บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 การกำจัดไนโตรเจนด้วยวิธีชีวเคมี

ไนโตรเจนที่พบในน้ำเสียสิ่งปฏิกูล มีอยู่ 4 ชนิด คือ สารอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic Nitrogen) , แอมโมเนีย (NH_3) , ไนไตรต์ (Nitrite) และไนเตรต (Nitrate) ในบรรดาไนโตรเจนในรูปต่าง ๆ นี้ สารอินทรีย์ไนโตรเจนจัดเป็นรูปที่รีดิวซ์มากที่สุด การกำจัดสารต่าง ๆ ดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของไนโตรเจน และจุดมุ่งหมายของการกำจัด สารอินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกย่อยสลายให้กลายเป็นแอมโมเนีย โดยปฏิกิริยา Ammonification แอมโมเนียที่เกิดขึ้นนี้ จะถูกกำจัดได้ 2 ทาง คือ ถูกจุลินทรีย์ดึงไปใช้เป็นสารอาหารเพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ หรือถูกแบคทีเรียประเภทออโตโทรพเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์ และ ไนเตรต การกำจัดแบบหลังนี้ เรียกว่าไนตริฟิเคชัน

3.1.1 การกำจัดแอมโมเนียด้วยวิธีชีวสังเคราะห์

วิธีนี้อาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระบบ Suspended Growthทั่ว ๆ ไป เพราะแอมโมเนียเป็นสารอาหารและแหล่งไนโตรเจนที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของเซลล์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบแอโรบิคออกซิเดชัน มีแบคทีเรียพวก Heterotroph ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน (COD) โดยใช้ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส ในอัตราส่วนเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์คาร์บอน คือ COD : N : P = 150 : 5 : 1 จากอัตราส่วนดังกล่าว จะเห็นว่าไนโตรเจนถูกกำจัดในสัดส่วนที่ต่ำมาก ประมาณ 3.3 % ของสารอินทรีย์คาร์บอน การกำจัดแอมโมเนียด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำเสีย ถ้าหากความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนมีค่าต่ำมาก ก็ไม่สามารถพึ่งพาอาศัยวิธีนี้ในการกำจัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์

3.1.2 การกำจัดแอมโมเนียด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

วิธีนี้สามารถกำจัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำเสียมีค่า COD : TKN ต่ำมากๆ ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้น เป็นแบบไนตริฟิเคชัน โดยมีแบคทีเรียพวกออโตโทรฟ (Autotroph) เจริญเติบโตเป็นแบคทีเรียหลัก ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาออกซิเคชันทางชีวเคมี ที่ทำให้แอมโมเนียเปลี่ยนไปเป็นไนไตรต์ก่อน แล้วจึงเปลี่ยนไปเป็นไนเตรต

$$NH_4^+ + 1.5O_2 \xrightarrow{\text{Nitrosomonas}} NO_2^- + 2H^+ + H_2O \qquad (3.1)$$

$$NO_2^- + 0.5O_2 \xrightarrow{\text{Nitrobacter}} NO_3^- \qquad (3.2)$$

สมการที่ (3.1) , (3.2) แสดงการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน แอมโมเนียถูกเปลี่ยนไปเป็น ไนไตรต์ (NO_2^-) โดยแบคทีเรียพวกไนโตรโซโมแนซ (Nitrosomonas) และไนไตรต์ (NO_2^-) ถูกเปลี่ยนไปเป็น ไนเตรต (NO_3^-) โดยแบคทีเรียพวกไนโตรแบคเตอร์ (Nitrobacter)

3.2 สตอยชิโอเมตริก และ จลน์ศาสตร์ของไนตริฟิเคชัน

3.2.1 สตอยชิโอเมตริกของไนตริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนเตรต โดยแบคทีเรีย พวก Autotroph (3) เจริญเติบโตเป็นแบคทีเรียหลัก แบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันนี้ เรียกว่า Nitrifying Bacteria

Nitrifying Bacteria ที่มีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน คือ ไนโตรโซโมแนซ และ ไนโตรแบคเตอร์ ไนโตรโซโมแนซ ออกซิไดซ์ แอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์ และไนโตรแบคเตอร์ ออกซิไดซ์ ไนไตรต์ ต่อไป จนกลายเป็นไนเตรต ดังสมการที่ (3.3), (3.4)

$$NH_4^+ + 1.5O_2 \longrightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O \qquad (3.3)$$

$$NO_2^- + 0.5O_2 \longrightarrow NO_3^- \qquad (3.4)$$

พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาทั้งสอง พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 58 - 84 KCal./ mole ของ NH_3 (4,5) ในการออกซิไดซ์ NH_3 ให้เป็น NO_2^- และมีค่าอยู่ระหว่าง 15.4 - 20.9

KCal./ mole ของ NO_2^- (5) ในการออกซิไดซ์ NO_2^- ให้เป็น NO_3^-

ในการสร้างเซลล์แบคทีเรียทั้งสองชนิดอาศัยพลังงานในการเจริญเติบโต จากการออกซิเดชัน สารอนินทรีย์คาร์บอน (คาร์บอนไดออกไซด์) อย่างไรก็ดี แบคทีเรียทั้งสองนี้สามารถใช้สับสเตรตที่เป็นสารอินทรีย์ได้ (6) แต่เนื่องจากใช้ได้น้อย และปริมาณที่ใช้เปลี่ยนแปลงตามสภาวะของการเติบโต ดังนั้นสมการที่แสดงให้เห็นถึง สตอยชิโอเมตริกของไนตริฟิเคชัน จึงพิจารณาเฉพาะที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแหล่งคาร์บอนเพียงอย่างเดียว สมการเคมีที่ใช้แทนปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ คือ .-

$$NH_4^+ + 2O_2 \longrightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O \qquad (3.5)$$

ถ้าหากให้สูตรเอ็มไพริกัล (empirical) ของเซลล์แบคทีเรียเป็น $C_5H_7NO_2$ สมการการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกไนโตรโซโมแนช และ ไนโตรแบคเตอร์ เป็นดังนี้ คือ.-

$$15CO_2 + 13NH_4^+ \longrightarrow 10NO_2^- + 3C_5H_7NO_2 + 23H^+ + 4H_2O \qquad (3.6)$$

(Nitrosomonas)

$$5CO_2 + NH_4^+ + 10NO_2^- + 2H_2O \longrightarrow 10NO_3^- + C_5H_7NO_2 + H^+ \qquad (3.7)$$

(Nitrobacter)

H^+ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา (3.3) ถึง (3.7) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพีเอช กล่าวคือ ที่ระดับพีเอชต่ำกว่า 8.3 H^+จะทำปฏิกิริยากับ HCO_3^- เกิดกรด H_2CO_3 นอกจากนี้ คาร์บอนไดออกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิด H_2CO_3ได้เช่นกัน ดังสมการ

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \qquad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.3) , (3.6) , (3.7) และ (3.8) H^+ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยากัน ดังสมการต่อไปนี้

$$NH_4^+ + 1.5O_2 + 2HCO_3^- \longrightarrow NO_2^- + 2H_2CO_3 + H_2O \qquad (3.9)$$

$$13NH_4^+ + 23HCO_3^- \longrightarrow 8H_2CO_3 + 10NO_2^- + 3C_5H_7NO_2 + 19H_2O \qquad (3.10)$$

$$NH_4^+ + 10NO_2^- + 4H_2CO_3 + HCO_3^- \longrightarrow 10NO_3^- + 3H_2O + C_5H_7NO_2 \qquad (3.11)$$

พลังงานที่เกิดขึ้นในสมการที่ (3.9) จะถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ในสมการที่ (3.10) ซึ่งเมื่อรวมสมการที่ (3.9) และ (3.10) เข้าด้วยกัน โดยสมมติให้ค่ายีลด์ของ ไนโตรโซโมแนซ เท่ากับ 0.15 มก./ มก. NH_3 - N (7,8) แล้วจะได้สมการดังนี้ คือ.-

$$55NH_4^+ + 76O_2 + 109HCO_3^- \longrightarrow C_5H_7NO_2 + 54NO_2^- + 57H_2O + 104H_2CO_3 \quad (3.12)$$

(Nitrosomonas)

สมการที่ (3.4) สามารถรวมได้กับสมการที่ (3.11) เช่นเดียวกัน โดยสมมติให้ค่ายีลด์ของ ไนโตรแบคเตอร์ เท่ากับ 0.02 มก./มก. NO_2^- - N (7,8) ดังนี้ คือ.-

$$400NO_2^- + NH_4^+ + 4H_2CO_3 + HCO_3^- + 195O_2 \longrightarrow C_5H_7NO_2 + 3H_2O + 400NO_3^- \quad (3.13)$$

(Nitrobacter)

จากการทดลองหาค่ายีลด์ Painter (4) ได้ทำการทดลองและรายงานผลว่า ค่ายีลด์ของ ไนโตรโซโมแนซ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.04 - 0.13 lb.VSS./lb. NH_3 - N และ ไนโตรแบคเตอร์ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.02 - 0.07 lb.VSS./lb. NO_2 - N

ค่ายีลด์ที่ Painter รายงานไว้ ปรากฏว่า มีค่าต่ำกว่าจากการคำนวณด้วย ทฤษฎีเทอร์โมไดนามิค Haug และ McCarty (5) รายงานผลการคำนวณค่ายีลด์ ของ ไนโตรโซโมแนซ และ ไนโตรแบคเตอร์ ไว้เท่ากับ 0.29 และ 0.084 ตามลำดับ การที่ค่ายีลด์จากผลการทดลองมีค่าต่ำกว่าจากการคำนวณ Haug และ McCarty ได้ให้ข้อสังเกตุว่า อาจเนื่องมาจากการที่พลังงานบางส่วนที่เกิดขึ้นได้ถูกนำไปใช้ในการดำรงชีวิตด้วย

เมื่อรวมสมการที่ (3.12) และ (3.13) เข้าด้วยกัน สมการที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่รวมการเจริญเติบโตด้วย เป็นดังนี้ คือ.-

$$NH_4^+ + 1.83O_2 + 1.98HCO_3^- \longrightarrow 0.021C_5H_7NO_2 + 1.041H_2O + 0.98NO_3^- + 1.88H_2CO_3 \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ดังนี้ คือ.-

- ในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ปรากฏว่า ยีลด์ของแบคทีเรียมีค่าต่ำมาก
- ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน มีค่าประมาณ 4.2 กรัม ของ

O_2 ต่อการกำจัดแอมโมเนีย 1 กรัม

- ปริมาณความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่ใช้ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน มีค่าประมาณ 7 กรัม ต่อ การกำจัดแอมโมเนีย 1 กรัม

3.2.2 จลน์ศาสตร์ของไนตริฟิเคชัน

จลน์ศาสตร์ของการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวก ออโตโทรฟ ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน สามารถที่จะแสดงได้ด้วยสมการโมโนดแบบเดียวกันกับของปฏิกิริยาแอโรบิคออกซิเดชัน โดยมีความซับซ้อนมากกว่า ทั้งนี้เพราะในปฏิกิริยาแอโรบิคออกซิเดชัน มีสับสเตรตที่ใช้กำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาเพียงตัวเดียว คือ สารอินทรีย์คาร์บอน ส่วนในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน สับสเตรตที่เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยามีมากกว่า 1 ตัว คือ แอมโมเนีย หรือ ไนไตรต์ และ ออกซิเจนละลาย การที่จำเป็นต้องแสดงออกซิเจนละลายอยู่ในสมการโมโนดด้วยนั้น เนื่องจาก K_s ของออกซิเจนละลายในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน มีค่าค่อนข้างสูง ประมาณ 0.5 - 2.0 มก./ล. (7,10,29) การที่ K_s ของออกซิเจนละลายมีค่าสูงเช่นนี้ จึงจำเป็นต้องแสดงอยู่ในสมการโมโนดด้วย

สมการโมโนดที่ใช้ในปฏิกิริยาแอโรบิคออกซิเดชัน ทั่วๆไป (9)

$$\mu = \mu_{max}\frac{S}{K_s + S} \qquad (3.15)$$

μ = ค่าคงที่ของการเจริญเติบโตจำเพาะ (มก./มก. - วัน)
(Specific growth rate constant)

$\mu_{max.}$ = ค่าคงที่ของการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (มก./มก. - วัน)
(Maximum growth rate constant)

S = ความเข้มข้นของสารอาหารที่กำหนดการเจริญเติบโต (มก./ล.)
(Growth limiting substrate concentration)

K_s = ค่าคงที่อิ่มตัว (Saturation constant) ซึ่งนิยามได้ว่า เป็นความเข้มข้นของสารอาหารที่ μ มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของ $\mu_{max.}$ หรือ อีกชื่อหนึ่ง เรียกว่า ตัวคงที่ที่มีความเร็วครึ่งหนึ่ง (Half velocity constant)

จากสมการที่ (3.15) เมื่อใช้อธิบายปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน สมการโมโนดจึงอาจเขียนได้ดังนี้

$$\mu = \mu_{max.} \frac{(NH_4^+ - N)}{K_s + (NH_4^+ - N)} \frac{DO}{K_o + DO} \qquad (3.16)$$

เนื่องจากในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน แบคทีเรียพวกไนโตรแบคเตอร์สามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็วกว่าไนโตรโซโมแนช อัตราเร็วของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจึงขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์ ของแบคทีเรียพวกไนโตรโซโมแนช ดังนั้นสมการที่ (3.16) จึงมีแต่เทอมของ $NH_4^+ - N$ และไม่มีเทอมของ $NO_2 - N$

จากตารางที่ 3.1 (11) K_s ของไนโตรโซโมแนช และ ไนโตรแบคเตอร์ มีค่าต่ำมาก สมการโมโนดจึงลดรูปลงเหลือเทอมของ DO ดังนี้ คือ .-

$$\mu = \mu_{max.} \frac{DO}{K_o + DO} \qquad (3.17)$$

จากสมการ (3.17) แสดงว่า อัตราเร็วในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียไม่ขึ้นอยู่กับ แอมโมเนียหรือ ไนไตรต์ ในกรณีที่ DO ในถังเติมอากาศมีค่าสูงมาก สมการ(3.17) จะเหลือเพียง

$$\mu = \mu_{max.} \qquad (3.18)$$

ซึ่งแสดงว่า อัตราเร็วในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ $\mu_{max.}$ เมื่อปริมาณออกซิเจนละลายในถังเติมอากาศมีค่าสูงมาก ๆ

พารามิเตอร์ที่สำคัญตัวอื่น ๆ ในการกำหนดจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ได้แก่ ค่า Y_g (Yield coefficient) , b (อัตราการสลายตัวจำเพาะ) , (อัตราการตายจำเพาะ) จากตารางที่ 3.1 แสดงค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ของแบคทีเรียในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน โดยรายงานค่ายีลด์ของ ไนโตรโซโมแนช และ ไนโตรแบคเตอร์ มีค่าระหว่าง 0.03 – 0.13 กรัมเซลล์ ต่อ กรัมของแอมโมเนียที่ถูกออกซิไดซ์ และ 0.02 ถึง 0.08 กรัมเซลล์ ต่อ กรัมของไนไตรต์ที่ถูกออกซิไดซ์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ค่า Y_g ของเซลล์ทั้งสองมีค่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Y_g ของแบคทีเรียพวก

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ทางจลน์ศาสตร์ของแบคทีเรียในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (11)

ค่าคงที่	แบคทีเรีย ไนโตรโซโมแนซ	แบคทีเรีย ไนโตรแบคเตอร์
Y_g (yield coefficient, กรัมเซลล์ ต่อ กรัมของ NH_4^+ - N ที่ถูกออกซิไดซ์)	0.03 - 0.13	0.02 - 0.08
$\mu_{max.}$ (ค่าคงที่ของการเจริญเติบโตสูงสุด , ต่อวัน)	0.46 - 2.20	0.28 - 1.44
K_s (ค่าคงที่อิ่มตัวของสับสเตรต มก./ล.)	0.06 - 5.60	0.06 - 8.40
K_o (ค่าคงที่อิ่มตัวของออกซิเจน มก./ล.)	0.30 - 1.30	0.25 - 1.30

Heterotroph (12) พบว่าค่า Y_g ของไนตริฟิเคชันต่ำมาก

สำหรับค่า b จากการรายงานของ R.A.Poduska และ J.F.Andrews (13) รายงานไว้ว่าแบคทีเรียทั้งสองชนิด มีค่า b ประมาณ 0.005 ต่อ ช.ม. ส่วนค่า ɤ นั้น เนื่องจากยังไม่มีรายงานผลการทดลองปรากฏอยู่ในเอกสารใดเลย จึงสมมติให้ ɤ มีค่าเท่ากับ 0

นอกจากนี้ ยังสามารถที่จะคำนวณค่าคงที่อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific rate of substrate removal ; q) ในการเติบโตของแบคทีเรีย พวกไนโตรโซโมแนช ได้ โดยใช้ค่า $\mu_{max.}$ และ Y_g จากตารางที่ 3.1 ดังนี้ คือ.-

$$q_{max.} = \frac{\mu_{max.}}{Y_g} \qquad (3.19)$$

3.3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจลน์ศาสตร์ของไนตริฟิเคชัน

3.3.1 อุณหภูมิ

จากการทดลองหาผลกระทบของอุณหภูมิ ที่มีต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน Downing และ ผู้ร่วมงาน (14,15) รายงานว่าทั้งค่าคงที่ของการเจริญเติบโตสูงสุด($\mu_{max.}$) และค่าคงที่อิ่มตัว (K_s) ของแบคทีเรียพวกไนโตรโซโมแนช และ ไนโตรแบคเตอร์ จะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิ ภาพที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงอัตราการเจริญเติบโตของไนตริฟายเออร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยปรากฏว่า ค่าการเจริญเติบโตสูงสุดของไนโตรโซโมแนชที่ได้จากการทดลองด้วยระบบแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้เชื้อพันธุ์บริสุทธิ์ ผลการทดลองหาค่า $\mu_{max.}$ ของนักวิจัยหลายท่านได้ค่า $\mu_{max.}$ ใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Downing และ ผู้ร่วมงาน ณ.อุณหภูมิเดียวกัน การที่เป็นเช่นนี้ Downing ได้ให้ข้อสังเกตุว่า อาจมีอิทธิพลจากพารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น DO (Dissolved Oxygen) ทำให้ผลการทดลองในระบบแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ ได้ค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

อุณหภูมิสามารถส่งผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียไนตริฟายเออร์ โดยแสดงได้ด้วยสมการของ Van't Hoff - Arrhenieus (10 , 14) ที่อุณหภูมิ ประมาณ 30 องศาเซลเซียส ดังนี้ คือ.-

$$\mu_T = \mu_{max.,15^\circ C} \, e^{C_T(T - 15)} \qquad (3.20)$$

โดยที่ μ_T เป็นอัตราการเจริญเติบโตที่อุณหภูมิ $T^\circ C$

$\mu_{max.15^\circ C}$ เป็นอัตราการเจริญเติบโตที่อุณหภูมิ $15^\circ C$

C_T เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (ต่อ $^\circ C$)

จากภาพที่ 3.1 เป็นผลการทดลองการเจริญเติบโตของไนโตรโซโมแนช โดยใช้เชื้อพันธุ์บริสุทธิ์ที่ได้จากแม่น้ำ (14,15) ได้ค่า $\mu_{max\ ,\ 15^\circ C}$ เท่ากับ 0.47 ต่อวัน และค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (C_T) เท่ากับ 0.098 ต่อองศาเซลเซียส ส่วนค่า $\mu_{max,15^\circ C}$ และค่า C_T ของระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์มีค่า 0.18 ต่อวัน และ 0.12 ต่อองศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากการวิจัยส่วนใหญ่ (8,13,16,17,18) ได้ค่า μ_{max} ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้เชื้อพันธุ์บริสุทธิ์ที่ได้จากแม่น้ำ สมการการเจริญเติบโตของไนโตรโซโมแนช จึงเป็นดังนี้ คือ.-

$$\mu = 0.47\, e^{0.098\,(T - 15)} \qquad (3.21)$$

เนื่องจากอัตราการสร้างไนไตรต์ ของไนโตรโซโมแนชเกิดได้ช้า ดังนั้นสมการที่ใช้ในการกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน จึงมีเฉพาะสมการของไนโตรโซโมแนชเท่านั้น

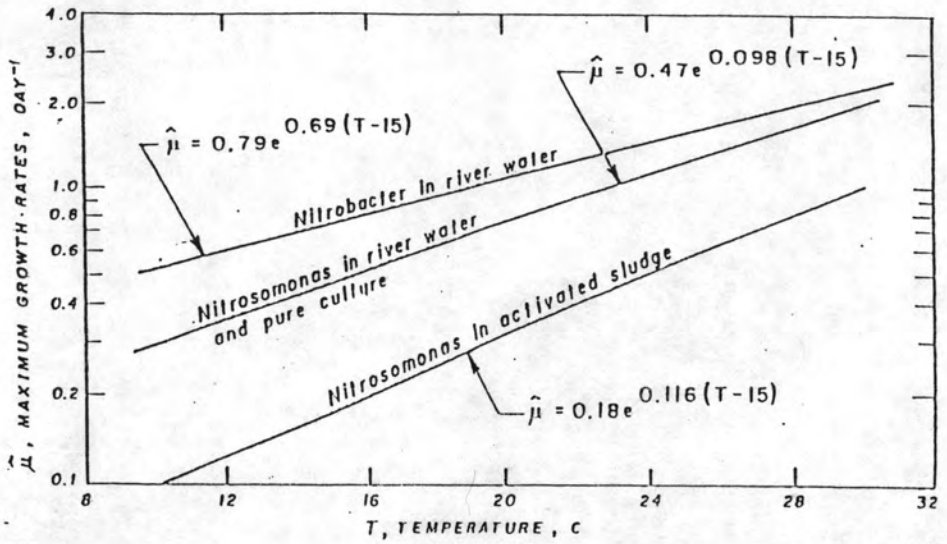
นอกจากผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตสูงสุดแล้ว ยังมีผลต่อค่าคงที่อิ่มตัว (K_s) ด้วย ภาพที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่อิ่มตัว (K_s) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป จากผลการทดลองทั้งไนโตรโซโมแนช และไนโตรแบคเตอร์ สามารถสรุปเป็น สมการที่แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อ K_s ได้ ดังนี้ คือ.-

สำหรับไนโตรโซโมแนช (14)

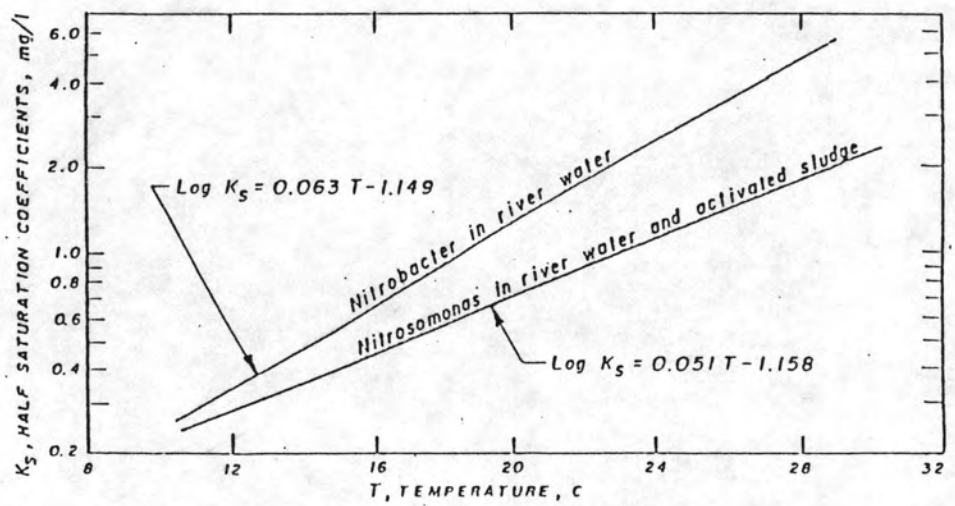
$$\log K_s = 0.051T - 1.158 \qquad (3.22)$$

013082

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.1 แสดงการเจริญเติบโตสูงสุดของไนตริฟายเออร์ที่อุณหภูมิต่างๆ (14,15)



ภาพที่ 3.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่อิ่มตัว (K_s) ของไนตริฟายเออร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (14,15)

สำหรับไนโตรแบคเตอร์ (14)

$$\log K_s = 0.063\ T - 1.149 \qquad (3.23)$$

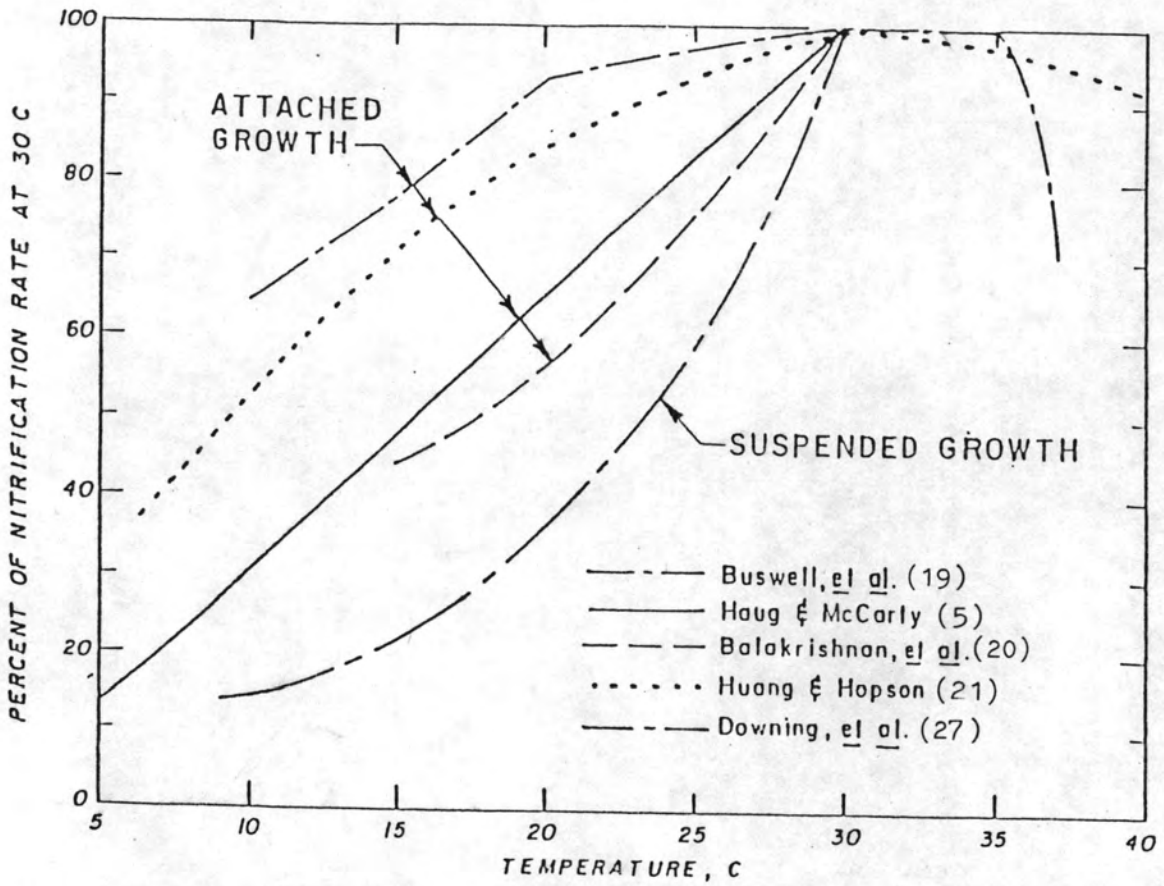
อนึ่ง ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ได้จากสมการเหล่านี้เป็นค่าประมาณเท่านั้น ถ้าต้องการค่าที่ถูกต้องกว่าที่ได้นี้ ต้องทำการหาในระหว่างการทำ Treatability Studies เท่านั้น

จากรายงานผลการทดลอง ไม่เพียงแต่รายงานเฉพาะค่าคงที่ต่าง ๆ ในปฏิกิริยาเท่านั้น ยังมีรายงานอื่น ๆที่เกี่ยวข้องด้วย เช่น การรายงานผลของการทดลองโดยเปรียบเทียบอัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน ในระบบ Attached growth และระบบ Suspended growth เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ภาพที่ 3.3 แสดงถึงรายงานผลการทดลองของนักวิจัย (5,14,15, 19,20,21) ปรากฏว่าระบบ Attached growth สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า ระบบ Suspended growth ที่อุณหภูมิ ต่ำ ๆ (น้อยกว่า 15 องศาเซลเซียส) ซึ่งจากผลการทดลองเหล่านี้ สอดคล้องกับการทดลองของ Borchardt (22) ซึ่งทำการทดลองกับระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ โดยพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน จะลดลงอย่างรวดเร็ว และลดลงประมาณ 50 % ที่อุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียส (กราฟ A , ภาพที่ 3.4)

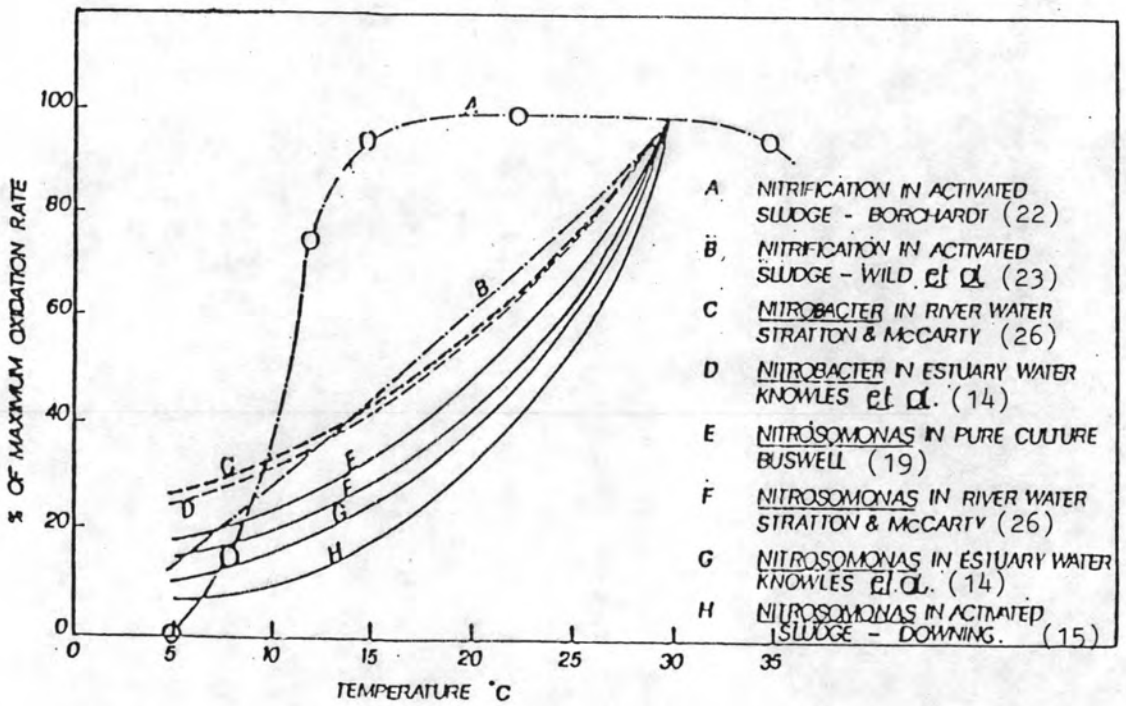
Wild (23) แสดงผลของการทดลอง (กราฟ B , ภาพที่ 3.4) ว่าอัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 90 % ของการเกิดไนตริฟิเคชันที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 17 องศาเซลเซียส การเกิดไนตริฟิเคชันจะเป็น 50 % ของที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าการรายงานผลของ Wild นี้แตกต่างจากรายงานของ Borchardt โดยสิ้นเชิง

Bishop (24) ทำการทดลองโดยใช้แบบจำลอง Single stage และพบว่า 84 % ของไนโตรเจนทั้งหมดจะถูกกำจัดในฤดูร้อน ขณะที่ 75 % ของไนโตรเจน ถูกกำจัดในฤดูหนาว

Sutton (25) รายงานผลการทดลองว่า การเจริญเติบโตของไนตริฟายเออร์จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 7 องศาเซลเซียส ถึง 26 องศาเซลเซียส โดยอัตราการเจริญเติบโตจะลดลง 53 % ที่ 5 องศาเซลเซียส และ 21 % ที่ 7 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบกับอัตราการเจริญเติบโตที่ 26 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิต่อการเกิด ไนตริฟิเคชัน ในระบบ Attached growth และ Suspended growth (21)



ภาพที่ 3.4 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (39)

ภาพที่ 3.4 ยังแสดงถึงผลของอุณหภูมิต่อการออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์ ของแบคทีเรียพวกไนโตรโซโมแนช (กราฟ E , F , G และ H) (14,19,26,27) และการเปลี่ยนไนไตรต์ไปเป็นไนเตรต ของแบคทีเรียพวกไนโตรแบคเตอร์ (กราฟ C และ D) (14,26) จากกราฟทั้งหมดพบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกัน อิทธิพลที่มีต่อแบคทีเรียไนโตรโซโมแนช จะมากกว่าไนโตรแบคเตอร์

จากผลการทดลองดังกล่าว ทำให้สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิที่พอเหมาะในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน จะอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ถึง 35 องศาเซลเซียส และจะเกิดมากที่สุดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอื่นๆด้วย

3.3.2 ออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen)

ความเข้มข้นของ DO มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในการกำจัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวเคมีเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลต่อการเกิดไนตริฟิเคชันจากสมการโมโนด พบว่า DO เป็นสับสเตรตตัวหนึ่งที่มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังนี้ คือ. -

$$\mu = \mu_{max.} \frac{DO}{K_o + DO} \qquad (3.24)$$

DO = ออกซิเจนละลายน้ำ , มก./ล.

K_o = ค่าคงที่การอิ่มตัวของออกซิเจน , มก./ล.

μ = ค่าคงที่ของการเจริญเติบโตจำเพาะ , ต่อวัน

$\mu_{max.}$ = ค่าคงที่ของการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด , ต่อวัน

จากสมการที่ (3.24) ถ้าหาก DO ในถังเติมอากาศมีค่าสูงมากๆ สมการที่ (3.24) จะเป็นดังนี้ คือ .-

$$\mu = \mu_{max.} \qquad (3.25)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะมีค่าสูงสุด เมื่อ DO มีค่าสูงมาก ๆ นอกจากค่าของ DO แล้ว ค่าคงที่การอิ่มตัวของออกซิเจน (K_o) ก็มีบทบาทไม่น้อยไปกว่าค่าของ DO เช่นกัน

จากการทดลองโดย Water Pollution Research ในประเทศอังกฤษ ได้รายงานค่า K_o ไว้ประมาณ 1.3 มก./ล. โดยไม่ได้ระบุอุณหภูมิที่แน่นอน นักวิจัยชาวอเมริกัน (28) ก็เสนอค่า K_o ไว้เช่นกัน คือ ที่ 15 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.15 มก./ล. และที่ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.42 มก./ล. ผลการทดลองดังกล่าวนี้ ไม่ได้ให้รายละเอียดในการทดลองไว้อย่างชัดเจน เช่นเดียวกัน จึงยังไม่สามารถสรุปค่า K_o ได้ ต่อมามีการศึกษาเพิ่มเติมโดย Los Angeles County Sanitation District ทำการศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียของ Pomona Water Renovation Plant โดยพยายามศึกษาถึงผลของ DO ต่ออัตราการเกิดไนตริฟิเคชันโดยตรง (29) ในการศึกษาระบบดังกล่าวนี้ เป็นการศึกษาระบบที่

กำจัดได้ทั้งปริมาณคาร์บอน และ ไนโตรเจนโดยควบคุม การระบายตะกอน , ปริมาณแอมโมเนีย และค่า DO ที่ระดับต่างๆ กัน เพื่อหาข้อสรุปในการเกิดไนตริฟิเคชัน จากผลการทดลองดังกล่าว ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของ อัตราการออกซิเดชันของแอมโมเนีย ที่ระดับ DO ต่างๆ กัน ดังภาพที่ 3.5 Nagel และ Haworth (29) ได้ใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้สรุปออกมาในรูปของสมการโมโนด ดังนี้ คือ.-

$$\mu = 0.19 \frac{DO}{2.0 + DO} \qquad (3.26)$$

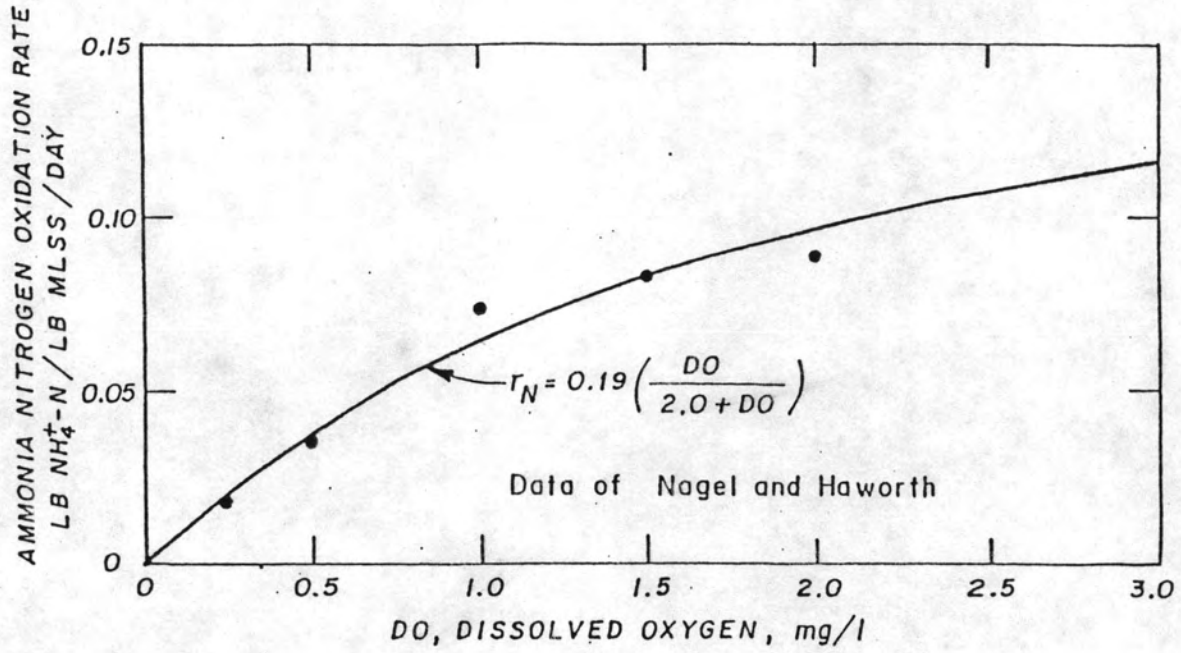
จากสมการ (3.26) ทำให้ทราบว่า Nagel และ Haworth ได้กำหนดค่าคงที่ของการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด ($\mu_{max.}$) และค่าคงที่การอิ่มตัวของออกซิเจน (K_o) เท่ากับ 0.19 ต่อวัน และ 2.0 มก./ล. ตามลำดับ มีข้อสังเกตุว่าการทดลองครั้งนี้ไม่มีการรายงานผลของอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ดี สามารถที่จะคาดคะเนอุณหภูมิที่เมือง Pamona ขณะทำการทดลองได้ว่า อุณหภูมิจะต้องสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส อย่างแน่นอน

Wuhrman (30) ได้ทำการศึกษาถึงผลของ DO ต่ออัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน โดยการควบคุมระบบให้ทำงานต่อเนื่องกัน พบว่า ค่า DO ประมาณ 1 มก./ล. จะเกิดไนตริฟิเคชันต่ำกว่า ระบบบำบัดที่มี DO ประมาณ 4 และ 7 มก./ล.

การวิจัยโดยใช้ Pilot Scale ที่ Metro Sewer District เมือง Cincinnati รัฐ Ohio พบว่า ถ้าหากควบคุม DO ให้อยู่ที่ 2 มก./ล. จะเกิดไนตริฟิเคชันประมาณ 40 % แต่ถ้าเพิ่มปริมาณ DO เป็น 4 มก./ล. จะเกิดไนตริฟิเคชัน ประมาณ 80 % (40)

อนึ่ง ถึงแม้รายงานต่างๆจะรายงานไว้ว่า DO จะต้องมีปริมาณสูง เพื่อให้ไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้โดยสมบูรณ์ก็ตาม แต่มีรายงานที่ขัดแย้งกัน โดยกล่าวว่า ระดับของ DO ที่มีค่าต่ำ ๆ ในถังเติมอากาศนั้น ไม่มีผลต่อการเกิดไนตริฟิเคชันเสมอไป การควบคุม Detention time ในถังเติมอากาศให้มีระยะเวลาเพียงพอ บางครั้งสามารถทำให้ไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ได้

ค่า K_o จากรายงานผลการทดลองปรากฏชัดว่า มีค่าไม่แน่นอน ซึ่งคาดว่าการเปลี่ยนแปลงค่า K_o ที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิ และชนิดของเชื้อพันธุ์ต่าง ๆ เช่น พบว่า ค่า K_o ที่ได้จากการทดลองด้วยระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ จะมีค่าสูงกว่า การทดลองด้วย pure culture(31) นอกจากนี้ขีดจำกัดในการแพร่กระจายตัวของออกซิเจนเข้าสู่ฟล็อค ก็เป็นอีก



ภาพที่ 3.5 แสดงผลของออกซิเจนละลาย (DO) ต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น (29)

สาเหตุหนึ่ง ที่ทำให้ค่า K_o เปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน ดังนั้นข้อมูลที่มีอยู่ จึงยังไม่อาจที่จะนำมาสร้างเป็นสมการเพื่ออธิบายผลของ DO ได้

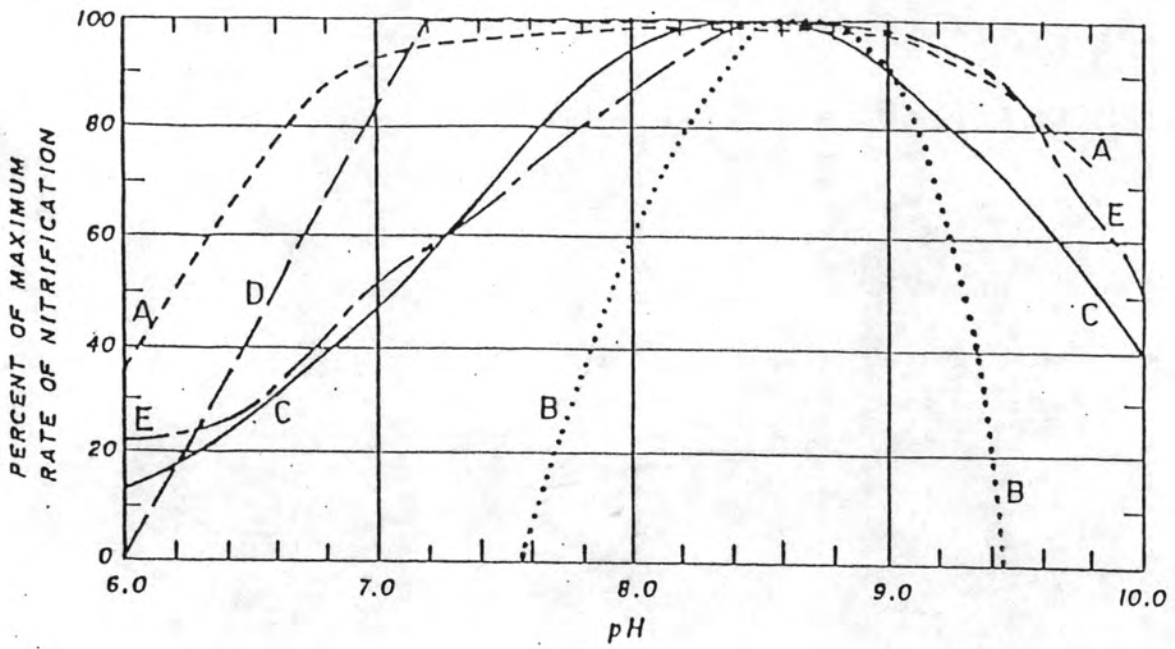
3.3.3 ความเป็นกรดและด่าง (pH)

ระดับของพีเอช นับว่าเป็นตัวการสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการเกิดไนตริฟิเคชัน จากการศึกษาถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนอิออน (Hydrogen ion) ทำให้ทราบว่า ระดับของพีเอชค่อนข้างที่จะแปรปรวน อย่างไรก็ตาม มีผลการศึกษาที่สอดคล้องกันอย่างหนึ่งว่า ระดับของพีเอชในช่วง 7.5 - 8.5 เหมาะสมที่สุดสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ทั้งสองขั้นตอน (4,11,32) แม้ว่ารายงานบางฉบับได้แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมนี้ จะอยู่ภายนอกช่วงดังกล่าวก็ตาม

ภาพที่ 3.6 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองของนักวิจัยหลายๆท่าน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของพีเอช ในการเกิดไนตริฟิเคชันสูงสุด จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ระดับพีเอชที่เหมาะสมนั้นมีช่วงค่อนข้างกว้าง และพบว่า เมื่อระดับของพีเอชลดลง อัตราการเกิดไนตริฟิเคชันก็จะลดต่ำลงด้วย

จากการรายงานผลของการเกิดไนตริฟิเคชัน พบว่า ในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน นั้น จะต้องทำลายสภาพความเป็นด่างส่วนหนึ่งเสมอ ซึ่งถ้าหากสภาพความเป็นด่างในน้ำเสียมีไม่เพียงพอ โอกาสที่ระดับของพีเอชจะลดต่ำลง จึงเป็นไปได้อย่างมาก การที่ระดับของพีเอชลดต่ำลงมาก (ประมาณ 5 - 5.5) เช่นนี้มีผลทำให้ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเกิดไม่ได้หรือเกิดได้น้อย ในขณะเดียวกันอาจทำให้เกิดการไม่จมตัวของสลัดจ์ (bulking) ขึ้น

นอกจากนี้ มีการศึกษาถึงผลของไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของพีเอชอย่างทันทีทันใด ผลการทดลองเปลี่ยนระดับของพีเอชจาก 7.2 เป็น 6.4 พบว่าไม่มีผลต่อปฏิกิริยา แต่ถ้าหากเปลี่ยนแปลงระดับของพีเอชจาก 7.2 เป็น 5.8 ในทันที พบว่าปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย ในน้ำทิ้งเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 11 มก./ล. และเมื่อทำการปรับระดับพีเอชเข้าสู่สภาวะเดิม คือที่ 7.2 จะพบว่า การเกิดไนตริฟิเคชันจะสามารถปรับตัวเข้าสู่สภาวะเดิมได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน จากการทดลองดังกล่าวนี้ทำให้ได้ข้อสรุปว่า การปรับระดับพีเอชให้ต่ำลงแล้วปรับให้เข้าสู่สภาวะเดิม



KEY

SYMBOL	ENVIRONMENT	REFERENCE
A	Nitrosomonas - pure culture	Engle and Alexander (46)
B	Nitrosomonas - pure culture	Meyerhof (48)
C	Activated sludge at 20°C	Sawyer, et al. (44)
D	Activated sludge	Downing, et al. (33)
E	Attached growth reactor at 22°C	Huang and Hopson (21)

ภาพที่ 3.6 แสดงระดับของพีเอชต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (7)

ได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน จากการทดลองดังกล่าวนี้ทำให้ได้ข้อสรุปว่าการปรับระดับพีเอชให้ต่ำลง แล้วปรับให้เข้าสู่สภาวะเดิมอย่างรวดเร็วนั้น ไม่ทำให้แบคทีเรียพวกไนตริฟายเออร์หยุดการเจริญเติบโต เพียงแต่จะไปชลอ (Inhibition) การเกิดปฏิกิริยาให้ลดต่ำลงเท่านั้น(13)

Downing และผู้ร่วมงาน (33) ได้ทำการทดลองถึงอิทธิพลของระดับพีเอชที่มีต่อ อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ที่เกิดขึ้นในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ โดยกล่าวว่า ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นได้สูงสุดในช่วงระดับพีเอชระหว่าง 7.2 ถึง 8.0 และถ้าหากระดับของพีเอชลดต่ำลงอยู่ในช่วงระหว่าง 6 ถึง 7.2 จะมีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตของไนโตรโซโมแนช เปลี่ยนแปลงไปดังสมการ.-

$$\mu = \mu_{max.} [1 - 0.83 (7.2 - pH)] \text{———} (3.27)$$

เนื่องจากแบคทีเรียพวกไนโตรแบคเตอร์สามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็วกว่าไนโตรโซโมแนช อัตราเร็วของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน จึงขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์ ของไนโตรโซโมแนชเท่านั้น ดังนั้นจึงพบว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาในสมการที่ (3.27) เป็นสมการที่ใช้กับแบคทีเรียพวกไนโตรโซโมแนช เท่านั้น

3.3.4 ความเป็นพิษและสารที่ชลอการเจริญเติบโตของไนตริฟายเออร์ (49)

ในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน สารที่ทำให้เกิดการชลอการเจริญเติบโตจะมีผลกระทบต่อแบคทีเรียไนโตรโซโมแนซมากกว่า แบคทีเรียไนโตรแบคเตอร์ โดยสารดังกล่าวนี้จะไปขัดขวางการทำงานของ Metabolism ภายในเซลล์ หรือ ไปทำลายปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากในการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันนั้น แบคทีเรียสามารถสร้างอาหารขึ้นเองจากสารอนินทรีย์ ทำให้มีความเชื่อเกิดขึ้นว่า สารอินทรีย์อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรีย อย่างไรก็ดี พบว่า ความเชื่อเช่นนี้ไม่ถูกต้อง (34,35) ทั้งนี้เพราะไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ในอัตราสูง แม้จะมีสารอินทรีย์ปรากฏอยู่ด้วยก็ตาม แต่จะต้องมีสภาวะแวดล้อมที่พอเหมาะ เช่น ระดับของพีเอช และ DO เป็นต้น

ในสภาวะแวดล้อมบางประการ สารอินทรีย์อาจเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ (37) และบางครั้งอาจจะชลอการเจริญเติบโตของไนตริฟายเออร์ได้เช่นกัน ตัวอย่างของสารอินทรีย์บางอย่างที่ชลอการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์

ตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นสารที่ชลอการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน จากผลการทดลองของ Verstraete และ Parker (37,38) พบว่าสารประกอบ 20 ชนิดจากจำนวนทั้งหมด 52 ชนิด สามารถชลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไนไตรต์ (NO_2^-) ดังนั้นจึงปรากฏว่าปฏิกิริยาของ ไนโตรโซโมแนช เป็นจุดอ่อนของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้ มีรายงานว่า Heterotroph อาจมีผลกระทบต่อแบคทีเรียไนตริฟายเออร์ได้ Hockenbury และผู้ร่วมงาน (36) ได้พิสูจน์ว่าปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่มี Heterotroph อยู่ด้วย ไม่ปรากฏผลเสียโดยตรงกับแบคทีเรียไนตริฟายเออร์แต่อย่างใด นอกจากผลทางอ้อมเท่านั้นเช่น ทำให้ระดับของออกซิเจนละลายลดลง หรือทำให้ระดับพีเอชภายในถังเติมอากาศเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น

ตารางที่ 3.2 สารอินทรีย์ต่างๆที่ชลอการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (36)

สารประกอบ	ความเข้มข้น *, มก./ล.
Acetone	2,000
Allyl alcohol	19.5
Allyl chloride	180
Allyl isothiocyanate	1.9
Benzothiazole disulfide	38
Carbon disulfide	35
Chloroform	18
o-Cresol	12.8
Di-allyl ether	100
Dicyandiamide	250
Diguanide	50
2,4-Dinitrophenol	460
Dithio-oxamide	1.1
Ethanol	2,400
Guanidine carbonate	16.5
Hydrazine	58
8-Hydroxyquinoline	72.5
Mercaptobenzothiazole	3.0
Methylamine hydrochloride	1,550
Methyl isothiocyanate	0.8
Methyl thiuronium sulfate	6.5
Phenol	5.6
Potassium thiocyanate	300
Skatol	7
Sodium dimethyl dithiocarbomate	13.6
Sodium methyl dithiocarbamate	0.9
Tetramethyl thiuram disulfide	30
Thioacetamide	0.53
Thiosemicarbazide	0.18
Thiourea	0.076
Trimethylamine	118

* ระดับความเข้มข้นที่ชลอการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ 75 %