



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การสะสมและการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารพืชในระบบบำบัดน้ำเสีย
แบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น

โดย นางสาวศศิธร พุทรวงษ์

พฤษภาคม พ.ศ.2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การสะสมและการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารพืชในระบบบำบัดน้ำเสีย
แบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น

ผู้วิจัย

นางสาวศศิธร พุทธวงษ์

สังกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยเล่มนี้สำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา(สกอ.) ที่ให้ทุนอุดหนุนเพื่อการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิต เป็นอย่างสูงที่สละเวลาให้ความคิดเห็น คำปรึกษา และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยเป็นอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ มาลีสามพราน จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณ สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเวลาเพื่อศึกษาวิจัย และทำให้การทำรายงานการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG5180090

ชื่อโครงการ : การสะสมและการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารพืชในระบบบำบัด
น้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น

ชื่อนักวิจัย : ศศิธร พุทธวงษ์

E-mail Address : sasidhorn.bud@kmutt.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 15 พฤษภาคม 2551 ถึง 15 พฤษภาคม 2554

บทคัดย่อ :

พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเลียนแบบธรรมชาติถูกนิยมนำมาใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียมากขึ้นในปัจจุบัน การศึกษาสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันของพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น การศึกษาถึงกระบวนการบำบัดหรือวงจรของธาตุอาหารพืชในโตรเจนจะเป็นประโยชน์ต่อความสามารถในการบำบัดน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงวงจรและการเปลี่ยนแปลงรูปของธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจน ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นแบบน้ำไหลเหนือพื้นผิว และศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อความสามารถและประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นในการดูดซับหรือกำจัดธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจนในน้ำเสีย

การวิจัยในขั้นแรกได้ทำการศึกษาการสะสมและการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นแบบน้ำไหลเหนือพื้นผิวเพื่อบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ โดยใช้น้ำเสียจริงที่รวบรวมมาจากบ่อรวมตะกอนและบ่อหมักไร้อากาศชนิดสร้างกรดที่มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 4.49-4.59 มีค่าบีโอดี 1241-2310 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอดี 1967- 4158 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เคเอ็น (TKN) 24.5-29.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าแอมโมเนียไนโตรเจน 1.68-1.82 มิลลิกรัมต่อลิตร และศึกษาการสะสมในพืช 2 ชนิดคือธูปฤาษีและพุทธรักษา โดยใช้วัสดุตัวกลางต่างกันคือ ทรายและหินกรวด ที่มีระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 5 วัน (Hydraulic Retention Time; HRT) มีอัตราการบรรทุกทางชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate; HLR) 0.009 ลบ.ม.ต่อวัน

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากแปลงทดลองที่ปลูกธูปฤาษีที่มีทรายเป็นตัวกลาง และแปลงทดลองที่ปลูกธูปฤาษีที่มีกรวดเป็นตัวกลาง มีค่าบีโอดี ซีโอดี และไนโตรเจนลดลงแต่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ระบบที่ปลูกธูปฤาษีที่มีทรายตัวกลางเป็นให้ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี ซีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด และอินทรีย์ไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางที่เป็นทรายมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 70.0-90.48%, 68.49-77.82%, 70.28-84.79% และ 75.0-89.85% ตามลำดับ ส่วนแปลงทดลองที่มีการปลูกต้นธูปฤาษี ที่มีกรวดเป็นตัวกลางมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 75.48-88.25%, 67.18-76.89%, 76.61-86.31% และ 77.43-89.76% ตามลำดับ

พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่ปลูกพืชต่างกันทั้ง 2 ชนิด และมีตัวกลางที่แตกต่างกันสามารถลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียได้ โดยไนโตรเจนในน้ำเสียถูกเปลี่ยนรูปไปด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการทดลองที่มีค่าพีเอชเฉลี่ยเพิ่มขึ้นระหว่างพีเอช 6-8 ในขณะที่มีค่าออกซิเจนละลายและค่าโออาร์พีลดลง และไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนรูปได้อีกด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ที่เกิดขึ้น โดยพบปริมาณของไนโตรัสและแอมโมเนียเกิดขึ้นในระบบแต่พบในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย ซึ่งจะเกิดในสภาวะที่มีค่าโออาร์พีที่ลดลงและเป็นสภาวะแบบไร้อากาศมากยิ่งขึ้น จากการทดลองยังพบปริมาณแอมโมเนียในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าลดลงในขณะที่พบไนเตรทเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันในช่วงท้ายระหว่างวันที่ 40 ถึงวันที่ 90 ของการทดลอง และสรุปในภาพรวมของระบบพบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ผลการศึกษาในขั้นที่สอง ที่ศึกษาโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เลียนแบบน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนลดลงจากปริมาณระหว่าง 14 ถึง 19.7 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือประมาณ 1.1 มิลลิกรัมต่อลิตรในระบบที่ปลูกพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบ่อที่มีตัวกลางเป็นกรวดมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 88 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 75 ในบ่อทรายที่ปลูกพืช ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำสามารถลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียที่เข้าระบบที่มีค่าเฉลี่ยที่ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำออกของบ่อที่ปลูกพืช ส่วนในบ่อที่ไม่ปลูกพืชสามารถลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดลงได้แต่ยังพบปริมาณที่สูงถึงกว่า 9 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้พบว่าโดยเฉลี่ยแล้วระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนี้มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80

ในการศึกษาการเจริญเติบโตของพืช พบว่าต้นธูปฤาษีในระบบที่มีทรายเป็นตัวกลางและที่มีกรวดเป็นตัวกลาง มีความสูงเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือ 170.07 ± 54.99 และ 168.29 ± 54.25 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีความยาวรากเฉลี่ย 25.6 ± 1.2 และ 25.4 ± 0.8 เซนติเมตร ตามลำดับ ในต้นธูปฤาษีที่มีทรายเป็นตัวกลางและที่มีกรวดเป็นตัวกลางพบว่าการสะสมปริมาณที่เคเอ็น (TKN) ที่ไม่แตกต่างกันคือ 1.120 และ 1.176 มิลลิกรัมที่เคเอ็นต่อกรัมพืช ตามลำดับ ไนโตรเจนทั้งหมดถูกพบสะสมมากที่สุดในตัวกลางทรายของแปลงที่ปลูกพุทธรักษา คือ 2.38 ไมโครกรัมที่เคเอ็น/กรัมตัวกลาง

พื้นที่ชุ่มน้ำที่ปลูกด้วยธูปฤาษีและมีทรายเป็นตัวกลางนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแปลงที่ปลูกพุทธรักษาและที่ไม่มีการปลูกพืช โดยสามารถบำบัดความสกปรกในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ดังนั้นไม่ว่าระบบทดลองที่มีการปลูกธูปฤาษีหรือพุทธรักษาที่มีทรายเป็นตัวกลางนั้น จะสามารถแสดงประสิทธิภาพได้ดีกว่าหรือใกล้เคียงกับการปลูกในระบบที่มีกรวดเป็นตัวกลาง และทุกระบบของพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่มีการปลูกพืชนั้นสามารถที่จะบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก : ธาตุอาหารพืช/ ธูปฤาษี/ พุทธรักษา/ พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น /น้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม

Abstract

Project Code : MRG5180090

Project Title : Plant nutrient accumulation and dynamic in constructed wetland for wastewater treatment

Investigator : Sasidhorn Buddhawong

E-mail Address : sasidhorn.bud@kmutt.ac.th

Project Period : 15 May 2008 – 15 May 2011

Abstract:

Constructed wetlands (CW) as artificial natural wetlands are widely used for wastewater treatment. The study of various conditions, plant nutrient or nitrogen removal and cycle in constructed wetlands is beneficial for wetlands' competency for wastewater treatment. The main objectives of this study are to evaluate the plant nutrient accumulation and dynamic in surface flow constructed wetland for wastewater treatment and to study the relation of various factors effected to capacity of constructed wetlands for adsorption or treatment of nutrient nitrogen in wastewater.

The first study examines an accumulation and transformation of plant nutrient in surface flow constructed wetlands for treatment of juice industry wastewater. Real wastewater was collected from anaerobic acid ponds which have pH in range of 4.49-4.59, contains mass concentration of BOD as 1241-2310 mg/L, COD of 1967- 4158 mg/L, TKN of 24.5-29.5 mg/L, and ammonia nitrogen of 1.68-1.82 mg/L. Accumulation studies in *Typha angustifolia*(Typha) and *Canna sp.*(Canna) planted in different bed medias; sand and gravel, have been analyzed under hydraulic retention time (HRT) of 5 day, hydraulic loading rate (HLR) of 0.009 m³/day.

Outlet wastewater from CW planted with Typha which use sand and gravel as wetland's bed reveal that concentration of BOD, COD and nitrogen have been decreased, but with

no significant difference. CW with Typha and sand has performed the removal capacity of BOD, COD, total nitrogen and organic nitrogen in the range of 70.0-90.48%, 68.49-77.82%, 70.28-84.79% and 75.0-89.85%, respectively. On the other hand, CW with Typha and gravel has shown those removal capacities in the range of 75.48-88.25%, 67.18-76.89%, 76.61-86.31% and 77.43-89.76%, respectively.

CW planted with Typha or Canna which contained different material bed could be performed for wastewater treatment. Nitrogen contaminated in wastewater will be transformed by biological process. Nitrification occurs in earlier stage of treatment process when pH is in between 6-8, whereas dissolved oxygen and ORP decrease. On the other hand, nitrogen can be transformed by denitrification process which be observed by appearance of nitrite and ammonia in the CW, but with small amount. These nitrite and ammonia occur under reducing ORP and further anaerobic conditions. Results of experiments reveal that ammonia has been decreased but nitrate has been increased in an outlet of CW. These may be the results of nitrification occurred during the day between 40th -90th of experiment. However, the total nitrogen in wastewater has been decreased significantly.

Results of second study using artificial juice industrial wastewater indicate that organic nitrogen in treated wastewater of planted CW has been decreased from 14-19.7 mg/L to be 1.1 mg/L. Especially, the planted CW with gravel bed show 88% of organic nitrogen removal efficiency, and 75% in the CW with sand bed. The 33 mg/L of total nitrogen has been decreased to 2 mg/L in the planted CW, but has been found in higher amount of 9 mg/L in unplanted CW. These indicate removal efficiencies of total nitrogen using CW are not less than 70-80 percent.

Plant growths in this study indicate that there are similar average heights of Typha planted in CW with sand bed and gravel bed, which are 170.07 ± 54.99 and 168.29 ± 54.25 cm, respectively. Their average roots' length are 25.6 ± 1.2 and 25.4 ± 0.8 cm, respectively. TKN accumulations in Typha of CW with sand and gravel bed are not significantly different, between 25.6 ± 1.2 and 25.4 ± 0.8 mgTKN/g plant. Highest amount of total nitrogen has been found in sand bed of the CW planted with Canna as 2.38 $\mu\text{m/g}$.

CWs which planted with Typha and contained sand as bed show better removal efficiencies, in term of parameters for water quality, than CW without plant. Therefore, even the CWs planted with Typha or Canna and contain sand as the bed will indicate the better or similar removal efficiency with the CWs which have gravel as the bed material.

However, all the planted CW systems have been indicated the similar competency for nitrogen removal.

Keywords : Plant nutrient/ Typha/ Canna/ Constructed wetland/ Industrial wastewater

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่

การใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (Constructed wetland; CW) หรือระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบธรรมชาติเป็นกระบวนการหลักในการบำบัด หรือแบบกึ่งธรรมชาติ (Semi natural plant system) นับเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ยอมรับใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสียในปัจจุบัน ที่นอกเหนือไปจากวิธีบำบัดอื่นๆ อีกหลายวิธี เช่น เช่นการบำบัดโดยการเติมอากาศและการกวนให้ตกตะกอน หรือที่เรียกว่าระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) การใช้สารเคมีตกตะกอน (Chemical coagulation - flocculation) ซึ่งต้องใช้เทคโนโลยีสูง ซับซ้อน และต้องการค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอย่างมากเพื่อช่วยลดปัญหาทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานดังกล่าว ดังนั้น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น จึงเป็นวิธีที่นับว่ามีราคาไม่สูง จึงเป็นที่นิยมใช้มากขึ้นในประเทศที่กำลังพัฒนา (Mashauri et al., 2000) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพแต่ใช้ค่าลงทุนไม่มากนัก จึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งในประเทศแถบเอเชีย อเมริกา และยุโรป หากพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันไป ก็ย่อมจะส่งผลกระทบต่อกลไกและประสิทธิภาพของการบำบัด ดังนั้น การศึกษาถึงสาเหตุที่ทำให้สารปนเปื้อนนั่นลดลงและการศึกษาวิเคราะห์ในรายละเอียดของพฤติกรรมหรือกลไกในกระบวนการบำบัด การเดินทางหรือวงจรของสารของธาตุอาหารพืช (Nutrient cycle) ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ที่ใดบ้าง และกระบวนการลดความเป็นพิษของสารปนเปื้อน การตรึงไม่ให้เกิดการเคลื่อนย้ายออกไปสู่สิ่งแวดล้อม หรือการเปลี่ยนรูปแบบให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษลดลง หรืออยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษนั้นจะมีประโยชน์ โดยทำให้การจัดการระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นให้อยู่ในสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นด้วย

น้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องดื่มหรือน้ำผลไม้ต่างๆ มีค่าความสกปรกในรูปของบีโอดี (BOD) ในปริมาณมาก มีการปนเปื้อนของธาตุอาหารพืชพวก เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอยู่ในปริมาณที่สูง ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ทำให้สาหร่ายและจุลินทรีย์ ในน้ำเจริญเติบโตมากผิดปกติ (Algae bloom/ Eutrophication) ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบลูกโซ่ต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำ หากประชาชนอุปโภคหรือบริโภคน้ำที่ปนเปื้อนธาตุอาหารพืชเหล่านั้นก็จะได้รับผลกระทบไม่ทางตรงก็โดยทางอ้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อเด็กทารกที่หากได้รับไนโตรเจนที่ปนเปื้อนจากน้ำจะทำให้เกิดโรค Blue Baby Syndrome ซึ่งเป็นอันตรายถึงชีวิต

การศึกษาลึกถึงวงจรของธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจนที่อยู่ในระบบ เนื่องจากความซับซ้อนของธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจนนี้ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปแบบทางเคมี (Transformation) ที่แตกต่างกันตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป (Vymazal, 2007) เมื่อสภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนั้นจะมีผลต่อการดูดซับสารอาหารและสารพิษโดยพืช และ/หรือ สิ่งมีชีวิตต่างๆ ดังนั้น หากพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันไป ก็ย่อมจะส่งผลกระทบต่อกลไกและประสิทธิภาพของการบำบัด

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมหรือกลไกของกระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ในการลดปริมาณและความเป็นพิษของธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจนและสารปนเปื้อนอื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ เพื่อตรงเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนย้ายออกไปสู่สิ่งแวดล้อม หรือการเปลี่ยนรูปแบบให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ หรืออยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษลดลง หรือไม่เป็นพิษ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทำให้การจัดการระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นให้อยู่ในสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ต่อการลดการใช้พลังงานในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียและยังช่วยลดปัญหาการเกิดภาวะโลกร้อนได้อีกทางหนึ่ง

การวิจัยในขั้นแรกได้ทำการศึกษาการสะสมและการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารพืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นแบบน้ำไหลเหนือพื้นผิวเพื่อบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ โดยใช้ค่าเฉลี่ยจริงที่รวบรวมมาจากป่รวมตะกอนและป่หมักไร้อากาศชนิดสร้างกรดที่มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 4.49-4.59 มีค่าบีโอดี 1241-2310 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอดี 1967- 4158 มิลลิกรัมต่อลิตร ทีเคเอ็น(TKN) 24.5-29.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าแอมโมเนียไนโตรเจน 1.68-1.82 มิลลิกรัมต่อลิตร และศึกษาการสะสมในพืช 2 ชนิดคือธูปฤาษีและพุทธรักษา โดยใช้วัสดุตัวกลางต่างกันคือ ทราย และหินกรวด ที่มีระยะเวลาเก็บน้ำเสีย 5 วัน (Hydraulic Retention Time; HRT) มีอัตราการบรรทุกทางชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate; HLR) 0.009 ลบ.ม.ต่อวัน

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากแปลงทดลองที่ปลูกธูปฤาษีที่มีทรายเป็นตัวกลาง และแปลงทดลองที่ปลูกธูปฤาษีที่มีกรวดเป็นตัวกลาง มีค่าบีโอดี ซีโอดี และไนโตรเจนลดลงแต่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ระบบที่ปลูกธูปฤาษีที่มีทรายตัวกลางเป็นให้ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี ซีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมดและอินทรีย์ไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางที่เป็นทรายมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 70.0-90.48%, 68.49-77.82%, 70.28-84.79% และ 75.0-89.85% ตามลำดับ ส่วนแปลงทดลองที่มีการปลูกต้นธูปฤาษี ที่มีกรวดเป็นตัวกลางมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 75.48-88.25%, 67.18-76.89%, 76.61-86.31% และ 77.43-89.76% ตามลำดับ

จากการศึกษาถึงการสะสมและการเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารพืชไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่ใช้ต้นธูปฤาษี และพุทธรักษา โดยมีกรวดและทรายเป็นวัสดุตัวกลาง พบว่า พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่ปลูกพืชต่างกัน และมีตัวกลางที่แตกต่างกันสามารถลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียได้ โดยไนโตรเจนในน้ำเสียถูกเปลี่ยนรูปไปด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เช่นกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการทดลองที่มีค่าเหมาะสมในการเกิดกระบวนการดังกล่าว และไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนรูปได้อีกด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง จะพบปริมาณของไนไตรท์และแอมโมเนียในระบบ แต่พบในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย ซึ่งเกิดจากสภาวะที่ระบบมีค่าไออาร์พีที่ลดลงและเป็นแอนแอโรบิกหรือสภาวะไร้อากาศเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่น้ำออกจากระบบจะพบปริมาณแอมโมเนียลดลงและมีไนเตรทเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันในช่วงท้ายในระหว่างวันที่ 40 ถึงวันที่ 90 ของการทดลอง และพบว่าภาพรวมของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ผลการศึกษาในขั้นที่สอง ที่ศึกษาโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เลียนแบบน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ผลิตน้ำผลไม้ พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนลดลง จากปริมาณระหว่าง 14 ถึง 19.7 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือประมาณ 1.1 มิลลิกรัมต่อลิตรในระบบที่ปลูกพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบ่อที่มีตัวกลางเป็นกรวดมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 88 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 75 ในบ่อทรายที่ปลูกพืช ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำสามารถลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำเสียที่เข้าระบบที่มีค่าเฉลี่ยที่ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำออกของบ่อที่ปลูกพืช ส่วนในบ่อที่ไม่ปลูกพืชสามารถลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดลงได้แต่ยังพบปริมาณที่สูงถึงกว่า 9 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้พบว่าโดยเฉลี่ยแล้วระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนี้มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80

ในการศึกษาการเจริญเติบโตของพืช พบว่าต้นรูปไข่ในระบบที่มีทรายเป็นตัวกลางและที่มีกรวดเป็นตัวกลาง มีความสูงเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือ 170.07 ± 54.99 และ 168.29 ± 54.25 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีความยาวรากเฉลี่ย 25.6 ± 1.2 และ 25.4 ± 0.8 เซนติเมตร ตามลำดับ ในต้นรูปไข่ที่มีทรายเป็นตัวกลางและมีกรวดเป็นตัวกลางพบว่าการสะสมปริมาณที่เคเอ็น (TKN) ที่ไม่แตกต่างกันคือ 1.120 และ 1.176 มิลลิกรัมที่เคเอ็นต่อกรัมพืช ตามลำดับ

อัตราการเจริญเติบโตของพืชทั้งสองชนิดที่ปลูกในระบบที่มีตัวกลางต่างกันพบว่า ทั้งรูปไข่และพุทธรักษาที่ปลูกในตัวกลางทรายจะมีอัตราการเติบโตที่สูงกว่าที่ปลูกในกรวด ชนิดพืชที่ปลูกในระบบจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเช่นกัน โดยไนโตรเจนถูกพบสะสมในรูปไข่ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับที่ถูกสะสมในพุทธรักษา (1.064-1.232 มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งมากกว่าที่พบในพืชที่ปลูกในบ่อควบคุม อย่างไรก็ตามในภาพรวมของการศึกษาองค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำทั้งระบบ ปรากฏว่าต้นรูปไข่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่าต้นพุทธรักษา เนื่องจากน้ำหนักของเนื้อเยื่อของรูปไข่มีปริมาณระหว่าง 12.13-12.89 กิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งมากกว่าของพุทธรักษาที่มีค่า 4.67-6.75 กิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร อีกทั้งระบบรากของรูปไข่มีการแพร่กระจายทั้งในแนวดิ่งและแนวราบทำให้มีปริมาณออกซิเจนในบริเวณชั้นตัวกลางที่เพียงพอต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ไนโตรเจนทั้งหมดถูกพบสะสมมากที่สุดถึง 2.38 ไมโครกรัมที่เคเอ็น/กรัมตัวกลางกลางทรายของแปลงที่ปลูกพุทธรักษา การสะสมของไนโตรเจนในตัวกลางที่เป็นทรายของทั้งระบบที่ปลูกรูปไข่หรือพุทธรักษาจะมีค่าสูงกว่าในตัวกลางกรวดของในทุกระบบเช่นกัน ปริมาณการสะสมของไนโตรเจนที่พบสะสมในตัวกลางกรวดที่ปลูกรูปไข่มีค่าสูงกว่าที่พบในกรวดที่ปลูกด้วยพุทธรักษา และถึงแม้ว่าน้ำเสียที่ผ่านออกมาจากระบบยังคงมีค่าบีโอดีหรือซีโอดีสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่ปริมาณของธาตุอาหารพืชหรือไนโตรเจนในน้ำขาออกนั้นมีปริมาณที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ให้กับระบบไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียจริงหรือน้ำเสียสังเคราะห์ก็ตาม ไม่มีผลทำให้ระบบล้มเหลวลงแต่ระบบยังคงสามารถมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ ดังนั้นพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนี้สามารถลดความสกปรกและสารปนเปื้อนในน้ำเสียลงได้

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	VI
หน้าสรุปโครงการ	IX
สารบัญเรื่อง	XII
สารบัญตาราง	XIV
สารบัญรูป	XV
 บทที่	
1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland)	3
2.2 ประเภทของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น	5
2.3 องค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น	6
3. วัตถุประสงค์	11
4. วิธีทดลอง	12
4.1 การออกแบบการทดลอง	12
4.2 พืชที่จะใช้ปลูกในแปลงทดลอง	13
4.3 การเตรียมวัสดุตัวกลาง	15
4.4 การเตรียมน้ำเสียและการป้อนน้ำเสียลงสู่แปลงทดลอง	15
4.4.1 การทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงาน	16
4.4.2 การทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์	17
4.5 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง	19
5. ผลการทดลองและวิจารณ์	22
5.1 การบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ที่มีตัวกลางเป็นทราย	17
5.2 การบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ที่มีตัวกลางเป็นกรวด	23
5.3 การศึกษาการเจริญเติบโตของพืช	50
5.4 ปริมาณไนโตรเจนในตัวกลางและตะกอนที่สะสมในระบบ	57

5.5 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เลียนแบบน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้	60
5.6 ตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสีย	69
6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	70
เอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก	79
ก. ผลการทดลองประสิทธิภาพพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ที่ใช้ตัวกลางที่เป็นทราย	79
ข. ผลการทดลองประสิทธิภาพพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ที่ใช้ตัวกลางที่เป็นกรวด	94
ค. ผลการวิเคราะห์พืชและวัสดุตัวกลาง	109

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 หน้าทีของพืชโผล่พ้นน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น	7
2.2 ลักษณะและหน้าที่ของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น	7
2.3 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินอนินทรีย์ (Mineral Soil) กับดินอินทรีย์ (Organic Soil)	9
4.1 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย	20
4.2 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของการวิเคราะห์ตัวอย่างพืช	21
4.3 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตัวกลาง	21
5.1 ลักษณะของน้ำเสยรวมที่อยู่ในบ่อรวมตะกอนและหมักไร้อากาศชนิดสร้างกรด (Anaerobic Acid Pond) จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้	22
5.2 ข้อมูลปัจจัยและความเข้มข้นของแต่ละพารามิเตอร์ในน้ำเสยของระบบที่มีตัวกลางทราย (S) ที่ปลูกธูปฤาษี (T) พุทธรักษา(C) และระบบที่ไม่มีการปลูกพืช (U) ที่ระดับความลึกที่ 10 (D10) และ 25 (D25) เซนติเมตร จากระดับน้ำในระบบที่จุดเก็บน้ำเสยตัวอย่างที่ 1(-1 น้ำเข้า), 2(-2 น้ำในบ่อ) และ 3(-3 น้ำออก)	46
5.3 ข้อมูลปัจจัยและความเข้มข้นของแต่ละพารามิเตอร์ในน้ำเสยของระบบที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ที่ปลูกธูปฤาษี (T) ต้นพุทธรักษา(C) และระบบที่ไม่มีการปลูกพืช (U) (G) ในแปลงการทดลองที่ 2, 4 และ 6 ระดับความลึกที่ 10 (D10) และ 25 (D25) เซนติเมตร จากระดับน้ำในระบบที่จุดเก็บน้ำเสยตัวอย่างที่ 1 (-1 น้ำเข้า), 2(-2 น้ำในบ่อ) และ 3(-3 น้ำออก)	47

สารบัญรูป

รูป	หน้า
4.1 การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นแบบที่ให้น้ำไหลเหนือพื้นผิว	13
4.2 ลักษณะของบ่อดูดซับพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นก่อนการเติมตัวกลาง	13
4.3 ต้นธูปฤๅษี (<i>Typha angustifolia</i>) ก่อนทำการทดลอง	14
4.4 พุทธรักษา (<i>Canna Spp.</i>) ก่อนทำการทดลอง	14
4.5 ตำแหน่งและระยะห่างของพืชที่ปลูกในแปลงทดลอง	15
4.6 ตัวกลางดินทรายและหินกรวด	15
4.7 จุดเก็บน้ำเสียก่อนเข้าบ่อรวมตะกอนและหมักไร้อากาศชนิดสร้างกรด	16
4.8 ลักษณะพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ณ สถานที่ทดลอง	17
4.9 แบบจำลองการทดลองพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น	18
4.10 แผนผังการดำเนินงานในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น	19
4.11 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียในแปลงทดลอง	20
5.1 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง ก) พีเอช ข) อุณหภูมิ ค) ออกซิเจนละลายที่ระดับ 10 ซม. ง) ออกซิเจนละลายที่ระดับ 25 ซม. จ) โออาร์พีที่ระดับ 10 ซม. ฉ) โออาร์พีที่ระดับ 25 ซม. (T: ธูปฤๅษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	26
5.2 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง ก) บีโอดี ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี ค) ค่าซีโอดี ง) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (T: ธูปฤๅษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	27
5.3 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง ก) ค่าไนโตรเจนทั้งหมด ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าไนโตรเจนทั้งหมด ค) ค่าอินทรีย์ไนโตรเจน ง) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าอินทรีย์ไนโตรเจน (T: ธูปฤๅษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	29
5.4 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง ก) ค่าไนเตรทไนโตรเจน ข) ค่าไนไตรท์ไนโตรเจน ค) ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ง) ทีเคเอ็น (TKN) (T: ธูปฤๅษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	32
5.5 ความสัมพันธ์ของแอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง (T: ธูปฤๅษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	33

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

5.6	การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ก) พีเอส ข) อุณหภูมิ ค) ออกซิเจนละลายที่ระดับ 10 ซม. ง) ออกซิเจนละลายที่ระดับ 25 ซม. จ) โออาร์พีที่ระดับ 10 ซม. ฉ) โออาร์พีที่ระดับ 25 ซม. (T: รูปร่าง, C: พืช, U: ไม่ปลูกพืช, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	34
5.7	การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ก) บีโอดี ข) ประสิทธิภาพการ บำบัดค่าบีโอดี ค) ค่าซีโอดี ง) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (T: รูปร่าง, C: พืช, U: ไม่ปลูกพืช, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	38
5.8	การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ก) ค่าไนโตรเจนทั้งหมด ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าไนโตรเจนทั้งหมด ค) ค่าอินทรีย์ไนโตรเจน ง) ประสิทธิภาพ การบำบัดค่าอินทรีย์ไนโตรเจน (T: รูปร่าง, C: พืช, U: ไม่ปลูกพืช, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	42
5.9	การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ก) ค่าไนเตรทไนโตรเจน ข) ค่าไนไตรท์ไนโตรเจน ค) ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ง) ทีเคเอ็น(TKN) (T: รูปร่าง, C: พืช, U: ไม่ปลูกพืช, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	43
5.10	ความสัมพันธ์ของแอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ผลิตน้ำตาลด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (T: รูปร่าง, C: พืช, U: ไม่ปลูกพืช, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	44
5.11	ความสูงของต้นรูปร่างที่มีทายเป็นตัวกลาง (TS1) และมีกรวดเป็นตัวกลาง (TG2)	50
5.12	ลักษณะของต้นรูปร่างที่มีทายเป็นตัวกลาง (บน) และมีกรวดเป็นตัวกลาง (ล่าง) ของการทดลองในช่วงระยะเวลา 1 ถึง 3 เดือน ของการทดลอง	51
5.13	การกระจายตัวของรากต้นรูปร่างที่มีทายเป็นตัวกลาง (บน) และมีกรวดเป็นตัวกลาง (ล่าง)	52
5.14	ปริมาณทีเคเอ็น (TKN) ที่สะสมในเนื้อเยื่อพืช ในแปลงที่มีการปลูกรูปร่างที่มีทายเป็นตัวกลาง (TS1) และที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (TG2)	53
5.15	ความสูงของต้นพืชรักษามีทายเป็นตัวกลาง (CS3) และที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (CG4)	54
5.16	ลักษณะของต้นพืชรักษามีทายเป็นตัวกลาง (บน) และที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (ล่าง) ที่มีการทดลองในระยะเวลา 1 ถึง 3 เดือนของการทดลอง	55
5.17	การกระจายตัวของรากต้นพืชรักษามีกรวดเป็นตัวกลาง (ซ้าย) และที่มีทายเป็น (ขวา)	56
5.18	ปริมาณทีเคเอ็น (TKN) ที่สะสมในพืชในแปลงที่มีการปลูกต้นพืชรักษามีทายเป็นตัวกลาง (CS3) และที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (CG4)	57
5.19	ลักษณะของแปลงควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืชที่มีทายเป็นตัวกลาง (บน) และที่มีกรวดเป็น ตัวกลาง (ล่าง) ของการทดลองตลอดระยะเวลาทดลอง 1 ถึง 3 เดือน	58

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

5.20	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ในตัวกลางที่เป็นทราย (S) และกรวด (G) สะสมในแปลงทดลองที่มีการปลูกธูปฤาษี (T) พุทธรักษา(C) และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช (U)	59
5.21	ค่า pH และ อุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง (T: ธูปฤาษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	61
5.22	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำของน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายและกรวดเป็นตัวกลางที่ระดับความลึกต่างกัน (T: ธูปฤาษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	62
5.23	ค่าโออาร์พีของน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางและระดับความลึกต่างกัน (T: ธูปฤาษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	63
5.24	ค่าบีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางและระดับความลึกต่างกัน (T: ธูปฤาษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	65
5.25	การบำบัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางและระดับความลึกต่างกัน (T: ธูปฤาษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	66
5.26	การบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางและระดับความลึกต่างกัน (T: ธูปฤาษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	67
5.27	การบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางและระดับความลึกต่างกัน (T: ธูปฤาษี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)	68

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากการที่ประเทศต่างๆ กำลังตื่นตัวและให้ความสนใจกับสินค้าสีเขียว (Green goods) ซึ่งต้องการให้มีระบบการผลิตที่สะอาด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตต่างๆ ควรลดหรือทำลายสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด ดังนั้น จึงทำให้ภาคอุตสาหกรรมและการเกษตรอุตสาหกรรมของประเทศไทย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มจำนวนมากที่มีการผลิตเพื่อการส่งออก ต้องเผชิญกับปัญหาการแข่งขันและการกีดกันทางการค้าจากประเทศในแถบทวีปยุโรปและอเมริกา กระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สินค้าสีเขียวนั้น นอกจากจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแล้ว ยังรวมไปถึงขั้นตอนการกำจัดหรือจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก็จะต้องเป็นกระบวนการสะอาด ช่วยลดการใช้พลังงาน และลดปัญหาการเกิดภาวะโลกร้อน (Global warming)

เพื่อเป็นการส่งเสริมเทคโนโลยีสะอาดให้ครอบคลุมทั้งกระบวนการการผลิต และการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้น การใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (Constructed wetland; CW) หรือระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบธรรมชาติเป็นกระบวนการหลักในการบำบัด จึงควรที่จะได้รับการสนับสนุนให้มากขึ้น เพื่อช่วยลดปัญหาทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานดังกล่าว

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (CW) นับเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ยอมรับใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสียในปัจจุบัน ที่นอกเหนือไปจากวิธีบำบัดอื่นๆ อีกหลายวิธี เช่น เช่นการบำบัดโดยการเติมอากาศและการกวนให้ตกตะกอนหรือที่เรียกว่าระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) การใช้สารเคมีตกตะกอน (Chemical coagulation-flocculation) ซึ่งระบบเหล่านี้เป็นวิธีที่ต้องใช้เทคโนโลยีสูง ซับซ้อน และต้องการค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอย่างมาก ดังนั้น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่นับว่ามีราคาไม่สูง จึงเป็นที่นิยมใช้มากขึ้นในประเทศที่กำลังพัฒนา (Mashauri et al., 2000) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพแต่ใช้ค่าลงทุนไม่มากนัก เป็นการฟื้นฟูระบบบำบัดแบบอาศัยธรรมชาติ เช่น พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland) หรือแบบกึ่งธรรมชาติ (Seminatural plant system) จึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งในประเทศแถบเอเชีย อเมริกา และยุโรป

สำหรับในประเทศเขตร้อนมีการศึกษาการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น เช่น ในประเทศไทย โครงการวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จ.เพชรบุรี (สำนักงาน กปร, 2543) เพื่อการบำบัดน้ำเสียชุมชน ศึกษาการใช้ชนิดพืชพวก กกกลม กล้วยไม้ และหญ้าพันธุ์ต่างๆ เพื่อกรองน้ำเสีย รวมทั้งศึกษาถึงอัตราและระยะเวลาการปล่อยน้ำและให้น้ำท่วมขังในพื้นที่ชุ่มน้ำที่แตกต่างกัน สามารถบำบัดสารอินทรีย์หรือลดค่าบีโอดีในน้ำเสียชุมชนได้ดี นอกจากนี้ พื้นที่ชุ่มน้ำที่ปลูกกล้วยไม้สามารถบำบัดค่าบีโอดีได้ถึงร้อยละ 66-71 (Kootatetep และ Polprasert, 1997)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนั้นเป็นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่ถูกจำลองขึ้นโดยการเลียนแบบธรรมชาติ เนื่องจากเป็นการใช้ธรรมชาติ พืช น้ำ ชนิดต่างๆ มาช่วยในการดูดซับ ช่วย

ลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียลงได้ และยังสามารถนำไปปรับปรุงให้ใช้ได้ในธรรมชาติ เช่น ในบ่อน้ำ บึง หนองน้ำต่างๆ (Stottmeister et al., 2003) พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นจะมีพืชที่สามารถที่จะดูดซับและเปลี่ยนแปลงรูปของสารพิษต่างๆ ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ หรือเป็นพิษน้อยลง โดยที่เป็นการปล่อยให้ระบบนิเวศธรรมชาติทำหน้าที่นั้น จึงเป็นการเพิ่มโอกาสให้เกิดความปลอดภัยให้กับสังคมแวดล้อมมากขึ้น และยังลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดสารพิษนั้นด้วย (Odum et al., 2000)

น้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องดื่มหรือน้ำผลไม้ต่างๆ มีค่าความสกปรกในรูปของบีโอดี (BOD) ในปริมาณมาก มีการปนเปื้อนของธาตุอาหารพืชพวก เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสอยู่ในปริมาณที่สูง ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ทั้งจุลินทรีย์สาหร่าย สัตว์น้ำต่างๆ ทำให้สาหร่ายและจุลินทรีย์ ในน้ำเจริญเติบโตมากผิดปกติ (Algae bloom/Eutrophication) ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบลูกโซ่ต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำ หากประชาชนอุปโภคหรือบริโภคน้ำที่ปนเปื้อนธาตุอาหารพืชเหล่านั้น ก็จะได้รับผลกระทบไม่ทางตรงก็โดยทางอ้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อเด็กทารกที่หากได้รับไนโตรเจนที่ปนเปื้อนจากน้ำจะทำให้เกิดโรค Blue Baby Syndrome ซึ่งเป็นอันตรายถึงชีวิต

อย่างไรก็ตาม การวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากเป็นการศึกษาเฉพาะประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสีย แต่ยังไม่ได้ศึกษาถึงวงจรของธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจนที่อยู่ในระบบ เนื่องจากวงจรของธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจนนี้ มีความซับซ้อน และสามารถเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปแบบทางเคมี (Transformation) ที่แตกต่างกัน ตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปได้ (Vymazal, 2007) ด้วยเหตุนี้สภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนั้นจะมีผลต่อการดูดซับสารอาหารและสารพิษโดยพืช และ/หรือ สิ่งมีชีวิตต่างๆ ดังนั้นหากพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันไป ก็ย่อมจะส่งผลกระทบต่อกลไกและประสิทธิภาพของการบำบัด ดังนั้น การศึกษาถึงสาเหตุที่ทำให้สารปนเปื้อนนั่นลดลงและการศึกษาวิเคราะห์ในรายละเอียดของพฤติกรรมหรือกลไกในกระบวนการบำบัด การเดินทางหรือวงจรของสารของธาตุอาหารพืช (Nutrient cycle) ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ที่ใดบ้าง และกระบวนการลดความเป็นพิษของสารปนเปื้อน การตรึงไม่ให้เกิดการเคลื่อนย้ายออกไปสู่สิ่งแวดล้อม หรือการเปลี่ยนรูปแบบให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษลดลง หรืออยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษนั้นจะมีประโยชน์ โดยทำให้การจัดการระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นให้อยู่ในสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นด้วย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (Constructed wetland; CW) เป็นระบบที่มีความซับซ้อนของปัจจัยหลายอย่าง ทั้งทางชีวภาพ กายภาพ ซึ่งจะเป็นผลให้ระบบเกิดสภาพแวดล้อม ที่จะเลือกวิธีในการบำบัด หรือลดปริมาณสารปนเปื้อนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย ปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการข้างต้นได้แก่ ชนิดของพืชน้ำ (Wetland plants) ดิน หรือกรวด หรือวัสดุดินที่ใช้ปูพื้นบ่อเพื่อให้พืชยึดเกาะ (Wetland bed/ Soil materials) จุลินทรีย์ (Microorganisms) อัตราการไหลและอัตราการเก็บกักน้ำเสียในระบบ กระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น การลดความเป็นพิษของสารปนเปื้อนโดยการตรึงไม่ให้เกิดการเคลื่อนย้ายออกไปสู่สิ่งแวดล้อม หรือการเปลี่ยนรูปแบบของโลหะให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษลดลง หรือในรูปที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้สามารถจำแนกได้เป็น 6 กระบวนการหลักๆ คือ 1) กระบวนการดูดซับและเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ 2) การเปลี่ยนรูปของโลหะหนักโดยจุลินทรีย์พวก Microbial sulfate reduction ตามด้วยการเกิดตกตะกอนกับพวกซัลไฟด์ 3) การตกตะกอนกับเหล็กและแมงกานีส ออกไซด์ 4) การดูดซับของโลหะโดยเฟอริกไฮดรอกไซด์ 5) การดูดซับโดยพืช 6) การผ่านการกรองโดยพวกสารแขวนลอยต่างๆ (Klusman and Machemer, 1991; EPA, 1996)

Stottmeister และคณะ (2003) ระบุว่า มีกลไกการบำบัดน้ำเสียที่สำคัญ เช่น การสะสมหรือดูดซับของโลหะในพืช พืชบางชนิดสามารถคงทนต่อสภาวะที่มีความเข้มข้นของสารอาหารและโลหะหนักสูงๆได้ และจะสะสมไว้ในเนื้อเยื่อเซลล์พืช การออกซิเดชันของโลหะโดยการเกิดเป็นตะกอนกับเหล็ก (Iron-forming) หรือเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้น้อยลง (Low-solubility precipitates) เกาะอยู่ที่บริเวณผิวรากพืช การตกตะกอนร่วมกัน (Coprecipitation) ของธาตุบางชนิด เช่น เหล็ก และจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchanging) ของแร่ธาตุและสารฮิวมิก (Humic fraction) ในดิน (Kästner, 2000)

2.1 พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland)

พื้นที่ชุ่มน้ำ หมายถึง พื้นที่ซึ่งมีน้ำขังอ้อมตัวไม่ลึกนัก และมีพืชน้ำขึ้นงอกงาม ระบบนิเวศนี้เป็นไปตามธรรมชาติ มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยา โดยอาศัยพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ รวมทั้งดินเป็นตัวบำบัด (USEPA, 2000)

พื้นที่ชุ่มน้ำที่ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ ระบบบึงธรรมชาติ (Natural Wetlands) และระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (Constructed Wetlands) ซึ่งจะรวมถึงระบบที่ใช้บำบัดน้ำเสีย โดยพืชที่เจริญในน้ำตื้น

1) ระบบบึงธรรมชาติ (Natural Wetlands) ประกอบด้วยพืชชนิดต่างๆ ขึ้นปะปนกันรวมถึงหนอง (Marsh) จะพบพืชที่โผล่พ้นน้ำ พืชที่ไม่มีลำต้น และบ่อ (Swamp) จะพบพืชที่มีลำต้นเป็นส่วนใหญ่ 2) ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (Constructed Wetlands) ที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบ

ธรรมชาติ โดยมีจุดประสงค์เพื่อการบำบัดน้ำเสียหลายประเภทประกอบด้วยน้ำเสียชุมชนน้ำเสียอุตสาหกรรม และน้ำเสียจากเกษตรกรรม ซึ่งการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำในการบำบัดน้ำเสียนั้นส่วนใหญ่เหมาะสำหรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว คือ การบำบัดน้ำเสียในขั้นที่สองหรือหลังจากนั้นการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสียมีหลักการเหมือนกันกับระบบบึงตามธรรมชาติ แต่แตกต่างกันตรงที่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้ เช่น การเลือกที่ตั้งของบ่อ ขนาดของบ่อ ควบคุมการไหลและระดับน้ำให้คงที่ และควบคุมทางเดินของน้ำและเวลากักเก็บได้ มลสารจะถูกกำจัดในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นโดยการผสมผสานกันระหว่างกระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพต่างๆ เช่น กระบวนการตกตะกอน กระบวนการตกตะกอนฟล็อก กระบวนการดูดซับ กระบวนการสะสมโดยพืช และกระบวนการเปลี่ยนแปลงโดยจุลินทรีย์ เป็นต้น

ข้อได้เปรียบในการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป คือ (1) เสียค่าใช้จ่ายน้อยในการก่อสร้าง และการดูแลรักษา (2) ต้องการพลังงานในการเดินระบบน้อย (3) เป็นระบบที่ใช้เทคโนโลยีต่ำทำให้สามารถดำเนินระบบได้โดยบุคลากรที่ไม่ต้องมีความรู้สูงมาก (4) ระบบมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระเข้าระบบของมลสาร สูงกว่าระบบบำบัดน้ำเสียอื่นทั่วไป

ข้อเสียเปรียบในการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป คือ (1) ต้องการพื้นที่มากกว่าในการก่อสร้างระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียชนิดอื่นทั่วไป (2) มีโอกาสที่ประสิทธิภาพในการทำงานจะด้อยลงในช่วงที่อากาศหนาว (3) ไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้น กรณีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นสูงควรมีระบบบำบัดขั้นต้นก่อนที่น้ำเสียจะไหลเข้าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (USEPA, 2000)

การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนั้น บทบาทและความสามารถในการบำบัดน้ำเสียของพืช ดิน สัตว์และจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน ในทางวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมจะนิยมนำพืชน้ำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียกันมาก เนื่องจากมีวงจรชีวิตอยู่ในน้ำโดยตรง โดยพืชจะดูดซับและนำแร่ธาตุอาหารในน้ำเสียไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโต และผลพลอยได้จากการเจริญเติบโตของพืช คือ ออกซิเจนจะช่วยให้ค่าบีโอดีในน้ำและในดินลดลง โดยการส่งผ่านมาทางรากพืช ทำให้ แบคทีเรียที่ใช้ ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ สามารถทำงานได้มากขึ้น ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ (Gray et al., 2000)

เมื่อน้ำเสียไหลเข้ามาในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นส่วนต้น สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะตกตะกอนจมตัวลงสู่ก้นบึง และถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่กับพืชน้ำหรือชั้นหินและจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ระบบนี้จะได้รับออกซิเจนจากการแทรกซึมของอากาศผ่านผิวน้ำหรือชั้นหินลงมา ออกซิเจนบางส่วนจะได้รับการสังเคราะห์แสงแต่มีปริมาณไม่มากนัก สำหรับสารแขวนลอยจะถูกกรองและจมตัวอยู่ในช่วงต้น ๆ ของระบบ

การลดปริมาณไนโตรเจนจะเป็นไปตามกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ส่วนการลดปริมาณฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิดที่ชั้นดินส่วนพื้นบ่อ และพืชน้ำจะช่วยดูดซับฟอสฟอรัสผ่านทางรากและนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ นอกจากนี้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นยังสามารถกำจัดโลหะหนัก (Heavy Metal) ได้บางส่วนอีกด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) การอาศัยบึงธรรมชาติบำบัดน้ำเสียนั้นมีข้อจำกัด โดยเหมาะสมเฉพาะสำหรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นสองมาแล้วแต่ยังต้องการการบำบัดต่อเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้าย (อุตร จารุรัตน์, 2537)

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นได้รับการออกแบบมาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของบึงธรรมชาติ สามารถควบคุมสิ่งแวดล้อมต่างๆ ของบึงได้ ไม่ว่าจะเป็นการป้องกันการไหลซึมของน้ำเสียออกสู่ดินรอบๆ โดยการปลูกพืชป้องกันหรือมีการบดอัดดินด้านล่างของบึงหรือมีการป้องกัน การอุดตันของชั้นดินโดยปรับทิศทางทางไหลของน้ำที่เข้าสู่บึง นอกจากนี้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าบึงธรรมชาติในกรณีที่มีพื้นที่การบำบัดเท่ากัน การก่อสร้างทำได้แทบทุกที่อาจปรับปรุงจากพื้นที่ธรรมชาติ หรือสร้างขึ้นใหม่โดยการขุดและปรับปรุงพื้นที่

2.2 ประเภทของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น

การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นสามารถจำแนกตามประเภทการไหลของน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นได้ 2 ประเภท ดังนี้

2.2.1 ประเภทการไหลเหนือพื้นผิว (Free Water Surface System, FWS)

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนี้ ประกอบด้วยแอ่งหรือร่องน้ำ ซึ่งมีระดับความลึกของน้ำประมาณ 10-60 เซนติเมตร โดยทั่วไปด้านก้นบ่อมีการเคลือบหรือฉาบวัสดุกันน้ำที่ทำจากดินเหนียวหรือจากวัสดุทางด้านธรณีวิทยาอื่นๆ ซึ่งปูพื้นด้วยแผ่นพลาสติก HDPE จะช่วยให้รากพืชสามารถยึดเกาะอยู่ได้ ในช่วงความลึกระดับหนึ่งจะเป็นการไหลอยู่เหนือผิวดินหรือชั้นตัวกรอง และมีการไหลของน้ำเสียเป็นแนวยาว (Plug Flow) ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีค่าภาระบรรทุกบีโอดี (BOD loading) อยู่ในช่วง 5-100 มิลลิกรัม/ลิตร

2.2.2 ประเภทการไหลใต้พื้นชั้นผิว (Subsurface flow: SF)

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนี้ ประกอบด้วยความลึกของชั้นดินประมาณ 30-80 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุชั้นตัวกลางเพื่อช่วยให้พืชยึดเกาะ ตัวกลางที่ใช้ ได้แก่ หินบด กรวด ดินและทราย โดยความสูงของชั้นตัวกลางประมาณ 60-70 เซนติเมตร ด้านล่างสุดมีการปูด้วยแผ่นโพลีเอทิลีน (PE) เพื่อกันน้ำซึมลงสู่ใต้ดิน โดยบริเวณก้นบ่อจะมีค่าความลาดชันประมาณร้อยละ 1 เพื่อไม่ให้เกิด

การกักขัง และบริเวณท้ายบ่อมีท่อเจาะรูเพื่อรับเอาน้ำออกจากบ่อ ซึ่งระบบนี้อาศัยการเติมอากาศด้วยพืชเป็นหลัก น้ำเสียจะถูกบำบัดเมื่อไหลผ่านตัวกลางของพืชที่สัมผัสกับผิวหน้าของตัวกรอง และส่วนรากของพืชบริเวณใต้ชั้นกรอง มีการดูดซึม การตกตะกอน และการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ ชั้นตัวกลางอิมมัวด้วยน้ำตลอดเวลา จึงเกิดสภาวะไร้อากาศขึ้น ระบบนี้จึงเหมาะกับน้ำเสียที่มีค่าการบีบอัดอยู่ในช่วง 30-175 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการไหลแบบน้ำใต้ผิวดิน แบ่งออกเป็น 2 ระบบ ดังนี้ (เกรียงศักดิ์ อุทมนสินโรจน์, 2542)

อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเสียในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นแบบ FWS สามารถคำนวณจากสมการ

$$Q = (LWdn) / t$$

เมื่อ	Q = อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
	L = ความยาวของบ่อ (เมตร)
	W = ความกว้างของบ่อ (เมตร)
	d = ความลึกของระดับน้ำในบ่อ (เมตร)
	n = ค่าคงที่แสดงช่องว่างภายในพื้นที่ชุ่มน้ำ (= 0.75 สำหรับระบบน้ำไหลพื้นผิว FWS)
	t = ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (วัน)

2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น

2.3.1 พืช (Plant)

พืชเป็นองค์ประกอบสำคัญในพื้นที่ชุ่มน้ำ ประกอบด้วยพืชลอยน้ำ (Floating Plants) พืชจมน้ำ (Submerged Plants) และพืชโผล่พ้นน้ำ (Emergent Plants) การเลือกใช้พืชเพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำสามารถเลือกตามลักษณะ หน้าทีหรือความสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้ ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้ชนิดพืชโผล่พ้นน้ำ (Emergent Plants) เช่น กล้วยข้าว (Cattail: *Typha Spp.*) กก (Bulrush: *Scirpus Spp.*) อ้อ (Reed: *Phragmites Spp.*) เป็นต้น

รากพืชจะเจริญเติบโตอยู่ภายในชั้นดินที่ระดับต่ำกว่าผิวดิน 50 – 150 ซม. หรือมากกว่า โดยส่วนใหญ่จะสร้างใบและลำต้นให้สัมผัสอากาศ มีรากแผ่ขยายในชั้นดิน ออกซิเจนจากบรรยากาศจะถ่ายเทเข้าสู่พืชทางใบและลงไปที่ทางช่องอากาศไปยังระบบรากโดยการแพร่ (Diffusion) และการพาของอากาศ (Convective) ออกซิเจนบางส่วนถูกปล่อยออกมารอบชั้นรากพืช ทำให้เกิดสภาพมีออกซิเจนเสริมให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ดีขึ้น และทำให้ไนโตรฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying Bacteria) มีการเจริญเติบโตได้ดี ทำให้เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเค

ชั้น และยังเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตะกอนด้วย พืชในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติช่วยบำบัดน้ำเสียหลายอย่าง (ศุภา กานตวนิชกูร, 2544)

ตารางที่ 2.1 หน้าที่ของพืชโผล่พ้นน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (Brix, 1997)

ส่วนประกอบของพืช	บทบาทในกระบวนการบำบัด
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	- ลดความเข้มข้นของแสง เพื่อลดการเจริญเติบโตของแพลงตอนพืช - ลดความเร็วลมเพื่อป้องกันการแขวนลอยของตะกอน - ช่วยให้ระบบคูลยวงาม - สะสมสารอาหาร
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	- กรองตะกอนขนาดใหญ่ - เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับของเมือกจุลินทรีย์ - ลดความเร็วกระแสน้ำ เพิ่มอัตราการตกตะกอน ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ - ปล่อยออกซิเจนเพื่อการสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน - ดูดซับสารอาหาร
รากและระบบรากพืชในชั้นตัวกลางใต้น้ำ	- ดูดซับสารอาหาร - ป้องกันการอุดตันของตัวกลางในระบบน้ำไหลแหวดิ่ง - ปล่อยออกซิเจนเพื่อเพิ่มการย่อยสลายและการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน - ปล่อยแอนติไบโอติก (Antibiotic)

ตารางที่ 2.2 ลักษณะและหน้าที่ของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ (USEPA, 2000)

ชนิดของพืชโดยทั่วไป	ลักษณะโดยทั่วไปของพืช	หน้าที่ และความสำคัญของพืช
พืชลอยน้ำ	โครงสร้างของใบและรากติดกัน โดยมีโครงสร้างของใบและลำต้นลอยอยู่เหนือผิวน้ำ เคลื่อนที่ไปตามกระแสน้ำ	ทำหน้าที่ในการดูดซับธาตุอาหาร ให้ร่มเงา ปิดกั้นแสงแดดไม่ให้ผ่านลงไปในน้ำ เป็นการช่วยชะลอการเจริญเติบโตของสาหร่าย และช่วยในการกระจายออกซิเจนจากอากาศลงสู่ น้ำ
พืชจมน้ำ	โครงสร้างของใบ และลำต้นลอย	มีโครงสร้างของใบ และรากเป็นที่ยึดเกาะ

	อยู่ระหว่างผิวดินด้านล่างของพื้นที่ชุ่มน้ำกับผิวน้ำด้านบน	ของพวกจุลินทรีย์ และช่วยในการเคลื่อนย้ายแก๊สออกซิเจนจากอากาศลงสู่ น้ำ
พืชโผล่พ้นน้ำ	มีโครงสร้างรากอยู่ด้านล่าง และลำต้นอยู่เหนือผิวน้ำ สัมผัสอากาศโดยตรงเป็นพืชที่ทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้ดี	ลักษณะโครงสร้างของใบ และลำต้นที่อยู่เหนือน้ำของพืชช่วยในการกระจายการไหลของน้ำและลดความเร็วของน้ำ เป็นการช่วยกรองสารแขวนลอยได้ดี พร้อมทั้งยังมีหน้าที่ในการปิดกั้นแสงไม่ให้ส่องผ่านลงใต้น้ำได้เท่ากับเป็นการชะลอการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้อีกเช่นกัน

2.3.2 ตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (Substrate)

ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำอยู่ในสภาพน้ำขัง เป็นดินที่มีความอึดตัวของน้ำ จนเกิดสภาวะไร้อากาศขึ้น ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำจึงมีความแตกต่างจากดินทั่วๆ ไปบนพื้นโลกคือ เป็นดินที่อึดตัวด้วยน้ำและเป็นดินที่มีการสะสมของสารอินทรีย์ (Organic Soil) ซึ่งมีความแตกต่างทางกายภาพและเคมี ดังแสดงในตาราง 2.3

ดังนั้นลักษณะทางกายภาพของดินในพื้นที่ชุ่มน้ำมีความสำคัญในการบำบัด หรือลดการปนเปื้อนในน้ำเสีย เช่น ดินทราย มีระยะเวลาที่น้ำสัมผัสกับดินน้อย ส่วนดินเหนียวแม้จะมีระยะเวลาที่น้ำสัมผัสกับดินนาน แต่พืชจะเจริญเติบโตได้ยาก เนื่องจากรากของพืชจะแยกรากได้ยาก จึงไม่เหมาะในการใช้บำบัดน้ำเสีย (Chamber and MacComb, 1992) ทดลองปลูกพืชโผล่พ้นน้ำ 9 ชนิดในดินเหนียวและดินทรายพบว่า พืชที่ปลูกในดินทรายจะมีอัตราการรอดสูงกว่าพืชที่ปลูกในดินเหนียว และดินเหนียวจะมีอัตราการไหลซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าดินทราย ดังนั้นเพื่อให้พื้นที่ชุ่มน้ำมีประสิทธิภาพที่ดีในการบำบัดน้ำเสีย ควรเลือกชนิดของดินที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในดิน (Hydraulic Conductivity) สูงเพียงพอให้เกิดปฏิกิริยา และยังเหมาะแก่การเจริญเติบโตของพืช เช่น ดินร่วน (Loamy Soil)

นอกจากลักษณะทางกายภาพของดินแล้ว ความสามารถของดินในการกำจัดหรือเคลื่อนย้ายสารต่างๆ ในน้ำเสียขึ้นอยู่กับประจุของดิน ซึ่งอนุภาคดินส่วนมากเป็นประจุลบ ประจุบวกจึงสามารถมายึดเกาะได้ ส่วนกระบวนการที่เกิดขึ้น ได้แก่ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การดูดซับ (Adsorption) การตกตะกอน (Precipitation) และการเกิดสารเชิงซ้อน (Complexation) Koottatep (1999) ได้รายงานไว้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนั้นตัวกลางที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น ดิน กรวด ทราย ถ่านและซากสาหร่ายสีแสด (Mearl) เป็นต้น โดยตัวกลางทำหน้าที่เป็นบริเวณที่ให้พืชในระบบเจริญเติบโตและยืนต้นอยู่ได้ อีกทั้งยังเป็นที่ให้เมือกจุลินทรีย์เกาะ

เช่นเดียวกับพืช และใช้สำหรับกรองสารแขวนลอยต่างๆได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้เกิดการกระจายของน้ำเสียที่เข้าระบบและช่วยรวบรวมน้ำทั้งก่อนระบายออกได้อีกด้วย ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ ศุภา กานตวนิชกูร (2544) ซึ่งการบำบัดน้ำเสียด้วยกกอียิปต์ ของระบบผสมผสานระหว่างพืชน้ำกับการเติมอากาศเป็นระบบบำบัดน้ำเสียอีกระบบหนึ่งที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวได้พระราชทานพระราชดำริเป็นประติมากรรมระบบหนองสนมมีการใช้กอนกรวดทำหน้าที่กรองสารแขวนลอยออกจากน้ำเสีย โดยการปล่อยน้ำเสียเข้าไปบนลานกอนกรวดเสียก่อน พร้อมกับช่วยเติมก๊าซออกซิเจน ซึ่งจะช่วยให้เกิดจุลินทรีย์เกาะตามกอนกรวดมากขึ้น อันจะนำไปสู่การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียได้มากขึ้น

ตารางที่ 2.3 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินอนินทรีย์ (Mineral Soil) กับดินอินทรีย์ (Organic Soil) (Chamber and MacComb, 1992)

ปัจจัยกำหนด (Parameter)	ดินอนินทรีย์	ดินอินทรีย์
ปริมาณสารอินทรีย์ (%)	น้อยกว่า 20-35	มากกว่า 20-35
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (%)	น้อยกว่า 12-20	มากกว่า 12-20
ความเป็นกรด-ด่าง	กลาง	กรด
ความหนาแน่น	สูง	ต่ำ
ความพรุนของดิน	ต่ำ (ประมาณ 45-55%)	สูง (ประมาณ 80 %)
ความสามารถซึมผ่านของน้ำในดิน	สูง (ยกเว้นดินเหนียว)	ต่ำ ถึง สูง
ความสามารถรองรับน้ำ	ต่ำ	สูง
ปริมาณสารอาหารที่ใช้ได้	โดยทั่วไปสูง	โดยทั่วไปต่ำ
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	ต่ำ	สูง

ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนั้นสามารถที่จะจำแนกออกแบบได้เป็นหลายๆ ชนิด ขึ้นอยู่กับลักษณะปัจจัยประกอบ และการออกแบบที่แตกต่างกัน เช่น 1) จำแนกตามลักษณะการไหลของน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น (Reed, 1991) เป็นแบบน้ำไหลเหนือพื้นผิว (Free surface flow wetland, FSW) หรือแบบน้ำไหลใต้ระดับพื้นผิว (Subsurface flow wetland, SSW) 2) การจำแนกตามทิศทางการไหลของน้ำ (Cooper et al., 1996; Kadlec and Knight, 1996) เป็นแบบการไหลในแนวระนาบ (Horizontal flow) และการไหลในแนวตั้ง (Vertical flow) นอกจากนี้ การออกแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่ดี ควรจะต้องให้สามารถรองรับปริมาณน้ำเสียที่จะไหลเข้าระบบได้มาก เพื่อจะได้ลดความต้องการพื้นที่ก่อสร้างระบบ อย่างไรก็ตาม หากอัตราการไหลของ

น้ำเข้าระบบมากเกินไปความสามารถรองรับของระบบ ก็จะทำให้เกิดการไหลล้น และทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดลดลง (Cohen, 2006)

เนื่องจากวงจรของธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจนนี้ มีความซับซ้อน และสามารถเปลี่ยนแปลงอยู่ในรูปแบบทางเคมี (Transformation) ที่แตกต่างกัน เช่น แอมโมเนียม(NH_4^+) ไนไตรท์(NO_2^-) และไนเตรท(NO_3^-) หรืออยู่ในรูปของแก๊สต่างๆ เช่น ไนโตรเจน(N_2) ไนตรัสออกไซด์(N_2O) ไนตริกออกไซด์(NO_2 และ N_2O_4) และแอมโมเนีย (NH_3) ตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปได้ (Vymazal, 2007) การออกแบบระบบที่แตกต่างกันนี้ จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียหรือสารปนเปื้อนนั้นแตกต่างกัน กล่าวคือ จะทำให้สภาวะแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระบบต่างกันเช่น สภาวะที่มีออกซิเจนหรือมีอากาศ (Aerobic) และสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic) ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องถึงปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ส่งผลต่อการดำรงชีวิต และการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ และมีผลต่อการเปลี่ยนรูปทางเคมีของธาตุอาหารพืช ไนโตรเจน และสารปนเปื้อนอื่นๆ ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์หรือเป็นโทษได้แตกต่างกัน เช่น จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันภายใต้สภาวะแอโรบิก และดีไนตริฟิเคชันภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก จุลินทรีย์ที่รีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate reducing bacteria) ซึ่งจะรีดิวซ์ซัลเฟตและตกตะกอนโลหะภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โลหะพวกไดวาเลนซ์ ซึ่งสามารถตกตะกอนกับซัลไฟด์ (Webb et al., 1998) และถูกกำจัดออกจากน้ำเสียได้ โดยมีปัจจัยควบคุมเช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณสารอินทรีย์และอนินทรีย์คาร์บอน รวมทั้งชนิดของจุลินทรีย์ในระบบ (Cooper et al., 1996; Vymazal, 2007)

จากที่กล่าวมาพบว่า โดยทั่วไปแล้วบริเวณที่เกิดกิจกรรมในการบำบัดมากที่สุด (Active zone) ก็คือ บริเวณรากพืช (Root zone) หรือ บริเวณโดยรอบที่ใกล้รากพืช (Rhizosphere) ซึ่งจะเป็นบริเวณที่เกิดกิจกรรมทั้งกายภาพ-เคมี และชีวภาพ และจะชักนำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างพืช จุลินทรีย์ ดิน และสารปนเปื้อน หรือโลหะหนักต่างๆ ทำให้ปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำลดลง (Stottmeister et al., 2003)

การศึกษาการใช้พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นในแถบประเทศเขตร้อน เช่น ในประเทศไทย โดยโครงการวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จ.เพชรบุรี (สำนักงาน กปร, 2543) ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสียชุมชน ศึกษาการใช้ชนิดพืชพวก กกกลม กล้วยและหญ้าพันธุ์ต่างๆเพื่อกรองน้ำเสีย รวมทั้งศึกษาถึงอัตราและระยะเวลาการปล่อยน้ำและให้น้ำท่วมขังในพื้นที่ชุ่มน้ำที่แตกต่างกัน สามารถบำบัดสารอินทรีย์หรือลดค่าบีโอดีในน้ำเสียชุมชนได้ดี พื้นที่ชุ่มน้ำที่ปลูกด้วยกล้วยสามารถบำบัดค่าบีโอดีได้ถึงร้อยละ 66-71 (Kooattatep และ Polprasert, 1997) พืชจำพวกลอยน้ำบางชนิด เช่น จอก ผักตบชวา สามารถบำบัดสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำต่างของประเทศคอสตาริกา ได้ถึงหลากหลายตั้งแต่ร้อยละ 45 ถึง 92 ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำเสีย การออกแบบและการจัดการพื้นที่ชุ่มน้ำนั้นๆ (Nahlik and Mitsch, 2006)

ดังนั้น พืชที่จะเป็นส่วนหนึ่งของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นก็ย่อมมีความสำคัญด้วยเช่นกัน พืชที่จะถูกเลือกใช้ปลูกในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ส่วนใหญ่เป็นพืชท้องถิ่นที่พบได้ทั่วไป (Local plant) อาจเป็นพืชล้มลุกเช่น กก (Reed) ธูปฤาษี (Cattail) หญ้าคา (Rush) หญ้าแฝก (Vetiver) หรือพืชยืนต้นที่มีพัฒนาการสูงขึ้นไปอีก โดยที่พืชแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะการเจริญเติบโตและการดูดซับสารอาหารได้แตกต่างกัน (Tanner, 1996; Collin et al., 2005; Matthews et al., 2004)

จากเหตุผลดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นแบบที่ให้น้ำไหลเหนือพื้นผิว จะสามารถรองรับปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบได้มากกว่า อีกทั้งยังสามารถที่จะปรับระดับความลึกของน้ำในระบบหรือระยะเวลาการเก็บกักน้ำในระบบได้ เพื่อให้ระบบเกิดเป็นสภาวะแบบที่มีอากาศหรือไร้อากาศ ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการบำบัดธาตุอาหารพืช โลหะหรือสารปนเปื้อนชนิดต่างๆ ได้ ดังนั้น การศึกษาถึงกลไก และความสามารถของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียอย่างเหมาะสม จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เมื่อมีความรู้และความเข้าใจต่อปัจจัยเหล่านั้นแล้ว จึงเป็นการง่ายขึ้น ที่จะจัดการให้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นอยู่ในสภาวะที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดน้ำเสีย

สำหรับงานวิจัยนี้สามารถศึกษาถึงพฤติกรรมหรือกลไกของกระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น การลดปริมาณและความเป็นพิษของธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจนและสารปนเปื้อนอื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร หรือเครื่องดื่ม การตรึงเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนย้ายออกไปสู่สิ่งแวดล้อม หรือการเปลี่ยนรูปแบบให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ หรืออยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษลดลง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ต่อการลดการใช้พลังงานในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียและยังช่วยลดปัญหาการเกิดภาวะโลกร้อนได้อีกทางหนึ่ง

3. วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาถึงวงจรและการเปลี่ยนแปลงรูปของธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจน ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นแบบให้น้ำไหลเหนือพื้นผิว
- เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถและประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นในการดูดซับหรือกำจัดธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจนในน้ำเสีย

4. วิธีดำเนินการทดลอง

การศึกษาถึงการสะสมและการเปลี่ยนแปลงรูปของไนโตรเจน ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นแบบที่ให้น้ำไหลเหนือพื้นผิวนั้น จะทำการศึกษาถึงกลไก และความสามารถของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการดูดซับหรือกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสีย โดยออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรหรือปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่ศึกษามีดังนี้

ปัจจัยที่ 1 คือชนิดพืชที่ศึกษา โดยศึกษาความสามารถของธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) และพุทธรักษา (*Canna Spp.*) ในการดูดซับไนโตรเจนและลดความสกปรกในน้ำเสีย ปัจจัยที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของหินกรวดและทรายที่นำมาใช้เป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสีย และปัจจัยที่ 3 คือปริมาณการระบายทุกสารอินทรีย์ ปริมาณของบีโอดีในน้ำเสีย

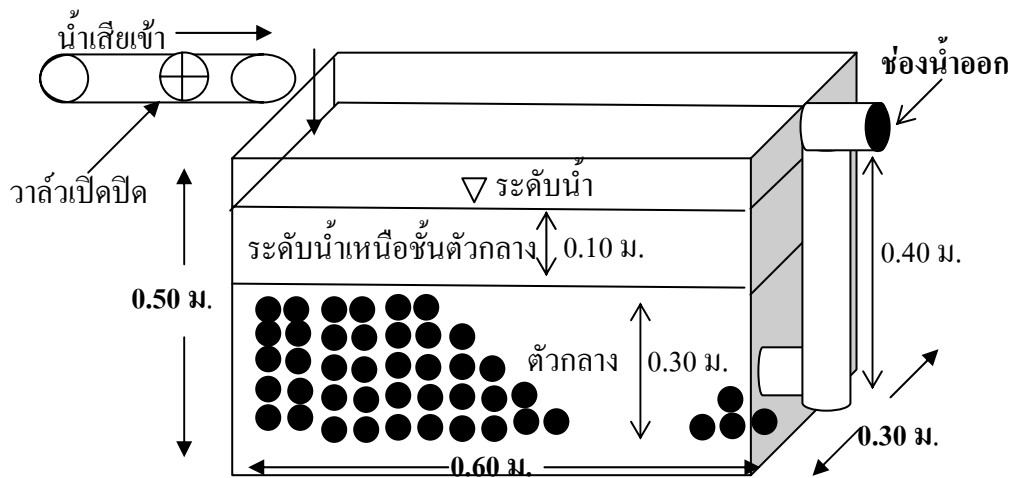
4.1 การออกแบบการทดลอง

4.1.1 สถานที่ทดลอง

เตรียมสถานที่ตั้งแปลงทดลองบริเวณหาดฟ้าชั้น 6 อาคารคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และวิเคราะห์ผลการทดลองที่สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

4.1.2 จัดสร้างแปลงทดลอง

แปลงทดลองประดิษฐ์จากแผ่นอะคริลิกหนา 10 มิลลิเมตร ขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 0.30 x 0.60 x 0.50 เมตร จำนวน 6 ถัง โดยต่อท่อน้ำเข้าและน้ำออกทางด้านข้างของแปลงทดลอง ภายในแปลงบรรจุตัวกลางที่ระบุ ให้มีความสูงของชั้นตัวกลางที่ระดับ 0.3 เมตร และให้มีระดับความสูงของน้ำในระบบเป็น 0.10 เมตรเหนือชั้นตัวกลาง เพื่อให้เป็นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นชนิดน้ำไหลเหนือพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การออกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นแบบที่ให้น้ำไหลเหนือพื้นผิว



รูปที่ 4.2 ลักษณะของบ่อทดลองพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นก่อนการเติมตัวกลาง

4.2 พืชที่จะใช้ปลูกในแปลงทดลอง

คัดเลือกพืชตามที่กำหนดไว้ 2 ชนิด คือ ฐุพฤาฐุ (Typha angustifolia) และ พุทรรักษา (Canna spp.) โดยมีกระบวนการเตรียมพืชแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

- ฐุพฤาฐุ (Typha angustifolia)

1. เตรียมเหง้าของต้นฐุพฤาฐุ และตัดแบ่งเหง้าเป็นท่อน ๆ แต่ละท่อนให้ต้นติดมา 1 ต้น และเตรียมตามจำนวนที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.3
2. คัดเลือกต้นฐุพฤาฐุที่มีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีความสูงประมาณ 50 เซนติเมตร
3. นำไปปลูกในแปลงทดลอง โดยให้มีความหนาแน่นของพืชเท่ากับ 66 ต้น/ตรม. ใน การทดลองมีการปลูกพืชลงในแปลง 12 ต้น /แปลงทดลอง



รูปที่ 4.3 ต้นธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) ก่อนทำการทดลอง

- พุทธรักษา (*Canna spp.*)

1. เตรียมเหง้าของต้นพุทธรักษา โดยตัดแบ่งเหง้าเป็นท่อนๆ แต่ละท่อนให้มีต้นติดมา 1 ต้น และเตรียมตามจำนวนที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.4
2. คัดเลือกต้นที่มีขนาดเท่าๆ กันโดยให้มีใบประมาณ 2-3 ใบแล้วนำมาปลูกในแปลง เช่นเดียวกับต้นธูปฤาษี
3. นำไปปลูกในแปลงทดลอง โดยให้ความหนาแน่นของพืชเท่ากับ 66 ต้น/ตร.ม ในการทดลองมีการปลูกพืชลงในแปลง 12 ต้น /แปลงทดลอง

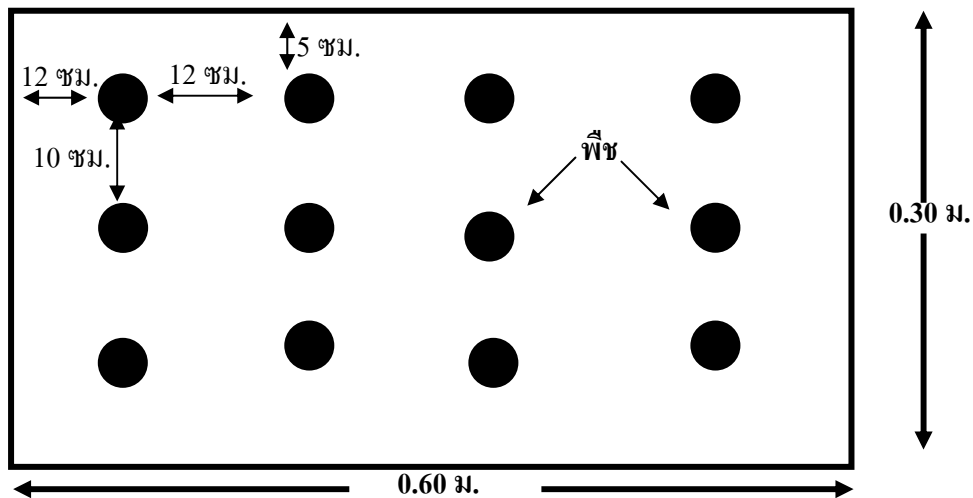


รูปที่ 4.4 พุทธรักษา (*Canna Spp.*) ก่อนทำการทดลอง

- การอนุบาลพืชทั้งสองชนิดก่อนดำเนินการทดลอง

1. นำพืชทั้งสองชนิดมาทำการอนุบาลลงดินก่อนที่จะนำลงแปลงทดลองจริง เป็นเวลา 1 เดือน
2. ใส่ธาตุอาหาร และปุ๋ยสูตร 15-15-15 ลงในแปลงทดลอง ปลอ่ยให้พืชทั้งสองชนิดฟื้นตัวและคุ้นเคยกับระบบทดลองเป็นเวลา 1 เดือน แล้วจึงเริ่มปลอ่ยน้ำเสียเข้าสู่ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น
3. นำพืชทั้งสองชนิดไปปลูกลงแปลงทดลอง โดยเว้นระยะห่างจากหัวแปลง และท้ายแปลงไว้ด้านละ 12 เซนติเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างต้นที่จะปลูก 10 เซนติเมตร และระยะห่างจากขอบแปลง 5 เซนติเมตร

การทดลองนี้มีการปลูกพืชทั้งสองชนิดในแปลงทดลองแปลงละ 12 ต้น/แปลงทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งและระยะห่างของพืชที่ปลูกในแปลงทดลอง

4.3 การเตรียมวัสดุตัวกลาง

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองคือ ดินทรายขนาด 0.1-0.2 เซนติเมตร และหินกรวดขนาด 0.5 – 1.0 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าความพรุนของตัวกลาง (Apparent density; ρ) ของดินทรายเท่ากับ 2.197 และของกรวดเท่ากับ 1.769 กิโลกรัมต่อลิตร ในการเตรียมตัวกลางจะต้องทำการล้างทำความสะอาดตัวกลางหินกรวดและดินทรายก่อนใส่ลงในแปลงทดลอง ตัวกลางดินทรายและหินกรวดแสดงดัง รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ตัวกลางดินทรายและหินกรวด

4.4 การเตรียมน้ำเสียและการป้อนน้ำเสียลงสู่แปลงทดลอง

การดำเนินการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ

1. การทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงาน
2. การทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์

เพื่อศึกษาตัวแปร ค่า BOD หรืออัตราการบำบัดทุกปีไอดี ที่แตกต่างกันหรือปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัด และกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสีย

4.4.1 การทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงาน

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง ได้รับความอนุเคราะห์จากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ มาลีสามพราน จำกัด (มหาชน) โดยจะใช้น้ำเสียรวมที่อยู่ในบ่อรวมตะกอนและหมักไร้อากาศชนิดสร้างกรด (Anaerobic Acid Pond) ดังรูปที่ 4.7 การทดลองในการทดลองจะทำการผสมน้ำเสียกับน้ำประปาในอัตราส่วน 1:10 และจะทำการตรวจสอบค่าตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บมาก่อนแล้วจึงทำการเก็บรักษาโดยอุณหภูมิไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส จึงจะถูกผสมในถังเก็บน้ำขนาด 400 ลิตร ก่อนสูบล่อยน้ำเสียสู่แปลงทดลอง โดยจัดให้มีการไหลแบบต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลคงที่



รูปที่ 4.7 จุดเก็บน้ำเสียก่อนเข้าบ่อรวมตะกอนและหมักไร้อากาศชนิดสร้างกรด

การทดลองซึ่งมีแปลงทดลองทั้งหมด 6 แปลงทดลอง โดยจัดให้มีการปลูกพืช 2 ชนิดด้วยกัน คือ ต้นธูปฤาษี โดยจะปลูกในแปลงที่ 1 และ 2 ส่วนพุทธรักษาจะปลูกในแปลงที่ 3 และ 4 โดยให้มีการกระจายตัวที่เท่ากันทั้งสองชนิด ซึ่งมีดินทรายเป็นตัวกลางในแปลงที่ 1 และ 3 มีหินกรวดเป็นตัวกลางในแปลงที่ 2 และ 4 ส่วนแปลงที่ 5 มีดินทรายเป็นตัวกลาง และ แปลงที่ 6 มีหินกรวดเป็นตัวกลาง ซึ่งแปลงที่ 5 และ 6 นี้กำหนดให้เป็นแปลงควบคุมที่ไม่ปลูกพืช เพื่อศึกษาการสะสมของไนโตรเจน ทั้งนี้กำหนดให้สำหรับระดับน้ำเสียในบ่อทดลองทุกบ่อมีความสูงประมาณ 0.10 เมตร จากระดับพื้นผิวหินกรวด ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังรูปที่ 4.8 โดยมีอัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ 8.1 ลิตร /วัน (Average Wastewater Flow) มีระยะเวลาที่กักเก็บน้ำเสีย 5 วัน (Hydraulic Retention Time, HRT) มีอัตราการบำบัดทุกทางชลศาสตร์ (Hydraulic loading rate) 0.009 ลบ.ม./ตร.ม.-วัน และอัตราการ

บรรทุกสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี (BOD loading rate) 1.9386 กรัม-BOD/ตร.ม-วัน (Buddhawong, 2005 และ เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542) ซึ่งแสดงแบบจำลองการทดลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ชนิดน้ำไหลเหนือพื้นผิว ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



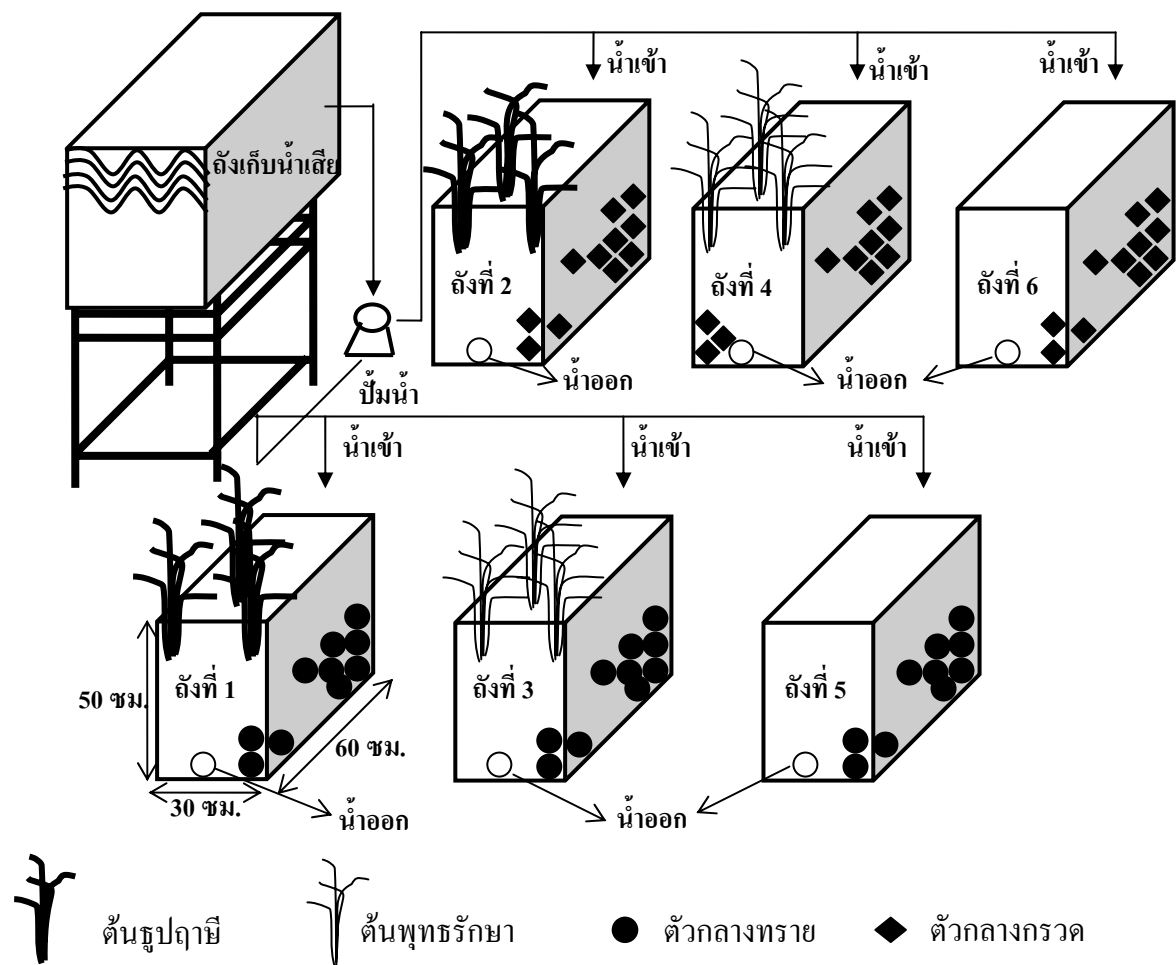
รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ณ สถานที่ทดลอง

4.4.2 การทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์

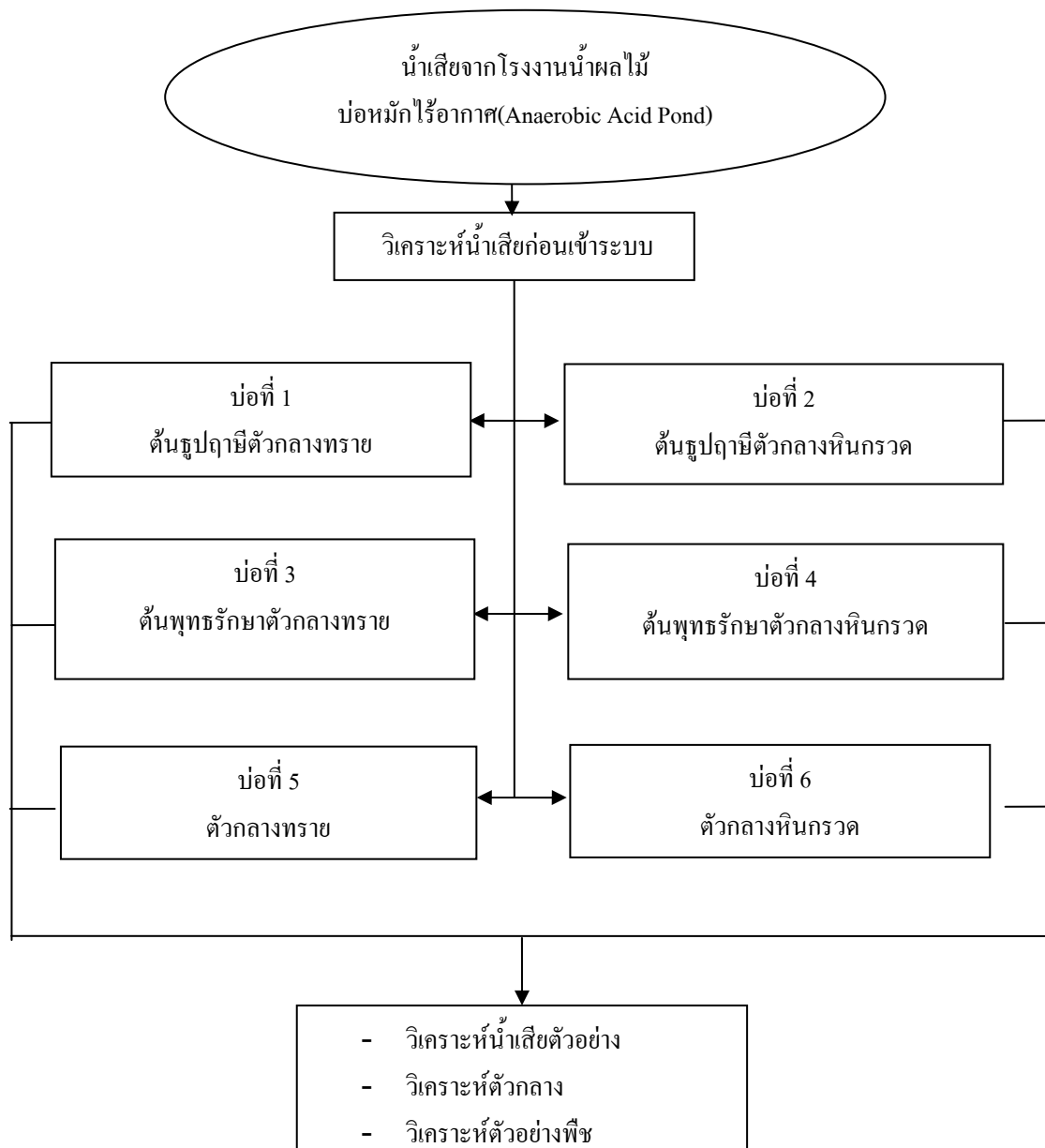
น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำเสียสังเคราะห์ จากการศึกษาระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) โดยทั่วไปกำหนดให้มีอัตราส่วนที่เหมาะสมของบีโอดีและอาหารเสริมที่จุลินทรีย์ต้องการคือ BOD: N: P: Fe เท่ากับ 100:5:1:0.5 (ดัดแปลงมาจาก วรวรรณ, 2539) ซึ่งแหล่งของไนโตรเจนที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ยูเรีย แต่ในการทดลองนี้ เป็นทดลองเพื่อเลียนแบบน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ดังนั้นการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์นี้จะเตรียมให้มีปริมาณของบีโอดีและไนโตรเจนที่สูงขึ้น โดยกำหนดให้ใช้อัตราส่วนของ BOD: N: P: Fe มาเป็น 200:20:2:1 เพื่อให้ได้ค่าน้ำเสียใกล้เคียงกับน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีค่าไนโตรเจนสูง

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ได้แก่ น้ำประปา น้ำตาลกลูโคส ยูเรีย โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไอออนซัลเฟต จากส่วนประกอบนี้ น้ำตาลกลูโคสเป็นสารอินทรีย์หรือบีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนยูเรีย โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไอออนซัลเฟต เติมเพื่อให้ได้สารอาหารเสริมคือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก จากสารดังกล่าว ตามลำดับ



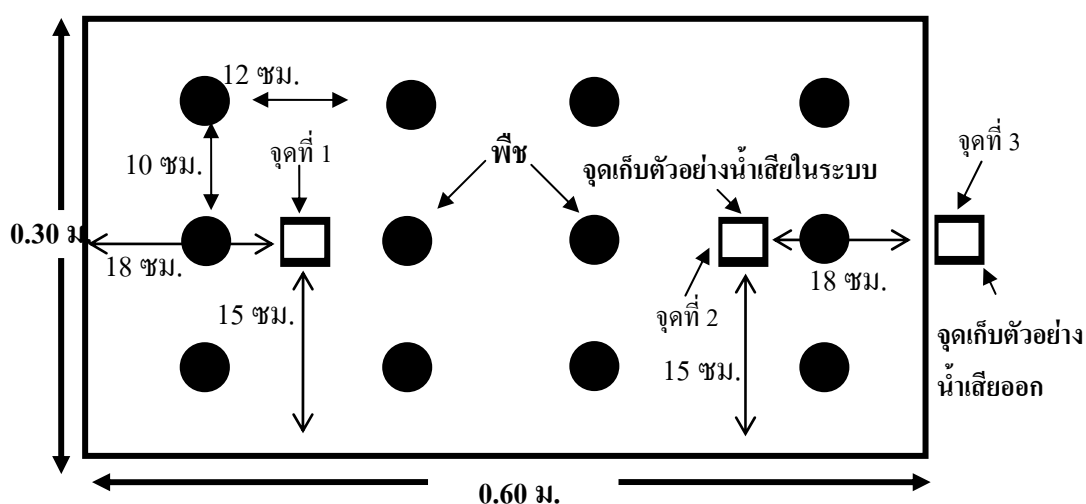
รูปที่ 4.9 แบบจำลองการทดลองพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.10 แผนผังการดำเนินงานในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น

4.5 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บทุกๆ 5 วัน โดยนำถังเก็บตัวอย่างมารองน้ำที่ผ่านการบำบัด โดยรองรับน้ำทิ้งไว้เป็นระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 12 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 24 ชั่วโมง และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ ทำการบันทึกความสูงของต้นรูปถ่าย และพุทธรักษาทุกๆ สัปดาห์ โดยมีจุดเก็บน้ำตัวอย่างดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียในแปลงทดลอง

4.5.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย

ทำการวิเคราะห์น้ำเสียที่เข้าระบบและน้ำเสียที่ออกจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น โดยทำการวิเคราะห์ทางเคมี ทางกายภาพ ตามมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำเสีย ตามวิธีการใน Standard Method for Water and Wastewater (AWWA, 1998) ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ความเป็นกรด – ด่าง (pH)	เครื่องวัดความเป็นกรด – ด่าง (pH Meter)
ค่าออกซิเจนละลาย (DO)	เครื่องวัดค่าออกซิเจนละลาย (DO Meter)
ซีโอดี (COD)	วิธีไดโครเมตแบบปิด (Close dichromate reflux)
อุณหภูมิ (Temperature)	เครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature Meter)
โออาร์พี (ORP)	ขั้ว Electrode (ORP Meter)
บีโอดี (BOD ₅)	Azide modification method
ทีเคเอ็น (TKN)	Total Kjeldahl Nitrogen
ไนไตรท์ (NO ₂ ⁻)	วิธี NED หรือวิธีวัดสี (Colorimetric)
ไนเตรท (NO ₃ ⁻)	วิธีแคดเมียมรีดักชัน (Cadmium reduction method)
แอมโมเนียม (NH ₄ ⁺)	ไอออนโครมาโตกราฟี (IC), Distillation (TKN)

4.5.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างพืช

สุ่มเก็บตัวอย่างพืชจำนวน 4 ต้นของแต่ละบ่อการทดลองมาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆโดยการวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด จะนำส่วนของราก ลำต้น และใบ มาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกัน การวิเคราะห์เก็บตัวอย่างพืชจะทำการวิเคราะห์ ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของการวิเคราะห์ตัวอย่างพืช

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่
ความสูงของต้น	การวัดขนาด	ทุกสัปดาห์
ความยาวของราก	การวัดขนาด	ก่อนและสิ้นสุดการทดลอง
น้ำหนักแห้ง	การอบแห้งตัวอย่าง	ก่อนและสิ้นสุดการทดลอง
ไนโตรเจนทั้งหมด(TN)	Kjeldahl Method	ก่อนและสิ้นสุดการทดลอง

4.5.3 การวิเคราะห์วัสดุตัวกลาง

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวัสดุตัวกลางกรวดหรือทรายจะมีการเก็บตัวอย่างที่ 3 ระดับความลึก คือ 5 10 และ 20 เซนติเมตร จากบ่อทดลองแต่ละบ่อ หลังจากนั้นนำตัวอย่างมารวมกันและนำไปวิเคราะห์ตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตัวกลาง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่
ไนโตรเจนทั้งหมด(TKN) อัตราการไหลผ่านของน้ำ	Kjeldahl Method จับเวลาและวัดปริมาตร	ก่อนและหลังการทดลอง ทุกเดือน

5. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นแบบน้ำไหลเหนือพื้นผิว ในการบำบัดไนโตรเจนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ โดยใช้ตัวกลางสองชนิด คือ ทราย และหินกรวด ในแปลงที่มีการปลูกพืชแตกต่างกัน เพื่อให้ทราบถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปของไนโตรเจนในน้ำเสียของระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองคือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ที่รวมรวมมาจากน้ำเสยรวมที่อยู่ในบ่อรวมตะกอนและบ่อหมักไร้อากาศชนิดสร้างกรด

(Anaerobic Acid Pond) สมบัติของน้ำเสียก่อนการนำมาวิจัยแสดงดังตารางที่ 5.1 ในการทดลองจะทำการเจือจางน้ำเสยรวมด้วยน้ำประปาในอัตราส่วน 1:10 ลิตร ปรับการไหลของน้ำเสียให้เป็นแบบต่อเนื่อง เข้าสู่แปลงทดลองทั้งหมด 6 แปลงทดลอง โดยแบ่งเป็นแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถั่วอยู่ 3 บ่อที่ 1 และ 2 ส่วนแปลงที่มีต้นพุทธรักษาอยู่ 3 บ่อที่ 3 และ 4 ส่วนแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชอยู่ 3 บ่อที่ 5 และ 6 ซึ่งแปลงทดลองที่ 1, 3 และ 5 จะมีตัวกลางเป็นทราย ส่วนแปลงทดลองที่ 2, 4 และ 6 จะมีตัวกลางเป็นกรวด โดยการทดลองนี้แบ่งเป็น 2 แบบการทดลอง ที่ใช้แหล่งและความเข้มข้นของน้ำเสียต่างกันคือ น้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ แต่กำหนดให้มีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียเท่ากันที่เวลา 5 วัน อัตราการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 8.1 ลิตร/วัน

ตารางที่ 5.1 ลักษณะของน้ำเสยรวมที่อยู่ในบ่อรวมตะกอนและหมักไร้อากาศชนิดสร้างกรด (Anaerobic Acid Pond) จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้

พารามิเตอร์	ค่าที่ตรวจวัดได้	อัตราส่วนน้ำเสียที่ใช้ น้ำเสียจริง : น้ำประปา (1:10)
pH	4.49-4.59	5.11-5.67
Chemical Oxygen Demand (COD, mg/L)	1,967-4,158	203.60-872.73
Biochemical Oxygen Demand (BOD, mg/L)	1,241-2,310	98.90-423.80
TKN (mg/L)	24.5-29.5	3.36-7.21
Nitrate (NO_3^- , mg/L)	0.135-0.152	0.052-0.085
Nitrite (NO_2^- , mg/L)	0.012-0.015	0.001-0.0013
Ammonium ion (NH_4^+ , mg/L)	1.68-1.82	0.56-0.960
โออาร์พี (ORP, mV)	(-98)-(-111)	(-15)-(-153)

5.1 การบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล โดยพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ที่มีตัวกลางเป็นทราย

5.1.1 พีเอช อุณหภูมิ ออกซิเจนละลาย และโออาร์พี

ผลการศึกษาค่าพีเอช อุณหภูมิ ออกซิเจนละลาย และโออาร์พี แสดงดังรูปที่ 5.1 พบว่าน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ที่ 5.28 ± 0.13 และเมื่อทดลองผ่านไป 90 วัน พบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่เข้าระบบในจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (น้ำเข้า) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (น้ำในระบบ) และที่จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 (น้ำออก) ที่มีทรายเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช มีสูงขึ้นไม่มากนัก คือมีค่าเป็นกรดอ่อนถึงกลางอยู่ระหว่าง 6.0-7.5

อุณหภูมิน้ำเสียที่เข้าระบบพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเฉลี่ยมีค่าระหว่าง 28.3-32.2 องศาเซลเซียส และน้ำเสียที่เข้าระบบในจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ถึง 3 ที่มีทรายเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชมีค่าช่วง 27.7 ถึง 31.4 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (ข)

ค่าออกซิเจนละลาย (Oxygen Demand, DO) ของน้ำเสียที่เข้าระบบที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร อยู่ในช่วง 2.4-0.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียที่เข้าระบบในจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 และ 2 ที่มีทรายเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช เมื่อระยะเวลาผ่านไป 90 วัน พบว่าในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษีมีค่าระหว่าง 0.1-2.4 และ 0.1-2.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา มีค่า 0.1-2.1 และ 0.1-1.9 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช มีค่า 0.1-5.1 และ 0.1-4.7 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ดังรูปที่ 5.1 (ค)

ที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตร ค่าออกซิเจนละลายมีค่าผันแปรอยู่ในช่วง 2.4-0.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียที่เข้าระบบในจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ถึง 3 (น้ำออก) ที่มีทรายเป็นตัวกลาง ผลการทดลองพบว่า น้ำที่ออกจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษีมีค่าระหว่าง 0.1-1.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา มีค่าระหว่าง 0.1-1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช มีค่าระหว่าง 0.1-2.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.1 (ง) โดยจุดเก็บที่ 1 และ 2 ของค่าออกซิเจนละลายที่วัดค่าออกซิเจนละลายในระดับความลึก 25 เซนติเมตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี และแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา ไม่สามารถวัดค่าได้อันเนื่องมาจากรากของพืชและชนิดตัวกลางทรายมีการเข้าไปอุดตันในจุดเก็บตัวอย่างน้ำ

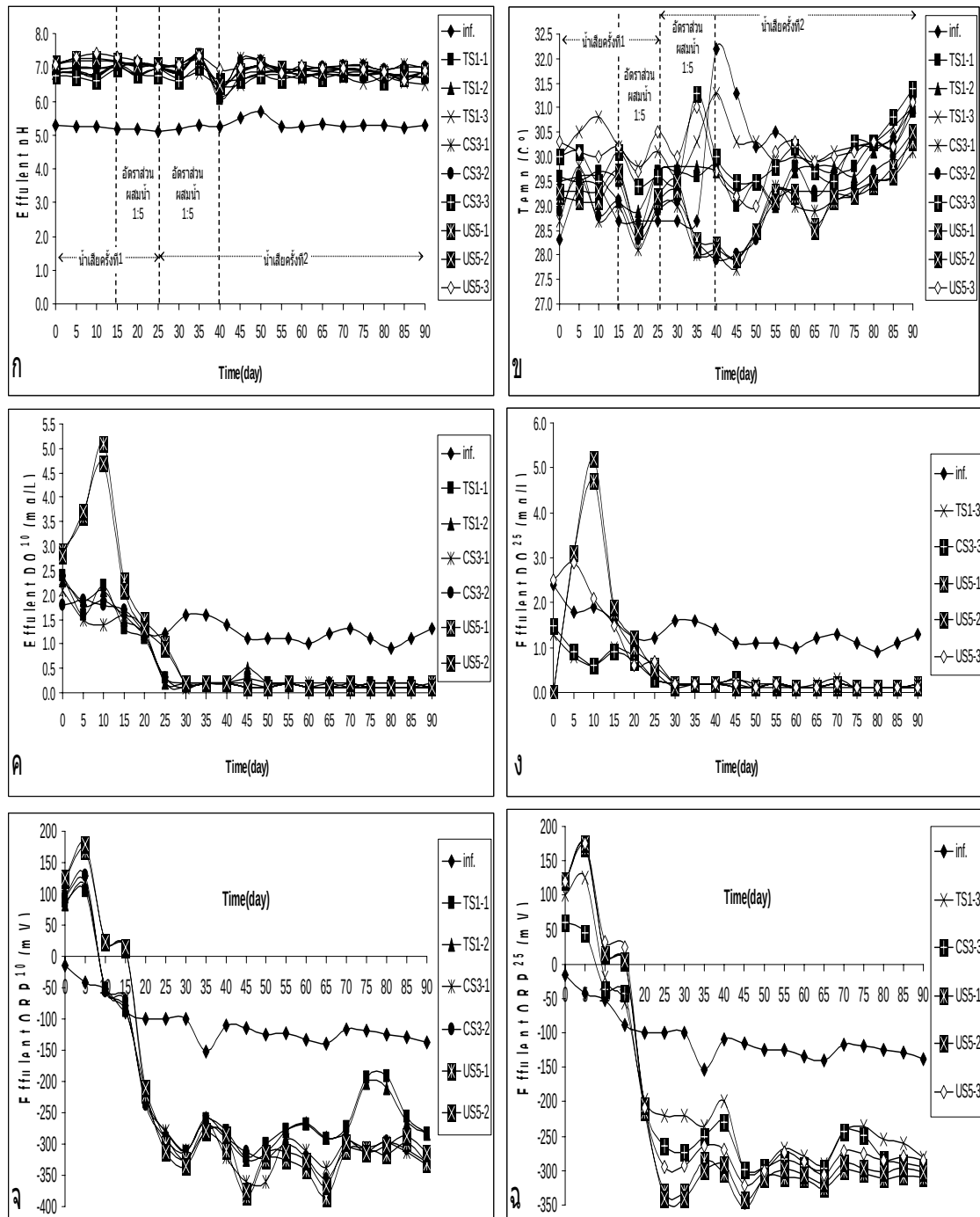
ค่าโออาร์พี (ORP) ของน้ำเข้าระบบที่ตรวจวัดในระดับความลึก 10 เซนติเมตร มีค่าอยู่ในช่วง (-15) - (-153) มิลลิโวลต์ และน้ำเสียที่เข้าระบบในจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 และ 2 ที่มีทรายเป็นตัวกลางจากแปลงที่

มีการปลูกต้นรูปถาพี ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช เมื่อระยะเวลาผ่านไป 90 วัน พบค่าอยู่ในช่วง (-320)-105 และ (-325)-112 มิลลิโวลต์ ในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถาพี และมีค่า (-360)-118 และ (-356)-130 มิลลิโวลต์ ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา ส่วนในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช มีค่าอยู่ในช่วง (-385.7)-168 และ (-375)-179 มิลลิโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (จ)

ค่าโออาร์พี (ORP) ที่วัดค่าในระดับความลึก 25 เซนติเมตร อยู่ในช่วง (-15.0)-(-153) มิลลิโวลต์ และน้ำเสียที่เข้าระบบในจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ถึง 3 ที่มีทรายเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถาพี ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช เมื่อระยะเวลาผ่านไป 90 วัน ของการทดลองมีค่าช่วง (-300)-125 มิลลิโวลต์ ในจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ของแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถาพี, (-298)-61 มิลลิโวลต์ ในจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ของแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา (-355)-169, (-342)-176 และ(-321)-176 มิลลิโวลต์ ในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.1 (ฉ)

ค่าพีเอช อุณหภูมิ ออกซิเจนละลาย และโออาร์พี ถือเป็นปัจจัยที่อาจแสดงถึงโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน แสดงถึงความเหมาะสมของระบบในการเกิดกระบวนการต่างๆ ได้ เช่น กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน และไม่ได้ขึ้นอยู่กับเพียงแค ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนและไนเตรตไนโตรเจนในระบบเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีกหลายประการ เช่น ปริมาณไนโตรฟายอิงแบคทีเรีย โดยปัจจัยที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังเช่นค่าโออาร์พี, ออกซิเจนละลาย, อุณหภูมิ และ พีเอช เนื่องจากจุลินทรีย์ดังกล่าวมีความไวและอ่อนแอต่อสารยับยั้งหลายชนิด (จันทิมา รอดมา, 2551)

จากการวิจัยของ (Cooper et al., 1996) พบว่าสำหรับกระบวนการไนตริฟิเคชันนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ ระหว่าง 25-35 องศาเซลเซียส หรือในดินที่ 30-40 องศาเซลเซียส พีเอชอยู่ในช่วง 7.5-8.6 และค่าโออาร์พีที่ตั้งแต่ +100 มิลลิโวลต์ ขึ้นไป ส่วนดีไนตริฟิเคชันนั้นจะเกิดในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน พีเอชอยู่ในช่วง 7-8 และมีโออาร์พีอยู่ในช่วง -50 ถึง +50 มิลลิโวลต์ ซึ่งพิจารณาพีเอช, ออกซิเจนละลาย และโออาร์พีที่เข้าระบบและน้ำเสีย ดังรูปที่ 5.1 พบว่าน้ำเสียที่เข้าระบบในจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ถึงจุดน้ำออก (จุดที่ 3) ที่มีทรายเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถาพี ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช ที่มีทรายเป็นตัวกลางเมื่อระยะเวลาผ่านไป 90 วัน จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชของระบบมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ค่าออกซิเจนละลายลดลง ค่าโออาร์พีลดลง ในจุดเก็บตัวอย่างทั้งสามจุดโดยค่าดังกล่าวยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการเกิดกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งจากความสัมพันธ์ของค่าออกซิเจนละลายลดลงและค่าโออาร์พีที่ลดลง แต่ช่วงแรกในการทดลองค่าพารามิเตอร์ทั้งสามจะมีค่าเหมาะสมในการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน



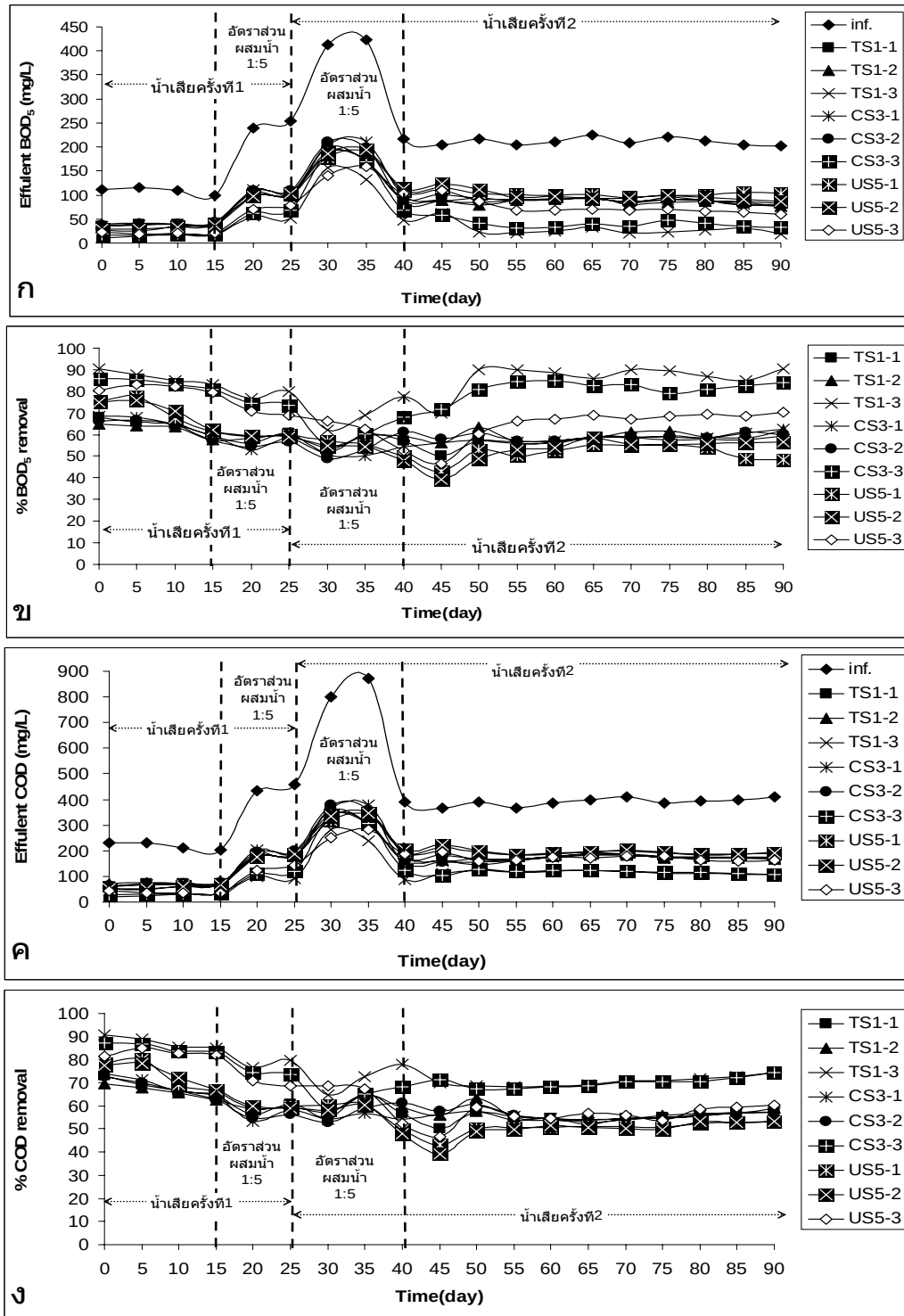
รูปที่ 5.1 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง ก) พีเอช ข) อุณหภูมิ ค) ออกซิเจนละลายที่ระดับ 10 ซม. ง) ออกซิเจนละลายที่ระดับ 25 ซม. จ) โออาร์พีที่ระดับ 10 ซม. ฉ) โออาร์พีที่ระดับ 25 ซม. (T: ทราย, C: พุรุษ, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)

5.1.2 บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD)

จากการทดลองพบค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของบีโอดีก่อนเข้าระบบมีค่า 211.69 ± 7.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียที่เข้าระบบในจุดเก็บตัวอย่างที่ 1(น้ำเข้า) ถึง 3 (น้ำออก) ที่มีทรายเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปไข่ ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชเมื่อระยะเวลาผ่านไป พบว่าระหว่างวันที่ 40-90 ของการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยของบีโอดีในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปไข่ เท่ากับ 91.15 ± 5.06 , 86.06 ± 5.39 และ 30.14 ± 13.15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา มีค่า 88.49 ± 6.16 , 86.51 ± 4.18 และ 42.15 ± 11.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช มีค่า 102.80 ± 5.84 , 99.81 ± 11.30 และ 75.85 ± 16.37 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ $56 \pm 2\%$, $59 \pm 2\%$ และ $85 \pm 6\%$ ของแปลงที่มีการปลูกต้นรูปไข่ $58 \pm 2\%$, $59 \pm 1\%$ และ $80 \pm 5\%$ ของแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา และ $51 \pm 3\%$, $52 \pm 5\%$ และ $64 \pm 7\%$ ในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชตามลำดับ (รูปที่ 5.2(ข))

จากรูปที่ 5.2 (ก) และ (ข) พบว่าระบบที่มีการปลูกพืชและไม่ปลูกพืชที่มีทรายเป็นตัวกลาง ในจุดเก็บน้ำออก (จุดที่3) มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีของระบบที่มีการปลูกต้นรูปไข่มีค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดีกว่าระบบที่ไม่ปลูกพืช

จากการที่ระบบรากของพืชมีการถ่ายเทออกซิเจนจากรากของต้นพืชสู่ชั้นของตัวกลาง และส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมารอบ ๆ รากพืช และส่วนปลายราก (Root Tips) เมื่อสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ จุลินทรีย์ที่ใช้ ออกซิเจนจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้บีโอดีมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบพบว่ามีค่าไม่สูงมากนัก ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดี (Armstrong et al., 1990) ทั้งนี้การกรองโดยระบบรากและตัวกลางที่เป็นทรายรวมถึงการตกตะกอน เป็นส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด



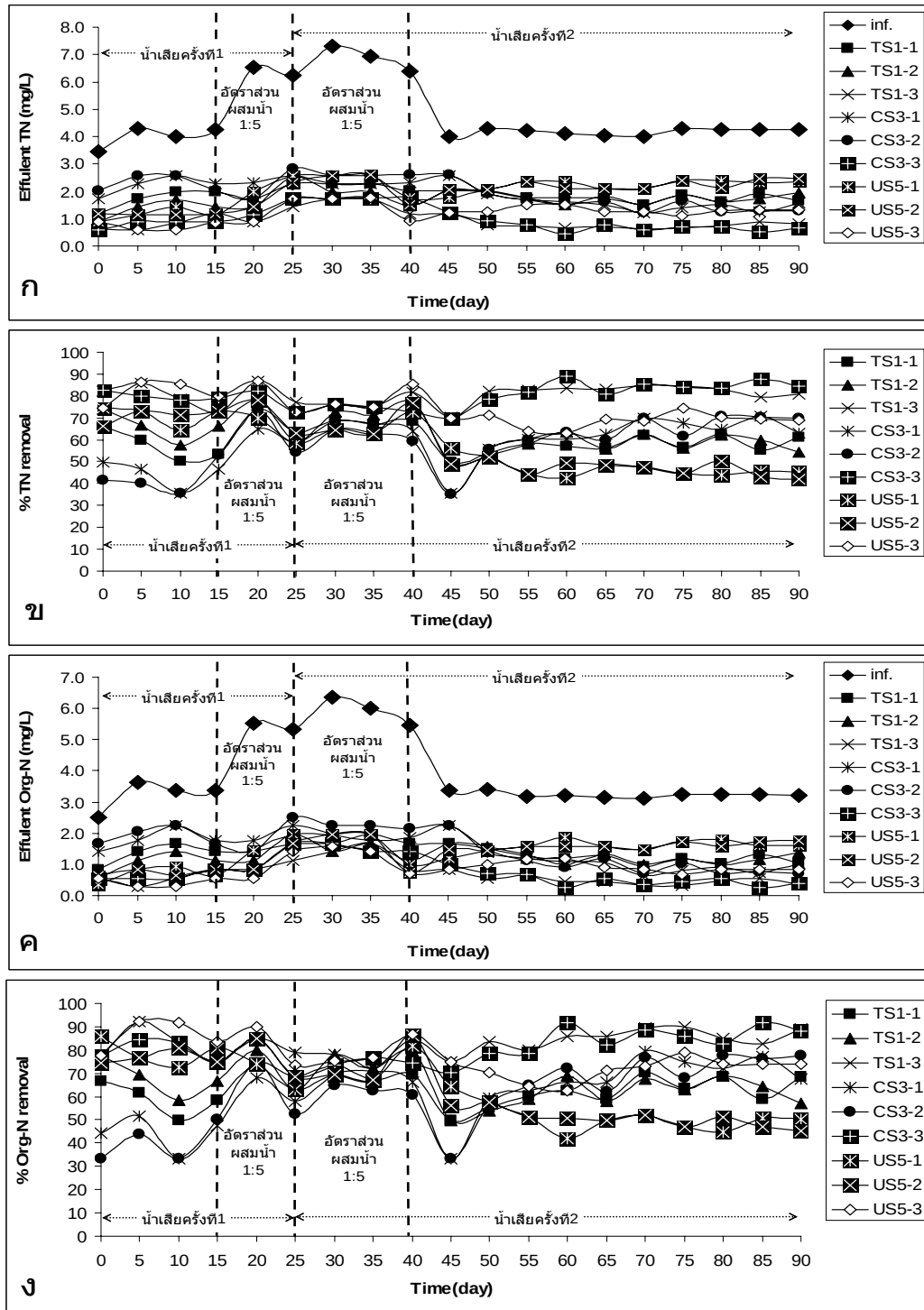
รูปที่ 5.2 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง ก) บีโอดี ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี ค) ค่าซีโอดี ง) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (T: รูปถ่าย, C: พุรรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)

5.1.3 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)

จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของซีโอดี ก่อนเข้าระบบมีค่าผันแปรอยู่ระหว่าง 391.18 ± 14.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียที่เข้าระบบจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีทราายเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชเมื่อระยะเวลาผ่านไป 50 วัน จากวันที่ 40-90 ของการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยของซีโอดี เท่ากับ 175 ± 6.87 , 168.74 ± 12.0 และ 112.28 ± 10.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษีตามลำดับ 174.17 ± 8.52 , 170.5 ± 13.12 และ 117.28 ± 7.76 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษาตามลำดับ และ 193.38 ± 7.40 , 196.06 ± 11.41 และ 172.76 ± 11.97 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชตามลำดับ ดังรูปที่ 5.2(ค) ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ $55 \pm 2\%$, $56 \pm 2\%$ และ $71 \pm 2\%$ แปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษีตามลำดับ $55 \pm 1\%$, $56 \pm 2\%$ และ $69 \pm 2\%$ แปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษาตามลำดับ และ $50 \pm 2\%$, $49 \pm 3\%$ และ $55 \pm 4\%$ แปลงที่ไม่มีการปลูกพืช ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.2 (ง)

จากผลการทดลองพบว่าการบำบัดซีโอดีเป็นไปในทางเดียวกับการบำบัดบีโอดี ซึ่งระบบที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี และต้นพุทธรักษา ที่มีทราายเป็นตัวกลางโดยการทดสอบทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ใกล้เคียงกันแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ดีกว่าแปลงที่ไม่ปลูกพืชอย่างมีนัยสำคัญ

ทั้งนี้ค่าซีโอดีส่วนใหญ่เป็นผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบ ส่วนสารอนินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในระบบจึงส่งผลให้การบำบัดซีโอดีมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าบีโอดี ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนั้น ออกซิเจนในชั้นตัวกลางส่วนหนึ่งเกิดจากการที่พืชสามารถส่งผ่านออกซิเจนไปยังบริเวณราก ทำให้บริเวณรอบ ๆ รากมีออกซิเจนเพียงพอที่จะทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนสามารถย่อยสลายจุลินทรีย์ได้ดี (ศุภา กานตวนิชกูร, 2544)



รูปที่ 5.3 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง ก) ค่าไนโตรเจนทั้งหมด ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าไนโตรเจนทั้งหมด ค) ค่าอินทรีย์ไนโตรเจน ง) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าอินทรีย์ไนโตรเจน (T: รูปถ่าย, C: พืชรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)

5.1.4 ไนโตรเจน (Nitrogen)

ความเข้มข้นเฉลี่ยของไนโตรเจนทั้งหมดก่อนเข้าระบบมีค่า 4.80 ± 1.19 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสียที่เข้าระบบจุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้าจุดที่ 1 ถึงจุดน้ำออกจุดที่ 3 ที่มีทรายเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถ่ายิ ดันพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช พบว่าปริมาณไนโตรเจนในน้ำออกมีค่าลดลง โดยในระหว่างวันที่ 40-90 ของการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยของไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 1.80 ± 0.17 ในน้ำเข้า และ 0.81 ± 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำออกของแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถ่ายิ พบค่าไนโตรเจนในน้ำออก 0.82 ± 0.37 มิลลิกรัมต่อลิตรในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา และมีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 1.26 ± 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตรในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ $81 \pm 4\%$ $81 \pm 5\%$ และ $70 \pm 5\%$ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.3 (ก, ข)

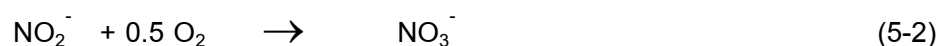
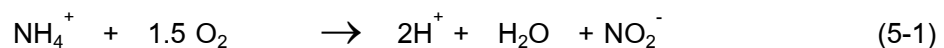
ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของอินทรีย์ไนโตรเจนก่อนเข้าระบบมีค่า 3.89 ± 1.17 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียที่เข้าระบบจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีทรายเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถ่ายิ ดันพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชเมื่อระยะเวลาผ่านไป 50 วัน (รูปที่ 5.3 (ค) และ (ง)) จากวันที่ 40-90 ของการทดลอง พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.28 ± 0.26 , 1.25 ± 0.23 และ 0.53 ± 0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถ่ายิตามลำดับ 1.18 ± 0.49 , 1.19 ± 0.55 และ 0.60 ± 0.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษาตามลำดับ และ 1.53 ± 0.25 , 1.51 ± 0.28 และ 0.89 ± 0.16 มิลลิกรัมต่อลิตรในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช โดยคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ $62 \pm 6\%$, $62 \pm 8\%$ และ $84 \pm 4\%$ ในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถ่ายิตามลำดับ $65 \pm 12\%$, $66 \pm 13\%$ และ $83 \pm 7\%$ ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา และ $53 \pm 11\%$, $54 \pm 11\%$ และ $73 \pm 6\%$ ในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชตามลำดับ

จากรูปที่ 5.3 (ก, ข) แสดงว่าระบบที่มีการปลูกต้นรูปถ่ายิ และต้นพุทธรักษา ที่มีทรายเป็นตัวกลางมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ใกล้เคียงกัน และแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญในจุดน้ำออกหรือจุดที่ 3 ส่วนในจุดเก็บที่หนึ่งและสองของแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถ่ายิ และต้นพุทธรักษา ยังคงมีปริมาณของไนโตรเจนในน้ำสูงกว่าน้ำที่ออกจากระบบ ทั้งนี้พบว่าน้ำที่ออกจากระบบของแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชมีค่าสูงกว่าและมีค่าแตกต่างจากแปลงที่มีการปลูกพืชอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% นอกจากนี้ในระบบที่มีการปลูกต้นรูปถ่ายิ และต้นพุทธรักษา ที่มีทรายเป็นตัวกลาง (รูปที่ 5.3 ค, ง) สามารถบำบัดอินทรีย์ไนโตรเจนได้ดีว่าแปลงที่ไม่ปลูกพืชโดยมีค่ากันอย่างมีนัยสำคัญ

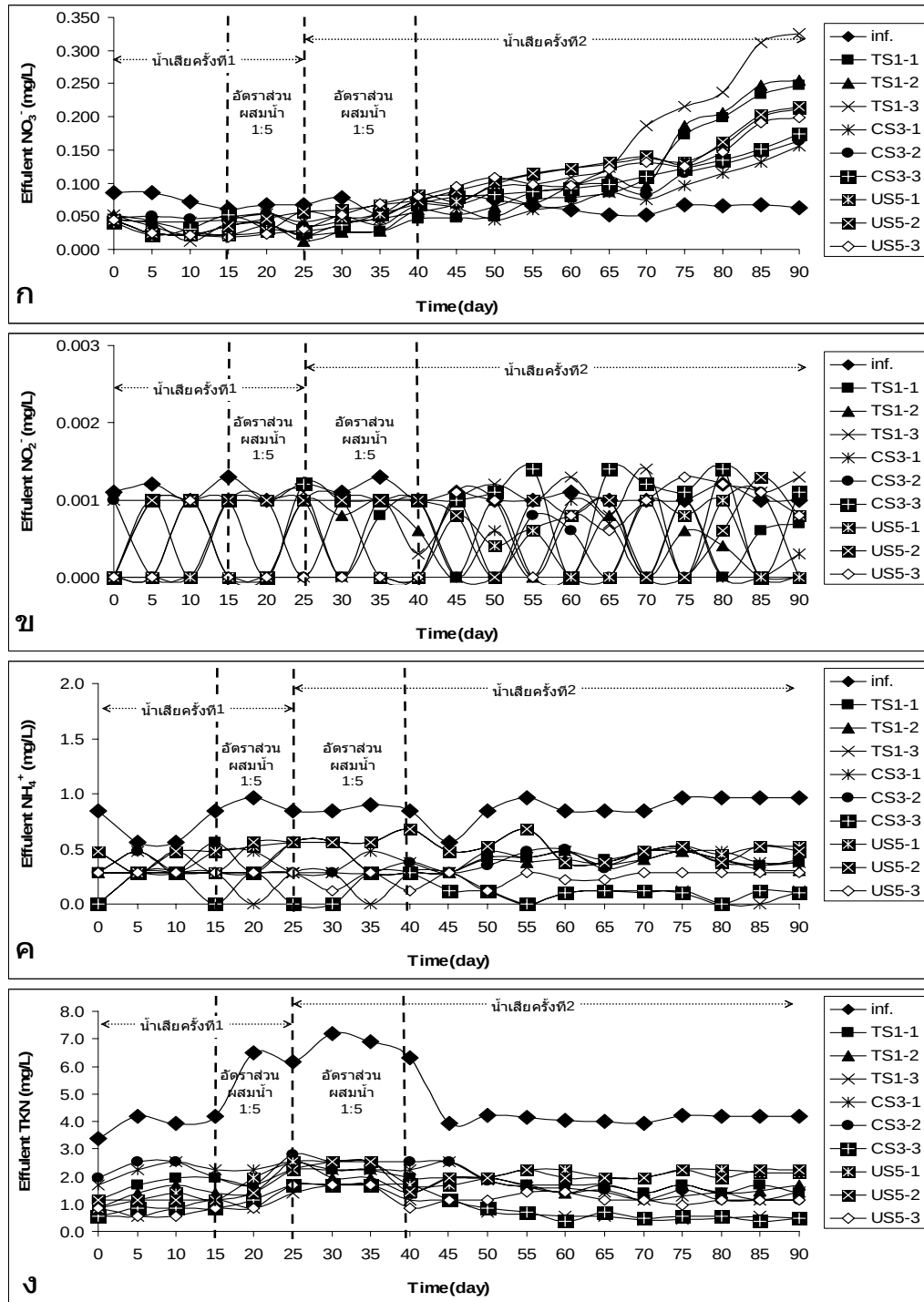
จากรูปที่ 5.4 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณของทีเคเอ็น(TKN) และ แอมโมเนียไนโตรเจนของแปลงที่มีการปลูกต้นรูปถ่ายิ และต้นพุทธรักษา ณ จุดเก็บตัวอย่างที่สามหรือน้ำออกจากระบบที่มีทรายเป็นตัวกลาง สามารถบำบัดได้ใกล้เคียงกัน ยกเว้นแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชยังคงพบว่ามีปริมาณทีเคเอ็นสูงกว่าในแปลงที่มีการปลูกพืชทั้ง 2 ชนิดนั้น

ปริมาณที่เคเอ็น(TKN) ของน้ำเสียที่เข้าระบบ เมื่อผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าไนโตรเจนทั้งหมดลดลง ด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การระเหยกลายเป็นไอของแอมโมเนีย ปฏิกริยาแอมโมนิฟิเคชัน ปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน ปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน การนำไปใช้โดยพืช และการดูดซับไว้ในตัวกลาง (Middlebrooks et al., 1983 และ Vymazal, 2002) โดยอินทรีย์ไนโตรเจนส่วนมากใน น้ำเสียพร้อมที่จะ ถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย และจะเกิดได้ดีในสภาวะที่มีออกซิเจน (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544)

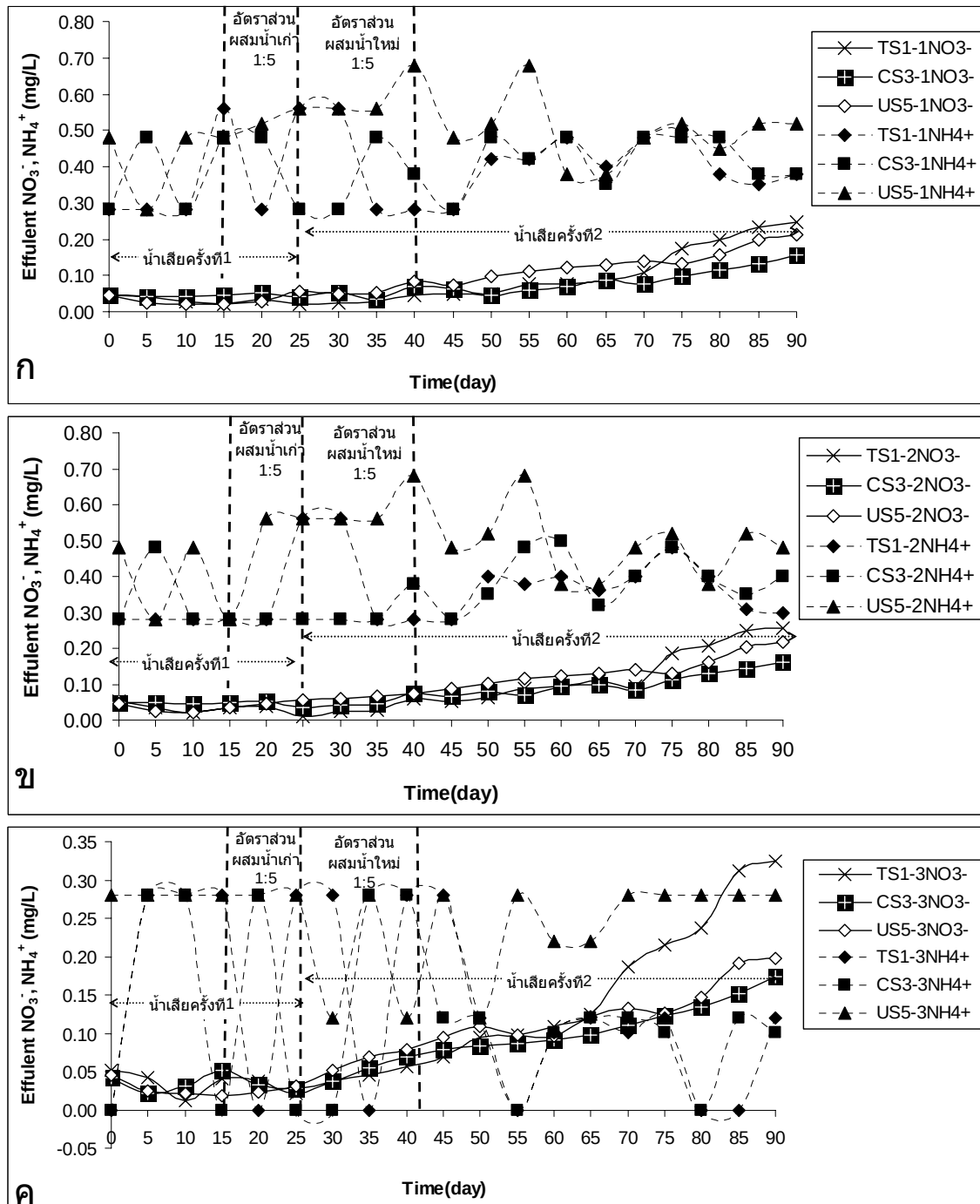
จากรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าแอมโมเนียไนโตรเจนและไนเตรท พบว่า ในแปลงที่มีที่มีทรายเป็นตัวกลางและปลูกพืชพบว่าปริมาณไนเตรทเพิ่มสูงขึ้น โดยในจุดน้ำออกหรือจุดเก็บตัวอย่าง ที่สามของแปลงที่มีการปลูกต้นรูปไข่ มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 0.166 ± 0.095 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ ในการพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าแอมโมเนียไนโตรเจนและค่าไนเตรทไนโตรเจน จะเห็นได้ว่าในช่วง ระหว่างวันที่ 40-90 วันของการทดลอง พบว่าปริมาณไนเตรทเพิ่มขึ้น โดยผผันกับปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรเจน ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก เกิดปฏิกริยาแอมโมนิฟิเคชันและไนตริฟิเคชันในระบบได้ดีกว่าปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชัน อีกทั้งระบบราก ของรูปไข่มีการกระจายตัวในแนวดิ่ง ประกอบกับต้นพืชทั้ง 2 ชนิด มีการขยายตัวของรากในแนวราบ ภายในชั้นตัวกลาง จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนในระบบเพียงพอต่อการเกิดปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน และ จากการทดลองพบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดมีปริมาณไนไตรท์และไนเตรทมากกว่าน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกริยาไนตริฟิเคชันมากกว่าดีไนตริฟิเคชัน โดยปฏิกริยาไนตริฟิเคชันนั้น ระบบ จะต้องอยู่ภายใต้สภาวะแอโรบิก และเนื่องจากตัวกลางที่มีความพรุน ก่อให้เกิดสภาวะแอโรบิกใน ระบบมากกว่าสภาวะแอนแอโรบิก ทำให้แอมโมเนียเปลี่ยนเป็นไนไตรท์และไนเตรทดังสมการที่ 5-1 และ 5-2 (Vymazal, 2002)



ปริมาณไนเตรทในระบบจึงมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ นอกจากนี้ Sezerino และคณะ(2003) ได้กล่าวไว้ ว่าการระเหยกลายเป็นไอของแอมโมเนียไนโตรเจน สามารถเกิดได้ที่ค่าความเป็นกรดต่างมากกว่า 7 โดยไนโตรเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแอมโมเนีย และสามารถกำจัดออกโดยการระเหย ซึ่งอัตราการระเหย ของแอมโมเนียไนโตรเจน จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนและทีเคเอ็น (TKN) ของระบบ เพิ่มขึ้น จากการทดลองจะพบว่าค่าที่จุดเก็บที่หนึ่งและสองของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นในการ บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ มีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน และทีเคเอ็น (TKN) อยู่ในระบบ มากกว่าจุดเก็บตัวอย่างที่สามหรือที่ใกล้ทางออกจากระบบ



รูปที่ 5.4 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง ก) ค่าไนเตรทไนโตรเจน ข) ค่าไนไตรท์ไนโตรเจน ค) ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ง) ทีเคเอ็น (TKN) (T: รูปถ่าย, C: พุรรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของแอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง (T: ฐุภาชี, C: พุชรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)

5.2 การบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ที่มีตัวกลางเป็นกรวด

5.2.1 พีเอช อุณหภูมิ ออกซิเจนละลาย และโออาร์พี

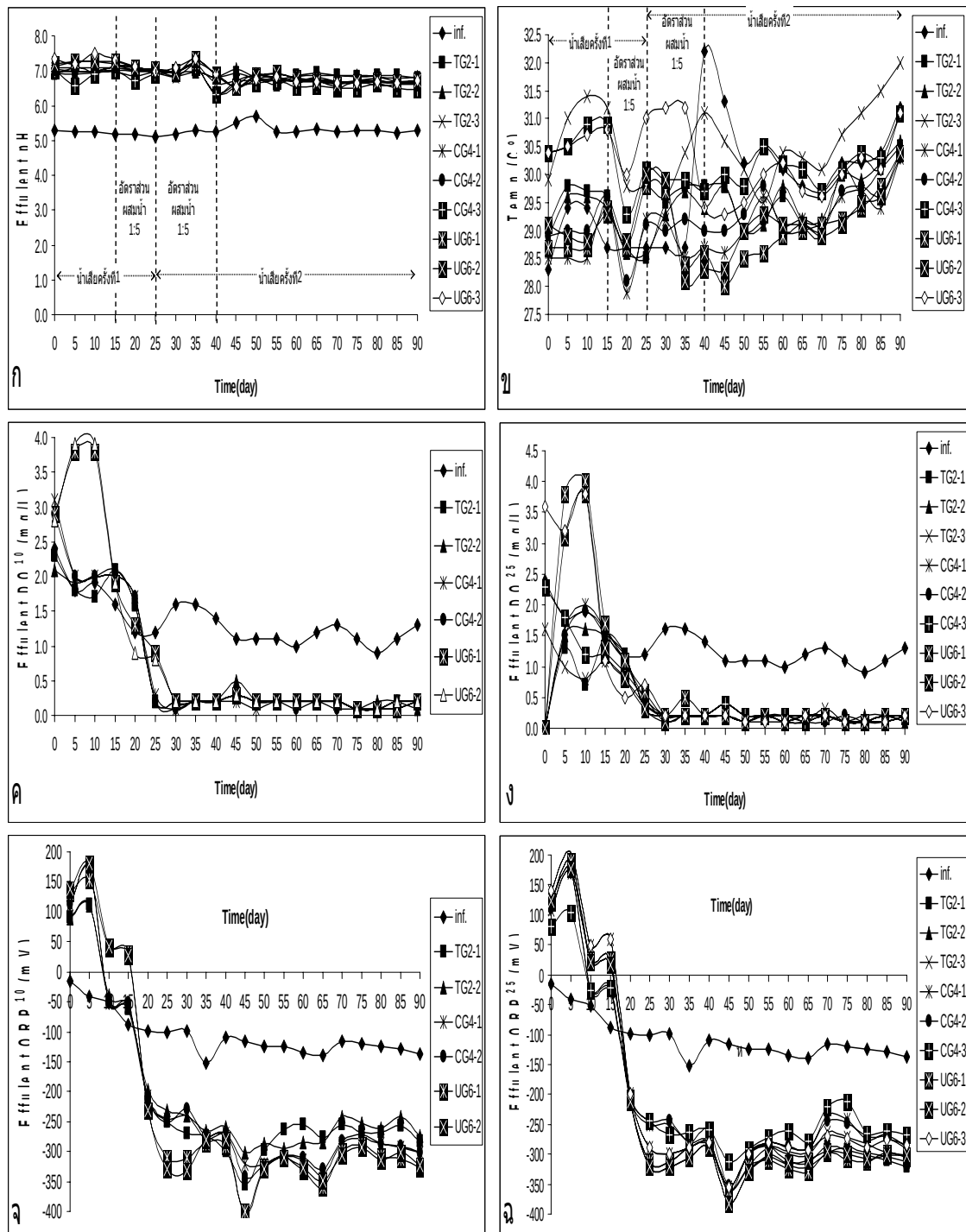
ประสิทธิภาพพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ที่มีตัวกลางเป็นกรวด ทำการทดลองโดยมีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 5 วัน อัตราการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 8.1 ลิตร/วัน พบว่าพีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่า 5.28 ± 0.13 (แสดงดังรูปที่ 5.6 (ก)) และพบว่าน้ำที่ออกจากแปลงที่ปลูกต้นทุเรียน ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่ปลูกพืชมีอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง คือมีค่าระหว่าง 6.3-7.4

อุณหภูมิของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบพบว่ามีค่าเฉลี่ยค่อนข้างสูงอยู่ระหว่าง 28.3-32.2 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 5.6 (ข) ทั้งนี้เนื่องจากแปลงทดลองตั้งอยู่ในโรงเรือนกลางแจ้งที่อยู่บนดาดฟ้าอาคารจึงได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ค่อนข้างสูง ซึ่งจะมีผลต่อการย่อยสลายของอินทรีย์สารในน้ำเสียในถังเตรียมน้ำเสียรวมด้วย

ปริมาณออกซิเจนละลาย (Oxygen Demand; DO) ของน้ำเสียที่เข้าระบบที่ตรวจวัดที่พื้นผิวในระดับความลึก 10 เซนติเมตร อยู่ที่ช่วง 2.40-0.90 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในช่วงแรกของการทดลองจะพบค่า DO ค่อนข้างสูง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปพบว่า ค่า DO ของน้ำเสียที่อยู่ในระบบและที่ออกจากระบบในจุดเก็บตัวอย่างที่ 2 และ 3 มีค่าค่อนข้างต่ำคือ ต่ำกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งในแปลงที่ปลูกพืชและไม่ปลูกพืช แสดงดังรูปที่ 5.6(ค) และค่าออกซิเจนละลายที่วัดในระดับความลึก 25 เซนติเมตร พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกันกับค่า DO ในน้ำเสียที่ระดับพื้นผิว ดังรูปที่ 5.6 (ง)

ค่าโออาร์พี (ORP) ของน้ำเสียที่เข้าระบบ มีค่าอยู่ในช่วง (-15.0) ถึง (-153) มิลลิโวลต์ หลังจากการทดลองผ่านไป 20 วัน พบว่า ค่า ORP เฉลี่ยของน้ำเสียในระบบที่ระดับความลึก 10 และ 25 เซนติเมตรของแปลงที่มีการปลูกต้นทุเรียน ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช มีค่าลดลงคือมีค่าต่ำกว่า (-200) มิลลิโวลต์ และหลังจาก 30 วันของการทดลองยังพบค่า ORP ยิ่งต่ำลงมีค่าอยู่ระหว่าง (-405)-(-200) มิลลิโวลต์

ผลจากการทดลองจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง พบว่า มีแนวโน้มใกล้เคียงกับระบบที่มีทรายเป็นตัวกลาง น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดโดยพื้นที่ชุ่มน้ำมีค่าพีเอชเฉลี่ยสูงขึ้นและค่อนข้างเป็นกลาง แต่มีค่าออกซิเจนละลายและค่าโออาร์พีลดลง ซึ่งเหมาะสำหรับการเติบโตของจุลินทรีย์เพื่อการบำบัดน้ำเสียหรือการเกิดกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพและกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ที่สามารถบำบัดหรือลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียได้



รูปที่ 5.6 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ก) พีเอช ข) อุณหภูมิ ค) ออกซิเจนละลายที่ระดับ 10 ซม. ง) ออกซิเจนละลายที่ระดับ 25 ซม. จ) โออาร์พีที่ระดับ 10 ซม. ฉ) โออาร์พีที่ระดับ 25 ซม. (T: รูปถ่าย, C: พืชรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)

5.2.2 บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD)

ความเข้มข้นเฉลี่ยของบีโอดีก่อนเข้าระบบมีค่า 211.69 ± 7.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียที่เข้าระบบในจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ถึง 3 ที่มีกรวดเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชเมื่อระยะเวลาผ่านไป 50 วัน จากวันที่ 40-90 ของการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยของบีโอดี เท่ากับ 92.98 ± 8.35 , 89.53 ± 7.13 และ 34.54 ± 8.90 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ตามลำดับ 82.78 ± 14.21 , 82.94 ± 16.22 และ 42.93 ± 9.92 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา ตามลำดับ และ 103.37 ± 12.43 , 102.86 ± 11.95 และ 77.45 ± 15.39 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชตามลำดับ ดังรูปที่ 5.7(ก) ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ $56 \pm 3\%$, $57 \pm 3\%$ และ $83 \pm 4\%$ แปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ตามลำดับ $60 \pm 6\%$, $60 \pm 7\%$ และ $79 \pm 4\%$ แปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา ตามลำดับ และ $51 \pm 6\%$, $51 \pm 5\%$ และ $63 \pm 7\%$ แปลงที่ไม่มีการปลูกพืชตามลำดับ ดังรูปที่ 5.7(ข)

ในจุดเก็บตัวอย่างที่สามของระบบที่มีกรวดเป็นตัวกลางและปลูกต้นรูปฤาษี หรือ ต้นพุทธรักษา มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (รูปที่ 5.7 (ก,ข)) ส่วนในแปลงที่ไม่ปลูกพืชแสดงประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับแปลงที่มีการปลูกพืชทั้ง 2 ชนิด แต่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญกับจุดเก็บตัวอย่างที่หนึ่งและสองของแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา ในจุดเก็บตัวอย่างที่หนึ่งและสองของแปลงที่ปลูกพืชทั้ง 2 ชนิดเมื่อทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีได้ใกล้เคียงกัน ยกเว้นแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชจะมีความแตกต่างกันกับแปลงที่มีการปลูกพืชอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทดลองพบว่าแปลงที่ปลูกต้นรูปฤาษีต้นพุทธรักษาและมีกรวดเป็นตัวกลางนั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีต่ำกว่าแปลงที่ปลูกต้นรูปฤาษีที่มีทรายเป็นตัวกลาง (ในจุดเก็บตัวอย่างที่สามหรือน้ำออก) แต่ปริมาณบีโอดีในน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดของทั้ง 6 แปลงทดลองยังพบว่ามีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดให้ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

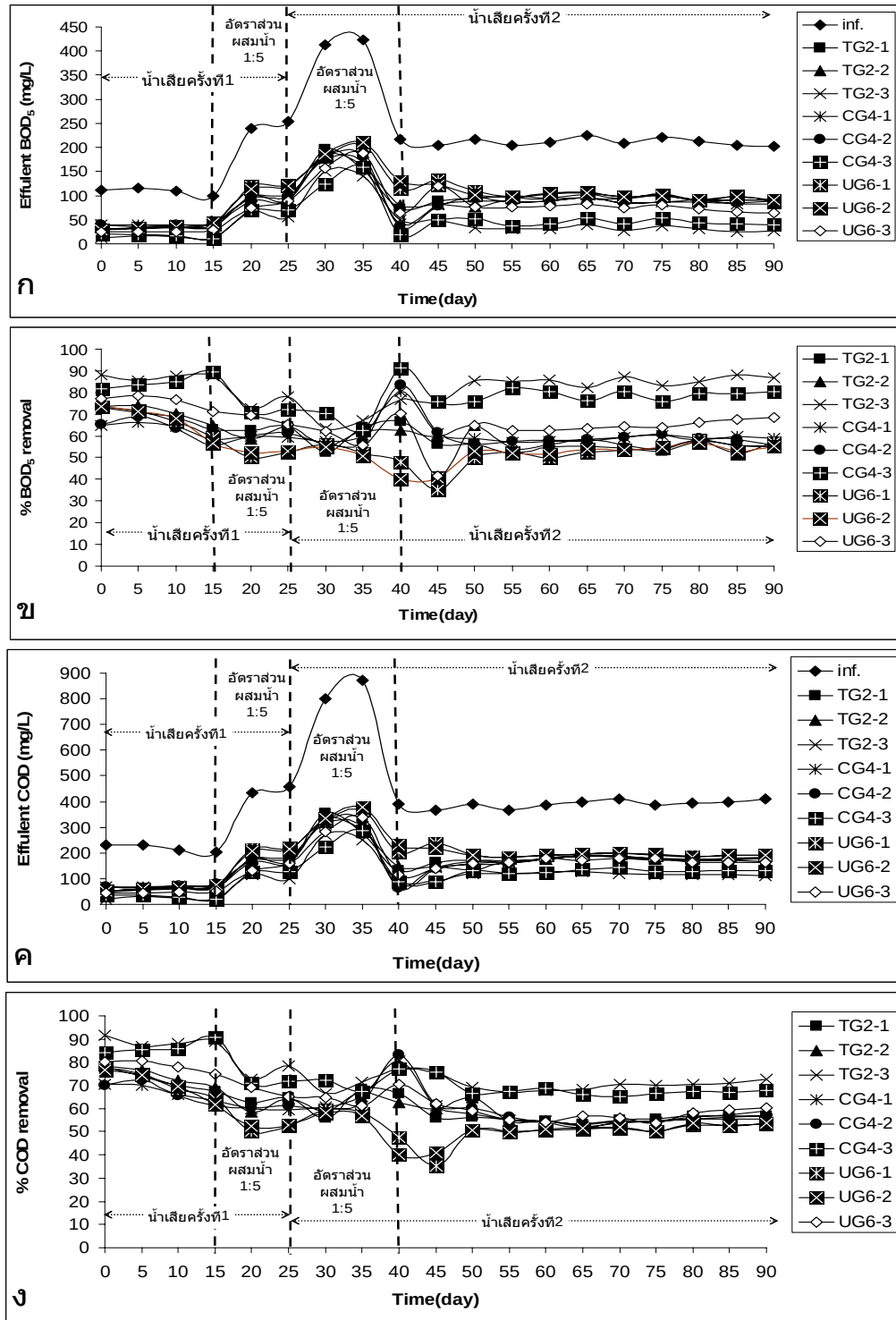
5.2.3 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)

ความเข้มข้นเฉลี่ยของซีโอดีก่อนเข้าระบบมีค่า 391.18 ± 14.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียที่เข้าระบบในจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีกรวดเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชเมื่อระยะเวลาผ่านไป 50 วัน จากวันที่ 40-90 ของการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยของซีโอดี เท่ากับ 169.82 ± 15.22 , 166.54 ± 16.16 และ 114.05 ± 12.52 มิลลิกรัมต่อลิตร ใน

แปลงที่มีการปลูกต้นรูปไข่ ตามลำดับ 165.37 ± 32.48 , 161.83 ± 35.39 และ 122.65 ± 17.94 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา ตามลำดับ และ 196.49 ± 14.86 , 196.52 ± 15.11 และ 161.81 ± 19.28 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชตามลำดับ (รูปที่ 5.7(ค,ง) ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ $56 \pm 3\%$, $57 \pm 3\%$ และ $70 \pm 3\%$ แปลงที่มีการปลูกต้นรูปไข่ ตามลำดับ $57 \pm 7\%$, $58 \pm 8\%$ และ $68 \pm 4\%$ แปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษาตามลำดับ และ $49 \pm 5\%$, $49 \pm 4\%$ และ $58 \pm 4\%$ แปลงที่ไม่มีการปลูกพืช ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.7 (ง)

รูปที่ 5.7 (ค,ง) แสดงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดชีโอดี ในจุดเก็บตัวอย่างที่สามพบว่าระบบที่มีการปลูกต้นรูปไข่ และต้นพุทธรักษา ที่มีกรวดเป็นตัวกลางได้ใกล้เคียงกันและแตกต่างกันอย่างไม่นัยสำคัญ ยกเว้นจุดเก็บตัวอย่างที่สามของแปลงที่ไม่ปลูกพืชแสดงประสิทธิภาพในการบำบัดชีโอดีแตกต่างกันกับแปลงที่มีพืชทั้งสองชนิดอย่างมีนัยสำคัญ แต่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญกับจุดเก็บที่หนึ่งและสองของแปลงที่มีการปลูกต้นรูปไข่ และต้นพุทธรักษา ส่วนในจุดเก็บที่หนึ่งและสองของแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

ออกซิเจนในชั้นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ส่วนหนึ่งนั้นเกิดจากการที่พืชสามารถส่งผ่านออกซิเจนไปยังบริเวณราก ทำให้บริเวณรอบ ๆ รากมีออกซิเจนเพียงพอที่จะทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนสามารถย่อยสลายจุลินทรีย์ได้ดี (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2544) สำหรับขนาดความยาวของรากพืชในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปไข่และต้นพุทธรักษา มีความยาวราก 25.6 ± 1.2 และ 21.3 ± 1.2 เซนติเมตร ตามลำดับ ในตัวกลางทราย ส่วนในตัวกลางกรวดมีความยาวราก 25.4 ± 0.8 และ 18.6 ± 0.6 เซนติเมตร ตามลำดับจากระดับผิวหน้าตัวกลางทั้ง 2 ชนิด โดยตัวกลางทรายมีค่าขนาด 0.1-0.2 เซนติเมตร และตัวกลางกรวดมีขนาด 0.5 – 1.0 เซนติเมตร ซึ่งความยาวรากของต้นรูปไข่มากกว่าต้นพุทธรักษา ทำให้มีการส่งผ่านออกซิเจนผ่านรากพืชได้จึงเกิดการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนได้ดี



รูปที่ 5.7 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ก) บีโอดี ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี ค) ค่าซีโอดี ง) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (T: รูปถาฐี, C: พุรรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)

5.2.4 ไนโตรเจน (Nitrogen)

ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของไนโตรเจนทั้งหมดก่อนเข้าระบบมีค่า 4.80 ± 1.19 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากวันที่ 40 ของการทดลอง พบว่าไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียมีค่าลดลง โดยพบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียที่เข้าระบบจุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้าจุดที่ 1 น้ำในบ่อจุดที่ 2 และน้ำออกจุดที่ 3 จากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี มีค่าเท่ากับ 1.73 ± 0.29 , 1.67 ± 0.23 และ 0.87 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ส่วนในแปลงที่ปลูกต้นพุทธรักษา มีค่า 1.80 ± 0.30 , 1.77 ± 0.22 และ 0.86 ± 0.16 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชมีค่าเท่ากับ 2.31 ± 0.17 , 2.36 ± 0.24 และ 1.33 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.8 (ก) ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ $79 \pm 2\%$ ในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี และในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษามีประสิทธิภาพ $79 \pm 4\%$ ส่วนในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชมีประสิทธิภาพต่ำสุดคือ $68 \pm 7\%$ แสดงดังรูปที่ 5.8 (ข)

ส่วนค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารอินทรีย์ไนโตรเจนก่อนเข้าระบบมีค่า 3.89 ± 1.17 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียที่เข้าระบบจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีกรวดเป็นตัวกลางจากแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ต้นพุทธรักษา และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชเมื่อระยะเวลาผ่านไป 50 วัน จากวันที่ 40-90 ของการทดลอง พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.19 ± 0.40 , 1.17 ± 0.33 และ 0.53 ± 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ตามลำดับ 1.26 ± 0.32 , 1.27 ± 0.21 และ 0.59 ± 0.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษาตามลำดับ และ 1.66 ± 0.13 , 1.73 ± 0.22 และ 0.95 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.8 (ค) ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ $65 \pm 10\%$, $65 \pm 8\%$ และ $84 \pm 4\%$ ในแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี ตามลำดับ $62 \pm 9\%$, $62 \pm 6\%$ และ $82 \pm 4\%$ ในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษา ตามลำดับ และ $50 \pm 6\%$, $48 \pm 8\%$ และ $71 \pm 8\%$ ในแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชตามลำดับ ดังรูปที่ 5.8 (ง)

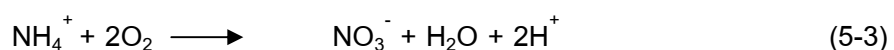
ส่วนรูปที่ 5.8 (ก, ข) พบว่าระบบที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี และต้นพุทธรักษา ที่มีกรวดเป็นตัวกลางโดยการทดสอบทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ใกล้เคียงกันแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญในจุดเก็บตัวอย่างที่สาม ยกเว้นจุดเก็บตัวอย่างที่สามของแปลงที่ไม่ปลูกพืชมีค่าทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดแตกต่างกันกับแปลงที่มีการปลูกพืชอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนในจุดเก็บที่หนึ่งและสองของแปลงที่มีการปลูกต้นรูปฤาษี และต้นพุทธรักษา มีค่าทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ใกล้เคียงกันแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่จุดเก็บที่หนึ่งและสองของแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับที่มีการปลูกพืช ส่วนจากรูปที่ 5.8 (ค, ง) พบว่าให้ผลของประสิทธิภาพในการบำบัดอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นไปในทางเดียวกันกับการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมด โดยการทดสอบทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนทั้งหมด และอินทรีย์

ไนโตรเจนในจุดเก็บตัวอย่างที่สาม คือน้ำเสียออกจากระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพืชทั้งสองชนิดโดยมีกรดเป็นตัวกลางมีค่าที่ดีกว่าแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช

จากรูปที่ 5.9 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด ทีเคเอ็น (TKN) และ แอมโมเนียไนโตรเจน ของแปลงที่มีการปลูกต้นธูปฤาษี และต้นพุทธรักษา ณ จุดเก็บตัวอย่างที่สามที่มีกรดเป็นตัวกลาง โดยการทดสอบทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดได้ใกล้เคียงกันแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ยกเว้นแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชมีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญกับแปลงที่มีการปลูกพืชทั้ง 2 ชนิด ส่วนในจุดเก็บที่หนึ่งและสองของแปลงที่มีการปลูกต้นธูปฤาษี และต้นพุทธรักษามีค่าทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด ทีเคเอ็น (TKN) และ แอมโมเนียไนโตรเจนได้ใกล้เคียงกันแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่จุดเก็บที่หนึ่งและสองของแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับที่มีการปลูกพืชจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็น (TKN) และ แอมโมเนียไนโตรเจน ของตัวกลางกรดในจุดที่สาม (น้ำออกระบบบำบัด) มีประสิทธิภาพต่ำกว่าตัวกลางที่เป็นทราย

จากรูปที่ 5.10 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าแอมโมเนียไนโตรเจนและค่าไนเตรทไนโตรเจน พบว่ามีค่าที่เป็นไปตามทิศทางเดียวกันกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่มีทรายเป็นตัวกลาง โดยปริมาณไนเตรทไนโตรเจนของแปลงที่มีการปลูกพืชทั้ง 2 ชนิด ที่มีกรดเป็นตัวกลางมีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะของค่าไนเตรทไนโตรเจนมีความสัมพันธ์แบบผกผันกันกับค่าแอมโมเนียไนโตรเจน โดยเริ่มในช่วงเวลาที่ 40-90 วันในการทดลอง ซึ่งพบว่าค่าของจุดเก็บตัวอย่างที่สามของแปลงที่มีการปลูกต้นธูปฤาษี มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 0.199 ± 0.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 5.10(ค)

จากงานวิจัย (Vymazal, 1998) ได้กล่าวไว้ว่ากลไกที่สำคัญในการบำบัดไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นได้แก่ กระบวนการไนตริฟิเคชันกับดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งกระบวนการไนตริฟิเคชันที่เกิดในระบบคือการออกซิไดซ์ทางชีวภาพ โดยจุลินทรีย์จำพวกไนตริฟายอิงแบคทีเรีย ทั้งนี้แอมโมเนียไนโตรเจนจะเกิดการออกซิไดซ์ไปเป็นไนไตรท์ไนโตรเจนด้วยแบคทีเรียกลุ่ม Chemolithotrophic เช่น แบคทีเรียไนโตรโซโมแนส (Nitrosomonas) จากไนไตรท์ไนโตรเจนจะออกซิไดซ์ไปเป็นไนเตรทไนโตรเจนด้วยแบคทีเรียไนโตรแบคเตอร์ (Nitrobacter) ทั้งนี้จะเกิดกระบวนการนี้ขึ้นจะต้องเกิดในสภาวะที่มีออกซิเจนเท่านั้น และมีสมการของปฏิกิริยา ดังสมการที่ 5-3 ได้แก่

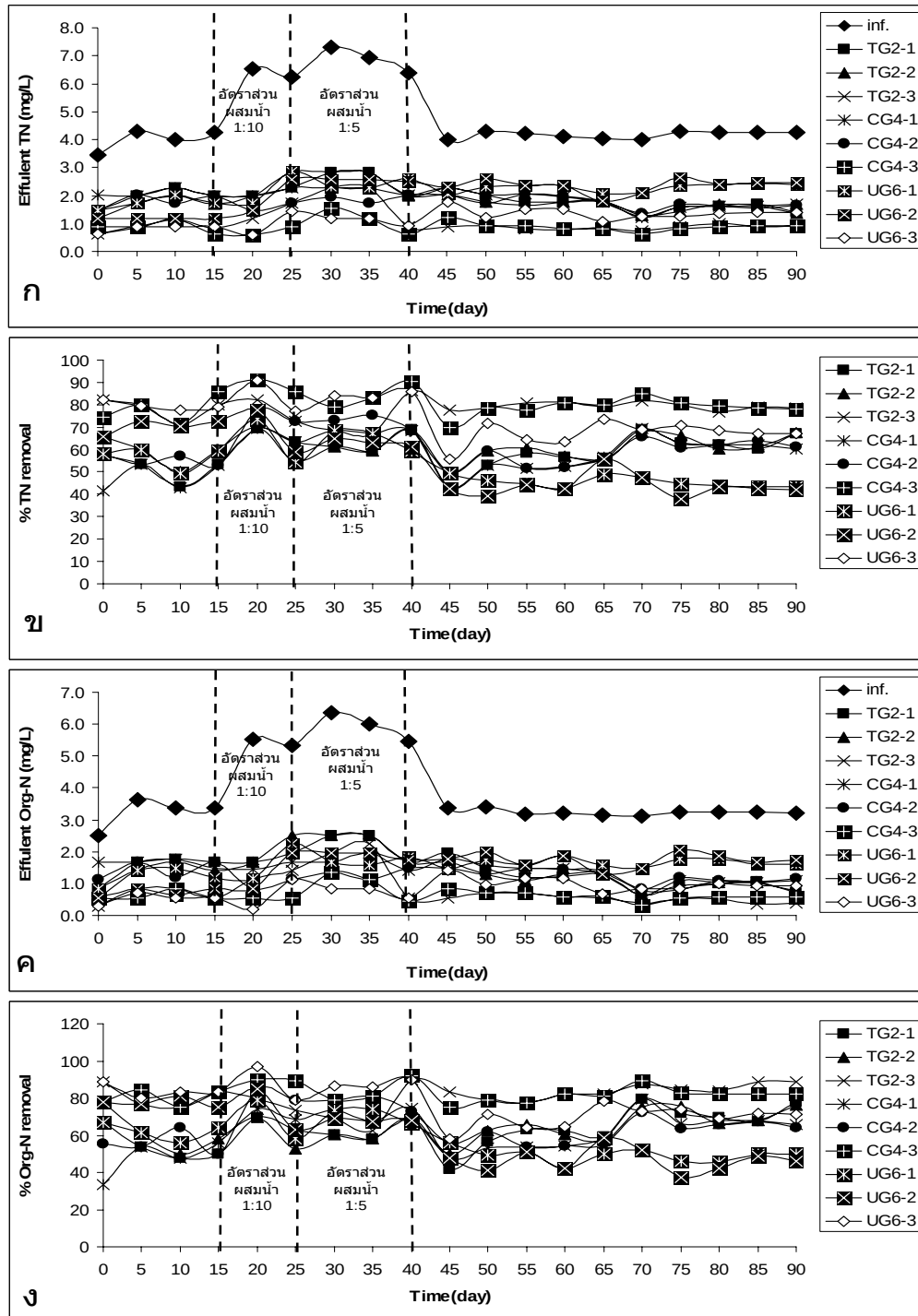


จากสมการดังกล่าวเป็นผลทำให้เกิดการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจน และการเพิ่มขึ้นของไนเตรทไนโตรเจนในระบบ ซึ่งผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณของแอมโมเนียมีค่าลดลง เมื่อผ่านจุดเก็บตัวอย่างที่สามของแปลงที่มีพืชทั้ง 2 ชนิด ในช่วงเวลาที่ 40-90 วันในการทดลอง แสดงถึงการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่จุดเก็บที่สาม ส่วนปริมาณของไนเตรทไนโตรเจนนั้น พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นใน

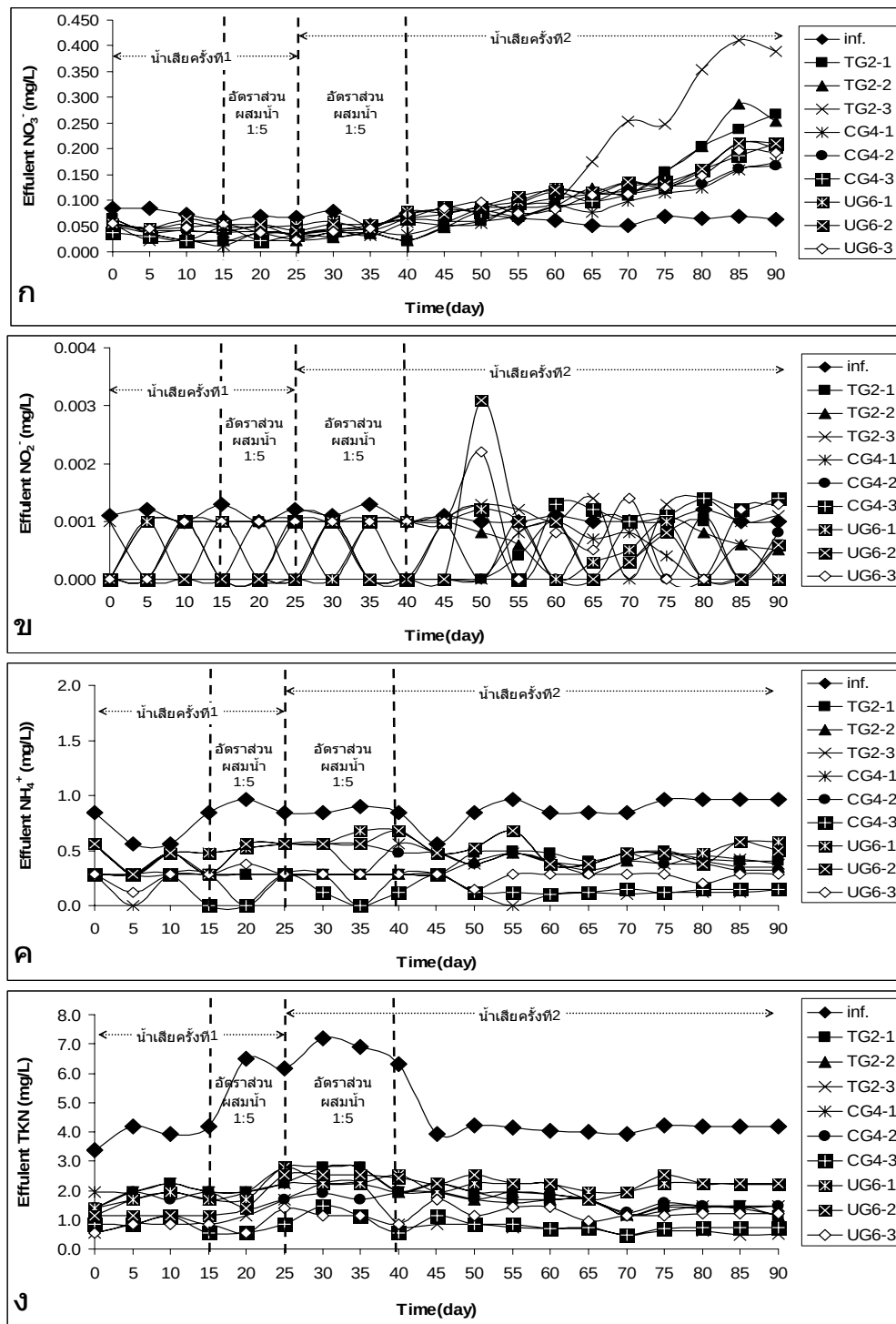
จุดเก็บตัวอย่างที่สามเมื่อผ่านระบบ แสดงให้เห็นถึงการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในการทดลองไม่ได้มีค่าที่เพิ่มขึ้นตลอดทั้งระบบการทดลอง หากแต่มีการเพิ่มขึ้นและลดลงในช่วงแรกของการทดลอง ซึ่งการลดลงของปริมาณไนเตรทไนโตรเจน อาจแสดงถึงการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในระบบ โดยการกักเก็บน้ำในระบบอาจทำให้เกิดสภาพ แอนแอโรบิกและส่งเสริมการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Kootatep et al., 1996) ซึ่งอาจเป็น สาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรทไนโตรเจนมีค่าต่ำลงได้

งานวิจัยของ (Yang et al., 2001) ที่ทดสอบความสามารถของตัวกลาง 2 ชนิด คือ กรวด และดิน ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นชนิดน้ำไหลใต้ผิวดิน พบว่าตัวกลางทั้ง 2 ชนิด บำบัดแอมโมเนีย ไนโตรเจนได้ดีพอๆ กันแต่ตัวกลางที่เป็นกรวดจะมีค่าไนเตรทไนโตรเจนมากขึ้น เนื่องจากภายในชั้นดิน มีความพรุนมากกว่าดินจึงมีสถานะแอโรบิกมากกว่าแอนแอโรบิก ทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน มากกว่าดีไนตริฟิเคชันจึงพบว่ามีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนอยู่ในระบบ

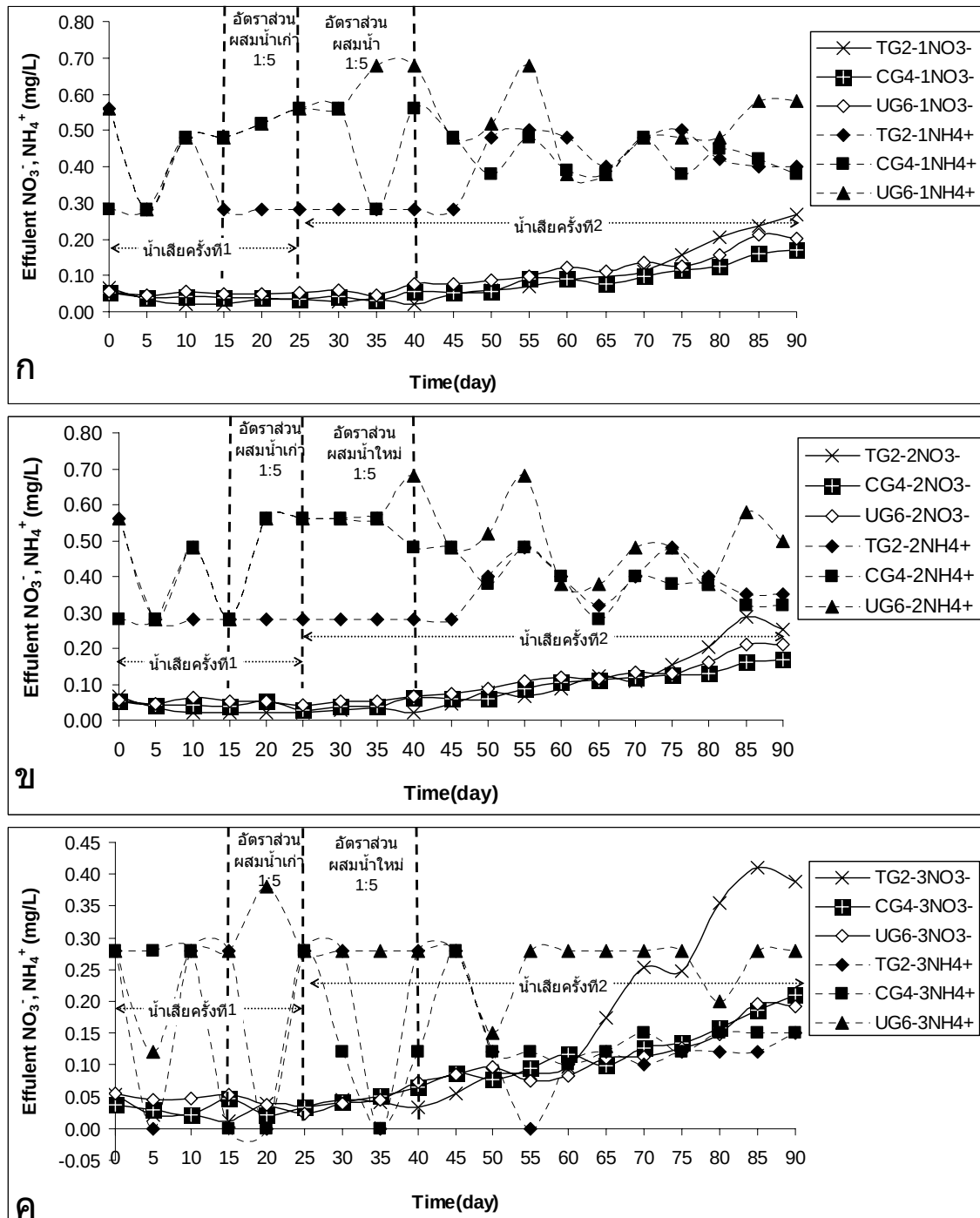
การวิเคราะห์ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำ หลังจากผ่านระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นในการบำบัดน้ำเสีย จากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล โดยมีการใช้พืช 2 ชนิด คือ ต้นธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) และ ต้น พุทธรักษา (*Canna Spp.*) พบว่าแปลงทดลองที่มีการปลูกต้นธูปฤาษี ที่มีทรายและกรวดเป็นตัวกลางมี ค่าทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด บีโอดี, ซีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด และ อินทรีย์ไนโตรเจนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในช่วง 90.48-70.0% 77.82-68.49% 84.79-70.28% และ 89.85-75.0% ในแปลงที่มีทรายเป็นตัวกลางตามลำดับ และในช่วง 88.25-75.48% 76.89-67.18% 86.31-76.61% และ 89.76-77.43% ในแปลงที่มีกรวดเป็นตัวกลางตามลำดับ ซึ่งจากผล การทดลองกล่าวได้ว่า ระบบรากของธูปฤาษีที่แพร่กระจายในแนวตั้งและราบ ดังรูปที่ 5.13 ส่งผลต่อ ปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์และเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี เมื่อมีการระ บรทุกเข้าสู่ระบบไม่สูงนัก ส่วนแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษาทั้ง 2 ตัวกลาง เนื่องจากลักษณะของ รากต้นพุทธรักษามีการกระจายน้อยกว่าต้นธูปฤาษี และมีการทับถมของซากพืชของต้นพุทธรักษา จึง ให้กลไกในการบำบัดในช่วงแรกของพุทธรักษามีประสิทธิภาพน้อย อีกทั้งการเจริญเติบโตของต้น ธูปฤาษีมีอัตราการเจริญที่ดีกว่าต้นพุทธรักษาแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.8 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ก) ค่าไนโตรเจนทั้งหมด ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าไนโตรเจนทั้งหมด ค) ค่าอินทรีย์ไนโตรเจน ง) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าอินทรีย์ไนโตรเจน (T: รูปถ่าย, C: พืช, U: ไม่ปลูกพืช, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)



รูปที่ 5.9 การบำบัดน้ำเสียในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ก) ค่าไนเตรทไนโตรเจน ข) ค่าไนไตรท์ ไนโตรเจน ค) ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ง) ทีเคเอ็น(TKN) (T: ฐุภธานี, C: พุทธรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ของแอมโมเนียไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจน ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (T: รูปทแยง, C: พุทรีรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลปัจจัยและความเข้มข้นของแต่ละพารามิเตอร์ในน้ำเสียของระบบที่มีตัวกลางทราย (S) ที่ปลูก
 ฐปถาฐี (T) พุทรรักษา(C) และระบบที่ไม่มีการปลูกพืช (U) ที่ระดับความลึกที่ 10 (D10) และ 25 (D25) เซนติเมตร
 จากระดับน้ำในระบบที่จุดเก็บน้ำเสียตัวอย่างที่ 1(-1 น้ำเข้า), 2(-2 น้ำในบ่อ) และ 3(-3 น้ำออก)

พารามิเตอร์	น้ำเข้า ระบบ		TS1 ฐปถาฐี			CS3 พุทรรักษา			US5 ไม่ปลูกพืช		
			TS1-1	TS1-2	TS1-3	CS3-1	CS3-2	CS3-3	US5-1	US5-2	US5-3
			D10	D10	D25	D10	D10	D25	D10	D10	D25
pH	5.28	Eff.	6.86	6.85	6.75	6.95	6.95	6.75	6.96	6.99	7.04
	0.12	SD	0.25	0.24	0.19	0.23	0.20	0.13	0.19	0.21	0.20
Temp (C°)	29.81	Eff.	29.63	29.68	30.27	28.92	29.05	30.03	29.04	29.07	30.09
	1.05	SD	0.51	0.48	0.42	0.65	0.68	0.60	0.59	0.65	0.50
DO (mg/L)	1.36	Eff.	0.59	0.62	0.38	0.53	0.55	0.36	0.96	0.91	0.64
	0.37	SD	0.75	0.76	0.35	0.66	0.71	0.39	1.47	1.40	0.90
ORP (mV)	-106.7	Eff.	-224.8	-227.9	-191.0	-256.3	-254.0	-211.9	-253.4	-245.5	-203.3
	35.5	SD	110.1	112.6	129.9	126.7	125.9	120.6	154.8	153.5	158.8
BOD (mg/L)	215.44	Eff.	91.06	88.04	41.37	92.42	91.42	53.64	96.00	94.90	71.71
	85.10	SD	40.40	38.65	39.38	46.74	45.59	46.87	42.61	44.62	37.69
		%Re.	58.54	59.68	82.97	58.61	58.84	77.83	56.74	57.51	68.37
		SD	4.29	3.05	8.39	4.95	4.27	8.81	8.83	8.86	9.20
COD (mg/L)	407.43	Eff.	170.10	166.46	108.23	174.80	172.83	120.55	177.64	180.37	150.19
	170.45	SD	73.03	69.71	64.71	83.78	82.23	79.28	77.41	80.79	69.54
		%Re.	58.86	59.53	75.17	58.38	58.72	72.75	57.35	56.86	64.25
		SD	6.06	4.74	7.55	6.13	5.71	7.68	10.00	10.46	11.67

หมายเหตุ: ค่า (%Re.) คือค่าประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าเป็น - คือมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลง
 ค่าเป็น + มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลปัจจัยและความเข้มข้นของแต่ละพารามิเตอร์ในน้ำเสียของระบบที่มีตัวกลางทราย (S) ที่ปลูก
 ฐปถาฐี (T) พุทรรักษา(C) และระบบที่ไม่มีการปลูกพืช (U) ที่ระดับความลึกที่ 10 (D10) และ 25 (D25) เซนติเมตร
 จากระดับน้ำในระบบที่จุดเก็บน้ำเสียตัวอย่างที่ 1(-1 น้ำเข้า), 2(-2 น้ำในบ่อ) และ 3(-3 น้ำออก) (ต่อ)

พารามิเตอร์	น้ำเข้า ระบบ		TS1 ฐปถาฐี			CS3 พุทรรักษา			US5 ไม่ปลูกพืช		
			TS1-1	TS1-2	TS1-3	CS3-1	CS3-2	CS3-3	US5-1	US5-2	US5-3
			D10	D10	D25	D10	D10	D25	D10	D10	D25
TN (mg/L)	4.79	Eff.	1.85	1.72	0.94	1.94	1.97	0.98	2.01	1.96	1.20
	1.19	SD	0.28	0.35	0.36	0.47	0.56	0.44	0.52	0.52	0.35
		%Re.	60.27	63.07	80.57	58.57	58.06	80.19	57.02	57.80	74.26
		SD	6.65	8.39	4.47	10.81	12.03	5.19	11.89	12.60	7.38
Org-N (mg/L)	3.89	Eff.	1.38	1.27	0.69	1.47	1.53	0.78	1.42	1.37	0.87
	1.17	SD	0.30	0.31	0.38	0.53	0.63	0.45	0.47	0.45	0.36
		%Re.	63.53	66.09	82.79	61.46	60.07	80.92	62.17	62.71	77.12
		SD	7.12	8.79	5.61	13.62	15.29	6.89	13.84	14.00	8.37
TKN (mg/L)	4.726	Eff.	1.77	1.62	0.83	1.87	1.89	0.90	1.92	1.86	1.11
	1.191	SD	0.31	0.35	0.41	0.49	0.59	0.47	0.49	0.49	0.34
		%Re.	61.62	64.61	82.91	59.50	59.19	81.73	58.50	59.38	75.91
		SD	6.71	7.95	5.68	11.40	12.77	6.02	10.81	11.51	6.61
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.837	Eff.	0.392	0.357	0.139	0.402	0.357	0.121	0.502	0.487	0.248
	0.134	SD	0.106	0.094	0.120	0.086	0.082	0.109	0.094	0.110	0.060
		%Re.	52.62	56.63	81.02	51.19	56.25	84.05	39.15	40.79	69.23
		SD	12.02	11.20	18.41	12.12	13.10	16.12	12.54	14.56	10.56
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.0681	Eff.	0.0836	0.0899	0.1113	0.0694	0.0783	0.0789	0.0923	0.0969	0.0883
	0.010	SD	0.0739	0.0772	0.0971	0.0336	0.0371	0.0446	0.0589	0.0575	0.0555
		%Re.	-29.01	-38.79	-73.36	-5.99	-19.77	-22.10	-43.50	-50.62	-36.65
		SD	117.20	122.30	156.46	57.06	63.04	75.04	99.15	97.36	92.62
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0.0011	Eff.	0.0005	0.0004	0.0009	0.0005	0.0003	0.0009	0.0003	0.0008	0.0005
	0.0001	SD	0.0005	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0005
		%Re.	53.45	64.93	12.87	53.74	67.91	17.60	67.88	30.69	49.86
		SD	42.73	40.48	38.97	43.49	44.34	47.02	40.44	40.20	50.84

หมายเหตุ: ค่า (%Re.) คือค่าประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าเป็น - คือมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลง
 ค่าเป็น + มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลปัจจัยและความเข้มข้นของแต่ละพารามิเตอร์ในน้ำเสียของระบบที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ที่ปลูกต้นรู่ฤาษี (T) ต้นพุทธรักษา(C) และระบบที่ไม่มีการปลูกพืช (U) (G) ในแปลงการทดลองที่ 2, 4 และ 6 ระดับความลึกที่ 10 (D10) และ 25 (D25) เซนติเมตร จากระดับน้ำในระบบที่จุดเก็บน้ำเสียตัวอย่างที่ 1(-1 น้ำเข้า), 2(-2 น้ำในบ่อ) และ 3(-3 น้ำออก)

พารามิเตอร์	น้ำเข้าระบบ		TG2 รู่ฤาษี					CG4 พุทธรักษา					UG6 ไม่ปลูกพืช				
			TG2-1		TG2-2		TG2-3	CG4-1		CG4-2		CG4-3	UG6-1		UG6-2		UG6-3
			D10	D25	D10	D25	D25	D10	D25	D10	D10	D25	D10	D25	D10	D25	D25
pH	5.28	Eff.	6.90	-	6.92	-	6.81	6.82	-	6.81	-	6.69	6.90	-	6.91	-	6.92
	0.12	SD	0.11	-	0.14	-	0.19	0.18	-	0.19	-	0.23	0.25	-	0.26	-	0.30
Temp (C°)	29.81	Eff.	29.50	-	29.47	-	30.55	29.06	-	29.24	-	30.20	29.03	-	29.13	-	30.26
	1.05	SD	0.52	-	0.52	-	0.71	0.57	-	0.48	-	0.46	0.60	-	0.59	-	0.61
DO (mg/L)	1.36	Eff.	0.64	0.42	0.66	0.48	0.43	0.70	0.49	0.68	0.47	0.54	0.89	0.76	0.88	0.63	0.78
	0.37	SD	0.79	0.44	0.79	0.54	0.43	0.93	0.62	0.91	0.59	0.64	1.26	1.22	1.27	1.07	1.25
ORP (mV)	-106.7	Eff.	-226.6	-238.0	-216.9	-244.0	-203.3	-234.9	-222.7	-234.2	-219.3	-197.3	-248.3	-241.3	-248.2	-243.3	-200.8
	35.5	SD	113.3	152.3	109.5	151.6	172.9	130.1	130.0	130.1	129.5	128.1	154.2	153.8	158.8	151.2	171.5

หมายเหตุ: ค่า (%Re.) คือค่าประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าเป็น - คือมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ค่าเป็น + มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลปัจจัยและความเข้มข้นของแต่ละพารามิเตอร์ในน้ำเสียของระบบที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ที่ปลูกต้นธูปฤาษี (T) ต้นพุทธรักษา(C) และระบบที่ไม่มีการปลูกพืช (U) (G) ในแปลงการทดลองที่ 2, 4 และ 6 ระดับความลึกที่ 10 (D10) และ 25 (D25) เซนติเมตร จากระดับน้ำในระบบที่จุดเก็บน้ำเสียตัวอย่างที่ 1(-1 น้ำเข้า), 2(-2 น้ำในบ่อ) และ 3(-3 น้ำออก) (ต่อ)

พารามิเตอร์	น้ำเข้าระบบ		TG2					CG4					UG6				
			TG2-1		TG2-2		TG2-3	CG4-1		CG4-2		CG4-3	UG6-1		UG6-2		UG6-3
			D10	D25	D10	D25	D25	D10	D25	D10	D10	D25	D10	D25	D10	D25	D25
BOD (mg/L)	215.44	Eff.	88.79	-	86.60	-	44.49	84.91	-	85.54	-	50.59	100.05	-	100.06	-	76.90
	85.10	SD	39.97	-	39.13	-	38.21	37.99	-	40.39	-	36.62	45.27	-	46.15	-	41.70
		%Re.	59.74	-	60.91	-	81.66	61.03	-	60.89	-	78.56	54.97	-	55.02	-	65.95
		SD	6.62	-	6.33	-	7.34	5.39	-	6.43	-	6.84	8.66	-	8.39	-	8.23
COD (mg/L)	407.43	Eff.	161.04	-	158.77	-	109.92	162.15	-	161.18	-	117.35	186.05	-	186.68	-	151.38
	170.45	SD	72.47	-	71.49	-	65.36	70.16	-	74.08	-	64.13	81.30	-	82.91	-	74.64
		%Re.	61.26	-	61.95	-	74.94	60.56	-	60.97	-	72.86	55.34	-	55.25	-	64.20
		SD	7.54	-	7.70	-	8.10	7.29	-	7.60	-	8.03	9.95	-	9.63	-	8.91
TN (mg/L)	4.79	Eff.	1.93	-	1.87	-	1.08	1.94	-	1.76	-	0.90	2.18	-	2.10	-	1.17
	1.19	SD	0.43	-	0.49	-	0.48	0.30	-	0.22	-	0.23	0.34	-	0.57	-	0.31
		%Re.	58.94	-	60.79	-	78.04	57.98	-	61.58	-	80.50	52.78	-	55.00	-	74.27
		SD	7.65	-	5.83	-	7.65	9.25	-	8.58	-	5.51	9.60	-	13.28	-	8.95
Org-N (mg/L)	3.89	Eff.	1.46	-	1.43	-	0.79	1.43	-	1.27	-	0.66	1.57	-	1.51	-	0.82
	1.17	SD	0.55	-	0.59	-	0.54	0.33	-	0.24	-	0.24	0.30	-	0.51	-	0.30
		%Re.	62.48	-	63.86	-	80.87	61.24	-	65.00	-	82.38	57.41	-	59.50	-	77.37
		SD	9.86	-	8.65	-	7.23	11.67	-	10.62	-	4.93	10.68	-	15.31	-	10.03

หมายเหตุ: ค่า (%Re.) คือค่าประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าเป็น - คือมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ค่าเป็น + มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลปัจจัยและความเข้มข้นของแต่ละพารามิเตอร์ในน้ำเสียของระบบที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ที่ปลูกต้นธูปฤาษี (T) ต้นพุทธรักษา(C) และระบบที่ไม่มีการปลูกพืช (U) (G) ในแปลงการทดลองที่ 2, 4 และ 6 ระดับความลึกที่ 10 (D10) และ 25 (D25) เซนติเมตร จากระดับน้ำในระบบที่จุดเก็บน้ำเสียตัวอย่างที่ 1(-1 น้ำเข้า), 2(-2 น้ำในบ่อ) และ 3(-3 น้ำออก) (ต่อ)

พารามิเตอร์	น้ำเข้าระบบ		TG2					CG4					UG6				
			TG2-1		TG2-2		TG2-3	CG4-1		CG4-2		CG4-3	UG6-1		UG6-2		UG6-3
			D10	D25	D10	D25	D25	D10	D25	D10	D10	D25	D10	D25	D10	D25	D25
TKN (mg/L)	4.726	Eff.	1.85	-	1.78	-	0.95	1.87	-	1.68	-	0.81	2.09	-	2.00	-	1.08
	1.191	SD	0.48	-	0.53	-	0.54	0.33	-	0.24	-	0.25	0.33	-	0.55	-	0.29
		%Re.	60.32	-	62.30	-	80.78	59.07	-	62.83	-	82.20	54.24	-	56.54	-	75.88
		SD	8.62	-	6.67	-	6.36	9.67	-	8.54	-	5.51	8.76	-	12.53	-	8.35
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.837	Eff.	0.386	-	0.351	-	0.153	0.433	-	0.414	-	0.148	0.518	-	0.494	-	0.266
	0.134	SD	0.101	-	0.086	-	0.110	0.092	-	0.104	-	0.094	0.104	-	0.113	-	0.055
		%Re.	52.83	-	57.59	-	80.41	46.79	-	49.01	-	80.24	37.35	-	40.07	-	67.68
		SD	14.24	-	9.66	-	16.11	15.40	-	16.66	-	16.03	12.72	-	14.64	-	8.12
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.0681	Eff.	0.0859	-	0.0888	-	0.1294	0.0741	-	0.0801	-	0.0863	0.0953	-	0.0964	-	0.0865
	0.010	SD	0.0763	-	0.0818	-	0.1337	0.0426	-	0.0446	-	0.0565	0.0524	-	0.0534	-	0.0507
		%Re.	-33.07	-	-37.69	-	-103.73	-13.73	-	-23.99	-	-33.80	-46.66	-	-48.83	-	-32.58
		SD	121.68	-	129.58	-	215.30	70.99	-	77.12	-	93.48	88.66	-	90.51	-	83.65
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0.0011	Eff.	0.0003	-	0.0007	-	0.0007	0.0004	-	0.0007	-	0.0008	0.0005	-	0.0004	-	0.0008
	0.0001	SD	0.0004	-	0.0004	-	0.0006	0.0005	-	0.0005	-	0.0006	0.0005	-	0.0008	-	0.0006
		%Re.	69.73	-	34.84	-	31.00	60.91	-	32.95	-	27.00	56.42	-	59.90	-	23.59
		SD	39.83	-	37.97	-	55.90	46.10	-	41.92	-	53.04	46.40	-	75.64	-	58.44

หมายเหตุ: ค่า (%Re.) คือค่าประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าเป็น - คือมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ค่าเป็น + มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น

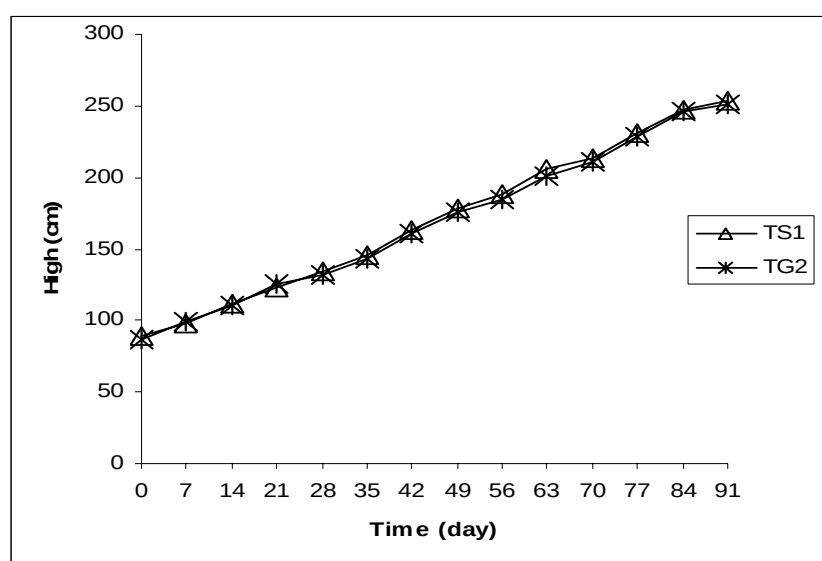
5.3 การศึกษาการเจริญเติบโตของพืช

ในการทดลองศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืช 2 ชนิด คือ ต้นรูปไข่และต้นพุทธรักษา โดยแบ่งเป็นการศึกษาด้านรูปไข่และต้นพุทธรักษาที่ปลูกในตุ่มกลางทราย และต้นรูปไข่และต้นพุทธรักษาที่ปลูกในตุ่มกลางที่เป็นกรวด ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดอัตราการเจริญเติบโตในด้านความสูง ความยาวราก และน้ำหนักแห้ง ควบคู่ไปกับการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น โดยแสดงผลการทดลองดังต่อไปนี้

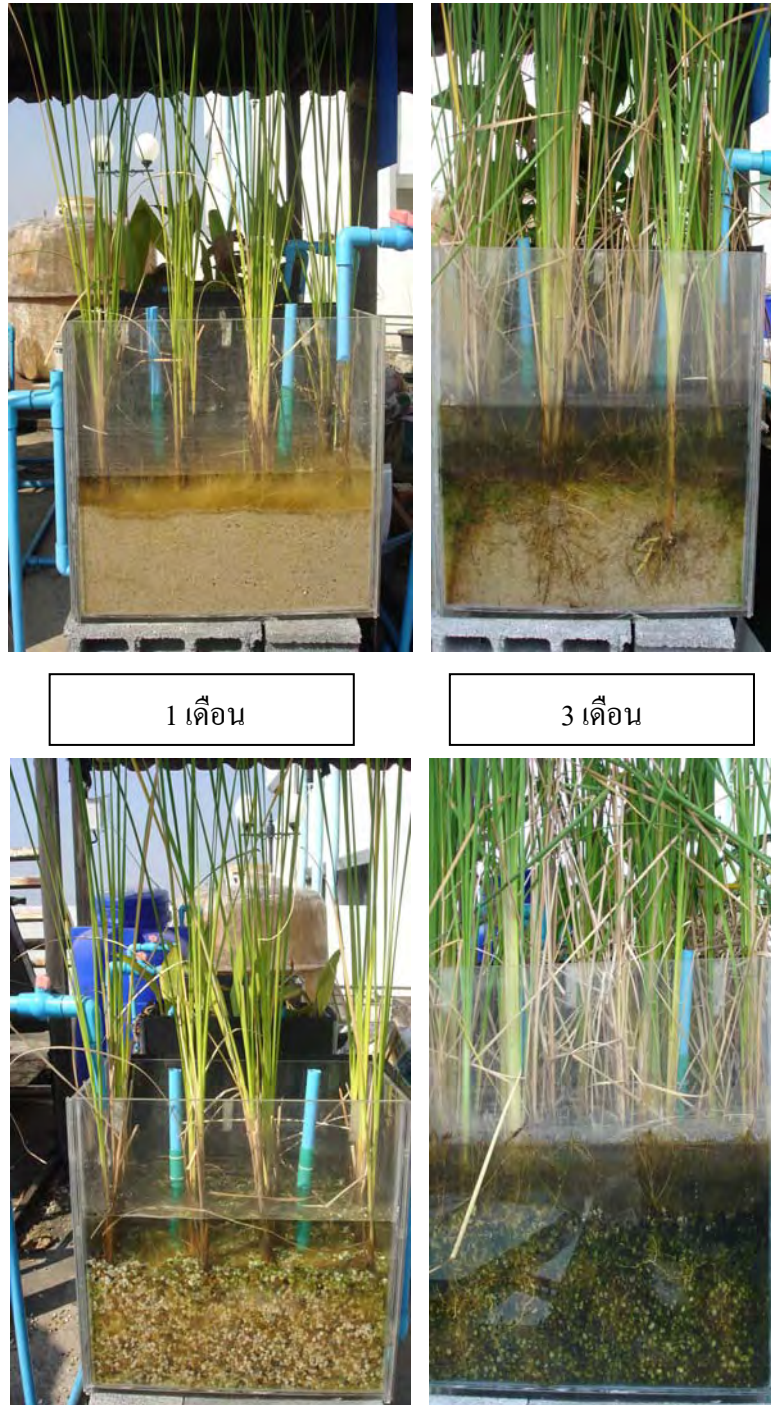
5.3.1 แปลงทดลองที่ปลูกรูปไข่

5.3.1.1 ความสูงและความยาวรากของรูปไข่

ในการทดลองได้ทำการคัดเลือกต้นรูปไข่ที่มีความสูงใกล้เคียงกันเฉลี่ย 94 เซนติเมตร เมื่อผ่านการอนุบาลต้นพืชเป็นเวลา 1 เดือน ซึ่งใช้ช่วงเวลาทำการทดลองทั้งสิ้น 3 เดือน และทำการวัดความสูงทุก 1 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า ต้นรูปไข่ที่มีทรายเป็นตุ่มกลาง และมีกรวดเป็นตุ่มกลาง มีความสูงเฉลี่ย เท่ากับ 170.07 ± 54.99 และ 168.29 ± 54.25 เซนติเมตร ตามลำดับ (แสดงดังรูปที่ 5.11) จะเห็นได้ว่าซึ่งมีความสูงใกล้เคียงกันหรือแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ อาจกล่าวได้ว่า ปริมาณน้ำเสียเข้าสู่แปลงทดลองที่มีต้นรูปไข่เป็นพืชที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นมีปริมาณสารอาหารเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ที่แสดงให้เห็นภาพตัดขวางและลักษณะการกระจายตัวของพืชและรากพืชในบ่อทดลอง

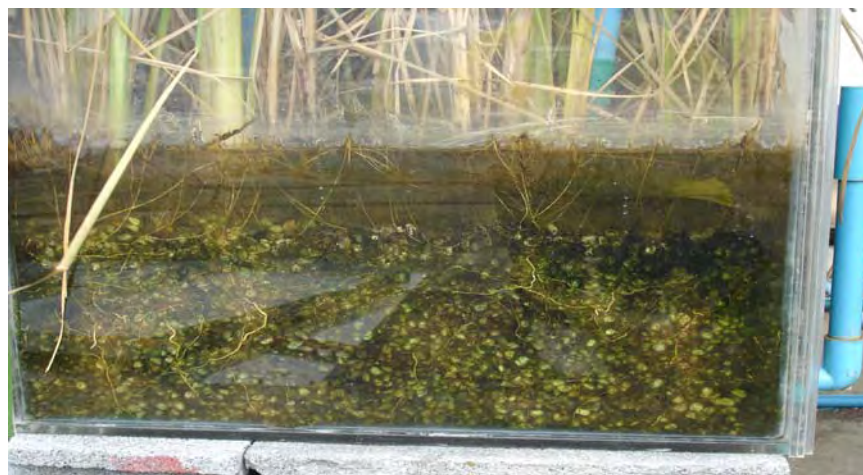


รูปที่ 5.11 ความสูงของต้นรูปไข่ที่มีทรายเป็นตุ่มกลาง (TS1) และมีกรวดเป็นตุ่มกลาง (TG2)



รูปที่ 5.12 ลักษณะของต้นรูปถ่ายที่มีทลายเป็นตัวกลาง (บน) และมีกรวดเป็นตัวกลาง (ล่าง) ของการทดลองที่
ช่วงระยะเวลา 1 ถึง 3 เดือน ของการทดลอง

เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวและความยาวรากแล้วพบว่าต้นธูปฤาษีที่มีทรายเป็นตัวกลาง และมีการวัดเป็นตัวกลางมีความยาวรากเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือ 25.6 ± 1.2 , และ 25.4 ± 0.8 เซนติเมตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 5.13) โดยผลจากความยาวของรากจะส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนให้กับระบบซึ่งมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน



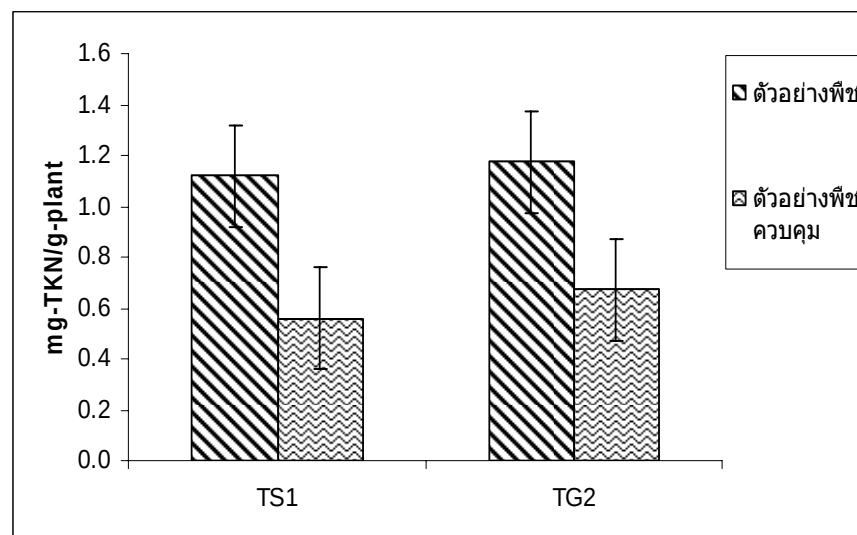
รูปที่ 5.13 การกระจายตัวของรากต้นธูปฤาษีที่มีทรายเป็นตัวกลาง (บน) และมีการวัดเป็นตัวกลาง (ล่าง)

5.3.1.2 น้ำหนักแห้ง

จากการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างรูปถ่ายจากแปลงทดลองที่มีทรายเป็นตุ๊กกลาง และมีกรวดเป็นตุ๊กกลาง แล้วทำการหาน้ำหนักแห้งเพื่อศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งให้ผลการทดลองที่มีทรายเป็นตุ๊กกลาง และมีกรวดเป็นตุ๊กกลาง เท่ากับ 12.89 และ 12.13 กิโลกรัมของน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ตามลำดับ ความสมบูรณ์ของต้นรูปถ่ายมีสมบัติใกล้เคียงกัน อัตราการไหลเข้าของน้ำที่ซึ่ทำให้ระบบรากของต้นพืชมีระยะเวลาสัมผัสกับน้ำเสีย ได้นานขึ้นทำให้มีการดูดซับสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตได้มากขึ้นด้วย

5.3.1.3 ปริมาณทีเคเอ็น (TKN) ทั้งหมดในเนื้อเยื่อพืช

จากการทดลองได้ทำการเก็บต้นรูปถ่ายจากแปลงทดลอง ที่มีทรายเป็นตุ๊กกลาง และมีกรวดเป็นตุ๊กกลาง มาเพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณทีเคเอ็น(TKN) ที่สะสมในต้นรูปถ่าย จากรูปที่ 5.14 แสดงถึงปริมาณการสะสมทีเคเอ็น (TKN) ในต้นพืชที่มีทรายเป็นตุ๊กกลาง และมีกรวดเป็นตุ๊กกลาง พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.120 และ 1.176 มิลลิกรัมทีเคเอ็นต่อกรัมพืช ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.14

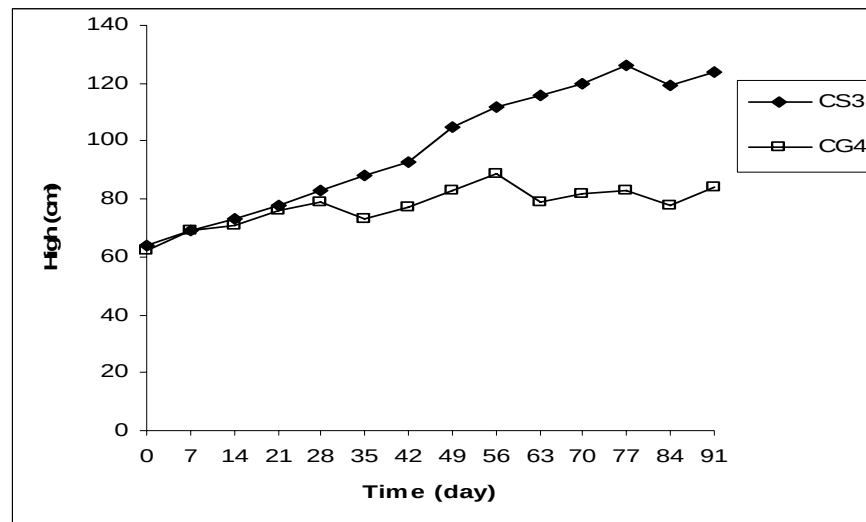


รูปที่ 5.14 ปริมาณทีเคเอ็น (TKN) ที่สะสมในเนื้อเยื่อพืช ในแปลงที่มีการปลูกรูปถ่ายที่มีทรายเป็นตุ๊กกลาง (TS1) และที่มีกรวดเป็นตุ๊กกลาง (TG2)

5.3.2 แปลงที่มีการปลูกพุทธรักษา

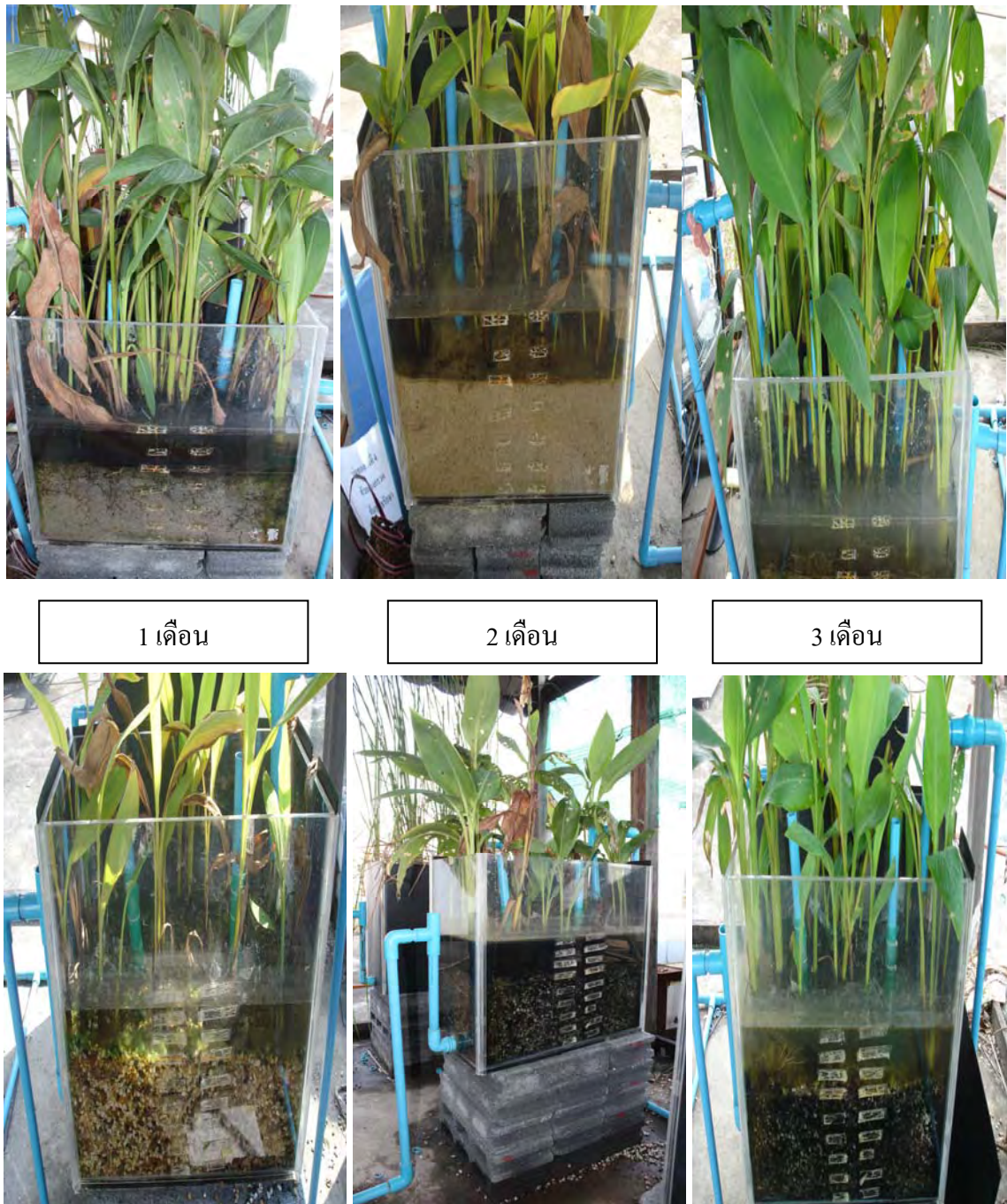
5.3.2.1 ความสูงและความยาวของพุทธรักษา

ในการทดลองได้ทำการคัดเลือกต้นพุทธรักษาที่ผ่านการอนุบาลต้นพืชเป็นเวลา 1 เดือน และมีความสูงใกล้เคียงกันเฉลี่ย 66.5 เซนติเมตร และทำการวัดความสูงทุก 1 สัปดาห์ ตลอดระยะเวลาของการทดลองทั้งสิ้นประมาณ 3 เดือน แสดงผลดังรูปที่ 5.15 และ 5.16 สามารถรายงานผลการทดลองได้ดังนี้

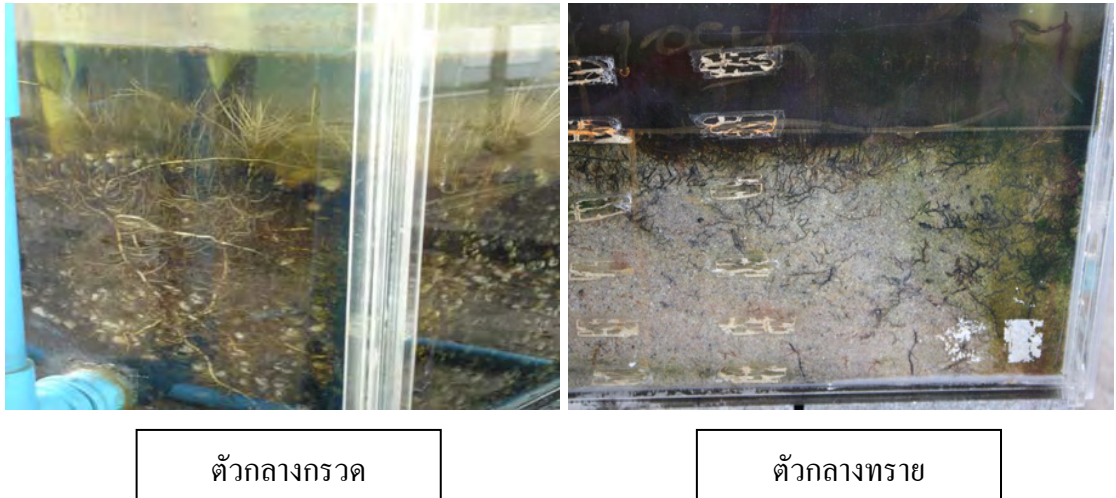


รูปที่ 5.15 ความสูงของต้นพุทธรักษาที่มีทรายเป็นตัวกลาง (CS3) และที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (CG4)

จากการทดลองความสูงของต้นพุทธรักษาที่มีทรายเป็นตัวกลาง และมีกรวดเป็นตัวกลางเฉลี่ย 97.86 ± 22.06 และ 77.50 ± 7.0 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าต้นพุทธรักษาที่มีทรายเป็นตัวกลาง มีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่าต้นพุทธรักษาที่มีกรวดเป็นตัวกลาง ดังรูปที่ 5.15 และเมื่อพิจารณาถึงความยาวรากต้นพุทธรักษาที่มีทรายเป็นตัวกลาง และมีกรวดเป็นตัวกลางพบว่ามีความยาวเฉลี่ย 21.3 ± 1.2 และ 18.6 ± 0.6 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.16 ลักษณะของต้นพุทธรักษาที่มีทรายเป็นตัวกลาง (บน) และที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (ล่าง) ที่มีการทดลองในระยะเวลา 1 ถึง 3 เดือนของการทดลอง



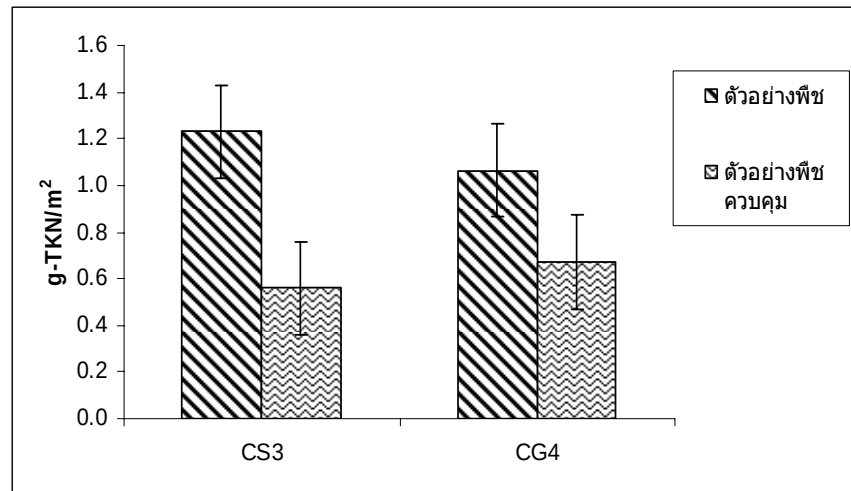
รูปที่ 5.17 การกระจายตัวของรากต้นพุทธรักษาที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (ซ้าย) และที่มีทรายเป็นตัวกลาง (ขวา)

5.3.2.2 น้ำหนักแห้ง

ในการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างต้นพุทธรักษาจากแปลงทดลองที่มีทรายเป็นตัวกลาง และมีกรวดเป็นตัวกลาง เพื่อศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืชทางน้ำหนักแห้งซึ่งให้ผลการทดลองที่ต้นพุทธรักษาที่มีทรายเป็นตัวกลาง และมีกรวดเป็นตัวกลาง เท่ากับ 6.75 และ 4.67 กิโลกรัมของน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ตามลำดับ พิจารณาน้ำหนักแห้ง คือ ต้นพุทธรักษาที่ปลูกในระบบที่มีทรายเป็นตัวกลางจะมีอัตราการเจริญเติบโตมากกว่าต้นพุทธรักษาที่ปลูกในระบบที่มีกรวดเป็นตัวกลาง

5.3.2.3 ปริมาณทีเคเอ็น (TKN) ทั้งหมดในเนื้อเยื่อพืช

จากการทดลองได้ทำการเก็บต้นพุทธรักษาจากแปลงทดลองที่มีทรายเป็นตัวกลาง และมีกรวดเป็นตัวกลาง และวิเคราะห์หาปริมาณทีเคเอ็น (TKN) ที่สะสมในต้นพุทธรักษา จากรูปที่ 5.18 แสดงถึงปริมาณการสะสมทีเคเอ็น (TKN) ในต้นพืชที่มีทรายเป็นตัวกลาง และมีกรวดเป็นตัวกลาง พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.232 และ 1.064 มิลลิกรัมทีเคเอ็นต่อกรัมพืช ตามลำดับดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ปริมาณทีเคเอ็น (TKN) ที่สะสมในฟืชในแปลงที่มีการปลูกต้นพุทธรักษาที่มีทรายเป็นตัวกลาง (CS3) และที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (CG4)

ลักษณะของวัสดุตัวกลางที่ใช้ในบ่อเพื่อการปลูกจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช กล่าวคือ ถ้าวัสดุตัวกลางสำหรับปลูกพืชมีลักษณะหยาบเกินไป จะทำให้รากพืชมีการแผ่กระจายได้ไม่ดี ทำให้พืชที่ปลูกมีการเจริญเติบโตไม่ดีด้วยเช่นกัน โดย Huang et al., (2000) และ Neralla et al., (2000) ได้กล่าวเสริมว่าการกำจัดไนโตรเจนนอกจากจะเกิดเนื่องมาจากปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแล้วการกำจัดไนโตรเจนภายในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ก็อาจจะเกิดจากการสะสมไนโตรเจนไว้ในชีวมวลของพืชและจุลินทรีย์ได้อีกด้วย

จากงานวิจัยของ (Silvan et al., 2003) ได้รายงานว่ารากพืชจะมีการดูดซึมไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเพื่อไปใช้ในการสร้างเซลล์ เมื่อพืชตายและถูกย่อยสลาย ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจะจมอยู่กับซากพืช และบางส่วนจะคายออกมา แต่ทั้งนี้ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้มีปริมาณน้อยมาก

5.4 ปริมาณไนโตรเจนในตัวกลางและตะกอนที่สะสมในระบบ

การทดลองนี้ตัวกลางที่ใช้มีทรายขนาด 0.1-0.2 เซนติเมตร และหินกรวดขนาด 0.5 – 1.0 เซนติเมตร มีค่า ความพรุนของตัวกลาง (Apparent density ρ) เท่ากับ 2.197 และ 1.769 กิโลกรัมต่อลิตร รูปที่ 5.19 แสดงภาพตัดขวางของระบบที่แสดงลักษณะของตัวกลางทรายและกรวดในบ่อทดลองที่ไม่ปลูกพืช



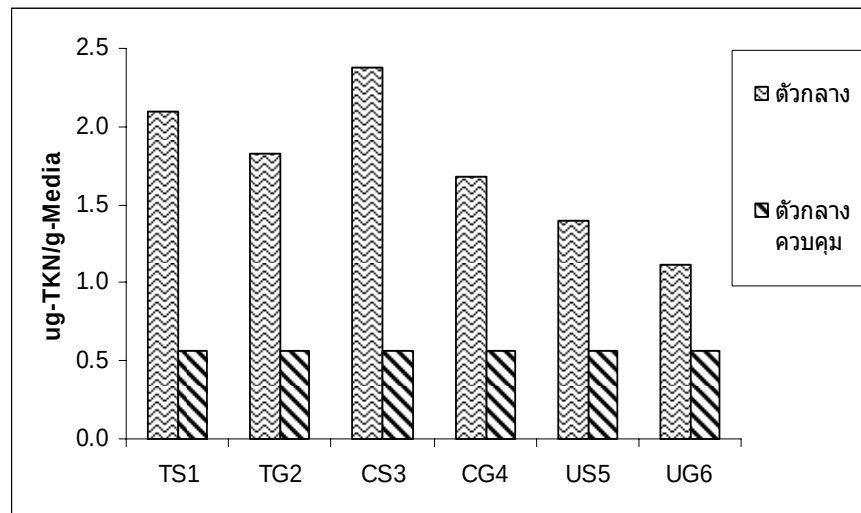
1 เดือน



3 เดือน



รูปที่ 5.19 ลักษณะของแปลงควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืชที่มีทรายเป็นตัวกลาง (บน) และที่มีกรวดเป็นตัวกลาง (ล่าง) ของการทดลองตลอดระยะเวลาทดลอง 1 ถึง 3 เดือน



รูปที่ 5.20 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ในตัวกลางที่เป็นทราย (S) และกรวด (G) สะสมในแปลงทดลองที่มีการปลูกธูปฤาษี (T) พุทธรักษา (C) และแปลงที่ไม่มีการปลูกพืช (U)

จากการทดลองพบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตัวกลางที่เป็นทราย และกรวด สำหรับการปลูกธูปฤาษี พุทธรักษา และไม่มีการปลูกพืช มีค่าแตกต่างกัน (แสดงดังรูปที่ 5.20) โดยแปลงที่มีการปลูกพุทธรักษาในตัวกลางที่เป็นทราย มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตัวกลางมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 2.38 ไมโครกรัม-ทีเคเอ็น/กรัม-ตัวกลาง เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกาะอยู่ในชั้นตัวกลางนั้นได้รับออกซิเจนที่มาจากการส่งจากใบและลำต้น ผ่านมายังรากของพืช (Vymazal, 2002)

5.5 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เลียนแบบน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล

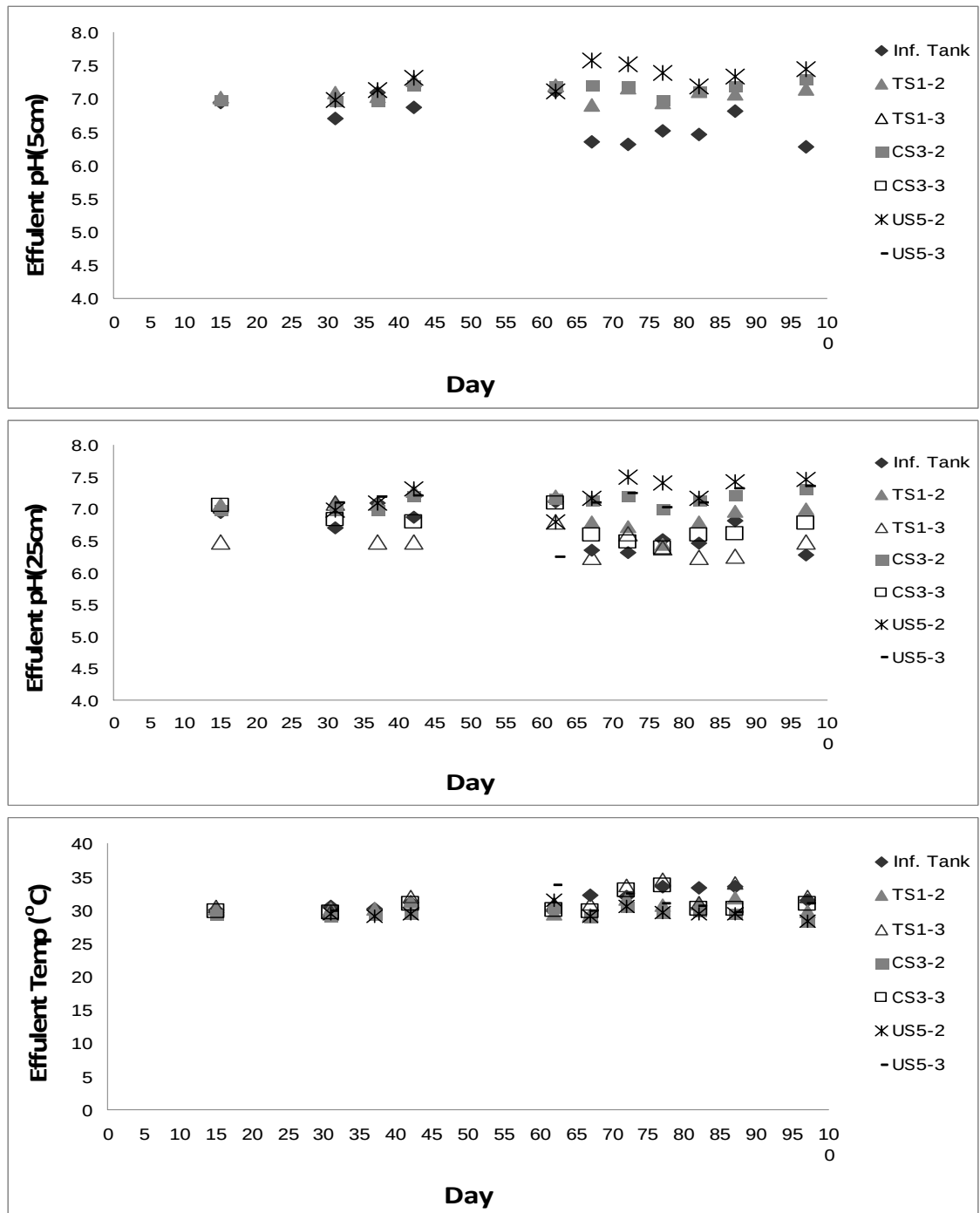
ในการศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ โดยออกแบบการทดลองเช่นเดียวกับการศึกษาจริง โดยปรับการไหลของน้ำเสียให้เป็นแบบต่อเนื่อง เข้าสู่แปลงทดลองทั้งหมด 6 แปลงทดลอง แบ่งเป็นแปลงที่มีการปลูกต้นธูปฤาษีในบ่อที่ 1 และ 2 และปลูกต้นพุทธรักษาในบ่อที่ 3 และ 4 ส่วนแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชในบ่อที่ 5 และ 6 ซึ่งแปลงทดลองที่ 1 3 และ 5 จะมีตัวกลางเป็นทราย ส่วนแปลงทดลองที่ 2 4 และ 6 จะมีตัวกลางเป็นกรวด โดยมีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียที่เวลา 5 วัน และอัตราการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 8.1 ลิตร/วัน เท่ากัน ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

5.5.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช อุณหภูมิ และ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและค่าไออาร์พี

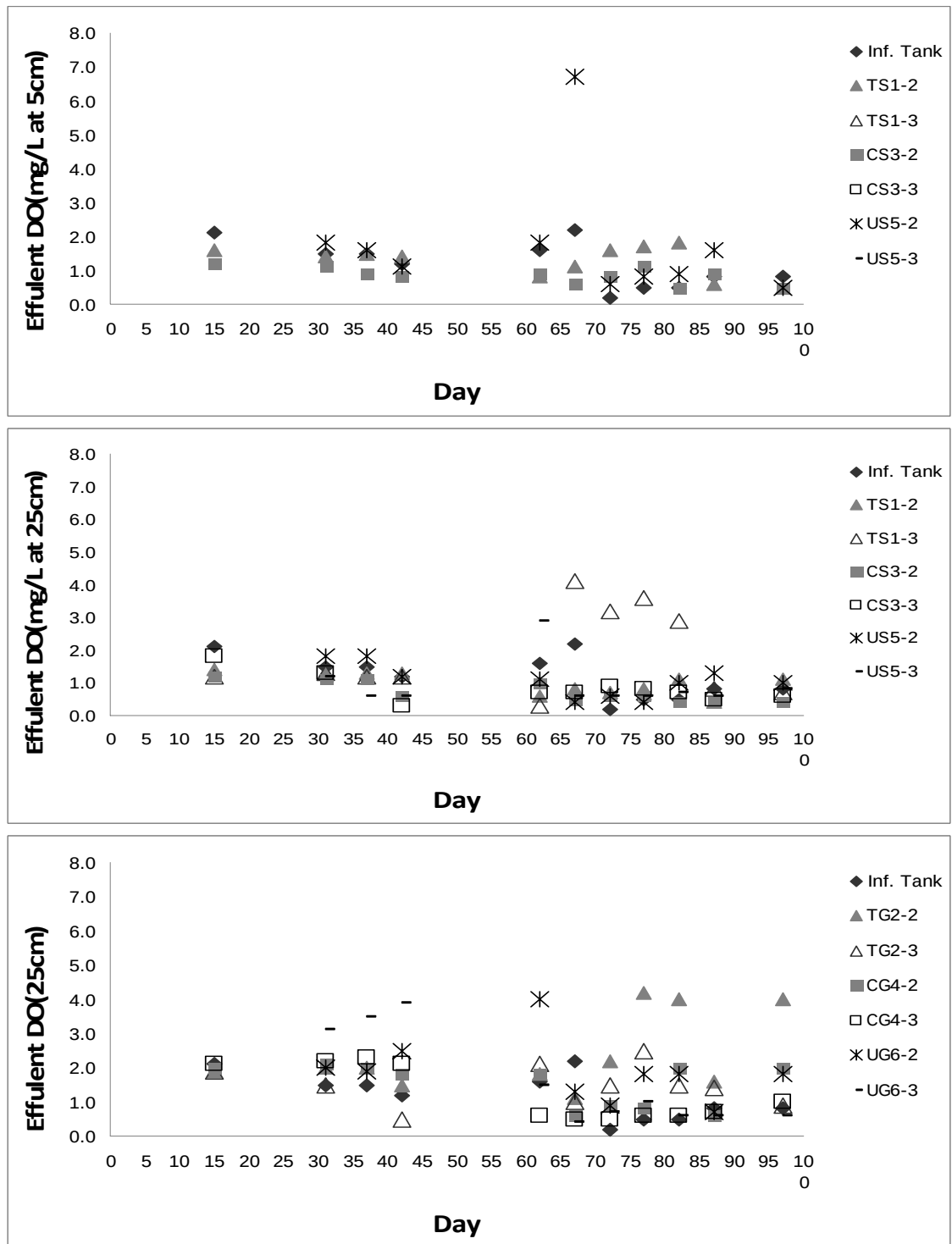
ผลการทดลองพบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงระหว่าง 28 ถึง 35 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ในขณะที่ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ระดับผิวน้ำลดลงไป 5 เซนติเมตรในระบบทั้งที่มีกรวดและทรายเป็นวัสดุตัวกลางนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างเป็นกลาง คือพีเอชระหว่าง 6.3-7.6 และมีค่าไม่แตกต่างกันกับค่าพีเอชของน้ำเสียที่ตรวจวัดได้ที่ระดับลึกลงไป 25 เซนติเมตร (6.2-7.5) ซึ่งคล้ายคลึงกันทั้งระบบที่ปลูกธูปฤาษี หรือพุทธรักษา หรือที่ไม่ปลูกพืช (รูปที่ 5.21)

จากการทดลองพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและอุณหภูมิที่ผิวน้ำมีค่าสูงขึ้น ตั้งแต่ช่วงเดือนที่สองของการทดลองพบปริมาณออกซิเจนละลายในบ่อที่ปลูกพืชธูปฤาษีจะมีค่าสูงขึ้นถึง 4.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในบ่อที่ปลูกพืชพุทธรักษา มีค่าออกซิเจนละลายในระหว่าง 45 วันแรกของการทดลองที่ไม่แตกต่างกันทั้งในบ่อที่มีกรวดหรือทรายเป็นวัสดุปลูกเช่นกัน (แสดงดังรูปที่ 5.21 และ 5.22) ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและอุณหภูมิที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตรจากผิวน้ำ มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.3-1.3 มิลลิกรัมต่อลิตรในบ่อที่มีทราย และมีค่าระหว่าง 0.5-2.5 มิลลิกรัมต่อลิตรในบ่อที่มีกรวดเป็นวัสดุปลูก ดังนั้นจะเห็นว่าในบ่อที่มีกรวดจะพบว่ามีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่สูงกว่าในบ่อทรายเล็กน้อย

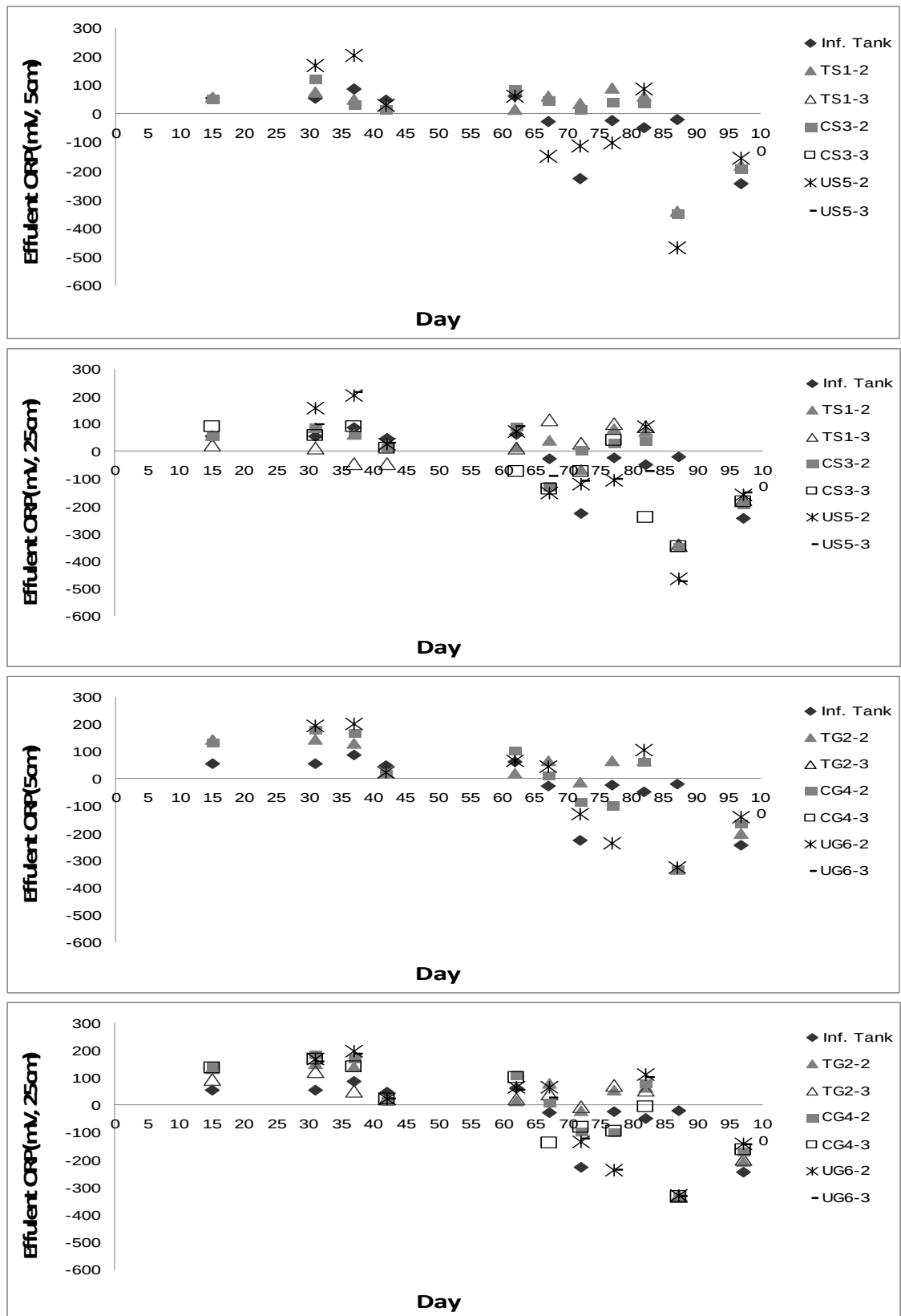
เมื่อเปรียบเทียบกับค่าไออาร์พีของบ่อทรายและกรวดที่ระดับ 5 เซนติเมตร พบว่าไออาร์พีมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาการทดลองและมีค่าติดลบต่ำสุดถึง -400 มิลลิโวลต์ ส่วนค่าไออาร์พีที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตรในบ่อที่ปลูกพืชส่วนใหญ่มีค่าต่ำมากกว่าที่ระดับ 5 เซนติเมตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบ่อที่มีทรายเป็นตัวกลาง มีค่าต่ำถึง -474 มิลลิโวลต์ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในระบบนี้อาจแสดงให้เห็นว่ามีการกระตุ้นการบำบัดน้ำเสียโดยจุลินทรีย์ทั้งในดินในน้ำและที่รากพืชมาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 5.21 ค่า pH และ อุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายเป็นตัวกลาง (T: ฐปถาณี, C: พุรรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)



รูปที่ 5.22 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำของน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีทรายและกรวด เป็นตัวกลางที่ระดับความลึกต่างกัน (T: รูปทรงแฉ, C: พุรุษรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)



รูปที่ 5.23 ค่าโออาร์พีของน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางและระดับความลึกต่างกัน
(T: ทุปถาษี, C: พุรรักรัษษ, U: ไม้ปลุกพืษ, S: ทรย, G: กรวด, -1: จุ่กเก็บตั่วอย่งน้้ำเข้า, -2: น้้ำใน
บ่อ, -3: น้้ำออก)

5.5.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าบีโอดี ซีโอดี และไนโตรเจน

ผลการทดลองพบว่าค่าบีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ในทุกะบบมีค่าลดลงตลอดช่วงการทดลอง และเมื่อพิจารณาที่ค่าซีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบจะพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกัน โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 60 (รูปที่ 5.24 และ 5.25) และมีประสิทธิภาพสูงสุดถึงร้อยละ 87-90 ทั้งในระบบที่ปลูกพืช ไม่ว่าจะเป็นรูปฤาษีหรือพุทธรักษา โดยเฉพาะที่ปลูกในทรายและกรวด

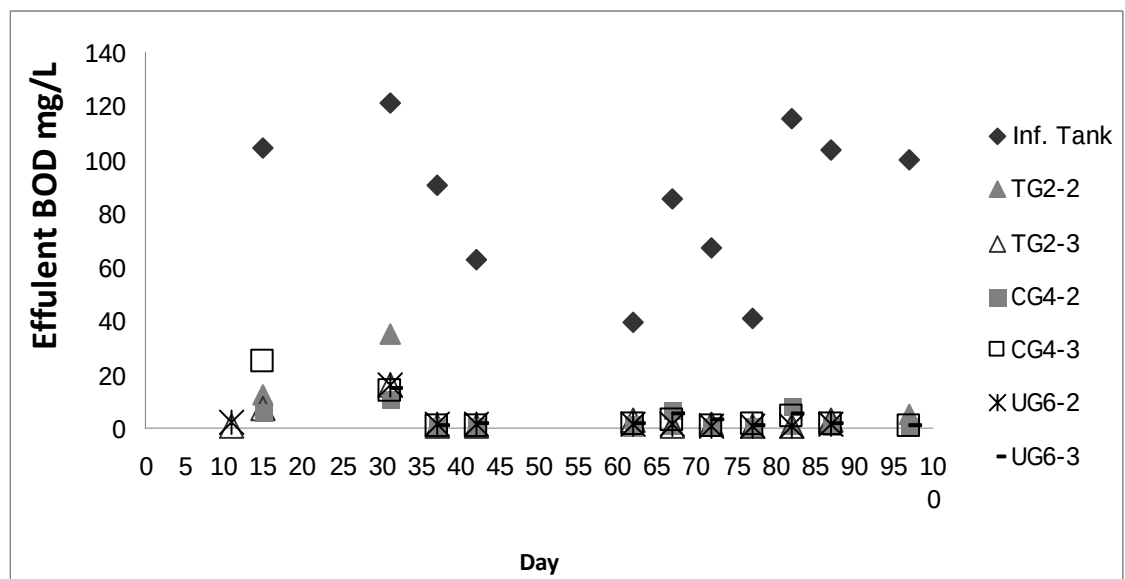
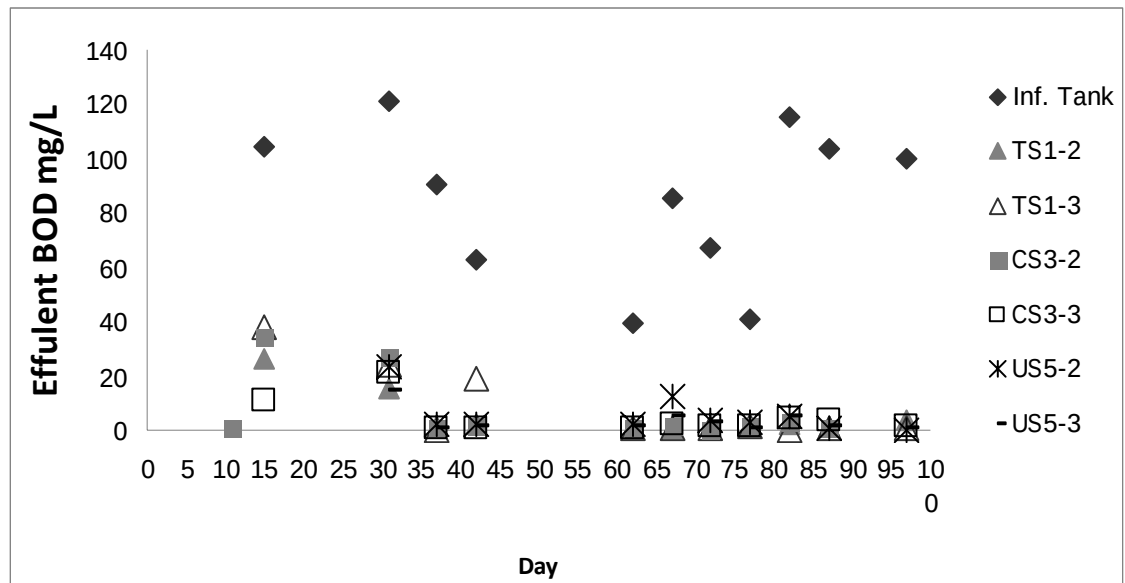
น้ำที่เข้าระบบมีปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนอยู่ระหว่าง 14 ถึง 19.7 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการบำบัดแล้วพบปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำออกมีค่าลดลง โดยในบ่อที่ปลูกพืชสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนลงได้มากที่สุด โดยพบค่าต่ำที่ 1.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งลดลงได้มากกว่าในบ่อที่ไม่ปลูกพืชและโดยเฉพาะอย่างยิ่งในบ่อที่เป็นกรวดมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 88 และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 75 ในบ่อทรายที่ปลูกพืช (รูปที่ 5.26)

เมื่อพิจารณาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าเฉลี่ยที่ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าในน้ำออกของบ่อที่ปลูกพืชมีค่าลดลงเหลือเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในบ่อที่ไม่ปลูกพืชพบว่าสามารถลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดลงได้ แต่ยังพบปริมาณที่สูงกว่า คือ 9 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้พบว่าโดยเฉลี่ยแล้วระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนี้มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 (รูปที่ 5.27)

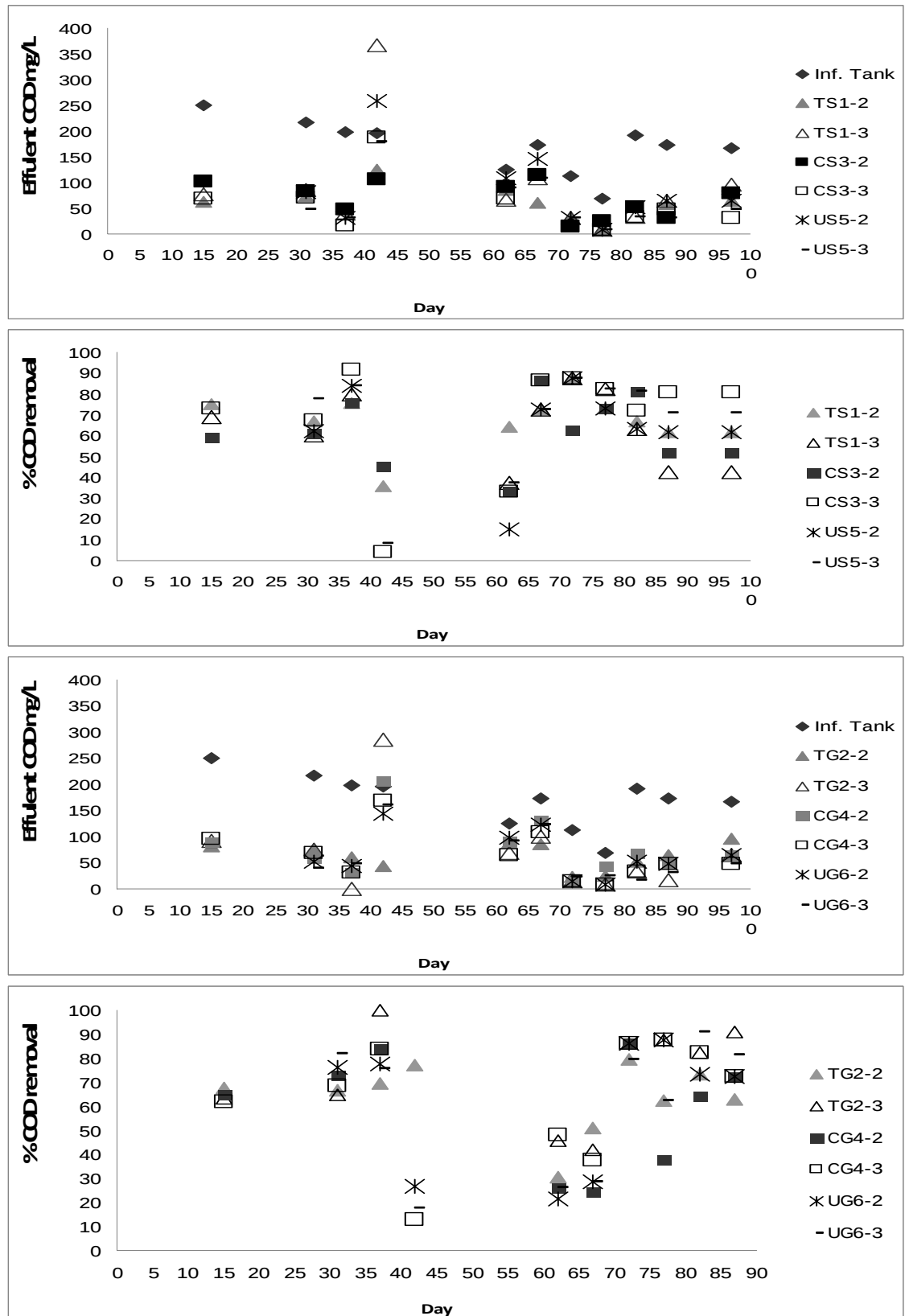
รากพืชที่ส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตอยู่ภายในชั้นดินที่ระดับต่ำกว่าผิวดิน 50–150 ซม. หรือมากกว่า โดยส่วนใหญ่จะสร้างใบและลำต้นให้สัมผัสอากาศ มีรากแผ่ขยายในชั้นดิน ออกซิเจนจากบรรยากาศจะถ่ายเทเข้าสู่พืชทางใบและลงไปทางช่องอากาศไปยังระบบรากโดยการแพร่

(Diffusion) และการพาของอากาศ (Convective) ออกซิเจนบางส่วนถูกปล่อยออกมารอบชั้นรากพืช ทำให้เกิดสภาพมีออกซิเจนเสริมให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ดีขึ้น และทำให้ไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying Bacteria) มีการเจริญเติบโตได้ดี ทำให้เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (ศุควา กานตวนิชกูร, 2544)

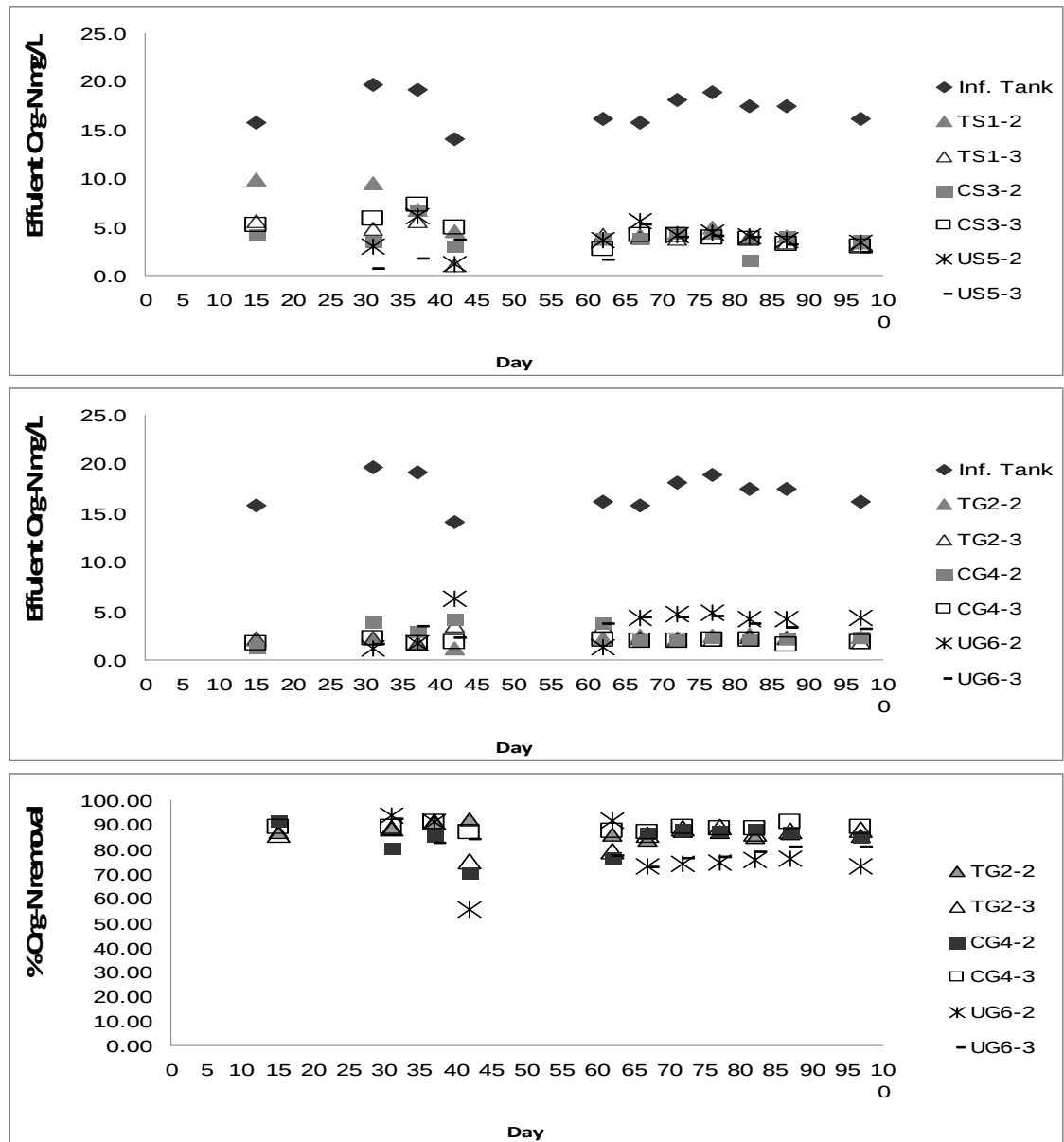
จากผลการทดลองแสดงว่าพืชนั้นเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งในการลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำ อีกทั้งจุลินทรีย์ในน้ำ โดยค่าไออาร์พีในน้ำที่ลดลงประกอบกับลักษณะของวัสดุตัวกลางในบ่อทดลองที่พบว่ามีส่วนสัมผัสถึงคล้ำก็ยิ่งแสดงถึงบทบาทของจุลินทรีย์ประเภทที่ไม่ใช้ออกซิเจนนั้นน่าจะมีบทบาทในการลดปริมาณไนโตรเจนเช่นกัน



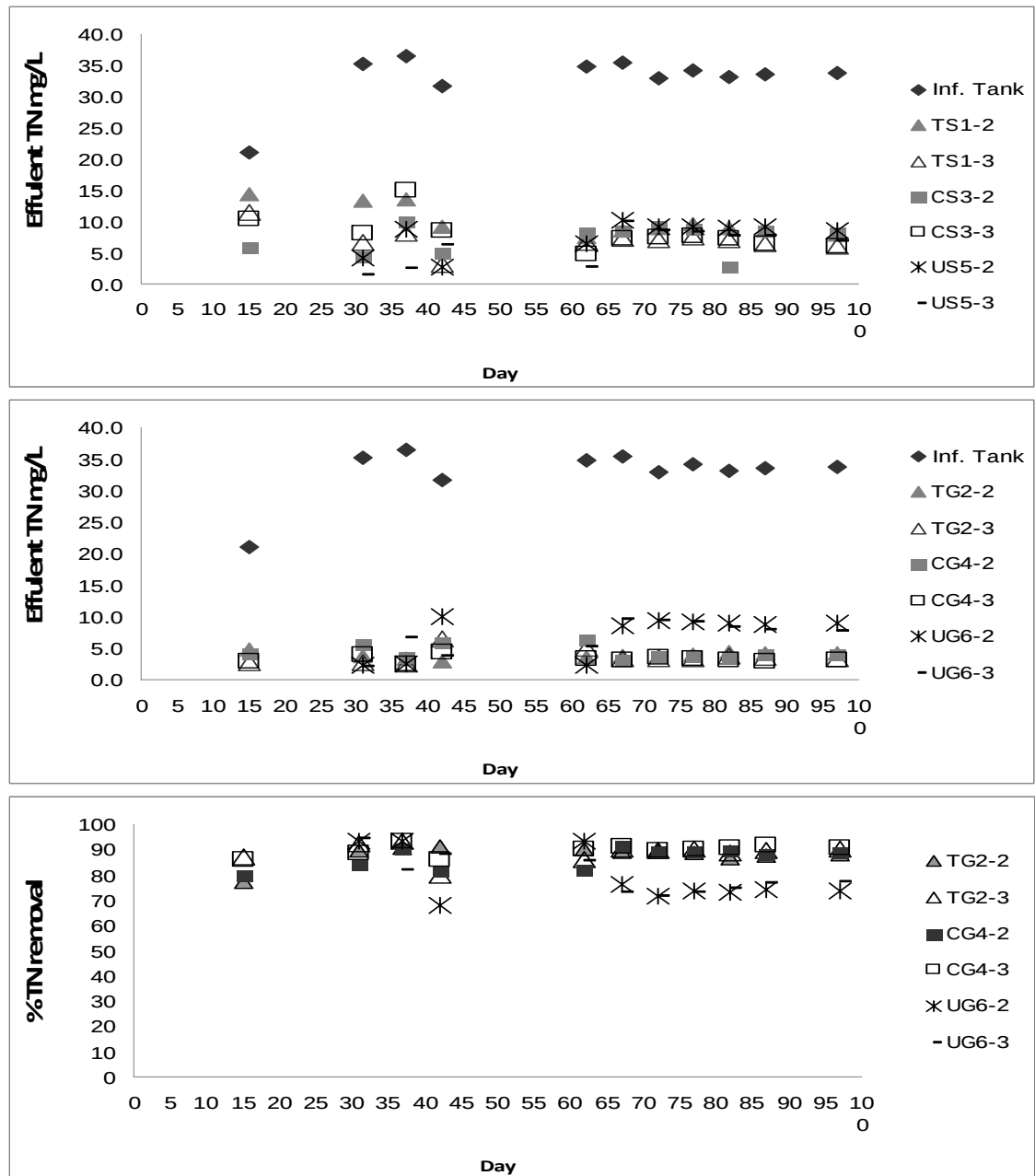
รูปที่ 5.24 ค่าบีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางและระดับความลึกต่างกัน
(T: ธูปฤาษี, C: พุรรักษา, U: ไม่น้ำพุพิษ, S: ทวาย, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)



รูปที่ 5.25 การบำบัดชีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางและระดับความลึกต่างกัน (T: รูปถาษี, C: พุรรักษ, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)



รูปที่ 5.26 การบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางและระดับความลึกต่างกัน (T: รูปถาษี, C: พุรรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราย, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)



รูปที่ 5.27 การบำบัดไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ในระบบบำบัดด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางและระดับความลึกต่างกัน (T: รูปถ่าย, C: พืชรักษา, U: ไม่ปลูกพืช, S: ทราบ, G: กรวด, -1: จุดเก็บตัวอย่างน้ำเข้า, -2: น้ำในบ่อ, -3: น้ำออก)

5.6 ตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสีย

จากผลการศึกษาการใช้วัสดุตัวกลางที่แตกต่างกันเพื่อใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสีย จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ทั้งน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ระบบที่ปลูกด้วย ฐูปฤาษีและมีทรายเป็นตัวกลางนั้น จะแสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่าแปลงทดลองที่ปลูกพุทธรักษา และระบบที่ไม่มีการปลูกพืช โดยสามารถบำบัดมลภาวะหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า และเมื่อพิจารณาที่ชนิดพืชแล้ว ไม่ว่าระบบที่มีการปลูก ฐูปฤาษีหรือ พุทธรักษาที่มีทรายเป็นตัวกลางเหมือนกันก็แสดงประสิทธิภาพได้ดีกว่าหรือใกล้เคียงกับการปลูก ในระบบที่มีกรวดเป็นตัวกลาง หากพิจารณาถึงกระบวนการของไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น ในทุกระบบที่ปลูกพืชนั้น พบว่าทุกระบบสามารถบำบัดได้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันหรือแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อพืชเจริญเติบโตขึ้นระบบรากของพืชจะเริ่มมีความหนาแน่น มากขึ้นและเกิดการกระจายตัวออกไปทั้งในแนวราบและแนวดิ่งภายในชั้นตัวกลาง เป็นการเพิ่ม พื้นที่ผิวบริเวณรากเพิ่มขึ้น จึงส่งเสริมให้เกิดการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสียได้โดยการดูดดึง ไปไว้ในเซลล์พืช นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะให้กับจุลินทรีย์ที่ช่วยดูดซับหรือย่อยสลาย สารปนเปื้อนในน้ำเสีย รวมถึงเป็นการเพิ่มการถ่ายเทออกซิเจนออกจากบริเวณรากที่จำเป็นต่อ การย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน (ดังรูปที่ 4.13 และ 4.17) ผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sirianuntapiboon และคณะ (2006) ที่ศึกษาการใช้ดินและทรายหยาบ เป็นตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นประเภทน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Flow System: SSF) สำหรับปลูกพืชจำพวก ฐูปฤาษี (*Typha spp.*) โดยใช้ดินและทรายหยาบในอัตราส่วน 75:25 50:50 และ 25:75) เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียจากหอพัก ที่สามารถบำบัดความสกปรกในรูปของบีโอดี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น(TKN) ได้มากกว่าร้อยละ 75 ถึงร้อยละ 93 และพืชสามารถ เจริญเติบโตได้ดี (ที่ระยะเวลาพักเก็บ 0.75 วัน) จากข้อมูลดังกล่าวอาจสรุปได้ว่าความโปร่ง ของตัวกลางจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณาหากต้องการพัฒนาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อ การบำบัดน้ำเสีย การใช้กรวดขนาด 2.5 – 3.0 ซม. เป็นตัวกลางในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นและ ปลูก ต้นกกและต้น ฐูปฤาษี พบว่ามีการบำบัดไนโตรเจนได้ประมาณร้อยละ 30 – 50 (Huang et al., 2000) นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Karathanasis และคณะ (2003) ได้รายงานว่ามีการใช้กรวด ขนาด 2.5 – 6.0 ซม ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนแล้วมีประสิทธิภาพการบำบัด บีโอดี ได้ประมาณ ร้อยละ 60 – 80

6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากการศึกษาถึงการสะสมและการเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารพืชในโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่ใช้ต้นธูปฤาษีและพุทธรักษา มีกรวดและทรายเป็นวัสดุตัวกลาง ระบบการทดลองที่ใช้นี้เป็นแบบที่ให้น้ำเสียไหลบนพื้นผิว ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1 ไนโตรเจนในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้น

พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่ปลูกพืชต่างกัน 2 ชนิด และมีตัวกลางที่แตกต่างกันสามารถลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสียได้ทั้งในการทดลองที่ใช้ น้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ ไนโตรเจนในน้ำเสียถูกเปลี่ยนรูปไปด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการทดลองที่มีค่าพีเอชเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นระหว่างพีเอช 6-8 ในขณะที่มีค่าออกซิเจนละลายและค่าโออาร์พีลดลง ซึ่งเหมาะสมในการเกิดกระบวนการดังกล่าว และไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนรูปได้อีกด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง จะพบปริมาณของไนไตรท์และแอมโมเนียมในระบบ แต่พบในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย ซึ่งเกิดจากสภาวะที่ระบบมีค่าโออาร์พีที่ลดลงและเป็นแอนแอโรบิกหรือสภาวะไร้อากาศเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่น้ำออกจากระบบจะพบปริมาณแอมโมเนียมลดลงและมีไนเตรทเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันในช่วงท้ายในระหว่างวันที่ 40 ถึงวันที่ 90 ของการทดลอง และพบว่าภาพรวมของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด

6.2 ไนโตรเจนในพืชและวัสดุตัวกลาง

ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดน้ำเสียนี้ สามารถลดความสกปรกและสารปนเปื้อนในน้ำได้ และเมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตของพืชทั้งสองชนิดที่ปลูกในระบบที่มีตัวกลางต่างกันพบว่า ทั้งธูปฤาษีและพุทธรักษาที่ปลูกในตัวกลางทรายจะมีอัตราการเติบโตที่สูงกว่าที่ปลูกในกรวด ทั้งนี้ชนิดพืชที่ปลูกในระบบจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบด้วยเช่นกัน โดยไนโตรเจนถูกพบสะสมในพืชคือธูปฤาษีในปริมาณที่ใกล้เคียงกับที่ถูกสะสมในพุทธรักษา (1.064-1.232 มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งปริมาณที่พบนี้มีมากกว่าที่พบในพืชทั้งสองชนิดที่ปลูกในบ่อควบคุม โดยที่พืชชนิดเดียวกันจะสามารถบำบัดน้ำเสียได้ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามในภาพรวมของการศึกษาองค์ประกอบของพื้นที่ชุ่มน้ำทั้งระบบ ผลปรากฏว่าต้นธูปฤาษีมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่าต้นพุทธรักษา เนื่องจากปริมาณน้ำหนักของเนื้อเยื่อของธูปฤาษีมีปริมาณระหว่าง 12.13-12.89 กิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ซึ่งมากกว่าของพุทธรักษาที่มีน้ำหนักแห้งระหว่าง 4.67-6.75 กิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตร ประกอบกับระบบรากของต้นธูปฤาษีมีการแพร่กระจายทั้งในแนวดิ่งและแนวราบทำให้มีปริมาณออกซิเจน ในบริเวณชั้นตัวกลางที่

เพียงพอ จึงส่งผลต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในโตรเจนที่ถูกสะสมในตัวกลางทรายที่ปลูกธูปฤาษีมีมากกว่าในตัวกลางทรายในระบบที่ปลูกพุทธรักษา เช่นกันกับปริมาณไนโตรเจนที่พบสะสมในตัวกลางกรวดที่ปลูกธูปฤาษีมีค่าสูงกว่าที่พบในกรวดที่ปลูกพุทธรักษา โดยสามารถสรุปได้ว่าพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่มีตัวกลางเป็นทราย สามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่าระบบที่มีตัวกลางที่เป็นกรวด

6.3 พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย

พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ คือ พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่มีการปลูกต้นธูปฤาษีโดยสามารถใช้วัสดุตัวกลางที่เป็นได้ทั้งทรายหรือที่เป็นกรวด แต่พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นที่มีตัวกลางเป็นทราย สามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่าระบบที่มีตัวกลางที่เป็นกรวด โดยทั้งสองระบบนี้มีประสิทธิภาพแตกต่างกันอย่างไม่นับสำคัญ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี ซีโอดี ในโตรเจนทั้งหมดและอินทรีย์ไนโตรเจน ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีตัวกลางที่เป็นทรายมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 70.0-90.48%, 68.49-77.82%, 70.28-84.79% และ 75.0-89.85% ตามลำดับ และที่มีตัวกลางเป็นกรวดมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 75.48-88.25%, 67.18-76.89%, 76.61-86.31% และ 77.43-89.76% ตามลำดับ

ผลการศึกษาปริมาณการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ต่างกันในงานวิจัยนี้ พบว่าถึงแม้จะมีการเพิ่มการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ต่างกันหรือเพิ่มสูงขึ้นให้กับระบบ ไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียจริงหรือน้ำเสียสังเคราะห์ก็ตาม ทำให้สารอินทรีย์ทั้งขาเข้าและขาออกมีปริมาณที่สูงขึ้น แต่พื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นนี้ก็ยังคงสามารถดำรงต่อไปได้ ถึงแม้จะพบว่าน้ำเสียที่ผ่านออกมาจากระบบ ยังคงมีค่าบีโอดีหรือซีโอดีสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเล็กน้อย แต่ปริมาณของธาตุอาหารพืชหรือไนโตรเจนในน้ำขาออกนั้นมีปริมาณที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้นก็ไม่ได้ส่งผลให้ระบบล้มเหลวลงและยังคงสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. จากการทดลองพบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นสามารถบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ที่ต้องมีความเข้มข้นไม่สูงมากนักได้หรือต้องทำการเจือจางก่อนได้ ในการวิจัยขั้นต่อไปอาจศึกษาการนำน้ำเสียที่มีค่าการระบรทุกสารอินทรีย์สูงขึ้นโดยไม่ต้องเจือจางเข้าผ่านระบบดังกล่าวเพื่อศึกษาถึงระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการบำบัด
2. ศึกษาการผสมตัวกลางหลายๆชนิด เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับตัวกลางในระบบ เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์ในระบบยึดจับกับตัวกลางได้ดีและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่สูงขึ้น

3. ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนของระบบที่แตกต่างจากระบบเดิม เช่น มีการดัดแปลงลักษณะการป้อนน้ำเสียให้เป็นแบบครั้งคราว เพื่อทดสอบความสามารถในการรองรับภาระน้ำเสียที่มากขึ้นและเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในการเดินระบบ

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ, กองจัดการคุณภาพน้ำ, บึงประดิษฐ์ (**Constructed Wetland**) [Online], Available : [http:// www.pcd.go.th / WaterQuality / WasteWT / ConstructedWetland.htm](http://www.pcd.go.th / WaterQuality / WasteWT / ConstructedWetland.htm) [20 มิถุนายน 51]

กรมควบคุมมลพิษ, กองจัดการคุณภาพน้ำ, บึงประดิษฐ์ [Online], Available [pcdv1.pcd.go.th/.../ ConstructedWetland.htm](http://pcdv1.pcd.go.th/.../ConstructedWetland.htm) [17 กรกฎาคม 51]

กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545, ตำราระบบบำบัดมลพิษทางน้ำ ,พิมพ์ครั้งที่ 1, สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ, หน้า 1-1

กองจัดการคุณภาพน้ำ, 2538, เกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำและมาตรฐานคุณภาพน้ำประเทศไทย, กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ, 127 หน้า.

กองจัดการคุณภาพน้ำ, 2545, รายงานสถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางน้ำ ปี **2544–2545**, กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ, 174 หน้า.

เกรียงศักดิ์ อุทุมสินโรจน์, 2542, การบำบัดน้ำเสีย เล่มที่ 2 , สยามสแตนเนอรี ซัพพลายส์, กรุงเทพฯ, หน้า 409-417.

การปลูกพืชไร้ดิน [Online], Available: <http://www.thai.net/cpflower/Anthurium.htm> # วัสดุปลูก [20 ตุลาคม 2550]

จันทิมา รอดมา, 2551, การบำบัดตะกอนจากบ่อเกรอะโดยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวในแนวดิ่ง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตรสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 71-80.

พัฒน์ จันทโรทัย, 2536, “ข้อพิจารณาในการใช้พืชน้ำปรับปรุงคุณภาพน้ำ”,วารสารวิทยาศาสตร์ มก., ปีที่ 11, ฉบับที่ 3, หน้า 154 – 157.

สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ(สำนักงาน กปร.). 2543. คู่มือเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียตามแนวพระราชดำริ : การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ

พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม. โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2545, “รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อมพ.ศ.2544”, กรุงเทพฯ: กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม.

สุภาพร จันรุ่งเรือง และ พิสิษฐ์ จัตวาพรวนิช, การศึกษาศักยภาพการใช้รูปถ่ายในการบำบัดน้ำเสีย[Online], Available: [http:// www.idd.go.th/abs-scd-33-42/abst-scd-th/conserve/waste19.html](http://www.idd.go.th/abs-scd-33-42/abst-scd-th/conserve/waste19.html) [20 ตุลาคม 2547]

เสริมพล รัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2524, การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, หน้า 34-45.

ศุภา กานตวนิชกูร, 2544, การกำจัดไนโตรเจนโดยระบบ **Combined Constructed Wetland ในเขตอากาศร้อน**, รายงานฉบับสมบูรณ์, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า (20-25)-(29-34)-234.

อุดร จารุรัตน์, 2537, “การใช้บึงประดิษฐ์ (Constructed Wetlands) ในการบำบัดน้ำเสีย”, วิศวกรรมสาร, ปีที่ 47, เล่มที่ 2, หน้า 66-69

Amstrong, W., Amstrong J. and Beckett P.M., 1990, “Measurement and Modeling of Oxygen Release from Roots of *Phragmites Australis*”, **Constructed Wetlands in Water Pollution Control**. Pergamon Press, Oxford, UK.

APHA, AWWA and WPCF., 1998, “**Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**”, 20th ed, Washington: American Public Health Association Inc.

Buddhawong, S., 2006, “Constructed Wetlands and their Performance for Treatment of Water Contaminated with Arsenic and Heavy Metals”, In: Viable Methods of Soil and Water Pollution Monitoring, Protection and Remediation. Ed. by Wardowska, I, Allen, H.E., Häggblom, M.H. and Stefaniak, S., NATO Science Series IV: **Earth and Environmental Sciences**. Vol. 69. pp. 417-432. Springer. Amsterdam.

Brix, H., 1997, "Do Macrophytes Play a Role in Constructed Wetland", **Water Science and Technology**, Vol. 35, No. 5 , pp.11 - 17.

Chamber, J.M., MacComb, A.J., 1992, "Establishing Wetland Plants in Artificial Systems", In AWWA and IAWQ, **Wetland Systems in Water Pollution Control, Proceeding of Intenation Specialist Conference, Sydney**, pp. 20.1-20.6. Australia.

Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B., and Shutes, R.B.E., 1996, "**Reed Beds and Constructed Wetland for Wastewater Treatment**", Wilshire: WRc publications.

Gray, S., Kinross J., Read, P. and Marland, A., 2000, "The Nutrient Assimilative Capacity of Maerl as a Substrate in Constructed Wetland Systems for Waste Treatment", **Water Research**, Vol.34, No.8, pp.2183 – 2190

Huang, J., Reneau, R. B., and Hagedorn C., 2000, "Nitrogen Removal in Constructed Wetlands Employed to Treat Domestic Wastewater", **Water Research**, Vol.34, No.9, pp.2582-2588.

Kadlec, R.H. and Knight, R.L., 1996, **Treatment Wetlands**, United State of America: CRC Press.

Karathanasis, A.D., C.L. Potter and M.S. Coyne, 2003, "Vegetation Effect on Fecal Bacteria, BOD, and Suspended Solid Removal in Constructed Wetlands Treating Domestic Wastewater", **Ecological Engineering**, Vol. 20, pp.157-169

Kong, X., Lin, W., Wang, B., and Luo, F., 2003, "Study on Vetiver's Purification for Wastewater from Pig Farm", **The Third International Conference on Vetiver and Exhibition Guangzhou**, October 2003, China.

Koottatep, T., 1999, **Fundamental of Constructed Wetland**, Special Lecture Document, Special Lecture at Silpakorn University.

Koottatep, T., and Polprasert, C., 1997, "Role of Plant Uptake on Nitrogen Removal in Constructed Wetland Located in The Tropics", **Water Science and Technology**, Vol. 36, No. 12., pp. 1 – 8.

Koottatep, T., Surinkul, N., Kamal, A.S.M., Polprasert, C., Montangero, A., Doulaye, K. and Strauss, M. Material Fluxes in Constructed Wetlands Treating Seepages and their Polishing Systems. Switzerland: **Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG)**, 1996

Lee, C., Lee, F., Tseng, S. and Liao, C., 2004, "Performance of Subsurface Flow Constructed Wetland Taking Pretreated Swine Effluent Under Heavy loads", **Bioresource Technology**, Vol.92, pp.173-179.

Matthews, D.J, Moran, B.M., McCabe, P.F. and Otte, M.L. 2004. Zinc tolerance, uptake, accumulation and distribution in plants and protoplasts of five European populations of the wetland grass *Glyceria fluitans*. **Aquatic Botany**. 80. pp.39-52.

Middlebrooks, E. J., Middlebrooks. C. H., Reynold, J. H., Watters, G. Z., Reed, S. C. and George, D.B., 1983, **Wastewater Stabilization Lagoons Design, Performance and Upgrading**, Macmillan, New York.

Nahlik, A.M. and Mitsch, W.J.. 2006. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica. **Ecological Engineering**. 28. pp.246-257.

Neralla, S., Weaver, R. W., Lesikar, B. J. and Persyn, R. A., 2000, "Improvement of Domestic Wastewater Quality by Subsurface Flow Constructed Wetlands", **Bioresource Technology**, Vol. 75, pp. 19-25.

Peter, S.B., Kadlec, R.H. and Henderson, M., 1999, "Treatment of Potato Processing Wastewater with Engineered Natural Systems", **Water Science and Technology**, Vol.40, No.3, pp.211-215.

QLG DNR, 2000, **Guidelines for Using Free Water Surface Constructed Wetlands to Treat Municipal Sewage**, Queensland Government, Department of Natural Resources, Brisbane.

Reed, S.C. 1991. Constructed wetlands for wastewater treatment. **Biocycle**. 1, 44-49.

Ronald, W.C., Middlebrooks, E.J. and Sherwood, C.R., 2006, **Natural Wastewater Treatment Systems**, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton

Scholz, M. and Xu, J., 2002, "Comparison of Constructed Reed Beds with Different Filter Media and Macrophytes Treating Urban Stream Water Contaminated with Lead and Copper", **Ecological Engineering**, Vol.18, pp.385 – 390.

Sezerino, P. H., Reginatto, V., Santos, M. A., Kayser, K., Philippi, L.S. and Soares, H. M., 2003, "Nutrient Removal from Piggery Effluent Using Vertical Flow Constructed Wetland in Southern Brazil", **Water Science and Technology**, Vol. 48, No.2, pp. 129-135.

Silvan, N., Vasander, H., Karsisto, M. and Laine, J., 2003, Microbial Immobilization of Added Nitrogen and Phosphorus in Constructed Wetland Buffer", **Applied Soil Ecology**, Vol. 24, pp. 143-149.

Sirianuntapiboon S., Kongchum M., and Jitmaikasem W., 2006, Effects of Hydraulic Retention Time and Media of Constructed Wetland for Treatment of Domestic Wastewater, **African Journal of Agricultural Research** , September 2006, Vol. 1(2), pp. 027-037.

Stottmeister, U., Wiessner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R.A., and Moormann, H. 2003. Effect of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. **Biotechnology Advances**. 22. pp.93-117.

Tanner, C.C. 1996. Plants for constructed wetland treatment systems- A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. **Ecological Engineering**. 7. pp.59-83.

USEPA, United States Environmental Protection Agency, 2000, **Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater**. EPA.625/R-99/010. Cincinnati, Ohio: U.S. office of Research and Development.

Vymazal, J., 1998, "Removal Mechanisms and Types of Constructed Wetlands", **Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe**, Backhuys Publishers, pp. 17-66.

Vymazal, J., 2002, "The Use of Sub-Surface Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in The Czech Republic : 10 Years Experience", **Ecological Engineering**, Vol.18 , pp 633-646.

Yang, L., Chang, H. and Huang, M. L., 2001, "Nutrient Removal in Gravel- and Soil- Based Wetland Microcosms with and Without Vegetation", **Ecological Engineering**, Vol.18, pp.91-105.

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองประสิทธิภาพพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสีย
อุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ที่ใช้ตัวกลางที่เป็นทราย

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดลองความเป็นกรดด่าง (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาญี, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		PH	%Eff.	PH	%Eff.	PH	%Eff.	PH	%Eff.	PH	%Eff.	PH	%Eff.	PH	%Eff.	PH	%Eff.	PH	%Eff.	
0	5.27	6.91	-31.12	6.98	-32.45	6.81	-29.22	6.81	-29.22	6.85	-29.98	6.75	-28.08	7.09	-34.54	7.12	-35.1	7.08	-34.35	
5	5.25	7.01	-33.52	6.98	-32.95	6.85	-30.48	6.89	-31.24	6.81	-29.71	6.7	-27.62	7.19	-36.95	7.25	-38.1	7.32	-39.43	
10	5.25	6.98	-32.95	6.98	-32.95	6.71	-27.81	6.77	-28.95	6.79	-29.33	6.59	-25.52	7.19	-36.95	7.25	-38.1	7.4	-40.95	
15	5.18	7.09	-36.87	7.02	-35.52	7.1	-37.07	7.1	-37.07	7.05	-36.1	6.98	-34.75	7.15	-38.03	7.19	-38.8	7.29	-40.73	
20	5.18	7.11	-37.26	7.11	-37.26	7.13	-37.64	6.81	-31.47	6.75	-30.31	6.8	-31.27	7.01	-35.33	7.05	-36.1	7.19	-38.8	น้ำผสม1:5
25	5.11	7.01	-37.18	7.05	-37.96	6.98	-36.59	6.98	-36.59	6.99	-36.79	6.75	-32.09	7.08	-38.55	7.05	-37.96	7.02	-37.38	น้ำผสม1:5
30	5.17	6.85	-32.5	6.81	-31.72	6.69	-29.4	6.81	-31.72	6.89	-33.27	6.62	-28.05	7.01	-35.59	7.08	-36.94	7.1	-37.33	น้ำผสม1:5
35	5.3	7.37	-39.06	7.38	-39.25	6.81	-28.49	7.3	-37.74	7.32	-38.11	7.02	-32.45	7.23	-36.42	7.34	-38.49	7.34	-38.49	น้ำผสม1:5
40	5.24	6.07	-15.84	6.15	-17.37	6.47	-23.47	6.26	-19.47	6.39	-21.95	6.62	-26.34	6.45	-23.09	6.46	-23.28	6.92	-32.06	
45	5.51	6.75	-22.5	6.6	-19.78	6.5	-17.97	7.28	-32.12	7.19	-30.49	6.63	-20.33	6.87	-24.68	6.89	-25.05	6.97	-26.5	
50	5.67	6.85	-20.81	6.81	-20.11	6.75	-19.05	7.21	-27.16	7.19	-26.81	6.75	-19.05	7.03	-23.99	7.1	-25.22	7.05	-24.34	
55	5.24	6.91	-31.87	6.85	-30.73	6.8	-29.77	6.82	-30.15	6.85	-30.73	6.65	-26.91	6.92	-32.06	6.98	-33.21	6.82	-30.15	
60	5.26	6.75	-28.33	6.8	-29.28	6.68	-27	6.98	-32.7	6.95	-32.13	6.78	-28.9	6.93	-31.75	6.95	-32.13	7.03	-33.65	
65	5.31	6.86	-29.19	6.79	-27.87	6.81	-28.25	6.96	-31.07	7.02	-32.2	6.69	-25.99	6.91	-30.13	6.87	-29.38	6.98	-31.45	
70	5.24	6.82	-30.15	6.8	-29.77	6.72	-28.24	7.03	-34.16	7.04	-34.35	6.83	-30.34	6.94	-32.44	6.96	-32.82	6.97	-33.02	
75	5.28	6.79	-28.6	6.75	-27.84	6.55	-24.05	7.09	-34.28	7.06	-33.71	6.87	-30.11	6.89	-30.49	6.92	-31.06	6.93	-31.25	
80	5.3	6.81	-28.49	6.81	-28.49	6.73	-26.98	6.89	-30	6.94	-30.94	6.57	-23.96	6.79	-28.11	6.81	-28.49	6.86	-29.43	
85	5.2	6.74	-29.62	6.76	-30	6.58	-26.54	7.1	-36.54	7.02	-35	6.86	-31.92	6.73	-29.42	6.68	-28.46	6.61	-27.12	
90	5.27	6.68	-26.76	6.71	-27.32	6.51	-23.53	6.97	-32.26	7.02	-33.21	6.81	-29.22	6.87	-30.36	6.89	-30.74	6.89	-30.74	
AVE	5.275	6.86	-30.14	6.85	-29.93	6.75	-27.98	6.95	-31.78	6.95	-31.85	6.75	-28.05	6.96	-32.05	6.99	-32.6	7.04	-33.54	
SD	0.125	0.25	5.89	0.24	5.96	0.19	5.29	0.23	4.19	0.2	3.72	0.13	4.01	0.19	4.75	0.21	4.99	0.2	4.98	

ตารางที่ ก.2 แสดงผลการทดลองการบำบัดดินปนเปื้อน (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถั่ว, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	
0	28.3	29.6	-4.59	29.5	-4.24	30	-6.01	28.7	-1.41	28.9	-2.12	30	-6.01	29.2	-3.18	29.3	-3.53	30.3	-7.07	
5	29.4	29.5	-0.34	29.6	-0.68	30.5	-3.74	29.8	-1.36	29.6	-0.68	30.1	-2.38	29.1	1.02	29.3	0.34	30.1	-2.38	
10	29.4	29.7	-1.02	29.6	-0.68	30.8	-4.76	28.7	2.38	28.8	2.04	29.5	-0.34	29.1	1.02	29.3	0.34	30	-2.04	
15	28.7	29.5	-2.79	29.1	-1.39	30.2	-5.23	29	-1.05	29.1	-1.39	30.1	-4.88	29.6	-3.14	29.7	-3.48	30.2	-5.23	
20	28.7	28.5	0.7	28.9	-0.7	29.8	-3.83	28.1	2.09	28.3	1.39	29.4	-2.44	28.5	0.7	28.5	0.7	29.7	-3.48	น้ำผสม1:5
25	28.7	29.7	-3.48	29.7	-3.48	30.1	-4.88	29	-1.05	28.9	-0.7	29.6	-3.14	29.1	-1.39	29.2	-1.74	30.5	-6.27	น้ำผสม1:5
30	28.7	29.7	-3.48	29.8	-3.83	29.6	-3.14	29	-1.05	29.1	-1.39	29.5	-2.79	29.3	-2.09	29.5	-2.79	30	-4.53	น้ำผสม1:5
35	28.7	29.6	-3.14	29.8	-3.83	30.3	-5.57	28	2.44	28.3	1.39	31.3	-9.06	28.3	1.39	28.1	2.09	31	-8.01	น้ำผสม1:5
40	32.2	29.8	7.45	29.7	7.76	31.3	2.8	28	13.04	27.9	13.35	30	6.83	28.2	12.42	28.1	12.73	29.7	7.76	
45	31.3	29	7.35	29.3	6.39	30.3	3.19	27.7	11.5	28	10.54	29.5	5.75	27.9	10.86	27.9	10.86	29.2	6.71	
50	30.2	29.5	2.32	29.5	2.32	30.3	-0.33	28.5	5.63	28.3	6.29	29.5	2.32	28.5	5.63	28.5	5.63	29	3.97	
55	30.5	29.1	4.59	29	4.92	29.9	1.97	29.4	3.61	29.3	3.93	29.8	2.3	29.3	3.93	29.1	4.59	30.1	1.31	
60	30.1	29.8	1	29.7	1.33	30	0.33	29	3.65	29.3	2.66	30.2	-0.33	29.2	2.99	29.3	2.66	30.3	-0.66	
65	29.8	29.2	2.01	29.8	0	29.9	-0.34	28.9	3.02	29.3	1.68	29.7	0.34	28.6	4.03	28.5	4.36	29.9	-0.34	
70	29.7	29.6	0.34	29.8	-0.34	30.1	-1.35	29.1	2.02	29.3	1.35	29.5	0.67	29.1	2.02	29.2	1.68	30	-1.01	
75	30.2	29.8	1.32	29.6	1.99	30.2	0	29.3	2.98	29.4	2.65	30.3	-0.33	29.2	3.31	29.2	3.31	30.1	0.33	
80	30.2	30.3	-0.33	30.1	0.33	30.3	-0.33	29.5	2.32	29.7	1.66	30.3	-0.33	29.4	2.65	29.5	2.32	30.3	-0.33	
85	30.4	30.2	0.66	30.4	0	30.6	-0.66	29.6	2.63	30	1.32	30.8	-1.32	29.8	1.97	29.6	2.63	30.2	0.66	
90	31.2	30.9	0.96	31	0.64	31	0.64	30.1	3.53	30.5	2.24	31.4	-0.64	30.3	2.88	30.5	2.24	31.1	0.32	
AVE	29.8	29.63	0.5	29.68	0.34	30.27	-1.64	28.92	2.89	29.05	2.43	30.03	-0.83	29.04	2.48	29.07	2.37	30.09	-1.07	
SD	1.05	0.51	3.37	0.48	3.31	0.42	2.92	0.65	3.88	0.68	3.93	0.6	3.74	0.59	4.04	0.65	4.24	0.5	4.26	

ตารางที่ ก.3 แสดงผลการทดลองการบำบัดออกซิเจนละลายที่ระดับ 10 ซม. จากระดับน้ำ (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปฤาษี, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	
0	2.4	2.4	0	2.3	4.17	*	-	2.1	12.5	1.8	25	*	-	2.9	-20.83	2.8	-16.67	*	-	* คือ ไม่มีจุดที่วัด
5	1.8	1.6	11.11	1.9	-5.56	*	-	1.5	16.67	1.9	-5.56	*	-	3.6	-100	3.7	-105.56	*	-	** คือ ช่วงเริ่มระบบ
10	1.9	2.2	-15.79	2.1	-10.53	*	-	1.4	26.32	1.8	5.26	*	-	5.1	-168.42	4.7	-147.37	*	-	
15	1.6	1.3	18.75	1.5	6.25	*	-	1.6	0	1.7	-6.25	*	-	2.3	-43.75	2.1	-31.25	*	-	
20	1.2	1.1	8.33	1.2	0	*	-	1.3	-8.33	1.2	0	*	-	1.5	-25	1.3	-8.33	*	-	น้ำผสม 1:5
25	1.2	0.3	75	0.2	83.33	*	-	0.2	83.33	0.3	75	*	-	1	16.67	0.9	25	*	-	น้ำผสม 1:5
30	1.6	0.2	87.5	0.2	87.5	*	-	0.1	93.75	0.1	93.75	*	-	0.2	87.5	0.2	87.5	*	-	น้ำผสม 1:5
35	1.6	0.2	87.5	0.2	87.5	*	-	0.2	87.5	0.2	87.5	*	-	0.2	87.5	0.2	87.5	*	-	น้ำผสม 1:5
40	1.4	0.2	85.71	0.2	85.71	*	-	0.2	85.71	0.2	85.71	*	-	0.2	85.71	0.2	85.71	*	-	
45	1.1	0.3	72.73	0.5	54.55	*	-	0.2	81.82	0.1	90.91	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	*	-	
50	1.1	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	*	-	
55	1.1	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	
60	1	0.1	90	0.1	90	*	-	0.2	80	0.1	90	*	-	0.1	90	0.1	90	*	-	
65	1.2	0.1	91.67	0.1	91.67	*	-	0.2	83.33	0.2	83.33	*	-	0.1	91.67	0.1	91.67	*	-	
70	1.3	0.1	92.31	0.1	92.31	*	-	0.2	84.62	0.1	92.31	*	-	0.1	92.31	0.2	84.62	*	-	
75	1.1	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	*	-	
80	0.9	0.2	77.78	0.2	77.78	*	-	0.1	88.89	0.1	88.89	*	-	0.1	88.89	0.1	88.89	*	-	
85	1.1	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	*	-	
90	1.3	0.1	92.31	0.1	92.31	*	-	0.1	92.31	0.1	92.31	*	-	0.2	84.62	0.1	92.31	*	-	
AVE	1.36	0.59	63.27	0.62	61.28	-	-	0.53	66.47	0.55	65.93	-	-	0.96	42.75	0.91	45.76	-	-	
SD	0.37	0.75	37.02	0.76	39.3	-	-	0.66	35.82	0.71	38.93	-	-	1.47	77.95	1.4	73.6	-	-	

ตารางที่ ก.4 แสดงผลการทดลองการบำบัดออกซิเจนละลายที่ระดับ 25 ซม. จากระดับน้ำ (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปฤาษี, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	
0	2.4	*	-	*	-	1.3	45.83	**	-	**	-	1.5	37.5	**	-	**	-	2.5	-4.17	* คือ ไม่มีจุดที่วัด
5	1.8	*	-	*	-	0.8	55.56	*	-	*	-	0.9	50	3.1	-72.22	3.1	-72.22	2.9	-61.11	** คือ ช่วงเริ่มระบบ
10	1.9	*	-	*	-	0.6	68.42	*	-	*	-	0.6	68.42	4.7	-147.37	5.2	-173.68	2.1	-10.53	
15	1.6	*	-	*	-	1	37.5	*	-	*	-	0.9	43.75	1.8	-12.5	1.9	-18.75	1.5	6.25	
20	1.2	*	-	*	-	0.8	33.33	*	-	*	-	0.7	41.67	1	16.67	1.2	0	0.6	50	น้ำผสม 1:5
25	1.2	*	-	*	-	0.3	75	*	-	*	-	0.3	75	0.6	50	0.5	58.33	0.7	41.67	น้ำผสม 1:5
30	1.6	*	-	*	-	0.2	87.5	*	-	*	-	0.2	87.5	0.2	87.5	0.1	93.75	0.2	87.5	น้ำผสม 1:5
35	1.6	*	-	*	-	0.2	87.5	*	-	*	-	0.2	87.5	0.2	87.5	0.2	87.5	0.2	87.5	น้ำผสม 1:5
40	1.4	*	-	*	-	0.2	85.71	*	-	*	-	0.2	85.71	0.2	85.71	0.2	85.71	0.2	85.71	
45	1.1	*	-	*	-	0.3	72.73	*	-	*	-	0.3	72.73	0.1	90.91	0.1	90.91	0.2	81.82	
50	1.1	*	-	*	-	0.2	81.82	*	-	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	
55	1.1	*	-	*	-	0.2	81.82	*	-	*	-	0.1	90.91	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	
60	1	*	-	*	-	0.1	90	*	-	*	-	0.1	90	0.1	90	0.1	90	0.1	90	
65	1.2	*	-	*	-	0.2	83.33	*	-	*	-	0.1	91.67	0.1	91.67	0.1	91.67	0.1	91.67	
70	1.3	*	-	*	-	0.3	76.92	*	-	*	-	0.2	84.62	0.1	92.31	0.2	84.62	0.2	84.62	
75	1.1	*	-	*	-	0.1	90.91	*	-	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	
80	0.9	*	-	*	-	0.1	88.89	*	-	*	-	0.1	88.89	0.1	88.89	0.1	88.89	0.1	88.89	
85	1.1	*	-	*	-	0.1	90.91	*	-	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	
90	1.3	*	-	*	-	0.2	84.62	*	-	*	-	0.1	92.31	0.2	84.62	0.1	92.31	0.1	92.31	
AVE	1.31	-	-	-	-	0.33	76.25	-	-	-	-	0.29	79.08	0.72	54.9	0.76	52.98	0.54	65.05	
SD	0.28	-	-	-	-	0.28	17.41	-	-	-	-	0.28	17.13	1.26	67.78	1.37	73.66	0.8	43.98	

ตารางที่ ก.5 แสดงผลการทดลองการบำบัดโออาร์พีที่ระดับ 10 ซม. จากระดับน้ำ(TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาวย, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	
0	-15	88	686.67	83	653.33	*	-	96	740	97	746.67	*	-	123	920	125	933.33	*	-	* คือไม่มีจุดที่วัด
5	-42	105	350	112	366.67	*	-	118	380.95	130	409.52	*	-	168	500	179	526.19	*	-	** คือช่วงเริ่มระบบ
10	-53	-53	0	-49	7.55	*	-	-51	3.77	-56	-5.66	*	-	22	141.51	23	143.4	*	-	
15	-89	-88	1.12	-84	5.62	*	-	-69	22.47	-71	20.22	*	-	12	113.48	14	115.73	*	-	
20	-99.8	-212	-112.42	-225	-125.45	*	-	-231	-131.46	-238	-138.48	*	-	-221	-121.44	-211	-111.42	*	-	น้ำผสม1:5
25	-100	-291	-191	-281	-181	*	-	-279	-179	-289	-189	*	-	-300	-200	-312	-212	*	-	น้ำผสม1:5
30	-99.8	-312	-212.63	-310	-210.62	*	-	-310	-210.62	-325	-225.65	*	-	-325	-225.65	-335	-235.67	*	-	น้ำผสม1:5
35	-153	-261	-70.59	-258	-68.63	*	-	-265	-73.2	-270	-76.47	*	-	-281	-83.66	-279	-82.35	*	-	น้ำผสม1:5
40	-110	-280	-154.55	-290	-163.64	*	-	-320	-190.91	-290	-163.64	*	-	-310	-181.82	-285	-159.09	*	-	
45	-115	-320	-178.26	-325	-182.61	*	-	-360	-213.04	-312	-171.3	*	-	-384	-233.91	-375	-226.09	*	-	
50	-125	-301	-140.8	-315	-152	*	-	-360	-188	-322	-157.6	*	-	-325	-160	-315	-152	*	-	
55	-123.7	-276.1	-123.2	-279.3	-125.79	*	-	-293	-136.86	-300	-142.52	*	-	-324.8	-162.57	-312.5	-152.63	*	-	
60	-134.2	-268	-99.7	-266.9	-98.88	*	-	-310	-131	-321.5	-139.57	*	-	-342	-154.84	-326.1	-143	*	-	
65	-139.1	-291	-109.2	-289.7	-108.27	*	-	-337	-142.27	-356	-155.93	*	-	-385.7	-177.28	-367	-163.84	*	-	
70	-116.3	-272.3	-134.14	-279.4	-140.24	*	-	-296.2	-154.69	-308	-164.83	*	-	-310.3	-166.81	-298.3	-156.49	*	-	
75	-119.7	-193	-61.24	-203	-69.59	*	-	-305.6	-155.3	-310.5	-159.4	*	-	-308.5	-157.73	-315	-163.16	*	-	
80	-124.9	-192.3	-53.96	-210	-68.13	*	-	-298.7	-139.15	-296	-136.99	*	-	-316	-153	-302.4	-142.11	*	-	
85	-129.4	-257.2	-98.76	-264.8	-104.64	*	-	-312	-141.11	-307.4	-137.56	*	-	-297.4	-129.83	-287.3	-122.02	*	-	
90	-137.8	-284.3	-106.31	-283.7	-105.88	*	-	-334	-142.38	-329	-138.75	*	-	-332	-140.93	-314	-127.87	*	-	
AVE	-106.66	-208.38	-42.58	-211.52	-45.91	-	-	-237.76	-62.2	-235.49	-59.31	-	-	-233.56	-40.76	-225.98	-33.22	-	-	
SD	35.48	128.86	213.06	130.64	209.6	-	-	147.25	235.67	146.5	238.64	-	-	173.42	290.44	171.69	293.76	-	-	

ตารางที่ ก.6 แสดงผลการทดลองการบำบัดโออาร์พีที่ระดับ 25 ซม. จากระดับน้ำ (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาญี, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวยก)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	
0	-15	*	-	*	-	100	766.67	*	-	*	-	61	506.67	120	900	121	906.67	119	893.33	* คือไม่มีจุดที่วัด
5	-42	*	-	*	-	125	397.62	*	-	*	-	45	207.14	169	502.38	176	519.05	176	519.05	** คือช่วงเริ่มระบบ
10	-53	*	-	*	-	-19	64.15	*	-	*	-	-37	30.19	12	122.64	15	128.3	31	158.49	
15	-89	*	-	*	-	-56	37.08	*	-	*	-	-42	52.81	3	103.37	5	105.62	25	128.09	
20	-99.8	*	-	*	-	-198	-98.4	*	-	*	-	-210	-110.42	-215	-115.43	-205	-105.41	-208	-108.42	น้ำผสม1:5
25	-100	*	-	*	-	-220	-120	*	-	*	-	-265	-165	-330	-230	-341	-241	-295	-195	น้ำผสม1:5
30	-99.8	*	-	*	-	-220	-120.44	*	-	*	-	-273	-173.55	-330	-230.66	-340	-240.68	-293	-193.59	น้ำผสม1:5
35	-153	*	-	*	-	-235	-53.59	*	-	*	-	-250	-63.4	-285	-86.27	-300	-96.08	-264	-72.55	น้ำผสม1:5
40	-110	*	-	*	-	-200	-81.82	*	-	*	-	-230	-109.09	-305	-177.27	-290	-163.64	-270	-145.45	
45	-115	*	-	*	-	-300	-160.87	*	-	*	-	-298	-159.13	-355	-208.7	-342	-197.39	-321	-179.13	
50	-125	*	-	*	-	-295	-136	*	-	*	-	-295	-136	-310	-148	-311	-148.8	-300	-140	
55	-123.7	*	-	*	-	-267	-115.84	*	-	*	-	-284	-129.59	-309.1	-149.88	-298.3	-141.15	-273	-120.7	
60	-134.2	*	-	*	-	-278.5	-107.53	*	-	*	-	-293.1	-118.41	-312	-132.49	-305.8	-127.87	-286.4	-113.41	
65	-139.1	*	-	*	-	-291.2	-109.35	*	-	*	-	-296	-112.8	-325	-133.64	-318.2	-128.76	-306	-119.99	
70	-116.3	*	-	*	-	-243	-108.94	*	-	*	-	-243.5	-109.37	-299.7	-157.7	-289	-148.5	-271.3	-133.28	
75	-119.7	*	-	*	-	-236	-97.16	*	-	*	-	-248.7	-107.77	-304.1	-154.05	-297	-148.12	-276.3	-130.83	
80	-124.9	*	-	*	-	-254.1	-103.44	*	-	*	-	-283.4	-126.9	-311.6	-149.48	-303.1	-142.67	-286	-128.98	
85	-129.4	*	-	*	-	-260	-100.93	*	-	*	-	-289	-123.34	-308	-138.02	-297	-129.52	-279	-115.61	
90	-137.8	*	-	*	-	-281.3	-104.14	*	-	*	-	-294	-113.35	-310.7	-125.47	-302	-119.16	-285.1	-106.89	
AVE	-106.67	-	-	-	-	-191.01	-18.58	-	-	-	-	-211.88	-55.86	-226.64	-37.3	-222.23	-32.58	-203.32	-16.05	
SD	35.5	-	-	-	-	129.93	226.98	-	-	-	-	120.55	164.08	166.14	283.73	165.99	285.9	158.83	277.65	

ตารางที่ ก.7 แสดงผลการทดลองการบำบัด บีโอดี (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาญี, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	
0	112	35.6	68.21	39.2	65	10.6	90.54	35.2	68.57	37.6	66.43	15.9	85.8	27.6	75.36	27.9	75.09	21.9	80.45	
5	115	39.6	65.57	41.4	64	14.1	87.74	36.7	68.09	38.5	66.52	16.95	85.26	25.5	77.83	27.9	75.74	19.5	83.04	
10	110	38.9	64.64	40.2	63.45	16.7	84.82	38.7	64.82	39.1	64.45	18.7	83	35.6	67.64	32.1	70.82	19.8	82	
15	98.9	40.3	59.25	42.2	57.33	16.8	83.01	40.2	59.35	42.5	57.03	18.9	80.89	38.5	61.07	37.4	62.18	20.3	79.47	
20	239.1	105	56.09	99.6	58.34	56	76.58	112	53.16	109	54.41	61.2	74.4	98.6	58.76	96.7	59.56	69.4	70.97	น้ำผสม1:5
25	254	99.7	60.75	102.4	59.69	51.2	79.84	106	58.27	110.3	56.57	67.3	73.5	101.5	60.04	103.9	59.09	79.3	68.78	น้ำผสม1:5
30	412	199.4	51.6	189.7	53.96	156.7	61.97	203.5	50.61	210.1	49	187.3	54.54	176.8	57.09	186.1	54.83	139.9	66.04	น้ำผสม1:5
35	423.8	169.1	60.1	171.3	59.58	132.4	68.76	210.2	50.4	198.2	53.23	169.3	60.05	189.1	55.38	193.2	54.41	158	62.72	น้ำผสม1:5
40	216.4	93	57.02	88	59.33	48	77.82	99	54.25	84	61.18	69	68.11	109	49.63	112.9	47.83	103	52.4	
45	204.3	101.4	50.37	89.7	56.09	61.3	70	89.5	56.19	86.1	57.86	58.2	71.51	116.2	43.12	124.1	39.26	109.3	46.5	
50	217.4	93	57.22	79.3	63.52	22.3	89.74	91.9	57.73	85.6	60.63	42.1	80.63	102.3	52.94	110.8	49.03	86.2	60.35	
55	203.8	90.6	55.54	89.7	55.99	20.4	89.99	88.2	56.72	87.9	56.87	31.8	84.4	101.3	50.29	95.8	52.99	68.4	66.44	
60	210.7	92.5	56.1	91.2	56.72	24.5	88.37	90.1	57.24	90.5	57.05	32.1	84.77	99.7	52.68	97.2	53.87	68.9	67.3	
65	225.8	93.1	58.77	94.1	58.33	32.4	85.65	92.3	59.12	92.8	58.9	38.7	82.86	101.2	55.18	93.4	58.64	69.8	69.09	
70	208.5	85.6	58.94	80.7	61.29	21.3	89.78	86.7	58.42	85.4	59.04	35.6	82.93	94.3	54.77	93.1	55.35	68.9	66.95	
75	221.4	94.2	57.45	84.9	61.65	23.7	89.3	90.4	59.17	91	58.9	46.7	78.91	99.5	55.06	98.7	55.42	69.8	68.47	
80	213.6	89.7	58.01	87.4	59.08	27.8	86.99	89.2	58.24	88.3	58.66	41.2	80.71	98.5	53.89	94.9	55.57	65.5	69.34	
85	205.1	87.4	57.39	85.2	58.46	30.6	85.08	80.7	60.65	79.4	61.29	35.8	82.55	105.2	48.71	90	56.12	64.8	68.41	
90	201.6	82.1	59.28	76.5	62.05	19.2	90.48	75.4	62.6	80.6	60.02	32.4	83.93	103.6	48.61	87	56.85	59.7	70.39	
AVE	215.442	91.06	58.54	88.04	59.68	41.37	82.97	92.42	58.61	91.42	58.84	53.64	77.83	96	56.74	94.9	57.51	71.71	68.37	
SD	85.102	40.4	4.29	38.65	3.05	39.38	8.39	46.74	4.95	45.59	4.27	46.87	8.81	42.61	8.83	44.62	8.86	37.69	9.2	
AVE40-90day	211.691	91.15	56.92	86.06	59.32	30.14	85.74	88.49	58.21	86.51	59.13	42.15	80.12	102.8	51.35	99.81	52.81	75.85	64.15	
SD40-90day	7.906	5.06	2.46	5.39	2.54	13.15	6.36	6.16	2.24	4.18	1.53	11.83	5.44	5.84	3.7	11.3	5.53	16.37	7.84	

ตารางที่ ก.8 แสดงผลการทดลองการบำบัด ชีโอดี (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาวย, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	
0	229.7	61.3	73.31	70.3	69.39	21.3	90.73	60.1	73.84	62.4	72.83	29.1	87.33	49.8	78.32	51.2	77.71	42.1	81.67	
5	232.1	71.3	69.28	74.5	67.9	25.4	89.06	66.1	71.52	69.3	70.14	30.5	86.86	45.9	80.22	50.2	78.37	35.1	84.88	
10	209.3	70	66.56	72.36	65.43	30.6	85.38	69.66	66.72	70.38	66.37	33.66	83.92	64.1	69.37	57.78	72.39	35.64	82.97	
15	203.6	72.5	64.39	76	62.67	30.2	85.17	72.4	64.44	76.5	62.43	34	83.3	69.3	65.96	67.3	66.94	36.5	82.07	
20	432.1	189	56.26	179.3	58.5	100.8	76.67	201.6	53.34	196.2	54.59	110.2	74.5	177.5	58.92	174.1	59.71	124.9	71.09	น้ำผสม1:5
25	457.2	179.5	60.74	184.3	59.69	92.2	79.83	190.8	58.27	198.5	56.58	121.1	73.51	182.7	60.04	187	59.1	142.7	68.79	น้ำผสม1:5
30	801.5	358.9	55.22	341.5	57.39	282.5	64.75	366.3	54.3	378.2	52.81	337.1	57.94	318.2	60.3	335	58.2	251.8	68.58	น้ำผสม1:5
35	872.73	304.4	65.12	308.3	64.67	238.3	72.69	378.4	56.64	356.8	59.12	304.7	65.09	340.4	61	347.8	60.15	284.4	67.41	น้ำผสม1:5
40	389.52	167.4	57.02	158.4	59.33	86.4	77.82	178.2	54.25	151.2	61.18	124.2	68.11	196.2	49.63	203.2	47.83	185.4	52.4	
45	367.74	182.5	50.37	161.5	56.08	110.3	70.01	161.1	56.19	155	57.85	104.8	71.5	209.2	43.11	223.4	39.25	196.7	46.51	
50	391.32	167.4	57.22	142.7	63.53	123	68.57	165.4	57.73	154.1	60.62	127	67.55	194.1	50.4	199.4	49.04	159.3	59.29	
55	366.84	168.9	53.96	165	55.02	115.6	68.49	163.5	55.43	162.4	55.73	119.4	67.45	181.2	50.61	183.5	49.98	163.2	55.51	
60	387.5	175.4	54.74	179.5	53.68	120.4	68.93	176	54.58	176.9	54.35	123.4	68.15	190.6	50.81	188.3	51.41	176.5	54.45	
65	398.5	185	53.58	182.4	54.23	122.5	69.26	187.2	53.02	189.4	52.47	124.5	68.76	195.3	50.99	196.1	50.79	171.8	56.89	
70	409.5	186.5	54.46	185	54.82	118.7	71.01	187	54.33	187.9	54.11	121.1	70.43	201	50.92	203.2	50.38	179.8	56.09	
75	387.2	173.2	55.27	170	56.1	112	71.07	174.9	54.83	174	55.06	113.8	70.61	190.9	50.7	195.1	49.61	179.9	53.54	
80	393.5	172.4	56.19	169.5	56.93	110.9	71.82	173.4	55.93	174.8	55.58	115.7	70.6	186.7	52.55	184.2	53.19	163.1	58.55	
85	399.7	170.5	57.34	173.1	56.69	109.5	72.6	172.4	56.87	173.4	56.62	110.5	72.35	188.9	52.74	187.6	53.06	161.2	59.67	
90	411.7	175.8	57.3	169	58.95	105.8	74.3	176.8	57.06	176.4	57.15	105.7	74.33	193.1	53.1	192.7	53.19	163.5	60.29	
AVE	407.43	170.1	58.86	166.46	59.53	108.23	75.17	174.8	58.38	172.83	58.72	120.55	72.75	177.64	57.35	180.37	56.86	150.19	64.25	
SD	170.45	73.03	6.06	69.71	4.74	64.71	7.55	83.78	6.13	82.23	5.71	79.28	7.68	77.41	10	80.79	10.46	69.54	11.67	
AVE40-90day	391.18	175	55.22	168.74	56.85	112.28	71.26	174.17	55.48	170.5	56.43	117.28	69.99	193.38	50.5	196.06	49.79	172.76	55.75	
SD40-90day	14.361	6.87	2.14	12	2.84	10.31	2.84	8.52	1.42	13.12	2.67	7.76	2.2	7.4	2.68	11.41	3.92	11.97	4.01	

ตารางที่ ก.9 แสดงผลการทดลองการบำบัด ในโตรเจนทั้งหมด(TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นทุเรียน, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	
0	3.45	1.17	66.19	0.89	74.12	0.61	82.21	1.73	49.91	2.01	41.7	0.6	82.53	0.89	74.32	1.17	66.19	0.89	74.32	
5	4.29	1.72	59.85	1.44	66.52	0.6	85.93	2.28	46.74	2.57	40.04	0.86	79.87	1.15	73.29	1.15	73.26	0.59	86.35	
10	3.99	1.99	50.24	1.7	57.35	0.85	78.64	2.56	35.84	2.57	35.74	0.87	78.16	1.42	64.39	1.14	71.37	0.58	85.4	
15	4.26	1.98	53.48	1.44	66.33	1.16	72.76	2.29	46.37	2.01	52.87	0.89	79.05	1.14	73.21	1.16	72.88	0.86	79.85	
20	6.55	1.72	73.8	1.44	78.01	0.88	86.58	2.29	64.97	1.73	73.54	1.15	82.41	1.99	69.66	1.45	77.91	0.86	86.82	น้ำผสม1:5
25	6.23	2.26	63.67	2.53	59.33	1.42	77.15	2.56	58.86	2.84	54.48	1.71	72.56	2.58	58.62	2.3	63.1	1.71	72.53	น้ำผสม1:5
30	7.29	2.27	68.91	1.99	72.74	1.72	76.43	2.29	68.56	2.56	64.85	1.72	76.43	2.57	64.76	2.58	64.6	1.73	76.24	น้ำผสม1:5
35	6.94	2.27	67.32	1.99	71.35	1.73	75.13	2.28	67.21	2.57	63.03	1.74	75.01	2.57	62.94	2.59	62.73	1.75	74.81	น้ำผสม1:5
40	6.39	2.01	68.57	1.46	77.13	1.18	81.56	2.31	63.84	2.59	59.4	1.75	72.6	1.76	72.39	1.49	76.61	0.92	85.61	
45	4.0	2.01	49.88	2.01	49.75	1.19	70.28	2.58	35.52	2.59	35.34	1.2	70.03	1.75	56.22	2.05	48.81	1.22	69.65	
50	4.31	1.98	54.04	2.03	52.97	0.78	82	1.91	55.75	1.9	55.83	0.92	78.54	2.06	52.2	2.06	52.09	1.23	71.44	
55	4.22	1.76	58.36	1.78	57.87	0.74	82.47	1.68	60.18	1.67	60.39	0.77	81.77	2.35	44.17	2.36	44.12	1.52	63.99	
60	4.11	1.76	57.22	1.5	63.64	0.67	83.72	1.63	60.38	1.49	63.64	0.45	89.01	2.36	42.52	2.08	49.31	1.52	63.1	
65	4.04	1.78	56.05	1.79	55.71	0.68	83.06	1.51	62.73	1.62	59.98	0.78	80.72	2.09	48.33	2.09	48.26	1.24	69.29	
70	3.99	1.51	62.23	1.5	62.53	0.61	84.79	1.2	70.07	1.2	69.85	0.59	85.19	2.1	47.43	2.1	47.38	1.25	68.62	
75	4.28	1.85	56.67	1.87	56.38	0.67	84.46	1.39	67.56	1.63	61.81	0.68	84.01	2.37	44.55	2.37	44.64	1.09	74.59	
80	4.26	1.6	62.45	1.61	62.26	0.72	83.12	1.49	64.9	1.25	70.63	0.7	83.66	2.4	43.64	2.12	50.13	1.27	70.2	
85	4.27	1.91	55.15	1.71	59.99	0.87	79.55	1.25	70.67	1.27	70.34	0.53	87.54	2.32	45.7	2.45	42.72	1.31	69.26	
90	4.24	1.65	61.14	1.94	54.37	0.81	81	1.58	62.85	1.28	69.76	0.66	84.56	2.33	45.04	2.46	42.1	1.32	68.92	
AVE	4.795	1.85	60.27	1.72	63.07	0.94	80.57	1.94	58.57	1.97	58.06	0.98	80.19	2.01	57.02	1.96	57.80	1.20	74.26	
SD	1.191	0.28	6.65	0.35	8.39	0.36	4.47	0.47	10.81	0.56	12.03	0.44	5.19	0.52	11.89	0.52	12.60	0.35	7.38	
AVE40-90day	4.373	1.8	58.34	1.74	59.33	0.81	81.46	1.68	61.31	1.68	61.54	0.82	81.6	2.17	49.29	2.15	49.65	1.26	70.43	

ตารางที่ ก.10 แสดงผลการทดลองการบำบัด อินทรีย์ในโตรเจน (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถ่าย, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	
0	2.52	0.84	66.67	0.56	77.78	0.56	77.78	1.4	44.44	1.68	33.33	0.56	77.78	0.36	85.71	0.64	74.6	0.56	77.78	
5	3.64	1.4	61.54	1.12	69.23	0.28	92.31	1.76	51.65	2.04	43.96	0.56	84.62	0.84	76.92	0.84	76.92	0.28	92.31	
10	3.36	1.68	50.0	1.4	58.33	0.56	83.33	2.24	33.33	2.24	33.33	0.56	83.33	0.92	72.62	0.64	80.95	0.28	91.67	
15	3.36	1.4	58.33	1.12	66.67	0.84	75	1.76	47.62	1.68	50	0.84	75	0.64	80.95	0.84	75	0.56	83.33	
20	5.52	1.4	74.64	1.12	79.71	0.84	84.78	1.76	68.12	1.4	74.64	0.84	84.78	1.44	73.91	0.84	84.78	0.56	89.86	น้ำผสม1:5
25	5.32	1.68	68.42	1.96	63.16	1.12	78.95	2.24	57.89	2.52	52.63	1.68	68.42	1.96	63.16	1.68	68.42	1.4	73.68	น้ำผสม1:5
30	6.37	1.68	73.63	1.4	78.02	1.4	78.02	1.96	69.23	2.24	64.84	1.68	73.63	1.96	69.23	1.96	69.23	1.56	75.51	น้ำผสม1:5
35	5.99	1.96	67.28	1.68	71.95	1.68	71.95	1.76	70.62	2.24	62.6	1.4	76.63	1.96	67.28	1.96	67.28	1.4	76.63	น้ำผสม1:5
40	5.47	1.68	69.29	1.12	79.52	0.84	84.64	1.86	66	2.14	60.88	1.4	74.41	1.0	81.72	0.74	86.47	0.72	86.84	
45	3.36	1.68	50.0	1.68	50.0	0.84	75.0	2.24	33.33	2.24	33.33	1.0	70.24	1.2	64.29	1.48	55.95	0.84	75	
50	3.39	1.51	55.46	1.56	53.98	0.56	83.48	1.38	59.29	1.47	56.64	0.72	78.76	1.44	57.52	1.44	57.52	1.0	70.5	
55	3.19	1.26	60.5	1.31	58.93	0.64	79.94	1.2	62.38	1.12	64.89	0.68	78.68	1.56	51.1	1.56	51.1	1.14	64.26	
60	3.21	1.2	62.62	1.0	68.85	0.46	85.67	1.08	66.36	0.9	71.96	0.26	91.9	1.86	42.06	1.58	50.78	1.2	62.62	
65	3.15	1.29	59.05	1.32	58.1	0.44	86.03	1.07	66.03	1.2	61.9	0.56	82.22	1.58	49.84	1.58	49.84	0.9	71.43	
70	3.1	0.92	70.32	1.0	67.74	0.32	89.68	0.64	79.35	0.72	76.77	0.36	88.39	1.48	52.26	1.48	52.26	0.84	72.9	
75	3.25	1.18	63.69	1.2	63.08	0.33	89.85	0.81	75.08	1.04	68	0.46	85.85	1.72	47.08	1.72	47.08	0.68	79.08	
80	3.23	1.02	68.42	1.0	69.04	0.48	85.14	0.9	72.14	0.72	77.71	0.56	82.66	1.79	44.58	1.58	51.08	0.84	73.99	
85	3.24	1.33	58.95	1.15	64.51	0.56	82.72	0.74	77.16	0.77	76.23	0.26	91.98	1.6	50.62	1.72	46.91	0.84	74.07	
90	3.22	1.02	68.32	1.38	57.14	0.36	88.82	1.04	67.7	0.72	77.64	0.38	88.2	1.6	50.31	1.76	45.34	0.84	73.91	
AVE	3.89	1.38	63.53	1.27	66.09	0.69	82.79	1.47	61.46	1.53	60.07	0.78	80.92	1.42	62.17	1.37	62.71	0.87	77.12	
SD	1.17	0.3	7.12	0.31	8.79	0.38	5.61	0.53	13.62	0.63	15.29	0.45	6.89	0.47	13.84	0.45	14	0.36	8.37	
AVE40-90day	3.44	1.28	62.42	1.25	62.81	0.53	84.63	1.18	65.89	1.19	66	0.6	83.03	1.53	53.76	1.51	54.03	0.89	73.15	
SD40-90day	0.68	0.26	6.42	0.23	8.33	0.18	4.4	0.49	12.45	0.55	13.16	0.34	7.06	0.25	11.04	0.28	11.36	0.16	6.54	

ตารางที่ ก.11 แสดงผลการทดลองการบำบัด ที่เคเอ็น(TKN) (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาญ, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	
0	3.36	1.12	66.67	0.84	75	0.56	83.33	1.68	50	1.96	41.67	0.56	83.33	0.84	75	1.12	66.67	0.84	75	
5	4.2	1.68	60	1.4	66.67	0.56	86.67	2.24	46.67	2.52	40	0.84	80	1.12	73.33	1.12	73.33	0.56	86.67	
10	3.92	1.96	50	1.68	57.14	0.84	78.57	2.52	35.71	2.52	35.71	0.84	78.57	1.4	64.29	1.12	71.43	0.56	85.71	
15	4.2	1.96	53.33	1.4	66.67	1.12	73.33	2.24	46.67	1.96	53.33	0.84	80	1.12	73.33	1.12	73.33	0.84	80	
20	6.48	1.68	74.07	1.4	78.4	0.84	87.04	2.24	65.43	1.68	74.07	1.12	82.72	1.96	69.75	1.4	78.4	0.84	87.04	น้ำผสม1:5
25	6.16	2.24	63.64	2.52	59.09	1.4	77.27	2.52	59.09	2.8	54.55	1.68	72.73	2.52	59.09	2.24	63.64	1.68	72.73	น้ำผสม1:5
30	7.21	2.24	68.93	1.96	72.82	1.68	76.7	2.24	68.93	2.52	65.05	1.68	76.7	2.52	65.05	2.52	65.05	1.68	76.7	น้ำผสม1:5
35	6.89	2.24	67.49	1.96	71.55	1.68	75.62	2.24	67.49	2.52	63.43	1.68	75.62	2.52	63.43	2.52	63.43	1.68	75.62	น้ำผสม1:5
40	6.31	1.96	68.94	1.4	77.81	1.12	82.25	2.24	64.5	2.52	60.06	1.68	73.38	1.68	73.38	1.42	77.5	0.84	86.69	
45	3.92	1.96	50	1.96	50	1.12	71.43	2.52	35.71	2.52	35.71	1.12	71.43	1.68	57.14	1.96	50	1.12	71.43	
50	4.23	1.93	54.37	1.96	53.66	0.68	83.92	1.86	56.03	1.82	56.97	0.84	80.14	1.96	53.66	1.96	53.66	1.12	73.52	
55	4.15	1.68	59.52	1.69	59.28	0.64	84.58	1.62	60.96	1.6	61.45	0.68	83.61	2.24	46.02	2.24	46.02	1.42	65.78	
60	4.05	1.68	58.52	1.4	65.43	0.56	86.17	1.56	61.48	1.4	65.43	0.36	91.11	2.24	44.69	1.96	51.6	1.42	64.94	
65	3.99	1.69	57.64	1.68	57.89	0.56	85.96	1.42	64.41	1.52	61.9	0.68	82.96	1.96	50.88	1.96	50.88	1.12	71.93	
70	3.94	1.4	64.47	1.4	64.47	0.42	89.34	1.12	71.57	1.12	71.57	0.48	87.82	1.96	50.25	1.96	50.25	1.12	71.57	
75	4.21	1.68	60.1	1.68	60.1	0.45	89.31	1.29	69.36	1.52	63.9	0.56	86.7	2.24	46.79	2.24	46.79	0.96	77.2	
80	4.19	1.4	66.59	1.4	66.59	0.48	88.54	1.38	67.06	1.12	73.27	0.56	86.63	2.24	46.54	1.96	53.22	1.12	73.27	
85	4.2	1.68	60	1.46	65.24	0.56	86.67	1.12	73.33	1.12	73.33	0.38	90.95	2.12	49.52	2.24	46.67	1.12	73.33	
90	4.18	1.4	66.51	1.68	59.81	0.48	88.52	1.42	66.03	1.12	73.21	0.48	88.52	2.12	49.28	2.24	46.41	1.12	73.21	
AVE	4.73	1.77	61.62	1.62	64.61	0.83	82.91	1.87	59.5	1.89	59.19	0.9	81.73	1.92	58.5	1.86	59.38	1.11	75.91	
SD	1.19	0.31	6.71	0.35	7.95	0.41	5.68	0.49	11.4	0.59	12.77	0.47	6.02	0.49	10.81	0.49	11.51	0.34	6.61	
AVE40-90day	4.31	1.68	60.6	1.61	61.84	0.64	85.15	1.6	62.77	1.58	63.35	0.71	83.93	2.04	51.65	2.01	52.09	1.13	72.99	
SD40-90day	0.67	0.21	5.67	0.22	7.38	0.25	5.1	0.45	10.25	0.52	10.9	0.39	6.6	0.21	8.05	0.24	8.86	0.17	5.73	

ตารางที่ ก.12 แสดงผลการทดลองการบำบัด แอมโมเนียไนโตรเจน (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาเฒ่า, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	
0	0.84	0.28	66.67	0.28	66.67	0	100	0.28	66.67	0.28	66.67	0	100	0.48	42.86	0.48	42.86	0.28	66.67	
5	0.56	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.48	14.29	0.48	14.29	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.28	50	
10	0.56	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.48	14.29	0.48	14.29	0.28	50	
15	0.84	0.56	33.33	0.28	66.67	0.28	66.67	0.48	42.86	0.28	66.67	0	100	0.48	42.86	0.28	66.67	0.28	66.67	
20	0.96	0.28	70.83	0.28	70.83	0	100	0.48	50	0.28	70.83	0.28	70.83	0.52	45.83	0.56	41.67	0.28	70.83	น้ำผสม1:5
25	0.84	0.56	33.33	0.56	33.33	0.28	66.67	0.28	66.67	0.28	66.67	0	100	0.56	33.33	0.56	33.33	0.28	66.67	น้ำผสม1:5
30	0.84	0.56	33.33	0.56	33.33	0.28	66.67	0.28	66.67	0.28	66.67	0	100	0.56	33.33	0.56	33.33	0.12	85.71	น้ำผสม1:5
35	0.9	0.28	68.89	0.28	68.89	0	100	0.48	46.67	0.28	68.89	0.28	68.89	0.56	37.78	0.56	37.78	0.28	68.89	น้ำผสม1:5
40	0.84	0.28	66.67	0.28	66.67	0.28	66.67	0.38	54.76	0.38	54.76	0.28	66.67	0.68	19.05	0.68	19.05	0.12	85.71	
45	0.56	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.12	78.57	0.48	14.29	0.48	14.29	0.28	50	
50	0.84	0.42	50	0.4	52.38	0.12	85.71	0.48	42.86	0.35	58.33	0.12	85.71	0.52	38.1	0.52	38.1	0.12	85.71	
55	0.96	0.42	56.25	0.38	60.42	0	100	0.42	56.25	0.48	50	0	100	0.68	29.17	0.68	29.17	0.28	70.83	
60	0.84	0.48	42.86	0.4	52.38	0.1	88.1	0.48	42.86	0.5	40.48	0.1	88.1	0.38	54.76	0.38	54.76	0.22	73.81	
65	0.84	0.4	52.38	0.36	57.14	0.12	85.71	0.35	58.33	0.32	61.9	0.12	85.71	0.38	54.76	0.38	54.76	0.22	73.81	
70	0.84	0.48	42.86	0.4	52.38	0.1	88.1	0.48	42.86	0.4	52.38	0.12	85.71	0.48	42.86	0.48	42.86	0.28	66.67	
75	0.96	0.5	47.92	0.48	50	0.12	87.5	0.48	50	0.48	50	0.1	89.58	0.52	45.83	0.52	45.83	0.28	70.83	
80	0.96	0.38	60.42	0.4	58.33	0	100	0.48	50	0.4	58.33	0	100	0.45	53.13	0.38	60.42	0.28	70.83	
85	0.96	0.35	63.54	0.31	67.71	0	100	0.38	60.42	0.35	63.54	0.12	87.5	0.52	45.83	0.52	45.83	0.28	70.83	
90	0.96	0.38	60.42	0.3	68.75	0.12	87.5	0.38	60.42	0.4	58.33	0.1	89.58	0.52	45.83	0.48	50	0.28	70.83	
AVE	0.84	0.39	52.62	0.36	56.63	0.14	81.02	0.4	51.19	0.36	56.25	0.12	84.05	0.5	39.15	0.49	40.79	0.25	69.23	
SD	0.13	0.11	12.02	0.09	11.2	0.12	18.41	0.09	12.12	0.08	13.1	0.11	16.12	0.09	12.54	0.11	14.56	0.06	10.56	
AVE40-90day	0.87	0.41	52.66	0.37	56.95	0.10	87.26	0.42	51.40	0.40	54.33	0.09	89.05	0.49	42.46	0.48	43.60	0.25	70.42	
SD40-90day	0.12	0.07	7.31	0.06	6.90	0.08	14.46	0.07	7.14	0.07	7.01	0.05	6.56	0.09	12.65	0.09	13.67	0.05	8.75	

ตารางที่ ก.13 แสดงผลการทดลองการบำบัด ไนเตรทไนโตรเจน (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาวยี่, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	
0	0.085	0.045	47.06	0.052	38.82	0.052	38.82	0.046	45.88	0.048	43.53	0.042	50.59	0.045	47.06	0.045	47.06	0.045	47.06	
5	0.085	0.041	51.76	0.035	58.82	0.042	50.59	0.042	50.59	0.05	41.18	0.022	74.12	0.025	70.59	0.025	70.59	0.025	70.59	
10	0.072	0.027	62.5	0.022	69.44	0.012	83.33	0.042	41.67	0.046	36.11	0.031	56.94	0.022	69.44	0.022	69.44	0.022	69.44	
15	0.061	0.022	63.93	0.035	42.62	0.04	34.43	0.045	26.23	0.049	19.67	0.052	14.75	0.022	63.93	0.035	42.62	0.019	68.85	
20	0.068	0.035	48.53	0.04	41.18	0.038	44.12	0.053	22.06	0.053	22.06	0.032	52.94	0.027	60.29	0.046	32.35	0.023	66.18	น้ำผสม1:5
25	0.067	0.022	67.16	0.012	82.09	0.022	67.16	0.042	37.31	0.035	47.76	0.028	58.21	0.056	16.42	0.057	14.93	0.031	53.73	น้ำผสม1:5
30	0.078	0.026	66.67	0.026	66.67	0.038	51.28	0.051	34.62	0.042	46.15	0.037	52.56	0.048	38.46	0.059	24.36	0.052	33.33	น้ำผสม1:5
35	0.052	0.028	46.15	0.028	46.15	0.046	11.54	0.036	30.77	0.047	9.62	0.054	-3.85	0.053	-1.92	0.067	-28.85	0.069	-32.69	น้ำผสม1:5
40	0.075	0.046	38.67	0.06	20	0.057	24	0.068	9.33	0.073	2.67	0.069	8	0.083	-10.67	0.073	2.67	0.079	-5.33	
45	0.083	0.047	43.37	0.052	37.35	0.069	16.87	0.062	25.3	0.068	18.07	0.079	4.82	0.072	13.25	0.089	-7.23	0.094	-13.25	
50	0.075	0.049	34.67	0.064	14.67	0.094	-25.33	0.045	40	0.082	-9.33	0.083	-10.67	0.098	-30.67	0.103	-37.33	0.109	-45.33	
55	0.065	0.075	-15.38	0.086	-32.31	0.098	-50.77	0.059	9.23	0.069	-6.15	0.087	-33.85	0.113	-73.85	0.115	-76.92	0.098	-50.77	
60	0.06	0.078	-30	0.095	-58.33	0.108	-80	0.068	-13.33	0.094	-56.67	0.092	-53.33	0.123	-105	0.123	-105	0.096	-60	
65	0.052	0.086	-65.38	0.11	-111.54	0.124	-138.46	0.086	-65.38	0.098	-88.46	0.098	-88.46	0.129	-148.08	0.131	-151.92	0.121	-132.69	
70	0.052	0.108	-107.69	0.096	-84.62	0.186	-257.69	0.075	-44.23	0.083	-59.62	0.11	-111.54	0.138	-165.38	0.141	-171.15	0.132	-153.85	
75	0.068	0.173	-154.41	0.186	-173.53	0.215	-216.18	0.097	-42.65	0.114	-67.65	0.123	-80.88	0.132	-94.12	0.129	-89.71	0.126	-85.29	
80	0.065	0.198	-204.62	0.206	-216.92	0.237	-264.62	0.114	-75.38	0.129	-98.46	0.134	-106.15	0.158	-143.08	0.162	-149.23	0.147	-126.15	
85	0.068	0.234	-244.12	0.248	-264.71	0.312	-358.82	0.132	-94.12	0.145	-113.24	0.152	-123.53	0.198	-191.18	0.204	-200	0.191	-180.88	
90	0.062	0.248	-300	0.256	-312.9	0.325	-424.19	0.156	-151.61	0.163	-162.9	0.174	-180.65	0.212	-241.94	0.216	-248.39	0.198	-219.35	
AVE	0.0681	0.0836	-29.01	0.0899	-82.31	0.1113	-131.72	0.0694	-25.96	0.0783	-45.07	0.0789	-55.96	0.0923	-88.78	0.124	-95.29	0.1163	-82.48	
SD	0.0104	0.0739	117.2	0.0772	125.73	0.0971	157.77	0.0336	58.85	0.0371	60.89	0.0446	65.97	0.0589	86.8	0.0575	84.74	0.0555	74.99	
AVE40-90day	0.0659	0.122	-91.35	0.1326	-107.53	0.1659	-161.38	0.0875	-36.62	0.1016	-58.34	0.1092	-70.57	0.1324	-108.24	0.1351	-112.2	0.1265	-97.54	

ตารางที่ ก.14 แสดงผลการทดลองการบำบัด ไนโตรที่ไนโตรเจน (TS1-1, 1-2, 1-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถ่าย, CS3-1, 3-2, 3-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ US5-1, 5-2, 5-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีทรายเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TS1-1		TS1-2		TS1-3		CS3-1		CS3-2		CS3-3		US5-1		US5-2		US5-3		หมายเหตุ
		NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	
0	0.0011	0	100	0	100	0.001	9.09	0	100	0.001	9.09	0	100	0	100	0	100	0	100	
5	0.0012	0	100	0	100	0.001	16.67	0.001	16.67	0	100	0.001	16.67	0	100	0.001	16.67	0	100	
10	0.001	0	100	0.001	0	0.001	0	0	100	0	100	0.001	0	0	100	0.001	0	0.001	0	
15	0.0013	0.001	23.08	0	100	0.001	23.08	0.001	23.08	0	100	0.001	23.08	0	100	0.001	23.08	0	100	
20	0.001	0.001	0	0	100	0.001	0	0.001	0	0	100	0	100	0	100	0.001	0	0	100	น้ำผสม1:5
25	0.0012	0.001	16.67	0.001	16.67	0.0011	8.33	0	100	0	100	0.0012	0	0.001	16.67	0.001	16.67	0	100	น้ำผสม1:5
30	0.0011	0	100	0.0008	27.27	0	100	0.001	9.09	0	100	0.001	9.09	0.001	9.09	0.001	9.09	0	100	น้ำผสม1:5
35	0.0013	0.0008	38.46	0.001	23.08	0.001	23.08	0.001	23.08	0	100	0.001	23.08	0	100	0.001	23.08	0	100	น้ำผสม1:5
40	0.001	0.001	0	0.0006	40	0.0003	70	0.001	0	0	100	0.001	0	0	100	0.001	0	0	100	
45	0.0011	0	100	0	100	0.001	9.09	0	100	0.001	9.09	0.001	9.09	0.0008	27.27	0.0008	27.27	0.0011	0	
50	0.001	0	100	0.001	0	0.0012	-20	0.0006	40	0	100	0.0011	-10	0.0004	60	0	100	0.001	0	
55	0.001	0.0006	40	0	100	0.001	0	0	100	0.0008	20	0.0014	-40	0.0006	40	0.001	0	0	100	
60	0.0011	0.0008	27.27	0	100	0.0013	-18.18	0.001	9.09	0.0006	45.45	0	100	0	100	0.0008	27.27	0.0008	27.27	
65	0.001	0.001	0	0.0008	20	0.0008	20	0.0007	30	0	100	0.0014	-40	0	100	0.001	0	0.0006	40	
70	0.001	0	100	0	100	0.0014	-40	0	100	0.001	0	0.0012	-20	0.001	0	0	100	0.001	0	
75	0.001	0.001	0	0.0006	40	0	100	0.001	0	0	100	0.0011	-10	0.0008	20	0	100	0.0013	-30	
80	0.0012	0	100	0.0004	66.67	0.0014	-16.67	0	100	0.001	16.67	0.0014	-16.67	0.001	16.67	0.0006	50	0.0012	0	
85	0.001	0.0006	40	0	100	0.0011	-10	0	100	0.0011	-10	0	100	0	100	0.0013	-30	0.0011	-10	
90	0.001	0.0007	30	0	100	0.0013	-30	0.0003	70	0	100	0.0011	-10	0	100	0.0008	20	0.0008	20	
AVE	0.00108	0.0005	53.45	0.00038	62.85	0.00094	14.41	0.00051	52.4	0.00034	60.09	0.00089	7.28	0.00035	59.46	0.00072	32.82	0.00068	34.41	
SD	0.00011	0.00046	42.73	0.00044	38.7	0.00041	47.28	0.00048	43.2	0.00047	46.53	0.00049	44.9	0.00044	41.57	0.00042	42.72	0.00053	48.61	

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองประสิทธิภาพพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสีย
อุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลเมื่อมีลักษณะการใช้ตัวกลางที่เป็นกรวด

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการทดลองความเป็นกรดต่าง (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถ้ำ, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีกรวดเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		PH	%Efl.	PH	%Efl.	PH	%Efl.	PH	%Efl.	PH	%Efl.	PH	%Efl.	PH	%Efl.	PH	%Efl.	PH	%Efl.	
0	5.27	6.91	-31.12	7.09	-34.54	6.99	-32.64	7.05	-33.78	6.95	-31.88	7.01	-33.02	7.12	-35.1	7.18	-36.24	7.35	-39.47	
5	5.25	7.1	-35.24	7.09	-35.05	6.96	-32.57	6.96	-32.57	6.91	-31.62	6.57	-25.14	7.28	-38.67	7.27	-38.48	7.21	-37.33	
10	5.25	6.99	-33.14	7.09	-35.05	6.96	-32.57	6.96	-32.57	6.95	-32.38	6.91	-31.62	7.28	-38.67	7.27	-38.48	7.47	-42.29	
15	5.18	7.12	-37.45	7.09	-36.87	7.12	-37.45	6.96	-34.36	7.01	-35.33	7.01	-35.33	7.21	-39.19	7.25	-39.96	7.31	-41.12	
20	5.18	7.02	-35.52	7.01	-35.33	7.13	-37.64	6.87	-32.63	6.98	-34.75	6.7	-29.34	7.1	-37.07	7.09	-36.87	7.12	-37.45	น้ำผสม1:5
25	5.11	7.02	-37.38	7.06	-38.16	6.92	-35.42	6.97	-36.4	6.99	-36.79	6.89	-34.83	7.03	-37.57	7.05	-37.96	6.99	-36.79	น้ำผสม1:5
30	5.17	6.83	-32.11	6.95	-34.43	6.82	-31.91	6.98	-35.01	6.99	-35.2	6.97	-34.82	6.98	-35.01	6.92	-33.85	7.08	-36.94	น้ำผสม1:5
35	5.3	6.99	-31.89	6.97	-31.51	7.15	-34.91	7.13	-34.53	7.13	-34.53	7.13	-34.53	7.23	-36.42	7.34	-38.49	7.34	-38.49	น้ำผสม1:5
40	5.24	6.8	-29.77	6.84	-30.53	6.65	-26.91	6.32	-20.61	6.34	-20.99	6.3	-20.23	6.89	-31.49	6.88	-31.3	6.9	-31.68	
45	5.51	6.92	-25.59	7.03	-27.59	6.73	-22.14	6.71	-21.78	6.62	-20.15	6.55	-18.87	6.53	-18.51	6.54	-18.69	6.52	-18.33	
50	5.67	6.75	-19.05	6.78	-19.58	6.73	-18.69	6.85	-20.81	6.9	-21.69	6.65	-17.28	6.85	-20.81	6.82	-20.28	6.75	-19.05	
55	5.24	6.75	-28.82	6.6	-25.95	6.7	-27.86	6.75	-28.82	6.8	-29.77	6.7	-27.86	6.91	-31.87	6.93	-32.25	6.81	-29.96	
60	5.26	6.85	-30.23	6.83	-29.85	6.72	-27.76	6.72	-27.76	6.67	-26.81	6.53	-24.14	6.78	-28.9	6.76	-28.52	6.69	-27.19	
65	5.31	6.93	-30.51	6.87	-29.38	6.74	-26.93	6.79	-27.87	6.76	-27.31	6.58	-23.92	6.73	-26.74	6.69	-25.99	6.68	-25.8	
70	5.24	6.86	-30.92	6.88	-31.3	6.63	-26.53	6.69	-27.67	6.68	-27.48	6.48	-23.66	6.54	-24.81	6.61	-26.15	6.63	-26.53	
75	5.28	6.83	-29.36	6.85	-29.73	6.67	-26.33	6.73	-27.46	6.68	-26.52	6.51	-23.3	6.68	-26.52	6.67	-26.33	6.63	-25.57	
80	5.3	6.87	-29.62	6.82	-28.68	6.58	-24.15	6.78	-27.92	6.73	-26.98	6.63	-25.09	6.73	-26.98	6.69	-26.23	6.69	-26.23	
85	5.2	6.85	-31.73	6.79	-30.58	6.61	-27.12	6.67	-28.27	6.64	-27.69	6.48	-24.62	6.65	-27.88	6.68	-28.46	6.64	-27.69	
90	5.27	6.79	-28.84	6.83	-29.6	6.59	-25.05	6.71	-27.32	6.66	-26.38	6.47	-22.77	6.67	-26.57	6.71	-27.32	6.72	-27.51	
AVE	5.275	6.9	-30.96	6.92	-31.25	6.81	-29.19	6.82	-29.38	6.81	-29.17	6.69	-26.86	6.9	-30.99	6.91	-31.15	6.92	-31.34	
SD	0.125	0.11	4.19	0.14	4.36	0.19	5.21	0.18	4.77	0.19	5.02	0.23	5.73	0.25	6.3	0.26	6.47	0.3	7.26	

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการทดลองการบำบัดดินหุภูมิ (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาญี, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีการวัดเป็นตัวอย่าง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	Temp	%Eff.	
0	28.3	29.1	-2.83	28.9	-2.12	29.9	-5.65	28.5	-0.71	28.9	-2.12	30.4	-7.42	28.7	-1.41	29.1	-2.83	30.4	-7.42	
5	29.4	29.8	-1.36	29.6	-0.68	31	-5.44	28.5	3.06	29	1.36	30.5	-3.74	28.7	2.38	28.9	1.7	30.5	-3.74	
10	29.4	29.7	-1.02	29.6	-0.68	31.4	-6.8	28.5	3.06	29	1.36	30.9	-5.1	28.7	2.38	28.8	2.04	30.7	-4.42	
15	28.7	29.6	-3.14	29.4	-2.44	31.2	-8.71	29.5	-2.79	29.6	-3.14	30.9	-7.67	29.4	-2.44	29.3	-2.09	30.8	-7.32	
20	28.7	28.7	0	28.6	0.35	29.8	-3.83	27.9	2.79	28.1	2.09	29.3	-2.09	28.7	0	28.8	-0.35	30	-4.53	น้ำผสม1:5
25	28.7	28.5	0.7	28.6	0.35	29.8	-3.83	29.2	-1.74	29.1	-1.39	30.1	-4.88	29.8	-3.83	30	-4.53	31	-8.01	น้ำผสม1:5
30	28.7	29.5	-2.79	29.3	-2.09	29.6	-3.14	29.2	-1.74	29	-1.05	29.9	-4.18	29.7	-3.48	29.9	-4.18	31.2	-8.71	น้ำผสม1:5
35	28.7	29.8	-3.83	29.7	-3.48	30.4	-5.92	28.5	0.7	29.2	-1.74	29.9	-4.18	28.4	1.05	28.1	2.09	31.2	-8.71	น้ำผสม1:5
40	32.2	29.8	7.45	29.4	8.7	31.1	3.42	28.7	10.87	29	9.94	29.7	7.76	28.6	11.18	28.3	12.11	29.4	8.7	
45	31.3	29.8	4.79	29.8	4.79	30.6	2.24	28.6	8.63	29	7.35	30	4.15	28	10.54	28.3	9.58	29.3	6.39	
50	30.2	29	3.97	29	3.97	30.1	0.33	29	3.97	29.3	2.98	29.8	1.32	28.5	5.63	29	3.97	29.5	2.32	
55	30.5	29.2	4.26	29.1	4.59	29.5	3.28	29.6	2.95	29.8	2.3	30.5	0	28.6	6.23	29.3	3.93	30	1.64	
60	30.1	29.6	1.66	29.8	1	30.4	-1	29.1	3.32	29	3.65	30.2	-0.33	28.9	3.99	29.1	3.32	30.2	-0.33	
65	29.8	29.1	2.35	29.2	2.01	30.3	-1.68	29.2	2.01	29.1	2.35	30.1	-1.01	29	2.68	29.1	2.35	29.7	0.34	
70	29.7	28.9	2.69	29.2	1.68	30.1	-1.35	29.1	2.02	29	2.36	29.7	0	29.1	2.02	28.9	2.69	29.6	0.34	
75	30.2	30.1	0.33	30	0.66	30.7	-1.66	29.6	1.99	29.7	1.66	30.1	0.33	29.2	3.31	29.1	3.64	30	0.66	
80	30.2	29.7	1.66	29.9	0.99	31.1	-2.98	29.7	1.66	29.8	1.32	30.4	-0.66	29.4	2.65	29.5	2.32	30.3	-0.33	
85	30.4	30.1	0.99	30.2	0.66	31.5	-3.62	29.4	3.29	29.6	2.63	30.3	0.33	29.8	1.97	29.6	2.63	30.1	0.99	
90	31.2	30.5	2.24	30.6	1.92	32	-2.56	30.3	2.88	30.3	2.88	31.1	0.32	30.4	2.56	30.4	2.56	31.1	0.32	
AVE	29.811	29.5	0.95	29.47	1.06	30.55	-2.57	29.06	2.43	29.24	1.83	30.2	-1.42	29.03	2.5	29.13	2.16	30.26	-1.68	
SD	1.055	0.52	3.01	0.52	2.94	0.71	3.3	0.57	3.26	0.48	3.13	0.46	3.8	0.6	4.02	0.59	4.08	0.61	5.01	

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองการบำบัดออกซิเจนละลายที่ระดับ 10 ซม. จากระดับน้ำ (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถ่าย, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีการวัดเป็น ตัวยกกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	DO ¹⁰	%Eff.	
0	2.4	2.3	4.17	2.1	12.5	*	-	3.1	-29.17	2.9	-20.83	*	-	2.9	-20.83	2.8	-16.67	*	-	* คือไม่มีจุดที่วัด
5	1.8	1.8	0	1.9	-5.56	*	-	2	-11.11	2	-11.11	*	-	3.8	-111.11	3.9	-116.67	*	-	** คือช่วงเริ่มระบบ
10	1.9	1.7	10.53	2	-5.26	*	-	2	-5.26	2	-5.26	*	-	3.8	-100	3.9	-105.26	*	-	
15	1.6	2.1	-31.25	2.1	-31.25	*	-	2	-25	2	-25	*	-	1.9	-18.75	1.9	-18.75	*	-	
20	1.2	1.6	-33.33	1.6	-33.33	*	-	1.7	-41.67	1.7	-41.67	*	-	1.3	-8.33	0.9	25	*	-	น้ำผสม1:5
25	1.2	0.2	83.33	0.2	83.33	*	-	0.3	75	0.2	83.33	*	-	0.9	25	0.8	33.33	*	-	น้ำผสม1:5
30	1.6	0.2	87.5	0.2	87.5	*	-	0.1	93.75	0.1	93.75	*	-	0.2	87.5	0.2	87.5	*	-	น้ำผสม1:5
35	1.6	0.2	87.5	0.2	87.5	*	-	0.2	87.5	0.2	87.5	*	-	0.2	87.5	0.2	87.5	*	-	น้ำผสม1:5
40	1.4	0.2	85.71	0.2	85.71	*	-	0.2	85.71	0.2	85.71	*	-	0.2	85.71	0.2	85.71	*	-	
45	1.1	0.3	72.73	0.5	54.55	*	-	0.2	81.82	0.3	72.73	*	-	0.3	72.73	0.3	72.73	*	-	
50	1.1	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	0.1	90.91	0.2	81.82	*	-	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	
55	1.1	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	
60	1	0.2	80	0.2	80	*	-	0.2	80	0.1	90	*	-	0.2	80	0.2	80	*	-	
65	1.2	0.2	83.33	0.2	83.33	*	-	0.2	83.33	0.2	83.33	*	-	0.2	83.33	0.2	83.33	*	-	
70	1.3	0.2	84.62	0.2	84.62	*	-	0.2	84.62	0.1	92.31	*	-	0.2	84.62	0.2	84.62	*	-	
75	1.1	0.1	90.91	0.1	90.91	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	*	-	0.1	90.91	0.1	90.91	*	-	
80	0.9	0.1	88.89	0.2	77.78	*	-	0.1	88.89	0.1	88.89	*	-	0.1	88.89	0.1	88.89	*	-	
85	1.1	0.2	81.82	0.2	81.82	*	-	0.2	81.82	0.1	90.91	*	-	0.1	90.91	0.2	81.82	*	-	
90	1.3	0.2	84.62	0.1	92.31	*	-	0.2	84.62	0.2	84.62	*	-	0.2	84.62	0.2	84.62	*	-	
AVE	1.363	0.64	59.19	0.66	57.37	-	-	0.7	56.76	0.68	58.09	-	-	0.89	45.6	0.88	46.96	-	-	
SD	0.373	0.79	43.74	0.79	44.57	-	-	0.93	49.29	0.91	49.1	-	-	1.26	65.73	1.27	65.41	-	-	

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองการบำบัดออกซิเจนละลายที่ระดับ 25 ซม. จากระดับน้ำ (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถ่าย, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีการวัดเป็น ตัวยกกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	DO ²⁵	%Eff.	
0	2.4	**	-	**	-	1.6	33.33	**	-	**	-	2.3	4.17	**	-	**	-	3.6	-50	* คือ ไม่มีจุดที่วัด
5	1.8	1.3	27.78	1.5	16.67	1	44.44	1.6	11.11	1.5	16.67	1.8	0	3.8	-111.11	3.1	-72.22	3.2	-77.78	** คือ ช่วงเริ่มระบบ
10	1.9	0.7	63.16	1.6	15.79	0.8	57.89	2	-5.26	1.9	0	1.2	36.84	4	-110.53	3.8	-100	3.8	-100	
15	1.6	1.5	6.25	1.5	6.25	1.1	31.25	1.6	0	1.5	6.25	1.2	25	1.7	-6.25	1.3	18.75	1.1	31.25	
20	1.2	1.2	0	1.2	0	0.8	33.33	1.1	8.33	1.1	8.33	0.9	25	1.1	8.33	0.8	33.33	0.5	58.33	น้ำผสม 1:5
25	1.2	0.3	75	0.3	75	0.4	66.67	0.5	58.33	0.4	66.67	0.5	58.33	0.6	50	0.3	75	0.7	41.67	น้ำผสม 1:5
30	1.6	0.2	87.5	0.2	87.5	0.2	87.5	0.2	87.5	0.2	87.5	0.1	93.75	0.2	87.5	0.1	93.75	0.2	87.5	น้ำผสม 1:5
35	1.6	0.2	87.5	0.2	87.5	0.2	87.5	0.2	87.5	0.2	87.5	0.2	87.5	0.5	68.75	0.2	87.5	0.2	87.5	น้ำผสม 1:5
40	1.4	0.2	85.71	0.2	85.71	0.2	85.71	0.2	85.71	0.2	85.71	0.2	85.71	0.2	85.71	0.2	85.71	0.2	85.71	
45	1.1	0.4	63.64	0.4	63.64	0.4	63.64	0.2	81.82	0.2	81.82	0.4	63.64	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	
50	1.1	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	0.1	90.91	0.1	90.91	0.2	81.82	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	
55	1.1	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	0.1	90.91	
60	1	0.2	80	0.2	80	0.1	90	0.1	90	0.2	80	0.2	80	0.1	90	0.1	90	0.1	90	
65	1.2	0.2	83.33	0.2	83.33	0.1	91.67	0.1	91.67	0.1	91.67	0.1	91.67	0.2	83.33	0.2	83.33	0.2	83.33	
70	1.3	0.2	84.62	0.2	84.62	0.3	76.92	0.2	84.62	0.1	92.31	0.2	84.62	0.2	84.62	0.2	84.62	0.2	84.62	
75	1.1	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	0.2	81.82	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	0.1	90.91	
80	0.9	0.1	88.89	0.2	77.78	0.1	88.89	0.1	88.89	0.1	88.89	0.1	88.89	0.1	88.89	0.1	88.89	0.1	88.89	
85	1.1	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	0.2	81.82	0.1	90.91	0.2	81.82	0.1	90.91	0.2	81.82	0.1	90.91	
90	1.3	0.2	84.62	0.1	92.31	0.1	92.31	0.2	84.62	0.2	84.62	0.2	84.62	0.2	84.62	0.2	84.62	0.2	84.62	
AVE	1.31	0.42	69.69	0.48	66.25	0.36	74.12	0.49	66.68	0.47	67.97	0.44	69	0.76	52.23	0.63	60.03	0.63	60.62	
SD	0.28	0.44	28.32	0.54	31.92	0.33	20.12	0.62	35.63	0.59	33.73	0.49	28.22	1.22	65.63	1.07	56.93	1.08	57.24	

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการทดลองการบำบัดโออาร์พีที่ระดับ 10 ซม. จากระดับน้ำ (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถ่าย, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีกรวดเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	ORP ¹⁰	%Eff.	
0	-15	91	706.67	89	693.33	*	-	112	846.67	113	853.33	*	-	131	973.33	138	1020	*	-	* คือไม่มี
5	-42	112	366.67	110	361.9	*	-	172	509.52	171	507.14	*	-	154	466.67	180	528.57	*	-	จุดที่วัด
10	-53	-48	9.43	-39	26.42	*	-	-51	3.77	-52	1.89	*	-	39	173.58	42	179.25	*	-	** คือช่วง
15	-89	-62	30.34	-58	34.83	*	-	-56	37.08	-52	41.57	*	-	31	134.83	26	129.21	*	-	เริ่มระบบ
20	-99.8	-213	-113.43	-198	-98.4	*	-	-207	-107.41	-213	-113.43	*	-	-231	-131.46	-231	-131.46	*	-	น้ำผสม1:5
25	-100	-251	-151	-231	-131	*	-	-247	-147	-251	-151	*	-	-310	-210	-330	-230	*	-	น้ำผสม1:5
30	-99.8	-270	-170.54	-240	-140.48	*	-	-240	-140.48	-230	-130.46	*	-	-310	-210.62	-332	-232.67	*	-	น้ำผสม1:5
35	-153	-274	-79.08	-265	-73.2	*	-	-279	-82.35	-275	-79.74	*	-	-286	-86.93	-281	-83.66	*	-	น้ำผสม1:5
40	-110	-300	-172.73	-260	-136.36	*	-	-270	-145.45	-270	-145.45	*	-	-291	-164.55	-280	-154.55	*	-	
45	-115	-355	-208.7	-301	-161.74	*	-	-321	-179.13	-342	-197.39	*	-	-401	-248.7	-405	-252.17	*	-	
50	-125	-298	-138.4	-287	-129.6	*	-	-320	-156	-324	-159.2	*	-	-326	-160.8	-330	-164	*	-	
55	-123.7	-263.1	-112.69	-295.4	-138.8	*	-	-308.3	-149.23	-306	-147.37	*	-	-311	-151.41	-309.3	-150.04	*	-	
60	-134.2	-254	-89.27	-284	-111.62	*	-	-314.6	-134.43	-310.2	-131.15	*	-	-332.1	-147.47	-327	-143.67	*	-	
65	-139.1	-276	-98.42	-283.7	-103.95	*	-	-338	-142.99	-328.5	-136.16	*	-	-359	-158.09	-349.8	-151.47	*	-	
70	-116.3	-253.8	-118.23	-241.2	-107.39	*	-	-286.3	-146.17	-283	-143.34	*	-	-299.3	-157.35	-305	-162.25	*	-	
75	-119.7	-267	-123.06	-253.1	-111.45	*	-	-279	-133.08	-272.1	-127.32	*	-	-289.6	-141.94	-294.1	-145.7	*	-	
80	-124.9	-268	-114.57	-261.9	-109.69	*	-	-286.4	-129.3	-286	-128.98	*	-	-308	-146.6	-315.2	-152.36	*	-	
85	-129.4	-256.4	-98.15	-242.8	-87.64	*	-	-293.8	-127.05	-290.8	-124.73	*	-	-312	-141.11	-302	-133.38	*	-	
90	-137.8	-281.7	-104.43	-273.2	-98.26	*	-	-302	-119.16	-300.9	-118.36	*	-	-327	-137.3	-324	-135.12	*	-	
AVE	-106.668	-209.89	-41.03	-200.81	-32.79	-	-	-216.6	-33.8	-215.92	-33.17	-	-	-228.32	-34	-227.86	-29.76	-	-	
SD	35.481	132	218.52	127.49	211.15	-	-	149.39	262.5	149.47	263.64	-	-	173.29	297.62	177.97	313.62	-	-	

ตารางที่ ข.6 แสดงผลการทดลองการบำบัดโออาร์พีที่ระดับ 25 ซม. จากระดับน้ำ (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถ่าย, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีกรวดเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	ORP ²⁵	%Eff.	
0	-15	121	906.67	123	920	141	1040	109	826.67	111	840	81	640	121	906.67	123	920	141	1040	* คือไม่มี
5	-42	189	550	177	521.43	205	588.1	170	504.76	171	507.14	103	345.24	189	550	177	521.43	205	588.1	จุดที่วัด
10	-53	24	145.28	20	137.74	48	190.57	-29	45.28	-24	54.72	-26	50.94	24	145.28	20	137.74	48	190.57	** คือช่วง
15	-89	24	126.97	16	117.98	59	166.29	-29	67.42	-24	73.03	-23	74.16	24	126.97	16	117.98	59	166.29	เริ่มระบบ
20	-99.8	-209	-109.42	-212	-112.42	-199	-99.4	-211	-111.42	-203	-103.41	-205	-105.41	-209	-109.42	-212	-112.42	-199	-99.4	น้ำผสม1:5
25	-100	-312	-212	-320	-220	-289	-189	-250	-150	-245	-145	-245	-145	-312	-212	-320	-220	-289	-189	น้ำผสม1:5
30	-99.8	-312	-212.63	-321	-221.64	-300	-200.6	-250	-150.5	-245	-145.49	-268	-168.54	-312	-212.63	-321	-221.64	-300	-200.6	น้ำผสม1:5
35	-153	-290	-89.54	-305	-99.35	-290	-89.54	-280	-83.01	-281	-83.66	-264	-72.55	-290	-89.54	-305	-99.35	-290	-89.54	น้ำผสม1:5
40	-110	-285	-159.09	-290	-163.64	-280	-154.55	-278	-152.73	-260	-136.36	-260	-136.36	-285	-159.09	-290	-163.64	-280	-154.55	
45	-115	-361	-213.91	-382	-232.17	-355	-208.7	-364	-216.52	-353	-206.96	-312	-171.3	-361	-213.91	-382	-232.17	-355	-208.7	
50	-125	-321	-156.8	-329	-163.2	-299	-139.2	-300	-140	-298	-138.4	-291	-132.8	-321	-156.8	-329	-163.2	-299	-139.2	
55	-123.7	-290	-134.44	-305.3	-146.81	-286	-131.2	-284	-129.59	-280	-126.35	-271	-119.08	-311.2	-151.58	-302.4	-144.46	-281	-127.16	
60	-134.2	-312.4	-132.79	-319	-137.7	-299	-122.8	-295	-119.82	-287.3	-114.08	-261.8	-95.08	-326	-142.92	-314	-133.98	-289.3	-115.57	
65	-139.1	-315	-126.46	-321.2	-130.91	-302.5	-117.47	-296	-112.8	-291.4	-109.49	-278	-99.86	-329.7	-137.02	-311	-123.58	-294.1	-111.43	
70	-116.3	-286.3	-146.17	-297	-155.37	-264.1	-127.09	-235.1	-102.15	-245	-110.66	-221.6	-90.54	-298	-156.23	-296.4	-154.86	-269.4	-131.64	
75	-119.7	-294	-145.61	-289.6	-141.94	-271.3	-126.65	-243	-103.01	-248.1	-107.27	-212.9	-77.86	-308.6	-157.81	-299.3	-150.04	-273	-128.07	
80	-124.9	-302	-141.79	-298.3	-138.83	-282	-125.78	-276	-120.98	-270	-116.17	-264.7	-111.93	-311.8	-149.64	-308	-146.6	-289.1	-131.47	
85	-129.4	-310.2	-139.72	-304	-134.93	-297	-129.52	-268.3	-107.34	-271	-109.43	-261	-101.7	-298.3	-130.53	-301.7	-133.15	-276.5	-113.68	
90	-137.8	-320.7	-132.73	-311.8	-126.27	-302	-119.16	-289.4	-110.01	-291.7	-111.68	-268	-94.48	-307	-122.79	-301	-118.43	-284	-106.1	
AVE	-106.668	-219.08	-27.59	-224.69	-33.06	-203.31	-5.04	-205.2	-24.51	-201.87	-20.5	-197.32	-32.22	-222.24	-30.16	-224.04	-32.65	-200.81	-3.22	
SD	35.481	169.35	289.12	169.7	289.94	172.94	315.94	147.51	257.21	146.92	258.87	128.14	201.08	171.02	290.24	169.27	289.84	171.51	315.26	

ตารางที่ ข.7 แสดงผลการทดลองการบำบัด ปิไอดี (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาญี, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีการวัดเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	BOD	%Eff.	
0	112	30.2	73.04	29.8	73.39	13.1	88.3	39.5	64.73	39.1	65.09	20.3	81.88	29.7	73.48	29.8	73.39	25.4	77.32	
5	115	33.6	70.78	30	73.91	16.8	85.39	38.6	66.43	35.6	69.04	18.9	83.57	32.4	71.83	32.9	71.39	24.9	78.35	
10	110	34.6	68.55	32.4	70.55	13.6	87.64	39.4	64.18	40.2	63.45	16.5	85	36.7	66.64	35.1	68.09	25.7	76.64	
15	98.9	36.7	62.89	34.9	64.71	12.3	87.56	41.3	58.24	43.7	55.81	10.3	89.59	40.2	59.35	43.1	56.42	28.4	71.28	
20	239.1	89.7	62.48	99.7	58.3	65.2	72.73	96.4	59.68	95.1	60.23	69.7	70.85	119	50.23	114	52.32	73.5	69.26	น้ำผสม1:5
25	254	89.9	64.61	90.5	64.37	55.2	78.27	103	59.45	98.7	61.14	71.2	71.97	121	52.36	119.4	52.99	87.9	65.39	น้ำผสม1:5
30	412	196.4	52.33	183.2	55.53	149.7	63.67	175.4	57.43	179.3	56.48	123	70.15	181.2	56.02	185.6	54.95	156.1	62.11	น้ำผสม1:5
35	423.8	153.2	63.85	160.1	62.22	139.6	67.06	169.1	60.1	181.2	57.24	159.1	62.46	203.6	51.96	209.7	50.52	187.3	55.8	น้ำผสม1:5
40	216.4	72	66.73	81	62.57	50	76.89	42	80.59	36	83.36	19	91.22	113.1	47.74	129.2	40.3	64	70.43	
45	204.3	89.6	56.14	82.3	59.72	50.1	75.48	79.6	61.04	78.2	61.72	49.2	75.92	132.2	35.29	120.9	40.82	119.7	41.41	
50	217.4	95.3	56.16	76.2	64.95	32.2	85.19	89.1	59.02	95.3	56.16	52.4	75.9	109.5	49.63	101.9	53.13	76.5	64.81	
55	203.8	98.1	51.86	93.1	54.32	30.8	84.89	87.4	57.11	86.9	57.36	36.7	81.99	96.8	52.5	97.5	52.16	75.9	62.76	
60	210.7	95.6	54.63	92.8	55.96	30.1	85.71	89.2	57.66	88.3	58.09	41.2	80.45	105.4	49.98	102.4	51.4	78.5	62.74	
65	225.8	100.8	55.36	94.1	58.33	40.2	82.2	95.4	57.75	94.3	58.24	53.7	76.22	106.8	52.7	104.5	53.72	82.5	63.46	
70	208.5	95.4	54.24	92.4	55.68	26.9	87.1	85.1	59.18	84.9	59.28	40.8	80.43	96.7	53.62	96.8	53.57	73.8	64.6	
75	221.4	104.1	52.98	101.7	54.07	36.9	83.33	87.6	60.43	86.5	60.93	53.4	75.88	101	54.38	100	54.83	79.5	64.09	
80	213.6	90.4	57.68	89.2	58.24	31.8	85.11	90.2	57.77	87.4	59.08	43.7	79.54	90.2	57.77	91.5	57.16	71.9	66.34	
85	205.1	90.8	55.73	91.4	55.44	24.1	88.25	82.1	59.97	85.4	58.36	42.3	79.38	98.7	51.88	96.8	52.8	66.2	67.72	
90	201.6	90.7	55.01	90.6	55.06	26.8	86.71	82.9	58.88	89.1	55.8	39.8	80.26	86.7	56.99	90	55.36	63.4	68.55	
AVE	215.442	88.79	59.74	86.6	60.91	44.49	81.66	84.91	61.03	85.54	60.89	50.59	78.56	100.05	54.97	100.06	55.02	76.9	65.95	
SD	85.102	39.97	6.62	39.13	6.33	38.21	7.34	37.99	5.39	40.39	6.43	36.62	6.84	45.27	8.66	46.15	8.39	41.7	8.23	
AVE40-90day	211.691	92.98	56.05	89.53	57.67	34.54	83.71	82.78	60.86	82.94	60.76	42.93	79.74	103.37	51.13	102.86	51.39	77.45	63.36	
SD40-90day	7.906	8.35	3.88	7.13	3.53	8.9	4.09	14.21	6.66	16.22	7.7	9.92	4.42	12.43	6.05	11.95	5.58	15.39	7.69	

ตารางที่ ข.8 แสดงผลการทดลองการบำบัด ชีโอดี (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาญี, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีการวัดเป็นตัวอย่าง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	COD	%Eff.	
0	229.7	50.2	78.15	49.3	78.54	19.6	91.47	68.1	70.35	69.3	69.83	36.7	84.02	52.1	77.32	53.6	76.67	45.6	80.15	
5	232.1	60.5	73.93	54	76.73	30.2	86.99	69.5	70.06	64.1	72.38	34	85.35	58.3	74.88	59.2	74.49	44.8	80.7	
10	209.3	62.28	70.24	58.32	72.14	24.48	88.3	70.92	66.12	72.36	65.43	29.7	85.81	66.1	68.42	63.2	69.8	46.26	77.9	
15	203.6	66.1	67.53	62.8	69.16	22.1	89.15	74.3	63.51	78.7	61.35	18.5	90.91	72.4	64.44	77.6	61.89	51.1	74.9	
20	432.1	161.5	62.62	179.5	58.46	117.4	72.83	173.5	59.85	171.2	60.38	125.5	70.96	214.2	50.43	205.2	52.51	132.3	69.38	น้ำผสม1:5
25	457.2	161.8	64.61	162.9	64.37	99.4	78.26	185.4	59.45	177.7	61.13	128.2	71.96	217.8	52.36	214.9	53	158.2	65.4	น้ำผสม1:5
30	801.5	353.5	55.9	329.8	58.85	269.5	66.38	315.7	60.61	322.7	59.74	221.4	72.38	326.2	59.3	334.1	58.32	281	64.94	น้ำผสม1:5
35	872.73	275.8	68.4	288.2	66.98	251.3	71.21	304.4	65.12	326.2	62.62	286.4	67.18	366.5	58.01	377.5	56.74	337.1	61.37	น้ำผสม1:5
40	389.52	129.6	66.73	145.8	62.57	90	76.89	75.6	80.59	64.8	83.36	88.7	77.23	203.6	47.73	232.6	40.29	115.2	70.43	
45	367.74	161.3	56.14	148.1	59.73	90.2	75.47	143.3	61.03	140.8	61.71	88.6	75.91	238	35.28	217.6	40.83	139.2	62.15	
50	391.32	171.5	56.17	137.2	64.94	121.4	68.98	166.2	57.53	155.2	60.34	130.9	66.55	193.1	50.65	192.4	50.83	160.3	59.04	
55	366.84	165.5	54.88	167	54.48	120.4	67.18	164.8	55.08	159.4	56.55	118.9	67.59	183.2	50.06	184.1	49.81	165.2	54.97	
60	387.5	175.6	54.68	176.3	54.5	124.5	67.87	175	54.84	178.2	54.01	121.5	68.65	190.8	50.76	189.3	51.15	177.4	54.22	
65	398.5	186.4	53.22	185.7	53.4	126.7	68.21	190	52.32	192.4	51.72	135.9	65.9	194.3	51.24	193.4	51.47	172.9	56.61	
70	409.5	184.2	55.02	186.7	54.41	120.5	70.57	188.6	53.94	187.6	54.19	142.1	65.3	198.3	51.58	197.5	51.77	181	55.8	
75	387.2	172.5	55.45	175	54.8	115.8	70.09	178	54.03	175.2	54.75	128.9	66.71	193.2	50.1	192.4	50.31	178.4	53.93	
80	393.5	170.5	56.67	171.4	56.44	115.7	70.6	175.8	55.32	174.9	55.55	129	67.22	185.3	52.91	182.3	53.67	163.9	58.35	
85	399.7	172.4	56.87	170	57.47	116.8	70.78	178.4	55.37	173.6	56.57	131.5	67.1	189.2	52.66	189.6	52.56	162.3	59.39	
90	411.7	178.5	56.64	168.7	59.02	112.5	72.67	183.4	55.45	178	56.76	133.2	67.65	192.4	53.27	190.5	53.73	164.1	60.14	
AVE	407.434	161.04	61.26	158.77	61.95	109.92	74.94	162.15	60.56	161.18	60.97	117.35	72.86	186.05	55.34	186.68	55.25	151.38	64.2	
SD	170.453	72.47	7.54	71.49	7.7	65.36	8.1	70.16	7.29	74.08	7.6	64.13	8.03	81.3	9.95	82.91	9.63	74.64	8.91	
AVE40-90day	391.184	169.82	56.59	166.54	57.43	114.05	70.85	165.37	57.77	161.83	58.68	122.65	68.71	196.49	49.66	196.52	49.67	161.81	58.64	
SD40-90day	14.361	15.22	3.53	16.16	3.76	12.52	3.08	32.48	7.89	35.39	8.66	17.94	4	14.86	5.02	15.11	4.68	19.28	4.71	

ตารางที่ ข.9 แสดงผลการทดลองการบำบัด ไนโตรเจนทั้งหมด (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถ่าย, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีกรวดเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	TN	%Eff.	
0	3.45	1.465	57.49	1.185	65.61	0.614	82.18	2.013	41.59	1.453	57.84	0.878	74.52	1.455	57.78	1.175	65.9	0.615	82.15	
5	4.29	1.995	53.46	1.716	59.96	0.862	79.89	1.998	53.39	2.002	53.29	0.869	79.73	1.726	59.73	1.165	72.82	0.885	79.35	
10	3.99	2.262	43.35	1.983	50.34	1.143	71.37	2.282	42.85	1.723	56.85	1.143	71.37	2.016	49.51	1.183	70.37	0.888	77.76	
15	4.26	1.982	53.5	1.703	60.05	0.852	80.01	1.998	53.12	1.999	53.1	0.608	85.74	1.728	59.46	1.173	72.48	0.894	79.03	
20	6.55	1.996	69.52	1.983	69.72	1.16	82.29	2	69.46	1.452	77.83	0.582	91.11	1.727	73.63	1.453	77.81	0.599	90.85	น้ำผสม1:5
25	6.23	2.275	63.47	2.823	54.67	1.7161	72.45	2.275	63.47	1.71	72.54	0.875	85.95	2.852	54.21	2.562	58.86	1.424	77.14	น้ำผสม1:5
30	7.29	2.828	61.2	2.827	61.22	2.286	68.64	2.283	68.68	1.959	73.12	1.523	79.11	2.299	68.46	2.575	64.67	1.161	84.07	น้ำผสม1:5
35	6.94	2.835	59.17	2.836	59.15	2.282	67.13	2.272	67.28	1.72	75.23	1.173	83.11	2.286	67.08	2.573	62.94	1.166	83.21	น้ำผสม1:5
40	6.39	1.982	68.96	1.983	68.95	0.874	86.31	2.017	68.42	2.023	68.32	0.625	90.21	2.599	59.3	2.485	61.09	0.914	85.69	
45	4	2.287	42.88	2.008	49.85	0.897	77.6	2.292	42.76	2.019	49.58	1.207	69.86	2.037	49.13	2.312	42.26	1.765	55.92	
50	4.31	2.018	53.14	1.7588	59.15	0.9253	78.51	2.016	53.18	1.741	59.57	0.9172	78.7	2.3272	45.95	2.6121	39.34	1.2182	71.71	
55	4.22	1.7484	58.53	1.6486	60.9	0.8072	80.85	2.0498	51.38	2.05	51.38	0.934	77.85	2.339	44.52	2.349	44.28	1.495	64.54	
60	4.11	1.779	56.73	1.768	56.99	0.777	81.1	1.953	52.49	1.965	52.2	0.7973	80.61	2.363	42.52	2.36	42.59	1.5038	63.42	
65	4.04	1.776	56.07	1.804	55.38	0.8564	78.82	1.7567	56.55	1.793	55.65	0.8192	79.74	2.0723	48.74	1.795	55.6	1.0705	73.52	
70	3.99	1.2323	69.14	1.291	67.67	0.734	81.62	1.2188	69.48	1.369	65.72	0.607	84.8	2.0945	47.55	2.0953	47.53	1.2334	69.11	
75	4.28	1.5768	63.15	1.4371	66.42	0.8693	79.68	1.5944	62.74	1.685	60.62	0.8161	80.93	2.366	44.71	2.6498	38.07	1.246	70.88	
80	4.26	1.605	62.29	1.6848	60.42	0.9954	76.61	1.604	62.31	1.6121	62.12	0.8804	79.31	2.398	43.66	2.401	43.59	1.348	68.33	
85	4.27	1.688	60.46	1.6666	60.96	0.891	79.13	1.6096	62.3	1.542	63.88	0.9082	78.73	2.412	43.5	2.45	42.61	1.3982	67.25	
90	4.24	1.3876	67.3	1.3745	67.61	0.9101	78.55	1.6914	60.14	1.6488	61.14	0.9314	78.05	2.403	43.37	2.4516	42.22	1.3943	67.14	
AVE	4.795	1.93	58.94	1.87	60.79	1.08	78.04	1.94	57.98	1.76	61.58	0.9	80.5	2.18	52.78	2.1	55	1.17	74.27	
SD	1.191	0.43	7.65	0.49	5.83	0.48	4.9	0.3	9.25	0.22	8.58	0.23	5.51	0.34	9.6	0.57	13.28	0.31	8.95	
AVE40-90day	4.373	1.73	59.88	1.67	61.3	0.87	79.89	1.8	58.34	1.77	59.11	0.86	79.89	2.31	46.63	2.36	45.38	1.33	68.86	
SD40-90day	0.677	0.29	7.75	0.23	5.96	0.07	2.61	0.3	7.97	0.22	6.14	0.16	4.94	0.17	4.76	0.24	6.97	0.23	7.34	

ตารางที่ ข.10 แสดงผลการทดลองการบำบัด อินทรีย์ไนโตรเจน (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถาวยี่, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีการวัดเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	Org-N	%Eff.	
0	2.52	0.84	66.67	0.56	77.78	0.28	88.89	1.68	33.33	1.12	55.56	0.56	77.78	0.84	66.67	0.56	77.78	0.28	88.89	
5	3.64	1.68	53.85	1.4	61.54	0.84	76.92	1.68	53.85	1.68	53.85	0.56	84.62	1.4	61.54	0.84	76.92	0.72	80.22	
10	3.36	1.76	47.62	1.68	50	0.84	75	1.76	47.62	1.2	64.29	0.84	75	1.48	55.95	0.64	80.95	0.56	83.33	
15	3.36	1.68	50	1.4	58.33	0.56	83.33	1.48	55.95	1.68	50	0.56	83.33	1.2	64.29	0.84	75	0.56	83.33	
20	5.52	1.68	69.57	1.68	69.57	1.12	79.71	1.44	73.91	0.84	84.78	0.56	89.86	1.16	78.99	0.84	84.78	0.18	96.74	น้ำผสม1:5
25	5.32	1.96	63.16	2.52	52.63	1.4	73.68	1.68	68.42	1.12	78.95	0.56	89.47	2.24	57.89	1.96	63.16	1.12	78.95	น้ำผสม1:5
30	6.37	2.52	60.44	2.52	60.44	1.96	69.23	1.68	73.63	1.36	78.65	1.36	78.65	1.68	73.63	1.96	69.23	0.84	86.81	น้ำผสม1:5
35	5.99	2.52	57.93	2.52	57.93	2.24	62.6	1.96	67.28	1.12	81.3	1.12	81.3	1.56	73.96	1.96	67.28	0.84	85.98	น้ำผสม1:5
40	5.47	1.68	69.29	1.68	69.29	0.56	89.76	1.4	74.41	1.48	72.94	0.44	91.96	1.84	66.36	1.74	68.19	0.56	89.76	
45	3.36	1.96	41.67	1.68	50	0.56	83.33	1.76	47.62	1.48	55.95	0.84	75	1.48	55.95	1.76	47.62	1.4	58.33	
50	3.39	1.48	56.34	1.28	62.24	0.72	78.76	1.58	53.39	1.3	61.65	0.72	78.76	1.72	49.26	2	41	0.97	71.39	
55	3.19	1.18	63.01	1.1	65.52	0.72	77.43	1.48	53.61	1.48	53.61	0.72	77.43	1.56	51.1	1.56	51.1	1.14	64.26	
60	3.21	1.21	62.31	1.28	60.12	0.58	81.93	1.47	54.21	1.46	54.52	0.58	81.93	1.86	42.06	1.86	42.06	1.14	64.49	
65	3.15	1.28	59.37	1.36	56.83	0.56	82.22	1.3	58.73	1.4	55.56	0.6	80.95	1.58	49.84	1.3	58.73	0.68	78.41	
70	3.1	0.64	79.35	0.78	74.84	0.38	87.74	0.64	79.35	0.85	72.58	0.33	89.35	1.48	52.26	1.48	52.26	0.84	72.9	
75	3.25	0.92	71.69	0.8	75.38	0.5	84.62	1.1	66.15	1.18	63.69	0.56	82.77	1.76	45.85	2.04	37.23	0.84	74.15	
80	3.23	0.98	69.66	1.08	66.56	0.52	83.9	1.03	68.11	1.1	65.94	0.57	82.35	1.76	45.51	1.86	42.41	1	69.04	
85	3.24	1.05	67.59	1.03	68.21	0.36	88.89	1.03	68.21	1.06	67.28	0.57	82.41	1.62	50	1.66	48.77	0.92	71.6	
90	3.22	0.72	77.64	0.77	76.09	0.37	88.51	1.1	65.84	1.16	63.98	0.57	82.3	1.62	49.69	1.74	45.96	0.92	71.43	
AVE	3.89	1.46	62.48	1.43	63.86	0.79	80.87	1.43	61.24	1.27	65	0.66	82.38	1.57	57.41	1.51	59.5	0.82	77.37	
SD	1.17	0.55	9.86	0.59	8.65	0.54	7.23	0.33	11.67	0.24	10.62	0.24	4.93	0.3	10.68	0.51	15.31	0.3	10.03	
AVE40-90day	3.44	1.19	65.26	1.17	65.92	0.53	84.28	1.26	62.69	1.27	62.52	0.59	82.29	1.66	50.72	1.73	48.67	0.95	71.43	
SD40-90day	0.68	0.4	10.58	0.33	8.2	0.12	4.12	0.32	9.9	0.21	6.95	0.14	4.84	0.13	6.36	0.22	8.84	0.23	8.19	

ตารางที่ ข.11 แสดงผลการทดลองการบำบัด ที่เคเอ็น (TKN) (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถ่าย, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีการวัดเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	TKN	%Eff.	Org-N	%Eff.	
0	3.36	1.4	58.33	1.12	66.67	0.56	83.33	1.96	41.67	1.4	58.33	0.84	75	1.4	58.33	1.12	66.67	0.56	83.33	
5	4.2	1.96	53.33	1.68	60	0.84	80	1.96	53.33	1.96	53.33	0.84	80	1.68	60	1.12	73.33	0.84	80	
10	3.92	2.24	42.86	1.96	50	1.12	71.43	2.24	42.86	1.68	57.14	1.12	71.43	1.96	50	1.12	71.43	0.84	78.57	
15	4.2	1.96	53.33	1.68	60	0.84	80	1.96	53.33	1.96	53.33	0.56	86.67	1.68	60	1.12	73.33	0.84	80	
20	6.48	1.96	69.75	1.96	69.75	1.12	82.72	1.96	69.75	1.4	78.4	0.56	91.36	1.68	74.07	1.4	78.4	0.56	91.36	น้ำผสม1:5
25	6.16	2.24	63.64	2.8	54.55	1.68	72.73	2.24	63.64	1.68	72.73	0.84	86.36	2.8	54.55	2.52	59.09	1.4	77.27	น้ำผสม1:5
30	7.21	2.8	61.17	2.8	61.17	2.24	68.93	2.24	68.93	1.92	73.37	1.48	79.47	2.24	68.93	2.52	65.05	1.12	84.47	น้ำผสม1:5
35	6.89	2.8	59.36	2.8	59.36	2.24	67.49	2.24	67.49	1.68	75.62	1.12	83.74	2.24	67.49	2.52	63.43	1.12	83.74	น้ำผสม1:5
40	6.31	1.96	68.94	1.96	68.94	0.84	86.69	1.96	68.94	1.96	68.94	0.56	91.13	2.52	60.06	2.42	61.65	0.84	86.69	
45	3.92	2.24	42.86	1.96	50	0.84	78.57	2.24	42.86	1.96	50	1.12	71.43	1.96	50	2.24	42.86	1.68	57.14	
50	4.23	1.96	53.66	1.68	60.28	0.84	80.14	1.96	53.66	1.68	60.28	0.84	80.14	2.24	47.04	2.52	40.43	1.12	73.52	
55	4.15	1.68	59.52	1.58	61.93	0.72	82.65	1.96	52.77	1.96	52.77	0.84	79.76	2.24	46.02	2.24	46.02	1.42	65.78	
60	4.05	1.69	58.27	1.68	58.52	0.68	83.21	1.86	54.07	1.86	54.07	0.68	83.21	2.24	44.69	2.24	44.69	1.42	64.94	
65	3.99	1.68	57.89	1.68	57.89	0.68	82.96	1.68	57.89	1.68	57.89	0.72	81.95	1.96	50.88	1.68	57.89	0.96	75.94	
70	3.94	1.12	71.57	1.18	70.05	0.48	87.82	1.12	71.57	1.25	68.27	0.48	87.82	1.96	50.25	1.96	50.25	1.12	71.57	
75	4.21	1.42	66.27	1.28	69.6	0.62	85.27	1.48	64.85	1.56	62.95	0.68	83.85	2.24	46.79	2.52	40.14	1.12	73.4	
80	4.19	1.4	66.59	1.48	64.68	0.64	84.73	1.48	64.68	1.48	64.68	0.72	82.82	2.24	46.54	2.24	46.54	1.2	71.36	
85	4.2	1.45	65.48	1.38	67.14	0.48	88.57	1.45	65.48	1.38	67.14	0.72	82.86	2.2	47.62	2.24	46.67	1.2	71.43	
90	4.18	1.12	73.21	1.12	73.21	0.52	87.56	1.48	64.59	1.48	64.59	0.72	82.78	2.2	47.37	2.24	46.41	1.2	71.29	
AVE	4.726	1.85	60.32	1.78	62.3	0.95	80.78	1.87	59.07	1.68	62.83	0.81	82.2	2.09	54.24	2	56.54	1.08	75.88	
SD	1.191	0.48	8.62	0.53	6.67	0.54	6.36	0.33	9.67	0.24	8.54	0.25	5.51	0.33	8.76	0.55	12.53	0.29	8.35	
AVE40-90day	4.306	1.61	62.21	1.54	63.84	0.67	84.38	1.7	60.12	1.66	61.05	0.73	82.52	2.18	48.84	2.23	47.6	1.21	71.19	
SD40-90day	0.674	0.35	8.88	0.29	6.85	0.14	3.22	0.33	8.58	0.25	6.56	0.17	4.91	0.17	4.18	0.24	6.74	0.23	7.34	

ตารางที่ ข.12 แสดงผลการทดลองการบำบัด แอมโมเนียไนโตรเจน (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นทุเรียน, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีการวัดเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	NH ₄ ⁺	%Eff.	
0	0.84	0.56	33.33	0.56	33.33	0.28	66.67	0.28	66.67	0.28	66.67	0.28	66.67	0.56	33.33	0.56	33.33	0.28	66.67	
5	0.56	0.28	50	0.28	50	0	100	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.12	78.57	
10	0.56	0.48	14.29	0.28	50	0.28	50	0.48	14.29	0.48	14.29	0.28	50	0.48	14.29	0.48	14.29	0.28	50	
15	0.84	0.28	66.67	0.28	66.67	0.28	66.67	0.48	42.86	0.28	66.67	0	100	0.48	42.86	0.28	66.67	0.28	66.67	
20	0.96	0.28	70.83	0.28	70.83	0	100	0.52	45.83	0.56	41.67	0	100	0.52	45.83	0.56	41.67	0.38	60.42	น้ำผสม1:5
25	0.84	0.28	66.67	0.28	66.67	0.28	66.67	0.56	33.33	0.56	33.33	0.28	66.67	0.56	33.33	0.56	33.33	0.28	66.67	น้ำผสม1:5
30	0.84	0.28	66.67	0.28	66.67	0.28	66.67	0.56	33.33	0.56	33.33	0.12	85.71	0.56	33.33	0.56	33.33	0.28	66.67	น้ำผสม1:5
35	0.9	0.28	68.89	0.28	68.89	0	100	0.28	68.89	0.56	37.78	0	100	0.68	24.44	0.56	37.78	0.28	68.89	น้ำผสม1:5
40	0.84	0.28	66.67	0.28	66.67	0.28	66.67	0.56	33.33	0.48	42.86	0.12	85.71	0.68	19.05	0.68	19.05	0.28	66.67	
45	0.56	0.28	50	0.28	50	0.28	50	0.48	14.29	0.48	14.29	0.28	50	0.48	14.29	0.48	14.29	0.28	50	
50	0.84	0.48	42.86	0.4	52.38	0.12	85.71	0.38	54.76	0.38	54.76	0.12	85.71	0.52	38.1	0.52	38.1	0.15	82.14	
55	0.96	0.5	47.92	0.48	50	0	100	0.48	50	0.48	50	0.12	87.5	0.68	29.17	0.68	29.17	0.28	70.83	
60	0.84	0.48	42.86	0.4	52.38	0.1	88.1	0.39	53.57	0.4	52.38	0.1	88.1	0.38	54.76	0.38	54.76	0.28	66.67	
65	0.84	0.4	52.38	0.32	61.9	0.12	85.71	0.38	54.76	0.28	66.67	0.12	85.71	0.38	54.76	0.38	54.76	0.28	66.67	
70	0.84	0.48	42.86	0.4	52.38	0.1	88.1	0.48	42.86	0.4	52.38	0.15	82.14	0.48	42.86	0.48	42.86	0.28	66.67	
75	0.96	0.5	47.92	0.48	50	0.12	87.5	0.38	60.42	0.38	60.42	0.12	87.5	0.48	50	0.48	50	0.28	70.83	
80	0.96	0.42	56.25	0.4	58.33	0.12	87.5	0.45	53.13	0.38	60.42	0.15	84.38	0.48	50	0.38	60.42	0.2	79.17	
85	0.96	0.4	58.33	0.35	63.54	0.12	87.5	0.42	56.25	0.32	66.67	0.15	84.38	0.58	39.58	0.58	39.58	0.28	70.83	
90	0.96	0.4	58.33	0.35	63.54	0.15	84.38	0.38	60.42	0.32	66.67	0.15	84.38	0.58	39.58	0.5	47.92	0.28	70.83	
AVE	0.84	0.39	52.83	0.35	57.59	0.15	80.41	0.43	46.79	0.41	49.01	0.15	80.24	0.52	37.35	0.49	40.07	0.27	67.68	
SD	0.13	0.1	14.24	0.09	9.66	0.11	16.11	0.09	15.4	0.1	16.66	0.09	16.03	0.1	12.72	0.11	14.64	0.06	8.12	
AVE40-90day	0.87	0.43	49.97	0.39	55.45	0.12	84.45	0.42	50.04	0.38	54.46	0.15	81.98	0.5	41.31	0.49	43.18	0.26	69.46	
SD40-90day	0.12	0.07	6.19	0.06	5.76	0.07	12.85	0.05	13.54	0.06	15.49	0.05	11.38	0.09	12.51	0.1	13.76	0.05	8.59	

ตารางที่ ข.13 แสดงผลการทดลองการบำบัด ไนเตรทไนโตรเจน (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นหญ้า, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีการวัดเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	NO ₃ ⁻	%Eff.	
0	0.085	0.065	23.53	0.065	23.53	0.054	36.47	0.052	38.82	0.053	37.65	0.038	55.29	0.055	35.29	0.055	35.29	0.055	35.29	
5	0.085	0.035	58.82	0.035	58.82	0.022	74.12	0.038	55.29	0.041	51.76	0.029	65.88	0.045	47.06	0.045	47.06	0.045	47.06	
10	0.072	0.022	69.44	0.022	69.44	0.022	69.44	0.042	41.67	0.042	41.67	0.022	69.44	0.056	22.22	0.063	12.5	0.047	34.72	
15	0.061	0.022	63.93	0.022	63.93	0.012	80.33	0.038	37.7	0.038	37.7	0.048	21.31	0.047	22.95	0.053	13.11	0.053	13.11	
20	0.068	0.035	48.53	0.022	67.65	0.04	41.18	0.04	41.18	0.051	25	0.022	67.65	0.047	30.88	0.053	22.06	0.038	44.12	น้ำผสม1:5
25	0.067	0.035	47.76	0.022	67.16	0.035	47.76	0.035	47.76	0.029	56.72	0.034	49.25	0.052	22.39	0.042	37.31	0.023	65.67	น้ำผสม1:5
30	0.078	0.027	65.38	0.027	65.38	0.045	42.31	0.042	46.15	0.038	51.28	0.042	46.15	0.059	24.36	0.054	30.77	0.04	48.72	น้ำผสม1:5
35	0.052	0.035	32.69	0.035	32.69	0.042	19.23	0.032	38.46	0.039	25	0.052	0	0.045	13.46	0.053	-1.92	0.045	13.46	น้ำผสม1:5
40	0.075	0.022	70.67	0.022	70.67	0.034	54.67	0.057	24	0.062	17.33	0.065	13.33	0.078	-4	0.065	13.33	0.073	2.67	
45	0.083	0.047	43.37	0.047	43.37	0.056	32.53	0.052	37.35	0.058	30.12	0.086	-3.61	0.076	8.43	0.072	13.25	0.084	-1.2	
50	0.075	0.058	22.67	0.078	-4	0.084	-12	0.056	25.33	0.061	18.67	0.076	-1.33	0.086	-14.67	0.089	-18.67	0.096	-28	
55	0.065	0.068	-4.62	0.068	-4.62	0.086	-32.31	0.089	-36.92	0.089	-36.92	0.094	-44.62	0.098	-50.77	0.108	-66.15	0.075	-15.38	
60	0.06	0.088	-46.67	0.088	-46.67	0.096	-60	0.092	-53.33	0.105	-75	0.116	-93.33	0.123	-105	0.119	-98.33	0.083	-38.33	
65	0.052	0.096	-84.62	0.124	-138.46	0.175	-236.54	0.076	-46.15	0.112	-115.38	0.098	-88.46	0.112	-115.38	0.115	-121.15	0.11	-111.54	
70	0.052	0.112	-115.38	0.11	-111.54	0.254	-388.46	0.098	-88.46	0.118	-126.92	0.126	-142.31	0.134	-157.69	0.135	-159.62	0.112	-115.38	
75	0.068	0.156	-129.41	0.156	-129.41	0.248	-264.71	0.114	-67.65	0.125	-83.82	0.135	-98.53	0.125	-83.82	0.129	-89.71	0.126	-85.29	
80	0.065	0.204	-213.85	0.204	-213.85	0.354	-444.62	0.124	-90.77	0.131	-101.54	0.159	-144.62	0.158	-143.08	0.161	-147.69	0.148	-127.69	
85	0.068	0.238	-250	0.286	-320.59	0.41	-502.94	0.159	-133.82	0.162	-138.24	0.187	-175	0.212	-211.76	0.21	-208.82	0.197	-189.71	
90	0.062	0.267	-330.65	0.254	-309.68	0.389	-527.42	0.172	-177.42	0.168	-170.97	0.21	-238.71	0.203	-227.42	0.211	-240.32	0.193	-211.29	
AVE	0.0681	0.0859	-33.07	0.0888	-82.05	0.1294	-178.48	0.0741	-40.25	0.0801	-54.34	0.0863	-74.69	0.0953	-82.1	0.117	-84.23	0.1063	-66.08	
SD	0.0104	0.0763	121.68	0.0818	135.3	0.1337	224.09	0.0426	71.61	0.0446	75.56	0.0565	85.05	0.0524	86.26	0.0534	88.9	0.0507	80.76	
AVE40-90day	0.0659	0.1233	-94.41	0.1306	-105.89	0.1987	-216.53	0.099	-55.26	0.1083	-71.15	0.1229	-92.47	0.1277	-100.47	0.1285	-102.17	0.1179	-83.74	
SD40-90day	0.0095	0.0818	128.97	0.0855	133.61	0.1396	223.35	0.0403	67.37	0.0383	69.25	0.0464	79.46	0.0467	80.69	0.049	84.44	0.0443	74.38	

ตารางที่ ข.14 แสดงผลการทดลองการบำบัด ไนโตรที่ไนโตรเจน (TG2-1, 2-2, 2-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นรูปถ่าย, CG4-1, 4-2, 4-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่มีต้นพุทธรักษาและ UG6-1, 6-2, 6-3 คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ถึงจุดที่ 3 ที่ไม่มีพืช โดยทุกจุดมีการวัดเป็นตัวกลาง)

วันที่	น้ำเข้า	TG2-1		TG2-2		TG2-3		CG4-1		CG4-2		CG4-3		UG6-1		UG6-2		UG6-3		หมายเหตุ
		NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	NO ₂ ⁻	%Eff.	
0	0.0011	0	100	0	100	0	100	0.001	9.09	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	
5	0.0012	0	100	0.001	16.67	0	100	0	100	0.001	16.67	0	100	0.001	16.67	0	100	0	100	
10	0.001	0	100	0.001	0	0.001	0	0	100	0.001	0	0.001	0	0	100	0	100	0.001	0	
15	0.0013	0	100	0.001	23.08	0	100	0	100	0.001	23.08	0	100	0.001	23.08	0	100	0.001	23.08	
20	0.001	0.001	0	0.001	0	0	100	0	100	0.001	0	0	100	0	100	0	100	0.001	0	น้ำผสม1:5
25	0.0012	0	100	0.001	16.67	0.0011	8.33	0	100	0.001	16.67	0.001	16.67	0	100	0	100	0.001	16.67	น้ำผสม1:5
30	0.0011	0.001	9.09	0	100	0.001	9.09	0.001	9.09	0.001	9.09	0.001	9.09	0	100	0.001	9.09	0.001	9.09	น้ำผสม1:5
35	0.0013	0	100	0.001	23.08	0	100	0	100	0.001	23.08	0.001	23.08	0.001	23.08	0	100	0.001	23.08	น้ำผสม1:5
40	0.001	0	100	0.001	0	0	100	0	100	0.001	0	0	100	0.001	0	0	100	0.001	0	
45	0.0011	0	100	0.001	9.09	0.001	9.09	0	100	0.001	9.09	0.001	9.09	0.001	9.09	0	100	0.001	9.09	
50	0.001	0	100	0.0008	20	0.0013	-30	0	100	0	100	0.0012	-20	0.0012	-20	0.0031	-210	0.0022	-120	
55	0.001	0.0004	60	0.0006	40	0.0012	-20	0.0008	20	0.001	0	0	100	0.001	0	0.001	0	0	100	
60	0.0011	0.001	9.09	0	100	0.001	9.09	0.001	9.09	0	100	0.0013	-18.18	0	100	0.001	9.09	0.0008	27.27	
65	0.001	0	100	0	100	0.0014	-40	0.0007	30	0.001	0	0.0012	-20	0.0003	70	0	100	0.0005	50	
70	0.001	0.0003	70	0.001	0	0	100	0.0008	20	0.001	0	0.001	0	0.0005	50	0.0003	70	0.0014	-40	
75	0.001	0.0008	20	0.0011	-10	0.0013	-30	0.0004	60	0	100	0.0011	-10	0.001	0	0.0008	20	0	100	
80	0.0012	0.001	16.67	0.0008	33.33	0.0014	-16.67	0	100	0.0011	8.33	0.0014	-16.67	0	100	0	100	0	100	
85	0.001	0	100	0.0006	40	0.001	0	0.0006	40	0	100	0.0012	-20	0	100	0	100	0.0012	-20	
90	0.001	0.0006	40	0.0005	50	0.0011	-10	0	100	0.0008	20	0.0014	-40	0	100	0.0006	40	0.0013	-30	
AVE	0.00108	0.00032	69.73	0.00071	34.84	0.00073	31	0.00033	68.28	0.00073	32.95	0.00078	27	0.00047	56.42	0.00041	59.9	0.00081	23.59	
SD	0.00011	0.00043	39.83	0.00041	37.97	0.00058	55.9	0.00042	39.84	0.00045	41.92	0.00056	53.04	0.0005	46.4	0.00076	75.64	0.00059	58.44	

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์พืชและวัสดุตัวกลาง

ตารางที่ ค.1 แสดงผลของความสูงซึ่งมีลักษณะการปลูกพืชญี่ปุ่น (T) และพุทธรักษา (C) ใน
ตัวกลางทราย (S) และกรวด (G)

วันที่	ความสูง(ซม)			
	TS1	TG2	CS3	CG4
0	89	87	64	62
7	98	99	69	69
14	112	111	73	71
21	123	125	78	76
28	134	132	83	79
35	146	143	88	73
42	163	161	93	77
49	178	176	105	83
56	188	185	112	89
63	206	201	116	79
70	213	211	120	82
77	231	228	126	83
84	247	246	119	78
91	253	251	124	84
AVE	170.07	168.29	97.86	77.50
SD	54.99	54.25	22.06	7.00

ตารางที่ ค.2 แสดงผลของความยาวรากและน้ำหนักแห้งซึ่งมีลักษณะการปลูกพืชธูปฤาษี (T) และ พุทธรักษา (C) ในตัวกลางทราย (S) และกรวด (G)

	ความยาวราก(ซม)		น้ำหนักแห้ง กรัม/ตร.ม
Int (T)	9.5 ± 0.8	Int (T)	1133.33
Int (C)	10.2 ± 1.2	Int (C)	1000.00
TS1	25.6 ± 1.2	TS1	12888.89
TG2	25.4 ± 0.8	TG2	12133.33
CS3	21.3 ± 1.2	CS3	6750.00
CG4	18.6 ± 0.6	CG4	4666.67

ตารางที่ ค.3 แสดงผลของปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในเนื้อเยื่อพืชซึ่งมีการปลูกพืชธูปฤาษี (T) และ พุทธรักษา (C) ในตัวกลางทราย (S) และกรวด (G)

	ปริมาณไนโตรเจน กรัม-ไนโตรเจน/ตร.ม
Int (T)	0.63
Int (C)	0.67
TS1	14.44
TG2	14.27
CS3	8.32
CG4	4.97

ตารางที่ ค.4 แสดงผลของปริมาณทีเคเอ็น(TKN) ซึ่งมีลักษณะการปลูกพืชธูปฤาษี (T) และพุทธรักษา (C) ในตัวกลางทราย (S) และกรวด (G)

	ปริมาณทีเคเอ็น ไมโครกรัมทีเคเอ็น/กรัม
Int (S)	0.56
Int (G)	0.56
TS1	2.10
TG2	1.82
CS3	2.38
CG4	1.68
US5	1.40
UG6	1.12

Output ที่ได้รับจากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ
 - ✓ กำลังอยู่ระหว่างการเตรียมงานเขียนผลงาน
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - เชิงพาณิชย์ (มีการนำไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาคธุรกิจ/บุคคลทั่วไป)
 - เชิงนโยบาย (มีการกำหนดนโยบายอิงงานวิจัย/เกิดมาตรการใหม่/เปลี่ยนแปลงระเบียบข้อบังคับหรือวิธีทำงาน)
 - เชิงสาธารณะ (มีเครือข่ายความร่วมมือ/สร้างกระแสความสนใจในวงกว้าง)
 - เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)
 - ✓ ใช้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนานักวิจัย นักศึกษาระดับปริญญาโท
3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)

✓ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ

Buddhawong, S., Praphong, W. and Srisatit, T. 2010. Fate and Transportation of Nutrient in Free Water Surface Constructed Wetland for Treatment of Juices Industry Wastewater. The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD2010). Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand, 4-6 March 2010.

Fate and Transportation of Nutrient in Free Water Surface Constructed Wetland for Treatment of Juices Industry Wastewater

Sasidhorn Buddhawong^{1*}, Wayu Praphong¹ and Thares Srisatit²

¹ Environmental Technology Division, School of Energy, Environment and Materials,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, KMUTT
126 Pracha U-thit, Bangmod, ThungKru, Bangkok, Thailand 10140
E-mail: sasidhorn.bud@kmutt.ac.th, E-mail: wayu_oh@hotmail.com

² Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
E-mail: Thares.S@eng.chula.ac.th

Abstract

Wastewater from juice industry contains mass concentration of BOD (4290 mg/L), COD (6321 mg/L) and nutrient nitrogen (37.14 mg/L) which results in water resource problems. Primary and secondary treatment process can decrease the pollutants, however, the effluent concentrations is still higher than effluent standard of industrial wastewater. This research aimed to study the nutrient cycling in constructed wetland system. Free water surface wetlands (FWS) were designed and used in evaluation of nitrogen reduction of wastewater from juice industry. The FWS were designed and used in evaluation of nitrogen reduction of wastewater from juice industry. There were factors affecting the efficiency of wetland for treatment of nitrogen, HRT, nitrogen loading and plant types. *Canna sp.* were planted in the FWS. Two different types of media; gravel and sand, were used as wetland substrate and were analyzed for their efficiency. The treatment process was performed at a HLR of 4.5 cm/day and HRT of 5 day. The influent wastewater of this FWS comprised of BOD, COD, TKN, and NH_4^+ which were 215, 407, 4.73, and 0.84 mg/L, respectively. The removal efficiency of sand bed FWS for BOD_5 , COD, TKN, and NH_4^+ were $77.83 \pm 8.8\%$, $72.75 \pm 7.7\%$, $81.73 \pm 6\%$ and $84.05 \pm 16.1\%$, respectively. The removal efficiency of gravel bed FWS for BOD_5 , COD, TKN, and NH_4^+ were $78.56 \pm 6.8\%$, $72.86 \pm 8\%$, $82.2 \pm 5.5\%$ and $80.24 \pm 16\%$, respectively. The system with sand and gravel media showed no significant different removal efficiency. However, the results showed that growth of *Canna sp.* in sand bed was higher than in gravel bed.

Keywords: Constructed Wetland, Free Water Surface, Juices Industry Wastewater, Nutrient Transportation

1. Introduction

Constructed wetlands are now widely used as a

cost-effective, 'natural' wastewater treatment technology, particularly appropriate for small communities, towns, industries and agriculture. Surface flow and subsurface-flow constructed wetlands are also known benefit in treating those wastewater. Wastewaters are treated as they pass through soil or gravel substrata in which wetland plants grow hydroponically. When compared to unplanted controls, planted beds commonly show enhanced removal of nitrogen and pathogens [1-4]. Other economic benefits, such as vegetation for animal feed (e.g., floating aquatic plants) and habitat for harvestable fish (e.g., tilapia), make wetlands an attraction to farmers and small industry [5-7]

Many tropical wetlands treatment have largely indicated the water quality improvement from various wastewater sources before effluents are discharged into major rivers [7-9].

The reduction of energy consumption is the way benefits to decrease the effect of global warming. Constructed wetland has been proved for its low energy used as it needs natural mechanisms for its growth and removal procedure. It reveals efficiency for decreasing of pollutants such as nutrients, metals or heavy metals in wastewater. However, different conditions of its system lead to variation of its performance.

This research aimed to study the nutrient cycling in constructed wetland system. The free water surface wetlands (FWS) were designed and used in evaluation of nitrogen reduction of juices industry wastewater.

2. Methods

2.1 Setting up the constructed wetlands

The small scales, with dimension of $0.3 \times 0.6 \times 0.5 \text{ m}^3$ (width x length x depth), of free water surface constructed wetlands (FWS) were carried out at the School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT). They were investigated for the factors affecting the efficiency of wetland for treatment of nitrogen.

The treatment process was performed at a hydraulic loading rate (HLR) of 4.5 cm/day, HRT of 5 days and organic loading rate (OLR) of 11.25 g/m²/day was applied and analyzed for the removal efficiency. Variation of nitrogen loadings were examined for the best removal performance.

The plant used in this study was the *Canna* sp. *Canna* sp. With the same age were planted in the two FWS wetlands and analyzed for their efficiency.

Two different types of media; gravel (5-10 mm in diameter) and sand (1-2 mm in diameter), were used as wetland substrate and were analyzed for their efficiency. These media may be affecting factor on the removal mechanism of nitrogen in comparison to the unplanted FWS which served as the control experiments. Moreover, the plant growth was also investigated for their height and weight.

2.2 Analytical methods

Input and output of wastewater were analyzed for BOD, COD, TKN, NH₄⁺, nitrite and nitrate nitrogen concentration following the standard method [10].

3. Results and discussion

3.1 Water quality improvement

The raw wastewater from juice industry contained 1051-4290 mg/L of BOD, 4132-6321 mg/L of COD and 27.82-37.14 mg/L of nutrient nitrogen. The influent wastewater of the FWS constructed wetlands comprised of BOD, COD, TKN, and NH₄⁺ were 215, 407, 4.73 and 0.84 mg/L, respectively. These concentrations were decreased from raw wastewater because of the limited capacity of FWS. Too high BOD and COD loading could affect the plant and microbial system in FWS.

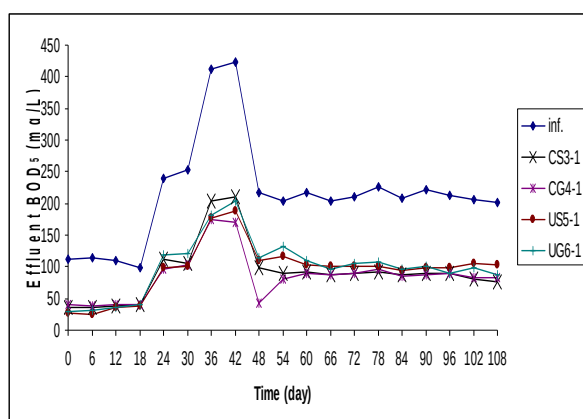


Figure 1. BOD concentration in the different small scale constructed wetlands (FWS) during the experimental study. inf: influent wastewater, CS: *Canna* planted in sand, CG: *Canna* planted in gravel, US and UG: unplanted of sand and gravel bed FWS.

Figure 1 illustrated the BOD content during the experiment. BOD decreased in all FWS systems. The low content of BOD was applied in the first stage in

order to acclimatize the FWS before receiving high BOD afterwards.

Concentrations of impurities were purified by the self purification process as it occurred in natural wetlands. Wetland plants, wetland bed or soil materials and microorganisms help in improving the water quality.

The removal efficiency of sand bed FWS for BOD, COD, TKN, and NH₄⁺ were 77.83±8.8 %, 72.75±7.7 %, 81.73±6 % and 84.05±16.1 %, respectively. The removal efficiency of gravel bed FWS for BOD, COD, TKN, and NH₄⁺ were 78.56±6.8%, 72.86±8%, 82.2±5.5% and 80.24±16%, respectively (data not shown).

Figure 2 and 3 showed the outlet concentration of total nitrogen (TN) and the removal efficiency of TN in FWS. The unplanted FWS with *Canna* planted in sand indicated the best TN removal. On the contrary, the unplanted gravel bed showed the lowest removal efficiency.

It was indicated that the planted systems reveal better removal efficiency. Since the plant plays an important role for the removal. The active zone for removal mechanism is the root zone and rhizosphere where found the physical, chemical and biological activities between plants, microorganisms, soil materials and other pollutants leading to reduction of water impurities [11]

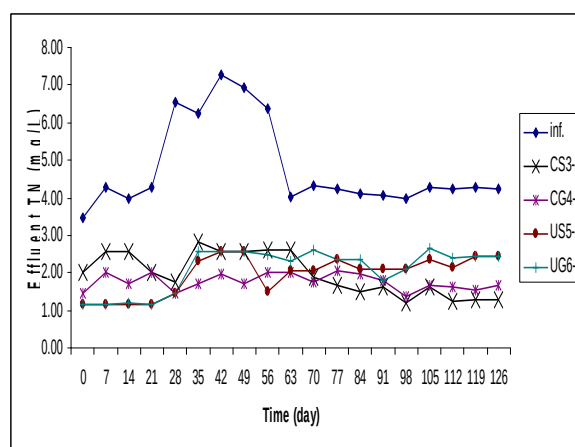


Figure 2. Total nitrogen content in the different small scale constructed wetlands (FWS) during the period of study. inf: influent wastewater, CS: *Canna* planted in sand, CG: *Canna* planted in gravel, US and UG: unplanted of sand and gravel bed FWS.

3.2 Nitrogen transformation

The concentration of total nitrogen decreased in the FWS. It was transformed into other formation of nitrogen, e.g., ammonia, nitrite and nitrate. Results of the study indicated that nitrogen was transformed into nitrate (Figure 4), nitrite and ammonia (data was not shown). The main removal mechanism is microbial nitrification-denitrification; in contrast, incorporation into the plant biomass is of only minor importance [11, 12]. Nitrifying organisms require oxygen and an

adequate surface area to grow on. Denitrification requires adequate organic matter (plant litter or straw) to convert nitrate to nitrogen gas. Volatilization of ammonia, denitrification, and plant uptake (if the vegetation is harvested) are the potential methods of nitrogen removal in wetland systems [2,12]. In intermittently loaded vertical filters nitrate is often enriched, in subsurface horizontal flow system the oxidized nitrogen is immediately reduced, preventing the enrichment of nitrite and nitrate [11].

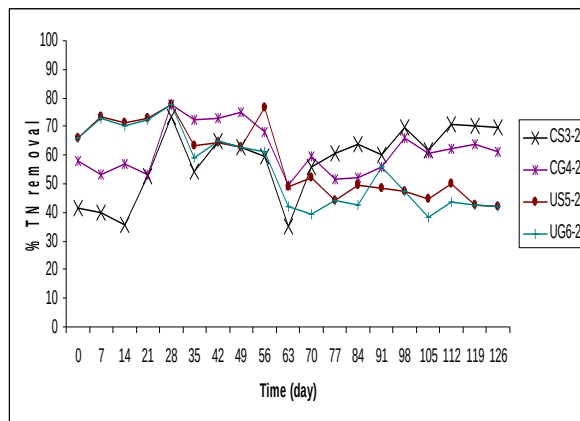


Figure 3. Efficiency of different small scale constructed wetlands (FWS) for removal of total nitrogen. inf: influent wastewater, CS: Canna planted in sand, CG: Canna planted in gravel, US and UG: unplanted of sand and gravel bed FWS.

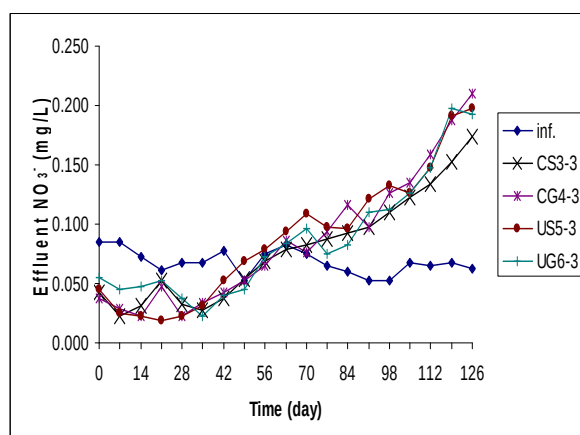


Figure 4. Nitrate influence and outlet concentration in the different small scale constructed wetlands (FWS). inf: influent wastewater, CS: Canna planted in sand, CG: Canna planted in gravel, US and UG: unplanted of sand and gravel bed FWS.

3.3 Wetland substrates

Wetland substrate or soil matrixes used in this study were sand and gravel which have different grain size and diameters. The soil is the main supporting material for plant growth and microbial films [11].

Results of this study revealed that the system with sand and gravel media showed no significant

different of nitrogen removal efficiency. However, chemical soil composition and physical parameters such as grain size distribution, interstitial pore spaces, effective grain size, degrees of irregularity and the coefficient of permeability are all important factors influencing the biotreatment system [11-12]. Even though there was no significant different of nitrogen removal efficiency, the results showed that growth of Canna sp. in sand bed was higher than in gravel bed FWS with stem density and height of 150 stem/m² and 88.9 stem/m², 116.3 cm and 79 cm, respectively.

The experience in Germany and long-term studies of the hydraulic of constructed wetlands with different soil parameters indicate that a mixture of sand and gravel produces the best results in terms of both hydraulic conditions and the removal contaminants [11,13,14]

5. Conclusions

FWS constructed wetlands have ability for wastewater removal, reduction of BOD, COD and total nitrogen. The concentration of total nitrogen decreased and transformed into other formation of nitrogen, e.g., ammonia, nitrite and nitrate by nitrification and denitrification. The planted FWS had better removal efficiency than the unplanted FWS. The sand media showed better removal results than the gravel since it contains higher surface area for removal activities. Therefore, both plant, Canna sp. and soil materials affected the removal efficiency of the FWS.

Acknowledgments

Gratefully acknowledges the TRF: The Thailand Research Fund, and the Office of the Higher Education Commission for funding research grant and thanks the School of Energy, Environment and Materials, KMUTT-King Mongkut's University of Technology Thonburi for providing the place for this research study.

References

- [1] Tanner, C.C. 2001. Growth and nutrient dynamics of soft-stem bulrush in constructed wetlands treating nutrient-rich wastewaters. *Wetlands Ecology and Management*, 9, 49-73.
- [2] Gersberg, R.M., Elkins, B.V. and Goldman, C.R. 1983. Nitrogen removal in artificial wetlands. *Wat. Res.* 17: 1009-1014.
- [3] Gersberg, R.M., Elkins, B.V., Lyon, S.R. and Goldman, C.R. 1986. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands. *Wat. Res.* 20: 363-368.
- [4] Gersberg, R.M., Brenner, R., Lyon, S.R. and Elkins, B.V. 1987. Survival of bacteria and viruses in municipal wastewaters applied to artificial wetlands. *In: Reddy, K.R. and Smith, W.H. (eds.), Aquatic plants for water treatment and resource*

- recovery. pp. 237–245. Magnolia Publ., Orlando FL.
- [5] Greenway, M. and Simpson, J.S. 1996. Artificial wetlands for wastewater treatment, water reuse and wildlife in Queensland, Australia. *Water Sci. Technol.* 33: 121-229.
- [6] Denny, P. 1997. Implementation of constructed wetlands in developing countries. *Water Sci. Technol.* 35: 27-34.
- [7] Nahlik, A.M. and Mitsch, W.J. 2006. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica. *Ecol. Eng.* 28: 246-257.
- [8] wetland systems to treat agricultural non-point source pollution. *Ecol. Eng.* 1: 49-82.
- [9] Kadlec, R.L. and Knight, R.L. 1996. *Treatment wetlands*. CRC Press–Lewis Publishers. Boca Raton, FL, USA.
- [10] APHA, AWWA, WEF. 1998. *Standard method for the examination of water and wastewater*, 20th ed., United Book Press, Ind., USA.
- [11] Stottmeister, U., Wiessner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R.A., and Moormann, H. 2003. Effect of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*. 22: 93-117.
- [12] Crites, R.W., Middlebrooks, E.J. and Reed, S.C. 2006. *Natural wastewater treatment systems*. CRC Press-Taylor & Francis. New York.
- [13] Wissing, F. 1995. *Wasserreinigung mit Pflazen*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- [14] Netter, R. 1992. Flow characteristics of planted soil filters. *Water Sci. Technol.* 29: 29-36.