

วารสารปริทรรศน์



2.1 การหมักในสภาวะที่เป็นของแข็ง (solid state fermentation)

การหมักวัสดุทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นอาหาร หรือการหมักวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร และอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้เป็นปุ๋ยอินทรีย์เป็นการหมักในสภาพที่เป็นของแข็งที่มีมานานแล้ว และเป็น การหมักโดยที่ เกิดขึ้น โดยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติ (normal flora) ปัจจุบันกำลังมีการพัฒนาโดยนำวิทยาการใหม่ ๆ มาใช้เพื่อให้ได้ผลดีขึ้น

Nagai (10) ได้กล่าวถึงรูปแบบต่าง ๆ ในการเพาะเลี้ยงในสภาพของแข็ง (solid state cultivation) โดยมีทั้งแบบที่อยู่นิ่ง (static) และมีการเคลื่อนที่ (dynamic) รวมทั้งการให้อากาศ และไม่มีการให้อากาศ พร้อมทั้งยกตัวอย่างและปัญหาในการทดลองด้วย

แบบที่ 1 การเพาะเลี้ยงในสภาพของแข็งอยู่นิ่ง และไม่มีการให้อากาศ (static cultivation without aeration)

ตัวอย่างของการทดลองคือ การทำ wheat tempeh ใน Petri dish โดยการเพาะเลี้ยง Rhizopus oligosporus บนเมล็ดข้าวสาลี (wheat) ที่ขึ้น (14) ปัญหาคือ ไม่สามารถควบคุมความชื้นในระหว่างการทดลองได้

แบบที่ 2 การเพาะเลี้ยงในสภาพที่ของแข็งอยู่นิ่ง และมีการให้อากาศ (static cultivation with force aeration)

ตัวอย่างของการทดลองคือ การผลิต โคจิ (koji) สำหรับทำเหล้าสาเก (Sake brewing) โดยใช้เครื่องอัตโนมัติ (10) ปัญหาที่ก็คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากขบวนการทางชีวเคมี ทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมได้ตลอดเวลา

แบบที่ 3 การเพาะเลี้ยงในสภาพที่ของแข็งมีการเคลื่อนที่โดยไม่มีการให้อากาศ (dynamic cultivation without aeration)

ตัวอย่างของการทดลองคือ การทดลองของ Lindenfelser และ Ciegler (9) ได้ทำเครื่องหมักเป็นถังเล็ก ๆ มี buffer อยู่ด้วย หมุนด้วยความเร็ว 0-10 รอบต่อนาที ไม่มีการให้อากาศ (แต่ให้อากาศที่อยู่ในเครื่อง) ใช้ในการผลิต mycotxin ซึ่งวิธีนี้ช่วยให้การถ่ายเทความร้อนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี และช่วยให้การถ่ายเทออกซิเจนสำหรับการเจริญเติบโตได้ด้วย แต่จะมีความชื้นเพิ่มขึ้นและทำให้ปริมาณของอาหารเลี้ยงเชื้อ (substrate) เพิ่มขึ้นด้วย

แบบที่ 4 การเพาะเลี้ยงในสภาพที่ของแข็งมีการเคลื่อนที่โดยมีการให้อากาศด้วย (dynamic cultivation with force aeration)

ตัวอย่างการทดลองคือ การผลิต Macerating enzymes โดยใช้จุลินทรีย์ *Aspergillus niger* เพาะเลี้ยงบนข้าวสาลี (wheat) (11) โดยใช้เครื่องหมักแบบถัง (drum fermenter) ที่หมุนได้ 50 รอบต่อนาที และมีการให้อากาศ 8.8 ลิตรต่อนาที การทดลองศึกษาผลของความชื้นเริ่มต้นที่มีต่อการเจริญของจุลินทรีย์ และเอนไซม์ที่ได้ รวมทั้งปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไปด้วย พบว่าความชื้นเริ่มต้น 52% ให้ผลผลิตที่ดีที่สุด และยังพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีความสัมพันธ์กับปริมาณการใช้ออกซิเจนด้วย

ในการเพาะเลี้ยงในสภาพของแข็งทุกแบบ สิ่งที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ คือ ขนาด และ รูปร่าง ของอาหารเลี้ยงเชื้อ ในตอนเริ่มต้น ปริมาณของอาหารเลี้ยงเชื้อ (substrate) ในเครื่องหมัก ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นของอากาศ อุณหภูมิ ความดันย่อยของกาซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ความเร็วในการกวน อัตราการให้อากาศ ปริมาณของจุลินทรีย์ที่ใส่ และอื่น ๆ อีก สิ่งที่เกี่ยวข้องกับสถานะของ อาหารเลี้ยงเชื้อ คือ ความเร็วในการกวน อุณหภูมิ และความชื้นของอาหารเลี้ยงเชื้อ

Hesseltine (7) ได้กล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของการหมักในสภาวะที่เป็นของแข็ง เมื่อเทียบกับการหมักในสภาวะที่เป็นของเหลวแล้วคือ

ข้อดี

1. ควบคุมการทำงานของเครื่องมือได้ง่าย และสิ้นเปลืองน้อย

2. ใช้เนื้อที่น้อยเมื่อเทียบผลผลิตกันแล้ว เพราะมีน้ำน้อยกว่าความเข้มข้นของสาร จึงมาก ลักษณะของเครื่องมือไม่ซับซ้อน
 3. ใช้สปอร์ (spore) ได้โดยตรงในการหมัก
 4. ใช้ความชื้นต่ำสำหรับผลผลิตที่ได้จากรา (fungi) รวมทั้งไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการปนเปื้อน (contamination) ของแบคทีเรีย (bacteria)
 5. มีลักษณะที่เหมือนกับการเจริญในธรรมชาติของจุลินทรีย์
 6. การให้อากาศในการทดลองในห้องทดลองทำได้ง่าย เพราะเป็นของแข็ง มีช่องว่างมากพอ
 7. ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถแยกออกได้โดยเติมตัวทำละลายลงไปได้เลย และใช้สารละลายน้อยกว่า
 8. ผลผลิตที่ได้มีความเข้มข้นสูง จึงอาจทำให้แห้งได้ และอาจใช้เป็นอาหารสัตว์ได้
- ข้อเสีย
1. ถ้ามีการกวนอยู่ตลอดเวลา จะใช้พลังงานสูง
 2. ต้องการน้ำสะอาดในตอนแรกของการหมัก เพื่อไม่ให้มีการปนเปื้อน และต้องมีความระมัดระวังในการไถ่หน้าควย
 3. ต้องใช้สปอร์ (spore) ปริมาณมาก
 4. อาหารเลี้ยงเชื้อ (substrate) ต้องมีการสับหรือทำให้แตกก่อน
 5. มีบางกระบวนการไม่สามารถผลิตสิ่งที่ต้องการได้

Nagai (10) กล่าวถึงสิ่งที่เป็นอุปสรรคในการพัฒนาการหมักในสภาวะที่เป็นของแข็ง

ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ คือ การวิเคราะห์คุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และชีววะ ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงทำได้ยาก แต่จากการศึกษาของเขาพบว่า การศึกษาปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจน และการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้จะช่วยบอกผลของการเปลี่ยนแปลงบางอย่างได้ เช่น อัตราการเจริญเติบโตของเชื้อ อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ อัตราการเกิดความร้อน ซึ่งสามารถแสดงอยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ :

$$\frac{dx}{dt} = a \frac{dO_2}{dt} - b \quad (2.1-1)$$

$$a, b = \text{ค่าคงที่}$$

อัตราการเกิดความร้อน :

$$\frac{dH_c}{dt} = c \frac{dO_2}{dt} \quad (2.1-2)$$

$$c = \Delta H_o$$

อัตราการเกิดน้ำ :

$$\frac{dW}{dt} = D \frac{dO_2}{dt} \quad (2.1-3)$$

อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ :

$$\frac{dP}{dt} = E \frac{dO_2}{dt}$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{dP}{dt} = f(RQ), \quad RQ = \frac{dCO_2}{dO_2} \quad (2.1-4)$$

$$\frac{dO_2}{dt} = \frac{F_N}{S} \left[\frac{P_{O_i}}{P - P_{O_i} - P_{W_i} - P_{C_i}} - \frac{P_{O_o}}{P - P_{O_o} - P_{W_o} - P_{C_o}} \right] \quad (2.1-5)$$

$$\frac{dCO_2}{dt} = \frac{F_N}{S} \left[\frac{P_{Co}}{P-P_{Co}-P_{Wo}-P_{Oo}} - \frac{P_{Ci}}{P-P_{Ci}-P_{Wi}-P_{Oi}} \right] \quad (2.1-6)$$

- F_N : อัตราการไหลของไนโตรเจนในอากาศมีหน่วยเป็น โมลของ ไนโตรเจนต่อชั่วโมง
 S : มวลของสารอาหาร มีหน่วยเป็นกรัม
 P : ความดันรวม มีหน่วยเป็นบรรยากาศ

อักษรที่เขียนไว้ข้างท้าย :

- O : หมายถึง ออกซิเจน
 C : หมายถึง คาร์บอนไดออกไซด์
 W : หมายถึง น้ำ
 o : หมายถึง ก๊าซที่ออก
 i : หมายถึง ก๊าซที่เข้า

สมการต่าง ๆ ที่กล่าวนี้ช่วยกำหนดเงื่อนไขในการทำผลผลิตที่ต้องการให้สูงสุดได้ ซึ่งจะ
 ต้องอาศัยการทดลองประกอบด้วย การควบคุมที่สามารถทำได้คือ อัตราการกวน หรือ การให้
 อากาศ ซึ่งจะช่วยควบคุมอุณหภูมิโดยการปรับความชื้นของอากาศ และปริมาณการไหลของอากาศ
 หรืออัตราการกวน สิ่งหนึ่งที่ยากแก่การควบคุมคือ ความชื้นของอาหารเลี้ยงเชื้อ (substrate)
 ระหว่างการทดลองเพาะเชื้อ แต่การศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำที่ผลิตและอัตราการผลิตกาซ
 คาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณการใช้ออกซิเจนแล้วก็อาจใช้เป็นข้อมูลสำหรับช่วยในการควบคุมได้

2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบตรึงชั้น

P. Tasakorn, T. Yoshida และ H. Taguchi (12) ได้ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์
 แบบตรึงชั้นขึ้นมาเพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับย่อยสลายฟางข้าว ลักษณะของเครื่อง
 ปฏิกรณ์เป็นถังทรงกระบอกสำหรับใส่วัสดุที่ต้องการย่อยสลาย แล้วมีการให้อากาศในแนวรัศมี และ
 กล่าวถึงตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ คือ

1. ขนาด รูปร่าง และปริมาณของวัสดุที่นำมาย่อยสลาย

2. ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุนั้น
3. ความชื้นของอากาศ
4. ปริมาณการให้อากาศแก่เครื่องปฏิกรณ์
5. ปริมาณของ เชื้อจุลินทรีย์ที่ใส่เข้าไปในวัสดุที่ต้องการย่อยสลาย

สำหรับสิ่งที่เป็นตัวกำหนดในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบตรึงชั้นที่ศึกษาคือ

1. ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของชั้นของแข็ง (permeability) ที่นำมาย่อยสลายกับขนาดและรูปร่างของวัสดุนั้น โดยศึกษาจากปริมาณการไหลของอากาศผ่านชั้นของแข็ง และ ค่าความดันตก (pressure drop)
2. ความพรุน (porosity) และ พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของชั้นของแข็ง โดยการบรรจุต่าง ๆ กัน
3. ความสัมพันธ์ของปริมาณการให้อากาศ กับ อัตราการแห้งของชั้นของแข็ง
4. การนำความร้อนของชั้นของแข็ง โดยการถ่ายเทความร้อน
5. การย่อยสลายของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

2.2.1 การไหลของอากาศผ่านชั้นของแข็ง

การไหลของอากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์นี้เป็นการไหลในแนวรัศมี สามารถแสดงได้ดังรูป 2.1 และเป็นลักษณะของการไหลของของไหลผ่านชั้นของแข็งที่มีรูพรุน (porous medium) Bird et.al(3) แสดงสมการของการไหลเป็นดังนี้

$$\epsilon \frac{\partial p}{\partial t} = - (\nabla \cdot \rho v_0) \quad (2.2.1-1)$$

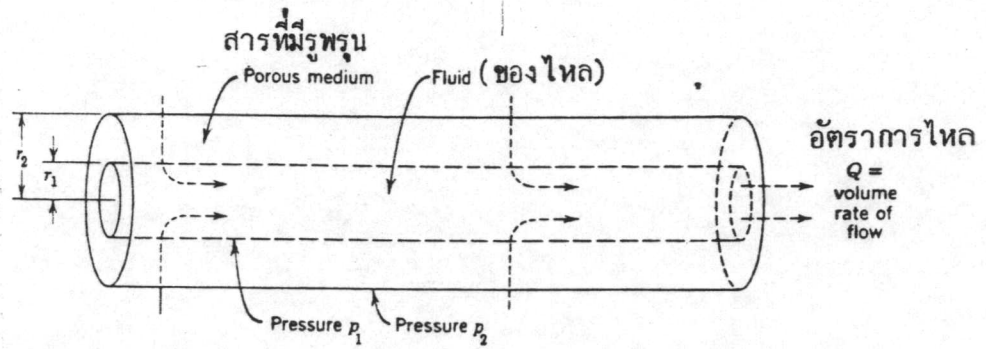
เมื่อ ϵ = ค่าความพรุน (porosity)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

v_0 = ความเร็วไหลผ่าน (superficial velocity)

จาก DARCY'S LAW

$$v_0 = - \frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho g) \quad (2.2.1-2)$$



รูปที่ 2.1 แสดงการไหลของของไหลตามแนวรัศมีผ่านชั้นที่มีรูพรุน

เมื่อ k = ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของชั้นที่มีรูพรุน (permeability of pore medium)

μ = ค่าความหนืดของของไหล (viscosity)

ρ = ความดันของ ρ ไหล



ดังนั้นเมื่อรวมสมการที่ 2.2.1-1 และ 2.2.1-2 จะได้

$$\left(\frac{\epsilon \mu}{k}\right) \frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot [\rho (\nabla P - \rho g)] \quad 2.2.1-3$$

ในกรณีที่ไม่นับผลของแรงโน้มถ่วงของโลกเนื่องจากเป็นก๊าซและการไหลอยู่ในแนวนอน

$$\left(\frac{\epsilon \mu}{k}\right) \frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot [\rho (\nabla P)] \quad 2.2.1-4$$

และจากสมการแห่งสถานะ (equation of state) โดยทั่วไป :-

$$\rho = \rho_0 p^m \exp \beta P \quad 2.2.1-5$$

สำหรับก๊าซ $\beta = 0$ และในกรณีการไหลของอากาศผ่านชั้นของพางนี้เป็นการขยายตัวแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (adiabatic expansion)

$$\text{ค่า } m = C_v/C_p$$

C_v = ค่าความจุความร้อนเมื่อปริมาตรคงที่

C_p = ค่าความจุความร้อนเมื่อความดันคงที่

เมื่อรวมสมการที่ 2.2.1-4 และ 2.2.1-5 จะได้

$$\frac{(m+1) E \mu \rho_0^{1/m}}{k} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla^2 \rho^{(1+m)/m} \quad 2.2.1-6$$

เมื่อสภาพการไหลคงที่ (steady state)

$$\nabla^2 \rho^{(1+m)/m} = 0 \quad 2.2.1-7$$

และ $\therefore \rho = \rho_0 p^m$

$$\therefore \nabla^2 \rho_0^{\frac{1+m}{m}} p^{1+m} = 0 \quad 2.2.1-8$$

$$\rho_0^{\frac{1+m}{m}} \nabla^2 p^{1+m} = 0$$

$$\nabla^2 p^{1+m} = 0 \quad 2.2.1-9$$

สำหรับการไหลในแนวรัศมีในดั่งทรงกระบอกจากสมการ 2.2.1-9 จะได้

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p^{1+m}}{\partial r} \right) = 0$$

$$r \frac{\partial p^{1+m}}{\partial r} = C_1 \quad 2.2.1-10$$

$$\therefore p^{1+m} = C_1 \ln r + C_2 \quad 2.2.1-11$$

เมื่อ C_1 และ C_2 คือค่าคงที่
 P คือค่าความดันที่รัศมี r

ดังนั้น ในกรณีนี้

$$P = P_1 \quad \text{ที่รัศมี} \quad r = r_1 \quad (\text{รัศมีภายใน})$$

จะได้

$$P_1^{(1+m)} = C_1 \ln r_1 + C_2 \quad 2.2.1-12$$

และ $P = P_2$ ที่รัศมี $r = r_2$ (รัศมีภายนอก)

$$\text{จะได้} \quad P_2^{(1+m)} = C_1 \ln r_2 + C_2 \quad 2.2.1-13$$

จากสมการที่ 2.2.1-12 และ 2.2.1-13 จะหาค่า

$$C_1 = \frac{P_2^{(1+m)} - P_1^{(1+m)}}{\ln(r_2/r_1)} \quad 2.2.1-14$$

$$C_2 = \frac{P_1^{(1+m)} \ln r_2 - P_2^{(1+m)} \ln r_1}{\ln(r_2/r_1)} \quad 2.2.1-15$$

แทนค่า C_1 ในสมการที่ 2.2.1-10

$$\frac{\partial P^{1+m}}{\partial r} = \frac{P_2^{(1+m)} - P_1^{(1+m)}}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{1}{r} \quad 2.2.1-16$$

จากสมการที่ 2.2.1-2 ในกรณีนี้ไม่ับผลของแรงโน้มถ่วง และเป็นการไหลในแนวรัศมีอย่างเดียว

$$v_o = -\frac{k}{\mu} (\nabla P)$$

$$= -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)$$

$$v_o = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{1}{(1+m) p^m} \frac{\partial p^{1+m}}{\partial r} \quad 2.2.1-17$$

แทนค่าจากสมการ 2.2.1-16 ลงในสมการที่ 2.2.1-17 จะได้

$$v_o = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{1}{(1+m) p^m} \cdot \frac{1}{r} \left(\frac{p_2^{1+m} - p_1^{1+m}}{\ln r_2/r_1} \right) \quad 2.2.1-18$$

เมื่อคิดที่ $r = r_1$ (รัศมีภายใน)

$$\therefore v_o \Big|_{r=r_1} = -\frac{k}{(1+m)\mu p_1^m} \cdot \frac{1}{r_1} \left(\frac{p_2^{1+m} - p_1^{1+m}}{\ln r_2/r_1} \right) \quad 2.2.1-19$$

$$\therefore Q = 2\pi r_1 (-v_o \Big|_{r=r_1}) h \quad 2.2.1-20$$

เมื่อ Q = ปริมาณการไหล (volume flow rate)

r_1 = รัศมีของชั้นที่มีรูพรุนที่กาซไหลออก

h = ความสูงของชั้นที่มีรูพรุน

แทนค่าจากสมการที่ 2.2.1-19 ลงใน 2.2.1-20

$$\therefore Q = \frac{2\pi h k}{(1+m)\mu \ln r_2/r_1} \left(\frac{p_2^{1+m} - p_1^{1+m}}{p_1^m} \right) \quad 2.2.1-21$$

จะเห็นว่า ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ (permeability) $[k]$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2.1-21 นี้ เมื่อทราบค่า ปริมาณการไหล (volume flow rate) $[Q]$ และค่าความดันตก (pressure drop) p_1 และ p_2

สำหรับการหาค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ในคอลัมน์ซึ่งเป็นการไหลในแนวแกน

สมการที่ใช้คำนวณจะเป็นดังนี้คือ :-

จากสมการที่ 2.2.1-9 จะได้เป็น

$$\frac{\partial^2 p^{1+m}}{\partial z^2} = 0$$

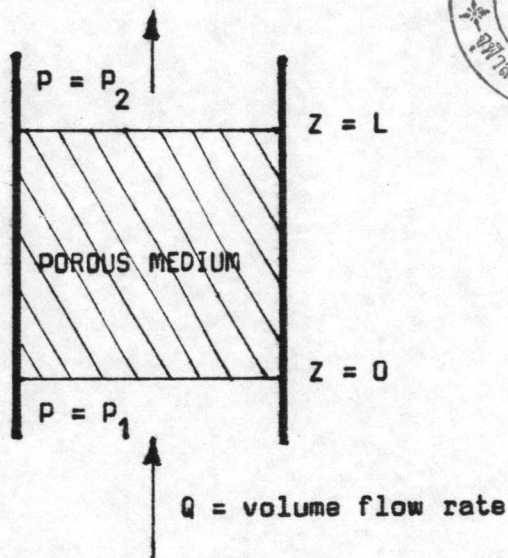
$$\therefore \frac{\partial p^{1+m}}{\partial z} = C_1 \quad 2.2.1-22$$

$$\text{และ } p^{1+m} = C_1 z + C_2 \quad 2.2.1-23$$

โดยที่ P = ความดันของ ก๊าซที่ตำแหน่ง Z

Z = ความสูงของชั้นที่มีรูพรุน

C_1, C_2 = ค่าคงที่



รูปที่ 2.2 แสดงการไหลของของไหลในแนวแกน (axial flow) ภายในคอลัมน์ที่มีรูพรุน R

จากรูปที่ 2.2 จะได้ว่า

$$P = P_1 \quad \text{เมื่อ } Z = 0 \quad 2.2.1-24$$

$$\text{และ } P = P_2 \quad \text{เมื่อ } Z = L \quad 2.2.1-25$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.2.1-24 และ 2.2.1-25 ลงใน 2.2.1-23

$$p_1^{1+m} = C_2 \quad 2.2.1-26$$

$$p_2^{1+m} = C_1 L + C_2 \quad 2.2.1-27$$

จากสมการที่ 2.2.1-26 และ 2.2.1-27

$$\therefore C_1 = - \left(\frac{p_1^{1+m} - p_2^{1+m}}{L} \right)$$

แทนค่า C_1 ลงในสมการที่ 2.2.1-22

$$\frac{\partial p^{1+m}}{\partial z} = - \left(\frac{p_1^{1+m} - p_2^{1+m}}{L} \right) \quad 2.2.1-28$$

จากสมการที่ 2.2.1-2 ในกรณีไม่นับแรงโน้มถ่วงของโลก และการไหลในแนวแกน

$$\begin{aligned} v_o &= - \frac{k}{\mu} (\nabla p) \\ &= - \frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \\ &= - \frac{k}{\mu} \cdot \frac{1}{(1+m)p^m} \frac{\partial p^{1+m}}{\partial z} \quad 2.2.1-29 \end{aligned}$$

แทนค่าจากสมการที่ 2.2.1-28 ใน 2.2.1-29

$$\therefore v_o = \frac{k}{\mu} \left[\frac{1}{(1+m)p^m} \left(\frac{p_1^{1+m} - p_2^{1+m}}{L} \right) \right]$$

เมื่อคิดความเร็ว v_o ที่ตำแหน่ง $z = L$

$$v_o \Big|_{z=L} = \frac{k}{\mu} \left[\frac{1}{(1+m)p_2^m} \left(\frac{p_1^{1+m} - p_2^{1+m}}{L} \right) \right] \quad 2.2.1-30$$

$$\therefore Q = \pi R^2 v_o \Big|_{z=L} \quad 2.2.1-31$$

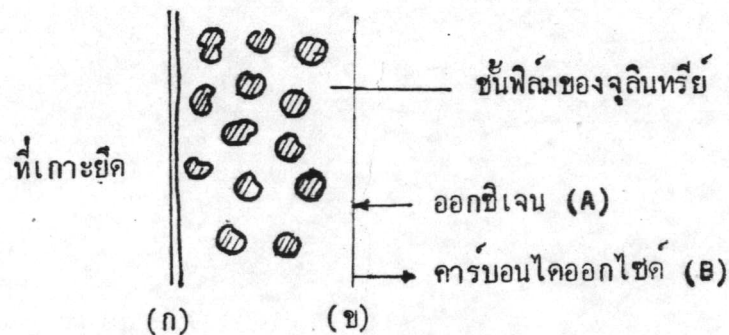
- เมื่อ Q = ปริมาณการไหลของก๊าซ (volume flow rate)
 R = รัศมีของคอลัมน์
 L = ความสูงของชั้นที่มีรูพรุน (porous medium)

แทนค่าสมการที่ 2.2.1-30 ใน 2.2.1-31

$$\therefore Q = \frac{\pi R^2 k}{\mu (1+m)L} \left(\frac{P_1^{1+m}}{P_2^m} - P_2 \right) \quad 2.2.1-32$$

ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ (k) ในกรณีของการไหลในแนวแกนของคอลัมน์ คำนวณได้จากสมการที่ 2.2.1-32 เมื่อทราบค่า Q และค่าความดันตก

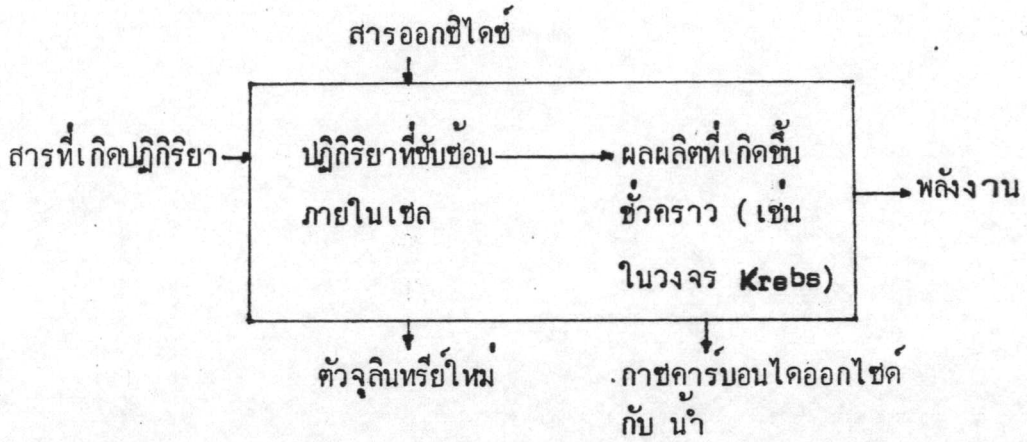
2.2.2 การถ่ายเทมวลระหว่างอากาศกับฟิล์มของจุลินทรีย์



- ก) ผิวสัมผัสของจุลินทรีย์กับที่เกาะยึด
 ข) ผิวสัมผัสของจุลินทรีย์กับอากาศ

รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลอง ของจุลินทรีย์ที่เกาะยึดอยู่กับอาหาร

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ภายในระบบของจุลินทรีย์นั้นมีความซับซ้อนมาก และเป็นปัญหาที่จะต้องนำมาพิจารณาด้วย ดังนั้นปัญหานี้เมื่อนำมาใช้ทางด้านการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ (bioreactor design) จึงจำเป็นต้องกำหนดสูตรอย่างง่ายในการคิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากในขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยานั้นจะถูกควบคุมโดยเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ กันไป ถ้า



รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในระบบของเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

กำหนดให้ขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง เป็นตัวการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดในสภาวะเช่นนี้
Michaelis - Menten ได้เสนอสมการสำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยา (6) คือ

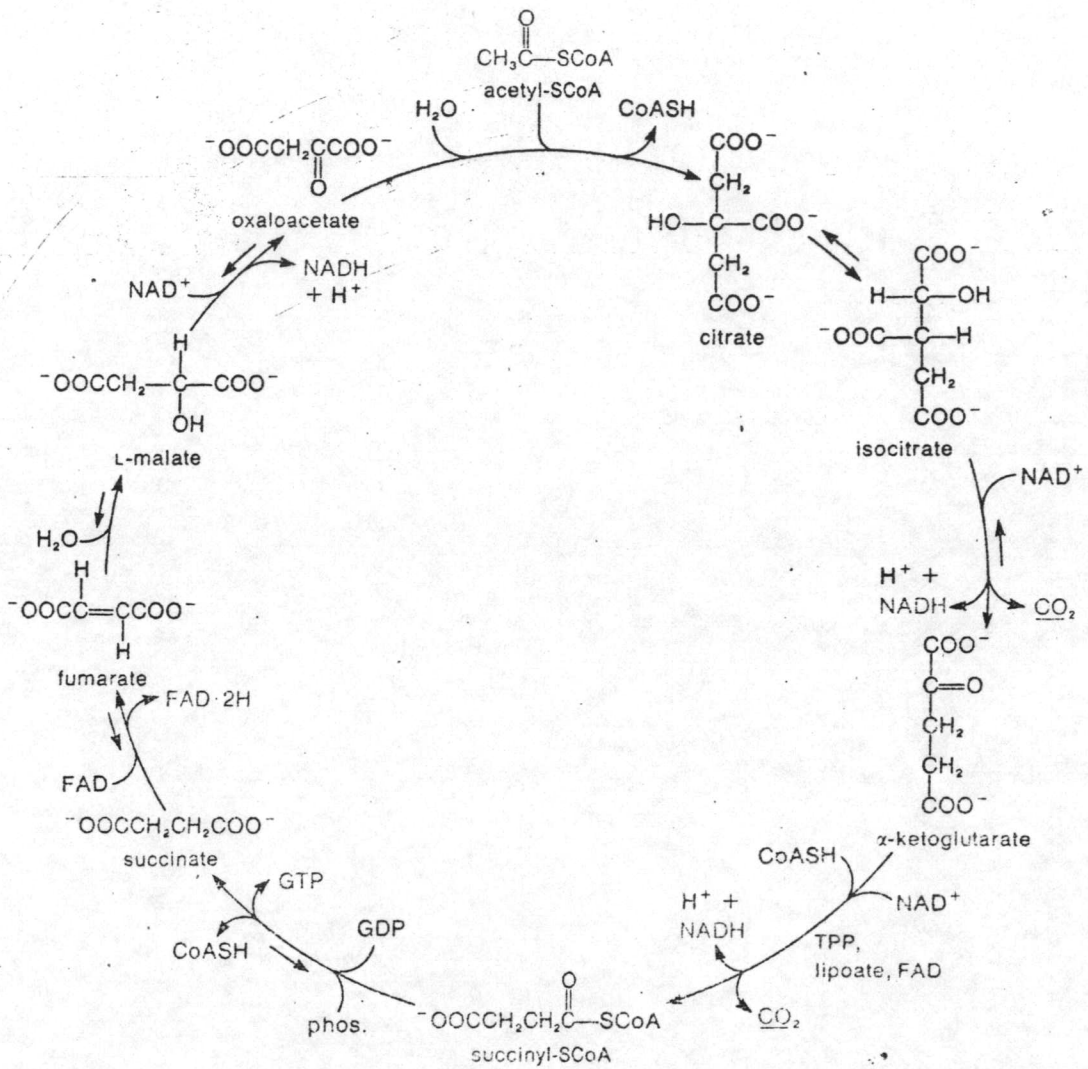
$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = \frac{A e}{1 + B/S} \quad 2.2.2-1$$

- เมื่อ
- A, B เป็นค่าคงที่
 - e เป็นความเข้มข้นของเอนไซม์
 - S เป็นความเข้มข้นของสารเคมีที่เกิดขึ้นชั่วคราวในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา

ค่า S นี้กำหนดให้ความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา โดยค่า R ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ของการเกิดปฏิกิริยา (stoichiometric coefficient)

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = \frac{A e}{1 + B/RC} \quad 2.2.2-2$$

C คือความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา



รูปที่ 2.5 แสดงวงจร Krebs (Krebscycle)



ในกรณีของการที่เกิดปฏิกิริยามีหลายชนิด และเกิดในลักษณะเดียวกับในสมการที่ 2.2.2-2

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i e_i}{1+B_i/R_i} C \quad 2.2.2-3$$

เมื่อความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยา (C) มีค่าน้อย ๆ สมการที่ 2.2.2-3 จะเขียนได้เป็น

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = \left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i e_i R_i}{B_i} \right) C \quad 2.2.2-4$$

หรือ

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} = K_V C \quad 2.2.2-5$$

เมื่อค่า K_V คือสัมประสิทธิ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยปริมาตร (volumetric rate coefficient)

เมื่อต้องการทราบปริมาณการถ่ายเทมวลของสารที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัส (ข) ในรูปที่ 2.3 จำเป็นต้องกำหนดลักษณะของการเกิดปฏิกิริยา และการซึมผ่านของสารในมวลของจุลินทรีย์ เพื่อใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์

ในกรณีนี้กำหนดให้เป็นกรณีการซึมผ่านโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีในสถานะเดียวกัน (homogeneous chemical reaction with diffusion) ลักษณะแบบนี้ Bird et.al(4) ได้เขียนสมการขึ้นมาโดยกำหนดว่าเป็นการถ่ายเทในสภาวะคงที่ ผ่านบริเวณที่เป็นชั้นบาง ๆ (Semi-infinite zone) ซึ่งอยู่นิ่ง และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 (first order chemical reaction)

$$\text{การถ่ายเทมวลผ่านผิวสัมผัส (ข)} = \sqrt{DK_V} C^* \quad 2.2.2-6$$

เมื่อ D คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านภายในชั้นของจุลินทรีย์

C^* คือความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยา ณ ที่ผิวสัมผัส (ข)

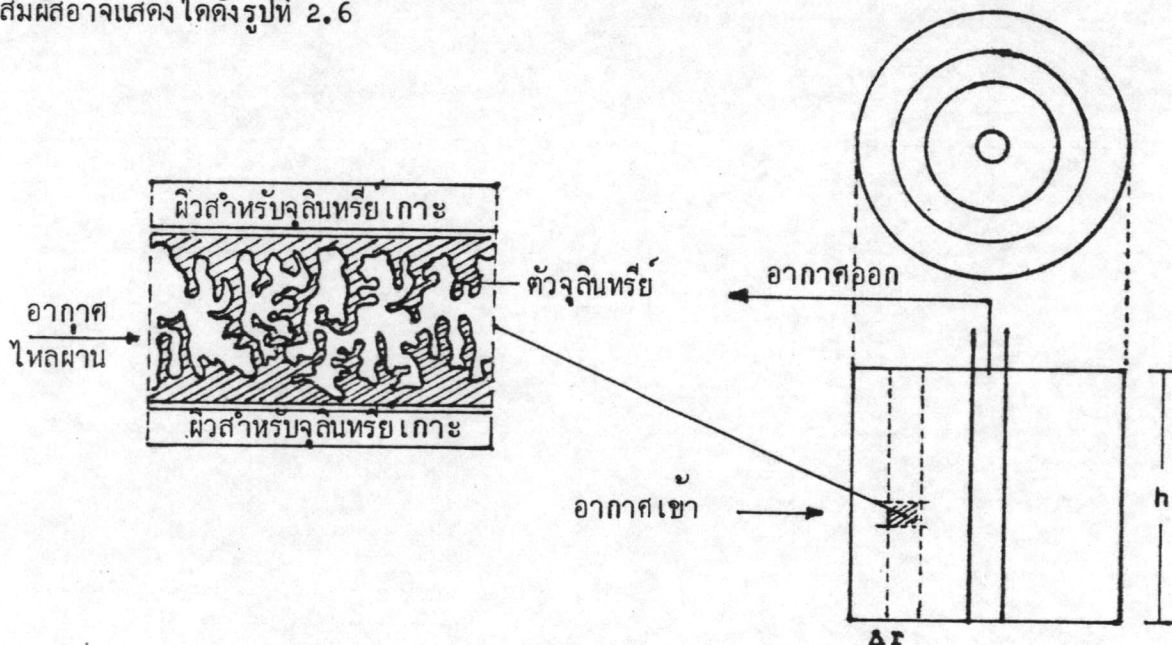
ผลคูณของ $\sqrt{D k_v}$ ในสมการที่ 2.2.2-6 มีหน่วยเป็นสัมประสิทธิ์ของการเกิดปฏิกิริยาที่ผิว (surface rate coefficient)

สมการที่ 2.2.2-6 อาจเขียนเป็น

$$N = k_s C^* \tag{2.2.2-7}$$

$$k_s = \sqrt{D k_v} \tag{2.2.2-8}$$

การถ่ายเทมวลผ่านผิวสัมผัสระหว่างชั้นของจุลินทรีย์กับอากาศ ออกซิเจนซึ่งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยา จะถ่ายเทเข้าสู่ตัวจุลินทรีย์ และคาร์บอนไดออกไซด์ถ่ายเทออกมา ลักษณะของผิวสัมผัสอาจแสดง ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบที่จำลองที่ออกซิเจนถ่ายเทเข้าสู่ตัวจุลินทรีย์ และคาร์บอนไดออกไซด์ถ่ายเทออกมา

การเกิดปฏิกิริยาของออกซิเจนกับสารอาหารในตัวจุลินทรีย์จะถือว่าเป็นไปตามสมการที่ 2.2.2-5 ดังนั้นอัตราการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงรัศมี Δr ก็จะเขียนได้ดังนี้

$$q d C_A = -(k_s a_s) C_A \cdot h 2 \pi r dr \tag{2.2.2-9}$$

- เมื่อ Q = อัตราปริมาตรการไหล (volume flow rate) ของอากาศ
- C_A = ความเข้มข้นของออกซิเจน
- a_S = พื้นที่ผิวของจุลินทรีย์ที่เกิดปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตร
- r = รัศมีของชั้นฟาง
- h = ความสูงของชั้นฟาง

ทำการอินทิเกรต จะได้

$$F = \frac{C_{Ao}}{C_{Ai}} = \exp \left[k_S a_S \cdot \frac{\pi h (R_2^2 - R_1^2)}{Q} \right] \quad 2.2.2-10$$

เมื่อ F = เป็นอัตราส่วนของความเข้มข้นของออกซิเจนที่ออก (C_{Ao}) กับความเข้มข้นของออกซิเจนที่เข้า (C_{Ai})

R_1, R_2 = คือรัศมีภายในของชั้นฟางและรัศมีภายนอกของชั้นฟางตามลำดับ

2.2.3 อุดหนุนภายในเครื่องปฏิกรณ์

ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลินทรีย์จะถ่ายเทออกมาภายนอกสู่อากาศที่ไหลผ่านเพื่อพาเอาความร้อนออกไป เมื่อพิจารณาภายในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปที่ 2.6)

กำหนดให้

1. S_B เป็นอัตราการผลิตความร้อนของจุลินทรีย์ต่อหน่วยปริมาตรของฟางข้าว (สมมติเสมอตลอดภายในเครื่องปฏิกรณ์)
2. การถ่ายเทความร้อนของจุลินทรีย์สู่อากาศไม่มีความต้านทานใด ๆ คือความร้อนที่เกิดจากตัวจุลินทรีย์ จะถ่ายเทออกมาภายนอกเลย
3. การนำความร้อนของฟางข้าวมีค่าน้อยกว่าการพาความร้อนของอากาศ จึงไม่นำมาคิดรวมด้วย
4. การคำนวณคิดที่สภาวะคงที่ (steady state)

พิจารณาสมการของพลังงานในช่วง Δr จะได้

$$Q C_p \frac{dT}{dr} = -2 \pi r h S_B \quad 2.2.3-1$$

- Q = อัตรา การไหลของอากาศ
 C_p = ความจุความร้อนของอากาศ
 r = รัศมีของ เครื่องปฏิกรณ์
 h = ความสูงของ เครื่องปฏิกรณ์
 T = อุณหภูมิภายใน เครื่องปฏิกรณ์ที่รัศมี r
 S_B = อัตราการผลิตความร้อนต่อหน่วยปริมาตร

เมื่ออินทิเกรต จะได้

$$T = - \frac{\pi h S_B}{C_p Q} r^2 + C \quad 2.2.3-2$$

เงื่อนไขสำหรับสมการที่ 2.2.3-2 คือ $r = R_2$, $T = T_R + T_0$

$$C = T_R + T_0 + \frac{\pi h S_B}{C_p Q} R_2^2$$

- R_2 = รัศมีภายนอกของ เครื่องปฏิกรณ์
 T_R = อุณหภูมิห้อง
 T_0 = ผลต่างของอุณหภูมิภายในชั้นฟางที่รัศมี R_2 กับอุณหภูมิห้อง

เพราะฉะนั้น

$$T - T_R = T_0 + \frac{\pi h S_B}{C_p Q} (R_2^2 - r^2) \quad 2.2.3-3$$

สมการที่ 2.2.3-3 นี้จะแสดงผลต่างของอุณหภูมิภายในชั้นฟางของ เครื่องปฏิกรณ์ กับ อุณหภูมิห้อง ที่เวลาใดเวลาหนึ่ง เมื่ออัตราการผลิตความร้อนของจุลินทรีย์มีค่าคงที่

2.3 การย่อยสลายเศษพืช (2)

การย่อยสลายเศษพืชเกิดขึ้นจากกิจกรรมของจุลินทรีย์พวก **heterothrophic micro-organism** คือเป็นพวกที่ได้รับพลังงานและคาร์บอนจากอินทรีย์สาร และส่วนใหญ่เป็นพวกที่ต้องการอากาศในการหายใจ มีอยู่หลายชนิด เช่น แบคทีเรีย แอคติโนมายซีท และพวกรา จุลินทรีย์พวกนี้จะมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับอาหารจากเศษพืช และได้รับออกซิเจนจากอากาศ โดยที่จุลินทรีย์จะมีการผลิตเอนไซม์ขึ้นแล้วปล่อยออกมานอกเซลล์ย่อยสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ไซแลน และ ลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเศษพืช โดยเฉพาะพวกข้าว ไม้มีโมเลกุลเล็กลงและสามารถผ่านผนังเซลล์เข้าไปเพื่อใช้เป็นสารอาหารต่อไปได้ อินทรีย์สารที่ถูกย่อยนี้จะทำหน้าที่ให้พลังงาน และเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจน, เก็ดือแร่ สำหรับจุลินทรีย์ คาร์บอนจากอินทรีย์วัตถุจะถูกเปลี่ยนเป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือจะเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ของเซลล์

จุลินทรีย์ดังกล่าวยังสามารถแยกออกได้เป็นสองพวกใหญ่ ๆ ตามความสามารถในการเจริญในสภาพที่มีความร้อนต่างกันคือ พวกแรกเป็นพวกที่สามารถเจริญได้ดีในสภาพที่มีความร้อนปานกลาง (**mesophilic**) คือเจริญเติบโตได้ดีในสภาพที่มีอุณหภูมิระหว่าง 25-37 องศาเซลเซียส และพวกที่สองเป็นพวกที่เจริญได้ดีในสภาพที่มีความร้อนสูง (**thermophilic**) คือระหว่าง 55-60 องศาเซลเซียส ความร้อนนี้อาจเป็นตามธรรมชาติหรืออาจเกิดเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกมาขณะที่มีการย่อยสลาย

การย่อยสลายเศษพืชโดยจุลินทรีย์นั้นจะแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของเศษพืชแต่ละชนิด โดยทั่วไปใช้ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของเศษพืชบอกความเปลี่ยนแปลงของเศษพืชในการย่อยสลาย เพราะสารทั้งสองนี้เป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ และใช้เป็นปริมาณมากพอที่จะวัดความแตกต่างกันได้ ถ้าอัตราส่วนของอาหารที่จุลินทรีย์ใช้ไม่เหมาะสมก็จะทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เป็นไปได้ช้า นั่นคือการย่อยสลายก็จะต้องใช้เวลานาน หรืออาจกล่าวได้ว่าเศษพืชนั้นถูกย่อยสลายได้ยาก

ในขณะที่มีการย่อยสลายจุลินทรีย์ จะใช้คาร์บอนส่วนหนึ่งสะสมไว้เป็นส่วนหนึ่งของเซลล์ และอีกส่วนหนึ่งก็จะเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์สูญเสียออกไป อีกส่วนเป็นสารอื่น ๆ เช่น แอลกอฮอล์ และกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปก็จะทำให้อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเปลี่ยนโดย

คาร์บอนลดลง อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนก็จะลดลงไปด้วย ซึ่งค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนนี้สามารถบอกความเปลี่ยนแปลงในการย่อยสลายได้ นอกจากนี้แล้วปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมา ก็มีความสัมพันธ์กับอัตราการทำงานของจุลินทรีย์และอัตราการเพิ่มปริมาณของจุลินทรีย์ด้วย เพราะถ้าจุลินทรีย์มีการเพิ่มปริมาณมากก็จะมีการปลดปล่อยกาซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมามากด้วย ดังนั้นการวัดปริมาณกาซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถที่จะบอกถึงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้

ผลของการย่อยสลายจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นคือ ลักษณะของเศษพืชจะมีลักษณะย่อยและสีจะดำหรือน้ำตาล ซึ่งในลักษณะนี้เศษพืชจะถูกเปลี่ยนเป็นอินทรีย์สารชนิดต่าง ๆ เป็นส่วนมากแล้ว และมีเซลล์ของจุลินทรีย์อยู่เป็นจำนวนมากขึ้น และพร้อมที่จะถูกย่อยสลายต่อไปอีก ซึ่งในที่สุดก็จะกลายเป็นปุ๋ยอินทรีย์

2.4 ปัจจัยที่ควบคุมการย่อยสลาย (1)

การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยการกระทำของจุลินทรีย์พวก *Heterotrophic* จะเกิดขึ้นได้คือหรือเลว เร็วหรือช้า มากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ โดยทั่วไปดังต่อไปนี้คือ

1. องค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์วัตถุที่มีโครงสร้าง โมเลกุลแบบธรรมดาจะถูกย่อยสลายได้ง่ายและเร็ว แต่หาอินทรีย์วัตถุใดมีองค์ประกอบที่มีโครงสร้าง โมเลกุลซับซ้อนก็จะถูกย่อยสลายได้ยากและช้า
2. อุณหภูมิ ถ้าระดับอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลาย ก็จะมีผลทำให้การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุนั้นลดลง
3. ความชื้นและการถ่ายเทอากาศ จำเป็นต้องมีความชื้นเพียงพอ และการถ่ายเทอากาศที่ดีจะทำให้ขบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เป็นไปได้เป็นอย่างดี เพราะขบวนการที่จะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยทั้งน้ำและกาซออกซิเจน
4. ปริมาณธาตุอาหาร ต้องมีเพียงพอเหมาะสมแก่การเจริญของจุลินทรีย์ เพราะต้องนำไปเป็นส่วนประกอบของเซลล์ และสารบางตัวช่วยกระตุ้นและเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายให้เป็นไปได้อย่างดียิ่งขึ้น
5. สภาพความเป็นกรดเป็นด่าง จุลินทรีย์จะทำหน้าที่ย่อยสลายได้ดีในสภาวะความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสม

6. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในอินทรีย์วัตถุ จุลินทรีย์ต้องการธาตุทั้งสองมาใช้
ในการเสริมสร้างเซลล์

2.5 ส่วนประกอบในฟางข้าว

ผนังเซลล์ของฟางข้าวมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารพวก cellulose, hemicellulose, xylan, lignin.

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของฟางข้าว (5)

Composition	Rice straw
Digestible energy, kcal/kg	1.9
Crude protein (%)	4.5
Ether extract (%)	1.5
Crude fiber (%)	35.0
Lignin (%)	4.5
Cellulose (%)	34.0
Nitrogen free extract (%)	42.0
Total digestible nutrients (TDN)	43.0
Ash (%)	16.5
Silica (%)	14.0
Ca (%)	0.19
k (%)	1.2
Mg (%)	0.11
P (%)	0.10
S (%)	0.10

เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส สามารถถูกย่อยสลายได้ง่ายโดย **cellulolytic organism** ส่วนสารประกอบของลิกนิน-เซลลูโลส นั้นจะถูกย่อยสลายได้ยาก ลิกนินเป็นสารประกอบชนิด **aromatic** ที่มาเกาะเกี่ยวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ ซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดความแข็งและเหนียวในผนัง เซลของพืช และทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ถ้ามีสารประกอบนี้มาก ๆ จะทำให้ความสามารถในการย่อยสลายของสารนั้นลดลง นอกจากนี้ฟางข้าวยังมีปริมาณของซิลิกา (**Silica**) อยู่ในปริมาณมาก (เทียบโดยน้ำหนักแห้ง) ซิลิกาในฟางข้าวเกิดจากการดูดซึมและขบวนการทางชีวของพืช ซิลิกานี้จะมีผลทำให้ความสามารถในการถูกย่อยสลายของฟางข้าวลดลง เพราะซิลิกาในผนัง เซลของพืชก็ทำหน้าที่เสริมสร้างความแข็งแรงให้กับผนัง เซลเช่นเดียวกับลิกนิน ซิลิกาที่อยู่ในพืชนี้มีอยู่ 2 ชนิด คือชนิดที่ละลายน้ำได้ และไม่สามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นถ้ามีการนำซิลิกาที่ละลายน้ำออกจากพืชได้ก็จะทำให้เพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้ (13) แต่โดยทั่วไปแล้วผลของซิลิกาจะมีน้อยกว่าลิกนิน

