



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเกาะตัวของเชื้ออานาม็อกซ์บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ ในระบบกึ่งต่อเนื่อง

Attachment of ANAMMOX Bacteria onto Surface of Different Plastic Media
in Semi Continuous System

นามผู้วิจัย นางสาวพรพิมล ยิ้มห้อย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเกาะตัวของเชื้ออนาม็อกซ์บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ ในระบบกึ่งต่อเนื่อง

Attachment of ANAMMOX Bacteria onto Surface of Different Plastic Media
in Semi Continuous System

โดย

นางสาวพรพิมล ยิ้มห้อย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2552

พรพิมล ยิ้มห้อย 2552: การเกาะตัวของเชื้อน้ามือกซ์บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ
ในระบบกึ่งต่อเนื่อง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D. 69 หน้า

การวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้อน้ามือกซ์บนตัวกลาง
พลาสติกชนิดต่าง ๆ โดยการถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และใช้
ทฤษฎี DLVO เพื่อคาดการณ์การเกาะติดของเชื้อน้ามือกซ์กับตัวกลาง รวมทั้งการหา
ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน โดยใช้ถังปฏิกริยาระบบกึ่งต่อเนื่องขนาด 200 มิลลิลิตร
แบ่งเป็น 5 ชุดการทดลอง ประกอบไปด้วย ชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกลาง (R1) และชุดทดลองที่มีการ
ใส่ตัวกลางชนิดต่าง ๆ จำนวน 4 ชนิด คือ เชือก (R2), ลูกปัดผิวเรียบ (R3), ลูกปัดขัดผิว (R4) และ
ฟองน้ำสังเคราะห์ (R5) น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้มีความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนไตรต์เท่ากับ
210 mgN/L และ 273 mgN/L ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดไนโตรเจนใน R1, R2, R3, R4 และ R5
มีค่าเท่ากับ $17.31 \pm 11.21 \%$, $15.44 \pm 12.49 \%$, $96.75 \pm 6.06 \%$, $97.26 \pm 6.88 \%$ และ
 $98.56 \pm 3.79 \%$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในถังปฏิกริยาที่มีเชือกเป็นตัวกลาง (R2) นั้นมีประสิทธิภาพ
ในการกำจัดไนโตรเจนเฉลี่ยต่ำที่สุด ในตัวกลางชนิดอื่น ๆ ให้ผลการกำจัดไนโตรเจนเหมือนกัน
ส่วนการใช้ทฤษฎี DLVO นั้น พบว่าเชื้อน้ามือกซ์สามารถเกาะติดกับตัวกลางได้ทุกชนิด และ
เมื่อยืนยันโดยการถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ผลปรากฏว่า
เชื้อน้ามือกซ์สามารถเกาะติดกับตัวกลางทุกชนิดได้จริง แต่การที่เชื้อน้ามือกซ์จะเกาะติด
ตัวกลางชนิดนั้น ๆ ได้มากน้อยเพียงใด ก็จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางชนิดนั้น ๆ ด้วย

Pornpimon Yimhoy 2009: Attachment of ANAMMOX Bacteria onto Surface of Different Plastic Media in Semi Continuous System. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Sanya Sirivithayapakorn, Ph.D. 69 pages.

This research involves with the formation of granule of ANAMMOX Bacteria on the surfaces of different plastic media in Semi Continuous System (SCS). The formation was investigated by using a Scanning Electron Microscope (SEM). Also, the DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey and Overbeek) theory was used to describe the attachment of ANAMMOX with the surfaces of the media. In addition, SCS 200 mL was used to study the nitrogen removal efficiency in the different media. There were five different experiments: control experiment without supporting medium (R1) and experiments with four different types of supporting media. The selected media for this research are Nylon string (R2), smooth-surface plastic bead (R3), rough-surface plastic bead (R4) and synthetic sponge (R5). The synthetic media for experiments contained 210 mgN/L of ammonium (NH_4^+) and 273 mgN/L of nitrite (NO_2^-).

The total nitrogen removal efficiencies from the experiment R1, R2, R3, R4 and R5 were 17.31 ± 11.21 %, 15.44 ± 12.49 %, 96.75 ± 6.06 %, 97.26 ± 6.88 % and 98.56 ± 3.79 % respectively. The lowest nitrogen removal efficiency was found in the set of string reactor (R2). The efficiencies of nitrogen removal in the other media were very similar. According to the DLVO theory, ANAMMOX could attach to the surfaces of all media. Also, the photos from a SEM confirmed that ANAMMOX can bind with all media.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัตยญา สิริวิทยาปกรณ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ ที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคำแนะนำในการดำเนินการวิจัย ตลอดจนคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ความรู้อันมีค่ายิ่งแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่เอื้อเพื่อสถานที่ทำงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการประสานงานต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา และขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคน ในทุกความช่วยเหลือ น้ำใจ และมิตรภาพ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องชาย และญาติ ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้ด้วยดี

พรพิมล ยิ้มห้อย

กันยายน 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	30
อุปกรณ์	30
วิธีการ	33
ผลและวิจารณ์	38
สรุปและข้อเสนอแนะ	56
สรุป	56
ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ภาคผนวก	62
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	69

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ลักษณะทางกายภาพของ POLYSTYRENE	21
2	ลักษณะทางกายภาพของ NYLON	23
3	ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์	32
4	ตัวกลางชนิดต่าง ๆ ในแต่ละชุดการทดลอง	33
5	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์และวิธีการวิเคราะห์	36
6	ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณตามทฤษฎี DLVO	37
ตารางผนวกที่		
1	ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	63
2	ความเข้มข้นของไนไตรต์ในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	64
3	ความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	65
4	ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	66
5	ค่าความเป็นกรดเบส (pH) ในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	67
6	ค่า ORP ในน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	68

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วัฏจักรไนโตรเจน	4
2	ขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ	5
3	วัฏจักรของซัลเฟอร์ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบบอโตโทรฟิก	10
4	กระบวนการบำบัดไนโตรเจนแบบ SHARON/ANAMMOX	11
5	ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter)	12
6	ระบบบำบัดแบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow anaerobic filter)	13
7	ระบบบำบัดแบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลลง (Downflow anaerobic filter)	14
8	ระบบชั้นลอยตัวไร้ออกซิเจน (Anaerobic Fluidized Bed, AFB)	15
9	ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)	16
10	ระบบแผ่นหมุนชีวภาพไร้ออกซิเจน (Anaerobic Rotating Biological Contactor, AnRBC)	17
11	ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน (Anaerobic Baffled Reactor, ABR)	18
12	สูตรโครงสร้างของโพลีสไตรีน (Polystyrene)	20
13	สูตรโครงสร้างของโพลีเอมิด (Polyamide) หรือไนลอน (Nylon)	22
14	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและการแยกกันของอนุภาค	24
15	ถังปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi Continuous System)	30
16	เครื่องเขย่า (Shaker) ที่ใช้ในการทดลอง	31
17	ตัวกลางที่เป็นเชือก	34
18	ตัวกลางที่เป็นลูกปัดผิวเรียบ	34
19	ตัวกลางที่เป็นลูกปัดขัดผิว	35
20	ตัวกลางที่เป็นฟองน้ำสังเคราะห์	35
21	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแอมโมเนียม, ไนไตรต์และไนเตรตในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	38
22	ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	39
23	ความเข้มข้นของไนไตรต์ในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	39

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	41
25	ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของแต่ละชุดการทดลอง	42
26	ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของแต่ละชุดการทดลอง (หลังจากการเติมทรายลงในชุดควบคุม)	43
27	ค่าความเป็นกรดเบส (pH) ในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง	44
28	ผลการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออณาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม (R1)	45
29	ผลการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออณาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) ในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม (R1)	46
30	เซลล์ของอณาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM)	46
31	ผลการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออณาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในถังปฏิกรณ์ที่มีเชือกเป็นตัวกลาง (R2)	47
32	ผลการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออณาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในถังปฏิกรณ์ที่มีลูกปัดผิวเรียบเป็น ตัวกลาง (R3)	47
33	ผลการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออณาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในถังปฏิกรณ์ที่มีลูกปัดผิวเป็นตัวกลาง (R4)	48
34	ผลการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออณาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในถังปฏิกรณ์ที่มีฟองน้ำสังเคราะห์เป็น ตัวกลาง (R5)	48
35	ผลจากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี DLVO	49
36	ชนิดของกลุ่มแบคทีเรียที่ตรวจพบซึ่งแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม (R1) โดยใช้เทคนิค FISH (A) ANAMMOX, (B) DAPI และ (C) EUB	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
37	ชนิดของกลุ่มแบคทีเรียที่ตรวจพบซึ่งแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มีเชื้อเป็นตัวกลาง (R2) โดยใช้เทคนิค FISH (A) ANAMMOX, (B) DAPI และ (C) EUB	51
38	ชนิดของกลุ่มแบคทีเรียที่ตรวจพบซึ่งแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มีลูกปัดผิวเรียบเป็นตัวกลาง(R3) โดยใช้เทคนิค FISH (A) ANAMMOX, (B) DAPI และ (C) EUB	52
39	ชนิดของกลุ่มแบคทีเรียที่ตรวจพบซึ่งแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มีลูกปัดขัดผิวเป็นตัวกลาง(R4) โดยใช้เทคนิค FISH (A) ANAMMOX, (B) DAPI และ (C) EUB	53
40	ชนิดของกลุ่มแบคทีเรียที่ตรวจพบซึ่งแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มีฟองน้ำสังเคราะห์เป็นตัวกลาง (R5) โดยใช้เทคนิค FISH (A) ANAMMOX, (B) DAPI และ (C) EUB	54

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ANAMMOX = ANaerobic AMMonium OXidation

NH_4^+ -N = Ammonia-Nitrogen

NO_2^- -N = Nitrite-Nitrogen

NO_3^- -N = Nitrate-Nitrogen

SEM = Scanning Electron Microscope

TEM = Transmission Electron Microscope

การเกาะตัวของเชื้ออานาโมกซ์บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ ในระบบกึ่งต่อเนื่อง

Attachment of ANAMMOX Bacteria onto Surface of Different Plastic Media in Semi Continuous System

คำนำ

นอกจากการบำบัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์หลายชนิดที่อยู่ในรูปค่าความสกปรก Biochemical Oxygen Demand (BOD) และ Chemical Oxygen Demand (COD) ในน้ำเสียแล้ว สารอาหารประเภทไนโตรเจนยังมีความจำเป็นที่ต้องบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แม่น้ำลำคลองหรือแหล่งน้ำสาธารณะ ทั้งนี้เพราะว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วแต่ยังมีไนโตรเจนในรูปแบบต่าง ๆ ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่สูงสามารถก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำได้อีกมากมาย รวมทั้งจะมีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ด้วย

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยอาศัยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย คูดซับ เปลี่ยนรูปของมลสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง มลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนไปเป็นจุลินทรีย์เซลล์ใหม่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไร้ออกซิเจนจะได้พลังงานน้อย เซลล์ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่จึงมีจำนวนไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ใช้ออกซิเจน

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ให้ตะกอนจุลินทรีย์หรือเมือกจุลินทรีย์ยึดเกาะที่ตัวกลาง (Attached growth system) เพิ่งมีการพัฒนาขึ้นมาเมื่อ 20 ปีนี้เอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียให้สูงขึ้น กล่าวคือ ประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย การพัฒนานำระบบบำบัดน้ำเสียที่จุลินทรีย์ยึดเกาะอยู่ที่ตัวกลาง (Attached growth process) มาใช้เพื่อเป็นการเพิ่มตะกอนจุลินทรีย์ให้กับระบบบำบัดน้ำเสียให้สูงขึ้น และเป็น การยึดตะกอนจุลินทรีย์ให้อยู่กับที่ ป้องกันไม่ให้ตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกจากถังปฏิกิริยา รวมทั้ง ป้องกันหรือรักษาระดับความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยาให้คงที่ โดยไม่ต้องมีการ หมุนเวียนตะกอนจุลินทรีย์ที่แยกออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้าไปยังถังปฏิกิริยาอีก โดยปกติแล้วระบบบำบัดน้ำเสียชนิดนี้จะเหมาะสมสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไม่

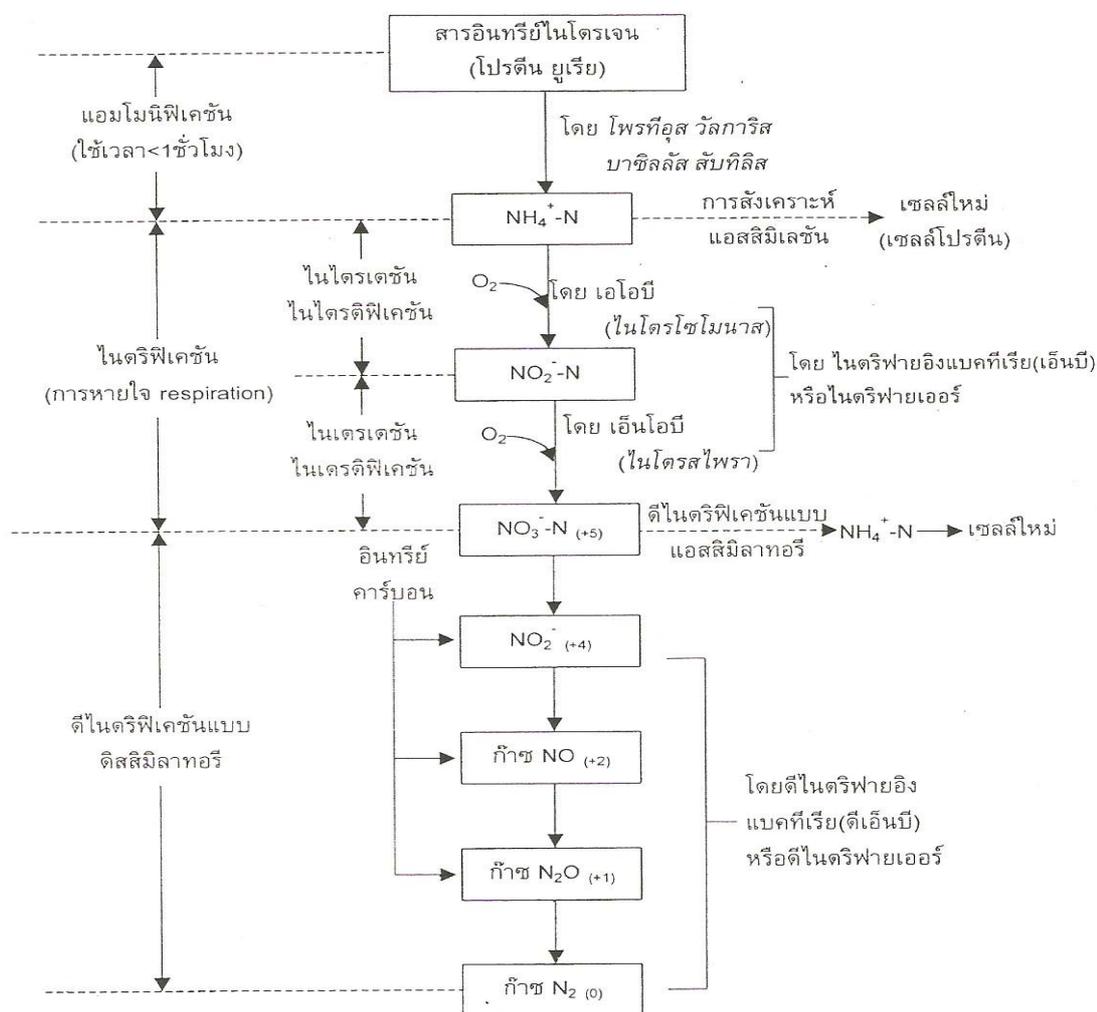
สูงมากนัก ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้จะถูกควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียที่อายุตะกอนสูง ๆ (Sludge age or Solid retention time : SRT) ตัวกลางที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีอยู่มากมาย รวมทั้งน้ำหนักของตัวกลางก็มีความสำคัญเช่นกัน กล่าวคือ ตัวกลางจะต้องมีน้ำหนักน้อย และมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในระบบให้สูง ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นด้วย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในกลุ่มอนาโมกซ์ (ANAMMOX bacteria) บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ ในระบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi Continuous System)
2. ศึกษารูปแบบการเกาะตัวของจุลินทรีย์ในกลุ่มอนาโมกซ์ (ANAMMOX bacteria) บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ

1.2 หลักการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

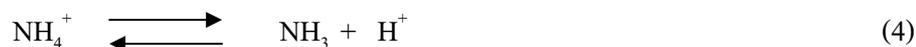
การกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพอาศัยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียอยู่สองกลุ่ม กลุ่มแรกมีหน้าที่ออกซิไดซ์ไนโตรเจน (ในรูปรีดิวซ์) ให้เป็นไนเตรต จากนั้นแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งจะลดรูปไนโตรเจนนี้ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนออกจากระบบ ภาพที่ 2 สรุปขั้นตอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ โดยระบบจะเริ่มต้นที่กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (ammonification) ก่อนกระบวนการอื่น ๆ



ภาพที่ 2 ขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

ที่มา : ธงชัย (2544)

แต่แอมโมเนียที่เกิดขึ้นมักไม่อยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระ เพราะที่ภาวะพีเอชเป็นกลางหรือเป็นกรดซึ่งมักเป็นสภาวะของน้ำเสียทั่วไป แอมโมเนียจะอยู่ในรูปของเกลือของแอมโมเนียม (NH_4^+) ดังสมการที่ (4)



ต่อเมื่อพีเอชถูกปรับขึ้นสูง แอมโมเนียมจึงแปรรูปเป็นแอมโมเนียอิสระ ซึ่งถูกขับออกจากน้ำไปสู่บรรยากาศได้ กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการ “เปลื้องแอมโมเนีย” หรือ ammonia stripping

1.2.2 ไนตริฟิเคชัน (nitrification)

เมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน จนสารอินทรีย์ไนโตรเจนแปรรูปไปเป็นแอมโมเนียแล้ว จะเกิดกระบวนการสังเคราะห์หรือแอสสิมิเลชันของไนโตรเจน เอาไปสร้างเป็นเซลล์ (โปรตีน) ใหม่ของโอเอชโอ ในขณะที่เดียวกันถ้าสารอาหารชนิดคาร์บอนลดลงจนเหลือน้อยและระบบยังอยู่ในภาวะแอโรบิก จะเกิดการหายใจ (respiration) โดยกระบวนการไนตริฟิเคชันขึ้น โดยกระบวนการนี้จะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนย่อย คือ ไนไตรเตชัน (nitritation) ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า ไนไตรติฟิเคชัน (nitritification) และ ไนเตรเตชัน (nitratation) ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า ไนเตรติฟิเคชัน (nitrification) ในขั้นตอนไนตริฟิเคชันนี้ จุลินทรีย์ทั้งชนิดเฮเทอโรโทรฟ (เช่น *Arthrobacter* และ *Aspergillus*) และออโตโทรฟจะมีบทบาททั้งคู่ แต่เมื่อเทียบกันแล้วจุลินทรีย์ชนิดหลังมีบทบาทมากกว่ามาก ในบางกรณีจึงตั้งสมมติฐานว่า บทบาทของจุลินทรีย์เฮเทอโรโทรฟ (ใช้สารอินทรีย์คาร์บอนและออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนเตรต) ไม่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ของกระบวนการ และการที่ออโตโทรฟออกซิไดซ์ NH_4^+ ไปเป็น NO_2^- และ NO_3^- ภายใต้ภาวะแอโรบิกนั้นจะได้พลังงานออกมาด้วย ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้พลังงานที่ได้นี้ไปดึงเอา CO_2 หรือ HCO_3^- หรือ CO_3^{2-} มาเป็นแหล่งคาร์บอนต่อไป ทั้งนี้ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะมีการปล่อย H^+ ออกมาซึ่งทำให้ระบบต้องมีสภาพด่างพอ ไม่เช่นนั้นบัพเฟอร์จะมีไม่พอ ซึ่งทำให้พีเอชในถังปฏิกิริยาลดลงและทำให้ระบบเกิดวิบัติ (failure) ได้ ในขั้นตอนย่อยแรกแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียมไปเป็นไนไตรต์ เรียกรวม ๆ ว่า เอโอบี หรือ AOB (ammonium oxidizing bacteria) โดยแบคทีเรียส่วนใหญ่ ได้แก่ กลุ่มไนโตรโซโมนาส เช่น *N. europaea* และ *N. oligocarbogenes* ในไตรสไพรา ไนโตรโคคคัส ไนโตรโซโลบัส เป็นต้น ส่วนในขั้นตอนย่อยที่สอง แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไตรต์ไปเป็นไนเตรต เรียกรวมว่า เอ็นโอบี หรือ NOB (nitrite oxidizing bacteria) เช่น ไนโตรแบคเตอร์ เช่น *N. agilis* และ *N. winogradski* ในไตรสไพรา ไนโตรโคคคัส เป็นต้น อนึ่ง

มีข้อสังเกตว่าไนโตรสไฟราปรากฏอยู่ในทั้งสองชั้นตอนย่อย และปกติมักเชื่อกันว่า ไนโตรแบคทีเรียเป็นแบคทีเรียหลักของชั้นตอนย่อยที่สอง แต่ Burrell *et al.* (1997) ได้พิสูจน์ว่า ไนโตรสไฟราต่างหากที่เป็นจุลินทรีย์หลักของการออกซิไดซ์ไนโตรต์ไปเป็นไนเตรต

อย่างไรก็ตาม ในระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไป จะไม่เกิดไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ เพราะมีบางส่วนของอินทรีย์ไนโตรเจนที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีววิทยาได้ (หรือได้ไม่ง่าย) ทำให้น้ำทิ้งมีอินทรีย์ไนโตรเจนอยู่ประมาณไม่น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรเสมอ

1.2.3 ดีไนตริฟิเคชัน (denitrification, DN)

เมื่อไนโตรเจนถูกแปรรูปมาอยู่ในรูปของไนเตรตแล้ว จะสามารถถูกลดรูปหรือถูกกำจัดออกจากระบบได้สองทาง คือ

1. วิธีแอสสิมิเลชัน (assimilatory DN)

จุลินทรีย์ต้องการไนโตรเจนสำหรับการสังเคราะห์โปรตีน ไนโตรเจนที่ดีที่สุดสำหรับการนี้ คือ ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียม แต่ถ้าไม่มีแอมโมเนียมในระบบหรือมีไม่พอ จุลินทรีย์บางชนิดจะสามารถลดรูปไนเตรตไปเป็นแอมโมเนียมและเอามาใช้เพื่อการนี้ได้ ในวิธีนี้ ไนเตรตจะถูกดีไนตริไฟด์และลดรูปไปเป็นแอมโมเนียมด้วยเอนไซม์ไนเตรรีดักเทสหลายชนิด ก่อนที่จะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสังเคราะห์หรือสร้างเซลล์ (เป็นโปรตีนหรือกรดนิวคลีอิก) ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า แอสสิมิเลชัน ชั้นตอนนี้จึงเรียกว่า ดีไนตริฟิเคชันแบบแอสสิมิเลชัน ซึ่งมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับวิธีที่สองหรือวิธีดีไนตริฟิเคชันแบบดิสสิมิเลชัน

2. วิธีดิสสิมิเลชัน (dissimilatory DN)

ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบบนี้ จุลินทรีย์ดีไนตริไฟเออร์เป็นได้ทั้งแบบเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟเหมือนกับชั้นตอนไนตริฟิเคชัน แต่ไม่เหมือนกันตรงที่ภาวะนี้ต้องเป็นแบบแอนอกซิก (anoxic) คือมีไนเตรตแต่ไม่มีออกซิเจนอิสระ และกลับกันตรงที่ในชั้นตอนนี้เฮเทอโรโทรฟมีบทบาทมากกว่าออโตโทรฟอย่างมาก จุลินทรีย์แบบเฮเทอโรโทรฟนี้ต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ในเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมอินทรีย์คาร์บอนเข้าสู่ระบบด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่า ต้องมีการใช้อินทรีย์คาร์บอนในการลดรูปของไนโตรเจนทุกชั้นตอน ตั้งแต่ไนเตรต (วาเลนซ์+5)

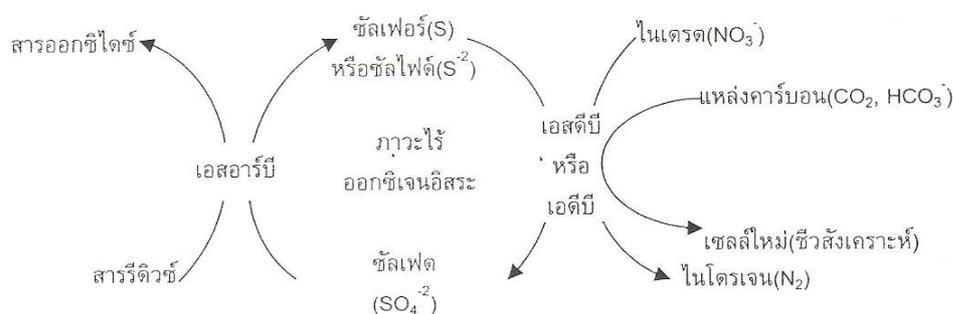
ไปเป็นไนไตรต์ (+4) ก๊าซไนตริกออกไซด์, NO (+2) ก๊าซไนตรัสออกไซด์, N₂O (+1) ไปจนถึง ก๊าซไนโตรเจน, N₂ (ศูนย์) ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยมาก จึงถูกจับหรือปล่อยออกจากมวลของน้ำได้ง่าย การกำจัดไนโตรเจนจึงเกิดขึ้นได้ไม่ยาก U.S.EPA (1975) ได้รายงาน่วาวิธีนี้สามารถกำจัดไนโตรเจนได้สูงถึงร้อยละ 95 อย่างไรก็ตามก๊าซไนโตรเจนนี้ถ้าไปเกิดและสะสมในถังทำใส (clarifier) ชั้นที่สองก็อาจมีผลต่อการตกจมของสลัดจ์ ทำให้น้ำที่ออกไปไม่ใสได้

ดีไนตริฟายเออร์นี้เป็นได้ทั้งออร์กาโนโทรฟ (organotrophs, ได้พลังงานจากสารอินทรีย์) ลิโธโทรฟ (lithotroph, ได้พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี) และโฟโตโทรฟ (phototroph, ได้พลังงานจากแสง) รวมทั้งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มฟาคัลเททิฟแอนแอโรบด้วย ที่ปรากฏอยู่ในรายงานก็มีหลายชนิดได้แก่ ชูโดโมนาส บาซิลลัส สปีริลัม ไฮไฟไมโครเบียม อะโกรแบคทีเรีย อะซิโนแบคทีเรีย โพรไฟโอโนแบคทีเรีย โรโซเบียม คอรีเนแบคทีเรีย ไฮโทฟาจ ไฮโอบาซิลลัส และ อัลคานีจินส์ ส่วนที่พบมากน่าจะได้แก่ ชูโดโมนาส เช่น *P. fluorescens*, *P. aeruginosa*, *P. denitrificans* และ *Alcaligenes*, *Spirillum*, *Agrobacterium*, *Propionobacterium*, *Rhizobium*, *Bacillus*, *Acinetobacter* และ *Thiobacillus* ซึ่งพบได้มากอยู่แล้วทั้งในดิน น้ำธรรมชาติ และน้ำเสีย อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้ว จะไม่เกิดดีไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ในทุกสถานการณ์ของการบำบัดน้ำเสีย ในบางกรณีจะเกิดเป็นก๊าซระดับกลาง คือ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ซึ่งทำให้ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ ก๊าซไนตรัสออกไซด์นี้ถือว่าเป็นก๊าซมลพิษที่สำคัญในส่วนของก๊าซเรือนกระจก และควรหลีกเลี่ยงการผลิตก๊าซนี้ไม่ว่าจะโดยตั้งใจหรือไม่ก็ตาม ในระบบบำบัดน้ำเสียภาวะที่จะทำให้เกิดไนตรัสออกไซด์ได้มาก คือ การที่มีอัตราซีโอดีต่อไนเตรดไนโตรเจน (COD/ NO₃⁻-N) ต่ำ เวลาที่สลัดจ์หรืออายุสลัดจ์สั้น และพีเอชต่ำ จึงควรหลีกเลี่ยงภาวะการณ์เช่นนี้ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

1.2.4 ดีไนตริฟิเคชันแบบพิเศษ

ในกรณีที่ไม่มีสารอินทรีย์หรือมีอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่ำ ออโตโทรฟบางกลุ่มสามารถดีไนตริฟายได้โดยใช้สารอนินทรีย์บางชนิดเป็นแหล่งพลังงาน เช่น *Thiobacillus denitrificans* สามารถใช้ในเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน มาออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ ซัลไฟด์ หรือไฮโอซัลเฟตไปเป็นซัลเฟต ซึ่งเกิดดีไนตริฟิเคชันไปพร้อมกันด้วย อนึ่ง จุลินทรีย์บางชนิดจะรีดิวซ์ไนเตรตหรือไนไตรต์ได้เป็นก๊าซไนโตรเจน ถ้าตัวให้อิเล็กตรอนเป็นซัลไฟด์ แต่จะผลิตไดไนโตรเจนออกไซด์หรือไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ถ้าใช้ไฮโอซัลเฟตเป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทั้งนี้ได้มี

การนำองค์ความรู้นี้ไปประยุกต์สำหรับการกำจัดไนโตรเจนแบบเป็นวัฏจักร กล่าวคือ เอาข้อดีของกระบวนการนี้ไปใช้ร่วมกับความสามารถของเอสอาร์บี หรือแบคทีเรียลดซัลเฟตที่ลดรูปซัลเฟตเป็นซัลไฟด์หรือซัลเฟอร์ได้ ซึ่งซัลเฟอร์ในรูปรีดิวซ์นี้จะถูกออกโตโทรฟิคดีไนตริฟายเออร์ใช้เป็นแหล่งให้อิเล็กตรอนสำหรับไปรีดิวซ์ไนเตรต (ภาพที่ 3) จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ไปเป็นซัลเฟต และรีดิวซ์ไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนพร้อม ๆ กันนี้ มีชื่อเรียกว่า ซัลเฟอร์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียหรือเอสดีบี (sulfur denitrifying bacteria, SDB) หรือออกโตโทรฟิคดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียหรือเออีดีบี (autotrophic denitrifying bacteria, ADB)



ภาพที่ 3 วัฏจักรของซัลเฟอร์ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบบออกโตโทรฟิ

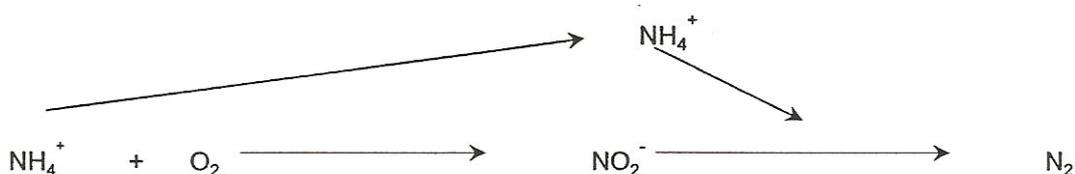
ที่มา : ธงชัย (2544)

2. Anammox Process (Anaerobic Ammonium Oxidation Process)

กระบวนการลดไนโตรเจนแบบ ANAMMOX (ANaerobic AMMonium Oxidation) ถูกค้นพบเมื่อจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันต้องการคาร์บอนในรูปของสารอินทรีย์ แต่ในน้ำเสียไม่มีสารอินทรีย์อย่างเพียงพอ แต่ปริมาณของแอมโมเนียมยังมีการลดลง ทำให้มีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม จึงทำให้มีการค้นพบว่า ยังมีกลุ่มจุลินทรีย์ *Candidatus Brocadia anammoxidans* และ *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* ที่สามารถใช้แอมโมเนียมในน้ำเสียเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor) และใช้ไนไตรที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) แล้วกลายเป็นก๊าซไนโตรเจน กระบวนการบำบัดไนโตรเจนด้วยวิธีการนี้ แสดงในภาพที่ 4 หลักการที่สำคัญของกระบวนการ ANAMMOX นี้ ยังต้องการหยุดหรือข้ามปฏิกิริยาจาก NO_2^- เป็น NO_3^- ในกระบวนการไนตริฟิเคชัน

ข้อดีของกระบวนการบำบัดไนโตรเจนด้วย ANAMMOX มีดังต่อไปนี้

1. สามารถลดปริมาณออกซิเจนที่ต้องเติมลงไปในการปฏิบัติในตรีฟิเคชัน
2. สามารถลดปริมาณคาร์บอนที่ต้องเติมลงไปในการปฏิบัติในตรีฟิเคชัน
3. มีปริมาณตะกอนที่เกิดลดลง



ภาพที่ 4 กระบวนการบำบัดไนโตรเจนแบบ SHARON/ANAMMOX

ที่มา : พงศ์ศักดิ์ (2551)

เนื่องด้วยการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการ ANAMMOX ช้ามาก ดังนั้นการเก็บตะกอนในระบบจึงมีความสำคัญต่อระบบอย่างมากและต้องมีการผสมตะกอนทั้งใหม่และเก่าให้เข้ากันอย่างดีเพื่อดูแลควบคุมระบบ ANAMMOX ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ ระบบที่มีการทดลองใช้เป็นแบบ fixed bed, fluidized bed และ sequencing batch reactor ระบบเหล่านี้สามารถใช้ในการควบคุม ANAMMOX ได้

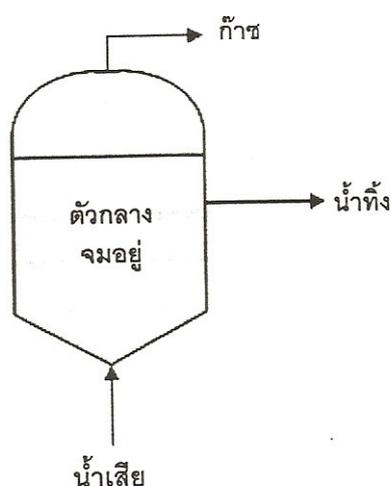
ในปัจจุบัน กระบวนการ ANAMMOX จะเป็นการนำกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความสามารถใช้ออแอมโมเนียมเป็น electron donor มาทำให้เด่นขึ้นและมีจำนวนมากขึ้นจนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ จึงทำให้จุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียสามารถจะทำงานได้ดีและประหยัดพลังงาน

3. ประเภทของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

3.1 ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter)

ภาพที่ 5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทั่วไปของถังกรองไร้อากาศ ส่วนประกอบที่สำคัญคือ ถังสูงที่มีลักษณะคล้ายถังกรอง ภายในบรรจุด้วยหินขนาด 1.5 – 2 นิ้ว หรืออาจใช้ตัวกลางพลาสติกแทนก็ได้ น้ำเสียจะไหลเข้าจากข้างล่างขึ้นข้างบน ลักษณะเช่นนี้จะทำให้น้ำท่วมตัวกลาง

อยู่ตลอดเวลา ถ้าทำให้แบคทีเรียส่วนใหญ่ถูกจับอยู่ภายในถังกรอง น้ำที่ไหลออกมาจะมีความใส โดยไม่ต้องใช้ถังตกตะกอนแยกต่างหาก โดยปกติถังย่อยแบบเครื่องกรองมีขนาดเล็กกว่าถังย่อยแบบธรรมดาเพราะใช้เวลาในการกักน้ำต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ถังกรองแบบไร้อากาศมีข้อบกพร่องบางอย่างที่ต้องแก้ไข ปัญหาที่สำคัญก็คือ ต้องหาวิธีการกระจายน้ำเสียให้ไหลเข้าถังกรองให้ได้ อย่างสม่ำเสมอ ส่วนเรื่องการอุดตันก็เป็นปัญหาเช่นเดียวกัน แต่สามารถแก้ไขหรือบรรเทาได้ โดยให้มีการตกตะกอนน้ำเสียก่อนส่งเข้าถังกรองไร้อากาศ



ภาพที่ 5 ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter)

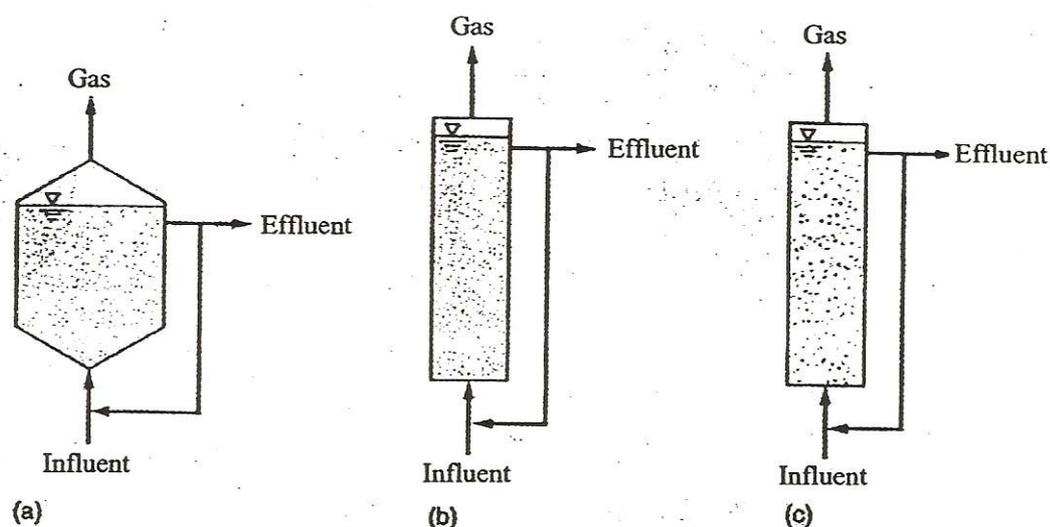
ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2545)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ ถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow anaerobic filter) และถังกรองไร้อากาศแบบไหลลง (Downflow anaerobic filter) โดยแต่ละระบบจะมีลักษณะและรูปแบบการทำงานดังนี้

3.1.1 ถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow anaerobic filter)

ระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นมีรูปแบบและการทำงานของถังปฏิกริยาดังแสดงในภาพที่ 6 โดยน้ำเสียจะถูกปั๊มเข้าสู่ถังปฏิกริยาทางด้านก้นถังและผ่านชั้นของตัวกลางขึ้นสู่ทางด้านบนของถังปฏิกริยา ชั้นของตัวกลางที่ถูกบรรจุอยู่ในถังปฏิกริยาจะทำหน้าที่ให้

จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่จะทำการย่อยสลายมลพิษ (สารอินทรีย์) ยึดเกาะ โดยทั่วไปแล้วการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวต้องคำนึงถึงความหนาหรือความสูงของตัวกลางด้วย นั่นคือ ความสูงของตัวกลางควรมีค่าไม่เกิน 1.5 เมตร หากความสูงของตัวกลางมากเกินไปอาจจะประสบปัญหาการอุดตันของชั้นตัวกลางได้ง่าย เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่เพิ่มจำนวนมากขึ้นหลังจากการเดินระบบไประยะหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้ความดันในระบบบำบัดน้ำเสียหรือถังกรองไร้อากาศลดลง (Head loss) ดังนั้น การออกแบบโดยทั่วไปแล้ว ชั้นของตัวกลางควรมีความสูงประมาณ 1.20 เมตร นอกจากนี้แล้ว ระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ควรจะไม่น้อยกว่า 4 วัน (โดยทั่วไปมักจะออกแบบไว้ประมาณ 7 วัน) อนึ่ง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมักจะมีค่าความเข้มข้นของมลพิษคือสารอินทรีย์หรือบีโอดีสูงอยู่ อาจจะกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของบีโอดีที่เหลือในน้ำเสียที่ผ่านถังปฏิกรณ์แล้วยังสูงกว่า 30 มก./ล.

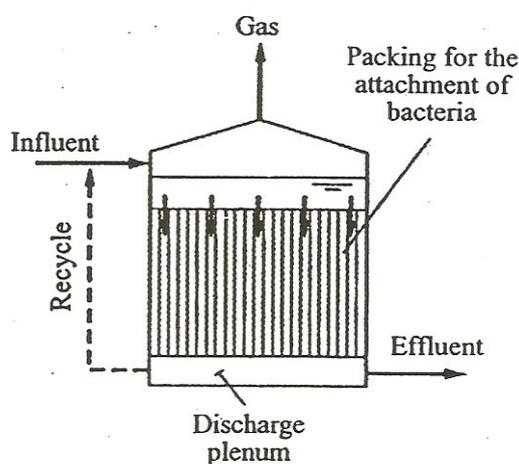


ภาพที่ 6 ระบบบำบัดแบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow anaerobic filter)

ที่มา : สันทัศน์ (2549)

3.1.2 ถังกรองไร้อากาศแบบไหลลง (Downflow anaerobic filter)

ระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลลงจะมีรูปแบบและการทำงานของถังปฏิกริยาดังแสดงในภาพที่ 7 ระบบบำบัดน้ำเสียชนิดนี้นิยมใช้สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณสารแขวนลอยไม่มากนักเมื่อเทียบกับกรณีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น กล่าวคือ น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกริยาทางด้านบนและไหลผ่านชั้นตัวกลางลงสู่ก้นถังปฏิกริยา



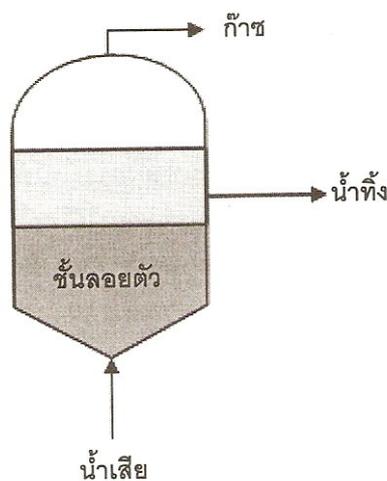
ภาพที่ 7 ระบบบำบัดแบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลลง (Downflow anaerobic filter)

ที่มา : สันทัศน์ (2549)

อนึ่ง ระบบบำบัดน้ำเสียทั้งแบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นและถังกรองไร้อากาศแบบไหลลงจะอาศัยข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบที่เหมือนกัน นอกจากนี้ การออกแบบอาจจะมีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วบางส่วนกลับเข้าสู่ถังปฏิกริยาอีกครั้งเพื่อให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดียิ่งขึ้น รวมทั้งจะเป็นการปรับสมดุลในเรื่องปริมาณและคุณภาพน้ำเสียที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียหรือถังปฏิกริยาอีกด้วย

3.2 ระบบชั้นลอยตัวไร้ออกซิเจน (Anaerobic Fluidized Bed, AFB)

ระบบนี้คล้ายกับระบบถังกรองแบบไร้อากาศตรงที่มีน้ำไหลจากข้างล่างขึ้นข้างบน จัดเป็นระบบฟิล์มตรึง (Fixed Film) แบบไร้อากาศ ที่มีสารตัวกลางขนาดเล็กเท่าเม็ดทรายเป็นที่จับเกาะของแบคทีเรีย (ภาพที่ 8) อัตราการไหลของน้ำเสียต้องสูงมากจนกระทั่งทำให้มีการลอยตัวของสารตัวกลาง ตัวอย่างสารตัวกลางที่ทดลองใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ทราย แอนทราไซค์ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น การใช้สารตัวกลางขนาดเล็ก (เมื่อเปรียบเทียบกับระบบถังกรองไร้อากาศ) ทำให้ระบบนี้มีแบคทีเรียจำนวนมากอาศัยอยู่ในระบบ อัตราเร็วในการบำบัดน้ำเสียของระบบนี้จึงสูงมาก ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าระบบอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ลักษณะการทำงานที่ต้องทำให้สารตัวกลางลอยตัวตลอดเวลาทำให้เกิดปัญหาในการออกแบบและควบคุมระบบหลายอย่าง และต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการทำให้สารตัวกลางลอยตัวสูงกว่าระบบอื่น ระบบเช่นนี้จึงยังไม่ได้รับความนิยม



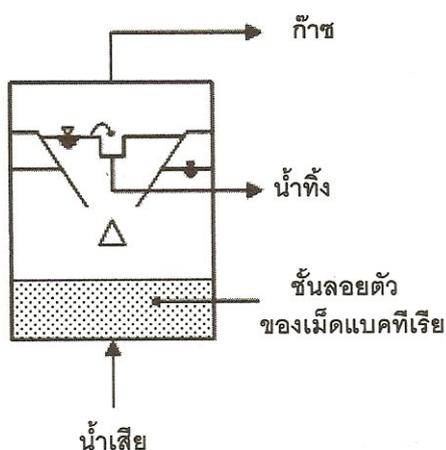
ภาพที่ 8 ระบบชั้นลอยตัวไร้ออกซิเจน (Anaerobic Fluidized Bed, AFB)

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2545)

3.3 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

การที่ต้องมีสารตัวกลางอยู่ในระบบถังกรองไร้อากาศ และระบบ AFB ทำให้ถึงปฏิบัติการต้องเสียปริมาณใช้งาน และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อสารตัวกลางเป็นจำนวนมาก ระบบยูเอเอสบีมีทิศทางการไหลของน้ำเสียจากด้านล่างขึ้นด้านบนโดยไม่มีตัวกลาง แต่แบคทีเรียจะถูกเลี้ยงให้จับตัวกันเป็นเม็ดขนาดใหญ่ จนกระทั่งมีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนได้ดี น้ำเสียที่ไหลเข้าถังปฏิบัติการจะทำให้เม็ดแบคทีเรียลอยตัวอยู่เป็นชั้นสลัดจ์ ไม่จมลงก้นถัง

ข้อบกพร่องของระบบนี้ คือ การสร้างชั้นสลัดจ์เป็นเรื่องยาก และอาจถือว่าเป็นเรื่องที่ผิดธรรมชาติของแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนที่จะมีการจับกันเป็นกลุ่มฟล็อก ซึ่งระบบนี้สามารถรับภาระอินทรีย์ได้สูงกว่าระบบบำบัดแบบไร้อากาศแบบอื่น ๆ และสามารถผลิตน้ำทิ้งที่มีคุณภาพสูงได้ เนื่องจากสามารถป้องกันมิให้แบคทีเรียหลุดออกไปกับน้ำทิ้งด้วยเสมอ

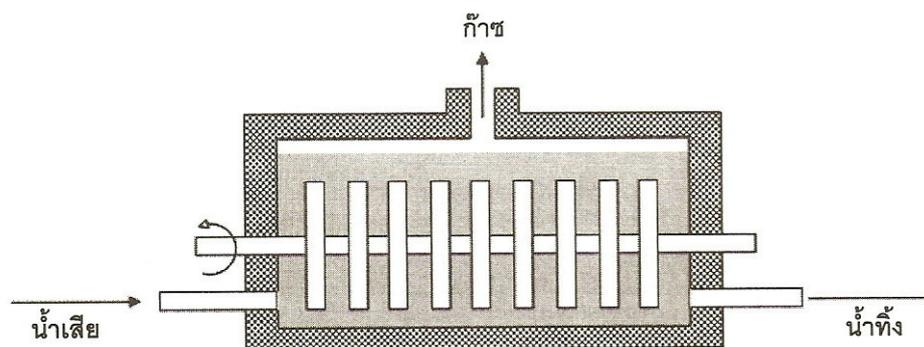


ภาพที่ 9 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2545)

3.4 ระบบแผ่นหมุนชีวภาพไร้ออกซิเจน (Anaerobic Rotating Biological Contactor, AnRBC)

ระบบ AnRBC เป็นระบบที่พัฒนาขึ้น เพื่อต้องการที่จะลดการใช้พลังงานในการสูบน้ำเสียให้หมุนเวียนใน AFB และได้นำข้อดีของระบบฟิล์มตรึง (Fixed Film) กับแผ่นหมุนชีวภาพธรรมดา (RBC) มาใช้ในระบบไร้ออกซิเจน ลักษณะของระบบ AnRBC จะคล้ายคลึงกับระบบแผ่นหมุนชีวภาพธรรมดา เพียงแต่มีฝาปิดเพื่อมิให้สัมผัสอากาศจากภายนอก และมีช่องระบายก๊าซออกทางตอนบน (ภาพที่ 10) ผลปรากฏว่าแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนสามารถยึดเกาะและเจริญเติบโตได้ดีบนผิวแผ่นงาน ซึ่งระบบนี้สามารถรับภาระอินทรีย์ที่สูงขึ้นอย่างกะทันหันได้ดี

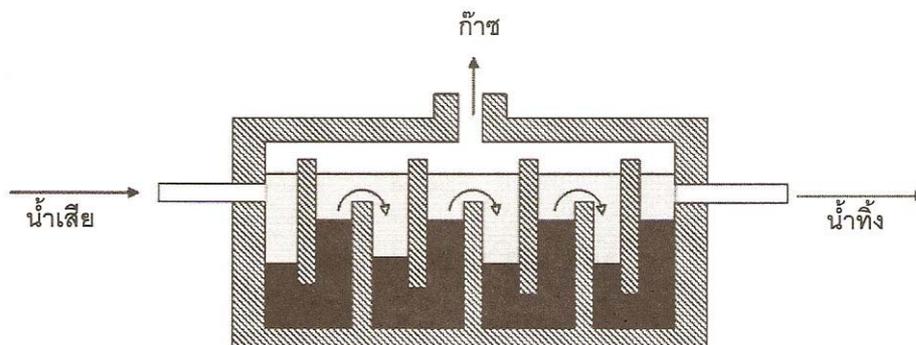


ภาพที่ 10 ระบบแผ่นหมุนชีวภาพไร้ออกซิเจน (Anaerobic Rotating Biological Contactor, AnRBC)

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2545)

3.5 ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน (Anaerobic Baffled Reactor, ABR)

ลักษณะของระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน คือ มีแผ่นกั้นเพื่อบังคับให้น้ำเสียไหลขึ้นลง ดังแสดงในภาพที่ 11 ถึงปฏิกิริยาจึงไม่จำเป็นต้องมีความสูงมากเหมือนของระบบไร้ออกซิเจนแบบอื่น ๆ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำ ข้อดีของระบบนี้ คือ เป็นระบบที่มีพื้นที่ผิวน้ำมาก ทำให้แบคทีเรียมีพื้นที่ตกตะกอนสูงกว่าระบบอื่น ๆ การแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำได้ดีและง่ายเช่นกัน ลักษณะดังกล่าวทำให้การเก็บกักเซลล์สามารถกระทำอย่างได้ผลดี จึงมีมวลแบคทีเรียสะสมอยู่ในระบบเป็นจำนวนมาก การบำบัดน้ำเสียจึงสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยอัตราสูง



ภาพที่ 11 ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน (Anaerobic Baffled Reactor, ABR)

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2545)

4. ตัวกลาง (Filter media)

ตัวกลาง (Filter media) เป็นส่วนที่จะให้พื้นที่ผิวกับจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียเกาะติดและเจริญเติบโตเป็นแผ่นเมือก (Biofilm) มีอยู่หลายรูปแบบ และมีการพัฒนาตั้งแต่ตัวกลางที่เป็นกรวดหิน ซึ่งมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรน้อยและมีน้ำหนักมาก มาเป็นพลาสติกที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากและมีน้ำหนักเบา หรือแม้แต่เป็นวัสดุธรรมชาติก็ตาม ลักษณะของตัวกลางที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้ (สันทัด, 2549)

- ให้พื้นที่ผิวแก่แบคทีเรียเกาะและเจริญเติบโตได้ดี กล่าวคือ มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง และเมือกจุลินทรีย์สามารถยึดเกาะได้ดี
- ราคาถูก ทนทาน มีอายุการใช้งานยาวนาน กล่าวคือ สามารถทนต่อการกัดกร่อนต่อน้ำเสียที่ต้องการบำบัดได้ดี
- ให้มีช่องไหลผ่านผิวหน้าจุลินทรีย์เกาะติดได้ทั่วถึง กล่าวคือ ตัวกลางที่ดีจะต้องไม่มีจุดอับที่น้ำเสียไหลผ่านไปไม่ถึงหรือเกิดการลัดวงจรได้ง่าย
- มีช่องว่างให้เมือกจุลินทรีย์ที่หนามากหลุดออกแล้วไหลออกและไหลผ่านได้ง่าย โดยไม่อุดตัน กล่าวคือ ช่องว่างในตัวกลางจะต้องใหญ่พอที่จะไม่เกิดการอุดตันด้วยเมือกจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโต

- มีสภาพเฉื่อยทางชีวภาพ (Biological inert) ตัวอย่างเช่น ไม่ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
- มีความคงตัวทางเคมี (Chemically stable) และทางกล (Mechanically stable)

4.1 ประเภทของพลาสติก

พลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งที่สามารถคงรูปร่างได้ ภายใต้สภาวะที่มีแรงกดและที่อุณหภูมิใช้งาน แต่จะเป็นของไหลหนืด (viscous flow) ที่อุณหภูมิที่ทำการแปรรูป สามารถแบ่งพลาสติกออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะเฉพาะของการแปรรูป หรือพฤติกรรมในกระบวนการแปรรูปเมื่อได้รับความร้อน คือ

1) เทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) คือ พอลิเมอร์ที่สามารถนำกลับไปหลอมใหม่หลังจากผ่านกระบวนการแปรรูป โดยที่สมบัติของพอลิเมอร์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ตัวอย่างพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลท (PET) และ พอลิซัน โฟน เป็นต้น

2) เทอร์โมเซต (thermosetting) คือ พอลิเมอร์ที่หลังจากผ่านการแปรรูปแล้ว จะแข็งตัวอย่างถาวร เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยง (cross-linking) และเกิดเป็นร่างแหของพอลิเมอร์ (polymer network) การให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ชนิดนี้หลังการแปรรูปแล้ว ไม่สามารถหลอมได้อีก แต่ถ้าให้ความร้อนสูงและติดต่อกันเป็นเวลานาน ๆ จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพและการออกซิเดชัน ซึ่งจะได้ถ่านเป็นผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลิก เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันแล้ว และ อีพอกซี เป็นต้น (เจริญ, 2547)

4.2 คุณสมบัติของพลาสติก

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษดีเด่นกว่าวัสดุอื่นที่ได้จากธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นมา เช่น ไม้ โลหะ แก้ว กระดาษ ฯลฯ ที่นิยมใช้กันมากก่อนอย่างมากมาย ทั้งนี้เพราะพลาสติกมีคุณสมบัติหลาย ๆ อย่างรวมกันในตัวของมันเองและยังมีคุณสมบัติใช้แทนวัสดุอื่นได้ดีเท่าเทียมหรือดีกว่าวัสดุเดิม เช่น

- แข็ง
- อ่อนนุ่ม
- ยืดตัว
- เหนียวทนทาน
- ไส
- ทึบ
- เบา
- ลอยน้ำได้
- ทนความร้อน
- ทนการกัดกร่อน
- ทนสารเคมี
- เป็นฉนวนไฟฟ้า
- กันน้ำ
- ไม่ติดง่าย
- หล่อลื่นในตัว
- ทำเป็นสีต่าง ๆ ได้
- ฯลฯ

พลาสติกมีคุณสมบัติทางโครงสร้างพิเศษที่เรียกว่า High Molecular Weight คือ มีโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันยาวกว่าสารชนิดอื่นมากมาย นับเป็นพันเท่า ด้วยเหตุดังกล่าวจึงทำให้พลาสติกมีคุณสมบัติพิเศษหลาย ๆ อย่างพร้อมกันไป คือ

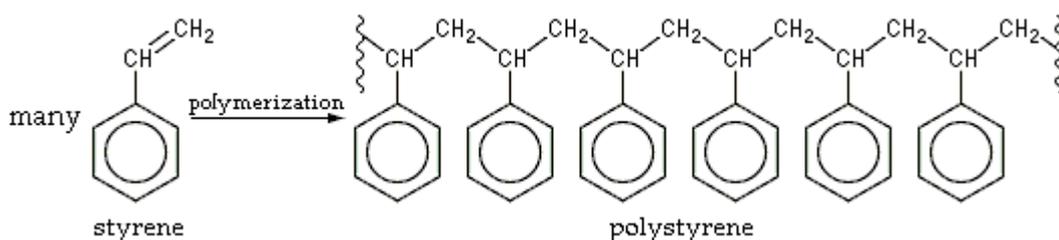
คุณสมบัติทางกายภาพ (Mechanical) มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น ฯลฯ

คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical) เป็นฉนวนไฟฟ้า

คุณสมบัติทางเคมี (Chemical) ทนกรด ด่าง และสารเคมีอื่น ๆ

4.3 ชนิดของพลาสติกที่ใช้เป็นตัวกลางในการทดลอง

1) โพลิสไตรีน (Polystyrene)



ภาพที่ 12 สูตรโครงสร้างของโพลิสไตรีน (Polystyrene)

ที่มา : Anonymous (2009)

คุณสมบัติ โพลีสไตรีนมีน้ำหนักเบาที่สุดในพลาสติกชนิดแข็ง (Rigid Plastics) มี ถ.พ. เท่ากับ 0.89 – 1.10 มีความหดตัวน้อยมาก

โพลีสไตรีนมีความคงรูปดีแต่เปราะ สามารถทำเป็นสีต่าง ๆ ได้ มีทั้งใส ฝ้า และทึบ ผิวมีทั้งเรียบและขรุขระ ไม่มีรส และกลิ่น เป็นฉนวนไฟฟ้าดี ความดูดซึมน้ำต่ำ ไม่เหมาะกับการใช้ภายนอก ทนความร้อนได้พอสมควร ทนสารเคมีใช้ในบ้านได้ ทนกรดและด่างชนิดอ่อนได้ ไม่ทนน้ำมันเบนซิน ทินเนอร์ อะซีโตน น้ำมันสน

โพลีสไตรีนชนิดธรรมดา (General Purpose) จะแข็งแต่เปราะ ส่วนโพลีสไตรีนชนิดพิเศษ เช่น High Impact และ Co – Polymer จะแข็งแรงกว่ามาก

การใช้ประโยชน์ ใช้ทำกล่องบรรจุอาหารชนิดใส กล่องบรรจุของใช้อื่น ๆ เช่น แปรงสีฟัน ถังบรรจุเครื่องดื่ม ของเด็กเล่น ไม้บรรทัดราคาถูก แผงและตู้โทรทัศน์ วิทยุ ไฟท้ายรถ

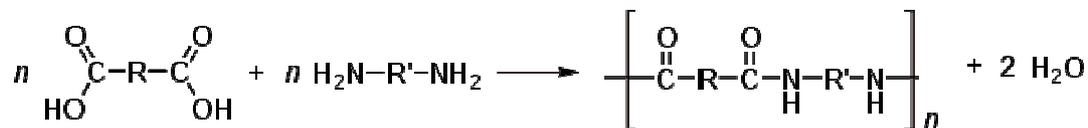
ในรูปโฟม ซึ่งเรารู้จักในชื่อสไตโรโฟม (Styrofoam) ใช้ทำป้ายและสิ่งประดับในงานต่าง ๆ วัสดุกันแตกในกล่องบรรจุของ แผ่นฉนวนกันความร้อนและเสียง ฯลฯ

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของ POLYSTYRENE

ลักษณะทางกายภาพของ POLYSTYRENE	
ความถ่วงจำเพาะ	1.04 – 1.10
ปริมาตร (ลูกบาศก์นิ้ว / ปอนด์)	25.2 – 28
ทนแรงดึง (ปอนด์ / ตารางนิ้ว)	1,500 – 12,000
ทนแรงอัด (ปอนด์ / ตารางนิ้ว)	4,000 – 16,000
ทนแรงกระทบ	0.25 – 11.0
ทนความร้อน	150 – 180 °F
ทนกรด	ทนชนิดอ่อนได้ ถูกทำลายโดย Oxidizing Acids
ทนด่าง	ได้
ทนสารละลาย	ละลายได้ใน Aromatic และ Chlorinated Hydrocarbon
ทนแสงแดด	เหลือง
ความใส	ใส – ทึบ

ที่มา : พิชิต (2542)

2) โพลีเอมีด (Polyamide) หรือไนลอน (Nylon)



ภาพที่ 13 สูตรโครงสร้างของโพลีเอมีด (Polyamide) หรือไนลอน (Nylon)

ที่มา : Anonymous (2009)

คุณสมบัติ ไนลอนเป็นพลาสติกชนิดที่มีน้ำหนักเบา ราคาแพง มีความทนทานต่อการเสียดสีสูง รับแรงดึงแรงอัดได้ดี ทนความร้อน ทนการขีดข่วน เป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ไม่เหมาะสำหรับไฟฟ้าแรงสูง ทนกรดชนิดอ่อน ทนด่างได้ทั้งชนิดอ่อนและแข็ง ทนสารเคมี เช่น น้ำมัน แอลกอฮอล์ ไขมัน คูคซึมน้ำได้บ้าง ไม่เหมาะกับการใช้ทำเป็นถ้วยชาหรือกาแฟเพราะจะเป็นคราบติด ไม่เหมาะสมกับการใช้ภายนอก

โดยทั่วไปเนื้อของไนลอนมีความโปร่งแสง ในรูปของเส้นใยจะโปร่งใส สามารถทำเป็นสีต่าง ๆ ได้

ไนลอนเป็น Engineering plastic ที่มีคุณสมบัติรองจากฟลูออ-โรคาร์บอน **การใช้ประโยชน์** นิยมทำเกียร์ แบร็งค์ บูช ส่วนรับน้ำหนัก และมีแรงเสียดทานสูง ในรูปเส้นใยใช้ทำร่มชูชีพ ถุงเท้า เสื้อผ้า เ็นตกปลา ผงกำมะหยี่ นอกจากนั้นยังใช้ทำก้อนพลาสติก วาล์ว ท่อส่งน้ำมันและสารเคมีอื่น ๆ ใบบัด ขวดสเปรย์บางชนิด แร็คเก็ตเทนนิส ฯลฯ

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของ NYLON

ลักษณะทางกายภาพของ NYLON	
ความถ่วงจำเพาะ	1.14
ปริมาตร (ลูกบาศก์นิ้ว / ปอนด์)	24.3
ทนแรงดึง (ปอนด์ / ตารางนิ้ว)	12,000
ทนแรงอัด (ปอนด์ / ตารางนิ้ว)	12,500
ทนแรงกระทบ	2.0
ทนความร้อน	250 – 300 °F
ทนกรด	ทนได้เฉพาะกรดอ่อน
ทนด่าง	ดี
ทนสารละลาย	ดี ยกเว้น Phenols และ Formic Acids
ทนแสงแดด	ไม่ดี สีซีด
ความใส	โปร่งแสง

ที่มา : พิชิต (2542)

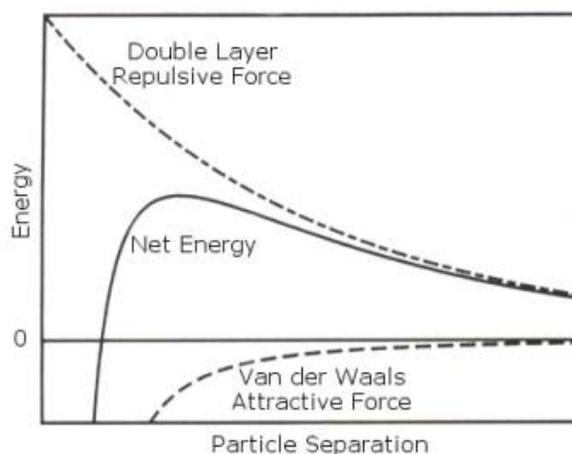
5. ทฤษฎี DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey และ Overbeek)

ทฤษฎี DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey และ Overbeek) อธิบายถึงความเสถียรของสารคอลลอยด์ในสารแขวนลอย ซึ่งจะมีความสมดุลกันระหว่างแรง 2 แรง คือ แรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic repulsion) และแรงดึงดูดซึ่งเกิดจากแรง van der waals (van der waals attraction)

แรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตย์จะมีความสำคัญเมื่อสารคอลลอยด์ 2 อนุภาคเข้าใกล้กัน และ double layer มีการแทรกสอดกัน ดังนั้นจึงต้องการแรงที่จะเอาชนะแรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ กราฟของแรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตย์บ่งบอกถึงพลังงานที่จะต้องเอาชนะถ้าอนุภาคมีแรงกระทำซึ่งกันและกัน โดยมีค่ามากที่สุดเมื่ออนุภาคสัมผัสกัน และจะลดลงจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ภายนอกของ double layer ค่าที่มากที่สุดจะเกี่ยวข้องกับ surface potential และ zeta potential

แรงดึงดูดซึ่งเกิดจากแรง van der waals เป็นผลของแรงระหว่างแต่ละโมเลกุลของสารคอลลอยด์ โดย 1 โมเลกุลของสารคอลลอยด์แรกมีแรงดึงดูด ซึ่งเกิดจากแรง van der waals ไปกระทำต่อแต่ละโมเลกุลในสารคอลลอยด์ที่สอง และเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวกับโมเลกุลอื่นในสารคอลลอยด์แรก ดังนั้น แรงทั้งหมดจึงเท่ากับผลรวมของแรงดังกล่าวทั้งหมด กราฟของพลังงานในการดึงดูดบ่งบอกถึงแรง van der waals ที่มีการผันแปรตามระยะห่างระหว่างอนุภาค

ทฤษฎี DLVO อธิบายแนวโน้มของสารคอลลอยด์ที่จะมารวมตัวหรือไม่รวมตัวกัน โดยจะนำกราฟของแรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic repulsion) มารวมกับแรงดึงดูดซึ่งเกิดจากแรง van der waals (van der waals attraction) ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและการแยกกันของอนุภาค

ที่มา : Malvern, 2009

จากสมการที่ 5 นั้น W คือแรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ 2 อนุภาคที่มีแรงกระทำกันในน้ำ, V คือ แรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิต และ A_{vdw} คือ แรงดึงดูดซึ่งเกิดจากแรง van der waals

$$W = V + A_{vdw} = 2\pi r \epsilon \epsilon_0 \psi_0^2 \text{EXP}(-\kappa D) - \frac{Ar}{12D} \quad (5)$$

กำหนดให้ r คือ รัศมีของ ANAMMOX (เมตร), ϵ คือ ค่า dielectric constant ของน้ำ, ϵ_0 คือ permittivity in free space ($\text{C}^2 \text{J}^{-1} \text{m}^{-1}$), ψ_0 คือ ค่า surface potential ของ ANAMMOX หรือ

ตัวกลาง (V), κ คือ inverse Debye length (m^{-1}), D คือ ระยะทางน้อยที่สุดของการแยกกันของอนุภาค (m) และ A คือ ค่า Hamaker constant ของ ANAMMOX หรือตัวกลาง (J)

ค่า inverse Debye length สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 (Shaw, 1992; Israelachvili, 2000)

$$\kappa = \left(\sum_i \frac{2N_A C_i e^2 z_i^2}{\epsilon \epsilon_0 kT} \right)^{1/2} \quad (6)$$

กำหนดให้ N_A คือ ค่า Avogadro's number (mol^{-1}), C_i คือ concentration of specie i ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$), e คือ ค่า electronic charge (C), z_i คือ valency of species i , k คือ ค่า Boltzmann's constant ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$) และ T คือ อุณหภูมิ (K)

ค่า Hamaker constant (A) สามารถคำนวณได้จากทฤษฎี Lifshitz ในสมการที่ 7 (Israelachvili, 1992)

$$A = \frac{3}{4} kT \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon}{\epsilon_1 + \epsilon} \right) \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon}{\epsilon_2 + \epsilon} \right) + \frac{3h\nu_e}{8\sqrt{2}} \frac{(n_1^2 - n^2)(n_2^2 - n^2)}{(n_1^2 + n^2)^{1/2} (n_2^2 + n^2)^{1/2} \left\{ (n_1^2 + n^2)^{1/2} + (n_2^2 + n^2)^{1/2} \right\}} \quad (7)$$

กำหนดให้ h คือ ค่า Planck's constant ($\text{J}\cdot\text{s}$), ν_e คือ ค่า absorption frequency (s^{-1}), ϵ_1 คือ ค่า dielectric constant ของ ANAMMOX (ในกรณีที่เป็นการเกาะติดของเชื่อน้ำมันอ็อกซ์กับเชื่อน้ำมันอ็อกซ์) หรือตัวกลาง (ในกรณีที่เป็นการเกาะติดของเชื่อน้ำมันอ็อกซ์บนตัวกลาง), ϵ_2 คือ ค่า dielectric constant ของ ANAMMOX, n_1 คือ ค่า refractive index ของ ANAMMOX (ในกรณีที่เป็นการเกาะติดของเชื่อน้ำมันอ็อกซ์กับเชื่อน้ำมันอ็อกซ์) หรือตัวกลาง (ในกรณีที่เป็นการเกาะติดของเชื่อน้ำมันอ็อกซ์บนตัวกลาง), n_2 คือ ค่า refractive index ของ ANAMMOX และ n คือ ค่า refractive index ของน้ำ

สำหรับ V คือแรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8 (Gregory, 1975)

$$V = \left(\sum_i N_A C_i \right) \frac{128\pi kT}{\kappa^2} \gamma_1 \gamma_2 \frac{rR}{(r+R+D)} \exp(-\kappa D) \quad (8)$$

$$\gamma_j = \tanh\left(\frac{y_j}{4}\right), \quad j = \text{either 1 or 2} \quad (9)$$

กำหนดให้ R คือรัศมีของตัวกลาง (m) และ y_j สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 10

$$y_j = \frac{\psi}{kT} \left(\sum_i z_i e \right) \quad (10)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จะใช้ในการคำนวณตามสมการข้างบนนั้น แสดงไว้ในตารางที่ 6

6. การระบุชนิดของจุลินทรีย์ด้วยวิธีฟลูออเรสเซนซ์อินซิติวไฮบริไดเซชัน (Fluorescence in situ Hybridization : FISH)

FISH (Fluorescence in situ Hybridization) เทคนิค เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบกลุ่มจุลินทรีย์ที่เจาะจง โดยทำการย้อม DNA ของกลุ่มจุลินทรีย์ ด้วย probe เจาะจงแต่ละกลุ่มจุลินทรีย์ (Oligonucleotide probe) เทคนิค FISH จะประกอบไปด้วย ขั้นตอนที่สำคัญ 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก เป็นการตรึงเซลล์ตัวอย่าง โดยนำเซลล์ตัวอย่างมาตรึงด้วยสารละลาย 4 % paraformaldehyde phosphate-buffer saline (PBS) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเซลล์ที่ตรึงไว้ล้างด้วย PBS 2 ครั้ง แล้วเก็บเซลล์ไว้ในสารละลายผสมระหว่าง PBS กับ เอทานอล (1 : 1 vol/vol) ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ขั้นที่สอง ทำการย้อมตัวอย่างเซลล์ที่ตรึงไว้ด้วย probe เจาะจงสำหรับแต่ละชนิดของจุลินทรีย์ ทำตามขั้นตอนของ Amann *et al.* (1990) โดยนำเซลล์ที่ตรึงไว้มาหยดลงบนสไลด์ แล้วทำให้แห้งในอากาศ จากนั้นเอาน้ำออกจากเซลล์ด้วยการแช่ในเอทานอล 50 % , 80 % และ 100 % ตามลำดับ โดยแช่นานครั้งละ 3 – 5 นาที แล้วทำให้แห้ง จากนั้นทำการ hybridize เซลล์ด้วยสารละลาย Hybrid buffer (0.9 M NaCl, 20 mM Tris-HCl, 0.01 % sodium dodecyl sulfate และ %probe formamide) เป็นเวลา 1 – 1.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส ขั้นที่สาม เป็นขั้นตอนการล้างตัวอย่าง เพื่อเป็นการนำเอา probe ที่ไม่ติดเซลล์ออก โดยแช่ใน washing buffer (40 mM NaCl, 0.01 % sodium dodecyl sulfate และ 20 mM Tris-HCl) เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส จากนั้นล้างสไลด์ด้วยน้ำกลั่น แล้วทำให้แห้งทันที และขั้นสุดท้าย หยดสาร Antifade จากนั้นนำตัวอย่างไปตรวจหาเชื้อจุลินทรีย์โดยส่องกล้องฟลูออเรสเซนซ์

7. การศึกษาเอกสารจากการทดลองอื่น ๆ

กระบวนการอนาม็อกซ์ คือ กระบวนการที่จุลินทรีย์เปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนโตรที่ แล้วกลายเป็นก๊าซไนโตรเจน โดยที่ขั้วหรือหุคปฏิกิริยาในระหว่าง ไนโตรที่เป็นไนเตรต และใน การกระบวนการนี้จะใช้ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ในน้ำเสียเป็นแหล่งคาร์บอนทดแทน

Arrojo *et al.* (2006) ศึกษาผลกระทบของ shear stress ต่อกระบวนการอนาม็อกซ์ใน sequencing batch reactor (SBR) ซึ่งใช้เวลาในการทดลอง 218 วัน โดยใช้อัตราเร็วในการกวนเท่ากับ 60 – 250 rpm เพื่อที่จะทำให้เกิดความแตกต่างของ shear conditions และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนอนาม็อกซ์ โดยที่ nitrogen loading rate (NLR) เท่ากับ

$0.3 \text{ g N(L.day)}^{-1}$ ซึ่ง nitrite จะถูกกำจัดไป 98 % และ specific anammox activity มีค่าเกือบจะคงที่เท่ากับ $0.4 \text{ g N(g VSS.day)}^{-1}$ ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดตะกอนอนาโม็อกซ์มีค่าเท่ากับ 0.64 mm

อัตราเร็วในการกวนที่ใช้กันส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 180 rpm ซึ่งจะไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนของอนาโม็อกซ์ แต่มีอัตราเร็วในการกวนมีค่าเท่ากับ 250 rpm ทำให้ anammox activity ลดลง 40 %, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมีค่าลดลง 45 %, ความเข้มข้นของแข็งในน้ำออกมีค่าเพิ่มขึ้น 0.2 g TSS/L และมี nitrite สะสมในถังปฏิกริยามากกว่า 60 mg N/L

Imajo *et al.* (2004) ศึกษาถึงความเหมาะสมในการสร้างเม็ดตะกอน ซึ่งใช้ถังปฏิกริยา 2 แบบ คือ 6.4 L lab – scale reactor โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ และ 200 L pilot – scale reactor โดยใช้น้ำเสียจาก sludge digester แล้วนำ sludge granules จากถัง UASB มาใส่ในถังปฏิกริยาที่ใช้ในการทดลองเพื่อเป็นการเพิ่มเม็ดตะกอนในกระบวนการสร้างเม็ดตะกอน แล้วสังเกตกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนของอนาโม็อกซ์ ซึ่งส่วนในสุดของเม็ดตะกอนอนาโม็อกซ์ คือ ส่วนของ sludge granules จากถัง UASB ที่ใส่ไปตอนเริ่มการทดลอง เม็ดตะกอนอนาโม็อกซ์จะมีความหนาแน่นน้อยกว่า sludge granules จากถัง UASB เล็กน้อย แต่ขนาดและคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกัน กระบวนการสร้างเม็ดตะกอนอนาโม็อกซ์มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนคงที่สำหรับ lab – scale reactor สามารถกำจัดไนโตรเจนได้มากที่สุด เท่ากับ $2.9 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ หลังจากวันที่ 173 ของการเดินระบบ แล้วสำหรับ pilot – scale reactor สามารถกำจัดไนโตรเจนได้มากที่สุด เท่ากับ $6.4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ หลังจากเดือนที่ 12 ของการเดินระบบ

Show and Tay (1999) ได้ทำการทดลองโดยใช้ lab-scale upflow anaerobic filters (AFs) ซึ่งใส่ตัวกลางที่แตกต่างกัน โดยให้ volumetric organic loadings และ hydraulic retention time มีค่าเท่ากัน และใช้ synthetic protein-carbohydrate waste โดยให้ organic loading เท่ากับ 16 g COD/L/d ซึ่งพบว่า ถังปฏิกริยาที่ใส่ตัวกลางแบบมีรูพรุนมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ 78 % ส่วนในถังปฏิกริยาที่ใส่ตัวกลางแบบผิวเรียบจะมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้น้อยกว่า 57 %

Waki *et al.* (2007) ได้ทำการทดลองนี้โดยมีจุดประสงค์เพื่อดูความเหมาะสมของกระบวนการอนาโม็อกซ์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราส่วนของ BOD / N ต่ำ โดยพบว่าปริมาณของ NO_2^- และ NH_4^+ จะมีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งไนโตรเจนที่ถูกกำจัดนั้นเกิดจากปฏิกริยาของ

อนาม็อกซ์ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ inorganic nitrogen ที่ถูกกำจัดได้ในน้ำเสียจริงกับน้ำเสียสังเคราะห์นั้น พบว่าน้ำเสียทั้งสองชนิดเหมาะสมกับการใช้กระบวนการอนาม็อกซ์ในการบำบัด

Ghangrekar *et al.* (2005) พบว่าลักษณะเฉพาะของเม็ดตะกอนภายในถังปฏิกริยาเป็นจุดเด่นของระบบ UASB โดยที่ค่า organic loading rate และ sludge loading rate ในช่วงเริ่มเดินระบบ คือ พารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะควบคุมลักษณะเฉพาะของเม็ดตะกอน ซึ่งจะศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ทั้งสองชนิดนี้ที่มีต่อลักษณะเฉพาะของเม็ดตะกอนในถัง UASB ทั้ง 6 ถัง โดยศึกษาในรูปของ VSS/SS ratio of the sludge, sludge volume index, specific gravity, settling velocity และ metal contents of the sludge ภายใต้ loading rate ที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองพบว่าลักษณะเฉพาะของเม็ดตะกอนมีการพัฒนาดีขึ้น โดยที่ organic loading rate เท่ากับ 2.0 – 4.5 kg COD/m³.d และ sludge loading rate เท่ากับ 0.1 – 0.25 kg COD/kg VSS.d ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนและประสิทธิภาพในการกำจัด COD มีค่าสูงด้วย

Bodik *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิและ HRT ในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบและในช่วง steady-state ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ upflow anaerobic filter (UAF) และระบบบำบัดน้ำเสียแบบ anaerobic sequencing batch reactor (AnSBR) โดยในการทดลองจะใช้น้ำเสียชุมชนและน้ำเสียสังเคราะห์ (กลูโคสและโซเดียมอะซิเตต) แล้วเลือกใช้อุณหภูมิในช่วง 9 – 23 °C และเลือกใช้ค่า HRT ในช่วง 6 – 46 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัด COD เท่ากับ 56 – 88 % (AnSBR) และ 46 – 92 % (UAF) ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัด COD นี้จะขึ้นอยู่กับค่า HRT และอุณหภูมิ สำหรับการทดลองนี้สามารถนำระบบบำบัดน้ำเสียแบบ AnSBR และ UAF มาใช้ในการบำบัดขั้นต้นของระบบบำบัดน้ำเสียในชุมชนขนาดเล็ก

Tsushima *et al.* (2007) ได้ทำการทดลองเพาะเลี้ยงเชื้อ ANAMMOX ใน up-flow fixed-bed biofilm column reactors ปฏิกริยาของ ANAMMOX จะเกิดขึ้นภายใน 50 วัน และอัตราการกำจัดไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 26.0 kg-N m⁻³ day⁻¹ ซึ่งจะเกิดหลังจาก 247 วัน ค่า HRT และสัดส่วนของ NH₄⁺/NO₂⁻ ที่เข้าสู่ระบบเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน ซึ่งอัตราการกำจัดไนโตรเจนที่มีค่ามาก จะเกิดในสถานะที่มีค่า HRT ต่ำและสัดส่วนของ NH₄⁺/NO₂⁻ ที่เข้าสู่ระบบมีค่ามาก หลังจากที่ใช้เชื้อ ANAMMOX เกิดอย่างสมบูรณ์แล้ววิเคราะห์โครงสร้างทางชุมชนของจุลินทรีย์โดยใช้วิธี PCR พบว่ามีเชื้อ ANAMMOX อยู่ 70 % ของ

แบคทีเรียทั้งหมด ซึ่งเชื้อ ANAMMOX ที่พบในการทดลองนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับ *Candidatus Brocadia anammoxidans* และที่ผิวของ biofilm ยังพบ *Nitrosomonas* อีกด้วย

Punal *et al.* (2000) กล่าวว่า อุปสรรคในการเริ่มต้นเดินระบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ คือปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ มี 2 ปัจจัย คือ ระยะเวลาเก็บกักตะกอนจุลินทรีย์และประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ทำเพื่อหาสัดส่วนระหว่าง C:N ที่เหมาะสมกับระยะเวลาเก็บกักตะกอนจุลินทรีย์ โดยในช่วงแรกของการเดินระบบจะจำกัดปริมาณไนโตรเจน ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าตะกอนจุลินทรีย์มีความเข้มข้นขึ้น และประสิทธิภาพของระบบก็ดีขึ้นด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ถังปฏิกิริยา

ถังปฏิกิริยาแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi Continuous System) แสดงในภาพที่ 15

ในการทดลองใช้ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดจุกด้วยจุกยางสีดำ พันรอยต่อของขวดกับจุกยางด้วยเทปกาว เจาะจุกยางจำนวน 3 ช่องเพื่อต่อท่อ โดยท่อที่ 1 เป็นท่อสูบน้ำเสียเข้าและออก ท่อที่ 2 เป็นท่อเป่าก๊าซเข้าไปในขวด และท่อที่ 3 เป็นท่อที่ปล่อยก๊าซออกจากขวด จำนวน 5 ชุดการทดลอง



ภาพที่ 15 ถังปฏิกิริยาแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi Continuous System)

2. ถังพักน้ำเสีย

ถังพักน้ำเสียที่จะสูบเข้าสู่ระบบเป็นถังพลาสติกชนิดปิดขนาด 3 ลิตร จำนวน 1 ถัง

3. ถังก๊าซผสม

ใช้ก๊าซผสม Ar 95 % และ CO₂ 5 % จำนวน 1 ถัง เพื่อใช้ในการป้อนเข้าสู่ถังพักน้ำเสีย (Influent Tank) และถังปฏิกรณ์

4. เครื่องเขย่า (Shaker)

ใช้ในการผสม โดยมีอัตราเร็วในการหมุนอยู่ที่ 50 รอบต่อนาที



ภาพที่ 16 เครื่องเขย่า (Shaker) ที่ใช้ในการทดลอง

5. น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยแอมโมเนียและไนไตรต์เป็นหลัก เพื่อเป็นอาหารของจุลินทรีย์ในกลุ่มอนาแอโรบิก น้ำเสียสังเคราะห์จะถูกเตรียมใหม่ทุกวัน เพื่อหลีกเลี่ยงการระเหยของแอมโมเนีย รายละเอียดของส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์

สารอาหาร	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)	ปริมาณสารที่ใช้ (มล.) / น้ำ 1 ลิตร
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	132	7.50
NaNO_2	138	9.75
KHCO_3	125	7.50
$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2 + 1	7.50
Na_2EDTA	15	0.75
KH_2PO_4	25	0.75
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	200	0.75
CaCl_2	300	0.75
$\text{Na}_2\text{O}_3\text{Se} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.40	0.15
$\text{MoNa}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.10	0.15
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.25	0.15
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.15	0.15
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	4.95	0.15
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.20	0.15
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.95	0.15

ที่มา : Noophan *et al.* (2009)

หมายเหตุ : สารเคมีที่ใช้เป็นชนิด Analytical reagent grade

วิธีการ

การศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเขื่อนาม็อกซ์บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ

1. ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi Continuous System) ซึ่งใช้ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร เริ่มต้นเดินระบบโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์ในกลุ่มอนาม็อกซ์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งกำหนดให้ 1 วัฏจักรของการเดินระบบเท่ากับ 24 ชั่วโมง ประกอบด้วย ช่วงเติมน้ำเสียปริมาณ 100 มิลลิลิตรนาน 20 นาที ช่วงทำปฏิกิริยา 23 ชั่วโมง ช่วงตกตะกอน 20 นาที และช่วงการคั่งน้ำออก 100 มิลลิลิตรนาน 20 นาที

โดยมีขั้นตอนในการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ ดังนี้ เริ่มต้นด้วยการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 1 ลิตร ไว้ในถังพักน้ำเสีย เป่าก๊าซผสม Ar 95 % และ CO₂ 5 % เป็นเวลา 5 นาที ในระหว่างนี้ก็เก็บน้ำออกจากถังปฏิกิริยาทั้ง 5 ชุดการทดลอง ๆ ละ 100 มิลลิลิตร แล้วจึงเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมลงไปทั้ง 5 ชุดการทดลอง ๆ ละ 100 มิลลิลิตร หลังจากนั้นจึงนำไปใส่ในเครื่องเขย่า (Shaker) แล้วนำตัวอย่างน้ำเข้าและน้ำออกที่เก็บไว้ไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

2. ดำเนินการทดลองโดยการเติมตัวกลางลงไปเพื่อใช้เป็นแกนกลางให้จุลินทรีย์มีที่ยึดเกาะ จำนวน 4 ชุดการทดลอง คือ R2, R3, R4 และ R5 โดยไม่เติมตัวกลางลงในชุดควบคุม (R1) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวกลางชนิดต่าง ๆ ในแต่ละชุดการทดลอง

ถังปฏิกิริยา	ชนิดของตัวกลาง	ปริมาณ
R1 (ชุดควบคุม)	-	-
R2	เชือก	50 ชิ้น (0.51 g)
R3	ลูกปัดผิวเรียบ	50 ลูก (11.73 g)
R4	ลูกปัดขัดผิว	50 ลูก (11.41 g)
R5	ฟองน้ำสังเคราะห์	50 ชิ้น × 1 ลบ.ซม. / ชิ้น (0.88 g)



ภาพที่ 17 ตัวกลางที่เป็นเชือก

ในชุดการทดลอง R2 ใช้เชือกไนลอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร มาตัดเป็นท่อนสั้น ๆ ขนาด 1 เซนติเมตร ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 18 ตัวกลางที่เป็นลูกปัดผิวเรียบ

ชุดการทดลอง R3 ใช้ลูกปัดพลาสติกที่ทำมาจากโพลีสไตรีน (Polystyrene) เป็นตัวกลาง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 19 ตัวกลางที่เป็นลูกปิดขัดผิว

ชุดการทดลอง R4 ใช้ลูกปิดพลาสติกที่ทำมาจากโพลีสไตรีน (Polystyrene) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 8 มิลลิเมตร แล้วนำมาขัดผิวด้วยกระดาษทราย ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 20 ตัวกลางที่เป็นฟองน้ำสังเคราะห์

ชุดการทดลอง R5 ใช้ฟองน้ำสังเคราะห์ที่ทำมาจากโพลีสไตรีน (Polystyrene) แล้วนำมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมลูกเต๋ารายขนาด 1 เซนติเมตร ดังภาพที่ 20

3. นำตัวอย่างน้ำเข้าและน้ำออกมาทำการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5 โดยวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียม, ไนไตรต์, ไนเตรต และ ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานอเมริกา (APHA/AWWA/WEF, 2005) ส่วน อุณหภูมิ, pH และ ORP ใช้ pH meter

ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนไตรต์และไนเตรตในแต่ละครั้ง จะทำการเก็บน้ำเข้าและน้ำออก แล้วนำมากรองด้วยกระดาษกรองที่มีขนาด 0.45 ไมโครเมตร เพื่อนำตะกอนที่แขวนลอยออกก่อนทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
Ammonium	Titration Method
Nitrite	Colorimetric Method
Nitrate	Hydrazine Method
Alkalinity	Titration Method

4. ศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออณามื้อกซ์บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ โดยการถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Micrographs (SEM)

5. ศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออณามื้อกซ์บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ โดยใช้ทฤษฎี DLVO

6. นำเชื้ออณามื้อกซ์มาทำการระบุชนิดของจุลินทรีย์ในเชิงคุณภาพด้วยวิธีฟลูออเรสเซนต์อินซิติวไฮบริไดเซชัน (Fluorescence in situ Hybridization : FISH)

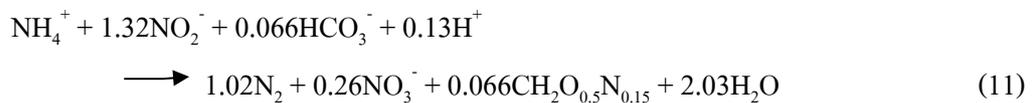
ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณตามทฤษฎี DLVO

พารามิเตอร์	ค่า	หมายเหตุ
Radius of cell membrane, r , (m)	4×10^{-7}	
Radius of string, R , (m)	1×10^{-3}	
Radius of bead, R , (m)	4×10^{-3}	
Radius of synthetic sponge, R , (m)	5×10^{-3}	
Dielectric constant, ϵ		
Water	78	
Cell membrane	9	(Glaser, 2001)
String (Nylon)	4	} (Anonymous, 2005)
Bead (Polystyrene)	2.5	
Synthetic sponge (Polystyrene)	2.5	
Permittivity in free space, ϵ_0 , ($C^2 - J^{-1} - m^{-1}$)	8.85×10^{-12}	
Surface potential, ψ_0 , (V)		
Cell membrane	-36.5	(Truesdail et al, 1998)
String (Nylon)	-25	(Hoek et al, 2002)
Bead (Polystyrene)	-59.5	(Nakao et al, 1998)
Synthetic sponge (Polystyrene)	-59.5	(Nakao et al, 1998)
Avogadro's number, N_A , (mol^{-1})	6.022×10^{23}	
Electronic charge, e , (C)	-1.602×10^{-19}	
Boltzmann's constant, k , ($J-K^{-1}$)	1.381×10^{-23}	
Absolute temperature, T , (K)	298	
Planck's constant, h , (J-s)	6.626×10^{-34}	
Absorption frequency for water, ν_e , (s^{-1})	3.0×10^{15}	(Israelachvili, 2000)
Refractive index, n		
Water	1.33	
Cell membrane	1.47	(Tanev et al, 2005)
String (Nylon)	1.53	} (Reed, 2009)
Bead (Polystyrene)	1.55	
Synthetic sponge (Polystyrene)	1.55	

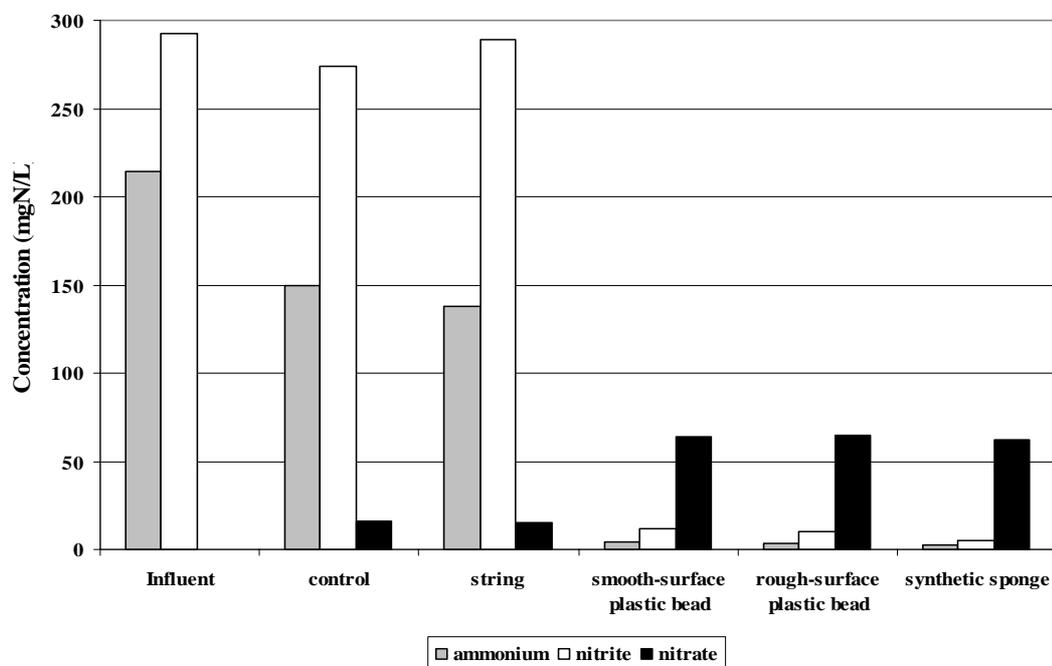
ผลและวิจารณ์

1. ประสิทธิภาพของระบบ

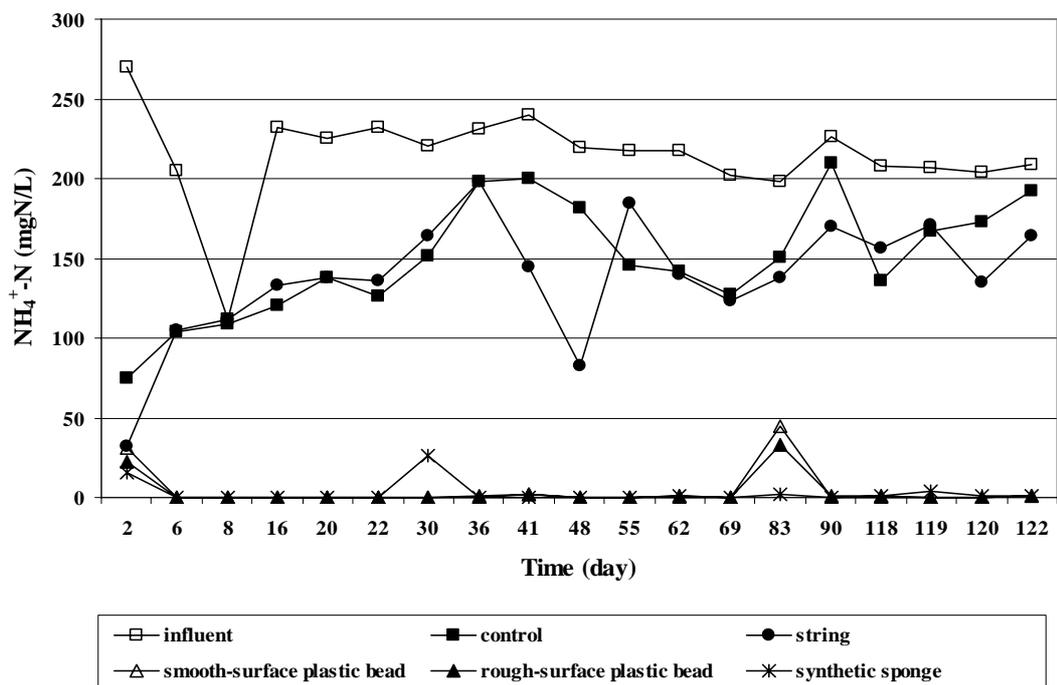
ในการทดลองนี้ ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วยแอมโมเนียมและไนไตรต์เท่ากับ 210 mgN/L และ 273 mgN/L ตามลำดับ ซึ่งจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนไตรต์ในน้ำเข้า (ภาพที่ 21) เมื่อนำมาคำนวณเป็นอัตราส่วนของแอมโมเนียมต่อไนไตรต์ จะมีค่าเท่ากับ 1 : 1.36 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Noophan *et al.* (2009) ที่กล่าวว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนของแอมโมเนียมต่อไนไตรต์เท่ากับ 1 : 1.38 มีผลต่อการเจริญเติบโตของอนาม็อกซ์ดีที่สุด



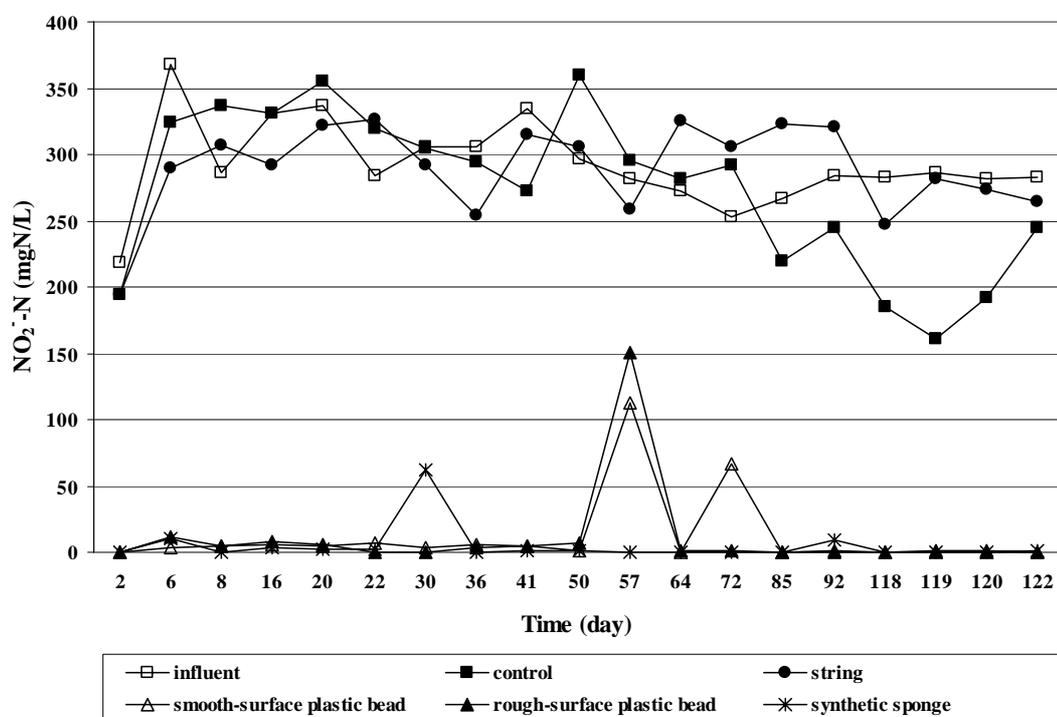
โดยในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนของแอมโมเนียมต่อไนไตรต์เท่ากับ 1 : 1.36 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของแอมโมเนียมต่อไนไตรต์ตามในสมการปฏิกิริยาของอนาม็อกซ์ดีที่มีค่าเท่ากับ 1 : 1.32 (Strous *et al.*, 1998; Ahn, 2006)



ภาพที่ 21 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแอมโมเนียม, ไนไตรต์และไนเตรตในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง



ภาพที่ 22 ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง



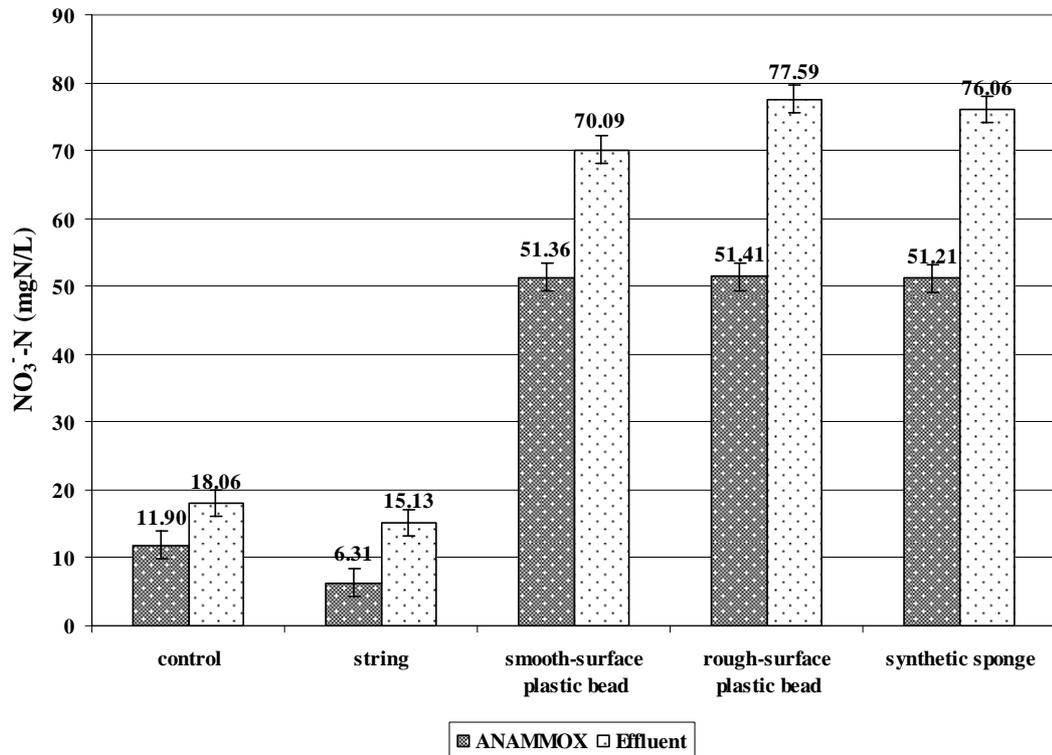
ภาพที่ 23 ความเข้มข้นของไนไตรต์ในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง

ผลการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนไตรต์ในน้ำออกของทุก ๆ ชุดการทดลอง ตามภาพที่ 22 และ 23 นั้น พบว่า ระบบสามารถกำจัดแอมโมเนียมและไนไตรต์ได้ทุกชุดการทดลอง ยกเว้นถึงปฏิกิริยาที่เป็นชุดควบคุม (R1) และถึงปฏิกิริยาที่มีเชื้อเป็นตัวกลาง (R2) ที่สามารถกำจัดแอมโมเนียมและไนไตรต์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

โดยในถึงปฏิกิริยาที่มีเชื้อเป็นตัวกลาง (R2) นั้น พบว่า จากการที่เชื้ออนาม็อกซ์หลุดออกจากถึงปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก จึงเหลือเชื้ออนาม็อกซ์อยู่ในถึงปฏิกิริยาในปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบสามารถกำจัดแอมโมเนียมและไนไตรต์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

ส่วนในถึงปฏิกิริยาที่เป็นชุดควบคุม (R1) สาเหตุที่ทำให้ระบบสามารถกำจัดแอมโมเนียมและไนไตรต์ได้เพียงบางส่วนนั้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Arrojo *et al.* (2006) ที่กล่าวว่า กระบวนการอนาม็อกซ์จะเกิดได้ดีที่สุด ถ้ามีค่า specific input power อยู่ระหว่าง 0.003 – 0.09 kW/m³ (หรือที่อัตราการกวนผสมเท่ากับ 60 -180 rpm) ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ใช้อัตราการกวนผสมเท่ากับ 50 rpm ซึ่งอาจจะทำให้ระบบมีการกวนผสมที่ไม่ดีพอในถึงปฏิกิริยาที่เป็นชุดควบคุม (R1) และถึงปฏิกิริยาที่มีเชื้อเป็นตัวกลาง (R2) แล้วงานวิจัยของ Fernandez *et al.* (2008) ก็ได้กล่าวไว้ว่า ต้องมีการกวนผสมที่สมบูรณ์ เพื่อที่จะให้ตัวกลางและเชื้ออนาม็อกซ์ได้สัมผัสกัน และแรงในการกวนผสมยังจะทำให้เกิดรอยสึกกร่อนที่พื้นผิวของตัวกลาง ช่วยทำให้เกิด การยึดเกาะของเชื้ออนาม็อกซ์กับตัวกลางได้ดีขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตาม น้ำหนักและพื้นที่ผิวของตัวกลางในชุดการทดลองอื่น ๆ นั้น ช่วยให้มีการกวนผสมที่ดีกว่า โดยที่เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักของตัวกลางทุกชนิดนั้น พบว่าตัวกลางที่เป็นเชื้อมีน้ำหนักน้อยที่สุด จึงทำให้ชุดการทดลองอื่น ๆ สามารถกำจัดแอมโมเนียมและไนไตรต์ได้ดีกว่าถึงปฏิกิริยาที่เป็นชุดควบคุม (R1) และถึงปฏิกิริยาที่มีเชื้อเป็นตัวกลาง (R2)

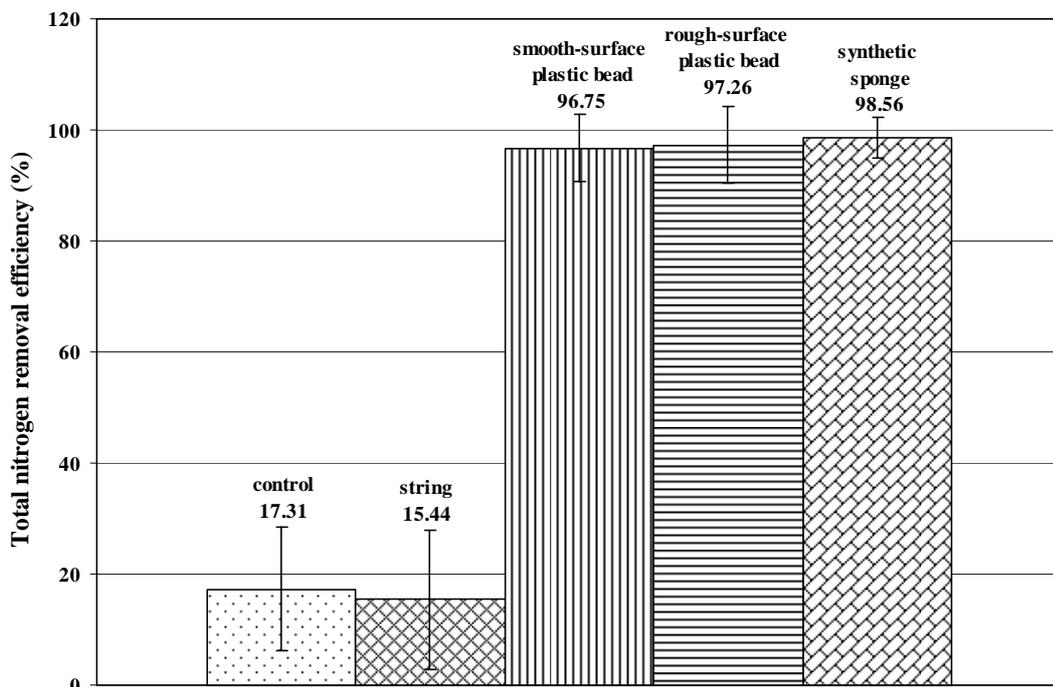


ภาพที่ 24 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง

จากภาพที่ 24 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำออกของทุก ๆ ชุดการทดลอง พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของไนเตรตใน R1, R2, R3, R4 และ R5 มีค่าเท่ากับ 18.06 ± 0.52 mgN/L, 15.13 ± 0.52 mgN/L, 70.09 ± 0.41 mgN/L, 77.59 ± 0.49 mgN/L และ 76.06 ± 0.76 mgN/L ตามลำดับ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี โดยคำนวณได้จากสมการที่ 12 (Wantawin *et al.*, 2008)

$$\text{NO}_3^- \text{-N} = 0.105(\Delta\text{TN}) \quad (12)$$

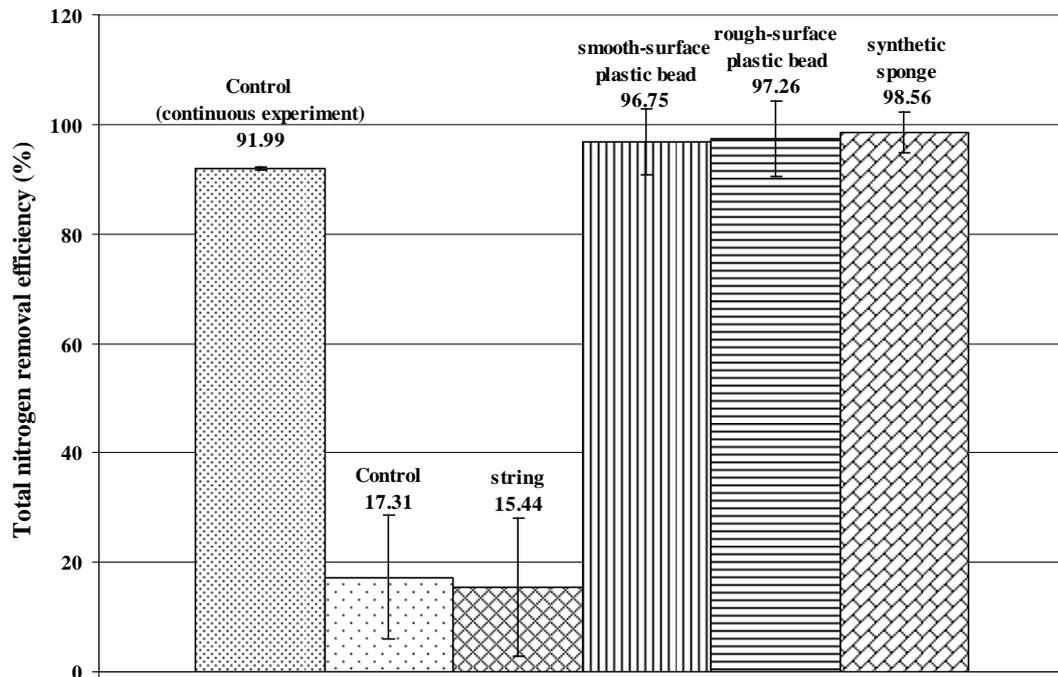
ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีนั้น พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี จากนั้นจึงได้มีการทำการทดลองต่อ โดยเก็บตัวอย่างน้ำก่อนและหลังทำปฏิกิริยาจากทุก ๆ ชุดการทดลอง เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไนเตรตที่ตกค้างอยู่ภายในระบบ พบว่ามีไนเตรตตกค้างอยู่ภายในระบบจริง โดยเมื่อนำค่าความเข้มข้นของไนเตรตที่ตกค้างอยู่ภายในระบบมารวมกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีแล้ว พบว่า ผลลัพธ์นั้นมีค่าเป็นไปตามภาพที่ 24 ที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 25 ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของแต่ละชุดการทดลอง

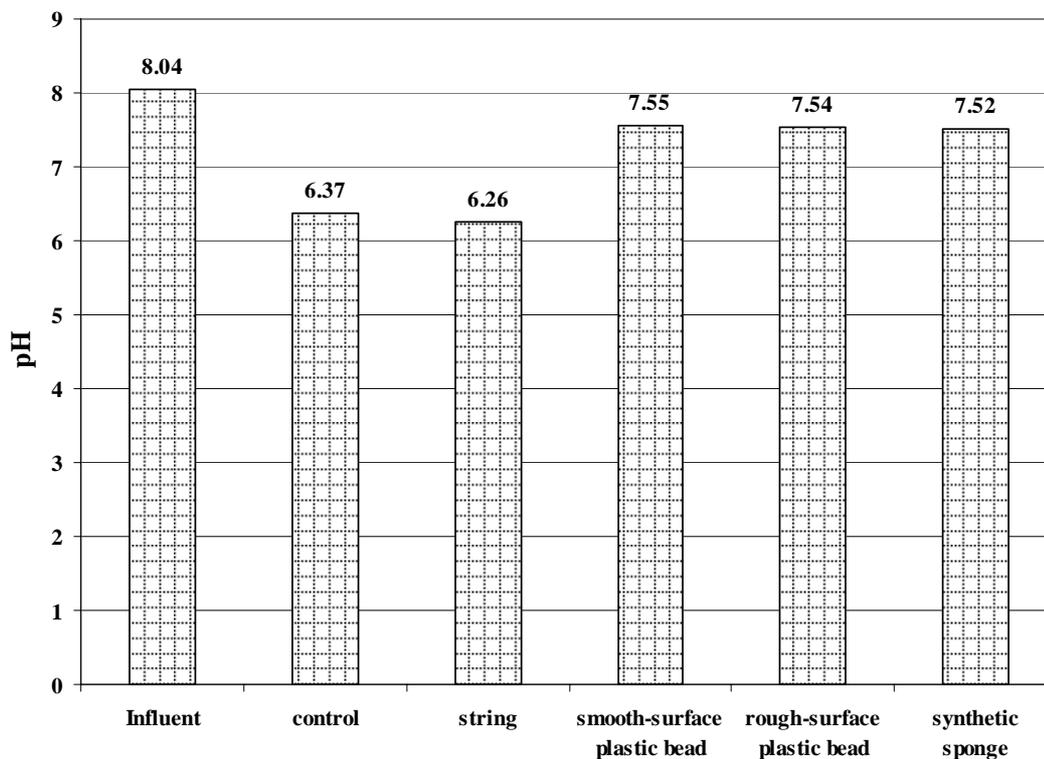
จากภาพที่ 25 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนใน R1, R2, R3, R4 และ R5 มีค่าเท่ากับ 17.31 ± 11.21 %, 15.44 ± 12.49 %, 96.75 ± 6.06 %, 97.26 ± 6.88 % และ 98.56 ± 3.79 % ตามลำดับ

จากการทดลองในครั้งนี้จะเห็นว่าในถังปฏิกรณ์ที่มีเชือกเป็นตัวกลาง (R2) นั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนเฉลี่ยต่ำที่สุด และในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม (R1) ก็มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนเฉลี่ยต่ำเช่นกัน



ภาพที่ 26 ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของแต่ละชุดการทดลอง (หลังจากการเติมทรายลงในชุดควบคุม)

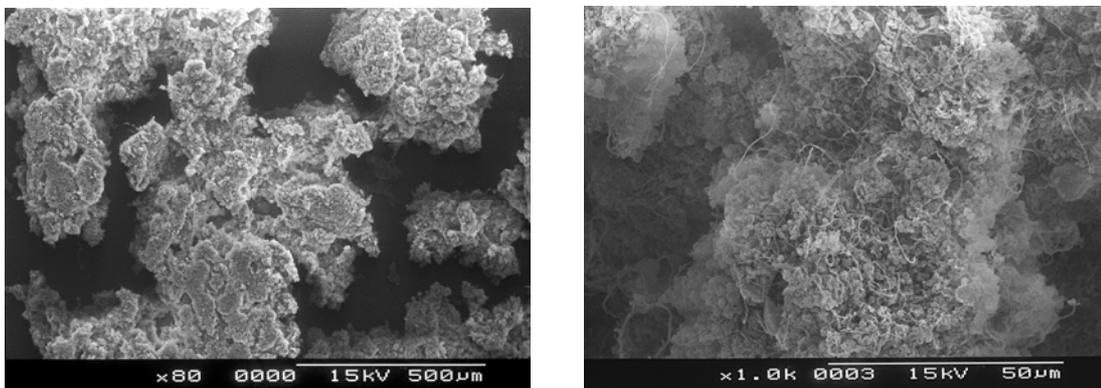
ในการทดลองนี้พบว่าการกวนผสมน่าจะมีผลต่อผลการทดลอง จึงได้มีการพิสูจน์สมมุติฐาน โดยการเติมตัวกลางที่เป็นทรายลงในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม (R1) หลังจากนั้นประมาณ 2 สัปดาห์พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 17.31 ± 11.21 % เป็น 91.99 ± 0.21 % (ภาพที่ 26) ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนในชุดการทดลองอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Strous *et al.* (1999) ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 89 % นอกจากนี้ Imajo *et al.* (2004) ได้ศึกษาการจับตัวเป็นเม็ดตะกอนของเชื้อน้ามือกซ์ในถังปฏิกรณ์แบบไหลขึ้น (up-flow reactor) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 92.3 %



ภาพที่ 27 ค่าความเป็นกรดเบส (pH) ในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง

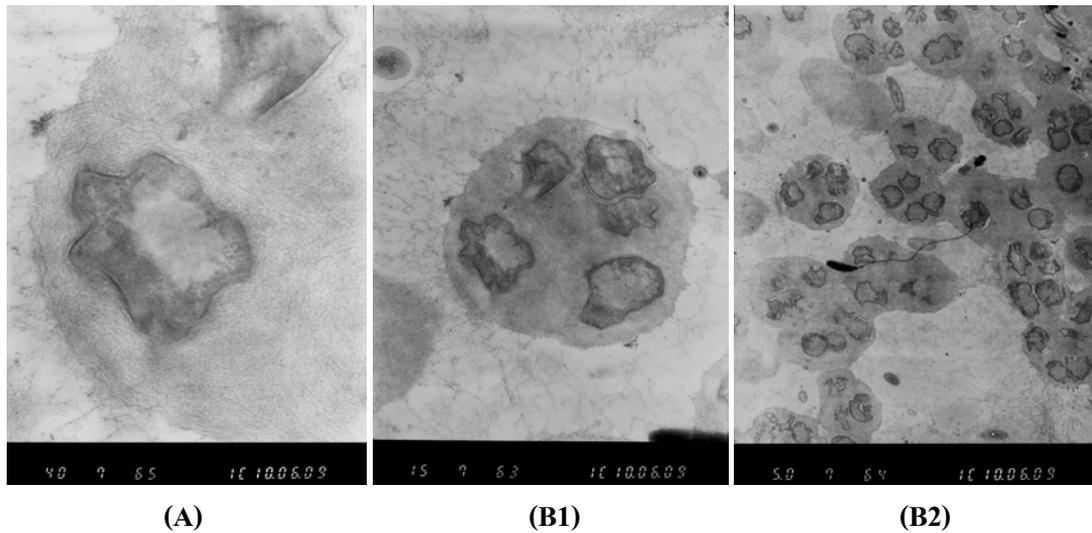
จากภาพที่ 27 ค่าความเป็นกรดเบส (pH) ในน้ำเข้ามีค่าเท่ากับ 8.04 ส่วนใน R1, R2, R3, R4 และ R5 มีค่าเท่ากับ 6.37, 6.26, 7.55, 7.54 และ 7.52 ตามลำดับ พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนสูงนั้น ค่าความเป็นกรดเบส (pH) มีค่าลดลงเล็กน้อยจากค่าความเป็นกรดเบส (pH) ในน้ำเข้า ซึ่งจากผลการทดลองในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Egli *et al.* (2001) ที่ได้ศึกษาหาค่าความเป็นกรดเบส (pH) ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของอนาม็อกซ์ แล้วพบว่าที่ค่าความเป็นกรดเบส (pH) เท่ากับ 8 เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของอนาม็อกซ์มากที่สุด

2. ผลการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออานาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และ Transmission Electron Microscope (TEM)

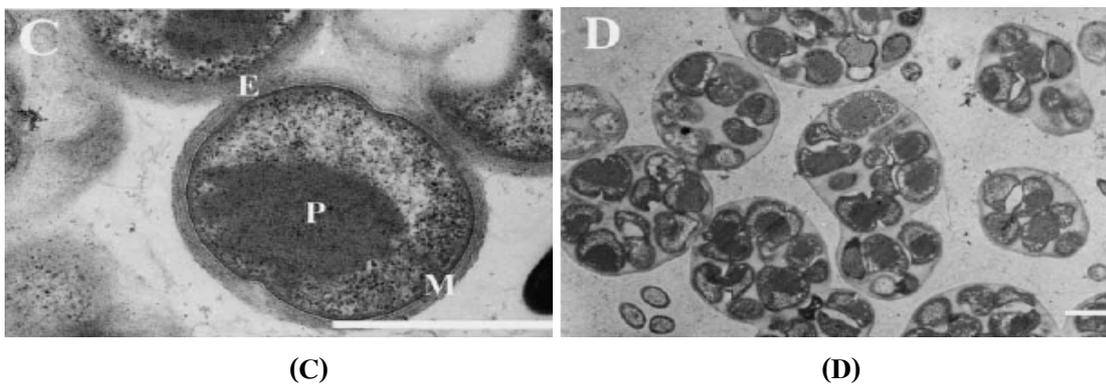


ภาพที่ 28 ผลการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออานาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม (R1)

จากภาพที่ 28 ลักษณะของเชื้ออานาม็อกซ์ในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม (R1) มีลักษณะเป็นเซลล์รูปร่างกลม หลาย ๆ เซลล์รวมกัน และเมื่อคูที่กำลังขยายสูงขึ้น ก็จะพบแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเส้นใยรวมอยู่ด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chamchoi and Nitisoravut (2007) ที่กล่าวว่า จากการวิเคราะห์ผลจากการถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Micrographs (SEM) พบว่า เชื้ออานาม็อกซ์มีลักษณะเป็นเซลล์รูปร่างกลม ผิวเรียบ และยังพบแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและท่อนสั้น ๆ รวมอยู่ด้วย

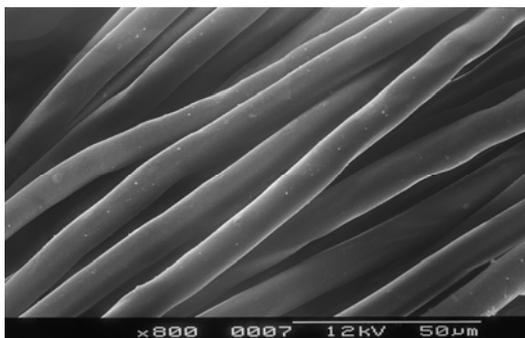


ภาพที่ 29 ผลการศึกษาแบบการเกตัวของเชื้ออนามือกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) ในถังปฏิบัติการที่เป็นชุดควบคุม (R1)

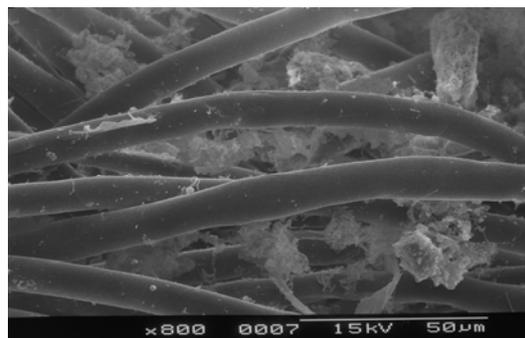


ภาพที่ 30 เซลล์ของอนามือกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) ที่มา : Egli *et al.* (2001)

จากภาพที่ 30 เป็นงานวิจัยของ Egli *et al.* (2001) ได้อธิบายถึงลักษณะเซลล์ของอนามือกซ์ ดังนี้ ตามภาพที่ 30(C) นั้น P คือส่วนของโปรตีนที่อยู่ภายในเซลล์, E คือส่วนของ extracellular polymer layer และ M คือส่วนของ membranes และจากภาพที่ 30(D) เป็นลักษณะของอนามือกซ์หลายๆ เซลล์รวมตัวกันเป็นเม็ดตะกอน เรียกว่า คลัสเตอร์ (clusters) โดยในภาพที่ 30(C) และภาพที่ 30(D) สามารถเปรียบเทียบได้กับภาพที่ 29(A) และ ภาพที่ 29(B1, B2) ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการวิจัยในครั้งนี้



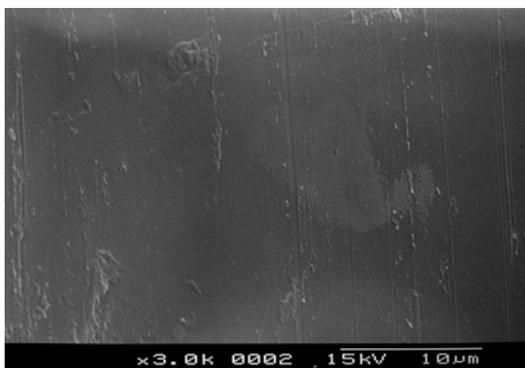
(ก่อน)



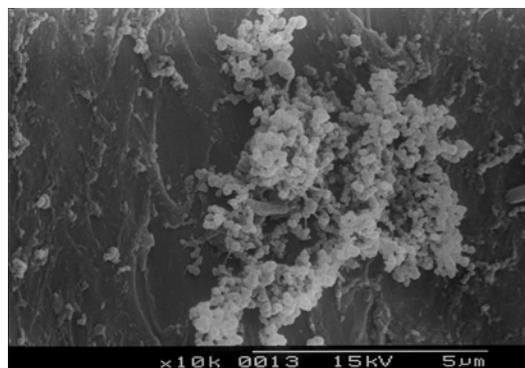
(หลัง)

ภาพที่ 31 ผลการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื่อนาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในถังปฏิกรณ์ที่มีเชือกเป็นตัวกลาง (R2)

จากภาพที่ 31 จะเห็นว่าเชื่อนาม็อกซ์จะเข้าไปเกาะอยู่ภายในเชือก ซึ่งถ้ามองด้วยตาเปล่าในถังปฏิกรณ์นั้น ในช่วงแรกของการทดลอง เชื่อนาม็อกซ์จะเกาะอยู่รอบ ๆ เส้นเชือกจนมีลักษณะคล้ายเชื่อกา



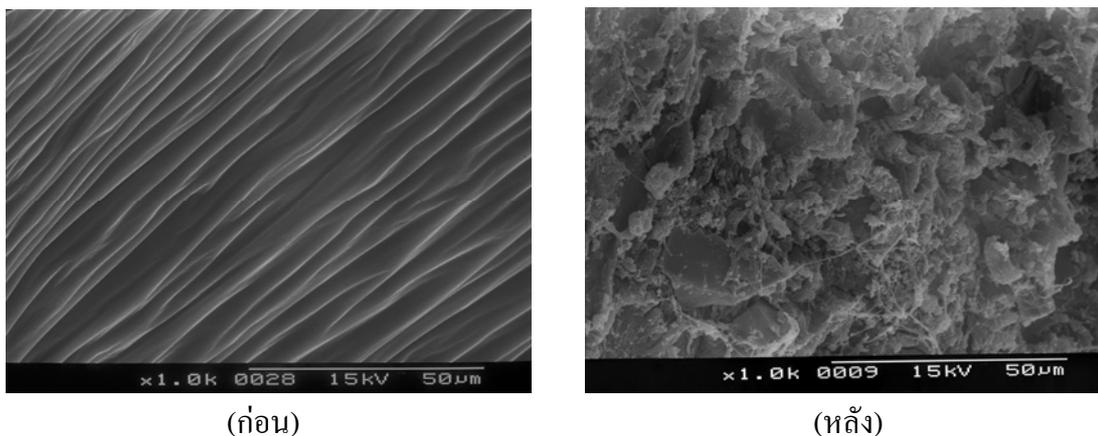
(ก่อน)



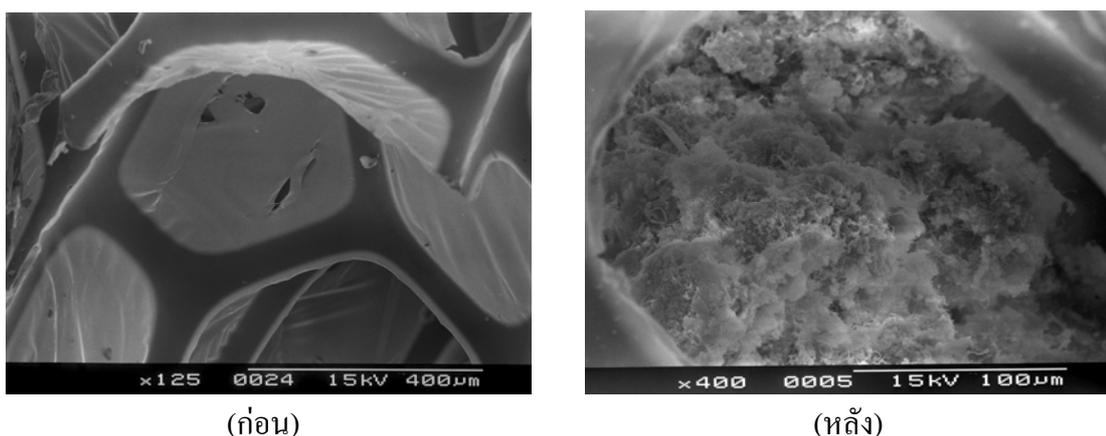
(หลัง)

ภาพที่ 32 ผลการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเชื่อนาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในถังปฏิกรณ์ที่มีลูกปัดผิวเรียบเป็นตัวกลาง (R3)

จากภาพที่ 32 เนื่องจากตัวกลางเป็นลูกปัดผิวเรียบ จึงทำให้เชื่อนาม็อกซ์เกาะติดได้น้อยกว่าตัวกลางที่เป็นลูกปัดขรุขระ (ตามภาพที่ 33) ซึ่งพื้นผิวมีความขรุขระ ง่ายต่อการเกาะติดของเชื่อนาม็อกซ์ ซึ่งถ้าสังเกตจากในถังปฏิกรณ์ด้วยตาเปล่าก็ไม่สามารถมองเห็นการยึดเกาะของเชื่อนาม็อกซ์บนตัวกลางทั้งสองชนิด



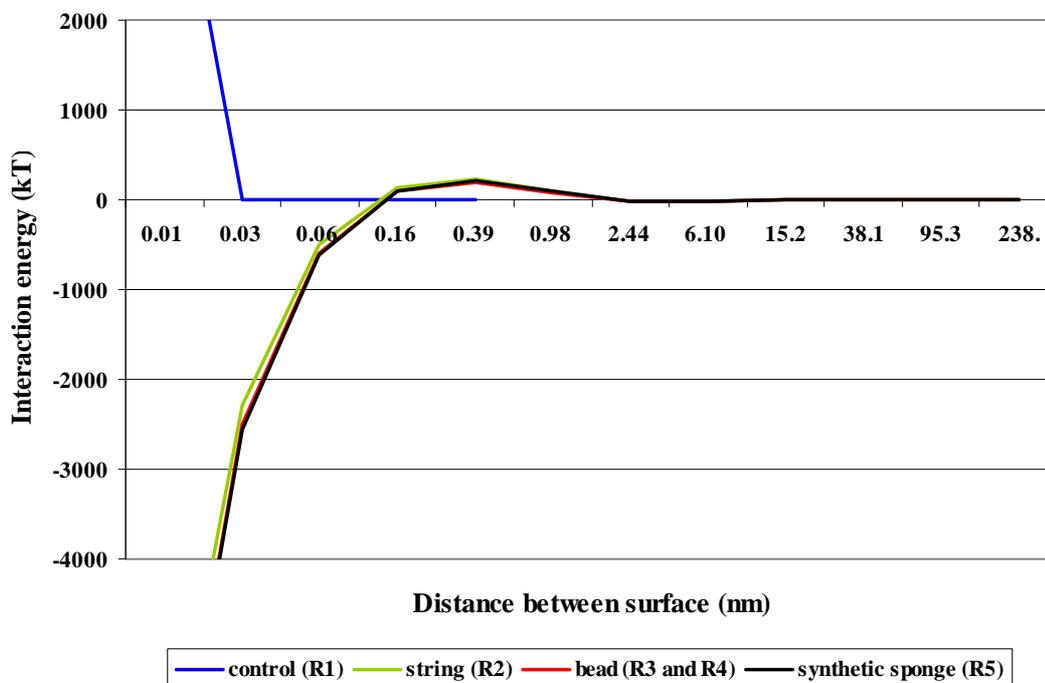
ภาพที่ 33 ผลการศึกษาารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออนาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในถังปฏิกริยาที่มีลูกปิดขัดผิวเป็นตัวกลาง (R4)



ภาพที่ 34 ผลการศึกษาารูปแบบการเกาะตัวของเชื้ออนาม็อกซ์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในถังปฏิกริยาที่มีฟองน้ำสังเคราะห์เป็นตัวกลาง (R5)

จากภาพที่ 34 ด้วยลักษณะพื้นผิวของตัวกลางที่เป็นฟองน้ำสังเคราะห์นั้นมึรูพรุนเป็นจำนวนมาก ซึ่งจากภาพนี้ พบว่า ในตัวกลางที่เป็นฟองน้ำสังเคราะห์จะมีจำนวนเชื้ออนาม็อกซ์ไปเกาะติดได้มากที่สุด โดยถ้าสังเกตจากในถังปฏิกริยานั้น จะเห็นว่าจากเดิมที่ฟองน้ำมีสีเหลือง ส่วนเชื้ออนาม็อกซ์จะมีสีแดงส้ม จากนั้นเมื่อเชื้ออนาม็อกซ์มาเกาะติดกับฟองน้ำสังเคราะห์ จนฟองน้ำสังเคราะห์กลายเป็นสีแดงส้ม และมีเชื้ออนาม็อกซ์อีกปริมาณเล็กน้อยที่แขวนลอยอยู่ในถังปฏิกริยา

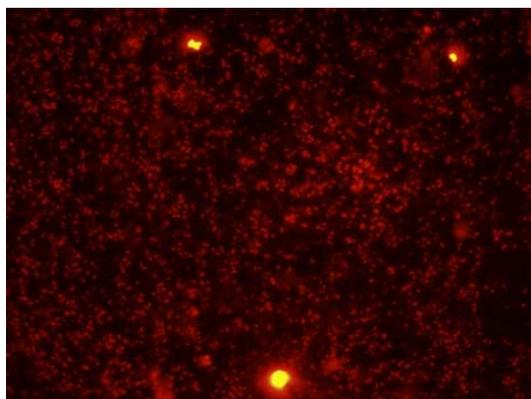
3. ผลการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎี DLVO



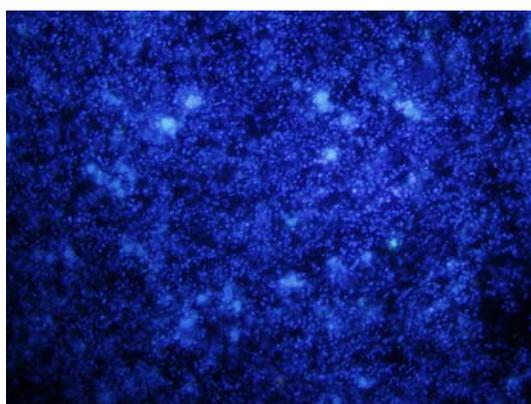
ภาพที่ 35 ผลจากการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎี DLVO

เราสามารถใช้อัตรา DLVO ในการคาดการณ์ว่าเชื่อนาม็อกซ์จะสามารถเกาะติดกับตัวกลางได้หรือไม่ จากภาพที่ 35 พบว่าเชื่อนาม็อกซ์สามารถเกาะติดกับตัวกลางได้ทั้ง 4 ชนิด ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Micrographs (SEM) ตามในภาพที่ 31 – 34 สามารถยืนยันได้ว่าเชื่อนาม็อกซ์สามารถเกาะติดกับตัวกลางทั้ง 4 ชนิดได้จริง แต่การที่เชื่อนาม็อกซ์จะเกาะติดตัวกลางชนิดนั้น ๆ ได้มากน้อยเพียงใด ก็จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางชนิดนั้น ๆ ด้วย

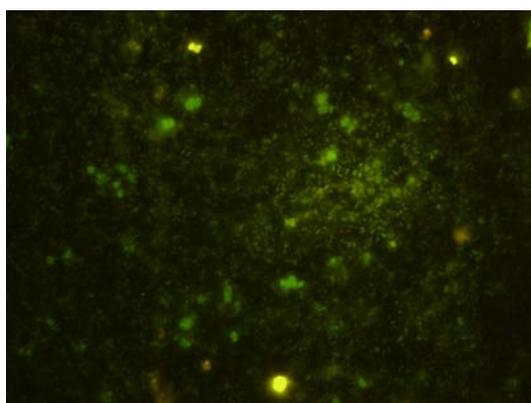
4. ผลการระบุชนิดของจุลินทรีย์ด้วยวิธีฟลูออเรสเซนซ์อินซิติวไฮบริไดเซชัน (Fluorescence in situ Hybridization : FISH)



(A)

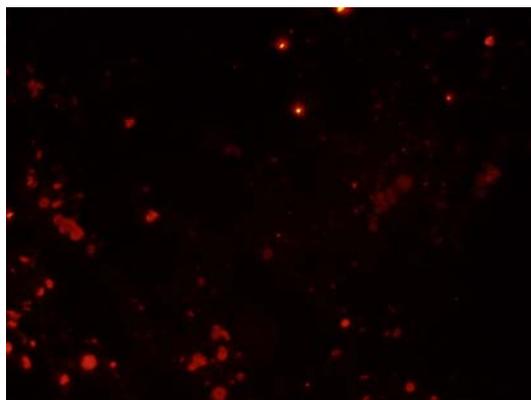


(B)

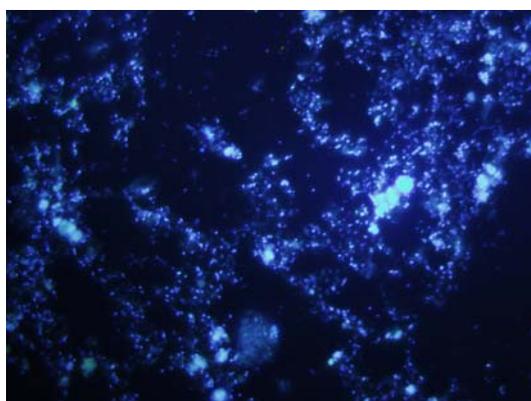


(C)

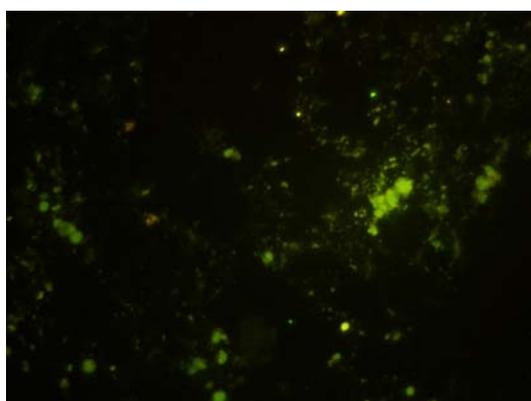
ภาพที่ 36 ชนิดของกลุ่มแบคทีเรียที่ตรวจพบซึ่งแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุมน้ำ (R1) โดยใช้เทคนิค FISH, (A) ANAMMOX, (B) DAPI และ (C) EUB



(A)

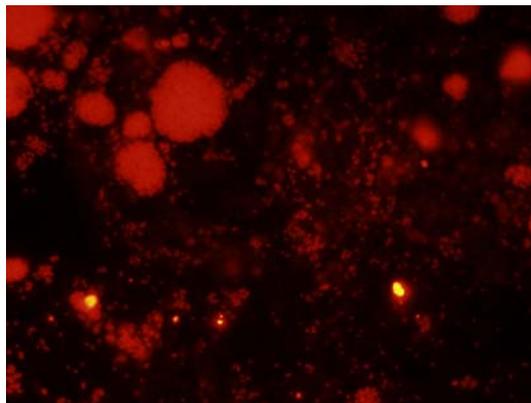


(B)

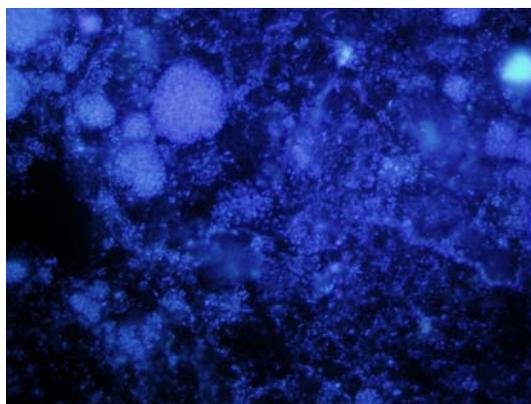


(C)

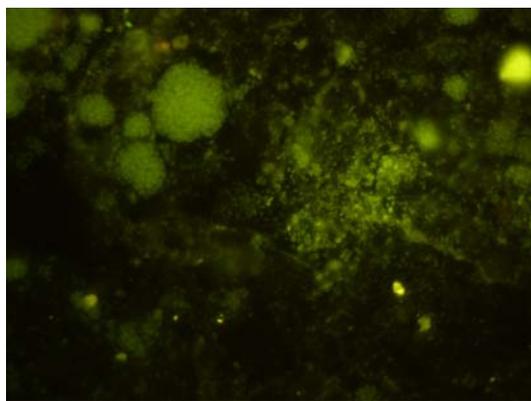
ภาพที่ 37 ชนิดของกลุ่มแบคทีเรียที่ตรวจพบซึ่งแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มีเชื้อเป็นตัวกลาง (R2) โดยใช้เทคนิค FISH, (A) ANAMMOX, (B) DAPI และ (C) EUB



(A)

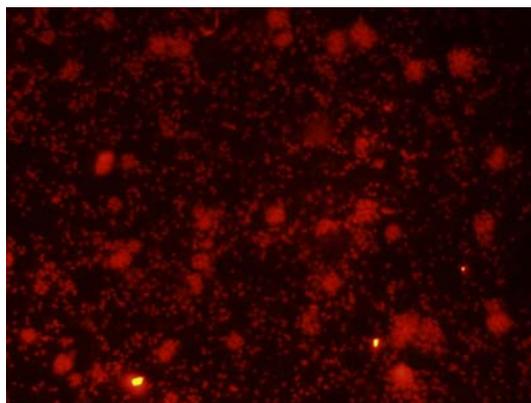


(B)

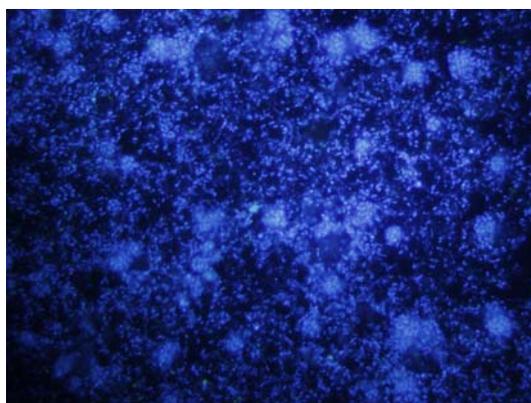


(C)

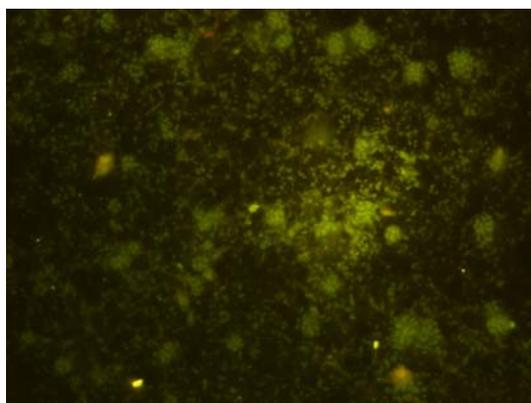
ภาพที่ 38 ชนิดของกลุ่มแบคทีเรียที่ตรวจพบซึ่งแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มีลูกปัดผิวเรียบเป็นตัวกลาง (R3) โดยใช้เทคนิค FISH, (A) ANAMMOX, (B) DAPI และ (C) EUB



(A)

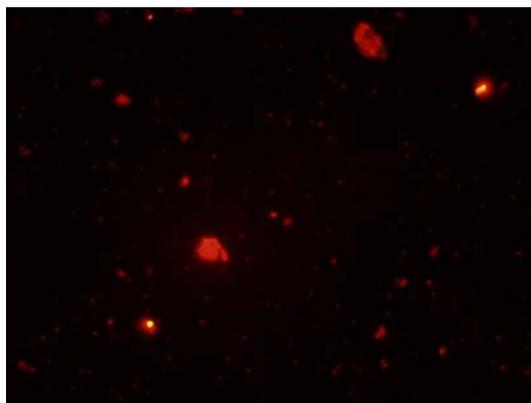


(B)

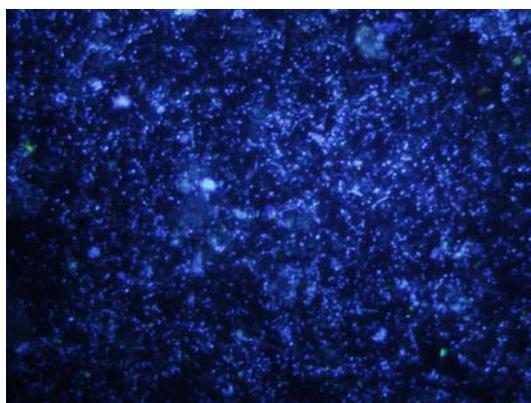


(C)

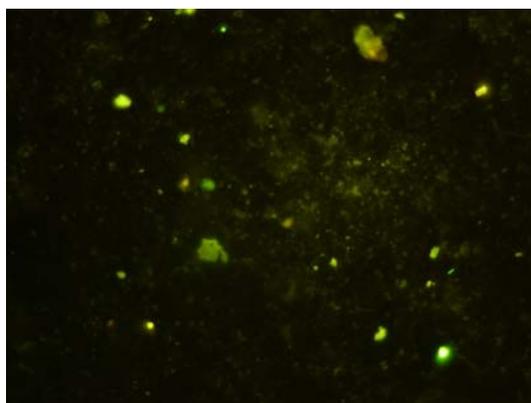
ภาพที่ 39 ชนิดของกลุ่มแบคทีเรียที่ตรวจพบซึ่งแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มีลูกปิดขัดผิวเป็นตัวกลาง (R4) โดยใช้เทคนิค FISH, (A) ANAMMOX, (B) DAPI และ (C) EUB



(A)



(B)



(C)

ภาพที่ 40 ชนิดของกลุ่มแบคทีเรียที่ตรวจพบซึ่งแขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ที่มีฟองน้ำสังเคราะห์
เป็นตัวกลาง (R5) โดยใช้เทคนิค FISH, (A) ANAMMOX, (B) DAPI และ (C) EUB

เมื่อนำเชื้ออณาม็อกซ์มาทำการระบุชนิดของจุลินทรีย์ในเชิงคุณภาพด้วยวิธีฟลูออเรสเซนซ์อินซิติวไฮบริไดเซชัน (Fluorescence in situ Hybridization : FISH) ในที่นี้ได้ทำการตรวจเฉพาะคุณภาพวิเคราะห์เท่านั้น เพื่อชี้ให้เห็นว่า ในระบบที่กำลังศึกษามีกลุ่มแบคทีเรียที่ต้องการทราบอยู่จริง โดยเมื่อตรวจด้วย probe Amx 820 พบแบคทีเรียในกลุ่ม ANAMMOX ในทุกชุดการทดลอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ในถังปฏิกรณ์ที่มีเข็อกเป็นตัวกลาง (R2) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนเฉลี่ยต่ำที่สุด และในถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดควบคุม (R1) มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนเฉลี่ยต่ำเช่นกัน ส่วนในถังปฏิกรณ์อื่น ๆ มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนใกล้เคียงกัน
2. จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี DLVO พบว่าเข็อกนาม็อกซ์สามารถเกาะติดกับตัวกลางได้ทุกชนิด
3. จากการศึกษารูปแบบการเกาะตัวของเข็อกนาม็อกซ์บนตัวกลางพลาสติกชนิดต่าง ๆ โดยถ่ายภาพผ่านเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าเข็อกนาม็อกซ์สามารถเกาะติดกับตัวกลางชนิดต่าง ๆ ได้จริง โดยที่เข็อกนาม็อกซ์สามารถเกาะติดกับตัวกลางที่เป็นฟองน้ำสังเคราะห์ได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นลูกปัดทั้งสองชนิด และเข็อก ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

ในการเลือกตัวกลาง สำหรับให้เป็นที่ยึดเกาะของเข็อกนาม็อกซ์ ในถังปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องนั้น ควรจะคำนึงถึงปัจจัยในหลาย ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นการหามาใช้ได้ง่าย, ราคาถูก, มีพื้นที่ผิวมาก และควรมีน้ำหนักที่เหมาะสมด้วย

ในการศึกษาครั้งนี้ ไม่สามารถระบุได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของระบบเกิดจากเข็อกนาม็อกซ์ที่เกาะติดอยู่ในตัวกลางแต่เพียงอย่างเดียว เนื่องจากในถังปฏิกรณ์มีเข็อกนาม็อกซ์ทั้งในส่วนที่แขวนลอยและส่วนที่เกาะติดอยู่ในตัวกลาง ดังนั้นหากมีการศึกษาในครั้งต่อไป ควรจะแยกส่วนที่มีการเกาะติดเกิดขึ้นแล้วมาใส่ในถังปฏิกรณ์ถังใหม่ เพื่อให้ทราบประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของระบบที่เกิดจากการเกาะติดของเข็อกนาม็อกซ์ในตัวกลางชนิดต่าง ๆ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2545. **ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ.**
พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- เจริญ นาคะสรรค์. 2547. **กระบวนการแปรรูปพลาสติก.** ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์. 2551. **ระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กและบำบัดแบบติดกับที่.** ภาควิชา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- พิชิต เลี่ยมพัฒน์. 2542. **พลาสติก.** ห.จ.ก. ป. สัมพันธ์พาณิชย์, กรุงเทพฯ.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2545. **การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ.** พิมพ์ครั้งที่ 1.
สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- สันทัต สิริอนันต์ไพบูลย์. 2549. **ระบบบำบัดน้ำเสีย : การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และ
การแก้ไขปัญหา.** สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.
- Ahn, Y.-H. 2006. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review. **Process
Biochemistry** (41): 1709-1721.
- Amann, R.I., L. Krumholz and D.A. Stahl. 1990. Fluorescent Oligonucleotide Probing of Whole
Cells for Determinative Phylogenetic and Environmental Studies in Microbiology.
Journal Bacteriology (172): 762-770.
- Anonymous. 2005. **Dielectric Constant of Materials.** Dielectric Constant Reference Guide.
Available Source: http://clippercontrols.com/info/dielectric_constants.html, May 6, 2009.

Anonymous. 2009. **Nylon**. Nylon - Wikipedia, the free in encyclopedia. Available Source: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nylon>, September 13, 2009.

Anonymous. 2009. **Polystyrene**. Polystyrene - Wikipedia, the free in encyclopedia. Available Source: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene>, September 13, 2009.

APHA, AWA, WPCF. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed. American Public Health Association, Washington, DC.

Arrojo, B., A. Mosquera-Corral, J.L. Campos and R. Mendez. 2006. Effects of mechanical stress on anammox granules in a sequencing batch reactor (SBR). **Journal of Biotechnology** (123):453-463.

Bodik, I., B. Herdova and M. Drtil. 2002. The use of upflow anaerobic filter and AnSBR for wastewater treatment at ambient temperature. **Water Res** (36):1084-1088.

Chamchoi, N. and S. Nitorisavut. 2007. Anammox enrichment from different conventional sludges. **Chemosphere** (66): 2225-2232.

Egli, K., U. Fanger, P.J.J. Alvarez, H. Siegrist, J.R. van der Meer and A.J.B. Zehnder. 2001. Enrichment and characterization of an anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate. **Arch Microbiol** (175): 198-207.

Fernandez, I., J.R. Vazquez-Padin, A. Mosquera-Corral, J.L. Campos and R. Mendez. 2008. Biofilm and granular systems to improve Anammox biomass retention. **Biochemical Engineering Journal** (42): 308-313.

Ghangrekar, M.M., S.R. Asolekar and S.G. Joshi. 2005. Characteristics of sludge developed under different loading conditions during UASB reactor start-up and granulation. **Water Res** (39):1123-1133.

- Glaser, R. 2001. **Biophysics**. 5th ed. Springer, Berlin, Germany.
- Gregory, J., M. Elimelech, X. Jia and R. William. 1975. **Particle Deposition and Aggregation: Measurement, Modelling and Simulation**. Butterworth-Heinemann, USA.
- Hoek, Eric M.V., S. Bhattacharjee and M. Elimelech. 2002. Influence of membrane surface morphology on colloid-membrane DLVO interactions. **Membrane Process and applications** (42): 424-426.
- Imajo, U., T. Tokutomi and K. Furukawa. 2004. Granulation of anammox microorganisms in up-flow reactors. **Water Science and Technology** (49):155-163.
- Israelachvili, J. 1992. Intermolecular and Surface Forces. 8th ed. Academic Press, USA.
- Malvern. 2009. **Derjaguin, Landau, Verwey and Overbeek theory (DLVO theory)**. Colloid solutions. Available Source:
http://www.malvern.com/LabEng/industry/colloids/dlvo_theory.htm, August 12, 2009.
- Nakao, A., Y. Suzuki and M. Iwaki. 1998. Water wettability and zeta-potential of polystyrene surface modified by Ne or Na implantation. **Journal of Colloid and Interface Science** (197): 257-262.
- Noophan, P., S. Sripiboon, M. Damrongsri and J. Munakata-Marr. 2009. Anaerobic ammonium oxidation by *Nitrosomonas* spp. and anammox bacteria in a sequencing batch reactor. **Journal of Environmental Management** (90):967-972.
- Punal, A., M. Trevisan, A. Rozzi and J.M. Lema. 2000. Influence of C:N ratio on the start-up of up-flow anaerobic filter reactors. **Water Res** (34):2614-2619.

- Reed, R. 2009. **Refractive index**. Refraction of light. Available Source: <http://interactagram.com/physics/optics/refraction/>, May 18, 2009.
- Show, K.-Y. and J.-H. Tay. 1999. Influence of support media on biomass growth and retention in anaerobic filters. **Water Res** (33):1471-1481.
- Strous, M., J.G. Kuenen and M.S.M. Jetten. 1999. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation. **Appl Environ Microbiol** (65): 3248-3250.
- Strous, M., J.J. Heijnen, J.G. Kuenen and M.S.M. Jetten. 1998. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. **Appl Microbiol Biotechnol** (50): 589-596.
- Tanev, S., W. Sun, N. Loeb, P. Paddon and V. Tuchin. 2005. The finite-difference time-domain method in the biosciences: Modelling of light scattering by biological cells in absorptive and controlled extra-cellular media. **Advances in Biophotonics Series I: Life and Behavioural Sciences** (369): 45-78.
- Truesdail, S.E., J. Lukasik, S.R. Farrah, D.O. Shah and R.B. Dickinson. 1998. Analysis of bacterial deposition on metal (hydr)oxide-coated sand filter media. **Journal of colloid and interface science** (203): 369-378.
- Tsushima, I., Y. Ogasawara, T. Kindaichi, H. Satoh and S. Okabe. 2007. Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) biofilm reactors. **Water Res** (41):1623-1634.
- Waki, M., T. Tokutomi, H. Yokoyama and Y. Tanaka. 2007. Nitrogen removal from animal waste treatment water by anammox enrichment. **Bioresource Technology** (98):2775-2780.

Wantawin, C., J. Juathea, P.L. Noophan and J. Munakata-Marr. 2008. Autotrophic nitrogen removal in sequencing batch biofilm reactors at different oxygen supply modes. **Water Science & Technology** (58): 1889-1894.

ภาคผนวก

ข้อมูลการทดลอง

ตารางผนวกที่ 1 ความเข้มข้นของแอมโมเนียมในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง

วันที่เดินระบบ	ความเข้มข้นของแอมโมเนียม (mgN/L)					
	น้ำเข้า	R1	R2	R3	R4	R5
2	269.90	75.04	32.48	31.36	22.4	15.12
6	204.40	104.16	104.72	0.00	0.00	0.00
8	111.44	108.64	112.00	0.00	0.00	0.00
16	232.40	120.40	132.72	0.00	0.00	0.00
20	225.40	138.04	137.76	0.00	0.00	0.00
22	232.40	126.00	136.08	0.00	0.00	0.00
30	220.08	151.76	164.08	0.00	0.00	25.76
36	230.72	198.24	197.68	0.00	1.12	0.00
41	240.24	200.48	144.48	2.24	1.68	0.00
48	219.80	182.00	82.60	0.00	0.00	0.00
55	217.28	145.60	184.24	0.00	0.00	0.00
62	217.84	141.68	140.00	0.00	0.56	0.56
69	202.16	127.12	123.20	0.00	0.00	0.00
83	197.68	150.64	137.76	44.24	33.04	1.68
90	226.24	209.44	169.68	0.00	0.56	0.00
118	207.76	135.52	156.24	0.00	0.56	0.56
119	206.64	166.88	170.80	0.00	0.00	3.92
120	203.84	172.48	134.96	0.00	0.00	1.12
122	208.88	192.08	164.08	0.56	0.56	0.56

ตารางผนวกที่ 2 ความเข้มข้นของไนโตรเจนในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง

วันที่เดินระบบ	ความเข้มข้นของไนโตรเจน (mgN/L)					
	น้ำเข้า	R1	R2	R3	R4	R5
2	218.90	193.76	193.76	0.00	0.00	0.00
6	367.69	324.31	289.20	3.07	11.73	10.61
8	286.68	337.24	306.79	4.19	4.75	0.56
16	331.37	331.37	291.99	5.31	8.10	3.07
20	336.96	354.84	322.16	5.03	5.31	1.96
22	283.88	319.08	326.35	6.82	0.14	2.57
30	306.24	304.28	291.99	3.83	0.05	62.32
36	306.23	294.78	254.56	6.14	4.01	0.31
41	334.18	272.43	315.18	4.47	4.18	0.73
50	296.10	359.31	306.24	1.48	7.43	1.12
57	281.10	295.06	258.75	112.57	150.28	0.56
64	272.72	281.10	325.79	0.28	0.78	0.03
72	253.16	292.27	306.24	66.12	1.68	0.12
85	267.13	219.64	323.00	0.02	0.02	0.05
92	283.89	244.78	320.20	0.80	0.10	8.66
118	283.15	185.35	246.84	0.04	0.26	0.01
119	286.22	161.36	281.47	0.67	0.19	0.06
120	281.75	192.37	273.65	0.68	0.03	0.04
122	282.31	244.60	264.44	0.39	0.02	0.71

ตารางผนวกที่ 3 ความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง

วันที่เดินระบบ	ความเข้มข้นของไนเตรต (mgN/L)					
	น้ำเข้า	R1	R2	R3	R4	R5
36	0.00	15.50	11.78	71.86	91.99	61.69
41	0.00	15.65	19.40	70.53	86.30	69.80
50	0.00	15.03	18.02	60.96	59.07	53.38
57	0.00	17.78	19.97	54.43	45.28	40.94
64	0.00	19.78	14.01	78.22	49.72	54.97
72	0.00	13.99	15.96	52.38	66.32	84.38
85	0.00	11.86	13.72	61.48	51.48	34.45
92	0.00	12.00	11.42	61.70	45.90	58.34
118	0.00	13.04	15.96	47.60	50.60	61.60
119	0.00	18.64	14.75	70.33	72.81	87.94
120	0.00	17.65	14.93	70.32	84.97	66.96
122	0.00	17.88	15.72	69.61	74.98	73.29

ตารางผนวกที่ 4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง

วันที่เดินระบบ	ค่าความเป็นด่าง : Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)					
	น้ำเข้า	R1	R2	R3	R4	R5
52	1000.00	870.00	475.00	565.00	570.00	595.00
59	730.00	460.00	600.00	550.00	525.00	575.00
66	712.50	432.50	360.00	535.00	585.00	575.00
73	575.00	425.00	365.00	400.00	505.00	515.00
87	730.00	320.00	205.00	520.00	540.00	605.00
94	750.00	250.00	490.00	575.00	605.00	595.00

ตารางผนวกที่ 5 ค่าความเป็นกรดเบส (pH) ในน้ำเข้าและน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง

วันที่เดินระบบ	ค่า pH					
	น้ำเข้า	R1	R2	R3	R4	R5
6	8.04	6.05	6.24	7.69	7.51	7.35
8	8.02	6.05	5.95	7.63	7.57	8.10
16	8.07	6.02	6.44	7.36	7.40	7.40
20	8.04	6.08	6.15	7.56	7.76	7.68
22	8.05	6.07	6.04	7.64	7.80	7.68
30	8.04	7.00	6.36	7.84	7.72	7.00
36	8.04	6.73	6.63	7.20	7.20	7.41
41	8.03	6.93	6.24	7.51	7.39	7.56

ตารางผนวกที่ 6 ค่า ORP ในน้ำออกของแต่ละชุดการทดลอง

วันที่เดินระบบ	ค่า ORP				
	R1	R2	R3	R4	R5
6	74	83	68	80	67
8	71	77	-20	-16	-50
16	72	47	-7	-10	-7
20	69	57	-18	-32	-29
22	71	69	-22	-34	-24

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวพรพิมล ยิ้มห้อย
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 26 มิถุนายน 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดชัยนาท
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเอก วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-