อภินันทนาการ

สำนักหอสมุด

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การบำบัดและใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

โดย พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก และคณะ

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน ๓ - ก.พ. ๒๕๕๘
เลขทะเบียน i.67703409
เลขเรียกหนังสือ ว TD
ว๓๙
พ๕๖๙
๒๕๕๖

พฤศจิกายน 2556

สัญญาเลขที่ R2555B020

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การบำบัดและใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

คณะผู้วิจัย สังกัด

พันธ์ทิพย์ กล่อมเจ๊ก คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิยาลัยนเรศวร

ดำรงศักดิ์ สุวรรณศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่พิษณุโลก

สนับสนุนโดยงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดงในระบบบำบัดพืชลอยน้ำ ในระยะที่ 1 ของกาวิจัย เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบบำบัดพืชลอยที่ใช้แหนแดงเป็นพืชในระบบในการลดมลสารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยน้ำเสียฟาร์มสุกรจากบ่อรวมรวบน้ำเสียได้ถูกเจือจางที่อัตราส่วนของน้ำเสียร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ก่อนการระบายลงสู่ระบบบำบัด ทั้งนี้ น้ำเสียได้ถูกกักพักและถูกบำบัดอยู่ภายในระบบเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่าระบบบำบัดสามารถลดมลสารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรได้ในกรณีที่ระบบมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ BOD ไม่เกิน 1.4 และ 1.0 $g/m^2/d$ ตามลำดับ ในด้านผลผลิตของแหนแดง พบว่าแหนแดงในระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราส่วนของน้ำเสียร้อยละ 25 สามารถให้ผลิตได้และมีอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ 0.046 d^{-1} ทั้งนี้ ค่าวัตถุแห้ง (DM) ของแหนแดงจากระบบบำบัดมีค่าต่ำกว่า DM ของแหนแดงที่ผลิตด้วยกระบวนการปกติ อย่างไรก็ตาม ค่าโปรตีนหยาบ (CP) ของแหนแดงจากระบบบำบัดมีค่าไม่แตกต่างจาก ค่า CP ของแหนแดงที่ผลิตด้วยกระบวนการปกติ และ ค่าฟอสฟอรัส (P) ของแหนแดงจากระบบบำบัดมีค่าสูงกว่า Pของแหนแดงที่ผลิตด้วยกระบวนการปกติ การศึกษาต่อเนื่องจากนั้นเป็นการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีแหนแดงเป็นพืชในระบบในการบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราส่วนของน้ำเสียร้อยละ 25 เมื่อระบบมีระยะในการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน (ทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์) ในระยะที่ 2 ของการศึกษานี้ น้ำเสียได้ถูกกักพักและถูกบำบัดภายในระบบเป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ ผลการศึกษาได้แสดงว่า ประสิทธิภาพการบำบัด COD, BOD, TSS, TDS, TKN, TP, Dissolved P และ TCB โดยเฉลี่ยของทุกระบบ มีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างระบบที่มีช่วงเวลาเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน โดยระบบที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 2 สัปดาห์ เป็นระบบที่ให้ปริมาณผลผลิตน้ำหนักสดสุทธิและปริมาณผลผลิตน้ำแห้งสดสุทธิสูงที่สุด และแหนแดงในระบบมีอัตราการเติบโตสัมพัทธ์สูงที่สุด คุณภาพของแหนแดงเมื่อพิจารณาถึงการใช้ประโยชน์เป็นพืชอาหารสัตว์ พบว่าแหนแดงจากแต่ละระบบที่มีช่วงเวลาเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกันมีคุณภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ ค่า CP และ P ของแหนแดงจากทุกระบบบำบัดมีค่าใกล้เคียงกับค่า CP และ P ของแหนแดงที่ผลิตโดยเกษตรกรด้วยวิธีการปกติ ค่า K และ Mg ของแหนแดงจากทุกระบบบำบัดมีค่าสูงกว่า ค่า K และ Mg ของแหนแดงที่ผลิตโดยเกษตรกร ค่า DM และ Ca ของแหนแดงจากทุกระบบบำบัดมีค่าต่ำกว่า ค่า DM และ Ca ของแหนแดงที่ผลิตโดยเกษตรกร อย่างไรก็ตาม พบว่า ค่า Cd, Zn และ Cu ของแหนแดงจากทุกระบบบำบัด มีค่าสูงขึ้นมากกว่า ค่า Cd, Zn และ Cu ในเนื้อเยื่อของแหนแดงก่อนการปล่อยลงสู่ระบบบำบัด

Abstract

The objectives of this study were to investigate swine wastewater treatment and application of swine wastewater for Azolla production in aquatic plant treatment system. In the first phase of the study, efficiency of aquatic plant treatment system using Azolla as plant in the treatment system for reduction of pollutants in swine wastewater was investigated. Swine wastewater from collecting pond with dilution ratio of 25, 50 75 and 100 % were fed into treatment system. The wastewater was retained and treated for 3 weeks. It was found that Azolla treatment system could reduce pollutants in swine wastewater when COD loading rate and BOD loading rate were not higher than 1.4 and 1.0 $g/m^2/d$, respectively. For Azolla production, the Azolla treatment system that fed with 25 % diluted wastewater provided yield with relative growth rate (RGR) of 0.046 d^{-1}. Dry matter of Azolla from the treatment system was less than that of Azolla from conventional production process. However, CP of Azolla from the treatment system was not different from CP of Azolla from normal production process and P of Azolla from the treatment system was higher than P of Azolla from conventional production process. Subsequently, the efficiency of Azolla treatment system fed with 25 % diluted wastewater was investigated at different Azolla harvest intervals (every 1, 2 and 3 week). In the second phase of study, the wastewater was retained and treated for 6 week. The result showed that average efficiencies of all tested systems for COD, BOD, TSS, TDS, TKN, TP, Dissolved P and TCB reduction were not significantly different between Azolla harvest intervals. For Azolla production, the treatment system that Azolla was harvested every 2 week provided the highest net wet and dry biomass and showed the highest RGR. Quality of Azolla from all tested system, when they were considered as feed plant, was not significantly different between Azolla harvest intervals. CP and P of Azolla from all tested system were similar to CP and P from Azolla from conventional production process by farmer. K and Mg of Azolla from all tested system were higher than K and Mg from Azolla from conventional production process by farmer. DM and Ca of Azolla from all tested system were less than DM and Ca from Azolla from conventional production process by farmer. However, Cd, Zn and Cu of Azolla from all tested system were higher than those in the tissues of Azolla that were applied into the system.

Executive summary

การบำบัดและใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำต่างๆ ทั้งในแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน กำลังประสบปัญหาความเสื่อมโทรม อันเนื่องมาจากการปนเปื้อนของมลสารต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่มีที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งจากกิจกรรมชุมชน กิจกรรมการพัฒนาทั้งในด้านการอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และการท่องเที่ยว ซึ่งการปนเปื้อนมลสารของน้ำในแหล่งน้ำจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของทรัพยากรน้ำทั้งด้านกายภาพ เคมีและชีวภาพ ส่งผลกระทบต่อสมดุลของระบบนิเวศในแหล่งน้ำ และเกิดผลกระทบต่อการนำน้ำนั้นไปใช้ประโยชน์ ความเสื่อมโทรมหรือความเน่าเสียของทรัพยากรน้ำ อาจปรากฏทั้งในรูปของการสูญเสียออกซิเจนละลายน้ำ (DO) หรือมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ รวมถึงจุลชีพในปริมาณสูง

การเลี้ยงสุกร เป็นกิจกรรมด้านปศุสัตว์ ซึ่งในปัจจุบันมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งนอกเหนือจากผลผลิตที่ได้จากการเลี้ยงแล้ว กิจกรรมการเลี้ยงยังก่อให้เกิดของเหลือและของเสีย ทั้งในรูปของของแข็งและของเหลวหรือน้ำเสียเพิ่มขึ้นด้วย น้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียจากการล้างคอก ซึ่งจะมีทั้งเศษอาหาร และสิ่งขับถ่ายของสุกรปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ซึ่งหากไม่มีการจัดการที่ดีก่อนการระบายลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งรองรับน้ำเสียนั้นอย่างแน่นอน น้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะมีมลสารในรูปของของแข็ง สารอินทรีย์ และธาตุอาหารปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยการลดปริมาณมลสารเหล่านี้ในน้ำเสียลง ด้วยการนำกลับมาใช้ประโยชน์ จะเป็นการลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม ขณะที่ เกษตรกรจะได้รับประโยชน์กลับคืนจากการบำบัดนั้น ซึ่งในเบื้องต้นอาจเป็นการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับไปใช้ทำความสะอาดคอกอีกครั้ง และหากวิธีการบำบัดที่ใช้เป็นวิธีการที่ไม่ต้องการงบลงทุนสูง เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เกษตรกรสามารถนำไปดำเนินการได้จริงและเป็นวิธีการที่สามารถให้ผลผลิตตอบแทนแก่เกษตรกรในรูปแบบอื่นได้ จะทำให้การดำเนินการบำบัดนั้น ส่งผลดีทั้งต่อสิ่งแวดล้อม ชุมชนโดยรอบบริเวณฟาร์มและเกษตรกรผู้ดำเนินการ

โครงการวิจัยนี้ จึงมีแนวทางในการวิจัยเพื่อศึกษาถึงแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนการระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ร่วมกับการใช้ประโยชน์ จากมลสารในน้ำเสียซึ่งอยู่ในรูปของธาตุอาหารในการผลิตแหนแดง ซึ่งเกษตรกรสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในรูปของการใช้เป็นปุ๋ย หรืออาหารสัตว์ ทั้งนี้ เพื่อนำเสนอแนวทางในการลดปัญหามลพิษน้ำและเป็นการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

2.1เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแหนแดงด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

2.3เพื่อศึกษาปริมาณ และคุณภาพของแหนแดงที่ผลผลิตด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

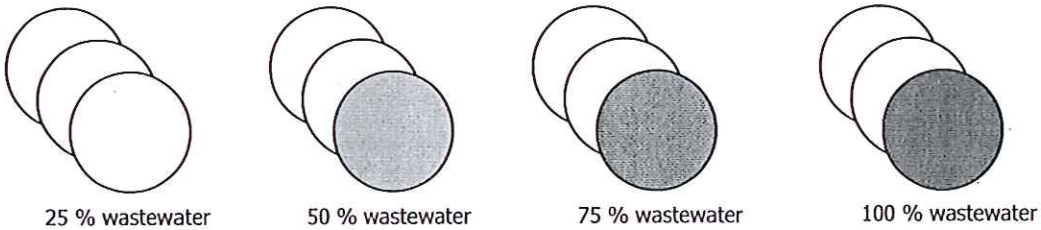
3 วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะประกอบด้วยวิธีการวิจัยสองส่วน คือ การศึกษาถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตแหนแดงด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ปริมาณ และคุณภาพของแหนแดงที่ผลิตด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งการดำเนินการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ดังนี้

3.1 การศึกษาในระยะที่ 1 การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

3.1.1 การเตรียมหน่วยทดลองและการดำเนินการทดลอง

เตรียมพื้นที่และเตรียมหน่วยทดลองถังเลี้ยงแหนแดง จากวงบ่อซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร สูง 1 เมตร จำนวน 12 หน่วย บรรจุน้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกร ซึ่งเป็น น้ำเสียจากกิจกรรมการเลี้ยง โดยทำการปรับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียที่ได้ด้วยน้ำบาดาลที่ 4 ระดับความเข้มข้น คือ 25 % 50 %, 75 % และ 100 % ของน้ำเสีย โดยมีหน่วยทดลองจำนวน 3 หน่วย (ซ้ำ) ในแต่ละความเข้มข้น โดยวางแผนการทดลองแบบ Complete randomize design (CRD) ทั้งนี้ทำการบรรจุน้ำเสียที่ใช้เลี้ยงแหนแดงลงสู่ถังจนถึงระดับความสูง 0.8 ม. จากก้นถัง ซึ่งทำให้มีปริมาตรน้ำในหน่วยทดลองแต่ละหน่วย เท่ากับ 0.9 ลบ.ม. เมื่อการเตรียมหน่วยทดลองแล้วเสร็จ จึงนำแหนแดง (*Azolla microphylla*) ลงเลี้ยงในหน่วยทดลอง ที่อัตรา 0.5 กก./หน่วย (ภาพที่ 1) ทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์



ภาพที่ 1 แผนการทดลองในระยะที่ 1

3.1.2 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) ตัวอย่างน้ำ

ทำการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกร ก่อนที่จะทำการเจือจางน้ำเสีย เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียภายหลังการเจือจางที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนการนำแหนแดงลงเลี้ยง และทำการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากหน่วยทดลองทั้ง 12 หน่วย ทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ (ตารางที่ 1) นำตัวอย่างน้ำที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ ตามที่ได้ระบุในตารางที่ 2 โดยบางดัชนีจะทำการตรวจวัดในภาคสนาม ณ จุดเก็บตัวอย่าง และบางดัชนีจะทำการตรวจวัดที่ห้องปฏิบัติการของคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยใช้วิธีการในการเก็บตัวอย่าง รักษาตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างตามที่ได้กำหนดไว้ใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WPCF, 1992)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างน้ำ วิธีการเก็บและระยะเวลาในการตรวจวัดน้ำเสียในการศึกษาระยะที่ 1

ตัวอย่างน้ำ	วิธีการเก็บ	ระยะเวลาในการตรวจวัด
น้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกร	Grab sampling	ก่อนการเจือจาง
น้ำเสียภายหลังการเจือจางที่สัดส่วนต่างๆ (Influent)	Grab sampling	หลังการเจือจางก่อนเริ่มเลี้ยงแหนแดง
น้ำเสียในหน่วยทดลอง และน้ำจากบ่อควบคุม	Composite sampling จาก 3 จุดเก็บ (ผิวน้ำ กลางน้ำ และที่ก้นถัง)	ทุก ๆ สัปดาห์ ภายหลังเริ่มเลี้ยงแหนแดง

ตารางที่ 2 ดัชนีคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัด และวิธีการในการวิเคราะห์

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	วิธีวิเคราะห์
BOD_5	mg/L	Azide modification method
COD	mg/L	Closed reflux method
TSS	mg/L	Gravimetric method, dried at 103-105 ^{o}C
TDS	mg/L	Multiprobe water analysis
TKN	mg/L	Kjeldahl method
TP	mg/L	Colorimetric method
DO	mg/L	Membrane electrode meter (DO meter)
EC	μS/cm	Conductivity meter
pH	-	Electrometric method (pH meter)
Temperature	^{o}C	Thermometer
Heavy metal* : Cu, Zn and Cd	mg/L	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

หมายเหตุ: * ตรวจวัดเฉพาะในน้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกร (ก่อนการเจือจาง) ของระยะที่ 1

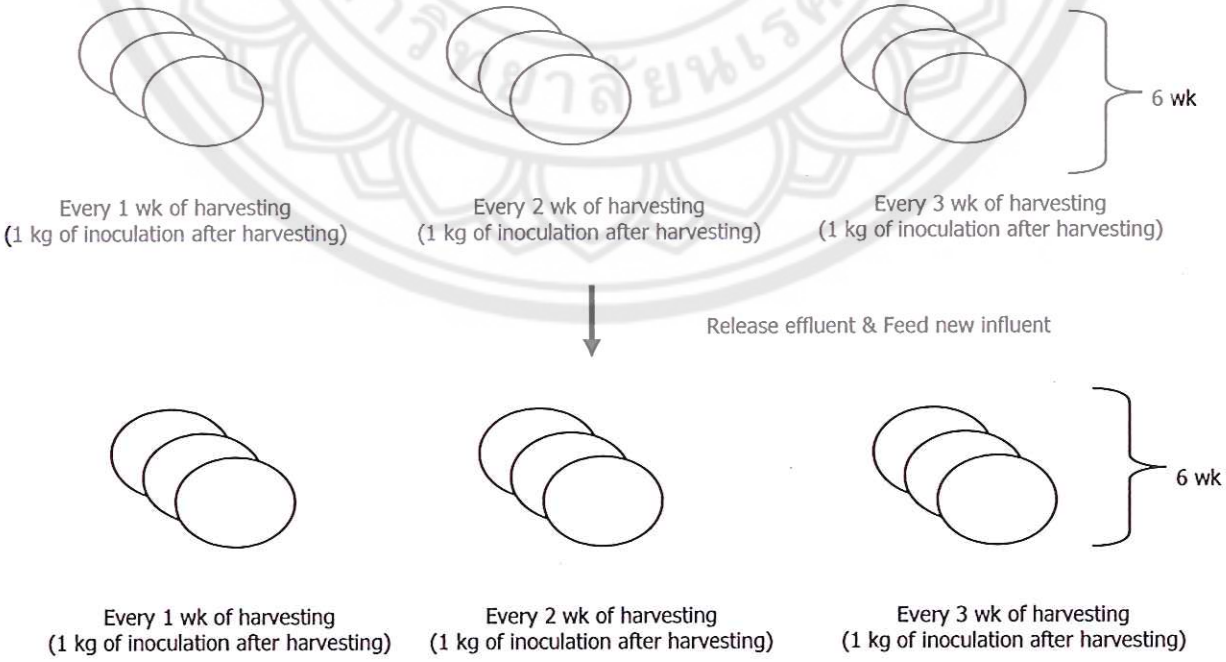
ความเข้มข้นแตกต่างกัน ซึ่งจะบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้และลักษณะของน้ำเสียที่เหมาะสมในการใช้ในผลิตแหนแดง

3.2 การศึกษาในระยะที่ 2 การศึกษาถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสีย จากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

การทดลองในระยะที่ 2 นี้ เป็นการทดลองต่อเนื่อง เพื่อศึกษาถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง โดยทำการศึกษาต่อยอดจากผลการศึกษาที่ได้จากการศึกษาในระยะที่ 1

3.2.1 การเตรียมหน่วยทดลองและการดำเนินการทดลอง

หน่วยทดลองวงบ่อซีเมนต์จากการทดลองในระยะที่ 1 จะถูกนำมาใช้ในการบรรจุน้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกรที่มีการเจือจางในระดับความเข้มข้นที่เลือกใช้ โดยพิจารณาจากผลการศึกษาในระยะที่ 1 โดยทำการบรรจุน้ำเสียลงถังจนถึงระดับความสูง 0.8 ม. จากก้นถัง ซึ่งทำให้มีปริมาตรน้ำในหน่วยทดลองแต่ละหน่วย เท่ากับ 0.9 ลบ.ม. เมื่อเตรียมหน่วยทดลองแล้วเสร็จ จึงนำ แหนแดง (*Azolla microphylla*) ลงเลี้ยงในหน่วยทดลอง ที่อัตรา 0.5 กก./หน่วย ในการทดลองในระยะที่ 2 นี้ จะทำการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบ ด้วยระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน (Treatment) คือ ทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ โดยมีหน่วยทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา และวางแผนการทดลองแบบ Complete randomize design ในการเก็บเกี่ยวแต่ละครั้ง จะเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจนหมด แล้วจึงนำแหนแดงในอัตราเดิม คือ 0.5 กก./หน่วย ลงเลี้ยงอีกครั้ง ทั้งนี้จะทำการระบายและเปลี่ยนน้ำเสียในทุกหน่วยทดลอง ที่ระยะเวลา 6 สัปดาห์ ภายหลังจากเริ่มต้นเลี้ยง ทำการทดลองเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 12 สัปดาห์ (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 แผนการทดลองในระยะที่ 2

3.2.2 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) ตัวอย่างน้ำ

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากฟาร์มสุกร น้ำเสียภายหลังการเจือจางตามสัดส่วนที่ได้เลือกใช้ ก่อนที่จะใช้น้ำเสียนั้นในการเลี้ยงแหนแดง (Influent) และตัวอย่างน้ำเสียที่ระบายออกจากหน่วยทดลองก่อนการเติมน้ำเสียใหม่ลงสู่หน่วยทดลอง และเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากหน่วยทดลองทั้ง 9 หน่วย ทุกๆ สัปดาห์ (ตารางที่ 4) นำตัวอย่างน้ำเสียที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพน้ำตามที่ได้ระบุในตารางที่ 2 โดยใช้วิธีการในการเก็บตัวอย่าง รักษาตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างเช่นเดียวกับการศึกษาในระยะที่ 1

2) ตัวอย่างพืช

สังเกตลักษณะทั่วไปของแหนแดง ตลอดระยะเวลาที่ทำการเลี้ยงในระบบและเมื่อทำการเก็บเกี่ยว และเก็บตัวอย่างแหนแดง เพื่อนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยทำการเก็บตัวอย่างทั้งก่อนนำลงเลี้ยงในระบบและภายหลังการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุกครั้ง ทั้งนี้มีรายละเอียดในศึกษาและตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแหนแดง ดังแสดงในตารางที่ 3 เช่นเดียวกับการศึกษาในระยะที่ 1

ตารางที่ 4 ตัวอย่างน้ำ วิธีการเก็บและระยะเวลาในการตรวจวัดน้ำเสียในการศึกษาระยะที่ 2

ตัวอย่างน้ำ	วิธีการเก็บ	ระยะเวลาในการตรวจวัด
น้ำเสียจากฟาร์มสุกรและน้ำเสียภายหลังการเจือจางตามสัดส่วนที่เลือกใช้ (Influent)	Grab sampling	ก่อนและหลังการเจือจางก่อนเริ่มเลี้ยงแหนแดง
น้ำเสียที่ระบายออกจากระบบ ก่อนการเติมน้ำเสียชุดใหม่	Grab sampling	เมื่อทำการเปลี่ยนน้ำ ที่ระยะ 6 wk หลังเริ่มเลี้ยงแหนแดง
น้ำเสียในระบบ/หน่วยทดลอง	Composite sampling จาก 3 จุดเก็บ (ผิวน้ำ กลางน้ำ และที่ก้นถัง)	ทุก ๆ สัปดาห์ ภายหลังเริ่มเลี้ยงแหนแดง

3.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) แนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บเกี่ยวหรือความถี่ในการเก็บเกี่ยวแหนแดงกับการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในระบบ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำ

ตามช่วงเวลา ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา เพื่อการวิเคราะห์ถึงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และช่วงเวลาที่เหมาะสมในบำบัดหรือกักพักน้ำเสียในระบบ

2) แนวทางที่เหมาะสมในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในการผลิตแหนแดง

นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในการผลิตแหนแดง โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บเกี่ยวแหนแดงหรือความถี่ในการเก็บเกี่ยวแหนแดงกับผลผลิตแหนแดงทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพของแหนแดง การเปลี่ยนแปลงของผลผลิตแหนแดงตามช่วงเวลา ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา

4 สรุปผลการวิจัย

4.1 การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

1) ความเป็นไปได้ในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสีย

การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งดำเนินการโดยน้ำทิ้งจากบ่อพักน้ำเสียของฟาร์มสุกรมาทำการเจือจางที่สัดส่วนความเข้มข้นร้อยละ 25 50 75 และ 100 แล้วทำการบำบัดด้วยระบบพืชลอยน้ำที่ใช้แหนแดงเป็นพืชในระบบ จากผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียเริ่มต้นก่อนการบำบัด พบน้ำเสียมีค่ามลสารปนเปื้อนในรูป BOD_5, COD, TSS, TKN, TP มีค่าเท่ากับ 90.0, 168.0, 90.0, 95.5 และ 7.24 mg/l ตามลำดับ และปริมาณ TCB ในน้ำเสีย มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml ในส่วนของโลหะหนัก ตรวจพบค่าความเข้มข้นของ Cu, Zn และ Cd ในน้ำเสีย มีค่าระหว่าง 0.0140-0.0343, 0.2093-0.4640 และ 0.0000-0.0006 mg/l ตามลำดับ

เมื่อทำการเจือจางน้ำเสียด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 50 และ 75 ก่อนนำน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการบำบัด ผลการตรวจวัดคุณลักษณะของน้ำเสีย พบน้ำเสียมีค่าอุณหภูมิ pH EC TDS และ Salinity ระหว่าง 24.8-25.3 °C, 7.0-7.3, 757.0-1,072.0 µS/cm, 379.0-536.0 mg/l และ 0.37-0.53 ppt ตามลำดับ และ DO มีค่าต่ำระหว่าง 0.01-0.02 mg/l ปริมาณสารอินทรีย์ในรูป BOD_5 มีค่าระหว่าง 24.8-28.7 mg/l COD มีค่าระหว่าง 28.0-128.0 mg/l TSS มีค่าระหว่าง 30.0-77.0 mg/l TKN มีค่าระหว่าง 33.3-58.5 mg/l TP มีค่าระหว่าง 2.1-6.2 mg/l และ TCB มีค่าระหว่าง 11,000.0 ถึง เท่ากับหรือมากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml ทั้งนี้ พบค่าการปนเปื้อนของมลสารส่วนใหญ่อยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ยกเว้นค่า BOD_5 ในน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 100 ซึ่งพบว่ามีค่าสูงกว่าค่า BOD_5 ของเกณฑ์มาตรฐาน ก ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 60 mg/l แต่ยังคงต่ำกว่าค่า BOD_5 ของเกณฑ์มาตรฐาน ข ซึ่งกำหนดให้มีค่า BOD_5 เท่ากับ 100 mg/l

ผลการศึกษาโดยรวม พบว่า ในการบำบัดน้ำเสียในระบบอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลา 3 สัปดาห์ นั้น ค่า DO และ pH ของน้ำเสียทุกสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียในระบบบำบัดพืชลอยน้ำ รวมถึงหน่วยควบคุม ซึ่งมีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 100 แต่ไม่มีพืชในระบบนั้น พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะค่า DO ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็นลำดับ ขณะที่ ค่า EC และ Salinity ของน้ำเสียทุกสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย และหน่วยควบคุม มีแนวโน้มลดลง

ในด้านประสิทธิภาพการบำบัดของระบบนั้น พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำสามารถลดมลสารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรได้ โดยพบว่าแหนแดงในระบบสามารถสนับสนุนกระบวนการบำบัดในระบบได้ แต่อย่างไรก็ตาม แหนแดงจะสามารถอยู่รอดและช่วยระบบในการบำบัดได้ในกรณีที่ระบบมีอัตราการรองรับความเข้มข้นของน้ำเสียในรูปของ COD (COD loading rate) และ BOD (BOD loading rate) สูงไม่เกิน 1.4 และ 1.0 g/m^2/d ที่ระยะเวลาการบำบัดรวม 21 วัน ซึ่งเป็นอัตราการรองรับสารอินทรีย์ที่แหนแดงสามารถเจริญเติบโตอยู่ได้ และการดำรงอยู่ของแหนแดงจะช่วยส่งเสริมกระบวนการบำบัด ในทางกลับกันคือแหนแดงที่ไม่สามารถเจริญเติบโตและตายลงในระบบจะเป็นการเพิ่มของเสียให้กับน้ำเสีย ทั้งนี้ ผลการศึกษาพบว่าในระบบพืชลอยน้ำที่มีแหนแดงเป็นพืชในระบบนั้น ในระบบที่มีความเข้มข้นของน้ำเสียในรูปของความเข้มข้นของ COD และ BOD เท่ากับ 28.0 และ 24.8 mg/l ตามลำดับ หรือจากกระบวนการทดลองในครั้งนี้คือระบบที่รองรับน้ำเสียที่มีอัตราความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 ซึ่งคิดเป็นอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD ในช่วงระยะเวลา 21 วัน ของการบำบัด เท่ากับ 1.0 และ 0.89 g/m^2/d ตามลำดับ นั้น โดยรวมแล้ว ระบบจะมีประสิทธิในการบำบัด BOD และ TKN สูงและแตกต่างจากหน่วยควบคุมที่ไม่มีแหนแดง ที่มีอัตราการรองรับของเสียเท่ากับ 6.0 g COD/m^2/d และ 32.0 g BOD/m^2/d รวมถึงระบบพืชลอยน้ำประเภทเดียวกันที่มีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ที่สูงกว่า คือระหว่าง 1.4-6.0 g COD/m^2/d และ 1.0-32.0 g BOD/m^2/d

2) ความเป็นไปได้ในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

การศึกษาด้านผลผลิตแหนแดง พบว่ามีเพียงระบบที่มีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD เท่ากับ 1.0 และ 0.89 g/m^2/d ตามลำดับ หรือจากกระบวนการทดลองในครั้งนี้คือในระบบที่รองรับน้ำเสียที่มีอัตราความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 เท่านั้น ที่สามารถให้ผลผลิตในทุกซ้ำของหน่วยทดลอง โดยผลผลิตที่ได้มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นจากปริมาณแหนแดงที่ปล่อยลงสู่ระบบบำบัดเมื่อเริ่มกระบวนการบำบัด โดยพบแหนแดงมีค่า RGR เฉลี่ยเท่ากับ 0.046 d^{-1} และเมื่อพิจารณาด้านคุณภาพ พบแหนแดงที่ผลิตได้มีค่า Dry matter ต่ำกว่าการผลิตตามปกติ มีค่า CP ในระดับเดียวกับแหนแดงที่มีการผลิตตามปกติ ในขณะที่มีค่า P สูงกว่าแหนแดงที่มีการผลิตตามปกติ

4.2 การศึกษาถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

1) แนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

การวิเคราะห์แนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในระบบบำบัดพืชลอยน้ำ โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บเกี่ยวหรือความถี่ในการเก็บเกี่ยวแหนแดงกับการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในระบบ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำตามช่วงเวลา ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา เพื่อการวิเคราะห์ถึงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และช่วงเวลาที่เหมาะสมในบำบัดหรือกักพักน้ำเสียในระบบ โดยใช้ผลจากการศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร มาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้น ในการดำเนินการศึกษาจึงทำการเจือจางน้ำเสียจากฟาร์มด้วยอัตราส่วนการเจือจางร้อยละ 25 ก่อนนำน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด

การศึกษาได้ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำในระบบบำบัดที่ทำการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบที่ช่วงเวลาแตกต่างกัน คือ ทุก 1 2 และ 3 สัปดาห์ โดยดำเนินระบบเป็นระยะเวลานานรวม 6 สัปดาห์ ทำการศึกษาจากสิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ และศึกษาในลักษณะเดียวกันนี้จำนวน 2 ครั้ง น้ำเสียที่ทำการศึกษาเป็นน้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ผลการตรวจวัดคุณสมบัติน้ำเสียก่อนการเจือจาง พบมลสารปนเปื้อนในรูป BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ Phosphate ในน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 49.5-63.0, 63.0-152.0, 70.0-191.0, 13.4-65.8, 51.9-129.39 และ 15.1-22.3 mg/l ตามลำดับ และปริมาณ TCB ในน้ำเสีย มีค่ามากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml ผลตรวจวัดค่าความเข้มข้นของ Cu, Zn และ Cd ในน้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสีย พบมีค่าระหว่าง 0.1610-0.2245, 0.0170-0.0215 และ 0.2345-0.3095 mg/l ตามลำดับ ภายหลังการเจือจางน้ำเสียที่อัตราความเข้มข้นน้ำเสียร้อยละ 25 พบมลสารปนเปื้อนในรูป BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ Phosphate ใน น้ำเสีย มีค่าเท่ากับ 8.7-16.2, 40.0-88.0, 10.0-38.0, 2.2-23.0, 13.5-63.9 และ 2.0-6.0 mg/l ตามลำดับ และปริมาณ TCB ในน้ำเสีย มีค่ามากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml

ผลการศึกษาโดยรวม พบว่า ในการบำบัดน้ำเสียในระบบอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลา 6 สัปดาห์ นั้น ค่า DO ของน้ำเสียที่ทำการบำบัดในแต่ละหน่วยทดลองมีค่าลดต่ำลงในสัปดาห์แรกของการบำบัด แล้วจึงเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มคงที่โดยมีการผันแปรของค่า DO ในช่วงแคบๆ น้ำเสียในระบบมีค่า pH ระหว่าง 6.02-8.88 โดยมีค่าผันแปรในช่วงเป็นกรดเล็กน้อยถึงเป็นด่างเล็กน้อย น้ำเสียในระบบมีค่าอุณหภูมิ ระหว่าง 25.3-31.9 ^{o}C โดยพบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิน้ำผันแปรในช่วงแคบๆ ค่า EC ของน้ำเสียในแต่ละระบบในแต่ละสัปดาห์มีแนวโน้มลดต่ำลงเป็นลำดับ โดยพบน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 3 สัปดาห์ มีค่า EC ต่ำกว่าน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 2 และ 1 สัปดาห์ ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่า Salinity ของน้ำเสีย

ในด้านประสิทธิภาพการบำบัดของระบบนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ระบบบำบัดมีค่าการรองรับสารอินทรีย์เมื่อเริ่มระบบ ในรูปของ COD และ BOD loading rate เท่ากับ 30.0-36.0 และ 6.5-11.7 และ g/m^2 ตามลำดับ หรือระบบมีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ BOD ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด (42 วัน) เมื่อเริ่มทำการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบเท่ากับ 0.71-0.86 และ 0.16-0.29 g/m^2/d ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบ ($P \geq 0.05$) ขณะที่การบำบัด COD ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 สัปดาห์นั้น มีประสิทธิภาพการบำบัด COD สูงสุดในสัปดาห์ที่ 3 และ 5 ตามลำดับ โดยการบำบัด COD ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 และ 3 สัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแต่ละสัปดาห์ของการบำบัดของแต่ละระบบ ($P \geq 0.05$)

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของ BOD ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกันประสิทธิภาพการบำบัด COD ขณะที่การบำบัด BOD ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 และ 3 สัปดาห์นั้น มีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 2 และแตกต่างจากค่าที่พบในสัปดาห์อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุป ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบในการบำบัดสารอินทรีย์ ทั้งในรูปของ COD และ BOD จะพบว่ามีประสิทธิภาพไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระหว่างระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ในแต่ละระบบอาจพบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ทั้งในรูปของ COD และ BOD แตกต่างกันระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด

ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูปของ TSS ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบ ($P \geq 0.05$) และประสิทธิภาพการบำบัด TSS ของแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างแต่ละสัปดาห์ของการบำบัด ($P \geq 0.05$) เช่นกัน

ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูปของ TDS ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบ ยกเว้นใน

ประสิทธิภาพการบำบัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (TCB) ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TCB ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบ ขณะที่ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TCB สูงที่สุด ในสัปดาห์ที่ 5 ของการบำบัด

2) แนวทางที่เหมาะสมในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในการผลิตแหนแดง

วิเคราะห์ถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในการผลิตแหนแดง โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บเกี่ยวแหนแดงหรือความถี่ในการเก็บเกี่ยวแหนแดงกับผลผลิตแหนแดงทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพของแหนแดง การเปลี่ยนแปลงของผลผลิตแหนแดงตามช่วงเวลา ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา

2.1) การเจริญเติบโตของแหนแดงและปริมาณผลผลิต

การศึกษาการเจริญเติบโตของแหนแดงในรูปของอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) ของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1 2 และ 3 สัปดาห์ นั้น พบว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการกักพักน้ำหรือระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียที่เท่ากันนั้น แหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้ในแต่ละสัปดาห์ มีค่า RGR ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน ในขณะที่ แหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 2 สัปดาห์ มีค่า RGR แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยว โดยมีค่าสูงที่สุดในรอบที่ 3 ของการเก็บเกี่ยวหรือที่สัปดาห์ที่ 6 ของการบำบัดของระบบ

การตรวจวัดอัตราการผลิตมวลชีวภาพในรูปของผลผลิตน้ำหนักสดของแหนแดง เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ จะพบว่าที่ระยะเวลาการกักพักน้ำหรือระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียที่เท่ากันนั้น พบว่า โดยส่วนแล้วผลผลิตน้ำหนักสดของแหนแดงจากระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัดที่พบว่าผลผลิตจากระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์ มีผลผลิตน้ำหนักสดสูงกว่าในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุกสัปดาห์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้ พบว่าอัตราการเพิ่มของน้ำหนักสดของแหนแดงในระบบบำบัดมีค่าต่ำกว่าอัตราการขยายตัวของแหนแดงในพื้นที่เลี้ยงที่เหมาะสม เมื่อทำการเก็บเกี่ยวแหนแดงจนครบระยะเวลาการดำเนินระบบทั้งสิ้น 6 สัปดาห์ พบว่า ระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 1 2 และ 3 สัปดาห์ ให้ผลผลิตแหนแดงในรูปน้ำหนักสดสุทธิรวมตลอด 6 เดือน เท่ากับ 5.90 6.82 และ 3.33 kg/m^2 หรือให้ผลผลิตน้ำหนักสดสุทธิเฉลี่ย 327.89 378.94 และ 184.95 $g/m^2/week$ ซึ่งจะพบกำลังการผลิตผลผลิตน้ำหนักสดสุทธิสูงในระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์

การตรวจวัดอัตราการผลิตมวลชีวภาพในรูปของผลผลิตน้ำหนักแห้งของแหนแดง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลผลิตมวลชีวภาพน้ำหนักแห้งในแต่ละสัปดาห์ พบว่าผลผลิตมวลชีวภาพน้ำหนักแห้งที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันหรือสัปดาห์เดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน ขณะที่แหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 2 สัปดาห์ มีผลผลิตน้ำหนักแห้งเฉลี่ยสูงในรอบที่ 3 ของการเก็บเกี่ยว หรือในสัปดาห์ที่ 6 ของการบำบัด ซึ่งสอดคล้องกับค่า RGR ของแหนแดง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวแหนแดงจนครบระยะเวลาการดำเนินระบบทั้งสิ้น 6 สัปดาห์ พบว่า ระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ ให้ผลผลิตแหนแดงในรูปน้ำหนักแห้งสุทธิรวมตลอด 6 เดือน เท่ากับ 0.19, 0.25 และ 0.11 kg/m^2 หรือให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งสุทธิเฉลี่ย 10.30, 13.77 และ 6.09 $g/m^2/week$ ซึ่งจะพบกำลังการผลิตผลผลิตน้ำหนักแห้งสุทธิสูงในระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์ สอดคล้องกับการผลิตมวลชีวภาพแหนแดงในรูปน้ำหนักสดสุทธิ

สรุปโดยรวม จะพบว่าในช่วงระยะเวลาของการดำเนินระบบครบ 6 สัปดาห์นั้น ระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์ มีค่า RGR ของแหนแดงในระบบสูงที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิตน้ำหนักสดสุทธิและปริมาณผลผลิตน้ำหนักแห้งสุทธิ ซึ่งมีค่าสูงในระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์ เช่นกัน

2.2) คุณภาพของผลผลิตแหนแดง

ค่าวัตถุแห้งของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1 2 และ 3 สัปดาห์นั้น พบว่าในแต่ละระบบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็นลำดับตามระยะเวลาการบำบัดของระบบที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า DM เฉลี่ย ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า DM ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน และ จะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า DM เฉลี่ย ต่ำกว่าค่า DM ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติเล็กน้อย

ค่าโปรตีนหยาบของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับตามระยะเวลาการบำบัดของระบบที่เพิ่มสูงขึ้น โดยในทุกระบบพบค่า CP สูงที่สุดใน แหนแดงที่ได้จากรอบแรกของการเก็บเกี่ยว ค่า CP เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในสัปดาห์เดียวกัน มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน ทั้งนี้ พบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า CP ในเกณฑ์เดียวกันกับค่า CP ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และบางส่วนพบมีค่า CP สูงกว่าค่า CP ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ โดยแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่า CP ใกล้เคียงกับค่า CP ของแหนเล็ก และมีค่าสูงกว่าค่า CP ของแหนใหญ่ ทั้งนี้ โปรตีนที่ตรวจพบในเนื้อเยื่อของแหนแดงจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำนั้น ส่วนหนึ่งเป็นผลจากการนำอนินทรียสารไนโตรเจนในน้ำเสียมาใช้ในการเปลี่ยนรูปเป็นอินทรียสารของแหนแดง ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียรูปแบบหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียพืชลอยน้ำนั่นเอง

ค่าเยื่อใยหยาบของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับตามระยะเวลาการบำบัดของระบบที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่า CF ของแหนเล็กและแหนใหญ่ที่ระบุในตารางคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์ จะพบว่าค่า CF ของแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่าสูงกว่ากับค่า CF ของแหนเล็ก และส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าค่า CF ของแหนใหญ่

เมื่อเปรียบเทียบค่า P เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า P ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน ทั้งนี้ ค่าฟอสฟอรัสของแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่าในเกณฑ์เดียวกันกับค่า P ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และบางส่วนพบมีค่า P สูงกว่าค่า P ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า P ของแหนเล็กและแหนใหญ่ที่ระบุในตารางคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์ จะพบว่าค่า P ของแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่า P สูงกว่าค่า P ของทั้งแหนเล็กและแหนใหญ่ ทั้งนี้ ฟอสฟอรัสที่แหนแดงในระบบบำบัดพืชลอยน้ำนำมาใช้นั้น เป็นฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ซึ่งการนำฟอสฟอรัสมาใช้โดยแหนแดงนั้นเป็นกระบวนการบำบัดฟอสฟอรัสใน น้ำเสียของระบบบำบัดพืชลอยน้ำนั่นเอง

ค่า K เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า K ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน และจะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า K สูงกว่าค่า K ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ

ค่า Ca เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Ca ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน โดยจะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า Ca โดยเฉลี่ยต่ำกว่า ค่า Ca ในแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และมีค่าต่ำกว่าค่า Ca ของทั้งแหนเล็กและแหนใหญ่ ทั้งนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากน้ำเสียมีปริมาณ Ca น้อย หรือมีอยู่ในรูปของตะกอนเคมีที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้

ค่า Mg เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Mg ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน โดยจะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า Mg สูงกว่าค่า Mg ในแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ

ค่าโลหะหนักเฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Zn Cd และ Cu ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกันเช่นกัน ทั้งนี้ แหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบบำบัด มีค่าโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด เพิ่มสูงขึ้นจากค่าโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ของแหนแดงที่ปล่อยลงเลี้ยงในระบบ

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	
	1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2	ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
	2.1 น้ำเสียจากฟาร์มสุกร	3
	2.2 การจัดการน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	5
	2.3 ระบบบำบัดพืชลอยน้ำ	7
	2.4 แหนแดง	8
	2.5 การใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสีย	13
	2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
3	วิธีดำเนินการวิจัย	
	3.1 การศึกษาในระยะที่ 1 การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดง ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	16
	3.2 การศึกษาในระยะที่ 2 การศึกษาถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง	19
4	ผลการทดลองและอภิปรายผล	
	4.1 การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	22
	4.2 การศึกษาถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง	44
5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	
	5.1 สรุปผลการวิจัย	78
	5.2 ข้อเสนอแนะ	86
	บรรณานุกรม	87
	Output ที่ได้จากโครงการ	90
	ภาคผนวก	91
	บทความวิจัยที่ตีพิมพ์บน Proceedings ในการประชุมวิชาการระดับชาติ	

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ปริมาณน้ำ ธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดในมูลสุกร	3
2.2	ธาตุอาหารในมูลและปัสสาวะสดของสุกรขุน	3
2.3	ลักษณะโดยเฉลี่ยของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจำแนกตามขนาดฟาร์ม	4
2.4	มาตรฐานเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร	5
2.5	ข้อดีและข้อเสียของระบบถังกรองไร้อากาศและระบบบ่อปรับเสถียร	6
2.6	กลไกการบำบัดมลสารในกระบวนการบำบัดแบบพืชน้ำ	8
3.1	ตัวอย่างน้ำ วิธีการเก็บและระยะเวลาในการตรวจวัดน้ำเสียในการศึกษาระยะที่ 1	17
3.2	ดัชนีคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัด และวิธีการในการวิเคราะห์	17
3.3	ดัชนีตัวอย่างพืชที่ทำการตรวจวัด และระยะเวลาในการตรวจวัด	18
3.4	ตัวอย่างน้ำ วิธีการเก็บและระยะเวลาในการตรวจวัดน้ำเสียในการศึกษาระยะที่ 2	20
4.1	คุณสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร (ร้อยละ 100) และคุณสมบัติของน้ำเสียภายหลังการเจือจาง ที่สัดส่วนร้อยละ 25 50 และ 75	23
4.2	ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบบำบัดพืชลอยน้ำ	29
4.3	ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งของระบบบำบัดพืชลอยน้ำ	32
4.4	ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารของระบบบำบัดพืชลอยน้ำ	36
4.5	ประสิทธิภาพการบำบัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ของระบบบำบัดพืชลอยน้ำ	40
4.6	ผลผลิตแหนแดง จากระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน	41
4.7	คุณค่าทางโภชนะและแร่ธาตุอาหารในแหนแดง จากระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน	42
4.8	คุณสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และคุณสมบัติของน้ำเสียภายหลังการเจือจาง ที่สัดส่วนร้อยละ 25 (ระยะที่ 2 ของการทดลอง)	45
4.9	ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชแตกต่างกัน	52
4.10	ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งของระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชแตกต่างกัน	55
4.11	ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารของระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชแตกต่างกัน	59

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
3.1	แผนการทดลองในระยะที่ 1	16
3.2	แผนการทดลองในระยะที่ 2	19
4.1	การเปลี่ยนแปลงของค่า DO ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียระหว่างการบำบัด	25
4.2	การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียระหว่างการบำบัด	25
4.3	การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียระหว่างการบำบัด	26
4.4	การเปลี่ยนแปลงของค่า EC ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียระหว่างการบำบัด	27
4.5	การเปลี่ยนแปลงของค่าความเค็มของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด	27
4.6	ค่า COD ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด	30
4.7	ค่า BOD ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด	31
4.8	ค่า TSS ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด	33
4.9	ค่า TDS ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด	35
4.10	ค่า TKN ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด	37
4.11	ค่า TP ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด	39
4.12	ค่า TCB ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด	40
4.13	ค่า DO ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	47
4.14	ค่า pH ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
4.15	อุณหภูมิของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	49
4.16	ค่า EC ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	50
4.17	ค่า Salinity ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	50
4.18	ค่า COD ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	53
4.19	ค่า BOD ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	54
4.20	ค่า TSS ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	56
4.21	ค่า TDS ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	57
4.22	ค่า TKN ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	60
4.23	ค่า TP ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	61
4.24	ค่า Dissolved P ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	62
4.25	ค่า TCB ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน	64

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำต่างๆ ทั้งในแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน กำลังประสบปัญหาความเสื่อมโทรม อันเนื่องมาจากการปนเปื้อนของมลสารต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่มีที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ ทั้งจากกิจกรรมชุมชน กิจกรรมการพัฒนาทั้งในด้านการอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และการท่องเที่ยว ซึ่งการปนเปื้อนมลสารของน้ำในแหล่งน้ำจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของทรัพยากรน้ำ ทั้งด้านกายภาพ เคมีและชีวภาพ ส่งผลกระทบต่อสมดุลของระบบนิเวศในแหล่งน้ำ และเกิดผลกระทบต่อการนำน้ำนั้นไปใช้ประโยชน์ ความเสื่อมโทรมหรือความเน่าเสียของทรัพยากรน้ำ อาจปรากฏทั้งในรูปของการสูญเสียออกซิเจนละลายน้ำ (DO) หรือมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ รวมถึงจุลชีพในปริมาณสูง

การเลี้ยงสุกร เป็นกิจกรรมด้านปศุสัตว์ ซึ่งในปัจจุบันมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งนอกเหนือจากผลผลิตที่ได้จากการเลี้ยงแล้ว กิจกรรมการเลี้ยงยังก่อให้เกิดของเหลือและของเสีย ทั้งในรูปของของแข็งและของเหลวหรือน้ำเสียเพิ่มขึ้นด้วย น้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียจากการล้างคอก ซึ่งจะมีทั้งเศษอาหาร และสิ่งขับถ่ายของสุกรปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ซึ่งหากไม่มีการจัดการที่ดีก่อนการระบายลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งรองรับน้ำเสียนั้นอย่างแน่นอน น้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะมีมลสารในรูปของของแข็ง สารอินทรีย์ และธาตุอาหารปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยการลดปริมาณมลสารเหล่านี้ในน้ำเสียลง ด้วยการนำกลับมาใช้ประโยชน์ จะเป็นการลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม ขณะที่ เกษตรกรจะได้รับประโยชน์กลับคืนจากการบำบัดนั้น ซึ่งในเบื้องต้นอาจเป็นการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับไปใช้ทำความสะอาดคอกอีกครั้ง และหากวิธีการบำบัดที่ใช้เป็นวิธีการที่ไม่ต้องการงบลงทุนสูง เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เกษตรกรสามารถนำไปดำเนินการได้จริงและเป็นวิธีการที่สามารถให้ผลผลิตตอบแทนแก่เกษตรกรในรูปแบบอื่นได้ จะทำให้การดำเนินการบำบัดนั้น ส่งผลดีทั้งต่อสิ่งแวดล้อม ชุมชนโดยรอบบริเวณฟาร์มและเกษตรกรผู้ดำเนินการ

โครงการวิจัยนี้ จึงมีแนวทางในการวิจัยเพื่อศึกษาถึงแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร **เพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนการระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ร่วมกับการใช้ประโยชน์ จากมลสารในน้ำเสียซึ่งอยู่ในรูปของธาตุอาหารในการผลิตแหนแดง ซึ่งเกษตรกรสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในรูปของการใช้เป็นปุ๋ย หรืออาหารสัตว์ ทั้งนี้ เพื่อนำเสนอแนวทางในการลดปัญหามลพิษน้ำและเป็นการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป**

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแหนแดงด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

1.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณ และคุณภาพของแหนแดงที่ผลผลิตด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยของโครงการ คือทำการศึกษาความเป็นไปได้ แนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และประสิทธิภาพในการบำบัดของแหนแดง รวมถึงการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตแหนแดงด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และการศึกษาถึงปริมาณ และคุณภาพของผลผลิตแหนแดงที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ผลการวิจัย ทำให้ทราบแนวทางในการบำบัดน้ำเสีย ที่ปลดปล่อยออกจากฟาร์มสุกร เพื่อให้น้ำเสียนั้นมีคุณภาพดีขึ้นและไม่ก่อผลกระทบต่อแหล่งรองรับน้ำเสียนั้น และทราบแนวทางในการใช้ประโยชน์จากน้ำเสียในการผลิตแหนแดง ซึ่งเป็นผลผลิตที่สามารถสร้างมูลค่าได้ในหลายแนวทาง กลุ่มที่ได้รับประโยชน์/หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ คือ กลุ่มเกษตรกร ซึ่งจะได้แนวทางในการจัดการน้ำเสียจากฟาร์ม ซึ่งเป็นวิธีการที่มีต้นทุนในการดำเนินการต่ำ เนื่องจากใช้เทคโนโลยีธรรมชาติในการจัดการ และได้แนวการในการผลิตแหนแดง โดยการใช้ประโยชน์จากของเสียที่ไม่มีมูลค่าและไม่เป็นที่ต้องการในการนำมาใช้ในการผลิตแหนแดง ซึ่งจะเป็นการผลิตที่มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากใช้ธาตุอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสียในกระบวนการผลิต นอกจากนั้น หน่วยงานด้านการเกษตรและหน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อม ยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการส่งเสริมเพื่อให้เกิดการจัดการน้ำเสีย และการนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม

1.4.2 ผลการวิจัย จะนำไปเผยแพร่ในวารสารทางวิชาการในสาขาที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นการเผยแพร่ข้อมูล อันจะนำไปสู่การนำไปประยุกต์ใช้หรือใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาต่อยอดต่อไป

1.4.3 นักวิจัยรุ่นใหม่ โดยเฉพาะนักศึกษาในระดับบัณฑิต จะได้ร่วมเรียนรู้และรับประสบการณ์ในการดำเนินการวิจัย

บทที่ 2
ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ที่มีผลผลิตทางการเกษตรทั้งประเภทพืชและสัตว์ โดยผลผลิตสัตว์ที่ผลิตได้นั้นถือเป็นแหล่งอาหารโปรตีนที่สำคัญ และสาเหตุเนื่องจากการเพิ่มจำนวนขึ้นของประชากร ประกอบกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีรวมถึงการดำเนินการผลิตเพื่อวัตถุประสงค์ทั้งการค้าภายในและภายนอกประเทศ ส่งผลให้ปริมาณการผลิตเพิ่มสูงขึ้น และทำให้ของเสียจากกระบวนการผลิตเพิ่มปริมาณมากขึ้นเป็นเงาตามตัวเช่นกัน

การทำฟาร์มสุกรเป็นกระบวนการผลิตสัตว์ที่มีปริมาณการผลิตสูงในอันดับต้นๆ ของประเทศ ในขณะที่ยังคงพบปัญหาการจัดการของเสียจากฟาร์มสุกรที่ยังไม่มีประสิทธิภาพอยู่เป็นระยะอย่างต่อเนื่อง และก่อผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะปัญหาด้านกลิ่นและน้ำเสีย ทั้งนี้ จะพบว่าในของเสียประเภทมูลและปัสสาวะของสุกรนั้น มีปริมาณธาตุอาหารเป็นองค์ประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก แสดงดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งหากไม่มีการจัดการน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่มีการปนเปื้อนธาตุอาหารและองค์ประกอบอื่นๆ ดังกล่าว ก่อนการระบายทิ้งลงสู่แหล่งรองรับโดยเฉพาะแหล่งน้ำแล้ว จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำได้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณน้ำ ธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดในมูลสุกร

รายการ	ปริมาณ*
มูล - สด (กก.)	84
มูล - แห้ง (กก.)	11
ความชื้นในมูล, %	87
ไนโตรเจนทั้งหมด (กก.)	0.52
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (กก.)	0.34

หมายเหตุ: * คิดต่อน้ำหนัก 1,000 กิโลกรัม/วัน
ที่มา : Mikkelsen and Gilliam (1995)

ตารางที่ 2.2 ธาตุอาหารในมูลและปัสสาวะสดของสุกรขุน

รายการ	ปริมาณ (% ของมูลและปัสสาวะสด)		
	มูล	เยี่ยวสด	รวม*
ไนโตรเจน	0.54	1.16	0.91
ฟอสฟอรัส	0.59	0.08	0.29
โปแตสเซียม	-	-	0.28
แคลเซียม	0.82	0.01	0.34
แมกนีเซียม	0.13	0.01	0.06

หมายเหตุ: *สัดส่วนของมูล: ปัสสาวะ ในสุกรเท่ากับ 2:3
ที่มา : Tietjen (1987)

น้ำเสียจากฟาร์มสุกรเป็นน้ำเสียจากกิจกรรมการเกษตร ที่ส่วนใหญ่เกิดจากการล้างทำความสะอาดคอก และโรงเรือน และการล้างทำความสะอาดความสกปรกจากปัสสาวะของสุกร ซึ่งจะทำให้เกิดน้ำเสียขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) โดยสิ่งขับถ่ายและน้ำเสียในฟาร์มจะมีความเข้มข้นต่างกันไปตามวิธีการทำความสะอาดและวิธีการใช้น้ำ ความเข้มข้นของน้ำเสียขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ การใช้น้ำมากทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียเจือจางลง แต่จะทำให้มีน้ำเสียในปริมาณที่มากขึ้นด้วย ทั้งนี้ มลสารหลักๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะประกอบด้วย สารอินทรีย์ ไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ที่มีสัดส่วนของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากประมาณ 40% (บุญชัย และนเรศ, 2550) ขณะที่ กรมควบคุมมลพิษ (2542) ได้รายงานผลการสำรวจลักษณะของฟาร์มสุกรตามขนาดของฟาร์มหรือปริมาณการเลี้ยง พบว่า ความเข้มข้นของค่าความสกปรกจากฟาร์มขนาดเล็กจะมีค่าน้อยกว่าฟาร์มขนาดใหญ่ ยกเว้นค่าฟอสฟอรัส (ตาราง 2.3) ทั้งนี้ เนื่องจากฟาร์มขนาดเล็กมีการใช้น้ำในการทำความสะอาดภายในฟาร์มมากกว่า

เนื่องจากน้ำเสียจากฟาร์มมีการปนเปื้อนมลสารในระดับความเข้มข้นสูง จึงจำเป็นจะต้องทำการบำบัดให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมก่อนการระบายลงสู่สิ่งแวดล้อม และเพื่อเป็นการลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้น ดังนั้น จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2548 (ตาราง 2.4) ซึ่งตามประกาศดังกล่าว ได้มีการจัดแบ่งเกณฑ์มาตรฐานออกเป็น 2 มาตรฐาน คือ มาตรฐาน ก และมาตรฐาน ข โดยมาตรฐาน ก ใช้ในการควบคุมการระบายน้ำทิ้งสำหรับฟาร์มประเภท ก และมาตรฐาน ข ใช้ในการควบคุมการระบายน้ำทิ้งสำหรับฟาร์ม ประเภท ข และ ค ทั้งนี้ฟาร์มสุกรประเภท ก เป็นฟาร์มสุกรที่มีขนาดใหญ่ที่มีแนวโน้มในการปล่อยน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงและมีปริมาณมากออกสู่แหล่งรองรับ

ตาราง 2.3 ลักษณะโดยเฉลี่ยของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจำแนกตามขนาดฟาร์ม

ขนาดฟาร์ม	อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/วัน/ตัว)	ลักษณะน้ำเสีย (mg/L)				
		BOD	COD	SS	TKN	TP
ขนาดใหญ่[1/]	10	3,000	7,000	4,800	540	8.0
ขนาดกลาง[2/]	15	2,500	3,000	3,000	540	9.5
ขนาดเล็ก[3/]	20	1,500	2,000	2,000	400	17.0

หมายเหตุ: [1/] ฟาร์มขนาดใหญ่ (ฟาร์มสุกรประเภท ก) มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ (นปส.) มากกว่า 600 นปส. (เทียบเท่าจำนวนสูตร มากกว่า 5,000 ตัว)

[2/] ฟาร์มขนาดกลาง (ฟาร์มสุกร ประเภท ข) มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ ตั้งแต่ 60-600 นปส. (เทียบเท่าจำนวนสุกร ตั้งแต่ 500-5,000 ตัว)

[3/] และฟาร์มขนาดเล็ก (ฟาร์มสุกรประเภท ค) มีน้ำหนักปศุสัตว์ ตั้งแต่ 6 ถึงน้อยกว่า 60 นปส. (เทียบเท่าจำนวนสุกร ตั้งแต่ 50-น้อยกว่า 500 ตัว)

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2542)

ตาราง 2.4 มาตรฐานเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

ดัชนีคุณภาพน้ำ	เกณฑ์มาตรฐานสูงสุด		
	หน่วย	มาตรฐาน ก	มาตรฐาน ข
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	5.5-9	5.5-9
บีโอดี (BOD)	mg/l	60	100
ซีโอดี (COD)	mg/l	300	400
สารแขวนลอย (SS)	mg/l	150	200
ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (TKN)	mg/l	120	200

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2546)

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมลสารในของเสียจากฟาร์มสุกรส่วนหนึ่งเป็นมลสารที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งนอกจากจะเป็นการป้องกันการเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าจากของเสียอีกด้วย ทั้งนี้ จึงพบการนำของเสียจากฟาร์มสุกร รวมถึงฟาร์มปศุสัตว์อื่นๆ มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ กัน ดังนี้

1) นำมาใช้เป็นปุ๋ยในกิจกรรมการเพาะปลูก

2) นำมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน ในรูปของก๊าซชีวภาพ ซึ่งปัจจุบันมีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น

3) นำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ เช่น การใช้มูลไก่และมูลสุกรเป็นอาหารปลาโดยตรง โดยการเลี้ยงไก่และสุกรบนบ่อปลา หรือการใช้มูลสุกรในการเพาะหนอนแมลงวัน และขายหนอนให้แก่ผู้เลี้ยงปลาในระยะก่อนที่หนอนจะเจริญเป็นแมลง (ผกาพรรณ, 2549)

2.2 การจัดการน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ปัจจุบัน การเลี้ยงสุกร ได้ถูกประกาศให้เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องมีการควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือแหล่งน้ำตามธรรมชาติ เนื่องจากมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรสามารถก่อผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำและก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ดังนั้นจึงมีการกำหนดให้การเลี้ยงสุกรประเภท ก หรือฟาร์มสุกรขนาดใหญ่ และการเลี้ยงสุกรประเภท ข หรือฟาร์มสุกรขนาดกลาง จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือแหล่งน้ำตามธรรมชาตินอกเขตที่ตั้ง ส่วนการเลี้ยงสุกรประเภท ค หรือฟาร์มขนาดเล็กนั้น ปัจจุบันยังไม่มีมาตรการบังคับใช้ จากมาตรการดังกล่าวทำให้ผู้ประกอบการฟาร์มสุกรได้ดำเนินการก่อสร้าง ปรับปรุง หรือแก้ไขระบบบำบัดน้ำเสียภายในฟาร์มของตนเพื่อให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ดังตารางที่ 2.4 และเพื่อการควบคุมคุณภาพของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรดังกล่าวข้างต้น กรมปศุสัตว์จึงได้กำหนดชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรแบบมาตรฐาน 2 ประเภท (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) คือ ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic

filter tank) และระบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization pond) ซึ่งระบบบำบัดมาตรฐานที่ได้นำเสนอทั้งสองระบบนี้ จะมีข้อดีและข้อจำกัดในการนำไปใช้ที่แตกต่างกันไป ดังตารางที่ 2.5

ตาราง 2.5 ข้อดีและข้อเสียของระบบถังกรองไร้อากาศและระบบบ่อปรับเสถียร

ประเด็นพิจารณา	ชนิดของระบบบำบัด	
	ระบบถังกรองไร้อากาศ	ระบบบ่อปรับเสถียร
ข้อดี	- การออกแบบง่าย การก่อสร้าง การควบคุมดูแลระบบสามารถทำได้ง่าย - ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างไม่มาก ต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ - ได้ก๊าซมีเทน	- ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและซ่อมบำรุงต่ำ - การเดินระบบไม่ยุ่งยากซับซ้อน - สามารถรองรับน้ำเสียได้มาก ทนทานต่อการเพิ่มของอัตรารับสารอินทรีย์และอัตราการไหลได้ดี - สามารถกำจัดจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคได้ มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียได้สูง (ประมาณ 80%)
ข้อเสีย	- รองรับปริมาณน้ำเสียได้น้อย ไม่มีความยืดหยุ่นต่อการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสีย - น้ำทิ้งออกจากระบบมีสีคล้ำ - ไม่สามารถกำจัดธาตุอาหารได้หมด จำเป็นต้องมีการลอกตะกอนก้นถังเป็นประจำ - ต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียขั้นหลัง (เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด)	- ต้องการพื้นที่ในการก่อสร้างมาก - ในน้ำทิ้งมีปัญหาเรื่องสาหร่ายปะปนอยู่มาก - อาจเกิดกลิ่นเหม็น

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2546); กัลยา (2544); ปิยะ (2544) และ วันชัย (2546)

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรของระบบถังกรองไร้อากาศและระบบบ่อปรับเสถียร ซึ่ง ลาวัลย์ (2541) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบผสมผสานกรองไร้อากาศและผักตบชวาร่วมหินกรองในการบำบัดน้ำค้างคอกสุกร โดยระบบบำบัดประกอบด้วยถังกรองไร้อากาศ เป็นระบบบำบัดชุดที่ 1 และถังผักตบชวาร่วมกับหินกรอง เป็นระบบบำบัดชุดที่ 2 จากผลการทดลองพบว่าระบบบำบัดชุดที่ 1 มีประสิทธิภาพการบำบัด COD TSS และไนโตรเจนทั้งหมด โดยเฉลี่ยร้อยละ 93.7

98.7 และ 45.6 ตามลำดับ และระบบบำบัดชุดที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดค่า COD TSS และไนโตรเจนทั้งหมด โดยเฉลี่ยร้อยละ 98.7 99.1 และ 75.7 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบโดยเฉลี่ย พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดค่า COD และไนโตรเจนทั้งหมดของ ระบบบำบัดชุดที่ 1 มีประสิทธิภาพน้อยกว่าระบบบำบัดชุดที่ 2

ขณะที่ กรรณพร (2545) ได้ศึกษาการใช้ระบบผสมผสานระหว่างถังกรองไร้อากาศและบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งมีค่าความเข้มข้น COD ในน้ำเสีย เท่ากับ 3,500 mg/l โดยถังกรองไร้อากาศถังที่หนึ่งและสอง ที่มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2.96 และ 0.36 kg COD/m^3/day ตามลำดับ และบึงประดิษฐ์ซึ่งปลูกกกจันทบูรณ์ ที่มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.006 kg COD/m^2/day พบว่าระบบผสมผสานมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่า COD TKN และ TSS ร้อยละ 96.36 79.53 และ 92.19 ตามลำดับ การบำบัด COD และ TSS ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในระบบถังกรองไร้อากาศ ร้อยละ 90.98 และ 84.19 ตามลำดับ โดยถังกรองไร้อากาศถังแรกมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD และ TSS ถึงร้อยละ 88.80 และ 79.05 ส่วน TKN ส่วนใหญ่ถูกบำบัดในระบบบึงประดิษฐ์ร้อยละ 54.13 และจากการวิเคราะห์ทางสถิติบ่งชี้ว่า ระบบบึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD และ TKN สูงกว่า

จากผลการศึกษาข้างต้นจะพบว่า ระบบบำบัดแบบมาตรฐานนั้น แม้จะสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความสกปรกในรูปของ BOD ได้ถึงร้อยละ 70-75 และ COD ได้ถึงร้อยละ 60-75 แต่ระบบบำบัดแบบมาตรฐาน ยังคงไม่สามารถบำบัดสารอาหารโดยเฉพาะธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ดังนั้น จึงควรนำน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบมาตรฐานไปทำการบำบัดต่อด้วยระบบบำบัดอื่น เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

2.3 ระบบบำบัดพืชลอยน้ำ

ระบบบำบัดพืชน้ำ (Aquatic plant treatment system) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียประเภทหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization pond) ทั้งนี้ ความแตกต่างกันของทั้งสองระบบคือ ในระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียรจะไม่มีพืชอยู่ในระบบเหมือนระบบบำบัดด้วยพืชน้ำ โดยระบบพืชน้ำจะมีความลึกของน้ำประมาณ 40-180 เซนติเมตร (U.S. EPA, 1988) ซึ่งการบำบัดด้วยพืชน้ำจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะพืชที่ใช้ในระบบ คือ

1) ระบบบำบัดด้วยพืชลอยน้ำ (Free-floating plant treatment system) พืชจะมีลักษณะลอยอยู่ที่ผิวน้ำ โดยมีส่วนของรากเจริญอยู่ใต้น้ำ เช่น จอก แหน เป็นต้น

2) ระบบบำบัดด้วยพืชใต้น้ำ (Submerged plant treatment system) พืชในระบบนี้จะมีส่วนของราก ลำต้น และใบ จมอยู่ใต้น้ำ เช่น สาหร่าย

การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดพืชน้ำนั้น กลไกลการบำบัดที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ พืชน้ำ และกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น กระบวนการตกตะกอนซึ่งเป็นผลจากแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำต่อวัตถุร่วมถึงมลสารในน้ำเสีย เหล่านี้เป็นต้น โดยกระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการบำบัดมลสารทั้งประเภทสารอินทรีย์ ของแข็ง ธาตุอาหาร และโลหะหนัก ออกจากน้ำที่ต้องการบำบัด (ตารางที่ 2.6)

ตาราง 2.6 กลไกการบำบัดมลสารในกระบวนการบำบัดแบบพืชน้ำ

พารามิเตอร์	กลไกการบำบัด
ของแข็ง	การตกตะกอน การกรองด้วยรากพืช
สารอินทรีย์	การย่อยสลายของจุลินทรีย์
ไนโตรเจน	การย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Ammonification, Assimilation, Nitrification, Denitrification) และโดยพืชสะสม (Plant accumulation)
ฟอสฟอรัส	การตกตะกอนทางเคมี (โดย Ca^{+} Al^{+} Fe^{+})
	การสะสมโดยพืช (Plant accumulation)
	การดูดซับ (Adsorb) โดยอนุภาคดินเหนียว
โลหะหนัก	การสะสมโดยพืช (Plant accumulation)

ที่มา: กลอยกาญจน์ (2544)

2.4 แหนแดง

แหนแดง เป็นเฟิร์นน้ำชนิดหนึ่ง อยู่ในวงศ์ Azollaceae ลักษณะทางนิเวศของแหนแดงนั้น จะพบว่า แหนแดงจะเจริญเติบโตลอยอยู่บนผิวน้ำบริเวณที่มีน้ำท่วมขัง สามารถแพร่กระจายพันธุ์ได้โดยการแยกส่วนของลำต้น และสืบพันธุ์โดยสปอร์ แหนแดงมีลักษณะพิเศษ คือ ในระหว่างใบบนและใบล่างของแหนแดงจะมีสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Anabeana) ที่สามารถตรึงไนโตรเจนในบรรยากาศได้อาศัยอยู่ (ดวงพร และรังสิต, 2544). ในลักษณะพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน (Symbiosis) โดยสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว จะตรึงไนโตรเจนจากอากาศแล้วเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบในรูปของแอมโมเนียมให้แหนแดงใช้ประโยชน์ได้ ทำให้แหนแดงเจริญเติบโตได้เร็วและมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูง แหนแดงมีคุณค่าทางอาหารใกล้เคียงกับใบกระถิน ที่นิยมนำมาเป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ แหนแดงมีอัตราการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างรวดเร็วและแตกต่างกันไปตามชนิดและสภาพแวดล้อม ทั้งนี้ แหนแดงส่วนใหญ่เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะโทรมและตายไปพักหนึ่ง แล้วจึงเกิดใหม่เมื่อสภาพแวดล้อมเหมาะสม จากคุณสมบัติของแหนแดงที่มีความสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ โดยอาศัยกิจกรรมของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่อาศัยร่วมกับแหนแดงและมีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนได้ดีนั้น ทำให้แหนแดงสามารถเจริญเติบโตได้ดีแม้ในสภาพที่มีปริมาณของปุ๋ยไนโตรเจนต่ำ เมื่อแหนแดงเน่าเปื่อยสลายตัวลง ธาตุอาหาร

ที่เป็นประโยชน์ก็จะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็ว เพื่อให้พืชอื่นหรือจุลินทรีย์นำไปใช้ต่อไป ด้วยเหตุนี้ แหนแดงจึงจัดเป็นพืชที่สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นปุ๋ยพืชสด และเพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน นอกจากนั้น เกษตรกรบางแห่งยังใช้แหนแดงในการเลี้ยงสัตว์ เช่น ปลา สุกร เป็ด เป็นต้น เนื่องจากในแหนแดงนอกจากจะมีธาตุอาหารพืชสูงแล้ว ยังมีปริมาณโปรตีนซึ่งเป็นสารอาหารที่สำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของสัตว์อยู่ในปริมาณที่สูงด้วยเช่นกัน

การขยายพันธุ์ของแหนแดงนั้น Becking (1979) และ Khan (1988) ระบุว่า แหนแดงมีการขยายพันธุ์ 2 แบบ คือ แบบอาศัยเพศ และแบบไม่อาศัยเพศ ในการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ แหนแดงจะสร้าง Sporocarp 2 ชนิด คือ Microsporocarp ซึ่งภายในมีสปอร์เพศเมียเพียง 1 อัน เมื่อสปอร์แก่ Sporocarp ทั้งสองชนิดจะหลุดจากใบแหนแดงลงน้ำ และจะอยู่ในระยะพักตัวเวลาหนึ่ง เมื่อสภาพแวดล้อมเหมาะสม Mecaspore จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์เพศเมียเรียก Oosphere ส่วน Microspore จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้เรียก Antheroziod เมื่อเซลล์สืบพันธุ์ทั้งสองชนิดเกิดผสมกันเกิดเป็นต้นอ่อนและติดอยู่กับ Megasporocarp และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ เจริญเติบโตเป็นต้นแก่ต่อไป

โดยทั่วไปแล้ว แหนแดงจะขยายพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแหนแดงเจริญเติบโตเต็มที่ กิ่งแหนแดงจะหลุดออกมาเจริญเติบโตเป็นต้นเล็กๆ และเจริญเติบโตต่อไป เรียกการขยายพันธุ์แบบนี้ว่า Fragmentation การขยายพันธุ์แบบนี้อัตราการเพิ่มปริมาณตัวเองเป็น 2 เท่า ช่วงเวลา 3-5 วัน และในช่วงเวลา 13-15 วัน จะเจริญเติบโตเต็มที่ มีราก 4-5 อันหรือมากกว่า (Khan, 1988)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของแหนแดง อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแหนแดงเหมือนกับพืชอื่นๆ ถ้าสิ่งแวดล้อมมีความเหมาะสมจะทำให้การเจริญเติบโตและการตรึงไนโตรเจนของแหนแดงดีตามไปด้วย (ประยูร และบรรหาญ, 2544) ปัจจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแหนแดงมีดังนี้

1) ธาตุอาหาร

แหนแดงต้องการธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตเช่นเดียวกับพืชสีเขียวชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะธาตุฟอสฟอรัส ซึ่งมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแหนแดงมากที่สุด แหนแดงมักจะแสดงอาการขาดธาตุฟอสฟอรัส เนื่องจากธาตุฟอสฟอรัสมักจะถูกตรึงอยู่ในดินและจะละลายอยู่ในน้ำในปริมาณที่ต่ำมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2523) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินมีอิทธิพลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของแหนแดง เมื่อดินมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ตั้งแต่ 120 ppm ขึ้นไป แหนแดงจะเจริญเติบโตได้เร็วมาก ในทางตรงกันข้ามถ้าดินมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำกว่า 8 ppm แหนแดงจะเจริญเติบโตได้ช้า แหนแดงจะเจริญเติบโตเมื่อน้ำมีฟอสฟอรัสเข้มข้น 50-125 ppm

2) น้ำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการเจริญเติบโตของแหนแดง เพราะแหนแดงเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่มีน้ำขัง อย่างไรก็ตามแหนแดงสามารถเจริญเติบโตได้ในระดับน้ำตื้นหรือในดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในเขตร้อนแหนแดงที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตในระดับน้ำ 15-30 เซนติเมตร ซึ่งในเวลา

กลางวันอุณหภูมิของน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิของอากาศ แหนแดงจะแสดงอาการเหี่ยวเฉาและกลับสู่สภาพปกติในตอนเช้า ถ้าเกิดติดต่อกันหลายวันอัตราการเจริญเติบโตของแหนแดงจะลดต่ำลง

3) กรด-ด่าง ของดินและน้ำ

แหนแดงสามารถเจริญเติบโตในช่วง pH 3.5–10 แต่ระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต คือ ช่วง pH 4.5–7 นอกจากนั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับระดับความเข้มของแสงจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของแหนแดง และอัตราการตรึงไนโตรเจนจะขึ้นอยู่กับ pH และอุณหภูมิด้วยเช่นกัน (Ashton, 1974 อ้างใน Khan, 1988)

4) อุณหภูมิและภูมิอากาศ

แหนแดงแต่ละชนิดจะเจริญเติบโตได้ดีในอุณหภูมิที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดที่พบแหนแดงชนิดนั้นๆ อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของแหนแดง มีค่าระหว่าง 16-30 องศาเซลเซียส

5) แสงแดด

แหนแดงต้องการแสงในช่วงความยาวคลื่น visible spectrum เหมือนพืชชั้นสูง แหนแดงในเขตร้อนที่ได้รับแสงแดดจัดในช่วงเวลากลางวันติดต่อกันหลายวันนั้น ใบของแหนแดงจะมีสีแดงปนเขียว อย่างไรก็ตาม แหนแดงจะแสดงอาการเดียวกันนี้เมื่อขาดธาตุฟอสฟอรัส

6) ความชื้นสัมพัทธ์และก๊าซในอากาศ

อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อแหนแดงจะปรากฏเด่นชัดโดยเฉพาะในเขตร้อน ซึ่งแสงแดดและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน มีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละวัน แหนแดงที่อยู่ในสภาพความชื้นสูงจะง่ายต่อการเกิดโรคจากเชื้อรา แต่แหนแดงที่อยู่ในความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 60 % ลำต้นจะแตกหักง่ายและเติบโตช้า ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่พอเหมาะสำหรับแหนแดงจะอยู่ในช่วง 85-90%

7) ความเค็ม

ความเค็มมีผลต่อการเจริญเติบโตของแหนแดง โดยความเค็มที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแหนแดงอยู่ในช่วงระหว่าง 90-150 mg/l

8) กระแสลม

ในพื้นที่ที่มีกระแสลมพัดแรง แหนแดงจะถูกพัดพาไปอัดรวมกันที่ด้านใดด้านหนึ่งของแปลง ทำให้การเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์ของแหนแดงช้าลงและเกิดการระบาดของโรคที่เกิดจากเชื้อราได้ ดังนั้นเนื้อที่ที่ทำการเลี้ยงขยายแหนแดง ควรมีขนาดของแปลงไม่กว้างเกินไปนัก และไม่ควรอยู่ในที่กระแสลมแรงเกิน (สุมิตรา, 2532)

9) โรคและศัตรูธรรมชาติ

โรคที่สำคัญของแหนแดงได้แก่ โรคระบาดจากเชื้อราที่ทำให้แหนแดงเน่าตายซึ่งเกิดจากเชื้อรา *Rhizoctonia solani* และ *Sclerotium ralfsti* ซึ่งมักจะเกิดเมื่อแหนแดงหนาแน่นขึ้นมาก มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สูง ศัตรูที่สำคัญของแหนแดงคือ ผีเสื้อกลางคืนพวก Lepidoptera ชนิดต่างๆ เช่น หนอนใย (*Pyralis sp.*) และหนอนปลอก (*Nymphula sp.*) โดยผีเสื้อจะวางไข่ไว้ที่ใบของ

แหนแดง เมื่อไข่ฟักเป็นตัวอ่อน หนอนใยจะชักใยสร้างเป็นทางเดินกัดกินแหนแดง ส่วนหนอนปลอกจะใช้ต้นแหนแดงหุ้มตัวไว้ ศัตรูธรรมชาติอีกชนิดหนึ่งคือ หอยคัน (*Lymnaea sp.*) ซึ่งจะกัดกินยอดและรากอ่อนของแหนแดง นอกจากนี้สาหร่ายยังเป็นศัตรูทางธรรมชาติที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของแหนแดง เพราะในสภาพอากาศร้อนและแสงแดดจัด สาหร่ายจะขึ้นปกคลุมผิวน้ำทำให้แหนแดงเจริญเติบโตได้ยาก นอกจากนั้นยังปล่อยสารประกอบบางอย่างซึ่งจะยับยั้งการเจริญเติบโตของแหนแดง (Becking, 1979; Lumpkin and Plucknett, 1982 และ Khan, 1988)

แหนแดงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายลักษณะ โดยมีลักษณะของการนำแหนแดงมาใช้ประโยชน์ในประเด็นหลักๆ ดังนี้

1) การใช้แหนแดงเป็นปุ๋ยพืชสดในนาข้าว เนื่องจากแหนแดงเป็นพืชที่สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ จึงทำให้แหนแดงมีปริมาณไนโตรเจนที่สูงซึ่งเหมาะแก่การนำมาเป็นปุ๋ยพืชสด เนื่องจากแหนแดงมี C: N ต่ำประมาณ 8-13 ทำให้แหนแดงสามารถเน่าสลายได้ง่าย (Lumpkin and Plucknett, 1982) ไนโตรเจนในต้นแหนแดงจะถูกปลดปล่อยออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชหลังจากที่แหนแดงได้เน่าสลายแล้ว แหนแดงจะปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาทีละน้อยๆ หลังจากถูกไถกลบแล้วหนึ่งสัปดาห์ ประมาณ 80% ของไนโตรเจนในต้นแหนแดงจะถูกปลดปล่อยออกมาภายใน 8 สัปดาห์ (Ito and Watanabe, 1985) แสดงว่าการใช้แหนแดงในนาข้าวแล้วปล่อยให้แหนแดงเน่าสลายไนโตรเจนถูกปลดปล่อยออกมาทีละน้อยๆ ตลอดช่วงการเจริญเติบโตของต้นข้าวซึ่งสัมพันธ์กับความต้องการใช้ไนโตรเจนของต้นข้าว

2) ใช้ในการควบคุมวัชพืช โดยที่แหนแดงสามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว และคลุมผิวน้ำจะป้องกันไม่ให้แสงแดดส่องผ่านถึงผิวน้ำ ทำให้วัชพืชต่างๆ หมดโอกาสเจริญเติบโตจนเป็นอันตรายต่อนาข้าวได้ (พรชัย, 2527)

3) แหนแดงสามารถลดอุณหภูมิของน้ำในนาข้าว ลดการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำ ลดค่ากรด-ด่างของน้ำ ปัจจัยดังกล่าว สามารถลดการสูญเสียปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่ในนาข้าวในรูปของก๊าซแอมโมเนีย ทำให้การใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (ประยูร และบรรหาญ, 2544)

4) การใช้แหนแดงเป็นอาหารสัตว์ ในแหนแดงมีโปรตีน ไขมัน เซลลูโลส และแร่ธาตุต่างๆ เป็นส่วนประกอบจำนวนมาก จากการวิเคราะห์พบว่ามี Essential amino acid หลายชนิดในปริมาณที่สูง จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ได้เป็นอย่างดี โดยมีการนำแหนแดงไปใช้เป็นอาหารสัตว์ ดังต่อไปนี้

4.1) การใช้แหนแดงเป็นอาหารสัตว์น้ำ

แหนแดงมี Essential amino acid หลายชนิดในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง arginine ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่สำคัญในการเจริญเติบโตของปลา ดังนั้นการเลี้ยงปลาในนาข้าวที่มีแหนแดงอยู่ด้วย สามารถทำให้ผลผลิตของปลาเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 60.5 % และขนาดของปลาเพิ่มขึ้นเป็น 37.3 % มากกว่าการเลี้ยงปลาในนาข้าวโดยไม่มีแหนแดงร่วมด้วย นอกจากนี้การเลี้ยงปลาในนาข้าวยังทำ

ให้ต้นข้าวได้รับปุ๋ยสม่ำเสมอตลอดฤดูปลูกจากมูลปลาที่ถ่ายออกมาหลังจากกินแหนแดงเข้าไป ทำให้ผลผลิตของข้าวเพิ่มขึ้นอีกด้วย (ประยูร และบรรหาญ, 2544)

4.2) การใช้แหนแดงเป็นอาหารสัตว์ปีก

มีการนำแหนแดงมาเป็นวัตถุดิบเพื่อผสมในอาหารสัตว์ปีก เพราะว่าแหนแดงมีปริมาณโปรตีนที่ดีและสามารถใช้ในสัตว์ปีกได้สูงถึง 15 % จากรายงานของ Basak *et al.* (2002) ได้ระบุว่าการใช้แหนแดงเพื่อทดแทนโปรตีนในสูตรอาหารไก่เนื้อ ในระดับ 0 5 10 และ 15 % ในสูตรอาหาร เป็นระยะเวลานาน 7 สัปดาห์ พบว่าน้ำหนักตัวของไก่เนื้อที่ได้รับแหนแดงในสูตรอาหารในสัปดาห์ที่ 1-4% ไม่แตกต่างกับสูตรควบคุม แต่น้ำหนักของไก่เนื้อที่ได้รับแหนแดงในสูตรอาหารในสัปดาห์ที่ 5-7 มีความแตกต่างกันทางสถิติ

4.3) การใช้แหนแดงเป็นอาหารสุกร

ความต้องการโปรตีนของสุกรอยู่ที่ประมาณ 16 % จึงทำให้สูตรอาหารที่ใช้เลี้ยงสุกรต้องใช้วัตถุดิบที่มีโปรตีนสูง เช่น กากถั่วเหลือง ซึ่งมีราคาสูงทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย มีการศึกษาของ Leterme *et al.* (2008) ที่ใช้แหนแดง *A. filiculoiddes* เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสุกรเล็ก 3 ระดับ คือ 0 12.5 และ 25 % ในสูตรอาหาร มีผลทำให้การเจริญเติบโตของสุกรเล็กลดลงและประสิทธิภาพการใช้อาหารลดลง เมื่อระดับแหนแดงในอาหารสูงขึ้น แต่แหนแดงยังสามารถใช้เป็นอาหารของสุกรได้ เนื่องจากมีพลังงานและกรดอะมิโนที่สูง แต่มีข้อจำกัดเรื่องการย่อยได้ของสุกร ทำให้การนำมาใช้เป็นอาหารสุกรไม่ควรเกิน 10-15% จากรายงานดังกล่าว แหนแดงที่ใช้ในการทดลองเป็นพันธุ์ *A. filiculoiddes* ซึ่งมีการเจริญเติบโตช้า ทำให้ *A. filiculoiddes* มีการสะสมของสารที่ขัดขวางการใช้ประโยชน์ของโภชนะ เช่น เยื่อใย และลิกนิน

4.4) การใช้แหนแดงเป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง

โดยทั่วไปสัตว์เคี้ยวเอื้องส่วนใหญ่กินหญ้าเป็นหลักจึงได้รับปริมาณโปรตีนค่อนข้างต่ำ Hillman and Culley (1978) ได้ทำการศึกษาโดยใช้แหนแดงซึ่งมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าหญ้าให้สัตว์เคี้ยวเอื้องกินแทน พบว่า โคนมที่ได้รับอาหารแหนแดง (*A. microphylla*) สดที่เก็บแล้วนำมาฉีดล้างทำความสะอาดเพื่อนำไปใช้เป็นอาหารโคนม ที่มีการเสริมโปรตีนประมาณ 60 % ของความต้องการปกติในแต่ละวัน พบว่าโคยอมรับอาหารที่มีแหนแดงสูงถึง 75 % ของน้ำหนักแห้งทั้งหมด โดยไม่เกิดการเจ็บป่วยและมีแนวโน้มว่าจะใช้แหนแดงได้ในสัดส่วนสูงขึ้นอีก 19 % ของน้ำหนักแห้งทั้งหมดของอาหารที่กินได้ปกติในแต่ละวัน นอกจากนี้ได้มีการใช้แหนแดงแห้งระดับ 25 50 75 และ 100% ของน้ำหนักแห้งร่วมกับส่วนผสมของหญ้าแห้งและ Alfalfa hay 8-9 ปอนด์ เพื่อให้มีโปรตีนหยาบ 16 % ของน้ำหนักแห้งรวม เป็นหญ้าโคนมรุ่นอายุ 9-10 เดือน (น้ำหนักเฉลี่ย 240 กิโลกรัม) นาน 15 สัปดาห์ พบว่าโคนมมีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันและอาหารที่มีส่วนผสมแหนแดงไม่ก่อให้เกิดอาการผิดปกติของระบบย่อยอาหารหรือปัญหาสุขภาพโคแต่อย่างใด

2.5 การใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสีย

แหนแดงเป็นพืชขนาดเล็ก ที่อาจมีความทนทานต่อน้ำเสียได้ในระดับที่ต่ำ ทั้งนี้ Arora and Saxena (2005) ได้ศึกษาลักษณะมวลชีวภาพของแหนแดง (*Azolla microphylla*) จากโรงบำบัดน้ำเสีย ใน New Delhi ประเทศอินเดีย พบว่าแหนแดงสามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่ 2 ซึ่งมีระดับฟอสฟอรัส ระหว่าง 1-2 ppm และมีปริมาณโลหะหนัก (Cd, Pb, Ni, Zn, Fe และ Mn) อยู่ใน เกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ โดยผลผลิตมวลชีวภาพของแหนแดงนั้น สามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยพืชสดในนา ข้าว และน้ำที่ผ่านการบำบัดสามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำชลประทานได้อีกด้วย

ขณะที่ Aston (1974) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของน้ำที่แหนแดงสามารถขึ้นได้และเจริญเติบโตได้ดี โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำที่พบแหนแดงขึ้นอย่างหนาแน่น พบว่าน้ำที่แหนแดงขึ้นอยู่นั้น มีค่า pH ระหว่าง 7.1-7.8 มีค่า EC ระหว่าง 173-2,970 micromhos/cm. ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแหนแดงสามารถขึ้นได้ในน้ำที่มีค่าความเข้มข้นของเกลือต่างๆ อยู่ค่อนข้างสูง รวมถึง แหนแดงสามารถขึ้นได้ในน้ำที่มีเกลือโซเดียมสูงด้วย เมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่น

ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของแหนแดงนั้น ประการหนึ่งเป็นผลจากแหนแดงมีอัตราการ เจริญเติบโตเป็น 2 เท่า ภายในระยะเวลา 3-5 วัน จึงทำให้แหนแดงปกคลุมผิวน้ำช่วยลดปริมาณแสงที่จะ ส่องลงใต้ผิวน้ำได้เกือบทั้งหมด จึงช่วยในการลดการเจริญเติบโตของสาหร่ายและวัชพืชในน้ำได้เป็นอย่างดี Forni *et al.* (2001) ได้รายงานว่าแหนแดงที่ระดับความหนาแน่น 70 % ของผิวน้ำในระบบบำบัดนั้น แหนแดงจะสามารถเจริญเติบโตในน้ำเสียจากแหล่งชุมชนได้ดีกว่าน้ำทิ้งจากการเกษตร และน้ำทิ้งจาก กิจกรรมการทำเหมืองแร่ อีกทั้งการเพิ่มจำนวนของแหนแดงนั้น จะส่งผลให้น้ำในระบบมีปริมาณ ออกซิเจนละลายเพิ่มมากขึ้นจากการสังเคราะห์แสงของแหนแดง ซึ่งส่งผลให้สภาพแวดล้อมในระบบบำบัด มีความเหมาะสมต่อการบำบัดมากยิ่งขึ้น สารแขวนลอยในน้ำบางส่วนจะถูกกรองด้วยรากของแหนแดง แม้จะเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก ขณะที่ สารแขวนลอยในระบบส่วนใหญ่จะตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วง ส่วนการลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้น จะเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบเป็นส่วนใหญ่

เนื่องจากในน้ำเสียโดยเฉพาะน้ำเสียจากฟาร์มสุกร เป็นน้ำเสียที่มีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจน และฟอสฟอรัสปนเปื้อนในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการพื้นฐานของแหนแดงที่มี ความต้องการธาตุฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแหนแดง แหนแดงในระบบจึงดูด ซึมฟอสฟอรัสในน้ำเสียไปใช้ โดยฟอสฟอรัสบางส่วนอาจเกิดการตกตะกอนทางเคมีออกจากน้ำเสีย สำหรับสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำเสียนั้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจากสารอินทรีย์ไปเป็น สารอนินทรีย์ โดยกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ และแหนแดงจะดูดซึมอนินทรีย์ไนโตรเจนใน น้ำไปใช้ โดยการตรึงไนโตรเจนจากอากาศของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะลดลง เมื่อไนโตรเจนในน้ำมี ปริมาณที่สูงและเพียงพอต่อการใช้ของแหนแดง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นิศานาถ และอำพร (2546ก) ทำการศึกษาการใช้พืชลอยน้ำปรับปรุงคุณภาพน้ำ ด้วยพืชลอยน้ำ 5 ชนิด คือ ผักตบชวา จอก จอกหูหนู แพงพวยน้ำ และแหนเป็ดใหญ่ พบว่าผักตบชวา จอก จอกหูหนูและแพงพวยน้ำ มีลักษณะรากเป็นระบบรากฝอย (Fibrous roots system) มีลำต้นส่วนที่ทอดเลื้อยไปตามผิวน้ำ ผลการตรวจวิเคราะห์ ค่า DO TDS NH_4^+ TKN และ TP พบว่าจอกหูหนูที่มีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียนาน 15 วัน จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่ม ค่า DO ในน้ำได้ดีที่สุด (99.63 %) แพงพวยน้ำที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียนาน 60 วัน จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัด ค่า TDS ในน้ำได้ดีที่สุด (26.82 %) และค่า TP ได้ดีที่สุด (98.95 %) ผักตบชวาที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียนาน 15 วัน จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัด ค่า NH_4^+ ได้ดีที่สุด (84.93 %) จอก และจอกหูหนูที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียนาน 60 วัน จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่า TKN ได้ 73.49 % และ 73.18 % ตามลำดับ

นิศานาถ และอำพร (2546ข) ศึกษานิเวศวิทยาและการใช้ประโยชน์ของแหนเป็ด พบแหนเป็ด (Duckweed) ที่พบในประเทศไทย 3 ชนิด คือ แหนเป็ดเล็ก แหนเป็ดใหญ่ และไข่น้ำหรือผำ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแหนเป็ดเล็ก แหนเป็ดใหญ่ และไข่น้ำ ในการควบคุม *Microcystis sp.* พบว่าที่ระยะเวลา 7 วัน ไข่น้ำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมสูงสุดคือ 38.57 % ที่ระยะเวลา 100 วัน ทั้งแหนเป็ดเล็ก แหนเป็ดใหญ่ และไข่น้ำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมสาหร่ายชั้นต่ำทั้ง 5 สกุลได้ดีและให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ ยกเว้นแหนเป็ดเล็กไม่สามารถควบคุม *Raphidiopsis sp.* ได้ และจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ ปริมาณ TKN ปริมาณ TP และความสามารถในการนำไนโตรเจนไปใช้ในต้นพืช (Uptake) พบว่า ที่ระยะเวลา 14 วัน แหนเป็ดเล็ก ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณคลอโรฟิลล์ได้ดีที่สุดคือ 74.66 % และที่ระยะเวลา 100 วัน นอกจากนั้น แหนเป็ดเล็กยังให้ประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณ TKN ได้ดีที่สุด คือ 49.10 % ส่วนแหนเป็ดใหญ่และไข่น้ำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณ TP ได้สูงสุด คือ 88.46 % เท่ากัน ที่ระยะเวลา 21 วัน และที่ระยะเวลา 7 วัน ขณะที่ แหนเป็ดใหญ่ให้ประสิทธิภาพในการนำไนโตรเจนไปใช้ในต้นพืช (Uptake) ได้สูงสุดคือ 99.17 %

เพ็ญจา และคณะ (2540) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงอาหารโดยใช้แหนแดง โดยทำการปรับความเข้มข้นของน้ำทิ้งเป็น 100 50 และ 25 % และใช้วิธีการทดสอบ 4 วิธี คือ วิธีการฟอกตัวตามธรรมชาติ วิธีการเติมอากาศในน้ำทิ้ง วิธีการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำทิ้งเพียงอย่างเดียว และวิธีการเติมอากาศร่วมกับการใช้แหนแดงในการบำบัด ผลการทดลองพบว่า หลังดำเนินการทดลองได้ 20 วัน วิธีการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงอาหารด้วยวิธีการเติมอากาศร่วมกับการใช้แหนแดงสามารถลดค่า BOD COD ฟอสฟอรัส และสารอินทรีย์ได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ

ณัฐสิมา (2553) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้แหนแดง โดยน้ำเสียที่นำมาทำการบำบัด เป็นน้ำเสียจากฟาร์มที่ได้ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบบ่อหมักไร้อากาศ ผลการศึกษาพบว่าการใช้แหนแดงบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรนั้น สามารถลดค่าความสกปรกในรูป BOD TKN NO_3^- และ

PO_3^- ได้ประมาณ 6-98 % ในช่วงเวลา 3 สัปดาห์ และปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สะสมในแหนแดงมีปริมาณมากกว่าแหนแดงก่อนการบำบัด จึงสามารถนำแหนแดงที่ใช้ในระบบนำไปทำเป็นปุ๋ยพืชสดแทนปุ๋ยเคมีได้

Arora and Sexena (2005) ได้ทดลองใช้แหนแดง (*Azolla microphylla*) ในการบำบัดน้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านการบำบัดแล้วในเมือง New Delhi ประเทศอินเดีย ผลการทดลองพบว่า ระดับฟอสฟอรัสในน้ำทิ้ง 1-2 ppm และปริมาณโลหะหนัก (Cd Pb Ni Zn Fe และ Mn) มีระดับต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่อนุญาตให้มีได้ และพบว่าแหนแดงสามารถเจริญเติบโตได้ดีถึง 2 เท่า หลังจากนั้นสามารถนำแหนแดงมาใช้เป็นปุ๋ยในนาข้าว และสามารถหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยแหนแดงกลับมาใช้ทดแทนน้ำชลประทานได้อีกด้วย

Forni *et al.* (2001) ศึกษาการลดลงของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของน้ำเสียที่ใช้แหนแดง (*Azolla filiculoides* Lam) ในการบำบัด พบว่าแหนแดงสามารถกำจัดไนโตรเจนในรูป NO_3^- ในน้ำเสียจากชุมชน น้ำเสียจากการเกษตร และน้ำเสียจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ ส่วนฟอสฟอรัสในรูป PO_4^{-3} พบว่ามีปริมาณน้อยมากในน้ำเสียจากชุมชน และน้ำเสียจากการเกษตร ส่วนน้ำเสียจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ก็พบว่ามีปริมาณลดลงเช่นเดียวกัน สำหรับความสามารถในการเจริญเติบโตของแหนแดง พบว่าที่ความหนาแน่นของแหนแดง 70 % ของผิวน้ำในบ่อบำบัด แหนแดงสามารถเจริญเติบโตในน้ำเสียจากแหล่งชุมชนได้ดีกว่าน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ

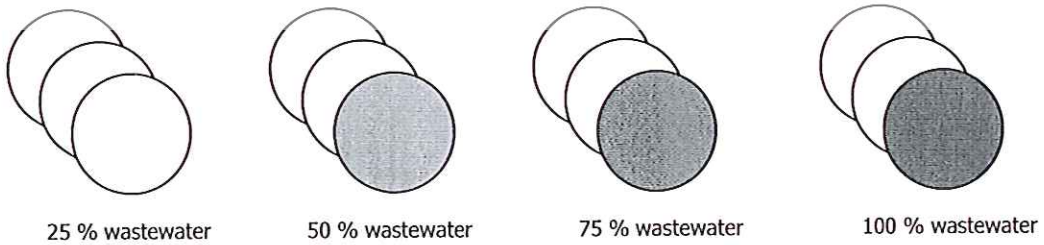
บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะประกอบด้วยวิธีการวิจัยสองส่วน คือ การศึกษาถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตแหนแดงด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ปริมาณ และคุณภาพของแหนแดงที่ผลิตด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งการดำเนินการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ทั้งนี้ จะทำการทดลองภาคสนามในพื้นที่ฟาร์มของเกษตรกรในจังหวัดพิษณุโลก และทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและพืชบางส่วนในห้องปฏิบัติการ ของภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยมีขั้นตอน วิธีการวิจัย การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง และการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

3.1 การศึกษาในระยะที่ 1 การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

3.1.1 การเตรียมหน่วยทดลองและการดำเนินการทดลอง

เตรียมพื้นที่และเตรียมหน่วยทดลองถังเลี้ยงแหนแดง จากวงบ่อซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร สูง 1 เมตร จำนวน 12 หน่วย บรรจุน้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกร ซึ่งเป็น น้ำเสียจากกิจกรรมการเลี้ยง โดยทำการปรับระดับความเข้มข้นของน้ำเสียที่ได้ด้วยน้ำบาดาลที่ 4 ระดับความเข้มข้น คือ 25 % 50 %, 75 % และ 100 % ของน้ำเสีย โดยมีหน่วยทดลองจำนวน 3 หน่วย (ซ้ำ) ในแต่ละความเข้มข้น โดยวางแผนการทดลองแบบ Complete randomize design (CRD) ทั้งนี้ทำการบรรจุน้ำเสียที่ใช้เลี้ยงแหนแดงลงสู่ถังจนถึงระดับความสูง 0.8 ม. จากก้นถัง ซึ่งทำให้มีปริมาตรน้ำในหน่วยทดลองแต่ละหน่วย เท่ากับ 0.9 ลบ.ม. เมื่อการเตรียมหน่วยทดลองแล้วเสร็จ จึงนำแหนแดง (*Azolla microphylla*) ลงเลี้ยงในหน่วยทดลอง ที่อัตรา 0.5 กก./หน่วย (ภาพที่ 3.1) ทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์



ภาพที่ 3.1 แผนการทดลองในระยะที่ 1

3.1.2 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) ตัวอย่างน้ำ

ทำการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกร ก่อนที่จะทำการเจือจางน้ำเสีย เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียภายหลังการเจือจางที่สัดส่วนต่างๆ ก่อนการนำแหนแดงลงเลี้ยง และทำการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากหน่วยทดลองทั้ง 12 หน่วย ทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ (ตารางที่ 3.1) นำตัวอย่างน้ำที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ ตามที่ได้ระบุในตารางที่ 3.2 โดยบางดัชนีจะทำการตรวจวัดในภาคสนาม ณ จุดเก็บตัวอย่าง และบางดัชนีจะทำการตรวจวัดที่ห้องปฏิบัติการของคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยใช้วิธีการในการเก็บตัวอย่าง รักษาตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างตามที่ได้กำหนดไว้ใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WPCF, 1992)

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างน้ำ วิธีการเก็บและระยะเวลาในการตรวจวัดน้ำเสียในการศึกษาระยะที่ 1

ตัวอย่างน้ำ	วิธีการเก็บ	ระยะเวลาในการตรวจวัด
น้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกร	Grab sampling	ก่อนการเจือจาง
น้ำเสียภายหลังการเจือจางที่สัดส่วนต่างๆ (Influent)	Grab sampling	หลังการเจือจางก่อนเริ่มเลี้ยงแหนแดง
น้ำเสียในหน่วยทดลอง และน้ำจากบ่อควบคุม	Composite sampling จาก 3 จุดเก็บ (ผิวน้ำ กลางน้ำ และที่ก้นถัง)	ทุก ๆ สัปดาห์ ภายหลังเริ่มเลี้ยงแหนแดง

ตารางที่ 3.2 ดัชนีคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัด และวิธีการในการวิเคราะห์

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	วิธีวิเคราะห์
BOD_5	mg/l	Azide modification method
COD	mg/l	Closed reflux method
TSS	mg/l	Gravimetric method, dried at 103-105 ^{o}C
TDS	mg/l	Multiprobe water analysis
TKN	mg/l	Kjeldahl method
TP	mg/l	Colorimetric method
DO	mg/l	Membrane electrode meter (DO meter)
EC	µS/cm	Conductivity meter
pH	-	Electrometric method (pH meter)
Temperature	^{o}C	Thermometer
Heavy metal*: Cu, Zn and Cd	mg/l	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

หมายเหตุ: * ตรวจวัดเฉพาะในน้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกร (ก่อนการเจือจาง) ของระยะที่ 1

2) ตัวอย่างพืช

เริ่มทำการวิเคราะห์พืช เมื่อเริ่มทำการเลี้ยงแหนแดง โดยทำการวิเคราะห์แหนแดงก่อนนำลงเลี้ยงในระบบ แหนแดงที่ทำการเลี้ยงในระบบ และวิเคราะห์แหนแดงเมื่อสิ้นสุดระยะการทดลองหรือเมื่อเก็บเกี่ยวออกจากระบบ ทั้งนี้รายละเอียดในการตรวจวัดตัวอย่างพืช ดังแสดงในตารางที่ 3.3 โดยจะทำการตรวจวัดที่ห้องปฏิบัติการของคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการของหน่วยงานที่มีความพร้อมของเครื่องมือที่มีลักษณะเฉพาะ

ตารางที่ 3.3 ดัชนีตัวอย่างพืชที่ทำการตรวจวัด และระยะเวลาในการตรวจวัด

ดัชนี	ระยะเวลา/ช่วงเวลาที่ตรวจวัด	วิธีวิเคราะห์
ลักษณะทั่วไป	ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา	Observation
น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง	- ก่อนเริ่มการเลี้ยงแหนแดง - เมื่อเก็บเกี่ยวออกจากหน่วยทดลอง	Weighting and Drying method
Crude Protein	- ก่อนเริ่มการเลี้ยงแหนแดง - เมื่อเก็บเกี่ยวออกจากหน่วยทดลอง	วิธีการของ AOAC (1990)
Crude fiber	- ก่อนเริ่มการเลี้ยงแหนแดง - เมื่อเก็บเกี่ยวออกจากหน่วยทดลอง	
Phosphorus	- ก่อนเริ่มการเลี้ยงแหนแดง - เมื่อเก็บเกี่ยวออกจากหน่วยทดลอง	วิธีการของ Perkin Elmer (1982)
Potassium	- ก่อนเริ่มการเลี้ยงแหนแดง - เมื่อเก็บเกี่ยวออกจากหน่วยทดลอง	
Calcium	- ก่อนเริ่มการเลี้ยงแหนแดง - เมื่อเก็บเกี่ยวออกจากหน่วยทดลอง	

3.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) ความเป็นไปได้ในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสีย

นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการใช้แหนแดงในการบำบัด น้ำเสีย และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของแต่ละหน่วยทดลอง ในแต่ละค่าดัชนีคุณภาพน้ำในรูปร้อยละของการบำบัด (Removal efficiency) และวิเคราะห์ความเข้มข้น (Concentration) ของมลสารในน้ำเสียหลังการบำบัดในแต่ละค่าดัชนีคุณภาพน้ำ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของแหนแดงในแต่ละระดับความเข้มข้นของน้ำเสีย ซึ่งจะบ่งชี้ได้ถึงสถานภาพที่เหมาะสมในการบำบัดมลสารในน้ำเสียของแหนแดงและศักยภาพของแหนแดงในการบำบัด

2) ความเป็นไปได้ในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในสัดส่วนความเข้มข้นที่แตกต่างกันในการผลิตแหนแดง วิเคราะห์ค่าความแตกต่างทางสถิติของดัชนีทั้งใน

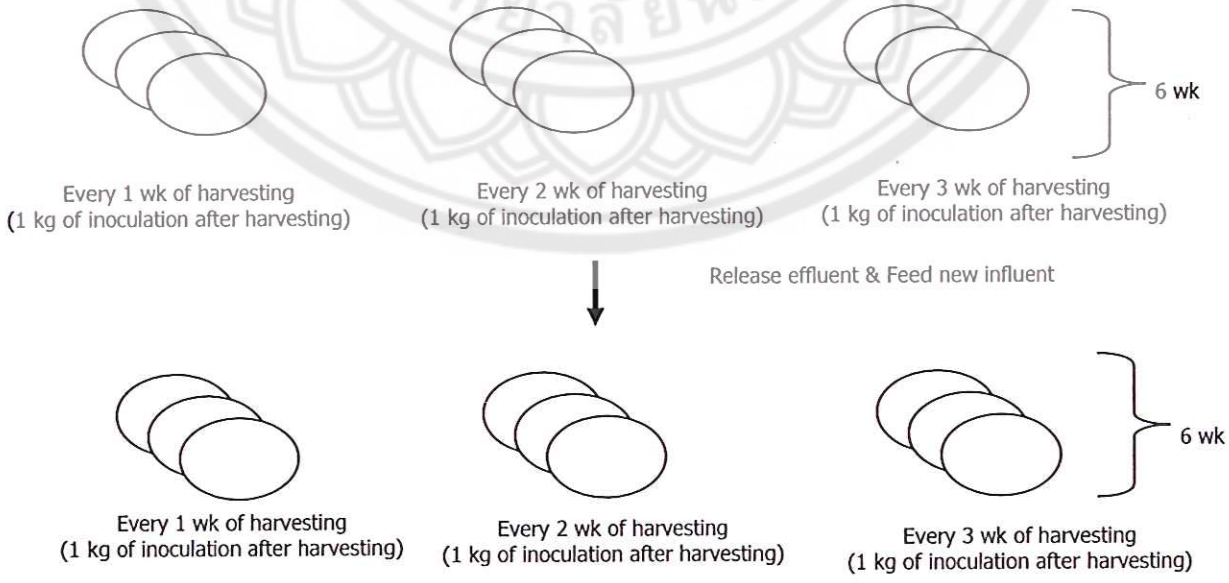
ด้านปริมาณและคุณภาพที่ทำการตรวจวัดในแหนแดงที่ผลิตได้ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ซึ่งจะบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้และลักษณะของน้ำเสียที่เหมาะสมในการใช้ในผลิตแหนแดง

3.2 การศึกษาในระยะที่ 2 การศึกษาถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

การทดลองในระยะที่ 2 นี้ เป็นการทดลองต่อเนื่อง เพื่อศึกษาถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง โดยทำการศึกษาต่อยอดจากผลการศึกษาที่ได้จากการศึกษาในระยะที่ 1

3.2.1 การเตรียมหน่วยทดลองและการดำเนินการทดลอง

หน่วยทดลองวงบ่อซีเมนต์จากการทดลองในระยะที่ 1 จะถูกนำมาใช้ในการบรรจุน้ำเสียที่ได้จากฟาร์มสุกรที่มีการเจือจางในระดับความเข้มข้นที่เลือกใช้ โดยพิจารณาจากผลการศึกษาในระยะที่ 1 โดยทำการบรรจุน้ำเสียลงถังจนถึงระดับความสูง 0.8 ม. จากก้นถัง ซึ่งทำให้มีปริมาตรน้ำในหน่วยทดลองแต่ละหน่วย เท่ากับ 0.9 ลบ.ม. เมื่อเตรียมหน่วยทดลองแล้วเสร็จ จึงนำ แหนแดง (*Azolla microphylla*) ลงเลี้ยงในหน่วยทดลอง ที่อัตรา 0.5 กก./หน่วย ในการทดลองในระยะที่ 2 นี้ จะทำการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบ ด้วยระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน (Treatment) คือ ทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ โดยมีหน่วยทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา และวางแผนการทดลองแบบ Complete randomize design ในการเก็บเกี่ยวแต่ละครั้ง จะเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจนหมด แล้วจึงนำแหนแดงในอัตราเดิม คือ 0.5 กก./หน่วย ลงเลี้ยงอีกครั้ง ทั้งนี้จะทำการระบายและเปลี่ยนน้ำเสียในทุกหน่วยทดลอง ที่ระยะเวลา 6 สัปดาห์ ภายหลังจากเริ่มต้นเลี้ยง ทำการทดลองเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 12 สัปดาห์ (ภาพที่ 3.2)



ภาพที่ 3.2 แผนการทดลองในระยะที่ 2

3.2.2 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) ตัวอย่างน้ำ

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากฟาร์มสุกร น้ำเสียภายหลังการเจือจางตามสัดส่วนที่ได้เลือกใช้ ก่อนที่จะใช้น้ำเสียนั้นในการเลี้ยงแหนแดง (Influent) และตัวอย่างน้ำเสียที่ระบายออกจากหน่วยทดลองก่อนการเติมน้ำเสียใหม่ลงสู่หน่วยทดลอง และเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากหน่วยทดลองทั้ง 9 หน่วย ทุกๆ สัปดาห์ (ตารางที่ 3.4) นำตัวอย่างน้ำเสียที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีคุณภาพน้ำตามที่ได้ระบุในตารางที่ 3.2 โดยใช้วิธีการในการเก็บตัวอย่าง รักษาตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง เช่นเดียวกับการศึกษาในระยะที่ 1

2) ตัวอย่างพืช

สังเกตลักษณะทั่วไปของแหนแดง ตลอดระยะเวลาที่ทำการเลี้ยงในระบบและเมื่อทำการเก็บเกี่ยว และเก็บตัวอย่างแหนแดง เพื่อนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยทำการเก็บตัวอย่างทั้งก่อนนำลงเลี้ยงในระบบและภายหลังการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุกครั้ง ทั้งนี้มีรายละเอียดในศึกษาและตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแหนแดง ดังแสดงในตารางที่ 3.3 เช่นเดียวกับการศึกษาในระยะที่ 1

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างน้ำ วิธีการเก็บและระยะเวลาในการตรวจวัดน้ำเสียในการศึกษาระยะที่ 2

ตัวอย่างน้ำ	วิธีการเก็บ	ระยะเวลาในการตรวจวัด
น้ำเสียจากฟาร์มสุกรและน้ำเสียภายหลังการเจือจางตามสัดส่วนที่เลือกใช้ (Influent)	Grab sampling	ก่อนและหลังการเจือจางก่อนเริ่มเลี้ยงแหนแดง
น้ำเสียที่ระบายออกจากระบบ ก่อนการเติมน้ำเสียชุดใหม่	Grab sampling	เมื่อทำการเปลี่ยนน้ำ ที่ระยะ 6 wk หลังเริ่มเลี้ยงแหนแดง
น้ำเสียในระบบ/หน่วยทดลอง	Composite sampling จาก 3 จุดเก็บ (ผิวน้ำ กลางน้ำ และที่ก้นถัง)	ทุก ๆ สัปดาห์ ภายหลังเริ่มเลี้ยงแหนแดง

3.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) แนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บเกี่ยวหรือความถี่ในการเก็บเกี่ยวแหนแดงกับการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในระบบ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำตาม

ช่วงเวลา ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา เพื่อการวิเคราะห์ถึงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และช่วงเวลาที่เหมาะสมในบำบัดหรือกักพักน้ำเสียในระบบ

2) แนวทางที่เหมาะสมในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในการผลิตแหนแดง

นำผลการตรวจวัดมาทำการวิเคราะห์ถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในการผลิตแหนแดง โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บเกี่ยวแหนแดงหรือความถี่ในการเก็บเกี่ยวแหนแดงกับผลผลิตแหนแดงทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพของแหนแดง การเปลี่ยนแปลงของผลผลิตแหนแดงตามช่วงเวลา ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการศึกษาถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตแหนแดงด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และปริมาณและคุณภาพของแหนแดงที่ผลิตด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร มีรายละเอียดดังนี้

4.1 การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

4.1.1 ความเป็นไปได้ในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสีย

การวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสีย และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของแต่ละหน่วยทดลอง ในแต่ละค่าดัชนีคุณภาพน้ำ ในรูปร้อยละของการบำบัด (Removal efficiency) และวิเคราะห์ความเข้มข้น (Concentration) ของมลสารในน้ำเสียหลังการบำบัดในแต่ละค่าดัชนีคุณภาพน้ำ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของแหนแดงในแต่ละระดับความเข้มข้นของน้ำเสีย ซึ่งจะบ่งชี้ได้ถึงสถานภาพที่เหมาะสมในการบำบัดมลสารในน้ำเสียของแหนแดง และศักยภาพของแหนแดงในการบำบัด มีรายละเอียดดังนี้

1) คุณสมบัติของน้ำเสียฟาร์มสุกรก่อนการบำบัด

น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียจากกิจกรรมการเลี้ยงสุกรที่ถูกระบายลงสู่บ่อรวบรวมน้ำเสีย โดยบ่อรวบรวมน้ำเสียดังกล่าวนี้ได้ถูกใช้ในการรวบรวมน้ำเสียและขณะเดียวกันได้ถูกใช้เป็นพื้นที่ในการบำบัดน้ำเสียที่ถูกรวบรวมและกักพักไว้ด้วยกระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นตามสภาพธรรมชาติ การกักเก็บน้ำเสียไว้ในบ่อรวบรวมน้ำเสียของเกษตรกรจะช่วยลดการปลดปล่อยน้ำเสียจากฟาร์มออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติภายนอกพื้นที่เลี้ยงโดยตรง อย่างไรก็ตาม หากมีน้ำเสียในปริมาณมากเกินประสิทธิภาพการกักเก็บของบ่อรวบรวมน้ำ รวมถึงหากมีปริมาณฝนตกมากในพื้นที่ น้ำเสียและรวมถึงมลสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียนั้นอาจเกิดการล้นออกสู่แหล่งน้ำภายนอกได้

ผลจากการตรวจวัดคุณลักษณะของตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสีย พบว่าน้ำเสียมีค่าอุณหภูมิน้ำ 24.1°C pH ของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 6.78 ค่า EC ของน้ำเสียเท่ากับ 1,270.0 µS/cm ค่า TDS ของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 635.0 mg/l ค่า Salinity ของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 0.58 ppt ทั้งนี้ พบค่า DO มีค่าต่ำเท่ากับ 0.01mg/l ปริมาณมลสารในรูป BOD_5, COD, TSS, TKN, TP มีค่าเท่ากับ 90.0, 168.0, 90.0, 95.5 และ 7.24 mg/l ตามลำดับ และปริมาณ TCB ในน้ำเสีย มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml (ตารางที่ 4.1) ในส่วนของโลหะหนัก ตรวจพบค่าความเข้มข้นของ Cu, Zn และ Cd ใน

น้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสีย มีค่าระหว่าง 0.0140-0.0343, 0.2093-0.4640 และ 0.0000-0.0006 mg/l ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร (ร้อยละ 100) และคุณสมบัติของน้ำเสียภายหลังการเจือจาง ที่สัดส่วนร้อยละ 25 50 และ 75

Indicators	Unit	Dilution ratio of wastewater			
		25 %	50 %	75 %	100 % [1/]
Temperature	°C	25.3	25.1	24.8	24.1
pH	-	7.00	7.33	7.31	6.78
DO	mg/l	0.02	0.01	0.01	0.01
Salinity	ppt	0.37	0.39	0.53	0.58
EC	µS/cm	757.0	797.0	1,072.0	1,270.0
TDS	mg/l	379.0	399.0	536.0	635.0
TSS	mg/l	30.0	34.0	77.0	90.0
BOD_5	mg/l	24.8	27.0	28.7	90.0
COD	mg/l	28.0	40.0	128.0	168.0
TKN	mg/l	33.3	35.0	58.5	95.5
TP	mg/l	2.1	2.6	6.2	7.2
TCB	MPN/100 ml	24,000.0	24,000.0	11,000.0	24,000.0

Note: [1/] Characteristics of raw wastewater collected from collecting pond.

ผลจากการตรวจวัดคุณลักษณะของตัวอย่างน้ำเสียภายหลังการเจือจางน้ำเสียด้วยน้ำบาดาลที่อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 50 และ 75 ก่อนนำน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการบำบัด พบว่าน้ำเสียมีค่าอุณหภูมิ, pH, EC, TDS และ Salinity ระหว่าง 24.8-25.3 °C, 7.0-7.3, 757.0-1,072.0 µS/cm, 379.0-536.0 mg/l และ 0.37-0.53 ppt ตามลำดับ และ DO มีค่าต่ำระหว่าง 0.01-0.02 mg/l ปริมาณสารอินทรีย์ในรูป BOD_5 มีค่าระหว่าง 24.8-28.7 mg/l COD มีค่าระหว่าง 28.0-128.0 mg/l TSS มีค่าระหว่าง 30.0-77.0 mg/l TKN มีค่าระหว่าง 33.3-58.5 mg/l TP มีค่าระหว่าง 2.1-6.2 mg/l และ TCB มีค่าระหว่าง 11,000.0 ถึง เท่ากับหรือมากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml (ตารางที่ 4.1)

ทั้งนี้ พบว่าน้ำเสียก่อนการบำบัด มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศขณะทำการตรวจวัด pH มีค่าในช่วงของเป็นกรดเล็กน้อยถึงด่างเล็กน้อย ค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำมากแม้ในน้ำเสียที่มีการเจือจางแล้วถึงร้อยละ 25 ค่าความเค็มของน้ำเสียที่มีสัดส่วนการเจือจางโดยใช้น้ำเสียจากบ่อรวบรวมร้อยละ 75 และร้อยละ 100 พบมีค่าสูงกว่าค่าความเค็มของน้ำจืดตามแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งบ่งชี้ได้ถึงการมีเกลือแร่อนินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในน้ำและสอดคล้องกับค่า EC และ ค่า TDS ที่ตรวจพบในน้ำเสีย ค่า TSS

ของน้ำเสียที่มีสัดส่วนของน้ำเสียร้อยละ 100 พบมีค่าต่ำกว่าค่า TSS ของเกณฑ์มาตรฐาน ก (เกณฑ์มาตรฐานสูงสุดสำหรับฟาร์มประเภท ก เทียบเท่าจำนวนสุกร มากกว่า 5,000 ตัว) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 150 mg/l (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) ไม่มากนัก ค่า BOD_5 ในน้ำเสียที่มีสัดส่วนของน้ำเสียร้อยละ 100 มีค่าสูงกว่าค่า BOD_5 ของเกณฑ์มาตรฐาน ก ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 60 mg/l และต่ำกว่าค่า BOD_5 ของเกณฑ์มาตรฐาน ข (เกณฑ์มาตรฐานสูงสุดสำหรับฟาร์มประเภท ข เทียบเท่าจำนวนสุกร ตั้งแต่ 500-5,000 ตัว และฟาร์มประเภท ค เทียบเท่าจำนวนสุกร ตั้งแต่ 50-น้อยกว่า 500 ตัว) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100 mg/l (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) เล็กน้อย ค่า COD ในน้ำเสีย มีค่าความเข้มข้นอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐาน ขณะที่ค่า TKN ในน้ำเสียที่มีสัดส่วนของน้ำเสียร้อยละ 100 มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ก ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 120 mg/l (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) เล็กน้อย

แม้มลสารที่พบในน้ำเสียโดยส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร อย่างไรก็ตาม การลดปริมาณการปนเปื้อนของมลสารที่มีในน้ำเสียก่อนการระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ไม่ว่าน้ำเสียนั้นจะมีค่าความเข้มข้นของมลสารที่ปนเปื้อนในระดับใดก็ตาม จะเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อมโดยรอบ และหากเป็นการลดความเข้มข้นของ มลสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียนั้น โดยการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ก็จะยิ่งเป็นการใช้ทรัพยากรน้ำและสิ่งปนเปื้อนในน้ำนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ การบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นของมลสารปนเปื้อนในระดับต่ำด้วยระบบบำบัดขนาดเล็ก ยังเป็นแนวทางในการนำรูปแบบของการบำบัดไปสู่การประยุกต์ใช้ที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงในระดับครัวเรือนหรือผู้ประกอบการรายย่อย ซึ่งจะช่วยส่งผลกระทบในทิศทางที่ดีต่อสภาพแวดล้อม

2) คุณสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในระบบบำบัด และประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

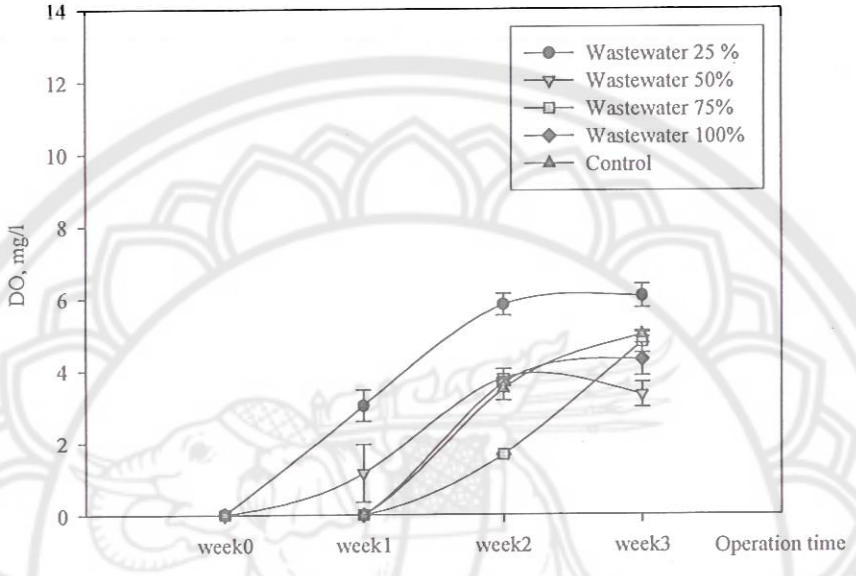
2.1) คุณสมบัติโดยทั่วไปของน้ำเสียระหว่างการบำบัด

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำโดยทั่วไปภาคสนามตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ ของการดำเนินระบบ พบค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ตรวจพบทั้งหมดจากทุกหน่วยทดลองที่มีอัตราการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกันและในหน่วยควบคุม ตั้งแต่เริ่มเติมน้ำเสียลงสู่ระบบและจากการตรวจวัดทุกสัปดาห์เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 0.00-6.41 mg/l โดยพบ ค่า DO ของน้ำเสียที่ทำการบำบัดในแต่ละหน่วยทดลองมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 4.1) ทั้งนี้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า DO ของน้ำเสียได้แก่การละลายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่น้ำ การสังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นในน้ำ รวมถึงอาจเกิดจากการลดต่ำลงของปริมาณความต้องการออกซิเจนของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลาย ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่า DO ของน้ำเสียในแต่ละสัดส่วนของอัตราการเจือจางรวมถึงในหน่วยควบคุม เมื่อมีระยะเวลาของการบำบัดที่เพิ่มสูงขึ้น พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

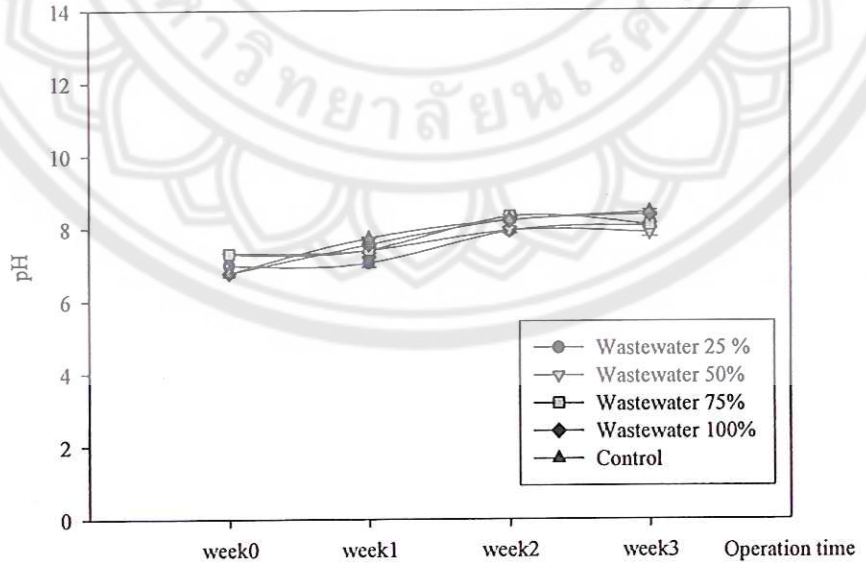
ค่า pH ของน้ำเสียที่ตรวจพบทั้งหมดจากทุกหน่วยทดลองที่มีอัตราการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกันและในหน่วยควบคุม ตั้งแต่เริ่มเติมน้ำเสียลงสู่ระบบและจากการตรวจวัดทุกสัปดาห์เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 6.78-8.53 โดยพบ ค่า pH ของน้ำเสียที่ทำการบำบัดในแต่ละหน่วยทดลองมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 4.2) ทั้งนี้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า pH ของน้ำเสีย

สำนักหอสมุด
๓ - ม.ค. ๒๕๕๘
1. 6703409
วิ TD
ว41
พร๒๘๕
2556

ได้แก่ การลดลงของ CO_2 ในน้ำจากการนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นในน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้ pH ของน้ำปรับสูงขึ้น ทั้งนี้ จะพบว่าสัมพันธ์กับค่า DO ของน้ำเสียที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งอาจเป็นผลจากกระบวนการสังเคราะห์แสงเช่นกัน ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่า pH ของน้ำเสียในแต่ละสัดส่วนของอัตราการเจือจางรวมถึงในหน่วยควบคุม เมื่อมีระยะเวลาของการบำบัดที่เพิ่มสูงขึ้น พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

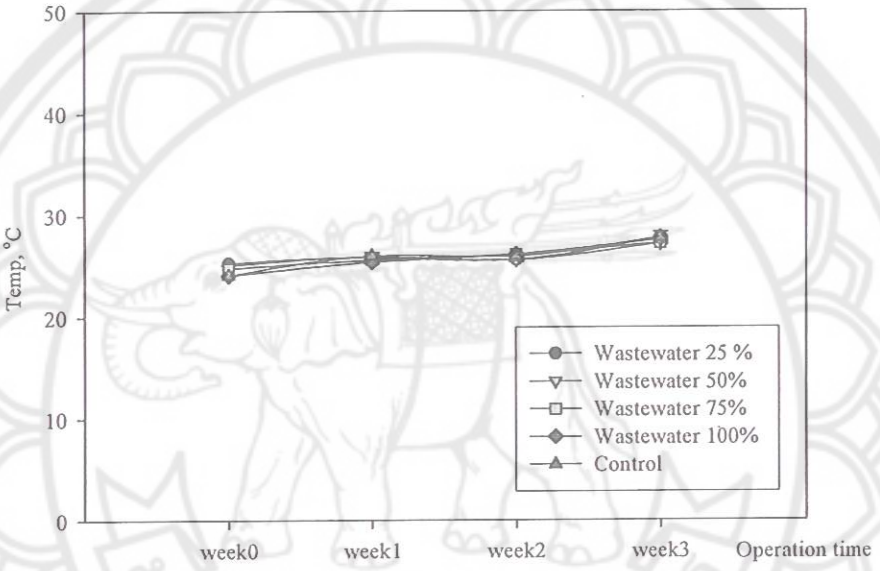


ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของค่า DO ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียระหว่างการบำบัด



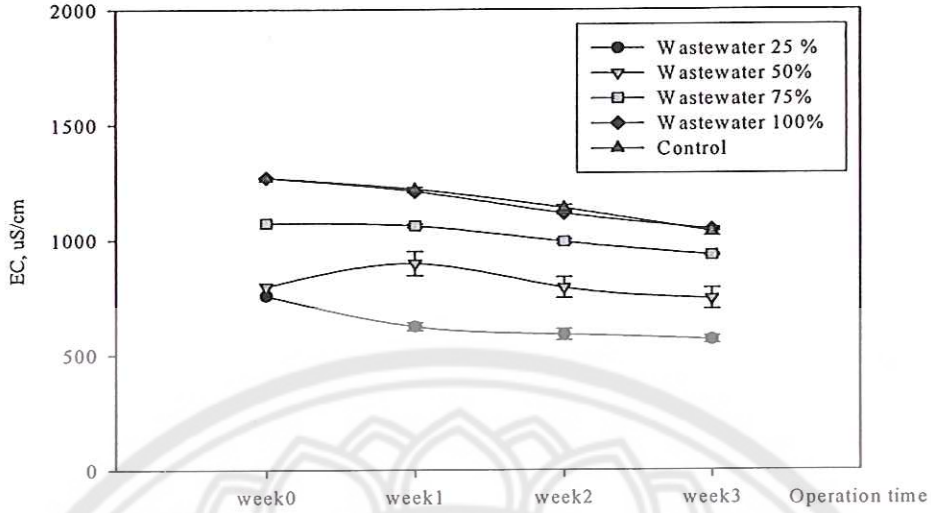
ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียระหว่างการบำบัด

อุณหภูมิของน้ำเสียที่ตรวจพบทั้งหมดจากทุกหน่วยทดลองที่มีอัตราการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกันและในหน่วยควบคุม ตั้งแต่เริ่มเติมน้ำเสียลงสู่ระบบและจากการตรวจวัดทุกสัปดาห์เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 24.1-28.8 ^{o}C โดยพบ ค่าอุณหภูมิของน้ำเสียที่ทำการบำบัดในแต่ละหน่วยทดลองมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 4.3) ทั้งนี้ ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิของน้ำเสียคือความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่น้ำได้รับ โดยจะพบว่าอุณหภูมิของน้ำเสียในแต่ละหน่วยทดลองมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณเดียวกัน และผลจากการวิเคราะห์อุณหภูมิของน้ำเสียในแต่ละสัดส่วนของอัตราการเจือจางรวมถึงในหน่วยควบคุม เมื่อมีระยะเวลาของการบำบัดที่เพิ่มสูงขึ้น พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



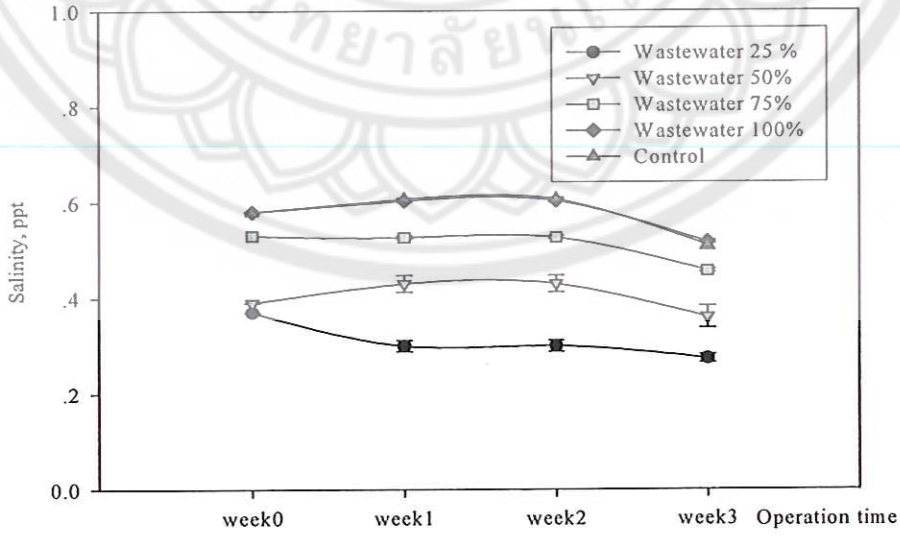
ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียระหว่างการบำบัด

ค่าความนำไฟฟ้า (EC) ของน้ำเสียที่ตรวจพบทั้งหมดจากทุกหน่วยทดลองที่มีอัตราการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกันและในหน่วยควบคุม ตั้งแต่เริ่มเติมน้ำเสียลงสู่ระบบและจากการตรวจวัดทุกสัปดาห์เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 541.0-1,270.0 μS/cm โดยพบ ค่า EC ของน้ำเสียที่ทำการบำบัดในแต่ละหน่วยทดลองมีแนวโน้มลดต่ำลง (ภาพที่ 4.4) ซึ่งบ่งชี้ถึงการลดลงของเกลืออนินทรีย์ที่สามารถแตกตัวให้ประจุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ในน้ำ ซึ่งอาจหมายรวมถึงการลดลงของมลสารประเภทสารอนินทรีย์ในน้ำ ทั้งนี้ อาจเกิดจากการสูญเสียจากระบบจากการระเหยโดยตรง หรือเกิดการเปลี่ยนรูปแล้วจึงเกิดการระเหย การนำไปใช้โดยพืช หรือการลดการแตกตัวจากการทำปฏิกิริยาร่วมกันของไอออนของสสาร เป็นต้น ทั้งนี้ พบว่าค่า EC ของน้ำเสียในแต่ละสัดส่วนของอัตราการเจือจางรวมถึงในหน่วยควบคุม เมื่อมีระยะเวลาของการบำบัดที่เพิ่มสูงขึ้น มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นค่า EC ของน้ำเสียที่อัตราส่วนการเจือจางร้อยละ 50 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของค่า EC ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียระหว่างการบำบัด

ค่าความเค็ม (Salinity) ของน้ำเสียที่ตรวจพบทั้งหมดจากทุกหน่วยทดลองที่มีอัตราการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกันและในหน่วยควบคุม ตั้งแต่เริ่มเติมน้ำเสียลงสู่ระบบและจากการตรวจวัดทุกสัปดาห์เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 0.26-0.61 ppt โดยพบค่า Salinity ของน้ำเสียที่ทำการบำบัดในแต่ละหน่วยทดลองมีแนวโน้มลดต่ำลง (ภาพที่ 4.5) สัมพันธ์กับค่า EC ซึ่งบ่งชี้ถึงการลดลงของการปนเปื้อนเกลืออนินทรีย์ในน้ำ ทั้งนี้ พบว่าค่า Salinity ของน้ำเสียในแต่ละสัดส่วนของอัตราการเจือจางรวมถึงในหน่วยควบคุม เมื่อมีระยะเวลาของการบำบัดที่เพิ่มสูงขึ้น มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นค่า Salinity ของน้ำเสียที่อัตราส่วนการเจือจางร้อยละ 50 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่า EC



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเค็มของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียระหว่างการบำบัด

2.2) ความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียในระบบบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

น้ำเสียจากบ่อรวมน้ำสียของฟาร์มสุกรในระดับครัวเรือนได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดของระบบพืชลอยน้ำ ที่มีแหนแดงเป็นพืชในระบบ โดยได้ศึกษาการบำบัดของระบบเมื่อรองรับน้ำเสียที่เก็บจากบ่อรวบรวมโดยตรง (อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 100) และน้ำเสียที่มีการนำมาเจือจางที่อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50 และ 75 และการบำบัดในหน่วยควบคุมที่ใช้น้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นน้ำเสียร้อยละ 100 แต่ไม่มีการเติมพืชลงสู่ระบบ

ระบบที่ทำการศึกษานี้เป็นวงปูนรูปทรงกระบอก (Cylinder) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m สูง 1.0 m ทั้งนี้ ได้ทำการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบที่ระดับความสูงของน้ำเท่ากับ 80 cm โดยมีปริมาตรน้ำเสียรวม เมื่อเริ่มระบบเท่ากับ 0.9 m^3 เมื่อคำนวณปริมาณการรองรับสารอินทรีย์ในรูป BOD (BOD loading rate) จะพบว่าในแต่ละหน่วยทดลองที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียที่แตกต่างกันนั้น หน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 100 รวมถึงหน่วยควบคุม จะมีค่า BOD loading rate เมื่อเริ่มระบบเท่ากับ 67.5 g/m^2 ขณะที่ หน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50 และ 75 มีค่า BOD loading rate เมื่อเริ่มระบบเท่ากับ 18.6, 20.3 และ 21.5 g/m^2 ตามลำดับ ทั้งนี้ ความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ ที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน เมื่อมีระยะเวลาของการกักพักหรือมีระยะเวลาการบำบัดที่แตกต่างกัน มีดังนี้

(1) การบำบัดสารอินทรีย์

ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์นั้น ระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 100 รวมถึงหน่วยควบคุม มีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูปของ COD เมื่อเริ่มระบายน้ำเสียลงสู่ระบบเท่ากับ 127 g/m^2 ขณะที่ หน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50 และ 75 มีค่า COD loading rate เมื่อเริ่มระบบเท่ากับ 21.0, 30.0 และ 96.0 g/m^2 ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD ของระบบ ที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้ระบบมีอัตราการรองรับ COD (COD loading rate) ระหว่าง 3.0-18.0 $g/m^2/d$ นั้น พบว่า ในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ระหว่างร้อยละ (-128.6)-52.4 ส่วนในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด ซึ่งระบบมีอัตราการรองรับ COD ระหว่าง 3.1-13.6 $g/m^2/d$ นั้น ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ระหว่างร้อยละ (-100.0)-50.0 ขณะที่ ในสัปดาห์ที่ 3 ของการบำบัด ซึ่งระบบมีอัตราการรองรับ COD ระหว่าง 3.1-11.0 g/m2/d นั้น ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ระหว่างร้อยละ (-200.0)-75.0 ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัดนั้น อัตราการรองรับ COD ของหน่วยควบคุมมีค่าเท่ากับ 18, 7.9-8.7 และ 14.4-17.1 g/m2/d ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการบำบัด COD ของหน่วยควบคุม ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด มีค่าระหว่างร้อยละ 47.6-52.4, (-120.0)-(-80.0) และ (-11.1)-50.0 ตามลำดับ

(ตารางที่ 4.2) ทั้งนี้ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด COD ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าหน่วยทดลองแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด พบว่าหน่วยทดลองที่บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงรวมถึงการบำบัดของหน่วยควบคุมจะมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ที่สูงกว่าระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ คือที่สัดส่วนความเข้มข้นร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ทั้งนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากการมีอินทรียสารในปริมาณที่สูงในระบบที่มีความเข้มข้นสูง และจุลินทรีย์ในระบบสามารถลดปริมาณอินทรียสารเหล่านั้นลงได้อย่างชัดเจน ขณะที่ในระบบที่มีความเข้มข้นต่ำ มีปริมาณอินทรียสารในปริมาณต่ำและอินทรียสารบางส่วนอาจเป็นอินทรียสารที่ย่อยสลายได้ยาก จึงทำให้ระบบไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบบำบัดพืชลอยน้ำ

Indicators/ operation time	Wastewater dilution ratio				
	25% of wastewater	50% of wastewater	75% of wastewater	100% of wastewater	Control[1/]
COD (% removal)					
1st week	(-71.4)±33.0 ^{aB}	(-46.7)±26.7 ^{aB}	29.2±5.5 ^{aA}	36.5±9.7 ^{aA}	50.8±1.6 ^{aA}
2nd week	0.0±28.9 ^{aA}	(-44.4)±29.4 ^{aA}	16.2±19.2 ^{aA}	(-10.0)±16.7 ^{aA}	(-93.9)±13.0 ^{bA}
3rd week	(-72.2)±54.7 ^{aA}	28.3±34.9 ^{aA}	(-60.0)±70.2 ^{aA}	(-14.3)±8.2 ^{aA}	19.0±17.6 ^{aA}
BOD (% removal)					
1st week	61.3±6.6 ^{aA}	58.9±21.8 ^{aA}	(-19.2)±7.5 ^{aC}	39.6±13.6 ^{aAB}	4.4±10.9 ^{aBC}
2nd week	32.9±5.7 ^{bA}	(-157.5)±75.0 ^{aB}	61.6±10.7 ^{aA}	72.8±6.6 ^{aA}	83.6±0.9 ^{aA}
3rd week	5.9±10.3 ^{bA}	33.5±26.5 ^{aA}	48.3±19.8 ^{aA}	(-181.7)±101.1 ^{bB}	(-194.8)±78.3 ^{bB}

Note: [1/] 100 % of wastewater without plant

Mean values±SEM are shown for each treatment.

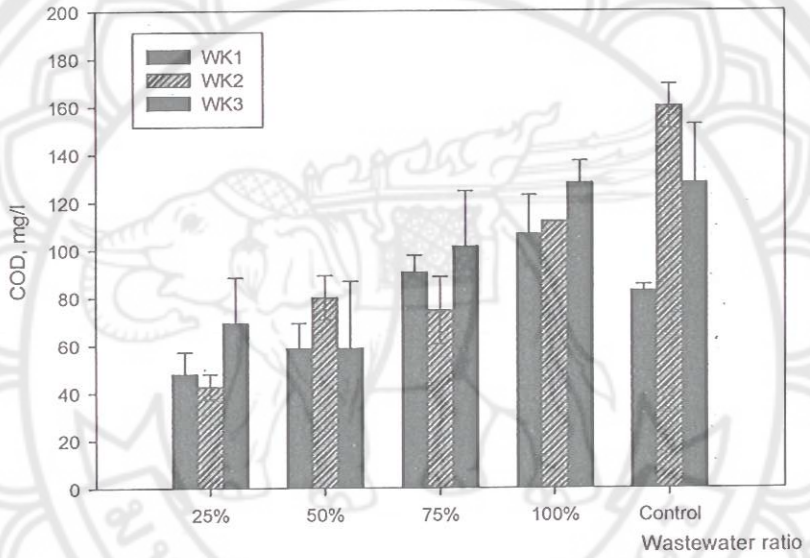
Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for wastewater dilution ratio at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 3

ค่าความเข้มข้นของ COD ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าน้ำเสียในหน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 มีค่าความเข้มข้นของ COD ในน้ำเสีย ระหว่าง 32.0-96.0, 16.0-112.0, 48.0-144.0 และ 80.0-144.0 mg/l ตามลำดับ แม้จะพบว่าค่าความเข้มข้นของ COD ในแต่ละหน่วยทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.6) อย่างไรก็ตาม ค่า COD ของน้ำเสียแต่ละสัดส่วนความเข้มข้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นในแต่ละสัปดาห์ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นแต่จะพบว่ามีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) นอกจากนั้น ยังพบว่า ค่า COD ที่ตรวจพบทั้งหมดมีค่าอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยการเพิ่มขึ้นของค่า COD นั้น ส่วนหนึ่งเป็นผลจากการเพิ่มอินทรียสารในระบบจากการตายของแหนแดงในระบบ

โดยเฉพาะในระบบที่มีสัดส่วนของน้ำเสียร้อยละ 100 ร้อยละ 75 และร้อยละ 50 ตามลำดับ ในขณะที่การที่น้ำเสียมีปริมาตรลดลงจากการระเหยของน้ำตามธรรมชาติเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของมลสารในน้ำเพิ่มสูงขึ้น และเนื่องจากการลดลงของมลสารในน้ำเสียในระบบนั้น เป็นผลโดยตรงจากการเปลี่ยนรูปของมลสารไปอยู่ในรูปของก๊าซและระเหยออกไป รวมถึงการเปลี่ยนรูปไปเป็นอินทรียสารของจุลินทรีย์และพืช โดยไม่รวมถึงมลสารส่วนที่บำบัดได้ด้วยการตกตะกอน เนื่องจากระบบที่ศึกษาไม่มีการระบายน้ำออกหรือเติมน้ำเข้า และทำการเก็บตัวอย่างน้ำด้วยวิธีการผสมระหว่างน้ำส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของระบบบำบัด จึงยังคงรวมมลสารส่วนที่สามารถบำบัดออกได้ด้วยกระบวนการตกตะกอนอยู่ในตัวอย่างน้ำเสียนั้นด้วย จึงทำให้พบค่าประสิทธิภาพการบำบัดของระบบมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากยังคงรวมมลสารส่วนที่สามารถบำบัดได้ด้วยการตกตะกอนอยู่ในน้ำเสียด้วย

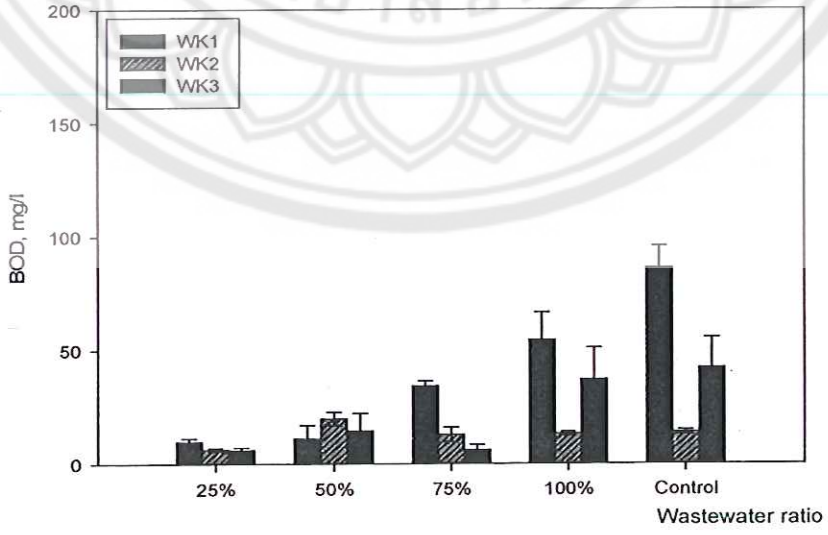


ภาพที่ 4.6 ค่า COD ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของ BOD ของระบบ ที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้ระบบมีอัตราการรองรับ BOD (BOD loading rate) ระหว่าง 2.7-9.6 $g/m^2/d$ นั้น พบว่า ในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ระหว่างร้อยละ (-33.8)-84.4 ส่วนในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด ซึ่งระบบมีอัตราการรองรับ BOD ระหว่าง 0.4-7.8 $g/m^2/d$ นั้น ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ระหว่างร้อยละ (-257.1)-85.4 ขณะที่ ในสัปดาห์ที่ 3 ของการบำบัด ซึ่งระบบมีอัตราการรองรับ BOD ระหว่าง 0.5-2.4 $g/m^2/d$ นั้น ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ระหว่างร้อยละ (-356.5)-80.6 ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัดนั้น อัตราการรองรับ BOD ของหน่วยควบคุมมีค่าเท่ากับ 9.6, 7.6-10.3 และ 1.2-1.5 $g/m^2/d$ ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ของหน่วยควบคุม ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด มีค่าระหว่างร้อยละ (-16.7)-20.0, 82.2-85.4 และ (-351.0)-(-108.3) ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) ทั้งนี้ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการ BOD ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด

BOD ของระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50 และร้อยละ 75 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่ ประสิทธิภาพการบำบัด BOD ของระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 และร้อยละ 100 มีค่าสูงในสัปดาห์แรกๆ และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้ จะพบว่าประสิทธิภาพการบำบัด BOD ในแต่ละระบบมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป โดยเป็นผลเนื่องมาจากการตายของแหนแดงในระบบ เมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 1 สัปดาห์ ภายหลังการดำเนินระบบ ทำให้ค่าสารอินทรีย์ของน้ำเสียในระบบเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลงโดยเฉพาะในระบบที่มีค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสูง ในขณะที่ ประสิทธิภาพการบำบัด BOD ในแต่สัปดาห์นั้น พบว่ามีค่าแตกต่างกันระหว่างหน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียต่างกัน ซึ่งคาดว่าเกิดจากปัจจัยรวมหลายประการ ได้แก่ การมีปริมาณอินทรียสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอินทรียสารชนิดที่ง่ายต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ การเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ลงในระบบจากการตายของแหนแดง และการสูญเสียน้ำจากการระเหย เป็นต้น

ค่าความเข้มข้นของ BOD ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าน้ำเสียในหน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 มีค่าความเข้มข้นของ BOD ในน้ำเสีย ระหว่าง 4.8-12.9, 4.2-30.0, 3.6-38.4 และ 11.7-78.0 mg/l ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่าค่าความเข้มข้นของ BOD ในแต่ละหน่วยทดลองโดยภาพรวมมีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 4.7) เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ BOD ของน้ำเสียแต่ละสัดส่วนความเข้มข้น ในแต่ละสัปดาห์จะพบว่าส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ยกเว้นในระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 75 และหน่วยควบคุม และค่า BOD ที่ตรวจพบทั้งหมดมีค่าอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยการเพิ่มขึ้นของค่า BOD นั้น มีสาเหตุเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่า COD ทั้งนี้ ประเภทของสารอินทรีย์ตามลักษณะความยากง่ายต่อการย่อยสลายจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้พบว่าแนวโน้มของค่า COD และค่า BOD ของระบบเดียวกันมีทิศทางที่แตกต่างกันได้



ภาพที่ 4.7 ค่า BOD ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด

(2) การบำบัดของแข็ง

ประสิทธิภาพการบำบัดมลสารในรูปของของแข็งแขวนลอย (TSS) ของระบบ ที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกัน พบว่า ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ระหว่างร้อยละ (-47.1)-73.3, 11.8-75.0 และ (-366.7)-13.3 ตามลำดับ ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด หน่วยควบคุมมีประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ระหว่างร้อยละ 17.8-33.3, (-46.7-10.8 และ (-36.4)-9.1 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) ทั้งนี้ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TSS ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าหน่วยทดลองแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ยกเว้นหน่วยทดลองที่สัดส่วนความเข้มข้นร้อยละ 75 ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพต่ำลงในสัปดาห์ที่ 3 ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด พบว่าหน่วยทดลองแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นมีประสิทธิภาพในการบำบัด TSS แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบมีค่าสูงสุดในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 75, 100 และร้อยละ 25 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) ทั้งนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียสูง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีค่าของแข็งปนเปื้อนอยู่สูงด้วยเช่นกัน จึงทำให้กระบวนการบำบัดของแข็งที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ สามารถแสดงประสิทธิภาพได้อย่างชัดเจนผ่านกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบ

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งของระบบบำบัดพืชลอยน้ำ

Indicators/ operation time	Wastewater dilution ratio				
	25% of wastewater	50% of wastewater	75% of wastewater	100% of wastewater	Control[1/]
TSS (% removal)					
1st week	46.7±15.4^{aAB}	(-11.8)±18.0^{aC}	64.5±4.3^{aA}	60.7±6.6^{aA}	23.0±5.2^{aBC}
2nd week	52.9±14.7^{aA}	37.3±14.0^{aA}	45.1±3.5^{aA}	48.1±8.3^{aA}	(-19.2)±16.6^{aA}
3rd week	(-256.6)±55.1^{aA}	(-70.0)±73.6^{aA}	(-228.2)±46.9^{bA}	(-224.1)±68.1^{aA}	(-6.9)±14.8^{aA}
TDS (% removal)					
1st week	17.8±2.4^{aA}	(-10.4)±4.7^{aC}	1.0±0.7^{aB}	4.7±0.5^{bB}	3.5±0.4^{bB}
2nd week	5.6±1.4^{bA}	10.2±1.4^{aA}	6.6±1.0^{aA}	7.8±0.2^{aA}	7.0±0.7^{aA}
3rd week	3.6±1.4^{bA}	5.8±5.9^{aA}	5.8±0.7^{aA}	6.3±0.5^{aA}	9.2±0.7^{aA}

Note: [1/] 100 % of wastewater without plant

Mean values±SEM are shown for each treatment.

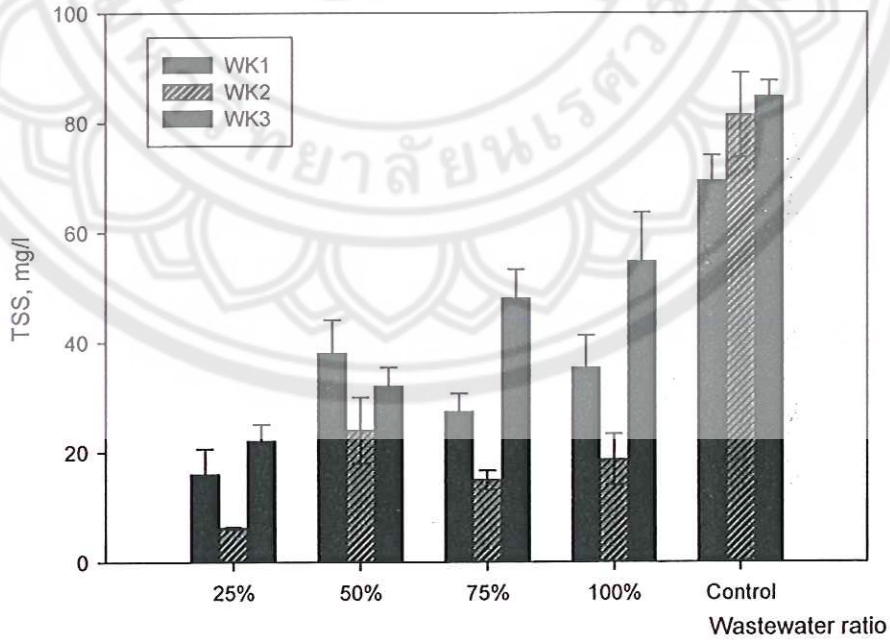
Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for wastewater dilution ratio at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 3

ค่าความเข้มข้นของ TSS ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าน้ำเสียในหน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 มีค่าความเข้มข้นของ TSS ในน้ำเสีย ระหว่าง 6.0-28.0, 12.0-50.0, 12.0-56.0 และ 10.0-72.0 mg/l ตามลำดับ โดยพบว่าค่าความเข้มข้นของ TSS ในเกือบทุกระบบบำบัด มีค่าลดลงในสัปดาห์ที่ 1 และ 2 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในสัปดาห์ที่ 3 (ภาพที่ 4.8) ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบ ค่า COD ของน้ำเสียแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นในแต่ละสัปดาห์ พบว่ามีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ยกเว้น ค่าความเข้มข้นของ TSS ของน้ำเสียในระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียที่ร้อยละ 75 ในขณะที่ ค่าความเข้มข้นของ TSS ในหน่วยควบคุม มีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งในสัปดาห์ที่ 2 และ 3 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัปดาห์ พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

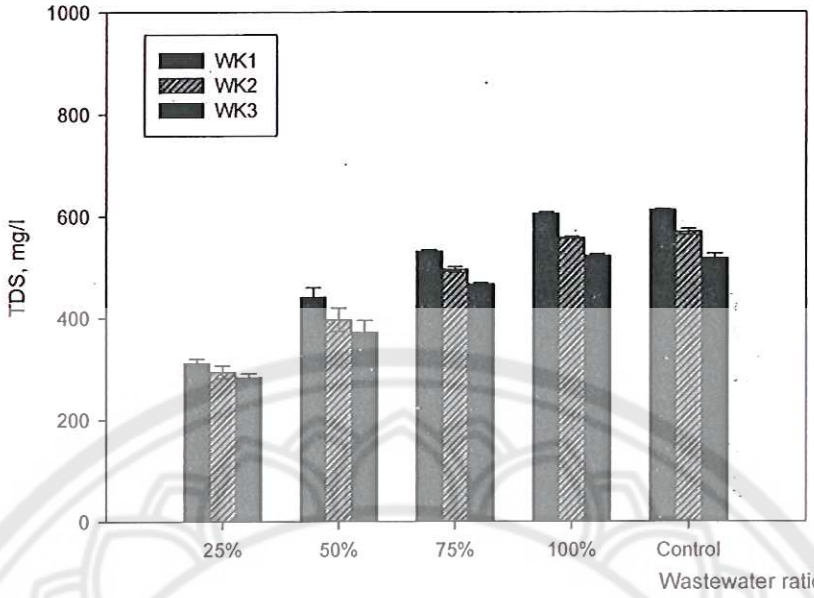
ค่า TSS ที่ตรวจพบทั้งหมดมีค่าอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยมีค่าต่ำกว่าค่า TSS ของเกณฑ์มาตรฐาน ก (เกณฑ์มาตรฐานสูงสุดสำหรับฟาร์มประเภท ก เทียบเท่าจำนวนสุกร มากกว่า 5,000 ตัว) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 150 mg/l (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) การลดลงของค่า TSS ในระบบเกิดขึ้นได้จากการย่อยสลายของของแข็งอินทรีย์ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่า TSS ในแต่ละระบบเกิดขึ้นได้จากชิ้นส่วนและเศษซากของแหนแดงที่ตาย และเกิดขึ้นจากการระเหยของน้ำทำให้น้ำมีปริมาตรลดลงและส่งผลให้ค่ามลสารที่ปนเปื้อนในน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังจะพบได้จากค่า TSS เช่นเดียวกับที่พบจากค่า BOD และ COD ของน้ำเสียในระบบ และพบการเพิ่มขึ้นของค่ามลสารในหน่วยควบคุมเช่นกัน ซึ่งเป็นการบ่งชี้ได้ถึงอิทธิพลของการระเหยของน้ำต่อค่าความเข้มข้นของมลสาร



ภาพที่ 4.8 ค่า TSS ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด

ประสิทธิภาพการบำบัดมลสารในรูปของของแข็งละลายทั้งหมด (TDS) ของระบบ ที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกัน พบว่า ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS ระหว่างร้อยละ (-18.3)-21.9, 2.8-11.8 และ (-5.1)-15.3 ตามลำดับ ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด หน่วยควบคุมมีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS ระหว่างร้อยละ 2.8-3.9, 6.0-8.4 และ 8.3-10.6 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) ทั้งนี้ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TDS ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าหน่วยทดลองแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด โดยพบมีค่าประสิทธิภาพการบำบัด TDS สูงสุด ในหน่วยทดลองที่สัดส่วนความเข้มข้นร้อยละ 25 และมีประสิทธิภาพแตกต่างจากระบบบำบัดที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียสัดส่วนอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.3) และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TDS ระหว่างสัปดาห์ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด TDS ของระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 มีค่าสูงในสัปดาห์ที่ 1 ขณะที่ ระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 100 มีประสิทธิภาพการบำบัด TDS สูงสุดในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด และแตกต่างจากกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ค่าความเข้มข้นของ TDS ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าน้ำเสียในหน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 มีค่าความเข้มข้นของ TDS ในน้ำเสีย ระหว่าง 271.0-327.0, 333.0-472.0, 462.0-535.0 และ 515.0-611.0 mg/l ตามลำดับ โดยพบค่าความเข้มข้นของ TDS ในทุกระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน มีค่าลดลงเป็นลำดับ (ภาพที่ 4.9) ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบ ค่า TDS ของน้ำเสียแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่าความเข้มข้นของ TSS ของน้ำเสียในระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียที่ร้อยละ 25 และ 50 มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ขณะที่ ค่าความเข้มข้นของ TSS ของน้ำเสียในระบบที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 75 และ 100 มีค่าแตกต่างกันระหว่างสัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) โดยมีค่าความเข้มข้นของ TSS สูงสุด ในสัปดาห์ที่ 1 และต่ำสุดในสัปดาห์ที่ 3 การลดลงของ TDS บ่งชี้ถึงการลดลงของสารอนินทรีย์ในน้ำเสียซึ่งรวมถึงการลดลงของมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย จากกระบวนการระเหยและการนำไปใช้โดยสิ่งมีชีวิต



ภาพที่ 4.9 ค่า TDS ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด

2.3) การบำบัดธาตุอาหาร

ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหาร ในรูปของเจดาล์ไนโตรเจน (TKN) ของระบบ ที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกัน พบว่า ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ระหว่างร้อยละ (-50.4)-66.4, 11.3-91.3 และ (-250.0)-68.2 ตามลำดับ ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด หน่วยควบคุมมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ระหว่างร้อยละ 14.1-17.9, 1.7-10.7 และ 6.9-21.8 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) ทั้งนี้เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TKN ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าหน่วยทดลองแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1 และ 2 ของการบำบัด พบว่าหน่วยทดลองแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบมีค่าสูงสุดในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารของระบบบำบัดพืชลอยน้ำ

Indicators/ operation time	Wastewater dilution ratio				
	25% of wastewater	50% of wastewater	75% of wastewater	100% of wastewater	Control[1/]
TKN (% removal)					
1st week	63.6±1.5 ^{aA}	(-18.4)±16.1 ^{aC}	(-14.7)±1.1 ^{aC}	12.1±0.7 ^{aB}	15.5±1.2 ^{aB}
2nd week	85.9±3.3 ^{aA}	41.3±12.0 ^{aB}	23.5±2.2 ^{aBC}	14.8±2.0 ^{aC}	7.1±2.7 ^{aC}
3rd week	(-63.9)±93.1 ^{aA}	28.0±35.1 ^{aA}	21.0±2.8 ^{aA}	22.6±3.4 ^{aA}	14.1±4.3 ^{aA}
TP (% removal)					
1st week	(-72.5)±14.7 ^{aB}	(-302.4)±19.1 ^{aC}	11.3±4.1 ^{aA}	6.9±6.9 ^{aA}	4.9±3.8 ^{aA}
2nd week	(-25.4)±32.1 ^{aA}	37.4±32.5 ^{aA}	19.1±5.9 ^{aA}	(-85.6)±32.2 ^{aA}	(-79.7)±38.4 ^{aA}
3rd week	21.0±19.6 ^{aA}	(-29.9)±61.8 ^{aA}	(-76.0)±17.9 ^{aA}	21.3±6.2 ^{aA}	13.5±16.4 ^{aA}

Note: [1/] 100 % of wastewater without plant

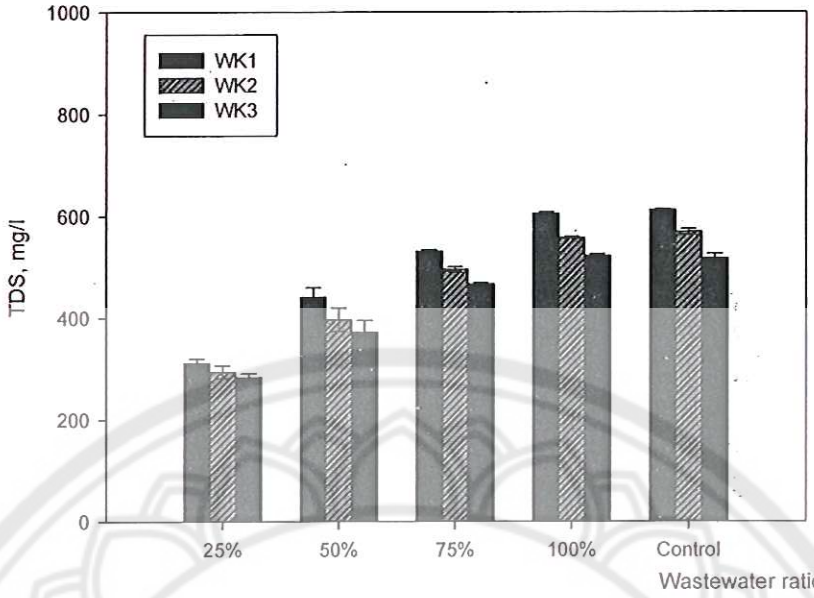
Mean values±SEM are shown for each treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for wastewater dilution ratio at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 3

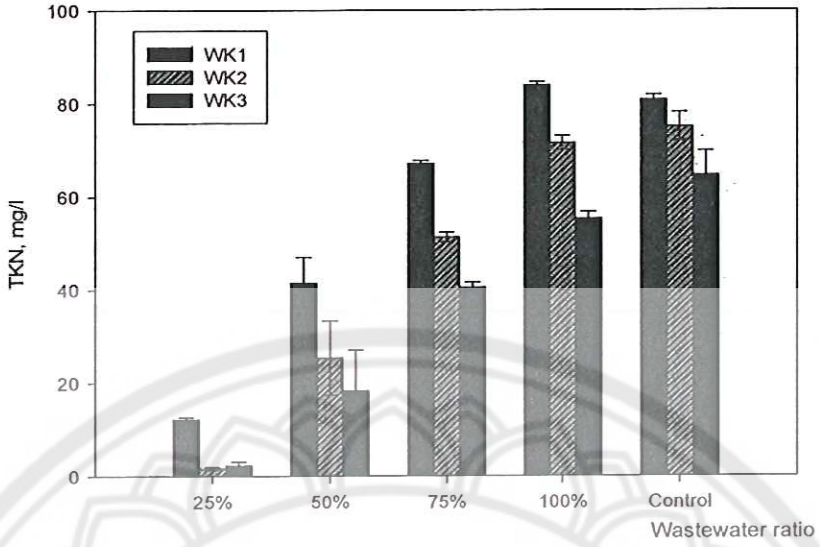
ค่าความเข้มข้นของ TKN ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าน้ำเสียในหน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 มีค่าความเข้มข้นของ TKN ในน้ำเสีย ระหว่าง 1.12-12.9, 3.9-52.6, 38.6-68.0 และ 52.6-85.1 mg/l ตามลำดับ โดยพบว่าค่าความเข้มข้นของ TKN ในเกือบทุกระบบบำบัด มีแนวโน้มลดลงทั้งในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 (ภาพที่ 4.10) ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 1 ของระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 75 และในสัปดาห์ที่ 3 ของระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบ ค่า TKN ของน้ำเสียแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นในแต่ละสัปดาห์ พบว่าน้ำเสียในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50 และหน่วยควบคุม มีค่า TKN ของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ขณะที่ระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 75 และ 100 นั้น ค่า TKN ของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) โดยพบค่าเฉลี่ยสูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่า TKN ที่ตรวจพบทั้งหมดมีค่าอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยมีค่าต่ำกว่าค่า TSS ของเกณฑ์มาตรฐาน ก (เกณฑ์มาตรฐานสูงสุดสำหรับฟาร์มประเภท ก เทียบเท่าจำนวนสุกร มากกว่า 5,000 ตัว) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 120 mg/l (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)



ภาพที่ 4.9 ค่า TDS ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด

2.3) การบำบัดธาตุอาหาร

ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหาร ในรูปของเจดาล์ไนโตรเจน (TKN) ของระบบ ที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกัน พบว่า ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ระหว่างร้อยละ (-50.4)-66.4, 11.3-91.3 และ (-250.0)-68.2 ตามลำดับ ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด หน่วยควบคุมมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ระหว่างร้อยละ 14.1-17.9, 1.7-10.7 และ 6.9-21.8 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) ทั้งนี้เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TKN ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าหน่วยทดลองแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1 และ 2 ของการบำบัด พบว่าหน่วยทดลองแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบมีค่าสูงสุดในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 (ตารางที่ 4.4)



ภาพที่ 4.10 ค่า TKN ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด

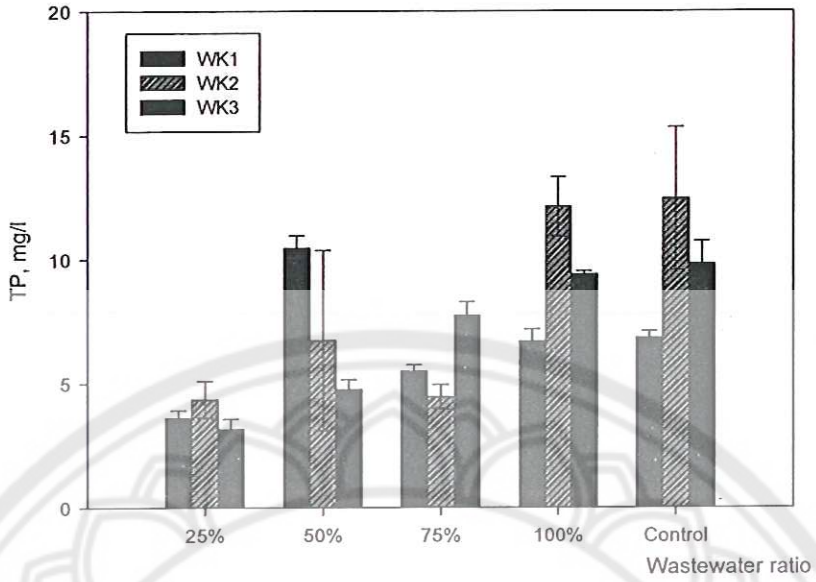
การลดลงของ TKN ของน้ำเสียในระบบนั้นเกิดขึ้นได้จากการลดลงของอินทรียไนโตรเจน (ON) และแอมโมเนียไนโตรเจน (NH_3N) โดยจุลินทรีย์จะทำการเปลี่ยนรูป ON ไปเป็น NH_3N ด้วยกระบวนการ Ammonification จากนั้นสามารถลดปริมาณ NH_3N ที่มีอยู่เดิมและ NH_3N ที่เปลี่ยนรูปมาจาก ON โดยการระเหยของ NH_3N ออกจากน้ำเสีย การนำ NH_3N ไปใช้โดยพืชและจุลินทรีย์ และการเปลี่ยนรูป NH_3N ไปเป็นไนโตรเจนรูปอื่น (NO_xN) โดยจุลินทรีย์ การตรวจพบประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ในสัปดาห์ที่ 1 และ 2 ของการบำบัด สูงในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 นั้น คาดว่าส่วนหนึ่งเป็นผลจากการนำ NH_3N ไปใช้ของ แหนแดงซึ่งพบว่าในระบบนี้แหนแดงเติบโตได้ดีกว่าระบบอื่นที่แหนแดงเกิดการทยอยตายซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณอินทรียสารรวมถึงอินทรียสารไนโตรเจนให้กับน้ำในระบบด้วย นอกจากนั้นการเปลี่ยนรูป ON ไปเป็น NH_3N ด้วยกระบวนการ Ammonification ส่วนหนึ่งเป็นการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ซึ่งระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 นั้น โดยทั่วไปจะมีความต้องการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายมลสารน้อยกว่าระบบอื่นที่มีความเข้มข้นของน้ำเสียสูงกว่า ดังนั้นจึงมีปริมาณ O_2 เหลือเพียงพอต่อการใช้ของ Aerobic bacteria ในกระบวนการ Ammonification

ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหาร ในรูปของฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ของระบบ ที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกัน พบว่า ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TP ระหว่างร้อยละ (-321.5)-19.2, (-147.4)-76.3 และ (-142.4)-70.9 ตามลำดับ ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด หน่วยควบคุมมีประสิทธิภาพในการบำบัด TP ระหว่างร้อยละ (-1.9)-11.3, (-132.7)-(-5.0) และ (-18.9)-33.6 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) ทั้งนี้ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TP ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าหน่วยทดลองแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการบำบัด TP ในแต่ละสัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่ ในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัดนั้น พบว่าระบบบำบัดแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการบำบัด TP แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบมีค่าสูงสุดในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 75 และร้อยละ 100 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4)

ค่าความเข้มข้นของ TP ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าน้ำเสียในหน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 มีค่าความเข้มข้นของ TP ในน้ำเสีย ระหว่าง 2.3-5.9, 2.2-13.9, 3.5-8.8 และ 5.9-14.5 mg/l ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้นของ TP ในน้ำเสียของหน่วยควบคุม ตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ของการบำบัดมีค่าระหว่าง 6.4-15.9 mg/l (ภาพที่ 4.11) ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของ TP ในน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ พบว่าน้ำเสียในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50, 75 และร้อยละ 100 มีค่า TP ของ น้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ของการบำบัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ขณะที่ระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 และหน่วยควบคุม มีค่า TP ของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ของการบำบัดไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

การลดลงของ TP ในน้ำเสียภายในระบบบำบัด เกิดขึ้นได้จากการนำฟอสเฟตไปใช้โดยพืชและจุลินทรีย์ในระบบ และการตกตะกอนของฟอสเฟตร่วมกับธาตุอื่น เช่น แคลเซียม แต่อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ การบำบัดมลสารในรูปของตะกอนนั้นจะยังคงรวมอยู่ในตัวอย่างน้ำ ดังนั้น ค่าความเข้มข้นของ TP จึงรวมถึงตะกอนเคมีฟอสเฟตด้วย ซึ่งหากมีการนำระบบไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ตะกอนเคมีฟอสเฟตที่เกิดขึ้นจะเป็นส่วนที่ถูกบำบัดออกจากน้ำด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) ซึ่งจะทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าที่ตรวจวัดได้ และค่าความเข้มข้นของ TP ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะต่ำกว่าที่ปรากฏในผลการศึกษาครั้งนี้ อย่างไรก็ตาม การตกตะกอนทางเคมีของฟอสฟอรัสนั้น จะได้รับอิทธิพลจากปริมาณออกซิเจนในน้ำเสีย โดยหากน้ำมีปริมาณออกซิเจนต่ำ ฟอสฟอรัสจะถูกปลดปล่อยกลับเข้าสู่น้ำเสียในรูปของสารละลายอันทำให้ค่าฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มสูงขึ้นได้



ภาพที่ 4.11 ค่า TP ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด

2.4) การบำบัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

ประสิทธิภาพการบำบัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำเสีย (TCB) ของระบบ ที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่สัดส่วนการเจือจางน้ำเสียที่แตกต่างกัน พบว่า ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TCB ระหว่างร้อยละ 80.8-98.6, (-4682.6)-95.7 และ (-425.0)-92.3 ตามลำดับ ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1, 2 และ 3 ของการบำบัด หน่วยควบคุมมีประสิทธิภาพในการบำบัด TCB ระหว่างร้อยละ 54.2-80.8, 47.8-96.1 และ 7.1-97.1 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) ทั้งนี้ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของหน่วยทดลองในแต่ละสัปดาห์ พบว่าหน่วยทดลองแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียมีประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละสัปดาห์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ในขณะที่ในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด พบว่าหน่วยทดลองที่บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ จะมีประสิทธิภาพในการบำบัด TCB ที่สูงกว่าระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง โดยพบประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่สัดส่วนความเข้มข้นร้อยละ 25, 50 และร้อยละ 75 ตามลำดับ

ปริมาณ TCB ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่า น้ำเสียในหน่วยทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 มีค่าของ TCB ในน้ำเสีย ระหว่าง 40.0-11,000.0, 40.0-1,444.6, 30-930 และ 30-4,600 MPN/100 ml ตามลำดับ ขณะที่ ค่า TCB ในน้ำเสียของหน่วยควบคุม ตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ของการบำบัดมีค่าระหว่าง 30.0-11,000 MPN/100 ml (ภาพที่ 4.12) ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า TCB ในน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ของการบำบัด พบว่าน้ำเสียในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียที่แตกต่างกันทุกระบบ คือ ระบบที่มีสัดส่วนน้ำเสียร้อยละ 50, 75 และร้อยละ 100 รวมถึงน้ำเสียในหน่วยควบคุม มีค่าของ TCB ใน

น้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ของการบำบัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

การลดลงของ TCB ในน้ำเสียภายในระบบบำบัด เกิดขึ้นได้จากสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงอยู่ของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ทั้งนี้ พบว่าน้ำเสียในระบบบำบัดมีปริมาณออกซิเจนต่ำ ค่า pH มีค่าเป็นกลางถึงเป็นกรดหรือด่างเล็กน้อย ความเค็มอยู่ในช่วงของความเค็มที่พบในน้ำจืดถึงกร่อยเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม คาดว่าการลดลงของโคลิฟอร์มแบคทีเรียในระบบได้รับอิทธิพลหลักจากแสงอาทิตย์ และการทำลายกันเองของแบคทีเรีย ในขณะที่ โคลิฟอร์มแบคทีเรียบางส่วนสามารถเพิ่มจำนวนขึ้นได้เช่นกัน ทำให้มีการตรวจพบค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เป็นลบในบางช่วงเวลา

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ของระบบบำบัดพืชลอยน้ำ

Indicators/ operation time	Wastewater dilution ratio				
	25% of wastewater	50% of wastewater	75% of wastewater	100% of wastewater	Control[1/]
TCB (% removal)					
1st week	99.3±0.1 ^{aA}	96.1±1.2 ^{aA}	95.4±2.1 ^{aA}	80.8±0.0 ^{aB}	71.9±8.9 ^{aB}
2nd week	(-1,589.8)±1,547.9 ^{aA}	22.6±69.5 ^{aA}	17.2±43.2 ^{aA}	93.7±1.5 ^{aA}	63.9±16.1 ^{aA}
3rd week	(-88.2)±168.4 ^{aA}	43.6±22.5 ^{aA}	66.6±21.0 ^{aA}	82.5±1.9 ^{aA}	65.7±29.3 ^{aA}

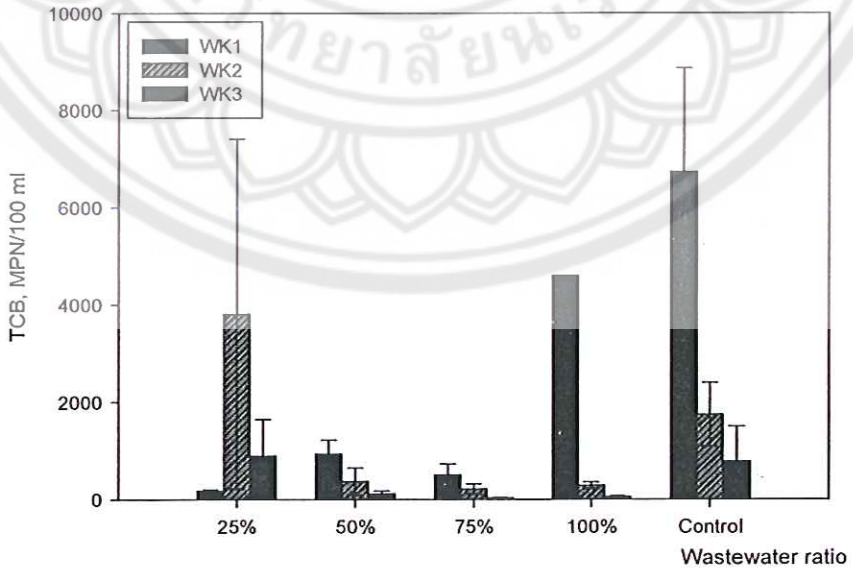
Note: [1/] 100 % of wastewater without plant

Mean values±SEM are shown for each treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for wastewater dilution ratio at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 3



ภาพที่ 4.12 ค่า TCB ของน้ำเสียในแต่ละอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย ระหว่างการบำบัด

4.1.2 ความเป็นไปได้ในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

การวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในสัดส่วนความเข้มข้นที่แตกต่างกันในการผลิตแหนแดง โดยวิเคราะห์ค่าและความแตกต่างทางสถิติของดัชนีทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพที่ทำการตรวจวัดในแหนแดงที่ผลิตได้ในน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งจะบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้และลักษณะของน้ำเสียที่เหมาะสมในการใช้ในผลิตแหนแดง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลผลิตแหนแดง ในระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25

จากการสังเกตลักษณะโดยทั่วไปของแหนแดงในแต่ละระบบบำบัดที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน พบว่าในระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 นั้น เมื่อผ่านสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด แหนแดงในระบบยังคงมีลำต้นและใบเป็น สีเขียวตามปกติ อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่ในสัปดาห์ที่ 2 และ 3 ของการบำบัด พบว่าใบของแหนแดงในระบบเริ่มเป็นสีเหลืองเล็กน้อย แต่ยังคงดำรงชีวิตอยู่ได้ และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการบำบัดของระบบ คือที่สัปดาห์ที่ 3 ของการบำบัด นับจากวันแรกของการระบายน้ำเสียและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบ ซึ่งได้ทำการปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่อัตราการปล่อยเท่ากับ 0.5 kg/m^2 หรือเท่ากับปล่อยแหนแดง 500 g น้ำหนักสด ลงในแต่ละหน่วยทดลอง ยกเว้นหน่วยควบคุม พบว่าเมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ ผลผลิตของแหนแดงในระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 นั้น พบค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 1,493.3 และ 53.3 g/m^2 ตามลำดับ คิดเป็นค่า Dry matter (DM) เฉลี่ยเท่ากับ 3.6 % มีอัตราการเติบโตสัมพันท์เฉลี่ย (RGR) 0.046 d^{-1} (ตารางที่ 4.6) คุณค่าทางโภชนะของผลผลิตแหนแดงในรูปของปริมาณโปรตีนหยาบ (CP) เยื่อใยหยาบ (CF) ปริมาณแร่ธาตุฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) และปริมาณแคดเมียม (Cd) ในผลผลิตแหนแดง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.96 %, 14.6 %, 1.12 %, 0.50 %, 0.07 %, 0.64 %, 34.00 ppm, 25.25 ppm และ 4.5 ppm ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.6 ผลผลิตแหนแดง จากระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน

Wastewater dilution ratio	Fresh weight (g/m^2)	Dry weight (g/m^2)	Dry matter (%)	Relative growth rate (d^{-1})
25 % of wastewater	1,180.0-1,740.0	44.3-59.4	3.3-3.8	0.038-0.052
50 % of wastewater	380.0	16.6	4.4	-0.009
75 % of wastewater	0	0	0	0
100 % of wastewater	0	0	0	0

ตารางที่ 4.7 คุณค่าทางโภชนะและแร่ธาตุอาหารในแหนแดง จากระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียแตกต่างกัน

Nutritional content	Wastewater dilution ratio			
	25 %	50 %	75 %	100 %
CP , %	21.0-30.63	25.38	-	-
CF, %	13.56-15.58	14.63	-	-
P, %	1.01-1.26	2.49	-	-
K, %	0.37-0.61	0.38	-	-
Ca, %	0.06-0.09	0.50	-	-
Mg, %	0.56-0.71	1.06	-	-
Zn, ppm	30.25-38.25	20.50	-	-
Cu, ppm	19.75-31.00	13.25	-	-
Cd, ppm	2.25-6.50	1.25	-	-

Note: - = no sample

เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตแหนแดงที่มีการเลี้ยงโดยเกษตรกร ซึ่งพบว่าแหนแดงที่มีการเลี้ยงกันตามปกติ จะมีค่า DM ของผลผลิตเท่ากับ 5.0-7.0 % มีปริมาณ CP ระหว่าง 13.0-30.0 % และมีปริมาณ P ระหว่าง 0.2-1.6 % (ประยูร และบรรหาญ, 2544) นั้น จะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 นั้น มีปริมาณ DM ต่ำกว่าการผลิตตามปกติ แต่มีค่าของ CP และปริมาณ P อยู่ในเกณฑ์เดียวกับที่พบในแหนแดงที่เลี้ยงตามปกติ

เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตแหนเล็กที่ใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งมีการรายงานค่า CP, CF, Ca และ P ของแหนเล็ก เท่ากับ 32.07, 8.03, 2.23 และ 0.70 % ตามลำดับ และผลผลิตแหนใหญ่ที่ใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งมีการรายงานค่า CP, CF, Ca และ P ของแหนใหญ่ เท่ากับ 17.35, 11.97, 3.57 และ 0.49 % ตามลำดับ (กรมปศุสัตว์, 2547) จะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 นั้น มีค่า CP ต่ำกว่า CP ของแหนเล็กแต่สูงกว่า CP ของแหนใหญ่ มีค่า CF และ ค่า P สูงกว่าแหนทั้งสองชนิด แต่มีค่า Ca ต่ำกว่า ค่า Ca ของแหนทั้งสองชนิด

2) ผลผลิตแหนแดง ในระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50

จากการสังเกตลักษณะโดยทั่วไปของแหนแดงในระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50 นั้น พบว่าเมื่อผ่านสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด แหนแดงเริ่มมีใบเป็นสีเหลือง และเมื่อเข้าสู่ในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด ลำต้นของแหนแดงเริ่มเล็กแกร็นและพบว่าเริ่มทยอยตายลงในบางหน่วยทดลอง เมื่อสิ้นสุดการดำเนินระบบ พบว่ามีเพียง 1 หน่วยทดลองเท่านั้น จาก

ทั้งหมด 3 หน่วยทดลอง ของระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50 ที่ยังคงมีผลผลิตแหนแดงเหลืออยู่ โดยพบผลผลิตของแหนแดง มีค่าน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 380 และ 16.6 g/m^2 ตามลำดับ คิดเป็นค่า Dry matter (DM) เท่ากับ 4.4 % มีค่า RGR เท่ากับ -0.009 d^{-1} ซึ่งหมายถึงการลดต่ำลงของผลผลิตเทียบกับปริมาณแหนแดงเมื่อเริ่มระบบ (ตารางที่ 4.6) คุณค่าทางโภชนะของผลผลิตแหนแดงในรูปของปริมาณโปรตีนหยาบ (CP) เยื่อใยหยาบ (CF) ปริมาณแร่ธาตุฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) และปริมาณแคดเมียม (Cd) ในผลผลิตแหนแดง มีค่าเท่ากับ 25.38 %, 13.0 %, 2.49 %, 0.38 %, 0.50 %, 1.06 %, 20.50 ppm, 13.25 ppm และ 1.25 ppm ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7)

เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตแหนแดงที่มีการเลี้ยงโดยเกษตรกร ซึ่งพบว่าแหนแดงที่มีการเลี้ยงกันตามปกติ จะมีค่า DM ของผลผลิตเท่ากับ 5.0-7.0 % มีปริมาณ CP ระหว่าง 13.0-30.0 % และมีปริมาณ P ระหว่าง 0.2-1.6 % (ประยูร และบรรหาญ, 2544) นั้น จะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50 นั้น มีปริมาณ DM ต่ำกว่าการผลิตตามปกติเล็กน้อย มีค่า CP อยู่ในเกณฑ์เดียวกับที่พบในแหนแดงที่เลี้ยงตามปกติ และมีค่า P สูงกว่าการผลิตตามปกติ

เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตแหนเล็กที่ใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งมีการรายงานค่า CP, CF, Ca และ P ของแหนเล็ก เท่ากับ 32.07, 8.03, 2.23 และ 0.70 % ตามลำดับ และผลผลิตแหนใหญ่ที่ใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งมีการรายงานค่า CP, CF, Ca และ P ของแหนใหญ่เท่ากับ 17.35, 11.97, 3.57 และ 0.49 % ตามลำดับ (กรมปศุสัตว์, 2547) จะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50 นั้น มีค่า CP ต่ำกว่า CP ของแหนเล็กแต่สูงกว่า CP ของแหนใหญ่ มีค่า CF และ ค่า P สูงกว่าแหนทั้งสองชนิด แต่มีค่า Ca ต่ำกว่า ค่า Ca ของแหนเล็ก แต่มีค่าใกล้เคียงกับค่า Ca ของแหนใหญ่

3) ผลผลิตแหนแดง ในระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50 และร้อยละ 100

จากการสังเกตลักษณะโดยทั่วไปของแหนแดงในระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50 และ 100 พบว่าเมื่อผ่านสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด แหนแดงมีลักษณะของลำต้นและใบเริ่มเหี่ยว มีสีคล้ำ และเริ่มทยอยตายลง และพบว่าแหนแดงได้ตายลงทั้งหมดในทุกหน่วยทดลองของระบบที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50 และ 100 ภายในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด

การศึกษาในระยะที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรนั้น ผลการศึกษา พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำสามารถลดมลสารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรได้ โดยพบว่าแหนแดงในระบบสามารถสนับสนุนกระบวนการบำบัดในระบบได้ แต่อย่างไรก็ตาม แหนแดงจะสามารถอยู่รอดและช่วยระบบในการบำบัดได้ในกรณีที่ระบบมีอัตราการรองรับความเข้มข้นของน้ำเสียในรูปของ COD (COD loading rate) และ BOD (BOD loading

rate) สูงไม่เกิน 1.4 และ 1.0 g/m^2/d ที่ระยะเวลาการบำบัดรวม 21 วัน ซึ่งเป็นอัตราการรองรับสารอินทรีย์ที่แหนแดงสามารถเจริญเติบโตอยู่ได้ และการดำรงอยู่ของแหนแดงจะช่วยส่งเสริมกระบวนการบำบัด ในทางกลับกันคือแหนแดงที่ไม่สามารถเจริญเติบโตและตายลงในระบบจะเป็นการเพิ่มของเสียให้กับน้ำเสีย ทั้งนี้ ผลการศึกษาพบว่าในระบบพืชลอยน้ำที่มีแหนแดงเป็นพืชในระบบนั้น ในระบบที่มีความเข้มข้นของน้ำเสียในรูปของความเข้มข้นของ COD และ BOD เท่ากับ 28.0 และ 24.8 mg/l ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD ในช่วงระยะเวลา 21 วัน ของการบำบัด เท่ากับ 1.0 และ 0.89 g/m^2/d ตามลำดับ นั้น โดยรวมแล้วระบบมีประสิทธิการบำบัด BOD และ TKN สูงและแตกต่างจากหน่วยควบคุมที่ไม่มีแหนแดงในระบบ และมีอัตราการรองรับของเสียเท่ากับ 6.0 g COD/m^2/d และ 32.0 g BOD/m^2/d รวมถึงระบบพืชลอยน้ำประเภทเดียวกันที่มีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ที่สูงกว่า คือระหว่าง 1.4-6.0 g COD/m^2/d และ 1.0-32.0 g BOD/m^2/d

ผลการศึกษาถึงผลผลิต พบว่ามีเพียงระบบที่มีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD เท่ากับ 1.0 และ 0.89 g/m^2/d ตามลำดับ เท่านั้น ที่สามารถให้ผลผลิตในทุกซ้ำของหน่วยทดลอง โดยผลผลิตที่ได้มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นจากปริมาณแหนแดงที่ปล่อยลงสู่ระบบบำบัด โดยมีค่า RGR เฉลี่ยเท่ากับ 0.046 d^{-1} เมื่อพิจารณาด้านคุณภาพ พบแหนแดงที่ผลิตได้มีค่า Dry matter ต่ำกว่าการผลิตตามปกติ มีค่า CP ในระดับเดียวกับแหนแดงที่มีการผลิตตามปกติ ในขณะที่มีค่า P สูงกว่าแหนแดงที่มีการผลิตตามปกติ

4.2 การศึกษาถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

การศึกษาในระยะนี้ เป็นการศึกษาต่อเนื่องถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง โดยทำการศึกษาต่อยอดจากผลการศึกษาที่ได้จากการศึกษาในระยะที่ 1

4.2.1 แนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

การวิเคราะห์ถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บเกี่ยวหรือความถี่ในการเก็บเกี่ยวแหนแดงกับการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในระบบ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำตามช่วงเวลา ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา เพื่อการวิเคราะห์ถึงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และช่วงเวลาที่เหมาะสมในบำบัดหรือกักพักน้ำเสียในระบบ

1) คุณสมบัติของน้ำเสียฟาร์มสุกรก่อนการบำบัด

น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียจากกิจกรรมการเลี้ยงสุกรที่ถูกระบายและรวบรวมไว้ในบ่อรวบรวมน้ำเสีย เพื่อให้น้ำเสียถูกบำบัดและกักพักอยู่ภายในบ่อ อย่างไรก็ตาม หากมีน้ำเสียในปริมาณมากเกินประสิทธิภาพการกักเก็บของบ่อรวบรวมน้ำ อาจทำให้น้ำเสียและมลสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียนั้นเกิดการแพร่กระจายออกสู่แหล่งน้ำภายนอกได้

ผลจากการตรวจวัดคุณลักษณะของตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสีย พบว่าน้ำเสียมีค่าอุณหภูมิน้ำเฉลี่ย 29.4 °C ค่า pH ของน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.17 ค่า EC ของน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 993.0 µS/cm ค่า TDS ของน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 496.5 mg/l ค่า Salinity ของน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.49 ppt DO มีค่าเฉลี่ย 2.15 mg/l ปริมาณมลสารในรูป BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ Phosphate มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 56.3, 143.7, 130.5, 39.6, 86.1 และ 18.7 mg/l ตามลำดับ และปริมาณ TCB ในน้ำเสีย มีค่ามากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml (ตารางที่ 4.8) ในส่วนของโลหะหนักนั้นในระยะที่ 2 ของการศึกษาได้ตรวจพบค่าความเข้มข้นของ Cu, Zn และ Cd ในน้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสียมีค่าระหว่าง 0.1610-0.2245, 0.0170-0.0215 และ 0.2345-0.3095 mg/l ตามลำดับ

ผลจากการตรวจวัดคุณลักษณะของตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ ซึ่งเป็นน้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสียที่ทำการเจือจางด้วยน้ำบาดาลที่สัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 โดยคุณสมบัติน้ำเสียที่ทำการทดสอบ มีดังนี้ น้ำเสีย มีค่าอุณหภูมิน้ำเฉลี่ย 29.3 °C ค่า pH ของน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.05 ค่า EC ของน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 650.8 µS/cm ค่า TDS ของน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 325.2 mg/l ค่า Salinity ของน้ำเสียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.32 ppt DO มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.9 mg/l ปริมาณมลสารในรูป BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ Phosphate มีค่าเท่ากับ 11.8, 52.0, 23.5, 9.8, 39.0 และ 3.9 mg/l ตามลำดับ และปริมาณ TCB ในน้ำเสีย มีค่าเท่ากับ 24,000.0 MPN/100 ml (ตารางที่ 4.8)

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และคุณสมบัติของน้ำเสียภายหลังการเจือจาง ที่สัดส่วนร้อยละ 25 (ระยะที่ 2 ของการทดลอง)

Indicators	Unit	Wastewater from collecting pond[1/]	25 % dilution of wastewater (Tested wastewater)[2/]
Temperature	°C	28.6-30.2	27.9-30.5
pH	-	6.77-7.57	6.41-7.84
DO	mg/l	1.22-3.08	3.28-4.89
Salinity	ppt	0.45-0.52	0.29-0.35
EC	µS/cm	929.0-1,057.0	604.0-720.0
TDS	mg/l	464.0-529.0	301.0-360.0
TSS	mg/l	70.0-191.0	10.0-38.0
BOD_5	mg/l	49.5-63.0	8.7-16.2
COD	mg/l	63.0-152.0	40.0-88.0
TKN	mg/l	13.4-65.8	2.2-23.0
TP	mg/l	51.9-129.39	13.5-63.9
Phosphate	mg/l	15.1-22.3	2.0-6.0
TCB	MPN/100 ml	≥24,000.0	24,000.0

Note: [1/] sample number =2
[2/] sample number =6

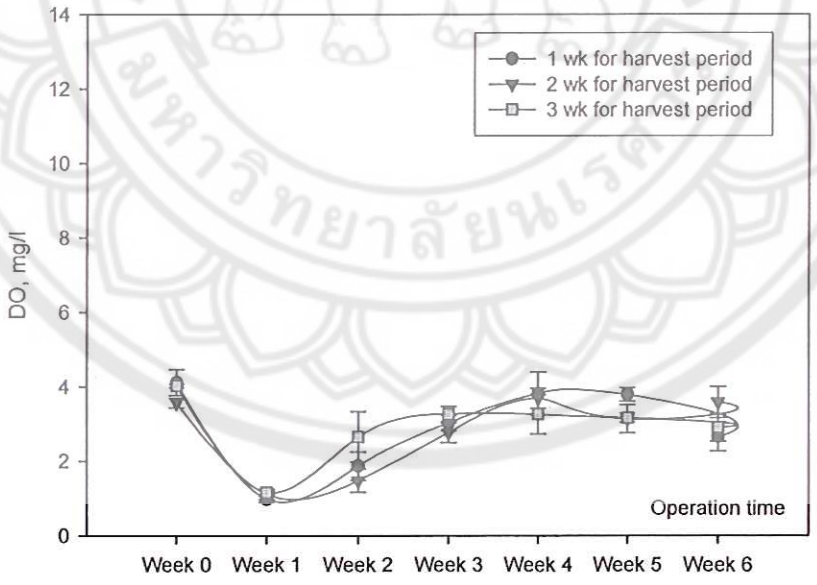
ทั้งนี้ พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการเจือจางแล้วก่อนการบำบัด มีคุณลักษณะทั่วไปใกล้เคียงกับน้ำเสียจากบ่อรวบรวม อย่างไรก็ตาม การเจือจางทำให้ค่าดัชนีที่บ่งชี้ถึงการปนเปื้อนมีค่าลดต่ำลง โดยน้ำเสียที่เจือจางแล้วก่อนการบำบัดมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศขณะทำการตรวจวัด pH มีค่าในช่วงของเป็นกรดเล็กน้อยถึงด่างเล็กน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.0 มีค่าออกซิเจนละลายน้ำสูงกว่าน้ำเสียจากบ่อรวบรวม โดยมีค่า DO เฉลี่ยเท่ากับ 3.90 mg/l ทั้งนี้เกิดจากการผสมกับน้ำที่มีค่า DO สูงกว่า รวมถึงการเติมออกซิเจนจากอากาศในขณะเจือจางและขณะที่น้ำเกิดการสัมผัสกับอากาศ ค่าความเค็มของน้ำเสียก่อนบำบัด มีค่าลดต่ำลงเมื่อเทียบกับน้ำเสียจากบ่อรวบรวม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.32 ppt และสอดคล้องกับค่า EC และ ค่า TDS ที่มีค่าลดต่ำลงเช่นกันเมื่อเทียบกับน้ำเสียจากบ่อรวบรวม โดยค่า EC และ ค่า TDS มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 650.8 และ 325.2 mg/l ตามลำดับ ค่า TSS ของน้ำเสียจากบ่อรวบรวมยังพบค่าที่สูงกว่าค่า TSS ของเกณฑ์มาตรฐาน ก (เกณฑ์มาตรฐานสูงสุดสำหรับฟาร์มประเภท ก เทียบเท่าจำนวนสุกร มากกว่า 5,000 ตัว) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 150 mg/l (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) และเมื่อเจือจางแล้วทำให้ค่า TSS ของน้ำเสียก่อนบำบัดมีค่าลดต่ำลง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 23.5 mg/l ค่า BOD_5 ในน้ำเสียจากบ่อรวบรวม พบค่าสูงกว่าค่า BOD_5 ของเกณฑ์มาตรฐาน ก ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 60 mg/l เล็กน้อย แต่มีค่าต่ำกว่าค่า BOD_5 ของเกณฑ์มาตรฐาน ข (เกณฑ์มาตรฐานสูงสุดสำหรับฟาร์มประเภท ข เทียบเท่าจำนวนสุกร ตั้งแต่ 500-5,000 ตัว และฟาร์มประเภท ค เทียบเท่าจำนวนสุกร ตั้งแต่ 50-น้อยกว่า 500 ตัว) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100 mg/l (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) ขณะที่ค่า BOD_5 ในน้ำเสียที่เจือจางแล้วก่อนการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.8 mg/l ค่า COD ในน้ำเสียจากบ่อรวบรวม มีค่าความเข้มข้นอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐาน ก ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 300 mg/l ขณะที่ COD ในน้ำเสียก่อนบำบัด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 52.0 mg/l ค่า TKN ในน้ำเสียจากบ่อรวบรวม มีค่าความเข้มข้นอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐาน ก ก ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 120 mg/l (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) ขณะที่ TKN ในน้ำเสียก่อนบำบัด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.8 mg/l

2) คุณสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในระบบบำบัด และประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

ในระยะที่ 2 ของการศึกษาในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำผลการศึกษาจากระยะของการศึกษามาดำเนินการศึกษาต่อ โดยการนำน้ำเสียที่มีอัตราการเจือจางของน้ำเสียร้อยละ 25 มาทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดและค่ามลสารในน้ำเสียระหว่างการบำบัดของระบบพืชลอยน้ำที่ใช้แหนแดงเป็นพืชในระบบ และมีระยะเวลาการบำบัดนาน 6 สัปดาห์ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบที่ระยะเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน คือ ทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดและมลสารในน้ำเสีย รวมถึงผลผลิตและคุณภาพของแหนแดงที่ผลิตได้จากระบบบำบัด โดยมีรายละเอียดของผลการศึกษา ดังนี้

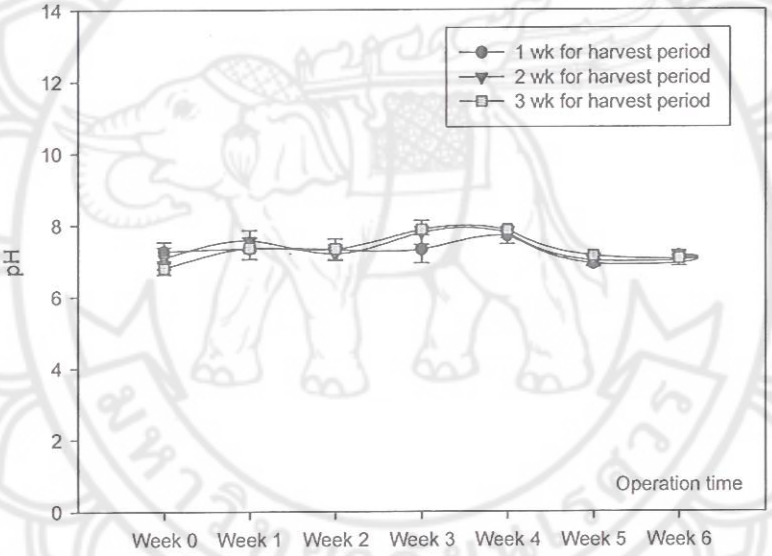
2.1) คุณสมบัติโดยทั่วไปของน้ำเสียระหว่างการบำบัด

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำโดยทั่วไปภาคสนามตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 6 ของการดำเนินระบบ พบออกซิเจนละลายน้ำ มีค่าระหว่าง 0.26-5.52 mg/l โดยพบ ค่า DO ของน้ำเสียที่ทำการบำบัดในแต่ละหน่วยทดลองมีค่าลดต่ำลงในสัปดาห์แรกของการบำบัด แล้วจึงเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มคงที่โดยมีการผันแปรของค่า DO ในช่วงแคบๆ (ภาพที่ 4.13) ทั้งนี้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า DO ในระบบคือความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายและการเปลี่ยนรูปมลสารของจุลินทรีย์ ซึ่งมีผลทำให้ DO ลดลงโดยเฉพาะในสัปดาห์แรกของการบำบัดซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นการบำบัดของระบบ จากนั้น DO มีค่าสูงขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากความต้องการออกซิเจนลดลง การเติมออกซิเจนจากอากาศและการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำในระบบ เมื่อเปรียบเทียบ ค่า DO ของน้ำเสียในระบบที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบที่ระยะเวลาเดียวกัน พบว่า ค่า DO ของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยพบว่าในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุกสัปดาห์และระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 2 สัปดาห์ น้ำเสียในระบบจะมีค่า DO เฉลี่ยสูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 4 ขณะที่ ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 3 สัปดาห์ น้ำเสียในระบบจะมีค่า DO เฉลี่ยสูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบค่า DO ของน้ำเสียในระบบที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกันในแต่ละสัปดาห์ พบว่า ค่า DO ของแต่ละระบบในสัปดาห์เดียวกัน พบว่าแต่ละสัปดาห์ของทั้ง 6 สัปดาห์ ระบบมีค่า DO เฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\geq0.05$)



ภาพที่ 4.13 ค่า DO ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

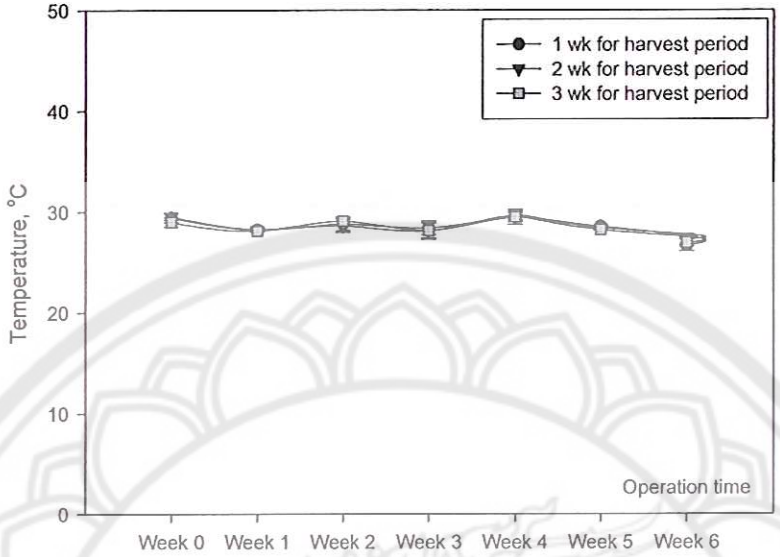
ค่า pH ของน้ำเสียในระบบที่ทำการศึกษา พบว่าตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการดำเนินระบบ น้ำเสียในระบบมีค่า pH ระหว่าง 6.02-8.88 โดยมีค่าผันแปรในช่วงเป็นกรดเล็กน้อยถึงเป็นด่างเล็กน้อย (ภาพที่ 4.14) ทั้งนี้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า pH ของน้ำเสีย ได้แก่ การลดลงหรือเพิ่มขึ้นของ CO_2 ในน้ำจากการนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง หรือการที่น้ำได้รับ free CO_2, HCO_2^-, CO_3^{2-}, H^+ และ OH^- จากกระบวนการทางเคมีอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบ ค่า pH ของน้ำเสียในระบบที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบที่ระยะเวลาเดียวกัน พบว่า ค่า pH ของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ยกเว้นในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 3 สัปดาห์ ซึ่งพบว่า ค่า pH แต่ละสัปดาห์มีค่าแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยมีค่า pH เฉลี่ยสูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบค่า pH ของน้ำเสียในระบบที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน พบว่า ค่า pH ของแต่ละระบบในแต่ละสัปดาห์ มีค่า pH เฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)



ภาพที่ 4.14 ค่า pH ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

ค่าอุณหภูมิของน้ำเสียในระบบที่ทำการศึกษา พบว่าตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการดำเนินระบบ น้ำเสียในระบบมีค่าอุณหภูมิ ระหว่าง 25.3-31.9 °C โดยพบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิน้ำผันแปรในช่วงแคบๆ (ภาพที่ 4.15) ทั้งนี้ ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิของน้ำเสียคือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่น้ำได้รับ เมื่อเปรียบเทียบ ค่าอุณหภูมิของน้ำเสียในระบบที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบที่ระยะเวลาเดียวกัน พบว่า ค่าอุณหภูมิของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ยกเว้นในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 3 สัปดาห์ ซึ่งพบว่า ค่าอุณหภูมิแต่ละสัปดาห์มีค่าแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 4 และเมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของน้ำเสียในระบบที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยว

แหนแดงออกจากระบบแตกต่างกันในแต่ละสัปดาห์ พบว่า ค่า pH ของแต่ละระบบในสัปดาห์เดียวกัน มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

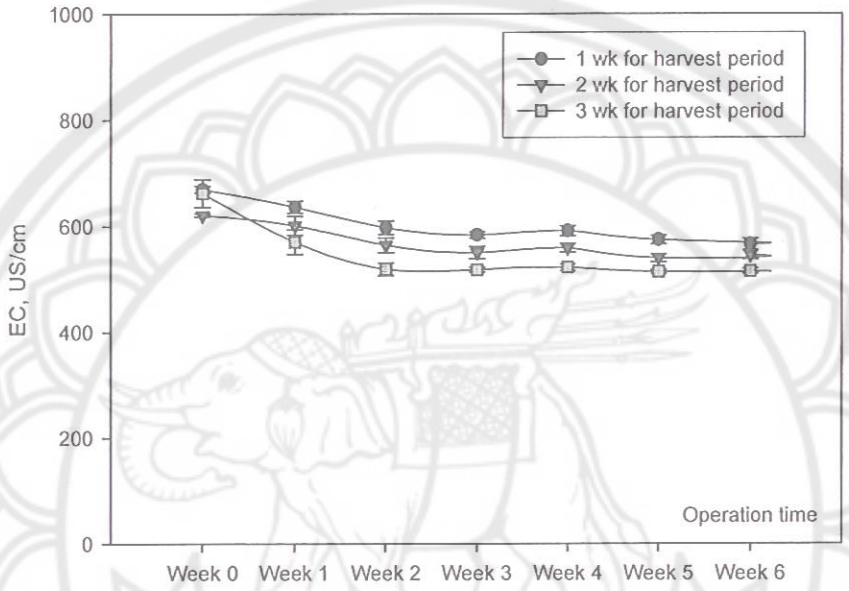


ภาพที่ 4.15 อุณหภูมิของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

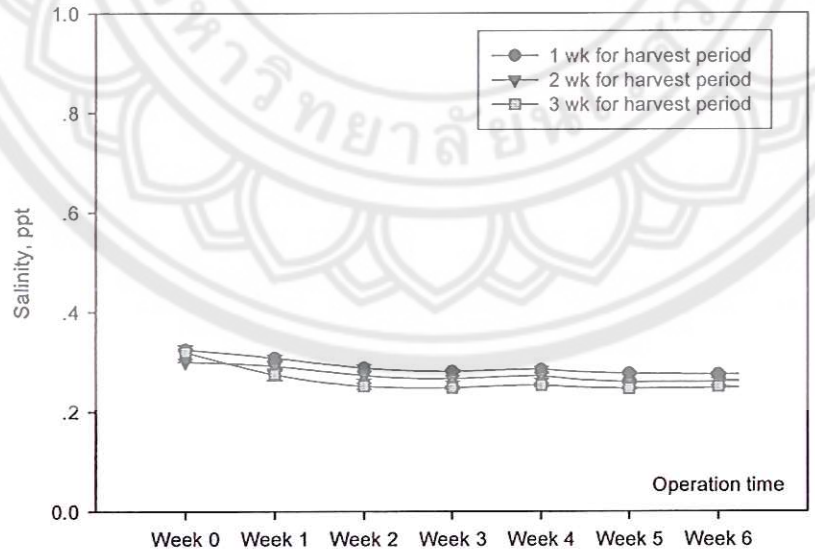
ค่า EC ของน้ำเสียในระบบที่ทำการศึกษา พบว่าตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการดำเนินระบบ น้ำเสียในระบบมีค่า EC ระหว่าง 489.0-670.0 μS/cm โดยพบ EC ของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์มีแนวโน้มลดต่ำลงเป็นลำดับ โดยพบน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 3 สัปดาห์ มีค่า EC ต่ำกว่าน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 2 และ 1 สัปดาห์ตามลำดับ และพบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในเกือบทุกสัปดาห์ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการดำเนินระบบ ($P \geq 0.05$) โดยยกเว้นในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด (ภาพที่ 4.16) และเมื่อเปรียบเทียบค่า EC ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบที่ระยะเวลาเดียวกัน พบว่า ค่า EC ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 1 สัปดาห์ มีค่า EC เฉลี่ยในแต่ละสัปดาห์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยพบค่า EC สูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 1ของการบำบัด ซึ่งการลดลงของค่า EC บ่งชี้ถึงการลดลงของเกลืออนินทรีย์ที่สามารถแตกตัวให้ประจุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ในน้ำ ซึ่งหมายรวมถึงการลดลงของมลสารประเภทสารอนินทรีย์ในน้ำจากกระบวนการบำบัดประเภทต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบด้วย

ค่า Salinity ของน้ำเสียในระบบที่ทำการศึกษา พบว่าตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ ของการดำเนินระบบ น้ำเสียในระบบมีค่า Salinity ระหว่าง 0.24-0.33 ppt โดยพบค่า Salinity ของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ มีความสัมพันธ์กับค่า EC ของน้ำเสียโดยมีแนวโน้มลดต่ำลงเป็นลำดับ โดยพบน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 3 สัปดาห์ มีค่า Salinity ต่ำกว่าน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 2 และ 1 สัปดาห์ ตามลำดับ และพบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติในทุกเกือบสัปดาห์ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการดำเนินระบบ ($P \geq 0.05$) ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด (ภาพที่ 4.17) และเมื่อเปรียบเทียบค่า Salinity ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบที่ระยะเวลาเดียวกัน พบว่า ค่า Salinity ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 1 สัปดาห์ มีค่า Salinity เฉลี่ยในแต่ละสัปดาห์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยพบค่า Salinity สูงที่สุดในสัปดาห์ที่ 1ของการบำบัด ซึ่งการลดลงของค่า Salinity บ่งชี้ถึงการลดลงของการปนเปื้อนของเกลือแร่ในน้ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า EC และ TDS ของน้ำเสีย



ภาพที่ 4.16 ค่า EC ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.17 ค่า Salinity ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

2.2) ความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียในระบบบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

น้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสียของฟาร์มสุกรในระดับครัวเรือนได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดของระบบพืชลอยน้ำที่มีแหนแดงเป็นพืชในระบบ โดยศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ เมื่อรองรับน้ำเสียจากฟาร์สุกรที่เก็บจากบ่อรวบรวมและทำการเจือจางที่อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 โดยศึกษาอิทธิพลของการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ ที่ระยะเวลาการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบที่ ระยะเวลาทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ โดยดำเนินระบบเป็นเวลานาน 6 สัปดาห์

หน่วยทดลองที่ใช้ในการในศึกษาในระยะที่ 2 นี้ เป็นหน่วยทดลองเดียวกันกับที่ใช้ในระยะที่ 1 ของการศึกษา โดยในการศึกษาครั้งนี้ระบบบำบัดมีค่าการรองรับสารอินทรีย์ เมื่อเริ่มระบบในรูปของ COD และ BOD loading rate เท่ากับ 30.0-36.0 และ 6.5-11.7 และ g/m^2 ตามลำดับ ทั้งนี้ความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ เมื่อมีระยะเวลาของการกักพักน้ำเสียหรือมีระยะเวลาการบำบัดที่แตกต่างกันไป มีดังนี้

(1) การบำบัดสารอินทรีย์

ในการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์นั้น ระบบมีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูปของ COD ตลอดระยะเวลา 6 เดือนของการบำบัด เมื่อเริ่มทำการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบเท่ากับ 0.71-0.86 $g/m^2/d$ โดยระบบมีค่า COD loading rate ในแต่ละสัปดาห์ของการบำบัดระหว่าง 1.6-17.1 $g/m^2/d$ ทั้งนี้ ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูปของ COD loading rate ในแต่ละสัปดาห์ของการบำบัดเท่ากับ 3.2-17.1, 1.6-11.6 และ 1.7-14.8 $g/m^2/d$ ตามลำดับ การผันแปรของค่า COD loading rate ในแต่ละสัปดาห์ เป็นผลจากการผันแปรของค่าความเข้มข้นของ COD จากกระบวนการบำบัด และการผันแปรของระดับน้ำจากการระเหยและการได้รับน้ำฝนของระบบ ทั้งนี้ เนื่องจากระบบถูกจัดตั้งในพื้นที่เปิดโล่งจึงได้รับอิทธิพลจากสภาพทางธรรมชาติซึ่งเป็นสภาพแท้จริงที่ส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของระบบบำบัดตามธรรมชาติดังเช่นระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่ทำการศึกษานี้

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพการบำบัด COD ในแต่ละสัปดาห์ระหว่างร้อยละ (-250.0)-72.2, (-300.0)-71.4 และ (-300.0)-72.7 ตามลำดับ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด COD ในแต่ละสัปดาห์ ตลอด 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบแตกต่างกัน มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ในแต่ละสัปดาห์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ขณะที่การบำบัด COD ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 สัปดาห์นั้น พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด COD ในแต่ละสัปดาห์ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยพบประสิทธิภาพการบำบัด COD

สูงสุดในสัปดาห์ที่ 3 และ 5 ตามลำดับ โดยการบำบัด COD ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 และ 3 สัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแต่ละสัปดาห์ของการบำบัดของแต่ละระบบ ($P \geq 0.05$) ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชแตกต่างกัน

Indicators/ operation time	Plant harvest period		
	Every 1 wk for plant harvest	Every 2 wk for plant harvest	Every 3 wk for plant harvest
COD (% removal)			
1st week	(-45.6)±20.5 ^{aA}	(-55.6)±35.1 ^{abA}	(-5.8)±51.9 ^{aA}
2nd week	(-38.9)±40.6 ^{aA}	(-56.9)±63.7 ^{abA}	(-88.2)±57.8 ^{aA}
3rd week	15.1±28.1 ^{aA}	35.4±3.4 ^{aA}	6.4±22.3 ^{aA}
4th week	(-36.7)±15.6 ^{aA}	(-125.0)±30.3 ^{bA}	(-39.3)±29.6 ^{aA}
5th week	(-40.3)±48.8 ^{aA}	29.2±13.5 ^{aA}	(-22.4)±16.9 ^{aA}
6th week	(-34.9)±40.8 ^{aA}	(-3.4)±21.8 ^{abA}	27.5±9.9 ^{aA}
BOD (% removal)			
1st week	1.4±13.5 ^{aA}	(-22.2)±13.7 ^{bA}	6.0±12.9 ^{bA}
2nd week	41.5±13.5 ^{aA}	50.7±12.3 ^{aA}	60.0±7.2 ^{aA}
3rd week	26.0±21.6 ^{aA}	38.9±12.1 ^{abA}	20.9±15.0 ^{bA}
4th week	31.6±11.5 ^{aA}	17.1±19.0 ^{abA}	26.6±5.8 ^{bA}
5th week	(-13.4)±13.9 ^{aA}	8.3±9.2 ^{abA}	5.0±9.4 ^{bA}
6th week	29.6±10.9 ^{aA}	9.4±11.2 ^{abA}	10.4±6.9 ^{bA}

Note: Mean values±SEM are shown for each treatment.

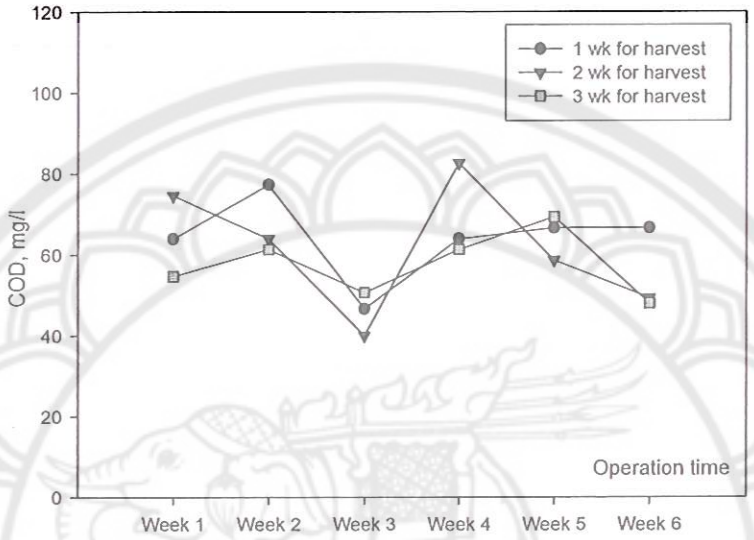
Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for plant harvest period at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

ค่าความเข้มข้นของ COD ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ COD ในน้ำเสีย ระหว่าง 32.0-144.0, 16.0-112.0 และ 16.0-144.0 mg/l ตามลำดับ โดยพบความเข้มข้นของ COD ในน้ำเสียของแต่ละระบบ มีทิศทางของความผันแปรในแต่ละ

สัปดาห์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน (ภาพที่ 4.18) และความเข้มข้นของ COD ในแต่ละสัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการเก็บเกี่ยวพืชที่ต่างกัน ($P \geq 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ COD ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชเหมือนกัน พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัปดาห์ของการบำบัดเช่นเดียวกัน



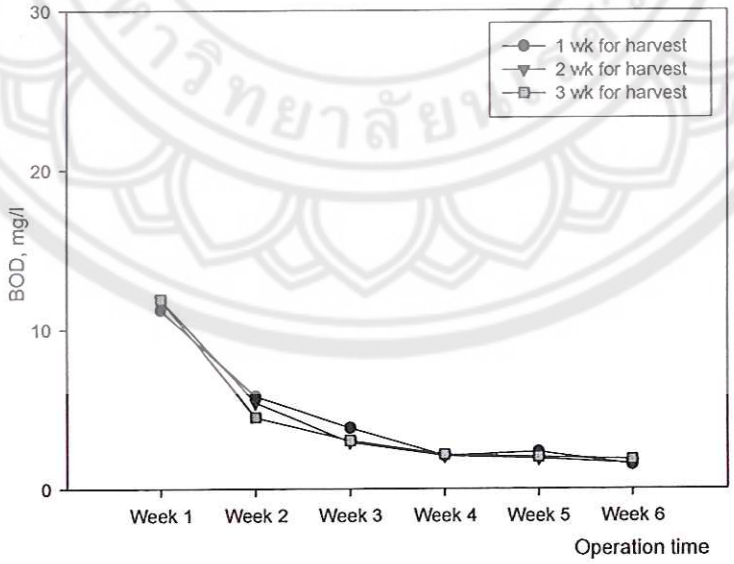
ภาพที่ 4.18 ค่า COD ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป BOD ของระบบ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ ของการบำบัดนั้น พบว่าเมื่อเริ่มทำการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบระบบมีอัตราการรองรับ BOD เท่ากับ 0.16-0.29 g/m^2/d (42 วัน) โดยระบบมีค่า BOD loading rate ในแต่ละสัปดาห์ของการบำบัดระหว่าง 0.1-2.0 g/m^2/d ทั้งนี้ ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูปของ BOD loading rate ในแต่ละสัปดาห์ของการบำบัด เท่ากับ 0.2-1.7, 0.1-1.4 และ 0.2-2.0 g/m^2/d ตามลำดับ การผันแปรของค่า BOD loading rate ในแต่ละสัปดาห์ เป็นผลจากการผันแปรของค่าความเข้มข้นของ BOD จากกระบวนการบำบัด และการผันแปรของระดับน้ำจากการระเหยและการได้รับน้ำฝนของระบบ ทั้งนี้ เนื่องจากระบบถูกจัดตั้งในพื้นที่เปิดโล่งจึงได้รับอิทธิพลจากสภาพทางธรรมชาติซึ่งเป็นสภาพแท้จริงที่ส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของระบบบำบัดตามธรรมชาติดังเช่นระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่ทำการศึกษานี้

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของ BOD ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพการบำบัด BOD ในแต่ละสัปดาห์ระหว่างร้อยละ (-68.8)-77.5, (-70.0)-77.9 และ (-37.5)-84.8 ตามลำดับ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด BOD ในแต่ละสัปดาห์ ตลอด 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มี

ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบแตกต่างกัน มีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ในแต่ละสัปดาห์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ขณะที่การบำบัด BOD ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 และ 3 สัปดาห์นั้น พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด BOD ในแต่ละสัปดาห์ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยพบประสิทธิภาพการบำบัด BOD ในทั้งสองระบบ มีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 2 (ตารางที่ 4.9) ในขณะที่ ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 สัปดาห์นั้น มีประสิทธิภาพการบำบัด BOD สูงสุดในสัปดาห์ที่ 2 เช่นกัน แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากประสิทธิภาพการบำบัด BOD ที่พบในสัปดาห์อื่นๆ

ค่าความเข้มข้นของ BOD ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ BOD ในน้ำเสีย ระหว่าง 1.2-12.2, 1.1-14.3 และ 1.1-18.8 mg/l ตามลำดับ โดยพบความเข้มข้นของ BOD ในน้ำเสียของแต่ละระบบ มีทิศทางความผันแปรของค่าความเข้มข้นในแต่ละสัปดาห์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน (ภาพที่ 4.19) และความเข้มข้นของ BOD ในแต่ละสัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการเก็บเกี่ยวพืชที่ต่างกัน ($P \geq 0.05$) ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า COD อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ BOD ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชเหมือนกัน พบว่าทั้ง 3 ระบบ มีค่าความเข้มข้นของ BOD แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด โดยพบว่าค่าความเข้มข้นของ BOD ของน้ำเสียสูงสุดในสัปดาห์ที่ 1ของการบำบัด และลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการบำบัดที่เพิ่มสูงขึ้นนับตั้งแต่เริ่มกระบวนการบำบัด



ภาพที่ 4.19 ค่า BOD ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

(2) การบำบัดของแข็ง

ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูปของ TSS ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพการบำบัด TSS ในแต่ละสัปดาห์ ระหว่างร้อยละ (-233.3)-77.8, (-1,614.3)-96.7 และ (-400.0)-81.8 ตามลำดับ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TSS ในแต่ละสัปดาห์ ตลอด 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบแตกต่างกัน มีประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ในแต่ละสัปดาห์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ขณะที่การบำบัด TSS ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบแต่ละระบบ มีประสิทธิภาพการบำบัด TSS ในแต่ละสัปดาห์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นกัน (ตารางที่ 4.10)

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งของระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชแตกต่างกัน

Indicators/ operation time	Plant harvest period		
	Every 1 wk for plant harvest	Every 2 wk for plant harvest	Every 3 wk for plant harvest
TSS (% removal)			
1st week	24.4±18.7^{aA}	(-502.9)±293.5$^{a\ A}$	(-47.5)±61.7^{aA}
2nd week	21.1±14.6^{aA}	(-9.1)±62.4$^{a\ A}$	54.7±11.7^{aA}
3rd week	43.5±10.5^{aA}	(-52.7)±40.4^{aA}	(-27.9)±34. 8^{aA}
4th week	(-22.2)±23.4^{aA}	22.6±19.7^{aA}	(-30.6)±16.3^{aA}
5th week	(-66.7)±49.6^{aA}	(-58.9)±71.7^{aA}	(-0.7)±24.1^{aA}
6th week	(-32.2)±20.5^{aA}	10.0±6.6^{aA}	(-86.1)±68.5^{aA}
TDS (% removal)			
1st week	4.9±1.2^{abB}	3.3±2.4^{abB}	13.7±1.0^{aA}
2nd week	6.1±0.7^{aA}	6.1±0.7^{aA}	8.7±1.8^{bA}
3rd week	2.2±2.4^{abcA}	2.3±1.3^{abcA}	(-0.09)±1.5^{cA}
4th week	(-1.3)±1.3^{bcA}	(-1.7)±1.0^{bcA}	(-0.7)±0.8^{cA}
5th week	2.8±1.8a^{bcA}	3.5±1.5^{abA}	1.5±0.9^{cA}
6th week	0.7±0.7^{bcA}	(-1.2)±1.8^{abcA}	(-0.08)±1.1^{cA}

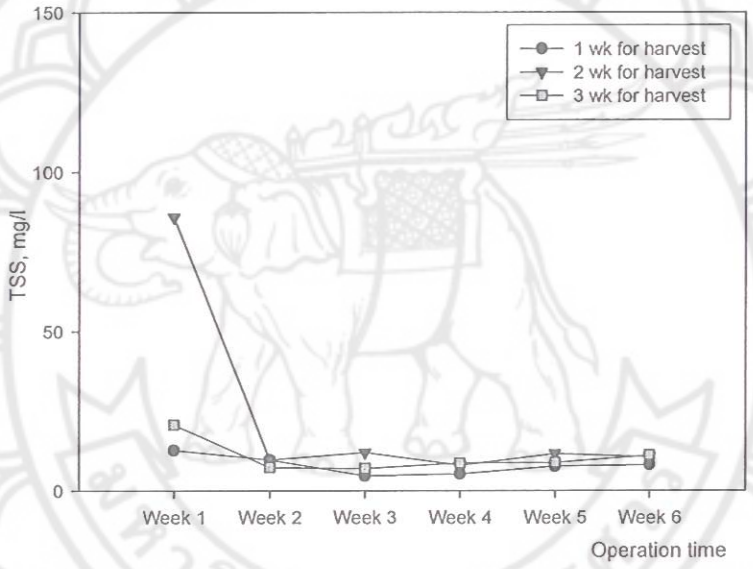
Note: Mean values±SEM are shown for each treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for plant harvest period at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

ค่าความเข้มข้นของ TSS ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ TSS ในน้ำเสีย ระหว่าง 2.0-20.0, 2.0-240.0 และ 2.0-46.0 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.20) เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ TSS ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชเหมือนกัน พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ TSS ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด ขณะที่ ระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 สัปดาห์ มีค่า TSS แตกต่างกันระหว่างสัปดาห์ของการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบค่าความเข้มข้นของ TSS ของน้ำเสียสูงสุดในสัปดาห์ที่ 1ของการบำบัด

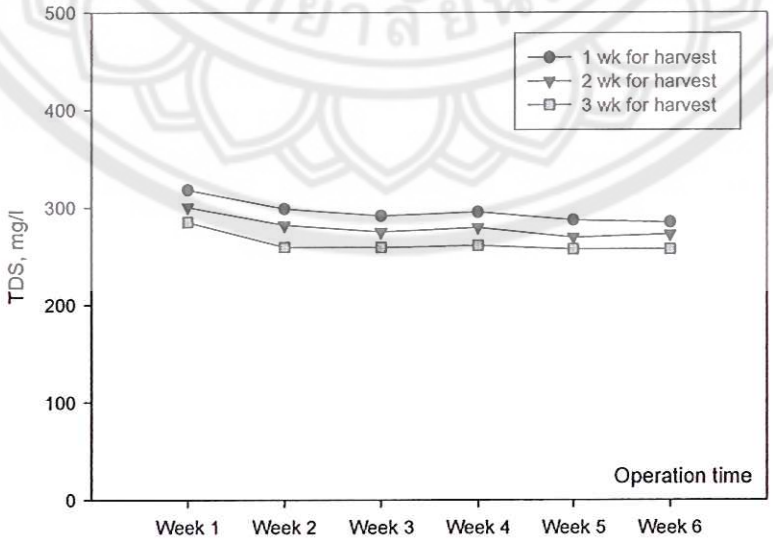


ภาพที่ 4.20 ค่า TSS ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูปของ TDS ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพการบำบัด TDS ในแต่ละสัปดาห์ ระหว่างร้อยละ (-6.7)-9.4, (-8.5)-12.1 และ (-4.7)-16.9 ตามลำดับ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TDS ในแต่ละสัปดาห์ ตลอด 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบแตกต่างกัน มีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS ในแต่ละสัปดาห์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัดที่พบว่าระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS สูงกว่าระบบอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ขณะที่การบำบัด TDS ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่

ระบบที่แตกต่างกันทั้ง 3 ระบบ มีประสิทธิภาพการบำบัด TDS ของแต่ละระบบ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด โดยระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 และ 2 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS สูง ในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด ขณะที่ ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS สูง ในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด (ตารางที่ 4.10)

ค่าความเข้มข้นของ TDS ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ TDS ในน้ำเสีย ระหว่าง 275.0-335.0, 256.0-325.0 และ 244.0-324.0 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.21) โดยพบค่าความเข้มข้นของ TDS ในน้ำเสียของแต่ละระบบมีแนวโน้มลดต่ำลงในแต่ละสัปดาห์ของการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ TDS ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชเหมือนกัน พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ TDS ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด ขณะที่ ระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 สัปดาห์ มีค่า TDS แตกต่างกันระหว่างสัปดาห์ของการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบค่าความเข้มข้นของ TDS ของน้ำเสียสูงสุดในสัปดาห์ที่ 1ของการบำบัด และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ TDS ของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ พบว่าความเข้มข้นของ TDS ในน้ำเสีย ในแต่ละสัปดาห์ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชต่างกัน ($P<0.05$) โดยทุกสัปดาห์พบค่า TDS ของน้ำเสียสูงที่สุดในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 สัปดาห์ ทั้งนี้ ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด ที่พบว่าค่า TDS ของน้ำเสียมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบ ($P\geq0.05$)



ภาพที่ 4.21 ค่า TDS ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

(3) การบำบัดธาตุอาหาร

ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนในรูปของ TKN ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพการบำบัด TKN ในแต่ละสัปดาห์ ระหว่างร้อยละ (-166.7)-80.4, (-200.0)-83.2 และ (-350.0)-86.6 ตามลำดับ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TKN ในแต่ละสัปดาห์ ตลอด 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบแตกต่างกัน มีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ในแต่ละสัปดาห์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ขณะที่การบำบัด TKN ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบแต่ละระยะเก็บเกี่ยว มีประสิทธิภาพการบำบัด TKN ในแต่ละสัปดาห์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) เช่นกัน (ตารางที่ 4.11)

ค่าความเข้มข้นของ TKN ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ TKN ในน้ำเสีย ระหว่าง 0.6-6.2, 0.6-7.8 และ 0.6-5.3 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.22) โดยพบค่าความเข้มข้นของ TKN ในน้ำเสียของแต่ละระบบมีแนวโน้มลดต่ำลงในแต่ละสัปดาห์ของการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ TKN ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชเหมือนกัน พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ TKN ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด ขณะที่ ระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 สัปดาห์ มีค่า TKN แตกต่างกันระหว่างสัปดาห์ของการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบค่าความเข้มข้นของ TKN ของน้ำเสียสูงสุดในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด แต่ไม่แตกต่างจากค่าความเข้มข้นของ TKN ของน้ำเสียในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ TKN ของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ พบว่าความเข้มข้นของ TKN ในน้ำเสีย ในแต่ละสัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชต่างกัน ($P \geq 0.05$)

ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสในรูปของ TP ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพการบำบัด TP ในแต่ละสัปดาห์ ระหว่างร้อยละ (-645.1)-87.8, (-1,865.5)-92.2 และ (-246.2)-93.5 ตามลำดับ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TP ในแต่ละสัปดาห์ ตลอด 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TP ในแต่ละสัปดาห์ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยมีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด ขณะที่การบำบัด TP ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบแต่ละระยะเก็บเกี่ยว

มีประสิทธิภาพการบำบัด TP ในแต่ละสัปดาห์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารของระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชแตกต่างกัน

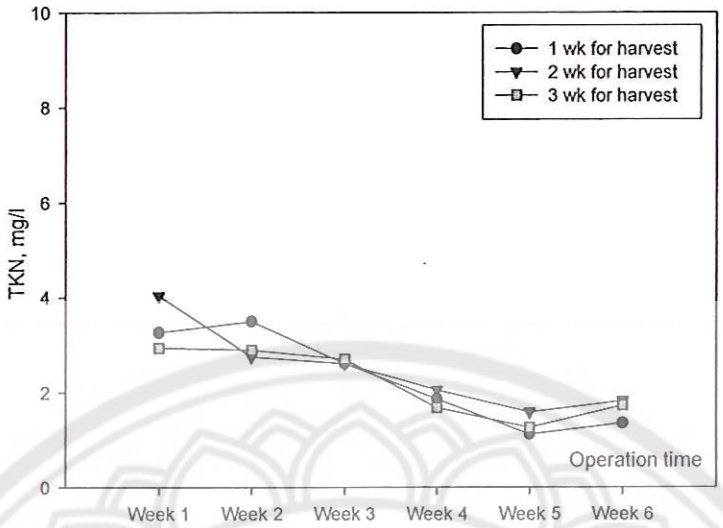
Indicators/ operation time	Plant harvest period		
	Every 1 wk for plant harvest	Every 2 wk for plant harvest	Every 3 wk for plant harvest
TKN (% removal)			
1st week	26.0±21.1 ^{aA}	32.4±15.5 ^{aA}	51.5±14.6 ^{aA}
2nd week	(-7.1)±34.7 ^{Aa}	26.2±23.4 ^{aA}	4.5±20.3 ^{aA}
3rd week	(-16.6)±34.8 ^{aA}	(-43.0)±39.2 ^{aA}	(-79.5)±67.3 ^{aA}
4th week	17.2±13.8 ^{aA}	21.9±17.0 ^{aA}	36.2±7.0 ^{aA}
5th week	41.3±8.6 ^{aA}	23.5±19.2 ^{aA}	26.1±15.7 ^{aA}
6th week	(-42.9)±26.3 ^{aA}	(-41.3)±34.9 ^{aA}	(-51.4)±20.9 ^{aA}
TP (% removal)			
1st week	20.3±9.6 ^{aA}	35.3±7.0 ^{aA}	(-5.4)±24.1 ^{aA}
2nd week	(-23.3)±23.9 ^{aA}	(-11.4)±13.4 ^{aA}	(-12.4)±15.1 ^{aA}
3rd week	(-48.4)±25.7 ^{aA}	(-34.0)±40.0 ^{abA}	(-24.1)±25.3 ^{aA}
4th week	(-4.0)±36.0 ^{aA}	(-429.5)±301.4 ^{bA}	(-3.6)±42.1 ^{aA}
5th week	(-191.0)±121.1 ^{aA}	52.0±12.1 ^{aA}	(-22.0)±45.9 ^{aA}
6th week	17.3±25.1 ^{aA}	(-294.4)±118.7 ^{abA}	(-36.5)±53.1 ^{aA}
Ort-P (% removal)			
1st week	(-84.0)±57.5 ^{aA}	(-15.7)±12.2 ^{bcA}	18.5±20.6 ^{aA}
2nd week	18.2±3.2 ^{aA}	18.7±3.7 ^{abA}	10.2±1.9 ^{aA}
3rd week	(-25.3)±11.7 ^{aA}	(-19.9)±11.7 ^{cA}	(-113.0)±98.6 ^{aA}
4th week	27.4±11.5 ^{aA}	29.5±15.2 ^{aA}	30.4±15.3 ^{aA}
5th week	(-16.6)±26.7 ^{aA}	(-10.1)±14.1 ^{bcA}	10.3±4.9 ^{aA}
6th week	24.2±5.7 ^{aA}	4.8±10.8 ^{abcA}	(-2.1)±11.0 ^{aA}

Note: Mean values±SEM are shown for each treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for plant harvest period at $P \geq 0.05$.

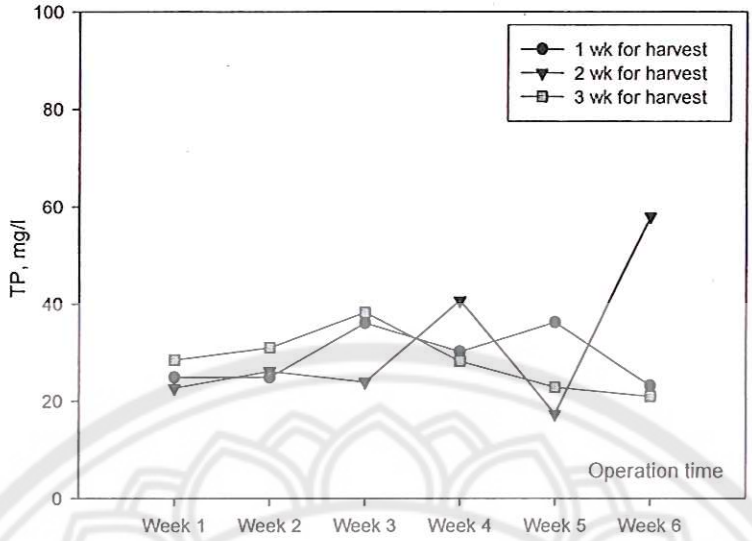
Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6



ภาพที่ 4.22 ค่า TKN ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

ค่าความเข้มข้นของ TP ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ TP ในน้ำเสีย ระหว่าง 7.1-58.3, 3.2-106.5 และ 2.8-53.4 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.23) โดยพบค่าความเข้มข้นของ TP ในน้ำเสียของแต่ละระบบ มีค่าผันแปรในทิศทางที่ไม่ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากในระบบบำบัดมีทั้งกระบวนการลด TP และกระบวนที่ทำให้ TP ถูกปลดปล่อยกลับเข้าสู่น้ำเสีย ซึ่งจะพบว่าสัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพการบำบัด TP ซึ่งมีความผันแปรสูงอันเป็นผลจากกระบวนการในการบำบัดฟอสฟอรัสซึ่งไม่สามารถลด TP ได้อย่างถาวร รวมถึงการบำบัดในสภาพธรรมชาติที่ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยแวดล้อมหลายประการด้วยกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ TP ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชเหมือนกัน พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ TP ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด ขณะที่ ระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 สัปดาห์ มีค่า TP แตกต่างกันระหว่างสัปดาห์ของการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบค่าความเข้มข้นของ TP ของน้ำเสียสูงสุดในสัปดาห์ที่ 6 ของการบำบัด แต่ไม่แตกต่างจากค่าความเข้มข้นของ TP ของน้ำเสียในสัปดาห์ที่ 4 ของการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ **และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ TP ของน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ พบว่าความเข้มข้นของ TP ในน้ำเสีย ในแต่ละสัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชต่างกัน** ($P \geq 0.05$)

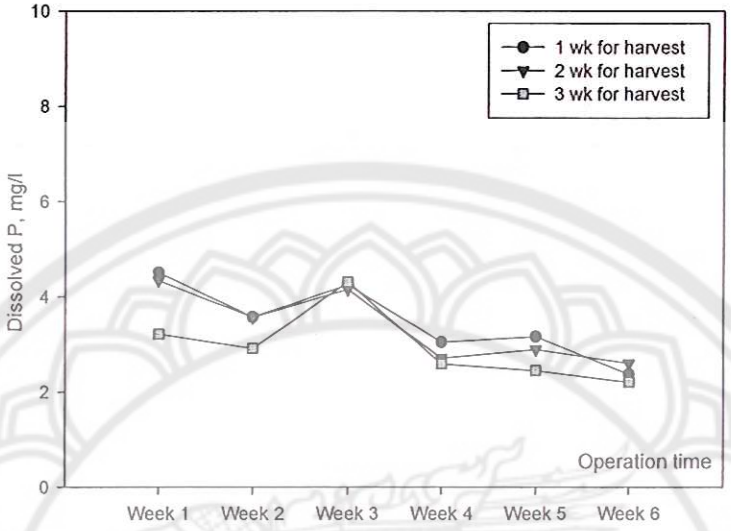


ภาพที่ 4.23 ค่า TP ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสในรูปของ Dissolved P ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพการบำบัด Dissolved P ในแต่ละสัปดาห์ ระหว่างร้อยละ (-253.7)-74.0, (-62.6)-60.6 และ (-602.8)-88.1 ตามลำดับ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด Dissolved P ในแต่ละสัปดาห์ ตลอด 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด Dissolved P ในแต่ละสัปดาห์ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยมีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 4 ของการบำบัด ขณะที่การบำบัด Dissolved P ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบแต่ละระยะเก็บเกี่ยว มีประสิทธิภาพการบำบัด Dissolved P ในแต่ละสัปดาห์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\geq0.05$) แสดงดัง ตารางที่ 4.11

ค่าความเข้มข้นของ Dissolved P ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าความเข้มข้นของ Dissolved P ในน้ำเสีย ระหว่าง 1.0-7.1, 1.2-6.2 และ 0.7-7.7 mg/l ตามลำดับ (ภาพที่ 4.24) โดยพบค่าความเข้มข้นของ Dissolved P ในน้ำเสียของแต่ละระบบ โดยรวมมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ เนื่องจาก Dissolved P เป็นรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ รวมถึงอาจลดลงโดยการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปอื่น เช่น ตะกอนหรือสารแขวนลอย จึงทำให้พบ Dissolved P มีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม Dissolved P อาจเพิ่มขึ้นได้จากการปลดปล่อยกลับเข้าสู่น้ำเสียจากกระบวนการต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ Dissolved P ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชเหมือนกัน พบว่าแต่ละระบบบำบัด มีค่าความเข้มข้นของ Dissolved P ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด ($P\geq0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของ Dissolved P ของน้ำเสีย

ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าความเข้มข้นของ Dissolved P ในน้ำเสีย ในแต่ละสัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชต่างกัน ($P \geq 0.05$)



ภาพที่ 4.24 ค่า Dissolved P ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

(4) การบำบัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

ประสิทธิภาพการบำบัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (TCB) ของระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพการบำบัด TCB ในแต่ละสัปดาห์ ระหว่างร้อยละ (-2,458.1)-99.5, (-2,566.7)-97.9 และ (-5,650.0)-99.6 ตามลำดับ เมื่อเทียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TCB ในแต่ละสัปดาห์ ตลอด 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TCB ในแต่ละสัปดาห์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยมีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 5 ของการบำบัด ขณะที่การบำบัด TCB ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบแต่ละระยะเก็บเกี่ยว มีประสิทธิภาพการบำบัด TP ในแต่ละสัปดาห์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ของระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวพืชแตกต่างกัน .

Indicators/ operation time	Plant harvest period		
	Every 1 wk for plant harvest	Every 2 wk for plant harvest	Every 3 wk for plant harvest
TCB (% removal)			
1st week	(-305.1)±302.9^{abA}	16.7±32.9^{aA}	(-184.5)±154.0^{aA}
2nd week	(-114.8)±162.3^{aA}	(-165.3)±173.9^{aA}	(-343.7)±323.5^{aA}
3rd week	(-78.3)±66.6^{aA}	(-323.5)±190.5^{aA}	(-1,603.4)±925.2^{aA}
4th week	(-775.6)±363.9^{bA}	(-398.3)±250.5^{aA}	(-165.6)±105.3^{aA}
5th week	46.2±20.6^{aA}	44.8±16.0^{aA}	42.9±19.2^{aA}
6th week	(-79.4)±62.3^{aA}	(-562.8)±423.2^{aA}	(-395.1)±304.4^{aA}

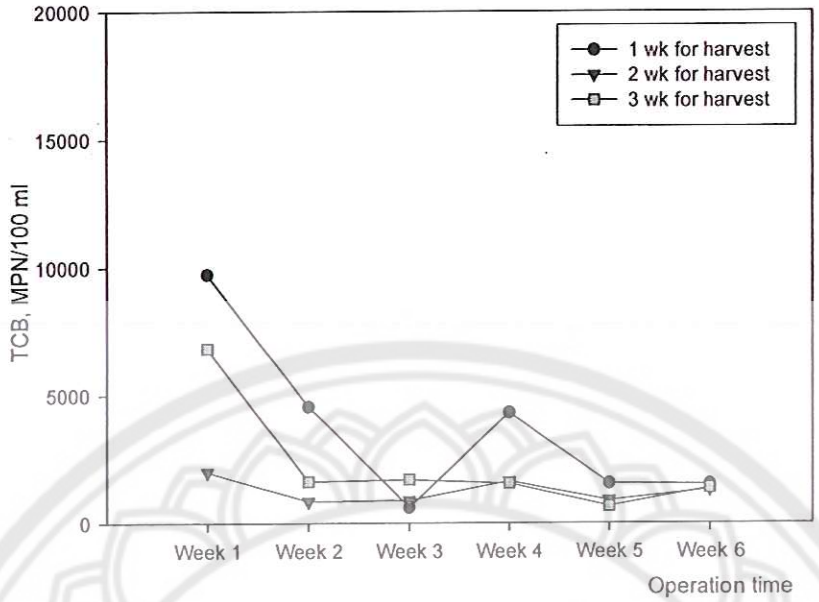
Note: Mean values±SEM are shown for each treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for plant harvest period at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

ปริมาณ TCB ในน้ำเสีย ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีปริมาณ TCB ในน้ำเสีย ระหว่าง 90-46,000, 90-4,300 และ 40-24,000 MPN/100 ml ตามลำดับ (ภาพที่ 4.25) โดยพบปริมาณของ TCB ในน้ำเสียของแต่ละระบบ โดยรวมมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ เนื่องจาก TCB เป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถเพิ่มจำนวนได้ แต่ด้วยสภาพที่ไม่เหมาะสมภายในระบบบำบัดจะทำให้ TCB ส่วนใหญ่ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ตามปกติ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของ TCB ของน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชเหมือนกัน พบว่าระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 สัปดาห์ มีปริมาณ TCB ในน้ำเสียแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด ($P<0.05$) โดยมีปริมาณสูงสุดในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ TCB ในน้ำเสียในแต่ละสัปดาห์ พบว่า **ปริมาณ TCB ในน้ำเสีย ในแต่ละสัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบที่มีการเก็บเกี่ยวพืชต่างกัน ($P \geq 0.05$)**



ภาพที่ 4.25 ค่า TCB ของน้ำเสีย ในระบบบำบัดที่มีระยะการเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน

4.2.2 แนวทางที่เหมาะสมในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในการผลิตแหนแดง

วิเคราะห์ถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในการผลิตแหนแดง โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บเกี่ยวแหนแดงหรือความถี่ในการเก็บเกี่ยวแหนแดงกับผลผลิตแหนแดงทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพของแหนแดง การเปลี่ยนแปลงของผลผลิตแหนแดงตามช่วงเวลา ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา

1) การเจริญเติบโตและผลผลิตมวลชีวภาพของแหนแดง

การเจริญเติบโตของแหนแดงในรูปของอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) ของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง (-0.160)-0.155, 0.014-0.107 และ (-0.006)-0.071 d^{-2} ตามลำดับ ทั้งนี้ จะพบว่าแหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 1 และ 3 สัปดาห์นั้น มีค่า RGR ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยว ขณะที่แหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 2 สัปดาห์ มีค่า RGR แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยว โดยมีค่าสูงที่สุดในรอบที่ 3 ของการเก็บเกี่ยวหรือที่สัปดาห์ที่ 6 ของการบำบัดของระบบ (ตารางที่ 4.13) และเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ของระยะเวลาในการบำบัด จะพบว่าที่ระยะเวลาการกักพักน้ำหรือระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียที่เท่ากันนั้น พบว่าแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้ในแต่ละสัปดาห์ มีค่า RGR ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.13)

ตารางที่ 4.13 การเจริญเติบโตและผลผลิตแหนแดง จากระบบบำบัดน้ำเสียพืชลอยน้ำ

Parameters/ Harvest period	Unit	Operation time					
		1st week	2nd week	3rd week	4th week	5th week	6th week
Relative growth rate (RGR)	d^{-1}						
- Every 1 wk for plant harvest		0.0818 ± 0.011^{A}	0.0495 ± 0.015^{aA}	-0.0087 ± 0.017^{aA}	0.0560 ± 0.045^{aA}	0.0275 ± 0.053^{A}	0.026 ± 0.072^{aA}
- Every 2 wk for plant harvest			0.0488 ± 0.010^{aB}		0.0478 ± 0.013^{aAB}		0.0933 ± 0.007^{aA}
- Every 3 wk for plant harvest				0.0193 ± 0.007^{aA}			0.0278 ± 0.007^{aA}
Fresh yield	g/m^2						
- Every 1 wk for plant harvest		962.85 ± 39.50^{A}	851.62 ± 136.92^{bA}	524.77 ± 59.90^{aA}	613.42 ± 131.83^{aA}	594.68 ± 133.79^{A}	603.61 ± 171.47^{aA}
- Every 2 wk for plant harvest		-	$1,261.11 \pm 147.80^{aA}$	-	728.01 ± 85.04^{aA}	-	$1,326.39 \pm 184.72^{aA}$
- Every 3 wk for plant harvest		-	-	930.32 ± 227.37^{aA}	-	-	820.60 ± 150.11^{aA}

Note: Mean values±SEM are shown for each treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for plant harvest period at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

ตารางที่ 4.13 การเจริญเติบโตและผลผลิตแหนแดง จากระบบบำบัดน้ำเสียพืชลอยน้ำ (ต่อ)

Parameters/ Harvest period	Unit	Operation time					
		1st week	2nd week	3rd week	4th week	5th week	6th week
Dry yield	g/m^2						
- Every 1 wk for plant harvest		27.44 ± 2.47^{A}	22.69 ± 3.23^{aA}	15.24 ± 2.34^{aA}	29.84 ± 8.62^{aA}	27.02 ± 8.84^{A}	29.33 ± 10.01^{aA}
- Every 2 wk for plant harvest		-	30.94 ± 3.09^{aB}	-	33.70 ± 7.08^{aB}	-	62.56 ± 6.47^{aA}
- Every 3 wk for plant harvest		-	-	23.50 ± 2.49^{aA}	-	-	42.01 ± 11.96^{aA}

Note: Mean values±SEM are shown for each treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for plant harvest period at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

อัตราการผลิตมวลชีวภาพในรูปของผลผลิตน้ำหนักสดของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 173.61-1,266.67, 534.72-1,704.86 และ 333.33-1,506.94 g/m^2 ตามลำดับ ทั้งนี้ จะพบว่าแหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุกสัปดาห์นั้น มีผลผลิตน้ำหนักสดเฉลี่ยไม่แตกต่างกันระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยว เช่นเดียวกับแหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 2 สัปดาห์ และทุก 3 สัปดาห์ ซึ่งพบว่ามีผลผลิตน้ำหนักสดเฉลี่ยไม่แตกต่างกันระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยวเช่นเดียวกัน (ตารางที่ 4.13) และเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ของระยะเวลาในการบำบัด จะพบว่าที่ระยะเวลาการกักพักน้ำหรือระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียที่เท่ากันนั้น พบว่า โดยส่วนแล้วผลผลิตน้ำหนักสดของแหนแดงจากระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัดที่พบว่าผลผลิตจากระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์ มีผลผลิตน้ำหนักสดสูงกว่าในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุกสัปดาห์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) แสดงดังตารางที่ 4.13

เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์พิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่ในการขยายพันธุ์ของแหนแดงในสภาพการเลี้ยงปกติ ซึ่งระบุว่าการเลี้ยงแหนแดงในพื้นที่เหมาะสมจะทำให้แหนแดงสามารถขยายตัวเป็น 2 เท่า (Doubling time) ในระยะเวลาระหว่าง 3-6 วัน (ประยูร และบรรหาญ, 2544) นั้น ผลการศึกษาผลผลิตน้ำหนักสดของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ พบว่าแหนแดงมีอัตราการเพิ่มของน้ำหนักสดเท่ากับ 0.50-3.09, 0.77-2.46 และ 0.27-1.45 เท่าต่อสัปดาห์ ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยอัตราการเพิ่มของน้ำหนักสดเท่ากับ 1.78, 1.37 และ 0.78 เท่าต่อสัปดาห์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอัตราการขยายตัวของแหนแดงในพื้นที่เลี้ยงที่เหมาะสม ซึ่งเป็นพื้นที่มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อแหนแดงโดยเฉพาะการมีฟอสฟอรัสละลายอยู่ในน้ำอย่างเพียงพอ ทั้งนี้รวมถึง ปริมาณความเหมาะสมของปริมาณธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแหนแดง ซึ่งได้แก่ K, Fe, Mo, Mg, Ca, Mn และ B (ประยูร และบรรหาญ, 2544)

เมื่อทำการเก็บเกี่ยวแหนแดงจนครบระยะเวลาการดำเนินระบบทั้งสิ้น 6 สัปดาห์ พบว่า ระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ ให้ผลผลิตแหนแดงในรูปน้ำหนักสดสุทธิรวมตลอด 6 เดือน เท่ากับ 5.90, 6.82 และ 3.33 kg/m^2 หรือให้ผลผลิตน้ำหนักสดสุทธิเฉลี่ย 327.89, 378.94 และ 184.95 g/m^2/week ซึ่งจะพบกำลังการผลิตผลผลิตน้ำหนักสดสุทธิสูงในระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์

อัตราการผลิตมวลชีวภาพในรูปของผลผลิตน้ำหนักแห้งของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 4.51-49.67, 16.81-75.42 และ 12.92-73.83 g/m^2 ตามลำดับ ทั้งนี้ จะพบว่า แหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 1 และ ทุก 3 สัปดาห์ มีผลผลิตน้ำหนักแห้งเฉลี่ยในแต่ละรอบของการเก็บเกี่ยวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\geq0.05$) ขณะที่แหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 2 สัปดาห์ มีผลผลิตน้ำหนักแห้งเฉลี่ยสูงใน

ตารางที่ 4.14 คุณภาพของผลผลิตแหนแดง จากระบบบำบัดน้ำเสียพืชลอยน้ำ

Parameters/ Harvest period	Unit	Operation time					
		1st week	2nd week	3rd week	4th week	5th week	6th week
Dry matter	%						
- Every 1 wk for plant harvest		2.87±0.26^{A}	2.73±0.14^{aA}	2.84±0.16^{aA}	4.40±0.49^{aA}	3.85±0.62^{A}	4.16±0.62^{aA}
- Every 2 wk for plant harvest		-	2.51±0.15^{aB}	-	4.40±0.56^{aAB}	-	4.76±0.16^{aA}
- Every 3 wk for plant harvest		-	-	3.19±0.54^{aA}	-	-	4.57±0.66^{aA}
Crude protein	%						
- Every 1 wk for plant harvest		32.97±1.61^{A}	32.53±1.96^{aA}	27.72±3.00^{aAB}	25.97±2.80^{aAB}	23.20±1.08^{B}	22.76±0.55^{aB}
- Every 2 wk for plant harvest		-	34.72±1.66^{aA}	-	22.76±1.13^{aB}	-	19.84±0.29^{aB}
- Every 3 wk for plant harvest		-	-	27.72±2.53^{aA}	-	-	20.42±0.84^{aB}

Note: Mean values±SEM are shown for each treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for plant harvest period at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

ตารางที่ 4.14 คุณภาพของผลผลิตแหนแดง จากระบบบำบัดน้ำเสียพืชลอยน้ำ (ต่อ)

Parameters/ Harvest period	Unit	Operation time					
		1st week	2nd week	3rd week	4th week	5th week	6th week
Magnesium	%						
- Every 1 wk for plant harvest		0.90±0.14^{A}	0.90±0.14^{aA}	0.92±0.15^{aA}	0.89±0.12^{aA}	0.84±0.14^{A}	0.87±0.15^{aA}
- Every 2 wk for plant harvest		-	0.87±0.17^{aA}	-	0.93±0.16^{aA}	-	1.20±0.01^{aA}
- Every 3 wk for plant harvest		-	-	0.96±0.17^{aA}	-	-	0.99±0.14^{aA}
Zine	ppm						
- Every 1 wk for plant harvest		239.21±77.32^{A}	132.13±29.89^{aA}	166.38±21.10^{aA}	145.67±35.63^{aA}	281.29±72.75^{A}	232.50±50.04^{aA}
- Every 2 wk for plant harvest		-	284.25±67.31^{aA}	-	256.79±66.25^{aA}	-	126.33±15.22^{aA}
- Every 3 wk for plant harvest		-	-	253.92±36.87^{aA}	-	-	161.04±42.78^{aA}

Note: Mean values±SEM are shown for each treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for plant harvest period at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

ตารางที่ 4.14 คุณภาพของผลผลิตแหนแดง จากระบบบำบัดน้ำเสียพืชลอยน้ำ (ต่อ)

Parameters/ Harvest period	Unit	Operation time					
		1st week	2nd week	3rd week	4th week	5th week	6th week
Cadmium	%						
- Every 1 wk for plant harvest		1.79±0.81^{A}	2.04±0.92^{aA}	1.50±0.67^{aA}	2.38±1.10^{aA}	0.92±0.41^{A}	1.05±0.67^{aA}
- Every 2 wk for plant harvest		-	1.96±0.91^{aA}	-	3.71±1.58^{aA}	-	0.00±0.00^{aA}
- Every 3 wk for plant harvest		-	-	2.54±1.14^{aA}	-	-	2.04±0.36^{aA}
Copper	%						
- Every 1 wk for plant harvest		86.25±26.26^{A}	83.13±35.27^{aA}	72.67±31.00^{aA}	41.33±14.06^{aA}	24.13±6.21^{A}	45.35±20.38^{aA}
- Every 2 wk for plant harvest		-	71.75±33.53^{aA}	-	38.25±11.06^{aA}	-	20.25±4.16^{aA}
- Every 3 wk for plant harvest		-	-	42.79±8.96^{aA}	-	-	20.96±3.42^{aA}

Note: Mean values±SEM are shown for each treatment.

Mean values within each row followed by the same letter (capital letter) are not significantly different for plant harvest period at $P \geq 0.05$.

Mean values within each column followed by the same letter (small letter) are not significantly different for each week at $P \geq 0.05$.

Sample size (n) = 6

(2) โปรตีนหยาบ (Crude protein: CP)

ค่าโปรตีนหยาบของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 17.51-38.51, 19.26-42.02 และ 17.51-34.14 % ตามลำดับ โดยพบว่าค่า CP เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับตามระยะเวลาการบำบัดของระบบที่เพิ่มสูงขึ้น และพบว่าค่า CP ในแต่ละระบบมีค่าแตกต่างกันระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยในทุกระบบพบค่า CP สูงที่สุดในแหนแดงที่ได้จากรอบแรกของการเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 4.14) และเมื่อเปรียบเทียบค่า CP เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยว ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า CP ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันหรือสัปดาห์เดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.14)

เมื่อเปรียบเทียบกับค่า CP ของแหนแดงที่มีรูปแบบการเลี้ยงตามปกติของเกษตรกร ซึ่งมีค่า CP ระหว่าง 13.0-30.0 % (ประยูร และบรรหาญ, 2544) จะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า CP ในเกณฑ์เดียวกันกับค่า CP ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และบางส่วนพบมีค่า CP สูงกว่าค่า CP ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า CP ที่ระบุในตารางคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งระบุค่า CP ของแหนเล็กและแหนใหญ่ เท่ากับ 32.07 และ 17.35 % (กรมปศุสัตว์, 2547) จะพบว่าค่า CP ของแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่า CP ใกล้เคียงกับค่า CP ของแหนเล็ก และมีค่าสูงกว่าค่า CP ของแหนใหญ่ ทั้งนี้ โปรตีนที่ตรวจพบในเนื้อเยื่อของแหนแดงในระบบบำบัดพืชลอยน้ำนั้น ส่วนหนึ่งเป็นผลจากการนำอินทรียสารไนโตรเจนในน้ำเสียมาใช้ในการเปลี่ยนรูปเป็นอินทรียสารของแหนแดง ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียรูปแบบหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียพืชลอยน้ำนั่นเอง

(3) เยื่อใยหยาบ (Crude fiber: CF)

ค่าเยื่อใยหยาบของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 10.30-19.90, 9.10-16.38 และ 11.20-15.70 % ตามลำดับ ทั้งนี้ จะพบว่า แหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 1 และ ทุก 2 สัปดาห์ มีค่า CF เฉลี่ยในแต่ละรอบของการเก็บเกี่ยวในแต่ละระบบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) โดยพบค่า CF เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบำบัดของระบบเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 4.14) และเมื่อเปรียบเทียบค่า CF เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า CF เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในสัปดาห์ที่ 3 และสัปดาห์ที่ 6 มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.14)

เมื่อเปรียบเทียบกับค่า CF ที่ระบุในตารางคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งระบุค่า CF ของแหนเล็กและแหนใหญ่ เท่ากับ 8.03 และ 11.97 % (กรมปศุสัตว์, 2547) จะ

พบว่าค่า CF ของแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่าสูงกว่ากับค่า CF ของแหนเล็ก และส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าค่า CF ของแหนใหญ่

(4) ฟอสฟอรัส (Phosphorus: P)

ค่าฟอสฟอรัสของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 1.07-2.91, 1.15-2.39 และ 1.15-3.14 % ตามลำดับ โดยพบว่าค่า P เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบค่า P เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า P ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันหรือสัปดาห์เดียวกันนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.14)

เมื่อเปรียบเทียบกับค่า P ของแหนแดงที่มีรูปแบบการเลี้ยงตามปกติของเกษตรกร ซึ่งมีค่า P ระหว่าง 0.2-1.6 % (ประยูร และบรรหาญ, 2544) จะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า P ในเกณฑ์เดียวกันกับค่า P ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และบางส่วนพบมีค่า P สูงกว่าค่า P ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า P ที่ระบุในตารางคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งระบุค่า P ของแหนเล็กและแหนใหญ่ เท่ากับ 0.70 และ 0.49 % (กรมปศุสัตว์, 2547) จะพบว่าค่า P ของแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่า P สูงกว่าค่า P ของทั้งแหนเล็กและแหนใหญ่ ทั้งนี้ ฟอสฟอรัสที่แหนแดงในระบบบำบัดพืชลอยน้ำนำมาใช้นั้นเป็นฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ซึ่งการนำฟอสฟอรัสมาใช้โดยแหนแดงนั้นเป็นกระบวนการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียของระบบบำบัดพืชลอยน้ำนั่นเอง

(5) โพแทสเซียม (Potassium: K)

ค่าโพแทสเซียมของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 0.43-7.36, 0.63-4.52 และ 0.70-3.87 % ตามลำดับ โดยพบว่าค่า K เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบค่า K เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า K ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันหรือสัปดาห์เดียวกันนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.14) เช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบกับค่า K ของแหนแดงที่มีรูปแบบการเลี้ยงตามปกติของเกษตรกร ซึ่งมีค่า K ระหว่าง 0.3-0.6 % (ประยูร และบรรหาญ, 2544) จะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า K สูงกว่าค่า K ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ

(6) แคลเซียม (Calcium: Ca)

ค่าแคลเซียมของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 0.15-0.93, 0.10-0.55 และ 0.24-

0.81 % ตามลำดับ โดยพบว่าค่า Ca เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบค่า Ca เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Ca ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันหรือสัปดาห์เดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.14)

เมื่อเปรียบเทียบกับค่า Ca ของแหนแดงที่มีรูปแบบการเลี้ยงตามปกติของเกษตรกร ซึ่งมีค่า Ca ระหว่าง 0.5-1.7 % (ประยูร และบรรหาญ, 2544) จะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า Ca โดยเฉลี่ยต่ำกว่า ค่า Ca ในแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Ca ที่ระบุในตารางคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งระบุค่า Ca ของแหนเล็กและแหนใหญ่ เท่ากับ 2.23 และ 3.57 % (กรมปศุสัตว์, 2547) จะพบว่าค่า Ca ของแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่าต่ำกว่าค่า Ca ของทั้งแหนเล็กและแหนใหญ่ ทั้งนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากน้ำเสียมีปริมาณ Ca น้อย หรือมีอยู่ในรูปของตะกอนเคมีที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้

(7) แมกนีเซียม (Magnesium: Mg)

ค่าแมกนีเซียมของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 0.45-1.29, 0.46-1.31 และ 0.43-1.35 % ตามลำดับ โดยพบว่าค่า Mg เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบค่า Mg เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Mg ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันหรือสัปดาห์เดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.14) เช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบกับค่า Mg ของแหนแดงที่มีรูปแบบการเลี้ยงตามปกติของเกษตรกร ซึ่งมีค่า Mg ระหว่าง 0.2-0.7 % (ประยูร และบรรหาญ, 2544) จะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า Mg สูงกว่าค่า Mg ในแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ

(8) สังกะสี (Zine: Zn)

ค่าสังกะสีของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 42.25-581.50, 54.25-549.50 และ 24.25-362.00 ppm ตามลำดับ โดยพบว่าค่า Zn เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบค่า Zn เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Zn ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันหรือสัปดาห์เดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.14) เช่นกัน ทั้งนี้ แหนแดงที่ปล่อยลงเลี้ยงในระบบ มีค่าZn

ระหว่าง 74.50-243.50 ppm ดังนั้น จึงพบว่าแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบบำบัดบางส่วน มีค่า Zn เพิ่มสูงขึ้นจากเดิม

(9) แคดเมียม (Cadmium: Cd)

ค่าแคดเมียมของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 0.00-5.50, 0.00-8.00 และ 0.00-5.25 ppm ตามลำดับ โดยพบว่าค่า Cd เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบค่า Cd เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Cd ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันหรือสัปดาห์เดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.14) เช่นกัน ทั้งนี้ แหนแดงที่ปล่อยลงเลี้ยงในระบบ มีค่าCd ระหว่าง 0.00-3.00 ppm ดังนั้น จึงพบว่าแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบบำบัด มีค่า Cd เพิ่มสูงขึ้นจากเดิมเล็กน้อย

(10) ทองแดง (Copper: Cu)

ค่าทองแดงของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มีค่าระหว่าง 6.75-223.00, 9.75-223.25 และ 8.00-67.25 ppm ตามลำดับ โดยพบว่าค่า Cd เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบค่า Cd เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Cd ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันหรือสัปดาห์เดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.14) เช่นกัน ทั้งนี้ แหนแดงที่ปล่อยลงเลี้ยงในระบบ มีค่าCu ระหว่าง 9.50-25.50 ppm ดังนั้น จึงพบว่าแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบบำบัด มีค่า Cu เพิ่มสูงขึ้น

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

1) ความเป็นไปได้ในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสีย

การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งดำเนินการโดยน้ำทิ้งจากบ่อพักน้ำเสียของฟาร์มสุกรมาทำการเจือจางที่สัดส่วนความเข้มข้นร้อยละ 25 50 75 และ 100 แล้วทำการบำบัดด้วยระบบพืชลอยน้ำที่ใช้แหนแดงเป็นพืชในระบบ จากผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียเริ่มต้นก่อนการบำบัด พบน้ำเสียมีค่ามลสารปนเปื้อนในรูป BOD_5, COD, TSS, TKN, TP มีค่าเท่ากับ 90.0, 168.0, 90.0, 95.5 และ 7.24 mg/l ตามลำดับ และปริมาณ TCB ในน้ำเสีย มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml ในส่วนของโลหะหนัก ตรวจพบค่าความเข้มข้นของ Cu, Zn และ Cd ในน้ำเสีย มีค่าระหว่าง 0.0140-0.0343, 0.2093-0.4640 และ 0.0000-0.0006 mg/l ตามลำดับ

เมื่อทำการเจือจางน้ำเสียด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 50 และ 75 ก่อนนำน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการบำบัด ผลการตรวจวัดคุณลักษณะของน้ำเสีย พบน้ำเสียมีค่าอุณหภูมิ pH EC TDS และ Salinity ระหว่าง 24.8-25.3 °C, 7.0-7.3, 757.0-1,072.0 µS/cm, 379.0-536.0 mg/l และ 0.37-0.53 ppt ตามลำดับ และ DO มีค่าต่ำระหว่าง 0.01-0.02 mg/l ปริมาณสารอินทรีย์ในรูป BOD_5 มีค่าระหว่าง 24.8-28.7 mg/l COD มีค่าระหว่าง 28.0-128.0 mg/l TSS มีค่าระหว่าง 30.0-77.0 mg/l TKN มีค่าระหว่าง 33.3-58.5 mg/l TP มีค่าระหว่าง 2.1-6.2 mg/l และ TCB มีค่าระหว่าง 11,000.0 ถึง เท่ากับหรือมากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml ทั้งนี้ พบค่าการปนเปื้อนของมลสารส่วนใหญ่อยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ยกเว้นค่า BOD_5 ในน้ำเสียที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 100 ซึ่งพบว่ามีค่าสูงกว่าค่า BOD_5 ของเกณฑ์มาตรฐาน ก ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 60 mg/l แต่ยังคงต่ำกว่าค่า BOD_5 ของเกณฑ์มาตรฐาน ข ซึ่งกำหนดให้มีค่า BOD_5 เท่ากับ 100 mg/l

ผลการศึกษาโดยรวม พบว่า ในการบำบัดน้ำเสียในระบบอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลา 3 สัปดาห์ นั้น ค่า DO และ pH ของน้ำเสียทุกสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียในระบบบำบัดพืชลอยน้ำรวมถึงหน่วยควบคุม ซึ่งมีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 100 แต่ไม่มีพืชในระบบนั้น พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะค่า DO ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็นลำดับ ขณะที่ ค่า EC และ Salinity ของน้ำเสียทุกสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย และหน่วยควบคุม มีแนวโน้มลดลง

ในด้านประสิทธิภาพการบำบัดของระบบนั้น พบว่าระบบบำบัดพืชลอยน้ำสามารถลดมลสารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรได้ โดยพบว่าแหนแดงในระบบสามารถสนับสนุนกระบวนการบำบัดในระบบได้ แต่อย่างไรก็ตาม แหนแดงจะสามารถอยู่รอดและช่วยระบบในการบำบัดได้ในกรณีที่ระบบมีอัตราการรองรับความเข้มข้นของน้ำเสียในรูปของ COD (COD loading rate) และ BOD (BOD loading rate) สูงไม่เกิน 1.4 และ 1.0 g/m^2/d ที่ระยะเวลาการบำบัดรวม 21 วัน ซึ่งเป็นอัตราการรองรับสารอินทรีย์ที่แหนแดงสามารถเจริญเติบโตอยู่ได้ และการดำรงอยู่ของแหนแดงจะช่วยส่งเสริมกระบวนการบำบัด ในทางกลับกันคือแหนแดงที่ไม่สามารถเจริญเติบโตและตายลงในระบบจะเป็นการเพิ่มของเสียให้กับน้ำเสีย ทั้งนี้ ผลการศึกษาพบว่าในระบบพืชลอยน้ำที่มีแหนแดงเป็นพืชในระบบนั้น ในระบบที่มีความเข้มข้นของน้ำเสียในรูปของความเข้มข้นของ COD และ BOD เท่ากับ 28.0 และ 24.8 mg/l ตามลำดับ หรือจากกระบวนการทดลองในครั้งนี้คือระบบที่รองรับน้ำเสียที่มีอัตราความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 ซึ่งคิดเป็นอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD ในช่วงระยะเวลา 21 วัน ของการบำบัด เท่ากับ 1.0 และ 0.89 g/m^2/d ตามลำดับ นั้น โดยรวมแล้ว ระบบจะมีประสิทธิในการบำบัด BOD และ TKN สูงและแตกต่างจากหน่วยควบคุมที่ไม่มีแหนแดง ที่มีอัตราการรองรับของเสียเท่ากับ 6.0 g COD/m^2/d และ 32.0 g BOD/m^2/d รวมถึงระบบพืชลอยน้ำประเภทเดียวกันที่มีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ที่สูงกว่า คือ ระหว่าง 1.4-6.0 g COD/m^2/d และ 1.0-32.0 g BOD/m^2/d

2) ความเป็นไปได้ในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

การศึกษาด้านผลผลิตแหนแดง พบว่ามีเพียงระบบที่มีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD เท่ากับ 1.0 และ 0.89 g/m^2/d ตามลำดับ หรือจากกระบวนการทดลองในครั้งนี้คือในระบบที่รองรับน้ำเสียที่มีอัตราความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 เท่านั้น ที่สามารถให้ผลผลิตในทุกซ้ำของหน่วยทดลอง โดยผลผลิตที่ได้มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นจากปริมาณแหนแดงที่ปล่อยลงสู่ระบบบำบัดเมื่อเริ่มกระบวนการบำบัด โดยพบแหนแดงมีค่า RGR เฉลี่ยเท่ากับ 0.046 d^{-1} และเมื่อพิจารณาด้านคุณภาพ พบแหนแดงที่ผลิตได้มีค่า Dry matter ต่ำกว่าการผลิตตามปกติ มีค่า CP ในระดับเดียวกับแหนแดงที่มีการผลิตตามปกติ ในขณะที่มีค่า P สูงกว่าแหนแดงที่มีการผลิตตามปกติ

5.1.2 การศึกษาถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรในการผลิตแหนแดง

1) แนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

การวิเคราะห์แนวทางที่เหมาะสมในการใช้แหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในระบบบำบัดพืชลอยน้ำ โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บเกี่ยวหรือความถี่ในการเก็บเกี่ยวแหนแดงกับการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในระบบ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำตามช่วงเวลา ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา เพื่อการวิเคราะห์ถึงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และช่วงเวลาที่เหมาะสมในบำบัดหรือกักพักน้ำเสียในระบบ โดยใช้

ผลจากการศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพของแหนแดงในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร มาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้น ในการดำเนินการศึกษาจึงทำการเจือจางน้ำเสียจากฟาร์มด้วยอัตราส่วนการเจือจางร้อยละ 25 ก่อนนำน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด

การศึกษาได้ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำในระบบบำบัดที่ทำการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบที่ช่วงเวลาแตกต่างกัน คือ ทุก 1 2 และ 3 สัปดาห์ โดยดำเนินระบบเป็นระยะเวลานานรวม 6 สัปดาห์ ทำการศึกษาจากสิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ และศึกษาในลักษณะเดียวกันนี้จำนวน 2 ครั้ง น้ำเสียที่ทำการศึกษาเป็นน้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ผลการตรวจวัดคุณสมบัติน้ำเสียก่อนการเจือจาง พบมลสารปนเปื้อนในรูป BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ Phosphate ในน้ำเสีย มีค่าเท่ากับ 49.5-63.0, 63.0-152.0, 70.0-191.0, 13.4-65.8, 51.9-129.39 และ 15.1-22.3 mg/l ตามลำดับ และปริมาณ TCB ในน้ำเสีย มีค่ามากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml ผลตรวจวัดค่าความเข้มข้นของ Cu, Zn และ Cd ในน้ำเสียจากบ่อรวมน้ำเสีย พบมีค่าระหว่าง 0.1610-0.2245, 0.0170-0.0215 และ 0.2345-0.3095 mg/l ตามลำดับ ภายหลังการเจือจางน้ำเสียที่อัตราความเข้มข้นน้ำเสียร้อยละ 25 พบมลสารปนเปื้อนในรูป BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ Phosphate ใน น้ำเสีย มีค่าเท่ากับ 8.7-16.2, 40.0-88.0, 10.0-38.0, 2.2-23.0, 13.5-63.9 และ 2.0-6.0 mg/l ตามลำดับ และปริมาณ TCB ในน้ำเสีย มีค่ามากกว่า 24,000.0 MPN/100 ml

ผลการศึกษาโดยรวม พบว่า ในการบำบัดน้ำเสียในระบบอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลา 6 สัปดาห์ นั้น ค่า DO ของน้ำเสียที่ทำการบำบัดในแต่ละหน่วยทดลองมีค่าลดต่ำลงในสัปดาห์แรกของการบำบัด แล้วจึงเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มคงที่โดยมีการผันแปรของค่า DO ในช่วงแคบๆ น้ำเสียในระบบมีค่า pH ระหว่าง 6.02-8.88 โดยมีค่าผันแปรในช่วงเป็นกรดเล็กน้อยถึงเป็นด่างเล็กน้อย น้ำเสียในระบบมีค่าอุณหภูมิ ระหว่าง 25.3-31.9 ^{o}C โดยพบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิน้ำผันแปรในช่วงแคบๆ ค่า EC ของน้ำเสียในแต่ละระบบในแต่ละสัปดาห์มีแนวโน้มลดต่ำลงเป็นลำดับ โดยพบน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 3 สัปดาห์ มีค่า EC ต่ำกว่าน้ำเสียในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงทุก 2 และ 1 สัปดาห์ ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่า Salinity ของน้ำเสีย

ในด้านประสิทธิภาพการบำบัดของระบบนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ระบบบำบัดมีค่าการรองรับสารอินทรีย์เมื่อเริ่มระบบ ในรูปของ COD และ BOD loading rate เท่ากับ 30.0-36.0 และ 6.5-11.7 และ g/m^2 ตามลำดับ หรือระบบมีอัตราการรองรับสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ BOD ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด (42 วัน) เมื่อเริ่มทำการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบเท่ากับ 0.71-0.86 และ 0.16-0.29 g/m^2/d ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบ ($P \geq 0.05$) ขณะที่การบำบัด COD ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 สัปดาห์นั้น มีประสิทธิภาพการบำบัด COD สูงสุดในสัปดาห์ที่ 3 และ 5 ตามลำดับ โดยการบำบัด

COD ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 และ 3 สัปดาห์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแต่ละสัปดาห์ของการบำบัดของแต่ละระบบ ($P \geq 0.05$)

ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของ BOD ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบ ($P \geq 0.05$) เช่นเดียวกันประสิทธิภาพการบำบัด COD ขณะที่การบำบัด BOD ของระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 และ 3 สัปดาห์นั้น มีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 2 และแตกต่างจากค่าที่พบในสัปดาห์อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุป ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบในการบำบัดสารอินทรีย์ ทั้งในรูปของ COD และ BOD จะพบว่ามีประสิทธิภาพไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระหว่างระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ในแต่ละระบบอาจพบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ทั้งในรูปของ COD และ BOD แตกต่างกันระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด

ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูปของ TSS ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TSS ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างระบบ ($P \geq 0.05$) และประสิทธิภาพการบำบัด TSS ของแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างแต่ละสัปดาห์ของการบำบัด ($P \geq 0.05$) เช่นกัน

ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูปของ TDS ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบ ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัดที่พบว่าระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS สูงกว่าระบบอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัด TDS ของแต่ละระบบมีค่าแตกต่างกันระหว่างแต่ละสัปดาห์ของการบำบัด โดยระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 และ 2 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS สูง ในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด ขณะที่ ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 3 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TDS สูง ในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด

สรุป ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบในการบำบัดของแข็งทั้งในรูป TSS และ TDS จะพบว่ามีประสิทธิภาพไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระหว่างระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ในแต่ละระบบอาจพบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งในรูป TDS แตกต่างของระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด โดยพบค่าสูงในสัปดาห์แรกๆ ของการบำบัดเช่นเดียวกับการบำบัดสารอินทรีย์

ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารไนโตรเจนในรูปของ TKN ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบ และประสิทธิภาพการบำบัด TKN ของแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างแต่ละสัปดาห์ของการบำบัด ($P \geq 0.05$) เช่นกัน

ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสในรูปของ TP ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TP ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบ ขณะที่ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TP สูงที่สุด ในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด ซึ่งพบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับประสิทธิภาพการบำบัดมลสารอื่นๆ เช่น การบำบัด BOD และ TDS ของระบบ

ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสในรูปของ Dissolved P ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด Dissolved P ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบ ขณะที่ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด Dissolved P สูงที่สุด ในสัปดาห์ที่ 4 ของการบำบัด

สรุป ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบในการบำบัดธาตุอาหารทั้งในรูป TKN TP และ Dissolved P จะพบว่ามีประสิทธิภาพไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระหว่างระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 2 สัปดาห์ จะพบประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารฟอสฟอรัสทั้งในรูปของ TP และ Dissolved P แตกต่างของระหว่างสัปดาห์ของการบำบัด โดยพบค่าสูงในสัปดาห์ที่ 2 และ 4 ของการบำบัด ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการบำบัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (TCB) ของระบบพืชลอยน้ำที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบที่ระยะเวลาแตกต่างกัน เมื่อเทียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการบำบัด พบมีประสิทธิภาพในการบำบัด TCB ไม่แตกต่างกันระหว่างระบบ ขณะที่ระบบที่มีการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบในทุก 1 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TCB สูงที่สุด ในสัปดาห์ที่ 5 ของการบำบัด

2) แนวทางที่เหมาะสมในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในการผลิตแหนแดง

วิเคราะห์ถึงแนวทางที่เหมาะสมในการใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในการผลิตแหนแดง โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเก็บเกี่ยวแหนแดงหรือความถี่ในการเก็บเกี่ยวแหนแดงกับผลผลิตแหนแดงทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพของแหนแดง การเปลี่ยนแปลงของผลผลิตแหนแดงตามช่วงเวลา ในแต่ละระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ทำการศึกษา

2.1) การเจริญเติบโตของแหนแดงและปริมาณผลผลิต

การศึกษาการเจริญเติบโตของแหนแดงในรูปของอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) ของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1 2 และ 3 สัปดาห์ นั้น พบว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการกักพักน้ำหรือระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียที่เท่ากันนั้น แหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้ในแต่ละสัปดาห์ มีค่า RGR ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน ในขณะที่ แหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 2 สัปดาห์ มีค่า RGR แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระหว่างรอบของการเก็บเกี่ยว โดยมีค่าสูงที่สุดในรอบที่ 3 ของการเก็บเกี่ยวหรือที่สัปดาห์ที่ 6 ของการบำบัดของระบบ

การตรวจวัดอัตราการผลิตมวลชีวภาพในรูปของผลผลิตน้ำหนักสดของแหนแดง เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสัปดาห์ จะพบว่าที่ระยะเวลาการกักพักน้ำหรือระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียที่เท่ากันนั้น พบว่า โดยส่วนแล้วผลผลิตน้ำหนักสดของแหนแดงจากระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัดที่พบว่าผลผลิตจากระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์ มีผลผลิตน้ำหนักสดสูงกว่าในระบบที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุกสัปดาห์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทั้งนี้ พบว่าอัตราการเพิ่มของน้ำหนักสดของแหนแดงในระบบบำบัดมีค่าต่ำกว่าอัตราการขยายตัวของแหนแดงในพื้นที่เลี้ยงที่เหมาะสม เมื่อทำการเก็บเกี่ยวแหนแดงจนครบระยะเวลาการดำเนินระบบทั้งสิ้น 6 สัปดาห์ พบว่า ระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 1 2 และ 3 สัปดาห์ ให้ผลผลิตแหนแดงในรูปน้ำหนักสดสุทธิรวมตลอด 6 เดือน เท่ากับ 5.90 6.82 และ 3.33 kg/m^2 หรือให้ผลผลิตน้ำหนักสดสุทธิเฉลี่ย 327.89 378.94 และ 184.95 $g/m^2/week$ ซึ่งจะพบกำลังการผลิตผลผลิตน้ำหนักสดสุทธิสูงในระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์

การตรวจวัดอัตราการผลิตมวลชีวภาพในรูปของผลผลิตน้ำหนักแห้งของแหนแดง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลผลิตมวลชีวภาพน้ำหนักแห้งในแต่ละสัปดาห์ พบว่าผลผลิตมวลชีวภาพน้ำหนักแห้งที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันหรือสัปดาห์เดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน ขณะที่แหนแดงในระบบที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบทุก 2 สัปดาห์ มีผลผลิตน้ำหนักแห้งเฉลี่ยสูงในรอบที่ 3 ของการเก็บเกี่ยว หรือในสัปดาห์ที่ 6 ของการบำบัด ซึ่งสอดคล้องกับค่า RGR ของแหนแดง เมื่อทำการเก็บเกี่ยวแหนแดงจนครบระยะเวลาการดำเนินระบบทั้งสิ้น 6 สัปดาห์ พบว่า ระบบบำบัดที่มีการ

เก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 1, 2 และ 3 สัปดาห์ ให้ผลผลิตแหนแดงในรูปน้ำหนักแห้งสุทธิรวมตลอด 6 เดือน เท่ากับ 0.19, 0.25 และ 0.11 kg/m^2 หรือให้ผลผลิตน้ำหนักแห้งสุทธิเฉลี่ย 10.30, 13.77 และ 6.09 g/m^2/week ซึ่งจะพบกำลังการผลิตผลผลิตน้ำหนักแห้งสุทธิสูงในระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์ สอดคล้องกับการผลิตมวลชีวภาพแหนแดงในรูปน้ำหนักสดสุทธิ

สรุปโดยรวม จะพบว่าในช่วงระยะเวลาของการดำเนินระบบครบ 6 สัปดาห์นั้น ระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์ มีค่า RGR ของแหนแดงในระบบสูงที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิตน้ำหนักสดสุทธิและปริมาณผลผลิตน้ำหนักแห้งสุทธิ ซึ่งมีค่าสูงในระบบบำบัดที่มีการเก็บเกี่ยวแหนแดงทุก 2 สัปดาห์ เช่นกัน

2.2) คุณภาพของผลผลิตแหนแดง

ค่าวัตถุแห้งของแหนแดงในระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวและปล่อยแหนแดงลงสู่ระบบบำบัดพืชลอยน้ำในทุก 1 2 และ 3 สัปดาห์นั้น พบว่าในแต่ละระบบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็นลำดับ ตามระยะเวลาการบำบัดของระบบที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า DM เฉลี่ย ในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า DM ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน และจะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า DM เฉลี่ย ต่ำกว่าค่า DM ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติเล็กน้อย

ค่าโปรตีนหยาบของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับตามระยะเวลาการบำบัดของระบบที่เพิ่มสูงขึ้น โดยในทุกระบบพบค่า CP สูงที่สุดในแหนแดงที่ได้จากรอบแรกของการเก็บเกี่ยว ค่า CP เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในสัปดาห์เดียวกัน มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน ทั้งนี้ พบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า CP ในเกณฑ์เดียวกันกับค่า CP ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และบางส่วนพบมีค่า CP สูงกว่าค่า CP ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ โดยแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่า CP ใกล้เคียงกับค่า CP ของแหนเล็ก และมีค่าสูงกว่าค่า CP ของแหนใหญ่ ทั้งนี้ โปรตีนที่ตรวจพบในเนื้อเยื่อของแหนแดงจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำนั้น ส่วนหนึ่งเป็นผลจากการนำอนินทรียสารไนโตรเจนในน้ำเสียมาใช้ในการเปลี่ยนรูปเป็นอินทรียสารของแหนแดง ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียรูปแบบหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียพืชลอยน้ำนั่นเอง

ค่าเยื่อใยหยาบของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวได้จากแต่ละระบบมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับตามระยะเวลาการบำบัดของระบบที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่า CF ของแหนเล็กและแหนใหญ่ที่ระบุในตารางคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์ จะพบว่าค่า CF ของแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่าสูงกว่ากับค่า CF ของแหนเล็ก และส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าค่า CF ของแหนใหญ่

เมื่อเปรียบเทียบค่า P เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า P ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน ทั้งนี้ ค่าฟอสฟอรัสของแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่าในเกณฑ์เดียวกันกับค่า P ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และบางส่วนพบมีค่า P สูงกว่าค่า P ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า P ของแหนเล็กและแหนใหญ่ที่ระบุในตารางคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์ จะพบว่าค่า P ของแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่า P สูงกว่าค่า P ของทั้งแหนเล็กและแหนใหญ่ ทั้งนี้ ฟอสฟอรัสที่แหนแดงในระบบบำบัดพืชลอยน้ำนำมาใช้นั้น เป็นฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ซึ่งการนำฟอสฟอรัสมาใช้โดยแหนแดงนั้นเป็นกระบวนการบำบัดฟอสฟอรัสใน น้ำเสียของระบบบำบัดพืชลอยน้ำนั่นเอง

ค่า K เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า K ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน และจะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า K สูงกว่าค่า K ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ

ค่า Ca เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Ca ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน โดยจะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า Ca โดยเฉลี่ยต่ำกว่า ค่า Ca ในแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และมีค่าต่ำกว่าค่า Ca ของทั้งแหนเล็กและแหนใหญ่ ทั้งนี้ อาจเป็นผลเนื่องมาจากน้ำเสียมีปริมาณ Ca น้อย หรือมีอยู่ในรูปของตะกอนเคมีที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้

ค่า Mg เฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Mg ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกัน โดยจะพบว่าแหนแดงที่ผลิตจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่า Mg สูงกว่าค่า Mg ในแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ

ค่าโลหะหนักเฉลี่ยของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบในแต่ละสัปดาห์ พบว่าค่า Zn Cd และ Cu ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวในช่วงเวลาเดียวกันนั้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ระหว่างระบบที่มีระยะการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงแตกต่างกันเช่นกัน ทั้งนี้ แหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบบำบัด มีค่าโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด เพิ่มสูงขึ้นจากค่าโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ของแหนแดงที่ปล่อยลงเลี้ยงในระบบ

สรุปโดยรวม จะพบว่าแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบบำบัด มีค่าของดัชนีคุณค่าทางโภชนะไม่แตกต่างกัน ระหว่างแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบที่มีช่วงเวลาการปล่อยและเก็บเกี่ยวแหนแดงออกจากระบบแตกต่างกัน ทั้งนี้จะพบคุณค่าทางโภชนะของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบบำบัด ได้แก่ CP และ P มีค่าใกล้เคียงกับ ค่า CP และ P ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ มีค่า K และ

Mg สูงกว่าค่า K และ Mg ของแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ ในขณะที่มีค่า DM และ Ca มีค่าต่ำกว่าค่า DM และ Ca ที่พบในแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ ส่วนค่า CF ของแหนแดงที่เก็บเกี่ยวจากระบบบำบัดมีค่าสูงกว่าค่า CF ที่พบในแหนเล็กและแหนใหญ่ ในส่วนของโลหะหนัก Cd Zn และ Cu นั้น พบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากค่า Cd Zn และ Cu ของแหนแดงที่ปล่อยลงเลี้ยงในระบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ผลการศึกษาได้บ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยมีลักษณะความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียเป็นเงื่อนไขในการนำไปสู่การประยุกต์ใช้ ทั้งนี้ การทดสอบถึงความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรด้วยระบบพืชลอยน้ำที่มีแหนแดงเป็นพืชในระบบ ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการควบคุมค่าความเข้มข้นของมลสารที่ระดับต่างๆ จะทำให้ได้องค์ความรู้ที่ละเอียดและชัดเจนขึ้นในการนำไปสู่การประยุกต์ใช้

5.2.2 เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาในหน่วยทดลองที่สร้างจากวงปูน การนำรูปแบบการศึกษานี้ไปทำการการศึกษาเพิ่มเติมในระบบบ่อบำบัด ลักษณะเดียวกันกับที่เกษตรกรใช้สำหรับการรวบรวมน้ำเสีย จะทำให้ได้องค์ความรู้ที่ละเอียดและชัดเจนขึ้นในการนำไปสู่การประยุกต์ใช้ของเกษตรกร

5.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบพืชลอยน้ำในครั้งนี้ ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบรวม (Composite sample) ตามระดับความลึกซึ่งรวมถึงน้ำระดับพื้นบ่อด้วย ทำให้มลสารที่ถูกบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนกลับเข้าสู่ตัวอย่างน้ำ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของระบบจึงไม่รวมประสิทธิภาพจากกระบวนการตกตะกอน ทำให้ระบบแสดงประสิทธิภาพต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้น จึงการศึกษาเพิ่มเติมจึงควรตรวจวัดตัวอย่างน้ำในระดับความลึกส่วนบนที่จะส่วนที่ระบายน้ำที่ผ่านการบำบัดและมีคุณภาพดีแล้วออกจากระบบ ซึ่งจะเป็นการบ่งชี้ประสิทธิภาพที่แท้จริงของระบบได้มากขึ้น

5.2.4 เนื่องจากเป็นระบบบำบัดอย่างง่ายที่เกษตรกรสามารถนำไปปรับใช้ได้จริง จึงควรทำการศึกษาระบบดังกล่าวนี้เพิ่มเติม เช่น การศึกษาโดยการใช้พืชลอยน้ำชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ หรือมีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น

บรรณานุกรม

กรมควบคุมมลพิษ. (2542). **คู่มือการจัดการฟาร์มสุกรเพื่อแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม**. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2546). **คู่มือการเลือกใช้ การดูแลและบำรุงรักษา ระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรตามแบบมาตรฐานกรมปศุสัตว์**. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมปศุสัตว์. (2547). **ตารางคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด.

กรรณพร รื่นพานิช. (2545) **การใช้ระบบผสมผสานระหว่างถังกรองไร้อากาศและบึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., กรุงเทพฯ: .มหาวิทยาลัยมหิดล.

กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ. (2544) **การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กัลยา พัตตานิชานนท์. (2544). **ประสิทธิภาพของบ่อปรับเสถียรแบบติดผิวสำหรับกำจัดสารอาหารจากน้ำเสียโรงงานผลิตภัณฑ์นม**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2533). **ปฐพีเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สวิตา.

ณัฐสิมา โทขันธ์. (2553). **การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้แหนแดง**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ดวงพร สุวรรณกุล และรังสิต สุวรรณเขตมงคล. (2544). **วัชพืชในประเทศไทย**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิศานาถ ละอองพันธ์ และอำพร คล้ายแก้ว. (2546ก). **การใช้พืชลอยน้ำปรับปรุงคุณภาพน้ำ**. นนทบุรี: สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน.

นิศานาถ ละอองพันธ์ และอำพร คล้ายแก้ว. (2546ข). **นิเวศวิทยาและการใช้ประโยชน์ของแหนเป็ด**. นนทบุรี: สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน.

บุญชัย วิจิตรเสถียร และนเรศ เชื้อสุวรรณ. (2550). การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในขั้นต้นด้วยวิธีทางเคมีกายภาพ. **วารสารเทคโนโลยีสุรนารี** 13(1), 29-37.

ประยูร สวัสดี และ บรรหาญ แตงฉ่ำ. (2544). **แหนแดง ชีววิทยาและการใช้ประโยชน์**. เอกสารวิชาการเรื่อง ปุ๋ยชีวภาพ. กรุงเทพฯ: กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร.

ปิยะ พานิชปฐม. (2544). **การศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยระบบถังกรองไร้อากาศ**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ผกาพรรณ สกุลมั่น. (2549). ของเสียจากฟาร์มปศุสัตว์: มูลค่าหรือมลพิษ. **สุกรสาส์น**, 32(128), 47-53.

พรชัย สุธาพร. (2527). **แหนแดง**. วารสารกรมพัฒนาที่ดิน. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน.

เพ็ญจา จิตจำรูญโชคไชย ศรีศักดิ์ สีหะเนิน และนิรุทร์ เหรียญโมรา. (2540). **การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงอาหารโดยใช้แหนแดง (*Azolla microphylla*)**. เอกสารประกอบการประชุม การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 35 สาขาประมง วิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ การจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม คหกรรมศาสตร์ ศึกษาศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2540, หน้า 589-597

ลาวัลย์ เอียวสวัสดิ์. (2541). **ประสิทธิภาพของระบบผสมผสานกรองไร้อากาศและผักตบชวาร่วมหินกรองในการบำบัดน้ำล้างคอกสุกร**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยมหิดล.

วันชัย อิศราภรณ์ศรี. (2546). **การประเมินการใช้งานและการออกแบบบ่อปรับเสถียรสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุมิตรา ภู่วโรดม. (2532). **ปุ๋ยชีวภาพเพื่อการเกษตร**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

AOAC, 1990. **Official Methods of Analysis of the Association of official Analytical Chemists.** 15th edition. AOAC, Washington, DC., USA

APHA, AWWA, WPCF. (2005). **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater,** 21st edition. American Public Health Association Inc., Washington DC., USA

Arora, A. and Saxena, S. (2005). Cultivation of *Azolla microphylla* biomass on secondary-treated Delhi municipal effluents. **Biomass and Bioenergy,** 29, 60-64.

Basak, B., Pramanik, MD. A. H., Rahman, M.S., Tarafder, S.U. and Roy, B. C. (2002). Azolla (*Azolla pinnata*) as feed ingradient in broiler ration. **International Journal of Poultry Science,** 1(1), 29-34.

Becking, J.H. (1979). **Environmental Requirement of Azolla for Use in Tropical Rice Production.** In Nitrogen and Rice International Rice Research Institute (IRRI). Los Banos Philippines. 345-373.

Forni, C., Chen, J., Pancioni, L. and Grilli Caiola, M. (2001): Evaluation of the fern Azolla for growth, nitrogen and phosphorous removal from wastewater. **Water research,** 35(6), 1592-1598

Hillman, W.S. and Culley, D.D. Jr. (1978). The uses of azolla: the rapid growth, Nutrition value, and high biomass productivity of these floating plants suggest their use in water treatment, as feed crops, and in energy-efficent farming. **Animal Feed Science and Technology,** 7, 111-113.

Ito, O. and Watanabe, I. (1985). Availability to rice plants of nitrogen fixed by Azolla. **Soil Science Plant Nutrition,** 31, 91-104.

Khan, M.M. (1988). **A primer on *Azolla* production & utilization in agriculture.** Institute of biological science of the university of the Philippines at Los Banos (IBS-UPLB) and the SEAMEO Regional Center for Graduate Study and Research in Agriculture (SEARCA).

Leterme, P., Londono, A.M., Munoz, J. E., Suarez, J., Bedoya, C.A., Souffrant W.B. and Buldgen, A. (2008). Nutrition value of aquatic ferns (*Azolla filiculoiddes Lam.*) and (*Salvinia molesta* Mitchell) in pig. **Animal Feed Science and Technology,** 13, 1008-1016.

Lumpkin, T.A. and Plucknett, D.L. (1982). Azolla as a green manure: Use and management in crop production. **Wastview Tropical Agriculture.** Series No. 5: 81.

Mikkelsen, R.L. and Gilliam, J.W. (1995). Animal waste management and edge of field losses. In **Animal Waste and the Land-Water Interface** (Ed., K. Steele). Lewis Publishers, N.Y. pp. 57-68.

Perkin-Elmer. (1982). **Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrophotometry.** Perkin-Elmer Inc., USA.

Tietjen, C. (1987). Influence of fecal wastes on soil, plant, surface water and ground water. In **Animal Production and Health** (Ed., D. Strauch). World Animal Science, B6. Elsevier Science Publishers, B.V., Amsterdam, pp. 203-217.

U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). (1988). *Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment: Design Manual.* Cincinnati, Ohio.

Output ที่ได้จากโครงการ

1. บทความวิจัยที่ตีพิมพ์บน Proceedings ในการประชุมวิชาการระดับชาติ การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 29 ณ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556 จำนวน 1 เรื่อง คือ การลดมลสารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรของแหนแดงในระบบพืชลอยน้ำ (ภาคผนวก ก)

สุกรโดยเฉลี่ยประมาณวันละ 10-20 ลิตรต่อตัว ทั้งนี้กรมควบคุมมลพิษ [3] ได้รายงานลักษณะน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งเป็นปริมาณการปนเปื้อนมลสารโดยเฉลี่ยของน้ำเสียจากฟาร์มขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ดังนี้ น้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะมีปริมาณ BOD, COD, TSS, TKN และ TP ปนเปื้อนเฉลี่ย 1,500-3,000 mg/L, 2,000-7,000 mg/L, 2,000-4,800 mg/L, 400-540 mg/L และ 8-17 mg/L ตามลำดับ

เพื่อเป็นการป้องกันและลดผลกระทบจากน้ำเสียจากฟาร์มสุกร กรมควบคุมมลพิษจึงได้กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขึ้น โดยกำหนดให้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีค่า pH ระหว่าง 5.5-9 ปริมาณ BOD ระหว่าง 60-100 mg/L มีค่า COD ปนเปื้อนระหว่าง 300-400 mg/L มีค่า SS ปนเปื้อนระหว่าง 150-200 mg/L มีค่า TKN ปนเปื้อน 120-200 mg/L ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดของฟาร์มสุกร ขณะที่กรมปศุสัตว์ได้นำเสนอระบบบำบัดน้ำเสียแบบมาตรฐานสำหรับฟาร์มสุกรไว้ 2 ประเภท คือ ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter tank) และระบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization pond) และถึงแม้ว่าระบบบำบัดดังกล่าวนี้ จะสามารถลดค่าความสกปรกในรูปของ BOD และ COD ได้มากถึงร้อยละ 80 ก็ตาม แต่เนื่องจากค่าความสกปรกเริ่มต้นของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมีค่าสูง จึงทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังคงมีมลสารปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่สูงเช่นกัน โดยเฉพาะมลสารในกลุ่มของธาตุอาหาร อีกทั้งยังมีข้อจำกัดอื่นๆ อีกหลายประการที่ทำให้การจัดการน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรยังคงไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ทั้งนี้รวมถึงการขาดความรู้หรือทักษะเกี่ยวกับการดูแลระบบบำบัดรวมถึงข้อจำกัดด้านพื้นที่และงบประมาณในการก่อสร้างระบบบำบัด โดยเฉพาะในฟาร์มสุกรขนาดเล็กหรือการเลี้ยงสุกรในระดับครัวเรือนของเกษตรกร ซึ่งการสร้างระบบบำบัดด้วยเงินลงทุนที่สูงยังคงเป็นปัจจัยจำกัดในการบำบัดและระบายน้ำทิ้ง

การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางธรรมชาติเป็นการบำบัดโดยใช้กลไกทางธรรมชาติเป็นกระบวนการหลักในการลดสิ่งปนเปื้อนในน้ำ จึงเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนในการดูแลและมีมูลค่าในการลงทุนต่ำ ดังนั้น จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยเฉพาะในฟาร์มของเกษตรกรที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณและความซับซ้อนของเทคโนโลยี อีกทั้งยังสามารถนำมาช่วยลดมลสารที่ยังคงเหลือตกค้างจากการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบมาตรฐานได้ ทั้งนี้การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพืชลอยน้ำ (Floating aquatic plant treatment system) เป็นระบบบำบัดทางธรรมชาติรูปแบบหนึ่งที่สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ ของแข็ง และสารอาหารในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4, 5] โดยกลไกในการบำบัดจะประกอบด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมีและชีวภาพที่สัมพันธ์กันและเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ทั้งนี้ พืชน้ำที่นำมาใช้ในระบบ เป็นองค์ประกอบที่สำคัญประการหนึ่งของกระบวนการบำบัด การเลือกใช้พืชน้ำที่เหมาะสมจะช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและหากพืชที่เลือกใช้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ภายหลังจากเก็บเกี่ยวออกจากระบบ จะทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มจากการบำบัดของระบบและทำให้ระบบบำบัดนี้มีความน่าสนใจเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้พบว่า แหนแดงเป็นพืชน้ำที่เกษตรกรสามารถจัดหาได้ง่ายและยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการ ซึ่งรวมถึงการใช้เป็นพืชอาหารสัตว์และการใช้เป็นปุ๋ยพืชสด ดังนั้น แหนแดงจึงเป็นพืชน้ำชนิดหนึ่งที่มีความเหมาะสมต่อการพิจารณาเลือกใช้ในระบบพืชลอยน้ำ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ จึงเป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของระบบพืชลอยน้ำซึ่งใช้แหนแดงเป็นพืชในระบบในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ระบบบำบัดทางธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่เกษตรกรสามารถได้รับประโยชน์เป็นผลพลอยได้จากพืชในระบบ ซึ่งนอกจากจะช่วยลดผลกระทบจากปัญหาน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรแล้ว ยังเป็นโอกาสในการเพิ่มรายได้ของเกษตรกรอีกด้วย

ระบบบำบัดที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระบบด้วยสถิติ Kruskal-Wallis Test และ DMRT

ผลการศึกษาวิจัยและการอภิปรายผล

1. ลักษณะน้ำเสียก่อนการบำบัด

น้ำเสียที่ทำการบำบัดเป็นน้ำเสียจากกิจกรรมการเลี้ยงสุกรที่ถูกระบายลงสู่บ่อรวบรวมน้ำเสียโดยตรงโดยไม่ผ่านระบบบำบัดใดๆ ผลการตรวจวัดน้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสียและน้ำเสียที่นำมาทำการเจือจางกับน้ำบาดาล ที่อัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 25 50 75 และ 100 ก่อนการบำบัด พบว่าน้ำเสียมีอุณหภูมิระหว่าง 24.1-25.3 °C มีค่า pH ระหว่าง 6.7-7.3 ค่า EC ระหว่าง 759.0-1,270.0 µS/cm ค่า TDS ระหว่าง 379.0-635.0 mg/L DO มีค่าต่ำระหว่าง 0.01-0.02 mg/L ปริมาณสารอินทรีย์ในรูป BOD_5 มีค่าระหว่าง 21.3-28.7 mg/L และ COD ระหว่าง 28.0-168.0 mg/L TSS มีค่าระหว่าง 30.0-90.0 mg/L TKN มีค่าระหว่าง 33.32-95.48 mg/L TP มีค่าระหว่าง 2.1-7.2 mg/L และ TCB มีค่าระหว่าง 11,000.0-24,000.0 MPN/100 mL (ตารางที่ 1)

2. คุณภาพน้ำและประสิทธิภาพหลังการบำบัด

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำหลังการบำบัดตลอดระยะเวลา 3 สัปดาห์ที่ดำเนินระบบ เมื่อผ่านสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด พบว่าน้ำเสียในระบบบำบัดพืชลอยน้ำมีค่าความสกปรกของมลสารในรูปของ BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ TCB มีค่าระหว่าง 6.3-78.0 mg/L, 32.0-136.0 mg/L, 8.0-50.0 mg/L, 11.2-85.1 mg/L, 3.1-10.9 mg/L และ 150.0-4,600.0 MPN/100 mL ตามลำดับ (ตารางที่ 2) ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ TCB ของระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่าเฉลี่ยระหว่าง (-20.6)-69.7, (-71.4)-38.0, (-26.6)-64.5, (-18.4)-63.5, (-293.3)-12.4 และ 71.9-99.2 % ตามลำดับ (ตารางที่ 2) จากผลการบำบัดของระบบในสัปดาห์ที่ 1 พบว่า ความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียที่อัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 25 50 และ 75 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรประเภท ค (จำนวนสุกร 50-น้อยกว่า 500 ตัว) ซึ่งกำหนดให้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีค่าความเข้มข้นของ BOD_5, COD, TSS และ TKN ในน้ำทิ้งเท่ากับ 60.0, 300.0, 150.0 และ 120.0 mg/L ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียที่อัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 100 นั้น แม้จะพบค่าเฉลี่ยของ BOD_5 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่จากผลการตรวจวัดยังคงพบว่ามีค่า BOD_5 บางส่วนสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน โดยพบมีค่าสูงถึง 78.0 mg/L ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากน้ำเสียเดิมก่อนการบำบัดมีค่า BOD_5 สูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ในขณะที่แหนแดงในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่อัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 100 นั้น ได้ตายลงทั้งหมด ซึ่งเป็นการเพิ่มสารอินทรีย์ลงสู่น้ำเสียในระบบด้วย จึงมีผลทำให้ค่าของสารอินทรีย์ในน้ำเสียสูงขึ้นและอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดมลสารของระบบ

จากผลศึกษาพบว่า ในสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัดประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5, TKN และ TCB มีสูงสุดในระบบบำบัดที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 ส่วนประสิทธิภาพการบำบัด TP และ TSS มีค่าสูงสุดในระบบบำบัดที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 75

ตารางที่ 1 คุณลักษณะน้ำเสียก่อนการบำบัด

ดัชนี	หน่วย	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำเสีย (ร้อยละ)				
		25	50	75	100	Control[ν]
BOD_5	mg/L	24.8	27.0	28.7	90.0	**90.0**
COD	mg/L	28.0	40.0	128.0	168.0	**168.0**
TSS	mg/L	30.0	34.0	77.0	90.0	**90.0**
TKN	mg/L	33.3	35.0	58.5	95.4	**95.4**
TP	mg/L	2.1	2.6	6.2	7.2	7.2
TCB	MPN/100 mL	24,000.0	24,000.0	11,000.0	24,000.0	24,000.0

หมายเหตุ: [ν] น้ำเสียอัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 100 โดยไม่ปล่อยแหนแดงลงในระบบ

ตารางที่ 2 ลักษณะน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบในสัปดาห์ที่ 1

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำเสีย (ร้อยละ)				
		25	50	75	100	Control[1/]
คุณลักษณะน้ำเสีย						
BOD_5	mg/L	9.6±2.8^{c}	17.5±9.7^{bc}	34.2±3.7^{bc}	45.8±28.8^{b}	86.0±17.0^{a}
COD	mg/L	48.0±16.0^{c}	58.6±18.4^{bc}	90.6±12.2^{ab}	106.6±28.0^{a}	82.6±4.6^{ab}
TSS	mg/L	16.0±8.0^{c}	38.0±10.5^{b}	27.3±5.7^{ab}	35.3±10.2^{b}	69.3±8.0^{a}
TKN	mg/L	12.1±0.8^{d}	41.4±9.7^{c}	67.1±1.1^{b}	83.9±1.2^{a}	80.7±2.0^{a}
TP	mg/L	3.6±0.5^{d}	10.4±0.8^{a}	5.5±0.4^{c}	6.7±0.8^{b}	6.8±0.4^{b}
TCB	MPN/100 mL	176.6±46.1^{b}	934.8±507.3^{b}	503.3±395.1^{b}	4,600.0±0.0^{a}	6,733.3±369.5^{a}
ประสิทธิภาพการบำบัด						
BOD_5	%	69.7±22.9^{a}	35.1±35.9^{ab}	(-20.6)±15.6^{c}	49.0±32.0^{ab}	4.4±18.9^{bc}
COD	%	(-71.4)±57.1^{b}	(-46.6)±46.1^{b}	29.1±9.5^{a}	38.0±14.4^{a}	50.8±2.7^{a}
TSS	%	58.9±19.4^{a}	(-26.6)±35.2^{c}	64.5±7.4^{a}	60.7±11.4^{a}	22.9±8.9^{b}
TKN	%	63.5±2.5^{a}	(-18.4)±27.8^{c}	(-14.6)±1.9^{c}	12.3±1.6^{b}	15.4±2.1^{b}
TP	%	(-70.1)±25.1^{b}	(-293.3)±32.3^{c}	12.4±6.9^{a}	7.4±11.8^{a}	5.4±6.5^{a}
TCB	%	99.2±0.1^{a}	96.1±2.1^{a}	95.4±3.5^{a}	80.8±0.0^{b}	71.9±15.3^{b}

หมายเหตุ: [1/] น้ำเสียอัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 100 โดยไม่ปล่อยแหนแดงลงในระบบ

ค่า Mean ± SD ที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวนอน หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียในระบบบำบัดพืชลอยน้ำในสัปดาห์ที่ 2 พบน้ำเสียมีค่าความสกปรกของมลสารในรูปของ BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ TCB ระหว่าง 6.0-33.0 mg/L, 32.0-112.0 mg/L, 6.0-30.0 mg/L, 1.1-74.4 mg/L, 2.2-14.4 mg/L และ 40.0-11,000.0 MPN/100 mL ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ TCB ของระบบพืชลอยน้ำมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 20.8-73.4, (-100.0)-41.6, 20.0-83.8, 12.2-94.9, (-153.3)-28.7 และ 84.4-98.7 % ตามลำดับ (ตารางที่ 3) เมื่อผ่านสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัดพบว่าความเข้มข้นของมลสารทั้งหมดที่ตรวจวัดในน้ำเสียที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 25 50 75 และ 100 มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรประเภท ค ทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจากการบำบัดอย่างต่อเนื่องของระบบ จึงทำให้มลสารในระบบโดยส่วนใหญ่มีค่าความเข้มข้นลดลงเป็นลำดับ

ทั้งนี้พบว่าในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัดประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5, TKN และ TCB มีค่าสูงสุดในระบบบำบัดที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 และประสิทธิภาพการบำบัด TSS และ TP มีค่าสูงสุดในระบบบำบัดที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 75

เมื่อผ่านสัปดาห์ที่ 3 ของการบำบัด พบว่าน้ำเสียในระบบบำบัดพืชลอยน้ำ มีค่าความสกปรกของมลสารในรูปของ BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ TCB ระหว่าง 4.8-186.0 mg/L, 16.0-144.0 mg/L, 18.0-72.0 mg/L, 1.1-57.6 mg/L, 2.3-9.6 mg/L และ 30.0-2,400.0 MPN/100 mL (ตารางที่ 4) ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ TCB ของระบบพืชลอยน้ำมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 47.7-91.5, (-147.6)-23.8, (-6.6)-46.4, 30.7-93.2, (-78.8)-(-7.3) และ 96.2-99.7 % ตามลำดับ (ตารางที่ 4)

จากการบำบัดของระบบในสัปดาห์ที่ 3 พบว่าความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียในระบบที่มีต่ออัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 50 และ 75 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรประเภท ค ในขณะที่ พบว่า

ค่า BOD_5 ในน้ำเสียในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 100 บางส่วนมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยพบค่า BOD_5 ระหว่าง 15.0-63.0 mg/L ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของค่า BOD_5 ส่วนหนึ่งอาจเป็นผลจากการระเหยของน้ำเสียที่กักพักอยู่ในระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

ในสัปดาห์ที่ 3 ของการบำบัดพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5 ของระบบพืชลอยน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่บำบัดน้ำเสียที่อัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 100 ซึ่งพบว่ามีค่าต่ำสุดและแตกต่างจากระบบอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัด TKN มีค่าสูงสุดในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่อัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 25 ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของธาตุอาหารในน้ำเสีย ส่วนหนึ่งเกิดจากการนำไปใช้ของพืชในระบบ จึงพบว่าระบบบำบัดที่มีแหนแดงเจริญเติบโตอยู่มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนได้สูงกว่าระบบอื่น

ตารางที่ 3 ลักษณะน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบในสัปดาห์ที่ 2

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำเสีย (ร้อยละ)				
		25	50	75	100	Control[ข]
คุณลักษณะน้ำเสีย						
BOD_5	mg/L	6.6±0.7^{c}	19.8±5.1^{ab}	12.8±5.5^{bc}	25.9±12.2^{a}	13.8±1.6^{abc}
COD	mg/L	42.6±9.2^{d}	80.0±16.0^{c}	74.6±24.4^{c}	112.0±0.0^{b}	160.0±16.0^{a}
TSS	mg/L	6.2±0.3^{c}	24.0±10.3^{b}	14.9±3.0^{bc}	18.6±8.0^{bc}	81.3±13.3^{a}
TKN	mg/L	1.6±0.5^{d}	25.3±13.7^{c}	51.3±1.8^{b}	71.4±2.6^{a}	75.0±5.3^{a}
TP	mg/L	4.3±1.2^{b}	6.7±6.2^{ab}	4.4±0.8^{b}	12.1±2.0^{a}	12.4±4.9^{a}
TCB	MPN/100 mL	3,810.0±6,229.1^{a}	370.0±484.9^{a}	220.0±175.2^{a}	290.0±121.6^{a}	1,743.3±1,137.3^{a}
ประสิทธิภาพการบำบัด						
BOD_5	%	73.4±3.1^{ab}	20.8±12.3^{c}	55.3±19.3^{b}	71.2±13.6^{ab}	84.6±1.8^{a}
COD	%	(-52.3)±32.9^{b}	(-100.0)±40.0^{c}	41.6±19.0^{a}	33.3±0.0^{a}	4.7±9.5^{a}
TSS	%	83.8±1.0^{a}	20.0±34.6^{b}	80.6±3.8^{a}	79.2±8.9^{a}	9.6±14.7^{b}
TKN	%	94.9±1.6^{a}	27.4±39.3^{b}	12.2±3.0^{b}	25.1±2.7^{b}	21.4±5.5^{b}
TP	%	(-104.8)±60.4^{a}	(-153.3)±236.5^{a}	28.7±13.3^{a}	(-67.5)±28.6^{a}	(-71.9)±69.0^{a}
TCB	%	84.4±26.2^{a}	98.4±2.0^{a}	97.9±1.5^{a}	98.7±0.5^{a}	92.7±4.7^{a}

หมายเหตุ: [ข] น้ำเสียอัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 100 โดยไม่ปล่อยแหนแดงลงในระบบ

ค่า Mean ± SD ที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวนอน หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบตลอด 3 สัปดาห์ โดยภาพรวมพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมลสารในน้ำเสียในระบบพืชลอยน้ำที่บำบัดน้ำเสียในแต่ละสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำเสีย มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดมลสารในน้ำเสียโดยส่วนใหญ่เพิ่มสูงขึ้นในแต่ละสัปดาห์ของระยะเวลาของการบำบัด โดยจะพบประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหาร โดยเฉพาะธาตุไนโตรเจนสูงสุดในระบบที่มีแหนแดงเจริญเติบโตอยู่ (ระบบบำบัดที่อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25) ในขณะที่ความเข้มข้นของมลสารส่วนใหญ่มีค่าสูงในหน่วยควบคุม เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียก่อนการบำบัดสูง และพบว่าโดยส่วนใหญ่ไม่แตกต่างจากระบบบำบัดพืชลอยน้ำที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 100 ซึ่งเป็นระบบที่มีลักษณะของน้ำเสียก่อนการบำบัดไม่แตกต่างจากหน่วยควบคุม ในขณะที่พืชในระบบนี้ได้ตายลงทั้งหมดภายในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด

ทั้งนี้ จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมลสารมีค่าเป็นลบในบางดัชนี รวมถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการบำบัดของระบบเป็นไปตามสภาพทางธรรมชาติที่แท้จริง ซึ่งมีปัจจัยทางธรรมชาติหลายประการที่ไม่สามารถควบคุมได้ดังเช่นการทดลองในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้รวมถึงปริมาณการได้รับแสง และกระแสลม เป็นต้น ปัจจัยทางธรรมชาติเหล่านี้ สามารถส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารของแต่ละหน่วยทดลองและส่งผลต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประสิทธิภาพการบำบัดของแต่ละชุดการทดลองด้วย ในขณะที่ปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น การระเหยของน้ำในระบบรวมถึงการตายของพืชในระบบ เป็นปัจจัยสำคัญสำคัญประการหนึ่ง ที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบในบางดัชนีมีค่าเป็นลบ

ตารางที่ 4 ลักษณะน้ำเสียและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบในสัปดาห์ที่ 3

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำเสีย (ร้อยละ) 25	50	75	100	Control[ข]
คุณลักษณะน้ำเสีย						
BOD_5	mg/L	5.4±1.0^{a}	9.5±4.7^{a}	9.5±4.7^{a}	47.0±27.7^{a}	3.4±0.9^{a}
COD	mg/L	69.3±33.3^{a}	58.6±48.8^{a}	101.3±40.2^{a}	128.0±16.0^{a}	128.0±42.3^{a}
TSS	mg/L	22.0±5.2^{d}	32.0±6.0^{cd}	48.0±9.1^{bc}	54.6±15.5^{b}	84.6±5.0^{a}
TKN	mg/L	2.2±1.4^{d}	18.2±15.1^{c}	40.5±1.9^{b}	55.2±2.5^{a}	64.5±9.1^{a}
TP	mg/L	3.1±0.7^{c}	4.7±0.6^{c}	7.7±0.9^{b}	9.4±0.2^{ab}	9.8±1.6^{a}
TCB	MPN/100 mL	893.3±1,306.6^{a}	120.0±98.4^{a}	33.3±5.7^{a}	53.3±32.1^{a}	776.6±1,258.7^{a}
ประสิทธิภาพการบำบัด						
BOD_5	%	91.5±9.5^{a}	82.5±13.1^{a}	85.3±3.6^{a}	47.7±30.7^{b}	96.2±1.0^{a}
COD	%	(-147.6)±118.9^{b}	(-46.6)±122.2^{ab}	20.8±31.4^{a}	23.8±9.5^{a}	23.8±25.1^{a}
TSS	%	44.1±16.4^{a}	(-6.6)±19.9^{c}	46.4±26.7^{a}	39.2±17.2^{ab}	5.9±5.5^{bc}
TKN	%	93.2±4.4^{a}	47.7±43.3^{b}	30.7±3.3^{b}	52.1±17.3^{b}	32.3±9.5^{b}
TP	%	(-48.1)±33.6^{ab}	(-78.8)±25.9^{b}	(-19.2)±8.7^{a}	(-7.3)±35.5^{a}	(-35.6)±22.2^{ab}
TCB	%	96.2±5.4^{a}	99.4±0.4^{a}	99.6±0.1^{a}	99.7±0.1^{a}	96.7±5.2^{a}

หมายเหตุ: [ข] น้ำเสียอัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 100 โดยไม่ปล่อยแหนแดงลงในระบบ

ค่า Mean ± SD ที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวนอน หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

3. ปริมาณผลผลิตและคุณค่าทางโภชนะของพืช

เมื่อผ่านสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัดพบว่า แหนแดงในระบบบำบัดที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 มีลักษณะของลำต้นและใบเขียวเป็นปกติ อย่างไรก็ตามพบว่าในสัปดาห์ที่ 2 และ 3 ของการบำบัดใบของแหนแดงในระบบเริ่มเป็นสีเหลืองเล็กน้อย แต่ยังคงดำรงชีวิตอยู่ได้ ส่วนแหนแดงในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50 นั้น พบว่าเมื่อผ่านสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด แหนแดงเริ่มมีใบเป็นสีเหลือง เมื่อเข้าสู่ในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด ลำต้นของแหนแดงเริ่มเล็กแกร็นและพบว่าเริ่มทยอยตายลงในบางหน่วยทดลอง

ขณะที่แหนแดงในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 75 และ 100 พบว่าเมื่อผ่านสัปดาห์ที่ 1 ของการบำบัด แหนแดงมีลักษณะของลำต้นและใบเริ่มเหี่ยว มีสีคล้ำ และเริ่มทยอยตายลง จนพบว่าแหนแดงได้ตายลงทั้งหมดในทุกหน่วยทดลองภายในสัปดาห์ที่ 2 ของการบำบัด

เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาในการบำบัดของระบบ (3 สัปดาห์) พบว่ามีเพียงแหนแดงในระบบบำบัดที่อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 25 และ 50 เท่านั้น ที่ยังคงดำรงชีวิตอยู่ได้ในระบบ โดยผลการตรวจวัดเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการบำบัดของระบบ พบว่าแหนแดงในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 25 มีปริมาณน้ำหนักสดระหว่าง 1,180.0-1,740.0 กรัม/ตารางเมตร ปริมาณน้ำหนักแห้งระหว่าง 44.3-59.4 กรัม/ตารางเมตร คิดเป็นปริมาณน้ำหนักแห้งร้อยละ 3.2-3.8 ของน้ำหนักสด มีปริมาณคุณค่าทางโภชนะในรูปของโปรตีนหยาบ เยื่อใยหยาบ และปริมาณฟอสฟอรัส ระหว่างร้อยละ 21.0-30.6, 13.5-15.5 และ 0.010-0.012 ตามลำดับ

ขณะที่แหนแดงในระบบที่บำบัดน้ำเสียที่อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 50 มีปริมาณน้ำหนักสดและปริมาณน้ำหนักแห้ง ระหว่าง 107.0-380.0 และ 0.1-16.6 กรัม/ตารางเมตร ตามลำดับ คิดเป็นปริมาณน้ำหนักแห้งร้อยละ 0.9-10.3 ของน้ำหนักสด พบปริมาณโปรตีนหยาบ เยื่อใยหยาบ และปริมาณฟอสฟอรัส ร้อยละ 25.3, 13.0 และ 0.02 ตามลำดับ

เมื่อนำผลการศึกษาเปรียบเทียบกับแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ ซึ่งแหนแดงที่เลี้ยงตามปกติ มีร้อยละของน้ำหนักแห้งเท่ากับ 5.0-7.0 ของน้ำหนักสด ปริมาณโปรตีนหยาบและฟอสฟอรัส มีค่าร้อยละ 13.0-30.0 และ 0.2-1.6 ตามลำดับ [6] นั้น จะพบว่าแหนแดงที่ได้จากระบบบำบัด มีค่าร้อยละของปริมาณน้ำหนักแห้ง ปริมาณโปรตีนหยาบและปริมาณฟอสฟอรัส ใกล้เคียงกันกับแหนแดงที่เลี้ยงตามปกติ

สรุปผลการศึกษาวิจัย

ผลจากการศึกษาพบว่า การใช้แหนแดงในระบบบำบัดพืชลอยน้ำ สามารถลดค่าความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรลงได้ โดยเฉพาะมลสารประเภทธาตุอาหาร ทั้งนี้พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5, COD, TSS, TKN, TP และ TCB ของระบบพืชลอยน้ำมีค่าเฉลี่ยระหว่าง (-20.6)-91.5, (-147.6)-41.6, (-26.6)-83.8, (-18.4)-94.9, (-293.3)-28.7 และ 80.8-99.7% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดในการใช้ เนื่องจากแหนแดงจะไม่สามารถทนทานได้ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของมลสารในระดับสูง ทั้งนี้จากการศึกษา พบว่าแหนแดงสามารถเจริญเติบโตและสามารถบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรได้ เมื่อมีค่าความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นในรูปของ BOD_5 ที่ระดับไม่เกิน 25.0 mg/L โดยประมาณ โดยจะพบผลผลิตของแหนแดงมีค่าใกล้เคียงกับแหนแดงที่มีการเลี้ยงตามปกติ และมีปริมาณของโปรตีนหยาบ เยื่อใยหยาบ และปริมาณฟอสฟอรัส ไม่แตกต่างจากการเลี้ยงแหนแดงตามปกติ ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าว สามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้แหนแดงในระบบพืชลอยน้ำในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ศึกษาขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณ และขอขอบคุณ ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม ที่เอื้อเฟื้อให้การสนับสนุนห้องปฏิบัติการ และอำนวยความสะดวก อันทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมปศุสัตว์. 2554. จำนวนสุกรและเกษตรกรผู้เลี้ยงรายจังหวัด ระหว่างปี 2553-2554. กรมปศุสัตว์. ค้นเมื่อ 25 มีนาคม 2555, จาก http://www.dld.go.th/ict/th/images/stories/stat_web/ yearly/2554/pig54/4pig province_53-54.pdf

[2] กรมควบคุมมลพิษ. 2546. **คู่มือการเลือกใช้ การดูแลและบำรุงรักษา ระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรตามแบบมาตรฐานกรมปศุสัตว์.** กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

[3] กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **คู่มือการจัดการฟาร์มสุกรเพื่อแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม.** กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

[4] Davis, L. 1993. **A Handbook of Constructed Wetland.** USDA-Natural Resources Conservation Service. Pennsylvania.

[5] จงรักษ์ ผลประเสริฐ. 2543. ระบบบำบัดแบบธรรมชาติสำหรับการควบคุมมลพิษน้ำและการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่. ว.วิทยาศาสตร์ 54(5): 272-287.

[6] ประยูร สวัสดี และบรรหาญ แดงฉ่ำ. 2544. แหนแดง ชีววิทยาและการใช้ประโยชน์. เอกสารวิชาการเรื่อง ปุ๋ยชีวภาพ. กลุ่มงานวิจัยจุลินทรีย์ดิน กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร.

[7] APHA, AWWA, WPCF. (1992). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters,** 18th ed. American Public Health Association Inc., Washington D.C, USA

[8] AOAC. (2000). **Official method of analysis of AOAC International,** 17th ed. AOAC International. Maryland.

[9] Arora, A. and S. Saxena. 2005. Phosphorus requirements of *Azolla microphylla*. **Soil nutrient & Water management.** 30(2): 25-26.