บทที่ 3

วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการสร้างต้นแบบ ซึ่งเป็นเครื่องมือเพื่อใช้ในการติดตามตรวจสอบการกำจัดไนโตรเจนของบ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวข้องตามเวลา ซึ่งอาศัยข้อมูลทางทฤษฎีในการกำจัดไนโตรเจน (สมการเคมีและจลศาสตร์) โครงสร้างของบ่อบำบัด ฯ หาดใหญ่ และทฤษฎีพลวัตระบบ ตามกรอบแนวคิดการวิจัยดังภาพประกอบ 18 โดยมีขั้นตอน ดังนี้

3.1 กำหนดตัวแปร ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และค่าเริ่มต้นของตัวแปร

3.1.1 <u>ตัวแปร</u> ในที่นี้หมายถึง องค์ประกอบใด ๆ ที่มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกันอยู่ในระบบที่พิจารณา ซึ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องในระบบการกำจัดไนโตรเจนในบ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำประกอบด้วยตัวแปรหลักและตัวแปรสิ่งแวดล้อม ดังนี้

3.1.1.1 ตัวแปรไนโตรเจน ได้แก่ ไนโตรเจนรูปต่างๆ ที่สามารถวัดได้ในรูปปริมาณ ได้แก่ Organic, NH_4^+ & NH_3, NO_2^- และ NO_3^- ในน้ำ และ TN ในตะกอน

3.1.1.2 ตัวแปรสิ่งแวดล้อม ในที่นี้หมายถึง ตัวแปรหรือปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไนโตรเจน โดยเป็นที่มาของไนโตรเจนหรือมีผลต่อการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจน ซึ่งตัวแปรสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย

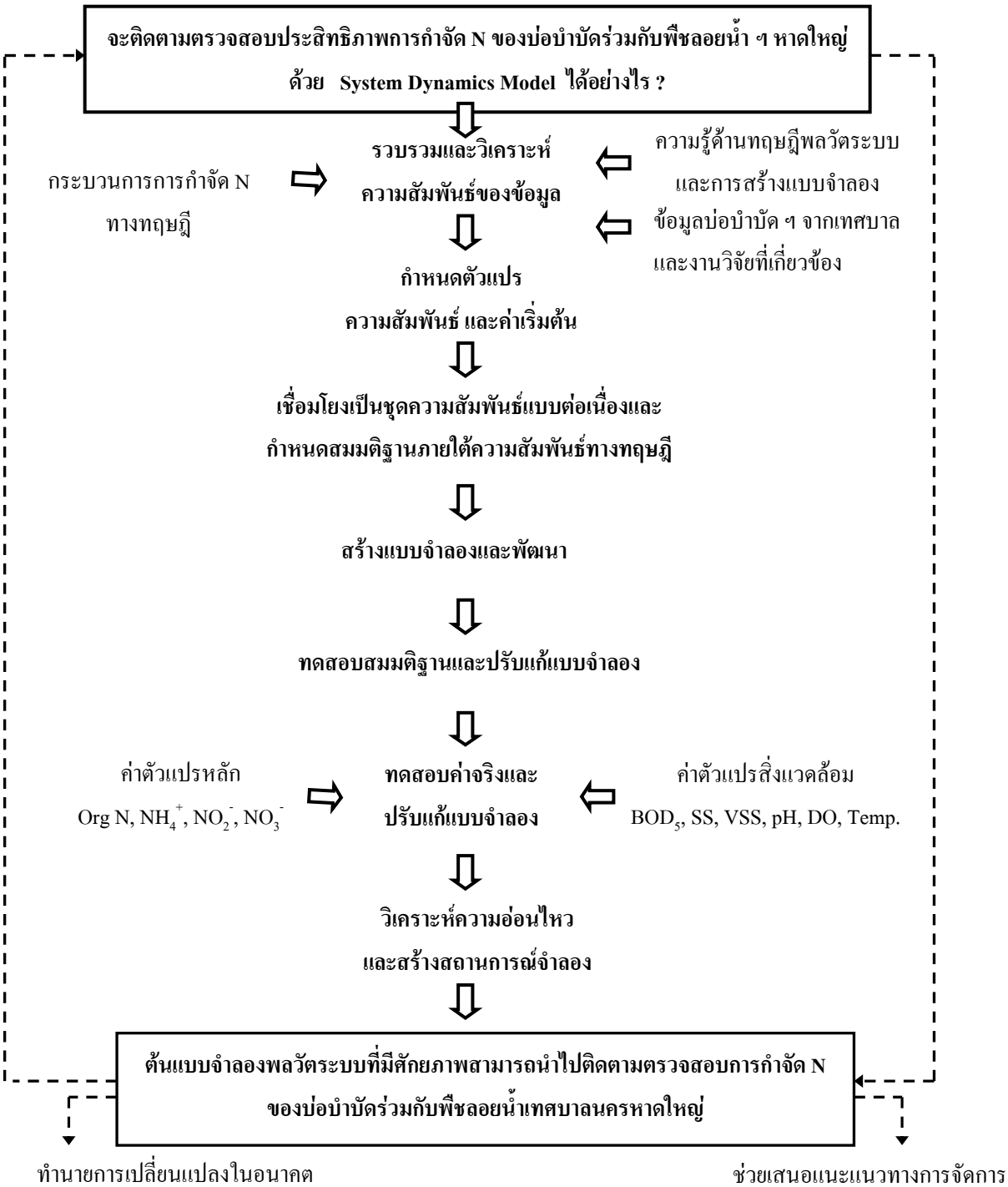
ก. ตัวแปรสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ โครงสร้างของระบบ เช่น ปริมาตรของน้ำในบ่อ อัตราการไหลของน้ำ เป็นต้น และตัวแปรกายภาพจากภายนอก เช่น น้ำฝน เป็นต้น

ข. ตัวแปรสิ่งแวดล้อมทางเคมี ได้แก่ pH, DO, BOD_5/COD และตัวแปรเคมีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนในรูปความสัมพันธ์ของสมการปฏิกิริยาเคมี เช่น H_2O, CO_2 และCH_4 เป็นต้น

ค. ตัวแปรสิ่งแวดล้อมทางชีวภาพ ได้แก่

(1) พืชลอยน้ำ ซึ่งพืชลอยน้ำที่พบในบ่อบำบัด ฯ หาดใหญ่ คือ ผักตบชวาและผักกระเฉด

กรอบแนวคิดในการวิจัย (Procedural - concept framework)



ภาพประกอบ 18 กรอบแนวคิดในการวิจัย

(2) สาหร่าย คำนึงถึงสาหร่ายโดยรวมเพราะดูดซับไนโตรเจนได้ แต่ที่มีบทบาทเกี่ยวข้องกับไนโตรเจนเป็นพิเศษ ได้แก่ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เพราะสามารถตรึงไนโตรเจนในอากาศเข้าสู่บ่อใหม่ และสาหร่าย chorella ที่มีบทบาทในการเปลี่ยนรูปไนโตรเจน

(3) แบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับไนโตรเจน ได้แก่ แบคทีเรีย heterotrophic, nitrifying (nitrosomonas และ nitrobacter) และ denitrifying

(4) ปลา พิจารณาภาพรวมในบ่อบำบัดร่วมพืชลอยน้ำ ฯ หาดใหญ่มีปลาอยู่บ้าง โดยตัวแปรนี้จะเป็นไปในลักษณะการเติมเข้าไปในระบบได้ ซึ่งภายใต้สมมติฐานจากสภาพความเป็นจริงในปัจจุบัน ปลาที่อยู่ในระบบนี้เกิดจากภาวะทางธรรมชาติ

ง. ตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ ตัวแปรในสมการจลศาสตร์ เช่น μ_{nm}, K_n และ Y_n เป็นต้น โดยเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียที่มีผลต่อการกำจัดไนโตรเจน

อนึ่งอาจมีปัจจัยโดยอ้อมที่มีผลต่อตัวแปรสิ่งแวดล้อมทางชีวภาพดังกล่าวข้างต้น โดยเฉพาะฟอสฟอรัส ซึ่งอาจมีผลต่อจำนวนสาหร่ายและพืชลอยน้ำ อย่างไรก็ตามภายใต้การศึกษาครั้งนี้มีข้อสมมติฐานไม่พิจารณาถึงปัจจัยโดยอ้อมดังกล่าว

3.1.2 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร</u> มี 2 รูปแบบความสัมพันธ์ ได้แก่

3.1.2.1 ความสัมพันธ์ในรูปสมการปฏิกิริยาชีวเคมี เช่น ไนโตรเจนในน้ำถูกพืชดูดซับเพื่อใช้ในการสังเคราะห์เซลล์ โดยมีความสัมพันธ์เกิดขึ้นดังสมการ (1) (2) และ (3) เป็นต้น

3.1.2.2 ความสัมพันธ์ในรูปสมการจลศาสตร์ เช่น อัตราการรีดิวซ์ของ NO_3-N เป็นผลจากการคำนวณของสมการ (27) โดยมีตัวแปร DO และ COD เข้ามาเกี่ยวข้อง เป็นต้น

3.1.3 <u>ค่าเริ่มต้นของตัวแปร</u> มี 2 ประเภท ได้แก่

3.1.3.1 ค่าเริ่มต้นที่ไม่ต้องเปลี่ยน ซึ่งเป็นค่าของตัวแปรที่มาจากการวิจัยเอกสารต่าง ๆ ดังนี้

(1) ค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและการทำงานของบ่อ เช่น ปริมาตรของน้ำในบ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำหาดใหญ่ประมาณ 694,900 m^3 และอัตราการไหลของน้ำประมาณ 69,120 m^3/day (เทศบาลนครหาดใหญ่, 2540) เป็นต้น

(2) ค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในสมการปฏิกิริยาชีวเคมี เช่น ค่าน้ำหนักโมเลกุลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปไนโตรเจน เช่น NH_4^+-N 14 g ที่เปลี่ยนรูปเป็น NO_2^--N ต้องใช้ HCO_3^- 109.8 g (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) เป็นต้น

(3) ค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในสมการจลศาสตร์ เช่น μ_{nm} ของแบคทีเรียไนโตรโซโมนาสมีค่าทั่วไปเท่ากับ 0.7 g VSS/g VSS*d (กรมควบคุมมลพิษ, ม.ม.ป.) เป็นต้น

3.1.3.2 ค่าเริ่มต้นที่ต้องเปลี่ยน ซึ่งเป็นค่าของตัวแปรไนโตรเจนและตัวแปรสิ่งแวดล้อมที่มาจากการตรวจวัดคุณภาพน้ำ โดยเปลี่ยนเมื่อต้องการให้สอดคล้องกับสภาพปัจจุบันของบ่อ ณ เวลานั้น ๆ

3.2 พัฒนาชุดของสมการทางคณิตศาสตร์เชื่อมโยงเป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่อง และกำหนดสมมติฐานภายใต้ความสัมพันธ์ทางทฤษฎี

โดยตัวแปร ความสัมพันธ์ และค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ที่ได้จากการวิจัยเอกสารขั้นต้นนำมาพัฒนาเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นและเชื่อมโยงให้สัมพันธ์กันแบบต่อเนื่อง โดยจัดกลุ่มเป็นชุดความสัมพันธ์ย่อย ๆ ของไนโตรเจนและตัวแปรสิ่งแวดล้อม ที่คำนึงถึงความสอดคล้องกับการทำงานของบ่อ หลักการของแบบจำลอง และสมมติฐานหลักของการเชื่อมโยงระหว่างตัวแปรไนโตรเจนและตัวแปรสิ่งแวดล้อม คือ “ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในบ่อเปลี่ยนแปลงตามความสัมพันธ์จากตัวแปรสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง”

สมมติฐานต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้นจากการเชื่อมโยงตัวแปรไนโตรเจนกับตัวแปรสิ่งแวดล้อมต้องมีข้อมูลหรือรูปแบบการเปลี่ยนแปลงทางทฤษฎีรองรับ โดยเน้นตัวแปรและความสัมพันธ์ที่มีข้อมูลเชิงตัวเลขอ้างอิง

3.3 ออกแบบและพัฒนาโครงสร้างความสัมพันธ์ของแบบจำลอง

ใช้โปรแกรม VensimPLE เวอร์ชัน 5.4 ในการออกแบบและพัฒนาแบบจำลอง โดยแยกเป็นแบบจำลองย่อยตามชุดความสัมพันธ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งในการพัฒนานั้นจะเริ่มต้นจากแบบจำลองขั้นต้นที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก แล้วพัฒนาเพิ่มตัวแปรและเชื่อมโยงความสัมพันธ์มากขึ้นจนได้แบบจำลองที่ครอบคลุม โดยขอบเขตของการขยายแบบจำลอง คือ ครอบคลุมตัวแปรที่มีข้อมูลเชิงตัวเลขอ้างอิงทางทฤษฎี

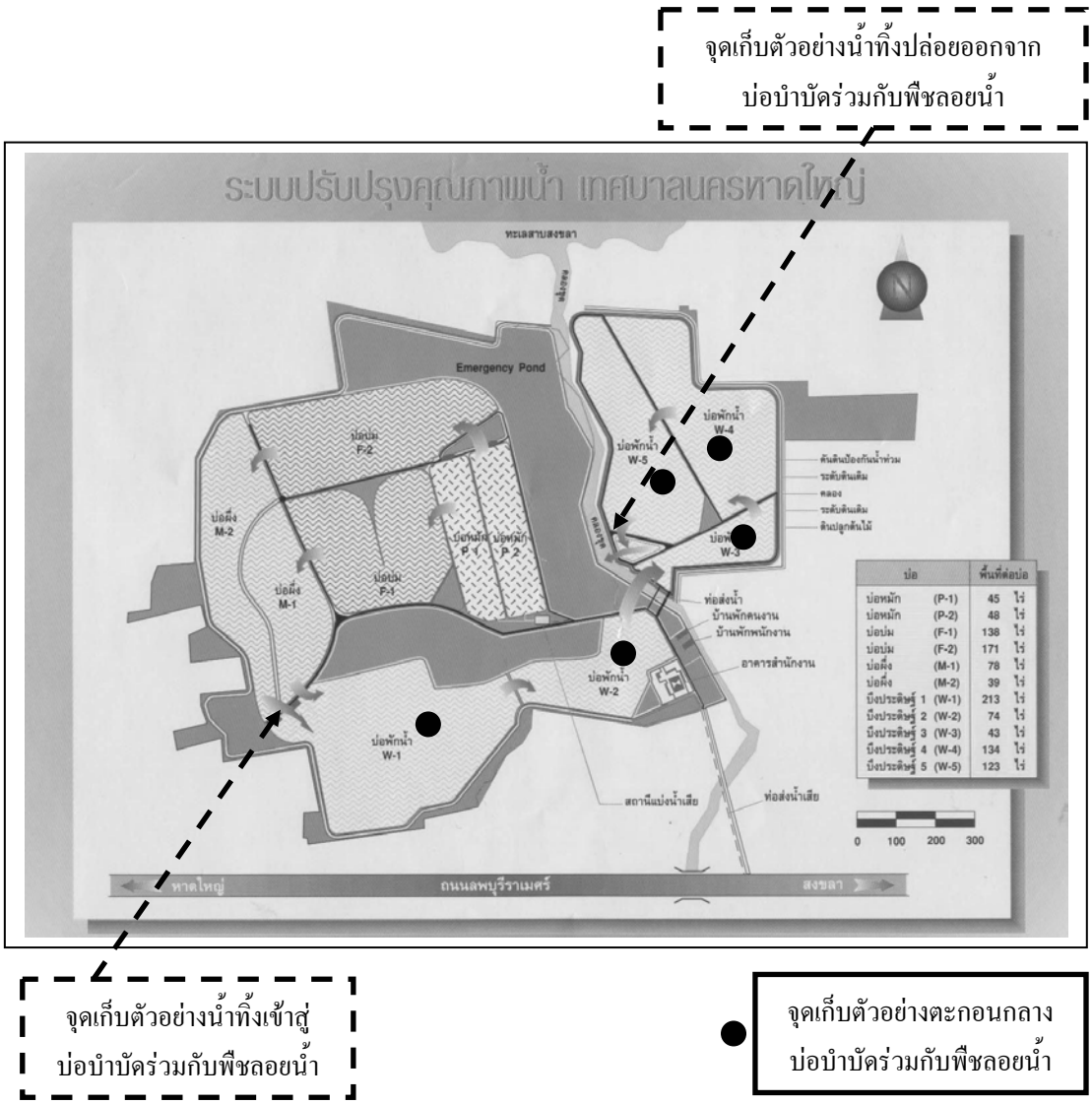
3.4 ทดสอบสมมติฐานและปรับแก้แบบจำลอง

ทดลองแปรค่าในแบบจำลอง เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่สนใจ ว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องตามข้อมูลหรือรูปแบบทางทฤษฎีที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้

หรือไม่ หากแนวโน้มไม่ได้ตามสมมติฐานทำการปรับแก้ความสัมพันธ์หรือเพิ่มลดตัวแปร เพื่อให้ได้แนวโน้มใกล้เคียง

3.5 เก็บข้อมูลตัวแปรไนโตรเจนและตัวแปรสิ่งแวดล้อมในพื้นที่จริง

เก็บข้อมูลตัวแปรสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ เช่น พื้นที่พืชลอยน้ำปกคลุม สภาพของพืชลอยน้ำ (ความเหี่ยวเฉา) ฝนตก เป็นต้น และเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอน (ดังภาพประกอบ 19) โดยเก็บน้ำที่จุดน้ำทิ้งเข้าและออกจากบ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำ และเก็บตะกอนกลางบ่อย่อยทั้ง 5 บ่อ พร้อมทั้งวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังตาราง 13 และ 14 ซึ่งทั้งหมดทำการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง ห่างกัน 10 วัน ซึ่งคำนึงถึงระยะเวลาเก็บกักน้ำของบ่อ (ดังสมการ (32) และข้อมูลที่ได้ส่วนนี้จะเป็นค่าเริ่มต้นกลุ่มที่ต้องเปลี่ยนในแบบจำลองเมื่อถึงขั้นทดสอบด้วยข้อมูลจริง



ภาพประกอบ 19 จุดเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอนของบ่อบำบัดร่วมกับพืชลอยน้ำของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ (เทศบาลนครหาดใหญ่, 2540)

ตาราง 13 พารามิเตอร์ของตัวแปรหลักและวิธีวิเคราะห์

ตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์	ตัวแปรหลัก	วิธีวิเคราะห์**
น้ำ	TKN	Preliminary distillation step, Titrimetric method
	NH_3-N	Phenate method
	NO_2^--N	Colorimetric method
	NO_3^--N	Cadmium reduction method
ดิน	TN	Macro-kjedahl method

ตาราง 14 พารามิเตอร์ของตัวแปรสิ่งแวดล้อมและวิธีวิเคราะห์

ตัวแปรสิ่งแวดล้อม*	วิธีการวิเคราะห์**
อุณหภูมิ	Thermometer
pH	pH meter
DO	Azide modification method
BOD	Azide modification method
COD	Closed reflux, Titrimetric method
Alkalinity	Tritation method
SS	Dried at 103 ^oC
VSS	Ignited at 550 ^oC

* วิเคราะห์เฉพาะน้ำ

** APHA, AWWA and WEF, 1998, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th edition, American Public Health Association, Washington D.C.

คำนวณระยะเวลาเก็บกักน้ำของบ่อ (hydraulic retention time, HRT) ดังสมการ (32)

$$HRT(day) = \frac{V(m^3)}{Q(\frac{m^3}{day})} = 10\ day = \left(\frac{694,900\ m^3}{69,120\ \frac{m^3}{day}} \right) \quad \text{....(32)}$$

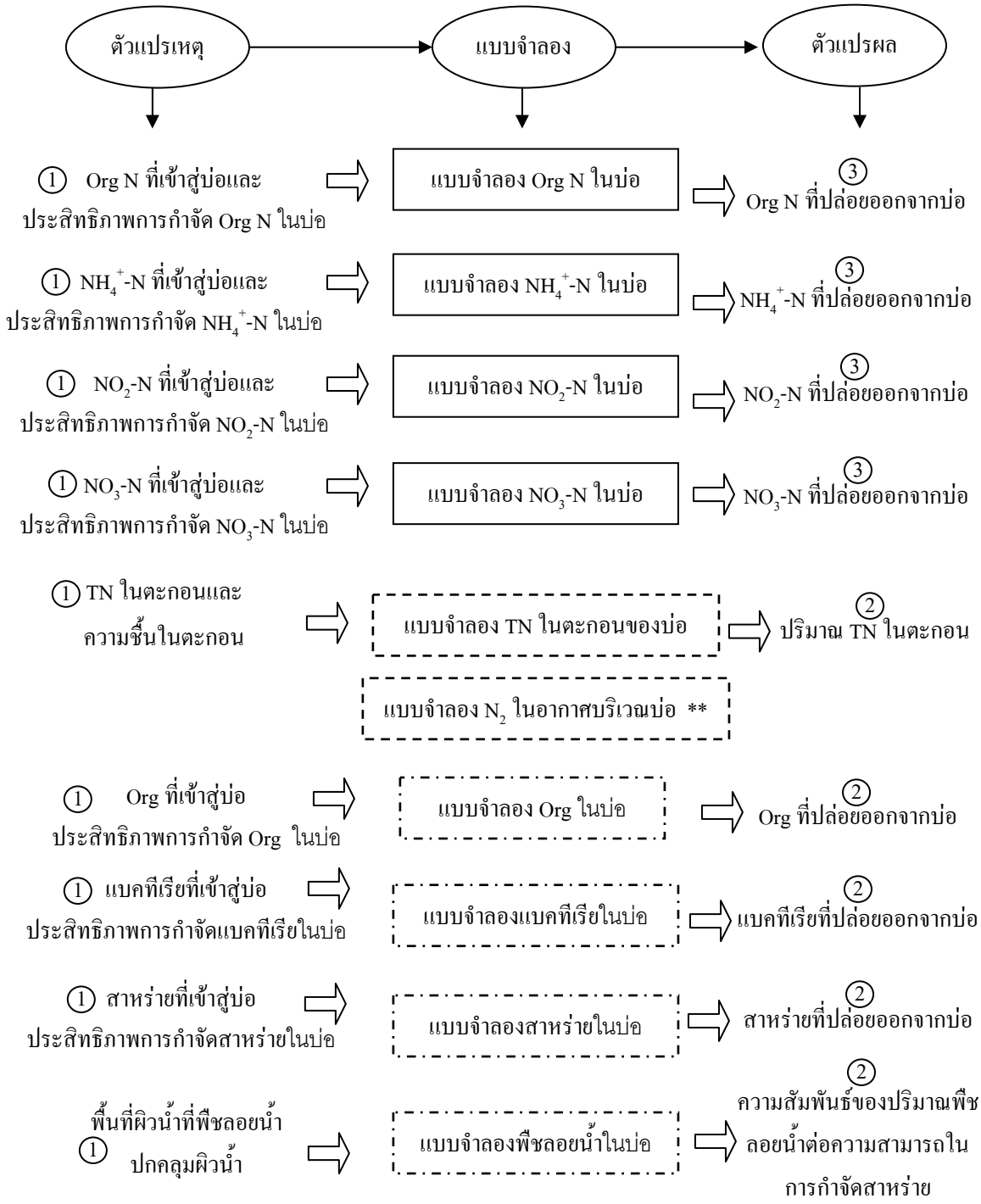
เมื่อ V = ปริมาตรน้ำในบ่อ = 694,900 m^3 (เทศบาลนครหาดใหญ่, 2540)

Q = อัตราการไหลของน้ำ = 69,120 m^3/day (เทศบาลนครหาดใหญ่, 2540)

3.6 ทดสอบแบบจำลองด้วยข้อมูลจริง และปรับแก้แบบจำลอง

โดยเริ่มด้วยการแทนค่าเริ่มต้นที่เป็นข้อมูลจริงในทุกแบบจำลองย่อยในช่วงวันที่ 0 และ 10 จากนั้นควบคุมค่าในแบบจำลองตัวแปรสิ่งแวดล้อม (ได้แก่ แบบจำลอง Org แบบจำลองแบคทีเรีย แบบจำลองสาหร่าย และแบบจำลองพืชลอยน้ำ) และแบบจำลองไนโตรเจนกลุ่มรอง (ได้แก่ แบบจำลอง TN ในตะกอนและแบบจำลอง N_2 ในอากาศบริเวณบ่อ) เพื่อให้ตัวแปรผลในแบบจำลองย่อยทั้ง 2 กลุ่มดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลจริง จากนั้นดูแนวโน้มของตัวแปรผลในแบบจำลองไนโตรเจนกลุ่มหลัก ได้แก่ ตัวแปร Org N, NH_4^+-N, NO_2^--N และ NO_3^--N ที่ปล่อยออกจากบ่อ ซึ่งดูค่าในวันที่ 0 และ 10 ว่าสอดคล้องกับข้อมูลจริงหรือไม่ หากไม่สอดคล้องทำการปรับแก้

การปรับแก้ในแต่ละแบบจำลอง ทำได้โดยการพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลให้ตัวแปรผลในแบบจำลองไนโตรเจนหลักนั้น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด จากนั้นทวนสอบสมมติฐานเดิมของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ส่งผลต่อแบบจำลองไนโตรเจนหลักนั้น ๆ ทดลองแปรค่าตัวแปรที่ส่งผลดังกล่าวในระดับต่าง ๆ เพื่อดูความสอดคล้องของตัวแปรผลกับข้อมูลจริง สุดท้ายปรับแก้สมมติฐานใหม่ เพื่อให้สอดคล้องกับการแปรค่าขั้นต้น ซึ่งภาพรวมของการทดสอบแบบจำลองด้วยข้อมูลจริง สรุปดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 แผนผังการทดสอบแบบจำลองด้วยข้อมูลจริง

หมายเหตุ : ▭ คือ แบบจำลองไนโตรเจนกลุ่มหลัก, ▭ คือ แบบจำลองไนโตรเจนกลุ่มรอง

▭ คือ แบบจำลองตัวแปรสิ่งแวดล้อม ** คือ แบบจำลองที่ขาดข้อมูล

① คือ ตัวแปรที่แทนค่าในแบบจำลอง, ② คือ ตัวแปรผลที่ต้องควบคุมค่าในแบบจำลอง

③ คือ ตัวแปรผลหลักที่ทำให้ต้องตรวจสอบสมมติฐานและปรับแก้ เพื่อให้ค่าตัวแปรผลหลักสอดคล้องกับข้อมูลจริง

3.7 ทดสอบความอ่อนไหวและสร้างสถานการณ์จำลอง

3.7.1 ทดสอบความอ่อนไหวโดยจำแนกตัวแปรเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

3.7.1.1 ตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์ความอ่อนไหว คือ ตัวแปรไนโตรเจนและตัวแปรสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรผลหลักของแบบจำลอง (ได้แก่ ตัวแปรผลในแบบจำลอง Org N, NH_4^+-N, NO_2^--N และ NO_3^--N) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

- กลุ่มตัวแปรที่มีข้อมูลความอ่อนไหวทางทฤษฎี คือ ตัวแปรที่มีข้อมูลทางทฤษฎีเชิงตัวเลขที่เกี่ยวข้องต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจน ได้แก่ อุณหภูมิ DO และpH

(1) อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์ต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดังหัวข้อ 2.3.5.1 ข้อย่อย (ง) หน้า 26 และ 2.3.5.2 ข้อย่อย (ง) หน้า 29

(2) DO มีความสัมพันธ์ต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดังหัวข้อ 2.3.5.1 ข้อย่อย (ค) หน้า 26 และ 2.3.5.2 ข้อย่อย (ข) หน้า 28

(3) pH มีความสัมพันธ์ต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียดังหัวข้อ 2.3.5.1 ข้อย่อย (จ) หน้า 27 และ 2.3.5.2 ข้อย่อย (ค) หน้า 28

- กลุ่มตัวแปรที่ไม่มีข้อมูลความอ่อนไหวทางทฤษฎี คือ ตัวแปรที่ขาดข้อมูลทางทฤษฎีเชิงตัวเลขที่เกี่ยวข้องต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจน ได้แก่ พืช สาหร่าย แบคทีเรีย อินทรีย์สาร (ยกเว้นปลาไม่ได้นำมาพิจารณา เพราะปลาไม่ได้เก็บข้อมูลในพื้นที่จริง แต่ตัวแปรอื่น ๆ สามารถประมาณการจากพารามิเตอร์ที่ได้ทำการตรวจวัด เช่น ปริมาณสาหร่ายประมาณการจากค่า VSS เป็นต้น)

3.7.1.2 ตัวแปรชี้วัด คือ ตัวแปรผลจุดสุดท้ายของไนโตรเจนที่มักจะให้ความสำคัญเป็นพิเศษ (คือ ตัวแปรเดียวกับตัวแปรผลหลักของแบบจำลอง) ได้แก่ ไนโตรเจนรูปต่าง ๆ ที่ถูกปล่อยออกจากบ่อ ซึ่งจะรวมเป็นตัวแปรเดียว คือ ไนโตรเจนรวม (total nitrogen, TN) เพื่อความสะดวกในการทดสอบ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟตัวแปรผลนี้ ที่จุดปลายของการวิเคราะห์ คือ วันที่ 20

ในการทดสอบจะเลือกปรับค่าตัวแปรเหตุทีละตัวแปร โดย

- กลุ่มตัวแปรที่มีข้อมูลความอ่อนไหวทางทฤษฎี จะปรับค่า โดยเพิ่มจากเดิม 10% และลดจากเดิม 10% ของค่าปกติที่เป็นอยู่ เหตุผลที่ปรับค่าเพิ่มลดเพียง 10% นั้น เป็นเพราะตัวแปรกลุ่มนี้มีข้อมูลความอ่อนไหวทางทฤษฎี สามารถส่งผลให้ตัวแปรชี้วัดมีการเปลี่ยนแปลงง่าย โดยการทดสอบนั้นจะเลือก 1 ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรชี้วัดมากที่สุด เพื่อนำไปสร้างสถานการณ์จำลอง

- กลุ่มตัวแปรที่ไม่มีข้อมูลความอ่อนไหวทางทฤษฎี จะปรับค่า โดยเพิ่มจากเดิม 20% และลดจากเดิม 20% ของค่าปกติที่เป็นอยู่ เหตุผลที่ปรับค่าเพิ่มลดมากกว่ากลุ่มแรกนั้น เป็นเพราะตัวแปรกลุ่มนี้ไม่มีข้อมูลความอ่อนไหวทางทฤษฎี เมื่อแปรค่าแล้วจะส่งผลให้ตัวแปรชี้วัดให้มีการเปลี่ยนแปลงยากกว่าตัวแปรกลุ่มแรก โดยการทดสอบนั้นจะเลือก 3 ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรชี้วัดมากที่สุด เพื่อนำไปสร้างสถานการณ์จำลอง

3.7.2 การสร้างสถานการณ์จำลอง นำตัวแปรที่มีความอ่อนไหวขั้นต้นมาสร้างสถานการณ์จำลอง โดยสมมติสถานการณ์ที่ตัวแปรดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงพร้อม ๆ กันทั้ง 4 ตัวแปรหรืออาจเปลี่ยนแปลงเฉพาะบางตัวแปร แล้วดูผลการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลอง ว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องตามความสัมพันธ์ทางทฤษฎีหรือไม่ พร้อมทั้งนำเสนอแนวทางจัดการ เพื่อโอกาสที่จะได้นำไปใช้จริง

ผลจากการจำลองสถานการณ์ จะนำเสนอแนวโน้มที่คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงในอนาคตอีก 10 วัน คือ เส้นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงในช่วง วันที่ 10 ถึงวันที่ 20 โดยคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมจากข้อมูลในอดีต (ผลจากการทดสอบด้วยข้อมูลจริงวันที่ 0 ถึงวันที่ 10)