การบำบัดน้ำทิ้งจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

Using constructed wetland for wastewater from Suranaree University of Technology

สุชาดา ปุณณสัมฤทธิ์*
จรียา ยิ้มรัตนบวร**
บุญชัย วิจิตรเสถียร**

บทคัดย่อ

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียใกล้เคียงกับระบบอื่น และมีค่าใช้จ่ายต่ำ ต้องการพลังงานน้อย จึงเหมาะกับชุมชนขนาดเล็กที่มีงบประมาณจำกัด การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และแบบไหลใต้ผิวตัวกลางที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 10 และ 12 วัน โดยใช้น้ำเสียจากหอพักนักศึกษา เรือนพักบุคลากร และอาคารต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา ในการศึกษาประกอบด้วย 2 บ่อ โดยแต่ละบ่อจะประกอบด้วยบ่อซีเมนต์ ขนาด 1.0 เมตร x 3.0 เมตร x 0.8 เมตร บ่อหนึ่งเป็นบ่อสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว อีกบ่อเป็นแบบไหลใต้ผิวตัวกลาง พืชที่ใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ ต้นกกรังกา *(Cyperus alternifolius* L.) ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวตัวกลาง ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 10 และ 12 วัน มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกัน โดยที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วัน ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด สำหรับสารอินทรีย์ในรูป COD ในรูป BOD ไนโตรเจนในรูป TKN และฟอสฟอรัส ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางมีค่าสูงสุดสำหรับประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส และเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวตัวกลางที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเท่ากัน พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบ มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสแตกต่างกันทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางสามารถบำบัดได้ดีกว่าแบบไหลผ่านพื้นผิว ดังนั้นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบสามารถนำไปใช้กับชุมชนขนาดเล็กได้ และควรศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการนำระบบแบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวตัวกลางมารวมกันเป็นระบบแบบผสม

คำสำคัญ : ต้นกกรังกา พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง

* นักศึกษาปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
**อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

Constructed wetlands generally have similar removal efficiency of wastewater as conventional systems. The wastewater treatment by constructed wetlands can be economically feasible and required low energy. It was considered as a suitable wastewater treatment system for small communities with inadequate budget. The objective of this study was to study the removal efficiency of wastewater using the constructed wetlands with comparison between the free water surface flow (FWS) and subsurface flow (SF) constructed wetlands. Hydraulic retention time (HRT) was set at 8, 10, and 12 days. The wastewaters from dormitories, and buildings in Suranaree University of Technology, Muang District, Nakhon Ratchasima Province were used as influent for this study. The study was conducted in two ponds, a FWS and a SF constructed wetland had the dimension of 1.0 m x 3.0 m x 0.8 m. The *Cyperus alternifolious* L. was planted in both constructed wetlands. The result showed that the removal efficiency of FWS and SF constructed wetlands was significantly different at HRT of 8, 10, and 12 days. The HRT of 10 days had the highest in COD, BOD, TKN, TP removal efficiency for FWS constructed wetland and TP removal efficiency for SF constructed wetland. The FWS and SF constructed wetlands were compared at the same HRT and the result showed that TP removal efficiency of both systems was significantly different for every HRT. The TP removal efficiency of SF constructed wetland was higher than FWS constructed wetland. Both systems were capable for treating wastewater from small communities. Further study on combined FWS and SF into a same system is of interest.

Keywords : *Cyperus alternifolious* L., Free water surface flow constructed wetlands, Subsurface flow constructed wetland

บทนำ

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetland) เป็นระบบที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบกลไกการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติ โดยใช้ประโยชน์จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพืชที่ปลูกกับจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย

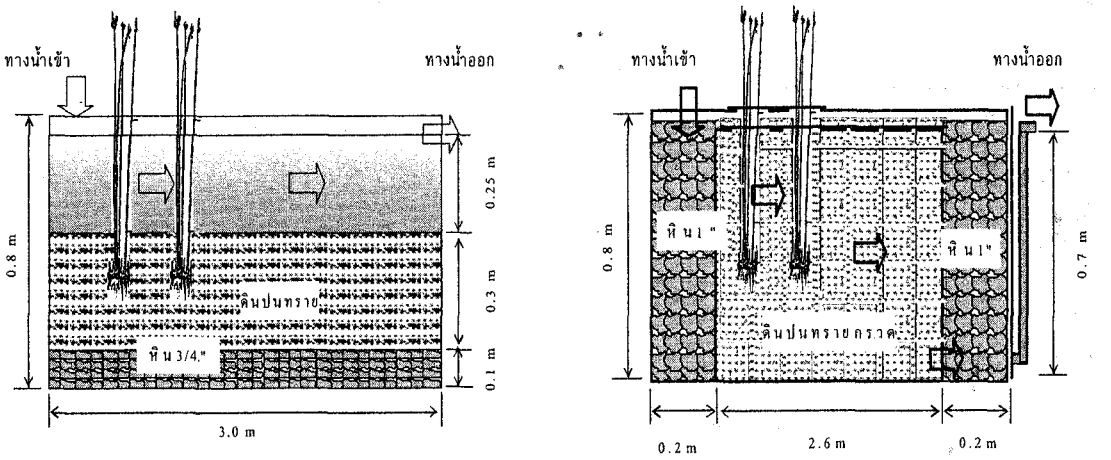
wasa, et al. 2003 : 199 - 205) จึงเป็นระบบที่ใช้พลังงานน้อย เงินทุนในการก่อสร้างต่ำ และให้คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบได้ใกล้เคียงกับระบบบำบัดน้ำเสียประเภทอื่น จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ (Reed, et al. 1995) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Free Water Surface Flow Constructed Wetland;

FWS) และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง (Subsurface Flow Constructed Wetland; SF) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS เป็นระบบที่น้ำเสียไหลผ่านผิวหน้าดินหรือตัวกลาง น้ำเสียจะสัมผัสกับอากาศโดยตรงหลังจากนั้นจึงไหลซึมลงสู่พื้น โดยปล่อยให้น้ำเสียไหลเข้าระบบอย่างช้า ๆ ผ่านต้นพืชและรากพืช หลักการบำบัดน้ำเสียของระบบนี้จะอาศัยการตกตะกอนโดยพืช และการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจนมีผลทำให้ค่า BOD ลดลง (Suwasa, et al. 2003 : 199 - 205) และจากการศึกษาของ รุจิรัชต์ มันตาพันธ์ (2537 : 30 - 41) ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS ในการบำบัดน้ำเสียจากหอพักนักศึกษาในมหาวิทยาลัยขอนแก่น จำนวน 4 บ่อ มีขนาดกว้าง 1.0 เมตร ยาว 9.0 เมตร พบว่าสามารถบำบัด BOD ได้เฉลี่ยร้อยละ 67.1 เป็นเพราะพืชช่วยเพิ่มพื้นที่ให้จุลินทรีย์เกาะอาศัย และมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลาย ทำให้มีจำนวนจุลินทรีย์เพียงพอที่จะช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF เป็นระบบที่น้ำเสียไหลผ่านลงไปในตัวกลางซึ่งมีพืชน้ำขึ้นอยู่ ตัวกลางที่ใช้เป็นพวกหินบด กรวด หรือดินชนิดต่าง ๆ ซึ่งตัวกลางอาจมีเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งหรือใช้รวมกันได้ (ลักษณี คณานิธินันท์. 2539 : 4) น้ำเสียที่ผ่านเข้าระบบจะถูกบำบัดระหว่างสัมผัสพื้นผิวตัวกลางและรากพืชซึ่งมีจุลินทรีย์เกาะอยู่ โดยสารแขวนลอยหรือสารอินทรีย์จะตกตะกอนภายในตัวกลาง ส่วนสารที่ละลายได้จะถูกดูดซับที่ผิวของตัวกลาง การย่อยสลายเกิดโดยจุลินทรีย์ทั้งกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน นอกจากนี้ธาตุอาหารในน้ำเสียจะลดลงเนื่องจากกลไกการดูดซึมของพืช พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและชนิดของน้ำเสีย (พิรัฐพล ตนานนท์. 2545 : 17 - 19) และจากการศึกษาของ กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ (2544) ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชนสังเคราะห์จำนวน 6 บ่อ มีขนาดกว้าง 0.3 เมตร ยาว 3.2 เมตร พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สามารถบำบัดไนโตรเจนได้สูงสุดในตัวกลางดินปนทรายคิดเป็นร้อยละ 94.6 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ในตัวกลางดินปนทรายที่นำไนโตรเจนไปใช้ในการสร้างเซลล์ ซึ่งพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF มีพื้นที่ของตัวกลางสำหรับให้จุลินทรีย์เจริญได้มาก จากนั้นพืชสามารถดูดซึมมลสารต่าง ๆ ไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป การศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา โดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลางกับแบบไหลผ่านใต้ผิวตัวกลางที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 10 และ 12 วัน และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวตัวกลางกับแบบไหลผ่านใต้ผิวตัวกลางที่ระยะเวลาเก็บกักเท่ากัน เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียที่ง่ายต่อการดูแลรักษา และต้องการพลังงานน้อย เพื่อเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะกับชุมชนขนาดเล็กที่มีงบประมาณจำกัด

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การศึกษาใช้ระยะเวลาตั้งแต่เดือนเมษายน ถึงธันวาคม พ.ศ. 2546 โดยทำการทดลองที่บริเวณระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบบ่อผึ่ง

(Oxidation Pond) ในฟาร์มของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษามีจำนวน 2 บ่อ ซึ่งมีลักษณะดังต่อไปนี้ บ่อที่ 1 สำหรับจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) มีขนาดกว้าง 1.0 เมตร ยาว 3.0 เมตร และลึก 0.8 เมตร ภายในบ่อประกอบด้วยการนำหินที่ผ่านตะแกรงมาตรฐาน ขนาด 3/4 นิ้ว และดินปนทรายใส่ลงในแบบจำลองให้มีระดับความสูง 0.1 และ 0.3 เมตร ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.47 ปรับระดับพื้นบ่อให้ราบเรียบสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 1ก บ่อที่ 2 สำหรับจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง (SF) ภายในบ่อประกอบด้วยการนำหินที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 1 นิ้ว ใส่ลงในแบบจำลองอยู่บริเวณช่วงต้นและช่วงท้ายของแบบจำลอง โดยมีความกว้างของชั้นหินเท่ากับ 0.2 เมตร ส่วนบริเวณที่ทำการปลูกพืชใส่ดินปนทรายมีอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.53 โดยระดับความสูงของชั้นหิน และชั้นดินเท่ากับ 0.7 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1ข เกณฑ์ในการออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบ เช่น ช่วงระยะเวลาเก็บกักอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง และความลึกของระดับน้ำ (Poh-Eng and Polprasert. 1996) ส่วนความลึกของตัวกลางอ้างอิงโดย ลักษณี คณานิธินันท์ (2539 : 30 - 38) และรุจิรัชต์ มันตาพันธ์ (2537 : 30 - 41)



(ก) แบบไหลผ่านพื้นผิว (ข) แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง

รูปที่ 1 แสดงรูปจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (ก) และแบบไหลใต้ผิวตัวกลาง (ข)

ขั้นตอนการทดลอง

1. การเตรียมพืช พืชที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ กกรังกา (*Cyperus alternifolius* L.) โดยทำการคัดเลือกพืชที่มีความสูงประมาณ 0.50 เมตร แล้วนำมาปลูกในแบบจำลองโดยมีระยะห่างระหว่างต้นเท่ากับ 0.15 เมตร มีความหนาแน่นเท่ากับ 45 ต้นต่อตารางเมตร โดยทิ้งช่วงระยะเวลาให้พืชพักตัวในแบบจำลองก่อนเริ่มการทดลองประมาณ 2 - 3 สัปดาห์ ต้นกกรังกาเป็นพืชที่มีความทนต่อสารพิษ สามารถปรับตัวเข้ากับลักษณะสมบัติของน้ำเสียได้ดี และโครงสร้างของต้นกกรังกาเป็นพืชที่มีเส้นใยที่ไม่เน่าสลายง่าย จึงมี

ผลน้อยในการก่อให้เกิดการเจือปนของสารอินทรีย์กลับคืนสู่น้ำเสียอีกครั้งหนึ่ง (กิตติ เอกอำพน และสำอาง หอมชื่น. 2530 : 14 - 30) ดังนั้นจึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นพืชสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

2. น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา ซึ่งเป็นน้ำเสียที่รวบรวมจากหอพักนักศึกษา เรือนพักบุคลากร และอาคารต่าง ๆ น้ำเสียดังกล่าวจะไม่รวมน้ำเสียจากการขับถ่าย การประกอบอาหาร และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าลักษณะสมบัติน้ำเสียของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจะมีความเข้มข้นของสารต่าง ๆ สามารถเป็นตัวแทนของชุมชนขนาดเล็ก

3. หลังจากทิ้งช่วงระยะเวลาพักระบบประมาณ 1 สัปดาห์ จึงเริ่มปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบจำลอง โดยระดับน้ำของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS สูง 0.25 เมตร ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สูง 0.65 เมตร เมื่อนำระดับน้ำทั้งสองมาเทียบกันจะมีความสูงเท่ากัน โดยน้ำเสียจะปล่อยเข้าระบบจำลองแบบต่อเนื่อง ส่วนพืชก่อนเริ่มการทดลองทุกครั้งได้ทำการตัดต้นพืชให้มีขนาดความสูงเท่ากับ 0.50 เมตร เพื่อให้พืชเจริญเติบโตขึ้นมาใหม่ หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารต่าง ๆ จากน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 10 และ 12 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

ลักษณะสมบัติ	หน่วย	ช่วงค่า	ค่าเฉลี่ย	n
COD	มิลลิกรัมต่อลิตร	35 - 92	64.0	15
BOD	มิลลิกรัมต่อลิตร	3 - 18	8.2	15
TKN	มิลลิกรัมต่อลิตร	8 - 36	20.0	15
TP	มิลลิกรัมต่อลิตร	7 - 21	13.9	15
TSS	มิลลิกรัมต่อลิตร	3 - 8	5.8	15

4. การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างน้ำ โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่เข้า - ออกของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบต่าง ๆ เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์หาค่า COD (Chemical Oxygen Demand), BOD (Biochemical Oxygen Demand), TKN (Total Kjeldahl Nitrogen) ของแข็งแขวนลอย และฟอสฟอรัส เพื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในแต่ละพารามิเตอร์ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบ

การเก็บตัวอย่างพืช ในแต่ละการทดลองได้ศึกษาอัตราการเจริญเติบโต โดยการวัดระดับความสูง และน้ำหนักแห้งที่เปลี่ยนแปลงของต้นกกรังกาในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบ

5. การวิเคราะห์ข้อมูล ข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นำมา

วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One-way ANOVA ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชั่น 11.0

ผลการวิจัย

1. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ

1.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

จากการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 10 และ 12 วัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p \leq 0.05$) สำหรับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD ในรูป BOD TKN และฟอสฟอรัส ยกเว้นของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอย โดยที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วันสามารถบำบัดได้ดีที่สุด (ตารางที่ 2 และ รูปที่ 2ก) และมีแนวโน้มลดลงที่ระยะเวลาเก็บกัก 12 วัน

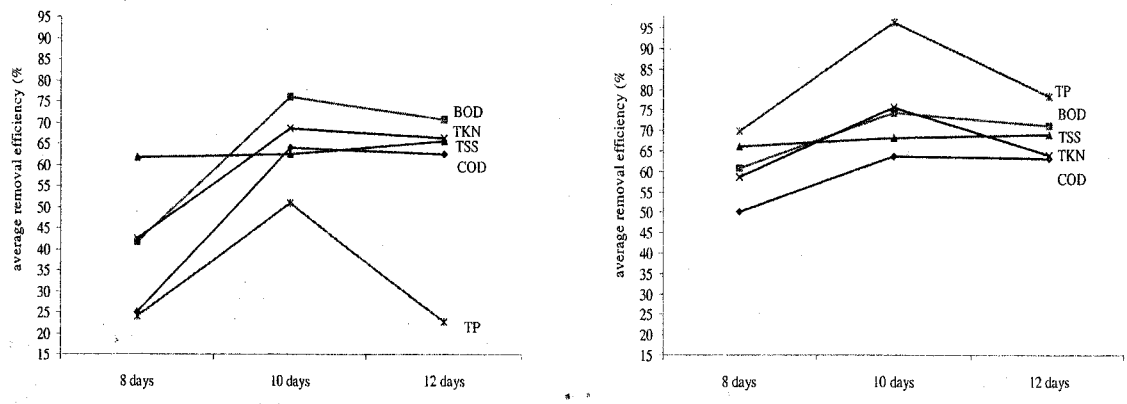
ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย (Mean (SD) ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) และแบบไหลใต้ผิวตัวกลาง (SF)

		FWS			SF		
	HRT (วัน)	น้ำชา (mg/L)	น้ำออก (mg/L)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	น้ำเข้า (mg/L)	น้ำออก (mg/L)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
COD	8	54.3±16.2	42.0±17.1	24.9±9.5	54.3±16.2	31.6±13.5	50.1±15.7
	10	66.3±16.8	25.0±5.0	64.1±13.1	66.3±16.8	24.5±15.3	63.7±13.9
	12	71.4±13.7	25.7±3.9	62.5±11.1	71.4±13.7	24.8±9.3	63.1±16.9
BOD	8	5.9±2.2	3.6±2.0	41.6±18.7	5.9±2.2	2.4±1.4	60.8±14.0
	10	11.9±4.4	3.1±1.6	75.9±14.3	11.9±4.4	3.0±2.2	74.4±16.5
	12	6.8±2.9	2.0±1.4	70.6±12.7	6.8±2.9	1.8±0.7	71.1±11.2
TSS	8	21.2±7.8	7.7±3.5	61.7±17.5	21.2±7.8	8.1±6.8	66.0±19.6
	10	20.8±10.4	7.2±3.0	62.5±12.3	20.8±10.4	6.7±4.0	68.3±7.2
	12	18.0±4.5	6.6±3.9	65.4±17.0	18.0±4.5	5.7±2.7	68.9±10.5
TKN	8	16.4±4.2	8.8±1.4	42.4±10.2	16.4±4.2	7.1±3.1	58.5±9.9
	10	17.0±4.7	5.2±2.7	68.5±14.5	17.0±4.7	4.5±1.0	75.7±7.5
	12	8.3±1.2	2.8±1.4	66.2±16.7	8.3±1.2	3.0±1.0	64.0±12.5
TP	8	6.7±0.7	5.1±0.6	24.1±8.9	6.7±0.7	1.5±0.8	69.9±13.7
	10	3.9±0.8	1.8±0.3	51.0±11.8	3.9±0.8	0.7±1.2	96.3±5.5
	12	6.7±1.1	5.3±1.4	22.7±9.7	6.7±1.1	1.5±0.4	78.3±2.8

HRT = ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time)

1.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง

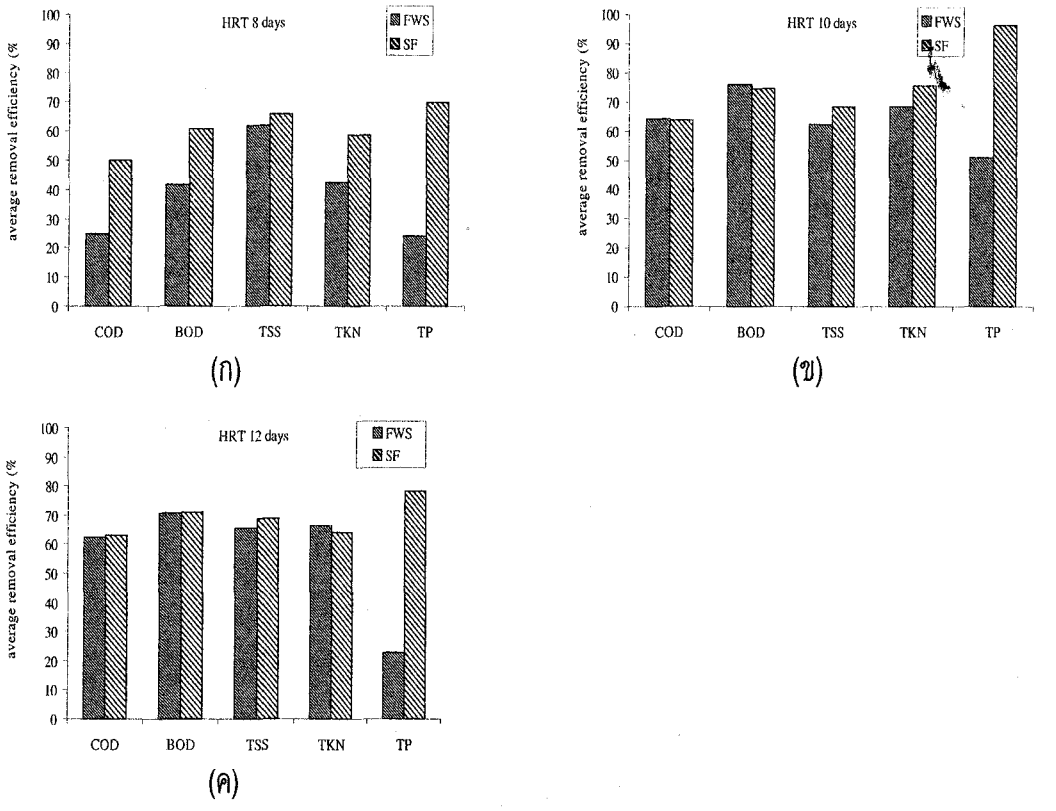
จากการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 10 และ 12 วัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p \leq 0.05$) สำหรับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส โดยที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วัน สามารถบำบัดได้ดีที่สุด ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาเก็บกักเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในรูป TKN ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มคงที่ที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 และ 12 วัน (รูปที่ 2ข)



รูปที่ 2 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยเฉลี่ยของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8, 10 และ 12 วัน (ก) แบบไหลผ่านพื้นผิว (ข) แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง

2. การเปรียบเทียบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวตัวกลาง

จากตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเท่ากัน พบว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 วัน ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD และฟอสฟอรัสมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p \leq 0.05$) โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สามารถบำบัดได้ดีกว่าแบบ FWS (รูปที่ 3ก) และประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป BOD ของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอย และไนโตรเจนในรูป TKN ของแบบ SF สูงกว่าแบบ FWS แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 และ 12 วัน ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p \leq 0.05$) โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สามารถบำบัดได้ดีกว่า FWS (รูปที่ 3ข และ 3ค) ส่วนค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD ของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอย และไนโตรเจนในรูป TKN มีค่าใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 3 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยเฉลี่ยของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) และแบบไหลใต้ผิวตัวกลาง (SF)
(ก) ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 วัน (ข) ที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน (ค) ที่ระยะเวลาเก็บกัก 12 วัน

การอภิปรายผล

1. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำต่าง ๆ

1.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

จากผลการศึกษาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS พบว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ สารอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัสสูงที่สุด (รูปที่ 2ก) และจากข้อมูลที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วัน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้ำเข้าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS เท่ากับ 5.2 กิโลกรัมบีโอดีต่อเฮกแตร์.วัน ขณะที่ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 และ 12 วัน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้ำเข้าเท่ากับ 3.1 และ 2.5 กิโลกรัมบีโอดีต่อเฮกแตร์.วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน มีปริมาณสารอินทรีย์มากเพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลาย ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วัน สูงที่สุด Brix (1994 : 71 - 78) ศึกษาพบว่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมจะมีผลต่อประสิทธิภาพการนำสารอินทรีย์ไปใช้ประโยชน์ของจุลินทรีย์ จิตติมา เชื้อกูล (2545 : 72) พบว่าถ้ามีปริมาณสารอินทรีย์น้อยเกินไปจะทำให้จุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ตามราก ลำต้นพืช ตามชั้นตัวกลาง และที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ มีการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในอัตราที่ต่ำ ทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์

ที่ยังไม่ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เหลืออยู่ และที่ระยะเวลาเก็บกัก 12 วัน มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงที่สุด เนื่องจากระยะเวลาเก็บกักที่นานขึ้นทำให้เกิดการตกตะกอนและการกรองสารแขวนลอยได้ดียิ่งขึ้น (Vynazal, 1998) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วันของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมดีที่สุด

1.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง

จากผลการศึกษาพบว่าสำหรับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วัน สามารถบำบัดได้ดีที่สุด และลดลงเมื่อระยะเวลาเก็บกักเพิ่มขึ้น กลไกการบำบัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นโดยพืชดูดไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโต การดูดซับทางเคมี และการตกตะกอน จากรูปที่ 2ข จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งแขวนลอยที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 และ 12 วันเริ่มคงที่ อาจเนื่องมาจากมีการอุดตันของตัวกลางซึ่งจะส่งผลทำให้มีการดูดซับฟอสฟอรัสไว้ในตัวกลางได้น้อยลง และจากการศึกษาของอุไรวรรณ เอกสินธุ์ และ ศุวศา กานตวนิชกูร (2545 : 17 - 24) พบว่าฟอสฟอรัสบางส่วนจะถูกใช้ในกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการย่อยสลายไนโตรเจนในรูป TKN ที่ระยะเวลาเก็บกักแตกต่างกันมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับฟอสฟอรัส การบำบัดไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีกลไกหลัก คือ กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันของจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูป BOD และ COD ที่ระยะเก็บกัก 12 วัน พบว่ามีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน และจากข้อมูลอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้ำเข้าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วันเท่ากับ 4.0 กิโลกรัมบีโอดีต่อเฮกแตร์.วัน ซึ่งสูงที่สุด และที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 และ 12 วัน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์น้ำเข้า เท่ากับ 2.6 และ 2.0 กิโลกรัมบีโอดีต่อเฮกแตร์.วัน ตามลำดับ ดังนั้นจึงอาจมีผลต่อการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ (Katrin and Sabine. 1997 : 79 - 85)

2. การเปรียบเทียบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และแบบไหลใต้ผิวตัวกลาง

เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS กับแบบ SF ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเท่ากัน จะเห็นได้ว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้แตกต่างกันทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สามารถบำบัดได้ดีกว่าแบบ FWS ซึ่งตรงกับผลการศึกษาของ Lin, et al. (2002 : 169 - 184) พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และจากการศึกษากลไกการดูดซับฟอสฟอรัส ของ Brix (1997 : 11 - 17) พบว่าฟอสฟอรัสจะถูกดูดซับไว้ในตัวกลางของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ และพืชจะดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไปได้ การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อกำจัดสารอาหารมีการศึกษาอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะการบำบัดน้ำเสียชุมชน Adrock, et al. (1995 : 203 - 210) ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน โดย

ใช้พืชโผล่พ้นน้ำหลาย ๆ ชนิด พบว่าสามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดได้โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 68 ซึ่งจากผลการศึกษานี้พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF อยู่ในช่วงร้อยละ 69-96 และจากการศึกษาของ จิตติมา เชื้อกูล (2545) ใช้ดินปนทรายปลูกพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าตัวกลางดินปนทรายสามารถดูดซับฟอสฟอรัสเพื่อให้พืชดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของปริมาตรตัวกลางดินปนทรายของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF และแบบ FWS ในการศึกษาครั้งนี้เท่ากับ 1.8 และ 0.9 ลูกบาศก์เมตรตามลำดับ และสอดคล้องกับข้อมูลอัตราการเจริญเติบโตในของต้นกกรังกาที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเท่ากันพบว่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของต้นกกรังกาของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF มากกว่าแบบ FWS ในทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3 ธัญลักษณ์ แต่บรรพกุล (2539) พบว่าพืชจำพวกกกเป็นพืชที่มีประสิทธิภาพการดูดซึมธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปใช้ได้ดี เนื่องจากมีรากลึกถึง 1.5 เมตรหรือมากกว่า และมีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ที่จะเกิดปฏิกิริยาแบบใช้ออกซิเจน ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF และแบบ FWS ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 วัน พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่จะถูกกำจัดโดยการกรอง การตกตะกอนในชั้นดินปนทรายและถูกย่อยสลายโดยสารอินทรีย์ ส่วนที่อยู่ในสภาพสารละลายจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ซึ่งมีอยู่ทั้งในส่วนที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน ซึ่ง COD จะถูกใช้ในการสร้างเซลล์จุลินทรีย์และเป็นแหล่งคาร์บอนในปฏิกิริยาไนติฟิเคชันรวมทั้งถูกดูดซึมโดยพืช (อุไรวรรณ เอกสินธุ์ และศุวศา กานตวนิชกูร. 2545 : 17 - 24) จากกลไกการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD ของแบบ SF เริ่มใกล้เคียงกับของแบบ FWS ซึ่งเนื่องมาจากการอุดตันของตัวกลางของแบบ SF ทำให้อัตราเร็วในการย่อยสลายสารอินทรีย์เริ่มลดลง ส่วนแนวโน้มการย่อยสลายสารไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์โดยเกี่ยวเนื่องกับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ในช่วงแรกแบบ SF จะดีกว่าแบบ FWS และจะใกล้เคียงกันเมื่อระยะเวลาเก็บกักเพิ่มขึ้น

ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอยพบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าของแบบ FWS Kadlec and Knight (1996) กล่าวว่าถ้าอัตราการไหลของน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ค่อนข้างช้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนทางกายภาพของสารแขวนลอย ซึ่งจากอัตราการไหลของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF พบว่าจะมีอัตราที่ช้ากว่าแบบ FWS ทุกระยะเวลาเก็บกัก อัตราการไหลของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF และแบบ FWS ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 วันเท่ากับ 0.13 และ 0.16 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ที่ระยะเก็บกัก 10 วันเท่ากับ 0.10 และ 0.13 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ และที่ระยะเวลาเก็บกัก 12 วัน เท่ากับ 0.09 และ 0.11 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ปริมาตรของตัวกลางดินปนทราย และอัตราการเจริญเติบโตของต้นกกรังกาของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (วัน)	ปริมาตรตัวกลางดินปนทราย (ลูกบาศก์เมตร)		น้ำหนักแห้งเฉลี่ย (กรัม/ตารางเมตร.วัน)	
	FWS	SF	FWS	SF
8	0.9	1.8	0.9	2.7
10	0.9	1.8	1.4	3.1
12	0.9	1.8	1.3	1.6

บทสรุป

จากการศึกษาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียจากหอพักนักศึกษา เรือนพักบุคลากร และอาคารต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 10 และ 12 วัน มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD ในรูป BOD ไนโตรเจนในรูป TKN และฟอสฟอรัสแตกต่างกัน ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 10 และ 12 วัน มีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสแตกต่างกัน โดยที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 10 วันของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF สามารถบำบัดได้ดีที่สุด และจากการเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS กับแบบ SF ที่ระยะเวลาเก็บกักเท่ากัน พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสแตกต่างกันทุกระยะเวลาเก็บกักน้ำ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สามารถบำบัดได้ดีกว่าแบบ FWS และที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 8 วัน ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป COD ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ FWS และแบบ SF มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยโดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF สามารถบำบัดได้ดีกว่าแบบ FWS

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งมีลักษณะสมบัติของน้ำเสียใกล้เคียงกับชุมชนขนาดเล็ก ดังนั้นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบสามารถนำไปใช้กับชุมชนขนาดเล็ก และควรมีการศึกษาขั้นต่อไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองแบบ โดยการนำระบบแบบ FWS และ SF มารวมกันในบ่อเดียวกัน เนื่องจากทั้งสองระบบจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดพารามิเตอร์ได้แตกต่างกัน

บรรณานุกรม

กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ. (2544) **การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน.** วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ภาควิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม). กรุงเทพมหานคร : บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กิตติ เอกอำพน และ สำอาง หอมชื่น. (2530) "การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษโดยใช้กกกลมและผักตบชวา" **วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม.** 9 (1) หน้า 14 - 30.

จิตติมา เชื้อกูล. (2545) **การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ต้นพุทธรักษาในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.** วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ภาควิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม) กรุงเทพ-มหานคร : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

ธัญลักษณ์ แต่บรรพกุล. (2539) **ประสิทธิภาพของดีปลีน้ำ** *Potamogeton malaianus* **และสาหร่ายหางกระรอก** *Hydrilla verticillata* **ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน.** วิทยานิพนธ์ วท.ม. (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม) กรุงเทพมหานคร : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

พิรัฐพล ตนานนท์. (2545) "การบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน" ใน **เอกสารการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 1** 17-19 มกราคม 2545. กรุงเทพมหานคร : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. หน้า 142-150.

รุจิรัชต์ มันตาพันธ์. (2537) **ประสิทธิภาพของที่ลุ่มน้ำขังที่ปลูกกกจันทบูรณ์** *(Cyperus corymbosus Rottb.)* **ในการบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3 จากหอพักนักศึกษา.** วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม) กรุงเทพมหานคร : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

ลักษณี คณานิธินันท์. (2539) **ประสิทธิภาพของกกกลม ธูปฤาษี อ้อ และแห้วทรงกระเทียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ.** วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ภาควิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม). กรุงเทพมหานคร : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

อุไรวรรณ เอกสินธุ์ และ ศุวศา กานตวนิชกูร. (2545) "การกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัด แบบไร้ออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานด้วยธูปฤาษีและกกสามเหลี่ยม" **วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.** 10 (3) หน้า 17 - 24.

Adrock, P. W., Ryan, G. L. and Osborne, P. L. (1995) "Nutrient partitioning in a clay-beded surface flow wetland" **Water Science and Technology.** 32 p 203 - 210.

Brix, H. (1994) "Functions of macrophytes in constructed wetlands" **Water Science and Technology.** 29 p 71 - 78.

_____. (1997) "Do macrophytes play a role in constructed wetlands?" **Water Science and Technology.** 35 (5) p11 - 17.

adlec, R.H., and Knight, R.L. (1996) **Treatment wetland.** Boca Raton : CRC Lewis.

Katrin, F., and Sabine, K. (1997) "N- and COD- Removal in vertical-flow Systems" **Water Science and Technology.** 35 (5) p 79 - 85.

Lin, Y-F., et al. (2002) "Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system" **Aquaculture.** 209 p169 - 184.

Poh-Eng, L. and Polprasert, C. (1996) **Environmental System Reviews. Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Rresource Recovery.** Bangkok : AIT.

Reed, S. C., Crites, R. W., and Middlebrooks, E. J. (1995) **Natural Systems for Wastewater Management and Treatment.** 2nd ed. New York : McGraw-Hill.

Suwasa, et al (2003). "Treatment of agricultural wastewater in two experimental combined constructed wetland systems in a tropical climate" **Water Science and Technology.** 48 (5) p 199 - 205.

Vymazal, J. (1998) **Removal Mechanism and Types of Constructed Wetlands. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe.** Leiden : Backhuys.