

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานและแนวคิดในการวิจัย

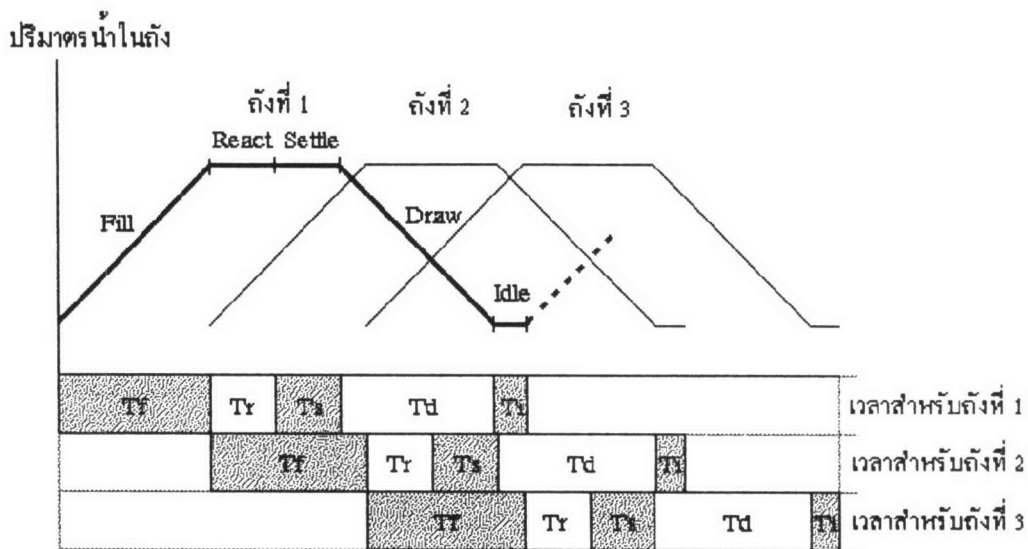
2.1 ทฤษฎีการทำงานพื้นฐานของระบบเอสบีอาร์

ระบบเอสบีอาร์อาจประกอบด้วยถังปฏิบัติการแบบถังเดียว (เหมาะสำหรับรับน้ำเสียที่ไหลไม่ต่อเนื่อง) หรือแบบหลายถัง (เหมาะสำหรับน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่อง) ถังปฏิบัติการแต่ละใบจะมีการทำงานตามลำดับหน้าที่ดังนี้

- รับน้ำเสีย (fill)
- กำจัดความสกปรก (react)
- ตกตะกอน (settle)
- ระบายน้ำทิ้ง (draw)
- ระยะเวลาพัก (idle)

เมื่อถังปฏิบัติการทำหน้าที่ครบตามลำดับข้างต้น ถือได้ว่าระบบเอสบีอาร์ได้ทำงานครบหนึ่งรอบวัฏจักร (cycle)

จากภาพที่ 2.1 ถังปฏิบัติการใบที่ 1 จะเริ่มต้นรับน้ำเสียจนเต็มถึงในช่วงเวลารับน้ำเสีย(T_f) จากนั้นก็จะเป็นช่วงกำจัดความสกปรก (T_r) ซึ่งเครื่องเติมอากาศจะทำงาน (การเติมอากาศจะเริ่มตั้งแต่เริ่มรับน้ำเสียก็ได้) เมื่อความสกปรกในน้ำเสียถูกกำจัดจนเพียงพอแล้วจึงหยุดเครื่องเติมอากาศและปล่อยให้ตกตะกอน (T_s) จนกระทั่งตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอนแยกชั้นออกมาจากน้ำใส จึงเข้าสู่ช่วงระบายน้ำทิ้ง (T_d) โดยการระบายน้ำใสที่ส่วนบนของถังออก จากนั้นก็จะเข้าสู่ช่วงพัก (T_i) เพื่อเตรียมพร้อมที่จะรองรับน้ำเสียในวัฏจักรใหม่ต่อไป อีกทั้งการระบายสลัดจ์ส่วนเกิน (เพื่อควบคุมอายุสลัดจ์) ก็สามารถกระทำในช่วงนี้ได้



$$T_c = T_f + T_r + T_d + T_i$$

- T_c = total cycle time
- T_f = fill time
- T_r = react time
- T_s = settle time
- T_d = draw time
- T_i = idle time

ภาพที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของระบบเอสบิอาร์ที่ประกอบด้วยถังปฏิกิริยา 3 ใบ

ถังปฏิกิริยาใบที่ 2 และ 3 ก็มีขั้นตอนการทำงานเช่นเดียวกับถังใบที่ 1 จะมีข้อแตกต่างกันก็เพียงจุดเริ่มต้นของรอบวัฏจักรเท่านั้น กล่าวคือจะต้องจัดให้ถังทั้งสามใบสามารถรับน้ำเสียต่อเนื่องกันได้ตลอดเวลา โดยเมื่อน้ำเสียเต็มถังใบที่ 1 แล้ว ถังใบที่ 2 จะต้องสามารถรับน้ำเสียต่อทันที ถังใบที่ 3 ก็เช่นเดียวกันกับถังใบที่ 2 จนกระทั่งก่อนที่น้ำเสียจะเต็มถังใบที่ 3 ถังใบที่ 1 ซึ่งรับน้ำเสียก่อนหน้านี้จะต้องทำการบำบัดน้ำเสีย ตกตะกอน และระบายน้ำใสทิ้งเรียบร้อยแล้ว ในช่วงพักและพร้อมที่จะรับน้ำเสียต่อจากถังใบที่ 3 ต่อไป จากขั้นตอนการทำงานข้างต้นระบบเอสบิอาร์ก็จะสามารถรองรับน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่องได้

ในการใช้ระบบเอสบิอาร์ในการบำบัดน้ำเสียนั้น จะต้องเลือกจำนวนรอบวัฏจักรต่อวัน (m) และเลือกจำนวนถังปฏิกิริยา (n) ที่เหมาะสม

จำนวนรอบวัฏจักรต่อวัน (m)

จำนวนรอบวัฏจักรต่อวัน (m) จะเป็นตัวกำหนดระยะเวลาของรอบวัฏจักร (T_c) โดยที่

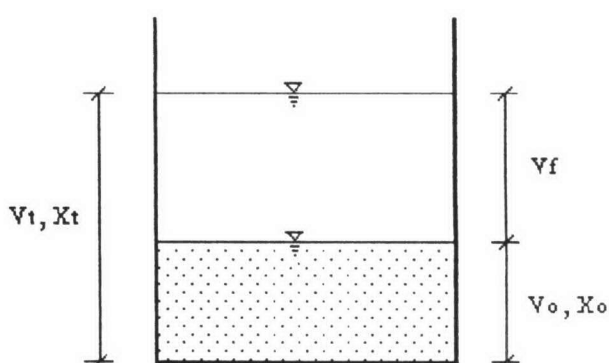
$$T_c = 1/m \quad , \text{วัน}$$

และ

$$T_c = T_f + T_r + T_s + T_d + T_i$$

ในการเลือกจำนวนรอบวัฏจักร (m) ที่เหมาะสม จะทำให้มีระยะเวลาของรอบวัฏจักร (T_c) ที่นานเพียงพอที่ระบบจะสามารถทำงานในช่วงต่าง ๆ คือ T_r , T_p , T_s , T_d , T_i ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถกำจัดความสกปรกให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งตามต้องการ

นอกจากนี้ ในกรณีที่น้ำเสียมีอัตราการไหลคงที่ จำนวนรอบวัฏจักรต่อวัน (m) จะเป็นตัวกำหนดปริมาณของถังปฏิกิริยาในส่วนที่รองรับน้ำเสียเข้า (V_f) อีกด้วย ดังในภาพที่ 2.2 แสดงปริมาณส่วนต่าง ๆ ของถังปฏิกิริยา



V_t = ปริมาตรของถังปฏิกิริยาทั้งหมด , m^3

V_f = ปริมาตรในส่วนที่รองรับน้ำเสียเข้าของถังปฏิกิริยาทั้งหมด , m^3

V_o = ปริมาตรหลังจากระบายน้ำใสส่วนบนทิ้งของถังปฏิกิริยาทั้งหมด , m^3

X_t = ความเข้มข้นของมวลจุลชีพในถังปฏิกิริยาในช่วงกำจัดความสกปรก (react) , $g./m^3$

X_o = ความเข้มข้นของมวลจุลชีพในถังปฏิกิริยาหลังจากระบายน้ำใสส่วนบนทิ้ง , $g./m^3$

ภาพที่ 2.2 ปริมาตรในส่วนต่าง ๆ ของถังปฏิกิริยา

หากน้ำเสียที่ไหลเข้ามีอัตราการไหลคงที่เท่ากับ Q $m^3/วัน$ ดังนั้น

$$Q = m V_f$$

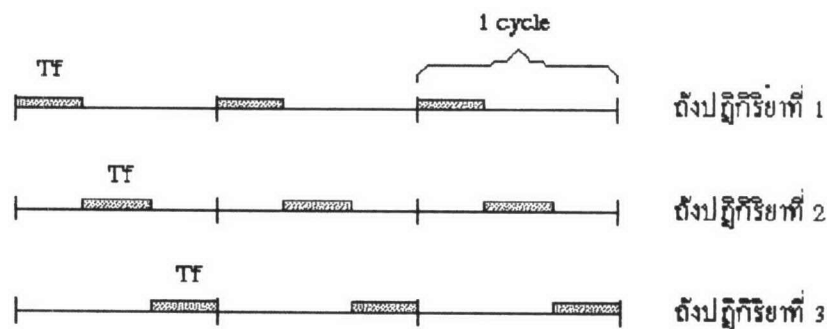
จำนวนรอบวัฏจักรต่อวัน (m) เป็นตัวกำหนดจำนวนครั้งที่ถังปฏิกิริยาจะรองรับน้ำเสียเพื่อทำการบำบัดในหนึ่งวัน ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดของถังปฏิกิริยาในส่วน V_f ด้วย กล่าวคือถ้ากำหนดให้มีจำนวนรอบวัฏจักรมากขึ้น ปริมาตรของถังปฏิกิริยาในส่วนนี้ก็จะลดลง

ในการควบคุมการทำงานของระบบเอสปีอาร์นั้น เพื่อเป็นการสะดวกในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ ควรที่จะใช้การควบคุมเวลามากกว่าที่จะใช้การควบคุมระดับ โดยการใช้ไทม์เมอร์ควบคุมให้มีจำนวนรอบวัฏจักรต่อวัน (m) ให้คงที่ ซึ่งจะทำให้มีระยะเวลาในการทำงานของช่วงต่าง ๆ ในรอบวัฏจักรมีค่าคงที่ โดยเฉพาะระยะเวลาในการป้อนน้ำเสีย

เนื่องจากการไหลของน้ำเสียจริงจะมีอัตราการไหลแปรเปลี่ยนตลอดเวลา โดยที่ควบคุมระยะเวลาในการป้อนน้ำเสียคงที่ ดังนั้นปริมาตรของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกริยาของแต่ละรอบวัฏจักรนั้นจึงไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำเสีย และเพื่อให้ถังปฏิกริยามีปริมาตรเพียงพอที่จะรองรับน้ำเสียในช่วงที่มีอัตราการไหลสูงสุดได้ ในการคำนวณหาค่า V_r จึงจำเป็นต้องคิดที่อัตราการไหลสูงสุด

จำนวนถังปฏิกริยา (n)

ในการทำงานของระบบเอสปีอาร์เพื่อที่จะให้สามารถรับน้ำเสียได้ต่อเนื่องนั้น ควรจะต้องมีจำนวนถังปฏิกริยามากกว่า 1 ใบ และณ.ที่เวลาใด ๆ จะต้องมีถังปฏิกริยาอย่างน้อยหนึ่งใบที่อยู่ในสถานะพร้อมที่จะรับน้ำเสีย ดังในภาพที่ 2.3 แสดงช่วงเวลาในการป้อนน้ำเสียของระบบเอสปีอาร์แบบสามถัง



ภาพที่ 2.3 ช่วงเวลาการป้อนน้ำเสียใน 1 รอบวัฏจักรของระบบเอสปีอาร์แบบ 3 ถัง : $3T_f = T_c$

จากภาพที่ 2.3 ระบบจะสามารถรับน้ำเสียที่ไหลต่อเนื่องได้ก็ต่อเมื่อ $3T_f = T_c$

ในกรณีที่มี n ถังปฏิกริยา ดังนั้น

$$T_f = T_c / n$$

จะเห็นได้ว่าการเลือกจำนวนถังปฏิกริยา (n) นั้นจะเป็นตัวกำหนดระยะเวลาในการป้อนน้ำเสีย (T_f) ของแต่ละระยะเวลารอบวัฏจักร (T_c) ที่กำหนด

2.2 การออกแบบระบบเอสปีอาร์

กระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบเอสปีอาร์เป็นกระบวนการแบบกึ่งเท ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอาหารและมวลจุลชีพเกิดขึ้นภายในแต่ละรอบวัฏจักร การมองการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในช่วงสั้น ๆ นี้ ทำให้ดูเหมือนกับว่าระบบเอสปีอาร์เป็นระบบที่ไม่มีสภาวะคงตัวและมีความแตกต่างจากระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์โดยสิ้นเชิง ในกรณีนี้ มั่นสิน ตันฑุลเวศม์ (2525) ได้เสนอให้พิจารณากระบวนการเอสปีอาร์ในสเกลเวลาที่กว้างขึ้น โดยให้พิจารณาที่ผลการทำงานของระบบเมื่อครบรอบวัฏจักรแล้ว และเมื่อพิจารณาจากหลาย ๆ รอบวัฏจักรที่ต่อเนื่องกันไปก็จะสามารถเห็นสภาวะคงตัวของระบบเอสปีอาร์ได้ ซึ่งก็มีลักษณะเช่นเดียวกับระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ จนน่าที่จะสามารถนำเอาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์มาใช้กับระบบเอสปีอาร์ได้

สมการในการออกแบบ (Orhon และ Artan, 1994)

ดังที่กล่าวมาแล้ว ระยะเวลาหนึ่งรอบวัฏจักรของระบบเอสปีอาร์ประกอบด้วยการทำงานต่าง ๆ ดังนี้

$$T_c = T_f + T_r + T_s + T_d + T_i \quad (2.1)$$

โดยให้

$$T_s = T_f + T_r \quad (2.2)$$

เมื่อ T_s = ระยะเวลาในการเติมอากาศ (ในที่นี้กำหนดให้เริ่มเติมอากาศขณะเริ่มป้อนน้ำเสีย)

กำหนดพารามิเตอร์ในการทำงาน 2 ตัวคือ จำนวนรอบวัฏจักรต่อวัน (m) และจำนวนถังปฏิกรณ์ (n) โดยกำหนดจำนวนรอบวัฏจักรต่อวัน (m) เพื่อให้หาปริมาตรของถังปฏิกรณ์ในส่วนที่รองรับน้ำเสียที่ป้อน (V_r) และหาเวลาของรอบวัฏจักร (T_c) โดย

$$Q = m V_r \quad , \text{ม.}^3/\text{วัน} \quad (2.3)$$

และ

$$T_c = 1 / m \quad , \text{วัน} \quad (2.4)$$

กำหนดอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะจาก

$$q = \frac{Q (S_0 - S)}{V_t X_t} = \frac{V_f m (S_0 - S)}{V_t X_t} \quad (2.5)$$

เมื่อ S_0 = ความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำเสียเข้าระบบ , ก./ม.³

S = ความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำทิ้งที่บำบัดได้ , ก./ม.³

q = อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ , วัน⁻¹

จาก

$$\frac{1}{\theta_c} = Y_{obs} q \quad (2.6)$$

เมื่อ θ_c = อายุสลัดจ์ , วัน

Y_{obs} = Observed yield

แทนสมการ 2.5 ลงใน 2.6 ได้

$$\theta_c = \frac{V_t X_t}{V_f m Y_{obs} (S_0 - S)} \quad (2.7)$$

จัดรูปสมการ 2.7 ใหม่ได้

$$M_x = V_t X_t = V_f m Y_{obs} (S_0 - S) \theta_c \quad (2.8)$$

เมื่อ M_x = มวลจุลชีพทั้งหมดในถังปฏิกรณ์ , ก.

แทน m จากสมการ 2.4 ลงใน 2.8 ได้

$$T_c = \frac{V_f}{V_t} \frac{Y_{obs} (S_0 - S)}{X_t} \theta_c \quad (2.9)$$

เนื่องจากมีการเติมอากาศเฉพาะในช่วงเวลา T_a เท่านั้น ดังนั้นระยะเวลาที่จุลชีพอยู่ในระบบจึงควรคิดเป็นอายุสลัดจ์สัมฤทธิ์ (Effective sludge age, θ_c^e) ซึ่งกำหนดโดย

$$\theta_c^e = \frac{T_a}{T_c} \theta_c \quad (2.10)$$

แทนค่า θ_c จากสมการ 2.10 ลงใน 2.9 ได้

$$T_a = \frac{V_f}{V_t} \frac{Y_{\text{obs}} (S_o - S)}{X_t} \theta_c^e \quad (2.11)$$

หรือ

$$T_a = \left(1 - \frac{V_o}{V_t} \right) \frac{Y_{\text{obs}} (S_o - S)}{X_t} \theta_c^e \quad (2.12)$$

โดยที่

$$Y_{\text{obs}} = \frac{Y}{1 + K_d \theta_c^e} \quad (2.13)$$

เมื่อ Y = สัมประสิทธิ์ยึดจับจริง

K_d = อัตราการสลายตัวจำเพาะ, วัน⁻¹

การเลือกจำนวนถังปฏิกรณ์ ในกรณีที่มี n ถังปฏิกรณ์จะสามารถกำหนด T_f ได้จาก

$$T_f = \frac{T_c}{n} = \frac{1}{m n} \quad (2.14)$$

คำนวณหาปริมาตรของถังปฏิกรณ์แต่ละใบได้จาก

$$V_{tn} = \frac{V_t}{n} \quad (2.15)$$

$$V_{fn} = \frac{V_f}{n} \quad (2.16)$$

$$V_{on} = \frac{V_o}{n} \quad (2.17)$$

เมื่อ V_{tn} = ปริมาตรรวมของถังปฏิกรณ์แต่ละใบ, ม.³

V_{fn} = ปริมาตรส่วนที่รองรับน้ำเสียของถังปฏิกรณ์แต่ละใบ, ม.³

V_{on} = ปริมาตรหลังจากระบายน้ำใสทิ้งของถังปฏิกรณ์แต่ละใบ, ม.³

$$P_{xv} \approx Y_{obs} Q_{ave} S_o$$

$$= 0.3 * 1000 * 0.28 = 84 \text{ Kg.VSS/day}$$

$$P_x = 84 / 0.8 = 105 \text{ Kg.SS/day}$$

C) เลือก m ให้ $m = 2$

$$V_f = Q_{ave} / 2 = 1000/2 = 500 \text{ m}^3$$

$$T_c = 1 / m = 1/2 \text{ day} = 12 \text{ hr.}$$

$$T_a = T_c - (T_s + T_d + T_i) = 12 - 2 = 10 \text{ hr.}$$

D) คำนวณ M_x

$$M_x = P_x \theta_c$$

$$= P_x (T_c / T_a) \theta_c'$$

$$= 105 * (12/10) * 20 = 2520 \text{ Kg.SS}$$

E) กำหนด X_o

$$X_o = 8000 \text{ mg/L SS}$$

F) คำนวณ V_o โดยเผื่อค่า Safety factor = 1.1 เพื่อป้องกันไม่ให้สลัดจ์หลุดออกมาพร้อมกับน้ำใสที่ระบายทิ้ง

$$V_o = 1.1 M_x / X_o = 1.1 * 2520 / 8 \approx 350 \text{ m}^3$$

G) คำนวณ V_t

$$V_t = V_o + V_f = 350 + 500 = 850 \text{ m}^3$$

H) คำนวณ X_t

$$X_t = M_x / V_t$$

$$= 2520 / 850 = 2.964 \text{ Kg/m}^3 = 2964 \text{ mg/L SS}$$

พิจารณาค่า X_t ที่ได้ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม หากได้ค่าที่สูงหรือต่ำเกินไปจะต้องเลือก T_c หรือ T_a หรือ V_o ใหม่

I) เลือก n ใช้ $n = 3$ จะได้

$$V_m = V_t / n = 850/3 = 284 \text{ m}^3$$

$$V_{fn} = V_f / n = 500/3 = 167 \text{ m}^3$$

$$V_{on} = V_o / n = 350/3 = 117 \text{ m}^3$$

แต่เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำเสียแปรเปลี่ยนคงในภาพที่ 2.4 ดังนั้นจึงต้องคำนวณปริมาตรถังเพื่อสำหรับรองรับน้ำเสียในช่วงที่มีอัตราการไหลสูงสุดด้วย โดย

$$T_f = T_c / n = 12/3 = 4 \text{ hr.}$$

จากภาพที่ 2.4 ที่ช่วงที่มีอัตราการไหลสูงสุดในช่วงระยะเวลา 4 ชั่วโมง คิดเป็นปริมาตร $= 240 \text{ m}^3$

ดังนั้นเลือกใช้

$$V_{fn} = 240 \text{ m}^3$$

$$V_{on} = 117 \text{ m}^3$$

$$V_m = V_{fn} + V_{on} = 240 + 117 = 357 \text{ m}^3$$

$$V_t = n V_m = 3 * 357 = 1071 \text{ m}^3$$

2.3 โมเดลการกำจัดสารอาหารของกระบวนการแบบกึ่งเท

เราสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารอาหาร และมวลจุลชีพในถังปฏิกรณ์ที่เวลาใด ๆ ได้จากการเขียนสมดุลย์ทางมวลภายในถังปฏิกรณ์ โดยแบ่งกระบวนการแบบกึ่งเทออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงเวลาที่ทำการป้อนน้ำเสียและช่วงหลังจากป้อนน้ำเสียแล้ว

ช่วงเวลาที่ทำการป้อนน้ำเสีย

ทำการดุลมวลของสารอาหารในถังปฏิกรณ์ได้ดังนี้

อัตราการไหลเข้า - อัตราการไหลออก + อัตราการใช้สารอาหาร = อัตราการสะสม

$$Q S_0 - 0 + V r_s = \frac{d(N_s)}{dt} = \frac{d(SV)}{dt} \quad (2.18)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าถังปฏิกรณ์, $\text{ม}^3/\text{วัน}$

V = ปริมาตรของน้ำสลัดจ์ในถังปฏิกรณ์ที่เวลาใด ๆ, ม^3

r_s = อัตราการใช้สารอาหาร, $\text{ก}./\text{ม}^3\text{-วัน}$

N_s = มวลของสารอาหารทั้งหมดในถังปฏิกรณ์ที่เวลาใด ๆ, $\text{ก}.$

S_0 = ความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์, $\text{ก}./\text{ม}^3$

S = ความเข้มข้นของสารอาหารในถังปฏิกรณ์ที่เวลาใด ๆ, $\text{ก}./\text{ม}^3$

เทอมขวามือของสมการที่ 2.18 อยู่ในรูปดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{d(SV)}{dt} = S \frac{dV}{dt} + V \frac{dS}{dt} \quad (2.19)$$

โดยที่ $dV/dt = Q$ ดังนั้นสมการที่ 2.19 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{d(SV)}{dt} = S Q + V \frac{dS}{dt} \quad (2.20)$$

แทนสมการที่ 2.20 ลงใน 2.18 จะได้

$$\frac{ds}{dt} = \frac{Q (S_o - S)}{V} + r_s \quad (2.21) \text{ (Irvine และ Richter, 1976)}$$

ทำการคูณมวลของจุลชีพในถังปฏิกิริยาได้ดังนี้

อัตราการไหลเข้า - อัตราการไหลออก + อัตราการเติบโตสุทธิ = อัตราการสะสม

$$0 - 0 + V r'_g = \frac{d(N_x)}{dt} = \frac{d(X V)}{dt} \quad (2.22)$$

เมื่อ r'_g = อัตราการเติบโตสุทธิของจุลชีพ, ก./ม.³-วัน

N_x = มวลทั้งหมดของจุลชีพในถังปฏิกิริยาที่เวลาใด ๆ, ก.

X = ความเข้มข้นของจุลชีพในถังปฏิกิริยาที่เวลาใด ๆ, ก./ม.³

เทอมขวามือของสมการที่ 2.22 อยู่ในรูปดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งสามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\frac{d(X V)}{dt} = X \frac{dV}{dt} + V \frac{dX}{dt} \quad (2.23)$$

โดยที่ $dV/dt = Q$ ดังนั้นสมการที่ 2.23 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{d(X V)}{dt} = X Q + V \frac{dX}{dt} \quad (2.24)$$

แทนสมการที่ 2.24 ลงใน 2.22 จะได้

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{Q X}{V} + r'_g \quad (2.25) \text{ (Irvine และ Richter, 1976)}$$

โดยการใช้วิธีแบบโมนอด จะได้

$$r_s = \frac{-\mu_m}{Y} \frac{S X}{K_s + S} \quad (2.26)$$

$$r'_g = \mu_m \frac{S X}{K_s + S} - K_d X \quad (2.27)$$

เมื่อ μ_m = อัตราการเติบโตสูงสุดจำเพาะ, วัน⁻¹

Y = ค่าสัมประสิทธิ์ยิลด์จริง

K_s = ค่าคงที่การอิ่มตัว (saturation constant), ก./ม.³

K_d = อัตราการสลายตัวจำเพาะ, วัน⁻¹

และถ้า Q มีค่าคงที่ในช่วงเวลาการป้อนน้ำเสีย ดังนั้น

$$V = V_0 + Q t \quad (2.28)$$

เมื่อ V_0 = ปริมาตรของน้ำสลัดจ์ที่จุดเริ่มต้นของการป้อนน้ำเสีย

แทนสมการที่ 2.26 2.27 และ 2.28 ลงใน 2.21 และ 2.25 จะได้ (Orhon,Cimsit,Tunay.,

1986 และ Orhon,Artan., 1994)

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V_0 + Q t} (S_0 - S) - \frac{\mu_m}{Y} \frac{S X}{K_s + S} \quad (2.29)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{-Q X}{V_0 + Q t} + \mu_m \frac{S X}{K_s + S} - K_d X \quad (2.30)$$

ช่วงหลังจากการป้อนน้ำเสียเรียบร้อยแล้ว

ทำการดุลมวลของสารอาหารในถังปฏิกริยาได้ดังนี้

อัตราการไหลเข้า - อัตราการไหลออก + อัตราการใช้สารอาหาร = อัตราการสะสม

$$0 - 0 + V r_s = \frac{d(S V)}{dt} \quad (2.31)$$

โดยที่ V มีค่าคงที่ ดังนั้นเขียนสมการที่ 2.31 ใหม่ได้เป็น

$$r_s = \frac{dS}{dt} \quad (2.32) \text{ (Irvine และ Richter, 1976)}$$

ทำการคูณมวลของจุลชีพในถังปฏิกิริยาได้ดังนี้

อัตราการไหลเข้า - อัตราการไหลออก + อัตราการเติบโตสุทธิ = อัตราการสะสม

$$0 - 0 + V r'_g = \frac{d(X \cdot V)}{dt} \quad (2.33)$$

โดยที่ V มีค่าคงที่ ดังนั้นจะเขียนสมการที่ 2.33 ใหม่ได้เป็น

$$r'_g = \frac{dX}{dt} \quad (2.34) \text{ (Irvine และ Richter, 1976)}$$

โดยการใช้นิพจน์แบบโมนอคตามสมการที่ 2.26, 2.27 แทนลงในสมการที่ 2.32, 2.34 จะได้ (Orhon, Cimsit, Tunay., 1986 และ Orhon, Artan., 1994)

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-\mu_m}{Y} \frac{S \cdot X}{K_s + S} \quad (2.35)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m \frac{S \cdot X}{K_s + S} - K_d \cdot X \quad (2.36)$$

สมการที่ 2.29, 2.30, 2.35, 2.36 เป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการทำนายความเข้มข้นของสารอาหารและจุลชีพของระบบเอสปีอาร์ โดยหากทราบค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ของน้ำเสียและค่าความเข้มข้นของสารอาหารและจุลชีพเริ่มต้น (S และ X ที่เวลา $t = 0$) ก็จะสามารถใช้ Fourth-order Runge-Kutta method (James, Smith, Wolford., 1985) ในการคำนวณโมเดลข้างต้น ซึ่งรายละเอียดของ Fourth-order Runge-Kutta method ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

ยกตัวอย่างเช่น

$$\mu_m = 2 \text{ d}^{-1}$$

$$V_t = 5 \text{ L}$$

$$Y = 0.5 \text{ g.VSS/g.BOD}_5$$

$$V_o = 3 \text{ L}$$

$$K_s = 80 \text{ mg.BOD}_5/\text{L}$$

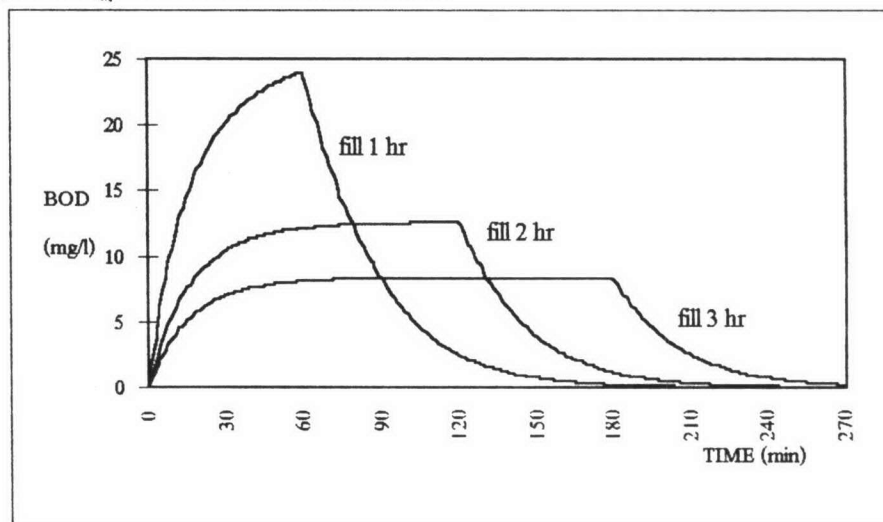
$$X(0) = 2000 \text{ mg.MLVSS/L}$$

$$K_d = 0.05 \text{ d}^{-1}$$

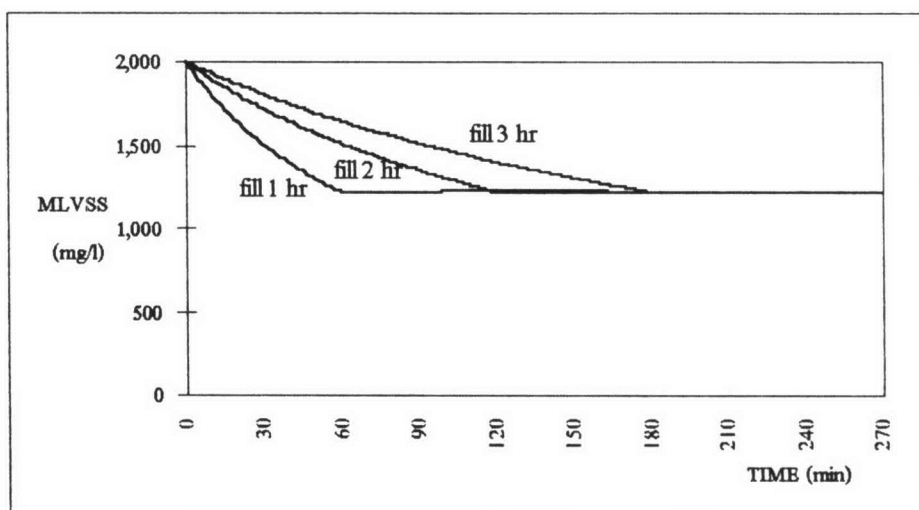
$$S(0) = 0 \text{ mg.BOD}_5/\text{L}$$

$$S_o = 150 \text{ mg.BOD}_5/\text{L}$$

ที่เวลาในการป้อนน้ำเสีย 1, 2 และ 3 ชม. จะได้ความเข้มข้นของสับสเตรทและจุลชีพที่เวลาใด ๆ ในดังปฏิกิริยาดังในภาพที่ 2.5 และ 2.6



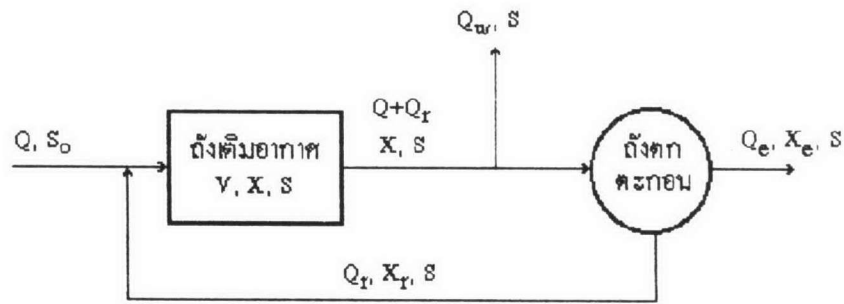
ภาพที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของ BOD_5 สำหรับการป้อนน้ำเสีย 1, 2, 3 ชม.



ภาพที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของ MLVSS สำหรับการป้อนน้ำเสีย 1, 2, 3 ชม.

2.4 วิธีประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ (Benefield และ Randall, 1980 : Metcalf&Eddy.Inc, 1991 : Mines และ Sherrard, 1989)

โดยการใช้แบบจำลองกระบวนการแยกที่เวเต็ดสลัดจ์แบบกวนสมบูรณ์และมีการเวียนสลัดจ์กลับ ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แบบจำลองกระบวนการแยกที่เวเต็ดสลัดจ์แบบกวนสมบูรณ์และมีการเวียนสลัดจ์กลับ

เมื่อ V = ปริมาตรของถังเติมอากาศ, m^3

X = ความเข้มข้นของจุลชีพในถังเติมอากาศ, $g./m^3$

X_e = ความเข้มข้นของจุลชีพในน้ำทิ้ง, $g./m^3$

X_r = ความเข้มข้นของจุลชีพในกระแสเวียนกลับ, $g./m^3$

S_0 = ความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำเสียที่เข้าระบบ, $g./m^3$

S = ความเข้มข้นของสารอาหารในถังเติมอากาศ, $g./m^3$

Q = อัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบ, $m^3/วัน$

Q_w = อัตราการทิ้งน้ำสลัดจ์จากถังเติมอากาศ, $m^3/วัน$

Q_r = อัตราการไหลของกระแสเวียนกลับ, $m^3/วัน$

Q_e = อัตราการไหลของน้ำทิ้งที่บำบัดแล้ว, $m^3/วัน$

เราสามารถที่จะทำการดุลมวลของจุลชีพและสารอาหาร เพื่อใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์ได้ โดยสมการการดุลมวลเหล่านี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานดังนี้

- การทำงานของถังเติมอากาศเป็นแบบกวนสมบูรณ์ ความเข้มข้นของสารต่างๆในถังจะมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน
- ความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าคงที่
- ไม่มีจุลชีพอยู่ในน้ำเสียที่เข้าระบบ
- ไม่เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีในถังตกตะกอน จะเกิดขึ้นเฉพาะในถังเติมอากาศเท่านั้น

- มวลของจุลชีพที่อยู่ในถังตกตะกอนและในกระแสลัดจ์เวียนกลับจากกันถังตกตะกอนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับมวลจุลชีพที่อยู่ในถังเติมอากาศ
- ปริมาตรที่ใช้ในการคำนวณค่าอายุสัดจ์ (จะกล่าวถึงต่อไป) จะใช้เฉพาะปริมาตรของถังเติมอากาศเท่านั้น
- ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว

การหาค่า Y และ K_d

จากภาพที่ 2.7 ค่าอายุสัดจ์ (θ_c) คือระยะเวลาที่จุลชีพอยู่ในระบบ กำหนดโดยมวลจุลชีพในระบบหารด้วยมวลจุลชีพที่ออกหรือทิ้งจากระบบในแต่ละวัน ได้นิพจน์ดังนี้

$$\theta_c = \frac{X \cdot V}{Q_w X + Q_e X_e} \quad (2.37)$$

ทำการคูณมวลของจุลชีพรอบทั้งระบบ จะได้

อัตราการไหลเข้า - อัตราการไหลออก + อัตราการเติบโตสุทธิ = อัตราการสะสม

$$0 - [Q_w X + Q_e X_e] + V r'_g = V \frac{dX}{dt}$$

เมื่อ r'_g = อัตราการเติบโตสุทธิของจุลชีพ, ก./ม.³-วัน
ที่สภาวะคงตัว $dX/dt = 0$ ดังนั้น

$$r'_g = \frac{Q_w X + Q_e X_e}{V} \quad (2.38)$$

$$\text{จาก } r_g = -Y r_s \quad (2.39)$$

$$\text{และ } r'_g = r_g - K_d X \quad (2.40)$$

เมื่อ r_g = อัตราการเติบโตของจุลินทรีย์, ก./ม.³-วัน

r_s = อัตราการใช้สารอาหาร, ก./ม.³-วัน

Y = ค่าสัมประสิทธิ์ยิลด์จริง (maximum yield coefficient)

K_d = อัตราการสลายตัวจำเพาะ (endogenous decay coefficient), วัน⁻¹

จากสมการที่ 2.39 และ 2.40 จะได้

$$r_g' = - Y r_s - K_d X \quad (2.41)$$

แทนค่า r_g' จากสมการ 2.38 ลงใน 2.41 และหารด้วย X

$$\frac{Q_w X + Q_e X_e}{X V} = - \frac{Y r_s}{X} - K_d \quad (2.42)$$

ด้านซ้ายมือของสมการที่ 2.42 เท่ากับส่วนกลับของค่าอายุสลัดจ์ในสมการที่ 2.37 ดังนั้น

$$\frac{1}{\theta_c} = - \frac{Y r_s}{X} - K_d \quad (2.43)$$

ทำการคูณมวลของสารอาหารรอบถังเดิมอากาศ จะได้

อัตราการไหลเข้า - อัตราการไหลออก + อัตราการใช้สารอาหาร = อัตราการสะสม

$$Q S_o + Q_r s - (Q + Q_r) s + r_s V = V \frac{dS}{dt}$$

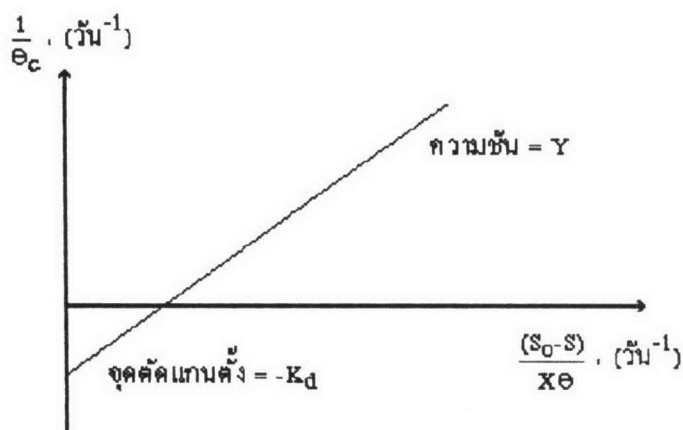
ที่สภาวะคงตัว $dS/dt = 0$ ดังนั้น

$$r_s = - \frac{Q (S_o - s)}{V} = - \frac{(S_o - s)}{\theta} \quad (2.44)$$

เมื่อ θ = เวลาที่กักน้ำของถังเติมอากาศ = V/Q , วัน
แทนสมการที่ 2.44 ลงใน 2.43 จะได้

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{Y (S_0 - S)}{X \theta} - K_d \quad (2.45)$$

จากสมการที่ 2.45 เขียนเส้นของ $\frac{1}{\theta_c}$ เป็นฟังก์ชันของ $\frac{(S_0 - S)}{X \theta}$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ Y และจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $-K_d$ ดังในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การหาค่า Y และ K_d

การหาค่า μ_m และ K_s

จากนิพจน์อัตราการเติบโตของจุลชีพ

$$r_g = \mu X \quad (2.46)$$

เมื่อ r_g = อัตราการเติบโตของจุลชีพ, ก./ม.³-วัน

μ = อัตราการเติบโตจำเพาะ (specific growth rate), วัน⁻¹

X = ความเข้มข้นของจุลชีพ, ก./ม.³

จากนิพจน์ของโมนอด

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_s + S} \quad (2.47)$$

เมื่อ μ_m = อัตราการเติบโตสูงสุดจำเพาะ, วัน⁻¹

S = ความเข้มข้นของสารอาหารที่จำกัดการเติบโต (growth limiting substrate), ก./ม.³

K_s = ค่าคงที่การอิ่มตัว (saturation constant) คือค่าความเข้มข้นของสารอาหารที่ทำให้ $\mu = \mu_m/2$, ก./ม.³

แทนค่าของ μ จากสมการที่ 2.47 ลงใน 2.46 จะได้นิพจน์ของอัตราการเติบโตของจุลชีพ

ดังนี้

$$r_g = \frac{\mu_m S X}{K_s + S} \quad (2.48)$$

$$\text{จากสมการ 2.39} \quad r_g = -Y r_s \quad (2.39)$$

แทนค่า r_g จากสมการ 2.48 ลงใน 2.39 จะได้

$$r_s = \frac{-\mu_m S X}{Y (K_s + S)} \quad (2.49)$$

จากสมการ 2.44
$$r_s = \frac{-(S_0 - S)}{\theta} \quad (2.44)$$

สมการ 2.44 เท่ากับสมการ 2.49 จะได้

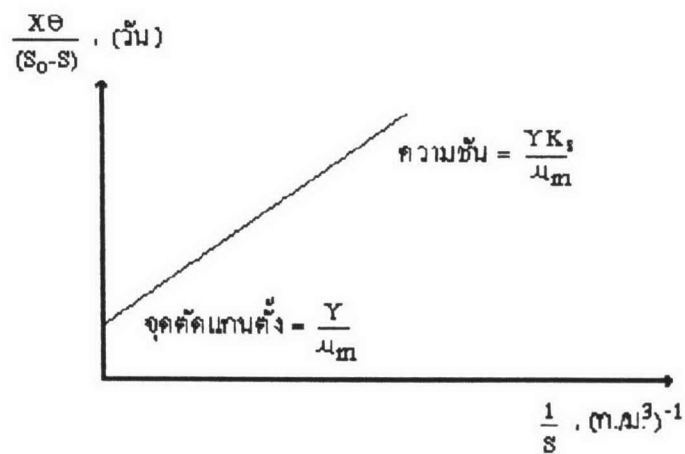
$$\frac{(S_0 - S)}{X \theta} = \frac{\mu_m S}{Y (K_s + S)} \quad (2.50)$$

ทำให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงโดยกลับเศษส่วนของสมการ 2.50 ได้

$$\frac{X \theta}{(S_0 - S)} = \left(\frac{Y K_s}{\mu_m} \right) \left(\frac{1}{S} \right) + \frac{Y}{\mu_m} \quad (2.51)$$

เขียนเส้นของ $\frac{X \theta}{(S_0 - S)}$ เป็นฟังก์ชันของ $\frac{1}{S}$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ

$\frac{Y K_s}{\mu_m}$ และจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $\frac{Y}{\mu_m}$ เมื่อเรารู้ค่าของ Y ก็จะสามารถหาค่าของ μ_m และ K_s ได้
ดังในภาพที่ 2.9



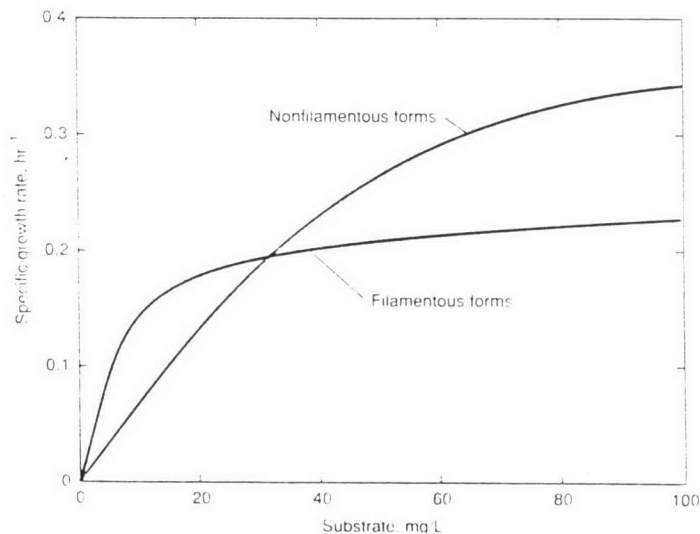
ภาพที่ 2.9 การหาค่า μ_m และ K_s

2.5 การป้องกันปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบกวนผสมที่มีการเวียนกลับสลัดจ์

ดังในหัวข้อ 2.4 ข้างต้น ได้กล่าวถึงวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนศาสตร์โดยใช้แบบจำลองกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบกวนผสมที่มีการเวียนกลับสลัดจ์ ซึ่งในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (lab scale) โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียที่ย่อยสลายได้ง่าย ก็มักจะเกิดปัญหาเรื่องสลัดจ์ไม่จมตัวอยู่เสมอ ทั้งนี้เนื่องมาจากจุลชีพชนิดเส้นใยสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าจุลชีพชนิดสร้างฟล็อก การประสานตัวกันของเส้นใยจุลชีพทำให้อัตราการจมตัวของสลัดจ์ลดลงจนถึงตกตะกอนช้ากว่าอัตราที่สลัดจ์เข้าสู่ถังตกตะกอนมาก ผลที่เกิดขึ้นก็คือ ชั้นสลัดจ์ในถังตกตะกอนมีการสะสมตัวและสูงขึ้นจนถึงถังตกตะกอนหลุดออกไปกับน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งมีความสกปรกสูง และการที่สลัดจ์หลุดออกไปนี้ ทำให้ไม่สามารถควบคุมปริมาณสลัดจ์ในระบบ ซึ่งก็คือไม่สามารถควบคุมค่าอายุสลัดจ์ได้นั่นเอง และหากมีการสูญเสียสลัดจ์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จุลชีพในระบบก็จะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งระบบล้มเหลวไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้

2.5.1 แนวคิดในการแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว

เนื่องจากปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเกิดจากจุลชีพชนิดเส้นใย ดังนั้นการแก้ไขปัญหานี้จึงต้องป้องกันมิให้มีจุลชีพชนิดเส้นใยเกิดขึ้น โดยการรักษาภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้จุลชีพชนิดสร้างฟล็อกเจริญเติบโตได้เร็วกว่า และมีจำนวนมากจนเป็นจุลชีพหลักของระบบ



ภาพที่ 2.10 เปรียบเทียบกราฟอัตราการเติบโตโดยทั่วไประหว่างจุลชีพชนิดเส้นใยและชนิดสร้างฟล็อก (Chudoba, Grau และ Ottova 1973)

จากภาพที่ 2.10 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารอาหารในถังปฏิกริยาต่ำ ๆ (ซึ่งปรกติมัก จะพบในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบกวนสมบรูณ์) จุลชีพชนิดเส้นใยจะมีอัตราการเติบโตสูงกว่า จุลชีพชนิดสร้างฟล็อก ซึ่งในทางกลับกันหากสามารถทำให้ความเข้มข้นของสารอาหารสูงขึ้น จุลชีพ ชนิดสร้างฟล็อกก็จะมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่า จากเหตุผลนี้เราสามารถควบคุมให้จุลชีพชนิด สร้างฟล็อกเติบโตได้ดีกว่าโดยใช้ถังคัดพันธุ์ (selector) ซึ่งเป็นถังเติมอากาศที่ให้จุลชีพในสลัดจ์ที่ เวียนกลับมาจากถังตกตะกอนผสมกับน้ำเสียภายใต้ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์สูง (ถังคัดพันธุ์จึงมี ขนาดเล็ก) จุลชีพชนิดสร้างฟล็อกมีความสามารถในการดึงหรือแย่งสารอาหารได้รวดเร็วกว่าใน ขณะที่มีสารอาหารในระดับทำให้สูง จึงเจริญเติบโตได้ดีกว่าจนกระทั่งเป็นจุลชีพตัวหลัก จากนั้น จุลชีพชนิดสร้างฟล็อกจึงจะถูกส่งไปยังถังเติมอากาศใบอื่นที่มีภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ในระดับ ปรกติ ด้วยวิธีการเช่นนี้จุลชีพชนิดเส้นใย จะไม่มีโอกาสเกิดขึ้นมากจนเป็นชนิดหลักในระบบแอก ทิเวเต็ดสลัดจ์แบบกวนสมบรูณ์

2.5.2 การออกแบบถังคัดพันธุ์

- เวลาในการสัมผัส (contact time) จะต้องมีเวลานานพอในการผสมกันของสลัดจ์ที่ เวียนกลับจากถังตกตะกอน กับน้ำเสียที่เข้าระบบ ซึ่งเวลาในการสัมผัสนี้จะมีผลโดยตรงต่อขนาด ของถังคัดพันธุ์ หากเวลาในการสัมผัสไม่มากพอ สารอาหารละลายจะไม่ถูกดูดซับได้หมดในถังคัด พันธุ์ และรั่วหลุดเข้าไปยังถังเติมอากาศหลัก ก็จะเป็นตัวสนับสนุนการเจริญเติบโตของจุลชีพชนิด เส้นใย แต่ในทางกลับกัน หากเวลาในการสัมผัสนานเกินไป ก็อาจจะเกิดจุลชีพในถังคัดพันธุ์เลข Wanner (1994) ได้สรุปเวลาในการสัมผัสที่แนะนำให้ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เวลาสัมผัสที่แนะนำให้ใช้ในถังคัดพันธุ์แบบออกซิก อ้างจาก Wanner (1994)

แหล่งที่มา	เวลาในการสัมผัส (นาที)
ATV Report 2.6.1 (1989)	10-12
Daigger และคณะ (1985)	15
Eikelboom (1991)	10-15
Pujol (1992)	15
Rensink และ Donker (1992)	ไม่น้อยกว่า 10
van Niekerk และคณะ (1987)	12 - 18

- ภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ในถังคัดพันธุ์ ดังที่กล่าวข้างต้นว่าในถังคัดพันธุ์จะต้องมีภาวะ บรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงเพียงพอ จึงจะสนับสนุนการเจริญเติบโตของจุลชีพชนิดสร้างฟล็อก ซึ่ง Wanner (1994) ได้แนะนำค่าภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ในถังคัดพันธุ์แบบออกซิกที่ควรใช้, อ้างจาก Wanner (1994)

แหล่งที่มา	ภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์	
	กก.บีโอดี/กก.เอ็มแอลวี เอสเอส-วัน	กก.ซีโอดี/กก.เอ็มแอล วีเอสเอส-วัน
Albertson (1991)	3.0	
ATV Report 2.6.1 (1989)	3.0	20
Chudoba และ Wanner (1989)	> 3.0	
Daigger และ Nicholson (1990)	3.2 - 4.9	
Eikelboom (1991)	2.0 - 5.0	
Lee และคณะ (1982)		> 20
Linne และคณะ (1989)	5.0 - 6.0	
van Niekerk และคณะ (1987)		20 - 30

ซึ่ง Jenkins, Richard และ Daigger (1993) ได้แนะนำให้แบ่งภายในถังคัดพันธุ์แบบออกซิกออกเป็น ส่วน ๆ อย่างน้อย 3 ส่วน เพื่อเป็นการลดการผสมในแนวยาว และใช้ค่าภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ในการกำหนดขนาดของถังคัดพันธุ์ โดยขนาดของแต่ละส่วนในถังจะคิดจากค่าภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ ซึ่งกำหนดจากค่าซีโอดีของน้ำเสียที่เข้าถังคัดพันธุ์ส่วนแรก ดังนี้

ส่วนแรก	12 กก.ซีโอดี / กก.เอ็มแอลเอสเอส-วัน
ส่วนที่สอง	6 กก.ซีโอดี / กก.เอ็มแอลเอสเอส-วัน
ส่วนที่สาม	3 กก.ซีโอดี / กก.เอ็มแอลเอสเอส-วัน

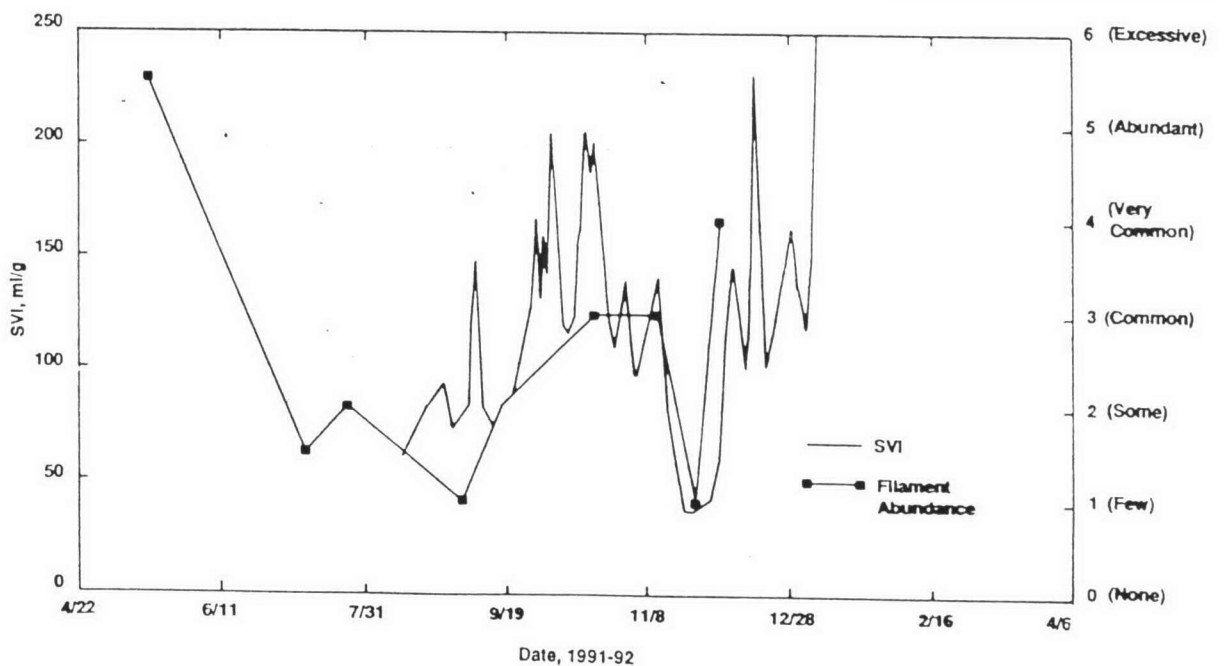
2.5.3 การจำแนกความอุดมสมบูรณ์ของเส้นใยจุลชีพ (อ้างจาก Jenkins, Richard และ Daigger, 1993)

การวัดปริมาณความมากน้อยของเส้นใยจุลชีพนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีจำแนกโดยใช้ระบบการนับเต็ม ด้วยการนำสลัดจ์มาส่องดูในกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายขนาด 100 เท่า นับจำนวนเส้นใยจุลชีพบนฟลอคกลุ่มต่าง ๆ แล้วให้เต็มตั้งแต่ 0 (none) ถึง 6 (excessive) ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.3 ซึ่งถ้าหากพบว่ามีเต็ม 4 (very common) หรือมากกว่า จุลชีพชนิดเส้นใยมักจะเป็นจุลชีพหลักในระบบและมักจะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการตกตะกอนแยกสลัดจ์ออกจากน้ำใสในถังตกตะกอน แต่ถ้าหากมีเต็ม 3 (common) หรือน้อยกว่า จุลชีพชนิดเส้นใยจะเป็นจุลชีพรองในระบบ ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการตกตะกอนของสลัดจ์ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วในการตรวจสอบปริมาณจุลชีพชนิดเส้นใย และช่วยในการพิจารณาว่าแนวโน้มในการแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมคั่วขณะนั้น ๆ ว่าได้ผลหรือไม่

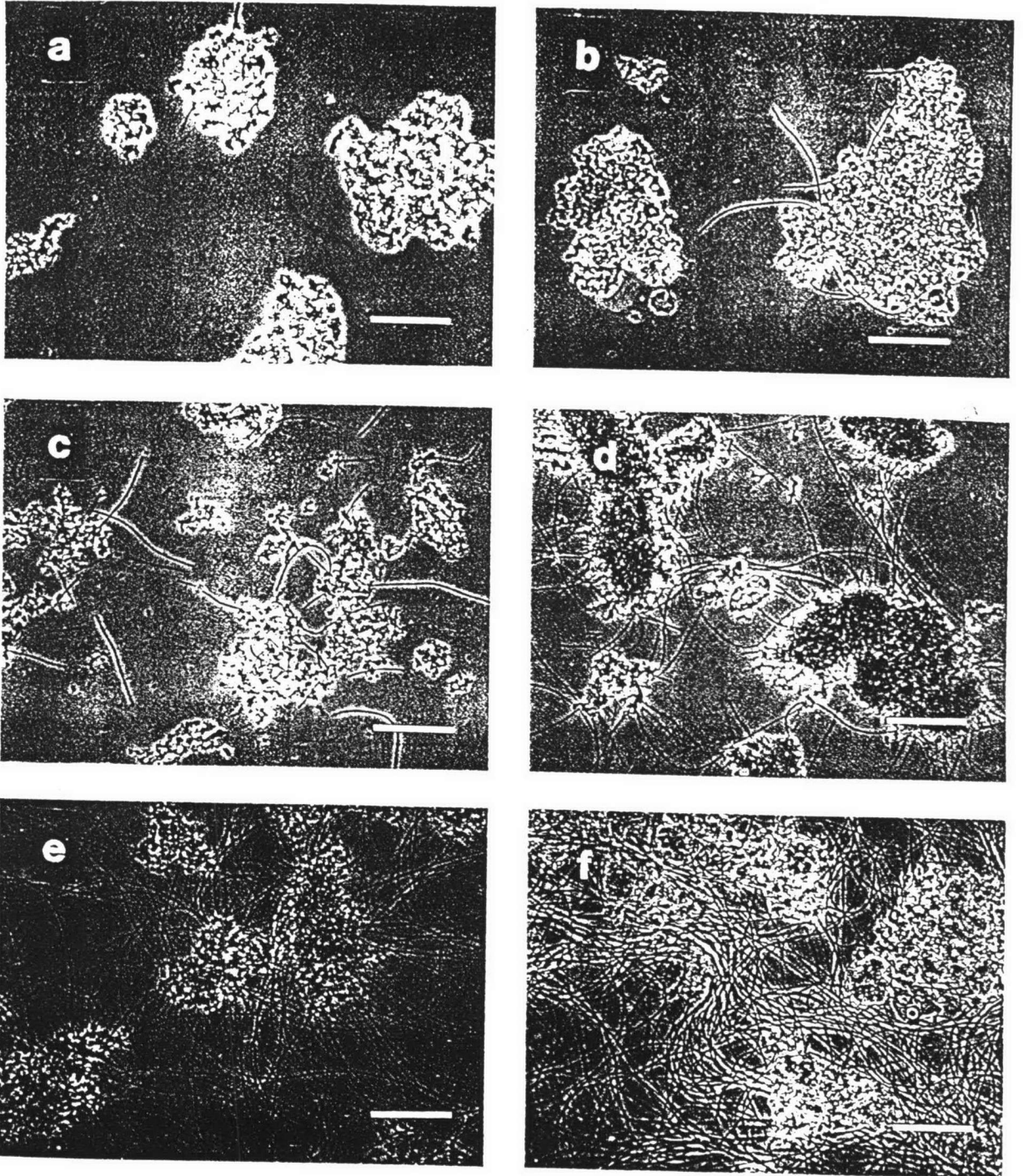
ภาพที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฉะของการนับเส้นใยจุลชีพ เทียบกับค่า SVI ของโรงบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แห่งหนึ่ง และภาพที่ 2.12 เป็นภาพถ่ายของจุลชีพซึ่งจำแนกตามความอุดมสมบูรณ์ของเส้นใยจุลชีพตามระบบการนับแฉะข้างต้น

ตารางที่ 2.3 ระบบการนับแฉะในการวัดความอุดมสมบูรณ์ของเส้นใยจุลชีพ

Numerical Value	Abundance	Explanation
0	none	
1	few	Filaments present, but only observed in an occasional floc
2	some	Filaments commonly observed, but not present in all flocs
3	common	Filaments observed in all flocs, but at low density (e.g., 1-5 filaments per floc)
4	very common	Filaments observed in all flocs at medium density (e.g., 5-20 per floc)
5	abundant	Filaments observed in all flocs at high density (e.g., >20 per floc)
6	excessive	Filaments present in all flocs—appears more filaments than floc and/or filaments growing in high abundance in bulk solution



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแฉะของการนับเส้นใยจุลชีพ เทียบกับค่า SVI ของโรงบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แห่งหนึ่ง



ภาพที่ 2.12 ภาพถ่ายของจุลชีพซึ่งจำแนกตามความอุดมสมบูรณ์ของเส้นใยจุลชีพตามระบบการนับเต็ม : a. few; b. some; c. common, d. very common, e. abundant; f. excessive (กำลังขยาย 100X phase contrast; bar100 = μm)