

บทที่ 3

ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย

3.1 จลนพลศาสตร์ของระบบชีวเคมี

การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการทางชีววิทยาในระบบหนึ่งๆ นั้น จะมีปฏิกิริยาทางชีวเคมี และปรากฏการณ์ต่างๆ เกิดขึ้นมากมาย โดยกลุ่มจุลชีพที่มีอยู่ในระบบนั้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ในโรงบำบัดจริงเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนหรือมีเหตุการณ์จำนวนมากเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ดังนั้นในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของระบบโดยใช้แบบจำลอง ซึ่งมีความมุ่งหมายเพื่อจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ต่างๆ เหล่านั้น ให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อที่จะได้ใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวในการคำนวณเพื่อทำนายผลและออกแบบกระบวนการ หรือเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียหนึ่งๆ ได้อย่างถูกต้องและมีเหตุผลนั้น ในเบื้องต้นนี้จึงแบ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเจริญเติบโตของจุลชีพออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

- 1) การใช้สารอาหาร (Substrate Utilization) และการเจริญเติบโตของเซลล์ (Cell Growth)
- 2) การตาย (Death) และการมีชีวิต (Viability)
- 3) การสลายตัวหรือการที่มวลของเซลล์ลดลง (Decay)

โดยปรากฏการณ์ 3 กลุ่มดังกล่าว สามารถอธิบายได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ในรูปของสมการอันดับหนึ่ง และมีความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้

3.1.1 การใช้สารอาหารและการเจริญเติบโตของเซลล์

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในขั้นแรก โดยเหตุการณ์ทั้งสองถือได้ว่าเป็นการเกิดขึ้นเกือบพร้อม ๆ กันหรือควบคู่กันไป และเกี่ยวพันกันอย่างใกล้ชิด โดยความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์ทั้งสองแสดงได้โดยยิลด์ (Yield) ซึ่งมีนิยามว่า เป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ต่ออัตราการใช้สารอาหารของจุลชีพ หรืออัตราส่วนของอัตราการผลิตเซลล์ใหม่ของจุลชีพต่อสารอาหารที่ถูกใช้ไปจากตัวกลาง ดังสมการที่ (3-1)

$$Y_g = r_{gx} / -r_s \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

โดยที่ Y_g = ยิลด์จริงของการเจริญเติบโต (ขณะที่ไม่คิดความต้องการพลังงานเพื่อการบำรุงรักษา)

r_{gx} = อัตราการเจริญเติบโต หรือ อัตราการผลิตแบคทีเรียที่มีชีวิต (ก./ม.³-ชม.)

$-r_s$ = อัตราการใช้สารอาหารของแบคทีเรีย (ก./ม.³-ชม.)

ค่า Y_g จะไม่แปรตามอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพ เนื่องจากไม่ได้คิดรวมความต้องการพลังงานเพื่อการบำรุงรักษา จึงทำให้สามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองได้ง่ายขึ้น การแสดงหน่วยของค่า Y_g ที่สะดวกที่สุดคือ แสดงในรูปของมวลที่แสดงถึงปริมาณของเซลล์ และปริมาณสารอินทรีย์ที่ลดลง ซึ่งแสดงถึงปริมาณของสารอาหารที่ถูกใช้ไปโดยกลุ่มจุลชีพ

3.1.1.1 การเจริญเติบโตของเซลล์

อัตราการทำปฏิกิริยาสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แสดงโดยสมการอันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ (3-2)

$$r_{gx} = \mu \cdot X_v \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

โดยที่

r_{gx} = อัตราการเจริญเติบโต หรืออัตราการผลิตแบคทีเรียที่มีชีวิต
(ก./ม.³-ชม.)

X_v = ความเข้มข้นของแบคทีเรียที่มีชีวิต (ก./ม.³)

μ = ค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ
(Specific growth rate constant , ชม.⁻¹)

3.1.1.2 การใช้สารอาหาร

จากสมการ (3-1) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการใช้สารอาหารและการเจริญเติบโตของเซลล์ และจากสมการที่ (3-2) ทำให้สามารถหาสมการของอัตราการใช้สารอาหาร ได้ดังสมการที่ (3-3)

จากสมการที่ (3-1) นำมาจัดรูปใหม่จะได้ว่า $-r_s = r_{gx} / Y_g$

และเมื่อแทนค่า r_{gx} จากสมการที่ (3-2) จะได้ว่า $-r_s = \mu \cdot X_v / Y_g$

หรือ $-r_s = q \cdot X_v$ (3-3)

โดยที่ q คือ อัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ (Specific Rate of Substrate Removal) และ $q = \mu / Y_g$

3.1.1.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ)

Monod ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า μ และความเข้มข้นของสารอาหาร (S) ได้ดังสมการ (3-4)

$$\mu = \mu_m \cdot S / (K_s + S) \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

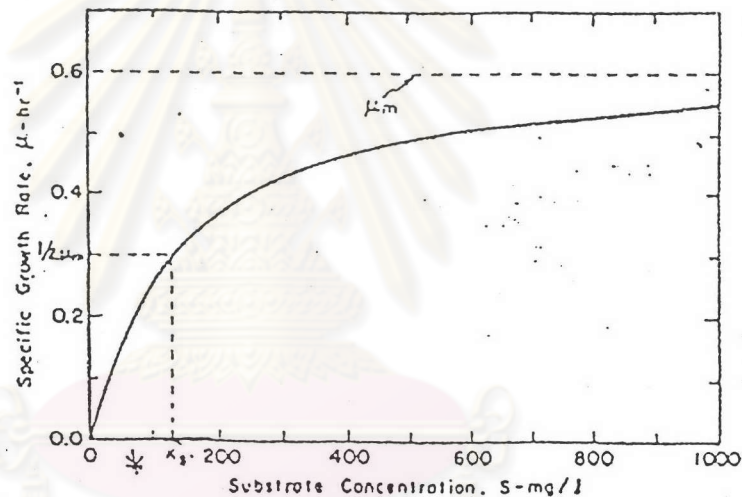
โดยที่ μ = ค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ชม.⁻¹)

S = ความเข้มข้นของสารอาหารที่เป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลชีพ
(Growth limiting Substrate , มก./ล.)

K_s = ค่าคงที่การอิ่มตัว(Saturation Constant) คือค่าความเข้มข้นของสารอาหาร
ณ.จุดที่ทำให้ค่า μ มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของ μ_m หรือเรียกว่าตัวคงที่ที่มี
ความเร็วครึ่งหนึ่ง (half velocity constant , มก./ล.)

μ_m = ค่าคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (ชม.⁻¹)

ความสัมพันธ์ตามสมการ (3-4) แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า μ และ S จากการทดลองของ Monod
(Monod ,1949 อ้างถึงใน ซีระ เกรอต , 2535)

ในระบบบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการทางชีวภาพ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในโรง
บำบัดจริงนั้นจะมีความซับซ้อนกว่านี้มาก เนื่องจากในน้ำเสียจริงประกอบไปด้วยส่วนผสมของสาร
ประกอบต่างๆ มากมายหลายชนิด ไม่ได้มีเพียงชนิดเดียวเหมือนดังเช่นที่ปรากฏในสมการ และกลุ่ม
จุลชีพที่มีในระบบเองก็มีหลากหลาย (Mixed Cultured) รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา
เนื่องจากไม่สามารถรักษาสภาวะคงที่ให้เกิดขึ้นจริงได้ แต่ก็มีผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอตรงกันว่า ยัง
คงสามารถใช้ความสัมพันธ์ตามแบบของ Monod ดังสมการ (3-4) เพื่ออธิบายถึงกลุ่มจุลชีพแบบผสม
(Mixed Culture) ที่มีอยู่ในระบบได้ โดยค่าพารามิเตอร์จลนในสมการก็เป็นการแสดงถึงค่าเฉลี่ยจาก
จุลชีพหลายชนิดที่เป็นตัวเด่น (Predominants) ในระบบนั้นนั่นเอง (อ้างถึงใน ซีระ เกรอต,2535)

ส่วนของประกอบต่างๆในน้ำเสียนั้น จนถึงในปัจจุบันนี้ยังไม่มีวิธีง่าย ๆ ที่สามารถจำแนกหรือระบุได้โดยละเอียดชัดเจนว่าองค์ประกอบต่างๆ เหล่านั้นเป็นสารชนิดใด และมักที่จะนิยมนวัดความเข้มข้นของสารประกอบทั้งหมดในน้ำเสียนี้รวมอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ซีไอดี ดังนั้นเฉพาะส่วนที่เป็นสารอาหารละลายและเป็นตัวจำกัดอัตราการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลชีพนั้น จึงสามารถทราบโดยใช้วิธีการประเมินเอาจากผลที่ได้จากการวัดปริมาณของสารประกอบทั้งหมดรวมกันนั่นเอง และแสดงค่าโดยรวมอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ซีไอดีเช่นกัน

ปริมาณของซีไอดีส่วนที่เป็นตัวจำกัดอัตราการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลชีพนั้น จะมีความแตกต่างกันไป ทั้งในด้านองค์ประกอบหรือโครงสร้างทางเคมี ที่มีผลต่อความยากง่ายในการย่อยสลายโดยกลุ่มจุลชีพ และในด้านปริมาณ ในน้ำเสียแต่ละประเภท และจะมีความเหมือนกันและมีค่าใกล้เคียงกันในน้ำเสียประเภทหรือชนิดเดียวกัน ดังจะเห็นได้จากค่ายิลด์ (Yield) ของน้ำเสียแต่ละชนิด ที่แสดงถึงความแตกต่างดังกล่าวได้อย่างชัดเจน

3.1.2 การตายและการมีชีวิตรอด

เซลล์ที่ตายหมายถึงเซลล์ที่ไม่สามารถทำกิจกรรมในการแบ่งเซลล์ออกเป็นเซลล์ใหม่ หรือไม่มีความสามารถที่จะผลิตเซลล์ใหม่ขึ้นให้กับระบบได้นั่นเอง ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งอาจเนื่องมาจากการที่เกิดสภาพการเปลี่ยนแปลงขึ้นในระบบตลอดเวลา ทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อกลุ่มของเซลล์จุลชีพบางชนิดจนไม่สามารถทำกิจกรรมดังกล่าวขึ้นได้ เช่น การเกิดสภาพการขาดแคลนอาหาร จากผลการจำกัดหรือรักษาความเข้มข้นของสารอาหารให้มีค่าความเข้มข้นต่ำในถังเติมอากาศ เป็นต้น

นอกเหนือจากนี้ยังมีกลุ่มจุลชีพที่มีลักษณะของเซลล์ที่มีชีวิตรอดแต่ไม่สามารถแบ่งตัวออกเป็นเซลล์ใหม่ได้เรียกว่า มอริบันด์ (moribund) ซึ่งพวกนี้จัดเข้าอยู่ในกลุ่มของเซลล์ที่ตายแล้วเช่นกัน แม้ว่าจะยังคงมีส่วนร่วมในการทำงานของกระบวนการการบำบัด โดยยังคงสามารถใช้สารอาหารส่วนหนึ่งจากกระแสที่ป้อนเข้าสู่ระบบตลอดเวลา เพราะยากมากที่จะตรวจพบ

ในระบบบำบัดน้ำเสียจริง ซึ่งมีสภาพการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ย่อมต้องมีเหตุการณ์ที่จะก่อให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการแบ่งเซลล์ของกลุ่มจุลชีพกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งได้เสมอ ดังนั้นในระบบจึงสามารถเกิดปรากฏการณ์ที่มีเซลล์ที่ตายเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา หรือระบบจะมี

อัตราการผลิตเซลล์ที่ตายตลอดเวลานั้นเอง โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์กับเซลล์ที่มีชีวิตได้เป็นสมการอันดับที่หนึ่งดังสมการที่ (3-5)

$$r_{Dxv} = \gamma \cdot X_v \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

โดยที่

r_{Dxv} = อัตราการตายของแบคทีเรียที่มีชีวิต (ก./ม.³- ชม.)

γ = ตัวคงที่อัตราการตายจำเพาะ (ชม.⁻¹)

X_v = ความเข้มข้นของเซลล์ที่มีชีวิต (ก./ม.³)

ในระบบยังมีกลุ่มของเซลล์จุลชีพอีกประเภทหนึ่ง ที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่สถานะการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของระบบได้เป็นอย่างดี จนเป็นกลุ่มที่เด่นของระบบ โดยนอกจากจะสามารถแย่งใช้สารอาหารเพื่อสังเคราะห์ให้เกิดพลังงานเพื่อการดำรงชีพได้แล้ว ยังสามารถนำพลังงานจากการสลายสารอาหารเหล่านี้อีกส่วนหนึ่ง ไปใช้ในการสังเคราะห์เป็นเซลล์ใหม่ขึ้นได้อีก เรียกกลุ่มของเซลล์ประเภทนี้ว่า เซลล์ที่มีชีวิต (Viable or Active Cell)

กลุ่มเซลล์ประเภทดังกล่าว ถือได้ว่าเป็นกลุ่มจุลชีพ (Microorganism) ที่สำคัญ และเป็นกลุ่มหลักที่เรามุ่งสนใจเพื่อศึกษาเกี่ยวกับการทำงานของมัน และมักจะใช้เป็นตัวแทนของระบบเพื่อชี้บอกถึงกิจกรรม หรือกระทั่งเป็นตัววัดผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ มากกว่ากลุ่มของเซลล์ประเภทแรก โดยผ่านทางพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการ เช่น ยืดได้ หรืออัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ เป็นต้น ดังนั้นการมีชีวิต (Viability, v) ของกลุ่มจุลชีพจึงมีนิยามว่า คือจำนวนของเซลล์ที่มีชีวิตอยู่หารด้วยจำนวนเซลล์ทั้งหมด ดังสมการ (3-6)

$$v = X_v / (X_v + X_d) \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

โดยที่

v = การมีชีวิต

X_v = ความเข้มข้นของเซลล์ที่มีชีวิต (ก./ม.³)

X_d = ความเข้มข้นของเซลล์ที่ตาย (ก./ม.³)

3.1.3 การสลายตัวของแบคทีเรีย

การสลายตัวของแบคทีเรียได้แก่ ปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการหายไปของมวลของเซลล์ที่มีในระบบ โดยสำหรับกลุ่มจุลชีพแบบผสมแล้ว การสลายตัวสามารถเกิดได้จากส่วนของกลุ่มที่เป็นเซลล์ที่มีชีวิต เช่นการเกิดภาวะการล่าเหยื่อ (Predator) จากการที่กลุ่มจุลชีพบางกลุ่มใช้จุลชีพอีกกลุ่มหนึ่งเป็นอาหารในการดำรงชีพ, การเกิดกระบวนการย่อยสลายตัวเองหรือการสลายส่วนสำรองเอนโดจีนัส (Endogenous Metabolism) เป็นต้น และยังสามารถเกิดได้จากส่วนของกลุ่มที่เป็นเซลล์ที่ตายแล้วเช่น การเกิดไลซิส (Lysis) ,การที่ซากของเซลล์ถูกกินต่อ เป็นต้น ดังนั้นอัตราการสลายตัวจึงขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์ว่าเป็นเซลล์ที่มีชีวิตอยู่ หรือเป็นเซลล์ที่ตายแล้ว และสามารถแสดงได้เป็นสมการอันดับหนึ่งดังสมการที่ (3-7) และ (3-8)

$$r_{dx_v} = b_v \cdot X_v \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

$$r_{dx_d} = b_d \cdot X_d \quad \dots\dots\dots (3-8)$$

โดยที่ r_{dx_v} = อัตราการสลายตัวของเซลล์ที่มีชีวิต (ก./ม.³-ชม.)
 r_{dx_d} = อัตราการสลายตัวของเซลล์ที่ตายแล้ว (ก./ม.³-ชม.)
 b_v, b_d = ตัวคงที่อัตราการสลายตัวจำเพาะของเซลล์ที่มีชีวิตและเซลล์ที่ตายแล้วตามลำดับ (ชม.⁻¹)

ในการนำมาใช้กับแบบจำลองเพื่อให้ง่ายขึ้น จะสมมติให้ b_v เท่ากับ b_d ($b=b_v=b_d$) และกำหนดให้มีค่าคงที่เสมอสำหรับกลุ่มจุลชีพที่ใช้เป็นตัวแทนของระบบนั้น โดยค่าดังกล่าวถือได้ว่าเป็นผลรวมของค่าเฉลี่ยจากกลุ่มของเซลล์ทั้ง 2 ประเภทนั่นเอง

3.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์จลน์

ก) ธรรมชาติของสารอาหาร หรือชนิดของสารอาหาร โดยขึ้นอยู่กับว่าในน้ำเสียแต่ละประเภทนั้นจะมีสารประกอบประเภทใดบ้าง และมีสัดส่วนขององค์ประกอบต่างๆเป็นอย่างไร รวมไปถึงลักษณะโครงสร้างและความซับซ้อนของโมเลกุล เพราะมีผลโดยตรงเกี่ยวกับความยากง่ายในการย่อยสลาย หรือ การนำไปใช้โดยกลุ่มจุลชีพ

ข) ชนิด (species) ของจุลชีพที่ปรากฏในระบบ เพราะจุลชีพแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการใช้สารอาหารหรือการย่อยสลายสารอาหารเพื่อให้เกิดพลังงานที่ภายใต้สภาวะแวดล้อมหนึ่งๆ และมีความสามารถในการเจริญเติบโต รวมไปถึงลักษณะการหาอาหารเพื่อดำรงชีพที่แตกต่างกัน

ค) สิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ในระบบ เช่น ลักษณะของตัวกลางที่เป็นที่อยู่ของกลุ่มจุลชีพในระบบ, อุณหภูมิ, สภาพความเป็นกรด-ด่าง หรือลักษณะของสภาพแวดล้อมของระบบ เป็นต้น โดยปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมนี้ จะมีผลกระทบเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีของการสลายสารอาหารโดยกลุ่มจุลชีพ ไม่โดยทางตรงก็โดยทางอ้อมเสมอ

ง) จำนวนชนิดของจุลชีพที่ประกอบขึ้นเป็นกลุ่มจุลชีพ เนื่องจากการมีจุลชีพหลายชนิดในระบบย่อมจะเกิดปรากฏการณ์ขึ้นได้จำนวนมาก และมีความซับซ้อนมากขึ้นเช่น เกิดภาวะการล่าเหยื่อ หรือการกินต่อกัน เป็นทอดในห่วงโซ่อาหารที่ซับซ้อนขึ้น เป็นต้น ทำให้ค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากหลายกลุ่มที่เป็นตัวแทนในระบบนั้นจะมีค่าที่แตกต่างกันได้ จากการที่ระบบมีจำนวนกลุ่มและชนิดของจุลชีพต่างกัน

3.2 แบบจำลองของกระบวนการตะกอนเร่งแบบธรรมดา

กระบวนการตะกอนเร่งแบบธรรมดาสามารถใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่มีการกวนเดี่ยวและการเวียนเซลล์กลับ (Continuous Stirred Tank Reactor With Cell Recycle ,CSTRWR) มาใช้สำหรับอธิบายการทำงานได้ (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) ซึ่งการใช้แบบจำลองดังกล่าวจะทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบที่สภาวะหนึ่งในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ โดยอาศัยหลักการทำสมดุลย์ของมวลของสารต่าง ๆ ในระบบ

สำหรับแบบจำลองที่จะใช้ในการศึกษาในครั้งนี้นี้กลุ่มจุลชีพที่กล่าวถึงจะหมายถึงกลุ่มจุลชีพแบบแอโรบิกที่สร้างอาหารเองไม่ได้ (Aerobic heterotrophic organisms) ที่ทำหน้าที่ในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายในถังเติมอากาศเท่านั้น เพื่อให้การศึกษาแบบจำลองง่ายขึ้น สามารถที่จะใช้แบบจำลองดังกล่าวเพื่ออธิบายถึงปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้นในระบบได้อย่างครอบคลุมและมีเหตุ

ผล และเพื่อให้สามารถนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงได้ จึงได้มีการกำหนดและตั้งชื่อสมมติต่างๆขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 การทำงานของถังเติมอากาศ

ก) การทำงานของถังเติมอากาศเป็นแบบถังผสมอย่างสมบูรณ์ (Completely Mixed) ความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ในถังจะมีความสม่ำเสมอ และเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งถัง

ข) สารต่าง ๆ ที่เข้าสู่ถังเติมอากาศ จะถูกกวนให้เกิดการผสมอย่างสมบูรณ์ทันทีที่เข้าสู่ถัง

ค) ปฏิกริยาทางชีวเคมี และปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่สำคัญ คือ การใช้สารอาหาร การเจริญเติบโต การตาย และการสลายตัว จะเกิดขึ้นเฉพาะที่ในถังเติมอากาศเท่านั้น

3.2.2 การทำงานของถังตกตะกอน

ก) ถังตกตะกอนทำหน้าที่ในการแยกส่วนที่เป็นของแข็งแขวนลอยออก และทำให้ส่วนที่แยกออกนี้ตกลงสู่ก้นถัง เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยขึ้นที่บริเวณก้นถังตกตะกอนเท่านั้น

ข) มวลของจุลชีพที่อยู่ในถังตกตะกอน และในกระแสตะกอนเวียนกลับจากก้นถังตกตะกอนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับมวลจุลชีพที่อยู่ในถังเติมอากาศ

3.2.3 องค์ประกอบต่างๆในน้ำเสีย

ในน้ำเสียจริงนั้น มีสารอาหารประเภทสารประกอบอินทรีย์อยู่มากมายหลายชนิด ทั้งในรูปของสารละลายและอนุภาคของแข็ง ซึ่งในปัจจุบันนี้ก็ยังไม่มีการวัดปริมาณหรือจำแนกชนิดของสารประกอบในน้ำเสียที่เหมาะสม และมักใช้วิธีการวัดปริมาณของสารประกอบต่างๆรวมกัน ในด้านผลกระทบของมันที่มีต่อสภาพแวดล้อม โดยแสดงผลของการวัดปริมาณดังกล่าวในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ซีโอดีหรือบีโอดี เป็นต้น โดยที่สารประกอบแต่ละชนิดในน้ำเสียนั้นมี

ความยากง่ายของการย่อยสลายโดยกลุ่มจุลชีพในระบบที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการจำแนกองค์ประกอบต่างๆในน้ำเสียจึงอาศัยเกณฑ์จากความสามารถของจุลชีพในการที่จะกำจัด หรือนำสารประกอบเหล่านี้ไปใช้ในการดำรงชีพ ว่ามีความยากง่ายหรือช้าเร็วเพียงใด และจากเกณฑ์ดังกล่าวจึงสามารถแบ่งสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียออกได้เป็น 3 กลุ่มด้วยกันดังนี้คือ

1) กลุ่มที่สามารถถูกย่อยสลายได้เร็ว (Rapidly Biodegradable) สารประกอบพวกนี้ได้แก่สารประกอบที่มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่ซับซ้อน (Simple Molecule) หรือเป็นลักษณะโมเลกุลเดี่ยว (Single Component) และอยู่ในรูปของสารละลายเท่านั้น ทำให้ง่ายต่อการที่กลุ่มจุลชีพจะนำสารประกอบเหล่านี้เข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง เพื่อนำไปสังเคราะห์ให้เกิดพลังงานได้ทันที สารประกอบเหล่านี้ได้แก่ กรดอะซิติก ,กรดไขมัน (Volatile Fatty Acids) ,เอทานอล และสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีลักษณะโครงสร้างอย่างง่าย (Simple Carbohydrates) เป็นต้น

2) กลุ่มที่ถูกย่อยสลายได้ช้า (Slowly Biodegradable) สารประกอบพวกนี้ได้แก่สารละลายที่มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อน เป็นสายยาว หรือมีลักษณะเป็นพวกที่มีหลายโมเลกุลประกอบกัน (Multi Component) ส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งได้แก่สารประกอบที่อยู่ในรูปของอนุภาคของแข็งแขวนลอย โดยสารประกอบเหล่านี้จุลชีพไม่สามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรงทันที ต้องรอให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และหรือรวมกับเอนไซม์จากกลุ่มจุลชีพบางกลุ่มที่สามารถสร้างขึ้นเพื่อย่อยสลายอนุภาคดังกล่าวได้ เพื่อเปลี่ยนสารประกอบเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของสารละลายที่มีลักษณะโมเลกุลเดี่ยวเหมือนกับกลุ่มแรกก่อน เพื่อที่ได้สามารถนำสารประกอบเหล่านี้เข้าสู่เซลล์ได้ และสามารถจำแนกประเภทของสารประกอบในกลุ่มนี้ออกได้เป็นอีก 2 กลุ่มย่อย โดยอาศัยเกณฑ์ความช้า-เร็วในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารประกอบเหล่านี้ ได้ดังนี้คือ

2.1) พวกที่สามารถถูกไฮโดรไลซิสได้เร็ว (Rapidly Hydrolyzed) ได้แก่สารประกอบที่มักอยู่ในรูปของสารละลาย และอนุภาคของแข็งแขวนลอยบางชนิด (Henze,1992)

2.2) พวกที่ถูกไฮโดรไลซิสได้ช้า (Slowly Hydrolyzed) ได้แก่สารประกอบที่มักอยู่ในรูปของอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ และมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนเท่านั้น

3) กลุ่มที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้เลย (Inert) สารประกอบพวกนี้มีทั้งอยู่ในรูปของสารละลาย และอนุภาคของแข็งแขวนลอยเช่นกัน สารเหล่านี้เมื่อเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียหนึ่งๆ แล้วจะไม่เข้าทำปฏิกิริยาใดๆ เลย หรือกลุ่มจุลชีพไม่สามารถที่จะนำสารเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ใดๆ ได้ สารประกอบเหล่านี้ในแต่ละสถานะจะแสดงผลกระทบต่อระบบต่างกัน คือพวกที่อยู่ในรูปของสารละลายจะผ่านเข้า และออกจากระบบโดยไม่เกิดมีการเปลี่ยนแปลงใดๆทั้งสิ้น ส่วนพวกที่อยู่ในรูปของอนุภาคของแข็งจะถูกกักไว้ในฟล็อกโดยทันทีที่เข้าสู่ระบบ และจะออกไปจากระบบพร้อมกับน้ำตะกอนเมื่อทำการทิ้งตะกอนเพื่อรักษาอายุตะกอนของระบบเท่านั้น

จากเกณฑ์การแบ่งสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียดังที่ได้กล่าว เมื่อนำมาพิจารณา ร่วมกับวิธีการทดลองที่ใช้ในการวิจัย ในการวัดปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบเหล่านี้ในทอมของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด แล้วนั้น ทำให้สามารถที่จะทำการประเมินเพื่อจำแนกองค์ประกอบส่วนต่างๆที่มีในน้ำเสีย เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ในแบบจำลองได้ โดยมีหลักการในการประเมินหาองค์ประกอบส่วนต่างๆดังนี้

3.2.3.1 สารละลายที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆเลยในระบบ (Inert Soluble,C₁)

โดยอาศัยหลักการของ Ekama et.al.(1986) และ Sollfrank et.al.(1992) และวิธีการของ Grady&Lim (1980) ที่เสนอว่าปริมาณของสารอินทรีย์ละลายส่วนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวะที่มีในน้ำเสียชนิดหนึ่งๆนั้น สามารถประเมินได้จากผลของการติดตามวัดค่าปริมาณซีโอดีกรอง (Filtrate COD) ของน้ำในถังเติมอากาศ จากการดำเนินการในช่วงสภาวะปกติของกระบวนการตะกอนเร่ง ที่ค่าอายุตะกอนต่างๆกัน ในช่วงระยะเวลาที่นานพอ และสามารถประเมินหาปริมาณดังกล่าวออกมาได้โดยวิธีกราฟ ดังรายละเอียดที่จะได้กล่าวในตอนๆที่ 3.4.3

3.2.3.2 อนุภาคของแข็งเจือย (Inert Suspended Solids)

โดยอาศัยหลักในการประเมินหาค่าเศษส่วนของมวลและปริมาณซีโอดี ระหว่างส่วนที่เป็นอนุภาคของแข็งเจือยกับอนุภาคของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีในน้ำเสีย (ค่า f และ f') ตามวิธีของ Grady&Lim (1980) แล้วนำมาประเมินร่วมกับผลที่ได้จากการวัดค่าแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีในน้ำเสีย (Z_0) และปริมาณซีโอดีทั้งหมดของน้ำเสีย (Γ_0) จะทำให้สามารถทราบปริมาณขององค์ประกอบดังกล่าวที่มีในน้ำเสียได้ ทั้งในรูปของพารามิเตอร์ ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

3.2.3.3 สารอาหารละลายที่สามารถถูกย่อยสลายได้ทันที (Readily Biodegradable)

เป็นปริมาณสารอาหารละลายส่วนที่กลุ่มของจุลชีพสามารถนำไปใช้ได้ทันที มีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลชีพโดยตรง โดยเป็นส่วนเดียวที่กลุ่มจุลชีพนำไปใช้สังเคราะห์เพื่อให้เกิดพลังงานสำหรับการสร้างเซลล์ใหม่ที่สัมพันธ์กันตามสมการที่ (3-1) ดังนั้นจึงต้องเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูปของสารละลาย และ/หรือมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่ซับซ้อนเท่านั้น ซึ่งได้แก่สารประกอบที่จัดอยู่ในกลุ่มที่สามารถถูกย่อยสลายได้เร็ว และกลุ่มที่ถูกย่อยสลายได้ช้าประเภทที่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้เร็วนั่นเอง สารอาหารละลายส่วนนี้จะเป็นตัวที่แสดงถึงปริมาณของสารอาหารส่วนที่เป็นตัวจำกัดอัตราการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลชีพในระบบ ตามสมการที่ (3-4) เท่านั้น (Sollfrank & Gujer, 1991) และสามารถประเมินได้จากการวัดปริมาณซีโอดีกรองของน้ำเสีย แล้วหักออกด้วยค่าของปริมาณซีโอดีละลายส่วนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวะ (C_p)

3.2.3.4 สารอาหารที่ถูกย่อยสลายได้ช้า (Slowly Biodegradable)

ในน้ำเสียนอกจากจะมีสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายได้ช้าในรูปของสารละลายที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อน และในรูปของอนุภาคอาหาร เหมือนกับที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังมักจะมีส่วนที่เป็นเซลล์ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอื่นๆ ที่ไม่ได้เกิดจากการผลิตของกระบวนการด้วยเสมอ แต่เนื่องจากการตรวจวัดถึงส่วนดังกล่าวว่ามีเป็นสัดส่วนและปริมาณเท่าใดเป็นสิ่งที่กระทำได้ยาก จึงมักคิดรวมส่วนของเซลล์ดังกล่าวเข้าไว้กับส่วนที่เป็นอนุภาคอาหารนี้ด้วย ทำให้เป็นการลดความยุ่งยากในการคิดส่วนดังกล่าวรวมในแบบจำลองลงได้ และสามารถแสดงปริมาณรวมอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ซีโอดีได้เช่นเดียวกัน โดยสามารถประเมินหาปริมาณได้จากการวัดปริมาณซีโอดีทั้งหมดในน้ำเสียแล้วหักออกด้วยค่าซีโอดีจากส่วนอื่นๆ ที่ทราบค่าแล้ว (ดังแสดงในภาคผนวก ค.)

ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ แม้จะผ่านการตกตะกอนชั้นต้นมาแล้วก็ตาม มักจะยังคงปรากฏว่ามีอนุภาคอาหารเป็นส่วนใหญ่ของสารอาหารทั้งหมดเสมอ (Heukelekian อ้างถึงใน Gujer, 1980) ซึ่งส่วนที่เป็นสารอาหารละลายนั้นกลุ่มจุลชีพจะสามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรงทันที จึงเป็นส่วนที่ถูกกำจัดได้อย่างรวดเร็ว และใช้เวลาไม่นานนักก็สามารถถูกย่อยสลายได้หมด แต่ส่วนที่เป็นอนุภาคอาหารเนื่องจากกลุ่มจุลชีพไม่สามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรงทันที ดังนั้นจึงสามารถถูกกำจัดภายในระยะเวลาการบำบัดของกระบวนการได้เพียงโดยการกัก (Entrapped) เอาไว้ในฟล็อกของกลุ่มจุลชีพเท่านั้น การจับเอาอนุภาคอาหารเหล่านี้เข้าไว้ในฟล็อกนั้น Griffin (1987) เคย

ได้ทำการวิจัยและสรุปว่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเสนอว่าน่าจะเป็นกลไกทางฟิสิกส์มากกว่าที่จะเป็นปฏิกิริยาทางชีวเคมี หลังจากนั้นอนุภาคอาหารเหล่านี้จะค่อยๆถูกไฮโดรไลซ์ให้เป็นสารละลายอย่างช้าๆ (Gujer,1980) จนเป็นสารอาหารละลายที่กลุ่มจุลชีพสามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้ (Exogeneous Substrate) และในที่สุดก็จะถูกย่อยสลายอย่างรวดเร็วโดยกลุ่มจุลชีพในระบบนั่นเอง (Somiya&Kawamura,1981)

Takahashi.S. และคณะเสนอว่า การที่ฟลอคของกลุ่มจุลชีพจับเอาอนุภาคอาหารที่เข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องตลอดเวลานั้น น่าจะเป็นการทำให้ฟลอคค่อยๆสูญเสียความสามารถในการดูดซับ (Adsorption) ของอนุภาคเหล่านี้ลงไป แต่เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างช้าๆ ของอนุภาคอาหารตลอดเวลา เป็นการทำให้อนุภาคดังกล่าวค่อยๆหมดไปจากฟลอคอย่างต่อเนื่อง หรือเป็นการทำให้ฟลอคยังคงรักษาความสามารถในการดูดซับเอาไว้ได้นั่นเอง และทำให้ระบบโดยรวมยังคงรักษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอาหารส่วนที่เป็นอนุภาคของแข็งแขวนลอยเอาไว้ได้เสมอ จากแนวความคิดดังกล่าวก็นับได้ว่าเป็นการสนับสนุนการอธิบายลำดับขั้นตอนของการกำจัดสารอาหารส่วนที่เป็นอนุภาคได้เป็นอย่างดี แต่เป็นที่น่าเสียดายที่ในปัจจุบันนี้ยังไม่สามารถกำหนดอัตราการสลายตัวของอนุภาคอาหารให้อยู่ในรูปของสมการแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลจากการวิจัยเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอนุภาคอาหารที่มากเพียงพอ จึงยังไม่สามารถพิจารณารวมเอาการสลายตัวของอนุภาคอาหารเข้าไว้ด้วยกันในการศึกษาแบบจำลองได้ ดังนั้นจึงมักทำการสมมติว่าไม่มีอนุภาคอาหารอยู่จริงในระบบและอนุภาคอาหารดังกล่าวเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสารอาหารละลายขึ้นอีกส่วนหนึ่งเท่านั้น และเนื่องจากการเกิดสารอาหารละลายส่วนดังกล่าวจะค่อยๆเกิดขึ้นอย่างช้าๆและต่อเนื่องตลอดเวลา จึงถือว่าเป็นแหล่งของสารอาหารที่กลุ่มจุลชีพในระบบจะค่อยๆทยอยนำไปใช้เพื่อสังเคราะห์ให้เกิดพลังงานสำหรับการสร้างเซลล์ขึ้นมาใหม่ ซึ่งมีผลทำให้มีปริมาณเซลล์เพิ่มขึ้นอีกส่วนหนึ่งจากสารอาหารละลายส่วนดังกล่าวเท่านั้น โดยไม่มีผลกระทบต่อปริมาณความเข้มข้นของสารอาหารละลายเริ่มต้นที่เข้าสู่ระบบในตอนแรกแต่อย่างใด การตั้งสมมติฐานแบบดังกล่าวทำให้ไม่ต้องพิจารณาถึงสารอาหารละลายจากส่วนที่มาจากจากการสลายตัวของอนุภาคอาหารว่าจะเกี่ยวข้องกับปริมาณของสารอาหารละลายที่เป็นตัวจำกัดอัตราการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลชีพ หรือจะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบเช่น ยิลด์ หรือไม่อย่างไร ซึ่งช่วยให้เป็นการลดความยุ่งยากในการศึกษาแบบจำลองได้

อนุภาคเฉื่อย ,อนุภาคอาหาร และกลุ่มจุลชีพที่มีในระบบจะผสมกัน โดยไม่สามารถจำแนกออกได้โดยง่ายว่าส่วนใดเป็นเซลล์ ส่วนใดเป็นอนุภาคเฉื่อยหรืออนุภาคอาหาร และเรียกส่วนผสมนี้โดยรวมๆ ว่าน้ำตะกอน (Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS) และสามารถวัดค่าแสดงออกมาในรูปของของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids, TSS) และจากเหตุผลดังกล่าวส่วนของน้ำตะกอนทั้งหมดจึงไม่สามารถถือได้ว่าเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายได้ทั้งหมด แต่สามารถประเมินเพื่อหาส่วนของน้ำตะกอนที่ทำหน้าที่ในการกำจัดสารอาหารดังกล่าวได้โดย การหักค่าของปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่วัดได้ในถังเติมอากาศด้วยค่าของส่วนที่เป็นอนุภาคเฉื่อยที่คำนวณได้ แล้วเรียกส่วนที่คำนวณได้นี้ว่าเป็นค่าความเข้มข้นประสิทธิภาพของเซลล์ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการคำนวณเพื่อประเมินหาค่าความเข้มข้นของส่วนที่เป็นเซลล์ที่เป็นตัวแทนของกลุ่มจุลชีพของระบบนั่นเอง

3.2.4 สภาพแวดล้อมอื่น ๆ ในการทำงาน

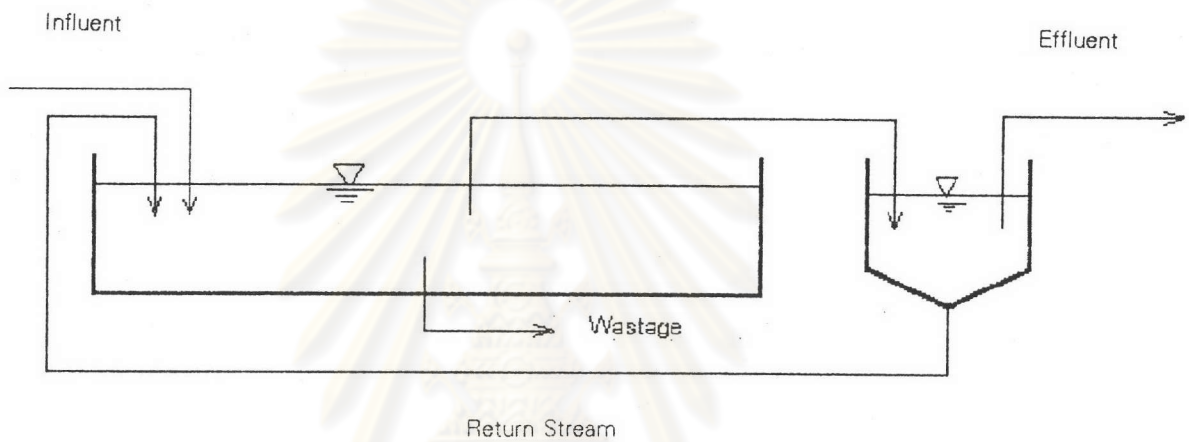
ก) ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ในระบบถือว่ามีค่าเพียงพอและสม่ำเสมอทั่วถึงตลอดทั้งถัง จนไม่เป็นตัวจำกัดอัตราการทำปฏิกิริยาของกลุ่มจุลชีพ

ข) ปริมาณสารอาหารชนิดอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพ ถือว่ามีค่าเพียงพอ ดังนั้น สารอินทรีย์ละลายจะเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโต (Growth Limiting Nutrients) เพียงชนิดเดียว

ค) ปัจจัยด้านอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ และพีเอช ถือว่าคงที่ ทั้งในกระแสที่เข้าสู่ระบบในระบบและในกระแสออกจากระบบ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในถังเติมอากาศจึงไม่มีผลกระทบจากปัจจัยเหล่านี้

3.3 สมการที่ได้จากแบบจำลอง

แบบจำลองของกระบวนการตะกอนเร่งแบบธรรมดาที่ใช้ในการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



Influent ; F	Reactor	Wastage ; F _w	Effluent ; F _e	Recycle ; F _r
Z _{io} : Inert Solids , (mg/l)	Z _i : Inert Solids , (mg/l)	Z _{iw} : Inert Solids , (mg/l)	Z _{ie} : Inert Solids , (mg/l)	Z _{ir} : Inert Solids , (mg/l)
	X : Total Cell , (mg/l)	X _w : Total Cell , (mg/l)	X _e : Total Cell , (mg/l)	X _r : Total Cell , (mg/l)
Z _{bo} : Biodegradable Solids in Wastewater ,(mg/l)	X _v : Viable Cell , (mg/l)	X _{wv} : Viable Cell , (mg/l)	X _{ve} : Viable Cell , (mg/l)	X _{vr} : Viable Cell , (mg/l)
	X _d : Dead Cell , (mg/l)	X _{dw} : Dead Cell , (mg/l)	X _{de} : Dead Cell , (mg/l)	X _{dr} : Dead Cell , (mg/l)
Z _o : Total Suspended Solids in Wastewater , (mg/l)	M : Total Suspended Solids in Reactor , (mg/l)	M _w : Total Suspended Solids in wastage , (mg/l)	M _e : Total Suspended Solids in effluent , (mg/l)	M _r : Total Suspended Solids in return stream(mg/l)
S _o : Soluble Biodegradable Substrate , (mg/l)	S : Soluble Biodegradable Substrate , (mg/l)	S _w : Soluble Biodegradable Substrate , (mg/l)	S _e : Soluble Biodegradable Substrate , (mg/l)	S _r : Soluble Biodegradable Substrate , (mg/l)

รูปที่ 3.2 แบบจำลองของกระบวนการตะกอนเร่งแบบธรรมดา (วีระ เกรอด , 2535)

3.3.1 เวลาพักเซลล์เฉลี่ย (Mean Cell Residence Time, MCRT)

มีนิยามว่า เป็นอัตราส่วนระหว่างมวลของจุลชีพที่มีในระบบต่อมวลของจุลชีพที่หายไปจากระบบต่อหน่วยเวลา หรือเขียนได้เป็น

$$\theta_c = \frac{\text{มวลของจุลชีพที่มีในระบบ}}{\text{มวลของจุลชีพที่หายไปจากระบบต่อหน่วยเวลา}}$$

โดยที่ θ_c = เวลาพักเซลล์เฉลี่ย (วัน)

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ดังรูปที่ 3.2 ใช้การทิ้งเซลล์จุลชีพออกจากถังเติมอากาศ ดังนั้นค่าอายุตะกอนของระบบจึงเขียนได้ดังสมการที่ (3-9) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการควบคุมค่าอายุตะกอนให้คงที่สามารถกระทำได้ง่าย โดยแค่ทำการควบคุมอัตราการทิ้งเซลล์จุลชีพ (น้ำตะกอน) จากถังเติมอากาศเพียงอย่างเดียว

$$\theta_c = V/F_w \quad \dots\dots\dots (3-9)$$

โดยที่

V = ปริมาตรของถังเติมอากาศ

F_w = อัตราการทิ้งเซลล์จุลชีพจากถังเติมอากาศ (ปริมาตร/เวลา)

3.3.2 การทำสมดุลของมวลของสารต่าง ๆ ที่สภาวะคงที่

ก) สมการแสดงสมดุลของมวลของสารอาหารที่ถังเติมอากาศ

$$F \cdot S_0 + \alpha F \cdot S - (F + \alpha F) \cdot S - r_s \cdot V = 0 \quad \dots\dots\dots (3-10)$$

โดยการแทนค่า $r_s = \mu \cdot X_v / Y_g$ จากสมการที่ (3-3) จะได้ว่า

$$X_v = Y_g (S_0 - S) / (\mu \tau) \quad \dots\dots\dots (3-11)$$

ข) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของเซลล์ที่มีชีวิตในถังเดิมอากาศ

$$\begin{aligned} F_r X_{Vr} - F_w X_v - (F - F_w + F_r) X_v + \mu X_v V - b X_v V - \gamma X_v V &= 0 \\ F_r X_{Vr} - (F + F_r) X_v + \mu X_v V - b X_v V - \gamma X_v V &= 0 \end{aligned} \quad \text{..... (3-12)}$$

โดยแทนค่า $F_r = \alpha F$, $\tau = V/F$ และกำหนดให้ $G = 1 + \alpha - \alpha(X_{Vr}/X_v)$ จะได้ว่า

$$\mu = G(1/\tau) + \gamma + b \quad \text{..... (3-13)}$$

ค) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของเซลล์ที่มีชีวิตในถังตกตะกอน

$$\begin{aligned} (F - F_w + \alpha F) X_v - \alpha F X_{Vr} &= 0 \\ 1 + \alpha - \alpha(X_{Vr}/X_r) = G = F_w/F & \end{aligned} \quad \text{..... (3-14)}$$

โดยการแทนค่า F_w จากสมการที่ (3-9) ลงในสมการที่ (3-14) จะได้ว่า $G = \tau/\theta_c$

และเมื่อแทนค่า $G = \tau/\theta_c$ ลงในสมการที่ (3-13) ทำให้ได้ว่า

$$\mu = 1/\theta_c + \gamma + b \quad \text{..... (3-15)}$$

ง) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของเซลล์ที่ตายในถังเดิมอากาศ

$$\begin{aligned} \alpha F X_{dr} - (F + \alpha F) X_d + \gamma X_v V - b X_d V &= 0 \\ 1 + \alpha - \alpha(X_{dr}/X_d) = (\gamma X_v \tau / X_d) - b \tau & \end{aligned} \quad \text{..... (3-16)}$$

เนื่องจาก $X_{dr}/X_d = X_{Vr}/X_v$ และ $G = \tau/\theta_c$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$X_d = \gamma X_v / (1/\theta_c + b) \quad \text{..... (3-17)}$$

จ) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของอนุภาคเฉื่อย (Z_i)

$$F.Z_{i0} + \alpha F.Z_{ir} - F.(1 + \alpha).Z_i = 0 \quad \dots\dots\dots (3-18)$$

สามารถจัดรูปได้เป็น $Z_i = Z_{i0} / (1 + \alpha - \alpha(Z_{ir}/Z_i))$

โดยที่ $Z_{ir}/Z_i = X_{vr}/X_v$ จะได้ว่า $1 + \alpha - \alpha Z_{ir}/Z_i = 1 + \alpha - \alpha(X_{vr}/X_v) = G$

$$\text{ดังนั้น} \quad Z_i = Z_{i0} (\theta_c / \tau) \quad \dots\dots\dots (3-19)$$

3.3.3 ความเข้มข้นของน้ำตะกอน (Mixed Liquor Suspended Solids, MLSS)

ความเข้มข้นของน้ำตะกอนในถังเติมอากาศ (M) จะเป็นผลรวมของส่วนที่เป็นเซลล์กับส่วนที่เป็นอนุภาคเฉื่อยเท่านั้น และสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ (3-20)

$$M = X + Z_i \quad \dots\dots\dots (3-20)$$

เนื่องจาก $X = X_v + X_d$ ดังนั้น เมื่อแทนค่าจากสมการ (3-11), (3-17) และ (3-19) จะได้ว่า

$$X = \theta_c . [Y_g . (S_0 - S)] / \tau (1 + b . \theta_c) \quad \dots\dots\dots (3-21)$$

$$M = \theta_c . [Y_g . (S_0 - S) + Z_{i0}] / \tau (1 + b . \theta_c) \quad \dots\dots\dots (3-22)$$

3.3.4 ความเข้มข้นของสารอาหารละลาย

จากสมการที่ (3-4) และ (3-15) จะได้สมการความเข้มข้นของสารอาหารละลายดังนี้

$$S = \frac{K_s (1/\theta_c + \gamma + b)}{\mu_m - (1/\theta_c + \gamma + b)} \quad \dots\dots\dots (3-23)$$

3.3.5 ความมีชีวิต

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3-6) และแทนค่าจากสมการ (3-11) และ (3-21) จะได้

$$v = \frac{1 + b \cdot \theta_c}{1 + b \cdot \theta_c + \gamma \cdot \theta_c} \quad \dots \dots \dots (3-24)$$

ตามสมการที่ (3-24) จะเห็นได้ว่าความมีชีวิตมีสัมพันธ์กับค่าอายุตะกอนของระบบ โดยในระบบที่มีค่าอายุตะกอนต่ำกว่าจะมีค่าความมีชีวิตสูงกว่าระบบที่มีค่าอายุตะกอนมากกว่า หรือมีส่วนที่เป็นเซลล์ที่มีชีวิตมากกว่านั่นเอง แต่ในกระบวนการบำบัดจริงต้องการการตกตะกอนที่ดีเพื่อที่จะสามารถแยกส่วนที่เป็นเซลล์ออกจากกระแสที่จะออกจากระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงต้องมักทำการดำเนินการที่ค่าอายุตะกอนสูง ในช่วงประมาณ 3-15 วัน ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าค่าอายุตะกอนน้อยสุดที่ต้องการสำหรับระบบ ($\theta_{c \text{ min}}$) เสมอ ทั้งนี้เพื่อต้องการให้เกิดการตกตะกอนที่ดีดังกล่าว

Weddle&Jenkins (1971) กล่าวว่า สำหรับกระบวนการตะกอนเร่งที่ดำเนินการในช่วงอายุตะกอนปกติคือ ในช่วงประมาณ 3-15 วันนั้น สามารถใช้การวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยส่วนที่เป็นโวลูไลต์ (VSS) ของน้ำในถังเติมอากาศเพื่อใช้แสดงหรือใช้เป็นตัวแทนของกลุ่มจุลชีพที่มีชีวิตที่มีในระบบนั้นได้ เนื่องจากในช่วงอายุตะกอนดังกล่าวน้ำตะกอนจะมีส่วนที่เป็นเซลล์ที่มีชีวิต (Viable-Cell) ค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบเป็นสัดส่วนกับค่า VSS ที่วัดได้ (ประมาณ 1.5×10^8 เซลล์/มก.VSS) และยังสามารถสรุปว่าในช่วงการดำเนินการดังกล่าวนั้น ในน้ำตะกอนซึ่งวัดในเทอมของค่า VSS ของทุกระบบนั้นจะมีส่วนที่เป็นเซลล์ที่มีชีวิตประมาณ 10-20% เท่านั้น ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 80-90% นั้น Nelson&Lawrence (1980) ได้วิจัยและสรุปว่าเป็นส่วนผสมของอนุภาคเฉื่อยจากน้ำเสียที่เกิดสะสมขึ้นจากการเวียนตะกอนกลับ, ซากของแข็งเฉื่อยจากเซลล์ที่เหลือจากการสลายตัว (Decay) และอนุภาคของแข็งอื่นๆที่สามารถถูกย่อยสลายเพื่อเป็นสารอาหารสำหรับจุลชีพบางกลุ่มได้อีก แต่เนื่องจากการย่อยสลายดังกล่าวจะเกิดอย่างช้าๆ และใช้ระยะเวลาานาน ดังนั้นจึงยังคงปรากฏมีอนุภาคส่วนดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของน้ำตะกอนได้ด้วยเสมอ

3.4 วิธีประเมินหาค่าพารามิเตอร์จลน์

ค่าพารามิเตอร์จลน์สามารถประเมินหาได้ โดยอาศัยสมการที่ได้จากแบบจำลอง นำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง จากนั้นก็ใช้วิธีกราฟในการประเมินหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ออกมา โดยการลงจุดในกราฟของสมการแต่ละชุดนั้น จะใช้ข้อมูลเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองบำบัดน้ำเสียอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ น้ำเสียจริงกับแบบทดลอง

การเก็บข้อมูลจากการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างจะต้องต่อเนื่องและนานพอที่จะประเมินหาค่าเฉลี่ยทางสถิติของข้อมูลตัวนั้นๆได้ โดยควรมีระยะเวลาในการเก็บข้อมูลตัวอย่างนานอย่างน้อย 2 เท่า ของค่าอายุตะกอนในการทดลองแต่ละครั้ง ตัวแปรอิสระ คือ ค่าอายุตะกอน (θ_c) โดยให้เวลากักน้ำ (τ) คงที่ การแปรและควบคุมค่าอายุตะกอนทำได้โดยการเปลี่ยนและควบคุมอัตราการทิ้งน้ำตะกอนจากถังเติมอากาศตามสมการที่ (3-9) และในการนำค่าอายุตะกอนไปใช้ในการคำนวณเพื่อประเมินหาค่าพารามิเตอร์นั้น จะต้องคำนวณค่าอายุตะกอนที่แท้จริงของระบบ โดยคิดปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกไปพร้อมกับกระแสออกด้วย เพื่อให้ค่าอายุตะกอนผิดพลาด จนทำให้การประมาณค่าพารามิเตอร์จลน์คลาดเคลื่อนไป ด้วยสมการ (3-25)

$$\theta_c = \frac{V.M}{F_w.M + (F - F_w) M_e} \dots\dots\dots (3-25)$$

- โดยที่
- M = ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในถังเติมอากาศ (มก./ล.)
 - M_e = ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในกระแสออก (มก./ล.)
 - V = ปริมาตร ของถังเติมอากาศ (ลิตร)
 - F_w = อัตราการทิ้งน้ำตะกอนจากถังเติมอากาศ (ลิตร/วัน)
 - F = อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ (ลิตร/วัน)

3.4.1 ข้อมูลที่ต้องการจากการทดลอง

ข้อมูลที่สำคัญสำหรับการประเมินค่าพารามิเตอร์จลน์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 โดยข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ที่เก็บได้ตลอดในช่วงระยะเวลาที่ทำการทดลองที่ค่าอายุตะกอนแต่ละค่า จะนำไปคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ดังกล่าว แล้วนำไปใช้ร่วมกันในการประเมินค่าพารามิเตอร์จลน์ต่อไป

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลที่ต้องการและวิธีการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว

พารามิเตอร์	ข้อมูลที่ต้องการ	วิธีการ
C_o	ปริมาณสารอินทรีย์ละลายที่มีในน้ำเสีย	ซีโอดีกรอง (Filtrate COD)
C	ปริมาณสารอินทรีย์ละลายในถังเติมอากาศ	ซีโอดีกรอง (Filtrate COD)
T_o	ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีในน้ำเสีย	ซีโอดีทั้งหมด (Total COD)
Z_o	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีในน้ำเสีย	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
M	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีในถังเติมอากาศ	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
M_e	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในกระแสนอก	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
F	อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ	บันทึกข้อมูลจากการทดลอง
F_w	อัตราการทิ้งน้ำตะกอนจากถังเติมอากาศ	บันทึกข้อมูลจากการทดลอง
f	เศษส่วนมวลของอนุภาคเฉื่อยในน้ำเสีย	การทดลองแบบแบทช์ระยะยาว
f'	เศษส่วนซีโอดีของอนุภาคเฉื่อยในน้ำเสีย	การทดลองแบบแบทช์ระยะยาว

3.4.2 การประเมินค่า f และ f'

การทดลองเพื่อหาค่า f และ f' สามารถกระทำได้โดยการแยกเอาของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีในน้ำเสียออก แล้วนำส่วนที่แยกได้ดังกล่าวมาทำการทดลองย่อยสลายต่อ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีอาหารเสริมอื่นๆ และจุลินทรีย์มากพอที่จะทำการย่อยสลายส่วนที่เป็นอนุภาคอาหารที่มีในของแข็งแขวนลอยทั้งหมดดังกล่าวได้ โดยการเติมอากาศอย่างต่อเนื่องและยาวนานพอที่อนุภาคดังกล่าวจะถูกย่อยสลายจนหมด และจากการที่ติดตามวัดค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยและปริมาณซีโอดีของน้ำตัวอย่างในถังดังกล่าวที่ตอนเริ่มต้น รวมกับค่าของปริมาณทั้งสองที่ค่าสุดท้ายเมื่อสังเกตได้ว่าค่าดังกล่าวเริ่มมีค่าคงที่แล้ว จะทำให้สามารถคำนวณหาค่า f และ f' ได้

ค่า f คืออัตราส่วนระหว่างมวลของอนุภาคเฉื่อยต่อมวลของอนุภาคของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีในน้ำเสีย ที่สามารถหาได้จากผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในการทดลองย่อยสลายแบบเบทซ์ระยะยาว โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยที่วัดได้ครั้งสุดท้าย หลังจากที่เราเริ่มมีค่าคงที่แล้ว ก็คือปริมาณของแข็งแขวนลอยส่วนที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายต่อได้อีกแล้วนั่นเอง และสามารถประเมินหาค่า f ได้โดยสมการที่ (3-26)

$$f = \frac{\text{ค่าความเข้มข้นสุดท้ายที่คงที่ของปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลืออยู่ในถังเดิมอากาศ}}{\text{ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีในน้ำเสีย}} \dots (3-26)$$

ค่า f ที่คำนวณได้สามารถนำไปใช้เพื่อการประเมินหาส่วนที่เป็นอนุภาคเฉื่อยที่มีในน้ำเสียได้โดยอาศัยสมการที่ (3-27)

$$Z_{i0} = f \cdot Z_0 \dots (3-27)$$

โดยที่ Z_{i0} คือความเข้มข้นของส่วนที่เป็นอนุภาคเฉื่อยที่มีในน้ำเสีย (มก./ล.)

ส่วนค่า f' ที่เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าซีโอดีของส่วนที่เป็นอนุภาคเฉื่อยกับค่าซีโอดีของส่วนที่เป็นอนุภาคของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีในน้ำเสีย สามารถประเมินหาค่าได้โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับการหาค่า f นั้นเองเพียงแต่ในระหว่างการทดลองก็เพิ่มการวัดค่าซีโอดีทั้งหมดของน้ำตัวอย่างควบคู่กันไปด้วย และค่าซีโอดีทั้งหมดของน้ำตัวอย่างที่เหลืออยู่ในถังเดิมอากาศ เมื่อความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยเริ่มมีค่าคงที่แล้วก็คือซีโอดีของส่วนที่เป็นอนุภาคเฉื่อยในน้ำเสียนั่นเอง และสามารถทำการคำนวณหาค่า f' ได้จากสมการที่ (3-28)

$$f' = \frac{\text{ค่าความเข้มข้นสุดท้ายที่คงที่ของปริมาณซีโอดีของอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่เหลืออยู่ในถังเดิมอากาศ}}{\text{ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของปริมาณซีโอดีของอนุภาคของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีในน้ำเสีย}} \dots (3-28)$$

ค่า f' ที่คำนวณได้ สามารถนำไปใช้เพื่อการประเมินหาค่าซีโอดีของส่วนที่เป็นอนุภาคเฉื่อยที่มีในน้ำเสียได้โดยอาศัยสมการที่ (3-29)

$$X_{i0} = f' \cdot (T_0 - C_0) \dots (3-29)$$

โดยที่ X_{i0} คือปริมาณซีโอดีของส่วนที่เป็นอนุภาคเฉื่อย (มก./ล.)

3.4.3 การประเมินค่าซีโอดีละลายที่ไม่ย่อยสลายทางชีวะ (C_i)

โดยหลักการของ Ekama และ Sollfrank [Ekama.et.al,(1986) & Sollfrank.et.al,(1992)] ที่เสนอไว้ก็คือ การที่กระบวนการตะกอนเร่งดำเนินการในช่วงของค่าอายุตะกอนปกติคือ 3-15 วันนั้น ระบบจะมีค่าอายุตะกอนสูงกว่าค่าอายุตะกอนน้อยที่สุดที่ต้องการ (θ_{cmin}) เสมอ ซึ่งจะเป็นการทำให้มีสารอาหารละลายที่เหลืออยู่ในถังเดิมอากาศในปริมาณที่ต่ำมาก จนแทบจะกล่าวได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นความเข้มข้นของปริมาณซีโอดีละลายที่วัดได้ในถังเดิมอากาศ น่าจะถือได้ว่าเป็นส่วนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทั้งหมด จากหลักการดังกล่าวปริมาณซีโอดีละลายส่วนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวะในน้ำเสียจึงทราบได้โดยการติดตามวัดค่าซีโอดีละลายในถังเดิมอากาศ ของกระบวนการตะกอนเร่งที่ดำเนินการในช่วงค่าอายุตะกอนดังกล่าว ในระยะเวลาที่นานพอนั่นเอง

Grady&Lim (1980) ได้เสนอวิธีการประเมินเพื่อหาค่าดังกล่าว โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า " อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ μ และอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะ q จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อความเข้มข้นของสารอาหารที่ย่อยสลายได้ทางชีวะมีค่าเป็นศูนย์ " และจากสมการที่ (3.3) และ (3.10) ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-30)

$$q = [F.(C_0 - C)] / V.X' \quad \dots\dots\dots (3-30)$$

จากสมการทำให้สามารถประเมินค่า C_i ได้ โดยทำการลงจุดระหว่างค่า q ที่คำนวณได้กับค่า C ที่ได้จากการทดลอง โดยมีค่า q เป็นแกนตั้งและค่า C เป็นแกนนอน เมื่อลากเส้นผ่านจุดทั้งหมดแล้ว ถ้ามีส่วนที่ย่อยสลายไม่ได้ทางชีวะเส้นนั้นจะตัดแกนนอนตรงค่าเท่ากับส่วนที่ย่อยสลายไม่ได้ (ดังรูป 3.3) โดยค่า X' ที่ใช้ในการหาค่า q ตามสมการที่ (3-30) นั้นคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ (3-19) , (3-20) และ(3-27) ซึ่งจะทำให้ได้สมการสำหรับการคำนวณหาค่า X' ดังสมการที่ (3-31)

$$X' = M - f.Z_0.(\theta_c / \tau) \quad \dots\dots\dots (3-31)$$

โดยที่ค่า X' ที่คำนวณได้คือค่าความเข้มข้นประสิทธิผลของเซลล์ และจะใช้เป็นตัวแทนของส่วนที่เป็นเซลล์ที่มีชีวิต ที่ทำหน้าที่ในการกำจัดสารอาหารละลายที่เข้าสู่ระบบ ซึ่งเป็นค่าที่จะสามารถคำนวณได้นอกเหนือไปจากการวัดปริมาณดังกล่าวโดยตรงจากการทำการทดลอง

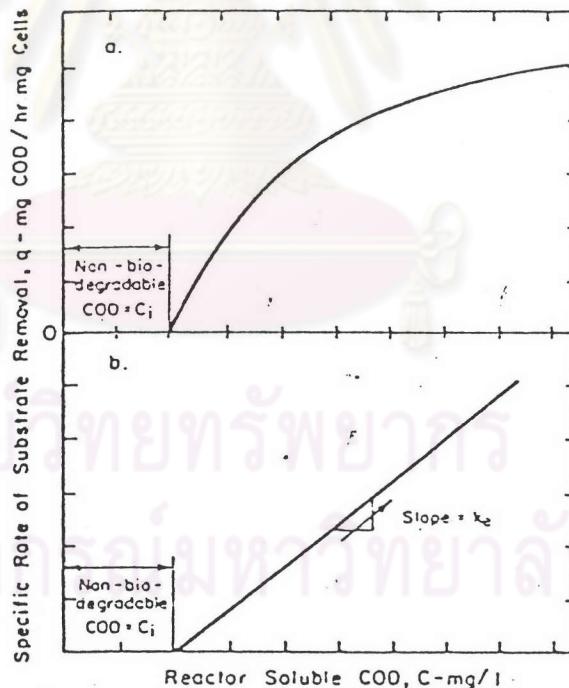
หลังจากที่ได้ประเมินหาค่า C_i แล้วทำให้สามารถที่จะทราบปริมาณของสารอาหารอินทรีย์ละลาย ที่เป็นตัวจำกัดอัตราการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลชีพ และปริมาณของสารอาหารละลายที่เหลืออยู่ในถังเดิมอากาศได้ โดยความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3-32) และ (3-33)

$$S_o = C_o - C_i \quad \dots\dots\dots (3-32)$$

$$S = C - C_i \quad \dots\dots\dots (3-33)$$

โดยที่ S_o คือค่าความเข้มข้นของสารอาหารละลายที่เป็นตัวจำกัดอัตราการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลชีพในระบบ

และ S คือค่าความเข้มข้นของสารอาหารละลายที่เหลืออยู่ในถังเดิมอากาศ



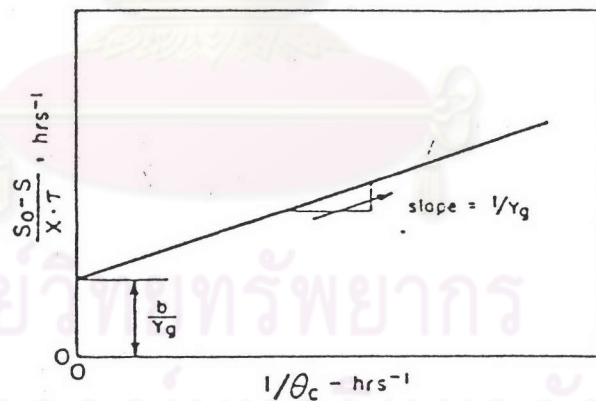
รูปที่ 3.3 วิธีการประเมินหาค่า COD ที่ไม่ย่อยสลายทางชีวะ (ธีระ เกรอด,2535)

3.4.4 การหาค่า Y_g และ b

สามารถประเมินหาได้โดยทำการเปลี่ยนสมการ (3-21) ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังสมการที่ (3-34)

$$(S_0 - S)/X \cdot T = (1/Y_g) \cdot (1/\theta_c) + b/Y_g \quad \dots\dots\dots (3-34)$$

แล้วเขียนเส้นของ $(S_0 - S)/X \cdot T$ เป็นฟังก์ชันของ $1/\theta_c$ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/Y_g$ และจุดตัดบนแกนตั้งที่มีค่าเท่ากับ b/Y_g ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วิธีการประเมินหาค่า Y_g และ b (ธีระ เกรอด, 2535)

3.4.5 การหาค่า μ_m และค่า K_s

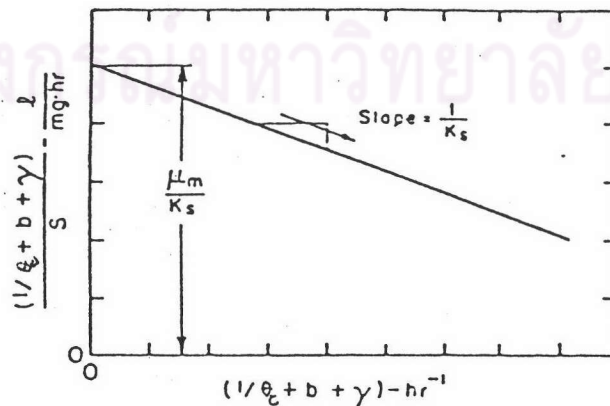
สามารถประเมินหาได้โดยทำการเปลี่ยนสมการ (3-23) ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังสมการที่ (3-35)

$$(1/\theta_c + \gamma + b)/S = (\mu_m/K_s) - (1/K_s)(1/\theta_c + \gamma + b) \quad \dots\dots\dots (3-35)$$

เมื่อเขียนเส้นของ $(1/\theta_c + \gamma + b)/S$ เป็นฟังก์ชันของ $(1/\theta_c + \gamma + b)$ โดยใช้ผลข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-1/K_s$ และจุดตัดแกนตั้งที่มีค่าเท่ากับ μ_m/K_s ดังแสดงในรูปที่ 3.5

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์อัตราการตายจำเพาะของแบคทีเรีย (γ) ไม่สามารถหาได้เนื่องจากไม่มีข้อมูลความมีชีวิตและข้อจำกัดในด้านวิธีการและอุปกรณ์ ดังนั้นจะทำการสมมติค่าดังกล่าวขึ้น และใช้ค่านั้นในการประเมินหาค่า μ_m และ K_s (โดยวิธีการประมาณหาค่าดังกล่าวให้มีความเหมาะสมและสัมพันธ์กับข้อมูลที่ได้จริงจากการทดลองแสดงอยู่ในภาคผนวก ง.)

ค่าอัตราการตายจำเพาะที่ได้เคยมีการนำมาใช้ ได้มีการนำมาจากจากผลงานการวิจัยของ Benefield et.al และจากการศึกษาของ Grady & Roper (อ้างถึงใน มณฑล, 2535) โดย Grady & Roper เสนอว่าค่าของ γ ควรมีค่าน้อยกว่า 0.005 ชม^{-1} ส่วน Benefield และคณะสรุปว่าค่าของ γ สำหรับน้ำเสียจากบ้านเรือนมีค่าประมาณ 0.003 ชม^{-1}



รูปที่ 3.5 วิธีการประเมินหาค่า μ_m และค่า K_s (ธีระ เกรอด, 2535)

3.5 การศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำค่าพารามิเตอร์จลน์ชุดเดียวกันกับที่หาได้จากแบบทดลองที่มีถังเติมอากาศใบเดียวมาใช้ในการศึกษาแบบจำลองของระบบแบบที่มีถังเติมอากาศหลายใบ

ในปัจจุบันแนวทางในการพิจารณาเพื่อออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียหนึ่งนั้น สามารถที่จะเลือกสร้างเป็นหน่วยปฏิบัติการเดียวที่มีขนาดใหญ่เลย (Single Stage) หรือเป็นแบบที่มีหน่วยปฏิบัติการย่อยหลายๆหน่วยประกอบกัน (Multi-Stage in Series) ก็ได้ และในกระบวนการตะกอนเร่งแบบที่มีถังเติมอากาศหลายใบก็เป็นการประยุกต์ หรือพัฒนาขึ้นจากระบบแบบเดิมที่มีถังเติมอากาศใบเดียว ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอาหารในงานน้ำเสียประเภทที่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูง หรือเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดปัญหาการจมตัวไม่ลงของตะกอน ที่มักพบได้เสมอในระบบแบบที่มีถังเติมอากาศเพียงใบเดียว (อาวูธ,2534) และในการออกแบบระบบแบบดังกล่าวหากมีการเตรียมการด้านการจัดวางลักษณะของท่อเพื่อป้อนน้ำเสียและเวียนตะกอนกลับ ให้สามารถรองรับการปรับเปลี่ยนได้แล้ว จะเป็นการทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นมากขึ้นสามารถเปลี่ยนลักษณะการดำเนินการของระบบได้เป็นหลายๆลักษณะอีกด้วย

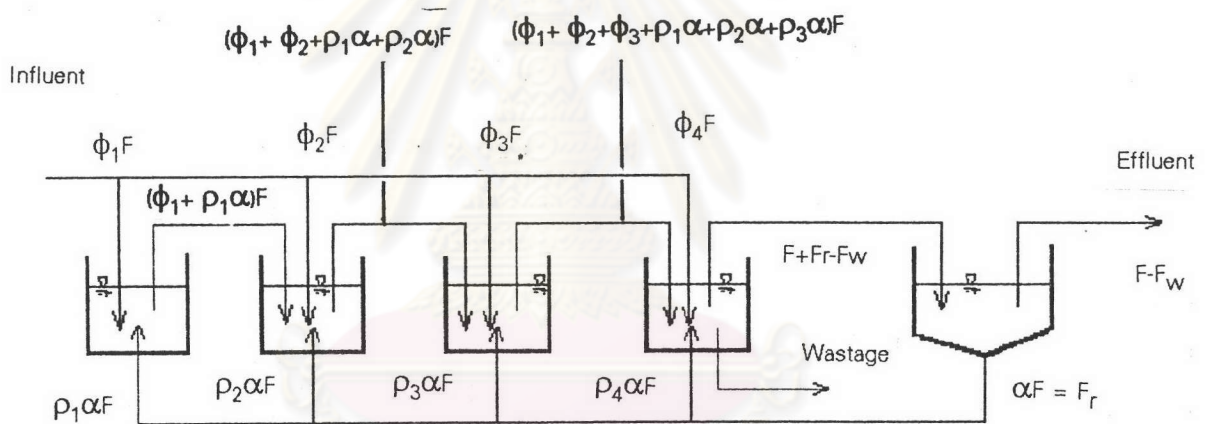
ในระบบที่มีถังเติมอากาศหลายใบนั้น จะมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีในแต่ละถังไม่เหมือนกัน ดังนั้น จลนพลศาสตร์ของแต่ละถังก็จะมีแตกต่างกันไปด้วย และในปัจจุบันยังไม่สามารถที่จะกำหนดหลักการของวิธีในการออกแบบเพื่อกำหนดขนาดของถังปฏิกิริยาแต่ละใบในระบบแบบที่มีถังเติมอากาศหลายใบได้อย่างชัดเจน โดยการใช้อย่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหมือนกับที่ใช้ในระบบแบบที่มีถังเติมอากาศใบเดียว และโดยเฉพาะในกระบวนการตะกอนเร่งด้วยแล้ว หากทำการพิจารณาโดยคิดแยกการเกิดปฏิกิริยาของถังแต่ละใบเมื่อรวมกับการเวียนตะกอนกลับด้วยแล้ว จะทำให้เกิดความยุ่งยากขึ้นในการศึกษาแบบจำลองและมักต้องใช้ความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์ขั้นสูงเพื่อช่วยในการคำนวณด้วยเสมอ ซึ่งนับได้ว่าเป็นข้อจำกัดของวิธีในการออกแบบระบบดังกล่าว ทำให้ไม่มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางเหมือนกับระบบแบบเดิม ดังนั้นจึงมักจะมีผู้พยายามเสนอแนวทางในการออกแบบอย่างง่ายที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนขึ้นเสมอ อาทิเช่น ผลงานของ Heckershoff&Wiesmann ,Moser และ Braha&Hafner เป็นต้น (อ้างถึงใน Braha&Hafner ,1985)

โดย Braha&Hafner (1985) ได้ทำการศึกษาจากผลงานของหลายๆท่าน เพื่อที่จะนำเสนอ แนวทางและวิธีการในการออกแบบระบบที่มีถึงปฏิกริยาหลายใบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนขึ้นใหม่ โดยมีแนวคิดและหลักการที่สำคัญว่า ในกลไกการกำจัดสารอาหารของระบบแบบดังกล่าว ยังคงสามารถใช้ความสัมพันธ์ตามที่ Monod ได้เสนอไว้ได้ โดยจะมีความเหมาะสมและสามารถใช้อธิบายได้อย่างมีเหตุผลมากกว่าความสัมพันธ์ในรูปแบบอื่น ส่วนค่าพารามิเตอร์จลน์ที่เกี่ยวข้องและต้องใช้ในการคำนวณ ก็ย่อมจะต้องมีความแตกต่างกันไปในตั้งแต่ละใบด้วย แต่เนื่องจากเพื่อต้องการลดความยุ่งยากในการคำนวณและออกแบบ จึงมักต้องสมมติให้ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีค่าคงที่ตลอดและมีค่าเท่ากันในทุกๆถัง จากการสมมติดังกล่าวย่อมจะต้องทำให้เกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างค่าที่คำนวณได้หรือค่าที่ออกแบบไว้ กับค่าที่จะเกิดขึ้นในโรงบำบัดจริงเสมอ แต่จนถึงในทุกวันนี้ก็ยังไม่มียังข้อมูลดังกล่าวมากพอที่จะสรุปถึงความถูกต้องหรือความเป็นไปได้ของแนวทางดังที่เขากล่าว ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ระบบแบบที่มีถึงปฏิกริยาหลายใบยังอยู่ในวงจำกัด ไม่ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเหมือนกับระบบที่มีถึงปฏิกริยาใบเดียว

มณฑล (2535) ได้ทำการวิจัยถึงการนำค่าพารามิเตอร์จลน์จากระบบที่มีถึงปฏิกริยาใบเดียวไปใช้เป็นค่าพารามิเตอร์จลน์ของถังทุกใบในระบบแบบที่มีถึงปฏิกริยาหลายใบ สำหรับการบำบัดโดยระบบบ่อเติมอากาศ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทำนายจากแบบจำลองกับค่าที่เกิดขึ้นจริงจากการทดลองเดินระบบที่ภายใต้สภาวะเดียวกันทุกประการ และได้สรุปว่ามีความเป็นไปได้ในการที่จะใช้ค่าพารามิเตอร์ร่วมกันสำหรับการออกแบบระบบบ่อเติมอากาศทั้ง 2 ลักษณะ

ดังนั้นการที่จะใช้ค่าพารามิเตอร์จลน์ชุดเดียวกันทั้งหมดในการออกแบบกระบวนการตะกอนเร่งแบบที่มีถึงเติมอากาศหลายใบ จึงควรจะต้องมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ด้วยเช่นกัน โดยการตรวจสอบถึงผลแตกต่างที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่าง ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางทฤษฎี กับค่าที่วัดได้จากการทดลองเดินระบบจริงที่ภายใต้สภาพแวดล้อม และการดำเนินการที่สภาวะเดียวกัน

การศึกษาระบบที่มีถังเติมอากาศหลายใบต่อกันแบบอนุกรมในทางทฤษฎีนั้น สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลอง และโดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว คือ การเขียนสมดุลย์มวลของสารอาหาร เซลล์ที่มีชีวิต และเซลล์ที่ตาย ในถังเติมอากาศแต่ละใบและถึงตกตะกอน โดยแบบจำลองของระบบที่มีถังเติมอากาศหลายใบที่ใช้ในการศึกษา จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นรูปนัยทั่วไปของระบบที่มี 4 ถัง และใช้กันทั่วไปในทางปฏิบัติ โดยการป้อนอาจเข้าถึงใดถังหนึ่งหรือทั้งหมด และการเวียนตะกอนกลับก็อาจเข้าถึงใดถังหนึ่งหรือทั้งหมดเช่นกัน ดังแสดงในรูป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ϕ_i = เศษส่วนการป้อนน้ำเสียเข้าถังใด ๆ ซึ่งรวมกันแล้วเท่ากับ 1

ρ_i = เศษส่วนการเวียนตะกอนกลับเข้าถังใด ๆ ซึ่งรวมกันแล้วเท่ากับ 1

รูปที่ 3.6 แบบจำลองของระบบตะกอนเร่งที่มีถังเติมอากาศหลายใบ (ธีระ เกรอต, 2535)

3.5.1 สมการที่ได้จากแบบจำลอง

โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกัน ในการทำสมดุลย์มวลของสารต่างๆ ทำให้สามารถเขียนสมการของระบบแบบที่มีถึงเต็มอากาศ 4 ใบ ที่แสดงในรูปที่ 3.6 ได้ดังต่อไปนี้

ก) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของสารอาหารที่สถานะคงที่

$$\text{ถังที่ 1: } \phi_1.F.S_0 + p_1\alpha.F.S_4 - (\phi_1+p_1\alpha).F.S_1 - [\mu_m.S_1/(K_s+S_1)](X_{V1}/Y_g).V_1 = 0 \dots\dots\dots (3-36)$$

$$\begin{aligned} \text{ถังที่ 2: } & \phi_2.F.S_0 + p_2\alpha.F.S_4 + (\phi_1+p_1\alpha).F.S_1 - [\phi_1+\phi_2+(p_1+p_2).\alpha].F.S_2 \\ & - [\mu_m.S_2/(K_s+S_2)].(X_{V2}/Y_g).V_2 = 0 \dots\dots\dots (3-37) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ถังที่ 3: } & \phi_3.F.S_0 + p_3\alpha.F.S_4 + [\phi_1+\phi_2+(p_1+p_2).\alpha].F.S_2 \\ & - [\phi_1+\phi_2+\phi_3+(p_1+p_2+p_3).\alpha].F.S_3 - [\mu_m.S_3/(K_s+S_3)].(X_{V3}/Y_g).V_3 = 0 \dots\dots\dots (3-38) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ถังที่ 4: } & \phi_4.F.S_0 + p_4\alpha.F.S_4 + [\phi_1+\phi_2+\phi_3+(p_1+p_2+p_3).\alpha].F.S_3 \\ & - (1+\alpha).F.S_4 - [\mu_m.S_4/(K_s+S_4)].(X_{V4}/Y_g).V_4 = 0 \dots\dots\dots (3-39) \end{aligned}$$

ข) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของเซลล์ที่มีชีวิตที่สถานะคงที่

$$\text{ถังที่ 1: } p_1\alpha.F.X_{Vr} - (\phi_1+p_1\alpha).F.X_{V1} + [\mu_m.S_1/(K_s+S_1)]X_{V1}.V_1 - \gamma X_{V1}.V_1 - bX_{V1}.V_1 = 0 \dots\dots\dots (3-40)$$

$$\begin{aligned} \text{ถังที่ 2: } & p_2\alpha.F.X_{Vr} + (\phi_1+p_1\alpha).F.X_{V1} - [\phi_1+\phi_2+(p_1+p_2).\alpha].F.X_{V2} \\ & + [\mu_m.S_2/(K_s+S_2)].X_{V2}.V_2 - \gamma X_{V2}.V_2 - bX_{V2}.V_2 = 0 \dots\dots\dots (3-41) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ถังที่ 3: } & p_3\alpha.F.X_{Vr} + [\phi_1+\phi_2+(p_1+p_2).\alpha].F.X_{V2} - [\phi_1+\phi_2+\phi_3+(p_1+p_2+p_3).\alpha].F.X_{V3} \\ & + [\mu_m.S_3/(K_s+S_3)].X_{V3}.V_3 - \gamma X_{V3}.V_3 - bX_{V3}.V_3 = 0 \dots\dots\dots (3-42) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ถังที่ 4: } & p_4\alpha.F.X_{Vr} + [\phi_1+\phi_2+\phi_3+(p_1+p_2+p_3).\alpha].F.X_{V3} - (1+\alpha).F.X_{V4} \\ & + [\mu_m.S_4/(K_s+S_4)].X_{V4}.V_4 - \gamma X_{V4}.V_4 - bX_{V4}.V_4 = 0 \dots\dots\dots (3-43) \end{aligned}$$

$$\text{ถึงตกตะกอน : } (1+\alpha-w).F.X_{v4} - \alpha F.X_{vr} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-44)$$

ค) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของเซลล์ที่ตายที่สถานะคงที่

$$\text{ถึงที่ 1: } \rho_1 \alpha.F.X_{dr} - (\phi_1 + \rho_1 \alpha).F.X_{d1} + \gamma X_{v1}.V_1 - b.X_{d1}.V_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-45)$$

$$\begin{aligned} \text{ถึงที่ 2: } & \rho_2 \alpha.F.X_{dr} + (\phi_1 + \rho_1 \alpha).F.X_{d1} - [\phi_1 + \phi_2 + (\rho_1 + \rho_2). \alpha].F.X_{d2} \\ & + \gamma X_{v2}.V_2 - b.X_{d2}.V_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-46) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ถึงที่ 3: } & \rho_3 \alpha.F.X_{dr} + [\phi_1 + \phi_2 + (\rho_1 + \rho_2). \alpha].F.X_{d2} - [\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3). \alpha].F.X_{d3} \\ & + \gamma X_{v3}.V_3 - b.X_{d3}.V_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-47) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ถึงที่ 4: } & \rho_4 \alpha.F.X_{dr} + [\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3). \alpha].F.X_{d3} - (1+\alpha).F.X_{d4} \\ & + \gamma X_{v4}.V_4 - b.X_{d4}.V_4 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-48) \end{aligned}$$

$$\text{ถึงตกตะกอน : } (1+\alpha-w).F.X_{d4} - \alpha.F.X_{dr} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-49)$$

ง) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของอนุภาคเชื้อยที่สถานะคงที่

$$\text{ถึงที่ 1: } \phi_1 F.Z_0 + \rho_1 \alpha.F.Z_{ir} - (\phi_1 + \rho_1 \alpha).F.Z_{i1} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-50)$$

$$\begin{aligned} \text{ถึงที่ 2: } & \phi_2 F.Z_0 + \rho_2 \alpha.F.Z_{ir} + (\phi_1 + \rho_1 \alpha).F.Z_{i1} \\ & - [\phi_1 + \phi_2 + (\rho_1 + \rho_2). \alpha].F.Z_{i2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-51) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ถึงที่ 3: } & \phi_3 F.Z_0 + \rho_3 \alpha.F.Z_{ir} + [\phi_1 + \phi_2 + (\rho_1 + \rho_2). \alpha].F.Z_{i2} \\ & - [\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3). \alpha].F.Z_{i3} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-52) \end{aligned}$$

$$\text{ถึงที่ 4: } \phi_4 F.Z_0 + \rho_4 \alpha.F.Z_{ir} + [\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3). \alpha].F.Z_{i3} - (1+\alpha).F.Z_{i4} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-53)$$

$$\text{ถึงตกตะกอน : } (1+\alpha-w).F.Z_{i4} - \alpha.F.Z_{ir} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-54)$$

3.5.2 การแก้สมการที่ได้จากแบบจำลอง

เนื่องจากการเวียนตะกอนกลับรอบอนุกรมทั้งหมด ทำให้ไม่สามารถหาสมการที่ชัดเจนเพื่ออธิบาย หรือทำนายการทำงานของระบบได้เช่นเดียวกับระบบที่มีถึงเต็มอากาศใบเดียวได้ โดยในสมการทั้งหมดจะมีตัวแปรอิสระที่สามารถออกแบบหรือกำหนดค่าขึ้นได้ คือ อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ (F), อัตราส่วนการเวียนตะกอนกลับ (α), ปริมาตรของถังเติมอากาศแต่ละใบ (V), อัตราส่วนการทิ้งน้ำตะกอนออกจากระบบ (w) เพื่อรักษาอายุตะกอนให้ได้ตามต้องการ และค่า ϕ_i กับค่า ρ_i ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดรูปแบบของการป้อนน้ำเสียและการเวียนตะกอนกลับ โดยมีค่าพารามิเตอร์จลน์ชุดเดียวกันเป็นค่าคงที่ในแต่ละสมการ ส่วนค่าตัวแปรตามได้แก่ ค่าความเข้มข้นของสารอาหารละลาย (S) และค่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (X โดยที่ $X=X_V+X_D+Z_i$) ในแต่ละถัง

การแก้สมการจะต้องทำพร้อมกันทั้งหมด โดยการป้อนค่าตัวแปรอิสระตามที่จะได้กำหนดไว้ในแผนการทดลอง และค่าพารามิเตอร์จลน์ที่หาได้จากการทดลองในชุดที่ 1 ลงในสมการทั้งหมด หลังจากนั้นจึงใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณสมการทั้งหมดพร้อมกัน ผลคำตอบของสมการที่ได้คือ ความเข้มข้นของสารอาหารละลาย และความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในแต่ละถัง ซึ่งจะถือว่าเป็นค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองทางทฤษฎี และจะใช้เป็นค่าสำหรับเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองเดินระบบจริงที่ภายใต้สภาวะเดียวกัน

3.6 แนวทางในการศึกษาของระบบที่มีถังเติมอากาศหลายใบ

ในระบบของอนุกรม 4 ถังที่น่าสนใจ และจะทำการศึกษาในครั้งนี้มีอยู่ 3 ลักษณะดังนี้คือ

- (1) ระบบอนุกรมอย่างง่ายที่มีการป้อนและการเวียนกลับทั้งหมดเข้าถังที่ 1
- (2) ระบบที่มีการป้อนกระจายสม่ำเสมอทั้ง 4 ถังและการเวียนกลับทั้งหมดเข้าถังที่ 1
- (3) ระบบที่มีการป้อนทั้งหมดเข้าถังที่ 3 และการเวียนกลับทั้งหมดเข้าถังที่ 1

ซึ่งการป้อนน้ำเสียและการเวียนตะกอนกลับที่แตกต่างกันทั้ง 3 ลักษณะจะทำให้เป็นการกำหนดค่า ϕ_i และ ρ_i ลงในสมการตามหัวข้อที่ 3.5.1 และจะทำให้ได้สมการสำหรับแต่ละระบบที่แตกต่างกันไป 3 ชุด ดังนี้

เมื่อทำการป้อนน้ำเสียและเวียนตะกอนกลับทั้งหมดลงสู่ถังเดิมอากาศใบที่ 1 (Plug Flow) จะเป็นการกำหนดค่า ϕ_i และ ρ_i ดังต่อไปนี้

$$\phi_1 = 1 \quad \phi_2 = 0 \quad \phi_3 = 0 \quad \phi_4 = 0 \quad \text{และ} \quad \rho_1 = 1 \quad \rho_2 = 0 \quad \rho_3 = 0 \quad \rho_4 = 0$$

ดังนั้นสมการตามหัวข้อที่ 3.5.1 สามารถจัดรูปได้ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (3-55) ถึง (3-73)

ก) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของสารอาหารที่สถานะคงที่

$$\text{ถังที่ 1: } F.S_0 + \alpha F.S_4 - (1+\alpha)F.S_1 - [\mu_m.S_1/(K_s+S_1)] \cdot (X_{v1}/Y_g).V_1 = 0 \dots\dots\dots (3-55)$$

$$\text{ถังที่ 2: } (1+\alpha)F.S_1 - (1+\alpha)F.S_2 - [\mu_m.S_2/(K_s+S_2)] \cdot (X_{v2}/Y_g).V_2 = 0 \dots\dots\dots (3-56)$$

$$\text{ถังที่ 3: } (1+\alpha)F.S_2 - (1+\alpha)F.S_3 - [\mu_m.S_3/(K_s+S_3)] \cdot (X_{v3}/Y_g).V_3 = 0 \dots\dots\dots (3-57)$$

$$\text{ถังที่ 4: } (1+\alpha)F.S_3 - (1+\alpha)F.S_4 - [\mu_m.S_4/(K_s+S_4)] \cdot (X_{v4}/Y_g).V_4 = 0 \dots\dots\dots (3-58)$$

ข) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของเซลล์ที่มีชีวิตที่สถานะคงที่

$$\text{ถังที่ 1: } \alpha F.X_{vr} - (1+\alpha)F.X_{v1} + [\mu_m.S_1/(K_s+S_1)]X_{v1}.V_1 - \gamma X_{v1}.V_1 - b.X_{v1}.V_1 = 0 \dots\dots\dots (3-59)$$

$$\text{ถังที่ 2: } (1+\alpha)F.X_{v1} - (1+\alpha)F.X_{v2} + [\mu_m.S_2/(K_s+S_2)]X_{v2}.V_2 - \gamma X_{v2}.V_2 - b.X_{v2}.V_2 = 0 \dots\dots\dots (3-60)$$

$$\text{ถังที่ 3: } (1+\alpha)F.X_{v2} - (1+\alpha)F.X_{v3} + [\mu_m.S_3/(K_s+S_3)]X_{v3}.V_3 - \gamma X_{v3}.V_3 - b.X_{v3}.V_3 = 0 \dots\dots\dots (3-61)$$

$$\text{ถังที่ 4: } (1+\alpha)F.X_{v3} - (1+\alpha)F.X_{v4} + [\mu_m.S_4/(K_s+S_4)]X_{v4}.V_4 - \gamma X_{v4}.V_4 - b.X_{v4}.V_4 = 0 \dots\dots\dots (3-62)$$

$$\text{ถังตกตะกอน: } (1+\alpha-w)F.X_{v4} - \alpha F.X_{vr} = 0 \dots\dots\dots (3-63)$$

ค) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของเซลล์ที่ตายที่สถานะคงที่

ถึงที่ 1: $\alpha F X_{dr} - (1 + \alpha) F X_{d1} + \gamma X_{v1} \cdot V_1 - b X_{d1} \cdot V_1 = 0$ (3-64)

ถึงที่ 2: $(1 + \alpha) F X_{d1} - (1 + \alpha) F X_{d2} + \gamma X_{v2} \cdot V_2 - b X_{d2} \cdot V_2 = 0$ (3-65)

ถึงที่ 3: $(1 + \alpha) F X_{d2} - (1 + \alpha) F X_{d3} + \gamma X_{v3} \cdot V_3 - b X_{d3} \cdot V_3 = 0$ (3-66)

ถึงที่ 4: $(1 + \alpha) F X_{d3} - (1 + \alpha) F X_{d4} + \gamma X_{v4} \cdot V_4 - b X_{d4} \cdot V_4 = 0$ (3-67)

ถึงตกตะกอน : $(1 + \alpha - w) F X_{d4} - \alpha F X_{dr} = 0$ (3-68)

ง) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของอนุภาคเฉื่อยที่สถานะคงที่

ถึงที่ 1: $F \cdot Z_o + \alpha \cdot F \cdot Z_r - (1 + \alpha) \cdot F \cdot Z_{i1} = 0$ (3-69)

ถึงที่ 2: $(1 + \alpha) \cdot F \cdot Z_{i1} - (1 + \alpha) \cdot F \cdot Z_{i2} = 0$ (3-70)

ถึงที่ 3: $(1 + \alpha) \cdot F \cdot Z_{i2} - (1 + \alpha) \cdot F \cdot Z_{i3} = 0$ (3-71)

ถึงที่ 4: $(1 + \alpha) \cdot F \cdot Z_{i3} - (1 + \alpha) \cdot F \cdot Z_{i4} = 0$ (3-72)

ถึงตกตะกอน : $(1 + \alpha - w) F \cdot Z_{i4} - \alpha F \cdot Z_r = 0$ (3-73)

เมื่อทำการป้อนน้ำเสียกระจายสม่ำเสมอทั้ง 4 ถัง และเวียนตะกอนกลับทั้งหมดเข้าสู่ถังเดิม อากาศใบที่ 1 (Step Feed) จะเป็นการกำหนดค่า ϕ_i และค่า ρ_i ดังต่อไปนี้

$\phi_1 = 0.25 \quad \phi_2 = 0.25 \quad \phi_3 = 0.25 \quad \phi_4 = 0.25$ และ $\rho_1 = 1 \quad \rho_2 = 0 \quad \rho_3 = 0 \quad \rho_4 = 0$

ดังนั้นสมการตามหัวข้อที่ 3.5.1 สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังแสดงในสมการที่ (3-74) ถึง (3-92)

ก) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของสารอาหารที่สถานะคงที่

ถึงที่ 1: $0.25 F \cdot S_o + \alpha F \cdot S_4 - (0.25 + \alpha) F \cdot S_1 - [\mu_m \cdot S_1 / (K_s + S_1)] (X_{v1} / Y_g) \cdot V_1 = 0$ (3-74)

ถึงที่ 2: $0.25 F \cdot S_o + (0.25 + \alpha) F \cdot S_1 - (0.50 + \alpha) F \cdot S_2 - [\mu_m \cdot S_2 / (K_s + S_2)] (X_{v2} / Y_g) \cdot V_2 = 0$ (3-75)

ถึงที่ 3: $0.25 F \cdot S_o + (0.50 + \alpha) F \cdot S_2 - (0.75 + \alpha) F \cdot S_3 - [\mu_m \cdot S_3 / (K_s + S_3)] (X_{v3} / Y_g) \cdot V_3 = 0$ (3-76)

ถึงที่ 4: $0.25 F \cdot S_o + (0.75 + \alpha) F \cdot S_3 - (1 + \alpha) F \cdot S_4 - [\mu_m \cdot S_4 / (K_s + S_4)] (X_{v4} / Y_g) \cdot V_4 = 0$ (3-77)

ข) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของเซลล์ที่มีชีวิตที่สถานะคงที่

$$\text{ถึงที่ 1: } \alpha F X_{vr} - (0.25 + \alpha) F X_{v1} + [\mu_m \cdot S_1 / (K_s + S_1)] X_{v1} \cdot V_1 - \gamma X_{v1} \cdot V_1 - b X_{v1} V_1 = 0 \dots (3-78)$$

$$\text{ถึงที่ 2: } (0.25 + \alpha) F X_{v1} - (0.5 + \alpha) F X_{v2} + [\mu_m \cdot S_2 / (K_s + S_2)] X_{v2} \cdot V_2 - \gamma X_{v2} \cdot V_2 - b X_{v2} V_2 = 0 \dots (3-79)$$

$$\text{ถึงที่ 3: } (0.5 + \alpha) F X_{v2} - (0.75 + \alpha) F X_{v3} + [\mu_m \cdot S_3 / (K_s + S_3)] X_{v3} \cdot V_3 - \gamma X_{v3} \cdot V_3 - b X_{v3} V_3 = 0 \dots (3-80)$$

$$\text{ถึงที่ 4: } (0.75 + \alpha) F X_{v3} - (1 + \alpha) F X_{v4} + [\mu_m \cdot S_4 / (K_s + S_4)] X_{v4} \cdot V_4 - \gamma X_{v4} \cdot V_4 - b X_{v4} V_4 = 0 \dots (3-81)$$

$$\text{ถึงตกตะกอน : } (1 + \alpha - w) F X_{v4} - \alpha F X_{vr} = 0 \dots (3-82)$$

ค) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของเซลล์ที่ตายที่สถานะคงที่

$$\text{ถึงที่ 1: } \alpha F X_{dr} - (0.25 + \alpha) F X_{d1} + \gamma X_{v1} \cdot V_1 - b X_{d1} \cdot V_1 = 0 \dots (3-83)$$

$$\text{ถึงที่ 2: } (0.25 + \alpha) F X_{d1} - (0.5 + \alpha) F X_{d2} + \gamma X_{v2} \cdot V_2 - b X_{d2} \cdot V_2 = 0 \dots (3-84)$$

$$\text{ถึงที่ 3: } (0.5 + \alpha) F X_{d2} - (0.75 + \alpha) F X_{d3} + \gamma X_{v3} \cdot V_3 - b X_{d3} \cdot V_3 = 0 \dots (3-85)$$

$$\text{ถึงที่ 4: } (0.75 + \alpha) F X_{d3} - (1 + \alpha) F X_{d4} + \gamma X_{v4} \cdot V_4 - b X_{d4} \cdot V_4 = 0 \dots (3-86)$$

$$\text{ถึงตกตะกอน : } (1 + \alpha - w) F X_{d4} - \alpha F X_{dr} = 0 \dots (3-87)$$

ง) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของอนุภาคเฉื่อยที่สถานะคงที่

$$\text{ถึงที่ 1: } 0.25 \cdot F \cdot Z_{i0} + \alpha F \cdot Z_{ir} - (0.25 + \alpha) F \cdot Z_{i1} = 0 \dots (3-88)$$

$$\text{ถึงที่ 2: } 0.25 \cdot F \cdot Z_{i0} + (0.25 + \alpha) F \cdot Z_{i1} - (0.50 + \alpha) F \cdot Z_{i2} = 0 \dots (3-89)$$

$$\text{ถึงที่ 3: } 0.25 \cdot F \cdot Z_{i0} + (0.50 + \alpha) F \cdot Z_{i2} - (0.75 + \alpha) F \cdot Z_{i3} = 0 \dots (3-90)$$

$$\text{ถึงที่ 4: } 0.25 \cdot F \cdot Z_{i0} + (0.75 + \alpha) F \cdot Z_{i3} - (1 + \alpha) F \cdot Z_{i4} = 0 \dots (3-91)$$

$$\text{ถึงตกตะกอน : } (1 + \alpha - w) F \cdot Z_{i4} - \alpha F \cdot Z_{ir} = 0 \dots (3-92)$$

และเมื่อทำการป้อนน้ำเสียทั้งหมดลงสู่ถังเดิมอากาศใบที่ 3 และเวียนตะกอนกลับทั้งหมดเข้าสู่ถังเดิมอากาศใบที่ 1 (Contact-Stabilized) จะเป็นการกำหนดค่า ϕ_i และค่า ρ_i ดังต่อไปนี้

$$\phi_1 = 0 \quad \phi_2 = 0 \quad \phi_3 = 1 \quad \phi_4 = 0 \quad \text{และ} \quad \rho_1 = 1 \quad \rho_2 = 0 \quad \rho_3 = 0 \quad \rho_4 = 0$$

ดังนั้นสมการตามหัวข้อที่ 3.5.1 สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังแสดงในสมการที่ 3-93 ถึง 3-111

ก) สมการแสดงสมดุลของมวลของสารอาหารที่สถานะคงที่

$$\text{ถังที่ 1: } \alpha F.S_4 - \alpha F.S_1 - [\mu_m.S_1 / (K_s + S_1)] (X_{v1}/Y_g).V_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-93)$$

$$\text{ถังที่ 2: } \alpha F.S_1 - \alpha F.S_2 - [\mu_m.S_2 / (K_s + S_2)] (X_{v2}/Y_g).V_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-94)$$

$$\text{ถังที่ 3: } F.S_0 + \alpha F.S_2 - (1 + \alpha)F.S_3 - [\mu_m.S_3 / (K_s + S_3)] (X_{v3}/Y_g).V_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-95)$$

$$\text{ถังที่ 4: } (1 + \alpha)F.S_3 - (1 + \alpha)F.S_4 - [\mu_m.S_4 / (K_s + S_4)] (X_{v4}/Y_g).V_4 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-96)$$

ข) สมการแสดงสมดุลของมวลของเซลล์ที่มีชีวิตที่สถานะคงที่

$$\text{ถังที่ 1: } \alpha F.X_{vr} - \alpha F.X_{v1} + [\mu_m.S_1 / (K_s + S_1)] X_{v1}.V_1 - \gamma X_{v1}.V_1 - b.X_{v1}.V_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-97)$$

$$\text{ถังที่ 2: } \alpha F.X_{v1} - \alpha F.X_{v2} + [\mu_m.S_2 / (K_s + S_2)] X_{v2}.V_2 - \gamma X_{v2}.V_2 - b.X_{v2}.V_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-98)$$

$$\text{ถังที่ 3: } \alpha F.X_{v2} - (1 + \alpha)F.X_{v3} + [\mu_m.S_3 / (K_s + S_3)] X_{v3}.V_3 - \gamma X_{v3}.V_3 - b.X_{v3}.V_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-99)$$

$$\text{ถังที่ 4: } (1 + \alpha)F.X_{v3} - (1 + \alpha)F.X_{v4} + [\mu_m.S_4 / (K_s + S_4)] X_{v4}.V_4 - \gamma X_{v4}.V_4 - b.X_{v4}.V_4 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-100)$$

$$\text{ถังตกตะกอน: } (1 + \alpha-w)F.X_{v4} - \alpha F.X_{vr} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-101)$$

ค) สมการแสดงสมดุลของมวลของเซลล์ที่ตายที่สถานะคงที่

$$\text{ถังที่ 1: } \alpha F.X_{dr} - \alpha F.X_{d1} + \gamma X_{v1}.V_1 - b.X_{d1}.V_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-102)$$

$$\text{ถังที่ 2: } \alpha F.X_{d1} - \alpha F.X_{d2} + \gamma X_{v2}.V_2 - b.X_{d2}.V_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-103)$$

$$\text{ถังที่ 3: } \alpha F.X_{d2} - (1 + \alpha)F.X_{d3} + \gamma X_{v3}.V_3 - b.X_{d3}.V_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-104)$$

$$\text{ถังที่ 4: } (1 + \alpha)F.X_{d3} - (1 + \alpha)F.X_{d4} + \gamma X_{v4}.V_4 - b.X_{d4}.V_4 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-105)$$

$$\text{ถังตกตะกอน: } (1 + \alpha-w)F.X_{d4} - \alpha F.X_{dr} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-106)$$

ง) สมการแสดงสมดุลย์ของมวลของอนุภาคเฉื่อยที่สถานะคงที่

$$\text{ถึงที่ 1: } \alpha F \cdot Z_{ir} - \alpha F \cdot Z_{i1} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-107)$$

$$\text{ถึงที่ 2: } \alpha F \cdot Z_{i1} - \alpha F \cdot Z_{i2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-108)$$

$$\text{ถึงที่ 3: } F \cdot Z_{i0} + \alpha F \cdot Z_{i2} - (1+\alpha)F \cdot Z_{i3} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-109)$$

$$\text{ถึงที่ 4: } (1+\alpha)F \cdot Z_{i3} - (1+\alpha)F \cdot Z_{i4} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-110)$$

$$\text{ถึงตกตะกอน : } (1+\alpha-w)F \cdot Z_{i4} - \alpha F \cdot Z_{ir} = 0 \quad \dots\dots\dots (3-111)$$

ดังนั้นในการทดลองเพื่อที่จะนำผลจากการทดลองเดินระบบจริงไปใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองทางทฤษฎี ก็จะทำให้กระทำโดยใช้แบบทดลองของระบบที่มีถึงเต็มอากาศ 4 ใบต่อกันแบบอนุกรม มาทำการทดลองเดินระบบ 3 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งจะจัดลักษณะการป้อนน้ำเสียและการเวียนตะกอนกลับให้แตกต่างกัน 3 ลักษณะตามที่ได้กล่าวมา และควบคุมให้ตัวแปรอิสระอื่นๆ มีค่าเท่ากับค่าที่ใช้ในการคำนวณหาผลคำตอบของสมการตลอดการทดลองทั้ง 3 ครั้ง

เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงที่แล้ว จึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำและนำไปวิเคราะห์เป็นข้อมูลเพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองทางทฤษฎี โดยข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์หา คือ ความเข้มข้นของสารอาหารละลายในรูปของซีโอดี และความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในถังเต็มอากาศแต่ละถัง ในรูปเดียวกันกับค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางทฤษฎีนั่นเอง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย