

ผลการทดลองและวิจารณ์

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่งและแนวนอนเปรียบเทียบกัน โดยพืชที่ใช้ในการทดลองคือ ธูปฤาษี ทั้งนี้ทำการบำบัดน้ำชะมูลฝอย 2 ชนิด คือ น้ำชะมูลฝอยสด และ น้ำชะมูลฝอยเก่า ซึ่งควบคุมให้น้ำชะมูลฝอยสดและเก่ามีค่า COD อยู่ในช่วง 5,000 – 12,000 mg/L (Organic Loading 0.074 - 0.460 kg COD/ha d) และ 3,000-5,000 mg/L (Organic Loading 0.030-0.060 kg COD/ha d) ตามลำดับ และใช้ระบบการทดลอง 2 แบบ คือ การไหลแบบแนวนอน (HSF) และ แนวดิ่ง (VSF) ซึ่งในแต่ละแบบมีการแปรผันอัตราการทางชลศาสตร์ 3 อัตราคือ 1, 2.8 และ 5.6 cm/d ตามลำดับ ทั้งนี้ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยสดและเก่ามีลักษณะแตกต่างที่สำคัญ (ตารางที่ 18) คือ น้ำชะมูลฝอยสดมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายสูง (SBOD เท่ากับ 3,000-7,500 mg/L) กว่าน้ำชะมูลฝอยเก่ามาก (SBOD เท่ากับ 200-300 mg/L) เช่นเดียวกับปริมาณของฟอสฟอรัสและของแข็งแขวนลอยในน้ำชะมูลฝอยสดก็มีค่าสูงกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่า อย่างไรก็ตามน้ำชะมูลฝอยสดและเก่ามีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากใกล้เคียงกัน (SCOD เท่ากับ 3,000-5,000 mg/L) ส่วนปริมาณไนโตรเจนทุกรูปในน้ำชะมูลฝอยเก่า (TN เท่ากับ 846-1,454, Org-N เท่ากับ 129-482, NH₃-N เท่ากับ 711-967, NO₂-N เท่ากับ 2.95-3.26, NO₃-N เท่ากับ 1.59-2.85 mg/L) มีปริมาณสูงกว่าน้ำชะมูลฝอยสด (TN เท่ากับ 144-366, Org-N เท่ากับ 87-262, NH₃-N เท่ากับ 43-108, NO₂-N เท่ากับ 0.0-3.2, NO₃-N เท่ากับ 0.3-3.8 mg/L) นอกจากนี้ปริมาณความเป็นด่างและคลอไรด์ในน้ำชะมูลฝอยเก่ามีปริมาณสูงกว่าน้ำชะมูลฝอยสดมาก โดยน้ำชะมูลฝอยเก่ามี Alk⁻ อยู่ในช่วง 7,700-9,050 mg/L, Cl⁻ อยู่ในช่วง 2,699-3,199 mg/L และน้ำชะมูลฝอยสดมี Alk⁻ อยู่ในช่วง 1,150-3,200 mg/L, Cl⁻ อยู่ในช่วง 125-1,000 mg/L

ทั้งนี้ลักษณะน้ำชะมูลฝอยข้างต้นใช้ในกรณี HLR เท่ากับ 1, 2.8, 5.6 cm/d สำหรับน้ำชะมูลฝอยสด ส่วนน้ำชะมูลฝอยเก่าใช้ในกรณี HLR เท่ากับ 1 cm/d แต่กรณี HLR เท่ากับ 2.8, 5.6 cm/d ได้มีการเจือจางน้ำชะมูลฝอยเก่าลงประมาณ 2-3 เท่า เพื่อทำให้ปริมาณไนโตรเจนมีค่าใกล้เคียงกับน้ำชะมูลฝอยสด ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณสารอินทรีย์และดัชนีอื่น ๆ มีความเข้มข้นต่ำกว่าความเข้มข้นที่พบในน้ำชะมูลฝอยสด ทั้งนี้ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เจือจางแล้วแสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ลักษณะน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า (Influent และ Effluent) ของระบบ HSF: Run 1, Run 2 และ Run 3

Parameter	Inf. Fresh	Avg. Inf. Fresh, (mg/L)	Avg. Effluent (mg/L), Fresh			Inf. Old	Inf. Old	Avg. Inf	Avg. Inf	Avg. Inf	Avg. Effluent (mg/L), Old		
	(Run 1, Run 2, Run 3)		Run 1	Run 2	Run 3	(Run 1)	(Run 2, Run 3)	Old, (Run 1)	Old, (Run 2)	Old, (Run 3)	Run 1	Run 2	Run 3
TCOD	5,848-12,816	8,555 ± 2,620	441	223	364	3,453-5,069	474-2,184	4,355 ± 691	1,802 ± 260	553 ± 68	1,787	1,045	185
SCOD	3,280-9,612	5,235 ± 1,662	349	195	283	3,110-4,506	414-2,184	3,938 ± 547	1,694 ± 330	493 ± 68	1,655	1,008	185
SBOD	3,150-7,400	4,170 ± 825	82	12	115	209-278	15-68	242 ± 25	58 ± 10	20 ± 5	70	27	11
TN	144-366	205 ± 15	117	139	182	846-1,454	107-305	1,092 ± 223	270 ± 31	141 ± 31	574	259	154
Org-N	87-262	156 ± 62	55	39	81	129-482	56-146	268 ± 143	95 ± 43	86 ± 25	50	76	90
NH ₃ -N	43-108	82 ± 32	54	93	98	711-967	88-441	809 ± 96	362 ± 58	100 ± 19	510	176	55
NO ₂ -N	0.0-3.2	2.58 ± 0.42	7.2	1.8	0.3	2.95-3.26	0.98-2.68	3.10 ± 0.1	1.3 ± 0.2	2.3 ± 0.5	11.4	4.9	17.1
NO ₃ -N	0.3-3.8	2.00 ± 1.5	0.7	5.9	3.0	1.59-2.85	0.99-2.50	2.4 ± 0.5	1.4 ± 0.5	2.0 ± 0.4	3.0	2.2	6.8
TP	4.3-23.4	10.8 ± 5.3	0.1	0.5	0.9	7.26-8.80	1.4-5.4	8.0 ± 0.8	5.0 ± 0.6	1.5 ± 0.1	6.0	3.0	1.2
SS	320-825	503 ± 223	49	113	87	124-223	10-158	162 ± 54	151 ± 9	15.8 ± 8.1	66	51	27.5
Alk ⁻	1,150-3,200	1,750 ± 474	2,760	1,825	2,750	7,700-9,050	1,550-3,150	8,400 ± 676	2,725 ± 601	1,775 ± 318	1,967	2,500	1,700
Cl ⁻	125-1,000	790 ± 42	580	400	1,125	2,699-3,199	400-875	2,932 ± 252	750 ± 177	500 ± 100	900	775	500
pH ^a	4.25-6.47	4.9 ± 0.5	7.8	8.1	7.6	8.2-8.5	7.9-9.2	8.4 ± 0.1	9.0 ± 0.2	8.3 ± 0.6	8.4	8.7	7.9
EC ^b	1.45-6.66	3.68 ± 3.16	4.8	6.8	4.1	17.4-21.3	1.4-13.1	19.4 ± 1.9	11 ± 3	3.7 ± 3.3	7.8	11	3.7

หมายเหตุ: Average ± SD.

^a ไม่มีหน่วย

^b หน่วย mS/cm

1. ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน (HSF) ที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ (HLR) 1, 2.8, 5.6 cm/d และระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 28, 10, 5 d

1.1 การบำบัดสารอินทรีย์ในระบบ HSF

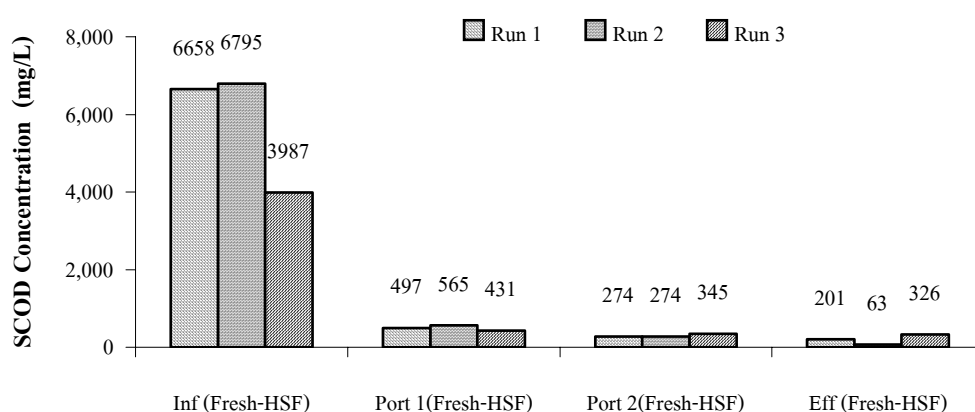
โดยทั่วไปแล้วระบบ HSF มีกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์โดยตะกอนของสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกกำจัดได้อย่างรวดเร็วเมื่อน้ำเสียถูกปล่อยเข้าระบบ ด้วยกระบวนการตกตะกอนและการกรอง ตะกอนที่ตกค้างอยู่บริเวณตัวกลางทรายและระบบรากพืชจะถูกย่อยสลายโดยการทำงานของ Heterotrophic Bacteria ในสภาวะ Aerobic Zone บริเวณส่วนบนของบ่อที่รากพืชยังถึงซึ่งได้รับออกซิเจนจากรากพืช ในสภาวะ Facultative Zone บริเวณกึ่งกลางบ่อ และสภาวะ Anaerobic Zone บริเวณส่วนล่างสุดของบ่อที่รากพืชไม่สามารถเข้าถึงได้

การบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยสดทุก Run ของระบบ HSF (ภาพที่ 21) พบว่า สารอินทรีย์ถูกกำจัดได้ดีที่สุด และถูกกำจัดได้เกือบหมดในบริเวณตอนต้น (ทางเข้า) ของบ่อ ส่วนบริเวณตอนกลาง และตอนท้าย (ทางออก) ของบ่อ สามารถกำจัดสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือจากตอนต้นได้ในลำดับต่อมา ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (SCOD) ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ร้อยละ 89-93, 2-4 และ 0-3 ตามลำดับ เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 Run โดยมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 92-99 ทั้งนี้คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ทั้งที่อยู่ในรูป BOD, COD ได้มากกว่าร้อยละ 90 ทั้ง 3 Run โดย HLR ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ HLR ที่ 2.8 cm/d ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัด BOD และ COD ได้ถึงร้อยละ 99 และ 97 ตามลำดับ (ตารางที่ 19)

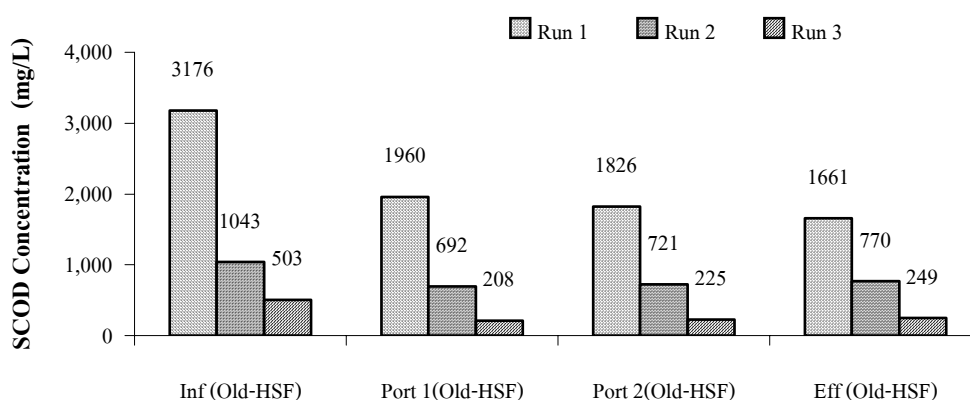
สำหรับการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยเก่าทั้ง Run ที่ 1, 2, 3 ของระบบ HSF (ภาพที่ 22) พบว่า สารอินทรีย์ถูกกำจัดได้ดี ในบริเวณตอนต้นของบ่อ ส่วนบริเวณตอนกลาง และตอนท้ายของบ่อ สามารถกำจัดสารอินทรีย์ส่วนที่เหลือจากตอนต้นได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (SCOD) ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ร้อยละ 34-59, 0-4 และ 0-5 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ (SCOD) ก่อนข้างต่ำทั้ง 3 Run โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 42-60 ซึ่งเมื่อเทียบกับการใช้น้ำชะมูลฝอยสดแล้วพบว่ามีประสิทธิภาพต่ำกว่ามาก ทั้งนี้ สืบเนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยเก่ามีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายต่ำ ทั้งนี้ ประสิทธิภาพโดยรวมของการบำบัดน้ำชะมูลฝอยเก่าในระบบ HSF มีการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป

BOD และ COD เท่ากับ 44 - 71 และ 42-60 ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการกำจัดสารอินทรีย์เมื่อ HLR เท่ากับ 1 cm/d

กล่าวโดยสรุปได้ว่าระบบ HSF เหมาะสมสำหรับการบำบัดในน้ำชะมูลฝอยสดโดยพิจารณาจากการบำบัดสารอินทรีย์เป็นเกณฑ์ และมี HLR ที่เหมาะสมที่สุดคือ HLR ที่ 2.8 cm/d



ภาพที่ 21 ความเข้มข้น SCOD ของน้ำชะมูลฝอยสดในระบบ HSF: Run 1, Run 2 และ Run 3



ภาพที่ 22 ความเข้มข้น SCOD ของน้ำชะมูลฝอยเก่าในระบบ HSF: Run 1, Run 2 และ Run 3

ตารางที่ 19 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจนและพารามิเตอร์อื่น ๆ ของน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า ในระบบ HSF

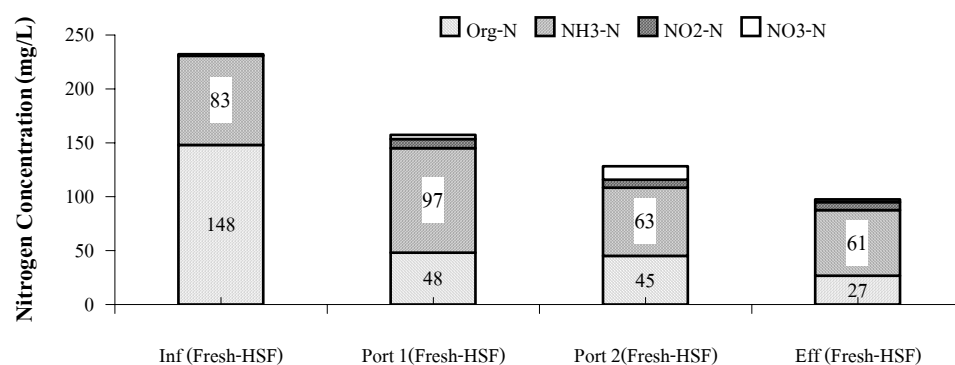
Parameter (mg./L)	Inf., Fresh (R1, R2, R3)	% Average Removal			Inf., Old (R1)	Inf., Old (R2, R3)	% Average Removal		
		Fresh Leachate					Old Leachate		
		Run 1	Run 2	Run 3			Run 1	Run 2	Run 3
TCOD	5,848-12,816	94	97	96	3,453-5,069	474-2,184	58	42	63
SCOD	3,280-9,612	92	97	93	3,110-4,506	414-2,184	58	42	60
SBOD	3,150-7,400	98	99	97	209-278	15-68	71	55	44
TN	144-366	43	36	4	846-1,454	107-305	46	41	< 0
Org-N	87-262	58	72	47	129-482	56-146	80	8	< 0
NH ₃ -N	43-108	24	< 0	< 0	711-967	88-441	34	49	45
NO ₂ -N	0.0-3.2	< 0	< 0	86	2.95-3.26	0.98-2.68	< 0	< 0	< 0
NO ₃ -N	0.3-3.8	32	< 0	< 0	1.59-2.85	0.99-2.50	< 0	< 0	< 0
TP	4.3-23.4	99	95	95	7.26-8.80	1.4-5.4	21	48	25
SS	320-825	88	71	88	124-223	10-158	56	66	< 0
Alk ⁻	1,150-3,200	< 0	< 0	< 0	7,700-9,050	1,550-3,150	77	0	0
Cl ⁻	125-1,000	25	19	< 0	2,699-3,199	400-875	70	0	0

หมายเหตุ: R1 = Run 1, R2 = Run 2, R3 = Run 3

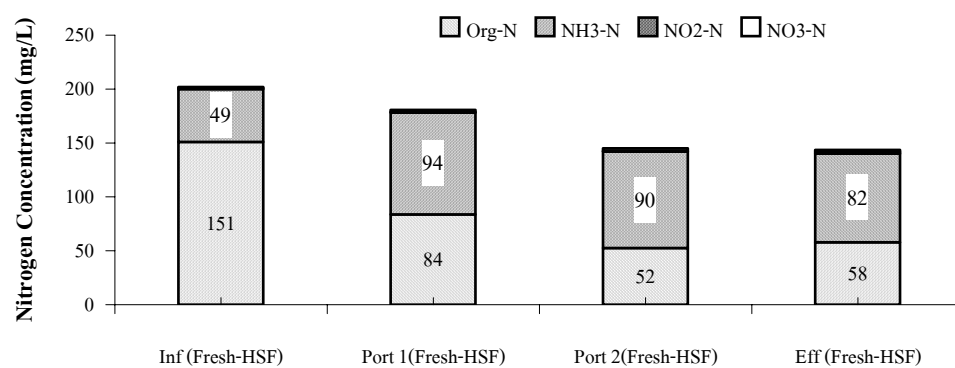
1.2 การบำบัดไนโตรเจนในระบบ HSF

น้ำชะมูลฝอยสดเมื่อผ่านการบำบัดโดยระบบ HSF มีความเข้มข้นของไนโตรเจน (ตารางที่ 18) ในรูป NH₃-N อยู่ในช่วง 54 – 98 mg/L และมีค่า Org-N อยู่ในช่วง 39 – 81 mg/L ส่วนค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนในรูปของ NO₂-N และ NO₃-N มีความเข้มข้นประมาณ 0.3-7.2 mg/L และ 0.7-5.9 mg/L ตามลำดับ โดยไนโตรเจนในรูป NH₃-N สามารถถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนโตรเจนในรูป NO₂-N และ NO₃-N ของการเกิดปฏิกิริยา Nitrification ในสภาวะมีอากาศและเมื่อปริมาณออกซิเจนต่ำมาก NO₃-N จะถูกรีดิวซ์เป็น N₂ ผ่านกระบวนการ Denitrification โดยความเข้มข้นในรูปต่าง ๆ ของไนโตรเจนในระบบแสดงในภาพที่ 23 ซึ่งพบว่า การบำบัดไนโตรเจนของ Run 1 ในรูป NH₃-N มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ NH₃-N เริ่มต้นที่ปล่อยเข้าระบบ และปริมาณความเข้มข้นจะค่อย ๆ ลดลงตามความยาวของบ่อ เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิด Heterotrophs ทำการย่อยสลาย

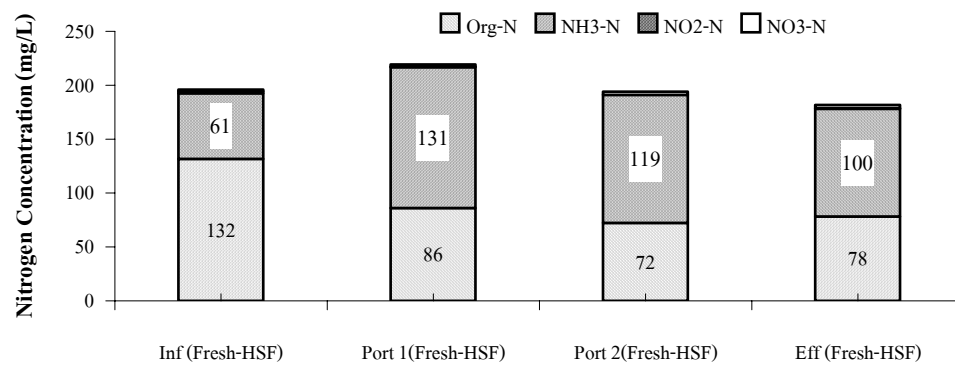
ก) Run 1



ข) Run 2



ค) Run 3

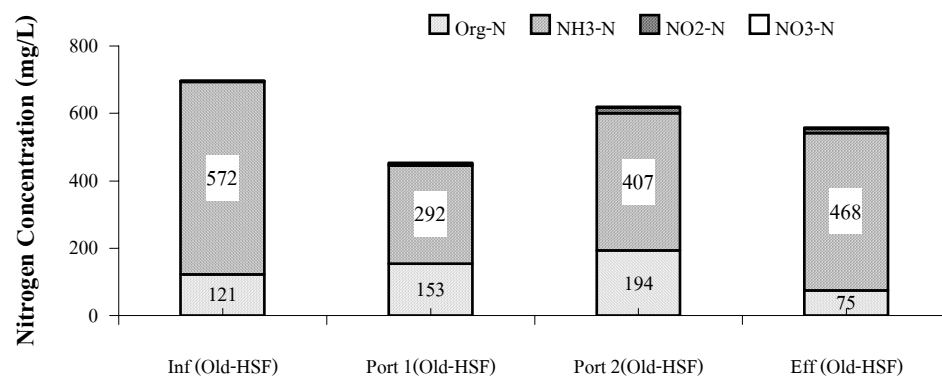


ภาพที่ 23 ความเข้มข้นไนโตรเจนของน้ำชะมูลฝอยสดในระบบ HSF

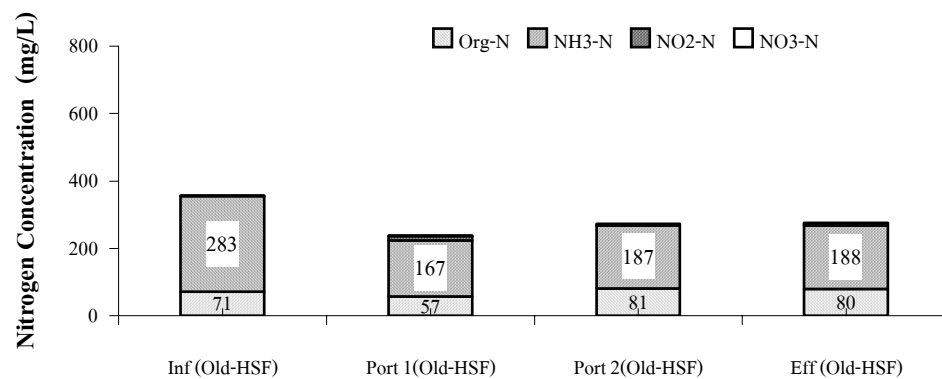
สารอินทรีย์ในโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งสารอินทรีย์ในโตรเจนก็ถูกย่อยสลายเปลี่ยนรูปไปเป็น $\text{NH}_3\text{-N}$ ผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน $\text{NH}_3\text{-N}$ จะถูกใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์กลุ่มไนตริไฟอิงต่อไป (ศุวสา, 2544) ในทางจลนศาสตร์ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันเกิดได้เร็วกว่าปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Kadlec and Knight, 1996) และเนื่องจากปริมาณออกซิเจนยังมีเพียงพอ (ภาพที่ 25) ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนในรูป $\text{NO}_2\text{-N}$ และ $\text{NO}_3\text{-N}$ มีค่าสูงขึ้นในกลางบ่อ Run ที่ 1 อย่างไรก็ตาม ในบริเวณตอนท้ายของบ่อพบว่าปริมาณ $\text{NO}_3\text{-N}$ มีค่าลดลงอาจเนื่องจากปริมาณ $\text{NO}_3\text{-N}$ บางส่วนถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนรูปเป็น N_2 ด้วยปฏิกิริยา Denitrification (Run 1) และการดูดซับโดยพืชเพื่อการเจริญเติบโตเนื่องจากพืชส่วนใหญ่มักใช้ในโตรเจนในรูป $\text{NO}_3\text{-N}$ ส่วนใน Run 2 และ 3 พบว่า ปฏิกิริยา Nitrification เกิดขึ้นได้ต่ำกว่าใน Run 1 ส่งผลให้ยังคงมีปริมาณ $\text{NH}_3\text{-N}$ ค่อนข้างสูงและปริมาณ $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ ดำตลอดความยาวของบ่อ ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนรวม(TN) ทั้ง 3 Run ของระบบ HSF จึงมีค่าต่ำอยู่ในช่วงร้อยละ 4-43 และประสิทธิภาพการกำจัดอินทรีย์ในโตรเจน แอมโมนีในโตรเจน ไนโตรที่ไนโตรเจน และไนเตรทไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 47-72, < 0-24, < 0-86 และ < 0-32 ตามลำดับ โดยที่ HLR 1 cm/d ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนรวมในน้ำชะมูลฝอยสดได้ดีที่สุด

สำหรับน้ำชะมูลฝอยเก่ามีความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูป $\text{NH}_3\text{-N}$ ในน้ำผ่านการบำบัดอยู่ในช่วง 55 – 510 mg/L และมีค่า Org-N อยู่ในช่วง 50 – 90 mg/L เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า การบำบัดไนโตรเจนในน้ำชะมูลฝอยเก่าของระบบ HSF ใน Run 1, 2, 3 มีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน (ภาพที่ 24) คือไนโตรเจนในรูป $\text{NH}_3\text{-N}$ ของน้ำเข้ามีความเข้มข้นค่อนข้างสูงเมื่อผ่านเข้าระบบจะลดลงในช่วง Port 1 และค่อย ๆ สูงขึ้นตามความยาวของบ่อแต่ยังสามารถกำจัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับ $\text{NH}_3\text{-N}$ ที่เข้าระบบ ส่วนค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนในรูปของ $\text{NO}_2\text{-N}$ และ $\text{NO}_3\text{-N}$ เมื่อผ่านเข้าไปบำบัดในระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.0-17.1mg/L และ 2.2-6.8 mg/L ตามลำดับชี้ให้เห็นว่ามีปฏิกิริยา Nitrification เกิดขึ้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำจัด TN, Org-N และ $\text{NH}_3\text{-N}$ ของทั้ง 3 Run คิดเป็นร้อยละ 0-46, 0-80 และ 34-49 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับน้ำชะมูลฝอยสดแล้ว พบว่า ระบบ HSF กำจัดไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์และแอมโมนีได้ดีทั้งสองรูปโดยที่ HLR 1 cm/d และ 2.8 cm/d ของน้ำชะมูลฝอยเก่าให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนรวมรวมใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามที่ HLR 1 cm/d พบว่ามีพืชบางส่วนตายโดยเฉพาะต้นบ่อ (ภาพผนวก ง-7) อาจเนื่องจากสาเหตุของ $\text{NH}_3\text{-N}$ เข้าระบบสูง(De Feo, 2005) หรือความเค็มสูง ($\text{EC} > 3.2 \text{ mS/cm}$) (Soil and Plant Analysis Council, 1999) สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัด TN และ $\text{NH}_3\text{-N}$ ที่ HLR 2.8 cm/d ดีที่สุดโดยคิดเป็นร้อยละ 41 และ 49 ตามลำดับ

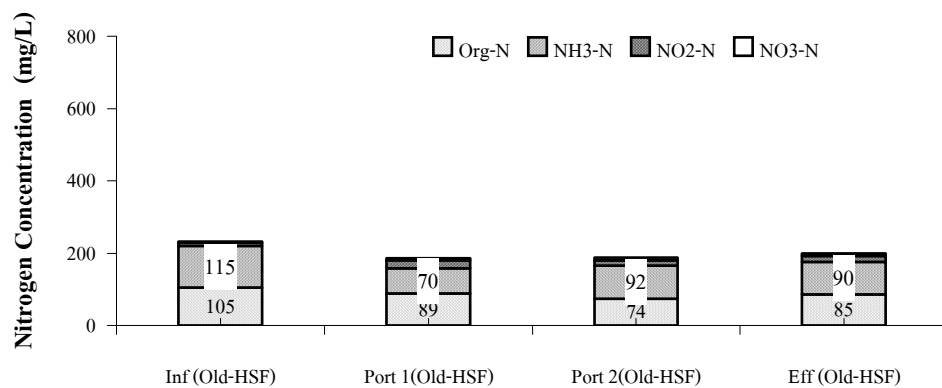
ก) Run 1



ข) Run 2



ค) Run 3



ภาพที่ 24 ความเข้มข้นไนโตรเจนของน้ำชะมูลฝอยเก่าในระบบ HSF

1.3 การบำบัดของแข็งแขวนลอย ฟอสฟอรัสและอื่น ๆ ในระบบ HSF

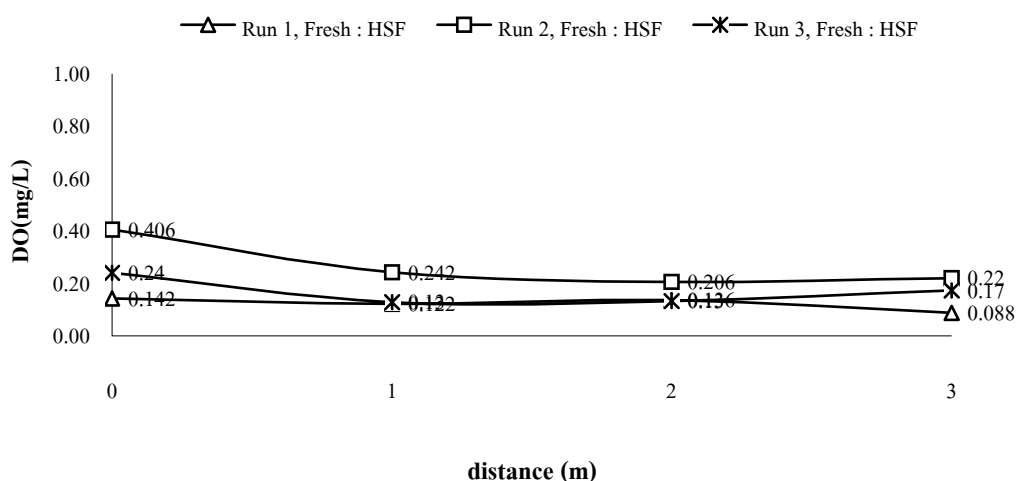
1.3.1 การบำบัดของแข็งแขวนลอย น้ำชะมูลฝอยสดและเก่ามีค่าของแข็งแขวนลอยแปรผันอยู่ในช่วง 320-825 mg/L และ 10-223 mg/L ตามลำดับ เมื่อผ่านเข้าระบบบำบัดของแข็งแขวนลอยในน้ำชะมูลฝอยสดถูกกำจัดโดยระบบ HSF มีค่าคิดเป็นประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 88, 71, 88 (ตารางที่ 19) ที่ HLR 1, 2.8, 5.6 cm/d ตามลำดับ ส่วนน้ำชะมูลฝอยเก่าให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 55, 66 และ < 0 ที่ HLR 1, 2.8, 5.6 cm/d ตามลำดับ การที่ระบบ HSF ให้ประสิทธิภาพต่ำกรณีน้ำชะมูลฝอยเก่า เนื่องจากปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำชะมูลฝอยสดที่ปล่อยเข้าระบบมีค่าสูงกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่ามากซึ่งเป็นของแข็งแขวนลอยที่สามารถย่อยสลายได้สูง (TCOD เท่ากับ 8,555 mg/L) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกทั้ง 3 Run ของน้ำชะมูลฝอยสดมีค่าสูงกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่าเล็กน้อยโดยพบอยู่ในช่วง 49-113 mg/L และ 27-66 mg/L ตามลำดับ (ตารางที่ 18)

1.3.2 การบำบัดฟอสฟอรัส ระบบ HSF สามารถกำจัด TP ได้ดีกรณีน้ำชะมูลฝอยสด โดยให้ประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 95 ทุกRun ตรงกันข้ามกับน้ำชะมูลฝอยเก่าให้ประสิทธิภาพในช่วงร้อยละ 21-48 ทั้ง 3 Run ทั้งนี้อาจสืบเนื่องจากรูปของฟอสฟอรัสที่พบในน้ำชะมูลฝอยอาจแตกต่างกันโดย PO_4^{3-} (Free-form หรือออร์โทฟอสฟอรัส) ที่ถูกย่อยสลายแล้ว พบในน้ำชะมูลฝอยสดมากกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่า (Tchobanoglous et al., 1993) ประกอบกับในน้ำชะมูลฝอยสดมีฟิเอร์เป็นกรดเล็กน้อยซึ่งสถานะนี้อ่อนของโลหะแตกตัวได้ดี ดังนั้นฟอสฟอรัส (ในรูปสารประกอบอินทรีย์) เมื่อผ่านเข้าระบบก็ถูกกำจัดโดยการการตกตะกอนกับโลหะ และการกรอง จึงทำให้สารอินทรีย์ฟอสฟอรัสถูกกำจัดจากกระบวนการนี้ได้เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีการสะสมอยู่ในบริเวณของชั้นทราย จึงทำให้ประสิทธิภาพมีความแตกต่างกันมาก

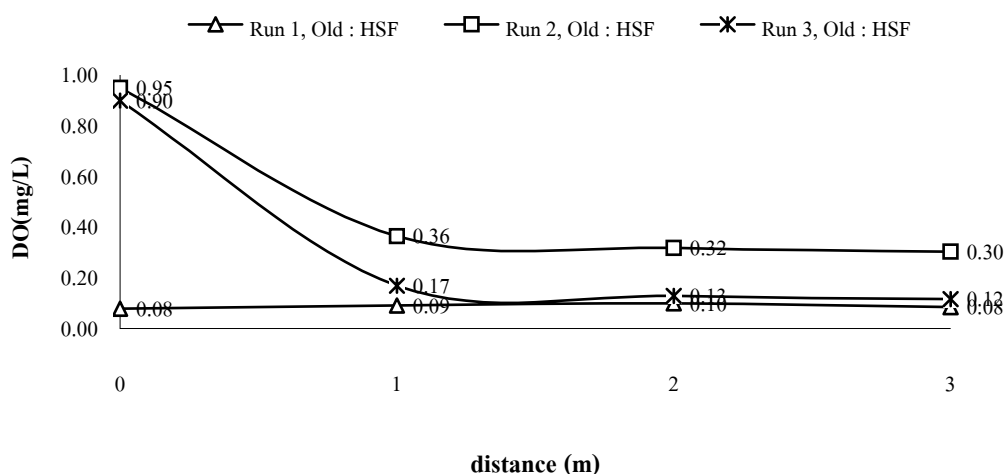
1.3.3 ความเป็นด่างและฟิเอร์ของน้ำชะมูลฝอยสดมีค่าต่ำกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่ามากโดยมีค่าความเป็นด่างของน้ำชะมูลฝอยสดและเก่าอยู่ในช่วง 1,000 – 3,200 mg/L และ 7,000 – 9,000 mg/L (Run 1) ; 1,000 – 3,200 mg/L (Run 2, 3) ตามลำดับ เมื่อผ่านเข้าระบบบำบัดความเป็นด่างของน้ำชะมูลฝอยสดมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ค่าฟิเอร์สูงขึ้นด้วย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.6-8.1 ทั้งนี้ค่าความเป็นด่างและฟิเอร์ที่สูงขึ้นมีผลเนื่องมาจาก น้ำเข้ามีฟิเอร์เฉลี่ยค่อนข้างต่ำ(เป็นกรดเล็กน้อย) ประกอบกับเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในสถานะมีออกซิเจนในระบบซึ่งให้ผลผลิตเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปริมาณของ CO_2 ที่เกิดขึ้นเมื่อละลายนํ้าก็ให้สภาพความเป็น

กรดบวกกับสภาพของน้ำชะมูลฝอยที่เป็นกรดเล็กน้อย จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบบางตัวในอนุภาคของทรายเช่น เกลือคาร์บอเนต ถูกละลายกลายเป็น HCO_3^- และอีกปัจจัยหนึ่งสภาพต่างอาจเกิดจาก $\text{NH}_3\text{-N}$ ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้อิออนแอมโมเนียม (NH_4^+) และอิออนไฮดรอกไซด์ (OH^-) ดังนั้นไม่ว่าจะเป็น OH^- หรือ HCO_3^- ล้วนทำให้พีเอชและความเป็นด่างในน้ำมีค่าสูงขึ้น ซึ่งมีรายงานว่าความเป็นด่างรวมที่เกิดขึ้นประมาณ 7.14 mg/L (ในรูปของ CaCO_3) ถูกใช้ไปในการเกิดไนตริฟิเคชัน 1 mg/L ของแอมโมเนียมไนโตรเจน และ 1.98 โมลของแอมโมเนียมไนโตรเจนถูกปล่อยออกมาต่อทุก 1 โมลของแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ใช้ไป (Kadlec and Knight, 1996) ดังนั้นปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะมีอัตราการเกิดสูงในสภาพที่มีความเป็นด่างรวมและพีเอชค่อนข้างต่ำ (สุวศา, 2544) ส่วนน้ำชะมูลฝอยเก่าความเป็นด่างมีค่าลดลงและพีเอชไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ด้วยเหตุผลนี้แสดงว่าน้ำชะมูลฝอยเก่าเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน ในโตรเจน และปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้น้อยซึ่งสอดคล้องกับผลในข้อ 1.1 และ 1.2 ดังกล่าวข้างต้น

1.3.4 ออกซิเจนละลาย (ที่ระดับ 40 cm) ออกซิเจนละลายที่ปล่อยเข้าระบบของน้ำชะมูลฝอยสดมีค่าต่ำกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่า และเมื่อผ่านเข้าระบบใน Port 1 (ระยะทาง 1 m) ออกซิเจนละลายมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วทั้งในกรณีของน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า และมีค่าค่อนข้างต่ำตลอดความยาวบ่อ ซึ่งเป็นค่าออกซิเจนที่เหลืออยู่ในระบบ อย่างไรก็ตาม DO ที่ระดับผิวบ่อคงมีค่าสูงกว่านี้เนื่องจากการถ่ายเทจากอากาศโดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากออกซิเจนถูกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่



ภาพที่ 25 DO Profile ของน้ำชะมูลฝอยสด ในระบบ HSF



ภาพที่ 26 DO Profile ของน้ำชะมูลฝอยเก่า ในระบบ HSF

หมายเหตุ: ใช้ประกอบคำอธิบายในภาพที่ 25 และ 26

- 1) Distance 1, 2 และ 3 m. เท่ากับ Port 1, Port 2 และ Eff
- 2) ค่าที่แสดงในกราฟเป็นค่าเฉลี่ยของ DO ที่ความลึก 40 cm จาก Surface

จากการทดลองและทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในน้ำทิ้งเมื่อผ่านระบบบำบัดบึงประดิษฐ์แบบ HSF ของการบำบัดน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งชี้จากตารางที่ 18 เช่น COD, BOD, TKN, SS และ pH เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมพบว่า COD, BOD และ TKN ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุก HLR ส่วนค่า SS และ pH ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามที่กำหนด (ภาคผนวก ก)

2. ระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง (VSF) ที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ (HLR)

1, 2.8, 5.6 cm/d และระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 28, 10, 5 d

2.1 การบำบัดสารอินทรีย์ในระบบ VSF

สำหรับการบำบัดสารอินทรีย์ของน้ำชะมูลฝอยในระบบ VSF พบว่า สารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยสดถูกกำจัดได้ดีในระบบ VSF ซึ่งให้ประสิทธิภาพทั้ง 3 Run (ตารางที่ 21) อยู่ในช่วงร้อยละ 89-96 และ 87-98 ในการกำจัด COD และ BOD ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับระบบ HSF แล้ว

ตารางที่ 20 ลักษณะน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า (Influent และ Effluent) ของระบบ VSF: Run 1, Run 2 และ Run 3

Parameter	Inf. Fresh	Avg. Inf.	Avg. Effluent (mg/L), Fresh			Inf. Old	Inf. Old	Avg. Inf	Avg. Inf	Avg. Inf	Avg. Effluent (mg/L), Old		
	(Run 1, Run 2, Run 3)	Fresh, (mg/L)	Run 1	Run 2	Run 3	(Run 1)	(Run 2, Run 3)	Old, (Run 1)	Old, (Run 2)	Old, (Run 3)	Run 1	Run 2	Run 3
TCOD	5,848-12,816	8,555 ± 2,620	774	302	739	3,453-5,069	474-2,184	4,355 ± 691	1,802 ± 260	553 ± 68	2,831	1,548	454
SCOD	3,280-9,612	5,235 ± 1,662	704	280	611	3,110-4,506	414-2,184	3,938 ± 547	1,694 ± 330	493 ± 68	2,651	1,495	454
SBOD	3,150-7,400	4,170 ± 825	61	124	508	209-278	15-68	242 ± 25	58 ± 10	20 ± 5	106	31	36
TN	144-366	205 ± 15	93	179	188	846-1,454	107-305	1,092 ± 223	270 ± 31	141 ± 31	784	350	241
Org-N	87-262	156 ± 62	58	44	57	129-482	56-146	268 ± 143	95 ± 43	86 ± 25	92	116	144
NH ₃ -N	43-108	82 ± 32	23	133	128	711-967	88-441	809 ± 96	362 ± 58	100 ± 19	686	231	90
NO ₂ -N	0.0-3.2	2.58 ± 0.42	11	0.0	0.3	2.95-3.26	0.98-2.68	3.10 ± 0.1	1.3 ± 0.2	2.3 ± 0.5	3.0	2.0	0.3
NO ₃ -N	0.3-3.8	2.00 ± 1.5	0.7	2.6	2.0	1.59-2.85	0.99-2.50	2.4 ± 0.5	1.4 ± 0.5	2.0 ± 0.4	2.9	1.9	7.5
TP	4.3-23.4	10.8 ± 5.3	0.7	2.9	2.2	7.26-8.80	1.4-5.4	8.0 ± 0.8	5.0 ± 0.6	1.5 ± 0.1	7.0	4.0	1.7
SS	320-825	503 ± 223	64	135	183	124-223	10-158	162 ± 54	151 ± 9	15.8 ± 8.1	93	36	25
Alk ⁻	1,150-3,200	1,750 ± 474	3,060	2,800	2,750	7,700-9,050	1,550-3,150	8,400 ± 676	2,725 ± 601	1,775 ± 318	4,533	3,000	2,400
Cl ⁻	125-1,000	790 ± 42	1,879	762	1,250	2,699-3,199	400-875	2,932 ± 252	750 ± 177	500 ± 100	2,499	1,275	1,125
pH ^a	4.25-6.47	4.9 ± 0.5	7.8	7.8	7.6	8.2-8.5	7.9-9.2	8.4 ± 0.1	9.0 ± 0.2	8.3 ± 0.6	8.3	8.5	7.8
EC ^b	1.45-6.66	3.68 ± 3.16	8.6	11.3	5.8	17.4-21.3	1.4-13.1	19.4 ± 1.9	11 ± 3	3.7 ± 3.3	16	14	7.5

หมายเหตุ: Average ± SD.

^a ไม่มีหน่วย

^b หน่วย mS/cm

ตารางที่ 21 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในโตรเจนและพารามิเตอร์อื่น ๆ ของน้ำชะมูล
ฝอยสดและเก่า ในระบบ VSF

Parameter (mg./L)	Inf., Fresh (R1, R2, R3)	%R, Fresh Leachate (VSF)			Inf., Old (R1)	Inf., Old (R2, R3)	%R, Old Leachate (VSF)		
		Run 1	Run 2	Run 3			Run 1	Run 2	Run 3
TCOD	5,848-12,816	89	96	91	3,453-5,069	474-2,184	34	12	23
SCOD	3,280-9,612	85	95	86	3,110-4,506	414-2,184	31	7	10
SBOD	3,150-7,400	98	98	87	209-278	15-68	57	46	< 0
TN	144-366	55	22	0	846-1,454	107-305	27	24	< 0
Org-N	87-262	56	70	51	129-482	56-146	60	< 0	< 0
NH ₃ -N	43-108	67	< 0	< 0	711-967	88-441	17	36	10
NO ₂ -N	0.0-3.2	< 0	0	88	2.95-3.26	0.98-2.68	< 0	< 0	92
NO ₃ -N	0.3-3.8	18	< 0	< 0	1.59-2.85	0.99-2.50	< 0	< 0	< 0
TP	4.3-23.4	97	65	86	7.26-8.80	1.4-5.4	16	15	< 0
SS	320-825	86	71	79	124-223	10-158	40	76	< 0
Alk ⁻	1,150-3,200	< 0	< 0	< 0	7,700-9,050	1,550-3,150	45	< 0	< 0
Cl ⁻	125-1,000	< 0	< 0	< 0	2,699-3,199	400-875	14	< 0	< 0

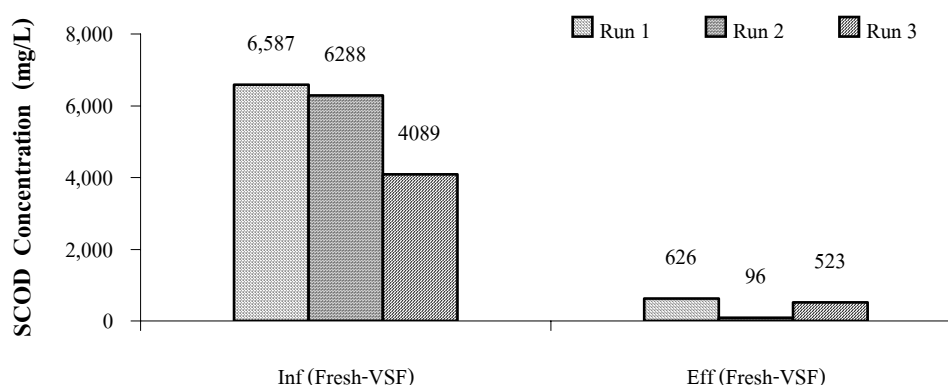
หมายเหตุ: R1 = Run 1, R2 = Run 2, R3 = Run 3

ระบบนี้ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ต่ำกว่าระบบ HSF เล็กน้อย โดยที่ HLR เท่ากับ 2.8 cm/d ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเช่นเดียวกับระบบ HSF ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยสด

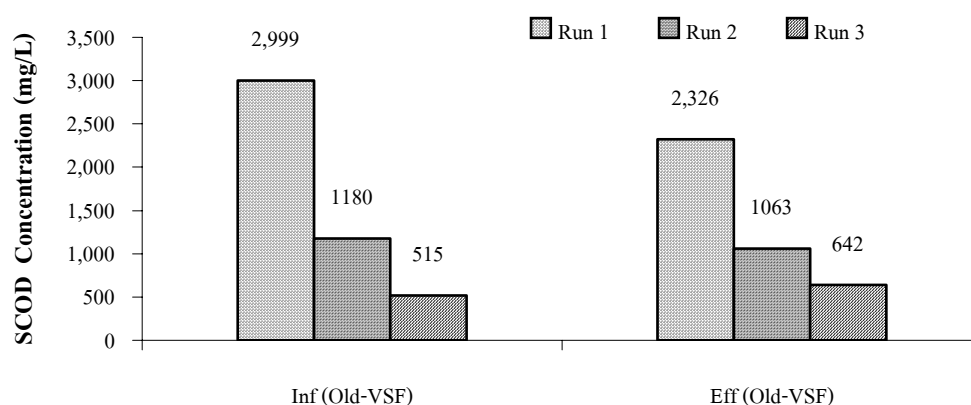
ส่วนการบำบัดน้ำชะมูลฝอยเก่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ทั้ง 3 Run ต่ำกว่าน้ำชะมูลฝอยสดโดยมีการกำจัด COD อยู่ในช่วงร้อยละ 12-34 และ BOD อยู่ในช่วง 0-57 ที่ทุกกรณี และที่ HLR 1 cm/d ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเช่นเดียวกับระบบ HSF ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยเก่า สรุปได้ว่าการบำบัดของระบบ VSF ซึ่งเมื่อเทียบกับระบบ HSF แล้ว พบว่า ระบบ VSF ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดทั้งน้ำชะมูลฝอยสดและเก่าต่ำกว่าระบบ HSF

2.2 การบำบัดในโตรเจนในระบบ VSF

สำหรับการบำบัดในโตรเจนของน้ำชะมูลฝอยในระบบ VSF แสดงในตารางที่ 20, 21 การบำบัดในโตรเจนของระบบ VSF (ภาพที่ 29) วิเคราะห์ผลได้ดังนี้



ภาพที่ 27 ความเข้มข้น SCOD ของน้ำชะมูลฝอยสดในระบบ VSF ; Run 1, Run 2 และ Run 3



ภาพที่ 28 ความเข้มข้น SCOD ของน้ำชะมูลฝอยเก่าในระบบ VSF ; Run 1, Run 2 และ Run 3

ในการทดลองใช้น้ำชะมูลฝอยสด พบว่า ไนโตรเจนถูกกำจัดได้ดี ที่ HLR 1 cm/d โดยให้ประสิทธิภาพของ TN, Org-N และ $\text{NH}_3\text{-N}$ คิดเป็นร้อยละ 55, 56 และ 67 ตามลำดับ กรณีของ HLR ที่ 2.8 กับ 5.6 cm/d พบว่า การกำจัด TN และ Org-N ทั้งสองกรณีอยู่ในช่วงร้อยละ 0-22 และ 51-70 ตามลำดับ แต่การกำจัด $\text{NH}_3\text{-N}$ มีค่าต่ำกว่าศูนย์ทั้งสองกรณีชี้ให้เห็นว่า Nitrification เกิดขึ้นได้ไม่ดี โดยเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ HSF พบว่า ใน Run 1 ของระบบ VSF ให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนรวม (TN เท่ากับร้อยละ 55) สูงกว่าระบบ HSF (TN เท่ากับร้อยละ 43) แต่ในกรณีของ Run 2 และ 3 ระบบ VSF ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบ HSF เนื่องจากเมื่ออัตราภาระบรรทุก

ทางสารอินทรีย์สูงขึ้นมีพืชบางส่วนตาย (บริเวณต้นบ่อ) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า HLR ที่ 2.8, 5.6 cm/d ไม่เหมาะสมกับระบบ VSF สรุปได้ว่าระบบ VSF ให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนรวมในน้ำชะมูลฝอยสดสูงกว่าระบบ HSF ที่ HLR 1cm/d ซึ่งเป็น HLR ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดของทั้งสองระบบ

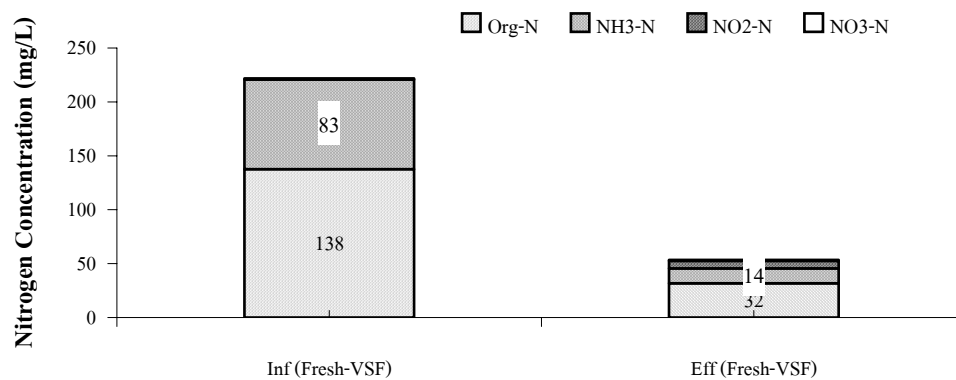
ส่วนน้ำชะมูลฝอยเก่า พบว่า ไนโตรเจนในรูป $\text{NH}_3\text{-N}$ และ pH ของน้ำเข้ามีค่าสูงอยู่ในช่วง 700-1,000 mg/L (Run 1) ; 80-450 mg/L (Run 2, 3) และ 7.9-9.2 (Run 1, 2, 3) ตามลำดับ จากค่าดังกล่าวนี้ทำให้ระบบเกิดปฏิกิริยา Nitrification ได้ไม่ดี เพราะที่ความเข้มข้นของ $\text{NH}_3\text{-N}$ และ pH สูง ๆ จะไปยับยั้งไนตริไฟอิงแบคทีเรียในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Paul and Clark, 1996) ทำให้แอมโมเนียไนโตรเจนมีการกำจัดโดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้น้อยกว่าน้ำชะมูลฝอยสด ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัด TN และ $\text{NH}_3\text{-N}$ ดีที่สุดที่ HLR 2.8 cm/d คิดเป็นร้อยละ 24 และ 36 ตามลำดับ กล่าวโดยสรุปได้ว่าระบบ VSF ให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนรวมต่ำกว่าระบบ HSF ในน้ำชะมูลฝอยเก่า

2.3 การบำบัดของแข็งแขวนลอย ฟอสฟอรัส และพารามิเตอร์อื่น ๆ ในระบบ VSF

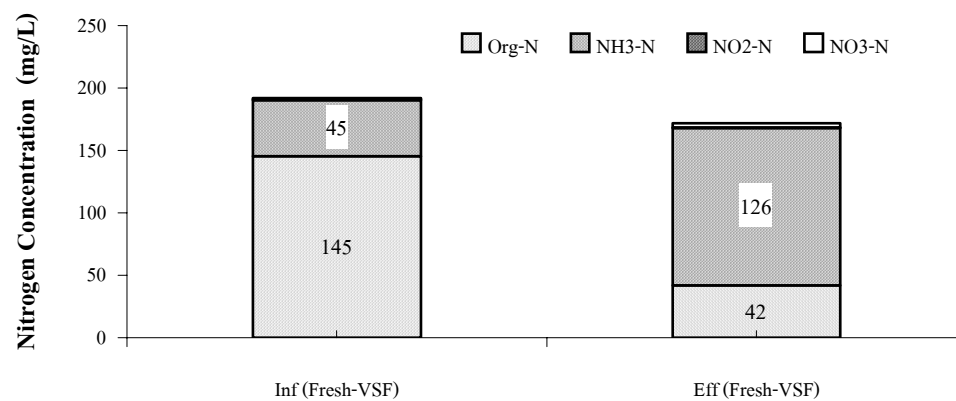
2.3.1 การบำบัดของแข็งแขวนลอย เมื่อผ่านเข้าระบบบำบัดของแข็งแขวนลอยในน้ำชะมูลฝอยสดถูกกำจัดโดยระบบ VSF คิดเป็นประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 86, 71, 79 (ตารางที่ 21) ที่ HLR 1, 2.8, 5.6 cm/d ตามลำดับ ส่วนน้ำชะมูลฝอยเก่าให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 40, 76 และ < 0 ที่ HLR 1, 2.8 และ 5.6 cm/d ตามลำดับ ซึ่งทั้งระบบ HSF และ VSF มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยสูงในน้ำชะมูลฝอยสด

2.3.2 การบำบัดฟอสฟอรัส ฟอสฟอรัสในระบบ VSF สามารถกำจัด TP ได้ดีกรณีน้ำชะมูลฝอยสด โดยให้ประสิทธิภาพร้อยละ 65-97 ตรงกันข้ามกับน้ำชะมูลฝอยเก่าให้ประสิทธิภาพในช่วงร้อยละ < 0 -16 ทั้งสามอัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ทั้งนี้อาจสืบเนื่องจากรูปของฟอสฟอรัสที่พบในน้ำชะมูลฝอยอาจแตกต่างกันโดย PO_4^{3-} (Free-form หรือออร์โทฟอสฟอรัส) พบในน้ำชะมูลฝอยสดมากกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่า โดยปกติแล้วการกำจัดฟอสฟอรัสเมื่อผ่านเข้าระบบก็ถูกกำจัดโดยการตกตะกอนกับไอออนของโลหะ(ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์) และการกรอง จึงทำให้ฟอสฟอรัสถูกกำจัดจากกระบวนการนี้ได้เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีการสะสมอยู่ในบริเวณของชั้นทราย แต่ในกรณีของน้ำชะมูลฝอยสดเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด

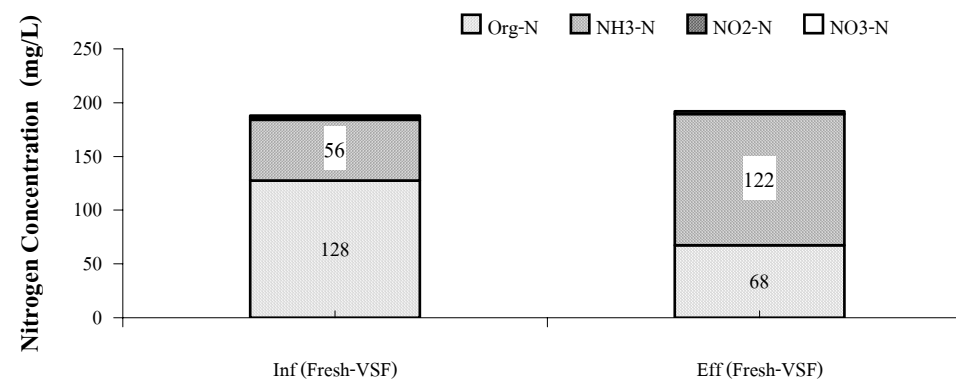
ก) Run 1



ข) Run 2

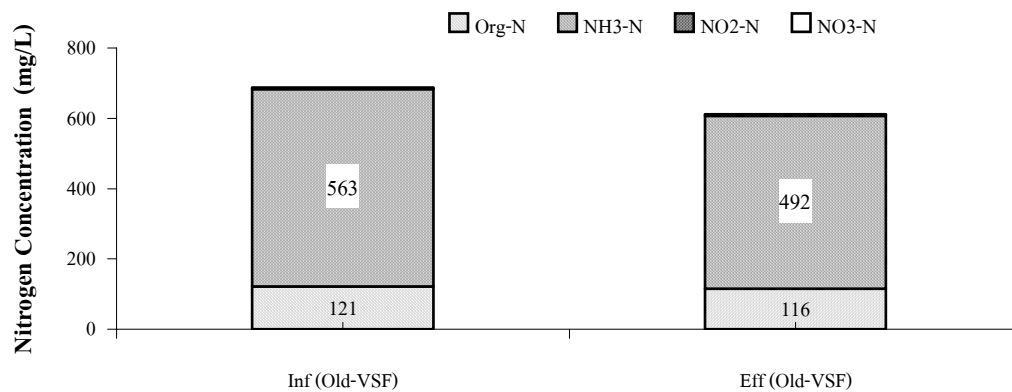


ค) Run 3

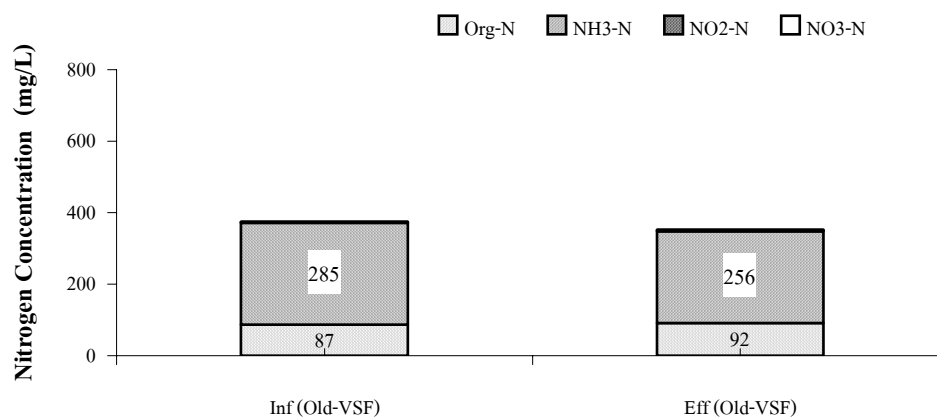


ภาพที่ 29 ความเข้มข้นไนโตรเจนของน้ำชะมูลฝอยสดในระบบ VSF

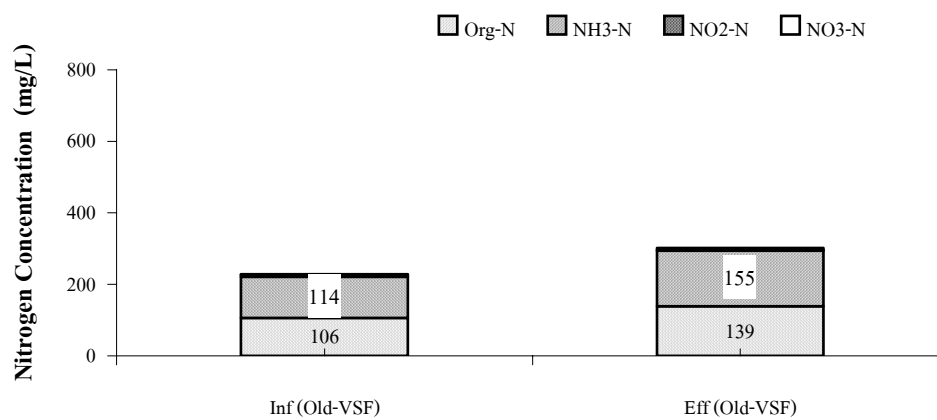
ก) Run 1



ข) Run 2



ค) Run 3



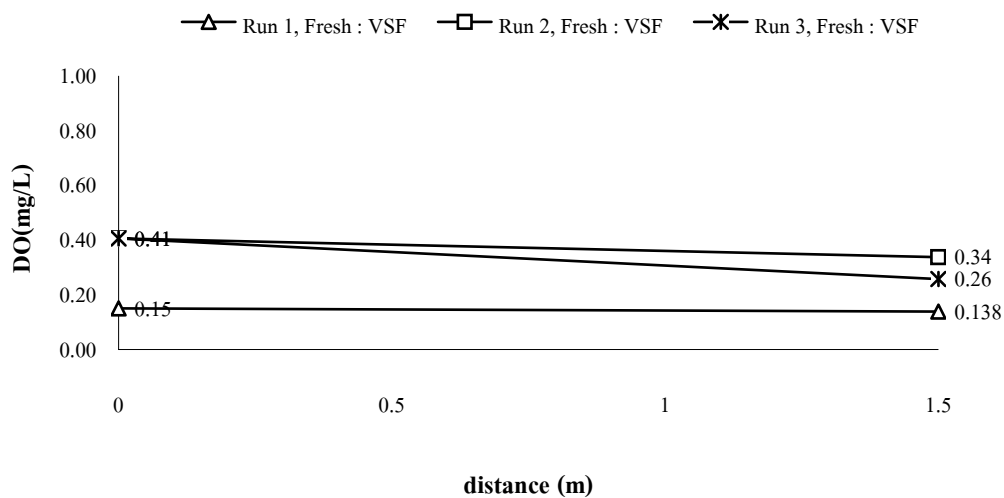
ภาพที่ 30 ความเข้มข้นไนโตรเจนของน้ำชะมูลฝอยเก่า ในระบบ VSF

ของระบบ VSF กับระบบ HSF พบว่า ระบบ VSF ให้ประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่าระบบ HSF ทั้งนี้เพราะใน Run 2 และ 3 ของระบบ VSF มีฟิซบางส่วนตาย ดังนั้นจึงอาจมีฟอสฟอรัสจากซากฟิชนี้จะถูกปลดปล่อยออกมา ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสโดยรวมต่ำ

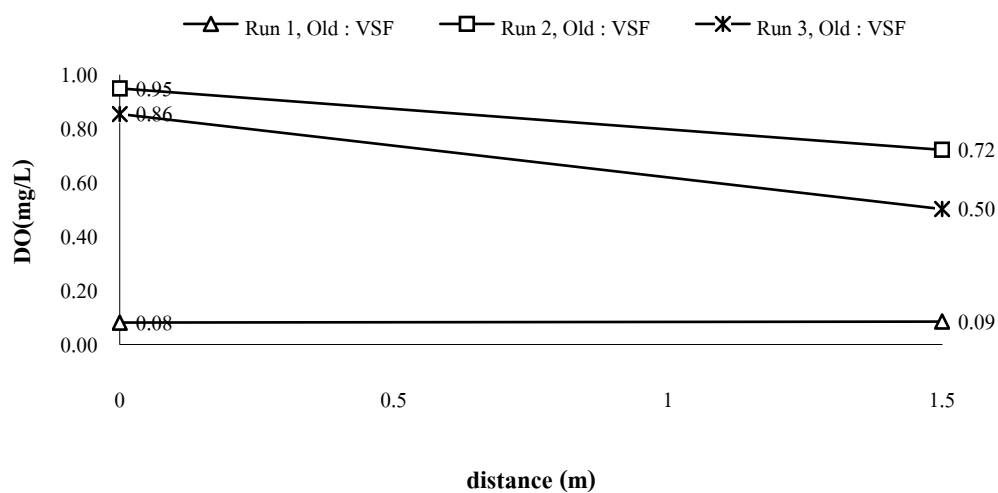
2.3.3 ความเป็นด่างและพีเอช ในน้ำชะมูลฝอยสดเมื่อผ่านเข้าระบบบำบัดของทุก Run พบว่าความเป็นด่างและพีเอชมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อผ่านระบบบำบัดเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในปริมาณสูง ซึ่ง CO_2 เมื่อละลายน้ำจะกลายเป็น HCO_3^- ประกอบกับในระบบมี $\text{NH}_3\text{-N}$ ในปริมาณมากทำให้ไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) และไอออนไฮดรอกไซด์ (OH^-) เกิดขึ้นมากเช่นเดียวกัน ซึ่งทั้งไอออนของ HCO_3^- และ OH^- ที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ค่าความเป็นด่างและพีเอชสูงขึ้นตามลำดับ ส่วนน้ำชะมูลฝอยเก่า พบว่า เมื่อผ่านเข้าระบบบำบัดความเป็นด่างมีค่าลดลงใน Run 1 ส่วน Run 2, 3 มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย และพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้มีเหตุผลเช่นเดียวกับระบบ HSF

2.3.4 ออกซิเจนละลาย ออกซิเจนของน้ำชะมูลฝอยสดและเก่าเมื่อปล่อยเข้าระบบจะมีค่าลดลง เนื่องจากใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจน รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และพบอีกว่า ออกซิเจนละลายของน้ำออกในระบบ VSF อาจมีค่าสูงกว่าระบบ HSF โดยเฉพาะ Run 2 และ 3 เนื่องจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของระบบ VSF เกิดไม่ดีประกอบกับสารอินทรีย์ย่อยสลายยากจึงทำให้เหลือปริมาณออกซิเจนละลายในระบบอยู่มากสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในหัวข้อ 2.1 และ 2.2 ดังกล่าวข้างต้น อย่างไรก็ตาม สุวสา (2544) รายงานว่า ระบบ VSF เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีกว่าระบบ HSF เมื่อบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ HLR 3 cm/d ทั้งนี้อาจเนื่องจากในน้ำชะมูลฝอยเก่ามีปริมาณ $\text{NH}_3\text{-N}$ ค่อนข้างสูง ซึ่งมีผลต่อฟิซในระบบจึงอาจทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำ

จากการทดลองและทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำทิ้งเมื่อผ่านระบบบำบัดบึงประดิษฐ์แบบ VSF ของการบำบัดน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งชี้จากตารางที่ 20 เช่น COD, BOD, TKN, SS และ pH เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมพบว่า COD, BOD และ TKN ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนค่า SS และ pH ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามที่กำหนดเช่นเดียวกับระบบ HSF (ภาคผนวก ก)



ภาพที่ 31 DO Profile ของน้ำชะมูลฝอยสด ในระบบ VSF



ภาพที่ 32 DO Profile ของน้ำชะมูลฝอยเก่า ในระบบ VSF

หมายเหตุ: ใช้ประกอบคำอธิบายในภาพที่ 31 และ 32

- 1) ค่าที่แสดงในกราฟเป็นค่าเฉลี่ยของ DO ที่ความลึก 40 cm จาก Surface

3. สมดุลมวลสารอินทรีย์และไนโตรเจนในระบบ HSF และ VSF ของน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า

3.1 สมดุลมวลสารอินทรีย์ในระบบ HSF และ VSF

สำหรับระบบ HSF กรณีน้ำชะมูลฝอยสดให้ประสิทธิภาพการกำจัดทั้ง 3 HLR ไกล่เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 92-99 พบว่า สารอินทรีย์มีการสะสมในรูปชีวมวลบนดินในระบบ ร้อยละ 37-43 ส่วนที่เหลืออยู่ในรูปก๊าซ CO_2 , CH_4 , และ ชีวมวลบนราก คิดเป็นร้อยละ 56-60 จาก ข้อมูลดังกล่าวถือว่าระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ค่อนข้างดี ส่วนกรณีน้ำชะมูลฝอยเก่าที่ให้ ประสิทธิภาพการกำจัดทั้ง 3 HLR อยู่ในช่วงร้อยละ 42-71 คิดเป็นการสะสมในรูปชีวมวลบนดิน ในระบบร้อยละ 0-15.5 และอยู่ในรูปก๊าซ CO_2 , CH_4 , และ ชีวมวลบนรากพืช คิดเป็นร้อยละ 0-10.7 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์กับน้ำชะมูลฝอยสด พบว่า น้ำชะมูลฝอยเก่าให้ ประสิทธิภาพต่ำกว่าน้ำชะมูลฝอยสด

ตารางที่ 22 สมดุลมวลสารอินทรีย์ในระบบ HSF และ VSF ของน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า

HLR (cm/d) / Type	Inf.	Eff.	Accumulate	Unaccount*
Leachate	g. (%)	g. (%)	Soil, g. (%)	g. (%)
HSF: FL				
1 (Run 1)	3,728 (100)	112 (3.0)	1,375 (36.9)	2,241 (60.1)
2.8 (Run 2)	3,805 (100)	35 (0.9)	1,628 (42.8)	2,142 (56.3)
HSF: OL				
2.8 (Run 2)	584 (100)	431 (73.8)	90.5 (15.5)	62.4 (10.7)
VSF: FL				
1 (Run 1)	4,150 (100)	394 (9.5)	2,235 (53.9)	1,520 (36.6)
2.8 (Run 2)	3,961 (100)	65 (1.7)	1,851 (46.7)	2,142 (51.6)
VSF: OL				
2.8 (Run 2)	743 (100)	670 (90.1)	74 (9.9)	0 (0)

หมายเหตุ: 1) * Biomass accumulated in soil + CO_2 + CH_4

2) FL: Fresh Leachate, OL: Old Leachate

3) Fresh Leachate; ไม่มีการวิเคราะห์สมดุลมวลของสารอินทรีย์และไนโตรเจนของ Run 3 เพราะพืชในระบบบางส่วนตายจึงขาดสมดุลวัฏจักรของพืชที่ตาย

- 4) Old Leachate; ไม่มีการวิเคราะห์สมดุลมวลของสารอินทรีย์และไนโตรเจนของ Run 1 และ Run 3 เพราะใน Run 1 ฟิชในระบบตาย ส่วนใน Run 3 ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ

ส่วนระบบ VSF การบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยสดของระบบนี้ที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 85-98 ทุกอัตราภาระทางชีวศาสตร์ คิดเป็นการสะสมในรูปของชีวมวลบนดินในระบบร้อยละ 37-52 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ HSF พบว่า ระบบ VSF มีการสะสมของสารอินทรีย์ในรูปดังกล่าวในระบบสูงกว่าระบบ HSF ส่วนน้ำชะมูลฝอยเก่าที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 7-57 มีการสะสมในรูปชีวมวลบนดินและในรูปอื่น ๆ ในระบบคิดเป็นร้อยละ 0-9.9 ซึ่งพบว่าปริมาณการสะสมต่ำกว่าระบบ HSF ซึ่งให้เห็นว่าระบบมีกิจกรรมของจุลินทรีย์ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยเก่ามีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายต่ำ จึงส่งผลให้ชีวมวลที่เกิดจากกิจกรรมของแบคทีเรียในการกำจัดสารอินทรีย์ต่ำด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ การที่ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ VSF ต่ำกว่าระบบ HSF อาจเป็นเพราะด้วยทิศทางกรไหลแบบ Plug Flow ในระบบ HSF จะทำให้มวลของน้ำชะมูลฝอยสัมผัสกับออกซิเจนที่ถ่ายเทบริเวณผิวของตัวกลางตลอดความยาวของบ่อได้มากกว่าทิศทางกรไหลแบบ Complete-mixed ในระบบ VSF ที่มีทิศทางกรไหลในแนวดิ่ง ซึ่งปริมาณออกซิเจนจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อน้ำชะมูลฝอยไหลตามแนวดิ่งถึงลงสู่ก้นบ่อ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์เกิดได้ไม่ดีในระบบ VSF

ดังนั้นจากการศึกษาประสิทธิภาพและการทำสมดุลมวลของสารอินทรีย์ ทั้งระบบ HSF และ VSF สรุปได้ว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เกิดขึ้นได้ดีในระบบ HSF ทั้งน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า กรณีน้ำชะมูลฝอยสดที่ HLR 1, 2.8 และ 5.6 cm/d ของระบบ HSF ให้ประสิทธิภาพดีใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ทั้งสามอัตราภาระทางชีวศาสตร์ ทั้งนี้จากการพิจารณาการทำสมดุลมวลร่วมด้วย พบว่า ที่ HLR 2.8 cm/d ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ส่วนกรณีน้ำชะมูลฝอยเก่าที่ HLR 1 cm/d ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ดีที่สุด

3.2 สมดุลมวลไนโตรเจนในระบบ HSF และ VSF

สำหรับระบบ HSF ในการบำบัดไนโตรเจนในอัตราภาระทางชีวศาสตร์ทุกอัตราการบำบัด TN และ $\text{NH}_3\text{-N}$ ของน้ำชะมูลฝอยสดให้ประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 4-43 และ < 0-24 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ไนโตรเจนรวมไม่มีการสะสมอยู่ในรูปชีวมวลของตัวกลางทราย แต่มีการ

สะสมในพืชคิดเป็นร้อยละ 0-21 ส่วนที่เหลืออยู่ในรูปก๊าซ N_2 , NH_3 , N_2O และ ชีวมวลบนรากพืช คิดเป็นร้อยละ 28-37 ส่วนกรณีของน้ำชะมูลฝอยเก่าที่ประสิทธิภาพการบำบัด TN และ NH_3-N ทุกกรณีของอัตราการทางชลศาสตร์อยู่ในช่วงร้อยละ < 0-46 และ 34-49 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในโตรเจนรวมสะสมในรูปชีวมวลบนตัวกลางทรายแต่ไม่สะสมในพืชคิดเป็นร้อยละ 0-10.5 ส่วนที่เหลืออยู่ในรูปก๊าซ N_2 , NH_3 , N_2O และ ชีวมวลบนรากพืช คิดเป็นร้อยละ 0-12.9 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า พบว่า ให้ประสิทธิภาพการบำบัดในโตรเจนในรูป TN ได้ใกล้เคียงกัน แต่การบำบัด NH_3-N ของน้ำชะมูลฝอยสดให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่า ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์ในโตรเจน (Org-N) ของน้ำชะมูลฝอยสดมีปริมาณสูง ทำให้ NH_3-N ที่ได้จากปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจนมีปริมาณสูงกว่า จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด NH_3-N ต่ำกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่า และขณะเดียวกันปริมาณของ NH_3-N ก็ถูกตรึงด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันกลายเป็น NO_3-N ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่พืชดูดซับเพื่อการเจริญเติบโตได้ดีกว่า จึงทำให้ในโตรเจนมีการสะสมอยู่ในพืชสูงกว่าน้ำชะมูลฝอยเก่าที่มีสถานะถูกยับยั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และทำให้ NH_3-N ของน้ำชะมูลฝอยเก่าถูกกำจัดได้โดยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน และการระเหยของแอมโมเนียที่พืชสูงกว่า 7.5-8 (Jayaweera and Mikkelsen, 1991) ได้เป็นส่วนใหญ่

สำหรับระบบ VSF การบำบัดในโตรเจนของน้ำชะมูลสดทั้งสามอัตราการทางชลศาสตร์ ให้ประสิทธิภาพการบำบัดในรูป TN และ NH_3-N อยู่ในช่วง 0-55 และ < 0-67 ตามลำดับ พบว่า ในโตรเจนรวมมีการสะสมในรูปชีวมวลบนตัวกลางทรายคิดเป็นร้อยละ 0-22.9 และสะสมในพืชร้อยละ 0-52.8 และกลายเป็นก๊าซ N_2 , NH_3 , N_2O และ ชีวมวลบนรากพืชได้น้อยมาก ตรงกันข้ามกับระบบ HSF ซึ่งมีในโตรเจนสะสมอยู่ในตัวกลางทรายและพืชต่ำกว่าและในโตรเจนถูกกำจัดเป็น N_2 , NH_3 และ N_2O ได้ดีกว่า ทั้งนี้จากประสิทธิภาพการกำจัด Org-N ทุกอัตราการทางชลศาสตร์ของระบบ HSF และ VSF ใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 47-72 และ 51-70 ตามลำดับ) แต่การกำจัด NH_3-N ด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันโดยส่วนใหญ่ของระบบ VSF เกิดได้ดีกว่าระบบ HSF ที่ HLR 1 cm/d (ศุวศา, 2544) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดในโตรเจนรวมของระบบ VSF ดีกว่าระบบ HSF แต่การกำจัดในโตรเจนในระบบ HSF เกิดปฏิกิริยากลายเป็นก๊าซ N_2 , NH_3 และ N_2O ได้สมบูรณ์กว่าระบบ VSF ส่วนน้ำชะมูลฝอยเก่าให้ประสิทธิภาพการบำบัดในโตรเจนในรูป TN และ NH_3-N ทุกกรณีของอัตราการทางชลศาสตร์อยู่ในช่วง < 0-27 และ 10-36 ตามลำดับ พบว่าในโตรเจนรวมสะสมในรูปชีวมวลบนตัวกลางทรายร้อยละ 0-5.4 และไม่มีการสะสมในพืช เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ HSF ในกรณีน้ำชะมูลฝอยเก่า พบว่า ระบบ HSF ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า

ระบบ VSF ทั้งนี้กรณีน้ำชะมูลฝอยสดและเก่าของระบบ VSF สำหรับการกำจัดไนโตรเจนให้อยู่ในรูปก๊าซ N_2 , NH_3 และ N_2O เกิดได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าระบบ VSF เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ไม่ดี โดยสอดคล้องกับการรายงานของ สุวศา (2544) คือ ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดได้ดีในส่วนที่มีการไหลของน้ำในแนวราบ (ระบบ HSF)

ตารางที่ 23 สมดุลมวลไนโตรเจนในระบบ HSF และ VSF ของน้ำชะมูลฝอยสดและเก่า

HLR (cm/d) / Type	Inf.	Eff.	Accumulate		Unaccount *
Leachate	g. (%)	g. (%)	Soil, g. (%)	Cattail, g. (%)	g. (%)
HSF: FL					
1 (Run 1)	130 (100)	55 (42.2)	0 (0)	27 (20.8)	48 (37.0)
2.8 (Run 2)	111 (100)	80 (72.2)	0 (0)	0 (0)	31 (27.8)
HSF: OL					
2.8 (Run 2)	201 (100)	154 (76.6)	21 (10.5)	0 (0)	26 (12.9)
VSF: FL					
1 (Run 1)	140(100)	34 (24.3)	32 (22.9)	74 (52.8)	0 (0)
2.8 (Run 2)	123(100)	108 (87.8)	0 (0)	0 (0)	15.1 (12.2)
VSF: OL					
2.8 (Run 2)	234 (100)	222 (94.6)	12.6 (5.4)	0 (0)	0 (0)

หมายเหตุ: 1) * Biomass on root + N_2 + NH_3 + N_2O

2) FL: Fresh Leachate, OL: Old Leachate

3) Fresh Leachate; ไม่มีการวิเคราะห์สมดุลมวลของสารอินทรีย์และไนโตรเจนของ Run 3 เพราะพืชในระบบบางส่วนตายจึงขาดสมดุลวัฏจักรของพืชที่ตาย

4) Old Leachate; ไม่มีการวิเคราะห์สมดุลมวลของสารอินทรีย์และไนโตรเจนของ Run 1 และ Run 3 เพราะใน Run 1 พืชในระบบตาย ส่วนใน Run 3 ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ

ดังนั้นจากการศึกษาประสิทธิภาพและสมดุลมวลของไนโตรเจน สรุปได้ว่า การบำบัดไนโตรเจนของน้ำชะมูลฝอยสดในระบบ VSF ที่ HLR 1 cm/d ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ส่วนกรณีของน้ำชะมูลฝอยเก่าระบบ HSF ที่ HLR 2.8 cm/d ให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนดีที่สุด

จากการศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในครั้งนี้ สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริง พบว่า การบำบัดน้ำชะมูลฝอยสดของระบบ HSF ที่ HLR 1 cm/d เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยระบบบึงประดิษฐ์มากที่สุด

4. การเปรียบเทียบการวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกัน

ในตารางที่ 11 และ 24 พิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองได้ดังนี้

จากการทดลองของ Bulc (1997) ซึ่งเปรียบเทียบได้กับการทดลองของน้ำชะมูลฝอยเก่าในระบบ HSF: Run 2 และ Run 3 (สำหรับการทดลองครั้งนี้) พบว่า การบำบัดสารอินทรีย์ (COD) ของ Bulc (1997) ให้ประสิทธิภาพการบำบัด COD คิดเป็นร้อยละ 68 สำหรับการทดลองครั้งนี้ของระบบดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการบำบัดสาร COD คิดเป็นร้อยละ 42-58 ส่วนการบำบัดไนโตรเจนในรูป $\text{NH}_3\text{-N}$ ของ Bulc (1997) และจากการศึกษานี้ให้ประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในช่วงร้อยละ 81 และ 34-49 ตามลำดับ ซึ่งจากการบำบัด COD และ $\text{NH}_3\text{-N}$ ของทั้งสองกรณีชี้ให้เห็นว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน แต่การบำบัด $\text{NH}_3\text{-N}$ ของการทดลองครั้งนี้ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าเนื่องจาก $\text{NH}_3\text{-N}$ ของน้ำเข้าสำหรับการทดลองครั้งนี้ ($\text{NH}_3\text{-N}$ อยู่ในช่วง 88-441 mg/L) มีค่าสูงกว่าการทดลองของ Bulc (1997) ($\text{NH}_3\text{-N}$ เท่ากับ 88 mg/L)

ตารางที่ 24 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกัน

Parameter (Influent), mg/L	การทดลองครั้งนี้		การทดลองที่คล้ายกัน		
	Fresh Leachate	Old Leachate	Bulc et al., 1997	De Feo et al., 2005	Lee et al., 2004
COD	5,848-12,816	474-5,069	1,264	512.5-2,050	1,115-1,160
BOD	3,280-9,612	414-4,506	60	-	343-411
TKN	133-364	168-1,454	-	-	200-218
$\text{NH}_3\text{-N}$	43-108	88-967	88	185.4-741.4	-
$\text{NO}_3\text{-N}$	0.3-3.8	0.99-3.26	-	65.5-262.2	-
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.0-3.2	0.98-2.85	-	-	-
SS	320-825	10-223	400	-	519-873
TP	4.3-23.4	1.4-8.8	-	-	39-44
pH	4.25-6.47	7.9-9.2	-	7.4-7.6	-
Cl^-	125-1,000	400-3,199	-	269.4-1,078	-

ตารางที่ 24 (ต่อ)

Parameter (Influent), mg/L	การทดลองครั้งนี้		การทดลองที่คล้ายกัน		
	Fresh Leachate	Old Leachate	Bulc et al., 1997	De Feo et al., 2005	Lee et al., 2004
Type of Wastewater	leachate	leachate	leachate	leachate	swine
Type of System	HSF, VSF	HSF, VSF	HSF	VSF	HSF
Loading (kg/ha.d)	740-4,600	300-600	397	52-207	390-1,370
Size (m ³)	1 X 3 X 0.7	1 X 3 X 0.7	10 X 21 X 0.9	Ø 0.3 X 0.7	2.6 X 9.5 X 0.65

ส่วนการทดลองของ De Feo (2005) ซึ่งเปรียบเทียบกับผลการทดลองของน้ำชะมูลฝอยเก่าในระบบ VSF: Run 1, 2 และ 3 (สำหรับการทดลองครั้งนี้) พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ (COD) ของ De Feo (2005) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 42-61 สำหรับการศึกษานี้ของระบบดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการบำบัด COD อยู่ในช่วง 7-34 ส่วนการบำบัดไนโตรเจนสำหรับการทดลองของ De Feo (2005) และการศึกษานี้ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูป $\text{NH}_3\text{-N}$ อยู่ในช่วงร้อยละ 40-48 และ 10-36 ตามลำดับ จากประสิทธิภาพการบำบัด COD และ $\text{NH}_3\text{-N}$ ของทั้งสองกรณีให้ผลที่สอดคล้องกัน แต่ประสิทธิภาพการบำบัด COD และ $\text{NH}_3\text{-N}$ สำหรับการทดลองครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าเนื่องจากในกรณีของ VSF: Run 1 มีความเข้มข้นของทุกพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 24 สูงกว่าน้ำเข้าสำหรับการทดลองของ De Feo มาก ดังนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจึงมีค่าต่ำกว่า

และการทดลองของ Lee (2004) เปรียบเทียบได้กับการทดลองของน้ำชะมูลฝอยสดในระบบ HSF (สำหรับการทดลองครั้งนี้) จากผลการทดลอง พบว่า การบำบัดสารอินทรีย์ (COD) ของ Lee (2004) คิดเป็นร้อยละ 77-84 สำหรับการศึกษานี้ให้ประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 92-98 ส่วนการบำบัดไนโตรเจนรวม (TN) สำหรับการทดลองของ Lee (2004) และการศึกษานี้ให้ประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 10-24 และ 4-43 ตามลำดับ ซึ่งจากประสิทธิภาพการบำบัด COD และ TN ทั้งสองกรณีให้ผลสอดคล้องใกล้เคียงกัน