

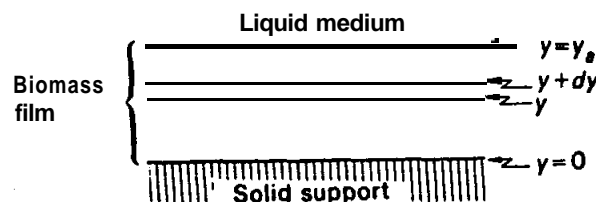
บทที่ 22

แผ่นฟิล์มและก้อนชีวมวลในสื่อกลางการหมัก (SUBMERGED FILMS AND PELLETS OF BIOMASS)

22.1 แผ่นฟิล์มชีวมวลในสื่อกลางการหมัก (SUBMERGED FILM OF BIOMASS)

จุลินทรีย์หลายชนิดและเซลล์เนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตชั้นสูงมีความสามารถที่จะยึดเกาะติดกันและเพิ่มจำนวนบนพื้นผิวของผิวนิ่งแข็งได้ ดังนั้นแบคทีเรียและฟังไจเหล่านี้ในสื่อกลางการหมักที่มีการปั่นกววนหรือคนเป็นระยะเวลายาวนานมักเจริญเติบโตเป็นแผ่นฟิล์มเคลือบปกคลุมบนพื้นผิวของภาชนะบรรจุหรือถังหมัก ตัวอย่างประโยชน์ที่เด่นชัดจากแผ่นฟิล์มชีวมวลคือการกรองหยดของเหลว เพื่อทำให้บริสุทธิ์ขึ้น (trickling filter) เซลล์เนื้อเยื่อของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมหรือสัตว์อื่นในการหมักที่อยู่นิ่งโดยไม่มีการปั่นกววนหรือคนจะเกาะติดกับพื้นผิวของภาชนะอย่างราบเรียบเป็นแผ่นและเพิ่มจำนวนมากขึ้นในลักษณะเดียวกัน แผ่นเนื้อเยื่อของสัตว์ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่าแผ่นเซลล์เนื้อเยื่อชั้นเดียว (monolayer culture)

เซลล์ที่เกาะติดกับผิวนิ่งแต่ละเซลล์เมื่อเริ่มคนจะไ้รับสัมผัสกับสื่อกลางอาหารอย่างเต็มที่และสามารถเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนด้วยอัตราความเร็วแบบขยายสูงสุด แต่เมื่อเซลล์เจริญเติบโตอยู่รวมกันเป็นแผ่นฟิล์มชีวมวลหนาขึ้นการเจริญเติบโตจะถูกจำกัดเนื่องจากการแพร่กระจายของซับสเตรตเข้าไปในแผ่นฟิล์มชีวมวล การอธิบายอย่างง่ายเกี่ยวกับการเจริญเติบโตที่ถูกจำกัดโดยการแพร่กระจายเข้าไปในแผ่นชีวมวลของซับสเตรตได้แสดงไว้ในรูปที่ 22.1



รูปที่ 22.1 Biomass film on solid surface. The concentration of limiting substrate at level y is s , at level $y + dy$, $s + ds$ and at level y_0 , s_0 .

ถ้าสรุปเอาอย่างง่ายว่ามีสถานะมั่นคง เกิดขึ้นแล้วคือ เมื่อ

substrate entering the film = substrate metabolized by the film

สำหรับความสัมพันธ์ของขั้วสเตรคในชั้นค่าสุดของแผ่นฟิล์มชีวมวลจาก $y=0$ ถึง y จะได้ว่า

$$aD' \frac{ds}{dy} = qay\rho \quad 22.1$$

ซึ่ง a = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์ม, D' = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของขั้วสเตรค, q = ผลหารทางเมตาโบลิซึมของขั้วสเตรคที่กำหนดจากอัตราการเจริญเติบโต, ρ = ความหนาแน่นของชีวมวล อินทิเกรตสมการที่ 21.1 จะได้ว่า

$$D' \int_0^a ds = q\rho \int_0^a y dy \quad 22.2$$

ดังนั้น

$$D'(s_r - s) = \frac{q\rho}{2} (y_a^2 - y^2) \quad 22.3$$

ถือว่าค่า q ไม่ขึ้นอยู่กับค่า s การถือเอาอย่างง่ายเช่นนี้จะใช้ได้ถูกต้องสมบูรณ์เมื่อความเข้มข้นของขั้วสเตรคที่เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานสูงเกินกว่า 20 ม.ก./ลิตร และความเข้มข้นของออกซิเจนสูงเกินกว่า 0.2 ม.ก./ลิตร สมมุติว่า $s=0$ เมื่อ $y=0$ ดังนั้นความหนาแน่นสูงสุดของชั้นชีวมวลที่ยังคงมีกิจกรรมอยู่คือ

$$y_a = (2D's_r/q\rho)^{1/2} \quad 22.4$$

ความหนาแน่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มกลามเนื้อของกบที่ยังคงมีการหายใจได้โดยไม่ถูกจำกัดด้วยออกซิเจนซึ่งข้างหนึ่งได้สัมผัสกับอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศถูกพบว่ามีค่าประมาณ 900 ไมโครมีเตอร์ (Hill, 1982) แต่ที่แตกต่างกันคือความหนาแน่นสูงสุดของแผ่นฟิล์มชีวมวลของ Escherichia coli ที่ไม่ถูกจำกัดด้วยออกซิเจนเมื่อข้างหนึ่งได้สัมผัสกับอากาศที่ 1 บรรยากาศพบว่ามีค่าประมาณ 40 ไมโครมีเตอร์ (Pirt, 1967) ค่าที่ต่ำกว่าค่าสำหรับเนื้อเยื่อของกบมากเช่นนี้ส่วนใหญ่ก็เนื่องมาจาก E. coli มีอัตราความเร็วในการหายใจมากกว่า สำหรับการเจริญเติบโตของหัวใจที่ถูกกำหนดจำกัดด้วยความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (10g/l) ความหนาแน่นของชั้นเนื้อที่มีกิจกรรมจะมีค่าประมาณ 1000 ไมโครมีเตอร์ (Pirt, 1966) ถ้าความหนาแน่นของแผ่นฟิล์มชีวมวลมีมากเกินกว่าความหนาแน่นสูงสุดของชั้นที่มีกิจกรรมจะถือว่าชั้นที่อยู่ต่ำกว่าชั้นที่มีกิจกรรมเป็นชั้นซึ่งเฉื่อยชาหรือชั้นซึ่งใช้ขั้วสเตรคกำหนดจากอัตราการเจริญเติบโตแตกต่างออกไป ดังนั้นชั้นที่อยู่สูงกว่าซึ่ง เป็นชั้นที่สัมผัสกับของเหลว

จึง เป็นชั้นที่อาจถูกกำหนดจากรังสีการ เจริญเติบโตโดยออกซิเจน ส่วนชั้นที่อยู่ต่ำกว่าซึ่ง เป็นชั้นที่ไม่ได้รับอากาศจึง เป็นชั้นที่อาจถูกกำหนดจากรังสีการ เจริญเติบโตโดยคาร์บอน

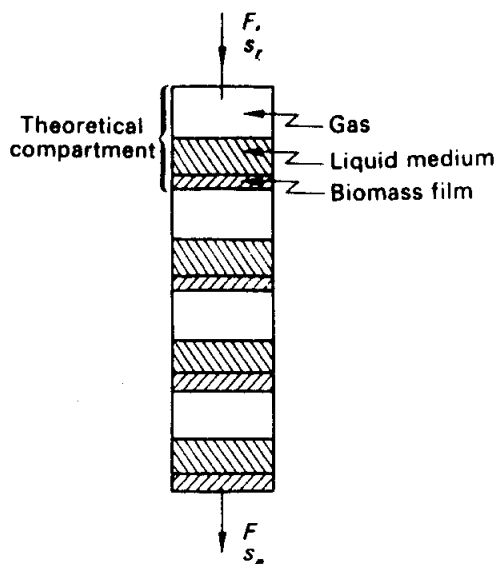
ความแบบจำลองนี้ถือว่าความเข้มข้นของซีสเตรทที่กำหนดจำกัดในสื่อกลาง อาหารเหลวที่ปกคลุมบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์มชีวมวลนั้น เท่าหรือเหมือนกันกับใน เนื้อสื่อกลาง อาหารเหลวส่วนอื่น ๆ แต่สิ่งนี้อาจ เป็นจริง โคลาสสื่อกลางอาหาร เหลวถูกบีบกันหรือคน กวญเครื่องกวนหรือกระแสน้ำพาต่าง ๆ สำหรับสื่อกลางอาหารเหลวที่อยู่ถึงความเข้มข้น ของซีสเตรทอาจไม่เท่ากันโดยตลอดทั้ง แผ่นฟิล์มชีวมวลและ เนื้อในของ เหวระดับที่อยู่ เหนือแผ่นฟิล์มขึ้นไปจึงอาจทำให้ความหนาของชั้นชีวมวลที่ยังคงมีกิจกรรมอยู่ลดลง ไปได้ และถ้าขบวนการ เป็นแบบแอโรบิกการ แพร่กระจายของออกซิเจนจากแก๊สไปยังของ เหว ก็ จะมีความสำคัญมาก(ตอนที่ 22.25)

22.2 การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่กับแหล่งคอลัมน์

22.2.1 ลักษณะโดยทั่วไป

วัตถุประสงค์ของ เครื่องที่อีกเป็นแห่งคอลัมน์โดยมีผิวหน้าให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะติดเพื่อ การเจริญเติบโตถูกพบใน เครื่องกรองแบบหยดเพื่อการทำให้ของเหลวบริสุทธิ์ ในขบวนการผลิตน้ำดื่มสายชูแบบไว เพื่อการอะซิทิฟเคชั่นของ แอลกอฮอล์ และในคินที่มีจุลินทรีย์ แทรกอยู่

Pirt (1973a) ได้เสนอแบบจำลองของ แหล่งคอลัมน์ที่ประกอบด้วยแผ่น ชีวมวลซึ่งถูกนำมาเรียงซ้อนสลับเป็นชั้นตามทฤษฎีจรูปที่ 22.2 แล้วปล่อยให้สื่อกลางอาหาร เหลวไหลผ่านลงมาตามคอลัมน์เพื่อถ่ายเทสารอาหารให้แก่แผ่นชีวมวล ถ้าขบวนการเป็น แบบแอโรบิกหรือมีแก๊สบางอย่างรวมด้วยของว่างระหว่างวัตถุที่อีกเป็นแห่งคอลัมน์จะถูกบรรจ ไปด้วยอากาศหรือแก๊สนั้น



รูปที่ 22.2 Diagrammatic representation of column of 'theoretical films' of biomass separating theoretical compartments each containing a volume V/n of liquid medium where n is the number of theoretical compartments and V is the total liquid volume in the column; F = medium flow rate, s_i = initial substrate concentration, s_e = substrate concentration in effluent from column.

22.2.2 การทำนายตามทฤษฎี

ตามข้อเสนอของ Pirt (1973 a) แห่งคอลัมน์ประกอบด้วยของตามทฤษฎี n ของ แต่ละช่องประกอบด้วยสื่อกลางอาหารเหลวที่ปกคลุมด้วยชั้นชีวมวลซึ่งอยู่ข้างใต้ตามทฤษฎีโดยมีพื้นที่หน้าตัด (A) เท่ากันกับของแห่งคอลัมน์ ปริมาตรของสื่อกลางอาหารเหลว (V) ในคอลัมน์ถือว่าถูกแบ่งเฉลี่ยไปยังช่องต่าง ๆ ตามทฤษฎีใดเท่ากัน และขั้วสเตรคที่ละลายอยู่ในของเหลวจะเข้าไปในแผ่นฟิล์มชีวมวลได้โดยวิธีการแพร่กระจายเท่านั้น สื่อกลางอาหารเหลวถูกถือว่าไหลข้ามผ่านแห่งคอลัมน์ได้ด้วยความเร็วในการไหลเท่ากับ F และใช้เวลาในการเดินทางผ่านแต่ละชั้นใดเท่ากัน คือ t_r/n ซึ่ง t_r คือระยะเวลาที่อาศัยอยู่หรือคงอยู่ในแห่งคอลัมน์ทั้งหมดของสื่อกลาง นั่นก็คือไม่มีการกระจายหรือแจกแจง

ของคาร์ระยะเวลาคงอยู่ ทั้งนี้การเคลื่อนที่ลงมาของของเหลวในแท่งคอลัมน์จึงเป็นแบบไหลผ่านไปเป็นระยะ (intermittent plug flow) และจะใกล้เคียงหรือคล้ายกันกับแบบไหลผ่านไปเป็นลำกับมากยิ่งขึ้นเมื่อจำนวนของแผ่นฟิล์มความทฤษฎีเพิ่มขึ้นและถือว่าของเหลวที่อยู่ในแต่ละช่องมีการผสมปนเปกันอย่างสมบูรณ์แต่ไม่มีการผสมปนเปของสื่อกลางที่อยู่ต่างช่องกัน

ชีวมวลที่เริ่มต้นมาจากการเจริญเติบโตด้วยซับสเตรคในสื่อกลางอาหาร จะใช้เวลาระยะหนึ่งเพื่อก่อให้เกิดแผ่นฟิล์มในคอลัมน์ ความหนาของแผ่นฟิล์มจะเพิ่มมากขึ้นตามเวลา อย่างไรก็ตามความหนาของชั้นชีวมวลที่มีกิจกรรมจะถูกจำกัดโดยการแพร่กระจาย ทั้งนี้ในท้ายที่สุดแผ่นฟิล์มชีวมวลจะประกอบด้วยชั้นชีวมวลที่มีกิจกรรมอยู่ข้างบนสัมผัสกับสื่อกลางอาหาร และชั้นชีวมวลที่อยู่ข้างล่างซึ่งถูกถือว่าไม่มีกิจกรรมเนื่องจากซับสเตรคที่กำหนดจำกัดการเจริญเติบโตทั้งหมดถูกใช้หมดไปโดยชั้นชีวมวลที่อยู่ข้างบน

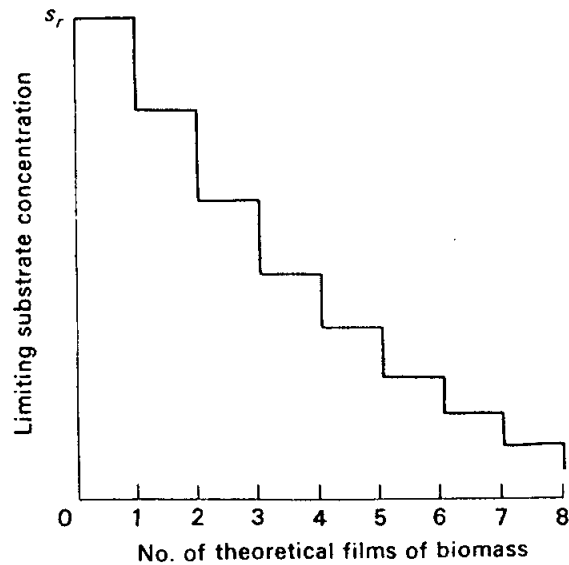
22.2.3 การใช้ซับสเตรคที่กำหนดจำกัดการเจริญเติบโต

ความหนาสูงสุดของชั้นชีวมวลที่มีกิจกรรมถูกกำหนดจำกัดโดยการแพร่กระจายของซับสเตรคที่จำเป็นซึ่งแสดงในสมการที่ 22.4 แผ่นฟิล์มชีวมวลทุกแผ่นจะเข้ามาสัมผัสกับความทฤษฎีอย่างเต็มที่เมื่อพื้นผิวที่อาจเป็นไปได้ของแท่งคอลัมน์ถูกปกคลุมอย่างสมบูรณ์ด้วยชีวมวลและแผ่นฟิล์มชีวมวลชั้นที่มีกิจกรรมมีความหนาถึงระดับสูงสุดของคน ปริมาตรของสื่อกลางอาหารเหลวในแต่ละส่วนของแท่งคอลัมน์คือ V/n การพิจารณาถึงปริมาตรของสื่อกลางอาหารเหลว (V/n) ที่ไหลผ่านจากส่วนแรกจนถึงส่วนสุดท้ายของแท่งคอลัมน์ได้สมมุติให้ปริมาตรของซับสเตรคที่กำหนดจำกัดการเจริญเติบโตถูกใช้ไปในแต่ละส่วนต่อเนื่องกันเป็นลำดับคือ $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ การลดลงอย่างเป็นขั้นตอนของความเข้มข้นของซับสเตรคอาจทดแทนได้ดังในรูปที่ 22.3 ถ้าให้ s_r เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นและ s_e เป็นความเข้มข้นสุดท้ายของซับสเตรคที่กำหนดจำกัดการเจริญเติบโตจะได้ว่า

$$\text{final concentration} = \text{initial concentration} - \text{fall in concentration}$$

นั่นก็คือ

$$s_e = s_r - (\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_n) / (V/n) \quad 22.5$$



รูปที่ 22.3 Predicted mode of fall in concentration of growth-limiting substrate in a packed column with microbes attached.

และ

$$\sigma_1 = qx_{o1}t_r/n \quad 22.6$$

ซึ่ง q คือผลหารทาง เมตาโบลิซึมสำหรับซับสเตรทที่กำหนดจากอัตราการเจริญเติบโต x_{o1} คือปริมาณของชีวมวลในชั้นที่มีกิจกรรม, t_r คือระยะเวลาคงอยู่ทั้งหมดของสื่อกลางอาหารในแท่งคอลัมน์, t_r/n คือระยะเวลาคงอยู่ในแต่ละส่วนของคอลัมน์ ปริมาณของชีวมวลในชั้นที่มีกิจกรรมอาจหาได้จากสมการคือ

$$x_{o1} = Ay_1\rho \quad 22.7$$

ซึ่ง A คือพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์และ y_1 คือความหนาของชั้นที่มีกิจกรรม ρ = ความหนาแน่นของชีวมวล แทนค่า y_1 จากสมการที่ 22.4 และ x_{o1} จากสมการที่ 22.3 จะได้ว่า

$$\sigma_1 = \frac{k}{n} s_r^{1/2} \quad 22.8$$

ซึ่ง $k = At_r(2D'\rho q)^{1/2}$

ความเข้มข้นของซีสเทรคที่กําหนดจํากัดการเจริญเติบโตในส่วนหรือชั้นคอนที่ สองอาจถูกกําหนดได้โดย

$$s_r - \sigma_1/(V/n) = s_r - ks_r^{1/2}/V \quad 22.9$$

และซีสเทรคที่ถูกใช้ไปในส่วนหรือชั้นคอนที่ สองตามทฤษฎีคือ

$$\sigma_2 = \frac{k}{n} \left(s_r - \frac{k}{V} s_r^{1/2} \right)^{1/2} \quad 22.10$$

นั่นก็คือ

$$\sigma_2 = \frac{k}{n} s_r^{1/2} (1 - k/Vs_r^{1/2})^{1/2} \quad 22.11$$

ให้ $\zeta = k/Vs_r^{1/2}$ จากทฤษฎีเลขสองจำนวนตามหลักคณิตศาสตร์ (binomial theorem)

ทำให้ ζ เป็นเพียงเศษส่วนย่อยส่วนหนึ่ง และ $(1 - \zeta)^{1/2} \approx 1 - \zeta/2$ ดังนั้น σ_2 จึงถูกประมาณไว้ว่า

$$\sigma_2 = \frac{k}{n} s_r^{1/2} \left(1 - \frac{k}{2Vs_r^{1/2}} \right) \quad 22.12$$

ในทำนองเดียวกันจึงอาจประมาณได้ว่าซีสเทรคที่ถูกเมตาโบไลซ์ไปในส่วนของแผ่นฟิล์มตามทฤษฎีที่ n คือ

$$\sigma_n = \frac{k}{n} s_r^{1/2} \left\{ 1 - (n-1) \frac{k}{2Vs_r^{1/2}} \right\} \quad 22.13$$

ผลรวมของ σ ตามลำดับชั้นถูกกําหนดได้โดย

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^n \sigma_n &= \frac{k}{n} s_r^{1/2} \left[n - \frac{k}{2Vs_r^{1/2}} \{1+2+3+\dots+(n-1)\} \right] \\ &= ks_r^{1/2} \left\{ 1 - \frac{k(n-1)}{4Vs_r^{1/2}} \right\} \end{aligned} \quad 22.14$$

เนื่องจาก $\sum_{n=1}^n \sigma_n$ คือปริมาณซีสเทรคจํากัดทั้งหมดที่ถูกใช้จากปริมาตร V/n ของสื่อกลางอาหาร เมื่อยานไปจนตลอดแห่งคอลัมน์จึงสามารถกําหนดได้ว่า

$$\sum_{n=1}^n \sigma_n = (s_r - s_e)V/n \quad 22.15$$

จากสมการที่ 22.14 และ 22.15 จะได้ว่า

$$\frac{k^2}{4V^2} n^2 - \left(\frac{k}{4V} + s_r^{1/2} \right) \frac{k}{V} n + s_r - s_e = 0 \quad 22.16$$

สมการที่ 22.16 อาจถูกเปลี่ยนแปลงได้เป็น

$$n = 0.5 + \frac{2F}{K} \left[s_r^{1/2} - \left\{ \left(\frac{K}{4F} + s_r^{1/2} \right)^2 - s_r + s_e \right\}^{1/2} \right] \quad 22.17$$

ซึ่ง $K = A(2D'pq)^{1/2}$ สมการที่ 22.17 จึงถูกถือว่าเป็นสมการสุทธกรยาว ถ้า $K/4F$ มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ $s_r^{1/2}$ ดังนั้นสมการที่ 22.17 จึงสามารถอนุมานเป็นสมการสุทธกรสั้นได้ว่า

$$n = \frac{2F}{K} (s_r^{1/2} - s_e^{1/2}) = \frac{2V}{t_r K} (s_r^{1/2} - s_e^{1/2}) \quad 22.18$$

พื้นที่ทั้งหมดของแผ่นฟิล์มทางชีววิทยาถูกกำหนดได้เท่ากับ nA และพื้นที่เฉพาะของแผ่นฟิล์มทางชีววิทยาคือ

$$\alpha_b = nA/V_c \quad 22.19$$

ซึ่ง V_c คือปริมาตรของแท่งคอลัมน์ทั้งหมด

22.2.4 การเกิดชีวมวล

ชีวมวลชั้นที่มีกิจกรรมทั้งหมดในแท่งคอลัมน์อาจถูกกำหนดได้โดยสมการ

$$x_g = F(s_r - s_e)/q \quad 22.20$$

ถ้าเขียนว่า $q = \mu/Y_g + \beta$ โดยที่ μ/Y_g หมายถึงอัตราการความเร็วในการใช้ซับสเตรตเพื่อการเจริญเติบโตเท่านั้น และ β คือการใช้หรือบริโภคเพื่อจุดประสงค์อื่นเช่นใช้เป็นพลังงานเพื่อการหาญบำรุง เป็นต้น ดังนั้น

$$x_g = \frac{F(s_r - s_e)}{(\mu/Y_g + \beta)} \quad 22.21$$

ชีวมวลทั้งหมด (x_t) หมายถึงชีวมวลชั้นที่มีกิจกรรมรวมกับชีวมวลชั้นที่ไม่มีกิจกรรมและจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราความเร็ว

$$dx_t/dt = YF(s_r - s_e) \quad 22.22$$

ซึ่ง Y คือพีชคณิตหรือประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตรวมทั้งหมด เมื่อมีขบวนการบางอย่างเช่นการออกโคไลซิสทำให้ชีวมวลชั้นที่ไม่มีกิจกรรมถูกกำจัดออกไปจุลินทรีย์ก็มีแนวโน้มที่จะทดแทนส่วนของชีวมวลที่ขาดหายไปในแท่งคอลัมน์ ถ้าอัตราการความเร็วในการสูญเสียชีวมวลชั้นที่ไม่มีกิจกรรมถูกแทนค่าด้วย $b(x_t - x_g)$ ซึ่ง b คือค่าคงที่จะได้ว่า

$$dx_t/dt = YF(s_r - s_e) - b(x_t - x_g) \quad 22.23$$

เมื่ออยู่ในสถานะมั่นคงความหนาของเยื่อฟิล์มชีวมวลจะคงที่ ($dx_i/dt=0$) ทำให้ปริมาณทั้งหมดของชีวมวลที่สถานะมั่นคง (\bar{x}_i) ถูกกำหนดได้เป็น

$$b(\bar{x}_i - x_o) = YF(s_r - s_o) \quad 22.24$$

22.2.5 การจำกัดโดยออกซิเจน

สำหรับขบวนการแบบแอโรบิกในถังคอลัมน์ออกซิเจนมักเป็นข้อจำกัดที่กำหนดจำกัดการเจริญเติบโตเนื่องจากมีการละลายต่ำมาก เพื่อให้ถังคอลัมน์มีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับขบวนการแบบแอโรบิกจึงจำเป็นต้องให้อากาศแก๊สสูบล้างอาหารเหลวในทุกชั้นตอนตลอดคอลัมน์ บางครั้งก็ถือว่าออกซิเจนถูกถ่ายเทจากแก๊สไปยังสูบล้างอาหารเหลวได้อย่างต่อเนื่องในทุกส่วนทางทฤษฎีของคอลัมน์และอัตราความเร็วของขบวนการก็ถูกจำกัดโดยออกซิเจน ความสมมูลของออกซิเจนในแต่ละส่วนทางทฤษฎีของคอลัมน์คือ

rate of increase in = rate of solution - rate of oxygen uptake by
dissolved oxygen theoretical film of biomass

นั่นก็คือ

$$R_o = K_L a(c_s - c) \frac{V}{n} - x_{o1} q_{O_2} \quad 22.25$$

ถือว่าเมื่ออยู่ในสถานะมั่นคง $R_o = 0$ จะได้ว่า

$$x_{o1} q_{O_2} = \frac{VK_L a}{n} (c_s - c) \quad 22.26$$

และสำหรับถังคอลัมน์ทั้งหมดเนื่องจากเยื่อฟิล์มทางทฤษฎีทุกแผ่นถูกถือว่ามีความหนาเท่ากัน ดังนั้น

$$n x_{o1} q_{O_2} = VK_L a (c_s - c) \quad 22.27$$

แทนค่าสำหรับ x_{o1} โดยสมการที่ 22.7 และ 22.4 จะได้ว่า

$$n = VK_L a (c_s - c) / Kc^{1/2} \quad 22.28$$

ซึ่ง $K = A(2D\rho q_{O_2})^{1/2}$

ปริมาณข้อจำกัดที่ถูกออกซิโคซ์ (Δs) มีความสัมพันธ์สอดคล้องกันกับปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ (ΔO_2) จึงแสดงว่า $\Delta O_2 = P_o \Delta s$ หรือ $q_{O_2} = P_o q$ ซึ่ง P_o คือค่าความต้องการออกซิเจนคงที่ อัตราความเร็วในการบริโภคข้อจำกัดที่ถูกออกซิโคซ์ได้ในถังคอลัมน์

ทั้งหมดคือ

$$F(s_r - s_e) = nx_{o_1}q \quad 22.29$$

แทนค่าสำหรับ x_{o_1} จากสมการที่ 22.26 และใส่ค่า $q_{o_2} = P_0q$ จะได้ว่า

$$s_r - s_e = \frac{VK_L a}{P_0 F} (c_s - c) \quad 22.30$$

และจากสมการที่ 22.28 และ 22.30 จะได้ว่า

$$s_r - s_e = nKc^{1/2}/P_0F \quad 22.31$$

22.2.6 การไหลประโยชน์จากแหล่งคอลัมน์ที่มีเชื้อจุลินทรีย์เกาะติดอยู่

การไหลประโยชน์จากทฤษฎีนี้เพื่อออกแบบแหล่งคอลัมน์สำหรับทำให้ชีสเตรคถูกย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์อาจสรุปได้ว่า ถ้าสื่อกลางอาหารถูกทำให้ไหลแตกต่างจากการไหลแบบผ่านไปเป็นลำดับแหล่งคอลัมน์จะมีประสิทธิภาพลดน้อยลง เนื่องจากสื่อกลางอาหารบางส่วนที่ชีสเตรคถูกใช้หมดไปแล้วยังคงยึดพื้นผิวของแผ่นฟิล์มชีวมวลอยู่ไม่อาจไหลประโยชน์ได้ การไหลแบบผ่านไปเป็นลำดับของสื่อกลางอาหารในแหล่งคอลัมน์เปิดโอกาสให้เกิดลำดับชั้นของชีวมวลที่ทำหน้าที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นลำดับการไหลชีสเตรคสองชนิดคือ X และ Y ซึ่ง X ยับยั้งหรือสกคการไหล Y Pirt (1973a) ได้เปรียบเทียบจำนวนแผ่นฟิล์มทางทฤษฎีที่ต้องการสำหรับแหล่งคอลัมน์แบบแอนแอโรบิกและที่ให้อากาศ แล้วเสนอแนะตามตัวเลขว่าแหล่งคอลัมน์จะมีประสิทธิภาพมากสำหรับการสลายตัวโดยจุลินทรีย์แบบแอนแอโรบิกแต่มีข้อจำกัดหลายอย่างจากอัตราความเร็วในการละลายของออกซิเจนในแหล่งคอลัมน์ที่ให้อากาศสำหรับการตรวจสอบเชิงปริมาณของแบบจำลองนี้ยังไม่อาจทำได้

22.3 การเจริญเติบโตเป็นก้อนเมือกของชีวมวลในของเหลว

22.3.1 ลักษณะโดยทั่วไป

จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตเป็นไมซีเลียมมักปรากฏเป็นสองรูปแบบแตกต่างกันแบบหนึ่งคือแบบที่เป็นเส้นสายเหมือนกันโดยตลอดซึ่งไมซีเลียมกระจายอยู่ในสื่อกลางอาหารอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งไฮฟาแต่ละเส้นใกล้ชิดกับสื่อกลางอาหาร รูปแบบที่สองคือ

แบบที่เป็นก้อนเม็ด (pellet or stromatic type) มีลักษณะเป็นก้อนกลมของชีวมวล ประกอบด้วยเส้นใยไฮฟาอีกรวมตัวเข้าด้วยกัน ก้อนเม็ดเหล่านี้สามารถเจริญเติบโตมีขนาดใหญ่อขึ้นได้และการอีกรวมตัวเข้าด้วยกันของไฮฟาอาจหนาแน่นมากจนกระทั่งขับสเตรทไม่สามารถถูกซึมซับเข้าไปข้างในโคเวนแต่ละเข้าไปโดยวิธีการแพร่กระจายเท่านั้น ดังนั้นการนำเอาขับสเตรทเข้าไปในก้อนเม็ดจึงถูกจำกัดโดยการแพร่กระจาย นอกจากนี้ก้อนเม็ดไมซีเลียมอาจมีโครงร่างโปร่งพวงจนกระทั่งสื่อกลางอาหารสามารถไหลเข้าไปแพร่อยู่ในก้อนเม็ดได้ การเจริญเติบโตเป็นก้อนเม็ดมีความสำคัญเนื่องจากมักปรากฏอยู่เสมอในการหมักหรือเพาะเลี้ยงพืช เช่น เกี่ยวกับการจับรวมตัวเป็นก้อน (flocs) ของจุลินทรีย์ในน้ำเสียหรือน้ำทิ้งซึ่งก็มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกันนี้

รูปแบบที่เป็นเส้นสายของไมซีเลียมมีการเจริญเติบโตแบบขยายตัวอัตราความเร็วในการเจริญเติบโตเฉพาะ (μ) คงที่จนกระทั่งขับสเตรทบางอย่างหรือผลิตภัณฑ์บางอย่างใดอย่างหนึ่งกลายเป็นสิ่งกำหนดจากการเจริญเติบโต (Pirt & Callow, 1959) แต่การเจริญเติบโตของรูปแบบที่เป็นก้อนเม็ดแตกต่างไปจากกฎการเจริญเติบโตแบบขยายคือ พบว่าการเพิ่มขึ้นของชีวมวลในก้อนเม็ดเป็นไปตามกฎรากที่สาม (cube root law) ของ Pirt (1966) และ Trinci (1970) ดังสมการ

$$M^{1/3} = kt + M_0^{1/3} \quad 22.32$$

กฎนี้จะใช้ได้ถ้าการเจริญเติบโตทั้งหมดเกิดขึ้นที่เปลือกชั้นนอกสุดของก้อนเม็ดโดยมีความหนาคงที่ w (รูปที่ 22.4) ตามแบบจำลองนี้อัตราความเร็วในการเพิ่มขึ้นตามรัศมีของก้อนเม็ด (r) อาจถูกกำหนดได้โดย

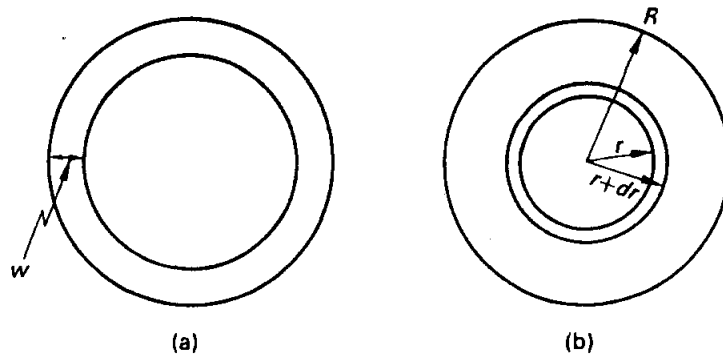
$$dr/dt = \mu w \quad 22.33$$

ซึ่ง μ = อัตราความเร็วในการเจริญเติบโตเฉพาะ ดังนั้น

$$r = \mu wt + r_0 \quad 22.34$$

ถ้า M = มวลทั้งหมดของก้อนเม็ด n ก้อน (ถ้าว่ามีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน) และ ρ = ความหนาแน่นของชีวมวล ดังนั้น $M = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho n$ เมื่อแทนค่า r ในสมการที่ 22.34 ก็จะได้สมการที่ 22.32 ซึ่ง

$$k = (4\pi \rho n/3)^{1/3} \mu w \quad 22.35$$



รูปที่ 22.4 (a) Diagram of cross section through the centre of a biomass pellet with peripheral growth zone of width, w . (b) Cross section through centre of a biomass pellet suspended in a nutrient medium. Substrate concentrations at radius r , $r + dr$, and R are s , $s + ds$ and s_m respectively.

Trinci (1970) พบว่ารัศมีสำหรับก้อนเม็ทของ Aspergillus nidulans เพิ่มขึ้นตามกฎเส้นตรงตามสมการที่ 22.34 จากการเปลี่ยนแปลงของอัตราความเร็วในการเจริญเติบโตเฉพาะโดยอิทธิพลของอุณหภูมิพบว่า $k \propto \mu$ ซึ่งก็สอดคล้องกันกับสมการที่ 22.35 ค่าของ w ถูกพบว่าค่อนข้างคงที่คือเท่ากับ 0.45 มม. ดังนั้นค่า w จึงเป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงของ μ เป็นที่น่าสังเกตว่า w มักมีค่าเป็นประมาณครึ่งหนึ่งของความกว้างรอบนอกของบริเวณที่มีการเจริญเติบโตสำหรับโคโลนีของจุลินทรีย์ชนิดเดียวกันซึ่งเจริญเติบโตบนผิววุ้นที่มีสื่อกลางอาหารแบบเดียวกัน (ตอนที่ 23.4.2) Trinci (1970) ยังได้พิสูจน์ว่า $k \propto n^{1/3}$ จึงสอดคล้องกันกับค่าที่ได้ทำนายไว้ในสมการที่ 22.35 และพบว่าเมื่อเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในช่วงระยะเวลาก่อนหน้าที่จะมีการเจริญเติบโตเป็นไปตามกฎรากที่สามก้อนเม็ทของ A. nidulans จะมีการเจริญเติบโตเป็นไปตามกฎการเจริญเติบโตแบบขยายในช่วงระยะเวลานี้ถ้ามีความจำเป็นไฮฟ่าทั้งหมดทุกส่วนก็สามารถเจริญเติบโตได้โดยไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดหยุดนิ่ง และจะสิ้นสุดลงเมื่อโคเส้นขนาดศูนย์กลางของก้อนเม็ทเป็นประมาณ $4w$

22.3.2 การกำหนดจากรากที่โดยการแพร่กระจายของซีสเตรท

ถ้าก้อนเม็ทถูกอัดแน่นมากจนกระทั่งซีสเตรทสามารถเข้าไปภายในได้โดยวิธีการแพร่กระจายเท่านั้น ขนาดของก้อนเม็ทเมื่อการเจริญเติบโตถูกกำหนดจากรากที่โดยการแพร่กระจายอาจถูกตรวจสอบได้ดังต่อไปนี้ เมื่อพิจารณาถึงความสมมูลของซีสเตรท

ในบริเวณตั้งแต่จากจุดศูนย์กลางของก้อนเนื้อไปจนถึงระดับความยาวรัศมี r ดังแสดงในรูปที่ 22.4 โดยถือเอาอย่างง่ายว่าอาหารทางเมตาโบลิซึม (q) ของซีสเทรคที่กำหนดจำกัดการเจริญเติบโตคงที่และเป็นอิสระจากความเข้มข้นของซีสเทรคจนกระทั่งความเข้มข้นของซีสเทรคมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ที่สถานะมั่นคงว่า

$$\text{Diffusion of substrate into the zone of radius, } r = \text{Uptake of substrate in the zone of radius, } r$$

ความสัมพันธ์นี้ถูกแทนโดยสมการคือ

$$4\pi r^2 D' \frac{ds}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho q \quad 22.36$$

ซึ่ง D' = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของซีสเทรค และ ρ = ความหนาแน่นของชีวมวล ดังนั้นจะได้ว่า

$$\int_s^m ds = \frac{\rho q}{3D'} \int_r^R r dr \quad 22.37$$

และ

$$s_m - s = \frac{\rho q}{6D'} (R^2 - r^2) \quad 22.38$$

รัศมีวิกฤติของก้อนเนื้อ (R_c) อาจเกิดขึ้นได้เมื่อการเจริญเติบโตของก้อนเนื้อถูกกำหนดจำกัดโดยการแพร่กระจายของซีสเทรค นั่นก็คือเมื่อความเข้มข้นของซีสเทรคมีค่าเป็นศูนย์ที่จุดศูนย์กลางของก้อนเนื้อ ดังนั้น $R = R_c$ เมื่อ $s = 0$ ที่ $r = 0$ ใส่ค่าเหล่านี้ในสมการที่ 22.38 จะได้ว่า

$$R_c = (6D' s_m / \rho q)^{1/2} = (6D' Y s_m / \rho \mu)^{1/2} \quad 22.39$$

ซึ่ง μ คืออัตราความเร็วในการเจริญเติบโตเฉพาะและ Y คือพีชผลหรือประสิทธิภาพในการเจริญเติบโต ซีสเทรคที่ถูกเชื่อมน่าจะเป็นสิ่งที่กำหนดจำกัดการเจริญเติบโตมากที่สุดในการหมักแบบแอโรบิกคือออกซิเจน เมื่อมีความเครียดออกซิเจนที่ละลาย 0.21 บรรยากาศในสื่อกลางอาหาร Phillips (1966) พบว่ารัศมีวิกฤติสำหรับก้อนเนื้อของ Penicillium chrysogenum จะมีค่าประมาณ 0.1 มม. ซึ่งก็สอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับค่าทางทฤษฎี แต่ถ้าน้ำตาลกลูโคส (1% W/V) เป็นซีสเทรคกำหนดจำกัดการเจริญเติบโต Pirt (1966) พบว่ารัศมีวิกฤติที่ตรวจสอบได้ควรจะมีค่าประมาณ 1 ถึง 2 มม. การวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับการแพร่กระจายของออกซิเจนเข้าไปในก้อนเนื้ออย่างถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้นได้

ถูกเสนอโดย Aibauer Kobeyashi (1971) แต่รัศมีวิกฤติสำหรับก้อนเม็คของ Penicillium chrysogenum พบว่ามีค่าซึ่งค่อนข้างต่ำมาก Trinici (1970) ได้ตรวจสอบพบว่าก้อนเม็คของ Aspergillus nidulans จะยังไม่ถูกจำกัดโดยออกซิเจนจนกว่าจะมีรัศมีเกินกว่า 2.5 มม. จึงแสดงว่าก้อนเม็คของ Aspergillus มีโครงสร้างโปร่งมากกว่าก้อนเม็คของ Penicillium

ในใจกลางของก้อนเม็คที่แน่นทึบสำหรับเชื้อรา มักมีไฮฟาซึ่งแตกสลายและสูญเสียไซโทพลาสซึมไป (Camici et al., 1952) ผลลัพธ์เช่นนี้ในบางครั้งก็อาจเป็นผลกระทบเนื่องมาจากการขาดแคลนหรือออกซิเจนภายในก้อนเม็คนั้นและชี้ให้เห็นว่าก้อนเม็คไมซีเลียมอาจมีลักษณะเป็นเนื้อกระระคนกันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟงไจที่อยู่ในรูปแบบซึ่ง เป็นเส้นสาย

22.3.3 สาเหตุที่ทำให้เกิดก้อนเม็คไมซีเลียม

ยังเป็นที่รู้จักกันน้อยมากเกี่ยวกับปัจจัยที่กำหนดว่าไมซีเลียมจะเจริญเติบโตเป็นก้อนเม็คหรือจะอยู่ในรูปแบบที่เป็นเส้นสาย ทั้งขนาดของแหล่งเชื้อจุลินทรีย์และธรรมชาติของซับสเตรตถูกชี้แจงว่ามีส่วนเกี่ยวข้องกับเรื่องนี้ (Camici et al., 1952) และยังพบควยว่ารูปแบบที่เป็นก้อนเม็คของ Penicillium chrysogenum จะเกิดขึ้นถ้ามีโคเน็คเียในแหล่งเชื้อจุลินทรีย์น้อยกว่าความเข้มข้นวิกฤติที่อาจประเมินได้เท่ากับ 0.3×10^6 /มล. ในสื่อกลางอาหารชั้นต่ำสุดและ 10^6 /มล. ในสื่อกลางอาหารอุดมสมบูรณ์ (น้ำแช่เม็คข้าวโพค) Trinici (1970) พบว่า Aspergillus nidulans ในสื่อกลางอาหารชั้นต่ำสุดทำให้เกิดก้อนเม็คอย่างไม่อาจเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่จำกัดกว่าความเข้มข้นของโคเน็คเียจะสูงขึ้นถึง 2.3×10^6 /มล. และสัดส่วนจำนวนก้อนเม็คที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโคเน็คเียที่เค็มลงไปจะมีเพียงประมาณ 10^{-5} เท่านั้น โคเน็คเียส่วนเกินจะรวมตัวกันเป็นก้อนเม็ค Trinici (1970) เสนอว่าความสามารถของโคเน็คเียในการจับรวมตัวกันอาจเป็นปัจจัยสำคัญในการทำให้เกิดก้อนเม็ค ระดับของการปั่นกว่นหรือคนและการคักเค็นในถังหมักก็อาจมีความสำคัญแต่ปรากฏว่ายังไม่ไค้มีการศึกษา Pirt และ Callow (1959) ไค้สังเกตว่าการหมักแบบคงที่ทางเคมิของ Penicillium chrysogenum ถูกชักนำให้เกิดก้อนเม็คไค้ควยค่าพีเอชที่สูงเกินกว่า 7.0 แต่จะไม่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่ำกว่านี้.