

การประยุกต์ระบบ SBR ในการปรับปรุงประสิทธิภาพบำบัดอากาศเดิม: กรณีศึกษา

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

Application of the SBR System to Improve the Efficiency of Existing Aerated Lagoons: A Case Study of Prince of Songkla University, Hat Yai campus

พนา เมฆตรง^{1,*}

¹ กองกายภาพและสิ่งแวดล้อม วิทยาเขตหาดใหญ่ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: pana.m0238@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายที่ใช้ดำเนินงานในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Sequencing Batch Reactor (SBR) ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ซึ่งทำการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียรวมจากเดิมเป็นระบบบ่อเติมอากาศประกอบด้วย 1) บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) และ 2) บ่อฝัง (Oxidation Pond) สามารถรองรับปริมาณน้ำเสียได้สูงสุดจำนวน 500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เปิดใช้งานมาแล้วมากกว่า 40 ปี ให้เป็นระบบ Sequencing Batch Reactor (SBR) ซึ่งสามารถรองรับน้ำเสียได้สูงสุดจำนวน 1,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในพื้นที่บ่อบำบัดน้ำเสียเดิมขนาด 2,244 ตารางเมตร โดยการปรับปรุงประกอบด้วย 1) การลอกตะกอนบ่อเติมอากาศ 2) การคาดผนังคอนกรีต 3) ติดตั้งปั๊มเติมอากาศ 4) ติดตั้งใบพัดเติมอากาศในบ่อฝัง และ 5) ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบคุณภาพน้ำก่อนปล่อยสู่ลำรางสาธารณะ ปรากฏว่าผลการวิเคราะห์ค่า BOD และ TKN ของน้ำเสียก่อนปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยในช่วงเปิดภาคการศึกษาเท่ากับ 64.06, 52.40 มิลลิกรัม/ลิตร และช่วงปิดภาคการศึกษาเท่ากับ 50.47, 41.53 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ หลังการปรับปรุงพบค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการลดค่า BOD และ TKN คิดเป็นร้อยละ 72 และ 37.01 ตามลำดับ โดยมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเป็นเงินจำนวน 1.65 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย ซึ่งประกอบไปด้วย 1) ค่าพลังงานไฟฟ้า 0.98 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย 2) ค่าวิเคราะห์คุณภาพน้ำ 0.40 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย และ 3) ค่าสารเคมีสำหรับปรับปรุงคุณภาพน้ำ 0.27 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย

คำสำคัญ: ความคุ้มค่า, การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย, สภาพการใช้งานภายในมหาวิทยาลัย, ระบบบำบัดน้ำเสียรวม, Sequencing Batch Reactor (SBR), การคิดค่าใช้จ่าย

Abstract

This research aims to study the efficiency and operating costs of the Sequencing Batch Reactor (SBR) wastewater treatment system at Prince of Songkla University, Hat Yai Campus. The system was upgraded from the original Aerated Lagoon system,

which consisted of two ponds: 1) an aeration pond and 2) a maturation pond. The original system could handle a maximum wastewater volume of 500 cubic meters per day and had been in operation for over 40 years. The upgrade transformed it into an SBR system capable of treating up to 1,000 cubic meters per day within the same treatment area of 2,244 square meters. The upgrade process included 1) sludge removal, 2) concrete wall reinforcement, 3) installation of aeration pumps, 4) installation of paddle aerators in the maturation pond, and 5) installation of water quality monitoring equipment before discharge into public waterways. The results of wastewater analysis revealed that the average BOD and TKN concentrations during the academic semester were 64.06 and 52.40 mg/L, respectively, while during the semester break, the concentrations averaged 50.47 and 41.53 mg/L, respectively. After the upgrade, the system demonstrated average reduction efficiencies of 72% for BOD and 37.01% for TKN. The operating cost of the upgraded wastewater treatment system was calculated at 1.65 THB per cubic meter, comprising 1) electricity costs of 0.98 THB per cubic meter, 2) water quality analysis costs of 0.40 THB per cubic meter, and 3) chemical costs for water quality improvement at 0.27 THB per cubic meter.

Keywords: Cost-efficiency, Upgrading WWTP, University setting, Wastewater Treatment, Sequencing Batch Reactor (SBR), Treatment Cost Analysis

1. บทนำ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่เป็นสถาบันอุดมศึกษา มีอาคารเรียน แพลตฟอรม์ที่พักบุคลากร หอพักนักศึกษา และ โรงพยาบาล สงขลานครินทร์ มีการใช้น้ำประปาสำหรับการอุปโภคบริโภคเพิ่มขึ้นจากการขยายพื้นที่และกิจกรรมการเรียนการสอน ในปี 2567 มีปริมาณการใช้

น้ำประปาคิดเป็น 3,500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพิ่มจากปี 2566 คิดเป็นร้อยละ 24 ซึ่งส่งผลต่อปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น น้ำเสียจากทุกกิจกรรมภายในมหาวิทยาลัยฯ ไหลเข้าระบบบำบัดน้ำเสียรวมก่อนระบายออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ บ่อบำบัดน้ำเสียรวมของมหาวิทยาลัยฯ มีสองจุดคือ บ่อบำบัดน้ำเสียรวมของโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ และ บ่อบำบัดน้ำเสียรวมของมหาวิทยาลัยฯ

ระบบบำบัดน้ำเสียรวมของมหาวิทยาลัยฯ ก่อสร้างในปีพ.ศ. 2510 รองรับน้ำเสีย 500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีลักษณะเป็นบ่อดินขุด ออกแบบเป็นระบบบ่อเติมอากาศและบ่อฝั้ววางต่อกันตามลำดับ การทดสอบคุณภาพทั้งประจำปีพ.ศ. 2559 - 2564 พบว่าคุณภาพน้ำทั้งที่ผ่านการบำบัดไม่ผ่านตามเกณฑ์น้ำทิ้ง [1] สาเหตุเกิดจากสภาพบ่อบำบัดน้ำเสียรวมมีสภาพไม่พร้อมใช้งาน มีตะกอน วัชพืชขึ้นปกคลุมผิวบ่อ บั่บเต็มอากาศ ขำรด และมีน้ำฝนไหลเข้าบ่อบำบัดน้ำเสีย ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 บ่อบำบัดน้ำเสียรวมก่อนปรับปรุง

รายงานการศึกษาการประเมินความเหมาะสมและออกแบบเบื้องต้นระบบบำบัดน้ำเสียรวม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ 2560 [2] ระบุว่าปริมาณน้ำเสียไหลเข้าบ่อบำบัดน้ำเสียรวมตามตารางที่ 1 มีค่า 795 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพของบ่อเติมอากาศในการลดสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียมีค่าคิดเป็นร้อยละ 45 และไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นแอลร้อยละ 39.8 ส่วนบ่อฝั้วมีสารแขวนลอยพวกสาหร่ายอยู่ในปริมาณมากทำให้ค่า BOD ในน้ำมีค่าสูงกว่าน้ำที่ไหลเข้า เมื่อพิจารณาคุณภาพน้ำทั้งที่ตามตารางที่ 2 ค่าความถ่วงสารแขวนลอยในน้ำเสียตามหลักของสมมูลมวลสาร [3] พบว่าภาระบรรทุกสารแขวนลอยในบ่อเติมอากาศและบ่อฝั้วคิดเป็น 48.89 และ 85.46 กิโลกรัมต่อ/วันตามลำดับ ด้วยภาระบรรทุกสารแขวนลอยของบ่อฝั้วมีค่ามากกว่าจึงส่งผลให้ความต้องการใช้ออกซิเจนภายในบ่อฝั้วมีค่าสูงตามกัน ซึ่งแปรผันตรงกับ BOD ในบ่อฝั้วและพบว่าออกซิเจนละลายน้ำสูงในช่วงกลางวันและต่ำในช่วงกลางคืน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ปลาตายภายในบ่อ รายงานการศึกษาระบุว่าปริมาณน้ำเสียมีปริมาณมากเกินไปกว่าระบบบำบัดน้ำเสียเดิมจะรองรับน้ำเสียได้ โดยมีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงเกินกว่าที่บ่อเติมอากาศและบ่อฝั้วรองรับได้ สาเหตุจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของมหาวิทยาลัยฯ มีพื้นที่จำกัดไม่สามารถขยายตัวได้ มีการทับถมของตะกอนภายในบ่อ ขนาดของมอเตอร์เติมอากาศมีขนาดไม่เหมาะสม ส่งผลให้คุณภาพน้ำทิ้งที่ปล่อยออกไม่ได้ตามมาตรฐาน มหาวิทยาลัยฯ สมควรปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียรวม โดยเสนอเป็น 2 ทางเลือกคือระบบตะกอนเร่งแบบยัดเวลา (Extended Aeration Activated Sludge) และระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (Membrane

Bioreactor: MBR) เพื่อลดขนาดพื้นที่บ่อบำบัดเสียรวมและนำพื้นที่ไปใช้ในกิจกรรมของมหาวิทยาลัย เนื่องด้วยพื้นที่บ่อบำบัดน้ำเสียรวมปัจจุบันราคาประเมินที่ดินโดยกรมธนารักษ์ประจำปี 2567 มีมูลค่าประเมินที่ดินของจังหวัดสงขลาอยู่ในช่วง 200 - 400,00 บาทต่อตารางวา ซึ่งเหมาะสำหรับพัฒนาเป็นพื้นที่สร้างรายได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวการพัฒนาบ่อบำบัดน้ำเสียรวมจึงจำเป็นต้องพร้อมรับการเปลี่ยนแปลงตามนโยบายของมหาวิทยาลัยฯ โดยกำหนดกรอบการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียรวมให้อยู่ในพื้นที่เดิม ใช้อุปกรณ์เดิมหรือเพิ่มระบบเท่าที่จำเป็น ให้รองรับน้ำเสียและบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพน้ำทั้งผ่านตามเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด

ตารางที่ 1 การประเมินหน่วยบำบัดน้ำเสียแต่ละหน่วยในระบบบำบัดน้ำเสียรวม

หน่วยปฏิบัติการ	บ่อเติมอากาศ	บ่อฝั้ว
ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	795	795
พื้นที่ผิวบ่อ (ตร.ม)	2,509	2,150
ปริมาตรบ่อ (ลบ.ม)	3,708	3,430
ระยะเวลาเก็บ (วัน)	4.35	3.99
ความลึก (เมตร)	1.47	0.96
ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อพื้นที่ผิว (กรัม บีโอดี/ตร.ม.วัน)	18.3	20

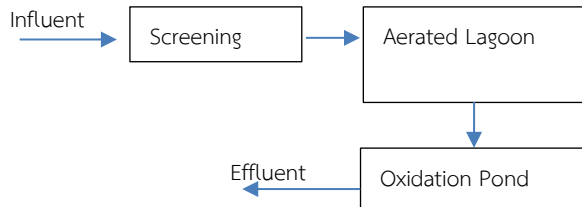
ตารางที่ 2 การประเมินคุณภาพน้ำของระบบบำบัดน้ำเสียรวม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	น้ำเข้า	น้ำออก	มาตรฐานน้ำทิ้ง
pH	8.05	8.55	5.5-9
บีโอดี (mg/L)	58	44.6	< 20.0
สารแขวนลอย (mg/L)	61.5	107.5	< 30.0
สารที่ละลายน้ำ (mg/L)	352.5	337	< 500
ซัลไฟด์ (mg/L)	0.8	ND	<1.0
TKN (mg/L)	36.26	22.4	< 35.0
น้ำมันและไขมัน (mg/L)	28.6	29	< 20.0

กองกายภาพและสิ่งแวดล้อมได้รับจัดสรรงบประมาณประจำปี 2566 จากมหาวิทยาลัยเป็นเงิน 5,400,000 บาท เพื่อปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียรวมและภูมิทัศน์โดยรอบมีรายละเอียดงานแบ่งออกเป็น 1) การลอกตะกอนบ่อเติมอากาศ และบ่อฝั้ว 2) การตาดผนังคอนกรีตบ่อบำบัดน้ำเสียพร้อมทำทางเดินรอบบ่อ 3) ปรับปรุงห้องปั๊มสูบน้ำและติดตั้งปั๊มเติมอากาศ 4) ติดตั้งใบพัดเติมอากาศในบ่อฝั้ว และ 5) ก่อสร้างอาคารควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบคุณภาพน้ำเบื้องต้นก่อนปล่อยสู่สาธารณะ การปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียรวมครั้งนี้ได้นำแนวคิด [4] [5] การบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor) ที่มีจุดเด่นที่สำคัญคือ สามารถรองรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อพื้นที่ผิวในช่วงที่กว้างคือ 0.08 - 0.24 กิโลกรัม บีโอดี/ตร.ม.วัน และใช้พื้นที่ไม่มากเนื่องจากรวมบ่อเติมอากาศและบ่อตกตะกอนอยู่ด้วยกัน นอกจากนี้ระบบดังกล่าวยังสามารถทำให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน เพื่อลดไนโตรเจนในน้ำลงได้ [4] การปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวจะมีลักษณะคล้ายระบบเติมอากาศเดิมที่ใช้งานอยู่จึงไม่สร้างความยุ่งยากต่อการบำรุงรักษาในอนาคต

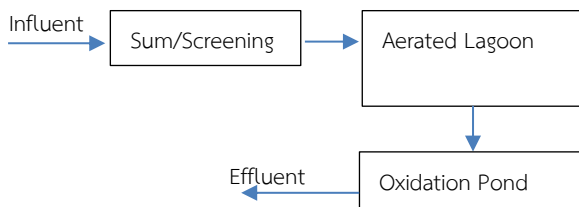
2. วิธีดำเนินการ

ระบบบำบัดน้ำเสียเดิมของมหาวิทยาลัยฯ น้ำเสียจะไหลเข้า (Influent) ผ่านชุดตะแกรงดักขยะ (Screening) ไหลลงบ่อเติมอากาศตามรูปที่ 2 ซึ่งมี บั้มเติมอากาศขนาด 5.5 kW จำนวน 2 ตัว ทำงานครั้งละ 1 ตัว สลับกันทุก 8 ชั่วโมง น้ำเสียส่วนเกินจะไหลต่อไปที่บ่อฝั่งก่อนปล่อยน้ำเสียออก (Effluent) สู่อ่างสาธารณะ



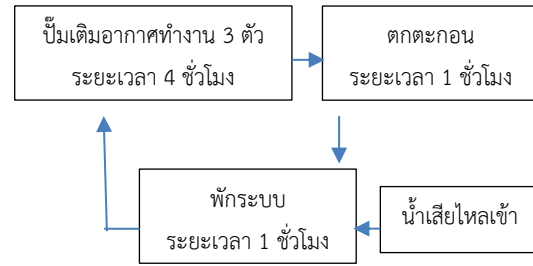
รูปที่ 2 แผนผังระบบบำบัดแบบเติมอากาศเดิม

การปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียรวมของมหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการแยกเป็นสองส่วนคือ 1) การปรับปรุงทางกายภาพ ประกอบด้วย การลอกตะกอนในบ่อ การตาดผนังคอนกรีตบ่อ และการซ่อมอุปกรณ์ที่ชำรุด 2) การประยุกต์ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยดัดแปลงมาเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor) [6] แสดงดังรูปที่ 3 เริ่มจากน้ำเสียไหลเข้า (Influent) บ่อรวมน้ำเสีย (Sum) ซึ่งออกแบบมาให้มีความลึก 3 เมตร ทำหน้าที่ในการดักตะกอนหนักและเป็นบ่อแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ (Screening) ก่อนที่น้ำเสียไหลเข้าสู่บ่อเติมอากาศซึ่งทำงานแบบ SBR cycle ซึ่งควบคุมการทำงานของบั้มเติมอากาศตามเวลาที่กำหนด น้ำเสียส่วนเกินจะไหลออกเข้าสู่บ่อฝั่ง (Oxidation Pond) ซึ่งมีความลึก 1.50 เมตร มีเครื่องเติมอากาศแบบกังหันพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อช่วยเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำก่อนปล่อยน้ำเสียออก (Effluent) สู่อ่างสาธารณะ



รูปที่ 3 แผนผังการประยุกต์ระบบบำบัดแบบเติมอากาศเดิมให้เป็นระบบบำบัดเอสบีอาร์

กำหนด [7] SBR cycle ภายในบ่อเติมอากาศใช้ระยะเวลาในการทำงาน 6 ชั่วโมงต่อ 1 วนรอบ ตามรูปที่ 4 คือ บั้มเติมอากาศทำงานพร้อมกัน 3 ตัว เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง หยุดเติมอากาศ 2 ชั่วโมง แบ่งเป็นระยะเวลาคักตะกอน 1 ชั่วโมง และระยะเวลาพักระบบ 1 ชั่วโมง ในช่วงระยะเวลาพักระบบจะสูบน้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสียเข้ามาบ่อเติมอากาศ เพื่อดันน้ำให้ไหลไปบ่อฝั่งต่อไป



รูปที่ 4 วนรอบการบำบัดน้ำเสียภายในบ่อเติมอากาศ

2.1 พื้นที่ศึกษา

ระบบบำบัดน้ำเสียรวมของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ตั้งอยู่ในตำแหน่งตามพิกัดภูมิศาสตร์ที่ 665276.80 ตะวันออก 775488.96 เหนือ ดังรูปที่ 3 มีพื้นที่รวม 7,656 ตารางเมตร ประกอบด้วย บ่อรวมน้ำเสีย (Sum/ Screening) บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) บ่อฝั่ง (Oxidation Pond) และอาคารสำนักงาน



รูปที่ 3 พื้นที่บ่อบำบัดน้ำเสียรวม

2.2 รายละเอียด

2.2.1 บ่อรวมน้ำเสีย (Sum/ Screening)

บ่อรวมน้ำเสีย (Sum/ Screening) เป็นบ่อดักตะกอนหนักและดักขยะขนาดใหญ่ ตามรูปที่ 4 มีขนาด (ก x ย x ล) 2 x 3 x 3 เมตร รับน้ำเสียรวมที่ไหลมาตามระบบท่อของมหาวิทยาลัยฯ ภายในบ่อรวมน้ำเสียประกอบด้วยบั้มดูดน้ำเสียขนาด 100 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงแบบจุ่มน้ำ จำนวน 1 ตัว ทำงานตามระดับน้ำที่ตั้งไว้ บ่อรวมน้ำเสียจะมีการเพิ่มปูนขาวเพื่อคอยปรับสภาพน้ำให้อยู่ในช่วง 7.5 – 7.8 และมีการเติมจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงเป็นประจำสัปดาห์ โดยเติม 1 ลิตรต่อน้ำ 200 ลิตร



รูปที่ 4 บ่อรวมน้ำเสีย (Sum / Screening)

2.2.2 บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon)

บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) มีขนาด(ก x ย x ล) 33 x 69 x 6 เมตร ตามรูปที่ 5 มีพื้นที่ผิวหน้า 2,271 ตารางเมตร มีความจุบ่อ 13,662 ลูกบาศก์เมตร ภายในบ่อเติมอากาศมีปั๊มเติมอากาศแบบให้อากาศใต้ผิวน้ำ (Submersible Aerator) จำนวน 3 ชุดขนาด 7.5 kW อัตราการให้อากาศ 124 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อตัว ควบคุมด้วยชุดควบคุมเวลา



รูปที่ 5 บ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon)

การทำงานของปั๊มเติมอากาศจะกำหนดให้ทำงานตามช่วงเวลา ซึ่งจะกำหนดให้ปั๊มเติมอากาศทำงานพร้อม และหยุดเดินพร้อมกันทั้ง 3 ชุด กำหนดหยุดในช่วงเวลา 02.00 – 04.00 น. 08.00 – 10.00 น. 14.00 – 16.00 น. และ 20.00 – 22.00 น. ของทุกวัน เพื่อให้กระบวนการตกตะกอน และเกิดกระบวนการดีไนริฟิเคชัน ภายในบ่อเติมอากาศ

2.2.3 บ่อผึ่ง (Oxidation Pond)

บ่อผึ่ง (Oxidation Pond) มีขนาด (ก x ย x ล) 26 x 69 x 1.5 เมตร ตามรูปที่ 7 มีพื้นที่ผิวหน้า 1,800 ตารางเมตร มีความจุบ่อ 2,700 ลูกบาศก์เมตร ภายในบ่อดัดตั้งใบพัดเติมอากาศพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 1 ชุดทำหน้าที่บำบัดน้ำเสียต่จากบ่อเติมอากาศโดยใช้กระบวนการเติมอากาศแบบธรรมชาติซึ่งอาศัยสาหร่ายในการบำบัดน้ำเสีย โดยการกำหนดความลึกไม่เกิน 1.5 เมตร เพื่อให้แสงแดดส่องถึงก้นบ่อ



รูปที่ 7 บ่อผึ่ง (Oxidation Pond)

2.2.4 สรุปรายละเอียดการปรับปรุง

การปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยสรุปเป็นรายละเอียดการปรับปรุงได้ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปรายละเอียดการปรับปรุงระบบบำบัดเสียรวม

หน่วยปฏิบัติการ	รายละเอียด
บ่อรวมน้ำเสีย	
ปริมาตรบ่อ (ลบ.ม)	15
ความลึก (เมตร)	3
ขนาดปั๊มดูดตะกอน (kW)	5.5
บ่อเติมอากาศ	
พื้นที่ผิวบ่อ (ตร.ม)	2,271
ปริมาตรบ่อ (ลบ.ม)	13,662
ความลึก (เมตร)	5.0
ขนาดปั๊มเติมอากาศ (kW)	22.5
บ่อผึ่ง (Oxidation Pond)	
พื้นที่ผิวบ่อ (ตร.ม)	1,800
ปริมาตรบ่อ (ลบ.ม)	2,700
ความลึก (เมตร)	1.5

2.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

2.3.1 การเก็บน้ำเสียเพื่อทำการวิเคราะห์

เก็บข้อมูลการวิเคราะห์น้ำเสียในช่วงเดือนตุลาคม 2566 ถึง เดือน มีนาคม 2568 โดยเก็บน้ำเสียเดือนละ 1 ครั้งในช่วงวันที่ 1-5 ของทุกเดือน ซึ่งจะเก็บน้ำเสียที่ทางเข้าระบบบำบัดน้ำเสียรวม และทางออกก่อนปล่อยสู่ลำรางสาธารณะ นำส่งให้ศูนย์เครื่องกลอง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เป็นผู้ทำการวิเคราะห์

2.3.2 พารามิเตอร์คุณสมบัติน้ำเสีย

พารามิเตอร์คุณสมบัติ น้ำเสีย ใช้ตาม ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำจากอาคารบางประเภทและบางขนาด ลงวันที่ 29 ธันวาคม 2548 ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์คุณสมบัติน้ำเสีย

ค่าที่ต้องตรวจวัด	ค่ามาตรฐาน
ความเป็นกรดและด่าง (pH)	5-9
สารที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolved Solids)	ไม่เกิน 500 mg/L
สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 30 mg/L
น้ำมันและไขมัน (Oil&Grease)	ไม่เกิน 20 mg/L
ซัลไฟด์ (Sulfide)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (TKN)	ไม่เกิน 35 mg/L

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์คุณสมบัติน้ำเสีย (ต่อ)

ค่าที่ต้องตรวจวัด	ค่ามาตรฐาน
บีโอดี (BOD)	ไม่เกิน 20 mg/L
ซีโอดี (COD)	-

2.3.3 การคำนวณประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสีย

สูตรการคำนวณหาประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียดังสมการที่ 1

$$\text{Efficiency (\%)} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

เมื่อ C_{in} = ค่าความสกปรกของน้ำเสียขาเข้า (mg/L)

C_{out} = ค่าความสกปรกของน้ำทิ้งที่บำบัดแล้ว (mg/L)

3. ผลการศึกษา

การวิเคราะห์ค่า BOD₅ ของระบบบำบัดน้ำเสียรวมก่อนและหลังทำการปรับปรุง ตามตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD₅ ที่ปล่อยออกสู่สาธารณะ ด้วยวิธี t-test มีค่า p-value = 0.014 น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 5 ค่า BOD₅ ของระบบบำบัดน้ำเสียรวมก่อนและหลังปรับปรุง

เดือน	BOD ₅ (mg/L)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
ต.ค.	33.5	19.5
พ.ย.	58	9.75
ธ.ค.	15	12
ม.ค.	35	17.5
ก.พ.	45	17.5
มี.ค.	32	20
เม.ย.	17	27.3
พ.ค.	50	19
มิ.ย.	28	12
ก.ค.	25	19.5

หมายเหตุ : BOD₅ ก่อนปรับปรุง (ปี 2564 – 2565) , BOD₅ หลังปรับปรุง (ปี 2566 – 2567)

ลักษณะน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบบำบัดน้ำเสียรวมของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ มีลักษณะน้ำเสียสัมพันธ์กับการเปิด ปิดภาคการศึกษา แสดงตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลักษณะน้ำเสียของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

พารามิเตอร์	เปิดภาคการศึกษา	ปิดภาคการศึกษา
ความเป็นกรดและด่าง	7.57±0.52	7.36±0.26
สารที่ละลายได้ทั้งหมด (mg/L)	332.86±102.63	323±76.98
สารแขวนลอย (mg/L)	71.07±25.49	56.86±3.30
น้ำมันและไขมัน (mg/L)	27.86±13.11	29.29±5.50
ซัลไฟด์ (mg/L)	0.12±0.16	0.06±0.03
ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (mg/L)	52.40±17.41	41.53±10.55
บีโอดี (mg/L)	64.06±23.89	50.47±16.78
ซีโอดี (mg/L)	206.43±83.06	155.29±27.97
อัตราการไหลเข้าเฉลี่ย (ลบ.มต่อวัน)	1,100	550

การควบคุมการทำงานของระบบบำบัดอากาศภายในบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ให้ทำงานแบบ SBR cycle ร่วมกับบ่อฝัง (Oxidation Pond) พบว่าคุณภาพน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดก่อนปล่อยสู่สาธารณะมีค่าตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัด

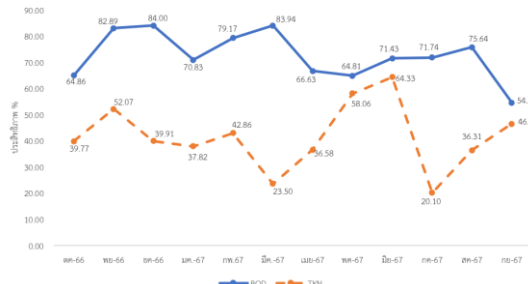
พารามิเตอร์	เปิดภาคการศึกษา	ปิดภาคการศึกษา
ความเป็นกรดและด่าง	7.71±0.41	7.78±0.46
สารที่ละลายได้ทั้งหมด (mg/L)	272.79±93.93	236.86±69.19
ตะกอนหนัก (mg/L)	36.86±30.21	32.43±13.49
น้ำมันและไขมัน (mg/L)	2.15±2.47	3.29±2.87
ซัลไฟด์ (mg/L)	ไม่พบ	ไม่พบ
ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (mg/L)	37.92±13.83	25.35±11.42
บีโอดี (mg/L)	16.01±5.40	15.54±6.25
ซีโอดี (mg/L)	107.57±36.88	100.86±21.67

การปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียให้ทำงานแบบ SBR cycle ร่วมกับบ่อฝังมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสีย (%)
สารที่ละลายได้ทั้งหมด (mg/L)	33.38
สารแขวนลอย (mg/L)	14.34
ตะกอนหนัก (mg/L)	72.22
น้ำมันและไขมัน (mg/L)	90.06
ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (mg/L)	37.01
บีโอดี (mg/L)	73.63
ซีโอดี (mg/L)	44.24

พิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในบางพารามิเตอร์ คือ BOD₅ และ TKN ตามรูปที่ 8 พบประสิทธิภาพการลด BOD₅ อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ในช่วงเปิดภาคการศึกษาและปิดภาคการศึกษาแต่จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงฤดูฝน (ตุลาคม - ธันวาคม) หรือมีฝนตกหนัก สาเหตุมาจากมีน้ำฝนไหลเข้าทำให้ น้ำเสียเจือจาง ส่วนประสิทธิภาพการลด TKN จะสูงในช่วงปิดภาคการศึกษา (เมษายน - มิถุนายน) และลดลงในช่วงฝนตกหนักสาเหตุจากสภาวะปัจจัยในบ่อไม่เหมาะสมทำให้กระบวนการดีไนริฟิเคชันไม่สมบูรณ์ในบางช่วงเวลา โดยเฉพาะช่วงฤดูฝน



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพในการลด BOD₅ และ TKN

ปีงบประมาณ 2567 มีปริมาณน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบบำบัดน้ำเสียรวมคิดเป็น 294,614 ลูกบาศก์เมตร สามารถสรุปค่าใช้จ่ายสำหรับควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียรวมประจำปี 2567 ในด้านต่างๆ ตามตารางที่ 9 และแสดงการใช้ประโยชน์จากการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียตามตารางที่ 10

ตารางที่ 9 ค่าใช้จ่ายในระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ลำดับที่	รายละเอียด	จำนวน	เป็นเงิน (บาท)
1	งานวิเคราะห์น้ำเสีย	12 ครั้ง	116,640
2	จุลินทรีย์เติมบ่อเกราะต้นทาง	100 ซอง	9,200
3	ค่าปูนขาวปรับสภาพน้ำ	60 กระสอบ	27,000
4	จุลินทรีย์เติมในบ่อรวมน้ำเสีย	100 ซอง	42,800
5	ค่าไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสีย (kWh)	57,896.7	289,483.5
รวมค่าใช้จ่าย			485,123.5

ตารางที่ 10 การใช้ประโยชน์จากการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสีย

ลำดับที่	รายละเอียด	จำนวน	เป็นเงิน (บาท)
1	ลดการใช้น้ำประปาเพื่อรดน้ำต้นไม้ (ลูกบาศก์เมตรต่อปี)	4,500	108,000
2	ป้องกันการถูกฟ้อง/ถูกปรับ	ต่อปี	200,000
3	ประกอบมาตรฐานโรงพยาบาลและบริการสุขภาพ (HA)	5 หน่วยงานต่อปี	-
4	ศึกษาดูงาน	2 ครั้งต่อปี	-
รวมเป็นเงิน			308,000

4. บทสรุปและอภิปรายผล

การศึกษานี้มุ่งเน้นการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียจากระบบบ่อเติมอากาศแบบดั้งเดิมให้เป็นระบบ Sequencing Batch Reactor (SBR) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและรองรับปริมาณน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาลักษณะน้ำเสียของมหาวิทยาลัยมี BOD₅ ในช่วงเปิดและปิดภาคการศึกษามีค่า 64.06 mg/L และ 50.47 mg/L ตามลำดับ ส่วน TKN ในช่วงเปิดและปิดภาคการศึกษามีค่า 52.40 mg/L และ 41.53 mg/L ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สูงมาก และอัตราการไหลของน้ำเสียไม่คงที่แปรผันตามการเปิด และปิดภาคการศึกษา ดังนั้นการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียเดิมโดยการควบคุมการทำงานของระบบบ่มเติมอากาศภายในบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ให้ทำงานเป็นระบบ SBR ร่วมกับบ่อฝัง (Oxidation Pond) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ [8] และผลการวิเคราะห์ค่า BOD₅ ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเดิมกับระบบบำบัดน้ำ

เสียที่ปรับปรุงใหม่ด้วยวิธี t-test มีค่า p-value = 0.014 น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สรุปว่าการทำงานของบ่มเติมอากาศแบบ SBR cycle ร่วมกับบ่อฝัง (Oxidation Pond) สามารถบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และสามารถเพิ่มกำลังการรองรับน้ำเสียจาก 500 ลูกบาศก์เมตรต่อวันเป็น 1,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันในพื้นที่บ่อเดิม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกทางชีวภาพ (BOD₅) และค่าไนโตรเจนรวม (TKN) เฉลี่ยที่ร้อยละ 72 และ 37.01 ตามลำดับ

การปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียรวมของมหาวิทยาลัยในพื้นที่ 7,656 ตารางเมตร ในงบประมาณ 5,400,000 บาท ประกอบด้วยงานการขุดลอกบ่อบำบัดน้ำเสีย งานดัดแปลงคอนกรีตบ่อบำบัดน้ำเสีย และการประยุกต์การทำงานของบ่อเติมอากาศให้ทำงานเป็นช่วงเวลาตามวิธีการบำบัดน้ำเสียแบบ SBR ต้องควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียประกอบด้วย

- 1) ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (Organic Loading) เนื่องจากลักษณะน้ำเสียของมหาวิทยาลัยจะมีการแปรผันตรงกับการเปิด ปิดภาคเรียน ทำให้ค่าของสารอินทรีย์ในน้ำเสียไม่คงที่ เพื่อให้จุลินทรีย์สามารถขยายตัวได้สม่ำเสมอ จึงเติมจุลินทรีย์เพิ่มเข้าไปในระบบบ่อเติมอากาศ เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศ ทดแทนจุลินทรีย์ที่ไหลหลุดออกไปสู่บ่อฝัง
- 2) ค่าความเป็นกรด - ด่าง (Positive Potential of Hydrogen Ions: pH) ทำการควบคุมโดยการเติมปูนขาว โดยจะเติมในบ่อรวมน้ำเสีย เพื่อให้ค่า pH ของน้ำเสียที่ไหลเข้าบ่อเติมอากาศมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 7.5 - 7.8 นอกจากนั้นยังช่วยตกตะกอนสารเป็นพิษ (Toxic) ไม่ให้หลุดเข้าไปในบ่อเติมอากาศซึ่งจะส่งผลเสียต่อจุลินทรีย์ภายในบ่อเติมอากาศ การควบคุมค่าความเป็นกรด - ด่าง ในบ่อเติมอากาศใช้ระบบ IOT ตามรูปที่ 9 ที่ติดตั้งไว้เพื่อช่วยตรวจสอบคุณภาพน้ำเสียเบื้องต้น



รูปที่ 9 ระบบ IOT ตรวจสอบคุณภาพน้ำเสียเบื้องต้น

- 3) การกวน (Stirring) ใช้บ่มเติมอากาศแบบให้อากาศใต้ผิวน้ำ (Submersible Aerator) จำนวน 3 ชุด วางห่างกัน 20 เมตร เพื่อเติมอากาศและกวนน้ำให้เข้ากัน
- 4) ระยะเวลาการบำบัด (Detention Time) กำหนดการเดินบ่มเติมอากาศ 3 ตัวพร้อมกัน โดยเลือกกำหนดหยุดบ่มเติมอากาศในช่วง 02.00 - 04.00 น 08.00 - 10.00 น 14.00 - 16.00 น และ

20.00 – 22.00 น ของทุกวัน เพื่อให้เกิดการตกตะกอนเนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณน้ำเสียไหลเข้ามาในปริมาณน้อยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย

การควบคุมปัจจัยที่สัมพันธ์กับการบำบัดน้ำเสียแบบ SBR ภายในบ่อเติมอากาศของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียรวมเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียมีค่าไม่คงที่สาเหตุจากระบบท่อน้ำเสียนำน้ำฝนไหลเข้าเมื่อเกิดฝนตกหนัก น้ำฝนจะนำจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศหลุดออกไปจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง ซึ่งจะเกิดปัญหาในช่วงฤดูฝน ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียรวมคิดเป็น 1.65 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย ตามตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียรวม

ลำดับที่	รายละเอียด	เป็นเงิน (บาท/ลบ.ม น้ำเสีย)
1	งานวิเคราะห์น้ำเสีย	0.40
2	สารเคมีและจุลินทรีย์	0.27
3	ค่าไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสีย	0.98
รวมเป็นเงิน		1.65

ค่าดำเนินการในระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยฯ ที่ควบคุมการทำงานของระบบบ่มเติมอากาศภายในบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ให้ทำงานแบบ SBR ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของระบบบำบัดน้ำเสียในชุมชนทั่วไปที่มีค่าใช้จ่ายระหว่าง 2 - 5 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยต้นทุนหลักของระบบบำบัดน้ำเสียรวมประกอบด้วยค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าวิเคราะห์คุณภาพน้ำและค่าสารเคมีสำหรับปรับปรุงคุณภาพน้ำ ซึ่งมีสัดส่วนที่เหมาะสมและสามารถควบคุมได้ ส่วนการวิเคราะห์แนวทางเลือกอื่น ในการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียรวมของมหาวิทยาลัยฯ สรุปได้ตามตารางที่ 12 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบ Membrane Bioreactor (MBR) และ Extended Aeration Activated Sludge พบว่าที่มีต้นทุนสูงกว่า ระบบ SBR จึงเป็นแนวทางเลือกที่เหมาะสมกับบริบทของมหาวิทยาลัยที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณและพื้นที่

ตารางที่ 12 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียรวม

ลำดับที่	รายละเอียด	เป็นเงิน (บาท)
1	Extended Aeration Activated Sludge	20,000,000
2	Membrane Bioreactor	25,000,000
3	Sequencing Batch Reactor	5,400,000

ระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ดัดแปลงบ่อเติมอากาศเดิมให้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบ SBR นั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดค่า BOD และ TKN ได้สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 83.94 และ 64.33 ตามลำดับ มีปริมาณน้ำเสียไหลเข้าในช่วง 550 - 1,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีน้ำฝนไหลเข้ามาผสมค่า BOD₅ ของน้ำเสียอยู่ในช่วงไม่เกิน 100 mg/L สามารถบำบัดน้ำเสียได้

ตามเกณฑ์คุณภาพน้ำทิ้ง โดยมีงบประมาณในการดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย 1.65 – 2 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย การพัฒนาในอนาคตคือการหาช่วงเวลา [9] ในการเติมอากาศที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (TKN)

ดังนั้นการประยุกต์ระบบ SBR จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียเดิมในสถาบันการศึกษาและชุมชนอื่น ๆ [10] ที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ ระบบ SBR สามารถเพิ่มกำลังการบำบัดน้ำเสียโดยไม่ต้องขยายพื้นที่ และลด BOD₅ ได้อย่างมีนัยสำคัญ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธนิยา เกาศล หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ในการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยความเรียบร้อย ขอขอบพระคุณรองอธิการบดีวิทยาเขตหาดใหญ่ ผู้อำนวยการกองกายภาพและสิ่งแวดล้อม วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่อนุญาตและให้ความอนุเคราะห์การใช้พื้นที่ วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2548). *ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด* (ประกาศลงวันที่ 7 พฤศจิกายน 2548), ราชกิจจานุเบกษา, เล่ม 122, ตอนที่ 125ง.
- [2] วีสสา คงนคร (2560). รายงานการศึกษาความเหมาะสมและออกแบบเบื้องต้นระบบบำบัดน้ำเสีย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [3] อรรถศักดิ์ จารีย์ (2557). ปฏิบัติการเฉพาะหน่วย 1, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี.
- [4] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2538). วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มิตรนรากรพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- [5] ขวัญเนตร สมบัติสมภพ (2551). การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเอสบีอาร์, *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 3, ก.ย. - ธ.ค., หน้า 255.
- [6] Devender Kumar (2022). Sequencing batch reactor: A promising technology in wastewater treatment. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 10(8), 1702–1706.
- [7] มั่นสิน ตันจุลเวคม และ มั่นรักษ ตันจุลเวคม (2547). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- [8] ศิริประภา แจ้งกรณ์ และ อิทธิกร ทศนัฏช์ (2022). การศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์แบบระบบเติมออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียชุมชนจากคลองกุดตาโป้ เทศบาลตำบลพัฒนานคร จังหวัดสระแก้ว, *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย, ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ออนไลน์)*, 16(3), หน้า 28-41.
- [9] ณรงค์ จันทราช และ Hang Thai Le (2559). การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงด้วยระบบเอสปีอาร์, *Naresuan University Engineering Journal*, Vol.11, No.1, January - June 2016, หน้า 61-66.
- [10] Adarsh Singh, Ashish Srivastava, Duduku Saidulu, Ashok and Kumar Gupta (2022). Advancements of sequencing batch reactor for industrial wastewater treatment, *Journal of Environmental Management*, 307, 114574.