บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของจุลินทรีย์แบบเม็ดในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจากน้ำเสียกลุ่มอุตสาหกรรมการเกษตร ซึ่งมีขอบเขตของการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา ดังนี้

1. จลนพลศาสตร์ของระบบชีวเคมี
2. จลนพลศาสตร์เบื้องต้นของระบบบำบัดน้ำเสีย
3. รูปแบบการประเมินค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์
4. ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในถังปฏิกิริยา Batch Reactor
5. วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ โดยจากโปรแกรม Weighted Nonlinear Least-Squares Analysis
6. ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา
7. จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน
8. กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน
9. ค่าความสามารถจำเพาะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตมีเทน (Specific Methanogenic Acitivity : SMA)
10. อุตสาหกรรมเกษตร
11. น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater)
12. กระบวนการผลิตและน้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมเกษตร
13. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. จลนพลศาสตร์ของระบบชีวเคมี

การเติบโตของกลุ่มจุลชีพเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน ประกอบด้วยเหตุการณ์ต่าง ๆ จำนวนมากที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน การใช้สารอาหาร (Substrate Utilization) และการเติบโตของเซลล์ (Cell Growth) เป็นเหตุการณ์ขั้นแรกที่เกิดขึ้นพร้อมกันและเกี่ยวพันกันอย่างใกล้ชิด เพราะว่าพลังงานและคาร์บอนที่ใช้สำหรับการเติบโตของเซลล์ได้มาจากการใช้สารอาหารเท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์ทั้งสองนี้แสดงโดยยิลด์ หรือ อัตราส่วนของอัตราการเติบโตต่ออัตราการใช้สารอาหาร เซลล์ต้องใช้พลังงานเพื่อรักษาสภาพ (Maintenance) ถ้าไม่มีแหล่งพลังงาน

ภายนอก (Exogenous Energy) ก็ต้องใช้พลังงานสำรองภายในเซลล์ (Endogenous Energy) รักษาสภาพเซลล์ มวลของเซลล์จะลดลงหรือสลายตัว (Decay) ถ้าชุมชนจุลชีพมีหลายชนิดอยู่ด้วยกัน ผู้ล่า (Predator) จะกินพวกที่อยู่ต่ำกว่าในสายโซ่อาหาร (Food Chains) ทำให้มวลของกลุ่มจุลชีพลดลงด้วย สุดท้ายจะมีการตาย (Death) ของจุลชีพเสมอ มันจะเสียความสามารถในการใช้สารอาหารและการแบ่งตัวนี้เป็นผลให้ส่วนหนึ่งของชีวมวลแข็งแรง (Active) เซลล์ที่ตายแล้วจะแตกตัว (Lyse) ปล่อยสารละลายออกมา แล้วถูกจุลชีพอื่นใช้เป็นสารอาหาร อีกด้านหนึ่งอาจถูกกินโดยผู้ล่า เป็นเหตุให้มวลของกลุ่มจุลชีพลดลง (ธีระ, 2539)

2. จลนพลศาสตร์เบื้องต้นของระบบบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพหรือโดยการใช้จุลินทรีย์ เป็นวิธีการที่ใช้กันมากที่สุดในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีความสกปรก จะถูกใช้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นจุลินทรีย์ทำให้น้ำมีความสกปรกลดลง

Monod (1949) ได้ศึกษาและวิจัยพบว่า อัตราการกินอาหารโดยจุลินทรีย์มีสมการดังนี้

$$\frac{dS}{dt} = \frac{k+S}{K_s+S} \qquad \text{.....(1)}$$

$\frac{dS}{dt}$ = อัตราการกินอาหารโดยจุลินทรีย์ (น้ำหนัก/ปริมาตร–เวลา)

k = อัตราสูงสุดในการกินอาหารต่อหน่วยน้ำหนักของจุลินทรีย์ (ต่อเวลา)

K_s = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ที่จุดซึ่งอัตราการกินอาหารเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราสูงสุด (น้ำหนัก/ปริมาตร)

S = ความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำเสีย (น้ำหนัก/ปริมาตร)

Metcalf และ Eddy (2003) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ กับความเข้มข้นของสารอาหารที่จำกัดโดยใช้สมการของ Monod ดังนี้

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_s+S} \qquad \text{.....(2)}$$

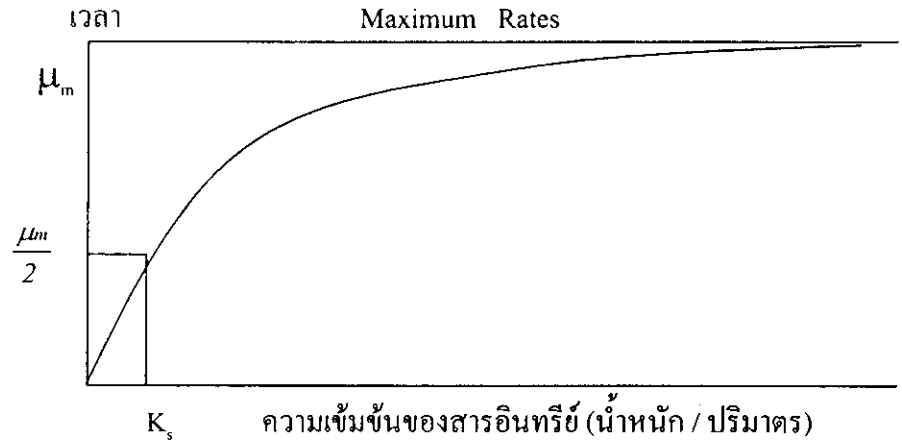
μ = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ต่อเวลา)

μ_m = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (ต่อเวลา)

S = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ในน้ำทิ้ง (น้ำหนัก/ปริมาตร)

K_s = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ในน้ำทิ้งที่จุดซึ่งอัตราการเจริญเติบโตเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราสูงสุด (น้ำหนัก/ปริมาตร)

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญสุทธิกับความเข้มข้นของสารอาหารที่จำกัด
ที่มา : Metcalf และ Eddy (2003)

การอธิบายและสร้างสมการต่าง ๆ สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีววิทยาสมการ(2) เป็นสมการที่นิยมใช้กันมากที่สุดสมการหนึ่ง

และจากสมการ $r_g = \frac{dX}{dt} = \frac{\mu_m XS}{K_s + S}$ ..... (3)

นำมาศึกษาวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้ คือ

1. เมื่อค่า S มีค่ามากกว่า K_s มาก ๆ จะได้ $r_g = \mu_m X$ ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง จุลชีพจะอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยอาหาร ทำให้อัตราการสังเคราะห์ทางชีวเคมีจะมีสูงสุด

2. เมื่อ S มีค่าเท่ากับ K_s จะได้ $r_g = \frac{\mu_m X}{2}$ ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง แต่จะมีอัตราการสังเคราะห์ทางชีวเคมีครึ่งหนึ่งของอัตราการสังเคราะห์ทางชีวเคมีสูงสุด

3. เมื่อ S มีค่าน้อยกว่า K_s มาก ๆ จะได้ $r_g = \frac{\mu_m XS}{K_s}$ ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาลำดับสอง โดยจะขึ้นอยู่กับทั้ง X และ S (เกรียงศักดิ์, 2545)

Metcalf และ Eddy (1991) ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ กับอัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่เป็นอาหาร (Substrate) สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

อัตราเติบโตสุทธิ = อัตราการสร้างเซลล์ – อัตราการตาย

$$\frac{dX}{dt} = Y\frac{dS}{dt} - k_d X \quad \text{.....(4)}$$

สมการ (4) นี้เป็นสมการที่ใช้ได้ทั้งในกรณีการเจริญเติบโตแบบใช้ออกซิเจนและการเจริญเติบโตแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยที่อาหารของจุลินทรีย์จะต้องอยู่ในรูปของสารละลายเท่านั้น เมื่อหารสมการ (4) ด้วย X ตลอด

$$(dX/dt)/X = Y\frac{dS/dt}{X} - k_d \quad \text{.....(5)}$$

หากกำหนดให้

$$\theta_c = X/(dX/dt) \quad \text{.....(6)}$$

$$U = (dS/dt)/X \quad \text{.....(7)}$$

จะได้ $1/\theta_c = Y \cdot U - k_d$ .....(8)

dX/dt = อัตราการเจริญสุทธิของจุลินทรีย์ (น้ำหนัก/ปริมาตร-เวลา)

Y = สัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

= อัตราส่วนน้ำหนักของจุลินทรีย์ ที่เพิ่มขึ้นต่อน้ำหนักของอาหารที่ใช้ไป

dS/dt = อัตราการกินอาหาร โดยจุลินทรีย์ (น้ำหนัก/ปริมาตร-เวลา)

k_d = สัมประสิทธิ์การตายของจุลินทรีย์ (ต่อเวลา)

X = ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ (น้ำหนัก/ปริมาตร)

θ_c = เวลาเฉลี่ยที่จุลินทรีย์ใช้ในการทำลายสารอินทรีย์ (เวลา)

= น้ำหนัก MLSS ที่มีอยู่ในระบบทั้งหมด/น้ำหนัก MLSS ที่ออกจากระบบต่อวัน

U = อัตราการกินอาหารของจุลินทรีย์ ต่อหน่วยน้ำหนักของจุลินทรีย์ (ต่อเวลา)

สมการ (8) นี้เป็นสมการพื้นฐานที่จะใช้ในการศึกษาและออกแบบระบบบำบัด น้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยาแบบต่าง ๆ ตัวแปรที่สำคัญที่สุด ได้แก่ θ_c และ U ซึ่งหากควบคุมค่าหนึ่งแล้วอีกค่าหนึ่งก็จะถูกควบคุมไปด้วยโดยอัตโนมัติ แต่การศึกษาพบว่าการควบคุมค่า θ_c กระทำได้ง่ายกว่าควบคุมค่า U ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่า θ_c เป็นตัวแปรในการควบคุมการทำงานและประสิทธิภาพของระบบบำบัด

3. รูปแบบการประเมินค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ สามารถดำเนินการได้ 2 วิธีคือ Continuous Culture Tests และ Batch Culture Tests

(1) Continuous Culture Tests

การทดลองแบบ Continuous Culture Tests จะออกแบบให้จุลินทรีย์ที่บำบัดน้ำเสียเจริญเติบโตในถังปฏิกิริยาที่กำหนดค่าอายุตะกอนของแข็ง (Solids Retention Time ; SRT) จนเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยทั่วไปเมื่อระบบบำบัดน้ำเสียเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยทางทฤษฎีแล้ว แต่ละค่าอายุของตะกอนของแข็งจะเป็นตัวกำหนดค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (สารมลพิษ) ที่เหลืออยู่ในถังปฏิกิริยา ดังสมการ 9

$$S_e = \frac{K_s(1+K_dSRT)}{\left|SRT(Yk-K_d)-1\right|} \qquad \text{.....(9)}$$

โดย S_e = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว (น้ำหนัก/ปริมาตร)

K_s = ค่าความเข้มข้นของสารอาหารที่ครึ่งหนึ่งของอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด (น้ำหนัก/ปริมาตร)

K_d = สัมประสิทธิ์การย่อยสลายของจุลินทรีย์ (ต่อเวลา)

SRT = อายุตะกอนแข็ง (เวลา)

Y = อัตราการเจริญเติบโตต่อปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลาย (น้ำหนักจุลินทรีย์/น้ำหนักของสารอินทรีย์)

k = อัตราเร็วสูงสุดในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (ต่อเวลา)

จากสมการที่ 9 จะเห็นว่าอายุตะกอนแข็งเพียงตัวเดียวเท่านั้น ที่สามารถถูกควบคุมได้อย่างเที่ยงตรง ซึ่งทำให้ไม่สามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายสารอินทรีย์

(k และ K_s) และค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Y และ K_d) ได้ดังนั้น จะประเมินสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์นี้ได้ต้องทำสมดุลมวล (Mass Balance) ของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ (สารมลพิษ) และสมดุลมวลของจุลินทรีย์รอบถังปฏิกิริยาโดยกำหนดให้ถังปฏิกิริยาอยู่ในสภาวะสมดุล (Steady-State) ซึ่งทำให้สมการรวมลดรูปลงมาอยู่ในรูปสมการเส้นตรง (Linear Equation) และสามารถประเมินค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ได้โดยวิธีทางกราฟ ดังสมการ 10 และ 11 เป็นสมการเส้นตรงจากการทำสมดุลย์มวลของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ตามลำดับ

$$\frac{(XV)}{Q(S_0 - S)} = \left(\frac{|X(HRT)|}{(S_0 - S)}\right) = \frac{1}{S}\left(\frac{K_s}{k}\right) + \frac{1}{k} \quad \text{.....(10)}$$

$$\frac{1}{HRT} = \frac{1}{SRT} = Y(kS)\left(\frac{-K_d}{K_s + S}\right) \quad \text{.....(11)}$$

โดย X = ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยา (น้ำหนัก/ปริมาตร)

V = ปริมาตรของถังปฏิกิริยา (ปริมาตร)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ (ปริมาตร/เวลา)

S_0 = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียเข้า (น้ำหนัก/ปริมาตร)

S = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (น้ำหนัก/ปริมาตร)

HRT = ระยะเวลากักเก็บน้ำในถังปฏิกิริยา (เวลา)

SRT = อายุตะกอนแข็ง (เวลา)

(2) Batch Culture Tests

ในขั้นตอนการประเมินค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของ Continuous พบว่าต้องใช้เวลามาก และต้องมีการดูแลอย่างใกล้ชิด ด้วยเหตุนี้จึงมุ่งสนใจมาที่วิธีการแบบ Batch (Coch et al, 1985 ; Robinson and Tiedje, 1983 ; Simkins and Alexander, 1985 ; Braha and Hafiner, 1987 อ้างใน Dararat, 2001) การทดลองแบบ Batch เป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากและเป็นวิธีการที่ใช้เวลาน้อยเหมาะสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์

Batch Culture จะมีการเปลี่ยนระบบไม่คงที่ เป็นสาเหตุที่ทำให้ความเข้มข้นของสารอาหารลดลง ค่าจะมีผลต่อรูปสมการน้อยมาก เพราะฉะนั้น จึงเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 13

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - k_d K \qquad \text{.....(12)}$$

ซึ่ง

$$\mu X = -Y\left(\frac{ds}{dt}\right)$$

$$\frac{dX}{dt} = Y\left(\frac{-ds}{dt}\right) \qquad \text{.....(13)}$$

Integrated แล้วจะได้

$$X = X_0 + Y(S_0 - S) \qquad \text{.....(14)}$$

ซึ่ง X_0 และ S_0 เป็นจุลินทรีย์เริ่มต้นและเป็นความเข้มข้นของสารอาหารตามลำดับ

รวมสมการ 13 และ 14 จะได้

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{k * S * |X_0 + Y * (S_0 - S)|}{(k_s + S)} \qquad \text{.....(15)}$$

Integrated สมการที่ 15 จะได้

$$k_s \frac{In(S)}{S_0} = \frac{(KX_0 + S_0)}{Y} .\text{In} \frac{|(S_0 + X_0 / Y) - S|}{(X_0 / Y)} - |(X_0 / Y) + S_0| Ykt \ldots\ldots (16)$$

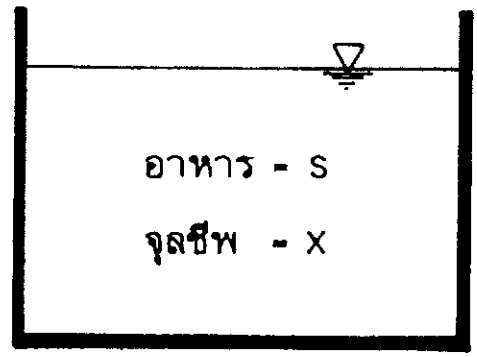
สมการที่ 16 จะใช้อธิบายการใช้สารอาหาร ที่ผ่านมามีผู้ทำการวิจัยได้นำเทคนิค Non-Linear Least Squares มาใช้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ โดยใช้สมการที่ 16 โดยใช้

ข้อมูลจากการทดลองแบบ batch (Montogomery, 1984 ; Stratton and McCarty, 1966 อ้างใน Dararat, 2001) ประโยชน์ที่สำคัญของการทดสอบแบบ Batch สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์จากการแปลงค่าความเข้มข้นของสารอาหารได้ในเวลารวดเร็ว ซึ่งวิธีการแบบ Batch สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ได้รวดเร็วกว่าวิธีการแบบ Continuous ด้วยเหตุนี้จึงนิยมหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์จากปฏิกิริยาแบบ Batch ซึ่งจะควบคุมให้อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมภายในระยะเวลาที่เหมาะสม นอกจากนี้จุลินทรีย์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณในช่วงที่ทำการทดลอง ข้อด้อยของวิธีการแบบ Batch ก็คือ ความเข้มข้นของสารอาหารที่เริ่มต้นจำเป็นต้องค่าใกล้เคียง K_s และความเข้มข้นของจุลินทรีย์จะต้องเพียงพอ

เมื่อเปรียบเทียบ Continuous Culture Tests กับ Batch Culture Tests สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ มักจะมีข้อถกเถียงในแต่ละงานวิจัย ซึ่งจากบางงานวิจัยก็ให้คำแนะนำว่า Continuous Culture Test ให้ข้อมูลที่เป็นจริงมากกว่าเพราะว่าการทดลองอยู่ภายใต้การควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิดและกระบวนการทดลองจะใกล้เคียงกับความจริงมากกว่า ส่วนบางงานวิจัยอื่นที่สนับสนุนการทดลองแบบ Batch Culture Tests ก็พบว่าการทดลองแบบ Batch Culture Tests มีความเหมาะสมไม่แตกต่างกับ Continuous Culture Tests และนอกจากนี้ยังพบว่า Batch Culture Tests เป็นวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ที่ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย (ปรียาพร อ้างใน Dararat, 2001)

4. ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในถังปฏิกิริยา Batch Reactor

ถังปฏิกิริยา Batch Reactor เป็นถังปฏิกิริยาแบบที่ไม่มีน้ำไหลเข้าและไม่มีน้ำไหลออกอย่างต่อเนื่อง แต่จะมีการกวนอย่างสมบูรณ์ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาในการทำปฏิกิริยา ถังปฏิกิริยาแบบนี้ก็เป็นหนึ่งในหลาย ๆ แบบที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรม โดยทั่ว ๆ ไปแล้วจะเริ่มด้วยการเติมน้ำเสียที่มีจุลินทรีย์ให้เต็มถังเสียก่อน แล้วจึงทำการกวนอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นน้ำเสียภายในถังจะมีส่วนประกอบและความเข้มข้นสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งถัง โดยปกติความเข้มข้นของสารในถังจะมีการแปรเปลี่ยนไปตามเวลา หลังจากถึงเวลาที่กำหนดไว้ หรือทำการบำบัดน้ำเสียจนกระทั่งเสร็จสิ้นแล้ว จึงทำการเทน้ำทิ้งจากถังปฏิกิริยานี้ออกเป็นอันเสร็จสมบูรณ์ของปฏิกิริยาชนิดนี้ ในการออกแบบและดำเนินการระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้วิธีทางชีววิทยา จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังหรือบ่อปฏิกิริยาที่มีความสัมพันธ์กันกับอาหารหรือที่มีอยู่ในน้ำเสีย ของการเจริญเติบโตของตัวจุลินทรีย์ ดังแสดงในภาพที่ 2 (อ้างใน เพ็ญชุดา และ สุภาภรณ์, 2544)



ภาพที่ 2 ถังปฏิกิริยา Batch Reactor
ที่มา : เกรียงศักดิ์, 2545

5. วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ โดยจากโปรแกรม Weighted Nonlinear Least-Squares Analysis

Stratton (1966) ได้นำเสนอ สมการทางคณิตศาสตร์ได้อธิบายส่วนของน้ำหนักที่หายไปของสารอาหาร ดังสมการ

$$\frac{dX}{dt} = -Y \times \frac{dS}{dt} - bX \quad \text{.....(17)}$$

เมื่อ $\frac{dX}{dt}$ = อัตราการเจริญสุทธิของจุลินทรีย์ (น้ำหนัก/ปริมาตร-เวลา)

$\frac{dS}{dt}$ = อัตราการกินอาหารโดยจุลินทรีย์ (น้ำหนัก/ปริมาตร-เวลา)

X = ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ (น้ำหนัก/ปริมาตร)

Y = สัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

b = อัตราการตายของเซลล์ต่อหน่วยเวลา

กำหนดอัตราการตายของจุลินทรีย์ bX คือ การลดลงของจำนวนจุลินทรีย์อันเนื่องมาจากหลายปัจจัยด้วยกัน รวมทั้งอัตราการหายใจภายในเซลล์ แต่จากการศึกษาของ Matlette (1963) ได้กำหนดค่า bX ซึ่งเกิดขึ้นน้อยมากในการเลี้ยงเชื้อ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราทั้งหมด เมื่อคูณเข้าทั้งสองข้างของสมการด้วย dt จะได้

$$dX = -Y \times (dS) \quad \text{..... (18)}$$

เมื่อ Integrated สมการ ที่ (18) และหาค่าคงที่ โดยกำหนดค่า

$X = X_0$ ที่ $S = S_0$ จะได้

$$X = X_0 + Y \times (S_0 - S) \quad \text{..... (19)}$$

เมื่อ X_0 และ S_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของจุลินทรีย์และสารอาหาร แทนค่าในสมการที่ (18) เป็นสมการ (19) ค่า Yeild ของสมการสำหรับอัตราของสารอาหารที่นำไปใช้ ต่อหน่วยเวลาสำหรับค่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ใน Batch Culture ดังสมการที่ (20)

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-k(X_0 + Y)(S_0 - S) \times S}{K_s + S} \quad \text{.....(20)}$$

$$t = -\frac{1}{k}\frac{[K_s \times In(X_0 + Y \times S_t)}{X_0 + Y \times S_0} + \frac{(K_s \times InS_t \times X_0) + (1 \times InX_0)]}{X_0 + Y \times S_0} \quad \text{..... (21)}$$

ข้อกำหนดของสมการที่ (18) ค่าพารามิเตอร์ที่จะวัดการตายของจุลินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งได้มีการทดสอบโดย Montgomery (1983) โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จากเส้นโค้งของสารอาหารที่ใช้ไปกับอัตราการตาย พบว่าค่าพารามิเตอร์ ทั้งสองอย่างได้ผลเหมือนกัน ระยะเวลาที่ใช้มากกว่า 15 วัน ที่จะสามารถนำสารอาหารไปใช้ได้หมด อัตราการตายสูงสุด พบว่ามีค่า 0.03 และ 0.04 วัน$^{-1}$ จะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์อย่างมีนัยสำคัญ อัตราการตายต่ำสุดประมาณ 0.01 วัน$^{-1}$ ที่ระยะเวลามากกว่า 20 วัน

สมการที่ (21) จะกำหนดเส้นโค้งของสารอาหารที่ใช้ไป เมื่อ S_0 คือค่าเริ่มต้นของสารอาหารที่ใช้ในการทดลอง S_t คือ ค่าเวลาที่ใช้ในการทดลอง โดยที่ไม่ทราบค่า k, K_s ซึ่งหาได้จากการใช้คอมพิวเตอร์ในสมการ Integreated Monod ในสมการที่ 21

จากการทดลอง ของ Montgomery (1983) สรุปค่า Yield Coefficient ซึ่งได้ศึกษาในถังปฏิกิริยาแบทเท (Batch) ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยใช้เทคนิคการวัดค่า C^{14} ซึ่งพบว่าค่า Acetate Yield จากการย่อยสลายของอะซิเตด ดังตารางที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ค่า Yield Coefficient = 0.0363 มก.เซล/มก. อะซิเตด ที่อุณหภูมิ 35°ซ และ 0.0356 มก.เซล/มก. อะซิเตด ที่อุณหภูมิ 30°ซ ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่า Yield Coefficients ที่ใช้การคำนวณในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Yield (มก.เซล/มก.อะซิเตต)
35	0.0363
30	0.0356
25	0.0346
20	0.0338
15	0.0333

ที่มา : Montgomery, 1983

หากนำสมการ Monod มาหาค่าสัมประสิทธิ์ของจุลินทรีย์สามารถทำได้แต่ค่อนข้างยุ่งยาก เพราะไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear) อย่างไรก็ตาม โปรแกรม Weighted Nonlinear Least-Squares สามารถนำมาใช้ในการหาค่าความแตกต่างระหว่างการทดลองและการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนาย โดย Smith et al (1998) ได้ศึกษาค่าจากตารางและสูตรคำนวณในโปรแกรม Microsoft Exell ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ k, K_s สามารถหาได้โดยสมการที่ 21 โดยเมตาบอลิซึมของอะซิเตตโดยใช้ตารางและสูตรคำนวณคอมพิวเตอร์และ โปรแกรม Weighted Nonlinear Least-Squares Analysis ในสมการที่ 22 และ สมการที่ 23

$$SSWW = {}^{n}\sum(W_i(t_i^{obs}) - t_i^{pred}))^2 \quad \text{.....(22)}$$

เมื่อ W_i = ค่าน้ำหนักที่เหมาะสม

t_i^{obs} = ค่าเวลาที่ใช้ในการสังเกต

t_i^{pred} = ค่าการทำนาย โดยแบบจำลองในการวัด ค่า S, S_0^{obs}

ในอุดมคติแล้วจะใช้ความแตกต่างระหว่างการวัดและการทำนายค่า S ("ΔS") เพราะว่าความผิดพลาดในการวัด S โดยทั่วไปมีมาจากการวัดค่า t ("Δt") สามารถกำหนดออกมาได้อย่างแน่นอน ความแตกต่างระหว่างค่าทำนาย และค่าสังเกตของค่า S สามารถประมาณค่าโดยการคูณ Δt ในความชันของสารอาหารที่หายไปในเส้นโค้ง $\Delta M / \Delta t$ เนื่องจาก Smith et al (1998) ได้กำหนด Logical Wieghted Factor คือ ค่าความชันของสารอาหารที่หายไป ดังนี้

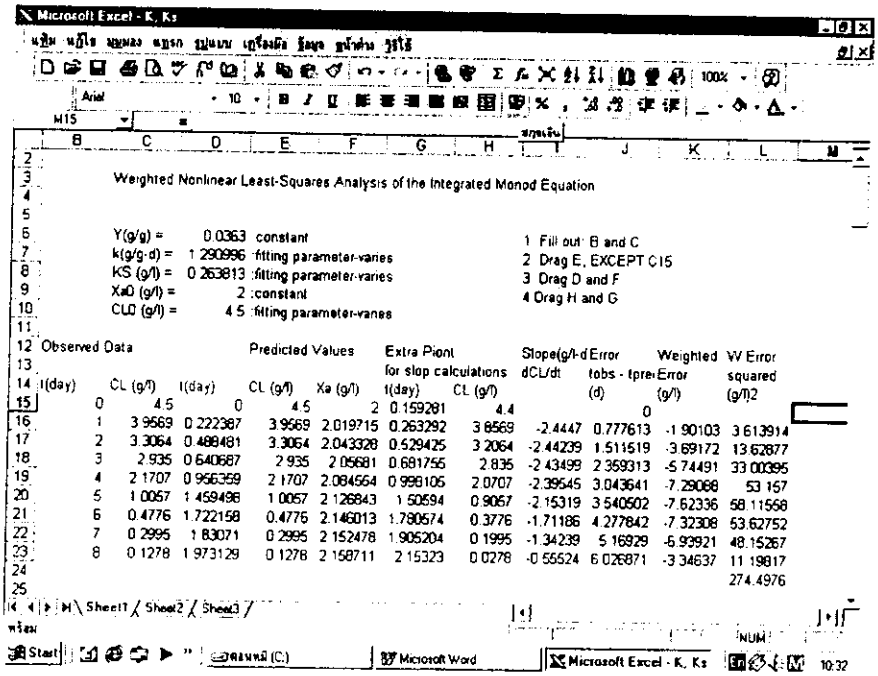
$$W_i = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{S_{i+1}^{pred} - S_{i+1}^{pred}}{t_{i+1}^{pred} - t_{i+1}^{pred}} \quad \text{.....(23)}$$

ให้ Wieghted Factor กำหนดค่า W_i ในสมการที่ (22) จะได้

$$W_i \ (t_{i+1}^{pred} - t_{i+1}^{pred}) = \frac{\Delta S}{\Delta t}(t_{i+1}^{pred} - t_{i+1}^{pred}) = S_{i+1}^{obs} - S_{i+1}^{pred} \quad \text{.....(24)}$$

ความคลาดเคลื่อนในการทำนายของ S_i^{obs} จะมีค่าใกล้เคียงกับการหาค่า S ในฟังก์ชัน t

การคำนวณ หาค่าสมการ Monod ได้จากการหาค่าจากการใช้ Microsoft Exell ซึ่งสามารถหาได้รวดเร็วจากค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของเซลล์ตามการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ค่าความเปรียบเทียบระหว่าง Numerical Model และ Monod Weighted Nonlinear Least-Squares Analysis (Smith et al, 1998) มีค่าเหมือนกับที่ใช้กันอยู่ที่ความเชื่อมั่น 95% อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงตัวอย่างโปรแกรม Weighted Nonlinear Least-Squares Analysis ภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ตัวอย่างโปรแกรม Weighted Nonlinear Least-Squares Analysis

ที่มา : ปรียาพร, 2547

6. ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา

ในการออกแบบและดำเนินการระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้วิธีทางชีววิทยา จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะการเจริญเติบโตของจุลชีพในถังหรือบ่อปฏิกิริยา ที่มีความสัมพันธ์กันกับอาหาร หรือ Substrate ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ได้อธิบายถึงลักษณะการเจริญเติบโตของตัวจุลชีพในถังหรือบ่อปฏิกิริยา และได้อธิบายลักษณะการเจริญเติบโตของตัวจุลชีพในถังหรือบ่อปฏิกิริยาประเภทต่าง ๆ ในเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำไปใช้ในการออกแบบและดำเนินการระบบบำบัด น้ำเสียดังกล่าวได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

จลนพลศาสตร์ของการเจริญเติบโตของตัวจุลชีพ

จุลชีพต่าง ๆ ในถังปฏิกิริยาจะมีการเจริญเติบโต การเพิ่มปริมาณขึ้น และการตาย ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันกับปริมาณของอาหาร (Substrate) ที่เติมลงไปในถังปฏิกิริยาและสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ค่าพีเอช อุณหภูมิ สารอาหารที่จำเป็นอื่น ๆ (เช่น N, P, K ฯลฯ) เป็นต้น

เพื่อการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเจริญเติบโตของตัวจุลชีพในถังปฏิกิริยาเป็นไปได้ง่าย อาจพิจารณาเลือกใช้ถังปฏิกิริยา Batch Reactor ภาพที่ 4 ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวจุลชีพในถังปฏิกิริยา Batch Reactor โดยมีความสัมพันธ์กันกับปริมาณอาหารที่เติมลงไป เป็นการแสดงลักษณะการเจริญเติบโตของจุลชีพในถังปฏิกิริยาเหมือนกัน เพียงแต่ว่าต้องการอธิบายในเชิงจลนพลศาสตร์เพิ่มขึ้น

ช่วงที่ 1 (Lag)

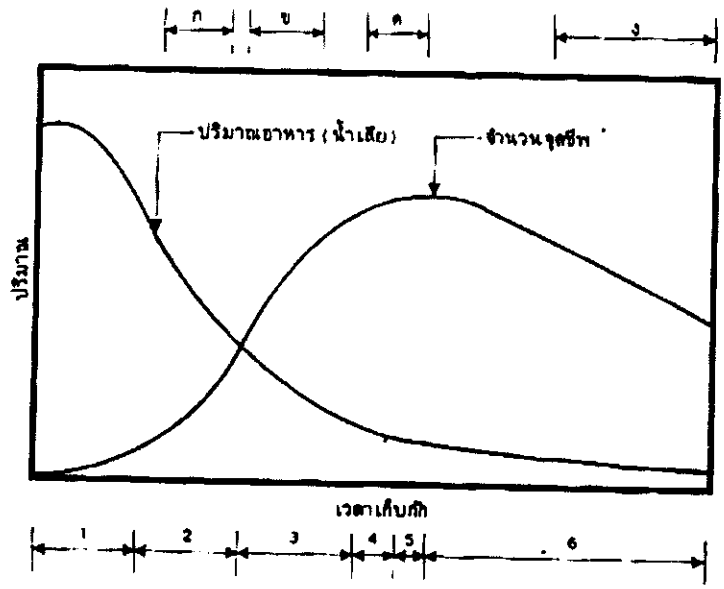
ช่วงที่ 1 นี้เป็นช่วงที่เปรียบเสมือนกับจุลชีพกำลังจะเข้าสู่สิ่งแวดล้อมใหม่ พวกจุลชีพเหล่านี้โดยมากจะมาจากน้ำเสียต่าง ๆ ดิน หรือ พวกเชื้อจุลชีพที่เพาะเก็บไว้ ซึ่งอาจมีสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกับสิ่งแวดล้อมใหม่ ดังนั้นช่วงที่ 1 นี้จึงเป็นช่วงที่ให้จุลชีพใหม่คุ้นเคยกับสิ่งแวดล้อมปัจจุบัน ช่วง Lag อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจำนวนเซลล์จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนที่สองจะมีการอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพเพิ่มขึ้นบ้างเล็กน้อย ช่วง Lag นี้ได้มาเกี่ยวพันกันกับการดำเนินการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียมาก ตัวอย่างเช่น จุลชีพจากระบบ Activated Sludge บางส่วนไม่ได้รับสารอาหารและออกซิเจนเพียงพอ ในบริเวณส่วนล่างของถังตกตะกอนที่สองได้ถูกสูบไปยังถังเติมอากาศ เปรียบเสมือนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมใหม่นั่นเอง ทำให้ต้องเสียเวลาในการให้จุลชีพปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่ จากนั้นจึงจะได้เข้าสู่ช่วงการเจริญเติบโตต่อ ๆ ไป แต่ถ้าต้องการให้ระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวอยู่ในช่วงที่มีการเจริญเติบโตของจุลชีพอย่างต่อเนื่อง โดยที่ไม่ต้องผ่านช่วงที่ 1 สามารถกระทำได้โดยการนำจุลชีพจำนวนมากพอจากระบบบำบัดน้ำเสียแห่งอื่นมาเติมใส่ลงในระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าว โดยต้องเป็นน้ำเสียประเภทเดียวกัน

ช่วงที่ 2 (Acceleration)

ช่วงที่ 2 นี้เป็นช่วงที่จะมีจุลชีพเริ่มเจริญเติบโต และขยายพันธุ์ ช่วงนี้เปรียบเสมือนรถยนต์กำลังเริ่มเร่งเครื่องเดินหน้า ปฏิกิริยาชีวเคมีได้เกิดขึ้นเป็นลูกโซ่ในช่วงที่ 2 นี้จนถึงระดับคงที่

ช่วงที่ 3 (Log)

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่พวกจุลชีพได้รับความคุ้นเคยกับระบบแล้ว การเจริญเติบโตของตัวจุลชีพได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจากการศึกษาวิจัยพบว่า อัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพมีลักษณะเป็นปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง ภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่าช่วงนี้มีค่า F/M สูง (อาหาร/จำนวนจุลชีพ) ดังนั้นจำนวนจุลชีพที่ตายลงไปจึงมีน้อยมากไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง



1	=	Lag	ก	=	Dispersed Growth
2	=	Acceleration	ข	=	High Rate
3	=	Log	ค	=	Conventional
4	=	Declining	ง	=	Extended Aeration
5	=	Stationary			
6	=	Endogenous			

ภาพที่ 4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวจุลชีพในถังปฏิกิริยา Batch Reactor
ที่มา : เกรียงศักดิ์, 2545

ช่วงที่ 4 (Declining)

ช่วงที่ 4 เป็นช่วงที่มีจำนวนจุลชีพเพิ่มขึ้นมากจนไม่มีอาหารเพียงพอสำหรับอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพที่สูงมาก ทำให้มีอัตราการตายลงของจุลชีพเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ค่าอัตราการเจริญเติบโตสุทธิของจุลชีพมีค่าลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงที่ 3 ช่วงที่ 4 และค่อย ๆ ลดลง ซึ่งในช่วงนี้จะมีจำนวนจุลชีพมาก แต่จะมีจำนวนจุลชีพมาก ๆ แบบนี้ได้ไม่นานนักจำนวนจุลชีพก็จะค่อย ๆ ลดลงในภายหลังคือในช่วงที่ 6

ช่วงที่ 5 (Stationary)

ช่วงที่ 5 เป็นช่วงที่มีจำนวนจุลชีพที่มากที่สุด (X สูงสุด) และมีค่า dX/dt เท่ากับ 0 คือจะไม่มีการเพิ่มขึ้น หรือลดจำนวนจุลชีพลง เป็นช่วงที่มีปริมาณอาหารจำกัด ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) จะเท่ากับ 0 ช่วงนี้จะมีระยะเวลาสั้นมาก จากช่วงที่ 5 จะเคลื่อนไปที่ช่วง 6 ซึ่งจำนวนจุลชีพเริ่มลดลง

ช่วงที่ 6 (Endogenous)

ช่วงที่ 6 เป็นช่วงที่มีจำนวนจุลชีพน้อยลงเรื่อย ๆ โดยมีอัตราการตายเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับอัตราลดลงของจำนวนจุลชีพมีได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมนั้น ๆ ดังนั้นการหาค่าอัตราลดลงของจำนวนจุลชีพสามารถกระทำได้โดยการทดลอง ณ สภาวะแวดล้อมนั้น ๆ

หลังจากทราบถึงลักษณะการเจริญเติบโตของจุลชีพในถังปฏิกิริยาชีวเคมีแบบเทแล้ว เพื่อให้สามารถนำความเข้าใจดังกล่าวมาช่วยในการศึกษาวิจัย และในการคำนวณออกแบบที่เกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา จึงต้องอาศัยความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์ มาช่วยสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับลักษณะการเจริญเติบโตของจุลชีพ เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ลึกซึ้งขึ้น (เกรียงศักดิ์, 2545)

7. จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนในแต่ละขั้นตอนต้องอาศัยการทำงานที่แตกต่างกันของจุลินทรีย์หลายชนิด สามารถแบ่งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

(1) Fermentative Bacteria

Fermentative Bacteria เป็นจุลินทรีย์เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของกระบวนการ Hydrolysis และ Acidogenesis จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ เจริญได้ดีในช่วงพีเอช 4.0-6.5 ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดีมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด จุลินทรีย์กลุ่มนี้อาจเป็นได้ทั้งพวก *Strictly Anaerobe* และ *Facultative Anaerobe* ได้แก่ จุลินทรีย์ที่อยู่ในวงศ์ (Family) *Streptococcaceae Enterobacteriaceae, Bacillaceae* และ *Lactobacillaceae* และจุลินทรีย์สกุล (Genus) *Bacteroides,*

Clostidium, Butyrivibio, Eubacterium, Bifidobacterium จุลินทรีย์เหล่านี้มีอยู่ประมาณ 3.9×10^{8}-10^{10} เซลล์ต่อมิลลิลิตร

(2) Acetogenic Bacteria

ขั้นตอนการผลิตกรดอะซิติก (Acidogenesis) มีจุลินทรีย์ Acetogens 2 กลุ่มคือ (Novae, 1986)

2.1) Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria เป็นจุลินทรีย์ย่อยสลายกรดไขมันและสารประกอบที่เป็นกลางบางชนิดให้เป็นอะซิเตท ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซไฮโดรเจน มีบทบาทสำคัญในการควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ เพราะ H^{+} ทำให้ค่าพีเอชในถังหมักเป็นกรด นอกจากนี้ก๊าซไฮโดรเจนยังเป็นการเริ่มต้นที่ใช้ในการสร้างก๊าซมีเทน โดยควบคุมอัตราการสร้างก๊าซมีเทนและกรดอะซิติก จุลินทรีย์กลุ่มนี้อาจถูกยับยั้งการเจริญเติบโตได้ถ้ามีก๊าซไฮโดรเจนภายในถังหมักสะสมอยู่ในปริมาณสูง นั่นคือ ก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์เนื่องจากค่าพีเอชเป็นกรดมาก แต่เมื่อมี Methanogens อยู่ด้วย จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะใช้ก๊าซไฮโดรเจนไปผลิตก๊าซมีเทนทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในถังหมักมีไม่มากจนถึงระดับที่เกิดพิษได้ จุลินทรีย์กลุ่มนี้ได้แก่ *Syntrophomonas Wolfei, Syntrophus Buswellii* มีจำนวนประมาณ $4x10^{6}$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในตะกอนน้ำโสโครก

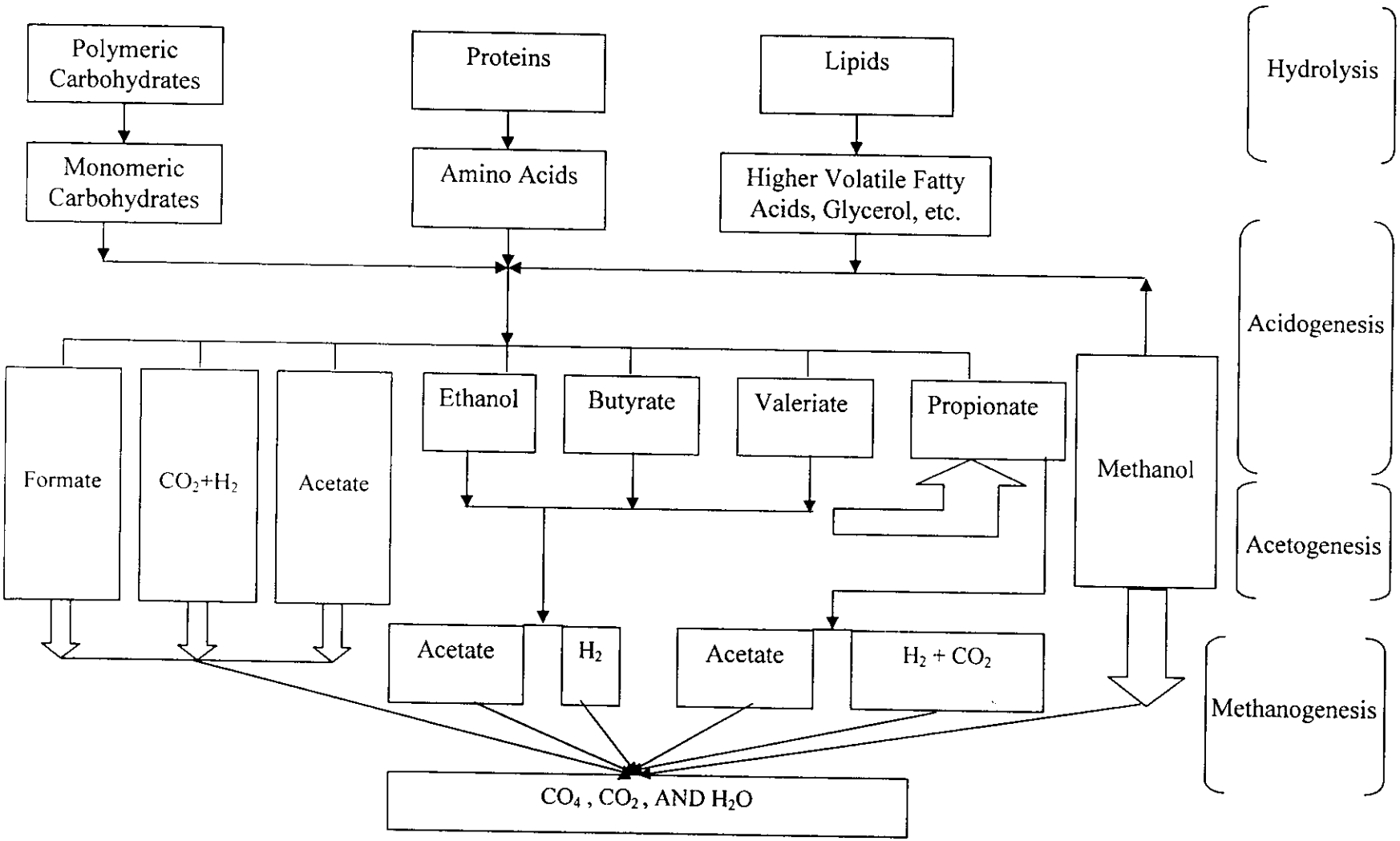
2.2) Homoacetogenic Bacteria จุลินทรีย์กลุ่มนี้ สร้างอะซิเตทจากสารประกอบที่มีคาร์บอนเพียงหนึ่งอะตอม เช่น ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือจากกรดฟอร์มิก

(3) Methanogenic Bacteria

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้เป็นพวกที่สร้างก๊าซมีเทน เป็นจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างแท้จริง (Strictly Anaerobic) ออกซิเจนเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มนี้ เจริญได้ดีที่พีเอชเป็นกลาง ประมาณ 6.5-7.5 มีทั้งเป็น Mesophile, Thermophile พวก Mesophile เจริญได้ที่อุณหภูมิ 15-40°ซ ในขณะที่ Thermophile เจริญที่อุณหภูมิ 50-65°ซ Methanogens มีอัตราการเจริญช้ากว่า Acidogens และ Acetogens เนื่องจาก Methanogens ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้น้อย จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถสร้างก๊าซมีเทนจากสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างง่าย เช่น กรดอะซิติก และหรือสารประกอบที่มีคาร์บอนเพียงอะตอมเดียว ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่สำคัญในขั้นตอนนี้ ได้แก่ จุลินทรีย์ในสกุล (Genus) *Methanobacterium, Methanobrevibacte, Methanococcus, Methanomicrobium, Methanosarcina* เป็นต้น (Novae, 1986)

8. กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในถังย่อยสลายแบบแอนแอโรบิกต้องอาศัยจุลินทรีย์ 4 กลุ่มในการย่อยสลายดังแสดงในภาพที่ 5 และมีรายละเอียดของแต่ละปฏิกิริยาคือ (อ้างใน Dararat, 2001)



ภาพที่ 5 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

ที่มา : Zeeuw, 1984

(1) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส คือ ปฏิกิริยาที่ทำการเปลี่ยนสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ (สารคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน) ซึ่งมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จุลินทรีย์ดูดซึมเข้าเซลล์ได้ ให้เป็นสารขนาดเล็ก (น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน) โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่เรียกว่า ไฮโดรไลซิสจุลินทรีย์ โดยผลิตเอนไซม์และปล่อยออกมาจากเซลล์ของจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หลังจากนั้นสารอินทรีย์ขนาดเล็กจะสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ได้โดยตรง (สุบัณฑิต, 2548)

(2) ปฏิกิริยาการเกิดกรด (Acidogenesis)

ปฏิกิริยาการเกิดกรด คือ ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารโมเลกุลขนาดเล็ก (น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน) ด้วยกระบวนการหมัก หรือ Fermentation จะได้ผลผลิตส่วนใหญ่ คือ กรดอินทรีย์ จึงทำให้ปฏิกิริยานี้เรียกว่าเป็นปฏิกิริยากรเกิดกรดนั่นเอง นอกจากผลิตผลส่วนใหญ่ที่เป็นกรดอินทรีย์แล้วนั้นยังสามารถพบผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ๆ ปะปนออกมาโดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์และสภาวะแวดล้อมของการเกิดปฏิกิริยา ยกตัวอย่าง เช่น ก๊าซไฮโดรเจน กรดอะซิติก และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

(3) ปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

ปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติก คือ ปฏิกิริยาที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่ระเหยง่ายที่เกิดจากขั้นตอนของปฏิกิริยาการเกิดกรดให้เป็นกรดอะซิติก โดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนิก (จุลินทรีย์สร้างกรดอะซิติก) ซึ่งจะเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญของการย่อยสลายในถังย่อยสลายแบบที่ไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากในขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต่อจากขั้นตอนนี้จะสามารถใช้สารตั้งต้นที่มีปริมาณคาร์บอนจำนวน 1-2 คาร์บอนเท่านั้น (กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก เมทานอล และเมทีลามีน) และก๊าซไฮโดรเจน โดยต้องมีสภาวะสิ่งแวดล้อมในถังย่อยสลายที่เหมาะสม เช่น จุลินทรีย์อะเซโตจีนิกที่ผลิตไฮโดรเจนต้องการสภาวะที่มีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า $2x10^{-3}$ บรรยากาศ และที่ย่อยสลาย กรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิกจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า $9x10^{-3}$ บรรยากาศ ตามลำดับดังสมการที่ 25 และ 26

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2 \quad \text{.....(25)}$$

$$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2 \quad \text{.....(26)}$$

(4) ปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

ปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทน คือ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methanogen)

จุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจะเป็นจุลินทรีย์กลุ่มอาร์คีย์ที่มีอัตราการเจริญช้ามากและยังเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารตั้งต้นเพียงบางชนิด คือ สารที่มีคาร์บอนเพียง 1 หรือ 2 คาร์บอนเท่านั้น ยกตัวอย่าง เช่น เมทานอล กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก รวมทั้งก๊าซไฮโดรเจน ส่วนกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนไม่สามารถที่จะใช้เป็นสารตั้งต้นในการเปลี่ยนให้เป็นก๊าซมีเทนได้ ดังนั้นจุลินทรีย์กลุ่มนี้จึงต้องอาศัยจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ที่เปลี่ยนกรดอินทรีย์ต่าง ๆ ให้เป็นกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจนก่อนที่จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจะสามารถย่อยสลายต่อได้

นอกจากนั้นจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนยังเป็นจุลินทรีย์ที่ไวต่อสภาวะแวดล้อมอย่างมาก เช่น ไม่อาจทนต่อก๊าซออกซิเจนแม้มีปริมาณของก๊าซออกซิเจนเพียงเล็กน้อยหรือไม่อาจเจริญได้ดีเมื่ออยู่ในช่วงพีเอชนอกเหนือจากช่วง 6.8–9.2 เป็นต้น ตารางที่ 2 และ 3 ได้ยกตัวอย่างจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนซึ่งมีหลากชนิด

ตารางที่ 2 การจำแนกชนิดของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน

อันดับของจุลินทรีย์สร้าง ก๊าซมีเทน (Order)	**ตระกูลของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน (Family)**	**สกุลของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน (Genus)**	**ชนิดของจุลินทรีย์สร้าง ก๊าซมีเทน (Species)**
Methanobacteriales	Methanobacteriaceae	Methanobacterium	*M. formicicum*
			M. bryanri
			M. hermoautotrophicum
			M. ruminantium
		Methanobrevibacter	*M. arboriphilus*
			M. smihii
			M. vannielli
Methanococcales	Methanococcaceae	Methanococcus	*M. voltae*
		Methanomicrobium	*M. mobile*
Methanomicrobiales	Methanomicrobiceae	Methanogenium	*M. cariaci*
			M. marisnigri
		Methanosprillum	*M. hungatei*
			M. barkeri
	Methanosarcinaceae	Methanosarcina	*M. mazei*

ที่มา : Bitton, 1994

ตารางที่ 3 ชนิดและแหล่งที่อยู่ของจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน

ชนิดของจุลินทรีย์	สารตั้งต้น	ชนิดของจุลินทรีย์	สารตั้งต้น
Methanobacterium bryantii	H_2	*Methanogenium cariaci*	H_2 และ HCOOH
M. formicium	H_2 และ HCOOH	*M. marisnigi*	H_2 และ HCOOH
M. thermoautotropicum	H_2	*M. tatii*	H_2 และ HCOOH
M. alcaliphilum	H_2	*M. olentagyi*	H_2
Methanobrevibacter arboriphilus	H_2	*M. thermophilicum*	H_2 และ HCOOH
M. ruminantium	H_2 และ HCOOH	*M.bourgense*	H_2 และ HCOOH
M. smithii	H_2 และ HCOOH	*M.aggregans*	H_2 และ HCOOH
Methanococcus vannilii	H_2 และ HCOOH	Methanococcoides	CH_3NH_2 และ CH_3OH
M. voltae	H_2 และ HCOOH	Methylutens	CH_3COOH
M. deltae	H_2 และ HCOOH	*Methanothrix soehngnii*	CH_3COOH
M. maripaludis	H_2 และ HCOOH	*M.concilii*	H_2
M. jannaschii	H_2 และ HCOOH	*Methanothermus fevidus*	CH_3OH,CH_3NH_2 และ $(CH_3)_2NH$
M. thermolithoautotrophicus	H_2, CH_3OH, CH_3NH_2 และ $(CH_3)_3N$	*etanolobus undarius*	CH_3OH,
M. frisius	H_2 และ HCOOH	*Methanosarcina barkeri*	CH_3COOH

ที่มา : Bitton, 1994

จุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนจำแนกได้เป็น 3 ชนิดตามชนิดของสารตั้งต้น ดังนี้คือ

1. จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจากกรดอะซิติก (Obligate Acetoclastic Methanogen) คือ จุลินทรีย์ที่สามารถใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งของคาร์บอนและแหล่งของพลังงานได้เพียงสารเดียว ปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนจากกรดอะซิติกดังแสดงในสมการที่ (27)

$$\underset{\text{กรดอะซิติก}}{CH_3COOH} + H_2O \longrightarrow CH_4 + H_2CO_3 \quad \text{.....(27)}$$

2. จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจน (Obligate Hydrogenotrophic methanogen) คือจุลินทรีย์ที่สามารถใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งของพลังงานและใช้ก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งของคาร์บอนเพื่อผลิตก๊าซมีเทน ดังนั้นจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถเรียกว่าเป็นจุลินทรีย์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2 Utilizer) ปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจนแสดงในสมการที่ (28)

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O + 32.4\ Kcal \quad \text{.....(28)}$$

จุลินทรีย์ชนิดนี้นอกจากสามารถใช้ก๊าซไฮโดรเจนแล้วยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารตั้งต้นได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากว่ากรดฟอร์มิกสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการที่ (29)

$$HCOOH \longrightarrow CO_2 + H_2 \quad \text{.....(29)}$$

กรดฟอร์มิก

3. จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจนหรือกรดอะซิติก (Hydrogenotrophic Acetoclastic Methanogen) คือ จุลินทรีย์ที่สามารถใช้ทั้งกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตก๊าซมีเทน แต่อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์กลุ่มนี้มีความชอบใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นมากกว่าใช้กรดอะซิติก

ปฏิกิริยาในถังย่อยสลายแบบที่ไม่ใช้ออกซิเจนนั้นจะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการย่อยสลายสารปนเปื้อนในถังย่อยสลายนี้จึงมีความสลับซับซ้อนเนื่องจากต้องมีการอาศัยและพึ่งพาของจุลินทรีย์ 4 กลุ่มในการทำงาน โดยเฉพาะอย่างในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดต่อประสิทธิภาพในย่อยสลายสารอย่างสมบูรณ์และทำให้ระบบการย่อยสลายไม่ล้มเหลวเนื่องจากเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต้องมีการควบคุมปัจจัยให้เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

ข้อดีของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเปรียบเทียบกับแบบที่ใช้ออกซิเจน

1. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นกระบวนการที่ไม่ต้องใช้ก๊าซออกซิเจนเหมือนกับกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งการใช้ก๊าซออกซิเจนในระบบบำบัดแบบที่ใช้ออกซิเจนทำให้มีค่าใช้จ่ายในปริมาณสูง แต่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนซึ่งเป็นก๊าซที่พบได้

ในสิ่งแวดล้อมทุกระบบ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับถังย่อยสลายระบบนี้

2. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นกระบวนการที่เกิดจากจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่มีการเจริญช้ากว่าจุลินทรีย์กลุ่ม ที่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นในกระบวนการดังกล่าวจึงผลิตกากตะกอนหรือเซลล์จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่ในปริมาณที่น้อยกว่าซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนในขั้นตอนต่อไป

3. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน จะผลิตก๊าซที่มีประโยชน์คือก๊าซมีเทนที่สามารถนำกลับมาใช้เป็นก๊าซหุงต้มหรือนำมาเผาไหม้เพิ่มความร้อนหรือนำมาทำการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ซึ่งจะเป็นการทำให้เกิดรายได้มาทดแทนค่าใช้จ่ายบางส่วน

4. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณสูง

5. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นระบบที่สามารถรับการเติมสารอินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณสูงหรือเรียกว่ามีการเติมสารปนเปื้อนในอัตราการโหลดดิงสูง

6. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถย่อยสลายสารที่มนุษย์สร้างขึ้นในขณะที่กระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนไม่สามารถย่อยสลายสารเหล่านั้นได้

ข้อเสียของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

1. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ใช้เวลาในการย่อยสลายสารปนเปื้อนนานกว่ากระบวนการย่อยสลายแบบที่ใช้ออกซิเจนเนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่มีออกซิเจนมีอัตราการเจริญต่ำ

2. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน มีขั้นตอนการทำงานหลายขั้นตอนรวมทั้งขั้นตอนของปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทนซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีความไวต่อสารพิษ ดังนั้นจึงทำให้กระบวนการย่อยสลายแบบที่ไม่ใช้ออกซิเจนจึงมีความไวต่อสารพิษได้มากกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่ใช้ออกซิเจน

3. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน จะมีเวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นหรือเรียกว่าช่วย Start-up ของการทำงานของระบบจะนานกว่ากระบวนการย่อยสลายแบบที่ใช้ออกซิเจนเนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนเจริญช้า

4. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ต้องมีการป้อนสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้นในปริมาณที่สูงและเป็นระบบที่ไม่สามารถปรับตัวได้ดีกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเสีย ค่าบีโอดี อุณหภูมิ และสภาวะแวดล้อมอื่น ๆ

5. กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน อาจจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีกลิ่นเหม็นรวมทั้งยังสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหรือโลหะหนักทำให้น้ำเสียมีสีดำและทำให้ระบบการย่อยสลายล้มเหลวได้

ปัจจัยที่ควบคุมกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

1. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญมากชนิดหนึ่งในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน เป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายครั้งนี้ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก ดังนั้นจึงต้องมีการระมัดระวังในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยอุณหภูมิของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบควรมีความผันแปรไม่เกิน ± 5 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่าง เช่น ถังย่อยสลายแบบที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงจะต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 50-65 °ซ และอุณหภูมิ 52°ซ เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายมากที่สุดและถังย่อยสลายแบบอุณหภูมิปานกลางซึ่งต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 30-35 °ซ (สุบัณฑิต, 2548)

2. ค่าพีเอช

ความเป็นกรด-ด่างหรือค่าพีเอชเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในถังย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน ถ้าค่าพีเอชมีค่าที่ไม่เป็นกลางการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนจะถูกยับยั้งทำให้ระบบการย่อยสลายทั้งระบบล้มเหลวได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการควบคุมพีเอชอาจจะต้องมีการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาวหรือโซดาไฟ หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Bitton, 1994; Maata, 1985)

3. เวลาที่น้ำเสียอยู่ในถังย่อยสลาย

เวลาที่น้ำเสียอยู่ในถังย่อยสลายต้องเป็นเวลาที่เหมาะสมและเพียงพอที่ทำให้เกิดการย่อยสลายสารปนเปื้อนได้อย่างสมบูรณ์

4. สารพิษ

สารพิษที่ปนเปื้อนในน้ำเสียมีหลากชนิด (ตารางที่ 4) ยกตัวอย่างเช่น ซัลไฟด์มีผลต่อการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน นอกจากนั้นพบว่ามีสารพิษอีกหลายชนิดปนเปื้อนในน้ำเสียที่ทำให้ระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนล้มเหลวและการตรวจวัดความล้มเหลวของระบบดังกล่าวสามารถดูจากปริมาณก๊าซมีเทนที่ลดลงและปริมาณของกรดอินทรีย์ที่ระเหยง่ายสูงขึ้นเนื่องจากสารพิษจะทำให้จุลินทรีย์ในระบบไม่สามารถเปลี่ยนสารโมเลกุลใหญ่ชนิดต่าง ๆ ในน้ำเสียไปเป็นกรดที่ระเหยง่าย (Volatile Acid) และเปลี่ยนจากกรดที่ระเหยง่ายไปเป็นกรดอะซิติก เพราะจุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่ม (จุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนและจุลินทรีย์กลุ่มซัลเฟตรีดิวเซอร์) สามารถใช้กรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน เป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้แต่ถ้ามีปริมาณกรด

อะซิติกจำนวนน้อยจะทำให้จุลินทรีย์กลุ่มซัลเฟตรีดิเซอร์เอาชนะจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนได้เพราะจุลินทรีย์กลุ่มซัลเฟตรีดิวเซอร์มีความสามารถในการจับสารตั้งต้นหรือตัวให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่าจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน

ดังนั้น ถ้ากรดอะซิติกในระบบเกิดขึ้นในปริมาณน้อยจะทำให้ขั้นตอนสุดท้ายในถังย่อยสลายแบบที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate Reduction) ได้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และทำให้ระบบล้มเหลวได้

ตารางที่ 4 ประเภทของสารพิษต่าง ๆ ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ประเภทของสารพิษ	ชนิดของสารพิษ
สารอินทรีย์	ฟีนอล
	สารประกอบฟีนอล
	คลอโรฟอร์ม
สารอนินทรีย์	โลหะหนัก(โครเมียม,นิกเกิล,สังกะสี,ทองแดง และสารหนู)
พิษสูง	ไซยาไนด์
พิษต่ำ	โซเดียม
	แคลเซียม
	โพแทสเซียม
	แมงกานีส
	คลอไรด์

ที่มา : Gaudy & Gaudy, 1981

5. ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์

ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนดังกล่าวมาแล้วในภาพที่ 5 กรดอินทรีย์จะเกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 2 หรือขั้นตอนการทำให้เกิดกรด (Acidogenesis) และเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) ดังนั้น ถ้าปริมาณของกรดอินทรีย์มีอยู่ในปริมาณสูงกว่าปกติจะทำให้บ่งชี้ได้ว่าขั้นตอนของปฏิกิริยาการสร้างมีเทนถูกยับยั้งหรือสัญญาณบ่งบอกถึงการไม่สมดุลของกระบวนการย่อยสลายในระบบซึ่งจะทำให้ระบบการบำบัดล้มเหลวได้ ปกติความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในรูปของกรดอะซิติกในระบบที่ดี จะอยู่ในช่วง 200-400 มก./ล.

6. อัตราการสร้างก๊าซมีเทน

อัตราการสร้างก๊าซมีเทนเป็นเครื่องวัดกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนและเป็นสิ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีความสำคัญมากเพราะถ้ามีอัตราการสร้างก๊าซมีเทนลดลงจะสามารถบ่งบอกเป็นสัญญาว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นกับกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน

9. ค่าความสามารถจำเพาะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตมีเทน (Specific Methanogenic Activity : SMA)

ความสามารถจำเพาะแบคทีเรียในการผลิตมีเทน (SMA) สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าการเกิดก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะพบว่าร้อยละ 70 ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบบัดไม่ใช้อากาศเป็นก๊าซมีเทน และที่เหลือจะเป็นก๊าซประเภทอื่นๆ (Metcalf and Eddy, 2003) ซึ่งกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่สำคัญที่พบในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ดังนั้น ความสามารถจำเพาะแบคทีเรียในการผลิตมีเทนของกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน จึงสามารถบ่งชี้ได้ถึงความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์และสามารถบ่งชี้เสถียรภาพของระบบบำบัดได้เมื่อมีสารพิษหรือเกิดการยับยั้งการทำงานของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัด (Liu and Tay, 2004) และค่าเอสเอ็มเอ (SMA) นั้นจะเป็นค่าที่ใช้เพื่อบ่งบอกว่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับสารอาหารและสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสีย หรือมีความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดีหรือไม่ ถ้าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์นั้นไม่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสารอาหารและสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียและสภาพแวดล้อมได้ ย่อมจะส่งผลให้เกิดปัญหาการ Wash Out ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ (สุมลรัตน์, 2548)

10. อุตสาหกรรมเกษตร

อุตสาหกรรมเกษตรเป็นธุรกิจเกษตรชนิดหนึ่ง จัดอยู่ในประเภทธุรกิจแปรรูปผลิตผลเกษตรเพื่อจัดจำหน่ายอุตสาหกรรมเกษตรจัดเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งจึงมีลักษณะคล้ายกับอุตสาหกรรมทั้งหลาย คือ มีปัจจัยในการดำเนินการที่สำคัญที่จะทำให้เกิดประสิทธิผลรวม 6 ปัจจัยด้วยกัน คือ วัตถุดิบ การตลาด ทุนในการดำเนินการ กำลังคนที่จะปฏิบัติงานทั้งด้านเทคนิคด้านการจัดการการบริหารงานที่มีประสิทธิภาพ และเครื่องจักรอุปกรณ์ในการแปรรูประบบอุตสาหกรรมทั้งจะต้องดำเนินการแปรรูประบบอุตสาหกรรม (Manufacture) คือ การนำวัตถุดิบจำนวนมากมาแปรรูป ด้วยเครื่องจักรอุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณ คุณภาพ ราคาต้นทุน

การผลิต ตามที่ต้องการในระยะเวลาที่กำหนดและจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ด้วยอุตสาหกรรมเกษตรคล้ายกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ จึงมักจะทำให้คนส่วนใหญ่เข้าใจว่าอุตสาหกรรมเกษตรเหมือนกัน หรือเป็นอย่างเดียวกันกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ซึ่งเป็นความเข้าใจผิดที่ส่งผลต่อการดำเนินงาน อุตสาหกรรมเกษตรอย่างยิ่ง และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การดำเนินการอุตสาหกรรมเกษตรล้มเหลว อุตสาหกรรมเกษตรมิใช่แตกต่างจากอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพียงที่ใช้วัตถุดิบแตกต่างกันเท่านั้น อุตสาหกรรมเกษตรยังมีความแตกต่างจากอุตสาหกรรมอื่น ๆ ทั้งในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ การจัดการและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วย (นฤดม, 2532)

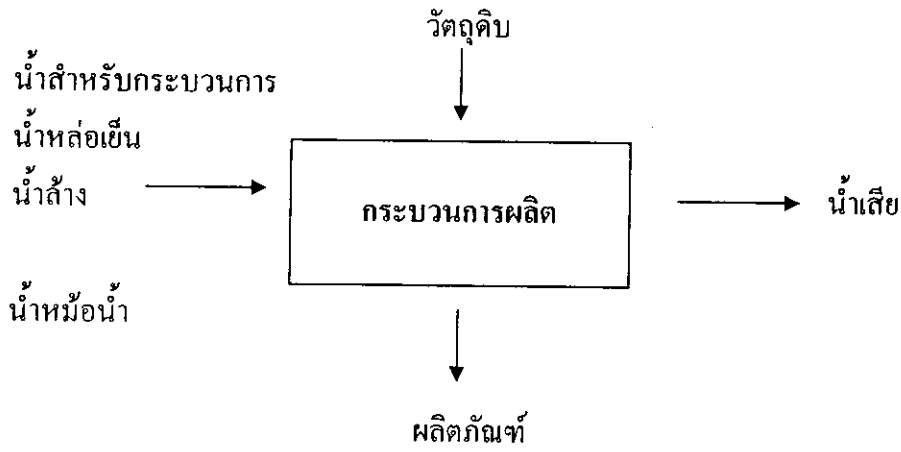
วัตถุดิบของอุตสาหกรรมเกษตรเป็นชีวภาพมีการเปลี่ยนแปลง เสื่อมเสีย ทั้งภายในตัวของวัตถุดิบเองและมีการเสื่อมเสียตามสภาวะธรรมชาติซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของวัตถุดิบมาก ทั้งวัตถุดิบของอุตสาหกรรมเกษตรส่วนใหญ่ได้มาจากผลผลิตเกษตรทั้งพืชและสัตว์ซึ่งได้จากการเกษตรกรรม การจัดการที่แตกต่างออกไปของอุตสาหกรรมเกษตรมีอยู่สองประการ ประการแรกได้แก่ การจัดการผลิตหรือจัดหาวัตถุดิบ เพื่อป้อนสายการผลิตให้พอเพียงและตามที่ต้องการเพราะวัตถุดิบจากผลิตผลเกษตรนั้นจะต้องมีการปลูกหรือเพาะเลี้ยงใหม่ทุกปี ความแตกต่างในการจัดการอุตสาหกรรมเกษตรประการที่สอง คือ การจัดการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้และของเหลือ (Waste) ทั้งผลพลอยได้และของเหลือเป็นสารชีวภาพ จึงมีการเสื่อมเสียตามธรรมชาติ หากไม่จัดการใช้ประโยชน์หรือกำจัดทิ้งแล้ว ผลที่เกิดจากการเสื่อมเสียนี้ทำให้เกิดมลภาวะขึ้น จำเป็นต้องจัดการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้และของเหลือ เพื่อเป็นการเพิ่มรายได้และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้ง หรือจะต้องจัดการกำจัดของเหลือที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น การจัดการกำจัดน้ำเสีย และสิ่งปฏิกูล เพื่อป้องกันและควบคุมไม่ให้เกิดมลพิษ อันจะเป็นอันตรายแก่สิ่งแวดล้อม และผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตรส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องอุปโภคและบริโภคในการดำรงชีวิตของมนุษย์ทำให้เกิดความต้องการคุณภาพผลิตภัณฑ์แตกต่างไปจากผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมอื่น ๆ (นฤดม, 2532)

11. น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater)

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมถูกปล่อยจากกระบวนการต่าง ๆ มากมาย ซึ่งมีการใช้น้ำในหลายวัตถุประสงค์ นอกเหนือจากน้ำหล่อเย็นที่มีปริมาณค่อนข้างมากแล้ว ยังมีน้ำจากกระบวนการผลิตซึ่งจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของกระบวนการผลิต และกรรมวิธีการผลิต โดยน้ำเสียเหล่านี้จะประกอบด้วยสารอาหาร สารแขวนลอย แบคทีเรีย และสารที่ต้องการใช้ออกซิเจน ซึ่งมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่จะถูกออกซิไดซ์ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง ทำให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ซึ่งทำให้เกิดการเน่าเสียของน้ำ และมีปัญหาของ

กลิ่นเหม็นของก๊าซไข่เน่าซึ่งจะเกิดตามมาภายหลัง หรือสารพิษต่าง ๆ ซึ่งส่วนมากเป็นสารอนินทรีย์ โดยอาจส่งผลทันที หรืออาจอยู่ในลักษณะของการสะสม เช่น พวกโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตพวกหอยและปลา เป็นต้น

นอกจากนี้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาจเป็นส่วนที่มาจากระบบหม้อน้ำ หรือน้ำชะล้างพื้นที่ต่าง ๆ ภายในโรงงานซึ่งอาจมีการพัดพาเอามลสารในบริเวณที่มีการผลิตภายในโรงงานลงสู่แหล่งน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 6



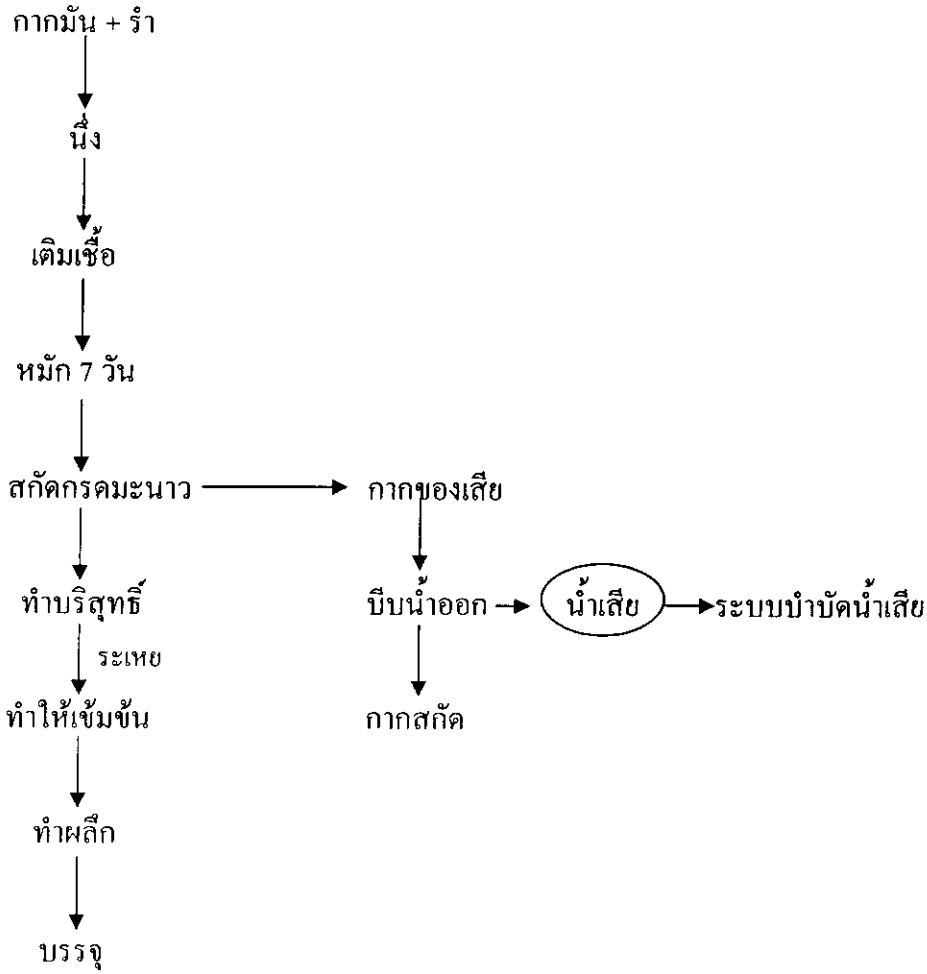
ภาพที่ 6 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม
ที่มา : กัลยา, 2547

ผลกระทบของการทิ้งน้ำทุกชนิดจากโรงงานลงสู่แหล่งรองรับน้ำทิ้งก็คือ ทำให้เกิดการสูญเสียการใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำนั้น ๆ ได้เช่น ในแง่ของการใช้ทำน้ำประปา อาจทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปาเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ๆ หรือส่งผลต่อการเกษตรกรรม หรือส่งผลในลักษณะที่คิดเป็นตัวเงินไม่ได้ เช่น ผลกระทบต่อการท่องเที่ยว เป็นต้น คุณสมบัติของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับอัตราการไหล โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของอุตสาหกรรม ในอุตสาหกรรมชนิดหนึ่ง ๆ ปริมาณความสกปรกจะแตกต่างกันไป ดังนี้ การศึกษาน้ำเสียชนิดหนึ่ง ๆ จึงต้องทำเป็นกรณี ๆ ไป โดยจากส่วนนี้ทำให้สามารถกำหนดการสำรวจระบบน้ำเสีย ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นที่จะนำไปสู่ฐานการออกแบบและระบบการบำบัด ที่ต้องการสำหรับน้ำเสียที่จะให้ได้มาตรฐานน้ำทิ้งตามที่หน่วยงานรัฐกำหนด นอกจากนี้ยังช่วยการลดน้ำใช้และปริมาณความสกปรกเท่าที่ทำได้ (กัลยา, 2547)

12. กระบวนการผลิตและน้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมเกษตร

(1) กระบวนการผลิตและน้ำเสียโรงงานผลิตกรดมะนาว

โรงงานเอเชียซิทริค ทำการผลิตสกัดกรดมะนาวโดยกระบวนการผลิต โดยใช้กากมันสำปะหลังและรำเป็นวัตถุดิบหลัก ต่อจากนั้นจะทำการนึ่งและมีการเติมเชื้อราดำ และเป็นระยะเวลาหมัก 7 วัน เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดมะนาว ก่อนที่จะนำมาสกัดกรดมะนาวจะมีการฆ่าเชื้อก่อนและในขั้นตอนนี้จะมีกากของเสียเกิดขึ้นจากการล้างกากมันที่หมักเพื่อให้ได้น้ำจากกากมันมาสกัดเป็นกรดมะนาว กากของเสียจะทำการบีบน้ำออกอีกรอบ จะเหลือกากสกัดเพื่อนำไปเป็นปุ๋ยและมีน้ำเสียไหลไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย จากนั้นน้ำที่สกัดกรดมะนาวจะทำให้บริสุทธิ์ โดยทำการระเหยและทำให้เข้มข้นต่อจากนั้นจึงมีการทำผลึกบรรจุส่งออกต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 7 (โดยมีค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียมีดังนี้ ค่าพีเอช 3.5 ซีโอดี 2,429 มก./ล. บีโอดี 1,802 มก./ล.)



ภาพที่ 7 กระบวนการผลิตกรดมะนาว

(2) กระบวนการผลิตและน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์ม

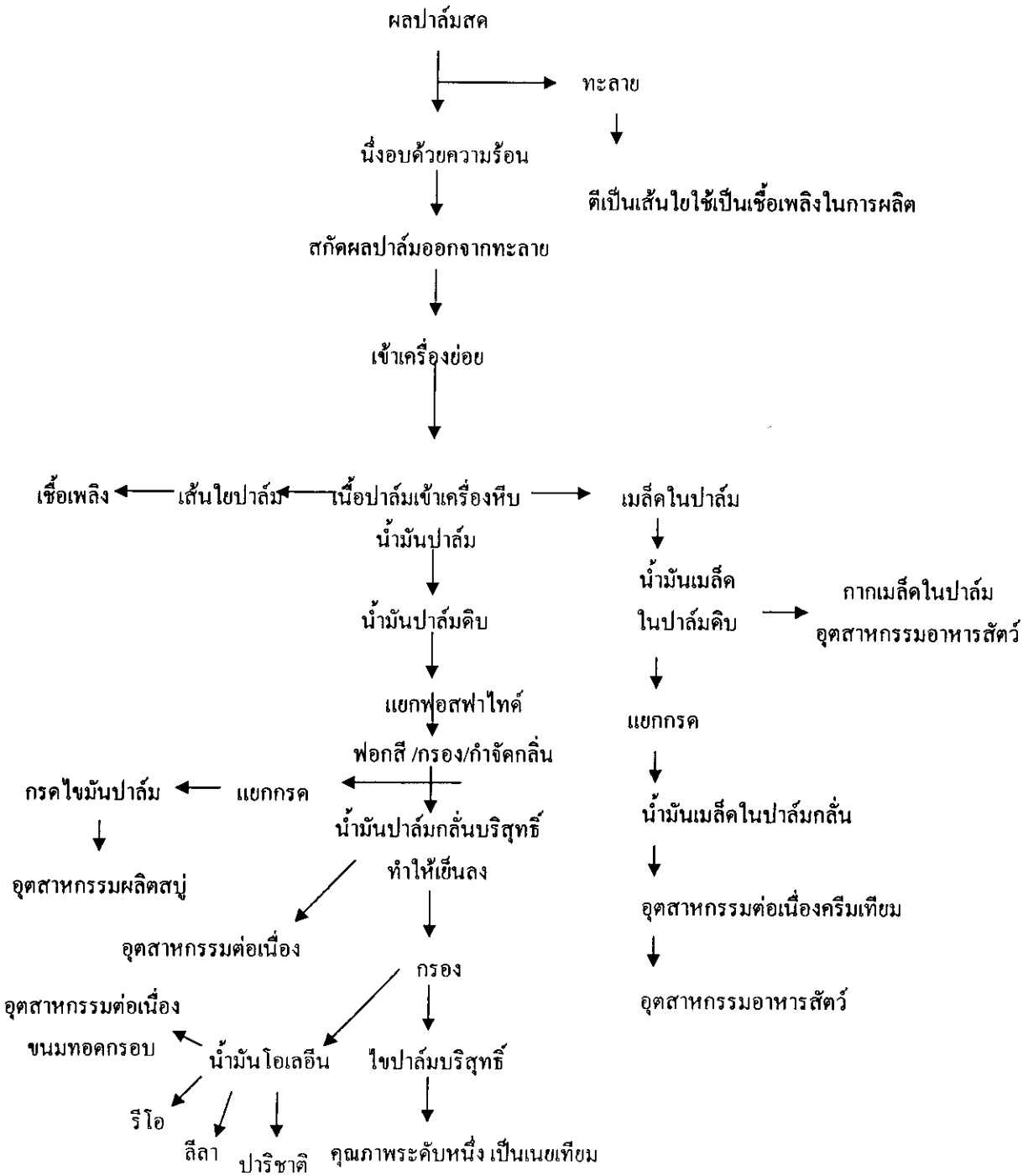
บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ได้จัดสรรพื้นที่ปลูกปาล์มกว่า 20,000 ไร่ ด้วยพันธุ์ปาล์มกว่า 500,000 ต้น ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบหลักของการผลิตน้ำมันปาล์มที่มีคุณภาพ เริ่มด้วยการเอาใจใส่ดูแลอย่างใกล้ชิดในทุกขั้นตอน นับตั้งแต่การคัดเลือก สายพันธุ์ การวิจัยและเพาะพันธุ์ การปลูก การให้ปุ๋ย การให้น้ำระบบน้ำหยด (Drip Irrigation System) การตกแต่งและการดูแลตามอายุของปาล์ม จากการดูแลและเอาใจใส่อย่างจริงจัง ผลที่ได้คือผลปาล์มสดที่มีคุณภาพ และเป็นพันธุ์ที่ดีที่สุด

นอกจากนี้บริษัทฯ ยังส่งเสริมให้เกษตรกรท้องถิ่น เพาะปลูกสวนปาล์มในจังหวัดชุมพร และจังหวัดใกล้เคียง ด้วยการจัดหาปุ๋ย และต้นกล้าพันธุ์ดี ให้กับเกษตรกร รวมทั้งการรับซื้อผลปาล์มสด ทั้งจากผู้ปลูกปาล์มรายใหญ่และเกษตรกรรายย่อย เพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจว่าบริษัทฯ จะสามารถรักษาคุณภาพ และปริมาณวัตถุดิบสำหรับใช้ในการผลิตได้อย่างพอเพียง

เมื่อคัดสรรวัตถุดิบที่ดี และมีคุณภาพแล้ว ทั้งหมดจะถูกส่งต่อมายังกระบวนการแปรรูป เป็นน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม โดยเริ่มจากการนำทะลายปาล์มสดผ่านเข้าระบบนึ่งทะลายปาล์ม เพื่อให้ง่ายต่อการแยกผลปาล์มสดออกออกจากทะลาย ส่วนของผลปาล์มสดจะผ่านเข้าเครื่องย่อยและหีบน้ำมันเพื่อแยกน้ำมันใยปาล์ม และเมล็ดในออกจากกัน ส่วนของน้ำมันใยปาล์มจะถูกส่งผ่านเข้าเครื่องแยกน้ำมัน น้ำและสิ่งเจือปน โดยน้ำมันจะถูกส่งไปยังเครื่องไล่ความชื้นก่อนที่จะเข้าถังเก็บน้ำมันเพื่อรอกระบวนการผลิตขั้นต่อไป

หลังจากผ่านขั้นตอนของการสกัดแล้ว น้ำมันปาล์มดิบจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการกลั่นให้เป็นน้ำมันบริสุทธิ์ โดยมีกำลังการผลิตถึง 300 ตันต่อวัน โดยจากนั้น น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่กลั่นได้ จะนำมาผ่านกรรมวิธีการแยกไขเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ส่วนข้น หรือน้ำมันปาล์มสเตียรีน ซึ่งสามารถนำไปใช้ทำเนยเทียมและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย และน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ส่วนใสหรือน้ำมันโอเลอิน ก็จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง และการปรุงอาหารซึ่งมีคุณค่าวิตามินอย่างครบถ้วน

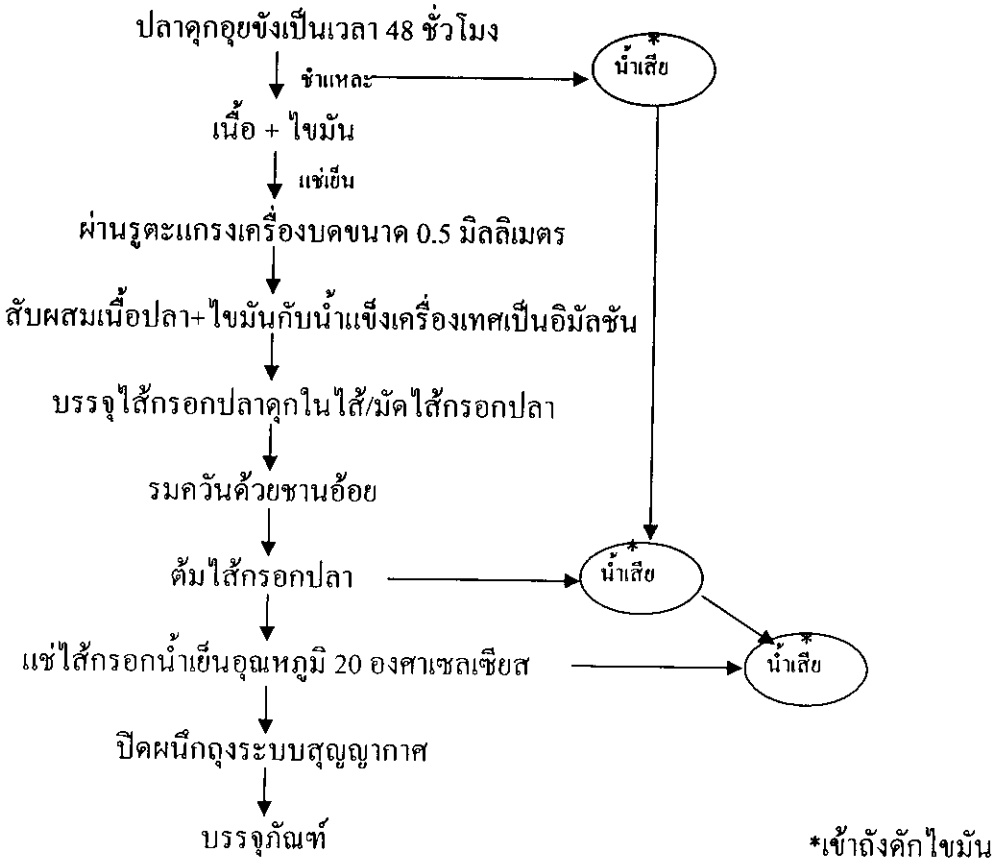
น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ได้หลังจากผ่านกรรมวิธีในการผลิตและตรวจสอบคุณภาพตามระบบมาตรฐานแล้ว จะถูกส่งเข้าถังเก็บเพื่อรอส่งมอบ ส่วนหนึ่งจะถูกส่งเข้าโรงบรรจุอันทันสมัยของบริษัทฯ ซึ่งสะอาดและปลอดภัย ก่อนส่งไปจำหน่ายให้กับผู้บริโภคทั่วประเทศในรูปแบบของขวด PET และแบบบรรจุปี๊บ ภายใต้ชื่อ "รีโอ" "ลีลา" และ "ปาริชาติ" เป็นต้น และน้ำเสียของโรงงานเกิดจากทุกขบวนการของการผลิต จะไหลไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

(3) กระบวนการผลิตและน้ำเสียโรงงานไส้กรอกปลา

โรงงานผลิตไส้กรอกปลา กาฬสินธุ์ ได้ทำการผลิตไส้กรอกปลาจำหน่ายทั่วไปในต่างจังหวัด โดยกระบวนการผลิตโดยใช้ปลาดุกอุยเทศน้ำหนักประมาณ 5.6 กิโลกรัม แล้วขังในบ่อซีเมนต์ไว้ 48 ชั่วโมง เพื่อรอการชำแหละ จากนั้นทำการชำแหละจะได้เนื้อปลาและไขมันปลาดุกอุยเทศแล้วนำเนื้อปลาแช่ที่อุณหภูมิ 2 องศา และไขมันไปแช่แข็ง นำเนื้อปลาและไขมันปลาผ่านรูตะแกรงเครื่องบดขนาด 0.5 มิลลิเมตร ต่อจากนั้นทำการสับเนื้อปลา ไขมันปลารวมกับน้ำแข็งและเครื่องเทศต่าง ๆ สับผสมให้ละเอียดจนเป็นอิมัลชัน จากนั้นจึงทำการบรรจุไส้กรอกปลาในไส้สังเคราะห์ ด้วยเครื่องอัดไส้กรอกระบบไฮโดรลิก และมัดไส้กรอกปลาด้วยมือ ต่อจากนั้นทำการรมควันด้วยชานอ้อย ขั้นตอนต่อไปทำการต้มไส้กรอกปลาและแช่น้ำเย็นอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทำการปิดผนึกถุงพลาสติกโดยระบบสูญญากาศ รอการจำหน่ายต่อ ส่วนน้ำเสียที่เกิดจะเกิดจากขบวนการผลิตจะมีจากการล้างปลา จากการต้มไส้กรอกปลา การแช่น้ำเย็นของไส้กรอกปลาและท้ายสุดจากขบวนการล้างเครื่องมือการผลิต น้ำเสียต่าง ๆ ไหลลงบ่อดักไขมัน และมีบางส่วน (น้ำจากการล้างปลา) ไหลลงท่อเทศบาล ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กระบวนการผลิตไส้กรอกปลากาฬสินธุ์

13. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นิติรัตน์ รุ่งรัตนพิทักษ์ (2545) ได้ศึกษาการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์สำหรับสมการทางคณิตศาสตร์โดยวิธี Gauss-Newton-Levenberg-Marquardt (GNLM) ในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เป็นการประเมินค่าจากสมการทางคณิตศาสตร์ใช้วิธีการของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regresion, LR) แต่สมการเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น โดยทำการแปลงให้เป็นสมการเส้นตรง (Tranformation) หรือตัดตอนเป็นสมการเส้นตรงย่อย ๆ ซึ่งมีความยุ่งยากในทางปฏิบัติและเกิดปัญหาในการประมวลผลได้ง่าย ส่วนวิธี Gauss-Newton-Levenberg-Marquardt เป็นวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ในการศึกษาได้ทำการทดสอบกับสมการทางคณิตศาสตร์ 3 แบบ ได้แก่ สมการในระบบตะกอนเร่งสมการในระบบหอโปรยกรอง โดย NRC (1946) และสมการในระบบหอโปรยกรองโดย Eckenfelder (1963) โดยวิธี GNLM และวิธี LR ผลการศึกษาพบว่า วิธี GNLM ใช้ได้กับสมการทางคณิตศาสตร์ทุกสมการอีกทั้งได้ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำสูงกว่าวิธี LR และสามารถนำวิธี GNLM ไปประยุกต์ใช้ในการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับสมการทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ต่อไป

ปรียาพร อุปสร (2547) ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic Coefficient) ของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนของระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารจากโรงงานผลิตนมสด และโรงงานผลิตน้ำอัดลม ไทยน้ำทิพย์ จำกัด จังหวัดขอนแก่น โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากโรงงานขอนแก่นบริวเวอรี่ จำกัด (จังหวัดขอนแก่น) ในการทดลองค่าซีโอดีของโรงงานผลิตนมสดมีค่าเท่ากับ 4,500 มก./ล. และค่าซีโอดีของโรงงานผลิตน้ำอัดลมมีค่าเท่ากับ 1,500 มก./ล. การศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองแตกต่าง 2 อุณหภูมิคือที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 35$\pm$2 องศาเซลเซียส โดยใช้ Serum Bottles เติมความเข้มข้นของจุลินทรีย์ระเหย 2,000 มก./ล. ใช้น้ำเสียร่วมกับน้ำเสียสังเคราะห์ (Basal Media) ซึ่งใช้เป็นสารอาหารของจุลินทรีย์ ในสัดส่วนที่แตกต่างกันโดย วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการแทนที่น้ำหาค่า k และ K_S นำมาเข้าสมการ Monod โดยเทคนิค Weighted Nonlinear Least Squares Analysis พบว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากสัดส่วนของน้ำเสียต่อน้ำเสียสังเคราะห์ (Basal Media) ในสัดส่วนที่ 1:10, 1:1 และ 0 มีรูปแบบที่คล้ายกัน สามารถสรุปได้ว่า น้ำเสียทั้งสองโรงงานไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์

เพ็ญชุดา และสุภาภรณ์ (2544) เพื่อหาค่าคงที่จลนพลศาสตร์ (Kinetic Constants) ของแบคทีเรียที่บำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมด้าย และหาประสิทธิภาพของการบำบัดสีในน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพ โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบเทในระดับห้องปฏิบัติการด้วยน้ำเสียจริง

จากการทดลองในระบบถังปฏิกิริยาแบบเท ได้ทำการทดลองในถังปฏิกิริยา 5 ชุด แต่ละชุดมีความเข้มข้นของสารอาหารเริ่มต้นแตกต่างกัน จากการวัดค่าความเข้มข้นของจุลชีพและความเข้มข้นของสารอาหารทุก ๆ 10, 20, 30, 60 120, 180 นาที พบว่า ค่าความเข้มข้นของสารอาหารที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงขึ้นด้วย

ภาณุพงศ์ และดุสิต (2542) ศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายน้ำมัน ซึ่งการทดลองทำโดยการนำจุลินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในบริเวณที่มีการปนเปื้อนน้ำมันอยู่เสมอ มาเลี้ยงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีน้ำมันเครื่องยนต์เป็นอาหารแก่จุลินทรีย์ จากการศึกษาการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ พบว่า ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของจุลินทรีย์ คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (Maximum Specific Growth Rate; μ_m) มีค่า 0.2118 ต่อวัน ปริมาณการผลิต (Yield; Y) มีค่า 0.713 ค่าคงที่ที่มีความเร็วครึ่งหนึ่ง (Half Velocity Constant; K_s) มีค่า 806.87 มก./ลิตร สัมประสิทธิ์การลดลงของจุลชีพ (Endogenous Decay Coeffient; k_d) มีค่า 0.0370 ต่อวัน การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมัน พบว่า ปริมาณน้ำมันมีแนวโน้มลดลง จุลินทรีย์สามารถลดปริมาณน้ำมันได้ 51.68, 55.62, 64.62, 54.08, 56.27 เปอร์เซ็นต์ โดยที่อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำมัน 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จุลินทรีย์สามารถลดปริมาณน้ำมันได้ดีที่สุด คือ 64.62 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าจุลินทรีย์ที่ใช้ทำการทดลองมีความสามารถในการย่อยสลายน้ำมันและมีความเป็นไปได้ที่จะนำจุลินทรีย์ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันปนเปื้อน

วิธาน ศิริปัญโญ (2545) ศึกษาค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ (Y_g, K_s, k_d, k และ μ_m) ของจุลินทรีย์แบบใช้อากาศในระบบน้ำเสียโรงพยาบาลขอนแก่น ซึ่งเป็นระบบตะกอนเร่ง การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งศึกษาโดยใช้แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งและใช้น้ำเสียจริงจากโรงพยาบาล จากการวิเคราะห์ในช่วงที่ทำการวิจัยพบว่า มีการปนเปื้อนของฟีนอลและสารประกอบคลอรีนในน้ำเสียก่อนเข้าระบบ โดยพบว่ามีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 0.2-0.46 มก./ลิตร และ 0-4.0 มก./ลิตร ตามลำดับ ซึ่งส่งผลต่อการทำงานและความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบ ผลของการศึกษาพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ในแบบจำลองระบบตะกอนเร่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง เมื่อควบคุมอายุตะกอนต่าง ๆ กัน ที่ 10, 15, 20 และ 30 วัน และโดยการใช้สมการของ Lawrence & McCarty ในการวิเคราะห์ พบว่าค่าพารามิเตอร์จลน์ของน้ำเสียโรงพยาบาลที่ใช้ระบบตะกอนเร่งมีค่า Y_g = 0.58 มก.เซลล์/มก. ซีโอดีกรอง, K_s = 121.12 มก./ล., k_d = 0.01 วัน$^{-1}$, k = 0.704 และ μ_m = 0.408 วัน$^{-1}$ ค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ดังกล่าวมีค่า Y_g , k_d , และ μ_m ใกล้เคียงกับน้ำเสียชุมชนแต่ค่า K_s มีค่าสูงกว่าทั้งนี้เนื่องจาก น้ำเสียโรงพยาบาลมีสารประกอบจากพวกยาฆ่าเชื้อที่อาจส่งผลกระทบต่อการใช้ สารอินทรีย์ในน้ำเสียของจุลินทรีย์

วรรณชนก และวรินดา (2542) ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ จากการทดลอง 2 ระบบ คือ ระบบถังปฏิกิริยาแบบเท (Batch Reactor) และระบบถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ที่ไหลต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) แบบไม่มีการหมุนเวียนตะกอนแบคทีเรีย

จากการทดลองในระบบถังปฏิกิริยาแบบเป็นคราว ๆ จะทดลองในถังปฏิกิริยา 4 ชุดแต่ละชุดมีความเข้มข้นของสารอาหารเริ่มต้นต่างกัน แต่มีความเข้มข้นของจุลชีพเริ่มต้นใกล้เคียงกันแล้วทำการวัดค่าความเข้มข้นของจุลชีพและความเข้มข้นของสารอาหารทุก ๆ 1 ชั่วโมง จากการทดลองอยู่ในช่วงค่าที่ใช้ในการออกแบบ คือ Y มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.8 มก.เอ็มแอลเอสเอส/มก. ซีโอดี ส่วนค่า K_s และ k แตกต่างจากช่วงค่าที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งมีค่า K_s และ k อยู่ระหว่าง 15-17 มก.ซีโอดี / ล. และ 2 – 10 ต่อวัน ตามลำดับ โดยค่า K_s จากการทดลองมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียจากโรงพยาบาลอาจปนเปื้อนด้วยสารเคมีและน้ำยาฆ่าเชื้อจึงทำให้ค่า K_s สูงกว่าน้ำทิ้งทั่วไป

จากการทดลองในระบบถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ที่ไหลต่อเนื่อง จะทำการทดลองในถังปฏิกิริยา 3 ชุด แต่ละชุดมีค่าอัตราการไหลเข้าสู่ระบบต่างกันคือ 2, 3 และ 4 ล./วัน ทำการวัดค่าความเข้มข้นของจุลชีพและความเข้มข้นของสารอาหารที่ออกจากระบบทุกวัน จนระบบเริ่มเข้าสู่สมดุล คือเมื่อค่าทั้งสองเริ่มคงที่ จากการศึกษาพบว่า เมื่อน้ำเสียอยู่ในระบบนานขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มข้นของสารอาหารที่ออกจากระบบน้อยลง จากนี้นำค่าที่ได้จากการทดลองมาหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ ผลคือ ค่า Y เท่ากับ 0.57 มก. เอ็มแอลเอสเอส/มก. ซีโอดี ค่า K_s เท่ากับ 78.26 มก. ซีโอดี/ล. ค่า k เท่ากับ 21.74 ต่อวัน ค่า μ_m เท่ากับ 12.28 ต่อวัน และค่าสัมประสิทธิ์การตายของจุลชีพ (k_d) เท่ากับ 0.3049 ต่อวัน ดังนั้นในระบบ CSTR จึงควรทำการทดลองเพิ่มขึ้น เพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าเหล่านี้

ศศิธร เท่าธุรี (2547) ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยใช้จุลินทรีย์จากมูลสัตว์เป็นเชื้อตั้งต้นโดยใช้สมการของโมโนด์ (Monod Equation) เป็นต้นแบบในการศึกษา มูลสัตว์ที่นำมาศึกษาคือ มูลไก่ มูลวัว และมูลหมู การศึกษาครั้งนี้ทดลองใน Serum Bottle ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 35±2°ซ โดยใช้ความเข้มข้นของ MLVSS เริ่มต้น ทุกชุดการทดลอง คือ 1,000 มก./ล และความเข้มข้นของสารอาหารเริ่มต้นในเทอมของแคลเซียมอะซิเตททุกชุดการทดลอง คือ 7,500 มก./ล ทำการวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยวิธีการแทนที่น้ำและวัดก๊าซจนกว่าก๊าซจะหมด ก๊าซที่ได้นำมาวิเคราะห์ค่าปริมาณมีเทน เพื่อนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ (Kinetic Coefficients) ด้านความเหมาะสมในการนำมูลสัตว์ทั้ง 3 ชนิด ไปเป็นเชื้อตั้งต้นในระบบบำบัดน้ำเสีย พบว่าจุลินทรีย์จากมูลหมูที่อุณหภูมิ 35±2°ซ มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีค่า k สูงที่สุด และมีค่า K_s ต่ำ รองลงมาคือ จุลินทรีย์จากมูลวัว

ที่อุณหภูมิ 35±2°ซ จุลินทรีย์จากมูลหมูที่อุณหภูมิห้อง และจุลินทรีย์จากมูลวัวที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ

อภิสิทธิ์ พรหมรับ (2541) ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์(Kinetic Coefficients) ของแบคทีเรียที่บำบัดน้ำเสียชุมชนของเทศบาลนครขอนแก่นในคลองร่องเหมือง ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์หาจากการทดลองในระบบถังปฏิกิริยาแบบเท (Batch Reactor) ซึ่งเป็นระบบที่วิเคราะห์หาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ได้โดยใช้ระยะเวลาสั้น และผลที่ได้ค่อนข้างแน่นอน โดยทำการทดลองใน ถังปฏิกิริยา 5 ชุด พบว่าค่าความเข้มข้นของสารอาหารที่สูงขึ้นทำให้ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงขึ้นในช่วง ซีโอดี ที่ทำการทดลองกล่าวคือ ซีโอดี ในช่วงระหว่าง 60 ถึง 170 มก./ล. จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์อันได้แก่ ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (μ_m) ค่าอัตราการเจริญเติบโตที่ครึ่งหนึ่งของค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (K_s) และค่า Yield Coefficient (Y) ผลจากการทดลองได้ค่า μ_m เท่ากับ 1.08 ต่อวัน ค่า K_s เท่ากับ 49.96 มก./ ซีโอดี/ล. ค่า Y หาได้เท่ากับ 0.764 มก. /เอ็มแอลเอสเอส/ มก. ซีโอดี

Banik และ Viraragavan (1998) ได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่ำที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยการศึกษาในระบบ Anaerobic Sequencing Bacth Reactor (ASBR) โดยศึกษาอุณหภูมิระหว่าง 5-25°ซ และ HRTs 24, 16, 12, 8, 6 ชั่วโมง โดยใช้เวลาทำการศึกษา 2 ปี ในการประเมินผลของความต่างของอุณหภูมิโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ คือ k, K_s, K_d, Y_g และ μ_m พบว่าค่าของ k, K_s, K_d, Y_g และ μ_m ลดลงส่วนค่า K_s จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง

Bozinis et al. (1996) กล่าวว่า สามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ได้โดยการนำแบบจำลองมาใช้ แบบจำลองดังกล่าวคือ แบบจำลองที่มีทั้งด้านชีวภาพและวิศวกรรม ใช้ศึกษาในสภาวะสมดุล (Steady State) เพื่อดูผลของน้ำเสียที่มีส่วนประกอบหลายๆ อย่างปนกันอยู่ เช่น ไขมัน คาร์โบไฮเดรทและโปรตีน เป็นต้น แบบจำลองที่ใช้เป็นโปรแกรม Nonlinear Optimization Programe (NOP) ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าการเตรียมส่วนประกอบของน้ำเสียที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญมากถือเป็นหัวใจสำคัญที่ต้องควบคุมให้ดี

Hu และ Thayanity (2001) กระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ที่ 35 °ซ ของน้ำเสียไอศกรีม สมการ Monod และ Contois โดยมี 2 หลักเกณฑ์ ที่นำมาพัฒนาโดยใช้แบบจำลองพื้นฐานค่าตัวแปรต้องการสำหรับประยุกต์แบบจำลองพื้นฐาน ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังกวนน้ำแบบต่อเนื่อง (5 ลิตร) ปล่อยน้ำเสียไอศกรีมสังเคราะห์ที่ HRT (2.79-7.45 วัน) โมเดลทั้งสองถูก

ประเมินด้วย ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้รับการจัดตั้งจากหน้าที่ประจำ จากพื้นที่ทดลองเบื้องต้น 5 ลูกบาศก์เมตร ติดต่อกับถังย่อยน้ำเสียไอศกรีมที่แหล่งพาณิชย์ แบบจำลองพื้นฐานใช้สมการ Contois เหมาะสมมากกว่าสมการของ Monod สำหรับอธิบายกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ของพื้นที่ทดลองเบื้องต้นเหตุผลหลักนี้ เพราะว่า Kinetic Model อยู่บนฐานสมการ Contois พิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของความเข้มข้นของสารตั้งต้นขาเข้าถูกคาดการณ์

Jeyaseelan (1997) ศึกษาแบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่าในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตกรดและจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซ ซึ่งก๊าซที่ได้ที่สำคัญคือ ก๊าซมีเทน และหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic Coefficients) โดยสมการ Monod จะต้องทำในห้องปฏิบัติการ ค่าที่ใช้ในการออกแบบจำลอง คือ ค่าบีโอดี ระยะเวลากักเก็บน้ำ และอุณหภูมิ

Liew Abdullah (2005) การประยุกต์กระบวนการของ Models (Monod, Contois และ Chen & Hashimato) ของกระบวนการบำบัดกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียด้วย MAR ถูกทดลองระบบประกอบด้วย Cross-Flow Ultrafiltration Membrane และ 6 Steady State สำเร็จเหนือช่วงของ ค่าเอ็มแอลเอสเอสที่ 12,760-21,800 มก./ล. ผลการทดลองทั้งหมด 6 Steady State ประสบความสำเร็จมากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่า Y มีค่า 0.74 ก.วีเอสเอส/ก.ซีโอดี ในขณะที่ค่า Specific Microorganism Decay Rate มีค่า 0.20 ต่อวัน ค่า k อยู่ในช่วง 0.350-0.519 ก. ซีโอดี/ก.วีเอสเอส. วัน และค่า μ_{max} มีค่าระหว่าง 0.259-0.384 ต่อวัน ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดี 96.5-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ HRT 7.8 วัน การเกิดก๊าซมีเทนระหว่าง 0.19 ล./ก. ซีโอดี/วัน ถึง 0.54 ล./ก. ซีโอดี/วัน เมื่ออัตรา Organic Loading เพิ่มขึ้นจาก 0.1 กก. ซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ถึง 10 กก. ซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร /วัน ประสิทธิภาพของระบบส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับ SRT และ OLR_s อัตราการไหลผ่าน Membrane เสื่อมลง จาก 62.1 ล./ตารางเมตร เป็น 6.9 ล./ตารางเมตร

Lili, Zhiping, Jie, Xiaojun และ Weimin (2005) ได้ศึกษาตะกอนจุลินทรีย์แบบใช้อากาศทดลองในระบบ SBR ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีกลูโคสเป็นสารอาหาร ลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์มีรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 มม. การเพิ่มความเข้มข้นของซีโอดีของน้ำเข้ามีผลให้มีเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตและเพิ่มขนาดเป็น 1.2-1.9 มม. นอกจากนี้ยังสามารถรับภาระสารอินทรีย์ในอัตราสูงได้ที่อัตรา (~4.0 ก.ซีโอดี/ล.-วัน) ความสามารถในการตกตะกอนได้ดี (อัตราความเร็ว 36 ม./ชม.) และมีความเข้มข้นของชีวมวลสูง (ค่าเอ็มเอลเอสเอส 6.7$\pm$0.2 ก./ล.) จากการทดลองสรุปได้ว่า การใช้สารตั้งต้นของจุลินทรีย์ และการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพ

เป็นไปตาม Monod's Kinetic ค่า k, K_s, Y และ K_d มีค่า 13.2 มก./ล., 275.8 มก./ล., 0.183-0.250 มก. เอ็มแอลเอสเอส/มก. ซีโอดี และ 0.023-0.075 ต่อวัน ตามลำดับ

Smith, McCarty และ Kitanidis (1998) ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางชีวเคมี โดยได้ศึกษา Nonlinear Least-Squares Method และวิธีการโดยใช้สมการเชิงเส้น พบว่า Nonlinear Least-Squares Method เป็นวิธีการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ทางชีวเคมีโดยใช้ข้อมูลจากการทดลองสามารถหาค่าได้ถูกต้องแม่นยำ ส่วนวิธีการโดยใช้สมการเชิงเส้นนั้นข้อมูลค่อนข้างยุ่งยากและค่อนข้างเชื่อถือไม่ได้นอกจากนี้แล้วเมื่อนำวิธีการโดยใช้สมการเชิงเส้นมาใช้ พบว่าไม่มีพื้นฐานสำหรับวิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ ข้อได้เปรียบในการประยุกต์ใช้สมการ Integrated Monod คือ เป็นวิธีการที่ประหยัดโดยใช้การทดลองแบบ Single Batch และมีความน่าเชื่อถือมากกว่า วิธีการโดยใช้สมการเชิงเส้น วิธีการคำนวณของ Weighted Least-Squares Analysis เพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสมการ Integrated Monod แม้ว่า สมการ Integrated Monod จะแสดงค่าความเข้มข้นของสารอาหารไม่ชัดเจนแต่สารอาหารระหว่างแบบอย่างทำนายและข้อมูลที่มีการหาค่าแบบทำซ้ำบ่อย ๆ ในโปรแกรมการคำนวณซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมที่สุดได้โดยให้ผลรวมของความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและค่าที่ได้จะต้องไม่ติดลบ