บทที่ 6

สรุป และเสนอแนะ

สรุปผลการพัฒนาต้นแบบจำลองพลวัตระบบสำหรับการติดตามตรวจสอบการกำจัดไนโตรเจนของบ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ ที่สามารถทดสอบเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการกำจัดไนโตรเจนของบ่อบำบัด ฯ ที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH) สาหร่าย (SS) และสารอินทรีย์ (BOD_5) ซึ่งจะนำไปสู่การเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงการทำงานของบ่อบำบัด ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยผลการศึกษาสรุปได้ ดังนี้

6.1 สรุปโครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบ

โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบออกแบบและพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Vensim PLE Plus รุ่น 5.4 โดยพัฒนาจากการประมวลความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เชื่อมโยงด้วยสมการรูปแบบต่าง ๆ เป็นชุดความสัมพันธ์ต่อเนื่อง ซึ่งโครงสร้างแบบจำลองประกอบด้วย 2 แบบจำลองกลุ่มหลัก ดังนี้

6.1.1 โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของตัวแปรไนโตรเจน ประกอบด้วย 2 กลุ่ม

6.1.1.1 โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของไนโตรเจนกลุ่มหลัก ประกอบด้วย 4 โครงสร้าง

ก. โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของOrg N ในบ่อ ฯ

ข. โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของ NH_4^+-N ในบ่อ ฯ

ค. โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของ NO_2^--N ในบ่อ ฯ

ง. โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของ NO_3^--N ในบ่อ ฯ

6.1.1.2 โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของไนโตรเจนกลุ่มรอง ประกอบด้วย 2 โครงสร้าง

ก. โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของ TN ในตะกอนของบ่อ ฯ

ข. โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของไนโตรเจน (N_2) ในบริเวณบ่อ ฯ

6.1.2 โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของตัวแปรสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วย 4 โครงสร้าง

6.1.2.1 โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของสารอินทรีย์ ในบ่อ ฯ

6.1.2.2 โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของแบคทีเรียในบ่อ ฯ

6.1.2.3 โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของสาหร่ายในบ่อ ฯ

6.1.2.4 โครงสร้างแบบจำลองพลวัตระบบของพืชในบ่อ ฯ

6.2 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานทางทฤษฎีและข้อมูลจริง

6.2.1 สรุปผลการทดสอบสมมติฐาน

แบบจำลองที่ผ่านการทดสอบสมมติฐาน และปรับแก้ พบว่าแนวโน้มของตัวแปรผลที่สนใจเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับทุกสมมติฐานที่กำหนดจากหลักการทางทฤษฎี โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.2.1.1 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทุกชนิดที่เกี่ยวข้องกับการการกำจัดไนโตรเจนเปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามเงื่อนไขของตัวแปร pH, DO และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในบ่อ ฯ

6.2.1.2 อัตราการกำจัด NH_4^+-N ในรูปก๊าซเปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามเงื่อนไขของตัวแปร pH ที่เปลี่ยนแปลงในบ่อ ฯ

6.2.1.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดิไนตริฟิเคชัน (denitrification) เปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามเงื่อนไขของตัวแปร COD ที่เปลี่ยนแปลงในบ่อ ฯ

6.2.1.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริเตชัน (nitritation)เปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามเงื่อนไขของสัดส่วน BOD_5 ต่อ TKN ที่เปลี่ยนแปลงในบ่อ ฯ

6.2.1.5 ความต่อเนื่องของการเปลี่ยนรูป Org N, NH_4^+-N, NO_2-N และ NO_3-N เปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามเงื่อนไขของสภาวะตัวแปร pH, DO และอุณหภูมิ ที่เปลี่ยนแปลงในบ่อ ฯ

6.2.1.6 อัตราการลดลงของ NH_4^+-N และ NO_3-N ในบ่อเปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาหร่าย แบคทีเรีย และพืช ที่เปลี่ยนแปลงในบ่อ ฯ

6.2.1.7 อัตราการตายของสาหร่ายในบ่อเปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามสัดส่วนพื้นที่ผิวน้ำที่ถูกปกคลุมโดยพืชลอยน้ำ ที่เปลี่ยนแปลงในบ่อ ฯ

6.2.1.8 ความสัมพันธ์ของการทำงานของบ่อบำบัด ได้แก่ ตัวแปรที่เข้าสู่บ่อ ตัวแปรที่เกิดขึ้นในบ่อ ตัวแปรที่ลดลงในบ่อ และตัวแปรที่ปล่อยออกจากบ่อ เปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามเงื่อนไขสมดุลมวล (mass balance) ของระบบบำบัด

6.2.1.9 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดิไนตริฟิเคชัน เปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามตัวแปรสัดส่วนพื้นที่ผิวน้ำที่ถูกปกคลุมโดยพืชลอยน้ำ ที่เปลี่ยนแปลงในบ่อ ฯ

6.2.1.10 พื้นที่ตะกอนที่มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาที่ต้องการ O_2 เปลี่ยนแปลงสอดคล้องตามเงื่อนไขของตัวแปรระดับความชื้นในตะกอน ที่เปลี่ยนแปลงในบ่อ ฯ

6.2.1.11 อัตราของสารอินทรีย์ ในตะกอนลอยตัวขึ้นสู่ชั้นน้ำสอดคล้องตามสัดส่วนตัวแปรพื้นที่ผิวน้ำที่ถูกปกคลุมโดยพืชลอยน้ำ ที่เปลี่ยนแปลงในบ่อ ฯ

<u>หมายเหตุ</u> : ความสามารถในข้อ 6.2.1.10 และ 6.2.1.11 ไม่ได้นำไปใช้ในขั้นการทดสอบข้อมูลจริงและการจำลองสถานการณ์ (โดยแทนค่าเป็น 0) เนื่องจากขาดข้อมูลเชิงตัวเลขทางทฤษฎี

การทดสอบด้วยข้อมูลจริงต้องคำถึงความแตกต่างของแต่ละระบบ การแทนค่าของชุดข้อมูลใหม่ (ได้จากการตรวจวัดคุณภาพน้ำ) ผลที่ได้จากแบบจำลองอาจไม่สอดคล้องกับแนวโน้มของข้อมูลจริงทันที ซึ่งต้องมีการปรับเพิ่มเติม โดยพิจารณาความแตกต่างของค่าและความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลชุดเดิมที่เคยใช้ (ดังตารางภาคผนวก ค 8) กับชุดข้อมูลใหม่ (ดังตารางภาคผนวก ค 9) โดยแบบจำลองแสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นของแบบจำลอง ที่สามารถปรับเปลี่ยนในรายละเอียดเพื่อให้สอดคล้องกับที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด

6.2.2 สรุปสมมติฐานทั้งหมดของแบบจำลองหลังการทดสอบสมมติฐานและข้อมูลจริง

6.2.2.1 ความสัมพันธ์ในรูปปฏิกิริยาชีวเคมีทุกสมการเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ 100%

6.2.2.2 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนแต่ละรูปที่ตรวจวัดได้ในเชิงปริมาณ จะมีตัวแปรสิ่งแวดล้อมเกี่ยวข้อง ได้แก่ ตัวแปรกายภาพ ชีวภาพ เคมี และอื่น ๆ (ดังหัวข้อวิธีวิจัย 3.1.1.2 หน้า 46)

6.2.2.3 Org N ที่เกิดขึ้นในบ่อมีแนวโน้มแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของ N ที่เกิดขึ้นจากซากพืช สาหร่าย และแบคทีเรีย โดย N ที่เกิดจากซากดังกล่าว (เฉพาะส่วนที่เกิดขึ้นในบ่อทั้งหมด) จะถูกเปลี่ยนรูปเป็น Org N ในชั้นน้ำเพียง 1% นอกเหนือจากนี้จะตกตะกอนในบ่อ

6.2.2.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยา ammonification nitrification และ denitrification จะเปลี่ยนแปลงตามความสัมพันธ์จาก pH DO และอุณหภูมิ โดย

ก. pH

- ระดับ pH ที่เหมาะสมต่อแบคทีเรีย nitrifying และ heterotrophic อยู่ในช่วง 6.5 – 7.5 (ดังข้อมูลทฤษฎีตาราง 4) มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจากผลการคำนวณของสมการ (27) โดยมีลักษณะแนวโน้มดังภาพประกอบทฤษฎี 14

ข. DO

- อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย heterotrophic และ nitrifying (ต้องการ O_2) มีแนวโน้มแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของ DO โดยอัตราการเจริญเติบโตจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อ DO > 2 g/m^3 (ดังข้อมูลทฤษฎีตาราง 4) ซึ่งเป็นผลจากสมการภาคผนวก ข (4) และมีลักษณะแนวโน้มดังทฤษฎีภาพประกอบ 10

- อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย denitrifying (ไม่ต้องการ O_2) จะผกผันกับการเปลี่ยนแปลงของ DO คือ เมื่อ DO ของน้ำมากกว่า 0.2 g/m^3 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะน้อยมากหรือเป็นศูนย์ แต่เมื่อ DO ของน้ำในบ่อต่ำกว่า 0.2 g/m^3 อัตราการเจริญเติบโตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณของสมการ (26) และมีลักษณะแนวโน้มดังภาพประกอบทฤษฎี 13

ค. อุณหภูมิ

- อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (สมมติฐานว่าทุกชนิดที่เกี่ยวกับ N) มีแนวโน้มแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยเป็นผลจากการคำนวณของสมการ (19)

หมายเหตุ : เฉพาะอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงระดับ pH, DO และอุณหภูมิ ที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย nitrobacter เกิดขึ้นเพียง 1 – 1.5 % ของผลจากการคำนวณจากสมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

6.2.2.5 NH_4^+-N ที่ลดลงในบ่อโดยพืช สาหร่าย และแบคทีเรียมีแนวโน้มแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณพืช สาหร่าย และแบคทีเรียในบ่อ

6.2.2.6 NH_4^+-N ที่ถูกกำจัดในรูปก๊าซ จะเปลี่ยนแปลงด้วยอิทธิพลของ pH คือ เมื่อ pH ของน้ำสูงกว่า 7 NH_4^+-N จะถูกกำจัดในรูปก๊าซเพิ่มขึ้นตามระดับ pH ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อ pH ของน้ำต่ำกว่า 7 จะไม่เกิดการกำจัดของแอมโมเนียไนโตรเจนในรูปก๊าซ โดยเป็นผลจากการคำนวณของสมการ (28) มีลักษณะของแนวโน้มดังทฤษฎีภาพประกอบ 7

6.2.2.7 NH_4^+-N ที่ถูกกำจัดด้วยปฏิกิริยา nitritation จะเปลี่ยนแปลงด้วยอิทธิพลของสัดส่วน BOD_5:TKN เมื่อสัดส่วน BOD_5:TKN มากกว่า 0.5 โอกาสเกิดปฏิกิริยา nitritation มีน้อยลง (ถ้าอยู่ในช่วง 0.5 – 4 แนวโน้มจะลดลง - 0.074 d^{-1} ถ้า > 4 แนวโน้มจะลดลง - 0.08 d^{-1} ดังภาคผนวก ข 2) และเมื่อสัดส่วนดังกล่าวน้อยกว่า 0.5 ปฏิกิริยา nitritation เกิดได้ปกติ

6.2.2.8 NH_4^+-N และ NH_3-N ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายของ Org (ดังสมการปฏิกิริยาชีวเคมี (15) และ (16)) เพียง 0.1% ที่เข้าสู่การเปลี่ยนรูปเป็นปริมาณ NH_4^+-N ในบ่อโดยตรง ซึ่งส่วนที่เหลือจะถูกใช้ประโยชน์โดยแบคทีเรียหรืออาจถูกกำจัดในรูปก๊าซโดยอิทธิพลของ pH โดยตรง

6.2.2.9 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในบ่อจะอยู่ในรูป NH_4^+ เท่านั้นโดย NH_3 ที่เป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาต่าง ๆ ในบ่อ (ดังสมการปฏิกิริยาชีวเคมี (4) (10) และ (16)) จะถูกเปลี่ยนรูปเป็น NH_4^+ ในบ่อก่อนที่จะกำจัดในรูปก๊าซหรือถูกใช้ประโยชน์ด้วยกรณีอื่น ๆ ในบ่อ

6.2.2.10 บ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำหาดใหญ่มีผักตบชวาและผักกระเฉดปะปนกันสามารถกำจัด SS ได้ 91% (อธิบายการกำหนดสมมติฐาน ดังหมายเหตุของตารางภาคผนวก ค 6)

6.2.2.11 อัตราการเจริญเติบโตของพืชลอยน้ำในบ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำหาดใหญ่เกิดขึ้น 0.065 d^{-1} (อธิบายการกำหนดสมมติฐาน ดังหมายเหตุของตารางภาคผนวก ค 6)

6.2.2.12 อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายในบ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำหาดใหญ่เกิดขึ้น 0.025 d^{-1} (อธิบายการกำหนดสมมติฐาน ดังหมายเหตุของตารางภาคผนวก ค 6)

6.2.2.13 TN ในตะกอนไม่มีการลอยตัวสู่ชั้นน้ำ (เพราะขาดข้อมูล) แต่มีการกำจัดในรูปก๊าซด้วยปฏิกิริยา denitrification

6.2.2.14 TN ในตะกอนจะลดลงด้วยกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแบคทีเรียเท่านั้นและเกิดขึ้นในสัดส่วนที่มากกว่าที่เกิดขึ้นในชั้นน้ำ 5 เท่า ทั้งนี้ต้องพิจารณาความเหมาะสมของ O_2 ในตะกอนต่อการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ (รายละเอียดเพิ่มเติมดังภาคผนวก ก หัวข้อ 1.5.2)

6.2.2.15 ไม่มี N_2 จากอากาศเข้าสู่บ่อบำบัดด้วยการนำพาของฝน (เพราะขาดข้อมูล)

6.2.2.16 ไม่มีการตรึงไนโตรเจนจากอากาศเข้าสู่บ่อโดยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (เพราะขาดข้อมูล)

6.2.217 สัดส่วนการกำจัดไนโตรเจนรูปต่าง ๆ ในชั้นน้ำและตะกอนของบ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำหาดใหญ่เกิดขึ้นดังการประมาณการในภาคผนวก ก

<u>หมายเหตุ</u> : เฉพาะการเกิดปฏิกิริยา denitrification เกิดขึ้นในช่วง 26.3 - 51.3 %

6.2 สรุปผลการจำลองสถานการณ์

จากการทดสอบความสามารถของแบบจำลองด้วยการสร้างสถานการณ์จำลองที่มีโอกาสเกิดขึ้นจริงกับสภาพบ่อบำบัด ฯ ในปัจจุบัน พบว่าสามารถอธิบายผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรที่มีความอ่อนไหว ได้แก่ (1) ตัวแปรที่เข้าสู่บ่อ ได้แก่ ไนโตรเจนที่เข้าสู่บ่อ ความเป็นกรด-ด่าง และสาหร่าย และ (2) ตัวแปรที่เกิดขึ้นในบ่อ ได้แก่ สาหร่ายและพืช ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

สถานการณ์จำลองที่ 1 พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่เข้าสู่บ่อ ฯ แต่ค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นในบ่อให้มีค่าคงเดิม โดยคำนวณในช่วง10 วัน พบว่าตัวแปรที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ตัวแปร NH_4^+-N ที่ถูกกำจัดในบ่อในรูปก๊าซ (โดยเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรความเป็นกรด-ด่าง) และ

ตัวแปร NH_4^+-N และ NO_3^--N ที่ถูกดูดซับเพื่อการสังเคราะห์เซลล์ของสาหร่าย และพืช แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรต่าง ๆ ที่เข้าสู่บ่อ มีผลต่อความสามารถในการบำบัดของบ่อ ฯ ในการบำบัดไนโตรเจนในรูปต่าง ๆ เช่น ฝนตก ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่บ่อ และปริมาณไนโตรเจนรูปต่าง ๆ ที่เข้าสู่บ่อ ฯ ซึ่งหากเราสามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ที่เข้าสู่บ่อได้ จะส่งผลให้ภาระการบำบัดไนโตรเจนของบ่อลดลง

สถานการณ์จำลองที่ 2 เมื่อค่าตัวแปรที่เข้าสู่บ่อคงเดิม แต่ค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นในบ่อ (พืช) เปลี่ยนแปลงโดยคำนวณในช่วง 10 วัน พบว่าตัวแปรที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ตัวแปรปริมาณ Org N และ NH_4^+-N ในบ่อ (โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยลงเมื่อมีการเก็บเกี่ยวซากพืช ในสถานการณ์จำลองที่ 2.2) ตัวแปรสาหร่ายที่ถูกกำจัดในบ่อ ตัวแปร NO_3^--N และ NH_4^+-N ที่ถูกดูดซับเพื่อการสังเคราะห์เซลล์ของสาหร่ายและพืช และตัวแปร NO_3^--N ที่ถูกกำจัดในรูปก๊าซ แสดงให้เห็นว่าตัวแปรต่าง ๆ ภายในบ่อ มีผลต่อความสามารถในการบำบัดของบ่อ เช่นเดียวกัน เช่น ปริมาณสาหร่าย และพืชที่เจริญเติบโตในบ่อ โดยการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ผิวของการปกคลุมของพืช มีส่วนทำให้การบำบัดไนโตรเจนเพิ่มขึ้น และเป็นการลดสาหร่ายภายในบ่อ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของค่า SS ที่ออกจากบ่อ แต่หากพืชที่ตายไม่ถูกกำจัดออกจากบ่อ จะเป็นการเพิ่มสารอินทรีย์ภายในบ่อ ซึ่งจะรบกวนความสามารถในการบำบัดไนโตรเจนของจุลินทรีย์ และเป็นการเพิ่ม SS ภายในบ่ออีกทางหนึ่ง ซึ่งมีส่วนให้ค่า SS ในน้ำออกมีค่าเพิ่มขึ้นได้อีกทางหนึ่ง

ผลจากการจำลองสถานการณ์ ทั้ง 2 ทำให้คาดการสาเหตุหนึ่งของการเกิดปัญหาในบ่อบำบัด ฯ ปัจจุบัน ว่าอาจเกิดจากซากพืชที่ตายบ่อ และสัดส่วนพื้นที่ผิวที่พืชปกคลุมไม่เพียงพอ ซึ่งปัญหา ค่า SS สูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง จากการตรวจวัดน้ำที่ออกจากระบบบำบัด และประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนรูปต่าง ๆ กรณีนี้สามารถทุเลาปัญหาได้ ด้วยการจัดการซากพืชอย่างสม่ำเสมอ และหาวิธีกระจายการปกคลุมผิวน้ำของพืชให้ทั่วทั้งในบ่อ หรือเพิ่มขึ้น จะช่วยบรรเทาปัญหาดังกล่าวได้ในอนาคต

สรุปโดยภาพรวมงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาต้นแบบจำลองพลวัตระบบ ซึ่งต้องใช้การเรียนรู้หลายด้านไปพร้อม ๆ กัน ทั้งทฤษฎีการกำจัดไนโตรเจน ทฤษฎีพลวัตระบบ การทำงานของบ่อบำบัด ฯ และการใช้โปรแกรม Vensim PLE Plus 5.4 ผลจากการพัฒนาแบบจำลองอย่างต่อเนื่องไปพร้อมกับการเรียนรู้ คือ ต้นแบบจำลองของไนโตรเจนที่ครอบคลุมตัวแปร ปัจจัยในการกำจัดไนโตรเจนรูปต่าง ๆ ในบ่อบำบัด ฯ ซึ่งแบบจำลองที่ได้สามารถใช้ทดลองปรับเปลี่ยนค่าตัวแปร

และศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงที่มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับสมมติฐานทางทฤษฎี ซึ่งจะช่วยชี้แนะปัญหานำไปสู่การวางแผนการจัดการของการปรับปรุงแก้ไขการทำงานของบำบัด ฯ

6.4 ปัญหาอุปสรรค และโอกาสในการพัฒนา

6.4.1 ปัญหาอุปสรรคในการวิจัย แบ่งได้เป็น ดังนี้

- การขาดข้อมูลในพื้นที่ศึกษาที่เพียงพอ และมีความต่อเนื่องของการเก็บข้อมูล ทำให้เป็นอุปสรรคในการการนำข้อมูลจริงมาสร้างความสัมพันธ์ และรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ทำได้ไม่ครอบคลุมทุกตัวแปร ปัจจัย จึงต้องอาศัยการศึกษาจากทฤษฎี และการตั้งสมมติฐานร่วมด้วย เพื่อให้สามารถพัฒนาแบบจำลองที่ครอบคลุมตัวแปร ปัจจัยที่สำคัญ ต่อการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนรูปต่าง ๆ เช่นข้อมูลที่ได้มีการรวบรวม จากการวิจัยเอกสารของระบบบำบัดของเทศบาลนครหาดใหญ่ พบว่า มีการเก็บค่าตัวแปรไนโตรเจนเพียงตัวแปรที่นิยมกัน เช่น ไนโตรเจนรวม (TN) ดังนั้นจึงต้องประยุกต์ใช้สัดส่วนแต่ละรูปของไนโตรเจนในทางทฤษฎีร่วมด้วย

- ด้วยการรวบรวม และประยุกต์ใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงในสมการทางทฤษฎีต่างๆ อาจทำให้ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือในระดับทฤษฎี แต่อาจไม่สอดคล้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาจริงในพื้นที่ จึงต้องมีการปรับแก้ โดยการปรับค่าตัวแปรอัตราต่าง ๆ โดยอยู่บนพื้นฐานของความสอดคล้องกับค่าที่เกิดขึ้นจริงจากข้อมูลในพื้นที่ที่มีอยู่ ทำให้ผลที่ได้เป็นอุปสรรคต่อความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง

- การสร้างแบบจำลองตามทฤษฎีพลวัตระบบ และการใช้โปรแกรม เป็นสิ่งใหม่ในประเทศไทย ซึ่งจากการวิจัยเอกสารในช่วงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2545 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2546 ไม่พบเอกสารงานวิจัยใดในประเทศไทยที่ศึกษาภายใต้กรอบแนวคิดนี้ จึงเป็นอุปสรรคให้ต้องใช้เวลามากในการศึกษาค้นคว้าเอกสาร งานวิจัยตัวอย่างจากต่างประเทศ เพื่อทำความเข้าใจ ก่อนจะพัฒนาแบบจำลองออกมาโดยใช้กระบวนการลองผิดลองถูก กว่าที่จะได้ออกมาเป็นต้นแบบจำลองนี้

- ด้วยเวลาค้นคว้าที่มีอยู่อย่างจำกัด จากขอบเขตของเวลาในการศึกษาระดับปริญญาโท และภาระหน้าที่การทำงานที่เป็นอุปสรรค ทำให้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาตัวแบบออกมาเพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อไป แต่จากการทดสอบด้วยข้อมูลจริงที่มีอยู่ พบว่าสามารถอธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนได้อย่างมีเหตุ มีผล และคาดหวังว่าหากมีการนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อทวนสอบ หรือมีการพัฒนาต่อ จะช่วยให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้นในอนาคต

6.4.2 โอกาสในการพัฒนา

แนวโน้มในศึกษาทฤษฎีพลวัตระบบ รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้คาดว่าจะมีความเป็นไปได้สูงในอนาคต จากแนวโน้มของกระแสแนวคิดแบบองค์รวม และการบูรณาการสิ่งต่างๆ เข้าด้วยกัน รวมไปถึงการเข้าใจถึงหลักการของความเป็นพลวัตในทุก ๆ ระบบที่มีมากขึ้น ซึ่งจากการที่ผู้วิจัยได้เข้าร่วมนำเสนองานวิจัยนี้ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 3 ได้รับการตอบรับจากทางสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมถึงความสนใจงานวิจัยนี้ จึงเป็นสัญญาณหนึ่งที่ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ และการขยายตัวในการศึกษาวิจัยด้านนี้ในอนาคตอันใกล้นี้

6.5 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป แบ่งได้เป็นดังนี้

- การพัฒนาแบบจำลองต่อจากต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้ ควรที่จะได้มีการขยายช่วงเวลาของการจำลองสถานการณ์จำลองให้กว้างขึ้น อาจเป็น เดือน หรือปี ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์จากฐานข้อมูลที่มีการเก็บข้อมูลยาวนานขึ้น งานวิจัยจึงควรจะมีทั้งงานวิจัยเพื่อพัฒนาฐานข้อมูล และงานวิจัยเพื่อนำข้อมูลมาปรับปรุงแบบจำลองให้ดีขึ้น

- ต้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ ไม่ได้แจกแจงบ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำเป็นบ่อย่อย ๆ แต่จะอาศัยภาพรวมของทั้ง 5 บ่อ ดังนั้น ในการพัฒนาแบบจำลองต่อไป เราสามารถแจกแจงออกเป็นบ่อย่อย ๆ ได้ เพื่อเข้าใจถึงปัจจัยความแตกต่างในแต่ละบ่อ ฯ ซึ่งจะช่วยให้การนำมาใช้เป็นเครื่องมือเพื่อการติดตามตรวจสอบสามารถทำได้ดียิ่งขึ้น

- จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองมีความสามารถในการจำลองสถานการณ์ และสามารถเชื่อมโยงกับตัวแปรในเรื่องน้ำเสียอื่นๆ ในระบบการบำบัดน้ำเสียได้ ดังนั้น เราสามารถพัฒนาแบบจำลองเพื่อการบำบัดน้ำเสียในภาพรวมทั้ง สารอินทรีย์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และอื่น ๆ เป็นแบบจำลองที่บูรณาการทุกตัวแปร ปัจจัยด้านการบำบัดน้ำเสียเข้าด้วยกัน

- การวิจัยเพื่อศึกษาหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนในรูปแบบต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษาเป็นสิ่งที่จะช่วยให้แบบจำลองสามารถคำนวณและแสดงผลการคำนวณได้แม่นยำและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นได้

- แบบจำลองสามารถพัฒนาจนเป็นโปรแกรมใช้งานตัวหนึ่งโดยนำเสนอในรูปแบบที่ง่ายต่อความเข้าใจในระดับคนทั่วไปนำไปใช้งานได้ ซึ่งจะสามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจได้ในระดับหนึ่ง เพราะภายในแบบจำลองได้คำนึงถึงความสัมพันธ์จำนวนมาก แต่ควรมี

การปรับปรุงในใช้งานได้ง่าย สำหรับผู้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้จริง แต่จำเป็นต้องใช้โปรแกรม Vensim ในการพัฒนาในรุ่นที่สูงกว่านี้

- ต้นแบบจำลองนี้สร้างขึ้นโดยอ้างอิงตัวแปรที่มาจากทฤษฎี และดำเนินการปรับแก้ให้สอดคล้องกับสภาพพื้นที่ ของบ่อบำบัดของเทศบาลนครหาดใหญ่ ดังนั้น อาจสามารถนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้กับบ่อบำบัดน้ำเสียร่วมกับพืชลอยน้ำที่มีความใกล้เคียงกับของเทศบาลนครหาดใหญ่ได้ แต่ควรมีการวิเคราะห์ตัวแปรใหม่ และปรับแก้แบบจำลอง เพื่อความสอดคล้องกับพื้นที่ใหม่ที่ศึกษา และพัฒนาให้ถึงขั้นทดสอบใช้จริงและติดตามผลการใช้งานด้วย ซึ่งจะทำให้งานวิจัยนี้เกิดประโยชน์มากขึ้น