บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 กลไกการทำงานของระบบ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ที่อาศัยจุลินทรีย์ ทำการเปลี่ยนรูปมลสารต่าง ๆ ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกน้อยลง ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งมีอยู่หลายแบบ โดยแตกต่างกันที่การควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และวิธีการเติมอากาศ กลไกการทำงานทั่วไปของระบบนี้คือ สิ่งมีชีวิตต้องอาศัยออกซิเจนอิสระที่มีอยู่ในน้ำและสารอินทรีย์เป็นแหล่งอาหารและพลังงาน ดังสมการที่ (2.1)

$$\text{สารอินทรีย์} + \text{จุลินทรีย์} \xrightarrow{\text{ออกซิเจน}} \text{จุลินทรีย์ที่เกิดใหม่} + \text{คาร์บอนไดออกไซด์} + \text{น้ำ} + \text{พลังงาน} \qquad (2.1)$$

โดยสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารและเจริญเติบโตต่อไปส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกไปสู่อากาศ, น้ำที่ผ่านการบำบัดและจุลินทรีย์ถูกแยกออกจากกันด้วยกระบวนการตกตะกอน ซึ่งในระบบที่มีการไหลของน้ำเสียอย่างต่อเนื่อง จุลินทรีย์ก็จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์และเพิ่มปริมาณอยู่ตลอดเวลา โดยจุลินทรีย์มีการใช้ออกซิเจนเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์, ใช้ในการสร้างเซลใหม่ และย่อยสลายจุลินทรีย์อื่นที่ตายแล้ว โดยมีไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสและเหล็กเป็นอาหารเสริม (Ralmalho, 1977) ซึ่งแสดงได้โดยสมการดังต่อไปนี้

- สมการที่เป็นปฏิกิริยาแบบออกซิเดชั่น

$$\text{สารอินทรีย์} + \text{ออกซิเจน} \xrightarrow{\text{จุลินทรีย์}} \text{คาร์บอนไดออกไซด์} + \text{น้ำ} + \text{พลังงาน} + \text{แอมโมเนีย} \qquad (2.2)$$

- สมการที่เป็นแบบสังเคราะห์

$$\text{สารอินทรีย์} + \text{ออกซิเจน} \xrightarrow[\text{พลังงาน}]{\text{จุลินทรีย์}} \text{เซลใหม่} \qquad (2.3)$$

- สมการที่เป็นแบบออโตออกซิเดชั่น

$$\text{จุลินทรีย์} + \text{ออกซิเจน} \xrightarrow[\text{เอนไซม์}]{\text{จุลินทรีย์}} \text{คาร์บอนไดออกไซด์} + \text{น้ำ} + \text{แอมโมเนีย} + \text{พลังงาน} \quad (2.4)$$

เมื่อพิจารณาถึงการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบพบว่ามันแปรผกผันกับการเพิ่มขึ้นของมวลจุลินทรีย์ดังความสัมพันธ์

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{dS}{dt} \quad (2.5)$$

หรือ

$$r_g = -Yr_{su} \quad (2.6)$$

เมื่อ r_g = อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่อหน่วยเวลา, น้ำหนักต่อปริมาตรต่อเวลา

r_{su} =อัตราการใช้ประโยชน์จากสารอาหารในการดำรงชีพของจุลินทรีย์, น้ำหนักต่อปริมาตรต่อเวลา

Y = สัมประสิทธิ์แสดงการเจริญเติบโตสูงสุดของจุลินทรีย์, มวลของจุลินทรีย์ต่อมวลของสารอาหาร

ค่า Y สามารถหาได้จากการทดลอง โดยขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมในการดำรงชีพของจุลินทรีย์ ซึ่งสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมจะทำให้จุลินทรีย์สามารถใช้อาหารในการดำรงชีพได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสมการที่ 2.6 ยังสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการของMonod คือ

$$r_g = \mu X = \mu_m X \frac{S}{K_s + S} \quad (2.7)$$

และ

$$r_{su} = -\frac{r_g}{Y} = -\mu_m \frac{X}{Y} \frac{S}{K_s + S} \quad (2.8)$$

เมื่อ μ = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลินทรีย์, ต่อเวลา

$$= \mu_m \frac{S}{K_s + S}$$

μ_m = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด, ต่อเวลา

S = ความเข้มข้นของอินทรีย์ละลายน้ำที่ออกจากระบบ, น้ำหนักต่อปริมาตร

K_s =ความเข้มข้นของสารอาหาร ณ จุดที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด, ต่อเวลา

X = ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ, น้ำหนักต่อปริมาตร

ถ้า $\frac{\mu_m}{Y} = k$ คืออัตราการใช้ประโยชน์จากสารอาหารที่มากที่สุดต่อมวลของจุลินทรีย์

ดังนั้น

$$r_{su} = -kX\frac{S}{K_s + S} \qquad (2.9)$$

ในบางสภาวะเช่นสภาพที่มีการขาดแคลนอาหาร หรือเซลบางเซลมีอายุมากจุลินทรีย์มีการย่อยสลายโปรโตพลาสซึมภายในเซลเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยอัตราการลดจำนวนของจุลินทรีย์ (Endogenous Decay), r_d สามารถแสดงได้โดยความสัมพันธ์

$$r_d = -k_dX \qquad (2.10)$$

เมื่อ r_d = อัตราการลดจำนวนของจุลินทรีย์, น้ำหนักต่อปริมาตรต่อเวลา

k_d = สัมประสิทธิ์การสลายตัวของจุลินทรีย์, ต่อเวลา

X = ความเข้มข้นของจุลินทรีย์, น้ำหนักต่อปริมาตรต่อเวลา

จากผลของอัตราการลดจำนวนของจุลินทรีย์ทำให้สามารถหาอัตราการเจริญเติบโตสุทธิของจุลินทรีย์ได้ดังนี้คือ

$$r'_g = r_g - k_dX \qquad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.6 จะเขียนใหม่เป็น

$$r'_g = -Yr_{su} - k_dX \qquad (2.12)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.12 หารด้วย X

$$\frac{r'_g}{X} = -\frac{Yr_{su}}{X} - k_d \qquad (2.13)$$

$$\frac{r'_g}{X} = \mu_m\frac{S}{K_s + S} = \mu' \qquad (2.14)$$

$$r'_g = Y_{obs}r_{su} \qquad (2.15)$$

โดย Y_{obs} = Observed Yield

2.2 การทำงานของตะกอนเร่ง

ตะกอนเร่งที่อยู่ในถังเติมอากาศ มีการทำงานอย่างต่อเนื่องกัน 3 ขั้นตอนคือ

2.2.1 ขั้นตอนการขนถ่าย (Transfer Step) สารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกจุลินทรีย์มาเกาะที่ผนังเซล และส่งน้ำย่อยออกมาย่อยสลายจนสารอินทรีย์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของโมเลกุลที่เล็กพอที่จะซึมผ่านเข้าไปในเซล เพื่อใช้เป็นสารอาหารได้ ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 10 - 30 นาที โดยน้ำย่อยหรือเอนไซม์นี้ จุลินทรีย์ผลิตขึ้นมาไว้ภายในเซลและในน้ำที่อยู่รอบตัวมัน สารอินทรีย์แต่ละชนิดต้องใช้เอนไซม์เฉพาะอย่างในการย่อย จึงต้องให้จุลินทรีย์มีเวลาการปรับตัว (Acclimatize) ที่พอเหมาะ โดยเฉพาะในช่วงเริ่มการทำงาน (Start Up) ของระบบเพื่อผลิตเอนไซม์ออกมาใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของน้ำเสีย

2.2.2 ขั้นตอนการเปลี่ยนรูป (Conversion Step) เมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยให้กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ที่สามารถละลายน้ำผ่านเข้าไปในเซลได้แล้ว จุลินทรีย์จะใช้มันในการสังเคราะห์เซลใหม่ (Synthesis) และเกิดกระบวนการออกซิเดชั่น ได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน

2.2.3 ขั้นตอนการรวบรวมตะกอน (Flocculation Step) ตะกอนที่ถูกกวนผสมกันอยู่ในถังเติมอากาศ จะเกิดการชนกันแล้วจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้นเรียกว่า ฟลอค (Floc) หรือตะกอนเร่ง(Activated Sludge) ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ดี ทำให้ตะกอนชนิดนี้สามารถแยกออกจากน้ำที่ถูกบำบัดแล้วได้ง่าย (Bolton and Klein, 1971)

2.3 ลักษณะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

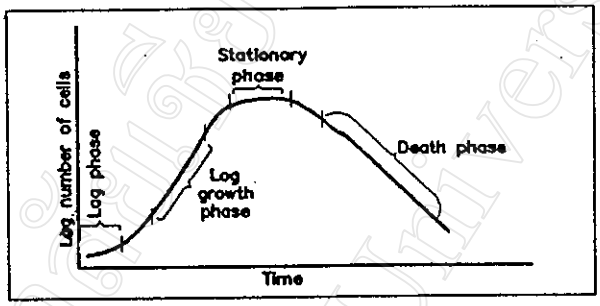
จุลินทรีย์ที่อยู่ในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์หรือแบบปลักโฟลว์ มีการเจริญเติบโตแบ่งได้เป็น 4 ระยะดังแสดงในรูปที่ 2 โดยแต่ละระยะสามารถอธิบายได้ดังนี้

ระยะที่ 1 เรียกว่า Lag Phase **ระยะนี้แบคทีเรียต้องการเวลาที่ใช้ในการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ ก่อนเริ่มแบ่งตัว**

ระยะที่ 2 เรียกว่า Log Phase **ระยะนี้เซลเริ่มแบ่งตัวเพิ่มจำนวนตามอัตราที่กำหนดโดย อัตราการเกิดและความสามารถในการผลิตอาหาร**

ระยะที่ 3 เรียกว่า Stationary Phase ระยะนี้แบคทีเรียมีจำนวนคงที่ เนื่องจากเซลได้ขับสารอาหารออกมา และการเกิดของเซลใหม่มีเท่ากันกับอัตราการตาย

ระยะที่ 4 เรียกว่า Log-Death Phase ระยะนี้อัตราการตายมีมากกว่าอัตราการเกิดเซลใหม่ ทำให้จำนวนประชากรของแบคทีเรียลดลง



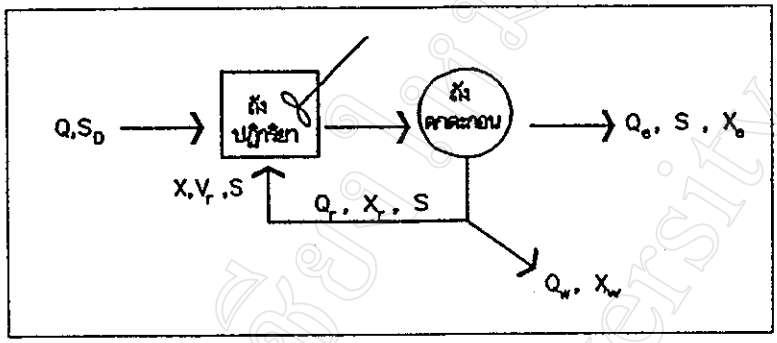
รูปที่ 2.1 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์หรือปลักโฟลว์
ที่มา : Metcalf and Eddy (1991)

ในการออกแบบระบบของถังเติมอากาศแบบกวนสมบูรณ์ (Complete Mix) มีการควบคุมระบบให้มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ในช่วงที่ 3 และ 4 ซึ่งจะทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีค่าคงที่ตลอดทั้งถัง เมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ที่เข้าสู่ระบบมีค่าคงที่แล้ว จะทำให้จุลินทรีย์สามารถรวมตัวกันเป็นฟลอค และตกตะกอนได้ดี

2.4 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบตะกอนเร่ง

ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบตะกอนเร่งนี้มีอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนเติมอากาศและส่วนตกตะกอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 โดยน้ำเสียถูกผ่านเข้ามายังส่วนเติมอากาศที่มีตะกอนเร่งและมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนซึ่งได้แก่ สารอาหาร, พีเอชและออกซิเจนที่ละลายน้ำ หลังจากนั้นตะกอนเร่งทำการลดค่ามลพิษสารอินทรีย์ ด้วยการย่อยสลายให้อยู่ในรูปคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ส่วนน้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วไหลไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำใส โดยตะกอนที่แยกตัวออกมาส่วนหนึ่ง ถูกหมุนเวียนกลับไปยังถังเติมอากาศเพื่อบำบัดมลสารที่เข้ามาใหม่ และอีกส่วนหนึ่งกลายเป็นตะกอนส่วนเกิน อันเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งต้องนำไปบำบัดต่อไป ซึ่งน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอนจะเป็นน้ำที่ถูกบำบัดแล้วซึ่งสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้ สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการควบคุมระบบ

คือการระบายตะกอนส่วนเกินออก โดยเป็นสิ่งที่ต้องกระทำอย่างสม่ำเสมอ เพื่อควบคุมอัตราส่วนของอาหารต่อปริมาณจุลินทรีย์ให้เหมาะสม



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง

2.5 ระบบตะกอนเร่งแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mixed Activated Sludge)

ลักษณะที่สำคัญของระบบแบบนี้คือ ถังเติมอากาศมีลักษณะที่สามารถทำให้น้ำเสียและตะกอนผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ระบบนี้สามารถรับภาระบรรทุกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วได้ดี เนื่องจากมีการกระจายของน้ำเสียอย่างทั่วถึงทั้งถังแต่จะมีปัญหาเรื่องตะกอนจุลินทรีย์ตกได้ไม่ดีเนื่องจากความเข้มข้นของมลสารในถังเติมอากาศมีค่าต่ำและอาจก่อให้เกิดตะกอนไม่จมตัวได้

2.5.1 จลนศาสตร์ของระบบตะกอนเร่งแบบกวนสมบูรณ์

อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบนี้มีค่าต่ำกว่าค่าตามสมการของโมโนด เพราะมีการระบายตะกอน (Q_w,X_w) และการไหลของน้ำเสียออกจากระบบ (Q_e,X_e) ดังนั้นจึงสามารถกำหนดอายุของตะกอน (Mean Cell Residence Time,θ_c) ที่มีอยู่ในระบบโดยสมการ

$$\theta_c = \frac{\text{จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ}}{\text{จุลินทรีย์ที่ออกจากระบบ}} \qquad (2.16)$$

หรือ

$$\theta_c = \frac{V_r X}{Q_w X_w + Q_e X_e} \qquad (2.17)$$

เมื่อ θ_c= อายุตะกอน,เวลา

V_r = ปริมาตรของถังปฏิกริยา,ปริมาตร

Q_w= อัตราการระบายตะกอนทิ้ง,ปริมาตรต่อเวลา

Q_e= อัตราการไหลของน้ำออกจากระบบ,ปริมาตรต่อเวลา

X = ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยา,มวลต่อปริมาตร

X_e = ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในน้ำที่ออกจากระบบ,มวลต่อปริมาตร

จากสมดุลของมวลในระบบ (Lawrence and McCarty, 1970) ซึ่งแสดงได้โดย

อัตราการสะสมของจุลินทรีย์ในระบบ = อัตราการไหลของจุลินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ - อัตราการไหลของจุลินทรีย์ออกจากระบบ + การเกิดจุลินทรีย์ในระบบ (2.18)

และสามารถเขียนเขียนได้ในรูปสมการ

$$\frac{dX}{dt}V_r = QX_o - [Q_wX_w + Q_eX_e] + V_r(r'_g) \qquad (2.19)$$

โดยที่สภาวะคงตัวอัตราการเพิ่มของจุลินทรีย์มีค่าเท่ากับศูนย์และน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบไม่มีจุลินทรีย์ดังนั้น

$$\frac{Q_wX_w + Q_eX_e}{V_rX} = -\frac{Yr_{su}}{X} - k_d \qquad (2.20)$$

เมื่อรวมสมการที่ (2.17) และ (2.20) เข้าด้วยกันจะได้สมการใหม่คือ

$$\frac{1}{\theta_c} = -\frac{Yr_{su}}{X} - k_d \qquad (2.21)$$

และจากสมดุลแบบจำลองของระบบตะกอนเร่งสามารถเขียนสมการอัตราการใช้ประโยชน์ของจุลินทรีย์ได้คือ

$$r_{su} = -\frac{Q}{V_r}(S_o - S) = -\frac{(S_o - S)}{\theta} \qquad (2.22)$$

เมื่อ S_o = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่เข้าสู่ระบบ,มวลต่อปริมาตร

S = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ออกจากระบบ,มวลต่อปริมาตร

θ = เวลากักเก็บ,เวลา

เมื่อแทนค่าจากสมการ (2.22) ลงในสมการ (2.21) จะได้ค่าความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบคือ

$$X = \frac{\theta_c Y(S_o - S)}{\theta(1 + k_d\theta_c)} \qquad (2.23)$$

และความเข้มข้นของสารอาหารที่ออกจากระบบจะมีค่า

$$S = \frac{K_s(1 + k_d\theta_c)}{\theta_c(Yk - k_d) - 1} \qquad (2.24)$$

ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ Observed Yield ได้คือ

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + k_d\theta_c} \qquad (2.25)$$

2.6 ชนิดของกระบวนการเมื่อแบ่งตามอัตราการบำบัด

เมื่อเราใช้อัตราการไหลของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ เป็นตัวกำหนดชนิดของกระบวนการ หมายความถึงการแบ่งช่วงการทำงาน ตามอัตราส่วนของน้ำหนักสารอินทรีย์ต่อน้ำหนักของจุลินทรีย์ (F/M) หรือค่าอายุของตะกอน ซึ่งจากรายงานของ จีรพงษ์ กันนรา และ มนัส ฟักแฟง (2531) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงคือ

2.6.1 อัตราการบำบัดต่ำ (Low Rate or Extended Aeration Rate) อัตรานี้มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์ประมาณ 0.05 - 0.15kg BOD / kg MLVSS และมีค่าอายุตะกอน 20 - 40 วัน โดยระยะเวลาเก็บกักในถังเติมอากาศ (θ) มีค่ามากกว่า 24 ชั่วโมง ส่วน MLSS มีค่าอยู่ระหว่าง 3500 - 6000 มก./ล. และมีประสิทธิภาพในการลดค่า BOD อยู่ในช่วง 85 - 98 %

2.6.2 อัตราการบำบัดธรรมดา (Conventional Rate) อัตรานี้มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์ประมาณ 0.2 -0.5kg BOD / kg MLVSS และมีค่าอายุตะกอน 5 - 15 วัน โดยมีระยะเวลาเก็บกักในถังเติมอากาศ (θ) 4 - 8 ชั่วโมง ส่วน MLSS มีค่าอยู่ระหว่าง 1500 - 3000 มก./ล. และมีประสิทธิภาพในการลดค่า BOD อยู่ในช่วง 85 - 95 %

2.6.3 อัตราการบำบัดสูง (High Rate) อัตรานี้มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์ประมาณ 0.5 - 1.5 kg BOD / kg MLVSS และมีค่าอายุตะกอนน้อยกว่า 3 วัน โดยมีระยะเวลาเก็บกักในถังเติมอากาศ (θ) 1 - 3 ชั่วโมง ส่วน MLSS มีค่าอยู่ระหว่าง 4000 - 5000 มก./ล. และมีประสิทธิภาพในการลด BOD อยู่ในช่วง 60 - 70 %

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบตะกอนเร่ง

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบได้แก่

2.7.1 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ถ้าค่าอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์มีค่าสูง จะทำให้การตกตะกอนเกิดได้ไม่ดี เนื่องจากจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดการเจริญเติบโตแบบกระจัดกระจายทั่วไป (Dispersed Growth) แทนที่จะเกิดการเจริญเติบโตแบบรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ถ้าอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์มีค่าต่ำ จะทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ลดลง แม้ว่าจุลินทรีย์สามารถตกตะกอนได้เร็ว แต่ก็ไม่สามารถจับตะกอนสารอินทรีย์ตกลงมาได้หมด ทำให้น้ำที่ออกจากถังตกตะกอนมีความขุ่น

2.7.2 สารอาหาร (Nutrients) จุลินทรีย์มีความต้องการสารอาหารซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสและเหล็ก โดยปกติแร่ธาตุเหล่านี้มีอยู่อย่างเพียงพอในน้ำเสียชุมชน ซึ่งการขาดสารอาหารเหล่านี้จะทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นตัวสร้างฟลอคเจริญเติบโตได้ไม่ดี จนทำให้จุลินทรีย์ชนิดที่เป็นเส้นใยเจริญเติบโตได้มากกว่า เป็นผลให้การตกตะกอนเกิดได้ยากและประสิทธิภาพของระบบจะลดต่ำลง ซึ่งโดยปกติอัตราส่วนของ BOD : N : P : Fe จะมีค่าเท่ากับ 100 : 5 : 1 : 0.5 ตามลำดับ (จีรพงษ์ กันนรา และ มนัส พักแฟง, 2531)

2.7.3 ออกซิเจนที่ละลายน้ำ ปริมาณของออกซิลนในถังเติมอากาศต้องมีค่าระหว่าง 1 - 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำนี้ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจุลินทรีย์จะสามารถทำงานได้มากขึ้น ทำให้อัตราการใช้ออกซิเจนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณออกซิเจนจะละลายน้ำได้น้อยลง

2.7.4 ระยะเวลาในการบำบัด ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ต้องมีเพียงพอที่จะให้จุลินทรีย์ในถังเติมอากาศสามารถทำการย่อยสลายมลสารต่าง ๆ หากมีระยะเวลาน้อยเกินไปสารบางชนิดอาจยังไม่ถูกย่อยทำให้ค่าบีโอดีสูงอยู่ ส่วนระยะเวลาในการตกตะกอนก็เช่นเดียวกัน หากมีน้อยก็ทำให้การตกตะกอนเกิดขึ้นได้ไม่ดี แต่หากนานเกินไปก็ทำให้ตะกอนเน่าได้

2.7.5 พีเอช ค่าพีเอชที่เหมาะแก่การเจริญเติบโตของแบคทีเรียอยู่ในช่วง 6.5 - 8.5 ถ้าค่าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.5 ราจะเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรีย ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงและตะกอนตกได้ไม่ดี ถ้าค่าพีเอชสูงเกินกว่านี้ ฟอสฟอรัสจะแยกตัวออกจากน้ำ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ระบบก็ทำงานได้ไม่ดีเช่นเดียวกัน

2.7.6 สารพิษ สารพิษแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ แบบมีพิษเฉียบพลัน (Acute Toxicity) และแบบมีพิษสะสม (Chronic Toxicity) โดยความเป็นพิษเฉียบพลันนี้จะเกิดขึ้นในระยะเวลารวดเร็วเพียงไม่กี่ชั่วโมง ซึ่งตัวอย่างของสารพิษเหล่านี้ได้แก่ อาร์เซนิกและไซยาไนด์ ส่วนความเป็นพิษสะสมเกิดจากสารพวกทองแดงและโลหะหนักต่าง ๆ ที่จุลินทรีย์สะสมไว้ภายในเซล เมื่อมีสารเหล่านี้ความเข้มข้นถึงระดับหนึ่ง จุลินทรีย์ก็จะตายในที่สุด (WPCF and ASCE, 1977)

2.7.7 อุณหภูมิ ผลของอุณหภูมิสามารถแบ่งได้เป็น

ก. ทางกายภาพ อุณหภูมิสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการตกตะกอนของจุลินทรีย์ในถังตกตะกอนได้ โดยหากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงเพียง 2 - 3 องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดการกวนขึ้นภายในถังตกตะกอน ทำให้การตกตะกอนเกิดได้ยากขึ้น

ข. ทางเคมี อุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของแก๊สออกซิเจนและการถ่ายเทแก๊สต่าง ๆ ออกจากระบบ ซึ่งผลของอุณหภูมิต่อปฏิกริยาชีวเคมีในระบบบำบัดน้ำเสียสามารถแสดงได้โดยสมการอัตราเร็วของปฏิกริยาชีวเคมี ณ อุณหภูมิใด ๆ ดังสมการ

$$r_T = r_{20}\theta^{(T-20)} \qquad (2.26)$$

เมื่อ r_T = อัตราเร็วของปฏิกริยาชีวเคมี ณ อุณหภูมิ $T^{\circ}C$, ชม.$^{-1}$

r_{20} = อัตราเร็วของปฏิกริยาชีวเคมี ณ อุณหภูมิ 20 $^{\circ}C$, ชม.$^{-1}$

θ = ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (มีค่า 1.00 - 1.04 สำหรับระบบตะกอนเร่ง)

ค. ทางชีววิทยา การที่อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นทุก 10 องศาเซลเซียส ทำให้จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอีกสองเท่า จนถึงอุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นหากมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอีก การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะลดลงอย่างรวดเร็ว

2.7.8 การกวน ภายในถังเติมอากาศต้องทำให้เกิดการกวนกันอย่างทั่วถึง ของจุลินทรีย์และน้ำเสีย เพื่อให้จุลินทรีย์กับมลสารต่าง ๆ สามารถจับตัวกันเป็นฟลอค และป้องกันการตกตะกอน โดยการกวนที่ดีต้องป้องกันไม่ให้เกิดการไหลลัดวงจร รวมทั้งทำให้ค่า MLSS และค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำ สม่ำเสมอกันทั่วทั้งถัง

2.7.9 อัตราการไหลของน้ำเสีย หากอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ มีค่ามากกว่าที่ออกแบบไว้ จะทำให้ระยะเวลาในการบำบัดลดน้อยลง สารอินทรีย์จะมีปริมาณมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบลดลง หากอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ มีค่าน้อยกว่าที่ออกแบบไว้ ก็ทำให้อาหารไม่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์

2.8 ไนโตรเจน

ปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ส่วนใหญ่ในโลกของเรานี้จะอยู่ในรูปของแก๊สไนโตรเจนซึ่งมีปริมาณถึง 79 %แต่สิ่งมีชีวิตจะไม่สามารถนำแก๊สนี้ไปใช้ประโยชน์โดยตรงได้ นอกจากมันจะอยู่ในสภาพของสารประกอบ ดังนั้นแหล่งสะสมไนโตรเจนจึงอยู่ในสภาพของสารอินทรีย์เช่น ยูเรีย โปรตีน และกรดนิวคลีอิก นอกจากนี้ไนโตรเจนยังเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการสร้างไซโตพลาสซึมของสิ่งมีชีวิต โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโปรตีน รวมทั้งเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย ซึ่งกระบวนการสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนได้แก่ กระบวนการแอมโมนิฟิเคชั่น, ไนตริฟิเคชั่นและดีไนตริฟิเคชั่น ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้คือ

2.8.1 แอมโมนิฟิเคชั่น (Ammonification) แอมโมนิฟิเคชั่นเป็นการย่อยสลายกรดอมิโนหรือโปรตีน โดยแอมมิโนไฟอิ้งแบคทีเรีย เช่น ซูโดโมนัส และโปรทีอัส

2.8.2 ไนตริฟิเคชั่น (Nitrification) แอมโมเนียที่เกิดจากสิ่งขับถ่ายและซากพืชซากสัตว์จะถูกไนไตรท์แบคทีเรียเช่น ไนโตรโซโมนัสเปลี่ยนให้กลายเป็นไนไตรท์ และไนไตรท์ถูกไนเตรทแบคทีเรียเช่นไนโตรแบคเตอร์ เปลี่ยนให้กลายเป็นไนเตรทต่อไปดังสมการ

$$NH_3 - N \xrightarrow[\text{Nitrosomonous}]{} NO_2 - N \qquad (2.27)$$

$$NO_2 - N \xrightarrow[\text{Nitrobactor}]{} NO_3 - N \qquad (2.28)$$

2.8.3 ดีไนตริฟิเคชั่น (Denitrification) ดีไนตริฟิเคชั่นคือการเกิดปฏิกริยารีดักชั่นของไนเตรท โดยมีแบคทีเรียพวกแฟคัลเททีฟ (Facultative)เป็นตัวการ ซึ่งแบคทีเรียพวกนี้มีทั้งที่สร้างอาหารเองได้ (Autotrophs) และสร้างอาหารเองไม่ได้ (Heterotrophs) และมันสามารถใช้ออกซิเจนได้เช่นเดียวกันกับไนเตรทแบคทีเรียบางชนิดยังสามารถทำให้เกิดการหมักในสภาพที่ไม่

มีไนเตรทหรือออกซิเจนได้ด้วย ในการเกิดดีไนตริฟิเคชั่นจากแบคทีเรียพวกที่สามารถสร้างอาหารเองได้ คาร์บอนไดออกไซด์หรือไบคาร์บอเนตจะเป็นแหล่งคาร์บอนแทนสารอินทรีย์ ระบบเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของมันมีอยู่ 2 แบบคือ

ก. Assimilatory ซึ่งทำหน้าที่แปลงไนเตรทให้เป็นแอมโมเนียสำหรับการสร้างเซล

ข. Dissimilatory ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนจากไนเตรท

การที่ระบบจะเกิดดีไนตริฟิเคชั่นนั้นปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่ละลายน้ำควรมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยปฏิกริยารีดักชั่นของไนเตรทสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.29)

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \qquad (2.29)$$

NO, N_2O และ N_2 จะถูกปล่อยออกมาในสภาพที่เป็นแก๊ส แต่โดยมากอยู่ในรูป N_2 เพื่อให้เกิดการสลายตัวในสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด ในระบบบำบัดโดยทั่วไปสารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเลคตรอน ส่วนออกซิเจนที่เติมเข้าไปจะเป็นตัวรับอิเลคตรอน เพื่อให้เกิดเซลใหม่และคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่นเป็นการกำจัดตัวรับอิเลคตรอน ซึ่งก็คือไนเตรท

2.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ (เกรียงศักดิ์ 2537, Metcalf and Eddy 1991)

ค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย มักทำการทดลองศึกษาโดยใช้ถังปฏิกริยาแบบตะกอนเร่งกวนสมบูรณ์ ที่มีการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งใช้ระยะเวลาในการศึกษาประมาณ 2-3 สัปดาห์ โดยสิ่งที่สำคัญในการดำเนินการทดลองคือ การควบคุมปริมาณความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยาให้มีค่าคงที่ ซึ่งกระทำโดยระบายตะกอนส่วนเกินออกจากระบบ เมื่อทำการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว ทำการวัดปริมาณการไหลของน้ำเสีย (Q) และเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบ (S_o และ S) ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบและที่ออกจากระบบ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการออกแบบดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.9.1 การหาค่า K_s และ k สามารถกระทำได้โดยพลอตกราฟระหว่าง $\frac{X\theta}{S_o - S}$ (แกน Y) และ $\frac{1}{S}$ (แกน X) ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $\frac{K_s}{S}$ และจุดตัดแกน Y มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{k}$

2.9.2 การหาค่า Y และ k_d สามารถกระทำได้โดยพลอตกราฟระหว่าง $\frac{1}{\theta_c}$ (แกน Y) และ $\frac{S_o - S}{X\theta}$ (แกน X) ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเท่ากับ Y และจุดตัดแกน Y มีค่าเท่ากับ $-k_d$

2.10 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

Bisogni and Lawrence (1971) พบว่าการเพิ่มค่าอายุตะกอน (θ_c) มีผลทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดีขึ้น แต่ค่า θ_c ต้องอยู่ในช่วง 3 - 15 วัน การที่ θ_c มีค่าน้อยกว่า 2 วันทำให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียเป็นแบบกระจัดกระจาย เกิดการตกตะกอนได้ไม่ดี เช่นเดียวกันกับถ้า θ_c มีค่ามากกว่า 15 วัน จะมีฟลอคเข็มหมุด (Pin Floc) เกิดขึ้นทำให้ความหนาแน่นของตะกอนลดลงและจมตัวยาก ส่วนอัตราการหมุนเวียนตะกอนกลับ ไม่มีผลต่อการทำงานของระบบตะกอนเร่งกวนสมบูรณ์

Malnou (1984) ได้ทำการทดลองใช้ระบบตะกอนเร่งขนาดห้องปฏิบัติการ ที่มีแอนแอโรบิค, แอนอคสิคและแอโรบิคโซนเพื่อศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัส โดยตะกอนที่ใช้ในการทดลองนำมาจากโรงงานบำบัดน้ำเสียแบบภาระบรรทุกต่ำ ซึ่งน้ำเสียที่ใช้มีส่วนผสมของน้ำเสียชุมชน, เนื้อสกัด, นมผงไม่คืนรูปและเปปโทน ส่วนอายุตะกอนมีค่า 9.6 วัน มีการควบคุมค่าซีโอดีที่เข้าสู่ระบบให้มีค่าประมาณ 656 มก./ล. ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า การใช้ฟอสฟอรัสเกิดในแอนอคสิกโซน เมื่อส่วนประกอบของไนโตรเจนในน้ำเสียมีค่าสูง ไนเตรทจะถูกหมุนเวียนกลับไปยังแอนแอโรบิกโซนพร้อมกับตะกอน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสลดลง เนื่องจากการหยุดยั้งการสร้างกรด ซึ่งลดแบคทีเรียของ Volatile Fatty Acids ที่กำจัดฟอสฟอรัส โดยไนเตรททำหน้าที่เป็นตัวรับอิเลคตรอนในการนำฟอสฟอรัสไปใช้ที่แอนอคสิคโซน

Hascoet and Florentz (1985) ได้ทำการทดลองใช้ระบบตะกอนเร่งขนาดห้องปฏิบัติการ 2 ระบบโดยระบบที่ 1 มีไนเตรทในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ อีกระบบไม่มี ซึ่งแต่ละระบบมีขนาดเท่ากัน และมีการเปิดเครื่องเติมอากาศเป็นเวลา 5.5 ชั่วโมงสลับกับการปิด 2.5 ชั่วโมง θ_c มีค่า 10 - 15 วัน โดยระบบที่ 1 ใช้ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนนำมาปรับสภาพด้วยสารอาหารสังเคราะห์ (เนื้อสกัดผสมกับน้ำประปา) และเมื่อระบบที่ 1 เข้าสู่สภาวะคงตัวระบบที่ 2 จะเริ่มทำงานโดยใช้ตะกอนส่วนเกินจากระบบที่ 1 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงระบบทั้ง 2 มีการบำบัดฟอสฟอรัส โดยระบบที่มีไนเตรทมีประสิทธิภาพ 70 % ส่วนระบบที่ไม่มีไนเตรทสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ 88 % ซึ่งการลดประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในระบบที่มีไนเตรท อาจเกิดเนื่องมาจากการขาดผลผลิตสำหรับจุลินทรีย์โพลีฟอสฟอรัส และระบบไม่มีสภาพที่ไร้ออกซิเจน รวมทั้งพีเอชบีในระบบมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวรับอิเลคตรอนน้อยกว่าไนเตรท ทำให้เกิดการนำฟอสฟอรัสไปใช้ได้น้อยลง

Lotter et. al. (1986) ได้ทำการทดลองโดยใช้ระบบตะกอนเร่งแบบกวนสมบูรณ์ 3 ชุดโดยชุดที่ 1 เป็นชุดควบคุม ชุดที่ 2 มีถังเติมอากาศต่อกันแบบอนุกรม ชุดที่ 3 จะเป็นระบบบาร์เดนโฟที่รับน้ำเสียชุมชนผสมกับอะซีเตท จากผลการทดลองที่ได้มีเพียงแต่ระบบบาร์เดนโฟเท่านั้นที่สามารถกำจัดฟอสฟอรัสส่วนเกิน แม้ว่าในแต่ละระบบจะมี Acinetobactor spp. (40 % ในระบบชุดควบคุม 60 % ในระบบที่มีถังเติมอากาศต่อกันแบบอนุกรม และ 90 % ในระบบบาร์เดนโฟ) ซึ่งประสิทธิภาพในการลดไนเตรทของแต่ละชุด ถูกตรวจสอบโดยการนำ MLSS จากถังเติมอากาศมาเพาะในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งไม่มีความแตกต่างของประสิทธิภาพระหว่างชุด ดังนั้นความสามารถในการบำบัดไนเตรทจึงไม่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมในกรณีของ Acenetobactor spp. และความสามารถในการลดไนเตรทมีเท่า ๆ กับการลดไนไตรท์ คือมีไนเตรทเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่จะเกิดเป็นแก๊สไนไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ (Acenetobactor ลดไนเตรทไปเป็นไนไตรท์ได้ 32 - 43 % และลดไนเตรทให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนได้ 6 - 12 %)

Zhao et. al. (1994) ได้ทำการทดลองใช้ระบบตะกอนเร่งที่มีการทำงานแบบสลับในการบำบัดสารอินทรีย์, ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โดยระบบจะประกอบไปด้วยถังแอนแอโรบิกขนาด 200 ลิตร 1 ถัง ถังเติมอากาศขนาด 800 ลิตร 2 ถัง และถังตกตะกอนขนาด 1000 ลิตร 1 ถัง ซึ่งอัตราการหมุนเวียนตะกอนมีค่าเท่ากับ 100 % และมีการเติม-หยุดเติมอากาศ การที่ระบบตะกอนเร่งมีแอนแอโรบิกโซนก่อน ช่วยให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียสามารถสะสมปริมาณฟอสเฟตส่วน

เกิน และภายใต้สภาพแอโรบิกการกำจัดฟอสฟอรัสทำได้โดยกำจัดตะกอนส่วนเกินออกจากระบบ ส่วนการกำจัดไนโตรเจนเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชั่นและดีไนตริฟิเคชั่น

Hao and Huang (1996) ได้ทำการทดลองใช้ระบบตะกอนเร่งกวนสมบูรณ์ ที่มีการทำให้เกิดสภาพที่มีออกซิเจน (Aerobic) และไร้ออกซิเจน (Anoxic) สลับกันในการกำจัดไนโตรเจนโดยระบบที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 5.4 ลิตรซึ่งแบ่งเป็นส่วนเติมอากาศ 4.2 ลิตรและส่วนตกตะกอน 1.2 ลิตร ซึ่งมีการควบคุมอายุตะกอนระหว่าง 7-20 วัน ที่ระยะเวลาเก็บกักประมาณ 10 วัน สัดส่วนการเติม-หยุดเติมอากาศเท่ากับ 50 % เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว ผลการทดลองที่ได้ในแต่ละการทดลองสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ 72, 75, 83 และ 83% ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเปิดปิดเครื่องเติมอากาศ ซึ่งบำบัดไนโตรเจนได้เพียง 37, 20, 27 และ 37 % ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระบบที่มีการเติมอากาศเป็นจังหวะ มีการกำจัดไนโตรเจนได้ดี

Mauret et. al. (1996) ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของแอมโมเนีย, อุณหภูมิและพีเอชในการกำจัดแอมโมเนียและการสะสมของไนไตรท์อย่างชั่วคราวโดยมีความเข้มข้นของแอมโมเนียอยู่ในช่วง 35 - 90 มก./ล. ที่อุณหภูมิ 8.5 - 15 องศาเซลเซียส และพีเอช 7 - 8.5 พบว่าอุณหภูมิและพีเอชที่สูงมีผลต่อการกำจัดแอมโมเนีย โดยไปหยุดยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ไนโตรแบคเตอร์ทำให้เกิดการสะสมของไนไตรท์ขึ้น

มงคล ดำรงค์ศรี (2530) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์เป็นค่าเฉพาะที่สภาวะใดสภาวะหนึ่งเท่านั้น หากสภาพในการทดลองเปลี่ยนไป ค่านี้ก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย

ชัยพร ภู่ประเสริฐ (2538) พบว่ากระบวนการดีไนตริฟิเคชั่นเกิดขึ้นได้ดีเมื่ออัตราส่วนระหว่าง COD : N มีค่ามากกว่า 15 เนื่องจากซีโอดีในน้ำเสียสามารถใช้ออกซิเจนที่ละลายน้ำให้หมดไป ทำให้จุลินทรีย์สามารถใช้ออกซิเจนที่เป็นส่วนประกอบของไนเตรทได้อย่างสมบูรณ์

ศราวุธ อุประวรรณา และ ศุภชัย คงอินทร์ (2540) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะการทำงานและหาค่าสัมประสิทธิ์จลน์ศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งกวนสมบูรณ์โดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการขนาด 10 ลิตร โดยแบ่งเป็นส่วนเติมอากาศ 8.33 ลิตร และส่วนตกตะกอน 1.67 ลิตร ทำให้ระยะเวลาเก็บกักทั้งหมด

มีค่าเท่ากับ 13.33 ชั่วโมงที่ค่าอายุตะกอน 4.5,9.3,13.8 และ 18.5 วัน จากผลการทดลองที่ได้เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว แล้วพบว่าสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูปของเอฟซีโอดีได้ 80, 85, 88 และ 89 % ตามลำดับ และได้ค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์จากการทดลองดังต่อไปนี้คือ Y=0.665 mg VSS/mg COD, k_d=0.0695 d^{-1}, k=0.7 d^{-1}, K_s=66.6 mg COD/l และ μ=0.46 d^{-1}

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University