บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาค่าอัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมของระบบจัดเรียงดินหลายชั้นที่มีประสิทธิภาพในการลดไนโตรเจนและสารอินทรีย์ในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองแรกใช้อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.1, 0.3 และ0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ชุดการทดลองที่ 2 ใช้อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองชุดแรก $\pm$ 0.05 $ม^3/(ม^2.วัน)$ โดยมีผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการทดลองชุดที่ 1

การทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพในการลดไนโตรเจนและสารอินทรีย์ในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะ โดยได้ทำการศึกษาที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.1, 0.3 และ0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ในการทดลองช่วงแรกนั้นได้ทำการเติมอากาศอย่างต่อเนื่องให้แก่ระบบในปริมาณ 4.2 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ซึ่งพบว่าระบบสามารถบำบัดสารอินทรีย์และแอมโมเนียไนโตรเจนได้ แต่ไม่สามารถบำบัดไนเตรทได้เนื่องจากภายในแบบจำลองมีอากาศที่มากเกินไป ดังนั้นจึงทำการลดปริมาณอากาศที่เติมเข้าไปเป็น 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ในช่วงวันที่ 59 ถึง 82 เพื่อลดปริมาณอากาศภายในแบบจำลองแต่ค่าไนเตรทในน้ำที่ออกจากระบบยังคงมีค่าสูง จึงทำการเติมอากาศเป็นจังหวะโดยตั้งเวลาเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 ชม.และ 8 ชม. ตามลำดับ ในการทดลองแต่ละช่วงการทดลองนั้นในการกำหนดช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่นั้นได้คำนึงถึงปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน และออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำออกเป็นหลัก โดยในช่วงแรกของการทดลองนั้นระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 35 ถึง 52 ในช่วงที่ 2 ของการทดลองระบบบำบัดเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 69 ถึง 82 ส่วนในช่วงที่ 3 ระบบบำบัดเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 114 ถึง 124

เมื่อทำการเก็บน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะในบ่อมาใช้ในการทดลอง พบว่าน้ำในบ่อมีลักษณะเป็นสีเหลืองขุ่นเมื่อผ่านการทดลองพบว่าน้ำที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองมีลักษณะสีเหลืองใส ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นไม่สามารถกำจัดสีของน้ำได้ แต่สามารถกรองตะกอนแขวนลอยที่อยู่ในน้ำได้ โดยผลการศึกษา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ลักษณะน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1 ได้แสดงดังตาราง 4.1 และน้ำที่ผ่านการบำบัดในการทดลองชุดที่ 1 ได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ก1-ก5 และมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

ตาราง 4.1 ลักษณะของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย
ซีโอดี	มก/ล.	209.7
บีโอดี	มก/ล.	58.8
เจดาลห์ไนโตรเจน	มก/ล.	90.1
แอมโมเนียไยโตรเจน	มก/ล.	81.2
ไนโตรเจนรวม	มก/ล.	92.7
ฟอสฟอรัสรวม	มก/ล.	0.08
ออกซิไดซ์ไนโตรเจน	มก/ล.	2.6
พีเอช	-	7.7-8.1
ค่าการนำไฟฟ้า	mS/cm.	3.9

4.1.1 การศึกษาการกำจัดไนโตรเจน

ในการศึกษาถึงการกำจัดไนโตรเจนได้ทำการศึกษาถึง แอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน และไนโตรเจนรวม โดยตารางที่ 4.2 และตารางในภาคผนวกที่ ก1– ก2 ได้แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

ก. แอมโมเนียไนโตรเจน

แอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเข้าระบบและออกจากระบบบำบัดตลอดช่วงการศึกษา ได้แสดงดังรูป 4.1 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน จากการทดลองพบว่าไนโตรเจนในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่นำมาทดลองส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน แสดงว่าที่หลุมฝังกลบขยะได้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนส่วนหนึ่งแล้ว จึงทำให้น้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่สูง ดังตาราง 4.2 จะเห็นได้ว่าน้ำใต้ดินที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนโดยเฉลี่ยในช่วงแรกเท่ากับ 70.7 มก./ล.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน และไนโตรเจนรวม ที่เข้าและออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1

อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ ($ม^3/(ม^2.วัน)$)	ช่วงที่ *	NH_3-N			TKN			$NO_{2,3}$-N			TN		
		น้ำเข้า (mg/l)	น้ำออก (mg/l)	%การกำจัด	น้ำเข้า (mg/l)	น้ำออก (mg/l)	%การกำจัด	น้ำเข้า (mg/l)	น้ำออก (mg/l)	%การเปลี่ยนแปลง	น้ำเข้า (mg/l)	น้ำเข้า (mg/l)	%การกำจัด
0.1	1	70.7	0.87	98.8	75.3	5.30	93.0	2.72	54.5	1930	78.3	59.7	23.8
	2	78.0	0.76	99.0	87.1	4.55	94.8	2.36	71.2	2910	89.4	75.8	15.3
	3	94.8	0.75	99.2	108	6.39	94.1	2.57	63.4	2370	111	69.6	37.1
0.3	1	70.7	0.53	99.2	75.3	5.16	93.2	2.72	68.5	2420	78.3	73.7	6.26
	2	78.0	1.23	98.4	87.1	5.63	93.5	2.36	72.3	2960	89.4	78.1	12.9
	3	94.8	7.03	92.6	108	10.9	90.0	2.57	69.2	2590	111	79.2	28.4
0.5	1	70.7	1.16	98.4	75.3	5.40	92.9	2.72	76.1	2700	78.3	81.5	-3.78
	2	78.0	1.35	98.3	87.1	5.75	93.4	2.36	77.7	3190	89.4	83.4	6.70
	3	94.8	11.64	87.7	108	18.67	82.6	2.57	71.6	2690	111	90.4	18.3

หมายเหตุ * ช่วงที่ 1 วันที่ 7-52 อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 4.2 $ม^3/(ม^2.วัน)$

2 วันที่ 59-82 อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 $ม^3/(ม^2.วัน)$

3 วันที่ 86-124 อัตราการเติมอากาศ 1.8 $ม^3/(ม^2.วัน)$และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม

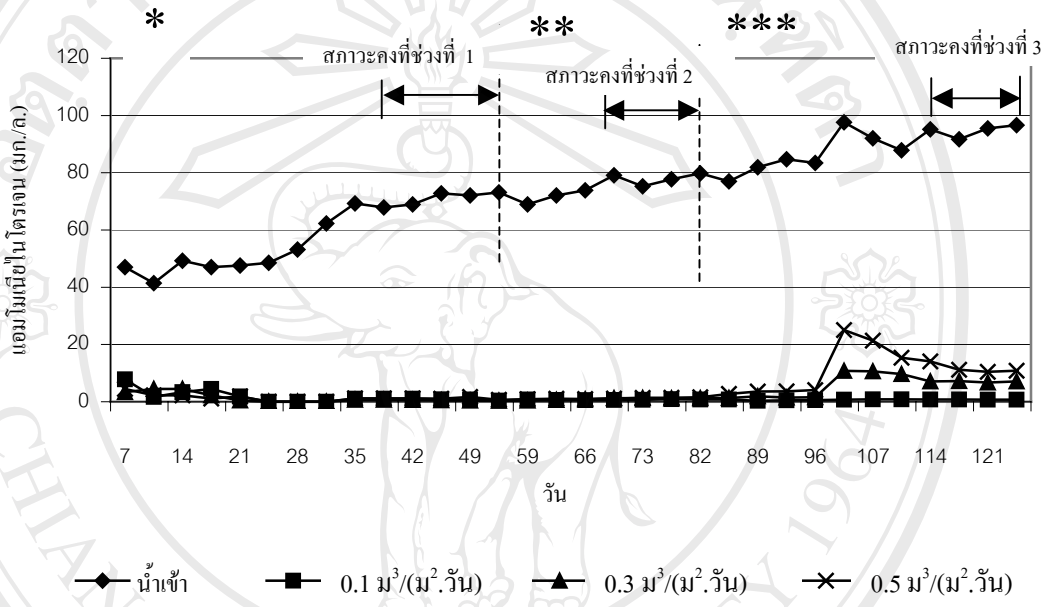
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การทดลองในช่วงแรกตั้งแต่วันที่ 7 ถึง 52 เมื่อทำการเติมอากาศให้แก่ระบบอย่างต่อเนื่องในอัตรา 4.2 ม^3/(ม^2.ชม.) พบว่าค่าแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำออกของทุกแบบจำลองมีแนวโน้มลดลง แต่ละแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ดี โดยแอมโมเนียอาจถูกดูดซับอยู่บนซีโอไลต์เนื่องจากซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวในการดูดซับและมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง (ศุภกาญจน์ ล้วนมณี, 2540) Booker, et al. (1996) ได้ศึกษาการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไลต์พบว่าซีโอไลต์สามารถกำจัดแอมโมเนียได้ถึง 4.5 มก. ไนโตรเจน/ ก. ซีโอไลต์ นอกจากนี้แอมโมเนียอาจถูกกำจัดออกไปโดยการเปลี่ยนรูปไปเป็นไนไตร์ทและไนเตรทตามกระบวนการไนตริฟิเคชั่นได้อีกด้วย โดยสภาพแอโรบิคนั้นจะเกิดในบริเวณช่องว่างระหว่างเม็ดซีโอไลต์และรูพรุนภายในซีโอไลต์ เนื่องจากซีโอไลต์มีความพรุนสูงทำให้อากาศสามารถเข้าไปแทรกในรูพรุนและระหว่างช่องว่างของเม็ดซีโอไลต์ได้ (Wakatsuki, et al., 1993) อีกทั้งยังเกิดสภาพแอโรบิคบริเวณผิววัสดุผสมเนื่องจากบริเวณผิววัสดุผสมเป็นส่วนที่สัมผัสอากาศ ดังนั้นจึงพบว่าสามารถเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยา ซึ่งได้แก่ การย่อยสลายของบีโอดี กระบวนการไนตริฟิเคชั่น และกระบวนการทางชีวเคมีของการตรึงฟอสเฟตในบริเวณผิวของวัสดุผสม (Masunaga, et al., 2002) ซึ่งเมื่อมีการเติมอากาศให้แก่ระบบอย่างเพียงพอในระบบเพื่อให้ออโตโทรฟิกแบคทีเรีย 2 ชนิดทำงานร่วมมือกันอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไนโตรโซโมแนสทำการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์ และไนโตรแบคเตอร์ทำการออกซิไดซ์ต่อไปจนกลายเป็นไนเตรท ซึ่งแบคทีเรียทั้ง 2 ประเภทนี้ได้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโตจากการทำออกซิเดชันที่เกิดกับอนินทรีย์ไนโตรเจน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ จากการทดลองเมื่ออัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน)น้ำออกจากระบบบำบัดมีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.87, 0.53 และ 1.16 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนที่สภาวะคงที่ในช่วงแรกเฉลี่ยเป็น 98.8, 99.2 และ 98.4 % ตามลำดับ

ในช่วงการทดลองที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 59 ถึง 82 จากเดิมที่มีการเติมอากาศในปริมาณ 4.2 ม^3/(ม^2.ชม.) ได้ปรับลดปริมาณอากาศเป็น 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) พบว่าค่าแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำที่เข้าระบบบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 78.0 มก./ล. โดยช่วงที่ 2 และ 3 พบว่าน้ำที่เข้าแบบจำลองมีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนสูงขึ้นเนื่องจากในช่วงนี้ได้ทำการทดลองอยู่ในช่วงฤดูฝน เมื่อฝนตกทำให้น้ำฝนไหลลงสู่กองขยะแล้วชะเอามลสารที่อยู่ในกองขยะปะปนลงมาสู่น้ำใต้ดินทำให้ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้น เมื่อผ่านการบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากระบบบำบัดของแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ยังคงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักและประสิทธิภาพในการกำจัดยังคงใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าจะมีการปรับลดปริมาณอากาศที่เติมเข้าไปให้เหลือครึ่งหนึ่งก็ตาม แสดงว่าปริมาณออกซิเจน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ในระบบยังคงมีมากเกินพอสำหรับแบคทีเรียในการออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจนให้เป็นไนไตรท์และไนเตรท โดยในน้ำออกจากแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$มีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 0.76, 1.23 และ 1.35 มก./ล. ประสิทธิภาพการบำบัดโดยเฉลี่ยเป็น 99.0, 98.4 และ 98.27 % ตามลำดับ



รูป 4.1 แอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1 (* อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 4.2 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ** อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ *** อัตราการเติมอากาศ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

เมื่อได้ทำการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการเติมอากาศจากเดิมที่มีการเติมอากาศให้แก่ระบบอย่างต่อเนื่อง เป็นเติมอากาศสลับกับหยุดเติมอากาศเป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยให้อากาศแก่ระบบในปริมาณ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ในช่วงการทดลองที่ 3 ตั้งแต่วันที่ 86 ถึง 124 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำที่เข้าระบบบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 94.8 มก./ล. เมื่อผ่านการกำจัดแล้วพบว่าในแบบจำลองที่ 1 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนยังคงที่ โดยน้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.75 มก./ล. และมีประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเป็น 99.2 % ส่วนในแบบจำลองที่ 2 และ 3 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

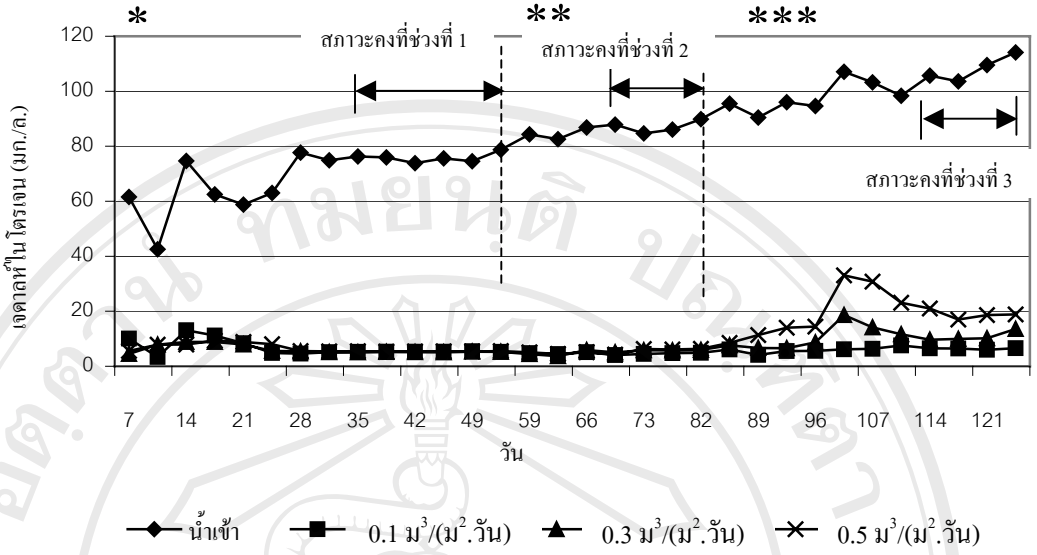
ตามลำดับ มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดที่ลดลง โดยน้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 7.03 และ 11.64 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยเป็น 92.6 และ 87.7 % ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการหยุดเติมอากาศส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในระบบลดลง อีกทั้งแบบจำลองที่ 2 และ 3 มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่สูงทำให้ระยะเวลาเก็บกักน้ำน้อยลง จึงทำให้แบคทีเรียไม่สามารถใช้ออกซิเจนได้เพียงพอต่อความต้องการในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะได้ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันลดลง ในสภาพที่มีออกซิเจนเพียงพอไนตริฟายเออร์แบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้ช้ากว่าเฮทเทอโรโทรฟิกแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ย่อยสลายคาร์บอน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ดังนั้นในระบบที่มีระยะเวลาเก็บกักน้อยจึงเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ไม่ดี เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 $ม^3/(ม^2.วัน)$ สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ดีกว่า

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแอมโมเนียไนโตรเจนระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวกที่ ข1-ข3) พบว่าค่าเฉลี่ยแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.3 $ม^3/(ม^2.วัน)$ และอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.3 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ข. เจดาลห์ไนโตรเจน

น้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่นำมาทำการทดลองมีค่าเจดาลห์ไนโตรเจนในช่วงแรกของการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 75.3 มก./ล. โดยในตาราง 4.2 และรูป 4.2 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดเจดาลห์ไนโตรเจนในน้ำที่เข้าและออกจากระบบบำบัดตลอดช่วงการศึกษา ที่สภาวะคงที่ในช่วงแรกของการทดลองช่วงวันที่ 7 ถึง 52 พบว่าเมื่อผ่านการบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากแบบจำลองมีค่าเจดาลห์ไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 5.30, 5.16 และ 5.40 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 93.0 , 93.2 และ 92.9 % ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ตามลำดับ แต่ละแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดเจดาลห์ไนโตรเจนได้ดี เนื่องจากค่าเจดาลห์ไนโตรเจนคือผลรวมของค่าแอมโมเนียไนโตรเจนและค่าอินทรีย์ไนโตรเจน ดังนั้นค่าเจดาลห์ไนโตรเจนมีความสัมพันธ์กับค่าแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองไปในทิศทางเดียวกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.2 เจดาลห์ในโตรเจนของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1(* อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 4.2 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ** อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ *** อัตราการเติมอากาศ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

ในช่วงที่ 2 ของการทดลอง ตั้งแต่วันที่ 59 ถึง 82 จากเดิมที่มีการเติมอากาศในปริมาณ 4.2 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ได้ปรับลดปริมาณอากาศเป็น 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ พบว่าค่าเจดาลห์ในโตรเจนในน้ำเข้าระบบบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 87.1 มก./ล. เมื่อผ่านการบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากระบบบำบัดของแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ยังคงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักและประสิทธิภาพในการกำจัดยังคงใกล้เคียงกัน โดยในน้ำออกจากแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีปริมาณเจดาลห์ในโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 4.55, 5.63 และ 5.75 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 94.8, 93.5 และ 93.4 % ตามลำดับ

เมื่อได้ทำการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการเติมอากาศจากเดิมที่มีการเติมอากาศให้แก่ระบบอย่างต่อเนื่อง เป็นเติมอากาศสลับกับหยุดเติมอากาศเป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยให้อากาศแก่ระบบในปริมาณ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ในช่วงการทดลองที่ 3 ตั้งแต่วันที่ 86 ถึง 124 พบว่าน้ำที่เข้าระบบบำบัดมีค่าเจดาลห์ในโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 108 มก./ล. การเพิ่มขึ้นของปริมาณมลสารในน้ำที่เข้าระบบนี้เนื่องจากในการทดลองช่วงหลังได้ทำการทดลองในช่วงฤดูฝน ซึ่งเมื่อฝนตกได้มีการชะเอามลสารจากหลุมฝังกลบขยะมาปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน จึงทำให้ค่ามลสารมี่ปนอยู่ในน้ำใต้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ดินที่นำมาทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำใต้ดินผ่านระบบบำบัดแล้วพบว่าในแบบจำลองที่ 2 และ 3 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ตามลำดับ มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดที่ลดลง โดยน้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าเจดาลห์ไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 10.85 และ 18.67 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยเป็น 90.0 และ 82.6 % ตามลำดับ ส่วนในแบบจำลองที่ 1 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ความสามารถในการกำจัดเจดาลห์ไนโตรเจนยังคงที่ โดยน้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีปริมาณเจดาลห์ไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 6.39 มก./ล. และมีประสิทธิภาพในการกำจัดเฉลี่ยเป็น 94.1 % จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชล-ศาสตร์เท่ากับ 0.1 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเจดาลห์ไนโตรเจนได้ดีที่สุด

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเจดาลห์ไนโตรเจนระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวกที่ ข4- ข6) พบว่าค่าเฉลี่ยเจดาลห์ไนโตรเจนของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$และระหว่างอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.3 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.3 $ม^3/(ม^2.วัน)$ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ค. ออกซิไดซ์ไนโตรเจน

จากการทดลองพบว่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่นำมาทำการทดลองในช่วงแรกของการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.72 มก./ล. ดังรูป 4.3 และตาราง 4.2 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำที่เข้าและออกจากระบบบำบัดตลอดช่วงการศึกษา ที่สภาวะคงที่เมื่อน้ำใต้ดินผ่านระบบบำบัดแล้วพบว่าน้ำที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองมีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียไปเป็นไนเตรท ซึ่งถ้าพิจารณาจากค่าแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำออกของทั้ง 3 แบบจำลองจะเห็นได้ว่ามีการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจนอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นผลให้มีปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นสูง ในช่วงแรกของการทดลองตั้งแต่วันที่ 7 ถึง 52 ทั้ง 3 แบบจำลองมีแนวโน้มของค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำออกเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเติมออกซิเจนให้แก่ระบบอย่างต่อเนื่องในปริมาณ 4.2 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ จึงทำให้มีปริมาณออกซิเจนที่มากเกินพอในระบบจนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ เนื่องจากในการเปลี่ยนรูปจากไนเตรทไนโตรเจนไปเป็นไนไตรท์ไนโตรเจนนั้นจะเกิดขึ้นภายใต้สภาพแอนอกซิก ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่มีออกซิเจนละลายน้ำหรือมีน้อยมาก แต่สามารถนำออกซิเจนซึ่งเป็นสารในการรับอิเลคตรอนจาก

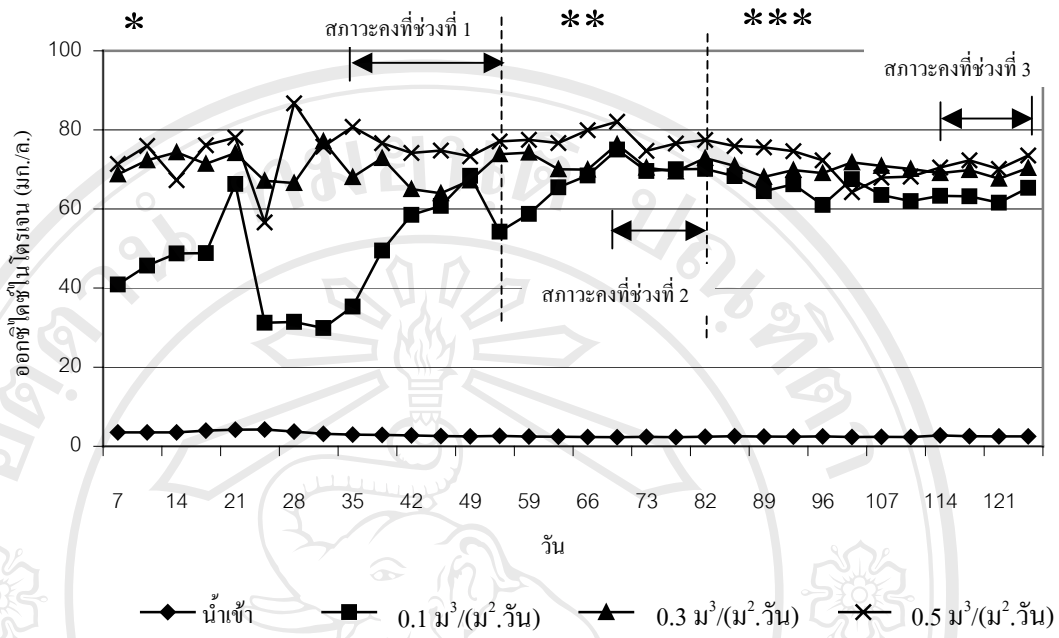
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

แหล่งอื่น ได้แก่ ไนเตรท มาใช้เพื่อการหายใจของแบคทีเรีย (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ดังนั้นเมื่อมีออกซิเจนในระบบมากเกินไปจึงทำให้ระบบมีสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ส่งผลให้ระบบไม่สามารถกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจนได้ จึงมีปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำออกจากระบบสูงโดยน้ำที่ออกจากระบบในช่วงแรกที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 54.5, 68.5 และ 76.1 มก./ล. ตามลำดับ

สำหรับในการทดลองช่วงที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 59 ถึง 82 นั้นถึงแม้ว่าได้มีการปรับลดการเติมอากาศให้เหลือ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ก็ตาม แต่ปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำออกยังคงมีค่าสูงอยู่ โดยน้ำออกจากแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ตามลำดับ มีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 71.2, 72.3 และ 77.7 มก./ล. โดยน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงนี้มีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.36 มก./ล.

ในช่วงที่ 3 ของการทดลองตั้งแต่วันที่ 86 ถึง 124 เมื่อได้ทำการเปลี่ยนเวลาการเติมอากาศจากเดิมเติมอากาศแบบต่อเนื่องตลอดเวลา เป็นเติมอากาศ 4 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 8 ชั่วโมง เพื่อให้ค่าออกซิเจนในระบบเหลือน้อยลง พบว่าน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงนี้มีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.57 มก./ล. เมื่อผ่านระบบบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากระบบบำบัดของแต่ละแบบจำลองยังคงมีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนที่สูง เนื่องจากในส่วนของชั้นดินยังมีสภาพแอนาโรบิคไม่มากพอจึงทำให้ไม่สามารถกำจัดไนเตรทได้ อีกทั้งอาจเนื่องมาจากขี้เลื่อยซึ่งเป็นวัสดุผสมมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนสูง ดังนั้นจึงสลายตัวได้ช้าทำให้ไม่สามารถปลดปล่อยคาร์บอนออกมาได้เพียงพอแก่ความต้องการของจุลินทรีย์เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานและนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ในการรีดิวซ์ไนเตรทให้เป็นก๊าซไนโตรเจน จึงทำให้มีไนเตรทออกมาจากระบบบำบัดมาก อีกทั้งอาจเนื่องมาจากแต่ละแบบจำลองนั้นมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่สูง น้ำที่เข้าสู่ระบบบำบัดจึงมีอัตราการไหลสูงระบบจึงมีปริมาณการรับภาระมากขึ้น ทำให้มีระยะเวลาเก็บกักน้ำที่น้อยซึ่งมีระยะเวลาไม่เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยน้ำออกจากแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ตามลำดับ มีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 63.4, 69.2 และ 71.6 มก./ล.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.3 ออกซิไดซ์ไนโตรเจนของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1(* อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 4.2 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ** อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ *** อัตราการเติมอากาศ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยออกซิไดซ์ไนโตรเจนระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวกที่ ข7- ข9) พบว่าค่าเฉลี่ยออกซิไดซ์ไนโตรเจนของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ และอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง0.1 กับ 0.3 $ม^3/(ม^2.วัน)$มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนระหว่างอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.3 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ง. ไนโตรเจนรวม

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดออกจากน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะแสดงดังรูป 4.4 และตาราง 4.2 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าใน

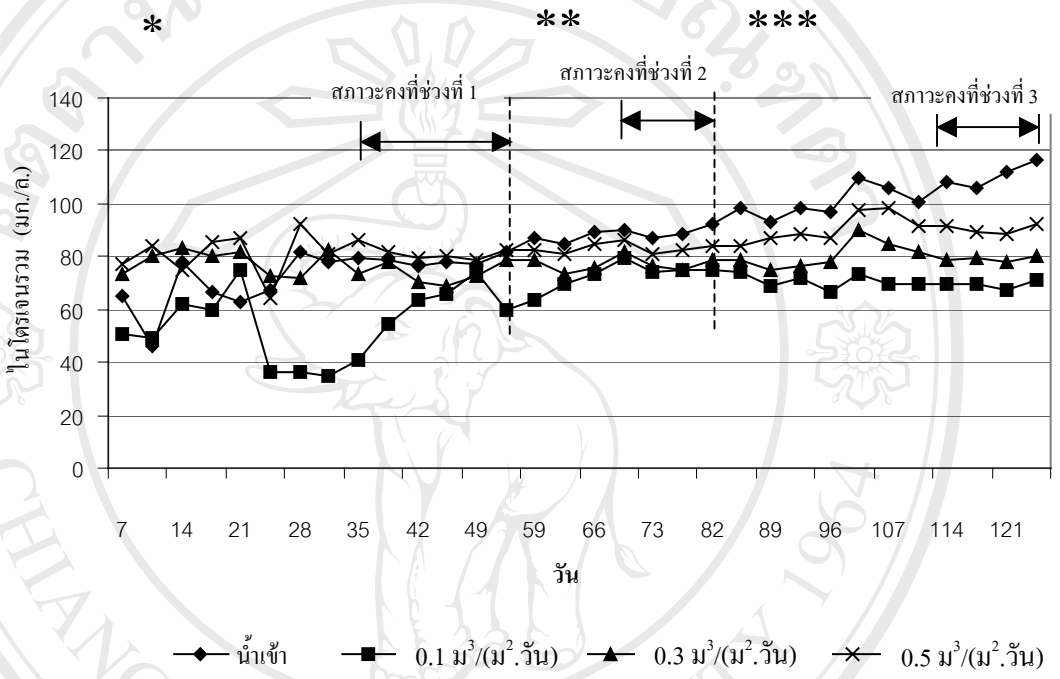
ช่วงแรกของการทดลองมีไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำใต้ดินที่เข้าสู่ระบบบำบัดเฉลี่ย 78.31 มก./ล. โดยในช่วงแรกของการทดลองตั้งแต่วันที่ 7 ถึง 52 เมื่อทำการเติมอากาศให้แก่ระบบอย่างต่อเนื่องในปริมาณ 4.2 ม^3/(ม^2.ชม.) จะเห็นได้ว่าแต่ละแบบจำลองยังสามารถกำจัดไนโตรเจนรวมได้ไม่ดีนัก เนื่องจากมีการเติมอากาศอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาทำให้มีอากาศที่มากเกินพอในระบบส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีจึงเกิดไนเตรทมาก เนื่องจากเมื่อให้อากาศแก่ระบบทำให้อินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียมที่ถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคดินและซีโอไลต์จะเกิดการสลายตัวได้ดี เพราะว่าการดูดซับของแอมโมเนียมเป็นการดูดซับอย่างหลวมๆ จึงเกิดการปลดปล่อยแอมโมเนียมได้ง่าย โดยแอมโมเนียมจะแปรสภาพเป็นไนไตรท์และไนเตรทอย่างรวดเร็ว ทำให้มีไนเตรทเกิดขึ้นปริมาณมาก (ประไพ อิสระ, 2544) แต่ในสภาวะที่มีอากาศมากเกินไปเช่นนี้ทำให้ระบบมีสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ดังนั้นจึงไม่สามารถกำจัดไนเตรทให้ลดลงได้ โดยน้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าไนโตรเจนรวมเฉลี่ยเท่ากับ 59.7, 73.7 และ 81.5 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 23.8, 6.3 และ –3.8 % ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน)ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกปริมาณไนโตรเจนรวมของน้ำที่ออกจากระบบมีค่ามากกว่าน้ำที่เข้าระบบบำบัด เนื่องจากมีไนโตรเจนบางส่วนในดินที่ถูกเปลี่ยนรูปโดยกระบวนการไนตริฟิเคชั่นให้กลายเป็นไนเตรทแล้วออกมากับน้ำที่ออกจากระบบ ซึ่งจากการนำดินที่ผ่านการทดลองแล้วมาวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนรวมในดิน(ภาคผนวก ค) พบว่าปริมาณไนโตรเจนรวมในดินมีค่าลดลงในแบบจำลองที่ 2 และ3 ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่าไนโตรเจนในดินบางส่วนได้ถูกเปลี่ยนรูปโดยแบคทีเรียให้กลายเป็นไนเตรทในกระบวนการไนตริฟิเคชัน

ในการทดลองช่วงที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 59 ถึง 82 นั้นถึงแม้ว่าได้มีการปรับลดการเติมอากาศให้เหลือ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) ก็ตาม แต่ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนรวมยังไม่ดีนักโดยน้ำออกจากแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน)ตามลำดับ มีค่าไนโตรเจนรวมเฉลี่ยเท่ากับ 75.8, 78.1 และ 83.4 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 15.3, 12.9 และ 6.7 % ตามลำดับ โดยน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงนี้มีค่าไนโตรเจนรวมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 89.4 มก./ล.

สำหรับในช่วงที่ 3 ของการทดลองตั้งแต่วันที่ 86 ถึง 124 เมื่อได้ทำการเปลี่ยนเวลาการเติมอากาศ เป็นเติมอากาศ 4 ชั่วโมงและหยุดเติมอากาศ 8 ชั่วโมง พบว่าน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงนี้มีค่าไนโตรเจนรวมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 111 มก./ล. เมื่อผ่านระบบบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากระบบบำบัดของแต่ละแบบจำลองมีแนวโน้มของการกำจัดไนโตรเจนรวมดีขึ้นโดยเฉพาะในแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 ม^3/(ม^2.วัน) มีประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนรวมได้สูงสุด คือเฉลี่ยเท่ากับ37.1% และมี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ปริมาณไนโตรเจนรวมในน้ำออกเฉลี่ยเท่ากับ 69.6 มก./ล. และน้ำออกจากแบบจำลองที่ 2 และ 3 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.3 และ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน) ตามลำดับ มีค่าไนโตรเจนรวมเฉลี่ยเท่ากับ 79.2 และ 90.4 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 28.4 และ 18.3 % ตามลำดับ



รูป 4.4 ไนโตรเจนรวมของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าและออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1 (* อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 4.2 ม^3/(ม^2.ชม.) ** อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) ***อัตราการเติมอากาศ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยไนโตรเจนรวมระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าค่าเฉลี่ยไนโตรเจนรวมของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.1, 0.3 และ0.5 ม^3/(ม^2.วัน) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวกที่ ข10 – ข12) โดยเมื่อพิจารณาจากผลวิเคราะห์ทางสถิติจะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

บรรทุกทางชลศาสตร์ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนรวมได้ดีที่สุด แสดงว่าในแบบจำลองที่ 1 นั้นมีการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ดีกว่า

4.1.2 การศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์

การศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์จะศึกษาการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป ซีโอดี และบีโอดี ในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนน้ำชะขยะ ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน) ในการทดลองชุดที่ 1 โดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และตารางในภาคผนวก ก3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

ตาราง 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี และซีโอดีที่เข้าและออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่1

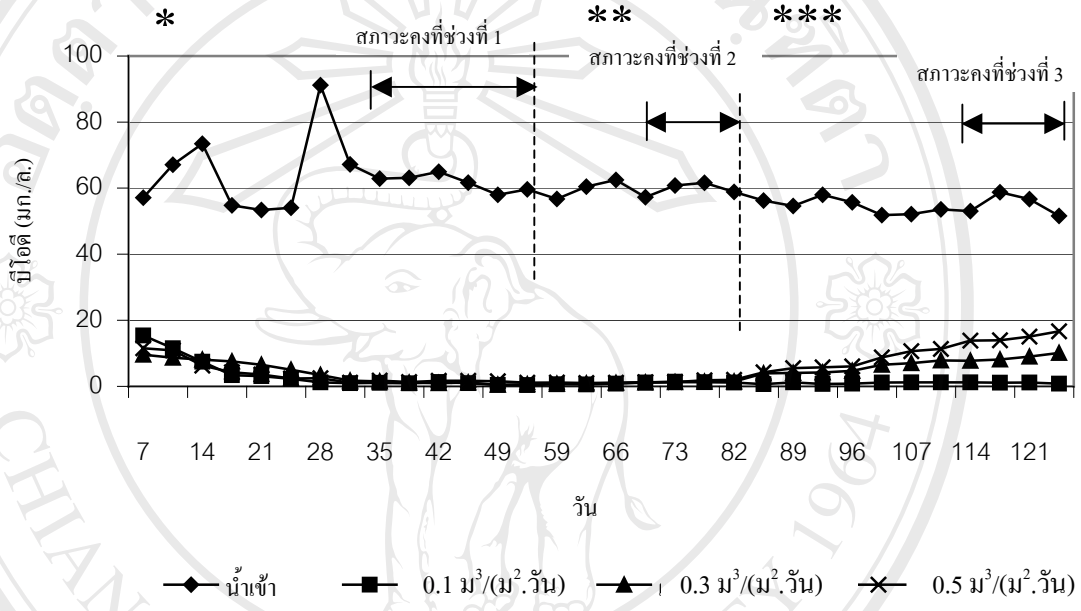
อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์, (ม^3/(ม^2.วัน))	ช่วงที่	BOD_5			COD		
		น้ำเข้า	น้ำออก	% การกำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	% การกำจัด
0.1	1	61.7	0.86	98.6	206	185	10.0
	2	59.6	1.26	97.9	203	186	8.6
	3	55.0	1.06	98.1	220	178	19.1
0.3	1	61.7	0.98	98.4	206	184	10.5
	2	59.6	2.01	96.5	203	187	7.8
	3	55.0	7.03	84.0	220	191	13.0
0.5	1	61.7	1.51	97.6	206	177	13.7
	2	59.6	1.59	97.3	203	193	4.9
	3	55.0	14.9	72.8	220	209	5.0

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ก. บีโอดี

จากการทดลองพบว่าน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงแรกมีค่าบีโอดีเฉลี่ย 61.7 มก./ล. เมื่อทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 7 ถึง 52 น้ำที่ไหลผ่านระบบบำบัดแล้วมีค่าบีโอดีในน้ำออกจากระบบของทุกแบบจำลองมีค่าลดลงโดยค่าบีโอดีในน้ำออกจากระบบบำบัดที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 ม^3/(ม^2

.วัน) มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.86, 0.98 และ 1.51 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าโดยเฉลี่ยเป็น 98.6, 98.4 และ 97.6% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแต่ละแบบจำลองมีประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากมีการเติมอากาศที่มากเกินพอให้แก่ระบบทำให้จุลินทรีย์สามารถกำจัดบีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูป 4.5 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีในน้ำเข้าระบบและออกจากระบบตลอดช่วงการศึกษา



รูป 4.5 บีโอดีของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1 (* อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 4.2 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ** อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ***อัตราการเติมอากาศ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

เมื่อมีการลดปริมาณอากาศที่เติมให้แก่ระบบให้เหลือ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ในช่วงวันที่ 59 ถึง 82 แต่ละแบบจำลองยังคงมีประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีไม่แตกต่างกันมากนัก โดยน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงนี้มีค่าบีโอดีเฉลี่ย 59.6 มก./ล. น้ำที่ผ่านระบบบำบัดแล้วมีค่าบีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 1.26, 2.01 และ1.59 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 97.9, 96.5 และ 97.3 % ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1, 0.3 และ0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สำหรับการกำจัดบีโอดีเมื่อมีระยะเวลาการเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยปริมาณอากาศที่เติมให้แก่ระบบยังคงเป็น 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ในช่วงวันที่ 86 ถึง 124 พบว่าแบบจำลองที่ 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เป็น 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ เมื่อน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะได้ผ่านระบบบำบัดแล้ว น้ำที่ออกจากระบบมีแนวโน้มของการบำบัดบีโอดีลดลง ทำให้ค่าบีโอดีในน้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 2 และ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.03 และ 14. 9 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 84.0 และ 72.8 % ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 $ม^3/(ม^2.วัน)$ พบว่าค่าบีโอดีในน้ำออกยังคงมีค่าคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.06 มก./ล. และมีประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 98.1 % โดยน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงนี้มีค่าบีโอดีเฉลี่ย 55.0 มก./ล. ในช่วงนี้พบว่าเมื่อมีการเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศจากเดิมที่เติมอากาศตลอดเวลาเป็นเปิด-ปิดเครื่องเติมเป็น 4 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ทำให้ออกซิเจนภายในระบบลดลงประกอบกับแบบจำลองที่ 2 และ 3 มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่สูงจึงทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถกำจัดบีโอดีได้ทันเนื่องจากมีระยะเวลาเก็บกักน้ำที่สั้น ทำให้น้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 2 และ 3 มีค่าบีโอดีในน้ำออกที่สูงขึ้นกว่าแบบจำลองที่ 1 โดยพบว่าถ้าอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มของการบำบัดบีโอดีลดลง จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีได้ดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.2

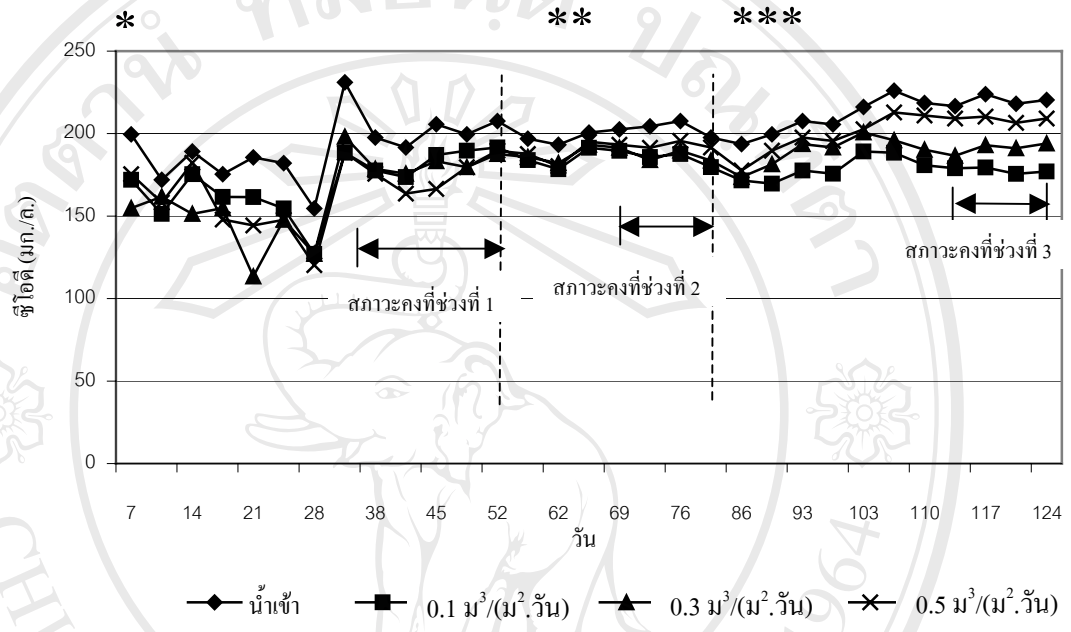
ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยบีโอดีระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าค่าเฉลี่ยบีโอดีของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวกที่ ข13 – ข15) ส่วนอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.3 $ม^3/(ม^2.วัน)$ และระหว่างอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.3 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ข. ซีโอดี

ซีโอดีในน้ำเข้าระบบบำบัดและออกจากระบบตลอดช่วงการศึกษาได้แสดงดังรูป 4.6 และตาราง 4.3 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่สภาวะคงที่ พบว่าปริมาณซีโอดีของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงแรกของการทดลองมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 206 มก./ล. ในช่วงวันที่ 7 ถึง 52 เมื่อทำการเติมอากาศอย่างต่อเนื่องในปริมาณ 4.2 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ให้แก่ระบบ พบว่าทุกแบบจำลองยังไม่สามารถกำจัดซีโอดีได้ดีนัก โดย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

น้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีค่าซีโอดีโดยเฉลี่ยเท่ากับ 185, 184 และ 177 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีโดยเฉลี่ยเท่ากับ 10.0, 10.5 และ 13.7 % ตามลำดับ



รูป 4.6 ค่าซีโอดีของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าและออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1 (* อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 4.2 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ** อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ***อัตราการเติมอากาศ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

ในช่วงวันที่ 59 ถึง 82 ถึงแม้ว่าจะปรับลดปริมาณการเติมอากาศที่ให้แก่ระบบเป็น 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ แต่ละแบบจำลองก็ยังสามารถกำจัดซีโอดีได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยปริมาณซีโอดีของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดในการทดลองช่วงนี้มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 204 มก./ล. น้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าซีโอดีโดยเฉลี่ยเท่ากับ 186, 187 และ193 มก./ล. มีประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดีโดยเฉลี่ยเท่ากับ 8.6, 7.8 และ 4.9% ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ตามลำดับ

ส่วนในช่วงวันที่ 86 ถึง 124 เมื่อทำการเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 ชม. และ 8 ชม. ตามลำดับ ทั้ง 3 แบบจำลองมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้เพียงเล็กน้อย โดยมีประสิทธิภาพการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บำบัดซีโอดีโดยเฉลี่ยเท่ากับ 19.1, 13.0 และ 5.0% และมีค่าซีโอดีในน้ำที่ออกจากระบบบำบัดเท่ากับ 178, 191 และ 209 มก./ล. ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ตามลำดับ โดยน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัด ในช่วงนี้มีค่าซีโอดีโดยเฉลี่ยเท่ากับ 220 มก./ล.

จะเห็นได้ว่าตลอดการทดลองตั้งแต่วันที่ 7 และ 124 พบว่าทุกแบบจำลองสามารถกำจัดซีโอดีได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ค่าซีโอดีในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสูงซึ่งต่างจากการกำจัดบีโอดี โดยระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีได้ดีกว่าซีโอดี เนื่องจากว่าหลุมฝังกลบขยะนี้ได้ทำการฝังกลบขยะมาเป็นเวลาหลายปีแล้ว ทำให้คุณลักษณะของน้ำชะขยะค่อนข้างเจือจางประกอบกับอัตราส่วนของบีโอดีต่อซีโอดี (BOD_5/COD) ของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าเท่ากับ 0.25 – 0.30 หมายความว่าสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยได้ถูกย่อยสลายทางชีววิทยาโดยจุลินทรีย์ในหลุมฝังกลบขยะแล้ว ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในน้ำชะขยะเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ ซึ่งประกอบด้วย กรดฮิวมิค (Humic acid) และกรดฟัลวิค (Fulvic acid) ทำให้ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ง่าย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าต่ำ (Tchobanoglous et. al., 1993)

ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของทั้งสามแบบจำลองจะมีค่าต่ำ แต่จะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เป็น 0.1 $ม^3/(ม^2.วัน)$ สามารถกำจัดซีโอดีได้ดีกว่าแบบจำลองที่ 2 และ 3 ซึ่งมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เป็น 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ตามลำดับ

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยซีโอดีระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ข16 – ข18) พบว่าค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.1, 0.3 และ0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

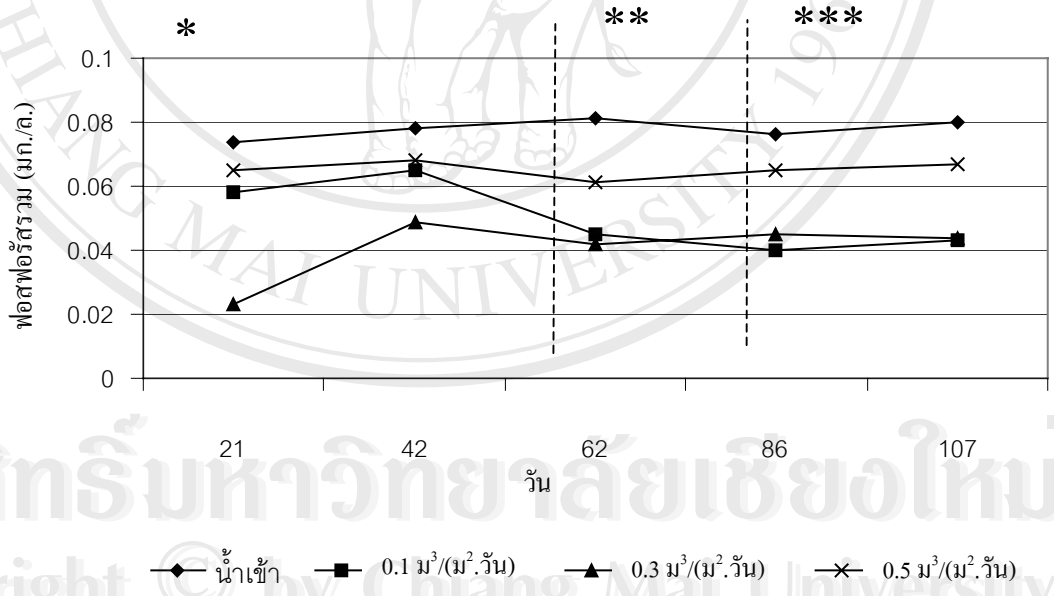
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

4.1.3 การศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสรวม

ฟอสฟอรัสรวมในน้ำเข้าระบบบำบัดและออกจากระบบตลอดช่วงการศึกษาได้แสดงดังรูป 4.7 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสรวมที่สภาวะคงที่ พบว่า ค่าฟอสฟอรัสรวมในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าต่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.078 มก./ล. เนื่องจากที่ฝังกลบขยะแห่งนี้ได้ทำการฝังกลบขยะมาแล้วเป็นเวลานาน ดังนั้นค่าความเข้มข้นของมลสารต่างๆในน้ำชะขยะจึงมีค่าค่อนข้างต่ำ หลังจากผ่านการกำจัดจากระบบบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากแบบจำลองมีค่าฟอสฟอรัสรวมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.043 , 0.044 และ

0.064 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 46.0 , 44.7 และ 18.5 % ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน)ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ทั้งนี้การที่ฟอสฟอรัสรวมทั้งหมดลดลงเนื่องมาจากฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปอินทรีย์ฟอสเฟตเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน ส่วนออโธฟอสเฟตที่มีปริมาณมากกว่านั้นส่วนใหญ่จะถูกดูดซับไว้ที่พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ที่มีเหล็กไฮดรอกไซด์ดูดซับอยู่ เนื่องจากซีโอไลต์มีความสามารถในการดูดซับประจุบวกสูง ทั้งนี้ฟอสเฟตในน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนน้ำชะขยะสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กไฮดรอกไซด์ตกตะกอนเกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำยากได้อีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใส่เหล็กลงไปในระบบจะช่วยให้สามารถกำจัดได้เพิ่มขึ้น (ประไพ อิสระ, 2543) อีกทั้งฟอสเฟตยังสามารถถูกกำจัดโดยดินได้อีกด้วยเนื่องจากบริเวณผิวของเม็ดดินมีประจุบวกซึ่งจะยึดเกาะประจุลบในน้ำเสียเกิดเป็นสารประกอบฟอสฟอรัสตกตะกอนอยู่ในชั้นดิน (โสมนัส สมประเสริฐ, 2545)

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เป็น 0.1 ม^3/(ม^2.วัน) สามารถบำบัดฟอสฟอรัสรวมได้ดีกว่าแบบจำลองที่ 2 และ 3 ซึ่งมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เป็น 0.3 และ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน) ตามลำดับ



รูป 4.7 ฟอสฟอรัสรวมของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าและออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1 (* อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง4.2 ม^3/(ม^2.ชม.) ** อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) *** อัตราการเติมอากาศ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

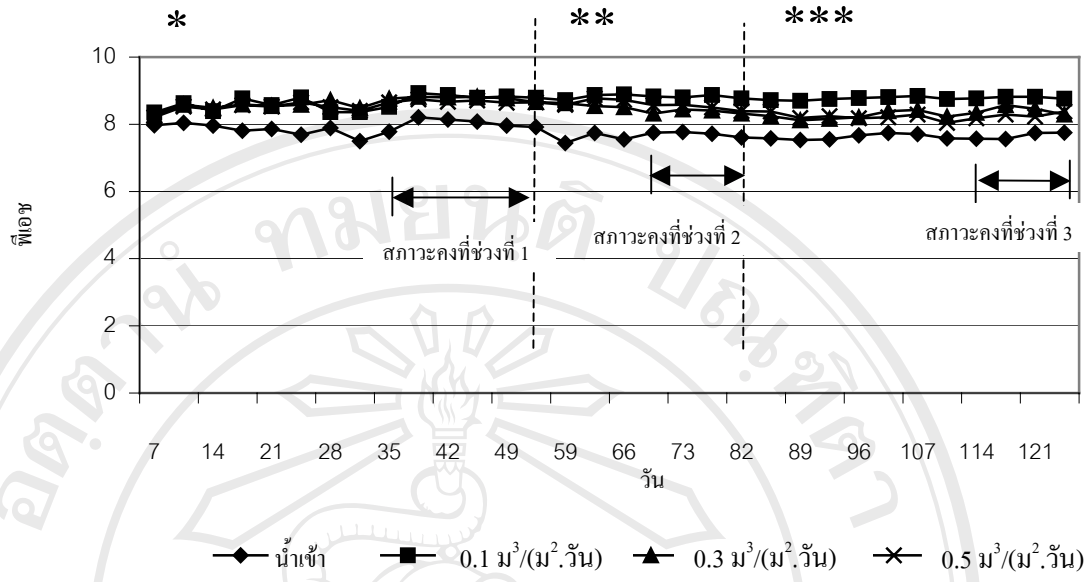
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสรวมระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสรวมของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.3 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2$.วัน) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวกที่ ข19 – ข21) ส่วนอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.3 $ม^3/ม^2$/วัน และระหว่างอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.1 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2$.วัน) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.1.4 ความเป็นกรด-ด่าง

ค่าพีเอชของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.66 – 8.10 หลังจากผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากแบบจำลองมีค่าพีเอชโดยเฉลี่ยเท่ากับ 8.79 – 8.82 , 8.37 – 8.77 และ 8.27 – 8.51 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2$.วัน) ตามลำดับ ดังรูป 4.8 จากการทดลองพบว่าเมื่อน้ำใต้ดินเข้าสู่ระบบบำบัดแล้วจะมีค่าพีเอชสูงขึ้น เนื่องจากในการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันซึ่งเปลี่ยนไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียไนโตรเจนให้กลายเป็นไนเตรทจะทำให้ได้ไฮโดรเจนไอออนออกมา โดยไฮโดรเจนไอออนบางส่วนจะถูกดูดซับอยู่บนผิวของซีโอไลต์ที่มีประจุเป็นลบ บางส่วนก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้ได้ไฮดรอกซิลไอออนออกมาทำให้น้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.8 ค่าพีเอชของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1 (* อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 4.2 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ** อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ***อัตราการเติมอากาศ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

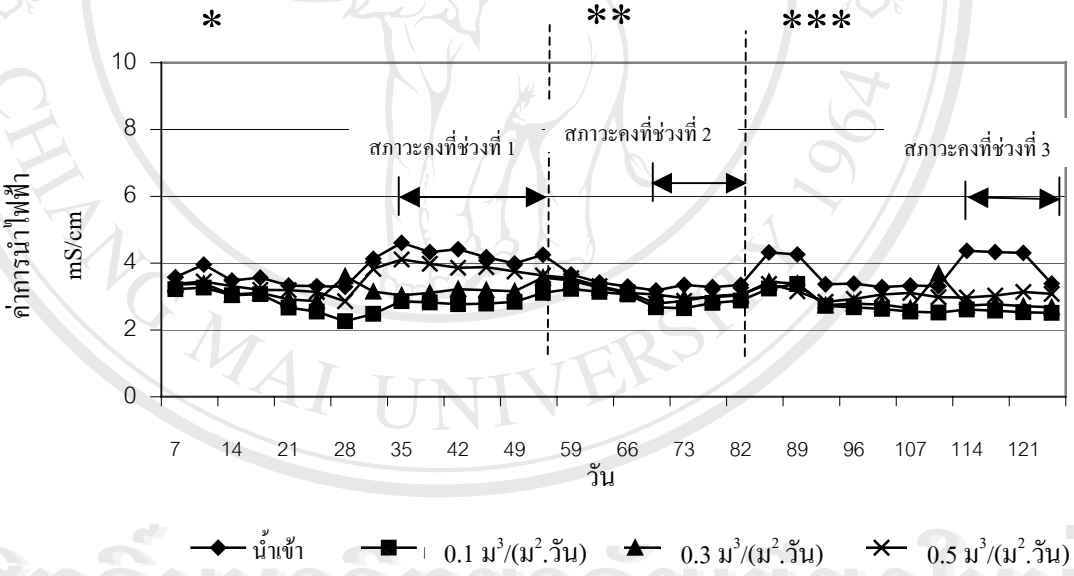
ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพีเอชระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ข22 – ข24) พบว่าค่าเฉลี่ยพีเอชของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ และอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.3 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนระหว่างอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.3 กับ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

4.1.5 ค่าการนำไฟฟ้า

จากการทดลองพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงแรกของการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.30 mS/cm หลังจากผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากแบบจำลองมีค่าการนำไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.87, 3.22 และ 3.87 mS/cm ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1, 0.3 และ 0.5 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ตามลำดับ ส่วนในช่วงที่ 2 ของการทดลองในวันที่ 59 – 76 พบว่าน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปน

เปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงนี้มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 3.29 mS/cm น้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าการนำไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.76, 3.01 และ 2.94 mS/cm ตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองต่อพบว่าในช่วงที่ 3 ของการทดลองตั้งแต่วันที่ 86 – 124 น้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดในช่วงนี้มีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 4.10 mS/cm น้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าการนำไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.56, 2.72 และ 3.06 mS/cm ตามลำดับ โดยได้แสดงดังรูป 4.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อน้ำใต้ดินผ่านการบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากแบบจำลองมีค่าการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจากมีสารประกอบที่ละลายน้ำได้ลดลง โดยภายในระบบมีบางส่วนที่สามารถเกิดสภาพแอโรบิคได้จึงทำให้สารประกอบที่ละลายน้ำได้มากจะถูกออกซิไดซ์ไปอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อย ส่วนไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำก็สามารถถูกดูดซับไว้บนผิวของวัสดุต่างๆ ภายในระบบได้ (ประไพ อิสระ, 2543) จึงทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดของระบบบำบัดมีค่าการนำไฟฟ้าที่ลดลง



รูป 4.9 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าและออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 1 (* อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง4.2 ม^3/(ม^2.ชม.) ** อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) *** อัตราการเติมอากาศ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ข25 – ข27) พบว่าค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน) และอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.1 กับ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนระหว่างอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.3 กับ 0.5 ม^3/(ม^2.วัน) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.1.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารของระบบ

จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ไนโตรเจนรวม และฟอสฟอรัสรวม ในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะ ได้แสดงดังตาราง 4.4 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงที่ระบบบำบัดอยู่ในสภาวะคงที่

ตาราง 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ไนโตรเจนรวม และฟอสฟอรัสรวม ในการทดลองชุดที่ 1

อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์, (ม^3/(ม^2.วัน))	ช่วงที่ *	% การกำจัด					
		BOD	COD	NH_3-N	TKN	TN	TP
0.1	1	98.6	10.0	98.8	93.0	23.8	46.0
	2	97.9	8.6	99.0	94.8	15.3	46.0
	3	98.1	19.1	99.2	94.1	37.1	46.0
0.3	1	98.4	10.5	99.2	93.2	6.26	44.7
	2	96.5	7.8	98.4	93.5	12.9	44.7
	3	84.0	13.0	92.6	90.0	28.4	44.7
0.5	1	97.6	13.7	98.4	92.9	-3.78	18.5
	2	97.3	4.9	98.3	93.4	6.70	18.5
	3	72.8	5.0	87.7	82.6	18.3	18.5

หมายเหตุ * ช่วงที่ 1 วันที่ 7-52 อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 4.2 ม^3/(ม^2.ชม.)

2 วันที่ 59-82 อัตราการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.)

3 วันที่ 86-124 อัตราการเติมอากาศ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากการทดลองชุดที่ 1 เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในแต่ละแบบจำลอง โดยพิจารณาการกำจัดสารไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน ไนโตรเจนรวม เป็นหลัก และผลวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าในแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 ม^3/(ม^2.วัน) โดยสามารถกำจัดสารไนโตรเจน และสารอินทรีย์ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

4.2 ผลการทดลองชุดที่ 2

การทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองที่ต่อเนื่องจากการทดลองแรกโดยจะใช้อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่ดีที่สุดในการลดไนโตรเจนและสารอินทรีย์ในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะในการทดลองแรกคือ 0.10 ม^3/(ม^2.วัน) มาทำการทดลองต่อในการทดลองที่ 2 โดยได้ทำการศึกษาที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05, 0.10 และ 0.15 ม^3/(ม^2.วัน) เพื่อหาอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ ที่เหมาะสมกับระบบ โดยทำการเติมอากาศให้แก่ระบบในปริมาณ 1.8 ม^3/(ม^2.วัน) และเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศเป็นเวลา 4 ชม. และ 8 ชม.ตามลำดับ ในการกำหนดช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่นั้นได้คำนึงถึงปริมาณ แอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน และออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำออกเป็นหลัก โดยระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 46 ถึง 56

เมื่อทำการเก็บน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะในบ่อมาใช้ในการทดลอง พบว่าน้ำในบ่อมีลักษณะเป็นสีเหลืองขุ่นเมื่อผ่านการทดลองพบว่าน้ำที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองมีลักษณะสีเหลืองใส ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นไม่สามารถกำจัดสีของน้ำได้ แต่สามารถกรองตะกอนแขวนลอยที่อยู่ในน้ำได้ ผลการศึกษาลักษณะน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นในการทดลองชุดที่ 2 แสดงได้ดังตาราง 4.5 และน้ำที่ออกจากระบบบำบัดได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก จ1 – จ5

อนึ่งในช่วงของการทดลองในการทดลองชุดที่ 2 นี้ได้มีการหาระยะเวลาเก็บกักน้ำในระบบที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ทั้ง 3 ค่า

สำหรับรายละเอียดของผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.5 ลักษณะของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 2

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย
ซีโอดี	มก/ล.	200
บีโอดี	มก/ล.	55.6
เจดาลห์ไนโตรเจน	มก/ล.	94.1
แอมโมเนียไยโตรเจน	มก/ล.	75.6
ไนโตรเจนรวม	มก/ล.	97.9
ฟอสฟอรัสรวม	มก/ล.	0.08
ออกซิไดซ์ไนโตรเจน	มก/ล.	3.8
พีเอช	-	7.88
ค่าการนำไฟฟ้า	mS/cm.	5.20

4.2.1 การหาระยะเวลาเก็บกักน้ำ

ในการหาระยะเวลาเก็บกักน้ำของแต่ละแบบจำลองในการทดลองที่ 2 โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นปล่อยลงสู่แบบจำลอง แล้ววัดค่าการนำกระแสไฟฟ้าของน้ำที่ออกจากแบบจำลองแล้วนำมาพล็อตกราฟระหว่างเวลาและการนำกระแสไฟฟ้าของน้ำ เพื่อหาระยะเวลาเก็บกักน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีระยะเวลาเก็บกักน้ำที่นานที่สุด คือ 1.60 วัน (ภาคผนวก ง) เมื่ออัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.10 และ 0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีระยะเวลาเก็บกักน้ำเท่ากับ 0.95 และ 0.45 วัน ตามลำดับ

4.2.2 การศึกษาการกำจัดไนโตรเจน

ในการศึกษาถึงการกำจัดไนโตรเจนได้ทำการศึกษาถึง แอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน และ ไนโตรเจนรวม ในการทดลองชุดที่ 2 โดยในตาราง 4.6 และตารางในภาคผนวก จ1 – จ2 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4 .6 ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน และไนโตรเจนรวม ที่เข้าและออกจากระบบบำบัด ในการทดลองชุดที่ 2

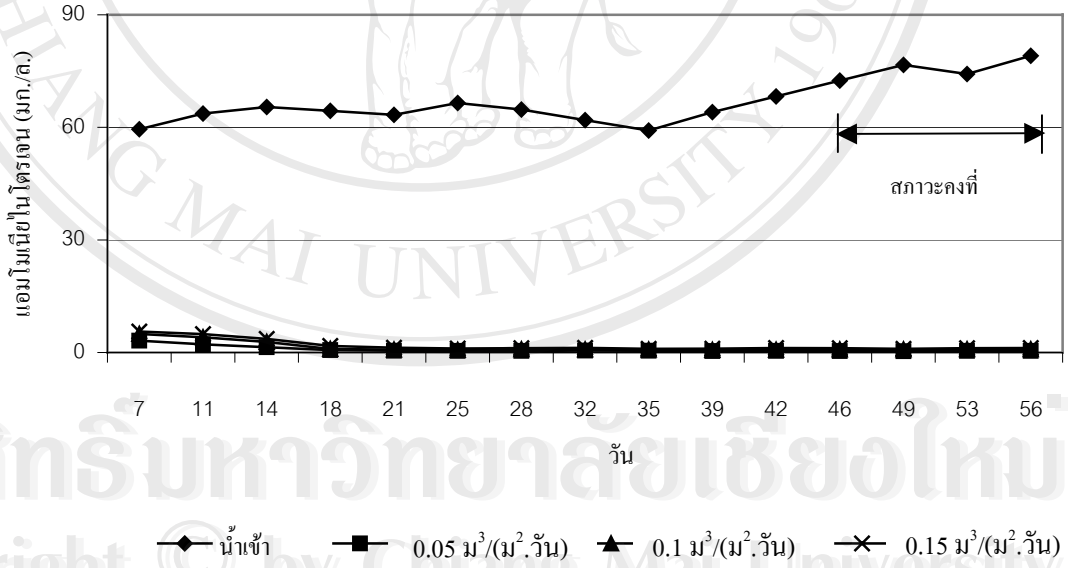
อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ ($ม^3/(ม^2.วัน)$)	NH_3-N			TKN			$NO_{2,3}$-N			TN		
	น้ำเข้า (mg/l)	น้ำออก (mg/l)	%การกำจัด	น้ำเข้า (mg/l)	น้ำออก (mg/l)	%การกำจัด	น้ำเข้า (mg/l)	น้ำออก (mg/l)	%การเปลี่ยนแปลง	น้ำเข้า (mg/l)	น้ำเข้า (mg/l)	%การกำจัด
0.05	75.6	0.39	99.5	94.1	4.01	95.7	3.83	7.26	89.9	97.9	11.3	88.5
0.10	75.6	0.84	98.9	94.1	4.53	95.2	3.83	32.0	738	97.9	36.6	62.6
0.15	75.6	1.12	98.5	94.1	4.85	94.8	3.83	72.9	1023	97.9	47.8	51.1

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ก. แอมโมเนียไนโตรเจน

การศึกษาการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนสามารถแสดงได้ดังรูป 4.10 และตาราง 4.6 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำที่เข้าและออกจากระบบบำบัด พบว่าปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 75.6 มก./ล. เมื่อทำการเติมอากาศให้แก่ระบบในปริมาณ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และทำการเปิด – ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 ชม.และ 8 ชม. ตามลำดับ

พบว่าเมื่อน้ำใต้ดินผ่านระบบบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากระบบบำบัดของแต่ละแบบจำลองมีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 0.39, 0.84 และ1.12 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 99.5, 98.9 และ 98.5 % ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05, 0.10 และ 0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทุกแบบจำลองสามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ดี เนื่องจากมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน จึงทำให้มีระยะเวลาเก็บกักน้ำที่นานเพียงพอ แบคทีเรียจึงสามารถเปลี่ยนรูปแอมโมเนียไนโตรเจนให้กลายไปเป็นไนเตรทโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันได้



รูป 4.10 แอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 2 (อัตราการเติมอากาศ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

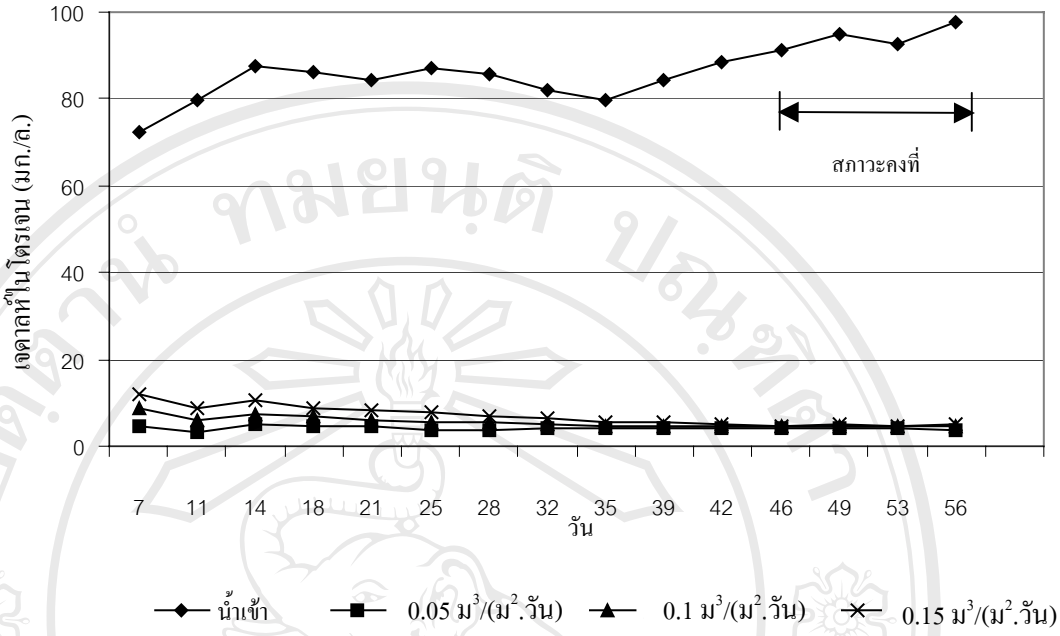
ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแอมโมเนียไนโตรเจนระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ฉ1 – ฉ3) พบว่าค่าเฉลี่ยแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05, 0.10 และ 0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าทั้ง 3 แบบจำลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ใกล้เคียงกัน

ข. เจดาลห์ไนโตรเจน

เจดาลห์ไนโตรเจนในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบตลอดช่วงการศึกษาได้แสดงดังตาราง 4.6 และรูป 4.11 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดเจดาลห์ไนโตรเจน โดยพบว่าปริมาณเจดาลห์ไนโตรเจนของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 94.1 มก./ล. เมื่อทำการเติมอากาศในปริมาณ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ให้แก่ระบบและทำการเปิด – ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 ชม.และ 8 ชม. ตามลำดับ พบว่าทุกแบบจำลองมีแนวโน้มของการกำจัดเจดาลห์ไนโตรเจนได้ดี เมื่อทำการบำบัดได้ 46 วันระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยน้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05, 0.10 และ 0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$มีค่าเจดาลห์ไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.01, 4.53 และ 4.85 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดเจดาลห์ไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 95.7, 95.2 และ 94.8 % ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าทั้งสามแบบจำลองที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05, 0.10 และ 0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ สามารถกำจัดเจดาลห์ไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การลดลงของค่าเจดาลห์ไนโตรเจนในน้ำที่ออกจากระบบสอดคล้องกับการลดลงของแอมโมเนียไนโตรเจน โดยพบว่าทั้ง 3 แบบจำลองมีการลดลงของค่าเจดาลห์ไนโตรเจนที่ไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากแต่ละแบบจำลองมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่ต่ำระบบจึงมีปริมาณการรับภาระต่ำ อีกทั้งอัตราการไหลที่ต่ำทำให้มีระยะเวลาเก็บกักค่อนข้างนานเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาต่างๆภายในระบบจึงมีมากขึ้น จึงทำให้มีการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียมได้มากระบบจึงมีค่าเจดาลห์ไนโตรเจนในน้ำที่ออกจากระบบต่ำ (ศุภกาญจน์ ล้วนมณี, 2540)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.11 เจดาลห์ไนโตรเจนของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะ ขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 2 (อัตราการเติมอากาศ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

อีกทั้งคาดว่าภายในแบบจำลองอาจเกิดสภาพแอโรบิคได้มาก ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของประไพ อิสระ (2543) ที่ศึกษาระบบที่ใช้ขี้เลื่อย ปอแก้ว และซังข้าวโพดเป็นวัสดุผสม พบว่าระบบที่ใช้ขี้เลื่อยเป็นวัสดุผสมสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ดีกว่า เนื่องจากภายในระบบที่ใช้ขี้เลื่อยมีส่วนที่เกิดสภาพแอโรบิคได้ดีกว่า (มีรีดอกซ์โพเทนเชียลสูงกว่า) จึงส่งเสริมให้ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของอินทรีย์ไนโตรเจน และแอมโมเนียไนโตรเจนถูกกำจัดออกไปจากระบบได้มาก

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเจดาลห์ไนโตรเจนระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ฉ4 – ฉ6) พบว่าค่าเฉลี่ยเจดาลห์ไนโตรเจนของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.05 กับ 0.10 ม^3/(ม^2.วัน) และอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.05 กับ 0.15 ม^3/(ม^2.วัน) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนระหว่างอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.10 กับ 0.15 ม^3/(ม^2.วัน) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาจากผลทางสถิติแล้วจะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ศาสตร์ 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) มีประสิทธิภาพการกำจัดเจดาลห์ไนโตรเจนได้ดีกว่าแบบจำลองที่ 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.10 และ 0.15 ม^3/(ม^2.วัน) ตามลำดับ

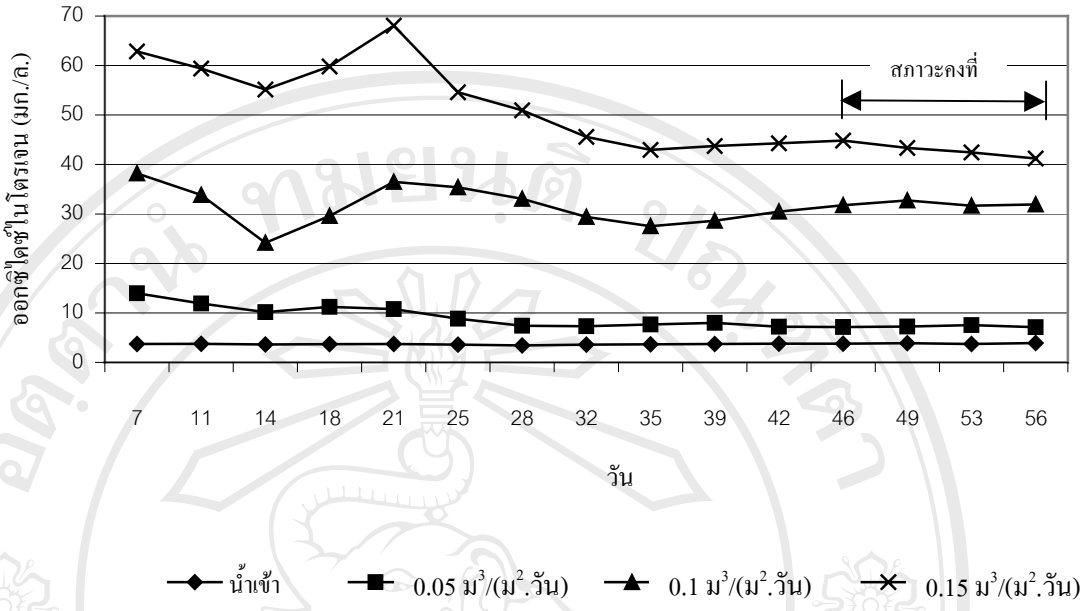
ค. ออกซิไดซ์ไนโตรเจน

ออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบตลอดช่วงการศึกษาได้แสดงดังตาราง 4.6 และรูป 4.12 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจน พบว่าปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3.83 มก./ล. เมื่อทำการเติมอากาศในปริมาณ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) ให้แก่ระบบและทำการเปิด – ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 ชม.และ 8 ชม. ตามลำดับ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05, 0.10 และ0.15 ม^3/(ม^2.วัน) มีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 7.26, 32.0 และ 42.9 มก./ล. การเพิ่มขึ้นของออกซิไดซ์ไนโตรเจนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 89.9, 738 และ 1023 % ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) มีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำออกที่ต่ำกว่าน้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 และ 0.15 ม^3/(ม^2.วัน) ตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) มีระยะเวลาเก็บกักน้ำที่นานที่สุดคือ 1.60 วัน(ภาคผนวก ฉ) จึงทำให้ระบบมีระยะเวลาเก็บกักน้ำเพียงพอที่สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ โดยส่วนของวัสดุดินผสมจะอยู่ในสภาพแอนอกซิกเนื่องจากส่วนของวัสดุดินผสมสามารถอุ้มน้ำไว้ได้ดี และมีแหล่งคาร์บอนที่ให้กับจุลินทรีย์ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ดังนั้นเมื่อไนเตรทเคลื่อนเข้ามาสู่ในส่วนของดินผสมนี้ไนเตรทก็จะถูกรีดิวซ์ไปเป็นก๊าซไนโตรเจน (ประไพ อิสระ, 2544) ทำให้ปริมาณไนเตรทที่อยู่ในน้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าลดลง ทำให้ค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 1 มีค่าต่ำกว่าน้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 2 และ 3

ส่วนในแบบจำลองที่ 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 และ 0.15 ม^3/(ม^2.วัน) ตามลำดับ มีระยะเวลากักเก็บน้ำที่สั้นกว่าคือ 0.95 และ 0.45 วัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นเวลาเก็บกักน้ำที่สั้นจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายไนเตรทได้ทันส่งผลให้น้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนสูงกว่าน้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 1

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.12 ออกซิไดซ์ไนโตรเจนของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 2 (อัตราการเติมอากาศ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจนของทั้ง 3 แบบจำลองพบว่า ถึงแม้ในน้ำที่ออกจากทั้ง 3 แบบจำลองจะมีการเพิ่มขึ้นของค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจน แต่ในแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) มีค่าออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำที่ออกจากระบบต่ำที่สุดซึ่งอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค ดังตาราง 4.7

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยออกซิไดซ์ไนโตรเจนระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าค่าเฉลี่ยออกซิไดซ์ไนโตรเจนของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05, 0.10 และ0.15 ม^3/(ม^2.วัน) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ฉ7 – ฉ9)โดยเมื่อพิจารณาจากผลวิเคราะห์ทางสถิติจะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) มีประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจนได้ดีที่สุด แสดงว่าในแบบจำลองที่ 1 นั้นมีสภาพที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ดีกว่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.7 มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค

ดัชนีแสดงคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	
		เกณฑ์กำหนดที่เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
สี	พลาตินั่ม-โคบอลต์	5	15
ความขุ่น	หน่วยความขุ่น	5	20
ความเป็นกรด-ด่าง	-	7.0-8.5	6.5-9.2
เหล็ก	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.5	1
แมงกานีส	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.3	0.5
ทองแดง	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 1.0	1.5
สังกะสี	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 5.0	15
ซัลเฟต	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 200	250
คลอไรด์	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 250	600
ฟลูออไรด์	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 0.7	1
ไนเตรท	มก./ล.as NO_3	ไม่เกินกว่า 45	45
ความกระด้างทั้งหมด	มก./ล.as $CaCO_3$	ไม่เกินกว่า 300	500
ความกระด้างถาวร	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 200	250
ปริมาณสารทั้งหมดที่ละลายได้	มก./ล.	ไม่เกินกว่า 600	1,200

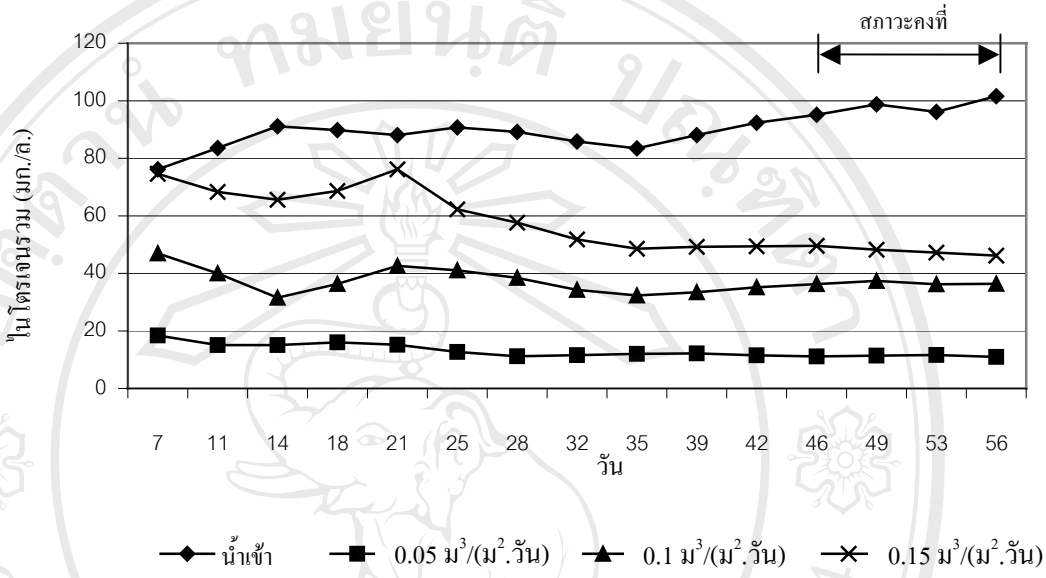
ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2542) ออกตามความในพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกันด้านสาธารณสุขและป้องกันด้านสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษาเล่ม 112 ตอนที่ 29ง ลงวันที่ 13 เมษายน พ.ศ. 2542

ง. ไนโตรเจนรวม

การกำจัดไนโตรเจนรวมในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะเมื่อทำการเติมอากาศในปริมาณ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ให้แก่ระบบและทำการเปิด – ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 ชม.และ 8 ชม. ตามลำดับสามารถแสดงได้ดังตาราง 4.6 และรูป 4.13 ซึ่งแสดงไนโตรเจนรวมในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบตลอดช่วงการศึกษา โดยพบว่าน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณไนโตรเจนรวมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 97.9 มก./ล. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ศาสตร์เท่ากับ 0.05, 0.10 และ0.15 ม^3/ม^2/วัน มีค่าไนโตรเจนรวมเฉลี่ยเท่ากับ 11.3, 36.6 และ 47.8 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนรวมโดยเฉลี่ยเป็น 88.5, 62.6 และ 51.1 % ตามลำดับ



รูป 4.13 ไนโตรเจนรวมของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าและออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 2 (อัตราการเติมอากาศ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

จะเห็นได้ว่าที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) มีแนวโน้มของการกำจัดไนโตรเจนรวมได้ดีกว่า เนื่องจากกระบวนการในการกำจัดไนโตรเจน คือกระบวนการไนตริฟิเคชันและกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์นั้นต้องมีเวลาเก็บกักน้ำที่พอเพียงด้วย ดังนั้นที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1.60 วันที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เป็น 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) จึงมีระยะเวลาที่นานเพียงพอที่จะเกิดทั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน จึงทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนรวมได้ดีกว่าที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.10 และ 0.15 ม^3/(ม^2.วัน) ซึ่งมีระยะเวลาเก็บกักน้ำ 0.95 และ 0.45 วัน ตามลำดับ

อีกทั้งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดออกซิไดซ์ไนโตรเจน ร่วมกับแอมโมเนียไนโตรเจน และเจดาลห์ไนโตรเจนแล้ว จะเห็นได้ว่าระบบบำบัดที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนรวมได้ดีที่สุด ซึ่งได้คุณภาพตามมาตรฐานของ Water Pollution Control Federation (WPCF, 1989) ที่กำหนดคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การเกษตรกรรม ซึ่งกำหนดให้น้ำที่ใช้ในการเกษตรกรรมควรจะมีปริมาณไนโตรเจนรวมในน้ำอยู่ในช่วง 5 – 30 มก./ล. และแนวทางคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ใช้ในการเกษตรกรรมสำหรับประเทศไทย ดังตาราง 4.8 เนื่องจากพบว่าได้มีการใช้น้ำใต้ดินจากบ่อที่ทำการเก็บตัวอย่างมาทดลอง มาใช้ในการรดน้ำต้นไม้ในบริเวณนั้น

ตาราง 4.8 แนวทางคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ใช้ในการเกษตรกรรมสำหรับประเทศไทย

ดัชนีคุณภาพ	หน่วย	คุณภาพน้ำทิ้งสำหรับพืชทุกชนิด
พีเอช	-	6.5 - 8.4
BOD	มก/ล	50
ของแข็งละลาย	มก/ล	500
SAR		< 3
โบรอน	มก/ล	< 0.7
ไนโตรเจนรวม	มก/ล	30
ไข่และหนอนพยาธิ	ตัว/ล	≤ 1
Fecal Coliforms	MPN/100 มล	≤ 4,000

ที่มา : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2545

อีกทั้งการเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศเป็นจังหวะจะช่วยส่งเสริมให้ระบบเกิดประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนรวม เนื่องจากเมื่อมีการเติมอากาศปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันก็สามารถเกิดได้มาก ทำให้มีปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนภายในระบบบำบัดมากขึ้น และเมื่อมีระยะเวลาการปิดเครื่องเติมอากาศจึงทำให้ออกซิไดซ์ไนโตรเจนภายในระบบบำบัดกลายเป็นก๊าซไนโตรเจนซึ่งแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันด้วย จึงทำให้ปริมาณออกซิไดซ์ไนโตรเจนในน้ำออกลดลงประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนรวมจึงมีมากขึ้นด้วย

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยไนโตรเจนรวมระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าค่าเฉลี่ยไนโตรเจนรวมของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05, 0.10 และ0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ฉ10 – ฉ12)โดยเมื่อพิจารณาจากผลวิเคราะห์ทางสถิติจะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนรวมได้ดีที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

แสดงว่าในแบบจำลองที่ 1 นั้นมีสภาพที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน จึงทำให้สามารถกำจัดไนโตรเจนรวมได้ดีกว่า

4.2.3 การศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์

การศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์จะศึกษาการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป ซีโอดี และ บีโอดี ในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนน้ำชะขยะ ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10 และ0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ โดยสามารถแสดงได้ดังตาราง 4.9 และตารางในภาคผนวก จ3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

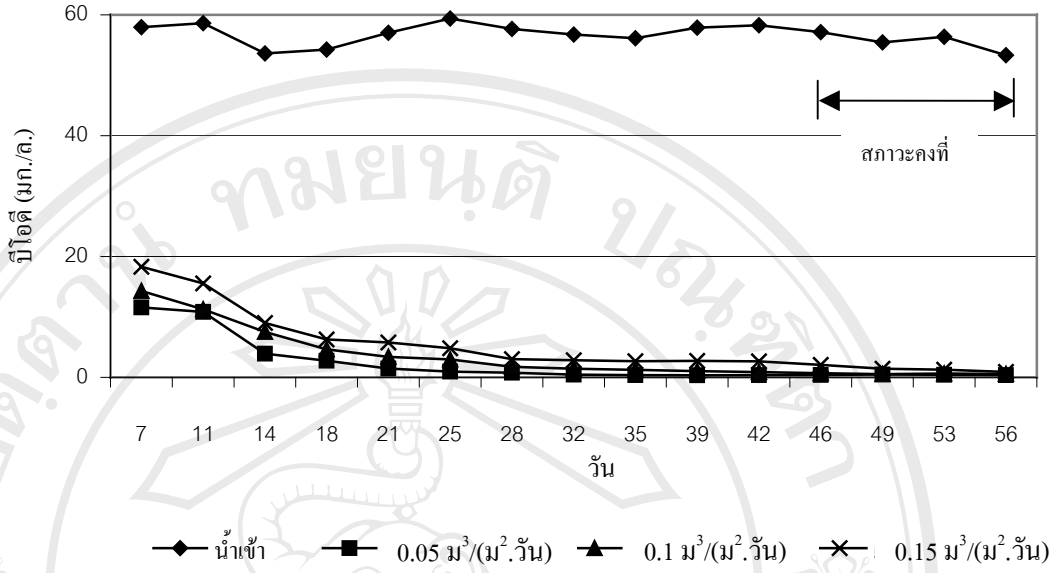
ตาราง 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีและซีโอดีที่เข้าและออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่2

อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์, $(ม^3/(ม^2.วัน))$	BOD_5			COD		
	น้ำเข้า	น้ำออก	% การกำจัด	น้ำเข้า	น้ำออก	% การกำจัด
0.05	55.6	0.42	99.2	200	156	22.1
0.10	55.6	0.60	98.9	200	170	14.7
0.15	55.6	1.42	97.5	200	185	7.4

ก. บีโอดี

บีโอดีในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบบำบัดแสดงได้ดังตาราง 4.9 และรูป 4.14 ซึ่งแสดงบีโอดีในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบตลอดช่วงการศึกษา โดยจากการทดลองพบว่าน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าบีโอดีเฉลี่ย 55.6 มก./ล. เมื่อน้ำไหลผ่านระบบบำบัดแล้วพบว่าค่าบีโอดีในน้ำออกจากระบบของทุกแบบจำลองมีค่าลดลงโดยค่าบีโอดีในน้ำออกจากระบบบำบัดที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10 และ0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.42, 0.60 และ 1.42 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าโดยเฉลี่ยเป็น 99.2, 98.9 และ 97.5 % ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.14 บีโอดีของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 2 (อัตราการเติมอากาศ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

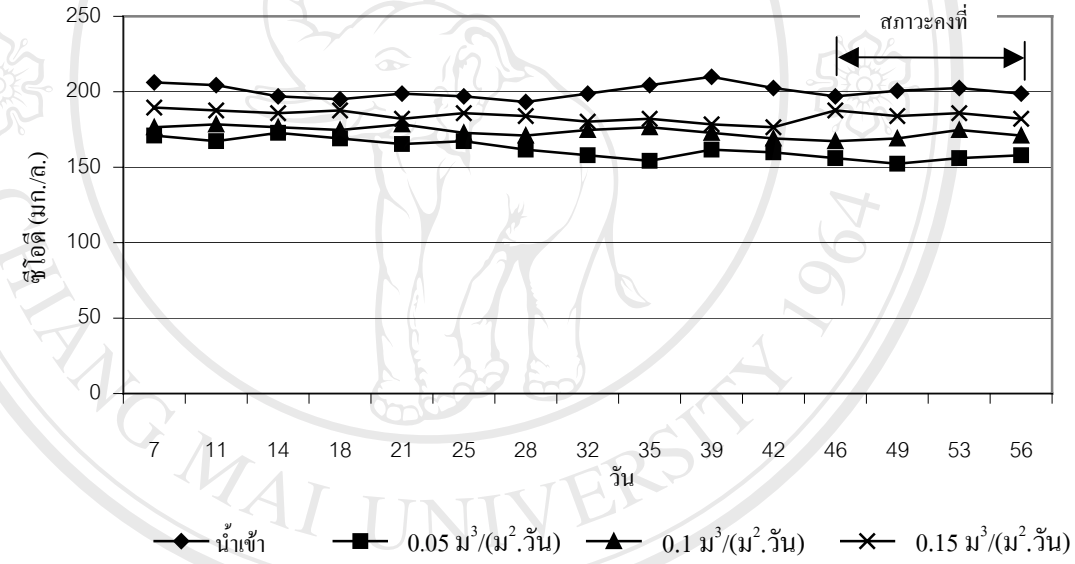
จะเห็นได้ว่าแต่ละแบบจำลองมีประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าจะมีการเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 ชม. และ 8 ชม.ตามลำดับ ทำให้ออกซิเจนภายในระบบลดลง แต่ทั้ง 3 แบบจำลองยังคงสามารถกำจัดบีโอดีได้ เนื่องจากทั้ง 3 แบบจำลองมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่ต่ำทำให้มีระยะเวลาเก็บกักน้ำที่นานเพียงพอที่จะทำให้จุลินทรีย์สามารถกำจัดบีโอดีได้ ดังนั้นน้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่าบีโอดีในน้ำออกที่น้อย โดยพบว่าถ้าอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ลดลงจะมีแนวโน้มของการบำบัดบีโอดีที่เพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) มีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีได้ดีที่สุด

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยบีโอดีระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ฉ13 – ฉ15) พบว่าค่าเฉลี่ยบีโอดีของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05, 0.10 และ0.15 ม^3/(ม^2.วัน) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าทั้ง 3 แบบจำลองมีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีได้ใกล้เคียงกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ข. ซีโอดี

ซีโอดีในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบบำบัดแสดงได้ดังตาราง 4.9 และรูป 4.15 ซึ่งแสดงซีโอดีในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบตลอดช่วงการศึกษา โดยจากการทดลองพบว่าในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 200 มก./ล. เมื่อทำการเติมอากาศในปริมาณ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) ให้แก่ระบบและทำการเปิด – ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 ชม. และ 8 ชม. ตามลำดับ พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำที่ออกจากแบบจำลองมีค่าซีโอดีโดยเฉลี่ยเท่ากับ 156, 170 และ 185 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 22.1, 14.7 และ 7.4 % ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05, 0.10 และ 0.15 ม^3/(ม^2.วัน) ตามลำดับ



รูป 4.15 ซีโอดีของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าและออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 2 (อัตราการเติมอากาศ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อพิจารณาจากค่าซีโอดีในน้ำที่ออกจากระบบจะเห็นได้ว่าทุกแบบจำลองสามารถกำจัดซีโอดีได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ค่าซีโอดีในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสูง เนื่องจากว่าอัตราส่วนของบีโอดีต่อซีโอดี (BOD_5/COD) ของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าเท่ากับ 0.28 หมายความว่าสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยได้ถูกย่อยสลายทางชีววิทยาโดยจุลินทรีย์ในหลุมฝังกลบขยะแล้ว ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในน้ำชะขยะเป็น

สารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ ซึ่งประกอบด้วย กรดฮิวมิค (Humic acid) และกรดฟัลวิค (Fulvic acid) ทำให้ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ง่าย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าต่ำ (Tchobanoglous et. al., 1993)

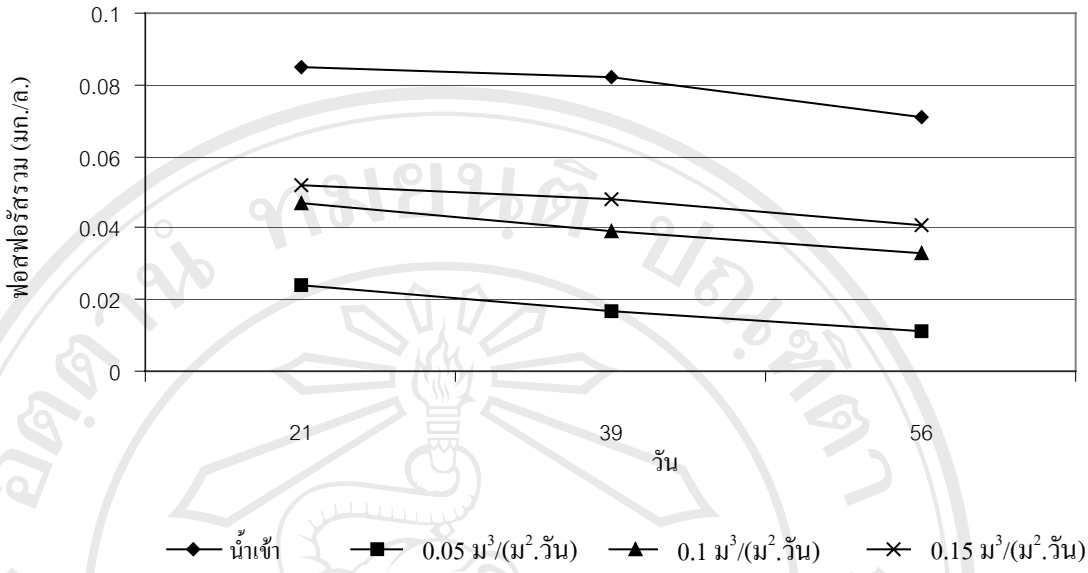
ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยซีโอดีระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05, 0.10 และ0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ฉ16 – ฉ18)โดยเมื่อพิจารณาจากผลวิเคราะห์ทางสถิติและประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของทั้งสามแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ดีที่สุด

4.2.4 การศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสรวม

จากการศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสรวมพบว่า ค่าฟอสฟอรัสรวมในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.079 มก./ล. ซึ่งมีค่าต่ำเนื่องจากที่ฝังกลบขยะแห่งนี้ได้ทำการฝังกลบขยะมาแล้วเป็นเวลานาน ดังนั้นค่าความเข้มข้นของมลสารต่างๆในน้ำชะขยะจึงมีค่าค่อนข้างต่ำ หลังจากผ่านการกำจัดจากระบบบำบัดแล้วเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่น้ำที่ออกจากแบบจำลองมีค่าฟอสฟอรัสรวมโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.017, 0.040 และ 0.047 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยเป็น 78.5, 50.2 และ 40.8 % ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05, 0.10 และ0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 4.16 และตาราง 4.10

ทั้งนี้การที่ฟอสฟอรัสรวมทั้งหมดลดลงนั้นสอดคล้องกับการทดลองของ ทัศนีย์ และคณะ (2541) ที่รายงานว่าการให้อากาศส่งเสริมการกำจัดฟอสฟอรัส โดยทำให้เกิดการออกซิเดชันของเหล็กไปเป็นเฟอรัสไอออน และเฟอรัสไอออนไปเป็นเฟอริกไอออนได้ดีขึ้น ซึ่งส่งเสริมการดูดซับหรือการตกตะกอนของฟอสเฟต (Phosphate adsorption / precipitation) และความสามารถในการตรึงฟอสเฟตสูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Wakatsuki และคณะ (1993) ที่ว่าการให้อากาศที่เหมาะสมแก่ระบบจะช่วยให้ระบบสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มเศษเหล็กลงไปในระบบจะช่วยในการตรึงฟอสเฟตได้ โดยเมื่อเติมอากาศเข้าไปในระบบจะช่วยให้เหล็กที่อยู่ภายในชั้นของดินเกิดการออกซิไดซ์เป็นเหล็กไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น จึงมีผลให้ฟอสเฟตในน้ำเสียถูกดูดซับและตกตะกอนกับเหล็กไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.16 ฟอสฟอรัสรวมของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 2 (อัตราการเติมอากาศ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

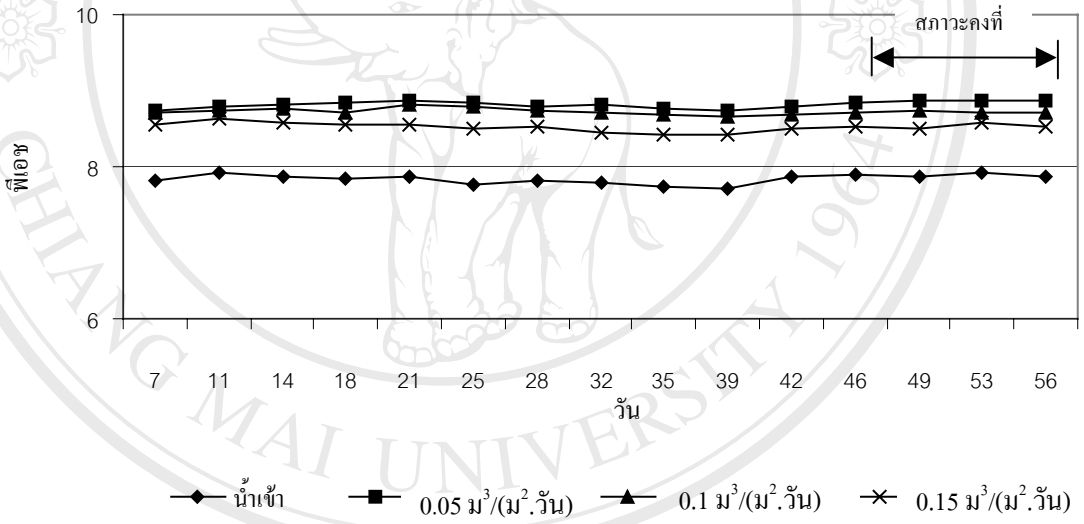
ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสรวมระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ฉ19 – ฉ21) พบว่าค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสรวมของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.05 กับ 0.10 $ม^3/(ม^2.วัน)$ และอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ระหว่าง 0.05 กับ 0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนระหว่างอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.10 กับ 0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาจากผลทางสถิติและประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสรวมแล้วจะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสรวมได้ดีกว่าแบบจำลองที่ 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์0.10 และ 0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2.5 ความเป็นกรด-ด่าง

จากการศึกษาค่าพีเอชของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.88 เมื่อทำการเติมอากาศในปริมาณ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ ให้แก่ระบบ

และทำการเปิด – ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 ชม. และ 8 ชม. ตามลำดับ พบว่าหลังจากผ่านการกำจัดจากระบบบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากแบบจำลองมีค่าพีเอชโดยเฉลี่ยเท่ากับ 8.86, 8.72 และ 8.53 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05, 0.10 และ0.15 ม^3/(ม^2.วัน) ตามลำดับ ดังรูป 4.17 จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าพีเอชของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากภายในระบบมีการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ทำให้มีการปลดปล่อยไฮดรอกซิลไอออนจากปฏิกิริยารีดักชันของไนเตรท โดยพบว่าแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) มีการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชมากกว่าในแบบจำลองที่ 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เป็น 0.1 และ 0.15 ม^3/(ม^2.วัน)ตามลำดับ เนื่องจากมีการกำจัดไนเตรทได้ดีกว่าจึงทำให้ค่าพีเอชของน้ำที่ออกจากระบบบำบัดมีค่ามากกว่า



รูป 4.17 พีเอชของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้า และออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 2 (อัตราการเติมอากาศ 1.8 ม^3/(ม^2.ชม.) และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

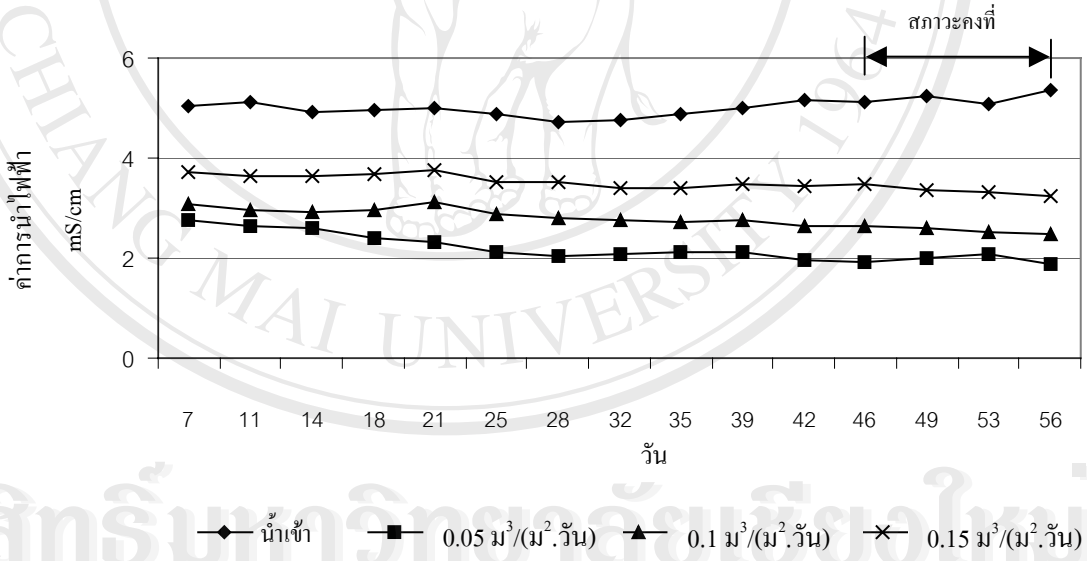
ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพีเอชระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ภาคผนวก ฉ22 – ฉ24) พบว่าค่าเฉลี่ยพีเอชของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05, 0.10 และ0.15 ม^3/(ม^2.วัน) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2.5 ค่าการนำไฟฟ้า

จากการทดลองศึกษาค่าการนำไฟฟ้าพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.20 mS/cm หลังจากผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดแล้วน้ำที่ออกจากแบบจำลองมีค่าการนำไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.97, 2.56 และ 3.37 mS/cm ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05, 0.10 และ0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ตามลำดับ ดังรูป 4.18

จะเห็นได้ว่าน้ำที่ออกจากแบบจำลองมีค่าการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจากมีสารประกอบที่ละลายน้ำได้ดีจะถูกออกซิไดซ์ไปอยู่ในรูปสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อย ส่วนไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำก็สามารถถูกดูดซับไว้บนผิวของวัสดุต่างๆ ภายในระบบ ทั้งยังสอดคล้องกับการลดลงของไนเตรทโดยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยเฉพาะในแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ซึ่งมีปริมาณไนเตรทออกมากับน้ำที่ออกจากระบบน้อย ดังนั้นเมื่อทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ออกจากแบบจำลองที่ 1 จึงพบว่ามีค่าน้อยกว่าแบบจำลองที่ 2 และ 3 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.10 และ 0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ตามลำดับ



รูป 4.18 การนำไฟฟ้าของน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะที่เข้าและออกจากระบบบำบัดในการทดลองชุดที่ 2 (อัตราการเติมอากาศ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และเปิดเครื่องเติมอากาศ 4 ชม. ปิด 8 ชม.)

ในการทดสอบทางสถิติโดยใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าระหว่างน้ำใต้ดินที่ออกจากแต่ละแบบจำลองระบบจัดเรียงดินหลายชั้นทั้ง 3 แบบจำลองที่ระดับความเชื่อมั่น 95%(ภาค

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ผนวกที่ ฉ25 – ฉ27) พบว่าค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าของน้ำใต้ดินที่ออกจากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.05, 0.10 และ 0.15 $ม^3/(ม^2.วัน)$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารของระบบ

จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี ซีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ไนโตรเจนรวม และฟอสฟอรัสรวม ในน้ำใต้ดินในชั้นหินอุ้มน้ำอิสระที่ปนเปื้อนจากน้ำชะขยะ แสดงดังตาราง 4.10 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงที่ระบบบำบัดอยู่ในสภาวะคงที่

ตาราง 4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี บีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ไนโตรเจนรวม และฟอสฟอรัสรวม ในการทดลองชุดที่ 2

อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์, ($ม^3/(ม^2.วัน)$)	% การกำจัด					
	BOD	COD	NH_3-N	TKN	TN	TP
0.05	99.2	22.1	99.5	95.7	88.5	78.5
0.10	98.9	14.7	98.9	95.2	62.6	50.2
0.15	97.5	7.4	98.5	94.8	51.1	40.8

จากการทดลองชุดที่ 2 เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในแต่ละแบบจำลอง โดยพิจารณาการกำจัดสารไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน ไนโตรเจนรวม เป็นหลัก และผลวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าในแบบจำลองที่ 1 ที่มีอัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 $ม^3/(ม^2.วัน)$ โดยสามารถกำจัดสารไนโตรเจน และสารอินทรีย์ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

จากการทดลองทั้งสองการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมลสารที่ดีที่สุดสำหรับระบบจัดเรียงดินหลายชั้นคือ ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.05 $ม^3/(ม^2.วัน)$ โดยสามารถกำจัดสารไนโตรเจนได้แก่ แอมโมเนียไนโตรเจน เจดาลห์ไนโตรเจน ออกซิไดซ์ไนโตรเจน ไนโตรเจนรวม และสารอินทรีย์ ได้แก่ บีโอดี และซีโอดี ได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยเติมอากาศให้แก่ระบบในปริมาณ 1.8 $ม^3/(ม^2.ชม.)$ และเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศเป็น 4 และ 8 ชม.ตามลำดับ

อนึ่งจากผลการทดลองชุดที่ 1 และ 2 นั้นจะเห็นได้ว่า ค่าไนโตรเจนรวมในน้ำออกที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 $ม^3/(ม^2.วัน)$ ในการทดลองทั้งสองชุดนั้นมีค่าแตกต่าง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

กัน เนื่องจากในการทดลองชุดที่ 2 ได้ทำการเปลี่ยนชั้นตัวกลางใหม่ในแบบจำลอง ส่วนในการทดลองที่ 1 นั้นก่อนที่จะมีการเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศเป็นเวลา 4 และ 8 ชม.นั้นได้ทำการทดลองมาแล้ว 86 วัน ดังนั้นจึงคาดว่าสภาพภายในแบบจำลองนั้นได้เปลี่ยนไปทำให้มีสภาพแตกต่างจากการทดลองชุดที่ 2 ที่ได้เริ่มทำการทดลองโดยเปลี่ยนชั้นตัวกลางใหม่ทั้งหมด อีกทั้งจะเห็นได้ว่าค่าไนโตรเจนรวมในน้ำเข้าในการทดลองชุดที่ 1 ช่วงที่ 3 มีค่ามากกว่าในการทดลองชุดที่ 2 ที่อัตราค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์เท่ากับ 0.1 ม^3/(ม^2.วัน) จึงอาจทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมีความแตกต่างกัน

4.3 การนำระบบจัดเรียงดินหลายชั้นไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำใต้ดินที่ได้รับการปนเปื้อนจากน้ำชะขยะ

ในพื้นที่ฝังกลบขยะหากไม่มีระบบป้องกันการซึมผ่านของน้ำชะขยะลงสู่น้ำใต้ดินที่ดีพอก็จะก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินได้ ซึ่งทำให้ต้องมีการฟื้นฟูสภาพน้ำใต้ดิน (Groundwater remediation) ในภายหลัง จากผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าระบบจัดเรียงดินหลายชั้นสามารถกำจัดมลสารในน้ำใต้ดินที่ได้รับการปนเปื้อนจากน้ำชะขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเนื่องจากค่าลงทุนในการก่อสร้างและเดินระบบนี้มีราคาไม่สูง จึงเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการฟื้นฟูสภาพของน้ำใต้ดินในพื้นที่กำจัดขยะแม่เหียะได้ โดยการขุดย้ายขยะที่ฝังกลบในพื้นที่แม่เหียะออกไปกำจัดอย่างถูกหลักสุขาภิบาล และทำการสูบน้ำใต้ดินในบริเวณดังกล่าวมาบำบัดและสูบน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับคืนลงไป และจากอัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ที่ 0.05 ม^3/(ม^2.วัน) เมื่อนำมาประมาณพื้นที่ในการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำใต้ดินที่ได้รับการปนเปื้อนจากน้ำชะขยะจะได้ว่า ถ้าต้องการสูบน้ำใต้ดินมาบำบัด 1 ม^3/วัน จะมีความต้องการการใช้พื้นที่ในการก่อสร้างระบบจัดเรียงดินหลายชั้น 20 ม^2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved