

รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเมมเบรนจมตัว
เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำทิ้งชุมชน

Application of Nanofibers in Submerged Membrane Wastewater
Treatment for Recycling of Domestic Wastewater

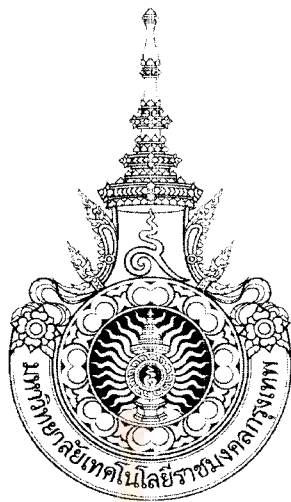
ผู้วิจัย

นางสาวมณีนรัตน์ ตีรนนทกุล

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2555

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเมมเบรนจมตัว
เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำทิ้งชุมชน

**Application of Nanofibers in Submerged Membrane Wastewater
Treatment for Recycling of Domestic Wastewater**

ผู้วิจัย

นางสาวมณีนรรัตน์ ตีรนนท์กุล

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2555

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทคัดย่อ

ศึกษาความเป็นไปได้และปัจจัยที่มีผลต่อการประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์เพื่อลดการอุดตันของเมมเบรนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำทิ้งชุมชน จากผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาการดำเนินงานเพิ่มขึ้นจะทำให้สารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำและสารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ประเภทโปรตีนและประเภทคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้นมากกว่าเท่าตัว และพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นจุลินทรีย์จะส่งผลให้ความต้านทานภายในรูกรองเมมเบรนของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของปริมาณสารแขวนลอยที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลอย่างมากต่อการอุดตันของเมมเบรนและส่งผลให้ความต้านทานภายในของรูกรองเมมเบรนเพิ่มขึ้นแบบเอกซิปแนนเชียล การเพิ่มขึ้นของปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำในระบบที่มีและไม่มีการเติมนานาไฟเบอร์ในระบบจะมีค่าใกล้เคียงกันแต่ในระบบที่มีการเติมนานาไฟเบอร์จะมีค่าการอุดตันของเมมเบรนต่ำกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการเติมนานาไฟเบอร์อยู่โดยเฉลี่ย 9% ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ในระบบที่มีและไม่มีการเติมนานาไฟเบอร์ในระบบจะมีค่าใกล้เคียงกันและในระบบที่มีการเติมนานาไฟเบอร์จะมีค่าการอุดตันของเมมเบรนต่ำกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการเติมนานาไฟเบอร์อยู่โดยเฉลี่ย 16% การเพิ่มปริมาณการเติมนานาไฟเบอร์ระหว่าง 0 - 10 กรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ จะส่งผลให้เกิดการอุดตันของปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรนลดลงเป็นอย่างมากกว่า 50% การเพิ่มขึ้นของค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบจะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรน โดยการค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบระหว่าง 712 - 1,136 ไมโครซีเมนต์ จะส่งผลให้เกิดการอุดตันของปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นกว่า 45% การกรองที่สภาวะไม่มีการเติมนานาไฟเบอร์ในระบบจะมีค่าความต้านทานการกรองโดยรวมสูงกว่าระบบควบคุม 44% เนื่องจากการลดลงของการอุดตันภายนอกเป็นสาเหตุหลัก การวิเคราะห์คุณลักษณะการอุดตันของเมมเบรนทางกายภาพโดยภาพด้วย SEM พบว่าในระบบที่มีการเติมนานาไฟเบอร์มีรูกรองบางส่วนมีลักษณะอุดตันอยู่น้อยกว่ารูกรองเมมเบรนที่สภาวะไม่มีการเติมนานาไฟเบอร์ การศึกษาคุณลักษณะการบำบัดน้ำเสียในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน พบว่าน้ำขาออกที่ผ่านการบำบัดจะมีพีเอชอยู่ระหว่าง 7.08 - 6.73, อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25.1 - 29.5 องศาเซลเซียส, ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำ 2.72 - 3.52 มิลลิกรัมต่อลิตร, ความเข้มข้นจุลินทรีย์เป็นศูนย์, ความเข้มข้นแอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร, ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต - ฟอสฟอรัสของระบบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 14%, ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์ของระบบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 81% จากผลการบำบัดที่ได้พบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบเติมนานาไฟเบอร์

ABSTRACT

This research project was to study feasibility of using nanofiber to reduce membrane fouling in membrane bioreactor (MBR) for wastewater treatment. The results showed that when the operation time increased, the extra-cellular polymeric substances (EPS) in both soluble and bound forms were increased. Gaining of MLSS affected on higher membrane fouling resistance. Also, there was an exponential relationship between colloidal concentration and fouling resistance. With nanofiber addition, a reduction 9 % and 16% of membrane fouling due to soluble EPS and bound EPS were observed. Moreover, nanofiber addition in the range of 0-1 g/g MLSS would help to decrease membrane fouling upto 50%. Increase of conductivity from 712 μS to 1,136 μS affected on 45% fouling resistance increasing. Application of nanofiber would help to reduce cake fouling in the system upto 44%. The SEM examination showed that far less cake fouling on membrane surface in the added chitosan MBR. Characteristics of domestic wastewater treatment from this MBR system were as well examined. The treated permeate illustrated pH 7.08 – 6.73, temperature 26.7 – 28.3 $^{\circ}\text{C}$, dissolved oxygen 2.72 – 3.52 mg/L, zero biomass concentration and ammonia-nitrogen concentration below 1 mg/L. Efficiency of phosphate-phosphorous removal was around 14% and COD removal was 81% by average. From the treated quality of permeate, the domestic wastewater could be possible reclaimed and reused by this MBR technology.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2555 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง และท้ายสุดขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา (สวพ.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่อำนวยความสะดวกในการตรวจทานเล่มงานวิจัย



สารบัญ

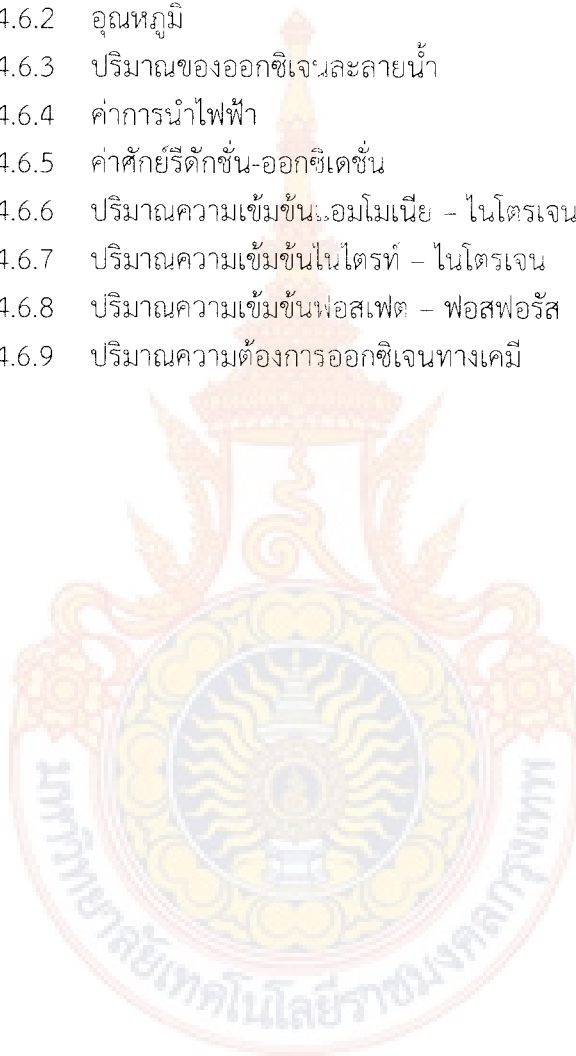
หน้า

บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	5
2.1 การตรวจสอบเอกสาร	5
2.2 น้ำเสีย	8
2.3 การบำบัดน้ำเสีย	13
2.4 เทคโนโลยีเมมเบรน	19
2.5 นาโนไฟเบอร์	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	39
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	39
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
3.3 ขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์ค่าต่างๆในการทดลอง	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง	52
4.1 ผลการหาค่าความต้านทานของเมมเบรนในน้ำสะอาด	52
4.2 ผลการจับตัวของนาโนไฟเบอร์กับสารโพลีเมอร์ชีวภาพ	53
4.3 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอุดตันของเมมเบรน	56
4.3.1 ผลของความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์	56
4.3.2 ผลของความเข้มข้นของสารแขวนลอย	57
4.3.3 ชนิดและปริมาณของสารโพลีเมอร์ชีวภาพ	58
4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีต่อการเติมนาโนไฟเบอร์	59
4.5 คุณลักษณะการอุดตันของเมมเบรนที่ใช้ในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ	61
4.5.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะการอุดตันของเมมเบรน	
โดยการพิจารณาความต้านทานเชิงกลศาสตร์	61
4.5.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะการอุดตันของเมมเบรน	
ทางกายภาพโดยภาพถ่าย SEM	63

สารบัญ

หน้า

4.6	คุณลักษณะการบำบัดน้ำเสียในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน	64
4.6.1	พีเอช	64
4.6.2	อุณหภูมิ	65
4.6.3	ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำ	66
4.6.4	ค่าการนำไฟฟ้า	67
4.6.5	ค่าศักย์รีดักชัน-ออกซิเดชัน	68
4.6.6	ปริมาณความเข้มข้นแอมโมเนีย – ไนโตรเจน	69
4.6.7	ปริมาณความเข้มข้นไนไตรท์ – ไนโตรเจน	70
4.6.8	ปริมาณความเข้มข้นฟอสเฟต – ฟอสฟอรัส	71
4.6.9	ปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมี	72
บทที่ 5	สรุปผล	74
	บรรณานุกรม	76
	ภาคผนวก	80



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้ทรัพยากรน้ำในด้านต่างๆ นั้นจะมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ จะส่งผลทำให้แหล่งน้ำเกิดการเน่าเสีย เป็นพิษ มีสิ่งเจือปนสูง และเป็นมลภาวะทางน้ำ จึงต้องนำน้ำเสียเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดปริมาณของเสีย สารแขวนลอย และความเป็นพิษของน้ำให้ลดลง ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งธรรมชาติ ในการบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันมีระบบการบำบัดที่มากมายในการบำบัดน้ำทิ้งจากแหล่งอุตสาหกรรมและบ้านเรือน ระบบที่มีความนิยมสำหรับการบำบัดน้ำเสียจะเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ ระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์นี้จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่การใช้ระบบบำบัดแบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์จะมีข้อเสียคือ คุณภาพน้ำที่ได้ยังมีสารแขวนลอยปนเปื้อนอยู่ในน้ำมาก และระบบนี้ต้องใช้พื้นที่ในการบำบัดมาก

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเมมเบรนเป็นเทคโนโลยีที่มีความทันสมัย เนื่องจากคุณสมบัติของเมมเบรนจะมีเยื่อกรองขนาดเล็ก มีความละเอียดในการกรอง สามารถกรองสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กได้ และกำจัดเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในระบบบำบัดน้ำเสียได้มีการนำถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (Membrane bioreactor: MBR) เข้ามาประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ ในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน จะเกิดสารโพลีเมอร์ชีวภาพ (Extracellular polymeric substances: EPS) สารโพลีเมอร์ชีวภาพในระบบบำบัดน้ำเสียจะมีลักษณะในรูปของสารละลายและสารแขวนลอย สารโพลีเมอร์ชีวภาพจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ เมื่อความเข้มข้นของตะกอนในน้ำเสียกับอายุสลัดจ์ที่เพิ่มขึ้น (Anja, Chung and Matthias, 2006) สารโพลีเมอร์ชีวภาพเกิดจากการสังเคราะห์ของแบคทีเรียที่อาศัยอยู่รวมกัน โดยมีโครงสร้างที่ยึดเกาะจับตัวกันสารโพลีเมอร์ชีวภาพที่แบคทีเรียสังเคราะห์ขึ้นจะมีหน้าที่ปกป้องชั้นผิวแบคทีเรีย และสร้างสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (สมบุญ.ม.ป.ป.) ลักษณะของสารโพลีเมอร์ชีวภาพที่แบคทีเรียสังเคราะห์ขึ้นจะมีสองรูปแบบ คือ รูปแบบแคปซูล (Capsule) มีลักษณะเป็นแคปซูลห่อหุ้มบริเวณตัวเซลล์ และรูปแบบเยื่อเมือก (Slime) มีลักษณะคล้ายของเหลวละลายตัวในน้ำ (ศิริพร และคณะ, 2549) ซึ่งจะเกาะตรงบริเวณผิวเมมเบรนทำให้เกิดการอุดตัน สารโพลีเมอร์ชีวภาพจะอุดตันบนผิวของเมมเบรนทำให้ประสิทธิภาพในการกรองของเมมเบรนลดลง

การอุดตันของเมมเบรน (Fouling) อันเนื่องมาจากอนุภาคจุลินทรีย์สร้างโพลีเมอร์สะสมตัวอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนและปิดกั้นรูพรุน ทำให้ความสามารถในการกรองผ่านลดลง ซึ่งส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของระบบ ค่าการล้างย้อนเมมเบรน และประสิทธิภาพของระบบ

งานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจศึกษาความเป็นไปได้ ในการประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์เพื่อป้องกันก่อดั้วของโพลีเมอร์ชีวภาพที่เกิดจากจุลินทรีย์บนผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้การอุดตันของเมมเบรนเกิดช้าลง รวมถึงศึกษาคุณภาพและความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำทิ้งชุมชน เพื่อเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหามลภาวะ รักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม และเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกแนวทางใหม่ของระบบบำบัดให้เหมาะสมกับน้ำทิ้งชุมชนในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และปัจจัยที่มีผลต่อการประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์เพื่อลดการอุดตันของเมมเบรนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำทิ้งชุมชน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของนาโนไฟเบอร์กับการจับตัวและพฤติกรรมการสร้างสารโพลีเมอร์ชีวภาพที่จุลินทรีย์ในระบบผลิตได้ (Extracellular polymeric substances: EPS) ได้แก่ Bound EPS และ Soluble EPS เป็นต้น

1.3.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอุดตันของเมมเบรนในระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารแขวนลอย (Colloidal concentration) ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (Mixed liquor suspended solid: MLSS) ปริมาณและชนิดของสารโพลีเมอร์ชีวภาพ

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อการจับตัวกันของโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรนเมื่อมีการประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์ในระบบ ได้แก่ ปริมาณการเติมนาโนไฟเบอร์ ค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้า เป็นต้น

1.3.4 ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการอุดตันของเมมเบรน เมื่อมีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ด้วยเทคนิคทางเคมีและทางกายภาพ ได้แก่ Scanning Electronmicroscope (SEM) การเปลี่ยนแปลงของความดันตกคล่อม (Pressure drop) และการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการกรอง (Filtration resistance) เป็นต้น

1.3.5 ศึกษาคุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนเมื่อมีและไม่มีการนาโนไฟเบอร์ โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณภาพของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัด ได้แก่ ค่า COD ค่าปริมาณธาตุอาหาร เช่น แอมโมเนีย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

1.4.1 ทราบถึงคุณลักษณะเฉพาะของนาโนไฟเบอร์กับการจับตัวและพฤติกรรมการสร้างสารโพลีเมอร์ชีวภาพที่จุลินทรีย์ในระบบผลิตได้ (Extracellular polymeric substances: EPS) ได้แก่ Bound EPS และ Soluble EPS เป็นต้น

1.4.2 ทราบตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเริ่มต้นของเมมเบรนในระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารแขวนลอย (Colloidal concentration) ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (Mixed liquor suspended solid: MLSS) ปริมาณและชนิดของสารโพลีเมอร์ชีวภาพ

1.4.3 ทราบถึงปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อการจับตัวกันของโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรนเมื่อมีการประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์ในระบบ ได้แก่ ปริมาณการเติมนาโนไฟเบอร์ ค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้า เป็นต้น

1.4.4 ทราบลักษณะการอุดตันของเมมเบรน เมื่อมีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ด้วยเทคนิคทางเคมีและทางกายภาพ ได้แก่ Scanning Electronmicroscope (SEM) การเปลี่ยนแปลงของความดันตกคูลอม (Pressure drop) และการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการกรอง (Filtration resistance) เป็นต้น

1.4.5 ทราบถึงคุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน เมื่อมีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณภาพของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบ ได้แก่ ค่า COD ค่าปริมาณธาตุอาหาร เช่น แอมโมเนีย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น

1.4.6 เพื่อเป็นต้นแบบและเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกแนวทางใหม่ของระบบบำบัดให้เหมาะสมกับน้ำทิ้งชุมชน

1.4.7 ลดปัญหามลภาวะ และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม โดยการเพิ่มโอกาสและความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำทิ้งชุมชน

1.4.8 สามารถนำความรู้ไปเผยแพร่/ถ่ายทอดให้แก่ชุมชนและผู้สนใจ

1.5 ประมวลศัพท์และคำย่อ

MBR	=	Membrane bioreactor คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนเป็นการทำงานร่วมกันของถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับเมมเบรน
MLSS	=	Mixed liquor suspended solids คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นโดยประมาณของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร
DO	=	Dissolved Oxygen คือปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
COD	=	Chemical oxygen demand คือ ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมี มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
BOD5	=	Biochemical oxygen demand คือ ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ชนิดที่ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

- $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ = Ammonia-nitrogen คือปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
- $\text{NO}_2\text{-N}$ = Nitrite คือ ปริมาณไนไตรท์ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร
- P = Phosphorus คือ ปริมาณฟอสเฟอรัส มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร
- EPS = Extracellular polymeric substance คือ สารประกอบพอลิเมอร์ที่หลั่งออกมา
นอกเซลล์และเกิดจากของแข็งแขวนลอย



บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและบทความเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียชุมชนและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยเมมเบรน

2.1 การตรวจสอบเอกสาร

Dhermendra K และคณะ (2008) ได้ศึกษาการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในการทำน้ำให้สะอาด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพิษ และเชื้อโรค ในปัจจุบันพบว่าได้มีการใช้ อนุภาคนาโน นาโนเมมเบรน และนาโนชนิดผง มาใช้ในการบำบัดโดยมีการควบคุมด้วยกระบวนการทางเคมีและชีววิทยา สารโลหะที่พบ ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว บรอมีน นิเกิลและสังกะสี สารอาหารที่มีอยู่ได้แก่ ฟอสเฟส แอมโมเนียม ไนเตรต และไนไตรท์ ไซยาไนต์ สารอินทรีย์ และแบคทีเรียที่เป็นพิษ ได้แก่ ไวรัส แบคทีเรีย ปรสิต เทคนิคขั้นพื้นฐานของวัสดุในระดับนาโนมี 4 ระดับ สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ได้แก่ อนุภาคนาโนที่เป็นโลหะ คาร์บอน วัสดุนาโน และซีโอไลท์ โดยคาร์บอนนาโนทิวป์และนาโนไฟเบอร์ได้แสดงผลดีในด้านบวก วัสดุนาโนได้แสดงผลที่ดีมากสำหรับเทคนิคที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง การนำเสนอนี้ครั้งนี้สามารถนำไปใช้ในการทำน้ำให้สะอาด โดยการบำบัดคอลลิฟอร์มที่แบคทีเรียสร้างขึ้น ด้วยวิธีฉายรังสีและอัลตราโซนิก โดยใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่น้อย การใช้อนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นต่ำสามารถจะช่วยป้องกันแบคทีเรีย ในอนาคตวิธีนี้อาจเป็นทางเลือกเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

Guoqiang Liu และคณะ (2011) ได้ศึกษาการใช้อนุภาคนาโนมาประยุกต์ในระบบบำบัดน้ำเสียในอนาคตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การศึกษาศักยภาพของอนุภาคนาโนในกระบวนการแอกติเวเตดสลัดจ์ โดยการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำ ความเป็นพิษของอนุภาคซิงค์นาโนในการกระตุ้นระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ เพื่อทำการย่อยสลาย BOD และไนโตรฟิเคชัน พฤติกรรมของความเป็นพิษของอนุภาค อนุภาคซิงค์นาโน และ ซิงค์ไอออน (อนุภาคซิงค์นาโน ที่ละลายน้ำ) ที่ใช้ศึกษาลักษณะของอนุภาคซิงค์นาโน ทั้งสามชนิดจะมีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในแอกติเวเตดสลัดจ์โดยอนุภาคซิงค์นาโน ที่ละลายน้ำจะเป็นพิษสูง ผลของอนุภาคซิงค์นาโน และ กลุ่มก้อนอนุภาคซิงค์นาโนในระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ อนุภาคซิงค์นาโนที่ละลายน้ำจะส่งผลให้เกิดการแตกตัวของอนุภาค โดยมีค่า IC_{50} ของซิงค์ที่ละลายน้ำในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ การย่อยสลาย BOD แอมโมเนีย และไนไตรท์ ที่ 2.2, 1.3, 0.8, และ 7.3 mg-Zn/L ตามลำดับ เป็นขั้นตอนแรกของปฏิกิริยาไนโตรฟิเคชันในการตอบสนองของซิงค์

Anja และคณะ (2006) พบว่า EPS ที่ละลายน้ำเป็นสารแขวนลอย ที่ทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนโดยมีปัจจัยต่างๆ ของน้ำเสีย ได้แก่ อัตราการบ้อนสลัดจ์ อายุของสลัดจ์ ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำ ความเค้น ความเครียด และระยะเวลาเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์มีผลต่อความเข้มข้นของ EPS ในสภาวะไม่คงที่ ระยะการบ้อนสลัดจ์ไม่สม่ำเสมอการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ใช้ ทั้งหมดเป็นปัจจัยทำให้ EPS เพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบกับรูปแบบของการอุดตัน ได้แก่ ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ ขนาดของการอุดตันของสลัดจ์ และความเข้มข้นของ EPS ที่ละลายน้ำ ผลและการวิเคราะห์ค่าต่างๆ ในการทดลองจะมีผลที่ต่างกัน ในบทความนี้จะตรวจสอบผลจากแหล่งต่างๆ ในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดและบทบาทของ EPS ในการ อุดตันของเมมเบรน

Babara และคณะ (2009) พบว่า EPS จากแบคทีเรียที่ผลิตสารโพลีเมอร์ชีวภาพของแบคทีเรียจะประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน กรดนิวคลีอิก ลิพิด และชีวมิติ EPS ที่สร้างขึ้นในเซลล์แบคทีเรียมีโครงสร้างเป็นก้อนของไบโอฟิล์ม EPS มีหน้าที่เป็นตัวกลางในการยึดเกาะระหว่างเซลล์กับพื้นผิว เพื่อป้องกันอันตรายจากความเค้น ความเครียด และความแห้งของตัวเซลล์ จุดประสงค์เพื่อเป็นพื้นฐานในการค้นหาหน้าที่ของ EPS ในแบคทีเรียที่อยู่ในรูปของไบโอฟิล์มซึ่งมีผลต่อ กระบวนการทางชีววิทยา เทคโนโลยีชีวภาพ อุตสาหกรรม เกษษกรรม วิศวกรรมอาหาร ศัลยศาสตร์โครงสร้างที่แปรผันของ EPS ที่ผลิตจากแบคทีเรีย จะมีผลหลายอย่างกับตัวอย่างที่ใช้ในการประยุกต์ไบโอเทคโนโลยี และจะทำการวัดค่าถึงขั้นตอนสุดท้ายของเทคนิคแบบใหม่ๆ ที่ศึกษา ลักษณะจำเพาะของไบโอฟิล์มในโพลีแซคาไรด์

Tae-Hyun Bae and Tae-Moon Tak (2005) กล่าวว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (MBR) นิยมใช้มากในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจะมีปัญหาในการอุดตันเมมเบรน ระบบนี้มีการศึกษาที่น้อยในการลดการอุดตัน การกรองแบบอัลตราฟิวเตรชั่น (TiO_2 แบบติดเมมเบรน) เป็นการกรองแอคทิเวเต็ดสลัดจ์ในการลดการอุดตัน ประสิทธิภาพเมมเบรนจะเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่ม TiO_2 อนุภาคนาโน TiO_2 แบบติดเมมเบรน จะแสดงการไหลของน้ำเพื่อเปรียบเทียบกับความสะอาดของเมมเบรน การเติมอนุภาคนาโนจะลดการอุดตัน แต่จะมีขอบเขตในการเติม การเติมมากเกินไปจะไม่ส่งผลลดการอุดตัน การอุดตันของเมมเบรนจะลดโดย TiO_2 เมมเบรนที่มี TiO_2 จะลดการอุดตันเมื่อเทียบกับ TiO_2 ที่ติดกับเมมเบรน ขนาดที่ใหญ่กว่าอนุภาคนาโนจะอยู่บนพื้นผิวของเมมเบรน มีวิธีมากมายสำหรับการลดการอุดตันในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

Magara และ Itoh (1991) และ Manem และ Sanderson (1996) พบว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของตะกอนชีวภาพ (MLSS) ส่งผลต่อแนวโน้มการอุดตันสูงขึ้นของเมมเบรน ในขณะที่ Defrance และ Jaffrin, 1999 และ Lee (2001) รายงานกลับกันถึงแนวโน้มการอุดตันที่น้อยลงของเมมเบรนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของตะกอนชีวภาพ

Wisniewski และ Grasmick (1998) ได้แยกองค์ประกอบในกระบวนการบำบัดแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนออกเป็นสามส่วนคือ ตะกอนชีวภาพ สารแขวนลอย และสารละลายใส และพบว่า องค์ประกอบของเฟสของเหลวส่งผลต่อความต้านทานการกรองของเมมเบรนในอัตราส่วน 76% ที่มาจากสารแขวนลอยและสารละลายใส 24% และ 52% ตามลำดับ โดยมีผลของตะกอนชีวภาพเพียง 24% สอดคล้องกับการรายงานของ Bouhabila และคณะ (2001) ในขณะที่ Defrance และคณะ (2000) และ Lee และคณะ (2001) กลับพบว่าเฟสสารละลายใสจะส่งผลต่อการอุดตันของเมมเบรน เพียง 35 และ 37% ตามลำดับและยังถือเป็นสัดส่วนที่น้อยกว่าผลของตะกอนชีวภาพมาก (63-65%)

Nagaoka และคณะ (1998); Chang และ Lee, (1998); Rosenberger และ Kraume, (2003); และ Hernandez Rojas และคณะ (2005) ร่วมกันรายงานว่า สารโพลีเมอร์ชีวภาพ (EPS) ซึ่งผลิตจากจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบจะมีผลเป็นอย่างมากต่อการเกิดและการควบคุมการอุดตันของเมมเบรน โดยสารโพลีเมอร์ชีวภาพนี้สามารถแบ่งแยกได้เป็นสองแบบ คือ สารโพลีเมอร์ชีวภาพที่มีอยู่ในตะกอนแขวนลอย และสารโพลีเมอร์ชีวภาพที่จุลินทรีย์ปล่อยออกมาอยู่ในรูปของสารละลายใส

Lee และคณะ (2003) พบว่า สัดส่วนของโปรตีนต่อคาร์โบไฮเดรตในโพลีเมอร์ชีวภาพมีความสำคัญต่อการอุดตันของเมมเบรนมากกว่าความเข้มข้นรวมของโพลีเมอร์ชีวภาพ รวมถึงค้นพบว่า องค์ประกอบของสารโพลีเมอร์ชีวภาพนี้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับผลการอุดตันของเฟสของเหลวใสในเมมเบรนเลย ในขณะที่ Hernandez Rojas และคณะ (2005) รายงานว่า สารโพลีเมอร์ชีวภาพที่มีอยู่ในตะกอนแขวนลอยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการกรอง และเฉพาะสารโพลีเมอร์ชีวภาพที่ละลายอยู่ในเฟสสารละลายใสเท่านั้นที่สัมพันธ์โดยตรงกับการอุดตันของเมมเบรน

Li และคณะ (1984) ได้หาความเป็นไปได้ในการใช้เมมเบรนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบไร้อากาศ (Membrane anaerobic reactor system) สำหรับบำบัดน้ำเสียจากหางนมหวาน (sweet whey) ในแบบจำลอง (pilot scale) มีค่าซีโอดี และบีโอดี 5 60,000 และ 35,000 มิลลิกรัม/ล. ตามลำดับ ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการแปรผันค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8 – 16 kg.COD/m³-day และ SRT 25 – 50 วัน พบว่าระบบสามารถกำจัดซีโอดีได้ 95% ที่ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 16 kg.COD/m³-day ของแข็งแขวนลอยในกระแสปล่อยออกต่ำกว่า 10 มิลลิกรัม/ล. ในขณะที่น้ำเข้ามีค่าของแข็งแขวนลอย 13,000 มิลลิกรัม/ล. ระบบสามารถดำเนินการได้ในช่วงมวลชีวภาพระหว่าง 0.06 – 0.12 kg.VSS/kg.COD removed ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยได้ในถังปฏิกรณ์มีค่าระหว่าง 22,000 – 26,000 มิลลิกรัม/ล. ผลตกค้างมีเทน 0.28 – 0.34 m³/kg.COD removed ที่ความดันและอุณหภูมิมาตรฐาน ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสีย

Sopajaree (1989) รายงานว่าที่ค่าอายุสลัดจ์ไม่จำกัด ค่าซีโอดีในน้ำขาออกไม่ขึ้นกับความลึกในการจมตัวของเมมเบรน ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.15 – 0.35 kg.COD./m²-day มี

ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี 90 – 98% ปฏิกริยาไนตริฟิเคชันเกิดได้กว่า 90% แต่จะต่ำลงเป็น 78% ที่เวลากักเก็บต่ำ และเมมเบรนอยู่สูงจากกันถึงจนเกิดการตกตะกอน ซึ่งค่าสัลไฟด์ซัลฟิฟในเขademอากาศมีค่าน้อย ความดันส่งผ่านจะมีค่าต่ำสุดที่ค่าพลักซ์เท่ากัน การเพิ่มอัตราไหลของอากาศจะลดการอุดตันและค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนลงได้

อริยะ (2543) ใช้ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนติดตั้งจมตัวในถังปฏิกรณ์เอเอส และใช้วิธีการเติมอากาศเป็นช่วงๆ พบว่า ที่รอบเวลาการเติมอากาศ 120 นาที เกิดปฏิกริยาไนตริฟิเคชัน 94 – 98% และดีไนตริฟิเคชัน 41 – 93 % ระบบสามารถกำจัดความขุ่น และของแข็งแขวนลอยได้มากกว่า 99 % กำจัดซีโอดีได้ 90 % และไนโตรเจน 40 – 90% ต้นทุนในการบำบัดต่อหน่วยมีค่าสูง เนื่องจากคิราคาคาเมมเบรนต่อหน่วยการบำบัดตลอดอายุการใช้งาน และอุปกรณ์ประกอบมีต้นทุนแรกเริ่มสูง ไม่ได้สัดส่วนกับกำลังผลิต ต้นทุนค่าพลังงานของระบบเติมอากาศเป็นช่วงๆ มีค่าสูง แต่มีต้นทุนค่าสารเคมีต่ำกว่าหลายเท่าตัว เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเติมอากาศต่อเนื่อง

ณัฐพันธ์ (2545) ทำการศึกษาประสิทธิภาพ และกลไกในการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบถังปฏิกรณ์เมมเบรนชีวภาพ แบบแอนน็อกซิก-แอนแอโรบิก-แอโรบิก โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ มีอัตราการป้อนน้ำเสียเฉลี่ย 96 ลิตรต่อวัน ค่าซีโอดี 325 มก./ล. ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด 7.9 มก./ล. และไนโตรเจน 35.8 มก.TKN/ล. จากผลการทดลองพบว่า อัตราการแบ่งน้ำเสียไม่มีผลต่อการกำจัดซีโอดี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เนื่องจากไนเตรตที่เวียนมาจากส่วนเดิมออกซิเจนของระบบมีค่าต่ำ ค่าอายุสัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นก็ไม่มีผลต่อการกำจัดสารมลภาวะ แต่อายุสัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดอนุภาคฟล็อกในระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงกว่า 97% ประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็นสูงกว่า 95 % ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูงกว่า 80% โดยมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเท่ากับ 171 บาท/ลบ.ม

นัทกาญจน์, 2546 ศึกษาการใช้ระบบถังปฏิกรณ์เมมเบรนชีวภาพ แบบแอนน็อกซิก-แอนแอโรบิก-แอโรบิก บำบัดน้ำเสียจากศูนย์การค้า ผลการทดลองพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 92-95 % ประสิทธิภาพในการกำจัดที่เคเอ็น 86-91 % ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส 62-92% โดยมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเท่ากับ 182 บาท/ลบ.ม

2.2 น้ำเสีย

น้ำเสีย คือ ของเสียที่อยู่ในสภาพของเหลว ที่เกิดจากการการอุปโภคบริโภคในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งจะทำให้คุณลักษณะของน้ำเปลี่ยนไปจากเดิมเนื่องจากมีสิ่งสกปรกต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ถ่ายเทเจือปนลงในน้ำนั้นในปริมาณสูงจนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้อีก (สุบัณฑิต, 2548) และมีลักษณะเน่าเสีย เป็นพิษ ถ้าปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติก็จะทำให้

เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำได้ การเจือปนนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของน้ำและเกิดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

2.2.1 ลักษณะของน้ำเสีย ที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆในชีวิตประจำวัน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

2.2.1.1 ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ (Physical characteristics) เป็นลักษณะของสภาวะมลพิษทางน้ำที่สามารถรับรู้ได้ แบ่งได้สามชนิด คือ

1) อุณหภูมิ (Temperature) เป็นระดับความร้อนที่ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ อุณหภูมิในแหล่งน้ำโดยปกติจะประมาณ 20 – 30 องศา อุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับของออกซิเจนในน้ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ออกซิเจนลดลง

2) สี (Color) ลักษณะสีของน้ำเสียจะมีสีขุ่น คล้ำ ตามสิ่งที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย นั้น สีของน้ำจะบ่งบอกการปนเปื้อนของน้ำที่มาจากแหล่งต่างๆ ที่ทำการปล่อยทิ้ง

3) กลิ่น (Odor) จะมาจากน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนจากสารเคมี สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียใช้บ่งชี้สภาวะของน้ำเสีย ส่วนมากจะเกิดจากก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (สุรศักดิ์, 2541)

4) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (Total Dissolved Solids; TDS) บ่งบอกถึงสิ่งที่เจือปนในน้ำ หรือสารที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ อาจเป็นสารอินทรีย์ หรือสารประกอบต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ

5) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสภาพการนำไฟฟ้า ความสามารถในการนำไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า เช่น สารอนินทรีย์ กรด ด่าง และเกลือ (วัชร, 2540)

2.2.1.2 ลักษณะน้ำเสียทางเคมี เกิดจากสารเคมีที่ถูกปล่อยทิ้งลงในแหล่งน้ำ สารโลหะหนักต่าง ๆ ที่มีความเป็นพิษในน้ำสูง ทำให้สิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงอยู่ได้ เช่น ความเป็นพิษในน้ำเสียนิยมทำตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ เช่น BOD, COD, และ TOC และสารอนินทรีย์ (inorganic) เช่น ค่าพีเอช คลอไรด์ ความเป็นกรด-ด่าง ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก และแก๊สละลายน้ำ

2.2.1.3 ลักษณะน้ำเสียทางชีวภาพ เป็นน้ำเสียที่มีส่วนประกอบทางชีวภาพ ที่มาจากพวกแบคทีเรีย จุลินทรีย์ สาหร่าย โพรทิสต์และเชื้อรา ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำเสีย สิ่งมีชีวิตเหล่านี้จะเป็น ผู้ย่อยสลายในแหล่งน้ำ

2.2.2 องค์ประกอบของน้ำเสีย เป็นองค์ประกอบของสารหรือสิ่งเจือปนปะปนอยู่ในน้ำเสีย สามารถแบ่งได้เป็น 10 ชนิด ได้แก่

2.2.2.1 สารอินทรีย์ (Organic matter)

เป็นการย่อยสลายอินทรีย์ในน้ำโดยใช้จุลินทรีย์และออกซิเจนในน้ำในการทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปะปนอยู่ในน้ำ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เศษอาหาร พืชผักต่างๆ ในการย่อยสลายนี้จะทำให้ออกซิเจนในน้ำลดระดับลงจะทำให้สภาพน้ำเสีย น้ำมีความสกปรกและมีกลิ่นเน่าเหม็น

2.2.2.2 สารอนินทรีย์ (Inorganic matter)

อาจอยู่ในรูปของแร่ธาตุ หรือของเสียทางอุตสาหกรรม ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆ สารจำพวกโลหะหนัก ที่เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

2.2.2.3 โลหะหนักและสารพิษ (Heavy metals)

โลหะหนักที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ สามารถสะสมอยู่ในวงจรอาหารเกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่นปรอท โครเมียม ทองแดง ส่วนมากจะอยู่ในรูปของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.2.2.4 สารแขวนลอย (Suspended solid)

สารแขวนลอยเป็นสารที่มีการสลายตัวแล้วเกิดกลิ่น เช่น น้ำมัน ไขมัน สารเหล่านี้จะปิดกั้นแสงแดดไม่ให้ผ่านสู่น้ำ เป็นอุปสรรคต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต และสารบางชนิดเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ (วัชร, 2540)

2.2.2.5 ของแข็ง (Solids)

ของแข็งเมื่อจมลงสู่น้ำจะทำให้เกิดความดัน น้ำด้านล่างจะมีออกซิเจนน้อย มีความขุ่นสูง ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ได้แก่ ของแข็งที่จมตัวได้ ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งที่ระเหยง่าย

2.2.2.6 สารทำให้เกิดฟอง (Foaming)

ฟองของสารจะทำให้ออกซิเจนไม่สามารถกระจายตัวจากอากาศสู่น้ำได้ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ สารทำให้เกิดฟองได้แก่ ผงซักฟอก สบู่

2.2.2.7 จุลินทรีย์ (Microorganism)

จุลินทรีย์ที่มาจากการปล่อยน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ เช่น น้ำเสียจากโรงพอกหนัง โรงฆ่าสัตว์ โรงงานอาหารกระป๋อง จุลินทรีย์เหล่านี้จะใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต และจะทำให้มีออกซิเจนในน้ำลดระดับลง จะทำให้น้ำเกิดสภาพเน่าเหม็น จุลินทรีย์บางชนิดอาจเกิดอันตรายต่อมนุษย์ เช่น จุลินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงพยาบาล (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.2.2.8 สี และความขุ่น (Color Turbidity)

สี และความขุ่นเป็นตัวกั้นแสงไม่ให้ผ่านลงสู่น้ำ ทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลง ทำให้สิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ น้ำจึงเกิดการเน่าเสียเมื่อน้ำเสียที่ถูกปล่อยมาจาก

แหล่งกำเนิดในระยะแรกจะมีสีเทาปนน้ำตาลอ่อนๆ และเมื่อระยะเวลามากขึ้นโดยน้ำไม่ได้ทำการบำบัด จะทำให้กลายเป็นสีเทาหรือเทาเข้ม และสุดท้ายน้ำจะเป็นสีดำหรือเรียกว่าน้ำเน่า

2.2.2.9 ธาตุอาหาร (Nutrients)

ธาตุอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ที่มีมากเกินไป จะทำให้สาหร่ายในน้ำเติบโตมากกว่าปกติและเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็ว (Algae Bloom) การเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วนี้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง

2.2.2.10 อุณหภูมิ และความร้อน (Temperature)

อุณหภูมิจะส่งผลต่อสิ่งมีชีวิต และการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ อุณหภูมิจะส่งผลทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาในการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ ออกซิเจนในน้ำลดระดับลง ความร้อนอาจทำให้แบคทีเรียและจุลินทรีย์ในน้ำเสียชีวิต จะทำให้เกิดการเน่าเสียของน้ำมากขึ้น เมื่อ น้ำนั้นมีระดับของอุณหภูมิที่สูง

2.2.3 สาเหตุของการเกิดน้ำเสีย

สาเหตุของการเกิดน้ำเสียเกิดจากการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ทั้งบ้านเรือน ชุมชน การเกษตรกรรม การเลี้ยงสัตว์ และโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้แล้วถูกปล่อยทิ้งโดยไม่ผ่านการบำบัด น้ำที่ปล่อยทิ้งนั้นจะมีสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำสูง เช่น สิ่งปฏิกูล โลหะหนัก และสารเคมี ซึ่งจะส่งผลให้แหล่งน้ำที่ถูกปล่อยทิ้งนั้นเน่าเสีย แหล่งน้ำไม่สามารถปรับสภาพได้ทันจึงเกิดการเน่าเสียเป็นแหล่งสะสมของสารพิษ ทำให้สิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และไม่สามารถนำน้ำจากแหล่งน้ำนั้นมาอุปโภคบริโภคได้

2.2.4 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

2.2.4.1 แหล่งธรรมชาติ

น้ำเสียจากแหล่งธรรมชาติ เกิดจากสิ่งมีชีวิตไม่ว่าจะเป็นพืช หรือสัตว์ที่ตายทับถมในน้ำ จากนั้นจะถูกย่อยสลายโดยผู้ย่อยสลายอินทรีย์สาร ได้แก่ แบคทีเรียที่มีอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติ

2.2.4.2 แหล่งบ้านเรือนชุมชน

น้ำเสียจากแหล่งบ้านเรือนและชุมชน ส่วนใหญ่เป็นการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ที่มาจากบ้านเรือน อาคาร ที่พักอาศัย ตลาดสด ศูนย์การค้า โรงพยาบาล สถานที่ราชการ เป็นต้น ที่ถูกระบายสู่แหล่งน้ำ น้ำเสียในแหล่งชุมชนจะเป็นอันตรายมาก เนื่องจากไม่มีการบำบัดน้ำก่อนปล่อยทิ้งสู่แหล่งธรรมชาติ เนื่องจากขาดการควบคุมดูแลในการจัดการ และหน่วยงานที่รับผิดชอบในการดำเนินงาน (วัชร, 2540)

2.2.4.3 โรงงานอุตสาหกรรม

เกิดจากกระบวนการต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรม ที่ลักลอบปล่อยน้ำเสีย สารเคมี โลหะหนักลงในน้ำ ทำให้น้ำเกิดการปนเปื้อน ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ น้ำที่ปนเปื้อนจากอินทรีย์สารของกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อ มนุษย์และสิ่งมีชีวิต น้ำเสียจากแหล่งอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมโลหะหนัก อุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ โรงงานชุบโลหะ โรงงานหมักกากน้ำตาล โรงงานกลั่นน้ำมัน และโรงงานผลิตยา น้ำทิ้ง จากแหล่งอุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถใช้อุปโภคบริโภคได้ซึ่งเป็นสาเหตุของ โรคผิวหนังเป็นอันตรายต่อร่างกาย อันตรายต่อพืชและสัตว์น้ำซึ่งจะส่งผลให้จำนวนพืชและสัตว์ใน แหล่งน้ำลดลง และน้ำเกิดการเน่าเสีย

2.2.4.4 เกษตรกรรมและการเลี้ยงสัตว์

น้ำเสียที่มาจากเกษตรกรรมและการเลี้ยงสัตว์ จะมาจากสารเคมีในการ เลี้ยงสัตว์ ปุ๋ยเคมี สารเคมีป้องกันศัตรูพืช การปล่อยมูลสัตว์และเศษของเสียต่างๆ ในโรงเลี้ยงสัตว์ ที่ เกิดตกค้างบริเวณดิน หรือบริเวณที่ใช้สารเคมี เมื่อถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ จะส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ จะทำให้เกิดเกิดการปนเปื้อนของสารเคมี และจะเกิดการสะสมของสารเคมีในสิ่งมีชีวิต สารเคมีที่พบ ในแหล่งธรรมชาติ เช่น ดีดีที ดีลตริน และเอนดริน

2.2.5 ลักษณะของน้ำเสียที่สำคัญในการนำมาตรวจวิเคราะห์

2.2.5.1 ค่าพีเอช (pH)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำเสีย โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตจะ สามารถในสภาวะที่เป็นกลาง คือช่วง pH ประมาณ 6-8 (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.2.5.2 ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD)

เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณออกซิเจนในแบคทีเรีย ที่ใช้ในการย่อยสลาย สารอินทรีย์เป็นมาตรฐานกำหนดคุณภาพของน้ำทิ้ง ถ้าค่าบีโอดีสูงกว่า 10 mg/L น้ำนั้นถือว่าเป็นน้ำ เสีย ถ้าค่าสูงมากๆ แสดงว่าน้ำมีความต้องการออกซิเจนสูง เนื่องจากน้ำนั้นมีความสกปรกหรือ สารอินทรีย์เจือปนในน้ำสูง ตามพระราชบัญญัติน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดโรงงาน อุตสาหกรรมปล่อยน้ำได้ แต่ต้องมีค่าบีโอดีไม่เกิน 20 mg/L

2.2.5.3 ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)

เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยวิธี ทางเคมี โดยทำให้ออกซิเจนออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ หลักในการหาค่า COD และ BOD จะคล้ายกันโดย COD จะทำให้สารอินทรีย์ในน้ำถูกออกซิไดซ์ จน ได้คาร์บอนไดออกไซด์ กับน้ำแต่ BOD จะต้องใช้แบคทีเรียในการย่อยสลาย ส่วน COD ใช้ตัวเติม ออกซิเจน (วัชรี, 2540) โดยการวัดค่า COD: BOD จะต่างกันประมาณ 2-4 เท่า

2.2.5.4 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved oxygen: DO)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ปริมาณของออกซิเจนในน้ำจะผูกพันกับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิในน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณออกซิเจนในการละลายในน้ำลดลง (สุรศักดิ์, 2541) น้ำในธรรมชาติทั่วไป ปกติจะมีค่าดีโอประมาณ 5-7 mg/L ถ้าค่าดีโอต่ำกว่า 3 mg/L จัดว่าน้ำในแหล่งนั้นเน่าเสีย

2.2.5.5 ปริมาณของแข็ง (Solids)

เป็นปริมาณสารแขวนลอยที่ละลายและไม่ละลายน้ำ และบางชนิดก็แขวนลอยในน้ำ ของแข็งมีน้ำหนักมากจะจมตัวสู่ด้านล่าง ถ้าบดทิ้งไว้จะทำให้เกิดความตื้นเขินและความสกปรกในแหล่งน้ำ

2.2.5.6 ไนโตรเจน (Nitrogen)

เป็นธาตุที่มีความสำคัญในการสร้างเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ไนโตรเจนจะเปลี่ยนสภาพเป็นแอมโมเนีย ถ้าในแหล่งน้ำนั้นมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ ออกซิเจนนั้นจะถูกย่อยสลายเป็นไนไตรต์และไนเตรท การปล่อยน้ำเสียที่มีปริมาณไนโตรเจนสูง จะทำให้แหล่งน้ำนั้นมีระดับออกซิเจนลดลง (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.2.5.7 ไขมันและน้ำมัน (Fat, Oil, and Grease)

ไขมันและน้ำมัน จะเป็นน้ำมันและไขมันจากพืชและสัตว์ สารเหล่านี้มีน้ำหนักเบาและสามารถลอยสู่ผิวน้ำได้

2.2.5.8 ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (Mixed Liquid Suspended Solids: MLSS) (mg/L)

ค่าความเข้มข้นโดยประมาณของจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ เป็นค่าที่ใช้วัดความเข้มข้นของน้ำเสียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (สุพัฒน์พงษ์, ม.ป.ป.)

น้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ก่อนการปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียจากแหล่งอุตสาหกรรม แหล่งบ้านเรือนชุมชน หรือแหล่งใดใดก็ตามต้องผ่านการบำบัดน้ำให้น้ำมีคุณภาพที่ดีก่อนที่จะทำการปล่อยทิ้ง เพื่อสามารถนำน้ำจากแหล่งน้ำมาอุปโภคบริโภคได้ ในการบำบัดน้ำเสียมีวิธีมากมายจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3 การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment)

ความสำคัญของการบำบัดน้ำเสีย เป็นการบำบัดน้ำหลังจากการที่นำน้ำไปใช้ในกิจกรรมต่างในชีวิตประจำวัน ในโรงงานอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม มาปรับสภาพน้ำให้ดีขึ้นก่อนปล่อยน้ำเหล่านั้นสู่แหล่งธรรมชาติ การเลือกระบบบำบัดน้ำเสียขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ลักษณะของน้ำเสีย

ระดับการบำบัดน้ำเสียที่ต้องการ สภาพทั่วไปของน้ำเสีย ค่าการบำรุงรักษา และขนาดของที่ดินที่ใช้ เพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องการมีความเหมาะสมในสภาพแวดล้อมที่ต้องการการบำบัด

2.3.1 การบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้ตามวิธีที่ใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียได้ 3 ทาง คือ

2.3.1.1 การบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) เป็นวิธีการแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย เช่น ของแข็งขนาดใหญ่ กระดาษ พลาสติก เศษอาหาร กรวด หิน ไขมัน และน้ำมัน โดยใช้อุปกรณ์ในการบำบัดทางกายภาพ คือ ตะแกรงดักขยะ และถังตกตะกอน ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีในน้ำเสีย

2.3.1.2 การบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งที่เจือปนในน้ำเสีย วิธีการนี้จะใช้กับน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของโลหะหนัก ค่าพีเอชที่สูง ต่ำเกินไป ไขมันและน้ำมัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.3.1.3 การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพ โดยใช้จุลินทรีย์และแบคทีเรียในการกำจัดสิ่งเจือปน โดยเฉพาะสารคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยความสกปรกเหล่านี้จะถูกใช้เป็นอาหาร และเป็นแหล่งพลังงาน

ของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อการเจริญเติบโต ทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกลดลงโดยจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic)

2.3.1.4 การบำบัดทางกายภาพเคมี (Physiochemical Unit Processes) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งเทคนิคทางกายภาพและทางเคมีร่วมกัน เพื่อใช้ในการกำจัดทั้งสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย เช่น ระบบ Ion exchange, Carbon adsorption และ Reverse osmosis

2.3.2 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย สามารถแบ่งตามขั้นตอนได้ดังนี้

2.3.2.1 การบำบัดขั้นต้น (Preliminary Treatment) เป็นการบำบัดขั้นต้น เป็นการบำบัดเพื่อคัดแยกทราย หิน กรวด และของแข็งที่มีขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสีย โดยใช้เครื่องจักร ได้แก่ ตะแกรงหยาบ (Coarse Screen) ถังตกตะกอนเบื้องต้น (Primary Sedimentation Tank) และตะแกรงละเอียด (Fine Screen) ในการบำบัดขั้นต้นสามารถกำจัดอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำเสียขนาดใหญ่ได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.3.2.2 การบำบัดขั้นที่สอง (Secondary Treatment) เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้น แต่ยังคงมีของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กและสารอินทรีย์ทั้งที่ละลาย และไม่ละลายในน้ำเสียเหลือค้างอยู่ การบำบัดขั้นที่สอง เรียกอีกอย่างว่าการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) จะอาศัยหลักการเลี้ยงจุลินทรีย์ในระบบภายใต้สภาวะที่สามารถควบคุมได้ เพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (สุรศักดิ์, 2541) และแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำทิ้งโดยใช้ถังตกตะกอน (Secondary Sedimentation Tank) ทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพดีขึ้น จากนั้นจึงผ่านเข้าระบบฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เพื่อลดสารปนเปื้อนก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หรือนำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ได้

2.3.2.3 การบำบัดขั้นสูง (Advance Treatment หรือ Tertiary Treatment) การบำบัด ขั้นสูงนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารอาหารจำพวก สี สารแขวนลอย ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในการบำบัดจะช่วยลดความเน่าเสียการเจริญเติบโตผิดปกติของสาหร่าย โดยที่การบำบัดขั้นที่สองไม่สามารถทำได้ การบำบัดขั้นสูงจะสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดีขึ้น และสามารถนำน้ำนั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ (สุริย์ และคณะ, 2551)

2.3.3 กระบวนการในการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้ 2 กระบวนการ คือ

2.3.3.1 การบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Process) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสีย ในทางกระบวนการทางชีวภาพโดยมีการเติมออกซิเจนลงในน้ำเสีย จุลินทรีย์จะทำปฏิกิริยาชีวเคมีทำให้จุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (ประสาธ, ม.ป.ป.)

2.3.3.2 การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Process) เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยไม่ใช้ออกซิเจน สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.3.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเตดสลัดจ์

ระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge: AS) เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีววิทยา โดยใช้แบคทีเรียพวกที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic Bacteria) เป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ระบบแอกติเวเตดสลัดจ์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถบำบัดได้ทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (สุริย์ และคณะ, 2551) ที่ต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมแก่การบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพสูงสุด (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 การบำบัดน้ำเสียในระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ (ที่มา: www.web.ku.ac.th : ออนไลน์)

2.3.4.1 ประเภทของระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ในลักษณะต่างๆ

1) ระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mixed Activated Sludge: CMAS) หลักการทำงานของระบบนี้ จะเป็นระบบที่มีการเติมอากาศ และกวนน้ำเสียให้เป็นเนื้อเดียวกัน

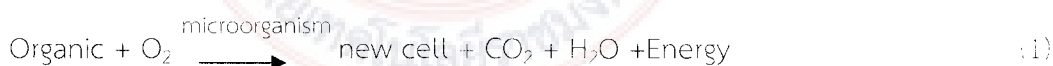
2) ระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์แบบปรับเสถียรสัมผัส (Contact Stabilization Activated Sludge: CSAS) หลักการทำงานของระบบนี้จะมีถังเติมอากาศ 2 ถัง มีถังสัมผัส และถังย่อยสลาย โดยตะกอนน้ำเสียจะถูกส่งมาสู่ถังย่อยสลายเพื่อเติมอากาศ และส่งต่อมาที่ถังสัมผัสเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

3) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบคลองเวียน (Oxidation Ditch: OD) หลักการทำงานของระบบนี้ลักษณะของถังเติมอากาศ จะเป็นวงกลม ทำให้น้ำมีการไหลเวียนอยู่ตลอดเวลา

4) ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสปีอาร์ (Sequencing Batch Reactor) หลักการทำงานของระบบนี้จะแตกต่างจากระบบอื่น เป็นระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ประเภทเติมถ่ายเข้าออก ในการบำบัดน้ำเสียโดยการเติมอากาศและการตกตะกอนจะดำเนินการตามลำดับ และทำปฏิกิริยาภายในถังเดียวกัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.3.4.2 หลักการทำงานของระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์

หลักการทำงานของระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์จะประกอบด้วย ถังเติมอากาศ (Aeration Tank) และถังตกตะกอน (Sediment Tank) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ จะใช้อากาศเป็นตัวเอื้ออำนวย ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นอาหารและแหล่งพลังงาน ในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์จะมีปฏิกิริยาทางชีวเคมี สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้ (ทุติยาภรณ์, 2548)



น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลต่อไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกสลัดจ์ออกจากน้ำใส สลัดจ์ที่แยกตัวจะตกอยู่ที่ก้นถังตกตะกอน ส่วนหนึ่งจะถูกสูบป้อนกลับเข้าไปในถังเติมอากาศใหม่เพื่อให้สลัดจ์มีความเข้มข้น และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นสลัดจ์ส่วนเกินที่ต้องนำไปกำจัดต่อไป สำหรับน้ำใสส่วนบนจะเป็นน้ำทิ้งที่สามารถปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.3.4.3 จุลินทรีย์ในแอคติเวเต็ดสลัดจ์ จะสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทคือ

- 1) จุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อก (Floc Former) จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียที่สามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มฟล็อก และตกตะกอนได้ดี
- 2) Saprophyte จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะเป็นแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ บางชนิดก็จะทำหน้าที่สร้างฟล็อกด้วย
- 3) จุลินทรีย์ทำลาย (Predator) จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ประกอบด้วยโพรโตซัว (Protozoa) อมیب (Amoeba) โรติเฟอร์ (Rotifer) ทำหน้าที่กินจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็กกว่าเป็นอาหาร
- 4) จุลินทรีย์ก่อกรวน (Nuisance Microorganisms) เป็นพวกที่ก่อกรวนการทำงานของระบบ เช่น แบคทีเรียที่เป็นเส้นใย (Filamentous Bacteria) ซึ่งทำให้เกิดตะกอนไม่จมตัว (Bulkin Sludge)

2.3.4.4 ขั้นตอนการเกิดของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ มีสามขั้นตอนดังนี้

- 1) ขั้นส่งถ่าย (Transfer Step) สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ดูดมาติดที่ผนังเซลล์และส่งน้ำย่อยออกมาย่อยสลายจนสารอินทรีย์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของโมเลกุลที่เล็กพอที่จะซึมผ่านเข้าข้างในเซลล์เพื่อใช้เป็นสารอาหารได้ ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 ถึง 30 นาทีจุลินทรีย์จะผลิตน้ำย่อยขึ้นมาไว้ภายในเซลล์และในน้ำที่อยู่รอบตัวของมันสารอินทรีย์แต่ละชนิดต้องใช้เอนไซม์เฉพาะอย่างในการย่อย จุลินทรีย์จึงต้องปรับตัวและผลิตเอนไซม์ออกมาใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของน้ำเสียต่างๆโดยเฉพาะในช่วงเริ่มการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย
- 2) ขั้นเปลี่ยนรูป (Conversion Step) ขั้นที่สองเมื่อจุลินทรีย์ถูกย่อยให้มีโมเลกุลเล็ก และสามารถละลายน้ำผ่านเข้าไปในเซลล์ได้แล้ว ก็จะถูกจุลินทรีย์ทำการเปลี่ยนรูปโดยกระบวนการสังเคราะห์ (Synthesis) ซึ่งหมายถึง การสร้างเซลล์ใหม่ และกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่มีการเติมออกซิเจนแล้วได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน
- 3) ขั้นรวมตะกอน (Flocculation Step) ขั้นที่สามเป็นการรวมตัวของตะกอนเร่งโดยจุลินทรีย์จะถูกกวนผสมกันอยู่ในถังเติมอากาศเมื่อมาชนกันก็จะจับรวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้นเรียกว่า ฟล็อก (Floc) หรือตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ตะกอนที่รวมตัวกันจนเป็นสารแขวนลอยและมีขนาดเล็กลงละลายปนกับน้ำเพื่อจะให้จุลินทรีย์ทำการย่อยในขั้นต่อไป

2.3.4.5 ปัจจัยสำคัญต่อการทำงานของระบบแอคติเวเต็ดสลัดจ์ มีดังนี้

- 1) อายุตะกอน (Sludge Age) เป็นระยะเวลาเฉลี่ยที่ตะกอนจุลินทรีย์หมุนเวียน อยู่ในถังเติมอากาศการควบคุมกระทำได้โดยการนำตะกอนส่วนเกินออกจากระบบ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมให้มีค่าคงที่ได้ตามต้องการ โดยทั่วไปจะควบคุมให้มีระบบอายุตะกอนประมาณ 5-15 วัน

2) อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M ratio) เป็นอัตราส่วนของน้ำหนักสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เข้ามาระบบต่อน้ำหนักตะกอน จุลินทรีย์ โดยทั่วไปจะควบคุมให้ระบบมีค่า F/M ratio ระหว่าง 0.1-0.4 ต่อวัน คุณสมบัติของน้ำเสีย มักมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทั้งอัตรา การไหลและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ที่เข้าสู่ระบบโดยใช้ F/M ratio ในการควบคุมระบบจะ กระทำได้ยาก และมีความไม่แน่นอน ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้การควบคุมระบบโดยอายุตะกอน (สุรีย์ และคณะ, 2551)

3) อาหารเสริม (Nutrient) อาหารเสริมของจุลินทรีย์ที่ต้องการ มี ไนโตรเจน แอมโมเนีย และฟอสฟอรัส โดยจุลินทรีย์จะนำสารอาหารมาดำรงชีวิต ถ้าปริมาณ สารอาหารในน้ำเสียมีอยู่น้อยเกินไปจุลินทรีย์จะเติบโตได้ไม่ดี (อภิษฎา, 2548)

4) เวลาในการบำบัด (Retention time) ระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียมี ผลต่อการบำบัดแบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ถ้ามีระยะเวลาในการบำบัดน้อยเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพ ในการบำบัดน้ำได้ไม่ดี จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้หมด ถ้าเวลาในการบำบัดน้ำที่ น้อยไป

5) ออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen; DO) ความเข้มข้นของค่า ออกซิเจนละลายน้ำมีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ในกระบวนการแอกติเวเต็ดสลัดจ์จะมีค่า ออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วง 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการแอกติเวเต็ดสลัดจ์ สูงขึ้นจะทำให้ ออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง

6) สารเป็นพิษ (Toxic Substance) ถ้ามีสารเป็นพิษปนเปื้อนเข้าสู่ ในระบบ แอกติเวเต็ดสลัดจ์ จะทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ตายหมด สารพิษจะ ทำลายเซลล์จุลินทรีย์ ได้แก่ สารโลหะหนักต่างๆ

2.3.4.6 ปัญหาในการควบคุมระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์

1) การลอยตัวของตะกอนในถังตกตะกอน (Rising Sludge) ปัญหาการเกิด ตะกอนลอยยกตัวในถังตกตะกอน เป็นปัญหาอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้ระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ล้มเหลว สาเหตุของการเกิดปัญหาดังกล่าว มาจากน้ำเสียที่มีปริมาณไนโตรเจนสูง โดยที่ไนโตรเจนที่อยู่ในรูป ของแอมโมเนียไนโตรเจนถูกบำบัดด้วย (พนาลี, 2010) กระบวนการไนตริฟิเคชัน เกิดจากตะกอนตก อยู่ภายในถังตกตะกอนนานเกินไปจนทำให้เกิดปฏิกิริยาชีวเคมีเปลี่ยนสารประกอบ ไนโตรที่และไน เตรตเป็นก๊าซไนโตรเจน ก๊าซที่เกิดขึ้นจะอยู่ในตะกอนถ้ามีมากจะพาตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ

2) ตะกอนเบาไม่จมตัว (Bulking Sludge) ในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ที่มี ประสิทธิภาพการบำบัดสูงตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศจะมีสีน้ำตาลแก่จับกันเป็นก้อนใหญ่และ จมตัวได้อย่างรวดเร็ว ในกรณีที่เกิดตะกอนเบานั้นจะเป็นตะกอนละเอียดจมตัวได้ช้า สาเหตุมีสอง ประการคือ อาจเกิดจากเชื้อราที่เป็นเส้นใย หรืออาจเกิดจากมีน้ำอยู่ในตะกอนระหว่างเซลล์ของ

จุลินทรีย์มากทำให้ตะกอน มีความหนาแน่นเกือบเท่ากับน้ำจึงจมตัวได้ลำบาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

ในการบำบัดน้ำเสียในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ ในการบำบัดนี้จะมีคุณภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มาจากแหล่งต่างๆได้ดี ในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ มีข้อเสียคือ ใช้พื้นที่ในการบำบัดมากต้องสร้างบ่อบำบัดขนาดใหญ่ คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพที่ไม่ค่อยดีนัก จึงต้องมีการนำเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียที่มีความทันสมัยมาประยุกต์ใช้กับระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ เพื่อให้ น้ำที่ผ่านการบำบัดดีขึ้น และลดสารแขวนลอยที่ปะปนในน้ำที่ผ่านการบำบัด เทคโนโลยีที่นำมาประยุกต์ คือ เทคโนโลยีเมมเบรนจะกล่าวรายละเอียดในข้อต่อไป

2.4 เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane technology)

เทคโนโลยีเมมเบรน เป็นเทคโนโลยีขั้นสูงในการกรองที่นิยมใช้ในปัจจุบัน สามารถกรองสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กได้โดยอาศัยเยื่อของเมมเบรนที่มีขนาดเล็ก และมีบทบาทมากมายในด้านโรงงานอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการทำน้ำดื่ม อุตสาหกรรมการทำน้ำผลไม้ อุตสาหกรรมการทำไวน์ และการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากในปัจจุบันมีความต้องการลดปริมาณของเสีย หรือความต้องการนำน้ำที่ผ่านกระบวนการต่างๆ นำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้ น้ำนั้นมีคุณภาพที่ดีจึงมีการนำเทคโนโลยีเมมเบรน เทคโนโลยีนี้จะใช้พลังงานที่ต่ำ พื้นที่ที่ใช้ในการวางระบบน้อยง่ายในการสร้างระบบ เพื่อจะได้ น้ำที่มีคุณภาพที่ดีมาใช้ (ศักดิ์สิทธิ์, 2551)

2.4.1 กระบวนการเมมเบรน

เมมเบรน คือ แผ่นฟิล์มบางๆ ของสารอินทรีย์ หรือสารอินทรีย์ ที่ทำให้เกิดการแยกตัวอย่างละเอียดในอนุภาคในของไหล ซึ่งในของไหลจะมีทั้งที่เป็นก๊าซ และของเหลวเมมเบรนที่มีอยู่ทั่วไปมีหลากหลายชนิด ตามความสามารถในการกรองของเมมเบรน (หุตยาภรณ์, 2548)

2.4.2 การกรองเมมเบรนโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่

2.4.2.1 ไมโครฟิเตรชัน (Microfiltration Membrane: MF)

เป็นเทคโนโลยีการกรองด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนขนาด 0.1 ไมครอน ทำให้สามารถกรองสารปนเปื้อนที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.1-10 ไมครอน ได้แก่ คอลลอยด์ ทราย สารแขวนลอย และแบคทีเรียต่างๆ ได้เกือบหมด อีกทั้งยังสามารถกรองไวรัสได้บางส่วน Microfiltration Membrane (MF) นี้สามารถประยุกต์ใช้กับ การบำบัดน้ำทั้ง อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ได้แก่ ไวน์ น้ำผลไม้

2.4.2.2 อัลตราฟิเตรชัน (Ultrafiltration Membrane: UF)

เป็นเทคโนโลยีการกรองด้วยเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาด 0.01 ไมครอน ทำให้สามารถกรองสารปนเปื้อนที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.01 ไมครอนได้ มีขนาดละเอียดมากกว่าการกรองด้วย

ระบบ Micro Filtration (MF) ทำให้สามารถกรอง ทราบ สารแขวนลอย และแบคทีเรีย ไวรัส และ สารอินทรีย์ได้ การประยุกต์ใช้ Ultrafiltration Membrane (UF) จะใช้กับอุตสาหกรรม น้ำ ผลไม้ และการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม

2.4.2.3 นาโนฟิเตรชั่น (Nanofiltration Membrane: NF)

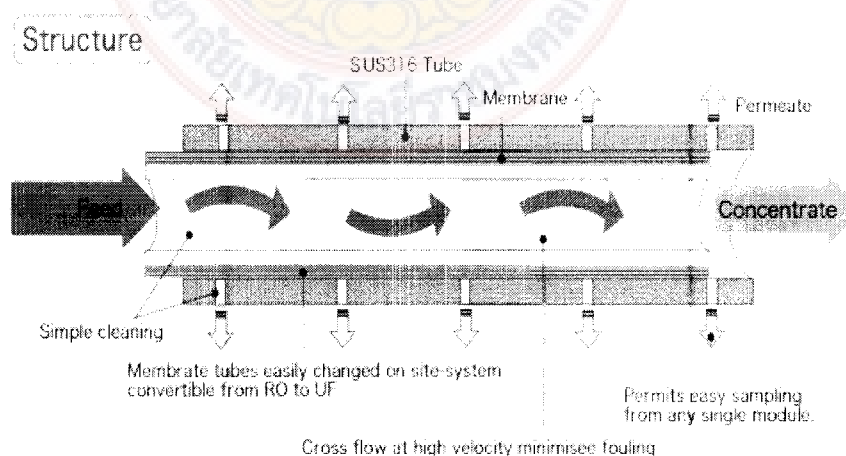
นาโนฟิเตรชั่นจะอยู่ในช่วงระหว่างอัลตราฟิเตรชั่นและออสโมซิสผันทกลับ นาโนฟิเตรชั่นเมมเบรนแต่เดิมถูกเรียกว่าออสโมซิสผันทกลับแบบหลวมหรือออสโมซิสผันทกลับแบบ ความดันต่ำ นาโนฟิเตรชั่นได้พัฒนาขึ้นเพื่อแยกสารในช่วงมวลโมเลกุลต่ำกว่า 300 การแยกสารต่ำกว่าออสโมซิสผันทกลับ สามารถแยกแบคทีเรีย ไวรัส และเกลือได้ การประยุกต์ใช้ Nanofiltration Membrane (NF) ส่วนมากใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม และการแยกเกลือออกจากน้ำทะเล

2.4.2.4 ออสโมซิสผันทกลับ (Reverse Osmosis Membrane: RO)

เป็นเทคโนโลยีการกรองด้วยเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาด 0.001 ไมครอน ทำให้สามารถกรองสารปนเปื้อนที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.001 ไมครอน ระบบการกรองด้วย Reverse Osmosis (RO) สามารถกรอง แบคทีเรีย ไวรัส และสารละลาย ได้แก่ โปรตีน ตะกั่ว โลหะหนักชนิดต่างๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำ การประยุกต์ใช้ในการแยกเกลือจากน้ำทะเล อุตสาหกรรมนม และการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

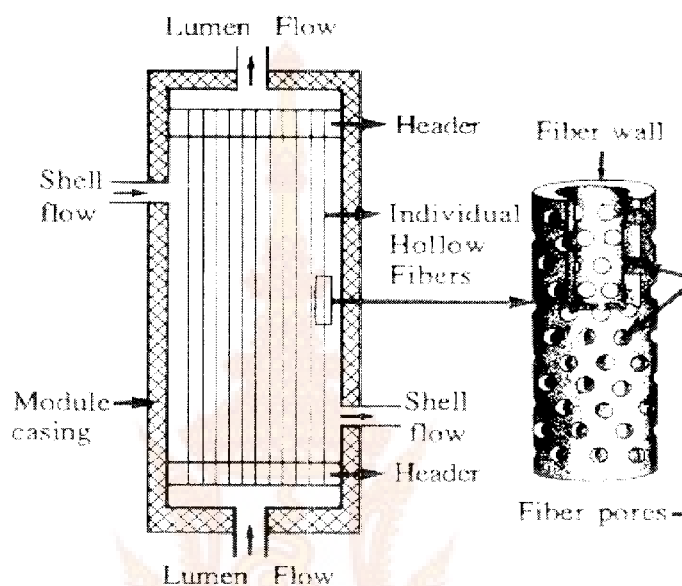
2.4.3 ประเภทของเมมเบรนสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ

2.4.3.1 เมมเบรนชนิดท่อ (Tubular Module) เป็นวิธีการที่ม้วนเมมเบรนให้เป็นหลอดหรือท่อขนาดเล็ก โดยท่อจะทำด้วยไฟเบอร์กลาสหรือสแตนเลส เมมเบรนชนิดนี้มีข้อดีคือสามารถทำความสะอาดง่าย (รูปที่ 2)



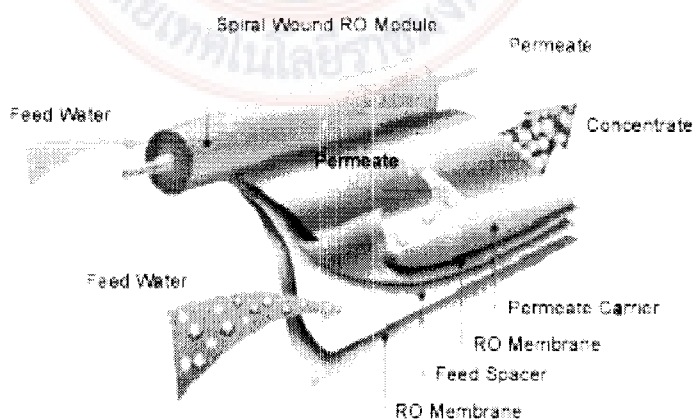
รูปที่ 2 เมมเบรนชนิดท่อ (ที่มา: www.tske.co.jp)

2.4.3.2 เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module) เป็นการนำเมมเบรนแบบเส้นใยมาทำการมัดรวมกัน โดยให้ปลายของเมมเบรนยึดติดกับด้านใดด้านหนึ่ง เมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงนี้เหมาะสำหรับบำบัดน้ำที่มีสีเจือปนสูง (รูปที่ 3)



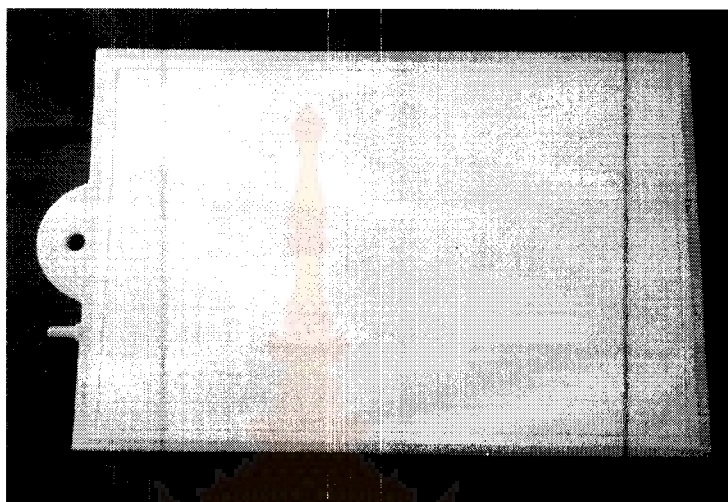
รูปที่ 3 เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (ที่มา: www.rpi.edu)

2.4.3.3 เมมเบรนแบบม้วน (Spiral wound Module) โมดูลชนิดนี้จะนำเมมเบรนสองแผ่นมาวางซ้อนกัน โดยมีวัสดุที่มีรูพรุนวางตรงกลางระหว่างเมมเบรนทั้งสอง แล้วม้วนแผ่นเมมเบรนรอบท่อที่มีการเจาะรู เพื่อบังคับให้น้ำไหลผ่านตามรูของท่อ (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 เมมเบรนแบบม้วน (ที่มา: www.aquaaccess.com/services.html)

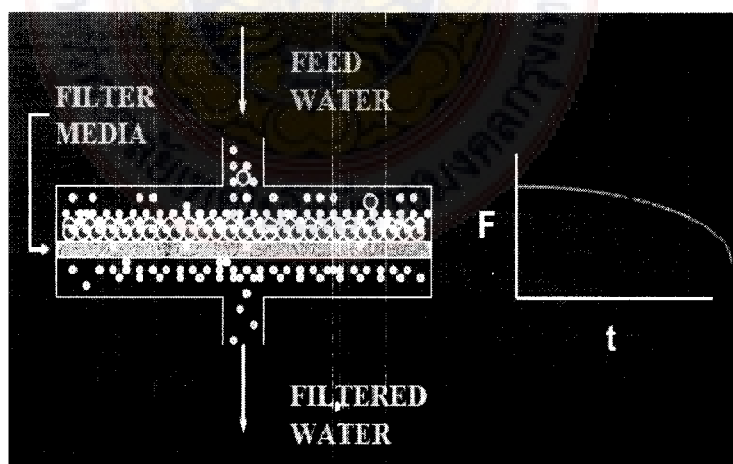
2.4.3.4 เมมเบรนแบบแผ่น (Plate and frame Module) เป็นโมดูลที่มีแผ่นเมมเบรนวางซ้อนกัน ในการจัดเมมเบรนจะมีลักษณะคล้าย filter press (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 เมมเบรนแบบแผ่น

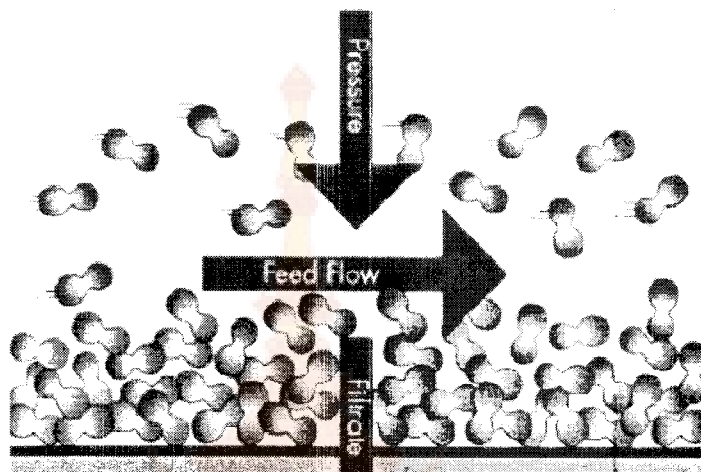
2.4.4 ชนิดการกรองของเมมเบรน สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

2.4.4.1 การกรองแบบไหลทางเดียว (Dead end filtration) การกรองแบบไหลทางเดียว จะเกิดการอุดตันบนพื้นผิวของเมมเบรนได้ง่ายขึ้น ส่วนมากการกรองแบบนี้จะใช้เป็นแบบกะ (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 การกรองแบบไหลทางเดียว (Dead end filtration) (ที่มา: Pornsak, 2001)

2.4.4.2 การกรองแบบไหลตัดขวาง (Cross-Flow Filtration) การอุดตันบนพื้นที่ผิวของเมมเบรนจะอุดตันช้ากว่า การกรองแบบไหลทางเดียว รักษาระดับค่าพลาซการกรองได้ดี มีประสิทธิภาพในการควบคุมได้ดีกว่า การกรองแบบไหลทางเดียว (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 การกรองแบบไหลตัดขวาง (ที่มา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี)

2.4.5 คุณสมบัติของระบบเมมเบรน

เมมเบรนจะมีคุณสมบัติในการกำจัดสารแขวนลอยและเชื้อโรคไม่ให้หลุดไปกับน้ำที่กรองได้ การใช้ระบบเมมเบรนเป็นระบบที่มีการแยกอย่างสมบูรณ์ มีการย่อยสลายทางชีวภาพระหว่างการใช้เมมเบรนในการกรอง ความเข้มข้นของจุลินทรีย์จะสูงกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบเดิม เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้เมมเบรน คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบเมมเบรนจะมีความสะอาดสูง

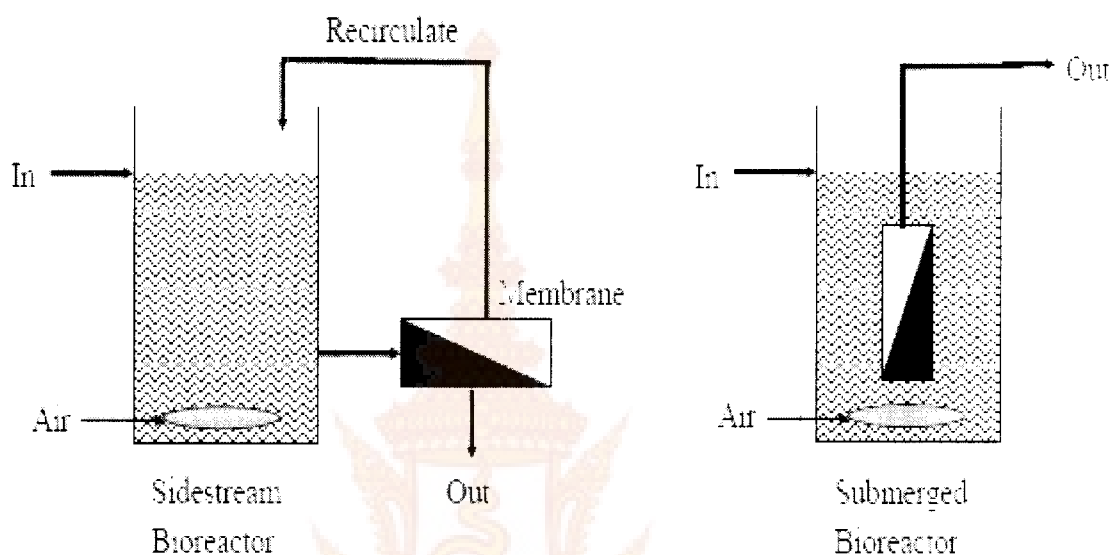
2.4.6 ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสีย

ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนเป็นระบบบำบัดน้ำเสีย ที่ปรับเปลี่ยนมาจากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของการบำบัดทางชีวภาพ และการบำบัดทางชีวภาพ (ศุภลักษณ์, 2552) โดยใช้เมมเบรนเป็นตัวกลางในการกรอง ระหว่างของเหลวจึงเกิดกระบวนการแยกสารเมมเบรนมีรูพรุนที่มีขนาดเล็กระดับไมโครฟิวด์ขึ้น ทำให้สารบางชนิดผ่านได้

2.4.6.1 หลักการทำงานของถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

หลักการทำงานโดยมีสารป้อน (Feed) เข้าด้านหนึ่งของเมมเบรน ด้านขาออกที่ผ่านเมมเบรน เรียกว่า เพอเมเตท (Permeate) ส่วนของสารป้อนที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนเรียกว่า รีเทนเตท (Retentate) ภายใต้การเดินระบบด้วยแรงดันขับ (Pressure driving force) ที่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล (จันทรทรงกลด, 2550)

2.4.6.2 รูปแบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน มีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ เมมเบรนอยู่นอกถังปฏิกรณ์ (Eternal membrane bioreactor, EMBR) และเมมเบรนที่จุ่มตัวในถังปฏิกรณ์ (Submerge membrane bioreactor, SMBR) ดังรูปที่ 8 (ศุภลักษณ์, 2552)



รูปที่ 8 รูปถ่าย เมมเบรนที่อยู่นอกถังปฏิกรณ์ รูปขวา เมมเบรนที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ (ที่มา: Paul T. Bolger และคณะ, 1938)

ในการแยกสารในระดับอัลตราฟิวเตรชันและไมโครฟิวเตรชัน จะประเมินสมรรถนะของเมมเบรนจากค่าฟลักซ์ในการกรองของเมมเบรน สมการค่าฟลักซ์ของเมมเบรน คือ

$$J = \Delta P / \mu R_t \quad (2)$$

J = ค่าฟลักซ์ของเมมเบรน (หน่วย $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ หรือ $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

ΔP = แรงขับเคลื่อน (หน่วย Pa)

μ = ความหนืด (หน่วย Pa.s)

R_t = ค่าความต้านทานรวม (หน่วย m^{-1})

สมการความต้านทานรวม จะเป็นผลบวกของความต้านทานย่อย มีความต้านทานของเมมเบรน (R_m) ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงที่ผันกลับได้ (R_{fd}) และความต้านทานการเกิดฟาวลิงที่ผันกลับไม่ได้ (R_{fnd}) (ศุภลักษณ์, 2552)

$$R_t = R_m + R_{fd} + R_{fnd} \quad (3)$$

R_t = ความต้านทานรวม (หน่วย m^{-1})

R_m = ความต้านทานของเมมเบรน (หน่วย m^{-1})

R_{rf} = ค่าความต้านทานการเกิดฟาวลิงที่ผันกลับได้ (หน่วย m^{-1})

R_{irf} = ความต้านทานการเกิดฟาวลิงที่ผันกลับไม่ได้ (หน่วย m^{-1})

2.4.7 ปรากฏการณ์อุดตัน (Fouling phenomena)

เป็นปรากฏการณ์ปฏิกิริยาทางเคมีชีวภาพระหว่างโมเลกุลกับอนุภาคของเหลว ขณะทำการกรองด้วยเมมเบรน เกิดจากสารละลายหรือสารแขวนลอยสะสมบนพื้นผิวของเมมเบรน (จันทรทรงกลด, 2550) ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองของเมมเบรนลดลง ระยะเวลาในการใช้เมมเบรนต่ำลง เนื่องจากเกิดการสะสมของสารแขวนลอยบนพื้นผิวหรือรูพรุนของเมมเบรน ทำให้ฟลักซ์ไหลผ่านเมมเบรนลดลง สามารถส่งผลต่ออายุการใช้งานของเมมเบรน โดยฟลักซ์ที่ลดลงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น และความเร็วของสารที่ทำการป้อน(ฐนีย์, 2548) ปรากฏการณ์ อุดตันแบ่งได้สองแบบ คือ อุดตันแบบผันสภาพได้ (Reversible fouling) และ อุดตันที่ผันสภาพไม่ได้ (irreversible fouling) (ศุภลักษณ์, 2552)

2.4.7.1 การอุดตันแบบผันสภาพได้ (Reversible fouling)

เกิดจากการสะสมอุดตันของตะกอนแข็งที่ผิวของเมมเบรน การอุดตันนี้เป็นชนิดที่ใช้วิธีการทางไฮโดรไดนามิกส์ โดยการใช้ความดันบวกการใช้แรงเฉือนผิวหน้า และการล้างย้อนเมมเบรน (จันทรทรงกลด, 2550)

2.4.7.2 การอุดตันที่ผันสภาพไม่ได้ (irreversible fouling)

เป็นชนิดของการอุดตันที่ต้องผันสภาพด้วยสารเคมี เนื่องจากจุลินทรีย์ในน้ำเสียมีการปล่อยสารประกอบนอกเซลล์ (Extracellular polymeric substance; EPS) โดยจะมีลักษณะเป็นเยื่อเมือกเกาะบริเวณผิวของเมมเบรน หรืออุดตตรูพรุนของเมมเบรน ทำให้รูของเมมเบรนมีขนาดที่เล็กลง กีดขวางทางไหล และล้างทำความสะอาดได้ยากปรากฏการณ์ดังกล่าว เรียกว่า ไบโอฟาวลิง (Biofouling) ปรากฏการณ์นี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการกรองของเมมเบรนลดลงสิ้นเปลืองพลังงานในการเดินระบบ และล้างย้อนเมมเบรน (ศุภลักษณ์, 2552)

2.4.8 สาเหตุของการเกิดการอุดตัน เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ การแตกตัวของขนาด ฟลอกเนื่องจากระบบที่มีอากาศ การเกิดในสภาวะทางกายภาพ-เคมี ทำให้เกิดการตกผลึกบนพื้นผิวของเมมเบรน (จันทรทรงกลด, 2550)

2.4.9. การอุดตันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ การอุดตันภายใน จากการที่มีการสะสมของวัสดุอินทรีย์ในรูโครงสร้างของเมมเบรน และการอุดตันภายนอก เกิดจากการสะสมของชั้นเค้กบนผิวหน้าของเมมเบรน (ธนาวุฒิ, 2546)

2.4.10 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอุดตัน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอุดตันได้แก่ คุณสมบัติของเมมเบรน ขนาดของสารแขวนลอย ในน้ำที่จะทำการบำบัด ลักษณะของน้ำที่ป้อนเข้าเมมเบรน และความเข้มข้นของสารโพลิเมอร์ชีวภาพ ปัจจัยในการดำเนินการ

2.4.10.1 คุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity)

เกิดจากการที่เมมเบรนสัมผัสกับน้ำ และแสดงการตอบสนองของโมเลกุล น้ำในลักษณะชอบโดยการสร้างพันธะกับโมเลกุลน้ำ และไม่ชอบน้ำโดยการผลักโมเลกุลน้ำให้ห่างออกไป คุณสมบัติการชอบน้ำจะส่งผลต่อการอุดตันตรงรูของเมมเบรน (จันทร์ทรงกลด, 2550)

2.4.10.2 คุณสมบัติของสารป้อน

การอุดตันของเมมเบรนเกิดจากการกระทำระหว่างของเมมเบรนกับสาร ป้อน คุณสมบัติของสารป้อนจะเกิดจากองค์ประกอบต่างๆ เช่น โปรตีน จะส่งผลในการอุดตันหรือ เปลี่ยนแรงกระทำต่อเมมเบรนส่งผลทำให้ฟลักซ์ลดลง เกลลี่ จะเกิดเป็นตะกอนแขวนลอยทำให้เกิด ความต้านทานการไหลของน้ำเพอมีเอทเพิ่มขึ้น (ฐปนีย์, 2548) อัตราการไหลหรือลักษณะของการ ไหลจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ และลดการเกิดการอุดตันของเมมเบรน

2.4.10.3 ขนาดของรูพรุนของเมมเบรน (Pore size)

ขนาดของรูพรุนมีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน เนื่องจากขนาดรูพรุนที่ ใหญ่การอุดตันจะเกิดได้น้อยกว่า รูพรุนที่มีขนาดเล็ก ขนาดของรูพรุนจะเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อ การ อุดตันของเมมเบรน ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองด้วยเมมเบรนลดลง

2.4.11 การฟื้นฟูสภาพเมมเบรน

การล้างเมมเบรน (Membrane cleaning) เป็นการล้างด้วยสารเคมีที่เหมาะสมทำให้ ฟลักซ์ของเมมเบรนกลับมาเท่าเดิม สารเคมีจะเป็นตัวช่วยในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้ สารที่อุดตันหลุดออกมา (จันทร์ทรงกลด, 2550) โดยทั่วไปจะใช้กรดซิตริกและโซเดียมไฮโป- คลอไรต์ในการล้างเมมเบรน เพราะโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีผลยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของขนาด กลุ่ม ก่อนของตะกอนจุลินทรีย์ (ศุภลักษณ์, 2552) การล้างเมมเบรนเพื่อที่จะลดการอุดตันสามารถ ทำให้ ประสิทธิภาพในการกรองที่ดี การใช้เมมเบรนในการบำบัดน้ำเสีย น้ำที่ผ่านการบำบัดจะมี ประสิทธิภาพที่ดี แต่ในการใช้เมมเบรนต่อเนื่องเป็นเวลานานจะทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันจาก ของแข็ง สารแขวนลอยต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกรองลดลง ทำให้ต้องเสียเวลา ในการล้างย้อนเมมเบรน เพื่อลดปัญหาในการอุดตันของเมมเบรน จึงมีการประยุกต์นำอนุภาคนาโน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน เพื่อจะ ให้อนุภาคนาโนมาลดการอุดตันของเมมเบรน ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองดีขึ้น และลดเวลาการ ล้างย้อนเมมเบรน

2.5 นาโนไฟเบอร์ (Nano fibers)

นาโนไฟเบอร์ ประกอบด้วยคำสองคำคือ นาโน และ ไฟเบอร์ เมื่อกล่าวถึง คำว่า “ไฟเบอร์” ในทางพฤกษศาสตร์ จะหมายถึง ผนังเซลล์พืชที่ให้ความแข็งแรงและเสริมสร้างความแข็งแรงในเนื้อเยื่อพืช ทางด้านกายวิภาคศาสตร์ ไฟเบอร์ คือเส้นใยที่เป็นส่วนประกอบของ extracellular matrix ในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน หรือเซลล์ที่มีรูปร่างยาว เช่น เซลล์กล้ามเนื้อ หรือเซลล์ประสาท ในด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอ ไฟเบอร์ คือเส้นใยจากธรรมชาติหรือเส้นใยสังเคราะห์ เช่น ผ้าและไนลอนในด้านชีววิทยา ไฟเบอร์ คือส่วนของพืชที่มนุษย์ย่อยไม่ได้ เช่น สารกลุ่มเซลลูโลส โดยสรุปแล้วไฟเบอร์หมายถึง ของแข็งที่มีรูปร่างเรียวยาวและมีความยาว ส่วนคำว่า “นาโน” เป็นคำนำหน้าที่มาจากภาษากรีก หมายถึง 10^{-9} ในหน่วยของ ความยาว ความกว้าง เวลา น้ำหนัก ประจุ เป็นต้น ซึ่งในที่นี้ นาโนไฟเบอร์ หมายถึง เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยทั่วไปนาโนไฟเบอร์ จะกำหนดให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ไม่เกิน 100 นาโนเมตร โดยทั่วไปจะผลิตขึ้นจากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ



รูปที่ 9 แสดงลักษณะของนาโนไฟเบอร์(ซ้าย) และนาโนไฟเบอร์เมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ขวา)3

คุณสมบัติที่โดดเด่นของ นาโนไฟเบอร์มีดังนี้

มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง

มีขนาดเล็กและมีความพรุนสูง

มีค่าแรงต้านทานแรงดึงตามยาวสูง ตัวอย่างเช่น คาร์บอนนาโนไฟเบอร์

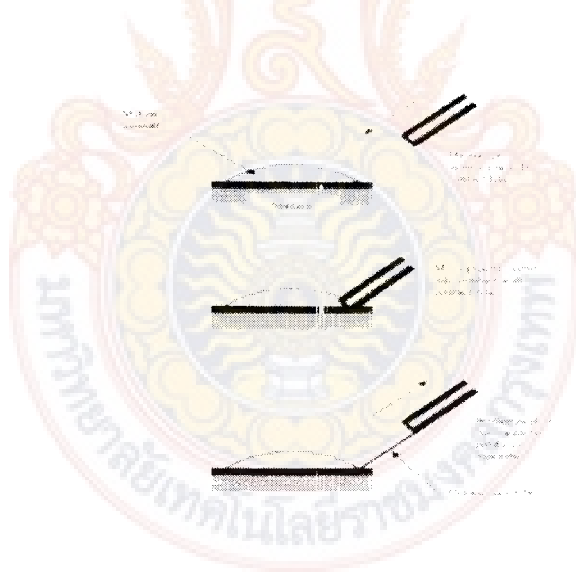
ด้วยลักษณะและคุณสมบัติดังกล่าวจึงมีการนำนาโนไฟเบอร์ไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ มากมาย เช่น เป็นวัสดุในการกรองสาร วัสดุวิศวกรรมเนื้อเยื่อ วัสดุควบคุมการนำส่งยาและ

เครื่องสำอาง สิ่งตกแต่งแฟชั่น วัสดุเสริมความแข็งแรง ตัวนำไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ใช้เป็นส่วนประกอบของเสื้อผ้า ใช้ควบคุมการปลดปล่อยยาฆ่าแมลงในเกษตรกรรม เป็นต้น

2.5.1 กระบวนการผลิต

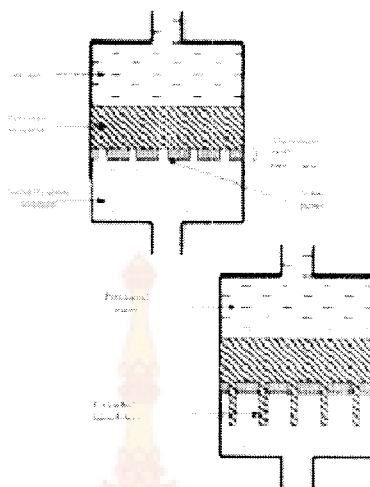
การผลิตนาโนไฟเบอร์มีด้วยกันหลายกระบวนการ ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์ สามารถแบ่งกระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์ได้ดังนี้

Drawing เป็นกระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์ที่ค้นพบโดย Ondarcuhu and Joachim ในปี 1998 วิธีการคือ หยดสารละลายของ sodium citrate ใน chroloauric acid ในขนาดไมโครเมตรใช้ไมโครปิเปต จุ่มลงในหยดของสารใกล้กับ contact line จากนั้นดึงไมโครปิเปตออกอย่างรวดเร็วโดยใช้ความเร็วประมาณ $1 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ นาโนไฟเบอร์จะถูกดึงออกมา พร้อมๆ กับการระเหยของตัวทำละลาย เทคนิคนี้ จะต้องมีการทำซ้ำหลายครั้งจึงจะได้นาโนไฟเบอร์ในปริมาณที่มากพอต่อการนำไปใช้ ระบบจึงไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการ drawing จะต้องใช้วัสดุที่มี viscoelastic เพียงพอต่อการเปลี่ยนรูปร่างในระหว่างการดึง โดยเทคนิคนี้มักจะเรียกได้อีกชื่อว่า dry spinning at a molecular level



รูปที่ 10 แสดง Drawing

Template Synthesis เป็นกระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์ที่ใช้ แม่พิมพ์ที่ประกอบด้วยรูที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร Feng และคณะ ปี 2002 ใช้ Polyacrylonitrile ละลายใน Dimethylformamide นำมาผ่านแม่พิมพ์เส้นผ่าศูนย์กลางระดับนาโนเมตร ภายใต้แรงดันน้ำ สารละลายพอลิเมอร์จะออกมาเป็นเส้นใยขนาดนาโนเมตร เข้าสู่ solidifying solution กระบวนการนี้ลักษณะเส้นใยที่ได้จะเป็นรูปท่อหรือหลอด ที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง จึงเป็นวิธีที่ไม่ได้รับความนิยม

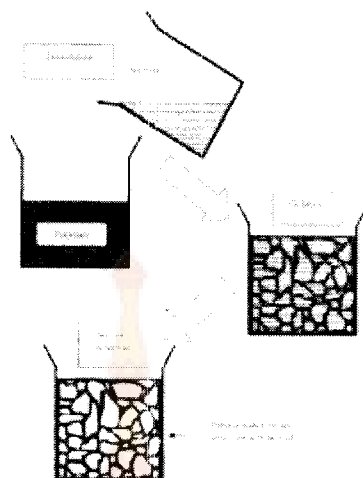


รูปที่ 11 แสดง Template synthesis

Phase separation ในกระบวนการนี้ มีหลักการคือพอลิเมอร์จะละลายในตัวทำละลายที่ละลายพอลิเมอร์ได้ที่ก่อน และจึงเปลี่ยนตัวทำละลายที่พอลิเมอร์นั้นละลายได้ไม่ดีลงไปทำให้เกิดเป็นนาโนไฟเบอร์ขึ้น

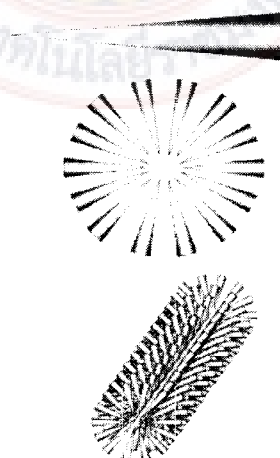
Ma and Zhang ค.ศ.1999 ได้ทำการศึกษา แบ่งกระบวนการออกเป็น

1. Polymer dissolution ละลาย Poly(L-lactic)acid PLLA ใน THF (tetrahydrofuran) คนที่ 60 °C 2 ชั่วโมง
2. Gelation เท 2 mL ของสารละลาย 50°C ใน Teflon vial ย้ายไปเก็บที่อุณหภูมิ -18°C to 45°C ทำให้เกิดการฟอร์มเจล
3. Solvent extraction นำ vial ที่มี เจลจุ่มลงในน้ำกลั่น ทำให้เกิดการแยกวัฏภาค เป็นเวลา 2 วัน
4. Freezing นำเจลออกจากน้ำ กดลงบนกระดาษกรองให้แห้ง นำไป ไว้ที่อุณหภูมิ -18°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. Freezing dry นำเจลไป freeze-dried ที่ -55°C ใน vacuum



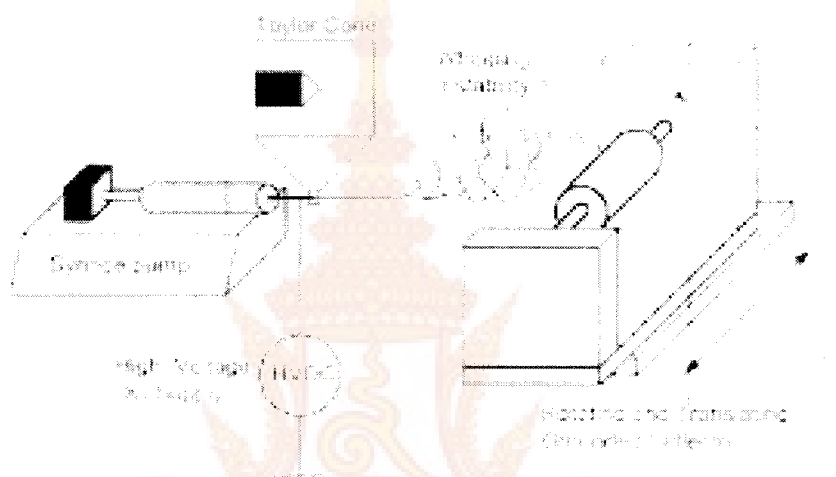
รูปที่ 12 แสดง Phase separation

Self-Assembly กระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์ที่เกิดขึ้นได้เองจากสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้โมเลกุลขนาดเล็ก เป็นพื้นฐานในการสร้างนาโนไฟเบอร์ เมื่อมีโมเลกุลมากขึ้นทำให้เกิดแรงระหว่างกัน เกิดการจัดเรียงตัวดังรูปที่ 5 Zhang ซึ่งเป็นหนึ่งในทีมวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับประโยชน์ต่าง ๆ ของ สายเปปไทด์ที่สามารถประกอบตัวเองได้ (Peptide self assembling) จนกระทั่งในปี 1991 ได้ค้นพบด้วยความบังเอิญว่า เมื่อสายเปปไทด์อยู่ในสารละลายน้ำเกลือ จะเกิดการจับกันเป็นโครงสร้าง โดยมีอัตราส่วนของโครงสร้าง คือ เป็นน้ำ 99 % และ 1%เป็นสายเปปไทด์ สายเปปไทด์นี้ประกอบด้วยกรดอะมิโน 3 ชนิดคือ อาร์จินิน (Argenine) อะลานิน (Alanine)และ กรดกลูตามิก (Glutamic acid) 16 โมเลกุลเรียงซ้ำไปมาและมีโครงสร้างแบบ β - sheet



รูปที่ 13 แสดง Self assembly

Electrospinning เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง โดยประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (high voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (metal collector) เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อย ต้นทุนต่ำ สามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 14 แสดง Electrospinning

อิเล็กโตรสปินนิงเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นมา 60 ปีแล้วแต่เพิ่งได้รับความสนใจศึกษากันอย่างจริงจังเมื่อไม่กี่ 10 ปีที่ผ่านมา ในปี ค.ศ. 1934 Formhals ได้จดสิทธิบัตรกระบวนการและเครื่องมือที่ใช้แรงทางไฟฟ้าในการสังเคราะห์เส้นใย ในปี ค.ศ. 1969 Taylor ได้ตีพิมพ์ผลงานที่อธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะที่ สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกจาก เข็มโลหะที่ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ว่ามีการเปลี่ยนรูปร่างของสารละลายจากทรงกลมเป็นลักษณะของสามเหลี่ยมคล้ายโคน เมื่อแรงสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งต่อมาได้มีการเรียกลักษณะนี้ว่า Taylor cone โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็น Taylor cone เชื่อมกับความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ ปี ค.ศ. 1971 Baumgarten เริ่มทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสารละลายพอลิเมอร์และพารามิเตอร์ในกระบวนการ ทำให้รู้ว่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีผลต่อลักษณะของนาโนไฟเบอร์ที่ได้ ปี ค.ศ. 1995 Reneker ได้ทำการศึกษา อย่างเป็นระบบมากขึ้น ทำให้อิเล็กโตรสปินนิงได้รับความสนใจจากนักวิจัยต่างๆ ทั่วโลก เห็นได้จากจำนวนผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวกับอิเล็กโตรสปินนิงเพิ่มจากประมาณ ปีละไม่ถึง 10 เรื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็น 40 เรื่องในปี ค.ศ. 2001 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

การทำงานของอิเล็กโตรสปินนิ่ง แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage DC supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with metal needle) และวัสดุรองรับ (collector) การทำงานของอิเล็กโตรสปินนิ่งเริ่มจากการให้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงแก่ สารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่หลอมเหลว ผ่านเข็มโลหะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก ทำให้แรงผลัทางไฟฟ้าในสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากหยดสารละลายรูปทรงกลมบนปลายเข็มจะเริ่มเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปโคนเมื่อแรงผลัทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงดึงดูดของสารละลายพอลิเมอร์ และเมื่อแรงผลัทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงดึงดูดของสารละลายพอลิเมอร์ สารละลายจะพุ่งออกจากปลายของโคนไปยัง วัสดุรองรับซึ่งต่อเข้ากับ ศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ ทำให้เกิดเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ สารละลายจะพุ่งเป็น แนวตรงในระยะหนึ่ง และจะผ่านเข้าไปในส่วนของ whipping instability ซึ่งจะเกิดการระเหยของ ตัวทำละลาย เส้นใยของแข็งเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กจะตกซ้อนทับกันบน วัสดุรองรับในลักษณะที่ ไม่ได้ทอ (Non-woven) ในส่วนของแข็งฉีที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ จะต้องมีการควบคุมให้มี อัตราการไหลที่สม่ำเสมอโดยวิธีต่างๆ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational force) บั๊ม (syringe pump) แรงดันก๊าซ (pressure gas) เป็นต้น ในส่วนของวัสดุรองรับก็มีหลายชนิด เช่น เพลท (stationary plate) ดรัม (rotating drum) ใช้สารละลายเช่น น้ำ เป็นต้น จากกระบวนการอิเล็กโตร สปินนิ่งจะเห็นได้ว่ามีขั้นตอนต่างๆ ซึ่งแต่ละขั้นตอนก็มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งส่งผลต่อลักษณะ สัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของนาโนไฟเบอร์ที่ได้

จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่ง พบว่ามีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ศักย์ไฟฟ้า จากการศึกษาของ Deitzel et al,2001 ใช้ Polyethylene oxide/water การศึกษา พบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น จะทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลง และมีแนว ไนวที่จะเกิด bead ในระบบเส้นใยมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก ศักย์ไฟฟ้าส่งผลถึง การเกิด Taylor cone และ fiber jet จึงจำเป็นต้องเลือกศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าเหมาะสม
2. อัตราการไหล จากการศึกษาของ Megelski et al,2002 ใช้ Polystyrene / tetrahydro furan ในการศึกษา พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของพอลิเมอร์จะทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางและรูมีขนาดเพิ่มขึ้น และแนวไนวที่จะเกิด bead ในระบบเส้นใยมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการระเหยของตัวทำ ละลายเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์
3. ระยะทางระหว่างปลายเข็มจนถึง collector จากการศึกษาของ Jaeger et al,1998 ใช้ Polyethylene oxide/น้ำ พบว่า เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นใยมีเส้นผ่าศูนย์กลางลดลง แต่ถ้า ระยะทางลดลงก็จะมีแนวไนวที่จะเกิด bead มากขึ้น การเพิ่มระยะทางจะทำให้การระเหยของตัวทำ ละลายเกิดได้อย่างสมบูรณ์

4. ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ จะส่งผลต่อความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลายจากการศึกษาของ Reneker et al,1995 ใช้ Poly(ethylene-co-vinyl alcohol) Propanol:Water พบว่าเมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นใยที่ได้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น เส้นใยที่มีความเข้มข้นน้อยจะมีแรงตึงผิวดำทำให้แรงไฟฟ้าเอาชนะตึงผิวได้ง่ายขึ้นและยังมีความหนืดต่ำทำให้การไหลดีขึ้นด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยจึงมีขนาดเล็ก

5. ความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารละลาย จากการศึกษากของ Zhang et al,2005 ใช้ Polyvinyl alcohol ละลายในน้ำและมีการเติมเกลือเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าในปริมาณต่างๆ ผลพบว่าเมื่อเติมเกลือในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การนำไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าลดลงและมีการกระจายตัวของขนาดในช่วงที่แคบด้วย ทั้งนี้ผู้วิจัยได้อธิบายว่า เมื่อการนำไฟฟ้าในสารละลายเพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถในการเก็บประจุของสารละลายเพิ่มขึ้น เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจึงมีค่า tensile strength สูงขึ้นเส้นใยที่ได้จึงมีขนาดเล็กลง

6. ความสามารถในการระเหยของตัวทำละลาย จากการศึกษากของ Megelski et al,2002 ใช้ Polystyrene ละลายในส่วนผสมของตัวทำละลาย 2 ชนิดคือ tetrahydrofuran(THF) ซึ่งมีความสามารถในการระเหยที่ดี และ dimethylformamide (DMF) ซึ่งมีความสามารถในการระเหยต่ำ ผลพบว่า เมื่อใช้ THF 100% จะทำให้เส้นใยที่ได้มีความพรุนสูง ส่วนเมื่อใช้ DMF 100% จะได้เส้นใยที่มีความเรียบและเส้นความเป็น microteztur ดังนั้นจะต้องเลือกใช้ระบบตัวทำละลายที่มีการระเหยที่เหมาะสมด้วย

2.5.2 ชนิดของอิเล็กโตรสปินนิง

อิเล็กโตรสปินนิงเป็นกระบวนการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย ในปัจจุบันมีนักวิจัยพยายามดัดแปลงกระบวนการเล็กโตรสปินนิงไปในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะที่ตรงกับการนำไปใช้งาน ชนิดของอิเล็กโตรสปินนิง จำแนกได้ตาม ชนิดของเข็มที่ใช้ และชนิดของสารละลายพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ ถ้าแบ่งตาม การเรียงตัวของเส้น capillary และเข็มโลหะ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

Single configuration ใช้ capillary ขึ้นเดียวและเข็มโลหะอันเดียว เป็นแบบที่ง่ายที่สุด ใช้สารละลายพอลิเมอร์เพียง ชนิดเดียว หรืออาจจะเป็นพอลิเมอร์หลายชนิดแต่ละสายในตัวทำละลายชนิดเดียว

Side by side configuration เป็นการเรียงตัวด้านข้าง โดยใช้ capillary 2 ชิ้นที่มีสารละลายพอลิเมอร์ 2 ชนิด เทคนิคนี้ใช้สำหรับการเส้นใยที่มีส่วนผสมของพอลิเมอร์ 2 ชนิด แต่พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด มีการละลายที่แตกต่างกันจึงต้องแยกละลายพอลิเมอร์ทั้ง 2 ออกจากกัน โดยการใช้เทคนิคนี้จะต้องคำนึงถึงค่า การนำไฟฟ้าของสารละลายทั้ง 2 ให้มีค่าใกล้เคียงกัน

Coaxial configuration เป็นเทคนิคใหม่ที่ทำเส้นใยนาโนไฟเบอร์ มีลักษณะเป็น core-shell โดยลักษณะของ capillary จะประกอบด้วย capillary อันใหญ่ที่มี capillary อันเล็กอยู่ด้านใน ภายใน capillary จะบรรจุสารละลายพอลิเมอร์สองชนิดที่ละลายเข้ากันไม่ได้ โดยพอลิเมอร์ที่ต้องการให้เป็น core จะบรรจุอยู่ในหลอดด้านใน

หากแบ่งชนิดของกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงตามชนิดของพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมสามารถแบ่งได้เป็น Polymer solution สารละลายพอลิเมอร์เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้กันมากที่สุด โดยนำพอลิเมอร์ที่ต้องการทำให้เป็นเส้นใยนาโนไฟเบอร์ มาละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม

Polymer melt พอลิเมอร์หลอมเหลว เทคนิคนี้เป็นการ electrospinning โดยใช้อุณหภูมิที่สูงจนพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งหลอมเป็นของเหลว ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ เช่น Polyethylene, Polypropylene เป็นต้น

ตารางที่ 1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้เทคนิค electrospinning และการนำไปใช้

Polymer	Solvent	Concentration	Perspective Application
Nylon6,6, PA 6,6	Formic acid	10 wt. %	Protective clothing
Polyurethanes, PU	Dimethyl formamide	10 wt. %	Electric, filter
Collagen-PEO	Hydrochloric acid	1-2 wt %	Wound healing, tissue engineering
Polyaniline (PANI) /PEO	Chloroform	2-4 wt %	Conductive fiber
Polyvinylcarbazole	Dichloromethane	7.5 wt. %	Sensor, filter
Cellulose acetate, CA	Acetone, acetic acid, dimethylacetamide	12.5-20%	Membrane
PLGA PLGA(PLA/PGA)=(85/15)	Tetrahydrofuran:dimethylformamide (1:1)	1 g/20 ml	Scaffold for tissue engineering
Polyvinil alcohol, PVA	Distilled water	8-16 wt. %	Drug delivery system
Poly(lactic acid, PLA	Dichloromethane	14 wt %	Drug delivery system
Polyacrylonitrile, PAN	Dimethyl formamide	600 mg/10 ⁻³ ml	Carbon nanofiber
Polyethylene oxide, PEO	Distilled water	7-10 wt %	Electret filter, blend other polymer
polyacrylic acid- polypyrrene methanol, PAA-PM	Dimethyl formamide	-	Optical sensor
poly vinyl phenol, PVP	Tetrahydrofuran	20, 60% (wt./vol.)	Antimicrobial agent
Polycaprolactone, PCL	Chloroform:methanol (3:1)	-	Biomedical application

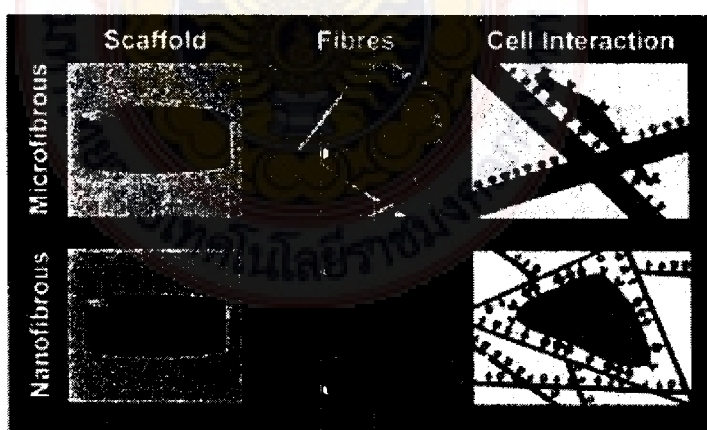
จากการศึกษาต่างๆของนักวิจัยได้พยายามนำ พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ มาศึกษาโดยใช้กระบวนการ อิเล็กโตรสปินนิง กันมากกว่า 50 ชนิด ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้และการนำไปใช้ แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งการใช้พอลิเมอร์ที่มีความหลากหลายทำให้ได้เส้นใยที่สามารถนำไปใช้ได้ในมุมที่กว้าง สามารถแบ่งการประยุกต์ใช้ได้เป็น

2.5.3 การประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์ในด้านต่างๆ

การประยุกต์ใช้ด้านการแพทย์

ในการนำไปใช้ทางการแพทย์และสุขภาพมักจะเลือกใช้พอลิเมอร์ที่เข้ากันได้กับร่างกาย (biocompatibility) และ/หรือ สามารถย่อยสลายได้ในร่างกาย (biocompatibility) ตัวอย่างของพอลิเมอร์เช่น poly L-lactic (PLLA), Chitosan, Polycaprolactone(PCL), poly ethylene-co-vinyl acetate (PEVA) เป็นต้น การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์และสุขภาพสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

โครงร่างวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering Scaffolds) การประยุกต์ใช้ทางด้านการวิศวกรรมเนื้อเยื่อจะใช้ นาโนไฟเบอร์เป็นโครงร่างเพื่อช่วยในการเจริญเติบโตของเซลล์เนื้อเยื่อ โดยการใช้นาโนไฟเบอร์เป็นโครงร่างจะมีข้อดีกว่าไมโครไฟเบอร์คือมีพื้นที่ให้เซลล์ยึดเกาะได้มากกว่า ดังรูปที่ 3 ทำให้เซลล์สามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่า และโครงสร้างของนาโนไฟเบอร์ยังมีลักษณะคล้ายกับ extracellular matrix อีกด้วย จึงมีผู้วิจัยทำการศึกษานาโนไฟเบอร์ที่นำไปใช้ทางด้านโครงร่างวิศวกรรมเนื้อเยื่อกันมากในปัจจุบัน



รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการเป็นโครงร่างของไมโครไฟเบอร์กับนาโนไฟเบอร์

กายอุปกรณ์ (Medical prostheses) เป็นการนำไปใช้การเป็นอวัยวะเทียม หลอดเลือดเทียมเนื้อเยื่อเทียมสำหรับซ่อมแซมกระดูกอ่อน และเส้นประสาท โดยตัวอย่างของการนำไปใช้ เช่น

the new technology of Virginia commonwealth university ได้ศึกษาการขึ้นรูปนาโนไฟเบอร์โดยใช้คอลลาเจนเป็นหลอดเลือดเทียม นำไปใช้ในการผ่าตัดทำ bypass หัวใจโดยแทนที่การใช้หลอดเลือดจากขา Professor Gerald E. Scheider และ Rutledge Ellis-Behnke ได้ทำการศึกษา นาโนไฟเบอร์ที่เกิดขึ้นได้เองอาร์จินิน (Argenine) อะลานีน (Alanine) และ กรดกลูตามิก (Glutamic acid) 16 โมเลกุลเรียงเข้าไปมาและโครงสร้างแบบ β - sheet ที่สามารถช่วยให้การเจริญเติบโตของ axon ขึ้นมาใหม่เมื่อฉีดยาสลายของกรดอะมิโนเหล่านี้เข้าไปในสมองหนูที่ถูกทำลาย เนื่องจากนาโนไฟเบอร์เข้าไปช่วยเสริมในสมองส่วนที่ถูกทำลายเมื่อเซลล์ประสาทเข้าไปอยู่ในโครงร่างนาโนไฟเบอร์ทำให้มีการเจริญเติบโตดีขึ้น งานวิจัยนี้ถือเป็นความหวังใหม่ในการซ่อมแซมเซลล์สมองของมนุษย์

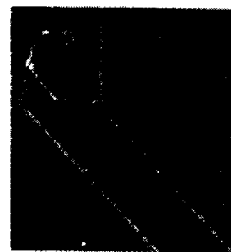
สิ่งตกแต่งแผล (Wound dressing) นาโนไฟเบอร์มีคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านพื้นที่ผิว ดังนั้นในการนำเป็นสิ่งตกแต่งแผลจะมีข้อดีกว่าผ้าก๊อซ คือมีพื้นที่ผิวในการดูดซับของเหลวได้มากกว่าทำให้แผลแห้งเร็ว และยังเป็นโครงร่างทำให้เซลล์ใหม่เจริญเติบโตได้ดีทำให้แผลหายเร็วและสามารถป้องกันการเกิดแผลเป็นได้ดีกว่า นอกจากนี้ด้วยรูที่มีขนาดเล็กของนาโนไฟเบอร์ยังเป็นสิ่งกีดขวางไม่ให้เกิดแบคทีเรียผ่านเข้าไม่ได้ แต่ยังระบายอากาศได้ดี นิยมใช้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติสลายได้เองในร่างกาย โดยสามารถ spray โดยตรงไปที่แผล ดังรูปที่ 4 หรือทำเป็นแผ่นสำหรับติดแผล พอลิเมอร์ที่นิยมใช้ เช่น คอลลาเจน ไคโตซาน เป็นต้น

เครื่องสำอาง (Cosmetic) โดยใช้เป็นเครื่องมือในการนำส่งเครื่องสำอางเข้าสู่ผิว ในลักษณะของแผ่นมาร์ก เนื่องจากแผ่นเส้นใยมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้การบรรจุสารต่างๆ ลงในแผ่นได้ปริมาณมาก สารที่นิยมใช้ เช่น สารทำความสะอาด สารเพิ่มความชุ่มชื้น สารแอนติออกซิเดชั่น เป็นต้น นอกจากนี้จะสามารถใส่สารในแผ่นมาร์กนาโนไฟเบอร์ได้ในปริมาณมากแล้ว การปลดปล่อยยังเกิดได้รวดเร็วในระยะอีกด้วย ทำให้ได้รับปริมาณมากในระยะเวลาอันสั้น

ระบบนำส่งยา (Drug delivery system ด้วยเหตุผลเดียวกันการประยุกต์ใช้เครื่องสำอาง ทำให้สามารถบรรจุยาได้มาก มีการปลดปล่อยยาที่รวดเร็ว และยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยยาได้โดยใช้เทคนิค coaxial electrospinning ดังรูปที่ 5 โดยสามารถควบคุมปริมาณยาปลดปล่อยได้โดยการควบคุมอัตราการไหลของตัวยาในสารละลายที่อยู่ใน capillary ด้านใน ทำให้แกนมีปริมาณมากหรือน้อยตามต้องการ ตัวอย่างยาที่มีการศึกษาวิจัย เช่น ยาในกลุ่มต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้ในการป้องกันการติดเชื้อหลังผ่าตัด โดยเมื่อผ่าตัดเสร็จแล้วจะฝังนาโนไฟเบอร์ที่สลายได้ในร่างกายที่มียาต้านเชื้อแบคทีเรียอยู่ลงไป ยาต้านมะเร็งใช้การฝังเข้าในอวัยวะที่เป็นมะเร็ง ยาแก้ปวดและด้านการอักเสบมีการศึกษาโดยการพัฒนาเป็นแผ่นแปะผิวหนัง เป็นต้น



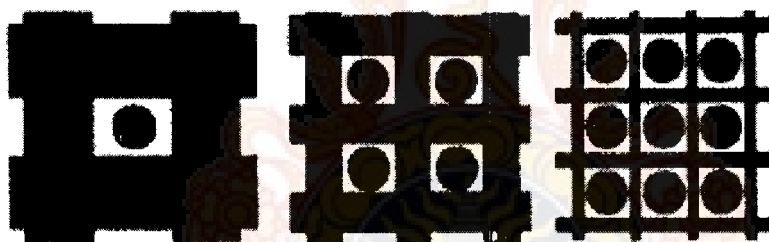
รูปที่ 4 แสดงการ
ประยุกต์ใช้เป็น
สิ่งตกแต่งแปล



รูปที่ 5 แสดงเส้นใยนาโนไฟเบอร์
ที่มีการใช้ในการนำส่งยา

การประยุกต์ด้านการกรองสาร

ในด้านการกรองสาร แผ่นเส้นใยที่ถักทอจากเส้นใยที่เล็กในระดับนาโนเมตร จะมีช่องว่างขนาดเล็กมากและสามารถกรองอนุภาคได้จำนวนมากกว่าหลายเท่าตัว แผ่นเส้นใยนาโนไฟเบอร์จึงสามารถนำมาใช้สามารถนำมาใช้สร้างระบบกรองที่มีประสิทธิภาพสูง แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงผลของขนาดเส้นใยที่เล็กลงต่อประสิทธิภาพการกรองสาร

นอกจากนี้ได้มีความพยายามนำเส้นใยนาโนมาเคลือบบนชุดเครื่องแบบทหาร (protective clothing) เพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ สารพิษทางเคมี นิวเคลียร์

การประยุกต์ใช้ด้านอิเล็กทรอนิกส์

ในกรณีนี้ที่เส้นใยมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีหรือสมบัติของสารกึ่งตัวนำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะเทคโนโลยีด้านตัวตรวจจับต่างๆ เช่น ตัวตรวจจับก๊าซ (gas sensor) ตัวตรวจจับความร้อน (thermal sensor) เป็นต้น

การประยุกต์ใช้ด้านวัสดุศาสตร์

เส้นใยนาโนไฟเบอร์บางชนิดถูกนำไปเสริมกับวัสดุอื่นเพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับสมบัติของเส้นใย เช่น เส้นใยนาโนคาร์บอน (carbon nanofibre) ซึ่งมีค่า Young's modulus และความแข็งแรง (strength) สูง อีกทั้งค่าแรงต้านทานแรงดึงตามยาว (tensile strength) ยังสูงกว่า

เหล็กถึงประมาณ 3 เท่า ในขณะที่มีความหนาแน่นกว่าเหล็กประมาณ 6 เท่า ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมในวัสดุคอมโพสิตเชิงกลที่ดีขึ้น ลักษณะเดียวกับการทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้นโดยการเสริมด้วยเหล็กเส้น และยังเป็นก้าวสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้ในยานอวกาศได้อีกด้วย

การประยุกต์ใช้ด้านอื่น ๆ

มีการนำนาโนไฟเบอร์ไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ อีกเช่น เป็นวัสดุนำส่งยาฆ่าแมลงในทางเกษตรกรรม เป็นเส้นใยในเสื้อผ้าที่ผสมโลหะทำให้สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ เป็นต้น

กล่าวโดยสรุปนาโนไฟเบอร์เป็นเส้นใยที่มีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือมีพื้นที่ผิวปริมาตรสูง มีรูขนาดเล็ก มีความพรุนมาก มีค่าแรงต้านทานแรงดึงตามยาวสูง เป็นต้น ซึ่งในการผลิตนาโนไฟเบอร์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น drawing, template synthesis, phase separation, self-assembly และ electrospinning โดยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสามารถควบคุมเส้นใยนาโนไฟเบอร์ ในแบบที่ต้องการได้โดยการควบคุมกระบวนการและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของนาโนไฟเบอร์นี้เอง ทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน และทางด้านเภสัชกรรมมีความน่าสนใจในการพัฒนาเป็นระบบนำส่งยาแบบใหม่

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียและคุณลักษณะของน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพโดยมีรายละเอียดของการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1 การเตรียมการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ตั้งต้น

การเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์เพื่อใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเมมเบรนจะใช้เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นจากโรงงานแปรรูปเนื้อไก่และโรงงานอาหารแปรรูปมินบุรี 1 ในเครือบริษัท เจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด (มหาชน) ที่มีความเข้มข้นของมวลตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น 6,200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดปริมาณ 75 ลิตร ใส่ในถังที่เตรียมไว้ เติมอากาศตลอดเวลา และทำการป้อนให้สารอาหารกับจุลินทรีย์โดยใช้สารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ตาม Meng et al. (2006) ซึ่งประกอบด้วย $C_6H_{12}O_6$ 20 g/L, Urea 5.39 g/L, K_2HPO_4 2.64 g/L, $CaCl_2$ 0.34 g/L และ $NaHCO_3$ 2.75 g/L

3.1.2 การศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

น้ำเสียขาเข้า และขาออกที่ผ่านการบำบัดด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนในการทดลองจะถูกทำการวิเคราะห์ค่าต่างๆทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ pH, TDS, Conductivity, Salinity, MLSS, COD, BOD, DO, NH_4^+-N , $NO_2^- -N$ และ P เป็นต้น

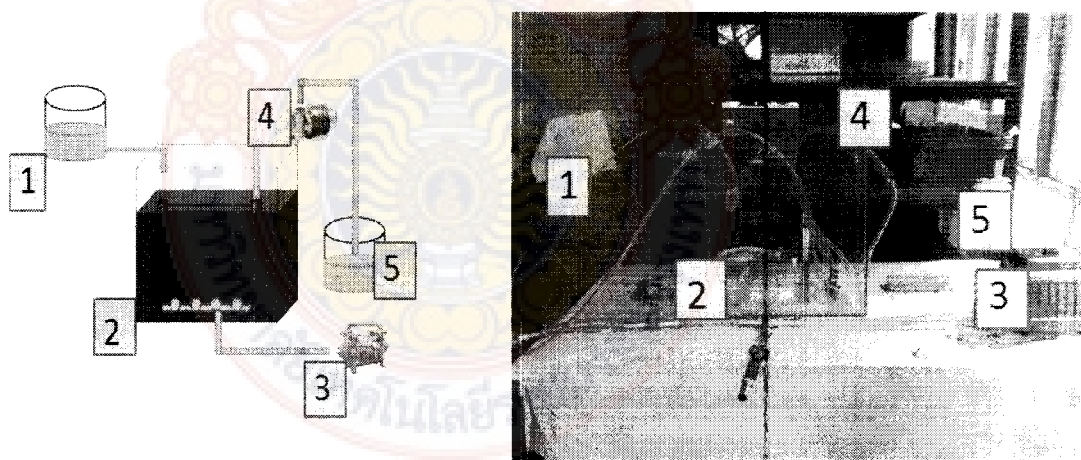
ตารางที่ 3.1 จุดเก็บและพารามิเตอร์วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย และความถี่การวิเคราะห์

ตัวอย่าง	พารามิเตอร์	ความถี่
Feed tank	pH , TDS , Conductivity , Salinity , NH_4^+-N , $NO_2^- -N$ และ P	2 ครั้งต่อสัปดาห์
	MLSS , COD , BOD5 และ DO	1 ครั้งต่อสัปดาห์
MBR tank	pH , TDS , Conductivity , Salinity , NH_4^+-N , $NO_2^- -N$ และ P	2 ครั้งต่อสัปดาห์

	MLSS , COD , BOD5 และ DO	1 ครั้งต่อสัปดาห์
ตารางที่ 3.1 จุดเก็บและพารามิเตอร์วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย และความถี่การวิเคราะห์		
Permeate tank	pH , TDS , Conductivity , Salinity , $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ และ P	2 ครั้งต่อสัปดาห์
	MLSS , COD , BOD5 และ DO	1 ครั้งต่อสัปดาห์
	EPS (โพรตีน และคาร์โบไฮเดรต)	1 ครั้งต่อสัปดาห์

3.1.3 การออกแบบและติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนแบบเมมเบรนจมตัวแบบแผ่นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้ถูกออกแบบและทำการติดตั้งดังภาพดังภาพ 3.1 โดยประกอบด้วย



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมแบบจำลองและภาพถ่ายระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่ใช้ในการวิจัย

1. ถังป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ (Feed tank) ขนาด 100 ลิตร จำนวน 1 ใบ
2. ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน คือ ถังปฏิกรณ์ทรงสี่เหลี่ยม ทำด้วยกระจก ขนาดปริมาตร 75 ลิตร ที่มีเมมเบรนจมตัวแบบแผ่น (flat sheet membrane) จม

ตัวอยู่ภายในระบบโดยคุณสมบัติเฉพาะของเมมเบรนที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตาราง 3.2

3. ปั๊มอากาศ (Air pump) ทำหน้าที่ให้อากาศแก่จุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ
4. ปั๊มน้ำ (Water pump) ทำหน้าที่สูบน้ำผ่านออกจากตัวเมมเบรนที่จมอยู่ในถังบำบัด
5. ถังเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัด (Permeate tank) คือถังพลาสติกขนาด 100 ลิตร จำนวน 1 ใบ



รูปที่ 3.2 ชุดเมมเบรนประเภทแผ่น (flat sheet membrane)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเฉพาะของเมมเบรนในงานวิจัย

คุณสมบัติเฉพาะ	รายละเอียด
ประเภทเมมเบรน	เมมเบรนแบบแผ่น (flat sheet)
วัสดุผลิตเมมเบรน	พอลิเอทิลีน
ขนาดรูเปิด	0.4 ไมโครเมตร

3.1.4 ทำการทดลองศึกษาตัวแปรต่างๆที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ได้แก่

- อิทธิพลของความเข้มข้นของสารแขวนลอย
- อิทธิพลของความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์

- อิทธิพลของปริมาณและชนิดของสารโพลีเมอร์ชีวภาพที่จุลินทรีย์ผลิต

3.1.5 ทำการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระหนาบต่อการอดตันของเมมเบรนเมื่อมีการเติมนาโนไฟเบอร์โพลีเมอร์บีด ได้แก่ ปริมาณการเติม และค่า pH ของนาโนไฟเบอร์ โพลีเมอร์บีด เป็นต้น

3.1.6 ทำการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการอดตันของเมมเบรนเมื่อมีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์โพลีเมอร์บีดในระบบ ด้วยเทคนิคทางเคมีและทางกายภาพ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของความดันตกคล่อม (Pressure drop) และการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการกรอง (Filtration resistance) เป็นต้น

3.1.7 ทำการศึกษาคุณภาพของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนเมื่อมีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์โพลีเมอร์บีด โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณภาพของน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบบำบัด ได้แก่ ค่าปริมาณธาตุอาหาร เช่น แอมโมเนีย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ

- 1) UV-vis spectrophotometer ผลิตภัณฑ์ Thermoโดยมีย่านการวัดคือ 625 nm
- 2) Colorimeter ผลิตภัณฑ์ Hach analysis รุ่น DR/890
- 3) เครื่องวัดค่าต่างๆ
 - ความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
 - เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
 - เครื่องวัดค่าความเป็นเกลือ (Salinity meter)
 - เครื่องวัดปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS meter)
 - เครื่องวัดกรดด่าง pH meter รุ่น PCSTestr 35
- 4) เตาไฟฟ้า (Hot plate)
- 5) กระจกกรอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด

- 1) น้ำกลั่น
- 2) Folin-Ciocalteu reagent
- 3) Anthrone
- 4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)

- 5) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid)
- 6) คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate; CuSO_4)
- 7) Sodium potassium tartrate x 4 H_2O
- 8) โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate; Na_2CO_3)
- 9) Na-K tartrate
- 10) กลูโคส ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)
- 11) ยูเรีย (Urea)
- 12) แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride ; CaCl_2)
- 13) ไดโพแทสเซียมฟอสเฟต (Dipotassium Hydrogen Orthophosphate; K_2HPO_4)
- 14) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate; NaHCO_3)

3.2.3 การวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ทางเคมีที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

- 1) ความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ (MLSS)
- 2) ปริมาณฟอสฟอรัส
- 4) ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน
- 5) ความเข้มข้นจุลินทรีย์พอลิเมอร์ชีวภาพ (EPS)
- 6) ค่าปริมาณความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD)
- 7) ค่าปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD)
- 8) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (DO)
- 9) ปริมาณไนโตรเจน

3.2.4 การวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ทางกายภาพที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

- 1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)
- 2) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)
- 3) ค่าความเค็ม (Salinity)
- 4) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (TDS)

3.3 ขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์ค่าต่างๆในการทดลอง

3.3.1 การตรวจวัดค่า EPS คาร์โบไฮเดรต

- 1) นำสารตัวอย่างมา 1 mL + Anthrone reagent 2 mL
- 2) นำมาต้มในน้ำร้อนอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 10 นาที
- 3) ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

- 4) นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 625 nm จากนั้นนำไปเทียบกับ calibration curve
- 5)

3.3.2 การตรวจวัดค่า EPS โปรตีน

1) เตรียมสารดังต่อไปนี้

สารประกอบ A

Na-K tartrate $\cdot 4 \text{ H}_2\text{O}$ จำนวน 2 g

Na_2CO_3 จำนวน 100 g

NaOH 1 N จำนวน 500 mL

สารประกอบ B

Na-K tartrate $\cdot 4 \text{ H}_2\text{O}$ จำนวน 2 g

$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{ H}_2\text{O}$ จำนวน 1 g

H_2O จำนวน 90 mL

NaOH 1 N จำนวน 10 mL

สารประกอบ C

เจือจาง Folin-Ciocalteu reagent : น้ำ (1:2)

- 2) นำสารตัวอย่างมา 1 mL + สารประกอบ A จำนวน 0.9 mL
- 3) นำมาต้มในน้ำร้อนอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 10 นาที
- 4) ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้น เติม สารประกอบ B จำนวน 0.1 mL
- 5) ทิ้งไว้ 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วเติม สารประกอบ C 3 mL อย่างรวดเร็ว
- 6) ทิ้งไว้ให้เย็น 10 นาที ที่อุณหภูมิห้องอีกครั้ง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 625 nm
- 7) นำไปเทียบกับ calibration curve

3.3.3 การตรวจวัดค่าฟลักซ์

- 1) เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองเมื่อครบ 30 นาที บันทึกปริมาตรน้ำชาออกที่ได้
- 2) ทำการทดลองซ้ำเมื่อครบ 60, 90, 120, 150, 180 นาที
- 3) นำมาคำนวณหาค่าฟลักซ์จากสูตร

$$\text{ฟลักซ์} = \frac{\text{ปริมาตร}}{\text{พื้นที่} \times \text{เวลา}}$$

3.3.4 การวิเคราะห์ค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจน

- 1) ตั้งระบบเครื่อง Hach analysis รุ่น DR/890 โดยการ กด prgm > พิมพ์ 64

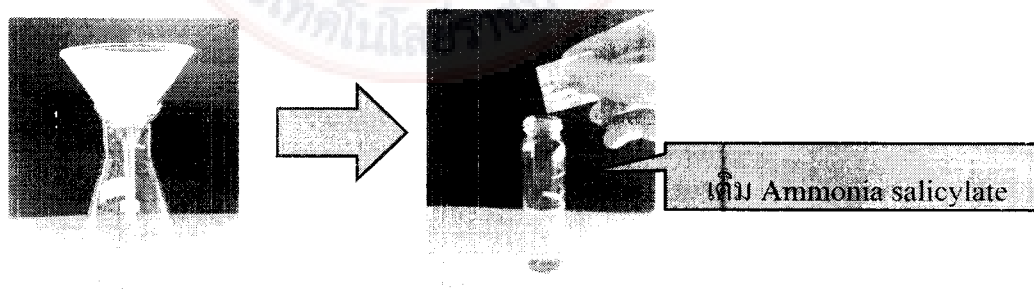


เครื่อง Hach analysis รุ่น DR/890

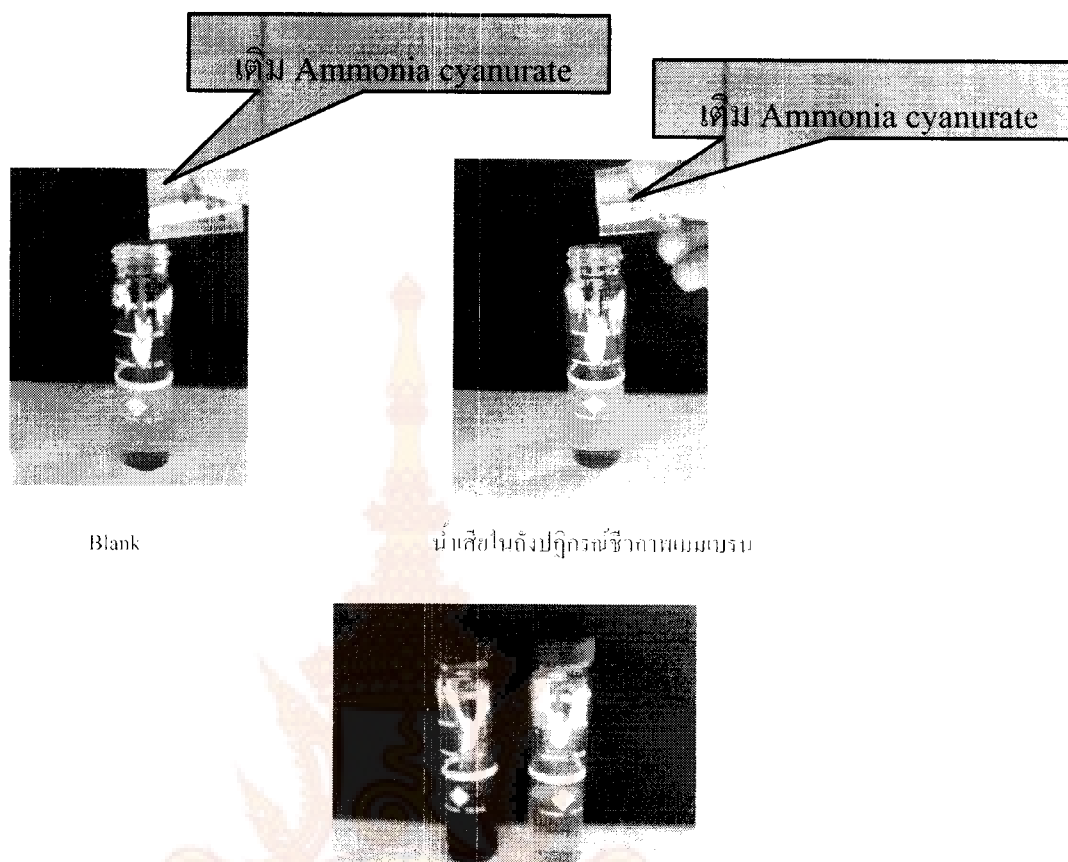
- 2) ใช้ Blank น้ำกลั่นจากนั้นนำมาเติม Ammonia salicylate



- 3) เก็บตัวอย่างน้ำในระบบนำมาเติม Ammonia salicylate จากนั้นทิ้งไว้ 3 นาที



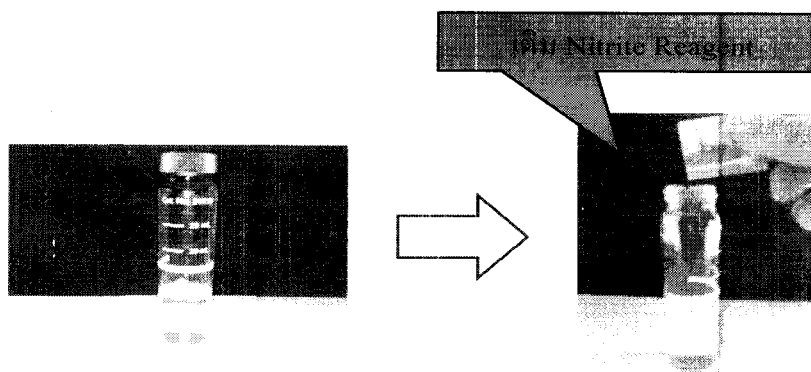
- 4) นำ Blank และน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ชีวภาพมาเติม Ammonia Cyanurate



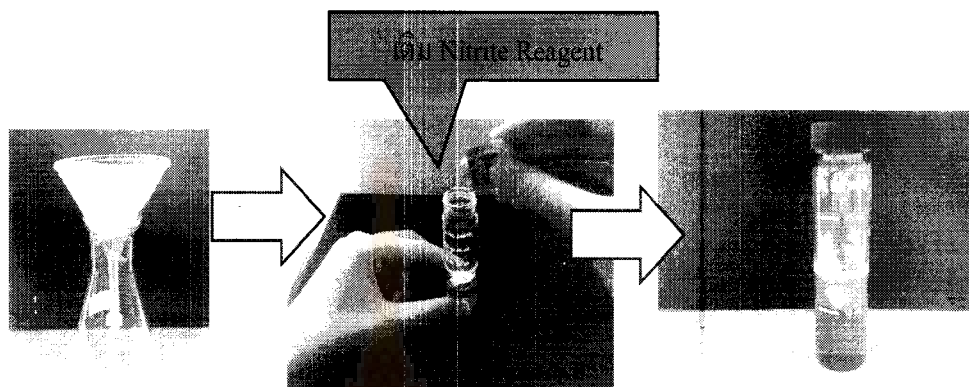
- 5) ทิ้งไว้ 15 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจนด้วยเครื่อง Hach

3.3.5 การวิเคราะห์ค่าไนโตรท์

- 1) ตั้งระบบเครื่อง Hach analysis รุ่น DR/890 โดยการ กด prgm > พิมพ์ 60
- 2) เตรียม Blank น้ำกลั่น จากนั้นเติม Nitrite Reagent



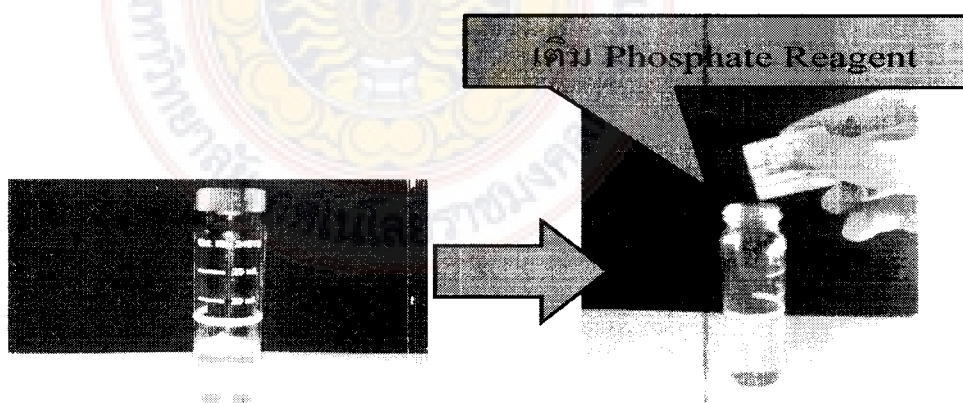
- 3) เก็บน้ำตัวอย่างในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจากนั้นนำมาเติม Nitrite Reagent



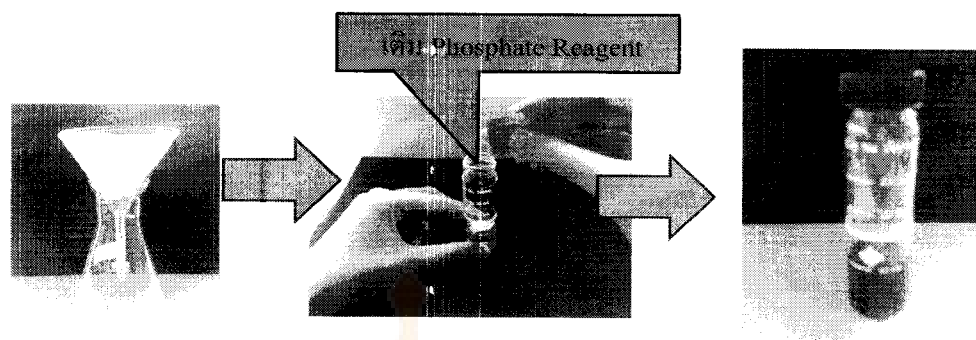
- 4) ทิ้งไว้ 15 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าไนไตรท์ด้วยเครื่อง Hach analysis

3.3.6 การวิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัส

- 1) ตั้งระบบเครื่อง Hach analysis รุ่น DR/890 โดยการ กด prgm > พิมพ์ 79
- 2) เตรียม Blank น้ำกลั่น จากนั้นเติม Phosphate Reagent



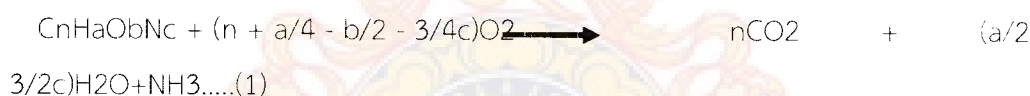
- 3) เตรียมจากน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจากนั้นนำมาเติม Phosphat Reagent



4) ทิ้งไว้ 2 นาทีจากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าฟอสฟอรัสด้วยเครื่อง Hach analysis

3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD)

ค่า COD หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการ oxidize สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (95-100 %) จะถูก oxidize โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง (Strong oxidizing agent) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ดังสมการที่ 1



จะเห็นว่าสมการการเกิดปฏิกิริยาของ COD คล้ายกับ BOD คือสารอินทรีย์ในน้ำจะถูก oxidize จนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ต่างกันตรงที่ BOD นั้นใช้แบคทีเรียในการย่อยสลาย ส่วน COD ใช้ตัวเติมออกซิเจน (oxidizer) ดังกล่าวแล้ว โดยปกติค่า COD จะสูงกว่าค่า BOD ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์คาร์บอนจะถูก oxidize อย่างสมบูรณ์โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการดูดซึมทางชีวภาพ (biological assimilation) ของสารเหล่านั้น เช่น กลูโคส ลิกนิน เซลลูโลส โดยเฉพาะถ้าน้ำเสียนั้นมีสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถถูก oxidize ทางชีวภาพอยู่ด้วย จะทำให้ค่า COD สูงกว่าค่า BOD มาก ในกรณีที่น้ำเสียมีสารอินทรีย์บางพวกเช่น straight-chain aliphatic compound, aromatic hydrocarbon, pyridine และ betaine ปะปนอยู่ ซึ่งสารเหล่านี้จะไม่ถูก oxidize ทางเคมี ค่า COD จะน้อยกว่าค่า BOD อีออนของสารอินทรีย์บางตัว เช่น halogen (F-, Cl-, Br-), NO₂⁻, S²⁻ และ Fe²⁺ มีผลทำให้ค่า COD มีค่ามากกว่าความเป็นจริง การหาค่า COD จะรู้ผลในเวลาไม่เกิน 3 ชม. ดังนั้นจึงเหมาะในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียเพราะสามารถแก้ไขข้อบกพร่องได้ทันทั่วทั้ง และใช้ในการประเมินค่า BOD อย่างคร่าว ๆ

Strong oxidizing agent ที่ใช้ในการหาค่า COD มีด้วยกันหลายตัวคือ potassium permanganate, ferric sulfate, potassium iodate และ potassium dichromate การหาค่า

COD โดยใช้โปแตสเซียมไดโครเมตเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ผลที่น่าเชื่อถือและแน่นอน หลักการของวิธีนี้คือ สารอินทรีย์คาร์บอนจะถูก oxidized โดยโปแตสเซียมไดโครเมตในสภาวะที่เป็นกรดอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงใช้การ reflux เพื่อป้องกันการระเหยสูญหายของสารเคมี จากนั้นจึงไทเทรตหาปริมาณโปแตสเซียม-ไดโครเมตที่เหลืออยู่ด้วย ferrous ammonium sulfate โดยใช้ ferroin เป็นอินดิเคเตอร์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



มีการเติม AgSO_4 เป็นตัว catalyst เพื่อเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดส์ของพวกกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ (straight chain aliphatic) นอกจากนี้ AgSO_4 ที่ใส่ไปจะไปทำปฏิกิริยากับ Cl^- , Br^- หรือ I^- ได้ แต่ AgSO_4 เป็น catalyst ที่ไม่ได้ผลในการออกซิไดส์สารประกอบพวก aromatic และ pyridine สารรบกวนที่สำคัญคือ Cl^- จึงต้องใส่ HgSO_4 ลงไปก่อนเพื่อไปจับกับ Cl^- ให้อยู่ในรูปของ mercuric chloride complex โดยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีค่า COD ตั้งแต่ 50 มก. /ล ขึ้นไปได้และแน่นอน ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่า COD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีดังนี้

- 1) ใส่ HgSO_4 ประมาณ 0.4 กรัม ลงในขวดรีฟลักซ์พร้อมด้วย glass bead 2-3 เม็ด จากนั้นเติมตัวอย่างน้ำที่ได้หาปริมาณที่เหมาะสมแล้วลงในขวด ปิดเตาสารละลายมาตรฐาน $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 10 มล.เติมลงไปอย่าให้เข้ากัน
- 2) ค่อย ๆ เติม กรด Sulfuric เข้มข้นที่ผสม AgSO_4 ลงไป 30 มล. (ไม่ต้องเขย่า)
- 3) นำขวดรีฟลักซ์นี้ไปต่อกับเครื่องควบแน่น ทำการรีฟลักซ์หรือต้มให้เดือดเป็นเวลานาน 2 ชม. ปลอยทิ้งไว้ให้เย็น ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างเครื่องควบแน่นก่อนที่จะถอดขวดรีฟลักซ์ออกไปไทเทรต
- 4) ทำ Blank โดยใช้ น้ำกลั่น 20 มล. และน้ำยาเคมีต่าง ๆ เหมือนที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง แล้วทำการรีฟลักซ์ไปพร้อมกับตัวอย่าง
- 5) ไทเทรตหาปริมาณ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ที่เหลือ หรือมาเกินพอด้วยสารละลาย $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ โดยใช้สารละลาย ferroin เป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด จะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ อ่านปริมาตรที่ไทเทรตตอนเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลแดงทันที

$$\text{COD, mg / L} = \frac{(a - b) \times N \times 8000}{\text{ml sample}}$$

a = ml ของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้ไทเทรต Blank

b = ml ของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้ไทเทรต น้ำตัวอย่าง

N = Normality ของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้

3.3.8 การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO)

Membrane electrode method หรือเครื่องมือที่เรียกว่า DO meter เป็นเครื่องมือที่ใช้ขบวนการเคมีไฟฟ้า โดยถือหลักอัตราการแพร่ของโมเลกุลออกซิเจนผ่านเยื่อ (membrane) ที่มีความเฉพาะเจาะจงกับออกซิเจน โดยที่เยื่อนี้อยู่ใน working electrode การวิเคราะห์ DO จะใช้วิธีได้นั้นขึ้นอยู่กับสารบวกรวมที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่างนั้นๆ และความแม่นยำของผลที่ได้จากการวิเคราะห์

3.3.9 การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นจุลินทรีย์ (MLSS)

Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS) หมายถึง ปริมาณหรือความเข้มข้นโดยประมาณของจุลชีพในถังเติมอากาศในระบบ Activated sludge คิดเป็นปริมาณสารแขวนลอยหรือ Mixed liquor ซึ่งเป็นของผสมระหว่างน้ำทิ้งกับตะกอนจุลชีพในถังเติมอากาศ การหาค่า MLSS มีประโยชน์ในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียโดยจะใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนของอาหารต่อมวลของจุลชีพ (Food/Microorganism Ratio; F/M) ซึ่งคำนวณได้จาก $F/M = \text{BOD Loading} / \text{MLSS}$ อัตราส่วน F/M นี้มีความสำคัญมากในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated Sludge เพราะจะเป็นปัจจัยที่ควบคุมและกำหนดองค์ประกอบที่สำคัญของระบบ คือ ขนาดของถังเติมอากาศ (Aeration tank) เวลาที่ใช้ในการเติมอากาศ (Aeration time) ปริมาณจุลชีพ (MLSS) และประสิทธิภาพของระบบ ตัวอย่างเช่น ในระบบบำบัดแบบ Activated Sludge ที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดีมากกว่า 90% จะมีอัตราส่วน F/M ไม่เกิน 0.4 และมี MLSS อยู่ในช่วงประมาณ 4000 - 5000 มิลลิกรัม/ลิตร

- 1) อดกระดากกรองให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในเตสติกเคเตอร์แล้วชั่งน้ำหนัก
- 2) วางกระดากกรองลงในกรวยบุคเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศ
- 3) ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดากกรองให้เปียกแล้วเปิดเครื่องดูดสุญญากาศเพื่อให้กระดากกรองติดกับกรวยบุคเนอร์
- 4) กรองตัวอย่างน้ำที่ผสมเข้ากันดีแล้ว 50-100 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องดูดอากาศ แล้วล้างเครื่องกรองด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เปิดเครื่องทิ้งไว้ 3 นาที
- 5) เมื่อแห้งแล้วนำกระดากกรองออกมาวางในภาชนะเดิม (อาจใช้ถ้วยระเหยหรือกระดากอลูมิเนียมก็ได้) แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในเตสติกเคเตอร์ และชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักคงที่

การคำนวณ

$$SS = (A - B) \times 1000 / C$$

เมื่อ SS = ปริมาณสารแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)

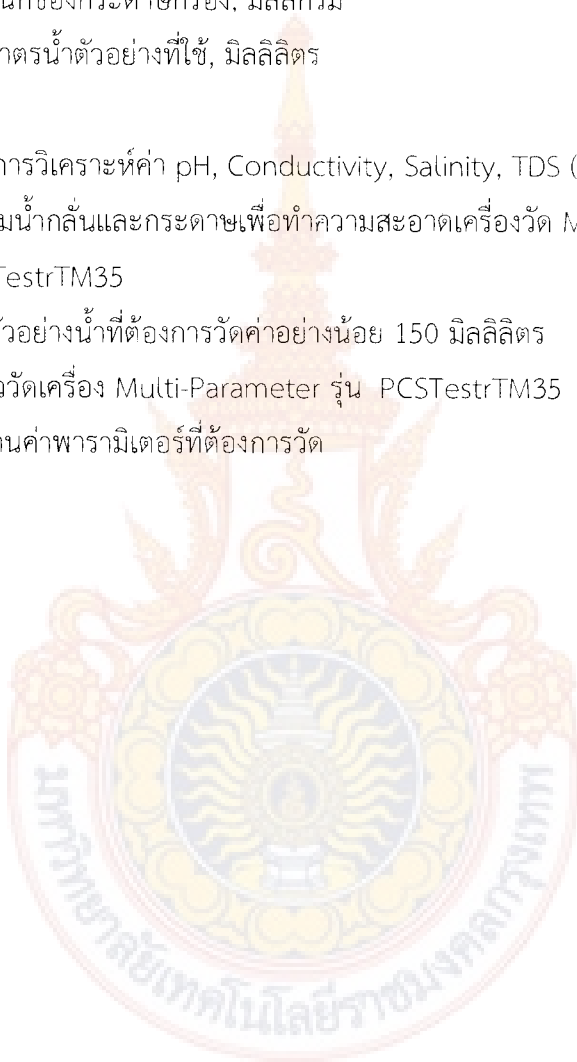
A = น้ำหนักกระดาศกรองและสารแขวนลอย, มิลลิกรัม

B = น้ำหนักของกระดาศกรอง, มิลลิกรัม

C = ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้, มิลลิลิตร

3.3.10 การวิเคราะห์ค่า pH, Conductivity, Salinity, TDS (Total Dissolved solid)

- 1) เตรียมน้ำกลั่นและกระดาศเพื่อทำความสะอาดเครื่องวัด Multi-Parameter รุ่น PCSTestrTM35
- 2) เก็บตัวอย่างน้ำที่ต้องการวัดค่าอย่างน้อย 150 มิลลิลิตร
- 3) จุ่มหัววัดเครื่อง Multi-Parameter รุ่น PCSTestrTM35
- 4) กดอ่านค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการวัด



บทที่ 4

ผลการทดลอง

การดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการกรองของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงในกระบวนการบำบัดน้ำเสียและคุณลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในกระบวนการถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ซึ่งการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียนั้นเราจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือการวิเคราะห์ทางกายภาพสามารถวัดด้วยเครื่องมือประเภทต่างๆและการวิเคราะห์ทางเคมีเป็นการวิเคราะห์ที่ต้องอาศัยสารเคมีเป็นส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์ ผลการทดลองต่างๆในงานวิจัยนี้แสดงดังรายละเอียดด้านล่าง

4.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดในน้ำกลั่น

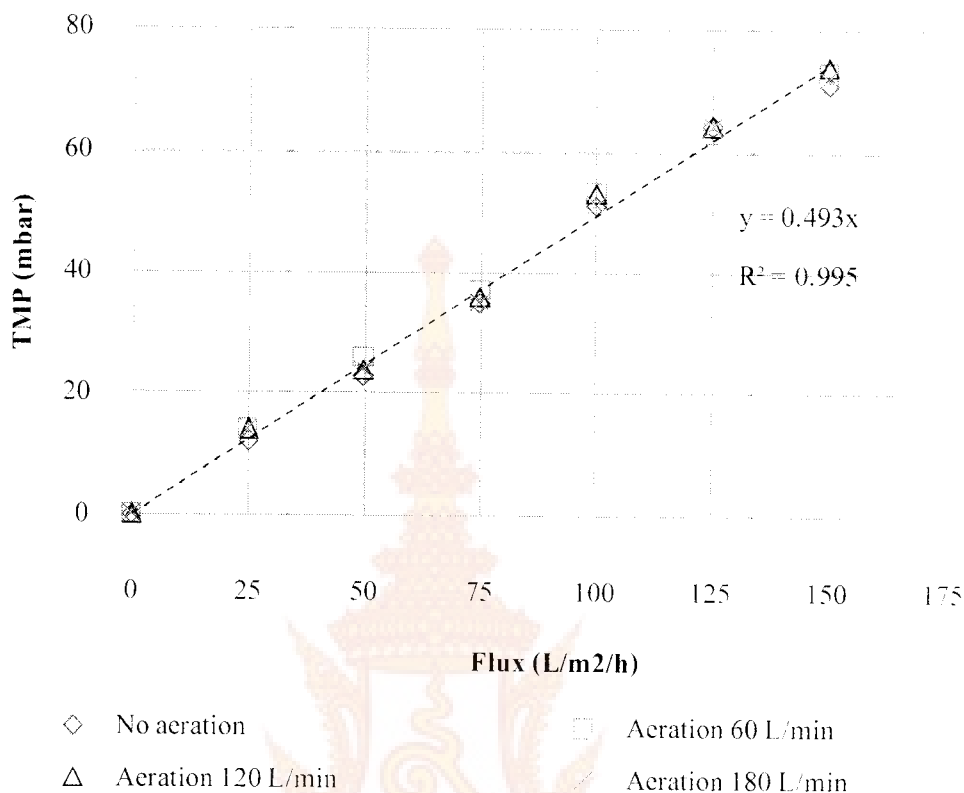
ในการศึกษาการทดสอบสภาพให้น้ำซึมผ่านได้ของเมมเบรนสะอาดในน้ำกลั่นเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าความต้านทานการกรองตั้งต้นก่อนใช้งานของเมมเบรน (intrinsic membrane resistance: R_m) จะสามารถทำได้โดยการหาความสัมพันธ์จากกราฟระหว่างค่าฟลักซ์กับค่าความดันส่งผ่านเมมเบรน จากรูป 4.2 แสดงผลการกรองน้ำกลั่นผ่านเมมเบรน 2 ครั้งและบันทึกการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์และค่าความดันส่งผ่านเมมเบรน จากนั้นนำค่าความชันของกราฟระหว่างค่าฟลักซ์กับค่าความดันส่งผ่านเมมเบรนมาแทนค่าในสมการที่ 4.1 และทำการคำนวณ ก็จะได้ค่าความต้านทานตั้งต้นของเมมเบรนสะอาดประมาณ $1.46E+10$ ต่อเมตร ซึ่งค่า R_m ที่ได้นี้ถือว่าใกล้เคียงกับค่า R_m โดยทั่วไปของเมมเบรนแบบแผ่น

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m} \quad (4.1)$$

สมการการกรอง (Darcy's law):

$$R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{J} \quad (4.2)$$

เมื่อ J คือค่าการส่งผ่านฟลักซ์, ΔP คือค่าความดันส่งผ่านเมมเบรน, μ คือค่าความหนืดของของไหล (ในที่นี้คือน้ำกลั่น อุณหภูมิห้อง = 0.862×10^{-3}) และ R_m คือค่าความต้านทานตั้งต้นของเมมเบรนสะอาด

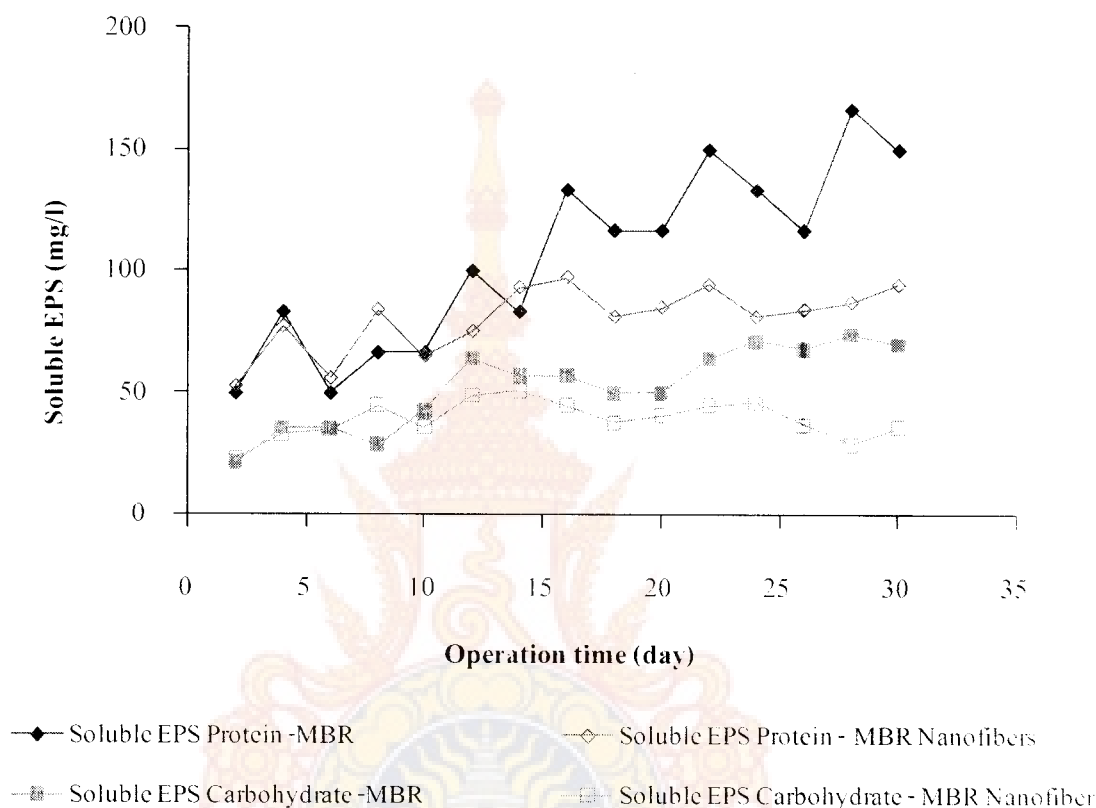


รูปที่ 4.1 ผลการทดลองการกรองน้ำกลั่นของเมมเบรนสะอาด

4.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของนาโนไฟเบอร์กับการจับตัวและพฤติกรรมการสร้างสารโพลีเมอร์ชีวภาพที่จุลินทรีย์ในระบบผลิตได้

มีการรายงานถึงอิทธิพลของสารโพลีเมอร์ชีวภาพในบางงานวิจัยว่ามีส่วนเกี่ยวพันอย่างมีนัยสำคัญกับการอุดตันของเมมเบรนในระบบการบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งร่วมกับการใช้เมมเบรนหมุนตัว (Chang and Lee 1998) Laspidou และ Rittman (2002) รวมทั้ง Hsieh et al. (1994) สารโพลีเมอร์ชีวภาพที่พบในระบบการบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ 1) สารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ที่ยึดติดอยู่ในตะกอนจุลินทรีย์ (bound extracellular polymeric substance: bound EPS) ได้แก่ สารโพลีเมอร์จากแคปซูลของเซลล์, เมือกที่คลุมเซลล์และเมือกที่ยึดติดเซลล์ และ 2) สารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำที่เซลล์ผลิตและปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (soluble extracellular polymeric substance: soluble EPS) ได้แก่ สารอินทรีย์ละลาย, สารอินทรีย์แขวนลอย และเมือกแขวนลอย เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าองค์ประกอบของสารโพลีเมอร์ชีวภาพจะประกอบด้วยสารต่างๆอันได้แก่ คาร์โบไฮเดรต, โปรตีน, กรดนิวคลีอิก, กรดไขมัน และสารดีเอ็นเอ อย่างไรก็ตามสารประเภทโพลีเมอร์คาร์โบไฮเดรตและโปรตีนถูก

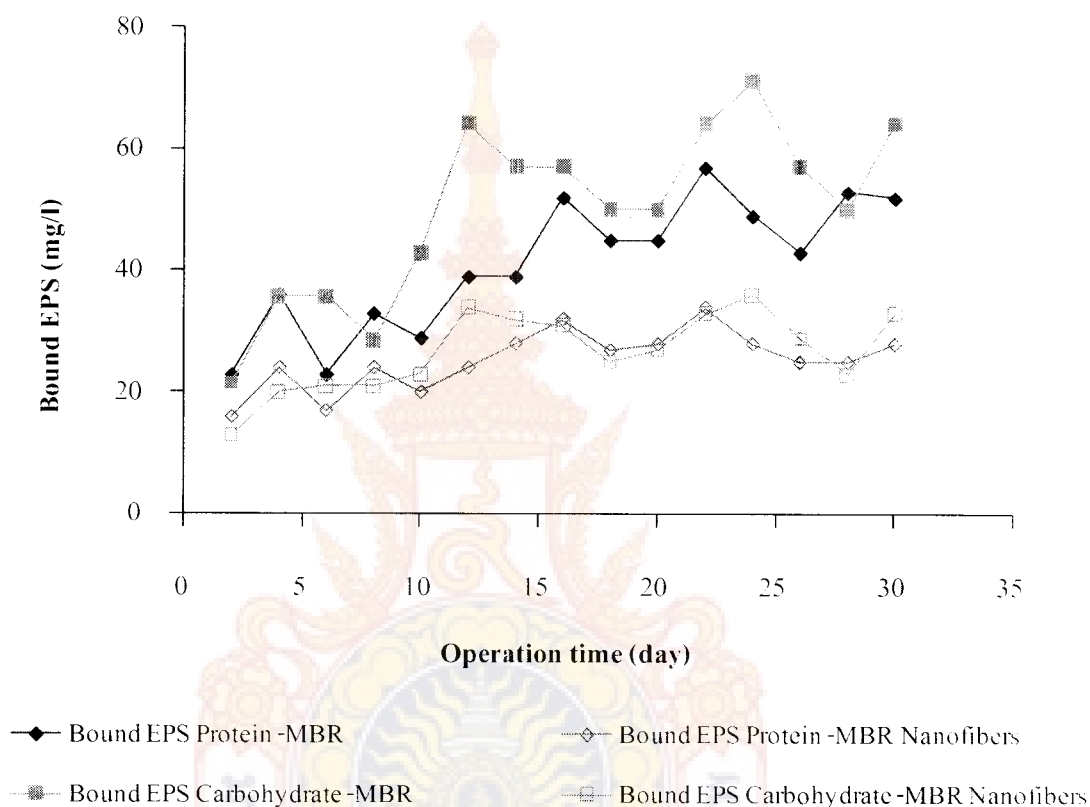
ยอมรับว่าเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่เมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่นๆ (Ji and Zhou 2006) ดังนั้น การวัดเฉพาะค่าโพลีเมอร์คาร์โบไฮเดรตและโพลีเมอร์โปรตีนจึงมักใช้ในงานวิจัยโดยทั่วไป



รูปที่ 4.2 ปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำ (Soluble EPS) ในระบบบำบัดแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่เติมและไม่เติมนาโนไฟเบอร์ (นาโนไฟเบอร์ 0.3 g/g MLSS)

จากรูปที่ 4.2 พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำ (Soluble EPS) พบว่าระยะเวลาการดำเนินงานเพิ่มขึ้นจะทำให้สารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำประเภทโปรตีนเพิ่มขึ้นมากกว่าเท่าตัวจาก 50 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ไปเป็น 150 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ในขณะที่สารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำประเภทคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้นเช่นกันจาก 24 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ไปเป็น 65 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ในขณะที่เมื่อพิจารณาแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัวที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ พบว่าค่าสารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำทั้งประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจะต่ำกว่าในถังควบคุม โดยในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่มีนาโนไฟเบอร์จะมีสารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตอยู่ระหว่าง 50 - 94 และ 23-36 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ตามลำดับ จะ

เห็นได้ว่าในระบบที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ จุลินทรีย์จะมีการสร้างสารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำลดลงมาก อาจเป็นเพราะอนุภาคนาโนไฟเบอร์ขัดขวางการดูดซึมธาตุอาหารและการผลิตสารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำ



รูปที่ 4.3 ปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ (Bound EPS) ในระบบบำบัดแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่เติมและไม่เติมนาโนไฟเบอร์

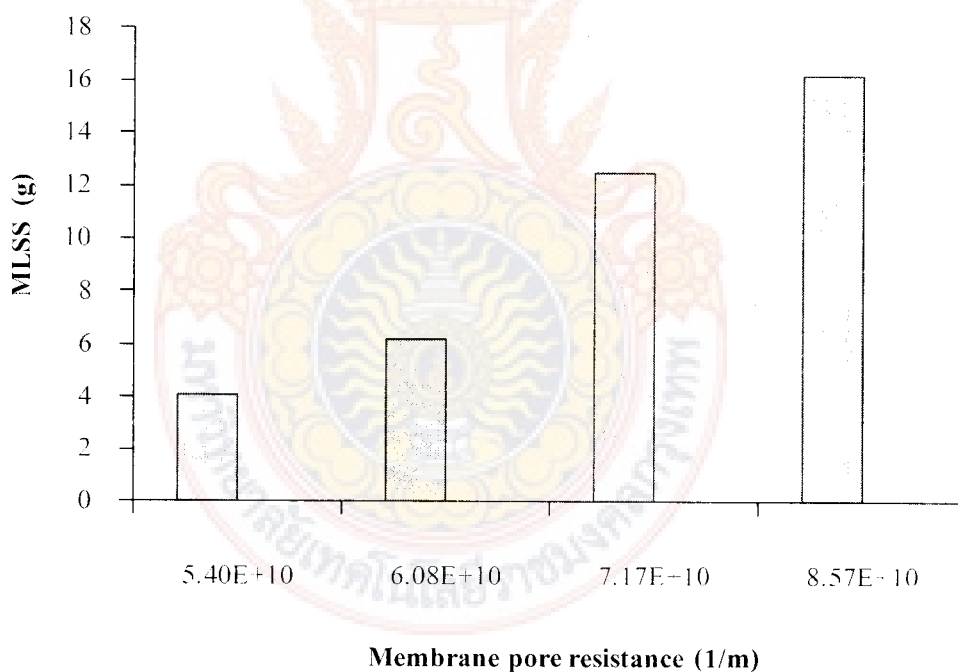
จากรูปที่ 4.3 พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ (Bound EPS) พบว่าระยะเวลาการดำเนินงานเพิ่มขึ้นจะทำให้สารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ประเภทโปรตีนเพิ่มขึ้นมากกว่าเท่าตัวจาก 21 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ไปเป็น 52 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ในขณะที่สารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ประเภทคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้นเช่นกันจาก 21 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ไปเป็น 64 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ในขณะที่เมื่อพิจารณาระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัวที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ พบว่าค่าสารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ทั้งประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจะต่ำกว่าในถังควบคุม โดยในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่มีนาโนไฟเบอร์จะมีสารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ประเภทโปรตีนและ

คาร์โบไฮเดรตอยู่ระหว่าง 14 – 33 และ 13-23 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ตามลำดับ จะเห็นว่าในระบบที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ จุลินทรีย์จะมีการสร้างสารโพลิเมอร์ชีวภาพจริงเซลล์ลดลงมาก

4.3 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอุดตันของเมมเบรนในระบบบำบัดน้ำเสีย

4.3.1 อิทธิพลของความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีต่อการกรองของเมมเบรนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

มีรายงานว่าพฤติกรรมการกรองของเมมเบรนจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของตัวแปรต่างๆรวมทั้งความเข้มข้นจุลินทรีย์ (MLSS) จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายในรูกรองเมมเบรนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจุลินทรีย์ในระบบ



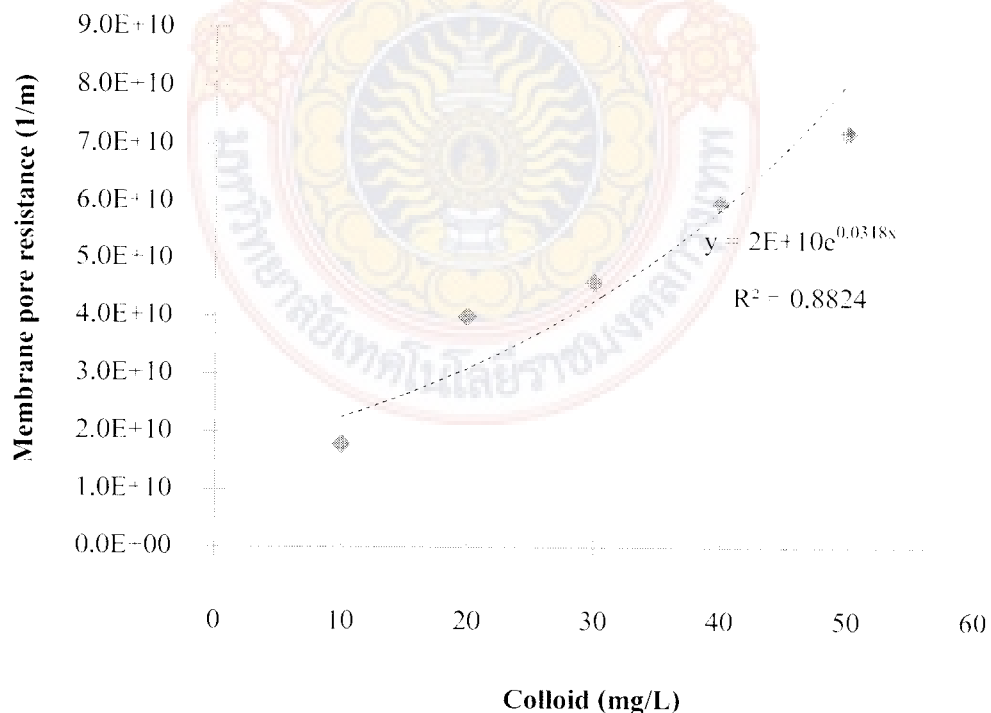
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์กับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายในรูกรองเมมเบรน

จากรูปที่ 4.4 พบว่าความเข้มข้นของจุลินทรีย์จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายในรูกรองเมมเบรน การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นจุลินทรีย์จะทำให้เกิดการไหลวนของอนุภาคบนผิวหน้าของเมมเบรนมากขึ้น เกิดการอุดตันง่ายขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานภายในรูกรองเมมเบรนของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ความสำคัญของความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีต่อการอุดตัน

ด้านการกรองของเมมเบรนได้ถูกกล่าวถึงในงานวิจัยต่างๆ โดยส่วนใหญ่มักกล่าวถึงการเพิ่มขึ้นของการอุดตันเมมเบรนเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (ขึ้นอยู่กับกระบวนการชีวรูปที่ประยุกต์ใช้ในระบบ ได้แก่ ระบบการให้และไม่ให้อากาศ : aerobic and anaerobic) (Brindle and Stephenson 1996) แต่อย่างไรก็ดี บางงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า การอุดตันของเมมเบรนไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์จนกว่าจะถึงค่าค่าหนึ่งที่ค่อนข้างสูง (Rose et al. 1990; Yamamoto et al. 1999) นอกจากนี้ยังมีบางงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างการอุดตันของเมมเบรน (หรือการลดลงของค่าฟลักซ์) กับความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (Manem and Sanderson, 1996)

4.3.2 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่มีต่อการกรองของเมมเบรนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

ในระบบการบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งร่วมกับการใช้เมมเบรนจมตัว มีการรายงานถึงอิทธิพลของสารแขวนลอยในบางงานวิจัยว่ามีส่วนเกี่ยวพันอย่างมีนัยสำคัญกับการอุดตันของเมมเบรน (Fan et al. 2006)

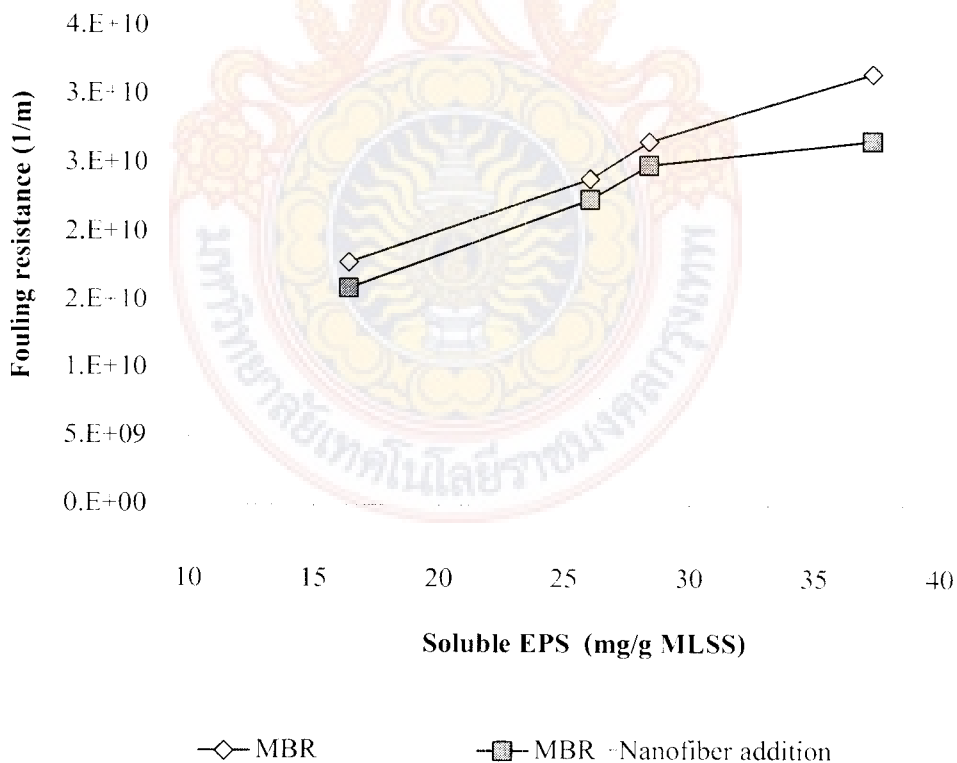


รูปที่ 4.5 ปริมาณสารแขวนลอยกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายในรูกรองเมมเบรน

สารแขวนลอยในระบบการบำบัดน้ำเสียจะหมายถึงส่วนของอนุภาคที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.01 to 1.0 ไมโครเมตร (Tchobanoglous et al. 2003) ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับขนาดรูเปิดของเมมเบรน สารแขวนลอยนี้จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่รวมถึงองค์ประกอบของซากเซลล์และสารชีวรูปที่เซลล์ผลิตได้ จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปริมาณสารแขวนลอยกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายในรูกรองของเมมเบรน พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของปริมาณสารแขวนลอยที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลอย่างมากต่อการอุดตันของเมมเบรนและส่งผลให้ความต้านทานภายในของรูกรองเมมเบรนเพิ่มขึ้นแบบเอกซโปเนนเชียล

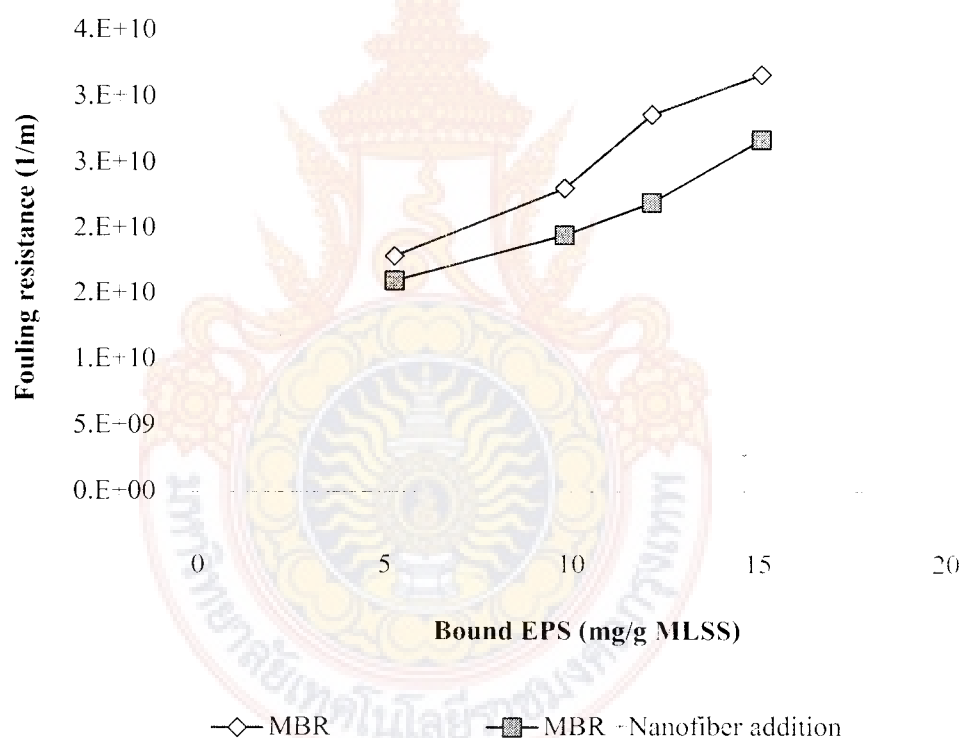
4.3.3 อิทธิพลของปริมาณและชนิดของสารโพลีเมอร์ชีวภาพที่จุลินทรีย์ผลิตที่มีต่อการกรองของเมมเบรนจมตัวในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 พบว่า การเพิ่มขึ้นของสารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์และสารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำจะส่งผลให้เกิดความต้านทานการกรองภายในรูกรองของเมมเบรนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 ปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำ (soluble EPS) กับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการกรองภายในรูกรองของเมมเบรน (ปริมาณการเติมนาโนไฟเบอร์ 0.25 g/ g MLSS)

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำ (Soluble EPS) ในระบบที่มีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ในระบบจะมีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ระหว่าง 15-40 mg/g MLSS และในระบบที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์จะมีค่าการอุดตันของเมมเบรน ต่ำกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์อยู่โดยเฉลี่ย 9% อาจเนื่องจากการเติมนาโนไฟเบอร์ในระบบ (ในกรณีนี้คือ 0.25 g nanofiber/ g MLSS) จะช่วยให้เกิดการขัดถูบนผิวหน้าเมมเบรนมากขึ้น จึงลดโอกาสการอุดตันของเมมเบรนจมตัวในระบบลง ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 4.7 พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ (Bound EPS) ในระบบที่มีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ในระบบจะมีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ระหว่าง 5-17 mg/g MLSS และในระบบที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์จะมีค่าการอุดตันของเมมเบรน ต่ำกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์อยู่โดยเฉลี่ย 16%

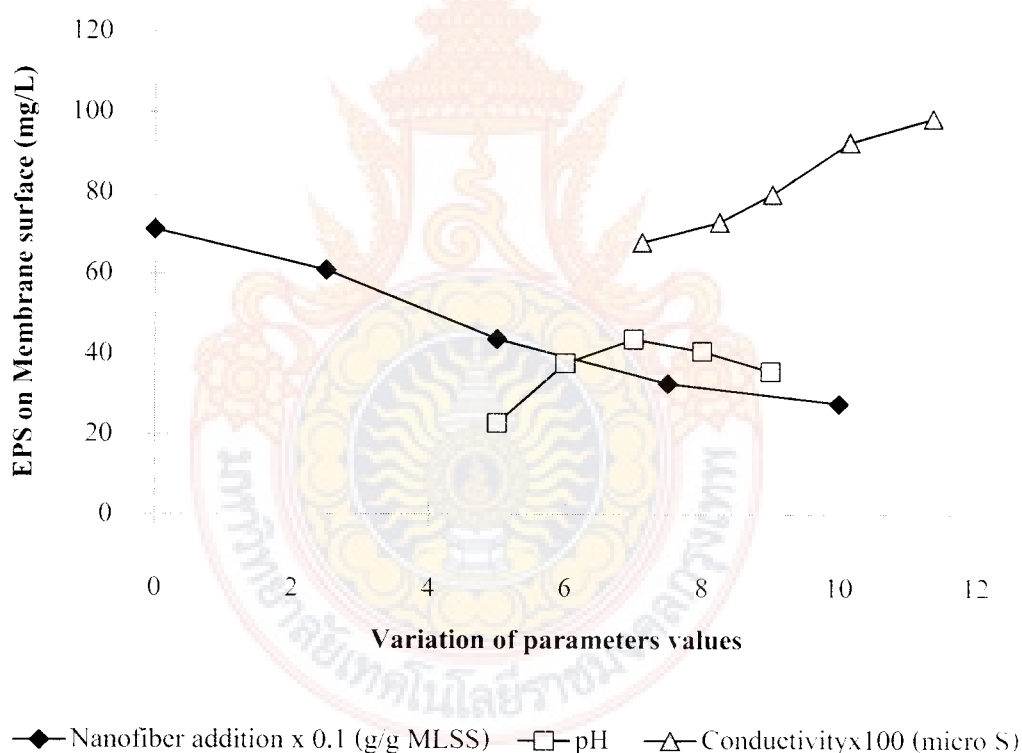


รูปที่ 4.7 ปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ (bound EPS) กับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการกรองภายในรูกรองของเมมเบรน (ปริมาณการเติมนาโนไฟเบอร์ 0.25 g/ g MLSS)

4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบท่อการจับตัวกันของโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรนเมื่อมีการประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์ในระบบ

จากรูปที่ 4.8 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอิทธิพลของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมในการประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์ (ปริมาณการเติมนาโนไฟเบอร์, ค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้า) กับระบบบำบัดน้ำเสียแบบถัง

ปฏิกิริยาสีภาพเมมเบรน พบว่าจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรน โดยการเพิ่มปริมาณการเติมนาโนไฟเบอร์ระหว่าง 0 - 10 กรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ จะส่งผลให้เกิดการยึดเกาะของปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรนลดลงเป็นอย่างมาก (จาก EPS 76 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ไปเป็น EPS 27 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์) ในทางตรงกันข้ามจะพบความสัมพันธ์ในเชิงบวกระหว่างการเพิ่มขึ้นของค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรน โดยการค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบระหว่าง 712 - 1,136 ไมโครซีเมนต์ จะส่งผลให้เกิดการยึดเกาะของปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นกว่า 45% (จาก EPS 67 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ไปเป็น EPS 99 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์)



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมเมื่อมีการประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์ (ปริมาณการเติมนาโนไฟเบอร์, ค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้า) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรน

จากรูปที่ 4.8 ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของระบบระหว่าง 5 - 9 (เมื่อเติมนาโนไฟเบอร์คงที่ที่ 0.25 กรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์) จะส่งผลให้เกิดกราฟเส้นแบบโค้งลงโดยมีค่า

ปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรนสูงสุดที่ pH 7 คาดว่าอาจเป็นเพราะที่ค่า pH เป็นกลางเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย

4.5 ผลการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการอุดตันของเมมเบรนเมื่อมีและไม่มี การเติมนาโนไฟเบอร์

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาคุณลักษณะการอุดตันของเมมเบรนที่ใช้ในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ โดยจะทำการวิเคราะห์ทางกายภาพด้วยภาพถ่าย Scanning Electron microscopic (SEM) และการวิเคราะห์ความต้านทานเชิงกลศาสตร์ของเมมเบรน (Hydraulic resistance of membrane)

4.5.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะการอุดตันของเมมเบรนโดยการพิจารณาความต้านทานเชิงกลศาสตร์ (Hydraulic resistance of membrane)

ค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์ของเมมเบรนเป็นค่าหนึ่ง que แสดงถึงสมรรถนะเชิงลึกของกระบวนการกรองผ่านเมมเบรน โดยค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์ของเมมเบรน (R_t) สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของความดันตกคร่อมและการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานการกรอง ตามสมการ 4.4

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} \quad (4.4)$$

สมการการกรอง (Darcy's law):

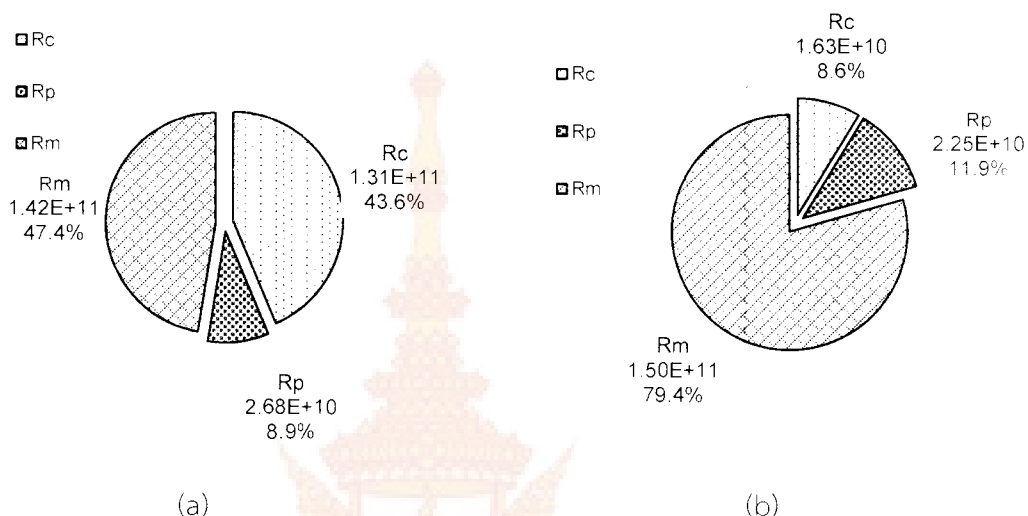
เมื่อ J คือค่าการส่งผ่านฟลักซ์, ΔP คือค่าความดันส่งผ่านเมมเบรน, μ คือค่าความหนืดของของไหล และ R_t คือค่าความต้านทานรวมของการกรอง

ทั้งนี้ค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์ทั้งหมดจะประกอบด้วย ค่าความต้านทานจากสาเหตุต่างๆของการอุดตันดังนี้

$$R_t = R_m + R_c + R_p \quad (4.5)$$

เมื่อ R_t คือค่าความต้านทานรวมของการกรอง, R_m คือค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาด, R_c คือค่าความต้านทานเค้กบนผิวหน้าเมมเบรน, R_p คือค่าความต้านทานรูกรองของเมมเบรน

จากการทดลองในงานวิจัยนี้เมื่อทำการทดลองโดยเปรียบเทียบระหว่างการเติมและไม่เติมนานาไฟเบอร์ในระบบการบำบัดน้ำเสียแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์ทั้งหมดของระบบจะแสดงได้ดังรูป 4.9



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์ของการกรองในระบบที่ (a) ไม่มีการเติมนานาไฟเบอร์ และ (b) มีการเติมนานาไฟเบอร์ (0.25 g nanofiber/ g MLSS)

จากรูปที่ 4.9 พบว่าการกรองที่สภาวะไม่มีการเติมนานาไฟเบอร์ในระบบจะมีค่าความต้านทานการกรองโดยรวมสูงมากกว่าเมื่อเทียบกับการกรองที่สภาวะมีการเติมนานาไฟเบอร์เนื่องจากเกิดการสะสมตัวของเค้กบนผิวหน้าเมมเบรน มีการวิเคราะห์ว่าที่สภาวะการกรองของเมมเบรนจมตัวในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ไม่มีการขัดผิวจะมีแรงดูดมากส่งผลให้เกิดการสะสมตัวมากขึ้นของอนุภาคบนผิวหน้าเมมเบรนและทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความหนาชั้นเค้กและเกิดการอัดตัวแน่นของชั้นเค้กได้ จากเหตุดังกล่าวนี้จะเห็นได้ความต้านทานการกรองที่เกิดจากชั้นเค้กจะเป็นความต้านทานส่วนใหญ่ของระบบ (มากกว่า 30%) นอกจากนี้พบว่าเมื่อมีการเติมนานาไฟเบอร์ (0.4 กรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจะทำให้ความต้านทานการกรองของระบบลดลงกว่า 44% (จากความต้านทานการกรองของระบบควบคุม 2.99×10^{11} ลดลงเป็น 1.98×10^{11} เมื่อมีการเติมนานาไฟเบอร์) เนื่องจากการลดลงของการอุดตันภายนอก (cake resistance : Rc) เป็นสาเหตุหลัก

4.5.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะการอุดตันของเมมเบรนทางกายภาพโดยภาพถ่าย Scanning Electron microscopic (SEM)

จากรูปที่ 4.10-4.11 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าเมมเบรนที่ใช้ในการกรองภายใต้สภาวะต่างๆ พบว่าผิวหน้าของของเมมเบรนใหม่ (รูปที่ 4.10) ก่อนนำมาใช้ในการทดลองมีลักษณะ

สะอาด รูกรองสม่ำเสมอและสังเกตเห็นได้ชัดเจน ขณะที่ภาพถ่าย SEM ของรูกรองเมมเบรนที่สภาวะการกรองโดยที่มีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ (รูปที่ 4.11) จะยังคงสังเกตเห็นรูกรองของเมมเบรนได้ชัดเจนทั้งในชุดควบคุมของระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนและในระบบที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ โดยพบว่าในระบบที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์มีรูกรองบางส่วนมีลักษณะอุดตันอยู่บ้างเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.11 (a)) ในทางกลับกันภาพถ่าย SEM ของรูกรองเมมเบรนที่สภาวะการกรองโดยไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ ((รูปที่ 4.11 (b)) จะไม่สามารถสังเกตเห็นรูกรองของเมมเบรนได้ชัดเจนเนื่องจากมีการปกคลุมของชั้นแค้กอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรน หรือกล่าวอีกในหนึ่งคือการเติมนาโนไฟเบอร์จะช่วยลดการสะสมตัวของแค้กบนผิวหน้าเมมเบรนนั่นเอง

รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของเมมเบรนสะอาดก่อนการทดลอง



(a) MBR+nanofiber (0.25 g/g MLSS)

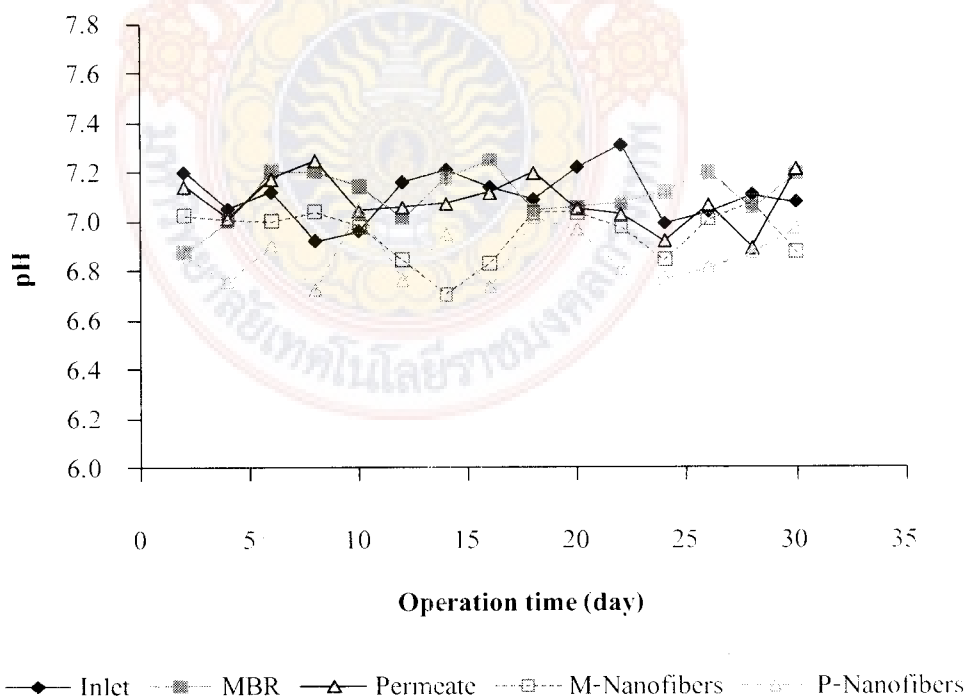
(b) Control MBR

รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของรูกรองเมมเบรนที่สภาวะการกรองโดยมีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์

4.6 ผลการศึกษาคุณภาพของน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบถ่วงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนเมื่อมีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์

4.6.1 พีเอช

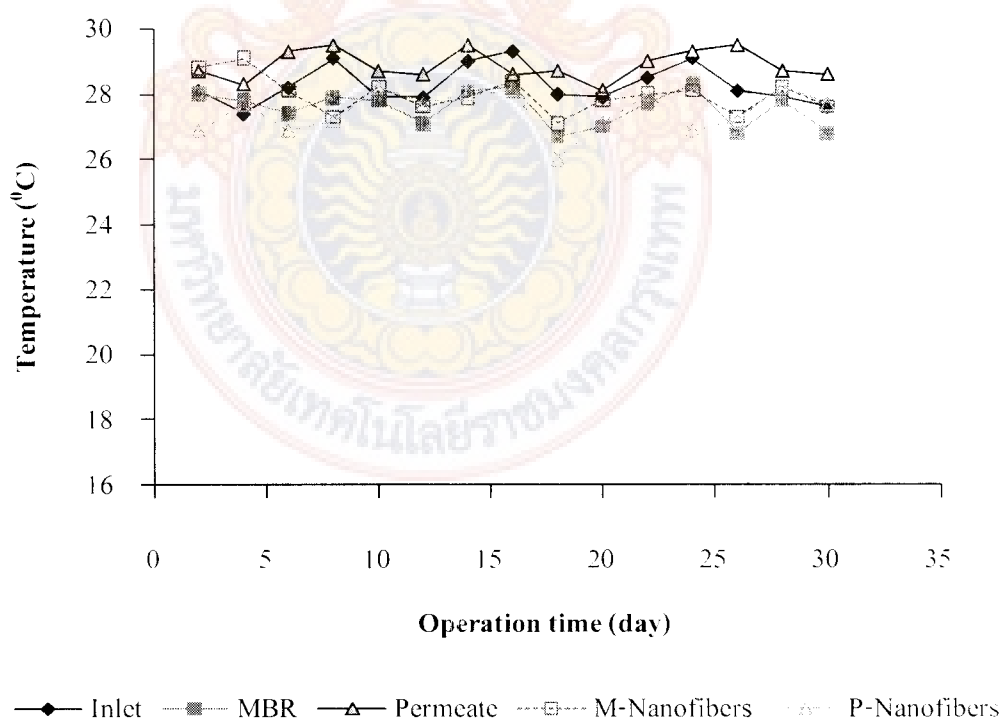
ผลการติดตามค่าพีเอชระบบถ่วงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมน้ำแสดงดังรูป 4.12 พบว่าในน้ำทิ้งขาเข้ามีค่าพีเอชระหว่าง 7.31 - 6.92 ค่าพีเอชในถังควบคุมปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมน้ำอยู่ระหว่าง 7.20 - 6.87 และค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบถ่วงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมน้ำจะอยู่ระหว่าง 7.20 - 6.80 ในขณะที่เมื่อพิจารณาถ่วงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมน้ำที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ พบว่าค่าพีเอชจะต่ำกว่าในถังควบคุม โดยในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่มีนาโนไฟเบอร์จะอยู่ระหว่าง 7.08 - 6.7 และค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบถ่วงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนเติมนาโนไฟเบอร์จะอยู่ระหว่าง 7.04 - 6.62 จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชในระบบมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบเดิมอากาศที่ทำให้ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันทำให้ค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (พีเอชต่ำ) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์พบว่ามีความเหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ตามค่ามาตรฐานที่แนะนำซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 6.50 - 8.50 (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2548)



รูปที่ 4.12 ค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่เติมและไม่เติมนาโนไฟเบอร์

4.7.2 อุณหภูมิ

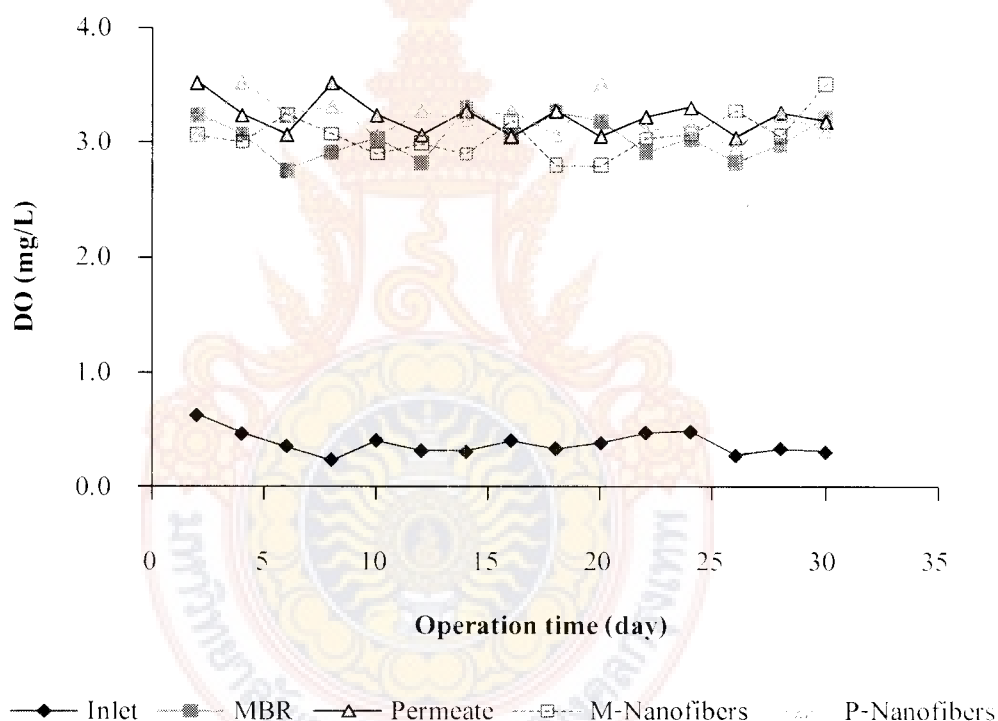
อุณหภูมิมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2545) และสมรรถนะของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเมมเบรน (Clech et al., 2006) จากการติดตามผลของอุณหภูมิในระบบดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัดขาออก และอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมน้ำอยู่ระหว่าง 25.4 – 29.8 องศาเซลเซียส ในขณะที่ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมน้ำที่มีการเติมนานโนไฟเบอร์จะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25.1 – 29.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดังกล่าวนี้นี้มีความเหมาะสมต่อการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และจากการศึกษาของ Clech et al., 2006 พบว่าการบำบัดน้ำเสียที่ระบบมีอุณหภูมิต่ำกว่า 17 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าความหนืดของ MLSS เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการสัมผัสอินทรีย์สารในน้ำเสียของจุลินทรีย์ต่ำลงและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ลดลงด้วย อีกทั้งอุณหภูมิที่ต่ำลงมีผลทำให้จุลินทรีย์ที่จับตัวเป็นก้อนแขวนลอย (floc) เกิดการแตกตัว และแบคทีเรียจะมีการปล่อยสารประกอบออกมานอกเซลล์ซึ่งมีผลต่อการเกิดอุดตันของเมมเบรนและทำให้สมรรถนะของเมมเบรนลดลง



รูปที่ 4.13 อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่เติมและไม่เติมนานโนไฟเบอร์

4.7.3 ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำ

จากผลการติดตามปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในน้ำทิ้งขาเข้ามีค่าต่ำมากและอยู่ระหว่าง 0.24 - 0.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัวและน้ำที่ผ่านการบำบัดจะอยู่ระหว่าง 2.65 - 3.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่เมื่อพิจารณาระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัวที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ พบว่าค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่มีนาโนไฟเบอร์และน้ำขาออกที่ผ่านการบำบัดจะอยู่ระหว่าง 2.72 - 3.52 มิลลิกรัมต่อลิตร



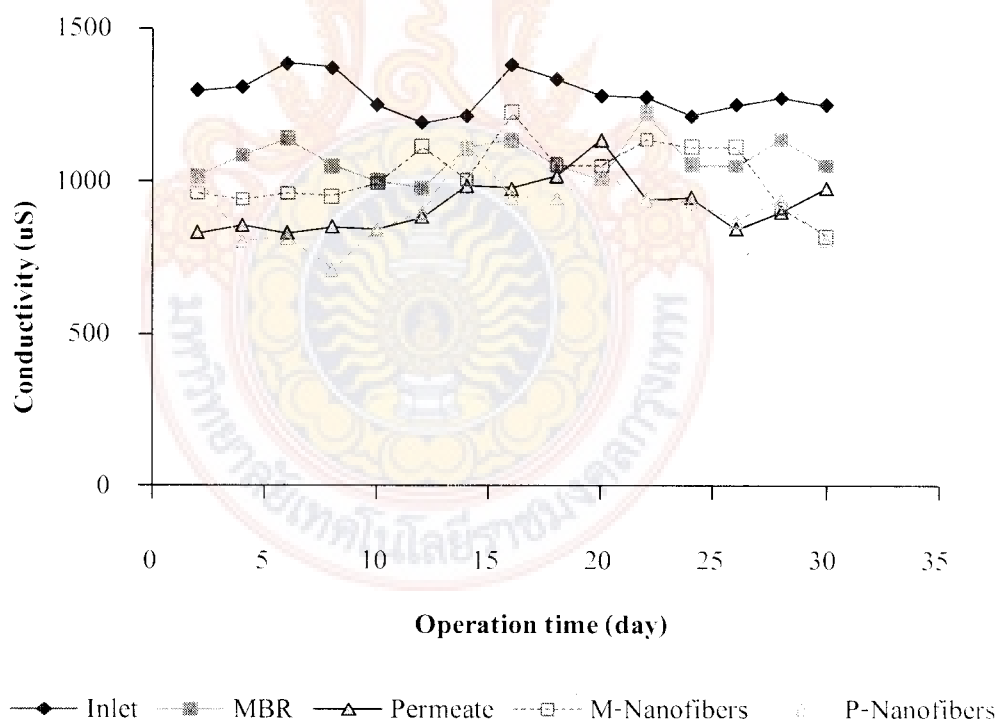
รูปที่ 4.14 ปริมาณ DO ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่เติมและไม่เติมนาโนไฟเบอร์

จะเห็นได้ว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในระบบบำบัดทั้งแบบที่มีและไม่มีนาโนไฟเบอร์จะมีค่าสูงและมากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และเป็นไปตามค่าปริมาณออกซิเจนที่แนะนำในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิก และกลุ่มแบคทีเรียไนตริฟายอิงในการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจน นอกจากนี้จากการศึกษาของ Han et al. (2005) พบว่าความเข้มข้นของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่ไม่เหมาะสมในการบำบัดด้วยระบบแอโรบิกคือ ต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่ต่ำกว่า

นี้จะทำให้ปริมาณการถ่ายโอนออกซิเจนในรูปของออกซิเจนอิสระเข้าสู่เซลล์ของกลุ่มจุลินทรีย์แอโรบิก ลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนต่ำลงตามไปด้วย และในอีกทางหนึ่งปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่สูงย่อมแสดงถึงอัตราการให้อากาศที่สูงด้วย มีผลให้เกิดการเคลื่อนไหวของฟองอากาศเกิดแรงเฉือนขัดถูบนผิวหน้าของเมมเบรนช่วยลดอัตราการอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรนด้วย

4.7.4 ค่าการนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการติดตามค่าการนำไฟฟ้าในระบบบำบัดถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัวที่มีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ในระบบ พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งขาเข้ามีค่ามากที่สุดเนื่องจากในน้ำทิ้งขาเข้ามีความเข้มข้นของไอออนโดยรวมในน้ำมากซึ่งเป็นผลมาจากที่น้ำทิ้งขาเข้ามีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงอันได้แก่พวกเกลือแร่และเกลือโลหะต่างๆ โดยที่ตัวอย่างน้ำในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนมีค่าการนำไฟฟ้าลดลง



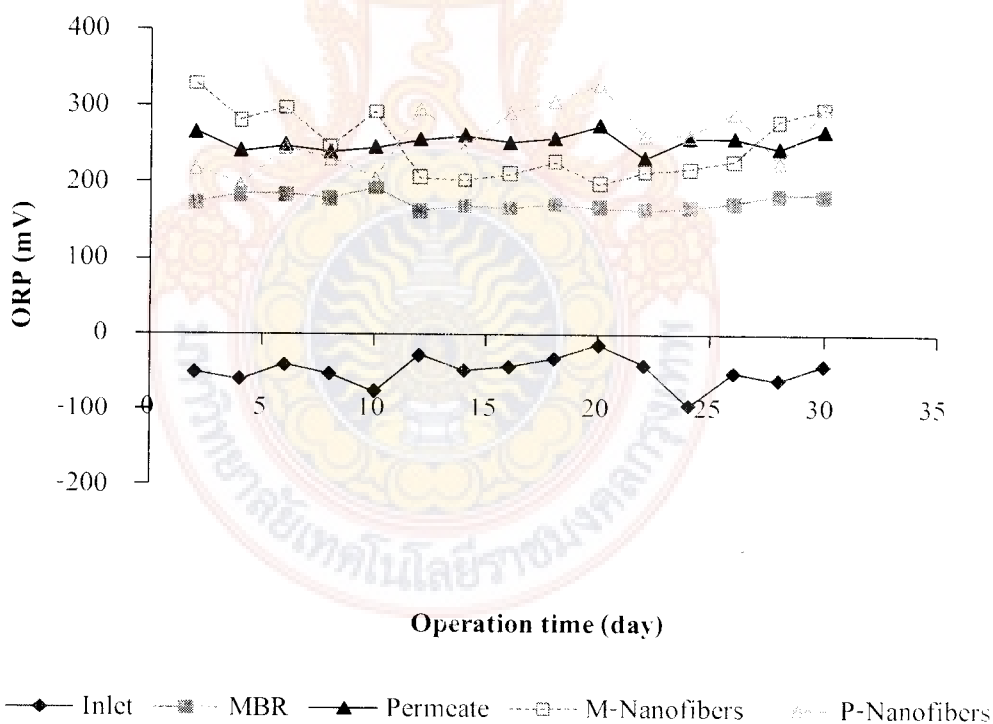
รูปที่ 4.15 ค่าการนำไฟฟ้าในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัวที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์

ในขณะที่ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัวที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์จะมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่าแบบที่ไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสารอาหาร

ของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ในระบบว่าจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอาหารที่ดี และนาโนไฟเบอร์เกิดการจับตัวและตกตะกอนของจุลินทรีย์ในระบบ ทำให้การบำบัดน้ำมีประสิทธิภาพดีขึ้น นอกจากนี้พบว่าน้ำขาออกที่ผ่านการบำบัดมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงต่ำกว่าภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนอีกเล็กน้อย

4.7.5 ค่าศักย์รีดักชัน-ออกซิเดชัน

จากรูปที่ 4.16 ผลการติดตามค่าศักย์รีดักชัน-ออกซิเดชันในระบบบำบัดถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนทั้งที่มีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ พบว่าในตัวอย่งน้ำทิ้งขาเข้าค่าศักย์รีดักชัน-ออกซิเดชันจะมีค่าเป็นลบซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณของของแข็งละลายน้ำที่มีอยู่มากและมีความบริสุทธิ์ของน้ำตัวอย่างต่ำ หรือกล่าวอีกในหนึ่งคือค่าศักย์รีดักชัน-ออกซิเดชันที่สูงจะบ่งบอกถึงปริมาณสารออกซิไดซ์ (ในที่นี้คือออกซิเจน) ที่สูงตามไปด้วย



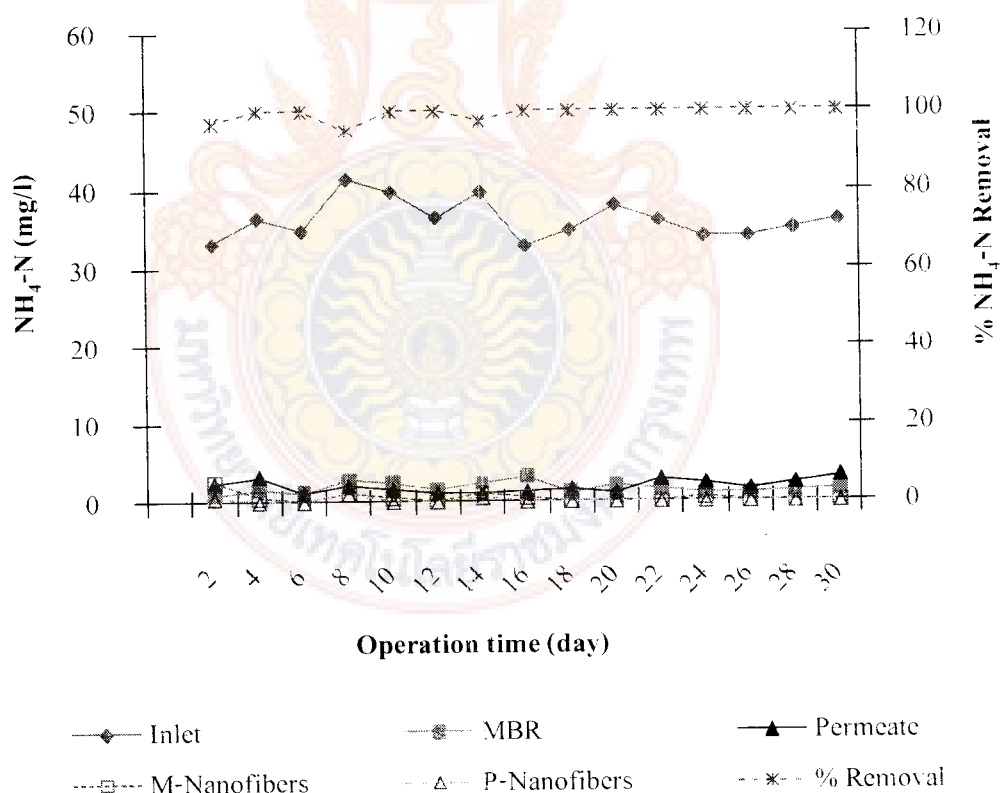
รูปที่ 4.16 ศักย์รีดักชัน-ออกซิเดชันในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่เติมและไม่เติมนาโนไฟเบอร์

เมื่อพิจารณาถึงค่าศักย์รีดักชัน-ออกซิเดชันของตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนและน้ำขาออกที่ผ่านการบำบัดพบว่า มีค่าศักย์รีดักชัน-ออกซิเดชันสูงระหว่าง 233 - 276 mV

ในขณะที่ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัวที่มีการเติมนานาไฟเบอร์จะมีค่าศักย์รีดักชัน-ออกซิเดชันในถังทดลองและน้ำขาออกที่ผ่านการบำบัดอยู่ระหว่าง 255 – 329 mV ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณสารออกซิไดซ์ที่มากอันเนื่องมาจากการให้อากาศร่วมกับการเติมนานาไฟเบอร์ในระบบ นอกจากนี้ยังมีการรายงานว่าปริมาณสารออกซิไดซ์ที่สูงเพียงพอที่ระดับค่าศักย์รีดักชัน-ออกซิเดชันมากกว่า 650 mV สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้เกือบทั้งหมด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ได้

4.7.7 ปริมาณความเข้มข้นแอมโมเนีย – ไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.17 ผลการติดตามค่าปริมาณความเข้มข้นแอมโมเนีย – ไนโตรเจนในระบบบำบัดถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัว พบว่าในตัวอย่างน้ำทิ้งขาเข้าปริมาณแอมโมเนีย – ไนโตรเจนจะมีค่าสูงและอยู่ระหว่าง 33 - 41 มิลลิกรัมต่อลิตร

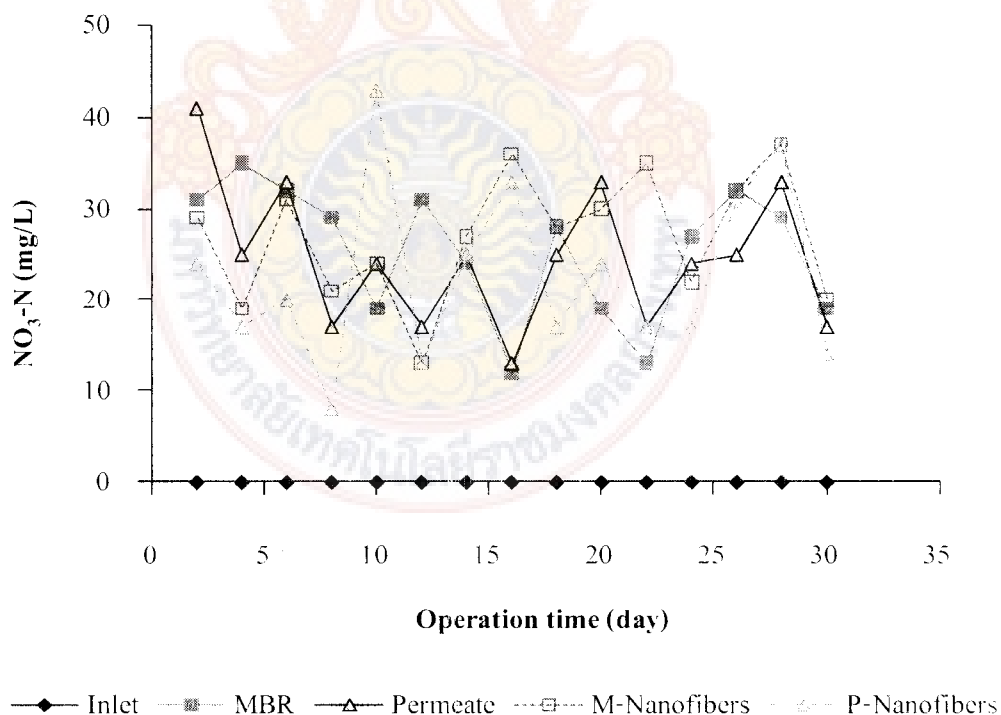


รูปที่ 4.17 ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในถังที่เติมและไม่เติมนานาไฟเบอร์

เมื่อพิจารณาถึงค่าปริมาณความเข้มข้นแอมโมเนีย - ไนโตรเจนของตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนทั้งที่มีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์และน้ำขาออกที่ผ่านการบำบัดในทั้งสองระบบพบว่าปริมาณความเข้มข้นแอมโมเนีย - ไนโตรเจนจะมีค่าน้อยมากและต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของระบบอยู่ในระดับดีมากและมีค่าใกล้เคียง 100% ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจนในน้ำเสียแสดงถึงปริมาณไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียทั้งหมด ส่วนใหญ่มักเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์น้ำเสียที่มีปริมาณแอมโมเนียสูงอาจจะเนื่องมาจากน้ำเสียเกิดการหมักและสารอินทรีย์เกิดการย่อยสลายได้แก๊สแอมโมเนียออกมา มีความสำคัญในการบ่งชี้สภาพความสกปรกของสภาพน้ำ

4.7.8 ปริมาณความเข้มข้นไนโตรท์ - ไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.18 ผลการติดตามค่าปริมาณความเข้มข้นไนโตรท์ - ไนโตรเจนในระบบบำบัดถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัว พบว่าในตัวอย่างน้ำทั้งขาเข้าปริมาณไนโตรท์ - ไนโตรเจนจะมีค่าเป็นศูนย์

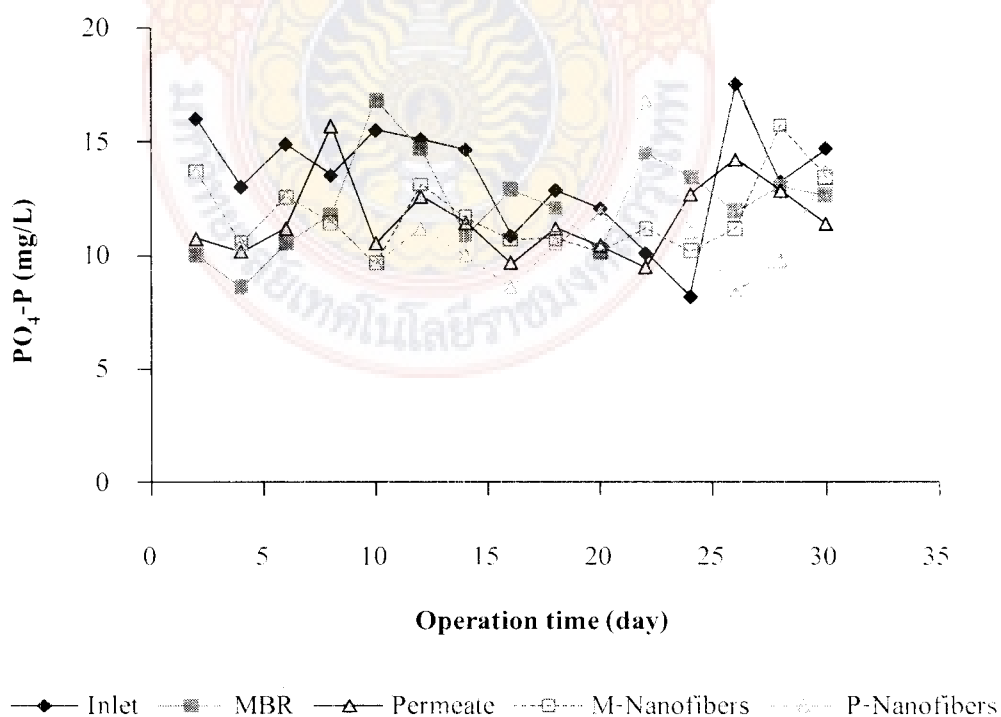


รูปที่ 4.18 ปริมาณไนโตรท์-ไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่เติมและไม่เติมนาโนไฟเบอร์

เมื่อพิจารณาถึงค่าปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจน - ไนโตรเจนของตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนทั้งที่เติมและไม่เติมนานาไฟเบอร์และน้ำขาออกที่ผ่านการบำบัดของทั้งสองระบบพบว่า ปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจน - ไนโตรเจนจะมีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ 8 - 43 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนโตรเจนเป็นสารประกอบไนโตรเจน โดยการเปลี่ยนแปลงสภาพจากสารอินทรีย์ในไนโตรเจนซึ่ง จุลินทรีย์จะเปลี่ยนไปเป็นสารอนินทรีย์ในไนโตรเจนหรืออยู่ในรูปไนโตรเจน การที่น้ำในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนและน้ำขาออกที่ผ่านการบำบัดมีปริมาณไนโตรเจนสูง เนื่องจากมีจุลินทรีย์ประเภท Autotrophic ammonia oxidizing bacteria (AOB) อยู่ในระบบ จุลินทรีย์ดังกล่าวจะทำการ ออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนโตรเจนทำให้ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนมีปริมาณไนโตรเจนมีมาก

4.7.9 ปริมาณความเข้มข้นฟอสเฟต - ฟอสฟอรัส

จากรูปที่ 4.19 ผลการติดตามค่าปริมาณความเข้มข้นฟอสเฟต - ฟอสฟอรัสในระบบบำบัด ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน พบว่าในตัวอย่างน้ำทั้งขาเข้า, น้ำตัวอย่างจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน ทั้งที่มีการเติมและไม่เติมนานาไฟเบอร์และน้ำขาออกที่ผ่านการบำบัดของทั้งสองระบบ พบว่าปริมาณ ฟอสเฟต - ฟอสฟอรัสจะมีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ระหว่าง 8 - 18 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต - ฟอสฟอรัสของระบบไม่สูงมากและมีค่าเฉลี่ยประมาณ 14%

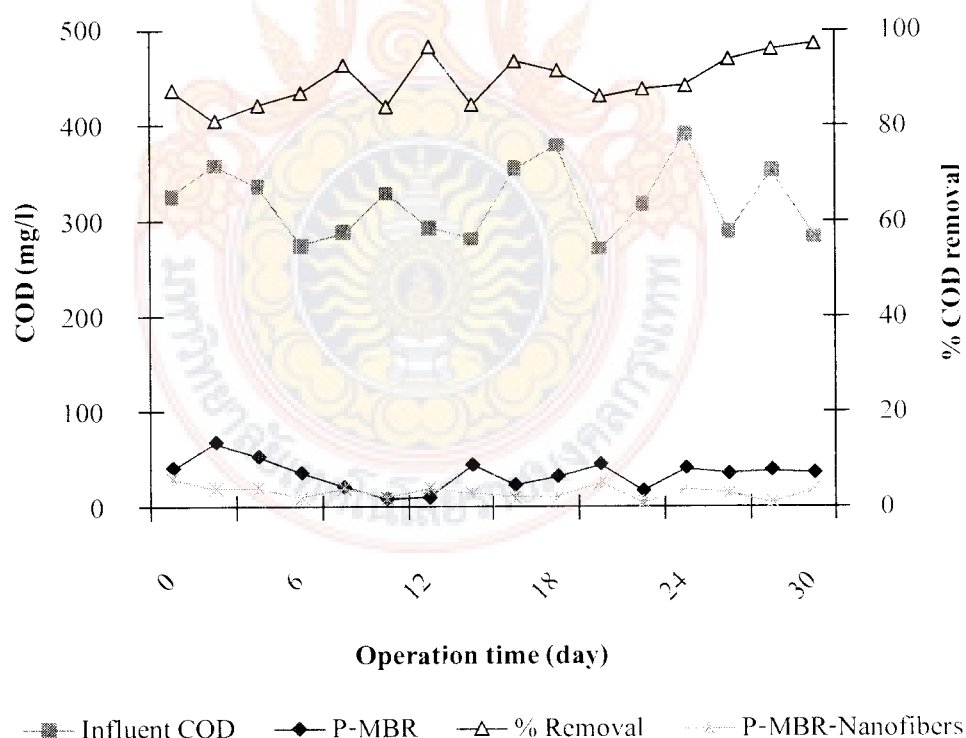


รูปที่ 4.19 ปริมาณฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่เติมและไม่เติมนานาไฟเบอร์

ฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่สำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิตในการสร้างเซลล์ใหม่ มักอยู่ในรูปของ ฟอสเฟต โพลีฟอสเฟตและอินทรีย์ฟอสเฟต โดยฟอสฟอรัสจะเป็นตัวที่เร่งการเจริญเติบโตของ สาหร่ายอย่างรวดเร็ว (algae bloom) จะเห็นได้ว่าน้ำขาออกที่ผ่านเมมเบรน (ทั้งที่มีและไม่มีนาโนไฟเบอร์ในระบบ) จะมีปริมาณฟอสฟอรัสลดลงเล็กน้อยและค่าไม่ต่างกัน เนื่องมาจากเป็นการ บำบัดน้ำเสียด้วยระบบตะกอนเร่ง หรือการให้อากาศ ซึ่งระบบนี้ไม่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ แต่จะ สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ในระบบที่ไม่มีอากาศและเมมเบรนไม่สามารถกำจัดปริมาณฟอสฟอรัส ออกได้ (มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2542: ออนไลน์)

4.7.10 ปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมี

จากรูปที่ 4.20 ผลการติดตามค่าปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ในระบบ บำบัดถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนจมตัว พบว่าในตัวอย่างน้ำทิ้งขาเข้าจะมีค่าสูงและอยู่ระหว่าง 272 – 392 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.20 ปริมาณ CODในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนที่เติมและไม่เติมนาโนไฟเบอร์

เมื่อพิจารณาถึงค่าปริมาณความออกซิเจนทางเคมี (COD) ของตัวอย่างน้ำขาออกที่ผ่านการบำบัดทั้งสองระบบจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนทั้งที่มีการเติมและไม่เติมนาโนโฟเบอร์ พบว่าค่าปริมาณความออกซิเจนทางเคมีทั้งสองระบบจะมีค่าใกล้เคียงกันและต่ำกว่าค่า COD ของน้ำขาเข้ามาก โดยทั้งสองระบบจะเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3 และ 33 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบสูงและมีค่าเฉลี่ยประมาณ 81% ปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมี (chemical oxygen demand) หมายถึงปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยทั่วไปน้ำเสียเข้าจะมีค่าซีโอดีสูงมากเนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์และปริมาณสารอินทรีย์ละลายอยู่มาก จึงมีความต้องการออกซิเจนในการออกซิไดซ์สูง ขณะที่น้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีค่าลดลงมาก เนื่องจากสารอาหารในน้ำเสียได้ถูกบำบัดแล้วจากการให้อากาศและการกินอาหารของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบตะกอนเร่ง (activated sludge process)



บทที่ 5

สรุปผล

จากผลการดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้นาโนไฟเบอร์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเมมเบรนจตัวเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำทิ้งชุมชนได้ข้อสรุปต่างๆดังนี้

1. ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานของเมมเบรนสะอาดในน้ำกลั่น พบว่าจะได้ค่าความต้านทานตั้งต้นของเมมเบรนแบบแผ่นประมาณ $1.46E+10$ ต่อเมตร
2. ระยะเวลาการดำเนินงานเพิ่มขึ้นจะทำให้สารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำประเภทโปรตีนเพิ่มขึ้นมากกว่าเท่าตัวจาก 50 ไปเป็น 150 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ในขณะที่สารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำประเภทคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้นมากขึ้นจาก 24 ไปเป็น 65 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ การเติมนาโนไฟเบอร์จะพบว่าค่าสารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำทั้งประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจะต่ำกว่าในถังควบคุม โดยจะมีสารโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตอยู่ระหว่าง 50 - 94 และ 23-36 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ตามลำดับ
3. ระยะเวลาการดำเนินงานเพิ่มขึ้นจะทำให้สารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ประเภทโปรตีนเพิ่มขึ้นมากกว่าเท่าตัวจาก 21 ไปเป็น 52 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ในขณะที่สารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ประเภทคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้นมากขึ้นจาก 21 ไปเป็น 64 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ การเติมนาโนไฟเบอร์ พบว่าค่าสารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ทั้งประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจะต่ำกว่าในถังควบคุม โดยจะมีสารโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตอยู่ระหว่าง 14 - 33 และ 13-23 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ ตามลำดับ
4. การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นจุลินทรีย์จะส่งผลให้ความต้านทานภายในรูกรองเมมเบรนของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น
5. การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของปริมาณสารแขวนลอยที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลอย่างมากต่อการอุดตันของเมมเบรนและส่งผลให้ความต้านทานภายในของรูกรองเมมเบรนเพิ่มขึ้นแบบเอกซิปแอนเชียล
6. การเพิ่มขึ้นของปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพละลายน้ำ (Soluble EPS) ในระบบที่มีและไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ในระบบจะมีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ระหว่าง 15-40 mg/g MLSS และในระบบที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์จะมีค่าการอุดตันของเมมเบรน ต่ำกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์อยู่โดยเฉลี่ย 9%

7. การเพิ่มขึ้นของปริมาณโพลีเมอร์ชีวภาพตรึงเซลล์ (Bound EPS) ในระบบที่มีและไม่มี การเติมนาโนไฟเบอร์ในระบบจะมีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ระหว่าง 5-17 mg/g MLSS และใน ระบบที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์จะมีค่าการอุดตันของเมมเบรน ต่ำกว่าระบบควบคุมที่ไม่มีการ เติมนาโนไฟเบอร์อยู่โดยเฉลี่ย 16%
8. การเพิ่มปริมาณการเติมนาโนไฟเบอร์ระหว่าง 0 - 10 กรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์ จะ ส่งผลให้เกิดการยืดเกาะของปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรนลดลงเป็นอย่าง มาก (76 ไปเป็น EPS 27 มิลลิกรัม/กรัมของตะกอนจุลินทรีย์)
9. การเพิ่มขึ้นของค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบจะเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบน ผิวหน้าเมมเบรน โดยการค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบระหว่าง 712 - 1,136 ไมโครซีเมนต์ จะ ส่งผลให้เกิดการยืดเกาะของปริมาณสารโพลีเมอร์ชีวภาพบนผิวหน้าเมมเบรนเพิ่มขึ้นกว่า 45%
10. การกรองที่สภาวะไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์ในระบบจะมีค่าความต้านทานการกรองโดยรวม สูงมากกว่าเมื่อเทียบกับการกรองที่สภาวะมีการเติมนาโนไฟเบอร์ 44% เนื่องจากการลดลง ของการอุดตันภายนอก (cake resistance : Rc) เป็นสาเหตุหลัก
11. การวิเคราะห์คุณลักษณะการอุดตันของเมมเบรนทางกายภาพโดยภาพถ่าย Scanning Electron microscopic (SEM) พบว่าในระบบที่มีการเติมนาโนไฟเบอร์มีรูกรองบางส่วนมี ลักษณะอุดตันอยู่บ้างเล็กน้อยดัง ในทางกลับกันภาพถ่าย SEM ของรูกรองเมมเบรนที่ สภาวะการกรองโดยไม่มีการเติมนาโนไฟเบอร์จะไม่สามารถสังเกตเห็นรูกรองของเมมเบรนได้ ชัดนักเนื่องจากการปกคลุมของชั้นเค้กอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรน
12. การศึกษาคุณลักษณะการบำบัดน้ำเสียในระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน พบว่าน้ำขาออก ที่ผ่านการบำบัดจะมีพีเอชอยู่ระหว่าง 7.08 - 6.73, อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25.1 - 29.5 องศา เซลเซียส, ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำ 2.72 - 3.52 มิลลิกรัมต่อลิตร, ความเข้มข้น จุลินทรีย์เป็นศูนย์, ความเข้มข้นแอมโมเนีย-ไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร. ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟต - ฟอสฟอรัสของระบบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 14%. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 81% จากผลการบำบัดที่ได้พบว่า มีความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำทิ้งชุมชนที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถึง ปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

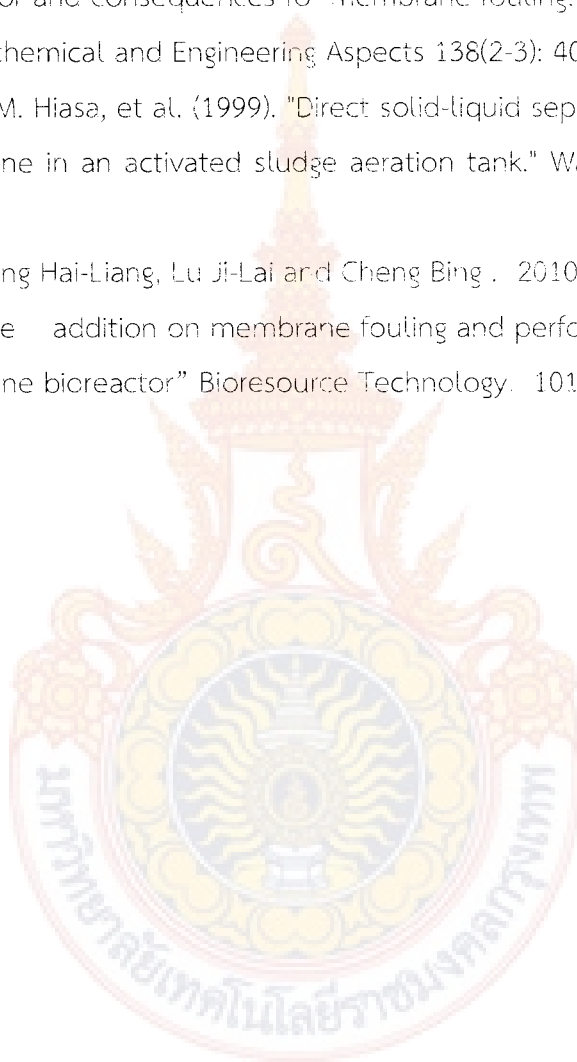
บรรณานุกรม

- กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, www.deqp.go.th.
- กฤติยา เลิศโกยะสมบัติ และธนาวุฒิ ส่งแสง. 2546. ผลของลักษณะเฉพาะของน้ำเสียต่อการอุดตันของไมโครฟิวเทรชันเมมเบรนในกระบวนการแยกทิวเด็ตสไลด์สำหรับการบำบัดน้ำเสียชุมชน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2542. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สยามสแตนเดอร์รี่พลาเยส์.
- กำพล นันทพงษ์. ม.ป.ป. “ความรู้เบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสีย” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.wvomc.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=538804283&Nttype=3>.
- ณัฐพันธ์ กลิ่นเกสร. 2545. “การกำจัดซีโอที ในโตรเจน และฟอสฟอรัส ด้วยกระบวนการทางชีวภาพร่วมกับไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน”. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นัทกาญจน์ ประเสริฐสังข์. 2546. “การกำจัดซีโอที ในโตรเจน ฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการกำจัดธาตุอาหารทางชีวภาพ ร่วมกับกระบวนการไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนแบบจมตัว”. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และวิบูลย์ลักษณ์. 2540. วิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์.
- ปราณี พันธุ์สินชัย และศักดิ์ชัย สุริยจันทร์ทอง. 2550. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2542. “ลักษณะของน้ำเสีย” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.swu.ac.th/royal/index.html>.
- วีระ ขานวิทกุล. 2546. “ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแยกทิวเด็ตสไลด์” [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: http://www.tumcivil.com/engfanatic/article_gen.php?article_id=118&hit=1
- สมพรรัตน์ จิโรภาส, กัลยา ศรีสุวรรณ และ ไพบุลย์ อินนาจิต. 2550. “การแพร่ของอนุภาคแบบไฮโดรไดนามิกในการกรองไมโครฟิลเตรชัน”. วารสารวิจัย มข. ฉบับ 7(1), หน้า 64-73
- สันทนต์ ศิริอนันไพบลูย์. 2549. ระบบบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์หอบ.
- อริยะ เตกษณานนท์. 2543. “การนำกลับน้ำเสียจากอาคารสูงมาใช้ใหม่โดยระบบถังปฏิบัติการชีวภาพที่มีไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนแบบจมตัว”. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Bouhabila, E. H., R. Ben Aim, et al. (2001). "Fouling characterisation in membrane

- bioreactors." *Separation and Purification Technology* 22-23: 123-132.
- Brindle, K. and T. Stephenson (1996). "The application of membrane biological reactors for the treatment of wastewaters." *Biotechnol. Bioeng.* 49: 601.
- Chang, I.-S. and C.-H. Lee (1998). "Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system - the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling." *Desalination* 120(3): 221-233.
- Defrance, L. and M. Y. Jaffrin (1999). "Reversibility of fouling formed in activated sludge filtration." *Journal of Membrane Science* 157(1): 73-84.
- Defrance, L., M. Y. Jaffrin, et al. (2000). "Contribution of various constituents of activated sludge to membrane bioreactor fouling." *Bioresource Technology* 73(2): 105-112.
- Fan, F., H. Zhou, et al. (2006). "Identification of wastewater sludge characteristics to predict critical flux for membrane bioreactor processes." *Water Research* 40(2): 205-212.
- Han, S.-S., T.-H. Bae, et al. (2005). "Influence of sludge retention time on membrane fouling and bioactivities in membrane bioreactor system." *Process Biochemistry* 40(7): 2393-2400.
- Hernandez Rojas, M. E., R. Van Kaam, et al. (2005). "Role and variations of supernatant compounds in submerged membrane bioreactor fouling." *Desalination* 179(1-3): 95-107.
- Ji, L. and J. Zhou (2006). "Influence of aeration on microbial polymers and membrane fouling in submerged membrane bioreactors." *Journal of Membrane Science* 276(1-2): 168-177.
- Lapidou, C. S. and B. E. Rittmann (2002). "A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass." *Water Research* 36(11): 2711-2720.
- Le Clech, P., V. Chen, et al. (2006). "Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment." *Journal of Membrane Science* 284(1-2): 17-53.
- Lee, J., W.-Y. Ahn, et al. (2001). "Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor." *Water Res.* 35(10): 2435-2445.

- Lee, W., S. Kang, et al. (2003). "Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors." *Journal of Membrane Science* 216(1-2): 217-227.
- Li, A., Kothari, D. and Corrado, J. J. Application of membrane anaerobic system for the treatment of industrial wastewater. Presented at 39th Annual Purdue industrial waste conference West Lafayette, Indiana, May 1984
- Li, J., Y. Li, et al. (2007). "Impact of filamentous bacteria on properties of activated sludge and membrane-fouling rate in a submerged MBR." *Separation and Purification Technology*.
- Magara, Y. and M. Itoh (1991). "The effect of operational factors on solid/liquid separation by ultra-membrane filtration in a biological denitrification system for collected human excreta treatment plants." *Water Sci. Technol.* 23 1583-1590.
- Manem, J. and R. Sanderson (1996). Chapter 17 Membrane bioreactors in water treatment. *Water Treatment Membrane Process*. A. R. Foundation. New York. McGraw-Hill.
- Meng Fangang, Zhang Hanmin, Yang Fenglin, Zhang Shoutong, Li Yansong and Zhang Xingwen. 2006. "Identification of activated sludge properties affecting membrane fouling in submerged membrane bioreactors" *Separation and Purification Technology*. 51 (January): 95-103.
- Nagaoka, H., S. Yamanishi, et al. (1998). "Modeling of biofouling by extracellular polymers in a membrane separation activated sludge system." *Water Science and Technology* 38(4-5): 497-504.
- Ross, W. R., J. P. Barnard, et al. (1990). "Application of ultrafiltration membranes for solid-liquid separation in anaerobic digestion systems: the ADUF process." *Water SA* 16(2): 85-91.
- Rosenberger, S. and M. Kraume (2003). Parameters influencing filterability of activated sludge in membrane bioreactors *Proc. AWWA Membrane Technology*, Atlanta
- Sopajaree, K. Domestic wastewater treatment using membrane bioreactor. Master's Thesis, Environmental Engineering Department, AIT, 1989.

- Sharman R . 1998. Water and Wastewater Technology. LBCC : Activated Sludge [online] Available: <http://www.bcc.cc.or.us/process1/resource/asbasic/asbasic1.html>.
- Wisniewski, C. and A. Grasmick (1998). "Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 138(2-3): 403-411.
- Yamamoto, K., M. Hiasa, et al. (1999). "Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank." *Water Sci. Technol.* 21: 43-54.
- Yang Xiao-Li, Song Hai-Liang, Lu Ji-Lai and Cheng Bing . 2010. "Influence of diatomite addition on membrane fouling and performance in a submerged membrane bioreactor" *Bioresource Technology*. 101 (July): 9178-9184.



- Sharman R . 1998. Water and Wastewater Technology. LBCC : Activated Sludge [online] Available. <http://www.bcc.cc.or.us/process1/resource/asbasic/asbasic1.html>.
- Wisniewski, C. and A. Grasmick (1998). "Floc size distribution in a membrane bioreactor and consequences for membrane fouling." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 138(2-3): 403-411.
- Yamamoto, K., M. Hiasa, et al. (1999). "Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank." *Water Sci. Technol.* 21: 43-54.
- Yang Xiao-Li, Song Hai-Liang, Lu Ji-Lai and Cheng Bing . 2010. "Influence of diatomite addition on membrane fouling and performance in a submerged membrane bioreactor" *Bioresource Technology.* 101 (July): 9178-9184.

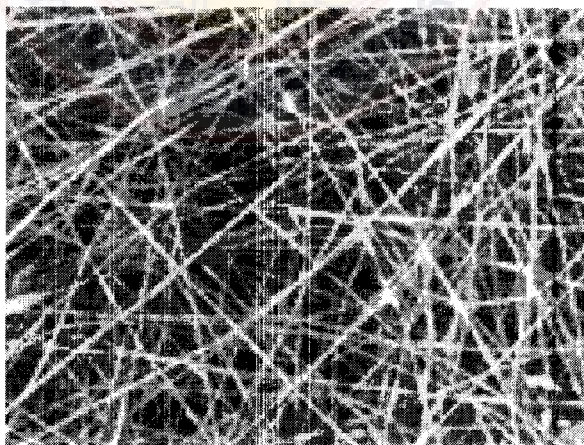


ภาคผนวก

ก. 1 ภาพถ่ายเครื่องมือและอุปกรณ์ในศึกษา



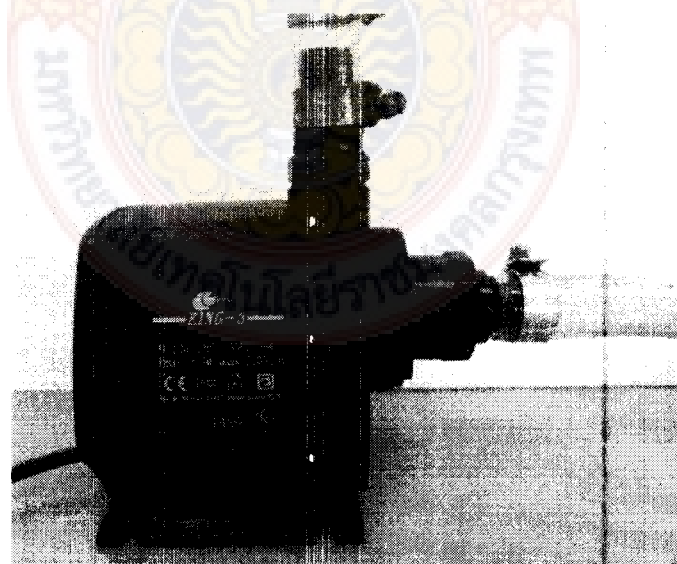
รูปที่ ก.1 เมมเบรนแบบแผ่น



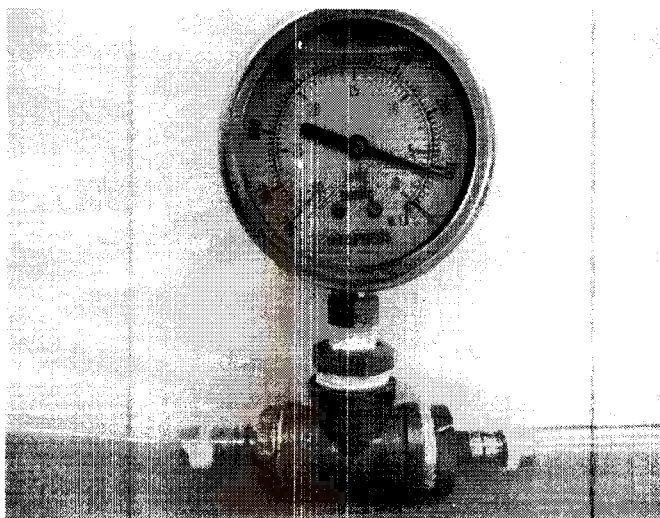
รูปที่ ก.2 PAN/CNT nanofibers



รูปที่ ก.3 ปั๊มอากาศ



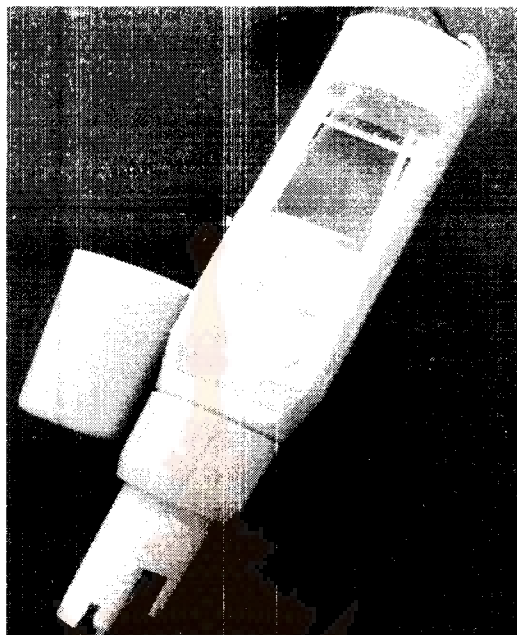
รูปที่ ก. 4 ปั๊มน้ำ



รูปที่ ก.5 Pressure guage



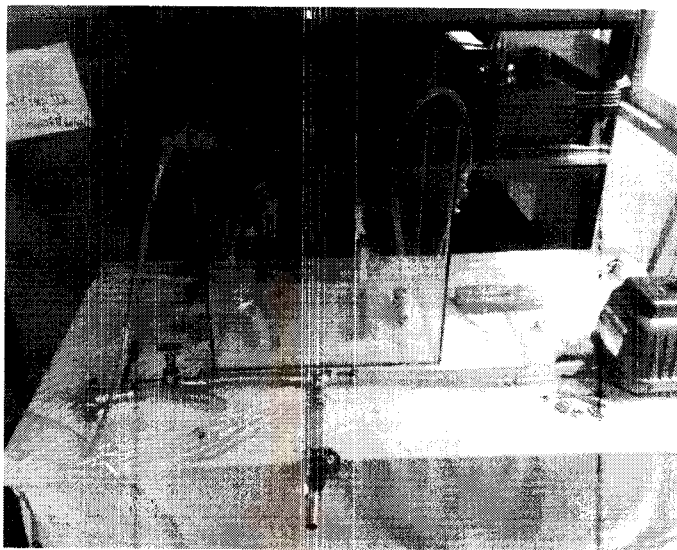
รูปที่ ก.6 Colorimeter ผลิตภัณฑ์ Hach analysis รุ่น DR/890



รูปที่ ก.7 เครื่อง Multi-Parameter แบบ Pocket ปากกา รุ่น PCS TestrTM 35



รูปที่ ก.8 UV-vis spectrophotometer ผลิตภัณฑ์ Thermo



รูปที่ ก.9 การสร้างถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนและติดตั้งระบบ

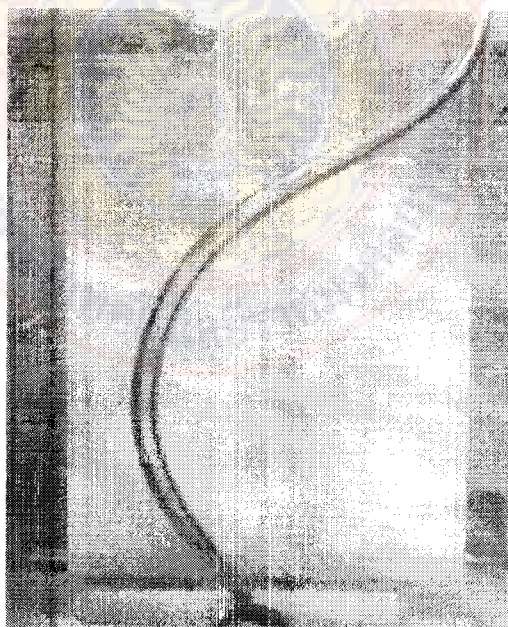


รูปที่ ก.10 ขั้นตอนการเลี้ยงหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนถ่ายลงถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน

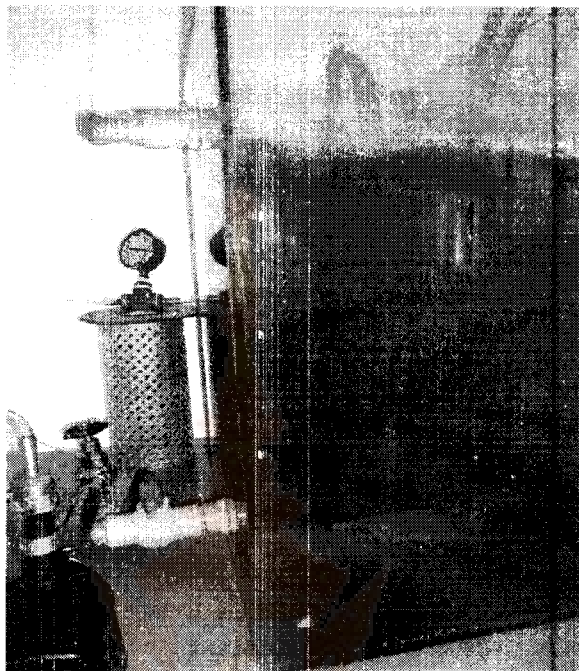
ก.2 ภาพการดำเนินการของระบบบำบัดน้ำเสีย



รูปที่ ก. 11 ถึงปฏิบัติการชีวภาพเมมเบรน



รูปที่ ก.12 ถึงปฏิบัติการชีวภาพเมมเบรนขณะให้อากาศ



รูปที่ ก.13 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนโดยมีการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ



รูปที่ ก.14 ลักษณะของเหลวในสภาวะการทดลองต่างๆที่เก็บจากถังปฏิกรณ์เมมเบรนจมตัว



รูปที่ ก. 15 รูปซ้ายเป็นน้ำที่ผ่านการกรองจากระบบถังปฏิกรณ์เมมเบรนจมตัว รูปกลางเป็นน้ำที่มีการ
ผ่านการกรองจากระบบถังปฏิกรณ์เมมเบรนจมตัวที่มีเติมนาโนไฟเบอร์ และรูปขวาเป็นน้ำกลั่น



ภาคผนวก ข

หลักในการวิเคราะห์

ข.1 การเก็บตัวอย่าง (Sampling and Storage)

ในการเก็บตัวอย่างในแต่ละครั้ง ขวดหรืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเก็บตัวอย่างต้องแห้งสะอาด ต้องมีความสะอาดไม่มีสารหรือสิ่งใดปนเปื้อน ในการเก็บตัวอย่างในแต่ละครั้งควรทำการวิเคราะห์ทันทีเนื่องจากตัวอย่างเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานานผลของการวิเคราะห์อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

ข.2 การวิเคราะห์สารโพลีเมอร์ที่ละลายน้ำ

นำบริเวณน้ำส่วนที่ใสมาหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที นำตะกอนส่วนที่ใสนำไปวิเคราะห์โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต

ข. 2.1 การวิเคราะห์สารโพลีเมอร์ละลายน้ำประเภทโปรตีน

การเตรียมสาร A

Na-K tartrate • 4H ₂ O	2 g
Na ₂ CO ₃	100 g
NaOH 1 N	500 ml

การเตรียมสาร B

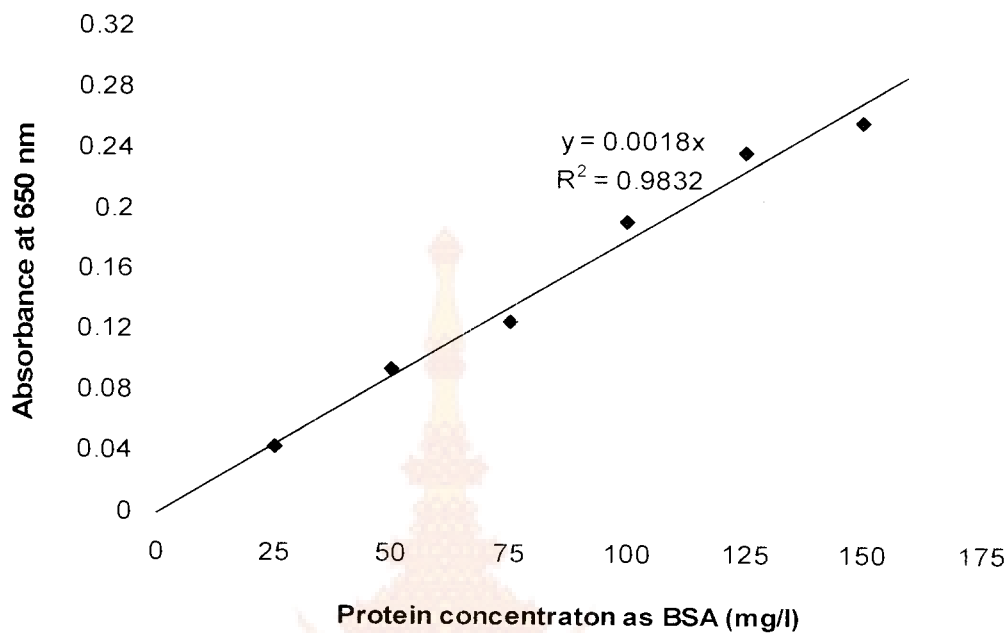
Na-K tartrate • 4H ₂ O	2 g
CuSO ₄ • 5H ₂ O	1 g
H ₂ O	90 ml
NaOH 1 N	10 ml

การเตรียมสาร C

เจือจาง Folin-Ciocalteu reagent: น้ำ (1:2)

วิธีการวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่างมาใส่หลอดทดลองปริมาตร 1 ml ใส่สาร A 0.9 ml
2. นำไปต้มที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 10 นาที เติมน้ำ B 0.1 ml ทิ้งไว้ 10 นาทีที่อุณหภูมิห้อง
3. เติมน้ำ C อย่างรวดเร็ว ทิ้งไว้ 10 นาที นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 650 nm
4. ค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน CALIBRATION CURVES

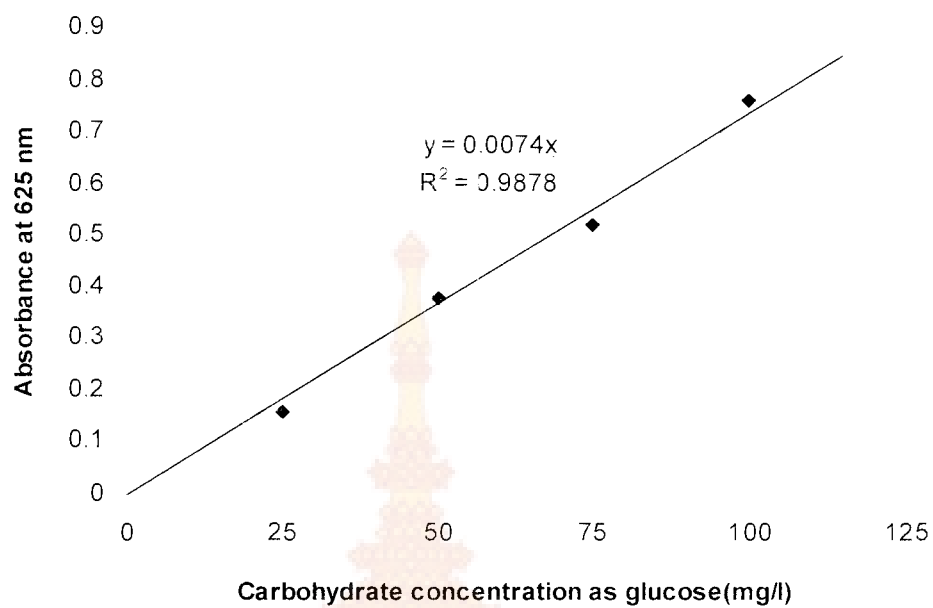


กราฟ ข.1 กราฟมาตรฐานประเภทโปรตีน

ข. 2.2 การวิเคราะห์สารโพลีเมอร์ละลายน้ำประเภทคาร์โบไฮเดรต

วิธีการวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่างใส่ในหลอดทดลองปริมาตร 1 ml และใส่ Anthrone ปริมาตร 2 ml
2. นำไปต้มที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 20 นาที ที่งให้เย็นแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 625 nm
3. ค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน CALIBRATION CURVES



กราฟ ข.2 กราฟมาตรฐานประเภทคาร์โบไฮเดรต

