

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ชีวเคมีแบบไร้อากาศสำหรับผลิต
แก๊สชีวภาพ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ ได้รับการพัฒนาเพื่ออธิบาย
พฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์แบบไร้อากาศ ดังภาพที่ 1.2 ซึ่งมีลักษณะดังนี้

1. เป็นเครื่องปฏิกรณ์เดี่ยว ที่มีปริมาตรคงที่
2. ระบบการกวนเป็นแบบนำแก๊สที่ผลิตได้จากระบบไหลเวียนกลับเข้าได้เครื่อง
ปฏิกรณ์เพื่อช่วยกวนผสม (ดังรูปที่ 1.1) โดยมีสมมติฐานว่าการกวนผสมใน
เครื่องปฏิกรณ์เข้าใกล้การกวนผสมที่สมบูรณ์ พิจารณาได้จากผลการทดลอง
ในตารางที่ ก.8 ซึ่งแสดงผลการทดลองค่าความเข้มข้นของตัวแปรต่างๆ ณ
ตำแหน่งที่ระดับน้ำสูงจากกันถึง 0.5, 1.5 และ 2.5 ตามลำดับมีค่าใกล้เคียงกัน
3. เครื่องปฏิกรณ์ทำงานแบบต่อเนื่อง อัตราการไหลคงที่ (Continuous and
steady flow)
4. ติดตั้งใบกวาดตะกอนบริเวณพื้นของเครื่องปฏิกรณ์

จุดประสงค์หลักของการพัฒนาเพื่อใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของตัวชี้การ
ควบคุมการทำงานของระบบการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางชีวเคมี โดยแบ่ง
การศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนเริ่มดำเนินการ หรือ ขั้นตอนการเลี้ยงเชื้อ
และ ขั้นตอนการดำเนินการปกติ เมื่อได้รับอิทธิพลจากการปรับเปลี่ยนอัตราการไหล
ในหม้อตัวชี้ที่ได้ผลคือ ความเข้มข้นของกรดโวลลาไทล์ สภาพต่างใบคาร์บอนเนต pH และ
อัตราการผลิตมีเทน ในงานวิจัยนี้แบบจำลองมุ่งพัฒนาเพื่อทำนายค่าความเข้มข้นของ
สารอาหาร ความเข้มข้นของกรดโวลลาไทล์ และปริมาณแก๊สที่ได้ เพื่อเปรียบเทียบค่ากับ
ผลการทดลองในระบบจริง โดยอาศัยพื้นฐานสมการทางจลนพลศาสตร์ของ Monod
(6) และ สมการสมดุลมวลของ Andrews (13) และ Dunn (14)

Andrews (13) ได้พัฒนาสมการโดยเขียนความสัมพันธ์ ของสารอาหาร มวลจุลชีพสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ ระบบการไหลต่อเนื่อง (continuous flow) และ การกวน สมบูรณ์ (completely mixed) แสดงดังนี้

$$\text{อัตราการเจริญเติบโต} \quad \frac{dX}{dt} = \mu X \quad (3.1)$$

$$\text{Monod Function} \quad \mu = \mu_m \left[\frac{S}{K_s + S} \right] \quad (3.2)$$

$$\text{ยิลด์ (Yield)} \quad \frac{dX}{dt} = -Y \frac{dS}{dt} \quad (3.3)$$

สมการดุลมวลของจุลชีพในเครื่องปฏิกรณ์

$$\begin{aligned} \text{อัตราการสะสมมวล} &= \text{อัตราเข้าทั้งหมด} - \text{อัตราออกทั้งหมด} \\ &+ \text{อัตราการผลิตขึ้นมาใหม่} \end{aligned}$$

$$\frac{dX_e}{dt} = \frac{F}{V} X_i - \frac{F}{V} X_e + \mu X_e \quad (3.4)$$

สมการดุลมวลของสารอาหาร

$$\frac{dS_e}{dt} = \frac{F}{V} S_i - \frac{F}{V} S_e - \frac{\mu}{Y} X_e \quad (3.5)$$

กำหนดให้

- X = ความเข้มข้นของแบคทีเรีย , ก./ลบ.ม.
- S = ความเข้มข้นของสารอาหาร , ก./ลบ.ม.
- F = อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเครื่องปฏิกรณ์ , ลบ.ม./วัน
- V = ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ , ลูกบาศก์เมตร

- Y = ยิลด์ (Growth Yield) , กรัม เซลล์ที่เกิด/กรัมอาหารที่หายไป
- μ = ตัวคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ
(specific growth rate constant) , วัน⁻¹
- μ_m = ตัวคงที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด
(maximum specific growth rate) , วัน⁻¹
- S = ความเข้มข้นของสารอาหารจำกัดการเจริญเติบโต (Growth limiting substrate), กรัม/ลูกบาศก์เมตร
- i = กระแสเข้า (influent)
- e = กระแสออก (effluent)

Dunn (14) ได้การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ชีวเคมีแบบไร้อากาศ ซึ่งดำเนินการแบบต่อเนื่อง โดยพิจารณาย่อยลงไปตามปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้น คือ ปฏิกิริยาผลิตกรดโวลไทต์ และปฏิกิริยาผลิตแก๊สมีเทน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เป็นขั้นตอนของปฏิกิริยาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Dunn

ตารางที่ 3.1 Stoichiometry of Anaerobic Reactions

Step 1	Hydrolysis (Example : Carbohydrate – hexoses) $(C_6H_{12}O_6)_n + nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$
Step 2	Acid production (Example glucose) $(C_6H_{12}O_6)_n \rightarrow CH_3(CH_2)_2COOH + 2H_2 + 2CO_2$ $(C_6H_{12}O_6)_n + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$ $(C_6H_{12}O_6)_n + 2H_2O \rightarrow 2CH_2COOH + 4H_2 + 2CO_2$
Step 3	Acetic acid production $CH_3(CH_2)_2COOH \rightarrow 2H_2O + 2CH_3COOH + 2H_2$ $CH_3(CH_2)_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$
Step 4	Methane production $CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$ $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$

น้ำทิ้งจากโรงงานซึ่งเป็นสารอาหารเริ่มต้นถูกย่อยโดยจุลชีพผลิตกรดได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดเวลาไหลหลัก 3 ชนิด คือ กรดบิวทีริก กรดไพโรพิโอนิท และกรดอะซิติก ต่อไปเป็นและกรดเวลาไหลแต่ละชนิด ถูกกลุ่มจุลชีพผลิตมีเทนย่อยต่อไปเป็นแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์

สมการดุลมวลของสารอาหาร

อัตราการสะสมมวล = อัตราเข้าทั้งหมด - อัตราออกทั้งหมด + อัตราการผลิตขึ้นมาใหม่

สารอาหารเริ่มต้น (Carbohydrate – hexoses) เป็นดังสมการ 3.5

$$\frac{dS_e}{dt} = \frac{F}{V} S_i - \frac{F}{V} S_e - \frac{\mu}{Y} X_e \quad (3.5)$$

สารอาหาร (กรดบิวทีริก , Bu)

$$\frac{dBu_e}{dt} = \frac{F}{V} Bu_i - \frac{F}{V} Bu_e + Pro(Bu) * F(Bu) - ConsBu \quad (3.6)$$

สารอาหาร (กรดไพโรพิโอนิท , Pr)

$$\frac{dPr_e}{dt} = \frac{F}{V} Pr_i - \frac{F}{V} Pr_e + Pro(Pr) * F(Pr) - ConsPr \quad (3.7)$$

สารอาหาร (กรดอะซิติก , Ac)

$$\frac{dAc_e}{dt} = \frac{F}{V} Ac_i - \frac{F}{V} Ac_e + Pro(Ac) * F(Ac1) + ConsPr * F(Ac2) + ConsBu * F(Ac3) - ConsAc \quad (3.8)$$

กำหนดให้

$F(\text{Bu})$, $F(\text{Pr})$, $F(\text{Ac1})$, $F(\text{Ac2})$, $F(\text{Ac2})$,

= Stoichiometry Coefficient ของ กรดบิวทิริก , กรดไพรฟิโอนิก และ กรดอะซิติก โดยกรดอะซิติกนอกจากเกิดจากสารอาหารเริ่มต้นแล้วยังสามารถเกิดจากกรดบิวทิริก และ กรดไพรฟิโอนิก อีกด้วย

Pro = การผลิต (Production)

ProBu , ProPr , ProAc = การผลิตกรดบิวทิริก , กรดไพรฟิโอนิก และ กรดอะซิติกตามลำดับ = μX ซึ่งค่า μ และ X ขึ้นกับสารอาหารแต่ละชนิด

Cons = การบริโภค (Consumption)

ConsBu , ConsPr , ConsAc = การบริโภคกรดบิวทิริก , กรดไพรฟิโอนิก และ กรดอะซิติกตามลำดับ = $\frac{\mu}{Y} X$ ซึ่งค่า μ , Y และ X ขึ้นกับสารอาหารแต่ละชนิด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนเริ่มดำเนินการหรือการเลี้ยงเชื้อ

สมมติฐาน

- กระแสเข้าของน้ำเสียมีเฉพาะสารอาหารละลายเป็นส่วนใหญ่ มีสารอาหารแข็งเล็กน้อยไม่มีผลกระทบต่อระบบกายเครื่องปฏิกรณ์
 - เป็นระบบดำเนินการแบบกะ (batch system)
 - มีการสลายตัวของจุลชีพเกิดขึ้น
- ขั้นตอนการผลิตกรด (Acid Producing, a)

พิจารณา สมการดุลมวลของสารอาหาร ภายในเครื่องปฏิกรณ์

อัตราการสะสมมวลสารอาหาร

$$= \text{อัตราเข้าทั้งหมดของสารอาหาร} - \text{อัตราออกทั้งหมดของสารอาหาร} \\ - \text{อัตราการใช้สารอาหาร}$$

แทนอัตราการใช้สารอาหารด้วยสมการ (2.5)

$$-r_s = (\mu/Y)X \quad (2.5)$$

$$\frac{VdS_e}{dt} = FS_i - FS_e - \frac{\mu_a}{Y_{(x/s)a}} X_{ae}V \quad (3.9)$$

ระบบการเลี้ยงเชื้อเป็นระบบแบบกะ ($F=0$) ดังนั้นพจน์ที่ 1 และ 2 ทางขวามือเป็นศูนย์ และนำ V มาหารทั้งสองข้างของสมการ (3.9)

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{dS_e}{dt} = -\frac{\mu_a}{Y_{(x/s)a}} X_{ae} \quad (3.10)$$

การแก้สมการ (3.10) หาค่า S_e จะทำให้ทราบว่า S_e เปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไร ซึ่งค่า S_e นี้จะเป็นตัวชี้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ ค่า S_e น้อยลงเพียงใด เท่ากับเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นในการบำบัดน้ำเสีย

สมการดุลมวลของจุลชีพ (a)

อัตราการสะสมมวลจุลชีพ = อัตราเข้าทั้งหมดของมวลจุลชีพ - อัตราออกทั้งหมดของมวลจุลชีพ
+ อัตราการเจริญเติบโต - อัตราการสลายตัว

แทนอัตราการเจริญเติบโตด้วยสมการ (2.3) และ อัตราการสลายตัวด้วยสมการ (2.9)

$$V \frac{dX_{ae}}{dt} = FX_{ai} - FX_{ae} + \mu_a X_{ae} V - b_a X_{ae} V \quad (3.11)$$

หารทั้งสองข้างของสมการ (3.11) ด้วย V และ เนื่องจากเป็นระบบแบบกะ ($F=0$) พจน์ที่ 1 และ 2 ทางขวามือเป็นศูนย์

ดังนั้น

$$\frac{dX_{ae}}{dt} = \mu_a X_{ae} - b_a X_{ae} \quad (3.12)$$

การแก้สมการ (3.12) จะทำให้ทราบเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ X_{ae} ที่ค่าเวลาใดๆ



- ขั้นตอนการผลิตแก๊สมีเทน (Methane Producing, me)

จุลชีพในขั้นตอนการผลิตมีเทนจะใช้กรดไขมันที่ผลิตได้ในขั้นตอนแรกเป็นอาหาร และผลิตแก๊สมีเทนออกมา

พิจารณา สมการดุลมวลของกรดไขมันไทล์ (Volatile Fatty Acid , VFA)

อัตราการสะสมของมวล VFA = อัตราเข้าทั้งหมดของมวล VFA - อัตราออกทั้งหมดของมวล VFA
+ อัตราการผลิต VFA - อัตราการใช้ VFA

$$V \frac{dVFA}{dt} = F * VFA_i - F * VFA_o + ProVFA_p * V - ConsVFA_c * V \quad (3.13)$$

หารทั้งสองข้างของสมการ (3.13) ด้วย V และ เนื่องจากเป็นระบบแบบกะ (F=0) พจน์ที่ 1 และ 2 ทางขวามือเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\frac{dVFA_c}{dt} = ProVFA_p - ConsVFA_c \quad (3.14)$$

กำหนดให้

$ProVFA = \frac{\mu_a}{Y_{(X/S)_a}} X_a * F(VFA)$ การผลิตกรดไขมันได้จากรสอาหารละลาย

$ConsVFA = \frac{\mu_{me}}{Y_{(X/S)_{me}}} X_{me}$ การใช้กรดไขมันไทล์เป็นสารอาหารของจุลชีพผลิตมีเทน

$F(VFA) =$ Stoichiometric coefficients หรือ $Y_{acetate/X}$

$$\mu_{me} = \frac{\mu_{mme} * VFA}{K_{sme} + VFA}$$

แทนค่า ProVFA และ ConsVFA ลงในสมการ (3.14) จะได้

$$\frac{dVFA_e}{dt} = \frac{\mu_a}{Y_{(X/S)_a}} X_a * F(VFA) - \frac{\mu_{me}}{Y_{(X/S)_{me}}} X_{me} \quad (3.15)$$

การแก้สมการ (3.15) จะทราบการเปลี่ยนแปลงค่า VFA_e ณ เวลาใดๆ

Buswell (14) ได้พบว่า กรดโวลเลไทด์ (VFA) ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะต้องไม่เกิน 2,000 – 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะจะมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลชีพผลิตแก๊สมีเทน การแทนที่อัตราการเจริญเติบโตด้วยสมการ Monod ไม่สามารถอธิบายได้ อย่างไรก็ตาม เหตุการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดย Inhibition Function ในสมการ (3.16)

$$\mu_{me} = \frac{\mu_{max} * VFA}{VFA + K_{sme} + \frac{VFA * VFA}{K_i}} \quad (3.16)$$

สมการดุลมวลจุลชีพ (me)

อัตราการสะสมมวลจุลชีพ = อัตราเข้าทั้งหมดของมวลจุลชีพ - อัตราออกทั้งหมดของมวลจุลชีพ
+ อัตราการเจริญเติบโต - อัตราการสลายตัว

$$\frac{dX_{me}}{dt} = \frac{F}{V} X_{mei} - \frac{F}{V} X_{mee} + \mu_{me} X_{me} - b_{me} X_{me} \quad (3.17)$$

หารทั้งสองข้างของสมการ (3.17) ด้วย V และ เนื่องจากเป็นระบบแบบกะ (F=0) พจน์ที่ 1 และ 2 ทางขวามือเป็นศูนย์

ดังนั้น

$$\frac{dX_{me}}{dt} = (\mu_{me} - b_{me}) * X_{me} \quad (3.18)$$

การแก๊สสมการ (3.18) สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ X_{me} ที่เวลาใดๆ ค่า X_{me} มีความสำคัญมากในการผลิตแก๊สมีเทน พิจารณาจากสมการ 3.19-3.20

ปริมาณแก๊สมีเทนที่ได้

$$CH_4 = I * V * Y_{CH_4/X} * X_{me} * \mu_{me} \quad (3.19)$$

ปริมาณแก๊สรวม

$$TGAS = CH_4 * 0.6^{(1)} \quad (3.20)$$

กำหนดให้

I = Conversion factor , 25.30 L gas/mole gas ที่ 35 องศาเซลเซียส (12)

TGAS = ปริมาณแก๊สรวม , ลิตร / วัน

⁽¹⁾ ได้จากการทดลองในระบบจริงดังตารางที่ ก.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนดำเนินการปกติ

สมมติฐาน

- ไม่มีตะกอนจุลชีพในกระแสเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ($X_{ai}, X_{mei}=0$)
- องค์ประกอบภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากับองค์ประกอบของกระแสเข้าออกจากเครื่องปฏิกรณ์

- ขั้นตอนการผลิตกรด (Acid Producing, a)

พิจารณา สมการดุลมวลของจุลชีพ (a)

อัตราการสะสมมวลจุลชีพ = อัตราเข้าทั้งหมดของมวลจุลชีพ - อัตราออกทั้งหมดของมวลจุลชีพ
+ อัตราการเจริญเติบโต - อัตราการสลายตัว

แทนอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการสลายตัวด้วยสมการ (2.3) และ (2.9) ตามลำดับ จะได้

$$V \frac{dX_{ae}}{dt} = FX_{ai} - FX_{ae} + \mu_a X_{ae} - b_a X_{ae} \quad (3.11)$$

จากสมมติฐาน ระบบการทำงานเสมือนเข้าสู่ภาวะคงตัว (Pseudo-Steady State) ดังนั้น

$$\frac{dX_{ae}}{dt} = 0, \quad X_{ia} = 0$$

จากสมการ (3.11)

$$0 = 0 - \frac{1}{\tau} X_{ae} + \mu_a X_{ae} - b_a X_{ae} \quad (3.21)$$

กำหนดให้ $\tau = RT = \frac{V}{F}$ เวลาที่เก็บน้ำเสีย, วัน

หารด้วย X_{sa} ทั้งสองด้านทั้งสองข้างของสมการ (3.21)

$$\mu_a = \frac{1}{\tau} + b_a \quad (3.22)$$

จากสมการของ Monod

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

แทนสมการ (2.7) ใน สมการ (3.22) เพื่อหาค่า S เป็นดังนี้

$$\frac{\mu_m S_e}{K_{sa} + S_e} = \frac{1}{\tau} + b_a$$

$$(\mu_m - \frac{1}{\tau} - b_a)S_e = (\frac{1}{\tau} + b_a)K_{sa}$$

$$S_e = \frac{(\frac{1}{\tau} + b_a)K_{sa}}{(\mu_m - \frac{1}{\tau} - b_a)} \quad (3.23)$$

จาก สมการ (3.23) เมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆ จะทราบค่า S_e ที่เวลากักเก็บน้ำเสียนั้นๆ ซึ่งเป็นค่าที่บอกความเข้มข้นของสารอาหารที่คงเหลือจากการย่อยสลายของจุลชีพ ค่า S_e ที่คำนวณมาได้จะมีประโยชน์หลายประการ เช่น ชี้ให้เห็นว่าจุลชีพผลิตกรดเวลาไหลมีความแข็งแรงและเจริญเติบโตมากน้อยเพียงใด ชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทน เป็นต้น

พิจารณา สมการดุลมวลของสารอาหาร

อัตราการสะสมมวลสารอาหาร

$$= \text{อัตราเข้าทั้งหมดของสารอาหาร} - \text{อัตราออกทั้งหมดของสารอาหาร} \\ - \text{อัตราการใช้สารอาหาร}$$

แทนอัตราการใช้สารอาหารด้วยสมการ (2.5)

$$V \frac{dS_e}{dt} = FS_i - FS_e - \frac{\mu_a}{Y_{(x/s)_a}} X_{ae} V \quad (3.9)$$

จากสมมติฐาน ระบบการทำงานเสมือนเข้าสู่ภาวะคงตัว (Pseudo-Steady State)

ดังนั้น

$$\frac{dS_e}{dt} = 0$$

และหาร F ทั้งสองข้างของสมการ (3.9) จะได้

$$0 = S_i - S_e - \frac{V}{F} \frac{\mu_a}{Y_{(x/s)_a}} X_{ae} \quad (3.24)$$

$$(S_i - S_e) = \tau * \frac{\mu_a}{Y_{(x/s)_a}} X_{ae} \quad (3.25)$$

จากสมการ (3.25) หาค่า X_{ae} และ แทนค่า μ_a จาก สมการ (3.22) จะได้

$$X_{ae} = \frac{Y_{(x/s)_a}}{1 + \tau b_a} (S_i - S_e) \quad (3.26)$$

การแก้สมการหาค่า X_{ae} จากสมการ (3.26) ทำให้ทราบความเข้มข้นของจุลชีพผลิตภัณฑ์ ณ เวลาที่เก็บน้ำเสียนั้นๆ ซึ่งผลจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของกรดเวลาไหล

- ขั้นตอนการผลิตมีเทน (Methane Producing, me)

พิจารณา สมการดุลมวลจุลชีพ (me)

อัตราการสะสมมวลจุลชีพ = อัตราเข้าทั้งหมดของมวลจุลชีพ - อัตราออกทั้งหมดของมวลจุลชีพ
+ อัตราการเจริญเติบโต - อัตราการสลายตัว

$$V \frac{dX_{me}}{dt} = FX_{mei} - FX_{meo} + \mu_{me} X_{me} V - b_{me} X_{me} V \quad (3.17)$$

จากสมมติฐาน ระบบการทำงานเสมือนเข้าสู่ภาวะคงตัว (Pseudo Steady-State) ดังนั้น

$$\frac{dX_{me}}{dt} = 0, \quad X_{mei} = 0$$

จาก (3.17)
$$0 = 0 - X_{meo} + \mu_{me} X_{me} \frac{V}{F} - b_{me} X_{me} \frac{V}{F} \quad (3.27)$$

แทนค่า V/F ด้วย τ และหารด้วย X_{me} ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$0 = -1 + \mu_{me} \tau - b_{me} \tau \quad (3.28)$$

หารด้วย τ ทั้งสองข้างของสมการ

$$\mu_{me} = \frac{1}{\tau} + b_{me} \quad (3.29)$$

แทน μ_{me} จากสมการ (2.7) ลงในสมการ (3.28) โดยเปลี่ยน S เป็น VFA จะได้

$$\frac{\mu_{me} VFA}{K_{me} + VFA_{me}} = \frac{1}{\tau} + b_{me} \quad (3.30)$$

$$(\mu_{me} - \frac{1}{\tau} - b_{me})VFA = (\frac{1}{\tau} + b_{me})K_{me}$$

$$VFA = \frac{(1 + b_{me}\tau)K_{me}}{(\mu_{me}\tau - 1 - b_{me}\tau)} \quad (3.31)$$

เมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆ ลงในสมการ (3.30) ทำให้ทราบความเข้มข้นของกรดโวลลาไทล์ (VFA) ณ เวลาที่เก็บน้ำเสียนั้น ความเข้มข้นของกรดโวลลาไทล์ค่อนข้างมีอิทธิพลเด่นชัดในการควบคุมเสถียรภาพของระบบ และสามารถให้สัญญาณว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพดีหรือไม่

พิจารณา สมการดุลมวลของกรดโวลลาไทล์

อัตราการสะสมของมวล VFA = อัตราเข้าทั้งหมดของมวล VFA - อัตราออกทั้งหมดของมวล VFA
+ อัตราการผลิต VFA - อัตราการใช้ VFA

$$V \frac{dVFA}{dt} = FVFA_i - FVFA_e + ProVFA_p V - ConsVFA_c V \quad (3.13)$$

จากสมมติฐาน ระบบการทำงานเสมือนเข้าสู่ภาวะคงตัว (Pseudo Steady-State)

$\frac{dVFA}{dt} = 0$ และ หาร F ทั้งสองข้างของสมการ (3.13)

$$0 = VFA_i - VFA_e + ProVFA_p \frac{V}{F} - ConsVFA_c \frac{V}{F} \quad (3.32)$$

แทนค่า V/F ด้วย τ จะได้

$$0 = VFA_i - VFA_e + ProVFA_p \tau - ConsVFA_c \tau \quad (3.33)$$

แทนค่า ProVFA และ ConsVFA

$$0 = VFA_i - VFA_e + \frac{\mu_a}{Y_{(X/S)_a}} X_a \tau * F(VFA) - \frac{\mu_{me}}{Y_{(X/S)_{me}}} X_{me} \tau \quad (3.34)$$

$$X_{me} = \frac{Y_{(X/S)_{me}}}{\mu_{me}} \left[\frac{1}{\tau} (VFA_i - VFA_e) + \frac{\mu_a}{Y_{(X/S)_a}} X_a * F(VFA) \right] \quad (3.35)$$

การแก้สมการหาค่า X_{me} ทำให้ทราบความเข้มข้นของจุลชีพผลิตมีเทน ณ เวลาที่เก็บน้ำเสียนั้นๆ

การหาปริมาณแก๊สมีเทนและปริมาณแก๊สรวม เหมือนสมการ (3.19) และ (3.20)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย