



รหัสโครงการ SUT6-617-52-24-35

รายงาน

สภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก
(คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนตรัสออกไซด์) ควบคู่กับการพัฒนา
ประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน

Appropriate Mitigations for Optimizing Greenhouse Gas Emissions
(CO₂, CH₄, N₂O) from Constructed Wetlands for an Effective
Treatment of Domestic Wastewater

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT6-617-52-24-35

รายงาน

สถานะที่เหมาะสมในการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก
(คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนตรัสออกไซด์) ควบคู่กับการพัฒนา
ประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน

Appropriate Mitigations for Optimizing Greenhouse Gas Emissions
(CO₂, CH₄, N₂O) from Constructed Wetlands for an Effective
Treatment of Domestic Wastewater

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นเรศ เชื้อสุวรรณ

สาขาวิชานามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาแพทยศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรียา ยิ้มรัตนบรร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริภรณ์ โพธิ์วิชานนท์

นายธนัญชัย วรรณสุข

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2552-2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2552 และ 2553 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยและหน่วยงานในสังกัดที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาอย่างต่อเนื่อง

โอกาสนี้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานที่ได้ดำเนินการจะช่วยสร้างความเข้าใจให้มากขึ้นกับสังคมที่จำเป็นต้องดำรงอยู่อย่างค้ำจุนถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต ปัญหาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเป็นอยู่ที่ดีของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ข้อมูลที่ได้เหล่านี้น่าจะเป็นประโยชน์ต่อสังคมส่วนรวมได้

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักในการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนและไนตรัสออกไซด์จากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) และแบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) ที่ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชน มีพืชแบบปลูกเชิงเดี่ยวสามชนิดที่ใช้ คือ ต้นอ้อ (*Phragmites* sp.) กก (*Cyperus* sp.) และพุทธรักษา (*Canna* sp.) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัสรวม ในช่วงร้อยละ 57-70, 49-67, 25-41 และ 39-48 ตามลำดับ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยต้นอ้อบำบัดบีโอดีได้สูงประมาณร้อยละ 70 ขณะที่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางที่ปลูกด้วยกกบำบัดบีโอดีได้ประมาณร้อยละ 67 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพุทธรักษาบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ประมาณร้อยละ 42 สำหรับฟอสฟอรัสรวมในน้ำทิ้ง พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางที่ใช้กกบำบัดได้สูงประมาณร้อยละ 48

การเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สองชนิด พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางบำบัดซีโอดีและฟอสฟอรัสรวมได้สูงกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขณะที่การบำบัดบีโอดีและแอมโมเนียไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองประเภทไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พืชจำพวกกก อ้อ และพุทธรักษามีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี ซีโอดี และแอมโมเนียไนโตรเจนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยอ้อบำบัดบีโอดีและซีโอดีได้สูงกว่าอ้อ และพุทธรักษา ขณะที่พุทธรักษาบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนสูงที่สุด แต่การบำบัดฟอสฟอรัสรวมไม่พบว่าพืชทั้งสามชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีอัตราการปล่อยก๊าซมีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.9-11.2, 0.9-1.8 และ 15.2-32.4 mg/m²/hr ตามลำดับ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกกก มีค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง ขณะที่อัตราการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์โดยเฉลี่ยของพื้นที่ชุ่มน้ำทั้งสองประเภทไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) พืชจำพวกอ้อมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงกว่าพืชชนิดอื่น แต่มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ต่ำกว่าพืชชนิดอื่น โดยพืชที่มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซ ไนตรัสออกไซด์สูงสุด คือ กก ดังนั้น การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางที่ปลูกด้วยกกเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียชุมชนในด้านประสิทธิภาพ และการไม่เพิ่มภาระต่อภาวะโลกร้อน

ABSTRACT

This research aims to evaluate carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) emissions from free water surface (FWS) and subsurface flow (SF) constructed wetlands (CWs) used for the treatment of domestic wastewater. Three types of mono-culture emerging plants were used in the constructed wetlands, i.e., *Phragmite* sp., *Cyperus* sp. and *Canna* sp. The results showed that removal efficiency of biological oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen (NH₃-N), and total phosphorus (TP) were in the ranges of 57-70%, 49-67%, 25-41%, and 39-48%, respectively. The highest removal efficiency of all CWs was the followings. The FWS planted with *Phragmite* sp. was best for BOD removal, about 70%, while the SF planted with *Cyperus* sp. had about 67% of COD removal. In FWS planted with *Canna* sp., the removal efficiency of NH₃-N was about 41%. TP was removed about 48% in SF.

The comparison of both CWs found that the SF had statistically higher removal efficiency of COD and TP than FWS ($p < 0.05$) whereas the removal efficiency of BOD and NH₃-N was not significantly difference. All emerging plants were statistically significant in removing BOD, COD, and NH₃-N ($p < 0.05$) with the exception of TP. *Phragmite* sp. was better for BOD and COD removal than *Canna* sp. and *Cyperus* sp. At the same time, *Canna* sp. was suitable for NH₃-N removal. No difference had found on TP removal in all these plants.

Average emissions of CH₄, N₂O and CO₂ from CWs were in the ranges of 2.9-11.2, 0.9-1.8, and 15.2-32.4 mg/m²/hr, respectively. The FWS planted with *Cyperus* sp. emitted higher CH₄ and CO₂ than the SF whilst N₂O emissions from both FWS and SF were not statistically significant ($p > 0.05$). *Phragmite* sp. in CWs had higher CH₄ emission than the rest of the plants. At the same time, *Phragmite* sp. emitted less N₂O. The highest N₂O emission was found in the CWs planted with *Cyperus* sp. Hence, the SF planted with *Phragmite* sp. was the optimum choice for the treatment of domestic wastewater and minimize the burden on the global warming.

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	6
2.1 ภาวะโลกร้อนและก๊าซเรือนกระจก	6
2.2 ทฤษฎีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	19
2.3 ประสิทธิภาพของพืชที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	29
2.4 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์กับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก	31
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	33
3.1 สถานที่ศึกษาวิจัย	33
3.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย	33
3.3 การเตรียมพืช	34
3.4 การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	35
3.5 การออกแบบการทดลอง	38
3.6 การศึกษาลักษณะการไหลในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	39
3.7 การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก	40
3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ	45
3.9 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ลักษณะของดิน	46
3.10 การวิเคราะห์ข้อมูล	46
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการศึกษา	48
4.1 การศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำภายในบ่อทดลอง	48
4.2 ประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดมลพิษ	51

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
4.3 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	70
4.4 การเปรียบเทียบศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (Global Warming Potential)	96
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	98
5.1 แนวทางที่เหมาะสมในการพัฒนาให้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการ บำบัดน้ำทิ้งสูงสุด โดยปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำที่สุด	100
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย	101
บรรณานุกรม	102

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2-1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติและปริมาณก๊าซเรือนกระจก	9
2-2 หน้าที่ของพืชโผล่เหนือน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	27
2-3 ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และอัตรารับสารอาหารในพืชโผล่พื้นน้ำ	30
2-4 สรุปอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	31
3-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์	34
3-2 รายละเอียดการออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	36
3-3 ค่าการกระจายของการไหล (d) กับลักษณะการไหล	40
3-4 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย	46
3-5 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของดิน	46
4-1 สรุปค่าที่ได้จากการศึกษาติดตาม	50
4-2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) และแบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) โดยการใช้การทดสอบค่าที (t-test)	57
4-3 สถิติเชิงพรรณนาประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษของพืชชนิดต่าง ๆ	61
4-4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพืชชนิดต่างๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)	62
4-5 สถิติเชิงพรรณนาประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ศึกษา	66
4-6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ศึกษา โดยใช้เทคนิค One-way ANOVA	67
4-7 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ศึกษา โดยการเปรียบเทียบรายคู่ (Post hoc)	68
4-8 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติดิน	84
4-9 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม	84
4-10 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวโดยเทคนิค Mann-Whitney U Test	86
4-11 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกพืชแตกต่างกัน โดยใช้เทคนิค Chi-Square (χ^2) Test (Kruskal Wallis)	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4-12 การเปรียบเทียบรายคู่ (Post hoc) อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกพืชแตกต่างกัน โดยใช้เทคนิค Mann-Whitney U Test	89
4-13 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางกับบ่อควบคุม โดยเทคนิค Mann-Whitney U Test	91
4-14 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกพืชต่างชนิดกับบ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช โดยใช้เทคนิค Chi-Square (χ^2) Test (Kruskal Wallis)	94
4-15 การเปรียบเทียบรายคู่ (Post hoc) อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกพืชต่างชนิดกับบ่อควบคุม Mann-Whitney U Test	95
4-16 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบต่าง ๆ	96
4-17 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์กับศักยภาพในการทำให้อากาศร้อน	97

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2-1 ปრაกฏการณ์เรือนกระจก	7
2-2 วัฏจักรของคาร์บอน (Carbon cycle)	11
2-3 การเกิดก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน	14
2-4 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ	16
2-5 ชั้นกรองของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	21
2-6 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ (Free Water Surface System: FWS)	23
2-7 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวนอน (Subsurface Flow System: SF)	24
2-8 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวตั้ง (Vertical Flow: VF)	25
3-1 สถานที่ก่อสร้างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง	33
3-2 ชนิดพืชที่ปลูกในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (ก) กก (ข) อ้อ (ค) พุทธรักษา	35
3-3 แบบร่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง	37
3-4 โครงหลังคาเหล็กโปรงแสงคลุมพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	38
3-5 แผนผังพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์และชนิดพืช	39
3-6 ฐานอลูมิเนียมสำหรับรองรับกล่องอะคริลิก	41
3-7 การวาง Chamber ในบ่อทดลองช่วงต้นบ่อ ช่วงกลาง และท้ายบ่อ	42
3-8 อุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่าง (ก) หลอด-เข็มฉีดยา (ข) ขวดแก้ว (ค) กล่องโฟมขนส่งตัวอย่างและควบคุมอุณหภูมิ	42
3-9 CO ₂ analyzer และจอมอนิเตอร์แสดงผลการวิเคราะห์	44
3-10 ตัวอย่างความสัมพันธ์แบบ Linear regression ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซที่สนใจกับเวลาที่เก็บตัวอย่าง	45
4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์กับเวลาสำหรับบ่อที่ปลูกกกในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF)	48
4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์กับเวลาสำหรับบ่อที่ปลูกอ้อในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)	49
4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์กับเวลาสำหรับบ่อที่ปลูกพุทธรักษาในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์กับเวลาสำหรับบ่อที่ปลูกกกในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)	50
4-5 ประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบต่าง ๆ	53
4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และแบบไหลผ่านพื้นผิว ตลอดจนการทดลอง	55
4-7 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และแบบไหลผ่านพื้นผิว ตลอดจนการทดลอง	54
4-8 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และแบบไหลผ่านพื้นผิว ตลอดจนการทดลอง	55
4-9 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสรวมของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และแบบไหลผ่านพื้นผิว ตลอดจนการทดลอง	55
4-10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และแบบไหลผ่านพื้นผิว	56
4-11 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของพืชชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว	58
4-12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของพืชชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว	58
4-13 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของพืชชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว	59
4-14 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสรวมของพืชชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว	59
4-15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษระหว่างพืชชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว	60
4-16 ประสิทธิภาพการของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดสารมลพิษรายชนิด	66
4-17 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (ก) ก้ามมีเทน (ข) ก้านไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4-18 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	75
4-19 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	77
4-20 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	79
4-21 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากบ่อควบคุมชนิดไหลใต้ผิวดักกลางที่ไม่มี การปลูกพืช (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	81
4-22 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากบ่อควบคุมชนิดไหลผ่านพื้นผิวที่ไม่มี การปลูกพืช (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	83
4-23 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ ไหลใต้ผิวดักกลางกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว	85
4-24 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูก พืชแตกต่างกัน	87
4-25 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ ไหลใต้ผิวดักกลางกับบ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช	90
4-26 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหล ผ่านพื้นผิวที่ปลูกพืชต่างชนิดกับบ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกที่สูงขึ้นก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่กล่าวถึงกันทั่วไปว่าสภาวะโลกร้อน (Global warming) เป็นประเด็นที่ทำให้เกิดความวิตกกังวล และหลายประเทศให้ความสำคัญในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการรวมตัวเป็นองค์กรระดับนานาชาติที่มีหน้าที่หลักในการทำความเข้าใจ สร้างความรู้ ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ เช่น Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) เป็นต้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของบรรยากาศโลกอาจเชื่อมโยงกับการเพิ่มขึ้นของภัยธรรมชาติ และการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศที่อาจส่งผลกระทบต่อสภาพความเป็นอยู่ของมนุษย์ในอนาคต ประเทศไทยมีการเชื่อมโยงประเด็นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกเข้ากับปัญหาภัยธรรมชาติที่เพิ่มมากขึ้น ในช่วงเวลาอย่างน้อย 5 ปีที่ผ่านมาภัยธรรมชาติเกิดขึ้นและส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก เช่น น้ำท่วมใหญ่ในพื้นที่ภาคกลาง ดินถล่ม ภัยแล้ง เป็นต้น

ในการอธิบายทางวิทยาศาสตร์ สภาวะโลกร้อนมีผลมาจากการที่ก๊าซหลายชนิดในบรรยากาศโลกมีระดับเพิ่มมากขึ้น ก๊าซเหล่านี้มีความสามารถในการดูดซับรังสีความร้อน เปรียบเสมือนการมีเรือนกระจกที่ใช้รักษาอุณหภูมิสำหรับดูแลต้นไม้ในภูมิอากาศเขตร้อน จึงเรียกว่า ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) ซึ่งก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ก๊าซเหล่านี้เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดซับรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรดได้ดี เมื่อมีปริมาณมากอยู่ในชั้นบรรยากาศของโลก จึงเป็นสาเหตุให้การปล่อยรังสีจากพื้นผิวโลกถูกกักไว้ไม่ให้ออกสู่อวกาศได้อย่างสะดวกหรือถูกกักเก็บไว้ในบรรยากาศ ก่อให้เกิดการสะสมความร้อนและทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกมีค่าสูงขึ้น หรือเรียกว่าปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) การใช้ทรัพยากรอย่างต่อเนื่องและการพัฒนาของมนุษย์ส่งผลให้ปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นสูงมาก จนคาดว่าเป็นตัวการทำลายสมดุลของธรรมชาติ อันอาจทำให้เกิดผลกระทบที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกอย่างรุนแรงได้

นอกจากวิกฤตภาวะโลกร้อน ที่นานาชาติประเทศรวมทั้งประเทศไทยต้องเผชิญแล้ว ประเทศไทยยังเผชิญกับภาวะวิกฤตทางธรรมชาติอีกหลายด้านที่เชื่อมโยงกับปัญหาการพัฒนาประเทศและการ

เปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม ในด้านคุณภาพน้ำ สมเด็จพระนางเจ้าพระบรมราชินีนาถมีพระราชเสาวนีย์ที่ทรงห่วงใยน้ำ และปัญหามลพิษ หลายหน่วยงานจึงพยายามช่วยกันรักษาสีน้ำและพัฒนาคูณภาพของแม่น้ำสายต่าง ๆ แนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำคือ การบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ โดยเฉพาะน้ำเสียจากชุมชนก่อนที่จะลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้การพัฒนาบบบำบัดน้ำเสียของชุมชนให้มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งจำเป็น อย่างไรก็ตาม ระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชนที่ใช้กันมีราคาค่อนข้างสูง และใช้เทคโนโลยีที่อาจทำให้การควบคุมระบบบำบัดน้ำทิ้งเกิดขีดความสามารถของชุมชน การเลียนแบบธรรมชาติด้วยการใช้บึงประดิษฐ์บำบัดน้ำเสียชุมชนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed wetlands) ได้ถูกสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยการเลียนแบบบึงหรือพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติด้วยการปลูกพืชชนิดต่างๆ เช่น พืชจำพวก อ้อ (*Phragmites* sp.), กก (*Scirpus* sp.) และธูปฤาษี (*Typha* sp.) บนตัวกลางที่เป็นดินทราย กรวด ซึ่งถูกใช้เป็นตัวกรองร่วมด้วย พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อาจถูกออกแบบให้มีรูปร่างแตกต่างกันไป ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นร่องหรือช่องแคบ ๆ และยาว การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เข้ามาช่วยให้หลีกเลี่ยงข้อขัดแย้งและปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดจากการใช้บึงที่เกิดในธรรมชาติบำบัดน้ำเสียได้ แม้ว่าพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ หรือระบบบึงธรรมชาติ สามารถใช้เป็นแหล่งรองรับและบำบัดของเสียได้ในระดับหนึ่งโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการออกแบบและก่อสร้างระบบบำบัดขึ้นมาใหม่ แต่แหล่งกำเนิดของเสียที่ต้องการบำบัดด้วยบึงธรรมชาติควรต้องตั้งอยู่ใกล้กับบึง มิเช่นนั้นจะมีค่าใช้จ่ายในการรวบรวมและขนถ่ายของเสียมาสู่บึงเพิ่มขึ้น การใช้ระยะห่างระหว่างบึงธรรมชาติและแหล่งกำเนิดของน้ำเสีย จึงเป็นข้อจำกัดหนึ่งของการเลือกใช้บึงธรรมชาติในการบำบัดของเสีย ทั้งนี้ไม่รวมถึงการรบกวนระบบนิเวศเดิมของบึงธรรมชาติ

นอกจากนี้ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถออกแบบเพื่อให้มีประสิทธิภาพดีในการบำบัดน้ำเสีย พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้นสามารถสร้างได้ในเกือบทุกพื้นที่ แม้แต่ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดในเรื่องการใช้ที่ดิน โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีประสิทธิภาพการทำงานได้ดีกว่าบึงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีขนาดพื้นที่เท่ากัน เพราะจะมีการปรับระดับดินที่พื้นบ่อและมีการควบคุมระบบการไหลของน้ำภายในบ่อ และสามารถปรับเปลี่ยนหรือดัดแปลงกระบวนการทำงานต่าง ๆ ภายในบ่อได้ตามความต้องการ โดยอาศัยหลักการจัดการเกี่ยวกับพืชและองค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบ (Reed *et al.*, 1988) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพดีระบบหนึ่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2547: Vymazal, 2001; Brix *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2009) จากการศึกษาข้อมูลการทำงาน และค่าใช้จ่ายในการลงทุนในแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ขนาดใหญ่ใช้งานจริงและในพื้นที่จริง พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดของเสียอีก

ระบบหนึ่งที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้าง, การควบคุมการทำงานและบำรุงรักษาระบบค่อนข้างต่ำ (Kadlec and Knight, 2008; Cooper *et al.*, 1996; Kadlec and Wallace, 2008; Zhou *et al.*, 2009) โครงการความร่วมมือของสหภาพยุโรปและหน่วยงานในกลุ่มประเทศอาเซียน (Partnership for Democratic Local Governance in Southeast-Asia หรือ DELGOSEA) มีรายงานการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ว่าเป็นแนวทางปฏิบัติที่ดีชนิดหนึ่งในการบำบัดน้ำทิ้ง (DELGOSEA, 2011) ดังนั้น ประโยชน์ที่จะได้รับจากการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำทิ้งและนำกลับมาใช้ใหม่จึงได้รับความสนใจ ทั้งในด้านความสามารถในการรองรับของเสียขั้นต้นที่เกิดขึ้น และการเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่าด้วย ในช่วงที่ผ่านมา พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสียประเภทต่าง ๆ รวมไปถึงการนำไปใช้เพื่อบำบัดกากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียอื่น ๆ อีกด้วย (Heinss and Koottatep, 1998)

อย่างไรก็ตาม การบำบัดน้ำเสียโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีศักยภาพในการเพิ่มปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน เนื่องจากคุณสมบัติของบึงประดิษฐ์เองที่มีสภาพไร้ออกซิเจน เมื่อได้รับสารอาหารและอินทรีย์สารในปริมาณมากที่ปนเปื้อนมาบับน้ำทิ้ง ระบบบึงประดิษฐ์จึงปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศมากขึ้นด้วยเช่นกัน จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า บึงประดิษฐ์ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกชนิดต่าง ๆ ค่อนข้างสูง เช่น งานวิจัยของ Liikanen *et al.* (2006) พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้บำบัดน้ำทิ้งจากกิจกรรมเหมืองแร่ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์ในอัตรา $7,270 - 13,600 \text{ mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $140 - 400 \text{ mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$ และ $340 \text{ to } 450 \text{ } \mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ตามลำดับ

ในประเทศไทย ได้มีการประเมินอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในพื้นที่โครงการแหลมผักเบี้ย ซึ่งพบว่ามีอัตราการปลดปล่อยอยู่ในช่วง $2.7 - 75.7 \text{ mg m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ หรือประมาณ $65 - 1,817 \text{ mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (Kaewkamthong, 2002) เห็นได้ว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีศักยภาพในการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอัตราสูง นอกจากนี้ การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ยังมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เช่น ชนิดพืช ลักษณะของน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบ ประเภทของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (แบบไหลผ่านพื้นผิว, แบบไหลใต้ผิวดิน) การเก็บเกี่ยวพืช และคุณสมบัติของพืช (มวลชีวภาพ, ความหนาแน่น) เป็นต้น

ที่ผ่านมา งานวิจัยในประเทศไทย ได้มุ่งเน้นศึกษาการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ การประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ได้รับความใส่ใจค่อนข้างน้อย แต่การเพิ่มขึ้นของการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนกำลังได้รับความนิยมมากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเพิ่มมากขึ้นในอนาคต การพัฒนาประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ควบคู่ไปกับการลดผลกระทบจึงเป็นสิ่งที่ควรดำเนินการ และควรต้องพิจารณาให้

การลดมลพิษทางน้ำลดปัญหาคัดค้านต่อปรากฏการณ์เรือนกระจกอันอาจส่งผลกระทบต่อสภาวะบรรยากาศของโลก

ด้วยเหตุนี้ การศึกษาวิจัยเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการพัฒนาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ควบคู่ไปกับการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จึงเป็นเรื่องจำเป็น และผลที่ได้จากการวิจัยจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจถึงศักยภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีต่อบรรยากาศ และสามารถนำมาใช้กำหนดแนวทางในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ควบคู่ไปกับการพัฒนาประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ และประการสำคัญ จะมีประโยชน์ต่อการปรับตัวของประเทศและชุมชนให้รองรับกับการเปลี่ยนแปลงและพลวัตของโลก และสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามยุทธศาสตร์การพัฒนาบนฐานความหลากหลายทางชีวภาพและการสร้างความมั่นคงของฐานทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1.2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่มีความแตกต่างในด้านชนิดพืช และชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
- 1.2.2 ประเมินอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2 , CH_4 , N_2O) จากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน รวมทั้งศึกษาการผันแปรตามฤดูกาล
- 1.2.3 เสนอแนวทางที่เหมาะสมในพัฒนาให้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงสุด โดยปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำที่สุด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การทดลองใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่สร้างจำลองขึ้นในสัดส่วนที่เป็นเกณฑ์แนะนำขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมและหน่วยงานของรัฐ เพื่อใช้ทดลองพัฒนาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชนที่สังเคราะห์ขึ้นควบคู่ไปกับการประเมินค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีความแตกต่างกันทั้งในด้านการออกแบบระบบ โดยเลือกใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและไหลผ่านใต้ผิวดักกลาง และชนิดของพืชที่ไพล่พื้นน้ำ ได้แก่ กก พุทธรักษา และอ้อ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์และอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
 - 1.4.2 ความรู้เกี่ยวกับแนวทางการพัฒนาประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ควบคู่กับการลดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์
 - 1.4.3 หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำข้อค้นพบจากการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อม ระดับประเทศ จนถึงระดับชุมชน เพื่อให้การบำบัดน้ำเสียโดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เกิดผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อนน้อยที่สุด
 - 1.4.4 เผยแพร่ความรู้ที่ได้ให้เกิดการสร้างความรู้ใหม่ในการประชุมวิชาการหรือวารสารระดับประเทศและนานาชาติ
-

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนและรวบรวมแนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้ดำเนินการให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา โดยแนวคิดด้านทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

2.1 ภาวะโลกร้อนและก๊าซเรือนกระจก

ภาวะโลกร้อนเป็นสภาวะที่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวโลกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA) รายงานว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2557 มีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.64 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในช่วงคริสต์ทศวรรษที่ 20 ในช่วงประมาณ 100 ปีที่ผ่านมา อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวโลกสูงขึ้นประมาณ 1 องศาเซลเซียส การเพิ่มอุณหภูมิของโลกค่อนข้างเร็วในช่วงประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา (Hansen, 1981) ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวโลกในทศวรรษที่ผ่านมา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นบริเวณพื้นผิวดินมากกว่าพื้นมหาสมุทรอันเนื่องมาจากการตอบสนองของมหาสมุทรเกิดขึ้นช้ากว่าพื้นผิวดิน (Hansen, 2010) ปัญหาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวโลกคาดว่าจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (Hansen et al., 2007; IPCC 2007; Sutton et al., 2007) สาเหตุหนึ่งเกิดจากการที่ก๊าซหลายชนิดหรือรวมเรียกว่า ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ปกคลุมชั้นบรรยากาศของโลก เป็นสาเหตุให้รังสีความร้อนถูกกักไว้ในชั้นบรรยากาศ และไม่สามารถผ่านกลับออกไปได้ ก่อให้เกิดการสะสมความร้อนและทำให้อุณหภูมิของโลกมีค่าสูงขึ้น หรือที่เรียกว่าปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect)

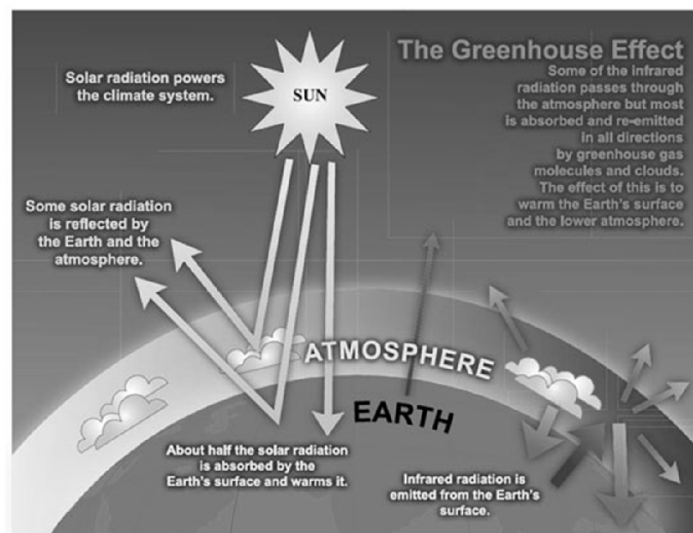
2.1.1 ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect)

ปรากฏการณ์เรือนกระจก คือ ขบวนการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวโลกที่ถูกดูดซับโดยก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ และแผ่รังสีกลับในทุกทิศทาง เนื่องจากการแผ่รังสีกลับนี้บางส่วนกลับไปยังพื้นผิวและชั้นบรรยากาศที่ต่ำกว่า ทำให้ระดับอุณหภูมิพื้นผิวโลกเฉลี่ยสูงขึ้น

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลก พลังงานแสงอาทิตย์ส่งมายังโลกโดยการแผ่รังสีในรูปของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) ซึ่งเป็นรังสีคลื่นสั้นในช่วงความยาวคลื่นที่เป็นรังสีอุลตราไวโอเลต (Ultraviolet) รังสีที่มองเห็นได้ (Visible) และรังสีอินฟราเรด

(Infrared) นอกจากนี้ ในบรรยากาศยังประกอบด้วยก๊าซ ฝุ่นละออง และเมฆ ซึ่งล้วนแล้วแต่ทำหน้าที่กั้นรังสีที่จะผ่านเข้ามายังพื้นผิวโลก รังสีแสงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศลงมาถึงพื้นโลกได้ ประมาณร้อยละ 70 ที่เหลืออีกร้อยละ 30 กระจายและถูกสะท้อนกลับไปในอวกาศด้วยชั้นบรรยากาศ และพื้นผิวโลก พื้นดินและมหาสมุทรจะดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศลงมาแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน และมีการแผ่รังสีกลับออกไปสู่บรรยากาศ เพื่อความสมดุลของพลังงานภายในโลก ในรูปของรังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นรังสีคลื่นยาว โดยรังสีอินฟราเรดที่แผ่กลับออกไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่พื้นผิวโลกดูดซับรังสีแสงอาทิตย์ไว้ รังสีอินฟราเรดบางส่วนจะถูกส่งผ่านชั้นบรรยากาศออกไปนอกอวกาศ แต่โดยส่วนมากจะถูกขวางกั้นไม่ให้ออกนอกโลกด้วยส่วนประกอบที่อยู่ในบรรยากาศและดูดซับรังสีอินฟราเรดไว้ จากนั้นมีการปล่อยรังสีกลับออกมาทางด้านล่างคืนสู่พื้นผิวโลกและปล่อยออกทางด้านบนซึ่งในท้ายที่สุดจะออกไปนอกอวกาศ

ก๊าซที่อยู่ในบรรยากาศมีลักษณะโปร่งแสงโดยสามารถให้รังสีผ่านได้ ประกอบด้วย ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ ทำหน้าที่ดูดซับรังสีอินฟราเรดเอาไว้ และปล่อยรังสีกลับออกมาเพื่อป้องกันพลังงานที่จะผ่านออกไปนอกอวกาศ ทำให้โลกไม่สูญเสียความร้อน ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับแผ่นกระจกของเรือนกระจกที่สร้างความอบอุ่น โดยยอมให้รังสีจากดวงอาทิตย์ผ่านเข้ามา แต่กลับเก็บกักความร้อนด้วยการกั้นอากาศร้อนที่ลอยตัวขึ้นสูงเอาไว้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) แสดงในรูปที่ 2-1 และเรียกก๊าซต่างๆ เหล่านี้ว่า ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases; GHGs)



รูปที่ 2-1 ปรากฏการณ์เรือนกระจก

ที่มา : <http://www.global-greenhouse-warming.com>

กระบวนการของปรากฏการณ์เรือนกระจกเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ บรรยากาศชั้นบนช่วยรักษาสมดุลของพลังงานให้กับโลก เป็นการเก็บรักษาความร้อนของโลกให้เหมาะสมกับการอยู่อาศัย

ของสิ่งมีชีวิต ทำให้ผิวโลกมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 15 องศาเซลเซียส ถ้าหากปราศจากปรากฏการณ์นี้ ปริมาณรังสีคลื่นยาวที่โลกแผ่กลับออกไป จะออกนอกอวกาศ มีผลต่ออุณหภูมิของโลก ทำให้โลกมีอุณหภูมิประมาณ -18 องศาเซลเซียส ระบบภูมิอากาศเมื่อมีความสมดุล พลังงานที่ดูดซับจะเท่ากับรังสีที่ปล่อยออกไปนอกอวกาศ ปัจจัยที่รบกวนความสมดุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เรียกว่ากำลังในการแผ่รังสี (Radiative forcing) ซึ่งเกิดจากการเพิ่มปริมาณในการแผ่รังสีของก๊าซเรือนกระจก มีผลจากปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศที่เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิของโลกมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงและมีผลต่อการหมุนเวียนและรูปแบบของสภาพอากาศ

2.1.2 ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases; GHGs)

เอกสารเผยแพร่ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (มปป.) อธิบายไว้ว่า ก๊าซเรือนกระจกเป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อน หรือรังสีอินฟราเรดได้ดี ก๊าซเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการรักษาอุณหภูมิในบรรยากาศของโลกให้คงที่ ซึ่งหากบรรยากาศโลกไม่มีก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ ดังเช่นดาวเคราะห์ดวงอื่น ๆ ในระบบสุริยะแล้ว จะทำให้อุณหภูมิในตอนกลางวันนั้นร้อนจัด และในตอนกลางคืนนั้นหนาวจัด เนื่องจากก๊าซเหล่านี้ดูดซับรังสีความร้อนไว้ในเวลากลางวัน แล้วค่อย ๆ แผ่รังสีความร้อนออกมาในตอนกลางคืน ทำให้อุณหภูมิในบรรยากาศโลกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน

ก๊าซหลายชนิดมีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อน และถูกจัดอยู่ในกลุ่มก๊าซเรือนกระจก ซึ่งมีทั้งก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญคือ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และสารซีเอฟซี เป็นต้น แต่ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโต มีเพียง 6 ชนิด โดยจะต้องเป็นก๊าซที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic greenhouse gas emission) เท่านั้น ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) ก๊าซเพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) และก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) ทั้งนี้ ยังมีก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง คือ สารซีเอฟซี (CFC หรือ Chlorofluorocarbon) ซึ่งใช้เป็นสารทำความเย็นและใช้ในการผลิตโฟม แต่ไม่ถูกกำหนดในพิธีสารเกียวโต เนื่องจากเป็นสารที่ถูกจำกัดการใช้ในพิธีสารมอนทรีออลแล้ว (Philander, 2012)

กิจกรรมหลากหลายของมนุษย์ กำลังเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้ (ยกเว้นไอน้ำ) การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากถ่านหิน น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ ก๊าซจากท่อไอเสียของยานพาหนะ และอุตสาหกรรม รวมทั้ง การตัดไม้ทำลายป่า การทำการเกษตรและการปศุสัตว์ปล่อยก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์ นอกจากนี้ กระบวนการแปรรูปอุตสาหกรรมยังได้ปล่อยสารในกลุ่มฮาโลคาร์บอน (CFCs, HFCs, PFCs)

การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกนั้น ส่งผลให้ชั้นบรรยากาศกักเก็บรังสีความร้อนได้มากขึ้น ผลที่ตามมาคือ อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกนั้น

ไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดยังมี ศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Global Warming Potential: GWP) ที่แตกต่างกัน ค่า ศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนนี้ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของโมเลกุล และขึ้นอยู่กับอายุของก๊าซนั้น ๆ ในบรรยากาศ Intergovernmental Panel on Climate Change ได้รายงานเกี่ยวกับค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกของก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิด เอาไว้ ซึ่งค่า GWP นี้เป็นค่าที่แสดงถึงศักยภาพของก๊าซเรือนกระจกในการทำให้โลกร้อนขึ้นเมื่อ เปรียบเทียบกับการแผ่รังสีความร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และจะคิดเทียบกับก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เช่น 20 ปี 50 ปี หรือ 100 ปี โดย IPCC กำหนดให้ค่า GWP ของก๊าซเรือนกระจกต่าง ๆ ในช่วงเวลา 100 ปี เป็นดังนี้ คือ กำหนดให้ค่า GWP ของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ เป็น 1 และค่า GWP ของก๊าซมีเทน และก๊าซไนตรัสออกไซด์มีค่าเป็น 23 และ 296 ตามลำดับ (IPCC, 2001; IPCC, 2007) แต่หากเปรียบเทียบปริมาณแล้ว จะเห็นว่าก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่ในปริมาณมหาศาลเมื่อเทียบกับก๊าซชนิดอื่น ๆ โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มี ส่วนในการทำให้โลกร้อนขึ้นสูงที่สุดถึงร้อยละ 49 (Lyman, 1990) ก๊าซมีเทนร้อยละ 25 (Mosier, 1998) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ร้อยละ 6 (IPCC, 2001) คุณสมบัติของก๊าซเรือนกระจกหลักใน บรรยากาศ แสดงในตาราง 2-1

ตาราง 2-1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติและปริมาณก๊าซเรือนกระจก

คุณสมบัติ	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	มีเทน (CH ₄)	ไนตรัสออกไซด์ (N ₂ O)
แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ	วัฏจักรธรรมชาติ การหายใจ	พื้นที่ชุ่มน้ำ	ดิน ป่าเขตร้อน
แหล่งกำเนิดโดยมนุษย์	การเผาป่า ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซเชื้อเพลิง	นาข้าว ปศุสัตว์ การเผาไหม้ เชื้อเพลิง มวลชีวภาพ	ปุ๋ย การใช้ประโยชน์ ที่ดิน
อายุ (lifetime) ¹	50 – 200 ปี	12 – 17 ปี	120 ปี
ปริมาณในปัจจุบัน ¹	365 ppm	1,750 ppb	310 ppb
ความสามารถในการทำให้ เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ¹	1	23	296
อิทธิพลต่อภาวะเรือน กระจก	49% ²	25% ³	6% ¹

หมายเหตุ ที่มา ¹IPCC (2001), ²Lyman (1990), ³Mosier (1998)

2.1.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) คือ สารประกอบของคาร์บอนที่อยู่ในสถานะก๊าซ ที่ลอยตัวอยู่ในชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน 1 อะตอม และ ออกซิเจน 2 อะตอม ในหนึ่งโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในสารประกอบเคมีของคาร์บอนที่เป็นที่รู้จักมากที่สุด มีสูตรทางเคมี คือ CO_2

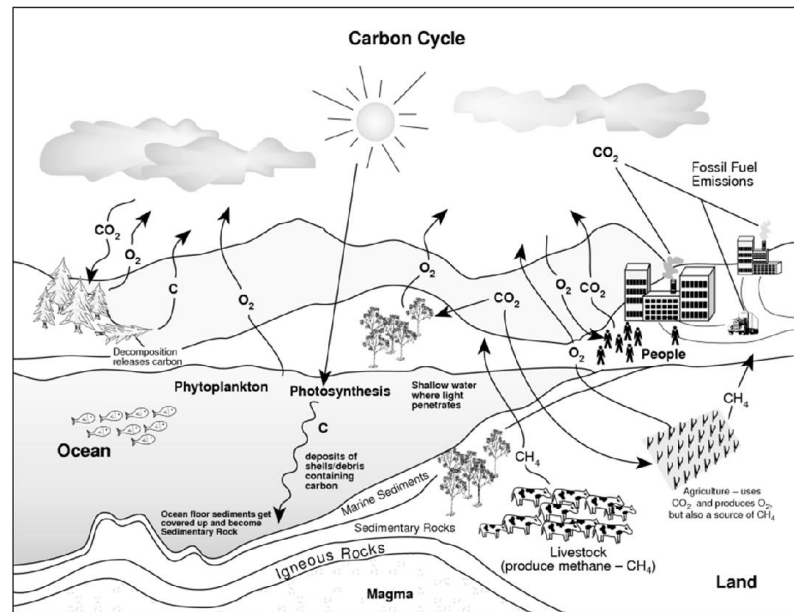
คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้หลายลักษณะ เช่น ภูเขาไฟระเบิด การหายใจของสิ่งมีชีวิต หรือการเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์ ก๊าซนี้เป็นวัตถุดิบสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เพื่อใช้คาร์บอนและออกซิเจนในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงนี้ พืชจะปล่อยก๊าซออกซิเจนออกมาสู่บรรยากาศ ทำให้สัตว์ได้ใช้ออกซิเจนนี้ในการหายใจ การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของพืชนี้เป็นการลดก๊าซเรือนกระจกได้ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซหนึ่งที่เป็นสาเหตุของปรากฏการณ์เรือนกระจก

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ซึ่งหากหายใจเอาก๊าซนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ จะรู้สึกเปรี้ยวที่ปาก เกิดการระคายเคืองที่จมูกและคอ เนื่องจากอาจเกิดการละลายของแก๊สนี้ในเมือกในอวัยวะ ก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิกอย่างอ่อน คาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่น 1.98 kg/m^3 ซึ่งเป็นประมาณ 1.5 เท่าของอากาศ (Dow and Downing, 2007) โมเลกุลประกอบด้วยพันธะคู่ 2 พันธะ ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$) ไม่ติดไฟและไม่ทำปฏิกิริยา คาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้ร้อยละ 1 ของสารละลายนั้นจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็นไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตในภายหลัง

วัฏจักรคาร์บอน

สารประกอบอินทรีย์ทุกชนิดจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ แหล่งที่มาของคาร์บอนจึงมีอยู่ทั้งที่อยู่ในพื้นดิน ชั้นหิน แหล่งน้ำและชั้นบรรยากาศ คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้หลายลักษณะ เช่น ภูเขาไฟระเบิด การหายใจของสิ่งมีชีวิต หรือการเผาไหม้และถ่านหิน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เพื่อใช้คาร์บอนในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงนี้ พืชจะปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนออกมาสู่บรรยากาศ ทำให้สัตว์ได้ใช้ออกซิเจนนี้ในการหายใจ การนำคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชจึงเป็นการลดก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศลงได้ นอกจากนี้ การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ ยังเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและถ่านหินที่มนุษย์ได้ขุดเจาะนำขึ้นมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ การใช้พลังงานในการดำรงชีวิต การหมุนเวียนของคาร์บอนในระบบนิเวศของโลก เริ่มจากคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศที่ละลายในน้ำฝนมีสภาพเป็นกรดคาร์บอนิก ซึ่งเป็นกรดอ่อน ๆ ไหลผ่านซากอินทรีย์ ดิน ตลอดจนชั้นหิน ทำให้เกิดการ

สลายตัวของหิน และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น แคลเซียมคาร์บอเนตสะสมอยู่ในแหล่งน้ำ พืชน้ำสามารถนำไปใช้ได้ทันที ส่วนพืชบกจะได้รับคาร์บอนในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการหายใจของพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ และจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ดังนั้นคาร์บอนจึงหมุนเวียนอยู่ในระบบนิเวศอย่างสมดุล



รูปที่ 2-2 วัฏจักรของคาร์บอน (Carbon cycle)

ที่มา : http://kids.earth.nasa.gov/guide/earth_glossary.pdf

คาร์บอนที่อยู่ในชั้นบรรยากาศมีโอกาสหมุนเวียนเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยการสังเคราะห์แสงของผู้ผลิต (พืชในธรรมชาติ) เป็นสำคัญ อัตราการจับคาร์บอนจากชั้นบรรยากาศของพืชในระบบนิเวศแต่ละแห่งมีค่าไม่เท่ากัน ป่าเขตร้อนมีอัตราการจับคาร์บอน (ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ในอัตราปีละ 1-2 กิโลกรัมต่อตารางกิโลเมตร (Reynolds, 2010) ในขณะเดียวกันที่เขตทุนดราหรือทะเลทรายที่ว่างเปล่าสามารถจับได้เพียง 10-20 กรัมต่อตารางกิโลเมตร ซึ่งถือว่าเป็นเพียงร้อยละ 1-2 ของป่าเขตร้อนเท่านั้น ส่วนในเขตอบอุ่นบริเวณที่เป็นป่าหรือบริเวณที่ทำการเพาะปลูก พืชมีอัตราการจับคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.2-0.4 กิโลกรัมต่อตารางกิโลเมตร (Lee, 2011) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาทั้งโลกนี้เวลานั้นจะพบว่าอัตราการสร้างสารอินทรีย์จากคาร์บอนทั้งหมด คิดเป็นน้ำหนักของสารอินทรีย์ได้ประมาณ 20,000-30,000 ล้านตันต่อปี

ส่วนในมหาสมุทรนั้นมีแพลงตอนพืช ทำหน้าที่จับคาร์บอน ประมาณ 4 หมื่นล้านตันต่อปี (Pitcock, 2009) ทั้งคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้กับออกซิเจนที่ถูกปลดปล่อยออกมาส่วนใหญ่อยู่ในรูปของก๊าซที่ละลายน้ำในบริเวณผิวของมหาสมุทร แม้ว่าคาร์บอนในมหาสมุทรจะสามารถหมุนเวียน

เป็นวัฏจักรได้ แต่ก็ยังมีการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (รวมทั้งก๊าซออกซิเจน) ระหว่างบรรยากาศกับทะเลโดยมีลมและคลื่นเป็นส่วนร่วมที่สำคัญในกระบวนการแลกเปลี่ยนนี้ และไม่ว่าจะใดก็ตามปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่บริเวณผิวของน้ำทะเลจะยังคงความสมดุลกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเสมอ (Philander, 2012).

โดยสรุป จะเห็นได้ว่าวัฏจักรของคาร์บอนสามารถแยกออกได้เป็น 2 วัฏจักร คือ วัฏจักรบนบก และวัฏจักรในมหาสมุทร แม้ว่าพืชบกมีบทบาทสำคัญในการตรึงคาร์บอนเอาไว้ในรูปของสารอินทรีย์ แต่แหล่งควบคุมใหญ่ของปริมาณคาร์บอนยังคงเป็นทะเลและมหาสมุทร ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศยังคงขึ้นอยู่กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในมหาสมุทร ธรรมชาติมีกลไกในการควบคุมสมดุลของปริมาณคาร์บอนบนบกและในทะเลเป็นอย่างดี กล่าวคือเมื่อคาร์บอนในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตถูกชะล้างจากบกลงสู่ทะเล ทำให้ทะเลมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันคาร์บอนในทะเลก็จะตกตะกอนสู่ก้นทะเลลึก ทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในทะเลลดลงไป

2.1.4 ก๊าซมีเทน (Methane)

ก๊าซมีเทนเป็นสารไฮโดรคาร์บอนอ้อมตัวมีสูตรทางเคมี คือ CH_4 เป็นก๊าซติดไฟที่ไม่มีสี ละลายในน้ำได้เล็กน้อย ละลายได้ดีในสารละลายอินทรีย์ ก๊าซมีเทนสามารถดูดซับรังสีความร้อนได้ดีกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 23 เท่า (IPCC, 2001) ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียโดยปราศจากออกซิเจน การทำนาในที่ลุ่มน้ำขังและพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติ ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในบรรยากาศที่เพิ่มขึ้นในปริมาณสูงมีผลมาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเกษตรกรรม ก๊าซมีเทนมีการผลิตจากสัตว์เคี้ยวเอื้อง ซึ่งมีการหมักในลำไส้และการย่อยสลายของของเสียจากสัตว์ การย่อยสลายของขยะชุมชนจากสถานที่ฝังกลบ การผลิตก๊าซธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี การทำเหมืองแร่ถ่านหิน การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ปริมาณก๊าซมีเทนที่มีการปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์มีประมาณร้อยละ 60-80 ของปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมด (Pittock, 2009)

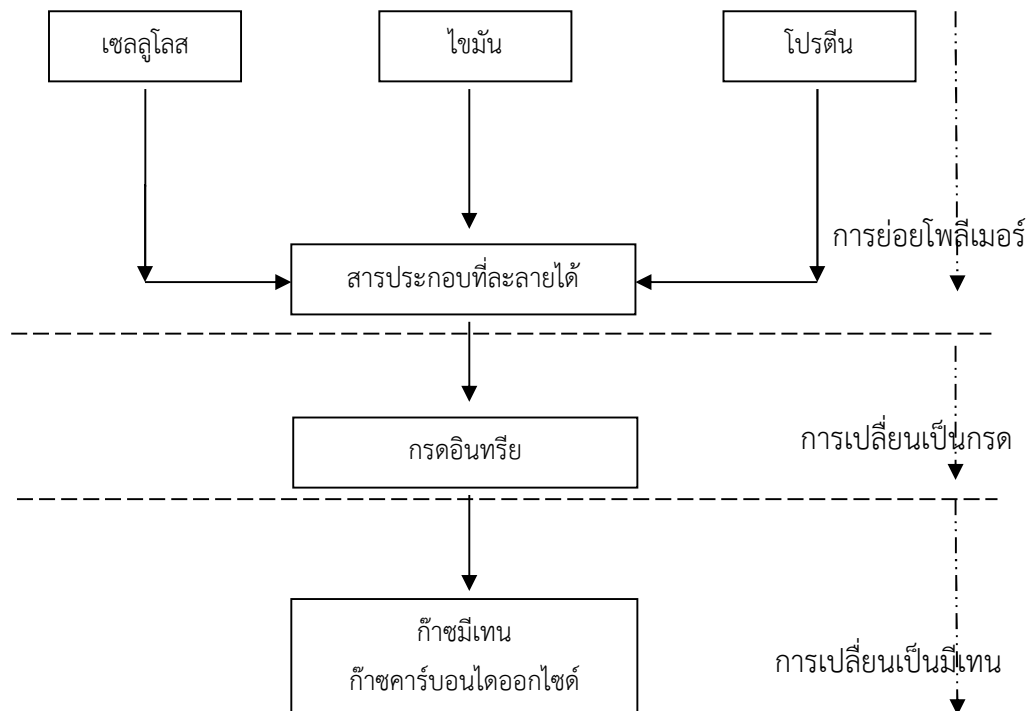
การเกิดก๊าซมีเทน

การเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในระยะแรกที่มีออกซิเจนปนอยู่ก็จะย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ต่อจากนั้นเมื่อออกซิเจนถูกใช้หมดแล้วการย่อยสลายก็กลายเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน ขณะดำเนินการย่อยสลายโดยกลุ่มแบคทีเรียหลายชนิดผสมกัน มีลักษณะคล้ายกับสภาวะไร้ออกซิเจนที่เกิดขึ้นที่ก้นบ่อ หรือหนองน้ำ ทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นเองในธรรมชาติ โดยมีขั้นตอนการย่อยสลาย 3 ขั้นตอน (Hites and Raff, 2012) ดังนี้

ก. การสลายโพลิเมอร์ ในขั้นนี้สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน ไขมันและคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเซลล์โลส และส่วนประกอบต่าง ๆ ของเนื้อเยื่อพืช แบคทีเรียไม่สามารถที่จะย่อยสลายสิ่งเหล่านี้ได้ทันที จำเป็นต้องส่งเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์เพื่อทำให้โมเลกุลใหญ่เหล่านี้แตกตัวออกเป็นโมเลกุลเล็ก หรือเป็นสารละลายก่อน เอนไซม์ที่แบคทีเรียส่งออกมา ได้แก่ Cellulolytic, Lipolytic, Protelytic โดยที่ Cellulolytic จะทำหน้าที่คือ ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนแตกตัวออกเป็นสารละลายและสารประกอบอินทรีย์ในโมเลกุลของเสียจากการเกษตร ได้แก่ เซลลูโลส ซึ่งการเปลี่ยนเซลลูโลสและสารประกอบเชิงซ้อนอื่น ๆ ให้เป็นสารพวกโมโนเมอร์

ข. การสร้างกรด แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในขั้นตอนนี้มีชื่อเรียกว่า อะซิโตจีนิคแบคทีเรีย (Acetogenic bacteria) อาจจะเป็นพวกแฟคคัลเททีฟ (Facultative) หรือแอนแอโรบิก (Anaerobic) ก็ได้ จะทำการย่อยสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่แตกตัวจากโมเลกุลใหญ่จากขั้นตอนแรกให้เป็นกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดอะซิติก กรดไพรูวิก กรดแลคติก อย่างไรก็ตาม กรดอะซิติกเป็นกรดอินทรีย์ที่สำคัญที่สุดสำหรับการเกิดมีเทน เพราะร้อยละ 70 ของมีเทนเกิดจากกรดอะซิติก

ค. การสร้างมีเทน กรดอะซิติกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่สองนั้น จะกลายมาเป็นสารอาหารสำหรับกลุ่มแบคทีเรียชนิดที่ต้องอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ แบคทีเรียกลุ่มนี้มีชื่อว่า เมทาโนจีนิคแบคทีเรีย (Methanogenic bacteria) จะทำการย่อยสลายกรดอะซิติกให้เกิดเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนี้จะรวมกับก๊าซมีเทนที่เกิดจากการที่แบคทีเรียรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และใช้ก๊าซไฮโดรเจน หรือฟอร์มเมทที่เกิดจากแบคทีเรียชนิดอื่นเป็นปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดของระบบ ซึ่งก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตอนสุดท้ายนี้ไม่ละลายในน้ำ และจะถูกปลดปล่อยออกไปในรูปแบบก๊าซ สามารถที่จะเก็บและนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงที่เป็นประโยชน์ได้ สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจะออกไปในรูปแบบของก๊าซ และบางส่วนก็จะละลายในน้ำ และทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออนในระบบ เกิดเป็นคาร์บอเนตไอออน ผลของการหมุนเวียนของคาร์บอนไดออกไซด์นี้ทำให้เกิดมีผลต่อองค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบ เช่น ค่าความเป็นกรดด่าง ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารอาหาร ดังแสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 การเกิดก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน

แหล่งกำเนิดก๊าซมีเทนที่สำคัญแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

ก. แหล่งกำเนิดจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่

ก.1 การทำนาข้าว การปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวเกิดขึ้นจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินนา เมื่อมีการทำนา สภาพน้ำขังในที่นาทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศ สารอินทรีย์ได้จากซากพืชทับถมในดินการใส่ปุ๋ย กิจกรรมแลกเปลี่ยนแร่ธาตุระหว่างพืชกับดิน ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะแทรกตัวไปตามลำต้น และใบของต้นข้าวเพื่อออกสู่บรรยากาศ (IPCC, 2001)

ก.2 การเลี้ยงสัตว์ มีเทนจากการเลี้ยงสัตว์เกิดเฉพาะในสัตว์เคี้ยวเอื้อง เนื่องจากจุลินทรีย์ในลำไส้ของสัตว์ที่มีสภาวะไร้ออกซิเจน และสัตว์เหล่านี้กินอาหารที่มีเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้เกิดการย่อยสลายในกระเพาะรูเมนหลังกินอาหาร วัวหนึ่งตัวอาจผลิตก๊าซได้ถึง 30 ลิตรต่อชั่วโมง โดยสัตว์จะปล่อยออกทางปาก หากสัตว์ไม่เรอจะมีการสะสมก๊าซอยู่ภายใน ทำให้เป็นโรคและสามารถล้มตายได้ สัตว์แต่ละชนิดมีการปล่อยก๊าซมีเทนไม่เท่ากัน อายุ เพศ และเผ่าพันธุ์ก็เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการปล่อยมีเทนที่แตกต่างกัน (Lee, 2011)

ก.3 การบำบัดน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจากชุมชน หรือโรงงานอุตสาหกรรม หากเป็นการบำบัดด้วยระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดก๊าซมีเทนได้ทั้งสิ้น อย่างไรก็ตาม

เทคโนโลยีใหม่สามารถกักเก็บก๊าซที่เกิดขึ้นมาใช้ประโยชน์ได้ การเกิดและปล่อยก๊าซมีเทนขึ้นกับชนิดและประสิทธิภาพของเทคโนโลยี ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และระบบการนำก๊าซมีเทนมาใช้ประโยชน์

ก.4 พื้นที่ฝังกลบขยะ การบำบัดขยะมูลฝอยซึ่งมีสารอินทรีย์ปนอยู่สูง โดยการนำมากองทับถมหรือการบำบัดแบบถูกสุขลักษณะด้วยการบดอัดขยะในหลุมแล้วกลบทับถมด้วยดิน ล้วนเหนี่ยวนำให้เกิดการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ปัจจัยที่ทำให้การปล่อยก๊าซมีเทนจากการฝังกลบขยะแตกต่างกัน คือ องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอย ความชื้น อุณหภูมิ ความลึก และแรงบดอัดภายในหลุมฝังกลบ (Metz, 2010)

ก.5 แหล่งอื่น ๆ นอกจากการปล่อยมีเทนจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศแล้ว ก๊าซมีเทนอาจเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ได้ เช่น การเผาวัสดุเกษตรหรือชีวมวล การทำเหมืองถ่านหิน หรือการขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ ก็ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซมีเทนซึ่งเป็นก๊าซของค์ประกอบหนึ่งในก๊าซธรรมชาติถูกปล่อยออกมาด้วย

ข. แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ ได้แก่

ข.1 พื้นที่ชุ่มน้ำและทะเลสาบ กลไกการปล่อยมีเทนจะคล้ายกับนาข้าว แต่เป็นการเกิดตามธรรมชาติ มีพืชหลายชนิดเป็นตัวช่วยปล่อย และสารอินทรีย์ในดินจะแตกต่างกันไปในแต่ละแห่ง ความลึกของระดับน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในทะเลสาบ การปล่อยจะเกิดสูงบริเวณใกล้ฝั่งในฤดูร้อนพื้นที่ชุ่มน้ำบางแห่งที่ขาดน้ำอาจไม่มีการปล่อยก๊าซมีเทน (Kernan *et al.*, 2010)

กระบวนการเกิดก๊าซเรือนกระจกในพื้นที่ชุ่มน้ำ

พื้นที่ชุ่มน้ำมีความสำคัญต่อการรักษาสมดุลของก๊าซต่าง ๆ ในบรรยากาศ เพราะดินในพื้นที่ชุ่มน้ำเป็นแหล่งเก็บกักคาร์บอนที่สำคัญ โดยจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชหลากหลายชนิดในพื้นที่ชุ่มน้ำและย่อยสลายเปลี่ยนเป็นธาตุอาหารในดิน แต่ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน การย่อยสลายสารต่าง ๆ เกิดขึ้นช้าลง และก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาพร้อม ๆ กับก๊าซมีเทน แต่หากเปรียบเทียบกันแล้ว พื้นที่ชุ่มน้ำจะดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปริมาณที่ปลดปล่อยออกมา

ก๊าซมีเทนเกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของของแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ (Anaerobic bacteria) มักเกิดในพื้นที่น้ำขัง เช่น พื้นที่ชุ่มน้ำ นาข้าว (Schutz *et al.*, 1990) ซึ่งมีน้ำท่วมขังอยู่เกือบตลอดปี ดังนั้น จึงเกิดสภาวะไร้ออกซิเจนเกือบตลอดปีเช่นกัน สภาวะไร้ออกซิเจนนี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงและกิจกรรมของจุลินทรีย์ ทำให้กิจกรรมของแบคทีเรียในกลุ่มที่ใช้อากาศ (Aerobic bacteria) ซึ่งใช้ออกซิเจนในการหายใจลดน้อยลง ส่วนในดินชั้นที่ถูกน้ำขังลึกลงไปจะเป็นชั้นดินที่ถูกรีดิวซ์ออกซิเจน การเปลี่ยนแปลงในดินชั้นนี้จึงเกิดขึ้นโดยแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่ใช้

อากาศ (Anaerobic bacteria) ซึ่งการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนนี้ก่อให้เกิดก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

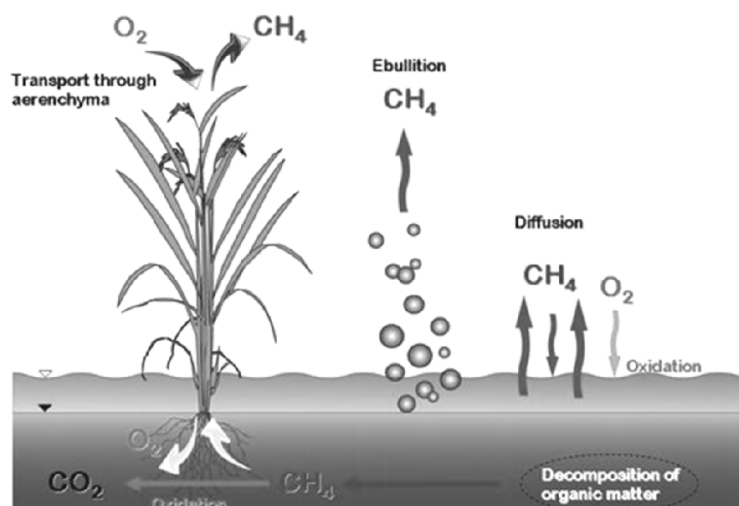
ก๊าซมีเทนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในดินพื้นที่ชุ่มน้ำนั้นเคลื่อนออกสู่บรรยากาศได้ 3 ทาง (Braatz and Hogan, 1991) คือ

ก. เคลื่อนที่ผ่านทางลำต้นพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ โดยเริ่มจากรากไปตามช่องอากาศภายในของกาบใบและใบ (Plant mediate passive transported) แล้วจึงออกสู่บรรยากาศ โดยปริมาณก๊าซมีเทนที่ผ่านทางลำต้นพืชนี้คิดเป็นร้อยละ 90-95 ของการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมด (รูปที่ 2-4)

ข. เคลื่อนที่ผ่านผิวน้ำโดยกระบวนการแพร่ (Diffusion) คิดเป็นร้อยละ 2 ของการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมด

ค. เคลื่อนที่ออกไปในรูปของฟองอากาศลอยสู่ผิวน้ำ (Ebullition) คิดเป็นร้อยละ 8 ของการปล่อยก๊าซมีเทนทั้งหมด

การเคลื่อนที่ของก๊าซมีเทนผ่านระบบลำเลียงของลำต้นพืชจากรากผ่านช่องอากาศ (air space) ภายในรากและกาบใบ และปล่อยออกสู่บรรยากาศ มีความสัมพันธ์กับการปล่อยก๊าซมีเทน โดยขนาดและปริมาณของช่องอากาศในรากและกาบใบจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามอายุของพืช หากปริมาณของช่องอากาศใหญ่ขึ้นความสามารถในการส่งผ่านก๊าซมีเทนก็จะมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2-4 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ

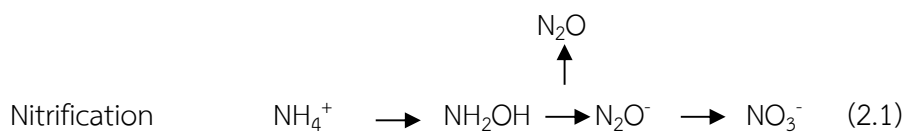
ที่มา: Braatz and Hogan (1991)

2.1.5 ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide)

ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) เป็นก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ในอดีตถูกใช้เป็นยาสลบอย่างอ่อนหรือใช้ระงับความเจ็บ คุณสมบัติพิเศษคือทำให้คนหัวเราะ บางครั้งจึงเรียกว่าก๊าซหัวเราะ แหล่งกำเนิดมีทั้งเกิดจากธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยในส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ประกอบด้วย การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเฉพาะจากยานพาหนะ กระบวนการทางอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์กรด และกรดไนตริก ระบบบำบัดน้ำเสีย การเผาไหม้ของเสีย การเผาไหม้ชีวมวล และปล่อยจากพื้นดินจากการทำการเกษตร รวมทั้งนาข้าว (IPCC, 2007)

กระบวนการเกิดก๊าซไนตรัสออกไซด์จากพื้นที่ชุ่มน้ำ

ก๊าซไนตรัสออกไซด์เกิดขึ้นจากกระบวนการที่สำคัญ 2 กระบวนการด้วยกัน (Lee, 2011) คือ กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) โดยกระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจน ซึ่งเป็นบริเวณดินชั้นบน บาง ๆ โดยแบคทีเรียพวก Nitrifying bacteria กระบวนการนี้ประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน 2 ขั้นตอน โดยขั้นแรกแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนไตรท์ โดยแบคทีเรียพวก Nitromonas และ Nitrococcus จากนั้นไนไตรท์ที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์อีกครั้งเป็นไนเตรท โดยแบคทีเรียพวก Nitrobacter ถ้าสภาพของดินเหมาะสมไนไตรท์ที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะไม่สะสมอยู่ในดินนาน เมื่อเกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรททันที (สมการ 2.1) ส่วนกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (สมการ 2.2) คือ ดินบริเวณชั้นล่าง ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะไม่พบออกซิเจนและไนเตรท แต่จะพบแอมโมเนียม ก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซไนตรัสออกไซด์แทน



ที่มา: Minami (1997)

การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากพื้นดินชุ่มน้ำนั้นขึ้นกับสภาพดิน ได้แก่ ความเข้มข้นของแอมโมเนียม และไนเตรท ปริมาณน้ำ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง และชนิดของดิน เป็นต้น ซึ่งการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนจัดเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญซึ่งมีอิทธิพลต่อการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดิน (Mosier and Kroeze, 2000) เนื่องจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นการเพิ่มแหล่งไนโตรเจน หรือเพิ่ม

ความเข้มข้นของแอมโมเนียมให้กับดิน ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันนั้นมีความเพิ่มขึ้นโดยตรง (Granli and Bockman, 1994; Smith *et al.*, 1997) และได้มีการคาดการณ์ว่า ในอนาคตอัตราการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความต้องการที่จะเพิ่มผลผลิต เพื่อให้รองรับกับความต้องการของประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น (Minami, 1997) ซึ่งอาจทำให้การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์อันเนื่องมาจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ปริมาณความชื้นในดินนับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Dobbie *et al.*, 1999; Akiyama *et al.*, 2000) ซึ่งปริมาณความชื้นในดินขึ้นกับลักษณะเนื้อดิน ปริมาณน้ำฝน อัตราการกลายเป็นไอและการซึมลงดิน โดยทั่วไปดินที่มีสภาพน้ำท่วมขังนั้นมีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์น้อย (Granli and Bockman, 1994) แต่เมื่อมีการระบายน้ำออกจากพื้นดินปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จะเพิ่มสูงขึ้น

2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์จากพื้นที่ชุ่มน้ำ

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์จากพื้นที่ชุ่มน้ำ ได้แก่

ก. แหล่งคาร์บอน

สารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเมื่อผ่านการย่อยสลายและการหมักจนได้กรดอินทรีย์แบบที่เรียกว่า Methanogenic bacteria ก็จะใช้เป็นแหล่งอาหารในการสร้างเซลล์และการเจริญเติบโตจนได้เป็นก๊าซมีเทน การใส่อินทรีย์วัตถุให้กับดิน จะเป็นการเพิ่มแหล่งคาร์บอนให้กับดิน นอกจากนี้สารที่หลั่งจากรากพืช (Root exudate) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน จะกลายเป็นแหล่งอินทรีย์วัตถุ ทำให้เกิดก๊าซมีเทนปริมาณมากในระยะสุดท้ายของการเจริญเติบโตของพืช (Schutz *et al.*, 1989) อีกทั้งการผลิตก๊าซมีเทนมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับปริมาณการปล่อยสารหลั่งจากรากพืชอีกด้วย (Mikha *et al.*, 2001)

ข. สภาพดิน

สภาพดินที่มีน้ำท่วมขังตลอดฤดูกาล ทำให้ดินมีความชื้นสูง ออกซิเจนลดลงเป็นสภาพที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจน ค่า Soil oxidation reduction potential (ORP) เป็นค่าดัชนีชี้วัดแนวโน้มของความแตกต่างกันของการยอมให้และรับออกซิเจนของดินซึ่งดูที่การแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าในปฏิกิริยาต่างๆ ในดินมีค่าแตกต่างกันตามลำดับ ซึ่งถ้า ORP มีค่าสูง แสดงว่ามีปฏิกิริยาออกซิเดชันในดินเกิดขึ้นมาก มีการให้และรับออกซิเจนได้สูงกว่าดินที่มีค่า ORP ต่ำ ดินที่มีค่า ORP ต่ำจะเป็นดินที่มีปริมาณออกซิเจนอิสระอยู่น้อย ดังนั้น ดินที่มีสภาพน้ำท่วมขังจะมีค่า ORP ต่ำด้วย ค่า ORP ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ Methanogenic bacteria จะเริ่มต้นที่ประมาณ -150 หรือ -160 มิลลิโวลต์ และในปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย

ไฮโดรเจนแล้วได้ก๊าซมีเทนนั้น มีค่า ORP ประมาณ -200 มิลลิโวลต์ โดยค่าการปล่อยก๊าซมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ค่า ORP ของดินลดลง (Lindau *et al.*, 1991) แต่หากค่า ORP มีค่าสูงกว่า 200 มิลลิโวลต์ จะพบการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Chen *et al.*, 1997) ถ้าสามารถควบคุมค่า ORP ให้มีค่าอยู่ระหว่าง -100 ถึง 200 มิลลิโวลต์ จะสามารถลดค่าการปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์ลงได้ (Hou *et al.*, 2000)

ค่าความเป็นกรดต่างของดิน (pH) ในช่วงที่มีค่าเป็นกลางนั้นเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์ แต่ถ้าค่าความเป็นกรดต่างของดินมีค่าต่ำกว่า 5.75 หรือสูงกว่า 8.75 จะทำให้เกิดการยับยั้งการเกิดก๊าซมีเทนได้อย่างสมบูรณ์ (Wang *et al.*, 1993) ซึ่งเชื่อมโยงถึงการยับยั้งการดำเนินกิจกรรมของแบคทีเรีย โครงสร้างของดินที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีก็มีส่วนส่งเสริมให้การดำเนินกิจกรรมของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนสูงขึ้นได้ นอกจากนี้ อุณหภูมิดินที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ ประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส โดยการปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์มีค่าสูงในตอนกลางวัน ซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูง

ค. ชนิดพืช

พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำแต่ละชนิดจะมีลักษณะแตกต่างกัน ทั้งนี้การปล่อยก๊าซมีเทนผ่านต้นพืชมีสูงถึงร้อยละ 90-95 ของปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน โดยก๊าซมีเทนถูกแพร่กระจายผ่านมาทางรากพืชผ่านช่องอากาศภายใน Aerenchyma และปล่อยออกสู่บรรยากาศทางใบและกาบใบ ดังนั้น ลักษณะสัณฐานวิทยาของพืช เช่น ปริมาณช่องอากาศในราก กาบใบ และ Aerenchyma ของพืชแต่ละชนิดจะต่างกัน อีกทั้งขนาดและปริมาตรของช่องอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามอายุของพืชหากปริมาตรช่องอากาศใหญ่ขึ้น ความสามารถในการส่งก๊าซมีเทนก็จะมากขึ้นด้วย

ง. สภาพภูมิอากาศ

สภาพภูมิอากาศ เกี่ยวข้องกับปริมาณแสงซึ่งจะมีผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืช เมื่อพืชสังเคราะห์แสงจะได้คาร์โบไฮเดรต และบางส่วนจะอยู่ในรูปของสารที่หลั่งจากรากพืช (Root exudate) ก๊าซมีเทนจึงเกิดสูงขึ้นด้วย

2.2 ทฤษฎีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

2.2.1 ความหมายของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

บึงหรือพื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetlands) หมายถึง พื้นที่ซึ่งมีน้ำท่วมถึงหรือชุ่มไปด้วยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินในระยะเวลาานพอที่จะทำให้พื้นที่นั้นคงสภาวะการอิมตัวด้วยน้ำไว้ได้ (U.S. EPA, 1988) โดยในพื้นที่ชุ่มน้ำนี้ยังเป็นบริเวณที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนพลังงานและสารอาหารระหว่างดวงอาทิตย์กับ

สิ่งมีชีวิตที่อาศัยภายในบึง นอกจากนี้ บึงยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ต่างๆ มากมาย เช่น เต่า กบ งู ปลา เป็ด นกอพยพ เป็นต้น ซึ่งเป็นสถานที่ที่มีความหลากหลายทางชีวภาพสามารถรักษาสมดุลให้กับสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปแล้วความลึกของน้ำในบึงจะมีระดับแตกต่างกันไป ประมาณ 1-2 เมตร และน้ำจะไหลผ่านเข้าไปในพืชที่ขึ้นกันอยู่หนาแน่นอย่างช้า ๆ พืชส่วนใหญ่ที่พบในบึงต้องเป็นพืชที่ทนต่อสภาพน้ำท่วมและสภาพขาดออกซิเจนของดินได้ โดยทั่วไปแล้วการใช้บึงธรรมชาติในการบำบัดของเสียจะมีรูปแบบของการไหลในแนวนอน โดยบึงธรรมชาติจะสามารถบำบัดของเสียได้ด้วยกระบวนการกรอง, การตกตะกอน, การดูดซับสารอาหารของพืชและการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตาม ระยะห่างระหว่างบึงธรรมชาติและแหล่งกำเนิดของเสีย เป็นข้อจำกัดของการเลือกใช้บึงธรรมชาติในการบำบัดของเสียแหล่งกำเนิดของเสียที่ต้องการบำบัดด้วยบึงธรรมชาติ มิเช่นนั้นจะมีค่าใช้จ่ายในการรวบรวมและขนถ่ายของเสียมาสู่บึงเพิ่มขึ้น

ในขณะที่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สร้างขึ้นเลียนแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติด้วยการปลูกพืชที่มีศักยภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง และมีดินหินทรายเป็นตัวกลาง การควบคุมระบบการไหลของน้ำภายในบ่อ และสามารถปรับเปลี่ยนหรือดัดแปลงกระบวนการทำงานต่างๆ ภายในบ่อได้ตามความต้องการ โดยอาศัยหลักการจัดการเกี่ยวกับพืชและองค์ประกอบอื่น ๆ ของระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถสร้างได้ในหลายพื้นที่ (Reed *et al.*, 1988)

2.2.2 องค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Wetland Component)

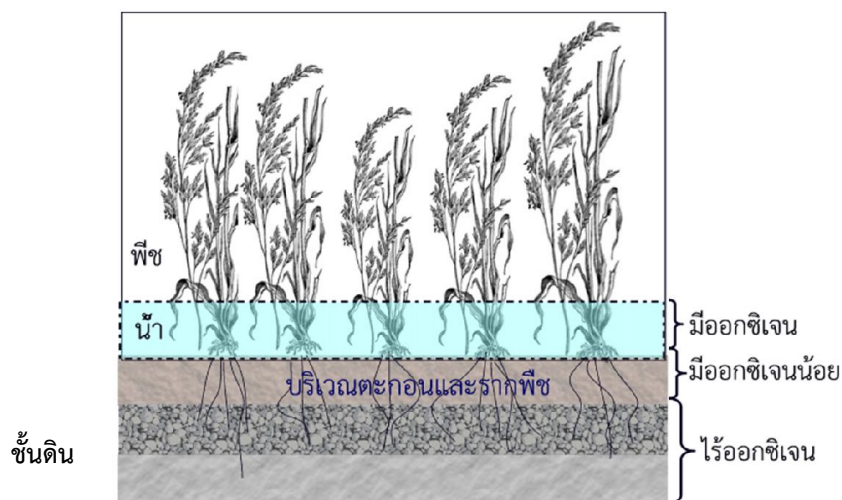
องค์ประกอบของระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สำหรับบำบัดน้ำเสียและสิ่งปฏิกูล มีดังต่อไปนี้

ก. ชั้นกรอง (Substrata)

ชั้นกรองที่เลือกนำมาใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มักเป็นวัสดุที่มีในธรรมชาติ คือ กรวด หิน และทราย ซึ่งสามารถหาได้ทั่วไป โดยจะใช้เพียงชนิดหนึ่งชนิดใดหรือใช้รวมกันก็ได้ ช่องว่างในชั้นกรองเหล่านี้จะใช้เป็นช่องทางการไหลของน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ นอกจากจะเป็นที่อยู่ของพืชและที่ยึดเกาะสำหรับจุลินทรีย์แล้ว ชั้นกรองยังเป็นพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบต่างๆ ด้วย ลักษณะทางกายภาพของชั้นกรองมีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ชั้นกรองที่เป็นทรายหรือกรวดนิยมนำมาใช้สำหรับบำบัดน้ำเสีย เพราะมีอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันขึ้นกับระบบ และพืชสามารถยึดเกาะได้ง่าย ชั้นกรองของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับแยกตามปริมาณของออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2-5 ได้แก่

- บริเวณที่มีออกซิเจน (Aerobic) เป็นบริเวณผิวน้ำของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ บริเวณนี้ น้ำเสียสามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับอากาศได้

- บริเวณที่มีออกซิเจนน้อย (Mildly Anaerobic) เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากชั้นที่มีออกซิเจน (Aerobic) ชั้นนี้เป็นชั้นที่มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างน้อย เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีซากพืชสะสมอยู่ อย่างไรก็ตามระบบรากของพืชที่ยึดเกาะอยู่ในชั้นนี้สามารถปล่อยออกซิเจนออกมาสู่ชั้นกรองได้บางส่วน
- บริเวณที่ไร้ออกซิเจน (Strongly Anaerobic) เป็นบริเวณที่อยู่ชั้นสุดท้ายหรือล่างสุดของชั้นกรอง และในบริเวณนี้จะอยู่ในสภาพไร้อากาศ



รูปที่ 2-5 ชั้นกรองของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ข. จุลินทรีย์ (Microbial Organisms)

จุลินทรีย์ที่พบในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีหลากหลายชนิด เช่น แบคทีเรีย รา สาหร่าย โปรโตซัว ซึ่งภายในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้สามารถแบ่งชนิดของจุลินทรีย์ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

- จุลินทรีย์ชนิดแขวนลอย คือ จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตและอาศัยอยู่บริเวณผิวน้ำของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นจุลินทรีย์ที่ต้องใช้ออกซิเจนในการดำรงชีพ
- จุลินทรีย์ชนิดเกาะติด คือ จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตและอาศัยอยู่ในส่วนที่จมอยู่ในน้ำของพืช (ราก, ลำต้น) ในดินทราย หรือเกาะบนตัวกลางโดยตรงสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน นอกจากนี้ จุลินทรีย์ต่าง ๆ ยังสะสมอยู่ในชั้นตะกอนบริเวณด้านล่างของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ด้วย

โดยทั่วไปจุลินทรีย์เหล่านี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสารปนเปื้อนในน้ำเสียให้เป็นอาหารและพลังงานสำหรับการดำรงชีพ ซึ่งแหล่งพลังงานหลักของจุลินทรีย์คือ สารอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์

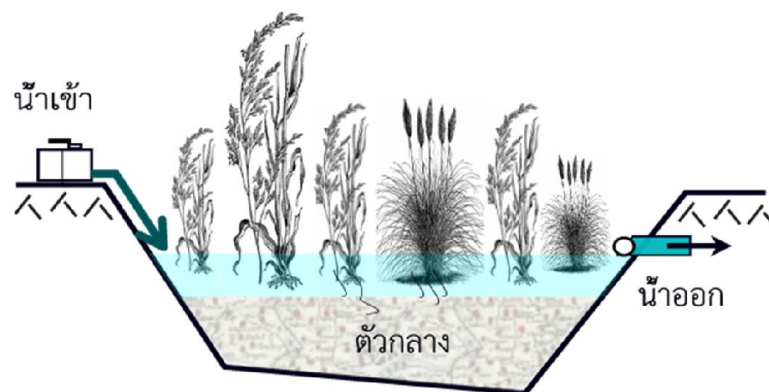
โดยจะใช้สารอินทรีย์ในการสร้างเซลล์ ในระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีการจัดสภาวะแวดล้อมให้มีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เหล่านี้ทั้งนี้เพื่อช่วยให้ยังมีประสิทธิภาพการบำบัดของเสียที่ดี (Kodlec and Knight, 2008)

2.2.3 ชนิดและหน้าที่ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นิยมแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) ประเภทที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ (Free Water Surface: FWS) ซึ่งมีระดับความลึกของน้ำไม่มากนัก 2) ประเภทที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวนอน (Subsurface Flow: SF) หรือระบบที่ปลูกพืชในชั้นกรอง (Vegetated Submerged Bed: VSB) ซึ่งจะมีน้ำไหลผ่านด้านข้างตัวกรองที่อาจเป็นกรวดหรือทราย และ 3) ประเภทที่น้ำไหลผ่านใต้ผิวชั้นกรองในแนวตั้ง (Vertical Flow) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ในการรีดน้ำออกจากกากตะกอน หรือสิ่งปฏิกูลตามอาคารบ้านเรือน ซึ่งจะมีของแข็งเป็นส่วนประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 3 ประเภทนี้ สามารถแบ่งตามแนวการไหลเป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำในแนวนอนและพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำในแนวตั้ง

ก. พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ (Free Water Surface Systems: FWS)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระหรือแบบไหลผ่านพื้นผิวมีลักษณะที่ชั้นกรองถูกปกคลุมด้วยน้ำ ดินและวัสดุตัวกรองจะช่วยให้รากพืชสามารถยึดเกาะอยู่ได้ โดยน้ำที่ความลึกระดับหนึ่งจะไหลอยู่เหนือผิวดินหรือชั้นกรอง (รูปที่ 2-6) ถ้าการกระจายน้ำเข้าสู่ระบบเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีพื้นที่แคบ ยาว และมีระดับความลึกของน้ำในบ่อไม่มากนัก ประกอบกับน้ำมีการไหลอย่างช้า ๆ ผ่านกึ่งก้านของพืชที่แผ่กระจายอยู่ทั่วไปในระบบ จะทำให้เกิดการไหลของน้ำแบบไหลตามกัน (Plug flow) ขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ปัญหาการไหลลัดวงจรของระบบลดลงได้ ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีค่าภาระบีโอดีอยู่ในช่วง 5-100 มก./ลิตร (U.S.EPA, 2000)



รูปที่ 2-6 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ (Free Water Surface Systems: FWS)

ข้อดีของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ คือ ค่าก่อสร้างระบบต่ำกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวนอนและพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวตั้ง เป็นระบบที่ดูแลรักษาง่าย ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย และระบบไม่ผลิตตะกอนที่ต้องบำบัดในขั้นต่อไป นอกจากนี้ ยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ต่าง ๆ ได้

ข้อจำกัดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ คือ เป็นระบบที่ต้องใช้พื้นที่มากและมีเวลาเก็บกักที่นานเมื่อน้ำเสียที่เข้าระบบมีปริมาณไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสสูง นอกจากนี้ ระบบยังมีข้อจำกัดในการบำบัดฟีคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Fecal coliform) ซึ่งส่งผลทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบมักมีปริมาณฟีคอลโคลิฟอร์มเกินกว่าค่ามาตรฐาน

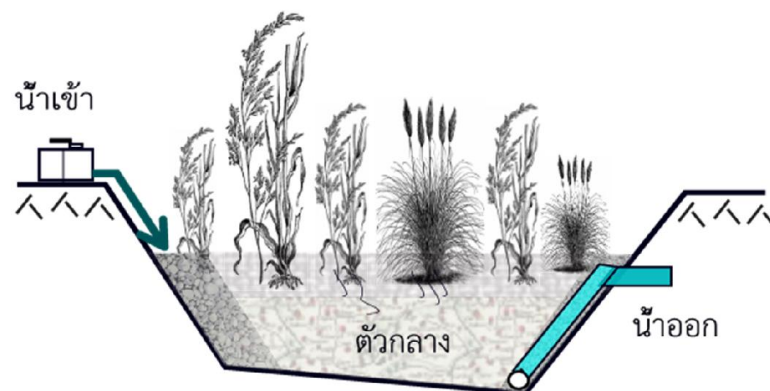
ข. พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวนอน (Subsurface Flow Systems: SF)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวชั้นกรองในแนวนอนหรือแบบไหลผ่านใต้ดินโดยทั่วไปประกอบด้วย ชั้นตัวกรองเพื่อช่วยให้พืชสามารถยึดเกาะและพืชเจริญเติบโตได้ (รูปที่ 2-7) น้ำที่ผ่านเข้ามาอยู่ใต้ผิวตัวกรองและไหลจากต้นทางของบ่อไปสู่ด้านท้าย โดยตัวกรองที่ใช้อาจเป็นหินหรือหินบด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-15 ซม.) กรวดและดินชนิดต่าง ๆ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกัน (Reed *et al.*, 1988) การไหลของน้ำเสียผ่านตัวกรองจะทำให้น้ำเสียถูกบำบัดในระหว่างสัมผัสกับผิวหน้าของตัวกรองและส่วนรากของพืช บริเวณใต้ชั้นกรองจะอึดด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic) ขึ้น

อย่างไรก็ตาม พืชยังสามารถดึงออกซิเจนเข้าไปยังส่วนราก ซึ่งทำให้จุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจน (Aerobic Microsites) สามารถเจริญเติบโตในส่วนรากและไรโซมของพืชได้ ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่ภาระสารอินทรีย์ปานกลาง โดยมีความเข้มข้นของบีโอดีอยู่ในช่วง 30-175 มก./ลิตร (U.S. EPA, 2000)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวน้ำชั้นกรองในแนวนอนมีข้อดีเช่นเดียวกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวน้ำชั้นกรองอย่างอิสระ กล่าวคือเป็นระบบที่ดูแลรักษาง่าย ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย และไม่ผลิตตะกอนที่ต้องบำบัดในขั้นต่อไป นอกจากนี้ ระบบยังสามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้มากกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวน้ำชั้นกรองอย่างอิสระและมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ดีกว่า

ข้อจำกัดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวน้ำชั้นกรองในแนวนอน คือ ค่าก่อสร้างที่สูงกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวน้ำชั้นกรองอย่างอิสระ เพราะต้องคำนึงถึงชั้นกรองและระบบท่อที่จะใช้ภายในระบบ และระบบมีข้อจำกัดในการบำบัดไนโตรเจน เพราะกระบวนการไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นได้ยากถ้าบางพื้นที่ในระบบมีสภาพไร้ออกซิเจน ดังนั้น ถ้าน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบมีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูง จำเป็นต้องมีการเพิ่มเวลาในการเก็บกัก ซึ่งจะส่งผลให้ความต้องการพื้นที่ในการก่อสร้างระบบเพิ่มมากขึ้น

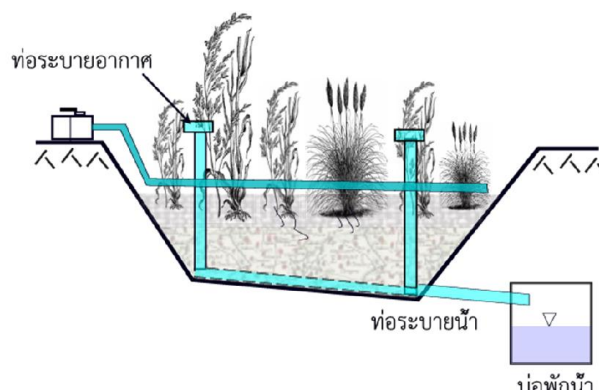


รูปที่ 2-7 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวน้ำชั้นกรองในแนวนอน (Subsurface Flow Systems: SF)

ค. พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวน้ำชั้นกรองในแนวตั้ง (Vertical Flow: VF)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลใต้ผิวน้ำชั้นกรองในแนวตั้งมีลักษณะโดยทั่วไปคล้ายกันกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ประเภท ก. และ ข. คือ ประกอบไปด้วยตัวกรองเพื่อช่วยให้พืชสามารถยึดเกาะและพืชเจริญเติบโตได้ ตัวกรองที่ใช้อาจเป็นหิน กรวด และทราย อย่างไรก็ตามหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกัน

น้ำเสียจะไหลผ่านชั้นกรองในแนวดิ่งโดยมีระบบการระบายน้ำอยู่ใต้ชั้นกรอง (Underdrain System) และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ประเภทนี้ยังมีระบบระบายอากาศ (Ventilation System) เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้มีสภาวะไร้อากาศเกิดขึ้นในส่วนรากของพืช และพื้นที่ว่างเหนือจากบริเวณผิวหน้าชั้นกรองขึ้นไป จะใช้เป็นที่สะสมกากตะกอนของเสียที่ถูกกรองน้ำออกแล้ว ระบบนี้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีภาระสารอินทรีย์สูง เช่น สิ่งปฏิกูล ได้ โดยมีความเข้มข้นของบีโอดีที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 500 – 70,000 มก./ลิตร (รูปที่ 2-8) (U.S. EPA, 2000)



รูปที่ 2-8 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลได้ผิวชั้นกรองในแนวดิ่ง (Vertical Flow: VF)

2.2.4 พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พืชในระบบทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ แลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนจากบรรยากาศสู่รากพืช (Root-zone) ทั้งยังช่วยให้แสงแดดกระทบผิวน้ำน้อยลง ซึ่งถือเป็นการป้องกันการเจริญเติบโตของพืชพืชรุกราน (Algae) ในน้ำทางอ้อม เนื่องจากพืชสามารถนำสารอาหารในน้ำเสียไปใช้ได้เพียงเล็กน้อย จึงไม่มีหน้าที่หลักในการย่อยสลายและดูดซึมสารอาหาร

หน้าที่ของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

หน้าที่หลักของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คือการลำเลียงออกซิเจน ระบบรากพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะเจริญเติบโตอยู่ในชั้นดินหรือแทรกตัวเข้าไปในชั้นกรองที่ระดับต่ำกว่าพื้นผิวประมาณ 50 – 150 ซม. โดยออกซิเจนจากบรรยากาศจะถ่ายเทเข้าสู่พืชทางใบ และลำเลียงออกซิเจนซึ่งใช้หลักการแพร่ (Diffusion) และการไหลพาของอากาศ (Convective) ลงไปยังระบบราก ทำให้สามารถลำเลียงออกซิเจนได้ดีกว่าการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียว ซึ่งหน้าที่ทั่วไปของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- การแพร่กระจายของออกซิเจน พืชนำปล่อยออกซิเจนจากรากออกสู่บริเวณรอบลำต้นใต้ดิน โดยอาศัยหลักการเคลื่อนย้ายออกซิเจนจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความ

เข้มข้นของออกซิเจนต่ำกว่า ซึ่งการซึมของออกซิเจนออกจากปลายรากทำให้เกิดการออกซิไดซ์ ซึ่งจะช่วยลดความเป็นพิษของสารพิษต่างๆ ได้ นอกจากนี้ ระบบรากของพืชบางชนิดยังสามารถปล่อยสารปฏิชีวนะซึ่งสามารถทำลายเชื้อโรคบางอย่างในน้ำเสีย หรือปล่อยสารบางอย่างที่สามารถยับยั้งการเติบโตของพืชชนิดอื่นได้ (ศุควา กานตวนิชกูร, 2544)

- การส่งผ่านออกซิเจนในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เป็นที่ยึดเกาะสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยส่วนลำต้นและใบของพืชที่อยู่ใต้น้ำจะเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ เนื้อเยื่อของพืชจะมีสาหร่ายที่สังเคราะห์แสงได้เกาะอยู่หนาแน่น รวมทั้งจุลินทรีย์และ โปรโตซัว เช่นเดียวกับรากและลำต้นใต้ดิน นอกจากนี้ยังมีไบโอฟิล์มที่เกาะกับซากพืชที่ตายแล้ว ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เช่นเดียวกัน (ศุควา กานตวนิชกูร, 2544)

- พืชในระบบจะช่วยลดความเร็วของกระแส น้ำ เพิ่มเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำเสีย และพืชให้มากขึ้น นอกจากนี้ ยังช่วยทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดีขึ้นอีกด้วย

- การดูดซับสารอาหาร พืชจะดูดสารอาหารจำนวนมากทางราก ส่วนลำต้นที่อยู่ใต้น้ำ และที่โผล่พ้นน้ำสามารถดูดสารอาหารได้เช่นเดียวกัน ซึ่งสารอาหารที่ถูกดูดซับเหล่านี้จะถูกบำบัดต่อไปโดยการตัดและการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบ อย่างไรก็ตาม พบว่าปริมาณสารอาหารที่ถูกบำบัดจากการเก็บเกี่ยวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับภาระของเสียที่เข้าสู่ระบบ แต่ถ้าระบบไม่มีการเก็บเกี่ยวพืชออกสารอาหารในพืชจะถูกปลดปล่อยออกมาสู่ระบบอีกครั้งด้วยกระบวนการย่อยสลาย (Decomposition) (ศุควา กานตวนิชกูร, 2544)

- พืชที่อยู่ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีการควบคุมการไหลของน้ำในแนวดิ่ง จะมีการเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการแผ่กระจายของรากและไรโซมไปทั่วชั้นกรองและทำให้เกิดช่องว่างขึ้นซึ่งจะช่วยป้องกันการอุดตันของชั้นกรองได้อีกทางหนึ่ง

ชนิดและลักษณะของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พืชถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยพืชที่ใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ พืชลอยน้ำ (Floating plant), พืชโผล่เหนือน้ำ (Emergent plant) และพืชใต้น้ำ (Submerged plant) ซึ่งพืชแต่ละประเภทจะมีคุณลักษณะและการเจริญเติบโตแตกต่างกันไป

พืชลอยน้ำ (Floating plant) เป็นไม้ที่สามารถปรับตัวให้เจริญเติบโตในน้ำและลอยอยู่ได้ หรือมีบางส่วนของต้นโผล่ขึ้นเหนือน้ำ ทั้งในน้ำตื้น ๆ หรือลึกเป็นเมตร โดยลำต้นมีลักษณะโป่งพองภายในกลวง ใบแผ่นแบน หรือมีรากที่เปลี่ยนเป็นนมรอบๆ ต้น และมีรากฝอยละเอียดอยู่ใต้น้ำ ตัวอย่างของพืชประเภทนี้ ได้แก่ จอก แหน กระจับ ผักตบชวา ผักบุ้ง ผักแว่น จอกหูหนู เป็นต้น

พืชโผล่เหนือน้ำ (Emergent plant) เป็นพืชที่มีรากเจริญอยู่ในดินใต้น้ำ ใบและดอกชูขึ้นเหนือน้ำ ซึ่งแต่ละชนิดก็เติบโตได้ที่ระดับน้ำต่างกัน ตัวอย่างของพืชประเภทนี้ได้แก่ บัวชนิดต่าง ๆ กกบางชนิด และกระเจียวญี่ปุ่น เป็นต้น พืชชนิดนี้นิยมใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เนื่องจากเป็นพืชที่สามารถปรับตัวและทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้ดี และสามารถปลูกได้ทั้งในพื้นที่ชุ่มน้ำและพื้นที่น้ำท่วม คุณสมบัติพิเศษของพืชประเภทนี้ คือ ส่วนใบที่อยู่เหนือน้ำสามารถนำหรือลำเลียงออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศไปยังส่วนรากพืชได้ ส่งผลทำให้ชั้นกรองในบริเวณที่รากพืชยึดเกาะไม่เกิดสภาพไร้อากาศ หน้าที่และบทบาทสำคัญในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของพืชประเภทนี้แสดงไว้ในตาราง 2-2

ตาราง 2-2 หน้าที่ของพืชโผล่เหนือน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ส่วนประกอบของพืช	บทบาทในกระบวนการบำบัด
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	- ลดความเข้มของแสง เพื่อลดการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน - ป้องกันอิทธิพลจากสภาพอากาศในฤดูหนาว - ลดความเร็วลมเพื่อป้องกันการแขวนลอยของตะกอน - ช่วยให้ระบบดูสวยงาม - สะสมอาหาร
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	- ลดความเร็วกระแส น้ำ เพิ่มอัตราการตกตะกอน - ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ กรองตะกอนขนาดใหญ่ - เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับของไบโอฟิล์ม - ปล่อย O_2 เพื่อการสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยใช้ O_2 - ดูดซับสารอาหาร
รากและระบบรากพืชในชั้นตะกอนใต้น้ำ	- ทำให้ผิวตะกอนใต้น้ำถูกกัดเซาะน้อย - ป้องกันการอุดตันของตัวกลางในระบบการไหลในแนวดิ่ง - ปล่อย O_2 เพื่อเพิ่มการย่อยสลายและการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน - ดูดซับสารอาหาร - ปล่อยสารปฏิชีวนะ (Antibiotic)

ที่มา: ศุวศา กานตวนิชกูร (2544)

พืชใต้น้ำ (Submerged plant) เป็นพืชที่มีทุกส่วนของต้นอยู่ใต้น้ำ มีรากยึดเกาะกับดิน หรืออินทรีย์วัตถุใต้น้ำ หรือลอยอยู่ในน้ำเพื่อให้ต้นทรงตัวอยู่ได้ในระดับน้ำ ตั้งแต่ 20 ซม. จนถึง 2 เมตร ตัวอย่างของพืชประเภทนี้ได้แก่ สาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายพวงกะโหลก ดีปลีน้ำ สันตะวาใบพาย เป็นต้น ถ้าระดับน้ำลึกมากๆ พืชประเภทนี้จะได้รับแสงน้อยและอาจไม่สามารถเจริญเติบโตได้

ปัจจุบันพืชส่วนใหญ่ที่นิยมปลูกในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มักจะเป็นพืชจำพวกธูปฤาษี อ้อ กก แผลก และหญ้าทรงกระเทียม เพราะพืชเหล่านี้สามารถดึงออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศได้ดี กล่าวคือ ประมาณ 5 - 45 กรัมออกซิเจน/ตร.ม.-วัน ซึ่งความสามารถในการดึงออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศของพืชจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและปริมาณออกซิเจนในดินหรือชั้นกรองด้วย (Reed *et al.*, 1988)

2.2.5 กลไกและประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถลดค่าสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก และเชื้อโรคต่าง ๆ ได้ดี กลไกพื้นฐานที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ การตกตะกอน การดูดซับ การย่อยสลายสารอินทรีย์ และสารอาหารด้วยจุลินทรีย์และการดูดซึมสารต่าง ๆ เข้าไปในพืช (U.S EPA, 1988)

กลไกการบำบัดของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) โดยทั่วไปกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดสารแขวนลอย คือ การตกตะกอน การกรอง การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และการดูดติดผิวทางเคมี สำหรับการบำบัดของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นอย่างได้ผลในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบนี้ คือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระและพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลได้ผิวชั้นกรองในแนวนอน โดยของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่จะถูกกรองออกและตกตะกอนในช่วง 2-3 เมตร แรก หลังจากนั้นน้ำเสียไหลผ่านช่องทางน้ำเข้า เข้าสู่ระบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับความนิ่งและความลึกของระดับน้ำ

กลไกการบำบัดสารอินทรีย์ (Organic compounds) สารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนใหญ่ที่เป็นของแข็งจะตกตะกอน ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ สำหรับขบวนการตกตะกอนของสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทุกแบบ และจะขึ้นอยู่กับความนิ่งของน้ำในกรณีที่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ ส่วนในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลได้ผิวชั้นกรองในแนวนอนนั้น จะขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนที่สะสมอยู่ในชั้นกรองและอัตราการซึมของน้ำผ่านชั้นกรอง หลักในการบำบัดบีโอดีในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลท่วมผิวชั้นกรองอย่างอิสระ ขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบและแหล่งออกซิเจนที่จะใช้ในปฏิกิริยาการบำบัดของเสียโดยจุลินทรีย์ ซึ่งได้มาส่วนหนึ่งจากการแพร่ของออกซิเจนจากบรรยากาศลงสู่ผิวน้ำ (Reaeration) และปริมาณออกซิเจนที่จะถูกปล่อยผ่านไปยังส่วนรากของพืช

กลไกการบำบัดไนโตรเจน (Nitrogen) โดยส่วนใหญ่แล้วไนโตรเจนจะถูกบำบัดด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ส่วนกลไกอื่น ๆ ในการบำบัดไนโตรเจน เช่น การดูดซึมไนโตรเจนเข้าไปในพืช และการระเหยของไนโตรเจนในรูปของ

แอมโมเนียสามารถบำบัดไนโตรเจนได้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับกลไกแรก ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ส่วนมากจะพบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ในสภาวะที่มีพีเอชและอุณหภูมิสูงกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic nitrogen) ไปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) เป็นขั้นตอนแรกของการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจน จากนั้นจะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ไปเป็นไนเตรตไนโตรเจน ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) โดยมีไนไตรท์ไนโตรเจน ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) เป็นสารที่อยู่ระหว่างการเกิดปฏิกิริยานี้ ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 25 – 85 (U.S. EPA, 1988)

กลไกการบำบัดฟอสฟอรัส (Phosphorus) การบำบัดฟอสฟอรัสในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะเกิดขึ้นได้ไม่มากนักเพราะข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาที่น้ำเสียสัมผัสกับดิน ดังนั้นกลไกหลักในการบำบัดฟอสฟอรัส คือ การดูดซึมฟอสฟอรัสเข้าไปในพืช และ ระยะเวลาที่น้ำเสียได้สัมผัสกับดิน (U.S. EPA, 1988) ในกรณีที่ต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงขึ้น การใช้ส่วนผสมระหว่างชั้นกรองที่มีเหล็กและอลูมิเนียมจะได้รับความนิยมค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม ชั้นกรองที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสได้ดี ต้องเป็นชั้นกรองที่มีเนื้อละเอียด โดยอาจจะมีการเติมทรายเข้าไปเพื่อช่วยปรับค่าการนำการไหล ดังนั้น การเติมเหล็กหรืออลูมิเนียมเข้าไปในชั้นกรอง หรือในน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสของระบบดีขึ้น

กลไกการบำบัดเชื้อโรค (Pathogen) เชื้อโรคส่วนใหญ่ที่พบอยู่ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ได้แก่ หนองพยาธิ, แบคทีเรีย และไวรัส เชื้อโรคจำพวกแบคทีเรียและไวรัสจะถูกบำบัดได้ด้วยกลไกต่างๆ ได้แก่ การกินกันและกัน, การตกตะกอน, การดูดซึม และการตายที่เกิดตามธรรมชาติ (Natural died off) เนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น แสงอุลตราไวโอเลต (UV) จากดวงอาทิตย์, อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมต่อการขยายพันธุ์ของเชื้อโรค เป็นต้น (U.S. EPA, 1988)

2.3 ประสิทธิภาพของพืชที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นิยมใช้พืชใล่พื้นน้ำ (Emerged Plant) ในการบำบัดน้ำเสียมากกว่าการใช้พืชลอยน้ำ (Floating Plant) เนื่องจากพืชลอยน้ำไม่สามารถทนกับอากาศ และศัตรูพืชได้ พืชที่ใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีหลายชนิดแต่ที่นิยมใช้ได้แก่ ธูปฤาษี (Cattail : *Typha* sp.) กก (Bulrush : *Scirpus* sp.) อ้อ (Reed : *Phragmites* sp.) และหญ้าแฝก (*Vetiveria* sp.) Reddy and Debusk (1987) ระบุอัตราการรับสารอาหารในพืชแต่ละชนิดดังแสดงในตาราง 2-3 โดยธูปฤาษีมีอัตราการรับสารอาหารในรูปไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงกว่ากกและอ้อ

ตาราง 2-3 ความเข้มข้นของไนโตรเจน และฟอสฟอรัส และอัตรารับสารอาหารในพืชโผล่พื้นน้ำ

พืชโผล่ พื้นน้ำ	อัตรารับสารอาหาร		สัดส่วนของสารอาหารในเยื่อ		ปริมาณพืช (ton/ha)	ผลผลิต (ton/ha/y)
	N (kg/ha/y)	P (kg/ha/y)	N (g/kg)	P (g/kg)		
ธูปฤาษี	600-2,630	75-403	5-24	0.5-4.0	4.3-22.5	8-61
กก	125	18	8-27	1-3	-	-
อ้อ	225	35	18-21	2-3	6-35	10-60

ที่มา : Reddy and Debusk, 1987

จากการรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของพืชหลายชนิดที่ใช้ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในประเทศไทย พบว่า พืชแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแตกต่างกัน ดังนี้

ธูปฤาษี สามารถลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียได้ถึงร้อยละ 89 และบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 68 (วรกร เกิดทรัพย์, 2543) บำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 98 และ 67 ตามลำดับ (กลอยกาญจน์ เก้าเนตรสุวรรณ, 2544) และมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยร้อยละ 86-92 (วรกร เกิดทรัพย์, 2543; พิรัชพล ตนานนท์, 2544)

ต้นกกสามารถลดค่า TKN ได้ร้อยละ 85-97 ลดปริมาณฟอสฟอรัสรวม (TP) ได้ร้อยละ 93-99 ลดค่าบีโอดีและปริมาณของแข็งแขวนลอยได้มากกว่าร้อยละ 60 (ศุวศา กานตวนิชกูร และคณะ, 2546; Buddhawong, 1996)

สำหรับต้นอ้อ จากการทดลองนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาดเล็ก พบว่า สามารถลดค่าบีโอดีได้ร้อยละ 85.8 ลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดลงร้อยละ 64 – 86 ลดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 17 และซีโอดีร้อยละ 94.4 นอกจากนี้ ยังสามารถบำบัดแบคทีเรียและจัดฟิโคลโลลิฟอร์มได้ร้อยละ 94 และ 99 ตามลำดับ (สุจินต์ พนาปวุฒิกุล, 2539; Urbance-Bercic and Bulc, 1995)

ส่วนหญ้าแฝก สามารถทำให้ค่าบีโอดีลดลงร้อยละ 97-98 และสามารถลดค่าไนโตรเจนทั้งหมดได้ร้อยละ 81-82 และลดปริมาณของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 93-94 (ภัทรา วงษ์พันธุ์กมล และคณะ, 2548)

ทั้งนี้ความผันแปรของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของพืชดังกล่าวในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เช่น ระบบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (FWS, SFS) อัตราการไหล ชนิดของตัวกลาง ระยะเวลาในการเก็บกักน้ำ ความเข้มข้นของมลพิษในน้ำเสีย อัตราการระบรทุกทางชลศาสตร์ เป็นต้น

2.4 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์กับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การทบทวนงานวิจัยด้านพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นแหล่งก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ทั้งพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำไหลผ่านผิวอย่างอิสระ และแบบไหลใต้ผิวดังกลาง พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองชนิดมีการใช้พืชต่างชนิดและมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซ CO_2 , CH_4 และ N_2O ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในตาราง 2-4 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกแตกต่างกันตามประเภทของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชนิดพืชที่ปลูก และปัจจัยอื่น ๆ เช่น ฤดูกาล (Zhu *et al.*, 2007; Liikanen *et al.*, 2006; Gui *et al.*, 2007) การออกแบบระบบเวลาเก็บกักน้ำ ระยะทาง (N. Zhu *et al.*, 2007; Kaewkamthong, 2002) การตัดพืช (Zhu *et al.*, 2007) การเจริญเติบโตของพืช และ biomass (Gui *et al.*, 2007 Liikanen *et al.*, 2006)

ตาราง 2-4 สรุปอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ระบบ	ที่ตั้ง	ชนิดพืช	CO_2	CH_4	N_2O	อ้างอิง
FWS	ญี่ปุ่น	<i>P. communis</i>	na	0-4 $\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$	na	Zhu <i>et al.</i> , 2007
	ฟินแลนด์	<i>S.angustifolium</i> , <i>S.papillosum</i> , <i>M. trifoliate</i> , <i>Carex lasiocarpa</i> , <i>P.palustris</i>	7,270 - 13,600 $\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$	140 - 400 $\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$	340-450 $\mu\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$	Liikanen <i>et al.</i> , 2006
FWS	นิวซีแลนด์	-	na	-50 – 1425 $\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$	na	Tanner <i>et al.</i> , 1997
	สวีเดน	<i>T. latifolia</i> , <i>P. australis</i> , <i>J. effusus</i>	1.39 - 77.5 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$	-377 - 1387 $\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$	13.9 - 31.5 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$	Ström <i>et al.</i> , 2007
	สวีเดน	<i>L. minor</i> , <i>T. latifolia</i> , <i>Spirogyra</i> sp., <i>G. maxima</i>	na	na	-350 - 1791 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$.	Johansson <i>et al.</i> , 2003
	นอร์เวย์	-	na	-1.2 - 1900 $\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$	-0.49 – 110 $\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$	Søvik and Kløve, 2007
	ไทย	<i>D. bicarnis</i> <i>T.angustifolin</i>	Na	2.7-75.7 $\text{mg m}^{-2}\text{hr}^{-1}$		Kaewkamthong, 2002

ตาราง 2-4 (ต่อ)

ระบบ	ที่ตั้ง	ชนิดพืช	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	อ้างอิง
FWS	ญี่ปุ่น	<i>P. australis</i> <i>Z. latifolia</i>	na	0-65 mg m ⁻² hr ⁻¹	0-0.14 mg m ⁻² hr ⁻¹	Inamori <i>et al.</i> , 2007
	ญี่ปุ่น	<i>T. latifolia</i> <i>Z. latifolia</i> <i>P. australis</i>	na	433-2540 mg m ⁻² d ⁻¹ 1621-6487 mg m ⁻² d ⁻¹ 1063-1697 mg m ⁻² d ⁻¹		Wang <i>et al.</i> , 2008
SFS	สาธารณรัฐ เชค	<i>P. australis</i>	4-309 mg m ⁻² h ⁻¹	0-93 mg m ⁻² h ⁻¹		Picek <i>et al.</i> , 2007
	เอสโตเนีย	<i>P. australis</i> , <i>Typha</i> <i>latifolia</i>	-6.1 - 1,050 mg m ⁻² h ⁻¹ 1	-1.7 - 87200 μgm ⁻² h ⁻¹	1-2600 μg m ⁻² h ⁻¹	Teiter and Mander, 2005
	เอสโตเนีย			31 -12,100 μg m ⁻² h ⁻¹	27 – 370 μg m ⁻² h ⁻¹	Mander <i>et al.</i> , 2005

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาใช้การวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยมีขั้นตอนและวิธีการ
ศึกษาวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ศึกษาวิจัย

บ่อทดลองบึงประดิษฐ์ออกแบบและสร้างในพื้นที่ว่างบริเวณบ้านพักบุคลากร มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา (รูปที่ 3-1)



รูปที่ 3-1 สถานที่ก่อสร้างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2 ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

เนื่องจากลักษณะสมบัติของน้ำเสียชุมชนโดยทั่วไปแล้วมักมีการผันแปรค่อนข้างสูง ทั้งการ
ผันแปรตามระยะเวลา ฤดูกาลและสถานที่ การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงจำเป็นต้องควบคุมการผันแปร

ดังกล่าวให้น้อยที่สุด การใช้น้ำเสียสังเคราะห์ (Synthetic wastewater) จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษา มีองค์ประกอบดังนี้คือ Glucose, FeCl_3 , NaHCO_3 , KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, และ Urea (Sirianuntapiboon, 2000) ซึ่งรายงานว่าคล้ายคลึงกับน้ำเสียชุมชน โดยทั่วไปของประเทศไทย

ความเข้มข้นของสารที่เป็นองค์ประกอบในการผลิตน้ำเสียสังเคราะห์ มีดังนี้

Glucose	190 mg/L	FeCl_3	0.31 mg/L
NaHCO_3	6.7 mg/L	KH_2PO_4	6.0 mg/L
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3.9 mg/L	Urea	9.0 mg/L

น้ำเสียสังเคราะห์ถูกปล่อยเข้าสู่แบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทุกวัน โดยใช้หลักการ Gravimetric flow และควบคุมอัตราการไหลระบบวาล์ว ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง ทำการวิเคราะห์ในช่วงการทดลองมีค่าที่นำไปใช้กับระบบชุ่มน้ำประดิษฐ์แสดงในตาราง 3-1

ตาราง 3-1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

ลักษณะสมบัติ	ช่วงค่า (mg/L)	ค่าเฉลี่ย (mg/L)
BOD	115-210	167
COD	17-23	20
TP	0.03-0.33	0.14
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.28-0.35	0.32

3.3 การเตรียมพืช

พืชที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มี 3 ชนิด คือ กก (*Cyperus* sp.) อ้อ (*Phragmites* sp.) และ พุทธรักษา (*Canna* sp.) (รูปที่ 3-2) ในแต่ละบ่อปลูกพืชเพียงหนึ่งชนิด โดยปลูกเรียงกัน 3 แถว ตามแนวความกว้าง และเว้นระยะห่างระหว่างต้นประมาณ 0.25 เมตร ตลอดความยาวของบ่อ เมื่อปลูกพืชเรียบร้อยแล้ว จึงปล่อยน้ำประปาเข้าสู่แบบจำลอง ชั่งทิ้งไว้ประมาณ 2 สัปดาห์ เพื่อให้พืชฟื้นตัว จากนั้นจึงค่อย ๆ ปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่แบบจำลองทีละน้อย แล้วค่อย ๆ เพิ่มความเข้มข้น เพื่อให้พืชปรับตัวได้ จนกระทั่งพืชสามารถรับน้ำเสียสังเคราะห์ได้ ซึ่งใช้เวลาในช่วงเริ่มต้น (Start-Up) ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ประมาณ 3-4 สัปดาห์



รูปที่ 3-2 ชนิดพืชที่ปลูกในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (ก) กก (ข) อ้อ และ (ค) พุทธรักษา

3.4 การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการศึกษาค้างนี้ เป็นไปตามหลักเกณฑ์แนวทางการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งกำหนดโดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) (U.S. EPA, 2000) และ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology : AIT) (AIT, 2007)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยสร้างขึ้นทั้งสิ้น 12 บ่อ ประกอบด้วย พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Free water surface flow) จำนวน 8 บ่อ และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (Subsurface flow) จำนวน 4 บ่อ ค่าการออกแบบแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดักกลาง คำนวณจากสูตรของ Lim and Polprasert (1996) และ Metcalf and Eddy (1991) ในสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ รายละเอียดค่าการออกแบบที่คำนวณจากสมการดังกล่าวแสดงในตาราง 3-2

- พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

$$HRT = \frac{LW(d_m + d_w)}{Q} \quad (3.1) \quad (\text{Lim and Polprasert, 1996})$$

โดยที่

HRT	=	ระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์ (hydraulic retention time, d)
L	=	ความยาว (basin length, m)
W	=	ความกว้าง (basin width, m)
d_m	=	ความลึกของชั้นดักกลาง (media depth, m)
d_w	=	ความลึกของระดับน้ำจากผิวดักกลาง (water depth from media surface, m)

n = สัดส่วนช่องว่างของตัวกลางที่ใช้ (void fraction in the media (as a decimal fraction))

Q = อัตราการไหล (average flow through the unit, m^3/d)

- พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง

$$\text{HRT} = \frac{LWnD}{Q} \quad (3.2) \text{ (Metcalf \& Eddy, 1991)}$$

โดยที่

HRT = ระยะเวลาเก็บกักทางชลศาสตร์ (hydraulic retention time, d)

L = ความยาว (basin length, m)

W = ความกว้าง (basin width, m)

D = ความลึกของชั้นตัวกลาง (media depth, m)

n = สัดส่วนช่องว่างของตัวกลางที่ใช้ (void fraction in the media (as a decimal fraction))

Q = อัตราการไหล (average flow through the unit, m^3/d)

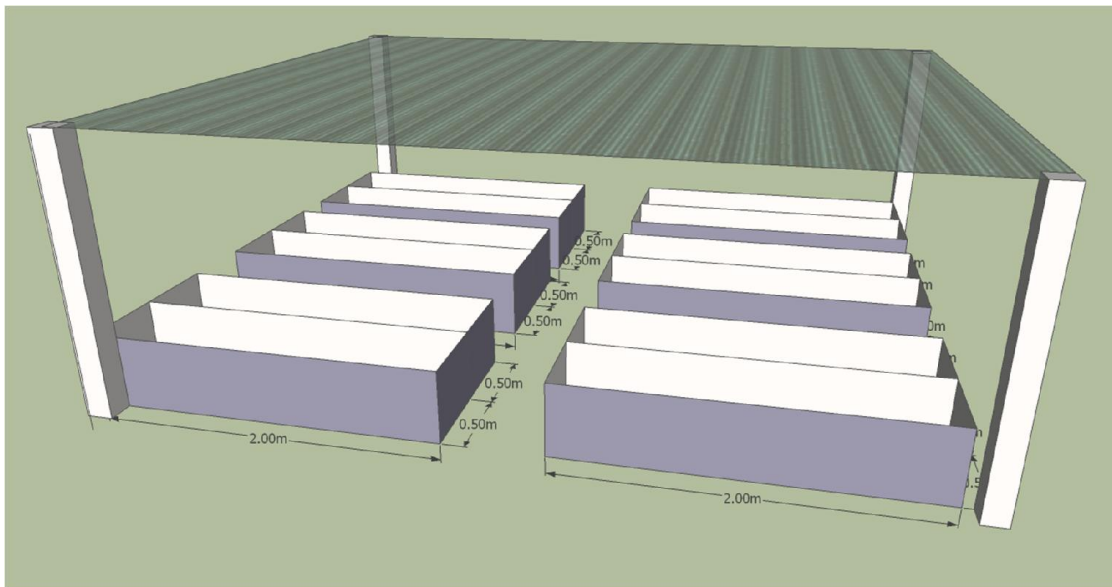
ตาราง 3-2 รายละเอียดการออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

รายละเอียด	ประเภทของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	
	แบบไหลผ่านพื้นผิว	แบบไหลใต้ผิวดักกลาง
ความยาว (เมตร)	2 m	2 m
ความกว้าง (เมตร)	0.5 m	0.5 m
อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง	4:1	4:1
ความสูงของตัวกลาง (เมตร)	0.45 m	0.65 m
ระดับความลึกของน้ำเสีย (เมตร)	0.20 m	0.55 m
อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)	0.04	0.04
ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (วัน)	9	4.5

จากการคำนวณค่าการออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ดังสมการข้างต้น ได้นำค่าต่าง ๆ มาใช้ในการก่อสร้างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดักกลาง ดังต่อไปนี้

- พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว มีลักษณะเป็นบ่อคอนกรีตสี่เหลี่ยม โดยแต่ละบ่อมีขนาดกว้าง × ยาว × ลึก เท่ากับ 0.5 เมตร × 2.0 เมตร × 0.8 เมตร พื้นบ่อสร้างให้มีความลาดชันประมาณร้อยละ 1 จากบริเวณทางน้ำเข้าไปสู่บริเวณทางน้ำออก เพื่อช่วยให้น้ำไหลได้สะดวก หลังจากนั้นนำหินที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว และดินปนทราย ใส่ลงในแบบจำลองให้มีระดับความสูง 0.2 เมตร และ 0.25 เมตร ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนช่องว่างเท่ากับ 0.4 และปรับระดับพื้นบ่อให้ราบเรียบสม่ำเสมอ
- พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง มีลักษณะเป็นบ่อคอนกรีตสี่เหลี่ยม โดยแต่ละบ่อมีขนาดกว้าง × ยาว × ลึก เท่ากับ 0.5 เมตร × 2.0 เมตร × 0.8 เมตร พื้นบ่อสร้างให้มีความลาดชันประมาณร้อยละ 1 จากบริเวณทางน้ำเข้าไปสู่บริเวณทางน้ำออก หลังจากนั้นนำหินที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 1 นิ้ว ใส่ลงในแบบจำลองบริเวณช่วงต้น และช่วงท้ายของแบบจำลองโดยมีความกว้างของชั้นหินเท่ากับ 0.15 เมตร ส่วนบริเวณที่ทำการปลูกพืชนำหินที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว และดินปนทราย ใส่ลงในแบบจำลองให้มีระดับความสูงของชั้นหินและชั้นดินเท่ากับ 0.65 เมตร จากนั้นปรับระดับพื้นบ่อให้ราบเรียบสม่ำเสมอ

ทั้งนี้ ได้มีการก่อสร้างโครงหลังคาแบบถาวรและใช้แผ่นลอนพลาสติกมุงหลังคาแบบโปร่งแสง เพื่อป้องกันมิให้น้ำฝนไหลเข้ามาปะปนในบ่อทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3-3 และ 3-4



รูปที่ 3-3 แบบร่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3-4 โครงหลังคาโปร่งแสงคลุมพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

3.5 การออกแบบการทดลอง

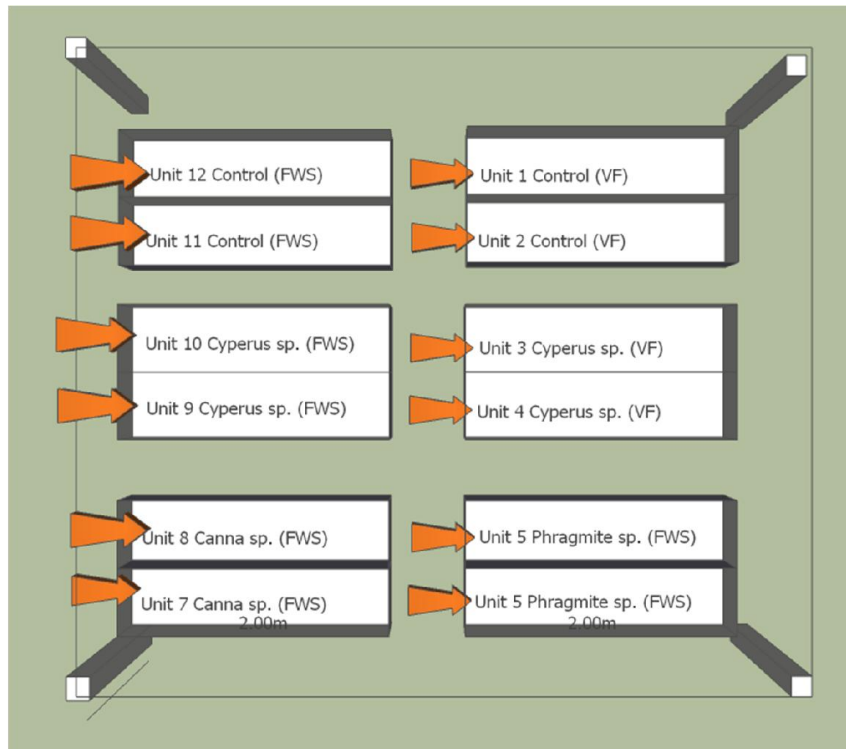
ด้วยการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ควบคู่กับการประเมินอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2 , CH_4 , N_2O) ของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่มีความแตกต่างในด้านชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ และชนิดพืช ซึ่งเป็นการศึกษาที่ต้องการค้นหาคำตอบในหลายประเด็นพร้อม ๆ กัน จึงได้ออกแบบการทดลองให้สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าว โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด ควบคู่กัน คือ

ชุดที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ควบคู่กับการประเมินอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แต่ละชนิด โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) และแบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) ซึ่งพืชที่ใช้ในการทดลองชุดนี้ คือ กก (*Cyperus* sp.) ในชุดการทดลองนี้จึงประกอบด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว จำนวน 2 บ่อ และ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง จำนวน 2 บ่อ

ชุดที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ควบคู่กับการประเมินอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกพืชต่างชนิดกัน โดยชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองชุดนี้ คือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และพืชที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ มี 3 ชนิด คือ กก (*Cyperus* sp.) อ้อ (*Phragmites* sp.) และพุทธรักษา (*Canna* sp.) ในชุดการทดลองนี้จึงประกอบด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว จำนวน 6 บ่อ ซึ่งจำแนกเป็นปลูกกก 2 บ่อ ปลูกอ้อ 2 บ่อ และปลูกพุทธรักษา 2 บ่อ

ชุดที่ 3 เป็นชุดควบคุม (Control unit) ประกอบด้วย แบบจำลองที่มีลักษณะคล้ายกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว จำนวน 2 บ่อ และ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง จำนวน 2 บ่อ ทุกบ่อของชุดควบคุมทั้งหมดไม่มีการปลูกพืช

แผนผังของแบบจำลองสำหรับการทดลองทั้ง 3 ชุดแสดงในรูปที่ 3-5 ลูกศรแสดงทางเข้าและทิศทางการไหลของน้ำเข้าสู่ชุดทดลอง



รูปที่ 3-5 แผนผังพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์และชนิดพืช

3.6 การศึกษาลักษณะการไหลในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

การศึกษาถึงลักษณะการกระจายของการไหลของแบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ใช้วิธีการศึกษาสารติดตามโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (เกลือ) ที่มีระดับคุณภาพการวิจัย (Research grade) เป็นสารติดตามในการคำนวณค่าการกระจายตัวของการไหลตามสมการของ Levenspiel (1992)

$$\text{ระยะเวลาเก็บกักเฉลี่ย (Mean Retention Time)} \quad T_{\text{mean}} = \frac{\sum tiCi\Delta t}{\sum Ci\Delta t} \quad (3.3)$$

$$\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน} \quad \sigma^2 = \frac{\sum ti^2Ci\Delta t}{\sum Ci\Delta t} - T^2 \quad (3.4)$$

ดังนั้น
$$\frac{\sigma^2}{T^2} = 2d + 8d^2 \quad (3.5)$$

ค่าการกระจายของการไหล (Dispersion Number, d) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$d = \frac{D}{\mu L_1} \quad (3.6)$$

โดยที่ t_i = ระยะเวลาหนึ่งที่สารละลายออกจากระบบ

C_i = ความเข้มข้นของ Cl^- ที่ออกจากระบบที่เวลาหนึ่ง

Δt = ช่วงเวลาที่สารละลายออกจากระบบ

D = สัมประสิทธิ์การไหลตามแนวแกน

μ = อัตราเร็วการไหล

L_1 = ระยะทางของไหลจากทางเข้าถึงทางออก

ค่าการกระจายของการไหล (d) ดังกล่าว สามารถบ่งบอกถึงลักษณะต่าง ๆ ได้ดังแสดงในตาราง 3-3

ตาราง 3-3 ค่าการกระจายของการไหล (d) กับลักษณะการไหล

ค่าการกระจายของการไหล (d)	ลักษณะการไหล
0	การไหลแบบท่อ
0.002	การกระจัดกระจายมีน้อย
0.025	การกระจัดกระจายปานกลาง
0.2	การกระจัดกระจายมีมาก
∞	การไหลแบบกวนสมบูรณ์

ที่มา : Levenspiel (1972)

3.7 การวัดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การวัดอัตราการปล่อยก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์ดำเนินการโดยใช้ระบบแบบกล่องปิด (Closed Chamber) ตามวิธีการของ Hutchingson and Moiser (1981) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ฐานอลูมิเนียมและกล่องอะคริลิก โดยฐานอลูมิเนียมมีลักษณะเป็นกรอบสี่เหลี่ยม และเขาให้เก็ตร่องตรงกลางขนาดความกว้าง 4 มิลลิเมตร สำหรับรองรับกล่องอะคริลิก (รูปที่ 3-6)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-6 ฐานอลูมิเนียมสำหรับรองรับกล่องอะคริลิก

กล่องอะคริลิก ผลิตจาก Acrylic ใส มีความหนา 3 มิลลิเมตร สร้างเป็นกล่องปิด มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม มีพื้นที่หน้าตัด 0.25 เมตร X 0.25 เมตร ความสูง 1.5 เมตร ป้องกันก๊าซรั่วซึม โดยใช้กาวร้อนและปิดทับด้วยซิลิโคนตามแนวรอยต่อด้านบนและด้านข้างของกล่องอะคริลิก ทั้งนี้ ได้มีการติดตั้งพัดลมขนาดเล็ก เพื่อช่วยผสมอากาศภายในกล่องให้หมุนเวียนอย่างทั่วถึง พร้อมทั้งติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศภายในกล่องอะคริลิก

การเก็บตัวอย่างก๊าซ เริ่มต้นโดยวางกล่องอะคริลิก ครอบบนฐานอลูมิเนียม ซึ่งนำมาวางและกดลึกลงไปในชั้นหน้าดินประมาณ 3-5 เซนติเมตร ก่อนการทดลอง 1 วัน ทั้งนี้ ในพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินได้ มีการหล่อน้ำบริเวณรอบฐานอลูมิเนียมเพื่อป้องกันการรั่วซึมของก๊าซระหว่างรอยต่อของกล่องอะคริลิกกับฐานอลูมิเนียม ในแต่ละบ่อทดลองได้วางกล่องอะคริลิกไว้ตามจุดต่างๆ จำนวน 3 จุด คือ บริเวณช่วงต้นบ่อ (จุดน้ำเสียเข้า) ช่วงกลาง และท้ายบ่อ (จุดน้ำเสียออก) ดังรูปที่ 3-7 ระหว่างการเก็บตัวอย่างก๊าซในกล่องอะคริลิก ได้เปิดพัดลมเพื่อให้อากาศหมุนเวียนตลอดระยะเวลาช่วงเก็บตัวอย่าง อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างก๊าซคือ หลอดฉีดยา ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และเข็มฉีดยา เบอร์ 25G ตัวอย่างก๊าซที่อยู่ในกระบอกฉีดยาถูกถ่ายเทและบรรจุลงขวดแก้วสุญญากาศ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดด้วยจุกยาง (rubber septum) และฝาครอบอลูมิเนียม (aluminium cap) จากนั้นปิดทับด้วยกาวซิลิโคนเพื่อป้องกันการรั่วซึม จากนั้นจึงแช่ขวดเก็บตัวอย่างก๊าซในกล่องโฟมเพื่อควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3-7 การวาง Chamber ในบ่อทดลองช่วงต้นบ่อ ช่วงกลาง และท้ายบ่อ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3-8 อุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่าง ได้แก่ (ก) หลอด-เข็มฉีดยา (ข) ขวดแก้ว (ค) กล่องโฟมขนส่งตัวอย่างและควบคุมอุณหภูมิ

ในการศึกษาครั้งนี้ กำหนดเก็บตัวอย่างก๊าซเป็นระยะเวลา 12 เดือน ดำเนินการเดือนละ 1 ครั้ง และเพื่อลดกระทบอันเกิดจากความแปรปรวนในรอบวัน (diurnal variation) ได้กำหนดเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์ ในช่วงเวลาเดียวกัน คือ 8.00-10.00 น. ตลอดการทดลอง ขณะที่การตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการในช่วงเวลา 18.30-20.30 เพื่อหลีกเลี่ยงกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช

ก๊าซที่บรรจุในหลอดเก็บตัวอย่างถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์ ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (HP 6890) FID/ μ ECD Detectors ก๊าซมาตรฐานมีเทนได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิต (Thai Industrial Gas) ส่วนก๊าซมาตรฐานไนตรัสออกไซด์ต้องนำเข้าจาก Scott Specialty Gas (UK) ทั้งนี้ เงื่อนไขของการควบคุมเครื่องมือมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์ก๊าซมีเทนใช้ Flame Ionization Detector (GC/FID) คอลัมน์ Poraplot Q capillary column (10 เมตร x 0.32 มิลลิเมตร) มีสถานะในการวิเคราะห์ดังนี้

Column temperature 40 องศาเซลเซียส

Injection temperature 250 องศาเซลเซียส

FID detector temperature 300 องศาเซลเซียส

Carrier gas (N_2) flow 20 มิลลิลิตร/นาที

split ratio 0.7:1

split flow 15.0 มิลลิลิตร/นาที

สำหรับวิเคราะห์ก๊าซไนตรัสออกไซด์ใช้ Electron Capture Detector (GC/ μ ECD) คอลัมน์ HP-Plot Q column (15 เมตร x 0.53 มิลลิเมตร) มีสถานะในการวิเคราะห์ดังนี้

Column temperature 180 องศาเซลเซียส

μ ECD detector temperature 300 องศาเซลเซียส

Carrier gas (N_2) flow 15 มิลลิลิตร/นาที

ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตรวจวัดโดยใช้ CO_2 analyzer (LI-COR, Inc., USA) ซึ่งเป็นการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในกล่องอะคริลิกโดยตรง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบได้ค่าจริง (Real time) (รูปที่ 3-8)



รูปที่ 3-9 CO₂ analyzer และจอมอนิเตอร์แสดงผลการวิเคราะห์

การประเมินค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยพื้นที่ คำนวณจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ ใน Chamber ต่อหน่วยเวลาและพื้นที่ ดังแสดงในสมการ เป็นการประเมินโดยใช้ความสัมพันธ์แบบ Linear regression ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซที่สนใจกับเวลาที่เก็บตัวอย่าง ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีนัยทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ร่วมกับปริมาตรของกล่องอะคริลิก (Chamber) ที่ใช้เก็บก๊าซ และอุณหภูมิระหว่างการเก็บตัวอย่าง (Healy *et al.*, 1996) ผลการคำนวณอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกดังกล่าว แสดงในหน่วย $\text{mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ หากในระหว่างการเก็บตัวอย่าง พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซที่สนใจกับเวลาที่เก็บตัวอย่าง ไม่เป็นไปตามลักษณะของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ข้อมูลดังกล่าวจะไม่นำมาใช้ในการพิจารณา (Altor and Mitsch, 2006)

$$E = \frac{XhM}{RT}$$

โดยที่ E = อัตราการปลดปล่อยก๊าซ ($\text{mg m}^{-2}\text{hr}^{-1}$)

X = การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซภายใน chamber (ppm hr^{-1})

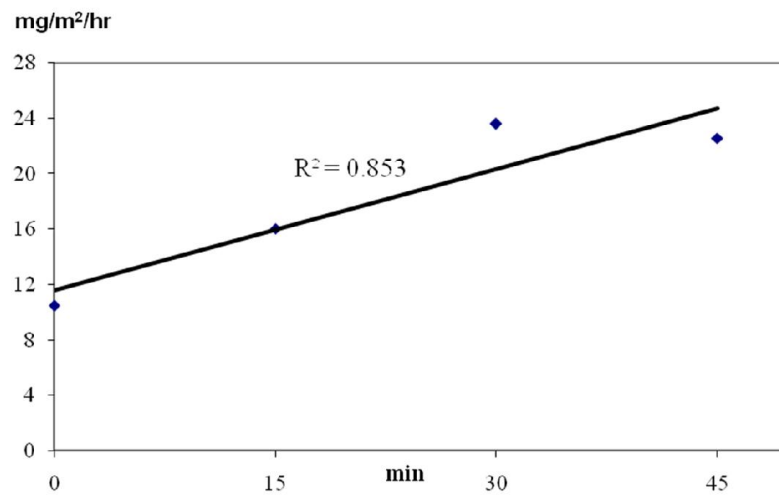
h = ความสูงของ chamber (m)

M = มวลโมเลกุลของก๊าซที่สนใจ

R = ค่าคงที่ของก๊าซ = $0.0821 (\text{m}^3 \text{atm K}^{-1} \text{mol}^{-1})$

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ความดันบรรยากาศ = 1 atm.



รูปที่ 3-10 ตัวอย่างความสัมพันธ์แบบ linear regression ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซที่สนใจกับเวลาที่เก็บตัวอย่าง

ข้อมูลอื่นๆ

ก. ค่าความเป็นกรดต่างของดินและน้ำ โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง HANNA instruments ที่ระดับความลึกของดินประมาณ 5 เซนติเมตร จากผิวดิน และวัดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำที่ระดับความลึกประมาณ 5 เซนติเมตร จากผิวน้ำ

ข. อุณหภูมิของดิน น้ำ และอากาศ โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์สเกล 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส วัดอุณหภูมิของดินที่ระดับความลึกของดินประมาณ 5 เซนติเมตร จากผิวดิน วัดอุณหภูมิของน้ำที่ระดับความลึกประมาณ 5 เซนติเมตร จากผิวน้ำ วัดอุณหภูมิของอากาศภายในกล่องเก็บตัวอย่างก๊าซ ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ที่ติดอยู่บริเวณส่วนบนของกล่อง และวัดอุณหภูมิของอากาศในบรรยากาศปกติ

3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

เมื่อปล่อยน้ำเสียลงสู่บ่อทดลองจนถึงสภาวะคงที่ (Steady-State Conditions) แล้วจึงนำน้ำตัวอย่างทั้งก่อนและหลังผ่านการบำบัดมาวิเคราะห์ โดยลักษณะสมบัติ และวิธีวิเคราะห์ ดังแสดงในตาราง 3-4

ตาราง 3-4 วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสีย

ลักษณะสมบัติน้ำเสีย	วิธีวิเคราะห์
BOD ₅	Dilution method
COD	Open Reflex method
NH ₃	Phenate method
TP	Ascorbic Acid method

ที่มา Standard Method for Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF, 2005)

3.9 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ลักษณะของดิน

เก็บตัวอย่างดินที่ชั้นความลึกต่าง ๆ โดยใช้ soil core จากนั้นนำตัวอย่างดินมาผึ่งให้แห้งในอุณหภูมิห้อง (air dry) เมื่อแห้งดีแล้ว นำมาร่อนโดยใช้ตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

ตัวอย่างดินที่เตรียมเรียบร้อยแล้ว ถูกนำมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่าง ๆ ตามหลักการที่ยังคงใช้อยู่ในปัจจุบันของ Black (1965) คือ วัดค่าของความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) และลักษณะของเนื้อดิน (Soil texture) ดังแสดงวิธีการวิเคราะห์ในตารางที่ 3-5

ตาราง 3-5 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของดิน

คุณสมบัติของดิน	วิธีวิเคราะห์
1. เนื้อดิน	Hydrometer Method
2. ค่าความเป็นกรดต่างของดิน	1:1 of Soil : Water
3. อินทรีย์วัตถุ	Walkley-Black method

3.10 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้โปรแกรม SPSS Version 13 ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของพืชชนิดต่าง ๆ ในการลดค่ามลพิษ ได้แก่ สารอินทรีย์ในรูปบีโอดี ซีโอดี แอมโมเนีย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสรวม ตลอดจนการเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสามชนิด

คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนตรัสออกไซด์ ที่ปล่อยจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่าน
พื้นผิวและไหลใต้ดินของพืชสามชนิด การวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบทางสถิติด้วยเทคนิคการ
วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

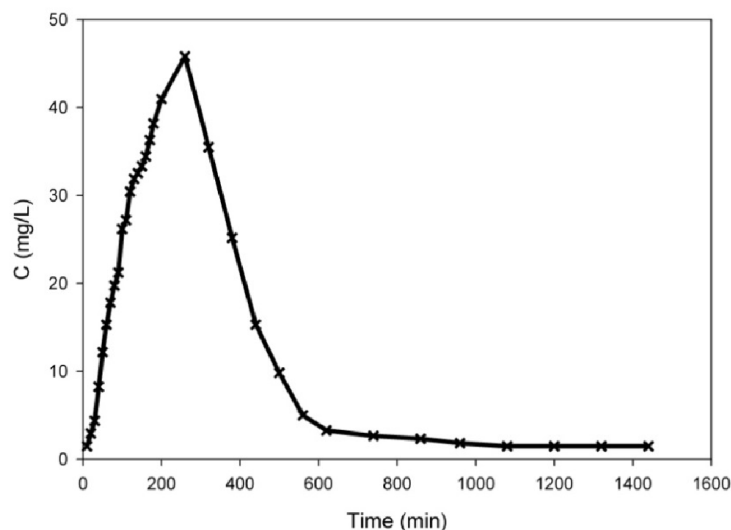
บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผลการศึกษา

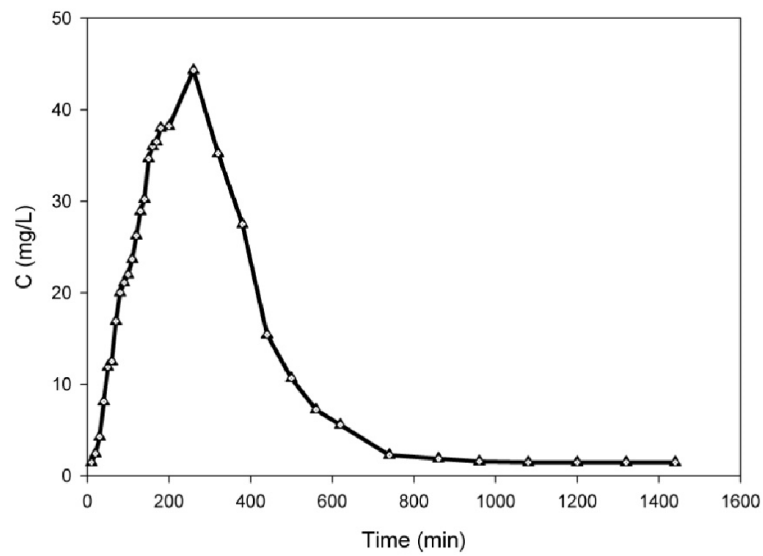
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CH_4 , N_2O , CO_2) จากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำภายในบ่อดูด

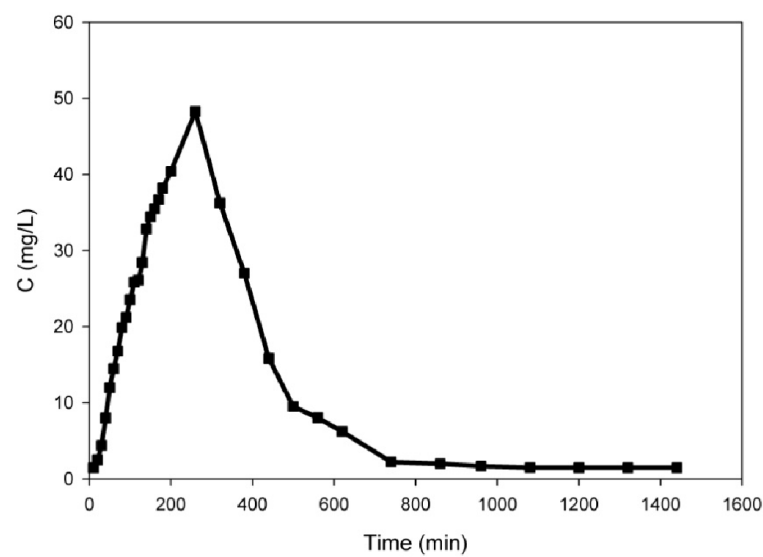
การศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำภายในบ่อของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่สร้างขึ้น ใช้สารติดตาม (Tracer) ที่เป็นสารละลายคลอไรด์ตามวิธีการแบบ Slug Feed ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ถูกวัดอย่างต่อเนื่องที่จุดน้ำออกจากระบบ และนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.3 ถึง 3.6 ความเข้มข้นเริ่มต้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ 600 mg/L ที่อัตราการไหล 58 L/h และ 30.25 L/h สำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และแบบไหลใต้ผิวดินตามลำดับ ค่าที่ทดลองได้แสดงความสัมพันธ์ดังภาพที่ 4-1 – 4-4 การคำนวณหาค่า T_{mean} และ ค่าตัวเลขการกระจาย (Dispersion Number, d) แสดงในตารางที่ 4-1



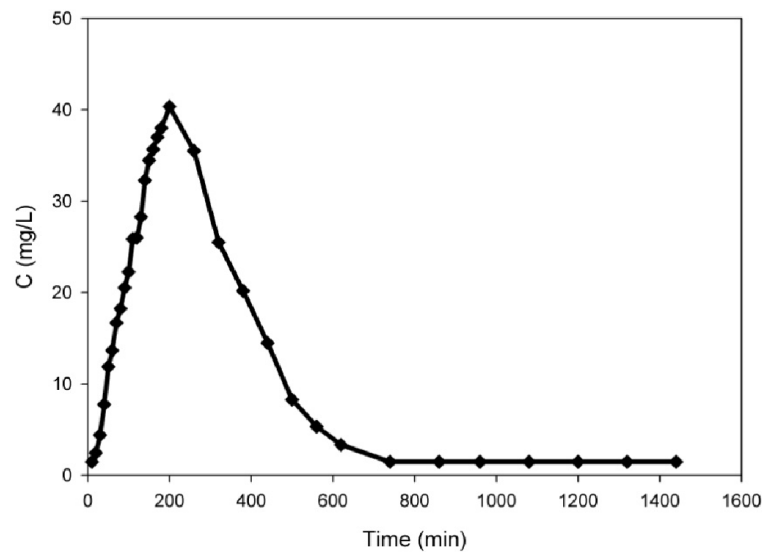
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์ กับเวลาสำหรับบ่อดูดที่ปลูกกกในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน (SF)



รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคลอไรด์ กับเวลาสำหรับอ้อในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)



รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคลอไรด์ กับเวลาสำหรับพืชรักษาในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคลอไรด์ กับเวลาสำหรับกกในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)

รูปที่ 4-1 – 4-4 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคลอไรด์กับเวลา พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นของสารติดตามที่เหลือน้อยจะค่อย ๆ สะสม และเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด จากนั้นจะลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ โดยแนวโน้มที่เกิดขึ้นเป็นไปในลักษณะเดียวกันทุกระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ทดลอง

ตาราง 4-1 สรุปค่าที่ได้จากการศึกษาสารติดตาม

ระบบบึงประดิษฐ์/พืช	HRT (ชม.)	Actual HRT (ชม)	Dispersion Number (วัน)
SF-CW / <i>Cyperus</i> sp.	6.0	5.88	0.18
FWS/ <i>Phragmite</i> sp.	6.0	5.96	0.17
FWS/ <i>Canna</i> sp.	6.0	5.94	0.17
FWS / <i>Cyperus</i> sp.	6.0	5.83	0.19

จากตารางที่ 4-1 พบว่า ค่าตัวเลขการกระจาย (d) ของแต่ละบึงประดิษฐ์แต่ละระบบมีค่าใกล้เคียงกัน และค่า T ทฤษฎี > Tmean ที่ได้จากการทดลอง โดยค่าตัวเลขการกระจาย (d) ของ

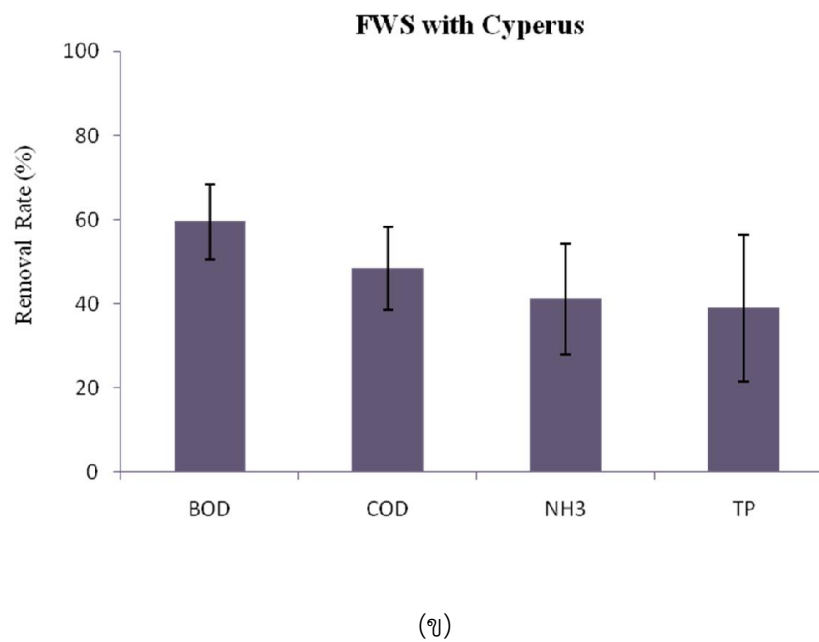
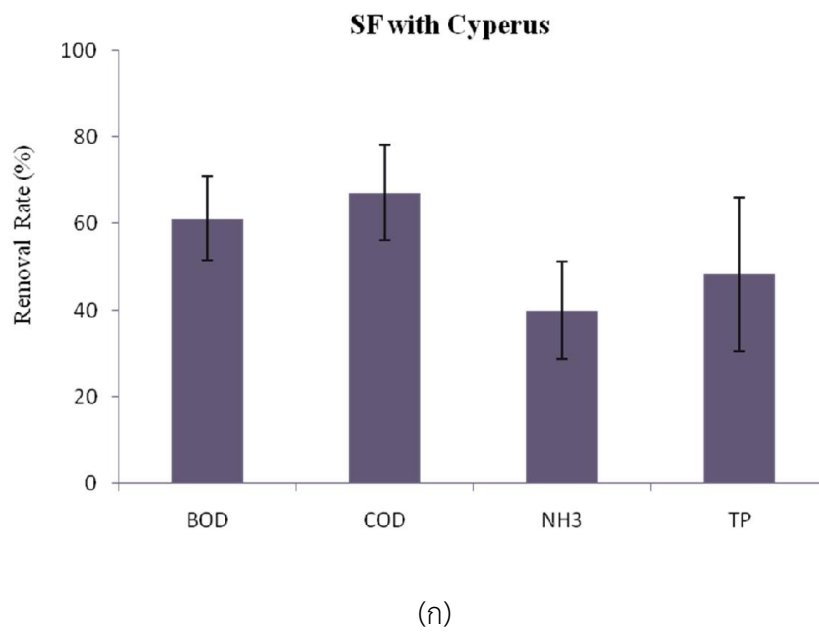
พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าระหว่าง 0.17 - 0.19 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าในตาราง 3-3 พบว่า เกิดสภาวะการไหลแบบท่อ (Plug Flow) แต่เป็นการไหลที่มีลักษณะแบบกระจายกระจายค่อนข้างมาก ทั้งนี้ เนื่องจากการรบกวนการไหลจากต้นพืช คือ กก อ้อ และพุทธรักษา ทำให้เกิดการไหลเบี่ยงเบนไปบ้างในระบบของบ่อที่ใช้ในการทดลอง

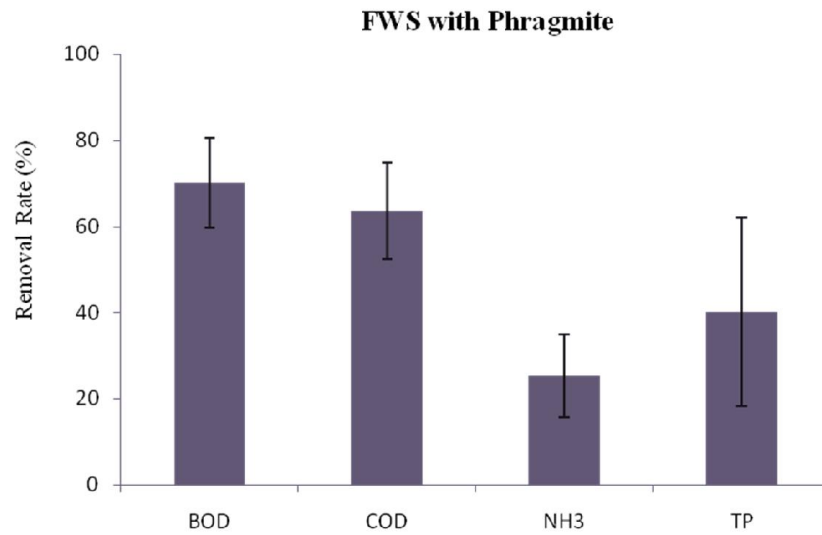
4.2 ประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดมลพิษ

4.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

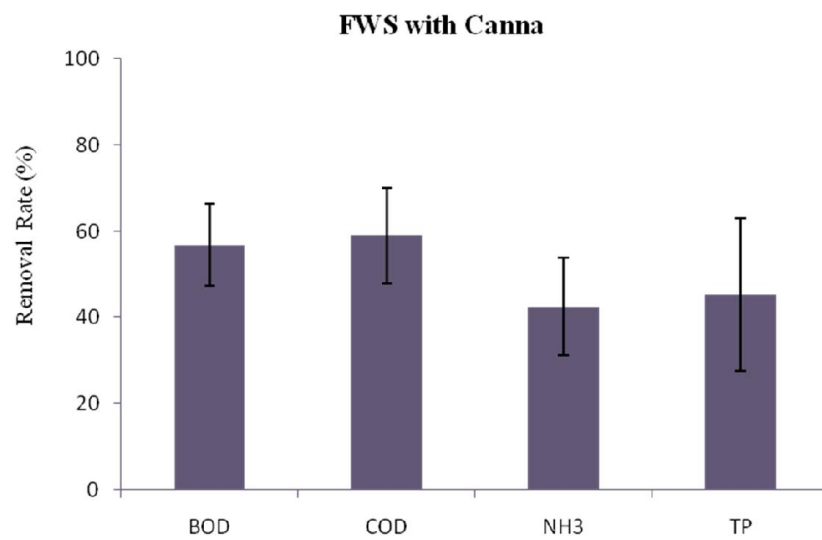
การวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้าและน้ำออกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และแบบไหลใต้ผิวดักกลาง ดำเนินการเป็นประจำทุกเดือนๆ ละ 2 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยพิจารณาจากค่าร้อยละของการบำบัดมลพิษ ได้แก่ บีโอดี (BOD), ซีโอดี (COD), แอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) และฟอสฟอรัสรวม (TP) ผลการทดลองสามารถสรุปประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ แต่ละประเภท ได้ดังนี้ (รูปที่ 4-5)

- พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus sp.*) มีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี (ร้อยละ 67) สูงที่สุด รองลงมาคือ สารอินทรีย์ในรูปบีโอดี (ร้อยละ 61) ฟอสฟอรัสรวม (ร้อยละ 48) และแอมโมเนียไนโตรเจน (ร้อยละ 40) ตามลำดับ
- พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite sp.*) มีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี (ร้อยละ 70) สูงที่สุด รองลงมาคือ สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี (ร้อยละ 64) ฟอสฟอรัสรวม (ร้อยละ 40) และแอมโมเนียไนโตรเจน (ร้อยละ 25) ตามลำดับ
- พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna sp.*) มีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี (ร้อยละ 59) สูงที่สุด รองลงมาคือ สารอินทรีย์ในรูปบีโอดี (ร้อยละ 57) ฟอสฟอรัสรวม (ร้อยละ 45) และแอมโมเนียไนโตรเจน (ร้อยละ 42) ตามลำดับ
- พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus sp.*) มีประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี (ร้อยละ 60) สูงที่สุด รองลงมาคือ สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี (ร้อยละ 48) ฟอสฟอรัสรวม (ร้อยละ 39) และแอมโมเนียไนโตรเจน (ร้อยละ 48) ตามลำดับ





(ค)

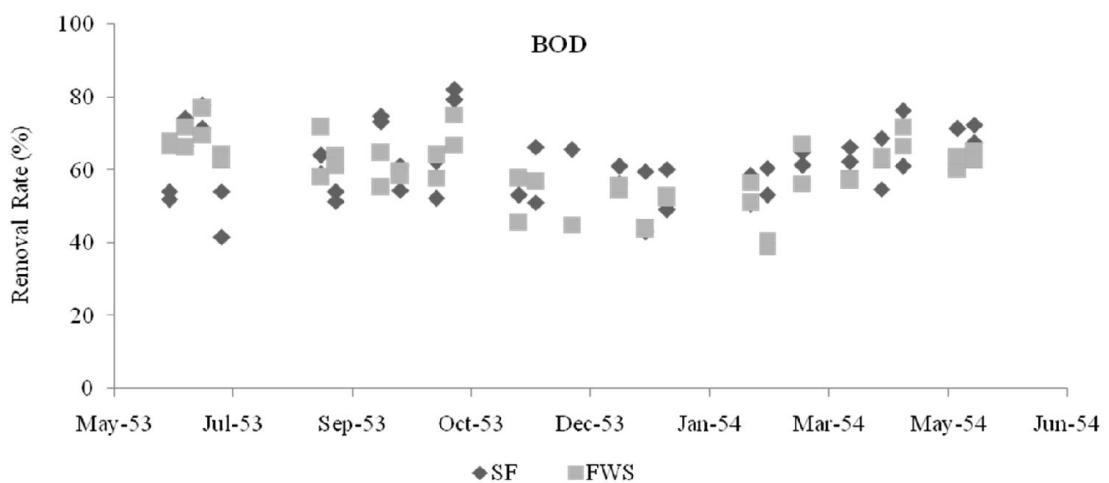


(ง)

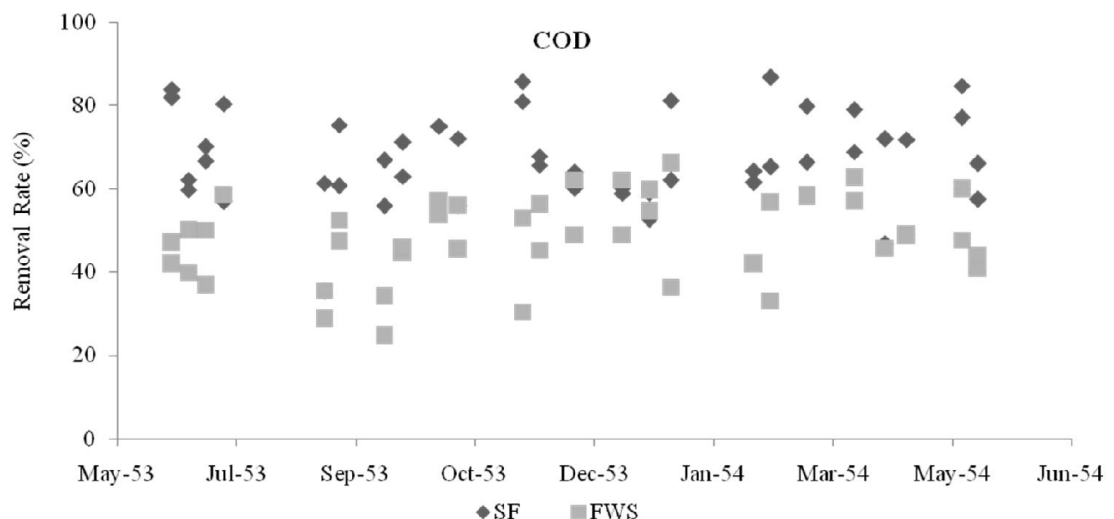
รูปที่ 4-5 ประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

4.2.2 ประเภทของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์กับประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษ

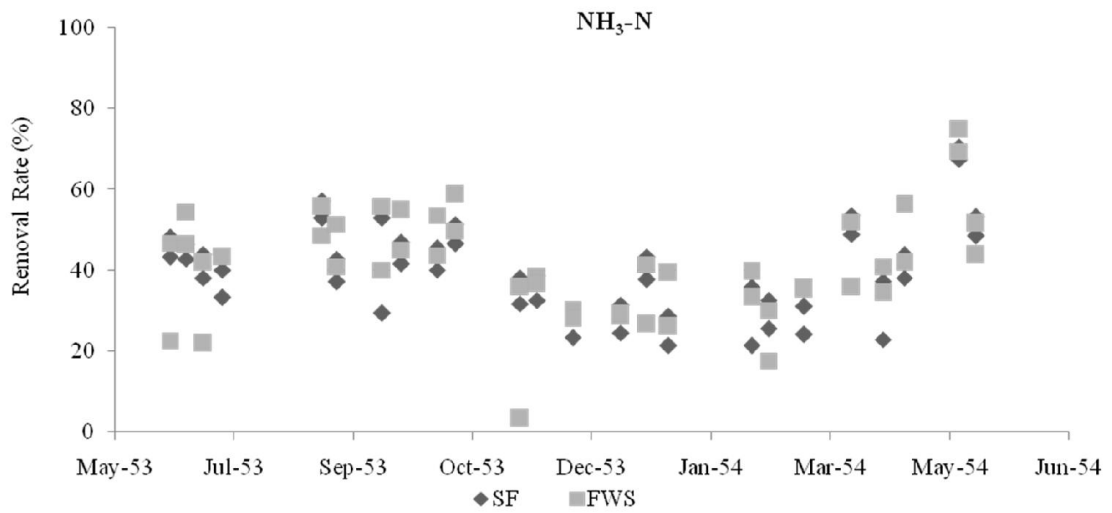
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แต่ละชนิด โดยทำการศึกษเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และแบบไหลผ่านพื้นผิว สำหรับพืชที่เป็น กก (*Cyperus* sp.) การทดลองนี้ประกอบด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง จำนวน 2 บ่อ และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว จำนวน 2 บ่อ ประสิทธิภาพการบำบัดสารมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ประเภท ตลอดการทดลองสำหรับสารอินทรีย์ในรูปปีโอดี ซีไอดี ฟอสฟอรัสรวม และแอมโมเนียไนโตรเจน แสดงดังรูปที่ 4-6 – 4-9



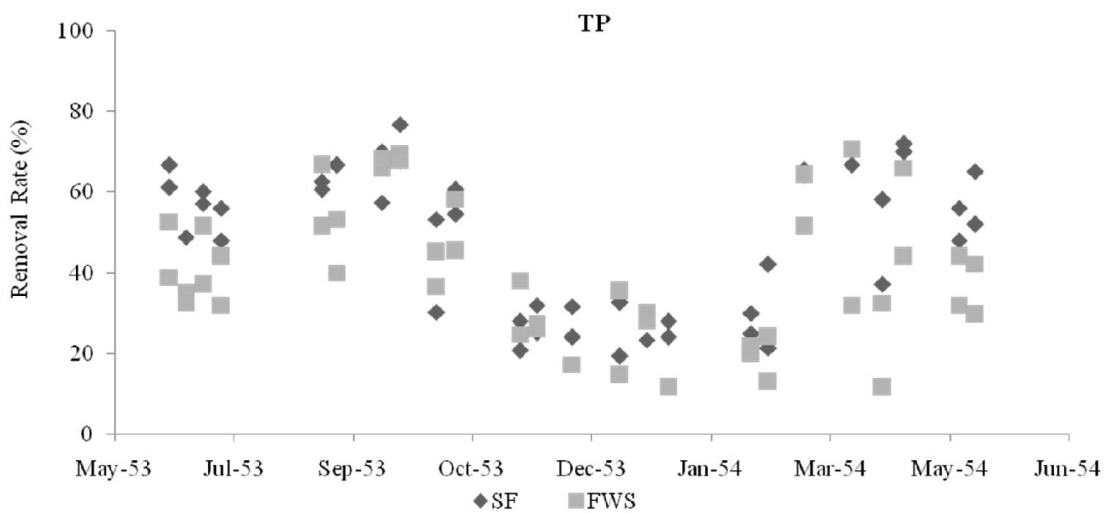
รูปที่ 4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) และแบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)



รูปที่ 4-7 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) และแบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)

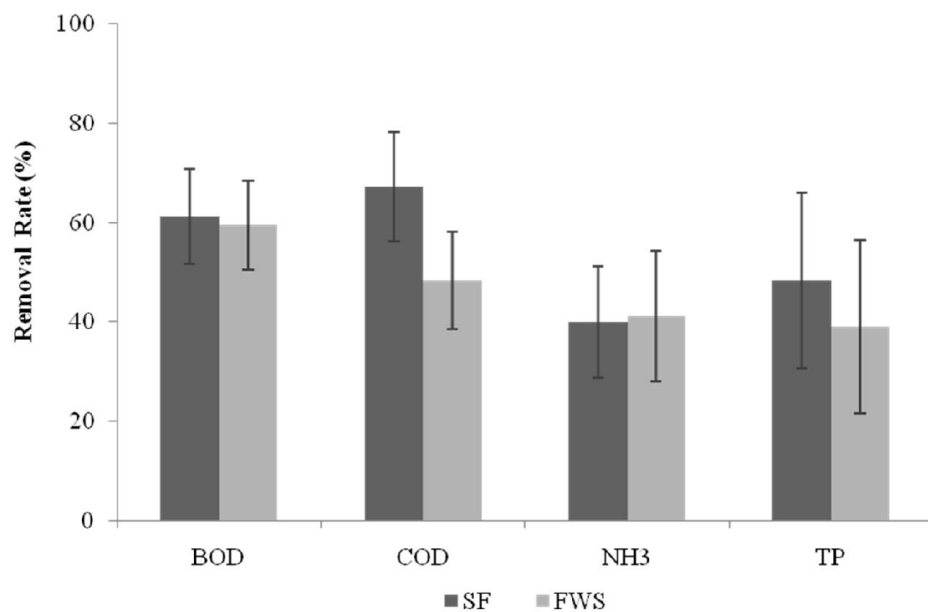


รูปที่ 4-8 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) และแบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)



รูปที่ 4-9 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสรวมของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) และแบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)

ข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้ทำการทดลองถูกทดสอบคุณสมบัติของชุดข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ผล พบว่า ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้มีการแจกแจงในลักษณะโค้งปกติ (Normal distribution) และข้อมูลแต่ละกลุ่มมีความแปรปรวนเท่ากัน (Homogeneity of variances) จึงสามารถใช้สถิติพารามетริก (Parametric statistics) ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ การทดสอบค่าที (t-test) และผลจากการทดสอบค่าที พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ประเภท มีประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษแตกต่างกัน โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินสามารถบำบัดสารมลพิษในรูปซีโอไซด์และฟอสฟอรัสรวมได้สูงกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขณะที่ความสามารถในการบำบัดสารมลพิษในรูปบีโอดีและแอมโมเนียไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองระบบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในรูปที่ 4-10 และตาราง 4-2



รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน (SF) และแบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS)

ตาราง 4-2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) และแบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) โดยใช้การทดสอบค่าที (t-test)

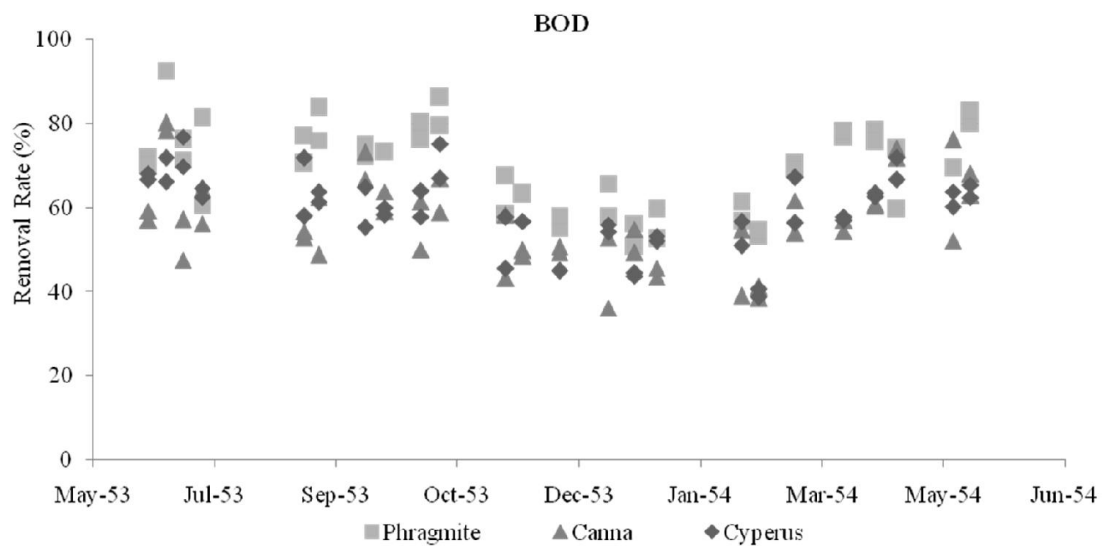
สารมลพิษ/ระบบบึงประดิษฐ์		ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)			t-test	
		N	Mean	S.D.	Mean difference	Sig. (2-tailed)
BOD	SF <i>Cyperus</i>	48	61.26	9.60	1.74	0.361
	FWS <i>Cyperus</i>	48	59.52	8.98		
COD	SF <i>Cyperus</i>	48	67.14	11.01	18.76	0.000**
	FWS <i>Cyperus</i>	48	48.39	9.78		
NH ₃	SF <i>Cyperus</i>	48	39.91	11.27	-1.22	0.627
	FWS <i>Cyperus</i>	48	41.13	13.11		
TP	SF <i>Cyperus</i>	48	48.42	17.74	9.37	0.011*
	FWS <i>Cyperus</i>	48	39.05	17.41		

หมายเหตุ * P < 0.05

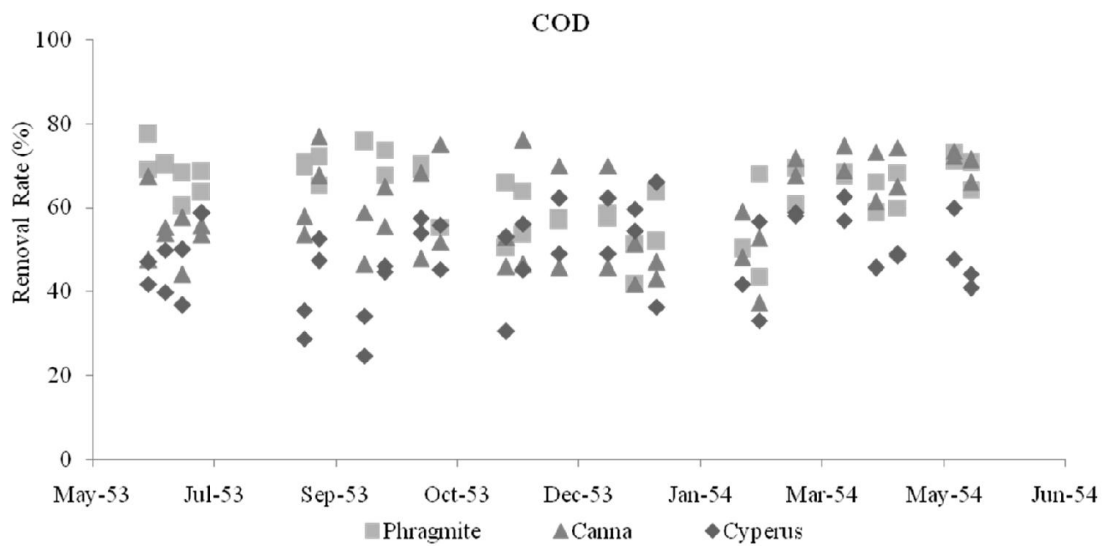
*P<0.01

4.2.3 ชนิดของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์กับประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษ

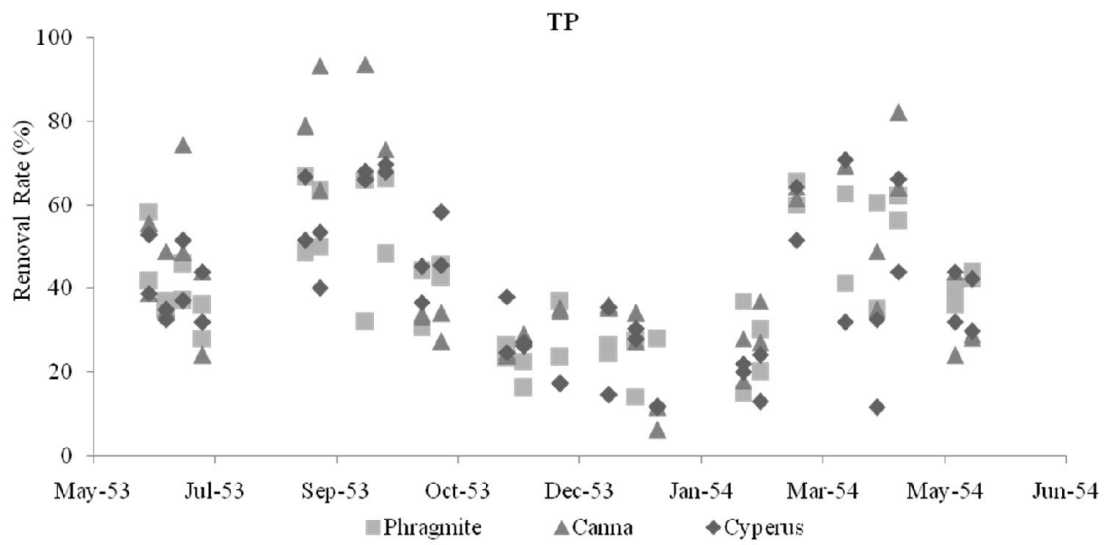
ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกพืชต่างชนิดกัน เป็นการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างพืชจำพวก กก (*Cyperus* sp.) อ้อ (*Phragmite* sp.) และ พุทธรักษา (*Canna* sp.) ซึ่งปลูกในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวชนิดพืชละ 2 บ่อ ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี ซีโอดี ฟอสฟอรัสรวม และแอมโมเนียไนโตรเจนของพืชทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 4-11 – 4-14



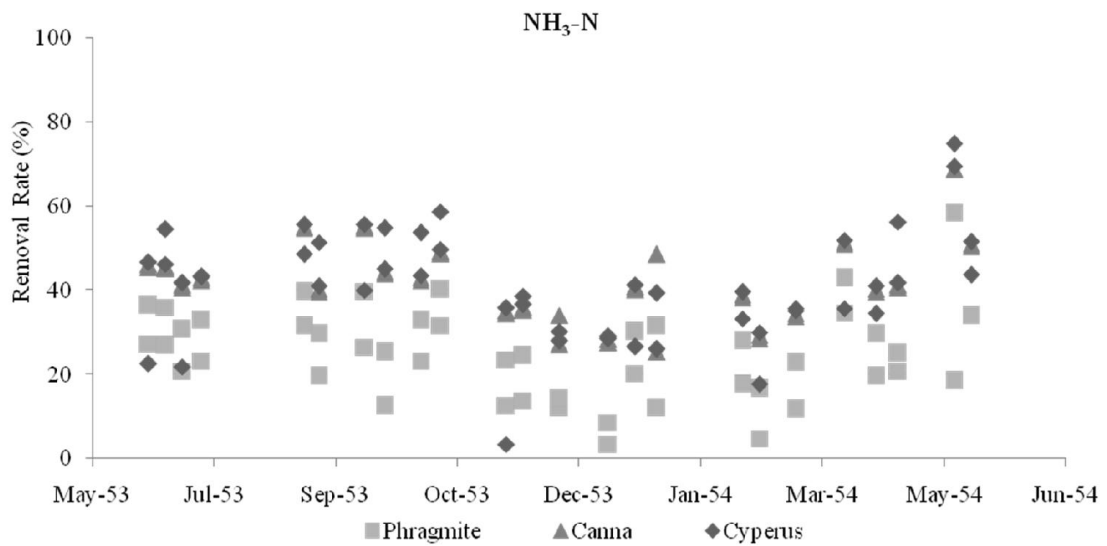
รูปที่ 4-11 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีของพืชชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว



รูปที่ 4-12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของพืชชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

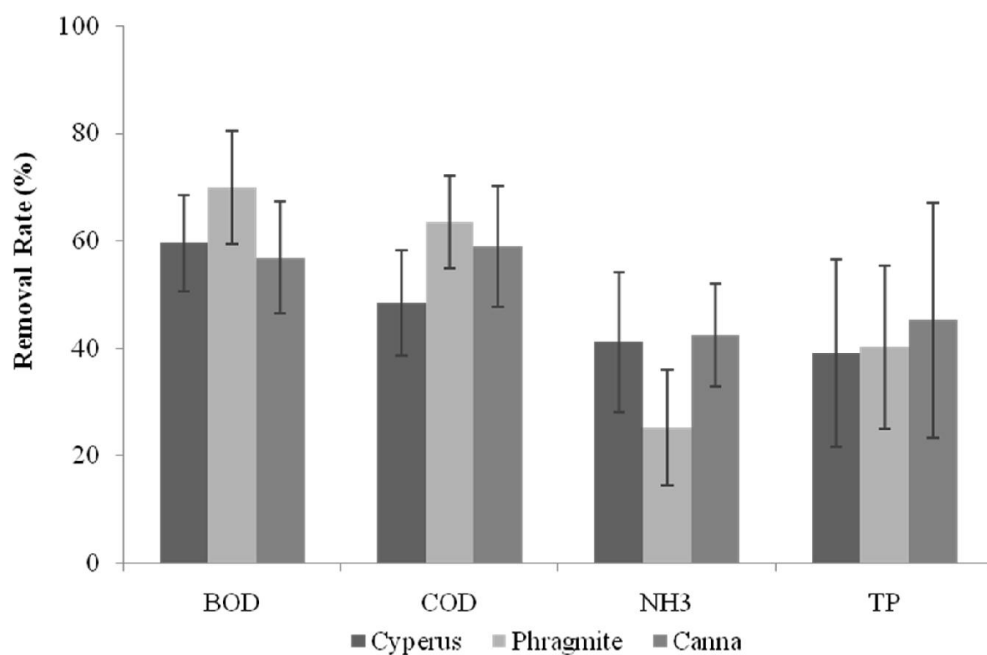


รูปที่ 4-13 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสรวมของพืชชนิดต่าง ๆ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว



รูปที่ 4-14 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนของพืชชนิดต่าง ๆ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

การทดสอบคุณสมบัติการกระจายตัวของชุดข้อมูลก่อนที่จะวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่า ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้มีการแจกแจงในลักษณะโค้งปกติ (Normal distribution) และข้อมูลแต่ละกลุ่มมีความแปรปรวนเท่ากัน (Homogeneity of variances) จึงสามารถใช้สถิติพารามेटริก (Parametric statistics) ในการทดสอบ ซึ่งเทคนิคที่ใช้คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว พบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี ซีโอดี และแอมโมเนียไนโตรเจนได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีและซีโอดีสูงที่สุด ขณะที่พืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna* sp.) มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนสูงที่สุด สำหรับสารมลพิษประเภทฟอสฟอรัสรวม พบว่า พืชต่างชนิดกันมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในรูปที่ 4-15 และตาราง 4-3 และ 4-4



รูปที่ 4-15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษระหว่างพืชชนิดต่าง ๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

ตาราง 4-3 สถิติเชิงพรรณนาประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษของพืชชนิดต่างๆ

สารมลพิษ/ระบบบึงประดิษฐ์ และพืช		ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)				
		N	Mean	S.D.	Min	Max
BOD	FWS Cyperus	48	59.52	8.98	38.80	76.80
	FWS Phragmite	48	69.98	10.54	50.70	92.60
	FWS Canna	48	56.85	10.44	36.20	80.20
	Total	144	62.12	11.46	36.20	92.60
COD	FWS Cyperus	48	48.39	9.78	24.70	66.07
	FWS Phragmite	48	63.52	8.58	41.60	77.38
	FWS Canna	48	59.01	11.23	37.28	76.91
	Total	144	56.97	11.73	24.70	77.38
NH ₃	FWS Cyperus	48	41.13	13.11	3.45	74.81
	FWS Phragmite	48	25.24	10.79	3.45	58.28
	FWS Canna	48	42.52	9.56	25.36	69.04
	Total	144	36.30	13.66	3.45	74.81
TP	FWS Cyperus	48	39.05	17.42	11.60	70.67
	FWS Phragmite	48	40.16	15.09	14.13	66.67
	FWS Canna	48	45.23	21.84	6.24	93.62
	Total	144	41.48	18.40	6.24	93.62

ตาราง 4-4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพืชชนิดต่างๆ ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

สารมลพิษ		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
BOD	Between Groups	4623.215	2	2311.608	23.046	0.000
	Within Groups	14142.838	141	100.304		
	Total	18766.053	143			
COD	Between Groups	5795.092	2	2897.546	29.431	0.000
	Within Groups	13881.736	141	98.452		
	Total	19676.828	143			
NH ₃ N	Between Groups	8849.592	2	4424.796	34.959	0.000
	Within Groups	17846.562	141	126.571		
	Total	26696.154	143			
TP	Between Groups	1043.951	2	521.975	1.553	0.215
	Within Groups	47378.359	141	336.017		
	Total	48422.310	143			

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชนิดพืชที่ปลูกในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ดังข้างต้น สรุปได้ว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) มีประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษประเภท BOD สูงที่สุด ขณะเดียวกัน ก็มีประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษประเภท NH₃-N ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ทำการศึกษา

4.2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในภาพรวม

หากพิจารณาประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ทำการศึกษาดูแล ทั้งพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และแบบไหลผ่านพื้นผิว รวมถึงทุกชนิดพืช ได้แก่ อ้อ (*Phragmite* sp.) กก (*Cyperus* sp.) และ พุทธรักษา (*Canna* sp.) ในการบำบัดมลพิษประเภทต่าง ๆ สรุปข้อค้นพบ ได้ดังนี้ (รูปที่ 4-16)

- สารอินทรีย์ในรูปบีโอดี : ระบบที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีสูงที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) สามารถบำบัดบีโอดีได้ประมาณร้อยละ 70 ขณะเดียวกันระบบที่มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีต่ำที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna* sp.) สามารถบำบัดบีโอดีได้ประมาณร้อยละ 57

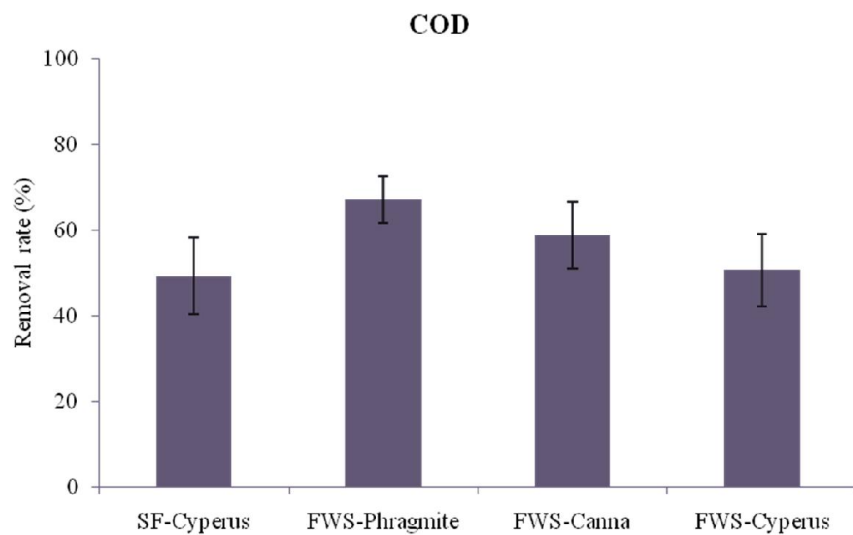
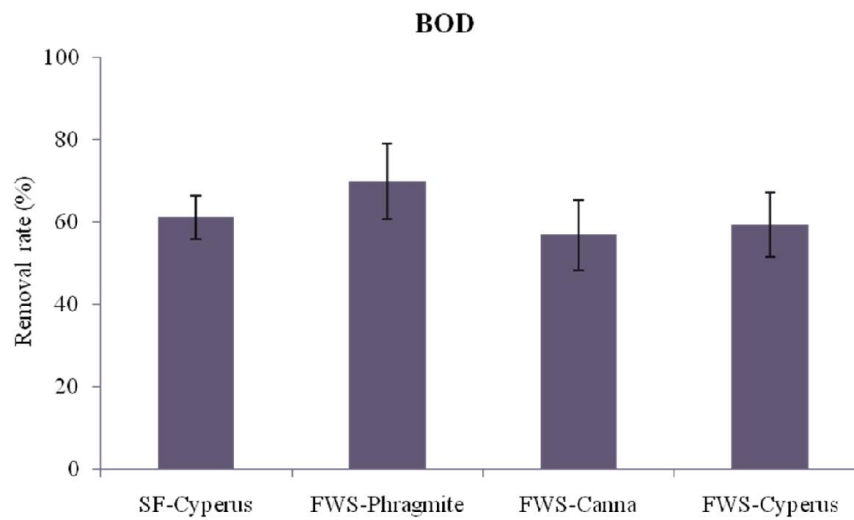
- สารอินทรีย์ในรูปซีโอดี : ระบบที่มีประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษในรูปของซีโอดีสูงที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) สามารถบำบัดซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 67 ขณะเดียวกันระบบที่มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีต่ำที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) สามารถบำบัดซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 48

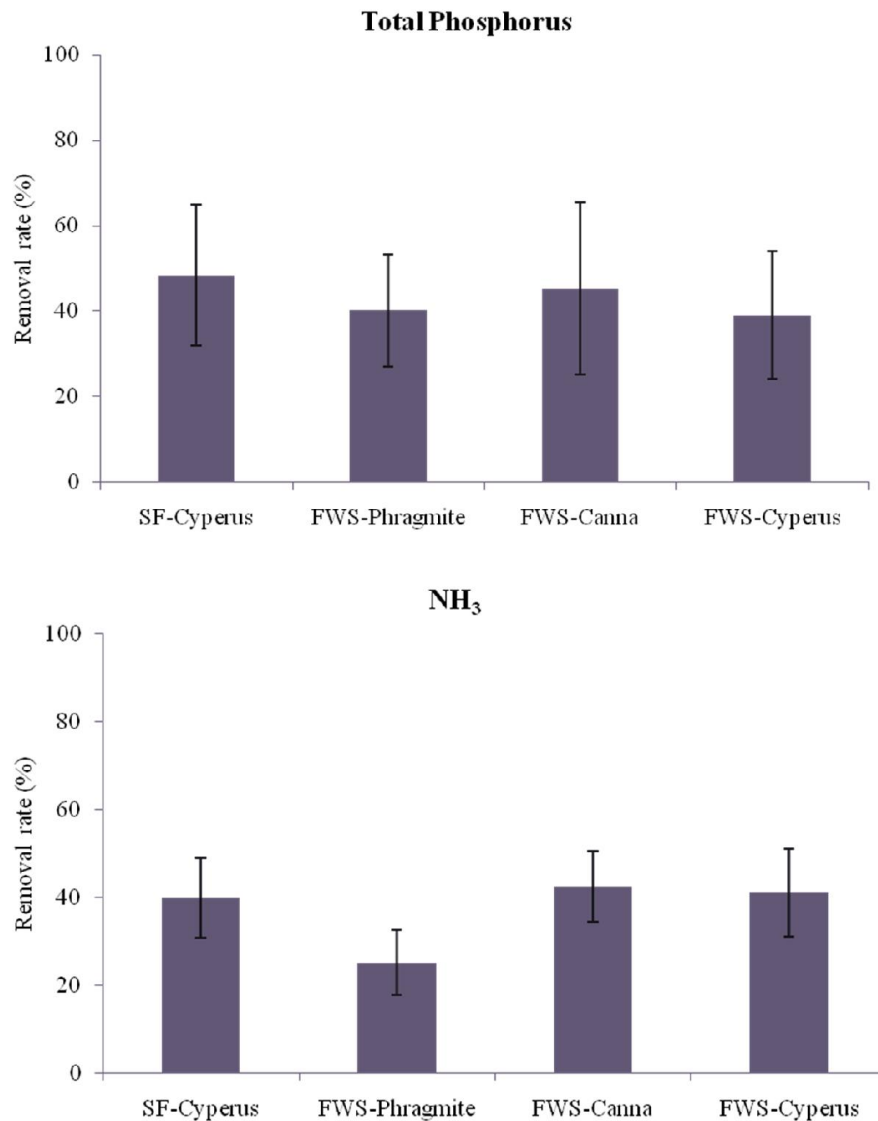
- ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียไนโตรเจน : ระบบที่มีประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนสูงที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna* sp.) สามารถบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน ได้ประมาณร้อยละ 42 และระบบที่มีประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนต่ำที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) บำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ประมาณร้อยละ 25

- สารมลพิษประเภทฟอสฟอรัสรวม : พบว่า ระบบที่มีประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสรวมสูงที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) สามารถบำบัดฟอสฟอรัสรวมได้ประมาณร้อยละ 48 และระบบที่มีประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสรวมต่ำที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) สามารถบำบัดฟอสฟอรัสรวมได้ประมาณร้อยละ 39

ทั้งนี้ หากพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษโดยรวมของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ทั้งแบบไหลผ่านพื้นผิวและแบบไหลใต้ผิวดักกลาง สรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 57-70 การบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 48-67 การบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 25-42 และการบำบัดฟอสฟอรัสรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 39-48 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ในการศึกษาทดลอง

ครั้งนี้ ยังคงพบความแปรปรวนของประสิทธิภาพของการทดลองอยู่ และนอกจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในภาพรวมแล้ว การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษที่จำแนกตามตามประเภทของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์และชนิดพืชที่ปลูก ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป





รูปที่ 4-16 ประสิทธิภาพการของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดสารมลพิษรายชนิด

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมด ได้ทดสอบคุณสมบัติของชุดข้อมูล พบว่า ข้อมูลมีการแจกแจงในลักษณะโค้งปกติ (Normal distribution) และข้อมูลแต่ละกลุ่มมีความแปรปรวนเท่ากัน (Homogeneity of variances) จึงสามารถใช้สถิติพาราเมตริกได้ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ทำการศึกษาลอง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดี ซีโอดี และแอมโมเนียไนโตรเจนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังรายละเอียดในตาราง 4-5 – 4-6 หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่ (Post-hoc) ผลการวิเคราะห์แสดงในตาราง 4-7

ตาราง 4-5 สถิติเชิงพรรณาประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ศึกษา

สารมลพิษ/ระบบบึงประดิษฐ์		ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)				
		N	Mean	S.D.	Min	Max
BOD	SF <i>Cyperus</i>	48	61.26	9.60	41.70	82.10
	FWS <i>Cyperus</i>	48	59.52	8.98	38.80	76.80
	FWS <i>Phragmite</i>	48	69.98	10.54	50.70	92.60
	FWS <i>Canna</i>	48	56.85	10.44	36.20	80.20
	Total	192	61.90	11.00	36.20	92.60
COD	SF <i>Cyperus</i>	48	67.14	11.01	35.42	86.77
	FWS <i>Cyperus</i>	48	48.38	9.78	24.70	66.07
	FWS <i>Phragmite</i>	48	63.52	8.58	41.60	77.38
	FWS <i>Canna</i>	48	59.01	11.23	37.28	76.91
	Total	192	59.51	12.34	24.70	86.77
NH ₃	SF <i>Cyperus</i>	48	39.91	11.27	21.43	70.37
	FWS <i>Cyperus</i>	48	41.13	13.11	3.45	74.81
	FWS <i>Phragmite</i>	48	25.24	10.79	3.45	58.28
	FWS <i>Canna</i>	48	42.52	9.56	25.36	69.04
	Total	192	37.20	13.17	3.45	74.81
TP	SF <i>Cyperus</i>	48	48.42	17.74	19.35	76.79
	FWS <i>Cyperus</i>	48	39.05	17.42	11.60	70.67
	FWS <i>Phragmite</i>	48	40.16	15.09	14.13	66.67
	FWS <i>Canna</i>	48	45.23	21.84	6.24	93.62
	Total	192	43.21	18.44	6.24	93.62

ตาราง 4-6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ศึกษา โดยใช้เทคนิค One-way ANOVA

สารมลพิษ		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
BOD	Between Groups	4649.438	3	1549.813	15.772	0.000
	Within Groups	18473.071	188	98.261		
	Total	23122.509	191			
COD	Between Groups	9521.381	3	3173.794	30.478	0.000
	Within Groups	19577.400	188	104.135		
	Total	29098.781	191			
NH ₃	Between Groups	9320.174	3	3106.725	24.526	0.000
	Within Groups	23814.186	188	126.671		
	Total	33134.360	191			
TP	Between Groups	2777.632	3	925.877	2.800	0.051
	Within Groups	62175.923	188	330.723		
	Total	64953.555	191			

ตาราง 4-7 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ศึกษา
โดยการเปรียบเทียบรายคู่ (Post hoc)

ตัวแปรที่สนใจ	(I) CW	(J) CW	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
BOD	SF-Cyperus	FWS-Cyperus	1.74	2.023	0.825
		FWS-Phragmite	-8.72*	2.023	0.000
		FWS-Canna	4.41	2.023	0.132
	FWS-Cyperus	SF-Cyperus	-1.74	2.023	0.825
		FWS-Phragmite	-10.46*	2.023	0.000
		FWS-Canna	2.67	2.023	0.551
	FWS-Phragmite	SF-Cyperus	8.72*	2.023	0.000
		FWS-Cyperus	10.46*	2.023	0.000
		FWS-Canna	13.13*	2.023	0.000
	FWS-Canna	SF-Cyperus	-4.41	2.023	0.132
		FWS-Cyperus	-2.67	2.023	0.551
		FWS-Phragmite	-13.13*	2.023	0.000
COD	SF-Cyperus	FWS-Cyperus	18.76*	2.083	0.000
		FWS-Phragmite	3.62	2.083	0.306
		FWS-Canna	8.14*	2.083	0.001
	FWS-Cyperus	SF-Cyperus	-18.76*	2.083	0.000
		FWS-Phragmite	-15.13*	2.083	0.000
		FWS-Canna	-10.62*	2.083	0.000
	FWS-Phragmite	SF-Cyperus	-3.62	2.083	0.306
		FWS-Cyperus	15.13*	2.083	0.000
		FWS-Canna	4.51	2.083	0.137
	FWS-Canna	SF-Cyperus	-8.14*	2.083	0.001

ตัวแปรที่สนใจ	(I) CW	(J) CW	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
		FWS-Cyperus	10.62*	2.083	0.000
		FWS-Phragmite	-4.51	2.083	0.137
NH ₃ -N	SF-Cyperus	FWS-Cyperus	-1.22	2.297	0.952
		FWS-Phragmite	14.67*	2.297	0.000
		FWS-Canna	-2.61	2.297	0.668
	FWS-Cyperus	SF-Cyperus	1.22	2.297	0.952
		FWS-Phragmite	15.89*	2.297	0.000
		FWS-Canna	-1.39	2.297	0.930
	FWS-Phragmite	SF-Cyperus	-14.67*	2.297	0.000
		FWS-Cyperus	-15.89*	2.297	0.000
		FWS-Canna	-17.28*	2.297	0.000
	FWS-Canna	SF-Cyperus	2.61	2.297	0.668
		FWS-Cyperus	1.39	2.297	0.930
		FWS-Phragmite	17.28*	2.297	0.000
TP	SF-Cyperus	FWS-Cyperus	9.37	3.712	0.059
		FWS-Phragmite	8.26	3.712	0.120
		FWS-Canna	3.19	3.712	0.826
	FWS-Cyperus	SF-Cyperus	-9.37	3.712	0.059
		FWS-Phragmite	-1.11	3.712	0.991
		FWS-Canna	-6.18	3.712	0.345
	FWS-Phragmite	SF-Cyperus	-8.26	3.712	0.120
		FWS-Cyperus	1.11	3.712	0.991
		FWS-Canna	-5.07	3.712	0.521
	FWS-Canna	SF-Cyperus	-3.18	3.712	0.826

ตัวแปรที่สนใจ	(I) CW	(J) CW	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
		FWS-Cyperus	6.18	3.712	0.345
		FWS-Phragmite	5.07	3.712	0.521

. * ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ $p < 0.05$

ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่ Post hoc บ่งชี้ว่า หากจำแนกพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ศึกษาทดลองตามประสิทธิภาพในการบำบัดสารมลพิษ สามารถจัดกลุ่มได้ดังนี้

- บีโอดี : พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ทำการศึกษา ซึ่งพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อื่น ๆ ที่เหลืออยู่นี้ ล้วนมีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีได้ในระดับใกล้เคียงกัน

- ซีโอดี : พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้สูงสุด รองลงมาคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna* sp.) และกลุ่มที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.)

- แอมโมเนียไนโตรเจน : พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ทำการศึกษา ซึ่งพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์อื่น ๆ ที่เหลืออยู่นี้ ล้วนมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ในระดับใกล้เคียงกัน

- ฟอสฟอรัสรวม : พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งหมดที่ศึกษาทดลองมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสรวมไม่แตกต่างกัน

4.3 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

การศึกษาวิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ประเภทต่างๆ ได้แก่ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) พุทธรักษา (*Canna* sp.) และกก (*Cyperus* sp.) ดำเนินการจำนวนทั้งสิ้น 12 บ่อทดลอง โดยเป็นบ่อควบคุมจำนวน 4 บ่อทดลอง และการเก็บตัวอย่างก๊าซดำเนินการบ่อละ 3 จุด บริเวณช่วงต้นบ่อ (จุดน้ำเสีย

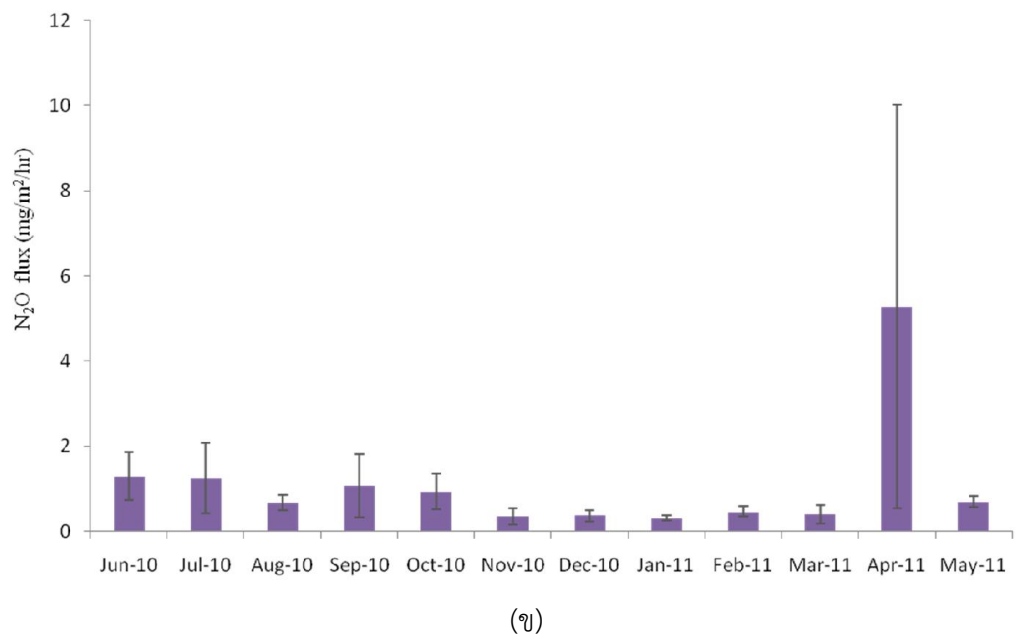
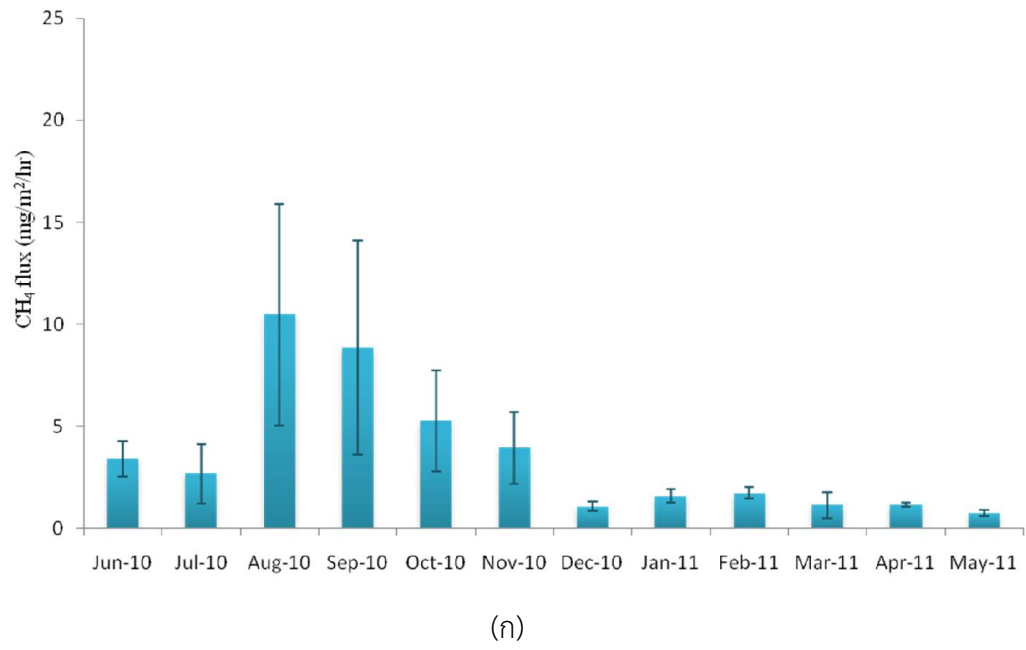
เข้า) ช่วงกลาง และท้ายบ่อ (จุดน้ำเสียออก) เพื่อวิเคราะห์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สนใจ คือ CH_4 , N_2O , CO_2 ทั้งนี้ ยังได้ศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะคุณสมบัติของดิน อย่างไรก็ตาม การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ก๊าซเรือนกระจกได้ดำเนินการเป็นเดือนละ 1 ครั้ง ผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

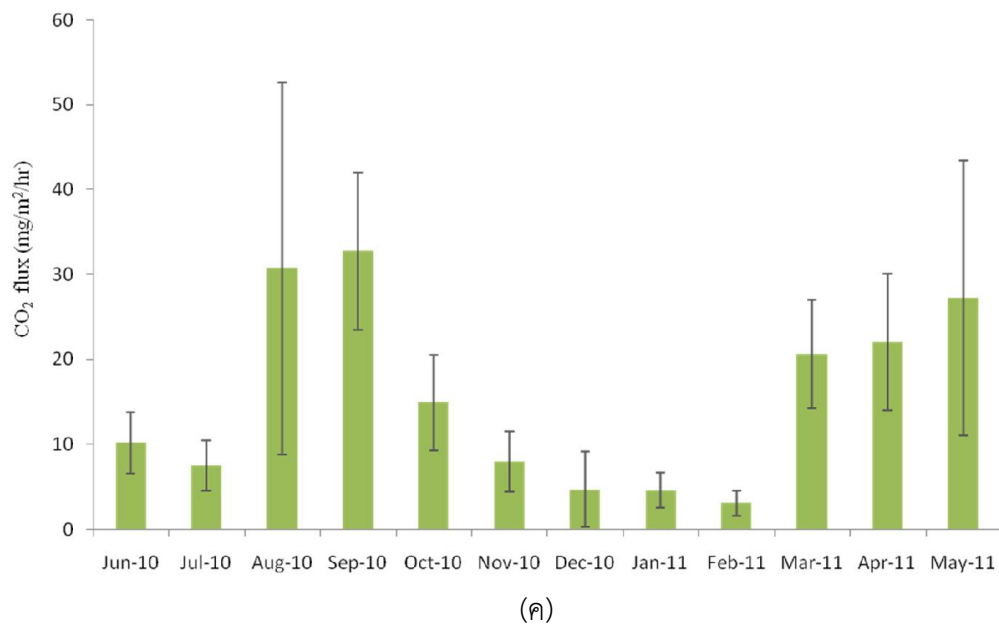
4.3.1 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ประเภทต่างๆ

ผลการศึกษาวิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จำแนกตามประเภทของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ชนิดพืชที่ปลูก มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1.1 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ตัวกลางปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus sp.*)

ผลจากการศึกษาพบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินตัวกลางที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus sp.*) มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทน (CH_4) โดยเฉลี่ยประมาณ $2.89 \pm 3.55 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ โดยค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงสุดปรากฏในเดือนสิงหาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ $10.5 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ และค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำสุดปรากฏในเดือนพฤษภาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ $0.8 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ ส่วนก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ $1.05 \pm 1.70 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนเมษายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ $5.3 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนมกราคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ $0.3 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ $15.18 \pm 12.32 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนสิงหาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ $32.7 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนกุมภาพันธ์ มีค่าเฉลี่ยประมาณ $3.1 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ (รูปที่ 4-17)

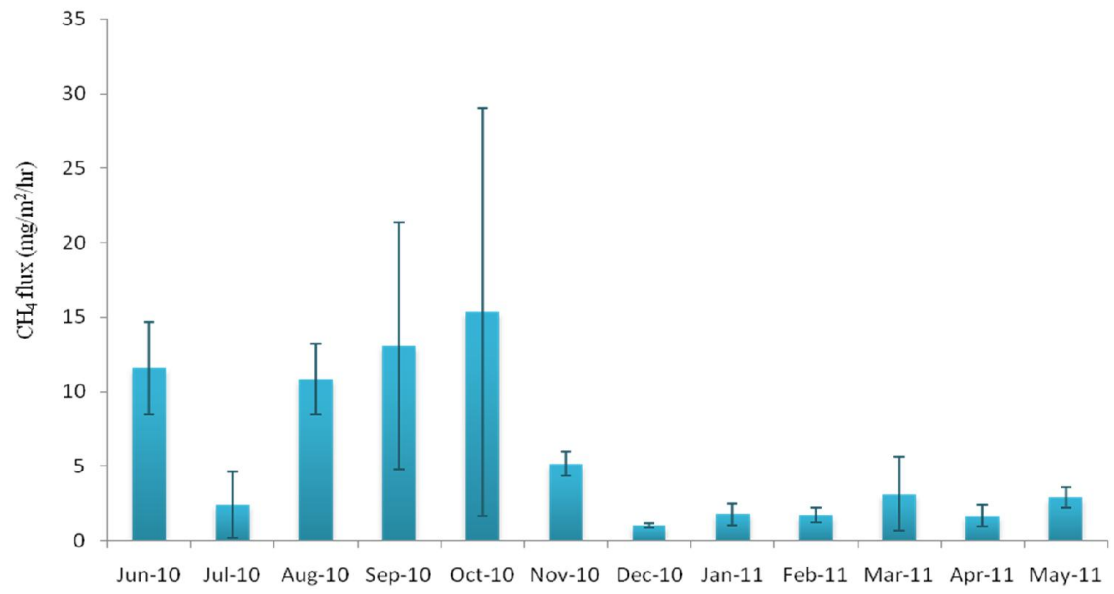




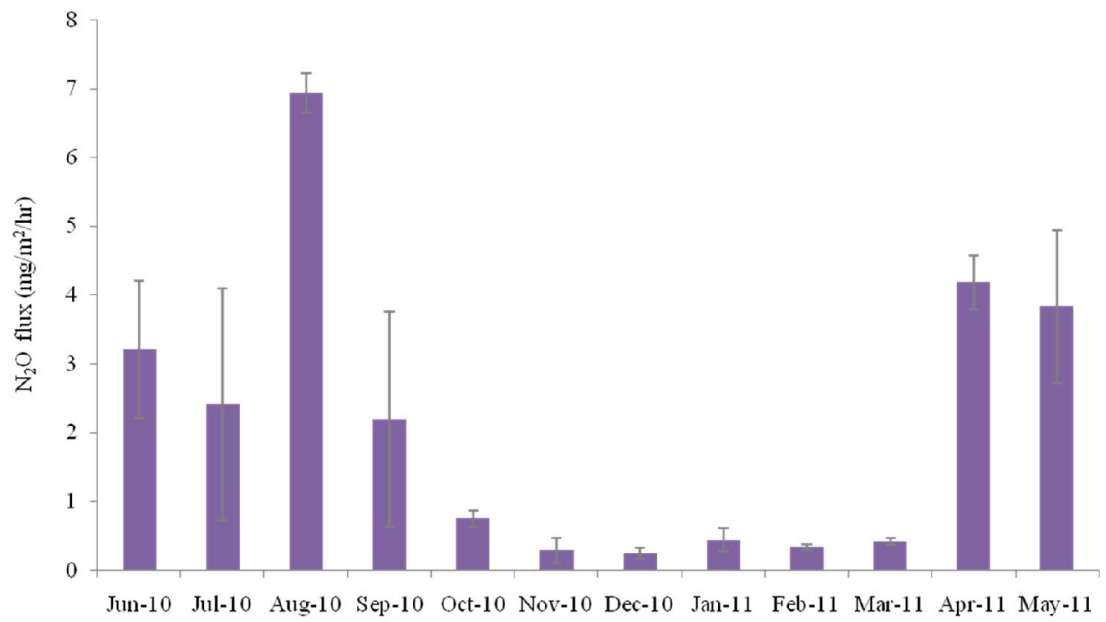
รูปที่ 4-17 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.3.1.2 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus sp.*)

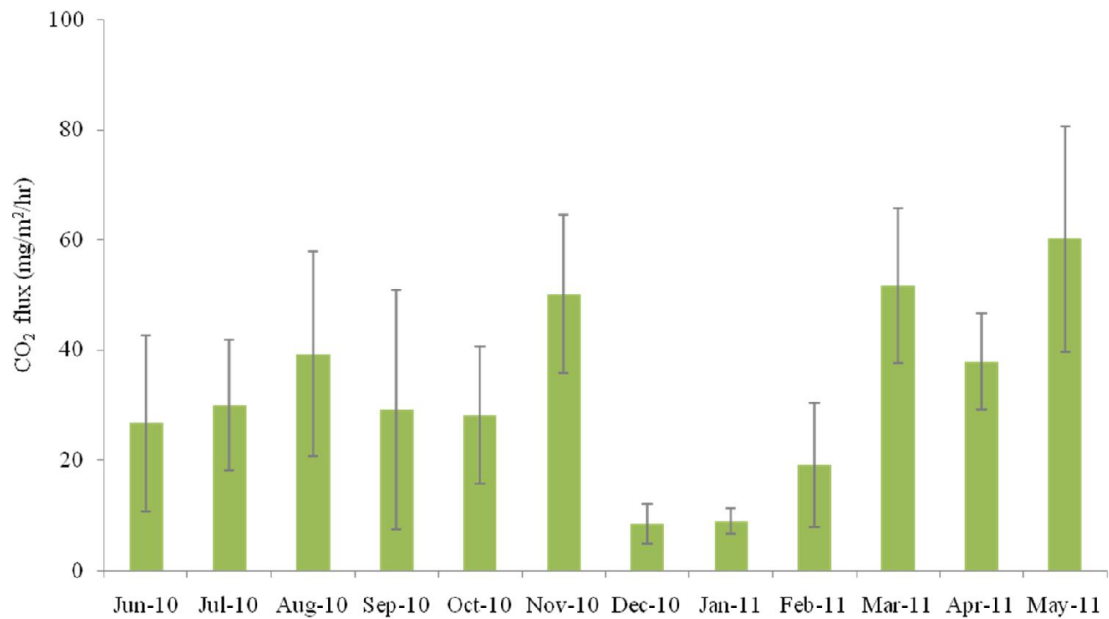
จากการศึกษา พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus sp.*) มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทน โดยเฉลี่ยประมาณ 5.92 ± 9.82 mg/m²/hr ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่มีความแปรปรวนพอสมควร โดยค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงสุดปรากฏในเดือนตุลาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 15.3 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำสุดปรากฏในเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.0 mg/m²/hr ส่วนก๊าซไนตรัสออกไซด์ พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 1.80 ± 2.06 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนสิงหาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 6.9 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.2 mg/m²/hr สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 29.61 ± 20.25 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนพฤษภาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 60.2 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 8.5 mg/m²/hr (รูปที่ 4-18)



(n)



(u)

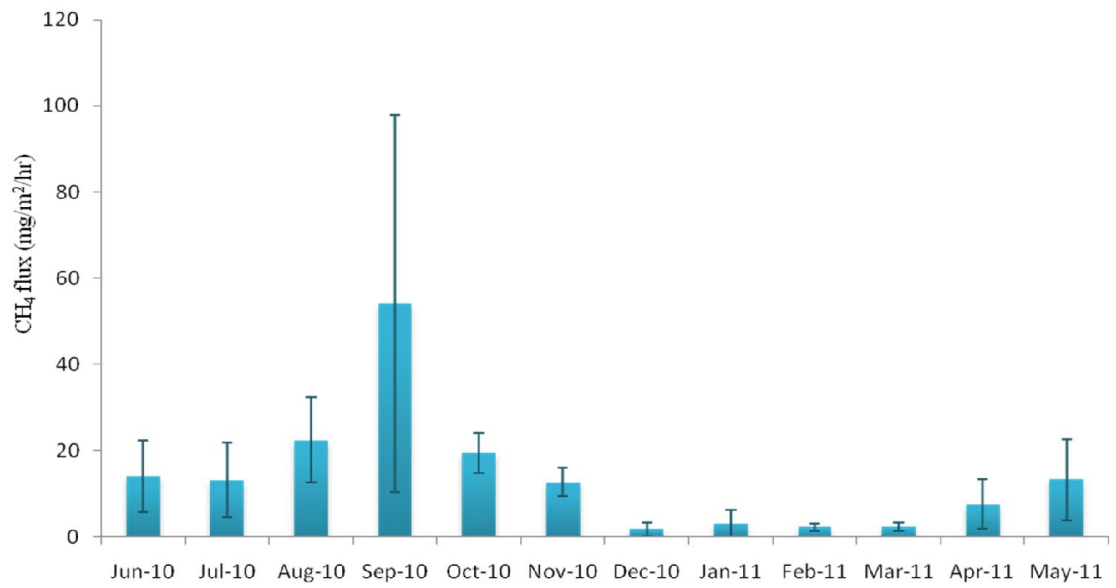


(ค)

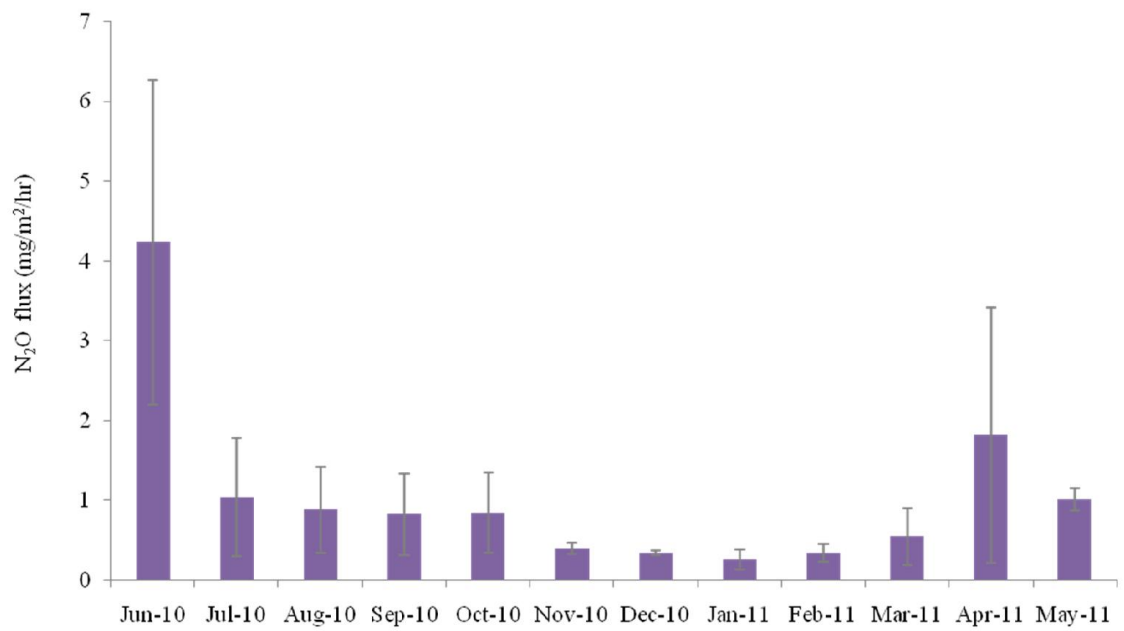
รูปที่ 4-18 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.3.1.3 การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite sp.*)

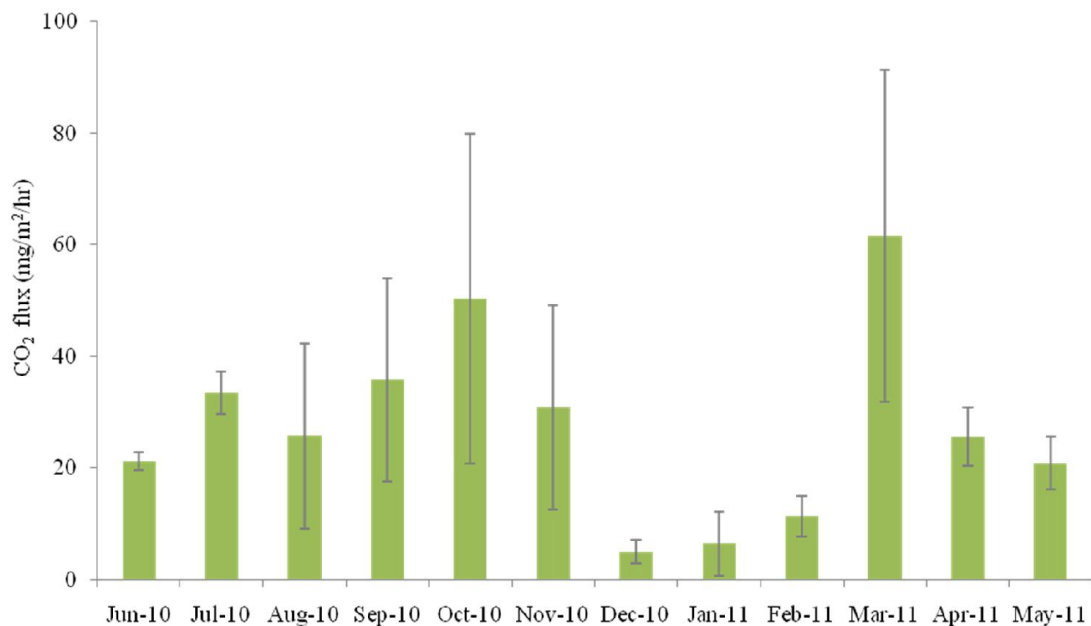
จากการศึกษา พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite sp.*) มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนโดยเฉลี่ยประมาณ 11.16 ± 16.10 mg/m²/hr ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่มีความแปรปรวนพอสมควร โดยค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงสุดปรากฏในเดือนกันยายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 54.1 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำสุดปรากฏในเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.8 mg/m²/hr ส่วนก๊าซไนตรัสออกไซด์พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 0.88 ± 1.17 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนมิถุนายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.2 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนมกราคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.3 mg/m²/hr สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 23.35 ± 18.71 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนมีนาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 61.5 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 5.0 mg/m²/hr (รูปที่ 4-19)



(n)



(o)



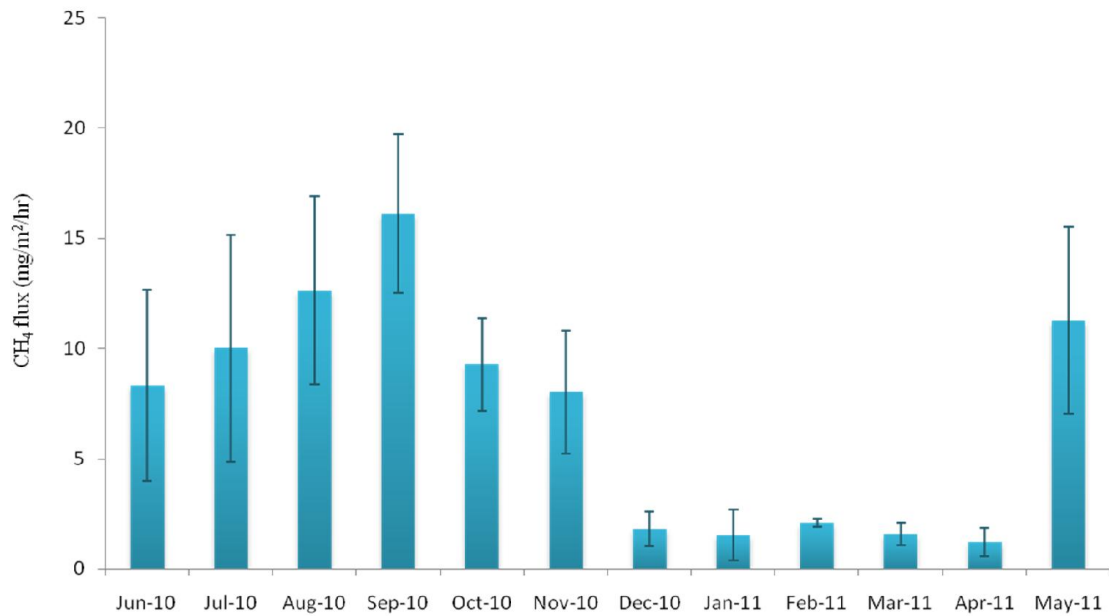
(ค)

รูปที่ 4-19 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

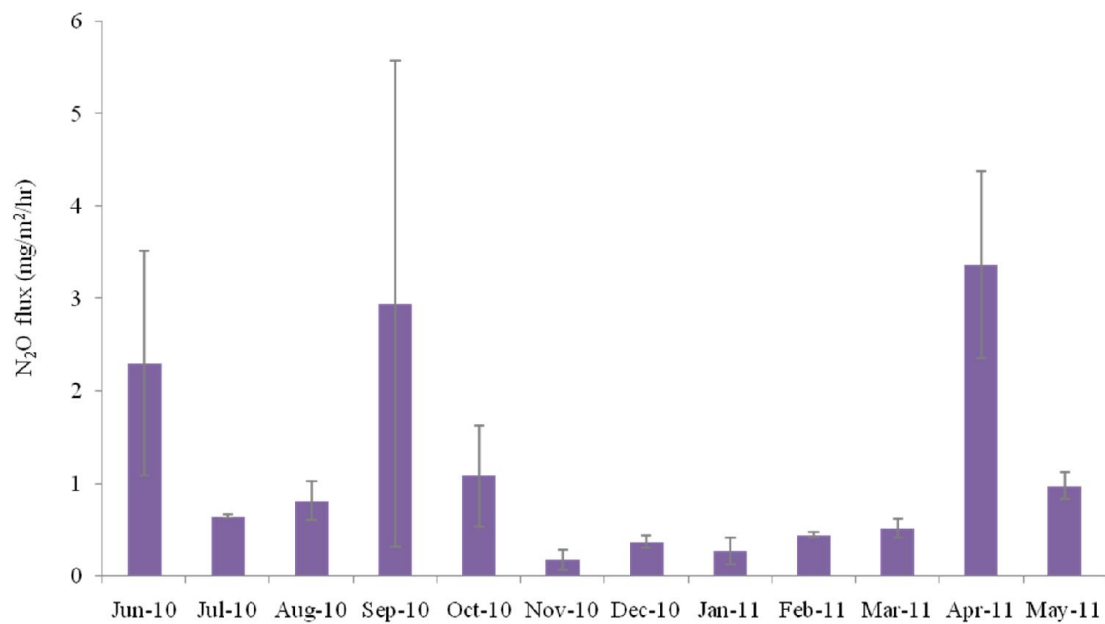
4.3.1.4 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna sp.*)

จากการศึกษา พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna sp.*) มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนโดยเฉลี่ยประมาณ 6.01 ± 6.70 mg/m²/hr ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่มีความแปรปรวนพอสมควร โดยค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงสุดปรากฏในเดือนกันยายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 16.1 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำสุดปรากฏในเดือนเมษายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.2 mg/m²/hr ส่วนก๊าซไนตรัสออกไซด์ พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 1.04 ± 1.20 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนเมษายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.4 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนพฤศจิกายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.2 mg/m²/hr สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 32.39 ± 24.96 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏใน

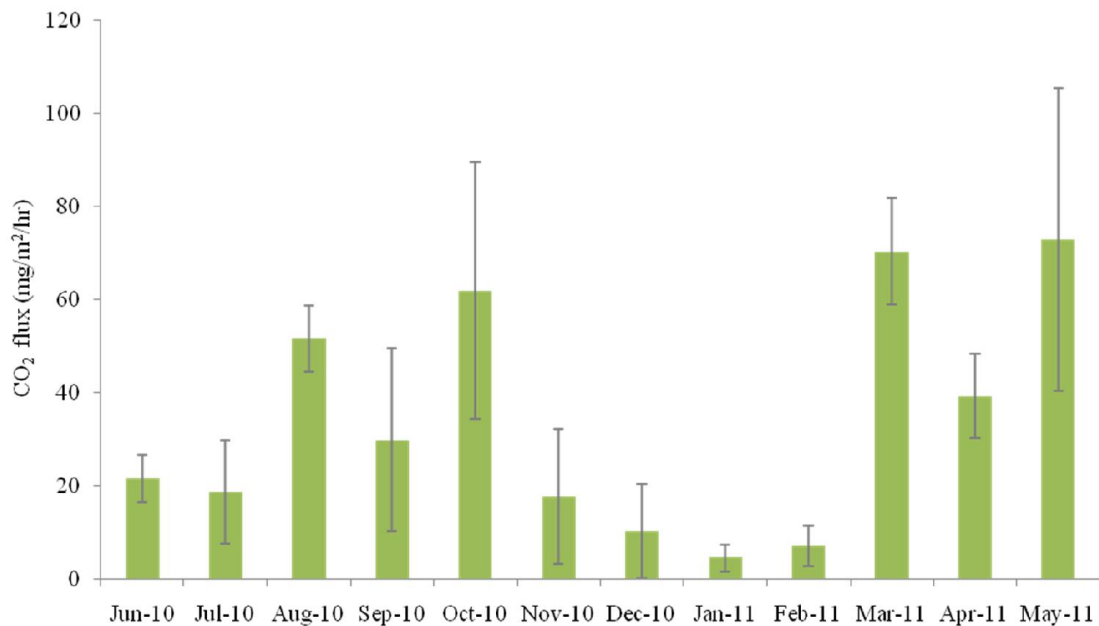
เดือนพฤษภาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 72.9 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนมกราคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.5 mg/m²/hr (รูปที่ 4-20)



(ก)



(ข)



(ค)

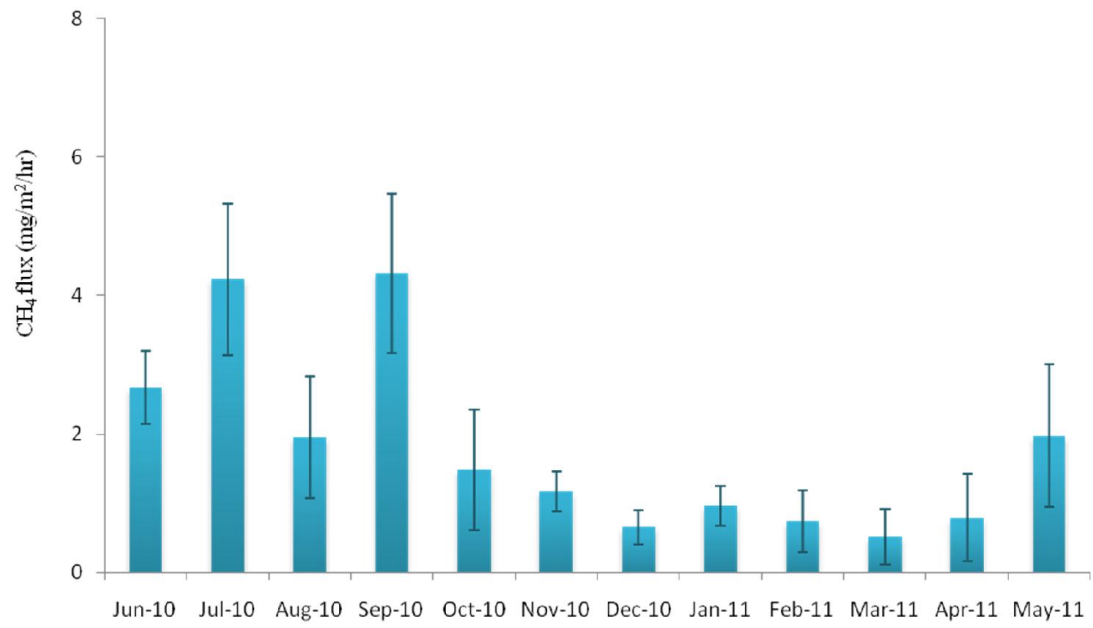
รูปที่ 4-20 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพืชรักษา (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.3.1.5 บ่อควบคุม (Control Unit)

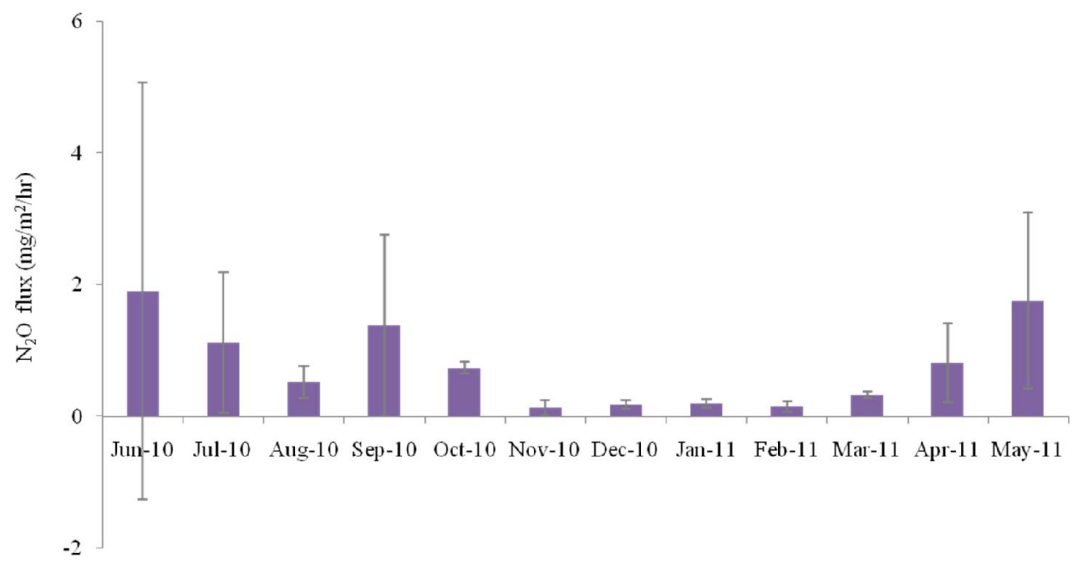
บ่อควบคุม (Control Unit) ในการทดลองครั้งนี้ เป็นการจำลองลักษณะของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง และแบบไหลผ่านพื้นผิวแต่ไม่มีการปลูกพืช เพื่อศึกษาเปรียบเทียบในประเด็นอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก กับอิทธิพลของพืช ผลการศึกษามีดังนี้

แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) ที่ไม่ได้ปลูกพืช

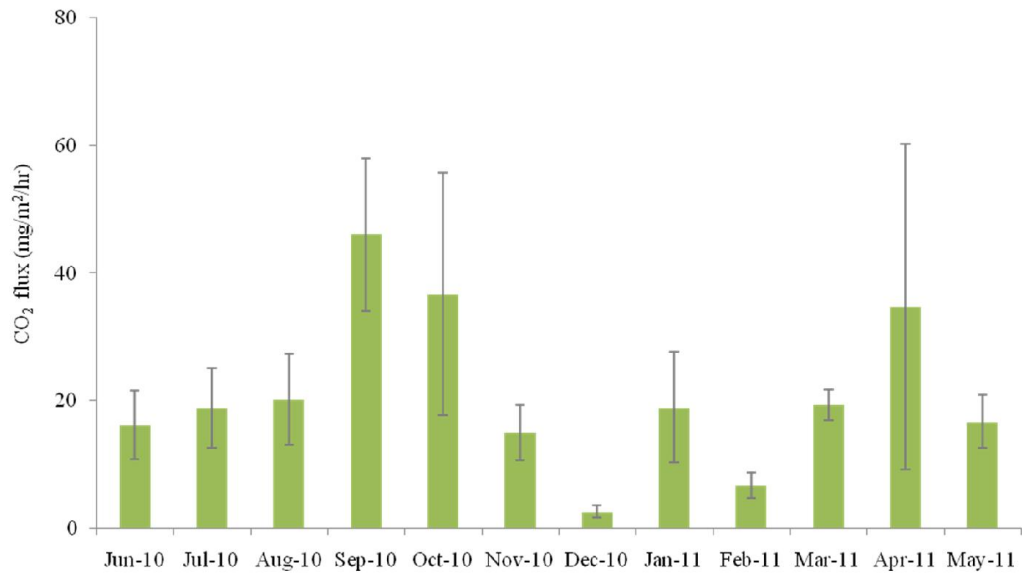
บ่อควบคุมนี้ มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนโดยเฉลี่ยประมาณ 1.79 ± 1.80 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงสุดปรากฏในเดือนกันยายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.3 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำสุดปรากฏในเดือนมีนาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.5 mg/m²/hr ส่วนก๊าซไนตรัสออกไซด์ พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 0.77 ± 1.16 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนมิถุนายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.9 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนพฤศจิกายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.2 mg/m²/hr สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 21.02 ± 15.27 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนกันยายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 46.1 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.6 mg/m²/hr (รูปที่ 4-21)



(f)



(g)

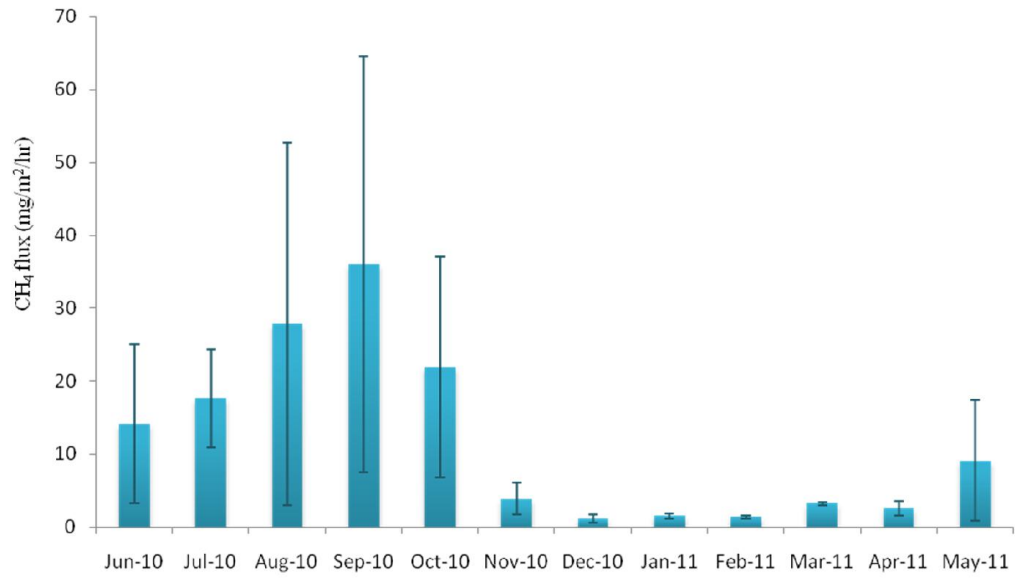


(ค)

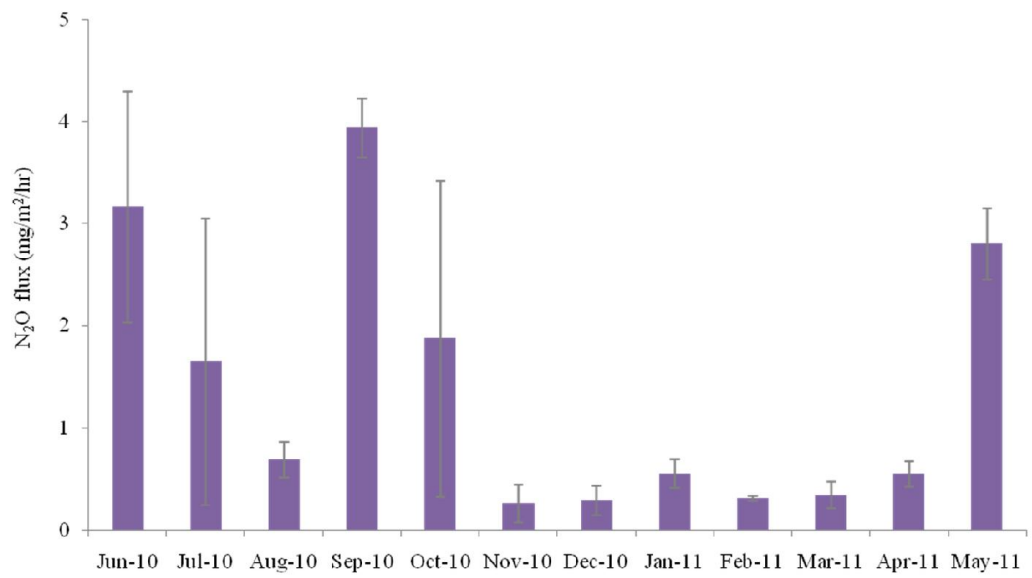
รูปที่ 4-21 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากบ่อควบคุมชนิดไหลใต้ผิวดักกลางที่ไม่มีการปลูกพืช (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) ที่มีได้ปลูกพืช

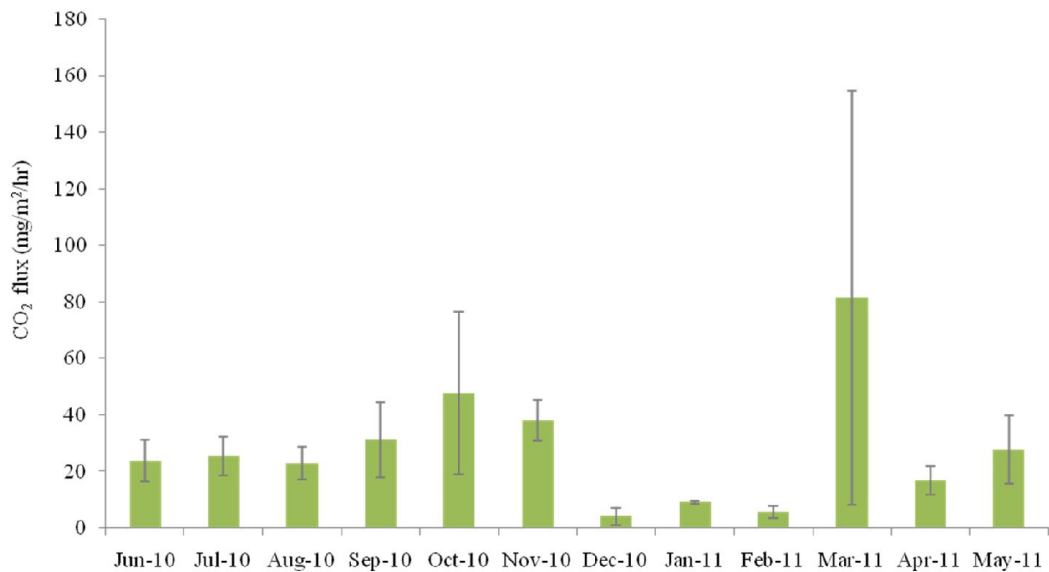
บ่อควบคุมดังกล่าวนี้ มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนโดยเฉลี่ยประมาณ 11.69 ± 15.88 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงสุดปรากฏในเดือนกันยายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 36.0 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำสุดปรากฏในเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.1 mg/m²/hr ส่วนก๊าซไนตรัสออกไซด์ พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 1.36 ± 1.42 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนกันยายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.9 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนพฤศจิกายน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.3 mg/m²/hr สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า อัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 27.87 ± 29.19 mg/m²/hr โดยค่าการปลดปล่อยสูงสุดปรากฏในเดือนมีนาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 81.5 mg/m²/hr และค่าการปลดปล่อยต่ำสุดปรากฏในเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.1 mg/m²/hr (รูปที่ 4-22)



(n)



(o)



(ค)

รูปที่ 4-22 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากบ่อควบคุมชนิดไหลผ่านพื้นผิวที่ไม่มีการปลูกพืช
(ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.3.2 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก

4.3.2.1 ลักษณะดิน

ลักษณะของดินที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ เนื้อดิน (soil texture) ความเป็นกรดต่างของดิน (soil pH) และอินทรีย์วัตถุในดิน (organic matter) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในภาพรวม จำนวน 1 ครั้ง จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดิน พบว่า ลักษณะเนื้อดินประกอบด้วยอนุภาคดินทรายร้อยละ 49.3 อนุภาคตะกอนทรายร้อยละ 28.6 และอนุภาคดินเหนียวร้อยละ 22.1 เมื่อเปรียบเทียบกับตารางสามเหลี่ยมมาตรฐานในการหาประเภทของเนื้อดิน (ดุษิต จิตตนนท์ และคณะ, 2537) พบว่า ลักษณะเนื้อดินจำแนกได้ว่าเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) สำหรับค่าเฉลี่ยความเป็นกรดต่างของดินเท่ากับ 7.1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินร้อยละ 1.8 ดังแสดงไว้ในตาราง 4-8

ตาราง 4-8 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติดิน

n=12

Parameter	Mean	S.D.
% Sand	49.28	9.64
% Silt	28.64	7.85
% Clay	22.08	8.52
pH	7.12	1.22
Organic Matter	1.84	0.68

4.3.2.2 ปัจจัยสิ่งแวดล้อม

ในแต่ละครั้งของการเก็บตัวอย่างก๊าซได้มีการตรวจวัดปัจจัยแวดล้อมของผิวดิน ลึกประมาณ 5 เซนติเมตร ได้แก่ อุณหภูมิของผิวดิน (soil temperature) ค่าความเป็นกรดต่าง (soil pH) ค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในดิน (soil oxidation-reduction potential : ORP) รวมทั้งค่าความเป็นกรดต่างของน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำแบบไหลผ่านพื้นผิว ผลการวิเคราะห์ พบว่า อุณหภูมิของผิวดินมีค่าเฉลี่ย 26.2 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างของผิวดินและผิวน้ำ มีค่าเฉลี่ย 7.3 และ 7.5 ตามลำดับ และค่าความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในดินมีค่าเฉลี่ย -211 mV ดังรายละเอียดในตาราง 4-9

ตาราง 4-9 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยสิ่งแวดล้อม

Parameter	N	Mean	S.D.	Minimum	Maximum
Soil Temperature (°C)	72	26.17	2.49	19.3	30.4
Soil pH	72	7.35	0.31	6.1	7.8
Water pH	72	7.53	0.49	6.1	8.3
Soil ORP (mV)	72	-198.53	20.28	-227.6	-124.6

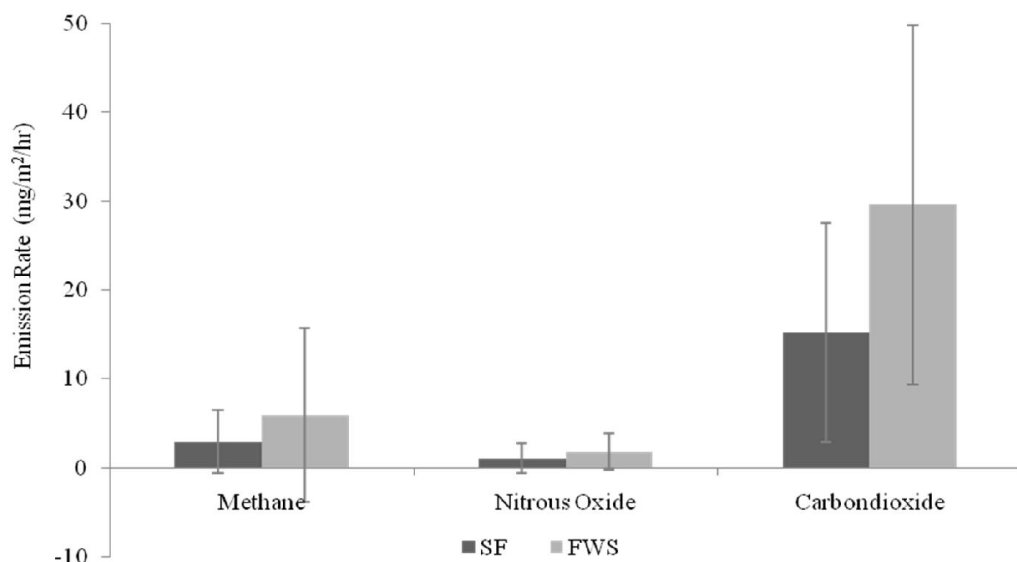
โดยสรุปแล้ว คุณลักษณะของดินในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ซึ่งเป็นสภาพดินที่มีน้ำท่วมขังตลอดระยะเวลาการทดลอง ทำให้ดินมีความชื้นสูง ออกซิเจนลดลง ค่า soil oxidation reduction potential (ORP) ซึ่งเป็นค่าดัชนีชี้วัดแนวโน้มของความแตกต่างกันของการยอมให้และรับออกซิเจนของดิน มีค่า -200 มิลลิโวลต์ จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้

ออกซิเจน (Lindau *et al.*, 1991) สำหรับค่าความเป็นกรดต่างของดิน (pH) พบว่าอยู่ในช่วงที่มีค่าเป็นกลางนั้น เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Wang *et al.*, 1993) นอกจากนี้อุณหภูมิดินก็อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทน คือประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส

4.3.3 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ต่างๆ

4.3.3.1 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางกับ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว ซึ่งล้วนปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus sp.*) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของชุดข้อมูล พบว่า ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ ขาดคุณลักษณะของการกระจายตัวแบบโค้งปกติ (Normal distribution) อีกทั้งข้อมูลยังขาดคุณลักษณะด้าน Homogeneity of variances จึงใช้สถิติแบบ Non-parametric statistics ในการทดสอบ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ คือ Mann-Whitney U Test ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 ประเภทนี้ มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่อัตราการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์โดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4-23 และตาราง 4-10



รูปที่ 4-23 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินกลางกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

ตาราง 4-10 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้
ผิวตัวกลางกับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวโดยเทคนิค Mann-Whitney
U Test

GHG /CW		GHG fluxes (mg/m ² /hr)			Mean difference	Sig. (2-tailed)
		N	Mean	S.D.		
CH ₄	SF <i>Cyperus</i>	72	2.89	3.55	-3.03	0.022*
	FWS <i>Cyperus</i>	72	5.92	9.82		
	Total	144	4.41	7.51		
N ₂ O	SF <i>Cyperus</i>	72	1.05	1.70	-0.76	0.108
	FWS <i>Cyperus</i>	72	1.80	2.06		
	Total	144	1.42	1.92		
CO ₂	SF <i>Cyperus</i>	72	15.18	12.32	-14.43	0.000**
	FWS <i>Cyperus</i>	72	29.61	20.25		
	Total	144	22.39	18.20		

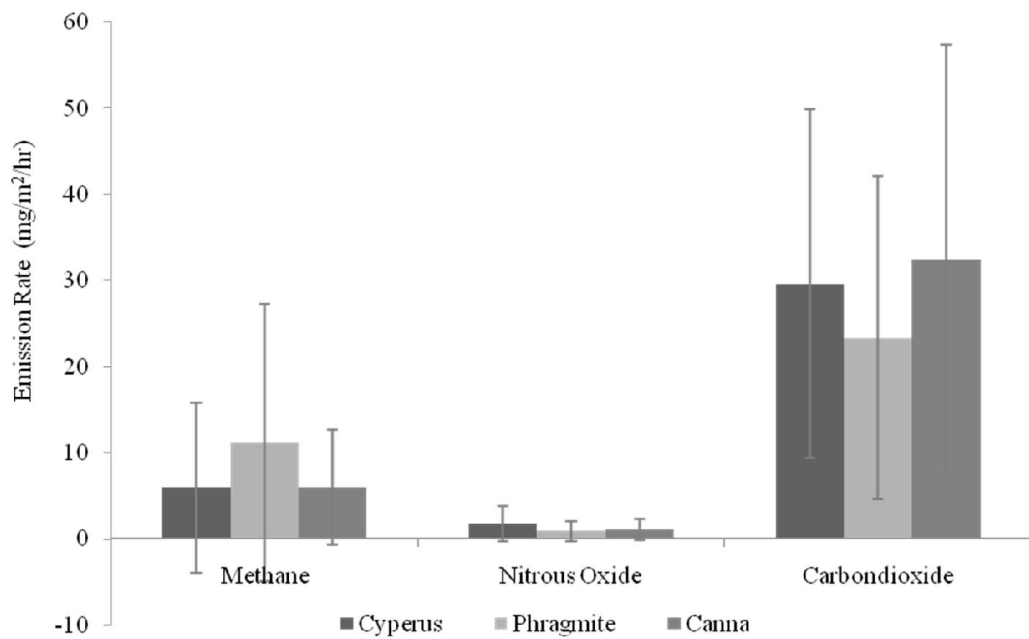
* significant at the 0.05 level

** significant at the 0.01 level

4.3.3.2 การเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์ที่ปลูกพืชแตกต่างกัน

ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำ
ประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกพืชต่างชนิดกัน ได้แก่ กก (*Cyperus* sp.) อ้อ (*Phragmite* sp.)
และพุทธรักษา (*Canna* sp.) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของชุดข้อมูล พบว่า ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้
ขาดคุณลักษณะของการกระจายตัวแบบโค้งปกติ (Normal distribution) อีกทั้งข้อมูลยังขาด
คุณลักษณะด้าน Homogeneity of variances จึงเลือกใช้สถิติแบบ Non-parametric statistics ใน
การทดสอบ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ คือ Chi-Square Test (Kruskal Wallis) หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์
เปรียบเทียบรายคู่ (Post Hoc) โดยใช้เทคนิค Mann-Whitney U Test ซึ่งผลจากการวิเคราะห์
พบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้ มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์โดย
เฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่อัตราการปลดปล่อยก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์โดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) และผลการวิเคราะห์ดังกล่าว บ่งชี้ว่า พืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ ขณะเดียวกันก็มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ต่ำกว่าพืชชนิดอื่น ๆ โดยพืชที่มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สูงสุด คือ พืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) ดังแสดงผลการวิเคราะห์ที่ในรูปที่ 4-24 และตาราง 4-11



รูปที่ 4-24 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกพืชแตกต่างกัน

ตาราง 4-11 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกพืชแตกต่างกัน โดยใช้เทคนิค Chi-Square (χ^2) Test (Kruskal Wallis)

GHG /Plant-FWS		GHG flux (mg/m ² /hr)					χ^2	Asymp. Sig (2-tailed)
		N	Mean	S.D.	Min	Max		
CH ₄	<i>Phragmite</i>	72	11.16	16.10	0.00	113.87	9.88	0.007**
	<i>Canna</i>	72	6.01	6.70	0.00	39.96		
	<i>Cyperus</i>	72	5.92	9.82	0.00	71.56		
	Total	216	7.70	11.76	0.00	113.87		
N ₂ O	<i>Phragmite</i>	72	0.88	1.17	0.08	6.06	7.06	0.029*
	<i>Canna</i>	72	1.04	1.20	0.02	6.67		
	<i>Cyperus</i>	72	1.80	2.06	0.03	7.32		
	Total	216	1.24	1.58	0.02	7.32		
CO ₂	<i>Phragmite</i>	72	23.35	18.71	1.18	92.22	5.86	0.053
	<i>Canna</i>	72	32.39	24.96	0.93	110.60		
	<i>Cyperus</i>	72	29.61	20.25	0.00	76.18		
	Total	216	28.45	21.70	0.00	110.60		

* significant at the 0.05 level

** significant at the 0.01 level

ตาราง 4-12 การเปรียบเทียบรายคู่ (Post hoc) อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำ
 ประดิษฐ์ที่ปลูกพืชแตกต่างกัน โดยใช้เทคนิค Mann-Whitney U Test

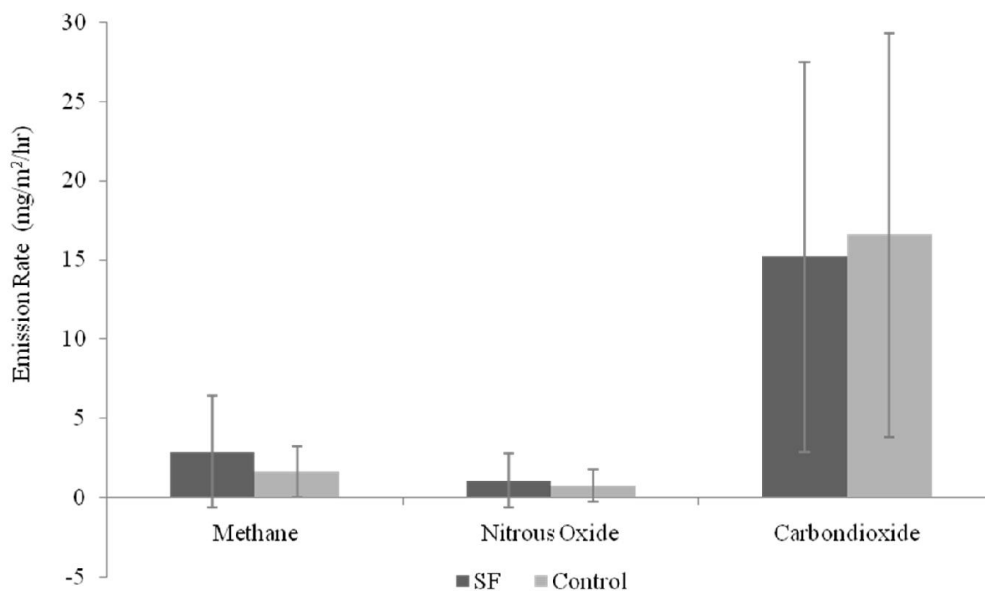
GHG	(i) plant	(j) plant	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
CH ₄	<i>Phragmite</i>	<i>Canna</i> *	5.15	1.925	0.024
		<i>Cyperus</i> *	5.24	1.925	0.021
	<i>Canna</i>	<i>Phragmite</i> *	-5.15	1.925	0.024
		<i>Cyperus</i>	0.09	1.925	1.000
	<i>Cyperus</i>	<i>Phragmite</i> *	-5.24	1.925	0.021
		<i>Canna</i>	-0.09	1.925	1.000
N ₂ O	<i>Phragmite</i>	<i>Canna</i>	-0.17	0.256	1.000
		<i>Cyperus</i> *	-0.92	0.256	0.001
	<i>Canna</i>	<i>Phragmite</i>	0.17	0.256	1.000
		<i>Cyperus</i> *	-0.76	0.256	0.010
	<i>Cyperus</i>	<i>Phragmite</i> *	0.92	0.256	0.001
		<i>Canna</i> *	0.76	0.256	0.010

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

4.3.3.3 การเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์กับบ่อควบคุม (Control Unit)

เปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง กับบ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช

ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางกับบ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของชุดข้อมูลพบว่า ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ ขาดคุณลักษณะของการกระจายตัวแบบโค้งปกติ (Normal distribution) อีกทั้งข้อมูลยังขาดคุณลักษณะด้าน Homogeneity of variances จึงเลือกใช้สถิติแบบ Non-parametric statistics ในการทดสอบ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ คือ Mann-Whitney U Test ผลการวิเคราะห์ พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์โดยเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่อัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) และผลการวิเคราะห์ดังกล่าว บ่งชี้ว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และไนตรัสออกไซด์สูงกว่าบ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4-25 และตาราง 4-13



รูปที่ 4-25 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางกับบ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช

ตาราง 4-13 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้
ผิวดินกลางกับบ่อควบคุม โดยเทคนิค Mann-Whitney U Test

GHG /CW		GHG fluxes (mg/m ² /hr)			Mean difference	Asymp. Sig. (2-tailed)
		N	Mean	S.D.		
CH ₄	SF Cyperus	72	2.89	3.55	1.25	0.008**
	Control	72	1.64	1.58		
	Total	144	2.26	2.81		
N ₂ O	SF Cyperus	72	1.05	1.70	0.31	0.017*
	Control	72	0.74	1.04		
	Total	144	0.89	1.41		
CO ₂	SF Cyperus	72	15.18	12.32	-1.38	0.373**
	Control	72	16.56	12.75		
	Total	144	15.87	18.20		

* significant at the 0.05 level

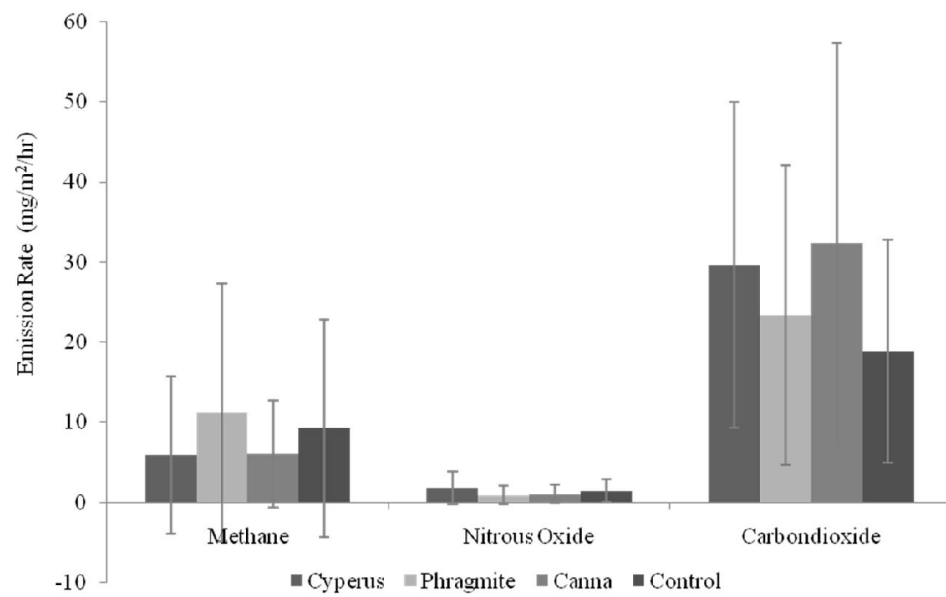
** significant at the 0.01 level

การเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบแบบไหลผ่านพื้นผิวกับบ่อควบคุมที่มีได้ ปลูกพืช

ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวกับบ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของชุดข้อมูลพบว่า ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ ขาดคุณลักษณะของการกระจายตัวแบบโค้งปกติ (Normal distribution) อีกทั้งข้อมูลยังขาดคุณลักษณะด้าน homogeneity of variances จึงเลือกใช้สถิติแบบ Non-parametric statistics ในการทดสอบ ซึ่งเทคนิคที่ใช้คือ Chi-Square Test (Kruskal Wallis) หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่ (Post Hoc) โดยใช้เทคนิค Mann-Whitney U Test โดยวิเคราะห์เฉพาะตัวแปร (ก๊าซ) ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการวิเคราะห์ มีดังนี้

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวกับบ่อควบคุม มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่อัตราการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์โดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) และผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่ (Post Hoc) ยังบ่งชี้ว่า แม้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกพืชจำพวกอ้อ (*Phragmites* sp.) จะมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงที่สุด เมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่นๆ แต่บ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช ก็มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงกว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกพืชชนิดต่างๆ ก็คือ กก และพุทธรักษา และยังพบว่า บ่อควบคุมมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4-26 และตาราง 4-14

ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะกลไกของพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ มีบทบาททั้งในด้านการลดและเพิ่มปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ด้วยเหตุผล 3 ประการ คือ (1) สารที่หลั่งจากรากพืช (root exudate) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน สามารถกลายเป็นแหล่งอินทรีย์วัตถุ ทำให้เกิดก๊าซมีเทนปริมาณมาก อีกทั้งการผลิตก๊าซมีเทนมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับปริมาณการปล่อยสารหลั่งจากรากพืชเหล่านี้ (Auklah *et al.*, 2001) (2) พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ แสดงบทบาทเสมือนเป็นท่อปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ เพราะหากเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซผ่านต้นพืช กับกระบวนการแพร่ผ่านผิวน้ำ (Diffusion) หรือเคลื่อนที่ออกไปในรูปของฟองอากาศลอยสู่ผิวน้ำ (Ebullition) พบว่า การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกผ่านต้นพืช มีอัตราสูงถึงร้อยละ 90-95 ของปริมาณการปล่อยก๊าซ โดยก๊าซเรือนกระจกจะถูกแพร่กระจายผ่านทางรากพืช ผ่านช่องอากาศภายใน aerenchyma และปล่อยออกสู่บรรยากาศทางใบและกาบใบ ดังนั้น ลักษณะสัณฐานวิทยาของพืช เช่น ปริมาณช่องอากาศในราก กาบใบ และ aerenchyma ของพืชแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างกัน ย่อมทำให้ความสามารถในการส่งก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศแตกต่างกันไปด้วย (3) นอกจากพืชจะมีบทบาทเป็นท่อปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศแล้ว ทอดังกล่าวยังสามารถนำก๊าซออกซิเจนจากบรรยากาศผ่านเข้ามาสู่ระบบรากพืช ทำให้เกิดภาวะมีออกซิเจน ซึ่งไปยับยั้งกระบวนการการผลิตก๊าซมีเทน อีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ข้อค้นพบในการศึกษารั้งนี้ บ่งชี้ว่า บทบาทของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีแนวโน้มไปในทางช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ



รูปที่ 4-26 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่าน
พื้นผิวที่ปลูกพืชต่างชนิดกับบ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช

ตาราง 4-14 เปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่าน
พื้นที่ปลูกพืชต่างชนิดกับบ่อควบคุมที่มีได้ปลูกพืช โดยใช้เทคนิค Chi-Square (χ^2)
Test (Kruskal Wallis)

GHG /CW		GHG flux (mg/m ² /hr)					χ^2	Asymp. Sig (2-tailed)
		N	Mean	S.D.	Min	Max		
CH ₄	FWS Phragmite	72	11.16	16.10	0.00	113.87	10.62	0.014*
	FWS Canna	72	6.01	6.70	0.00	39.96		
	FWS Cyperus	72	5.92	9.82	0.00	71.56		
	Control	72	10.84	13.11	0.39	68.57		
	Total	288	8.48	12.16	0.00	113.87		
N ₂ O	FWS Phragmite	72	0.88	1.17	0.08	6.06	7.61	0.055
	FWS Canna	72	1.04	1.20	0.02	6.67		
	FWS Cyperus	72	1.80	2.06	0.03	7.32		
	Control	72	1.43	1.43	0.10	4.70		
	Total	288	1.28	1.54	0.02	7.32		
CO ₂	FWS Phragmite	72	23.35	18.71	1.18	92.22	16.31	0.001**
	FWS Canna	72	32.39	24.96	0.93	110.60		
	FWS Cyperus	72	29.61	20.25	0.00	76.18		
	Control	72	18.84	13.97	0.67	71.31		
	Total	288	26.05	20.46	0.00	110.60		

* significant at the 0.05 level

** significant at the 0.01 level

ตาราง 4-15 การเปรียบเทียบรายคู่ (Post hoc) อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำ
ประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกพืชต่างชนิดกับบ่อควบคุม Mann-Whitney U Test

GHG	(i) plant	(j) plant	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
CH ₄	Phragmite	Canna	5.15	1.993	0.054
		Cyperus*	5.24	1.993	0.044
		Control	0.32	1.993	0.998
	Canna	Phragmite	-5.15	1.993	0.050
		Cyperus	0.09	1.993	1.000
		Control*	-4.83	1.993	0.045
	Cyperus	Phragmite*	-5.24	1.993	0.044
		Canna	-0.09	1.993	1.000
		Control*	-4.92	1.993	0.046
	Control	Phragmite	-0.32	1.993	0.784
		Canna*	4.83	1.993	0.045
		Cyperus*	4.91	1.993	0.046
CO ₂	Phragmite	Canna*	-9.04	3.310	0.034
		Cyperus	-6.26	3.310	0.234
		Control	4.50	3.310	0.526
	Canna	Phragmite	9.04	3.310	0.486
		Cyperus	2.78	3.310	0.836
		Control*	13.54	3.310	0.000
	Cyperus	Phragmite	6.26	3.310	0.234
		Canna	-2.78	3.310	0.836
		Control*	10.76	3.310	0.007
	Control	Phragmite	-4.50	3.310	0.526
		Canna*	-13.54	3.310	0.000
		Cyperus*	-10.76	3.310	0.007

*ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยคิดที่นัยสำคัญทางสถิติที่ร้อยละ 95

4.4 การเปรียบเทียบศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (Global warming potential)

การค้นหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CH_4 , N_2O , CO_2) จากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน ทำการเปรียบเทียบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แต่ละชนิดในด้านประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ควบคู่กับอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนของก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ดังตาราง 4-16 และ 4-17

หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งมีสารมลพิษที่สำคัญคือ ค่าความสกปรกในรูปบีโอดี หากจัดลำดับประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยพิจารณาจากค่าบีโอดีเป็นหลัก จะพบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีสูงสุด รองลงมาคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) ขณะที่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna* sp.) มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด ดังแสดงในตาราง 4-16

ตาราง 4-16 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบต่าง ๆ

ชนิดบีงประดิษฐ์	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)			
	BOD	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP
SF <i>Cyperus</i>	61.26	49.26	39.92	48.42
FWS <i>Cyperus</i>	59.53	50.71	41.13	39.05
FWS <i>Phragmite</i>	69.97	67.17	25.24	40.16
FWS <i>Canna</i>	56.85	58.83	42.52	45.23

สำหรับอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) มีศักยภาพในการทำให้โลกร้อนต่ำที่สุด คือ $392.4 \text{ GWP/m}^2/\text{hr}$ ขณะที่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) มีศักยภาพในการทำให้โลกร้อนสูงที่สุด $698.6 \text{ GWP/m}^2/\text{hr}$ รองลงมาคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) เท่ากับ $540.5 \text{ GWP/m}^2/\text{hr}$ และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna* sp.) $478.46 \text{ GWP/m}^2/\text{hr}$ ตามลำดับ ดังตาราง 4-17

ตาราง 4-17 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์กับศักยภาพในการทำให้โลกร้อน

ชนิดบึงประดิษฐ์	Emissions (mg/m ² /hr)			GWP Net GHGs (GWP/m ² /hr)			
	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	Total
SF <i>Cyperus</i>	2.89	1.05	15.18	66.47	310.8	15.18	392.45
FWS <i>Cyperus</i>	5.92	1.80	29.61	136.16	532.8	29.61	698.57
FWS <i>Phragmite</i>	11.16	0.88	23.35	256.68	260.48	23.35	540.51
FWS <i>Canna</i>	6.01	1.04	32.39	138.23	307.84	32.39	478.46

* GWPs CH₄ เท่ากับ 23 และ GWPs N₂O เท่ากับ 296 (100 Year Time Horizon) (IPCC, 2001),

จากผลการวิเคราะห์ พอสรุปได้ว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดบิโอดีในน้ำเสียชุมชน ทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษ และการไม่เพิ่มภาระต่อภาวะโลกร้อน หากไม่สามารถใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ทางเลือกในลำดับถัดไปคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) และสำหรับการบำบัดสารมลพิษในรูปแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำทิ้งชุมชน พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna* sp.) ก็เป็นอีกทางเลือกที่เหมาะสม กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ พืชเป็นปัจจัยสำคัญ ทั้งในกลไกของการบำบัดน้ำเสีย และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้น การเลือกชนิดพืชให้เหมาะสมกับสารมลพิษที่จะบำบัด จึงเป็นสิ่งสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) และแบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) ที่ใช้พืชสามชนิด ต้นอ้อ (*Phragmites* sp.) กก (*Cyperus* sp.) และพุทธรักษา (*Canna* sp.) ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนในช่วงเวลา 2 ปีที่ทำการศึกษาค้นคว้าพบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษามีความสามารถในการบำบัดสารมลพิษทางน้ำที่เกิดจากน้ำทิ้งชุมชนได้แตกต่างกันตามชนิดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์และพืชเชิงเดี่ยวที่ใช้เลือกใช้ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสารมลพิษทางน้ำในรูปของบีโอดี ซีโอดี ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย และฟอสฟอรัสรวม สรุปได้ดังนี้

ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาในการบำบัดบีโอดี ซีโอดี ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย และฟอสฟอรัสรวม มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 57-70, 49-67, 25-41 และ 39-48 ตามลำดับ โดยระบบของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีได้ดีที่สุดคือพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยต้นอ้อ (*Phragmites* sp.) ที่สามารถบำบัดบีโอดีได้สูงประมาณร้อยละ 70 ขณะที่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางที่ปลูกด้วยกก (*Cyperus* sp.) สามารถบำบัดซีโอดีได้สูงที่สุดประมาณร้อยละ 67 ส่วนการบำบัดไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียระบบที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพุทธรักษา (*Canna* sp.) สามารถบำบัดไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียได้ประมาณร้อยละ 42 สำหรับฟอสฟอรัสรวมในน้ำทิ้ง ระบบที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุดคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางที่ใช้กก (*Cyperus* sp.) สามารถบำบัดได้ประมาณร้อยละ 48

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบำบัดสารมลพิษทางน้ำระหว่างพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 2 ประเภท คือ แบบไหลใต้ผิวดักกลาง กับแบบไหลผ่านพื้นผิว พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองประเภท มีความสามารถในการบำบัดทั้งคู่แต่ประสิทธิภาพที่ได้จากการบำบัดแตกต่างกันไป โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางสามารถบำบัดสารมลพิษในรูปซีโอดีและฟอสฟอรัสรวมได้สูงกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ขณะที่ความสามารถในการบำบัดสารมลพิษในรูปบีโอดีและแอมโมเนียไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองประเภทไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

หากพิจารณาพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวโดยเปรียบเทียบเฉพาะพืชต่างชนิดกัน คือ กก (*Cyperus sp.*) อ้อ (*Phragmite sp.*) และพุทธรักษา (*Canna sp.*) พบว่า พืชทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี ซีโอดี และแอมโมเนียไนโตรเจนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite sp.*) มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีและซีโอดีได้สูงกว่าอ้อและพุทธรักษา ขณะที่พุทธรักษา (*Canna sp.*) มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนสูงที่สุด สำหรับการบำบัดฟอสฟอรัสรวมพบว่า พืชทั้งสามชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ความสามารถในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชนของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีประสิทธิภาพโดยรวมที่ไม่เทียบเท่ากับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการศึกษาของ วรากร เกิดทรัพย์ (2543), กลอยกาญจน์ เก้าเนตรสุวรรณ (2544), ศุวศา กานตวนิชกูร (2546), ภัทรา วงษ์พันธุ์มกล และคณะ (2548) เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการศึกษามีได้มีเป้าหมายเพียงการบำบัดน้ำทิ้ง แต่เป็นการใช้สภาวะของการบำบัดน้ำทิ้งที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีความสำคัญกับวิกฤติการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศร่วมด้วย เพื่อมิให้การใช้งานของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำทิ้งกลายเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ย้อนกลับไปส่งผลกระทบต่อภูมิอากาศ

การประเมินอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CH_4 , N_2O , CO_2) จากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน รวมทั้งศึกษาการผันแปรตามฤดูกาล พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษา มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง $2.9\text{--}11.2 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$, $0.9\text{--}1.8 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ และ $15.2\text{--}32.4 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ ตามลำดับ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินปลูกด้วยกก (*Cyperus sp.*) มีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยก๊าซมีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 2.9 ± 3.5 , 1.05 ± 1.7 และ $15.2 \pm 12.3 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ ตามลำดับ ขณะที่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวปลูกด้วยกก (*Cyperus sp.*) มีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยก๊าซมีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 5.9 ± 9.8 , 1.8 ± 2.1 และ $29.6 \pm 20.2 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวปลูกด้วยอ้อ (*Phragmite sp.*) มีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยก๊าซมีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 11.2 ± 16.1 , 0.9 ± 1.2 และ $23.3 \pm 18.7 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ ตามลำดับ และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวปลูกด้วยพุทธรักษา (*Canna sp.*) มีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยก๊าซมีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 6.0 ± 6.7 , 1.0 ± 1.2 และ $32.4 \pm 24.9 \text{ mg/m}^2/\text{hr}$ ตามลำดับ

การเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน กลาง กับ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้งสองประเภท มีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวปลดปล่อยก๊าซดังกล่าวในอัตราสูงกว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินขณะที่อัตราการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์โดยเฉลี่ยของพื้นที่ชุ่มน้ำทั้งสองประเภทไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

การเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกพืชต่างชนิดกัน ได้แก่ กก (*Cyperus* sp.) อ้อ (*Phragmites* sp.) และพุทธรักษา (*Canna* sp.) พบว่า พืชทั้งสามชนิดในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้ มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์โดยเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่อัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) และผลการวิเคราะห์ดังกล่าว บ่งชี้ว่า พืชจำพวกอ้อ (*Phragmites* sp.) มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ ขณะเดียวกันก็มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ต่ำกว่าพืชชนิดอื่น ๆ โดยพืชที่มีอัตราการปลดปล่อยก๊าซ ไนตรัสออกไซด์สูงสุด คือ พืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.)

5.1 แนวทางที่เหมาะสมในพัฒนาให้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงสุด โดยปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำที่สุด

ผลการทดลองบ่งชี้ถึงสถานะที่เหมาะสมในการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CH_4 , N_2O , CO_2) จากพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน พิจารณาจากประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบต่าง ๆ ควบคู่กับอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน พอสรุปได้ว่า

หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งมีสารมลพิษที่สำคัญคือ ค่าความสกปรกในรูปบีโอดี หากจัดลำดับประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยพิจารณาจากค่าบีโอดีเป็นหลัก จะพบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmites* sp.) มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีสูงสุด รองลงมาคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) ขณะที่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna* sp.) มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจนสูงสุด

สำหรับอัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) มีศักยภาพในการ

ทำให้โลกร้อนต่ำที่สุด คือ 392.4 GWP/m²/hr ขณะที่พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) มีศักยภาพในการทำให้โลกร้อนสูงที่สุด 698.6 GWP/m²/hr รองลงมาคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) เท่ากับ 540.5 GWP/m²/hr และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา

ดังนั้น พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินที่ปลูกด้วยพืชจำพวกกก (*Cyperus* sp.) เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดปิโอดีในน้ำเสียชุมชน ทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษ และการไม่เพิ่มภาระต่อภาวะโลกร้อน หากไม่สามารถใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน ทางเลือกในลำดับถัดไปคือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกอ้อ (*Phragmite* sp.) และสำหรับการบำบัดสารมลพิษในรูปแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำทิ้งชุมชน พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวที่ปลูกด้วยพืชจำพวกพุทธรักษา (*Canna* sp.) เป็นอีกทางเลือกที่เหมาะสม กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ พืชเป็นปัจจัยสำคัญ ทั้งในกลไกของการบำบัดน้ำเสีย และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้น การเลือกชนิดพืชให้เหมาะสมกับสารมลพิษที่จะบำบัด จึงเป็นสิ่งสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ให้สามารถทำหน้าที่บำบัดน้ำทิ้งชุมชนและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

1. การพิจารณาใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์แบบอัตโนมัติ พื้นที่ทำการทดลอง จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์แบบต่อเนื่องตามเวลาจริง (real time) อีกทั้งยังเป็นการลดค่าความคลาดเคลื่อนในการเก็บรักษาตัวอย่างก๊าซเพื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์ในห้องปฏิบัติการได้อีกทางหนึ่ง
2. การศึกษาชนิดของพืชที่ใช้ในการศึกษาให้หลากหลายมากขึ้นจะช่วยอธิบายและสร้างความเข้าใจให้เพิ่มมากขึ้น
3. การศึกษาปัจจัยอื่นเพิ่มเติมเป็นส่วนเสริมให้เกิดการประยุกต์ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชนได้อย่างมั่นใจ อาทิ ระยะเวลาเก็บกักน้ำ ค่าการออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เป็นต้น

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. (2547). **โครงการพัฒนาแนวทางด้านเทคนิคและสาธิตระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์**. ฝ่ายคุณภาพสิ่งแวดล้อมและห้องปฏิบัติการ, กรมควบคุมมลพิษ. กรุงเทพฯ.
- กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ. (2544). **การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน**. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดุสิต จิตตนนท์, มงคล จันทรเพ็ญ และนิสากร พลบูรณ์. (2537). **ดินและวิธีการเก็บตัวอย่างดิน**, กรมส่งเสริมการเกษตร กรุงเทพฯ.
- พิริฐพล ตนานนท์. (2544). **การบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน**. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภัทรา วงษ์พันธ์กุล และคณะ. (2548). **รายงานการวิจัยเรื่อง ระบบบำบัดน้ำเสียบึงประดิษฐ์ด้วยหญ้าแฝกและผักบุ้ง**. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพายัพ
- วรกร เกิดทรัพย์. (2543). **การใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินเพื่อการบำบัดขั้นที่สามสำหรับน้ำชะมูลฝอย**. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศุภา กานตวนิชกุล. (2544). **รายงานการวิจัยเรื่อง การบำบัดไนโตรเจนโดยระบบ Combined constructed wetland ในเขตอากาศร้อน**. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ศุภา กานตวนิชกุล และคณะ. (2546). **การบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยระบบบึงประดิษฐ์แบบผสม**. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 2 (หน้า 365-371) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- สุจินต์ พนาปวุฒิกุล. (2539). **การบำบัดน้ำเสียชุมชนและอุตสาหกรรมโดยใช้ต้นอ้อหรือต้นกก (Reed-Bed) ในกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน. เดอะกรีนเพื่อสิ่งแวดล้อม 3(26) : 76-84**

- Akiyama H., Tsuruta H. and Watanabe T. (2000). N₂O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers”, **Chemosphere: Global Change Science**, 2: 313-320.
- APHA-AWWA-WEF. (2005). **Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater**, (21st ed). American Public Health Association, Washington, DC.
- Aulakh, M.S., Wassmann, R., Bueno, C., Rennenberg, H. (2001). Impact of root exudates of different cultivars and plant development stage of rice (*Oryza sativa* L.) on methane production in a paddy soil, **Plant and Soil**, 230: 70-86.
- Bartlett, K.B., Croll, P.M., Sebacher, D.I., Harriss, R.C., Wilson, J.O., and Melack, J.M. (1988). Methane flux from the central amazonian floodplain. **J. of Geo Res**, 93: 1571-1582.
- Bastian, R.K., Shanaghan, P.E. and Thompson, B.P. (1989). Use of wetlands for municipal wastewater treatment and disposal-regulatory issues and EPA policies. In D.A. Hammer (ed.). **Constructed wetland for wastewater treatment: Municipal industrial and agricultural**. Boca Raton: Lewis.
- Black, C.A. (1965). **Method for soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties**. Wisconsin: American Society of Agronomy Publisher.
- Braatz, B., and Hogan, K. (1991). **Sustainable Rice Productivity and Methane Reduction Research Plan**, United States Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Washington D. C.
- Brix, H., Sorrell, B.K., Lorenzen, B. (2001). Are phragmites – dominated wetlands a net a net sink of greenhouse gases? **Aquat. Bot.** 69: 313-324.
- Brix, H., Kootatep, T., and laugesen, C.H. (2006). Re-establishment of wastewater treatment in tsunami affected areas of Thailand by the use of constructed wetlands, In: **Proceedings 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, MAOTDR 2006**, Lisbon, Portugal, pp. 59-67.
-

- Buddhawong, S. (1996). **Efficiency of *Cyperus corymbosus* and *Eleocharis dulcis* in constructed wetland for municipal wastewater treatment**. M.S. thesis, Chulalongkorn University.
- Chen, G.X., Huang, G.H., Yu, K.W., J. Wu and H. Xu. (1997). Nitrous oxide and methane emissions from soil-planted systems, **Nutrient Cycling in Agro. Ecosystems**, 49: 41-45.
- Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B., and Shutes, R.B.E. (1996). **Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment**, WRc Swindon, Wiltshire.
- Dobbie K.E., Mc. Taggart I.P., and Smith K.A. (1999). Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: Variations between crops and seasons: key driving variables: and mean emission factors, **Journal of Geographical Research**, 104: 26,891-26,899.
- Dow, K. and Downing, T.E. (2007). **The atlas of climate change: Mapping the world's greatest challenge**. Berkeley: University of California Press.
- Granli T. and Bockman O.C. (1994). Nitrous oxide from agriculture, **Nor. J. Agriculture Science Supply**, 12:128.
- Gui, P., Inamori, R., Matsumura M., Inamori Y. (2007). Evaluation of constructed wetlands by wastewater purification ability and greenhouse gas emissions. **Water Science & Technology**, 56: 49–55.
- Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Levedeff, S., Lee, P., and Russell G. (1981). Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide, **Science**, 213: 957-966.
- Heinss, U. and Koottatep, T. (1998). Use of Reed Beds for Faecal Sludge Dewatering. EAWAG/AIT. Unpublished report.
- Hites, R.A., and Raff, J.D. (2012). **Elements of environmental chemistry**. New Jersey: Wiley.
-

- Hou, A.X., Chen, G.X., Wang, Z.P., Van Cleemput, O. and Patrick, W.H. (2000). Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes, **Soil Science Society America Journal**, 64: 2180-2186.
- Houweling *et al.* (1999). Trace Gases: Current Observations, Trends, and Budgets. **Climate Change 2001**. United Nations Environment Programme.
- Hutchinson, G.L. and A.R. Mosier. (1981) Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. **Soil Science Society America Journal**, 45:311-316.
- Inamori, R., Gui, P., Dass, P., Matsumura, M., Xu, K-Q., Kondo, T., Ebie, Y., and Inamori, Y. (2007). Investigating CH₄ and N₂O emissions from eco-engineering wastewater treatment processes using constructed wetland microcosms. **Process Biochemistry**, 42:363-373.
- Intergovernmental panel on climate change (IPCC). (2001). **Climate change 2001: the scientific basis. Summary for policy makers**. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Intergovernmental panel on climate change (IPCC). (2007). **Climate Change 2007: The physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Johansson A.E., Klemetsson Å.K., Klemetsson L., Svensson B.H. (2003). Nitrous oxide exchanges with the atmosphere of a constructed wetland treating wastewater: Parameters and implications for emission factors. **Tellus B**, 55: 737-750.
- Kadlec, R.H. and Knight, R.L. (2008). **Treatment Wetlands** (2nd ed). New York: Lewis Publisher.
- Kaewkamthong, N. (2002). **Methane emission from constructed wetland**. M. Phil. thesis, King Mongkut's University of Technology.
-

- Kernan, M. Battarbee, R.W., and Moss, B. (2010). **Climate change impacts on freshwater ecosystems**. New Jersey: Wiley-Blackwell.
- Kuzyakov, Y., Ehrensberger, H., Stahr, K (2001) Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne*. **Soil Biol. Biochem.** 33, 61–74.
- Lee, H. (2011). **Climate change biology**. Massachusetts: Academic Press.
- Levenspiel, O. (1972). **Chemical reaction engineering**. New York: Wiley.
- Liikanen, A., Huttunen, J.T., Karjalainen, S.M., Heikkinen K., Tero S. Väisänen, T.S., Nykänen, H., Martikainen, P.J. (2006). Temporal and seasonal changes in greenhouse gas emissions from a constructed wetland purifying peat mining runoff waters. **Ecological Engineering**, 26: 241-251.
- Lim, P.E and Polprasert, C. (1996). Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Resource Recovery, Environmental Systems Reviews, Thailand. unpublished.
- Lindau, C.W., Bollich, P. K., Delaune, R.D., Patrick, W.H. Jr., and Law, V.,J. (1991). Effect of Urea Fertilizer and environment Factors on Methane Emission from a Louisiana U.S.A. Rice Field, **Plant and Soil**, 136: 195-203.
- Lyman , F. (1990). **The greenhouse trap**. Massachusetts: Beacon Press.
- Mander, Ü., Löhmus, K., Teiter, S., Nurk, K., Mauring, T., and Augustin, J. (2005). Gaseous Fluxes from Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, 40: 1215 – 1226.
- Metcalf and Eddy. (1991). **Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse** (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Metz, B. (2010). **Controlling climate change**. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Minami K. (1997). Atmospheric methane and nitrous oxide: sources, sinks and strategies for reducing agricultural emission, Nutrient Cycling. **Agroecosystems**, 49: 203-211.
-

- Mosier, A R. (1998). Soil processes and global change. **Biol Fertil Soils**, 27: 221–229.
- Mosier A. and Kroeze C. (2000) Potential impact on the global atmospheric N₂O budget of the increased nitrogen input required to meet future global food demands, **Chemosphere Global Change Science**, 2: 465-473.
- Patruno, J. and Russell, J. (1994). Natural wetland polishing effluent discharging to Wooloweyah lagoon. **Water Science & Technology**, 20: 185-192.
- Philander, S.G. (2012). **Encyclopedia of global warming and climate change**. California: SAGE.
- Picek, T., Cizkova, H., Dusek, J. (2007). Greenhouse gas emissions from a constructed wetland -Plants as important sources of carbon. **Ecological Engineering**, 31: 98–106.
- Pittock, A.B. (2009). **Climate change: The science, impacts and solution**. London: Earthscan.
- Reynolds, M.P. (2010). **Climate change and crop production**. Cambridge, UK: Wallingford.
- Reed, S., Parten, S., Maatzen, G. and Pohren, R. (1996). Water reuse for sludge management and wetland habitat. **Water Science and Technology**. 33: 213-219.
- Reed, S.C., Middlebrooks, E.J., and Crites, R.W. (1988). **Natural System for Waste Management and Treatment**, New York: McGraw-Hill Inc.
- Reddy, K. R. and Debusk, W. F. (1987). Nutrient Storage Capabilities of Aquatic and Wetland Plants, in Reed, S.C. (eds.). **Aquatic Plants for Wastewater Treatment and Resource Recovery** (pp. 337-353). Orlando: Magnolia Public Inc.
- Schmidt, G. and Wolfe, J. (2009). **Climate change: Picturing the science**. New York: W.W. Norton.
- Schutz H., Seiler W. and Conrad R. (1989). Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies. **Biogeochem**, 7: 33-35.
-

- Sirianuntapiboon, S. (2000). Some properties of packed cage BRC system on treating of domestic wastewater. **Thammasat International Journal of Science and Technology**. 5(1): 40-49.
- Smith K.A., Mc. Taggart I.P. and Tsuruta H. (1997) Emissions of N_2O and NO associated with nitrogen fertilization for intensive agriculture and the potential for mitigation, **Soil Use Man** 13: 296-304.
- Søvik and Kløve. (2007). Emission of N_2O and CH_4 from a constructed wetland in southeastern Norway. **Science of the Total Environment** 380: 28–37
- Ström, L., Lamppa, A., Christensen, T. (2007). Greenhouse gas emissions from a constructed wetland in southern Sweden. **Wetlands Ecology and Management**. 15: 43-50.
- Tanner, C. C., Adams, D. D., and Downes, M. T. (1997). Methane emissions from constructed wetlands treating agricultural wastewaters. **Journal of Environmental Quality**. 26: 1056-1062.
- Theisen, A.A. and Matin, C.D. (1987). Removal of phenols from water by duckweed (lemnaceae). In K.R. Reddy and W.H. Smith (eds.). **Aquatic plant for wastewater treatment and resource recovery**. Magnolia.
- Teiter, s., and Mander, Ü. (2005). Emission of N_2O , N_2 , CH_4 , and CO_2 from constructed wetlands for wastewater treatment and from riparian buffer zones. **Ecological Engineering**, 25: 528–541.
- Urbance-Bercic, O. and Bulc, T. (1995). Integrated constructed wetland for small community. **Water Science & Technology**, 32: 41-48.
- U.S. EPA. (1988). **Design Manual Constructed Wetlands and Aquatic Plant System for Municipal Wastewater Treatment**, Office of Research and Development. Center for Environmental Research Information. Cincinnati, OH. EPA/625/1-88/022.
- U.S. EPA. (2000a). **Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters**. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C. EPA/625/R-99/010
-

- U.S. EPA. (2000b). **Wastewater Technology Fact Sheet, Wetland: Free Water Surface**. United States Environmental Protection Agency. Washington, D. C. EPA/832/F-00/024.
- U.S. EPA. (2000c). **Wastewater Technology Fact Sheet, Wetland: Subsurface Flow**. United States Environmental Protection Agency. Washington, D. C. EPA/832/F-00/023.
- Vymazal, J. (2001). Types of constructed wetlands for wastewater treatment: Their potential for nutrient removal. In: J. Vymazal (ed.). **Transformation of nutrient in natural and constructed wetlands**. Leiden: Backhuys Publishers
- Wang, P.Z., Delaune, D.R., Masscheleyn, H.P. and Patrick, H.W., Jr. (1993). Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. **Soil Science Society America Journal**, 57: 382-385.
- Wang, Y.H., Inamori, R., Kong, H.N., Xu, K.Q., Inamori, Y., Kondo, T., and Zhang, J.X. (2008). Nitrous oxide emission from polyculture constructed wetlands: effect of plant species. **Environmental Pollution**. 152: 351-360.
- Zhou, J.B., Jiang, M.M., Chen, B., and Chen, G.Q. (2009). Emery evaluation for constructed wetland and conventional wastewater treatment. **Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, 14: 1781-1789.
-