บทที่ 2
ทฤษฎีและสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ระบบบึงประดิษฐ์ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบอาศัยธรรมชาติที่กำลังได้รับการพัฒนาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากการก่อสร้างและออกแบบไม่ซับซ้อน อีกทั้งการดูแลระบบไม่ต้องอาศัยเทคโนโลยีมากนัก และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อย นอกจากนี้ระบบบึงประดิษฐ์ ยังเป็นระบบที่ได้รับการยอมรับว่าเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดี เพราะเป็นการใช้ธรรมชาติของ ดิน ต้นไม้ น้ำ และจุลินทรีย์ ในการบำบัดน้ำเสีย

บึงประดิษฐ์เป็นการสร้างเลียนแบบบึงธรรมชาติ ถูกสร้างขึ้นโดยมีคันขอบดินสูงประมาณ 1 ม. โดยพื้นที่ก้นบึงปรับให้ได้ระดับเสมอกันเพื่อขังน้ำ ดินพื้นควรมีคุณสมบัติที่ให้พืชน้ำยึดเกาะได้ดี เมื่อก่อสร้างงานดินเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำพืชน้ำมาปลูก ซึ่งจะมีทั้งพืชที่มีรากเกาะดิน เช่น ธูปฤาษี บัว กก อ้อ ฯลฯ พืชที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น จอก แหน ผักตบชวา และพืชที่ลอยอยู่ในน้ำ เช่น สาหร่าย เป็นต้น

บึงประดิษฐ์ถูกนำมาใช้เป็นระบบในการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป พบว่าสามารถกำจัดมลสารต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในระบบนี้มลสารถูกกำจัดโดยกระบวนการทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ รวมไปถึงกระบวนการตกตะกอน การดูดซับกับอนุภาคของดิน การนำไปใช้โดยพืชและการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ ข้อดีของบึงประดิษฐ์ ในการบำบัดน้ำเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดอื่นๆ มีดังต่อไปนี้

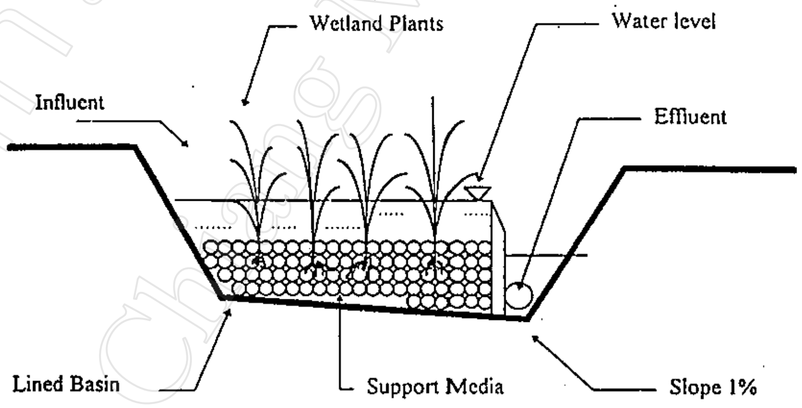
- ค่าก่อสร้าง โดยเฉพาะค่าบำรุงรักษาต่ำ
- ใช้พลังงานน้อย
- ใช้เทคโนโลยีน้อย ไม่จำเป็นต้องใช้บุคลากรผู้ชำนาญงานในการดำเนินการและเดินระบบ
- ระบบมีความยืดหยุ่นสูงเมื่อถูกกระทบกระเทือนจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราภาระบรรทุกต่างๆ
- สามารถควบคุมสิ่งแวดล้อมต่างๆ ของบึงได้

Metcalf และ Eddy (1991) แบ่งระบบบึงประดิษฐ์ออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.1 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน (Free Water Surface System, FWS)

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดินนี้ประกอบไปด้วย บ่อดินที่น้ำไหลซึมลงดินได้น้อย จะมีอยู่หลายบ่อวางเรียงขนานกัน มีระดับน้ำลึกประมาณ 10-60 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในการปล่อยน้ำเสียเข้าระบบควรปล่อยให้ไหลลงอย่างช้าๆ ผ่านก้าน ลำต้นพืช และรากพืชต่างๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักที่ทำการบำบัดน้ำเสียของระบบนี้ การเติมอากาศในระบบมาจากพืช ลมพัด และการสังเคราะห์แสง ระบบนี้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ค่าภาระบีโอดีค่อนข้างปานกลางซึ่งไม่ควรเกิน 6 ก. ของบีโอดี/(ม.^{2}.วัน) ควรมีเวลาเก็บกักประมาณ 4-15 วัน และมีค่าภาระชลศาสตร์เท่ากับ 0.01-0.05 ม.^{3}/(ม.^{2}.วัน) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

การออกแบบโดยทั่วไปประกอบด้วย บึงที่มีความกว้าง 3-5 ม. และยาวมากกว่า 100 ม. การบำบัดน้ำเสียจะเป็นไปในลักษณะตามยาว ปลูกด้วยพืชที่มีรากเกาะดิน มีส่วนที่โผล่พ้นผิวน้ำ การบำบัดน้ำเสียเกิดจากส่วนของต้นพืชที่จมอยู่ในน้ำ และซากพืชที่ทับถมที่ผิวหน้าดินช่วยให้จุลินทรีย์มาจับและเจริญเติบโต แต่ส่วนสำคัญที่ควรคำนึงถึงก็คือ น้ำเสียอาจจะรั่วออกจากทางน้ำ เพราะพื้นดินด้านล่างไม่ได้ปูด้วยวัสดุกันซึม



รูปที่ 2.1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลบนผิวดิน
ที่มา : Sintumongkolchai (1996)

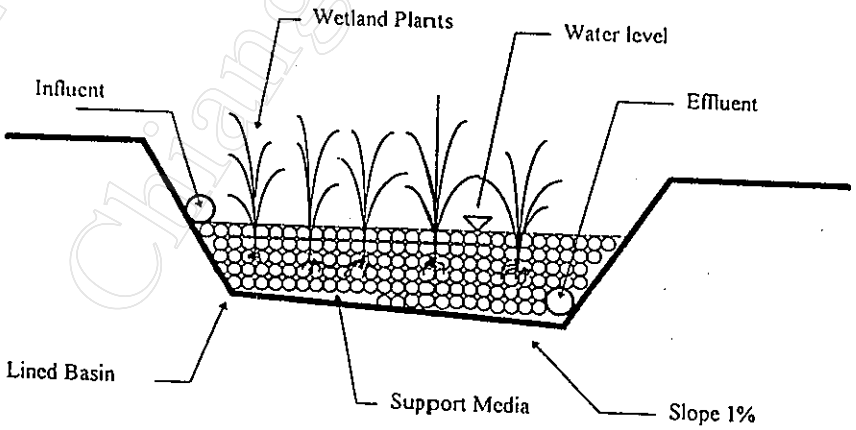
2.2 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน (Subsurface System, SFS)

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินนี้ จะบรรจุชั้นตัวกลางเพื่อให้รากพืชยึดเกาะ ชั้นตัวกลางที่ใช้ได้แก่ หินบด กรวด ทราย และดิน มีความหนาของชั้นตัวกลางประมาณ 60-70 ซม. ด้านล่างดาดด้วยดินเหนียว วัสดุกันซึมอื่นๆ หรือปูด้วยแผ่นโพลีเอธิลลีน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำรั่วซึมไปปนเปื้อนน้ำใต้ดิน ส่วนก้นบึงให้มีความลาดชันประมาณ 1% เพื่อให้น้ำไหลลงโดยไม่มีการกักขังเกิดขึ้น และในบริเวณท้ายน้ำจะมีท่อเพื่อทำหน้าที่รวบรวมและรับน้ำออกจากระบบ น้ำเสียจะถูกบำบัดเมื่อไหลผ่านตัวกลางในสภาพไร้ออกซิเจน และไหลผ่านรากของพืชน้ำที่ปลูก ระบบนี้อาศัยการเติมอากาศด้วยรากพืชเป็นหลัก ซึ่งออกซิเจนจากรากพืชจะช่วยในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ตามรากพืช ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.2.1 การไหลตามแนวนอน

การออกแบบโดยทั่วไปประกอบด้วยแปลงที่ปลูกด้วยต้นพืชโผล่พ้นน้ำ และปูด้านล่างด้วยวัสดุกันซึม เพื่อป้องกันการรั่วซึมไปปนเปื้อนน้ำใต้ดิน ตัวกลางที่ใช้ในระบบอาจเป็นดิน กรวด หรือทราย มีการไหลในแนวนอนจากจุดน้ำเข้า ผ่านชั้นตัวกลางและไหลออกที่จุดน้ำออก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในช่วงที่น้ำเสียไหลผ่านชั้นรากพืชจะเกิดการบำบัดมลสารให้ลดน้อยลงได้



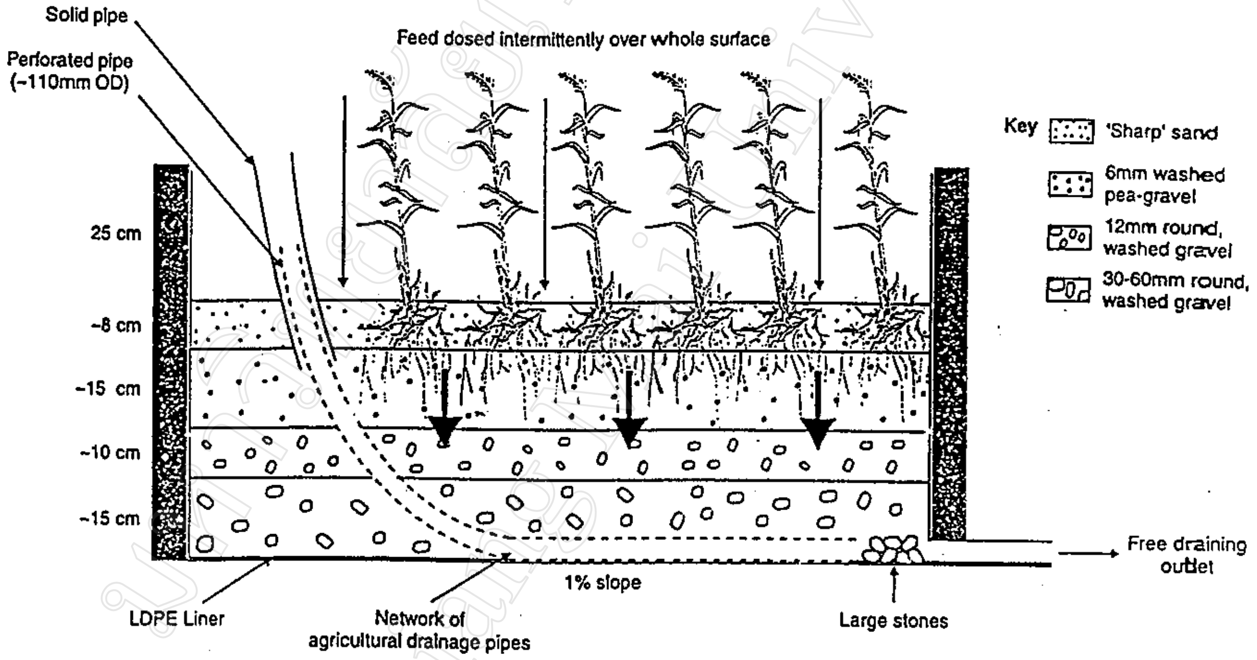
รูปที่ 2.2 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน ที่มีการไหลตามแนวนอน

ที่มา : Sintumongkolchai (1996)

2.2.2 การไหลตามแนวดิ่ง

การออกแบบประกอบไปด้วย แปลงบึงประดิษฐ์ที่ปลูกด้วยต้นพืชโผล่พ้นน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การไหลซึมลงชั้นตัวกลางและการให้น้ำแบบครั้งคราว จะช่วยเพิ่มออกซิเจนให้แก่ดินได้มากกว่าการไหลตามแนวนอนหลายเท่า ในช่วงการให้น้ำเข้าระบบอากาศจะเติมเข้ามายังช่องว่างในดิน จึงเป็นการเพิ่มออกซิเจนให้แก่ดิน ยิ่งไปกว่านั้นการแพร่ของออกซิเจนผ่านดินเพิ่มให้ดีขึ้นได้ในช่วงหยุดการให้น้ำ

การออกแบบและการเดินระบบ เป็นการจัดให้เกิดสภาพมีอากาศ และไม่มีอากาศเกิดขึ้นสลับกันเพื่อไปกระตุ้นให้เกิด ไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) และการดูดซับฟอสฟอรัสตามลำดับ



รูปที่ 2.3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน ที่มีการไหลตามแนวดิ่ง
ที่มา : Cooper et al. (1996)

ปัจจุบันได้มีการศึกษาพัฒนาระบบบึงประดิษฐ์ให้มีความก้าวหน้า และมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จึงเกิดระบบใหม่ที่เรียกว่า "บึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน" ซึ่งมีขีดความสามารถสูงกว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน หรือแนวดิ่งเพียงอย่างเดียว

2.3 บึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน

บึงประดิษฐ์แบบผสมผสานนี้ เป็นระบบบึงประดิษฐ์ที่รวมเอาระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอนและแนวดิ่งเข้าด้วยกัน

จากการศึกษามากว่า 13 ปีในยุโรปแสดงให้เห็นว่า ระบบการไหลในแนวนอนสามารถกำจัดบีโอดีและของแข็งแขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถถ่ายเทออกซิเจนได้ในอัตราที่เพียงพอต่อการเกิดไนตริฟิเคชันได้โดยสมบูรณ์ ส่วนระบบการไหลในแนวดิ่งได้ถูกพัฒนามากว่า 11 ปี เพื่อแก้ไขข้อจำกัดที่เกิดขึ้นกับการไหลในแนวนอน ในการออกแบบสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจนได้เป็นอย่างดี และยังกำจัดบีโอดีได้อีกด้วย แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยต่ำ ในระบบแบบผสมผสานนี้ ช่วยให้จุดแข็งและจุดอ่อนของการไหลในแนวดิ่งและแนวนอนผสมผสานกันจนเกิดความสมดุลย์ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดบีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และของแข็งแขวนลอย ถ้าสามารถเกิดไนตริฟิเคชันได้สมบูรณ์ก็มีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบเพื่อกำจัดไนเตรทโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งสามารถทำได้โดยระบบการไหลในแนวนอนเพราะปริมาณออกซิเจนถูกจำกัด ในระบบนี้จะมีพื้นที่ที่มีสภาพแอนนอกซิกภายในชั้นตัวกลาง ซึ่งสามารถเอื้ออำนวยต่อการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ในปัจจุบันมีผู้ศึกษาระบบนี้แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของ Johansen และ Brix (1996) และกลุ่มของ Cooper และ de Maeseneer (1996) Johansen และ Brix ได้จัดวางระบบให้การไหลในแนวดิ่งต่อจากการไหลในแนวนอน มีขนาด 10 ม.^{2} ต่อสมมูลประชากร เพื่อให้เกิดดีไนตริฟาย (Denitrify) จากนั้นจึงสูบน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจากจุดน้ำออกของระบบการไหลแนวดิ่ง กลับเข้าสู่จุดน้ำเข้าของระบบการไหลในแนวนอน โดยใช้แหล่งคาร์บอนจากภายนอก (นำมาจากระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง) ช่วยเสริมกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ส่วน Cooper และ de Maeseneer (1996) ได้จัดวางระบบการไหลในแนวดิ่งไว้ก่อนการไหลในแนวนอน เนื่องจาก

ก. สามารถทำให้ขนาดของระบบเล็กลง เพราะการไหลในแนวดิ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าในการกำจัดบีโอดีและออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจน

ข. เป็นไปได้ที่จะกำจัดไนเตรทได้ในระบบบำบัดขั้นที่ 3 โดยการไหลในแนวนอนโดยปราศจากการสูบน้ำหมุนเวียนกลับไป

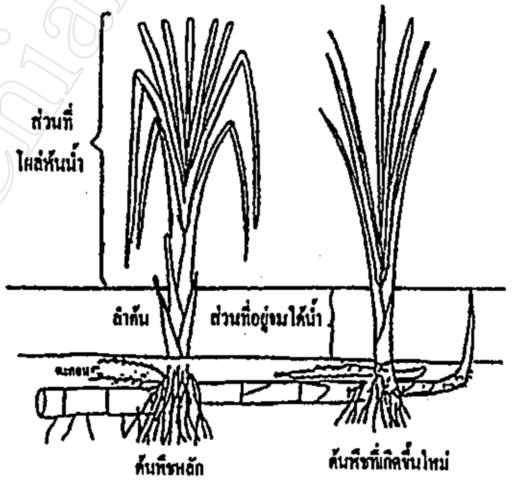
ซึ่งในกรณีนี้แหล่งคาร์บอนที่ใช้สำหรับดีไนตริฟิเคชันเป็นแหล่งคาร์บอนภายในและอัตราในการเกิดดีไนตริฟิเคชันจะช้ากว่าการใช้แหล่งคาร์บอนภายนอก แต่เมื่อมีระยะเวลาเก็บกักนานขึ้นในการไหลแนวนอนก็สามารถเกิดได้ดีเช่นกัน ในปัจจุบันประเทศเยอรมันกำลังศึกษาระบบผสมผสานบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวดิ่ง อยู่บนถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวนอนเพื่อประโยชน์ในการประหยัดพื้นที่ และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้สูงขึ้น

2.4 พืชที่ใช้ในบึงประดิษฐ์

พืชในระบบบึงประดิษฐ์ส่วนใหญ่เป็นพืชโผล่พ้นน้ำ เช่น ธูปฤาษี (Cattail : *Typha*) กก (Bulrush : *Scirpus*) อ้อ (Reed : *Phragmites*) และหญ้าทรงกระเทียม (Sedge : *Carex*) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ2.5 ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง ดังแสดงในตารางที่ 2.1

รากของพืชโผล่พ้นน้ำนั้นเป็นส่วนที่สำคัญต่อระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งเจริญเติบโตอยู่ภายในชั้นดินที่ระดับน้ำต่ำกว่าผิวดิน 50 ซม. อาจถึง 150 ซม. หรือมากกว่า โดยทั่วไปจะสร้างลำต้นและใบให้สัมผัสอากาศ และแผ่ขยายรากและระบบรากพืชภายใต้ชั้นดิน

รูปที่ 2.4 พืชโผล่พ้นน้ำ (Emergent Plant)
ที่มา : Thayalakumaran (1994)



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบหลักของพืชโผล่พ้นน้ำ
ที่มา : Thayalakumaran (1994)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

ตารางที่ 2.1คุณสมบัติของพืชโผล่พ้นน้ำชนิดต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสีย

ชื่อสามัญ (ชื่อวิทยาศาสตร์)	แหล่งที่พบ	อุณหภูมิ °ซ		ระดับความเค็มสูงที่พืชทนได้ (ppt)	พีเอช ที่เหมาะสม
		ที่ต้องการ (Desirable)	ที่ดำรงอยู่ได้ (Survival)		
ธูปฤาษี (*Typha spp.*)	ทั่วโลก	10 - 30	12 - 24	30	4 - 10
อ้อ (*Phragmites communis spp.*)	ทั่วโลก	12 - 33	10 - 30	45	2 - 8
กกกลม (*Juncus spp.*)	ทั่วโลก	16 - 26	-	20	5 - 7.5
กกสามเหลี่ยม (*Scirpus spp.*)	ทั่วโลก	16 - 27	-	20	4 - 9
หญ้าแห้วหมู (*Carex spp.*)	ทั่วโลก	14 -32	-	-	5

หมายเหตุ : ppt (part per thousand)

ที่มา : Reed et al. (1988)

ในระบบบึงประดิษฐ์พืชโผล่พ้นน้ำมีหน้าที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ออกซิเจนถูกถ่ายเทผ่านช่องว่างของใบ และลำต้นไปยังรากและระบบรากพืช โดยการแพร่และโดยการไหลพาของอากาศ ออกซิเจนบางส่วนถูกปลดปล่อยจากระบบรากออกสู่ชั้นรากพืชโดยรอบ ก่อให้เกิดสภาพมีออกซิเจน และช่วยเสริมในการย่อยสลายอินทรีย์สาร รวมถึงการเจริญเติบโตของไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitrifying Bacteria) อัตราการถ่ายเทออกซิเจนของพืชเหล่านี้อยู่ในช่วงประมาณ 5 ถึง 45 ก. ของ O_2/(ม.^{2}.วัน) ของพื้นที่ผิวของบึงประดิษฐ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและระดับความดันของออกซิเจนในดิน การแพร่และการเคลื่อนผ่านของออกซิเจนจากลำต้นและปล่อยออกที่ชั้นรากพืชจะไปเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และเพิ่มอัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน และเพิ่มความสามารถในการตกตะกอนดูดซับฟอสฟอรัส (Cooper และ Boon, 1987)

ตารางที่ 2.2หน้าที่ของพืชโผล่พ้นน้ำในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบบึงประดิษฐ์

ส่วนประกอบของพืช	หน้าที่ในกระบวนการบำบัด
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	• ลดความเข้มของแสง เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน • ป้องกันอิทธิพลจากสภาพอากาศในฤดูหนาว • ลดผลกระทบจากลมต่อผิวน้ำ • ทำให้ระบบมองดูสวยงาม • สะสมสารอาหาร
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	• ลดความเร็วกระแสน้ำ เพิ่มอัตราการตกตะกอน ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ • เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับตัวของไบโอฟิล์ม • กรองตะกอนขนาดใหญ่ • ปลดปล่อยออกซิเจนเพื่อการสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มการย่อยสลายโดยออกซิเจน • ดูดซับสารอาหาร
รากและระบบรากพืชในชั้นตะกอนใต้น้ำ	• ทำให้ผิวตะกอนใต้น้ำอยู่ตัว ถูกกัดเซาะน้อย • ป้องกันตัวกลางอุดตันในระบบการไหลในแนวดิ่ง • ปลดปล่อยออกซิเจนเพื่อการย่อยสลาย และการเกิดไนตริฟิเคชัน • ดูดซับสารอาหาร • ปลดปล่อยแอนติไบโอติก (Antibiotics)

ที่มา : Brix (1997)

2.4.1 การนำสารอาหารไปใช้โดยพืช

อัตราการกำจัดสารอาหารของพืชน้ำนั้นมีบทบาทสำคัญในการกำจัดสารอาหารในระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และองค์ประกอบอื่นๆ ในน้ำเสีย เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ที่กำจัดได้ยาก ฯลฯ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 อัตราการนำสารอาหารไปใช้โดยพืชถูกจำกัดโดยขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของพืช พืชที่ปลูก ความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อของพืชและลักษณะของตะกอนและน้ำเสีย การนำสารอาหารไปใช้โดยพืชโผล่พ้นน้ำมีปริมาณสูงในพืชที่เพิ่งเริ่มทำการบำบัด หรือมีอายุน้อย (มากกว่า 2.5 ก./กก.ของเนื้อเยื่อ) แต่จะน้อยลงเมื่อพืชนั้นใช้งานมานานหรือโตเต็มที่ (Reddy และ Debusk, 1987)

ตารางที่ 2.3ความเข้มข้นและอัตราการดูดซึมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปใช้โดยทั่วไปในพืชโผล่พ้นน้ำ

พืชโผล่พ้นน้ำ	อัตราการดูดซึมในพืช		สารอาหาร ในเนื้อเยื่อพืช		มวล/พื้นที่ กก./เฮกแตร์ (10^3)	ผลผลิตของพืช กก./(เฮกแตร์.ปี) (10^3)
	ไนโตรเจน กก./(เฮกแตร์.ปี)	ฟอสฟอรัส กก./(เฮกแตร์.ปี)	ไนโตรเจน ก./กก.	ฟอสฟอรัส ก./กก.		
ธูปฤาษี	600 - 630	75 - 403	5 - 24	0.54	4.3 - 22.5	8 - 61
กกสามเหลี่ยม	125	18	8 - 27	1 - 3	-	-
อ้อ	225	35	18 - 21	2 - 3	6 - 35	10 - 60

ที่มา : Reddy และ Debusk (1987)

2.4.2 การสูญเสียน้ำจากการคายระเหย

การคายระเหยเป็นการรวมกันของการระเหยจากพื้นผิวน้ำ และน้ำที่สูญเสียจากพืชโผล่พ้นน้ำเอง (Kadlec, 1987) การคายระเหยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ควบคุม เช่น แสงแดด ลม ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิอากาศ (Hammer และ Kadlec, 1983) น้ำที่สูญเสียจากการระเหยในฤดูร้อนจะทำให้ปริมาณน้ำในน้ำเสียที่อยู่ในระบบบึงประดิษฐ์ลดลง และทำให้ความเข้มข้นของสารที่ปนเปื้อนที่ยังคงมีอยู่ในน้ำนั้นมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อปริมาณน้ำลดลงจะทำให้เวลากักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งอาจจะเกิดสภาวะขาดออกซิเจนขึ้นได้ (Reed et al., 1988) ในการแก้ปัญหาการสูญเสียน้ำจากการคายระเหยแต่ยังคงให้ได้อัตราการไหลตามค่าที่ออกแบบไว้ ควรจะนำน้ำที่ออกจากระบบบางส่วนกลับเข้ามาใหม่ในฤดูแล้งที่มีการสูญเสียน้ำเป็นปริมาณมาก (Metcalf และ Eddy, 1991)

2.4.3 การถ่ายเทออกซิเจน

พืชโผล่พ้นน้ำ เช่น กก ธูปฤาษี กกสามเหลี่ยม และต้นอ้อ สามารถดูดซึมออกซิเจนจากบรรยากาศผ่านใบและลำต้นที่อยู่เหนือน้ำไหลลงสู่รากได้ ออกซิเจนจะถูกปลดปล่อยออกจากรากเข้าไปในโซนของรากและสร้างชั้นที่มีออกซิเจน ดังนั้นในโซนของดินจะมีสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจนอยู่ พืชโผล่พ้นน้ำสามารถถ่ายเทออกซิเจนได้ในช่วง 5 ถึง 45 ก.ของO_2/(ม.^{2}.วัน) ของพื้นที่ผิวของบึงประดิษฐ์ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชและระดับออกซิเจนที่มีอยู่ในดิน (Cooper และ Boon, 1987)

2.5 ดิน

สารอาหารที่ต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ส่วนใหญ่จะได้รับมาจากดินยกเว้นคาร์บอน ดินในธรรมชาติที่ธูปฤาษีอยู่จะมีลักษณะเป็นโคลน แต่ส่วนใหญ่แล้วพืชจะเจริญเติบโตในตัวกลาง (Media) ที่แตกต่างกัน ช่องว่างในดินหรือตัวกลางชนิดอื่นจะใช้เป็นช่องทางน้ำไหลแก่ระบบน้ำไหลใต้ผิวดินที่มีการไหลลงสู่เบื้องล่าง ซึ่งจะมีการบำบัดโดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่ที่รากชั้นรากพืช และดินที่อยู่บริเวณโดยรอบ

ดินอาจจะถูกใช้ให้เป็นพื้นของตัวกลางเมื่อต้องการที่จะกำจัดฟอสฟอรัส เนื่องจากการกำจัดฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ชั้นดิน แต่อย่างไรก็ตามดินที่มีศักยภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้สูงจะต้องเป็นดินที่มีเนื้อละเอียด และน้ำสามารถซึมผ่านได้ต่ำถึงปานกลางซึ่งอาจจะเป็นตัวจำกัดความจุทางชลศาสตร์ของดินพื้นส่วนล่างในระบบบึงประดิษฐ์ได้

2.6 จุลินทรีย์

ในระบบบึงประดิษฐ์ จะพบจุลินทรีย์หลายชนิดที่เป็นประโยชน์ เช่น แบคทีเรีย โปรโตซัว ฟังไจ จนถึงสัตว์พวกที่มีกระดูกสันหลัง ในกรณีของพืชโผล่พ้นน้ำในระบบน้ำไหลใต้ผิวดินจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ในส่วนของพืชที่จมอยู่ในน้ำ (ราก และลำต้นที่จมอยู่ใต้น้ำ)ในชั้นตะกอนที่อยู่ด้านล่าง และบนผิวตัวกลาง (Thayalakumaran, 1994)

แบคทีเรียอาจจะดำรงชีวิตอย่างอิสระในน้ำ เช่น Bacterioplankton หรือบางชนิดเกาะอยู่ที่ผิวของส่วนที่จมอยู่ในน้ำหรือใต้ดินของพืชน้ำ เช่น บริเวณราก และส่วนของลำต้นที่จมอยู่ใต้น้ำ ซึ่งเป็นพวก Periphytic Bacteria และชนิดที่เกาะอยู่ที่ผิวตัวกลาง เช่น หิน กรวด ทราย และชั้นตะกอนด้านล่าง ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิด Benthic Bacteria (Rogers et al., 1985)

Periphytic Bacteria ชนิด *Elodea canadensis* ซึ่งเกาะติดอยู่กับพืชน้ำนั้นมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า Planktonic Benthic Bacteria (Fry และ Humphrey, 1978) ส่วนฟังไจชนิดต่างๆ ซึ่งรวมถึงประเภท Saprophytic ที่อาศัยดำรงชีวิตอยู่ในซากพืชที่ตายแล้วและประเภท Parasitic ยังมีส่วนช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปที่คงตัว (Rheinheimer, 1980) พวกที่ดำรงชีวิตอิสระ เช่น Zooplankton Benthic หรือจำพวกไม่มีกระดูกสันหลังที่อาศัยเกาะบริเวณผิวของพืชก็พบในระบบบึงประดิษฐ์เช่นเดียวกับพวก Annelid Worms, Mollusks, Crustaceans, Insect ฯลฯ ซึ่งทั้งสิ่งมีชีวิตที่ไม่มีกระดูกสันหลังและพืชกลายเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญสำหรับพวกมีกระดูกสันหลัง เช่น ปลาเล็กๆ เป็นต้น

ดังนั้นสิ่งมีชีวิตทั้งพวกมีกระดูกสันหลังและไม่มีกระดูกสันหลังจึงมีส่วนสำคัญในการถ่ายเทพลังงาน สารอาหาร และยังช่วยจัดระเบียบห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศน์ของบึงประดิษฐ์อีกด้วย (Rogers et al., 1985)

2.7 กลไกการบำบัด (Treatment Mechanisms)

จากการศึกษาโดยส่วนใหญ่ได้ชี้ให้เห็นว่า บึงประดิษฐ์สามารถกำจัดบีโอดี สารแขวนลอย สารอาหาร โลหะหนัก และเชื้อโรค จากน้ำเสียหลากหลายชนิดได้ในปริมาณสูง กลไกการบำบัดประกอบไปด้วย การตกตะกอน การทำงานของจุลินทรีย์ การดูดซับ การย่อยสลายทางเคมี และการดูดซับของดิน (Rogers et al., 1985)

2.7.1 การกำจัดบีโอดี

บีโอดีเป็นการวัดค่าการดูดซับออกซิเจนของพืชน้ำ ซึ่งเป็นผลของกระบวนการทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ในระบบ ค่าบีโอดีในระดับที่สูงในน้ำเสียเป็นผลให้ออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งน้ำที่รองรับหมดไป

สารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมตัวอยู่ก้นบึงย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่เกาะติดอยู่กับพืชน้ำและที่แขวนลอยอยู่ ออกซิเจนส่วนใหญ่จะได้มาจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายที่มีอยู่จำนวนน้อย เนื่องจากการเติบโตของสาหร่ายถูกจำกัดจากการบดบังแสงแดดของพืชเหนือน้ำ

ในระบบเบื้องล่าง ออกซิเจนจากบรรยากาศจะถูกพืชน้ำดูดซับและแพร่ออกในชั้นรากพืชซึ่งจะมีชั้นรากหนาประมาณ 30 ซม. แต่รากพืชจำพวก กก แฝก จะหยั่งลึกลงถึง 70 ซม.

2.7.2 การกำจัดสารของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอยถูกกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพในระบบบึงประดิษฐ์ เนื่องจากเวลาเก็บกัก (HRT) ที่ยาวนาน ตื้น และมีสภาพที่สงบนิ่ง การตกตะกอนโดยส่วนใหญ่ของของแข็งเกิดขึ้นภายใน 2-3 ม.แรกจากทางน้ำเข้า (Reed et al., 1988) ยิ่งไปกว่านั้น ต้นพืชมีแนวโน้มที่จะทำให้ความเร็วของน้ำเสียที่เข้ามาต่ำลง และช่วยกระจายน้ำเข้าได้ทั่วทั้งระบบ ซึ่งไปช่วยเสริมการตกตะกอนให้ดียิ่งขึ้น (Gray, 1989) พวกคอลลอยด์และของแข็งที่ไม่ตกตะกอนถูกกำจัดอย่างน้อยส่วนหนึ่งโดยการจับติดกับแบคทีเรีย การชนกัน การไหลไปรวมกัน และการดูดติดกับวัสดุอื่นๆ เช่น ลำต้นพืชด้านข้างและก้นร่องดิน (Kessomboon, 1990) การกำจัดของแข็งแขวนลอย และการย่อยสลายมลสาร เป็นผลให้เกิดชั้นของตะกอน (Sludge Layer) สะสมในร่อง (Hammer และ Kadlec, 1983)

2.7.3 การกำจัดไนโตรเจน

การกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียในระบบบึงประดิษฐ์เกิดขึ้นจากกลไกดังต่อไปนี้ (Rogers et al., 1985)

- การนำไนโตรเจนไปใช้โดยพืช และการเก็บเกี่ยวภายหลัง
- การระเหยของแอมโมเนีย
- การดูดซับแอมโมเนีย
- กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน
- กระบวนการไนตริฟิเคชัน

ในระบบบึงประดิษฐ์นั้น แบคทีเรียเป็นตัวการสำคัญในการกำจัดไนโตรเจน ซึ่งมันจะเปลี่ยนรูปจากสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็นสารประกอบอนินทรีย์ และจากรูปแบบหนึ่งของสารประกอบอนินทรีย์ไปเป็นรูปแบบอื่นๆ

แบคทีเรียเปลี่ยนรูป NH_4^+ ไปเป็น NO_3^- โดยกระบวนการไนตริฟิเคชันนั้นต้องการสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนซึ่งเติมจากผิวน้ำได้ดีหรือสภาพมีออกซิเจนชั้นบางๆ ที่โซนของรากพืชที่ซึ่งปริมาณของออกซิเจนนั้นถูกปลดปล่อยโดยความสามารถในการส่งผ่านก๊าซของพืชโผล่พ้นน้ำ ภายใต้สภาพแอนนอกซิกในกระบวนการเหล่านี้ NO_3^- จะถูกแปรรูปไปเป็น N_2 และปล่อยออกจากระบบบึงประดิษฐ์ ในอีกทางหนึ่งไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์อาจจะสูญไปในรูปของ NH_3 โดยการระเหย (Volatilization) จากผิวน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพที่มีอุณหภูมิและพีเอชสูง ผิวน้ำที่กว้างและตื้นในระบบบึงประดิษฐ์มีส่วนช่วยในการระเหยของแอมโมเนีย (Rogers et al., 1985)

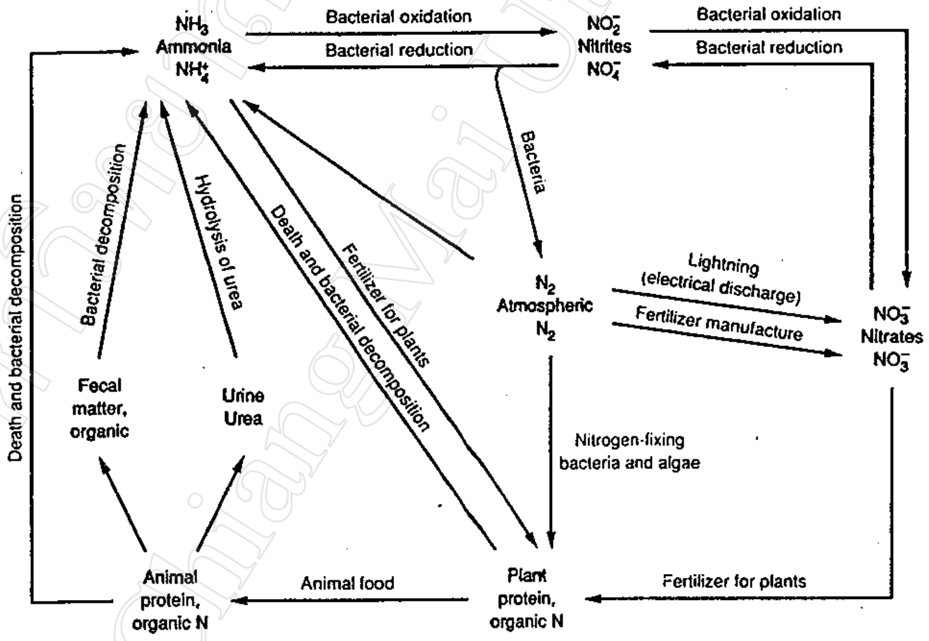
มีรายงานที่ระบุว่าการกำจัดไนโตรเจนอาจสูงถึง 79% ในอัตราภาระไนโตรเจน 44 กก./(เฮกแตร์.วัน) แต่ในบางแห่งก็สามารถกำจัดได้เพียง 10% การกำจัดไนโตรเจนเป็นไปตามกระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน แอมโมเนียจะถูกแปรไปเป็นไนเตรทโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรียในส่วนที่มีอากาศ แล้วไนเตรทจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนในส่วนที่ไร้อากาศโดยดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย

การบำบัดไนโตรเจนโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับ อัตราภาระชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate) กลไกสำคัญในการบำบัดไนโตรเจน ขึ้นอยู่กับรูปแบบของไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำเสียนั้นๆ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงปริมาณคาร์บอน อุณหภูมิ ตลอดจนอัตราและระยะเวลาในการปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของกระบวนการที่ลดไนโตรเจน อาจจำแนกได้ 2 ประเภทดังนี้

ก. การเปลี่ยนรูปไนโตรเจน

การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนจะเกิดขึ้นในน้ำเสียที่ไหลผ่านระบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งประกอบไปด้วยการเปลี่ยนรูปจากแอมโมเนียมไปเป็นแอมโมเนีย หรือเปลี่ยนรูปในทิศทางตรงกันข้าม การตรึงไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์ในรูปของแอมโมเนีย ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาที่กล่าวถึงทั้งหมดนี้ ยังสามารถเกิดขึ้นในดินได้ด้วย นอกจากนั้นการแลกเปลี่ยนไอออนของแอมโมเนียม การแปรรูปเป็นฮิวมัสและไนโตรเจนที่ถูกพืชนำไปใช้ ปฏิกิริยาเหล่านี้ก็เป็นการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนที่สำคัญในดิน การเปลี่ยนรูปแบบของไนโตรเจนได้แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนรูปแบบของไนโตรเจน

ที่มา : Metcalf และ Eddy (1991)

ในขณะที่มีปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในน้ำเสียที่ไหลผ่านมากมาย แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนก็ต่ำกว่าในดิน เพราะในน้ำเสียมีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าในดิน นอกจากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้แล้ว ปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่จำกัดการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนก็คือ ระยะเวลาการกักเก็บที่ไม่ยาวนานพอ

ข. การลำเลียงไนโตรเจน

ในการบำบัดไนโตรเจนจากน้ำเสีย จะต้องอาศัยการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนเป็นกระบวนการแรก และจะประกอบไปด้วยการลำเลียงออกจากระบบ ซึ่งต้องอาศัยการลำเลียงไนโตรเจนโดยกระบวนการต่างๆ ดังต่อไปนี้

ข.1 การระเหยของแอมโมเนีย

การระเหยแอมโมเนียสู่บรรยากาศจะช่วยกำจัดแอมโมเนียในรูปของก๊าซ ปฏิกิริยานี้จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช อุณหภูมิ และสัดส่วนของอากาศที่เจือปนในน้ำเสีย แต่โดยส่วนใหญ่แล้ว การลำเลียงไนโตรเจนจากระบบบึงประดิษฐ์จะค่อนข้างต่ำ เพราะค่าพีเอชของน้ำเสียมักจะเป็นกลาง

ข.2 กลไกการบำบัดทางกายภาพ

ไนโตรเจนในส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่มีสภาพเป็นอนุภาคจะถูกบำบัดโดยการตกตะกอนและการกรอง กรณีของไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่ถูกบำบัดโดยการตกตะกอนและการกรอง จะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของอนุภาคมวลสารและความเข้มข้นของไนโตรเจนในอนุภาคมวลสาร นอกจากนี้ยังขึ้นกับอุณหภูมิและความแปรปรวนในการไหลของน้ำเสีย

ถ้าพิจารณากลไกการบำบัดไนโตรเจนโดยแยกเป็นส่วนๆ อาจจำแนกได้ดังนี้

- **การตกตะกอนและการกรอง**

อนุภาคที่ประกอบไปด้วยไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์จะตกลงสู่ผิวของดินหรือชั้นทราย และถูกกรองโดยชั้นทรายร่วมกับระบบรากฝอยของพืชซึ่งสานกันเป็นร่างแหในชั้นทราย

- **การระเหยของแอมโมเนีย**

การระเหยของแอมโมเนียเป็นกลไกรองในการบำบัดไนโตรเจน เพราะเกือบทั้งหมดของปริมาณไนโตรเจนอยู่ในรูปอนินทรีย์สาร ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน นอกจากนี้อัตราการเปลี่ยนสภาวะจากของเหลวเป็นก๊าซแอมโมเนียมยังอยู่ในระดับที่ต่ำ

- การนำไนโตรเจนไปใช้โดยพืช

โดยการใช้เพื่อการสร้างเซลล์ของพืช

- ไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน

ในขณะที่ปล่อยน้ำเสียไหลผ่านระบบบำบัด ไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบในอินทรีย์สารจะถูกตรึงในรูปของแอมโมเนียมโดยการแลกเปลี่ยนไอออน ในขณะเดียวกันสภาพเช่นนี้ไม่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เพราะน้ำเสียที่ปล่อยเข้าระบบจะมีออกซิเจนน้อยและมีแบคทีเรียชนิดไนตริไฟร์ (Nitrifier) น้อย แต่ปฏิกิริยานี้จะเกิดช่วงที่หยุดปล่อยน้ำเสีย

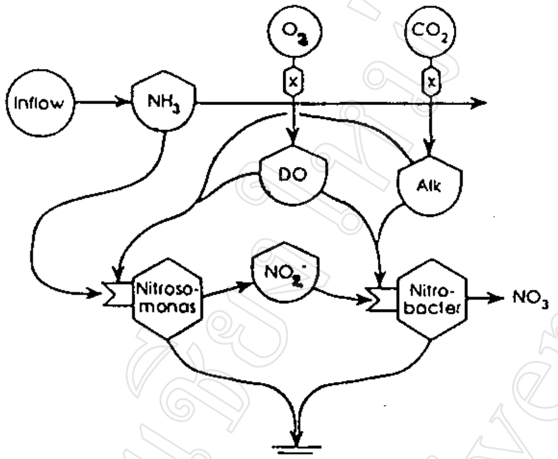
กลไกของระบบไนตริฟิเคชัน แสดงดังสมการที่ (1) และ (2) และรูปที่ 2.7 โดยขั้นแรก Nitrosomonas Bacteria จะเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนให้กลายเป็นไนไตรท์ไนโตรเจน และ Nitrobacter จะเปลี่ยนไนไตรท์ให้เป็นไนเตรท

(Nitrosomonas) $2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+$ (1)

(Nitrobacter) $2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^-$ (2)

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่มีประสิทธิผลมากที่สุดในระบบบำบัดแบบ Land Treatment สำหรับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจะทำการเปลี่ยนไนเตรทไนโตรเจนไปเป็นไนไตรท์ไนโตรเจนและก๊าซไนโตรเจนในที่สุด โดยไนเตรทไนโตรเจนจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน มีสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน สามารถจำแนกปฏิกิริยานี้ได้เป็น 2 ชนิด คือ Substrate Nitrate Denitrification คือ สารอินทรีย์คาร์บอนที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนมาจากแหล่งอื่นที่ไม่ใช่มาจากเซลล์ของจุลินทรีย์ และ Endogenous Nitrate Denitrification กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีคาร์บอนจากแหล่งภายนอก คือ จุลินทรีย์จะใช้แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์ของตน ปฏิกิริยานี้จึงเสมือนว่าเป็นการย่อยตัวเอง

การรักษาสภาพมีอากาศเป็นเหตุผลหนึ่งของการเติมน้ำเสียเป็นครั้งคราว หรือในช่วงไม่ยาวมากนัก เพราะสภาพมีอากาศจะยังคงอยู่ในระหว่างที่ยังไม่มีน้ำเสียไหลผ่าน ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นบริเวณผิวดินเพราะเป็นสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจน และยังเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างช่องว่างของเม็ดดินหรืออนุภาคทรายซึ่งมีออกซิเจนจากรากพืชแทรกอยู่ อันส่งผลให้ไนตริฟายอิงแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ได้ และเมื่อถึงเวลาเติมน้ำเสียครั้งต่อไปแอมโมเนียที่ผ่านมากับน้ำเสียก็จะถูกดูดซับลงสู่ดินและแปรรูปเป็นวัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไป อย่างไรก็ตามการบำบัดน้ำเสียให้ได้ผลดี น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบควรมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากกว่า 3



รูปที่ 2.7 กระบวนการไนตริฟิเคชัน ในระบบบึงประดิษฐ์

ที่มา : Kadlec และ Knight (1996)

การกำจัดไนโตรเจนในรูปของไนเตรท ทำโดยการเปลี่ยนให้เป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาพแอนนอกซิก เป็นสภาพที่ไม่มีออกซิเจนละลายน้ำ แต่สามารถนำออกซิเจนมาใช้จากแหล่งอื่น คือ ไนเตรท ไนไตรท์ หรือแม้กระทั่งซัลเฟต ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า ดีไนตริฟิเคชัน กระบวนการนี้มี 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคือการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นไนไตรท์ ซึ่งในขั้นต่อมาจะผลิตไนตริกออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกมาแล้วปลดปล่อยสู่บรรยากาศ

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \quad (3)$$

ออกซิเจนละลายน้ำเป็นตัวยับยั้งเอนไซม์ของระบบดีไนตริฟิเคชัน ค่าพีเอชที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 7 และ 8 แต่อย่างไรก็ตามค่าความเป็นด่างที่ผลิตออกมาในช่วงที่เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นผลทำให้มีค่าพีเอชสูงขึ้น อุณหภูมิก็มีผลต่อปฏิกิริยาอย่างมากซึ่งไม่ควรมีค่าต่ำกว่า 5^{o}ซ และควรมีอัตราการไหลเข้าระบบต่ำ

2.7.4 การกำจัดฟอสฟอรัส

ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสมีตั้งแต่ 0-90% ส่วนใหญ่การกำจัดเกิดขึ้นที่ชั้นดินในส่วนพื้นบึง ถ้าหากดินมีส่วนผสมของเหล็ก อลูมิเนียมและแคลเซียม ก็จะช่วยส่งเสริมการกำจัดให้ดีขึ้น ส่วนพืชน้ำจะนำฟอสฟอรัสไปใช้ในการสร้างเซลล์ผ่านทางราก เมื่อพืชตายและย่อยสลายจะคายฟอสฟอรัสบางส่วนออกมา ส่วนที่เหลือจะจมอยู่กับซากพืช

2.7.5 การกำจัดเชื้อโรค

มีการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียของระบบบึงประดิษฐ์ที่ชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ในช่วง 86-90% Gersberg et al. (1987) รายงานว่ามีปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำเข้าเป็นจำนวน 6.75 $\times 10^7$ MPN/100 มล. แล้วถูกกำจัดลดลงถึง 99.1% ในน้ำออก

กลไกหลักในการกำจัดเชื้อโรคในระบบบึงประดิษฐ์ คือ การตายตามธรรมชาติ การจับกินกันเอง การตกตะกอน และการดูดซับ พยาธิไส้เดือนและซีสต์ของปาราสิตชนิดอื่นๆ และไข่ของมันจะตกตะกอนลงที่ก้นบึงเนื่องจากระบบบึงประดิษฐ์มีสภาพที่สงบนิ่ง และมีความลึกของน้ำน้อย แบคทีเรียจะถูกดูดซับด้วยอนุภาคที่อยู่ในน้ำ และถูกกำจัดเมื่ออนุภาคนั้นตกตะกอน ยิ่งไปกว่านั้นแบคทีเรียบางส่วนอาจถูกดูดซับบนผิวของพืชน้ำที่ปลูกในระบบบึงประดิษฐ์นั้น

มีการศึกษาอีกมากมายที่กล่าวถึงการกำจัดเชื้อโรคในระบบบึงประดิษฐ์นั้นพบว่าขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อโรค เวลาเก็บกัก และอุณหภูมิ (Reed et al., 1988) Bavor et al. (1987) ได้รายงานว่า การกำจัดแบคทีเรียที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ (Indicator) โดยระบบบึงประดิษฐ์ ที่ใช้เวลาเก็บกัก 3-7 วันนั้นมีความสามารถในการกำจัดเท่าเทียมหรือมากกว่าที่กำจัดด้วยระบบบ่อเติมอากาศแบบธรรมดาซึ่งใช้เวลาเก็บกักที่ยาวนานกว่า

2.7.6 การกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก

สารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก สารประกอบอินทรีย์ที่คงตัว รวมไปถึงเซอร์แฟคแตนท์ (Surfactants) ฟีนอล เบนซิน และยาฆ่าแมลงในการเกษตร ซึ่งเป็นพิษและมีการย่อยสลายทางชีววิทยาได้ช้ามาก วิธีหลักในการกำจัดสารเหล่านี้ในระบบบึงประดิษฐ์ คือ การทำให้เกิดการระเหย การดูดซับ และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Rogers et al., 1985) Polprasert (1989) ได้แสดงเอกสารสนับสนุนว่าสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากใน Aquatic System จะถูกกำจัดโดยการดูดซับภายในผิวหน้าของระบบ และถูกเปลี่ยนไปโดยกระบวนการสลายตัวทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ Kadlec (1996) รายงานว่าการดูดซับที่ชั้นตะกอนด้านล่างและส่วนที่จมอยู่ในดินของพืช สามารถช่วยลดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากได้บางส่วน ในระบบบึงประดิษฐ์ สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากนี้จะไปสะสมอยู่ในตะกอนซึ่งค่อยๆ ถูกย่อยสลายไปโดยการทำงานของจุลินทรีย์ อัตราการย่อยสลายทางชีวะของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีจำนวนแบคทีเรียเพิ่มขึ้น ค่าพีเอช อุณหภูมิของน้ำ ลักษณะของอาหาร และระยะเวลาเก็บกักจะมีผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ

2.7.7 การกำจัดโลหะ

ในระบบบึงประดิษฐ์ โลหะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียโดยการนำไปใช้โดยพืช การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับกับดินและสารประกอบอนินทรีย์ที่ตกตะกอน (Gearheart, 1992) อย่างไรก็ตามดูเหมือนว่าขีดความสามารถของระบบบึงประดิษฐ์ในการกำจัดโลหะโดยการนำไปใช้โดยพืชและการเก็บเกี่ยวมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และการกำจัดโลหะจากระบบบึงประดิษฐ์ ท้ายสุดบางทีอาจเป็นผลมาจากวิธีการในการกำจัดฟอสฟอรัส (Stowell et al., 1981)

2.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน

โดยทั่วไปแล้วบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลของน้ำใต้ผิวดินในแนวนอนจะประกอบไปด้วยร่องยาว หรือบ่อที่ปูพื้นข้างล่างด้วยวัสดุที่น้ำไม่สามารถผ่านได้ เพื่อป้องกันการรั่วซึม และภายในบรรจุตัวกลางซึ่งให้พืชโผล่พ้นน้ำยึดเกาะและเจริญเติบโตได้ ตัวกลางที่ใช้จะมีหินหรือหินบดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10-15 ซม. กรวด และดินประเภทต่างๆ ซึ่งภายในบ่ออาจจะบรรจุตัวกลางชนิดเดียวหรือบรรจุตัวกลางหลายชนิดรวมกัน

น้ำเสียจะไหลผ่านตัวกลางและถูกบำบัดในระหว่างที่สัมผัสกับพื้นผิวของตัวกลางและชั้นรากของพืช ในพื้นผิวตัวกลางจะมีสภาวะที่อิ่มตัวตลอดเวลาซึ่งจะเกิดสภาพขาดออกซิเจนแต่อย่างไรก็ตามพืชสามารถนำเอาออกซิเจนเข้าสู่ระบบรากได้ ดังนั้นจะมีสภาวะใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณใกล้ๆ รากพืชด้วย

2.8.1 การพิจารณาทางชลศาสตร์

ในสภาพที่ตื้นและเต็มไปด้วยสภาวะอิ่มตัวของน้ำในร่องซึ่งไม่มีการรั่วซึมข้างล่าง อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรลิกต่อหนึ่งหน่วยความยาว จะถูกสมมุติให้เป็นความลาดชันของพื้นบ่อ ซึ่งสามารถหาอัตราการไหลได้ตามสมการที่ (4) (Reed et al., 1988)

$$Q = K_s * A * S \quad (4)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล

K_s = สภาพนำทางชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) ของพื้นที่ 1 หน่วยของตัวกลาง

A = พื้นที่หน้าตัด

S = อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮโดรลิกต่อหนึ่งหน่วยความยาว

= $\Delta h / \Delta L$

และสามารถหาพื้นที่หน้าตัดที่สภาวะอิ่มตัวของน้ำจากสมการ (5) ได้เป็น

$$a_c = \frac{Q}{K_S * S} \quad (5)$$

$$S = 8.6 / K_s \quad (6)$$

เมื่อ a_c = พื้นที่หน้าตัดของบ่อที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ (ม.^{2}) และมีค่าเท่ากับ $d_l \times w_l$

d_l = ความลึกของน้ำในบ่อ (ม.)

w_l = ความกว้างของบ่อ (ม.)

K_s = สภาพทางชลศาสตร์ของตัวกลาง (อาจดูได้จากตารางที่ 2.4)

และเมื่อต้องการคำนวณหาเวลาเก็บกักและพื้นที่ผิวของบึงประดิษฐ์แบบ SFS สามารถคำนวณได้จากสมการ (7) และ (8)

$$t = \frac{L * W * Y * n}{Q} \quad (7)$$

$$A_s = L * W \quad (8)$$

เมื่อ t = เวลาเก็บกัก, วัน

L = ความยาวของบ่อ, ม.

W = ความกว้างของบ่อ, ม.

A_s = พื้นที่ผิวของบ่อ, ม.^{2}

Q = อัตราไหลเฉลี่ยของระบบ (($Q_{เข้า} + Q_{ออก}$) / 2), ม.^{3}/วัน

Y = ความลึกของน้ำในบ่อ, ม.

n = ค่าความพรุนของตัวกลางในบ่อมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-0.45 ขึ้นอยู่กับขนาดของกรวด อาจดูได้จากตารางที่ 2.4

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างคุณสมบัติของตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

ชนิดของตัวกลาง	ขนาดสัมฤทธิ์ มม.	ความพรุน	สภาพนำทางชลศาสตร์ (K_s) ม.^{3}/(ม.^{2}.วัน)	K_{20}
ทรายละเอียดปานกลาง	1	0.42	420	1.84
ทรายหยาบ	2	0.39	480	1.35
กรวดทราย	3	0.35	500	0.86

ที่มา : Metcalf และ Eddy (1991)

เมื่อคำนวณหาเวลาเก็บกัก โดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการกำจัด บีโอดี จะใช้สมการ (9)

$$\frac{BOD_{ออก}}{BOD_{เข้า}} = e^{-K_T t} \qquad (9)$$

$$K_T = K_{20}(1.1)^{T-20} \qquad (10)$$

เมื่อ K_T = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาลำดับหนึ่งที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, ต่อวัน

T = อุณหภูมิในระบบ, °ซ

เมื่อพิจารณาถึงสภาพนำทางชลศาสตร์ จะใช้สมการ (11) คำนวนหา t

$$t = \frac{L}{K_S S} \qquad (11)$$

อัตราการไหลของน้ำอาจใช้ฝายน้ำล้น ในการควบคุมการไหล ให้ส่วนก้นบ่อมีความลาดของบ่อประมาณ 1% เพื่อให้น้ำไหลลง โดยไม่มีการกักขังเกิดขึ้น ส่วนก้นบ่อบริเวณปลายท้ายน้ำของบ่อจะมีท่อดักเจาะรูรอบท่อเพื่อรับน้ำทิ้งออกจากระบบบึงประดิษฐ์ เป็นการหลีกเลี่ยงที่จะรบกวนโครงสร้างของตัวกลางและชั้นรากของพืช และเพื่อให้แน่ใจได้ว่ามีเวลาในการสัมผัสที่เพียงพอสำหรับการบำบัด ค่าความเร็วของการไหลของน้ำผ่านระบบไม่ควรเกิน 8.6 ม./วัน (Reed et al., 1988) ในการออกแบบความลึกของบ่อ ควรจะเลือกให้สอดคล้องกับชนิดของพืชในระบบซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าเสนอแนะในการออกแบบความลึกสำหรับระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

ชนิดของพืช	ความลึกของบ่อ, ซม.
กกสามเหลี่ยม	76
อ้อ	60
ธูปฤาษี	30

ที่มา : Reed et al. (1988)

ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ มีขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้

1) พิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่ที่จะเลือกใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสีย
2) ศึกษาว่าควรจะมีระบบบำบัดน้ำเสียขั้นแรกและหรือขั้นที่สองก่อนที่จะนำเข้าสู่ระบบบึงประดิษฐ์
3) ทำการเลือกชนิดของพืชที่จะปลูกในบึงประดิษฐ์
4) ศึกษาหาค่าการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์
5) ทำการศึกษาระบบควบคุมแมลงต่างๆ ในบึงประดิษฐ์
6) ออกแบบรายละเอียดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์
7) พิจารณาถึงการติดตั้งสถานีตรวจสอบประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียแบบประดิษฐ์

ข้อมูลที่ควรทราบเกี่ยวกับระบบบึงประดิษฐ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

2.8.2 ภาระบรรทุกสารอินทรีย์

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ไม่ได้เป็นตัวแปรที่กำหนดค่าวิกฤตในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์ แต่เป็นตัวตรวจสอบให้แน่ใจว่าใต้ผิวดินมีออกซิเจนพอเพียง โดยทั่วไปแล้วพืชโผล่พ้นน้ำสามารถส่งผ่านออกซิเจนได้ในช่วง 5-45 ก. ของ O_2/(ม.^{2}.วัน) ของพื้นผิวบึงประดิษฐ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพของออกซิเจนในบริเวณราก แต่สามารถสมมุติได้ว่าออกซิเจนที่ต้องการมีค่าเป็น 1-1.5 เท่าของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เป็นค่าสมมุติที่เหมาะสมสำหรับ SFS ซึ่งจะป้องกันอัตราการเกิดออกซิเจนสำหรับพืช ไม่ให้มากกว่า 20 ก. ของ O_2/(ม.^{2}.วัน) สำหรับค่าแนะนำที่ใช้ในการออกแบบ SFS ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลที่ควรทราบเกี่ยวกับระบบบึงประดิษฐ์

ข้อมูลที่ควรทราบ	รายละเอียด
1. ชนิดของชั้นดิน	ควรเป็นดินประเภทที่ให้น้ำไหลซึมลงดินได้ช้า
2. เทคนิคการกระจายน้ำเสีย	ใช้หัวกระจายน้ำเสียหรือท่อเจาะรูด้านข้างเพื่อกระจายน้ำเสีย
3. ภาระปริมาณน้ำเข้า	5-18 ม./ปี
4. ขนาดพื้นที่ที่ต้องการ	20-66 $ม.^2/(ม.^3.วัน)$
5. ความต้องการพืชบนพื้นที่บำบัด	ต้องการพืชปลูกบนพื้นที่ลาดเอียง
6. ความต้องการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น	ควรมีระบบตกตะกอนขั้นต้นก่อนปล่อยลงบนพื้นที่ และอาจเติมอากาศเล็กน้อยลงในน้ำเสียก่อนปล่อยเข้าบึงประดิษฐ์ แต่ไม่ควรมีสาหร่ายเข้าระบบบึง
7. ความลาดของพื้นที่บำบัด	น้อยกว่า 5%
8. การเก็บเกี่ยวพืชน้ำ	ไม่จำเป็นต้องทำ
9. การกำจัดไนโตรเจนในน้ำเสีย	จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของ C/N ว่ามีเพียงพอหรือไม่ โดยทั่วไปควรมีมากกว่า 2 ต่อ 1 จึงจะสามารถกำจัดสารไนโตรเจนได้
10. ค่าอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนเข้าระบบ	เมื่อเป็นพืชที่จุ่มในน้ำจะมีประมาณ 5-45 ก. ของ O_2 $/(ม.^2.วัน)$
11. ระบบป้องกันน้ำท่วม	ควรมีระบบป้องกันน้ำท่วมสำหรับบึงประดิษฐ์

ที่มา : เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2539)

ตารางที่ 2.7 ค่าแนะนำที่ใช้ในการออกแบบระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน

พารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบ	หน่วย	ระบบ SFS
เวลาเก็บกัก (HRT)	วัน	4-15
ระดับน้ำ	ม.	0.3-0.8
อัตราภาระบรรทุกอินทรีย์	กก./(เฮกแตร์.วัน)	<68
อัตราภาระชลศาสตร์	$ม.^3/(ม.^2.วัน)$	0.014-0.047
พื้นที่ผิวจำเพาะ	$เฮกแตร์/(10^3.ม.^3.วัน)$	2.14-7.16

ที่มา : Metcalf และ Eddy (1991)

2.8.3 โครงร่างของระบบ

โดยส่วนใหญ่โครงสร้างของระบบน้ำไหลใต้ผิวดิน มีลักษณะและรายละเอียดต่างๆ ไม่เป็นที่แน่นอนเท่าใดนัก เช่น ความลึกของน้ำและตัวกลาง ชนิดของตัวกลาง ความลาดชันของความลึก ระดับของการบำบัดในขั้นต้น และชนิดของพืช แต่ก่อนระบบน้ำไหลใต้ผิวดินส่วนใหญ่มีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง เป็น 10:1 หรือมากกว่า ในระบบน้ำไหลใต้ผิวดินจะมีความลึกของตัวกลางประมาณ 0.3-0.76 ม. และใช้ทราย กรวด หิน เป็นตัวกลาง พื้นที่ส่วนล่างมีความลาดชัน 0-1% ระดับน้ำควรจะต่ำกว่าพื้นผิวบนของตัวกลาง และสามารถควบคุมระดับน้ำได้ที่ทางออก (Reed และ Brown, 1992)

2.8.4 การบำบัดขั้นต้น

น้ำเสียที่เข้าระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดิน อย่างน้อยที่สุดควรผ่านการบำบัดขั้นต้นมาก่อนแล้ว ซึ่งอาจจะผ่านบ่อเกรอะ ถังตกตะกอน การบำบัดขั้นต้นแบบธรรมดา หรือถังปฏิกิริยาไม่ใช้อากาศขั้นต้น ซึ่งจะมีประโยชน์ในการลดสารอินทรีย์ และจำนวนของแข็งของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้

2.9 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

House et al. (1996) ได้ทำการศึกษาระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน ซึ่งรวมแบบการไหลใต้ผิวดินชนิดแนวนอนและแนวดิ่ง (Vertical - Horizontal Subsurface Flow) เพื่อทดสอบหาความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสีย ซึ่งอัตราของน้ำเสียเข้าระบบมีค่า 15 และ 140 ล./วัน โดยติดตั้งระบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลใต้ผิวดินชนิดแนวดิ่งเป็นจำนวน 2 บ่อ มีขนาดกว้าง 9.1 ม. ยาว 13.7 ม. และลึก 0.6 ม. ภายในบรรจุด้วยตัวกลางคือ ทรายหยาบ และกรวด ปลูกด้วย *Juncus effusus* ปล่อยน้ำเข้าระบบ 3-4 ครั้ง/วัน มีค่าภาระทางชลศาสตร์ 40 ล./(ม.^{2}.วัน) จนถึง 120 ล./(ม.^{2}.วัน) เพื่อความแน่ใจในการเกิดไนตริฟิเคชัน จึงเพิ่มระบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลใต้ผิวดินชนิดแนวนอนเป็นจำนวน 2 บ่อ มีขนาดกว้าง 9.8 ม. ยาว 13.7 ม. และลึก 0.6 ม. ซึ่งภายในบรรจุด้วยตัวกลาง คือ กรวด ปลูกด้วย *Scirpus validus* โดยออกแบบให้มีเวลาเก็บกัก 5-7 วัน เพื่อช่วยเสริมการเกิดดีไนตริฟิเคชัน ใช้อิฐหักซึ่งมีปริมาณเหล็กสูงเป็นตัวกรอง Substrate ในชั้นล่าง เพื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัส การดำเนินการโดยผ่านน้ำเสียเข้าระบบการไหลในแนวดิ่งก่อน น้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วบางส่วนถูกสูบมายังระบบการไหลในแนวนอน หรือถูกส่งหมุนเวียนกลับไปยังบ่อเกรอะ เพื่อช่วยเสริมในการบำบัดไนโตรเจน

ผลการศึกษาพบว่า ระบบนี้สามารถลดปริมาณไนโตรเจนรวมได้ 75% และลดปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนได้ถึง 98.5% แสดงถึงการเกิดไนตริฟิเคชันที่เกือบจะสมบูรณ์ ระบบสามารถ

ลดปริมาณฟอสฟอรัสรวมได้ดีในช่วงปีแรกของการดำเนินการแต่จะลดลงในปีต่อมา ซึ่งควรมีการปรับปรุงค่า ปริมาณน้ำเข้าต่อจำนวนรอบของการสูบน้ำ และเพิ่มช่วงเวลาระหว่างรอบการสูบน้ำเข้าเพื่อเสริมปฏิกิริยาการดูดซับฟอสฟอรัสของตัวกรองปริมาณเหล็กสูงที่ใช้ให้ดียิ่งขึ้น ระบบสามารถกำจัดสารแขวนลอยทั้งหมดได้ 55% และบีโอดี 97% สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นจาก 16% ในปีแรก ไปเป็น 96% ในปีที่ 4 ได้

Laber et al. (1996) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยระบบบึงประดิษฐ์แบบการไหลใต้ผิวดินชนิดแนวดิ่ง โดยทดลองใช้ระบบ 2 แบบ เพื่อช่วยเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ดีขึ้น คือ ระบบ A ซึ่งเป็นบึงประดิษฐ์บ่อเดียว ส่วนระบบ B เป็นบึงประดิษฐ์ 2 บ่อ ติดตั้งต่อเนื่องกัน การทำงานของระบบ A มีค่าออกแบบ 5 ม.^{2}/สมมูลประชากร และปริมาณเข้าระบบมีสมมูลประชากรเท่ากับ 8 เป็นการไหลแนวดิ่งผ่านชั้นตัวกลางที่มีความลึก 80 ซม. ชั้นตัวกลางประกอบด้วยทรายและกรวดผสมกัน มีขนาด 0-8 มม. ปลูกด้วยต้นอ้อ (*Phragmites australis*) มีระบบบำบัดขั้นต้นคือ ถังตกตะกอนขนาด 3 ม.^{3} การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนเปรียบเทียบกันโดยขั้นแรกต้องรักษาสภาพของตัวกลางไม่ให้อิ่มตัว (มีระดับน้ำในตัวกลางต่ำ) และให้น้ำเข้าระบบ 4 ครั้ง/วัน มีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วหมุนเวียนกลับไปยังถังตกตะกอน น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Nitrified Effluent) ผสมกับน้ำเสียที่เข้าระบบ ซึ่งมีสารประกอบคาร์บอนที่จำเป็นต่อดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียและมีสภาพอะนอกซิกในถังตกตะกอน อัตราการหมุนเวียนในขั้นแรกมีค่า 50-60% ของปริมาณน้ำออก ขั้นที่สองดำเนินการเหมือนขั้นแรก แต่เพิ่มอัตราการหมุนเวียนเป็น 80% เพื่อให้เกิดสภาพอิ่มตัวของชั้นตัวกลางเสริมการเกิดดีไนตริฟิเคชัน ระดับน้ำในชั้นตัวกลางสูงขึ้น 0-20 ซม. ส่วนการทำงานของระบบ B มีค่าออกแบบ 5 ม.^{2}/สมมูลประชากรและปริมาณน้ำเข้าระบบมีสมมูลประชากรเท่ากับ 8 เป็นการไหลแนวดิ่งผ่านชั้นตัวกลางที่มีความลึก 60 ซม. ทั้ง 2 บ่อ ชั้นตัวกลางประกอบไปด้วยทรายและกรวดผสมกัน มีขนาด 1-4 มม. ปลูกด้วยต้นอ้อและมีระบบบำบัดขั้นต้นคือ ถังตกตะกอน 3 ม.^{3} โดยบ่อแรกรักษาไม่ให้เกิดสภาพอิ่มตัวของชั้นตัวกลาง และให้น้ำแก่ระบบ 4 ครั้ง/วัน ส่วนบ่อที่ 2 ซึ่งติดตั้งต่อเนื่องกันแบบอนุกรม จัดให้มีสภาพอิ่มตัวของชั้นตัวกลาง (ระดับน้ำในชั้นตัวกลางสูง) เพื่อให้เกิดสภาพไร้อากาศ เสริมปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในบ่อที่ 2 มีการเติมแหล่งคาร์บอนภายนอกคือ เมทานอล 4 ครั้ง/วัน ระบบ B ได้ทดสอบการให้น้ำแบบต่างๆ 3 แบบ คือ แบบครั้งคราว แบบต่อเนื่อง และแบบเท

ผลการศึกษาพบว่า ระบบ A ขั้นแรกที่อัตราการหมุนเวียน 50-60% มีอัตราการกำจัดเฉลี่ยดังนี้ อนินทรีย์ไนโตรเจน 42% และไนโตรเจนรวม 53% ขั้นที่สองที่อัตราการหมุนเวียน 80% มีอัตราการกำจัดเฉลี่ยดังนี้ อนินทรีย์ไนโตรเจน 69% และไนโตรเจนรวม 72% ส่วนอัตราการกำจัดซีโอดี อินทรีย์คาร์บอนรวมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในขั้นที่สองจะมีค่าต่ำกว่าเนื่องจากมีค่า

ภาระทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ A ที่ไม่มีการหมุนเวียนซึ่งมีอัตราการกำจัดอนินทรีย์ไนโตรเจน 17% และไนโตรเจนรวม 34% จะเห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่ามาก ส่วนระบบ B ซึ่งทดสอบให้น้ำแก่ระบบเป็น 3 แบบและมีการเติมเมทานอลซึ่งแบบครั้งคราวมีอัตราการกำจัดเฉลี่ยดังนี้ อนินทรีย์ไนโตรเจน 82% และไนโตรเจนรวม 78% แบบต่อเนื่อง อนินทรีย์ไนโตรเจน 59% และไนโตรเจนรวม 61% แบบเท อนินทรีย์ไนโตรเจน 62% และไนโตรเจนรวม 63% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ไม่มีการเติมเมทานอลมีอัตราการกำจัดอนินทรีย์ไนโตรเจน 13% และไนโตรเจนรวม 28% จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมเมทานอลจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า สำหรับระบบ A และ B เปรียบเทียบกันพบว่า ระบบ B ที่มีการให้น้ำแบบครั้งคราว มีประสิทธิภาพสูงสุดแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชันได้ดี อย่างไรก็ตาม สรุปได้ว่าทั้งการหมุนเวียนและการเติมเมทานอล แสดงถึงประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์ในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับไปยังถังตกตะกอนสามารถดำเนินการได้โดยมีค่าใช้จ่ายและบำรุงรักษาระบบต่ำ ซึ่งเหมาะกับครัวเรือนและชุมชนขนาดเล็ก ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี บีโอดี และอินทรีย์คาร์บอนรวมสามารถกำจัดได้ดีเช่นกัน J. Vymazal et al. (1998) ได้แนะนำอัตราการหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 50-100%

Wang et al. (1996) ได้ทำการศึกษาหาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับกำจัดไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์ การออกแบบการทดลองให้เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ทำเป็น 2 กรณี คือ ปลูกพืช และไม่ปลูกพืชในถังที่มีค่า C/N ratios แตกต่างกัน ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 20-23°ซ ถังมีขนาด 30 × ϕ 27 ซม. บรรจุด้วยตัวกลางที่มีส่วนผสมเป็นกรวดขนาด 40-50 มม. 10% 20-30 มม. 45% และ ขนาด 10-25 มม. 45% ในทุกๆ ถังใส่ท่อพลาสติกเจาะรู ขนาด ϕ 5 ซม. เพื่อเก็บตัวอย่าง วัดค่าดีโอ และอุณหภูมิ พืชที่ปลูกคือ Calamus น้ำที่บำบัดมีองค์ประกอบของ K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Fe^{2+}, NH_4^+, No_3^-, SO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$, CH_3COO^- และอื่นๆ เพื่อเพาะจุลินทรีย์ และเพื่อให้พืชพัฒนาระบบรากก่อนทำการทดลองแต่ละครั้งจะต้องระบายน้ำและล้างทุกๆ ถังด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง เพื่อความแน่ใจว่าจะไม่มีสารอาหารหลงเหลืออยู่

จากผลการศึกษาพบว่า เกิดดีไนตริฟิเคชันได้สมบูรณ์ เมื่อ $C/N > 1.3$ ในถังที่ปลูกพืชและไม่ปลูกพืช ช่วงค่า COD/N ที่เหมาะสม คือ 3.6 ถึง 4.0 (หมายถึง C/N = 1.35-1.5) ในถังที่ไม่ปลูกพืช และ 3.3-4.0 (หมายถึง C/N = 1.24-1.5) ในถังที่ปลูกพืช ซึ่งสามารถกำจัดซีโอดี ไนเตรทไนโตรเจน และไนไตรท์ไนโตรเจนได้ดีในช่วงระยะเวลาเก็บกักสั้นๆ (ประมาณ 11 ชม.) ความเข้มข้นของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีดังนี้ ซีโอดี 20 มก./ล. ไนเตรทไนโตรเจน 0.5 มก./ล. และไนไตรท์ไนโตรเจน 0.1 มก./ล. เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรทไนโตรเจนของถังที่ปลูกพืชและไม่ปลูกพืชมีความแตกต่างกันน้อยมาก

Platzer (1996) ได้ทำการศึกษาระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน ซึ่งเป็นแบบน้ำไหลใต้ผิวดิน โดยประกอบไปด้วยบึงประดิษฐ์ 2 บ่อ บ่อแรกเป็นชนิดน้ำไหลแนวดิ่ง (VFB_S) ตามด้วยบ่อที่ 2 เป็นชนิดน้ำไหลแนวนอน (HFB_S) จุดประสงค์ของการศึกษาเพื่อเสริมประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน และมีขนาดของระบบเท่าขนาดใช้งานจริง มีจำนวน 2 ระบบ ขนาดของระบบที่ LieBen (Li) มีสมมูลประชากรเท่ากับ 150 และที่ Merzdorf (Me) มีสมมูลประชากรเท่ากับ 300 มีขนาดบึงประดิษฐ์เกือบเท่ากัน ปลูกด้วยต้นอ้อ (*Phragmite australis*) VFB_S ในทั้งสองแห่ง ประกอบไปด้วยบ่อย่อย 10 บ่อ โดยใช้ตัวกลางต่างชนิดกัน ลักษณะของตัวกลางประกอบด้วย ดินปนทราย และทราย ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด และส่วนผสมของทรายกับเบนโทไนท์ ส่วน HFB_S มีความยาว 6.2 ม. ที่ Li มี 4 บ่อ ส่วนที่ Me มี 5 บ่อ ตัวกลางที่ใช้เป็นทราย โดยส่วนใหญ่ มีเพียงบ่อเดียวที่เป็นดินปนทราย รอบการเก็บตัวอย่างมีระยะเวลาเป็น 1.5 เท่าของเวลาเก็บกัก สำหรับรอบการเก็บตัวอย่างของ VFB_S เป็น 5 วัน และ HFB_S เป็น 21-28 วัน การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะไม่พิจารณาหากมีค่าภาระทางชลศาสตร์เกินกว่า 300 มม./วัน หรือค่าภาระเจดาลไนโตรเจนมากกว่า 15 ก./(ม.^{2}.วัน) ระบบที่ Me มีปริมาณการใช้น้ำต่ำ ทำให้ความเข้มข้นของมลสารมีค่าสูงกว่าที่ Li

ผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 5°ซ ไนตริฟิเคชัน จะถูกจำกัด อัตราการกำจัดเฉลี่ยคือ 35% (Me) และ 45% (Li) ส่วนการกำจัดไนไตรท์ไนโตรเจนรวมเฉลี่ยมีค่า 30% ในทั้งสองแห่ง ผลการทดลองใน VFB_S แสดงการเกิดไนตริฟิเคชัน ในอัตราสูงเมื่อค่าภาระเจดาลไนโตรเจนต่ำกว่า 6.5 ก./(ม.^{2}.วัน) และเมื่ออุณหภูมิในน้ำออกสูงกว่า 10°ซ อัตราไนตริฟิเคชัน ที่ Li สูงกว่า Me อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสิ่งที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดของทั้ง 2 แห่ง คือ ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า และภาระทางชลศาสตร์ที่สูงกว่าของ Li ไนตริฟิเคชันถูกจำกัดเมื่อเกิดการอุดตันของระบบ ดังนั้นค่าภาระทางชลศาสตร์และไนตริฟิเคชันจึงไม่ใช่เป็นตัวแปรวิกฤติที่เกี่ยวกับขีดความสามารถสูงสุดใน VFB_S สิ่งที่ควรพิจารณาและรักษาคือ ความสามารถในการให้น้ำซึมผ่าน ภาระบรรทุกและรอบการหมุนเวียนน้ำ สำหรับดีไนตริฟิเคชันใน VFB_S กรณีที่มีความต้องการการกำจัดไนโตรเจนสูง ต้องมีการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับไปยังระบบบำบัดขั้นต้น เพื่อให้เกิดพรี-ดีไนตริฟิเคชัน (pre-denitrification) ค่าภาระเจดาลไนโตรเจนออกแบบอยู่ในช่วง 2-5 ก./(ม.^{2}.วัน) ซึ่งทำให้ระบบบำบัดมีราคาต่ำและง่ายในการกำจัดไนโตรเจน เมื่อน้ำเข้ามีความเข้มข้นสูงจึงใช้ HFB_S เป็นระบบบำบัดขั้นที่สอง เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากของการนำน้ำหมุนเวียนกลับไป ซึ่งในกรณีนี้ HFB_S เป็นโพสต์-ดีไนตริฟิเคชัน (post-denitrification) โดยปราศจากแหล่งคาร์บอนภายนอก ผลการทดลองใน HFB_S พบว่ามีการกำจัดไนโตรเจนรวม ได้ 75-80% ซึ่งเป็นที่น่าพอใจ

Cooper et al. (1998) ได้รายงานถึงการศึกษาระบบไฮบริด ซึ่งเป็นการผสมผสานรวมเอาระบบที่มีการไหลในแนวนอน (Horizontal Flow : HF) และการไหลในแนวดิ่ง (Vertical Flow : VF) เข้าด้วยกัน ซึ่งจากผลการวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาสรุปได้ว่าระบบที่มีการไหลในแนวนอนนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดของแข็งแขวนลอยและบีโอดี ส่วนระบบที่มีการไหลในแนวดิ่งมีความสามารถสูงในการกำจัดบีโอดีที่อัตราภาระบรรทุกที่สูงกว่า อีกทั้งสามารถเกิดไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ในการออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจน แต่มีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดของแข็งแขวนลอย เมื่อผสมผสานทั้งระบบการไหลในแนวนอนและแนวดิ่งเข้าด้วยกันอย่างเหมาะสมจึงสามารถสร้างระบบที่มีประสิทธิภาพสูงกำจัดได้ทั้ง บีโอดี ของแข็งแขวนลอย และเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์สามารถกำจัดไนเตรทและลดค่าไนโตรเจนให้ต่ำลง จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ของทางเลือกต่างๆ ในระบบผสมผสานนี้ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบ ตัวอย่างของระบบนี้ที่กำลังพิจารณาศึกษาคือ การออกแบบที่ Stoulton Hawbridge การออกแบบขั้นต้นคือให้วางระบบการไหลในแนวดิ่งอยู่ลำดับแรก แล้วตามด้วยระบบการไหลในแนวนอน ซึ่งต่อมาให้ติดตั้งระบบการไหลในแนวนอนอยู่ก่อนการไหลในแนวดิ่งเพิ่ม รายละเอียดของระบบเบื้องต้นคือมีระบบการไหลในแนวดิ่ง 2 ขั้น (VF1 และ VF2) ต่อกันแบบอนุกรม ตามด้วยระบบการไหลในแนวนอน 2 ขั้น (HF2 และ HF3) ต่อกันแบบอนุกรม ต่อมาได้ติดตั้งระบบการไหลในแนวนอนคือ HF1 ซึ่งวางอยู่ก่อนระบบการไหลในแนวดิ่งทั้ง 2 ขั้น การออกแบบระบบการไหลในแนวดิ่งยึดเกณฑ์การออกแบบระบบของ Oaklands Park ที่มี VF 2 แปลง พื้นที่รวมเท่ากับ 0.97 ม.^{2}/สมมูลประชากรและสามารถกำจัดบีโอดีได้อย่างสมบูรณ์ แต่เกิดไนตริฟิเคชันไม่สมบูรณ์ (เฉลี่ย 11.1 มก. NH_4/ล. จำนวน 48 ตัวอย่าง ในระยะเวลา 2 ปี) ต่อมาเป็น HF 2 แปลง พื้นที่รวมเท่ากับ 0.43 ม.^{2}/สมมูลประชากร ซึ่งสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ ลดบีโอดีได้บางส่วน และเกิดไนตริฟิเคชันบางส่วน และการออกแบบระบบการไหลในแนวดิ่งเพื่อเกิดไนตริฟิเคชัน ยึดเกณฑ์การออกแบบระบบของ WRC Medmenhans ที่มี VF 2 แปลง เป็นระบบบำบัดขั้นที่ 3 เพื่อเกิดไนตริฟิเคชัน ผลของอัตราการออกซิไดซ์เท่ากับ 10-18.6 ก. ของแอมโมเนียไนโตรเจน/ม.^{2} ของแปลงต่อวัน ซึ่งเท่ากับอัตราการถ่ายเทออกซิเจน 43-80 ก. ของ O_2/(ม.^{2}.วัน) เพื่อออกซิเดชันแอมโมเนียไนโตรเจนเท่านั้น เมื่อพิจารณาเห็นว่าในระบบ VF มีความไม่แน่นอนในการออกซิไดซ์แอมโมเนียได้ดีเหมือนบีโอดี จึงออกแบบใช้ค่า 2 ม.^{2}ต่อสมมูลประชากรโดย VF1 และ VF2 มีค่าแต่ละขั้นเท่ากับ 1 ม.^{2}/สมมูลประชากร ขนาดของแปลงทั้งหมด 4 แปลง คือกว้าง 6 ม. และยาว 6 ม. มีพื้นที่ 144 ม.^{2}/ขั้น และมีค่า 1.11 ม.^{2}/สมมูลประชากรต่อขั้น ถึง 2.22 ม.^{2}/สมมูลประชากรของทั้งหมด ในช่วงของการทดลองมีความเป็นไปได้ที่จะกดดันแก่ระบบเพื่อหาค่าออกแบบที่เหมาะสมโดยใช้เพียง 3 แปลง ใน VF แต่ละขั้น ซึ่งจะให้พื้นที่เท่ากับ 0.84 ม.^{2}/สมมูลประชากรต่อขั้น ถึง 1.68 ม.^{2}/สมมูลประชากรของ

ทั้งหมด เช่นเดียวกันก็เป็นไปได้ที่จะเดินระบบโดยไม่ผ่าน VF2 ทำงานแค่เพียง VF1 ขั้นเดียว ขั้นของ VF มีการให้น้ำแบบครั้งคราว โดยใช้เพียงแปลงเดียวเท่านั้นของแต่ละขั้น ส่วน 3 แปลงที่เหลือของแต่ละขั้นจะปล่อยพักไว้ ส่วนระบบการไหลในแนวนอน 2 ขั้น (HF2 และ HF3) มีจุดมุ่งหมายเพื่อเป็นการกำจัดของแข็งแขวนลอย ขั้นที่ 3 และเพื่อเกิดดีไนติฟิเคชัน ออกแบบให้มีค่าพื้นที่มากกว่า Oaklands Park ประมาณ 2 เท่า คือเท่ากับ 0.5 ม.^{2}/สมมูลประชากร.วัน ขนาดกว้าง 8 ม. และยาว 8 ม. เพื่อเกิดดีไนตริฟิเคชันได้มากขึ้น (ที่ Oaklands Park แปลง HF1 มีพื้นที่เท่ากับ 0.12 ม.^{2}/สมมูลประชากร.วัน สามารถลดค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนทั้งหมดจาก 22.5 เป็น 10 มก./ล. ต่อมาเป็น HF2 มีพื้นที่เท่ากับ 0.31 ม.^{2}/สมมูลประชากร.วัน สามารถลดออกซิไดซ์ไนโตรเจนทั้งหมดได้เหลือ 7.2 มก./ล.) มีความเป็นไปได้ที่จะกดดันแก่ระบบเช่นเดียวกับระบบ VF เพื่อหาค่าออกแบบที่เหมาะสม ส่วนแปลง HF1 นั้นจะใช้งานเป็นระบบขั้นต้น หรือผ่านไปยังระบบ VF เลยก็ได้ จุดมุ่งหมายของ HF1 เพื่อทดสอบว่ามีประโยชน์ในการกำจัดของแข็งแขวนลอยในการป้องกัน VF1 จากการอุดตันหรือไม่ มีขนาด 0.5 ม.^{2}/สมมูลประชากร ส่วนทางเลือกสำหรับประโยชน์ของ HF1 คือ เป็นขั้นดีไนตริฟิเคชันขั้นต้น โดยสูบน้ำออกจา VF2 หมุนเวียนกลับมาเข้า HF1 ตัวกลางที่ใช้สำหรับ VF1 และ VF2 ชั้นล่างเป็นกรวด ต่อมาเป็นชั้นทราย ส่วนตัวกลางที่ใช้สำหรับแปลง HF เป็นกรวดขนาด 5-10 มม. ยกเว้นบริเวณทางน้ำเข้าและทางน้ำออก บรรจุด้วยหินขนาด 50-200 มม. ปูวัสดุกันซึมด้วยแผ่นโพลีเอธิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พืชที่ปลูกเป็นต้นอ้อ (*Phragmites australis*) ซึ่งเพาะจากเมล็ดพันธุ์