บทที่ 5

บทสรุป และ ข้อเสนอแนะ

5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของไมโครฟิลเทรชันเมมเบรนในระบบเอสเอ็มเอฟ-เอ็มบีอาร์

สถานะคงตัวของระบบทางชีวภาพ : การควบคุมค่าฟลักซ์ให้คงที่ ใช้เครื่องสูบที่สามารถสร้างแรงดันชดเชยความดันสูญเสียที่ผิวเมมเบรน จะสามารถรักษาอัตราไหล เวลากักเก็บในถังปฏิกรณ์ให้คงที่ ระบบจะมีภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตรสม่ำเสมอ เมื่อไม่มีการจำกัดอายุสลัดจ์ สารอาหารที่ระบบได้รับไม่เพียงพอต่อจำนวนจุลชีพ มีการใช้อาหารที่สะสมภายในเซลล์ จากเซลล์ที่แตกตาย ที่สุดอาหารทั้งหมดจะถูกนำไปใช้สร้างทดแทนเซลล์ที่ตาย และที่ถูกแยกออกจากการแขวนลอยมาสะสมค้างที่ผิวหน้าเมมเบรน (สังเกตจากความดันสูญเสีย) ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส.จะสม่ำเสมอคงตัว ระบบสามารถเข้าสู่สถานะคงตัวแฝง (Pseudo Steady state) ในช่วงการเจริญแบบเอ็นโดจีนัส

ความคงตัวในการทำงานของเมมเบรน : การควบคุมค่าฟลักซ์ให้คงที่ ค่าความดันสูญเสียในระบบกรอง จะใช้บ่งบอกความคงตัว และควบคุมการทำงาน การเพิ่มค่าฟลักซ์ 0.06-0.09 ลิตร/ตร.ม.วัน (เปลี่ยนค่าเวลา กักเก็บ 24-16 ชม.) มีผลกระทบต่อความดันในการกรองผ่านเมมเบรน 4.6-6.3 KPa.(Pm.) การเพิ่มค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์เชิงปริมาตร โดยการเพิ่มค่าซีโอดีในน้ำเสียเข้า และการเพิ่มอัตราไหล ค่าเอ็มแอลวีเอสเอส.เปลี่ยนแปลง 2,500-5,200 มก./ล. อัตราเร็วและความเข้มข้นการสะสมของสลัดจ์ที่ผิวหน้าเมมเบรนจะส่งผลต่ออัตราการเพิ่มความดันสูญเสียสลัดจ์สะสม (Pd.)

ระบบการสร้างแรงเฉือนต่อผิวเมมเบรนได้แก่ การเติมอากาศ ฉีดพ่นอากาศ และปั๊มหมุนเวียนน้ำภายใน เป็นหัวใจในการช่วยขจัดหรือชะลอ การสะสมของสลัดจ์ ระบบทำงานได้นานก่อนถึงความดันวิกฤติ (Pmax - Pm. = Pd.max (20-30 KPa.)) การออกแบบควรพิจารณาระหว่างปริมาณความต้องการออกซิเจนของจุลชีพที่ภาระบรรทุกสูงสุด ปริมาณ-ความดันอากาศ และน้ำ ของระบบสร้างแรงเฉือนที่ผิวหน้าเมมเบรน โดยสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์ ค่าเอ็มแอลแอสเอส. วีเอสเอส. ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการเพิ่มของความดันสูญเสีย และความคงตัวของเมมเบรน ให้เหมาะสมทั้งด้านเทคนิค และเศรษฐศาสตร์

การเกาะสะสมสลัดจ์ในรูเมมเบรน และการอุดตัน สังเกตุจาก ความดันในการกรองผ่าน (Pm.) จะสูงขึ้น 7.9 KPa. แม้ค่าฟลักซ์คงที่ และความดันสูญเสียรวมเพิ่มสูงทันทีทันใด ตามลำดับ การหยุดระบบเพื่อแก้ไขการอุดตันในทันทีที่สังเกตุพบ จะช่วยรักษาประสิทธิภาพของเมมเบรน และอายุใช้งานได้ยาวนานขึ้น

5.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอาคารสูงของระบบเอสเอ็มเอฟ-เอ็มบีอาร์

ผลการทดลองได้แสดงประสิทธิภาพ ความคงตัวที่สูงของระบบ ในการกำจัดความขุ่น เอสเอส. สารอินทรีย์ และไนโตรเจน สรุปผลการทดลองดังตารางที่ 5.1 ไมโครฟิลเทรชันเมมเบรนสามารถกักแยกสลัดจ์จุลชีพออกจากน้ำใส และไม่สามารถตรวจพบฟีคัลโคไลฟอร์มแบคทีเรียได้ในทุกการวิเคราะห์

<u>การกำจัดความขุ่น ของแข็งแขวนลอย</u> : ระบบมีความคงตัว และประสิทธิภาพสูงในการกำจัดความขุ่น และของแข็งแขวนลอย โดยมีประสิทธิภาพมากกว่า 99% ในทุกสภาวะ เท่าที่ไม่เกิดความเสียหายกับเมมเบรน และข้อต่อต่างๆ ด้วยกลไกการกรองติดค้าง

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดลองเฉลี่ยที่สถานะคงตัว ประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียอาคารสูง

EXP.1	pH	Turbi. NTU.	SS. mg./l.	COD. mg./l	MLSS mg./l	VSS. mg./l	TKN. mg./l.	TN. mg./l	COD./ TKN.	% Nitri.	% De nitri	% TN.
Inf.	7.32	38.6	51	167	66.4%		61.3	63.3				
Rec.(%)	7.00	(99.6)	(99.1)	(91.2)	3,704	2,461	222	-	2.72	98.2	-	-
Eff.	7.25	0.1	0.47	14.7			1.0	60.5				

EXP.2	pH	Turbi. NTU.	SS. mg./l.	COD. mg./l	MLSS mg./l	VSS. mg./l	TKN. mg./l.	TN. mg./l	COD./ TKN.	% Nitri.	% De nitri	% TN.
Inf.	7.16	51.5	118.7	473	85.2%		65.3	67.7				
Rec.(%)	7.05	(99.8)	(99.5)	(95.8)	4,027	3,431	281	-	7.23	98.1	87.8	86.2
Eff.aero	-	-	-	20.0			0.4	-				
Eff.anx	-	-	-	18.8			2.1	-				
Eff.avg.	7.30	0.1	0.6	19.7			1.3	10.5				

ต่อ

EXP.3	pH	Turbi. NTU.	SS. mg./l.	COD. mg./l	MLSS mg./l	VSS. mg./l	TKN. mg./l.	TN. mg./l	COD./ TKN.	% Nitri.	% De nitri	% TN.
Inf.	7.21	61.0	119	463	87.9%		87.1	89.4				
Rec.(%)	6.98	(99.9)	(99.4)	(95.3)	4,453	3,915	392	-	5.32	97.0	90.7	87.7
Eff.aero	-	-	-	20.2			1.2	-				
Eff.anx	-	-	-	22.4			4.6	-				
Eff.avg.	7.23	0.1	0.7	21.3			2.9	11.1				

EXP.4	pH	Turbi. NTU.	SS. mg./l.	COD. mg./l	MLSS mg./l	VSS. mg./l	TKN. mg./l.	TN. mg./l	COD./ TKN.	% Nitri.	% De nitri	% TN.
Inf.	7.12	45.1	114.4	387	89.2%		62.6	64.1				
Rec.(%)	7.15	(99.8)	(99.9)	(96.2)	5,789	5,165	482	-	6.18	94.5	92.7	87.6
Eff.aero	-	-	-	13.0			1.4	-				
Eff.anx	-	-	-	16.1			5.4	-				
Eff.avg.	7.26	0.1	0.2	14.5			3.4	7.9				

EXP.5	pH	Turbi. NTU.	SS. mg./l.	COD. mg./l	MLSS mg./l	VSS. mg./l	TKN. mg./l.	TN. mg./l	COD./ TKN.	% Nitri.	% De nitri	% TN.
Inf.	7.82	36.1	48.6	129	91.4%		61.0	61.9				
Rec.(%)	7.16	(99.7)	(99.8)	(87.3)	2,570	2,349	234	-	2.11	97.0	41.1	40.2
Eff.aero	-	-	-	15.5			0.9	-				
Eff.anx	-	-	-	16.1			4.1	-				
Eff.avg.	7.27	0.1	0.1	14.7			2.5	38.6				

การกำจัดสารอินทรีย์ : ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เฉลี่ยกว่า 90 % คงตัวสูง คุณภาพน้ำออกเป็นอิสระจากภาระบรรทุกสารอินทรีย์ แต่ขึ้นกับ ค่าอายุสลัดจ์ (กำหนดนิเวศน์ในถังปฏิกรณ์) และค่าคงที่ทางจลศาสตร์ ทุกการทดลองไม่ควบคุมอายุสลัดจ์ อัตราส่วนสารอาหารต่อจุลชีพมีค่าต่ำในช่วง 0.08-0.15 g.COD./g.VSS.d. ซีโอดีในน้ำออกเฉลี่ย 15 มก./ล. ซึ่งย่อยได้ยากทางชีวภาพ ความคงตัวของเมมเบรน ทำให้ละทิ้งปัญหาสลัดจ์หัวเข็มหมุด สลัดจ์ไม่จมตัว ได้อย่างสิ้นเชิง

รูปแบบการเติมอากาศต่อเนื่อง และเป็นช่วงๆ ไม่ส่งผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ ต่างกันที่พันธุ์เด่นของจุลชีพเป็น แอโรบิคแท้ใช้ออกซิเจนอิสระเพียงอย่างเดียว และแฟคคัลเททีฟ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะแอโรบิค และแอนนอกซิค จุลชีพจะสามารถใช้ทั้ง ออกซิเจนอิสระ และออกซิเจนจากไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็คตรอน ตามลำดับ ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้พร้อมกันทั้งสองสภาวะอย่างต่อเนื่อง

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น : จากสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม อุณหภูมิ พีเอช (ความเป็นด่าง) ออกซิเจนละลายกว่า 2 มก./ล อายุสลัดจ์ยาวนาน ระบบมีประสิทธิภาพปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น 94-98 % ซึ่งที่อัตราส่วนซีโอดีต่อทีเคเอ็นต่ำ การทดลองที่ 1 , 5 มีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นสูงกว่า การทดลองที่ 2-4 เล็กน้อย

รูปแบบการเติมอากาศเป็นช่วงๆ ส่งผลให้เกิดการจำกัดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่นจน ค่าทีเคเอ็นสะสมเพิ่มขึ้นช่วงแอนนอกซิค และมีค่าเฉลี่ยสองสภาวะสูงขึ้นกว่าระบบเติมอากาศต่อเนื่องซึ่ง เป็นสภาวะแอโรบิคตลอดเวลา รอบเวลาเติมอากาศเป็นช่วงๆเพิ่มขึ้น 90 ,120 นาที และเวลากักเก็บลดลง 24 ,16 ชม. ทำให้ผลต่างค่าทีเคเอ็นสะสมในช่วงแอโรบิค-แอนนอกซิคสูงขึ้น ประสิทธิภาพไนตริฟิเคชั่น เฉลี่ยลดลงเล็กน้อย 2-4%

สรุปได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพไนตริฟิเคชั่นเฉลี่ยที่สภาพแวดล้อม เดียวกันคือ อัตราส่วนซีโอดีต่อทีเคเอ็น การสะสมของค่าทีเคอ็นจากการถูกจำกัดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น เนื่องจาก รูปแบบและรอบเวลาการเติมอากาศ เวลากักเก็บ แต่ส่งผลน้อยอย่างค่อยเป็นค่อยไป

ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่น : การเปลี่ยนรูปแบบจากการเติมอากาศต่อเนื่อง มาเป็นช่วงๆ และมีสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นแหล่งอาหารคาร์บอน ในการทดลองที่สภาพแวดล้อมเดียวกัน ส่งผลให้ เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่นประสิทธิภาพ 40-90 %

จากผลการทดลองที่ 3 และ 2 สรุปได้ว่า ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อทีเคเอ็นเท่ากัน รอบเวลาเติมอากาศ 120 นาที มีประสิทธิภาพดีไนตริฟิเคชั่น และการกำจัดไนโตรเจนสูงกว่าที่ 90 นาที

จากผลการทดลองที่ 3 และ 4 สรุปได้ว่า การลดค่าเวลากักเก็บในถังปฏิกรณ์จาก 24 เป็น 16 ชม. จะเพิ่มค่าภาระบรรทุกทีเคเอ็น และสารอินทรีย์ ซึ่งไม่ส่งผลต่ออัตราปฏิกิริยาจำเพาะใดๆ แต่ผลต่างการสะสมค่าไนเตรทช่วงแอโรบิคเพิ่มขึ้น ซึ่งที่อัตราส่วนซีโอดีต่อทีเคเอ็นเท่ากัน ค่าไนเตรท เฉลี่ยในน้ำทิ้งสองสภาวะจะสูงขึ้น มีผลกระทบทางอ้อมให้ประสิทธิภาพดีไนตริฟิเคชั่นต่ำลงเล็กน้อย

ผลการทดลองที่ 4 , 5 ประสิทธิภาพปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่น 41.0-90.7-93.0 % แปรผันตามอัตราส่วนซีโอดีต่อทีเคเอ็นในน้ำเสีย 2.1-5.3-6.2 ที่สภาพแวดล้อมเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4.37 และเป็นตัวกำหนดระดับค่าไนเตรทเฉลี่ยในน้ำทิ้ง สูง-ต่ำ-ต่ำสุด ตามลำดับ ผลต่างการสะสมของไนเตรท จากการถูกจำกัดปฏิกิริยาดีไนตริฟิคชั่นช่วงแอโรบิค จะแปรผันตามภาระบรรทุกทีเคเอ็น และการมีอัตรา ส่วนซีโอดีต่อทีเคเอ็นกว่า 6.2 ค่าไนเตรทปลายแอนนอกซิคจะต่ำกว่า 0.5-1.0 มก./ล.มีผลกับประสิทธิภาพ ดีไนตริฟิเคชั่นน้อยลง ขณะที่การสะสมของไนเตรทช่วงแอโรบิคที่เพิ่มขึ้น ค่าไนเตรทเฉลี่ยจะสูงขึ้นได้

สรุปได้ว่า อัตราส่วนซีโอดีต่อทีเคเอ็น คือปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อระดับค่าไนเตรท เฉลี่ยในน้ำออก และประสิทธิภาพดีไนตริฟิเคชั่นเฉลี่ยอย่างชัดเจน และการสะสมของค่าไนเตรทจากการ ถูกจำกัดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชั่นช่วงแอโรบิค จะสัมพันธ์กับ รอบเวลาเติมอากาศเป็นช่วงๆ เวลากักเก็บ และภาระบรรทุกทีเคเอ็น แต่ส่งผลทีละน้อยอย่างค่อยเป็นค่อยไป

6.3 ความเหมาะสมของคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในการนำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมของอาคารสูง

จากการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่บำบัด กับค่ามาตรฐานการนำกลับน้ำเสียมาใช้ใหม่ขององค์กรรัฐ และเอกชน ที่มีผลงานการศึกษาทั้งด้านเทคโนโลยี และสถิติ ที่เชื่อถืออาทิ "US.EPA. , Japan Ministry of Construction , State of California , Florida Department of Environmental Protection" เป็นต้น พบว่าระบบเอสเอ็มเอฟ-เอ็มบีอาร์ มีศักยภาพ ความคงตัวสูง ในการเป็นระบบนำกลับน้ำเสียมาใช้ใหม่หลักรวมกระบวนการชีวภาพได้แก่ การกำจัดสารอินทรีย์ 90% และไนโตรเจน 40-90 % กระบวนการกรองด้วยเมมเบรน ได้แก่ กำจัดเอสเอส. ความขุ่น มากกว่า 99% กำจัดกักแยกสลัดจ์ชีวภาพ และแบคทีเรียก่อโรคด้วยถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียว น้ำที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพสูงคงตัว แม้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารมลพิษต่างๆในน้ำเสียจริงช่วงกว้างตามวัน เวลา และช่วงเวลาของปี

คุณภาพน้ำเฉลี่ยที่ผ่านการบำบัดมีค่า ความขุ่น 0.1 NTU. สี 0.9 SU. เอสเอส. ซีโอดี ทีเคเอ็น และไนโตรเจนทั้งหมด 0.4 , 15.0 , 2.2 และ 7.9-38.6 มก./ล. ตามลำดับ ปลอดภัยจากแบคทีเรียก่อโรค ได้แก่ โคไลฟอร์มและฟีคัลโคไลฟอร์ม แบคทีเรีย คุณภาพน้ำภาพรวม มีความเหมาะสมใช้งานได้ในกิจกรรมพื้นฐานเพื่อการอุปโภคน้ำในอาคารสูงซึ่งมีมากกว่า 70% ของความต้องการน้ำทั้งหมด แต่ทว่า มาตรฐานคุณภาพ เป็นเพียงแนวทางเบื้องต้นในการกำหนด ประสิทธิภาพ เทคโนโลยีที่ใช้ สัมพันธ์กับข้อมูลทางสถิติของความมีสุนทรีย์ภาพในการใช้น้ำ ทั้งนี้การยอมรับของสาธารณชนขึ้นกับปัจจัยพื้นฐานต่างกันไปตามสถานที่ และประเภทกิจกรรมการใช้งานอาคาร ซึ่งควรมีการศึกษาเฉพาะแต่ละโครงการ

6.4 แนวทางการประเมินต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบำบัดและนำกลับน้ำเสียมาใช้ใหม่ต่อหน่วยปริมาตร

ต้นทุนในการบำบัดรวมค่าเสื่อมราคาตลอดอายุใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ 130-190 บาท/ลบ.ม.สูงมากเมื่อเทียบกับราคาน้ำประปา จุดสำคัญคือ ชุดทดลองมีการลงทุนขั้นต้นที่สูง ไม่ได้สัดส่วนกับกำลังการผลิตที่ออกแบบ เนื่องจากราคาเมมเบรนต่อหน่วยกำลังผลิตตลอดอายุการใช้งาน มีราคาสูงมาก และต้นทุนขั้นต้นของอุปกรณ์ประกอบต่างๆอยู่ในระดับ "Commerial type" ซึ่งมีราคาสูง ในขณะที่ต้องออกแบบระบบให้ความกระทัดรัดเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ และงบวิจัย โดยยังไม่รวมปัจจัยบวกทางอ้อมอื่นๆ เช่น ต้นทุนการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง ราคาที่ดิน ต้นทุนการควบคุม และการซ่อมบำรุง เป็นต้น

ระบบแบบเติมอากาศต่อเนื่องประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า แต่สิ้นเปลืองสารปรับพีเอชมากกว่าระบบเติมอากาศเป็นช่วงๆ เนื่องจากปั๊มหมุนเวียนน้ำภายใน (ถ้าไม่ถูกจำกัดพื้นที่เครื่องกลกวนผสมอื่นๆจะประหยัดพลังงานมากกว่า) และปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ความเป็นด่างกลับคืน ตามลำดับ ทำให้ต้นทุนการผลิตไม่รวมค่าเสื่อมใกล้เคียงกัน คือ 10.5-15.8 บาท/ลบ.ม.

6.5 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยครั้งต่อๆไป

ศึกษาความเหมาะสมคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ระหว่างการไม่ควบคุมและควบคุมอายุสลัดจ์เพื่อการประหยัดพลังงาน กับค่าใช้จ่ายในการขนส่งหรือกำจัดสลัดจ์ส่วนเกิน ในอาคารสูงใจกลางเมือง

ศึกษาในระบบขนาดใหญ่ หรือโครงการจำลอง ระหว่างการนำกลับน้ำเสียมาใช้ใหม่โดยระบบเอสเอ็มเอฟเอ็มบีอาร์กับระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง สาม กับค่าน้ำประปา ร่วมกับปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ

ศึกษาอัตราส่วนเวลา แอโรบิค-แอนนอกซิค ในการกำจัดไนโตรเจนเพิ่ม กับน้ำเสียหลายๆชนิด

ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัส ไนโตรเจน พร้อมสารอินทรีย์ โดยระบบเอ็มบีอาร์ แบบแอนแอโรบิคนำหน้า มีการเวียนเซลล์กลับ และควบคุมอายุสลัดจ์

การทดลองเพื่อผลทางทฤษฎี ควรใช้เมมเบรน และถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (กางไม่ถูกจำกัดเนื้อที่) หลายๆชุด ทดลองได้หลายตัวแปรพร้อมกัน และซ่อมบำรุงสะดวก

งานวิจัยด้วยเมมเบรนชนิดผสานการเติมอากาศผ่านเส้นใยกลวง และล้างย้อนสลัดจ์สะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนพร้อมกัน (Membrane as solid/liquid separator and air diffusor) กำลังเป็นที่สนใจ แต่ยังมีราคาต้นทุนที่สูงมาก