บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

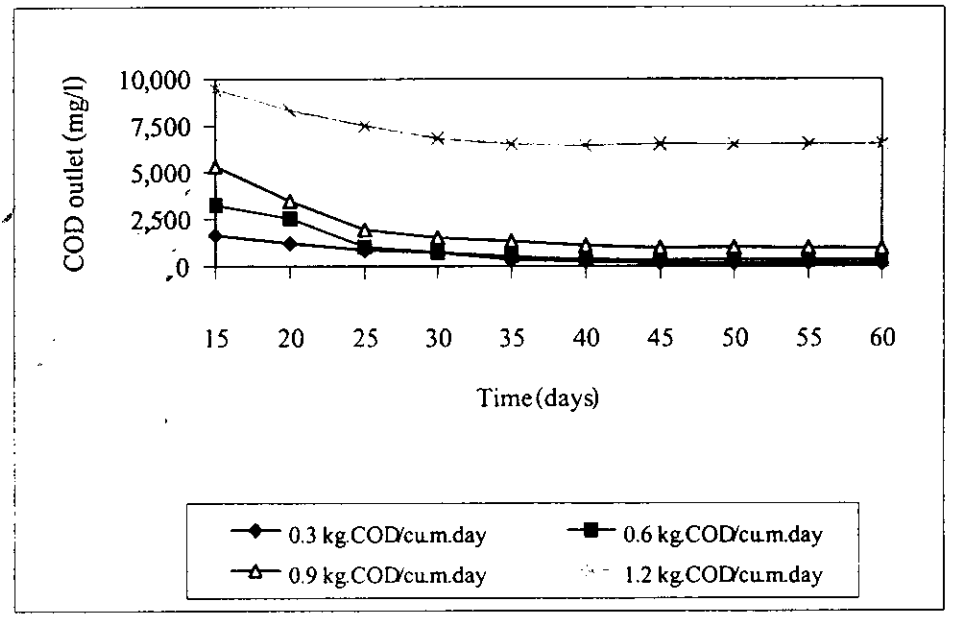
3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ

3.1.1 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR)

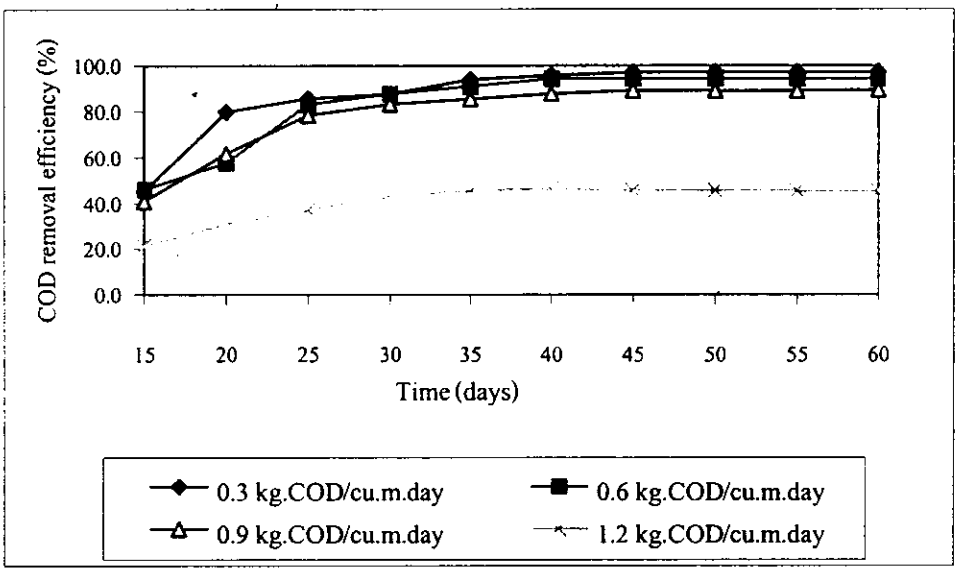
จากการทดลอง ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลง เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น โดยพบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วันประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยในน้ำเสียเท่ากับ 94.3 89.2 และ 44.7 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับดัง แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการทดลองเฉลี่ยภายใต้สภาวะคงตัวที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

พารามิเตอร์	อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)				
	0.3	0.6	0.9	1.2	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ความเข้มข้นซีโอดี (มก./ล.)	172	342	975	6,635	4-11
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%)	94.3	94.3	89.2	44.7	0.1-0.2
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (มก./ล.)	1,590	1,645	1,845	2,245	3-28
กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.ในรูป CH_3COOH)	606	630	1,619	2,084	29-43
สภาพด่าง (มก./ล. ในรูป $CaCO_3$)	1,896	2,088	2,249	2,468	51-82
ความเป็นกรด-ด่าง	8.21	8.09	7.61	7.31	0.01-0.08
อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่าง (-)	0.32	0.30	0.72	0.84	0.02-0.04
ความหนาฟิล์มชีวะ (ไมครอน)	67.14	68.10	51.43	30.47	5.06-8.49

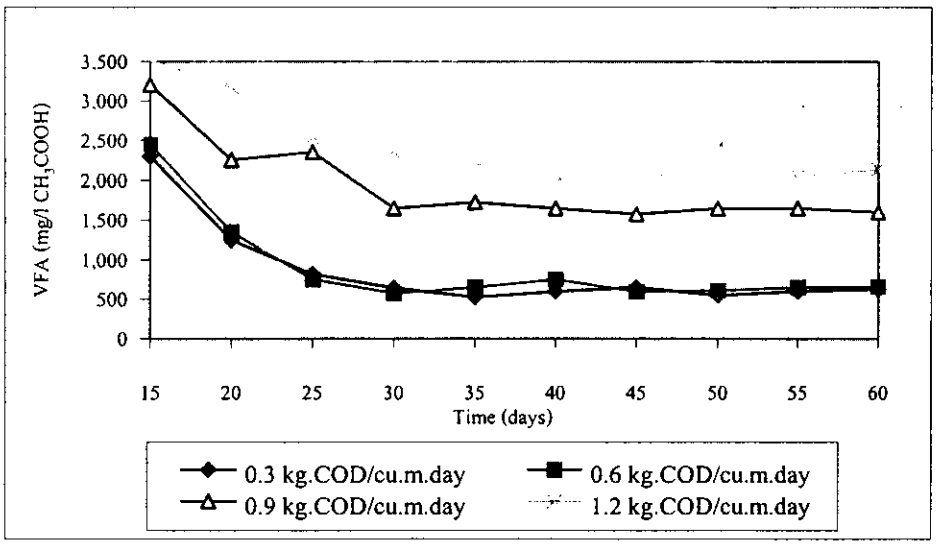


ภาพประกอบ 3.1 ความเข้มข้นซีโอดีทางออกของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน

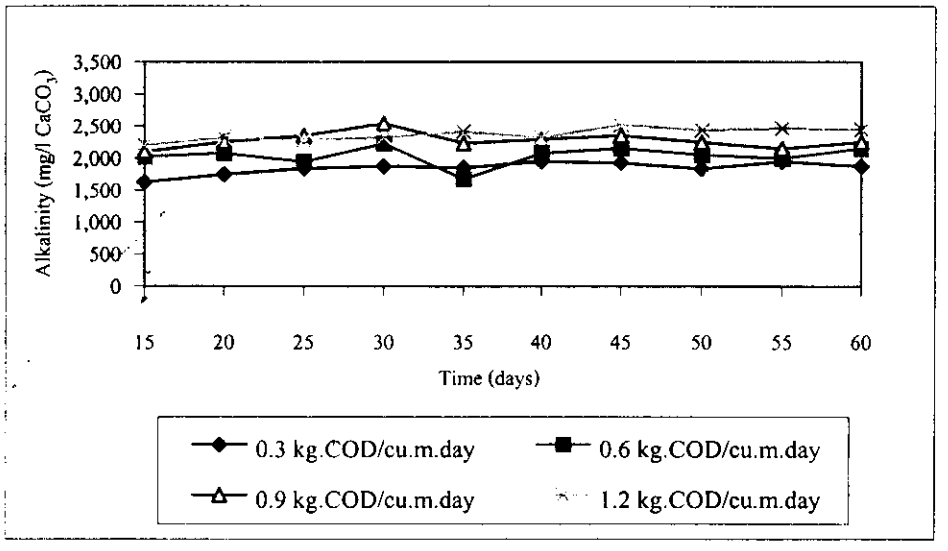


ภาพประกอบ 3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน

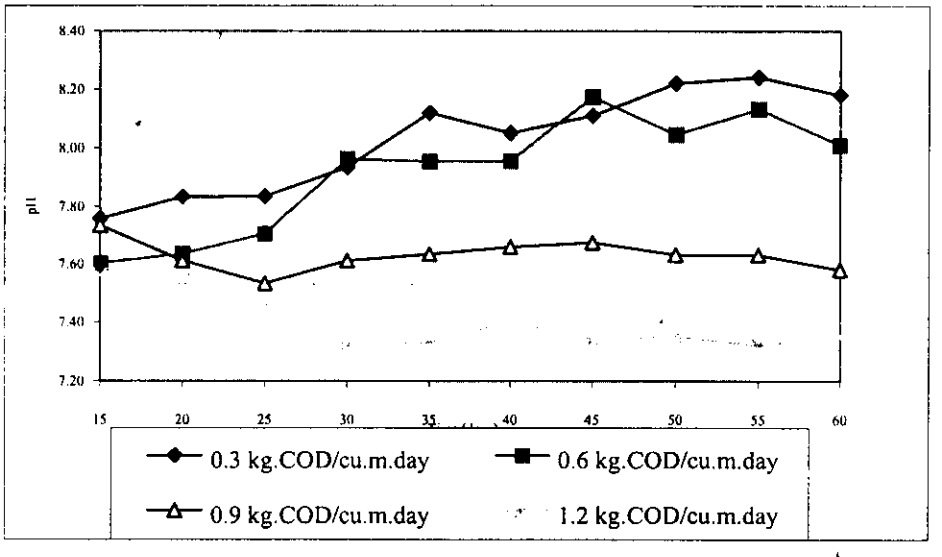
จากภาพประกอบ 3.1 และ 3.2 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.3 และ 0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าที่ 0.9 และ 1.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ อภิสิทธิ์ และ ขจรศักดิ์ (1997) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ พบว่า ที่อัตราภาระบรรทุก 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าที่อัตราภาระบรรทุก 2 2.4 3 4 และ 9 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เนื่องจากเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทนถูกยับยั้ง จึงทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย (Chua *et al.*, 1997) ทำให้กรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้นเท่ากับ 606 630 1,619 และ 2,084 มก./ล. ตามลำดับ ดังแสดงภาพประกอบ 3.3 ในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่าย จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก ซึ่งไม่เสถียร จากนั้นจะแตกตัวให้ไฮโดรเจนและไบคาร์บอเนตไอออน ทำให้สภาพด่างเฉลี่ยเพิ่มขึ้นดังนี้ 1,896 2,088 2,249 และ 2,468 มก./ล.ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 3.4 สภาพด่างจะทำหน้าที่รักษาสมดุลของระบบ ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นบัฟเฟอร์ของระบบ มีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วงเป็นกลาง คือที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.2 8.1 7.6 และ 7.3 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 3.5 และ 3.6



ภาพประกอบ 3.3 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน

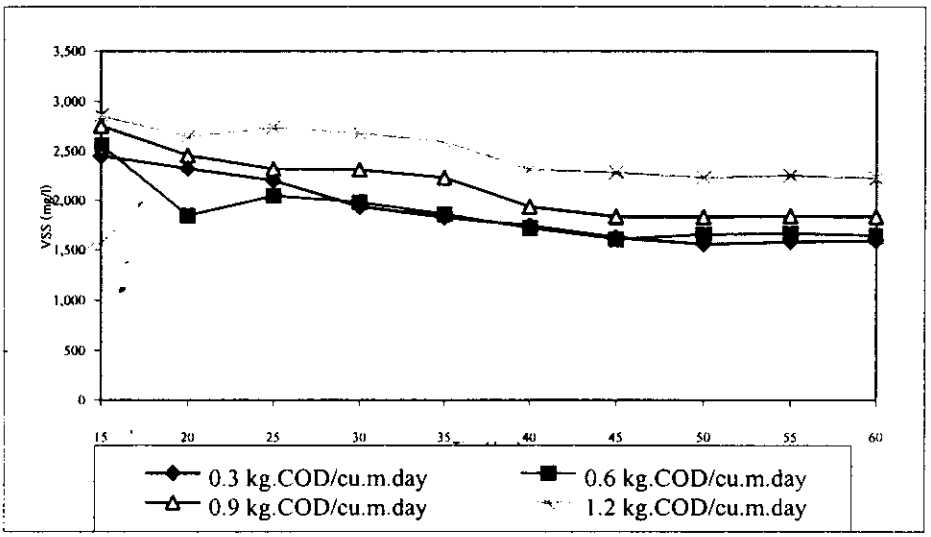


ภาพประกอบ 3.4 สภาพด่างของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน



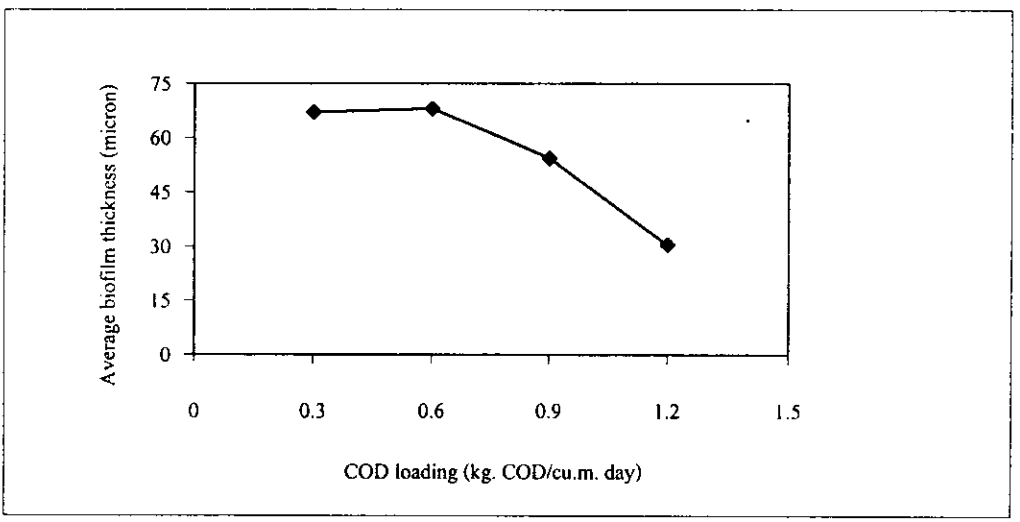
ภาพประกอบ 3.5 ความเป็นกรด-ด่างของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน

จากภาพประกอบ 3.6 ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบสูงขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งมีค่าเฉลี่ยดังนี้ 1,590 1,645 1,845 และ 2,246 มก./ล.ตามลำดับ เนื่องจากระบบเริ่มขาดเสถียรภาพ กล่าวคืออัตราส่วนระหว่างกรดไขมัน

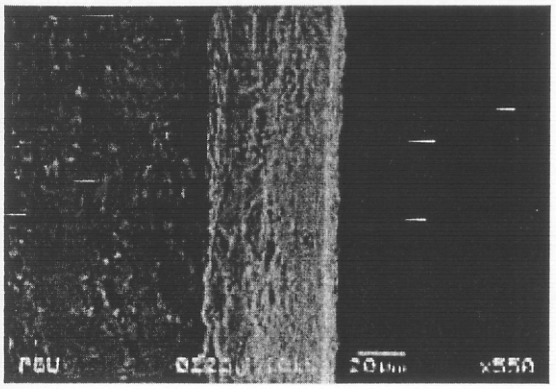


ภาพประกอบ 3.6 ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน

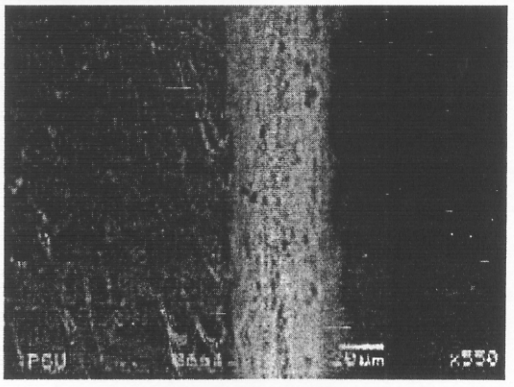
ระเหยง่ายต่อสภาพด่าง (VFA:Alkalinity) มากกว่า 0.4 ดังตารางที่ 6 มีผลทำให้จุลินทรีย์เริ่มตาย (เกรียงศักดิ์, 2543), และหลุดลอกออกมาจากตัวกลางกรอง ดังนั้นจุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในระบบจึงเพิ่มมากขึ้น ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบมีแนวโน้มสูงขึ้น ประกอบกับความหนาของฟิล์มชีวะมีแนวโน้มลดลง ดังภาพประกอบ 3.7 และ 3.8



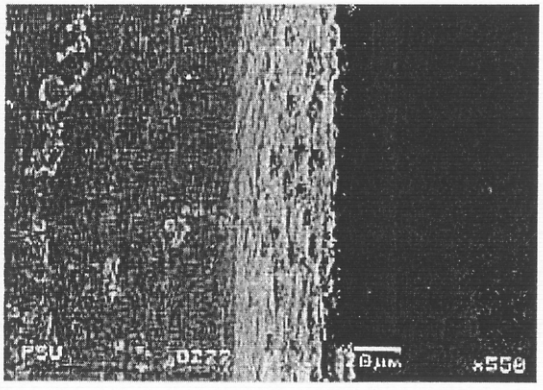
ภาพประกอบ 3.7 ความหนาของฟิล์มชีวะอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ



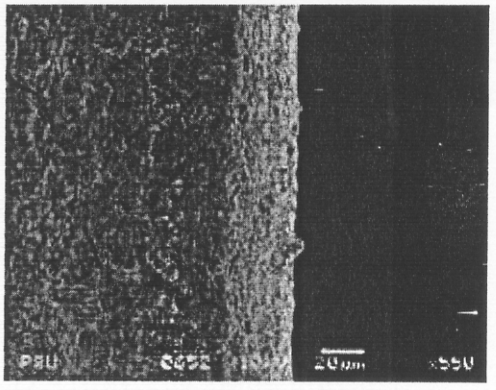
ก. อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน



ข. อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน



ค. อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.9 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน



ง. อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

ภาพประกอบ 3.8 ตัวอย่างความหนาฟิล์มชีวะที่แสดงด้วยเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 550 เท่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

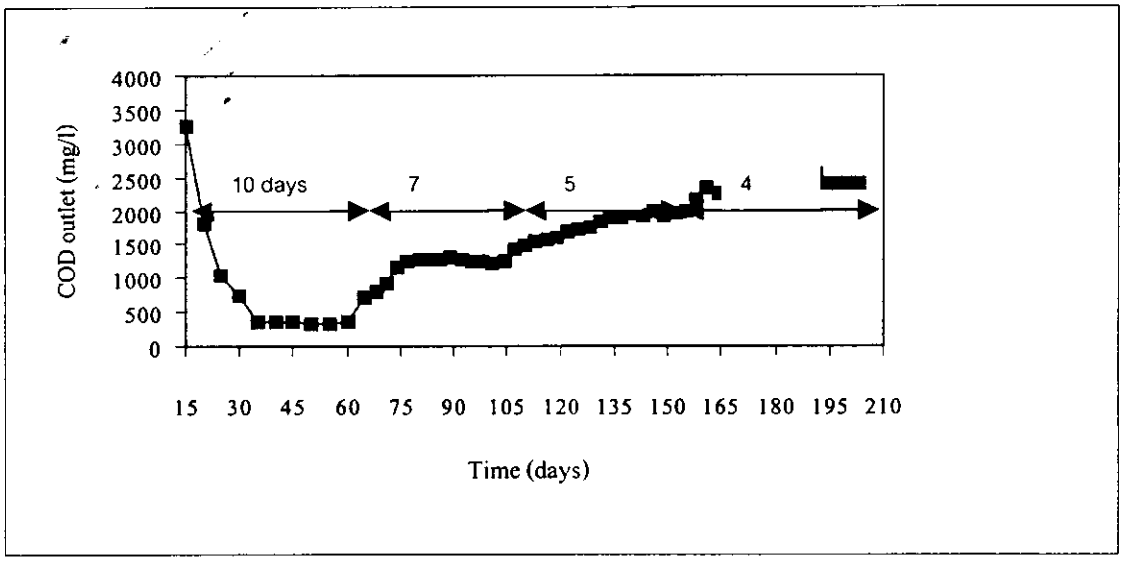
3.1.2 ระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic retention time, HRT)

การศึกษาผลของระยะเวลากักเก็บต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลง เมื่อระยะเวลากักเก็บลดลง โดยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยที่ระยะเวลากักเก็บ 10 7 5 และ 4 วันเท่ากับ 94.3 78.7 65.0 และ59.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 3.2

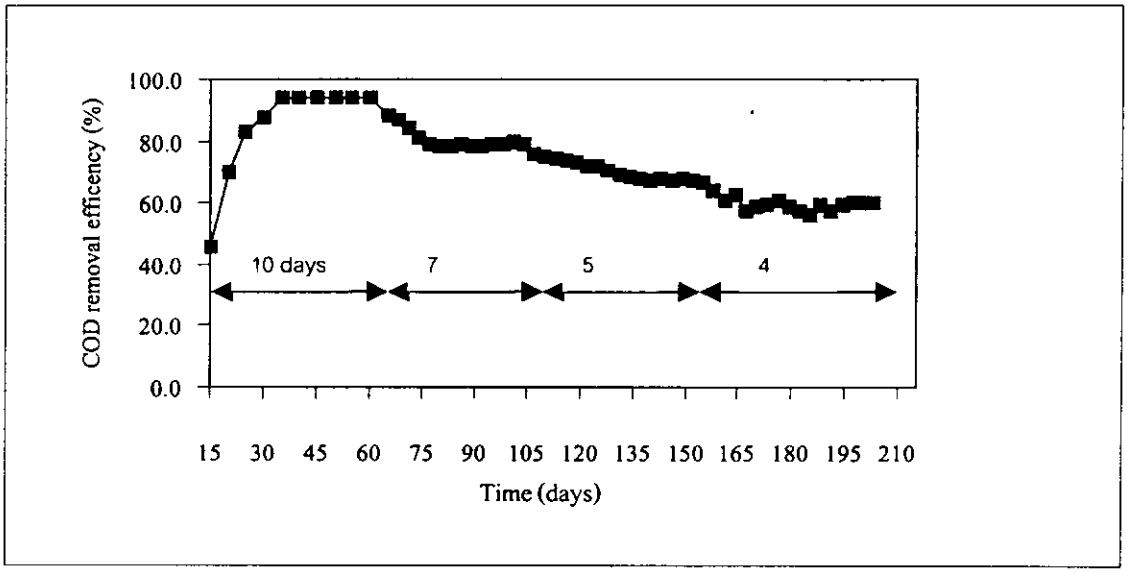
ตารางที่ 3.2 ผลการทดลองเฉลี่ยของระบบถังกรองไร้อากาศภายใต้สภาวะคงตัวที่ระยะเวลากักเก็บต่าง ๆ (อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)

พารามิเตอร์	ระยะเวลากักเก็บ (วัน)				
	10	7	5	4	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ความเข้มข้นซีโอดี (มก./ล.)	342	1,237	1,964	2,401	4-25
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%)	94.3	78.7	67.3	59.7	0.1-0.5
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (มก./ล.)	1,645	1,535	1,433	1,100	20-28
กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.ในรูป CH_3COOH)	496	1,312	1,456	1,729	44-84
สภาพด่าง (มก./ล. ในรูป $CaCO_3$)	2,088	2,355	2,079	1,875	46-75
ความเป็นกรด-ด่าง	8.09	8.13	7.73	7.03	0.03-0.11
อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่าง (-)	0.24	0.58	0.70	0.92	0.02-0.07
ความหนาฟิล์มชีวะ (ไมครอน)	68.10	47.71	34.86	20.22	3.43-10.11

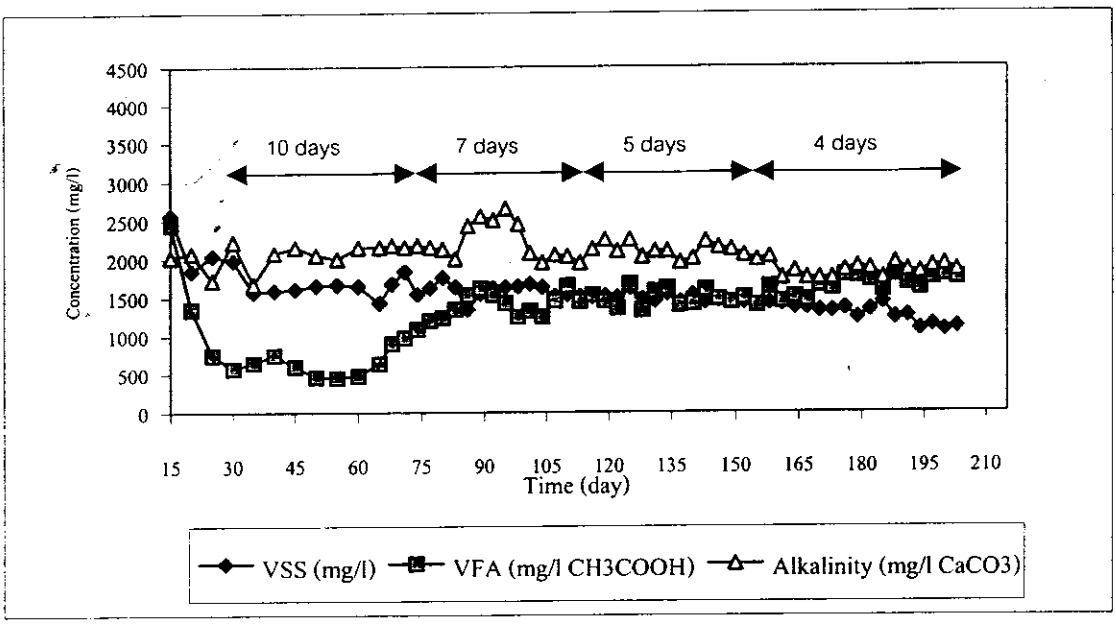
จากภาพประกอบ 3.9 และ 3.10 ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ระยะเวลากักเก็บ 7 5 และ 4 วัน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องผลการทดลองของธงชัย และวิบูลลักษณ์ (1997) พบว่าโดยทั่วไปแล้วเวลาที่ใช้ในการบำบัดไม่ควรต่ำกว่า 5 วัน ระยะเวลาที่เหมาะสมคือ 10 วัน ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.8-4.8 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 84-98 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ในการศึกษาอื่นๆ ก็ได้ผลในแนวโน้มเช่นเดียวกันที่แสดงว่าระยะเวลากักเก็บที่ลดลง จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลง Denac และ Dunn (1988) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์แบบ Packed bed และ Fluidized bed ภายใต้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งสองถังปฏิกรณ์ลดลง เมื่อระยะเวลากักเก็บลดลง Grobicki และ Stuckey (1991) พบว่าอัตราการถ่ายโอนมวลจะลดลงเมื่อระยะเวลากักเก็บลดลง Guiot *et al.*, (1989) พบว่าความเข้มข้นซีโอดีที่ทางออกของถังปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลากักเก็บลดลงนั้น กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจะมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 3.9 ความเข้มข้นซีโอดีทางออกของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่ระยะเวลากักเก็บต่าง ๆ

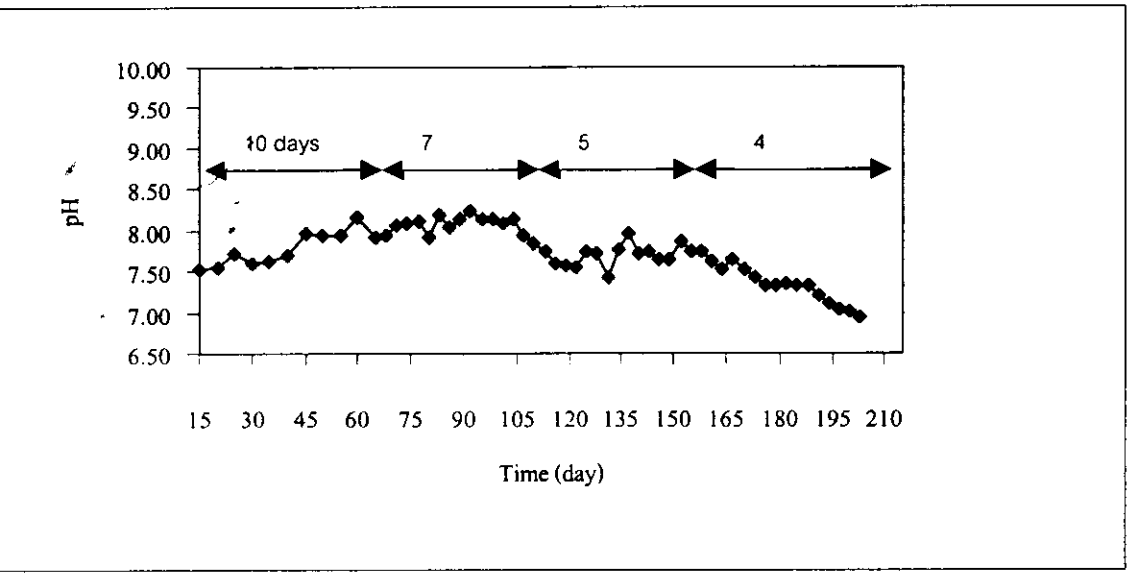


ภาพประกอบ 3.10 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่ระยะเวลากักเก็บต่าง ๆ

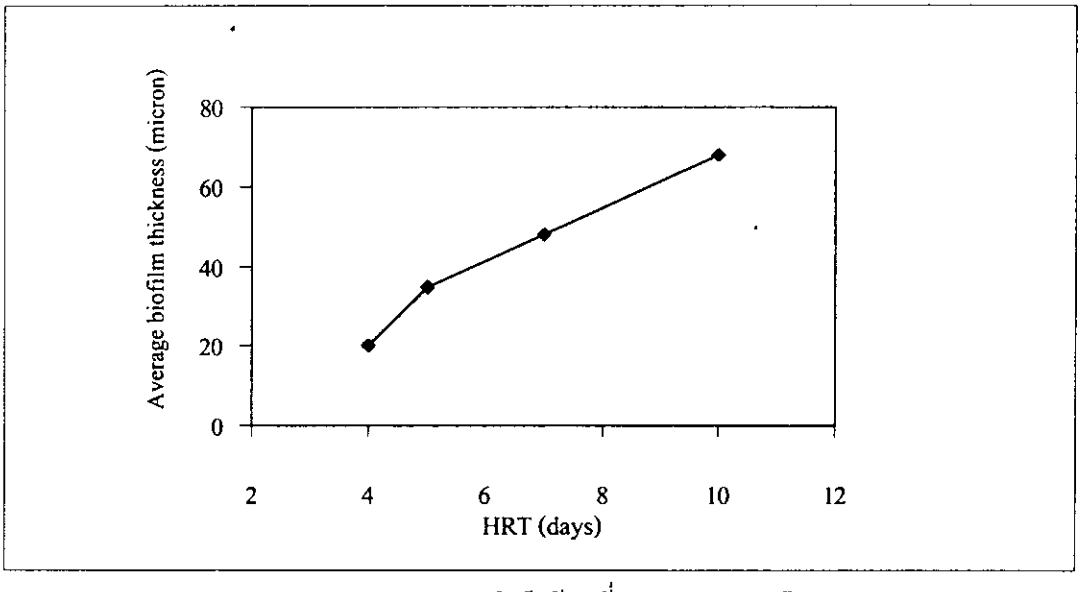


ภาพประกอบ 3.11 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย สภาพด่าง และปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่ระยะเวลากักเก็บต่าง ๆ

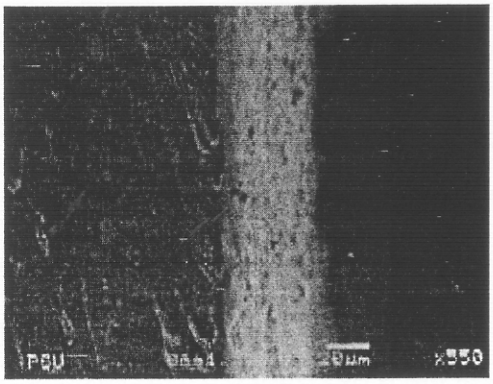
เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนถูกยับยั้ง ทำให้เกิดการสะสมของไขมันระเหยง่ายจำนวนมากเกิดขึ้น (Chua *et al.*, 1997) ทำให้กรดไขมันระเหยง่ายไม่สามารถถูกย่อยสลายให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทนได้ ซึ่งกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 496 1,312 1,456 และ 1,729 มก./ล. ตามลำดับ ดังแสดงภาพประกอบ 3.11 มีผลทำให้อัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างมากกว่า 0.4 แสดงในตารางที่ 3.2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลากักเก็บลดลงซึ่งเป็นสภาพที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนลดจำนวนลง ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลงด้วย ประกอบกับค่าสภาพด่างมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากจุลินทรีย์สร้างมีเทนมีจำนวนน้อยทำให้การย่อยสลายกรดไขมันแล้วทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อย ผลก็คือสภาพด่างจึงมีแนวโน้มคงที่ ประกอบกับค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ดังภาพประกอบ 3.12



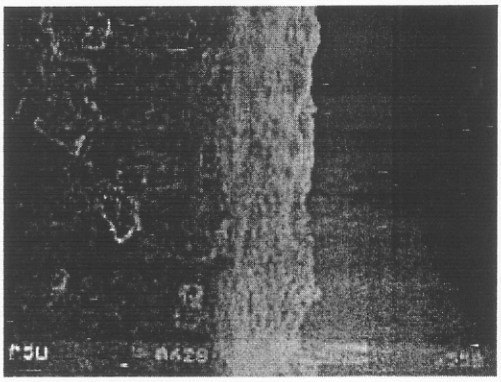
ภาพประกอบ 3.12 ความเป็นกรด-ด่างของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่ระยะเวลากักเก็บต่างๆ



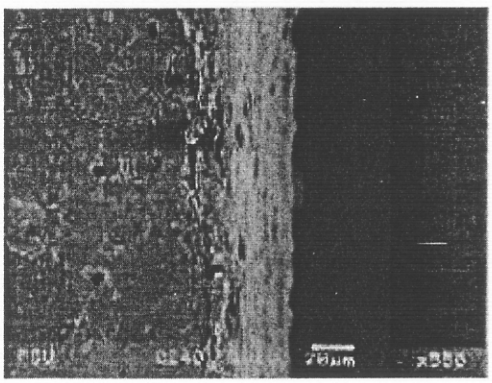
ภาพประกอบ 3.13 ความหนาของฟิล์มชีวะที่ระยะเวลากักเก็บต่าง ๆ



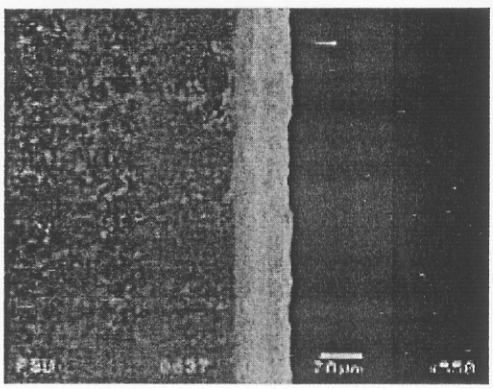
ก. ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน



ข. ระยะเวลากักเก็บ 7 วัน



ค. ระยะเวลากักเก็บ 5 วัน



ง. ระยะเวลากักเก็บ 4 วัน

ภาพประกอบ 3.14 ตัวอย่างความหนาฟิล์มชีวะที่แสดงด้วยเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 550 เท่าที่ระยะเวลากักเก็บต่างๆ

จากภาพประกอบ 3.11 แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบลดลง เมื่อระยะเวลากักเก็บลดลง เนื่องจากที่ระยะเวลากักเก็บต่ำ ความเร็วของน้ำเสียที่ผ่านระบบสูงมีผลทำให้จุลินทรีย์ถูกพัดพาออกจากระบบมากในช่วงแรก แต่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ปริมาณจุลินทรีย์ที่ออกจากระบบจะมีแนวโน้มลดลง โดยทั่วไปแล้วลักษณะของระบบ Immobilized cell จุลินทรีย์ที่ออกจากระบบมักจะมีปริมาณของแข็งออกจากระบบต่ำ (Chua *et al.*,1997) ทำให้ของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายที่วัดได้มีปริมาณลดลง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยดังนี้ 1,645 1,535 1,433 และ 1,100 มก./ล.ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองของ Faisal *et al.*, (1999) พบว่าที่ระยะเวลากักเก็บสูงขึ้น ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายมีค่าลดลง ดังนั้นความหนาของฟิล์มชีวะที่เกาะอยู่บนตัวกลางกรองซึ่งมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลากักเก็บลดลง ดังภาพประกอบ 3.13 และ 3.14

3.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง (Specific surface area of media)

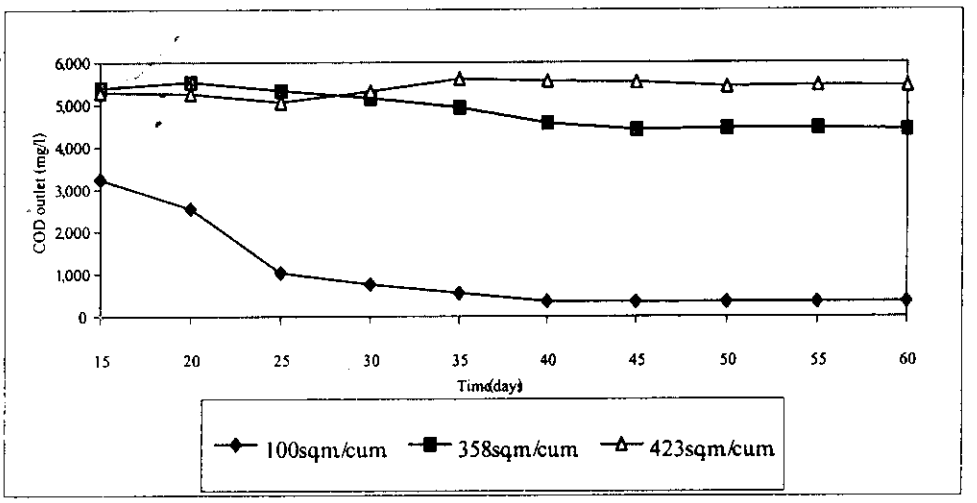
การศึกษาผลของพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี พบว่า ประสิทธิภาพสูงขึ้นตามพื้นที่ผิวพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองที่ลดลง โดยถังปฏิกรณ์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองดังนี้ 100 358 และ 423 $ม^2/ม^3$ โดยใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นซีโอดี 6,000 มก./ล. ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยดังนี้ 94.3 26.3 และ 9.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองเฉลี่ยภายใต้สภาวะคงตัวที่พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองขนาด ต่างๆ

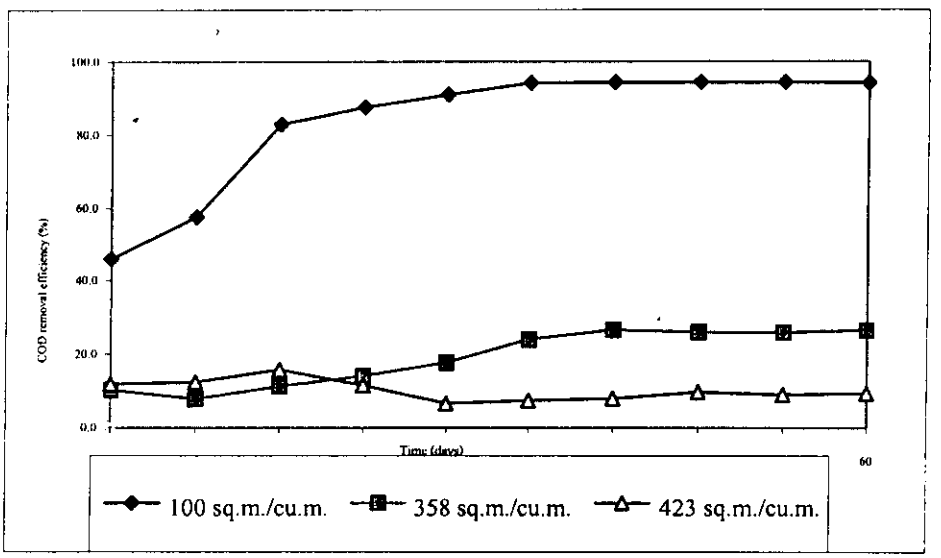
พารามิเตอร์	พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง ($ม^2/ม^3$)			
	100	358	423	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ความเข้มข้นซีโอดี (มก./ล.)	342	4,420	5,460	10.5-55.0
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%)	94.3	26.3	9.0	0.2-4.8
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (มก./ล.)	1,645	1,700	1,837	11.1-30.9
กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล.ในรูป CH_3COOH)	630	3,722	4,190	29.4-76.8
สภาพด่าง (มก./ล. ในรูป $CaCO_3$)	2,088	2,000	2,025	20.4-75.0
ความเป็นกรด-ด่าง	8.02	7.21	6.92	0.06-0.13
อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่าง (-)	0.3	0.9	1.04	0.02-0.06
ความหนาฟิล์มชีวะ (ไมครอน)	68.10	25.36	17.22	3.42-8.49

จากภาพประกอบ 3.15 และ 3.16 จากผลของพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองที่เพิ่มขึ้นต่อการลดลงของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี จะเห็นว่าถังปฏิกรณ์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง 100 $ม^2/ม^3$ จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ถังปฏิกรณ์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง 358 และ 423 $ม^2/ม^3$ สอดคล้องผลการทดลองของ Kuan-Yeow Show *et al.*, (1998) ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของชีวมวลที่อยู่บนตัวกลางกรอง ในช่วงที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2-4 ก./ล.-วัน พบว่า ปริมาณชีวมวลที่เกาะบนตัว

กลางกรองที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 132 $ม^2/ม^3$ ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองน้อยที่สุดจะมีปริมาณชีวมวลที่อยู่ในระบบมากที่สุด และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด



ภาพประกอบ 3.15 ความเข้มข้นซีโอดีทางออกของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองต่าง ๆ



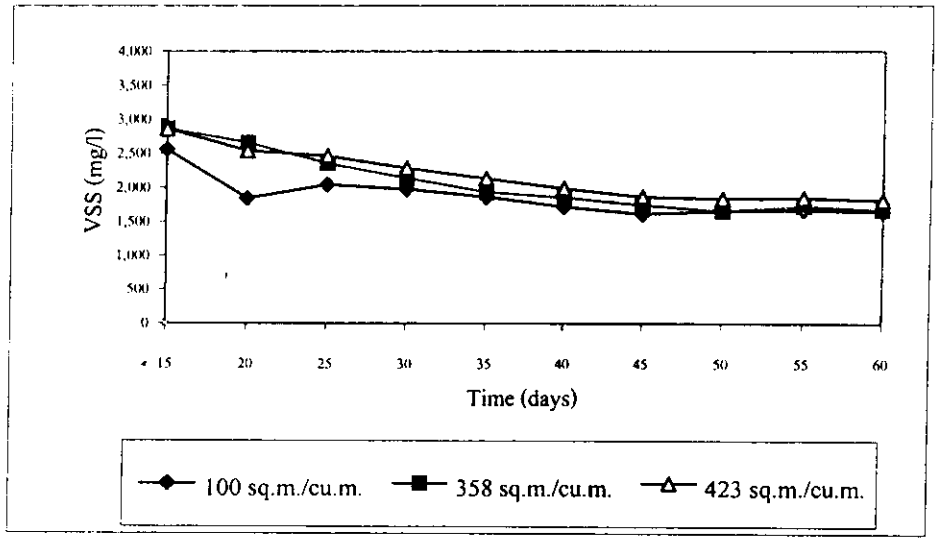
ภาพประกอบ 3.16 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองต่าง ๆ

เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลผ่านตัวกลางกรองที่แตกต่างกันทำให้เกิดแรงเฉือน (Hydraulic shear) ที่ผิวของตัวกลางกรองที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์บรรจุตัวกลางกรองที่มีพื้นที่

ผิวจำเพาะ 423 ม^2/ม^3 มีแรงเฉือนเกิดขึ้นมากที่สุด เนื่องจากค่าอัตราการผุพังของฟิล์มชีวะ เนื่องจากแรงเฉือนซึ่งคำนวณจากสมการของ Rittman และ McCarty (1982) ดังตารางที่ 3.4

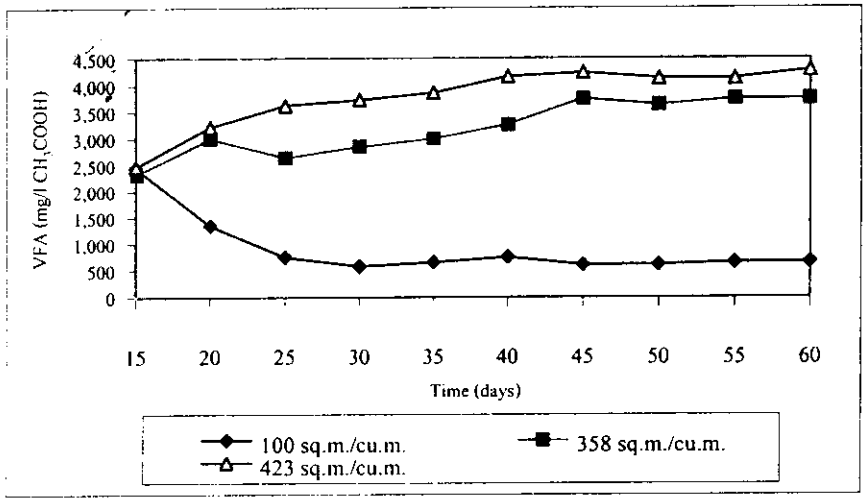
ตารางที่ 3.4 อัตราการผุพังของฟิล์มชีวะ ในถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองขนาดต่างๆ

พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง (ม^2/ม^3)	อัตราการผุพังของฟิล์มชีวะ (วัน$^{-1}$)
100	4.88×10^{-3}
358	4.92×10^{-3}
423	4.94×10^{-3}

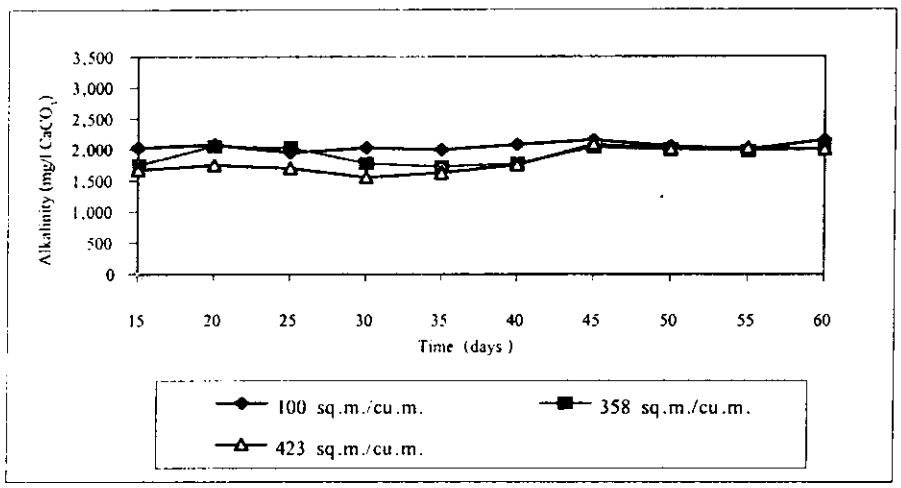


ภาพประกอบ 3.17 ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองต่าง ๆ

จากการอัตราผุพังของฟิล์มชีวะที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายที่อยู่ในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,645 1,700 และ 1837 มก./ล. เมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองมากขึ้น ดังภาพประกอบ 23 เนื่องจากระบบเริ่มขาดเสถียรภาพ กล่าวคือ อัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่าง (VFA:Alkalinity) มากกว่า 0.4 ดังตารางที่ 3.3 มีผลทำให้จุลินทรีย์เริ่มตาย (เกรียงศักดิ์, 2543) และหลุดลอกจากตัวกลางกรอง



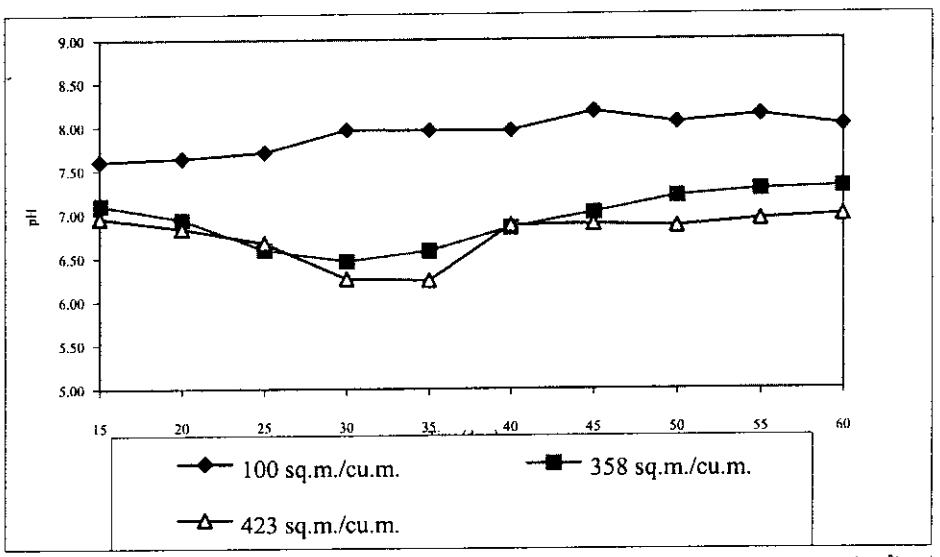
ภาพประกอบ 3.18 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองต่าง ๆ



ภาพประกอบ 3.19 ปริมาณสภาพด่างของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองต่าง ๆ

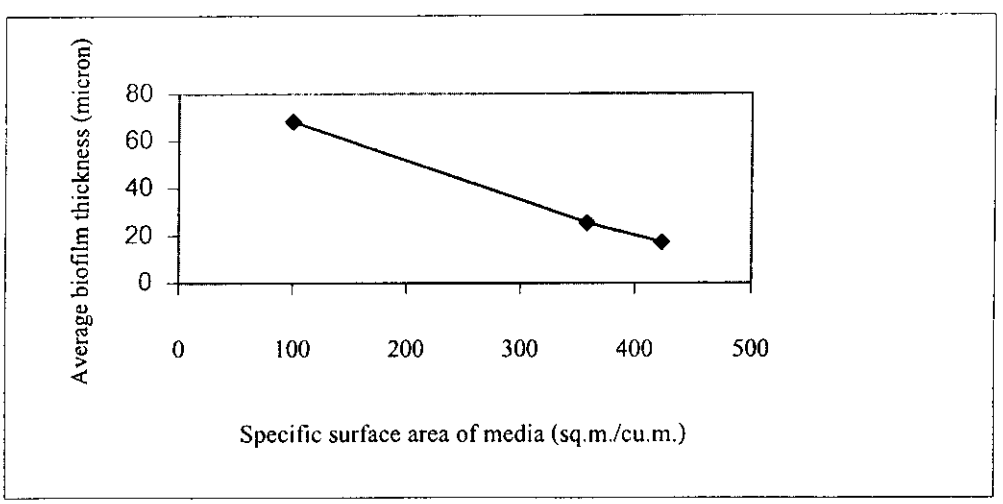
จากภาพประกอบ 3.18 และ 3.19 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย และสภาพด่างพบว่ากรดไขมันมันระเหยง่ายที่ 100 $ม^2/ม^3$ ต่ำที่สุดเมื่อเทียบที่ 358 และ 423 $ม^2/ม^3$ ขณะที่สภาพด่างมีแนวโน้มคงที่ เนื่องแรงเฉือนทำให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดและมีเทนหลุดออกไปมาก ในขณะที่อัตรา

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์คงที่ ดังนั้นจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนจึงมีปริมาณไม่เพียงพอ โดยปกติแล้วจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดจะมีมากกว่าชนิดสร้างมีเทน และทนต่อสภาพความเป็นกรดได้ดี(เกรียงศักดิ์, 2543)

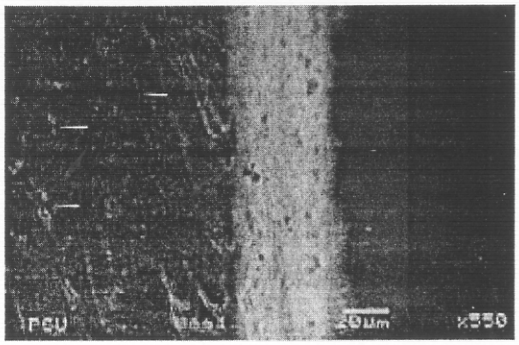


ภาพประกอบ 3.20 ความเป็นกรด-ด่างของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองต่าง ๆ

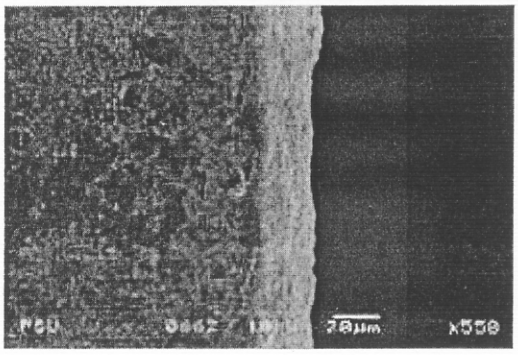
ที่จะย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านี้ ทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย มีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ดังภาพประกอบ 3.20 มีผลทำให้ความหนาของฟิล์มชีวะมีแนวโน้มลดลง ดังภาพประกอบ 3.21 และ 3.22



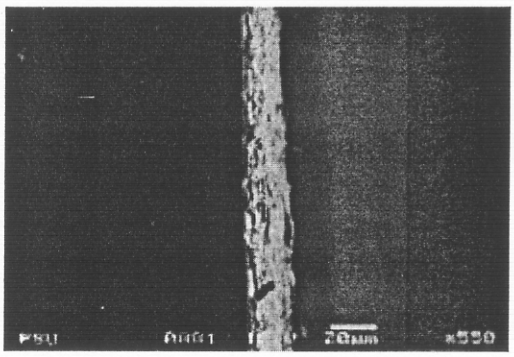
ภาพประกอบ 3.21 ความหนาของฟิล์มชีวะที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองต่าง ๆ



ก. พื้นที่ผิวจำเพาะ 100 ม^2/ม^3



ข. พื้นที่ผิวจำเพาะ 358 ม^2/ม^3



ค. พื้นที่ผิวจำเพาะ 423 ม^2/ม^3

ภาพประกอบ 3.22 ตัวอย่างความหนาฟิล์มชีวะที่แสดงด้วยเครื่อง SEM ด้วยกำลังขยาย 550 เท่าที่พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองต่างๆ

3.2 สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

จากการทดลองเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียทุกการทดลองหาความสัมพันธ์

ระหว่างความเข้มข้นน้ำเสียซีโอดีทางเข้า (S_i) ความเข้มข้นน้ำเสียซีโอดีทางออก (S_e) ระยะเวลากักเก็บในถังปฏิกรณ์ (HRT) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.1)

$$S_e = aSi^xHRT^y \qquad \text{------- (3.1)}$$

เมื่อ S_e = ความเข้มข้นซีโอดีทางออก (มก./ล.)

S_i = ความเข้มข้นซีโอดีทางเข้า (มก./ล.)

HRT = ระยะเวลากักเก็บ (วัน)

a,x,y = ค่าคงที่

ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง S_e, S และ HRT โดยใช้วิธีวิเคราะห์ แบบ Nonlinear – regression โดยใช้โปรแกรม Polymath 5.1 วิเคราะห์ (รายละเอียดการคำนวณดูภาคผนวก) ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (r^2) มีค่า 0.958 จะได้

$$S_e = 8.70x10^{-14}S_i^{4.78}HRT^{-2.65} \qquad \text{------- (3.1a)}$$

จากสมการที่ (3.1) สามารถเพิ่มตัวแปรผลของพื้นที่ผิวของตัวกลางกรอง จะได้สมการที่ (3.2) เพื่อให้มีความถูกต้องในการทำนายประสิทธิภาพมากขึ้นดังนี้

$$S_e = aS_i^xHRT^yA_{sp}^z \qquad \text{------- (3.2)}$$

เมื่อ S_e = ความเข้มข้นซีโอดีทางออก (มก./ล.)

S_i = ความเข้มข้นซีโอดีเข้าออก (มก./ล.)

HRT = ระยะเวลากักเก็บ (วัน)

A_{sp} = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง ($ม^2/ม^3$)

a, x, y, z = ค่าคงที่

ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง S_e, S_i HRT และ A_{sp} โดยใช้วิธีวิเคราะห์ แบบ Nonlinear – regression โดยใช้โปรแกรม Polymath 5.1 วิเคราะห์ (รายละเอียดการคำนวณดูภาคผนวก) จะได้

$$S_e = 5.44x10^{-17}S_i^{4.49}HRT^{-2.43}A_{sp}^{2.08} \qquad \text{-------(3.2a)}$$

จากสมการที่ (3.2a) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (R^2) มีค่า 0.968 เมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบกรองไร้อากาศที่มีลักษณะตัวกลางคล้ายกันคือ Raschig ring ในการบำบัดน้ำเสียชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 3.5

จากสมการที่ (3.1a) และ (3.2a) ที่ได้โดยจากใช้วิธีวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ แบบ Nonlinear –regression โดยใช้โปรแกรม Polymath 5.1 นำไปสู่การทดลองเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของสมการ โดยทำการทดลองเปลี่ยนระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 8 วัน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.6 และ 3.7 แสดงผลของการทดสอบสมการทางคณิตศาสตร์และการทดลอง

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบสมการทางคณิตศาสตร์จากการศึกษาทดลองและสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียชนิดต่าง ๆ

Researcher	Wastewater type	OLR (g COD / L. d.)	Relationship	R^2	Obs. No.
Go nzalez (1987)	Tin Stillage	0.51-21.66	$S_e = 0.276S_i^{1.08}HRT^{-1.32}$	0.940	10
Jhung and Choi (1995)	Molasses	0.75-19.33	$S_e = 6.770S_i^{0.28}HRT^{-0.39}$	0.894	9
Francis et al. (1998)	Municipal wastewater	0.2-0.54	$S_e = 0.084S_i^{0.73}HRT^{-0.97}$	0.926	6
Apisit et al. (2001)	SAA paper wastewater	2.37-10.66	$S_e = 0.037S_i^{1.46}HRT^{-0.418}$	0.851	5
This study	Synthetic wastewater	0.3-1.2	$S_e = 8.7x10^{-14}S_i^{4.78}HRT^{-2.65}$	0.958	6
This study (modify)	Synthetic wastewater	0.3-1.2	$S_e = 5.44x10^{-17}S_i^{4.49}HRT^{-2.43}A_{sp}^{2.08}$	0.968	9

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบสมการทางคณิตศาสตร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 8 วันโดยใช้ สมการ $S_e = 8.7x10^{-14}S_i^{4.78}HRT^{-2.65}$

ความเข้มข้นซีโอดีทางเข้า (มก./ล.)	ความเข้มข้นซีโอดีทางออก (มก./ล.)		
	สมการ	ผลการทดสอบ	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
6,000	403	450	10.0
9,000	1,552	1,715	11.3
12,000	6,138	5,548	10.6

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบสมการทางคณิตศาสตร์ที่ระยะเวลากักเก็บ 8 วัน โดยใช้สมการ $S_e = 5.44x10^{-17}S^{4.49}HRT^{-2.43}A_{sp}^{2.08}$

ความเข้มข้นซีโอดีทางเข้า (มก./ล.)	ความเข้มข้นซีโอดีทางออก (มก./ล.)		
	สมการ	ผลการทดสอบ	ความผิดพลาด (%)
6,000	436	450	3
9,000	1,660	1,715	3.3
12,000	6041	5,548	5.3

จากตารางที่ 3.6 และ 3.7 พบว่าค่าความเข้มข้นซีโอดีที่ทางออกของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ $S_e = 5.44x10^{-17}S_i^{4.49}HRT^{-2.43}A_{sp}^{2.08}$ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าสมการ $S_e = 8.70x10^{-14}S_i^{4.78}HRT^{-2.65}$ เนื่องจากสมการใช้ตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดซีโอดีมากกว่า และใช้ผลการทดลองมากกว่า จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ดังนั้นสมการนี้สามารถนำมาใช้ในการทำนายผลเบื้องต้นของการบำบัดที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.3-1.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ระยะเวลากักเก็บ 4-10 วัน

3.3 แบบจำลองฟิล์มชีวะในถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ

จากรูปแบบการคำนวณหาความหนาฟิล์มชีวะที่ได้นำเสนอในบทที่ 1 มีความซับซ้อน เนื่องจากสมการติดในรูปของดิฟเฟอร์เรนเชียล ดังสมการที่(1.1)-สมการที่(1.4) และใช้วิธีการลองผิดลองถูก

(Trial and Error) ดังสมการที่ (1.6)-สมการที่ (1.9) เพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ดังนั้นการหาค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อแทนค่าในสมการความหนาฟิล์มชีวะของ Rittmann และ McCarty (1980a) เพื่อให้ง่ายสำหรับการคำนวณ

การคำนวณความหนาฟิล์มชีวะสามารถหาได้จากสมการของ Rittman and McCarty (1980a) ดังสมการที่ (1.5) โดยนำค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองโดยการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (2.3)-สมการที่ (2.17) สามารถคำนวณ ดังตารางที่ 3.8 และ 3.9

ตารางที่ 3.8 ผลของฟลักซ์สารอาหาร สัมประสิทธิ์ผลิตได้ของชีวมวล และ ความหนาแน่นของจุลินทรีย์

พารามิเตอร์		J	Y_t	X_f
อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ *	0.3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	2.83	0.54	1,690
	0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	5.66	0.27	1,645
	0.9 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	8.03	0.16	1,279
	1.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	5.47	0.17	965
ระยะเวลากักเก็บ **	10 วัน	5.66	0.27	1,645
	7 วัน	4.76	0.20	1,535
	5 วัน	4.04	0.18	1,433
	4 วัน	3.60	0.09	1,100
พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง***	100 $ม^2/ม^3$	5.66	0.27	1,645
	358 $ม^2/ม^3$	0.44	0.92	1,700
	423 $ม^2/ม^3$	0.14	2.33	1,837

หมายเหตุ

* ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง 100 $ม^2/ม^3$

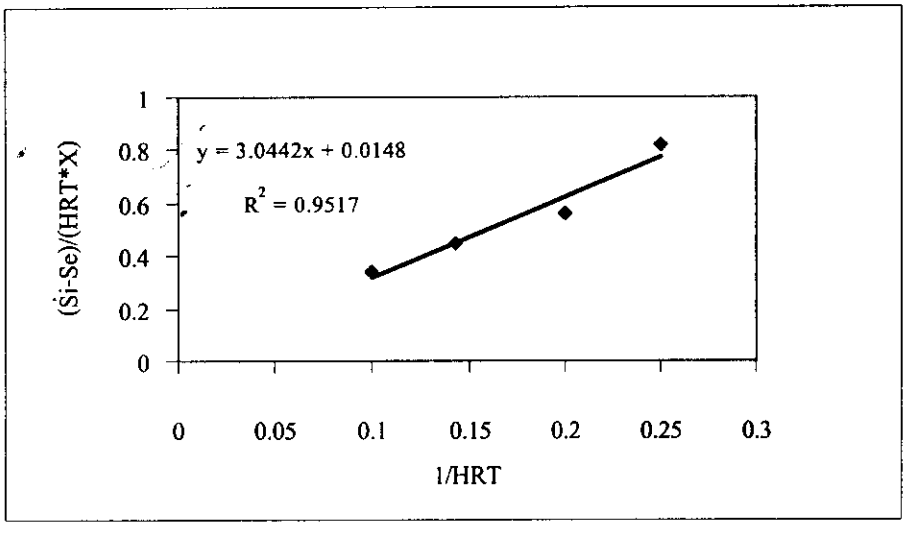
** ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง 100 $ม^2/ม^3$

*** ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลากักเก็บ 10 วัน

J = ค่าฟลักซ์ของสารอาหาร (มก.สารอาหารที่ใช้/ตร.ซม.-วัน)

Y_t = ค่าสัมประสิทธิ์การผลิตได้ของชีวมวล (-)

X_f = ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ (มก.ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย/ล.)



ภาพประกอบ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(S_i-S_e)/(HRT*X)$ กับ (1/HRT)

จากภาพประกอบ 3.23 สามารถคำนวณหาอัตราการผุพังของฟิล์มชีวะเนื่องจากการตายของจุลินทรีย์โดยใช้สมการของโมนอด ดังสมการ (3.2a)

ตารางที่ 3.9 ผลการคำนวณอัตราการผุพังของฟิล์มชีวะ

พารามิเตอร์		b_{s1}	b_{s2}	b_S
อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์*	0.3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	4.86×10^{-3}	2.54×10^{-5}	4.88×10^{-3}
	0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	4.86×10^{-3}	2.54×10^{-5}	4.88×10^{-3}
	0.9 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	4.86×10^{-3}	2.54×10^{-5}	4.88×10^{-3}
	1.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	4.86×10^{-3}	2.54×10^{-5}	4.88×10^{-3}
ระยะเวลากักเก็บ**	10 วัน	4.86×10^{-3}	2.54×10^{-5}	4.88×10^{-3}
	7 วัน	4.86×10^{-3}	2.54×10^{-5}	4.88×10^{-3}
	5 วัน	4.86×10^{-3}	2.54×10^{-5}	4.88×10^{-3}
	4 วัน	4.86×10^{-3}	2.54×10^{-5}	4.88×10^{-3}
พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง***	100 $ม^2/ม^3$	4.86×10^{-3}	2.54×10^{-5}	4.88×10^{-3}
	358 $ม^2/ม^3$	4.86×10^{-3}	6.00×10^{-5}	4.92×10^{-3}
	423 $ม^2/ม^3$	4.86×10^{-3}	7.54×10^{-5}	4.94×10^{-3}

หมายเหตุ

* ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง 100 $ม^2/ม^3$

** ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง 100 $ม^2/ม^3$

*** ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลากักเก็บ 10 วัน

b_s = อัตราการผุพังของชีวมวล ($วัน^{-1}$)

b_{s1}= อัตราการผุพังของชีวมวลเนื่องจากการตายของชีวมวล ($วัน^{-1}$)

b_{s2} = อัตราการผุพังของชีวมวลเนื่องจากแรงเฉือน ($วัน^{-1}$)

จากการคำนวณความหนาฟิล์มชีวะโดยใช้สมการของ Rittman และ McCarty (1980a) ดังตารางที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง มีผลทำให้ค่าฟลักซ์สารอาหาร (J) เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การผลิตได้ของชีวมวล (Y_t) ลดลง และความหนาแน่นจุลินทรีย์ (X_f) เพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราการผุพังของฟิล์มชีวะ (b_s) คงที่ เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบมีมากเกินความต้องการของจุลินทรีย์ในระบบ จุลินทรีย์เกิดการช็อคและตายเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ฟิล์มชีวะที่เกาะบนผิวตัวกลางกรองหลุดลอกออกมากขึ้น ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกาะบนผิวตัวกลางกรองลดลง ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และความหนาฟิล์มชีวะลดลง

ในกรณีระยะเวลากักเก็บสูง มีผลทำให้ค่าฟลักซ์สารอาหาร (J) สัมประสิทธิ์การผลิตได้ของชีวมวล (Y_t) และความหนาแน่นจุลินทรีย์ (X_f) เพิ่มขึ้น ขณะที่อัตราการผุพังของฟิล์มชีวะ (b_s) คงที่ เนื่องจากมีการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่าจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและความหนาของฟิล์มชีวะเพิ่มขึ้น

ในกรณีพื้นผิวจำเพาะของตัวกลางกรองเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์สารอาหาร (J) ลดลง สัมประสิทธิ์การผลิตได้ของชีวมวล (Y_t) ความหนาแน่นจุลินทรีย์ (X_f) และอัตราการผุพังของฟิล์มชีวะ (b_s) เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการผุพังของชีวมวลเนื่องจากแรงเฉือนที่ผ่านตัวกลางกรองเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มชีวะที่เกาะบนผิวตัวกลางกรองหลุดลอกออก มีผลทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกาะบนผิวตัวกลางกรองลดลง แต่ปริมาณจุลินทรีย์ที่หลุดลอกนี้จะเพิ่มในส่วนของจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในระบบ ซึ่งสังเกตจากค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายที่ออกจากระบบที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และความหนาฟิล์มชีวะลดลง

จากผลการทดลองทุกการทดลองดังตารางที่ 3.9 จะเห็นว่าฟลักซ์สารอาหาร (J) ค่าสัมประสิทธิ์การผลิตได้ของชีวมวล (Y_t) อัตราการผุพังของชีวมวล (b_s) และความหนาแน่นของชีวมวล (X_f) มีความสัมพันธ์กันกับการคำนวณความหนาของฟิล์มชีวะ ซึ่งมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้น และลดลงของแต่ละการทดลองแตกต่างกัน ดังนั้นความหนาของฟิล์มชีวะจะไม่ขึ้นกับตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง แต่ขึ้นกับทุกตัวแปร และแต่ละตัวแปรจะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

ตาราง 3.10 การคำนวณความหนาฟิล์มชีวะโดยสมการ Rittman an d McCarty (1980a)

พารามิเตอร์		S_i (mg/l)	S_e (mg/l)	X_f (mg/l)	Biofilm moiseture (%)	V (cm3)	a (cm^2/cm^3)	Q (l/day)	J (mg/cm2-day)	Y_t	b_s (day^{-1})	L_f Calculation wet (um)	L_f Calculation dry (um)	L_f SEM dry (um)	Error (%)
อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์*	0.3 kg.COD/m^3-day	3,000	172	1,590	96.3	2,750	1	2.75	2.83	0.541	0.00488	1,973	73.01	67.14	8.74
	0.6 kg.COD/m^3-day	6,000	342	1,645	96.3	2,750	1	2.75	5.66	0.275	0.00488	1,939	71.74	68.1	5.35
	0.9 kg.COD/m^3-day	9,000	975	1,845	96.2	2,750	1	2.75	8.03	0.159	0.00488	1,418	53.89	51.43	4.78
	1.2 kg.COD/m^3-day	12,000	6,535	2,245	96.2	2,750	1	2.75	5.47	0.176	0.00488	879	33.39	30.47	9.59
ระยะเวลากักเก็บ**	4 days	6,000	2,401	1,100	96.2	2,750	1	2.75	3.6	0.086	0.00488	577	21.92	20.22	8.39
	5 days	6,000	1,964	1,433	96.4	2,750	1	2.75	4.04	0.177	0.00488	1,023	36.81	34.86	5.60
	7 days	6,000	1,237	1,535	96.2	2,750	1	2.75	4.76	0.203	0.00488	1,290	49.02	47.71	2.74
	10 days	6,000	342	1,645	96.3	2,750	1	2.75	5.66	0.275	0.00488	1,939	71.74	68.1	5.35
พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง***	100 m^2/m^3	6,000	342	1,645	96.3	2,750	1	2.75	5.66	0.275	0.00488	1,939	71.74	68.1	5.35
	358 m^2/m^3	6,000	4,420	1,700	96.2	2,450	3.58	2.45	0.44	0.918	0.00492	483	18.35	18.32	0.17
	423 m^2/m^3	6,000	5,460	1,837	96.25	2,350	4.23	2.35	0.14	2.339	0.00494	361	13.53	12.54	7.91

หมายเหตุ

a = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลาง

b_s = อัตราการผุพังของชีวมวล

J = ฟลักซ์สารอาหารของจุลินทรีย์

L_f = ความหนาฟิล์มชีวะ

S_i = ความเข้มข้นสารอินทรีย์ (COD) ทางเข้า

S_e = ความเข้มข้นสารอินทรีย์ (COD) ทางออก

X_f = ความหนาแน่นของจุลินทรีย์

V = ปริมาตรถังปฏิกรณ์

Y_t = สัมประสิทธิ์การผลิตได้ของชีวมวล

* ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง 100 $ม^2/ม^3$

** ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง 100 $ม^2/ม^3$

*** ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลากักเก็บ 10 วัน

ตารางที่ 3.10 และ 3.11 การคำนวณความหนาฟิล์มชีวะที่คำนวณได้กับความหนาของฟิล์มชีวะที่วัดจากเครื่อง SEM พบว่ามีความแตกต่างน้อยกว่า 10 % ดังนั้นรูปแบบแบบจำลองชีวะจึงเหมาะสมใกล้เคียงกับความเป็นจริงในช่วงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.3-1.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ระยะเวลากักเก็บ 4 – 10 วัน

ตารางที่ 3.11 ผลความหนาฟิล์มชีวะที่คำนวณได้กับความหนาของฟิล์มชีวะที่วัดจากเครื่อง SEM

พารามิเตอร์		ความหนาฟิล์มชีวะที่ได้จากการคำนวณ (ไมครอน)	ความหนาของฟิล์มชีวะที่ได้จากเครื่อง SEM (ไมครอน)	ความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์*	0.3 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	73.01	67.14	8.58
	0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	71.74	68.10	5.20
	0.9 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	53.89	51.43	4.63
	1.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน	33.39	30.47	9.43
ระยะเวลากักเก็บ**	10 วัน	21.92	20.22	8.24
	7 วัน	36.81	34.86	5.45
	5 วัน	49.02	47.71	2.60
	4 วัน	71.74	68.10	5.20
พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง***	100 $ม^2/ม^3$	71.74	68.10	5.20
	358 $ม^2/ม^3$	18.35	18.32	0.13
	423 $ม^2/ม^3$	13.53	12.54	8.00

หมายเหตุ

* ที่ระยะเวลากักเก็บ 10 วัน และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง 100 $ม^2/ม^3$

** ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง 100 $ม^2/ม^3$

*** ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และระยะเวลากักเก็บ 10 วัน