วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 26 (ฉบับที่ 1) มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 26 (No.1) January – April 2021 บทความวิจัย

การบำบัดไตรบิวทิลทินในระบบบึงประดิษฐ์

Tributyltin Reduction in Constructed Wetland

ธิวาริ โอภิธากร[1], ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์[2] และ สุทธิสา ยาอีด[3*]

Thiwari Ophithakorn[1], Pakamas Chetpattananondh[2] and Sutisa Yaeed[3*]

[1] *วิทยาลัยนวัตกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา*

[2] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*

[3] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหาดใหญ่*

[1] *College of Innovation and Management, Songkhla Rajabhat University*

[2] *Faculty of Engineering, Prince of Songkla University*

[3] *Faculty of Science and Technology, Hatyai University*

Received : 7 January 2020

Revised : 20 April 2020

Accepted : 4 May 2020

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์จำลอง ได้แก่ น้ำ ตะกอนจุลินทรีย์ และพืช ในการบำบัดไตรบิวทิลทิน และแสดงกลไกที่สำคัญจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบ ได้แก่ การออกซิเดชันในน้ำ การตกจมและสะสมในตะกอนจุลินทรีย์ และการดูดเก็บไว้โดยพืช ผลการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงของดีบุกในระบบเกิดขึ้นในช่วงเวลา 48 ชั่วโมงของการทดลอง และจะเข้าสู่สภาวะสมดุล หลังการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์ 1.3 วัน พบว่าปริมาณดีบุกในน้ำคงเหลือไม่เกิน 1% มีดีบุกถูกดูดเก็บไว้โดยพืช 13% และมีดีบุกตกจมและสะสมอยู่ในตะกอนจุลินทรีย์มากกว่า 76% ผลที่ได้จากระบบบึงประดิษฐ์ในระดับห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของบึงประดิษฐ์ในส่วนของตะกอนจุลินทรีย์ และกลไกการตกจมและสะสมมีอิทธิพลในการบำบัดไตรบิวทิลทินในระบบมากที่สุด ตามมาด้วยการดูดเก็บไว้โดยพืช และการออกซิเดชัน ตามลำดับ

คำสำคัญ : ไตรบิวทิลทิน ; บึงประดิษฐ์ ; การบำบัด

Abstract

The objective of this study is to investigate the influence of components in constructed wetland including water, sediment microorganisms and plants in tributyltin treatment and show important mechanisms from various components of the system including oxidation, settling and accumulation of sediment microorganisms and plant uptake. The results showed that the change of tin concentration in all laboratory experiments was occurred for 48 hours and then turned to equilibrium. After 1.3 days of treatment in the constructed wetland tin was found to be not exceed 1%, tin was absorbed by plant 13% and settling of tin and adsorption on sludge were over 76%. Therefore, the composition of the constructed wetland in terms of sediment microorganisms and settling and accumulation were the most influence mechanisms on tributyltin treatment followed by plant uptake and oxidation, respectively.

Keywords : tributyltin ; constructed wetland ; reduction

***Corresponding author. E-mail** : sutisa@hu.ac.th

บทนำ

ไตรบิวทิลทินเป็นสารประกอบโลหะหนักกลุ่มดีบุกที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม การปนเปื้อนของไตรบิวทินทินในแหล่งน้ำธรรมชาติมาจากกิจกรรมของมนุษย์ เนื่องจากสารประกอบชนิดนี้เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นโดยมนุษย์ (Ansari *et al.*, 1998; Bangkephol *et al.*, 2009) การสะสมของไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำธรรมชาติมีผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารและสุขภาพของมนุษย์ผ่านทางการบริโภคอาหารทะเลที่มีการปนเปื้อน ซึ่งส่วนใหญ่มักจะพบในสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตสีกันเพรียงหรือจากการแพร่กระจายจากท่าเรือพาณิชย์ขนาดใหญ่ โดยหลายประเทศทั่วโลกทั้งในยุโรป อเมริกา แคนาดา นิวซีแลนด์ ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น รวมถึงฮ่องกงได้ประกาศบังคับการห้ามใช้สีที่มีส่วนประกอบของไตรบิวทิลทินกับเรือที่มีอยู่ในปัจจุบันแล้ว (Kan-atireklap *et al.*, 1997; Ansari *et al.*, 1998; Murai *et al.*, 2005; Antizar-Ladislao, 2008; Ayanda *et al.*, 2012; Ayanda *et al.,* 2013; Ophithakorn *et al.*, 2014) แต่ในหลายพื้นที่ยังคงตรวจพบการปนเปื้อนของไตรบิวทิลทินได้ในแหล่งน้ำจืดและในตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย จากการนำไตรบิวทิลทินไปใช้ในกิจกรรมอื่น โดยยังคงมีรายงานถึงการตรวจพบการปนเปื้อนของไตรบิวทิลทินได้ในน้ำเสียชุมชนและตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย รวมถึงน้ำชะจากหลุมฝังกลบขยะ ซึ่งยังคงเป็นประเด็นให้ต้องมีการศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียในพื้นที่นั้น ๆ ก่อนปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติด้วย (Ophithakorn *et al.*, 2016)

การจัดการน้ำเสียจากชุมชนในหลายพื้นที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ในการบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากกลไกการทำงานเป็นกระบวนการทางธรรมชาติ เป็นพื้นที่สีเขียว เป็นที่พักผ่อนหย่อนใจ เป็นแหล่งศึกษาเรียนรู้ระบบนิเวศจำลอง ในบางโอกาสอาจเก็บเกี่ยวผลประโยชน์จากพืชหรือสัตว์ในระบบได้ รวมถึงเป็นระบบที่มีสามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจกจากการทำงานของพืชในระบบด้วย (ITRC, 2003; Economopoulou & Tsihrintzis, 2004; Kayombo *et al.,* 2005; UN-HABITAT, 2008; Kumar & Zhao, 2010)

ในปัจจุบันพบว่าหลายพื้นที่ยังคงประสบปัญหาในเรื่องการบำบัดสารไตรบิวทิลทินในน้ำเสียชุมชนก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้นในกรณีที่น้ำเสียชุมชนมีการปนเปื้อนไตรบิวทิลทิน การศึกษาเพื่อพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์เพื่อรองรับวิกฤตการณ์การปนเปื้อนสารที่มีคุณสมบัติเฉพาะจึงมีความสำคัญยิ่ง ผู้วิจัยจึงศึกษากลไกการบำบัดไตรบิวทิลทินในน้ำเสียชุมชนด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่ประกอบด้วยผักตบชวาและตะกอนจุลินทรีย์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ระบบบึงประดิษฐ์จำลองในห้องปฏิบัติการ

จัดเตรียมระบบบึงประดิษฐ์จำลอง 4 ชุดทดลอง โดยอ้างอิงกับองค์ประกอบตามโครงสร้างของระบบบึงประดิษฐ์ ได้แก่ ระบบน้ำ ระบบตะกอนจุลินทรีย์ ระบบพืช และระบบบึงประดิษฐ์ โดยระบบน้ำเป็นระบบจำลองที่ประกอบด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว เพื่อศึกษากลไกออกซิเดชันของไตรบิวทิลทินในน้ำ ระบบตะกอนจุลินทรีย์เป็นระบบจำลองที่ประกอบด้วยตะกอนจุลินทรีย์และน้ำ เพื่อศึกษากลไกการตกจมและสะสมของไตรบิวทิลทินในตะกอนจุลินทรีย์ ระบบพืชเป็นระบบจำลองที่ประกอบด้วยผักตบชวาและน้ำ เพื่อศึกษากลไกการดูดเก็บไว้หรือสะสมในพืช และระบบบึงประดิษฐ์เป็นระบบจำลองที่

ประกอบด้วย ตะกอนจุลินทรีย์ ผักตบชวา และน้ำ ในการศึกษาผู้วิจัยทำการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์จำลองเลียนแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน สำหรับติดตั้งในห้องปฏิบัติการ ขนาดกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และสูง 75 เซนติเมตร บึงประดิษฐ์ทำจากพลาสติกอะคลีลิกใส สามารถมองเห็นและวัดระดับน้ำได้ ติดตั้งที่อุณหภูมิอากาศทั่วไป (30±2°C) เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงสภาพตามธรรมชาติของระบบบึงประดิษฐ์ของเทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยอ้างอิงจากระบบบึงประดิษฐ์จำลองของ Ophithakorn *et al*. (2013)

2. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และองค์ประกอบสำหรับระบบจำลอง

1) ทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ และนำไปใช้งานทันที โดยเตรียมจากน้ำกลั่นให้ได้สารละลายไตรบิวทิลทินคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 100 mg/L จำนวน 75 ลิตร ต่อชุดการทดลอง

2) ตะกอนจุลินทรีย์ เตรียมโดยใช้ตะกอนดินเลนจากบ่อบึงประดิษฐ์เทศบาลนครหาดใหญ่ ที่ความลึกไม่เกิน 10 cm. บรรจุในภาชนะพลาสติกและแช่เย็นไว้ที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนนำไปใช้ (ในการศึกษาไม่พิจารณาชั้นดิน เนื่องจากพบว่าชั้นดินมีสภาพเป็นดินลูกรังที่มีความลึกใต้โคลนเลนตะกอนมากกว่า 50 cm. มีโอกาสสัมผัสสารปนเปื้อนในน้ำน้อยมาก)

3) พืช เตรียมโดยใช้ผักตบชวาที่ขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกันในทุกระบบจำลอง โดยการวัดส่วนสูง นับจำนวนใบ และชั่งน้ำหนัก ทำการล้างรากด้วยน้ำกลั่นหลายครั้ง และแช่น้ำกลั่นทิ้งไว้นาน 48 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้งาน (Zurita *et al*, 2009)

3. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดไตรบิวทิลทินและการตรวจวัด

1) หาเวลาที่จุดสมดุลของระบบ โดยทำการศึกษาการลดลงของไตรบิวทิลทินในระบบจำลองแต่ละระบบด้วยการทดลองแบบกะ โดยมีสมมุติฐานว่าความเข้มข้นของไตรบิวทิลทินควรจะเปลี่ยนไปที่เวลาเปลี่ยนไปโดยการบำบัดด้วยกลไกในระบบ เดินระบบเป็นเวลา 15 วัน โดยอ้างอิงระยะเวลาในการศึกษาการบำบัดไตรบิวทิลทิน จาก Ophithakorn *et al.,* (2017)

2) หาค่าคงที่ปฏิกิริยา โดยทำการทดลองเพื่อหาค่าคงที่ปฏิกิริยาของกลไกในการบำบัดไตรบิวทิลทินในระบบจำลองแต่ละระบบด้วยการทดลองแบบกะ ตรวจวัดความเข้มข้นของดีบุกทุก 2 ชั่วโมง จนถึงเวลาที่จุดสมดุลของระบบ

3) ปริมาณไตรบิวทิลทินหาจากการวิเคราะห์ปริมาณดีบุก (Sn) (Ruiz *et al*., 1996; Mathurasa *et al*., 2012) โดยใช้ Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) เนื่องจากในการศึกษาไม่สามารถควบคุมการย่อยสลายหรือการเปลี่ยนรูปของไตรบิวทิลทินไปเป็นสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในรูปอื่นอันเกิดจากสภาพแวดล้อมได้

4) ตรวจวัดความเข้มข้นของดีบุกในน้ำโดยวิธีการจ้วงเก็บ ตรวจวัดความเข้มข้นของดีบุกในตะกอนก่อนและหลังทดลอง โดยอบแห้งที่ 103-105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจวัดความเข้มข้นของดีบุกในผักตบชวาก่อนและหลังทดลองโดยการปั่นละเอียดทุกส่วน (Pimpan & Jindal, 2009) และวิเคราะห์ด้วย ICP-OES

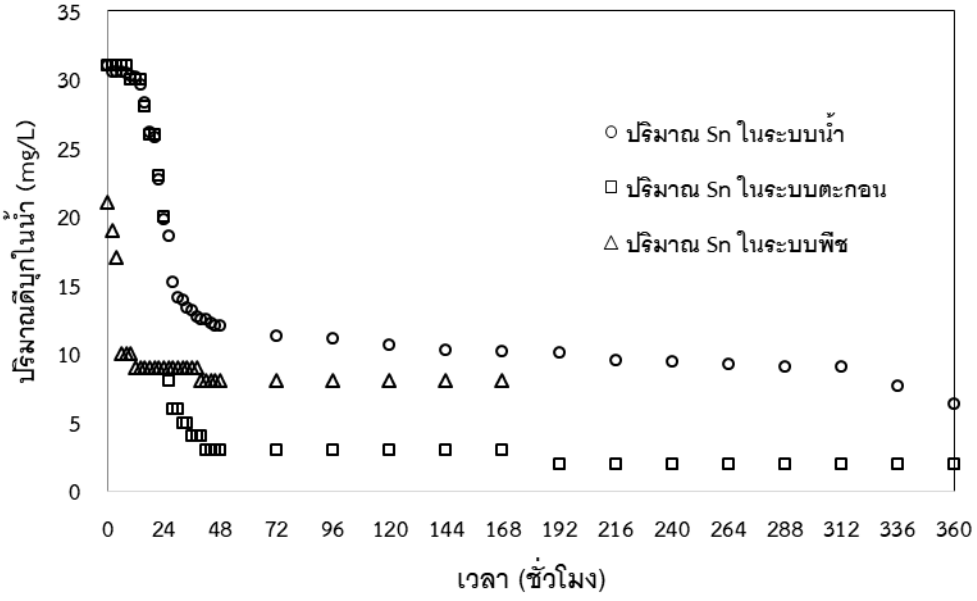
4. การสร้างแบบจำลองแผนภาพเพื่ออธิบายกลไกการบำบัดในระบบบึงประดิษฐ์

ในการสร้างแบบจำลองเพื่ออธิบายการทำงานของกลไกและความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบบึงประดิษฐ์ด้วยผักตบชวา ในการศึกษาจะพัฒนาแบบจำลองใหม่จากแบบจำลองพื้นฐานของ Ophithakorn & Yaeed (2016) ซึ่งได้ศึกษาแบบจำลองแผนภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน โดยพัฒนาใหม่เป็นแบบจำลองที่มี 3 องค์ประกอบ คือ น้ำ ตะกอนจุลินทรีย์ และพืช ด้วยโปรแกรม STELLA 10.1 โดยมีสมการสมดุลมวลของระบบที่ใช้ในการคำนวณตามสมการที่ 1 คือ

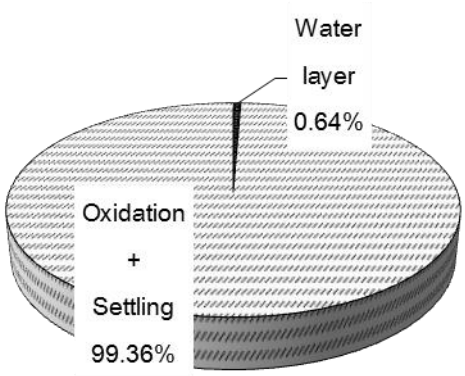
ปริมาณดีบุกทั้งหมด = ปริมาณดีบุกในน้ำ + ปริมาณดีบุกในตะกอน (ตกจมและสะสม) +
ปริมาณดีบุกในพืช (พืชดูดไว้) + ปริมาณดีบุกที่ถูกบำบัดด้วยกลไกออกซิเดชัน (1)

ผลการวิจัย

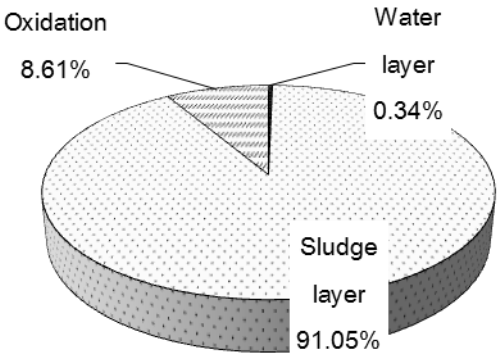
ผลจากการศึกษาแต่ละองค์ประกอบ ได้แก่ องค์ประกอบน้ำ (Water layer) องค์ประกอบตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge layer) และองค์ประกอบพืช (Water hyacinth layer) ของระบบแยกออกจากกัน เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลขององค์ประกอบต่าง ๆ ในการบำบัดไตรบิวทิลทิน โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณดีบุกในระบบน้ำ ระบบตะกอนจุลินทรีย์ และระบบพืช เก็บตัวอย่างทุก 2 ชั่วโมง ใน 48 ชั่วโมงแรกของการทดลอง และทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 15 วัน พบว่าในองค์ประกอบน้ำ ประสิทธิภาพการบำบัดไตรบิวทิลทินจะเกิดขึ้นในระยะเวลาไม่เกิน 1.16 วัน และจะเข้าสู่สมดุลระบบ ดีบุกในน้ำจากสภาวะเริ่มต้นถูกบำบัดโดยกลไกที่อาจเกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ การออกซิเดชัน (Oxidation) และการตกจม (Settling) 99.36% โดยเหลือปริมาณดีบุกในน้ำ 0.64% ในองค์ประกอบตะกอนจุลินทรีย์ ประสิทธิภาพการบำบัดไตรบิวทิลทินจะเกิดขึ้นในระยะเวลาไม่เกิน 1.08 วัน และจะเข้าสู่สมดุลระบบ ดีบุกในน้ำจากสภาวะเริ่มต้นถูกบำบัดโดยกลไกที่อาจเกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ การออกซิเดชัน 8.61% โดยเหลือปริมาณดีบุกในน้ำ 0.34% และมีดีบุกตกจมและสะสมในตะกอนจุลินทรีย์ 91.05% และในองค์ประกอบพืช ประสิทธิภาพการบำบัดไตรบิวทิลทินจะเกิดขึ้นในระยะเวลาไม่เกิน 0.5 วัน และจะเข้าสู่สมดุลระบบ ดีบุกในน้ำจากสภาวะเริ่มต้นถูกบำบัดโดยกลไกที่อาจเกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ การออกซิเดชัน และการตกจม 87.25% โดยเหลือปริมาณดีบุกในน้ำ 0.38% และมีดีบุกถูกดูดเก็บไว้โดยพืช 12.37% แสดงดังภาพที่ 1 ภาพที่ 2 ภาพที่ 3 และภาพที่ 4 ตามลำดับ



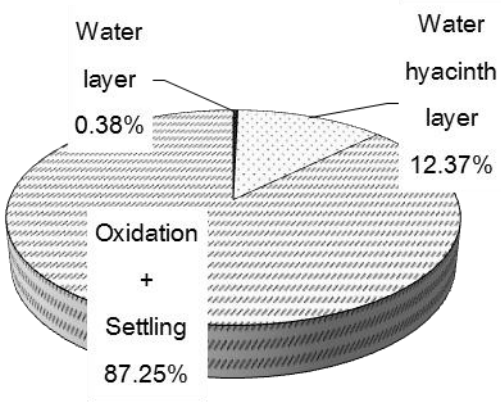
ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณดีบุกในระบบน้ำ ระบบตะกอน และระบบพืช



ภาพที่ 2 ปริมาณดีบุกในระบบน้ำที่สภาวะสมดุล



ภาพที่ 3 ปริมาณดีบุกในระบบตะกอนจุลินทรีย์ที่สภาวะสมดุล



ภาพที่ 4 ปริมาณดีบุกในระบบพืชที่สภาวะสมดุล

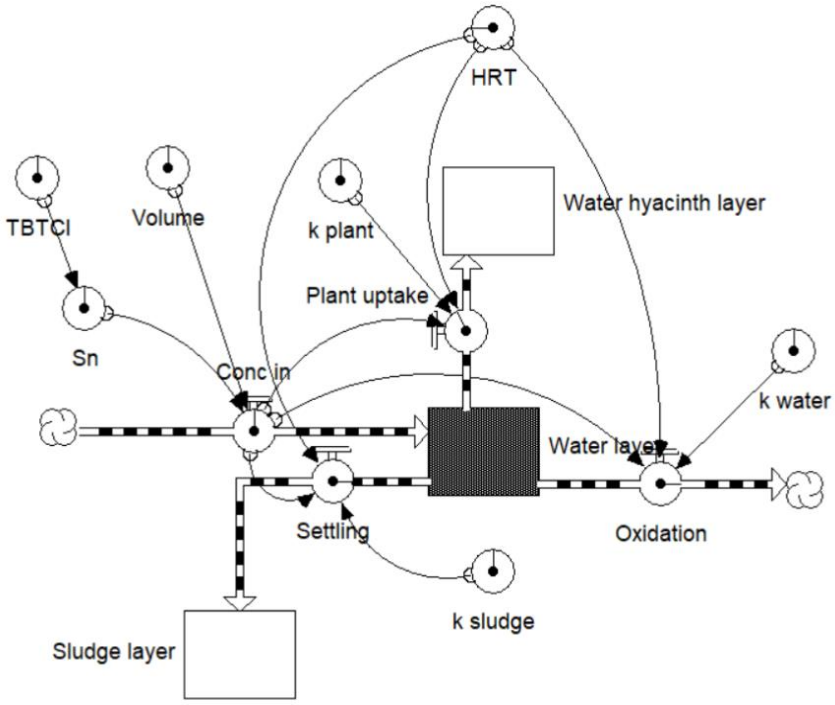
ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์เป็นความสัมพันธ์ระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียกับชนิดระบบ ซึ่งเป็นตัวแทนของความสัมพันธ์ระหว่างสารปนเปื้อนและกลไกการบำบัดที่เกิดจากสภาวะทางกายภาพของระบบ จุลินทรีย์ และพืชน้ำในระบบ การหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์สามารถหาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ จากผลการเดินระบบจริง หรือจากเอกสารอ้างอิง ซึ่งในปัจจุบันยังมีการวิจัยน้อยมากสำหรับการบำบัดไตรบิวทิลทินด้วยบึงประดิษฐ์ โดยการทดลองนี้ได้ทำการหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของกลไกการบำบัดในระบบจำลองด้วยวิธีกราฟ

ผลการตรวจวิเคราะห์ระบบจำลองในช่วงที่มีการศึกษาเพื่อหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของไตรบิวทิลทินในระบบเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ ในช่วง 48 ชั่วโมงแรกของการทดลอง โดยหลังจากเวลา 48 ชั่วโมงไปแล้วนั้น ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลระบบ ผลการหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 ของการบำบัดไตรบิวทิวทินในระบบน้ำ ระบบตะกอนจุลินทรีย์ และระบบพืช โดยวิธีการกราฟ $-\ln(C/C_0)$ และ t แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของระบบบึงในระดับห้องปฏิบัติการ

ลำดับที่	**ระบบจำลอง**	**กลไกที่อาจเกิดขึ้นในระบบ**	**ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 (day^{-1})**	R^2
1	น้ำ	Oxidation Settling	0.8193	0.9444
2	ตะกอนจุลินทรีย์	Oxidation Settling	2.0646	0.9104
3	พืช	Oxidation Settling Plant uptake	1.7624	0.7519

การสร้างแบบจำลองแผนภาพเพื่ออธิบายกลไกการบำบัดและความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบบึงประดิษฐ์ด้วยผักตบชวา โดยสร้างแบบจำลองแผนภาพแสดงการบำบัดไตรบิวทิลทินในระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งประกอบด้วย 3 องค์ประกอบสำคัญ คือ น้ำ ตะกอนจุลินทรีย์ และพืช และกลไกการบำบัดสำคัญ คือ การออกซิเดชัน การตกจม และการดูดเก็บไว้โดยพืช และกำหนดให้มีปริมาณไตรบิวทิลทินเข้าสู่ระบบวัดในรูปของดีบุก โดยการกำหนดปริมาตรของระบบที่ 75 ลิตร ด้วยโปรแกรม STELLA 10.1 แสดงดังภาพที่ 5



กำหนดให้

TBTCl คือ ความเข้มข้นของ ไตรบิวทิลทินคลอไรด์ (mg/L)

Sn คือ ความเข้มข้นของดีบุกที่เข้าระบบ (mg/L)

Water layer คือ ปริมาณดีบุกในองค์ประกอบน้ำในระบบ (mg)

Conc in คือ ปริมาณดีบุกที่เข้าระบบทั้งหมด (mg)

Sludge layer คือ ปริมาณดีบุกในองค์ประกอบตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ (mg)

Volume คือ ปริมาณน้ำกลั่นที่ใส่ในระบบจำลอง (L)

Water hyacinth layer คือ ปริมาณดีบุกในองค์ประกอบผักตบชวาในระบบ (mg)

HRT คือ ระยะเวลากักเก็บหรือเกิดการบำบัดของระบบ (day)

k sludge คือ ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 ของการตกตะกอน (Settling) (day^{-1})

k water คือ ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 ของการออกซิเดชันในน้ำ (Oxidation) (day^{-1})

k plant คือ ค่า ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 ของการดูดเก็บไว้โดยพืช (Plant uptake) (day^{-1})

ภาพที่ 5 แบบจำลองแผนภาพการบำบัดในระบบบึงประดิษฐ์จำลอง

จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง โดยใช้สมการและค่าคงที่ดังตารางที่ 2 พบว่าการบำบัดไตรบิวทิลทินเมื่อเวลาผ่านไป 1.3 วัน จะเข้าสู่สมดุลระบบ ดีบุกในน้ำจากสภาวะเริ่มต้นถูกบำบัดโดยกลไกที่อาจเกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ การออกซิเดชัน 23% โดยเหลือปริมาณดีบุกในน้ำ 1% เกิดการตกจมและสะสมในตะกอนจุลินทรีย์ 57% และสะสมโดยการดูดเก็บไว้โดยพืช 19%

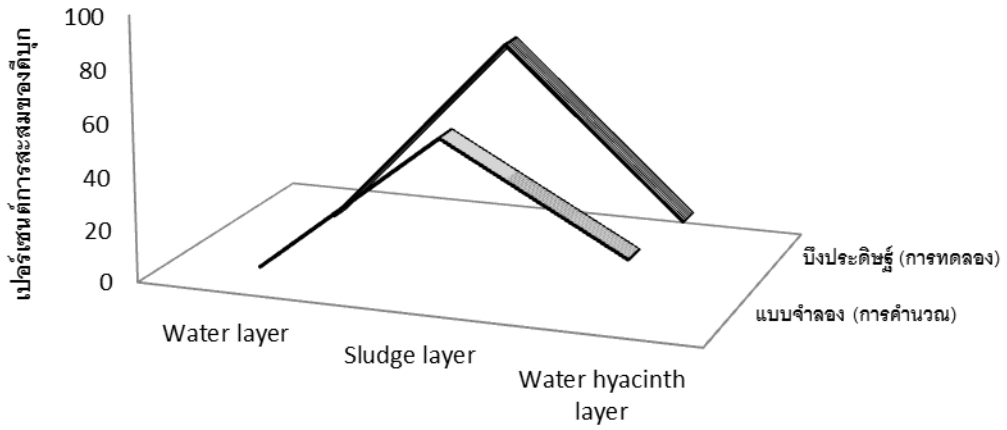
ตารางที่ 2 สมการและค่าคงที่ในการคำนวณ

รายละเอียดสมการและค่าคงที่ในการคำนวณ	แหล่งที่มา
Conc in = Sn x Volume	
Oxidation = Conc in x k water x HRT	
Settling = Conc in x k sludge x HRT	
Water layer = Conc in – Plant uptake – Settling – Oxidation	
Plant uptake = IF(HRT>0.5)THEN(Conc in x k plant x 0.5)ELSE(Conc in x k plant x HRT)	
Sn = 0.3122 x TBTCl	สมการจาก Calibration curve
TBTCl =100 mg/L	กำหนดและใช้ในการทดลอง
Volume = 75 L	กำหนดและใช้ในการทดลอง
HRT = 1.3 d	HRT จากการทดลอง
k water = 0.8193 day^{-1}	จากการคำนวณ
k sludge = 2.0646 day^{-1}	จากการคำนวณ
k plant = 1.7624 day^{-1}	จากการคำนวณ

วิจารณ์ผลการวิจัย

ระบบบึงประดิษฐ์ในระดับห้องปฏิบัติการมีการแสดงผลของปริมาณดีบุกสะสมในองค์ประกอบตะกอนจุลินทรีย์มากที่สุด รองลงมาคือการสะสมในองค์ประกอบพืช และการสะสมในองค์ประกอบน้ำ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบของบึงประดิษฐ์ในส่วนของตะกอนจุลินทรีย์และกลไกการตกจมมีอิทธิพลในการบำบัดไตรบิวทิลทินในระบบมากที่สุด ซึ่งในการทดลองในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีองค์ประกอบตะกอนจุลินทรีย์ ผักตบชวา และน้ำ รวมอยู่ด้วยกันนั้น ปริมาณของไตรบิวทิลทินที่สะสมในองค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบบึงประดิษฐ์จำลองจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาการบำบัดผ่านไป 1.3 วัน ดีบุกในน้ำจากสภาวะเริ่มต้นถูกบำบัดโดยกลไกที่อาจเกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ การออกซิเดชัน 10% โดยเหลือปริมาณดีบุกในน้ำ 1% สะสมอยู่ในพืช 13% และสะสมในตะกอนจุลินทรีย์ 76% ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลขององค์ประกอบในการบำบัดไตรบิวทิลทินในบึงประดิษฐ์จากระบบบึงประดิษฐ์จำลองและการคำนวณด้วยค่าจลนพลศาสตร์จากระบบจำลองแบบแยกองค์ประกอบ พบว่าระบบบึงประดิษฐ์มีกลไกการตกจม และตะกอนจุลินทรีย์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการบำบัดไตรบิวทิลทิน แสดงดังภาพที่ 6

ดังนั้นการควบคุมกลไกการตกจมและสะสมให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นสามารถทำได้โดยการควบคุมค่าพีเอช และความเค็มในน้ำ (Ophithakorn *et al*., 2017) ซึ่งมีอิทธิพลต่อความสามารถในการตกจมของไตรบิวทิลทิน



ภาพที่ 6 อิทธิพลขององค์ประกอบในการบำบัดไตรบิวทิลทินในบึงประดิษฐ์

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการบำบัดไตรบิวทิลทินในระบบจำลอง โดยการแยกองค์ประกอบของระบบ ได้แก่ องค์ประกอบน้ำ องค์ประกอบตะกอนจุลินทรีย์ และองค์ประกอบพืช พบว่าการเปลี่ยนแปลงของไตรบิวทิลทินในรูปของดีบุกในระบบทุกระบบจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ ไม่เกิน 48 ชั่วโมงแรกของการทดลอง โดยหลังจากเวลา 48 ชั่วโมงไปแล้วนั้น ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล และจะมีค่าดีบุกคงเหลือในน้ำประมาณ 1% ในการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดไตรบิวทิลทินด้วยพืช พบว่าผักตบชวาที่ใช้ในการศึกษาสามารถดูดซับไตรบิวทิลทินไว้ได้ประมาณ 13% และกลไกการตกจมและสะสมในตะกอนจุลินทรีย์เป็นกลไกสำคัญในการบำบัดไตรบิวทิลทิน โดยจากการทดลองพบว่าดีบุกสามารถสะสมในตะกอนจุลินทรีย์ได้มากกว่า 76%

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการวิจัยจากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ปีงบประมาณ 2561 โดยการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สัญญาเลขที่ 06/2561 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา วิทยาลัยนวัตกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุน ขอบคุณคณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ในการเอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษาวิจัย ขอบคุณเทศบาลนครหาดใหญ่และองค์การจัดการน้ำเสีย สำนักงานจัดการน้ำเสีย สาขาหาดใหญ่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้เข้าศึกษาระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ และขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความร่วมมือและให้ข้อมูลจนงานวิจัยสำเร็จลงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Ansari, A. A., Singh, I. B. & Tobschall, H. J. (1998). Organotin compounds in surface and pore waters of Ganga Plain in the Kanpur-Unnao industrial region, India. *The Science of the Total Environment*, *223*, 157-166.

Antizar-Ladislao, B. (2008). Environmental levels, toxicity and human exposure to tributyltin (TBT)-contaminated marine environment, A review. *Environmental International, 34*, 292-308.

Ayanda. O. S., Fatoki, O. S. Adekola, F. A. & Ximba, B. J. (2012). Fate and remediation of organotin compounds in seawaters and soils. *Chemical Science Transactions, 1*(3), 470-481.

Ayanda, O. S., Fatoki, O. S., Adekola, F. A. & Ximba, B. J. (2013). Kinetics and equilibrium models for the sorption of tributyltin to nZnO, activated carbon and nZnO/activated carbon composite in artificial seawater. *Marine Pollution Bulletin, 72*, 222-230.

Bangkephol, S., Keenan, H. E., Davidson, C., Sakultantimetha, A. & Songsasen, A. (2009). The partition behaviour of tributyltin and prediction of environmental fate, persistence and toxicity in aquatic environments. *Chemosphere, 77*, 1326-1332.

Economopoulou, M. A. & Tsihrintzis, V. A. (2004). Design methodology of free water surface constructed wetlands. *Water Resources Management, 18*, 541-565.

Interstate technology regulatory cooperation (ITRC). (2003). *Technical and regulatory guidance treatment wetlands*. New York, USA.

Isee systems, inc. (2016). STELLA 10.1 Non-Educator License. 966-796-234-835.

Kan-atireklap, S., Tanabe, S., Sanguansin, J., Tabucanon, M. S. & Hungspreugs, M. (1997). Contamination by butyltin compounds and organochlorine residues in Green Mussel (Perna Viridis, L) from Thailand coastal waters. *Environmental Pollution, 97*(1-2), 79-89.

Kayombo, S., Mbwette, T. S. A., Katima, J. H. Y, Ladegaard, N. & Jorgensen, S. E. (2005). *Waste stabilization ponds and constructed wetlands design manual*. Tanzania: University of Dar es Salaam.

Kumar, J. L. G. & Zhao, Y. Q. (2011). A review on numerous modeling approaches for effective, economical and ecological treatment wetlands. *Journal of Environmental Management, 92*(3), 400-406.

Mathurasa, L., Tongcumpou, C., Sabatini, D. A. & Luepromchai, E. (2012). Anionic surfactant enhanced bacterial degradation of tributyltin in soil. *International Biodeterioration & Biodegradation, 75*, 7-14.

Murai, R., Takahashi, S., Tanabe, S. & Takeuchi, I. (2005). Status of butyltin pollution along the coasts of western Japan in 2001, 11 years after partial restrictions on the usage of tribultin. *Marine Pollution Bulletin, 51*, 940-949.

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

Ophithakorn, T., Yaeed, S. & Suksaroj, T. T. (2014). Harmful effects of tributyltin in Songkhla old-town bay. In *The 3rd Annual Prince of Songkla University Phuket International Conference (PSU PIC 2014): Multidisciplinary Studies on Sustainable Development*. (pp. 114-119). Phuket, Thailand.

Ophithakorn, T., Sabah, A., Delalonde, M., Bancon-Montigny, C., Suksaroj, T. T. & Wisniewski, C. (2016). Organotins' fate in lagoon sewage system: dealkylation and sludge sorption/desorption. *Environmental Science and Pollution Research, 23*, 22832-22842.

Ophithakorn, T. & Yaeed, S. (2016). Pictorial model of organic matter treatment in free water surface constructed wetland. In *Proceeding of the 6th SKRU Conference: Focus on Education and Culture for Community Devalopment*. (pp 841-850). Songkhla: Songkhla Rajabhat University, Thailand. (in Thai)

Ophithakorn, T., Suksaroj, T. T. & Vitayavirasuk, B. (2017). Contamination of organotin in Songkhla old-town coast lagoon. Songkhla: Songkhla Rajabhat University. (in Thai)

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

Ruiz, J. M., Bachelet, G., Caumette, P. & Donard, O. F. X. (1996). Three decades of tributyltin in the coastal environment with emphasis on Arcachon bay, France. *Environmental Pollution, 93*(2), 195-203.

United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT). (2008). *Constructed wetland manual*. Nairobi, Kenya.

Zurita, F., De Anda, J. & Belmont, M. A. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering, 35*, 861-869.