แบบจำลองแผนภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน

Pictorial Model of Organic Matter Treatment in Free Water Surface Constructed Wetland

ธิวาริ โอภิธากร[1*], สุทธิสา ยาอีด[2]
Thiwari Ophithakorn[1*], Sutisa Yaeed[2]

บทคัดย่อ

แบบจำลองแผนภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินโดยการใช้ STELLA ถูกพัฒนาเพื่อการวิเคราะห์พลวัตระบบ แบบจำลองประกอบด้วยแบบจำลองกลไกการบำบัดสารอินทรีย์และแบบจำลองทางชลศาสตร์ โดยการแยกองค์ประกอบระบบและทำการศึกษากลไกการบำบัดและปัจจัยทางชลศาสตร์ที่สำคัญบางประการที่มีต่อการการบำบัดสารอินทรีย์ ซึ่งแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการอธิบายระบบความสัมพันธ์ขององค์ประกอบและกลไกที่มีผลต่อการทำงานของระบบ นอกจากนี้แบบจำลองที่ได้ยังเป็นต้นแบบของการพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาของระบบต่อไปในอนาคตได้

คำสำคัญ: แบบจำลอง, การบำบัด, สารอินทรีย์, ระบบบึงประดิษฐ์, ผักตบชวา

Abstract

A pictorial model of the organic matter treatment in the free water constructed wetland using a STELLA was developed for system dynamic analysis. The model consisted of a mechanism model and a hydrology model. The model was separated in many components and studied some important mechanisms and hydraulic factor that effected on organic matter removal. It could use to describe relationship of components and mechanisms that effected on operation system. Moreover, the developed model was the foundation model for mathematical model development and could use in troubleshooting system in the future.

Keyword: Pictorial model, Treatment, Organic matter, Constructed wetland, Water Hyacinth

[1]*วิทยาลัยนวัตกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาวิทยาเขตสตูล มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
[2]คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
[*]**Corresponding author, E-mail:** thiwari.op@skru.ac.th

บทนำ

สารอินทรีย์ในน้ำที่มากเกินไปก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ มากมาย โดยเป็นตัวลดการส่องผ่านของแสงในน้ำ เป็นแหล่งอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำทำให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (Pinney et al., 2000; Li et al., 2008) เป็นสาเหตุให้เกิดการเบ่งบานของสาหร่ายเกิดการเพิ่มขึ้นของวัชพืชน้ำอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุของการลดต่ำลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำทำให้ปลาตาย ลดความหลากหลายทางชีวภาพและลดคุณภาพชีวิตของสิ่งมีชีวิตในพื้นที่และโดยรอบได้ (Bojcevska and Tonderski, 2007) จึงมีความจำเป็นต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียและมีการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพเพื่อป้องกันไม่ให้สารอินทรีย์เหล่านี้สร้างผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ

มนุษย์รู้จักการใช้บึงประดิษฐ์ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำมากกว่า 100 ปีมาแล้ว โดยในช่วงแรกของการพัฒนาระบบบึงประดิษฐ์ส่วนใหญ่ทำหน้าที่เป็นที่รองรับการระบายน้ำเสียมากกว่าการบำบัดน้ำเสียอย่างแท้จริง การทำหน้าที่ของบึงประดิษฐ์ในตอนนั้นจึงเป็นเหมือนบริเวณที่พักน้ำก่อนลงสู่แม่น้ำเท่านั้น ในช่วง 30-40 ปีที่ผ่านมาการนำบึงประดิษฐ์มาใช้จึงเริ่มเป็นที่สนใจมากขึ้น เนื่องจากการตระหนักถึงคุณค่าของกลไกการบำบัดตามธรรมชาติ ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์จึงเป็นที่รู้จักแพร่หลายมากขึ้นนับแต่นั้นโดยได้เริ่มมีการใช้หลักการทางวิศวกรรมเข้าช่วยปรับปรุงการทำงานให้ทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และในระยะ 20 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์อย่างกว้างขวางมากขึ้น ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน (คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2552; Brix, 1994)

ดังนั้นการทำความเข้าใจกลไกการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์จึงมีความสำคัญต่อการนำระบบไปใช้และการพัฒนาระบบ ผู้วิจัยจึงสนใจการพัฒนาแบบจำลองแผนภาพในการแสดงองค์ประกอบและกลไกการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำ เพื่อให้สามารถสื่อสารให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น นำไปใช้อธิบายกระบวนการทำงานของระบบที่มีความสลับซับซ้อน แสดงข้อเท็จจริงเกี่ยวกับระบบ และเป็นต้นแบบนำไปสู่การพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบและวางแผนในการพัฒนาระบบในอนาคตได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาแบบจำลองแผนภาพสำหรับแสดงองค์ประกอบและกลไกการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินในการบำบัดสารอินทรีย์

แนวคิด ทฤษฎี กรอบแนวคิด

แบบจำลองเป็นการสร้างตัวแทนของวัตถุ เหตุการณ์ กระบวนการ หรือระบบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการคาดการณ์ การควบคุม หรือทำหน้าที่อธิบายลักษณะ เหตุการณ์ กระบวนการ และระบบ ให้สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงในสถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้น หรือบ่งบอกสิ่งที่มีผลกระทบต่อองค์ประกอบในระบบ (นิพนธ์ ตั้งธรรม, 2539) โดยวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองนั้นทำเพื่อสร้างสถานการณ์อุดมคติขึ้นให้สามารถจำลองสถานการณ์จริงและนำมาใช้ในการอธิบายลักษณะ ลำดับของกระบวนการต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ในระบบ รวมถึงใช้ในการแก้ปัญหาระบบที่มีความซับซ้อนได้อันเกิดจากความความเชื่อมโยงกันขององค์ประกอบต่างๆ ในระบบ (Pimpan and Jindal, 2009) สำหรับแบบจำลองแผนภาพเป็นการสร้างแบบจำลองที่เป็นภาพวาดหรือไดอะแกรมแทนความสัมพันธ์ของกระบวนการ และระบบย่อยต่างๆ โดยจะมีความเป็นระเบียบแบบแผน มีความชัดเจน และสามารถถ่ายทอดความคิดให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น (นิพนธ์ ตั้งธรรม, 2539)

การบำบัดสารอินทรีย์ของระบบบึงประดิษฐ์สามารถอธิบายลำดับของกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ โดยจากการวิเคราะห์การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน พบว่ากลไกการทำงานของระบบมีความเชื่อมโยงกับโครงสร้างของระบบโดยตรง (ITRC, 2003) และสามารถแยกองค์ประกอบของ

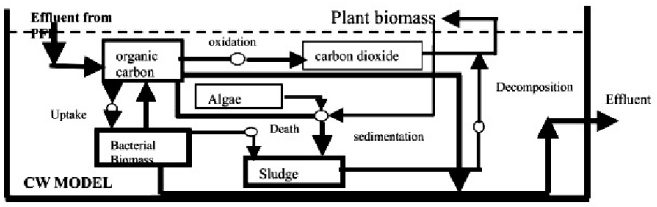
ระบบได้เป็นส่วนหรือเป็นชั้น ได้แก่ ดิน พืช น้ำ และจุลินทรีย์ (Kincanon and McAnally, 2004) และมีกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในบึงประดิษฐ์แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 กลไกการบำบัดสารอินทรีย์ในบึงประดิษฐ์

สารปนเปื้อน	กายภาพ	เคมี	ชีวภาพ
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	การตกจม	-	การย่อยสลายทางชีวภาพ
BOD COD	การตกจม	การออกซิเดชัน	การย่อยสลายทางชีวภาพ
ไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันและไขมัน แอลกอฮอล์ สารประกอบอินทรีย์กลุ่ม BTEX TPH PAHs และอื่นๆ	การแพร่ การระเหย การตกจม	การออกซิเดชันโดยแสงและเคมี การออกซิเดชัน	การย่อยสลายทางชีวภาพ การย่อยสลายโดยพืช การคายน้ำของพืช การคายระเหยของพืช
สารประกอบไนโตรเจน เช่น สารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนีย ไนเตรต ไนไตรต์	การตกจม	-	ไนตริฟิเคชัน ดีไนตริฟิเคชัน การดูดซึมของพืช
สารประกอบฟอสฟอรัส เช่น สารอินทรีย์ฟอสฟอรัส ฟอสเฟต	การตกจม	การตกผลึก การดูดซับ	การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ การดูดซึมของพืช
จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค	-	การฆ่าเชื้อโดยใช้รังสียูวี	การตายของจุลินทรีย์

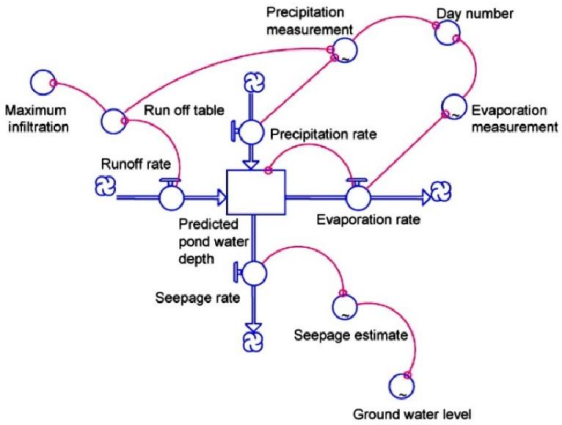
ที่มา : ดัดแปลงจาก ITRC (2003)

Mashauri and Kayombo (2002) ได้ศึกษากลไกการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินในการเปลี่ยนสภาพสารอินทรีย์คาร์บอนจากการทำงานร่วมกันของกลไกการออกซิเดชัน การย่อยสลายทางชีวภาพและการตกจม โดยพัฒนาเป็นแบบจำลองแผนภาพดังภาพ 1 ซึ่งเมื่อทำการพัฒนาสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผ่านการทวนสอบแล้วสามารถนำมาใช้อธิบายการถ่ายโอนของสารอินทรีย์ในรูป COD ในระบบได้ที่ค่า R^2 เท่ากับ 0.59



ภาพ 1 แบบจำลองแผนภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนในบึงประดิษฐ์
ที่มา: ดัดแปลงจาก Mashauri and Kayombo (2002)

Kipkemboi et al. (2007) ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม STELLA 8.0 ในการพัฒนาแบบจำลองแผนภาพและแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาชลศาสตร์ของน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ พื้นที่เลี้ยงปลา และพื้นที่เกษตรกรรม พบว่าปริมาณน้ำที่ระเหยจากระบบ (Evaporation) และปริมาณน้ำฝนที่ตกในระบบ (Precipitation) มีอิทธิพลอย่างมากต่อการทำสมดุลน้ำในระบบดังภาพ 2



ภาพ 2 แบบจำลองแผนภาพชลศาสตร์ในบึงประดิษฐ์
ที่มา: ดัดแปลงจาก Kipkemboi et al., 2007

วิธีดำเนินการวิจัย

1. โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษา

โปรแกรม STELLA เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยบริษัท High Performance Systems (HPS) ซึ่งนำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์ระบบเศรษฐศาสตร์ และต่อมาได้มีการนำ STELLA มาประยุกต์ในการสร้างและพัฒนาแบบจำลองเพื่อศึกษาชลศาสตร์ พลวัตรระบบ และระบบบึงประดิษฐ์ (Zhang and Mitsch, 2005; Pimpan and Jindal, 2009; Kumar and Zhoa, 2010) ในการศึกษาใช้โปรแกรม STELLA 9.1 โดยพัฒนาระดับแบบจำลองแผนภาพไม่ได้กล่าวถึงสมการและค่าคงที่ของกลไกที่เกิดขึ้นภายในสำหรับการพัฒนาแบบจำลองสู่การเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ขั้นสูง

2. ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

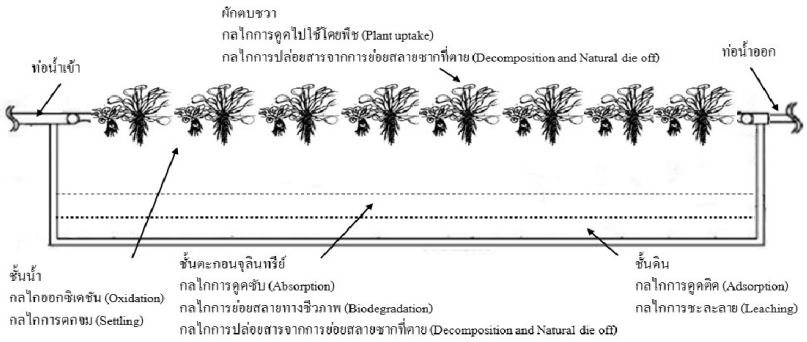
ในการศึกษานี้เลือกวิเคราะห์ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินโดยการใช้ผักตบชวาของเทศบาลนครหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลาเป็นระบบกรณีศึกษา เนื่องจากเป็นแบบที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะมีต้นทุนต่ำในการก่อสร้าง เป็นระบบที่มีความหลากหลายทางชีวภาพ มีปัญหาในด้านการสะสมของตะกอนน้อยและสามารถสะสมตะกอนในระบบได้ยาวนานกว่าแบบอื่น (Tanner et al., 1998; Fountoulakis et al., 2009) โดยสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์จะลดลงในลักษณะฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทางในแนวยาวจากทางเข้าระบบไปสู่ทางออกของระบบ ซึ่งอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์อันดับ 1 ด้วยการไหลแบบราบเรียบและเป็นแบบไหลตามกัน (Brix, 1994; Koyombo et al., 2005) ด้วยความแพร่หลายในการนำระบบไปใช้จึงคาดว่าผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์ในวงกว้าง

3. ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง

ในการศึกษานี้เลือกพิจารณาการผสานกันของแบบจำลอง 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองกลไกการบำบัดซึ่งแสดงองค์ประกอบและกลไกที่เกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ การออกซิเดชันในน้ำ การดูดไปใช้โดยพืช การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ การชะละลายจากดิน เป็นต้น และแบบจำลองที่สองที่เป็นแบบจำลองทางชลศาสตร์ ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำเข้าระบบ ปริมาณน้ำออกจากระบบ การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในระบบ เป็นต้น โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองแผนภาพได้ 4 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 การพัฒนาแบบจำลององค์ประกอบของบึงประดิษฐ์

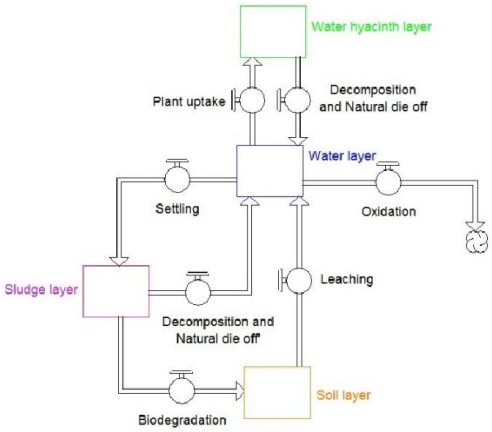
ในการศึกษาใช้แนวคิดการแยกองค์ประกอบระบบบึงประดิษฐ์ด้วยผักตบชวาแบบน้ำไหลบนผิวดิน โดยแบ่งองค์ประกอบเป็น 4 ชั้น ได้แก่ ชั้นพืช (Water hyacinth layer) ชั้นน้ำ (Water layer) ชั้นตะกอนจุลินทรีย์ (Sluge layer) และชั้นดิน (Soil layer) (ธิวาริ โอภิธากร, 2557; Ophithakorn, et al., 2013) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบดังภาพ 3



ภาพ 3 องค์ประกอบและกลไกในการบำบัดสารอินทรีย์ในบึงประดิษฐ์

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ของบึงประดิษฐ์

กลไกที่เกิดขึ้นในระบบบึงประดิษฐ์มีสอดคล้องตามองค์ประกอบทางโครงสร้างของระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งสัญลักษณ์หัวลูกศรจะทำหน้าที่บ่งชี้ทิศทางการเกิดขึ้นของกลไกนั้นๆ เช่น กลไกการดูดซับโดยพืชทำหน้าที่บำบัดหรือลดปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำ ขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ที่สะสมในพืช เป็นต้น การบอกทิศทางมีความสำคัญในการอธิบายการถ่ายโอนสารอินทรีย์ในระบบจากองค์ประกอบหนึ่งไปยังอีกองค์ประกอบหนึ่ง และเป็นเครื่องหมายแสดงการเพิ่มขึ้น (บวก) หรือลดลง (ลบ) ในสมการสำหรับการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ต่อไป สามารถแสดงแบบจำลองกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ของบึงประดิษฐ์ได้ดังภาพ 4



ภาพ 4 แบบจำลององค์ประกอบและกลไกภายในบึงประดิษฐ์

ขั้นตอนที่ 3 การพัฒนาแบบจำลองทางชลศาสตร์ของบึงประดิษฐ์

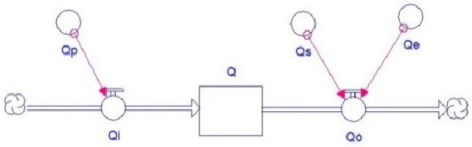
การกำหนดขอบเขตของปริมาณน้ำเสียที่ไหลเข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์มีความสำคัญต่อการศึกษาเรื่องภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในระบบ ระยะเวลากักเก็บ และการคำนวณอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของน้ำ โดยในการศึกษานี้อ้างอิงตามสมการปริมาณน้ำเข้าและออกจากระบบสุทธิ (USEPA, 1998; Wynn and Liehr, 2001; Kincanon and McAnally, 2004; Ederfedt and Fritzson, 2008; Zhang et al., 2011) ซึ่งสามารถแสดงการไหลของน้ำเข้าและออกจากระบบ และปัจจัยควบคุมปริมาณน้ำทางชลศาสตร์ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน การคายระเหย และการซึมของบึงประดิษฐ์ดังสมการ 1

$$Q = Q_i - Q_o - Q_e - Q_s + Q_p \qquad 1$$

โดย

Q = ปริมาณน้ำในบึงประดิษฐ์ต่อวัน (Volume of water)
Q_i = ปริมาณน้ำเข้าบึงประดิษฐ์ต่อวัน (Influent wastewater flow)
Q_o = ปริมาณน้ำออกจากบึงประดิษฐ์ต่อวัน (Effluent wastewater flow)
Q_e = ปริมาณน้ำที่คายระเหยจากบึงประดิษฐ์ต่อวัน (Evapotranspiration)
Q_s = ปริมาณน้ำที่ซึมออกจากบึงประดิษฐ์ที่เป็นบ่อดินต่อวัน (Seepage out)
Q_p = ปริมาณน้ำฝนที่ตกในบึงประดิษฐ์ต่อวัน (Direct precipitation)

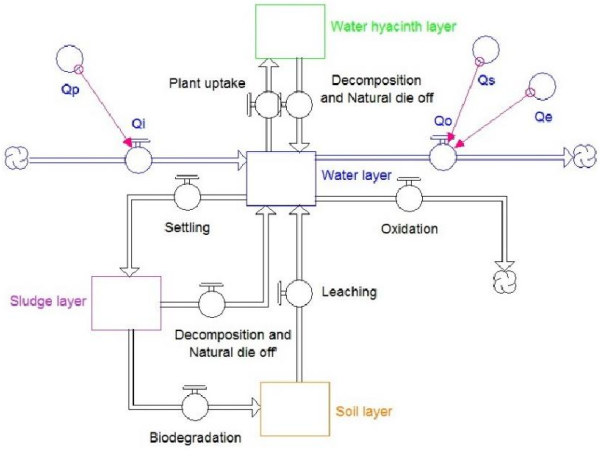
ในการศึกษาได้ทำการกำหนดให้ Q_e และ Q_s เป็นปริมาณที่ทำให้เกิดการลดลงของปริมาณน้ำในระบบ ขณะที่ Q_p เป็นปริมาณที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในระบบดังภาพ 5



ภาพ 5 แบบจำลองทางชลศาสตร์ในบึงประดิษฐ์

ขั้นตอนที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองการบำบัดสารอินทรีย์ของบึงประดิษฐ์

การผสานแบบจำลองกลไกการบำบัดสารอินทรีย์และแบบจำลองทางชลศาสตร์เข้าด้วยกันจะได้แบบจำลองแผนภาพที่มีความซับซ้อนมากขึ้น สามารถนำไปใช้ในการอธิบายการแยกองค์ประกอบระบบ กลไกที่เกิดขึ้นในการบำบัดสารอินทรีย์ ทิศทางและการถ่ายโอนสารอินทรีย์ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อปริมาณน้ำเข้าและออกจากระบบ ดังภาพ 6



ภาพ 6 แบบจำลองแผนภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในบึงประดิษฐ์

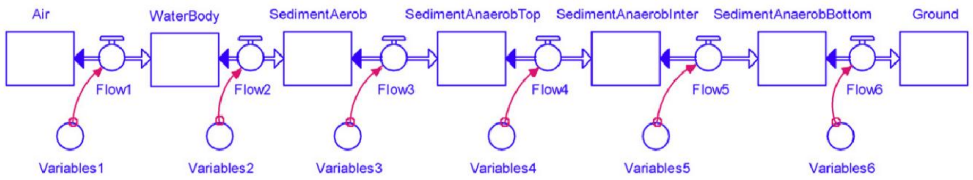
สรุปผลการวิจัย

1. ได้แบบจำลองแผนภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในบึงประดิษฐ์ที่ประกอบด้วยแบบจำลองกลไกการบำบัด ซึ่งแสดงองค์ประกอบและกลไกที่เกิดขึ้นในระบบและแบบจำลองทางชลศาสตร์ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำเข้าและออกจากระบบสุทธิรวมกันในแผนภาพเดียว

2. ได้แบบจำลองแผนภาพสำหรับอธิบายการทำงานของบึงประดิษฐ์เทศบาลนครหาดใหญ่หรือบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินด้วยผักตบชวา

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองแผนภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในบึงประดิษฐ์ที่ได้สามารถแสดงกลไกที่เกิดขึ้นในระบบได้บางส่วนไม่ครบถ้วนตามกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ในบึงประดิษฐ์ของ ITRC (2003) ทั้งนี้เพราะในการศึกษานี้เลือกวิเคราะห์ระบบบึงประดิษฐ์ด้วยการแยกองค์ประกอบเพียง 4 ชั้น ได้แก่ ชั้นพืช ชั้นน้ำ ชั้นตะกอนจุลินทรีย์และชั้นดิน ตามแนวคิดของ ธิวาริ โอภิธากร (2557) และ Ophithakorn, et al., (2013) โดยยังไม่มีองค์ประกอบชั้นอากาศ ทำให้ไม่สามารถอธิบายกลไกการแพร่ กลไกการระเหย กลไกการคายน้ำของพืช และกลไกการคายระเหยของพืชได้ โดยในการพัฒนาแบบจำลองอาจพิจารณาการแยกองค์ประกอบให้มีความละเอียดมากขึ้น เช่นการแบ่งองค์ประกอบเป็น 7 ชั้น ได้แก่ ชั้นอากาศ ชั้นน้ำ ชั้นตะกอนแอโรบิค ชั้นตะกอนแอนแอโรบิคตอนบน ชั้นตะกอนแอนแอโรบิคตอนกลาง ชั้นตะกอนแอนแอโรบิคตอนล่างและชั้นดิน ตามแนวคิดของ Edelfedt and Fritzson (2008) ดังภาพ 7



ภาพ 7 แบบจำลองแผนภาพองค์ประกอบบึงประดิษฐ์ 7 ชั้น
ที่มา: ดัดแปลงจาก Edelfedt and Fritzson (2008)

ข้อเสนอแนะและการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

แบบจำลองแผนภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินที่ได้เป็นเพียงการพัฒนาในระดับแบบจำลองแผนภาพ โดยสามารถจำลองลักษณะ อธิบายกลไกการทำงาน ลำดับของกระบวนการต่างๆ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ในระบบได้เท่านั้น หากมีการศึกษาและพัฒนาในส่วนของสมการคณิตศาสตร์และค่าคงที่ที่จำเป็นต้องใช้ในแบบจำลอง เช่น สมการและอัตราการลดลงของสารอินทรีย์ที่เกิดจากกลไกการดูดซับโดยผักตบชวา สมการและอัตราการลดลงของสารอินทรีย์ที่เกิดจากกลไกการตกจม เป็นต้น ก็จะสามารถพัฒนาแบบจำลองแผนภาพเข้าสู่แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนและใช้ประโยชน์ในการทำนายการออกแบบ และการประเมินระบบในสถานการณ์ต่างๆ ได้ เช่น การประเมินสภาวะที่อาจเกิดน้ำท่วม (Kipkemboi et al., 2007) การตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานขององค์ประกอบในระบบ (ธิวาริ โอภิธากร, 2557; Ophithakorn, et al., 2013)

เอกสารอ้างอิง

คณะวิศวกรรมศาสตร์. (2552). “การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบึงประดิษฐ์”. **เอกสารประกอบโครงการ Decentralized Wastewater Management Using Constructed Wetland Technology**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ธิวาริ โอภิธากร. (2557). **แบบจำลองการบำบัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยระบบบึงประดิษฐ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียของเทศบาลนครหาดใหญ่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

นิพนธ์ ตั้งธรรม. (2539). “Environmental impact assessment modeling”. **เอกสารจัดทำเพื่อประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อม.**

Brix, H. (1994). Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. **Water Science Technology**, 30(8), 209-223.

Bojcevska, H. and Tonderski, K. (2007). Impact of loads, season, and plant species on the performance of a tropical constructed wetland polishing effluent from sugar factory stabilization ponds. **Ecological Engineering**, 29, 66-76.

Edelfeldt, S. and Fritzson, P. (2008). Evaluation and comparison of models and modeling tools simulating nitrogen processes in treatment wetlands. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 16, 26–49.

Fountoulakis, M. S., Terzakis, S., Chatzinotas, A., Brix, H., Kalogerakis, N. and Manios, T. (2009). Pilot-scale comparison of constructed wetlands operated under high hydraulic loading rates and attached bio fi lm reactors for domestic wastewater treatment. **Science of the Total Environment**, 407, 2996-3003.

Interstate technology regulatory cooperation (ITRC). (2003). “Technical and regulatory guidance treatment wetlands”. **Technical/Regulatory Guidelines**. The Interstate Technology & Regulatory Council Wetlands Team.

Kincanon, R. and McAnally, A. S. (2004). Enhancing commonly used model predictions for constructed wetland performance: as-built design considerations. **Ecological Modelling**, 174, 309-322.

Kipkemboi, J., Dam, V. A. A., Mathooko, J. M. and Denny, P. (2007). Hydrology and the functioning of seasonal wetland aquaculture-agriculture systems (Fingerponds) at the shores of Lake Victoria, Kenya. **Aquacultural Engineering**, 37, 202-214.

Kayombo, S., Mbwette, T. S. A., Katima, J. H. Y, Ladegaard, N. and Jorgensen, S. E. (2005). “Waste stabilization ponds and constructed wetlands design manual”. **A joint publication by UNEP-IETC with the Danish International Development Agency (Danida)**.

Kumar, J. L. G. and Zhao, Y.Q. (2010). A review on numerous modeling approaches for effective, economical and ecological treatment wetlands. **Journal of Environmental Management**, 1-7.

Li, J., Wen, Y., Zhou, Q., Xingjie, Z., Li, X., Yang, S. and Lin, T. (2008). Influence of vegetation and substrate on the removal and transformation of dissolved organic matter in horizontal subsurface-flow constructed wetlands. **Bioresource Technology**, 99, 4990–4996.

Mashauri, D. A. and Kayombo, S. (2002). Application of the two coupled models for water quality management: facultative pond cum constructed wetland models. **Physics and Chemistry of the Earth**. 27, 773-781.

Ophithakorn, T., Suksaroj, C. and Suksaroj, T. T. (2013). Simulation modeling of dissolved organic matter removal in a free water surface constructed wetland. **Ecological Modelling**, 258, 82-90.

Pimpan, P. and Jindal, R. (2009). Mathematical modeling of cadmium removal in free water surface constructed wetlands. **Journal of Hazardous Materials**, 163, 1322-1331.

Pinney, M. L., Westerhoff, P. K. and Baker, L. (2000). Transformations in dissolved organic carbon through constructed wetlands. **Water Research**, 34(6), 1897-1911.

Quanrud, D. M., Karpiscak, M. M., Lansey, K. E. and Arnold, R. G. (2004). Transformation of effluent organic matter during subsurface wetland treatment in the Sonoran Desert. **Chemosphere**, 54, 777-788.

Tanner, C. C., Sukias, J. P. S. and Upsdell, M. P. (1998). Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters. **Water Research**, 32(10), 3046-3054.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (1988). “Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment”. **Office of Research and Development**. Cincineti, OH: EPA/625/1-88/022.

Wynn, T. M. and Liehr, S. K. (2001). Development of a constructed subsurface-flow wetland simulation model. **Ecological Engineering**, 16, 519-536.

Zhang, H., Cui, B., Hong, J. and Zhang, K. (2011). Synergism of natural and constructed wetlands in Beijing, Chaina. **Ecological Engineering**, 37, 128-138.

Zhang, L. and Mitsch, W. J. (2005). Modelling hydrological processes in created freshwater wetlands: an integrated system approach. **Environmental Modelling & Software**. 20 : 935-946.