

การตรวจเอกสาร

1. น้ำชะมูลฝอย

1.1 ปริมาณน้ำชะมูลฝอย

น้ำชะมูลฝอยเป็นน้ำเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์แล้วซึมผ่านชั้นของมูลฝอยในสถานที่ฝังกลบโดยละลายหรือชะเอาสารแขวนลอย สารละลาย และจุลินทรีย์ต่าง ๆ รวมออกมาคือน้ำด้วย (อุทัย, 2538) โดยทั่วไปถ้ามีน้ำไหลผ่านชั้นมูลฝอยมากก็จะชะเอาสารปนเปื้อนออกมามากขึ้น น้ำชะมูลฝอยมักประกอบไปด้วยของเหลวที่เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายของตัวมูลฝอยเอง รวมกับน้ำที่ซึมเข้าหลุมฝังกลบจากแหล่งภายนอก เช่น น้ำจากระบบระบายน้ำ น้ำฝน และน้ำผิวดิน ด้วยเช่นกัน

ปัจจัยเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำชะมูลฝอยคือ สภาพภูมิอากาศที่ทำการฝังกลบ สภาพภูมิประเทศ ลักษณะดิน สภาพอุทกธรณีวิทยา ดินและวัสดุกลบทับชั้นสุดท้าย รวมทั้งลักษณะของมูลฝอยที่ฝังกลบ ปริมาณของน้ำชะมูลฝอยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของน้ำที่ซึมเข้าสู่หลุมฝังกลบได้แก่ ความสัมพันธ์ของปริมาณฝน การระเหยกลับ และการสูญเสียอื่น ๆ ทั้งนี้ ปริมาณของน้ำชะมูลฝอยอาจเพิ่มขึ้นถ้าอัตราการซึมของน้ำผ่านดินรองชั้นฝังกลบและดินกลบทับสูง

1.2 องค์ประกอบของน้ำชะมูลฝอย

ลักษณะโดยทั่วไปของน้ำชะมูลฝอยจากขยะมูลฝอยชุมชนมีความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดคาร์บอกซิลิกที่มีพันธะสั้นแอมโมเนีย คลอไรด์ ซัลเฟต และสารประกอบโลหะหนัก เช่น เหล็ก แกลิอแร่ต่างๆ เช่น แคลเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม ซึ่งพบในระดับสูง (Cambell, 1982) คุณสมบัติของน้ำชะมูลฝอยจะขึ้นอยู่กับ ชนิดขยะมูลฝอย สภาพอากาศ ฤดูกาล ช่วงระยะเวลาของการย่อยสลาย (อายุของหลุมฝังกลบมูลฝอย)

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเก่าและใหม่

ส่วนประกอบในน้ำชะมูลฝอย	หลุมฝังกลบใหม่ (น้อยกว่า 2 ปี)		หลุมฝังกลบเก่า (มากกว่า 10 ปี)
	mg/L		mg/L
	ช่วงค่า	ค่าที่แนะนำ	
บีโอดี	2,000-30,000	10,000	100-200
ทีโอดี	1,500-20,000	6,000	80-160
ซีโอดี	3,000-60,000	18,000	100-500
ของแข็งแขวนลอย	200-2,000	500	100-400
สารอินทรีย์ในโตรเจน	10-800	200	80-120
แอมโมเนียในโตรเจน	10-800	200	20-40
ไนเตรท	5-40	25	5-10
ฟอสฟอรัสรวม	5-100	30	5-10
อโทฟอสฟอรัส	4-80	20	4-8
สภาพด่าง(เทียบกับ CaCO_3)	1,000-10,000	3,000	200-1,000
พีเอช	4.5-7.5	6	6.5-7.5
ความกระด้าง(เทียบกับ CaCO_3)	300-10,000	3,500	200-500
แคลเซียม	200-3,000	1,000	100-400
แมกนีเซียม	50-1,500	250	50-200
โพแทสเซียม	200-1,000	300	50-400
โซเดียม	200-2,500	500	100-200
คลอไรด์	200-3,000	500	100-400
ซัลเฟต	50-1,000	300	20-50
เหล็ก	50-1,200	60	20-200

ที่มา: Tchobanoglous et al. (1993)

โดยทั่วไปแล้วระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอย ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำชะมูลฝอย สภาพภูมิประเทศ และลักษณะทางกายภาพของสถานที่กำจัดมูลฝอย สำหรับคุณสมบัติของน้ำชะมูลฝอย ประกอบด้วย Total Dissolved Solids (TDS), COD, Sulfate (SO_4^{2-}) โลหะหนักและสารที่เป็นพิษ

อื่นๆ น้ำชะมูลฝอยที่ประกอบด้วยค่า TDS ในปริมาณสูง (คือมากกว่า 50,000 mg/L) การบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพได้ยาก ส่วนน้ำชะมูลฝอยที่มีค่า COD สูง เหมาะกับกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากการบำบัดโดยใช้ออกซิเจนจะต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง น้ำเสียที่มีปริมาณซัลเฟตสูงไม่เหมาะกับระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากทำให้เกิดกลิ่นจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของซัลเฟตเกิดเป็นซัลไฟด์ ส่วนโลหะหนักที่เป็นพิษนับเป็นปัญหาสำหรับกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

2. ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland System)

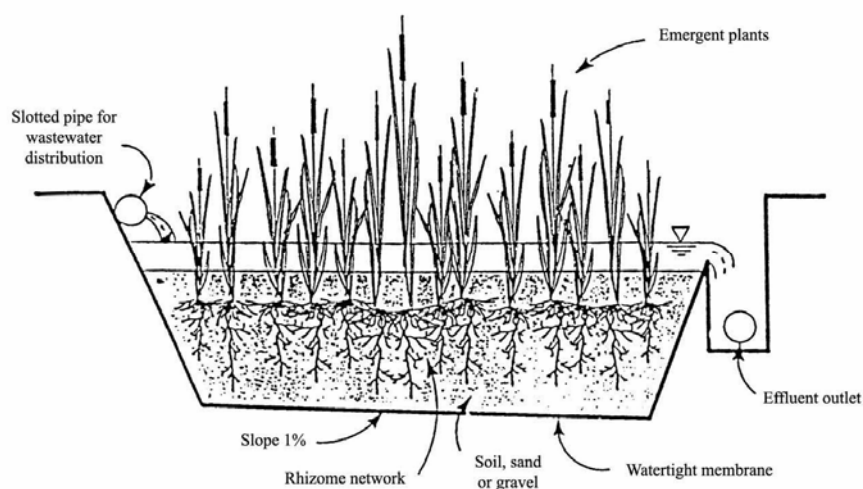
เป็นระบบที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการหรือกลไกที่เกิดขึ้นในระบบเลียนแบบธรรมชาติ ระบบบึงประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียโดยอาศัย ดิน น้ำ พืช และจุลินทรีย์ในการบำบัดของเสียในน้ำ ปัจจุบันระบบบึงประดิษฐ์ได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวาง ซึ่งพบว่าสามารถกำจัดมลสารต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งการดูแลระบบไม่ต้องใช้เทคโนโลยีมากนัก การออกแบบก่อสร้างไม่ซับซ้อนจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ และนอกจากนี้ระบบยังมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราภาระบรรทุกต่าง ๆ ได้ดี แต่เป็นระบบที่ต้องการพื้นที่ในการก่อสร้างระบบมาก

Metcalf and Eddy (1991) แบ่งระบบบึงประดิษฐ์ออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.1 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน (Free Water Surface System, FWS)

มีลักษณะเป็นบ่อหรือร่องน้ำวางเรียงขนานกัน ซึ่งใช้ดินที่น้ำไหลซึมได้น้อย มีระดับน้ำลึกประมาณ 10-60 cm พืชที่ใช้ในระบบนี้เป็นพืชโผล่พ้นน้ำ (Emergent Plant) การปล่อยน้ำเสียเข้าระบบควรปล่อยให้ไหลลงอย่างช้าๆ ผ่านก้น ลำต้น และรากของพืช โดยบ่อต้องมีลักษณะการไหลของน้ำเป็นแบบแนวยาว (Plug Flow) (Reed et al., 1998) การเติมอากาศในระบบมาจากพืช ลมพัด และจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในน้ำและขณะที่น้ำเสียไหลผ่านพืชจะเกิดการตกตะกอนและการดักจับ เนื่องจากต้นพืชทำให้ความเร็วของน้ำลดลง การดูดซับโดยดินและการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในระบบจึงเกิดขึ้น (Kadlec and Knight, 1995)

ระบบนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีค่าการระบรทุกสารอินทรีย์น้อยกว่า 112 kg BOD/(ha.d) มีค่าการทางชลศาสตร์ 1.2-4.7 cm/d และ 1.9-9.4 cm/d เมื่อใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 2 และขั้นที่ 3 ตามลำดับ และควรมีระยะเวลาเก็บกัก 5-15 d อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างควรมากกว่า 10:1 ความลาดเอียงร้อยละ 0.5 และดินจะต้องมีความหนา 20-30 cm เพื่อรองรับการเจริญเติบโตของพืชได้ (เกียรติศักดิ์, 2546)



ภาพที่ 1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน

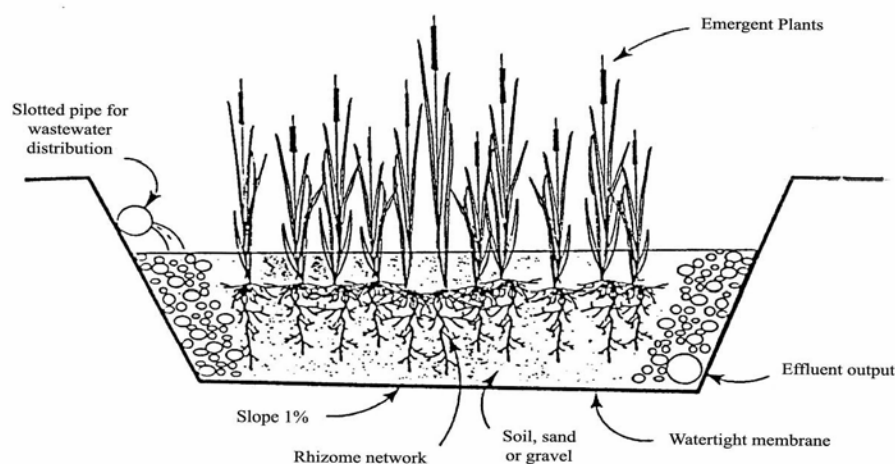
ที่มา: Koottatep (1999)

2.2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Flow System, SFS)

บึงประดิษฐ์แบบนี้แบ่งกลไกการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นรากพืช (Root Zone) และส่วนที่เป็นชั้นของวัสดุตัวกรอง (Rock-Reed Filters) (Koottatep, 1999) ในส่วนของชั้นที่เป็นรากพืชจะบรรจุตัวกลางเพื่อให้รากพืชยึดเกาะเช่น ดิน ทราย กรวดหรือหินบด มีความหนาของชั้นตัวกลางประมาณ 60-70 cm ด้านล่างลาดด้วยดินเหนียว วัสดุกันซึมอื่นๆ หรือปูด้วยแผ่นโพลีเอทิลีน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำรั่วซึม ส่วนกันบึงให้มีความลาดประมาณร้อยละ 1 และในบริเวณท้ายน้ำจะมีท่อเพื่อรับน้ำออกจากระบบ อาศัยการเติมอากาศด้วยรากพืชเป็นหลัก น้ำเสียจะถูกบำบัดเมื่อไหลผ่านรากพืชและตัวกลาง ชั้นตัวกลางจะมีสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic) แต่จุลินทรีย์จะใช้ ออกซิเจนจากรากพืชในการดำรงชีวิต (เกรียงศักดิ์, 2539) พืชที่ใช้ในระบบนี้เป็นพืชโผล่พ้นน้ำ (Emergent Plant) เช่นเดียวกัน

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.2.1 การไหลตามแนวนอน (Horizontal Subsurface Flow, HSF) น้ำเสียจะไหลอย่างช้าๆ ผ่านตัวกลางในแนวราบผ่านช่องว่างของชั้นตัวกลางจนกระทั่งถึงบริเวณทางออก ภายในระบบชนิดนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่มีอากาศ (Aerobic Zone) จะเกิดขึ้นบริเวณรากและลำต้นใต้ดินของพืช ส่วนที่ขาดออกซิเจน (Anoxic Zone) และส่วนที่ไร้อากาศ (Anaerobic Zone) จะเกิดขึ้นบริเวณชั้นของตัวกลางที่ลึกลงไป น้ำเสียจะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ที่เกาะบริเวณรากและตัวกลาง (Cooper et al., 1996)



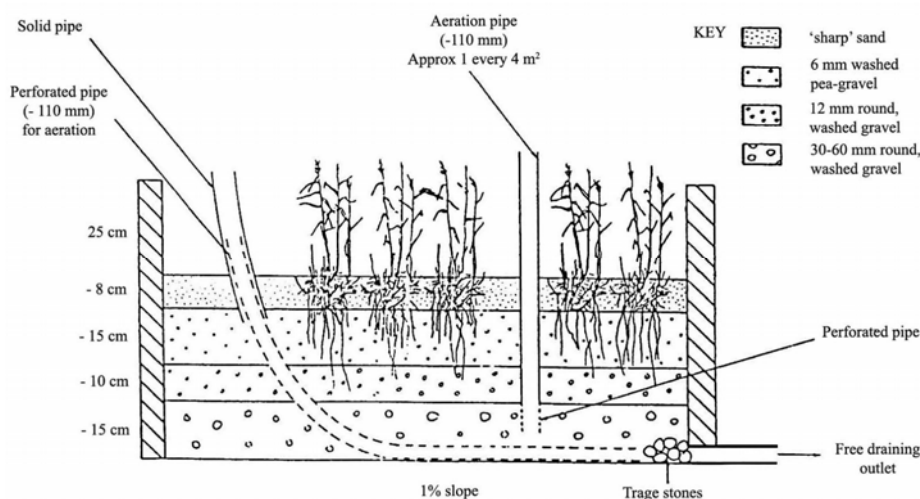
ภาพที่ 2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน

ที่มา: Koottatep (1999)

2.2.2 การไหลตามแนวตั้ง (Vertical Subsurface Flow, VF) ระบบนี้จะประกอบด้วยชั้นตัวกลางหลายชั้นอาจมีขนาดต่างกันมีการกระจายน้ำเข้าทั่วบริเวณผิวน้ำชั้นตัวกลาง และมีระบบที่รับน้ำออกอยู่ใต้ผิวน้ำชั้นตัวกลางโดยมีหินและกรวดรองรับอยู่ และถัดจากชั้นที่ขึ้นมาก็จะเป็นชั้นทรายหยาบและทรายละเอียดตามลำดับ การให้น้ำไหลเข้าระบบแบบครั้งคราว (intermittent loading) จะช่วยเพิ่มออกซิเจนให้แก่ดินเมื่อหยุดการให้น้ำ และในขณะที่ให้น้ำระบบจะเกิดสภาพไม่มีอากาศ สภาวะที่เกิดขึ้นเช่นนี้จะกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (nitrification) ดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) และการดูดซับฟอสฟอรัส (P-adsorption) ตามลำดับให้เกิดขึ้นได้ดี (สุวศา 2544, อุไรวรรณ 2545 และเกียรติศักดิ์ 2546)

3. ระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน (Hybrid System)

เป็นระบบบึงประดิษฐ์ที่รวมเอาระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอนและแนวดิ่งเข้าด้วยกันโดยนำข้อดีของการไหลในแนวดิ่งและการไหลในแนวนอนมาใช้ร่วมกัน โดยพบว่าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีเพราะมีการถ่ายเทออกซิเจนดี ส่วนระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอนสามารถกำจัดบีโอดีของแข็งแขวนลอย และไนเตรทไนโตรเจนได้ดี เพราะเกิดสภาพขาดออกซิเจน ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ดี ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสเกิดได้ทั้งในระบบการไหลแบบแนวดิ่งและแบบแนวนอน (สุวศา 2544, เกียรติศักดิ์ 2546)



ภาพที่ 3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง
ที่มา: Cooper et al (1996)

4. ข้อดีข้อเสียของระบบบึงประดิษฐ์

4.1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน (FWS)

4.1.1 ข้อดี (Advantage)

1) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพด้วยวิธีการง่าย ๆ ใช้อุปกรณ์พลังงานน้อยและต้องการผู้ควบคุมที่ไม่มีความรู้มากก็ได้ในการดูแลระบบ

2) ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำ ต้นทุนในการดำเนินการและบำรุงรักษาน้อยกว่าระบบที่ใช้เครื่องจักรในการบำบัด

3) การบำบัดในขั้นที่ 2 ระบบจะทำงานได้ดีทุกสภาวะอากาศตลอดทั้งปี ยกเว้นสภาวะอากาศที่มีภูมิอากาศหนาวจัดระบบจะทำงานได้ไม่ดี ส่วนการบำบัดขั้นสูงหรือการบำบัดขั้นที่ 3 ระบบจะทำงานได้ดีที่สภาวะอากาศแบบร้อนชื้น

4) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์จะเป็นการเพิ่มคุณค่าของพื้นที่สีเขียวมากขึ้น และเป็นที่อยู่อาศัยของพืชและสัตว์ได้

5) ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินเป็นระบบบำบัดที่ไม่เหลือของแข็งและกากตะกอนทำให้ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ในการบำบัดและกำจัดตะกอน

6) การกำจัด บีโอดี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด โลหะ และสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในน้ำเสียชุมชนจะมีประสิทธิภาพเมื่อมีระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสม ส่วนการกำจัด ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลากักเก็บนานขึ้น

4.1.2 ข้อเสีย (Disadvantage)

1) ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินต้องการพื้นที่มากในการก่อสร้าง โดยเฉพาะการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

2) การกำจัด บีโอดี ซีโอดี และไนโตรเจนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นทางชีวภาพซึ่งจะมีการบำบัดเกิดขึ้นตลอดเวลาและต่อเนื่อง ส่วนฟอสฟอรัส โลหะ และสารอินทรีย์บางชนิดจะถูกกำจัดโดยระบบการสะสมของตะกอนเป็นเวลานานมาก

3) ในสภาพภูมิอากาศที่หนาวเย็น อุณหภูมิต่ำ จะลดอัตราการกำจัด บีโอดี และปฏิกิริยาทางชีวภาพซึ่งส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันได้ ดังนั้นจะต้องเพิ่มระยะเวลาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

4) ปริมาณน้ำที่ขังอยู่ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินจะเกิดปฏิกิริยา anoxic เป็นพื้นฐานในระบบนี้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของแอมโมเนีย

5) เกิดปัญหาของยูงและแมลงอื่นๆ ที่เป็นพาหะขึ้นในระบบนี้

6) ประชากรของนกในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน จะส่งผลกระทบต่อสนามบินที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง

7) ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินสามารถกำจัด fecal coliform ที่กับของเสียจากบ้านเรือน ซึ่งการกำจัดไม่เพียงพอในการรองรับของเสียที่จะปล่อยลงมาสำหรับทุก

พื้นที่ และจำเป็นจะต้องมีการฆ่าเชื้อโรค ในสถานการณ์เช่นนี้ต่อไปในอนาคตจะทำให้ยุ่งยากขึ้น เพราะมีของเสียจากนก และสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นที่ก่อให้เกิด fecal coliform เพิ่มจำนวนมากขึ้น

4.2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน (SFS)

4.2.1 ข้อดี (Advantage)

- 1) ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินให้ผลการบำบัดโดยไม่มีปฏิกิริยาอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อวิธีการทดลอง มีกลไกในการบำบัดที่ไม่สลับซับซ้อน ใช้เครื่องมืออุปกรณ์พลังงานในการบำบัดน้อย รวมถึงไม่จำเป็นต้องมีผู้ควบคุมดูแลที่มีความชำนาญมากก็ได้
- 2) ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำ รวมถึงค่าบำรุงรักษาของระบบก็ต่ำด้วยเช่นกัน ขณะที่น้ำทิ้งที่ออกมาก็ยังมีความปลอดภัยเมื่อเปรียบเทียบกับบำบัดด้วยระบบอื่น ๆ
- 3) การบำบัดขั้นที่ 2 ระบบจะทำงานได้ดีทุกสภาวะอากาศตลอดทั้งปี ยกเว้นสภาวะอากาศที่มีภูมิอากาศหนาวจัดระบบจะทำงานได้ไม่ดี
- 4) การบำบัดขั้นสูงหรือการบำบัดขั้นที่ 3 ระบบจะทำงานได้ดีที่สภาวะอากาศแบบร้อนชื้น และระบบบึงประดิษฐ์แบบนี้จะป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายนอกได้ดีกว่าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน
- 5) การบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินจะไม่เกิดตะกอนหลงเหลืออยู่ในระบบหลังจากมีการบำบัดด้วยวิธีนี้
- 6) ค่าต่างๆ ที่ได้จากการบำบัดด้วยวิธีนี้เช่น บีโอดี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ทั้งหมด โลหะ และสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากในน้ำเสียชุมชนจะให้ค่าที่เชื่อถือได้ ส่วนการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสให้อยู่ในระดับที่มีค่าต่ำก็สามารถทำได้แต่ต้องใช้ระยะเวลาเก็บกักที่นานขึ้น
- 7) ไม่มีปัญหาในเรื่องของบูมและแมลงที่เป็นพาหะต่างๆ อาศัยอยู่ในระบบนี้

4.2.2 ข้อเสีย (Disadvantage)

- 1) ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินต้องใช้พื้นที่มากเพื่อให้กลไกในการบำบัดเกิดขึ้นได้ดี
- 2) การกำจัด บีโอดี ซีโอดี และไนโตรเจน ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนฟอสฟอรัส โลหะ และสารอินทรีย์บางชนิดถูกกำจัดในระบบการสะสมของตะกอนโดยใช้ระยะเวลาที่นานมาก

3) ในสภาวะภูมิอากาศหนาวเย็นจะลดอัตราการกำจัด บีโอดี แอมโมเนีย และไนเตรท ซึ่งการเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดจะช่วยลดปัญหานี้ได้

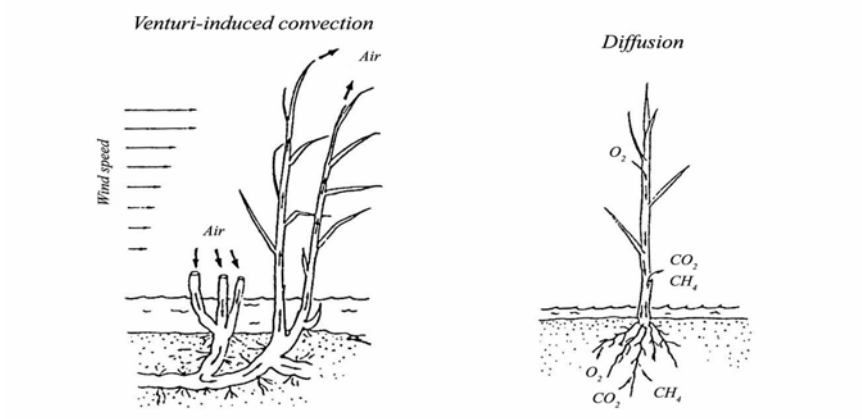
4) น้ำส่วนใหญ่ที่เข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินจะเกิดสถานะ Anoxic ขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระดับการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของแอมโมเนีย การเพิ่มขนาดของระบบบึงประดิษฐ์และการเพิ่มระยะเวลจะช่วยลดปัญหานี้ได้

5) แม้ว่าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินจะสามารถกำจัดปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ให้เหลือในปริมาณที่น้อยกว่าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน แต่จะมีค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวเองกลางเข้ามาเกี่ยวข้องจึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบมีค่าสูงขึ้นด้วย

5. พืชที่ใช้ในระบบบึงประดิษฐ์

พืชในระบบบึงประดิษฐ์มีหลายชนิด แต่โดยส่วนใหญ่จะเป็นพืชที่ไหลพันน้ำ ซึ่งมีส่วนของใบ และลำต้นอยู่เหนือผิวดิน มีรากแผ่ขยายอยู่ในดิน เช่น ฐปฤยา (Cattail: *Typha spp.*) อ้อ (Reed: *Phragmites spp.*) กก (Bulrush: *Scirpus spp.*) รากพืชจะเติบโตอยู่ในดินที่ระดับน้ำตั้งแต่ 5-150 cm หรือมากกว่านี้ โดยส่วนใหญ่จะสร้างใบและลำต้นให้สัมผัสอากาศและมีรากแผ่ขยายในชั้นดิน พืชจำพวกอ้อหรือกกมักเลือกใช้กับระบบน้ำไหลได้ผิวดินเพราะระบบรากพืชแทรกซึมได้ดีจนถึงก้นบ่อ ระบบรากพืชของฐปฤยาสามารถแทรกซึมได้ที่ระดับความลึกประมาณ 30 cm ขณะที่อ้อมีความลึกของรากมากกว่า 60 cm ส่วนกกมีความลึกของรากมากกว่า 76 cm ฐปฤยาเจริญเติบโตได้ดีที่ความลึกของน้ำประมาณ 15 cm ขึ้นไป กกเจริญเติบโตได้ดีที่ความลึกของน้ำประมาณ 5 cm ถึง 25 cm ส่วนอ้อเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับน้ำลึกประมาณ 150 cm

ออกซิเจนจากบรรยากาศถ่ายเทเข้าสู่พืชทางใบ ผ่านทางช่องอากาศไปยังระบบรากโดยการแพร่ (Diffusion) และการพาของอากาศ (Convection) ออกซิเจนบางส่วนถูกปลดปล่อยออกมาบริเวณชั้นรากพืชเกิดสภาพมีออกซิเจนดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ดีขึ้น ทำให้ไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying Bacteria) เจริญเติบโตได้ดีเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเพิ่มขึ้น และช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของตะกอนด้วย (Cooper and Boon, 1987) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนของพืชอยู่ในช่วงประมาณ 5-45 g $O_2/(m^2 \cdot d)$ ของพื้นที่ผิวดินระบบบึงประดิษฐ์ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและระดับความดันของออกซิเจนในดินด้วย



ภาพที่ 4 การถ่ายเทออกซิเจนในพืช

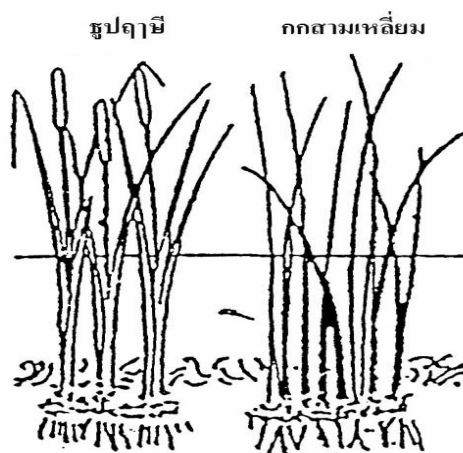
ที่มา: Moshiri (1993)

5.1 รูปฉายี่

รูปฉายี่วงศ์ Typhaceae ชื่อวิทยาศาสตร์ *Typha angustifolia* L. เป็นวัชพืชที่พบบริเวณแหล่งน้ำขัง ในหนอง บึง ในนาข้าวทั่วประเทศไทย ขยายพันธุ์โดยใช้เหง้าและเมล็ด มีอายุหลายฤดู ลำต้นเจริญตั้งตรงเป็นกอ มีลำต้นใต้ดินเรียกว่าเหง้า สามารถแตกกอใหม่ได้ ต้นสูงประมาณ 1-2 m เป็นใบเดี่ยวแบบเรียวยาวแหลมยาวประมาณ 1 m โคนใบแผ่เป็นกาบประกบกันกาบใบด้านในมีเมือกเหนียว มีดอกแบบช่อเชิงลด (spike) ช่อดอกกลมคล้ายรูปสีน้ำตาลเข้มเมื่อแก่ดอกตัวผู้กับดอกตัวเมียจะแยกกันอยู่คนละส่วนของช่อเดียวกัน ผลมีขนาดเล็ก กลมเรียวยาว มีเมล็ดเดี่ยว ที่ปลายมีขนสีขาวเป็นกระจุกติดอยู่ ผลแก่มีสีน้ำตาล ใช้ประโยชน์จากใบในการจักสานเป็นผลิตภัณฑ์หัตถกรรมในครัวเรือน (ดวงพร และ รังสิต, 2544)

5.2 กกสามเหลี่ยม

กกสามเหลี่ยม กกตาแดงหรือกกคมบาง วงศ์ Cyperaceae ชื่อวิทยาศาสตร์ greater club rush, bulrush เป็นวัชพืชที่ชอบที่ชื้นและน้ำขัง พบมากในหนองน้ำแพร่กระจายทั่วประเทศไทยเป็นวัชพืชหลายฤดู ขยายพันธุ์โดยใช้ไหล ลำต้นตั้งตรงมีไหลขนานไปตามพื้นดินลำต้นตามขวางเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่บริเวณฐานหนา สูง 1-2 m ใบเป็นรูปหอก แฉกยาว 50-100 cm ช่อดอกเรียงแบบช่อเชิงหลั่น (Corymbosus) ยาว 10-20 cm ประกอบด้วยช่อดอกย่อยทั้งที่มีก้านและไม่มีก้านดอกย่อยยาว 5-10 cm ประโยชน์จากใบใช้สานทำเสื่อและหลังคา (ดวงพร และ รังสิต, 2544)



ภาพที่ 5 พืชโผล่พ้นน้ำ

ที่มา: Thayalakumaran (1994)

ตารางที่ 2 บทบาทส่วนประกอบของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

ส่วนประกอบของพืช	บทบาทในการบำบัด
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	● ลดความเข้มแสงเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน ● ป้องกันอิทธิพลจากสภาพอากาศในฤดูหนาว ● ลดความเร็วลมเพื่อให้ของแข็งแขวนลอยตะกอนได้ดี ● เพิ่มพื้นที่สีเขียวให้ดูสวยงาม ● สะสมอาหาร
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	● ลดความเร็วกระแสน้ำเพิ่มอัตราการตกตะกอน ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ ● กรองตะกอนขนาดใหญ่ ● เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับตัวของไบโอฟิล์ม ● ปลดปล่อยออกซิเจนเพื่อการสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน ● ดูดซับสารอาหาร

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ส่วนประกอบของพืช	บทบาทในการบำบัด
รากและระบบรากพืชในชั้นตะกอนใต้ น้ำ	● ทำให้ผิวตะกอนใต้น้ำถูกกักเซาะน้อย ● ป้องกันการอุดตันของตัวกรองในระบบการไหล แนวตั้ง ● ปล่อยออกซิเจนเพื่อเพิ่มการย่อยสลายและ เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ● ดูดซับสารอาหาร ● ปล่อยแอนติไบโอติก (Antibiotic)

ที่มา: Brix (1997)

5.3 หน้าที่ของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

5.3.1 การดูดซับสารอาหาร พืชต้องการสารอาหารในการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ โดยพืชจะดูดสารอาหารผ่านระบบรากแต่บางส่วนก็ดูดซับผ่านลำต้นและใบ สามารถลดปริมาณสารอาหารของพืชได้โดยการเก็บเกี่ยวพืชไพล่พื้นน้ำประมาณ 30-150 kg P / (ha yr) และ 200-2500 kg N / (ha yr) (Brix and Schierup, 1989) ถ้าระบบไม่มีการเก็บเกี่ยวสารอาหารในพืชจะถูกปลดปล่อยออกมาสู่ระบบอีกเพื่อการย่อยสลายต่อไป

5.3.2 การปลดปล่อยทางราก พืชน้ำจะปลดปล่อยออกซิเจนจากรากสู่บริเวณรอบๆ ลำต้นใต้ดิน อัตราการปลดปล่อยออกซิเจนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน ความต้องการออกซิเจนของตัวกลางโดยรอบและความพรุนของผนังราก พืชไพล่พื้นน้ำสามารถถ่ายเทออกซิเจนได้ในช่วง 5 - 45 g O₂ / (m² d) ของพื้นที่ผิวของบึงประดิษฐ์ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและระดับออกซิเจนที่มีอยู่ในดิน (Cooper and Boon, 1987)

5.3.3 เป็นที่ยึดเกาะสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ลำต้นและใบของพืชที่อยู่ใต้น้ำจะเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ เนื้อเยื่อของพืชจะมีสาหร่ายที่สังเคราะห์แสงได้เกาะอยู่หนาแน่น รวมทั้งจุลินทรีย์และโปรโตซัว เช่นเดียวกับราก ลำต้นใต้ดิน (ศุวศา, 2544)

5.3.4 ความสามารถทางกายภาพ พืชในระบบจะช่วยลดความเร็วของกระแส น้ำ ทำให้ตกตะกอนได้ดีขึ้น และลดการฟุ้งกระจายของตะกอน และช่วยเพิ่มเวลาสัมผัสระหว่างน้ำ และพื้นที่ผิวของพืช รากพืชที่หนาแน่นช่วยลดการกัดเซาะผิวดิน ในระบบการไหลแนวตั้งการให้น้ำเข้าระบบเป็นครั้งคราวร่วมกับการปลูกพืช รากพืชที่เติบโตในตัวยางจะช่วยลดการทับถมของซากพืช ช่วยป้องกันการอุดตันในตัวยางได้ ส่วนยอดต้นพืชช่วยลดความเร็วของกระแสลม ลดความเข้มของแสงทำให้เกิดสาหร่ายลดลง และเป็นฉนวนป้องกันอุณหภูมิของดินไม่ให้สูง หรือต่ำเนื่องจากอุณหภูมิของอากาศ

5.3.5 ผลต่อสภาพนำทางชลศาสตร์ (hydraulic conductivity) สำหรับระบบที่มีการไหลในแนวนอนการไหลของน้ำจะไหลไปตามร่องที่เกิดจากรากที่มีชีวิตและรากที่ตายแล้ว รวมทั้งการไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดดินเมื่อรากเจริญมากขึ้นจะรบกวนการเกาะติดของดินทำให้ดินหลวมขึ้นเมื่อรากและลำต้นใต้ดินตายจะเกิดการย่อยสลาย เหลือลักษณะเป็นโพรงหรือร่องซึ่งเพิ่มความเสถียรของ Hydraulic Conductivity ของดินได้ (Vymazal et al., 1998)

ตารางที่ 3 อัตราการดูดซึมไนโตรเจนกับฟอสฟอรัสของพืชในระบบบึงประดิษฐ์

ชนิดพืช	อัตราการดูดซึมในพืช		สารอาหารในเนื้อเยื่อพืช		ผลผลิตของพืช (kg / ha yr)
	(kg / ha yr)		(g / kg)		
	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	
ธูปฤาษี	600-630	75-403	5-24	0.5-4	8-61
กกสามเหลี่ยม	125	18	8-27	1-3	-
อ้อ	225	35	18-21	2-3	10-60

ที่มา : Reddy and Debusk (1987)

6. กลไกการบำบัดน้ำเสียของระบบบึงประดิษฐ์

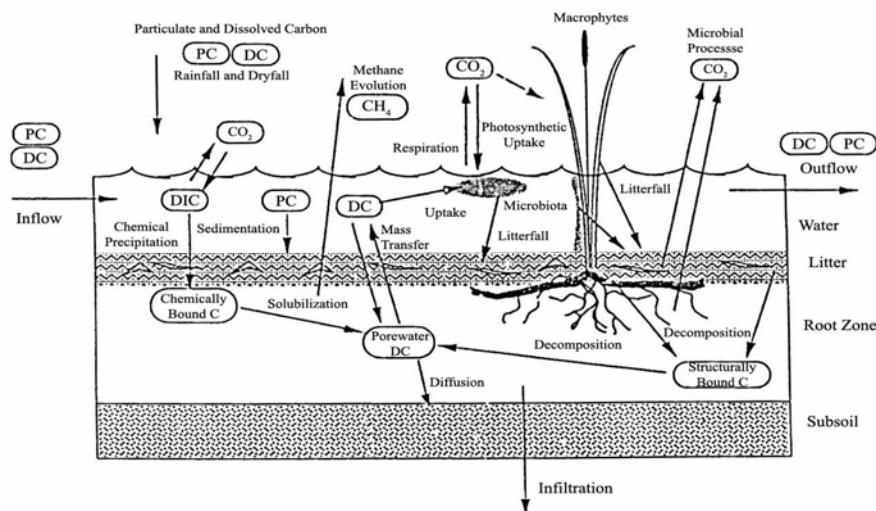
6.1 การกำจัดบีโอดี

การกำจัดบีโอดีเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วผ่านกระบวนการตกตะกอนและการดูดซับอนุภาคสารในช่องว่างระหว่างตัวกลางหินหรือกรวด บีโอดีที่ละลายน้ำอยู่จะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนผิวของตัวกลางและจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่ที่รากพืช ส่วนค่าของออกซิเจนที่ใช้สำหรับการบำบัดในระบบได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชและส่งผ่านออกซิเจนมาทางรากพืช แต่บริเวณของตัวกลางที่รากพืชยังไม่ถึงจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บริเวณนี้ก็จะกำจัดด้วยกระบวนการที่ใช้ออกซิเจนแทน ระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้บำบัดทั้งแบบการไหลได้ผิวดินและการไหลบนผิวดินไม่สามารถกำจัดปริมาณบีโอดีได้หมด แต่ควรมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2-7 mg/L ในน้ำทิ้ง ซึ่งบีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งเกิดจากการสลายตัวของพืชในน้ำที่มีขนาดเล็กและสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ (U.S. EPA, 1993) แสดงดังภาพที่ 6

จากการศึกษาการกำจัดบีโอดีของ U.S. EPA พบว่าที่ระยะเวลาเก็บกักประมาณ 1 d ก็สามารถกำจัดบีโอดีได้ประมาณร้อยละ 60-65 ข้อเสนอแนะในการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินควรออกแบบให้อัตราส่วนระหว่างความยาว : ความกว้าง มีค่าสูงๆ เพื่อให้ระบบมีสภาวะการไหลของน้ำเป็นแบบตามยาว (Plug Flow) และทำให้ระบบดำเนินไปได้ด้วยดี ค่าความยาว : ความกว้าง ที่แนะนำสำหรับการออกแบบน้อยที่สุดประมาณ 10 : 1 และถ้าอัตราส่วนต่ำกว่านี้ระบบจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีน้อยลง

6.2 การกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

การกำจัดของแข็งแขวนลอยมีความสำคัญสำหรับการบำบัดด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน (SFS) การกำจัดของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในระบบจะทำการกำจัดในระยะทางการไหลของน้ำช่วงแรก ๆ จากทางน้ำเข้าเท่านั้น ของแข็งแขวนลอยที่ไม่ตกตะกอนจะถูกกำจัดโดยแบคทีเรียและการชนกันของอนุภาคแล้วตกตะกอน รวมทั้งการดูดติดกับวัสดุอื่น ๆ เช่น พืช (Stowell et al., 1981) แต่การตกตะกอนจะทำให้เกิดการอุดตันของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีน้ำไหลได้ผิวดินได้ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ในการออกแบบระบบแบบจำลองไม่สามารถหา



ภาพที่ 6 กลไกการบำบัดสารอินทรีย์ในระบบบึงประดิษฐ์

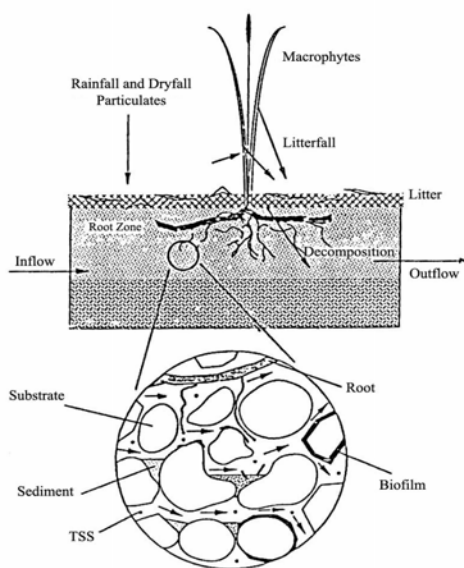
ที่มา: Kadlec and Knight (1995)

ค่าได้จากการกำจัดของแข็งแขวนลอย การกำจัดของแข็งแขวนลอยจะมีรูปแบบหรือกลไกในการบำบัดคล้าย ๆ กับการกำจัดบีโอดี แสดงดังภาพที่ 7

6.3 การกำจัดไนโตรเจน

ถ้าพิจารณากลไกการบำบัดไนโตรเจนโดยแยกเป็นส่วนๆ อาจจำแนกได้ดังนี้

- การตกตะกอนและการกรอง อนุภาคที่ประกอบไปด้วยไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์จะตกลงสู่ผิวดินหรือชั้นทราย และถูกกรองโดยชั้นทรายร่วมกับระบบรากฝอยของพืชซึ่งสานกันเป็นร่างแหในชั้นทราย
- การเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนไนโตรเจนที่เป็นสารอินทรีย์ให้เป็นสารอนินทรีย์โดยเฉพาะแอมโมเนียมไอออน เป็นขั้นแรกของการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจน ในทางจุลชีวศาสตร์แอมโมนิฟิเคชันเกิดได้เร็วกว่าไนตริฟิเคชัน ทำให้แอมโมเนียมเพิ่มขึ้นตามการไหลของน้ำ การเกิดแอมโมนิฟิเคชันเกิดได้เร็วเมื่อมีออกซิเจนเนื่องจากประสิทธิภาพการรีดิวซ์ของการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เฮเทอโรโทรฟในสภาพมีออกซิเจนสูงกว่า ในทางกลับกันแอมโมเนียไนโตรเจนมีการสะสมในสภาพไร้ออกซิเจนมากกว่า อัตราการเกิดกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ พีเอช อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง $40-60^{\circ}\text{C}$ และ พีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.5 (Reddy and Patrick, 1984)



ภาพที่ 7 กระบวนการบำบัดอนุภาคหรือของแข็งแขวนลอยในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน

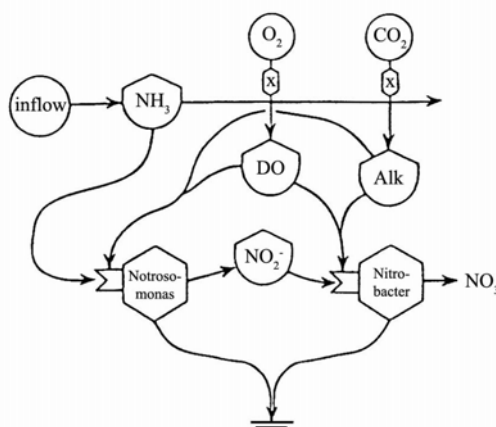
ที่มา: Kadlec and Knight (1995)

- การระเหยของแอมโมเนีย เป็นกลไกรองในการบำบัดไนโตรเจน เพราะเกือบทั้งหมดของปริมาณไนโตรเจนในรูปอนินทรีย์สาร ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียไอออน นอกจากนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงสภาวะจากของเหลวเป็นก๊าซแอมโมเนียมยังอยู่ในระดับที่ต่ำ
- การนำไนโตรเจนไปใช้โดยพืช โดยใช้เพื่อการสร้างเซลล์ของพืช
- ปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน ในขณะที่ปล่อยน้ำเสียไหลผ่านระบบบำบัด ไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบในอินทรีย์สารจะถูกตรึงในรูปของแอมโมเนียมโดยการแลกเปลี่ยนไอออน ในขณะเดียวกันสภาพเช่นนี้ไม่เหมาะสมสำหรับปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน เพราะน้ำเสียที่ปล่อยเข้าระบบจะมีออกซิเจนน้อยและมีแบคทีเรียชนิดไนตริไฟร์ (Nitrifier) น้อย แต่ปฏิกริยานี้จะเกิดช่วงที่หยุดปล่อยน้ำเสีย

กลไกของระบบไนตริฟิเคชัน แสดงดังสมการที่ 1) และ 2) และภาพที่ 8 ซึ่งขั้นแรก Nitrosomonas จะเปลี่ยนแอมโมเนียมให้เป็นไนไตรท์ ส่วนขั้นที่สอง Nitrobacter จะเปลี่ยนไนไตรท์ให้เป็นไนเตรท



ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่มีประสิทธิผลมากที่สุดในระบบบำบัดด้วยดิน (Land Treatment) สำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะทำการเปลี่ยนไนเตรทไนโตรเจนไปเป็นไนไตรท์ไนโตรเจนและก๊าซไนโตรเจนในที่สุด โดยไนเตรทไนโตรเจนจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน มีสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน สามารถจำแนกปฏิกิริยานี้ได้เป็น 2 ชนิด คือ Substrate Nitrate Denitrification คือ สารอินทรีย์คาร์บอนที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนมาจากแหล่งอื่นที่ไม่ใช่มาจากเซลล์ของจุลินทรีย์ และ Endogenous Nitrate Denitrification กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีคาร์บอนจากแหล่งภายนอก คือ จุลินทรีย์จะใช้แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ของตน ปฏิกิริยานี้จึงเสมือนว่าเป็นการย่อยตัวเอง



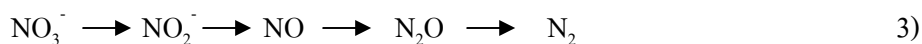
ภาพที่ 8 กลไกการกำจัดไนโตรเจน

ที่มา: Kadlec and Knight (1995)

การรักษาสภาพมีอากาศเป็นเหตุผลหนึ่งของการเติมน้ำเสียเป็นครั้งคราว หรือในช่วงไม่ยาวมากนัก เพราะสภาพมีอากาศจะยังคงอยู่ในระหว่างที่ยังไม่มีน้ำเสียไหลผ่าน ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นบริเวณผิวดินเพราะเป็นสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจน และยังเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างช่องว่างของเม็ดดินหรืออนุภาคทรายซึ่งมีออกซิเจนจากรากพืชแทรกอยู่ อันส่งผลให้ไนตริฟายอิงแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ได้ และเมื่อถึงเวลาเติมน้ำเสียครั้งต่อไป แอมโมเนียที่ผ่านมากับน้ำเสียก็จะถูกดูดซับลงสู่ดินและแปรรูปเป็นวัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไป อย่างไรก็ตามการบำบัดน้ำเสียให้ได้ผลดี น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบควรมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากกว่า

การกำจัดไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ทำโดยการเปลี่ยนให้เป็นก๊าซไนโตรเจนซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาพแอนอนอกซิก เป็นสภาพที่ไม่มีออกซิเจนละลายน้ำ แต่สามารถนำออกซิเจนมา

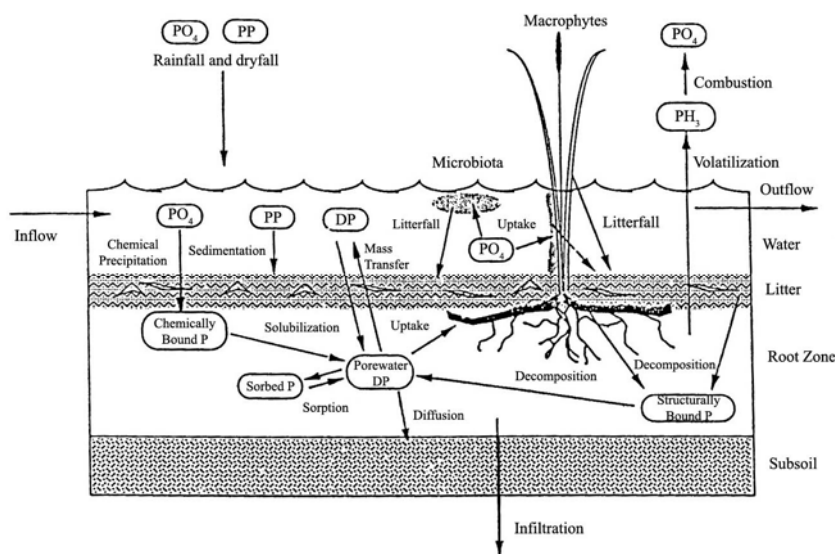
ใช้จากแหล่งอื่น คือ ไนเตรท ไนไตรท์ หรือแม้กระทั่งซัลเฟต ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า ดีไนตริฟิเคชัน กระบวนการนี้มี 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคือการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นไนไตรท์ ซึ่งในขั้นต่อมาจะผลิตไนตริกออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกมาแล้วปลดปล่อยสู่บรรยากาศ



ออกซิเจนละลายน้ำเป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญของระบบดีไนตริฟิเคชัน ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7 และ 8 แต่อย่างไรก็ตามค่าความเป็นด่างที่ผลิตออกมาในช่วงที่เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นผลทำให้มีค่าพีเอชสูงขึ้น อุณหภูมิก็มีผลต่อปฏิกิริยาอย่างมากซึ่งไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 5°C และควรมีอัตราการไหลเข้าระบบต่ำ

6.4 การกำจัดฟอสฟอรัส

ส่วนใหญ่การกำจัดเกิดขึ้นที่ชั้นดินในส่วนพื้นบึง ถ้าหากดินมีส่วนผสมของเหล็ก อลูมิเนียมจะช่วยส่งเสริมการกำจัดให้ดีขึ้น ส่วนพืชจะนำฟอสฟอรัสไปใช้ในการสร้างเซลล์ผ่านทางราก และส่งผ่านไปยังเนื้อเยื่อเพื่อนำไปสร้างเซลล์ ความสามารถในการดูดซับของพืชมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับไนโตรเจน (Brix, 1994 and Vymazal, 1995) เมื่อพืชตายและย่อยสลายจะคายฟอสฟอรัสบางส่วนออกมา ส่วนที่เหลือจะจมอยู่กับซากพืช แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กลไกการบำบัดฟอสฟอรัสในระบบบึงประดิษฐ์

ที่มา: Kadlec and Knight (1995)

การกำจัดฟอสฟอรัสในระบบบึงประดิษฐ์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นน้อยหรือมีผลน้อยมากสำหรับการกำจัดด้วยวิธีนี้เพราะเกิดข้อจำกัดระหว่างน้ำและดินในระบบบึง ส่วนการพัฒนาการใช้งานในการเดินระบบจะต้องเพิ่มปริมาณพื้นที่ของดินเหนียว หินบดให้มากขึ้น รวมถึงปริมาณไออนเหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์ในระบบด้วยเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น ในการบำบัดด้วยวิธีอื่นๆ อาจทำได้แต่ไม่ระบุว่าในระยะเวลาที่นานขึ้นจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นอย่างไร (U.S. EPA, 1993) จากการศึกษาของ Richardson et al. (1995) พบว่าในดินที่เป็นกรด สารอินทรีย์ฟอสเฟตจะถูกดูดซับในรูปของไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม และสารที่ไม่ละลายน้ำจะตกตะกอนในรูปเหล็กฟอสเฟตและอลูมิเนียมฟอสเฟต แต่แคลเซียมฟอสเฟตจะตกตะกอนที่พีเอชมากกว่า 7 การดูดซับฟอสฟอรัสจะเกิดขึ้นได้ดีในดินที่มีแร่ธาตุและสารอินทรีย์ (เกียรติศักดิ์, 2546) บางระบบในยุโรปใช้ทรายแทนการเพิ่มปริมาณของหินหรือกรวดเพื่อให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสดีขึ้น แต่ระบบที่ใหญ่ขึ้นการเลือกวัสดุกรองจะมีผลเพราะสภาพการนำไฟฟ้าในน้ำของทรายและหินมีส่วนเกี่ยวข้องต่อการกำจัดฟอสฟอรัส (U.S. EPA, 1993)

6.5 การกำจัดเชื้อโรค

กลไกหลักในการกำจัดเชื้อโรคในระบบบึงประดิษฐ์ คือ การตายตามธรรมชาติ การกินกันเอง การตกตะกอน และการดูดซับ แบคทีเรียจะถูกดูดซับด้วยอนุภาคที่อยู่ในน้ำ และถูกกำจัดเมื่ออนุภาคนั้นตกตะกอน การกำจัดเชื้อโรคในระบบบึงประดิษฐ์พบว่าขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อโรค เวลาเก็บกัก และอุณหภูมิ (Reed et al., 1988) และจากการศึกษาของ Bavor et al. (1987) พบว่า การกำจัดแบคทีเรียโดยระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้เวลาเก็บกัก 3-7 d มีความสามารถในการกำจัดเทียบได้หรือมากกว่าการกำจัดด้วยระบบเดิมอากาศแบบธรรมดา ซึ่งใช้เวลาเก็บกักที่ยาวนานกว่า

6.6 การกำจัดโลหะ

กระบวนการกำจัดโลหะในระบบบึงประดิษฐ์ประกอบไปด้วย การตกตะกอน การกรอง การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน การเกิดสารเชิงซ้อน และการดูดซับของพืช (Watson et al., 1989) จากการศึกษาสรุปได้ว่า พบโลหะในปริมาณสูงสุดที่รากของพืชและจะค่อยๆ ลดลงที่ลำต้นใต้ดิน และพบในปริมาณน้อยที่สุดในส่วนที่เหลือน้ำในดิน คือ ส่วนของลำต้นและใบ (Vymazal, 1995) จึงทำให้การเก็บเกี่ยวพืชสามารถกำจัดโลหะหนักได้น้อยมาก นอกจากนี้พืชยังมีส่วนช่วย

กำจัดโลหะโดยการกรองโดยเฉพาะพืชที่มีพื้นที่ผิวสูงซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากในการกรองโลหะไฮดรอกไซด์และตกตะกอนในที่สุด (Cooper et al., 1996 ; เกียรติศักดิ์, 2546)

7. การออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

พารามิเตอร์ที่พิจารณาในการออกแบบเบื้องต้นสำหรับระบบบึงประดิษฐ์มีดังนี้ Hydraulic retention time, Basin depth, Basin geometry (width and length), BOD₅ loading rate, and Hydraulic-loading rate ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้โดยทั่วไปของระบบบึงประดิษฐ์มีเกณฑ์กำหนดดังตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 เกณฑ์การออกแบบสำหรับระบบบึงประดิษฐ์

รายการที่ใช้ออกแบบ	หน่วย	ประเภทของระบบบึงประดิษฐ์	
		FWS	SFS
ระยะเวลาเก็บกัก	d	4-15	4-15
ระดับน้ำ	m	0.1-0.6	0.3-0.8
อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์	kg / (ha d)	< 68	< 68
อัตราการชลศาสตร์	m ³ / (m ² d)	0.014-0.047	0.014-0.047
พื้นที่ผิวจำเพาะ	ha / (10 ³ m ³ d)	2.14-7.16	2.14-7.16

ที่มา: Metcalf and Eddy (1991)

ตารางที่ 5 ค่าที่เหมาะสมในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์

รายการที่ใช้ออกแบบ	หน่วย	FWS	SFS
อัตราการสารอินทรีย์	kg BOD / (ha d)	<112	<150 (โดยทั่วไป <80)
อัตราการชลศาสตร์	cm/d	1.2-4.7*	<5*
		1.9-9.4**	<20**
ระยะเวลาเก็บกัก	d	5-15	<5
อัตราส่วนความยาว: ความกว้าง	-	>10:1	3:1 (ใช้น้อยกว่า 1:1 ได้)
ความหนาของตัวกลาง	cm	20-30	60-80

ตารางที่ 5 (ต่อ)

รายการที่ใช้ออกแบบ	หน่วย	FWS	SFS
ความลาดชัน	%	0.5	1
ความพรุนของตัวกลาง	-	-	0.3-0.45
ความหนาของวัสดุกันซึม	mm	-	0.5-1.0

ที่มา: Reed et al. (1988), Watson and Hobson (1989), Cooper et al. (1996)

หมายเหตุ: * ใช้เป็นระบบบำบัดขั้นที่สอง

** ใช้เป็นระบบบำบัดขั้นที่สาม

ตารางที่ 6 ข้อมูลที่ควรทราบเกี่ยวกับระบบบึงประดิษฐ์

ข้อมูลที่ควรทราบ	รายละเอียด
1. ชนิดของชั้นดิน	ควรเป็นดินประเภทที่ให้น้ำไหลซึมลงดินได้ช้า
2. เทคนิคการกระจายน้ำเสีย	ใช้หัวกระจายน้ำเสียหรือท่อเจาะรูด้านข้างเพื่อกระจายน้ำเสีย
3. ภาระปริมาณน้ำเข้า	5-18 m/yr
4. ขนาดพื้นที่ที่ต้องการ	20-66 m ² /(m ³ d)
5. ความต้องการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น	ต้องการพืชปลูกบนพื้นที่ลาดเอียง
6. ความต้องการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น	ควรมีระบบตกตะกอนขั้นต้นก่อนปล่อยลงบนพื้นที่ และอาจเติมอากาศเล็กน้อยลงในน้ำเสียก่อนปล่อยเข้าบึงประดิษฐ์ แต่ไม่ควรมีสารร้ายเข้าระบบบึง
7. ความลาดของพื้นที่บำบัด	น้อยกว่าร้อยละ 5
8. การเก็บเกี่ยวพืชน้ำ	ไม่จำเป็นต้องทำ

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ข้อมูลที่ควรทราบ	รายละเอียด
9. การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสีย	จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของ C/N ว่ามีเพียงพอหรือไม่ โดยทั่วไปควรมีมากกว่า 2 ต่อ 1 จึงจะสามารถกำจัดสารไนโตรเจนได้
10. ค่าอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนเข้าระบบ	เมื่อเป็นพืชที่จุ่มในน้ำจะมีประมาณ 5-45 g O ₂ /(m ² d)
11. ระบบป้องกันน้ำท่วม	ควรมีระบบป้องกันน้ำท่วมสำหรับบึงประดิษฐ์

ที่มา: เกรียงศักดิ์ (2539)

7.1 การออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน

พิจารณาระบบทางชลศาสตร์จากกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) สำหรับการไหลผ่านช่องว่างของตัวกลาง ซึ่งถือว่าในทางทฤษฎีอัตราการไหลในระบบคงที่ สมบูรณ์ มีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำและไม่มีการรั่วซึม แสดงดังสมการที่ 4) (U.S. EPA, 1993)

$$Q = k_s AS \quad 4)$$

เมื่อ

Q = อัตราการไหลต่อเวลา, m³/d

k_s = สภาพนำทางชลศาสตร์ของพื้นที่หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล, m³/(m² d)

A = พื้นที่หน้าตัดรวมที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล, m²

S = อัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำต่อหนึ่งหน่วยความยาว (dh/dL), m/m

ถ้า Q ในสมการที่ 4) พิจารณาเป็นค่าเฉลี่ย อัตราการไหลในระบบคำนวณได้จาก $[(Q_{in}+Q_{out})/2]$ หน่วย m³/d (U.S. EPA, 1993)

7.1.1 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด จากสมการที่ 4) ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดินสามารถคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดที่สภาวะอิ่มน้ำได้จากสมการที่ 5) ดังนี้ (Metcalf and Eddy, 1991)

$$A_c = \frac{Q}{k_s S} \quad 5)$$

เมื่อ A_c = พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ, m^2
 k_s = สภาพนำทางชลศาสตร์ของพื้นที่หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล, $m^3/(m^2 d)$ ดูจากตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของลักษณะตัวกลางต่างๆ ในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน

ชนิดตัวกลาง	ขนาดสัมฤทธิ์ (mm)	ความพรุน α , (%)	สภาพนำทางชลศาสตร์ k_s ($m^3/m^2 d$)	K_{20}
ทรายละเอียดปานกลาง	1	0.42	420.6	1.84
ทรายหยาบ	2	0.39	480.1	1.35
กรวดทราย	8	0.35	500	0.86

ที่มา: Metcalf and Eddy (1991)

7.1.2 การคำนวณหาระยะเวลาในการเก็บกัก HRT จากสมการ First-order Plug Flow ในการกำจัดบีโอดีของระบบแบบน้ำไหลได้ผิวดินสามารถใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาในการเก็บกัก ดังสมการที่ 6) (Metcalf and Eddy, 1991)

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t') \quad 6)$$

โดยที่

$$C_e = \text{ปริมาณ } BOD_5 \text{ ในน้ำออกจากระบบ, mg/L}$$

$$C_o = \text{ปริมาณ } BOD_5 \text{ ในน้ำเข้าระบบ, mg/L}$$

$$K_T = \text{อัตราค่าคงที่ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมินั้นๆ, d}^{-1}$$

เมื่อ

$$K_T = K_{20}(\theta)^{(T-20)} \quad 7)$$

$$K_{20} = \text{อัตราค่าคงที่ของอุณหภูมิที่ } 20^\circ\text{C, d}^{-1}$$

$$T = \text{อุณหภูมิของน้ำในระบบ, } ^\circ\text{C}$$

ผลจากสมการที่ 6) นี้ไม่สามารถใช้ออกแบบระบบที่ต้องการบำบัด BOD_5 สุดท้ายให้มีค่าน้อยกว่า 5 mg/L ได้ ส่วนในตารางที่ 8 ได้แนะนำอัตราค่าคงที่ของอุณหภูมิ 20°C จากสมการที่ 7) สำหรับระบบที่มีค่าอัตราการระเหยอินทรีย์ประมาณ 110 kg/ha d ดังนี้ (U.S. EPA, 1993)

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบอัตราค่าคงที่ของอุณหภูมิ 20°C ในสมการ First-order สำหรับระบบการบำบัดต่าง ๆ

ชนิดของระบบบำบัด	$K_{20} \text{ (d}^{-1}\text{)}$
ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน	1.104
ระบบบ่อบำบัดแบบกึ่งเดิมอากาศ	0.117
ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน	0.501

ที่มา: U.S.EPA (1993)

จากสมการที่ 6)

$$\bar{t} = \frac{LW\alpha d}{Q} \quad 8)$$

เมื่อ $\bar{t}$ = ระยะเวลาเก็บกักน้ำขณะที่อยู่ในช่องว่างของตัวกลาง ตาม
ทฤษฎี, d
 L = ความยาวของบ่อ, m

W = ความกว้างของบ่อ, m

α = ความพรุน, %

d = ความลึกของบ่อ, m

ส่วนระยะเวลาเก็บกักที่เกิดขึ้นจริงเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$t = \frac{L}{k_s S} \quad 9)$$

อัตราการไหลของน้ำอาจใช้ฝายนํ้าดันในการควบคุมการไหลให้ส่วนก้นบ่อมีความลาดของบ่อประมาณร้อยละ 1 เพื่อให้ให้นํ้าไหลลงโดยไม่มีการขังเกิดขึ้น ส่วนก้นบ่อบริเวณปลายท้ายน้ำของบ่อจะมีท่อรับนํ้าออกจากระบบบึงประดิษฐ์ เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการถูกรบกวนของตัวกลางและชั้นของรากพืช และเพื่อให้แน่ใจได้ว่ามีเวลาในการสัมผัสที่เพียงพอสำหรับการบำบัด ค่าความเร็วของการไหลของน้ำที่ผ่านระบบไม่ควรเกิน 8.6 m/d (Reed et al., 1988)

7.1.3 การออกแบบความลึกของบ่อ ในระบบบึงประดิษฐ์แบบนํ้าไหลได้ผิวดินความลึกของบ่อถูกควบคุมโดยชนิดของพืชที่ใช้ในระบบเพื่อให้สอดคล้องกันระหว่างความสูงของน้ำกับปริมาณออกซิเจนที่รากพืชใช้ในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าที่แนะนำในการออกแบบความลึกของบ่อสำหรับระบบบึงประดิษฐ์แบบนํ้าไหลได้ผิวดิน

ชนิดของพืช	ความลึกของบ่อ, cm
กกสามเหลี่ยม	76
อ้อ	60
ธูปฤาษี	30

ที่มา: Reed et al. (1988)

7.1.4 การออกแบบขนาดของบ่อ เมื่อรู้ข้อมูลหน้าตัดของบ่อ (A_c) และความลึกของบ่อจากการคำนวณข้างต้นแล้ว สามารถคำนวณความกว้างของบ่อจากสมการที่ 10) ได้ดังนี้ (Metcalf and Eddy, 1991)

$$W = \frac{A_c}{D} \quad 10)$$

เมื่อกำหนดความกว้างของบ่อแล้วก็นำค่าความลึกของบ่อ (d) และความกว้างของบ่อ (W) ไปคำนวณหาความยาวของบ่อ (L) จากสมการที่ 8) ก็จะได้ขนาด กว้าง ยาว สูง ของบ่อ

8. สาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้องกับระบบบึงประดิษฐ์

8.1 น้ำชะมูลฝอย

วรากร (2543) ศึกษาการทำงานของระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface flow) ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่ออกจากระบบบำบัดก่อนระบายทิ้งเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของแบบจำลอง 3 ชุด โดยทุกชุดการทดลองจะบรรจุตัวกลางทรายขนาด 1-3 mm ชุดการทดลองที่ 1 เป็นระบบควบคุมไม่ปลูกพืช ชุดการทดลองที่ 2 ปลูกธูปฤาษี (*Typha angustifolia*) และการทดลองที่ 3 ปลูกเหงือกปลาหมอ แต่ละชุดการทดลองมีระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ 3, 5 และ 10 d ที่ภาระปริมาณน้ำ 3.9, 2.2 และ 1.1 cm/d ตามลำดับ ป้อนน้ำเสียที่มีค่าซีโอดี ประมาณ 500 mg/L พบว่าธูปฤาษีมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าที่ภาระปริมาณน้ำ 1.1 cm/d โดยกำจัดซีโอดีร้อยละ 68 ของแฉ่งแขวนลอยร้อยละ 92 ไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 89 และสิร้อยละ 65

Bulc et al. (1997) ศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินโดยใช้พื้นที่รวม 450 m² ปลูกต้นอ้อ (*Phragmites australis*) น้ำชะมูลฝอยทำการทดลองมีความเข้มข้นของซีโอดี 1,264 mg/L บีโอดี 60 mg/L แอมโมเนียไนโตรเจน 88 mg/L ของแฉ่งแขวนลอย 400 mg/L และเหล็ก 10 mg/L ปล่อยเข้าระบบบึงประดิษฐ์ที่ภาระปริมาณน้ำ 3 cm/d พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 68 บีโอดีร้อยละ 46 แอมโมเนียไนโตรเจนร้อยละ 81 เหล็กร้อยละ 80 และแบคทีเรียร้อยละ 85

จากการศึกษาดังกล่าวในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบบึงประดิษฐ์พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณสารอินทรีย์มีค่าประมาณร้อยละ 46-68 และสีประมาณร้อยละ 65 ถือว่าประสิทธิภาพในการกำจัดยังไม่ดีเท่าที่ควรเพราะออกซิเจนในระบบเกิดขึ้นน้อย และสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบเป็นชนิดที่ย่อยสลายยากด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์เป็นไปได้ไม่ดี แต่สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอย ในโตรเจน และแบคทีเรียได้ประมาณร้อยละ 81-92 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ส่วนค่าการระปรมาณน้ำตั้งแต่ 1.1-3.9 cm/d พบว่าที่การระปรมาณน้ำที่น้อยจะให้ผลในการบำบัดดีกว่าและระยะเวลาเก็บกักที่นานกว่าก็จะให้ผลในการบำบัดสูงกว่าด้วย

8.2 น้ำเสียจากสิ่งปฏิกูล

Jittawattanasarat (1998) ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากตะกอนบ่อเกรอะด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวดิ่งโดยรูปถ่ายั ทำการปล่อยน้ำแบบครั้งคราวด้วยอัตราภาระบรรทุกของแข็ง (SLR) ในช่วง 80-250 kg TS/ m² yr ทดลองเป็นระยะเวลา 8 เดือน และในการทดลองไม่สนใจประสิทธิภาพในการกำจัด TS, SS, NH₃-N และ TCOD แต่ที่อัตราภาระบรรทุกของแข็ง SLR สูง ๆ จะมีประสิทธิภาพในการลด NH₃-N ได้เพราะเกิดสภาวะ Anoxic ในการกำจัด NH₃-N และ TKN จะเริ่มให้ผลที่ระยะเวลา 2 วันหลังจากมีการไหลซึม แต่ถ้าต้องการกำจัดไนโตรเจนได้ทั้งหมดจะได้ผลที่ระยะเวลา 6 วันหลังจากมีการไหลซึม ระบบนี้ลดปริมาตรตะกอนได้ร้อยละ 96-99 ซึ่งเหลือปริมาณตะกอนประมาณร้อยละ 38-52 ของของแข็งที่ปล่อยเข้าไป ค่าที่ได้จากผลการทดลองที่เหมาะสมควรใช้ SLR ประมาณ 250 kg TS/m² yr ความถี่ในการปล่อยน้ำเข้าระบบประมาณ 1 ครั้ง/สัปดาห์ และมีระยะเวลาในการไหลซึมประมาณ 6 วัน

Limsuwan (1997) ศึกษาค่าที่เหมาะสมในระบบการแยกน้ำออกจากตะกอนบ่อเกรอะในระบบน้ำไหลลงในแนวดิ่งด้วยรูปถ่ายั เปรียบเทียบกับลานตากตะกอน ผลการทดลองพบว่าที่อัตราภาระบรรทุก 80-125 kg TS/m² yr ที่ช่วงระยะเวลา 1 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพในการกำจัด TSS, TCOD, BOD₅, fecal coliforms และ Bacteria สูงกว่าร้อยละ 96 ผลในการแยกน้ำออกจากบ่อเกรอะ เกิดขึ้นได้ดี และที่อัตราภาระบรรทุก 40 kg TS/m² yr พืชจะเจริญเติบโตได้ไม่ดี ขณะที่อัตราภาระบรรทุก 250 kg TS/m² yr สามารถแยกตะกอนและกำจัดตะกอนจาก บ่อเกรอะได้ดี การปล่อยน้ำที่ 2 ครั้ง/สัปดาห์ รูปถ่ายัเจริญเติบโตได้ดีกว่า 1 ครั้ง/สัปดาห์ คุณภาพการไหลซึมของระบบบึงประดิษฐ์ดีกว่าระบบลานตากตะกอนแต่ตะกอนที่เกิดจากลานตากจะมีประสิทธิภาพมากกว่า

Pinisakul (1997) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลลงในแนวดิ่งโดยใช้ธูปฤาษี (*Typha latifolia*) โดยเปรียบเทียบกับลานตากตะกอน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนสูงสุดร้อยละ 92-99 ที่อัตราการระบวรทุกประมาณ 80-125 kg TS/m² yr การสะสมตะกอนในชั้นตัวกลางให้ผลในการกำจัด TKN และการเจริญเติบโตของพืชได้ดี และจากการทำสมดุลมวลของไนโตรเจนพบว่าประมาณร้อยละ 9-30 ของไนโตรเจนที่ป้อนเข้าระบบไหลซึมจะเกิดการกรองและสะสมในดินประมาณร้อยละ 40-80 จะอยู่ในรูปของตะกอนแห้งประมาณร้อยละ 0.01-0.16 พืชจะทำการดูดซับ ส่วนที่เหลือประมาณร้อยละ 10-45 ถูกกำจัดโดยกระบวนการอื่น ๆ เช่นการดูดซับ การระเหยที่เกิดขึ้นในซากพืช และการเกิดปฏิกิริยาไนตริ-ดีไนตริฟิเคชัน และพบว่าเกิดไนเตรทขึ้นในชั้นของตัวกลาง แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในชั้นนี้ด้วย

จากการศึกษาการบำบัดตะกอนจากบ่อเกรอะด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวดิ่งด้วยธูปฤาษี จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนสูงถึงร้อยละ 92-99 ที่อัตราการระบวรทุก 80-250 kg TS/m² yr และมีประสิทธิภาพในการกำจัด TSS, TCOD, BOD₅, fecal coliforms และ Bacteria สูงกว่าร้อยละ 96 ระยะเวลาในการไหลซึมจะอยู่ช่วงประมาณ 7 วัน แต่ธูปฤาษีจะเจริญเติบโตได้ดีที่ระยะเวลาการไหลซึมประมาณ 3 วัน หรือมีการปล่อยน้ำเข้าระบบ 2 ครั้ง/สัปดาห์ และจากการทดลองด้วยระบบนี้ยังพบว่าเกิดไนเตรทขึ้นบริเวณชั้นของตัวกลางแสดงว่าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลในแนวดิ่งเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีกว่าปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

8.3 น้ำเสียจากสุกร

เกียรติศักดิ์ (2546) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนด้วยระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งแบบไหลขึ้นตามด้วยแบบไหลลง ซึ่งตัวกลางที่ใช้เป็นกรวดหยาบและทราย โดยบ่อที่มีน้ำไหลขึ้นปลูกต้นธูปฤาษี ส่วนบ่อที่มีน้ำไหลลงปลูกด้วยต้นกกกรังกา ที่อัตราการระบวรทุกปริมาณน้ำ 5, 10, 15 และ 20 cm/d โดยป้อนน้ำเสียเข้าระบบแบบต่อเนื่องและมีการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบร้อยละ 100 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนสูงสุดที่อัตราการระบวรปริมาณน้ำ 5 cm/d มีค่าประมาณร้อยละ 63.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีประมาณร้อยละ 74 และพบว่าเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในบ่อที่มีน้ำไหลขึ้น เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในบ่อที่มีน้ำไหลลง ส่วนการสะสมไนโตรเจนของบ่อที่มีน้ำไหลขึ้นซึ่งปลูกธูปฤาษีสามารถสะสมไนโตรเจนได้ร้อยละ 0.5-

3.8 และในบ่อที่มีน้ำไหลลงซึ่งปลูกกกทรงกามีการสะสมไนโตรเจนได้ร้อยละ 0.4-3.7 และอัตราภาระบรรทุกปริมาณน้ำไม่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสรวมและของแข็งแขวนลอย

อุไรวรรณ (2545) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยระบบไร้ออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานด้วยรูปถ่ายและกกสามเหลี่ยม โดยจำลองระบบที่มีการไหลของน้ำได้ผิวดินในแนวนอนซึ่งปลูกรูปถ่าย และแนวดิ่งซึ่งปลูกกกสามเหลี่ยมต่อเนื่องกัน กำหนดอัตราภาระบรรทุกปริมาณน้ำที่ 3.2, 6.4 และ 12.8 cm/d โดยปล่อยน้ำเสียเข้าระบบแบบครั้งคราวคือสูบน้ำเข้าระบบ 4 hr และหยุด 4 hr และมีการหมุนเวียนน้ำด้วยอัตราส่วน 1:1 พบว่าอัตราภาระบรรทุกปริมาณน้ำ 3.2 cm/d ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุดที่สุด กำจัดไนโตรเจนรวมได้ประมาณร้อยละ 85-92 สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ฟอสฟอรัสและฟิโคลโคลิฟอร์มแบคทีเรียกำจัดได้ประมาณร้อยละ 93-99 และพบว่ารูปถ่ายมีการสะสมไนโตรเจนดีกว่ากกสามเหลี่ยม

กัญญาดา (2544) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียมูลสุกรโดยบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลได้ผิวดินในแนวดิ่งซึ่งปลูกด้วยกกทรงก้า และการกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอน ทำการสูบน้ำเสียเข้าระบบแบบครั้งคราวคือสูบน้ำเสียเข้าระบบ 4 hr และหยุด 4 hr ที่อัตราการไหลของน้ำ 4.5 L/hr และเปลี่ยนอัตราการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบที่ร้อยละ 0, 50, 100 และ 200 เพื่อหาอัตราการหมุนเวียนที่สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ดีที่สุด พบว่าเมื่อมีการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบร้อยละ 100 สามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ดี มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนประมาณร้อยละ 93 ที่ภาระบรรทุกปริมาณน้ำ 7.5 cm/d และพบว่าระบบที่มีการไหลในแนวดิ่งจะเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและสามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 97.5 ส่วนระบบถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนจะลดซีโอดีได้เพิ่มขึ้น และเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันซึ่งสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ ร้อยละ 80.3

ศุวศา (2544) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานที่ประกอบด้วยระบบการไหลของน้ำผิวดินในแนวดิ่งรวมกับการไหลของน้ำใต้ผิวดินในแนวนอน โดยทำการเปรียบเทียบพืช 2 ชนิด คือ รูปถ่ายและกกสามเหลี่ยม และใช้แบบจำลอง 2 แบบคือ แบบแรกมีการไหลของน้ำใต้ผิวดินในแนวดิ่งอยู่บนส่วนของการไหลในแนวนอนซึ่งเป็นถังกรองทรายแบบที่สองเป็นสองถังต่อแบบอนุกรมกัน ซึ่งตัวกลางที่ใช้เป็นกรวดและทรายหยาบ โดยในระบบแบบสองถังนี้ ถังแรกจะมีการไหลของน้ำใต้ผิวดินในแนวนอนต่อกับถังที่สองซึ่งมีการไหลของน้ำ

ได้ผิวดินในแนวตั้ง และปลูกธูปฤาษี กับกกสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกัน กำหนดให้มีภาระบรรทุก ปริมาณน้ำที่ 3, 6 และ 12 cm/d พร้อมกับมีการหมุนเวียนน้ำในอัตราส่วน 1:1 เหมือนกันทั้ง 2 แบบ จากผลการทดลองพบว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีในส่วนที่มีการไหลของน้ำในแนวตั้ง และเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ดีในส่วนที่มีการไหลของน้ำในแนวนอน ซึ่งทั้ง 2 ระบบมี ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนใกล้เคียงกัน โดยประสิทธิภาพสูงสุดเกิดที่ภาระบรรทุกทางชล ศาสตร์ที่ 3 cm/d ซึ่งกำจัดไนโตรเจนได้ประมาณร้อยละ 76-98 กำจัดซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอย เชื้อโรคและฟอสฟอรัสรวมได้ประมาณร้อยละ 93-99 ส่วนการสะสมไนโตรเจนของพืช พบว่าธูปฤาษีมีการสะสมไนโตรเจนได้ดีกว่ากกสามเหลี่ยม และพืชมีการนำไนโตรเจนไปใช้น้อย มากเมื่อเทียบกับกลไกอื่น ๆ ในระบบจำลองแบบที่ 1 มีการสะสมไนโตรเจนในธูปฤาษีและกก สามเหลี่ยมที่ 3 และร้อยละ 4 ตามลำดับ ส่วนในระบบจำลองแบบที่ 2 มีการสะสมไนโตรเจนใน ธูปฤาษีและกกสามเหลี่ยมที่ร้อยละ 6 และ 3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้ง 2 ระบบพบว่าระบบแบบที่ 1 มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าระบบแบบที่ 2 เล็กน้อย และระบบ แบบที่ 1 ยังสามารถสร้างได้ในพื้นที่จำกัดแต่การดูแลรักษายุ่งยากกว่าเนื่องจากเป็นสองถังซ้อนกัน

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสุกรด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลได้ผิวดิน ดังกล่าวพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกทุกปริมาณน้ำที่ต่ำๆ ประมาณ 3 cm/d จะให้ประสิทธิภาพในการ บำบัดดีกว่าอัตราภาระบรรทุกทุกปริมาณน้ำที่ค่าสูงๆ และพบว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำ ได้ผิวดินในแนวตั้งจะเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันดีกว่า ส่วนการไหลของน้ำได้ผิวดินในแนวนอนจะ เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ดี จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ปฏิกิริยาทำให้ระบบบึงประดิษฐ์มี ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนได้ดี ส่วนการกำจัดซีโอดีและบีโอดีจะมีประสิทธิภาพในการ กำจัดเกิดขึ้นได้ดีเช่นเดียวกันเพราะน้ำเสียจากฟาร์มสุกรส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ ในการกำจัดไนโตรเจนเพื่อจะให้ได้ผลดียิ่งขึ้นควรมีการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าระบบบำบัดอีกครั้ง ส่วนพืชที่ใช้ปลูกในระบบบึงประดิษฐ์จะพบว่าธูปฤาษีมีการสะสมของไนโตรเจนสูงกว่ากกและใน ระบบการไหลของน้ำในแนวนอนจะเกิดการสะสมไนโตรเจนได้ดีกว่าการไหลในแนวตั้ง

8.4 น้ำเสียชุมชน

Kottatep (1999) ศึกษาความเหมาะสมของช่วงอายุพืชในการกำจัดไนโตรเจนด้วย ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินด้วยธูปฤาษีในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น จากการทดลองที่ ระยะเวลาในการเก็บกัก 9.8 d พบว่า ระบบที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวพืชที่นานขึ้นจะมี

ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนดี และจากการวิเคราะห์สมมูลมวลของไนโตรเจนพบว่ากลไกการบำบัดไนโตรเจนส่วนใหญ่จะเกิดจากการดูดซับด้วยพืชและการเกิดปฏิกิริยาไนตริ-ดีไนตริฟิเคชันประมาณร้อยละ 43 และ 47 ตามลำดับ ขณะที่การดูดซับไนโตรเจน การระเหยของแอมโมเนีย และการนำไปใช้โดยจุลินทรีย์ มีผลน้อยมากต่อการกำจัดไนโตรเจน ผลจากการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกัก 9.8 d และมีช่วงระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่ 8 สัปดาห์ พบว่าไนโตรเจนถูกดูดซับด้วยพืชในปริมาณที่สูงถึง 7.5 kg/(ha d) และกำจัดที่เคเอ็นได้ประมาณร้อยละ 97 ส่วนช่วงระยะเวลาเก็บเกี่ยว 2 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์การดูดซับไนโตรเจนด้วยพืชจะเกิดขึ้นได้น้อย และระยะเวลาการเก็บเกี่ยวของพืชไม่มีผลในการกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอย

Khatiwada (1999) ศึกษาปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อโรคในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินสำหรับการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่า การกำจัดสารอินทรีย์และแบคทีเรียจะเกิดการสร้างไบโอฟิล์มขึ้นบริเวณผิวของตัวกลาง และด้วยเหตุนี้ จะเกิดการย่อยสลายขึ้นในชั้นของไบโอฟิล์ม ซึ่งตัวกลางที่พิจารณาครั้งนี้มี 2 แบบ คือ ตัวกลางที่เป็นแผ่นและตัวกลางที่เป็นทรงกระบอก การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีจะใช้สมการ First-order ในการพิจารณา โดยให้ค่า Rate-coefficient มีค่าประมาณ 0.42 d^{-1} หรือ 44 m/yr ส่วนกลไกในการกำจัดเชื้อโรคและแบคทีเรียอธิบายโดยใช้สมการ First-order ร่วมกับอุณหภูมิ แสงแดดและการซึมผ่านตัวกลาง อัตราสัมประสิทธิ์ในการกำจัดเชื้อโรคและแบคทีเรียในสมการ First-order มีค่าประมาณ 1.61 d^{-1} หรือ 168 m/yr และ 0.91 d^{-1} หรือ 95 m/yr ตามลำดับ

Pholkerd (1997) ศึกษาการกำจัดแบคทีเรียในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินด้วยธูปฤาษี ผลการทดลองที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 50 kg COD/(ha d) และระยะเวลาเก็บกักตั้งแต่ 0.5-5 d สามารถกำจัดแบคทีเรียได้ร้อยละ 57-94 ขณะที่การกำจัด Fecal Coliform และ Fecal Streptococci ประมาณร้อยละ 60-97 และภายใต้สภาวะนี้สามารถกำจัดบีโอดีได้ร้อยละ 47-74 กำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 33-60 และกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 71-96 ส่วนค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสรวมกำจัดได้เพียงร้อยละ 25-65 และ 16-34 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรีย Fecal Coliform และ Fecal Streptococci ที่ระยะเวลาหลังเก็บเกี่ยวพืชจะดีกว่าช่วงเวลาก่อนการเก็บเกี่ยวพืชเพราะระยะเวลาหลังเก็บเกี่ยวพืชตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์จะถูกแสงแดดมากกว่า

Maw (1996) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน โดยปัจจัยที่ทำการศึกษานี้คือ ระยะเวลาเก็บกัก พีเอช และการเก็บเกี่ยวพืชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส พบว่าฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดในกระบวนการตกตะกอนของของแข็ง และมีการตกตะกอนทางเคมีเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 97 ที่ระยะเวลาเก็บกัก 9 d ขณะที่ระยะเวลาเก็บกักที่ 5, 3 และ 1 d ให้ผลในการกำจัดที่คล้ายกันคือร้อยละ 92, 80 และ 68 ตามลำดับ ในช่วงพีเอช 4-9.5 จะไม่มีผลในการกำจัดฟอสฟอรัส ความถี่ในการเก็บเกี่ยวพืชที่ 1 ครั้งทุก 2 สัปดาห์ จะไม่มีผลในการกำจัดฟอสฟอรัสเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเก็บเกี่ยวพืช จากการวิเคราะห์สมดุลมวลในตัวกลางของระบบบึงประดิษฐ์พบว่าพืชสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 90

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน พบว่า สารอินทรีย์และแบคทีเรียจะถูกกำจัดในชั้นที่เป็นไบโอฟิล์ม ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณผิวของตัวกลางต่าง ๆ และถ้าต้องการจะกำจัดแบคทีเรียในระบบบึงประดิษฐ์ควรจะมีการเก็บเกี่ยวพืชจึงจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดี และการกำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิดในดินหรือตะกอนของของแข็ง ส่วนค่าของพีเอชจะไม่มีผลในการกำจัดฟอสฟอรัส และการกำจัดไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินจะเกิดจากการดูดซับด้วยพืชและเกิดจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชันเป็นส่วนใหญ่ โดยระบบที่มีช่วงระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวพืชประมาณ 8 สัปดาห์ พืชจะสามารถดูดซับไนโตรเจนได้ดีและที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่น้อยหรือมากกว่านี้การดูดซับไนโตรเจนด้วยพืชจะเกิดขึ้นได้ไม่ดี

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบผลการทดลองระบบบึงประดิษฐ์ในประเทศไทย

Author	Wastewater	HRT (d)	Size	System	Loading Rate ^a HLR ^b	Plants	% Removal						
							TN	TP	BOD	COD	SS	color	patho
วรากร, 2543	leachate	10 d	0.3 x 0.68 x 0.35 m.	HSF	1.1 cm./d. ^b	cattail	89	—	—	68	92	65	—
เกียรติศักดิ์, 2546	swine		1.2 x 1.2 x 1.0 m.	up&down	5 cm./d. ^b	cattail,bulrush	63.7	—	—	74	—	—	—
อุไรวรรณ, 2545	swine		1.5 x 2.5 x 0.75 m.	Hybrid	3.2 cm./d. ^b	cattail,bulrush	85-92	93-99	93-100	93-100	93-100	—	93-99
ภิญญาดา, 2544	swine		1.2 x 1.2 x 1.2 m.	Hybrid	7.5 cm./d. ^b	bulrush	93	—	—	97.5	—	—	—
สุวศา, 2544	swine		1.5 x 2.5 x 0.75 m.	Hybrid	3 cm./d. ^b	cattail,bulrush	76-82	93-99	93-100	93-100	93-100	—	93-99
Jittawattarat, 1998	septage	6 d		VSF	250 kg Solid/ m ² • yr ^a	cattail							
Limsuwan, 1997	septage	7 d	2 x 2 x 1.2 m.	VSF	80-125 kg Solid/ m ² • yr ^a	cattail	—	—	>96	>96	>96	—	>96
Pinisakul, 1997	septage			VSF	80-120 kg Solid/ m ² • yr ^a	cattail	92-99	—	—	—	—	—	—
Pholkerd, 1997		0.5-5 d	1 x 10 x 0.65 m.	FWS	50 kg COD/ ha • d. ^a	cattail	25-65	16-34	47-74	33-60	71-96	—	57-97
Maw, 1996	municipal	9 d	0.5 x 1.65 x 0.75 m.	FWS			—	97	—	—	—	—	—
Mattaraj, 1995	municipal	1.5-10	1 x 10 x 0.7 m.	FWS	50-200 kg COD/ ha • d. ^a	cattail	81-87	38	>90	71-86	81-87	—	>90
Kottatep, 1999	municipal	9.8 d	1 x 10 x 0.5 m.	FWS		cattail	97						

หมายเหตุ: ^a Organic Loading Rate (kg/ d)
^b Hydraulic Loading Rate (cm/d)

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบผลการทดลองระบบบึงประดิษฐ์ในต่างประเทศ

Author	Wastewater	HRT (d)	Size	System	Loading Rate ^a HLR ^b	Plants	% Removal						
							TN	TP	BOD	COD	SS	color	patho
Abira et al.,2003	Papermill	5-10 d.	0.091 m ² x 0.41	VSF	2.67-5.33 cm./d. ^b	Catt.,Cyp.,Prag.	—	—	—	10-65	44-86	—	—
Baley et al. , 2003	municipal	3.7-10.5 d	1.6 x 5.5 x 0.5m. m.	Hybrid	2.2-10 cm./d. ^b	Phragmites	58,(60)	—	97	—	—	—	—
Billore et al., 1999	municipal		4.57 x 9.14 x 0.85 m.	HSF	13.55 m ³ /d. ^b	Cattail, Phrag.	59.4,(78.6	58.3	65.1	—	77.8	—	—
Bulcet al., 1997	leachate		10 x 21 x 0.9 m.	HSF	1.5-4.5 cm./d. ^b	Phragmites	(81)	—	46	68	—	—	85
De Feo et al., 2005	leachate		Ø0.3 x 0.7 m.	VSF	2.86 cm./d. ^b	Phragmites	(40-48)	—	—	42-61	—	—	—
Kaseva, 2004	municipal	2.5 d.	1.4 x 4.2 x 0.6 m.	HSF		Phragmites	11.2-25.2	—	—	56.3-60.7	—	—	43-72
Lee et al., 2004	swine	4.3-14.7 d.	2.6 x 9.5 x 0.65 m.	HSF		Hyacinth	10-24	47-59	—	77-84	96-99	—	—
Yirong, 2005	Seafood	5-15 d.	0.3 x 1.2 x 0.7 m.	FWS		Cattail	41-52	—	—	—	—	—	—

หมายเหตุ: ^a Organic Loading Rate (kg/ d)

^b Hydraulic Loading Rate (cm/d)

 () % Removal NH₃-N