รายงานผลการวิจัย

เรื่อง การบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร โดยใช้ไส้เดือนดินร่วมกับบึงประดิษฐ์

Treatment of Effluent from Swine Farm Biogas System by Earthworm and Constructed Wetlands

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2557
จำนวน 160,000 บาท

หัวหน้าโครงการ ผศ. ดร. ฐปน ชื่นบาล
ผู้ร่วมโครงการ ผศ. ดร. ศิราภรณ์ ชื่นบาล

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

15/09/58

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญภาพ	ข
สารบัญตาราง	ง
บทคัดย่อ	1
Abstract	1
คำนิยม	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	19
ผลการวิจัย	29
วิจารณ์ผลการวิจัย	37
สรุปผลการวิจัย	39
บรรณานุกรม	40

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1	บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน	8
ภาพที่ 2	บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินตามแนวนอน	9
ภาพที่ 3	บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินตามแนวดิ่ง	10
ภาพที่ 4	การติดตั้งวาล์วในบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง	20
ภาพที่ 5	การติดตั้งท่อปลายเปิดเพื่อระบายน้ำล้นในบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอน	20
ภาพที่ 6	ชั้นวัสดุตัวกลางและภาพการทดลองในแนวดิ่งและแนวนอน	21
ภาพที่ 7	ลักษณะของวัสดุตัวกลางในแต่ละชั้นของระบบบึงประดิษฐ์ทั้งแบบแนวดิ่งและแนวนอน	22
ภาพที่ 8	ไส้เดือนดินสายพันธุ์ขี้ตาแร่ *Perionyx sp.*	23
ภาพที่ 9	การเติมไส้เดือนดินในบึงประดิษฐ์	23
ภาพที่ 10	บ่อน้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกรยุพา	24
ภาพที่ 11	แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียของยุพาฟาร์ม	25
ภาพที่ 12	การทดลองบึงประดิษฐ์แบบผสม (hybrid system)	26
ภาพที่ 13	การเติมไส้เดือนดินในบึงประดิษฐ์แบบผสม	27
ภาพที่ 14	การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในบึงประดิษฐ์แบบไหลตามแนวดิ่ง (V) และแนวนอน (H)	30
ภาพที่ 15	การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีในบึงประดิษฐ์แบบไหลตามแนวดิ่ง (V) และแนวนอน (H)	30
ภาพที่ 16	การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายของบึงประดิษฐ์ในแนวดิ่ง (V) และแนวนอน (H)	31
ภาพที่ 17	การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยของบึงประดิษฐ์ในแนวดิ่ง (V) และแนวนอน (H)	32
ภาพที่ 18	การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในบึงประดิษฐ์แบบผสม	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 19	การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีในบึงประดิษฐ์แบบผสม	34
ภาพที่ 20	การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายในบึงประดิษฐ์แบบผสม	35
ภาพที่ 21	การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยในบึงประดิษฐ์แบบผสม	35
ภาพที่ 22	การเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรทในบึงประดิษฐ์แบบผสม	36
ภาพที่ 23	การเปลี่ยนแปลงค่าฟอสเฟตในบึงประดิษฐ์แบบผสม	37

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	สารปนเปื้อนสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดน้ำเสีย	6
ตารางที่ 2	คุณภาพน้ำทิ้งจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกร คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่โจ้	7
ตารางที่ 3	อิทธิพลของไส้เดือนดินต่ออัตราการระบายน้ำในดินเหนียวประเภทต่างๆ	11
ตารางที่ 4	ปริมาณสิ่งขับถ่ายของสัตว์ต่างๆ ในแต่ละวัน	11
ตารางที่ 5	ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร	12
ตารางที่ 6	มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร	13
ตารางที่ 7	การเปลี่ยนรูปไนโตรเจนในบึงประดิษฐ์	16
ตารางที่ 8	การศึกษาการนำไส้เดือนดินมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียและสลัดจ์	18
ตารางที่ 9	คุณลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง	29
ตารางที่ 10	คุณลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองระบบบึงประดิษฐ์แบบผสม	33

การบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร โดยใช้ไส้เดือนดินร่วมกับบึงประดิษฐ์

Treatment of Effluent from Swine Farm Biogas System by Earthworm and Constructed Wetlands

ฐปน ชื่นบาล และ ศิราภรณ์ ชื่นบาล

Tapana Cheunbarn and Siraporn Cheunbarn

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ. เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

ศึกษาชนิดพืชที่เหมาะสมร่วมกับการเติมไส้เดือนดินสายพันธุ์ท้องถิ่นในบึงประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกร โดยบึงประดิษฐ์แบ่งออกเป็นการไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งและแนวนอนที่ปลูกพืชโผล่เหนือน้ำ 3 ชนิดคือ หญ้าแฝก, ธูปฤาษี และกกราชินี ร่วมกับไส้เดือนดิน และใช้ไส้เดือนดินเพียงอย่างเดียวเป็นชุดควบคุม เติมน้ำเสียแบบแบตช์เข้าบึงประดิษฐ์ทุกวันโดยวิเคราะห์ค่าพีเอช, ซีโอดี, ของแข็งละลายและของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียก่อนเติมเข้าระบบ เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากบึงประดิษฐ์ทุก 3 วันเป็นเวลา 66 วันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด พบว่า หญ้าแฝกมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียดีที่สุดในบึงประดิษฐ์ทั้งสองแบบซึ่งเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ร่วมกับไส้เดือนดิน จึงทดลองต่อในขั้นตอนที่ 2 ในบึงประดิษฐ์แบบผสมรวมแนวดิ่งกับแนวนอน โดยปลูกหญ้าแฝกร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน เปรียบเทียบกับการปลูกเพียงหญ้าแฝก พบว่า หญ้าแฝกร่วมกับไส้เดือนดินมีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าการปลูกหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว โดยลดสามารถลดค่าซีโอดี, ของแข็งละลาย, ของแข็งแขวนลอย, ไนเตรทและฟอสเฟตได้ร้อยละ 91.42, 61.31, 98.40, 71.31 และ 96.34 ตามลำดับ

คำสำคัญ : น้ำเสียฟาร์มสุกร บึงประดิษฐ์ บึงประดิษฐ์แบบผสม พืชโผล่เหนือน้ำ ไส้เดือนดิน

Abstract

Study on suitable plant in constructed wetlands (CWs) added with local earthworm for treatment of effluent treated by biogas system. The CWs devided into two flows consist of vertical sub-surface flow (VSFCWs) and horizontal sub-surface flow (HSFCWs) constructed wetlands planted with 3 emergent plants *Vetiveria zizanioides*, *Typha angustifolia* L. and *Cyperus alternifolius* L. and used only earthworm as control. Daily batch feeding and sampling the outlet every 3 day for a total of 66 days were compared. Results showed that *V. zizanioides* had highest efficiency removal in both CWs which suitable for conjunct with earthworm in stage 2, hybrid system (HS) of VSF and HSF flows. The *V. zizanioides* within earthworm in HS were compared by only *V. zizanioides* HS. Results indicated that HS of *V. zizanioides* with earthworm was better than the only *V. zizanioides* HS. The HS of *V. zizanioides* with earthworm can removed COD (91.42%), TDS (61.31%), TSS (98.40%) Nitrate (71.31%) and Phosphate (96.34%)

Keywords : swine wastewater, constructed wetlands, hybrid system, emergent plant, earthworm

คำนิยม

โครงการวิจัยเรื่อง การบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรโดยใช้ไส้เดือนดินร่วมกับบึงประดิษฐ์ (Treatment of Effluent from Swine Farm Biogas System by Earthworm and Constructed Wetlands) ได้ดำเนินการวิจัยเสร็จลุล่วงโดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2557 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโรงบำบัดน้ำเสีย งานประปาและสุขาภิบาล กองสวัสดิการ สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

คณะผู้วิจัย

บทที่ 1
บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

สภาพแวดล้อมที่เสื่อมโทรมของแหล่งน้ำนั้นถือได้ว่าเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากเกิดการเน่าเสียของน้ำในแม่น้ำลำคลองซึ่งการเน่าเสียนั้นเกิดจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ได้รับจากเกษตรกรรมอุตสาหกรรมและชุมชนสำหรับประเทศไทย ซึ่งถือได้ว่าเป็นประเทศกสิกรรมนั้นน้ำเสียซึ่งเกิดจากแหล่งเกษตรกรรมถือได้ว่าเป็นสาเหตุที่สำคัญโดยเฉพาะน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร โดยน้ำทิ้งเหล่านี้จะไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการเกษตรกรรม สุขอนามัยของชุมชนและเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรเหล่านี้จะมีสารอินทรีย์แอมโมเนียและของแข็งแขวนลอยค่อนข้างสูง ในการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงการควบคุมดูแลเป็นไปด้วยความยากลำบากเพราะนอกจากฟาร์มขนาดใหญ่เท่านั้นจึงจะมีระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพและได้มาตรฐาน แต่โดยทั่วไปลักษณะของการเลี้ยงสุกรจะเป็นฟาร์มขนาดกลางและขนาดเล็กรวมไปถึงการเลี้ยงภายในครัวเรือนซึ่งพบว่า มีการกระจายอยู่ทั่วไปแทบทุกภาคของประเทศไทย ดังนั้นเพื่อลดปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นนี้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำทิ้งด้วยวิธีที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนต่ำและขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก เพื่อให้ประชาชนที่เลี้ยงสุกรโดยทั่วไปสามารถนำไปปฏิบัติได้ วิธีการบำบัดที่ได้ผลที่ดีและได้รับการยอมรับว่าสามารถแก้ไขปัญหาน้ำเสียจากฟาร์มสุกรได้ดีวิธีหนึ่ง คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยได้ผลพลอยได้เป็นก๊าซชีวภาพ อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำล้นจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศนั้นยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรจำเป็นต้องบำบัดต่อด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบอื่นๆ ต่อไป ซึ่งในปัจจุบันพบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน ทั้งแบบการไหลตามแนวนอน (Vertical Subsurface-Flow Constructed Wetlands, VSFCWs) และการไหลตามแนวดิ่ง (Horizontal Subsurface-Flow Constructed Wetlands, HSFCWs) เป็นทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียต่อจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เนื่องจากค่าก่อสร้างถูกและการดูแลรักษาง่าย

อย่างไรก็ตาม การบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์ต้องอาศัยระยะเวลาการเก็บกักน้ำที่เพียงพอต่อการดูดซับโดยพืช ทำให้เกิดตะกอนสะสมในระบบ ซึ่งส่งผลให้เกิดการอุดตันในระบบทำให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ลดลง โดยการไหลตามแนวนอน (VSFCWs) จะเกิดปัญหาการอุดตันเนื่องจากการสะสมของของแข็งบริเวณผิวหน้าหรือ

ในช่องว่างระว่างตัวกลาง และการไหลตามแนวดิ่ง (HSFCWs) ตัวกลางจะอุดตันบริเวณทางน้ำเข้า จากปัญหาการอุดตันที่เกิดขึ้นได้มีการนำไส้เดือนดินมาประยุกต์ใช้กับบึงประดิษฐ์ เพราะมีรายงานว่า ในดินที่มีไส้เดือนดินอาศัยอยู่นั้นมีอัตราการซึมผ่านของน้ำดีกว่าดินที่ไม่มีไส้เดือนดิน (อานัฐ, 2550) และพบว่าเมื่อนำไส้เดือนดินมาใส่ร่วมในระบบบึงประดิษฐ์ สามารถแก้ปัญหาการอุดตันได้ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้น (Chiarawatchai *et al.*, 2007)

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จะดำเนินการศึกษาการใช้บึงประดิษฐ์แบบไหลแนวดิ่งร่วมกับการไหลในแนวนอน ร่วมกับการใช้ไส้เดือนดินสายพันธุ์ท้องถิ่นเพื่อลดปัญหาการอุดตันและเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศของฟาร์มสุกร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาชนิดของพืชที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียร่วมกับไส้เดือนดินสายพันธุ์ท้องถิ่น
2. ศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ไส้เดือนดินสายพันธุ์ท้องถิ่นร่วมกับบึงประดิษฐ์ที่ไหลตามแนวดิ่งและแนวนอนในการบำบัดน้ำเสียจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศของฟาร์มสุกร

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงชนิดพืชที่มีความเหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียร่วมกับไส้เดือนดินสายพันธุ์ท้องถิ่น
2. ทราบถึงประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศของฟาร์มสุกรโดยระบบบึงประดิษฐ์ที่ไหลตามแนวดิ่งและแนวนอนร่วมกับการใช้ไส้เดือนดินสายพันธุ์ท้องถิ่น
3. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาเป็นเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียสำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็กและขนาดกลางที่มีค่าคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานต่อไปได้

บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

น้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำซึ่งผ่านการใช้งานแล้วโดยชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม เกษตรกรรม หรือการใช้งานประเภทอื่นๆ เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วจะเกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำจนถึงระดับที่ทำให้แหล่งน้ำนั้นนำมาใช้งานไม่ได้อีก น้ำเสียประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะหนักหรือสารพิษอื่นๆ น้ำมันหรือไขมัน ความร้อน ปริมาณของแข็ง สีและความขุ่น กรดและด่าง จุลินทรีย์ เป็นต้น โดยจะทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไป (จุฬาภรณ์, 2551)

ตารางที่ 1 สารปนเปื้อนสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดน้ำเสีย

สารปนเปื้อน	ความสำคัญ
สารแขวนลอย (suspended solids)	สามารถทำให้เกิดการสะสมของของแข็งส่วนเกินที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการทางชีวภาพหรือเคมี และเกิดสภาวะไร้อากาศเมื่อปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ
สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ (biodegradable organics)	ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก คือโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ซึ่งวัดในรูปของค่าบีโอดี (biochemical oxygen demand) และซีโอดี (chemical oxygen demand) ถ้าไม่ผ่านการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง
สารอาหาร (nutrients)	ทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัส รวมทั้งคาร์บอน เป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโต เมื่อปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมสามารถทำให้เกิดการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตที่ไม่ต้องการได้
โลหะหนัก (heavy metal)	ส่วนใหญ่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมและจำเป็นต้องกำจัดเมื่อต้องการนำน้ำกลับมาใช้
สารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำ (dissolved inorganics)	สารอนินทรีย์ เช่น แคลเซียม โซเดียม และซัลเฟต พบในน้ำใช้โดยทั่วไป และจำเป็นต้องกำจัดเมื่อต้องการนำน้ำกลับมาใช้

ที่มา : Tchobanoglous (1979)

ปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพร่วมกับบึงประดิษฐ์มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากน้ำทิ้งที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ยังมีความสกปรกเหลืออยู่ค่อนข้างสูง (ตารางที่ 2) ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ต้องบำบัดต่อด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบอื่นๆ ต่อไป เช่น บ่อเติมอากาศ บ่อผึ่ง บึงประดิษฐ์ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบัน พบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์เป็นทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียต่อจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เนื่องจากค่าก่อสร้างถูกและการดูแลรักษาง่าย

ตารางที่ 2 คุณภาพน้ำทิ้งจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกร คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ตัวแปร	ลักษณะของน้ำทิ้ง
pH	7.5-8.9
อุณหภูมิ	27-32 องศาเซลเซียส
DO	1.0-2.3 มิลลิกรัมต่อลิตร
COD	1200-1800 มิลลิกรัมต่อลิตร
BOD	760-1600 มิลลิกรัมต่อลิตร
NO_3^--N	40-90 มิลลิกรัมต่อลิตร
NH_4^+-N	73-210 มิลลิกรัมต่อลิตร
SRP	260-675 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา : Cheunbarn และ Peerapornpisal (2010)

ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetlands)

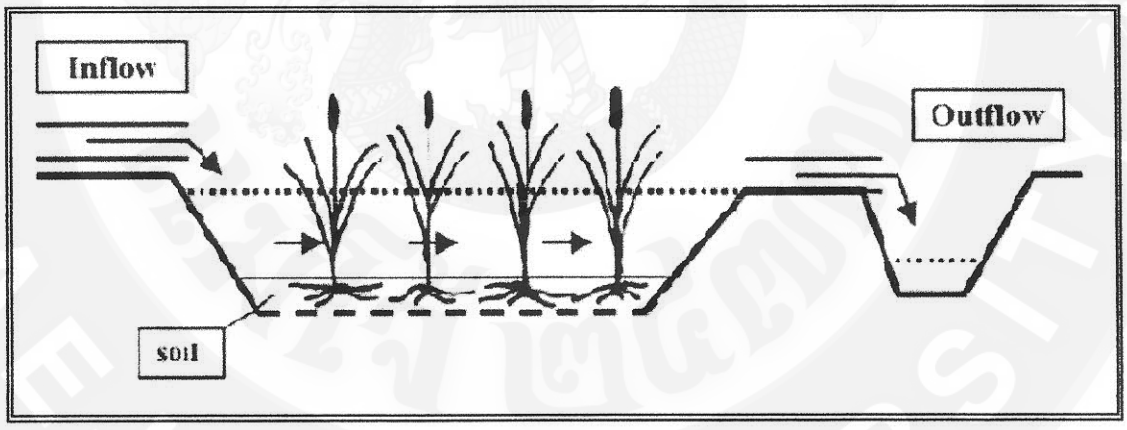
บึงประดิษฐ์ (Constructed Wetlands) ได้ถูกสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติด้วยการปลูกพืชต่างๆ เช่น พืชจำพวกอ้อ (*Phragmites*) กก (*Scirpus*) และธูปฤาษีหรือก้านธูป (*Typha*) บนทราย กรวดหรือดิน ซึ่งใช้เป็นตัวกลาง (กรมควบคุมมลพิษและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546)

การบำบัดน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์จะใช้สารตัวกลาง พืช จุลชีพ และบรรยากาศมาเกี่ยวพันกันคือ มาทำหน้าที่ที่แตกต่างกันตามความสามารถของแต่ละสิ่งเพื่อเกื้อกูลและช่วยกันบำบัดน้ำเสียให้ที่สารปนเปื้อนนั้นลดน้อยลงโดยไม่ต้องอาศัยเครื่องจักรหรือระบบชั้นสูงต่างๆ วิธีนี้จะบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยกลไกธรรมชาติเป็นหลัก (เกรียงศักดิ์, 2539) ซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนในการก่อสร้างและดูแลรักษาต่ำ สูญเสียพลังงานน้อย ทนต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งคุณภาพและปริมาณของ

ของเสียได้มาก (Todorovics *et al.*, 2005) โดยทั่วไป ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน (Free Water Surface-Flow Constructed Wetlands, FWSFCWs)

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินประกอบด้วยบ่อตื้นๆ ซึ่งสร้างด้วยดินที่มีการซึมน้ำได้น้อยหรืออาจปูด้วยวัสดุกันซึม มีระดับน้ำลึก 0.2-0.4 เมตร ปล่อยน้ำเสียเข้าระบบช้าๆ ผ่านต้นพืช ดังภาพที่ 1 ขั้นตอนหลักที่บำบัดน้ำเสียของระบบนี้คือ การเติมอากาศในระบบที่มาจากพืชลมพัด และขณะที่น้ำไหลผ่านพืชทำให้ความเร็วของน้ำลดลงจึงเกิดการตกตะกอนและการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่พื้นผิวท้องน้ำ พืชที่นิยมใช้ในระบบมักจะเป็นพวกที่มีรากยึดเกาะดิน เช่น กก ต้นอ้อและธูปฤาษี (เกรียงศักดิ์, 2539) ประสิทธิภาพของระบบ FWSFCWs จะเป็นการบำบัดน้ำเสียทั่วไปซึ่งเกี่ยวกับการกำจัดมลพิษ โลหะหนัก และสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อน ซึ่งโดยทั่วไประบบน้ำไหลบนผิวดิน จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากขั้นที่ 2 นอกจากนี้ระบบ FWSFCWs ยังมีความเหมาะสมสำหรับเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะสำหรับนก จุลินทรีย์ เชื้อก่อโรคบางชนิดโดยเฉพาะ Fecal Coliform, *Streptococci* และ *Salmonella* เป็นต้น (Ghermandi *et al.*, 2007)



ภาพที่ 1 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน

ที่มา : Vymazal (2007)

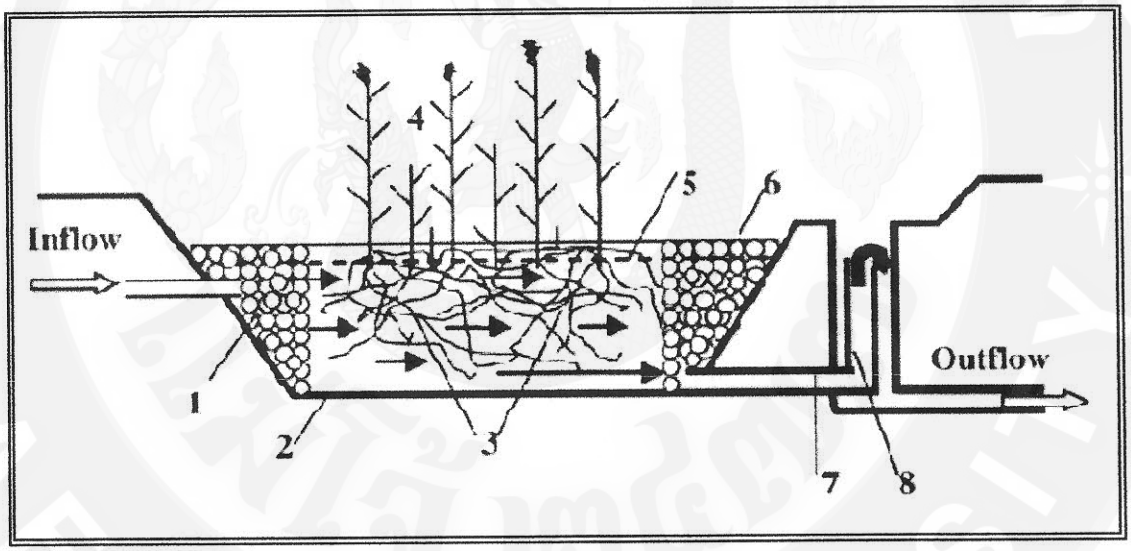
2. บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Sub surface-Flow Constructed Wetlands, SFCWs)

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินนี้ ภายในบรรจุชั้นตัวกลางเพื่อให้รากพืชยึดเกาะ เช่น ดิน ทราย กรวดหรือหินบด มีความหนาของชั้นตัวกลางประมาณ 0.3-0.6 เมตร ด้านล่างคาดด้วยดินเหนียว วัสดุกันซึมอื่นๆ หรือแผ่นโพลีเอทธิลีน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำรั่วซึมไปปนเปื้อนน้ำใต้

ดิน ส่วนก้นบึงมีความลาดชันประมาณร้อยละ 1 เพื่อให้น้ำไหลได้ตามธรรมชาติโดยไม่มีการกักขังเกิดขึ้น ทางด้านน้ำเข้าจะมีท่อกระจายน้ำเข้าสู่ระบบ และมีท่อรวบรวมน้ำออกที่ข้างใต้ชั้นตัวกลาง ระบบนี้อาศัยการเติมอากาศด้วยพืชเป็นหลัก น้ำเสียจะถูกบำบัดเมื่อไหลผ่านตัวกลางและรากพืช (เกรียงศักดิ์, 2539) บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.1 การไหลตามแนวนอน (Horizontal Subsurface-Flow Constructed Wetlands, HSFCWs)

ระบบบึงประดิษฐ์แบบนี้จะมีการออกแบบให้ชั้นที่ปลูกพืชเป็นรูปสี่เหลี่ยม พืชที่ใช้กันโดยทั่วไปจะเป็นกก (*P. australis*) และจะปลูกเป็นแนวเพื่อเป็นผนังป้องกันการซึมผ่าน กลไกการบำบัดของระบบคือ จะปล่อยน้ำเสียไหลเข้าไปช้าๆ ผ่านตัวกรองที่อยู่ใต้ผิวของชั้นหินจนกระทั่งถึงบริเวณทางออกดังแสดงในภาพที่ 2 ในระหว่างที่น้ำเสียไหลผ่านพืชและชั้นหินน้ำเสียจะสัมผัสกับบริเวณที่เป็นแอโรบิค แอนอกซิคและแอนแอโรบิค (Vymazal, 2005)



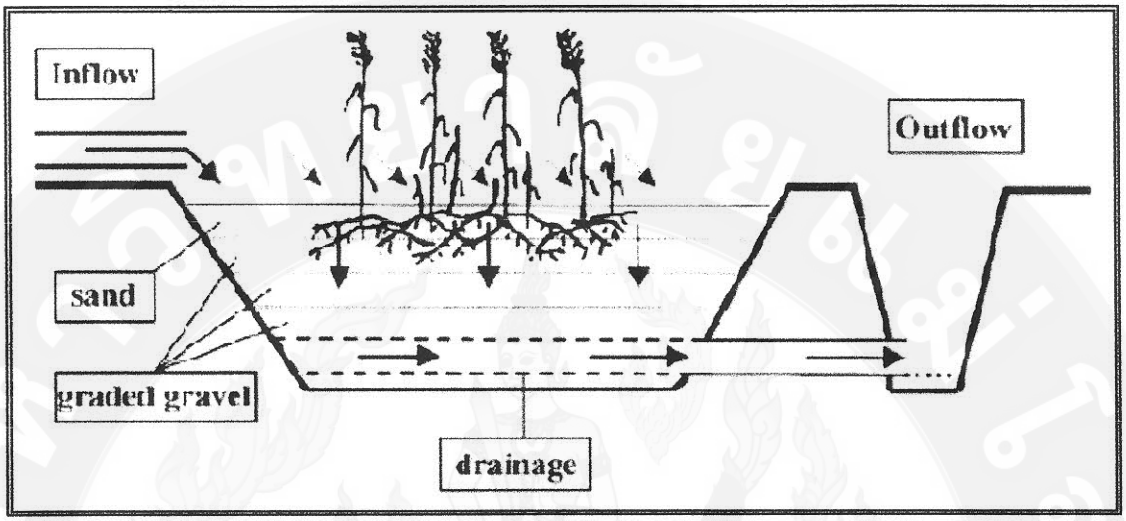
ภาพที่ 2 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินตามแนวนอน

ที่มา : Vymazal (2005)

2.2 แบบการไหลตามแนวดิ่ง (Vertical Subsurface-Flow Constructed Wetland, VSFCWs)

บึงประดิษฐ์ประกอบด้วย ชั้นตัวกลางหลายชั้น ซึ่งอาจมีขนาดต่างกันก็ได้ มีการกระจายน้ำเข้าทั่วบริเวณผิวหน้าชั้นตัวกลางและมีระบบท่อรับน้ำออกอยู่ใต้ผิวชั้นตัวกลาง (ภาพที่ 3) น้ำเสียจะเข้าระบบเป็นครั้งคราว (Intermittent Loading) เพื่อให้เกิดสภาพมีอากาศในช่วงหยุดเติมน้ำ

เสียโดยอากาศจะแพร่ผ่านเข้าไปในช่องว่างของชั้นตัวกลาง จุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ที่ตัวกลางและรากพืชจะทำหน้าที่ลดสารอินทรีย์ในน้ำ (สุรศักดิ์, 2550)



ภาพที่ 3 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินตามแนวดิ่ง

ที่มา : Vymazal (2007)

ปัญหาที่พบส่วนใหญ่คือ ระบบบึงประดิษฐ์มักมีการอุดตัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและอายุการใช้งานของระบบลดลงจากปัญหาการอุดตันที่เกิดขึ้น ได้มีการคิดค้นและวิจัยนำไส้เดือนดินมาประยุกต์ใช้กับบึงประดิษฐ์ เนื่องจากมีรายงานว่า ในดินที่มีไส้เดือนดินอาศัยอยู่นั้น มีอัตราการซึมผ่านของน้ำดีกว่าดินที่ไม่มีไส้เดือนดิน (ตารางที่ 2) และพบว่าเมื่อนำไส้เดือนดินมาประยุกต์ใช้ร่วมในระบบบึงประดิษฐ์ สามารถแก้ปัญหาการอุดตันได้และมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้นเล็กน้อย Chiarawatchai *et al.* (2007) ได้ศึกษาการนำไส้เดือนดินมาประยุกต์ใช้กับบึงประดิษฐ์เพื่อที่จะลดผลกระทบจากการอุดตัน โดยทำการทดลองกับน้ำเสียมูลสุกรและน้ำเสียเทศบาล ผลการทดลองพบว่า ไม่มีการอุดตันในระบบที่มีการเติมไส้เดือนดิน ส่วนระบบที่ไม่มีการเติมไส้เดือนดินจะมีการอุดตันเฉพาะกับน้ำเสียมูลสุกร ส่วนคุณภาพการบำบัดน้ำเสียพบว่า มีการบำบัดเกิดขึ้นในระดับไม่สูง ทั้งนี้ไส้เดือนดินสามารถเจริญเติบโตอยู่ในบึงประดิษฐ์ได้ โดยมีอัตราการรอดชีวิตอยู่ร้อยละ 50 และ 85 ในน้ำเสียเทศบาลและน้ำเสียมูลสุกรตามลำดับ

ตารางที่ 3 อิทธิพลของไส้เดือนดินต่ออัตราการระบายน้ำในดินเหนียวประเภทต่างๆ

วัสดุ	อัตราการซึมผ่านของน้ำ (นิ้ว/นาที)	
	ไม่มีไส้เดือนดิน	มีไส้เดือนดิน
ดินเหนียวไม่ใส่อะไร	0.0	0.0
ดินเหนียวที่มีเศษหญ้าบริเวณผิวดิน	0.2	0.80
ดินเหนียวที่มีเศษใบไม้ที่เน่าเปื่อย	0.0	1.5

ที่มา : อานัฐ (2550)

ลักษณะน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ในฟาร์มสุกรของเสียเกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ คือ เศษอาหาร มูล ปัสสาวะ น้ำล้างคอก ก๊าซต่างๆ และสารระเหยที่มีกลิ่นจากการสลายตัวของมูลและปัสสาวะที่ขับถ่ายแล้ว ปริมาณของสิ่งขับถ่ายและลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นในฟาร์มแต่ละวัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ขนาดของฟาร์มหรือจำนวนสัตว์ยืนคอก ลักษณะอาหารและวิธีการให้อาหาร ขนาด ชนิดของสัตว์และประเภทสัตว์ที่เลี้ยง ลักษณะโรงเรือนและระบบการจัดการของเสีย วิธีการทำความสะอาดคอกและปริมาณน้ำที่ใช้ล้างหรือทำความสะอาด โดยปริมาณสิ่งขับถ่ายของสุกรในแต่ละวันจะแตกต่างกันตามขนาดของสุกรด้วย เช่น แม่สุกรกับสุกรขุนที่มีน้ำหนักเท่ากัน คือ 90-120 กิโลกรัม จะขับถ่ายของเสียเท่ากับ 4 และ 12 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ปริมาณสิ่งขับถ่ายของสัตว์ต่างๆ ในแต่ละวัน

ชนิดสัตว์ที่ขับถ่าย	น้ำหนักตัว (กิโลกรัม)	ร้อยละของความชื้น	ปริมาตร (ลิตรต่อวัน)
แม่สุกรท้องว่าง	90-120	90	4
สุกรขุน อาหารแห้ง	90-120	90	12
สุกรขุน อาหารเหลว (4:1)	40-75	90	4

ที่มา : สถานเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2549: ระบบออนไลน์)

เมื่อเปรียบเทียบกับการขับถ่ายของสัตว์ชนิดอื่น ปรากฏว่าสุกรขับถ่ายมากกว่าม้า โคและกระบือถึงสองเท่าเมื่อคิดต่อหน่วยน้ำหนัก (นิพนธ์, 2526) ขณะที่กรมปศุสัตว์ (2533) รายงานว่าส่วนประกอบทางเคมีและปริมาณมวลสุกรที่ขับถ่ายออกมาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ อายุ น้ำหนักตัว พันธุ์ อาหาร ปริมาณน้ำที่กิน ความสามารถในการย่อยอาหาร สิ่งแวดล้อมและการ

จัดการเกี่ยวกับของเสียซึ่งก่อให้เกิดลักษณะน้ำเสียที่แตกต่างกันไปในแต่ละฟาร์มสุกรดังแสดงไว้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
อัตราการเกิดน้ำเสีย	10-20 ลิตรต่อตัวต่อวัน
บีโอดี	1,500-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี	4,000-7,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	2,000-4,800 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น	400-800 มิลลิกรัมต่อลิตร
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	8-17 มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเป็นกรดด่างหรือค่าพีเอช	6-8

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2546)

น้ำเสียจากฟาร์มสุกรมีความเข้มข้นสูงมาก ทั้งในรูปของบีโอดีและธาตุอาหาร (ธงชัย, 2544) ซึ่งเมื่อปล่อยน้ำเสียลงสู่แม่น้ำจะทำให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (eutrophication) หรือสาหร่ายสะพรั่งจากการมีธาตุอาหารไนโตรเจน และ/หรือฟอสฟอรัสมากเกินไปในแหล่งน้ำปิด ในประเทศไทยเกิดยูโทรฟิเคชันหรือที่เรียกกันว่า "ปรากฏการณ์ขี้ปลาวาฬ" ในหลายพื้นที่แล้ว เช่น ศรีราชา ชะอำ หัวหิน กว๊านพะเยา บึงแก่นนคร (ขอนแก่น) เมื่อต้นปี พ.ศ. 2543 เกิดปัญหาสาหร่ายสะพรั่งขึ้นที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดสมุทรปราการ เป็นบริเวณกว้างกว่า 3 กิโลเมตร ตามชายฝั่งทะเลปากแม่น้ำ (ธงชัย, 2544) จึงได้มีข้อกำหนดเพื่อควบคุมการปล่อยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเพื่อให้มีการบำบัดน้ำเสียดีก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งมาตรฐานน้ำทิ้งมีค่ากำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าสูงสุด	
		ประเภท ก.	ประเภท ข.
ความเป็นกรดและด่าง	-	5.5-9	5.5-9
บีโอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	60	100
ซีโอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	300	400
ของแข็งแขวนลอย	มิลลิกรัมต่อลิตร	150	200
ทีเคเอ็น	มิลลิกรัมต่อลิตร	120	200

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2546)

หมายเหตุ : ประเภท ก ฟาร์มขนาดใหญ่ (จำนวนสุกรตั้งแต่ 5,000 ตัวขึ้นไป)
ประเภท ข ฟาร์มขนาดกลาง (ฟาร์มที่มีจำนวนสุกรในช่วง 500-5,000 ตัว)

เมื่อของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ที่มีสารอินทรีย์ระดับสูงไหลลงแหล่งน้ำ จะมีกลไกทางธรรมชาติในการบำบัดสารอินทรีย์เกิดขึ้น คือ จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในน้ำเพื่อการย่อยสลายสารอินทรีย์น้ำเสียมากขึ้น ทำให้ออกซิเจนในแหล่งน้ำถูกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารเคมีเชิงซ้อนที่เป็นส่วนประกอบอยู่ จะถูกเปลี่ยนเป็นสารออกไซด์เชิงเดี่ยว จำพวก CO_2, NO, SO_4, PO_4^+ และสารอื่นๆ ปริมาณออกซิเจนจึงลดน้อยลงตามลำดับจนหมด ส่งผลให้ปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ ขาดออกซิเจนที่จำเป็นต่อชีวิตและตายในที่สุด ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ต่ำจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันต่ำ และเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันสูงขึ้น (Adave *et al.*, 2008) การปนเปื้อนของไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมอิสระหรือแอมโมเนียมไอออน (NH_3/NH_4^+) ก็เพิ่มการใช้ออกซิเจนโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรีย เพื่อเปลี่ยน NH_3/NH_4^+ เป็นไนไตรท์ (NO_2^-) ในขบวนการไนตริฟิเคชัน ส่วน blue-green algae บางชนิดที่ได้รับไนโตรเจนสูงในน้ำที่ไหลช้าสามารถเป็นพิษต่อผู้ใช้น้ำได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอาหารและสารอินทรีย์ในปริมาณสูงและมีของแข็งอยู่ด้วย ระหว่างการบำบัดน้ำเสีย ระบบก็จะผลิตก๊าซมีเทนขึ้นโดยไม่ต้องใช้พลังงาน (Feng *et al.*, 2007) และผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้อีกด้วย ซึ่งการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบก๊าซชีวภาพนี้ เป็นระบบที่ไม่ต้องมีการเติมอากาศ จึงทำให้ประหยัดพลังงาน อีกทั้งยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อนได้อีกด้วย

(สุวิมล, 2548) ซึ่งองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซต่างๆ คือ มีเทน (CH_4) ประมาณร้อยละ 60-70 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 30-40 ไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 5-10 และแก๊สอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน (N_2) ประมาณร้อยละ 2-3 และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ประมาณร้อยละ 1-2 (จตุพรและคณะ, 2548)

กลไกการบำบัดน้ำเสียในบึงประดิษฐ์

การบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการธรรมชาติทั้งทางกายภาพ ทางเคมีและชีวภาพ ที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมของดินและน้ำ กล่าวคือ การบำบัดน้ำเสียที่สมบูรณ์จะต้องใช้วิธีทางชีวภาพ กายภาพ และเคมีร่วมกับพืช ตัวกลางและจุลินทรีย์ในบึงประดิษฐ์ โดยวิธีการบำบัดน้ำเสียนี้สามารถกำจัดหรือแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสียได้ระดับหนึ่ง ซึ่งสิ่งได้แก่ ของแข็งแขวนลอย สารอินทรีย์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เชื้อก่อโรค เป็นต้น (เกรียงศักดิ์, 2539; Ayaz และ Akca, 2001) โดยมีกลไกดังนี้

1. การกำจัดของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ไหลผ่านบนดินสามารถถูกกำจัดหรือแยกออกจากน้ำเสียได้ไม่ยากนักโดยอาศัยการตกตะกอน การกรองผ่านชั้นดิน หรือการกรองผ่านรากพืชต่างๆ สำหรับการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นอย่างได้ผลในบึงประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ คือ ของแข็งส่วนใหญ่จะถูกกรองออกในช่วง 2-3 เมตรแรก หลังจากที่น้ำเสียไหลผ่านช่องทางน้ำเข้าเข้าสู่ระบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับความนิ่งและความลึกของระดับน้ำด้วย ในการควบคุมการกระจายน้ำเสียเข้าสู่ระบบด้วยการติดตั้งท่อกระจายน้ำนั้นสามารถควบคุมความเร็วในการไหลของน้ำให้ลดลง โดยทั่วไปแล้วความเร็วการไหล ณ จุดใดๆ ของทางน้ำเข้าไม่ควรมีค่ามากกว่า 0.3 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะช่วยในการกำจัดของแข็งแขวนลอยและช่วยลดภาวะของเสียที่เข้ามาในระบบได้ นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันไม่ให้สภาวะไร้อากาศ (Anoxic Condition) เกิดขึ้นที่ส่วนต้นของช่องทางการไหลของน้ำอีกด้วย (กรมควบคุมมลพิษและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546)

2. การกำจัดสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจำเป็นต้องถูกกำจัดออก ซึ่งวิธีบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีธรรมชาติสามารถกำจัดได้โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพแบบใช้อากาศ คือ พวกจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่ตามผิวเม็ดดินต่างๆ จะอาศัยออกซิเจนจากอากาศดำรงชีพอยู่ได้และจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ส่วนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนก็มีบางส่วนเกิดขึ้นภายในชั้นดินบ้างแต่ก็มีไม่มากนัก ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในระบบคือ ปริมาณออกซิเจนถ่ายเทเข้าสู่ระบบจะต้องมีมากกว่าปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในระบบ

3. การกำจัดไนโตรเจน

ส่วนใหญ่แล้วไนโตรเจนจะถูกกำจัดด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ส่วนกลไกอื่นในการกำจัดไนโตรเจน เช่น การดูดซึมเข้าไปในพืช และการระเหยในรูปของแอมโมเนียสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับกลไกแรก ในระบบบึงประดิษฐ์ส่วนมากจะพบไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม (NH_4^+-N) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ในสภาวะที่มีพีเอชและอุณหภูมิสูงกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic Nitrogen) ไปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน (NH_4^+-N) เป็นขั้นตอนแรกของการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจน จากนั้นจะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจน (NH_4^+-N) ไปเป็นไนเตรทไนโตรเจน (NO_3-N) โดยมีไนไตรท์ไนโตรเจน (NO_2^--N) เป็นตัวกลางที่อยู่ระหว่างการเกิดปฏิกิริยานี้ ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดในน้ำหรือดินที่มีออกซิเจนเพียงพอ (Aerobic) ซึ่งจะรวมถึงบริเวณรอบๆ รากพืชด้วย แต่ถ้าระบบอยู่ในสภาพที่ไร้อากาศ (Anoxic) หรือออกซิเจนไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาของกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) จะเกิดขึ้นและไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^--N) จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนไตรท์ไนโตรเจน (NO_2^--N) และก๊าซไนโตรเจนในที่สุด (N_2) (กรมควบคุมมลพิษและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546)

จากตารางที่ 7 จะเป็นการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนในการบำบัดน้ำเสียในบึงประดิษฐ์ซึ่งกลไกในการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียประกอบด้วย การระเหยของแอมโมเนีย (Ammonia Volatilization) ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) การนำไปใช้โดยพืช (Plant Uptake) การดูดซับแอมโมเนีย (Ammonia Adsorption) การออกซิไดซ์แบบแอนแอโรบิคของแอมโมเนีย (Anaerobic Ammonia Oxidation) และการทับถมของสารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic Nitrogen Burial) ส่วนกระบวนการอื่นๆ เช่น Ammonification หรือไนตริฟิเคชัน (Nitrification) เป็นเพียงการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนไม่ใช่การกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสีย (Vymazal, 2007)

ตารางที่ 7 การเปลี่ยนรูปไนโตรเจนในบึงประดิษฐ์

Nitrogen transformation in (constructed) wetlands	
Process	Transformation
Volatilization	ammonia-N (aq) ⟶ ammonia-N (g)
Ammonification	organic-N ⟶ ammonia-N
Nitrification	ammonia-N ⟶ nitrite-N ⟶ nitrate-N
Denitrification	nitrate-N ⟶ nitrite-N ⟶ gaseous N_2, N_2O
N_2 Fixation	gaseous N_2 ⟶ ammonia-N (organic-N)
Plant-microbial uptake (assimilation)	ammonia-N, nitrite-N, Nitrate-N ⟶ organic-N
Ammonia adsorption	
Organic nitrogen burial	
ANAMMOX (anaerobic ammonia oxidation)	ammonia-N ⟶ gaseous N_2

ที่มา : Vymazal (2007)

4. การกำจัดฟอสฟอรัส

ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมีตั้งแต่ 0-90% ส่วนใหญ่การกำจัดเกิดขึ้นที่ชั้นดินส่วนพื้นบึงถ้าหากดินมีส่วนผสมของเหล็ก อลูมิเนียมและแคลเซียม ก็จะช่วยส่งเสริมการกำจัดให้ดีขึ้น ส่วนพืชน้ำจะนำฟอสฟอรัสไปใช้ในการสร้างเซลล์ผ่านทางราก เมื่อพืชตายจะย่อยสลายและคายฟอสฟอรัสบางส่วนออกมา ส่วนที่เหลือจะจมอยู่กับซากพืช นอกจากนี้ กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสจะเป็นการดูดไปใช้โดยพืชและหลังจากนั้นจะมีการเก็บเกี่ยวพืชออกจากระบบ ซึ่งปริมาณของฟอสฟอรัสที่สามารถกำจัดออกโดยการเก็บเกี่ยวพืชนั้นเป็นการกำจัดเพียงส่วนน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณของฟอสฟอรัสที่เข้าไปในระบบ นอกจากนี้ฟอสฟอรัสอาจติดอยู่กับตัวกรองของพืชที่อยู่ชั้นล่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องของการดูดซับและการตกตะกอนกับแคลเซียม อลูมิเนียม และเหล็ก ในทรายหรือหิน (ศักดิ์ชัย, 2547; Arias *et al.*, 2001)

5. การกำจัดเชื้อโรค

เชื้อโรคส่วนใหญ่ที่พบอยู่ในบึงประดิษฐ์ ได้แก่ หนอนพยาธิ แบคทีเรีย และไวรัส (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) วิธีการกำจัดเชื้อโรคในบึงประดิษฐ์ประกอบด้วย วิธีทางกายภาพ เช่น การตกตะกอน การกรอง การถูกทำลายด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต วิธีทางเคมี ได้แก่ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การดูดซับโดยอินทรียวัตถุ และสารพิษที่พืชบางชนิดปล่อยออกมา ส่วนวิธีทางชีวภาพ

ประกอบด้วย การตายลงตามธรรมชาติ (Natural Die-Off) การกินกันเอง (Predation) และสารปฏิชีวนะที่สิ่งมีชีวิตอื่นปล่อยออกมา (ประนัดดา, 2548)

ไส้เดือนดิน

สายพันธุ์ไส้เดือนดินสามารถแบ่งออกตามระบบนิเวศวิทยา คือ กลุ่ม epigeic, endogeic และ anecic ซึ่งในแต่ละกลุ่มจำแนกตามการขุดดินและการกินอาหาร ในกลุ่มของ epigeic เป็นกลุ่มของไส้เดือนดินผิวดิน เป็นไส้เดือนดินที่เลือดมีรงควัตถุ (ไส้เดือนดินสีแดง) ลำดังขนาดเล็กยาว 2-5 นิ้ว อาศัยบริเวณผิวดินที่มีอินทรียวัตถุมาก ความชื้นสูงตลอดปี ไม่มีการขุดรู กินอาหารเก่ง และแพร่พันธุ์ได้มาก เป็นกลุ่มไส้เดือนดินที่ใช้ย่อยสลายขยะอินทรีย์ในการผลิตปุ๋ยหมักมูลไส้เดือน ในส่วนของ endogeic เป็นกลุ่มไส้เดือนดินในดิน เป็นไส้เดือนดินที่เลือดไม่มีรงควัตถุ (ไส้เดือนดินสีเทา) มีขนาดลำตัวใหญ่กว่าไส้เดือนดินในกลุ่มผิวดิน อาศัยอยู่ในดินทั่วไปหรือกองปุ๋ยหมัก มีการขุดรูในแนวระนาบผิวดินไม่ลึกมาก กินอินทรียวัตถุและดินเป็นอาหาร มีอัตราการแพร่พันธุ์น้อยกว่าไส้เดือนดินในกลุ่มผิวดิน และมีการพักตัวในช่วงหน้าแล้ง ไส้เดือนดินกลุ่มนี้ไม่เหมาะต่อการใช้ย่อยสลายขยะอินทรีย์ และกลุ่ม anecic เป็นกลุ่มไส้เดือนดินในดินลึก เป็นไส้เดือนดินที่เลือดไม่มีรงควัตถุ (ไส้เดือนดินสีเทา) มีลำตัวขนาดใหญ่และบางชนิดยาวมาก (Edwards และ Bohlen, 1996)

การใช้ไส้เดือนในการบำบัดน้ำเสีย

ในปัจจุบันเราสามารถนำไส้เดือนดินสายพันธุ์ที่เหมาะสมมาเลี้ยงเพื่อใช้ประโยชน์ ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยมคือ การเลี้ยงไส้เดือนดินเพื่อกำจัดขยะอินทรีย์ชนิดต่างๆ และได้ผลพลอยได้เป็นปุ๋ยหมักมูลไส้เดือนดิน และในบางประเทศมีการผลิตปุ๋ยหมักมูลไส้เดือนดินเพื่อใช้ในฟาร์มกันอย่างแพร่หลาย เช่น ในประเทศอินเดีย มีเกษตรกรเกือบ 1,000 ราย สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีลงถึง 90% โดยหันมาใช้ปุ๋ยหมักจากมูลไส้เดือนดิน ไส้เดือนดินที่นิยมนำมาใช้ผลิตปุ๋ยหมักมูลไส้เดือนดินทางการค้า ประกอบด้วย ไส้เดือนดินสายพันธุ์ *Eisenia fetida* (brandling หรือ tiger worm) *Eisenia Andrei* (red tiger worm) *Eudrilus eugeniae* (African night-crawler) *Dendrobaena veneta*, *Perionyx excavatus* และ *Lumbricus rubellus* (red worm) สำหรับประเทศไทยจากการศึกษาและวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีไส้เดือนดินสายพันธุ์ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้กำจัดขยะอินทรีย์ได้อย่างดีเยี่ยมและมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับสายพันธุ์ทางการค้า นั่นก็คือ ไส้เดือนดินสายพันธุ์ขี้ตาแร่ ไส้เดือนดินส่วนใหญ่ที่มีศักยภาพในการนำมาใช้ย่อยสลายขยะอินทรีย์นั้น จะเป็นไส้เดือนดินในกลุ่มสีแดงที่อาศัยอยู่ใต้กองมูลสัตว์เป็นสำคัญ ส่วนไส้เดือนดินสีเทาที่สำรวจพบและมีอัตราการแพร่พันธุ์ที่ดีที่นำมาทดลองกลับไม่สามารถทนอยู่ในสภาพที่ใช้ทดลองได้ เนื่องจาก

ไส้เดือนดินสีเทาส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ทดลองจะพบว่าอาศัยอยู่ใต้กองปุ๋ยหมัก และอาศัยอยู่ใต้ดินเป็นหลัก จึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ย่อยสลายขยะอินทรีย์สดปริมาณมากๆ เพื่อผลิตปุ๋ยหมักมูลไส้เดือนดินที่เป็นทางการค้าได้

นอกจากการนำไส้เดือนดินมาใช้กำจัดขยะแล้ว ยังมีรายงานว่าไส้เดือนดินโดยเฉพาะกลุ่มไส้เดือนดินผิวดินสามารถนำมาใช้บำบัดน้ำเสียและสลัดจ์ได้เป็นอย่างดี (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 การศึกษาการนำไส้เดือนดินมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียและสลัดจ์

Type of sludge/wastewater	Worm species used	Major observations	References
Aquatic worm ((Tubificidae, Lumbriculidae, Naidids and Aeolosomatids)			
Waste sludge produced in wastewater treatment plant	*Lumbriculus variegatus*	Sludge reduction was 77% during the process	Hendrickx et al. [11]
Waste sludge produced in wastewater treatment plant	*Lumbriculus variegatus*	TSS reduced up to 99% after treatment	Elissen et al. [14]
Effluent of activated sludge process	*Lumbriculida hoffmeisteri*	Worm effectively removes major pollutant from sludge	Wei et al. [15]
Sludge from wastewater water	*Branchinnta Sowerbyi, Limnodrins*	There was drastic impact on sludge (46.4% reduction in first stage). COD (more than 80% removal) and BOD (more than 81%) during the process	Song et al. [16]
Sewage of domestic sludge	*Lumbriculus variegatus*	20–40% sludge converted into worm biomass and nitrate as well as nitrite removed efficiently	Buys et al. [17]
Earthworms			
Domestic wastewater (assessment of toxicity of ammonia on earthworm in vermi-biofiltration system)	*Eisenia fetida*	High salt concentration may cause damage to earthworms in vermifiltration units	Hughes et al. [10]
Liquid waste products from dairy industry	*E. fetida*	Removal of 5 day BOD by 98%, COD by 80–90%, TDS by 90–92% during the process	Sinha et al. [3]
Domestic wastewater sludge	*E. fetida*	Significant reduction in pollutant during vermistabilization process	Wang et al. [5]
Secondary liquid effluents from Gelatine Industry	*Lumbricus rubellus*	Decrease in COD by 90% and BOD by 89%.	Ghatnekar et al. [18]
Raw sewage	*E. fetida, Perionyx excavatus, Eudrilus euginae*	Removal of COD by 80–90% and BOD by 90% during vermi-biofiltration	Sinha et al. [19]
Treatment of sewerage and sludge	*E. fetida*	Removal of COD by 81–86% and BOD by 90–98% during vermi-biofiltration	Xing et al. [20]
Domestic wastewater treatment	*E. fetida*	Removal of COD by 55–66% and BOD by 47–65% during process	Xing et al. [21]

ที่มา : Tomar และ Suthar (2011)

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

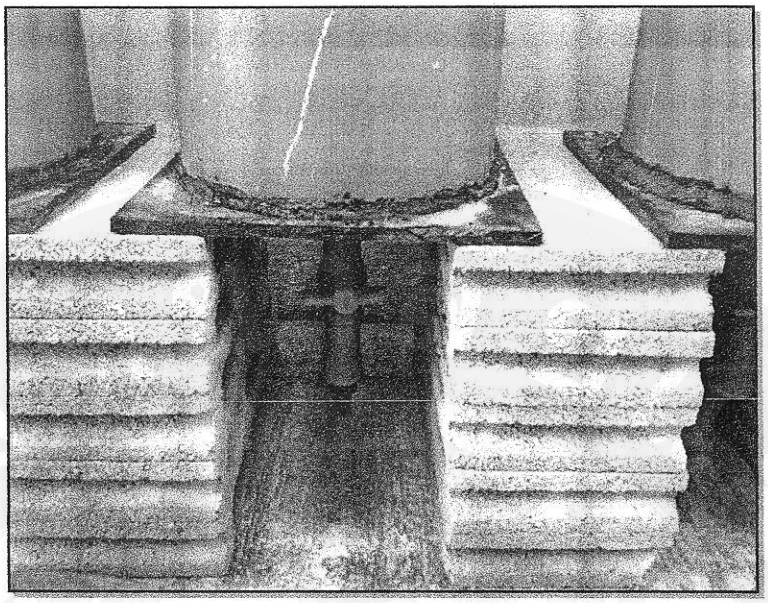
การศึกษาวิจัยครั้งนี้ เริ่มดำเนินการตั้งแต่เดือนตุลาคม 2556 – เดือนสิงหาคม 2558 โดยมีรายละเอียดของการทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1. การศึกษาชนิดของพืชในระบบบึงประดิษฐ์ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียร่วมกับไส้เดือนดิน

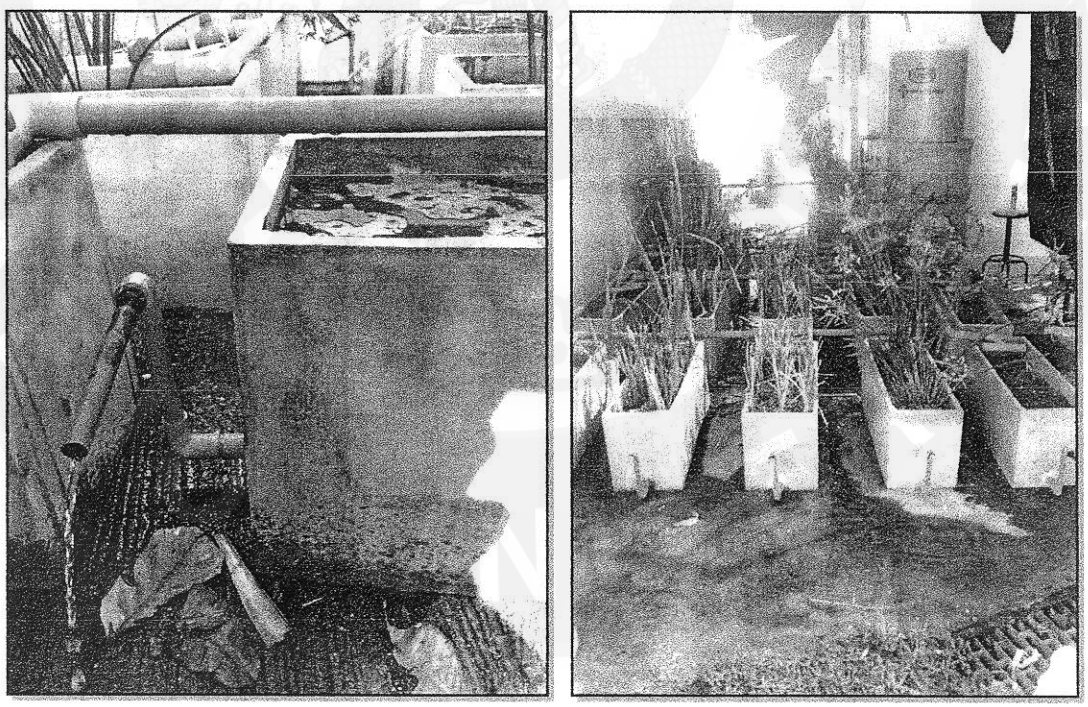
1.1 บึงประดิษฐ์

1.1.1 บึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง

สร้างระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง (Vertical sub-surface flow constructed wetland : VSFCWs) โดยศึกษาและจำลองขนาดบึงประดิษฐ์ (ภาพที่ 6 ข) จากรายงานของ Tomar and Suthar (2011) โดยใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 ซม. สูง 50 ซม. ติดตั้งวาล์วเปิดปิดไว้ที่ด้านล่างสุดของถังเพื่อระบายน้ำและเก็บตัวอย่างน้ำ (ภาพที่ 4) ภายในบรรจุหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20-50 มม. ให้มีความสูง 5 ซม. จากก้นถัง (Layer- I) จากนั้นบรรจุหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-20 และ 1-5 มม. ตามลำดับ ให้มีความหนา 2 ซม. ทั้งสองขนาด (Layer II และ III) คลุมทับด้วยตาข่ายไนลอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1x0.1 ซม. (Layer IV) จากนั้นใส่ขี้เลื่อยและใบไม้แห้งให้มีความสูงชั้นละ 2 ซม. (Layer V และ VI) และชั้นบนสุด (Layer VII) ใส่วัสดุปลูกที่เป็นส่วนผสมระหว่างดิน (50%) ทราย (25%) และกรวดขนาด 1-5 มม. (25%) ให้มีความหนาของชั้น 11 ซม. (ภาพที่ 6 ก)



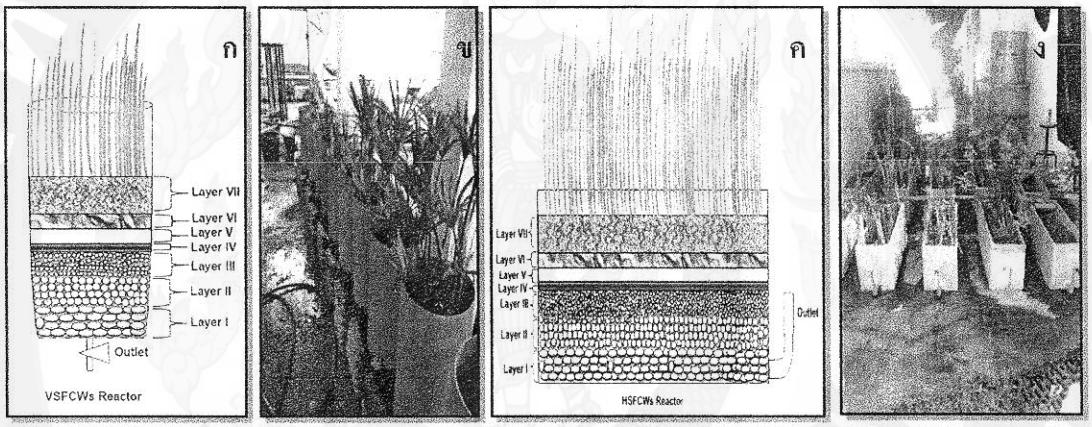
ภาพที่ 4 การติดตั้งวาล์วในบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง



ภาพที่ 5 การติดตั้งท่อปลายเปิดเพื่อระบายน้ำล้นในบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอน

1.1.2 บึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอน

สร้างระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแนวนอน (Horizontal sub-surface flow constructed wetland : HSFCWs) ด้วยถังซีเมนต์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ภาพที่ 6 ง) ขนาดกว้าง 25 ซม. ยาว 76.5 ซม. สูง 33 ซม. ติดตั้งท่อปลายเปิดสูง 10 ซม. ไว้ด้านปลายสุดของถังเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำ (ภาพที่ 5) ภายในบรรจุตัวกลางเช่นเดียวกันกับแนวดิ่งทั้งขนาดของหินกรวดและความหนาของแต่ละชั้นวัสดุ (ภาพที่ 6 ค)

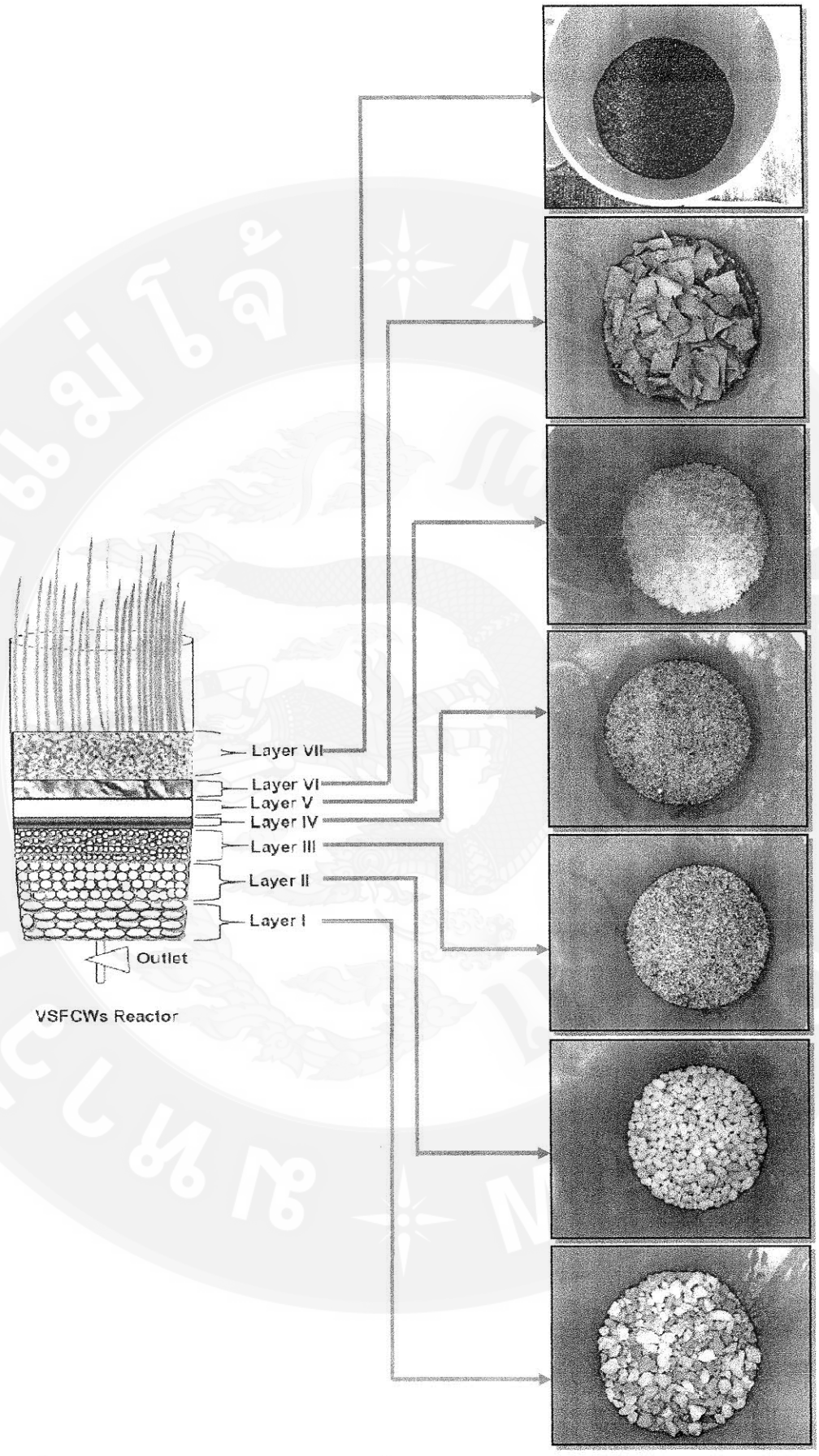


ภาพที่ 6 ก,ข ชั้นวัสดุตัวกลางและภาพการทดลองในแนวดิ่ง

ค,ง ชั้นวัสดุตัวกลางและภาพการทดลองในแนวนอน

1.2 พืชในบึงประดิษฐ์

การวิจัยในครั้งนี้ ใช้พืชโผล่เหนือน้ำ 3 ชนิด คือ หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) ธูปฤาษี (*Typha angustifolia* L.) และกกราชินี (*Cyperus alternifolius* L.) โดยชุดการทดลองที่เติมไส้เดือนดินเพียงอย่างเดียวเป็นชุดควบคุม ปลูกพืชลงในระบบบึงประดิษฐ์โดยให้ความหนาแน่นของพืชทุกชนิดเท่ากับ 110 ต้น/ตรม. และทุกชุดการทดลองทำ 3 ซ้ำ

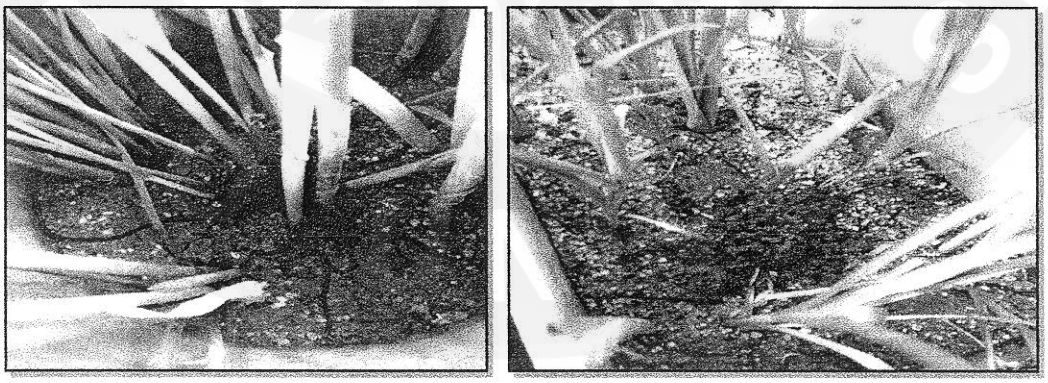


ภาพที่ 7 ลักษณะของวัสดุตัวกลางในแต่ละชั้นของระบบบึงประดิษฐ์ทั้งแบบแนวดิ่งและแนวนอน

1.3 ไส้เดือนดิน

ใช้ไส้เดือนดินสายพันธุ์ท้องถิ่น (ภาพที่ 8) ที่พบในภาคเหนือของประเทศไทย คือ สายพันธุ์ขี้ตาแร่ (*Perionyx* sp.) เติมไส้เดือนดินในระบบบึงประดิษฐ์ในอัตราความหนาแน่น 1 กก./ตรม. โดยเติมไส้เดือนดินลงในบึงประดิษฐ์บริเวณชั้นบนสุดของวัสดุตัวกลาง (ภาพที่ 9) จากนั้นรอให้ไส้เดือนดินชอนไชลงสู่ชั้นล่างของวัสดุจึงเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์

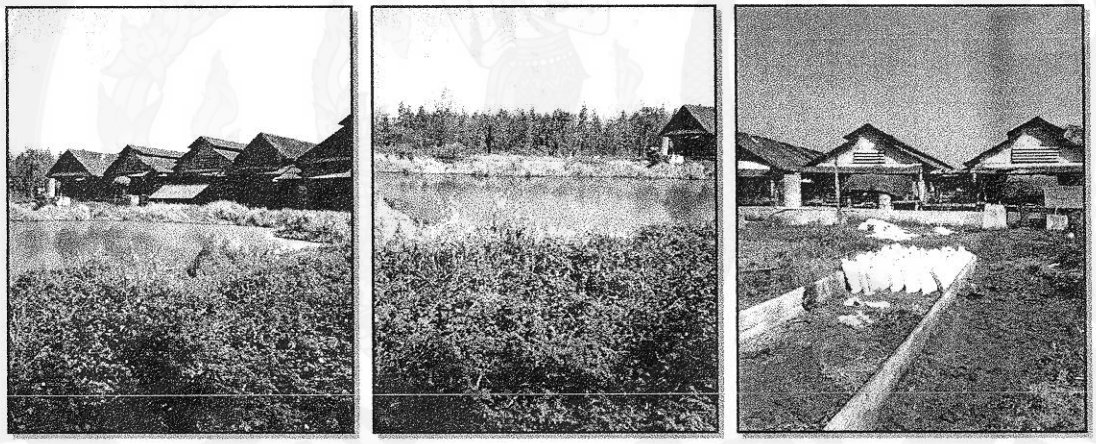
ภาพที่ 8 ไส้เดือนดินสายพันธุ์ขี้ตาแร่ *Perionyx sp.*



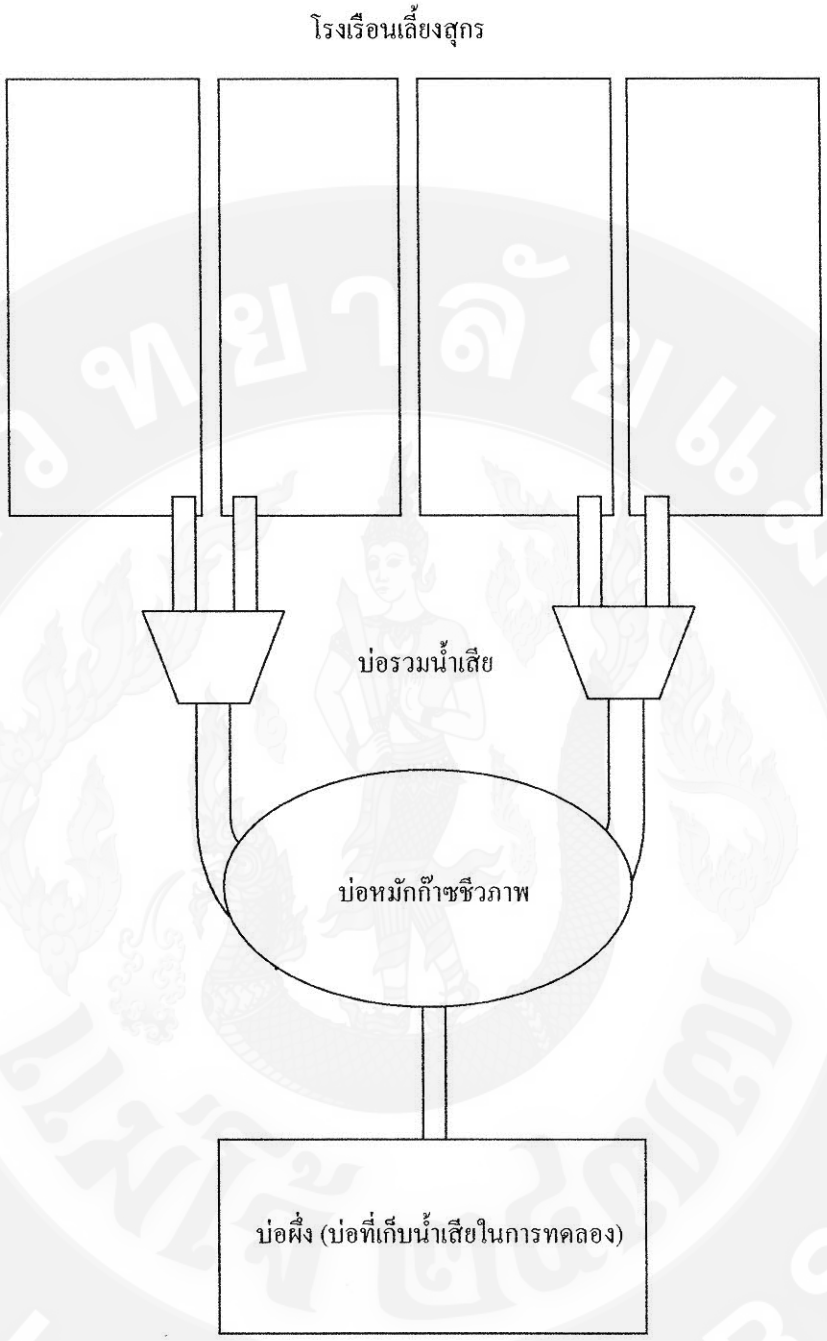
ภาพที่ 9 การเติมไส้เดือนดินในบึงประดิษฐ์

1.4 แหล่งของน้ำเสีย พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์และการเดินระบบ

เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากยุพาฟาร์ม อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ โดยเก็บจากบ่อที่ต่อจากบ่อหมักก๊าซชีวภาพแล้วนำไปเก็บไว้ที่ถังพัก เติมน้ำเสียจำนวน 2 และ 6 ลิตรเข้าสู่บึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งและแนวนอนตามลำดับ โดยเติมแบบแบตช์เข้าสู่บึงประดิษฐ์ทุกวัน วิเคราะห์ค่าพีเอช, ซีโอดี, ของแข็งละลาย และของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียก่อนเติมเข้าสู่บึงประดิษฐ์ เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากบึงประดิษฐ์ทุก 3 วันเป็นเวลา 66 วัน วิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์เดียวกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด



ภาพที่ 10 บ่อน้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกรยุพา



ภาพที่ 11 แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียของยุพาฟาร์ม

การทดลองที่ 2. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบผสมของบึงประดิษฐ์แบบการไหลตามแนวดิ่งและการไหลตามแนวนอนร่วมกับไส้เดือนดิน

ในการทดลองขั้นตอนที่ 2 นี้ เป็นการทดลองระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินตามแนวดิ่ง (Vertical Subsurface-Flow Constructed Wetland, VSFCWs) ต่อเนื่องด้วยการไหลใต้ผิวดินตามแนวนอน (Horizontal Subsurface-Flow Constructed Wetlands, HSFCWs) ร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน ดำเนินการปลูกพืชที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 1 คือหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) โดยให้การปลูกหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียวเป็นกลุ่มควบคุม

2.1 บึงประดิษฐ์

ระบบบึงประดิษฐ์ในขั้นตอนที่ 2 นี้ ใช้ภาชนะ (container) และวัสดุตัวกลาง (media) ชนิดเดียวกันกับการทดลองที่ 1 ทุกประการทั้งแนวดิ่ง (VSFCWs) และแนวนอน (HSFCWs) ดังแสดงในภาพที่ 12 แต่มีการเพิ่มความต่อเนื่องของการไหลของน้ำที่ออกจากบึงประดิษฐ์แบบแนวดิ่งไปยังแนวนอนโดยทันทีด้วยสายยาง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบผสม (hybrid system หรือ combined system)

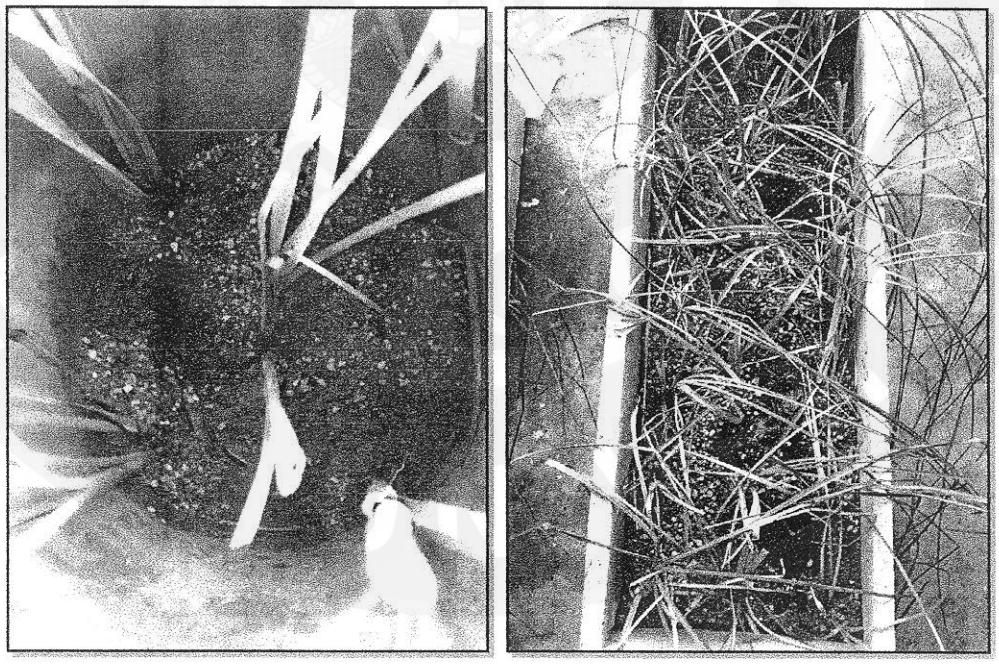
ภาพที่ 12 การทดลองบึงประดิษฐ์แบบผสม (hybrid system)

2.2 พืชในบึงประดิษฐ์

การวิจัยในขั้นตอนที่ 2 นี้ ใช้พืชโผล่เหนือน้ำที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 คือ หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียแบบผสมร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน โดยชุดการทดลองที่ปลูกหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียวเป็นชุดควบคุม ปลูกหญ้าแฝกลงในระบบบึงประดิษฐ์โดยให้ความหนาแน่นของหญ้าแฝกเท่ากับ 110 ต้น/ตรม.

2.3 ไส้เดือนดิน

ใช้ไส้เดือนดินสายพันธุ์เดียวกันกับการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นไส้เดือนดินสายพันธุ์ท้องถิ่นที่พบในภาคเหนือของประเทศไทย คือ สายพันธุ์ขี้ตาแร่ (*Perionyx* sp.) โดยเติมไส้เดือนดินในระบบบึงประดิษฐ์ในอัตราความหนาแน่น 1 กก./ตรม. โดยเติมไส้เดือนดินลงในบึงประดิษฐ์บริเวณชั้นบนสุดของวัสดุตัวกลาง (ภาพที่ 13) รอให้ไส้เดือนดินชอนไชลงสู่ชั้นล่างของวัสดุจึงเริ่มเดินระบบบึงประดิษฐ์แบบผสม



ภาพที่ 13 การเติมไส้เดือนดินในบึงประดิษฐ์แบบผสม

2.4 แหล่งของน้ำเสีย พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์และการเดินระบบแบบผสม

เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากแหล่งเดียวกันกับการทดลองที่ 1 คือตัวน้ำเสียจากยุพาฟาร์ม อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ โดยเก็บจากบ่อที่ต่อจากบ่อหมักก๊าซชีวภาพแล้วนำไปเก็บไว้ที่ถังพัก วิเคราะห์ค่าพีเอช, ซีโอดี, ของแข็งละลาย, ของแข็งแขวนลอย, ไนเตรทและฟอสเฟตของน้ำเสียก่อนเติมเข้าสู่บึงประดิษฐ์ เติมน้ำเสียแบบแบตช์จำนวน 2 ลิตรเข้าสู่บึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งทุกวันและให้มีระยะเวลาพักกักน้ำเสีย 24 ชั่วโมงในบึงประดิษฐ์แบบไหลในแนวดิ่ง เมื่อครบกำหนดตามระยะเวลาเก็บกักแล้วจึงปล่อยน้ำทิ้งจากบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งให้ไหลต่อเนื่องไปยังระบบบำบัดบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอนโดยทันที เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากบึงประดิษฐ์แบบผสมทุก 7 วันเป็นเวลา 70 วัน วิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์เดียวกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด

บทที่ 4
ผลการวิจัย

การทดลองที่ 1. การศึกษาชนิดของพืชในระบบบึงประดิษฐ์ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียร่วมกับไส้เดือนดิน

เริ่มเดินระบบการทดลองโดยการเติมน้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกรเข้าระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งและแนวนอนจำนวน 2 และ 6 ลิตรตามลำดับ โดยเติมเข้าระบบทุกวันเป็นเวลา 45 วัน เพื่อให้ระบบบึงประดิษฐ์ปรับสภาพ หลังจากเดินระบบได้ 45 วัน แล้วจึงเริ่มเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากระบบเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบึงประดิษฐ์ทั้งสองแบบ ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

คุณลักษณะของน้ำเสีย

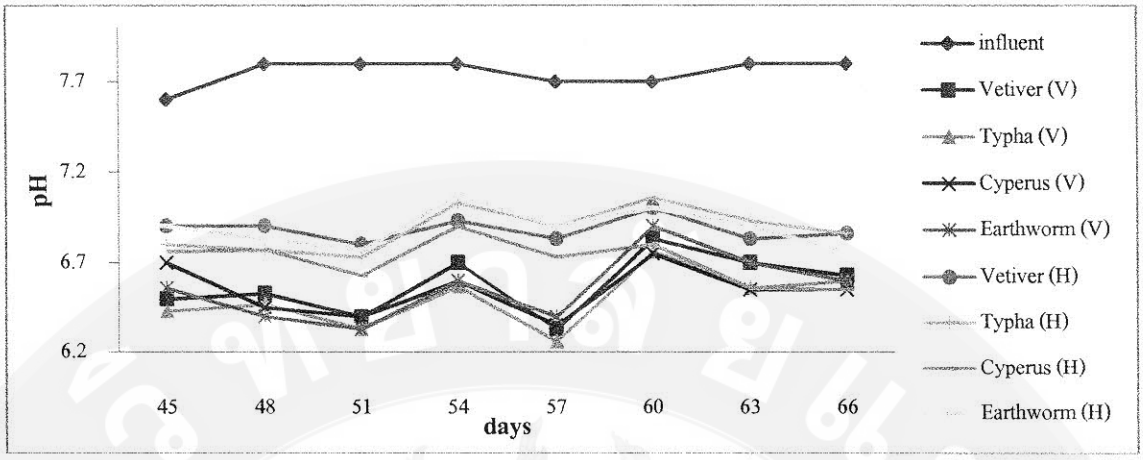
น้ำเสียที่ใช้ในทดลองระบบบึงประดิษฐ์ เป็นน้ำทิ้งจากบ่อหมักก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกร ซึ่งมีค่าพีเอช, ซีโอดี, ของแข็งละลาย และของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วง 7.6-7.8, 483.3-595.8 มก./ล., 1,490.0-3,000.0 มก./ล. และ 113.3-306.7 มก./ล. ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 คุณลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

parameters	range
pH	7.6-7.8
Chemical oxygen demand (COD)	483.3-595.8 mg L^{-1}
Total dissolved solids (TDS)	1,490.0-3,000.0 mg L^{-1}
Total suspended solids (TSS)	113.3-306.7 mg L^{-1}

พีเอช

ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่เข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 7.6-7.8 เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 45 วัน พบว่าน้ำเสียที่ผ่านระบบบึงประดิษฐ์นั้นมีค่าพีเอชต่ำลงทุกชุดการทดลอง โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของการไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง (V) นั้น มีแนวโน้มต่ำกว่าการไหลใต้ผิวดินในแนวนอน (H) ดังแสดงในภาพที่ 14

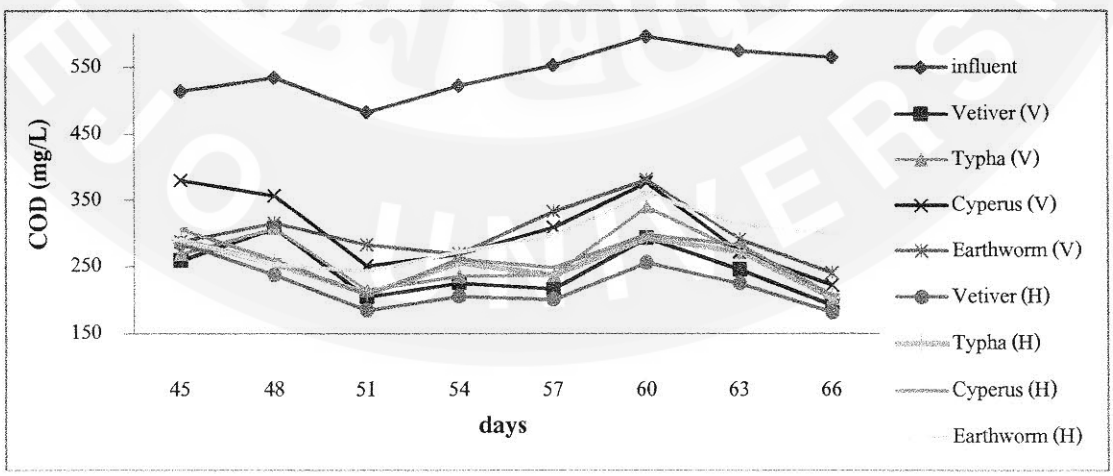


ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในบึงประดิษฐ์แบบไหลตามแนวดิ่ง (V) และแนวนอน (H)

การบำบัดซีโอดี (Chemical oxygen demand)

ค่าซีโอดีที่เข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 483.3-595.8 มก./ล. ผลการทดลองพบว่า หญ้าแฝก (Vetiver) ที่ปลูกในแนวดิ่ง (V) ลดค่าซีโอดีได้ดีที่สุดร้อยละ 42.56-66.09 รองลงมาคือ ธูปฤาษี (Typha) และกกราชินี (Cyperus) ลดได้ร้อยละ 42.56-64.25 และ 33.26-60.59 ตามลำดับ ส่วนการเติมไส้เดือนดิน (Earthworm) เพียงอย่างเดียว ลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 35.47-57.38 (ภาพที่ 15)

ส่วนการไหลใต้ผิวดินในแนวนอน (H) พบว่า หญ้าแฝก (Vetiver) ลดค่าซีโอดีได้ดีที่สุดตลอดการทดลอง โดยลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 44.72-67.92 รองลงมาคือกกราชินี (Cyperus) และธูปฤาษี (Typha) ลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 43.72-64.25 และ 40.70-63.34 ตามลำดับ ส่วนการทดลองที่เติมไส้เดือนดิน (Earthworm) เพียงอย่างเดียวลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 39.47-46.84 (ภาพที่ 15)

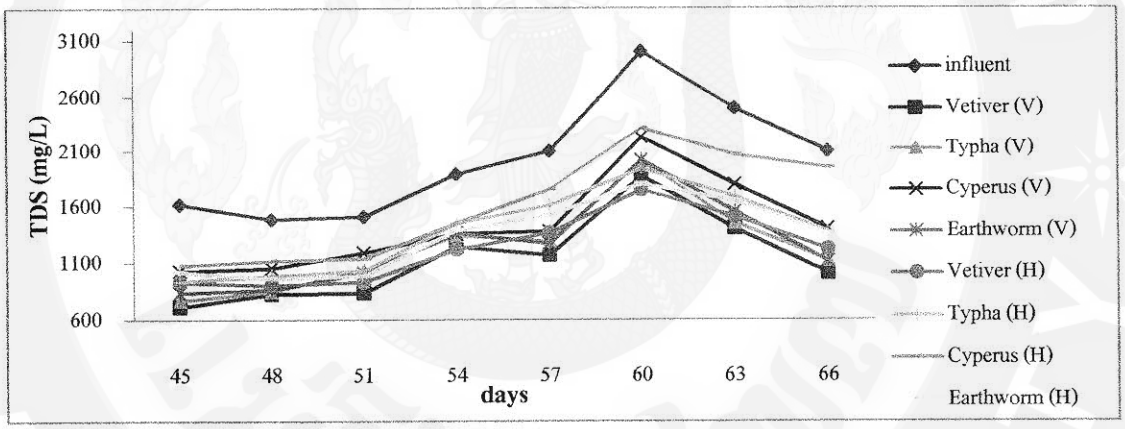


ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีในบึงประดิษฐ์แบบไหลตามแนวดิ่ง (V) และแนวนอน (H)

การบำบัดค่าของแข็งละลาย (Total dissolved solid)

ค่าของแข็งละลายที่เข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์มีค่าอยู่ในช่วง 1,490.0-3,000.0 มก./ล. การทดลองระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง (V) พบว่า หญ้าแฝก (Vetiver) สามารถลดค่าของแข็งละลายได้ดีที่สุดร้อยละ 37.66-55.97 รองลงมาคือธูปฤาษี (Typha) และชุดควบคุม (Earthworm) ลดได้ร้อยละ 33.22-52.26 และ 32.67-48.14 ตามลำดับ ส่วนกกราชินี (Cyperus) ลดค่าของแข็งละลายได้ต่ำที่สุดร้อยละ 25.66-36.42 (ภาพที่ 16)

ส่วนการไหลในแนวนอน (H) นั้นพบว่า หญ้าแฝก (Vetiver) ลดค่าของแข็งละลายได้ดีที่สุดร้อยละ 35.07-42.59 รองลงมาคือชุดควบคุม (Earthworm) และธูปฤาษี (Typha) ลดได้ร้อยละ 27.30-40.00 และ 23.17-42.18 ตามลำดับ ส่วนกกราชินี (Cyperus) ลดค่าของแข็งละลายได้ต่ำที่สุดร้อยละ 16.50-33.58 (ภาพที่ 16)



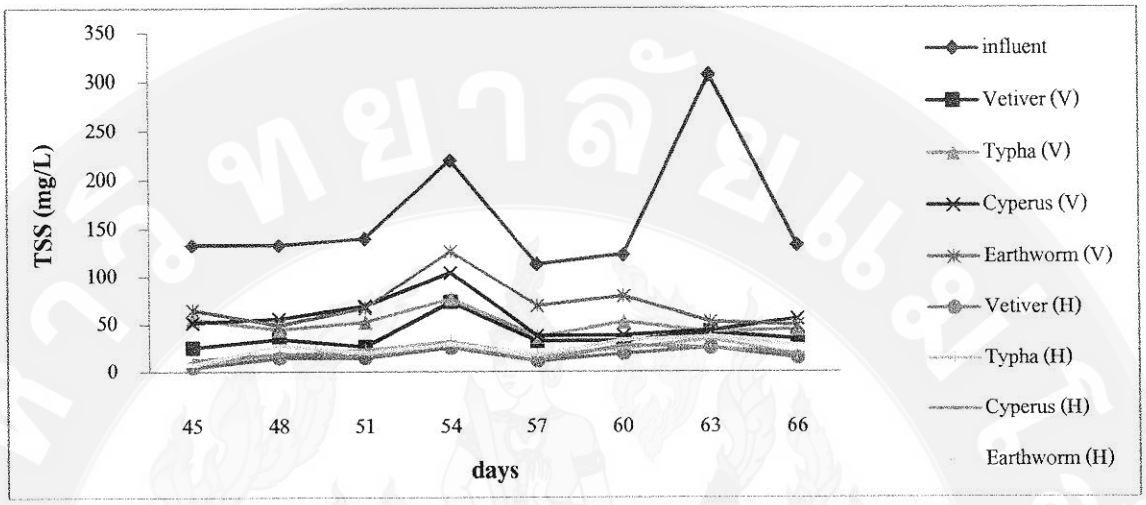
ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายของบึงประดิษฐ์ในแนวดิ่ง (V) และแนวนอน (H)

การบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย (Total suspended solids)

ค่าของแข็งแขวนลอยที่เข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์มีค่าอยู่ในช่วง 113.3-306.7 มก./ล. ผลการทดลองในแนวดิ่ง (V) พบว่า หญ้าแฝก (Vetiver) ลดค่าของแข็งแขวนลอยได้ดีที่สุดร้อยละ 66.67-80.95 รองลงมาคือธูปฤาษี (Typha) และกกราชินี (Cyperus) ลดได้ร้อยละ 57.65-86.23 และ 50.79-85.87 ตามลำดับ ส่วนชุดควบคุม (Earthworm) ลดค่าของแข็งแขวนลอยได้ต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 36.03-82.97 (ภาพที่ 17)

ส่วนในแนวนอน (H) นั้นพบว่า หญ้าแฝก (Vetiver) ลดค่าของแข็งแขวนลอยได้สูงที่สุดถึงร้อยละ 84.68-96.67 รองลงมาคือธูปฤาษี (Typha) และกกราชินี (Cyperus) ลดได้ร้อยละ 80.18-

94.17 และ 77.47-91.67 ตามลำดับ ส่วนชุดควบคุมที่เติมไส้เดือนดินเพียงอย่างเดียว (Earthworm) ลดค่าของแข็งแขวนลอยได้ต่ำที่สุดแต่ยังบำบัดได้มากกว่าร้อยละ 50.00 (ภาพที่ 17)



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยของบึงประดิษฐ์ในแนวดิ่ง (V) และแนวนอน (H)

การทดลองที่ 2. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบผสมของบึงประดิษฐ์แบบการไหลตามแนวดิ่งและการไหลตามแนวนอนร่วมกับไส้เดือนดิน

เริ่มเดินระบบการทดลองของบึงประดิษฐ์แบบผสมโดยการเติมน้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกรเข้าระบบบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งจำนวน 2 ลิตรทุกวันและให้มีระยะเวลาพักกักน้ำเสีย 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดตามระยะเวลาเก็บกักแล้วจึงปล่อยน้ำทิ้งจากแนวดิ่งให้ไหลต่อเนื่องไปยังระบบบำบัดบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวนอนโดยทันที เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากบึงประดิษฐ์แบบผสมทุก 7 วันเป็นเวลา 70 วัน เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของระบบบึงประดิษฐ์แบบผสม ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

คุณลักษณะของน้ำเสีย

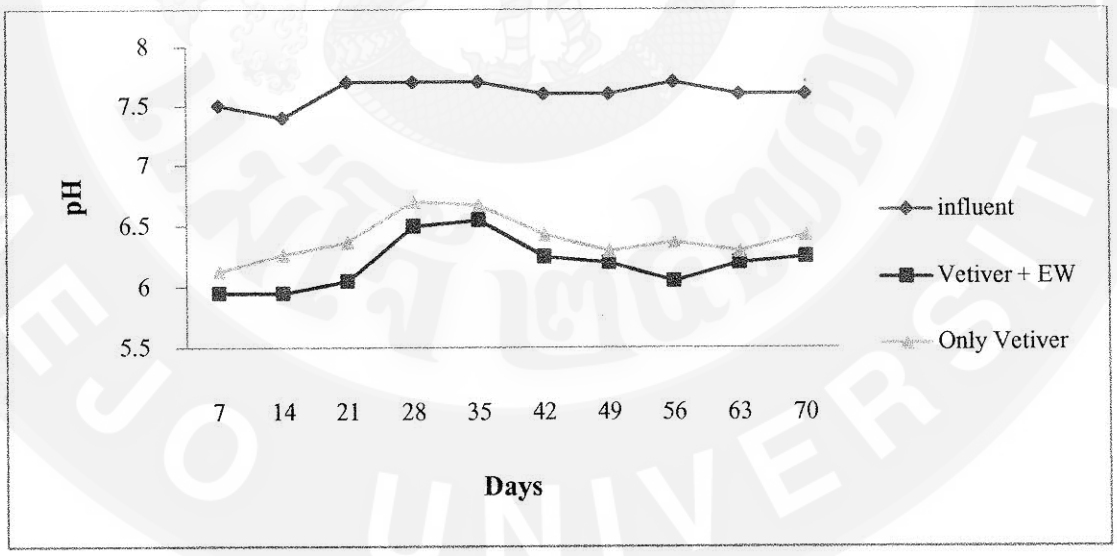
น้ำเสียที่ใช้ในทดลองระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมใช้น้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร ซึ่งมีค่าพีเอช, ซีโอดี, ของแข็งละลาย, ของแข็งแขวนลอย, ไนเตรทและฟอสเฟตอยู่ในช่วง 7.4-7.7, 529.3-676.3 มก./ล., 730.0-810.0 มก./ล., 66.7-206.7 มก./ล., 16.0-31.0 มก./ล. และ 72.0-205.0 มก./ล. ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 คุณลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์แบบผสม

parameters	range
pH	7.4-7.7
Chemical oxygen demand (COD)	529.3-676.3 mg L^{-1}
Total dissolved solids (TDS)	730.0-810.0 mg L^{-1}
Total suspended solids (TSS)	66.7-206.7 mg L^{-1}
Nitrate	16.0-31.0 mg L^{-1}
Phosphate	72.0-205.0 mg L^{-1}

พีเอช

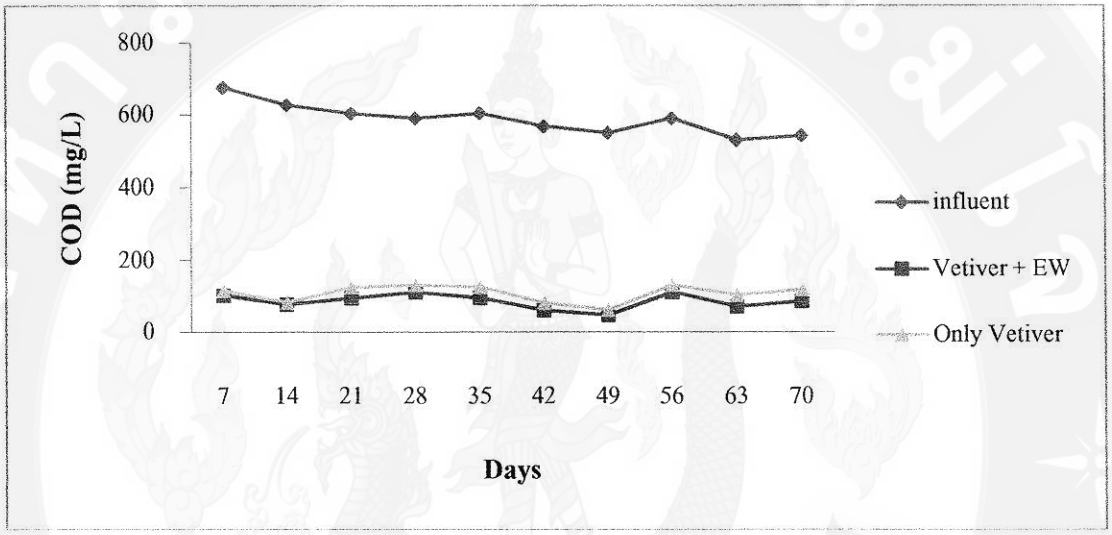
ค่าพีเอชของน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 7.4-7.7 ผลการทดลอง พบว่า น้ำเสียที่ผ่านระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมนั้นมีค่าพีเอชต่ำลงทุกชุดการทดลอง โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของบึงประดิษฐ์ที่ปลูกหญ้าแฝกร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน (Vetiver + EW) นั้น มีแนวโน้มต่ำกว่าบึงประดิษฐ์ที่ปลูกหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว (Only Vetiver) ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในบึงประดิษฐ์แบบผสม

การบำบัดซีโอดี (Chemical oxygen demand)

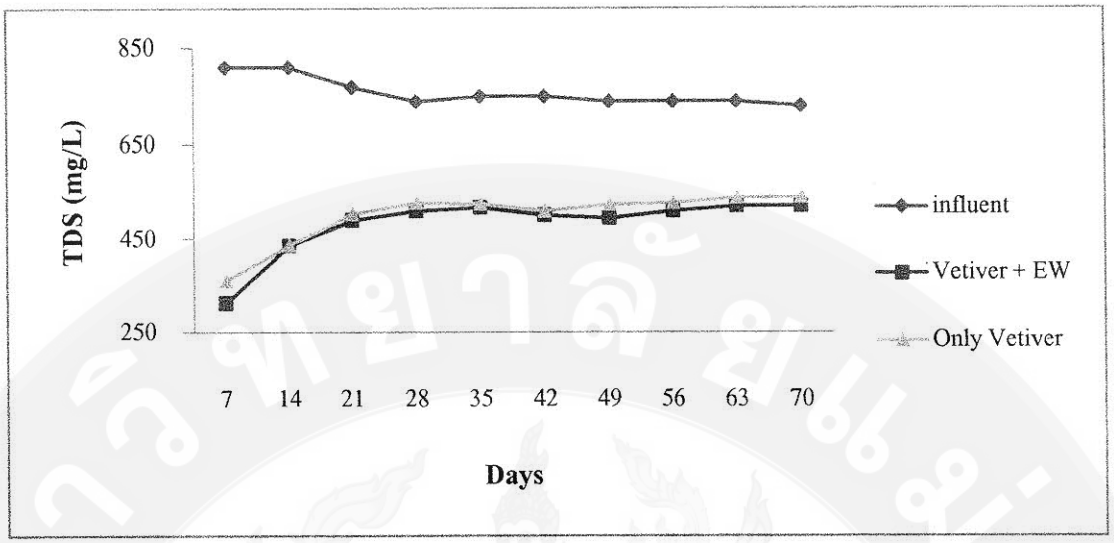
ค่าซีโอดีที่เข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 529.3-676.3 มก./ล. ผลการทดลองพบว่า บึงประดิษฐ์แบบผสมที่ปลูกหญ้าแฝกร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน (Vetiver + EW) สามารถลดค่าซีโอดีได้ดีกว่าบึงประดิษฐ์ที่ปลูกเพียงหญ้าแฝก (Only Vetiver) โดยบึงประดิษฐ์แบบผสม Vetiver + EW ลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 81.20-91.42 ส่วนบึงประดิษฐ์ที่ปลูกหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว ลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 77.63-86.81 (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีในบึงประดิษฐ์แบบผสม

การบำบัดค่าของแข็งละลาย (Total dissolved solid)

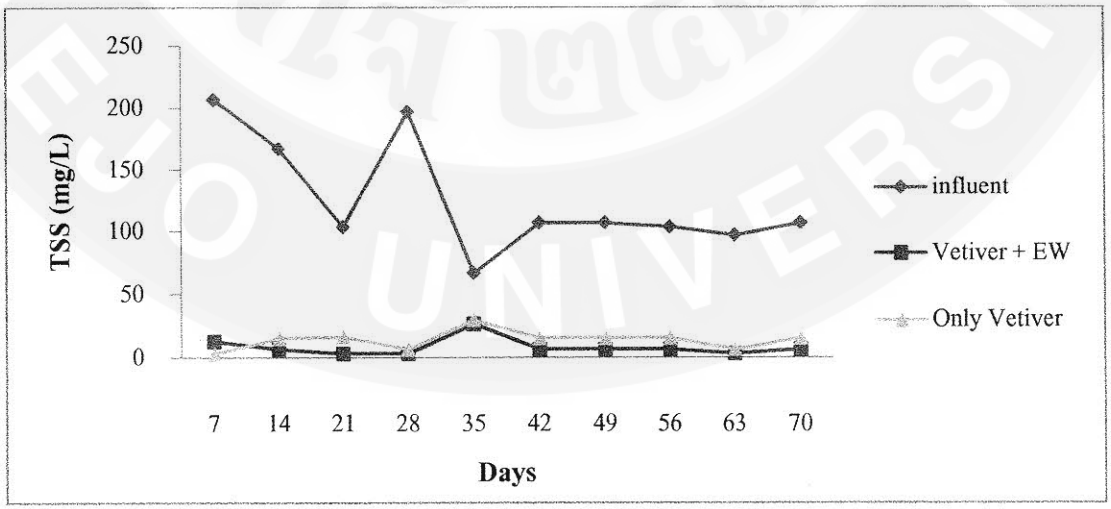
ค่าของแข็งละลายที่เข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมมีค่าอยู่ในช่วง 730.0-810.0 มก./ล. ผลการทดลอง พบว่า บึงประดิษฐ์แบบผสมที่ปลูกหญ้าแฝกร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน (Vetiver + EW) สามารถลดค่าของแข็งละลายได้ดีกว่าบึงประดิษฐ์ที่ปลูกเพียงหญ้าแฝก (Only Vetiver) โดยบึงประดิษฐ์แบบผสม Vetiver + EW ลดค่าของแข็งละลายได้ร้อยละ 28.76-61.31 ส่วนบึงประดิษฐ์แบบผสมที่ปลูกหญ้าแฝก (Only Vetiver) เพียงอย่างเดียว ลดค่าของแข็งละลายได้ร้อยละ 26.02-55.55 (ภาพที่ 20)



ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งละลายในบึงประดิษฐ์แบบผสม

การบำบัดค่าของแข็งแขวนลอย (Total suspended solids)

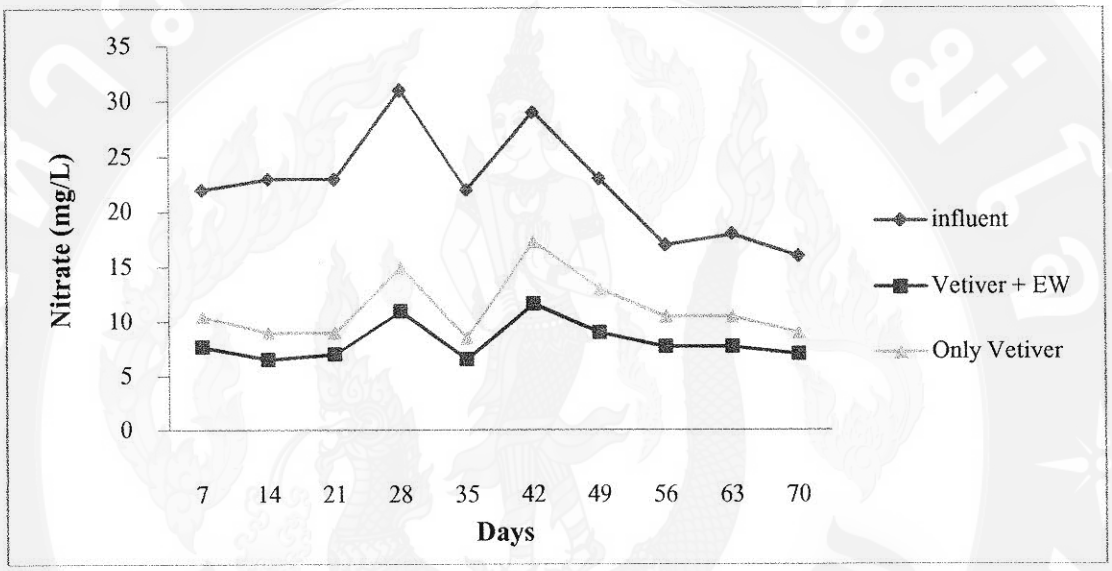
ค่าของแข็งแขวนลอยที่เข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมมีค่าอยู่ในช่วง 66.7-206.7 มก./ล. ผลการทดลองพบว่า บึงประดิษฐ์แบบผสมที่ปลูกหญ้าแฝกร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน (Vetiver + EW) สามารถลดค่าของแข็งแขวนลอยได้ดีกว่าบึงประดิษฐ์ที่ปลูกเพียงหญ้าแฝก (Only Vetiver) โดยบึงประดิษฐ์แบบผสม Vetiver + EW ลดค่าของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 59.97-98.40 ส่วนบึงประดิษฐ์แบบผสมที่ปลูกหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว ลดค่าของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 55.00-96.60 (ภาพที่ 21)



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยในบึงประดิษฐ์แบบผสม

การบำบัดค่าไนเตรท (Nitrate)

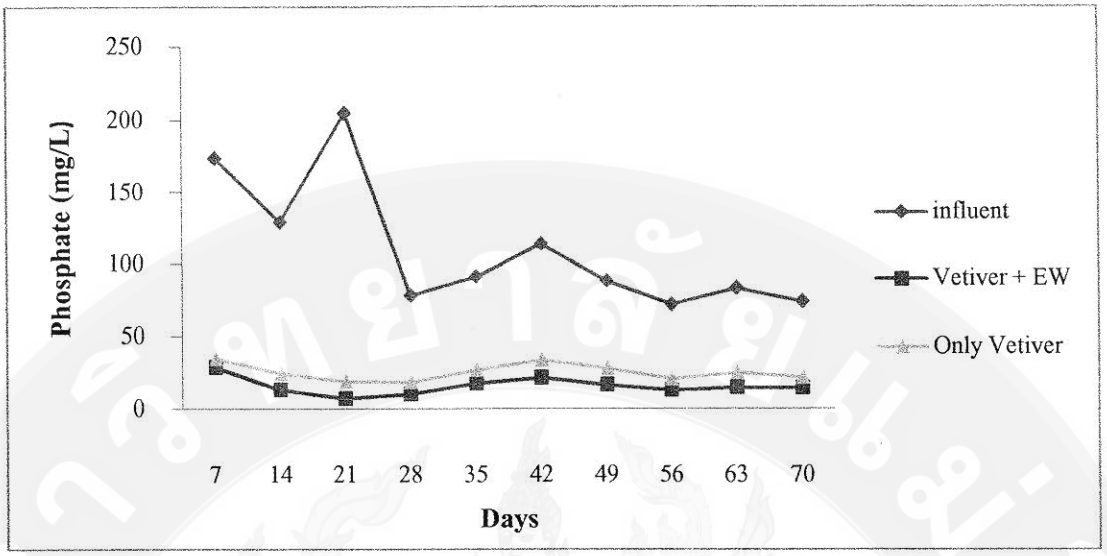
ค่าไนเตรทที่เข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมมีค่าอยู่ในช่วง 16.0-31.0 มก./ล. ผลการทดลองพบว่า บึงประดิษฐ์แบบผสมที่ปลูกหญ้าแฝกร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน (Vetiver + EW) สามารถลดค่าไนเตรทได้ดีกว่าบึงประดิษฐ์ที่ปลูกเพียงหญ้าแฝก (Only Vetiver) โดยบึงประดิษฐ์แบบผสม Vetiver + EW ลดค่าไนเตรทได้ร้อยละ 54.88-71.73 ส่วนบึงประดิษฐ์แบบผสมที่ปลูกหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว ลดค่าไนเตรทได้ร้อยละ 38.23-61.36 (ภาพที่ 22)



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรทในบึงประดิษฐ์แบบผสม

การบำบัดค่าฟอสเฟต (Phosphate)

ค่าฟอสเฟตที่เข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมมีค่าอยู่ในช่วง 72.0-205.0 มก./ล. ผลการทดลองพบว่า บึงประดิษฐ์แบบผสมที่ปลูกหญ้าแฝกร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน (Vetiver + EW) สามารถลดค่าฟอสเฟตได้ดีกว่าบึงประดิษฐ์ที่ปลูกเพียงหญ้าแฝก (Only Vetiver) โดยบึงประดิษฐ์แบบผสม Vetiver + EW ลดค่าฟอสเฟตได้ร้อยละ 80.21-96.34 ส่วนบึงประดิษฐ์แบบผสมที่ปลูกหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว ลดค่าฟอสเฟตได้ร้อยละ 68.18-90.57 (ภาพที่ 23)



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงค่าฟอสเฟตในบึงประดิษฐ์แบบผสม

วิจารณ์ผลการวิจัย

น้ำทิ้งเมื่อผ่านเข้าสู่ระบบพบว่าค่าพีเอชค่าต่ำลง สอดคล้องกับรายงานของ Tomar and Suthar (2011) ที่พบว่า พีเอชมีค่าต่ำลงเมื่อผ่านระบบบึงประดิษฐ์ อันเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ภายในชั้นตัวกลาง (media) ของระบบ โดยเมื่อจุลินทรีย์มีกิจกรรมในวิถีเมทาบอลิซึมและกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบเพื่อนำมาใช้ในการเจริญและดำรงชีพ ก็จะปลดปล่อยเอนไซม์และกรดอินทรีย์ออกมาภายนอกเซลล์

หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) ที่ปลูกในบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง (VSFCWs) และแนวนอน (HSFCWs) สามารถลดค่าซีโอดีได้ดีที่สุดถึงร้อยละ 66.09 และ 67.92 ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าการทดลองของ Tomar and Suthar (2011) ที่รายงานว่า ประสิทธิภาพของการบำบัดซีโอดีด้วยบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการวนน้ำ (recirculation) กลับเข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์เป็นจำนวน 8 ครั้ง สามารถลดค่าซีโอดีได้ถึงร้อยละ 90 แต่หากไม่มีการวนน้ำ (1^{st} cycle) พบว่าลดค่าซีโอดีได้เพียงร้อยละ 45

หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) สามารถลดค่าของแข็งละลายได้ดีที่สุดทั้งแบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง (VSFCWs) และแนวนอน (HSFCWs) โดยลดค่าของแข็งละลายได้ร้อยละ 55.97 และ 42.59 ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าการทดลองของ Tomar and Suthar (2011) ที่ทำการทดลองโดยวนน้ำ (recirculation) เข้าระบบบึงประดิษฐ์เป็นจำนวน 8 ครั้ง (8^{th} cycle) สามารถลดค่าของแข็งละลายได้

ถึงร้อยละ 99.80 แต่ในรอบของการวนน้ำที่ 2-4 ของการทดลอง สามารถลดค่าของแข็งละลายได้เพียงร้อยละ 50

ผลการทดลองในบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง (VSFCWs) และแนวนอน (HSFCWs) ชี้ให้เห็นว่า หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) สามารถลดค่าของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 80.95 และ 96.67 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าการทดลองบึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง (VSFCWs) และแนวนอน (HSFCWs) ของ Mustafa *et al.* (2009) ที่สามารถลดค่าของแข็งแขวนลอยได้เพียงร้อยละ 67.00-77.00 โดยหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) ที่ปลูกบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำใต้ผิวดินในแนวดิ่ง (VSFCWs) และแนวนอน (HSFCWs) นี้ มีประสิทธิภาพในการลดค่าของแข็งแขวนลอยได้เกือบเทียบเท่าและดีกว่าผลการทดลองในระบบผสม (hybrid system) ของ Mustafa *et al.* (2009) ที่ผสมทั้งการไหลในแนวดิ่ง (VSFCWs) และการไหลในแนวนอน (HSFCWs) ต่อเนื่องกัน ซึ่งสามารถลดค่าของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 93.70

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

1. ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง (VSFCWs) ที่ปลูกด้วยหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) สามารถบำบัดน้ำทิ้งจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกรได้ดีที่สุด โดยลดค่าซีโอดี, ของแข็งละลาย และของแข็งแขวนลอยได้สูงที่สุดร้อยละ 66.09, 55.97 และ 80.95 ตามลำดับ

2. หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) ที่ปลูกในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน (HSFCWs) สามารถบำบัดน้ำทิ้งจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกรได้ดีที่สุด โดยลดค่าซีโอดี, ของแข็งละลาย และของแข็งแขวนลอยได้สูงที่สุดร้อยละ 67.92, 42.59 และ 96.67 ตามลำดับ

3. ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสม (hybrid system) ที่ปลูกหญ้าแฝกร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน (Vetiver + EW) สามารถบำบัดน้ำทิ้งจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกรได้ดีกว่าระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมที่ปลูกหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว (Only Vetiver) โดยสามารถลดค่าซีโอดี, ของแข็งละลาย, ของแข็งแขวนลอย, ไนเตรทและฟอสเฟตได้สูงที่สุดร้อยละ 91.42, 61.31, 98.40, 71.31 และ 96.34 ตามลำดับ

4. หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินร่วมกับการเติมไส้เดือนดิน

บรรณานุกรม

กรมควบคุมมลพิษ. 2546. **คู่มือการเลือกใช้และบำรุงรักษาระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรตามแบบมาตรฐานกรมปศุสัตว์**. กรุงเทพฯ: สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. 33 น.

กรมควบคุมมลพิษสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2546. **เทคนิคการบำบัดน้ำเสียบางวิธี : การนำน้ำทิ้งมาใช้ประโยชน์และการทดสอบพิษวิทยาสำหรับน้ำทิ้ง**. เล่ม4. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ. 122 น.

กรมปศุสัตว์. 2533. **สรุปผลการฝึกอบรมเกษตรกร เรื่องการจัดการน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ประจำปีงบประมาณ 2532-2533**. กรุงเทพฯ: กรมปศุสัตว์ 23 น.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. **ตำราระบบบำบัดมลพิษทางน้ำ**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. 440 น.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. **การบำบัดน้ำเสีย**. กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์. 412 น.

จตุพร แก้วอ่อน ภักดิ์ ชูขาว และ สัมภาส ฉีดเกตุ. 2548. **การผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและการประยุกต์ใช้ในครัวเรือนในจังหวัดพัทลุง**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://e-nett.sut.ac.th/dowload/ECI/ECI05.pdf (30พฤศจิกายน2551).

จุฬาภรณ์ เลิศบวรวงศ์. 2551. **สุขาภิบาลสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 417 น.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. **การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ**. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 703 น.

นิพนธ์ จันทร์โพธ์. 2526. **การจัดการการเลี้ยงสุกร**. ขอนแก่น: ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 124 น.

ประนัดดา เจริญราช. 2548. **การบำบัดน้ำทิ้งจากการฟอกย้อมไหมโดยใช้บึงประดิษฐ์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 119 น.

สถานเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2549. ปัญหามลภาวะในฟาร์มเลี้ยงสัตว์และการบำบัด. ระบบออนไลน์.แหล่งที่มาhttp://teenet.chiangmai.ac.th/btc/formpollution 03.php#0230 (30พฤศจิกายน2551).

สุรศักดิ์ นุ่มมีศรี. 2550. **การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษสาโดยระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานที่มีการไหลใต้ผิว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 120 น.

สุวิมล สวยสม. 2548. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี: UASB. **เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ** 2(4): 6.

สำนักงานปศุสัตว์จังหวัด. 2550. สถิติจำนวนสุกรในประเทศไทยแสดงรายภาค ปี 2536-2545.

[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dld.go.th (1มีนาคม2550).

ศักดิ์ชัย อัคสิงห์. 2547. **การบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนโดยใช้บึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินร่วมกับระบบการระเหยโดยพืช**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 199 น.

อานัฐ ตันโช. 2550. **ไส้เดือนดิน.** พิมพ์ครั้งที่ 2 . Trio Advertising & Media Co.,Ltd 259 น.

Chiarawatchai, N. Nuengjamnong, C. Rachdawong, P. and Otterpohl, R. 2007. **Potenial study of using earthworm as an enhancement to treat high strength wastewater**. TJVM 37(4): 25-32

Mustafa A., M. Scholz, R. Harrington and P. Carroll. 2009. **Long-term performance of a representative integrated constructed wetland treating farmyard runoff.** Ecol. Eng. 35 (2009) 779–790.

Pagilla, K.R., H. Kim and T. Cheunbarn. 2000. **Aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of swine waste.** Water Resource. Vol. 34, No. 10, pp. 2747-2753.

Todorovics, C., T.M. Garayand and Z. Bratek. 2005. **The use of the reed (*Phragmites australish*) in wastewater treatment on constructed wetlands**. ActaBiologica Szegediensis 49(1-2): 81-83.

Tomar, P. and Suthar, S. 2011. **Urban wastewater treatment using vermin-biofiltration system**. Desalination. 282: 95-103.

Vymazal, J. 2007. **Removal of nutrients in various types of constructed wetlands**. Science of The Total Environment. 380(1-3): 48-65.