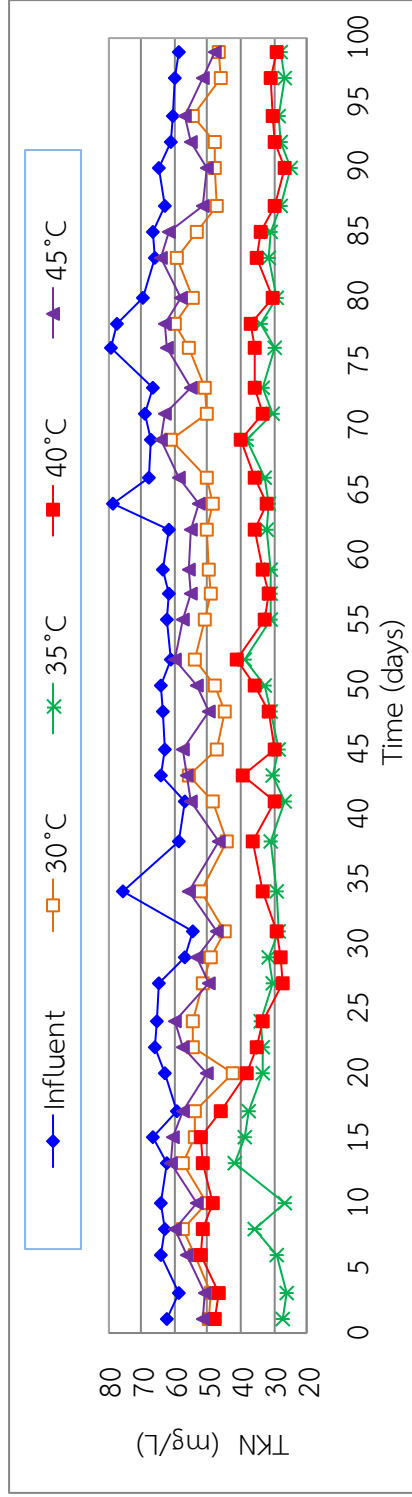


(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยของถังกรองใรร้ออากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม.

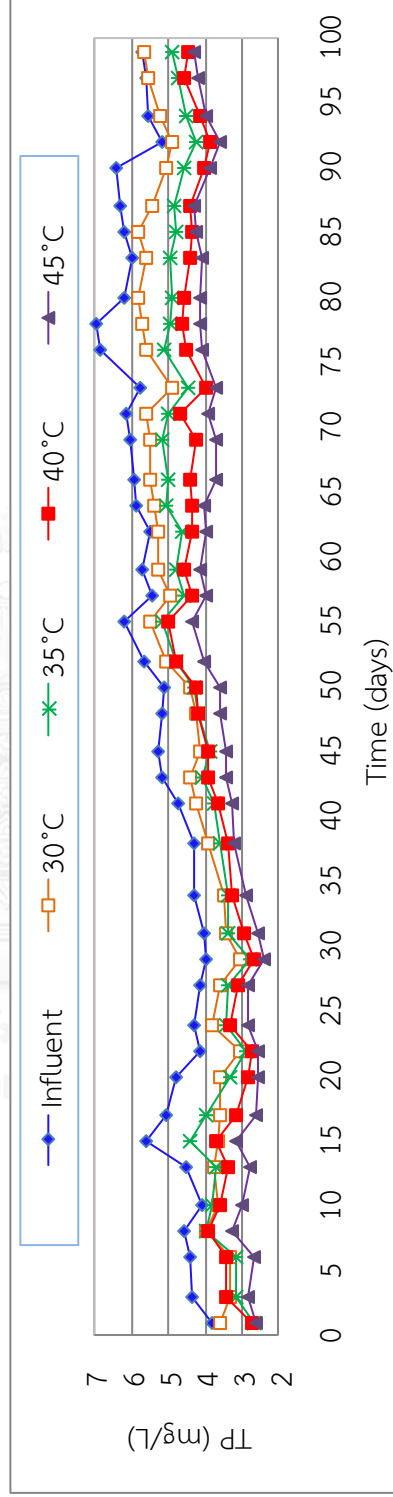


(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าสารอินทรีย์ในรูปซีโอไซด์ของถังกรองใรร้ออากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม.

รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีโอไซด์ (ค) เจดาคัลไมโนเตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองใรร้ออากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชั่วโมง



(ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าเจตาที่ลดไนโตรเจนของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม.



(ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าฟอสฟอรัสรวมของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม.

รูปที่ 4.3 (ต่อ) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแอมโมเนียไนโตรเจน (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี (ค) เจตาที่ลดไนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองไร้อากาศที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม.

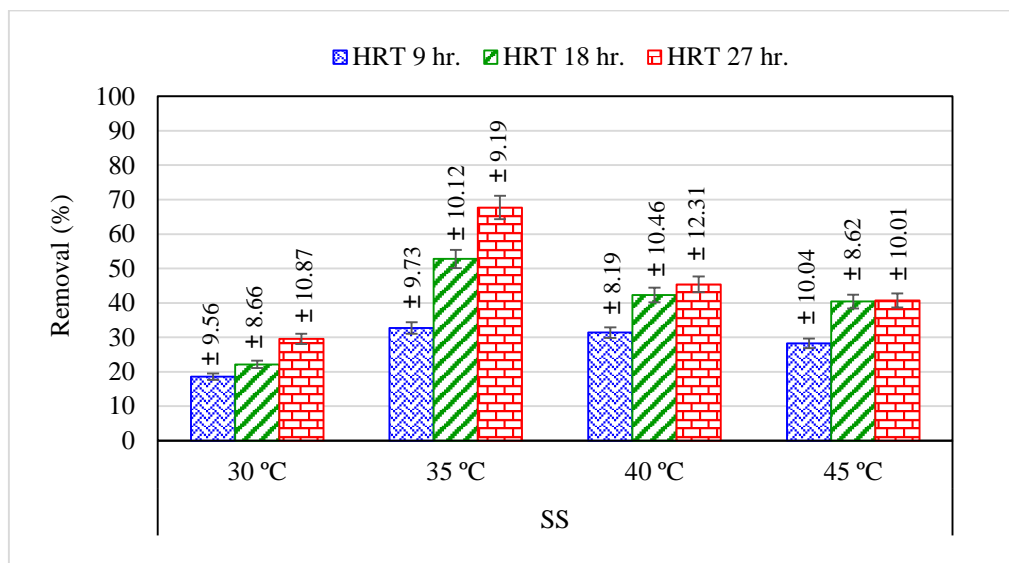
ตารางที่ 4.1 แสดงคุณภาพน้ำเฉลี่ยก่อนและหลังการบำบัดแต่ละถังกรองไร้อากาศ รวมจำนวน 12 ถัง

ดัชนีชี้วัดคุณภาพ	น้ำเสียก่อน												
	เวลาที่พักน้ำ 9 ชม.						น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังกรองไร้อากาศ						
	T10	T11	T12	T13	T20	T21	T22	T23	T30	T31	T32	T33	
อุณหภูมิ (°C)	29.82	30	35	40	45	30	35	40	45	30	35	40	45
พีเอช	7.17	7.83	7.88	7.98	8.06	7.85	7.91	8.00	8.26	7.89	7.88	7.97	8.18
โอมาร์พี (mV)	-225	-197	-225	-244	-333	-235	-200	-197	-323	-250	-217	-196	-321
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	56.13	45.58	37.68	38.33	40.02	43.68	26.07	32.23	33.24	39.06	18.11	30.64	33.21
สารอินทรีย์รูปซีโอไซด์ (mg/L)	163.52	113.77	101.88	111.42	112.79	115.20	76.44	93.43	106.53	113.72	63.28	91.50	102.72
ไนโตรเจนรวม (mg/L)	64.44	56.53	51.10	50.30	55.43	52.56	38.83	37.24	56.25	51.23	31.29	36.28	55.80
ฟอสฟอรัสรวม (mg/L)	5.25	4.59	4.77	4.63	4.59	4.35	4.55	4.52	3.96	4.56	4.20	3.91	3.49

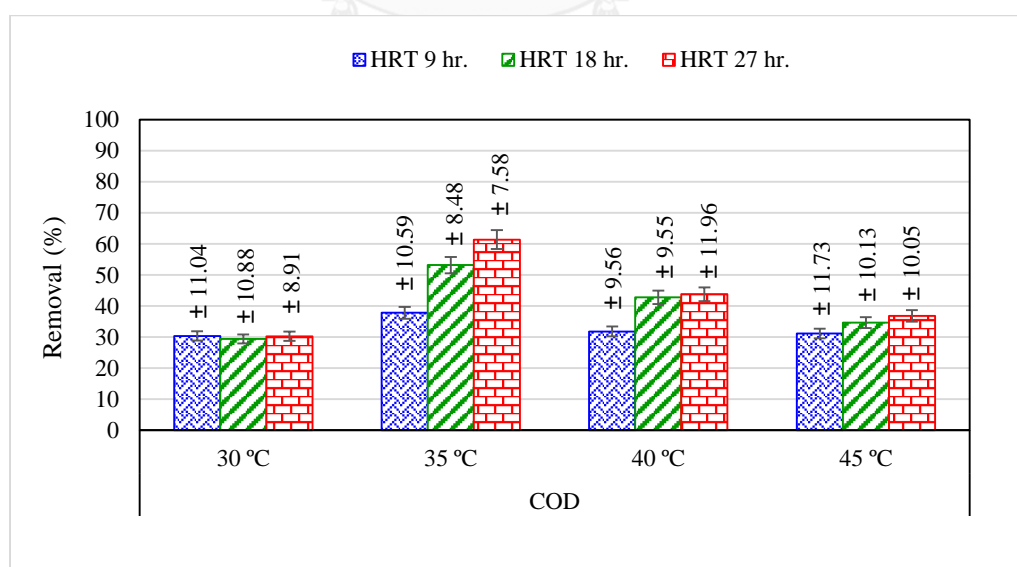
ตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยแต่ละถังกรองไร้อากาศ รวมจำนวน 12 ถัง

ดัชนีชี้วัดคุณภาพ	ร้อยละประสิทธิภาพ												
	เวลาที่พักน้ำ 9 ชม.						เวลาที่พักน้ำ 18 ชม.						เวลาที่พักน้ำ 27 ชม.
	T10	T11	T12	T13	T20	T21	T22	T23	T30	T31	T32	T33	
ของแข็งแขวนลอย (%)	18.60	32.70	31.36	28.21	22.15	52.76	42.27	40.39	29.54	67.71	45.39	40.68	
สารอินทรีย์รูปซีไอดี (%)	30.34	37.78	31.77	31.11	29.36	53.13	42.75	34.66	30.23	61.35	43.76	36.76	
ไนโตรเจนรวม (%)	12.06	20.50	21.69	13.72	18.16	39.48	42.14	12.31	20.21	51.20	43.38	13.17	
ฟอสฟอรัสรวม (%)	13.10	9.29	12.24	13.02	17.72	13.44	14.01	25.09	13.46	20.08	25.27	33.49	

รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดาลีไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม ส่วนข้อมูลประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดาลีไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม แสดงผลรวมจำนวน 12 ถัง ในตารางที่ 4.2

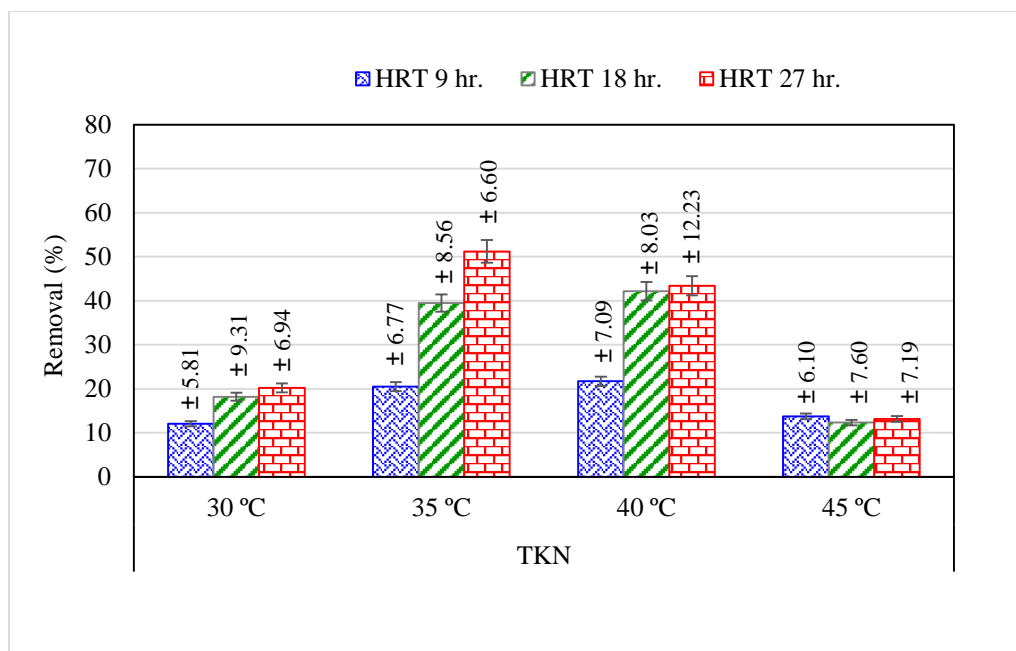


(ก) แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย

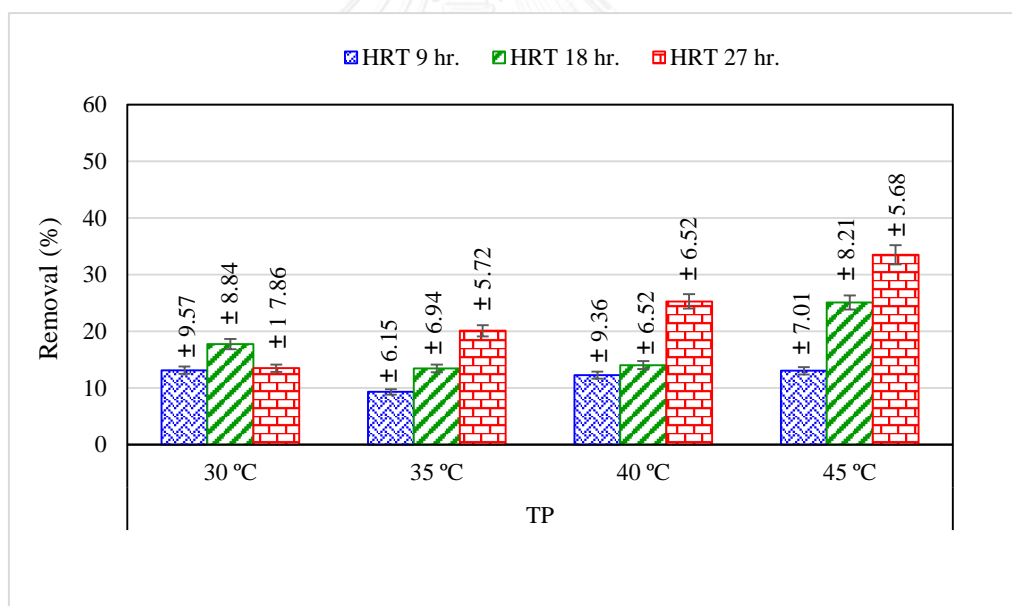


(ข) แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี

รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง



(ค) แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน



(ง) แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสรวม

รูปที่ 4.4 (ต่อ) แสดงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง

4.1.2 อภิปรายผลการทำงานของถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง

4.1.2.1 ของแข็งแขวนลอย

น้ำเสียจากถังปรับเสมอของอาคารสำนักงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบถังกรองไร้อากาศที่กลุ่มระยะเวลาพักน้ำ 9 18 และ 27 ชม. นั้น ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids; SS) มีค่าไม่คงที่แสดงในรูปที่ 4.1 (ก) 4.2 (ก) และ 4.3 (ก) โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองอยู่ที่ 56.13 มก./ล. จากการทดลองถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง พบว่าสามารถบำบัดความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยลงมาได้อยู่ในช่วงระหว่าง 45.58 ถึง 18.11 มก./ล.แสดงในตารางที่ 4.1 โดยถังกรองไร้อากาศกลุ่มระยะเวลาพักน้ำ 9 18 และ 27 ชม. ที่ควบคุมอุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 35°C จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยอยู่ที่ 37.68 26.07 และ 18.11 มก./ล.ตามลำดับ และการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 32.70 52.76 และ 67.71 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) และตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 35°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกำจัดค่าของแข็งแขวนลอยมากที่สุดในทุกระยะเวลาพักน้ำ สาเหตุอาจมาจากจุลินทรีย์กลุ่ม Mesophilic ทำงานได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30°C มาเป็น 35°C อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 40°C มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Mesophilic อย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาการลดลงของความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยต่อระยะเวลาการพักน้ำก็พบว่า การเพิ่มระยะเวลาพักน้ำทำให้ค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยลดลงเช่นกัน ส่วนปัจจัยด้านอุณหภูมิมีความสำคัญต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด (Acidogen) และผลิตก๊าซมีเทน (Methanogen) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่พบในระบบไร้อากาศที่อาศัยอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 38°C (De Lemos Chernicharo, 2007) ซึ่งเป็นช่วง Mesophilic และในการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ทำให้ถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 35°C

ผลประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศที่ดีที่สุดคือ ถังกรองไร้อากาศที่มีระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. อุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 35°C น้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยอยู่ที่ 18.11 มก./ล. ซึ่งผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด อาคารประเภท ก. ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 30 มก./ล. โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ไม่เกิน 50 มก./ล.

4.1.2.2 การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี

เมื่อพิจารณาสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี (Chemical Oxygen Demand; COD) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบนี้ ค่าซีโอดีรวมตลอดระยะเวลาการทดลองมีความเข้มข้นเฉลี่ย 163.52 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ค่อนข้างต่ำสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศที่สามารถรับภาระบรรทุกได้สูง เนื่องจากน้ำเสียที่นำมาใช้บำบัดครั้งนี้เป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจริงจากกิจกรรมต่าง ๆ ของอาคารสำนักงานซึ่งถือว่าเป็นน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นน้อย จากการทดลองถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง พบว่าถังกรองไร้อากาศกลุ่มระยะเวลาพักน้ำ 9 18 และ 27 ชม. ที่ควบคุมอุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 35°C จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีเฉลี่ยอยู่ที่ 101.88 76.44 และ 63.28 มก./ล.ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.1 (ข) 4.2 (ข) และ 4.3 (ข) และตารางที่ 4.1 และมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยอยู่ที่ 37.78% 53.13% และ 61.35% ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.4 (ข) และตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าระบบถังกรองไร้อากาศที่มีระยะเวลาพักน้ำ 27 ชั่วโมงและอุณหภูมิ 35°C เป็นระบบที่กำจัดสารอินทรีย์ดีที่สุด น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบมีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีเฉลี่ยอยู่ที่ 63.28 มก./ล.

ในงานวิจัยนี้เนื่องจากระบบถังกรองแบบไร้อากาศอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ สามารถทำงานได้ดีมีอยู่ 2 ช่วงคือ Mesophilic ช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 38°C และ Thermophilic ช่วงอุณหภูมิ 50°C ถึง 60°C สำหรับระบบถังกรองไร้อากาศที่พัฒนามีช่วงค่าอุณหภูมิของการเดินระบบอยู่ในช่วง Mesophilic และระยะเวลาพักน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 9 ชั่วโมงมาเป็น 18 และ 27 ชั่วโมงจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเพิ่มมากขึ้นด้วยเหมือนกัน จึงสอดคล้องกับผลการศึกษาของนักวิจัยที่ศึกษาระยะเวลากักพักน้ำของถังย่อยแบบไร้อากาศที่สภาวะ Mesophilic และ Thermophilic พบว่าการเพิ่มระยะเวลาพักน้ำจะทำให้ภาระอินทรีย์ต่ำลง (Nges & Liu, 2010)

4.1.2.3 การกำจัดไนโตรเจน

เมื่อพิจารณาไนโตรเจนซึ่งเป็นกลุ่มสารอาหารอินทรีย์จำเป็นในการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ที่ทำงานในระบบถังกรองแบบไร้อากาศในการศึกษานี้ โดยการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองพบว่าเจดัลไนโตรเจนมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย 64.44 มก./ล. จากการทดลองถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถัง ค่าความเข้มข้นของเจดัลไนโตรเจนลดลงแสดงในรูป

ที่ 4.1 (ค) 4.2 (ค) 4.3 (ค) และตารางที่ 4.1 ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดแสดงในรูปที่ 4.4 (ค) และตารางที่ 4.2 พบว่ากลุ่มถังกรองใรร้ออากาศที่ควบคุมระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. อุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 35 °C มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความเข้มข้นเจดัลไนโตรเจนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 31.29 มก./ล. และมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 51.20 รองลงมาคือระยะเวลาพักน้ำ 18 ชม. อุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 40 °C มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นเจดัลไนโตรเจนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 37.24 มก./ล. และมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 42.14 และสุดท้ายคือระยะเวลาพักน้ำ 9 ชม. อุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 40°C มีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นเจดัลไนโตรเจนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 50.30 มก./ล. และมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 21.69

ช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 36°C และ 32°C ถึง 40°C เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดไนโตรซาโมนาสและไนโตรแบคเตอร์ ซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่มีผลต่อการลดลงของไนโตรเจนรวมในระบบ (Verstraete & Focht, 1977) จะเห็นได้อย่างชัดเจนจากผลการศึกษาของถังกรองใรร้ออากาศทั้ง 12 ถังนี้ ถ้าควบคุมระดับอุณหภูมิน้ำเสียจะต้องเพิ่มระยะเวลาพักน้ำให้มากขึ้นเพื่อทำให้เกิดการลดลงของไนโตรเจนรวมมีประสิทธิภาพสูงสุดสอดคล้องกับผลการทดลองของถังกรองใรร้ออากาศในภาพรวมที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. อุณหภูมิน้ำเสีย 35°C ถังกรองใรร้ออากาศมีประสิทธิภาพการย่อยสลายของไนโตรเจนได้ดีที่สุด แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40°C ไปถึง 45°C ประสิทธิภาพการบำบัดก็จะลดน้อยลงเพราะเกินค่าการทำงานของแบคทีเรียไนโตรซาโมนาสและไนโตรแบคเตอร์ (Grunditz and Dalhammar 2001) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค)

สำหรับประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองใรร้ออากาศที่ดีที่สุดคือ ถังกรองใรร้ออากาศที่มีระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. อุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 35°C น้ำเสียที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของเจดัลไนโตรเจนเฉลี่ยอยู่ที่ 31.29 มก./ล. ซึ่งผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ไม่เกิน 100 มก./ล. และมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด อาคารประเภท ก. ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 35 มก./ล. โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

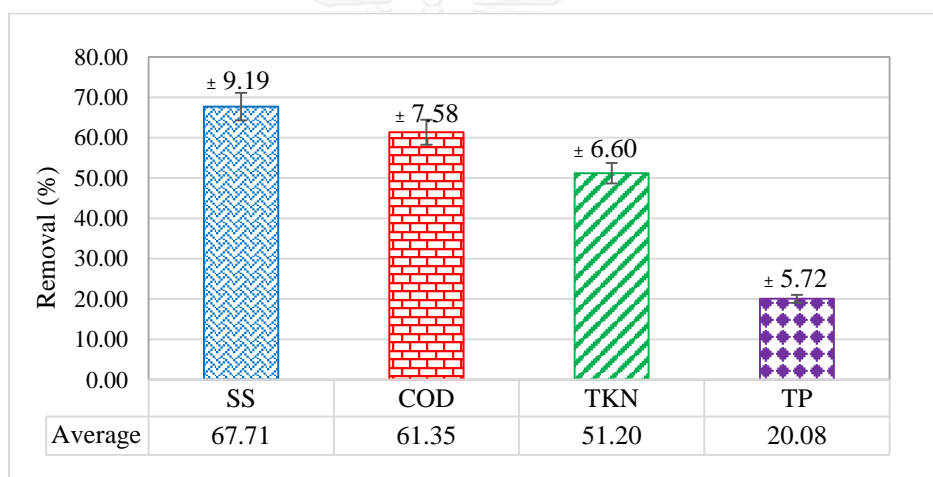
4.1.2.4 การกำจัดฟอสฟอรัสรวม

ฟอสฟอรัสรวม (Total phosphorus; TP) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศถือเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสำคัญในฐานะเป็นธาตุอาหารกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ น้ำเสียที่นำมาบำบัดเข้าสู่ระบบถังกรองแบบไร้อากาศในการศึกษาครั้งนี้มีค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสรวมเฉลี่ยที่ 5.25 มก./ล. จากการทดลองถังกรองไร้อากาศจำนวน 12 ถังพบว่าถังกรองไร้อากาศกลุ่มระยะเวลาพักน้ำ 9, 18 และ 27 ชม. ที่ควบคุมอุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 45°C จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสรวมเฉลี่ยอยู่ที่ 4.59, 3.96 และ 3.49 มก./ล. ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.1 (ง), 4.2 (ง) และ 4.3 (ง) และตารางที่ 4.1 และมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดฟอสฟอรัสรวมเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 13.02, 25.09 และ 33.49 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.4 (ง) และตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ 45°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการบำบัดฟอสฟอรัสรวมมากที่สุด โดยภาพรวมแล้วการลดลงของฟอสฟอรัสรวมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสนี้เป็นกระบวนการที่เกิดจากการดูดซับฟอสฟอรัสในเซลล์จุลินทรีย์เพื่อนำไปสร้างเซลล์ ซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ และเป็นแหล่งพลังงานของเซลล์จุลินทรีย์ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงอาจทำให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้น และทำให้การเกิดการกระตุ้นหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่แอลกอฮอล์ (Alcoholic) คาร์บอนิลิก (Carbonylic) และฟีนอลิก (Phenolic) ซึ่งอยู่บนพื้นผิวของการดูดซับทำให้เกิดแรงดึงดูดและทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นตามมาด้วย (Doğan, Abak et al. 2009) นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้แบคทีเรียมีบทบาทในการย่อยสลายแบบไร้อากาศเจริญเติบโตได้มากขึ้น ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถดูดซับสารฟอสฟอรัสเอาไว้ในเซลล์ของตัวเองเรียกการดูดซับแบบชีวภาพ (Delgadillo-Mirquez, Lopes et al. 2016) ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่อกระบวนการดูดซับและลดลงของฟอสฟอรัสอีกด้วย อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิก็ยังถือว่ามีผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายฟอสฟอรัสน้อยกว่ามลสารชนิดอื่น ๆ (Kadlec and Reddy 2001, Akrotos and Tsihrantzis 2007)

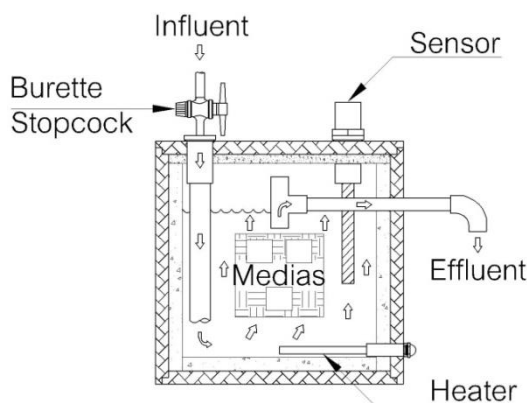
ผลประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศที่ดีที่สุดคือ ถังกรองไร้อากาศทำงานที่มีระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. อุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 45°C น้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสรวมเฉลี่ยอยู่ที่ 3.49 มก./ล. ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำมารดน้ำต้นไม้ เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช

4.1.3 สรุปผลการบำบัดน้ำเสียของถังกรองใรอากาศจำนวน 12 ถัง

ผลจากการทดลองพบว่าถังกรองใรอากาศในจำนวน 12 ถัง ถังกรองใรอากาศที่มีประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมสูงสุด คือถังกรองใรอากาศ T31 ที่มีระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. อุณหภูมิน้ำเสีย 35°C ข้อมูลจากตารางที่ 4.1 และ 4.2 มีความสามารถในการลดความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดาร์ลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวมมีค่าเฉลี่ย 18.10 63.28 31.29 และ 4.20 มก./ล. และมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุดในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดาร์ลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวม มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 67.71 ± 9.19 61.35 ± 7.58 51.20 ± 6.60 และ 20.08 ± 5.72 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 และถังกรองใรอากาศนี้ความเป็นกรดต่างมีค่าเฉลี่ย 7.88 ± 0.11 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันมีค่าเฉลี่ย -217 ± 18.60 มิลลิโวลต์ ข้อมูลจากตารางที่ 4.1



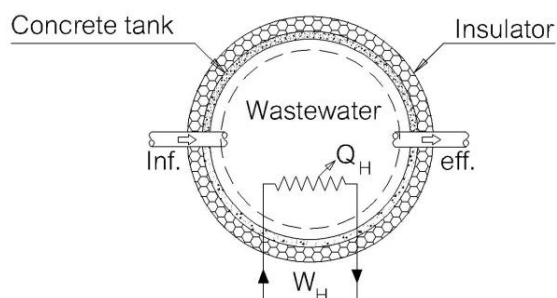
รูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองใรอากาศ (T31) ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 27 ชม. และอุณหภูมิ 35°C ในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดาร์ลไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม



รูปที่ 4.6 เครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า

4.1.4 การพัฒนาแบบจำลองสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาแบบจำลองสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานของเครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้า W_H ที่จ่ายให้กับเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า (Heater) จะมีค่าเท่ากับ Q_H คูณด้วยประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนและการถ่ายเทความร้อนสู่น้ำเสีย (η_{heater}) แสดงในสมการที่ (4.1) เมื่อนำกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้พิจารณารูปที่ 4.7 ถังกรองไร้อากาศที่หุ้มฉนวนป้องกันการถ่ายเทความร้อนและใช้ความร้อนจากเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า สามารถนำมาเขียนเป็นสมการที่ (4.2) โดย Q_{ww} เป็นความร้อนรวมจากเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าที่ถ่ายเทให้กับน้ำเสียประกอบด้วยสองส่วนคือ $\Delta E_{in Tank}$ เป็นความร้อนจากเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าที่ถ่ายเทเพื่อเปลี่ยนสถานะของน้ำเสียภายในถังกรองไร้อากาศ และ $\Delta E_{from Flow}$ เป็นความร้อนจากเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าที่ถ่ายเทเพื่อเปลี่ยนสถานะของน้ำเสียที่ไหลผ่านถังกรองไร้อากาศ ส่วน Q_{loss} เป็นค่าการสูญเสียพลังงานความร้อนจากการทดลองซึ่งรวมผลจากการสูญเสียพลังงานเนื่องจากประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทั้งหมด นำสมการที่ (4.2) มาพิจารณาวิเคราะห์ห้ระบบและกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นสมการที่ (4.3) เมื่อ N คือจำนวนครั้งในการทำงานของเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าในช่วงเวลาที่น้ำเสียไหลผ่านถังกรองไร้อากาศ นำสมการ (4.3) มาพิจารณาเป็นแบบต่อเนื่องซึ่งค่าอัตราการไหลน้ำเสีย v_{ww} สามารถอธิบายในพจน์ของค่าปริมาตรน้ำเสีย V_{ww} และระยะเวลาพักน้ำ HRT แสดงในสมการที่ (4.4) เมื่อนำสมการที่ (4.4) มาพิจารณาร่วมกับสมการที่ (4.3) จึงสามารถเขียนเป็นสมการที่ (4.5)



รูปที่ 4.7 ขอบเขตการทำงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า

$$Q_H = W_H \eta_{heater} \quad (4.1)$$

$$Q_{ww} = Q_H + Q_{loss} = \Delta E_{In\ tank} + \Delta E_{From\ flow} + Q_{loss} \quad (4.2)$$

$$Q_{ww} = \rho_{ww} V_{ww} C_{p_{ww}} (T_{end} - T_{start}) N + \sum_{t=start}^{end} \rho_{ww} v_{ww} C_{p_{ww}} (T_{eff_t} - T_{inf_t}) \Delta t + Q_{Loss} \quad (4.3)$$

$$v_{ww} = \frac{V_{ww}}{HRT} \quad (4.4)$$

$$Q_{ww} = \rho_{ww} V_{ww} C_{p_{ww}} (T_{end} - T_{start}) N + \int_{t=0}^n \rho_{ww} \frac{V_{ww}}{HRT} C_{p_{ww}} (T_{eff_t} - T_{inf_t}) dt + Q_{loss} \quad (4.5)$$

Nomenclature			Nomenclature		
W_H	Electric energy consumption	kWh	V_{ww}	Wastewater volume	m^3
Q_H	Heat energy from heater	kJ	HRT	Hydraulic retention time	hr
η_{heater}	Heater efficiency		N	Number times of heater working	times
Q_{ww}	Heat energy in wastewater	kJ			
	from calculation		t	Work periods	hr
ρ_{ww}	Wastewater density	kg/m^3	T_{start}	Temperature start	$^{\circ}C$
$C_{p_{ww}}$	Wastewater specific heat	$kJ/kg\ ^{\circ}C$	T_{end}	Temperature end	$^{\circ}C$
Q_{loss}	Heat loss	kJ	T_{inf}	Wastewater temperature influent	$^{\circ}C$
	Energy loss from system	kJ	T_{eff}	Wastewater temperature effluent	$^{\circ}C$

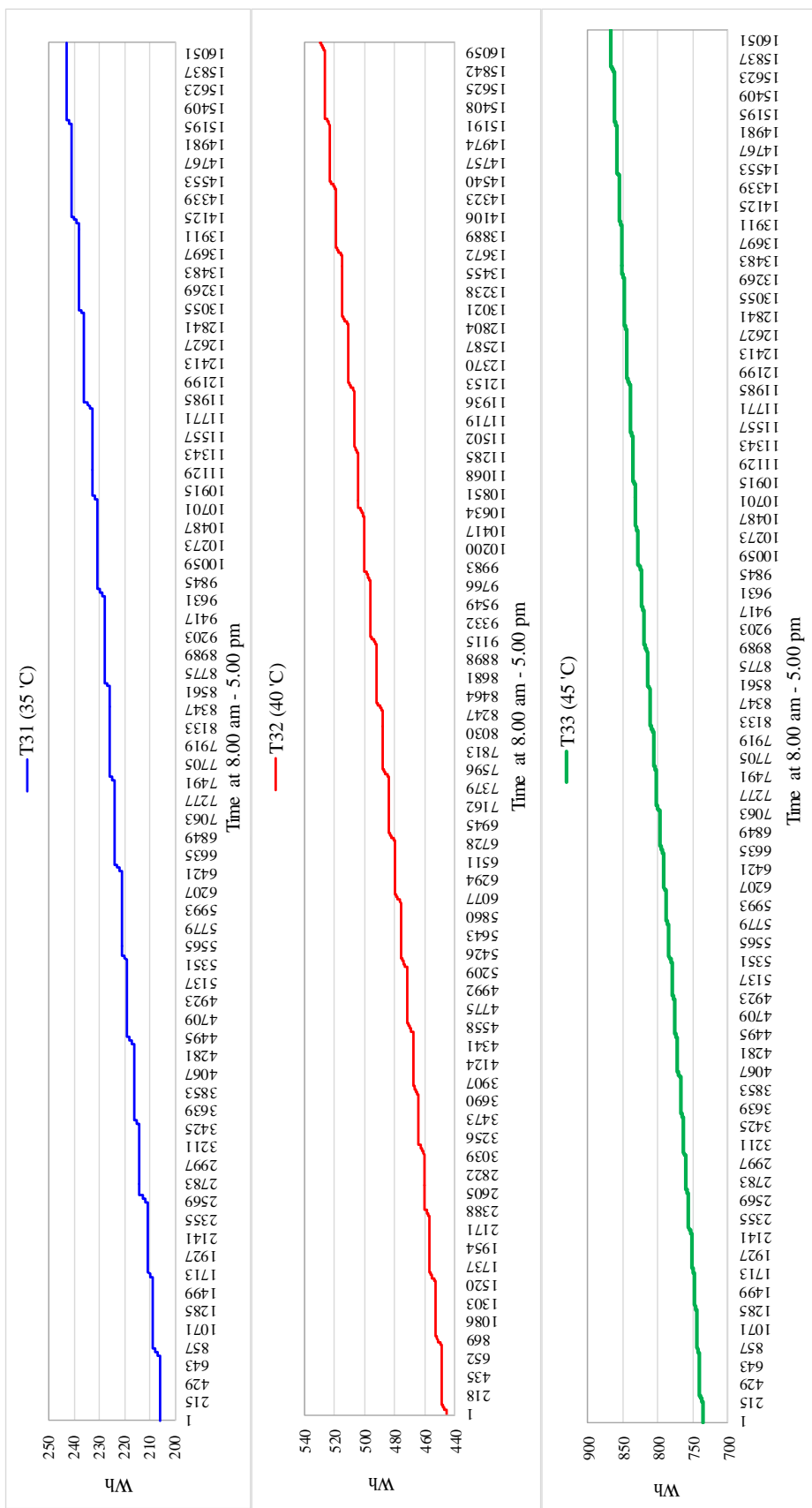
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า

IAF	HRT (hr.)	t (hr.)	ρ_{ww} (kg/m ³)	V_{ww} (m ³)	Cp_{ww} (kJ/kg °C)	T_{start} (°C)	T_{end} (°C)	T_{inf} (°C)	T_{eff} (°C)	N (times)
T31	27	9	994.10	0.00540	4.1780	34.90	35.10	29.82	35.00	14.00
T32	27	9	992.30	0.00540	4.1790	39.90	40.10	29.82	40.00	25.00
T33	27	9	990.20	0.00540	4.1810	44.90	45.10	29.82	45.00	35.00

4.1.4 การวิเคราะห์ผลต่างค่าพลังงานที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนากับการค่าพลังงาน

ไฟฟ้าจากการใช้งานจริง

เลือกกลุ่มถังกรองไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพรวมสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียคือ T31 T32 และ T33 แล้วทำการเก็บข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า ในการรักษาระดับอุณหภูมิน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศระหว่าง T_{start} กับ T_{end} ระยะเวลา 10 วัน ช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. (เวลาที่น้ำเสียไหลผ่านถังกรองไร้อากาศ) พบว่าการทำงานของเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า T31 T32 และ T33 มีค่าเฉลี่ย จำนวน (N) 14 25 และ 35 ครั้งตามลำดับ แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.3 และอธิบายในสมการที่ (4.3) และ (4.5) นำข้อมูล T31 T32 และ T33 ที่แสดงในตารางที่ 4.3 มาแทนค่าในสมการที่ (4.5) จะได้ค่าพลังงานความร้อน (Q_{ww}) เฉลี่ย 3.13 5.80 และ 8.18 วัตต์ชั่วโมงตามลำดับ และข้อมูลจากการวัดพลังงานไฟฟ้า W_H มีค่าเฉลี่ย 4.70 9.31 และ 14.90 วัตต์ชั่วโมงตามลำดับ ข้อมูลทั้งสองแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างจำนวนครั้งในการทำงานของเครื่องทำความร้อนด้วยหลอดไฟฟ้า

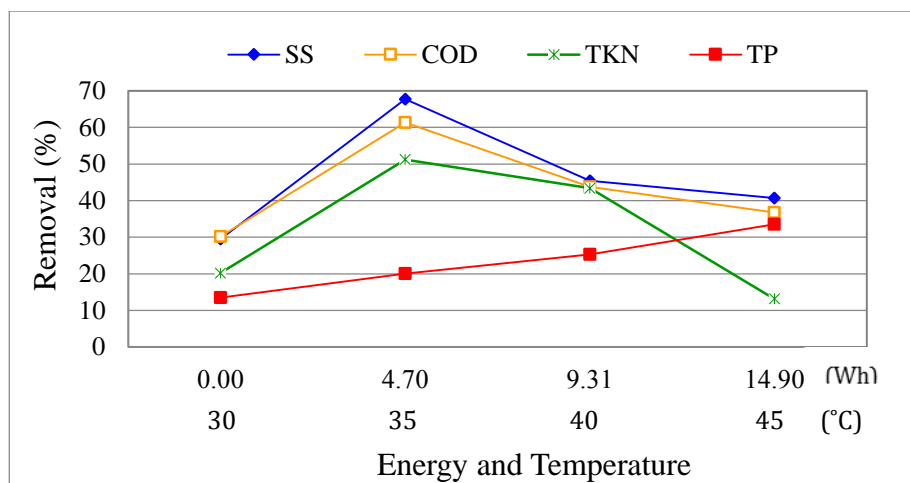
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพลังงานที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับการค่าพลังงานไฟฟ้าจากการใช้งานจริง

AF		Energy (Wh)				Difference		
HRT 27 hr.		Real fide (W_H)				Theoretical	$W_H - Q_{ww}$	(%)
Temp (°C)		Max.	Min.	Avg.	SD	Calculation (Q_{ww})	(Wh)	
T30	30	0	0	0	0	0		
T31	35	5.13	3.84	4.70	0.41	3.13	1.57	33.40
T32	40	9.97	8.82	9.31	0.44	5.80	3.51	37.70
T33	45	15.27	14.25	14.90	0.38	8.18	6.72	45.10

เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลทั้งสองพบว่าค่าพลังงานจากการวัด (W_H) สูงกว่าค่าพลังงานที่ได้จากการคำนวณ (Q_{ww}) เนื่องจากความคลาดเคลื่อน (Q_{loss}) ที่เป็นการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากฉนวนไม่สมบูรณ์เพราะในทางปฏิบัติจะมีการถ่ายเทความร้อนผ่านรอยต่อต่าง ๆ เช่นฝาถัง ท่อน้ำเสียไหลเข้า ไหลออกและหัววัดอุณหภูมิ และจากการสูญเสียค่าพลังงานไฟฟ้าให้กับชุดควบคุมพลังงานไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมควบคุมพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า (η_{heater}) เพราะการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดควบคุมพลังงานไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า แต่การสูญเสียค่าพลังงานไฟฟ้านี้จะลดลงเมื่อขนาดถังกรองไร้อากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากจะต้องใช้เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้ามีค่ามากกว่าชุดควบคุมพลังงานไฟฟ้า

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานต่ำสุด

จากรูปที่ 4.9 เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ T31 T32 และ T33 ที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. จากตารางที่ 4.2 มาเปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการวัด (W_H) ในตารางที่ 4.4 พบว่าถังกรองไร้อากาศ T31 อุณหภูมิน้ำเสีย 35°C มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุดในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดัล-ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส รวมมีค่าเฉลี่ย 67.71% 61.35% 51.20% และ 20.08 % ตามลำดับต่อการการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดเฉลี่ย 4.70 Wh. สาเหตุที่ T31 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่า T32 และ T33 เนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมของห้องทดสอบมีค่าเฉลี่ย 30.69°C จึงทำให้ผลต่างระหว่างค่าอุณหภูมิของ T31 35°C กับอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าน้อย ส่งผลทำให้จำนวนครั้ง (N) ในการทำงานของเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าและค่าความผิดพลาด (Q_{loss}) จากการใช้พลังงานไฟฟ้าของ T31 (35°C) ต่ำกว่า T32 (40°C) และ T33 (45°C)



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานต่ำสุด

4.1.6 ผลการพัฒนาดัชนีประสิทธิภาพ (Performance index)

เนื่องจากยังไม่มีผลการรายงานผลการใช้เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้ามาใช้ในการบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศ ดังนั้นผู้วิจัยจึงพัฒนาดัชนีประสิทธิภาพระหว่างการทำงานของถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter; AF) ที่ไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าเสริมในการบำบัดน้ำเสีย กับถังกรองไร้อากาศ (Insulator Anaerobic Filter; IAF) ที่หุ้มฉนวนป้องกันความร้อนและใช้เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้ามาเสริมเพิ่มอุณหภูมิน้ำเสียช่วยในการบำบัดน้ำเสียนี้ เพื่อนำข้อมูลดัชนีประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศ (IAF) ไปใช้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ ต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า

$$\text{Performance index} = \frac{\%IAF - \%AF}{W_H} \quad \%/Wh. \quad (4.5)$$

โดย $\%IAF$ = ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศที่ใช้พลังงานไฟฟ้า

(IAF) จากตารางที่ 4.2 (T31 T32 และ T33)

$\%AF$ = ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า

(AF) จากตารางที่ 4.2 (T30)

W_H = พลังงานไฟฟ้าจากการวัดที่ถังกรองไร้อากาศที่ใช้พลังงานไฟฟ้า

(IAF) จากตารางที่ 4.4 (Avg.)

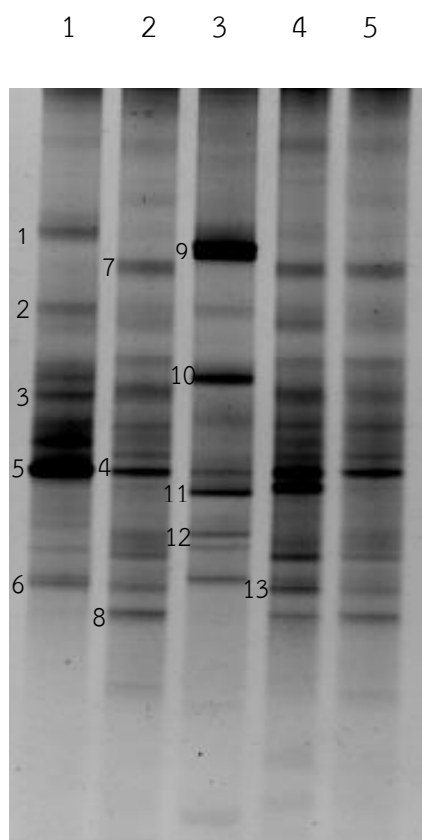
ตารางที่ 4.5 ดัชนีประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศกลุ่มระยะกักพักน้ำ 27 ชม.

ดัชนีชี้วัดคุณภาพ	ดัชนีประสิทธิภาพ (ร้อยละของการกำจัดต่อวัตต์ชม.)		
	35°C	40°C	45°C
ของแข็งแขวนลอย	8.12	1.70	0.62
สารอินทรีย์รูปซีไอดี	6.62	1.45	0.36
ไนโตรเจนรวม	6.59	2.49	-0.39
ฟอสฟอรัสรวม	1.41	1.27	1.12

จากตารางที่ 4.5 พบว่าถังกรองไร้อากาศกลุ่มระยะเวลากักพักน้ำ 27 ชม. และอุณหภูมิน้ำเสียอยู่ที่ 35°C มีค่าดัชนีประสิทธิภาพต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดากลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวมมีค่าเฉลี่ย 8.12% 6.62% 6.59% และ 1.41% ต่อวัตต์ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าดัชนีประสิทธิภาพสูงสุดของกลุ่มการทดลอง ที่จะนำไปใช้เปรียบเทียบระหว่างถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้ากับระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ ต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า และนำค่าระยะกักพักน้ำ 27 ชม. กับค่าอุณหภูมิน้ำเสีย 35°C ไปใช้ในการออกแบบถังกรองไร้อากาศให้ทำงานร่วมกับความร้อนทั้งจากอาคารหรือเครื่องจักรกลต่าง ๆ ส่วนค่า TKN (45°C) มีค่า -0.39 เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศของ T30 (30°C) มีค่า 20.21% ซึ่งมากกว่า T33 (45°C) ที่มีค่า 13.17%

4.1.7 การวิเคราะห์ประชาคมของแบคทีเรียในระบบ

ผลการทดลองพบว่าถังกรองไร้อากาศกลุ่มควบคุมระยะกักพักน้ำ 27 ชั่วโมง T30 อุณหภูมิ 30°C (เป็นถังควบคุมการทดลอง) มีประสิทธิภาพต่ำสุด ส่วน T31 อุณหภูมิ 35°C มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและเจดากลไนโตรเจนสูงสุด และ T33 อุณหภูมิ 45°C มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสรวมสูงสุด ส่วนถังกรองไร้อากาศ T21 ระยะเวลากักพักน้ำ 18 ชั่วโมง อุณหภูมิ 35°C มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและเจดากลไนโตรเจนรองลงมาจาก T31 ดังนั้นจึงเลือกตัวอย่างน้ำเสียทั้ง 4 ตัวอย่าง คือ T21 T30 T31 และ T33 มาสกัดดีเอ็นเอและนำไปเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนดีเอ็นเอ ด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรส โดยใช้ไพรเมอร์ 341F-GC/520R และ PARCH340F-GC/PARCH519R ซึ่งจำเพาะต่อ 16S rDNA ในแบคทีเรียและอาร์เคีย ผลการทดลองพบว่า สามารถพบผลิตภัณฑ์ PCR ได้ทั้ง 2 คู่ไพรเมอร์ในตัวอย่างน้ำเสียทุกตัวอย่าง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างประชาคมจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค DGGE โดยใช้เกรเดียนท์ของความเข้มข้น denaturant 40-80% แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ และเพื่อยืนยันผลการศึกษาก็ทำการทดลองตัวอย่างน้ำจาก T31 สองซ้ำ



รูปที่ 4.10 โครงสร้างประชาคมแบคทีเรียโดยวิธี DGGE

อธิบายช่องวิ่งในรูปที่ 10 โครงสร้างประชาคมแบคทีเรียโดยวิธี DGGE

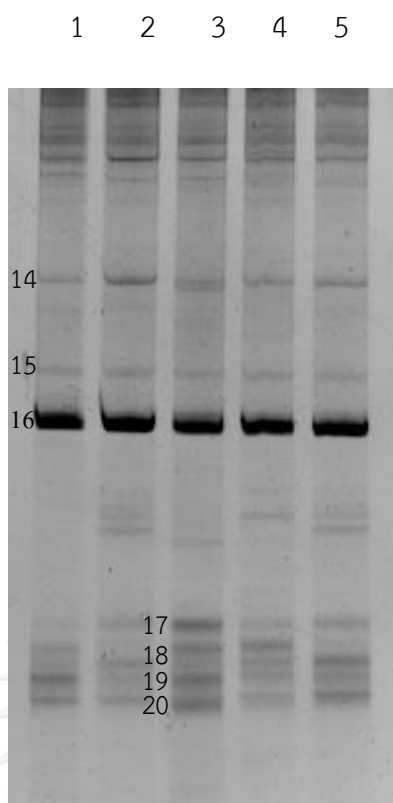
ช่องวิ่งที่ 1: ดีเอ็นเอจากตัวอย่างน้ำเสีย T30 (อุณหภูมิ 30°C HRT 27 ชม.)

ช่องวิ่งที่ 2: ดีเอ็นเอจากตัวอย่างน้ำเสีย T31 (อุณหภูมิ 35°C HRT 27 ชม.)

ช่องวิ่งที่ 3: ดีเอ็นเอจากตัวอย่างน้ำเสีย T33 (อุณหภูมิ 45°C HRT 27 ชม.)

ช่องวิ่งที่ 4: ดีเอ็นเอจากตัวอย่างน้ำเสีย T21 (อุณหภูมิ 35°C HRT 18 ชม.)

ช่องวิ่งที่ 5: ดีเอ็นเอจากตัวอย่างน้ำเสีย T31 (อุณหภูมิ 35°C HRT 27 ชม.)



รูปที่ 4.11 โครงสร้างประชาคมอาร์เคียโดยวิธี DGGE

อธิบายช่องวิ่งรูปที่ 11 โครงสร้างประชาคมอาร์เคียโดยวิธี DGGE

ช่องวิ่งที่ 1: ดีเอ็นเอจากตัวอย่างน้ำเสีย T30 (อุณหภูมิ 30°C HRT 27 ชม.)

ช่องวิ่งที่ 2: ดีเอ็นเอจากตัวอย่างน้ำเสีย T31 (อุณหภูมิ 35°C HRT 27 ชม.)

ช่องวิ่งที่ 3: ดีเอ็นเอจากตัวอย่างน้ำเสีย T33 (อุณหภูมิ 45°C HRT 27 ชม.)

ช่องวิ่งที่ 4: ดีเอ็นเอจากตัวอย่างน้ำเสีย T21 (อุณหภูมิ 35°C HRT 18 ชม.)

ช่องวิ่งที่ 5: ดีเอ็นเอจากตัวอย่างน้ำเสีย T31 (อุณหภูมิ 35°C HRT 27 ชม.)

4.1.8 การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์จากแถบดีเอ็นเอเตน

นำแถบดีเอ็นเอเตนไปทำการวิเคราะห์ข้อมูลรหัสพันธุกรรมในฐานข้อมูล GenBank (GenBank database) โดยโปรแกรม NCBI BLAST (National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine) โดยเลือกตัดแถบดีเอ็นเอเตนที่ 1 5 7 9 10 11 (แบคทีเรีย) และ 16 (อาร์เคีย) มาวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ แสดงผลในตารางที่ 4.6

จากรูป 4.10 ช่องวุ้นที่ 1 แสดงดีเอ็นเอจากระบบถังกรอง T30 ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. อุณหภูมิ 30°C มีแถบดีเอ็นเอที่ 1 ซึ่งเป็นหนึ่งในแบคทีเรียสายพันธุ์ที่เด่นจากการวิเคราะห์ลำดับพันธุกรรมพบว่าคล้ายคลึงกับ *Paludibacter sp.* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทน้ำตาลในน้ำเสีย เช่น ไซโลส ฟลูคโตส กลูโคส และ ซูโคส เป็นต้น (Qiu, Kuang et al., 2014) และใช้น้ำตาลเหล่านั้นเป็นแหล่งพลังงานได้ *Paludibacter sp.* ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการย่อยสลายโดย *Paludibacter sp.* ก็คือเกลือโพรพาเนต เกลืออะซิเตต และซาซิเนตอีกเล็กน้อย สารผลิตภัณฑ์เหล่านี้ถือเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ นอกจากนี้ *Paludibacter sp.* ยังเป็นแบคทีเรียที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 30°C (Ueki, Akasaka et al., 2006) แต่มีความอ่อนไหวต่อออกซิเจน (Strictly anaerobes) จึงสอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบแบคทีเรียสายพันธุ์นี้ในถังกรองไร้อากาศ T30 และช่องวุ้นที่ 1 แถบดีเอ็นเอที่ 5 ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับแบคทีเรียสายพันธุ์ *Firmicutes sp.* ซึ่งเป็นแบคทีเรียสายพันธุ์ที่สามารถพบได้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน แต่ก็สามารถเติบโตได้เช่นกันในสภาวะที่มีออกซิเจน ทำหน้าที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น กรดอินทรีย์ระเหยง่ายหรือสารอินทรีย์อะโรมาติกให้เป็นเกลืออะซิเตตหรือกรดอะซิติกซึ่งเป็นสารตั้งต้นหลักในการผลิตมีเทน (Kato, Chino et al., 2015, Regueiro, Veiga et al., 2012) ในถังกรองไร้อากาศ T30 ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. อุณหภูมิ 30°C พบว่ามีความหนาแน่นของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้อยู่ค่อนข้างมาก

จากรูปที่ 10 ช่องวุ้นที่ 2 และช่องวุ้นที่ 4 ดีเอ็นเอเตนแถบที่ 7 พบว่าเป็นสายพันธุ์ที่มีความคล้ายกับแบคทีเรียสายพันธุ์ *Flavobacterium sp.* เป็นแบคทีเรียแกรมลบซึ่งพบทั่วไปตามสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติสามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในสภาวะมีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน (Facultative anaerobes) แบคทีเรียสายพันธุ์นี้สามารถพบได้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยมีการทำงานอยู่ในขั้นตอนการสลายสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์สายสั้นโมเลกุลเล็ก (Acidogenesis) ซึ่งแบคทีเรียสายพันธุ์นี้ที่ทำงานได้ดีทั้งสภาวะมีและไม่มีอากาศ (Ali Shah, Mahmood et al., 2014) ในการศึกษาพบว่าแบคทีเรียสายพันธุ์นี้มีมากในถังกรองไร้อากาศ T31

และ T21 ที่มีอุณหภูมิน้ำเสีย 35°C และเป็นถังกรองไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุดของแต่ละกลุ่มเหมือนกัน จึงคาดว่าแบคทีเรียสายพันธุ์ *Flavobacterium sp.* ช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์สายที่สั้นลง เช่น กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดโพรพานิก กรดบิวทริกและแอลกอฮอล์ จึงทำให้การย่อยสลายในลำดับต่อไปมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของระบบถังกรองไร้อากาศสูงขึ้น

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์

แถบ ดีเอ็นเอ	สายพันธุ์ จุลินทรีย์	ความ คล้ายคลึง	อุณหภูมิ (°C)			ความ ยาวขนาด (bp)	GenBank accession number
			30	35	45		
1	<i>Paludibacter sp.</i>	100%	X			116	LT841582
5	<i>Firmicutes bacterium sp.</i>	100%	X			322	KU131275
7	<i>Flavobacterium sp.</i>	97%		X		305	KC451690
9	<i>Solitalea sp.</i>	91%			X	154	JX493405
10	<i>Pseudomonas sp. strain SYSU P18</i>	100%			X	350	KY818010
11	<i>Thauera sp.</i>	100%			X	215	LC145286
16	<i>Methanosaeta concilii strain GP6</i>	95%	X	X	X	243	NR102903

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ X คือเชื้อแบคทีเรียที่พบ ณ ค่าอุณหภูมิ

จากรูปที่ 10 ช่องวงที่ 3 ดีเอ็นเอเด่นแถบที่ 9 พบได้อย่างเด่นชัดในถังกรองไร้อากาศ T33 ที่มีระยะเวลาที่กักน้ำ 27 ชม. อุณหภูมิน้ำเสีย 45°C ว่ามีความคล้ายคลึงกับแบคทีเรียสายพันธุ์ *Solitalea sp.* ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นในการรีดิวซ์ซัลเฟตในน้ำเสียอินทรีย์และทำให้เกิดการยับยั้งการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (Jung, Kim et al., 2016) เมื่อกระบวนการเกิดก๊าซมีเทนไม่สมบูรณ์โดยจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แทน จึงส่งผลกระทบต่อระบบโดยรวมเกิดความไม่สมบูรณ์ตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีแถบดีเอ็นเอเด่นอีกสายพันธุ์หนึ่งก็คือ แถบที่ 10 มีความคล้ายคลึงกับสายพันธุ์ *Pseudomonas sp.* แบคทีเรียชนิดนี้เป็นแบคทีเรียที่มีความแข็งแรง ทนต่อสภาวะแวดล้อมได้หลากหลาย แต่กลับสามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่มีออกซิเจน ในบางการศึกษาวิจัยจึงนำเอาแบคทีเรียสายพันธุ์ *Pseudomonas sp.* มาทำงานในระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ เพื่อเป็นการดึงเอาศักยภาพของแบคทีเรียสายพันธุ์นี้ออกมาใช้งาน เพราะสามารถลดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีจากน้ำเสียที่เกิดจาก

กระบวนการย่อยผ้าได้มากถึง ร้อยละ 90.7 ที่ระยะเวลาพักน้ำ 90 ชม.(Lin, Zhang et al., 2010) อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เป็นเพียงระบบแบบไร้อากาศ การทำงานของแบคทีเรียสายพันธุ์เหล่านี้ อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งของการกำจัดซีโอติที่มีประสิทธิภาพไม่เท่าที่ควรเพียงร้อยละ 36.76 ของระบบถังกรอง T33 ส่วนดีเอ็นเอเด่นแถบที่ 11 พบสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่คล้ายคลึงกับ *Thauera* sp. เป็นสายพันธุ์ที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน ออกซิเจนจำกัดหรือไม่มีออกซิเจนเลย (Facultative bacteria) โดย *Thauera* sp. จะทำหน้าที่หลักในการย่อยสลายไนโตรเจนในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) น้ำเสียที่เหมาะสมกับแบคทีเรียสายพันธุ์นี้ มักจะเป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอน เช่น กระบวนการผลิตโพลีเอทิลีน ถ่านหิน เป็นต้น (Mao, Zhang et al., 2010, Mechichi, Patel et al., 2005, Shinoda, Sakai et al., 2004)

จากรูปที่ 11 ช่องวิ่งที่ 1 2 3 และ 4 แถบดีเอ็นเอแถบที่ 16 พบอาร์เคียสายพันธุ์ใกล้เคียงกับ *Methanosaeta concilii* ที่มีอยู่ใน T21 T30 T31 และ T33 ซึ่ง *Methanosaeta concilii* เป็นสายพันธุ์ที่อยู่อาศัยได้ในเฉพาะสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น ใช้กรดอะซิติกและคาร์บอนไดออกไซด์ช่วยในการเจริญเติบโตและเป็นแหล่งพลังงานเพื่อผลิตก๊าซมีเทนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ในบางครั้งก็ยังสามารถใช้ก๊าซมีเทนเป็นแหล่งพลังงาน (Hinrichs, Hayes et al., 1999) นอกจากนี้ *Methanosaeta concilii* ยังสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 35°C (PATEL & SPROTT, 1990, Steinhaus, Garcia et al., 2007) เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอตินี้ อาจกล่าวได้ว่าเป็นการทำงานของจุลินทรีย์รวมในระบบสภาวะไร้ออกซิเจน โดยอาศัยสารอินทรีย์เป็นแหล่งอาหารและพลังงาน แต่ในทางกลับกัน *Methanosaeta concilii* ที่พบในทุกๆระบบถังกรองไร้อากาศกลับสามารถใช้ก๊าซมีเทนเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน จึงทำให้เกิดการเลือกใช้ก๊าซมีเทนเป็นแหล่งอาหารแทนสารอินทรีย์ในรูปซีโอติ ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอติของถังกรองไร้อากาศนี้จึงไม่สูงเท่าที่ควร โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 61.35 ของ T31

Band 1

ATTACCGCGGCTGCTGGCACGGAGTTAGCCGATCCTTATTTCGTACAGTACATACAAAAGGTTAC
 ACGTAACCCACTTTATTCTGCACAAAAGAAGTTTACAATTCATAGAACCGTCTTCCTTCACGCG
 ACTTGGCTGGTTCAGACTCTCGTCCATTGACCAATATTCTCACTGCTGCCTCCCGTA

Band 5

TTCTACGGGAGGCAGCAGTGGGAATATTGCGCAATGGAGAAGAACTCTGACGCAGCAATACC
 GCGTGAGCGAAGAAGGTCTTCGGATCGTAAAGCTCTGTTATCAGGGAAGAAGAAAATGACGGTA
 CCTGATGAGCAAGTCCCGGCTAACTACGTGCCAGCAGCCGCGGTAAT

Band 7

ATTACCGCGGCTGCTGGCACGGAGTTAGCCGATCCTTATTCTTACAGTACAATCAGCTCTTTAC
 ACGTAAAGAGGTTTTTTCCCGTACAAAAGAAGTTTACAACCCATAGGGCCGTATCCTTCACGC
 GGCATGGCTGGATCAGTGTTTCCACCATTGTCCAATATTCTTACTGCTGCCTCCCGTAGGAA

Band 9

ATTACCGCGGCTGCTGGCACGGAGTTAGCCGATGCTTATTCTTCAGGTACTTTCAACCTTATAC
 AAGTATAAGGATTTACTCCCTGACAAAAGCAGTTTACAACCCATAAGGCCGTCTTCCTGCACGC
 GGCATGGCTGGGTCAGCCTTGCGGCCATTGCCCAATATTCTTACTGCTGCCTCCCGTAGGAAT
 C

Band 10

TCCTACGGGAGGCAGCAGTGGGAATATTGGACAATGGGCGAAAGCCTGATCCAGCCATGCCG
 CGTGTGTGAAGAAGGTCTTCGGATTGTAAAGCACTTTAAGTTGGGAGGAAGGGCATTAACTAA
 TACGTTAGTGCTTTGACGTTACCGACAGAATAAGCACCGGCTAACTCTGTGCCAGCAGCCGC

Band 11

TTACCGCGGCTGCTGGCACGTAGTTAGCCGGTGCTTCTTAGTCCGGTACCGTCATCCATGTCCT
 ATGTTAGAGAACACGATTTCTTCCCGGCCGAAAGAGCTTTACAACCCGAAGGCCCTTCTTCACTC
 ACGCGCATGGCTGGATCAGGCTTGCGCCCATTGTCCAAAATTCCCCACTGCTGCCTCCCGTAG

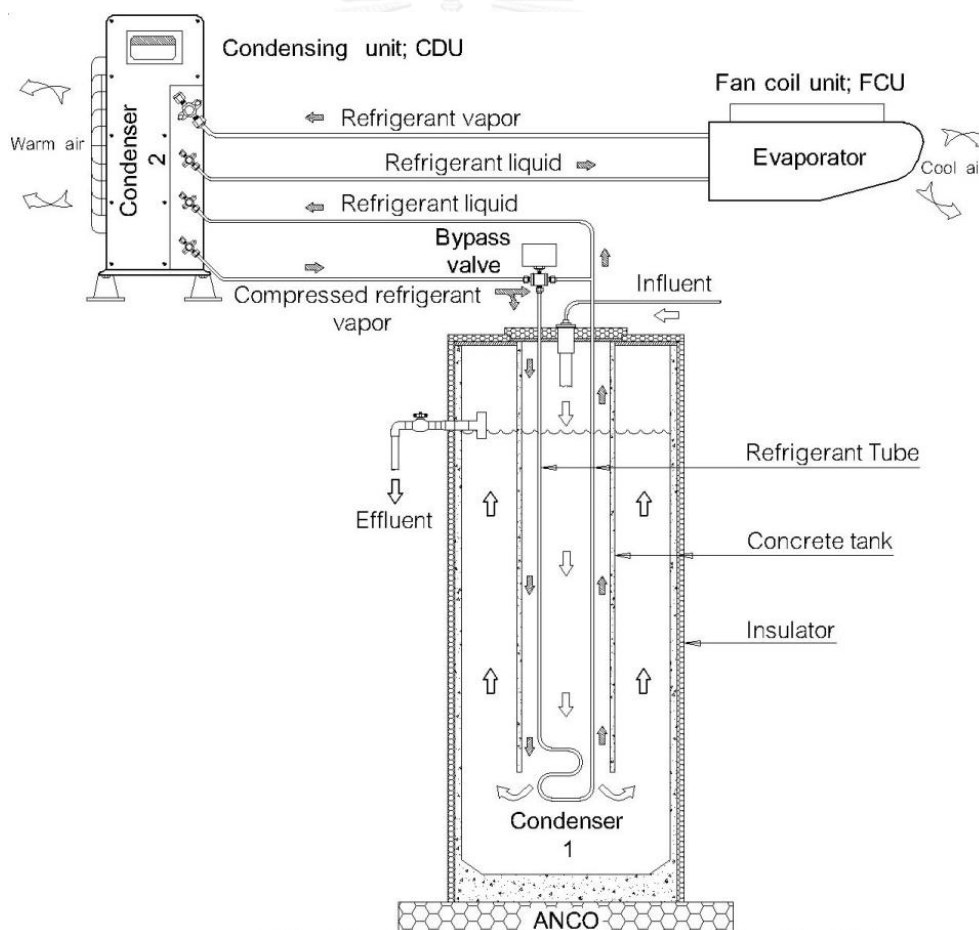
Band 16

TTACCGCGGCGGCTGGCACCGGTCTTGCCCGGCCCTTGCTATGCAATGCTTTTTAGGCATCACG
 ACAGCCAAGATTGTATCCTGGCACTCGAGGTCCCCTTATCGCTGTTGCCAGCATTGTAAAGTTT
 TCGCGCCTGGTGCACCCCGTAGGGAATC

4.2 การประยุกต์ใช้การศึกษาจากห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรอง ไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น (การศึกษาส่วนที่ 2)

4.2.1 การพัฒนาเครื่องต้นแบบ

เนื่องจากการศึกษาส่วนที่ 2 ต้องการศึกษการทำงานจริงระหว่างถังกรองไร้อากาศกับเครื่องควบแน่น ดังนั้นจึงต้องอาศัยข้อมูลจากการศึกษาส่วนที่ 1 มาใช้ในการออกแบบและสร้างถังกรองไร้อากาศและเครื่องควบแน่น โดยเครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นนี้ประกอบด้วยสี่ส่วนคือ ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter; AF) เครื่องปรับอากาศ (Air-Conditioner, AC) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger or Condenser) และเครื่องควบคุมทิศทางกรไหลของสารแลกเปลี่ยนความเย็น (Bypass Valve) ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แผนภาพเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติเครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

Equipment of Anaerobic Filter	Specification	Equipment of Air-Conditioner	Specification
Concrete tank		Air-conditioner	
Outer tank height	2 m	Cooling capacity	5.66 kW
Outer tank diameter	80 cm	Power consumption	1.58 kW
Outer tank thickness	6 cm	Coefficient of Performance	3.57
Inner tank height	1.60 m	Refrigerant	R22
Inner tank diameter	30 cm	Fan Coil Unit	
Inner tank thickness	2 cm	Air flow rate	24.01 m ³ /min
Anaerobic Filter		Capillary tube	
Wastewater volume	540 L	Condensing Unit	
Wastewater flow rate	180 L/9 hr-day	Air flow rate	84.92 m ³ /min
Hydraulic Retention Time	27 hr	Compressor	Rotary
Wastewater temperature controlled range	35.50-37.00 °C	Coaxial heat exchanger	
Plastic media		Copper tube diameter	9.50 mm.
Random flow configuration	17.40 m ²	Copper tube thickness	0.80 mm.
Peristaltic Pump		Surface of heat exchanger	0.36 m ²
Power consumption	2 W	Bypass valve	
Voltage	220-230 Vac	Max. operating pressure	25 bar
		Temperature	5 - 125 °C
		Voltage	220-230 Vac

4.2.1.1 ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter; AF)

นำข้อมูลผลจากการศึกษาส่วนที่ 1 ที่ถังกรองไร้อากาศมีโครงสร้างถังเป็นคอนกรีตแล้วหุ้มฉนวนป้องกันความร้อน บรรจุน้ำเสียจำนวน 5.40 ลิตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 1.80 ลิตร/ 9 ชม.-วัน ระยะกักพักน้ำ 27 ชม. ใช้แหล่งผลิตพลังงานความร้อนจากเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า และควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 35 °C±0.10 ซึ่งเป็นถังกรองไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุดต่อการใช้พลังงานต่ำสุด มาใช้เป็นต้นแบบใช้ในการออกแบบและสร้างถังกรองไร้อากาศ

- 1) สร้างถังกรองไร้อากาศจากคอนกรีตและหุ้มฉนวนป้องกันความร้อน
- 2) กำหนดปริมาตรน้ำเสียและอัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 100 เท่า คือ ปริมาตรน้ำเสีย 540 ลิตรและอัตราการไหลของน้ำเสีย 180 ลิตร/ 9 ชม.-วัน ดังนั้นระยะเวลากักพักน้ำจึงมีค่าเท่าเดิมคือ 27 ชม.
- 3) เปลี่ยนแหล่งผลิตความร้อนจากเครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้ามาเป็นความร้อนที่จากเครื่องปรับอากาศ โดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- 4) การควบคุมอุณหภูมิน้ำเสีย เนื่องจากการใช้ความร้อนที่จากเครื่องปรับอากาศมาเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำเสียนั้น จะไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิน้ำเสียให้อยู่ในระดับ 35 °C±0.10 ได้เหมือนกับ

เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า เพราะการทำงานของเครื่องควบแน่น 1 จะขึ้นอยู่กับการทำงาน of คอมเพรสเซอร์ (ดูรูปที่ 4.13 ประกอบ) และการทำงานของคอมเพรสเซอร์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศในห้องปรับอากาศ คืออุณหภูมิอากาศ 26°C คอมเพรสเซอร์ทำงานและเมื่ออุณหภูมิอากาศ 25°C คอมเพรสเซอร์หยุดทำงาน กับช่วงเวลาการทำงาน of สำนักงานคือ 8.00 น. ถึง 17.00 น. ดังนั้นการกำหนดค่าอุณหภูมิน้ำเสียจึงต้องคำนึงถึงช่วงอุณหภูมิน้ำเสียที่เบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิ 35°C และจะต้องสะสมพลังงานความร้อนในน้ำเสียเก็บไว้ใช้งานหลังจากสำนักงานหยุดทำงานคือ ช่วงเวลา 17.00 น. ถึง 8.00 น. ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดการทำงาน of เครื่องควบแน่นคือ เมื่อน้ำเสียนี้อุณหภูมิ 37.00°C เครื่องควบแน่นทำงาน และเมื่อน้ำเสียนี้อุณหภูมิ 35.50°C เครื่องควบแน่นหยุดทำงาน ซึ่งสอดคล้องกับช่วง Mesophilic อุณหภูมิ 30°C ถึง 38°C (de Lemos Chernicharo 2007)

4.2.1.2 เครื่องปรับอากาศ (Air-Conditioner, AC)

เนื่องจากเครื่องปรับอากาศของเดิมของสำนักงานมีขนาด 18,000 บีทียู/ชม. ซึ่งใช้งานมานานเป็นระยะเวลา 20 ปี จึงทำการเปลี่ยนใหม่ โดยเลือกเครื่องปรับอากาศแบบที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดที่มีขนาดใกล้เคียงกับของเดิมคือ 19,302 บีทียู/ชม. และส่งทดสอบตามมาตรฐานที่บริษัท บีพีไวส์ (ประเทศไทย) จำกัด ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากบทที่ 3 ข้อ 3.1.2.4

4.2.1.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหรือเครื่องควบแน่น 1 (Condenser 1) นำสมการที่ 4.5 ของการศึกษาที่ 1 มาใช้ประเมินหาขนาดพลังงานที่ต้องการจากเครื่องควบแน่น 1 แล้วสร้างขึ้นจากท่อทองแดงโดยนำม้วนเป็นรูปทรงกระบอก (Coaxial heat exchanger) ให้มีพื้นที่ผิวรวม 0.36 ตรม. และนำไปติดตั้งไว้ในถังกรองไร้อากาศ ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากบทที่ 3 ข้อ 3.1.2.5

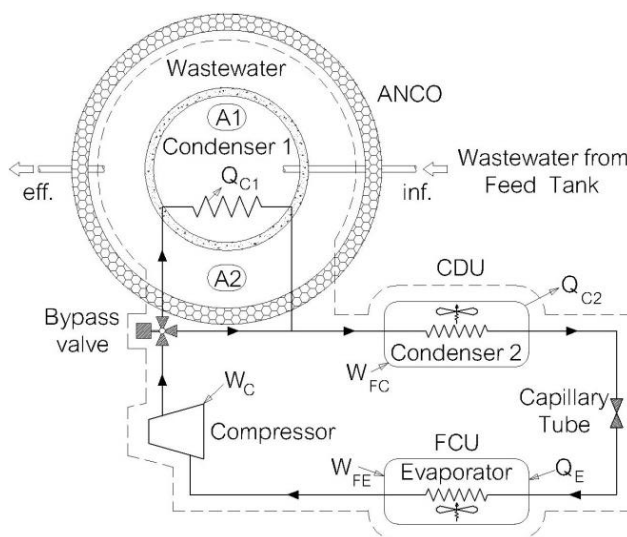
4.2.1.4 เครื่องควบคุมทิศทางการไหลของสารแลกเปลี่ยนความเย็น (Bypass Valve)

เครื่องควบคุมทิศทางการไหลของสารแลกเปลี่ยนความเย็นหรือบายพาสวาล์ว เป็นอุปกรณ์ที่มีขายตามท้องตลาด นำมาใช้ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของสารแลกเปลี่ยนความเย็นระหว่างเครื่องควบแน่น 1 กับเครื่องควบแน่น 2 ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากบทที่ 3 ข้อ 3.1.2.6 ข้อ 3.6.2 และรูปที่ 4.13

4.2.2 การพัฒนาแบบจำลองสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิด เมื่อนำมาใช้พิจารณาระบบการทำงาน of เครื่องปรับอากาศที่แสดงในรูปที่ 4.13 สามารถเขียนเป็นสมการที่ (4.6) โดย $Q_E - W_C - W_{FE} - W_{FC}$ เป็นพลังงานที่เข้าสู่ระบบเครื่องปรับอากาศ และ $Q_{C1} + Q_{C2}$ เป็น

พลังงานที่ถ่ายเทออกจากระบบเครื่องปรับอากาศที่สามารถวัดได้และนำค่ามาคำนวณในการทดลองครั้งนี้ ส่วน Q_{loss} เป็นค่าการสูญเสียความร้อนจากระบบและความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง เมื่อนำสมการที่ (4.6) มาเขียนเป็นสมการที่ (4.7) จะติดค่า Q_{C1} เนื่องจากเป็นส่วนที่ถังกรองไร้อากาศทำงานร่วมกับเครื่องปรับอากาศ



รูปที่ 4.13 ขอบเขตการทำงานของระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

การพิจารณาลังกรองไร้อากาศที่หุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนและใช้ความร้อนจากเครื่องควบแน่น 1 นั้น ใช้กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิดมาพิจารณารูปที่ 4.13 ในส่วนของ Q_{C1} สามารถนำมาเขียนเป็นสมการที่ (4.8) และพิจารณาเปลี่ยนเป็นสมการที่ (4.9) โดย $\Delta E_{In\ tank}$ เป็นความร้อนที่ถ่ายเทเพื่อเปลี่ยนสถานะของน้ำเสียภายในถังกรองไร้อากาศ ซึ่งปริมาณความร้อนจะขึ้นอยู่กับปริมาตรของน้ำเสีย (V_{ww}) และผลต่างของอุณหภูมิน้ำเสีย ($T_{end} - T_{start}$) ภายในถังกรองไร้อากาศ ส่วน $\Delta E_{From\ flow}$ เป็นเป็นความร้อนที่ถ่ายเทเพื่อเปลี่ยนสถานะของน้ำเสียที่ไหลผ่านถังกรองไร้อากาศ ซึ่งปริมาณความร้อนจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำเสีย (v_{ww}) หรือปริมาตรของน้ำเสียต่อระยะกักเก็บน้ำ ($\frac{V_{ww}}{HRT}$) แสดงในสมการที่ 4.3 ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเสียไหลเข้ากับน้ำเสียไหลออก ($T_{eff} - T_{inf}$) และระยะเวลา (t) นำสมการที่ (4.3) ไปแทนค่าในสมการที่ (4.9) และนำสมการที่ (4.9) มาพิจารณา ไปแทนค่า Q_{C1} ในสมการที่ (4.7) จึงสามารถเขียนเป็นสมการ (4.10) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณการใช้พลังงานของระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

$$Q_E - W_C - W_{FE} - W_{FC} + Q_{loss} = Q_{C1} + Q_{C2} \quad (4.6)$$

$$\sum_{t=start}^{end} [\rho_{air} v_{E_{air}} C_{p_{air}} (T_{E_{out}} - T_{E_{in}}) - \dot{W}_C - \dot{W}_{FE} - \dot{W}_{FC}] + Q_{loss} = \sum_{t=start}^{end} \dot{Q}_{C1_t} + \sum_{t=start}^{end} \rho_{air} v_{C2_{air}} C_{p_{air}} (T_{C2_{out}} - T_{C2_{in}}) \quad (4.7)$$

$$Q_{C1} = \Delta E_{In\ tank} + \Delta E_{From\ flow} \quad (4.8)$$

$$v_{ww} = \frac{V_{ww}}{HRT} \quad (4.3)$$

$$Q_{C1} = \sum_{t=start}^{end} \dot{Q}_{C1_t} = \rho_{ww} V_{ww} C_{p_{ww}} (T_{end} - T_{start}) + \sum_{t=start}^{end} \rho_{ww} v_{ww} C_{p_{ww}} (T_{eff_t} - T_{inf_t}) \Delta t \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} & \int_{t=0}^n \rho_{air} v_{E_{air}} C_{p_{air}} (T_{E_{out_t}} - T_{E_{in_t}}) dt - \int_{t=0}^n \dot{W}_{C_t} dt - \int_{t=0}^n \dot{W}_{FE_t} dt - \int_{t=0}^n \dot{W}_{FC_t} dt + Q_{loss} \\ &= \rho_{ww} V_{ww} C_{p_{ww}} (T_{end} - T_{start}) + \int_{t=0}^n \rho_{ww} \frac{V_{ww}}{HRT} C_{p_{ww}} (T_{eff_t} - T_{inf_t}) dt \\ &+ \int_{t=0}^n \rho_{air} v_{C2_{air}} C_{p_{air}} (T_{C2_{out_t}} - T_{C2_{in_t}}) dt \end{aligned} \quad (4.10)$$

ตารางที่ 4.8 แสดงตัวแปรคงที่สำหรับที่ใช้คำนวณระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

HRT	V_{ww}	t	ρ_{ww}	$C_{p_{ww}}$	ρ_{air}	$C_{p_{air}}$	$V_{E_{air}}$	$V_{C2_{air}}$
(hr.)	(m^3)	(hr.)	(kg/m^3)	($kJ/kg\ ^\circ C$)	(kg/m^3)	($kJ/kg\ ^\circ C$)	m^3/s	m^3/s
27	0.540	9	994.10	4.1780	1.1660	1.0050	0.4002	1.4154

Nomenclature			Nomenclature		
$C_{p_{air}}$	Air specific heat	$kJ/kg\ ^\circ C$	T_{end}	Temperature end	$^\circ C$
$C_{p_{ww}}$	Wastewater specific heat	$kJ/kg\ ^\circ C$	T_{start}	Temperature start	$^\circ C$
HRT	Hydraulic Retention Time	hr	$T_{C2_{in}}$	Air temperature of inlet condenser 2	$^\circ C$
Q_E	Heat input to evaporator	kJ	$T_{E_{in}}$	Air temperature of inlet evaporator	$^\circ C$
Q_{C1}	Heat output condenser 1	kJ	$T_{C2_{out}}$	Air temperature of outlet condenser 2	$^\circ C$
Q_{C2}	Heat output condenser 2	kJ	$T_{E_{out}}$	Air temperature of outlet evaporator	$^\circ C$
$v_{E_{air}}$	Air flow rate of evaporator	m^3/s	T_{inf}	Wastewater temperature of influent	$^\circ C$
$v_{C2_{air}}$	Air flow rate of condenser 2	m^3/s	T_{eff}	Wastewater temperature of effluent	$^\circ C$
v_{ww}	Wastewater flow rate	m^3/s	W_C	Power of Compressor	kW
V_{ww}	Wastewater volum	m^3	W_{FC}	Power of condenser 2 fan motor	kW
ρ_{air}	Air density	kg/m^3	W_{FE}	Power of evaporator fan motor	kW
ρ_{ww}	Wastewater density	kg/m^3	Q_{loss}	Heat loss	kJ
t	Work periods	hr		Loss from heat input to compressor	

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลอุณหภูมิน้ำเสียและอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยที่ได้จากการวัด

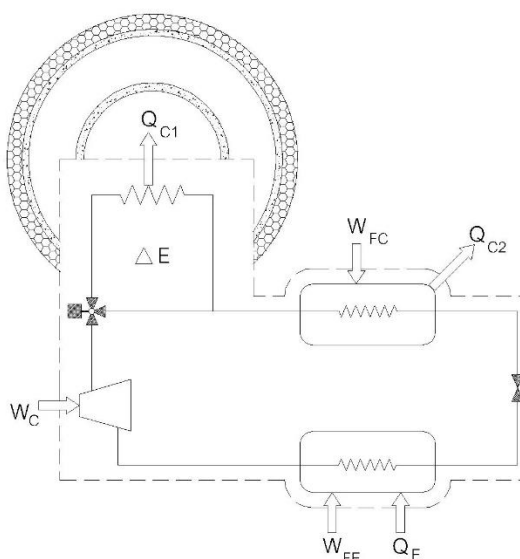
Sensor		Max.	Min.	Avg.	SD
Indoor	Ambience (°C)	35.50	24.20	25.92	2.47
	T _{E in} (°C)	31.30	24.30	26.05	0.89
	T _{E out} (°C)	30.00	8.00	16.72	4.60
Outdoor	Ambience (°C)	36.50	23.80	31.04	2.86
	T _{E in} (°C)	35.30	23.50	29.94	2.71
	T _{E out} (°C)	41.70	24.00	34.29	3.29
ANCO	T _{WW inf} (°C)	28.10	27.60	27.24	0.48
	T _{WW inner} (°C)	40.70	32.30	35.40	1.81
	T _{WW eff} (°C)	37.50	34.80	35.42	0.97

4.2.2 ผลการใช้พลังงานของเครื่องต้นแบบระบบร่วมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

จากรูปที่ 4.14 เป็นการนำข้อมูลค่ากำลังไฟฟ้าจากตารางที่ ค.1 ค่าอุณหภูมิน้ำเสียและอุณหภูมิอากาศจากตารางที่ ง.1 จากภาคผนวก มาแทนค่าในสมการที่ 4.10 จะได้ค่าพลังงานขาเข้า คือ Q_E เป็นพลังงานความร้อนจากห้องปรับอากาศถ่ายเทให้กับสารแลกเปลี่ยนความเย็น W_C เป็นพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าของคอมเพรสเซอร์ W_{FE} เป็นพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์พัดลมของเครื่องส่งลมเย็น W_{FC} เป็นพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์พัดลมของเครื่องส่งลมร้อน ส่วน Q_{loss} เป็นค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองที่ไม่สามารถวัดได้ในการทดลองครั้งนี้ ประกอบด้วยสารทำความเย็นระบายความร้อนออกจากคอมเพรสเซอร์เพื่อรักษาความมีเสถียรภาพทางกลของคอมเพรสเซอร์ให้คงที่ การสูญเสียความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น และท่อแลกเปลี่ยนสารทำความเย็น พลังงานขาออก Q_{C1} เป็นพลังงานความร้อนจากสารแลกเปลี่ยนความเย็นที่ถ่ายเทให้กับน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศ ประกอบด้วยสองส่วนคือ Q_{Intank} และ $Q_{From flow}$ ส่วน Q_{C2} คือพลังงานความร้อนจากสารแลกเปลี่ยนความเย็นที่ถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมนอกอาคาร แสดงในรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลพลังงานแต่ละส่วนที่ใช้ในการเดินระบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

Equipment	Energy (kWh/day)			SD	
	Max.	Min.	Avg.		
Input	Q_E	46.39	34.31	40.89	4.94
	W_C	8.26	6.60	7.39	0.57
	W_{FE}	0.88	0.81	0.86	0.02
	W_{FC}	0.62	0.47	0.54	0.05
Output	Q_{C1}	3.10	2.52	2.82	0.18
	Q_{C2}	72.01	58.25	65.61	4.80



รูปที่ 4.14 สมดุลพลังงานที่ใช้ในการเดินระบบเครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

4.2.3 สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมของเครื่องปรับอากาศในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

จากกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์และวัฏจักรเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอและสมการที่ (2.25) ถูกนำเขียนเป็นสมการที่ (4.11) และนำมาใช้ประเมินสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมของเครื่องปรับอากาศตามสภาวะการใช้งานจริง โดย $COP_{Overall}$ เป็นตัวแทนค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมของระบบ (Coefficient of Performance; $COP_{Overall}$) ในช่วงเวลา (t) 8.00 น. ถึง 17.00 น. และ Q_E คือ อัตราความร้อนที่ถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ อีวาโปเรเตอร์ (Evaporator) ในช่วงเวลา (t) ส่วน \dot{W}_T คือค่าพลังงานไฟฟ้ารวม ($\dot{W}_C + \dot{W}_{FE} + \dot{W}_{FC}$) ที่จ่ายให้กับเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลา (t) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมของเครื่องปรับอากาศมี

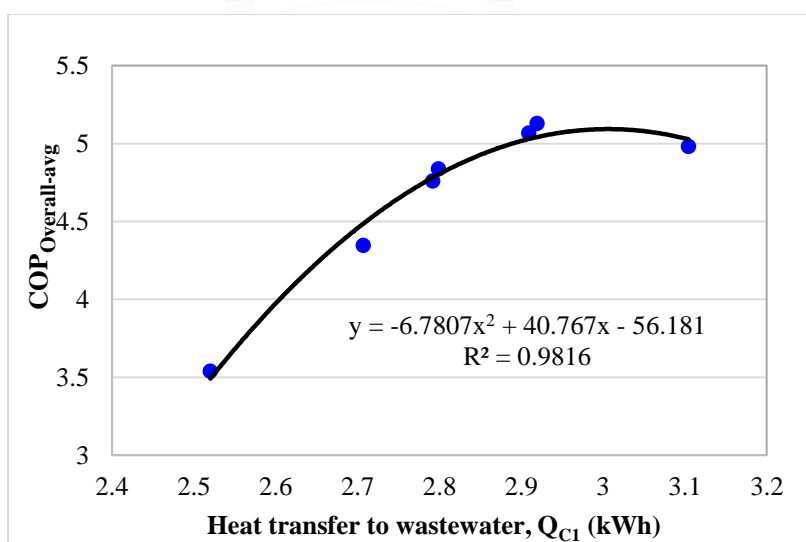
ค่าเฉลี่ย 4.65 เพิ่มขึ้น 30.30% จากสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศมาตรฐานของผู้ผลิตซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.57

$$COP_{Overall} = \frac{\int_{t=0}^n \dot{Q}_E dt}{\int_{t=0}^n \dot{W}_T dt} \quad (4.11)$$

สมการที่ (4.8) ถูกนำมาใช้ประเมินความร้อนทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ของเครื่องต้นแบบระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นตามสภาวะการใช้งานจริง โดย Q_{C1} เป็นตัวแทนค่าความร้อนทิ้งทั้งหมดที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ในช่วงเวลา (t) 8.00 น. ถึง 17.00น. นำสมการที่ (4.6) มาแทนค่าในสมการที่ (4.11) จะได้สมการที่ (4.12) จากการทดลองเก็บข้อมูลจำนวนมากและใช้เวลาอย่างยาวนานสามารถพิจารณาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบได้ ดังนั้นสมมติว่า Q_{loss} ที่เกิดขึ้นในระบบเป็นตัวแปรแบบสุ่มไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (Uncorrelated error) มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ จึงทำให้พจน์ของสมการ $\int_{t=0}^n \dot{Q}_{loss} dt = 0$ จึงจัดพจน์คณิตศาสตร์ใหม่เป็นสมการ (4.13) และสมการ (4.13) ถูกนำมาใช้ประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง $COP_{Overall}$ กับ Q_{C1} ดังนั้นจะพบว่าการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ Q_{C1} มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ $COP_{Overall}$

$$COP_{Overall} = \frac{\int_{t=0}^n (\dot{Q}_{C1} + \dot{Q}_{C2} + \dot{W}_T + \dot{Q}_{loss}) dt}{\int_{t=0}^n \dot{W}_T dt} \quad (4.12)$$

$$COP_{Overall} = \frac{\int_{t=0}^n (\dot{Q}_{C1} + \dot{Q}_{C2}) dt}{\int_{t=0}^n \dot{W}_T dt} + 1 \quad (4.13)$$

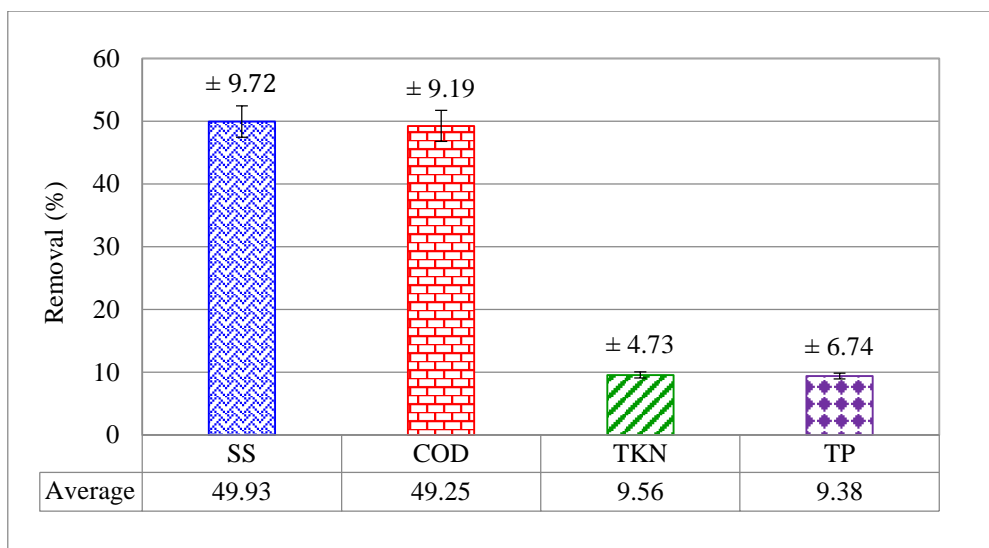


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะกับความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำเสีย

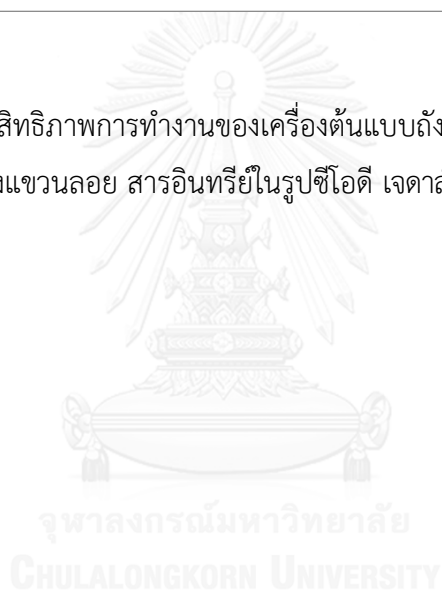
จากรูปที่ 4.15 ผลจากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ($COP_{Overall}$) ต่อความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศ (Q_{C1}) มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 3.54 / 2.52 kWh และสูงสุดอยู่ที่ 5.13 / 2.92 kWh เมื่อประเมินเส้นแนวโน้ม (Polynomial) พบว่าถ้าความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำเสียในถังกรองไร้อากาศอยู่นอกช่วงระหว่าง 2.91 - 3.10 kWh ค่า $COP_{Overall}$ จะลดลง เพราะสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศส่วนหนึ่ง จะแปรผันตามอุณหภูมิของน้ำเสียและช่วงเวลาการทำงานของระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ดังนั้นเมื่อน้ำเสียมีอุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ $37.00^{\circ}C$ การถ่ายเทความร้อนออกจาก Q_{C1} จะลดลง และเมื่อน้ำเสียมีอุณหภูมิลดลงจนมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ $35.50^{\circ}C$ การถ่ายเทความร้อนออกจาก Q_{C1} จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13

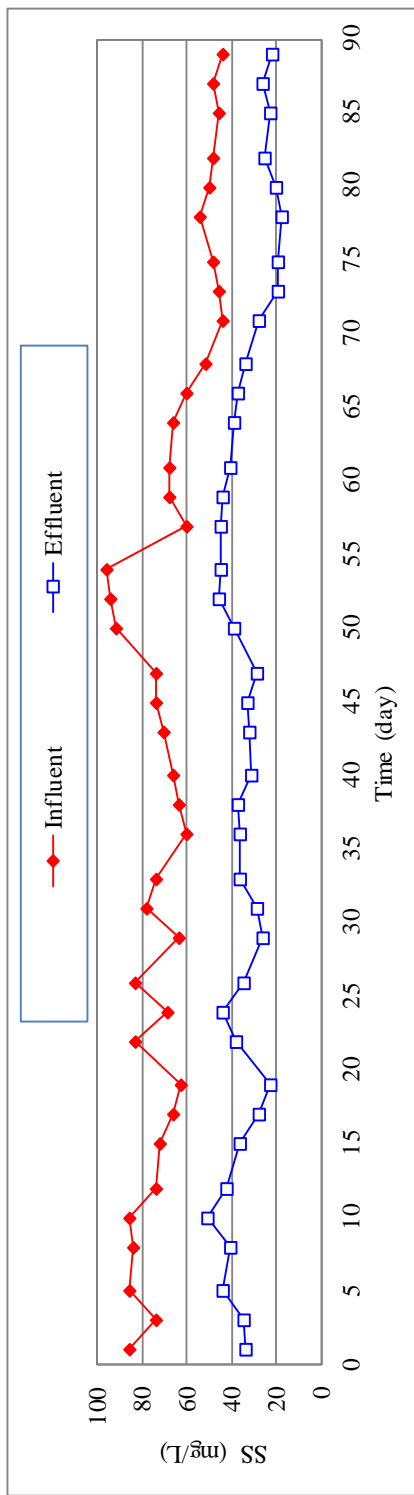
4.2.4 ผลการบำบัดน้ำเสียของเครื่องต้นแบบระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

จากการเดินระบบเครื่องต้นแบบระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นต่อเนื่องรวม 190 วัน โดยช่วงเริ่มต้นในการเดินระบบใช้ระยะเวลา 100 วัน จนเครื่องต้นแบบระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ปรับสภาพการทำงานเข้าสู่สภาวะสมดุล (ระบบมีความคงตัวด้านคุณภาพและปริมาณ ของแฉ่งแขวนลอยค่อนข้างเปลี่ยนแปลงน้อย) และช่วงที่เหลือจำนวน 90 วัน จึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำไปทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ของแฉ่งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดัลไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม รวมจำนวน 39 ตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ 1 ตัวอย่างต่อ 1 ครั้ง พบว่าเครื่องต้นแบบระบบรวมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ที่มีระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. อุณหภูมิน้ำเสียภายในถังกรองไร้อากาศมีค่าเฉลี่ย $35.40^{\circ}C$ ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าเฉลี่ย 7.23 ± 0.14 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันมีค่าเฉลี่ย -278 ± 29.63 มิลลิโวลต์ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแฉ่งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี เจดัลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวมมีค่าเฉลี่ย 49.93% 49.25% 9.56% และ 9.38% ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.16 และ 4.17

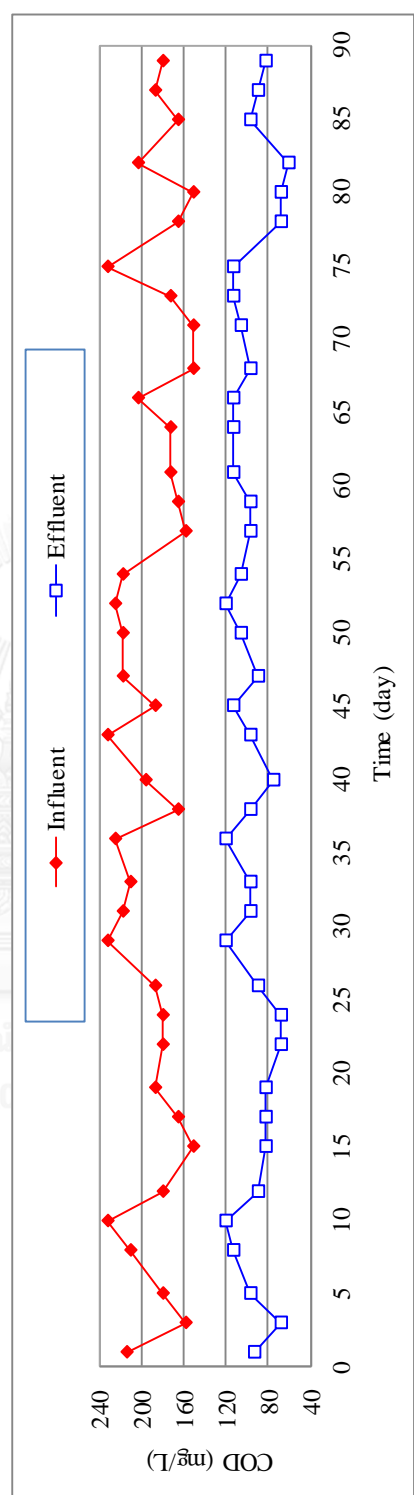


รูปที่ 4.16 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอติ เจดัลไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม



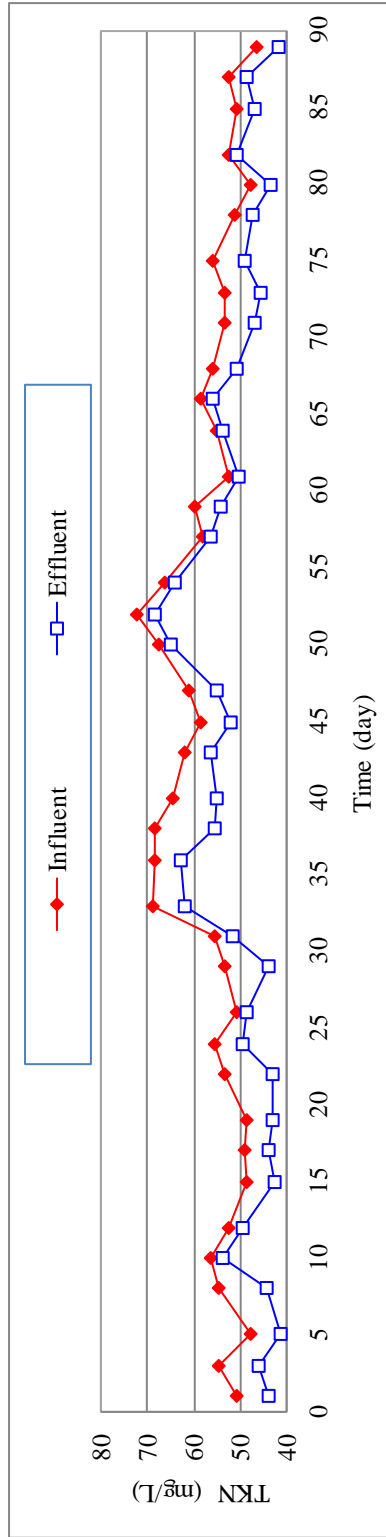


(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าของแข็งแขวนลอยของโรงอากาศ-เครื่องควบแน่น

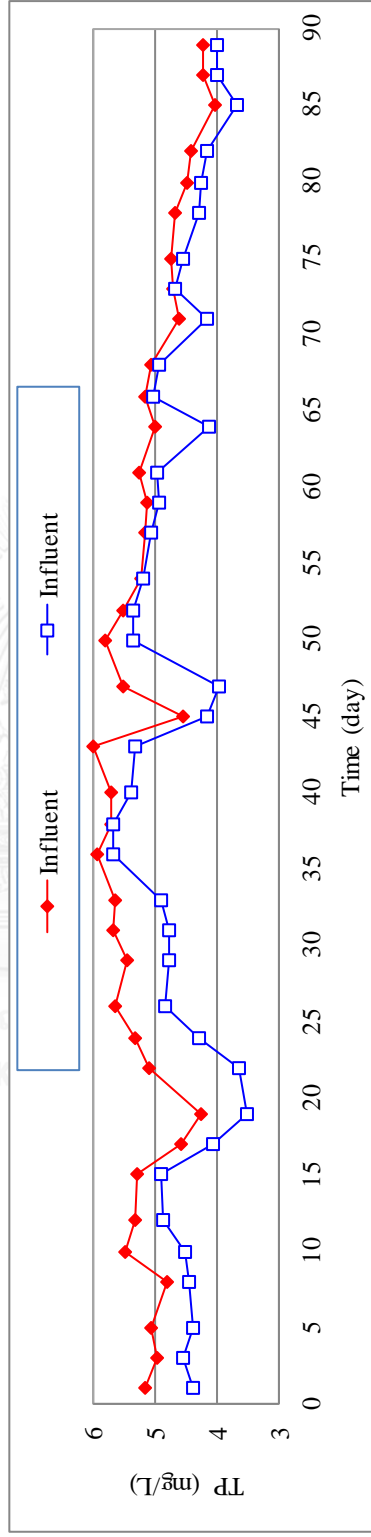


(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีของถังกรองโรงอากาศ-เครื่องควบแน่น

รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี (ค) เจดาคีโนไลโรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองโรงอากาศ-เครื่องควบแน่น



(ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าเจดาคัลไนโตรเจนของโรงอากาศ-เครื่องควบแน่น



(ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าฟอสฟอรัสรวมของโรงอากาศ-เครื่องควบแน่น

รูปที่ 4.17 (ต่อ) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี (ค) เจดาคัลไนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองโรงอากาศ-เครื่องควบแน่น

ตารางที่ 4.11 แสดงคุณภาพน้ำเฉลี่ยก่อนและหลังการบำบัด และประสิทธิภาพการกำจัดของเครื่องต้นแบบถึงกรองอากาศ-เครื่องควบแน่น

ดัชนีวัดคุณภาพ	น้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ				น้ำเสียออกจากระบบ				ประสิทธิภาพ
	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ความแปรปรวน	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ความแปรปรวน	
อุณหภูมิ (°C)	28.10	27.60	27.24	0.48	40.7	32.3	35.40	1.81	
พีเอช	7.61	6.79	7.23	0.19	7.58	6.92	7.23	0.14	
โอมาร์ที (mV)	-8.00	-155.00	-87.87	34.31	-210	-352	-278	29.23	
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	96.00	44.00	67.54	14.84	51	18	33.59	8.68	49.93
สารอินทรีย์รูปซีไอที (mg/L)	233.12	150.40	190.02	26.96	120.32	60.16	95.54	17.16	49.25
ไนโตรเจนรวม (mg/L)	72.24	46.32	56.21	6.76	68.32	41.44	50.87	6.94	9.56
ฟอสฟอรัสรวม (mg/L)	5.99	4.04	5.09	0.51	5.67	3.53	4.6	0.55	9.38

4.2.5 ผลการเดินระบบเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น

4.2.5.1 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

จากการทำงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. น้ำเสียเข้าระบบความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยมีค่าเฉลี่ย 67.54 มก./ล. มีอุณหภูมิเฉลี่ย 35.40°C และมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 49.93 ซึ่งเป็นการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่มีประสิทธิภาพปานกลางและค่อนข้างต่ำกว่าการศึกษาในส่วนของที่ 1 ที่ถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าทำงานที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. น้ำเสียเข้าระบบความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยมีค่าเฉลี่ย 56.13 มก./ล. มีอุณหภูมิ 35°C และมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 67.71 สาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบมีความเข้มข้นมากขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นลดลง แต่ถึงอย่างไรถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นก็สามารถบำบัดน้ำเสียจนความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยมีค่าเฉลี่ยลดลงเหลือ 33.59 มก./ล. ซึ่งผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ไม่เกิน 50 มก./ล. และมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด อาคารประเภท ข. ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 40 มก./ล. โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

4.2.5.2 การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี

จากการทำงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นน้ำเสียเข้าระบบมีความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปซีไอดีมีค่าเฉลี่ย 190.02 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 49.25 ซึ่งเป็นการกำจัดที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำกว่าการศึกษาในส่วนของที่ 1 ที่น้ำเสียเข้าถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า มีความเข้มข้นสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปซีไอดีมีค่าเฉลี่ย 163.52 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 61.35 สาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบมีความเข้มข้นมากขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นลดลง แต่ถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นก็สามารถบำบัดน้ำเสียจนความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีมีค่าเฉลี่ยลดลงเหลือ 95.54 มก./ล. ซึ่งผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ไม่เกิน 120 มก./ล. ส่วนมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาดกำหนดเฉพาะค่าบีโอดีไว้จึงไม่ได้ทำการเปรียบเทียบ เพราะการทดลองนี้ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าบีโอดี

4.2.8.3 การกำจัดเจดาร์ไนโตรเจน

จากการทำงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. น้ำเสียเข้าระบบความเข้มข้นเจดาร์ไนโตรเจนมีค่าเฉลี่ย 56.21 มก./ล. มีอุณหภูมิเฉลี่ย $35.40^{\circ}\text{C} \pm 1.81$ และมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 9.56 ซึ่งเป็นการกำจัดเจดาร์ไนโตรเจนมีประสิทธิภาพต่ำมากกว่าการศึกษาใน ส่วนที่ 1 ที่ถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าทำงานที่ระยะเวลาพักน้ำ 27 ชม. น้ำเสียเข้าระบบความเข้มข้นเจดาร์ไนโตรเจนมีค่าเฉลี่ย 64.44 มก./ล. มีอุณหภูมิ $35^{\circ}\text{C} \pm 0.10$ และมีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 51.20 ซึ่งสมมุติฐานเกิดจากความแปรปรวนของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียในระบบเช่นไนโตรซามอนาส ไนโตรแบคเตอร์ และดีไนตริฟายด์ ซึ่งเป็นแบคทีเรียค่อนข้างที่มีความอ่อนไหวต่อสิ่งแวดล้อมภายนอก ต้องใช้เวลาในการปรับตัว 1 ถึง 2 วัน และ หากต้องปรับตัวตลอดเวลาที่ย่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบได้ (Ahn and Forster 2002, El-Mashad, Zeeman et al. 2004)

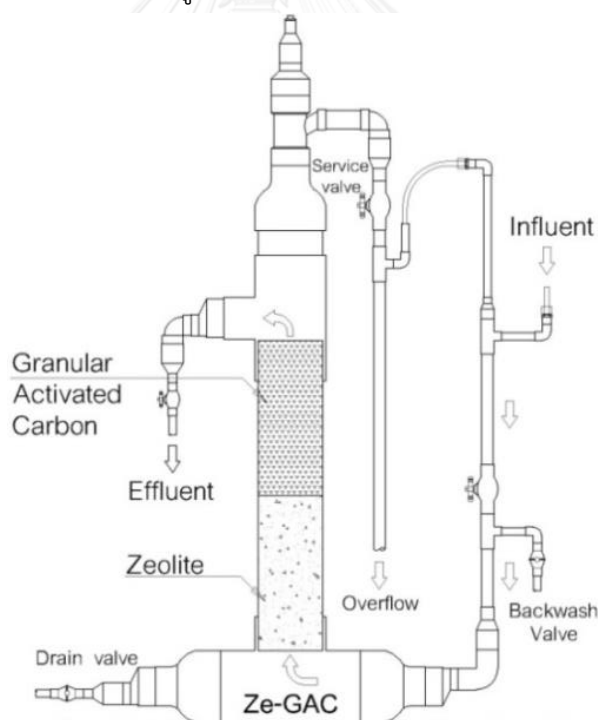
4.2.8.4 การกำจัดฟอสฟอรัสรวม

จากการทำงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นน้ำเสียเข้าระบบมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสรวมมีค่าเฉลี่ย 5.09 มก./ล. และน้ำเสียออกจากระบบมีความเข้มข้น 4.60 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 9.38 ซึ่งเป็นการกำจัดที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการศึกษาใน ส่วนที่ 1 ที่น้ำเสียเข้าถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า ความเข้มข้นฟอสฟอรัสรวมมีค่าเฉลี่ย 5.25 มก./ล. และน้ำเสียออกจากระบบมีความเข้มข้น 4.20 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยร้อยละ 20.08 ซึ่งสมมุติฐานเกิดจากความแปรปรวนของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียในระบบหรืออาจจะมีตัวยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระบบ เนื่องจากการย่อยสลายฟอสฟอรัสของจุลินทรีย์เพื่อนำไปสร้างเซลล์จุลินทรีย์และเป็นแหล่งพลังงานสำหรับจุลินทรีย์เป็นสำคัญ

4.3 การพัฒนาระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (การศึกษาส่วนที่ 3)

4.3.1 การออกแบบเครื่องต้นแบบถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

เนื่องจากการศึกษาส่วนที่ 3 ต้องการศึกษการทำงานจริงระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ซึ่งยังไม่มีถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมาใช้ในการศึกษา ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องอาศัยข้อมูลจากการทดลองเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นของการศึกษาส่วนที่ 2 ที่ใช้อัตราการไหลของน้ำเสีย 180 ลิตร/9ชม.-วัน และระยะความสูงของน้ำไหลออกจากถังกรองไร้อากาศอยู่ที่ +1.60 เมตร มาใช้ในการออกแบบถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด การออกแบบถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว ชั้นความหนา 5 เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นจึงมีราคาถูก และช่างพื้นเมืองสามารถสร้างขึ้นได้ง่ายสะดวกและรวดเร็ว กำหนดการไหลของน้ำผ่านสารกรองรวมสูง 1 เมตร



รูปที่ 4.18 แผนภาพเครื่องต้นแบบถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

เป็นแบบไหลย้อนกึ่งต่อเนื่อง มีระยะเวลาพักน้ำ 1.62 ชม. แสดงในรูปที่ 4.17 แล้วนำถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดไปต่อร่วมให้ทำงานพร้อมกับถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น แสดงในรูปที่ 4.25 ซึ่งเมื่อนำระบบทั้งสองรวมกัน ผู้วิจัยจึงนิยามระบบนี้ว่าเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

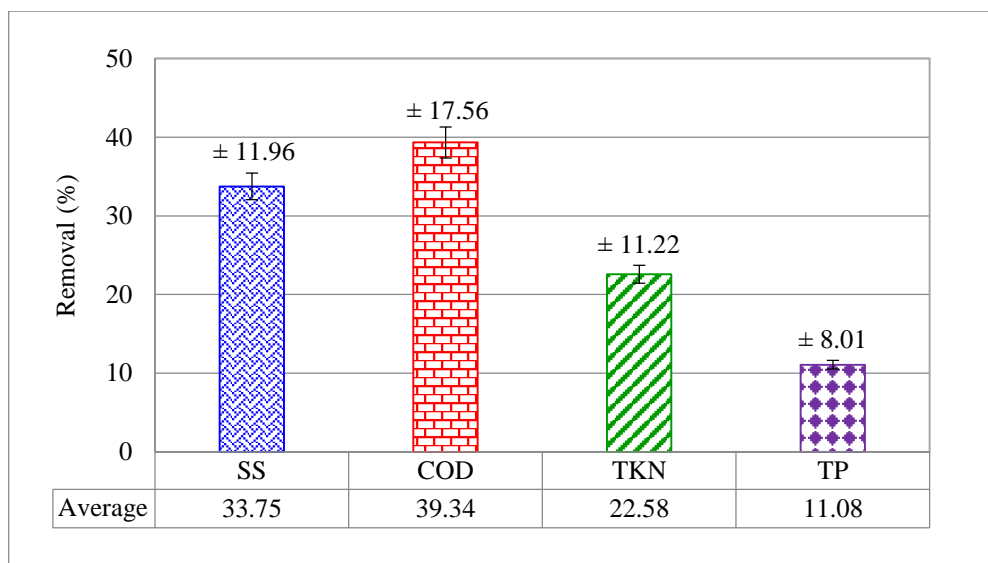
4.3.1.1 สร้างจากท่อพีวีซีสูง 2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 20.32 ซม.

4.3.1.2 สารกรองซีโอไลท์ (Zeolite) เป็นแบบที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Naturally occurring zeolite or Mineral zeolite) ขนาด 5-7 มม. จำนวน 16.20 ลิตร

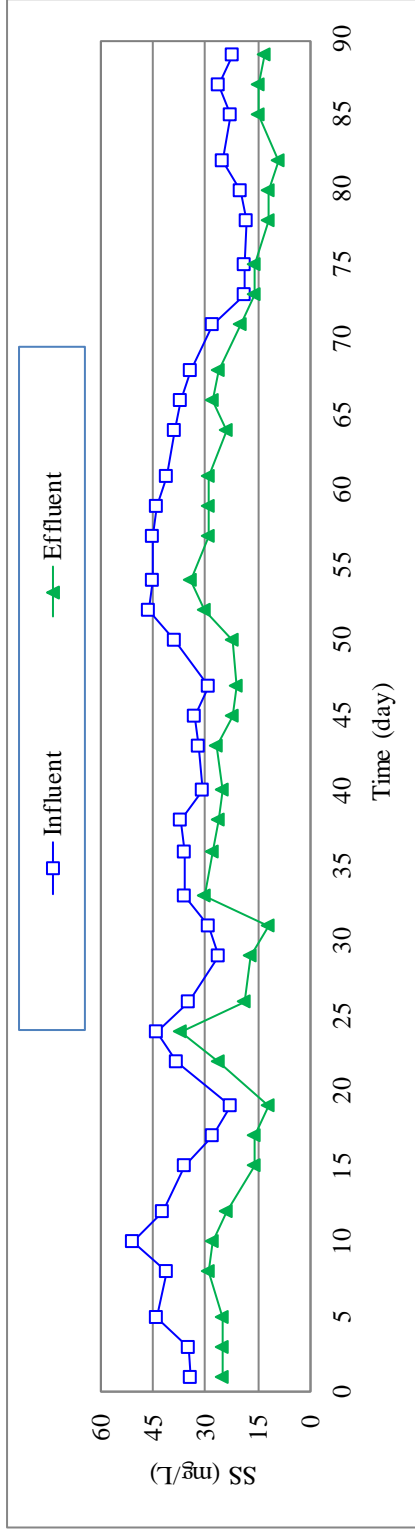
4.3.1.3 สารกรองถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัตถุดิบธรรมชาติ (กะลามะพร้าว) ด้วยวิธีก่อกัมมันต์ (Activation Process) ชนิดเกล็ด (Granular) ขนาด 1-3 มม. จำนวน 16.20 ลิตร

4.3.2 ผลการเดินระบบเครื่องต้นแบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

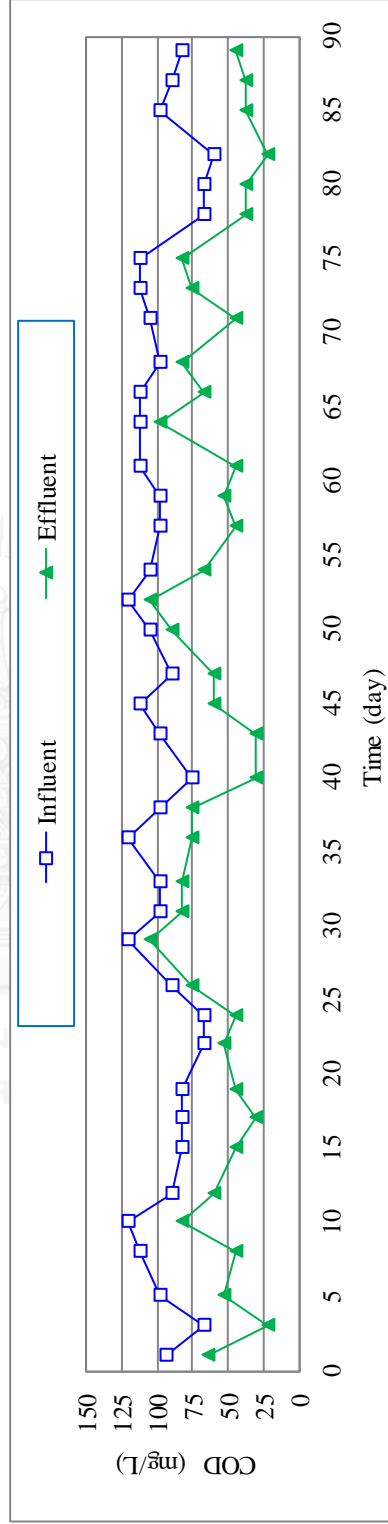
จากการเดินระบบเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นต่อเนื่องรวม 190 วัน โดยช่วงเริ่มต้นในการเดินระบบใช้ระยะเวลา 100 วัน จนเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ปรับสภาพการทำงานเข้าสู่สภาวะสมดุล และช่วงที่เหลือจำนวน 90 วัน จึงเปิดน้ำให้ไหลผ่านถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด และทำการเก็บตัวอย่างน้ำเฉพาะวันจันทร์ พุธ และศุกร์ ไปทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดาลีไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม ส่วนตัวอย่างน้ำเฉพาะวันพุธทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ สี โคลิฟอร์มรวมและฟิโคลิฟอร์ม ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ 1 ตัวอย่างต่อ 1 ครั้ง พบว่าเครื่องต้นแบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีระยะเวลาพักน้ำ 1.62 อุณหภูมิน้ำทิ้งไหลออกมีค่าเฉลี่ย 31.89°C ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าเฉลี่ย 7.42 ± 0.25 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดาลีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวมมีค่าเฉลี่ย 33.75% 39.34% 22.58% และ 11.08% ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.19 แสดงประสิทธิภาพถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอติ เจดัลไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม

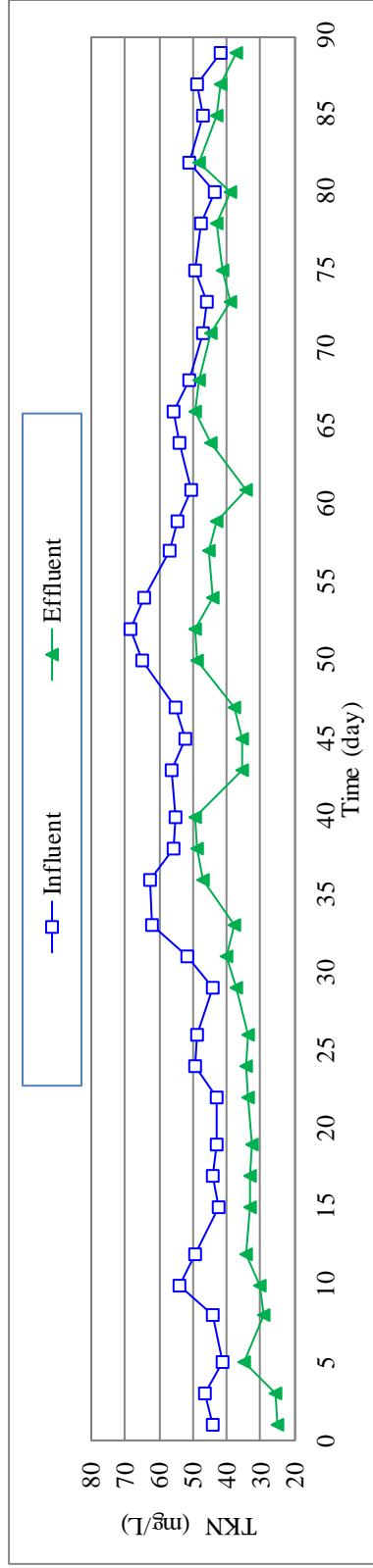


(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าของแข็งแขวนลอยของสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกิด

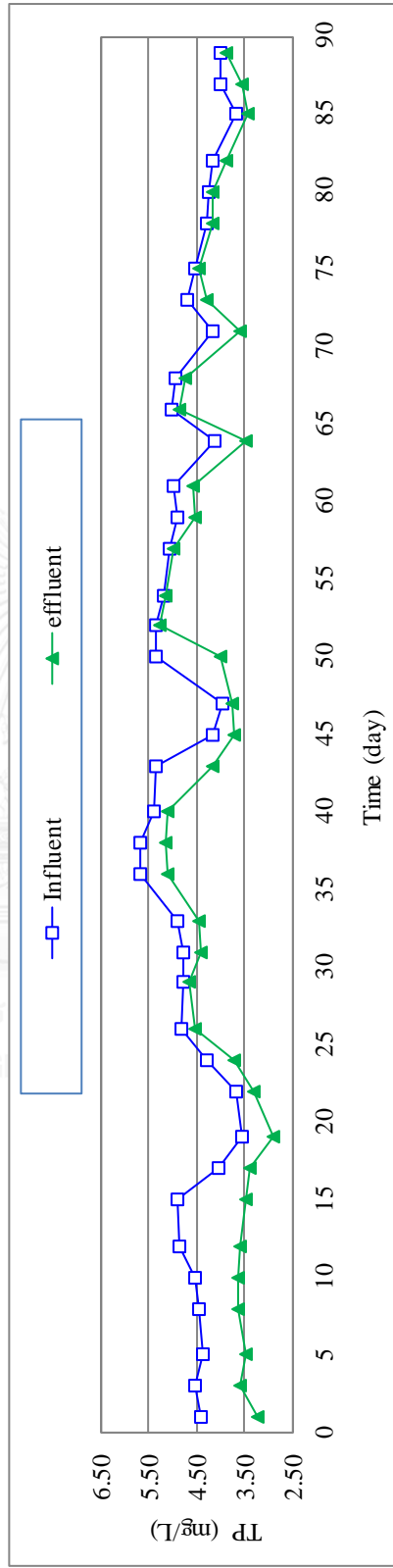


(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าสารอินทรีย์ในรูปซีไอไลท์ของถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกิด

รูปที่ 4.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอไลท์ (ค) เจตาไลโนไตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกิด



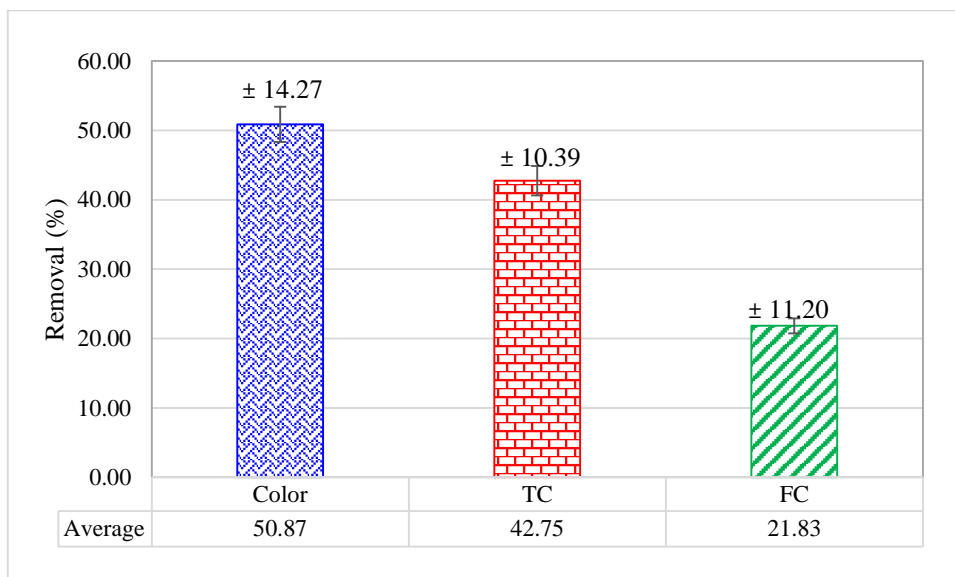
(ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าเจตาท์ไนโตรเจนของสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด



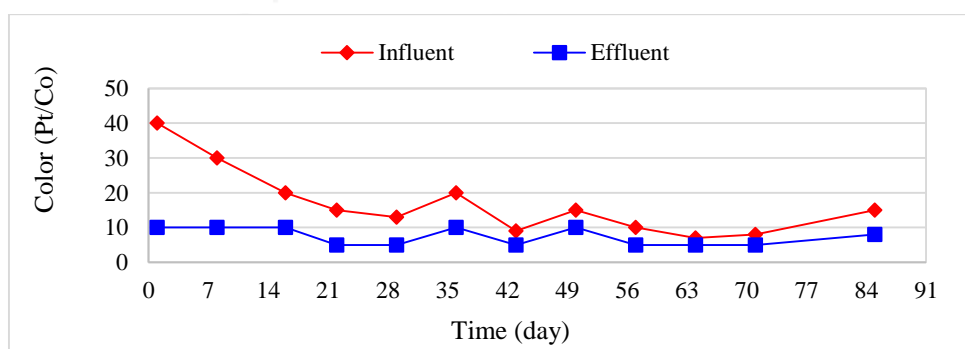
(ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าฟอสฟอรัสรวมของสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

รูปที่ 4.20 (ต่อ) แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (ก) ของแข็งแขวนลอย (ข) สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี (ค) เจตาท์ไนโตรเจน และ (ง) ฟอสฟอรัสรวม ของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

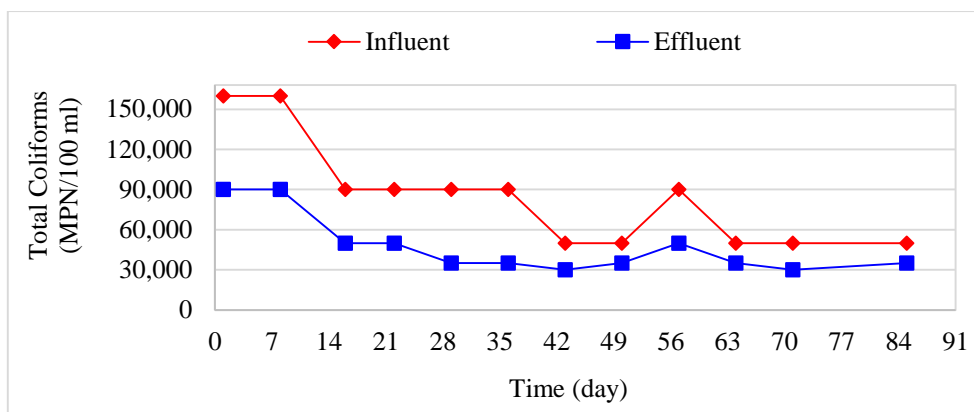
การทดลองเครื่องต้นแบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสี โคลิฟอร์มรวมและฟิโคลโคไล-ฟอร์มมีค่าเฉลี่ย 50.87% 42.75% และ 21.83% ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.12



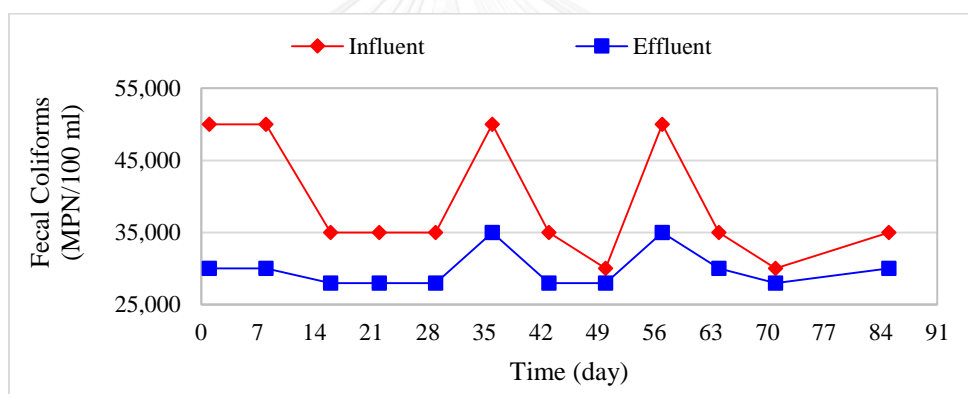
รูปที่ 4.21 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการกำจัดสี โคลิฟอร์มรวมและฟิโคลโคไลฟอร์ม



รูปที่ 4.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสีของของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด



(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าโคลิฟอร์มรวมของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด



(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าฟิคัลโคลิฟอร์มของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

รูปที่ 4.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า (ก) โคลิฟอร์มรวม และ (ข) ฟิคัลโคลิฟอร์ม ของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

ตารางที่ 4.12 แสดงคุณภาพน้ำเฉลี่ยก่อนและหลังการบำบัด และประสิทธิภาพการกำจัดของสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกิด

ดัชนีวัดคุณภาพ	น้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ				น้ำเสียออกจากระบบ				ประสิทธิภาพร้อยละ
	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าแปรปรวน	ค่ามากที่สุด	ค่าน้อยที่สุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าแปรปรวน	
อุณหภูมิ (°C)	37.50	34.80	35.42	0.97	35.80	23.50	31.89	2.91	
พีเอช	7.58	6.92	7.23	0.14	8.27	6.93	7.42	0.25	
ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	51.00	18.00	33.59	8.68	37.00	9.00	22.28	6.97	33.75
สารอินทรีย์รูปซีไอไลท์ (mg/L)	120.32	60.16	95.54	17.16	105.28	22.56	58.91	22.63	39.34
ไนโตรเจนรวม (mg/L)	68.32	41.44	50.87	6.94	49.56	24.92	39.23	6.82	22.58
ฟอสฟอรัสรวม (mg/L)	5.67	3.53	4.60	0.55	5.24	2.91	4.10	0.64	11.08
ซี (Pt/Co)	40.00	7.00	17.00	9.71	10.00	5.00	7.00	2.50	50.87
โคไลฟอร์มรวม (MPN/100 mL)	160,000	50,000	85,000	39,000	90,000	30,000	47,000	21,000	42.75
ฟิโคลโคไลฟอร์ม (MPN/100 mL)	50,000	30,000	39,000	8,000	35,000	28,000	30,000	2,500	21.83

4.3.3 อภิปรายผลการทำงานเครื่องต้นแบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

4.3.3.1 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

ค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยของน้ำจากถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นที่ไหลเข้าถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีค่าอยู่ระหว่าง 18.0 ถึง 51.0 มก./ล. คิดเป็นค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองอยู่ที่ 33.59 มก./ล. และเมื่อผ่านการบำบัดแล้วลดลงมีค่าเฉลี่ย 22.28 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 33.75 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้ขึ้นอยู่กับตัวกลางของกระบวนการกรอง ซึ่งถ้าตัวกลางมีขนาดเล็กเกินไปก็จะเกิดการอุดตันภายในช่องรูพรุนได้ง่ายและทำให้ระบบทำงานได้ไม่ต่อเนื่อง โดยภายในถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้เลือกบรรจุตัวกลางคือสารกรองซีโอไลท์ขนาด 5-7 ม.ม. และถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดขนาด 1-3 ม.ม. ที่มีขนาดใหญ่เพื่อลดการอุดตันและสะดวกในการบำรุงรักษา จึงทำให้การบำบัดของแข็งแขวนลอยมีประสิทธิภาพไม่สูง ทั้งนี้ น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยต่ำกว่า 30.0 มก./ล. ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน ดังนั้นระบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งได้โดยอาศัยกลไกการกรองแบบติดค้างที่ผิวหน้าและการกรองตามความลึกของชั้นกรอง อย่างไรก็ตามเพื่อให้ระบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสามารถทำงานได้ดีในระยะยาว จำเป็นต้องมีการล้างย้อนระบบ เพื่อลดการสะสมตัวของอนุภาคแขวนลอยที่ติดค้างในระบบ

4.3.3.2 การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี

น้ำเสียจากถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นที่ไหลเข้าสู่ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้มีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีอยู่ที่ 60.16 ถึง 120.32 มก./ล. คิดเป็นค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองอยู่ที่ 95.54 มก./ล. เมื่อผ่านการบำบัดแล้วลดลงมีค่าเฉลี่ย 58.91 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีที่มีค่าน้อย ดังนั้นระบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสามารถช่วยปรับสภาพน้ำด้านสารอินทรีย์เพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยอาศัยกลไกการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งสารอินทรีย์จะแพร่มาที่ผิวหน้าและเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์

4.3.3.3 การกำจัดเจตาไลน์โตรเจน

การพิจารณาเจตาไลน์โตรเจนโดยการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียออกจากถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นไทลเข้าสู่ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้มีค่าความเข้มข้นของเจตาไลน์โตรเจนอยู่ระหว่าง 41.44 ถึง 68.32 มก./ล. คิดเป็นค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองอยู่ที่ 50.87 มก./ล. เมื่อผ่านการบำบัดแล้วลดลงมีค่าเฉลี่ย 39.23 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 22.58 สำหรับกลไกการกำจัดไนโตรเจนรวมนี้ เป็นไปด้วยหลักการดูดซับของแอมโมเนียไนโตรเจนในรูปของตัวกลางสารกรองซีโอไลท์ การเพิ่มระยะเวลาที่กักน้ำมากกว่า 1.62 ชม. และการเพิ่มปริมาณตัวกลางสารกรองซีโอไลท์จะช่วยให้การกำจัดไนโตรเจนรวมได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช อาจนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์สำหรับรดน้ำต้นไม้และการจัดสวนได้

4.3.3.4 การกำจัดฟอสฟอรัสรวม

ในส่วนของการกำจัดฟอสฟอรัสรวมนี้ น้ำเสียจากถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นที่ไทลเข้าสู่ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้มีค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสรวมอยู่ที่ 3.53 ถึง 5.67 มก./ล. คิดเป็นค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองอยู่ที่ 4.60 มก./ล. เมื่อผ่านการบำบัดแล้วลดลงมีค่าเฉลี่ย 4.10 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 11.08 ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดได้ต่ำ เนื่องจากการใช้สารกรองซีโอไลท์กับถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการกำจัดฟอสฟอรัส นอกจากนี้ฟอสฟอรัสยังเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช อาจนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์สำหรับรดน้ำต้นไม้และการจัดสวนได้

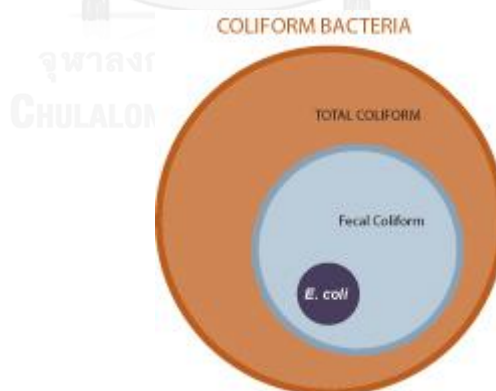
4.3.3.5 การกำจัดสี

สีของน้ำเสียเป็นสิ่งที่ควรคำนึงเพราะเป็นส่วนที่แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำเสีย เพราะถ้าสีเข้มมากเกินไปจะเกิดความรู้สึกไม่พึงประสงค์ ค่าสีของน้ำเสียที่ออกจากถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นแล้วไทลเข้าสู่ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 7.00 ถึง 40.00 Pt/Co คิดเป็นค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองอยู่ที่ 17.00 Pt/Co เมื่อผ่านการบำบัดแล้วลดลงมีค่าเฉลี่ย 7.00 Pt/Co คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 50.87 น้ำที่ผ่านการบำบัดไม่มีสีที่พึงรังเกียจ ดังนั้นระบบถังกรองสาร ซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสามารถช่วยปรับสภาพน้ำด้านสีได้เพื่อนำน้ำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยอาศัยกลไกการดูดซับสีที่เกิดจากสารอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ โดยการแพร่มาที่ผิวหน้าและเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์

พิจารณาจากรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อเริ่มต้นเดินระบบการทำงานของถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดจะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด เนื่องจากยังไม่เกิดการอุดตันในรูพรุนหรือช่องว่างในตัวกลางกรองคือสารกรองสารซีโอไลท์และถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อเดินระบบนานมากขึ้น ดังนั้นเมื่อจึงต้องทำการบำรุงรักษาเพื่อป้องกันการอุดตัน (Zheng, Yu et al., 2013) ในขณะที่อีกแง่มุมหนึ่งหากว่าสีที่ปะปนในน้ำเสียนี้เป็นสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ เช่น สารฟีนอลิก (Phenolic compounds) สารเหล่านี้จะเป็นแหล่งอาหารและถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ ซึ่งอาจจะแทรกอาศัยอยู่ในรูพรุนของตัวกลาง มีการรายงานว่ากระบวนการบำบัดสีที่เกิดจากสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถทำให้สลายหรือลดลงได้ถึงร้อยละ 90 ด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Satyawali & Balakrishnan, 2008) และเพื่อยืดอายุการใช้งานของตัวกลางและการบำรุงรักษาประสิทธิภาพของระบบให้มีค่าคงที่หรือมากขึ้นนั้น ส่วนหนึ่งจึงอยู่ที่การควบคุมมลสารในน้ำเสียที่จะป้อนเข้าสู่ระบบให้มีค่าน้อยและคงที่ เพราะระบบถังกรองนี้เป็นระบบบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมหรือนำน้ำไปใช้ประโยชน์ซ้ำ

4.3.3.6 การกำจัดโคลิฟอร์มรวม

แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มมีคุณสมบัติที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพที่มีอากาศและไม่มีอากาศ (facultative anaerobic) เป็นพวกแกรมลบ (gram negative) ไม่สร้างสปอร์ รูปร่างเป็นท่อนสั้น (rod shape) สามารถย่อยสลายน้ำตาลแลคโตสได้ก๊าซที่อุณหภูมิ 35°C ภายในเวลา 48 ชม.



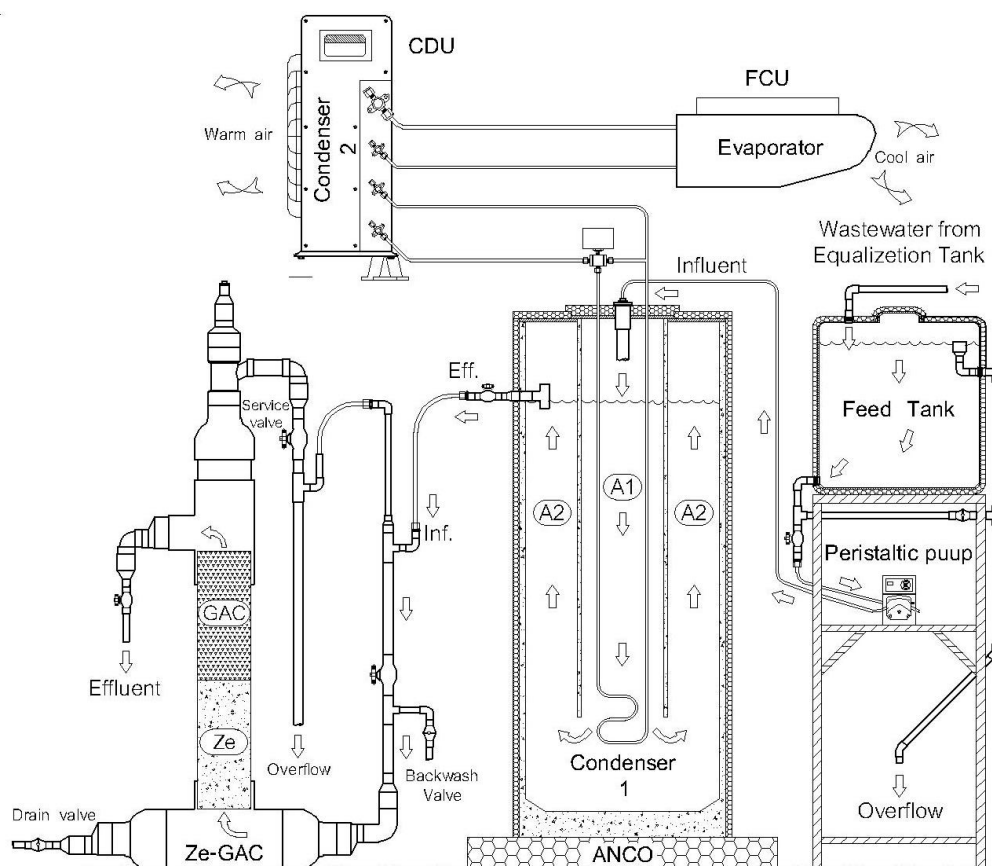
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโคลิฟอร์มรวม ฟีคัลโคลิฟอร์มและแบคทีเรียอีโคไลที่ปนเปื้อนในน้ำเสียทั่วไป (Vendrell & Atiles, 2003)

ในการศึกษาประสิทธิภาพถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้ น้ำเสียจากถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นที่ไหลเข้าสู่ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้มีค่าโคลิฟอร์มรวม 50,000 ถึง 160,000 MPN/100 ml คิดเป็นค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองอยู่ที่ 85,000 MPN/100 ml เมื่อผ่านการบำบัดแล้วลดลงมีค่าเฉลี่ย 47,000 MPN/100 ml คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 42.75 น้ำเสียที่ผ่านจากถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้ จึงต้องมีการบำบัดในขั้นต่อไปเพื่อลดปริมาณ โคลิฟอร์มแบคทีเรียให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน เช่น กระบวนการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน (Chlorination) หรือ กระบวนการดูดซับด้วยตัวกรองที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่าตัวกรองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโคลิฟอร์มได้ดีมากขึ้นหากทำงานร่วมกับกระบวนการรวมกลุ่มตกตะกอน (Coagulation) ด้วยสารเร่งเพอริคลอไรด์ (Ferric Chloride) (Zhang & Farahbakhsh, 2007)

4.3.3.7 การกำจัดฟีคัลโคลิฟอร์ม

จากรูปที่ 4.24 ฟีคัลโคลิฟอร์ม (Fecal Coliform) จะถูกจำแนกออกจากกลุ่มโคลิฟอร์มแบคทีเรีย โดยฟีคัลโคลิฟอร์มสามารถสลายสารอาหาร หมักย่อยน้ำตาล ได้ภายในเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 44.50 °C ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์มมีหน่วยวัดเช่นเดียวกับปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด ตามมาตรฐานของ US.EPA ในตารางที่ 4.13 กำหนดให้คุณภาพของน้ำที่จะทำกลับไปใช้ใหม่มีค่า ฟีคัลโคลิฟอร์มไม่เกิน 200 MPN/100 ml (Crook & Surampalli, 1996, Jeong, Kim et al., 2016, Pescod, 1992)ในการศึกษาประสิทธิภาพถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้ น้ำเสียจากถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นที่ไหลเข้าสู่ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนี้มีค่าฟีคัลโคลิฟอร์ม 30,000 ถึง 50,000 MPN/100 ml คิดเป็นค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองอยู่ที่ 39,000 MPN/100 ml เมื่อผ่านการบำบัดแล้วลดลงมีค่าเฉลี่ย 30,000 MPN/100 ml คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 21.83 ซึ่งยังคงต้องทำการบำบัดต่อไป หากจะนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (Zhang & Farahbakhsh, 2007) นอกจากนี้มีการพิจารณาน้ำเสียที่การบำบัดมาเพื่อใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรมสามารถเทียบได้จากมาตรฐานของ US.EPA (Jeong et al., 2016)

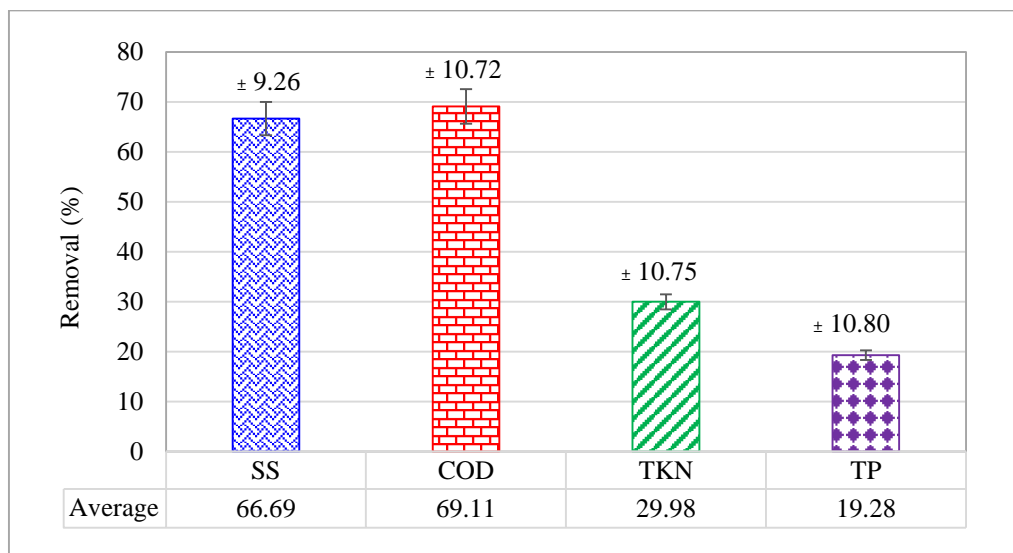
4.3.4 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองใรอากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด



รูปที่ 4.25 แผนภาพเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองใรอากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

จากการวิเคราะห์เครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองใรอากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด โดยใช้ค่าพารามิเตอร์น้ำเสียไหลเข้าถังกรองใรอากาศ-เครื่องควบแน่นจากตารางที่ 4.11 อุณหภูมิน้ำเสียมีค่าเฉลี่ย 27.24°C ความเป็นกรดต่างมีค่าเฉลี่ย 7.23 ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันมีค่าเฉลี่ย -87 มิลลิโวลต์ ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดัลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวมมีค่าเฉลี่ย 67.54 190.02 56.21 และ 5.09 มก./ล. ตามลำดับ และใช้ค่าพารามิเตอร์น้ำไหลออกจากถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดจากตารางที่ 4.12 อุณหภูมิน้ำทิ้งไหลออกมีค่าเฉลี่ย 31.89°C ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าเฉลี่ย 7.42 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดัลไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวมมีค่าเฉลี่ย 22.28 58.91 39.23 และ 4.10 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งทำให้ถังกรองใรอากาศ-

เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดาร์-ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวมมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 66.69 69.11 29.98 และ 19.28 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดาร์ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม

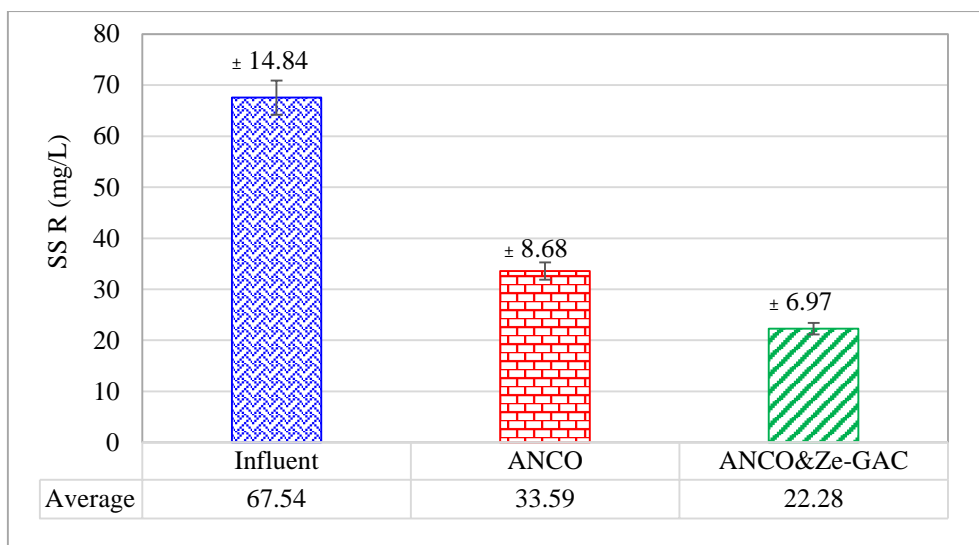
โปรไฟล์การลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากอาคารโดยใช้ระบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.27-4.30

- โปรไฟล์การลดลงของของแข็งแขวนลอย จากรูปที่ 4.27 การทำงานของระบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์ สามารถช่วยลดความเข้มข้นปริมาณของแข็งแขวนลอยจากการย่อยสลายของแข็งแขวนลอยในระบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น โดยกลไกปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ซึ่งของแข็งแขวนลอยที่เหลือในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยระบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นแล้ว มีการลดลงด้วยการกรองโดยใช้ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์ ทำให้น้ำทิ้งหลังการบำบัดมีค่าของแข็งแขวนลอยน้อยกว่า 30 มก./ล. ซึ่งสามารถส่งเสริมการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้

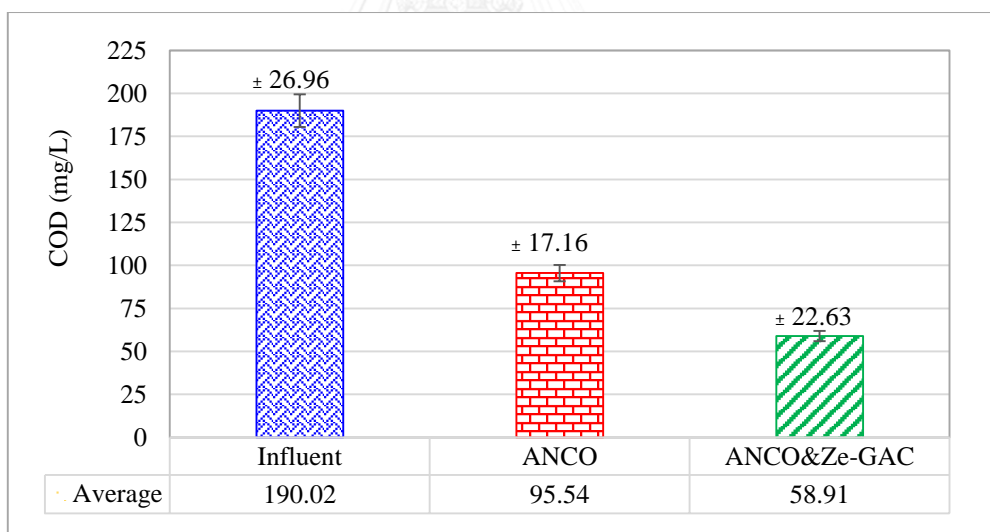
- โพรไฟล์การลดลงของสารอินทรีย์ จากรูปที่ 4.28 การทำงานของระบบถังกรองใรร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์ สามารถช่วยลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่น โดยกลไกปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายแบบใรร้ออากาศ ซึ่งสารอินทรีย์ที่เหลือในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยระบบถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่นแล้ว มีการลดลงด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในระบบถังกรองสาร ซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์ ทำให้น้ำทิ้งหลังการบำบัดมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์น้อยกว่า 60 มก./ล. ซึ่งสามารถส่งเสริมการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้

- โพรไฟล์การลดลงของเจดัลไนโตรเจน จากรูปที่ 4.29 การทำงานของระบบถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่นและ ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์ สามารถช่วยลดความเข้มข้นของเจดัลไนโตรเจนได้บางส่วน (< 10%) จากการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพในระบบถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่น โดยกลไกปฏิกิริยาทางชีวภาพของจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายแบบใรร้ออากาศ ซึ่งความเข้มข้นของเจดัลไนโตรเจน ที่เหลือในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยระบบถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่นแล้ว มีการลดลงด้วยการดูดซับด้วยซีโอไลท์ในระบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถส่งเสริมการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้

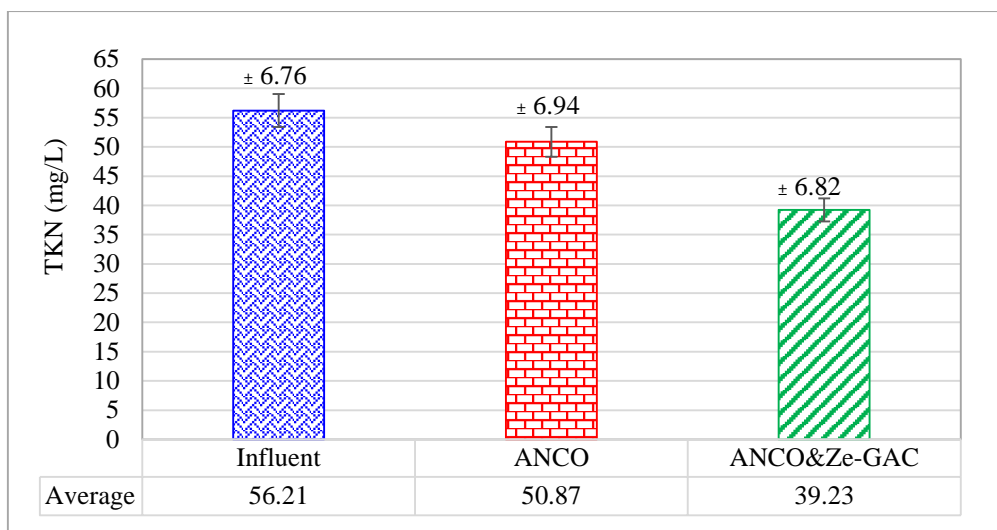
- โพรไฟล์การลดลงของฟอสฟอรัสรวม จากรูปที่ 4.30 การทำงานของระบบถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์ สามารถช่วยลดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสได้บางส่วน (< 10%) จากการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพในระบบถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่น โดยกลไกปฏิกิริยาทางชีวภาพของจุลินทรีย์ในระบบการย่อยสลายแบบใรร้ออากาศ ซึ่งความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เหลือในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยระบบถังกรองใรร้ออากาศ-เครื่องควบแน่นแล้ว มีการลดลงอีกเล็กน้อยด้วยการดูดซับในระบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถส่งเสริมการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้



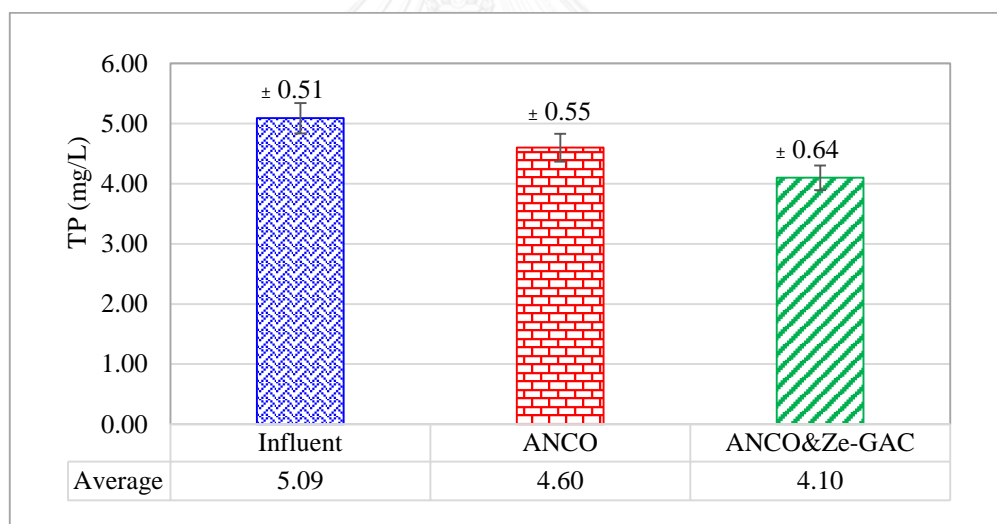
รูปที่ 4.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าของแข็งแขวนลอยของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด



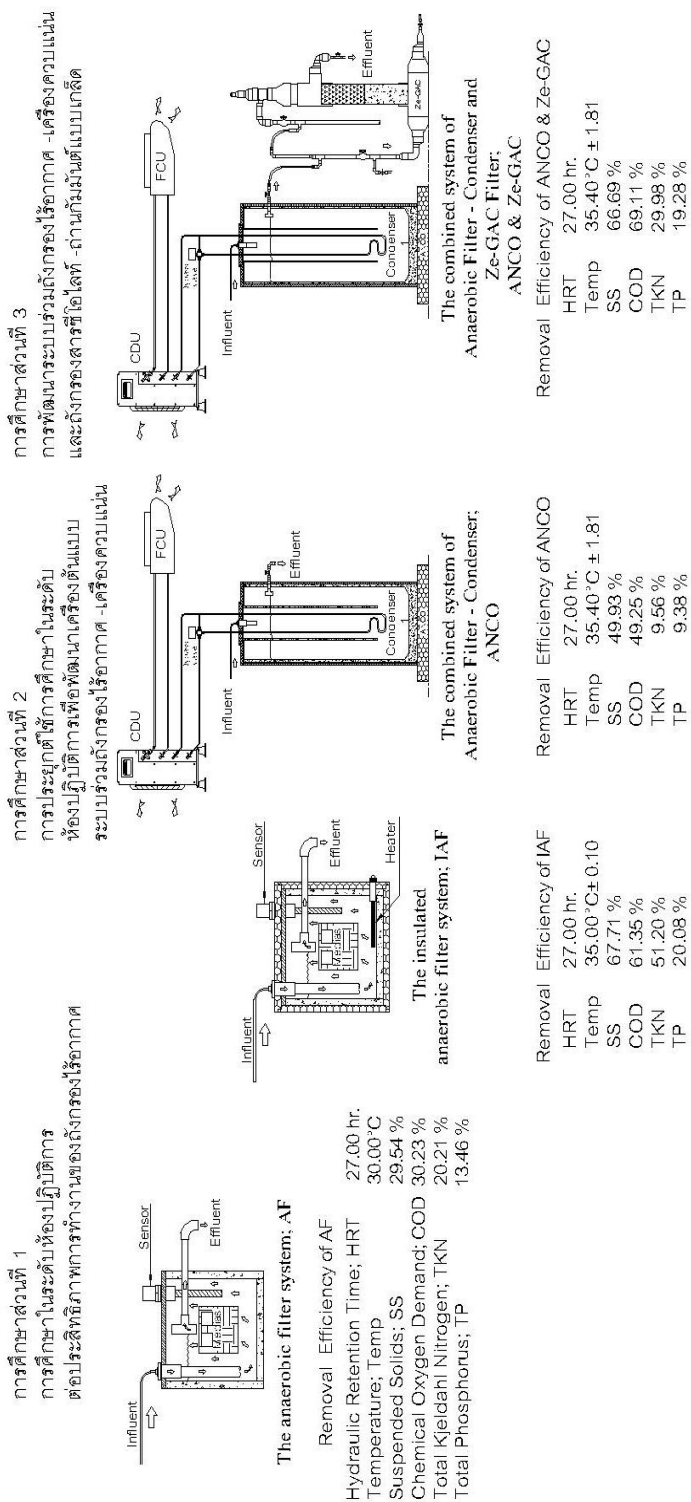
รูปที่ 4.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด



รูปที่ 4.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าเจตาไนโตรเจน ของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด



รูปที่ 4.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นค่าฟอสฟอรัสรวมของถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด



สรุปการพัฒนากระบวนการรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกีต สำหรับการใช้งานเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่.

รูปที่ 4.31 ภาพรวมการพัฒนากระบวนการรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น และถังกรองสารซีโอไลต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกีต สำหรับการใช้งานทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่

4.4 การนำน้ำเสียจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่

4.4.1 การประเมินคุณภาพน้ำที่นำกลับมาใช้รดน้ำต้นไม้

การประเมินคุณภาพน้ำที่ออกจากเครื่องต้นแบบระบบร่วมถึงกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่แสดงในรูปที่ 4.25 นั้น ใช้ค่ามาตรฐาน Water reuse for agriculture โดยองค์กร US.EPA แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 มาตรฐานและข้อเสนอแนะสำหรับคุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนำกลับไปใช้ใหม่ในการเกษตรกรรมโดย US.EPA (Crook & Surampalli, 1996)

ดัชนีชี้วัดคุณภาพ	พืชอาหารที่นำมาทานโดยไม่ผ่านการแปรรูป	พืชอาหารที่นำมาทานผ่านการแปรรูป	ไม่ใช่พืชอาหาร	น้ำที่ออกจากระบบ ANCO และ Ze-GAC
ฟีคัลโคลิฟอร์ม (/100 มล.)	0.0 MPN	≤ 200 MPN	≤ 200 MPN	30,000 *
ความขุ่น (NTU) ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	≤ 2	-	-	-
สารอินทรีย์รูปซีไอดี (มก./ล.)	-	≤ 30	≤ 30	22.28
สารอินทรีย์รูปซีไอดี (มก./ล.)	≤ 10	≤ 30	≤ 30	-
สารอินทรีย์รูปซีไอดี (มก./ล.)	-	-	-	58.91
กลิ่น	-	-	-	ไม่มีกลิ่น
ไนโตรเจนรวม (มก./ล.)	-	-	-	39.23
ฟอสฟอรัสรวม (มก./ล.)	-	-	-	4.10
พีเอช	6.0 - 9.0	-	-	7.42

* น้ำทิ้งสามารถปรับปรุงคุณภาพได้โดยการใช้สารเคมีคลอรีนในการฆ่าเชื้อฟีคัลโคลิฟอร์ม

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียที่มาจากการอุปโภคและบริโภคออกมา ปริมาณไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสที่คงค้างนั้นกลับมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณภาพของดินให้เหมาะสมกับการเพาะปลูกได้ อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำดังกล่าวยังมีการปนเปื้อนของฟิคัลโคลิฟอร์มที่ยังไม่สามารถกำจัดจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานนี้ ดังนั้นถ้าต้องการผ่านเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าวก็สามารถเติมสารเคมีคลอรีน (Chlorine; Cl) หรือ (Potassium Permanganate; $KMnO_4$) ในการฆ่าเชื้อโรคได้ นอกจากนี้ในส่วนของสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีนั้น ค่ามาตรฐาน Water reuse for agriculture ขององค์กร USEPA กำหนดให้ค่าบีโอดี < 10 มก./ล. หรือถ้าเป็น COD อาจได้ถึง 20 มก./ล. ซึ่งคุณภาพน้ำทิ้งหลังการปรับสภาพน้ำโดยระบบถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเคลื่อนที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และสารอินทรีย์จากน้ำทิ้งชุมชนไม่เป็นสารพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้สามารถนำน้ำทิ้งไปใช้รดน้ำต้นไม้ได้ทั้งหมด 180 ลิตรต่อวัน

4.4.2 ผลการประเมินปริมาณน้ำทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่

การประเมินปริมาณน้ำทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่าสามารถนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ในการรดน้ำต้นไม้ได้ 46.80 ลบ.ม./ปี และคำนวณเป็นจำนวนเงินได้ 477 บาท/ปี แสดงข้อมูลในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 แสดงข้อมูลปริมาณน้ำทิ้งที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	ปริมาณน้ำทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้	0.18	ลบม./วัน
2	การทำงานของสำนักงาน	260	วัน/ปี
3	ปริมาณน้ำทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้	46.80	ลบ.ม./ปี
4	ราคาน้ำประปา (การประปาส่วนภูมิภาค)	10.20	บาท/ลบม.
5	จำนวนเงินที่ประหยัดได้	477	บาท/ปี

4.5 ผลการนำความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่

4.5.1 การประเมินความร้อนทิ้งจากเครื่องปรับอากาศนำกลับมาใช้ใหม่

การประเมินความร้อนทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่ (Q_{C1}) พบว่าสามารถนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้ 2.82 กิโลวัตต์ชั่วโมง/วัน แสดงข้อมูลในตารางที่ 4.10 และทำให้น้ำเสียที่มีปริมาตร 540 ลิตร อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าถังกรองไร้อากาศ 20 ลิตรต่อชั่วโมง มีอุณหภูมิเฉลี่ย ($T_{ww\ inner}$) 35.40°C แสดงในตารางที่ 4.9

4.5.2 ผลการประเมินความร้อนทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า

ใช้ข้อมูลค่าพลังงานจากตารางที่ 4.15 มาแทนในสมการที่ 3.1 เพื่อประเมินความร้อนทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า

$$\Delta Electrical\ Energy = \left(\frac{W_{COM} Q_{ANCO}}{Q_{COM}} \right) - W_{ANCO} \quad (3.1)$$

ราคาพลังงานไฟฟ้า = 3 บาท/หน่วย (ค่าพลังงานไฟฟ้า+ค่าบริการรายเดือน+ค่า Ft)

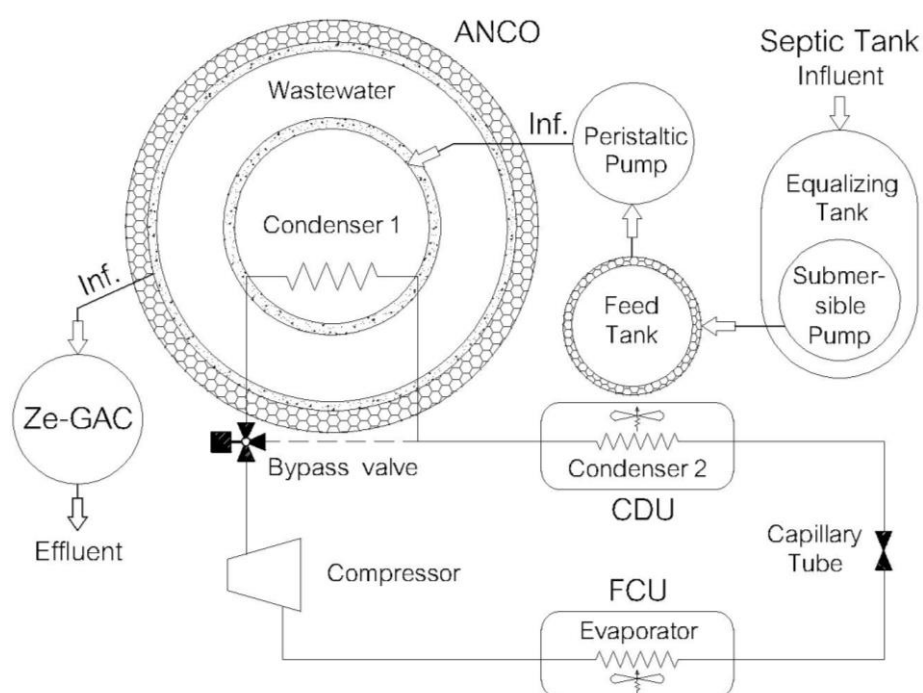
ผลการประเมินพบว่าสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 2,043 บาท/ปี แสดงข้อมูลในตารางที่ 4.15 หรือทำให้เครื่องปรับอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 22.96

ตารางที่ 4.15 ข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	ความสามารถในการทำความเย็น (Q_{COM})	5.660	กิโลวัตต์
2	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (W_{COM})	1.580	กิโลวัตต์
3	ความสามารถในการทำความเย็น (Q_{ANCO})	40.890	กิโลวัตต์ชั่วโมง/วัน
4	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (W_{ANCO})	8.790	กิโลวัตต์ชั่วโมง/วัน
5	ผลต่างพลังงาน	2.62	กิโลวัตต์ชั่วโมง/วัน
6	ราคาค่าไฟฟ้า (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค)	3.00	บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง
7	สำนักงานทำงาน	260	วัน/ปี
8	จำนวนเงินที่ประหยัดได้	2,043	บาท/ปี

4.5 ผลตอบแทนการลงทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ จากการได้น้ำเสียและความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่

จากการศึกษาส่วนที่ 1 2 และ 3 ส่งผลทำให้เกิดเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด แสดงในรูปที่ 4.25 ดังนั้นการพัฒนากระบวนการรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด สำหรับการนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่ จึงสามารถเขียนเป็นวงจรระบบการนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่ แสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แผนภาพวงจรระบบการนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งจากอาคารสำนักงานกลับมาใช้ใหม่

4.5.1 การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น

การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น จะประเมินจากค่าใช้จ่ายค่าอุปกรณ์ เครื่องมือและแรงงานที่ใช้ในการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น 128,600 บาท แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วย	วัสดุ-แรงงาน	รวมสุทธิ	การลงทุน
				(ราคา:หน่วย)	(บาท)	(%)
1	Submersible Pump	1	เครื่อง	2,500	2,500	1.94
2	Feed Tank	1	ถัง	4,200	4,200	3.27
3	Peristaltic Pump	1	เครื่อง	68,000	68,000	52.88
4	ถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด					
	- ถัง พีวีซี.	1	ถัง	3,000	3,000	2.33
	- สารซีโอไลท์-	35	ลิตร	20	700	0.54
	- ถ่านกัมมันต์	35	ลิตร	80	2,800	2.18
	- ระบบท่อ	1	งาน	1,000	1,000	0.78
5	ฉนวนกันความร้อน	14	ตรม.	600	8,400	6.53
6	ถังกรองไร้อากาศ					
	- ถังคอนกรีต	1	ถัง	12,000	12,000	9.33
	- พลาสติกมึติเย	300	ลูก	5	1,500	1.17
	- ระบบท่อ + วาล์ว	1	งาน	4,500	4,500	3.50
5	เครื่องควบแน่น 1	1	เครื่อง	6,500	6,500	5.05
6	บายพาสวาล์ว	1	เครื่อง	3,500	3,500	2.72
7	เครื่องปรับอากาศ					
	- ระบบท่อ + ฉนวน	1	งาน	3,500	3,500	2.72
	- สารทำความเย็น	2.50	กก.	200	500	0.39
	- ระบบควบคุมไฟฟ้า	1	งาน	6,000	6,000	4.67
9	ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น				128,600	100

4.5.2 การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่อปี

การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง จะประเมินจากค่าใช้จ่ายค่าซ่อมบำรุงอุปกรณ์ เครื่องมือและแรงงานที่ใช้ในการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3 โดยมีค่าใช้จ่าย 1,217 บาทต่อปี แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 การประมาณราคาค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่อปี

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วย	วัสดุ-แรงงาน	รวมสุทธิ	การลงทุน
				(ราคา:หน่วย)	(บาท)	(%)
1	Submersible Pump					
	- ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี	6.10	kWh	3	18	1.50
	- ค่าซ่อมบำรุง	1	งาน	150	150	12.32
2	Peristaltic Pump					
	- ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี	4.40	kWh	3	13	1.08
	- ค่าสายปั๊มน้ำ	5	เมตร	100	500	41.08
	- ค่าซ่อมบำรุง	1	งาน	150	150	12.32
3	ถังกรอง Ze-GAC					
	- Back Wash	24	งาน	3.57	86	7.04
4	เครื่องปรับอากาศ					
	- ค่าซ่อมบำรุง	1	งาน	300	300	24.65
5	ค่าซ่อมบำรุงต่อปี				1,217	100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.3 การประเมินระยะเวลาการคืนทุนจากเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

การวิจัยในการนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่นี้ พบว่าค่าใช้จ่ายในการลงทุน เริ่มต้นมีมูลค่าเป็นจำนวนเงิน 128,000 บาท แสดงในตารางที่ 4.16 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเป็นจำนวนเงิน 1,217 บาท/ปี แสดงในตารางที่ 4.17 มูลค่าน้ำทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้เป็นจำนวนเงิน 477 บาท/ปี แสดงในตารางที่ 4.14 และมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้เป็นจำนวนเงิน 2,043 บาท/ปีแสดงในตารางที่ 4.15 เนื่องจากเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดอยู่ในขั้นตอนการวิจัยเชิงพัฒนาจึงยังไม่คุ้มค่าการลงทุน เพราะอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ในระดับห้องปฏิบัติการที่มีความเที่ยงตรงสูงเช่น Peristaltic Pump ที่มีราคา 68,000 บาท ดังนั้นถ้านำงานวิจัยนี้ไปทำการ

วิจัยต่อไปในด้านการลดต้นทุนการผลิต โดยการนำเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นไปฝังดินแบบระบบบำบัดน้ำเสียปกติ และพัฒนานาให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นจากตารางที่ 4.16 ลำดับที่ 1-5 ลดลงมามีมูลค่าถึง 70% และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่อปีจากตารางที่ 4.17 ลำดับที่ 1-3 ลดลงมามีมูลค่าถึง 75% จากประสบการณ์ของผู้วิจัยในการสร้างถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นแบบที่นำไปฝังดินและทดลองใช้อยู่มานานถึง 10 ปี ประเมินว่าถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นจะมีอายุการทำงานได้นานถึง 20 ปี จึงจะต้องทำการสูบตะกอนจากถังกรองไร้อากาศ และเปลี่ยนเครื่องควบแน่นใหม่



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 การเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำเสียในถังกรองไร้อากาศมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของถังกรองไร้อากาศสูงขึ้นและสามารถลดระยะเวลาที่เก็บน้ำลงมาได้ โดยถังกรองไร้อากาศขนาด 5.40 ลิตร ที่ควบคุมระยะเวลาที่พักน้ำ 27 ชั่วโมง และอุณหภูมิน้ำเสีย 35°C มีประสิทธิภาพรวมสูงสุดในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดาล์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวม โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 67.71 61.35 51.20 และ 20.08ตามลำดับ ต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด มีค่าเฉลี่ย 4.70 Wh.

5.1.2 ดัชนีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดาล์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวม ต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของถังกรองไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในระดับห้องปฏิบัติการ (ระยะเวลาที่พักน้ำ 27 ชั่วโมง และอุณหภูมิน้ำเสีย 35°C) มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 8.12 6.62 6.59 และ 1.41 ต่อวัตต์ชั่วโมงตามลำดับ และพบแบคทีเรียกลุ่มเด่นที่ช่วยในการบำบัดน้ำเสียสายพันธุ์ *Flavobacterium* sp. และอาร์เคียสายพันธุ์ *Methanoseta* sp.

5.1.3 เครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นสามารถนำความร้อนที่กลับมาใช้ได้ใหม่มีค่าเฉลี่ย 2.82 กิโลวัตต์ชั่วโมง/วัน เครื่องปรับอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยรวมเฉลี่ย 4.65 เพิ่มขึ้นร้อยละ 30.25 และทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงเฉลี่ย 2.65 กิโลวัตต์ชั่วโมง/วัน คิดเป็นร้อยละ 22.96 สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 2,043 บาท/ปี และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดาล์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวมมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 49.93 49.25 9.56 และ 9.38 ตามลำดับ

5.1.4 เครื่องต้นแบบถังกรองสารซีโโอลิต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เจดาล์ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสรวม สี โคลิฟอร์มรวม และฟิโคลโคลิฟอร์มมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 33.75 39.34 22.58 11.08 50.87 42.75 และ 21.83 ตามลำดับ

5.1.5 เครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโโอลิต์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด สามารถนำน้ำที่กลับมาใช้ในการรดน้ำต้นไม้ได้ 180 ลิตรต่อวัน ประหยัด

ค่าใช้จ่ายได้เป็นจำนวนเงิน 477 บาท/ปี มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ ในรูปซีไอดี เจดากลันโนโตรเจน ฟอสฟอรัสรวม ซี โคลิฟอร์มรวมและพีคัลโคลิฟอร์ม มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 66.69 69.11 29.98 และ 19.28 ตามลำดับ

5.1.6 เครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีไอไลท์- ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีศักยภาพในการนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้จริง เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียเป็นสิ่งที่ดีและจำเป็นต้องทำทั้งในด้านคุณธรรมและกฎหมายดังนั้นเครื่องต้นแบบระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีไอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับอาคารอนุรักษ์พลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green Building) จะนำไปสู่การลดการสำรองพลังงานไฟฟ้าของประเทศได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากการทดลองระบบร่วมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า เป็นการทดลองเชิงเดี่ยว ข้อมูลดัชนีประสิทธิภาพต่อพลังงานยังไม่สามารถนำไปใช้เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการทำงานระหว่างถังบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศกับถังบำบัดน้ำเสียแบบไม่เติมอากาศ ต่อการใช้พลังงานได้จริง ดังนั้นจึงควรทำการวิจัยเพิ่มเติมโดยการนำถังบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ กับถังบำบัดน้ำเสียแบบไม่เติมอากาศมาทดลองภายใต้เงื่อนไขใช้น้ำเสียแหล่งเดียวกันเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการประเมิน เลือกลงแหล่งพลังงานและความคุ้มค่าที่จะนำมาใช้เพิ่ม ประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

5.2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่น ในการนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งจากอาคารกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้แบบจำลองสมการ (4.10) ที่พัฒนาขึ้นมา พิจารณาเพิ่มจำนวนปริมาณน้ำเสีย (V_{ww}) โดยการเพิ่มจำนวนถังกรองไร้อากาศ ทำให้ระยะเวลาพักเก็บน้ำ (HRT) เพิ่มมากขึ้น ผลการศึกษาส่วนที่ 1 การเพิ่มระยะเวลาพักเก็บน้ำมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงาน of ถังกรองไร้อากาศสูงขึ้นด้วยเหมือนกัน ดังนั้นการออกแบบถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นแบบหลายถัง โดยแต่ละถังจะถูกควบคุมอุณหภูมิน้ำเสียให้เหมาะสมกับแต่ละพารามิเตอร์น้ำ ที่ต้องการบำบัด จะส่งผลทำให้คุณภาพน้ำทิ้งสูงขึ้นและสามารถนำความร้อนทิ้งจากอาคารกลับมาใช้ใหม่ได้มากขึ้นเช่นกัน

5.2.3 จากการทดลองพบว่าคุณภาพน้ำทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้อยู่ในระดับยังมีการปนเปื้อนเชื้อโรคพีคัลโคลิฟอร์มอยู่ ดังนั้นยังสามารถนำความร้อนจากเครื่องควบแน่น 2 (Q_{c2}) ที่ยังมีเหลืออยู่ถึงร้อยละ 95 ไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำทิ้งจนมีความร้อนระดับฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ต้องการได้

5.2.4 การพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบรวมถังกรองไร้อากาศ-เครื่องควบแน่นและถังกรองสารซีโอไลท์-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสามารถนำน้ำเสียและความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ได้จริง จึงควรทำการวิจัยในการลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น เช่น นำถังกรองไร้อากาศไปติดตั้งฝังดินแบบระบบบำบัดน้ำเสียปกติทั่วไป เพื่อยกเลิกการใช้ Peristaltic Pump และถังจ่ายน้ำเสียโดยเปลี่ยนไปใช้แรงโน้มถ่วงของโลก อีกทั้งยังเป็นการประหยัดพื้นที่ และยกเลิกการใช้ฉนวนกันความร้อนโดยเปลี่ยนไปใช้ความร้อนสะสมในดินเป็นต้น



รายการอ้างอิง

- Ali Shah F, Mahmood Q, Maroof Shah M, Pervez A, Ahmad Asad S (2014) Microbial ecology of anaerobic digesters: the key players of anaerobiosis. The Scientific World Journal 2014
- Bajpai P (2017) Basics of Anaerobic Digestion Process. In Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry, pp 7-12. Springer
- Booker NA, Cooney, E.L. and Priestley, A.J. (1996) Ammonia removal from sewage using natural Australian zeolite. Water Science and Technology 34: 17-24
- Brigham EF, Houston JF (2012) Fundamentals of financial management. Cengage Learning,
- Cengel YA, Boles MA (2002) Thermodynamics: an engineering approach. Sea 1000: 8862
- Chawla O (1986) Advances in biogas technology. Indian Council of Agricultural Research; New Delhi, กรุงเทพมหานครมหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY
- Crook J, Surampalli RY (1996) Water reclamation and reuse criteria in the US. Water Science and Technology 33: 451-462
- De Lemos Chernicharo CA (2007) Anaerobic Reactor. IWA publishing
- Deublein D, Steinhauser A (2011) Biogas from waste and renewable resources: an introduction. John Wiley & Sons,

- Elmitwallia TA, Sklyarb, V., Zeemana, G. and Lettinga, G. (2002) Low temperature pre-treatment of domestic sewage in an anaerobic hybrid or an anaerobic filter reactor. *Bioresource Technology* 82: 233-239
- Hinrichs K-U, Hayes JM, Sylva SP, Brewer PG, DeLong EF (1999) Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments. *Nature* 398: 802
- Hlavay J, Vigh, G.Y., Olaszi, V. and Inczédy, J. (1982) Investigations on natural Hungarian zeolite for ammonia removal. *Water Research* 16: 417-420
- Jeong H, Kim H, Jang T (2016) Irrigation water quality standards for indirect wastewater reuse in agriculture: a contribution toward sustainable wastewater reuse in South Korea. *Water* 8: 169
- Jorgensen TCaW, L.R. (2003) Ammonia removal from wastewater by ion exchange in the presence of organic contaminants. *Water Research* 37: 1723-1728
- Jung H, Kim J, Lee J, Hwang S, Lee C (2016) Biomethanation potential of marine macroalgal *Ulva* biomass in sequencing batch mode: Changes in process performance and microbial community structure over five cycles. *Biomass and Bioenergy* 91: 143-149
- Kai-li M, Xiang-kun, L., Ke, W., Yu-hui, R., Zhao-rui, C. and Jie, Z. (2017) Role of temperature on microbial community profiles in an anaerobic bioreactor for treating PTA wastewater. *Chemical Engineering Journal* 308: 256-263
- Kato S, Chino K, Kamimura N, Masai E, Yumoto I, Kamagata Y (2015) Methanogenic degradation of lignin-derived monoaromatic compounds by microbial enrichments from rice paddy field soil. *Scientific reports* 5

- Lin J, Zhang X, Li Z, Lei L (2010) Biodegradation of Reactive blue 13 in a two-stage anaerobic/aerobic fluidized beds system with a *Pseudomonas* sp. isolate. *Bioresource Technology* 101: 34-40
- Mao Y, Zhang X, Xia X, Zhong H, Zhao L (2010) Versatile aromatic compound-degrading capacity and microdiversity of *Thauera* strains isolated from a coking wastewater treatment bioreactor. *Journal of industrial microbiology & biotechnology* 37: 927-934
- Mata-Alvarez J, Macé S, Llabrés P (2000) Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology* 74: 3-16
- Mechichi T, Patel BKC, Sayadi S (2005) Anaerobic degradation of methoxylated aromatic compounds by *Clostridium methoxybenzovorans* and a nitrate-reducing bacterium *Thauera* sp. strain Cin3,4. *International Biodeterioration & Biodegradation* 56: 224-230
- Mohd HAH, Aznah, N. A., Nur, S. A. J., Siti, I. A, Zaini, U. and Mustafa, M. B. (2016) Influence of high temperature on the performance of aerobic granular sludge in biological treatment of wastewater. *Journal of Environmental Management* 184: 271-280
- Nges IA, Liu J (2010) Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered-sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions. *Renewable Energy* 35: 2200-2206
- Omil F, Garrido JM, Arrojo B, Méndez R (2003) Anaerobic filter reactor performance for the treatment of complex dairy wastewater at industrial scale. *Water Research* 37: 4099-4108

PATEL GB, SPROTT GD (1990) *Methanosaeta concilii* gen. nov., sp. nov. (“*Methanothrix concilii*”) and *Methanosaeta thermoacetophila* nom. rev., comb. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 40: 79-82

Pescod M (1992) *Wastewater treatment and use in agriculture.*

Puñal A, Trevisan, M., Rozzi, A. and Lema, J.M., (2002) Influence of C:N ratio on the start-up of up-flow anaerobic filter reactors. *Water Research* 34: 2614-2619

Qiu Y-L, Kuang X-Z, Shi X-S, Yuan X-Z, Guo R-B (2014) *Paludibacter jiangxiensis* sp. nov., a strictly anaerobic, propionate-producing bacterium isolated from rice paddy field. *Archives of microbiology* 196: 149-155

Regueiro L, Veiga P, Figueroa M, Alonso-Gutierrez J, Stams AJM, Lema JM, Carballa M (2012) Relationship between microbial activity and microbial community structure in six full-scale anaerobic digesters. *Microbiological Research* 167: 581-589

Satyawali Y, Balakrishnan M (2008) Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: A review. *Journal of Environmental Management* 86: 481-497

Shinoda Y, Sakai Y, Uenishi H, Uchihashi Y, Hiraishi A, Yukawa H, Yurimoto H, Kato N (2004) Aerobic and anaerobic toluene degradation by a newly isolated denitrifying bacterium, *Thauera* sp. strain DNT-1. *Applied and Environmental Microbiology* 70: 1385-1392

Speece RE (1996) Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. In *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters,*

Steinhaus B, Garcia ML, Shen AQ, Angenent LT (2007) A portable anaerobic microbioreactor reveals optimum growth conditions for the methanogen *Methanosaeta concilii*. *Applied and environmental microbiology* 73: 1653-1658

Tchobanoglous G, Burton FL (1991) *Wastewater engineering. Management* 7: 1-4

Ueki A, Akasaka H, Suzuki D, Ueki K (2006) *Paludibacter propionicigenes* gen. nov., sp. nov., a novel strictly anaerobic, Gram-negative, propionate-producing bacterium isolated from plant residue in irrigated rice-field soil in Japan. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 56: 39-44

Vendrell PF, Atilas JH (2003) Your household water quality: Coliform bacteria in your water. White Paper–The University of Georgia College of Agricultural and Environmental Sciences and the US Department of Agriculture

Verstraete W, Focht D (1977) Biochemical ecology of nitrification and denitrification. In *Advances in microbial ecology*, pp 135-214. Springer

Zhang K, Farahbakhsh K (2007) Removal of native coliphages and coliform bacteria from municipal wastewater by various wastewater treatment processes: Implications to water reuse. *Water Research* 41: 2816-2824

Zheng Y, Yu S, Shuai S, Zhou Q, Cheng Q, Liu M, Gao C (2013) Color removal and COD reduction of biologically treated textile effluent through submerged filtration using hollow fiber nanofiltration membrane. *Desalination* 314: 89-95

จิรวรรณ ออตยกุล (2549) การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการแบบไร้อากาศสองขั้นตอน. In สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- เชิดศักดิ์ อ่อนระยับ (2548) การศึกษารูปแบบและประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก สำหรับบ้านพักอาศัยชุมชนริมน้ำ. In สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- ต่อพงศ์ กวีธาชาติ (2544) การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อและกระดาษ โดยกระบวนการดูดซับด้วยแอคทีเวเต็ดคาร์บอน. In สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ธนวรา ทองล้วน (2547) การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อน ด้วยอากาศโดยการพ่นน้ำ. In สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ-วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ปรมาภรณ์ โอจงเพียร (2546) การนำน้ำทิ้งจากบ้านเรือนกลับมาใช้ใหม่เพื่อการปลูกไม้ประดับ. In สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ปัญญา มณีจักร (2555) การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง. วารสารวิชาการสมาคม สถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย (สสอท)
- ภัทร วิวัฒน์สร (2555) ผลของระยะเวลาที่เก็บน้ำและอัตราการเวียนกลับต่อประสิทธิภาพของถัง กรองไร้ออกซิเจน. In สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ภัทรินถน บุขสาย (2547) ขนาดรูพรุนที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด สำหรับการปรับปรุง คุณภาพน้ำทิ้งของกระบวนการซักรีด. In สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- มันสิน ตันจุลเวศน์ (2542) เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร
- ยะโก๊ะ ขาเมตาเบะ (2553) การดูดซับน้ำเสียด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ. In ภาควิชาเคมีประยุกต์ คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

ศิลป์ชัย มณีชาติย์ (2552) การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและไก่ ด้วยแมงกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียง. In สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมคิด ชัยรัตน์ (2542) การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโดยใช้ความร้อนจากคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศเพื่อการประหยัดพลังงาน. In สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สิรินภา สิทธิธรรม (2555) ผลของความเข้มข้นซีโอดีและพื้นที่ผิวตัวกลางต่อประสิทธิภาพกรองไร้อากาศ. In

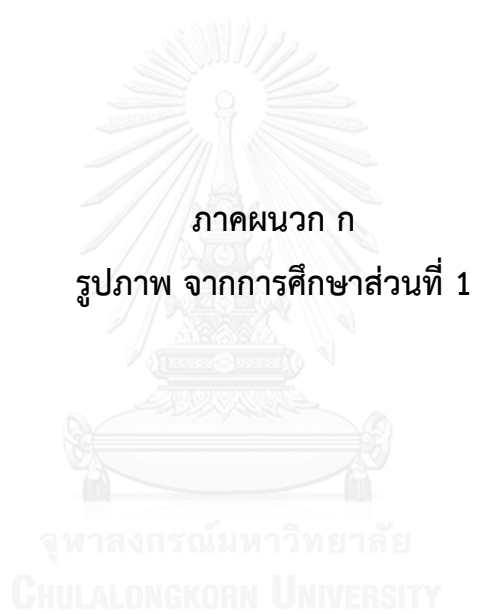
สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อริยะ เตกษณานนท์ (2543) การนำกลับน้ำเสียจากอาคารสูงกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีไมโครฟิลเทรชันเมมเบรนแบบจุ่มตัว. In สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY





รูปที่ ก.1 การทดลองกลุ่มที่ 1 ควบคุมระยะกักพักน้ำ 9 ซม.



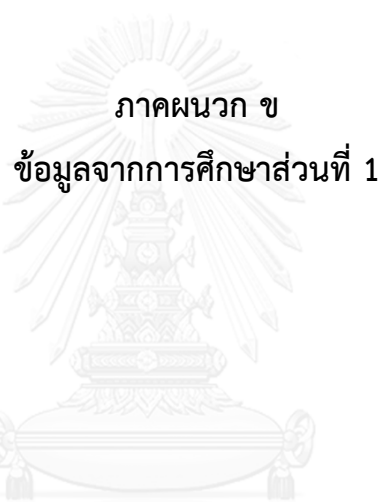
รูปที่ ก.2 การทดลองกลุ่มที่ 2 ควบคุมระยะกักพักน้ำ 18 ซม.



รูปที่ ก.3 การทดลองกลุ่มที่ 3 ควบคุมระยะกักพักน้ำ 27 ชม.



รูปที่ ก.4 การทดลองกลุ่มที่ 1 2 และ 3



ภาคผนวก ข
ข้อมูลจากการศึกษาส่วนที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการวัดค่าอุณหภูมิน้ำเสีย อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ เริ่มต้น วันที่ 22 ก.ค - 28 ต.ค 2558 ของการศึกษาส่วนที่ 1

Time	D/M/Y	Soil	Temperature (°C) & Humidity (%)																	
			Indoor		Influent				HRT 9 hr.				HRT 18 hr.				HRT 27 hr.			
			Temp. (°C)	Humidity (%)	T00 (30°C)	T10 (30°C)	T11 (35°C)	T12 (40°C)	T13 (45°C)	T20 (30°C)	T21 (35°C)	T22 (40°C)	T23 (45°C)	T30 (30°C)	T31 (35°C)	T32 (40°C)	T33 (45°C)			
1	22-Jul-15	↓	30.05	80.00	30.21	29.75	35.05	40.05	45.05	29.55	35.15	40.00	45.20	29.65	35.10	40.05	45.00			
2	24-Jul-15	↓	29.85	78.00	30.14	29.30	35.20	40.00	45.15	28.95	35.10	40.10	45.15	29.40	35.00	40.15	45.05			
3	27-Jul-15	↓	30.60	73.00	30.05	34.80	35.15	40.05	45.10	29.65	35.05	40.00	45.15	29.90	35.10	40.15	45.20			
4	29-Jul-15	↓	30.40	73.00	29.89	29.75	35.05	40.00	45.05	29.65	35.05	40.05	45.05	29.75	35.10	40.15	45.10			
5	31-Jul-15	↓	30.15	75.50	29.89	29.75	35.15	40.00	45.05	29.60	35.05	40.05	45.00	29.70	35.05	40.05	45.05			
6	3-Aug-15	↓	29.90	75.00	29.73	29.35	35.10	40.00	45.05	29.00	35.05	40.10	45.15	29.35	35.15	40.10	45.20			
7	5-Aug-15	↓	30.50	75.50	29.64	29.65	35.00	40.00	45.05	34.15	35.05	40.00	45.05	29.70	35.00	40.15	45.05			
8	7-Aug-15	↓	30.75	76.00	29.52	29.85	35.30	40.00	45.15	29.65	35.10	40.00	45.15	30.10	35.05	40.05	45.10			
9	10-Aug-15	↓	30.75	64.50	29.80	30.00	35.00	39.95	44.95	34.85	35.05	40.05	45.05	30.25	35.05	40.10	45.05			
10	12-Aug-15	↓	30.90	69.50	29.82	30.20	35.05	39.95	45.25	29.70	35.10	40.00	45.00	30.50	35.00	40.05	45.00			
↓		↓			↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓			
33	7-Oct-15	↓	30.45	75.00	30.00	29.45	35.05	42.15	45.15	29.35	35.00	40.05	45.30	29.70	35.10	40.15	45.05			
34	9-Oct-15	↓	30.20	75.00	29.95	29.50	35.00	40.05	45.20	29.40	35.05	40.05	45.30	29.75	35.15	40.00	45.05			
35	12-Oct-15	↓	28.20	75.50	29.60	27.45	35.30	40.05	45.10	26.60	35.10	40.05	45.20	27.55	35.05	40.15	45.10			
36	14-Oct-15	↓	28.05	75.00	29.34	27.30	35.00	40.00	45.00	26.65	35.10	40.00	45.10	27.25	35.10	40.25	45.15			
37	16-Oct-15	↓	29.75	81.50	29.01	28.30	35.05	40.05	45.00	28.15	35.15	40.05	45.15	28.30	35.10	40.10	45.10			
38	19-Oct-15	↓	30.70	72.50	29.22	29.80	35.00	40.05	45.10	29.95	35.00	40.10	45.25	30.00	35.05	40.20	45.10			
39	21-Oct-15	↓	31.45	74.50	29.31	30.10	35.05	40.05	45.00	30.23	35.15	40.05	45.20	30.25	35.05	40.05	45.00			
40	23-Oct-15	↓	31.20	72.50	29.51	30.15	35.05	40.05	45.25	30.30	35.05	40.05	45.20	30.40	35.15	40.00	45.05			
41	26-Oct-15	↓	30.45	70.50	29.60	29.35	35.20	39.95	45.00	29.25	35.15	40.07	45.20	29.60	35.05	40.00	45.10			
42	28-Oct-15	↓	31.45	73.50	29.60	30.10	35.05	40.05	45.15	30.25	35.10	40.00	44.90	30.30	35.00	40.10	45.10			

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้น วันที่ 22 ก.ค - 28 ต.ค 2558 ของการศึกษารหัสส่วนที่ 1

S Firm	D/M/Y	pH parameters														
		Influent T00 (30°C)	HRT 9 hr.			HRT 18 hr.			HRT 27 hr.							
		T10 (30°C)	T11 (35°C)	T12 (40°C)	T13 (45°C)	T20 (30°C)	T21 (35°C)	T22 (40°C)	T23 (45°C)	T30 (30°C)	T31 (35°C)	T32 (40°C)	T33 (45°C)			
1	22-Jul-15	7.19	7.90	8.06	8.11	7.89	7.95	8.06	8.30	8.04	7.87	8.12	8.34			
2	24-Jul-15	7.07	8.00	8.13	8.16	7.91	8.01	8.08	8.34	8.11	7.95	8.13	8.37			
3	27-Jul-15	7.02	7.95	8.11	8.18	8.05	7.95	8.10	8.29	8.12	7.97	8.14	8.31			
4	29-Jul-15	7.24	8.01	8.11	8.19	7.97	7.90	8.11	8.32	8.03	7.98	8.10	8.37			
5	31-Jul-15	7.20	7.96	8.10	8.18	7.75	7.85	8.06	8.27	8.12	8.02	8.12	8.30			
6	3-Aug-15	7.23	7.64	7.71	7.70	7.78	7.63	7.75	7.97	7.91	7.65	7.87	7.97			
7	5-Aug-15	7.19	7.91	8.03	8.06	7.88	7.91	8.08	8.29	8.02	7.94	8.04	8.23			
8	7-Aug-15	7.15	7.88	7.95	8.06	7.78	7.91	8.06	8.27	7.96	7.97	8.03	8.24			
9	10-Aug-15	7.16	8.00	7.89	7.79	7.82	7.84	7.99	8.23	8.06	7.88	7.96	8.22			
10	12-Aug-15	7.26	7.78	7.85	8.01	7.86	8.84	8.04	8.18	7.04	7.83	7.99	8.24			
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓			
35	12-Oct-15	7.20	7.94	8.06	8.00	7.87	7.87	7.96	8.33	7.89	7.86	7.92	8.23			
36	14-Oct-15	7.18	7.88	7.00	8.05	7.92	7.89	7.98	8.31	7.88	7.92	7.91	8.22			
37	16-Oct-15	7.16	7.88	8.03	8.14	7.80	7.85	7.96	8.29	7.80	7.90	7.92	8.22			
38	19-Oct-15	7.21	7.88	8.03	8.16	7.78	7.86	7.97	8.28	7.80	7.87	8.21	7.90			
39	21-Oct-15	7.10	7.87	7.96	8.12	7.78	7.85	7.97	8.25	7.77	7.84	7.84	7.19			
40	23-Oct-15	7.17	7.86	8.01	8.07	7.81	7.86	7.95	8.25	7.84	7.86	7.86	8.17			
41	26-Oct-15	7.21	7.88	8.05	8.21	8.01	7.88	8.00	8.29	7.90	7.91	7.90	8.18			
42	28-Oct-15	7.19	7.89	8.07	8.15	7.86	7.84	8.00	8.31	7.89	7.32	7.88	8.29			

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการวัดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันน้ำเสีย เริ่มต้น วันที่ 22 ก.ค - 28 ต.ค 2558 ของการศึกษาส่วนที่ 1

Stn	D/M/Y	Oxidation Reduction Potential parameters (mv)																
		Influent			HRT 9 hr.			HRT 18 hr.			HRT 27 hr.							
		T00 (30°C)	T10 (30°C)	T11 (35°C)	T12 (40°C)	T13 (45°C)	T20 (30°C)	T21 (35°C)	T22 (40°C)	T23 (45°C)	T30 (30°C)	T31 (35°C)	T32 (40°C)	T33 (45°C)				
1	22-Jul-15	-249	-205	-122	-130	-329	-111	-93	-104	-315	-237	-230	-283	-318				
2	24-Jul-15	-145	-64	-80	-113	-292	-211	-169	-268	-294	-217	-242	-160	-305				
3	27-Jul-15	-200	-18	-90	-190	-305	-213	-174	-173	-305	-195	-220	-267	-311				
4	29-Jul-15	-78	-24	-91	-196	-315	-210	-168	-163	-301	-212	-210	-264	-302				
5	31-Jul-15	-147	-72	-116	-203	-323	-228	-176	-174	-311	-206	-225	-254	-313				
6	3-Aug-15	-215	-120	-140	-210	-330	-245	-184	-185	-320	-199	-223	-243	-323				
7	5-Aug-15	-197	-74	-139	-265	-331	-176	-170	-184	-321	-231	-202	-229	-325				
8	7-Aug-15	-219	-115	-129	-215	-313	-210	-215	-197	-334	-233	-212	-209	-324				
9	10-Aug-15	-241	-86	-200	-308	-357	-222	-186	-170	-344	-265	-216	-205	-300				
10	12-Aug-15	-185	-44	-69	-226	-318	-236	-185	-184	-319	-235	-200	-161	-312				
↓																		
36	14-Oct-15	-272	-313	-334	-281	-353	-233	-210	-205	-330	-205	-202	-172	-313				
37	16-Oct-15	-227	-302	-319	-277	-334	-285	-215	-203	-326	-334	-198	-185	-330				
38	19-Oct-15	-273	-295	-335	-286	-360	-337	-226	-250	-349	-245	-230	-227	-337				
39	21-Oct-15	-259	-284	-281	-307	-306	-293	-226	-207	-303	-286	-216	-191	-301				
40	23-Oct-15	-282	-284	-311	-331	-355	-312	-255	-229	-340	-323	-249	-220	-332				
41	26-Oct-15	-277	-308	-313	-338	-340	-280	-227	-220	-318	-314	-246	-220	-324				
42	28-Oct-15	-275	-307	-322	-333	-345	-295	-249	-233	-306	-276	-254	-226	-328				

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของแข็งแขวนลอย เริ่มต้น วันที่ 22 ก.ค - 28 ต.ค 2558 ของการศึกษาคส่วนที่ 1

Site	D/M/Y	Suspended solids parameters (mg/L)														
		Influent					HRT 9 hr.			HRT 18 hr.			HRT 27 hr.			
		T00 (30°C)	T10 (30°C)	T11 (35°C)	T12 (40°C)	T13 (45°C)	T20 (30°C)	T21 (35°C)	T22 (40°C)	T23 (45°C)	T30 (30°C)	T31 (35°C)	T32 (40°C)	T33 (45°C)		
1	22-Jul-15	45.50	40.00	27.00	32.50	37.50	37.00	26.50	31.00	35.50	34.50	9.50	31.00	35.50		
2	24-Jul-15	43.50	39.00	23.50	30.50	33.00	32.00	17.00	27.00	25.50	27.50	5.00	27.00	27.50		
3	27-Jul-15	56.00	37.50	29.50	41.50	43.50	36.00	17.50	28.00	30.50	35.50	12.00	36.00	31.00		
4	29-Jul-15	49.50	42.00	41.50	40.50	41.00	38.50	13.00	33.50	34.50	39.00	12.00	35.00	34.00		
5	31-Jul-15	62.00	41.00	36.00	45.00	39.00	44.00	16.00	37.00	39.00	36.00	11.00	36.00	36.00		
6	3-Aug-15	62.00	45.00	43.00	45.00	43.00	44.00	20.00	31.00	33.00	28.00	17.00	34.00	36.00		
7	5-Aug-15	60.00	54.00	47.00	50.00	49.00	51.00	31.00	44.00	43.00	38.00	23.00	43.00	47.00		
8	7-Aug-15	72.00	65.00	48.00	45.00	47.00	64.00	25.00	41.00	40.00	37.00	20.00	43.00	45.00		
9	10-Aug-15	72.00	65.00	48.00	45.00	47.00	64.00	25.00	41.00	40.00	37.00	20.00	43.00	45.00		
10	12-Aug-15	69.00	61.00	52.00	51.00	55.00	59.00	28.00	51.00	44.00	41.00	17.00	48.00	48.00		
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
34	9-Oct-15	64.00	43.00	47.00	43.00	44.00	49.00	32.00	32.00	33.00	46.00	28.00	30.00	32.00		
35	12-Oct-15	66.00	39.00	29.00	37.00	29.00	34.00	30.00	23.00	33.00	34.00	18.00	20.00	28.00		
36	14-Oct-15	46.00	39.00	31.00	30.00	31.00	33.00	29.00	24.00	25.00	33.00	16.00	18.00	21.00		
37	16-Oct-15	43.00	38.00	36.00	35.00	35.00	37.00	29.00	30.00	27.00	36.00	20.00	24.00	25.00		
38	19-Oct-15	52.00	32.00	36.00	35.00	31.00	35.00	24.00	21.00	27.00	40.00	17.00	22.00	23.00		
39	21-Oct-15	62.00	41.00	34.00	37.00	43.00	44.00	32.00	28.00	40.00	35.00	25.00	29.00	33.00		
40	23-Oct-15	49.00	32.00	40.00	34.00	41.00	43.00	26.00	26.00	33.00	37.00	14.00	19.00	24.00		
41	26-Oct-15	37.00	32.00	29.00	30.00	31.00	30.00	24.00	24.00	21.00	30.00	7.00	13.00	23.00		
42	28-Oct-15	42.00	37.00	30.00	25.00	34.00	31.00	25.00	20.00	26.00	36.00	11.00	14.00	22.00		

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ความต้องการออกซิเจนทางเคมี เริ่มต้น วันที่ 22 ก.ค - 28 ต.ค 2558 ของการศึกษารุ่นที่ 1

Items	D/M/Y	Periods	Chemical Oxygen Demands parameters (mg/L)																																			
			Influent									HRT 9 hr.									HRT 18 hr.									HRT 27 hr.								
			T00 (30°C)	T10 (30°C)	T11 (35°C)	T12 (40°C)	T13 (45°C)	T20 (30°C)	T21 (35°C)	T22 (40°C)	T23 (45°C)	T30 (30°C)	T31 (35°C)	T32 (40°C)	T33 (45°C)	T00 (30°C)	T10 (30°C)	T11 (35°C)	T12 (40°C)	T13 (45°C)	T20 (30°C)	T21 (35°C)	T22 (40°C)	T23 (45°C)	T30 (30°C)	T31 (35°C)	T32 (40°C)	T33 (45°C)										
1	22-Jul-15	1	144.00	116.00	112.00	120.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	96.00	96.00	96.00	96.00	96.00	96.00	96.00	96.00	96.00	116.00	60.00	60.00	112.00	116.00									
2	24-Jul-15	3	116.00	92.00	72.00	96.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	84.00	44.00	44.00	96.00	100.00									
3	27-Jul-15	6	184.00	92.00	108.00	116.00	112.00	116.00	116.00	112.00	96.00	64.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	140.00	52.00	52.00	136.00	128.00									
4	29-Jul-15	8	160.00	116.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	116.00	128.00	56.00	104.00	108.00	108.00	104.00	108.00	108.00	108.00	108.00	108.00	108.00	108.00	108.00	132.00	44.00	44.00	80.00	120.00									
5	31-Jul-15	10	176.00	104.00	100.00	120.00	124.00	124.00	124.00	124.00	116.00	64.00	108.00	124.00	124.00	108.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	100.00	60.00	60.00	112.00	100.00									
6	3-Aug-15	13	184.00	100.00	116.00	144.00	132.00	132.00	132.00	128.00	128.00	76.00	120.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	88.00	84.00	44.00	44.00	84.00	60.00									
7	5-Aug-15	15	188.00	144.00	100.00	116.00	136.00	136.00	144.00	144.00	144.00	76.00	108.00	128.00	128.00	108.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	108.00	76.00	76.00	140.00	128.00									
8	7-Aug-15	17	172.00	152.00	100.00	116.00	132.00	132.00	148.00	148.00	148.00	80.00	100.00	104.00	104.00	100.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	104.00	56.00	56.00	92.00	100.00								
9	10-Aug-15	20	164.00	140.00	140.00	140.00	144.00	144.00	132.00	132.00	132.00	68.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00	120.00	72.00	72.00	124.00	136.00									
→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→									
34	9-Oct-15	80	203.04	135.36	135.36	127.84	142.88	142.88	142.88	142.88	142.88	90.24	97.76	120.32	120.32	120.32	120.32	120.32	120.32	120.32	120.32	120.32	120.32	120.32	127.84	82.72	82.72	97.76	120.32									
35	12-Oct-15	83	165.44	112.80	120.32	112.80	127.84	127.84	120.32	120.32	120.32	90.24	97.76	105.28	112.80	112.80	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	112.80	75.20	75.20	90.24	97.76									
36	14-Oct-15	85	150.40	112.80	90.24	82.72	75.20	75.20	90.24	90.24	90.24	67.68	75.20	82.72	82.72	82.72	82.72	82.72	82.72	82.72	82.72	82.72	82.72	82.72	90.24	52.64	52.64	60.16	75.20									
37	16-Oct-15	87	157.92	82.72	82.72	75.20	75.20	75.20	82.72	82.72	82.72	67.68	60.16	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	90.24	60.16	60.16	75.20	82.72									
38	19-Oct-15	90	180.48	157.92	97.76	112.80	112.80	112.80	157.92	157.92	157.92	97.76	105.28	127.84	142.88	142.88	142.88	142.88	142.88	142.88	142.88	142.88	142.88	142.88	142.88	142.88	75.20	75.20	97.76	112.80								
39	21-Oct-15	92	135.36	90.24	82.72	90.24	105.28	105.28	112.80	112.80	112.80	82.72	90.24	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	105.28	60.16	60.16	67.68	90.24								
40	23-Oct-15	94	150.40	82.72	120.32	112.80	120.32	120.32	112.80	112.80	112.80	90.24	105.28	120.32	127.84	127.84	127.84	127.84	127.84	127.84	127.84	127.84	127.84	127.84	127.84	127.84	67.68	67.68	82.72	112.80								
41	26-Oct-15	97	142.88	105.28	120.32	97.76	105.28	105.28	120.32	120.32	120.32	75.20	82.72	97.76	97.76	97.76	97.76	97.76	97.76	97.76	97.76	97.76	97.76	97.76	97.76	97.76	60.16	60.16	67.68	90.24								
42	28-Oct-15	99	120.32	67.68	60.16	82.72	75.20	75.20	82.72	82.72	82.72	52.64	67.68	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	75.20	82.72	45.12	45.12	60.16	75.20									

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลวิเคราะห์พารามิเตอร์เจตาไรต์ไนโตรเจนรวม เริ่มต้น วันที่ 22 ก.ค - 28 ต.ค 2558 ของการศึกษาส่วนที่ 1

Sludge ID	D/M/Y	Total Kjeldahl Nitrogen parameters (mg/L)																							
		Influent						HRT 9 hr.						HRT 18 hr.						HRT 27 hr.					
		T00 (30°C)	T10 (30°C)	T11 (35°C)	T12 (40°C)	T13 (45°C)	T20 (30°C)	T21 (35°C)	T22 (40°C)	T23 (45°C)	T30 (30°C)	T31 (35°C)	T32 (40°C)	T33 (45°C)											
1	22-Jul-15	62.63	56.11	44.69	54.48	57.09	37.84	39.14	31.64	52.19	49.58	27.40	47.63	51.21											
2	24-Jul-15	58.72	52.19	43.38	49.91	54.80	34.90	48.60	30.34	48.60	48.93	26.10	46.65	50.89											
3	27-Jul-15	64.26	54.80	47.63	54.80	56.76	54.80	51.21	29.03	54.15	53.82	29.03	51.87	56.11											
4	29-Jul-15	63.28	58.39	48.28	50.89	53.82	52.84	38.17	36.86	59.37	57.41	35.88	51.21	60.02											
5	31-Jul-15	63.94	59.37	49.26	50.23	50.89	38.17	32.95	31.97	55.45	50.23	26.75	48.60	53.50											
6	3-Aug-15	62.63	58.06	52.52	51.54	56.76	48.60	34.25	48.93	59.69	57.41	41.75	51.54	61.33											
7	5-Aug-15	66.54	59.37	53.82	53.50	60.35	51.21	34.25	39.14	61.98	53.82	38.82	51.87	60.35											
8	7-Aug-15	59.37	56.76	49.91	51.87	54.80	54.15	36.53	35.56	58.39	53.82	37.84	45.99	57.41											
↓		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓											
34	9-Oct-15	69.55	66.19	59.81	53.09	63.17	59.81	39.65	43.01	61.49	54.77	28.90	30.58	58.13											
35	12-Oct-15	66.19	59.47	53.09	54.10	62.50	60.82	44.35	41.33	61.82	59.14	31.58	34.94	64.18											
36	14-Oct-15	66.86	60.48	56.78	47.38	57.46	55.44	38.30	36.29	54.43	53.09	31.25	33.94	61.82											
37	16-Oct-15	63.17	51.07	50.06	45.70	51.41	49.06	35.28	36.62	54.43	47.38	27.89	29.57	51.41											
38	19-Oct-15	64.51	52.08	45.36	47.38	49.39	49.06	29.90	30.24	52.08	48.05	24.86	26.88	50.06											
39	21-Oct-15	61.10	54.78	54.18	48.76	55.69	56.29	29.80	31.30	49.36	48.16	27.99	29.50	55.38											
40	23-Oct-15	60.50	52.98	51.47	46.96	52.07	56.59	34.01	40.03	57.79	54.48	28.60	30.40	56.89											
41	26-Oct-15	60.20	52.68	48.46	47.26	52.68	47.86	33.71	31.91	54.78	46.35	26.79	30.70	51.47											
42	28-Oct-15	59.00	53.28	52.68	49.97	54.18	47.26	34.31	30.10	47.86	46.66	27.69	29.20	48.16											

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลวิเคราะห์พารามิเตอร์ของฟอสฟอรัสรวม เริ่มต้น วันที่ 22 ก.ค - 28 ต.ค 2558 ของการศึกษาส่วนที่ 1

Stn ID	D/M/Y	Total Phosphorus parameters (mg/L)																	
		Influent						HRT 9 hr.			HRT 18 hr.			HRT 27 hr.					
		T00 (30°C)	T10 (30°C)	T11 (35°C)	T12 (40°C)	T13 (45°C)	T20 (30°C)	T21 (35°C)	T22 (40°C)	T23 (45°C)	T30 (30°C)	T31 (35°C)	T32 (40°C)	T33 (45°C)					
1	22-Jul-15	3.80	3.00	3.21	3.43	2.86	3.53	2.96	2.89	2.60	3.61	2.66	2.74	2.60					
2	24-Jul-15	4.34	3.39	4.30	2.21	3.37	3.37	2.56	3.79	2.19	3.33	3.14	3.43	2.86					
3	27-Jul-15	4.39	3.53	3.79	3.53	3.74	2.77	3.63	3.74	2.71	3.33	3.19	3.46	2.67					
4	29-Jul-15	4.56	4.03	4.34	4.14	4.16	3.74	4.26	4.41	3.43	3.99	3.97	3.94	3.29					
5	31-Jul-15	4.09	3.84	3.90	3.73	3.64	3.51	3.84	3.97	3.00	3.67	3.80	3.61	2.99					
6	3-Aug-15	4.53	4.16	4.31	3.76	3.67	3.13	3.84	4.03	2.91	3.74	3.71	3.39	2.79					
7	5-Aug-15	5.60	4.09	4.59	4.21	4.19	3.69	4.40	4.40	3.34	3.64	4.40	3.71	3.17					
8	7-Aug-15	5.03	3.74	4.47	3.56	3.49	3.23	4.00	3.84	2.94	3.57	3.97	3.19	2.61					
33	7-Oct-15	6.97	6.43	6.26	6.27	6.17	5.87	6.03	5.79	5.37	5.71	4.94	4.60	4.14					
34	9-Oct-15	6.17	5.89	5.66	6.00	5.74	5.73	5.54	5.70	4.90	5.80	4.89	4.57	4.13					
35	12-Oct-15	6.00	4.86	5.90	5.50	5.34	5.43	5.43	5.40	5.03	5.60	4.96	4.39	4.09					
36	14-Oct-15	6.20	5.84	5.51	5.63	5.57	5.40	5.31	5.39	4.87	5.83	4.80	4.37	4.24					
37	16-Oct-15	6.29	5.07	5.40	5.43	5.57	5.24	5.36	5.37	5.03	5.44	4.81	4.43	4.29					
38	19-Oct-15	6.43	4.96	4.96	4.74	4.93	5.03	4.71	4.73	4.43	5.06	4.57	4.03	3.86					
39	21-Oct-15	5.14	4.91	5.00	4.83	4.70	4.84	4.63	4.71	4.14	4.91	4.24	3.86	3.57					
40	23-Oct-15	5.53	5.17	5.24	5.27	5.07	5.04	4.81	4.87	4.50	5.24	4.51	4.16	4.00					
41	26-Oct-15	5.61	5.43	5.51	5.29	5.39	5.24	5.01	5.21	4.69	5.54	4.73	4.57	4.17					
42	28-Oct-15	5.69	5.56	5.41	5.56	5.29	5.29	5.29	4.60	4.89	5.63	4.91	4.44	4.29					

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของถังกรองน้ำร้ออากาศ (HRT 9 hr.) เริ่มต้น วันที่ 23 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2558 ของการศึกษาส่วนที่ 1

Item	D/M/Y	h:m:s	One milliseconds	Energy Consumption (Wh)		
				T21 (35 °C)	T22 (40 °C)	T23 (45 °C)
			Total			
1	23/10/2015	7:10:07	00000:00:02	0.00	0.00	0.00
2	23/10/2015	7:10:09	00000:00:04	0.00	0.00	0.00
3	23/10/2015	7:10:11	00000:00:06	0.00	0.00	0.00
4	23/10/2015	7:10:13	00000:00:08	0.00	0.00	0.00
5	23/10/2015	7:10:15	00000:00:10	0.00	0.00	0.00
6	23/10/2015	7:10:17	00000:00:12	0.00	0.00	0.00
7	23/10/2015	7:10:19	00000:00:14	0.00	0.00	0.00
8	23/10/2015	7:10:21	00000:00:16	0.00	0.00	0.00
9	23/10/2015	7:10:23	00000:00:18	0.00	0.00	0.00
10	23/10/2015	7:10:25	00000:00:20	0.00	0.00	0.00
30,289	23/10/2015	23:59:43	00016:49:38	47.85	106.05	165.89
30,290	23/10/2015	23:59:45	00016:49:40	47.85	106.05	165.91
30,291	23/10/2015	23:59:47	00016:49:42	47.85	106.05	165.93
30,292	23/10/2015	23:59:49	00016:49:44	47.85	106.05	165.95
30,293	23/10/2015	23:59:51	00016:49:46	47.85	106.05	165.98
30,294	23/10/2015	23:59:53	00016:49:48	47.85	106.05	166.00
30,295	23/10/2015	23:59:55	00016:49:50	47.85	106.05	166.02
30,296	23/10/2015	23:59:57	00016:49:52	47.85	106.05	166.04
30,297	23/10/2015	23:59:59	00016:49:54	47.85	106.05	166.07
30,298	23/10/2015	0:00:01	00016:49:56	47.85	106.05	166.09

ตารางที่ ข.8 (ต่อ) ข้อมูลการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของถังกรองไร้อากาศ (HRT 9 hr.) สิ้นสุด วันที่ 1 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2558 ของการศึกษาคส่วนที่ 1

Item	D/M/Y	h:m:s	One milliseconds	Total	Energy Consumption (Wh)		
					T21 (35 °C)	T22 (40 °C)	T23 (45 °C)
1	1/11/2015	0:00:01	00051:41:52	776.02	2.27	304.57	470.04
2	1/11/2015	0:00:03	00051:41:54	776.02	2.27	304.57	470.04
3	1/11/2015	0:00:05	00051:41:56	776.02	2.27	304.57	470.04
4	1/11/2015	0:00:07	00051:41:58	776.02	2.27	304.57	470.04
5	1/11/2015	0:00:09	00051:42:00	776.02	2.27	304.57	470.04
6	1/11/2015	0:00:11	00051:42:02	776.02	2.27	304.57	470.04
7	1/11/2015	0:00:13	00051:42:04	776.02	2.27	304.57	470.04
8	1/11/2015	0:00:15	00051:42:06	776.02	2.27	304.57	470.04
9	1/11/2015	0:00:17	00051:42:08	776.02	2.27	304.57	470.04
10	1/11/2015	0:00:19	00051:42:10	776.02	2.27	304.57	470.04
43067	1/11/2015	23:59:43	00016:42:22	276.06	0.76	110.01	165.65
43068	1/11/2015	23:59:45	00016:42:24	276.07	0.76	110.02	165.65
43069	1/11/2015	23:59:47	00016:42:26	276.09	0.76	110.04	165.65
43070	1/11/2015	23:59:49	00016:42:28	276.10	0.76	110.05	165.65
43071	1/11/2015	23:59:51	00016:42:30	276.11	0.76	110.06	165.65
43072	1/11/2015	23:59:53	00016:42:32	276.12	0.76	110.07	165.65
43073	1/11/2015	23:59:55	00016:42:34	276.14	0.76	110.09	165.65
43074	1/11/2015	23:59:57	00016:42:36	276.15	0.76	110.10	165.65
43075	1/11/2015	23:59:59	00016:42:38	276.16	0.76	110.11	165.65
43076	1/11/2015	0:00:01	00016:42:40	276.17	0.76	110.12	165.65

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ (HRT 18 hr.) เริ่มต้น วันที่ 13 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2558 ของการศึกษาคส่วนที่ 1

Item	D/M/Y	h:m:s	One milliseconds	Total	Energy Consumption (Wh)		
					T21 (35 °C)	T22 (40 °C)	T23 (45 °C)
1	13/10/2015	0:00:00	00017:30:18	479.88	102.42	168.16	242.32
2	13/10/2015	0:00:02	00017:30:20	479.90	102.42	168.18	242.32
3	13/10/2015	0:00:04	00017:30:22	479.91	102.42	168.20	242.32
4	13/10/2015	0:00:06	00017:30:24	479.93	102.42	168.23	242.32
5	13/10/2015	0:00:08	00017:30:26	479.95	102.42	168.25	242.32
6	13/10/2015	0:00:10	00017:30:28	479.97	102.42	168.27	242.32
7	13/10/2015	0:00:12	00017:30:30	479.97	102.42	168.28	242.32
8	13/10/2015	0:00:14	00017:30:32	479.97	102.42	168.28	242.32
9	13/10/2015	0:00:16	00017:30:34	479.97	102.42	168.28	242.32
10	13/10/2015	0:00:18	00017:30:36	479.97	102.42	168.28	242.32
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
43,192	13/10/2015	23:59:42	00041:30:00	1,119.64	237.66	391.59	564.02
43,193	13/10/2015	23:59:44	00041:30:02	1,119.67	237.68	391.61	564.02
43,194	13/10/2015	23:59:46	00041:30:04	1,119.70	237.70	391.63	564.02
43,195	13/10/2015	23:59:48	00041:30:06	1,119.74	237.71	391.66	564.02
43,196	13/10/2015	23:59:50	00041:30:08	1,119.77	237.73	391.68	564.02
43,197	13/10/2015	23:59:52	00041:30:10	1,119.81	237.75	391.70	564.02
43,198	13/10/2015	23:59:54	00041:30:12	1,119.84	237.77	391.72	564.02
43,199	13/10/2015	23:59:56	00041:30:14	1,119.88	237.79	391.74	564.02
43,200	13/10/2015	23:59:58	00041:30:16	1,119.91	237.80	391.77	564.02
43,201	14/10/2015	0:00:00	00041:30:18	1,119.95	237.82	391.79	564.02

ตารางที่ ข.9 (ต่อ) ข้อมูลการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ (HRT 18 hr.) สิ้นสุด วันที่ 22 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2558 ของการศึกษาส่วนที่ 1

Item	D/M/Y	h:m:s	One milliseconds	Energy Consumption (Wh)			
				Total	T21 (35 °C)	T22 (40 °C)	T23 (45 °C)
1	22/10/2015	0:00:00	00014:29:56	285.22	44.70	99.01	161.51
2	22/10/2015	0:00:02	00014:29:58	285.22	44.70	99.01	161.51
3	22/10/2015	0:00:04	00014:30:00	285.22	44.70	99.01	161.51
4	22/10/2015	0:00:06	00014:30:02	285.22	44.70	99.01	161.51
5	22/10/2015	0:00:08	00014:30:04	285.22	44.70	99.01	161.51
6	22/10/2015	0:00:10	00014:30:06	285.22	44.70	99.01	161.51
7	22/10/2015	0:00:12	00014:30:08	285.22	44.70	99.01	161.51
8	22/10/2015	0:00:14	00014:30:10	285.22	44.70	99.01	161.51
9	22/10/2015	0:00:16	00014:30:12	285.22	44.70	99.01	161.51
10	22/10/2015	0:00:18	00014:30:14	285.22	44.70	99.01	161.51
41,118	22/10/2015	22:50:34	00037:20:30	713.78	110.43	247.65	403.83
41,119	22/10/2015	22:50:36	00037:20:32	713.78	110.43	247.65	403.83
41,120	22/10/2015	22:50:38	00037:20:34	713.78	110.43	247.65	403.83
41,121	22/10/2015	22:50:40	00037:20:36	713.78	110.43	247.65	403.83
41,122	22/10/2015	22:50:42	00037:20:38	713.78	110.43	247.65	403.83
41,123	22/10/2015	22:50:44	00037:20:40	713.78	110.43	247.65	403.83
41,124	22/10/2015	22:50:46	00037:20:42	713.78	110.43	247.65	403.83
41,125	22/10/2015	22:50:48	00037:20:44	713.78	110.43	247.65	403.83
41,126	22/10/2015	22:50:50	00037:20:46	713.78	110.43	247.65	403.83
41,127	22/10/2015	22:50:52	00037:20:48	713.78	110.43	247.65	403.83

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ (HRT 27 hr.) เริ่มต้น วันที่ 2 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2558 ของการศึกษาส่วนที่ 1

Item	D/M/Y	h:m:s	One milliseconds	Energy Consumption (Wh)			
				Total	T21 (35 °C)	T22 (40 °C)	T23 (45 °C)
1	2/10/2015	0:00:00	00040:20:08	824.50	138.72	306.19	508.82
2	2/10/2015	0:00:02	00040:20:10	824.50	138.72	306.19	508.82
3	2/10/2015	0:00:04	00040:20:12	824.50	138.72	306.19	508.82
4	2/10/2015	0:00:06	00040:20:14	824.50	138.72	306.19	508.82
5	2/10/2015	0:00:08	00040:20:16	824.50	138.72	306.19	508.82
6	2/10/2015	0:00:10	00040:20:18	824.50	138.72	306.19	508.82
7	2/10/2015	0:00:12	00040:20:20	824.50	138.72	306.19	508.82
8	2/10/2015	0:00:14	00040:20:22	824.50	138.72	306.19	508.82
9	2/10/2015	0:00:16	00040:20:24	824.50	138.72	306.19	508.82
10	2/10/2015	0:00:18	00040:20:26	824.50	138.72	306.19	508.82
43,192	2/10/2015	23:59:42	00001:32:38	26.97	6.74	10.49	15.18
43,193	2/10/2015	23:59:44	00001:32:40	26.97	6.74	10.49	15.18
43,194	2/10/2015	23:59:46	00001:32:42	26.97	6.74	10.49	15.18
43,195	2/10/2015	23:59:48	00001:32:44	26.97	6.74	10.49	15.18
43,196	2/10/2015	23:59:50	00001:32:46	26.97	6.74	10.49	15.18
43,197	2/10/2015	23:59:52	00001:32:48	26.97	6.74	10.49	15.18
43,198	2/10/2015	23:59:54	00001:32:50	26.97	6.74	10.49	15.18
43,199	2/10/2015	23:59:56	00001:32:52	26.97	6.74	10.49	15.18
43,200	2/10/2015	23:59:58	00001:32:54	26.97	6.74	10.49	15.19
43,201	3/10/2015	0:00:00	00001:32:56	26.97	6.74	10.49	15.19

ตารางที่ ข.10 (ต่อ) ข้อมูลการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ (HRT 27 hr.) สิ้นสุด วันที่ 11 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2558 ของการศึกษาส่วนที่ 1

Item	D/M/Y	h:m:s	One milliseconds	Total	Energy Consumption (Wh)		
					T21 (35 °C)	T22 (40 °C)	T23 (45 °C)
1	11/10/2015	0:00:00	00016:13:18	371.30	69.56	137.33	222.93
2	11/10/2015	0:00:02	00016:13:20	371.31	69.56	137.37	222.93
3	11/10/2015	0:00:04	00016:13:22	371.33	69.56	137.40	222.93
4	11/10/2015	0:00:06	00016:13:24	371.35	69.56	137.43	222.93
5	11/10/2015	0:00:08	00016:13:26	371.36	69.56	137.47	222.93
6	11/10/2015	0:00:10	00016:13:28	371.38	69.56	137.50	222.93
7	11/10/2015	0:00:12	00016:13:30	371.40	69.56	137.53	222.93
8	11/10/2015	0:00:14	00016:13:32	371.42	69.56	137.57	222.93
9	11/10/2015	0:00:16	00016:13:34	371.43	69.56	137.60	222.93
10	10/10/2015	0:00:18	00016:13:36	371.45	69.56	137.64	222.93
43,192	11/10/2015	23:59:42	00064:13:00	1,468.86	283.71	543.01	866.43
43,193	11/10/2015	23:59:44	00064:13:02	1,468.86	283.71	543.01	866.43
43,194	11/10/2015	23:59:46	00064:13:04	1,468.86	283.71	543.01	866.43
43,195	11/10/2015	23:59:48	00064:13:06	1,468.86	283.71	543.01	866.43
43,196	11/10/2015	23:59:50	00064:13:08	1,468.86	283.71	543.01	866.43
43,197	11/10/2015	23:59:52	00064:13:10	1,468.86	283.71	543.01	866.43
43,198	11/10/2015	23:59:54	00064:13:12	1,468.86	283.71	543.01	866.43
43,199	11/10/2015	23:59:56	00064:13:14	1,468.86	283.71	543.01	866.43
43,200	11/10/2015	23:59:58	00064:13:16	1,468.86	283.71	543.01	866.43
43,201	12/10/2015	0:00:00	00064:13:18	1,468.86	283.71	543.01	866.43

ภาคผนวก ค
ข้อมูลจากการศึกษาส่วนที่ 2



ตารางที่ ค.1 ข้อมูลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าถึงกรงเรืออากาศ เริ่มต้น วันที่ 19 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2560 ของการศึกษาส่วนที่ 2

Item	Time			Volt (V)	I _{FF} (A)	I _C (A)	I _{FC} (A)	P _{FC} (A)	P _C (A)	P _{FC} (A)
	Y	M	D							
1	2017	2	19	0	0	0	0	0	0	0
2	2017	2	19	8	229.9	5.08	0.539	0.1	1.071	0.11
3	2017	2	19	8	231.4	5.08	0.539	0.1	1.071	0.11
4	2017	2	19	8	230.8	5.08	0.539	0.1	1.071	0.11
5	2017	2	19	8	231.7	5.08	0.539	0.1	1.071	0.11
6	2017	2	19	8	224.5	5.08	0.539	0.1	1.071	0.11
7	2017	2	19	8	224.2	5.374	0.546	0.1	1.136	0.111
8	2017	2	19	8	224.3	5.455	0.545	0.101	1.155	0.112
9	2017	2	19	8	225.3	5.489	0.537	0.099	1.164	0.111
10	2017	2	19	8	224.4	5.512	0.538	0.1	1.168	0.111
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
3232	2017	2	19	16	229.7	0	0	0.102	0	0
3233	2017	2	19	16	230.2	0	0	0.101	0	0
3234	2017	2	19	16	230.1	0	0	0.101	0	0
3235	2017	2	19	16	229.6	0	0	0.1	0	0
3236	2017	2	19	16	229.9	0	0	0.102	0	0
3237	2017	2	19	16	230.3	0	0	0.101	0	0
3238	2017	2	19	16	230	0	0	0.103	0	0
3239	2017	2	19	16	230.1	0	0	0.101	0	0
3240	2017	2	19	16	230.7	0	0	0.102	0	0
3241	2017	2	19	17	230.8	0	0	0.103	0	0

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าถึงเครื่องปรับอากาศ สิ้นสุด วันที่ 26 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2560 ของการศึกษาคส่วนที่ 2

Item	Year		Time				Volt (V)	I _{FF} (A)	I _C (A)	I _{FC} (A)	P _{FC} (A)	P _C (A)	P _{FC} (A)
	Y	M	D	h	m	s							
1	2017	2	26	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2017	2	26	8	0	10	226	0	0	0	0	0	0
3	2017	2	26	8	0	20	219.1	0.64	5.24	0.549	0.097	1.102	0.11
4	2017	2	26	8	0	30	218.9	0.641	5.392	0.539	0.095	1.133	0.108
5	2017	2	26	8	0	40	218.4	0.631	5.471	0.545	0.095	1.15	0.109
6	2017	2	26	8	0	50	218.2	0.632	5.546	0.54	0.094	1.164	0.108
7	2017	2	26	8	1	0	218.1	0.634	5.628	0.549	0.095	1.183	0.11
8	2017	2	26	8	1	10	218.5	0.622	5.715	0.534	0.092	1.204	0.107
9	2017	2	26	8	1	20	218.5	0.624	5.784	0.541	0.094	1.219	0.109
10	2017	2	26	8	1	30	217.7	0.622	5.831	0.547	0.095	1.226	0.109
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
3232	2017	2	26	16	58	30	226.1	0.633	0	0	0.096	0	0
3233	2017	2	26	16	58	40	226.3	0.635	0	0	0.096	0	0
3234	2017	2	26	16	58	50	226.3	0.625	0	0	0.097	0	0
3235	2017	2	26	16	59	0	226	0.633	0	0	0.096	0	0
3236	2017	2	26	16	59	10	225.4	0.642	0	0	0.098	0	0
3237	2017	2	26	16	59	20	226	0.639	0	0	0.099	0	0
3238	2017	2	26	16	59	30	226.1	0.639	0	0	0.098	0	0
3239	2017	2	26	16	59	40	226.1	0.631	0	0	0.096	0	0
3240	2017	2	26	16	59	50	226.1	0.636	0	0	0.098	0	0
3241	2017	2	26	16	0	0	226.1	0.643	0	0	0.099	0	0

ภาคผนวก ง
ข้อมูลจากการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3



ตารางที่ ง.1 ข้อมูลการวัดค่าอุณหภูมิในเสีย อุณหภูมิและความชื้นอากาศ เริ่มต้น วันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 ของการศึกษารุ่นที่ 2 และ 3

Item	Indoor (%)						Outdoor (%)						ANCO (°C)						Ze-GAC
	Y	M	D	h	m	s	Humidity	Temp. T _{Ein}	T _{Eout}	Humidity	Temp.	T _{C2in}	T _{C2out}	T _{EQ}	T _{inf}	T _{inner}	T _{eff}		
1	2017	2	19	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	2017	2	19	8	0	10	63	28.1	28	28	23.8	24	24	28	27.5	69	35.5	24.1	
3	2017	2	19	8	0	20	63	28.1	28	28	23.8	24	24	28	27.5	69	35.5	24.1	
4	2017	2	19	8	0	30	63	28.1	28	28	23.8	24	24	28	27.5	69	35.5	24.1	
5	2017	2	19	8	0	40	63	28.1	28	28	23.8	24	24	28	27.5	69	35.5	24.1	
6	2017	2	19	8	0	50	63	28.1	28	28	23.8	24	24	28	27.5	69	35.5	24.1	
7	2017	2	19	8	1	0	63	28.2	28	28	23.8	24	24.1	28	27.5	69	35.5	24.1	
8	2017	2	19	8	1	10	64	28.1	28	26	23.8	24	24.6	28	27.5	69	35.5	24.1	
9	2017	2	19	8	1	20	64	28.1	28	24	23.8	24	25.3	28	27.5	69	35.5	24.1	
10	2017	2	19	8	1	30	64	28.1	28	23	23.9	24	25.9	28	27.5	69	35.5	24.1	
3232	2017	2	19	16	58	30	65	25.1	26	13	32.3	31	37.5	28	29.8	73	37.3	34.8	
3233	2017	2	19	16	58	40	65	25.1	26	13	32.3	31	37.6	28	29.8	73	37.3	34.8	
3234	2017	2	19	16	58	50	64	25	26	13	32.3	31	37.5	28	29.8	73	37.3	34.8	
3235	2017	2	19	16	59	0	66	25	26	18	32.4	32	36.9	28	29.8	73	37.3	34.8	
3236	2017	2	19	16	59	10	66	24.9	26	20	32.3	32	36.3	28	29.8	73	37.3	34.8	
3237	2017	2	19	16	59	20	67	24.9	26	21	32.3	32	36.1	28	29.8	73	37.3	34.8	
3238	2017	2	19	16	59	30	67	24.9	26	21	32.3	32	35.7	28	29.8	73	37.3	34.8	
3239	2017	2	19	16	59	40	67	24.9	26	21	32.3	32	35.5	28	29.8	73	37.3	34.8	
3240	2017	2	19	16	59	50	68	24.9	26	21	32.3	32	35.1	28	29.8	73	37.3	34.8	
3241	2017	2	19	17	0	0	68	24.9	26	21	32.3	32	34.9	28	29.8	73	37.3	34.8	

ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ข้อมูลการวัดค่าอุณหภูมิน้ำเสีย อุณหภูมิและความชื้นอากาศ สิ้นสุด วันที่ 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 ของการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3

Item	Time			Indoor (%)			Indoor (°C)			Outdoor (%)			Outdoor (°C)			ANCO (°C)			Ze-GAC		
	Y	M	D	h	m	s	Humidity	Temp.	T _{Ein}	T _{Eout}	Humidity	Temp.	T _{C2in}	T _{C2out}	T _{EQ}	T _{inf}	T _{inner}	T _{eff}			
1	2017	2	26	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2017	2	26	8	0	10	70	30	29	30	78	25.9	26	26	28	28	35	35	35	26.1	
3	2017	2	26	8	0	20	70	30	29	30	78	25.9	26	26	28	28	35	35	35	26.1	
4	2017	2	26	8	0	30	69	30	29	30	78	25.9	26	26	28	28	35	35	35	26.1	
5	2017	2	26	8	0	40	69	30	29	29	78	26	26	26	28	28	35	35	35	26.1	
6	2017	2	26	8	0	50	70	30	30	27	78	26	26	27	28	28	35	35	35	26.1	
7	2017	2	26	8	1	0	70	29.9	30	27	78	26	26	27	28	28	35	35	35	26.1	
8	2017	2	26	8	1	10	70	29.9	30	27	78	26	26	28	28	28	35	35	35	26.1	
9	2017	2	26	8	1	20	70	29.8	30	26	78	26.1	26	28	28	28	35	35	35	26.1	
10	2017	2	26	8	1	30	70	29.8	30	26	78	26.1	26	29	28	28	35	35	35	26.2	
3232	2017	2	26	16	58	30	69	25.4	27	21	54	32.6	32	34	28	31	37	37	37	34.7	
3233	2017	2	26	16	58	40	69	25.4	27	21	54	32.6	32	34	28	31	37	37	37	34.7	
3234	2017	2	26	16	58	50	69	25.5	27	21	54	32.6	32	34	28	31	37	37	37	34.7	
3235	2017	2	26	16	59	0	69	25.5	27	21	54	32.6	32	34	28	31	37	37	37	34.6	
3236	2017	2	26	16	59	10	69	25.6	27	21	54	32.5	32	33	28	31	37	37	37	34.7	
3237	2017	2	26	16	59	20	69	25.6	27	21	54	32.5	32	33	28	31	37	37	37	34.7	
3238	2017	2	26	16	59	30	69	25.7	27	22	54	32.5	32	33	28	31	37	37	37	34.7	
3239	2017	2	26	16	59	40	69	25.7	27	22	54	32.5	32	33	28	31	37	37	37	34.7	
3240	2017	2	26	16	59	50	69	25.7	27	22	54	32.5	32	33	28	31	37	37	37	34.7	
3241	2017	2	26	16	0	0	69	25.8	27	22	54	32.4	32	33	28	31	37	37	37	34.7	

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง วันที่ 3 ต.ค - 30 พ.ย 2558 ของการศึกษารุ่นที่ 2 และ 3

Item	d/m/y	ANCO				Ze-GAC (°C)		
		Influent		Effluent				
		EQ	T1	T2	T3		T4	
1	3/10/2015	7.08	7.03	7.08	7.23	7.35	7.60	7.35
2	4/10/2015	7.10	7.04	7.07	7.15	7.26	7.56	7.31
3	5/10/2015	7.12	7.01	7.09	7.14	7.23	7.37	7.27
4	6/10/2015	7.10	7.05	7.07	7.15	7.22	7.55	7.30
5	7/10/2015	7.08	7.05	7.11	7.14	7.22	7.40	7.50
6	8/10/2015	7.07	7.01	7.06	7.12	7.17	7.52	7.27
7	9/10/2015	7.06	7.05	7.07	7.17	7.22	7.56	7.31
8	10/10/2015	7.02	7.03	7.07	7.14	7.19	7.36	7.51
9	11/10/2015	7.09	7.03	7.03	7.12	7.20	7.53	7.28
10	12/10/2015	7.08	6.97	7.03	7.09	7.15	7.23	7.47
→	→	→	→	→	→	→	→	→
81	22/11/2015	7.51	7.33	7.39	7.48	7.53	7.86	7.61
82	23/11/2015	7.42	7.38	7.42	7.41	7.53	7.59	7.74
83	24/11/2015	7.46	7.31	7.38	7.46	7.53	7.85	7.60
84	25/11/2015	7.48	7.35	7.40	7.47	7.56	7.88	7.63
85	26/11/2015	7.49	7.32	7.38	7.40	7.54	7.27	8.27
86	27/11/2015	7.55	7.37	7.41	7.40	7.50	7.85	7.60
87	28/11/2015	7.59	7.37	7.42	7.47	7.53	7.38	7.60
88	29/11/2015	7.57	7.38	7.43	7.51	7.55	7.90	7.65
89	30/11/2015	7.49	7.40	7.46	7.53	7.58	7.45	7.74

ตารางที่ ๓.3 ข้อมูลการวัดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันดินร่วนซุย วันที่ 3 ต.ค - 30 พ.ย 2558 ของการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3

ITEM	d/m/y	Periodes	ANCO				
			Influent		Inner		
			EQ	T1	T2	T3	T4
1	3/10/2015	1	-105	-275	-270	-276	-282
2	5/10/2015	3	-85	-291	-302	-303	-308
3	7/10/2015	5	-105	-275	-270	-276	-282
4	10/10/2015	8	-85	-291	-302	-303	-308
5	12/10/2015	10	-60	-307	-309	-314	-310
6	14/10/2015	12	-120	-306	-306	-311	-315
7	17/10/2015	15	-102	-305	-310	-312	-314
8	19/10/2015	17	-150	-286	-322	-328	-322
9	21/10/2015	19	-105	-297	-302	-311	-304
10	24/10/2015	22	-88	-289	-294	-300	-303
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
80	21/11/2015	50	-71	-257	-270	-284	-300
81	23/11/2015	52	-46	-264	-280	-276	-282
82	25/11/2015	54	-62	-268	-274	-268	-287
83	28/11/2015	57	-75	-262	-265	-279	-266
84	30/11/2015	59	-75	-342	-335	-337	-332
85	2/12/2015	61	-16	-274	-263	-266	-262
86	5/12/2015	64	-128	-338	-341	-349	-351
87	7/12/2015	66	-120	-325	-332	-343	-348
88	9/12/2015	68	-120	-320	321	-333	-352
89	12/12/2015	71	-120	-320	-321	-333	-352

ตารางที่ ง.4 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของแข็งแขวนลอย เริ่มต้น 3 ต.ค - 30 ธ.ค 2559 ของการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3

Item	D/M/Y	Periodes	Suspended solids parameters (mg/L)		
			Influent	ANCO	Ze-GAC
1	3 Oct 16	1	86.00	34.00	25.00
2	5 Oct 16	3	74.00	35.00	25.00
3	7 Oct 16	5	86.00	44.00	25.00
4	10 Oct 16	8	84.00	41.00	29.00
5	12 Oct 16	10	86.00	51.00	28.00
6	14 Oct 16	12	74.00	42.00	24.00
7	17 Oct 16	15	72.00	36.00	16.00
8	19 Oct 16	17	66.00	28.00	16.00
9	21 Oct 16	19	63.00	23.00	12.00
10	24 Oct 16	22	83.00	38.00	26.00
→	→	→	→	→	→
30	9 Dec 16	68	52.00	34.00	26.00
31	12 Dec 16	71	44.00	28.00	20.00
32	14 Dec 16	73	46.00	19.00	16.00
33	16 Dec 16	75	48.00	19.00	16.00
34	19 Dec 16	78	54.00	18.00	12.00
35	21 Dec 16	80	50.00	20.00	12.00
36	23 Dec 16	82	48.00	25.00	9.00
37	26 Dec 16	85	46.00	23.00	15.00
38	28 Dec 16	87	48.00	26.00	15.00
39	30 Dec 16	89	44.00	22.00	13.00

ตารางที่ ๓.๕ ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ความต้องการออกซิเจนทางเคมี เริ่มต้น 3 ต.ค - 30 ธ.ค 2559 ของการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3

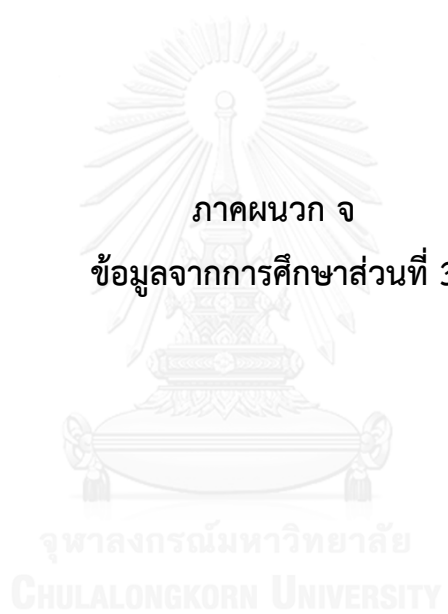
Item	D/M/Y	Periodes	Chemical Oxygen Demands parameters (mg/L)		
			Influent	ANCO	Ze-GAC
1	3 Oct 16	1	214.32	94.00	63.92
2	5 Oct 16	3	157.92	67.68	22.56
3	7 Oct 16	5	180.48	97.76	52.64
4	10 Oct 16	8	210.56	112.80	45.12
5	12 Oct 16	10	233.12	120.32	82.72
6	14 Oct 16	12	180.48	90.24	60.16
7	17 Oct 16	15	150.40	82.72	45.12
8	19 Oct 16	17	165.44	82.72	30.08
9	21 Oct 16	19	188.00	82.72	45.12
10	24 Oct 16	22	180.48	67.68	52.64
→	→	→	→	→	→
30	9 Dec 16	68	150.40	97.76	82.72
31	12 Dec 16	71	150.40	105.28	45.12
32	14 Dec 16	73	172.96	112.80	75.20
33	16 Dec 16	75	233.12	112.80	82.72
34	19 Dec 16	78	165.44	67.68	37.60
35	21 Dec 16	80	150.40	67.68	37.60
36	23 Dec 16	82	203.04	60.16	22.56
37	26 Dec 16	85	165.44	97.76	37.60
38	28 Dec 16	87	188.00	90.24	37.60
39	30 Dec 16	89	180.48	82.72	45.12

ตารางที่ ๑.๖ ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เจตาที่ไลโนเตรเจน เริ่มต้น 3 ต.ค - 30 ธ.ค 2559 ของการศึกษาศาสนที่ 2 และ 3

Item	D/M/Y	Periodes	Total Kjeldahl Nitrogen parameters (mg/L)		
			Influent	ANCO	Ze-GAC
1	3 Oct 16	1	50.68	43.82	24.92
2	5 Oct 16	3	54.60	46.20	25.76
3	7 Oct 16	5	47.60	41.44	34.72
4	10 Oct 16	8	54.60	44.24	28.84
5	12 Oct 16	10	56.28	53.76	29.96
6	14 Oct 16	12	52.36	49.56	34.16
7	17 Oct 16	15	48.44	42.56	33.32
8	19 Oct 16	17	49.00	43.96	33.32
9	21 Oct 16	19	48.44	42.84	32.48
10	24 Oct 16	22	53.48	43.12	33.60
↓	↓	↓	↓	↓	↓
30	9 Dec 16	68	55.83	50.80	47.89
31	12 Dec 16	71	53.18	47.10	44.45
32	14 Dec 16	73	53.18	45.78	38.90
33	16 Dec 16	75	55.83	49.22	41.01
34	19 Dec 16	78	51.33	47.36	43.13
35	21 Dec 16	80	47.63	43.39	38.90
36	23 Dec 16	82	52.66	50.94	47.89
37	26 Dec 16	85	50.80	47.10	42.87
38	28 Dec 16	87	52.66	48.69	42.07
39	30 Dec 16	89	46.32	41.59	37.11

ตารางที่ ง.7 ข้อมูลวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของฟอสฟอรัสรวม เริ่มต้น 3 ต.ค - 30 ธ.ค 2559 ของการศึกษาส่วนที่ 2 และ 3

Item	D/M/Y	Periodes	Total Phosphorus parameters (mg/L)		
			Influent	ANCO	Ze-GAC
1	3 Oct 16	1	5.15	4.39	3.24
2	5 Oct 16	3	4.96	4.53	3.57
3	7 Oct 16	5	5.06	4.37	3.47
4	10 Oct 16	8	4.79	4.44	3.64
5	12 Oct 16	10	5.47	4.51	3.63
6	14 Oct 16	12	5.31	4.87	3.60
7	17 Oct 16	15	5.29	4.90	3.49
8	19 Oct 16	17	4.57	4.06	3.37
9	21 Oct 16	19	4.24	3.53	2.91
10	24 Oct 16	22	5.09	3.66	3.29
			→	→	→
30	9 Dec 16	68	5.04	4.94	4.71
31	12 Dec 16	71	4.60	4.16	3.57
32	14 Dec 16	73	4.71	4.67	4.29
33	16 Dec 16	75	4.73	4.54	4.44
34	19 Dec 16	78	4.69	4.27	4.16
35	21 Dec 16	80	4.49	4.24	4.17
36	23 Dec 16	82	4.41	4.17	3.86
37	26 Dec 16	85	4.04	3.67	3.43
38	28 Dec 16	87	4.23	4.00	3.56
39	30 Dec 16	89	4.21	3.99	3.89



ตารางที่ จ.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์สีและจุดอินทรีย์ของการศึกษาสารซีไอโอไลท์ – ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด วันที่ 5 ต.ค – 28 ธ.ค 2559
ของนักศึกษาส่วนที่ 3

Item	D/M/Y	Periods	Color parameters (Pt/Co)		Total Coliforms parameters (MPN/100 ml)		Fecal Coliforms parameters (MPN/100 ml)	
			Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
1	5/10/2016	1	40	10	160,000	90,000	50,000	30,000
2	12/10/2016	8	30	10	160,000	90,000	50,000	30,000
3	20/10/2016	16	20	10	90,000	50,000	35,000	28,000
4	26/10/2016	22	15	5	90,000	50,000	35,000	28,000
5	2/10/2016	29	13	5	90,000	35,000	35,000	28,000
6	9/10/2016	36	20	10	90,000	35,000	50,000	35,000
7	16/10/2016	43	9	5	50,000	30,000	35,000	28,000
8	23/10/2016	50	15	10	50,000	35,000	30,000	28,000
9	30/10/2016	57	10	5	90,000	50,000	50,000	35,000
10	7/10/2016	64	7	5	50,000	35,000	35,000	30,000
11	14/10/2016	71	8	5	50,000	30,000	30,000	28,000
12	28/10/2016	85	15	8	50,000	35,000	35,000	30,000

ภาคผนวก ฉ
รายละเอียดคุณสมบัติน้ำและคุณสมบัติอากาศ



ตารางที่ ฉ.1 รายละเอียดคุณสมบัติน้ำ

Temperature	Density	Specific Heat
- t - (° C)	- ρ - (kg/m ³)	- C_p - (kJ/(kg K))
20	998.3	4.182
25	997.1	4.180
30	995.7	4.178
35	994.1	4.178
40	992.3	4.179
45	990.2	4.181
50	988	4.182

ที่มา : Water Thermodynamic Properties Thermal properties of water - density, freezing temperature, boiling temperature, latent heat of melting, latent heat of evaporation, critical temperature and more. Retrieved May 2,2017, from <http://www.EngineeringToolBox.com>

ตารางที่ ฉ.2 รายละเอียดคุณสมบัติอากาศ

Temperature	Density	Specific Heat
- t - (°C)	- ρ - (kg/m ³)	- C_p - (kJ/(kg K))
20	1.205	1.005
40	1.127	1.005
60	1.067	1.009

ที่มา: Air Properties Density, specific heat, thermal conductivity, expansion coefficient, kinematic viscosity and Prandtl's number – air temperature ranging -150 °C to 400 °C. Retrieved May 2,2017, from <http://www.EngineeringToolBox.com>

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเจริญ บัวเทศ เกิดเมื่อวันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2506 ที่อำเภอเมืองจังหวัดพิษณุโลก ปีการศึกษา 2526 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาช่างไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยเทคนิคพิษณุโลก อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ปีการศึกษา 25231 สำเร็จการศึกษาระดับการศึกษาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒพิษณุโลก อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ปีการศึกษา 2541 สำเร็จการศึกษาระดับการศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาอุตสาหกรรมศึกษา จากมหาวิทยาลัยนเรศวร อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก และปีการศึกษา 2554 เข้ารับการศึกษาต่อในระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

