



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การจับตัวของเขื่อนนาม็อกซ์เป็นเม็ดตะกอน โดยใช้ตัวกลางชนิดจมน้ำ

Formation of ANAMMOX Granule Using Submerged Media

นามผู้วิจัย นางสาววราฐกา อินทรประสงค์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิมา ศรีลัมพ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การจับตัวของเชื้ออานาโมกซ์เป็นเม็ดตะกอน โดยใช้ตัวกลางชนิดจมน้ำ

Formation of ANAMMOX Granule Using Submerged Media

โดย

นางสาววาทูกา อินทรประสงค์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2552

วาทูกา อินทรประสงค์ 2552: การจับตัวของเชื่อนาม็อกซ์เป็นเม็ดตะกอน โดยใช้
ตัวกลางชนิดจมน้ำ ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ, Ph.D. 74 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างเม็ดตะกอนของเชื่อนาม็อกซ์โดยใช้ตัวกลางชนิดจมน้ำ
เพื่อเป็นการเพิ่มอายุตะกอนในถังปฏิกรณ์ SBBR ปริมาตร 200 mL. โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มี
ปริมาณแอมโมเนียม-ไนโตรเจน และไนเตรด-ไนโตรเจน เท่ากับ 15 และ 19.5 mM ตามลำดับ ใน
การทดลองได้ศึกษาตัวกลางสามชนิด ได้แก่ ทราย เซรามิก และ GAC และการทดลองหาคะแนน
เพื่อให้เชื่อนาม็อกซ์เกาะและสร้างเป็นเม็ดตะกอน

ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในตัวกลางทั้งสามชนิด เท่ากับ
99.36±0.91, 98.79±2.02 และ 99.02±2.49 % ในตัวกลางทราย เซรามิกและ GAC ตามลำดับ ส่วน
การทดลองหาคะแนนประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 16.16±13.20 % และเมื่อทดลอง
ต่อโดยการใส่ตัวกลางทรายลงไปในถังปฏิกรณ์ เพื่อเพิ่มการกวนประสิทธิภาพการกำจัด
ไนโตรเจนสูงขึ้นถึง 91.84 % วิเคราะห์การสร้างเม็ดตะกอนของเชื่อนาม็อกซ์โดยใช้ทฤษฎี
Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek (DLVO) เพื่อคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นระหว่างตัวกลางกับ
เชื่อนาม็อกซ์หรือระหว่างเชื่อนาม็อกซ์ด้วยกันเอง และได้มีการเปรียบเทียบทฤษฎี DLVO กับ
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ พบว่าทฤษฎี DLVO สามารถใช้เพื่อทำนายการสร้างเม็ดตะกอนของ
เชื่อนาม็อกซ์ แต่ยังมีปัจจัยอื่นที่ช่วยสร้างเม็ดตะกอน เช่น ลักษณะพื้นผิวของตัวกลาง ลักษณะ
โครงสร้างของตัวกลาง และความปั่นป่วน เป็นต้น

Vatuga Intaraprasong 2009: Formation of ANAMMOX Granule Using Submerged Media. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Sanya Sirivithayapakorn, Ph.D. 74 pages.

Experimental studies for granulation of ANAMMOX by submerged media for biomass retention in Batch reactors with synthesis medium. To enhance the granulation process, 3 types of core media (i.e. sand, ceramic and granulation activated carbon) were added and compare with one control experiment without media.

The nitrogen removal efficiency was more than 98% in experiment that were added core media. But control reactor nitrogen removal efficiency was 16.41 %. The continuous operation in the adding 2 grams of sand in control reactor, the nitrogen removal efficiency increase gradually and at the end of the experiment, the efficiency was 91.84 %. Granulations of ANAMMOX were calculated by Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek (DLVO) theory using the interaction energy curves between cell of ANAMMOX and media or ANAMMOX and ANAMMOX. This study compare the result between DLVO theory and photograph from Scanning electron microscope (SEM). The granule formation predict by DLVO theory was in according to the observations from scanning electron microscope. However, there were several factors other than attachment that involved in granular formation and were not included in the DLVO theory, such as surface media, structure of media, and turbulent.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สันยญา สิริวิทยาปกรณ และ ผศ.ดร. พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ ที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำในการดำเนินการวิจัย และคำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และขอบพระคุณ พี่กุลยา สารีชีวิน ที่ช่วยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ ที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยได้อย่างราบรื่นและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชากรรมสิ่งแวดลอม ที่เอื้อเฟื้อพื้นที่ในการทำงานวิจัย และอุปกรณ์เพื่อการวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่และพี่น้อง ที่ได้ให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยในทุกเรื่อง

วาสุกา อินทรประสงค์

สิงหาคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	48
ผลและวิจารณ์	50
ผล	50
วิจารณ์	61
สรุปและข้อเสนอแนะ	65
สรุป	65
ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	66
ภาคผนวก	70
ประวัติการศึกษาและทำงาน	74

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าคงที่ใช้ในการคำนวณ Interaction energy ตามทฤษฎี DLVO	44
2	ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์	47
3	พารามิเตอร์และวิธีการทดลองที่ใช้ในการทดลอง	49
4	ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน	52
5	ความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนไตรต์ในน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกิริยาที่ไม่บรรจุตัวกลาง เมื่อทำการทดลองต่อ	54
6	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียม, ไนไตรต์และไนโตรเจนในถังปฏิกิริยาที่ไม่ใส่ตัวกลาง เมื่อทำการทดลองต่อ	54
ตารางผนวกที่		
1	ความเข้มข้นแอมโมเนียของน้ำเข้าและออก (mg N/L) ในถังปฏิกิริยาบรรจุตัวกลางทราย, เซรามิค, GAC และไม่บรรจุตัวกลาง	71
2	ความเข้มข้นไนไตรต์ในน้ำเข้าและออก (mg N/L) ในถังปฏิกิริยาบรรจุตัวกลางทราย, เซรามิค, GAC และไม่บรรจุตัวกลาง	71
3	ความเข้มข้นไนเตรตในน้ำเข้าและออก (mg N/L) ในถังปฏิกิริยาบรรจุตัวกลางทราย, เซรามิค, GAC และไม่บรรจุตัวกลาง	72
4	ค่า OPR และ pH ในถังปฏิกิริยาบรรจุตัวกลางทราย, เซรามิค, GAC และไม่บรรจุตัวกลาง	73
5	ค่า Alkalinity ในถังปฏิกิริยาบรรจุตัวกลางทราย, เซรามิค, GAC และไม่บรรจุตัวกลาง	73

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 วัฏจักรไนโตรเจน	3
2 ขั้นตอนต่างๆในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ	4
3 วัฏจักรของซัลเฟอร์ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบบออโตโทรฟิก	9
4 แสดงวงศัวัณวิวัฒนาการของอนาม็อกซ์	12
5 แสดงแบบจำลอง Inert nuclei	24
6 แสดงแบบจำลอง Multi-valence positive ion-bonding	25
7 แบบจำลอง polymer หรือ filament bonding	26
8 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของกลุ่มจุลินทรีย์	32
9 แบบจำลอง Multi-layer	33
10 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและการแยกกันของอนุภาค	42
11 แบบจำลองถึงปฏิกิริยาแบบ Batch	46
12 ความเข้มข้นของเอมโมเนียในน้ำออก ตลอดช่วงการทดลอง	50
13 ความเข้มข้นของไนไตรต์ในน้ำออก ตลอดช่วงการทดลอง	51
14 ความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำออก ตลอดช่วงการทดลอง	52
15 ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในการทดลองเทียบกับปฏิกิริยาของอนาม็อกซ์	53
16 กราฟแสดงการทำนายการเกาะติดของเชื่อนาม็อกซ์ตามทฤษฎี DLVO ของ ตัวกลางทราย	55
17 กราฟแสดงการทำนายการเกาะติดของเชื่อนาม็อกซ์ตามทฤษฎี DLVO ของ ตัวกลางเซรามิก	56
18 กราฟแสดงการทำนายการเกาะติดของเชื่อนาม็อกซ์ตามทฤษฎี DLVO ของ ตัวกลาง GAC	56
19 กราฟแสดงการทำนายการเกาะติดของเชื่อนาม็อกซ์กับตัวกลางตามทฤษฎี DLVO ของเชื่อนาม็อกซ์	56
20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการเกาะติดตามทฤษฎี DLVO ของถึงปฏิกิริยาต่างๆ	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางทราย วันที่ 0 (a) ,59 (b) และ 8 (c) ตามลำดับ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะเชื่อนาม็อกซ์ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางทราย (d)	58
22 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเซรามิก วันที่ 0 (a) ,59 (b) และ 75 (c) ตามลำดับ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะเชื่อนาม็อกซ์ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเซรามิก(d) วันที่ 0 (a) ,59 (b) และ 75 (c) ตามลำดับ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะเชื่อนาม็อกซ์ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเซรามิก (d)	59
23 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลาง GAC วันที่ 0 (a) ,59 (b) และ 75 (c) ตามลำดับ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะเชื่อนาม็อกซ์ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเม็ดถ่านกัมมันต์ (d) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิกิริยาที่ไม่บรรจุตัวกลาง วันที่ 59 (a) และ 75 (b) ตามลำดับ	60
24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิกิริยาที่ไม่บรรจุตัวกลางวันที่ 0 (a) ,59 (b) และ 75 (c) ตามลำดับ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะเชื่อนาม็อกซ์ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเม็ดถ่านกัมมันต์ (d) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิกิริยาที่ไม่บรรจุตัวกลาง วันที่ 59 (a) และ 75 (b) ตามลำดับ	60

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ADB	=	Autotrophic Denitrifying Bacteria
Alk	=	Alkalinity
AND	=	Autotrophic nitrification and denitrification
AS	=	Activated sludge
A_{vdW}	=	sum of electrostatic double layer repulsion and van der waals attraction forces
COD	=	Chemical Oxygen Demand
Ci	=	concentration of species i ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$)
DLVO	=	Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek
DN	=	Denitrification
ECPs	=	Extracellular polymers Free energy of adhesion,
e	=	Electronic charge (C),
GAC	=	Granular Activated Carbon
ΔG_{adh}	=	Free energy of adhesion
h	=	Planck’s constant (J-s),
HRT	=	Hydraulic retention time,
k	=	Boltmann’s constant ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$)
N_A	=	Avogadro’s number (mol^{-1})
n_1	=	Refractive index of media
n_2	=	Refractive index of ANAMMOX
n	=	Refractive index of water
ORP,	=	Oxidation Reduction potential
R	=	Average radius of cell
SDB	=	Sulfur Denitrifying Bacteria,
SBR	=	Sequencing Batch Reactor)
SEM	=	Scanning electron microscope,
SHARON	=	Single reactor system for High activity Ammonium Removal Over Nitrite

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SRT	=	Sludge retention time
T	=	Temperature (K)
Temp	=	Temperature
TOC	=	Total organic carbon,
UASB	=	Upflow anaerobic sludge blanket
USB	=	upflow sludge bed
V	=	van der waals
ν_c	=	Absorption frequency (s^{-1})
WAP	=	Water absorbing polymer
W	=	double layer repulsion force
y_i	=	reduced potential at any distance from the surface of 1 and 2
Z_i	=	Valency number of species i
γ	=	แรงดึงดูดของเหลว
ϵ_1	=	Dielectric constant of media
ϵ	=	Dielectric constant of ANAMMOX
ϵ_2	=	Dielectric constant of water
$\rho_{\infty,i}$	=	ion density of species i in the bulk solution (m^{-3})

การจับตัวของเชื้อน้าม็อกซ์เป็นเม็ดตะกอน โดยใช้ตัวกลางชนิดจมน้ำ

Formation of ANAMMOX Granule Using Submerged Media

คำนำ

กระบวนการสร้างเม็ดตะกอนเป็นกระบวนการที่สำคัญของระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ ทำให้ความหนาแน่นของมวลจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น สามารถตกตะกอนได้ง่าย ควบคุมการทำงานของระบบได้ง่ายกว่าเนื่องจากไม่มีปัญหาในเรื่องการควบคุมความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบและจุลินทรีย์จะออกออกจากระบบซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น เนื่องจากสามารถยืดอายุตะกอน (Sludge retention time, SRT) (Tchobanoglous *et al.*, 2004) โดยที่ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (Hydraulic retention time, HRT) สั้น เราสามารถสร้างเม็ดตะกอนได้ง่ายขึ้น โดยใช้ตัวกลางเพื่อให้จุลินทรีย์เกาะติดและเจริญเป็นไบโอฟิล์ม (Biofilm) ต่อไป (Yu *et al.*, 1999)

อน้าม็อกซ์ สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีไนโตรเจนสูง มีประโยชน์เนื่องจากลดความต้องการออกซิเจน ผลิตตะกอนส่วนเกินน้อยทำให้ลดค่าใช้จ่ายสำหรับการเดินระบบ ลดการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ ที่เป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อน (Trigo *et al.*, 2006) แต่จุลินทรีย์อน้าม็อกซ์จะใช้ระยะเวลานานในการเริ่มระบบ เนื่องจากอน้าม็อกซ์เป็นจุลินทรีย์ที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้ามาก (Jetten *et al.*, 1997) จึงได้มีการป้องกันการชะออกของจุลินทรีย์ชนิดนี้ออกจากระบบ เพื่อให้จุลินทรีย์ชนิดนี้คงอยู่ในระบบและทำให้ระบบมีความคงตัว การสร้างเม็ดตะกอนอน้าม็อกซ์ขึ้นเพื่อให้จุลินทรีย์อน้าม็อกซ์ยึดเกาะและเพิ่มอายุตะกอนของจุลินทรีย์ อน้าม็อกซ์ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบบำบัดน้ำเสียด้วย จึงใช้วัสดุที่เป็นตัวกลางเพื่อให้จุลินทรีย์ชนิดนี้ยึดเกาะและสร้างเป็นไบโอฟิล์มต่อไป วัสดุตัวกลางที่นำมาเพิ่มประสิทธิภาพในระบบบำบัดควรมีคุณสมบัติดังนี้ มีพื้นที่ผิวต่อปริมาณสูง ราคาต่ำ ความทนทานสูงและมีรูพรุน

ทฤษฎี Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek หรือ DLVO เป็นทฤษฎีที่ใช้เพื่อคำนวณพลังงานในการดูดติดผิวของจุลินทรีย์ ในงานวิจัยนี้นำมาคำนวณเพื่อทำนายการดูดติดผิวของเชื้อน้าม็อกซ์กับตัวกลางชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นเม็ดตะกอนของเชื้อน้าม็อกซ์

วัตถุประสงค์

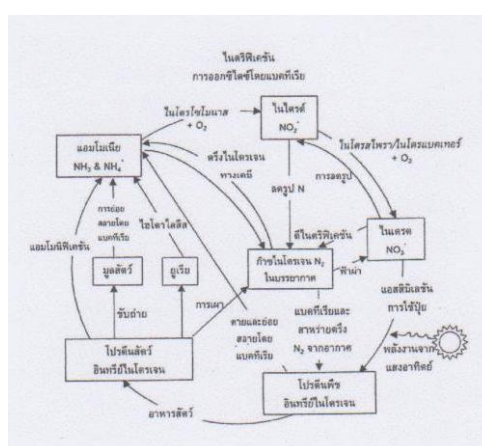
1. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนของกระบวนการอนาโมกซ์โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ SBBR (Sequencing Biofilm Batch Reactor)
2. ศึกษารูปแบบการจับตัวเป็นเม็ดตะกอน (Granule) ของจุลินทรีย์ในกลุ่มอนาโมกซ์ (Anammox bacteria) ในตัวกลางชนิดจมน้ำ (ทราย เซรามิก เม็ดถ่านกัมมันต์) โดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

การตรวจเอกสาร

1. ไนโตรเจน

1.1 วัฏจักรไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสำหรับ โปรตีนและกรดนิวคลีอิกในเซลล์จุลินทรีย์และพืชรวมทั้งสัตว์ จึงมีความสำคัญต่อวงจรชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกรูปแบบ แม้ว่าไนโตรเจนจะมีมากถึงมีถึงร้อยละ 79 ในบรรยากาศ แต่ไนโตรเจนก็กลับเป็นธาตุที่มีอยู่อย่างจำกัดในดินและสิ่งแวดล้อมน้ำ ทำให้การเกษตรทำได้ไม่เต็มที่ในบางประเทศ และเนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุที่คงตัวมากและเปลี่ยนรูปไม่ได้ง่ายๆ ยกเว้นบางกรณีเช่น ไฟฟ้า หรือมีอุณหภูมิหรือความดันสูง ฯลฯ จุลินทรีย์จึงมีบทบาทในการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนให้เป็นแอมโมเนียภายใต้กระบวนการที่เรียกว่า “แอมโมนิฟิเคชัน” แอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์โดยจุลินทรีย์กลุ่มไนโตรโซโมนาสไปเป็นไนไตรต์ และจุลินทรีย์กลุ่มไนโตรสไพราหรือไนโตรแบคเตอร์ไปเป็นไนเตรต ซึ่งจะถูกใช้ต่อไปได้ง่ายๆ โดยพืชและแอลจี ซึ่งกลายเป็นอาหารของสัตว์ในวงจรชีวิตอีกขั้นหนึ่ง และเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันกลายเป็นไนโตรเจน (N_2) ในอากาศ พืชและสัตว์เมื่อตายลงซากของมันจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียกลับมาเป็นแอมโมเนียได้อีกเช่นกัน รายละเอียดดังแสดงดังรูปที่ 1 (ธงชัย, 2546)

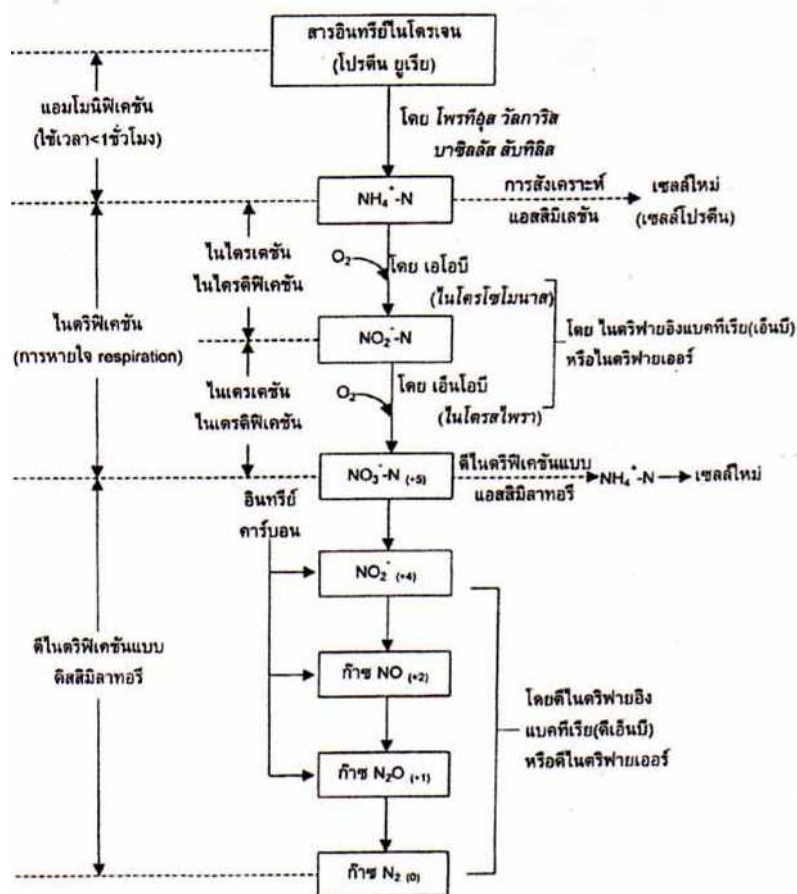


ภาพที่ 1 วัฏจักรไนโตรเจน

ที่มา : ธงชัย (2546)

1.2 หลักการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

การกำจัดไนโตรเจนทางชีววิทยาอาศัยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียสองกลุ่ม กลุ่มแรกมีหน้าที่ออกซิไดซ์ไนโตรเจน (ในรูปรีดิวซ์) ให้เป็นไนเตรต จากนั้นแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งจะลดรูปไนโตรเจนนี้ให้กลายเป็นแก๊สไนโตรเจนออกจากระบบ ภาพที่ 2 สรุปขั้นตอนทั้งหมดที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการนี้ โดยระบบจะเริ่มตั้งแต่กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ก่อนกระบวนการอื่นๆ (ธงชัย, 2546)



ภาพที่ 2 ขั้นตอนต่างๆในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

ที่มา : ธงชัย (2546)

หมายเหตุ : ไนโตรเจนที่ลดลงเนื่องจากการเอาไปสร้างเซลล์ใหม่นั้นมีปริมาณน้อยมาก ประมาณร้อยละ 3 ของค่าซีโอดีที่ถูกกำจัด

แต่แอมโมเนียที่เกิดขึ้นมักไม่อยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระ เพราะที่ภาวะพีเอชเป็นกลางหรือเป็นกรด ซึ่งมักเป็นสถานะของน้ำเสียทั่วไป แอมโมเนียจะอยู่ในรูปของเกลือแอมโมเนียม (NH_4^+) ดังสมการ(4)



ต่อเมื่อพีเอชถูกปรับขึ้นสูงแอมโมเนียจึงแปรรูปเป็นแอมโมเนียอิสระ ซึ่งถูกขับออกจากน้ำไปสู่บรรยากาศได้ กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการ “เป่าแอมโมเนีย” หรือ “Ammonia stripping” (ธงชัย, 2546)

1.2.2 ไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

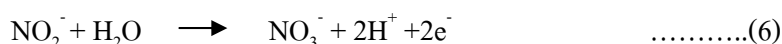
เป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์ทำการลดรูปสารประกอบไนโตรเจน (สารประกอบเริ่มต้นคือแอมโมเนีย) โดนการออกซิไดซ์ให้เป็นไนไตรต์และไนเตรตตามลำดับ กระบวนการไนตริฟิเคชันจะประกอบด้วยแบคทีเรียออโตโทรฟิกไนตริไฟด์ (Autotrophic nitrifying bacteria) 2 กลุ่มด้วยกัน ที่สามารถสร้างโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ใช้พลังงานจากสารอนินทรีย์ ในกรณีนี้เป็นแอมโมเนียหรือไนไตรต์ คือ

ในขั้นตอนแรกของกระบวนการไนตริฟิเคชัน แบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิง (Ammonia-oxidizing bacteria) จะออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนไตรต์ตามสมการที่ (5)



ไนโตรโซโมนาส (*Nitrosomonas*) เป็นแบคทีเรียกลุ่มหลักที่พบที่พบในขั้นตอนนี้ โดยแบคทีเรียไนโตรโซโมนาสจัดอยู่ในจีนัส *Nitrosococcus* และ *Nitrosospira*

ในขั้นตอนที่ 2 แบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซิง (Ntrite-oxidizing bacteria) จะออกซิไดซ์ไนไตรต์ให้เป็นไนเตรต แสดงดังสมการที่ (6)



ไนโตรแบคเตอร์ (Nitrobacter) เป็นแบคทีเรียที่มักพบในชั้นตอนนี้ โดยจัดอยู่ในจีนัส *Nitrospina*, *Nitrococcus* และ *Nitrospira*

อย่างไรก็ตามในระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป จะไม่เกิดไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ เพราะมีบางส่วนของอินทรีย์ไนโตรเจนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ (หรือได้ไม่ง่าย) ทำให้น้ำทิ้งมีอินทรีย์ไนโตรเจนอยู่ประมาณไม่น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรเสมอ

1.2.3 ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification, DN)

เมื่อไนโตรเจนถูกแปรรูปมาอยู่ในรูปของไนเตรตแล้ว จะสามารถลดรูปหรือถูกกำจัดออกจากระบบได้สองทาง คือ

ก. วิธีแอสสิมิเลชัน (Assimilatory, DN)

จุลินทรีย์ต้องการไนโตรเจนสำหรับสังเคราะห์โปรตีน ไนโตรเจนที่ดีที่สุดสำหรับการนี้คือไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียม แต่ถ้าไม่มีแอมโมเนียมในระบบหรือมีไม่พอ จุลินทรีย์บางชนิดจะสามารถลดรูปไนเตรตไปเป็นแอมโมเนียม และเอามาใช้เพื่อการนี้ได้ ในวิธีนี้ไนเตรตจะถูกดีไนตริฟายด์และลดรูปไปเป็นแอมโมเนียมด้วยเอนไซม์ไนเตรรีดักเทสหลายชนิด ก่อนที่จะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสังเคราะห์หรือสร้างเซลล์ (เป็นโปรตีนหรือกรดนิวคลีอิก) ผ่านกระบวนการที่เรียกว่าแอสสิมิเลชัน ชั้นตอนนี้จะเรียกว่าดีไนตริฟิเคชันแบบแอสสิมิเลชัน ซึ่งมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับวิธีที่สองหรือวิธีดีไนตริฟิเคชันแบบดิสสิมิเลชัน

ข. วิธีดิสสิมิเลชัน (Dissimilatory, DN)

ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบบนี้ จุลินทรีย์ดีไนตริฟายเออร์เป็นได้ทั้งแบบเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟเหมือนกับในขั้นตอนไนตริฟิเคชัน แต่ไม่มีเหมือนกันตรงที่ภาวะนี้ต้องเป็นแบบแอนอกซิก (Anoxic) คือมีไนเตรตแต่ไม่มีออกซิเจนอิสระ และกลับกันตรงที่ในขั้นตอนนี้เฮเทอโรโทรฟมีบทบาทมากกว่าออโตโทรฟอย่างมาก จุลินทรีย์แบบเฮเทอโรโทรฟนี้ต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ในเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมอินทรีย์คาร์บอนเข้าสู่ระบบด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง จากรูปที่ 2 จะเห็น

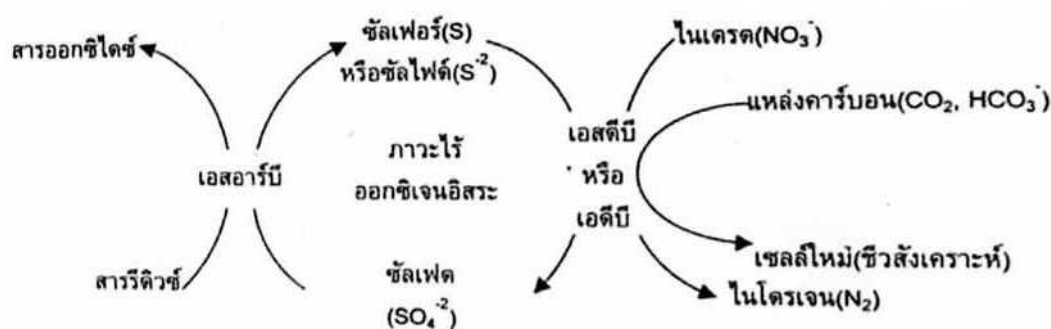
ได้ว่า ต้องมีการใช้อินทรีย์คาร์บอนในการลดรูปของไนโตรเจนทุกขั้นตอน ตั้งแต่ไนเตรต (วาเลนซ์ +5) ไปเป็นไนไตรต์ (+4) ก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO (+2)) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O (+1)) จนไปถึงก๊าซไนโตรเจน (N₂ (0)) ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยมาก จึงถูกขับออกหรือไล่ออกจากมวลของน้ำได้ง่าย การกำจัดไนโตรเจนจึงเกิดขึ้นได้ไม่ยาก วิธีการนี้สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ถึงร้อยละ 95 อย่างไรก็ตามก๊าซไนโตรเจนนี้ถ้าไปเกิดสะสมในถังทำใส (Clarifier) ขั้นตอนที่สองก็อาจมีผลต่อการตกจมของสลัดจ์ ทำให้น้ำที่ออกไปไม่ใสได้

ดีไนตริฟายเออร์นี้เป็นได้ทั้งออร์กาโนโทรฟ (Organotrophs, ได้พลังงานจากสารอินทรีย์) ลิโธโทรฟ (Lithotroph, ได้พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี) และโฟโตโทรฟ (Phototroph, ได้พลังงานจากแสง) รวมทั้งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มฟอสโฟเททิฟแอนแอโรบด้วย ที่ปรากฏอยู่ในรายงานมีหลายชนิด เช่น ซูโดโมนาส บาซิลลัส สปีริลัม ไฮโฟโครีเยียม อะโครแบคทีเรีย อะซิโนแบคทีเรีย โพรไฟโอโนแบคทีเรีย โรโซเยียม คอรีเนแบคทีเรีย ไชโทฟาจ ไชโอบาซิลลัส และอัลคานีจินส์ ส่วนที่พบมากได้แก่ ซูโดโมนาส เช่น *Pseudomonas. fluorescens*, *P. aeruginosa*, *P. denitrificans* และ *Alcaligenes*, *Spirillum*, *Agrobacterium*, *Propionobacterium*, *Rhizabium*, *Bacillus*, *Acinetobacter* และ *Thiobacillus* ซึ่งพบมากอยู่แล้วทั้งในดิน น้ำธรรมชาติ และน้ำเสีย อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วจะไม่เกิดดีไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ในทุกสถานการณ์ของการบำบัดน้ำเสีย ในบางกรณีจะเกิดเป็นแก๊สระดับกลางคือแก๊สไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ซึ่งทำให้ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ แก๊สไนตรัสออกไซด์นี้ถือว่าเป็นแก๊สมลพิษที่สำคัญในส่วนของแก๊สเรือนกระจก และควรหลีกเลี่ยงการผลิตแก๊สนี้ไม่ว่าจะโดยตั้งใจหรือไม่ก็ตาม ในระบบบำบัดน้ำเสียภาวะที่จะทำให้เกิดไนตรัสออกไซด์ได้มากคือ การที่มีอัตราซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจน (COD/NO₃⁻ - N) ต่ำ เวลาพักสลัดจ์หรืออายุสลัดจ์สั้น และพีเอชต่ำจึงควรหลีกเลี่ยงภาวะการณ์เช่นนี้ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ (ธงชัย, 2546)

1.2.4 ดีไนตริฟิเคชันแบบพิเศษ

ในกรณีที่ไม่มีสารอินทรีย์หรืออัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่ำ ออโตโทรฟบางกลุ่มสามารถดีไนตริฟายได้โดยใช้สารอินทรีย์บางชนิดเป็นแหล่งพลังงาน เช่น *Thiobacillus denitrificans* สามารถใช้ในเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน มาออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ ซัลไฟด์ หรือไฮโดรซัลเฟตไปเป็นซัลเฟต ซึ่งเกิดดีไนตริฟิเคชันไปพร้อมกันด้วย อนึ่งจุลินทรีย์บางชนิดจะรีดิวซ์ไนเตรตหรือไนไตรต์ได้เป็นก๊าซไนโตรเจนถ้าตัวให้อิเล็กตรอนเป็นซัลไฟด์ แต่จะผลิตไดไนโตรเจน

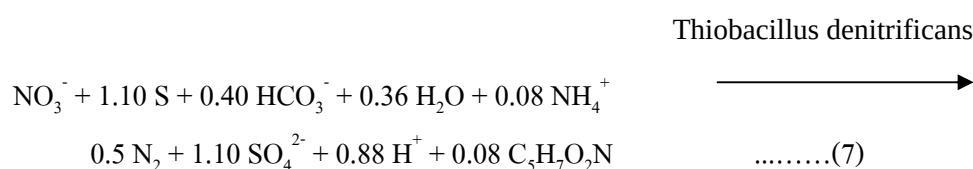
ออกไซด์หรือไนโตรสออกไซด์ (N_2O) ถ้าใช้ไฮโดรซัลไฟด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ทั้งนี้ได้มีการนำความรู้นี้ไปประยุกต์สำหรับการกำจัดไนโตรเจนเป็นแบบวัฏจักร กล่าวคือ เอาข้อดีของกระบวนการนี้ไปใช้ร่วมกับความสามารถของเอสปีอาร์ หรือแบคทีเรียลดซัลเฟต ที่ลดรูปซัลเฟตเป็นซัลไฟด์หรือซัลเฟอร์ได้ ซึ่งซัลเฟอร์ในรูปรีดิวซ์นี้จะถูกออกซิไดซ์ในไตรฟายเออร์ใช้เป็นแหล่งให้อิเล็กตรอนสำหรับปรีดิวซ์ไนเตรต (ดังรูปที่ 3) จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ไปเป็นซัลเฟต และรีดิวซ์ไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนพร้อมๆ กันนี้มีชื่อเรียกว่า ซัลเฟอร์ดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียหรือเอสดีบี (Sulfur Denitrifying Bacteria, SDB) หรือออกซิไดซ์ไนโตรเจนในไตรฟายอิงแบคทีเรียหรือเอดีบี (Autotrophic Denitrifying Bacteria, ADB) (ธงชัย, 2546)



ภาพที่ 3 วัฏจักรของซัลเฟอร์ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบบออกซิไดซ์ไนโตรเจน

ที่มา : ธงชัย (2546)

สมการสำหรับดีไนตริฟิเคชันที่รวมกับการออกซิไดซ์ซัลเฟอร์เป็นซัลเฟตนั้น
ได้เป็นดังสมการที่ (7)



ซึ่งเห็นได้ว่าในสมการนี้ต้องมีแอมโมเนียมที่ฝั่งซ้ายของสมการด้วย นั่น
หมายถึงการออกซิไดซ์ที่เคเอ็นเป็นไนเตรตนั้น ต้องทำให้ไม่สมบูรณ์ร้อยละ 100 มิฉะนั้นต้องมีการ
เติมแอมโมเนียมเข้าสู่ระบบด้วย แต่ในระบบจริงออกซิเดชันสมบูรณ์มักไม่เกิดขึ้น และมีแอมโมเนียม

ในถังเดิมอากาศอยู่เสมอ ส่วนที่แปลกจากดีไนตริฟิเคชันแบบธรรมดาและสำคัญมากคือ ดีไนตริฟิเคชันแบบนี้ต้องการสภาพต่าง (แทนที่จะผลิตสภาพต่าง) ด้วย (ธงชัย, 2546)

1.3 ระบบบำบัดไนโตรเจน

โดยปกติแล้วในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมต่ำ เนื่องจากเป็นพิษต่อสัตว์น้ำที่ความเข้มข้นสูงกว่า 3 มก. / ลิตร และจุลินทรีย์ชนิด Nitrifying จะออกซิไดซ์ให้กลายเป็นไนไตรท์โดยใช้ออกซิเจนที่อยู่ในน้ำ ซึ่งไนไตรท์ไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากเป็นสารอาหารของสาหร่ายและพืชน้ำ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันได้ แอมโมเนียมสามารถกำจัดทั้งทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ

2. อนาโมกซ์

อนาโมกซ์ (ANAMMOX) หรือ Anaerobic Ammonium Oxidation เป็นกระบวนการทางชีวภาพแบบใหม่ที่จะลดอุปสรรคในการบำบัดไนโตรเจน กระบวนการอนาโมกซ์นี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นวิธีที่เหมาะสมมากในการกำจัดแอมโมเนียมในน้ำเสียและแอมโมเนียในแก๊ส เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันแบบธรรมดาแล้ว ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการลดลงกว่า 90% ขณะที่การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงถึง 90% (Paques, 2009)

2.1 ข้อดีของการใช้อนาโมกซ์ (Paques, 2009)

- ก. มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนสูง
- ข. ลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 90% (เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไนตริ-ฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันแบบธรรมดา)
- ค. ลดพลังงานที่ใช้มากถึง 60% (เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันแบบธรรมดา)
- ง. ไม่มีการผลิตมีเทน
- จ. มีการผลิตตะกอนส่วนเกินน้อยมาก

2.2 การประยุกต์ใช้ออนาม็อกซ์

อนาม็อกซ์ถูกใช้ในการกำจัดแอมโมเนียมในทุกระบบของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียมสูง ($\text{NH}_4^+ > 100 \text{ mg/L}$) ตัวอย่างกระบวนการและอุตสาหกรรมที่มีน้ำเสียดังกล่าว (Paques, 2009)

- ก. น้ำเสียชุมชน (ไม่ต้องมีน้ำเสียจากขั้นตอนการย่อยตะกอน)
- ข. การบำบัดน้ำเสียที่ของแข็งอินทรีย์ (หลุมฝังกลบ, การทำปุ๋ยหมัก, การย่อย)
- ค. อุตสาหกรรมที่มีขั้นตอนการใช้ปุ๋ย
- ง. อุตสาหกรรมปุ๋ย
- จ. อุตสาหกรรมปิโตรเคมี
- ฉ. อุตสาหกรรมโลหะ
- ช. อุตสาหกรรมเหมืองแร่

2.3 ลักษณะทางชีวเคมีของอนาม็อกซ์

ยึดตามการทดลอง ^{15}N ได้อ้างอิงตามกลไกของกระบวนการออกซิเดชันแบบไม่ใช้ออกซิเจนของอนาม็อกซ์ ที่จุลินทรีย์อนาม็อกซ์จะรีดิวซ์ไนไตรท์ เป็นไฮโดรไซลามีน (Hydroxylamine, NH_2OH) และไฮดราซีน (Hydrazine) ซึ่งเป็นบทบาทสำคัญในลักษณะทางชีวเคมีของอนาม็อกซ์ที่มีมากกว่า 10% (w/w) ของทั้งหมดของเซลล์โปรตีน ในเรื่องนี้ได้สามารถแยกเอนไซม์ไนไตรท์รีดิวซิง (Nitrite reducing enzyme) และเอนไซม์ไฮดราซีนโปรดักซิง (Hydrazine producing enzyme) (Radboud University, 2004)

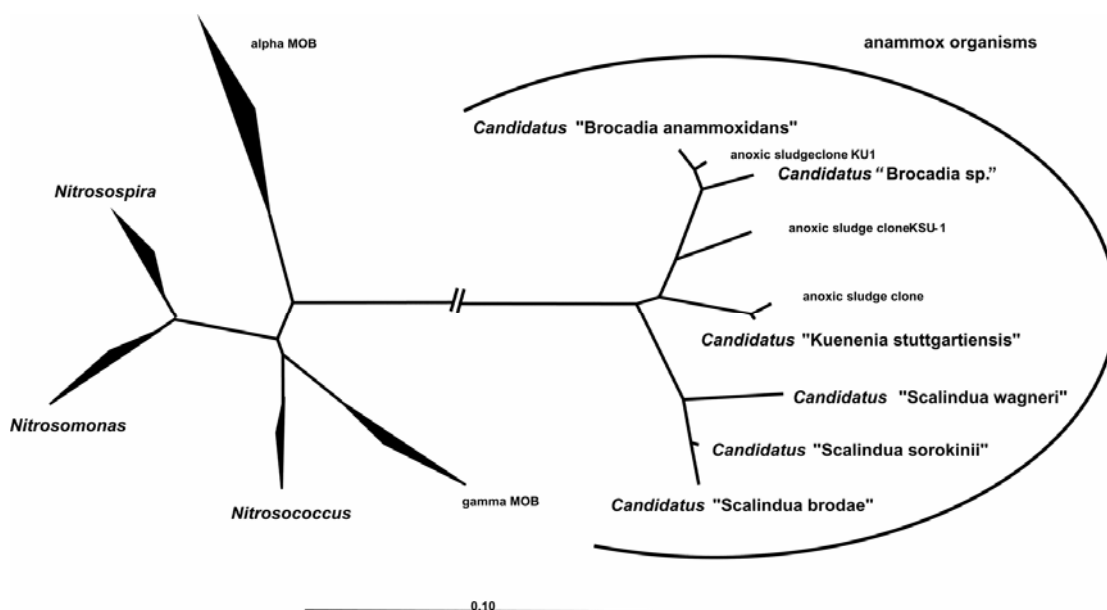
2.4 ลักษณะทางชีววิทยา

อนาม็อกซ์เป็นแบคทีเรียในไฟลัม Planctomycetes หนึ่งในจำพวกที่มีความแตกต่างจากกลุ่มแบคทีเรียหลัก เหมือนกับกลุ่ม Planctomycetes อื่นที่แบคทีเรียมีไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) ที่แตกต่างโดยมีอวัยวะที่เป็นเยื่อหุ้มพิเศษที่ชื่อว่าอนาม็อกโซโซม (Anammoxosome) ที่มีปฏิกิริยาของอนาม็อกซ์อยู่ภายใน ได้มีการศึกษาเพื่อให้รู้การทำงานของอนาม็อกโซโซมและความต้องการของอวัยวะนี้ต่อกระบวนการออกซิเดชันของอนาม็อกซ์แบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่าเยื่อหุ้มที่อยู่

รอบๆอนาม็อกโซโซมประกอบด้วยไขมันที่ขดไปมาภายในถุง ไขมันนี้ประกอบด้วยการเชื่อมกันของวงไซโคลบิวเทนจำนวนมาก (Cyclobutane rings) อาจเป็นได้ว่าถุงอนาม็อกโซโซมมีสมบัติที่ไม่ใช้สารละลายซึมผ่านได้สูง (Radboud University, 2004)

2.5 วงศ์วานวิวัฒนาการของอนาม็อกซ์

อนาม็อกซ์จัดอยู่ในอันดับ Planctomycetales ที่ไม่มี Peptidoglycan ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ที่พบโดยทั่วไปในแบคทีเรียที่พบส่วนมาก อนาม็อกซ์จัดอยู่ในจีนัสและสายพันธุ์ที่ชื่อว่า *Candidatus Brocadia anammoxidans* (Trigo *et al.*, 2006) แสดงในภาพที่ 4



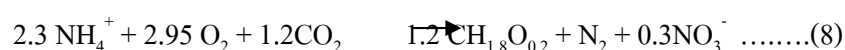
ภาพที่ 4 แสดงวงศ์วานวิวัฒนาการของอนาม็อกซ์

ที่มา : Jetten *et al.* (2005)

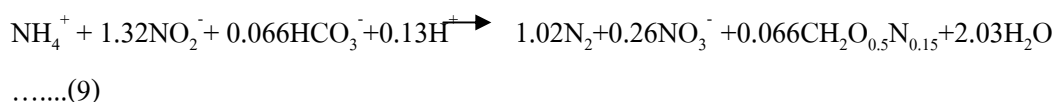
2.6 กระบวนการบำบัดแอมโมเนียโดยอนาม็อกซ์

กระบวนการอนาม็อกซ์ในการกำจัดแอมโมเนียโดยปราศจากออกซิเจนที่มีไนโตรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ราคาในการบำบัดแอมโมเนียในแบบธรรมดาโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันมาจากการกำจัดตะกอนออกจากน้ำ ส่วนมากเป็นค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศและ

นอกจากนั้นเป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่แพง เช่น เมทานอล กระบวนการอนาโม็กซ์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่ต้องการตัวให้อิเล็กตรอนที่พิเศษ เมื่อรวมกระบวนการ SHARON รวมด้วยพบว่าค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศลดลง 25% และไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับ COD ในกระบวนการ ปฏิริยาทั้งหมดของการรวมกระบวนการ SHARON-ANAMMOX แสดงดังสมการที่ (8)



ปฏิกิริยาของอนาโม็กซ์เกิดจากแอมโมเนียถูกออกซิไดส์เป็นแก๊สไนโตรเจน โดยใช้ไนโตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ในสมการที่ (9) ใช้แอมโมเนียมและไนโตรตเป็นสารตั้งต้น เกิดแก๊สไนโตรเจนและไนเตรตปริมาณเล็กน้อย (Trigo *et al.*, 2006)



ถึงแม้ว่าการลดอย่างมากในการปล่อยแก๊สเรือนกระจกในกระบวนการอนาโม็กซ์ การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบบำบัดน้ำเสียสามารถลดได้มากถึง 95% เนื่องจากด้วยกระบวนการของอนาโม็กซ์จะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ยิ่งกว่านั้นการผลิตไนตรัสออกไซด์ (N_2O) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแบบธรรมดาแต่ไม่มีการปล่อยจากกระบวนการอนาโม็กซ์ (Radboud University, 2004)

2.7 การศึกษาการลดไนโตรเจนโดยแบคทีเรียกลุ่มอนาโม็กซ์

Sumino *et al.* (2006) ได้ศึกษาการลดไนโตรเจนจากน้ำเสียพร้อมทั้งเกิดปฏิกิริยารีดักชันไนเตรตและออกซิเดชันแอมโมเนียมภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในถังปฏิริยาเพียงถังเดียว ผลกระทบของอัตราส่วน C/N และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน (Total organic carbon, TOC) ต่อการลดไนโตรเจนที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันไนเตรตและออกซิเดชันแอมโมเนียมภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในถังปฏิริยาเพียงถังเดียว เมื่อตะกอนนำมาจากถังปฏิริยาการหมักมีเทนใส่เข้าไปในถังปฏิริยาแบบไหลขึ้นและป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยไนเตรตที่มีอัตราส่วน C/N

เท่ากับ 1 จุลินทรีย์ชนิด เฮเทอโรโทรฟิก ดีไนตริฟายอิง (Heterotrophic denitrifying) เมื่อกำจัดไนโตรเจนได้ 30% ตะกอนอนาม็อกซ์

Waki *et al.* (2007) ได้ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียที่มีสิ่งขับถ่ายของสัตว์โดยอนาม็อกซ์ จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้พิจารณาความสามารถของกระบวนการออกซิเดชันแบบไม่ใช้ออกซิเจนของอนาม็อกซ์บำบัดน้ำเสียที่มีสิ่งขับถ่ายของสัตว์ 3 ชนิดที่มีอัตราส่วน C/N ต่ำในระบบ Batch การลดลงอย่างรวดเร็วของไนไตรท์และแอมโมเนียมถูกสังเกตจากช่วงที่ใช้ระบบ AS (Activated sludge) และ UASB (Upflow anaerobic sludge blanket)/Trickling filter และสัมพันธ์กับการควบคุมน้ำเสียสังเคราะห์ การที่ไนโตรเจนลดนี้มาจากกิจกรรมของอนาม็อกซ์ เนื่องจากอัตราส่วนของการกำจัดไนไตรท์และแอมโมเนียมใกล้เคียงกับอัตราส่วนตามทฤษฎีของปฏิกิริยาของอนาม็อกซ์ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการกำจัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนของน้ำเสียจริงและของน้ำเสียสังเคราะห์แสดงได้น้ำเสียทั้งสองชนิดของน้ำเสียเหมาะสมมากสำหรับการบำบัดด้วย อนาม็อกซ์

Nootong (2007) ได้ศึกษาระบบปฏิกิริยาแบบไหลขึ้นที่ไม่มีส่วนแยกชีวมวลและของเหลว เพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพของกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันของจุลินทรีย์กลุ่มออโรโทรฟิก (Autotrophic nitrification and denitrification, AND) ถึงปฏิกิริยาสามารถให้ AND คงอยู่โดยควบคุมการผลิตออกซิเจนเพื่อให้เกิดการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนได้สูงสุดที่อัตรา 0.054 g N/VSS. D (ประสิทธิภาพกำจัด 38%) ที่ปล่อยออกซิเจนให้เข้ามา และภาระบรรทุกไนโตรเจนเท่ากับ 3.86 mg O₂/h. L reactor และ 182 mg N/d. L reactor ตามลำดับ นอกจากนี้การกำจัดไนโตรเจนสำเร็จโดยการทำงานของปฏิกิริยา 2 ตอน เนื่องจากช่วงการตาย (Endogenous) ของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันมีช่วงอายุของเซลล์เจ็ลลีแนน ในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนไหวควบคุมในถังปฏิกิริยาทำให้เกิดสภาวะการเคลื่อนไหวของของเหลวที่เสถียรสำหรับรูปร่างชีวมวลของ Chemoautotrophic ซึ่งเผยให้เห็นโครงสร้างที่เป็นรู โครงสร้างที่หลวม และมีรูปร่างคล้ายพรมเช็ดเท้า มากกว่า 95% ของปริมาณชีวมวลที่ยึดเวลาออกไป (1.3-1.5 g VSS) ถูกเก็บไว้ ด้วยเหตุนี้ที่มีอัตราการชะออกของชีวมวลต่ำ (~40 mg VSS/d) น้ำออกมีของแข็งแขวนลอยที่ระเหยได้ (VSS) น้อยกว่า 11 mg VSS/L

Noophan *et al.* (2009) ศึกษาเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายจากถังปฏิกิริยา anoxic จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated sludge ที่หนองแขม โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบ SBR พบเชื้อกลุ่มไนตริฟายจำนวนมากเมื่อควบคุมให้อยู่ในสภาวะไร้อากาศ โดยใช้แอมโมเนียมเป็นตัวให้อิเล็กตรอน

และไนไตรต์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน แบคทีเรียกลุ่ม Autotrophic ammonium oxidizing สามารถมีชีวิตอยู่ได้ในสภาวะดังกล่าว อัตราการใช้แอมโมเนียมต่อไนไตรต์ของจุลินทรีย์ดังกล่าวเท่ากับ 0.08 และ 0.05 g N/g VSS/d ตามลำดับ ในช่วง 3 เดือน ป้อนแอมโมเนียม 42 mg N/L การเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียมต่อไนไตรต์ เท่ากับ 1:1.38 เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และระดับไนโตรเจนในน้ำออกลดลงต่ำกว่า ที่อัตราส่วน 1:0.671, 1:2.18 และ 1:3.05 การทดสอบ FISH พบว่าเป็นเชื้อจุลินทรีย์กลุ่ม Autotrophic ammonium oxidizing (*Nitrosomonas* spp., *Candidatus Brocadia anammoxidans* และ *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*) เชื้อกลุ่ม Ammonium oxidizing ควบคุมแอมโมเนียมที่ 42 mg N/L พบจุลินทรีย์กลุ่ม *Nitrosomonas* spp. (30%) มากกว่า *Candidatus B. anammoxidans* และ *K. stuttgartiensis* (2.1%) เมื่อควบคุมแอมโมเนียมที่ 210 mg N/L พบ *Candidatus B. anammoxidans* และ *K. stuttgartiensis* เป็นกลุ่มหลัก (85.6%) อัตรากำจัดไนโตรเจนจำเพาะ (0.6 g N/g anammox VSS/d) สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญกลุ่ม ammonium oxidizing (0.4 g N/g *Nitrosomonas* VSS/d) จุลินทรีย์กลุ่ม Anammox กำจัดไนโตรเจนทั้งหมดสูงถึง 979 mg N/L/d (แอมโมเนียม : ไนไตรต์ เท่ากับ 387:582 mg N/L) ผลดังกล่าวแสดงว่าเหมาะกับการประยุกต์ใช้น้ำเสียที่มีไนโตรเจนสูง แต่มีคาร์บอนต่ำ เช่นที่พบในน้ำเสียชุมชนในกรุงเทพ

3. ตัวกลางที่ใช้ในถังปฏิกริยา

3.1 เซรามิก

ดินเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก ดินมีหลายชนิดที่แตกต่างกันในเรื่องคุณสมบัติด้านกายภาพและเคมี ดินอาจจำแนกเป็น 2 ชนิด คือ ดินขาวและดินเหนียว

3.1.1 ดินขาว (Kaolinite, China clay)

ดินขาว หมายถึงดินที่มีสีขาวหรือสีซีดทั้งในสภาพที่ยังไม่ได้เผาและเผาแล้ว ดินขาวมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่ดินกลุ่ม Kaolinite และมีความสัมพันธ์กับมัสโคไวต์ ไมกา อิลไลต์ ควอตซ์ และอาจมีมอนต์มอริลโลไนต์ แหล่งดินชนิดนี้มี 2 แบบ

ก. ส่วนประกอบทางเคมีของดินขาว

ผลึกที่บริสุทธิ์ของดินขาวมีส่วนประกอบทางเคมีเป็น $(\text{OH})_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ หรือ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ หรือ 39.8% Al_2O_3 , 46.3% SiO_2 และ 13.9% H_2O ดินขาวที่พบตามแหล่งมีส่วนประกอบต่างกันไปด้วยเหตุผล 2 ประการ

(1) เนื่องจากโครงสร้างของดินขาวมีการแทนที่กันในโลหะธาตุที่มีประจุบวก

(2) เนื่องจากมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ ได้แก่ quartz, feldspar, rutile, pyrite เป็นต้น

3.1.2 แร่ดินขาว

โครงสร้างของสารประกอบพวกซิลิเกต สารประกอบพวกซิลิเกตมีโครงสร้างได้หลายแบบซึ่งขึ้นกับการเชื่อมโยงกันของ Silicon – oxygen tetrahedron

แร่กลุ่มนี้เป็นแร่กลุ่มที่มีทั้งส่วนประกอบเคมีและโครงสร้างที่สลับซับซ้อน โครงสร้างแร่กลุ่มนี้ทั่วไปแบ่งได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่

ก. ออโรซิลิเกต (Orthrosilicate) SiO_4^{2-} มีโครงสร้างเป็นเตตระฮีดรอลเดี่ยวๆ แร่ที่จัดอยู่ในกลุ่ม ได้แก่ Mg_2SiO_4 และ $x\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot y\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ garnet, zircon และกลุ่มอะลูมิเนียมซิลิเกตซึ่งได้แก่ Kyanite, Sillimanite, Andalusite และ Mullite

ข. ไพโรซิลิเกต (Pyrosilicate) $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$ โครงสร้างอนุมูลไพโรซิลิเกตประกอบด้วยรูปเตตระฮีดรอล 2 รูป เชื่อมกันที่มุม แร่กลุ่มไพโรซิลิเกตเป็นแร่กลุ่มที่หายาก

ค. เมตาซิลิเกต (Metasilicate) SiO_3^{2-} , $-(\text{SiO}_3)_n^{2n-}$ โครงสร้างของมันจะมีมุม 2 มุมของรูปเตตระฮีดรอลเชื่อมต่อกัน ทำให้เกิดรูปวงหรือรูปเส้นแบบต่างๆ แร่ที่มีโครงสร้างเป็นวง เช่น Wollastonite (CaSiO_3) และ Beryl ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$)

ง. ซิลิเกตที่มีโครงสร้างแบบเลเยอร์ (Layer) $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n^{2n-}$ เลเยอร์ประกอบด้วย โครงสร้างเตตระฮีดรอลซึ่งที่มุมสามมุมของรูปมีการเชื่อมโยงกัน

(1) คุณสมบัติทางกายภาพของแร่ดินขาว

การทราบคุณสมบัติทางกายภาพของแร่ดินขาว จะช่วยให้เราสามารถ ทำนายคุณสมบัติของเนื้อดินที่ปั้น ซึ่งแร่ดินเหล่านั้นผสมอยู่ได้ดีพอสมควร คุณสมบัติที่เราควรจะได้ศึกษา คือ

ขนาด (Particle size) คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากอันดับหนึ่ง เพราะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติด้านความเหนียว (Plasticity) ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (Dry strength) ความสามารถแลกเปลี่ยนอนุมูล และการหดตัวเมื่อแห้ง (Dry shrinkage) กล่าวโดยทั่วไปดินเม็ดละเอียดจะให้ความเหนียวและการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าดินเม็ดหยาบ

รูปร่าง (Particle shape) แร่ Kaolinite อนุภาคของมันมีรูปร่างเป็นแผ่น หกเหลี่ยมมีขนาดจาก 0.05 – 10 ไมครอน โดยเฉลี่ยขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (Base exchange capacity) คุณสมบัติข้อนี้สำหรับแร่ Kaolinite มีน้อยมาก เพราะว่าในแร่มีการแทนที่กันของพวกอนุมูลบวก ในโครงสร้างมีน้อยมาก โดยเฉพาะผลึก Kaolinite ที่บริสุทธิ์จะไม่สามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูลเลย มันจะแลกเปลี่ยนได้เมื่อมันเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์ หรือมันดูดซับเอาผลึกขนาดเล็กของแร่พวก Three layer หรือ TOT เข้าไว้ที่ผิวของมัน

คุณสมบัติเมื่อแห้ง (Dryin propreties) การหดตัวเมื่อแห้งของแร่ดิน ล้วนๆ เราไม่ค่อยใส่ใจ เพราะว่าเนื้อดินปั้นมักประกอบด้วยแร่หลายอย่าง แต่อาจกล่าวได้กว้างๆ ว่า ดินที่ละเอียดกว่ามีการหดตัวมากกว่าดินหยาบเมื่อปล่อยให้แห้งไว้ให้แห้ง

ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (Green strength) คุณสมบัตินี้สำคัญมาก โดยเฉพาะ เมื่อนำแร่ดินขาวไปใช้ในเนื้อดินไม่มีดินเหนียวผสมอยู่เลย เพราะดินขาวเหล่านั้นที่

เป็นตัวช่วยให้ผลิตภัณฑ์ดินมีความแข็งแรงมากน้อยเพียงไร ดินละเอียดหรือดินที่มีมอนต์มอริลโลไนต์จะให้ความแข็งแรงมากที่สุด

คุณสมบัติหลังจากการเผา (Firing properties) แร่ดินขาวมีการหดตัวมาก หลังการเผา ไม่ควรใช้แร่ดินขาวล้วนเป็นเนื้อดินปั้น แร่ดินขาวเมื่อเผาแล้วจะหดตัวประมาณ 20%

3.1.3 ดินเหนียว (Ball clay)

ดินขาวเป็นดินที่ใช้มากในอุตสาหกรรมเซรามิก แต่ก็มีดินอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีความสำคัญเช่นกัน ดินชนิดนี้มีสีดำ แต่เมื่อเผาแล้วจะมีสีขาว ดินชนิดนี้มีความเหนียวมากกว่าและให้ผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่เผามีความแข็งแรงมากกว่าดินขาว

ดินเหนียวอาจให้คำจำกัดความได้ว่า หมายถึงดินที่มีสีขาว ขาวคล้ำถึงดำสนิท มีแหล่งสะสมที่ลุ่ม มีเม็ดละเอียด มีอินทรียสารปน มีความเหนียวดี ให้ความแข็งแรงต่อผลิตภัณฑ์ก่อนเผาดีกว่าดินขาว มีช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพของเนื้อดินไปเป็นเนื้อแก้วค่อนข้างยาว หลังเผามีสีขาวหรือสีจาง ดินเหนียวมีการเปลี่ยนแปลงมากในแต่ละแห่ง

ธรรมชาติของดินเหนียว ดินชนิดนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วย Kaolinite แต่มีผลึกขนาดเล็กกว่าดินชนิดอื่นๆ และผลึกมักจะไม่สมบูรณ์ และบางครั้งก็พบแร่ดินชนิดอื่น เช่น Montmorillonite และ Illite เป็นต้น แร่ที่มักพบปนอยู่ในดินเหนียวเสมอ เช่น Quartz, Mica และ Iron sulfide ดินเหนียวมีลักษณะพิเศษก็คือ มีสารอินทรีย์ปนอยู่เสมอ สารอินทรีย์นี้มีส่วนประกอบคล้ายลิกไนต์มาก ดินเหนียวเมื่อแห้งมีความแข็งแรงสูงและมีการหดตัวสูงเช่นเดียวกัน ดินเหนียวหลายชนิดมีช่วงอุณหภูมิกว้างที่จะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นแก้ว ซึ่งเป็นประโยชน์ คือ ช่วยปรับปรุงเนื้อผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น ในประเทศไทยดินเหนียวที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกมีหลายแห่ง เช่น สุราษฎร์ธานี ปราจีนบุรี แม่เมาะ ลำปาง เชียงใหม่ เป็นต้น

ก. ส่วนประกอบของดินเหนียว

ส่วนประกอบทางเคมีของดินเหนียวแตกต่างกันไปตามแหล่งที่มันสะสม ส่วนประกอบโดยประมาณ อาจจำแนกได้ดังนี้

- (1) SiO_2 อยู่ระหว่าง 40 – 60%
- (2) Al_2O_3 ประมาณ 30%
- (3) H_2O ในผลึกและอินทรีย์สาร 100%
- (4) TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O เล็กน้อย

แร่ดินต่างๆ ที่พบในดินเหนียวพอสรุปได้ คือ Kaolite ซึ่งมีทั้งหยาบและละเอียด เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มี Montmorillonite และ Illite เล็กน้อย แร่อื่นๆ ที่เป็นส่วนประกอบอยู่ก็มี Quartz, Mica เป็นต้น

ส่วนสารอินทรีย์ที่พบ ได้แก่ Lignite, Waxes, Resins, Lignin และ Humus นอกจากนี้ก็มีเกลือที่ละลายน้ำได้ เกลือส่วนใหญ่เป็นเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ของ Al, Fe, Ca, Mg, K, Na ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูลอยู่ระหว่าง 7 ถึง 30 Milliequivalents ต่อ 100 กรัมของดินแห้ง

ข. คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว

ขนาด ดินเหนียวมีขนาดละเอียดกว่าดินขาว ขนาดดินเหนียวมีขนาดละเอียดแค่ไหนและมากน้อยเพียงใดจะเปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่พบ คือ แหล่งดินที่ถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งเดิมมากจะมีการเสียดสี และบดกันตามธรรมชาติมาก ขนาดของเม็ดดินจะละเอียดมากขึ้นตามลำดับ

ความเหนียว กล่าวโดยทั่วไป ดินเหนียวมีความเหนียวมากกว่าดินขาว การผสมดินเหนียวลงไปเหนียวดินจะช่วยทำให้การขึ้นรูปได้ดีขึ้น

การหดตัวเมื่อแห้ง ดินเหนียวมีการหดตัวมากน้อยแตกต่างกันไปตามแหล่งหรือชนิดของดินเหนียวนั้น เช่น ดินเหนียวที่มี SiO_2 สูงแทบไม่มีการหดตัวเลย แต่ดินเหนียวที่มีสารอินทรีย์สูงจะมีการหดตัวมากประมาณ 15% แต่อย่างไรก็ตามเราไม่ใช้ดินเหนียวอย่างเดียวในการผสมเนื้อดินปั้น

ความแข็งแรงก่อนเผา ปกติดินเหนียวจะมีความแข็งแรงมากกว่าดินขาว ดินเหนียวที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อผสมในเนื้อดินปั้นจะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย

คุณสมบัติหลังการเผา เมื่อผสมดินเหนียวลงไปเนื้อดินปั้น ดินเหนียวบางอย่างมี Mica ประกอบอยู่ เมื่อเผา Mica จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาในเนื้อดินปั้นทำให้ผลิตภัณฑ์แน่นและเนียนมากขึ้น (ปรีดา, 2539)

3.2 ทราย

ทราย (Sand) เป็นหินแข็งที่แตกแยกออกมาจากก้อนหินใหญ่ โดยทรายจะแยกตัวออกมาได้เองตามธรรมชาติ ทรายมีขนาดระหว่าง 1/12 นิ้วถึง 1/400 นิ้ว ถ้ามีขนาดเล็กกว่านี้จะมีสภาพเป็นฝุ่นทราย จะประกอบด้วยแร่ควอตซ์หรือหินบะซอลต์ ทรายแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ทรายบกและทรายแม่น้ำ

ก. ทรายบก

ทรายบกเกิดจากหินทรายที่แตกแยกชำรุดออกมา เป็นเม็ดทรายตามสภาพภูมิอากาศสิ่งแวดล้อม และจะฝังจมอยู่ในพื้นดินเป็นแห่ง ๆ ทรายชนิดนี้จะมีดิน ซากพืชและซากสัตว์ปะปนอยู่ด้วย ในการใช้งานจึงต้องนำทรายมาล้างแยกดินซากพืชและซากสัตว์ออกให้สะอาด ทรายจากทะเลทรายก็จัดเป็นทรายบกด้วย

ข. ทรายแม่น้ำ

ทรายชนิดนี้มีอยู่ทั่ว ๆ ไปในที่ราบลุ่มของแม่น้ำ ทรายชนิดนี้เกิดจากปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ โดยกระแสน้ำได้พัดพาทรายจากที่ต่าง ๆ มาตกตะกอนรวมกันในพื้นที่ราบลุ่มที่เป็นที่รวมของทราย

3.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ มีชื่อภาษาอังกฤษว่า แอกทิฟคาร์บอน (Active carbon) หรือ แอกทิเวเตดคาร์บอน (Activated carbon) เป็นถ่านที่มีสมบัติพิเศษที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพมากขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ เพื่อให้มีสมบัติหรืออำนาจในการดูดซับสูง เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก และขนาดรูพรุนก็แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิตและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด วัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบมักเป็นพวกอินทรีย์สารซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่มักเป็นพวกเซลลูโลสที่มาจากพืชและต้นไม้ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ กะลามะพร้าว จี้เลื่อยซังข้าวโพด เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีพวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ แอนทราไซต์ เป็นต้น ส่วนวัตถุดิบที่มาจากสัตว์นั้นมีไม่มากนัก เช่น กระดูก หรือ เขาสัตว์ เป็นต้น

3.3.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ แบ่งตามลักษณะรูปร่าง ได้ 2 ชนิด คือ

- 1) ชนิดผงละเอียด ซึ่งสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
- 2) ชนิดเม็ดหรือเกล็ด ซึ่งจะสามารถนำกลับมา Re-used เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด สามารถนำมาใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกันไปในหลายอุตสาหกรรม จำแนกได้ดังนี้

3.3.2 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์

ในการผลิตถ่านกัมมันต์มี 2 วิธี คือ

- 1) วิธีกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation) คือการนำกะลามะพร้าวมาผสมกับสารเคมีเช่น ซิงค์คลอไรด์หรือโปแตสเซียมคาร์บอเนต แล้วนำไปเผาในที่อับอากาศ โดยใช้

อุณหภูมิประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ล้างเพื่อเอาสารเคมีออกให้หมด และนำมาผึ่งแดดให้แห้ง ซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนในการผลิตสูง และอาจมีสารเคมีตกค้าง ซึ่งการผลิตด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมีนั้น ตัวกระตุ้นจะแทรกเข้าไปในเนื้อถ่านโดยจะทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่

2) วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) โดยวัตถุดิบที่สามารถใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ มีหลายชนิด เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม น้ำมัน แกลบ ชี้เลื่อย ถ่านหิน กระดูกสัตว์ เลือดสัตว์ และสารเคมีที่มีคุณสมบัติในการดูดน้ำได้ เช่น ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก ในกรณีการผลิตด้วยวิธี Chemical activation หรือใช้ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจน กรณีการผลิตด้วยวิธี Physical activation (บุญชัย, 2552)

4. กลไกและแบบการเกิดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนของระบบ UASB

ถังปฏิกริยาของระบบ UASB สามารถกำจัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงเนื่องจากมีความเข้มข้นของชีวมวลสูงและมีกลุ่มจุลินทรีย์หลากหลาย ความเข้มข้นชีวมวลที่สูงนี้หมายความว่า มีการเปลี่ยนรูปของสิ่งปนเปื้อนได้เร็ว และความเข้มข้นหรือปริมาณของเสียอินทรีย์ที่สูงสามารถบำบัดได้ในถังปฏิกริยานี้ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีไม่ใช้ออกซิเจนอื่นๆ เช่น การกรองแบบไม่ใช้ออกซิเจน, ระบบ SBR (Sequencing Batch Reactor) แบบไม่ใช้ออกซิเจน ฯลฯ ระบบ UASB เป็นระบบที่ขึ้นกับกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนด้วยอนุภาคของน้ำเสียอินทรีย์ เม็ดตะกอนเป็นส่วนประกอบหลักของถังปฏิกริยา UASB มีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนมีลักษณะทึบ, เป็นกลุ่มจุลินทรีย์, มีหลายสายพันธุ์ และไม่มีสายพันธุ์เดียวในระบบนิเวศของเม็ดตะกอนเพื่อให้สามารถย่อยสลายของเสียอินทรีย์เชิงซ้อน

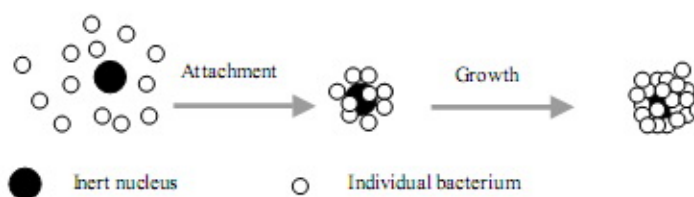
หนึ่งในอุปสรรคหลักของถังปฏิกริยา UASB คือ ใช้ระยะเวลาในการเริ่มระบบยาวนาน ซึ่งปกติจะใช้เวลาประมาณ 2-8 เดือน สำหรับการพัฒนาเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อลดการเสียเวลาในถังปฏิกริยาและในท้ายที่สุดนำไปสู่ค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าของการบำบัดของเสีย แผนการสำหรับการเร่งให้สร้างเม็ดตะกอนได้เร็วขึ้นเป็นสิ่งที่ต้องการ การที่จะประสบความสำเร็จนี้ต้องเข้าใจกลไกการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน

4.1 แบบจำลองทางกายภาพเคมี

การเกาะติดแน่นของจุลินทรีย์หรือการหุคหนึ่งเอง เป็นจุดเริ่มของกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถอธิบายในรูปแบบของพลังงาน รวมถึงปฏิกิริยาระหว่างจุลินทรีย์ หรือระหว่างจุลินทรีย์และพื้นผิวของแข็ง ในความหมายของอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) เมื่อจุลินทรีย์เข้าใกล้กับจุลินทรีย์ตัวอื่นปฏิกิริยาระหว่างกัน รวมถึงแรงต้านไฟฟ้าสถิตย์ (Repulsive electrostatic force), แรงดึงดูด เดอ วาล์ว (Attractive Wan de Waals force) และปฏิกิริยาระหว่างแรงต้านของน้ำ บนพื้นฐานของอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) บางแบบจำลองการเกิดเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนถูกพัฒนาขึ้น รวมถึงแบบจำลอง Inert nuclei, แบบจำลอง Selection pressure, แบบจำลอง Multi-valence position ion-bonding, แบบจำลอง ECP bonding, แบบจำลอง Synthetic and natural polymer-bonding, แบบจำลอง Secondary minimum adhesion, แบบจำลอง Local dehydration and hydrophobic interaction และ แบบจำลอง surface tension

4.1.1 แบบจำลอง Inert nuclei

แบบจำลอง Inert nuclei สำหรับการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นการนำเสนอแรกของแบบจำลองทางกายภาพเคมี แบบจำลองนี้ได้กล่าวถึงอนุภาคเนื้อขนาดเล็ก (Inert microparticle) ของระบบ UASB จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนสามารถเกาะติดกับผิววัสดุเพื่อสร้างเป็นไบโอฟิล์ม (Biofilm) ที่เรียกว่า เอ็มบริโอนิก แกรนูล (Embryonic granules) (ภาพที่ 5) เม็ดตะกอนที่โตเต็มที่แล้วสามารถพัฒนาต่อไป จนสามารถให้จุลินทรีย์เกาะภายใต้สภาวะที่ควบคุมแบบจำลองนี้กล่าวได้ว่าได้นิวเคลียสหรือตัวนำชีวภาพขนาดเล็กสำหรับให้จุลินทรีย์เกาะติด ซึ่งถือเป็นขั้นตอนแรกของการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้อากาศ ได้มีการใช้ซีโอไลต์ (Zeolite) หรือไฮโดรแอนทราไซต์ (Hydro-anthracite) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 ไมครอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้อากาศ อนุภาค Water absorbing polymer (WAP) ถูกใช้ให้สร้างเม็ดตะกอนได้เร็วขึ้น โดย WAP เป็นเรซินชนิดผง ซึ่งจะขยายตัวในน้ำและมีโครงสร้างตาข่ายที่สมบูรณ์ จะมีพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์เกาะมากกว่าอนุภาคเนื้อ ผลการทดลองในห้องทดลองแสดงการใช้ WAP ทำให้การเริ่มระบบ (Startup) ได้เร็วขึ้น และการเกาะกันระหว่างอนุภาคและมวลชีวภาพดีขึ้น เนื่องจาก WAP มีความหนาแน่นน้อยกว่าทรายและวัสดุเนื้อชนิดอื่น



ภาพที่ 5 แสดงแบบจำลอง Inert nuclei

ที่มา: Yu *et al.* (2003)

4.1.2 แบบจำลอง Selection pressure

พื้นฐานของการสร้างตะกอนเป็นการคัดเลือกของอนุภาคอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ นั่นคือตะกอนที่เบาและฟุ้งจะถูกชะออกไป ขณะที่สารประกอบที่หนักกว่าจะคงอยู่ในระบบ แบบจำลองนี้เสนอการรวมตัวของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ UASB อาจจะมีประสิทธิภาพในการต้านแรงสูงที่เลือกได้ ในถังปฏิกรณ์ UASB การเลือกความดันเป็นสิ่งปกติของการไหลแบบไหลขึ้น การไม่ปรากฏของการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนเมื่อแรงดันน้ำที่เลือกต่ำเกินไป การสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่เร็วเกิดจากการรวมตัวทางภาพภาพเพียงอย่างอย่างเดียว เพราะแรงดันน้ำที่แรงถูกใช้ในการสร้างกลุ่มจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการรวมกลุ่มตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถเปลี่ยนเป็นการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยการเพิ่มการรวมกลุ่มให้เร็วขึ้นด้วยแรงดันน้ำที่ระยะเวลาสั้นกว่า 8 ชั่วโมง

4.1.3 แบบจำลอง Multi-valence positive ion-bonding

ด้วยเหตุที่จุลินทรีย์มีประจุลบบนผิวภายใต้สภาวะที่พีเอชเป็นปกติ ความคิดพื้นฐานที่จะให้เกิดกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยลดแรงดันไฟฟ้าสถิตย์ของประจุลบบนผิวจุลินทรีย์ ซึ่งจะเติมไอออนที่มีประจุบวกมาก เช่น แคลเซียม, เฟอร์ริก, อลูมิเนียม หรือแมกนีเซียม ในเม็ดตะกอน (รูปที่ 6) ทำให้ลดแรงดันไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างจุลินทรีย์ จะช่วยให้เกิดกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน การเติม Ca^{2+} ที่มีความเข้มข้น 80-200 mg/L, Mg^{2+} ความเข้มข้น 12-120 mg/L หรือ Al^{3+} ความเข้มข้น 300 mg/L พบว่าเพิ่มอัตราการ

สร้างเม็ดตะกอนในถังปฏิกริยา UASB อย่างไรก็ตาม Ca^{2+} ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 500 mg/L หรือ 600 mg/L เป็นผลเสียต่อกระบวนการสร้างเม็ดตะกอน เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมที่สูงเป็นปัญหาต่อการทำงานของระบบเป็นอย่างมาก เช่น การตกตะกอนและการสะสมแคลเซียมในกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้อากาศและลดกิจกรรมของจุลินทรีย์ของเม็ดตะกอน

แบบจำลองนี้ยึดปฏิกริยาไฟฟ้าสถิตอย่างง่ายระหว่างประจุลบบนผิวจุลินทรีย์และไอออนบวก อธิบายดังรูปที่ 7 ทฤษฎี DLVO ได้กล่าวว่า เมื่อพื้นผิวสองสิ่งมีประจุที่เหมือนกัน จะเกิดแรงผลักเกิดขึ้นระหว่างกัน แรงนี้สามารถต้านการเข้าใกล้กันของเซลล์ ไอออนบวกที่เติมให้แก่ตะกอนจะไปทำให้ประจุลบบนพื้นผิวจุลินทรีย์เป็นกลาง โดยกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าสถิตระหว่างจุลินทรีย์จะลดลง โดยไอออนที่ใส่เข้าไปทำปฏิกริยาระหว่างเซลล์ถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการสร้างเม็ดตะกอน ในการเติมไอออนที่มีประจุบวกมากจะช่วยให้ตะกอนจับตัวเป็นเม็ดตะกอนโดยพันธะ Extracellular polymers (ECPs) ความสัมพันธ์ระหว่าง ECPs และไอออนแคลเซียม โดยไอออนแคลเซียมจะเป็นสะพานเชื่อมระหว่าง ECPs และ ECPs และเชื่อมเซลล์ และ ECPs เข้าด้วยกันเพื่อสร้างเป็นโครงสร้าง 3 มิติของกลุ่มจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้



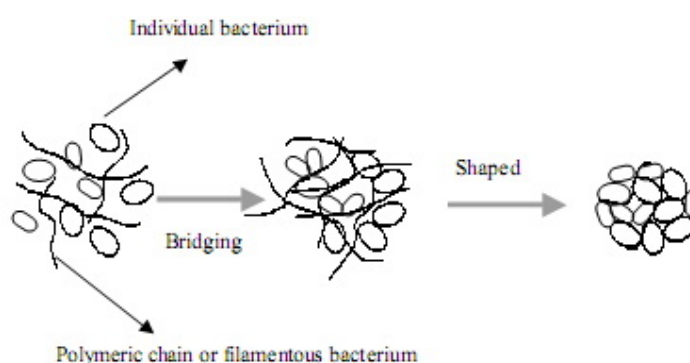
ภาพที่ 6 แสดงแบบจำลอง Multi-valence positive ion-bonding

ที่มา: Yu *et al.* (2003)

4.1.4 แบบจำลอง ECP bonding

ECPs เป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดรวมเป็นก้อน (Cohesion) และการเกาะติด (Adhesion) ของเซลล์ และยังมีบทบาทในการช่วยรักษาโครงสร้างจุลินทรีย์ให้สมบูรณ์ กลไกยับยั้งการสังเคราะห์เอ็กโซโพลิแซคคาไรด์ (Exopolysaccharides) ที่จะขัดขวางการรวมกลุ่มกันของจุลินทรีย์

นทรีย์ มีรายงานว่า ECPs สามารถเปลี่ยนประจุลบของจุลินทรีย์ และลักษณะทางกายภาพของสะพานเชื่อมระหว่างเซลล์กับอนุภาคเนื้อเยื่ออื่น อธิบายดังรูปที่ 7 (Chen and Lun, 1993) ได้สังเกตว่าเมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate) *Methanosarcina* ได้เจริญขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและที่น่าแปลกใจมากคือ ECPs ก่อตัวเป็นกลุ่มใหญ่ และ *Methanothrix* มีแนวโน้มที่เดิมในกลุ่ม *Methanosarcina*



ภาพที่ 7 แบบจำลอง polymer หรือ filament bonding

ที่มา: Yu *et al.* (2003)

4.1.5 แบบจำลอง Synthesis and natural polymer-bonding

การสังเคราะห์โพลิเมอร์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการจับตัวเป็นก้อน (Coagulation) และการรวมเป็นกลุ่ม (Flocculation) และสามารถทำให้อนุภาครวมกันเป็นกลุ่มในทางเดียวกันการสังเคราะห์โพลิเมอร์สามารถนำไปใช้พัฒนาให้เกิดเม็ดตะกอนในระบบ UASB ได้เร็วยิ่งขึ้น มักใช้โพลิเมอร์ไคโตซาน (Chitosan polymer) เป็นตัวช่วย ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับโพลิแซ็กคาไรด์ ช่วยเร่งให้เกิดเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้อากาศในถังปฏิกรณ์ที่คล้ายกับ UASB เช่น อัตราการสร้างเม็ดตะกอน (Granulation rate) ในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุไคโตซาน ที่ค่าสูงกว่า 2.5 เท่า เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ควบคุมที่ไม่ได้ใส่ไคโตซานโพลิเมอร์ ซึ่งค่า Specific activity of methane production คล้ายกันในทั้งสองถังปฏิกรณ์

4.1.6 แบบจำลอง Secondary minimum adhesion

แบบจำลองนี้ยึดทฤษฎี DLVO สำหรับอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งแสดงการเกาะติดแบบผันกลับได้ พลังงานกิบส์ (Gibbs energy) ของการเกิดแบบผันกลับได้มีความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อย และจะแยกจุลินทรีย์ 2 ตัวที่เกาะติดกัน ดังนั้นการเกาะติดแบบผันกลับได้สามารถเปลี่ยนเป็นการเกาะติดแบบผันกลับไม่ได้โดยผ่านพลังงานที่เกิดขวางหรือโดยการยื่นของเส้นใย (Fimbriae) ซึ่งเป็นตัวเชื่อมระหว่างจุลินทรีย์ แบบจำลองนี้ถือว่าทั้งประจุผิวและพลังงานที่ผิว หรือ ไฮโดรโฟบิซิตี (Hydrophobicity) ซึ่งสัมพันธ์กับแรงระยะสั้นและยาว มักพบแบบจำลองนี้สำหรับการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่เริ่มด้วยจุลินทรีย์ที่หุ้ยนึงได้ด้วยตนเองด้วยปฏิกิริยาระหว่างจุลินทรีย์ที่ผันกลับได้ตามด้วยผันกลับไม่ได้ มันจะเกิดขึ้นจริงถ้าแบบจำลองนี้จะมองเฉพาะด้วยอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) ของปฏิกิริยาซึ่งกันและกันของจุลินทรีย์ ดังนั้นความหมายที่แท้จริงของแบบจำลองนี้ถูกจำกัดสำหรับทางชีวภาพของถังปฏิกิริยา

4.1.7 แบบจำลอง Local dehydration and hydrophobic interaction

ภายใต้สภาวะพิเศษปกติของการเลี้ยงเชื้อ ผิวภายนอกของจุลินทรีย์มีน้ำเป็นองค์ประกอบ ดังเช่น ชั้นน้ำที่ผิวจุลินทรีย์จะป้องกันจุลินทรีย์รวมตัวกับจุลินทรีย์อื่นๆ มันเชื่อได้ว่าภายใต้สภาวะทางกายภาพที่ปกติก็มีแรงดันของน้ำสูงมาก เป็นแรงหลักที่ทำให้เซลล์กันเป็น ส่วนๆ ด้วยเหตุนี้การดึงน้ำออกจากผิวที่ถูกกันเป็นส่วนๆ จะเป็นความต้องการแรกๆของการรวมตัวของเซลล์ แบบจำลองนี้ถูกเสนอโดย Wilschut and Hoekstra (1984) กล่าวว่าเมื่อผิวจุลินทรีย์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) สูง เกิดการเกาะติดแบบผันกลับไม่ได้เกิดขึ้น ตามทฤษฎีผิวเซลล์ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นมาจากสาเหตุความสัมพันธ์การลดลงของพลังงานกิบส์ที่ผิวเซลล์ ซึ่งกลับเป็นการช่วยให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเซลล์ และเป็นตัวผลักดันให้เซลล์แยกออกจากส่วนที่เป็นไขมันด้วยตนเอง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ผิวของจุลินทรีย์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำเป็นตัวการสำคัญในกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน

เซลล์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำสามารถจะบอกปริมาณได้โดยการวัดน้ำที่ทำมุมสัมผัส ส่วนที่ไม่ชอบน้ำของเซลล์จุลินทรีย์สามารถวัดได้อย่างคร่าวๆ 3 กลุ่ม คือ ผิวเซลล์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะทำมุมสัมผัสมากกว่า 90° , ผิวเซลล์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำปานกลางจะทำมุมสัมผัสระหว่าง $50^\circ - 60^\circ$ และผิวเซลล์ส่วนที่ชอบน้ำจะทำมุมสัมผัสน้อยกว่า 40° ส่วนมากของจุลินทรีย์กลุ่มเอซิโคเจน

(Acidogen) และมีทาโนเจน (Methanogen) จากเมื่อดตะกอนที่ไม่ใช้ออกซิเจนมีสัดส่วนที่ไม่ชอบน้ำสูง อธิบายได้โดยน้ำทำมุมสัมผัสมากกว่า 45° ซึ่งกลายเป็นคำอธิบายทางกายภาพเคมีว่าทำไม จุลินทรีย์กลุ่มเอซิโดเจนมีตำแหน่งอยู่ภายนอกของเมื่อดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน

4.1.8 แบบจำลอง Surface tension

ตามทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) การสร้างเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์เป็นกระบวนการผิวสัมผัสใหม่, เมื่อดตะกอนไขมันจากการรวบรวมนั้นโดยเฉพาะผิวสัมผัสส่วนไขมันของ จุลินทรีย์ที่พบอยู่ก่อนแล้ว และโมเลกุลที่สัมผัสระหว่างจุลินทรีย์ 2 ตัวที่เกาะติดกันอย่างซับซ้อน พลังงานการเกาะติดอิสระ (Free energy of adhesion ΔG_{adh}) สามารถอธิบายได้โดยสมการที่ (10)

$$\Delta G_{adh} = 2(r_c^{1/2} - r_i^{1/2})(r_i^{1/2} - r_s^{1/2}) \quad \dots\dots(10)$$

โดย r_c แทนพลังงานอิสระบนผิวจุลินทรีย์, r_i แทนพลังงานอิสระที่ผิวส่วนที่เป็นไขมัน และ r_s แทนพลังงานอิสระบนผิวนูนภาคเนื้อ สมการนี้แสดงว่าถ้าพลังงานอิสระที่ผิวของจุลินทรีย์ต่ำกว่าของเหลว พลังงานอิสระในการรวมตัวจะลดลง ผลการรวมตัวมักจะลดพลังงานที่ผิวของตัวพาเพื่อ แนวนอนความสัมผัสที่ตรงข้ามจะเกิดขึ้นถ้าพลังงานที่ผิวของจุลินทรีย์สูงกว่าพลังงานของของเหลว ในความเป็นจริงมากกว่าสมการทางอุณหพลศาสตร์ตามทฤษฎีของแบบจำลอง Surface tension ในถังปฏิกรณ์ UASB พบว่าการรวมตัวของเซลล์ที่มีสมบัติชอบน้ำจะมากขึ้นถ้าแรงดึงผิวของของเหลว (Liquid surface tension) ถึงแม้ว่าความขัดแย้งนี้เป็นจริงสำหรับเซลล์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ขึ้นอยู่กับแรงดึงผิวของของเหลว (γ) ในถังปฏิกรณ์ UASB จุลินทรีย์โคขึ้นและรวมตัวกันอย่างค่อนข้างหลวม ในเมื่อดตะกอนที่มีเส้นใยจำนวนมาก ($\gamma < 50 \text{ mN/m}$) หรือในกลุ่มที่มีความหลากหลาย ($\gamma < 56 \text{ mN/m}$)

4.1.9 การพิจารณาแบบจำลองทางกายภาพเคมี

แบบจำลองนี้เกิดขึ้นมาเหนือคำอธิบายของแต่ละแบบจำลองทางการภาพเคมี ที่มองเฉพาะการสนับสนุนเพียง 1 หรือ 2 ปัจจัยที่จะเริ่มกระบวนการสร้างเมื่อดตะกอนในถังปฏิกรณ์ UASB ตั้งแต่ปัจจัยเหล่านั้นถูกกำหนดให้มีอิทธิพลภายใต้สภาวะแวดล้อมเฉพาะ และใน

เฉพาะขั้นตอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างเม็ดตะกอน แบบจำลองทางกายเคมีทำให้มีคำอธิบายที่ง่ายขึ้นของกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน

แบบจำลอง Inert nuclei สามารถทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น และแสดงการสร้างเม็ดตะกอน UASB ที่มักเกิดขึ้นกับอนุภาคเนื้อเยื่อในถังปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามมันเป็นหลักฐานที่แสดงว่าเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถพัฒนาได้โดยปราศจากการเติมวัสดุเนื้อเยื่อตัวอื่นๆ มันอาจเป็นจริงเพียงพอ ที่ไม่แค่เพียงการเกาะติดบนผิวของแข็งแต่การหลุดเคลื่อนที่เองของจุลินทรีย์ก็สามารถนำไปสู่การรวมกลุ่มของจุลินทรีย์ด้วย เนื่องจากแบบจำลอง Multi-valence positive ion-bonding บางการศึกษาถือว่าไอออนแคลเซียมไม่ช่วยให้เกิดการสร้างเม็ดตะกอนและการที่มีไอออนแมกนีเซียมสูงๆอาจเป็นสาเหตุที่เม็ดตะกอนแตกตัว อีกด้านหนึ่งแบบจำลอง Multi-valence positive ion-bonding นี้ไม่นับผลกระทบทางชีววิทยาใดๆของการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน งานวิจัยที่มีการรวมตัวของเมมเบรนจริงๆแล้ว Ca^{2+} เป็นสาเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงของบางกลุ่มโปรตีนหรือโพลีเปปไทด์ (Polypeptide) บนผิว ซึ่งสามารถทำให้ปฏิกริยาระหว่าง 2 พื้นผิวและเชื่อมมันเข้าด้วยกัน มันได้ถูกเสนอว่าผลประโยชน์ที่ได้ที่ได้จากการเติมแคลเซียมจากการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นไปได้ที่แคลเซียมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกริยาคีไฮเดรชัน (Dehydration) และการรวมตัวของผิวจุลินทรีย์ การเหนี่ยวนำของแคลเซียมที่นำไปให้เกิดการรวมตัวของเซลล์อาจทำให้เซลล์รวมกันเป็นกลุ่ม ซึ่งเป็นการกระทำของนิวเคลียสจุลินทรีย์ในการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ส่วนแบบจำลอง Secondary minimum adhesion ทฤษฎี DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey และ Overbeek) ไม่สามารถทำนายการแยกออกในช่วงสั้นๆของเครื่องคำนวณปฏิกริยาไฟฟ้า (Computation of electrical interaction) และไม่สนใจแรงที่ทำให้เกิดการแยกออกด้วย เช่น พันธะไฮโดรเจน และผลกระทบอื่นๆในสารละลายและพันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic bond) ซึ่งในแบบจำลอง Local dehydration และ Surface tension การสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ง่ายถ้ามีเฉพาะกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ และดังเช่นคำอธิบายพื้นฐานโดยปกติจะไม่เหมาะเนื่องจากการรวมตัวของจุลินทรีย์มีปรากฏการณ์ทางชีววิทยาที่ซับซ้อนมากและมีส่วนประกอบที่ไม่สามารถระบุได้อีกจำนวนมากรวมอยู่ด้วย อาจเป็นไปได้ที่สร้างแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์เพียงอย่างเดียว ที่จริงแล้วจุลินทรีย์มีขอบเขตไม่ชัดเจน, รูปร่างเรขาคณิตอย่างง่าย หรือตำแหน่งโมเลกุลที่เหมือนกัน เช่น จุลินทรีย์ไม่มีขอบเขตทางกายภาพของคอลลอยด์ที่ตายตัว แรงทางกายภาพเคมีเพียงอย่างเดียวที่สามารถอธิบายได้อย่างสมบรูณ์ของ

กระบวนการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ด้วยเหตุนี้มีการเสนอแนะว่าปรากฏการณ์ทางกายภาพเคมี รวมทั้งการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มักจะสัมพันธ์กับ Biological trigger ซึ่งควบคุมพวกมันอยู่

4.2 แบบจำลองโครงสร้าง

การสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน มีปัจจัยทั้งทางด้านชีววิทยา จุลชีววิทยาและอย่างอื่นมากกว่าแรงทางกายภาพเคมี ช่วงเวลา 20 ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยมากมายที่พยายามทำความเข้าใจลักษณะจุลชีววิทยาของเม็ดตะกอน UASB และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสายพันธุ์ต่างๆมากมายในเม็ดตะกอน เช่น กรณีชุดแบบจำลองโครงสร้างสำหรับการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนถูกพัฒนาให้อธิบายปรากฏการณ์ที่สังเกตได้

4.2.1 แบบจำลอง Capetown

คล้ายคลึงกับแบบจำลอง polymer-bonding ที่อธิบายให้เข้าใจได้ง่าย แบบจำลองของ Capetown กล่าวว่า ECPs ถูกผลิตโดย *Methanobacterium* สายพันธุ์ AZ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนที่ใช้ไฮโดรเจน (Hydrogen-utilizing methanogen) ภายใต้สภาวะที่มีความดันไฮโดรเจนสูงและมีซิสเทอีน (cysteine) จำกัด กรดอะมิโน (โดยเฉพาะซิสเทอีน) มักขับของเหลวออกมา การผลิตกรดอะมิโนที่มากเกินไปจะเหนี่ยวนำให้เกิดสร้าง ECPs และนอกจากนั้น *Methanobacterium* สายพันธุ์ AZ และจุลินทรีย์ตัวอื่นๆจะเข้าไปติดในโครงสร้าง ECPs เป็นการนำไปสู่การสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน (รูปที่ 7) ในแบบจำลองนี้ ECPs ที่ผลิตออกมามากเกินไปเป็นกุญแจในขั้นตอนการเริ่มสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน

4.2.2 แบบจำลอง Spaghetti

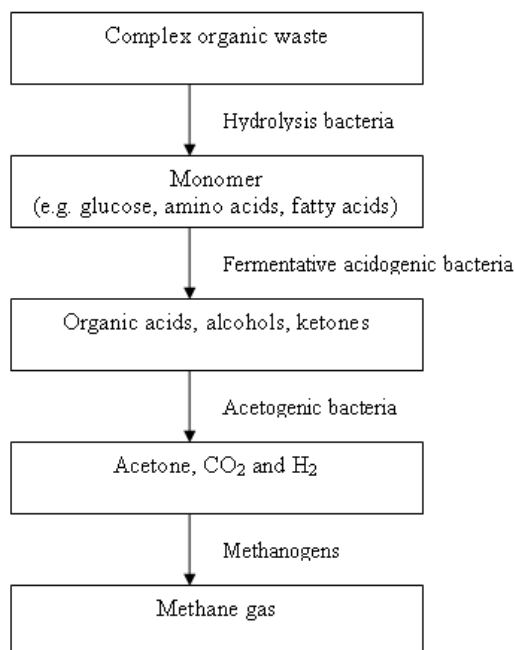
ยี่ดโครงสร้างเล็กๆของเม็ดตะกอน UASB ศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Wiegant (1998) เสนอแบบจำลองนี้สำหรับการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน แสดงการพัฒนาแรกเริ่มของการสร้างเม็ดตะกอน UASB โดยเส้นใยของ *Methanosaeta* ไปจับตัวต้นแบบ (Precursor) และสร้างเป็นตาข่าย 3 มิติต่อไป ช่วงการเจริญเติบโตของกิ่ง จุลินทรีย์ตัวอื่นๆ เช่น *Methanosarcina* จับกับตาข่ายนี้ได้ง่ายกว่า โครงสร้างที่รวมตัวจะเจริญเติบโตต่อไปเนื่องจาก

การเพิ่มจำนวนเซลล์จำนวนมากที่เกาะกับจุลินทรีย์ จนหนาแน่นขึ้นและมีรูปร่างเป็นเกลียวด้วยแรงทางอุณหพลศาสตร์จากการไหลขึ้นของของเหลวและแก๊ส มันเป็นลักษณะสำคัญของแบบจำลองนี้

4.2.3 แบบจำลอง Syntrophic microcolony

ปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวภาพของของเสียอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน มีจุลินทรีย์หลายพันธุ์เข้ามาเกี่ยวข้อง (รูปที่ 9) และสายพันธุ์เหล่านั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด ซึ่งผลิตภัณฑ์ เช่น ไฮโดรเจน และสารตัวกลางอื่นๆ (Intermediate) ที่มีประสิทธิภาพในการขนส่งกลุ่มจุลินทรีย์เฉพาะ ในแบบจำลองนี้มากกว่าข้อเสนอที่จะนำไปสู่การสร้างโคโลนี (Colony) กลุ่มเล็กๆที่เสถียร หรือคอนโซรเทีย (Consortia) คือเมื่อดตะกอนแรกๆ เมื่อดตะกอนชนิดไม่ใช้ออกซิเจนสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการรวมตัวของเซลล์ที่เสถียร, สมบูรณ์, ติดกัน, มีหลายเซลล์เชื่อมติดกันภายใต้สภาวะทางกายภาพในระบบชีวภาพ การวางตัวอย่างใกล้ชิดของจุลินทรีย์ในโครงสร้างเมื่อดตะกอนช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) อย่างชัดเจน

ในเมื่อดตะกอน UASB มีกลุ่มจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน ดำเนินการลำดับกระบวนการเมแทบอลิซึม (รูปที่ 8) และปฏิกิริยา Interspecific syntrophic จะเกิดผลดีในการกระตุ้นจุลินทรีย์ เนื่องจากความต้องการใกล้ชิด ความสัมพันธ์อย่างสุมของเซลล์กับเซลล์ในเมื่อดตะกอน UASB จะมีประสิทธิภาพเมแทบอลิซึมต่ำกว่า เพื่อให้มีประสิทธิภาพในเมแทบอลิซึมสูงเอาไว้ ความสัมพันธ์ของเซลล์เมื่อดตะกอนที่มีโครงสร้างที่รวมตัวกัน และกลไกการส่งสัญญาณไปยังกลุ่มเซลล์ Syntrophic พบจากแบบจำลอง Syntrophic microcolony มีแรงผลักดันที่จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของเมื่อดตะกอน เป็นผลมาจากความต้องการอยู่รอดของจุลินทรีย์ ความสมดุลและการรวมตัวของจุลินทรีย์หลายสายพันธุ์ที่มีปัจจัยทางชีวเคมีที่แตกต่างกันภายใต้สภาวะของเชื้อ

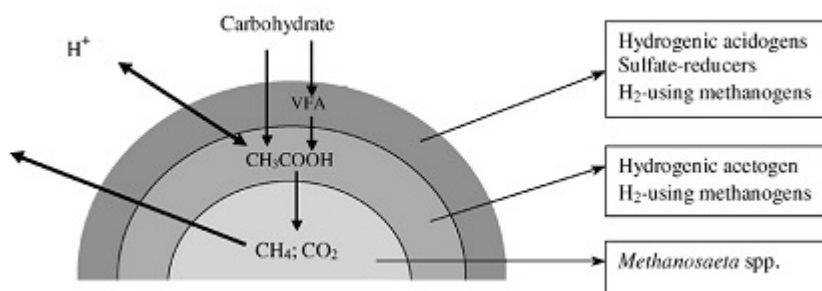


ภาพที่ 8 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของกลุ่มจุลินทรีย์

ที่มา: Yu *et al.* (2003)

4.2.4 แบบจำลอง Multi-layer

ยึดตามการสำรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบจำลอง Multi-layer ของการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นการนำเสนอแรกของ MacLeod *et al.* และ Guiot (1990, 1992) ตามแบบจำลองนี้ตำแหน่งจุลินทรีย์ของเม็ดตะกอนแตกต่างกันในแต่ละชั้น ที่ชั้นในสุดส่วนมากประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนจะเป็นนิวเคลียส จำเป็นในการที่จะพัฒนาเป็นเม็ดตะกอนต่อไป จุลินทรีย์ที่ผลิตและใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นกลุ่มที่พบมากในชั้นกลาง และสายพันธุ์ผสมรวมทั้งจุลินทรีย์ที่มีรูปร่างเป็นท่อน กลมและเส้นใยเป็นสายพันธุ์ที่พบในชั้นนอกสุด (รูปที่ 9)



ภาพที่ 9 แบบจำลอง Multi-layer

ที่มา: Yu *et al.* (2003)

4.3 ทฤษฎี Proton translocation-dehydration

ยิ่ดการพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งของโปรตอนของผิวเมมเบรนของจุลินทรีย์ ทฤษฎีนี้สำหรับการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน เริ่มจากกระบวนการดีไฮเดรชัน (Dehydration) ของผิวจุลินทรีย์, ตามด้วยการสร้างพื้นฐานของเม็ดตะกอน (Embryonic granule formation), การเจริญของเม็ดตะกอนที่โตเต็มที่ (Granulation maturation) และเม็ดตะกอนหลังจากการโตเต็มที่แล้ว (Post-maturation)

4.3.1 กระบวนการดีไฮเดรชัน (Dehydration) ของผิวจุลินทรีย์

ช่วงกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)/เอซิดิฟิเคชัน (Acidification) และการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน การขนย้ายอิเล็กตรอนจากการหายใจบนผิวจุลินทรีย์ถูกกระตุ้นการเชื่อมกันนี้ จะกระตุ้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เชื่อมหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ การเคลื่อนที่ของโปรตรอนนี้สามารถสร้างโปรตรอนเกรเดียน (Proton gradient) ขวางผิวจุลินทรีย์และสาเหตุการเคลื่อนที่ของโปรตรอนบนผิวจุลินทรีย์ที่ถูกกระตุ้นบนผิวเป็นสาเหตุในการแตกพันธะไฮโดรเจนระหว่างกลุ่มประจุลบและโมเลกุลน้ำทำให้ประจุลบบนผิวจุลินทรีย์เป็นกลางจะเกิดการเหนี่ยวนำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของผิวจุลินทรีย์

4.3.2 การสร้างพื้นฐานของเม็ดตะกอน (Embryonic granule formation)

แหล่งเก็บโปรตอน (Proton pump) บนผิวเซลล์ของจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจน (Acetogen) และมีเทนโนเจนถูกกระตุ้นผิวส่วนที่เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรชันจะมีพลังงานโปรตอนสูง โดยการกระทำของแรงอุณหพลศาสตร์ภายนอกซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกลางและไฮโดรโฟบิกอะซิโดเจน (Hydrophobic acidogen), อะซิโดเจน (Acetogen) และมีเทนโนเจน (Methanogen) อาจะติดแน่นกับสิ่งอื่น เนื่องจากแรงผลักรถของน้ำอ่อนลง การติดแน่นแข็งแรงขึ้น โดยการดึงน้ำออกจากผิวจุลินทรีย์มากขึ้นทำให้จุลินทรีย์รวมตัวได้ง่ายขึ้นประสิทธิภาพในการย้ายผลผลิตของกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์และอัตราเมทาบอลิซึมเร็วขึ้น จุลินทรีย์จะรวมตัวกันเป็นพื้นฐานของเม็ดตะกอน

4.3.3 เม็ดตะกอนเจริญเต็มที่ (Granulate maturation)

ด้วยการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องและจุลินทรีย์มากมายที่อยู่ในเม็ดตะกอนพื้นฐาน จุลินทรีย์ที่ฟุ้งกระจายบางตัวที่อยู่ในอาหารอาจจะเกาะติดกับเม็ดตะกอนพื้นฐาน และรวมเป็นแบคทีเรียลคอนโซเรเทีย ในเม็ดตะกอนพื้นฐานที่ไม่มีกระบวนการเมทาบอลิซึมของมีเทนโนเจนิก การกระจายแต่ละกลุ่มของจุลินทรีย์ขึ้นกับตำแหน่งของการเคลื่อนย้ายของตัวกลางที่เผาผลาญ (Intermediate metabolites) ซึ่งทางที่มีประสิทธิภาพที่สุด สำหรับจุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้ออกซิเจนที่เคลื่อนย้ายตัวกลาง ผลที่ได้จะไปสร้างกลุ่มแบคทีเรียลคอนโซเรเทีย ที่มีการเรียงตัวที่คล้ายเป็นเม็ดตะกอนที่โตเต็มที่

4.3.4 เม็ดตะกอนหลังการเติบโตเต็มที่ (Post-Maturation)

โปรตอนของจุลินทรีย์ที่เคลื่อนที่ในเม็ดตะกอนที่โตเต็มที่แล้วจะรักษาผิวจุลินทรีย์ที่สภาวะไม่ชอบน้ำ ที่ถูกบังคับโดยกลไก Photon translocation-dehydration และป้องกันเม็ดตะกอนจะชนกับฟองก๊าซและแรงเค้นภายในถังปฏิกิริยา

4.4 แบบจำลอง Cell-to-cell communication

ถึงแม้ว่ามีหลายกลไกและแบบจำลองของการสร้างตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน

แต่ไม่มีอันไหนที่จะอธิบายกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ นานมาแล้วที่การติดต่อสื่อสารภายในเซลล์ และความร่วมมือของเซลล์จำนวนมากทราบว่าเป็นทางที่มีประสิทธิภาพสำหรับจุลินทรีย์ที่จะสร้างเป็นโครงสร้างที่จัดแบบช่องว่างให้สำเร็จ กลุ่มตัวอย่างที่เห็นเด่นชัดคือลักษณะกลุ่มของจุลินทรีย์ เนื่องจากสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเซลล์จะปล่อยให้ประชากรของจุลินทรีย์เลือกทางที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เร็ว ๆ นี้ได้มีการวิจัยที่ได้อธิบายกลไกการสื่อสารของเซลล์ต่อเซลล์ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการพัฒนาการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน และสร้างโครงสร้างที่จัดแบบช่องว่างเป็นจุลินทรีย์ที่เป็นเม็ดตะกอนที่จะตอบสนองความเครียดทางสิ่งแวดล้อม ในความเป็นจริงการรวบรวมจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่สังเกตได้ว่าการรวมตัวที่เด่นชัดของสายพันธุ์และเมทาบอลิซึมที่เด่นชัดเกิดขึ้นภายในเม็ดตะกอน UASB

ในรูปที่ 9 แสดงจำนวนกลุ่มที่แตกต่างกันของจุลินทรีย์นำทางตามลำดับกระบวนการเมทาบอลิซึมในกระบวนการสร้างเม็ดตะกอน UASB การใช้ประโยชน์ของเสียที่ต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ จุลินทรีย์จะรวมเป็นโครงสร้างที่จัดแบบช่องว่าง (รูปที่ 5) จากการสรุปโดย Shapiro (1998) ผลประโยชน์ของการรวมกลุ่มโครงสร้างจุลินทรีย์รวมถึงการสร้างจำนวนอย่างมีประสิทธิภาพ การเข้าถึงแหล่งอาหารและซอกที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์โดย Isolate cell การอยู่รวมเป็นกลุ่มจะป้องกันสิ่งที่เป็นอันตรายมากกว่าการกำจัดเซลล์ที่แยกตัวออกและความเหมาะสมของประชากรที่มีชีวิตโดยความแตกต่างของชนิดเซลล์ที่เด่นชัด มันเป็นสิ่งที่สนับสนุนหลักฐานจากการทดลองที่เม็ดตะกอน UASB จะมีความต้านทานมากกว่า เม็ดตะกอนแขวนลอยที่มีพิษจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ โลหะหนักและสารพิษกลุ่มอะโรมาติกในน้ำเสีย

ในถึงปฏิกิริยา UASB มักพบเสมอว่า การเปลี่ยนแปลงสารประกอบในน้ำเสียเป็นผลมาจากการชะของเม็ดตะกอนที่ฐานที่สร้างขึ้นในระยะเวลาสั้นๆ ปรากฏการณ์นี้สามารถให้เหตุผลที่อธิบายกลไกการสื่อสารระหว่างเซลล์กับเซลล์ คำอธิบายที่ง่ายกว่ากล่าวว่า จุลินทรีย์ในเม็ดตะกอน UASB ไม่กระจัดกระจายแบบสุ่มแต่มีกรรวมตัวเพื่อสนองความต้องการสำหรับสารอินทรีย์ตั้งต้น นั่นคือ โครงสร้างที่จัดแบบช่องว่างของเม็ดตะกอน UASB ถูกพัฒนาเพื่อจัดการกับความอดทนที่บังคับโดยสารตั้งต้นที่ให้และความสอดคล้องของกระบวนการเมทาบอลิซึม เมื่อสารประกอบของน้ำถูกเปลี่ยนแปลงเม็ดตะกอน UASB ที่มีจุลินทรีย์รวมอยู่ต้องรวมตัวกันอีกครั้งเพื่อกระจายตัวให้เต็มช่องว่างและโครงสร้างจะปรับให้เข้ากับกระบวนการเมทาบอลิซึมใหม่ที่ต้องการ สำหรับการออกซิเดชันของสารอินทรีย์ตั้งต้นที่มีอยู่ ในความเป็นจริงสารตั้งต้นสามารถเปลี่ยนแปลงโดยการเหนี่ยวนำของสารตั้งต้นที่เคลื่อนที่ถูกรายงานไว้ในกระบวนการเกิดไบโอฟิล์มของเชื้อ เช่น สารตั้ง

ต้นที่เปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำสารตั้งต้นให้รวมกลุ่มอีกครั้งเป็นผลมาจากการแตกออกเพียงบางส่วนหรือทั้งหมดของเม็ดตะกอน UASB ที่โตขึ้นมากับสารตั้งต้นตัวแรก จากการสำรวจการชะของส่วนเชื่อมหุ้มตะกอนเป็นผลมาจากสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงจากสาเหตุการแตก หักของเม็ดตะกอน ซึ่งพบในแบบจำลองนี้

4.5 แบบจำลองทั่วไปของการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน

สำหรับจุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้ออกซิเจนที่จะสร้างเม็ดตะกอน แรงที่ช่วยทางกายภาพ, เคมีและชีวภาพในกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนซึ่งไม่สามารถแยกออกจากกันได้ นานมาแล้วที่แต่ละแบบจำลองจะเสนอง่ายๆ แต่ไม่สามารถอธิบายได้อย่างมีเหตุผลของกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้อย่างสมบูรณ์ ยึดตามกลไกที่มีอยู่จริงของกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจะสนับสนุนแบบจำลอง Four-step สำหรับการสร้างเม็ดตะกอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนแรก : การเคลื่อนที่ทางกายภาพของการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์ หรือการเกาะติดของจุลินทรีย์กับนิวเคลียส แรงที่ใช้ในขั้นตอนนี้คือ

- แรงการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic force)
- แรงการแพร่ (Diffusion force)
- แรงโน้มถ่วง (Gravity force)
- Thermodynamic force เช่น การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement)
- การเคลื่อนที่ของเซลล์ เซลล์สามารถเคลื่อนที่โดยแฟลเจลล่า (Flagella), ซีเลีย (Cilia) และชูโดพอด (Pseudopods) ซึ่งเซลล์สามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางได้โดยกลไกสัญญาณ

ขั้นตอนที่ 2 : แรงที่ใช้ในการยึดเกาะแรกๆ จะสร้างให้เซลล์หลายเซลล์ยึดติดกันอย่างเสถียร แรงทางกายภาพ ได้แก่

- แรงวาน เดอ วาล์ว (Van der Waal force)
- การดึงดูดของประจุตรงข้าม (Opposite charge attraction)

- แรงทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic force) รวมทั้งพลังงานอิสระของผิวหรือแรงตึงผิว
- ไฮโดรโฟบิกซิตี (Hydrophobicity)
- จุลินทรีย์กลุ่มเส้นใยที่สามารถเชื่อมหรือจับเซลล์รวมเข้าด้วยกัน

ควรให้ความสนใจพื้นผิวของจุลินทรีย์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจำเป็นต่อการสร้างไบโอฟิล์มหรือเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ตามทฤษฎีอุณหพลศาสตร์การเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำบนผิว จุลินทรีย์จะสัมพันธ์กับการลดพลังงานกิบบ์ที่ผิว แต่กลายเป็นการช่วยให้เกิดการเกาะติดของเซลล์กับเซลล์ และมีแรงผลักดันให้เซลล์รวมตัวกันเองออกมาจากส่วนที่เป็นของเหลว (Hydrophilic phase)

แรงทางเคมี ได้แก่

- การติดต่อของไฮโดรเจน (Hydrogen liaison)
- การสร้างคู่อิออนิก (Formation of ionic pairs)
- การสร้างไอออนิกสามคู่อิออนิก (Formation of ionic triplet)
- การเชื่อมระหว่างอนุภาคและตัวอื่น (Interparticulate bridge and so on)

แรงทางชีวเคมี ได้แก่

- การดึงน้ำออกที่ผิวเซลล์ (Cellular surface dehydration)
- การรวมเมมเบรนของเซลล์ (Cellular membrane fusion)
- การส่งสัญญาณและการกระทำร่วมกันของกลุ่มจุลินทรีย์

สามารถอธิบายได้โดยทฤษฎี Proton translocation-dehydration ที่ผิวเซลล์จะดึงน้ำออกและเมมเบรนจะรวมเข้าด้วยกันกลายเป็นจุดเริ่มของการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจะสัมพันธ์กับการรวมตัวกันเองของจุลินทรีย์ที่จะช่วยจัดโครงสร้างเป็นช่องว่าง

ขั้นตอนที่ 3 : แรงของจุลินทรีย์ที่ทำให้เซลล์เจริญเติบโตเต็มที่

- การสร้างโพลิเมอร์ของภายนอกเซลล์โดยจุลินทรีย์ เช่น เอ็กโซโพลิแซคาไรด์

เป็นต้น

- การเจริญเติบโตของกลุ่มเซลล์
- การเปลี่ยนแปลงเมแทบอลิซึมและความสามารถทางพันธุกรรมที่เหนียวแน่นโดยสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้ปฏิกริยาระหว่างเซลล์เกิดได้ง่ายขึ้น และผลลัพธ์ในการเรียงตัวของโครงสร้างจุลินทรีย์

ขั้นตอนที่ 4 : การรวมตัวเป็นโครงสร้าง 3 มิติที่คงตัวแล้วโดยแรงเค้นทางการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hydrodynamic shear force) การรวมตัวของจุลินทรีย์สุดท้ายจะมีรูปร่างตามแรงเค้นทางการเคลื่อนที่ของของเหลว รูปร่างภายนอกและขนาดของจุลินทรีย์ที่รวมตัวกันถูกกำหนดโดยปฏิกริยาระหว่างการรวมตัวและแรงเค้นทางการเคลื่อนที่ของของเหลว สายพันธุ์ของจุลินทรีย์และอัตราภาระบรรทุกสารตั้งต้น

แบบจำลอง Four-step model สำหรับการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนพยายามครอบคลุมความเข้าใจของการสร้างเม็ดตะกอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เป็นไปได้ที่จะระบุเหตุการณ์ทั้งหมดทางวิศวกรรมที่สัมพันธ์กับการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนให้ง่ายขึ้น แต่เหตุการณ์ระดับจุลินทรีย์หรือพันธุกรรมยังต้องการความเข้าใจที่ลึกซึ้งของกลไกที่สัมพันธ์กับการสร้างเม็ดตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจน

5. การศึกษากระบวนการเกิดเม็ดตะกอน

Nery *et al.* (2008) ได้ศึกษาลักษณะของเม็ดตะกอนโดยมองตามความสูงของถังปฏิกริยา UASB ขนาดที่ใช้จริง ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ปีก โดยถังปฏิกริยามีขนาด 450 m³ ระยะเวลาในการทดลอง 1.228 วัน สามารถลดค่า COD เฉลี่ยประมาณ 85% พบเม็ดตะกอน 3 ชนิด แบ่งตามความสูงของถังปฏิกริยา เม็ดตะกอนส่วนมากที่พบมีขนาด 0.6 – 1.5 mm. แสดงว่าเป็นการทำงานแบบยี่ระยะเวลา เม็ดตะกอนเป็นไปได้ที่กำลังเจริญเติบโตหรือกำลังเสื่อมสลาย หรืออาจเป็นไปได้ทั้งคู่ ในเม็ดตะกอนมีโครงสร้างไม่เป็นเลขอร์ พบว่ามีจุลินทรีย์กลุ่ม Methanogen ที่ชื่อ *Archea* ในทุกส่วนของถังปฏิกริยา

Franco *et al.* (2006) ได้ศึกษาผลกระทบจากระบบจังหวะ (Pulse system) ในถังปฏิกริยา Anoxic upflow sludge bed (USB) denitrification เพื่อให้มีการสร้างเม็ดตะกอนได้เร็วยิ่งขึ้น โดยใช้ถังปฏิกริยาขนาด 0.8 L จำนวน 3 ถัง (สองถังแรกจะมีการควบคุมการทำงานแบบระบบจังหวะ P1 มีการ

รีไซเคิลน้ำออก และ P2 ไม่มีการรีไซเคิลน้ำออก NP ไม่มีการใช้ระบบจางหะ) ได้ป้อนสารละลายผสมระหว่าง NaNO_3 และกลูโคสแก่เม็คตะกอนที่มีจุลินทรีย์กลุ่มมีทาโนเจนอยู่ ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์และอัตราภาระบรรทุกไนโตรเจนเพิ่มขึ้น และในช่วงท้ายการทดลองมีค่าต่ำมาก ($67.5 \text{ kg COD/m}^3\cdot\text{d}$ และ $11.25 \text{ kg N-NO}_3/\text{m}^3\cdot\text{d}$) แอมโมเนียและไนไตรท์สะสมในถังปฏิกิริยา NP จำเป็นมากในช่วงที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว ประสิทธิภาพในการลดไนโตรเจน 20% ขณะที่ในถังปฏิกิริยา P1 มีปริมาณไนไตรท์ต่ำ สังเกตได้ในช่วงท้ายของการทดลอง ในถังปฏิกิริยา P2 สามารถกำจัดไนโตรเจนได้ 100% ปัญหาในการควบคุม(การลอยและเกิดการชะต่อมาของชีวมวล) พบในถังปฏิกิริยา NP เมื่ออัตราภาระบรรทุกของการลดไนโตรเจน (Denitrification loading rate) สูง ขณะที่ในถังปฏิกิริยา P1 และ P2 ไม่พบปัญหาดังกล่าว เนื่องจากลักษณะของการพัฒนาตะกอนเป็นหลัก และประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนโดยการไหลที่เป็นจางหะ ตะกอนในถังปฏิกิริยา NP จะมีโครงสร้างเป็นกลุ่มและเม็คตะกอนที่มีจุลินทรีย์กลุ่มมีทาโนเจนในตอนแรกแตกหมด ขณะที่เม็คตะกอนขนาดเล็กของชีวมวลมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงพบในถังปฏิกิริยาที่มีการควบคุมจางหะ เนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้น

Yu *et al.* (2008) ได้ศึกษาการสร้างเม็คตะกอนไนตริฟายอิง (Nitrifying) ที่เสถียรระยะยาวในถังปฏิกิริยา SBR โดยถังปฏิกิริยาขนาด 2.0 L นำน้ำออกจากส่วนกลางของถังอัตราส่วน 50% ระยะเวลาที่ใช้ในการถ่ายน้ำเข้าและออกเท่ากับ 3 และ 6 นาทีตามลำดับ ส่วนระยะเวลาของวงจรและตกตะกอนจะเปลี่ยนแปลงตามช่วงการควบคุม เริ่มเดินระบบโดยใช้เม็คตะกอนไนตริฟายอิงที่มีขนาดเฉลี่ย $127 \mu\text{m}$. และ SVI_{30} เท่ากับ 112 mL/g . ใช้ระยะเวลาการทดลอง 411 วันผลการทดลองพบว่าในวันที่ 21 ใช้ระยะเวลาคตกตะกอน 10 นาที เม็คตะกอนที่ได้มีขนาด $240 \mu\text{m}$. และ SVI เท่ากับ 40 mL/g เมื่อใช้ระยะเวลาคตกตะกอน 15 นาที ตั้งแต่วันที่ 57-183 ของการทดลองไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของตะกอนและส่วนของฟล็อกที่แขวนลอย นอกจากนี้เม็คตะกอนไนตริฟายอิง สามารถทนการเปลี่ยนแปลงการแปรผันของของอัตราภาระบรรทุกของไนโตรเจนในช่วง $0.72\text{-}1.8 \text{ g/L}\cdot\text{d}$ ตลอดช่วงการทดลอง 2 เดือน โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอย่างใดก็ตามสังเกตได้ว่าการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์เพื่อเปลี่ยนเป็นไนเตรทและเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันบางส่วนที่เปลี่ยนเป็นไนไตรท์ โดยตะกอนจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนความเข้มข้นแอมโมเนียในไนโตรเจนในน้ำเข้า ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมที่ต้องการรักษาความเสถียรของกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์หรือกระบวนการไนตริฟิเคชันเพียงบางส่วนภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแอมโมเนียในไนโตรเจนในน้ำเข้าและอัตราภาระบรรทุกไนโตรเจน

6. การศึกษาดังปฏิกิริยาที่มีไบโอฟิล์ม

Park *et al.* (2004) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถังปฏิกิริยาชนิด Fixed-bed biofilm ที่มีจุดปล่อยตะกอนและระบบการล้างย้อน โดยใช้ถังเก็บน้ำขนาด 0.66 m^3 และถังปฏิกิริยาชนิด Fixed-bed biofilm ที่มีปริมาตร 1.0 m^3 (55 mm. x 1,350 mm.x 1500 mm.) ภายในมีตัวกลางเซรามิกซ์บรรจุอยู่ (ยาว 25 mm. เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 25 mm. และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 17 mm.) มีระบบการล้างย้อนด้วยน้ำและอากาศ ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชน, ร้านอาหาร, น้ำฝนและน้ำส้วม จะเก็บกักไว้ในถังเก็บน้ำ แล้วมีการสูบไปยังถังปฏิกิริยาที่มีระยะเวลา HRT 6 ชม. ระยะเวลาการทดลอง 360 วัน พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด BOD และ TSS เท่ากับ 87.3% และ 86.8% ตามลำดับ ระบบการล้างย้อนจะช่วยกำจัดไบโอฟิล์มส่วนเกิน และจุดปล่อยตะกอนจะกำจัด TSS ที่อยู่ส่วนล่างของถังปฏิกิริยาและไบโอฟิล์มส่วนเกินออก

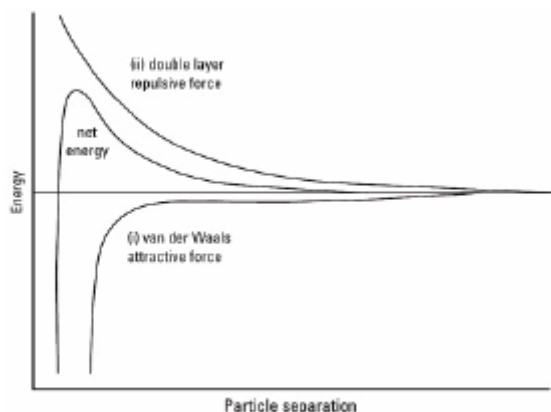
Trigo *et al.* (2006) ได้ศึกษาการเริ่มต้นกระบวนการอนาโมกซ์ ในถังปฏิกิริยาที่มีไบโอฟิล์ม โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบจำลอง Submerge ultrafiltration hollow fibre membrane เป็นระบบ Membrane SBR (MSBR) ที่มีขนาด 5.1 L ทำงานที่อุณหภูมิ 35°C มีการกวนผสมภายใน ภายในบรรจุเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน $0.04 \mu\text{m}$. ใส่เม็ดตะกอนชนิด Ananerobic ammonium-oxidation granular ความเข้มข้น 0.125 g/L มีค่า Specific anammox activity เท่ากับ 0.3 g./g.d มีการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 3 ชนิด หนึ่งรอบของการทำงานระบบแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงแรกจะมีการเติมน้ำเสียสังเคราะห์และกวนผสมเป็นเวลา 330 นาที ช่วงที่สองตกตะกอนเป็นเวลา 9 นาที ช่วงที่สามมีการกรองของเหลวออกจากถังปฏิกิริยาใช้เวลา 18 นาที และช่วงที่สี่มีการล้างย้อนเป็นเวลา 3 นาที โดยในหนึ่งรอบจะใช้ระยะเวลา 6 ชม. ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ช่วงตามลักษณะของน้ำเสียที่ใส่เข้าไปในระบบ โดยจะประสบความสำเร็จในช่วงที่ 3 ของการทดลองเพราะมีอัตราการกำจัดไนโตรเจนสูงที่สุดในช่วงที่ 3 (700 mg./L.d) ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 73.5% พบกลไกการทำงานของอนาโมกซ์ในระบบและเกิดการสร้างเม็ดตะกอนที่มีช่วงการตกตะกอนสูง

Tsushima *et al.* (2007) ได้พัฒนาดังปฏิกิริยาไบโอฟิล์มที่มีอนาโมกซ์จำนวนมาก โดยใช้ถังปฏิกิริยาที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 50 mm. สูง 500 mm. สามารถบรรจุของเหลวได้ 0.8 L ภายในมีแผ่นที่เป็นใยขนาด 12.5 cm. x 2.0 cm. x 0.8 cm. เพื่อให้เกิดไบโอฟิล์ม มีพื้นที่ผิวสัมผัส 500 m^2 ถูกเติมเข้าไป 5% ของปริมาตรถังปฏิกิริยา มีการคัดเลือกตะกอนจากแหล่งที่มีอนาโมกซ์มากที่สุดใช้วิธีตรวจสอบโคดอน PCR ชนิด Real-time (RTQ-PCR) นำไปใส่ในถังปฏิกิริยา อาหาร

เลี้ยงเชื้อจะมีการเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชม. มีการแปรผันความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนไตรต์จาก 20 – 550 mg.N/L และ 20 – 460 mg.N/L ตามลำดับ และลดระยะเวลา HRT จาก 8 ชม. เป็น 1.4 ชม. ควบคุมอุณหภูมิที่ 37 °c พบว่าในถังปฏิกิริยาสามารถกำจัดไนโตรเจนเท่ากับ 26.0 kg.N/m².d ภายในระยะเวลา 250 วัน มีการตรวจสอบปริมาณอนาม็อกซ์บนเส้นใยโดยใช้วิธี FISH พบว่ามีอนาม็อกซ์มากกว่า 70% ของแบคทีเรียทั้งหมด และแบคทีเรียกลุ่ม Aerobic ammonium-oxidation และอนาม็อกซ์บนผิวไบโอฟิล์ม มีอัตราการกำจัดไนโตรเจนเฉพาะเท่ากับ 1.6 kg.N/kg.VSS.d มีอัตราส่วนของแอมโมเนียที่ใช้ไป, ไนไตรต์ที่ใช้ไปและไนเตรดที่ผลิตขึ้นในไบโอฟิล์มเท่ากับ 1:1.1:0.33 ซึ่งมีค่าเหมือนกับที่ได้จากการทดลองของอนาม็อกซ์ (1:1.31±0.06:0.22±0.02) ระยะเวลา HRT ที่ลดลง ทำให้มีอัตราการบรรทุกไนโตรเจนสูงขึ้น

7. ทฤษฎี DLVO

ทฤษฎี DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey และ Overbeek) อธิบายถึงความเสถียรของสารคอลลอยด์ในของเหลว ซึ่งจะมีความสมดุลกันระหว่างแรง 2 แรง คือ แรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic repulsion) และแรงดึงดูดซึ่งเกิดจากแรง van der waals (van der waals attraction) แรงปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 ปฏิกิริยาสามารถแสดงได้แรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตย์จะมีความสำคัญเมื่อสารคอลลอยด์ 2 อนุภาคเข้าใกล้กันและ Double layer มีการแทรกสอดกัน ดังนั้นจึงต้องการแรงที่จะเอาชนะแรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตย์ กราฟของแรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตย์บ่งบอกถึงพลังงานที่จะต้องเอาชนะถ้าอนุภาคมีแรงกระทำซึ่งกันและกัน โดยจะมีค่ามากที่สุดเมื่ออนุภาคสัมผัสกัน และจะลดลงจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ภายนอกของ Double layer ค่าที่มากที่สุดจะเกี่ยวข้องกับ Surface potential และ Zeta potential



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและการแยกกันของอนุภาค

ที่มา : Hiemenz and Rajagopalan (1997)

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) ของ Double layer มารวมกับแรงดึงดูดซึ่งเกิดจากแรง van der waals (van der waals attraction) (Bhattacharjee *et al.*, 1998) ซึ่ง W คำนวณจากผลรวมของแรงผลักซึ่งเกิดจากไฟฟ้าสถิตย์, V และแรง van der waals, A_{vdw} ตามสมการที่ (11)

$$W = V + A_{vdw} = 2\pi\epsilon\epsilon_0\Psi_0^2\text{EXP}(-\kappa D) - \frac{A121r}{12D} \quad \text{.....(11)}$$

การเปลี่ยนหน่วยความยาว Debye สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12) (Shaw, 1992; Israelachvili, 1992)

$$\kappa = \left(\sum_i \frac{2\rho_{\infty,i} e^2 z_i^2}{\varepsilon \varepsilon_0 kT} \right)^{1/2} = \left(\sum_i \frac{2N_A C_i e^2 z_i^2}{\varepsilon \varepsilon_0 kT} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(12)$$

ซึ่ง $\rho_{\infty,i}$ แทนค่าความหนาแน่นของไอออน i ในสารละลาย (m^{-3}), N_A แทน Avogadro's number (mol^{-1}), C_i แทนความเข้มข้นของไอออน i ($\text{mol}^{-1}\text{m}^{-3}$), e แทนประจุ (C), z_i แทนเลขวาเลนซ์ของไอออน i, k แทนค่าคงที่ Boltzmann ($\text{J}^{-1}\text{K}^{-1}$), และ T แทนอุณหภูมิ (K)

ค่า A เป็นปฏิกิริยาระหว่างเชื้อ ANAMMOX และ Media ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (13) ตามทฤษฎี Lifshitz (Israelacvili, 1992)

$$A = \frac{3}{4} kT \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon}{\varepsilon_1 + \varepsilon} \right) \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon}{\varepsilon_2 + \varepsilon} \right) + \frac{3h\nu_e}{8\sqrt{2}} \frac{(n_1^2 - n^2)(n_2^2 - n^2)}{(n_1^2 + n^2)^{1/2} (n_2^2 + n^2)^{1/2} \left\{ (n_1^2 + n^2)^{1/2} + (n_2^2 + n^2)^{1/2} \right\}} \dots\dots\dots(13)$$

ซึ่ง h คือค่าคงที่ของ Planck (J-s) ν_e คือความถี่ของการดูดซับ (s^{-1}) ε_1 ค่าคงที่ Dielectric ของ Media ε คือค่าคงที่ Dielectric ของ Anammox, ε_2 ค่าคงที่ Dielectric ของน้ำ n_1 คือ Refractive index ของ media n_2 คือ Refractive index ของ Anammox, n คือ Refractive index ของน้ำ

สำหรับปฏิกิริยาพลังงานระหว่างฟองอากาศและคอลลอยด์ แรงผลักไฟฟ้าสถิต Double layer, V , สามารถคำนวณได้จากสมการ ซึ่งตั้งสมมุติฐานว่าประจุคงที่และเป็นเส้นตรงตามสมการที่ (14)

$$V = \left(\sum_i N_A C_i \right) \frac{128\pi kT}{\kappa^2} \gamma_1 \gamma_2 \frac{rR}{(r + R + D)} \exp(\kappa D) \dots\dots\dots(14)$$

$$\gamma_j = \tanh\left(\frac{y_i}{4}\right), j = \text{either } 1 \text{ or } 2 \dots\dots\dots(15)$$

ซึ่ง R คือค่าเฉลี่ยรัศมีของตัวกลาง y_i คือการลดลงของ Potential ที่ระยะห่างใดๆจากพื้นผิววัสดุที่ 1 และ 2 ในกรณีคอลลอยด์และฟองอากาศ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16)

$$y_i = \frac{\Psi}{kT} \left(\sum_i z_i e \right)$$

.....(16)

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณข้างต้นสามารถคำนวณได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ใช้ในการคำนวณ Interaction energy ตามทฤษฎี DLVO

พารามิเตอร์	ค่าคงที่	ที่มา
Dielectric constant, ϵ		
Sand	5	Anonymous (n.d.)
Ceramic	2.3	Anonymous (n.d.)
GAC	2	Anonymous (n.d.)
Cell membrane	9	Anonymous (n.d.)
Water	78	Anonymous (n.d.)
Permittivity in free space, ϵ_0 , ($C^2 \cdot J^{-1} \cdot m^{-1}$)	8.85×10^{-12}	
Surface potential, Ψ , (V)		
Sand	-90	Truesdail et al.(1998)
Ceramic	-0.03	Radovic (2000)
GAC	-0.13	Radovic (2000)
Cell membrane	-36.5	Truesdail et al.(1998)
Hamaker constant, A, (J)		
Sand	6.62×10^{-21}	Calculated
Ceramic	1.17×10^{-20}	Calculated
GAC	1.94×10^{-20}	Calculated
Cell membrane	7.14×10^{-21}	Calculated
Avogadro's number, NA, (mol^{-1})	6.022×10^{23}	
Electronic charge, e, (c)	2.56×10^{-38}	
Boltzmann's constant, k, ($J \cdot K^{-1}$)	1.381×10^{-23}	
Absolute temperature, T, (K)	298	

ตารางที่ 1 (ต่อ)

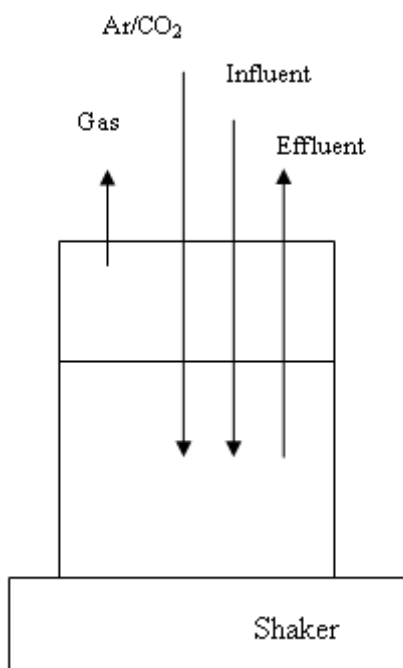
พารามิเตอร์	ค่าคงที่	ที่มา
Planck's constant, h , (J-s)	6.626×10^{-34}	
Absorption frequency for water, ν_e , (s^{-1})	3.0×10^{15}	
Refractive index, n_i		
Sand	1.45	Reed (2009)
Ceramic	1.59	Reed (2009)
GAC	1.83	Reed (2009)
Cell membrane	1.47	Reed (2009)
Water	1.33	Reed (2009)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. แบบจำลองถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบ SBBR

แบบจำลองถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบ SBBR ทำจากขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL. จำนวน 4 ขวด เพื่อศึกษาการจับตัวเป็นเม็ดตะกอน การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 11



ภาพที่ 11 แบบจำลองถังปฏิกรณ์แบบ SBBR

2. ถังเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

ถังเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เป็นถังพลาสติกที่มีฝาปิด ขนาด 4 L จำนวน 1 ถัง

3. เครื่องเขย่า (Shaker)

เครื่องเขย่าตั้งไว้ที่ 60 rpm เพื่อทำการกวนผสมถึงปฏิกิริยา

4. อังก๊าซผสม Ar/CO₂

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

5. น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยแอมโมเนียและไนไตรท์เป็นหลัก เพื่อเป็นอาหารของจุลินทรีย์ในกลุ่มอนาแอโรบิก น้ำเสียสังเคราะห์จะทำการเตรียมทุก ๆ วันเพื่อหลีกเลี่ยงการระเหยของแอมโมเนีย รายละเอียดของส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์

สารอาหาร	ความเข้มข้น
(NH ₄) ₂ SO ₄	42 mg N/L
NaNO ₂	54.6 mg N/L
KH ₂ PO ₄	18 mg/L
KHCO ₃	1,250 mg/L
CaCl ₂ ·7H ₂ O	474 mg/L
MnSO ₄ ·7H ₂ O	526.3 mg/L
FeSO ₄ /EDTA	7.6/18.6 mg/L
Trace element	
No.1	1 mL/L
No.2	1 mL/L

Trace elements No. 1: 5 g/L EDTA, 5 g/L FeSO_4 .

Trace elements No. 2: 15 g/L EDTA; 0.43 g/L $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0.24 g/L $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 0.99 g/L $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 0.25 g/L $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; 0.22 g/L $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 0.19 g/L $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; และ 0.21 g/L $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

ที่มา: Noophan *et al.* (2009)

6. ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองได้แก่ GAC, ทราช และ เซรามิก คัดขนาดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 500-600 μm โดยใช้ sieve นำไปล้างด้วยน้ำจนสะอาด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °c ตลอคคืน

วิธีการ

1. ทำการทดลองในแบบจำลองถึงปฏิกิริยาไร้อากาศแบบ Batch เริ่มต้นดำเนินการระบบโดยเลือกตะกอนจุลินทรีย์ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 3

2. ดำเนินการทดลองโดยทำการแปรผันของชนิดตัวกลางที่เติมลงไป เพื่อใช้เป็นแกนกลางของจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะ จำนวน 4 การทดลองดังนี้

- ก. การทดลองที่ 1 เติมทราช
- ข. การทดลองที่ 2 เติมเซรามิก
- ค. การทดลองที่ 3 เติม GAC
- ง. การทดลองที่ 4 ไม่เติมตัวกลาง

ในแต่ละการทดลองจะทำการเติมตัวกลางชนิดต่างๆ ลงไปในปริมาณ 2 g ทำการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง

3. นำน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 ml. เชื้อตะกอนอนาม็อกซ์ 100 ml. และตัวกลางปริมาณ 2 g. ลงในถังปฏิกิริยา เป่าก๊าซ Ar/CO_2 ระยะเวลา 5 นาที เพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากถังปฏิกิริยา แล้วนำถังปฏิกิริยาไปเขย่าเพื่อให้กวนผสมในเครื่อง Shaker

4. เมื่อถึงเวลาเปลี่ยนถ่ายน้ำ รอให้ตกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที ถ่ายส่วนน้ำใสออก นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเป่าก๊าซ Ar/CO₂ ระยะเวลา 5 นาทีแล้ว ใส่ในถังปฏิกริยาปริมาตร 100 mL. แล้วทำการเป่าก๊าซ Ar/CO₂ ระยะเวลา 5 นาที เพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากถังปฏิกริยาออกให้หมด แล้วจึงนำไปใส่ในเครื่อง Shaker

5. ทำการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ pH, Temp, ORP, Alk, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N วิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนในระบบ โดยวิธีการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์และวิธีการทดลองที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	อุปกรณ์ที่ใช้/วิธีการทดลอง
อุณหภูมิ	Temperature meter
พีเอช (pH)	pH meter
โออาร์พี (ORP)	ORP meter
ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)	Standard method (2320 Alkalinity)
ไนโตรเจน (NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻)	Standard method (4500 Nitrogen)

2.6 ศึกษารูปแบบการจับตัวของเม็ดตะกอน อธิบายโดยใช้ทฤษฎี DLVO เปรียบเทียบกับภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope, SEM)

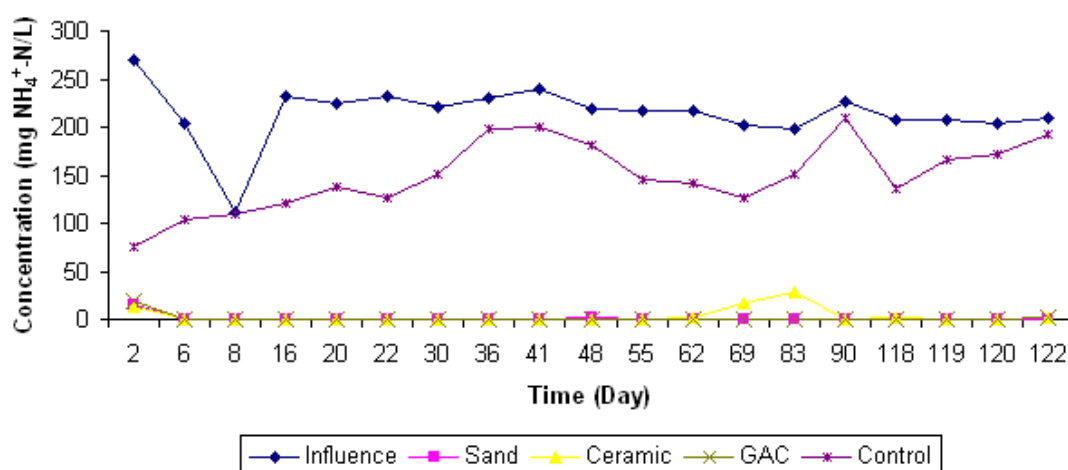
ผลและวิจารณ์

ผล

1. การกำจัดไนโตรเจน

1.1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย

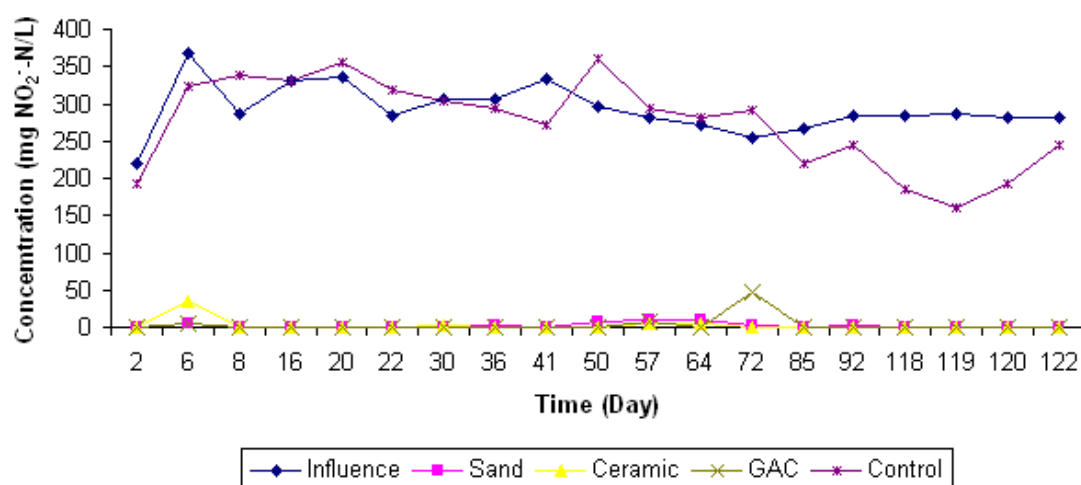
ในการทดลองความเข้มข้นของแอมโมเนียเฉลี่ยในน้ำเข้าเท่ากับ 214.5 mg N/L ความเข้มข้นของแอมโมเนียเฉลี่ยในน้ำออกของถังปฏิบัติการที่บรรจุตัวกลาง ทราช เซรามิก เม็ดถ่านกัมมันต์ และไมไ่สตัวกลางเท่ากับ 0.93 ± 3.32 , 3.39 ± 7.80 , 1.18 ± 4.37 และ 149.80 ± 36.40 mg N/L ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 99.64 ± 1.23 , 98.39 ± 3.84 , 99.54 ± 1.63 และ 28.90 ± 17.64 % ในถังปฏิบัติการที่บรรจุตัวกลาง ทราช เซรามิก เม็ดถ่านกัมมันต์ และไมไ่สตัวกลางตามลำดับ โดยในถังปฏิบัติการที่บรรจุตัวกลาง เม็ดถ่านกัมมันต์ เซรามิกและทราชมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียใกล้เคียงกัน โดยถังปฏิบัติการที่บรรจุตัวกลางทราชมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงที่สุด แต่ในถังปฏิบัติการที่ไม่ได้บรรจุตัวกลางมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียน้อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 12



ภาพที่ 12 ความเข้มของแอมโมเนียในน้ำออก ตลอดช่วงการทดลอง

1.2 ความเข้มข้นไนไตรต์

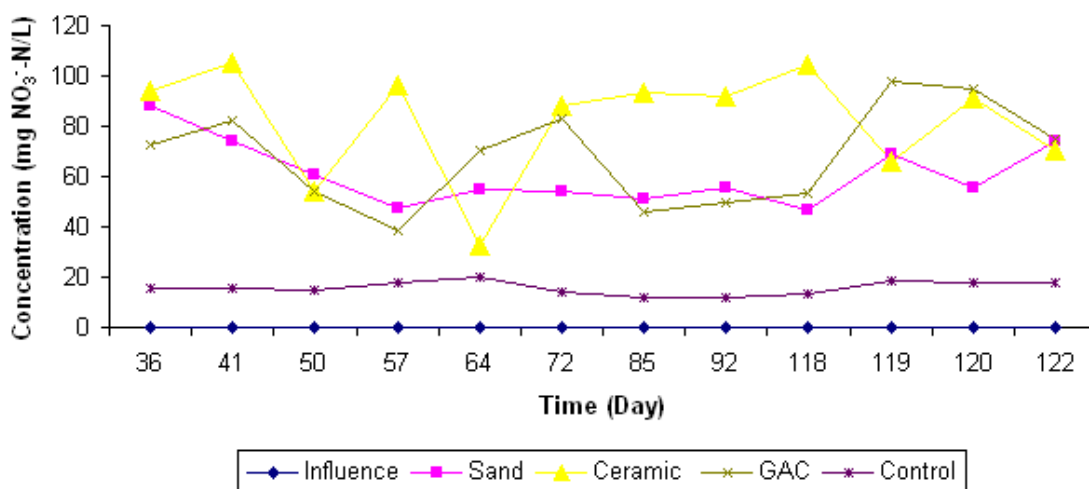
ในการทดลองความเข้มข้นของไนไตรต์เฉลี่ยในน้ำเข้าเท่ากับ 292.61 mg N/L ความเข้มข้นของไนไตรต์เฉลี่ยในน้ำออกของถังปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลาง ทราช เม็ดถ่านกัมมันต์ เซรามิก และไม้ไผ่ตัวกลางเท่ากับ 2.25 ± 3.46 , 2.68 ± 7.84 , 3.48 ± 10.94 และ 274.10 ± 60.63 mg N/L ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนไตรต์เท่ากับ 99.23 ± 1.21 , 99.20 ± 2.15 , 98.69 ± 4.21 และ 10.58 ± 13.52 % ในถังปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลาง ทราช เม็ดถ่านกัมมันต์ เซรามิก และไม้ไผ่ตัวกลางตามลำดับ โดยในถังปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลาง เม็ดถ่านกัมมันต์ เซรามิกและทราชมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนไตรต์ใกล้เคียงกัน โดยถังปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางทราชมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนไตรต์สูงที่สุด แต่ในถังปฏิกิริยาที่ไม่ได้บรรจุตัวกลางมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนไตรต์น้อยที่สุด แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ความเข้มข้นของไนไตรต์ในน้ำออก ตลอดช่วงการทดลอง

1.3 ความเข้มข้นของไนเตรต

ความเข้มข้นของไนเตรตเฉลี่ยในน้ำออกของถังปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลาง ทราช GAC เซรามิก และไม้ไผ่ตัวกลางเท่ากับ 60.89 ± 12.61 , 82.30 ± 22.08 , 68.12 ± 19.54 และ 15.73 ± 2.65 mg N/L โดยในน้ำออกจากถังปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเซรามิกมีความเข้มข้นของไนเตรตมากที่สุด รองลงมาคือถังปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลาง เม็ดถ่านกัมมันต์ ทราชและไม้ไผ่ตัวกลางตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำออก ตลอดช่วงการทดลอง

1.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน

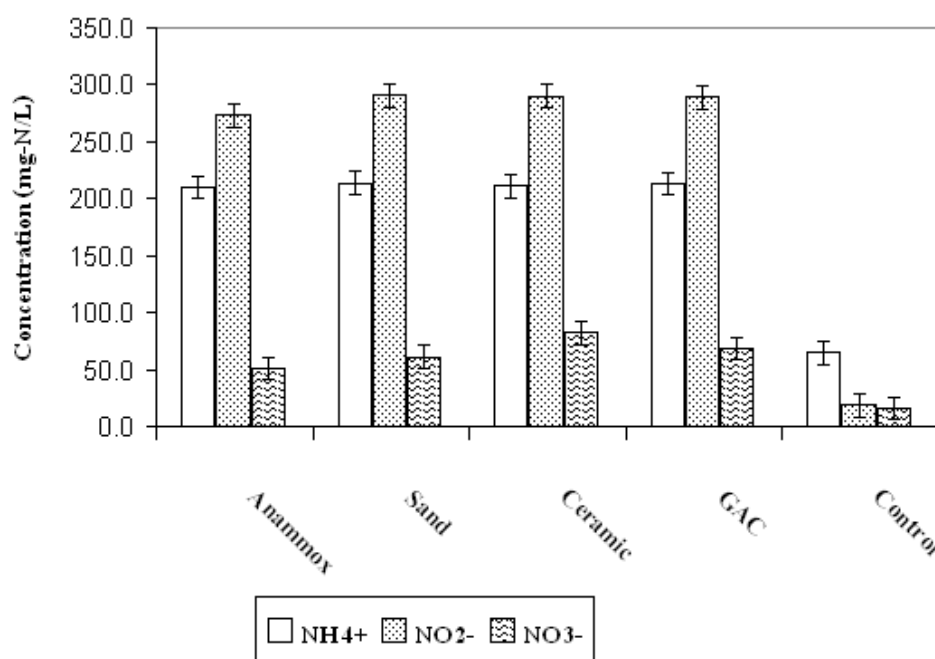
ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลาง ทราช เซรามิก เม็ดถ่านกัมมันต์ และไมสัตัวกลางเท่ากับ 99.36 ± 0.91 , 98.79 ± 2.02 , 99.02 ± 2.49 และ 16.16 ± 13.20 %ตามลำดับ โดย ในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลาง เม็ดถ่านกัมมันต์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนมากที่สุด รองลงมาคือ ถังปฏิกรณ์บรรจุตัวกลางทราช, ถังปฏิกรณ์บรรจุตัวกลางเซรามิก และถังปฏิกรณ์ที่ไม่บรรจุตัวกลาง ตามลำดับ แสดงตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน

ถังปฏิกรณ์	TN น้ำเข้า (mg N/L)	TN น้ำออก (mg N/L)	ประสิทธิภาพการ กำจัดไนโตรเจน (%)
ตัวกลางทราช	507.09	3.18	99.36 ± 0.91
ตัวกลางเซรามิก	507.09	6.07	98.79 ± 2.02
ตัวกลาง GAC	507.09	4.66	99.02 ± 2.49
ไม่บรรจุตัวกลาง	507.09	423.90	16.16 ± 13.20

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมและไนไตรต์ และการเกิดไนเตรตของการทดลองเทียบกับสมการของอนาโมกซ์ (สมการที่ (7)) (ภาพที่ 15) เมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นของ

น้ำเสียสังเคราะห์เท่ากัน แสดงให้เห็นว่า ในถังปฏิกริยาที่บรรจุตัวกลาง เม็ดถ่านกัมมันต์ เซรามิคทรายมีประสิทธิภาพมากกว่าที่ได้จากสมการของอนาโมกซ์เล็กน้อย ยกเว้นในถังปฏิกริยาที่ไม่ได้บรรจุตัวกลางมีประสิทธิภาพต่ำกว่าสมการของอนาโมกซ์มาก



ภาพที่ 15 ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในการทดลองเทียบกับปฏิกริยาของอนาโมกซ์

ค่า pH ในน้ำออกจากถังปฏิกริยาที่บรรจุตัวกลางทราย เซรามิค เม็ดถ่านกัมมันต์ และไมไ่สตัวกลาง มีค่าอยู่ในช่วง 7-8

ค่า ORP ที่วัดได้ในน้ำออกจากถังปฏิกริยาที่บรรจุตัวกลางทราย เซรามิค เม็ดถ่านกัมมันต์ และไมไ่สตัวกลางมีค่าติดลบในทุกถังปฏิกริยา

2. การทดลองต่อเนื่อง

จากการทดลองของ Arrojo *et al.* (2006) การกวนผสมมีผลต่อปฏิกริยาของอนาโมกซ์ จึงทำการทดลองต่อโดยใส่ตัวกลางทรายปริมาณ 2 g. ลงในถังปฏิกริยาที่บรรจุตัวกลาง แล้วดำเนินการ

ทดลองเหมือนเดิม พบว่าปริมาณแอมโมเนียมและไนไตรต์ในน้ำที่ออกจากระบบในตอนสิ้นสุดการทดลองลดลงเหลือ 25.2 และ 15.06 mg N/L ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนไตรต์ในน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกิริยาที่ไม่บรรจุตัวกลาง เมื่อทำการทดลองต่อ

วันที่ทดลอง	น้ำเข้า (mg N/L)		น้ำออก (mg N/L)	
	NH_4^+	NO_2^-	NH_3	NO_2^-
2	224.66	282.96	150.64	125.7
7	226.8	291.34	82.32	56.42
9	206.08	303.63	25.76	14.36
14	201.04	292.18	25.2	15.06

เมื่อคิดประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน, แอมโมเนียมและไนไตรต์ในตอนสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 91.84, 87.47 และ 94.85 % ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียม, ไนไตรต์และไนโตรเจนในถังปฏิกิริยาที่ไม่ใส่ตัวกลาง เมื่อทำการทดลองต่อ

วันที่ทดลอง	ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	แอมโมเนียม	ไนไตรต์	ไนโตรเจน
2	32.95	55.58	45.56
7	63.70	80.63	73.22
9	87.50	95.27	92.13
14	87.47	94.85	91.84

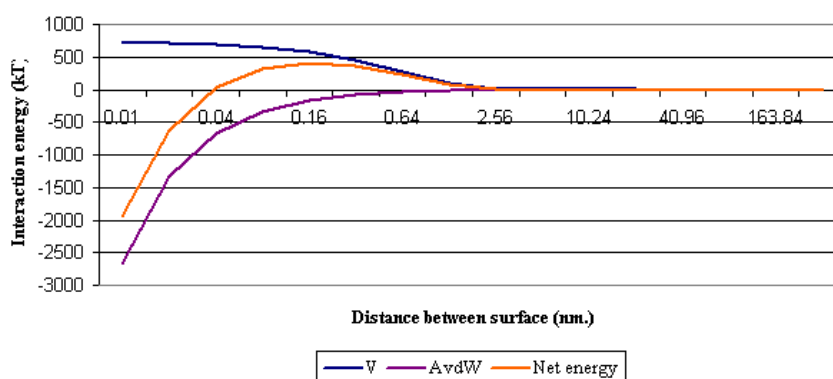
3. การสร้างเม็ดตะกอน

3.1 การสร้างเม็ดตะกอน

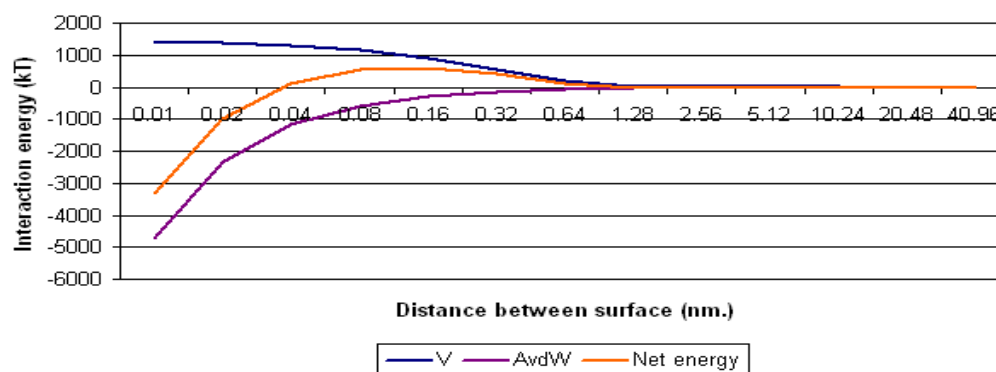
การสร้างเม็ดตะกอนเป็นไปตามแบบจำลอง Inert nuclei ซึ่งตัวกลางต่างๆ ถือเป็น Inert nucleus กลุ่มเชื่อมาม็อกซ์มาเกาะบริเวณพื้นผิวตัวกลาง สร้างเป็นไบโอฟิล์ม และรวมตัวเป็นเม็ดตะกอน

3.2 ทฤษฎี DLVO

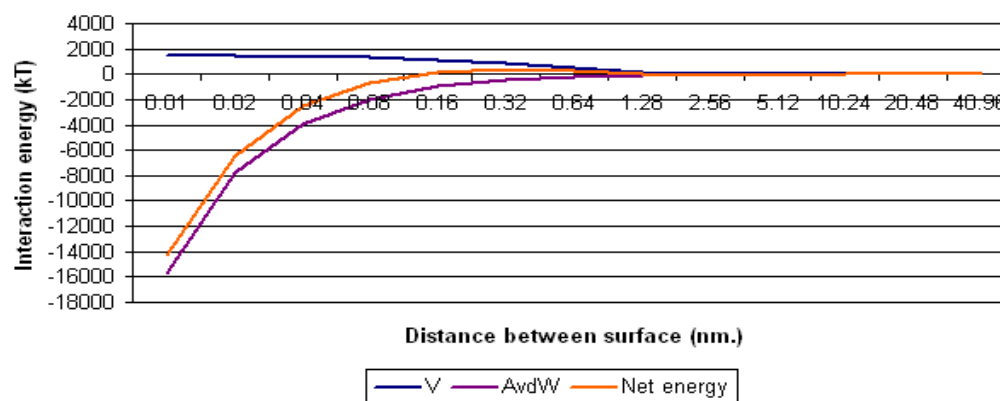
จากทฤษฎี DLVO สามารถอธิบายแนวโน้มของเชื่อมาม็อกซ์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่จะเกิดการรวมตัวกันหรือไม่ เป็นผลรวมระหว่างแรง Van der waal และ Double layer แสดงผลดังภาพที่ 16-19 พบว่า ในทุกการทดลอง เชื่อมาม็อกซ์สามารถเกาะเป็นเม็ดตะกอนได้ จากพบ Net energy เป็นลบเนื่องจากแรงดูด (แรง Van der Waal) มากกว่าแรงผลัก (ไฟฟ้าสถิต) ยกเว้นในถังปฏิกรณ์ที่ไม่เติมตัวกลาง ค่า Net energy มีค่าเป็นบวก แสดงว่าเชื่อมาม็อกซ์ไม่สามารถเกิดการเกาะกันเป็นเม็ดตะกอนได้ ตามทฤษฎี DLVO



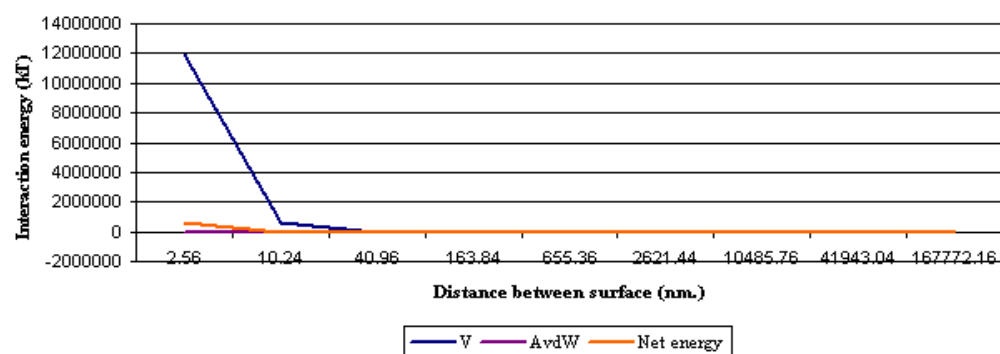
ภาพที่ 16 กราฟแสดงการทำนายการเกาะติดของเชื่อมาม็อกซ์ตามทฤษฎี DLVO ของตัวกลาง
ทราย



ภาพที่ 17 กราฟแสดงการทำนายการเกาะติดของเขื่อนาม็อกซ์ตามทฤษฎี DLVO ของตัวกลางเซรามิก

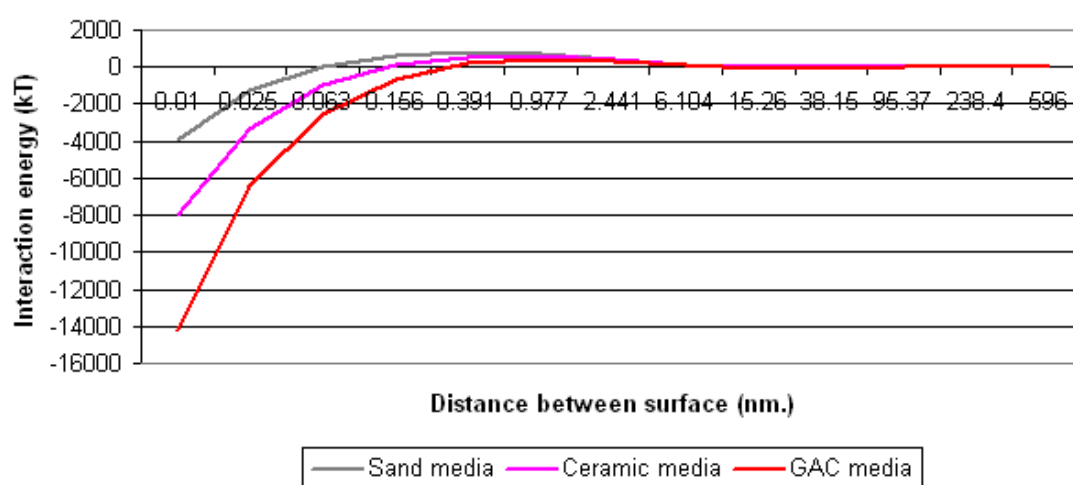


ภาพที่ 18 กราฟแสดงการทำนายการเกาะติดของเขื่อนาม็อกซ์ตามทฤษฎี DLVO ของตัวกลางเม็ดถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 19 กราฟแสดงการทำนายการเกาะติดระหว่างเขื่อนาม็อกซ์ ตามทฤษฎี DLVO

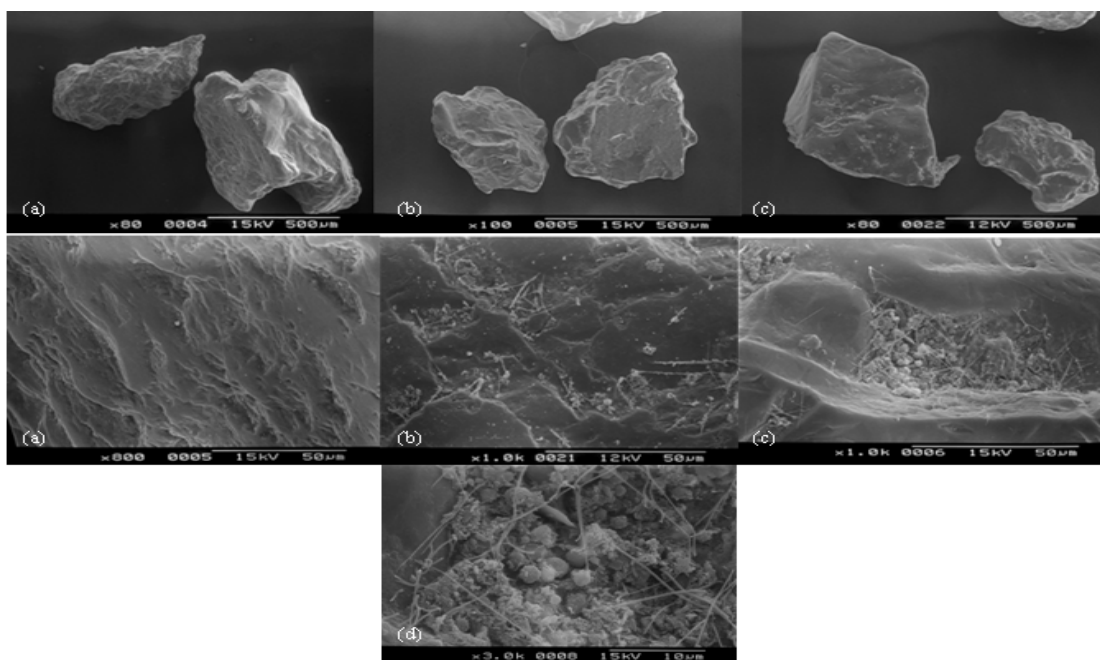
เมื่อเปรียบเทียบ Net energy ในแต่ละถึงปฏิกิริยาที่ระยะห่างที่เท่ากัน พบว่าตัวกลางเม็ดถ่านกัมมันต์มีแรงดูดมากที่สุด รองลงมาคือ ตัวกลางเซรามิก และตัวกลางทราย Energy barrier ของตัวกลางทราย, เซรามิก, เม็ดถ่านกัมมันต์และเชื้ออาม็อกซ์เท่ากับ 817.79, 601.90 และ 254.51 kT ตัวกลางที่มี Energy barrier มากที่สุดคือ ตัวกลางทราย รองลงมาคือ ตัวกลางเซรามิก และตัวกลางเม็ดถ่านกัมมันต์ โดย Energy barrier จะเป็นพลังงานที่บ่งบอกความยากง่ายในการเกาะเป็นเม็ดตะกอน โดยการเกาะเป็นเม็ดตะกอนต้องมีพลังงานมากกว่า Energy barrier จึงสามารถเกาะเป็นเม็ดตะกอนได้ แสดงดังภาพที่ 20



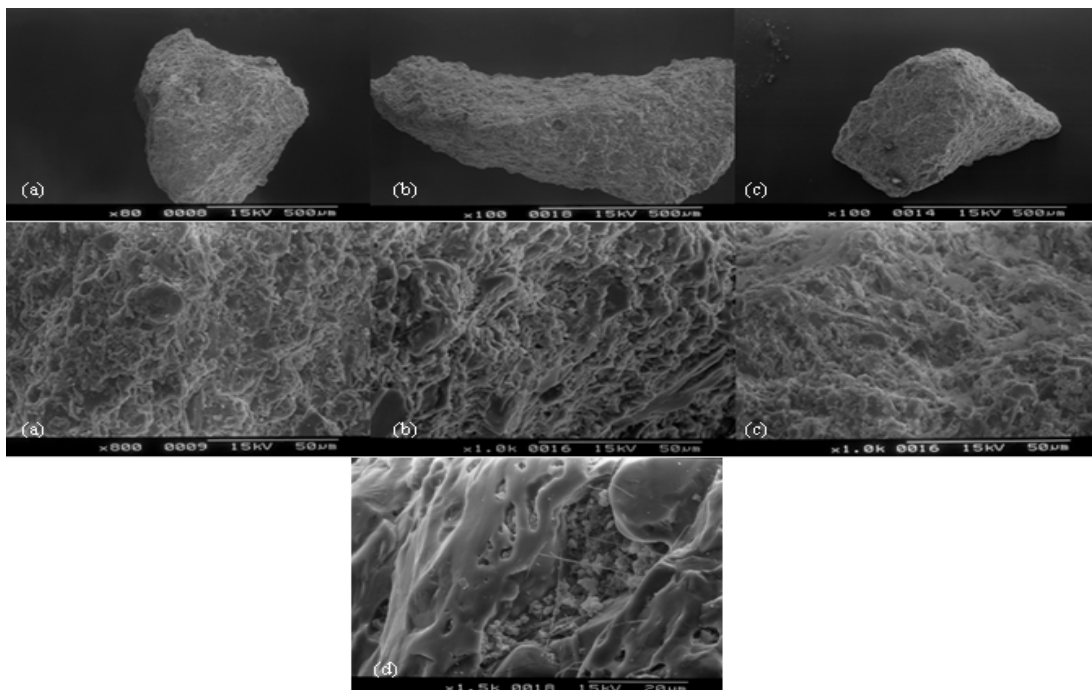
ภาพที่ 20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการเกาะติดตามทฤษฎี DLVO ของถึงปฏิกิริยาต่างๆ

3.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope)

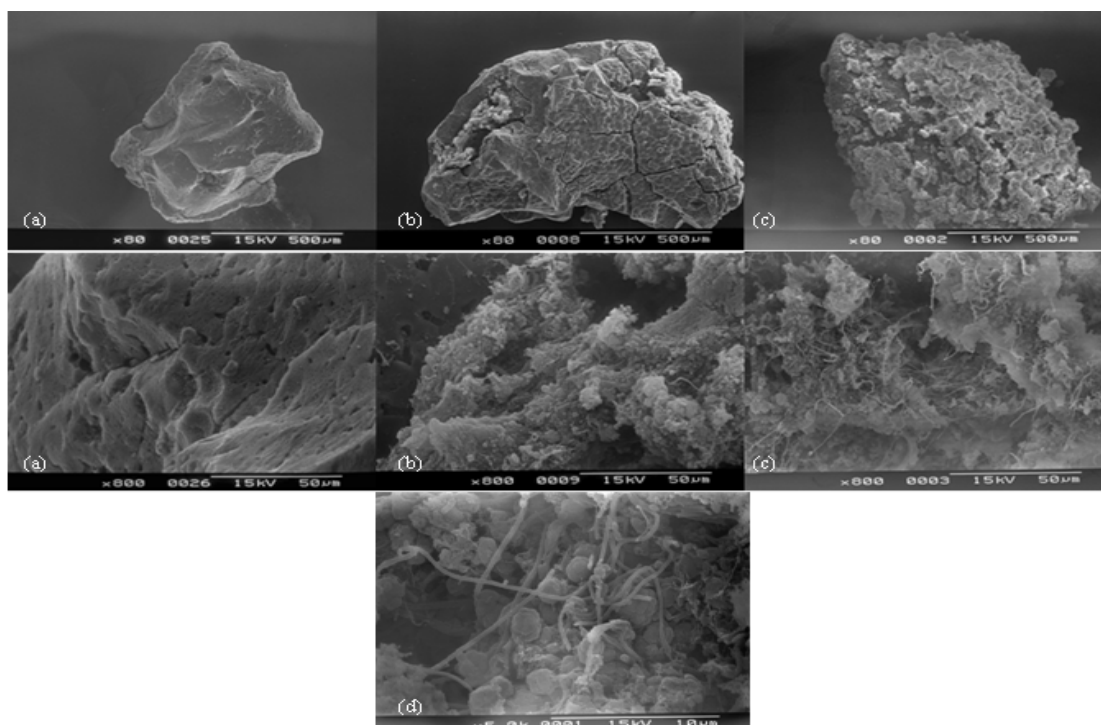
ภาพที่ 21 ถึง 24 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางต่างๆ แสดงให้เห็นว่าทุกถึงปฏิกิริยาเชื้ออาม็อกซ์สามารถเกาะกับตัวกลางได้ ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางทราย พบลักษณะพื้นผิวของตัวกลางส่วนมากมีลักษณะเรียบแต่มีชอกลิกลงไป โดยจะพบเชื้ออาม็อกซ์อยู่ตามพื้นผิวดังกล่าวที่เป็นลักษณะชอกลิกลงไป ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเซรามิก จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวกลางเป็นพื้นผิวขรุขระไม่เรียบเสมอกัน จะพบเชื้ออาม็อกซ์เกาะตามชอกของพื้นผิวที่ลิกลงไป เช่นเดียวกับตัวกลางทราย ส่วนถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเม็ดถ่านกัมมันต์สร้างเป็นไบโอฟิล์มเกือบคลุมทั้งพื้นผิวของเม็ดถ่านกัมมันต์และในถึงปฏิกิริยาที่ไม่บรรจุตัวกลาง เชื้ออาม็อกซ์สามารถเกาะกันเป็นกลุ่มได้ โดยในทุกถึงปฏิกิริยาพบลักษณะของเชื้ออาม็อกซ์เป็นทรงกลมและพบแบคทีเรียชนิดเส้นสั้น



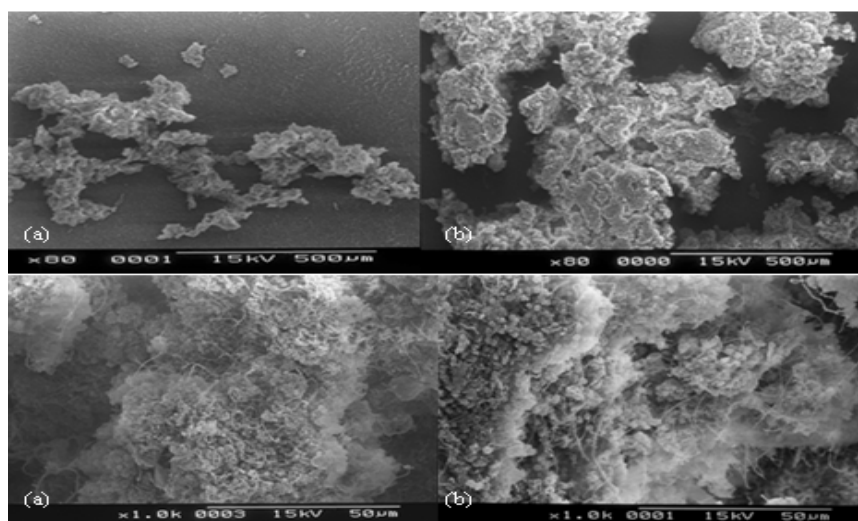
ภาพที่ 21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางทราย วันที่ 0 (a) ,59 (b) และ 8 (c) ตามลำดับ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะเชื้ออานาโมกซ์ ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางทราย (d)



ภาพที่ 22 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเซรามิก วันที่ 0 (a) ,59 (b) และ 75 (c) ตามลำดับ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะเชื่อมามือกซ์ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเซรามิก (d) วันที่ 0 (a) ,59 (b) และ 75 (c) ตามลำดับ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะเชื่อมามือกซ์ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางเซรามิก (d)



ภาพที่ 23 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิบัติการที่บรรจุตัวกลางเม็ดถ่านกัมมันต์วันที่ 0 (a) ,59 (b) และ 75 (c) ตามลำดับ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงลักษณะเชื้ออเนาม็อกซ์ ในถึงปฏิบัติการที่บรรจุตัวกลาง GAC (d)



ภาพที่ 24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนถึงปฏิบัติการที่ไม่บรรจุตัวกลาง วันที่ 59 (a) และ 75 (b) ตามลำดับ

วิจารณ์

1. การกำจัดไนโตรเจน

เมื่อทำการทดลองโดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนเฉลี่ย แอมโมเนียม : ไนไตรต์ เท่ากับ 1:1.36 ซึ่งใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่เชื้ออนาม็อกซ์สามารถกำจัดแอมโมเนียมและไนไตรต์ให้เหลือน้อยที่สุด (1:1.38 (Noophan *et al.*, 2009))

1.1 ความเข้มข้นของแอมโมเนียม

ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมของถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางทราย, เซรามิกและ เม็ดถ่านกัมมันต์ มากกว่า 98% ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียม 88% ที่ทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ fixed bed (Strous *et al.*, 1997) และ 80% ที่ทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ UASB (Chamchoi and Nitisoravut, 2007) แต่ในถังปฏิกรณ์ที่ไม่ใส่ตัวกลาง ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมเท่ากับ 30.16 % และเมื่อดำเนินการทดลองต่อโดยการใส่ตัวกลางทราย ประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียมเพิ่มขึ้นเป็น 87.47%

1.2 ความเข้มข้นของไนไตรต์

ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมของถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางทราย เซรามิกและ เม็ดถ่านกัมมันต์ มากกว่า 98% ซึ่งเท่ากับการทดลองของ Chamchoi and Nitisoravut (2007) ซึ่งประสิทธิภาพในการลดไนไตรต์ที่มากที่สุด เมื่ออยู่ในช่วงเสถียรของการทดลอง

ในปฏิกรณ์ของอนาม็อกซ์ ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนตามทฤษฎีที่มากที่สุดเท่ากับ 89% (Strous *et al.*, 1999) แต่ในการทดลองนี้ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางทราย เซรามิกและเม็ดถ่านกัมมันต์ มากกว่า 98% อาจเป็นไปได้เนื่องจากเชื้ออนาม็อกซ์เมื่อรวมตัวเป็นเม็ดตะกอนจะลดปริมาณเชื้ออนาม็อกซ์ที่ถูกชะออกจากถังปฏิกรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพในการลดไนโตรเจนสูงขึ้น (Strous *et al.*, 1997) อัตราส่วนที่เชื้ออนาม็อกซ์เกิดปฏิกริยาขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางทราย เซรามิก เม็ดถ่านกัมมันต์ และไม่ใส่ตัวกลางเท่ากับ 1:1.36, 1:1.37, 1:1.36 และ 1:0.29 ในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวกลางตัวกลางทราย, เซรามิกและ GAC มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่เชื้อ

อนาม็อกซ์สามารถทำปฏิกิริยาเพื่อลดแอมโมเนียมและไนไตรต์ได้ดีที่สุด (1:1.38 (Noophan *et al.*, 2009))

1.3 ความเข้มข้นไนเตรต

อัตราส่วนของแอมโมเนียมที่ใช้ไป : ไนเตรตที่เกิดขึ้นของถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางทราย เซรามิก เม็ดถ่านกัมมันต์และไม่บรรจุตัวกลาง เท่ากับ 1:0.29, 1:0.39, 1:0.32 และ 1:0.24 ซึ่งตามสมการของปฏิกิริยาของอนาม็อกซ์เท่ากับ 1:0.26 (Trigo *et al.*, 1996) ในถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลางทราย เซรามิกและเม็ดถ่านกัมมันต์ มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากสมการของปฏิกิริยาอนาม็อกซ์ แต่ในถึงปฏิกิริยาที่ไม่ได้บรรจุตัวกลางมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการ

1.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจน

ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของถึงปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลาง ทราย เซรามิก และ เม็ดถ่านกัมมันต์ มากกว่า 98% ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการกำจัดไนโตรเจนสูงสุดของอนาม็อกซ์ตามทฤษฎี (89% (Strous *et al.*, 1999)) เนื่องจากเชื้ออนาม็อกซ์เกาะรวมเป็นเม็ดตะกอนทำให้ลดการชะออกจากถึงปฏิกิริยา ส่งผลให้อายุสัต์จมากขึ้นและประสิทธิภาพของปฏิกิริยาที่สูงขึ้น (Tsushima *et al.*, 2007) ในทุกถึงปฏิกิริยามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสมการอนาม็อกซ์ ยกเว้นในถึงปฏิกิริยาที่ไม่เติมตัวกลาง แต่เมื่อใส่ตัวกลางทรายลงไปแล้วใส่ในเครื่องกวนพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนใกล้เคียงกับสมการอนาม็อกซ์ เนื่องจากการกวนผสมมีผลต่อปฏิกิริยา เพราะทรายทำให้เกิดการกวนผสมได้ดีขึ้น โดยเม็ดตะกอนที่เกิดขึ้นจากการกวนผสมด้วยแรงเฉือน (Shear force) ดำ จะสร้างเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ ไม่เกาะติดกันแน่น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบไม่ดีและควบคุมระบบได้ยาก (Chen *et al.*, 2007)

2. การสร้างเม็ดตะกอนของเชื้ออนาม็อกซ์

ลักษณะตัวกลางที่เหมาะสมกับการสร้างเม็ดตะกอน ได้แก่ มีพื้นที่ผิวมาก, มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) และมีลักษณะทรงกลม (Yu *et al.*, 1999) ซึ่งการเติมตัวกลางทราย, เซรามิกและเม็ดถ่านกัมมันต์ เป็นการช่วยให้เกิดการสร้างเม็ดตะกอนของเชื้ออนาม็อกซ์ นอกจากนี้ทราย, เซรามิกและเม็ดถ่านกัมมันต์ถูกใช้ในการสร้างเม็ดตะกอนอย่างกว้างขวาง (Strous *et al.*,

1997; Park *et al.*, 2004; Yu *et al.*, 2003) แบบจำลองทางชีวเคมีที่สามารถใช้อธิบายกลไกในการสร้างเม็ดตะกอนของเชื้ออาม็อกซ์ คือ แบบจำลอง Inert nuclei ซึ่งเชื้ออาม็อกซ์จะเกาะกับพื้นผิวอนุภาค ในการทดลองคือ ตัวกลางที่ได้ใส่ลงไป (ทราย, เซรามิค และเม็ดถ่านกัมมันต์) เพื่อสร้างเป็นไบโอฟิล์ม โดยการเกาะของเชื้ออาม็อกซ์ถือเป็นขั้นแรกที่จะสร้างเป็นไบโอฟิล์ม และแบบจำลองทั่วไปของการสร้างเม็ดตะกอน ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 จะเป็นการเคลื่อนที่ทางกายภาพของเซลล์อาม็อกซ์และตัวกลาง เพื่อเข้ามายึดเกาะกัน ขั้นตอนที่ 2 เป็นการยึดเกาะระหว่างเซลล์อาม็อกซ์และตัวกลาง ขั้นตอนที่ 3 เซลล์อาม็อกซ์จะรวมตัวกันเป็นเซลล์ที่โตขึ้น และขั้นตอนที่ 4 เป็นกระบวนการที่เซลล์อาม็อกซ์รวมตัวกันเป็นโครงสร้าง 3 มิติ จากทฤษฎี DLVO ทำนายว่าตัวกลางทุกชนิดสามารถสร้างเม็ดตะกอนของเชื้ออาม็อกซ์ได้ ยกเว้นถึงปฏิกิริยาที่ไม่ใส่ตัวกลาง แต่ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เชื้ออาม็อกซ์สามารถเกาะเป็นเป็นตะกอนในทุกถึงปฏิกิริยา โดยจากทฤษฎี DLVO สอดคล้องกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ยกเว้นถึงปฏิกิริยาที่ไม่ใส่ตัวกลาง แสดงว่าทฤษฎี DLVO สามารถทำนายการสร้างเม็ดตะกอนของเชื้ออาม็อกซ์กับตัวกลางได้ แต่ไม่สามารถทำนายการสร้างเม็ดตะกอนของเชื้ออาม็อกซ์โดยไม่ใส่ตัวกลาง เนื่องจากทฤษฎี DLVO มีข้อจำกัด เพราะตามทฤษฎี DLVO จะสนใจเฉพาะ 2 แรง คือ แรงดึงดูดโดย van der Waal และแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต โดยไม่สนใจพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิตของคอลลอยด์ในน้ำ (Grasso *et al.*, 2002) และลักษณะของเชื้ออาม็อกซ์ที่พบจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นเชื้อที่มีลักษณะเป็นทรงกลมและเส้นใย ซึ่งเหมือนกับการทดลองของ Chamchoi and Nitisoravut (2007) กล่าวว่าเชื้ออาม็อกซ์มีลักษณะรูปร่างทรงกลมและมีแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเส้นใยซึ่งอยู่ร่วมกับในระบบ โดยในตัวกลางเม็ดถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มให้เชื้ออาม็อกซ์สามารถสร้างเม็ดตะกอนได้ดีที่สุด สอดคล้องกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เห็นได้จากภาพถ่ายอิเล็กตรอน ตัวกลางทรายและเซรามิคจะพบเชื้ออาม็อกซ์เกาะไม่ครอบคลุมทั้งพื้นผิว เนื่องจากการกวนที่รุนแรงเป็นผลให้เกิดแรงเสียดสีระหว่างตัวกลางด้วยกันเอง (Fernandez *et al.*, 2008) ทำให้เชื้ออาม็อกซ์อาจหลุดออกไป พื้นผิวที่ขรุขระจะช่วยให้เชื้ออาม็อกซ์สามารถเกาะกับพื้นผิวได้ดียิ่งขึ้นและลดการหลุดของเชื้ออาม็อกซ์ในถึงปฏิกิริยาที่ไม่บรรจุตัวกลางเชื้ออาม็อกซ์สามารถเกาะกันเป็นเม็ดตะกอนได้ แต่ประสิทธิภาพในการลดไนโตรเจนน้อยกว่าจากสมการของอาม็อกซ์ ส่วนตัวกลางเม็ดถ่านกัมมันต์ มีลักษณะพื้นผิวที่พิเศษ คือมีรูพรุนมาก พื้นผิวสูง (Sandro *et al.*, 2008) ทำให้เชื้ออาม็อกซ์มีพื้นที่ในการเกาะมากกว่าตัวกลางชนิดอื่นๆ เหมาะเป็นตัวกลางที่จะใช้เพื่อสร้างเม็ดตะกอน เพื่อป้องกันการชะออกจากระบบของเชื้ออาม็อกซ์ และยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ (Park *et*

al., 2004) ก่อให้เกิดประโยชน์ทั้ง 2 ทาง คือ เป็นตัวกลางให้เขื่อนนาม็อกซ์สร้างเป็นเม็ดตะกอนและสามารถบำบัดกลิ่นและสีของน้ำเสีย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ในถึงปฏิบัติการที่บรรจุตัวกลางทราย เซรามิกและเม็ดถ่านกัมมันต์ มีความสามารถในการกำจัดไนโตรเจนมากกว่า 98% และยังสามารถช่วยการชะออกของเชื้อน้าม็อกซ์จากถังปฏิบัติการ เพื่อเพิ่มอายุตะกอนทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดดีขึ้น
2. ทฤษฎี DLVO สามารถใช้ในการทำนายแนวโน้มการสร้างเม็ดตะกอนของเชื้อน้าม็อกซ์
3. ตัวกลางที่ใช้ในการสร้างเม็ดตะกอนต้องมีคุณสมบัติพื้นที่ผิวขรุขระและพื้นที่ผิวสูง เพื่อให้เชื้อน้าม็อกซ์มีพื้นที่ในการเกาะเป็นเม็ดตะกอน
4. ตัวกลางเม็ดถ่านกัมมันต์ เหมาะสำหรับเป็นที่เกาะของเชื้อน้าม็อกซ์เพื่อสร้างเป็นเม็ดตะกอนมากที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. นำวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมกับการสร้างเม็ดตะกอนของเชื้อน้าม็อกซ์ นำไปใช้เป็นตัวกลางให้อาาม็อกซ์ยึดเกาะในถังปฏิบัติการ UASB หรือ Fixed bed
2. ศึกษาเพิ่มเติมหาขนาดวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมในการสร้างเม็ดตะกอนของเชื้อน้าม็อกซ์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

บุญชัย ตระกูลมหชัย. 2544. ถ่านกัมมันต์. แหล่งที่มา:

http://www.tistr.or.th/t/publication/page_area_show_bc.asp?i1=77&i2=18, 20
เมษายน 2552.

บุญธรรม ภัทราจารกุล. 2543. วัสดุช่าง. ครั้งที่ 1. ประพันธ์ศาสน์, กรุงเทพฯ.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2539. เซรามิก. ครั้งที่ 4. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2546. การบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส. ครั้งที่ 1. กรมวิชาการ, กรุงเทพฯ.

Anonymous. n.d. **Anammox**. Available Source:

<http://www.biochemsoctrans.org/bst/033/0119/bst0330119f03.gif>, April 11,
2009.

_____. n.d. **Dielectric constant chart**. Available Source:

<http://www.asiinstr.com/technical/Dielectric%20onstants.htm#Section%20P>,
April 11, 2009.

_____. n.d. **Refraction of light**. Available Source:

<http://interactagram.com/physics/optics/refraction>, April 28, 2009., April 28,
2009.

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 2006 (123): 453-463.

Bhattacharjee, S., F. Kuhnen, S. Barmettler, M. Elimelech and R. Kretzschmar. 2000.
Transport of iron oxide colloids in packed quartz sand media. **Journal**
Colloid Interface Sci 2000 (231): 32-41.

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

Chen, J. and S.Y. Lun. 1993. Study on mechanism of anaerobic sludge granulation
in UASB reactor. **Water Science Technology** 1993 (28): 2225-2232.

- Chen, Y., W. Jiang, D.T. Liang and J.H. Tay. 2007. Structure and stability of aerobic granules cultivated under different shear force in sequencing batch reactors. **Applied Microbiology and Biotechnology** 2007 (76): 1199-1208.
- Franco, A., E. Roca and J.M. Lema. 2006. Granulation in high-load denitrifying upflow sludge bed (USB) pulsed reactors. **Water Research** 2006 (40): 871-880.
- Fernandez, I., J.R. Padin, A.M. Corral, J.L. Campos and R. Mendez. 2008. Biofilm and granular systems to improve Anammox biomass retention. **Biochemical Engineering Journal** 2008 (42): 308-313.
- Grasso, D., K. Subraminiam, M. Butkus, K. Strevett and J. Bergendahl. 2002. A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems. **Environmental Science and Biotechnology** 2002 (1): 17-38.
- Guiot, SR., A. Pauss and JW. Costerton. 1992. A structure model of the anaerobic granules consortium. **Water Sci Technol** 1992 (25): 1-10.
- Hiemenz, P.C. and R. Rajagopalan. 1997. **Principle of Colloid and Surface Chemical**. 3 ed. Marcel dekker Inc., Newyork.
- Israelachvili, J. 1992. **Intermolecular and Surface Force**. 8 ed. Academic Press, USA.
- Jetten, M.S.M., S. Logemann, G. Muyzer, L.A. Robertson, S.D. Vries, V. Loosdrecht and J.G. Kuenen. 1997. Novel principles in the microbial conversion of nitrogen compound. **Antonic van Leeuwenhoek** 1997 (71): 75-93.
- Jetten, M.S.M., I. Cirpust, B. Kartal, L.V. Niftrik, K.T. van de Pas-Schoonen, O. Sliekerst, S. Haaijer, W. van der Star, M. Schmid, J. van de Vossenberg, I. Schmidt, H. Harhangi, M. van Loosdrech, J.G. Kuenent, O. den Camp, M. Strous. 2005. 1994-2004: 10 years of researc on the anaerobic oxidation of ammonium. **Biochemical Society Transactions** 2005 (33): 119-123.
- Liu, Y., H.L. Xu, S.F. Yang, J.H. Tay. 2003. Mechanism and models for anaerobic granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactor. **Water Research** 2003 (37): 661-673.
- Liu, Y.Q., W.W. Wu, J.H. Tay and J.L. Wang. 2008. Formation and long-term stability of nitrifying granules in a sequencing batch reactor. **Biosource Technology** 2008 (99): 3919-3922.
- Macleod, FA., SR. Guiot and JW. Costerton. 1990. Layered structure of bacterial aggregated produced in an upflow anaerobic sludge bed and filer reactor. **Appl Environ Microbial** 1990 (56): 1598-1607.

- Nery, V.D., E. Pozzi, M.H.R.Z. Damianovic, M.R. Domingues and M. Zaiat. 2008. Granules characteristics in the vertical profile of a full-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor treating poultry slaughterhouse wastewater. **Bioresource Technology** 2008 (99): 2018-2024.
- Noophan, P, S. Sripiboon, M. Damrongsri and J.M. Marr. 2009. Anaerobic ammonium oxidation by *Nitrosomonas* spp. and anammox bacteria in a sequencing batch reactor. **Journal of Environmental Management** 2009 (90): 967-972.
- Nootong, K. and W.K. Shieh. 2008. Analysis of an upflow bioreactor system for nitrogen removal via autotrophic nitrification and denitrification. **Bioresource Technology** 2008 (99): 6292-6298.
- Paques. Available Source: http://www.paques.nl/en/anammox_nitrogen_removal, March 17, 2008.
- Park, Y.S., J.H. Moon, D.S. Kim and K.H. Ahn. 2004. Treatment of polluted stream by a fixed-bed biofilm reactor with with sludge discharger and backwashing system. **Chemical Engineering Journal** 2004 (99): 265-271.
- Radboud University. 2004. **Nitrogen cycle**. Radboud University. Available Source: <http://www.microbiology.science.ru.nl/research/nitrogen>, March 17, 2008.
- Radovic, L.R. 2000. A serie of advance. **Chemical and Physical of Carbon** 2000 (27): 416.
- Sandro, A., C. Bette, E. Emmanuel, J. Lambert, J.J. Ehrhardt and S. Gaspard. 2008. Adsorption studies of methylene blue and phenol onto vetiver roots activated carbon prepare by chemical action. **Journal of Hazard Material** 2008 (165): 1029-1039.
- Shaw, D.J. 1992. **Introduction to Colloid and surface Chemistry**. 4 ed. Butterworth-heirmann, Newyork.
- Spapiro, J.A. 1998. Thing about bacterial populations as multicellular organism. **Annu Rev Microbial** 1998 (52): 81-104.
- Strous, M., E.V. Gerven, P. Zheng, J.G. Kuenen and M.S.M. Jetten. 1997. Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) process in different reactor configuration. **Water Research** 1997 (31): 1955-1962.
- Strous, M., J.G. Kuenen and M.S.M. Jetten. 1999. Key physiology of anaerobic ammonium oxidant. **Appl. Environ. microbial** 1999 (65): 3248-3250.

- Sumino, T., K. Isaka, H. Ikata, Y. Saiki and T. Yokota. 2006. Nitrogen removal from wastewater using simultaneous nitrate reduction and anaerobic ammonium oxidation in single reactor. **Journal of Bioscience and Bioengineering** 2000 (102): 346-351.
- Tchobanoglous, G., F.L. Burton and H.D. Stensel. 2004. **Wastewater Engineering Treatment and Reuse**. 4 ed. McGraw-Hill Company, Singapore.
- Tsushima, I., Y. Ogasama and K. Tomonori. 2007. Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (ANAMMOX) biofilm reactor. **Water Research** 2007 (41): 1623-1634.
- Trigo, C., J.L. Campos, J.M. Garrido and R. Mendez. 2006. Start-up of the Anammox process in a membrane bioreactor. **Journal of Biotechnology** 2006 (126): 475-487.
- Truesdail, S.E., J. Lukasik, S.R. Farrah, D.O. Shah and R.B. Diskinson. 1998. Analysis of bacteria deposition on metal (Hydr) oxide-coated sand filter media. **Journal of Colloid and Interfaces Science** 1998 (203): 369-378.
- Waki, M., T. Tokutomi, H. Yokoyama and Y. Tanaka. 2007. Nitrogen removal from animal waste water treatment by Anammox enrichment. **Water Research** 2007 (98): 2775-2780.
- Wilchut, J. and D. Hoekstra. 1984. Membrane fusion: from liposome to biological membrane. **Trend Biochem Sci** 1984 (9): 479-483.
- Yu, H.Q., J.H. Tay and H.H.P. Fang. 1999. Effects of added power and granular activated carbon on start-up performance of UASB reactors. **Environmental Technology** 1999 (20): 1095-1100.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ความเข้มข้นแอมโมเนียของน้ำเข้าและออก (mg N/L) ในถังปฏิบัติการบรรจุ
ตัวกลางทราย, เซรามิก, GAC และไม่บรรจุตัวกลาง

วันที่ทดลอง	น้ำเข้า	น้ำออก			
		ตัวกลาง ทราย	ตัวกลาง เซรามิก	ตัวกลาง GAC	ไม่บรรจุ ตัวกลาง
2	269.9	14.56	12.32	19.04	75.04
6	204.4	0	0	0	104.16
8	111.44	0	0	0	108.64
16	232.4	0	0	0	120.4
20	225.4	0	0	0	138.04
22	232.4	0	0	0	126
30	220.08	0	0	0	151.76
36	230.72	0	0	0	198.24
41	240.24	0	0	0	200.48
48	219.8	1.4	0	0	182
55	217.28	0	0	0	145.6
62	217.84	0.56	2.8	0.56	141.68
69	202.16	0	17.36	0	127.12
83	197.68	0.56	29.12	0	150.64
90	226.24	0	0	0	209.44
118	207.76	0	1.68	0	135.52
119	206.64	0	0	0	166.88
120	203.84	0	0	0	172.48
122	208.88	0.56	1.12	2.8	192.08

ตารางผนวกที่ 2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในน้ำเข้าและออก (mg N/L) ในถังปฏิบัติการบรรจุ
ตัวกลางทราย, เซรามิก, GAC และไม่บรรจุตัวกลาง

วันที่ทดลอง	น้ำเข้า	น้ำออก			
		ตัวกลาง ทราย	ตัวกลาง เซรามิก	ตัวกลาง GAC	ไม่บรรจุ ตัวกลาง
2	218.9	0	0	0	193.76
6	367.69	4.75	34.36	6.15	324.31
8	286.68	0	0	0	337.24
16	331.37	0.56	1.12	0.84	331.37
20	336.96	0	0	0	354.84
22	283.88	0.5	0.7	0	319.08
30	306.24	0.67	2.65	0.03	304.28

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	น้ำเข้า	น้ำออก			
		ตัวกลาง ทราย	ตัวกลาง เซรามิค	ตัวกลาง GAC	ไม่บรรจุ ตัวกลาง
36	306.23	1.48	0.06	0.7	294.78
41	334.18	0.03	0.03	0.04	272.43
50	296.1	8.05	0.09	0.21	359.31
57	281.1	10.34	5.03	7.82	295.06
64	272.72	9.86	5.34	0.25	281.1
72	253.16	1.75	0.68	47.79	292.27
85	267.13	0.01	0.01	1.01	219.64
92	283.89	3.63	0.08	0.85	244.78
118	283.15	0.01	0.08	0.02	185.35
119	286.22	0.33	0.06	0.34	161.36
120	281.75	0.68	0	0.07	192.37
122	282.31	0.07	0.69	0.02	244.6

ตารางผนวกที่ 3 ความเข้มข้นไนเตรตในน้ำน้ำเข้าและออก (mg N/L) ในถังปฏิบัติการบรรจุตัวกลาง ทราย, เซรามิค, GAC และไม่บรรจุตัวกลาง

วันที่ทดลอง	น้ำเข้า	น้ำออก			
		ตัวกลาง ทราย	ตัวกลาง เซรามิค	ตัวกลาง GAC	ไม่บรรจุ ตัวกลาง
36	0	88.02	94.4	72.8	15.5
41	0	73.9	104.97	81.96	15.65
50	0	60.95	53.91	54.29	15.03
57	0	47.66	96.47	38.68	17.78
64	0	55.14	32.66	70.25	19.78
72	0	53.75	87.82	83.21	13.99
85	0	51	93.49	45.99	11.86
92	0	55.37	92.08	49.65	12
118	0	46.91	104.52	52.99	13.04
119	0	68.67	65.94	97.66	18.64
120	0	55.32	91	94.93	17.65
122	0	73.93	70.31	74.98	17.88

ตารางผนวกที่ 4 ค่า OPR และ pH ในถังปฏิริยาบรรจุตัวกลางทราย, เซรามิค, GAC และไม่บรรจุตัวกลาง

วันที่ทดลอง	น้ำเข้า	น้ำออก							
		ตัวกลางทราย				ไม่บรรจุตัวกลาง			
		เซรามิค				GAC			
		pH	pH	ORP (mV)	pH	ORP (mV)	pH	ORP (mV)	pH
6	8.04	7.6	85	7.32	78	7.59	62	6.05	74
8	8.02	7.77	-33	7.45	-11	7.82	-35	6.05	71
16	8.07	7.52	-17	6.88	19	7.38	-17	6.02	72
20	8.04	7.74	-34	7.28	-5	7.72	-31	6.08	69
22	8.05	7.72	-28	7.4	-10	7.64	-24	6.07	71

ตารางผนวกที่ 5 ค่า Alkalinity ในถังปฏิริยาบรรจุตัวกลางทราย, เซรามิค, GAC และไม่บรรจุตัวกลาง

วันที่ทดลอง	น้ำเข้า	น้ำออก			
		ตัวกลาง	ตัวกลาง	ตัวกลาง	ไม่บรรจุ
		ทราย	เซรามิค	GAC	ตัวกลาง
52	1000	575	150	575	870
59	730	595	392.5	592.5	460
66	712.5	575	570	592.5	432.5
73	575	515	260	385	425
87	730	580	175	565	320
94	750	590	470	57	250

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	วาธุกา อินทรประสงค์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	15 สิงหาคม 2527
สถานที่เกิด	จ. สุพรรณบุรี
ประวัติการศึกษา	2550-2552 ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ม.เกษตรศาสตร์ (บางเขน) 2546-2549 ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ม. ศิลปากร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-