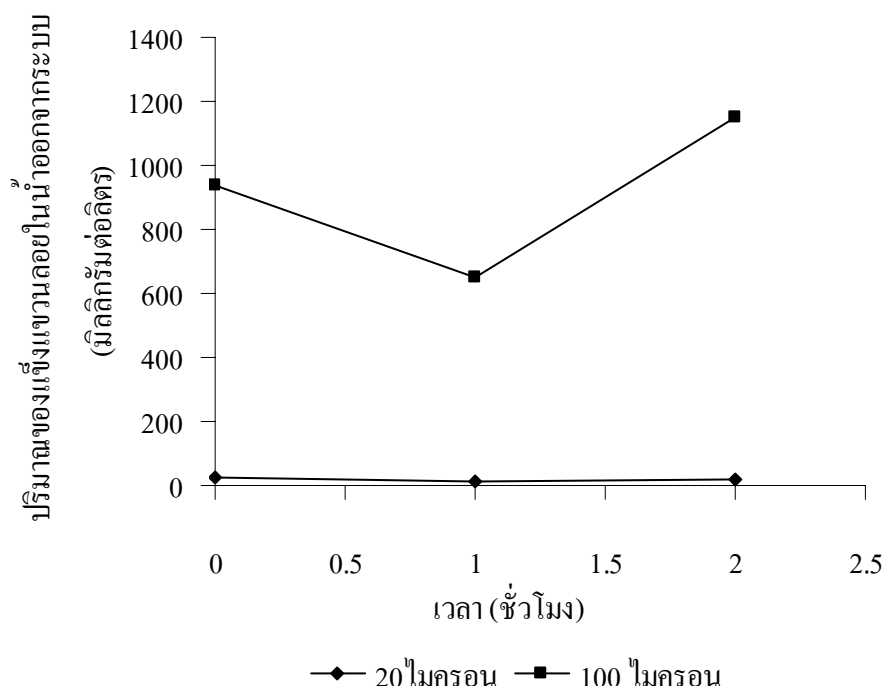


ผลการทดลองและวิจารณ์

การเริ่มต้นการทดลอง นำตะกอนจุลินทรีย์จากบ่อเดิมอากาศโรงงาน คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด มาเติมอากาศตลอดเวลา โดยให้มีปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำมากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วจึงทำการทดลองโดยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ เติมน้ำแบบป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่อง (Continuous Flow) เข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบมีแผ่นกรองจมตัวที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน ได้แก่ 20 ไมครอน และ 100 ไมครอน

จากการทดลองพบว่า เมื่อควบคุมปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในแต่ละการทดลองให้ได้ประมาณ 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองที่ใช้แผ่นกรองจมตัวที่มีรูพรุนขนาด 100 ไมครอน ตะกอนจุลินทรีย์สามารถผ่านแผ่นกรองได้ ทำให้น้ำที่ออกจากระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยสูง ไม่สามารถกักตะกอนจุลินทรีย์ไว้ในระบบได้ ส่วนการทดลองที่ใช้แผ่นกรองที่มีรูพรุนขนาด 20 ไมครอน สามารถกักตะกอนจุลินทรีย์ไว้ในระบบได้ โดยมีของแข็งแขวนลอยออกจากระบบไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในภาพที่ 14 แต่ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ ด้วยการเดินระบบแบบป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องควบคุมอัตราการไหลให้เท่าเดิมตลอดช่วงการทดลอง ทำให้เป็นข้อจำกัดในการเดินระบบแบบใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีแผ่นกรองจมตัว เนื่องจากยังไม่ทราบค่าฟลักซ์แท้จริง (Actual Flux) ที่ใช้ในการเดินระบบ จึงเปลี่ยนการเดินระบบเป็นแบบพ่นน้ำเสียเป็นลำดับสลับ (Sequencing Batch) เพื่อควบคุมระยะเวลาเก็บกักได้โดยไม่ต้องควบคุมอัตราการไหล แล้วจึงควบคุมตัวแปรต่างๆ ตามรายละเอียดในตารางที่ 1 แล้วทำการป้อนน้ำเสียต่อเนื่องจนน้ำที่ออกจากระบบมีค่าซีโอดีคงที่หรือระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady State) จึงเริ่มต้นเก็บข้อมูล



ภาพที่ 14 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำออกจากระบบที่ใช้แผ่นกรองขนาดรูพรุน 20 ไมครอน และ 100 ไมครอน

1. การวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด

1.1 อัตราส่วนระหว่างค่าบีไอดี บีไอดีละลาย ซีไอดี และซีไอดีละลาย

ในการศึกษาทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากส่วนที่ผ่านการตกตะกอนขั้นแรกมาแล้วนำมาตรวจวิเคราะห์เพื่อหาค่าซีไอดี, ซีไอดีละลาย, บีไอดี และบีไอดีละลาย การเก็บตัวอย่างน้ำเสียใช้วิธีการเก็บแบบจ้วง โดยทำการเก็บตัวอย่างตั้งแต่เดือน กรกฎาคม ถึง ธันวาคม 2548 รวมทั้งสิ้น 8 ครั้ง ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซีไอดีต่อบีไอดี, ซีไอดีละลายต่อบีไอดีละลาย, ซีไอดีละลายต่อ ซีไอดี และบีไอดีละลายต่อบีไอดีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ มีอัตราส่วนเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.53, 1.35, 0.86 และ 0.83 ตามลำดับ โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ± 0.31 , ± 0.19 , ± 0.07 และ ± 0.06 ตามลำดับ และเขียนกราฟเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ซีไอดีละลายต่อบีไอดีละลาย, ซีไอดีละลายต่อซีไอดี และ บีไอดีละลายต่อบีไอดี ได้ตามภาพที่ 15, 16, 17 โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการเส้นตรง เท่ากับ ซีไอดีละลาย (มก./ล.) = 1.06

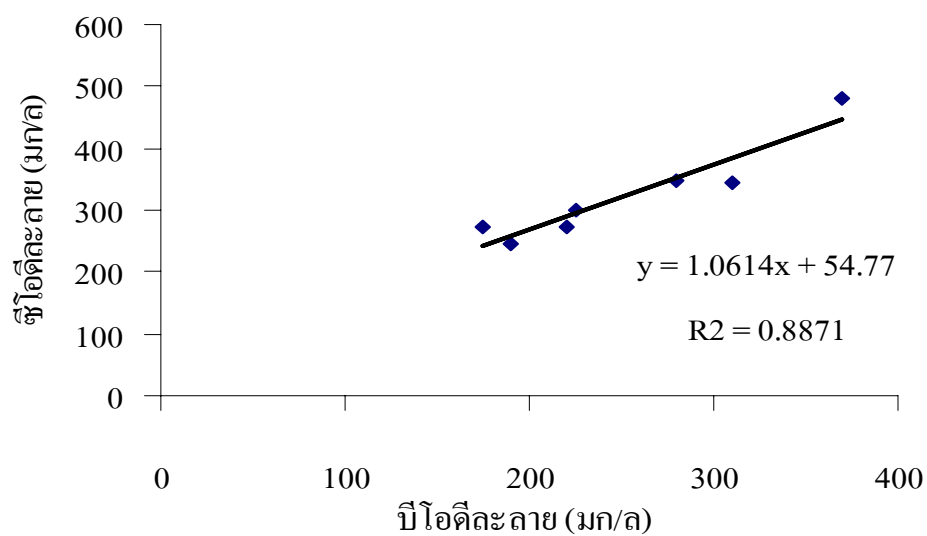
[บีโอดีละลาย(มก./ล.)] + 54.77, ซีโอดีละลาย(มก./ล.) = 1.04 [ซีโอดี(มก./ล.)] + 66.50 และ บีโอดีละลาย(มก./ล.) = 0.52 [บีโอดี(มก./ล.)] + 89.58

จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีต่อบีโอดี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.53 ซึ่งมีค่าต่ำกว่ารายงานการศึกษาของ Dutta (1999) ซึ่งมีค่าประมาณ 1.98 ทั้งนี้เพราะโรงงานใช้กระดาษรีไซเคิลเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษจึงไม่ต้องใช้สารเคมีในการแปรรูปไม้เพื่อขจัดลิกนินออกจากเซลลูโลส (Simon and Bruce, 2003) และน้ำเสียที่ตรวจวิเคราะห์เป็นน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนขั้นแรกแล้ว ทำให้ค่าซีโอดีลดลงไปบางส่วน และพบว่าการกรองเพื่อวัดค่าซีโอดีละลายและบีโอดีละลาย เหลือส่วนที่ละลายน้ำมาก และมีผลในการลดค่าซีโอดีมากกว่าค่าบีโอดี ดังนั้นค่าที่ใช้เป็นตัวแทนวัดความสกปรกในน้ำเสียได้อย่างเหมาะสมที่สุด คือ ค่าบีโอดีละลาย

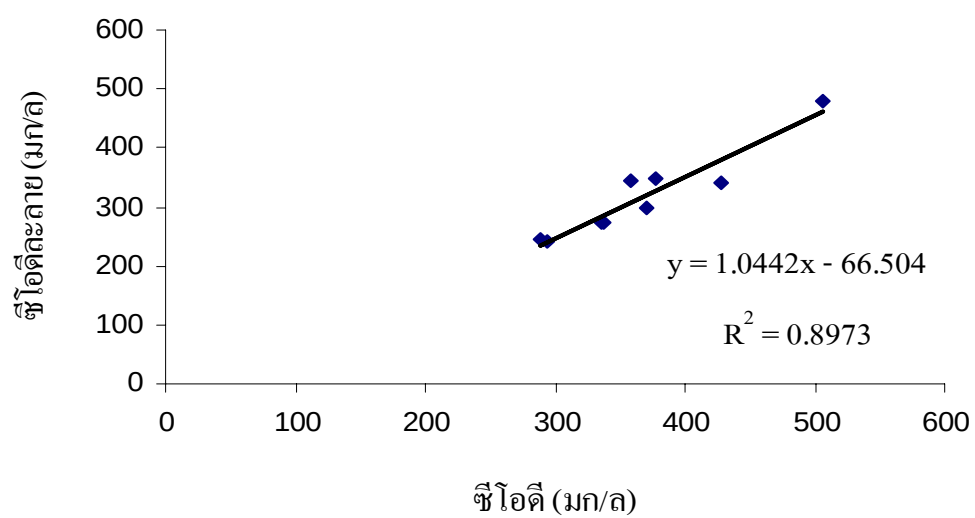
ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วน ซีโอดีต่อบีโอดี, ซีโอดีละลายต่อบีโอดีละลาย, ซีโอดีละลายต่อบีโอดี และ บีโอดีละลายต่อบีโอดี

ลำดับ ที่	บีโอดี (มก./ล)	บีโอดี ละลาย (มก./ล)	ซีโอดี (มก./ล)	ซีโอดี ละลาย (มก./ล)	ซีโอดี: บีโอดี	ซีโอดี ละลาย: บีโอดี ละลาย	ซีโอดี ละลาย: ซีโอดี	บีโอดี ละลาย: บีโอดี
1	345	370	505	480	1.46	1.30	0.95	1.07*
2	340	280	378	349	1.11	1.25	0.92	0.82
3	420	310	358	344	0.85*	1.11	0.96	0.74
4	145	190	290	244	2.00	1.28	0.84	1.31*
5	230	175	335	274	1.46	1.57	0.82	0.76
6	228	200	428	340	1.88	1.70	0.79	0.88
7	250	225	370	299	1.48	1.33	0.81	0.90
8	258	220	337	272	1.31	1.24	0.81	0.85
		ค่าเฉลี่ย			1.53	1.35	0.86	0.83

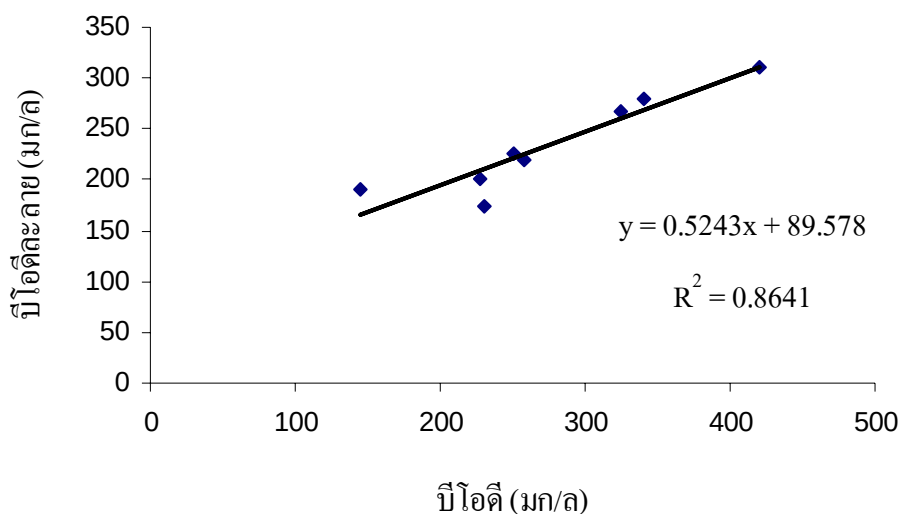
หมายเหตุ * หมายถึง ไม่ใช้ในการคำนวณ



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีละลาย และบีโอดีละลาย ของน้ำเสีย



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีละลาย และซีโอดีของน้ำเสีย



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีละลาย และบีโอดีของน้ำเสีย

1.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอย

จากการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เข้าระบบ พบว่าน้ำเสียมีปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 73.33 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ± 25.8 จะเห็นได้ว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยค่อนข้างต่ำซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์อัตราส่วนบีโอดีละลายต่อบีโอดีที่มีค่าเท่ากับ 0.83 เพราะฉะนั้นสารแขวนลอยที่เข้าระบบและสะสมอยู่ในระบบมีค่าต่ำ จึงมีความเหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพระบบจากค่าบีโอดีละลาย

2. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายทางชีวภาพ

การออกแบบเพื่อควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย ขึ้นกับคุณลักษณะของการย่อยสลายสารอาหาร และรูปแบบการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งทำได้โดยควบคุมสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ อาหารเสริม การเติมอากาศและการกวน จะเป็นหลักสำคัญที่ทำให้แบคทีเรียเจริญเติบโต และเพื่อให้แน่ใจได้ว่าสามารถควบคุมระบบและแบคทีเรียได้จำเพาะ จึงจะสามารถบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องควบคุมอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

การศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัท คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด เป็นการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพและค่าตัวแปรที่สำคัญต่อการออกแบบระบบซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งแบบป้อนน้ำเสียต่อเนื่องและแบบเป็นลำดับสลับกันได้ ผลการทดลองได้ใช้ข้อมูลในช่วงเสถียรหรือสภาวะคงที่ของระบบคือเป็นช่วงที่ระบบมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย การทดลองทำโดยกำหนดสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ (F/M Ratio) ที่แตกต่างกัน 4 ค่า คือ 0.1, 0.2, 0.5 และ 0.8 กิโลกรัมบีโอดีต่อกิโลกรัมของตะกอนจุลินทรีย์ต่อวัน ตามลำดับ จากนั้นจึงเปลี่ยนระยะเวลาเก็บกักจาก 16 เป็น 8 ชั่วโมง โดยควบคุมสภาวะแวดล้อมให้ใกล้เคียงกันทุกการทดลอง แล้วทำการวัดปริมาณจุลินทรีย์ในรูปของปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหย (Mixed-liquor Volatile Suspended Solid, MLVSS) ในขณะเดียวกันก็วัดสารอินทรีย์ในน้ำที่ออกจากระบบด้วยการวิเคราะห์ค่าบีโอดีและซีโอดี แล้วจึงนำค่าเหล่านี้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ด้วยกราฟเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ตามสมการของโมนอต

2.1 อัตราการใช้สารอาหารสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักรวมจุลินทรีย์ (Maximum rate of substrate utilization, k) และค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียเมื่อมีการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราสูงสุด (Half velocity coefficient, K_s)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแต่ละระยะเวลาเก็บกักแสดงในตารางที่ 4 และ 5 นำมาเขียนกราฟเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $X(\text{HRT})/(S_0 - S_e)$ และ $1/S_e$ ได้ดังภาพที่ 18 และ 19 ซึ่งได้ค่าความชัน คือค่า K_s/k และมีจุดตัดแกน Y คือค่า $1/k$ สรุปค่าได้ดังนี้

การทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักต่างกัน คือ 8 และ 16 ชั่วโมง ได้ค่า k และ K_s ในแต่ละค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นค่าคงที่เฉพาะของจุลินทรีย์ต่อน้ำเสียประเภทนั้น ๆ ค่า k ของการทดลองที่ 8 และ 16 ชั่วโมง เท่ากับ 1.384 และ 1.029 มก.บีโอดีต่อมก.ของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน ส่วนค่า K_s ของการทดลองที่ 8 และ 16 ชั่วโมง เท่ากับ 5.342 และ 5.548 มก.บีโอดีต่อลิตร ดังนั้นค่า k และ K_s เฉลี่ยของการทดลองเท่ากับ 1.207 มก.บีโอดีต่อมก.ของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน และ 5.445 มก.บีโอดีต่อลิตร ซึ่ง Metcalf and Eddy (2003) แสดงค่ามาตรฐานของค่า k และ K_s จากน้ำเสียชุมชน อยู่ในช่วง 2 – 10 มก.บีโอดีต่อมก.ของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน และ 25 – 100 มก.บีโอดีต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าทั้งสองมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์มีแบคทีเรียชนิดเส้นใยเป็นจุลินชีพหลักในระบบ ซึ่งมีอัตราการย่อยสลายสาร อินทรีย์ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักรวมต่ำ

กว่าจุลินทรีย์ชนิดสร้างฟล็อก และที่ระดับสารอาหารต่ำ แบคทีเรียเส้นใยมีอัตราการเจริญเติบโตและย่อยสลายอาหารได้เร็วกว่า จึงทำให้ค่า k และ K_s มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน (Chudoba, 1973) อีกทั้งยังพบว่าค่า K_s มีค่าใกล้เคียงกับรายงานของ Contreras (1999) ซึ่งทดลองหาค่า K_s ของเชื้อ *S. natans* โดยใช้น้ำเสียโรงงานแปรงมัน ได้เท่ากับ 4.6 มก.ซีโอดีต่อลิตร ดังนั้นในการเดินระบบที่มี จุลินทรีย์เส้นใยเป็นจุลินทรีย์หลักซึ่งเกิดจากคุณลักษณะน้ำเสียที่สารอาหารต่ำ จำเป็นต้องควบคุมให้มีระยะเวลาเก็บกัก หรือความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์มากกว่าระบบที่มีจุลินทรีย์ชนิดสร้างฟล็อกเป็นจุลินทรีย์หลัก เนื่องจากค่า k ของจุลินทรีย์เส้นใยต่ำกว่าจุลินทรีย์ชนิดสร้างฟล็อก

ตารางที่ 4 ข้อมูลที่ใช้หาอัตราการใช้อาหารสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักจุลินทรีย์ และค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เมื่อมีการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราสูงสุด ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมง

Reactor number	X_0 (mg/l)	X_t (mg/l)	AverageX (mg/l)	HRT (d)	S_i (mg/l)	S_t (mg/l)	$1/S_t$ (l/mg)	AverageX (HRT)/($S_i - S_t$) (d)
1	672	713	692	0.33	230	10.1	0.099	1.04
2	619	687	653	0.33	230	17.7	0.056	1.02
3	535	578	556	0.33	230	22.8	0.044	0.89
4	471	541	506	0.33	230	30.4	0.033	0.84
5	672	708	690	0.33	212	12.5	0.080	1.14
6	628	661	644	0.33	212	12.5	0.080	1.07
7	575	625	600	0.33	212	17.5	0.057	1.02
8	503	547	525	0.33	212	29.9	0.033	0.95
9	681	699	690	0.33	277	18.0	0.056	0.88
10	619	636	628	0.33	277	18.0	0.056	0.80
11	516	582	549	0.33	277	25.7	0.039	0.72
12	458	448	453	0.33	277	41.2	0.024	0.63
13	640	681	660	0.33	258	15.2	0.066	0.90
14	615	670	642	0.33	258	20.267	0.049	0.89
15	531	556	544	0.33	258	43.061	0.023	0.83

ตารางที่ 4 (ต่อ)

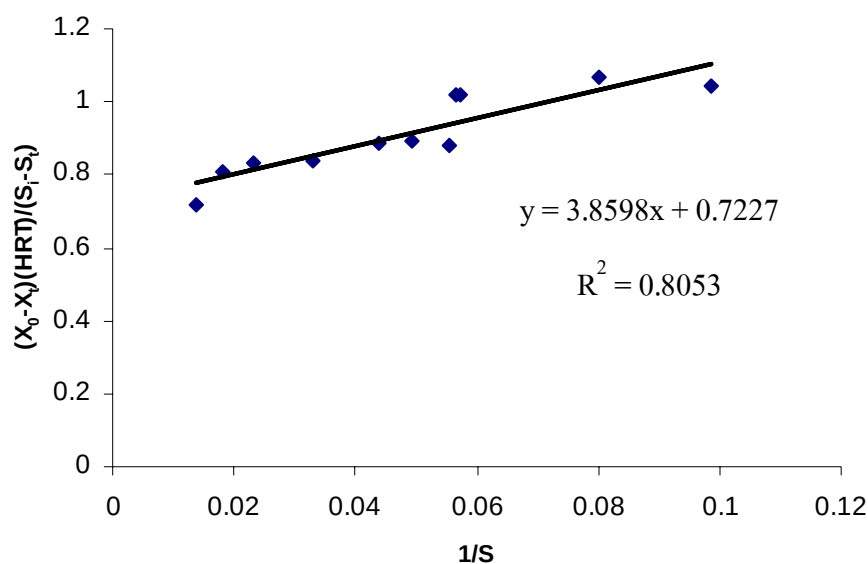
Reactor number	X_0 (mg/l)	X_t (mg/l)	AverageX (mg/l)	HRT (d)	S_i (mg/l)	S_t (mg/l)	$1/S_t$ (l/mg)	AverageX (HRT)/($S_i - S_t$) (d)
16	509	538	523	0.33	258	70.929	0.014	0.92
17	635	699	667	0.33	254	9.974	0.100	0.90
18	514	649	581	0.33	254	17.455	0.057	0.81
19	407	567	487	0.33	254	54.857	0.018	0.81
20	298	496	397	0.33	254	72.312	0.013	0.72

ตารางที่ 5 ข้อมูลที่ใช้หาอัตราการใช้อาหารสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักจุลินทรีย์ และค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เมื่อมีการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราสูงสุด ที่ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง

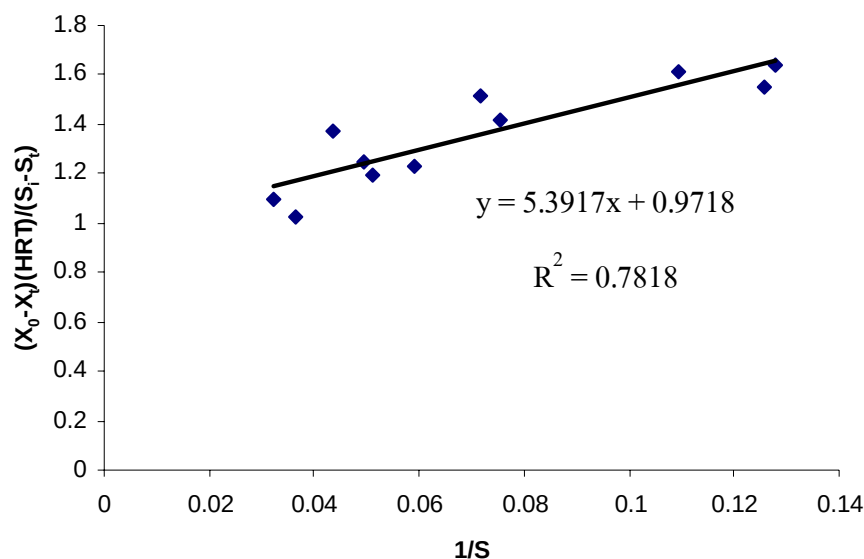
Reactor number	X_0 (mg/l)	X_t (mg/l)	AverageX (mg/l)	HRT (d)	S_i (mg/l)	S_t (mg/l)	$1/S_t$ (l/mg)	AverageX (HRT)/($S_i - S_t$) (d)
1	706	674	690	0.67	256	10.1	0.099	1.88
2	584	513	548	0.67	256	13.9	0.072	1.52
3	454	680	567	0.67	256	15.2	0.066	1.58
4	349	528	438	0.67	256	20.3	0.049	1.24
5	703	729	716	0.67	256	17.3	0.058	2.01
6	585	625	605	0.67	256	17.3	0.058	1.70
7	437	520	479	0.67	256	23.0	0.043	1.38
8	330	407	369	0.67	256	31.1	0.032	1.10
9	569	581	575	0.67	256	8.0	0.126	1.55
10	505	524	515	0.67	256	13.3	0.075	1.42
11	369	466	417	0.67	256	14.6	0.069	1.16
12	344	398	371	0.67	256	18.6	0.054	1.05

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Reactor number	X_0 (mg/l)	X_t (mg/l)	AverageX (mg/l)	HRT (d)	S_i (mg/l)	S_t (mg/l)	$1/S_t$ (l/mg)	AverageX (HRT)/($S_i - S_t$) (d)
13	602	616	609	0.67	256	7.8	0.128	1.64
14	535	567	551	0.67	256	18.2	0.055	1.55
15	406	471	439	0.67	256	16.9	0.059	1.23
16	320	377	349	0.67	256	27.4	0.037	1.02
17	594	598	596	0.67	256	9.1	0.109	1.62
18	535	640	587	0.67	256	14.4	0.070	1.63
19	406	437	421	0.67	256	19.6	0.051	1.19
20	320	363	342	0.67	256	24.8	0.040	0.99



ภาพที่ 18 การหาค่าอัตราการใช้อาหารสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักจุลินทรีย์ และค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เมื่อมีการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราสูงสุด ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมง



ภาพที่ 19 การหาค่าอัตราการใช้อาหารสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักจุลินทรีย์ และค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์เมื่อมีการย่อยสลายเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราสูงสุด ที่ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง

2.2 อัตราการเพิ่มของจุลินทรีย์ หรือ สัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Yield coefficient, Y) และอัตราการตายของจุลินทรีย์ (Decay rate, k_d)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 6 และ 7 เมื่อนำเขียนกราฟเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(dX/dt)/\text{Average}X$ และ $(S_i - S_t)/\text{Average}X(\text{HRT})$ ได้ดังภาพที่ 20 และ 21 ซึ่งได้ค่าความชัน คือค่า Y และมีจุดตัดแกน Y คือค่า $-k_d$ สรุปค่าได้ดังนี้

การทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักต่างกัน คือ 8 และ 16 ชั่วโมง ได้ค่า Y และ k_d ในแต่ละค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นค่าคงที่เฉพาะของจุลินทรีย์ต่อน้ำเสียประเภทนั้น ๆ ค่า Y ของการทดลองที่ 8 และ 16 ชั่วโมง เท่ากับ 0.395 และ 0.369 มก.ของแข็งแขวนลอยระยะเหยต่อมก.บีโอดี, ส่วนค่า k_d ของการทดลองที่ 8 และ 16 ชั่วโมง เท่ากับ 0.179 และ 0.164 ต่อวัน ดังนั้นค่า Y และ k_d เฉลี่ยของการทดลองเท่ากับ 0.382 มก.ของแข็งแขวนลอยระยะเหยต่อมก.บีโอดี, และ 0.172 ต่อวัน ซึ่ง Metcalf and Eddy (2003) แสดงค่ามาตรฐานของค่า Y และ k_d จากน้ำเสียชุมชน อยู่ในช่วง 0.4 – 0.8 มก.ของแข็งแขวนลอยระยะเหยต่อมก.บีโอดี, และ 0.06 – 0.15 ต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่า Y มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน แต่พบว่าค่า k_d มีค่าสูงกว่ามาตรฐานของระบบตะกอนเร่ง เนื่องด้วยตะกอนจุลินทรีย์มี

จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยเป็นจุลินทรีย์หลักในระบบแทนจุลินทรีย์ชนิดสร้างฟล็อก ซึ่งมีอัตราการเพิ่มของจุลินทรีย์ต่ำเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นเส้นใยโครงสร้างเปิด น้ำหนักเบา (Eikelboom, 2000) และพบว่ามีความใกล้เคียงกับรายงานของ Contreras (1999) ที่ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของเชื้อ *S. natans* ทั้ง 2 รายงานซึ่งมีค่า Y เท่ากับ 0.490 และ 0.575 มก.ของแฉ่งแฉวนลอยระเหยต่อมก.ชีโอดี ส่วนค่า k_d ที่ค่อนข้างสูงสอดคล้องกับค่าอายุตะกอนที่ต่ำ เพราะตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในระบบไม่นาน

ตารางที่ 6 ข้อมูลที่ใช้หาสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และอัตราการตายของจุลินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมง

Reactor number	X_0 (mg/l)	X_t (mg/l)	AverageX (mg/l)	HRT (d)	S_i (mg/l)	S_t (mg/l)	(dX/dt) /AverageX	(S_i-S_t) /X(HRT)
1	672	713	692	0.33	230	10.1	0.180	0.961
2	619	687	653	0.33	230	17.7	0.313	0.984
3	535	578	556	0.33	230	22.8	0.238	1.127
4	471	541	506	0.33	230	30.4	0.422	1.194
5	672	708	690	0.33	212	12.5	0.161	0.876
6	628	661	644	0.33	212	12.5	0.158	0.938
7	575	625	600	0.33	212	17.5	0.257	0.982
8	503	547	525	0.33	212	29.9	0.259	1.051
9	681	699	690	0.33	277	18.0	0.080	1.138
10	619	636	628	0.33	277	18.0	0.081	1.251
11	516	582	549	0.33	277	25.7	0.361	1.388
12	458	448	453	0.33	277	41.2	-0.064	1.579
13	640	681	660	0.33	258	15.2	0.189	1.116
14	615	670	642	0.33	258	20.3	0.258	1.123
15	531	556	544	0.33	258	43.1	0.142	1.200
16	509	538	523	0.33	258	70.9	0.167	1.086
17	635	699	667	0.33	254	10.0	0.291	1.110
18	514	649	581	0.33	254	17.5	0.703	1.235

ตารางที่ 6 (ต่อ)

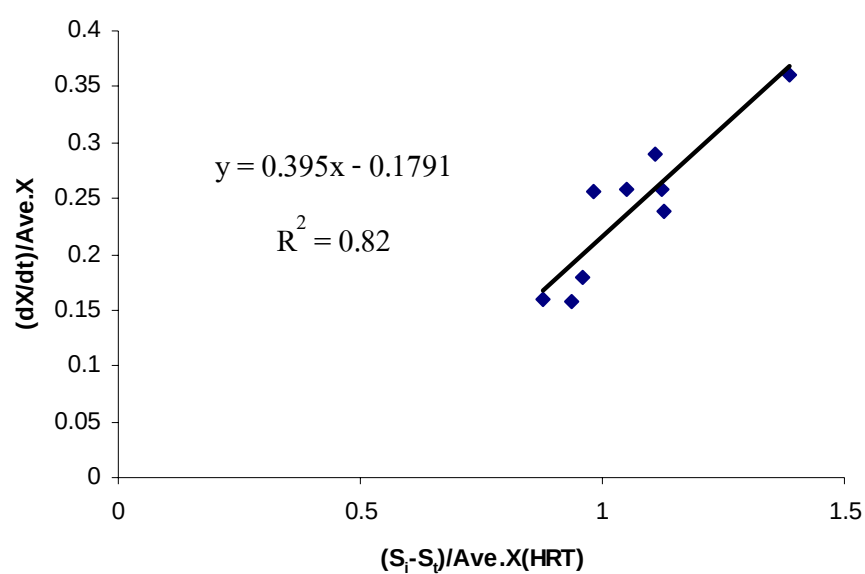
Reactor number	X_0 (mg/l)	X_t (mg/l)	AverageX (mg/l)	HRT (d)	S_i (mg/l)	S_t (mg/l)	(dX/dt) /AverageX	(S_i-S_t) /X(HRT)
19	407	567	487	0.33	254	54.9	0.995	1.241
20	298	496	397	0.33	254	72.3	1.515	1.390

ตารางที่ 7 ข้อมูลที่ใช้หาสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และอัตราการตายของจุลินทรีย์
ที่ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง

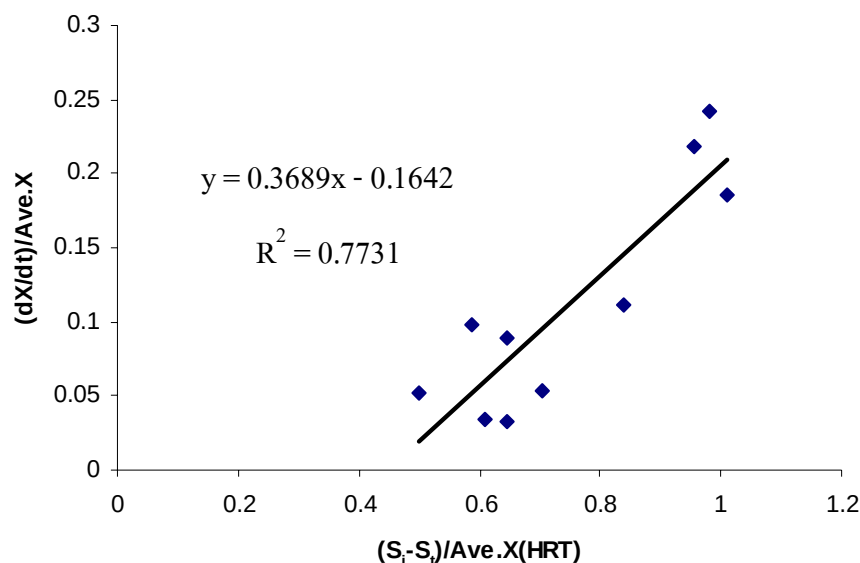
Reactor number	X_0 (mg/l)	X_t (mg/l)	AverageX (mg/l)	HRT (d)	S_i (mg/l)	S_t (mg/l)	(dX/dt) /AverageX	(S_i-S_t) /X(HRT)
1	706	674	690	0.67	256	10.1	-0.068	0.532
2	584	513	548	0.67	256	13.9	-0.193	0.660
3	454	680	567	0.67	256	15.2	0.594	0.634
4	349	528	438	0.67	256	20.3	0.610	0.804
5	703	729	716	0.67	256	17.3	0.053	0.498
6	585	625	605	0.67	256	17.3	0.099	0.589
7	437	520	479	0.67	256	23.0	0.258	0.727
8	330	407	369	0.67	256	31.1	0.315	0.912
9	569	581	575	0.67	256	8.0	0.033	0.644
10	505	524	515	0.67	256	13.3	0.053	0.705
11	369	466	417	0.67	256	14.6	0.348	0.864
12	344	398	371	0.67	256	18.6	0.218	0.956
13	602	616	609	0.67	256	7.8	0.034	0.609
14	535	567	551	0.67	256	18.2	0.089	0.645
15	406	471	439	0.67	256	16.9	0.224	0.814
16	320	377	349	0.67	256	27.4	0.242	0.980
17	594	598	596	0.67	256	9.1	0.011	0.619
18	535	640	587	0.67	256	14.4	0.268	0.615

ตารางที่ 7 (ต่อ)

Reactor number	X_0 (mg/l)	X_t (mg/l)	AverageX (mg/l)	HRT (d)	S_i (mg/l)	S_t (mg/l)	(dX/dt) /AverageX	(S_i-S_t) /X(HRT)
19	406	437	421	0.67	256	19.6	0.111	0.838
20	320	363	342	0.67	256	24.8	0.185	1.011



ภาพที่ 20 การหาค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และอัตราการตายของจุลินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมง



ภาพที่ 21 การหาค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และอัตราการตายของจุลินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง

2.3 อัตราการเจริญเติบโตสูงสุดสุทธิของจุลินทรีย์ (Maximum specific growth rate, μ_m)

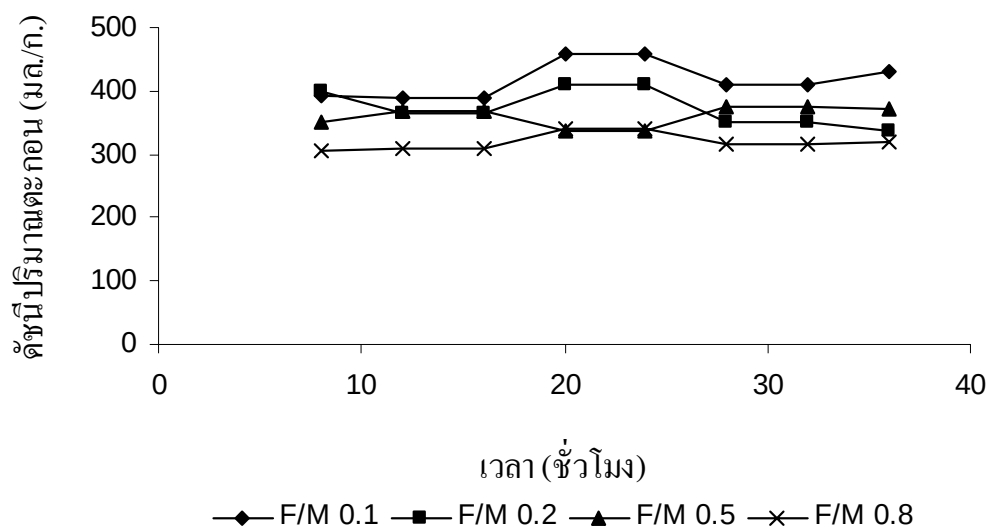
อัตราการเติบโตสูงสุดสุทธิของจุลินทรีย์ เป็นค่าของผลคูณระหว่างอัตราการใช้ อัตราการใช้อาหารสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนักของจุลินทรีย์ (k) กับสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Y) ดังนั้น จากค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวข้างต้นในข้อ 2.1 และ 2.2 สามารถคำนวณค่าอัตราการเติบโตสูงสุดสุทธิของจุลินทรีย์ ได้ดังนี้

ระบบถังปฏิกรณ์แบบมีแผ่นกรองจมตัว มีอัตราการเติบโตสูงสุดสุทธิของจุลินทรีย์เฉลี่ยเท่ากับ 0.464 ต่อวัน ในการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 และ 16 ชั่วโมง มีค่าอัตราการเติบโตสูงสุดสุทธิของจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.547 และ 0.380 ต่อวัน ตามลำดับ จากการทดลองนี้พบว่าค่าอัตราการเติบโตสูงสุดสุทธิของจุลินทรีย์จะแปรตามกับสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เป็นสำคัญ ทำให้ค่าที่ได้ค่อนข้างแตกต่างกัน และมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของ Metcalf and Eddy (2003) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 – 8 ต่อวัน เพราะเป็นลักษณะของแบคทีเรียเส้นใย

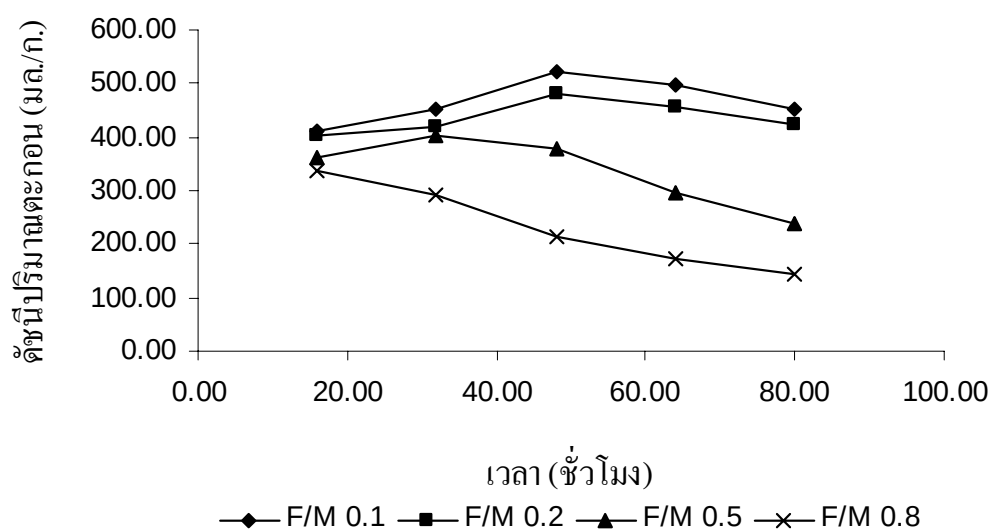
2.4 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีปริมาณตะกอน (Sludge volume index, SVI) และความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีปริมาณตะกอนกับสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ระหว่างการทดลอง

จากภาพที่ 22 และ 23 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีปริมาณตะกอนหรือการเกิดสภาวะตะกอนลอย ซึ่งแต่ละการทดลองมีปัจจัยด้านระยะเวลาเก็บกัก และสัดส่วนระหว่างสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน พบว่า การทดลองที่ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมง มีค่าดัชนีปริมาณตะกอนค่อนข้างคงที่ในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่มีสัดส่วนระหว่างสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์เท่ากัน ในถังปฏิกรณ์ที่มีสัดส่วนระหว่างสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์สูงกว่ามีค่าดัชนีปริมาณตะกอนต่ำกว่าหรือเกิดสภาวะตะกอนลอยน้อยนั่นเอง ส่วนการทดลองที่ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง พบว่า ถังปฏิกรณ์ที่ทำการควบคุมค่าสัดส่วนระหว่างสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์เท่ากับ 0.5 และ 0.8 กิโลกรัมบีโอดีต่อกิโลกรัมของตะกอนจุลินทรีย์ต่อวัน มีแนวโน้มการลดลงของสภาวะตะกอนลอยได้อย่างชัดเจน และสังเกตได้ว่าค่าดัชนีปริมาณตะกอนลดลงเหลือ 145 มิลลิลิตรต่อกรัม (ไม่เกิดสภาวะตะกอนลอย) เมื่อค่าสัดส่วนระหว่างสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.8 กิโลกรัมบีโอดีต่อกิโลกรัมของตะกอนจุลินทรีย์ต่อวัน โดยเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 80 ชั่วโมง

จึงสรุปได้ว่าที่ระยะเวลากักเก็บหรือเทน้ำเสียต่างกัน โดยที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากันนั้น พบว่า ถ้ามีการเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบน้อยครั้งกว่าจะทำให้สภาวะการเกิดตะกอนลอยต่ำลงได้รวดเร็วกว่า เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบในแต่ละรอบที่สูงที่ระยะเวลาเก็บกักนาน ทำให้แบคทีเรียสร้างฟล็อกเจริญเติบโต (Houtmeyers *et al.*, 1987; Kohno, 1987) และในกรณีที่ระยะเวลากักเก็บหรือเทน้ำเสียเท่ากัน ระบบที่มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากกว่าจะมีแนวโน้มในการลดสภาวะตะกอนลอยได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียชนิดสร้างฟล็อกที่มีค่าความเข้มข้นของสารอาหารที่ครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุดมากกว่าแบคทีเรียเส้นใย (มันสิน, 2544) และต้องใช้ระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงชนิดของจุลินทรีย์หลักในระบบ



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีปริมาณตะกอนในถังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมง



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีปริมาณตะกอนในถังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง

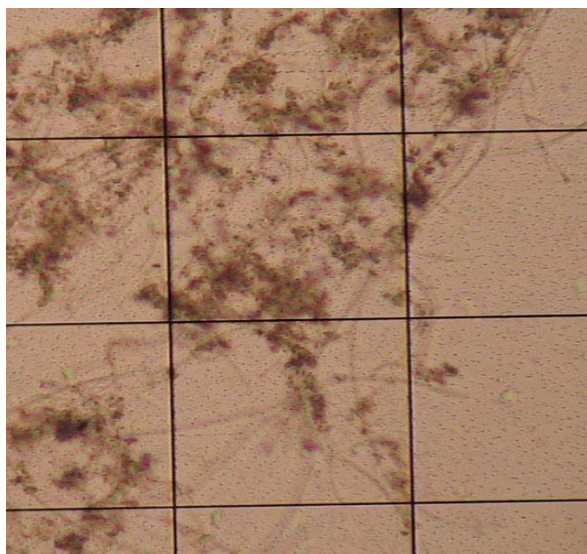
2.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแบคทีเรียเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์

จากการตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ระหว่างการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 และ 16 ชั่วโมง ปรากฏว่าเชื้อจุลินทรีย์ทั้งสองช่วงการทดลองมีลักษณะลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ มีลักษณะเป็นเส้นใยแทงออกมาจากกลุ่มตะกอน โดยมีความยาวของแบคทีเรียเส้นใยที่หลากหลายตั้งแต่ 30 – 300 ไมครอน ดังที่แสดงในภาพที่ 24 และ 25

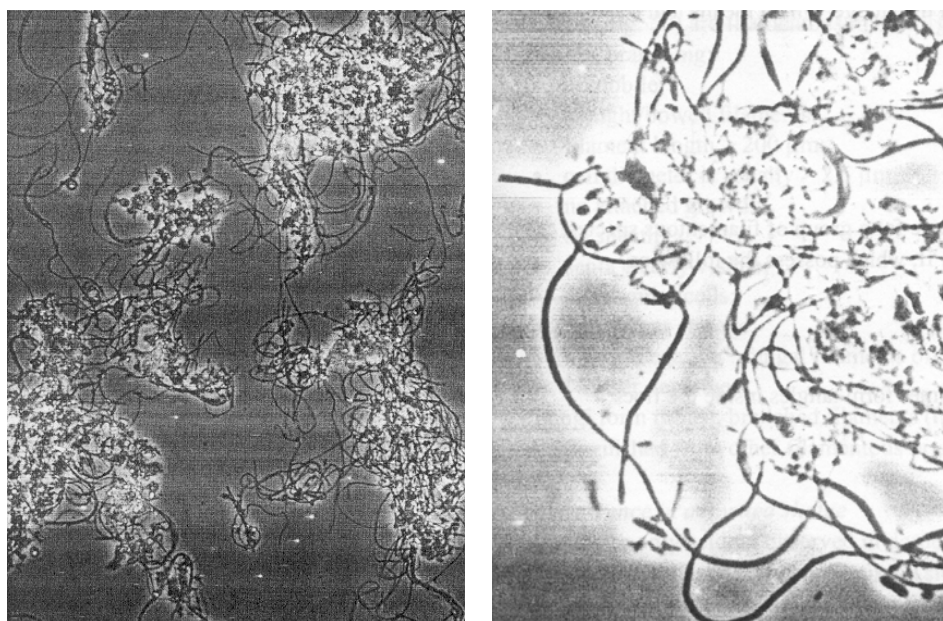
ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการใช้แผ่นกรองที่มีขนาดรูพรุน 20 ไมครอนที่สามารถกักแบคทีเรียไว้ในระบบได้ และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพกับรายงานของ Eikelboom (2000) พบว่ามีลักษณะคล้ายกับเชื้อ *M. Parvicella* ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยแทงออกมาจากกลุ่มตะกอน โดยที่เส้นใยไม่มีการแตกแขนง ไม่เคลื่อนที่ ไม่มีเปลือกหุ้มเซลล์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 ไมครอน และส่วนใหญ่มีความยาวน้อยกว่า 200 ไมครอน ดังที่แสดงในภาพที่ 25 อีกทั้งมีปัจจัยการเกิดของแบคทีเรียชนิดนี้ที่สอดคล้องกับสภาวะการเดินระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท เช่น ภาวะบรรทุสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบต่ำ และมีการนำน้ำจากกระบวนการรีดตะกอนกลับมาบำบัดใหม่ซึ่งมีสารประกอบซัลเฟอร์และไนโตรเจนที่ถูกย่อยสลายแล้วปนอยู่



ภาพที่ 24 แบคทีเรียเส้นใยในช่วงการทดลองระยะเวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 300 เท่า



ภาพที่ 25 แบคทีเรียเส้นใยในช่วงการทดลองระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 300 เท่า

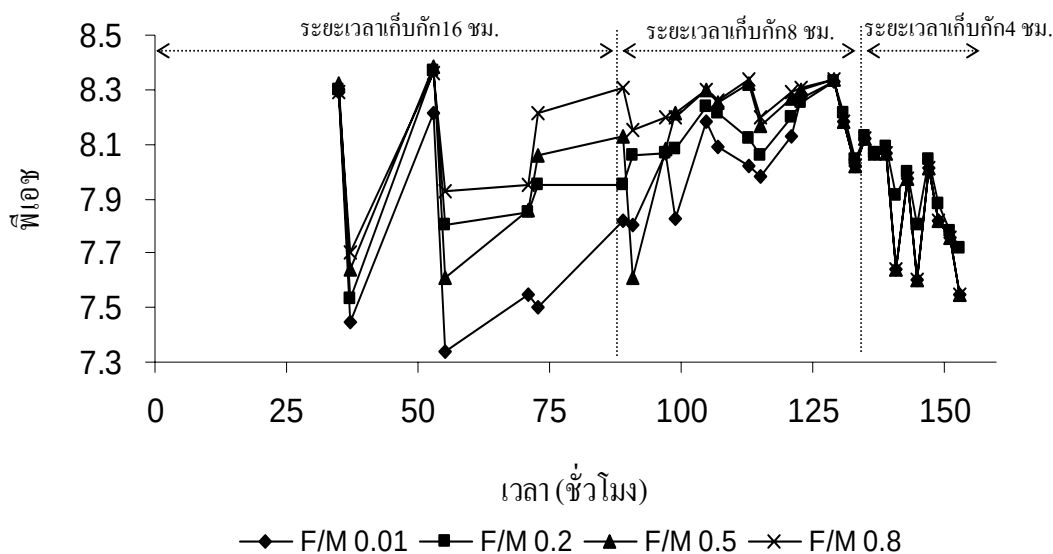


ภาพที่ 26 เชื้อ *M. parvicella* ที่กำลังขยาย 300 และ 1200 เท่า
ที่มา: Eikelboom (2000)

2.6 การเปลี่ยนแปลงปัจจัยทางสภาพแวดล้อมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพระหว่างการทดลอง

2.6.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) ระหว่างการทดลอง

ในการทดลองได้ควบคุมค่าพีเอชให้ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริงในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท คิมเบอร์ลี-คลีฟ ประเทศไทย จำกัด ซึ่งอยู่ระหว่าง 7 – 8.5 หากมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบจะทำการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงดังกล่าวด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง แต่จะสังเกตเห็นว่าค่าพีเอชจะสูงขึ้นในแต่ละช่วงที่ทำปฏิกิริยา และเมื่อเติมน้ำเสียรอบใหม่จะทำให้ค่าพีเอชต่ำลง ที่พีเอชสูงขึ้นเนื่องมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยาการย่อยสลายทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ของระบบ ซึ่งจะเป็นผลให้ความเป็นด่าง (ธีระ, 2539) รวมถึงกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในโตรเจนกลายเป็นแอมโมเนียมไนโตรเจน (Ammonification) มีผลในการเพิ่มพีเอชมากกว่าการลดพีเอชที่เกิดขึ้นในกระบวนการไนตริฟิเคชัน ดังในงานวิจัยของ Medrzycka (2004) ที่ทดลองการเปลี่ยนแปลงพีเอชในระบบเอสบีอาร์ ปรากฏว่าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจากประมาณ 7.1 เป็น 7.6 ในช่วงการเติมอากาศ และพบว่าถึงปฏิกิริยาที่เดินระบบด้วยค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ที่สูงกว่ามีค่าพีเอชสูงกว่าตาม เนื่องด้วยเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายมากกว่า ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 27

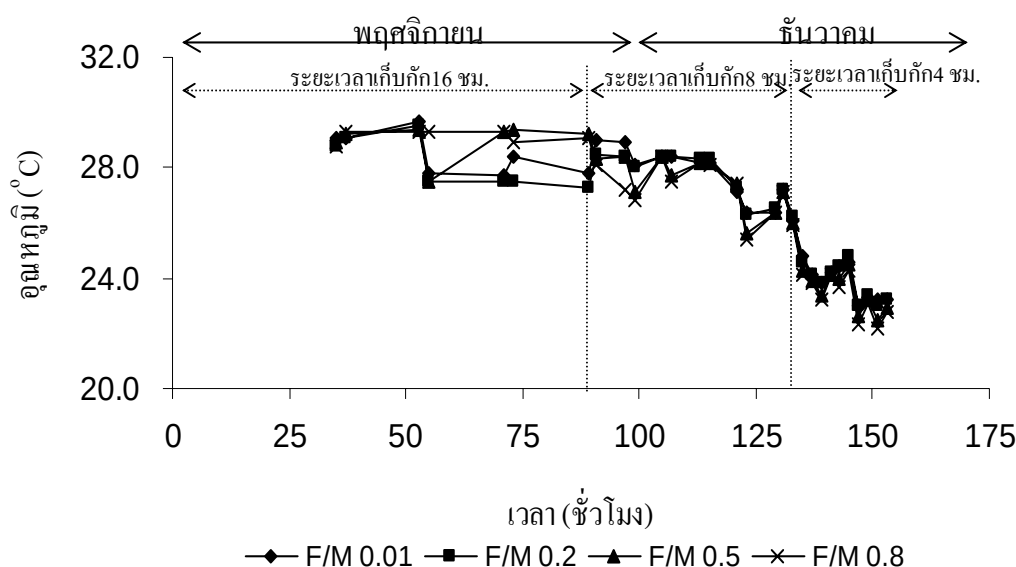


ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

2.6.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature) ระหว่างการทดลอง

จากภาพที่ 27 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรอง ซึ่งเห็นได้จากการทดลองที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์แตกต่างกัน คือ 0.1, 0.2, 0.5 และ 0.8 กก.บีโอดีต่อกก.ของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน อุณหภูมิในแต่ละการ

ทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ระหว่าง 24 - 30 องศาเซลเซียส ซึ่งคาบเกี่ยวอยู่ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคมที่มีอากาศหนาว โดยที่เดือนพฤศจิกายนมีอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 28.8 องศาเซลเซียส และลดลงเป็น 26.7 องศาเซลเซียสในเดือนธันวาคม (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2548) ซึ่งสอดคล้องกับค่าอุณหภูมิในกราฟที่มีแนวโน้มอุณหภูมิลดลง แต่พบว่ามีเพียงแค่ช่วงการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกัก 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่ำลงมากกว่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะทำการทดลองในช่วงกลางคืน ซึ่งอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 – 40 องศาเซลเซียส จึงไม่ใช้ผลการทดลองในช่วงระยะเวลาเก็บกัก 4 ชั่วโมงในการหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์และประสิทธิภาพของระบบ

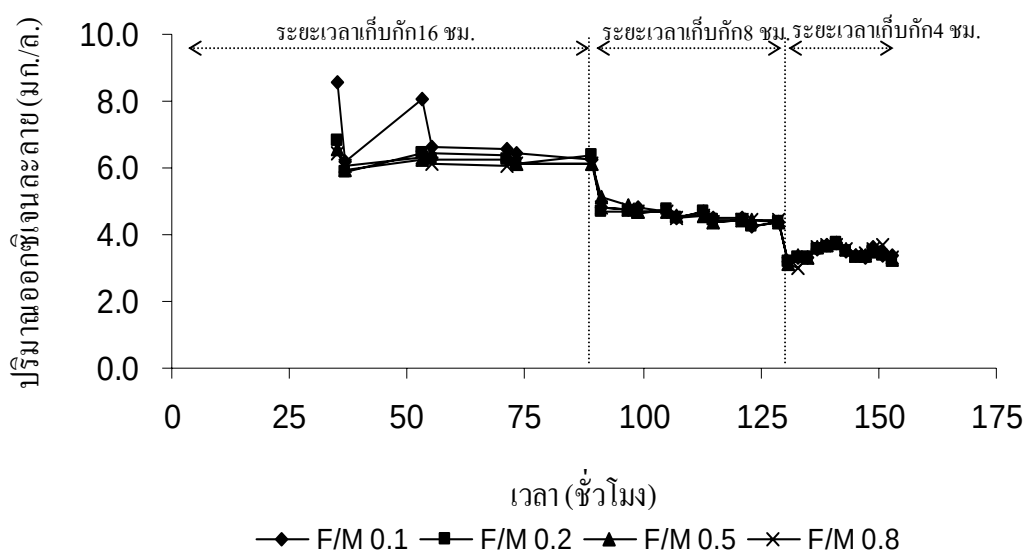


ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature) ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

2.6.3 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen, DO) ในถังปฏิกรณ์ระหว่างการทดลอง

จากภาพที่ 29 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรอง ซึ่งเห็นได้จากการทดลองที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์แตกต่างกัน คือ 0.1, 0.2, 0.5 และ 0.8 กก.บีโอดีต่อกก.ของแข็งแขวนลอยระยะเหยต่อวัน ค่าออกซิเจนละลายในแต่ละถังมีค่ามากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ระหว่าง 4 – 6 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าค่า สัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันมีปริมาณออกซิเจนละลายใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาเก็บกัก หรือเทปปริมาณน้ำเสียเข้าระบบต่างกัน ซึ่งทำ

ให้ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ต่างกัน ดังนั้นระบบที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์สูงจะมีปริมาณออกซิเจนละลายในระบบต่ำกว่าระบบที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ต่ำ เพราะอัตราการถ่ายเทออกซิเจนน้อยเมื่อผ่านระบบที่มีความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความหนืดสูง



ภาพที่ 29 การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลาย (Dissolve oxygen) ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

3. การศึกษาประสิทธิภาพของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองจมตัวในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ

จากการทดลองเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองจมตัว ที่ระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 8 และ 016 ชั่วโมง ที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.103, 0.224, 0.512 และ 0.877 ต่อวัน หรือที่ค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์ เท่ากับ 3.38, 3.07, 2.65 และ 2.30 วัน ที่ค่าภาระบรรทุกเชิงปริมาตรเฉลี่ย เท่ากับ 0.704, 1.412, 2.824 และ 4.234 กก.บีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีโดยเฉลี่ยร้อยละ 95.30, 93.51, 89.95 และ 85.43 ตามลำดับ ดังรายละเอียดในตารางที่ 8 และ 9

ตารางที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดค่าบีโอดี ที่ระยะเวลาเก็บกัก ค่าสัดส่วน
 สารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ย และค่าภาระบรรทุก
 เชิงปริมาตรต่างๆ ของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองจมตัว

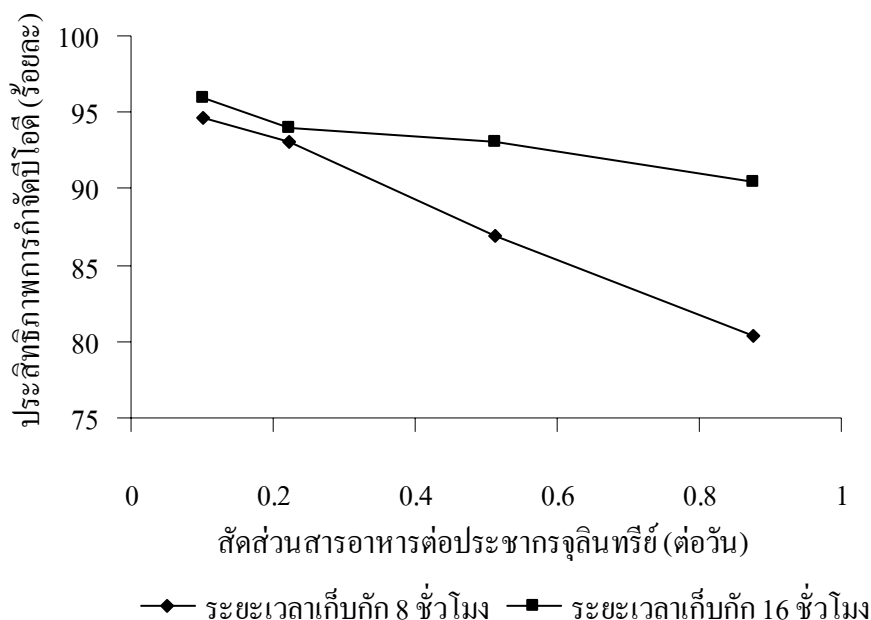
F/M ratio (kgBOD ₅ / kgMLVSS.d)	HRT (hr)	BOD loading (kgBOD ₅ /m ³ .d)	S ₀ (mg/l)	S _t (mg/l)	AverageX (mg/l)	BOD Removal (%)
0.103	8	0.704	251	11.8	658	94.7
	16					95.9
0.224	8	1.412	251	16.3	596	93.0
	16					94.0
0.512	8	2.824	251	25.3	506	86.9
	16					93.0
0.877	8	4.234	251	36.7	427	80.4
	16					90.5

ตารางที่ 9 แสดงค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดค่าบีโอดี ที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากร
 จุลินทรีย์ และอายุตะกอนจุลินทรีย์ของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองจมตัว

F/M ratio (kgBOD ₅ / kgMLVSS.d)	S ₀ (mg/l)	S _t (mg/l)	Yield (Y) (kgMLVSS/ kgBOD ₅)	(S ₀ - S _t) /(X·HRT) (1/d)	k _d (1/d)	SRT (d)	BOD Removal (%)
0.102	251	11.8	0.382	0.810	0.172	3.38	95.3
0.227	251	16.3	0.382	0.874	0.172	3.07	93.5
0.512	251	25.3	0.382	0.981	0.172	2.65	90.0
0.877	251	36.7	0.382	1.096	0.172	2.30	85.4

3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าบีโอดีที่ระยะเวลาเก็บกัก ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ ค่าการบริโภคน้ำแข็งปริมาตร และค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์เฉลี่ย

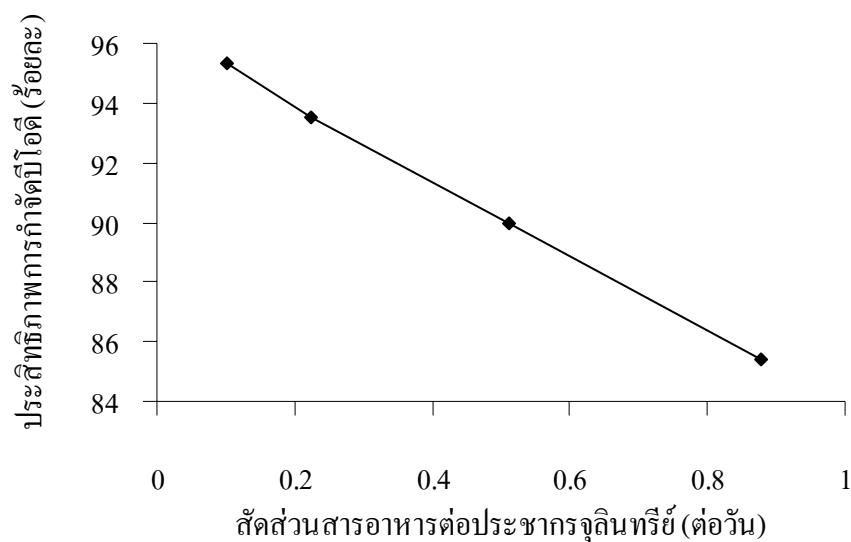
จากข้อมูลการทดลองในตารางที่ 8 พบว่า ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมง ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.103, 0.224, 0.512 และ 0.877 ต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าบีโอดีเฉลี่ย ร้อยละ 88.74 ส่วนที่ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าบีโอดีเฉลี่ย ร้อยละ 93.35 และพบว่าแนวโน้มและลักษณะการกำจัดค่าบีโอดีที่แปรผันกับค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ จาก 0.103 เป็น 0.877 ต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี มีแนวโน้มลดลงเร็วกว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง แสดงได้ดังภาพที่ 30 โดยที่ระยะเวลาเก็บกัก 8 ชั่วโมงประสิทธิภาพลดลงจากร้อยละ 94.68 เป็น 80.38 มีค่าผลต่างถึง 14.3 ส่วนที่ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมงประสิทธิภาพลดลงจากร้อยละ 95.92 เป็น 90.47 มีค่าผลต่างเท่ากับ 5.45 ดังนั้นที่ระยะเวลาเก็บกักน้อย ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีมากกว่าที่ระยะเวลากักเก็บนาน เนื่องด้วยที่ระยะเวลาเก็บกักสูงจะทำให้การทำลายสารอาหารเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ นั่นคือ เสถียรภาพของระบบเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของระยะเวลาเก็บกัก (มันสิน, 2523)



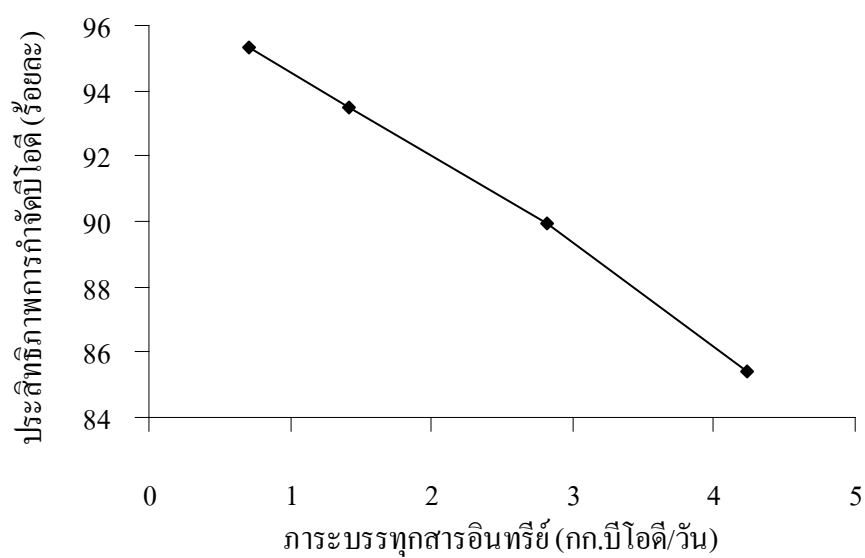
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี กับค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักต่างกัน

จากข้อมูลการทดลองในตารางที่ 8 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีเฉลี่ย ลดลงจากร้อยละ 95.30 เป็น 85.43 เมื่อค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ เพิ่มขึ้นจาก 0.103 เป็น 0.877 ต่อวัน ค่าภาระบรรทุกเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นจาก 0.704 เป็น 4.234 กก.บีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน และค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ลดลงจาก 659 เป็น 427 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นระบบ ปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองจมตัวที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ และค่าภาระ บรรทุกเชิงปริมาตรต่ำ จะมีประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีสูงกว่าที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากร จุลินทรีย์ และค่าภาระบรรทุกเชิงปริมาตรสูง ซึ่งตรงข้ามกับค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ ที่ ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี จะสูงเมื่อมีค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์สูงด้วย แสดงได้ดังภาพที่ 31, 32 และ 33

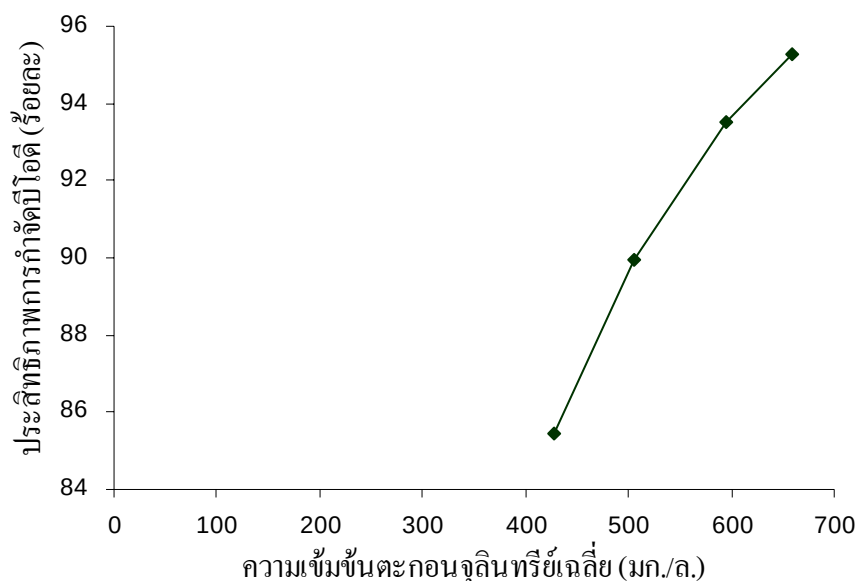
ดังนั้นการควบคุมระบบให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าบีโอดีสูงสุดร้อยละ 95.30 ควรควบคุมค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์เท่ากับ 0.103 และระยะเวลาเก็บกัก เท่ากับ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ จากข้อมูลการเดินระบบบำบัดน้ำเสียโรงงาน คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด ควบคุมค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ ระหว่าง 0.2 – 0.4 ระยะเวลาเก็บกัก 8 – 15 ชั่วโมง และความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ ระหว่าง 1500 – 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่า บีโอดี ก่อนเข้าระบบค่อนข้างต่ำประมาณ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เกิดปัญหาตะกอนลอยโดยมีค่า ดัชนีปริมาณตะกอน มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อกรัมตลอดการเดินระบบซึ่งทำให้ค่าบีโอดีน้ำออกเกิน ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งได้เนื่องจากตะกอนลอยออกถังเวียร์ ดังนั้นการประยุกต์ใช้แผ่นกรองเป็นส่วนคัด แยกอย่างสมบูรณ์แทนบ่อดกตะกอน จึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้แก้ปัญหาตะกอนลอย ถังเวียร์ได้ และสามารถเพิ่มความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบให้สูงขึ้นได้ โดยควบคุมค่า สัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ และระยะเวลาเก็บกักที่ได้ในการทดลอง เพื่อคุมค่าบีโอดีที่ ออกจากระบบให้น้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจจะแก้ปัญหาตะกอนลอยโดยการเดินระบบที่ ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ให้มากกว่า 0.5 (ในการทดลองทำการทดลองที่ค่า สัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ระหว่าง 0.5123 – 0.8767 ต่อวัน) ที่ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง เป็นค่าการเดินระบบที่ทำให้สภาวะการเกิดตะกอนลอยลดลงอย่างชัดเจน



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีกับค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ของระบบ



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีกับค่าภาระบรรทุกเชิงปริมาตร

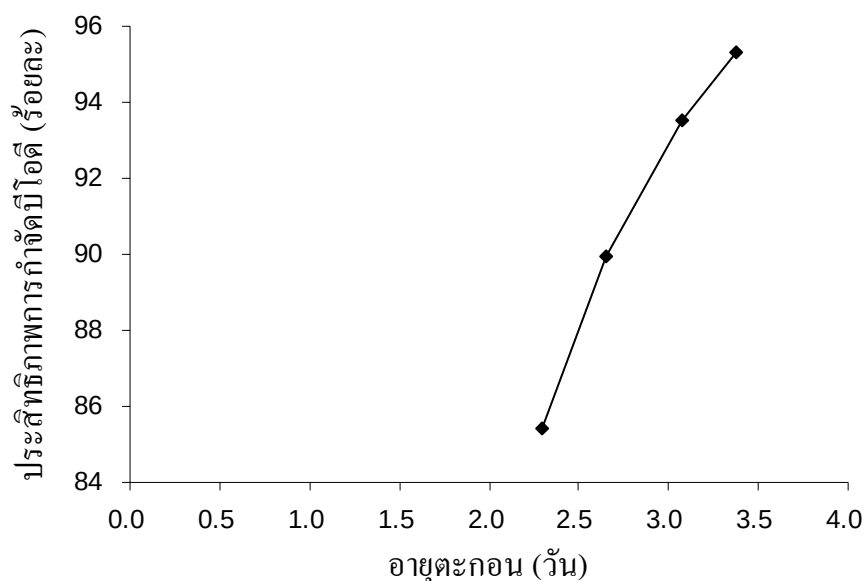


ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีกับค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์

3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าบีโอดีที่ค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์ และความสัมพัทธ์ระหว่างค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ กับค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์

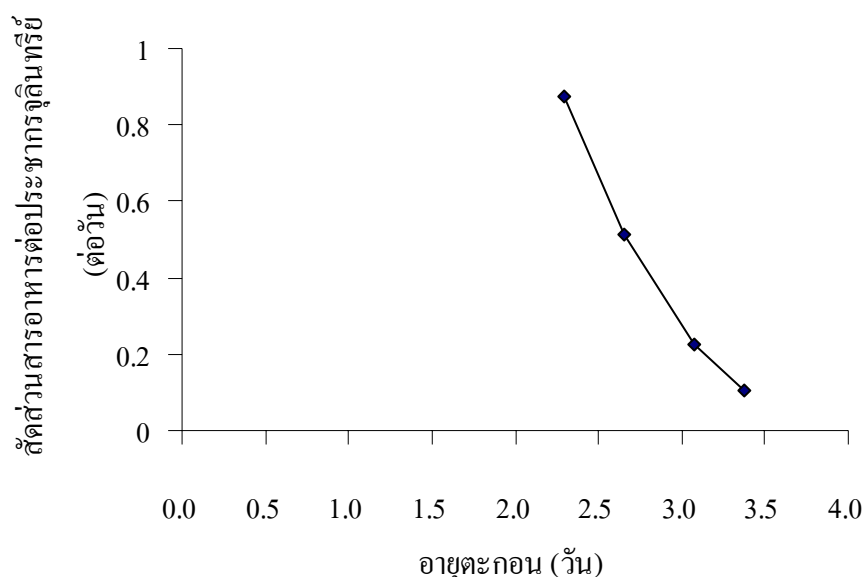
จากข้อมูลการทดลองในตารางที่ 9 พบว่า ที่ค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์มากจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีสูงกว่าที่ค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์น้อย แสดงได้ดังภาพที่ 34 นั่นคือ จุลินทรีย์มีเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้นาน ที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ต่ำ หรือค่าภาระบรรทุกทุกเชิงปริมาณต่ำ ยังผลให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตน้อย ระบบมีในช่วงการเจริญเติบโตแบบคงที่ (Stationary Phase) ดังภาพที่ 2 คือ อัตราการเกิดและการตายของแบคทีเรียใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์มาก ประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีจึงสูงกว่าระบบที่มีค่าอายุตะกอนต่ำ ซึ่งแสดงโดยประสิทธิภาพของระบบเพิ่มจากร้อยละ 85.43 เป็น 95.30 เมื่ออายุตะกอนจุลินทรีย์เพิ่มจาก 2.30 เป็น 3.38 วัน

ดังนั้นการควบคุมระบบปฏิกรณ์แบบมีแผ่นกรองจมตัวในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ ให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีสูงสุด เท่ากับร้อยละ 95.30 ต้องควบคุมค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์เท่ากับ 0.103 ต่อวัน หรือค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 3.38 วัน และควบคุมระบบให้มีระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 16 ชั่วโมง



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดปิโตรเลียมกับค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์

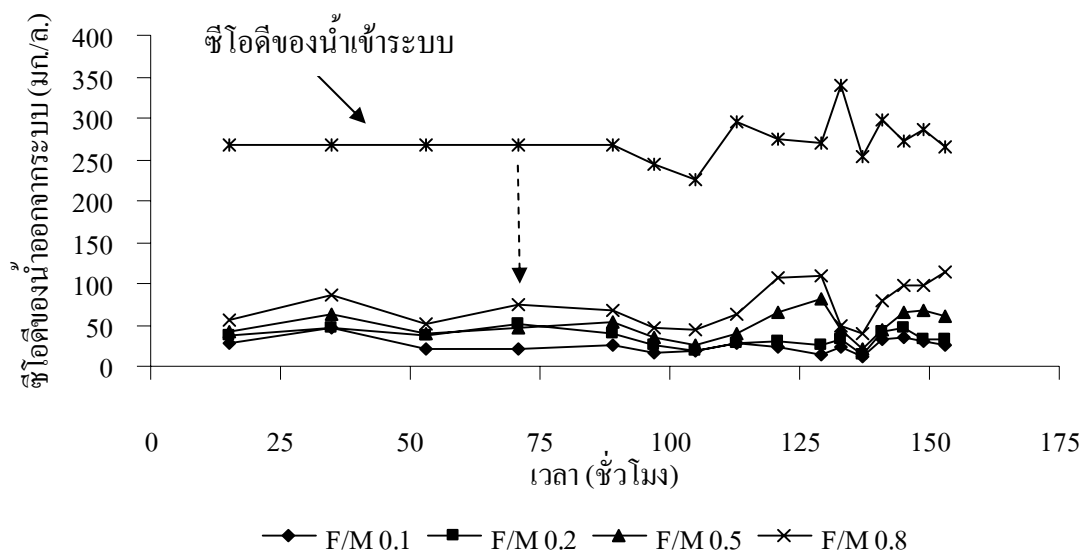
จากข้อมูลการทดลองในตารางที่ 9 พบว่า ระบบมีค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์เฉลี่ย เท่ากับ 3.38, 3.07, 2.65 และ 2.30 วัน ที่สัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.103, 0.224, 0.512 และ 0.877 ต่อวัน ตามลำดับ พบว่า ค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์เฉลี่ยกับสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ มีค่าแปรผกผันกัน แสดงดังในภาพที่ 35 ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดปิโตรเลียมกับค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์ กล่าวคือ จุลินทรีย์อยู่ในระบบนาน ที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ต่ำ ดังนั้นปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณน้อย ถ้าเดินระบบที่ค่าอายุตะกอนสูง ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนได้ แต่ถ้าระบบมีค่าอายุตะกอนสูงเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหาแผ่นกรองอุดตันได้ เพราะตะกอนมีขนาดเล็กลงทำให้ไปอุดรูพรุนของแผ่นกรอง (Pore-blocking) (Mulder, 2000)



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ กับค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์

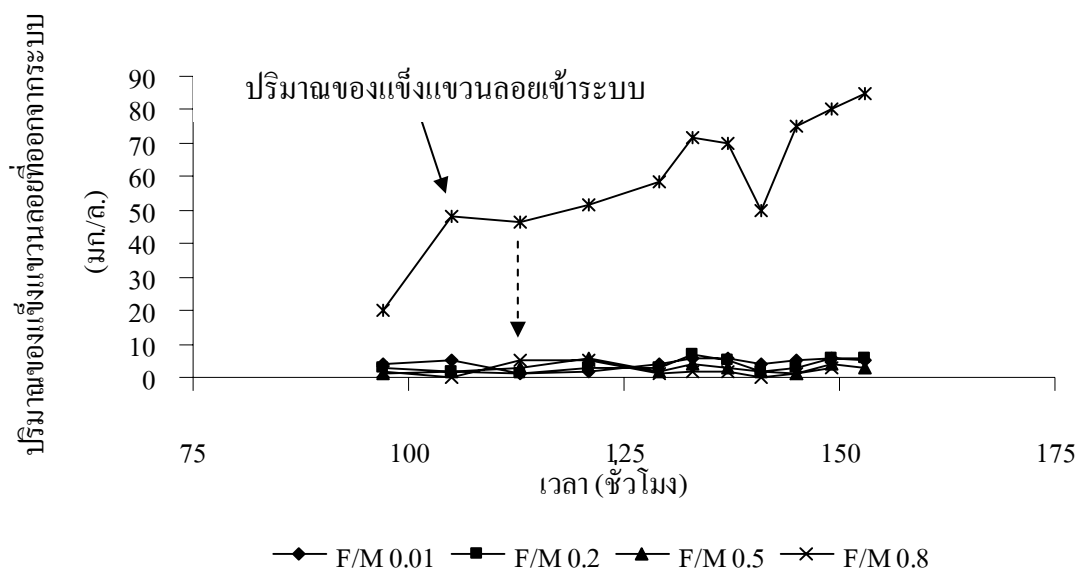
3.3 การกำจัดชีโอดีที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ และการคัดแยกสารแขวนลอยด้วยแผ่นกรอง ตลอดระยะเวลาการทดลอง

จากภาพที่ 36 แสดงให้เห็นว่า ที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ต่ำ ค่าความเข้มข้นของชีโอดีที่ออกจากระบบมีค่าน้อยกว่าที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์สูง เมื่อค่าน้ำเสียที่เข้าระบบมีชีโอดีเฉลี่ย เท่ากับ 272.42 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์เท่ากับ 0.103 ต่อวัน ค่าชีโอดีที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์เท่ากับ 0.224 ต่อวัน ค่าชีโอดีที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 33.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์เท่ากับ 0.512 ต่อวัน ค่าชีโอดีที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 53.08 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์เท่ากับ 0.877 ค่าชีโอดีที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 85.09 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมถึงระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีใกล้เคียงกันในถึงปฏิกรณ์ที่มีสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์เท่ากัน ซึ่งให้เห็นว่าระบบอยู่ในสภาวะคงที่



ภาพที่ 36 การกำจัดซีโอดีของน้ำออกจากระบบที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากร จุลินทรีย์ เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.5 และ 0.8 ต่อวัน

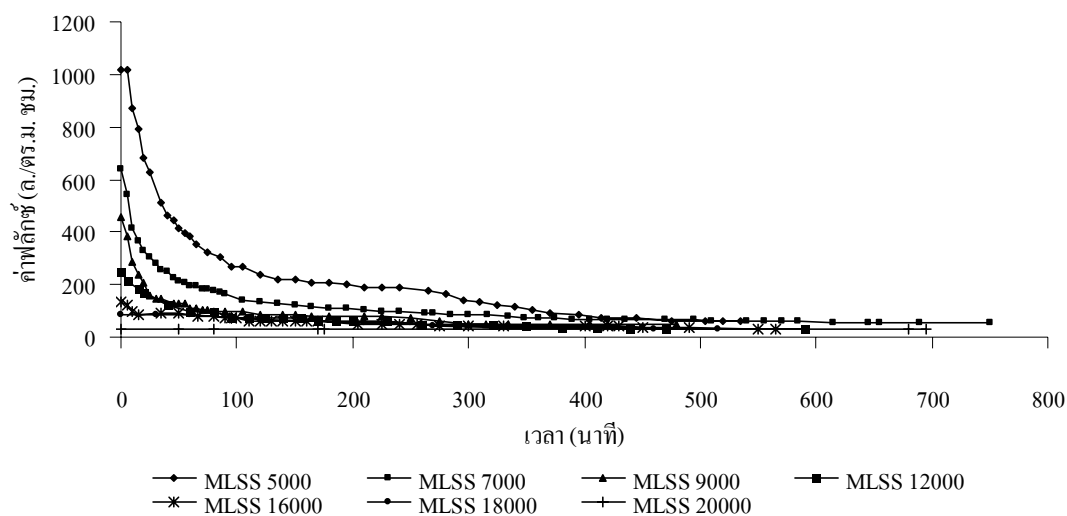
จากภาพที่ 37 แสดงให้เห็นว่า ระบบถังปฏิกรณ์แบบมีแผ่นกรองจมตัวโดยใช้แผ่นกรองไนลอน ขนาดรูพรุนเท่ากับ 20 ไมครอนสามารถคัดแยกสารแขวนลอยได้โดยค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์และปริมาณสารแขวนลอยเข้าระบบไม่มีผล โดยมีปริมาณสารแขวนลอยที่สามารถผ่านแผ่นกรองออกมาได้ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ที่กำหนดไว้ให้ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2539 และสามารถกักตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในระบบได้ เนื่องจากไม่มีปริมาณสารแขวนลอยระเหยผ่านออกมาจากแผ่นกรอง



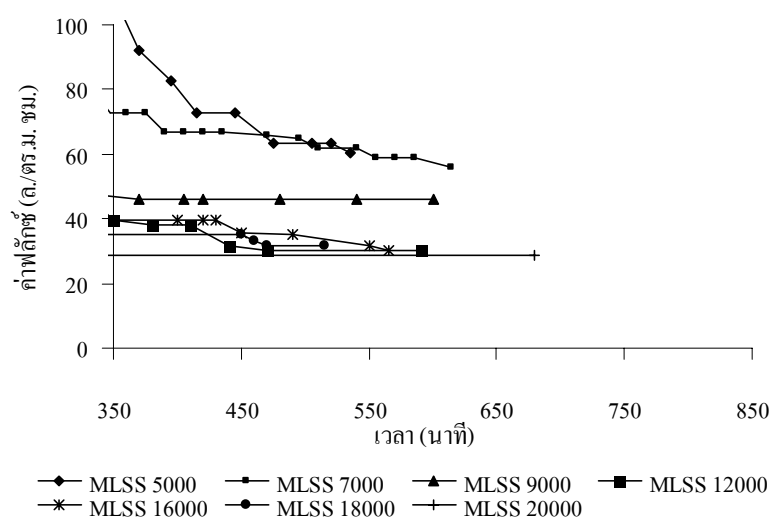
ภาพที่ 37 ปริมาณสารแขวนลอยที่ออกจากระบบ ที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.5 และ 0.8 ต่อวัน

4. การศึกษาหาค่าความเข้มข้นตะกอนสูงสุด (Maximum MLSS) และค่าฟลักซ์จำเพาะ (Specific flux)

ในการทดลองใช้แผ่นกรองไนลอนที่มีรูพรุนขนาด 20 ไมครอน พื้นที่ผิวเท่ากับ 0.019 ตารางเมตร การศึกษาคุณสมบัติการกรองทำโดยนำแผ่นกรองไปกรองน้ำที่มีค่าความเข้มข้นของตะกอน เท่ากับ 5000, 7000, 9000, 12000, 16000, 18000 และ 20000 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้วทำการวัดค่าฟลักซ์โดยควบคุมให้มีค่าความดัน (Suction pressure) เท่ากันตลอดการทดลอง เท่ากับ -7 กิโลพาสคาล และเติมอากาศให้เกิดสภาวะปั่นป่วนในปริมาณที่เท่ากัน ผลการทดลองเห็นได้ว่า ระบบที่ความเข้มข้นของตะกอนต่ำ จะมีความเร็วของการไหลเริ่มต้นสูงและจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับระบบที่มีความเข้มข้นของตะกอนสูงกว่า และความเร็วในการกรองจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่ง ตั้งแต่ นาทีที่ 370 ถึง 655 ตามที่แสดงในภาพที่ 38 และ 39 โดยพบว่าค่าความเร็วการกรองคงที่มีค่าใกล้เคียงเดิมตั้งแต่ระบบที่ความเข้มข้นของตะกอน เท่ากับ 12000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้นไป เนื่องด้วยพื้นที่ผิวของแผ่นกรองที่เกิดการอุดตันเมื่ออนุภาคไปเกาะทำให้มีความเร็วในการกรองลดลง มีพื้นที่จำกัดซึ่งทำให้เกิดชั้นเจลได้ในระดับหนึ่งที่ทำให้ความเร็วในการกรองคงที่ ทำให้ความเข้มข้นของตะกอนที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่าความเร็วในการกรอง



ภาพที่ 38 ค่าฟลักซ์ในการกรองของแผ่นกรองที่ความเข้มข้นของตะกอนต่างๆ เทียบกับเวลา

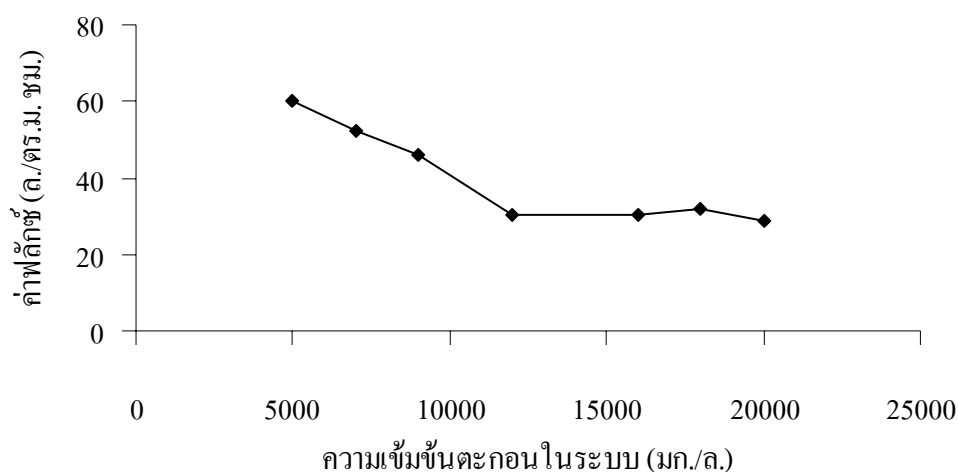


ภาพที่ 39 ค่าฟลักซ์คงที่ในการกรองของแผ่นกรองที่ความเข้มข้นของตะกอนต่างๆ เทียบกับเวลา

การศึกษาหาความเข้มข้นของตะกอนสูงสุดและค่าฟลักซ์สูงสุดที่สามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่องโดยมีอัตราการกรองคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จากการทดลองพบว่า ค่าฟลักซ์แท้จริงที่ความเข้มข้นของตะกอน 5000, 7000, 9000, 12000, 16000, 18000 และ 20000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความดันผ่านแผ่นกรอง -7 กิโลพาสกาล มีค่าเท่ากับ 60.32, 52.38, 46.03, 30.16, 30.16, 31.75 และ 28.57 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 40 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ที่ความเข้มข้นของตะกอนตั้งแต่ 5000 ถึง 9000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นของตะกอนจุนเจือทรียมาก

อัตราการกรองจะมีค่าต่ำลง แต่ที่ความเข้มข้นของตะกอนตั้งแต่ 12000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้นไป ในการเดินระบบนั้นไม่จำกัดค่าความเข้มข้นเพราะค่าฟลักซ์มีแนวโน้มคงที่ ค่าฟลักซ์แท้จริง (Actual Flux) เหลือเมื่อเดินระบบที่มีค่าความเข้มข้นของตะกอนตั้งแต่ 12000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้นไป มีค่าเท่ากับ 30.16 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง หรือมีค่าฟลักซ์จำเพาะ (Specific Flux) เท่ากับ 430.86 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงต่อบาร์ ทำให้พบว่าการใช้แผ่นกรองมีอัตราการกรองต่อพื้นที่ผิวต่อความดัน สูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีเยื่อกรองชนิดไมโครฟิลเตรชันซึ่งมีค่าฟลักซ์จำเพาะอยู่ระหว่าง 20 – 200 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงต่อบาร์ (Tom *et al.*, 2000)

จากข้อมูลโรงงานมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นประมาณ 6000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังนั้นการเดินระบบปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองจมตัวสามารถเดินระบบโดยมีความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์อย่างไม่จำกัด และสามารถเดินระบบป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่องได้ด้วยค่าฟลักซ์แท้จริงตามแต่ละค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ข้างต้น แต่ถ้าต้องการเดินระบบโดยที่มีค่าความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์มากกว่า 12000 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป สามารถเดินระบบที่ค่าฟลักซ์จำเพาะเท่ากับ 430.86 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงต่อบาร์ แต่ถ้าเดินระบบที่ค่าความดัน -7 กิโลพาสกาลจะใช้พื้นที่แผ่นกรองประมาณ 8300 ตารางเมตร



ภาพที่ 40 ค่าฟลักซ์แท้จริงของแผ่นกรองที่ความเข้มข้นของตะกอนต่างๆ กัน

5. การออกแบบระบบทดลองขนาดใหญ่ (Pilot Plant) ตามค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์และการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียกับระบบเดิม

5.1 การออกแบบระบบทดลองขนาดใหญ่

บริษัท คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด เป็นโรงงานผลิตกระดาษที่มีปริมาณน้ำเสียประมาณ 6000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมีค่าบีโอดีละลายจากถังตกตะกอนชั้นแรกเข้าสู่ถังเติมอากาศขนาด 3750 ลูกบาศก์เมตร ประมาณ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นตะกอนในถังเติมอากาศอยู่ระหว่าง 1500 – 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ลักษณะตะกอนสลัดจ์เป็นตะกอนจุลินทรีย์ร้อยละ 75 และคอลลอยด์ส่วนอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.2 – 0.4 มก. บีโอดีต่อมก. ของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน ค่าอายุตะกอนเท่ากับ 5 – 15 วัน น้ำเสียที่ออกจากระบบต้องมีค่าบีโอดีน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีระยะเก็บกักน้ำเสียประมาณ 15 ชั่วโมง

จากการทดลองพบว่า จุลินทรีย์ในระบบที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากบริษัท คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด มีค่า k เท่ากับ 1.21 มิลลิกรัมบีโอดีต่อตะกอนจุลินทรีย์ต่อวัน, K_s เท่ากับ 5.45 มิลลิกรัมบีโอดีต่อลิตร, Y เท่ากับ 0.38 มิลลิกรัมตะกอนจุลินทรีย์ต่อมิลลิกรัมบีโอดี, k_d เท่ากับ 0.17 ต่อวัน และ μ_m เท่ากับ 0.46 ต่อวัน ลักษณะตะกอนสลัดจ์เป็นตะกอนจุลินทรีย์ร้อยละ 70 และจากการทดลองหาความเข้มข้นตะกอนสูงสุด ได้เลือกความเข้มข้นตะกอนที่ใช้ในการลงเดินระบบเริ่มแรกที่ 12000 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.1 ระยะเวลาเก็บกักที่ใช้ในการเดินระบบ

$$\text{จากสมการ } \frac{1}{\theta_c} = \mu_m \frac{S_1}{K_s + S_1} - k_d$$

$$\frac{1}{\theta_c} = (0.46) \left(\frac{20}{5.45 + 20} \right) - 0.17$$

$$\theta_c = 5.26 \text{ วัน}$$

$$\text{จากสมการ } \theta_i = \left(\frac{\theta_c}{X} \right) \left[\frac{Y(S_i - S_1)}{(1 + k_d \theta_c)} \right]$$

$$\text{ค่าตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบ (MLVSS)} = (0.7)(12000) = 8400$$

มก./ล.

$$\theta_i = \left(\frac{5.26}{8400} \right) \left[\frac{0.38(300 - 20)}{(1 + (0.17)(5.26))} \right]$$

$$\theta_i = 0.355 \text{ วัน หรือ } 8.5 \text{ ชั่วโมง}$$

5.1.2 ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์

$$\frac{F}{M} = \frac{(S_i - S_1)}{X \theta}$$

$$\frac{F}{M} = \frac{(300 - 20)}{(12000)(0.355)}$$

$$\frac{F}{M} = 0.04 \text{ มก. บีโอดีต่อมก. ของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน}$$

5.1.3 ขนาดถังปฏิกรณ์และขนาดของแผ่นกรองที่ใช้ในระบบ

$$\text{จากสมการ } V = Q \theta_i$$

$$V = (6000 \text{ ลบ.ม./วัน})(0.355 \text{ วัน})$$

$$V = 2130 \text{ ลบ.ม.}$$

ดังนั้นระบบการทดลองขนาดใหญ่มีขนาดถึงปฏิกรณ์ เท่ากับ 2130 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งสามารถลดพื้นที่ก่อสร้างของถังเดิมอากาศได้ถึงร้อยละ 43.2 ยังไม่รวมถึงพื้นที่การก่อสร้างถังตกตะกอนที่ไม่ต้องใช้ แต่ต้องลงทุนติดตั้งแผ่นกรอง (แผ่นกรองในลอนขนาดรูปทรงแปดเหลี่ยม 20 ไมครอน ราคาตารางเมตรละ 3000 บาท) โดยคุณระบบที่ค่าความเข้มข้นตะกอนเท่ากับ 12000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นได้มากกว่า 4 เท่าของระบบเดิมด้วยการประยุกต์ใช้แผ่นกรอง ยังผลให้ค่าระยะเวลาเก็บกักลดลงเท่ากับ 8.5 ชั่วโมง ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ที่น้อยลงเท่ากับ 0.04 มก.บีโอดีต่อมก.ของแข็งแขวนลอยระยะเหยต่อวัน และค่าอายุตะกอนเท่ากับ 5.26 วัน ซึ่งสามารถลดปริมาตรตะกอนส่วนเกินที่ต้องสูบออกต่อวันได้ประมาณร้อยละ 15.6 จากปริมาตรตะกอนประมาณ 480000 ลิตรต่อวัน เป็น 404943 ลิตรต่อวัน โดยตะกอนที่สูบออกมีความเข้มข้นสูงมากกว่า 12000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงไม่ต้องผ่านกระบวนการทำขึ้นทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการจัดการตะกอนได้มาก ส่วนการเดินระบบกรองใช้ค่าพลังค์จำเพาะเท่ากับ 430.86 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงต่อบาร์ ซึ่งสามารถลดพื้นที่แผ่นกรองที่ใช้ได้โดยการเพิ่มค่าความดันโดยคิดจากระยะเวลาคุ้มทุนในการลงทุนซื้อแผ่นกรองกับค่าใช้จ่ายในการเดินระบบกรอง

5.2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีแผ่นกรองจมตัวกับระบบเดิม

เหตุผลสำคัญในการนำถังปฏิกรณ์แบบมีแผ่นกรองจมตัวมาใช้ คือ กักจุลินทรีย์ไว้ในระบบไม่ให้ตะกอนลอยหลุดลอยออกไป ยังผลให้สามารถเพิ่มความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ในระบบได้ และใช้ประโยชน์จากลักษณะเป็นเส้นยาวของแบคทีเรียเส้นใยเคลือบรูปทรงแปดเหลี่ยมของแผ่นกรองให้มีขนาดเล็กลงแทนที่การใช้เยื่อกรองซึ่งมีราคาต่อพื้นที่สูงกว่ามาก การใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีแผ่นกรองจมตัวมีข้อดีข้อเสียเทียบกับระบบเดิมตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 10 ดังนี้

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของถังปฏิกรณ์แบบมีแผ่นกรองจมตัวกับระบบเดิม

ปัจจัย	ข้อดีและข้อเสียของระบบ	
	SFBR	AS
1. พื้นที่ก่อสร้าง	ใช้พื้นที่น้อย เนื่องจากไม่ต้องใช้ถังตกตะกอน และขนาดถังเดิมอากาศเล็กลง (ความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์สูงขึ้น)	ใช้พื้นที่มาก เนื่องจาก ต้องมีถังตกตะกอน และใช้ถังเดิม อากาศขนาดใหญ่
2. อัตราการบำบัดน้ำเสีย	ต่ำ เนื่องจากขึ้นอยู่กับอัตราการกรอง	สูง เนื่องจากอาศัยการคัดแยกของแข็งด้วยการตกตะกอน
3. ประสิทธิภาพในการบำบัด	สูง เนื่องจาก ความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์สูงขึ้น และมีการคัดแยกสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำอย่างสมบูรณ์ตามขนาดรูพรุนของแผ่นกรอง	ต่ำ เนื่องจาก ความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ต่ำ และอาจมีการหลุดลอยของตะกอนจากสภาวะตะกอนลอย
4. ระยะเวลาเก็บกัก	สั้น เนื่องจาก ความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์สูงขึ้น ทำให้ระบบย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำได้เร็วกว่า และไม่ต้องใช้เวลาในการตกตะกอน	นาน เนื่องจากความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ต่ำ และใช้เวลาในการตกตะกอน
5. ค่าใช้จ่าย	สูง เนื่องจาก ต้องมีการลงทุนในหน่วยบำบัดการกรอง และการเดินระบบด้วยการอัดความดันและการเติมอากาศที่สูง แต่สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการจัดการตะกอนได้	ต่ำ เนื่องจาก ใช้กลไกการตกตะกอน แต่มีค่าใช้จ่ายในการจัดการตะกอนสูงเนื่องจากเกิดตะกอนมาก

ตารางที่ 10 (ต่อ)

ปัจจัย	ข้อดีและข้อเสียของระบบ	
	SFBR	AS
6. การใช้ประโยชน์จากน้ำที่ผ่านการบำบัด	ได้คุณภาพที่ดีขึ้นในการนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้การสะสมของมวลสกปรกน้อยลง	น้ำที่ออกจากระบบไม่เหมาะสมในการนำกลับไปใช้ใหม่ ถ้าเกิดสภาวะตะกอนลอย
7. การจัดการตะกอน	ตะกอนที่ต้องกำจัดลดลง เนื่องจากสามารถคุมระบบที่ค่าอายุตะกอนสูงขึ้นโดยไม่มีผลต่อการตกตะกอน รวมถึงตะกอนที่สูบออกมีความเข้มข้นสูงอยู่แล้วจึงไม่ต้องผ่านกระบวนการทำขึ้นสัลดจ์	ตะกอนที่ต้องกำจัดมาก ต้องใช้ถังทำขึ้น เพราะความเข้มข้นตะกอนในถังตกตะกอนไม่มาก

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. คุณลักษณะน้ำเสียของโรงงาน บริษัท คิมเบอร์ลี-คล้าค ประเทศไทย จำกัด มีค่าบีโอดีสูงเมื่อเทียบกับค่าซีโอดี เป็นอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดี เท่ากับ 0.65 เนื่องจากเป็นน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนขั้นแรกมาก่อน และอัตราส่วนบีโอดีกรองต่อซีโอดีกรอง เท่ากับ 0.74 ทำให้พบว่า การกรองมีผลในการลดค่าซีโอดีมากกว่าบีโอดี เลยทำให้สารอินทรีย์ละลายน้ำเหลือในน้ำเสียนอกจากสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำ

2. ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของแบบกิติเรชชนิดเส้นใยในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองจมตัว มีค่าดังนี้

สัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์	หน่วย	ค่าคงที่
k	มิลลิกรัมบีโอดีต่อตะกอนจุลินทรีย์ ต่อวัน	1.21
K_s	มิลลิกรัมบีโอดีต่อลิตร	5.45
Y	มิลลิกรัมตะกอนจุลินทรีย์ต่อ มิลลิกรัมบีโอดี	0.38
k_d	ต่อวัน	0.17
μ_m	ต่อวัน	0.46

3. การเกิดสภาวะตะกอนลอยมีค่าต่ำเมื่อเดินระบบที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์สูง และจะสามารถแก้ปัญหาการเกิดตะกอนลอยได้เมื่อเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง และที่ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.5 และ 0.8 ต่อวัน

4. ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีแผ่นกรองร่วมกับแบคทีเรียเส้นใย ขึ้นอยู่กับค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ ค่าอายุตะกอน และระยะเวลาเก็บกัก โดยแปรผันกับค่าอายุตะกอนจุลินทรีย์และระยะเวลาเก็บกัก และ แปรผกผันกับค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ จากการทดลองพบว่าควมคุมระยะเวลาเก็บกัก 16 ชั่วโมง ค่าสัดส่วน

สารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์ 0.103 ต่อวัน และอายุตะกอน 3.38 วัน จึงได้ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีสูงสุดร้อยละ 95.92

5. แผ่นกรองในลอนขนาดรูปวง 20 ไมครอนที่จุ่มในถังปฏิกรณ์ สามารถทำหน้าที่กักตะกอน จุลินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีของแข็งแขวนลอยปนเปื้อนมากับน้ำออกจากระบบน้อยมาก ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่อนข้างคงที่ไม่ว่าจะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยเข้าระบบมากน้อยเพียงใด

6. อัตราการกรองของแผ่นกรองขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสลัดจ์ หากสลัดจ์มีความเข้มข้นมาก ค่าฟลักซ์มีค่าต่ำ แต่ที่ความเข้มข้นของสลัดจ์ตั้งแต่ 12000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้นไปในการเดินระบบนั้นไม่จำกัดค่าความเข้มข้นเพราะค่าฟลักซ์มีแนวโน้มคงที่ และค่าฟลักซ์แท้จริงเฉลี่ยเมื่อเดินระบบที่มีค่าความเข้มข้นของตะกอนตั้งแต่ 12000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้นไป มีค่าเท่ากับ 30.16 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง และค่าฟลักซ์จำเพาะเท่ากับ 430.86 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงต่อบาร์

7. การใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีแผ่นกรองจมสามารถลดพื้นที่ก่อสร้างของถังเดิมอากาศได้ถึงร้อยละ 43.2 เมื่อเทียบกับระบบเดิม สามารถเพิ่มความเข้มข้นตะกอนได้มากกว่า 4 เท่า ยังผลให้ค่าระยะเวลาเก็บกักลดลงเท่ากับ 8.5 ชั่วโมง ค่าสัดส่วนสารอาหารต่อประชากรจุลินทรีย์น้อยลง เท่ากับ 0.04 มก.บีโอดีต่อมก.ของแข็งแขวนลอยระเหยต่อวัน และค่าอายุตะกอนเท่ากับ 5.26 วัน ซึ่งสามารถลดปริมาตรตะกอนส่วนเกินที่ต้องสูบออกต่อวันได้ประมาณร้อยละ 15.6

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษโดยระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเชื้อกรอง ร่วมกับแบบที่เรียกชนิดเส้นใย ระดับแบบจำลองขนาดใหญ่ (Pilot Scale) โดยนำค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองไปใช้ในการออกแบบ ตลอดจนการปรับปรุงระบบบำบัดของโรงงาน บริษัท กิมเบอร์ลี-คล๊าก ประเทศไทย จำกัด โดยการติดตั้งโมดูลแผ่นกรองลงไปในบ่อเติมอากาศ
2. ศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่างๆ ซึ่งเป็นวัตถุดิบในโรงงานผลิตกระดาษ ที่มีผลต่อการเกิดสภาวะตะกอนลอย เช่น เชื้อกระดาษดิบ เชื้อกระดาษรีไซเคิล แป้ง ชัลไฟฟ้า โบรอน เป็นต้น
3. ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายไนโตรเจนในน้ำเสีย เทียบทั้งการเดินระบบแบบป้อนน้ำเสียต่อเนื่อง (Continuous Flow) กับแบบที่เป็นลำดับสืบเนื่อง (Sequencing Batch) ของระบบที่มีประชากรจุลินทรีย์หลักเป็นแบบที่เรียกเส้นใย
4. ศึกษาขนาดรูพรุนของแผ่นกรองที่เหมาะสมกับระบบทั้งในด้านประสิทธิภาพการกรองตะกอนจุลินทรีย์ โดยเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายกับการนำน้ำกลับไปใช้ใหม่
5. ศึกษาการสะสมของของแข็งแขวนลอยในระบบที่มีผลต่อประสิทธิภาพและศึกษาค่าอายุตะกอนที่ต้องควบคุมในระยะยาว
6. ศึกษาอัตราการอุดตันของแผ่นกรองที่การเดินระบบระยะยาว ทั้งการอุดตันทางชีวภาพและกายภาพ รวมถึงออกแบบและการจัดวางแผ่นกรองในถังปฏิกรณ์ โดยใช้หลักทฤษฎีทางกลศาสตร์ของน้ำ (Fluid Dynamic) เพื่อควบคุมการอุดตันของแผ่นกรองด้วยการไหลผ่านเงื่อนไขผิวแผ่นกรอง