

ประสิทธิภาพของระบบพืชกรองน้ำ ร่วมกับเครื่องกลเติมอากาศในการบำบัดน้ำเสียจากพื้นที่โครงการพัฒนาคอยดุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ Efficiency of Wastewater Treatment using a Combination System of Plantbed Filter and Aerators from Doi Tung Development Project: Mae Fah Luang Foundation Under Royal Patronage

ชนิษฐา เจริญลาภ^{1*} และธนพงศ์ ดวงมณี²

Received: August, 2015; Accepted: February, 2016

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบพืชกรองน้ำ ร่วมกับเครื่องกลเติมอากาศในการบำบัดน้ำเสีย จากพื้นที่โครงการพัฒนาคอยดุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริในการลดค่าของแข็งแขวนลอย บีโอดี ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน ไนเตรต และออร์โธฟอสเฟต จากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมและโรงงานกระดาษ อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ 31.2 ลิตรต่อวินาที หรือ 22 มิลลิลิตรต่อนาที ทดลองกับระบบบำบัดน้ำเสีย 4 รูปแบบ ได้แก่ ระบบเติมอากาศ ระบบรางพืชร่วมกับระบบเติมอากาศ ระบบรางพืช และพืชลอยน้ำร่วมกับระบบเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศ 2 เครื่อง และระบบรางพืช และพืชลอยน้ำร่วมกับระบบเติมอากาศ ด้วยเครื่องเติมอากาศ 1 เครื่อง ผลการทดลองพบว่าระบบรางพืช และพืชลอยน้ำร่วมกับระบบเติมอากาศ ด้วยเครื่องเติมอากาศ 2 เครื่อง มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุดโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด บีโอดี ซีโอดี ออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน และแอมโมเนียไนเตรต มีค่าร้อยละ 61.34 ± 8.26 92.48 ± 3.72 67.71 ± 9.14 -49.27 ± 33.93 52.62 ± 9.17 63.21 ± 15.45 ตามลำดับ

คำสำคัญ : ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน; ระบบเติมอากาศ; ระบบพืชกรองน้ำ; ระบบพืชลอยน้ำ; แพลก

¹ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

² มูลนิธิแม่ฟ้าหลวงในพระบรมราชูปถัมภ์ กรุงเทพมหานคร

* Corresponding Author E - mail Address: Khanittha.C@rmutk.ac.th

Abstract

This research investigates the efficiency of wastewater treatment from Doi Tung development project: Mae Fah Luang Foundation Under Royal Patronage for Total Suspended Solid (TSS), Biochemical Oxygen Demand (BOD_5), Chemical Oxygen Demand (COD), ammonia nitrogen (NH_4^+-N), nitrate (NO_3^--N), and orthophosphate (PO_4^{3-}) removal using a combination system of planted filter and aerators. The flow rate of 31.2 Ld^{-1} (22 mLmin^{-1}) was fed to the four plug flow treatment systems. Such treatments were the aerator systems, hybrid system between planted bed filter and aerators, hybrid system between planted bed filter, floating plant and 2 aerators and hybrid system between planted bed filter, floating plant and 1 aerators. The test results showed that the hybrid system combining planted bed filter, floating plant and 2 aerators had the best performance. An improvement of TSS by $61.34 \pm 8.26\%$, BOD by $92.48 \pm 3.72\%$, COD by $67.71 \pm 9.14\%$, PO_4^{3-} $49.27 \pm 33.93\%$, NH_4^+-N $52.62 \pm 9.17\%$, and NO_3^--N $63.21 \pm 15.45\%$ can be obtained.

Keywords: Hybrid Constructed Wetland; Planted Bed System; Floating Planted System; Vetiver

บทนำ

การพัฒนาพื้นที่โครงการพัฒนาออยดุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ ความกินดีอยู่ดีของประชาชน และฟื้นฟูสภาพสิ่งแวดล้อมของพื้นที่โครงการฯ ที่เสื่อมโทรมจากการตัดไม้ทำลายป่า การทำไร่เลื่อนลอย และปลูกฝิ่นของราษฎรชาวเขาในพื้นที่มาเป็นเวลานานให้กลับคืนสู่สภาพปกติ ด้วยการป้องกัน และให้มีการปลูกป่าอนุรักษ์ต้นน้ำลำธาร ป่าเศรษฐกิจและป่ายังชีพขึ้น จากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องนี้ ทำให้ดอยดุงได้กลายเป็นป่าต้นน้ำสำคัญชาวบ้านในพื้นที่มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น จากการส่งเสริมให้ราษฎร ชาวเขาในพื้นที่มีงานทำ สร้างรายได้จากกิจกรรมการผลิตต่าง ๆ เช่น การปลูกกาแฟและแมคคาเดเมีย การทำกระดาษสา การย้อมสี การทอผ้า การทำเซรามิค และคว่ำกาแฟ ฯลฯ กิจกรรมดังกล่าว ทำให้โครงการพัฒนาออยดุงฯ เป็นตัวอย่างที่ดีของการพัฒนาทางเลือกที่ยั่งยืน อย่างไรก็ตามจากกิจกรรมดังกล่าวโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การทำกระดาษสา การย้อมสี และการทำเซรามิค เป็นกิจกรรมที่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตในปริมาณมาก (200 - 300 ลิตรต่อวัตถุดิบ 1 กิโลกรัม) เมื่อเทียบกับกิจกรรมอื่น และในขณะเดียวกัน ก็ปล่อยน้ำเสียในปริมาณมากเช่นเดียวกัน จำเป็นต้องได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธี เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่ธรรมชาติ จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีระบบบำบัดน้ำเสีย และควรเป็นระบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม กล่าวคือเป็นระบบที่อาศัยธรรมชาติช่วยธรรมชาติ ประหยัดพลังงาน และมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของกิจกรรมดังกล่าว การบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติอาศัยกลไกธรรมชาติทั้งที่เป็นกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี และ

ทางชีวภาพ ที่มีอยู่ในดิน น้ำ พืช และจุลินทรีย์เพื่อช่วยในการปรับสภาพน้ำเสียให้เป็นน้ำที่มีสารปนเปื้อนลดน้อยลง โดยไม่ใช่เครื่องจักรกล จึงเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานไฟฟ้า แต่ต้องอาศัยเทคนิคการบริหารจัดการพื้นที่บำบัดอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากต้องใช้พื้นที่มาก และต้องไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่ วิธีบำบัดน้ำเสียแบบกระจายบนดิน (Land Treatment Systems) วิธีบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland Systems) และวิธีพืชลอยน้ำ (Floating Aquatic Plant Treatment Systems) [1] ในส่วนวิธีบึงประดิษฐ์ และพืชลอยน้ำ พืชจะช่วยในการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซึมธาตุอาหาร โลหะหนัก และสารอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียเพื่อนำมาใช้ในการเจริญเติบโตโดยผ่านทางระบบรากเข้าสู่ลำต้น นอกจากนี้รากพืชยังเป็นส่วนสำคัญในการบำบัดน้ำเสีย กล่าวคือทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ มีการเคลื่อนย้ายแก๊สต่าง ๆ รวมถึงออกซิเจนจากกาบใบลงสู่ระบบราก เกิดสภาพออกซิเจนเป็นฟิล์มบาง ๆ (Rhizosphere) รอบ ๆ ราก ทำให้จุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสิ่งสกปรกต่าง ๆ ในน้ำ ทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น [2] นอกจากนี้ก้านหรือลำต้นที่อยู่ในน้ำยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการกรองดูดซับตะกอน และของแข็งที่แขวนลอยในน้ำ จากที่กล่าวมาข้างต้น พืชจะมีกลไกหลายประการที่ช่วยลดปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำเสียได้ แต่การนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีข้อจำกัด กล่าวคือต้องมีการคัดเลือกชนิดพืชที่เหมาะสม [3] แนะนำให้ใช้พืชจากบริเวณใกล้เคียงในรัศมี 100 ไมล์ทางเส้นรุ้ง ความยาว 200 ไมล์ทางเส้นแวง และระดับความสูงไม่เกิน 1,000 ฟุต โดยนักนิเวศวิทยาได้อธิบายว่าหากนำพืชจากบริเวณอื่นมาใช้ การเจริญเติบโตของพืชอาจถูกยับยั้งได้ [4] การนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย มีผู้ทดลองใช้พืชน้ำหลายชนิด เช่น ฤๅษี อ้อ กก แผลก และผักตบชวา เป็นต้น เนื่องจากสามารถเจริญเติบโตได้ในบริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำ และยังสามารถบำบัดน้ำเสีย ชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรมได้ [1], [5] และการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระบบบึงประดิษฐ์เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียทั้งน้ำเสียชุมชน [6] - [7] น้ำเสียจากการเกษตร [8] - [9] น้ำเสียอุตสาหกรรม [10] - [11] และน้ำเสียจากการทำเหมืองแร่ [12] และจากการศึกษาของ Bulc, T. G. and Ojstršek, A. [13] พบว่า ระบบบึงประดิษฐ์ สามารถกำจัดสรีรแอคทีฟ สีดิสเพิร์ส และซีแวนด์ จากโรงงานสิ่งทอในประเทศสโลวาเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคุณภาพน้ำที่ได้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง อย่างไรก็ตาม ระบบบึงประดิษฐ์โดยทั่วไป พบว่าหลังจากใช้งานไประยะเวลาหนึ่งระบบจะเริ่มมีปัญหาจากการอุดตันของตะกอน [28] ทำให้มีน้ำเสียไหลล้นออกจากระบบ

จากการที่พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดชทรงคิดค้นประดิษฐ์ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยรางพืชร่วมกับเครื่องกลเติมอากาศ โดยกรมทรัพยากรสิ่งแวดล้อมได้ถวายสิทธิบัตรการประดิษฐ์เลขที่ 29091 เมื่อวันที่ 9 พฤศจิกายน พ.ศ. 2553 [15] โดยพบว่าระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยรางพืชร่วมกับเครื่องกลเติมอากาศ เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับแก้ไขปัญหาน้ำเสียชุมชน ที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาน้ำเสียอันเกิดจากสาหร่ายขึ้นดำได้เมื่อใช้เครื่องกลเติมอากาศอย่างเดียว โดยเครื่องกลเติมอากาศทำหน้าที่ถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ รางพืชทำหน้าที่กรองน้ำธรรมชาติ [15] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบพืชกรองน้ำ ร่วมกับเครื่องกลเติมอากาศในการบำบัดน้ำเสีย จากพื้นที่โครงการพัฒนาออยคอง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาการอุดตันของระบบบึงประดิษฐ์รวมทั้งเป็นระบบที่ลดการใช้พลังงาน สารเคมี ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการบำบัดน้ำเสีย โดยทำให้คุณภาพของแหล่งรองรับน้ำทิ้งดีขึ้น เกิดความสมดุลของระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม

นอกจากนี้การใช้พืชในการบำบัดน้ำเสียยังได้รับผลพลอยได้จากการนำพืชไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นอีกด้วย เช่น การใช้ในการผลิตสินค้าหัตถกรรม งานทอ เสื้อ ทำกระดาษ สามารถนำรายได้กลับมาให้กับโครงการพัฒนาออยคุงฯ เพื่อเป็นการจ้างแรงงานราษฎรในพื้นที่

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องยววิวิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo รุ่น Helios Aquamate
- เครื่องวัดความชื้น ยี่ห้อ EUTECH รุ่น NT-100
- เครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อ CyberScans รุ่น PC 200
- เครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์ทางเคมี
- ตู้อบ
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

2. วิธีทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบและสร้างระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบระบบจริง (Pilot-Scale) โดยผสมผสานระหว่างระบบพืชกรองน้ำ ร่วมกับเครื่องกลเติมอากาศ

1) สร้างโรงเรือนขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ $3.8 \times 5.9 \times 2$ เมตร มุงหลังคาโรงเรือนด้วยแผ่นพลาสติกใส

2) ระบบกระจายน้ำ ประกอบด้วยถังพักน้ำเสียขนาดความจุ 200 ลิตร และถังควบคุมอัตราการไหลของน้ำทิ้ง ขนาดความจุ 50 ลิตร โดยบ่อน้ำทิ้งเข้าสู่ระบบตลอดเวลา ควบคุมอัตราการไหลที่ 1.25 ลิตรต่อชั่วโมง (30 ลิตรต่อวัน) โดยใช้วาล์วในการปรับอัตราการไหลของน้ำทิ้ง

3) ระบบถังบำบัดน้ำเสียจำลอง มีความจุ 130 ลิตร เจาะรูน้ำทิ้งที่ความสูง 24 เซนติเมตร ในบริเวณดังกล่าว ติดตั้งท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ในแนวตั้งในระดับที่สูงกว่าท่อน้ำทิ้ง เพื่อสร้างสภาวะน้ำนิ่ง ป้องกันตะกอนออกจากถังบำบัด

4) รางพืช ขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ $16 \times 131 \times 37$ เซนติเมตร โดยยกรางพืชให้สูงจากพื้น 27 เซนติเมตร เพื่อให้ น้ำไหลกลับลงบ่อบำบัด ก่อปูนทางกันน้ำที่เข้าสู่บริเวณที่ปลูกพืช สูง 26 เซนติเมตร และทางกันน้ำออก สูง 19.5 เซนติเมตร รางพืชทำจากอิฐบล็อก และฉาบปูนที่ผสมสารกันซึม เพื่อป้องกันการซึมของน้ำ บริเวณที่จะปลูกพืช มีความยาว 1 เมตร โดยใส่ทรายให้สูง 15 เซนติเมตร

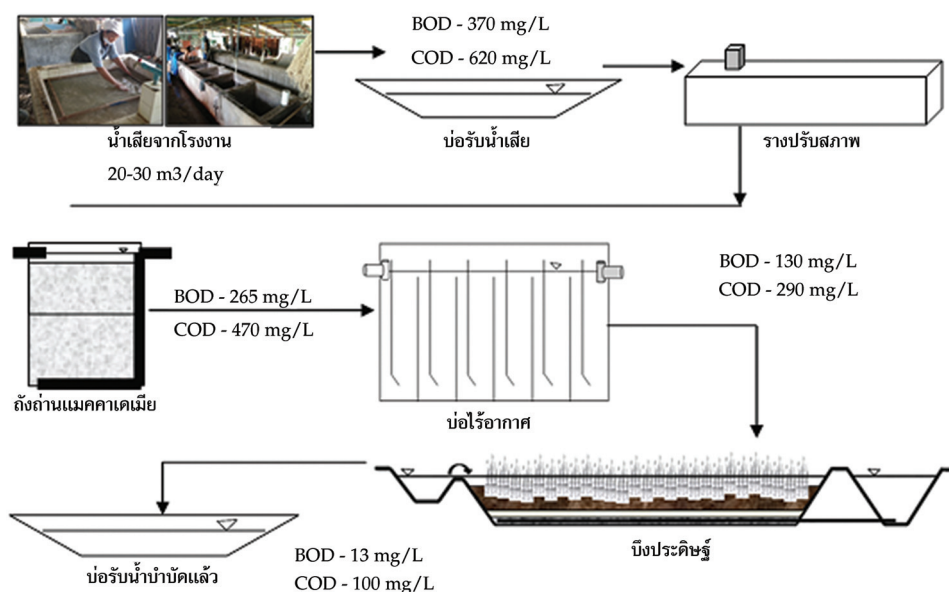
ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพืชกรองน้ำ ร่วมกับเครื่องเติมอากาศ โดยเติมน้ำเสียในบ่อเติมอากาศ โดยอัตราการไหลของน้ำ 1.25 ลิตรต่อชั่วโมง โดยดัชนีคุณภาพน้ำที่วิเคราะห์มีดังนี้ พีเอช ค่าความนำไฟฟ้า ความชื้น ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณของแข็งละลาย ซีโอดี บีโอดี ใช้วิธีตาม American Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 20th.ed. 1998. [16]

ผลการทดลอง

1. การศึกษาเบื้องต้นของระบบบำบัดน้ำเสียพื้นที่โครงการพัฒนาออยดุง

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมและโรงงานกระดาษสาของพื้นที่โครงการพัฒนาออยดุงฯ มีปริมาณวันละ 20 - 30 ลูกบาศก์เมตร ขึ้นกับกระบวนการผลิตในแต่ละวัน น้ำเสียทั้งหมดจะไปรวมที่บ่อรวมก่อนส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย โดยน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียมีค่าความสกปรกของน้ำในรูปของบีโอดีเฉลี่ย 370 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดี เฉลี่ย 620 มิลลิกรัมต่อลิตร

น้ำเสียจากบ่อรวมถูกส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสียปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วย การปรับสภาพพีเอช การกรองด้วยถ่านแมคคาเดเมีย ระบบบ่อไร้อากาศ และระบบบึงประดิษฐ์ ดังแสดงในรูปที่ 1



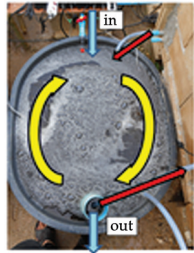
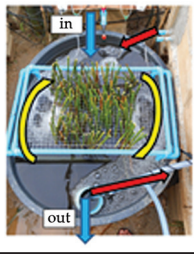
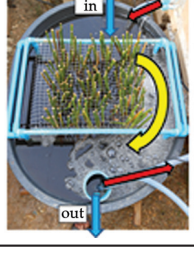
รูปที่ 1 ระบบบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันของพื้นที่โครงการพัฒนาออยดุงฯ

ระบบบึงประดิษฐ์มีขนาดส่วนบน 27 x 7 เมตร และขนาดส่วนล่าง 25 x 5 เมตร ลึก 1 เมตร จำนวน 2 บ่อ โดยปลูกกกเหลื่อม และกกกลม อย่างละ 1 บ่อ ออกแบบให้น้ำไหลได้ผิวดินในแนวตั้ง ประสิทธิภาพของระบบบึงประดิษฐ์ในปัจจุบันหลังจากใช้งานได้ 1 ปี พบว่าสามารถกำจัดบีโอดี ร้อยละ 97 และกำจัดซีโอดีร้อยละ 84 แต่ระบบเริ่มมีปัญหาจากการอุดตันของตะกอน ทำให้มีน้ำเสียไหลล้นออกจากระบบ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงระบบใหม่ โดยในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการบำบัด ความเป็นไปได้ในการดำเนินงาน และต้นทุนในการจัดสร้างระบบ ดังนั้นในงานวิจัยมีแนวคิดในการเอาตัวกรองออกจากกระบอกเดิม เปลี่ยนเป็นระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานระหว่าง ระบบฟิสิกส์กรองน้ำ ระบบรางพีช และระบบเติมอากาศ

2. การออกแบบและสร้างระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบระบบจริง (Pilot-Scale)

ออกแบบและสร้างระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบระบบจริง (Pilot-Scale) โดยผสมผสานระหว่างระบบพืชลอยน้ำ ระบบรางพืช ระบบเดิมอากาศ โดยมีรูปแบบการทดลอง 4 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง 4 แบบ

รูปแบบการทดลอง	ลักษณะการจัดวาง	
รูปแบบการทดลองที่ 1 ระบบเดิมอากาศ	ใช้เครื่องเดิมอากาศ 2 เครื่อง วางชิดริมด้านใน บ่อบำบัด	
รูปแบบการทดลองที่ 2 ระบบเดิมอากาศร่วมกับ รางพืช	ใช้เครื่องเดิมอากาศ 2 เครื่อง วางชิดริมด้านใน บ่อบำบัด และมีระบบคูน้ำเสียจากบ่อเดิมอากาศ เข้าสู่รางพืช และน้ำที่ไหลผ่านรางพืช (ต้นคล้าน้ำ) แล้วจะไหลกลับสู่ระบบเดิมอากาศในทิศตรงข้าม	
รูปแบบการทดลองที่ 3 ระบบพืชลอยน้ำ และรางพืช ร่วมกับการ เดิมอากาศ (ใช้เครื่อง เดิมอากาศ 2 เครื่อง)	ใช้เครื่องเดิมอากาศ 2 เครื่อง วางชิดริมด้านใน บ่อบำบัด ภายในบ่อเดิมอากาศมีระบบพืชลอยน้ำ (ต้นกก) และมีระบบคูน้ำเสียจากบ่อเดิมอากาศ เข้าสู่รางพืช และน้ำที่ไหลผ่านรางพืชแล้วจะไหลกลับสู่ระบบเดิมอากาศในทิศตรงข้าม	
รูปแบบการทดลองที่ 4 ระบบพืชลอยน้ำและ รางพืชร่วมกับการ เดิมอากาศ (ใช้เครื่อง เดิมอากาศ 1 เครื่อง)	ใช้เครื่องเดิมอากาศ 1 เครื่อง วางชิดริมด้านใน บ่อบำบัด ภายในบ่อเดิมอากาศมีระบบพืชลอยน้ำ (ต้นกก) และมีระบบคูน้ำเสียจากบ่อเดิมอากาศ เข้าสู่รางพืช และน้ำที่ไหลผ่านรางพืชแล้วจะไหลกลับสู่ระบบเดิมอากาศในทิศตรงข้าม	

2. คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง

ศึกษาคุณสมบัติของน้ำเสียที่ไหลออกจากบ่อไร้อากาศ เพื่อนำมาบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียทุกสัปดาห์เป็นเวลา 22 สัปดาห์ นำมาวิเคราะห์ ค่าพีเอช ของแข็งแขวนลอย บีโอดี ซีโอดี ออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรดไนโตรเจน ได้ผลแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียจำลอง

สมบัติของน้ำเสีย	min	max	$\bar{X}$	SD.	ค่ามาตรฐาน
ค่าพีเอช	7.20	8.03	7.63	0.18	5.5-9
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	25.00	125.00	63.95	30.49	<50
บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	43.00	330.00	141.87	73.14	<20
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	225.00	476.00	345.27	61.09	<120
ออร์โธฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.53	3.62	1.70	0.98	-
แอมโมเนียไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.91	16.25	7.60	4.29	-
ไนเตรดไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	8.63	63.24	32.99	15.38	-

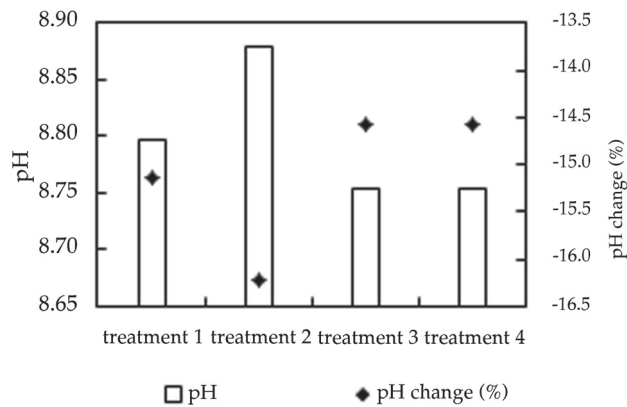
จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียอากาศ โดยภาพรวมพบว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ ยังไม่ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 โดยเฉพาะปริมาณของแข็งแขวนลอย ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี [17]

3. ประสิทธิภาพของระบบบำบัดในแต่ละรูปแบบ

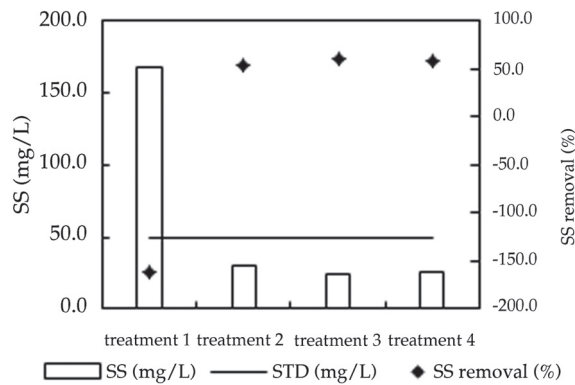
ทดลองโดยใช้น้ำเสียที่ไหลออกจากบ่อไร้อากาศ เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียจำลองทั้งสี่รูปแบบ ตามตารางที่ 1 ควบคุมอัตราการไหลประมาณ 21 - 23 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่า ระบบส่วนใหญ่สามารถปรับตัวได้หลังจากเดินระบบไปได้สามเดือน ในการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดทั้งสี่รูปแบบ จึงเก็บตัวอย่างน้ำหลังจากการเดินระบบไปได้สามเดือน โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ นำมาวิเคราะห์ค่าพีเอช ของแข็งแขวนลอย บีโอดี ซีโอดี ออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรดไนโตรเจน และนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบตามสมการ ดังนี้

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

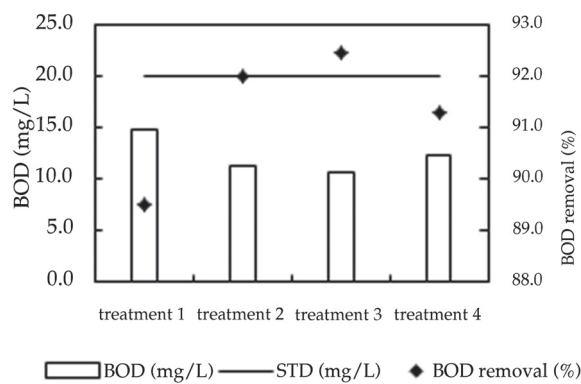
นำค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการบำบัด มาวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อทดสอบว่าระบบบำบัดที่แตกต่างกัน มีผลต่อค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการปรับสภาพพีเอช ประสิทธิภาพกำจัดปริมาณของแข็งแขวนลอย บีโอดี ซีโอดี ออร์โธฟอสเฟต แอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรดไนโตรเจนหรือไม่ ได้ผลแสดงในรูปที่ 2 - 8



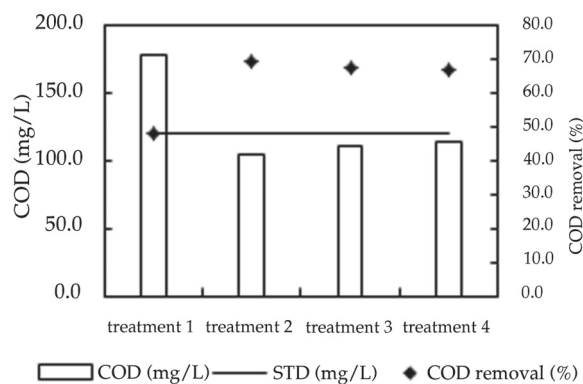
รูปที่ 2 เปรียบเทียบค่าพีเอชและประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพีเอช



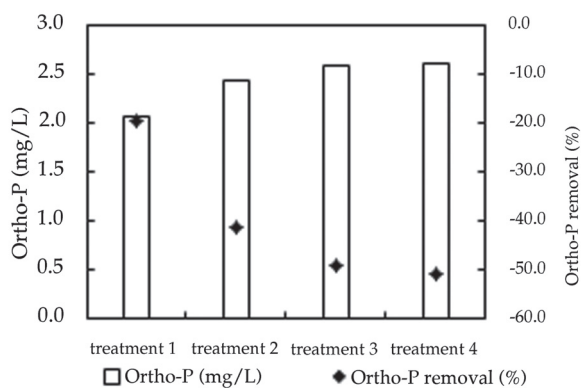
รูปที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย



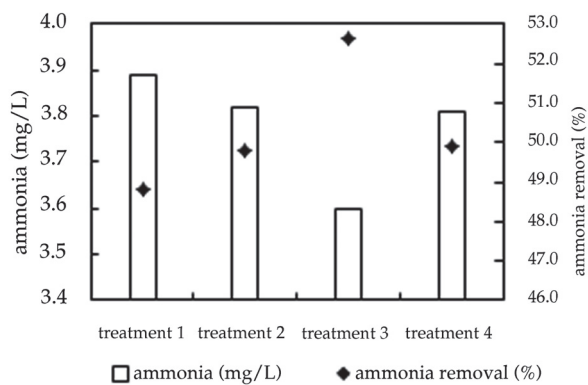
รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าบีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี



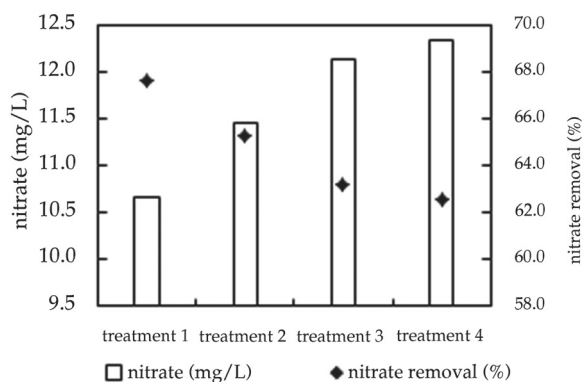
รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่าบีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี



รูปที่ 6 เปรียบเทียบปริมาณออร์โธฟอสเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดออร์โธฟอสเฟต



รูปที่ 7 เปรียบเทียบปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนและประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน



รูปที่ 8 เปรียบเทียบปริมาณไนเตรดไนโตรเจนและประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรดไนโตรเจน

ผลการทดลองจากรูปที่ 2 - 8 และจากผลการทดสอบด้วยค่าสถิติ F-test ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียต่างกัน มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ระบบรางพืชน้ำ และพืชน้ำร่วมกับระบบเดิมอากาศ ด้วยเครื่องเดิมอากาศ 2 เครื่อง มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยบีโอดี 10.67 ± 5.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ 92.48 ± 3.72) ค่าเฉลี่ยปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจน 24.72 ± 5.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ 61.34 ± 8.26) และค่าเฉลี่ยซีโอดี 111.39 ± 31.54 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ 67.71 ± 9.14) ค่าเฉลี่ยปริมาณออร์โทฟอสเฟต 2.58 ± 0.58 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ -49.27 ± 33.93) ค่าเฉลี่ยปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน 3.60 ± 0.69 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ 52.62 ± 9.17) ค่าเฉลี่ยปริมาณไนเตรดไนโตรเจน 12.14 ± 5.09 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประสิทธิภาพร้อยละ 63.21 ± 15.45)

โดยกลไกการทำงานของระบบรางพืชน้ำ ระบบพืชน้ำร่วมกับระบบเดิมอากาศ เป็นกลไกที่มียางพืชน้ำร่วมกันของกระบวนการตกตะกอน การกรอง การระเหย การดูดซับ การดูดซึมโดยพืชน้ำ และการทำงานของจุลินทรีย์ [18] - [19] การมีระบบเดิมอากาศช่วยให้ระบบบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพสูง และน้ำที่บำบัดแล้วมีคุณภาพได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ทั้งนี้ได้มีรายงานวิจัยหลายรายงานที่สนับสนุนว่าการใช้ระบบเดิมอากาศในระบบบึงประดิษฐ์ จะทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาก [20] - [22] ในส่วนของระบบพืชน้ำ รากพืชน้ำที่อยู่ใต้ระดับน้ำช่วยเพิ่มพื้นที่ของเมือกแบคทีเรีย และโครงสร้างของลำต้นพืชน้ำจะมีท่ออากาศเพื่อส่งผ่านออกซิเจนจากใบพืชน้ำมาสู่รากพืชน้ำทำให้เกิดมีสภาพออกซิเจนบริเวณรอบ ๆ รากพืชน้ำออกซิเจนที่ปล่อยออกจากรากพืชน้ำในช่วง 2.08 - 12 กรัมออกซิเจน/(ตารางเมตร - วัน) [22] อย่างไรก็ตามปริมาณออกซิเจนที่ได้จากพืชน้ำไม่เพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ [23] - [25] และในส่วนของระบบรางพืชน้ำ การทำงานของระบบรางพืชน้ำจะคล้ายกับบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิว (Free Water Surface System, FWS) โดยให้น้ำจากระบบเดิมอากาศไหลเข้า ๆ เข้าในระบบรางพืชน้ำ ที่มีลักษณะยาวและแคบทำให้ระบบอยู่ในสภาพปลักโฟว์ [25] กลไกการบำบัดในรางพืชน้ำทั้งกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ กลไกทั้งสามจะทำงานสัมพันธ์กัน กลไกหลักที่พบ ได้แก่ การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (Biochemical Conversions) การตกตะกอนและการกรอง (Setting/Filtration) การสะสมในทราย (Accretion)

การระเหย (Volatilization) การดูดซับ (Adsorption) และการสะสมในพืช (Plant Uptake) ไนโตรเจนจะถูกกำจัดจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน ความหนาแน่นของพืช ทำให้การไหลของน้ำช้าลงเกิดการตกตะกอนได้ดี [26] และช่วยเพิ่มเวลาเก็บกักน้ำเพื่อให้แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ดีขึ้น พืชส่วนที่อยู่ใต้น้ำช่วยเพิ่มพื้นที่ของเมือกแบคทีเรีย และโครงสร้างของลำต้นพืชจะมีท่ออากาศเพื่อส่งผ่านออกซิเจนจากใบพืชมายังรากพืชทำให้เกิดมีสภาพออกซิเจนบริเวณรอบ ๆ รากพืช ออกซิเจนที่ปล่อยออกจากรากพืชอยู่ในช่วง 2.08 - 12 กรัมออกซิเจน/(ตารางเมตร - วัน) [27] - [28] พืชสามารถลดสารอาหารโดยมีการเก็บเกี่ยวพืชประมาณ 30 - 150 กิโลกรัมฟอสฟอรัสต่อเฮกแตร์ต่อปี และ 200 - 2500 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อเฮกแตร์ต่อปี [4], [23], [27] - [28] อย่างไรก็ตามปริมาณสารอาหารที่ถูกกำจัดโดยการเก็บเกี่ยวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับภาระน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ แต่ถ้าไม่มีการเก็บเกี่ยวพืช สารอาหารที่อยู่ในเนื้อเยื่อจะถูกปล่อยกลับสู่น้ำโดยกระบวนการย่อยสลาย ส่วนของทรางในระบบรางพืชมีหน่ที่ช่วยยึดเกาะรากพืช พื้นผิวของทรางจะเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ที่ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้การใช้ทรางจะมีช่องว่างระหว่างเม็ดทราง ทำให้อากาศสามารถผ่านลงสู่ด้านล่างของระบบตามช่องว่างเหล่านี้ได้

สรุปผลการวิจัย

น้ำทิ้งที่ออกจากระบบรางพืช และพืชลอยน้ำร่วมกับระบบบ่อเติมอากาศ มีคุณสมบัติได้ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) โดยสารอาหารในน้ำเสียจะถูกพืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และถูกกำจัดออกจากระบบเมื่อมีการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบ และเมื่อน้ำไหลเข้าสู่ระบบรางพืช สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะตกตะกอนจมลงสู่ด้านล่าง และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกกำจัดโดยการดูดติดผิว และการกรองของพืช โดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดกับพืชน้ำ หรือชั้นตัวกลางที่เป็นทรางและจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ สำหรับสารแขวนลอยจะถูกกรองแล้วจมตัวในช่วงต้น ๆ ของรากพืชการลดปริมาณไนโตรเจนจะเป็นไปตามกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ส่วนการลดปริมาณฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิดที่ชั้นทราง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาปี 2557 ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย มูลนิธิแม่ฟ้าหลวง ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ให้ความสนับสนุนความร่วมมือในทุกด้าน และนายอัมมารถ สมงาน ที่ได้มีส่วนร่วมเป็นผู้ช่วยวิจัย

References

- [1] Kadlec, R.H. and Knight R.L. (1996). Treatment Wetlands. Florida.: CRC Press. Boca Raton

- [2] Hammer, D. A. (1989). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*. CRC Press
- [3] 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
- [4] Cincinatti, O. (n.d.). (2014). NEPIS Document Display. Access (27 May 2014). Available (<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30004TBD.TXT>)
- [5] Cooper, P. F., Job, G. D., Green, M. B. and Shutes, R. B. E. (1996). *Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Swindon: WRc Publications.
- [6] H. Brix. (1994). Functions of Macrophytes in Constructed Wetlands. *Water Science and Technology*. Vol. 29. No. 4. pp 71-78
- [7] Vymazal, J. (2011). Plants Used in Constructed Wetlands with Horizontal Subsurface Flow: s Review. *Hydrobiologia*. Vol. 674. No. 1. pp. 133-156
- [8] Wood, J., Fernandez, G., Barker, A., Gregory, J. and Cumby, T. (2007). Efficiency of Reed Beds in Treating Dairy Wastewater. *Biosystems Engineering*. Vol. 98. No. 4. pp. 455-469
- [9] Zhao, Y., Sun, G. and Allen, S. (2004). Purification Capacity of a Highly Loaded Laboratory Scale Tidal Flow Reed Bed System with Effluent Recirculation. *Science of The Total Environment*. Vol. 330. Issue 1-3. pp. 1-8
- [10] Calheiros, C. S. C., Duque, A. F., Moura, A., Henriques, I. S., Correia, A., Rangel, A. O. S. S. and Castro, P. M. L. (2009). Substrate Effect on Bacterial Communities from Constructed Wetlands Planted with *Typha Latifolia* Treating Industrial Wastewater. *Ecological Engineering*. Vol. 35. No. 5. pp. 744-753
- [11] Mbuligwe, S. E. (2005). Comparative Treatment of Dye-Rich Wastewater in Engineered Wetland Systems (EWSs) Vegetated with Different Plants. *Water Research*. Vol. 39. Issue 2-3. pp. 271-280
- [12] R.K. Wieder. (1989). A Survey of Constructed Wetlands for Acid Coal Mine Drainage Treatment in the Eastern United States. *Wetlands*. Vol. 9. pp. 299-315
- [13] Bulc, T. G. and Ojstršek, A. (2008). The Use of Constructed Wetland for Dye-Rich Textile Wastewater Treatment. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 155. Issue 1-2. pp. 76-82
- [14] Wu, S., Kuschik, P., Brix, H., Vymazal, J. and Dong, R. (2014). Development of Constructed Wetlands in Performance Intensifications for Wastewater Treatment: A nitrogen and Organic Matter Targeted Review. *Water Research*. Vol. 57. pp. 40-55

- [15] The Chaipattana Foundation. (n.d.). Improve Water Quality in the Area Rail System. Access (15 July 2014). Available (<http://www.chaipat.or.th/chaipat/index.php/th/-plantbed-filter/5825-2013-05-29-17-24-36>)
- [16] APHA, AWWA and WEF. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (21st ed.)
- [17] Royal Gazette. (2010). *Announcement of Pollution Control Department: The Design Criteria of Wastewater Collection System and Sewage System of the Community*. No. 127:72
- [18] Faulwetter, J. L., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M. D., Brisson, J. and Stein, O.R. (2009). Microbial Processes Influencing Performance of Treatment Wetlands: A review. *Ecological Engineering*. Vol. 35. No. 6. pp. 987-1004
- [19] Kadlec, R. H. and Wallace, S. (n.d.). (2015). *Treatment Wetlands*. (2nd ed.). Boca Raton, FL., USA
- [20] Austin, D. and Nivala, J. (2009). Energy Requirements for Nitrification and Biological Nitrogen Removal in Engineered Wetlands. *Ecological Engineering*. Vol. 35. No. 2. pp. 184-192
- [21] Nivala, J., Hoos, M. B., Cross, C., Wallace, S. and Parkin, G. (2007). Treatment of Landfill Leachate Using an Aerated, Horizontal Subsurface-Flow Constructed Wetland. *Science of The Total Environment*. Vol. 380. Issue 1-3. pp. 19-27
- [22] Nivala, J., Wallace, S., Headley, T., Kassa, K., Brix, H., van Afferden, M. and Müller, R. (2013). Oxygen Transfer and Consumption in Subsurface Flow Treatment Wetlands. *Ecological Engineering*. Vol. 61. Part B. pp. 544-554
- [23] Brix, H. and Schierup, H.-H. (1989). The Use of Aquatic Macrophytes in Water-Pollution Control. *Ambio*. Vol. 18. pp. 100-107
- [24] Ouellet-Plamondon, C., Chazarenc, F., Comeau, Y. and Brisson, J. (2006). Artificial Aeration to Increase Pollutant Removal Efficiency of Constructed Wetlands in Cold Climate. *Ecological Engineering*. Vol. 27. No. 3. pp. 258-264
- [25] Vymazal, J. (2007). Removal of Nutrients in Various Types of Constructed Wetlands. *Science of The Total Environment*. Vol. 380. Issue. 1-3. pp. 48-65
- [26] Petticrew, E.L. and Kalff, J. (1992). Water Flow and Clay Retention in Submerged Macrophyte Beds. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Vol. 49. No. 12. pp. 2483-2489
- [27] Gumbricht, T. (1993a). Nutrient Removal Capacity in Submersed Macrophyte Pond Systems in a Temperate Climate. *Ecological Engineering*. Vol. 2. pp. 49-61
- [28] Gumbricht, T. (1993b). Nutrient Removal Processes in Freshwater Submersed Macrophyte Systems. *Ecological Engineering*. Vol. 2. pp. 1-30