บทที่ 4
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

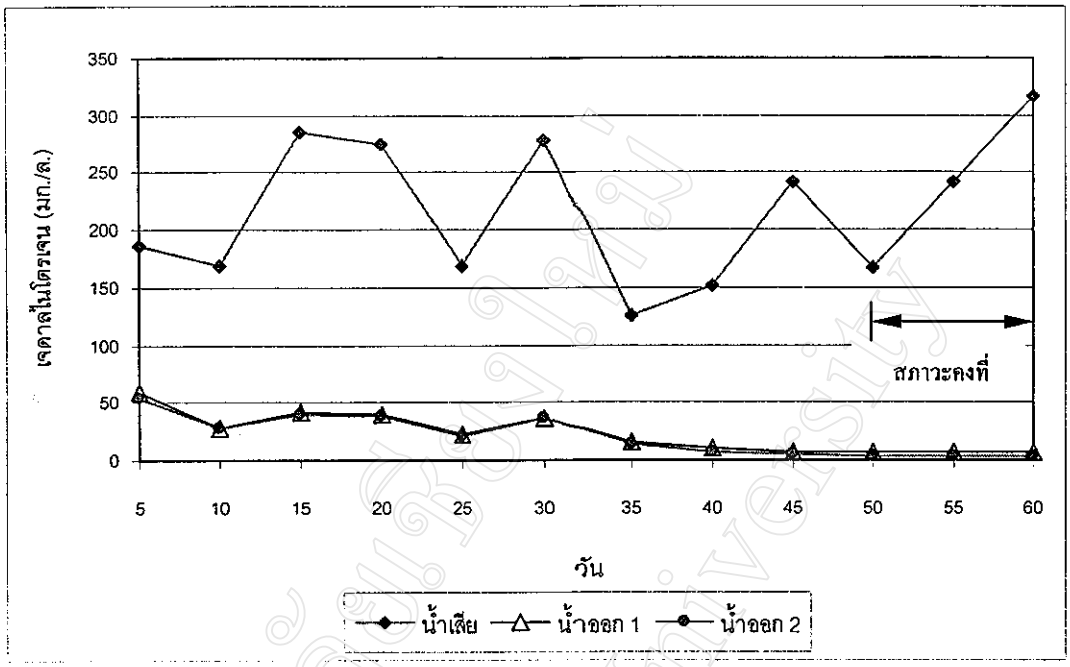
การทดลองนี้เป็นการศึกษาการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียมูลสุกรโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง และถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบในพารามิเตอร์อื่นๆ ด้วย การทดลองแบ่งออกเป็น 4 การทดลอง โดยใช้อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบที่มีการไหลในแนวดิ่งคือ 4.50 ล./ชม. โดยการทดลองที่ 1 ไม่มีการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบ ส่วนการทดลองที่ 2 3 และ 4 มีอัตราการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบแตกต่างกันเป็น 50% 100% และ 200% ตามลำดับ

พืชที่ใช้ในการทดลองเป็นต้นกกรังกา เริ่มการทดลองเมื่อพืชมีอายุประมาณ 2 เดือนและขนาดใกล้เคียงกัน โดยก่อนเริ่มปลูกลงในระบบได้มีการเติมน้ำเสียมูลสุกรเพื่อให้พืชคุ้นเคยโดยค่อยๆ เพิ่มความเข้มข้นจนพืชสามารถเจริญเติบโตด้วยน้ำเสียจริงที่ไม่ได้เจือจาง

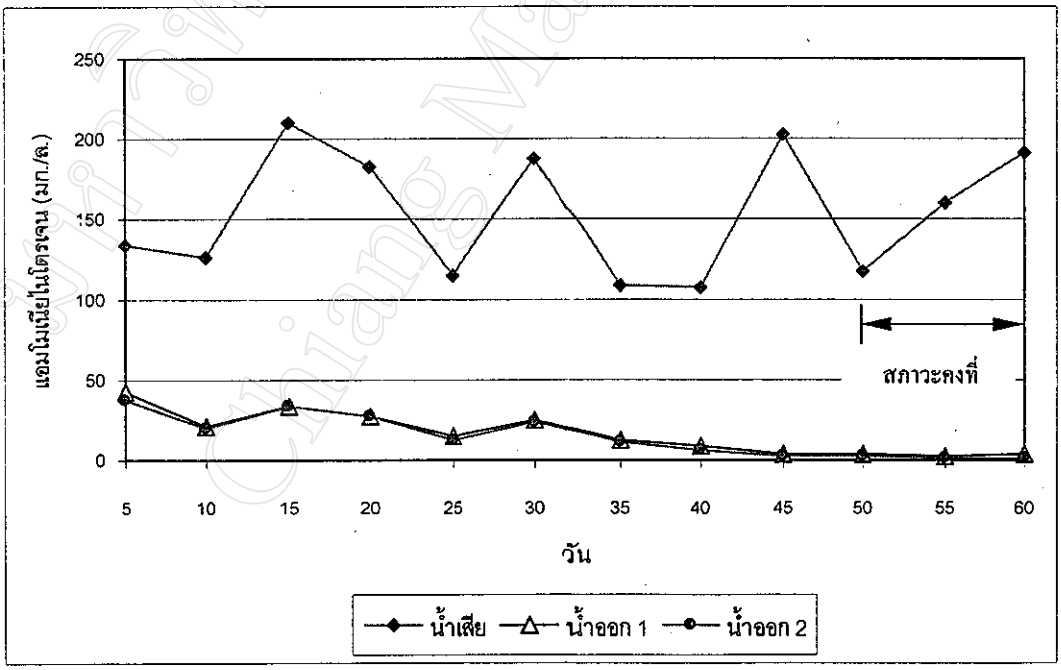
4.1 การทดลองที่ 1 (ไม่มีการหมุนเวียนน้ำ)

4.1.1 การกำจัดไนโตรเจน

ในการทดลองได้ใช้น้ำเสียมูลสุกรซึ่งมีค่าอุณหภูมิของน้ำเสียเข้าระบบเฉลี่ย 26.8 องศาเซลเซียส และมีค่าพีเอชเฉลี่ย 6.9 ทำการทดลองโดยควบคุมให้มีค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เป็น 3.75 ซม./วัน ซึ่งการกำจัดเจดาลไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน พบว่ามีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อทำการทดลองได้ 50 วัน น้ำเสียเข้าระบบมีค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 167.9-317.7 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 242.4 มก./ล. แอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 117.0-191.7 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 156.3 มก./ล. และออกซิไดซ์ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.4-1.2 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 0.7 มก./ล. ในส่วนบนซึ่งเป็นการไหลในแนวดิ่งสามารถลดค่าเจดาลไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 6.3-7.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 6.7 มก./ล. และแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 2.5-3.5 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 3.1 มก./ล. ดังรูปที่ 4.1-4.2 โดยน้ำเสียคือ น้ำเสียที่ปล่อยเข้าสู่ระบบส่วนน้ำออก 1 คือ น้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่ง และน้ำออก 2 คือ น้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนล่างที่เป็นถังกรองทราย และมีการไหลในแนวนอน มีประสิทธิภาพในการกำจัด 97.1% และ 98.0% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในระบบที่มีการไหลในแนวดิ่งมีการออกซิเดชันของไนโตรเจนเกิดขึ้นเนื่องจากมีการส่งผ่านออกซิเจนสู่รากพืช และการให้น้ำแบบครั้งคราวจะช่วยให้เกิดสภาพแอโรบิคได้ดีขึ้นช่วยเสริมปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน สามารถเปลี่ยนรูปแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเจดาลไนโตรเจนให้กลายเป็นไนไตรท์ และไนเตรทได้



รูปที่ 4.1 ค่าเจดาลไนโตรเจน ในการทดลองที่ 1

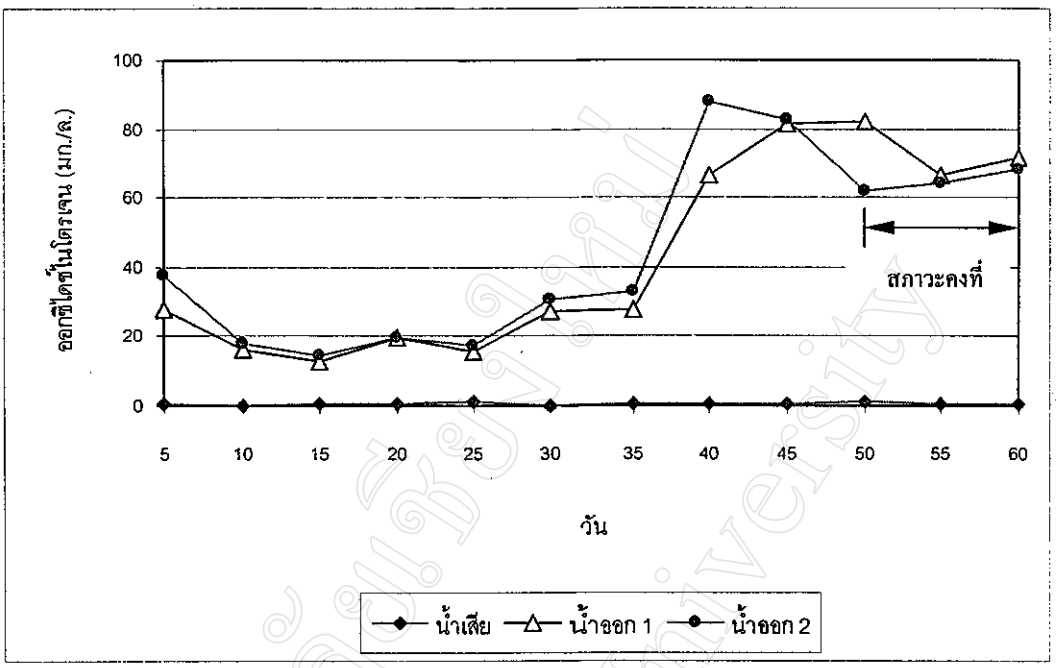


รูปที่ 4.2 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ในการทดลองที่ 1

โดยไนตริฟายอิงแบคทีเรีย ดังสมการที่ 1 และ 2 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นบริเวณผิวดิน และยังเกิดขึ้นบริเวณรอบรากพืชที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้แบคทีเรียเกาะซึ่งมีการส่งผ่านออกซิเจนมายังรากพืชและบริเวณรอบๆที่รากพืชแทรกอยู่ กลไกของปฏิกิริยาเกิดจากการทำงานของออโตโทรฟิกแบคทีเรีย 2 ชนิดร่วมมือกัน โดยไนโตรโซโมแนซทำการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์ และไนโตรแบคเตอร์ทำการออกซิไดซ์ไนไตรท์ต่อไปจนกลายเป็นไนเตรท ซึ่งแบคทีเรียทั้งสองประเภทนี้ได้พลังงานสำหรับการเติบโตจากการทำออกซิเดชันที่เกิดกับอนินทรีย์ไนโตรเจน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณเจดาลไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นผลให้มีปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 66.5-81.9 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 73.4 มก./ล. โดยเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 72.7 มก./ล. ดังรูปที่ 4.3 พบว่ามีการเปลี่ยนรูปเป็นออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 103 เท่า

เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการลดลงของเจดาลไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนอีกเล็กน้อยทำให้เหลือค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 3.2-3.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 3.5 มก./ล. และแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 1.3-2.3 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 1.7 มก./ล. เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดเป็น 98.5%และ 98.8% ตามลำดับ และในขั้นนี้พบว่ามีการเกิดดีไนตริฟิเคชันบ้างเล็กน้อย โดยสามารถลดค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนลงอยู่ในช่วง 62.0-68.2 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 64.9 มก./ล. หรือมีออกซิไดซ์ไนโตรเจนลดลงจากส่วนบนเฉลี่ย 1.1 เท่า หรือลดลง 11.6% เนื่องจากมีสภาพแอนนอกซิกทำให้ไนเตรทไนโตรเจนเปลี่ยนรูปไปเป็นไนไตรท์ไนโตรเจนและก๊าซไนโตรเจนในที่สุดดังสมการที่ 3 โดยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันนี้เกิดขึ้นภายใต้สภาพแอนนอกซิก ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่มีออกซิเจนละลายน้ำหรือมีน้อยมากแต่สามารถนำออกซิเจนซึ่งเป็นสารสุดท้ายในการรับอิเล็กตรอนจากแหล่งอื่นได้แก่ ไนเตรท มาใช้เพื่อการหายใจของแบคทีเรีย (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) เป็นผลให้ค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนมีค่าลดลง การรีดักชันของไนเตรทอีกรูปแบบหนึ่งเกิดขึ้นในสภาวะที่ไม่มีแอมโมเนียและมีไนเตรทเพียงรูปเดียวของไนโตรเจนที่นำไปใช้ได้ในการสังเคราะห์เซลล์ ซึ่งไนเตรทจะเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นแอมโมเนีย (ธีระ เกรอต, 2539)

เมื่อพิจารณาการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำเสียเข้าระบบซึ่งมีค่าเฉลี่ย 243.2 มก./ล. กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนที่มีการไหลในแนวดิ่งซึ่งมีค่าเฉลี่ย 80.1 มก./ล. พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัด 64.3% ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองทรายพบว่ามีการลดลงของไนโตรเจนทั้งหมดอีกเล็กน้อยทำให้เหลือค่าเฉลี่ยเป็น 68.3 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งระบบ 70.3% สรุปผลการกำจัดไนโตรเจนทั้งระบบ แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจน ในการทดลองที่ 1

ตารางที่ 4.1 ผลการกำจัดไนโตรเจน ในการทดลองที่ 1

พารามิเตอร์	น้ำเสีย (มก./ล.)	น้ำออก 1 (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด(%)	น้ำออก 2 (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด(%)
เจดาลไนโตรเจนเฉลี่ย	242.4	6.7	97.1	3.5	98.5
แอมโมเนียไนโตรเจนเฉลี่ย	156.3	3.1	98.0	1.7	98.8
ออกซิไดซ์ไนโตรเจนเฉลี่ย	0.7	73.4	-	64.9	11.6
ไนโตรเจนทั้งหมด	243.2	80.1	64.3	68.3	70.3

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าเจดาลไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน และไนโตรเจนทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสีย กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงระบบมีประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งกับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน

การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดของการทดลองที่ 1 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งกับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถัง

กรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน โดยใช้การทดสอบแบบ t พบว่าไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากการทดลองจะเห็นได้ว่ามีการเกิดไนตริฟิเคชันในส่วนบนซึ่งมีการไหลในแนวดิ่ง และดีไนตริฟิเคชันในส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พิจารณาได้จากน้ำเสียเสียเข้าระบบมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 653.4-1,102.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 838.3 มก./ล. โดยพบว่าน้ำเสียที่ผ่านส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 31.5-52.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 42.0 มก./ล. มีค่าลดลง 796.2 มก./ล. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เนื่องมาจากมีการใช้ความเป็นด่างระหว่างการออกซิเดชันของแอมโมเนียไนโตรเจนเพื่อทำให้ไฮโดรเจนอิออนที่ปล่อยออกมาระหว่างการออกซิเดชันเป็นกลาง ดังสมการที่ 12 (ธีระ เกรอต, 2539)

$$NH_4^+ + 1.83O_2 + 1.98HCO_3^- \rightarrow 0.021C_5H_7O_2N + 0.98NO_3^- + 1.041H_2O + 1.88H_2CO_3 \qquad (12)$$

น้ำเสียที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน มีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 64.2-80.1 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 70.1 มก./ล. มีค่าความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 28.1 มก./ล. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยไนเตรทถูกใช้เป็นสารรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนและมีสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนทำให้เกิดอนุมูลของไบคาร์บอเนตเป็นผลให้ค่าความเป็นด่างรวมเพิ่มขึ้นดังสมการที่ 13 (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

$$C_{10}H_{19}O_3N + 10NO_3^- \rightarrow 5N_2 + NH_3 + 3H_2O + 10HCO_3^- \qquad (13)$$

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าความเป็นด่างรวม เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสีย กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าระบบมีประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งกับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน แสดงว่าเกิดดีไนตริฟิเคชันไม่ดีเท่าที่ควร

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.8-7.2 มีค่าเฉลี่ย 6.9 เมื่อผ่านส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าพีเอชลดลงซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5.8-6.1 ค่าเฉลี่ย 5.9 เนื่องมาจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน มีการปลดปล่อยไฮโดรเจนอิออนในรูปของกรดคาร์บอนิกทำให้มีค่าพีเอชลดลงดังสมการที่ 12 หลังจากนั้นเมื่อน้ำไหลผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนค่า พีเอชจะสูงขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 6.4-6.5 มีค่าเฉลี่ย 6.5 เนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน เกิดอนุมูลของไบคาร์บอเนตทำให้มีค่าพีเอชลดลงดังสมการที่ 13 ระดับพีเอชมีผลกระทบต่อการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

จะอยู่ในช่วง 7.5-8.6 อย่างไรก็ตามเมื่อเคยชินก็สามารถทนได้ที่พีเอชต่ำกว่านี้ (Vymazal et al., 1998) ส่วนค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจะอยู่ในช่วง 7.0-8.0 เมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 6.0 และมากกว่า 8.0 จะทำให้อัตราการเกิดดีไนติฟิเคชันลดลง (Kadlec และ Knight, 1996)

อุณหภูมิก็มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทั้งไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันซึ่งช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันคือ 25-35 องศาเซลเซียสใน Pure Culture และ 30-40 องศาเซลเซียสในดิน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียสจะมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่ออัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน Cooper et al. (1996) รายงานว่าอุณหภูมิต่ำที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของไนโตรโซโมแนซและไนโตรแบคเตอร์คือ 5 และ 4 องศาเซลเซียสตามลำดับ ถ้าสูงกว่า 35 องศาเซลเซียส อัตราการเจริญเติบโตของไนตริฟายอิงแบคทีเรียจะลดลงเนื่องจากโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบหลักในน้ำย่อยของจุลินทรีย์จะเปลี่ยนสภาพและเนื่องด้วยอุณหภูมิที่สูงออกซิเจนละลายน้ำจะมีปริมาณลดลง ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันคือ 40 องศาเซลเซียส และสูงสุดที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันจะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส จากการทดลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่า 26.8 องศาเซลเซียส ส่วนที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าเฉลี่ย 27.2 องศาเซลเซียส และส่วนที่ไหลผ่านถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนมีค่าเฉลี่ย 27.3 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

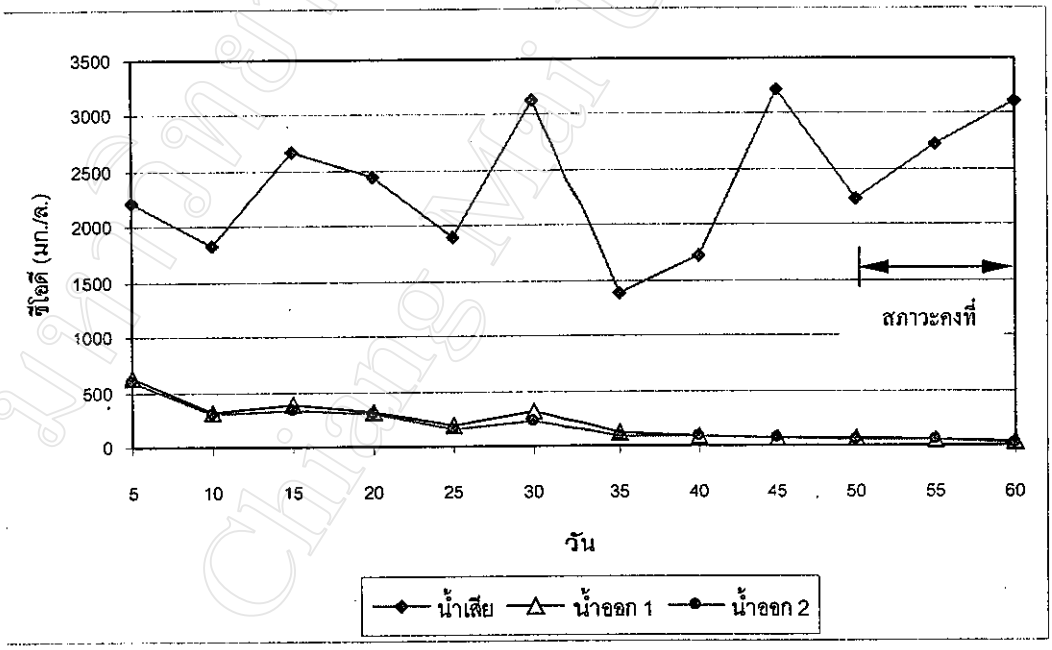
4.1.2 การกำจัดซีโอดี

น้ำเสียเข้าระบบมีค่าซีโอดีแปรผันอยู่ในช่วง 2,227.2-3,121.5 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 2,688.7 มก./ล. มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เฉลี่ย 1,010 กก.ซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) เมื่อเริ่มการทดลองซีโอดีในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนทดลองได้ 50 วันระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ ในส่วนบนซึ่งมีการปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพเหลืออยู่ในช่วง 42.3-72.8 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 56.5 มก./ล. ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัด 97.8% ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะถูกกำจัดอย่างรวดเร็วโดยการตกตะกอน และการกรอง โดยการทำงานของแอโรบิคเฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรียที่เกาะอยู่ตามกรวด ทรายและรากพืช แบคทีเรียชนิดนี้มีหน้าที่ในการกำจัดสารละลายอินทรีย์ซึ่งมีการย่อยสลายแบบแอโรบิค และได้รับออกซิเจนโดยตรงจากบรรยากาศ โดยการแพร่และส่งผ่านออกซิเจนมายังรากพืชและบริเวณรอบๆ ที่รากพืชแทรกอยู่ การย่อยสลายแบบแอโรบิคนี้เป็นไปดังสมการที่ 14 (Vymazal et al., 1998)

$$(CH_2O) + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O \qquad (14)$$

เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่าการลดลงของซีโอดีเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยทำให้เหลือซีโอดีอยู่ในช่วง 26.3-53.8 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 43.7 มก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 98.3% ทั้งนี้เนื่องจากในชั้นนี้มีซีโอดีบางส่วนถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนโดยแบคทีเรียในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งสารอินทรีย์คาร์บอนที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันอาจแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้ตามชนิดของสารคาร์บอนคือ Substrate Nitrate Denitrification ซึ่งใช้สารอินทรีย์คาร์บอนจากแหล่งใดก็ได้ที่ไม่ใช่คาร์บอนในเซลล์จุลินทรีย์ สารอินทรีย์คาร์บอนอาจเป็น ซีโอดี/บีโอดีที่อยู่ในน้ำเสียดังสมการที่ 13 หรือเป็นสารเคมีที่เติมลงไปก็ได้ แหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนที่นิยมเติมให้กับน้ำได้แก่ เมทานอล ส่วน Endogenous Nitrate Denitrification เป็นกรณีที่เกิดดีไนตริฟิเคชันโดยไม่มีแหล่งคาร์บอนภายนอก แต่ใช้แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ ปฏิกิริยานี้จึงเสมือนเป็นการย่อยสลายตัวเอง (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ดังสมการที่ 15 ผลการกำจัดค่าซีโอดีแสดงในรูปที่ 4.4

$$C_5H_7O_2N + NO_3^- \rightarrow CO_2 + NH_3 + 2N_2 + 4HCO_3^- \qquad (15)$$



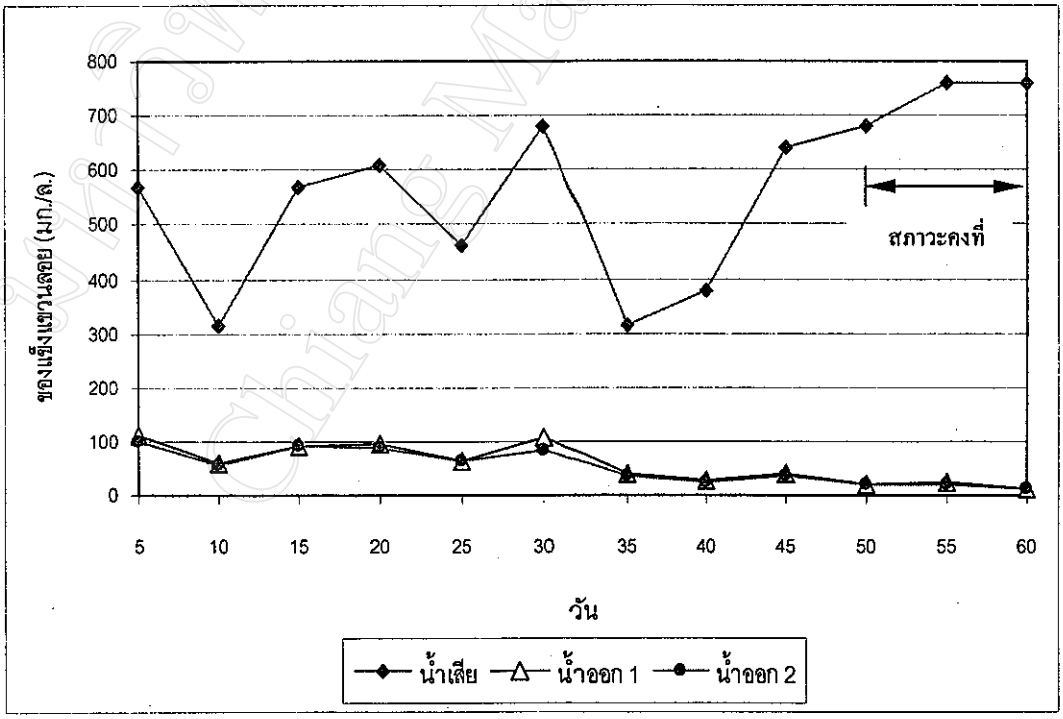
รูปที่ 4.4 ค่าซีโอดี ในการทดลองที่ 1

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ความเชื่อมั่น 95% สำหรับซีโอดี เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสีย กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน

4.1.3 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

เมื่อเริ่มการทดลองค่าของแข็งแขวนลอยมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเมื่อทำการทดลองได้ 50 วัน ระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำเสียเข้าระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยแปรผันอยู่ในช่วง 681.8-761.1 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 734.5 มก./ล. ในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดค่าของแข็งแขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพเหลืออยู่ในช่วง 12.4-24.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 19.5 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัด 97.3%

เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการลดลงของค่าของแข็งแขวนลอยอีกเล็กน้อย ทำให้เหลือค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 10.3-21.0 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 16.9 มก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 97.7% ดังรูปที่ 4.5 ทั้งนี้กลไกการกำจัดของแข็งแขวนลอยเกิดจากการตกตะกอน และการกรอง และการจับติดกับชั้นฟิล์มของจุลินทรีย์ ยิ่งไปกว่านั้นต้นพืชมีแนวโน้มที่จะทำให้ความเร็วของน้ำเสียที่เข้ามาต่ำลง และช่วยกระจายน้ำเข้าได้ทั่วทั้งระบบ ซึ่งไปช่วยเสริมการตกตะกอนให้ดียิ่งขึ้น ทำให้ของแข็งแขวนลอยเกิดการตกตะกอนได้อย่างรวดเร็วและตกค้างระหว่างเม็ดทราย (Grey, 1989)



รูปที่ 4.5 ค่าของแข็งแขวนลอย ในการทดลองที่ 1

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าของแข็งแขวนลอย เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสียกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทราย พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่ถูกกำจัดไปในส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง

4.1.4 ผลการวิเคราะห์พืช

ก. อัตราการเจริญเติบโตของพืช

เมื่อเริ่มการทดลอง จากการสุ่มตัวอย่างต้นกกรังกาจำนวน 5 กอ โดยวัดความสูงของต้นกกทุกต้นในแต่ละกอหาค่าเฉลี่ยความสูง จากนั้นนำค่าเฉลี่ยความสูงของแต่ละกอมาหาค่าเฉลี่ยความสูงในจำนวน 5 กอเพื่อหาค่าเฉลี่ยความสูงของต้นกกทั้งหมดซึ่งได้ค่าเท่ากับ 45 ซม. มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 1,342.50 ก. หลังจากทดลองได้มีการวัดความสูงของต้นกกทุก 30 วัน พืชมีความสูงเฉลี่ยเป็น 56.4 ซม. และต่อมาในวันที่ 60 วัน สูงขึ้นเป็น 58.3 ซม. มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 3,579.50 ก. คิดเป็นน้ำหนักแห้งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 15.535 ตัน/เฮกแตร์ หรือมีอัตราการเจริญเติบโต 0.259 ตัน/(เฮกแตร์.วัน) จะเห็นได้ว่าพืชมีการเจริญเติบโตเร็วในช่วงแรกเนื่องจากอายุยังน้อย สามารถนำสารอาหารต่างๆ ไปใช้ในการเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ และค่อยๆ เติบโตช้าลงเมื่ออายุมากขึ้นสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดอัตราการเจริญเติบโตของพืช ในการทดลองที่ 1

ระยะเวลา (วัน)	ความสูง (ซม.)	ความสูงที่เพิ่มขึ้น (ซม.)	น้ำหนักแห้งเริ่มต้น (ก.)	น้ำหนักแห้งหลังการทดลอง (ก.)	น้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้น (ตัน/เฮกแตร์)	อัตราการเจริญเติบโต (ตัน/(เฮกแตร์.วัน))
0	45.0	-	1,342.50	-	-	-
30	56.4	11.4	-	-	-	-
60	58.3	1.9	-	3,579.50	15.535	0.259

ข.ปริมาณไนโตรเจนสะสมในพืช

เมื่อเริ่มต้นทำการทดลองพบว่าปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในส่วนต่างๆ ของพืชคือ ใบ ลำต้น และราก มีค่า 0.0023 0.0011 และ 0.0026 ก.ไนโตรเจน/ก. น้ำหนักแห้งตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 1 หรือที่เวลา 60 วัน ปริมาณไนโตรเจนในส่วนต่างๆ เพิ่มขึ้นเป็น 0.0074

0.0083 และ 0.0037 ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง มีอัตราการสะสมไนโตรเจน 0.063 0.150 และ 0.025 ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน) ตามลำดับ รวมเป็น 0.237 ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน) คิดเป็น 2.9% ของไนโตรเจนที่เข้าระบบทั้งหมด จะเห็นได้ว่าอัตราการสะสมไนโตรเจนในลำต้นมากกว่าส่วนอื่นๆ รองลงมาเป็นใบ และน้อยที่สุดคือราก ดังตารางที่ 4.3 Koottatep และ Polprasert (1997) ได้ทดลองหาอัตราการสะสมไนโตรเจนในต้นธูปฤาษีในการทดลองหาบทบาทของการนำไนโตรเจนไปใช้โดยพืชเพื่อกำจัดไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์ในเขตอากาศร้อน โดยใช้น้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นในการทดลอง พบว่ามีอัตราการสะสมไนโตรเจนในใบมากกว่าส่วนอื่นๆ รองลงมาเป็นลำต้น และน้อยที่สุดคือราก มีอัตราการสะสมไนโตรเจนเป็น 0.220 0.070 และ 0.010 ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ปริมาณไนโตรเจนสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช ในการทดลองที่ 1

ส่วนของพืช	ก่อนทดลอง (ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง)	หลังการทดลอง (ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง)	อัตราการสะสม (ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน))
ใบ	0.0023	0.0074	0.063
ลำต้น	0.0011	0.0083	0.150
ราก	0.0026	0.0037	0.025

จากผลการทดลองที่ 1 จะเห็นได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชันได้ดีมากในส่วนบนที่มีการปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่ง สามารถลดค่าเจดาลไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนลงอย่างมากเป็นผลให้มีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น อีกทั้งการเกิดไนตริฟิเคชันนี้ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างรวมลดลง และทำให้ค่าพีเอชลดลงตามไปด้วยดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี และของแข็งแขวนลอยได้ดีเช่นกัน เนื่องจากมีการบำบัดด้วยกลไกต่างๆ เช่น การย่อยสลายทางชีวภาพ รวมทั้งกลไกการกรอง และการตกตะกอน ในส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน สามารถกำจัดเจดาลไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนได้อีกเล็กน้อย ส่วนค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนพบว่าลดลงเล็กน้อยเนื่องมาจากการเกิดดีไนตริฟิเคชัน ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างรวมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ในส่วนของถังกรองทรายนี้สามารถกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยได้เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย เนื่องจากมีการใช้ค่าซีโอดีเป็นแหล่งคาร์บอนในการเกิดดีไนตริฟิเคชัน และมีการกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยกลไกการกรอง และการตกตะกอน เมื่อพิจารณาทั้งระบบแล้วการทดลองนี้สามารถบำบัดให้น้ำออกมีค่าเจดาลไนโตรเจน พีเอช ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรของจังหวัดเชียงใหม่ และกระทรวงวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ดังตารางที่ 4.4 สามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนยังมีค่าสูงอยู่จึงทดลองหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบ 50% ในการทดลองที่ 2

ตารางที่ 4.4 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร

พารามิเตอร์	กระทรวงวิทยาศาสตร์		จังหวัดเชียงใหม่		
	การเลี้ยงสุกรประเภท ก	การเลี้ยงสุกรประเภท ข และ ค	ฟาร์มขนาดเล็ก	ฟาร์มขนาดกลาง	ฟาร์มขนาดใหญ่
ความเป็นกรดและด่าง (พีเอช)	5.5-9.0	5.5-9.0	5.0-9.0	5.0-9.0	5.0-9.0
บีโอดี	≤ 60 มก./ล.	≤ 100 มก./ล.	≤ 120 มก./ล.	≤ 100 มก./ล.	≤ 60 มก./ล.
สารแขวนลอย	≤ 150 มก./ล.	≤ 200 มก./ล.	≤ 300 มก./ล.	≤ 150 มก./ล.	≤ 100 มก./ล.
ซีโอดี	≤ 300 มก./ล.	≤ 400 มก./ล.	≤ 500 มก./ล.	≤ 400 มก./ล.	≤ 250 มก./ล.
เจดาลไนโตรเจน	≤120 มก./ล.	≤ 200 มก./ล.	≤ 300 มก./ล.	≤ 200 มก./ล.	≤ 100 มก./ล.

ที่มา : ประกาศจังหวัดเชียงใหม่ พ.ศ. 2541 และร่างประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2543

หมายเหตุ : การเลี้ยงสุกรประเภท ก คือ ฟาร์มสุกรขนาดใหญ่ หมายถึง การเลี้ยงสุกรพ่อพันธุ์ แม่พันธุ์ สุกรขุน หรือลูกสุกร ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ที่มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์เกินกว่า 600 หน่วย

การเลี้ยงสุกรประเภท ข คือ ฟาร์มสุกรขนาดกลาง หมายถึง การเลี้ยงสุกรพ่อพันธุ์ แม่พันธุ์ สุกรขุน หรือลูกสุกร ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ที่มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ตั้งแต่ 60 หน่วย แต่ไม่เกิน 600 หน่วย

การเลี้ยงสุกรประเภท ค คือ ฟาร์มขนาดเล็ก หมายถึง การเลี้ยงสุกรพ่อพันธุ์ แม่พันธุ์ สุกรขุน หรือลูกสุกร ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ที่มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ตั้งแต่ 6 หน่วย แต่ไม่เกิน 60 หน่วย

(น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ 1 หน่วย มีค่าเท่ากับสุกรน้ำหนักรวม 500 กก.)

4.2 การทดลองที่ 2 (มีการหมุนเวียนน้ำ 50%)

ในการทดลองที่ 2 ทำการทดลองต่อเนื่องจากการทดลองที่ 1 โดยไม่มีการตัดต้นพืชก่อนเริ่มเดินระบบ ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการหมุนเวียนน้ำกลับเข้ามาผสมกับน้ำเสียที่เข้าระบบที่อัตราการหมุนเวียนน้ำ 50% ทำให้มีค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เปลี่ยนแปลงไปเป็น 5.63 ซม./วัน ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อทำการทดลองได้ 80 วัน ซึ่งมีค่าอุณหภูมิของน้ำเสียเข้าระบบเฉลี่ย 24.9 องศาเซลเซียส และมีค่าพีเอชเฉลี่ย 7.3

4.2.1 การกำจัดไนโตรเจน

น้ำเสียมีค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 318.4-596.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 419.8 มก./ล. แอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 240.2-432.2 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 305.8 มก./ล. และออกซิไดซ์ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.7-1.9 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 1.1 มก./ล. เมื่อมีการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านถังกรองทรายกลับไปผสมกับน้ำเสียทำให้น้ำที่เข้าระบบมีการเจือจาง และน้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับเป็นน้ำเข้าระบบมีค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 182.5-333.2 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 237.3 มก./ล. แอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 112.0-268.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 168.6 มก./ล. และออกซิไดซ์ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 22.4-40.6 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 27.6 มก./ล. ในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดค่าเจดาลไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 5.8-9.6 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 7.4 มก./ล. และแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 3.5-6.0 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 4.9 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัด 98.2% และ 98.4% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 เป็นผลให้มีปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 124.5-175.4 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 142.3 มก./ล. โดยเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 141.2 มก./ล. หรือมีการเปลี่ยนรูปเป็นออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 126 เท่าเมื่อพิจารณาระบบโดยรวม

เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการการลดลงของเจดาลไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนอีกเล็กน้อย ทำให้เหลือค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 3.7-4.9 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 4.6 มก./ล. และแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 2.0-2.9 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 2.5 มก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 98.9%และ 99.2% ตามลำดับ และมีการเกิดดีไนตริฟิเคชันดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1 โดยพบว่าค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนลดลงเหลือ 45.4-65.1 มก./ล. หรือมีค่าเฉลี่ย 52.7 มก./ล. ซึ่งแสดงว่ามีออกซิไดซ์ไนโตรเจนลดลงจากส่วนบนเฉลี่ย 2.7 เท่า หรือลดลง 62.9%

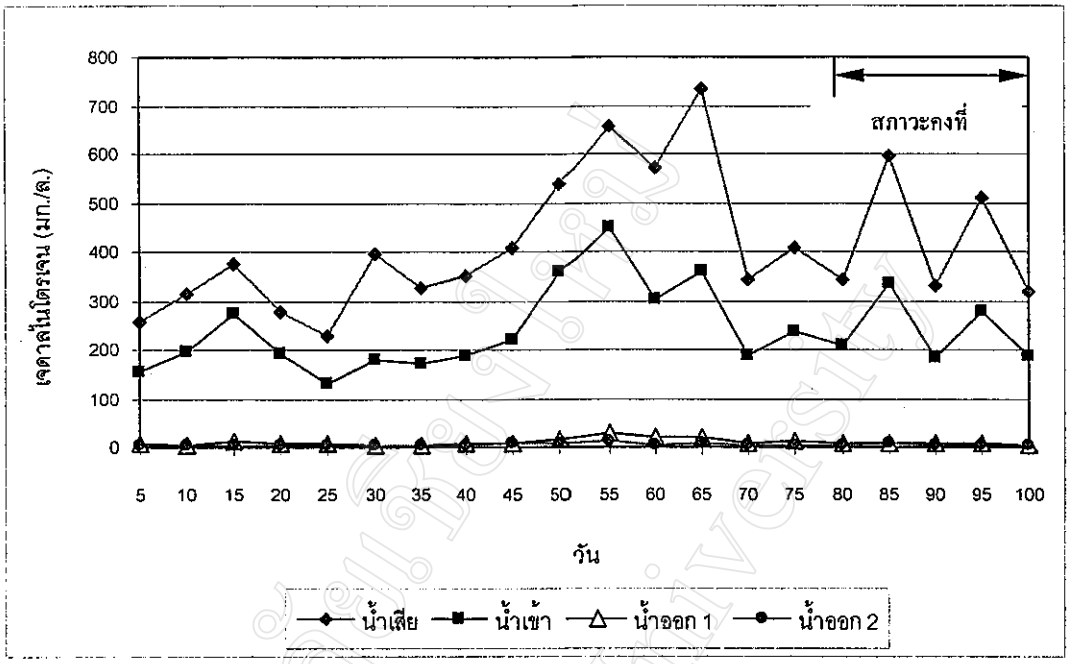
พิจารณาการกำจัดค่าไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำเสียเข้าระบบมีค่าเฉลี่ย 421.0 มก./ล. กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งซึ่งมีค่าเฉลี่ย 149.7 มก./ล. พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัด 62.9% ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองทรายพบว่ามีการลดลงของไนโตรเจนทั้งหมดทำให้เหลือค่าเฉลี่ยเป็น 57.3 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งระบบ 85.7% ผลการกำจัดเจดาลไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน และออกซิไดซ์ไนโตรเจน แสดงในรูปที่ 4.6-4.8 และผลการกำจัดไนโตรเจนสรุปในตารางที่ 4.5

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าเจดาลไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน และไนโตรเจนทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสีย กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแสดงว่าระบบมีประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ยกเว้นค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในชั้นถังกรองทรายมีประสิทธิภาพในการเกิดดีไนตริฟิเคชัน

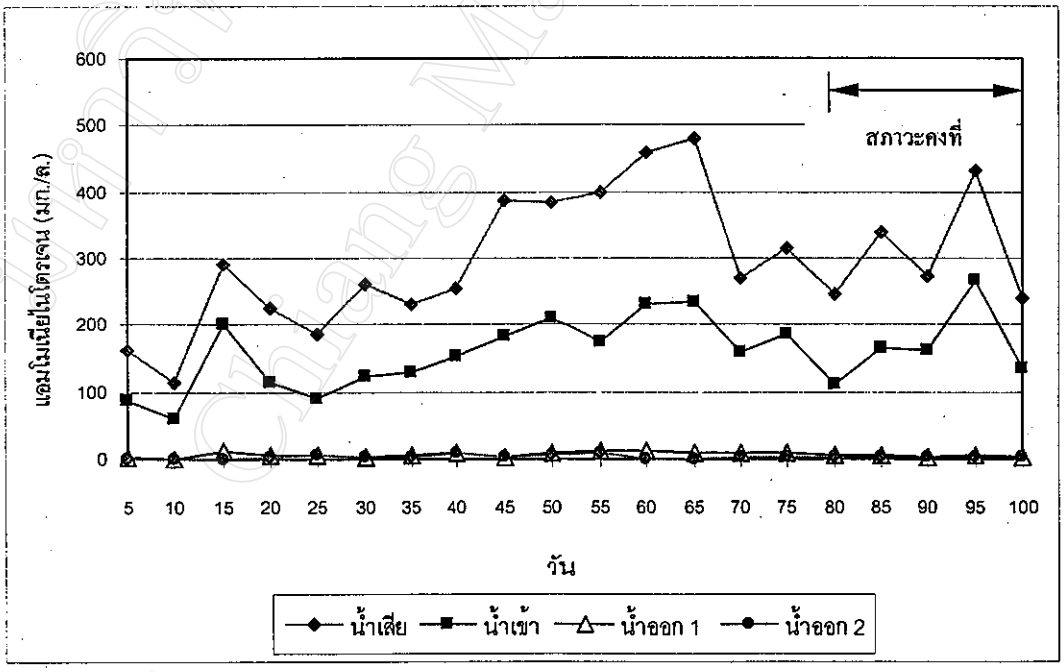
การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดของการทดลองที่ 2 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน โดยใช้การทดสอบแบบ t พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ดีขึ้นในชั้นถังกรองทราย

ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1 จะเห็นได้ว่ามีการเกิดไนตริฟิเคชันในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งและเกิดดีไนตริฟิเคชันในส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พิจารณาที่สภาวะคงที่จากน้ำเสียมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 785.0-1,240.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 1,016.6 มก./ล. และน้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 623.7-850.6 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 724.5 มก./ล. โดยพบว่าน้ำเสียที่ผ่านส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 43.2-63.6 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 50.2 มก./ล. มีค่าความเป็นด่างลดลง 674.3 มก./ล. ชี้ให้เห็นว่ามีการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

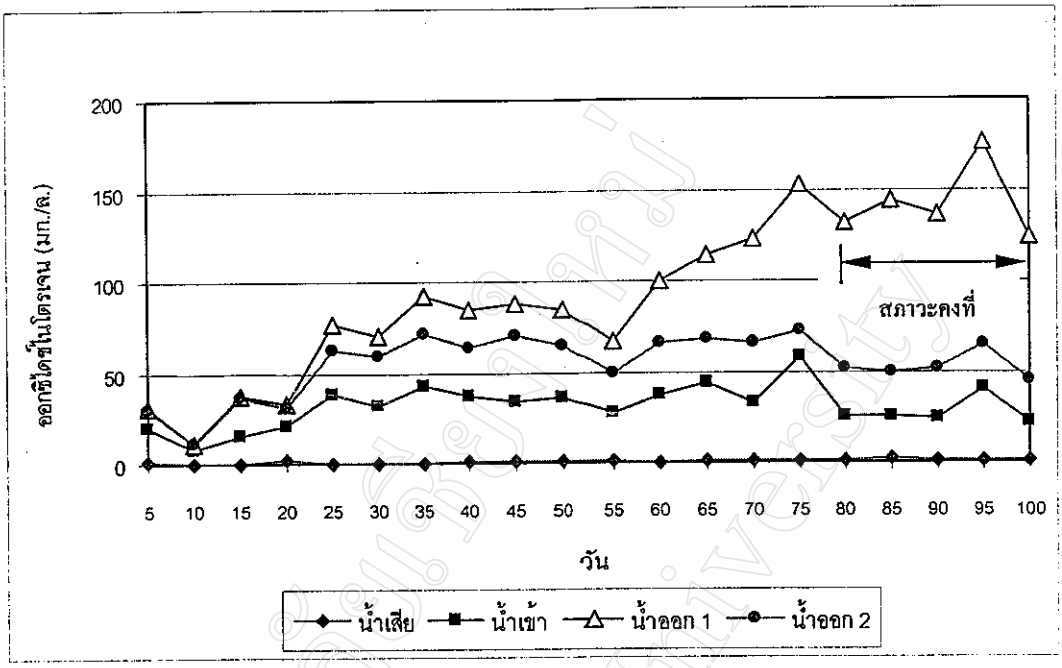
น้ำเสียที่ผ่านส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 57.0-74.9 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 68.0 มก./ล. และมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย 17.8 มก./ล. ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในส่วนนี้



รูปที่ 4.6 ค่าเจดาลไนโตรเจน ในการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.7 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ในการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจน ในการทดลองที่ 2

ตารางที่ 4.5 ผลการกำจัดไนโตรเจน ในการทดลองที่ 2

พารามิเตอร์	น้ำเสีย (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก1 (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด(%)	น้ำออก2 (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด(%)
เคดาลไนโตรเจนเฉลี่ย	419.8	237.3	7.4	98.2	4.6	98.9
แอมโมเนียไนโตรเจนเฉลี่ย	305.8	168.6	4.9	98.4	2.5	99.2
ออกซิไดซ์ไนโตรเจนเฉลี่ย	1.1	27.6	142.3	-	52.7	62.9
ไนโตรเจนทั้งหมด	421.0	264.9	149.7	62.9	57.3	85.7

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าความเป็นด่างรวม เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสีย กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.9-7.7 มีค่าเฉลี่ย 7.3 ในน้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.7-7.5 มีค่าเฉลี่ย 7.1 เมื่อผ่านส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่งมีค่าพีเอชลดลงอยู่ในช่วง 5.3-6.6 มีค่าเฉลี่ย 6.0 เนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน หลังจากนั้นเมื่อไหลผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนค่าพีเอชจะสูงขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 6.1-7.8 มีค่าเฉลี่ย 6.7 จะเห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1

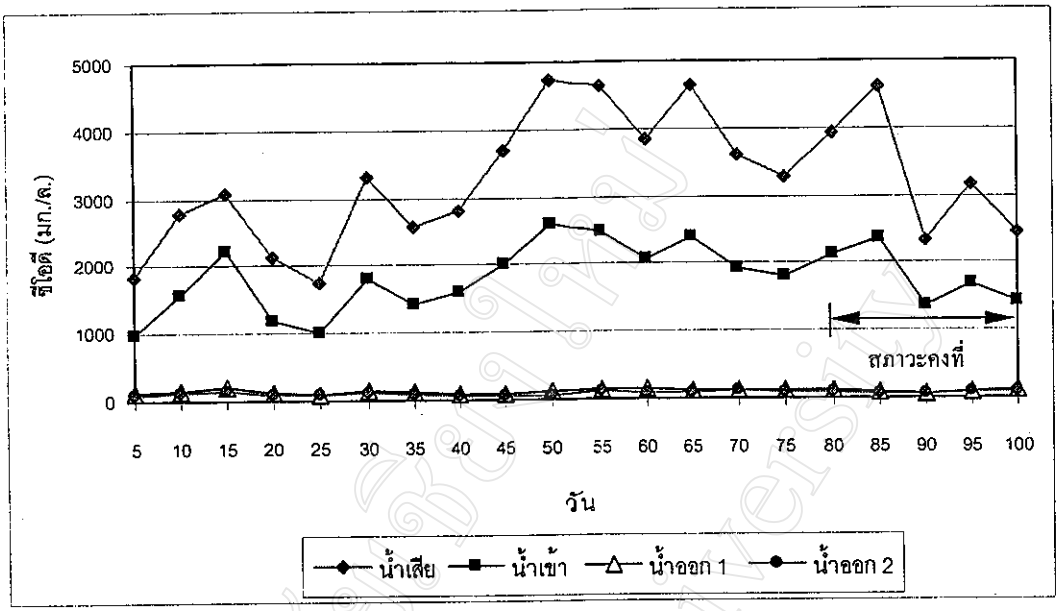
จากการทดลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเสียมีค่า 24.9 องศาเซลเซียส น้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับมีค่า 25.7 องศาเซลเซียส ส่วนที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าเฉลี่ย 25.8 องศาเซลเซียส และส่วนที่ไหลผ่านถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนมีค่าเฉลี่ย 26.1 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

4.2.2 การกำจัดซีโอดี

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำเสียมีค่าซีโอดีแปรผันอยู่ในช่วง 2,341.4-4,603.2 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 3,301.5 มก./ล. และเมื่อผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับทำให้มีการเจือจาง เป็นผลให้น้ำเสียที่ผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับเป็นน้ำเข้าระบบมีค่าซีโอดีแปรผันอยู่ในช่วง 1375.0-2,353.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 1,791.3 มก./ล. มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เฉลี่ย 1,240 กก.ซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ในส่วนบนซึ่งลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพเหลืออยู่ในช่วง 56.8-118.0 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 94.1 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัด 97.0% ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังเกิดการตกตะกอน การกรองโดยตัวกลางกรวด ทราย และการกรองผ่านต้นพืชดังกลไกที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.2

เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการลดลงของค่าซีโอดีอีกเล็กน้อย ทำให้เหลือซีโอดีอยู่ในช่วง 45.7-92.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 74.0 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 97.6% ทั้งนี้เนื่องจากในชั้นนี้พบว่ามีซีโอดีบางส่วนถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนโดยแบคทีเรียในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ดังสมการที่ 13 ผลการกำจัดค่าซีโอดีแสดงในรูปที่ 4.9

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าซีโอดีเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสียกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทราย พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน



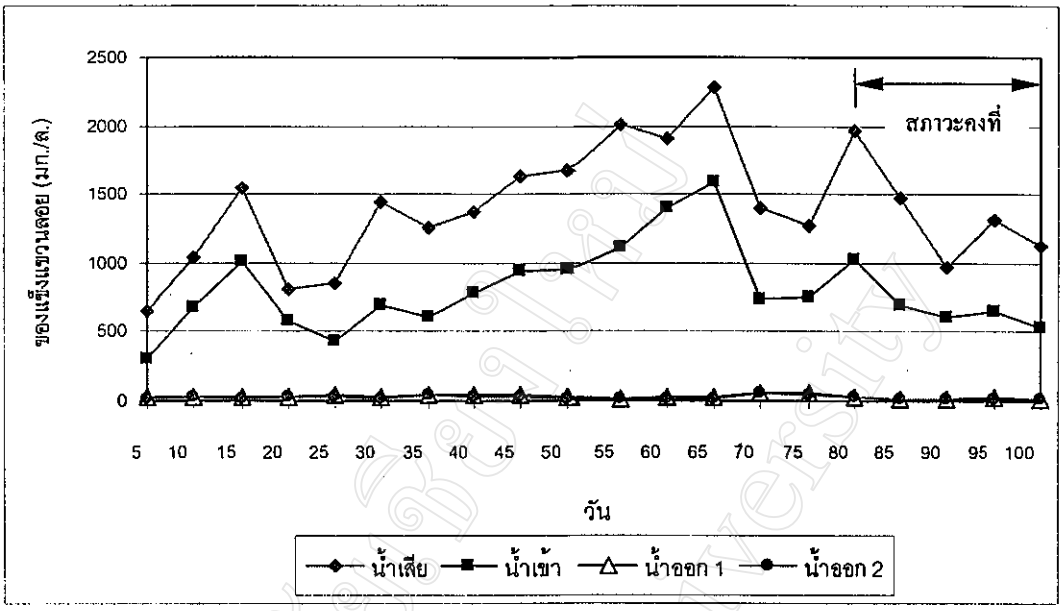
รูปที่ 4.9 ค่าซีโอดี ในการทดลองที่ 2

4.2.3 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำเสียมีค่าของแข็งแขวนลอยแปรผันอยู่ในช่วง 972.8-1,964.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 1,368.9 มก./ล. และเมื่อผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับทำให้มีการเจือจาง เป็นผลให้น้ำเสียที่ผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับเป็นน้ำเข้าระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยแปรผันอยู่ในช่วง 536.7-1,022.1 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 699.6 มก./ล. ในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดค่าของแข็งแขวนลอยลงอย่างมีประสิทธิภาพเหลืออยู่ในช่วง 15.1-32.3 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 22.8 มก./ล. หรือมีประสิทธิภาพในการกำจัด 98.3%

เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการลดลงของค่าของแข็งแขวนลอยอีกเล็กน้อยทำให้เหลือค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 10.2-26.0 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 16.2 มก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 98.8% ดังรูปที่ 4.10 ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการตกตะกอน การกรองผ่านต้นพืชและการจับติดกับชั้นฟิล์มของจุลินทรีย์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.3

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าของแข็งแขวนลอย เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสียกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทราย พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่ถูกกำจัดไปในส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง



รูปที่ 4.10 ค่าของแข็งแขวนลอย ในการทดลองที่ 2

4.2.4 ผลการวิเคราะห์พืช

ก. อัตราการเจริญเติบโตของพืช

ทำการทดลองต่อเนื่องจากการทดลองที่ 1 โดยไม่มีการตัดต้นพืช เมื่อเริ่มการทดลองต้นกกรังกามีความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 58.3 ซม. มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 3,579.50 ก. หลังจากทดลองได้มีการวัดความสูงของต้นกกทุก 30 วัน พบว่าพืชมีความสูงเฉลี่ยเป็น 73.5 88.1 และ 100.9 ซม. ตามลำดับ และหลังจากนั้นอีก 10 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองพืชมีความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 101.2 ซม. มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 7,603.35 ก. คิดเป็นน้ำหนักแห้งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 27.94 ตัน/เฮกแตร์ หรือมีอัตราการเจริญเติบโต 0.279 ตัน/(เฮกแตร์.วัน) จะเห็นได้ว่าพืชมีการเจริญเติบโตเร็วในช่วงแรกและค่อยๆ เติบโตช้าลงเมื่ออายุมากขึ้นดังสรุปในดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดอัตราการเจริญเติบโตของพืช ในการทดลองที่ 2

ระยะเวลา (วัน)	ความสูง (ซม.)	ความสูงที่เพิ่มขึ้น (ซม.)	น้ำหนักแห้งเริ่มต้น (ก.)	น้ำหนักแห้งหลังการทดลอง (ก.)	น้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้น (ตัน/เฮกแตร์)	อัตราการเจริญเติบโต (ตัน/(เฮกแตร์.วัน))
0	58.3	-	3,579.50	-	-	-
30	73.5	15.2	-	-	-	-
60	88.1	14.6	-	-	-	-
90	100.9	12.8	-	-	-	-
100	101.2	3.3	-	7,603.35	27.94	0.279

ข.ปริมาณไนโตรเจนสะสมในพืช

เมื่อเริ่มต้นทำการทดลองพบว่าปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในส่วนต่างๆ ของพืชคือ ใบ ลำต้น และราก มีค่า 0.0074 0.0083 และ 0.0037 ก.ไนโตรเจน/ก. น้ำหนักแห้งตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 2 หรือที่เวลา 100 วัน ปริมาณไนโตรเจนในส่วนต่างๆ คือ ใบ ลำต้น และราก เพิ่มขึ้นเป็น 0.0261 0.0139 และ 0.0107 ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง มีอัตราการสะสมไนโตรเจน 0.248 0.295 และ 0.118 ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน) ตามลำดับ รวมเป็น 0.661 ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน) คิดเป็น 4.3% ของปริมาณไนโตรเจนที่เข้าระบบทั้งหมด จะเห็นได้ว่ามีอัตราการสะสมไนโตรเจนในลำต้นมากกว่าส่วนอื่นๆ รองลงมาเป็นใบ และน้อยที่สุดคือราก ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปริมาณไนโตรเจนสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช ในการทดลองที่ 2

ส่วนของพืช	ก่อนทดลอง (ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง)	หลังการทดลอง (ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง)	อัตราการสะสม (ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน))
ใบ	0.0074	0.0261	0.248
ลำต้น	0.0083	0.0139	0.295
ราก	0.0037	0.0107	0.118

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ 1 กับการทดลองที่ 2 โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเจดาลไนโตรเจนในส่วนที่ปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งดังตารางที่ 4.8 โดยการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในการทดลองที่ 2 เมื่อมีการหมุนเวียนน้ำ 50% กลับเข้าระบบทำให้มีประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชันได้ดีกว่าการทดลองที่ 1 ซึ่งไม่มีการหมุนเวียนน้ำ อีกทั้งการเกิดไนตริฟิเคชันนี้ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างรวมลดลงทำให้ค่าพีเอชลดลงตามไปด้วย ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยมีค่าใกล้เคียงกันในทั้งสองการทดลอง และเมื่อพิจารณาในส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนโดยเปรียบเทียบการลดลงของออกซิไดซ์ไนโตรเจน ดังตารางที่ 4.8 โดยการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในการทดลองที่ 2 มีประสิทธิภาพในการเกิดดีไนตริฟิเคชันได้ดีกว่าการทดลองที่ 1 อีกทั้งการเกิดดีไนตริฟิเคชันนี้ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างรวมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยมีค่าใกล้เคียงกันในทั้งสองการทดลอง และเมื่อพิจารณาการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดที่ประสิทธิภาพการกำจัดโดยรวมดังตารางที่ 4.8 ด้วยการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความ

แปรปรวนที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าการทดลองที่ 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ดีกว่าการทดลองที่ 1

จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการทดลองหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบทำให้เกิดดีไนตริฟิเคชันได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาทั้งระบบแล้วการทดลองที่ 2 สามารถบำบัดให้น้ำออกมีค่าเจดาลไนโตรเจน พีเอช ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรของจังหวัดเชียงใหม่ และกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ดังตารางที่ 4.4 สามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนยังมีค่าสูงอยู่จึงทดลองหมุนเวียนน้ำในอัตราที่สูงขึ้นในการทดลองที่ 3

ตารางที่ 4.8 การเกิดไนตริฟิเคชัน ดีไนตริฟิเคชัน และประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ 1 กับการทดลองที่ 2

พารามิเตอร์	ส่วนที่พิจารณา	หน่วย	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2
เจดาลไนโตรเจน (ไนตริฟิเคชัน)	ปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่ง	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	97.1*	98.2*
ออกซิไดซ์ไนโตรเจน (ดีไนตริฟิเคชัน)	ถังกรองทรายและมีการไหลในแนวนอน	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	11.6*	62.9**
		จำนวนเท่าที่ลดลง	1.1	2.7
ไนโตรเจนทั้งหมด	ทั้งระบบ	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	70.3*	85.7*

หมายเหตุ : * คิดจากน้ำเสียที่เข้าระบบก่อนผสมกับน้ำที่หมุนเวียนกลับ

** คิดจากน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งแล้ว

4.3 การทดลองที่ 3 (มีการหมุนเวียนน้ำ 100%)

ในการทดลองที่ 3 นี้ได้มีการปลูกพืชใหม่ทั้งหมดเพื่อไม่ให้เกิดข้อจำกัดเนื่องจากอายุของพืช การเตรียมและปลูกพืชชุดใหม่ดำเนินการเช่นเดียวกับก่อนเริ่มการทดลองที่ 1 โดยเมื่อเริ่มการทดลองพืชมีอายุประมาณ 2 เดือนเท่ากัน

4.3.1 การกำจัดไนโตรเจน

ในการทดลองที่ 3 มีการหมุนเวียนน้ำ 100% ทำให้มีค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เปลี่ยนแปลงไปเป็น 7.5 ซม./วัน ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อทำการทดลองได้ 55 วัน ซึ่งมีค่าอุณหภูมิของน้ำเสียเข้าระบบเฉลี่ย 25.6 องศาเซลเซียส และมีค่าพีเอชเฉลี่ย 7.1 น้ำเสียมีค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 286.5-346.1 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 313.8 มก./ล. แอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 208.4-273.6 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 237.9 มก./ล. และออกซิไดซ์ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.1-1.3 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 0.8 มก./ล. เมื่อมีการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านถังกรองทรายกลับไปผสมกับน้ำเสียทำให้น้ำที่เข้าระบบเกิดการเจือจาง และน้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับเป็นน้ำเข้าระบบมีค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 142.4-186.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 170.0 มก./ล. แอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 102.4-146.8 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 126.0 มก./ล. และออกซิไดซ์ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 7.5-14.1 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 9.3 มก./ล. ในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดค่าเจดาลไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 6.9-8.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 7.8 มก./ล. และแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 6.2-8.1 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 7.2 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัด 97.5% และ 97.0% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 เป็นผลให้มีปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 74.3-89.0 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 81.7 มก./ล. โดยเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 80.9 มก./ล. หรือมีการเปลี่ยนรูปเป็นออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 109 เท่าเมื่อพิจารณาระบบโดยรวม

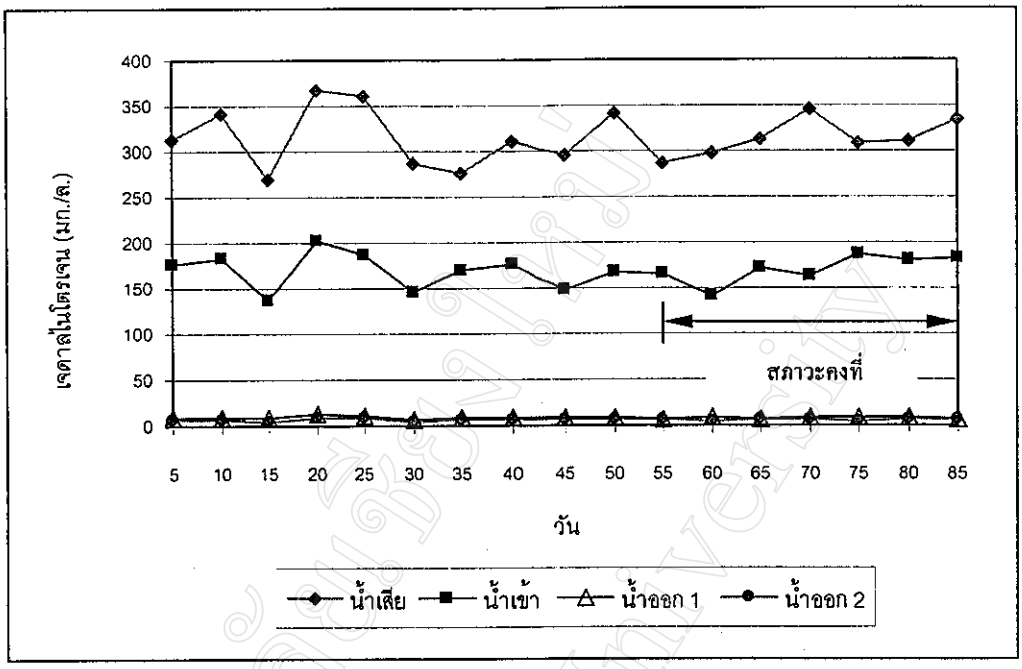
เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการลดลงของเจดาลไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนอีกเล็กน้อยทำให้เหลือค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 4.5-6.6 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 5.8 มก./ล. และแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 3.7-6.3 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 4.8 มก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 98.2%และ 98.0% ตามลำดับ และมีการเกิดดีไนตริฟิเคชันดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1 โดยพบว่าค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนลดลงเหลือ 13.3-18.1 มก./ล. หรือมีค่าเฉลี่ย 16.1 มก./ล. ซึ่งแสดงว่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนลดลงจากส่วนบนเฉลี่ย 5.1 เท่า หรือลดลง 80.3%

เมื่อพิจารณาการกำจัดค่าไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำเสียเข้าระบบมีค่าเฉลี่ย 314.6 มก./ล. กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าเฉลี่ย 89.5 มก./ล. พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัด 71.5% ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองทรายพบว่า มีการลดลงของไนโตรเจนทั้งหมดทำให้เหลือค่าเฉลี่ยเป็น 21.9 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งระบบ 93.0% ผลการกำจัดเจดาลไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน และออกซิไดซ์ไนโตรเจน แสดงในรูปที่ 4.11-4.13 และผลการกำจัดไนโตรเจนสรุปในตารางที่ 4.9

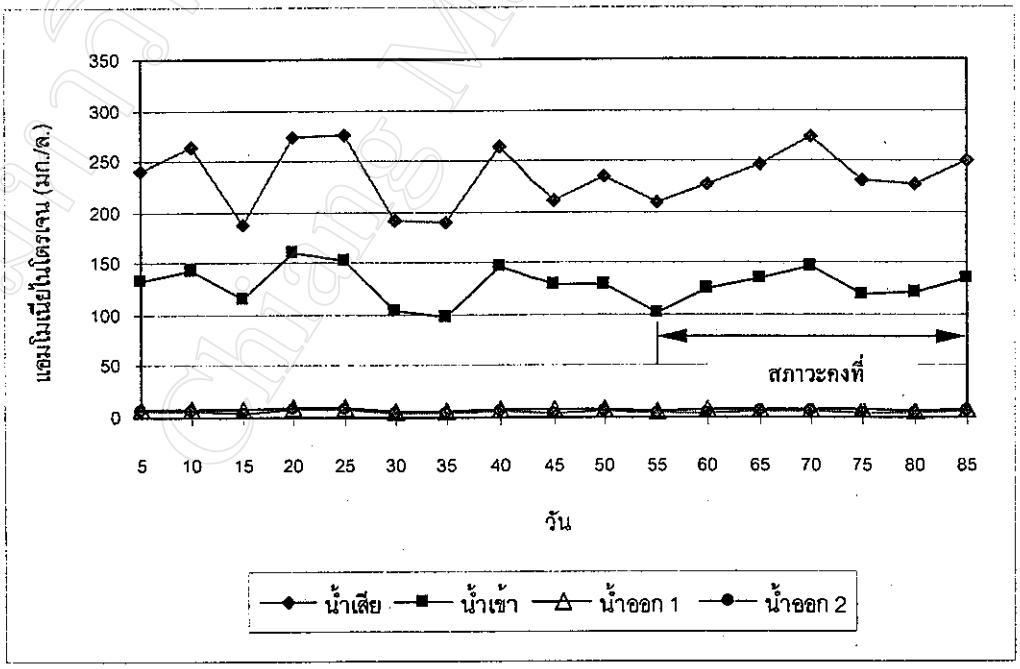
ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าเจดาลไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน และไนโตรเจนทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสีย กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแสดงว่าระบบมีประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ยกเว้นค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจน และค่าไนโตรเจนทั้งหมดที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในชั้นถังกรองทรายมีประสิทธิภาพในการเกิดดีไนตริฟิเคชันได้ดี

การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดของการทดลองที่ 3 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการบำกำจัดบัดเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน โดยใช้การทดสอบแบบ t พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ดีขึ้นในชั้นถังกรองทราย

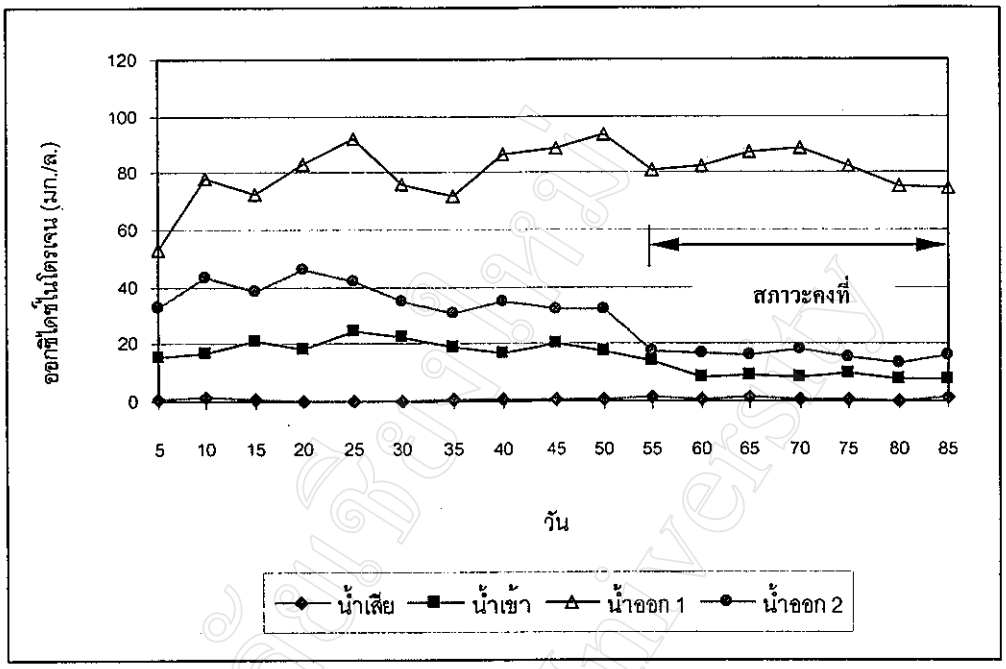
ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1 จะเห็นได้ว่ามีการเกิดไนตริฟิเคชันในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งและเกิดดีไนตริฟิเคชันในส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พิจารณาได้จากน้ำเสียมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 923.5-1245.8 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 1032.0 มก./ล. น้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 588.0-681.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 637.4 มก./ล. โดยพบว่าน้ำเสียที่ผ่านส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 82.5-134.5 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 104.5 มก./ล. มีค่าความเป็นด่างลดลง 532.9 มก./ล. ชี้ให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน น้ำเสียที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน มีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 256.0-350.9 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 298.3 มก./ล. มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 193.8 มก./ล. ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในส่วนนี้



รูปที่ 4.11 ค่าเจดาลไนโตรเจน ในการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.12 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ในการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจน ในการทดลองที่ 3

ตารางที่ 4.9 ผลการกำจัดไนโตรเจน ในการทดลองที่ 3

พารามิเตอร์	น้ำเสีย (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก 1 (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด(%)	น้ำออก2 (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด(%)
เจดาลไนโตรเจนเฉลี่ย	313.8	170.0	7.8	97.5	5.8	98.2
แอมโมเนียไนโตรเจนเฉลี่ย	237.9	126.0	7.2	97.0	4.8	98.0
ออกซิไดซ์ไนโตรเจนเฉลี่ย	0.8	9.3	81.7	-	16.1	80.3
ไนโตรเจนทั้งหมด	314.6	179.3	89.5	71.5	21.9	93.0

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าความเป็นด่างรวม เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสีย กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.9-7.2 มีค่าเฉลี่ย 7.1 ในน้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.8-7.1 มีค่าเฉลี่ย 7.0 เมื่อผ่านส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่งมีค่าพีเอชลดลงอยู่ในช่วง 5.7-6.0 มีค่าเฉลี่ย 5.9 เนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน หลังจากนั้นเมื่อไหลผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนค่าพีเอชจะสูงขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 6.8-6.9 มีค่าเฉลี่ย 6.8 จะเห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1

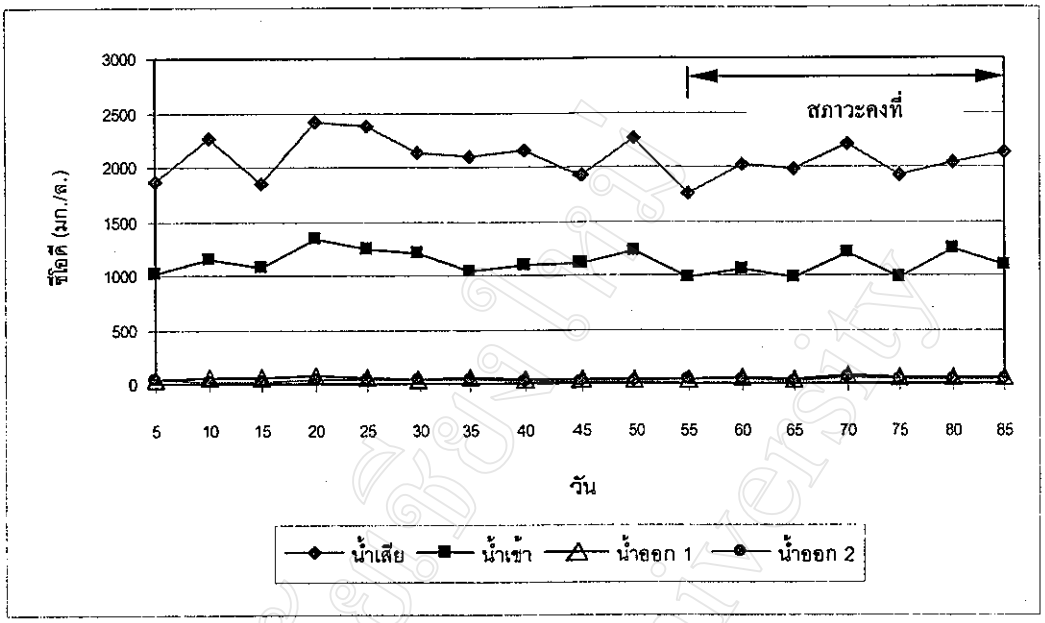
จากการทดลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเสียมีค่า 25.6 องศาเซลเซียส น้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับมีค่า 25.7 องศาเซลเซียส ส่วนที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าเฉลี่ย 25.8 องศาเซลเซียส และส่วนที่ไหลผ่านถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนมีค่าเฉลี่ย 25.7 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

4.3.2 การกำจัดซีโอดี

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำเสียมีค่าซีโอดีแปรผันอยู่ในช่วง 1,761.3-2,207.3 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 2,008.8 มก./ล. และเมื่อผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับทำให้มีการเจือจาง เป็นผลให้น้ำเสียที่ผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับเป็นน้ำเข้าระบบมีค่าซีโอดีแปรผันอยู่ในช่วง 981.3-1,254.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 1,083.4 มก./ล. มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เฉลี่ย 750 กก.ซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดค่าซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพเหลืออยู่ในช่วง 43.3-72.6 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 51.1 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัด 97.5% ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังเกิดการตกตะกอน การกรองโดยตัวกลางกรวด ทราย และการกรองผ่านต้นพืชดังกลไกที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.2

เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการลดลงของค่าซีโอดีอีกเล็กน้อย ทำให้เหลือซีโอดีอยู่ในช่วง 25.1-51.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 34.6 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 98.3% ทั้งนี้เนื่องจากในชั้นนี้พบว่ามีซีโอดีบางส่วนถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนโดยแบคทีเรียในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันดังสมการที่ 13 ผลการกำจัดซีโอดีแสดงในรูปที่ 4.14

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าซีโอดีเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสียกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทราย พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน



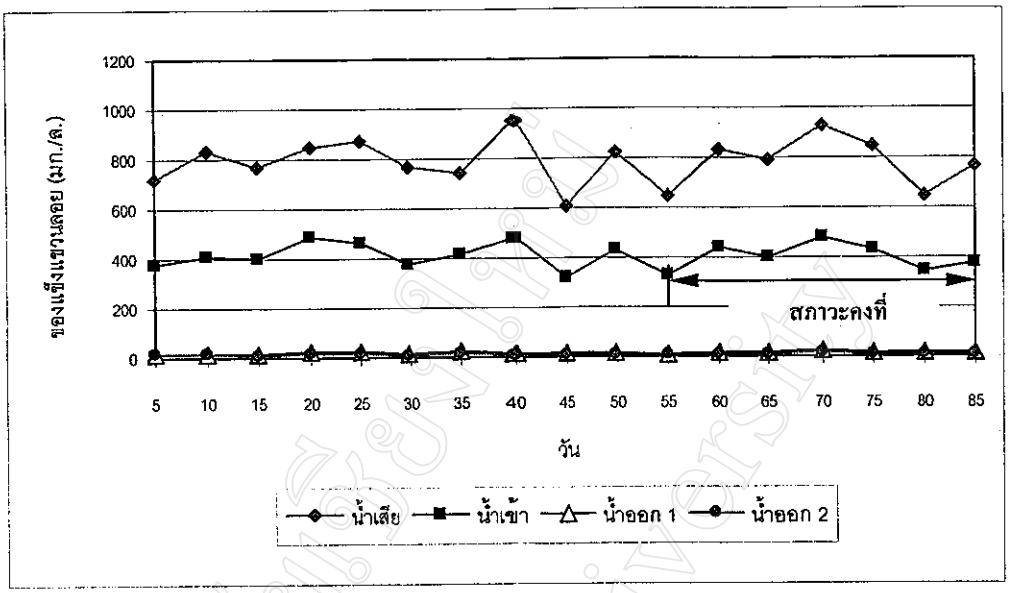
รูปที่ 4.14 ค่าซีโอดี ในการทดลองที่ 3

4.3.3 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำเสียมีค่าของแข็งแขวนลอยแปรผันอยู่ในช่วง 648.0-924.8 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 780.0 มก./ล. และเมื่อผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับทำให้มีการเจือจาง เป็นผลให้น้ำเสียที่ผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับเป็นน้ำเข้าระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยแปรผันอยู่ในช่วง 324.1-482.6 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 399.7 มก./ล. ในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดค่าของแข็งแขวนลอยลงอย่างมีประสิทธิภาพเหลืออยู่ในช่วง 12.0-21.6 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 15.0 มก./ล. หรือมีประสิทธิภาพในการกำจัด 98.1%

เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการลดลงของค่าของแข็งแขวนลอยอีกเล็กน้อยทำให้เหลือค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 8.6-14.0 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 10.4 มก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 98.7% ดังรูปที่ 4.15 ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการตกตะกอน การกรองผ่านต้นพืชและการจับติดกับชั้นฟิล์มของจุลินทรีย์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.3

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าของแข็งแขวนลอย เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสียกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทราย พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่ถูกกำจัดไปในส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง



รูปที่ 4.15 ค่าของแข็งแขวนลอย ในการทดลองที่ 3

4.3.4 ผลการวิเคราะห์พืช

ก. อัตราการเจริญเติบโตของพืช

ในการทดลองที่ 3 มีการปลูกพืชใหม่ทั้งหมดเพื่อไม่ให้เกิดข้อจำกัดเนื่องจากอายุของพืช ได้ทำการเตรียมและปลูกพืชชุดใหม่และดำเนินการเช่นเดียวกับก่อนเริ่มการทดลองที่ 1 โดยเมื่อเริ่มการทดลองพืชมีอายุประมาณ 2 เดือนเท่ากัน เมื่อเริ่มการทดลองต้นกกรังกามีความสูงเท่ากับ 48.8 ซม. มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 1,254.75 ก. หลังจากทดลองได้มีการวัดความสูงของต้นกกทุก 30 วัน พบว่าพืชมีความสูงเฉลี่ยเป็น 63.4 และ 79.2 ซม. ตามลำดับและหลังจากนั้นอีก 25 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองพืชมีความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 85.5 ซม. มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 3,897.75 ก. คิดเป็นน้ำหนักแห้งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 18.35 ตัน/เฮกแตร์ หรือมีอัตราการเจริญเติบโต 0.216 ตัน/(เฮกแตร์.วัน) จะเห็นได้ว่าพืชมีการเจริญเติบโตเร็วในช่วงแรกและค่อยๆ เติบโตช้าลงเมื่ออายุมากขึ้นดังสรุปในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการวัดอัตราการเจริญเติบโตของพืช ในการทดลองที่ 3

ระยะเวลา (วัน)	ความสูง (ซม.)	ความสูงที่เพิ่มขึ้น (ซม.)	น้ำหนักแห้งเริ่มต้น (ก.)	น้ำหนักแห้งหลังการทดลอง (ก.)	น้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้น (ตัน/เฮกแตร์)	อัตราการเจริญเติบโต (ตัน/(เฮกแตร์.วัน))
0	48.8	-	1,254.75	-	-	-
30	63.4	14.6	-	-	-	-
60	76.2	12.8	-	-	-	-
85	85.5	9.3	-	3,897.75	18.35	0.216

ข. ปริมาณไนโตรเจนสะสมในพืช

เมื่อเริ่มต้นทำการทดลองพบว่าปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในส่วนต่างๆ ของพืชคือ ใบ ลำต้น และราก มีค่า 0.0021 0.0014 และ 0.0025 ก.ไนโตรเจน/ก. น้ำหนักแห้งตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 3 หรือที่เวลา 85 วัน ปริมาณไนโตรเจนในส่วนต่างๆ คือ ใบ ลำต้น และราก เพิ่มขึ้นเป็น 0.0165 0.0120 และ 0.0085 ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง มีอัตราการสะสมไนโตรเจน 0.148 0.186 และ 0.044 ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน) ตามลำดับ รวมเป็น 0.378 ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน) คิดเป็น 2.7% ของปริมาณไนโตรเจนที่เข้าระบบทั้งหมด จะเห็นได้ว่ามีอัตราการสะสมไนโตรเจนในลำต้นมากกว่าส่วนอื่นๆ รองลงมาเป็นใบ และน้อยที่สุดคือราก ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ปริมาณไนโตรเจนสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช ในการทดลองที่ 3

ส่วนของพืช	ก่อนทดลอง (ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง)	หลังการทดลอง (ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง)	อัตราการสะสม (ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน))
ใบ	0.0021	0.0165	0.148
ลำต้น	0.0014	0.0120	0.186
ราก	0.0025	0.0085	0.044

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ 2 กับการทดลองที่ 3 โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเจดาลไนโตรเจนในส่วนที่ปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งดังตารางที่ 4.12 โดยการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในการทดลองที่ 3 เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำเป็น 100% กลับเข้าระบบทำให้มีประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชันน้อยกว่าการทดลองที่ 2 ซึ่งมีการหมุนเวียนน้ำ 50% อีกทั้งการเกิดไนตริฟิเคชันนี้ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างรวมลดลงทำให้ค่าพีเอชลดลงตามไปด้วย ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยมีค่าใกล้เคียงกันในทั้งสองการทดลอง และเมื่อพิจารณาในส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนโดยเปรียบเทียบการลดลงของออกซิไดซ์ไนโตรเจน ดังตารางที่ 4.12 โดยการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในการทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพในการเกิดดีไนตริฟิเคชันได้ดีกว่าการทดลองที่ 2 อีกทั้งการเกิดดีไนตริฟิเคชันนี้ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างรวมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยมีค่าใกล้เคียงกันในทั้งสองการทดลอง และเมื่อพิจารณาการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดที่ประสิทธิภาพการกำจัดโดยรวมดังตารางที่ 4.12 ด้วยการทดสอบทางสถิติโดย

ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าการทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ดีกว่าการทดลองที่ 2

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำจาก 50% เป็น 100% ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชันลดลงเล็กน้อยและเกิดดีไนตริฟิเคชันได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาทั้งระบบแล้วการทดลองที่ 3 สามารถบำบัดให้น้ำออกมีค่าเจดาลไนโตรเจน พีเอช ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรของจังหวัดเชียงใหม่ และกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ดังตารางที่ 4.4 สามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ อีกทั้งสามารถลดค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนได้ดี จึงทดลองหมุนเวียนน้ำในอัตราที่สูงขึ้นในการทดลองที่ 4 เพื่อหาอัตราการหมุนเวียนน้ำที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนสูงสุด

ตารางที่ 4.12 การเกิดไนตริฟิเคชัน ดีไนตริฟิเคชันและประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ 2 กับการทดลองที่ 3

พารามิเตอร์	ส่วนที่พิจารณา	หน่วย	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3
เจดาลไนโตรเจน (ไนตริฟิเคชัน)	ปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่ง	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	98.2*	97.5*
ออกซิไดซ์ไนโตรเจน (ดีไนตริฟิเคชัน)	ถังกรองทรายและมีการไหลในแนวนอน	ประสิทธิภาพการกำจัด (%) จำนวนเท่าที่ลดลง	62.9** 2.7	80.3** 5.1
ไนโตรเจนทั้งหมด	ทั้งระบบ	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	85.7*	93.0*

หมายเหตุ : * คิดจากน้ำเสียที่เข้าระบบก่อนผสมกับน้ำที่หมุนเวียนกลับ

** คิดจากน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งแล้ว

4.4 การทดลองที่ 4 (มีการหมุนเวียนน้ำ 200%)

มีการเปลี่ยนทรายกรองในส่วนบนที่ปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่ง เนื่องจากเกิดการอุดตันจากตะกอนที่แทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดทราย นอกจากนี้ยังมีการอุดตันของแผ่นจีโอเท็กซ์ไทล์จึงทำการถอดออก มีการผสมทรายเดิมบางส่วนเข้ากับทรายใหม่เพื่อลดเวลาในการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ใหม่ และทำการล้างย้อนในส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนเนื่องจากมีการอุดตัน สาเหตุอาจเนื่องมาจากการแทรกตัวของฟองก๊าซไนโตรเจนตามช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดทรายซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดดีไนตริฟิเคชัน ส่วนต้นกกรังกายังคงใช้ชุดเดิมต่อเนื่องมาจากการทดลองที่ 3 ในการทดลองที่ 4 มีการหมุนเวียนน้ำ 200% ทำให้มีค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เปลี่ยนแปลงไปเป็น 11.25 ซม./วัน ซึ่งมีค่าอุณหภูมิของน้ำเสียเข้าระบบเฉลี่ย 23.3 องศาเซลเซียส และมีค่าพีเอชเฉลี่ย 7.1

4.4.1 การกำจัดไนโตรเจน

ในช่วงแรกระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าเจดาลไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนดีพอสมควรจนสามารถปรับตัวและเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ในเวลาไม่นานนัก ส่วนค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อทดลองได้ 65 วัน ในการทดลองนี้น้ำเสียมีค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 264.6-372.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 305.1 มก./ล. แอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 198.2-297.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 243.2 มก./ล. และออกซิไดซ์ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.3-1.2 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 0.7 มก./ล. เมื่อมีการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านถังกรองทรายกลับไปผสมกับน้ำเสียทำให้น้ำที่เข้าระบบเกิดการเจือจาง และน้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับเป็นน้ำเข้าระบบ มีค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 89.2-142.9 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 113.5 มก./ล. แอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 79.5-108.5 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 91.5 มก./ล. และออกซิไดซ์ไนโตรเจนอยู่ในช่วง 12.3-15.3 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 13.5 มก./ล. ในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดค่าเจดาลไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 22.0-31.8 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 26.4 มก./ล. และแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 20.2-26.3 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 23.4 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัด 91.4% และ 90.3% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 เป็นผลให้มีปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 39.2-46.1 มก./ล. มีค่าเฉลี่ย 42.2 มก./ล. โดยเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 41.5 มก./ล. หรือมีการเปลี่ยนรูปเป็นออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 58 เท่าเมื่อพิจารณาระบบโดยรวม

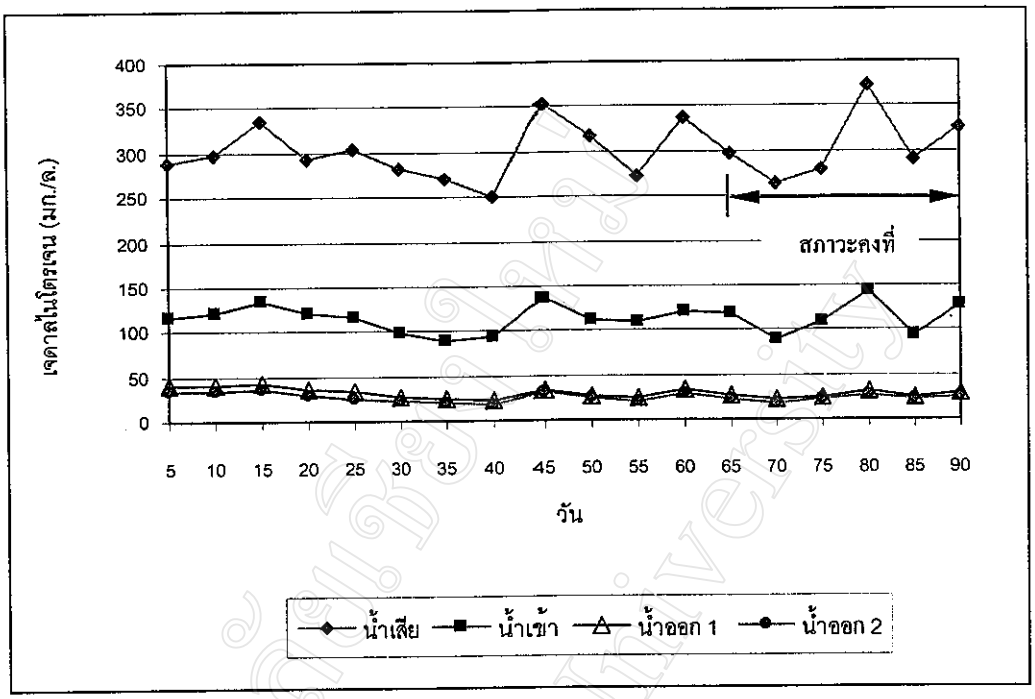
เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการลดลงของเจดาลไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนอีกเล็กน้อย ทำให้เหลือค่าเจดาลไนโตรเจนอยู่ในช่วง 18.8-26.8 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 22.4 มก./ล. และแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 16.3-23.6 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 19.7 มก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 92.7%และ 91.9% ตามลำดับ และมีการเกิดดีไนตริฟิเคชันดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1 โดยพบว่าค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนลดลงเหลือ 21.4-24.0 มก./ล. หรือมีค่าเฉลี่ย 22.6 มก./ล. ซึ่งแสดงว่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนลดลงจากส่วนบนเฉลี่ย 1.9 เท่าหรือลดลง 46.4%

เมื่อพิจารณาการกำจัดค่าไนโตรเจนทั้งหมดของน้ำเสียเข้าระบบมีค่าเฉลี่ย 305.9 มก./ล. กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าเฉลี่ย 68.6 มก./ล. พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัด 77.5% ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังกรองทรายพบว่ามีการลดลงของไนโตรเจนทั้งหมดทำให้เหลือค่าเฉลี่ยเป็น 45.0 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งระบบ 85.2% ผลการกำจัดเจดาลไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน และออกซิไดซ์ไนโตรเจน แสดงในรูปที่ 4.16-4.18 และผลการกำจัดไนโตรเจนสรุปในตารางที่ 4.13

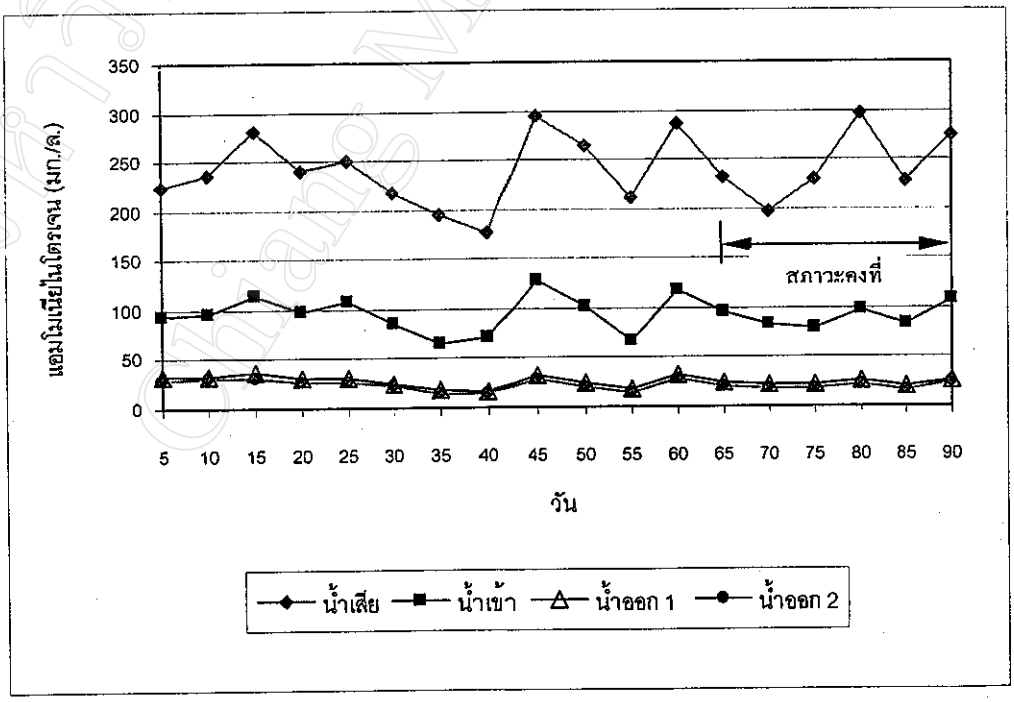
ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าเจดาลไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน และไนโตรเจนทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสีย กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแสดงถึงระบบมีประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ยกเว้นค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนซึ่งพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในชั้นถังกรองทรายมีประสิทธิภาพในการเกิดดีไนตริฟิเคชันได้ดี

การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดของการทดลองที่ 4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน โดยใช้การทดสอบแบบ t พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ดีขึ้นในชั้นถังกรองทราย

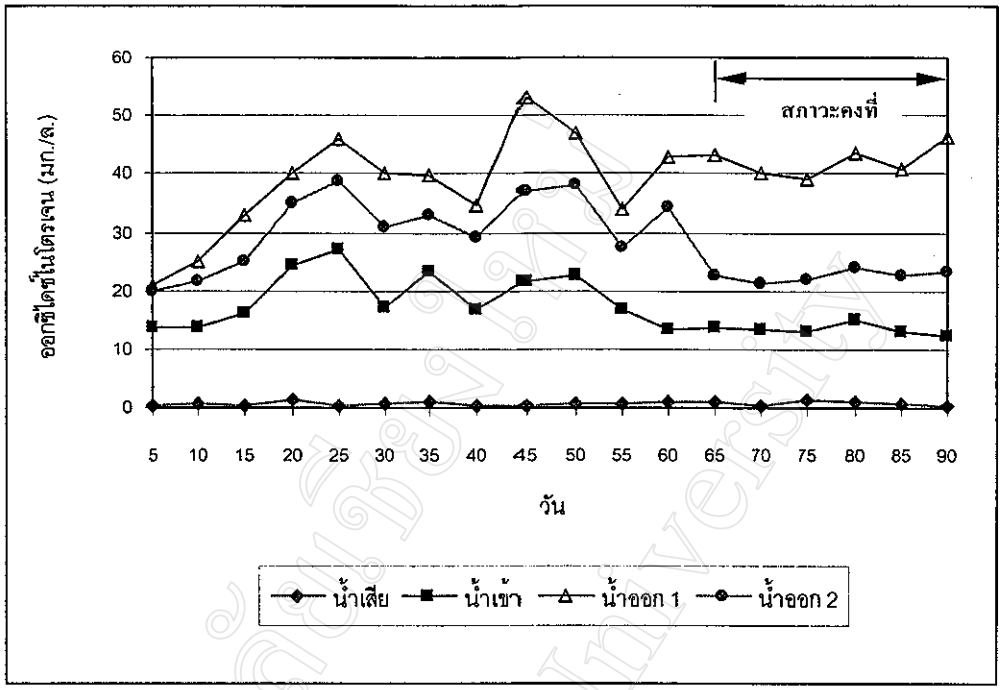
ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1 จะเห็นได้ว่ามีการเกิดไนตริฟิเคชันในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งและเกิดดีไนตริฟิเคชันในส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พิจารณาได้จากน้ำเสียมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 924.8-1,203.8 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 1,032.1 มก./ล. น้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง



รูปที่ 4.16 ค่าเจดาลไนโตรเจน ในการทดลองที่ 4



รูปที่ 4.17 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน ในการทดลองที่ 4



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจน ในการทดลองที่ 4

ตารางที่ 4.13 ผลการกำจัดไนโตรเจน ในการทดลองที่ 4

พารามิเตอร์	น้ำเสีย (มก./ล.)	น้ำเข้า (มก./ล.)	น้ำออก 1 (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	น้ำออก 2 (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
เจคาลไนโตรเจนเฉลี่ย	305.1	113.5	26.4	91.4	22.4	92.7
แอมโมเนียไนโตรเจนเฉลี่ย	243.2	91.5	23.4	90.3	19.7	91.9
ออกซิไดซ์ไนโตรเจนเฉลี่ย	0.7	13.5	42.2	-	22.6	46.4
ไนโตรเจนทั้งหมด	305.9	127.0	68.6	77.5	45.0	85.2

428.1-543.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 483.3 มก./ล. โดยพบว่าน้ำเสียที่ผ่านส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 116.7-189.0 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 160.7 มก./ล. มีค่าความเป็นด่างลดลง 322.6 มก./ล. ชี้ให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน น้ำเสียที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน มีค่าความเป็นด่างรวมอยู่ในช่วง 181.0-238.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 215.7 มก./ล. มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 55.0 มก./ล. ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในส่วนนี้

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าความเป็นด่างรวม เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสีย กับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

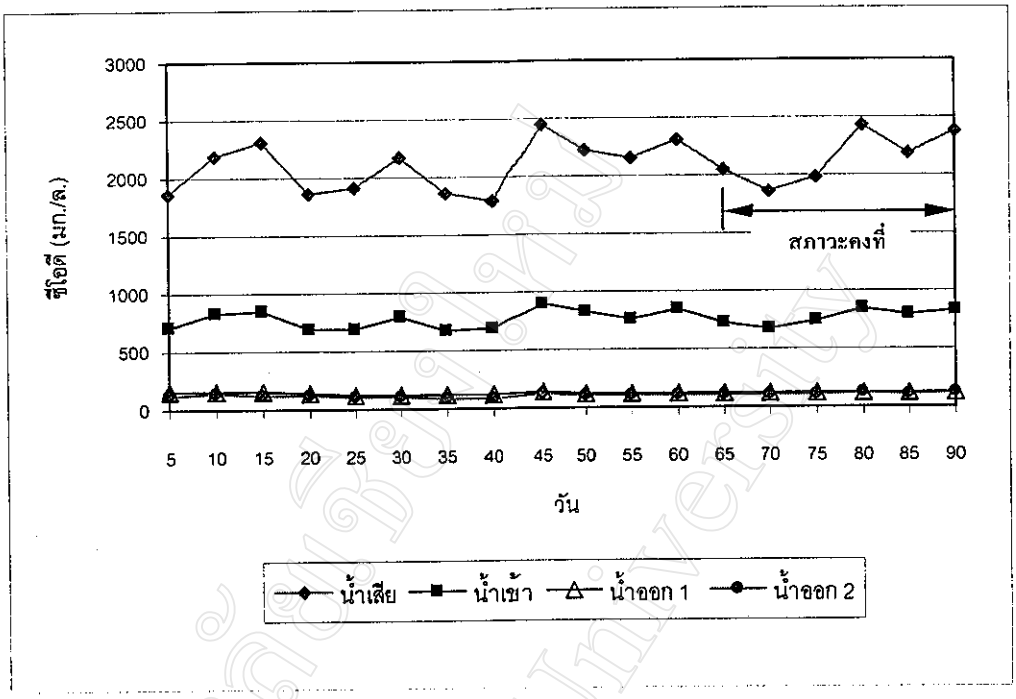
น้ำเสียมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.8-7.1 มีค่าเฉลี่ย 7.1 น้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.7-6.9 มีค่าเฉลี่ย 6.9 เมื่อผ่านส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่งมีค่าพีเอชลดลงอยู่ในช่วง 5.8-6.0 มีค่าเฉลี่ย 6.0 เนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน หลังจากนั้นเมื่อไหลผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนค่าพีเอชจะสูงขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 6.6-6.9 มีค่าเฉลี่ย 6.8 จะเห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1

จากการทดลองค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเสียมีค่า 23.3 องศาเซลเซียส น้ำเสียที่ผ่านการผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับมีค่า 23.2 องศาเซลเซียส ส่วนที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งมีค่าเฉลี่ย 23.1 องศาเซลเซียส และส่วนที่ไหลผ่านถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนมีค่าเฉลี่ย 23.2 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

4.4.2 การกำจัดซีโอดี

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำเสียมีค่าซีโอดีแปรผันอยู่ในช่วง 1,870.4-2,423.4 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 2,149.4 มก./ล. และเมื่อผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับทำให้มีการเจือจาง เป็นผลให้น้ำเสียที่ผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับเป็นน้ำเข้าระบบมีค่าซีโอดีแปรผันอยู่ในช่วง 673.2-846.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 769.0 มก./ล. มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เฉลี่ย 810 กก.ซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน) ในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดค่าซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพเหลืออยู่ในช่วง 116.6-126.3 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 120.8 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัด 94.4% ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังเกิดการตกตะกอนการกรองโดยตัวกลางกรวด ทราย และการกรองผ่านต้นพืชดังกลไกที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.2

เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการลดลงของค่าซีโอดีอีกเล็กน้อย ทำให้เหลือซีโอดีอยู่ในช่วง 97.5-116.1 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 104.3 มก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 95.1% ทั้งนี้เนื่องจากในชั้นนี้พบว่ามีซีโอดีบางส่วนถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนโดยแบคทีเรียในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันดังสมการที่ 13 ผลการกำจัดค่าซีโอดีแสดงในรูปที่ 4.19



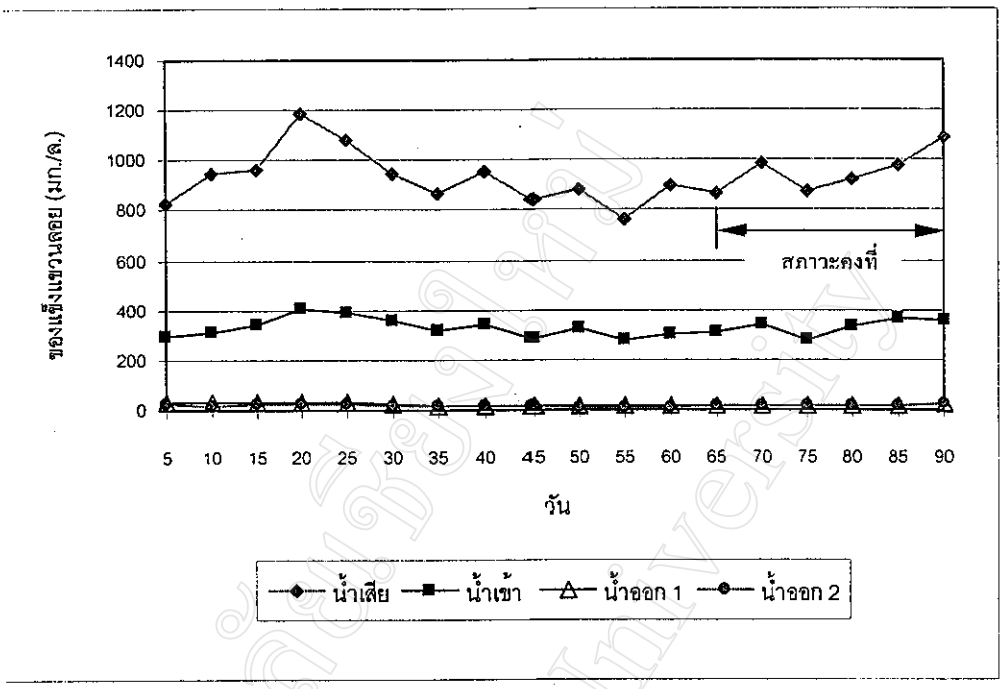
รูปที่ 4.19 ค่าซีโอดี ในการทดลองที่ 4

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าซีโอดีเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสียกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทราย พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน

4.4.3 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ น้ำเสียมีค่าของแข็งแขวนลอยแปรผันอยู่ในช่วง 864.2-1,087.5 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 952.8 มก./ล. และเมื่อผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับทำให้มีการเจือจาง เป็นผลให้น้ำเสียที่ผสมกับส่วนที่หมุนเวียนกลับเป็นน้ำเข้าระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยแปรผันอยู่ในช่วง 280.6-366.0 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 331.7 มก./ล. ในส่วนบนซึ่งปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งสามารถลดค่าของแข็งแขวนลอยลงอย่างมีประสิทธิภาพเหลืออยู่ในช่วง16.1-22.7 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 18.5 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัด 98.1%

เมื่อน้ำเสียผ่านลงสู่ส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน พบว่ามีการลดลงของค่าของแข็งแขวนลอยอีกเล็กน้อยทำให้เหลือค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 12.0-21.0 มก./ล. ค่าเฉลี่ย 14.4 มก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มเป็น 98.5% ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ค่าของแข็งแขวนลอย ในการทดลองที่ 4

ทั้งนี้เนื่องจากการกลไกการตกตะกอน การกรองผ่านต้นพืชและการจับติดกับชั้นฟิล์มของจุลินทรีย์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.3

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่าของแข็งแขวนลอย เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำเสียกับน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่ง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่เป็นการไหลในแนวดิ่ง กับน้ำที่ผ่านส่วนล่างที่เป็นถังกรองทราย พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่ถูกกำจัดไปในส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง

4.4.4 ผลการวิเคราะห์พืช

ก. อัตราการเจริญเติบโตของพืช

ทำการทดลองต่อเนื่องจากการทดลองที่ 3 เมื่อเริ่มการทดลองได้ตัดต้นต้นกกรังกาให้มีความสูงเท่ากันเป็น 35.4 ซม. มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 1,880.50 ก. หลังจากทดลองได้มีการวัดความสูงของต้นพืชทุก 30 วัน พบว่าพืชมีความสูงเฉลี่ยเป็น 46.0 58.3 และ 70.6 ซม. เมื่อสิ้นสุดการทดลอง มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 3,719.75 ก. คิดเป็นน้ำหนักแห้งเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 12.77 ตัน/เฮกแตร์ หรือมีอัตราการเจริญเติบโต 0.142 ตัน/(เฮกแตร์.วัน) จะเห็นได้ว่าพืชมีการเจริญเติบโตช้าในช่วง 30 วันแรกเนื่องจากมีการรบกวนต้นพืช โดยมีการเปลี่ยนทรายกรองในส่วนบนที่ปลูกพืชและมีการไหล

ในแนวดิ่งเนื่องจากเกิดการอุดตัน ทำให้ต้องย้ายต้นพืชออกและนำมากลับมาปลูกคืนเมื่อเสร็จสิ้นการเปลี่ยนทรายกรอง ซึ่งเป็นการกระทบกระเทือนต่อต้นพืช แต่เมื่อเวลาผ่านไปพืชสามารถปรับตัวและค่อยๆ เจริญดีขึ้นจนเติบโตช้าลงในช่วงสุดท้ายเมื่ออายุมากขึ้นสรุปได้ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการวัดอัตราการเจริญเติบโตของพืช ในการทดลองที่ 4

ระยะเวลา (วัน)	ความสูง (ซม.)	ความสูงที่เพิ่มขึ้น (ซม.)	น้ำหนักแห้งเริ่มต้น (ก.)	น้ำหนักแห้งหลังการทดลอง (ก.)	น้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้น (ตัน/เฮกแตร์)	อัตราการเจริญเติบโต (ตัน/(เฮกแตร์.วัน))
0	35.4	-	1,880.50	-	-	-
30	46.0	10.6	-	-	-	-
60	58.3	12.3	-	-	-	-
90	70.6	11.1	-	3,719.75	12.77	0.142

ข. ปริมาณไนโตรเจนสะสมในพืช

เมื่อเริ่มต้นทำการทดลองพบว่าปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในส่วนต่างๆ ของพืชคือ ใบ ลำต้น และราก มีค่า 0.0166 0.0121 และ 0.0087 ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 4 หรือที่เวลา 90 วัน ปริมาณไนโตรเจนในส่วนต่างๆ คือ ใบ ลำต้น และราก เพิ่มขึ้นเป็น 0.0235 0.0185 และ 0.0119 ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง มีอัตราการสะสมไนโตรเจน 0.126 0.163 และ 0.042 ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน) ตามลำดับ รวมเป็น 0.331 ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน) คิดเป็น 2.3% ของปริมาณไนโตรเจนที่เข้าระบบทั้งหมด จะเห็นได้ว่ามีอัตราการสะสมไนโตรเจนในลำต้นมากกว่าส่วนอื่นๆ รองลงมาเป็นใบ และน้อยที่สุดคือราก ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ปริมาณไนโตรเจนสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช ในการทดลองที่ 4

ส่วนของพืช	ก่อนทดลอง (ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง)	หลังการทดลอง (ก.ไนโตรเจน/ก.น้ำหนักแห้ง)	อัตราการสะสม (ก.ไนโตรเจน/(ม.^{2}.วัน))
ใบ	0.0166	0.0235	0.126
ลำต้น	0.0121	0.0185	0.163
ราก	0.0087	0.0119	0.042

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ 4 กับการทดลองที่ 2 และ 3 โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดเจดาลไนโตรเจนในส่วนที่ปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่งดังตารางที่ 4.16 โดยการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.16 การเกิดไนตริฟิเคชัน ดีไนตริฟิเคชัน และประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ 2 กับการทดลองที่ 3 กับการทดลองที่ 4

พารามิเตอร์	ส่วนที่พิจารณา	หน่วย	การทดลองที่ 2	การทดลองที่ 3	การทดลองที่ 4
เจตาลไนโตรเจน (ไนตริฟิเคชัน)	ปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่ง	ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)	98.2*	97.5*	91.4*
ออกซิไดซ์ไนโตรเจน (ดีไนตริฟิเคชัน)	ถังกรองทรายและมีการไหลในแนวนอน	ประสิทธิภาพการกำจัด (%) จำนวนเท่าที่ลดลง	62.9** 2.7	80.3** 5.1	46.4** 1.9
ไนโตรเจนทั้งหมด	ทั้งระบบ	ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)	85.7*	93.0*	85.2*

หมายเหตุ : * คิดจากน้ำเสียที่เข้าระบบก่อนผสมกับน้ำที่หมุนเวียนกลับ

** คิดจากน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งแล้ว

อย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในการทดลองที่ 4 เมื่อมีการหมุนเวียนน้ำ 200% กลับเข้าระบบทำให้มีประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชันน้อยกว่าการทดลองที่ 2 และ 3 ซึ่งมีการหมุนเวียนน้ำ 50% และ 100% ตามลำดับ อีกทั้งการเกิดไนตริฟิเคชันนี้ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างรวมลดลงทำให้ค่าพีเอชลดลงตามไปด้วย และการกำจัดซีโอดีในการทดลองที่ 4 มีประสิทธิภาพลดลงน้อยกว่าการทดลองที่ 2 และ 3 เนื่องจากการทดลองที่ 4 มีการหมุนเวียนน้ำในอัตราที่สูงมากเป็นผลให้มีภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณออกซิเจนซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำจัดซีโอดีมีปริมาณน้อยลงเนื่องจากเกิดการอิ่มตัวของชั้นตัวกลาง ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีค่าใกล้เคียงกันในทั้งสามการทดลอง และเมื่อพิจารณาในส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนโดยเปรียบเทียบการลดลงของออกซิไดซ์ไนโตรเจนดังตารางที่ 4.16 โดยการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในการทดลองที่ 4 มีประสิทธิภาพในการเกิดดีไนตริฟิเคชันน้อยกว่าการทดลองที่ 2 และ 3 อีกทั้งการเกิดดีไนตริฟิเคชันนี้ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างรวมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยในทั้งสามการทดลอง และเมื่อพิจารณาการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดที่ประสิทธิภาพการกำจัดโดยรวมดังตารางที่ 4.16 ด้วยการทดสอบทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ความ

เชื่อมั่น 95% พบว่ามีความแตกต่างกันเกิดขึ้น โดยการทดลองที่ 4 กับการทดลองที่ 3 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าการทดลองที่ 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้น้อยกว่าการทดลองที่ 3 ส่วนการทดลองที่ 4 กับการทดลองที่ 2 พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน แสดงว่าทั้งการทดลองที่ 4 และการทดลองที่ 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้เท่ากัน

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการหมุนเวียนน้ำจนเป็น 200% ทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดไนตริฟิเคชันและเกิดดีไนตริฟิเคชันลดลงอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาทั้งระบบแล้วการทดลองที่ 4 สามารถบำบัดให้น้ำออกมีค่าเจดาลไนโตรเจน พีเอช ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรของจังหวัดเชียงใหม่ และกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ดังตารางที่ 4.4 สามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ แต่อย่างไรก็ตามการทดลองที่ 4 ต้องสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมากในการสูบน้ำเพื่อหมุนเวียนกลับ แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้เท่ากับการทดลองที่ 2 ดังนั้นการทดลองที่ 2 จึงมีอัตราการหมุนเวียนที่เหมาะสมกว่าการทดลองที่ 4 ในขณะที่การทดลองที่ 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ดีกว่าการทดลองที่ 2 อย่างชัดเจน ดังนั้นการทดลองที่ 3 ที่มีอัตราการหมุนเวียนน้ำ 100% จึงมีอัตราที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสรุปเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมดดังตารางที่ 4.17 พบว่าในทุกการทดลองสามารถบำบัดให้น้ำออกจากส่วนบนที่ปลูกพืชและมีการไหลในแนวดิ่ง ให้มีค่าเจดาลไนโตรเจน พีเอช ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย ได้คุณภาพตามมาตรฐานดังตารางที่ 4.4 โดยยังไม่ผ่านการบำบัดจากส่วนล่างที่มีการไหลในแนวนอน เมื่อพิจารณาในส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งที่ค่าเจดาลไนโตรเจน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดจนเกือบหมดแสดงว่าเกิดไนตริฟิเคชันได้ดีมาก และเมื่อพิจารณาที่ค่าไนโตรเจนทั้งหมดก็สามารถกำจัดให้ลดลงอย่างมากเช่นกัน แสดงว่ามีการเกิดทั้งไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันในส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งนี้ เพียงแต่ในน้ำออกยังมีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนที่สูงอยู่ ซึ่งหากต้องการกำจัดให้มีค่าลดลงจำเป็นต้องผ่านการบำบัดส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายและมีการไหลในแนวนอนเพื่อเสริมการเกิดดีไนตริฟิเคชันให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นก็จะสามารถกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจนให้มีค่าน้อยลงได้ เป็นผลให้ไนโตรเจนทั้งหมดที่ออกจากระบบลดลงตามไปด้วย

การหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบมีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมด พิจารณาได้อย่างชัดเจนจากผลการกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจนในส่วนล่างซึ่งเป็นถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนที่เพิ่มขึ้นจาก 11.6% เป็น 62.9% 80.3% และ 46.4%

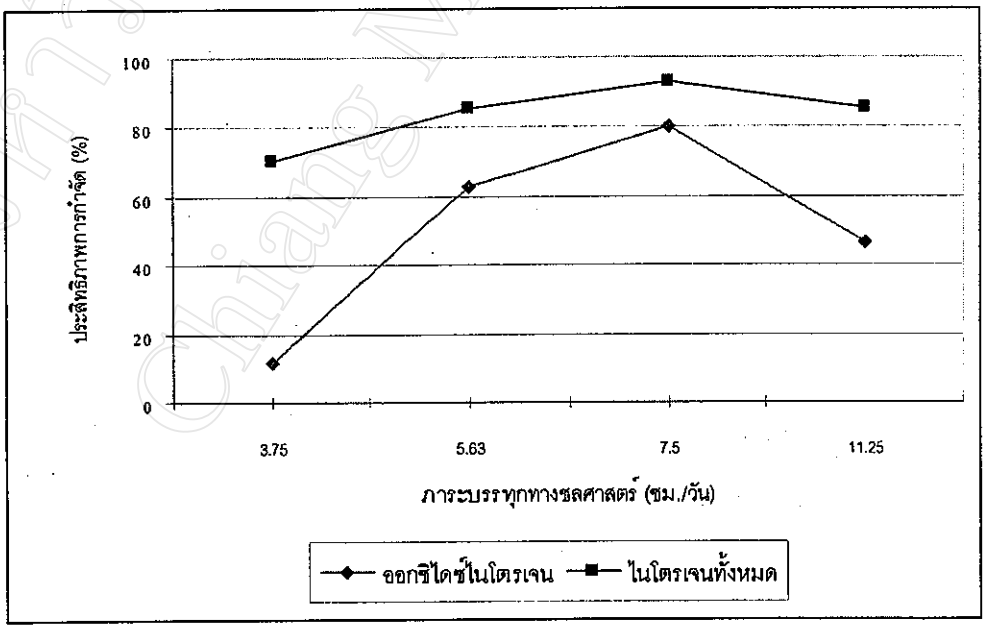
ตารางที่ 4.17 สรุปเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมด

พารามิเตอร์	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3			การทดลองที่ 4		
	น้ำเสีย	น้ำออก 1	น้ำออก 2	น้ำเสีย	น้ำออก 1	น้ำออก 2	น้ำเสีย	น้ำออก 1	น้ำออก 2	น้ำเสีย	น้ำออก 1	น้ำออก 2
เจดาลไนโตรเจน (มก./ล)	242.4	6.7	3.5	419.8	7.4	4.6	313.8	7.8	5.8	305.1	26.4	22.4
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)*		97.1	98.5		98.2	98.9		97.5	98.2		91.4	92.7
แอมโมเนียไนโตรเจน (มก./ล.)	156.3	3.1	1.7	305.8	4.9	2.5	237.9	7.2	4.8	243.2	23.4	19.7
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)*		98.0	98.8		98.4	99.2		97.0	98.0		90.3	91.9
ออกซิไดซ์ไนโตรเจน (มก./ล.)	0.7	73.4	64.9	1.1	142.3	52.7	0.8	81.7	16.1	0.7	42.2	22.6
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)**		-	11.6		-	62.9		-	80.3		-	46.4
ไนโตรเจนทั้งหมด (มก./ล.)	243.2	80.1	68.3	421.0	149.7	57.3	314.6	89.5	21.9	305.9	68.6	45.0
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)*		64.3	70.3		62.9	85.7		71.5	93.0		77.5	85.2
พีเอช	6.9	5.9	6.5	7.3	6.0	6.7	7.1	5.9	6.8	7.1	6.0	6.8
ซีโอดี (มก./ล.)	2,688.7	56.5	43.7	3,301.5	94.1	74.0	2,008.8	51.1	34.6	2,149.4	120.8	104.3
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)*		97.8	98.3		97.0	97.6		97.5	98.3		94.4	95.1
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	734.5	19.5	16.9	1,368.9	22.8	16.2	780.0	15.0	10.4	952.8	18.5	14.4
ประสิทธิภาพการกำจัด (%)*		97.3	97.7		98.3	98.8		98.1	98.7		98.1	98.5
อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/(เฮกแตร์.วัน))	1,010			1,240			750			810		
อัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน (กก.ไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน))	90			160			120			110		
ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ (ซม./วัน)	3.75			5.63			7.50			11.25		

หมายเหตุ : * คิดจากน้ำเสียที่เข้าระบบก่อนผสมกับน้ำที่หมุนเวียนกลับ

** คิดจากน้ำที่ผ่านการบำบัดจากส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่งแล้ว

ในการทดลองที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ แสดงว่าเกิดดีไนตริฟิเคชันดีขึ้นกว่าการทดลองที่ 1 ในทุกการทดลองที่มีการหมุนเวียนน้ำ ซึ่งเป็นผลให้การกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 70.3% เป็น 85.7% 93.0% และ 85.2% ตามลำดับ การหมุนเวียนน้ำทำให้ค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบอย่างชัดเจนต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในส่วนบนที่มีการไหลในแนวดิ่ง ยกเว้นในการทดลองที่ 4 ซึ่งมีค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เป็น 11.25 ซม./วัน ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดเจดาลไนโตรเจนลงลงอย่างเห็นได้ชัดเหลือเพียง 91.4% อีกทั้งยังส่งผลให้ในส่วนล่างที่มีการไหลในแนวนอนเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันลดลงน้อยกว่าการทดลองที่ 2 และ 3 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจนลดลงเหลือเพียง 46.4% ผลของค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ต่อการกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจน และไนโตรเจนทั้งหมด แสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าในการทดลองที่ 3 ซึ่งมีค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 7.5 ซม./วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้สูงที่สุด ส่วนการทดลองที่ 2 และ 4 ที่ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 5.63 และ 11.25 ซม./วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดเป็น 85.7% และ 85.2% ตามลำดับ และการทดลองที่ 1 ที่ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 3.75 ซม./วัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดต่ำที่สุดเป็น 70.3%



รูปที่ 4.21 ค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์กับการกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจน และไนโตรเจนทั้งหมด

ในการทดลองที่ 1 และ 2 ใช้ต้นพืชทำการทดลองต่อเนื่องกันโดยไม่มีการตัดต้นพืชเมื่อเริ่มการทดลองที่ 2 ค่าอัตราภาระบรรทุกไนโตรเจนเฉลี่ยในการทดลองที่ 1 มีค่าเพียง 90 กก.ไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ในขณะที่การทดลองที่ 2 มีค่าสูงถึง 160 กก.ไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) พิจารณาเปรียบเทียบการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่า การทดลองที่ 2 มีอัตราการสะสมไนโตรเจนสูงขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากมีสารอาหารอุดมสมบูรณ์ โดยการทดลองที่ 1 มีอัตราการสะสมไนโตรเจนเป็น 0.237 ก.ไนโตรเจน/ม.^{2}.วัน ส่วนการทดลองที่ 2 มีอัตราการสะสมไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 0.661 ก.ไนโตรเจน/ม.^{2}.วัน ส่วนอัตราการเจริญเติบโตของการทดลองที่ 2 ค่าเพิ่มขึ้นจากการทดลองที่ 1 เล็กน้อย โดยการทดลองที่ 1 มีอัตราการเจริญเติบโตเป็น 0.259 ตัน/(เฮกแตร์.วัน) และการทดลองที่ 2 มีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเป็น 0.279 ตัน/(เฮกแตร์.วัน) อัตราการสะสมไนโตรเจน/อัตราการเจริญเติบโต ในการทดลองที่ 1 มีค่าเป็น 0.0092 กก.ไนโตรเจน/กก.น้ำหนักแห้ง จึงมีปริมาณไนโตรเจนสะสมตลอด 60 วันที่ทำการทดลองเท่ากับ 20.5 ก. ในขณะที่การทดลองที่ 2 มีอัตราการสะสมไนโตรเจน/อัตราการเจริญเติบโต เท่ากับ 0.0237 กก.ไนโตรเจน/กก.น้ำหนักแห้ง จึงมีปริมาณไนโตรเจนสะสมตลอด 100 วันที่ทำการทดลองเท่ากับ 95.3 ก.

ในการทดลองที่ 3 และ 4 ใช้ต้นพืชทำการทดลองต่อเนื่องกันโดยมีการตัดต้นพืชเมื่อเริ่มการทดลองที่ 4 ค่าอัตราภาระบรรทุกไนโตรเจนเฉลี่ยในการทดลองที่ 3 มีค่า120 กก.ไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) ในขณะที่การทดลองที่ 4 มีค่า 110 กก.ไนโตรเจน/(เฮกแตร์.วัน) พิจารณาเปรียบเทียบการทดลองที่ 3 และ 4 พบว่าการทดลองที่ 4 มีอัตราการเจริญเติบโตลดลงอย่างชัดเจน โดยการทดลองที่ 3 มีอัตราการเจริญเติบโตเป็น 0.216 ตัน/(เฮกแตร์.วัน) ส่วนการทดลองที่ 4 มีค่าลดลงเหลือ 0.142 ตัน/(เฮกแตร์.วัน) อาจเนื่องมาจากต้นพืชถูกกระทบกระเทือนจากการโยกย้ายเพราะการเปลี่ยนทรายกรอง ส่วนอัตราการสะสมไนโตรเจนของการทดลองที่ 4 มีค่าลดลงจากการทดลองที่ 3 เล็กน้อย โดยการทดลองที่ 3 มีอัตราการสะสมไนโตรเจน 0.378 ก.ไนโตรเจน/ม.^{2}.วัน ส่วนการทดลองที่ 4 มีค่าลดลงเหลือ 0.331 ก.ไนโตรเจน/ม.^{2}.วัน อาจเนื่องมาจากมีสารอาหารน้อยลง อัตราการสะสมไนโตรเจน/อัตราการเจริญเติบโต ในการทดลองที่ 3 มีค่าเป็น 0.0175 กก.ไนโตรเจน/กก.น้ำหนักแห้ง จึงมีปริมาณไนโตรเจนสะสมตลอด 85 วันที่ทำการทดลองเท่ากับ 46.3 ก. ในขณะที่การทดลองที่ 4 มีอัตราการสะสมไนโตรเจน/อัตราการเจริญเติบโต เท่ากับ 0.0233 กก.ไนโตรเจน/กก.น้ำหนักแห้ง จึงมีปริมาณไนโตรเจนสะสมตลอด 90 วันที่ทำการทดลองเท่ากับ 42.9 ก.