



รายงานวิจัย

ปรับปรุงประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ และ
ย้อมสีด้าย โครงการพัฒนาตอยตุง (พื้นที่ทรงงาน)
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

The improvement of the efficiency of the Constructed Wetland for
Treatment of Wastewater from Mulberry paper and yarn
dyeing at Doi Tung Development Project :
Mae Fah Luang Foundation Under Royal Patronage.

ชนิษฐา เจริญลาภ

RMUTK- CARIT

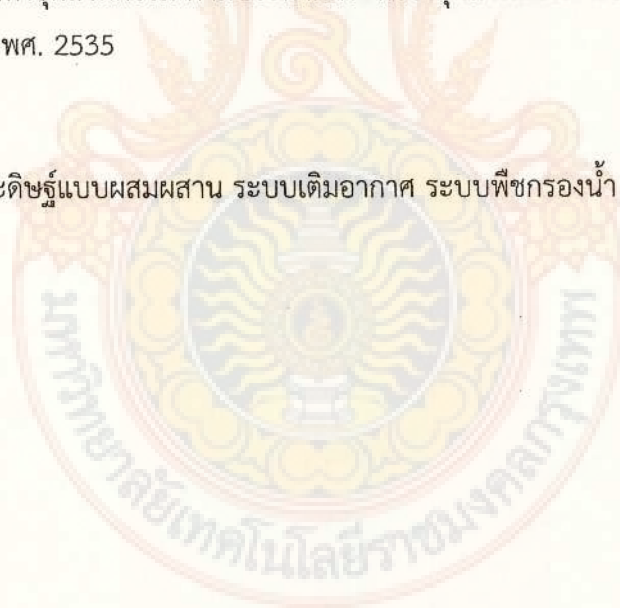


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ธันวาคม ๒๕๕๖
(งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี ๒๕๕๓)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษสา และย้อมสีด้วย โครงการพัฒนาตอยตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยใช้ระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับระบบเติมอากาศ ผลการทดลองระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบระบบจริง พบว่า น้ำหลังการบำบัดมีค่าเฉลี่ยบีโอดี 10.67 ± 5.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ 92.48 ± 3.72) ค่าเฉลี่ยปริมาณของแข็งแขวนลอย 24.72 ± 5.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ 61.34 ± 8.26) และค่าเฉลี่ยซีโอดี 111.39 ± 31.54 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ 67.71 ± 9.14) ค่าเฉลี่ยปริมาณออร์โธฟอสเฟต 2.58 ± 0.58 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ -49.27 ± 33.93) ค่าเฉลี่ยปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน 3.60 ± 0.69 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ 52.62 ± 9.17) ค่าเฉลี่ยปริมาณไนเตรตไนโตรเจน 12.14 ± 5.09 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ 63.21 ± 15.45) และจากการขยายผลไปสู่การปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียจริง พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียหลังการปรับปรุงแล้วคุณภาพน้ำหลังการบำบัดมีค่าพีเอช 8.11 ปริมาณของแข็งแขวนลอย 14 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าบีโอดี 13.92 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดี 108.56 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าน้ำทิ้งที่ออกจากกระบวนรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับระบบบ่อเติมอากาศ มีสมบัติได้ตามเกณฑ์ มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

คำสำคัญ :ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน ระบบเติมอากาศ ระบบพีชกรองน้ำ ระบบพีชลอยน้ำ



Abstract

This research investigated the efficiency of wastewater treatment from Doi Tung development project: Mae Fah Luang Foundation Under Royal Patronage using a combination system of planted filter, floating plant and aerators. The test results from pilot plant showed that the hybrid system between planted bed filter, floating planted and aerators capable of removing TSS by $61.34 \pm 8.26\%$, BOD by $92.48 \pm 3.72\%$, COD by $67.71 \pm 9.14\%$, PO_4^{3-} by $-49.27 \pm 33.93\%$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ by $52.62 \pm 9.17\%$, and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ by $63.21 \pm 15.45\%$ respectively. The properties effluent from pilot plant were 27.72 mgL^{-1} SS, 10.6 mgL^{-1} BOD, 111.39 mgL^{-1} COD, 2.54 mgL^{-1} PO_4^{3-} , 3.60 mgL^{-1} $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and 12.14 mgL^{-1} $\text{NO}_3^-\text{-N}$. The effluent qualities after improving the wastewater treatment system were 24.00 mgL^{-1} SS, 13.92 mgL^{-1} BOD, and 108.56 mgL^{-1} COD. The treated water properties of both (pilot plant and improved system) met to the Thailand industry effluent standard.

Keyword: Hybrid constructed wetland, planted bed system, floating planted system



กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ และ
ย้อมสีด้วย โครงการพัฒนาอยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย (พื้นที่ทรงงาน)
เทคโนโลยีราชมงคลกรจาก เงินอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยกรุงเทพ ปี 2557
ขอขอบพระคุณมูลนิธิแม่ฟ้าหลวง ที่ให้ความสนับสนุน ความร่วมมือ และนายอัมมารถ สมงาน ที่ได้มีส่วนร่วม
เป็นผู้ช่วยวิจัย



สารบัญ

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ	V
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 กรอบแนวคิด	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.6 นิยามศัพท์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 การบำบัดน้ำเสียแบบใช้ธรรมชาติ	7
2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพืชลอยน้ำ (free floating macrophyte-based system)	8
2.3 การทำงานของระบบบึงประดิษฐ์	12
2.4 การส่งผ่านออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์	15
2.5 ชนิดพืชที่ใช้ปลูก	18
2.6 ปริมาณน้ำเสียจากพื้นที่โครงการพัฒนาตอยตุ้ง	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	25
บทที่ 4 ผลการทดลอง	27
4.1 การศึกษาเบื้องต้นของระบบบำบัดน้ำเสียพื้นที่โครงการพัฒนาตอยตุ้ง	27
4.2 การทดสอบความเหมาะสมของพืชที่ใช้ปลูกในบึงประดิษฐ์	36
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนด้วยเครื่องเติมอากาศ	40
4.4 การออกแบบและสร้างระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบระบบจริง (pilot-scale)	45
4.5 การจัดการพืชที่ใช้ในระบบบ่อบำบัดจำลอง	47
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย	52
4.6 การปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียจริง	62
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุป	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก ก	75
ภาคผนวก ข	87

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.2.1 ลักษณะและหน้าที่ของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ.....	10
ตารางที่ 2.2.2 ผลของการกำจัดบีโอดี ของแข็งแขวนลอยในบึงประดิษฐ์.....	13
ตารางที่ 2.2.3 กลไกการกำจัดมลสารต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำ.....	15
ตารางที่ 2.2.4 ปริมาณการใช้น้ำรายเดือนเฉลี่ยต่อวันของโรงงาน.....	22
ตารางที่ 4.3.1 รูปแบบการทดลองของเครื่องให้อากาศ.....	40
ตารางที่ 4.3.2 อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะมาตรฐาน.....	43

สารบัญรูป

รูปที่ 2.2.1 ชนิดของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ (wetland plant).....	8
รูปที่ 2.2.2 การแพร่ของแก๊สจากตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่มีความเข้มข้นต่ำ.....	16
รูปที่ 2.2.3 การพาของแก๊สในพืชประเภทลอยน้ำ.....	17
รูปที่ 2.2.4 การส่งผ่านออกซิเจนของระบบรากโดยอาศัยความแตกต่างของความดัน.....	17
รูปที่ 2.2.5 การส่งผ่านออกซิเจนที่อาศัยความเร็วลมรอบๆ ต้นพืช.....	18
รูปที่ 2.2.6 หลุม้าแฝก.....	18
รูปที่ 2.2.7 การปลูกหลุม้าแฝกเป็นแพลอยน้ำ.....	21
รูปที่ 2.2.8 ปริมาณการใช้น้ำสะสมของโรงงานกระดาษสา และย้อมสีเส้นด้าย.....	22
รูปที่ 4.1.1 แผนผังบ่อบำบัดน้ำเสีย.....	27
รูปที่ 4.1.2 ระบบบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันของพื้นที่โครงการพัฒนาตอตุ้งฯ.....	28
รูปที่ 4.1.3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินในแนวตั้ง.....	28
รูปที่ 4.1.4 ลักษณะของน้ำที่ออกจากระบบในแต่ละขั้นตอน.....	29
รูปที่ 4.1.5 ผลการกำจัดสีย้อมด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	30
รูปที่ 4.1.6 ผลการกำจัดสีย้อมด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	31
รูปที่ 4.1.7 ผลการกำจัดสีย้อมด้วยเพนทอนรีเอเจนต์.....	32
รูปที่ 4.1.8 ผลการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมีย.....	33
รูปที่ 4.1.9 ผลการกำจัดสีย้อมด้วยโอโซน.....	34
รูปที่ 4.1.10 ทางเลือกที่ 1 ในการปรับปรุงระบบ.....	35
รูปที่ 4.1.11 ทางเลือกที่ 2 ในการปรับปรุงระบบ.....	35
รูปที่ 4.1.12 ทางเลือกที่ 3 ในการปรับปรุงระบบ.....	36
รูปที่ 4.2.1 การเตรียมบ่อดูดซับชนิดพืช.....	37
รูปที่ 4.2.2 บ่อดูดซับพืช (ก่อนการทดสอบ).....	37
รูปที่ 4.2.3 บ่อดูดซับพืช (หลังการทดสอบ).....	37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การพัฒนาพื้นที่โครงการพัฒนาโดยดุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ ความกินดีอยู่ดีของประชาชน และฟื้นฟูสภาพสิ่งแวดล้อมของพื้นที่โครงการฯ ที่เสื่อมโทรม จากการตัดไม้ทำลายป่า การทำไร่เลื่อนลอย และปลูกฝิ่นของราษฎรชาวเขาในพื้นที่มาเป็นเวลานานให้กลับคืนสู่สภาพปกติ ด้วยการป้องกัน และให้มีการปลูกป่าอนุรักษ์ต้นน้ำลำธาร ป่าเศรษฐกิจและป่ายังชีพขึ้น จากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องนี้ ทำให้ดอยดุงได้กลายเป็นป่าต้นน้ำสำคัญ ชาวบ้านในพื้นที่มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น โดยการส่งเสริมให้ราษฎร ชาวเขาในพื้นที่มีงานทำ สร้างรายได้จากกิจกรรมการผลิตต่าง ๆ เช่น การปลูกกาแฟ และแมคคาเดเมีย การทำกระดาษสา การย้อมสี การทอผ้า การทำเซรามิค และคั่วกาแฟ ฯลฯ กิจกรรมดังกล่าวทำให้โครงการ พัฒนาโดยดุงฯ เป็นตัวอย่างที่ดีของการพัฒนาทางเลือกที่ยั่งยืน อย่างไรก็ตามจากกิจกรรมดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การทำกระดาษสา การย้อมสี และการทำเซรามิค เป็นกิจกรรมที่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตในปริมาณมาก (200-300 ลิตรต่อวัตถุดิบ 1 กิโลกรัม) เมื่อเทียบกับกิจกรรมอื่น และในขณะเดียวกัน ก็ปล่อยน้ำเสียในปริมาณมากเช่นเดียวกัน จำเป็นต้องได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธี เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่ธรรมชาติ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และทางอ้อมกับชื่อเสียง ของโครงการพัฒนาโดยดุงฯ และมูลนิธิแม่ฟ้าหลวงที่สร้างมาเป็นเวลานาน ด้วยสาเหตุดังกล่าว จึงเป็นความจำเป็นอย่างเร่งด่วนที่ต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถ ใช้งานได้จริง และมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของกิจกรรมดังกล่าว และจากการศึกษาแนวพระราชดำริ และทฤษฎีธรรมชาติของการย่อยสลายสารอินทรีย์ ที่มีในน้ำเสียได้สารอินทรีย์ หรือธาตุอาหารพืช ด้วยทฤษฎีธรรมชาติดังกล่าว องค์พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ทรงมีพระราชดำริในการดำเนินการด้านการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยอาศัยหลักการธรรมชาติช่วยธรรมชาติ (สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2552) โดยการใช้พืชน้ำจืดพวก กก ธูปฤาษี ผักตบชวา สาหร่ายบางชนิด ซึ่งสามารถ เปลี่ยนน้ำเสียให้เป็นน้ำดีได้ โดยเฉพาะต้นธูปฤาษี ซึ่งพบได้ทั่วไปตามพื้นที่ต่างๆ มีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น สามารถเจริญเติบโตได้ง่าย ทนต่อสภาพสิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้ดี และสามารถดูดซับและละลายธาตุอาหารได้เช่น ธาตุโพแทสเซียม ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และยังสามารกกำจัดพวกธาตุโลหะหนักบางชนิดได้ด้วย เช่น พวกปรอท แคดเมียม ตะกั่ว ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ที่อาจจะมาจากการปล่อยน้ำทิ้งจากบ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระบบบึงประดิษฐ์เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียทั้งน้ำเสียชุมชน น้ำเสียอุตสาหกรรม และน้ำเสียจากการทำเหมืองแร่ (Vymazal, 2002) และจากการศึกษาของ (Bulc & Ojstrsek, 2008) พบว่า ระบบบึงประดิษฐ์ สามารถกำจัด สิริแอกทิฟ สีดิสเพิร์ส และสีแหวด จากโรงงานสิ่งทอในประเทศสโลวาเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคุณภาพ

น้ำที่ได้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง ด้วยเหตุผลดังกล่าวโครงการพัฒนาดอยตุงฯ โดยมูลนิธิแม่ฟ้าหลวงในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้ติดตั้งระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ดินในแนวนอน เพื่อบำบัดน้ำเสียของโครงการฯ แต่ระยะเวลาที่ผ่านมาระบบบึงประดิษฐ์มีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาการอุดตันขึ้นในอนาคต

ดังนั้นงานวิจัยนี้สนใจศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจาก โรงงานกระดาษสา โรงงานย้อมสี และโรงงานเซรามิก บริเวณพื้นที่โครงการพัฒนาดอยตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานระหว่างระบบบึงประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ (free water surface system) และระบบบึงประดิษฐ์แบบพืชลอยน้ำ (floating wetland) ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาการอุดตันของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ดินในแนวนอน รวมทั้งเป็นระบบที่ลดการใช้พลังงาน สารเคมี ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการบำบัดน้ำเสีย โดยทำให้คุณภาพของแหล่งรองรับน้ำทิ้งดีขึ้น เกิดความสมดุลของระบบนิเวศน์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การใช้พืชน้ำในการบำบัดน้ำเสียยังได้รับผลพลอยได้จากการนำพืชไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นอีกด้วย เช่น การใช้ในการผลิตสินค้าหัตถกรรม งานทอ เสื้อ ทำกระดาษ หรือการใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อทดแทนแก๊สหุงต้ม หรือใช้ผลิตไฟฟ้า สามารถนำรายได้กลับมาให้กับโครงการพัฒนาดอยตุงฯ เพื่อเป็นการจ้างแรงงานราษฎร ในพื้นที่

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

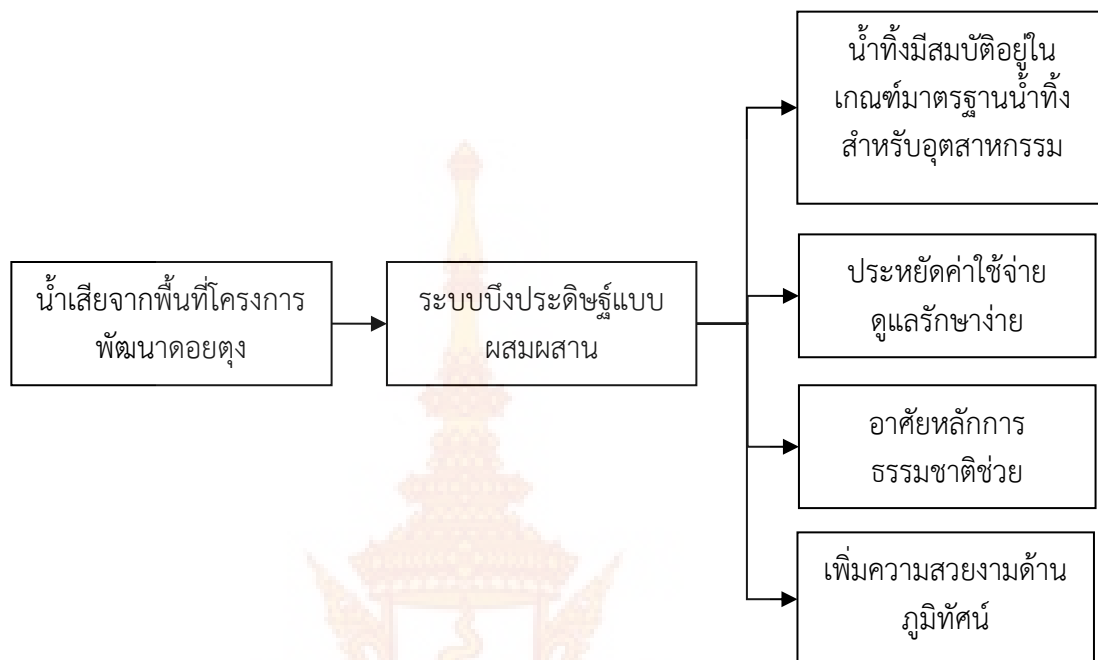
- (1) ออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานระหว่างระบบที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ และระบบพืชลอยน้ำ
- (2) สร้างระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานที่มีรูปทรงเลียนแบบระบบจริง (pilot-scale)
- (3) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- (1) ทดลองกับน้ำเสียจากการทำกระดาษสา การย้อมสี และการทำเซรามิกจากพื้นที่โครงการพัฒนาดอยตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ
- (2) รูปแบบของระบบบึงประดิษฐ์เป็นแบบผสมผสานระหว่างระบบที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ และระบบพืชลอยน้ำร่วมกับระบบเติมอากาศเชิงกล
- (3) ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเครื่องจักรชีวภาพ โดยพิจารณาปัจจัยดังนี้
 - ชนิดของพืชน้ำ
 - ปริมาณการเติมอากาศ
 - อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ

(4) วิเคราะห์ พื้เอช ความนำไฟฟ้า ความชื้น บีโอดี ซีโอดี ของน้ำก่อนเข้าระบบ และหลังจาก ผ่านระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน

1.4 กรอบแนวคิด



1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

(1) แนวทางในการประยุกต์ใช้ระบบบึงประดิษฐ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โรงงานฟอกย้อมกระดาษสา โรงงานเซรามิค ที่ใช้เทคโนโลยีอย่างง่าย เน้นต้นทุนต่ำ สะดวกในการดูแลรักษา ระบบและมีประสิทธิภาพ

(2) แนวทางในการพึ่งพาตนเองโดยไม่ต้องใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ

(3) แบบจำลองระบบบึงประดิษฐ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน

1.6 นิยามศัพท์

อุณหภูมิน้ำ (water temperature)

หมายถึง ระดับความร้อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแหล่งน้ำ เกิดได้จากอากาศที่มีแสงส่องผ่านลงไปในแหล่งน้ำ ต่อมาเกิดการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานความร้อน นอกจากนี้รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ ลม และการระเหยของน้ำ มีส่วนทำให้อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน

ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

พีเอชเป็นค่าที่แสดงความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด ค่าพีเอชขึ้นกับปริมาณของไฮโดรเจนไอออนที่แตกตัวในน้ำ

การนำไฟฟ้าของน้ำ (conductivity)

การนำไฟฟ้าของน้ำ หมายถึง ความสามารถในการเป็นสื่อนำกระแสไฟฟ้า ตัวการที่เป็นสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าในน้ำ คือ ไอออน (ion) ของสารประกอบอนินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดอนินทรีย์ ต่างและเกลือ เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี เพราะเมื่ออยู่ในน้ำจะแตกตัวให้ไอออน (ionization) ได้ ตรงข้ามกับสารอินทรีย์ เช่น น้ำตาล สารเบนซิน สารเหล่านี้ไม่แตกตัวในน้ำจึงไม่นำไฟฟ้า การนำไฟฟ้าเป็นเครื่องบ่งชี้ถึงปริมาณเกลือแร่ต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ นิยมวัดออกมาในรูปอัตราส่วนของความต้านทาน โดยมีหน่วยเป็นไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (microsiemen $\mu\text{S}/\text{cm}$) หรือไมโครมhos ต่อเซนติเมตร (micromhos หรือ $\mu\text{mhos}/\text{cm}$)

ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (total dissolved solids, TDS)

ของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหมายถึง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และสามารถไหลผ่านกระดาษกรองใยแก้ว เมื่อกรองปริมาณของแข็งแขวนลอยออกแล้วเอาน้ำใสที่ผ่านกระดาษกรองใยแก้ว ไประเหยจะหาปริมาณของแข็งละลายได้ ของแข็งส่วนที่ละลายในน้ำได้ ได้แก่ เกลืออนินทรีย์ต่างๆ ของอินทรีย์สาร ตัวอย่างน้ำที่กรองผ่านกระดาษกรอง GF/C ในถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักจะถูกนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วนำไปอบที่ 103.00-105.00 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่ม คือ น้ำหนักของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของแข็งทั้งหมดในน้ำ (total solids, TS)

ของแข็งทั้งหมดในน้ำ หมายถึง สารที่เหลือเป็นตะกอนอยู่ภายหลังจากที่ผ่านการระเหยไอน้ำ ตัวอย่างน้ำที่ผสมเข้ากันได้ดีในถ้วยระเหยซึ่งทราบน้ำหนัก จะถูกนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้ง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103.00-105.00 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่ม ซึ่งตะกอนที่เหลือนี้จะมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ของแข็งทั้งหมดในน้ำเป็นสิ่งที่เจือปนในน้ำที่เหลืออยู่เมื่อระเหยน้ำออกจนหมด ไม่รวมสารบางอย่างที่ระเหยไปกับน้ำ เช่น พวกกรดอินทรีย์ และกรดต่างๆ ที่ละลายน้ำ สิ่งเจือปนเหล่านี้มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำทั้ง

ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solids, TSS)

ของแข็งแขวนลอย คือ สารหรือของแข็งส่วนที่ไม่ละลายน้ำ แต่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดความขุ่นเป็นของแข็งส่วนที่กรองได้โดยการกรองน้ำตัวอย่างผ่านกระดาษกรอง GF/C ที่ทราบน้ำหนัก ตะกอนที่ติดอยู่บนกระดาษกรอง นำไปอบที่ 103.00-105.00 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น คือ น้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้ของแข็งแขวนลอยมีผลทำให้ค่าบีโอดีและค่าซีโอดีในน้ำสูงขึ้น

ความขุ่น (turbidity)

ความขุ่นเกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่เป็นต้นเหตุทำให้น้ำไม่ใส การวัดความขุ่นเป็นการวัดเกี่ยวกับแสง มีหน่วยวัดเป็นเอ็นทียู (Nephelometric turbidity unit, NTU)

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (dissolved oxygen, DO)

ออกซิเจนเป็นแก๊สที่ละลายน้ำได้น้อยมาก และไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับน้ำ การละลายของออกซิเจนขึ้นกับความดัน อุณหภูมิ และปริมาณของแข็งละลาย ค่าออกซิเจนละลายน้ำมีความสำคัญใช้บอกให้ทราบว่าน้ำนั้นมีความเหมาะสมเพียงใดต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ

ปริมาณความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (biochemical oxygen demand, BOD)

บีโอดีเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณความสกปรกของน้ำเสีย โดยคิดเปรียบเทียบในรูปปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้ภาวะที่มีปริมาณออกซิเจน ในช่วงระยะเวลา และอุณหภูมิที่กำหนดให้ การวิเคราะห์ค่าออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยทั่วไปเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้หมดในเวลา 5 วัน ในตู้ควบคุมที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส

ปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมี (chemical oxygen demand, COD)

ซีโอดีเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณความสกปรกของน้ำเสีย โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการออกซิไดส์สารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ โดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ในสารละลายที่เป็นกรด

ไนโตรเจน (N)

เป็นสารอาหารที่สิ่งมีชีวิตต้องการ ในน้ำเสียมีไนโตรเจนอยู่หลายรูปแบบ คือ ในรูปของสารอินทรีย์ แอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท การตรวจพบว่าในน้ำเสียมีไนโตรเจนในรูปแบบใดจะสามารถบอกได้ว่าน้ำเสียนั้นใหม่หรือเก่า น้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นใหม่จะมีค่าไนโตรเจนในรูปของสารอินทรีย์ประมาณ 20-25 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าเป็นน้ำเสียเก่าจะมีค่าไนเตรตสูงเป็นต้น

ฟอสฟอรัส (P)

เป็นสารอาหารเช่นเดียวกับไนโตรเจน จำเป็นต่อการดำรงชีวิตด้วยเช่นกัน หากน้ำผิวดินมีค่าฟอสฟอรัสสูงจะทำให้เกิดสาหร่ายขึ้นเป็นจำนวนมาก ฟอสฟอรัสมีอยู่หลายรูปแบบเช่นเดียวกับไนโตรเจน คือ ในรูปของสารอินทรีย์ โพลีฟอสเฟต และออร์โธฟอสเฟต ในน้ำทิ้งชุมชนทั่วไปจะมีค่าฟอสฟอรัสประมาณ 2-20 มิลลิกรัมต่อลิตร



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี แต่เทคโนโลยีที่สร้างขึ้นเหล่านี้นี้มักจะต้องใช้การลงทุนที่ค่อนข้างสูง ทั้งในด้านเครื่องจักรกลและพลังงาน ระบบบึงประดิษฐ์เป็นทางเลือกหนึ่งโดยมีระบบเทคโนโลยีการจัดการที่ง่าย สะดวก และเป็นวิธีการที่อาศัยธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งได้แก่ความสัมพันธ์ของตัวกรอง น้ำ และพืชร่วมกับจุลินทรีย์

2.1 การบำบัดน้ำเสียแบบใช้ธรรมชาติ

การบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติอาศัยกลไกธรรมชาติทั้งที่เป็นกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ที่มีอยู่ในดิน น้ำ พืช และจุลินทรีย์เพื่อช่วยในการปรับสภาพน้ำเสียให้เป็นน้ำที่มีสารปนเปื้อนลดน้อยลง โดยไม่ใช้เครื่องจักรกล จึงเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานไฟฟ้า แต่ต้องอาศัยเทคนิคการบริหารจัดการพื้นที่บำบัดอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากต้องใช้พื้นที่มาก และต้องไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่ วิธีบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน (land treatment systems) วิธีบึงประดิษฐ์ (constructed wetland systems) และวิธีพืชลอยน้ำ (floating aquatic plant treatment systems) (Kadlec, R.H. & Knight R.L., 1996)

วิธีบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน (land treatment systems) เป็นวิธีการปล่อยน้ำเสียลงบนพื้นที่เกษตรกรรม หรือพื้นที่ว่างเปล่าที่ไม่ได้ใช้ในกิจกรรมใด ๆ ทั้งสิ้น วิธีนี้เป็นวิธีที่ประหยัดแต่ต้องใช้พื้นที่มากในการบำบัดน้ำเสีย การใช้วิธีนี้ต้องคำนึงด้วยว่าในน้ำเสียมีสารพิษปะปนหรือไม่ เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อ การเจริญงอกงามของพืช และถ้าเป็นพืชที่ต้องนำมารับประทานเป็นอาหาร อาจมีการปนเปื้อนของสารพิษเหล่านั้นในพืชผลที่เก็บเกี่ยวได้

วิธีบึงประดิษฐ์หรือระบบที่ชุ่มน้ำเทียม (constructed wetland systems) เป็นวิธีการปล่อยน้ำเสียลงในบึง ซึ่งสร้างขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำเสียโดยตรง บึงประดิษฐ์ที่มีความลึกน้อยกว่า 0.6 เมตร มีพืชน้ำซึ่งมีรากอยู่ใต้ดินเจริญเติบโตภายในบึง ซึ่งรากของพืชเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้แบคทีเรียเกาะได้ และทำหน้าที่เป็นตัวกรองและตัวดูดซับสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำเสีย เพิ่มปริมาณออกซิเจนให้แก่ น้ำ และใบของพืชป้องกัน ยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยทำหน้าที่กั้นแสงแดดไม่ให้ส่องลงไปใน

วิธีพืชลอยน้ำ (floating aquatic plant treatment systems) การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้คล้ายคลึงกับระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำอยู่เหนือผิวดิน ส่วนที่แตกต่างกันคือพืชที่ใช้ในการบำบัด ซึ่งเป็นพืชจำพวก ผักตบชวา และ แหน ความลึกของบ่อมีความลึกมากกว่า คือ 50-180 เซนติเมตร น้ำเสียที่จะเข้าไปบำบัดด้วยวิธีนี้ต้องผ่านการตกตะกอนและการเติมอากาศในระยะเวลาสั้นมาก่อน เพื่อให้บ่อบำบัดมีปริมาณออกซิเจน

ตลอดเวลาและเพื่อป้องกันกลิ่นเหม็น และแมลงต่าง ๆ มาตอม เมื่อน้ำเสียที่ปล่อยลงบ่อไหลผ่านรากพืชลอยน้ำ ซึ่งมีแบคทีเรียเกาะอยู่บนราก ก็จะเกิดการบำบัดน้ำเสียขึ้น

2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีพืชลอยน้ำ (free floating macrophyte-based system)

พรรณไม้น้ำ หรือพืชน้ำ (aquatic plants, water plants, hydrophytes) หมายถึง พืชที่ขึ้นอยู่ในน้ำ โดยอาจจะจมอยู่ใต้น้ำทั้งหมด หรือโผล่บางส่วนขึ้นมาอยู่เหนือน้ำ ลอยอยู่ที่ผิวน้ำหรือเป็นพืชที่ขึ้นอยู่ ตามริมน้ำ ชายตลิ่ง นอกจากนี้ยังรวมถึงพืชที่เจริญเติบโตอยู่ในบริเวณที่ลุ่มน้ำขังด้วย

2.2.1 ประเภทของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ

พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำจำแนกได้เป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

(1) จำแนกตามขนาด ได้เป็น 2 ประเภท คือ

Microphytes คือ พืชที่มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์

Macrophytes คือ พืชที่มีขนาดใหญ่ มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ กลุ่มสาหร่าย กลุ่มมอส กลุ่มเฟิร์น และกลุ่มพืชมีเมล็ด สำหรับพืชในกลุ่มนี้แบ่งเป็นกลุ่มย่อยตามลักษณะแหล่งน้ำได้ 2 ประเภท คือ

Limnophytes เป็นพืชที่ขึ้นอยู่ในบริเวณแหล่งน้ำจืด

Halophytes เป็นพืชที่ขึ้นอยู่ในบริเวณแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำเค็ม

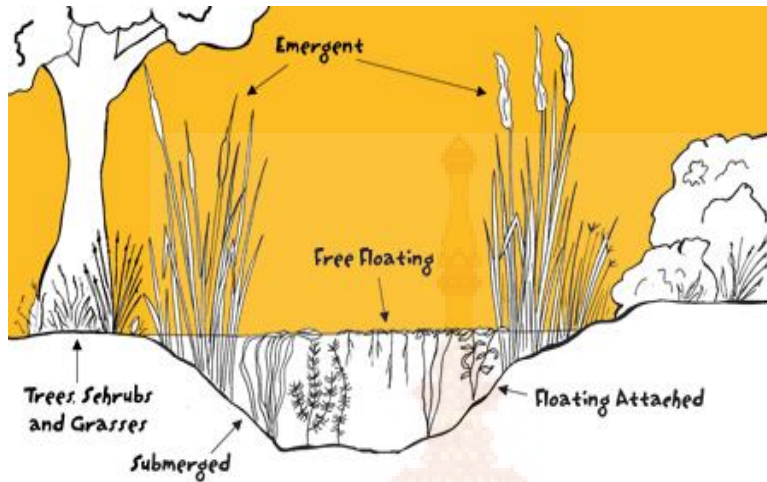
(2) จำแนกตามลักษณะการเจริญเติบโตในแหล่งน้ำ หรือแหล่งที่อยู่ มี 4 ประเภท คือ

พืชลอยน้ำ (floating plants) เป็นพรรณไม้น้ำที่เจริญลอยอยู่ในระดับผิวน้ำ มีรากห้อยอยู่ใต้ระดับน้ำ ส่วนของลำต้น ใบและดอก เจริญอยู่เหนือน้ำ ถ้าอยู่ในน้ำตื้น ๆ รากอาจจะหยั่งยึดพื้นดินใต้น้ำก็ได้ พืชประเภทนี้ส่วนใหญ่ มักจะมีส่วนหนึ่งส่วนใดเปลี่ยนไปเป็นท่อน เพื่อพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ เช่น ผักตบชวา มีส่วนของก้านใบพองตัวเป็นท่อน ผักบุ้งมีส่วนลำต้นภายในกลวง ช่วยให้ลำต้นเลื้อยทอดตัวไปบนผิวน้ำได้ดี

พืชใต้น้ำ (submerged plants) เป็นพืชที่มีส่วนของราก ลำต้น และใบอยู่ใต้น้ำทั้งหมด อาจมีรากยึดติดกับพื้นดินใต้น้ำหรือไม่ก็ได้ บางชนิดเมื่อเจริญเต็มที่ก็จะส่งดอกขึ้นมาเจริญที่ผิวน้ำหรือเหนือน้ำ เช่น สาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายพวงขะโด และสันตะวา

พืชโผล่เหนือน้ำ (emerged plants) เป็นพืชที่เจริญเติบโตอยู่ใต้น้ำบางส่วน และโผล่เหนือน้ำบางส่วน โดยมีรากหรือทั้งรากและลำต้นเจริญอยู่ในพื้นดินใต้น้ำ แล้วส่งส่วนของใบและดอกขึ้นมาเจริญเหนือน้ำ เช่น บัวต่าง ๆ กกบางชนิด

พืชชายน้ำ (marginal plants) เป็นพืชที่ขึ้นตามชายน้ำ ริมตลิ่ง หรือหนองน้ำที่ท่วมขังตื้น ๆ โดยทั่วไปมีรากและลำต้นเจริญอยู่ในพื้นดิน และส่งลำต้นบางส่วน ใบ และดอกขึ้นมาเหนือน้ำ เช่น ผักเป็ดน้ำ หญ้าต่าง ๆ พืชน้ำประเภทนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับพืชใล้น้ำจนบางครั้งไม่สามารถแยก ได้ชัดเจน เช่น ผักตบไทย โสน



รูปที่ 2.2.1 ชนิดของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ (wetland plant)

ที่มา: (“Waterwatch Adelaide & Mount Lofty Ranges - Growth Forms,” n.d.)

การใช้พืชเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ สามารถเลือกตามลักษณะ หน้าที่ หรือความสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.2.1

ตารางที่ 2.2.1 ลักษณะและหน้าที่ของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ

ชนิดพืช	ลักษณะทั่วไปของพืช	หน้าที่ของพืช
พืชลอยน้ำ	โครงสร้างของใบและรากติดกัน โดยมีโครงสร้างของใบและลำต้นลอยอยู่เหนือผิวน้ำ เคลื่อนที่ไปตามกระแสน้ำ	ทำหน้าที่ในการดูดซับธาตุอาหาร ให้ร่มเงา ปิดกั้นแสงแดดไม่ให้ผ่านลงไปในน้ำ เป็นการชะลอการเจริญเติบโตของสาหร่าย และช่วยในการกระจายออกซิเจนจากอากาศลงสู่ผิวน้ำ
พืชจมน้ำ	โครงสร้างของใบ และลำต้นลอยอยู่ระหว่างผิวดินด้านล่างของพื้นที่ชุ่มน้ำ กับผิวน้ำด้านบน	มีโครงสร้างของใบ และรากเป็นที่ยึดเกาะของพืชน้ำจืด และช่วยในการเคลื่อนย้ายแก๊สออกซิเจนจากอากาศลงสู่ผิวน้ำ
พืชใล้น้ำ	มีโครงสร้างรากอยู่ด้านล่าง และลำต้นอยู่เหนือผิวน้ำ สัมผัสอากาศโดยตรงเป็นพืชที่ทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้ดี	ลักษณะโครงสร้างของใบ และลำต้นที่อยู่เหนือผิวน้ำของพืชช่วยในการกระจายการไหลของน้ำ และลดความเร็วของน้ำ เป็นการกรองสารแขวนลอยได้ดี พร้อมทั้งยังมีหน้าที่ในการปิดกั้นแสงไม่ให้ส่องผ่านลงไปในน้ำได้เท่ากับเป็นการชะลอการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ที่มา: (U.S. EPA, 1988)

พืชจะช่วยในการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับธาตุอาหาร โลหะหนัก และสารอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียเพื่อนำมาใช้ในการเจริญเติบโตโดยผ่านทางระบบรากเข้าสู่ลำต้น นอกจากนี้รากพืชยังเป็นส่วนสำคัญในการบำบัดน้ำเสีย คือทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ มีการเคลื่อนย้ายแก๊สต่าง ๆ รวมถึงออกซิเจนจากกาบใบลงสู่ระบบราก เกิดสภาพออกซิเจนเป็นฟิล์มบาง ๆ (rhizosphere) รอบ ๆ ราก ทำให้จุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสิ่งสกปรกต่าง ๆ ในน้ำ ทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น (Hammer, 1989) นอกจากนี้ก้านหรือลำต้นที่อยู่ในน้ำเป็นตัวกลางในการกรองดูดซับตะกอน และของแข็งที่แขวนลอยในน้ำ

จากที่กล่าวมาข้างต้น พืชจะมีกลไกหลายประการที่ทำให้สามารถลดปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำเสีย การนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจะมีข้อจำกัด กล่าวคือต้องมีการคัดเลือกชนิดพืชที่เหมาะสม โดยสมบัติของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย สรุปได้ดังนี้

- (1) สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ดีในท้องถิ่นนั้น ๆ นอกจากนี้ยังต้องสามารถปรับตัวได้ดีในสภาพอุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง
- (2) มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูง และเจริญเติบโตได้ดี

(3) มีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนได้สูง โดยนำออกซิเจนจากบรรยากาศส่งผ่านไปตามใบ ลำต้น และราก โดยพืชจำพวกธูปฤาษี มีชั้นรากหนาประมาณ 0.30 เมตร และรากพืชจำพวกกก แฝก จะหยั่งลึกถึง 0.70 เมตร

(4) สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของสารมลพิษได้ในช่วงกว้าง

(5) มีความสามารถในการดูดซึมและเก็บสะสมสารต่างๆได้

(6) มีความคงทนต่อโรคและแมลงต่างๆได้ดี

(7) สามารถนำออกระบบได้ง่าย เนื่องจากพืชจะลดปริมาณสารที่มีอยู่ในน้ำเสียให้ได้ผลดีที่สุดนั้น พืชต้องมีการนำออกจากระบบบ้าง เพื่อมิให้พืชอยู่หนาแน่นจนเกินไปจนระบบขาดประสิทธิภาพ

(US Army Corps of Engineering., 1993) แนะนำให้ใช้พืชจากบริเวณใกล้เคียง ในรัศมี 100 ไมล์ ทางเส้นรุ้ง ความยาว 200 ไมล์ทางเส้นแวง และระดับความสูงไม่เกิน 1,000 ฟุต โดยนักนิเวศวิทยาได้อธิบายว่าหากนำพืชจากบริเวณอื่น มาการเจริญเติบโตของพืชอาจถูกยับยั้งได้ (Cincinnati, n.d.)

การนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย มีผู้ทดลองใช้พืชน้ำหลายชนิด เช่น ธูปฤาษี อ้อ กก แฝก และผักตบชวา เป็นต้น เนื่องจากสามารถเจริญเติบโตได้ในบริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำ และยังสามารถบำบัดน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรมได้ (Cooper, P. F., Job, G. D., Green, M. B., & Shutes, R. B. E., 1996; Kadlec, R.H. & Knight R.L., 1996)

ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการศึกษา เพื่อนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย พบว่ามีประสิทธิภาพดีในการบำบัดน้ำเสีย พืชลอยน้ำ (floating plant) จากการศึกษาลักษณะทางพฤกษศาสตร์พืชลอยน้ำ (floating plant) 5 ชนิด คือ ผักตบชวา จอก จอกหูหนู แพงพวยน้ำ และแหนเป็ดใหญ่ ของนิศานารถ ละอองพันธ์ และอำพร คล้ายแก้ว (นิศานารถ ละอองพันธ์ & อำพร คล้ายแก้ว, 2013) รายงานว่า ผักตบชวา จอก จอกหูหนู และแพงพวยน้ำ มีลักษณะรากเป็นระบบรากฝอย (fibrous roots system) มีลำต้นส่วนที่ทอดเลื้อยไปตามผิวน้ำ เรียก ไหล (stolon) เหมือนกัน แต่มีบางลักษณะต่างกัน เช่น จอกหูหนู ไม่สร้างดอก แต่มีอวัยวะสร้างเซลล์สืบพันธุ์ เรียก sporocarp ซึ่งทำหน้าที่สร้างสปอร์ ขยายพันธุ์โดยสปอร์และการแตกไหล แหนเป็ดใหญ่ มีโครงสร้างที่ต่างจากพืชลอยน้ำอื่น มีแผ่นใบเรียก ทัลลัส (thallus) มีดอกขนาดเล็กมากและมักไม่ค่อยออกดอก ดังนั้นจึงขยายพันธุ์โดยการแตกทัลลัสใหม่ ส่วนผักตบชวา จอก และแพงพวยน้ำ ขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด และการแตกไหล เมื่อศึกษาการเจริญเติบโตของพืชลอยน้ำในสภาพน้ำเสียเทียบกับน้ำปกติ พบว่า ที่ระยะเวลาเก็บกักนาน 7 - 30 วัน ผักตบชวามีการเจริญเติบโตทางใบได้ดีที่สุด และที่ระยะเวลาเก็บกักนาน 30 - 60 วัน มีจำนวนต้นที่แตกกอสูงสุด ส่วนจอกมีอัตราการเพิ่มของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย โดยศึกษาปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ปริมาณตะกอนที่ละลายในน้ำทั้งหมด (TDS) ปริมาณแอมโมเนีย (NH_4^+) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) พบว่า จอกหูหนูมีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละของค่า DO สูงสุด คือร้อยละ 99.63 ที่ระยะเวลาเก็บกักนาน 15 วัน หลังจากระยะนี้ไปแล้วพืชทุกชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยมาก แพงพวยน้ำมี

ประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละของค่า TDS สูงสุด คือร้อยละ 26.82 ที่ระยะเวลาเก็บกักนาน 60 วัน ผักตบชวามีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละของค่า NH_4^+ สูงสุด คือร้อยละ 84.93 ที่ระยะเวลาเก็บกักนาน 15 วัน หลังจากระยะนี้ไปแล้วพืชทุกชนิดไม่ได้ช่วยในการบำบัด จอก และจอกหูหนู มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละของค่า TKN สูงสุดคือร้อยละ 73.49 และ 73.18 ตามลำดับ ส่วนแพลงพวยน้ำมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่า TP สูงสุดคือร้อยละ 98.95 ที่ระยะเวลาเก็บกักนาน 60 วัน

จากรายงานผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียในชุมชนด้วยพืชน้ำในท้องถิ่น ของ ภูมิพงษ์ นวลศิริ (หนังสือพิมพ์ผู้จัดการ, 2551) โดยศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืชที่มีอยู่ใน ท้องถิ่น 5 ชนิด ได้แก่ บอน คล้าน้ำ กรรขีนิ เฮลิโคเนีย และว่านน้ำ ทดลองปลูกพืชแต่ละชนิดดังกล่าวลงดิน ในบ่อคอนกรีต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร และอนุบาลพืชเป็นเวลา 2 สัปดาห์ โดยค่อย ๆ เพิ่มน้ำเสียเข้าไปในบ่อ เพื่อให้พืชสามารถปรับตัวได้ในน้ำเสีย สำหรับการบำบัด ต้องใส่น้ำเสียลงไปให้มีความสูงประมาณ 30 เซนติเมตร พักน้ำไว้ 7, 14 และ 21 วัน จากนั้นวิเคราะห์ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ของแข็งแขวนลอย และไขมัน ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังครบกำหนดระยะเวลาทดลอง พบว่าเพียง 7 วัน พืชแต่ละชนิดสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้น และสามารถปล่อยลงสู่ แหล่งน้ำธรรมชาติได้โดยไม่เป็นผลเสีย ต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพืชและสาหร่ายเซลล์เดียวในน้ำเสียเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสง และช่วยเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำเสีย จุลินทรีย์ในน้ำเสียจึงย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้มากขึ้น และช่วยลดค่าบีโอดีในน้ำเสียลงได้ และจากการวิจัย พบว่าพืชแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของชุมชนประมาณได้ประมาณร้อยละ 80 ทั้งนี้ขึ้นกับประเภทของน้ำเสียด้วย โดยคล้าน้ำมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนสูงที่สุด ส่วน กรรขีนิสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ดีที่สุด และว่านน้ำสามารถบำบัดไขมันและของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม นักวิจัยแนะนำว่า ควรตัดใบที่อยู่เหนือน้ำทิ้งทุก ๆ 45 วัน เพื่อให้พืชแตกกอมากขึ้น และไม่ให้มีใบแก่ หลุดร่วงลงไปเพิ่มปริมาณของเสียในบ่อบำบัด

2.3 การทำงานของระบบบึงประดิษฐ์

บึงประดิษฐ์สามารถลดค่าบีโอดี ของแข็งแขวนลอยและไนโตรเจน ได้ดีเท่ากันกับสามารถลดปริมาณโลหะ สารอินทรีย์ขนาดเล็กและเชื้อโรคต่างๆ ได้ กลไกพื้นฐานที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่การตกตะกอน การใช้สารเคมีช่วยในการตกตะกอนและการดูดซับ การทำปฏิกิริยากันระหว่างจุลินทรีย์กับบีโอดี ของแข็งแขวนลอยและไนโตรเจน และการดูดซับสารต่างๆ เข้าไปในพืช (U.S. EPA, 1988)

(1) กำจัดสารอินทรีย์ (organic matter removal) พวก BOD และ COD

การกำจัดสารอินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในบึงประดิษฐ์ทุกแบบ และจะขึ้นกับความนิ่งของน้ำในกรณีที่บึงประดิษฐ์แบบ FWS ส่วนในบึงประดิษฐ์แบบ SF นั้นจะขึ้นกับปริมาณตะกอนที่สะสมในชั้นกรองและอัตราการซึมของน้ำผ่านชั้นกรอง

หลักในการกำจัดบีโอดีประเภทที่ละลายน้ำได้ในบึงประดิษฐ์ แบบ FWS ขึ้นกับอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ และแหล่งออกซิเจนที่จะใช้ในปฏิกิริยาการกำจัดของเสียโดยจุลินทรีย์ มาจากการแพร่

ของออกซิเจนจากบรรยากาศลงสู่ผิวน้ำ ซึ่งจะเกิดในกรณีที่ไม่มีการไหลในระบบ ปริมาณออกซิเจนส่วนเกินจะถูกปล่อยผ่านไปยังรากของพืช และถูกนำไปใช้ในชั้นดินโดยจะไม่มีผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ และในบึงประดิษฐ์ที่พืชขึ้นอย่างหนาแน่นจะสามารถลดการปนเปื้อนของน้ำที่เกิดจากกระแสน้ำได้ด้วย โดยในตารางที่ 2.2.2 แสดงการกำจัดบีโอดี และของแข็งแขวนลอยในบึงประดิษฐ์ ในประเทศแคนาดา สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย

ตารางที่ 2.2.2 ผลของการกำจัดบีโอดี ของแข็งแขวนลอยในบึงประดิษฐ์

พื้นที่โครงการ	ปริมาณน้ำ (ลบ.ม./วัน)	ชนิดของ บึง ประดิษฐ์	บีโอดี(มก./ล.)		เอสเอส(มก./ล.)		%การกำจัด		ภาระของเสียต่อ พื้นที่ผิว(ลบ.ม./เฮค แตร์/วัน)
			Inf.	Eff.	Inf.	Eff.	BOD	SS	
Listowel, Ontario	17	FWS ^a	56	10	111	8	82	93	-
Santee, CA	-	SF ^b	118	30	57	5.5	75	90	-
Sydney, Australia	240	SF	33	4.6	57	4.5	86	92	-
Arcata, CA	11,350	FWS	36	13	43	31	64	28	907
Emmitsburg, MD	132	SF	62	18	30	8.3	71	73	1,543
Gustine, CA	3,785	FWS	150	24	140	19	84	86	412

หมายเหตุ ^a Free water surface system

^b subsurface water flow system

ที่มา: (U.S. EPA, 1988)

(2) กำจัดของแข็ง (solid removal)

โดยการตกตะกอนและกรองผ่านชั้นดิน (sedimentation and filtration) การกำจัดของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้นอย่างได้ผลในบึงประดิษฐ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2.2 การกำจัดของแข็งแขวนลอยในบึงประดิษฐ์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วง 2-3 เมตรแรก หลังจากทีน้ำเสียไหลผ่านช่องทางน้ำเข้ามา ซึ่งจะขึ้นกับความนิ่งและความลึกของระดับน้ำด้วย การควบคุมการกระจายน้ำเสียเข้าสู่ระบบด้วยการติดตั้งท่อกระจายน้ำจะสามารถควบคุมความเร็วในการไหลของน้ำให้ลดลงได้ ซึ่งช่วยในการกำจัดของแข็งแขวนลอย และช่วยลดภาระของเสียที่เข้ามาในระบบได้ นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดสภาวะแอนออกซิก (anoxic) ขึ้นที่ส่วนต้นของช่องทางไหลของน้ำอีกด้วย

(3) กำจัดไนโตรเจน (nitrogen removal)

โดยทั่วไปแล้วไนโตรเจนจะถูกกำจัดไปโดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชันเป็นส่วนใหญ่ ส่วนกลไกในการกำจัดไนโตรเจนอื่นๆ ได้แก่การดูดซึมไนโตรเจนเข้าไปในพืช (plant uptake) และการระเหยของไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย (NH_3 volatilization) จากกระบวนการ ammonification nitrification และ denitrification พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในบึงประดิษฐ์มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 25-85 (U.S. EPA, 1988)

(4) กำจัดฟอสฟอรัส (phosphorus removal)

การกำจัดฟอสฟอรัสในบึงประดิษฐ์จะเกิดขึ้นได้ไม่มากนัก เพราะข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาที่น้ำเสียสัมผัสกับดิน ดังนั้นกลไกในการกำจัดฟอสฟอรัสหลักๆ คืออัตราการดูดซึมฟอสฟอรัสเข้าไปในพืช และระยะเวลาที่น้ำเสียสัมผัสกับดิน (U.S. EPA, 1988)

ในกรณีที่มีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดฟอสฟอรัส การใช้ส่วนผสมระหว่างดินเหนียว เหล็ก และอลูมิเนียมจะได้รับความนิยมค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามดินที่จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้ดีต้องเป็นดินที่มีเนื้อละเอียดโดยอาจมีการเติมทรายเข้าไปเพื่อช่วยปรับค่าการนำไฟฟ้า ดังนั้นการเติมเหล็กหรืออลูมิเนียม เข้าไปในชั้นกรอง หรือในน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบ จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบดีขึ้น (Hammer, 1989)

(5) กำจัดแบคทีเรียและไวรัส (bacteria and viruses removal)

เชื้อโรคส่วนใหญ่ที่พบอยู่ในบึงประดิษฐ์ ได้แก่ หนอนพยาธิ แบคทีเรีย และไวรัส เชื้อโรคจำพวกแบคทีเรียและไวรัสจะถูกกำจัดได้ด้วยกลไกต่างๆ ได้แก่ การกินกันและกัน การตกตะกอน การดูดซึม และการตายที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่นการมีแสงอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมต่อการขยายพันธุ์ของเซลล์ เป็นต้น (U.S. EPA, 1988)

ระบบบึงประดิษฐ์ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลาย เช่นน้ำเสียจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำอาศัยการปลดปล่อยออกซิเจนของพืชที่ได้จากการสังเคราะห์แสง กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์ต่างๆ จากจุลินทรีย์ในดิน การดูดซึมสารอาหารของพืชเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต และการกรองสิ่งปนเปื้อนของดินร่วมกัน ซึ่งสามารถบำบัดความสกปรกของน้ำเสียโดยลดปริมาณบีโอดี (BOD) ของแข็งแขวนลอย (TSS) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โลหะหนักและเชื้อโรคบางชนิดได้ (Kadlec, R.H. & Knight R.L., 1996) โดยเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นร่วมกันระหว่างปฏิกิริยาทางชีววิทยา ปฏิกิริยาทางฟิสิกส์เคมี (Ayaz, Aktaş, Findik, Akça, & Kinacı, 2012) ซึ่งการกำจัดมลสารต่างๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำมีกลไกการบำบัด ดังแสดงในตารางที่ 2.2.3

ตารางที่ 2.2.3 กลไกการกำจัดมลสารต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำ

กลไกการกำจัดมลสาร	ของแข็งที่ตกตะกอน (settleable solids)	ของแข็งแขวนลอย (colloidal solids)	บีโอดี (BOD)	ไนโตรเจน (N)	ฟอสฟอรัส (P)	โลหะหนัก	แบคทีเรียและไวรัส
กายภาพ							
- การตกตะกอน	P	S	I	I	I	I	I
- การกรอง	S	S					
- การดูดซับทางกายภาพ		S					
เคมี							
- การตกตะกอน					P	P	
- การดูดซับทางเคมี					P	P	
ชีวภาพ							
- กลไกของแบคทีเรีย		P	P	P			
- กลไกของพืช							S
- การดูดซับโดยพืช				S	S	S	
- การตายโดยธรรมชาติ							P

หมายเหตุ: P หมายถึงกลไกหลัก S หมายถึงกลไกรอง I หมายถึง ผลที่เกิดเสริมจากการกำจัดมลสารอื่น ๆ

2.4 การส่งผ่านออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์

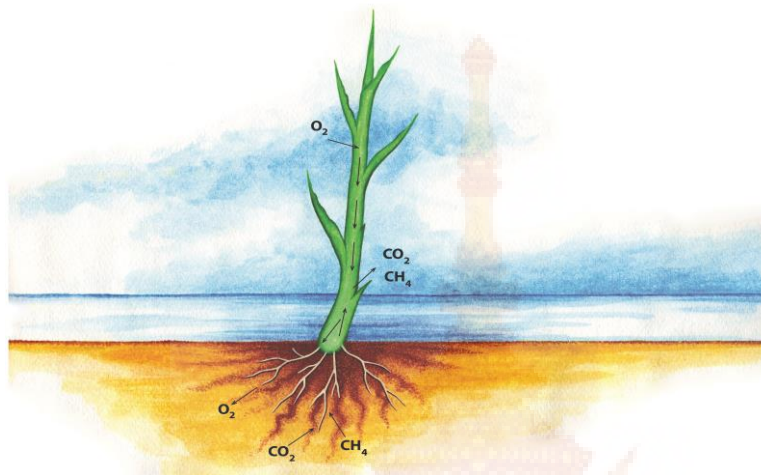
ออกซิเจนเข้าสู่บึงประดิษฐ์ได้โดยกลไกหลัก 2 ทางคือ การพา (convection) และการแพร่ (diffusion)

การพา คือการที่ออกซิเจนในอากาศถูกเหนี่ยวนำให้เข้ามาในระบบโดยการไหลของน้ำ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่เข้ามาในระบบได้ จึงขึ้นกับพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของระบบ เนื่องจากกระบวนการแพร่ของออกซิเจนในน้ำช้ากว่าการแพร่ของออกซิเจนในอากาศ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่จะนำไปใช้ได้ในระบบขึ้นกับอัตราส่วนของน้ำกับอากาศในช่องว่างระหว่างตัวกลางของระบบ ซึ่งการควบคุมไม่ให้เกิดการอุดตันจะช่วยให้การแพร่ของออกซิเจนเกิดได้ดีขึ้น ออกซิเจนในบรรยากาศ ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าในพืช และในชั้นตัวกลางจะแพร่เข้าสู่พืชทางปากใบ ลำเลียงผ่านต้น และปล่อยออกทางราก บริเวณที่อยู่ใกล้รากพืชจะมีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป ออกซิเจนปริมาณนี้บางครั้งพบว่าเพียงพอเฉพาะสำหรับการสั่นดาบของรากเท่านั้น แต่บางกรณีพบว่ามีเหลือพอสำหรับจุลินทรีย์รอบๆ ด้วย

การแพร่ เป็นกระบวนการที่มีการส่งผ่านจากส่วนหนึ่งของระบบไปยังอีกส่วนหนึ่ง อันเป็นผลให้มีการเคลื่อนย้ายโมเลกุลแบบสุ่ม โดยการเคลื่อนย้ายสุ่มนี้จะเกิดจากตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูง (หรือมี partial pressure) สูง ไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.2.2 อัตราการแพร่ของแก๊ส ขึ้นกับ

ตัวกลางที่แก๊สแพร่ผ่าน เช่น น้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส และอุณหภูมิ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (diffusion coefficient)

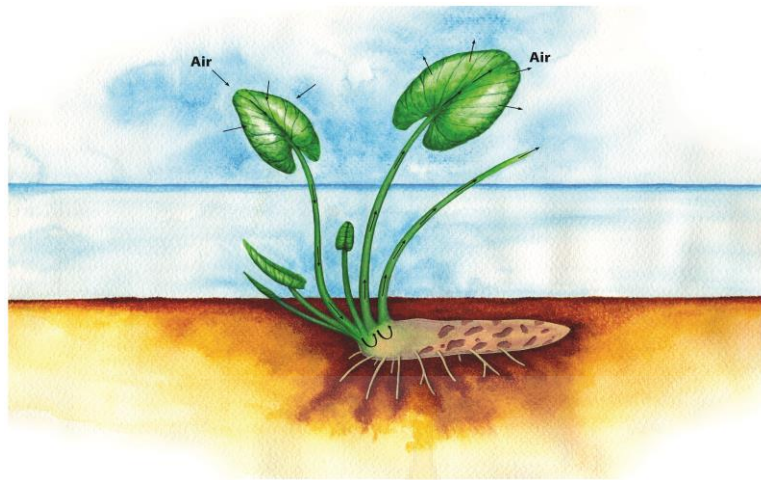
กลไกการส่งผ่านแก๊สภายในพืช เชื่อว่าเป็น passive diffusion ตามความแตกต่างของแก๊สนั้นๆ เช่น ความแตกต่างของออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยออกซิเจนจะมีความเข้มข้นมากในส่วนที่อยู่เหนือดิน และคาร์บอนไดออกไซด์จะมีความเข้มข้นมากในส่วนใต้ดิน และส่งผ่านไปในทิศทางตรงข้าม



รูปที่ 2.2.2 การแพร่ของแก๊สจากตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่มีความเข้มข้นต่ำ

นอกจากนี้ยังมีการพบกลไกการพาของแก๊ส (convection) ในพืชประเภทลอยน้ำ เช่น บัวบางชนิด ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และความดันไอน้ำของภายในใบ และบรรยากาศรอบๆ อากาศจะถูกนำเข้าสู่ลำต้นใต้ดิน และใบที่แก่ จากนั้นจะวนกลับคืนสู่บรรยากาศอีกครั้งด้วยแรงขับ (driving force) ซึ่งเรียกว่า Thermal Transpiration และ Humidity-induced Pressurization ทั้งสองกระบวนการต้องมีช่องว่างที่พอรุนภายในเนื้อเยื่อพืช ซึ่งถ้าจะให้ดีที่สุด ต้องมีขนาดช่องว่างเล็กกว่าขนาดเฉลี่ยของทางแพร่โมเลกุลของแก๊ส (<0.1 ไมโครเมตร) และมีการใช้พลังงานในรูปของความร้อน การเกิด Humidity-induced Pressurization ต้องการ การให้น้ำที่คงที่ภายในพืชอีกด้วย

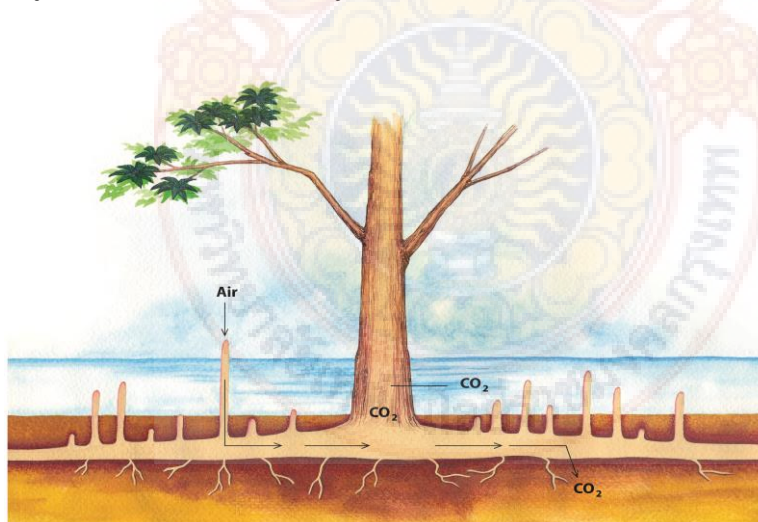
Thermal transpiration เป็นการเคลื่อนที่ของแก๊สผ่านส่วนที่พอรุนในพืช เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละส่วน ซึ่งจะทำให้มีความแตกต่างของความดันเกิดขึ้นโดยในด้านที่ชื้นกว่าจะมีความดันสูงกว่า ในกรณีของต้นบัว ใบที่อ่อนที่สุดจะมีความดันสูงที่สุด ความดันที่เพิ่มขึ้นในใบอ่อนจะส่งผ่านอากาศจากใบ ก้านใบ และลำต้นใต้ดิน และกลับสู่บรรยากาศผ่านทางก้านใบ และแผ่นใบของใบที่แก่กว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.2.3



รูปที่ 2.2.3 การพาของแก๊สในพืชประเภทลอยน้ำ

การแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างช่องว่างของเนื้อเยื่อพืช ส่วนที่อยู่ใต้ดินกับน้ำที่อยู่รอบๆ ก็ทำให้เกิดการพาของอากาศ โดยอาศัยความแตกต่างของการละลายของออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ โดยคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำได้ดีกว่าออกซิเจนถึง 10 เท่า

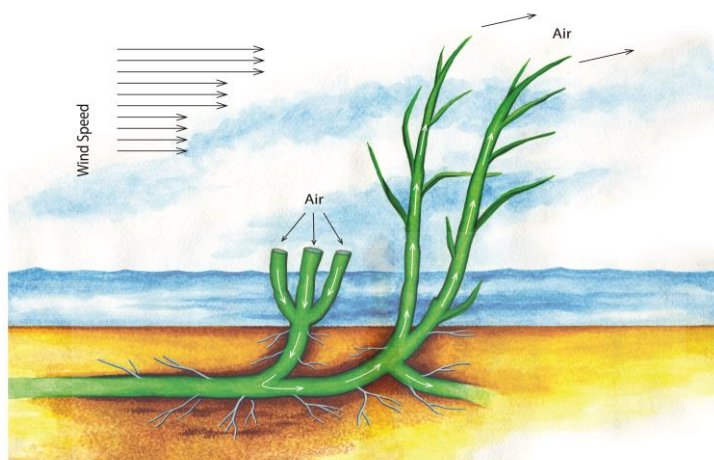
รากอากาศ (air-roots) มี Lenticels จำนวนมาก (ส่วนที่เปิดสู่บรรยากาศ) และต่อเชื่อมกับระบบรากในแนวราบที่อยู่ใต้ดิน รากอากาศจะส่งผ่านออกซิเจนไปยังระบบราก เมื่อระดับน้ำสูงขึ้นปิด Lenticels ความดันในช่องว่างอากาศของรากก็เริ่มลดลง ซึ่งการลดลงนี้เกิดจากการใช้ออกซิเจนโดยระบบราก และมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นจากการหายใจ ความดันในระบบรากจะต่ำลงจนกว่าระดับน้ำลดลง อากาศภายนอกจะเข้าสู่ระบบรากได้อีกดังแสดงในรูปที่ 2.2.4



รูปที่ 2.2.4 การส่งผ่านออกซิเจนของระบบรากโดยอาศัยความแตกต่างของความดัน

อีกชนิดของการพาคือ Venturi-induced convection เกิดจากความแตกต่างของความเร็วกระแสลมรอบๆ ต้นพืช โดยความเร็วลมจะสูงที่สุดที่เรือนยอด ดังแสดงในรูปที่ 2.2.5 Venturi-induced convection เกิดขึ้นโดยความแตกต่างของความดันที่เกิดจากลมพัดยอดที่ตาย ซึ่งอากาศจะถูกดูดลงสู่ราก ผ่านยอดที่หัก

ใกล้พื้นดิน Venturi-induced convection อาจเกิดในต้นพืชที่หัก หรือตาย หรืออาจเกิดในช่วงกลางคืน และ
ฤดูหนาวที่ความแตกต่างของไอน้ำ หรืออุณหภูมิมีน้อยมาก หรือไม่มีเลย



รูปที่ 2.2.5 การส่งผ่านออกซิเจนที่อาศัยความเร็วลมรอบๆ ต้นพืช

2.5 ชนิดพืชที่ใช้ปลูก

2.5.1 หญ้าแฝก

หญ้าแฝก (Vetiver grass)

ชื่อสามัญ : *Vetiveria* spp.

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash ex Small

ชื่อวงศ์ : POACEAE

ชื่ออื่นๆ : แฝก แฝกหอม แฝกลุ่ม แกงหอม แคมหอม Vetiver



รูปที่ 2.2.6 หญ้าแฝก

เป็นพืชตระกูลหญ้าที่ขึ้นเป็นกอหนาแน่นอยู่ตามธรรมชาติทั่วทุกภาคของประเทศจากที่ลุ่มจนถึงที่ดอน สามารถขึ้นได้ดีในดินเกือบทุกชนิด เจริญเติบโตโดยการแตกกอ เส้นผ่าศูนย์กลางกอประมาณ 30 เซนติเมตร ความสูงจากยอดประมาณ 0.5-1.5 เมตร ใบแคบยาวประมาณ 75 เซนติเมตร กว้างประมาณ 8 มิลลิเมตร ค่อนข้างแข็งเจริญเติบโตในแนวตั้งมากกว่าออกทางด้านข้าง และมีจำนวนรากมากจึงเป็นพืชที่ทนแล้งได้ดี รากจะประสานติดต่อกันหนาแน่นเสมือนม่านหรือกำแพงใต้ดิน สามารถกักเก็บน้ำและความชื้นได้ ระบบรากจะแผ่ขยายกว้างเพียง 50 เซนติเมตร โดยรอบกอเท่านั้น ไม่เป็นอุปสรรคต่อพืชที่ปลูกข้างเคียง จึงสามารถนำมาปลูกเพื่อใช้ในการอนุรักษ์ดินและน้ำ ช่วยให้ดินมีความชุ่มชื้นและรักษาหน้าดิน รักษาสภาพแวดล้อมและอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ สามารถนำไปปลูกบนพื้นที่สองข้างทางชลประทาน อ่างเก็บน้ำ บ่อน้ำ ป่าไม้ขอบตลิ่ง คอสะพาน ไหล่ถนน เพื่อป้องกันการชะล้างพังทลายได้

หญ้าแฝก พบกระจายอยู่ทั่วไปหลายพื้นที่ตามธรรมชาติ จากการสำรวจพบว่า มีกระจายอยู่ทั่วโลก ประมาณ 12 ชนิด และสำรวจพบในประเทศไทย 2 ชนิด ได้แก่

(1) กลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกกลุ่ม (*Vetiveria zizanioides* Linn.) ได้แก่ พันธุ์สุราษฎร์ธานี กำแพงเพชร 2 ศรีลังกา สงขลา 3 และพระราชทาน ฯลฯ

(2) กลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกดอน (*Vetiveria nemoralis* Balansa A. Camus) ได้แก่ พันธุ์ราชบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ร้อยเอ็ด กำแพงเพชร 1 นครสวรรค์ และเลย เป็นต้น

ลักษณะพิเศษของหญ้าแฝก

หญ้าแฝก มีลักษณะพิเศษหลายประการ ที่ทำให้มันมีบทบาทในการควบคุมคุณภาพน้ำ (Paul Truong & Barbara Hart, n.d.) ได้แบ่งลักษณะพิเศษเหล่านี้ ออกเป็นลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphological features) และลักษณะทางสรีรวิทยา (physiological features) ดังนี้

ทางสัณฐานวิทยา:

- ลำต้นแข็งตรง สามารถต้านทานกระแส น้ำไหลแรงได้
- กอแน่น หนา เป็นที่กรองกั้นอนุภาค ทั้งละเอียดยและหยาบ
- ระบบรากลึก แผ่กระจาย และเจาะไซ ช่วยยึดลำต้น และจับยึดอนุภาคของดินไม่ให้ถูกพัดพาหรือพังทลาย

ทางสรีรวิทยา:

- ทนทานมากต่อสภาพภูมิอากาศ เช่นอากาศเย็น อากาศร้อน แห้งแล้ง น้ำท่วม พื้นที่สูงๆ ต่ำๆ
- ทนทานอย่างมากต่อสภาพดินวิปลาส เช่น ดินเปรี้ยว ดินด่าง ดินเค็ม ดินที่มีแร่โซเดียม แมกนีเซียม อลูมิเนียม แมงกานีส สูงจนเกิดความเป็นพิษ

- ทนทานต่อระดับความเข้มข้นสูง ๆ ของโลหะหนัก เช่น สารหนู แคดเมียม ทองแดง โครเมียม ตะกั่ว พรอท นิเกิล ซีลีเนียม และสังกะสี

ประโยชน์ของหญ้าแฝก

หญ้าแฝกเป็นหญ้าที่มีคุณประโยชน์มากมาย การนำหญ้าแฝกไปใช้อนุรักษ์ดินและน้ำ ได้ผลอย่างดีมากนอกจากนี้หญ้าแฝกยังมีประโยชน์ในด้านอื่น ๆ อีกมาก มีรายงานวิจัยพบว่าหญ้าแฝกมีความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้นำหญ้าแฝกมาใช้ในการ รักษาและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมได้แก่

- ปลุกหญ้าแฝกเพื่อกำจัดสารพิษจากขยะ เป็นการปลูกสกัดไม่ให้สารพิษในส่วนที่เป็นน้ำไหลออกมาจากกองขยะ วิธีการทำได้โดยการปลุกหญ้าแฝกเป็นแถวเช่นเดียวกับการปลุกหญ้าแฝกล้อมต้นไม้ แต่เป็นการปลุกล้อมกองขยะ โดยในแถวหญ้าแฝกต้นต้องปลูกชิดติดกันเหมือนแนวรั้วหรือกำแพงธรรมชาติ จำนวน 3-5 แถว ห่างกันแถวละ 2 เมตร หรือปลุกหญ้าแฝกเป็นเส้นขวาง ทางน้ำจากกองขยะที่จะไหลไปปนเปื้อนบริเวณที่ต่ำกว่า จำนวน 3-5 แถว ห่างกันแถวละ 2 เมตร

- การปลุกหญ้าแฝกเพื่อลดระดับน้ำใต้ดิน เพื่อป้องกันดินเค็มหรือลดความเป็นกรดเป็นด่าง การ ปลุกหญ้าแฝกเพื่อแก้ปัญหานี้จะปลูกเต็มพื้นที่ที่จะดำเนินการ ลักษณะปลูกแบบด้านาข้าวไร่ระยะ ปลูก ระหว่างต้น และระหว่างแถว 50x50 เซนติเมตร จะช่วยลดระดับน้ำใต้ดินที่เค็ม หรือลดระดับน้ำใต้ดินที่จะ ไป ละลายธาตุที่ทำให้ดินเป็นกรดเพิ่มขึ้น

- การปลุกหญ้าแฝกเพื่อบำบัดน้ำเสีย ปัจจุบันปัญหาน้ำเสียทำให้สภาพแม่น้ำ คูคลองต่างๆ ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ การปลุกหญ้าแฝกเพื่อบำบัดน้ำเสียทำได้ 2 รูปแบบ คือ แบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ได้แก่ ที่มีคัน คูล้อมรอบ วิธีการปลูกจะปลูกเต็มพื้นที่ที่จะดำเนินการใช้ระยะระหว่างต้นและระหว่างแถว 50x50 เซนติเมตร เมื่อหญ้าแฝกเจริญเติบโตมีอายุ 3-4 เดือน จึงปล่อยน้ำเสียลงไปยังให้ล้นคันคู โดยมีน้ำท่วมขังสูง 10-15 เซนติเมตร เป็นเวลา 5-7 วัน จึงระบายน้ำออก และให้น้ำเสียเข้ามา บำบัดใหม่ หมุนวนไปตลอด และต้องตัด ใบหญ้าแฝกทุก 1-2 เดือน นำใบที่ตัดไปทำปุ๋ยหมัก สายพันธุ์หญ้าแฝกที่เหมาะสม เป็นกลุ่มของสายพันธุ์หญ้าแฝกกลุ่ม สายพันธุ์ที่เจริญเติบโตในน้ำเสียได้ดี เช่น สายพันธุ์ใหม่ห้วยหวาย พิจิ และอินโดนีเซีย น้ำเสียที่บำบัด ได้ดี ได้แก่ น้ำเสียจากชุมชน และน้ำเสียจากการเลี้ยงปศุสัตว์ และอีกแบบโดยการปลูกบนแพและปล่อยให้ รากของหญ้าแฝกเจริญเติบโตในน้ำ



รูปที่ 2.2.7 การปลูกหญ้าแฝกเป็นแพลอยน้ำ

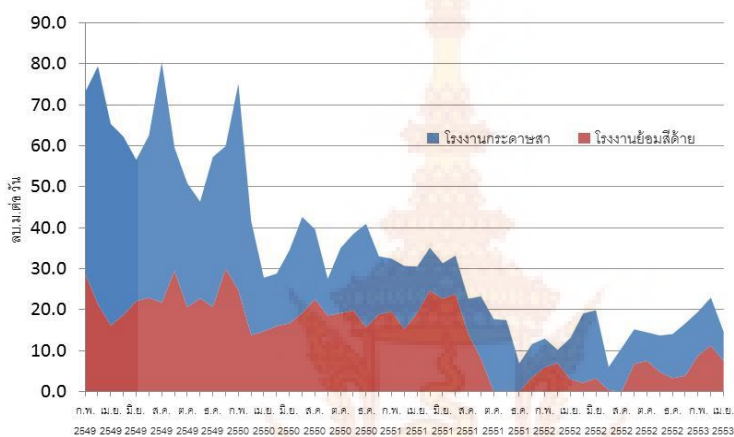
ที่มา: (Paul Truong & Barbara Hart, n.d.)

ในส่วนองหญ้าแฝก ปัจจุบันพบว่าหญ้าแฝก มีลักษณะพิเศษหลายประการ เติบโตได้ทั้งในสภาพแห้งแล้ง และสภาพน้ำท่วมขัง (Boonsong & Monchai, 2007; Dalton, Smith, & Truong, 1996; Xindi Liao, Shiming Luo, Yinbao Wu, & Zhisun Wang, 2003) แฝกเป็นพืชที่ทนทานต่อความเป็นพิษของโลหะหนัก สามารถกำจัดโลหะหนัก เช่น As, Zn และ Cu (Chiu, K.K., 2005) โดย Thares and Sengsai (2003) ใช้หญ้าแฝกปลูกในพื้นที่ชุ่มน้ำเพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมร้อยละ 86.30- 89.29 (Chiu, Ye, & Wong, 2005) ศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้หญ้าแฝก พบว่าในต้นหญ้าแฝกมีปริมาณการสะสมสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ในปริมาณสูงคือร้อยละ 42-67

นอกจากนี้พบว่าหญ้าแฝกสามารถกำจัดสารประกอบพอลิไซคลิก แอโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) (Kong, Lin, Wang, & Luo, 2003) กำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันจากโรงกลั่นน้ำมัน (Xindi Liao, Shiming Luo, Yinbao Wu, & Zhisun Wang, 2003) และการปลูกหญ้าแฝกในลักษณะท่อนไม้ไผ่ลอยน้ำเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในประเทศจีน ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโลหะหนักสูง พบว่าหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ดี ลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้สูงถึงร้อยละ 60 และ 85 ตามลำดับ (Kong et al., 2003; Xindi Liao et al., 2003) หญ้าแฝกจึงเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยหญ้าแฝกสามารถดูดซับธาตุอาหารที่อยู่ในน้ำทิ้งไปใช้ในการเจริญเติบโต ทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น ดังนั้นการนำหญ้าแฝกมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าจะสามารถแก้ไขปัญหาคุณภาพน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมก่อนปล่อยสู่ภายนอก

2.6 ปริมาณน้ำเสียจากพื้นที่โครงการพัฒนาออยตุง

เนื่องจากโรงงานกระดาษสา และย้อมสีเส้นด้าย ไม่มีมาตรวัดน้ำเสีย ดังนั้นจึงไม่สามารถวัด ปริมาณน้ำเสียจากโรงงานดังกล่าวได้โดยตรง โดยตามปกติปริมาณน้ำเสียจากชุมชนจะเป็นร้อยละ 80-90 ของปริมาณน้ำใช้ จากการรั่ว ระบาย และ รดน้ำต้นไม้ แต่การประมาณน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม จะต้องคำนึงถึงลักษณะของกระบวนการผลิตด้วย เช่น มีการต้มน้ำ หรือมีน้ำที่ไปพร้อมกับผลิตภัณฑ์หรือไม่ จากการประเมินกระบวนการผลิต ปริมาณน้ำเสียจากโรงงานทำกระดาษสา ย้อมสี และเซรามิค จะถูกกำหนดเป็นร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำใช้เนื่องจากน้ำที่เสียไปใน กระบวนการต้ม กระบวนการตากหรืออบแห้ง ปริมาณน้ำใช้ของโรงงานแสดงในรูปที่ 2.2.7



รูปที่ 2.2.8 ปริมาณการใช้น้ำสะสมของโรงงานกระดาษสา และย้อมสีเส้นด้าย

จะเห็นว่าปริมาณการใช้น้ำของโรงงานทั้งสอง ลดลงจากประมาณ 80,120 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในช่วงต้นปี 2549 เหลือประมาณ 2,040 ลูกบาศก์เมตรต่อวันในช่วงต้นปี 2553 เนื่องจากการผลิตของโรงงานลดลง แต่อย่างไรก็ตามการใช้น้ำเฉลี่ยของทั้งสองโรงงานในช่วงที่การใช้น้ำค่อนข้างคงที่ (ในช่วงปี 2551-2553) แสดงในตารางที่ 2.2.4

ตารางที่ 2.2.4 ปริมาณการใช้น้ำรายเดือนเฉลี่ยต่อวันของโรงงาน

โรงงาน	ปริมาณการใช้น้ำรายเดือนเฉลี่ยต่อวัน (ลูกบาศก์เมตร)	ปริมาณน้ำเสียต่อวัน (ลูกบาศก์เมตร)
กระดาษสา	12.3	9.8
ย้อมสี	12.0	9.6
รวม	24.3	19.4



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

รูปแบบการทดลองเป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experiment research design) แบ่งการทดลองเป็น 5 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานระหว่างระบบที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ ระบบพืชลอยน้ำ ระบบเติมอากาศเชิงกล

ขั้นตอนที่ 2 ปรับปรุงระบบบึงประดิษฐ์

- (1) ปรับปรุงบึงประดิษฐ์บ่อหนึ่งให้เป็นบ่อเติมอากาศ และปลูกพืชลอยน้ำ
- (2) ติดตั้งปั๊ม เครื่องเติมอากาศ
- (3) ปลูกพืชชุ่มน้ำประเภท กก คล้าน้ำ (ก่อนทดลองอนุบาลให้พืชตั้งตัวได้ก่อน)

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย

- (1) ศึกษาชนิดของพืชน้ำที่เหมาะสม

ตัวแปรควบคุม อัตราการไหลของน้ำ

ตัวแปรตาม ชนิดพืช

วิธีทดลอง ปล่อน้ำเสียจากลงสู่ระบบบำบัด ควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้คงที่ เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- (2) ศึกษาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสม

ตัวแปรควบคุม ชนิดพืช อัตราการไหลของน้ำ

ตัวแปรตาม อัตราการเติมอากาศ

วิธีทดลอง ปล่อน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดด้วยอัตราการไหลคงที่ และชนิดพืชจากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 ควบคุมอัตราการเติมอากาศ เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- (3) ศึกษาอัตราการไหล

ตัวแปรควบคุม ชนิดพืช อัตราการเติมอากาศ

ตัวแปรตาม อัตราการไหล และอัตราการหมุนเวียนน้ำ

วิธีทดลอง ปลอยน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดด้วยชนิดพืชจากการทดลองในขั้นที่ 1 และอัตราการเติมอากาศในขั้นตอนที่ 2 แปรผันอัตราการไหล เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ

ดัชนีคุณภาพน้ำที่วิเคราะห์มีดังนี้ ค่าพีเอช ค่าความนำไฟฟ้า ค่าความขุ่น ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณของแข็งละลาย ค่าซีโอดี ค่าบีโอดี

ใช้วิธีตาม American Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. 1998.

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

(1) วิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพน้ำจากค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

(2) วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ โดยคำนวณจากปริมาณสารในน้ำเข้า และปริมาณในน้ำออกเมื่อสิ้นสุดการทดลองเป็นร้อยละ ดังแสดงในสมการ

$$\% \text{ removal} = 1 - \frac{C_e}{C_i} \times 100$$

C_e เป็นปริมาณสารในน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด

C_i เป็นปริมาณสารในน้ำหลังการบำบัด

(3) ทดสอบค่าเฉลี่ยดัชนีคุณภาพน้ำด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (one - way analysis of variance) โดยการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ ณ ระดับ 0.05 เมื่อพบว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่ากลางด้วยวิธีของทูคี (Turkey) โดยให้ดัชนีคุณภาพน้ำเป็นตัวแปรตาม และอัตราการไหลของน้ำ ความสกปรกของน้ำในรูปบีโอดี ค่าพีเอชของน้ำ และชนิดพืช เป็นตัวแปรต้น

ขั้นตอนที่ 6 สร้างแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของพื้นที่โครงการ

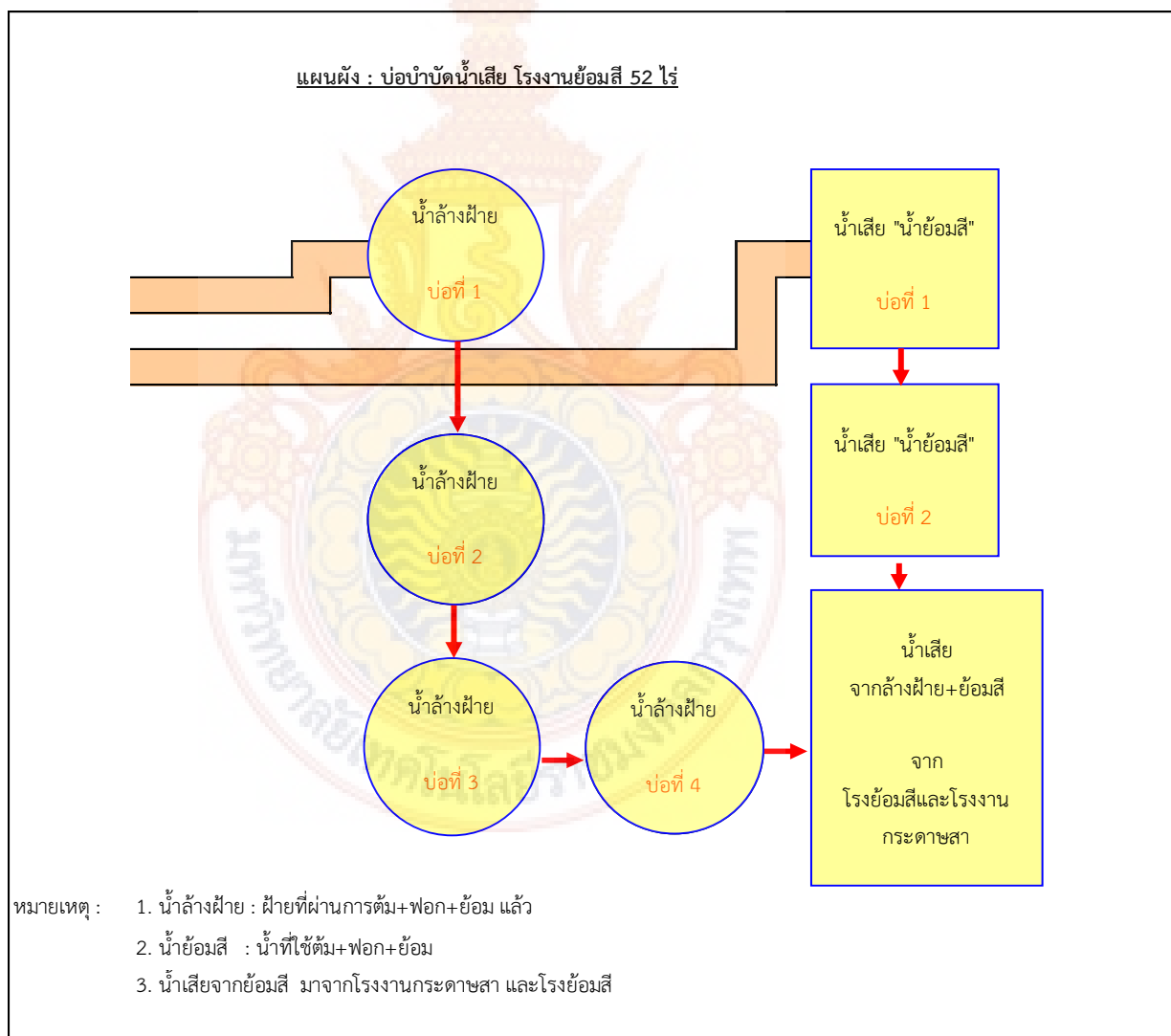
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาเบื้องต้นของระบบบำบัดน้ำเสียพื้นที่โครงการพัฒนาโดยดุง

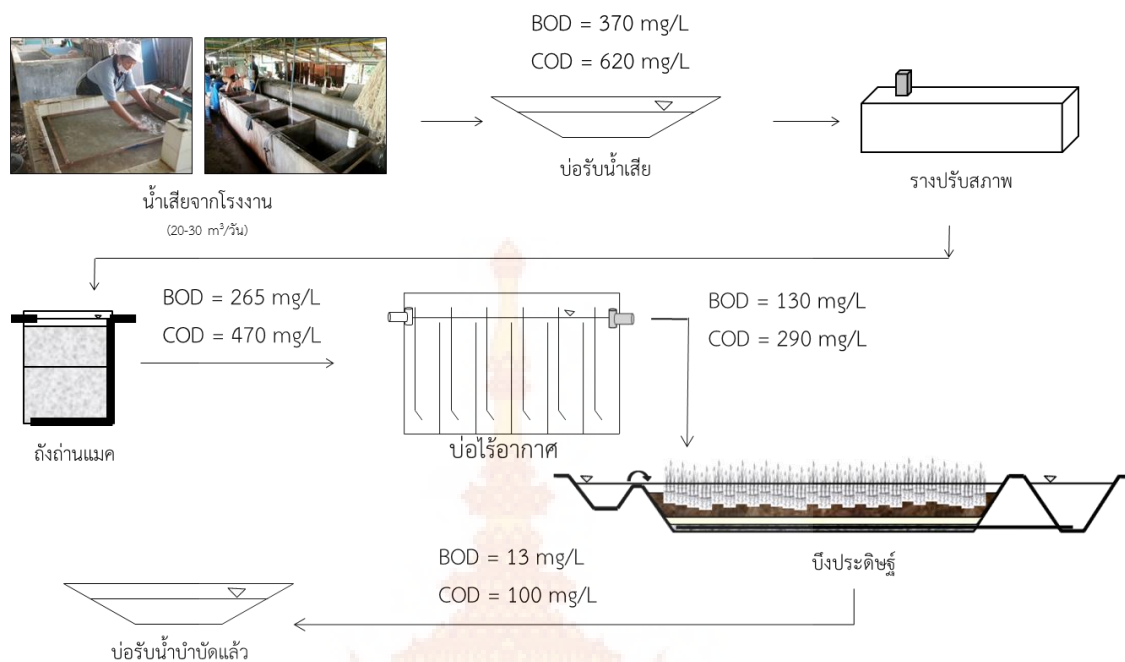
4.1.1 ระบบบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันของพื้นที่โครงการพัฒนาโดยดุงฯ

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานกระดาษสาของพื้นที่โครงการพัฒนาโดยดุงฯ มีปริมาณวันละ 20-30 ลูกบาศก์เมตร ขึ้นกับกระบวนการผลิตในแต่ละวัน น้ำเสียทั้งหมดจะไปรวมที่บ่อรวมก่อนส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย (รูปที่ 4.1.1) โดยน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียมีค่าความสกปรกของน้ำในรูปของบีโอดีเฉลี่ยวันละ 370 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีเฉลี่ยวันละ 620 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.1.1 แผนผังบ่อบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียจากบ่อรวมถูกส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสียปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วยระบบการปรับสภาพฟิโอส การกรองด้วยถ่านแมคคาเดเมีย ระบบบ่อไร้อากาศ และระบบบึงประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1.2



รูปที่ 4.1.2 ระบบบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันของพื้นที่โครงการพัฒนาตอยตุ้งฯ



รูปที่ 4.1.3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินในแนวตั้ง

ระบบบึงประดิษฐ์มีขนาดส่วนบน 27 เมตร x 7 เมตร x 1 เมตร และขนาดส่วนล่าง 25 เมตร x 5 เมตร x 1 เมตร จำนวน 2 บ่อ โดยปลูกกกเหลื่อม และกกกลม อย่างละ 1 บ่อ ออกแบบให้น้ำไหลใต้ผิวดินใน แนวตั้ง ลักษณะของน้ำที่ออกจากระบบในแต่ละขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.1.4

				
น้ำเสียเข้า ระบบบำบัด	น้ำผ่านถึง แมคคาเดเมีย	น้ำผ่านบึงประดิษฐ์ บ่อกกเหลื่อม	น้ำผ่านบึงประดิษฐ์ บ่อกกกลม	น้ำสุดท้ายออก จากระบบ

รูปที่ 4.1.4 ลักษณะของน้ำที่ออกจากระบบในแต่ละขั้นตอน

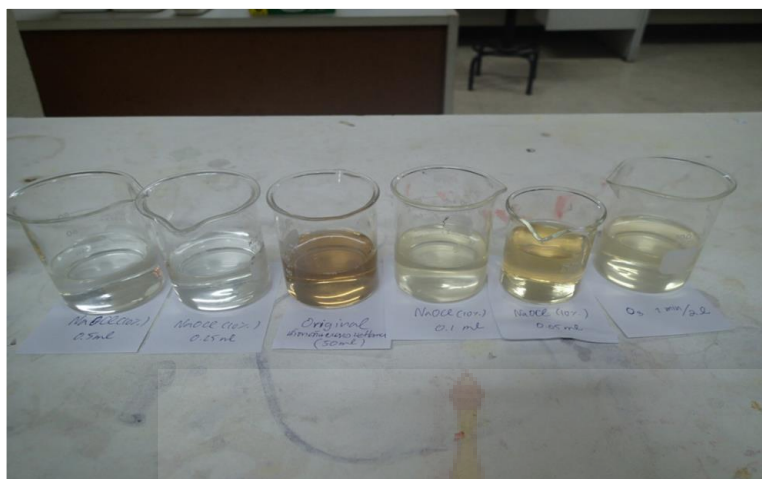
ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในปัจจุบันหลังจากใช้งานได้ 1 ปี พบว่าสามารถกำจัดบีโอดี ร้อยละ 97 และกำจัดซีโอดีร้อยละ 84 แต่ระบบเริ่มมีปัญหาจากการอุดตันของตะกอน ทำให้น้ำเสียไหลล้นออกจากระบบ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงระบบใหม่

4.1.2 ทางเลือกในการกำจัดสีจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม และโรงงานกระดาษสา

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม และโรงงานกระดาษสาของพื้นที่โครงการพัฒนาตอยตุงฯ เป็นน้ำที่มีสีปนเปื้อนซึ่งกำจัดสีออกได้ยาก น้ำที่ผ่านระบบบึงประดิษฐ์ยังคงมีสี ทางเลือกในการกำจัดสีของน้ำเสียมีดังนี้

(1) การกำจัดสีด้วยไฮโดรคลอไรต์

นำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ปริมาณ 50 มิลลิลิตร มากำจัดสีด้วยโซเดียมไฮโดรคลอไรต์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยแปรผันปริมาณโซเดียมไฮโดรคลอไรต์ 0.05, 0.10, 0.25 และ 0.5 มิลลิลิตร ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1.5



รูปที่ 4.1.5 ผลการกำจัดสีด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์

ข้อดีของการกำจัดสีด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์

- สามารถกำจัดสีจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานกระดาษสาได้ในเวลา 1 ชั่วโมง
- ลดค่าบีโอดี และซีโอดี
- มีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพดีขึ้น

ข้อเสียของการกำจัดสีด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์

- มีสารเคมีที่เป็นพิษตกค้างในน้ำเสีย

การติดตั้ง

- ติดตั้งเป็นส่วนสุดท้ายของระบบบำบัด

(2) การกำจัดสีด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

นำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ปริมาณ 50 มิลลิลิตร มากำจัดสีด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 แปรผันปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 0.5 และ 1.0 มิลลิลิตร ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1.6



รูปที่ 4.1.6 ผลการกำจัดสีด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

ข้อดีของการกำจัดสีด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

- สามารถกำจัดสีจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานกระดาษสาได้ในเวลา 1 ชั่วโมง
- ลดค่าบีโอดี และซีโอดี
- มีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพดีขึ้น

ข้อเสียของการกำจัดสีด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

- ราคาสารเคมี

การติดตั้ง

- ติดตั้งเป็นส่วนสุดท้ายของระบบบำบัด

(3) การกำจัดสีด้วยเพนทอนรีเอเจนต์ (hydrogen peroxide + ferric sulfate)

นำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ปริมาณ 50 มิลลิลิตร มากำจัดสีด้วยเพนทอนรีเอเจนต์ โดยใช้สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาณ 0.25 มิลลิลิตร ร่วมกับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยแปรผันปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 0.5 และ 1.0 มิลลิลิตร ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1.7



รูปที่ 4.1.7 ผลการกำจัดสีด้วยเฟนตอนรีเอเจนต์

ข้อดีของการกำจัดสีด้วยเฟนตอนรีเอเจนต์

- สามารถกำจัดสีจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานกระดาษสาได้ในเวลา 1 ชั่วโมง แต่ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะต่ำกว่าการใช้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว
- ลดค่าบีโอดี และซีโอดี
- มีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพดีขึ้น

ข้อเสียของการกำจัดสีด้วยเฟนตอนรีเอเจนต์

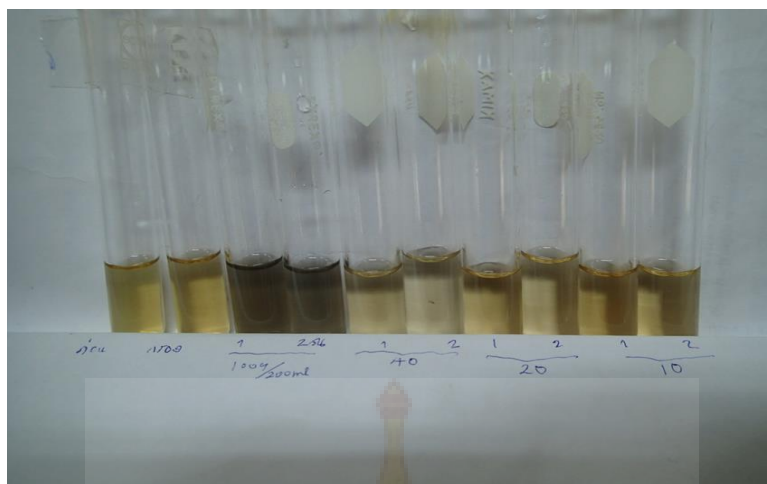
- มีปริมาณตะกอนเคมีเกิดขึ้น

การติดตั้ง

- ติดตั้งเป็นส่วนสุดท้ายของระบบบำบัด

(4) การกำจัดสีด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมีย

นำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์ ปริมาณ 200 มิลลิลิตร มากำจัดสีด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมีย แปรผันปริมาณถ่านกัมมันต์ 10 กรัม 20 กรัม 40 กรัม และ 100 กรัม กวนให้สัมผัสกับน้ำเสียนาน 1 วันและ 2 วัน ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1.8



รูปที่ 4.1.8 ผลการกำจัดสีด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมีย

ข้อดีของการกำจัดสีด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมีย

- สามารถกำจัดสีจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานกระดาษสาได้แต่ต้องใช้ เวลารนานประมาณ 24 ชั่วโมง
- ลดค่าบีโอดี และซีโอดี
- มีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพดีขึ้น

ข้อเสียของการกำจัดสีด้วยถ่านแมคคาเดเมีย

- ราคาถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมีย (ใช้ประมาณ 400 ตันต่อปี)
- ความยุ่งยากในการเตรียมถ่านกัมมันต์

การติดตั้ง

- ติดตั้งเป็นส่วนสุดท้ายของระบบบำบัด

(5) การกำจัดสีด้วยโอโซน

นำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์ มาผ่านโอโซนเป็นเวลานาน 10 นาที ได้ผลแสดงดังรูปที่

4.1.9



รูปที่ 4.1.9 ผลการกำจัดสีด้วยโอโซน

ข้อดีของการกำจัดสีด้วยโอโซน

- สามารถกำจัดสีจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานกระดาษสาได้ใน 10 นาที
- กำจัดบีโอดี และซีโอดี
- ช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำ
- ไม่มีสารพิษตกค้างในน้ำเสีย
- มีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพดีขึ้น
- ข้อเสียของการกำจัดสีด้วยโอโซน
- มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และการบำรุงรักษา

การติดตั้ง

- ติดตั้งได้ทั้งก่อนและหลังระบบบำบัด

4.1.3 ทางเลือกในการปรับปรุงระบบ

ทางเลือกที่ 1 เปลี่ยนตัวกรอง และเพิ่มบ่อบึงประดิษฐ์อีก 1 บ่อ

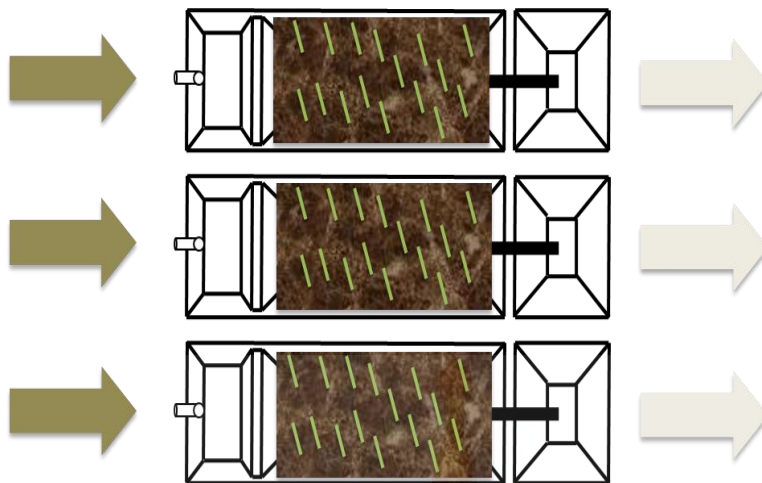
เงินลงทุน ค่าก่อสร้างระบบบึงประดิษฐ์เพิ่ม 1,230,000 บาท

ค่าเปลี่ยนตัวกรอง 860,000 บาท

ค่าบำบัด 78 baht/m³

ข้อดี ระบบสามารถกำจัดสีได้ดีขึ้นเพราะเพิ่มตัวกรอง และไม่มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

ข้อเสีย มีค่าใช้จ่ายสูงเกี่ยวกับการปรับปรุงระบบ และการปลูกพืชใหม่ และมีแนวโน้มของปัญหาอุดตัน อีกในอนาคต



รูปที่ 4.1.10 ทางเลือกที่ 1 ในการปรับปรุงระบบ

ทางเลือกที่ 2 เอาตัวกรองออกจากระบบ ติดตั้งเครื่องเติมอากาศ 4 เครื่องในแต่ละบ่อ และติดตั้งเครื่องโอโซน (Ozone reduce 1/3 of BOD)

เงินลงทุน ค่าปรับปรุงระบบ 760,000 บาท ค่าเครื่องโอโซน 1,000,000 บาท

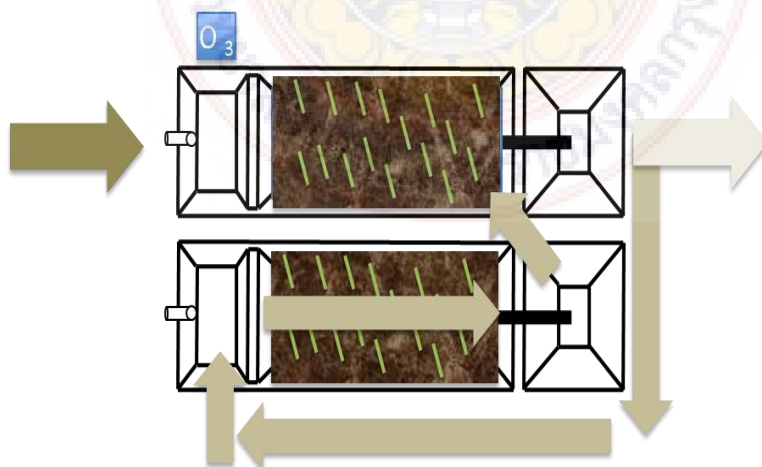
ค่าบำรุงรักษาระบบ 80,000 บาทต่อปี

ค่าไฟฟ้า 230,000 บาทต่อปี

ค่าบำบัด 27 บาท/m³

ข้อดี ระบบสามารถกำจัดได้ดีขึ้นเพราะเพิ่มตัวกรอง และไม่มีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนตัวกรอง ในแต่ละปี

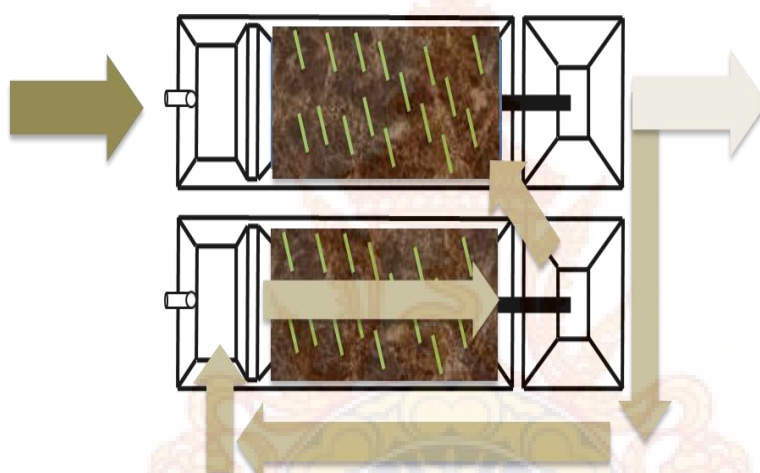
ข้อเสีย ค่าใช้จ่ายสูงด้านพลังงาน และค่าเครื่องผลิตโอโซน



รูปที่ 4.1.11 ทางเลือกที่ 2 ในการปรับปรุงระบบ

ทางเลือกที่3	เอาตัวกรองออกจากระบบ ติดตั้งเครื่องเติมอากาศ 4 เครื่องในแต่ละบ่อ และติดตั้งระบบพีชลอยน้ำ ร่วมกับรางพีช
เงินลงทุน	ค่าปรับปรุงระบบ 760,000 บาท ค่าบำบัด 17 baht/m ³ ค่าไฟฟ้า 230,000 บาทต่อปี
ข้อดี	ระบบสามารถกำจัดสีได้ดี และไม่มีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนตัวกรองในแต่ละปี
ข้อเสีย	ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

จากการพิจารณาทั้ง 3 ทางเลือกงานวิจัยนี้เลือกใช้ทางเลือกที่ 3 โดยการเอาตัวกรองออกจากระบบเดิม ติดตั้งเครื่องเติมอากาศ 2 เครื่องในแต่ละบ่อ และติดตั้งระบบพีชลอยน้ำ ร่วมกับรางพีช



รูปที่ 4.1.12 ทางเลือกที่ 3 ในการปรับปรุงระบบ

4.2 การทดสอบความเหมาะสมของพีชที่ใช้ปลูกในบึงประดิษฐ์

ทดสอบความเหมาะสมของพีชที่ใช้ปลูกในบึงประดิษฐ์โดยใช้บ่อวงซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร จำนวน 10 บ่อ ปลูกพืชจำนวน 3 ชนิด คือ กก ธูปฤาษี และแฟก ชนิดละ 3 บ่อ โดยมีหนึ่งบ่อเป็นบ่อควบคุม (ไม่ปลูกพืช) แต่ละบ่อปูด้วยกรวดสูงประมาณ 5 เซนติเมตร ทรายหยาบสูงประมาณ 10 เซนติเมตร และดินเหนียว (สีดำ) ผสมทรายประมาณ 20 เซนติเมตร ด้านล่างของบ่อมีท่อรูปกากบาทเจาะรู เพื่อรับน้ำเสียหลังจากผ่านชั้นตัวกลางแล้ว ในระหว่างการทดลอง ในทุกวัน ในแต่ละบ่อจะมีการนำน้ำเสียที่ผ่านชั้นกรองแล้วจากด้านล่างออก ปริมาตร 5 ลิตร และจากนั้นจะมีการเติมน้ำเสียก่อนบำบัดในปริมาตรที่เท่ากันเข้าจากทางด้านบนของบ่อการเก็บตัวอย่าง เก็บตัวอย่างทุกสัปดาห์



รูปที่ 4.2.1 การเตรียมบ่อดสอบชนิดพีช



รูปที่ 4.2.2 บ่อดสอบพีช (ก่อนการทดสอบ)



รูปที่ 4.2.3 บ่อดสอบพีช (หลังการทดสอบ)



รูปที่ 4.2.4 รูปถ่ายหลังการทดสอบ



รูปที่ 4.2.5 กกหลังการทดสอบ



รูปที่ 4.2.6 แผลกหลังการทดสอบ



รูปที่ 4.2.7 ตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อที่ปลูกพืชชนิดต่างๆ

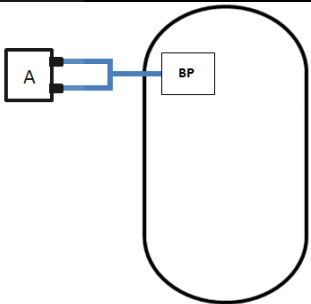
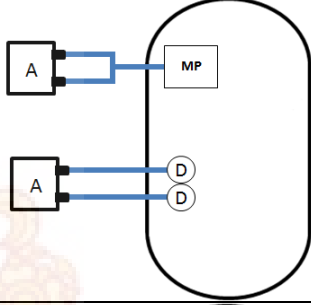
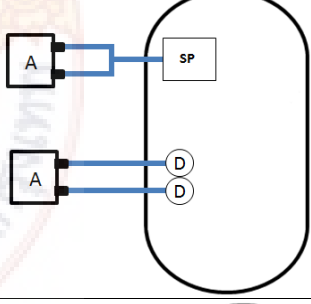
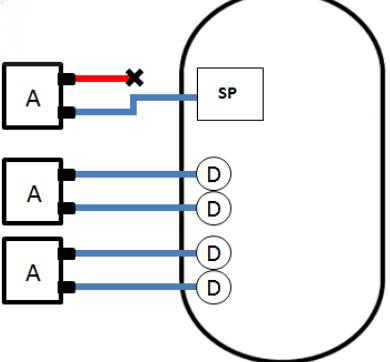
จากการทดสอบใช้ กก แฝก และรูปถ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากพื้นที่โครงการพบว่า รูปถ่าย มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาเป็นกก และแฝก ในการใช้พืชงานวิจัยนี้เลือกใช้กก เนื่องจากรูปถ่ายจะมีปัญหาเรื่องการแพร่กระจายของดอกรูปถ่าย และกกเป็นพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อได้อีก



4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนด้วยเครื่องเติมอากาศ

ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ โดยใช้น้ำปริมาตร 140 ลิตร เติบเครื่องเติมอากาศในลักษณะต่างๆ ดังตารางที่ 4.3.1 – 4.3.2 และตารางผนวก ก1-ก10

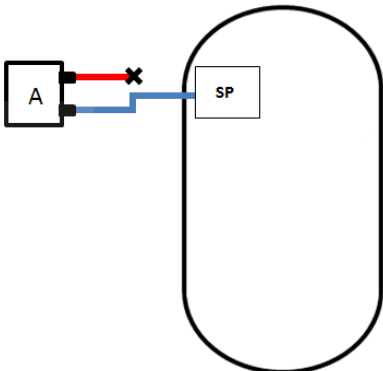
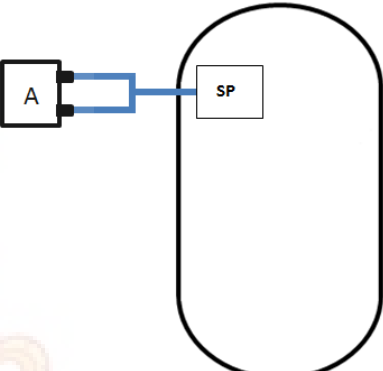
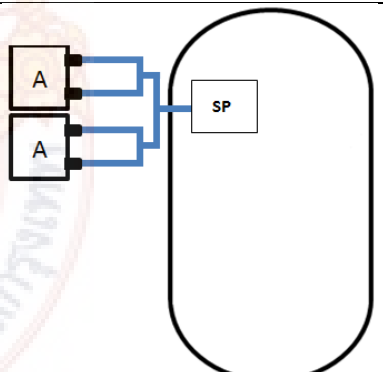
ตารางที่ 4.3.1 รูปแบบการทดลองของเครื่องให้อากาศ

รูปแบบ	อัตราการไหลของปั๊ม (L/min)	จำนวนปั๊มน้ำ	จำนวนเครื่องให้อากาศ	จำนวนหัวฟู่	รูปแบบการจัดวาง
A1	2000	1	1	-	
A2	900	1	2	2	
A3	600	1	2	2	
A4	600	1	3	4	

ตารางที่ 4.3.1 รูปแบบการทดลองของเครื่องให้อากาศ (ต่อ)

รูปแบบ	อัตราการไหลของปั๊ม (L/min)	จำนวนปั๊มน้ำ	จำนวนเครื่องให้อากาศ	จำนวนหัวฟู	รูปแบบการจัดวาง
A5	600	1	3	4	
A6	600	1	4	4	
A7	600	1	6	4	
A8	600	1	1	-	

ตารางที่ 4.3.1 รูปแบบการทดลองของเครื่องให้อากาศ (ต่อ)

รูปแบบ	อัตราการไหล ของปั๊ม (L/min)	จำนวน ปั๊มน้ำ	จำนวน เครื่องให้ อากาศ	จำนวน หัวฟู	รูปแบบการจัดวาง
A8	600	1	1	-	
A9	600	1	2	-	
A10	600	1	4	-	

- หมายเหตุ
- BP** = เครื่องเติมอากาศขนาดเล็ก อัตราการไหลของน้ำ 600 ลิตรต่อนาที
 - MP** = เครื่องเติมอากาศขนาดกลาง อัตราการไหลของน้ำ 900 ลิตรต่อนาที
 - SP** = เครื่องเติมอากาศขนาดใหญ่ อัตราการไหลของน้ำ 1,200 ลิตรต่อนาที
 - A** = ปื้มอากาศ
 - D** = หัวกระจายอากาศแบบหัวฟู ชนิดที่ใช้กับตุปลา

ตารางที่ 4.3.2 อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะมาตรฐาน

รูปแบบการทดลอง	อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (gO_2/hr)	อัตราการไหลของปื้ม (L/hr)
A1	3.38	2000
A2	3.02	900
A3	2.07	600
A4	2.71	
A5	3.98	
A6	3.96	
A7	4.15	
A8	1.67	
A9	2.10	
A10	2.64	

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ปื้มน้ำที่มีอัตราไหลมากขึ้น อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะมาตรฐานจะมีค่ามากขึ้นด้วย และเมื่อใช้ลูกฟูก่วมกับปื้มน้ำให้อากาศ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะมาตรฐานจะมีค่ามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งรูปแบบการให้อากาศแบบมีปื้มให้อากาศ 4 ตัว ปื้มน้ำขนาดกลาง 1 ตัว ร่วมกับลูกฟูก 4 ตัว (A7) ให้อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะมาตรฐานมากที่สุด คือ 4.15 กรัมออกซิเจนต่อชั่วโมง และรูปแบบการให้อากาศที่มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะมาตรฐานน้อยที่สุด คือรูปแบบที่มีปื้ม

น้ำขนาดเล็ก 1 เครื่องและปั๊มให้อากาศ ที่ให้อากาศเพียงหนึ่งช่องจำนวน 1 เครื่อง (A8) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.67 กรัมออกซิเจนต่อชั่วโมง

เนื่องจากบ่อบำบัดจำลอง มีปริมาณความจุ 140 ลิตร เมื่อเทียบกับขนาดบ่อบำบัดจริง ซึ่งมีปริมาณความจุ 125 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นบ่อบำบัดจริงจึงมีขนาดใหญ่ประมาณ 963 เท่าของขนาดความจุของบ่อบำบัดจำลอง และเครื่องให้อากาศที่จะใช้ในบ่อบำบัดจริงคือ เครื่องให้อากาศชัยพัฒนา รุ่น RX-5C มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ประมาณ 1.8 ถึง 2.0 กิโลกรัมออกซิเจนต่อชั่วโมงต่อแรงม้า หรือ 3.6 ถึง 4.0 กิโลกรัมออกซิเจนต่อชั่วโมงต่อแรงม้า เพื่อให้ได้เครื่องให้อากาศที่เหมาะสมกับบ่อบำบัดจำลอง เมื่อนำมาคำนวณทางคณิตศาสตร์ จะได้ว่า อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานของเครื่องให้อากาศในบ่อบำบัดจำลองจะมีค่าประมาณ 3.74 ถึง 4.15 กรัมออกซิเจนต่อชั่วโมง ดังนั้นรูปแบบการทดลองของเครื่องให้อากาศที่เหมาะสมก็คือ A7

แต่เนื่องจากรูปแบบการทดลอง A7 ทำให้เกิดการไหลวนของน้ำภายในถังช้า เพื่อให้เกิดภาวะที่เหมาะสมกับการทดลอง จึงเลือกใช้รูปแบบการทดลอง A9 จำนวน 2 เครื่อง โดยทำให้น้ำมีการไหลวนไปในทิศทางเดียวกัน



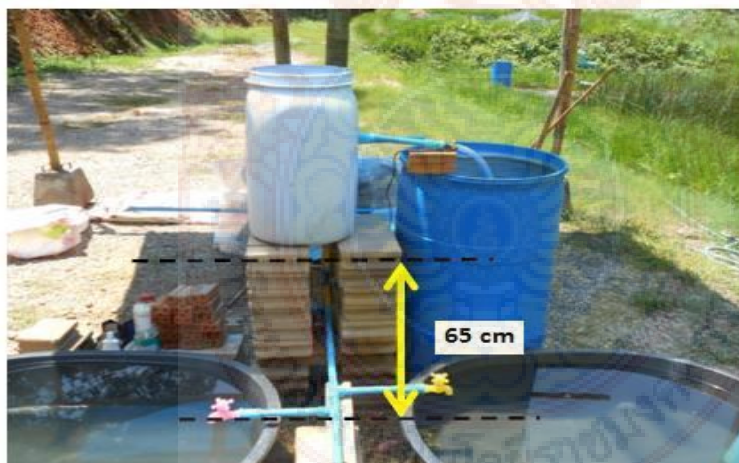
4.4 การออกแบบและสร้างระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบระบบจริง (pilot-scale)

การออกแบบและสร้างระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบระบบจริง (pilot-scale) โดยผสมผสานระหว่างระบบพืชกรองน้ำ ร่วมกับเครื่องกลเติมอากาศโดยสร้างและทดลอง ณ พื้นที่โครงการพัฒนาออยตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ แสดงดังรูปที่ 4.4.1

โรงเรือนขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 3.8 เมตร x 5.9 เมตร x 2 เมตร มุงหลังคาโรงเรือนด้วยแผ่นพลาสติกใส



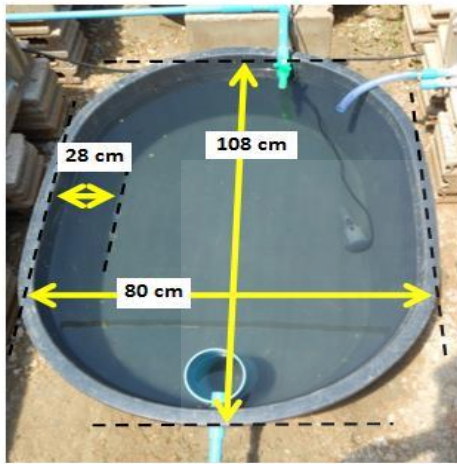
รูปที่ 4.4.1 โรงเรือนจำลอง



รูปที่ 4.4.2 ถังควบคุมระดับน้ำ

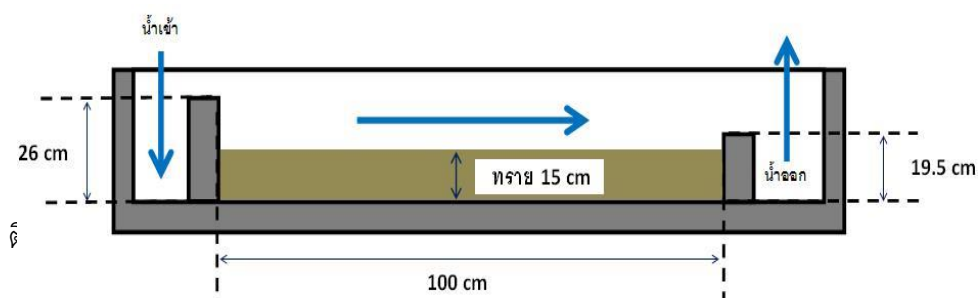
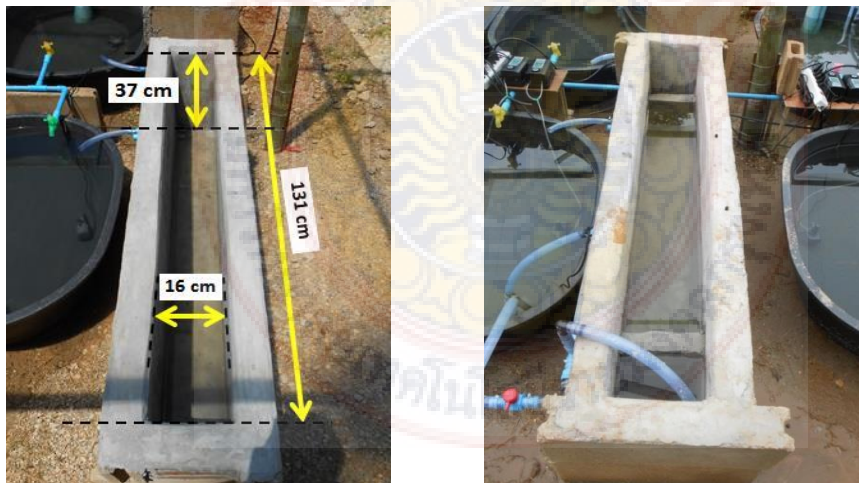
ระบบกระจายน้ำ ประกอบด้วยถังพักน้ำเสียขนาดความจุ 200 ลิตร และถังควบคุมอัตราการไหลของน้ำทิ้ง ขนาดความจุ 50 ลิตร สูงจากพื้น 65 เซนติเมตร โดยป้อนน้ำทิ้งเข้าสู่ระบบตลอดเวลา ควบคุมอัตราการไหลที่ 1.3 ลิตรต่อชั่วโมง (31.2 ลิตรต่อบำบัดต่อวัน) โดยใช้วาล์วในการปรับอัตราการไหลของน้ำเสียจ่ายให้กับระบบบำบัด

ระบบถังบำบัดน้ำเสียจำลอง กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 80 x 108 x 28 เซนติเมตร ความจุ 130 ลิตร เเจาะรูน้ำทิ้งที่ความสูง 24 เซนติเมตร ในบริเวณดังกล่าว ติดตั้งท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ในแนวตั้งใน ระดับที่สูงกว่าท่อน้ำทิ้ง เพื่อสร้างสภาวะน้ำนิ่ง ป้องกันตะกอนออกจากถังบำบัด

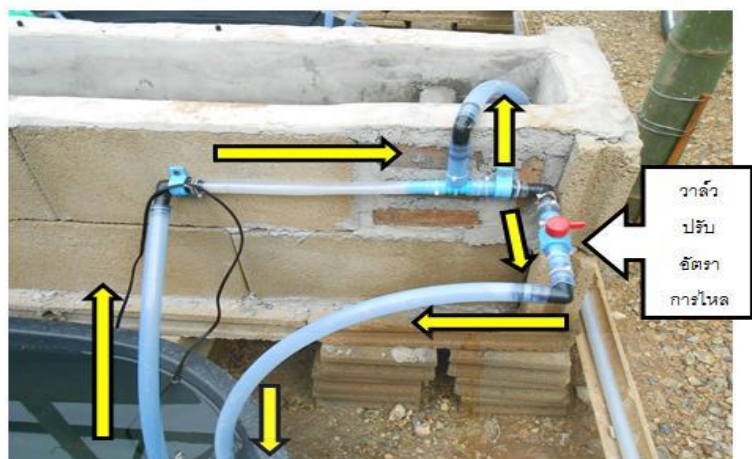


รูปที่ 4.4.3 ขนาดและรูปแบบบ่อบำบัดจำลอง

รางพีช ขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 16 x 131 x 37 เซนติเมตร โดยยกรางพีชให้สูงจากพื้น 27 เซนติเมตร เพื่อให้ น้ำไหลกลับลงบ่อบำบัด ก่อปูนทางกันน้ำที่เข้าสู่บริเวณที่ปลุกพีช สูง 26 เซนติเมตร และ ทางกันน้ำออก สูง 19.5 เซนติเมตร รางพีชทำจากอิฐบล็อก และฉาบปูนที่ผสมสารกันซึม เพื่อป้องกันการซึม ของน้ำ บริเวณที่จะปลุกพีช มีความยาว 1 เมตรโดยใส่ทรายให้สูง 15 เซนติเมตร



รูปที่ 4.4.4 ขนาดและรูปแบบรางพีช



รูปที่ 4.4.5 รูปแบบการทำงานของปั๊มในรางพีช

เนื่องจากปั๊มน้ำที่ใช้ ไม่สามารถปรับความเร็วรอบได้ ทำให้ไม่สามารถปรับอัตราการไหลที่ตัวปั๊มได้ จึงสร้างท่อระบายน้ำ (drain) เพื่อปรับให้น้ำเสียบางส่วนไหลกลับไปยังบ่อบำบัดจำลอง ซึ่งทำให้สามารถปรับอัตราการไหลเข้าสู่รางพีชได้

4.5 การจัดการพีชที่ใช้ในระบบบำบัดจำลอง

การผสมผสานระหว่างพีชลอยน้ำ รางพีช และระบบเติมอากาศ ในส่วนของรางพีชเลือกใช้ต้นคัล้าน้ำ และในส่วนของพีชลอยน้ำเลือกใช้ต้นกกกลม

4.5.1 การอนุบาลพีช

การอนุบาลต้นคัล้าน้ำ มีขั้นตอนดังนี้

- (1) ล้างดินเหนียวออกจากรากพีช



รูปที่ 4.5.1 ล้างดินเหนียวออกจากรากต้นคล้าน้ำ

(2) นำคล้าน้ำที่ล้างดินเหนียวออก ใส่ลงกระถางเดิมที่ล้างดินออกแล้ว จากนั้นเติมถ่านแมคคาเดเมียลงไปประมาณ 4/5 ของขนาดกระถาง (หรืออาจมากกว่า เพื่อให้พืชทรงตัวอยู่ได้) จากนั้นเติมน้ำจนเต็ม



รูปที่ 4.5.2 การทำให้ต้นคล้าน้ำทรงตัวโดยใช้ถ่านแมคคาเดเมีย

(3) ตัดแต่งใบที่หักและเหลือง คัดแยกคล้าน้ำ โดยแยกต้นที่มีลำต้นขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ จากนั้นนำไปไว้ที่บริเวณอนุบาล



รูปที่ 4.5.3 สถานที่อนุบาลต้นคล้าน้ำ

(4) อนุบาลคล้าน้ำประมาณ 1 สัปดาห์ เพื่อให้พืชปรับตัว

การอนุบาลต้นกกกลม

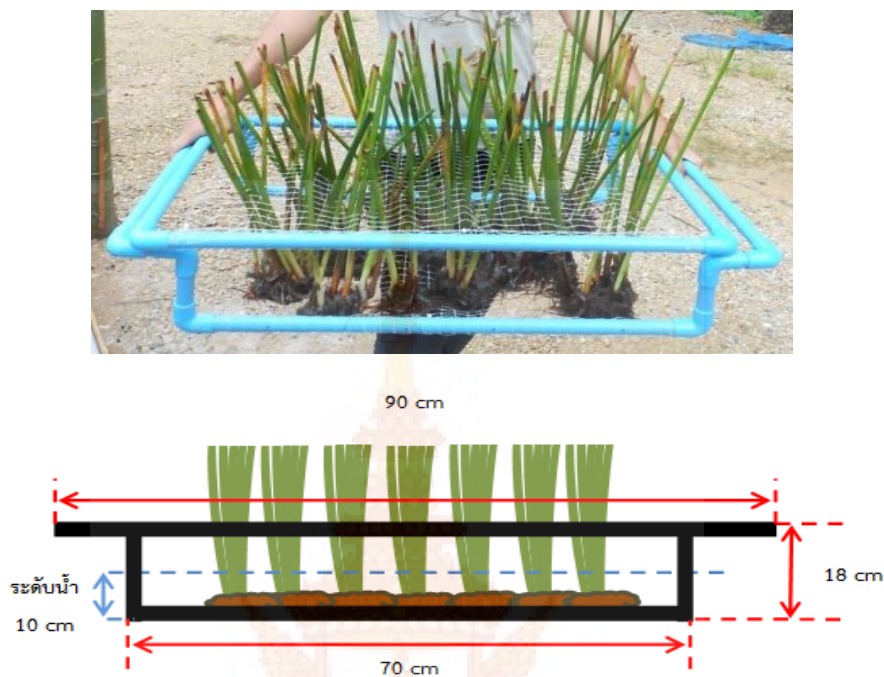
เนื่องจากต้นกกกลมที่นำมาใช้มีอยู่ในระบบเดิมอยู่แล้ว จึงไม่ได้อนุบาล วิธีการเตรียมต้นกกกลมมีดังนี้

- (1) นำต้นกกกลมจากบ่อบำบัดในระบบเดิม ล้างดินออก
- (2) แบ่งต้นกกกลมออกเป็นกอขนาดเล็ก
- (3) จัดเรียงต้นกกกลมใส่ในราง โดยใส่ต้นกกกลมในแต่ละรางให้มีน้ำหนักโดยเฉลี่ยรางละ 3

กิโลกรัม

4.5.2 การจัดวางพืชในระบบบำบัด

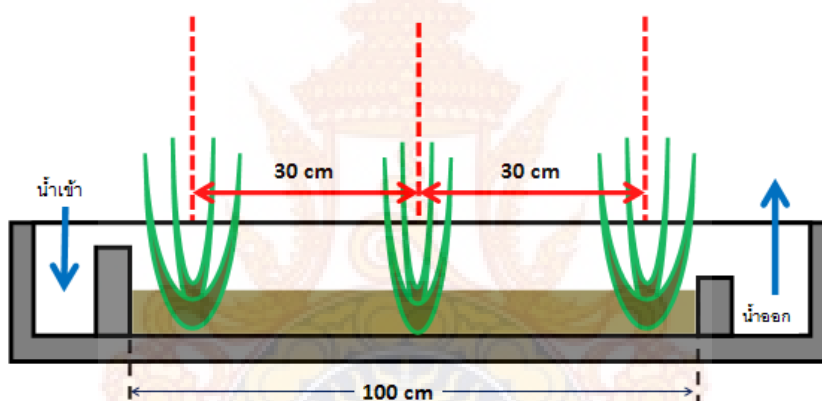
ในการทดลองนี้ปลูกต้นกกกลมโดย นำมาปลูกแบบแพลอยน้ำ ที่ทำจากท่อพีวีซี ลักษณะการจัดวางต้นกกกลม แสดงดังรูปที่ 4.5.4



รูปที่ 4.5.4 ขนาดและรูปแบบวางต้นกก

การวางต้นกกกลม จะวางให้มีความหนาแน่นประมาณ 4 ใน 5 ของพื้นที่ราง หรือ 1 ใน 2 ของพื้นที่บ่อบำบัด ให้ส่วนรากของต้นกกกลมจะจมในน้ำประมาณ 10 เซนติเมตร (รูปที่ 4.4.4) โดยใช้ตะแกรงพลาสติกเป็นตัวรองรับในส่วนของรากและการทรงตัวของต้นกกกลม ท่อพีวีซี ที่ใช้เป็นโครงจะเจาะรูเพื่อรักษาปริมาณน้ำเสียในบ่อบำบัด ตัวรางมีน้ำหนักประมาณ 1.3 กิโลกรัม

การจัดวางต้นคล้าน้ำ



รูปที่ 4.5.5 รูปแบบการวางต้นคล้าน้ำในรางพืช

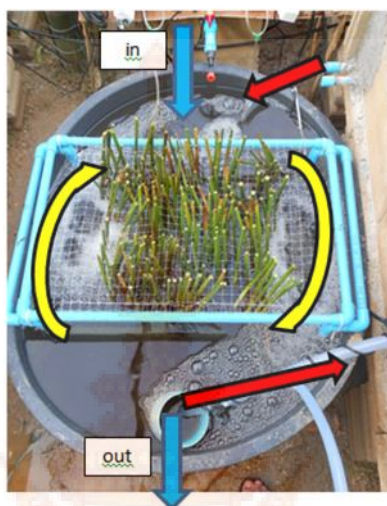
การวางต้นคล้าน้ำจะวางจำนวน 3 กอ ต่อ รางพืช โดยกอที่อยู่ตรงกลางจะมีขนาดเล็กกว่าสองกอที่เหลือ อัตราการไหลเข้าสู่รางพืชประมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

4.5.3 การควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียก่อนบำบัด

ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบที่ 21-23 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยใช้วาล์ว (บ่อบำบัดจริงมีปริมาตร 125 ลูกบาศก์เมตร ส่วนแบบจำลองมีปริมาตร 130 ลิตร ซึ่งมีขนาดต่างกันอยู่ประมาณ 963 เท่า ในขณะที่อัตราการไหลของน้ำเสียจริงมีปริมาณ 30 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังนั้น อัตราการไหลของน้ำเสียในแบบจำลองจึงมีปริมาณ 31.2 ลิตรต่อวัน หรือ 1.3 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 22 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย

ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียจำลองระบบพืชลอยน้ำ และรางพีช ร่วมกับการเติมอากาศ ใช้เครื่องเติมอากาศ 2 เครื่อง วางชิดริมด้านในบ่อบำบัด ภายในบ่อเติมอากาศมีระบบพืชลอยน้ำ (ต้นกก) และมีระบบดูดน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศเข้าสู่รางพีช และน้ำที่ไหลผ่านรางพีชแล้วจะไหลกลับสู่ระบบเติมอากาศในทิศทางตรงข้ามโดยทำซ้ำ 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4.5.1

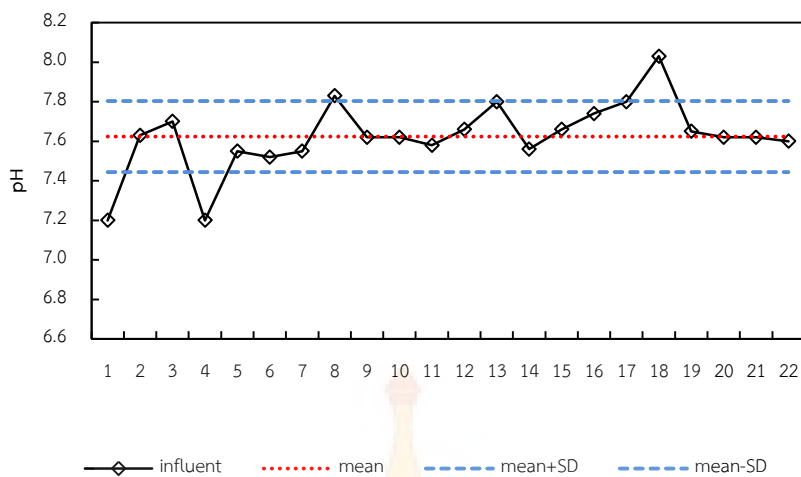


รูปที่ 4.5.1 ระบบบำบัดน้ำเสียจำลองระบบพืชลอยน้ำ และรางพีช ร่วมกับการเติมอากาศ

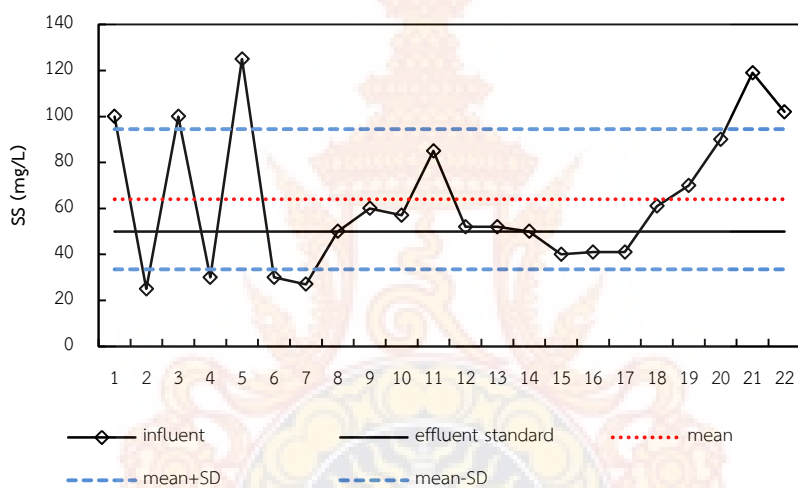
ก่อนทดลอง นำน้ำเสียจากบ่อเก็บน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดโดยผ่านบึงประดิษฐ์ของระบบเดิมมาแล้ว เพื่อให้พืชปรับตัวกับน้ำเสียได้ เป็นเวลา 5 วัน โดยป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบในแต่ละบ่อที่อัตราการไหลประมาณ 21 – 23 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ หลังจากปรับสภาพของระบบบ่อบำบัดน้ำเสียจำลองครบ 5 วัน เริ่มทดลองโดยเปลี่ยนน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบจากน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดโดยผ่านบึงประดิษฐ์ เป็นน้ำเสียที่ไหลออกจากบ่อไร้อากาศ ควบคุมอัตราการไหลประมาณ 21 – 23 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ และเก็บน้ำตัวอย่างทุกสัปดาห์ โดยเก็บบริเวณจุดทางน้ำออกของแต่ละบ่อบำบัด

4.5.1 สมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง

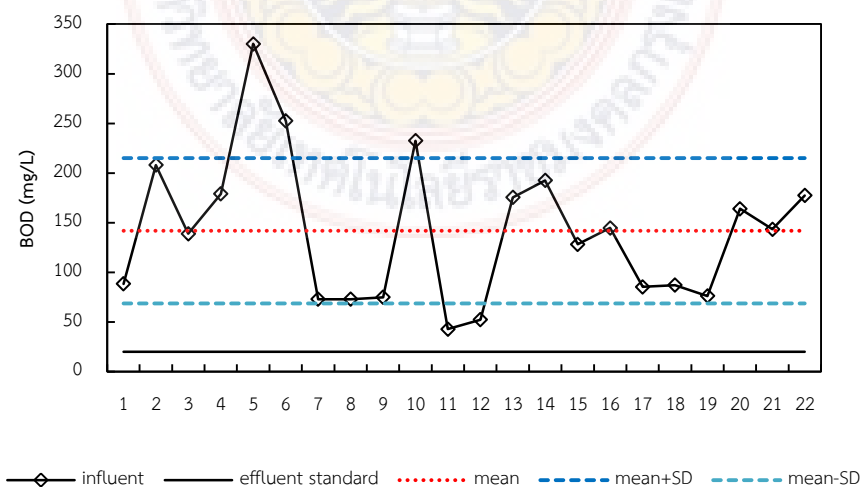
ศึกษาสมบัติของน้ำเสียที่ไหลออกจากบ่อไร้อากาศ เพื่อนำมาบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียทุกสัปดาห์ นำมาวิเคราะห์ ค่าพีเอช ของแข็งแขวนลอย บีโอดี ซีโอดี ออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรดไนโตรเจน ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ ข1-ข7 และรูปที่ 4.5.2-4.5.8



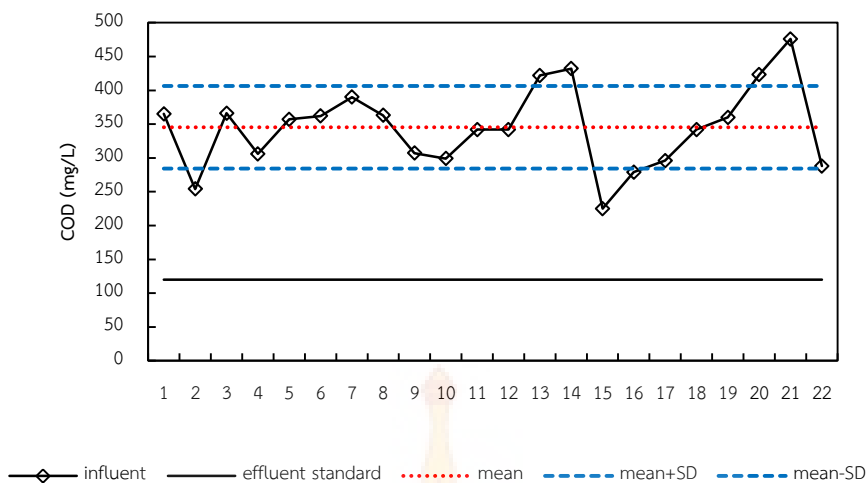
รูปที่ 4.5.2 พีเอชของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด



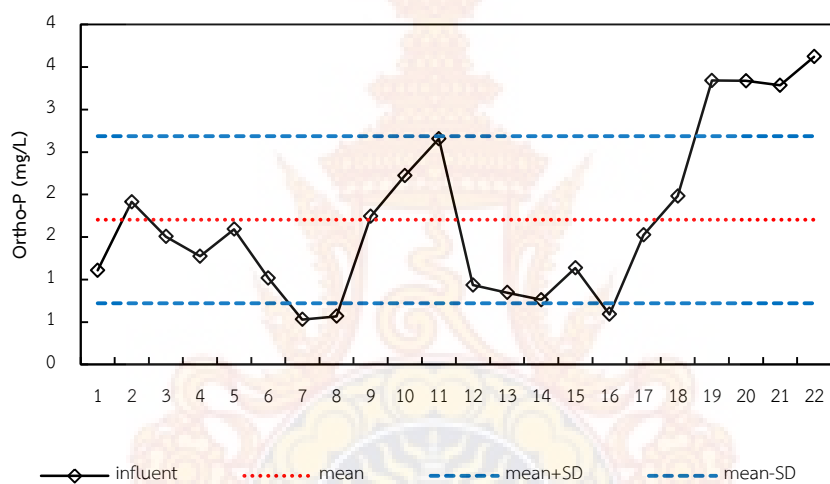
รูปที่ 4.5.3 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด



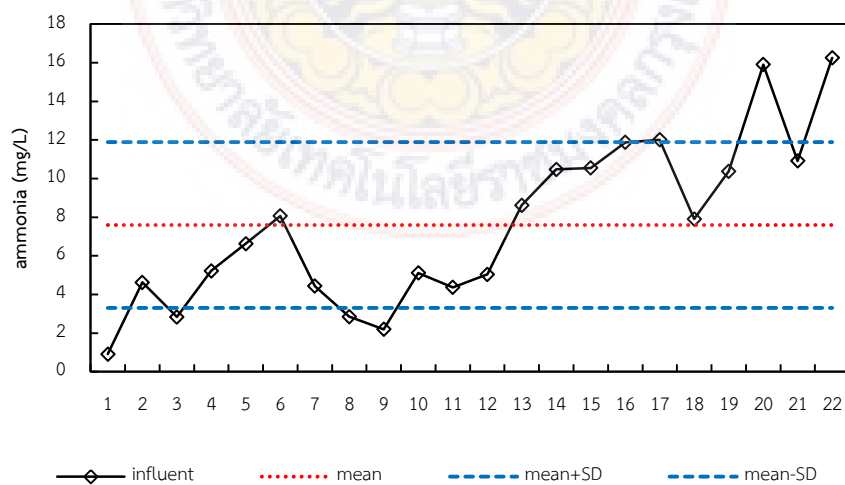
รูปที่ 4.5.4 ค่าบีโอดีของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด



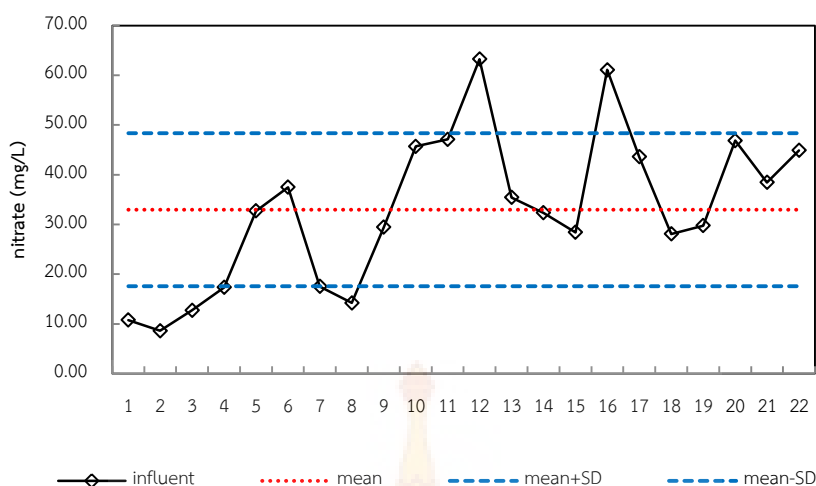
รูปที่ 4.5.5 ค่าซีโอดีของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด



รูปที่ 4.5.6 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด



รูปที่ 4.5.7 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด

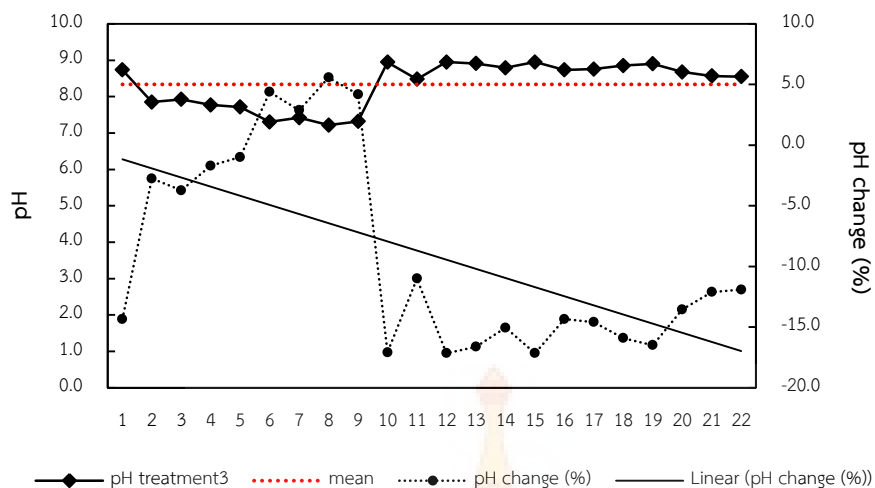


รูปที่ 4.5.8 ปริมาณไนเตรตไนโตรเจนของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด

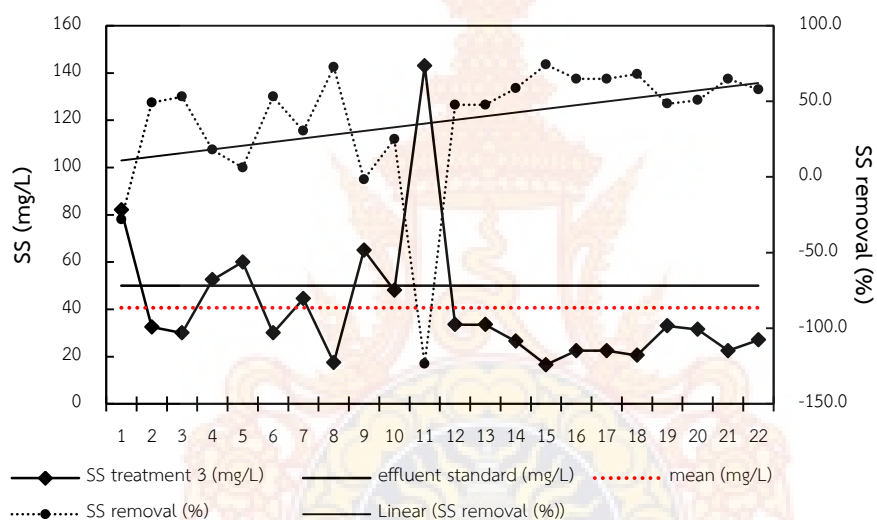
จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดพบว่าน้ำเสียมีค่าพีเอชเฉลี่ย 7.64 ± 0.18 ปริมาณของแข็งแขวนลอย 63.95 ± 30.49 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐาน < 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าบีโอดี 141.87 ± 73.13 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐาน < 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าซีโอดี 345 ± 61.09 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐาน < 120 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาณออร์โทฟอสเฟต 1.73 ± 0.98 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน 7.60 ± 4.29 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไนเตรตไนโตรเจน 32.99 ± 15.38 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากระบบบำบัดไร้อากาศ ยังไม่ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 โดยเฉพาะปริมาณของแข็งแขวนลอย ค่าบีโอดีและค่าซีโอดี (ราชกิจจานุเบกษา, 2553)

4.5.2 ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับเครื่องเติมอากาศ

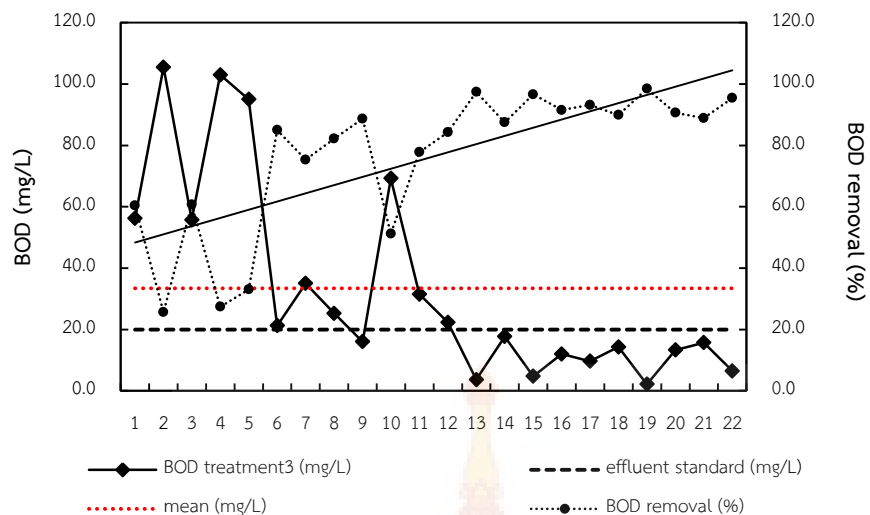
ศึกษาสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับการเติมอากาศ โดยใช้เครื่องเติมอากาศ 2 เครื่อง (เครื่องเติมอากาศ 1 เครื่องให้ออกซิเจนได้ 2.10 กรัมออกซิเจนต่อชั่วโมง) วางเครื่องเติมอากาศชิดริมด้านในบ่อบำบัด มีระบบพีชลอยน้ำ (ต้นกกกลม) ขนาด $\frac{1}{2}$ ของพื้นที่บ่อเติมอากาศ และมีระบบดูดน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศเข้าสู่รางพีช และน้ำที่ไหลผ่านรางพีช (ต้นคล้าน้ำ) แล้วจะไหลกลับสู่ระบบเติมอากาศในทิศตรงข้าม เปิดเครื่องเติมอากาศ ตลอด 24 ชั่วโมง ป้อนน้ำทิ้งเข้าสู่ระบบตลอดเวลา ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 1.3 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งทุกอาทิตย์ เป็นเวลา 22 สัปดาห์ นำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ ค่าพีเอช ของแข็งแขวนลอย บีโอดี ซีโอดี ออร์โทฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรตไนโตรเจน ได้ผลแสดงในตารางผนวกที่ ข1-ข7 และรูปที่ 4.5.9-4.5.15



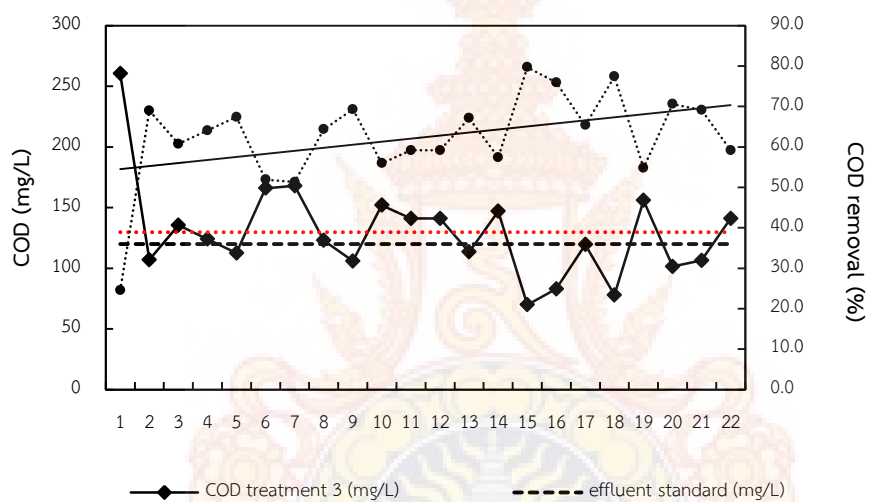
รูปที่ 4.5.9 พีเอชของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับการเติมอากาศ



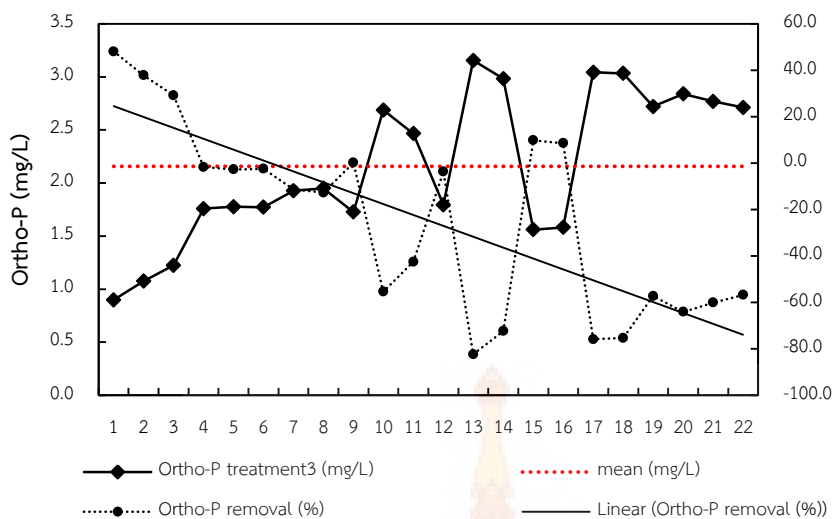
รูปที่ 4.5.10 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับการเติมอากาศ



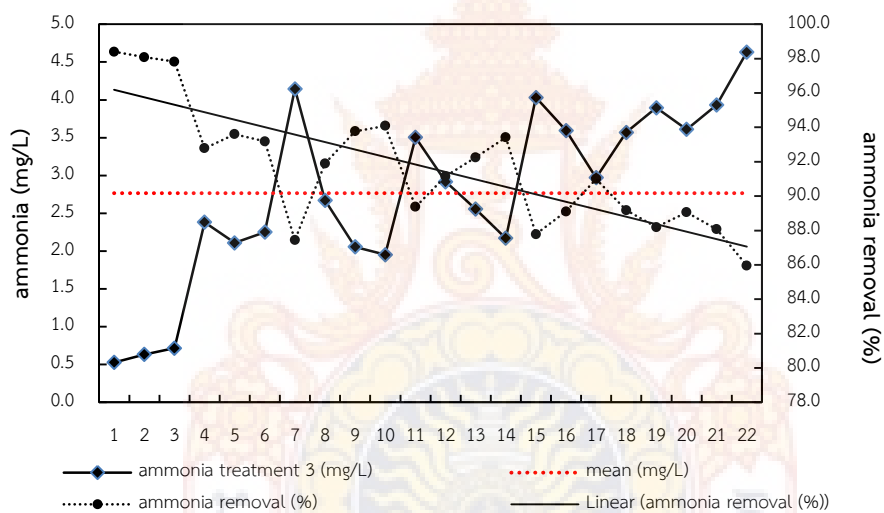
รูปที่ 4.5.11 ค่าบีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับการเติมอากาศ



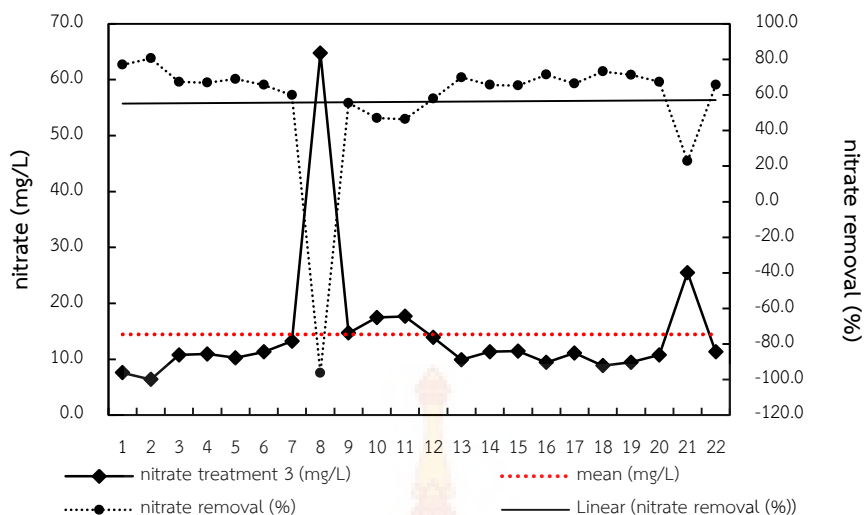
รูปที่ 4.5.12 ค่าซีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับการเติมอากาศ



รูปที่ 4.5.13 ปริมาณออร์โธฟอสเฟตของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับการเติมอากาศ



รูปที่ 4.5.14 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับการเติมอากาศ



รูปที่ 4.5.15 ปริมาณไนเตรตไนโตรเจนของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับการเติมอากาศ

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.5.9 -4.5.15 พบว่าการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานกระดาษสาของพื้นที่โครงการพัฒนาโดยดงฯ ด้วยระบบรางพีช และพีชลอยน้ำร่วมกับระบบเติมอากาศ ระบบใช้เวลาปรับตัวประมาณสามเดือน และหลังจากสามเดือน พบว่าน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัด ค่าพีเอช และออร์โธฟอสเฟต และมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนค่าบีโอดี ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรตไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลง

น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีสมบัติดังนี้

พีเอชของน้ำหลังบำบัดมีค่าสูงขึ้น มีค่าเฉลี่ยพีเอชในช่วงสามเดือนแรกเท่ากับ 8.04 ± 0.67 (ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพีเอชร้อยละ -5.26 ± 8.81) และหลังจากเดือนที่สามค่าพีเอชของน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่าในช่วงสามเดือนแรก โดยมีค่าเฉลี่ยช่วงสามเดือนหลังเท่ากับ 8.75 ± 0.14 (ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพีเอชร้อยละ -14.57 ± 1.82)

ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำหลังบำบัดมีค่าลดลง มีค่าเฉลี่ยสามเดือนแรกเท่ากับ 51.69 ± 32.54 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง < 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) (ประสิทธิภาพการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยร้อยละ 19.17 ± 50.89) และหลังจากเดือนที่สาม ปริมาณของแข็งแขวนลอย ลดลงไปอีกจนอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม มีค่าเฉลี่ยช่วงสามเดือนหลังเท่ากับ 24.72 ± 5.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยร้อยละ 61.34 ± 8.26)

ค่าบีโอดีของน้ำหลังบำบัดมีค่าลดลง มีค่าเฉลี่ยสามเดือนแรกเท่ากับ 49.21 ± 34.67 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง < 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) (ประสิทธิภาพการลดค่าบีโอดี ร้อยละ 65.31 ± 24.44) และหลังจากเดือนที่สาม ค่าบีโอดีลดลงไปอีกจนอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม มีค่าเฉลี่ยช่วงสามเดือนหลังเท่ากับ 10.67 ± 5.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการลดค่าบีโอดี ร้อยละ 92.48 ± 3.72)

ค่าซีไอดีของน้ำหลังบำบัดมีค่าลดลง ค่าเฉลี่ยสามเดือนแรกเท่ากับ 142.31 ± 41.16 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง < 120 มิลลิกรัมต่อลิตร) (ประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดี ร้อยละ 58.78 ± 11.92) และหลังจากเดือนที่สาม ค่าซีไอดีลดลงไปอีก จนอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม โดยมีค่าเฉลี่ยช่วงสามเดือนหลังเท่ากับ 111.39 ± 31.54 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดี ร้อยละ 67.71 ± 9.14)

ปริมาณออร์โธฟอสเฟตของน้ำหลังบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยสามเดือนแรกเท่ากับ 1.86 ± 0.63 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการลดปริมาณออร์โธฟอสเฟต ร้อยละ -7.66 ± 36.29) และค่าเฉลี่ยช่วงสามเดือนหลังเท่ากับ 2.58 ± 0.58 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการลดปริมาณออร์โธฟอสเฟต ร้อยละ -49.27 ± 33.93)

ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำหลังบำบัดมีค่าลดลง ค่าเฉลี่ยสามเดือนแรกเท่ากับ 2.19 ± 1.08 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการลดปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน ร้อยละ 93.37 ± 3.26) และหลังจากเดือนที่สามของการเดินระบบบำบัด ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำหลังการบำบัดมีแนวโน้มสูงขึ้น มีค่าเฉลี่ยช่วงสามเดือนหลังเท่ากับ 3.60 ± 0.69 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการลดปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน ร้อยละ 52.62 ± 9.17)

ปริมาณไนเตรตไนโตรเจนลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยสามเดือนแรกเท่ากับ 16.07 ± 15.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการลดปริมาณไนเตรตไนโตรเจน ร้อยละ 51.29 ± 45.51) และค่าเฉลี่ยช่วงสามเดือนหลังเท่ากับ 12.14 ± 5.09 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพการลดปริมาณไนเตรตไนโตรเจน ร้อยละ 63.21 ± 15.45)

การบำบัดน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานระหว่างพืชกรองน้ำ พืชลอยน้ำ และการเติมอากาศ ต้องอาศัยกระบวนการต่างๆ รวมกันทั้งฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ซึ่งกระบวนการต่างๆ เหล่านี้อาจเกิดอย่างเป็นอิสระต่อกัน หรือมีผลต่อเนื่องกันก็ได้ กลไกที่ใช้ในการกำจัดสารมลพิษต่างๆ ในระบบดังกล่าว จำแนกได้ดังนี้

การจัดของแข็งที่ตกตะกอนได้ และของแข็งแขวนลอย ของแข็งที่ตกตะกอนได้และของแข็งแขวนลอยจะถูกกำจัดออกภายในบึงประดิษฐ์โดยการตกตะกอนและการกรอง โดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพเพียงอย่างเดียวนี้ จะสามารถกำจัดองค์ประกอบส่วนใหญ่ของสารมลพิษในน้ำเสีย เช่น บีโอดี ธาตุอาหาร และเชื้อโรค

การจัดสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมอยู่กับของบึง ย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายได้จะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ในสภาพที่มีออกซิเจน โดยที่ตะกอนติดอยู่กับพืช และผิวของชั้นตะกอน อย่างไรก็ตามในบางกรณีการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนก็มีความสำคัญออกซิเจนที่จำเป็นสำหรับกระบวนการที่มีออกซิเจนได้มาโดยตรงจากบรรยากาศ โดยการแพร่ผ่านชั้นตะกอน หรือรอยต่อระหว่างผิวน้ำและบรรยากาศ หรือได้จากการสังเคราะห์แสงของพืชในน้ำและอาจได้มาจากออกซิเจนที่รั่วไหลออกมาจากบริเวณราก ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลน และเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน

การกำจัดไนโตรเจน การกำจัดขึ้นอยู่กับรูปแบบของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ กลไกการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำมีหลายกลไก คือ การนำไปใช้โดยพืช การระเหยในรูปของแอมโมเนีย กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งนับเป็นกลไกหลักในการกำจัดไนโตรเจน แอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรต โดยไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (Nitrifying Bacteria) ในบริเวณที่มีออกซิเจน และไนเตรตจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนโดย ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (Denitrifying Bacteria) ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Reddy, Patrick Jr, & Lindau, 1989; Vymazal, 2010)

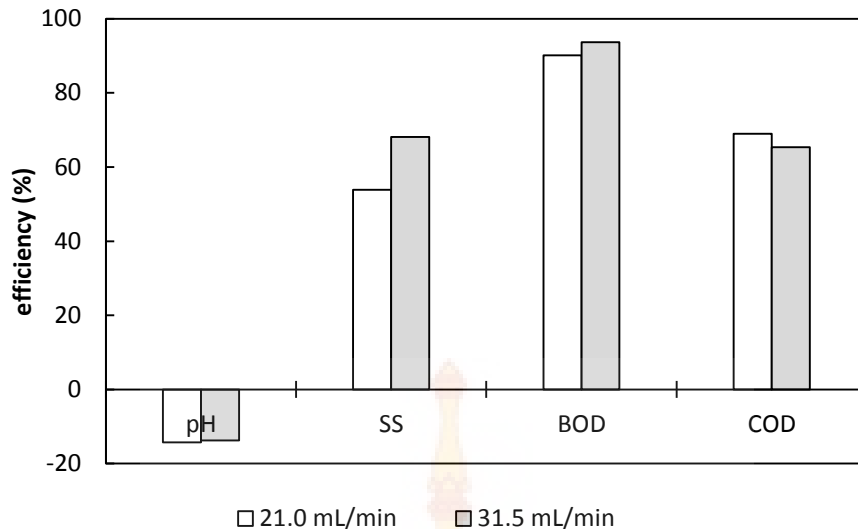
การกำจัดฟอสฟอรัส กลไกหลัก คือ ปฏิกริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน และปฏิกริยาดูดซับโดยตะกอน และปฏิกริยาดักตะกอนผลึกกับอลูมินัม เหล็ก แคลเซียม และแร่ธาตุในชั้นทราย ส่วนกลไกรอง คือ การตกตะกอนและการดูดซับโดยพืชผ่านทางราก และนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ เมื่อพืชตายและย่อยสลายจะคายฟอสฟอรัสออกมาบางส่วน และบางส่วนจะจมอยู่กับซากพืช (Vymazal, 2010) ระยะเวลาในการเดินระบบเพิ่มขึ้น ปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกลไกในการบำบัดฟอสฟอรัสที่สำคัญคือการดูดติด ดังนั้นเมื่อระบบเดินไปเรื่อยๆ ความสามารถในการดูดติดของชั้นกรองจะลดลง หรือพื้นที่ผิวในการดูดติดลดลง

4.5.3 เปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด

ศึกษาสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดทั้งสี่แบบ โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำจาก 21.0 มิลลิลิตรต่อวินาที เป็น 31.5 มิลลิลิตรต่อวินาที เก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง เป็นเวลา 4 สัปดาห์ นำตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ ค่าพีเอช ของแข็งแขวนลอย บีโอดี ซีโอดี ออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรตไนโตรเจน และนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบตามสมการ ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัด} = [(ค่าเฉลี่ยก่อนบำบัด - ค่าเฉลี่ยหลังบำบัด) / ค่าเฉลี่ยก่อนบำบัด] \times 100$$

นำค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการบำบัด มาวิเคราะห์ t test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อทดสอบว่าระบบบำบัดที่อัตราการไหลต่างกันแตกต่างกัน มีผลต่อค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการปรับสภาพพีเอช ประสิทธิภาพกำจัดปริมาณของแข็งแขวนลอย บีโอดี ซีโอดี ออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรตไนโตรเจนหรือไม่ ได้ผลทดสอบแสดงในตารางผนวกที่ ข8 และรูปที่ 4.5.16

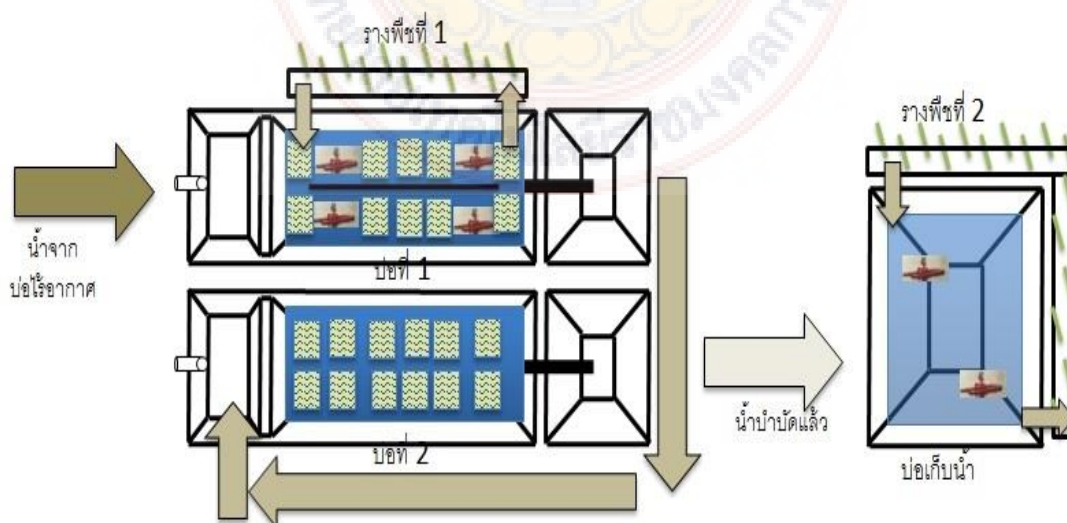


รูปที่ 4.5.16 การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัด

ผลการทดสอบด้วยค่าสถิติ t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ในทุกพารามิเตอร์ ($P > 0.05$) จากผลการทดลองสรุปได้ว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบผสมผสานระหว่างรางพืช พืชลอยน้ำร่วมกับระบบเติมอากาศ สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ หรือเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสียให้กับระบบบำบัด ระบบยังคงสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.6 การปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียจริง

จากผลการทดลองในระดับ pilot plant พบว่าระบบที่ได้ออกแบบไว้สามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และน้ำหลังการบำบัดมีคุณภาพอยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม แม้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ ระบบก็ยังทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียขนาด 26 เมตร x 6 เมตร โดยมีขั้นตอนการดำเนินการ ดังรูปที่ 4.6.1



รูปที่ 4.6.1 ขั้นตอนการปรับปรุงระบบ

- (1) นำดิน หิน ทราย จากบ่อที่ 1 ออก แล้วล้างทำความสะอาด (รูปที่ 4.6.2 - 4.6.3) พร้อมกับสร้างรางพีชที่ 1 และ 2 (รูปที่ 4.6.4) ติดตั้งระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในขณะที่ปรับปรุงระบบในบ่อที่ 1 จะใช้ปั๊ประดิษฐ์ (บ่อที่ 2) บำบัดน้ำเสียชั่วคราวก่อน
- (2) หลังจากล้างทำความสะอาดบ่อที่ 1 จะปล่อยน้ำเข้า แล้วติดตั้งผนังกันบ่อเดิมอากาศ (รูปที่ 4.6.5) ติดตั้งพีชลอยน้ำ (รูปที่ 4.6.6 - 4.6.8) และเครื่องเติมอากาศ (รูปที่ 4.6.9)
- (3) นำดิน หิน ทราย จากบ่อที่ 2 ออก ล้างทำความสะอาด แล้วนำน้ำจากบ่อที่ 1 เข้าบ่อที่ 2
- (4) ติดตั้งพีชลอยน้ำในบ่อที่ 2 และติดตั้งเครื่องเติมอากาศในบ่อสุดท้าย (รูปที่ 4.6.10) พร้อมตรวจสอบคุณภาพน้ำเสียหลังจากเดินระบบไปได้ 1 เดือน



รูปที่ 4.6.2 การล้างบ่อ



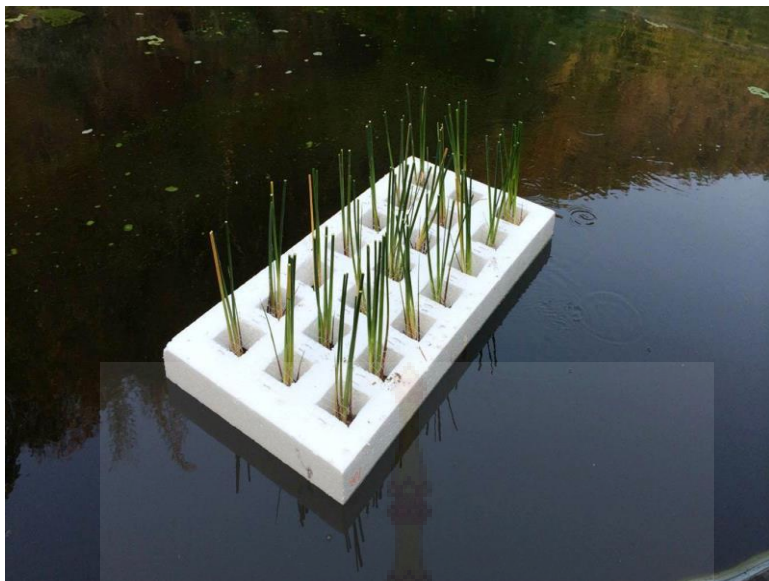
รูปที่ 4.6.3 การซ่อมแซมบ่อ



รูปที่ 4.6.4 รางพีชขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 20 เมตร x 80 เมตร x 50 เมตร



รูปที่ 4.6.5 ผนังกันบ่อเติมอากาศ



รูปที่ 4.6.6 วัสดุพืชลอยน้ำ



รูปที่ 4.6.7 แพกกลอยน้ำ



รูปที่ 4.6.8 แพกกกลอยน้ำร่วมกับรางพีช

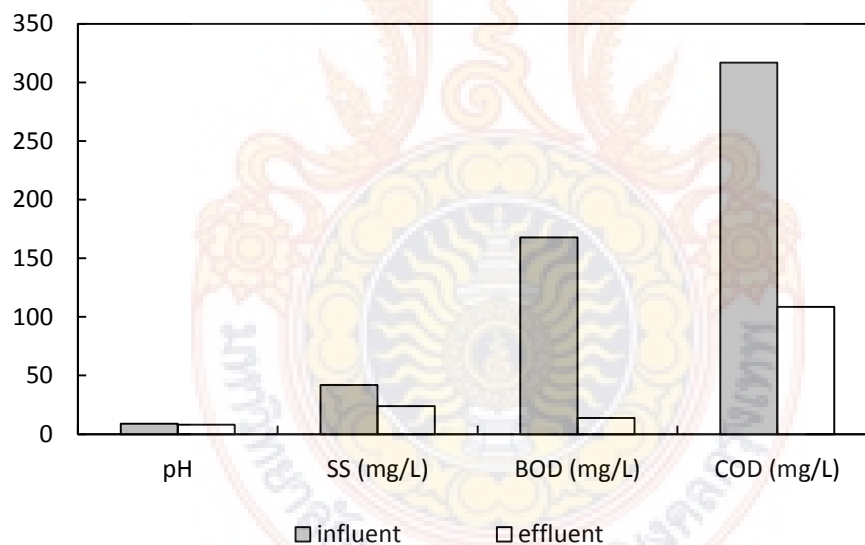


รูปที่ 4.6.9 แพกกกลอยน้ำร่วมกับการเติมอากาศ



รูปที่ 4.6.10 เครื่องเติมอากาศในบ่อสุดท้าย

หลังจากปรับปรุงระบบและปล่อยให้ระบบปรับสภาพเป็นเวลา 1 เดือน เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ ได้ผลดังแสดงในตารางผนวกที่ ข 9 และรูปที่ 4.6.11



รูปที่ 4.6.11 สมบัติของน้ำหลังการปรับปรุงระบบบำบัด

หลังจากการปรับปรุงระบบ และปล่อยให้ระบบทำงานเป็นระยะเวลา 1 เดือน เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ พบว่าน้ำหลังการบำบัดมีค่าพีเอช 8.11 ปริมาณของแข็งแขวนลอย 14 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าบีโอดี 13.92 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดี 108.56 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าน้ำทิ้งที่ออกจากระบบรางพีช และพีช ลอยน้ำร่วมกับระบบบ่อเติมอากาศ มีสมบัติได้ตามเกณฑ์ มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวง อุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบพืชรองน้ำ ร่วมกับเครื่องกลเติมอากาศ ในการบำบัดน้ำเสียจากพื้นที่โครงการพัฒนาตอตุ้ง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยสร้างระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง ออกแบบระบบแบบผสมผสาน การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบรางพืชรองน้ำร่วมกับ พืชลอยน้ำและระบบเติมอากาศโดยใช้เครื่องเติมอากาศ 2 เครื่อง มีผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

การบำบัดน้ำเสียจากโรงฟอกย้อมและโรงงานกระดาษสาด้วยระบบเติมอากาศด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานระหว่างระบบรางพืช และพืชลอยน้ำร่วมกับระบบบ่อเติมอากาศขนาดความจุ 140 ลิตร ภายในบ่อเติมอากาศมีระบบพืชรองน้ำ โดยปลูกต้นกกกลม วางระบบไว้บริเวณกลางบ่อเติมอากาศ โดยใช้เครื่องเติมอากาศที่สามารถถ่ายเทออกซิเจนให้กับน้ำได้ 2.10 กรัมออกซิเจนต่อชั่วโมง จำนวนสองเครื่อง บ่อน้ำทิ้งเข้าสู่ระบบตลอดเวลาที่อัตราการไหล 22 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที น้ำที่ออกจากบ่อเติมอากาศส่งเข้าสู่ระบบรางพืชขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 16x131x37 เซนติเมตร บรรจุทรายที่มีความสูง 15 เซนติเมตร ปลูกต้นคัล้าน้ำจำนวน 3 กอต่อรางพืช อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบรางพืชประมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าสามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอย ค่าบีโอดี ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรตไนโตรเจน ของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม และโรงงานกระดาษสาของพื้นที่โครงการพัฒนาตอตุ้งฯ โดยมีค่าเฉลี่ยบีโอดีในช่วงในช่วง 10.67±5.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง < 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนปริมาณของแข็งแขวนลอยมีค่าเฉลี่ย 24.72±5.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง < 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) และค่าซีโอดี มีค่าเฉลี่ย 111.39±31.54 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง < 120 มิลลิกรัมต่อลิตร) แสดงว่าน้ำทิ้งที่ออกจากระบบรางพืช และพืชลอยน้ำร่วมกับระบบบ่อเติมอากาศ น้ำทิ้งมีสมบัติได้ตามเกณฑ์ มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

โดยกลไกในการบำบัดน้ำเสียเป็นกลไกที่มีการทำงานร่วมกันของกระบวนการตกตะกอน การกรอง การระเหย การดูดซับ การดูดซึมโดยพืช และการทำงานของจุลินทรีย์ (Faulwetter et al., 2009; Kadlec & Wallace, n.d.; Vymazal, 2007) การมีระบบเติมอากาศช่วยให้ระบบบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพสูง และน้ำที่บำบัดแล้วมีคุณภาพได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ทั้งนี้ได้มีรายงานวิจัยหลายรายงานที่สนับสนุนว่า การใช้ระบบเติมอากาศในระบบบึงประดิษฐ์ จะทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาก (Austin & Nivala, 2009; J. Nivala, Hoos, Cross, Wallace, & Parkin, 2007; Jaime Nivala et al., 2013) โดยในส่วน of พืชลอยน้ำ รากพืชส่วนที่อยู่ใต้น้ำช่วยเพิ่มพื้นที่ของเมือกแบคทีเรีย และโครงสร้างของลำต้นพืชจะมีท่ออากาศเพื่อส่งผ่านออกซิเจนจากใบพืชมายังรากพืชทำให้เกิดมีสภาพออกซิเจนบริเวณรอบๆรากพืช ออกซิเจนที่ปล่อยออก

จากรากพืชอยู่ในช่วง 2.08-12 กรัมออกซิเจน/(ตารางเมตร-วัน) (Jaime Nivala et al., 2013) อย่างไรก็ตาม ปริมาณออกซิเจนที่ได้จากพืชไม่เพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (H. Brix, 1994; Ouellet-Plamondon, Chazarenc, Comeau, & Brisson, 2006; Vymazal, 2011) โดยกลไกของระบบระบบรางพืชร่วม ระบบพืชลอยน้ำ ร่วมกับการเติมอากาศ ด้วยเครื่องเติมอากาศ 2 เครื่อง สรุปได้ว่า สารอาหารในน้ำเสียจะถูกพืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และถูกกำจัดออกจากระบบเมื่อมีการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบ และเมื่อน้ำไหลเข้าสู่ระบบรางพืช สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะตกตะกอนจมลงสู่ด้านล่าง และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกกำจัดโดยการดูดติดผิว และการกรองของพืช โดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดกับพืชน้ำ หรือชั้นตัวกลางที่เป็นทรายและจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ระบบนี้จะได้รับออกซิเจนจากการแทรกซึมของอากาศผ่านผิวน้ำ หรือชั้นตัวกลางลงมา ออกซิเจนบางส่วนจะได้รับการสังเคราะห์แสงแต่มีปริมาณไม่มากนัก สำหรับสารแขวนลอยจะถูกกรองแล้วจมตัวในช่วงต้นๆ ของรางพืช การลดปริมาณไนโตรเจนจะเป็นไปตามกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) ส่วนการลดปริมาณฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิดที่ชั้นทราย

และจากการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียในระบบจริงพบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยน้ำหลังการบำบัดมีค่าพีเอช 8.11 ปริมาณของแข็งแขวนลอย 14 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าบีโอดี 13.92 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดี 108.56 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าน้ำทิ้งที่ออกจากระบบรางพืช และพืชลอยน้ำร่วมกับระบบบ่อเติมอากาศ มีสมบัติได้ตามเกณฑ์ มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในส่วนของรางพืชทดลองนำพืชชนิดอื่น เช่น พุทธรักษา ว่านน้ำ บัวอะเมซอน เตย เพื่อเพิ่มภูมิทัศน์ให้กับระบบบำบัด รวมทั้งศึกษาระยะเวลาที่ต้องตัดพืชแต่ละชนิดออกจากระบบ รวมถึงระยะเวลาที่ต้องดูแลรักษาระบบ

เอกสารอ้างอิง

- Austin, D., & Nivala, J. (2009). Energy requirements for nitrification and biological nitrogen removal in engineered wetlands. *Ecological Engineering*, 35(2), 184–192. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.03.002
- Ayaz, S. Ç., Aktaş, Ö., Findik, N., Akça, L., & Kinacı, C. (2012). Effect of recirculation on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system. *Ecological Engineering*, 40, 1–5. doi:10.1016/j.ecoleng.2011.12.028
- Bulc, T. G., & Ojstrsek, A. (2008). The use of constructed wetland for dye-rich textile wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 155(1-2), 76–82. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.11.068
- Chiu, K. K., Ye, Z. H., & Wong, M. H. (2005). Enhanced uptake of As, Zn, and Cu by *Vetiveria zizanioides* and *Zea mays* using chelating agents. *Chemosphere*, 60(10), 1365–1375. doi:10.1016/j.chemosphere.2005.02.035
- Cincinnati, O. (n.d.). *NEPIS Document display*. Retrieved May 27, 2014, from <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30004TBD.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995+Thru+1999&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C95thru99%5CTxt%5C00000016%5C30004TBD.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=p%7Cf&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>
- Cooper, P. F., Job, G. D., Green, M. B., & Shutes, R. B. E. (1996). *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*. Swindon: WRC Publications.
- Faulwetter, J. L., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M. D., Brisson, J., ... Stein, O. R. (2009). Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 35(6), 987–1004. doi:10.1016/j.ecoleng.2008.12.030
- H. Brix. (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Sci. Technol*, 29(4), 71–78.
- Hammer, D. A. (1989). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*. CRC Press.

- Kadlec, R. H., & Wallace, S. . (n.d.). *Treatment wetlands*. (2 nd ed.). Boca Raton, FL,USA: CRC Press. Retrieved from http://www.firelandtributaries.net/pdfs/Local%20workgroup/Treatment_Wetlands.pdf
- Kadlec, R.H., & Knight R.L. (1996). *Treatment wetlands*. Florida.: CRC Press. Boca Raton.
- Kong, X., Lin, W., Wang, B., & Luo, F. (2003). Study on vetiver's purification from pig farm. (pp. 181–185). Presented at the the third international conference on vetiver and exhibition, Guangzhou, P.R., China. Retrieved from http://www.betuco.be/coverfodder/Vetiver%20Grass%20CHN_pigwaste.pdf
- Nivala, J., Hoos, M. B., Cross, C., Wallace, S., & Parkin, G. (2007). Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Science of The Total Environment*, 380(1–3), 19–27. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.030
- Nivala, J., Wallace, S., Headley, T., Kassa, K., Brix, H., van Afferden, M., & Müller, R. (2013). Oxygen transfer and consumption in subsurface flow treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 61, Part B, 544–554. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.08.028
- Ouellet-Plamondon, C., Chazarenc, F., Comeau, Y., & Brisson, J. (2006). Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate. *Ecological Engineering*, 27(3), 258–264. doi:10.1016/j.ecoleng.2006.03.006
- Paul Truong, & Barbara Hart. (n.d.). *VETIVER SYSTEM FOR WASTEWATER TREATMENT* (Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin No. 2001/2). Retrieved from http://www.vetiver.org/PRVN_wastewater_bul.pdf
- Reddy, K. R., Patrick Jr, W. H., & Lindau, C. W. (1989). Nitrification-denitrification at the plant root-sediment interface in wetlands. *Limnology and Oceanography*, 34(6), 1004–1013.
- U.S. EPA. (1988). *Design Manual-Constructed Wetlands and Aquatic Plants Systems for Municipal Wastewater Treatment*. (No. EPA/625/1-88/022). United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- US Army Corps of Engineering. (1993). *Selection and acquisition of wetland plant species for wetland management*. (No. project. VN-EM-2.1). Vicksburg: US Army Corps of Engineering.
- Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering*, 18(5), 633–646. doi:10.1016/S0925-8574(02)00025-3

- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 380(1–3), 48–65. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.09.014
- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience†. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61–69. doi:10.1021/es101403q
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133–156. doi:10.1007/s10750-011-0738-9
- Waterwatch Adelaide & Mount Lofty Ranges - Growth Forms. (n.d.). Retrieved July 15, 2014, from <http://waterwatchadelaide.net.au/index.php?page=growth-forms>
- Xindi Liao, Shiming Luo, Yinbao Wu, & Zhisan Wang. (2003). Studies on the Abilities of *Vetiveria zizanioides* and *Cyperus alternifolius* for Pig Farm Wastewater Treatment. Presented at the The Third International Conference on Vetiver and Exhibition Vetiver and Water, China. Retrieved from http://www.vetiver.com/ICV3-Proceedings/CHN_pigwaste2.pdf
- นิตานารท ละอองพันธ์, & อัมพร คล้ายแก้ว. (2013). การใช้พืชลอยน้ำปรับปรุงคุณภาพน้ำ. Retrieved July 15, 2014, from http://www2.rid.go.th/research/vijais/index.php?option=com_content&view=article&id=263:2013-02-19-00-47-13&catid=41:science&Itemid=167
- ราชกิจจานุเบกษา. ประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่องเกณฑ์การออกแบบระบบรวบรวมน้ำเสีย และระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน, Pub. L. No. เล่ม 127 ตอนพิเศษ 72 ง (2553).
- สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. (2552). สำนักงาน กปร. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, โครงการพระราชดำริ. Retrieved July 15, 2014, from <http://www.rdpb.go.th/RDPB/front/Projects/RDPBProjectType.aspx?p=41>
- หนังสือพิมพ์ผู้จัดการ. (2551). มรก.อุบลฯ ส่งเสริมชุมชนบำบัดน้ำเสียด้วยพืชน้ำในท้องถิ่น - *Science Manager Online*. Retrieved July 15, 2014, from <http://www.manager.co.th/science/ViewNews.aspx?NewsID=9510000109459&TabID=1&>

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) ของรูปแบบการทดลอง 10 แบบ และการคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR)

ตารางที่ 1ก ค่าออกซิเจนที่นาที่ต่าง ๆ ของรูปแบบการทดลอง A1 ที่อุณหภูมิ 30.0 °C และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) 367 mg/L

เวลา(นาที่)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) (gO ₂ /hr)
0	0.05	3.38
2	0.40	
4	0.90	
6	1.77	
8	2.53	
10	3.28	
12	3.79	
14	4.50	
16	4.77	
18	5.23	
20	5.35	
22	5.54	
24	5.75	
26	5.92	
28	6.08	
30	6.16	
32	6.28	
34	6.34	
36	6.42	
38	6.53	
40	6.55	

ตารางที่ 2ก ค่าออกซิเจนที่นาที่ต่างๆของรูปแบบการทดลอง A2 ที่อุณหภูมิ 29.8 °C และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) 367 mg/L

เวลา(นาที่)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) (gO ₂ /hr)
0	0.05	3.02
2	0.58	
4	1.20	
6	1.72	
8	2.23	
10	2.72	
12	3.17	
14	3.88	
16	4.20	
18	4.52	
20	4.80	
22	5.03	
24	5.25	
26	5.46	
28	5.65	
30	5.81	
32	5.94	
34	6.07	
36	6.21	
38	6.29	
40	6.39	

ตารางที่ 3ก ค่าออกซิเจนที่นาที่ต่าง ๆ ของรูปแบบการทดลอง A3 ที่อุณหภูมิ 29.8 °C และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) 367 mg/L

เวลา(นาที่)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) (gO ₂ /hr)
0	0.05	2.07
2	0.67	
4	1.15	
6	1.45	
8	1.88	
10	2.30	
12	2.61	
14	2.95	
16	3.22	
18	3.51	
20	3.77	
22	4.07	
24	4.29	
26	4.51	
28	4.71	
30	4.92	
32	5.12	
34	5.24	
36	5.32	
38	5.46	
40	5.51	

ตารางที่ 4ก ค่าออกซิเจนที่นาที่ต่างๆของรูปแบบการทดลอง A4 ที่อุณหภูมิ 29.8 °C และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) 367 mg/L

เวลา(นาที่)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) (gO ₂ /hr)
0	0.26	2.71
2	0.58	
4	1.47	
6	2.03	
8	2.68	
10	3.19	
12	3.54	
14	4.03	
16	4.37	
18	4.73	
20	4.90	
22	4.95	
24	5.30	
26	5.50	
28	5.50	
30	5.73	
32	5.90	
34	5.95	
36	6.13	
38	6.10	
40	6.17	

ตารางที่ 5ก ค่าออกซิเจนที่นาที่ต่าง ๆ ของรูปแบบการทดลอง A5 ที่อุณหภูมิ 29.5 °C และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) 367 mg/L

เวลา(นาที่)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) (gO ₂ /hr)
0	0.00	3.98
2	0.78	
4	1.89	
6	3.00	
8	3.58	
10	4.18	
12	4.67	
14	5.10	
16	5.47	
18	5.75	
20	5.96	
22	6.16	
24	6.32	
26	6.40	
28	6.56	
30	6.62	
32	6.71	
34	6.74	
36	6.79	
38	6.84	
40	6.85	

ตารางที่ 6ก ค่าออกซิเจนที่นาที่ต่างๆของรูปแบบการทดลอง A6 ที่อุณหภูมิ 29.2 °C และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) 367 mg/L

เวลา(นาที่)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) (gO ₂ /hr)
0	0.11	3.96
2	0.85	
4	1.96	
6	3.00	
8	3.76	
10	4.30	
12	4.88	
14	5.19	
16	5.52	
18	5.78	
20	6.00	
22	6.28	
24	6.40	
26	6.43	
28	6.59	
30	6.66	
32	6.65	
34	6.85	
36	6.86	
38	6.83	
40	6.71	

ตารางที่ 7ก ค่าออกซิเจนที่นาที่ต่างๆของรูปแบบการทดลอง A7 ที่อุณหภูมิ 29.2 °C และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) 367 mg/L

เวลา(นาที่)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) (gO ₂ /hr)
0	0.09	4.15
2	1.52	
4	2.80	
6	3.70	
8	4.46	
10	5.05	
12	5.48	
14	5.83	
16	6.05	
18	6.29	
20	6.44	
22	6.60	
24	6.65	
26	6.6	
28	6.87	
30	6.89	
32	6.90	
34	6.88	
36	6.94	
38	6.94	
40	6.94	

ตารางที่ 8ก ค่าออกซิเจนที่นาที่ต่างๆของรูปแบบการทดลอง A8 ที่อุณหภูมิ 30.6 °C และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) 367 mg/L

เวลา(นาที่)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) (gO ₂ /hr)
0	0.01	1.67
2	0.27	
4	0.68	
6	1.06	
8	1.43	
10	1.77	
12	2.10	
14	2.42	
16	2.71	
18	2.96	
20	3.20	
22	3.46	
24	3.68	
26	3.89	
28	4.08	
30	4.25	
32	4.39	
34	4.60	
36	4.67	
38	4.83	
40	4.98	

ตารางที่ 9ก ค่าออกซิเจนที่นาที่ต่างๆของรูปแบบการทดลอง A9 ที่อุณหภูมิ 29.5 °C และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) 367 mg/L

เวลา(นาที่)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) (gO ₂ /hr)
0	0.11	2.1
2	0.68	
4	1.10	
6	1.56	
8	1.98	
10	2.37	
12	2.71	
14	3.04	
16	3.34	
18	3.64	
20	3.88	
22	4.10	
24	4.10	
26	4.57	
28	4.57	
30	4.91	
32	5.10	
34	5.25	
36	5.36	
38	5.52	
40	5.62	

ตารางที่ 10ก ค่าออกซิเจนที่นาที่ต่างๆของรูปแบบการทดลอง A10 ที่อุณหภูมิ 29.5 °C และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) 367 mg/L

เวลา(นาที่)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)	อัตราการถ่ายเท ออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) (gO ₂ /hr)
0	0.06	2.64
2	0.40	
4	1.05	
6	1.66	
8	2.19	
10	2.67	
12	3.11	
14	3.47	
16	3.82	
18	4.17	
20	4.42	
22	4.73	
24	4.91	
26	5.14	
28	5.31	
30	5.50	
32	5.58	
34	5.74	
36	5.88	
38	6.01	
40	6.07	

การคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR)

กรณีรูปแบบการทดลองที่ A9

(1) การหาค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัวในน้ำ (C_s)

จากข้อมูลตารางผนวกที่ 9ก ครั้งที่ 1 อุณหภูมิ $29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีปริมาณของแข็งละลาย 367 mg/L

$$C_s = \frac{475 - 2.65(\text{TDS})}{(33.5 + T)}$$

แทนค่าอุณหภูมิ และ ของแข็งละลาย ลงในสมการ

$$C_s = \frac{475 - 2.65(3.67)}{(33.5 + 29.5)}$$

$$C_s = 7.52\text{ mg/L}$$

(2) การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La)

จากสมการ

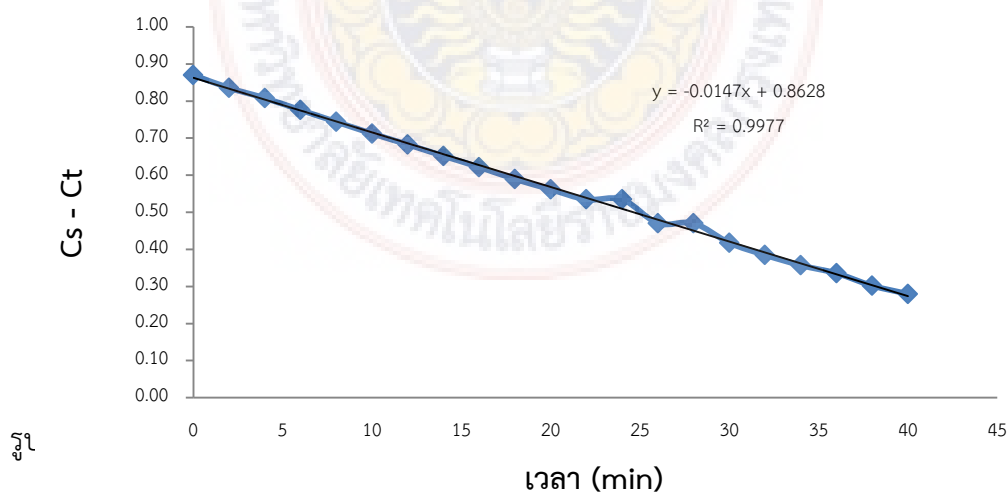
$$K_La = \frac{(\log D_1 - \log D_2)(2.303)}{(t_2 - t_1)}$$

เมื่อพิจารณาสมการข้างตรงให้เป็นสมการเส้นตรง

$$\log D_2 = -\frac{K_La}{2.303} t_2$$

โดยที่ $D_2 = C_s -$ ค่าละลายออกซิเจนในน้ำ ณ เวลาหนึ่ง(C_t)

พิจารณาข้อมูลตารางผนวกที่ 9ก ครั้งที่ 1 โดยใช้สมการข้างต้นและนำไปพลอตกราฟ semi - log



0.0345 min^{-1}

จากรูปผนวกที่ 1 ก ได้ค่าความชันเท่ากับ -0.0147 ซึ่งเมื่อนำไปหาค่า K_La จะได้เท่ากับ

- (3) การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิมาตรฐาน $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($K_{La\ 20}$)

จากสมการ

$$K_{La} = K_{La\ 20} \times \Theta^{(T-20)}$$

โดยที่ Θ มีค่าเท่ากับ 1.024

T คือ อุณหภูมิในขณะทดลอง ($^{\circ}\text{C}$)

$$K_{La\ 20} = 0.0276$$

- (4) หาค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR)

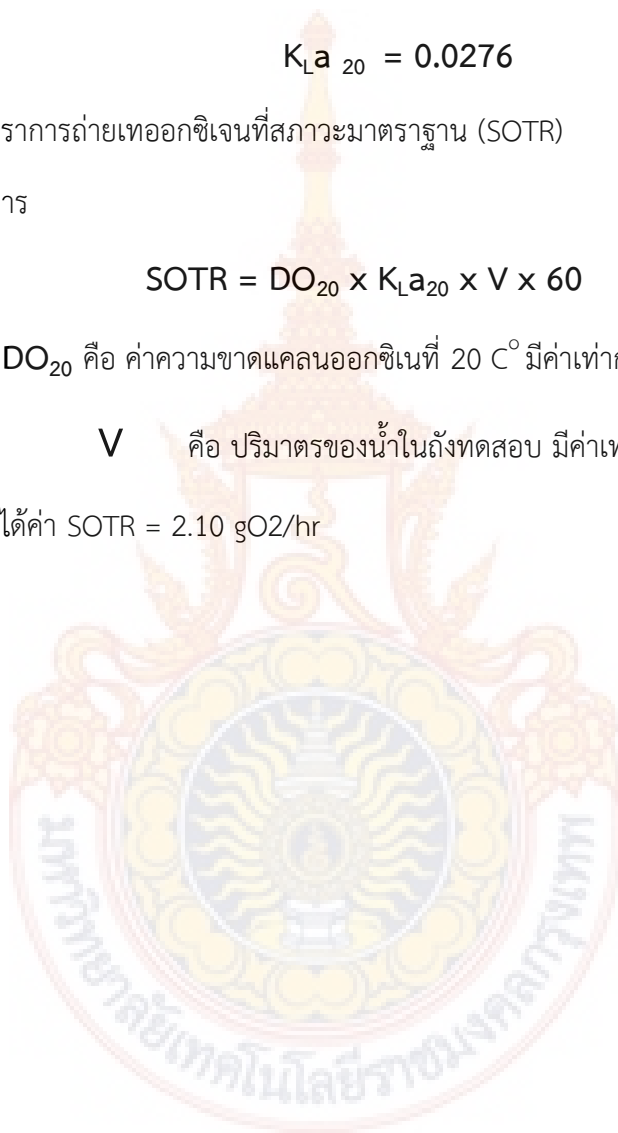
จากสมการ

$$\text{SOTR} = \text{DO}_{20} \times K_{La20} \times V \times 60$$

โดยที่ DO_{20} คือ ค่าความขาดแคลนออกซิเจนที่ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าเท่ากับ 9.08 mg/L

V คือ ปริมาตรของน้ำในถังทดสอบ มีค่าเท่ากับ 0.140 m^3

แทนค่าสมการจะได้ค่า $\text{SOTR} = 2.10\text{ gO}_2/\text{hr}$



ภาคผนวก ข

ตารางที่ 1ข ค่า pH ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ

สัปดาห์ที่ N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
		1	2
ก่อนการทดลอง	7.20	8.67	8.80
1	7.63	7.75	7.95
2	7.70	7.88	7.97
3	7.20	7.85	7.69
4	7.55	7.77	7.66
5	7.52	7.25	7.36
6	7.55	7.32	7.52
7	7.83	7.21	7.22
8	7.62	7.32	7.32
9	7.62	9.05	8.84
10	7.58	8.56	8.4
11	7.66	9.04	8.86
12	7.80	8.99	8.83
13	7.56	8.98	8.60
14	7.66	9.04	8.86
15	7.74	8.98	8.9
16	7.80	8.94	8.91
17	8.03	8.80	8.91
18	7.65	8.91	8.89
19	7.62	8.73	8.62
20	7.62	8.53	8.60
21	7.60	8.49	8.61

ตารางที่ 2ข ค่าบีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ

ลำดับที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	2
ก่อนการ ทดลอง	1	94.0	45.0	69.0
	2	83.0	44.0	67.0
	MEAN	88.5	44.5	68.0
	SD	5.5	0.5	1.0
1	1	217.0	83.0	125.0
	2	199.0	90.0	124.0
	MEAN	208.0	86.5	124.5
	SD	9.0	3.5	0.5
2	1	143.0	65.0	41.0
	2	135.0	76.0	41.0
	MEAN	139.0	70.5	41.0
	SD	4.0	5.5	0.0
3	1	179.0	112.0	94.0
	2	179.0	112.0	94.0
	MEAN	179.0	112.0	94.0
	SD	0.0	0.0	0.0
4	1	330.0	132.0	58.0
	2	330.0	132.0	58.0
	MEAN	330.0	132.0	58.0
	SD	0.0	0.0	0.0
5	1	259.0	13.0	29.0
	2	246.0	18.0	25.0
	MEAN	252.5	15.5	27.0
	SD	6.5	2.5	2.0
6	1	81.0	24.0	48.0
	2	65.0	25.0	43.0
	MEAN	73.0	24.5	45.5
	SD	8.0	0.5	2.5
7	1	70.0	26.0	23.0
	2	76.0	26.0	26.0
	MEAN	45.0	26.0	24.5
	SD	1.0	0.0	1.5

ตารางที่ 2ข ค่าบีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
8	1	75.0	17.0	16.0
	2	75.0	18.0	13.0
	MEAN	75.0	17.5	14.5
	SD	0.0	0.5	1.5
9	1	237.0	82.0	54.0
	2	228.0	84.0	57.0
	MEAN	232.5	83.0	55.5
	SD	4.5	1.0	1.5
10	1	48.0	22.0	47.0
	2	38.0	30.0	47.0
	MEAN	43.0	26.0	47.0
	SD	5.0	4.0	0.0
11	1	54.8	25.4	16.7
	2	50.0	25.1	22.1
	MEAN	52.4	25.3	19.4
	SD	2.4	0.1	2.7
12	1	176.7	23.5	25.0
	2	174.3	23.5	25.0
	MEAN	175.5	23.5	25.0
	SD	1.2	0.0	0.0
13	1	194.6	32.5	30.5
	2	190.7	32.5	30.5
	MEAN	192.7	32.5	30.5
	SD	2.0	0.0	0.0
14	1	137.0	21.5	8.5
	2	119.6	21.5	8.5
	MEAN	128.3	21.5	8.5
	SD	8.7	0.0	0.0
15	1	137.1	18.0	18.0
	2	152.4	18.0	18.0
	MEAN	144.8	18.0	18.0
	SD	7.7	0.0	0.0

ตารางที่ 2ข ค่าบีโอดีของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
16	1	80.3	26.0	25.0
	2	90.8	26.0	25.0
	MEAN	85.6	26.0	25.0
	SD	5.3	0.0	0.0
17	1	84.9	16.0	17.5
	2	89.7	16.0	17.5
	MEAN	87.3	16.0	17.5
	SD	2.4	0.0	0.0
18	1	75.6	3.5	3.2
	2	75.6	3.2	2.7
	MEAN	75.6	3.4	3.0
	SD	0.0	0.2	0.3
19	1	116.2	26.6	28.2
	2	162.0	26.7	28.8
	MEAN	139.1	26.7	28.5
	SD	22.9	0.0	0.3
20	1	143.7	20.6	20.6
	2	143.1	15.8	16.8
	MEAN	143.4	18.2	18.7
	SD	0.3	2.4	1.9
21	1	138.0	5.3	6.0
	2	144.0	5.3	7.5
	MEAN	141.0	5.3	6.8
	SD	3.0	0.0	0.8

ตารางที่ 3ข ค่าซีไอของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
ก่อน ทดลอง	1	365.0	330.0	191.0
	2	365.0	330.0	191.0
	3	365.0	330.0	191.0
	MEAN	365.0	330.0	191.0
	SD	0.0	0.0	0.0
1	1	254.0	103.0	111.0
	2	254.0	103.0	111.0
	3	254.0	103.0	111.0
	MEAN	254.0	103.0	111.0
	SD	0.0	0.0	0.0
2	1	366.0	125.0	146.0
	2	366.0	125.0	146.0
	3	366.0	125.0	146.0
	MEAN	366.0	125.0	146.0
	SD	0.0	0.0	0.0
3	1	308.0	131.0	117.0
	2	306.0	131.0	117.0
	3	304.0	131.0	117.0
	MEAN	306.0	131.0	117.0
	SD	1.6	0.0	0.0
4	1	357.0	103.0	122.0
	2	357.0	103.0	122.0
	3	357.0	103.0	122.0
	MEAN	357.0	103.0	122.0
	SD	0.0	0.0	0.0
5	1	362.0	164.0	168.0
	2	362.0	157.0	168.0
	3	362.0	172.0	168.0
	MEAN	362.0	164.3	168.0
	SD	0.0	6.1	0.0

ตารางที่ 3ข ค่าซีไอของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
6	1	391.0	173.0	163.0
	2	388.0	173.0	163.0
	3	391.0	173.0	163.0
	MEAN	390.0	173.0	163.0
	SD	1.4	0.0	0.0
7	1	371.0	119.0	127.0
	2	355.0	124.0	117.0
	3	363.0	114.0	137.0
	MEAN	363.0	119.0	127.0
	SD	6.5	4.1	8.2
8	1	308.0	107.0	104.0
	2	308.0	107.0	104.0
	3	305.0	107.0	106.0
	MEAN	307.0	107.0	104.7
	SD	1.4	0.0	0.9
9	1	270.0	136.0	148.0
	2	322.0	145.0	171.0
	3	304.0	154.0	159.0
	MEAN	298.7	145.0	159.3
	SD	21.6	7.3	9.4
10	1	342.0	115.0	118.0
	2	342.0	118.0	128.0
	3	342.0	103.0	123.0
	MEAN	342.0	112.0	123.0
	SD	0.0	6.5	4.1
11	1	342.0	138.0	138.0
	2	339.0	138.0	144.0
	3	346.0	138.0	150.0
	MEAN	342.3	138.0	144.0
	SD	2.9	0.0	4.9

ตารางที่ 3ข ค่าซีไอของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
12	1	424.0	114.0	120.0
	2	424.0	117.0	109.0
	3	417.0	109.0	114.0
	MEAN	421.7	113.3	114.3
	SD	3.3	3.3	4.5
13	1	432.0	161.0	133.0
	2	432.0	161.0	144.0
	3	432.0	150.0	138.0
	MEAN	432.0	157.3	138.3
	SD	0.0	5.2	4.5
14	1	235.0	96.0	38.0
	2	214.0	102.0	38.0
	3	225.0	108.0	38.0
	MEAN	224.7	102.0	38.0
	SD	8.6	4.9	0.0
15	1	279.0	73.0	79.0
	2	286.0	96.0	85.0
	3	271.0	85.0	79.0
	MEAN	278.7	84.7	81.0
	SD	6.1	9.4	2.8
16	1	296.0	124.0	118.0
	2	296.0	118.0	115.0
	3	296.0	130.0	112.0
	MEAN	296.0	124.0	115.0
	SD	0.0	4.9	2.4
17	1	339.0	77.0	83.0
	2	347.0	71.0	71.0
	3	339.0	73.0	83.0
	MEAN	341.7	73.7	79.0
	SD	3.8	2.5	5.7

ตารางที่ 3ข ค่าซีไอของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
18	1	360.0	156.0	156.0
	2	353.0	156.0	156.0
	3	367.0	156.0	156.0
	MEAN	360.0	156.0	156.0
	SD	5.7	0.0	0.0
19	1	423.0	108.0	97.0
	2	423.0	106.0	97.0
	3	423.0	105.0	97.0
	MEAN	423.0	106.3	97.0
	SD	0.0	1.2	0.0
20	1	473.0	115.0	38.0
	2	478.0	115.0	38.0
	3	478.0	113.0	38.0
	MEAN	476.3	114.3	38.0
	SD	2.4	0.9	0.0
21	1	285.0	119.0	160.0
	2	288.0	119.0	167.0
	3	291.0	119.0	167.0
	MEAN	288.0	119.0	164.7
	SD	2.4	0.0	3.3

ตารางที่ 4ข ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
ก่อน ทดลอง	1	100	80	80
	2	90	80	80
	3	110	70	701
	MEAN	100	77	287
	SD	8.16	4.71	292.74
1	1	20	60	40
	2	30	10	20
	3	20	30	30
	MEAN	23	33	30
	SD	5	21	8
2	1	160	50	20
	2	40	10	40
	3	100	30	30
	MEAN	100	30	30
	SD	49	16	8
3	1	40	30	70
	2	10	70	40
	3	30	50	60
	MEAN	27	50	57
	SD	12	16	12
4	1	80	60	60
	2	170	60	60
	3	130	60	60
	MEAN	127	60	60
	SD	37	0	0
5	1	30	20	40
	2	30	20	40
	3	30	20	40
	MEAN	30	20	40
	SD	0	0	0

ตารางที่ 4ข ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
6	1	20	43	39
	2	60	48	47
	3	40	45	47
	MEAN	40	45	44
	SD	16	2	4
7	1	50	10	40
	2	50	10	10
	3	50	10	25
	MEAN	50	10	25
	SD	0	0	12
8	1	60	80	40
	2	80	80	60
	3	40	80	50
	MEAN	60	80	50
	SD	16	0	8
9	1	50	10	80
	2	70	10	90
	3	50	50	50
	MEAN	57	23	73
	SD	9	19	17
10	1	70	140	130
	2	100	200	120
	3	90	150	120
	MEAN	87	163	123
	SD	12	26	5
11	1	44	50	20
	2	67	20	40
	3	44	20	50
	MEAN	52	30	37
	SD	11	14	12

ตารางที่ 4ข ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
12	1	44	50	20
	2	67	20	40
	3	44	20	50
	MEAN	52	30	37
	SD	11	14	12
13	1	60	35	40
	2	50	30	30
	3	40	40	20
	MEAN	50	35	30
	SD	8	4	8
14	1	40	13	20
	2	40	13	20
	3	40	13	20
	MEAN	40	13	20
	SD	0	0	0
15	1	37	20	24
	2	45	20	26
	3	41	20	25
	MEAN	41	20	25
	SD	3	0	1
16	1	37	20	24
	2	45	20	26
	3	41	20	25
	MEAN	41	20	25
	SD	3	0	1
17	1	45	32	17
	2	77	34	17
	3	67	33	24
	MEAN	63	33	19
	SD	13	1	3

ตารางที่ 4ข ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
18	1	70	23	38
	2	50	33	38
	3	90	28	38
	MEAN	70	28	38
	SD	16	4	0
19	1	90	33	30
	2	90	24	38
	3	90	29	34
	MEAN	90	29	34
	SD	0	4	3
20	1	125	21	21
	2	113	22	22
	3	119	22	22
	MEAN	119	22	22
	SD	5	0	0
21	1	97	22	30
	2	107	28	27
	3	102	25	29
	MEAN	102	25	29
	SD	4	2	1

ตารางที่ 5ข ค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
ก่อนการ ทดลอง	1	10.29	8.14	7.25
	2	11.27	8.53	8.43
	MEAN	10.78	8.34	7.84
	SD	0.49	0.19	0.59
1	1	9.31	7.25	7.16
	2	7.94	5.59	5.59
	MEAN	8.63	6.42	6.38
	SD	0.69	0.83	0.79
2	1	13.33	10.59	11.08
	2	12.16	10.29	11.08
	MEAN	12.75	10.44	11.08
	SD	0.59	0.15	0.00
3	1	16.27	11.27	9.51
	2	18.43	11.37	11.57
	MEAN	17.35	11.32	10.54
	SD	1.08	0.05	1.03
4	1	34.01	10.20	10.49
	2	31.45	10.20	10.10
	MEAN	32.73	10.20	10.30
	SD	1.28	0.00	0.20
5	1	37.63	11.18	11.27
	2	37.37	12.45	10.39
	MEAN	37.50	11.82	10.83
	SD	0.13	0.64	0.44
6	1	17.65	14.80	11.47
	2	17.45	16.57	10.10
	MEAN	17.55	15.69	10.79
	SD	0.10	0.89	0.69
7	1	13.92	63.71	64.11
	2	14.51	63.44	67.20
	MEAN	14.22	63.58	65.66
	SD	0.30	0.14	1.55

ตารางที่ 5ข ค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
8	1	29.03	13.82	13.33
	2	29.84	17.55	14.02
	MEAN	29.44	15.69	13.68
	SD	0.40	1.87	0.35
9	1	49.19	27.55	15.98
	2	42.20	14.61	26.34
	MEAN	45.70	21.08	21.16
	SD	3.50	6.47	5.18
10	1	47.58	16.96	15.69
	2	46.64	17.06	28.76
	MEAN	47.11	17.01	22.23
	SD	0.47	0.05	6.54
11	1	63.31	13.33	13.82
	2	63.17	14.31	14.12
	MEAN	63.24	13.82	13.97
	SD	0.07	0.49	0.15
12	1	31.85	7.45	8.63
	2	38.98	11.18	12.45
	MEAN	35.42	9.32	10.54
	SD	3.57	1.87	1.91
13	1	32.26	11.57	11.57
	2	32.39	11.08	11.18
	MEAN	32.33	11.33	11.38
	SD	0.07	0.25	0.20
14	1	28.49	14.61	10.49
	2	28.36	9.31	11.37
	MEAN	28.43	11.96	10.93
	SD	0.06	2.65	0.44
15	1	60.22	10.29	7.94
	2	61.96	11.67	7.84
	MEAN	61.09	10.98	7.89
	SD	0.87	0.69	0.05

ตารางที่ 5ข ค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
16	1	44.89	8.33	9.31
	2	42.34	16.69	9.80
	MEAN	43.62	12.51	9.56
	SD	1.28	4.18	0.25
17	1	26.21	11.67	7.06
	2	29.97	9.80	6.86
	MEAN	28.09	10.74	6.96
	SD	1.88	0.94	0.10
18	1	29.97	11.67	8.14
	2	29.57	8.82	9.22
	MEAN	29.77	10.25	8.68
	SD	0.20	1.42	0.54
19	1	47.18	11.47	10.10
	2	46.51	11.47	10.10
	MEAN	46.85	11.47	10.10
	SD	0.34	0.00	0.00
20	1	38.44	38.31	12.65
	2	38.44	38.31	12.65
	MEAN	38.44	38.31	12.65
	SD	0.00	0.00	0.00
21	1	44.89	11.47	11.18
	2	44.89	11.47	11.18
	MEAN	44.89	11.47	11.18
	SD	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 6ข ค่า $\text{NH}_4\text{-N}$ ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ

ลำดับที่	N	น้ำเสีย เข้า ระบบ	Pilot plant	
			1	1
ก่อนการ ทดลอง	1	0.91	0.49	0.57
	2	0.91	0.49	0.57
	MEAN	0.91	0.49	0.57
	SD	0.00	0.00	0.00
1	1	4.79	0.54	0.79
	2	4.46	0.50	0.70
	MEAN	4.63	0.52	0.75
	SD	0.17	0.02	0.05
2	1	1.42	1.00	0.68
	2	1.42	0.86	0.50
	MEAN	1.42	0.93	0.59
	SD	0.00	0.07	0.09
3	1	1.79	2.38	2.38
	2	1.79	2.38	2.38
	MEAN	1.79	2.38	2.38
	SD	0.00	0.00	0.00
4	1	6.96	2.10	2.12
	2	6.31	2.10	2.12
	MEAN	6.64	2.10	2.12
	SD	0.33	0.00	0.00
5	1	8.22	2.16	2.37
	2	7.90	2.31	2.15
	MEAN	8.06	2.24	2.26
	SD	0.16	0.08	0.11
6	1	4.58	6.44	1.66
	2	4.29	6.61	1.87
	MEAN	4.44	6.53	1.77
	SD	0.15	0.09	0.11
7	1	3.64	3.79	1.97
	2	2.08	2.13	1.98
	MEAN	2.86	2.96	1.98
	SD	0.78	0.83	0.01

ตารางที่ 6ข ค่า $\text{NH}_4\text{-N}$ ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

ลำดับที่	N	น้ำเสีย เข้า ระบบ	Pilot plant	
			1	1
8	1	2.39	2.16	2.09
	2	2.01	1.96	2.01
	MEAN	2.20	2.06	2.05
	SD	0.19	0.10	0.04
9	1	5.11	1.90	1.99
	2	5.13	1.92	1.99
	MEAN	5.12	1.91	1.99
	SD	0.01	0.01	0.00
10	1	4.36	2.14	4.86
	2	4.38	2.15	4.86
	MEAN	4.37	2.15	4.86
	SD	0.01	0.00	0.00
11	1	5.03	2.33	3.50
	2	5.06	2.32	3.51
	MEAN	5.05	2.33	3.51
	SD	0.01	0.01	0.00
12	1	8.67	2.21	3.51
	2	8.57	2.21	2.29
	MEAN	8.62	2.21	2.90
	SD	0.05	0.00	0.61
13	1	10.54	2.07	2.27
	2	10.42	2.08	2.28
	MEAN	10.48	2.08	2.28
	SD	0.06	0.01	0.00
14	1	10.60	4.06	4.01
	2	10.50	4.07	3.99
	MEAN	10.55	4.07	4.00
	SD	0.05	0.01	0.01
15	1	11.81	3.67	3.53
	2	11.94	3.65	3.53
	MEAN	11.88	3.66	3.53
	SD	0.06	0.01	0.00

ตารางที่ 6ข ค่า $\text{NH}_4\text{-N}$ ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้า ระบบ	Pilot plant	
			1	1
16	1	12.06	3.61	2.34
	2	11.97	3.57	2.36
	MEAN	12.02	3.59	2.35
	SD	0.04	0.02	0.01
17	1	7.92	3.61	3.56
	2	7.90	3.60	3.51
	MEAN	7.91	3.61	3.54
	SD	0.01	0.00	0.03
18	1	10.47	3.72	4.06
	2	10.28	3.74	4.07
	MEAN	10.38	3.73	4.07
	SD	0.10	0.01	0.01
19	1	17.19	3.64	3.56
	2	14.61	3.62	3.62
	MEAN	15.90	3.63	3.59
	SD	1.29	0.01	0.03
20	1	10.67	3.88	3.89
	2	11.17	4.07	3.90
	MEAN	10.92	3.98	3.90
	SD	0.25	0.10	0.00
21	1	15.64	4.36	4.85
	2	16.86	4.58	4.74
	MEAN	16.25	4.47	4.80
	SD	0.61	0.11	0.05

ตารางที่ 7ข ค่า PO_4^{3-} ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
ก่อนการ ทดลอง	1	1.11	0.91	0.88
	2	1.11	0.91	0.88
	MEAN	1.11	0.91	0.88
	SD	0.00	0.00	0.00
1	1	1.91	1.01	1.14
	2	1.91	1.01	1.14
	MEAN	1.91	1.01	1.14
	SD	0.00	0.00	0.00
2	1	1.50	1.25	1.20
	2	1.50	1.25	1.20
	MEAN	1.50	1.25	1.20
	SD	0.00	0.00	0.00
3	1	1.27	1.83	1.68
	2	1.28	1.83	1.69
	MEAN	1.28	1.83	1.69
	SD	0.01	0.00	0.01
4	1	1.65	1.78	1.76
	2	1.65	1.79	1.77
	MEAN	1.65	1.79	1.77
	SD	0.00	0.01	0.01
5	1	1.14	1.80	1.74
	2	0.89	1.79	1.76
	MEAN	1.02	1.80	1.75
	SD	0.13	0.01	0.01
6	1	0.49	1.98	1.87
	2	0.56	1.99	1.88
	MEAN	0.53	1.99	1.88
	SD	0.04	0.01	0.00
7	1	0.50	1.95	1.94
	2	0.63	1.93	1.98
	MEAN	0.57	1.94	1.96
	SD	0.07	0.01	0.02

ตารางที่ 7ข ค่า PO_4^{3-} ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

8	1	1.73	1.74	1.72
	2	1.75	1.75	1.70
	MEAN	1.74	1.75	1.71
	SD	0.01	0.01	0.01
9	1	2.25	2.93	2.39
	2	2.19	2.94	2.49
	MEAN	2.22	2.94	2.44
	SD	0.03	0.00	0.05
10	1	2.44	2.34	2.27
	2	2.87	2.40	2.13
	MEAN	2.66	2.37	2.20
	SD	0.22	0.03	0.07
11	1	0.92	1.77	1.80
	2	0.95	1.81	1.80
	MEAN	0.94	1.79	1.80
	SD	0.02	0.02	0.00
12	1	0.85	3.16	3.15
	2	0.85	3.17	3.13
	MEAN	0.85	3.17	3.14
	SD	0.00	0.00	0.01
13	1	0.77	2.96	3.03
	2	0.75	2.90	3.04
	MEAN	0.76	2.93	3.04
	SD	0.01	0.03	0.01
14	1	2.23	3.26	3.06
	2	2.32	3.15	3.02
	MEAN	2.28	3.21	3.04
	SD	0.04	0.05	0.02
15	1	1.17	3.28	3.05
	2	1.19	3.25	3.08
	MEAN	1.18	3.27	3.07
	SD	0.01	0.01	0.02

ตารางที่ 7ข ค่า PO_4^{3-} ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ (ต่อ)

สัปดาห์ที่	N	น้ำเสีย เข้าระบบ	Pilot plant	
			1	1
16	1	1.54	3.05	3.07
	2	1.51	3.00	3.05
	MEAN	1.53	3.03	3.06
	SD	0.02	0.02	0.01
17	1	1.98	3.04	3.02
	2	1.99	3.05	3.02
	MEAN	1.99	3.05	3.02
	SD	0.01	0.00	0.00
18	1	3.35	2.70	2.74
	2	3.33	2.70	2.75
	MEAN	3.34	2.70	2.75
	SD	0.01	0.00	0.00
19	1	3.30	2.84	2.86
	2	3.38	2.85	2.80
	MEAN	3.34	2.85	2.83
	SD	0.04	0.01	0.03
20	1	3.17	2.70	2.82
	2	3.40	2.75	2.81
	MEAN	3.29	2.73	2.82
	SD	0.12	0.02	0.00
21	1	3.60	2.66	2.75
	2	3.64	2.70	2.74
	MEAN	3.62	2.68	2.75
	SD	0.02	0.02	0.00

ตารางที่ 8ข ค่าเฉลี่ยดัชนีคุณภาพน้ำหลังการบำบัดด้วยระบบรางพีซี ระบบพีซีลอยน้ำร่วมกับการเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศ 2 เครื่อง

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง (22สัปดาห์)		ค่าเฉลี่ยช่วง 3 เดือนแรก (12 สัปดาห์)		ค่าเฉลี่ยช่วงหลัง 3 เดือน (10 สัปดาห์)	
	ดัชนีคุณภาพน้ำ (mg/L)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด	ดัชนีคุณภาพน้ำ (mg/L)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด	ดัชนีคุณภาพน้ำ (mg/L)	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด
pH	8.33 ± 0.63	-9.06 ± 8.22	8.04 ± 0.67	-5.26 ± 8.81	8.75 ± 0.14	-14.57 ± 1.82
SS	40.66 ± 28.28	36.42 ± 44.23	51.69 ± 32.54	19.17 ± 50.89	24.72 ± 5.28	61.34 ± 8.26
BOD	33.44 ± 32.77	76.43 ± 23.09	49.21 ± 34.67	65.31 ± 24.44	10.67 ± 5.28	92.48 ± 3.72
COD	129.66 ± 39.86	62.45 ± 11.54	142.31 ± 41.16	58.78 ± 11.92	111.39 ± 31.54	67.71 ± 9.14
Ortho-P	2.16 ± 0.69	-24.68 ± 40.37	1.86 ± 0.63	-7.66 ± 36.29	2.58 ± 0.58	-49.27 ± 33.93
NH ₃ -N	2.76 ± 1.16	91.62 ± 3.53	2.19 ± 1.08	93.37 ± 3.26	3.60 ± 0.69	52.62 ± 9.17
NO ₃ -N	14.46 ± 11.94	56.17 ± 36.20	16.07 ± 15.01	51.29 ± 45.51	12.14 ± 5.09	63.21 ± 15.45

ตารางที่ 9ข การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดัชนีคุณภาพน้ำที่อัตราไหลต่างกัน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	treatment	Flow (mL/min)	mean	SD	sig	P
pH	1	21.0	-12.61	4.65	0.159	>0.05
		31.5	-15.63	1.12		
	2	21.0	-15.23	2.31	0.03	<0.05
		31.5	-14.94	1.56		
	3	21.0	-14.26	2.84	0.03	<0.05
		31.5	-13.77	1.83		
	4	21.0	-13.48	2.26	0.24	>0.05
		31.5	-12.59	1.82		
SS	1	21.0	-94.20	78.81	0.17	>0.05
		31.5	-87.15	76.10		
	2	21.0	47.13	9.02	0.03	<0.05
		31.5	68.93	14.03		
	3	21.0	53.85	10.55	0.10	>0.05
		31.5	68.12	12.11		
	4	21.0	55.28	10.09	0.27	>0.05
		31.5	67.10	16.22		
BOD	1	21.0	89.16	6.55	0.29	>0.05
		31.5	87.10	5.28		
	2	21.0	90.66	5.38	0.37	>0.05
		31.5	92.13	3.89		
	3	21.0	90.09	5.32	0.167	>0.05
		31.5	93.62	5.83		
	4	21.0	89.67	2.97	0.21	>0.05
		31.5	91.96	4.43		

ตารางที่ 9ข การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดัชนีคุณภาพน้ำที่อัตราไหลต่างกัน (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	treatment	Flow (mL/min)	mean	SD	sig	P
COD	1	21.0	46.99	19.94	0.49	>0.05
		31.5	47.07	7.50		
	2	21.0	67.64	8.68	0.33	>0.05
		31.5	71.54	11.81		
	3	21.0	68.99	7.22	0.37	>0.05
		31.5	65.33	13.47		
	4	21.0	68.42	8.01	0.35	>0.05
		31.5	64.36	11.02		
Ortho P	1	21.0	-53.41	64.23	0.03	
		31.5	30.26	9.52		
	2	21.0	-80.62	53.89	0.01	
		31.5	22.41	4.29		
	3	21.0	-89.54	58.71	0.02	
		31.5	18.59	4.62		
	4	21.0	-95.31	59.83	0.01	
		31.5	18.75	4.92		
NH ₄ -N	1	21.0	64.26	12.11	0.09	
		31.5	71.73	6.03		
	2	21.0	64.78	4.95	0.17	
		31.5	68.43	7.83		
	3	21.0	65.42	8.95	0.30	
		31.5	68.80	6.91		
	4	21.0	63.07	7.92	0.26	
		31.5	67.47	9.33		
NO ₃ ⁻ -N	1	21.0	72.05	10.97	0.38	
		31.5	73.66	3.24		
	2	21.0	74.63	8.56	0.19	
		31.5	65.33	15.59		
	3	21.0	71.83	10.43	0.26	
		31.5	63.43	20.15		
	4	21.0	63.98	11.38	0.21	
		31.5	63.94	13.33		

ตารางที่ 10ข คุณภาพน้ำของระบบบำบัดน้ำเสียที่ปรับปรุงระบบแล้ว

พารามิเตอร์	Week1		Week2		Week3		Week4	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
pH	6.33	7.69	8.81	7.05	8.77	7.35	8.93	8.11
SS (mgL ⁻¹)	37	21	49	24	57	36	42	24
BOD (mgL ⁻¹)	180.85	21.60	133.01	18.92	413.91	19.35	167.85	13.92
COD (mgL ⁻¹)	316.24	257.43	555.32	217.93	711.11	210.10	316.83	108.56

