

การศึกษาทางทฤษฎีถึงผลของน้ำและ อุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยใช้ MATLABTM

หัตยา ศรีสุขวัฒนา

อาจารย์ ตรีสัตยาเวช

เพ็ญจิตร แสงสุรศักดิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กรุงเทพฯ 10900

บทคัดย่อ

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น อุณหภูมิ ปริมาณน้ำ ปริมาณออกซิเจน และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ในบทความนี้เป็นการศึกษาทางทฤษฎีถึงผลของความเร็วของอากาศที่ผ่านเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ที่มีต่อปริมาณน้ำ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของชีวมวลของกระบวนการหมักแบบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกสร้างขึ้นจากการทำตุลของการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 100 ชั่วโมงของการหมัก MATLABTM ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งผลที่ได้พบว่า อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิและปริมาณน้ำในถังหมัก โดยที่จุลินทรีย์จะสามารถเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 305-310°K และปริมาณน้ำของตัวกลางในช่วง 40-60% เท่านั้น นอกจากช่วงอุณหภูมิและปริมาณน้ำดังกล่าว จุลินทรีย์จะมีการเจริญเติบโตลดลง จากการศึกษา ยังพบว่า อัตราการใช้ให้มีผลโดยตรงต่อความเข้มข้นของชีวมวล เมื่อความเข้มข้นของชีวมวลมากหรือจำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นจะมีผลให้มีการใช้น้ำสูงขึ้น ปริมาณน้ำที่อยู่ในตัวกลางของแพคเบตจึงน้อยลง นอกจากนี้ความเร็วของอากาศขึ้นขาเข้า (V_z) ก็มีผลต่อความเข้มข้นของชีวมวล กล่าวคือเมื่อความเร็วของอากาศขึ้นขาเข้าต่ำสุดที่ 0.0001 m/s มีผลให้อุณหภูมิภายในเบตเพิ่มสูงขึ้นถึง 325°K อุณหภูมิของระบบที่มีค่าสูงเช่นนี้มีผลให้ราเจริญเติบโตได้น้อยลงและมีการระเหยของน้ำเพิ่มขึ้น

Theoretical study of the effects of water content and temperature on solid-state fermentation using MATLABTM

Hattaya Srisukwattana

Anjaree Trisuttayawait

Penjit Sangsurasak

Department of Chemical Engineering,

Faculty of Engineering, Kasetsart University,

Bangkok 10900

Abstract

Microbial growth can be affected by growth conditions such as temperature, water content, oxygen and carbon dioxide concentrations. This study investigated the effects of input air velocities on water content, temperature and biomass concentration at any height of the packed column. Mathematical modelling was performed based on heat and mass balances detecting those parameters during the 100 hours fermentation period. MATLABTM was applied to solve the equations in one-dimension. The study shows that temperature and water content crucially affect the microbial growth. The fungi can grow very well at temperature 305-310°K. However, the growth will decrease when the system temperature is out of this range. The results also show that microorganisms consume water during the growth and increasing the cell numbers. When the growth is high, therefore, the water content of the system reduces. The velocities of input moist air affect the biomass concentration. At the lower air velocity of 0.001 m/s results higher system temperature (325°K) which causes low fungal growth and high water evaporated.

บทนำ

การหมัก (fermentation) เป็นคำที่มีรากศัพท์มาจากภาษาละติน "fervere" แปลว่า เดือด ในปัจจุบันนักชีวเคมีและนักจุลชีววิทยาอุตสาหกรรมได้นำคำว่า *การหมัก* มาใช้ในความหมายแตกต่างกันไปบ้างเช่น ในทางชีวเคมีการหมักหมายถึง การสร้างพลังงานจากกระบวนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ โดยมีสารอินทรีย์เป็นทั้งตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ส่วนการหมักในทางจุลชีววิทยาอุตสาหกรรมหมายถึง กระบวนการผลิตผลใดๆ ก็ตาม ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์จำนวนมาก ซึ่งจะครอบคลุมทั้งกระบวนการแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน ในขณะที่การหมักทางชีวเคมีจะหมายถึงเฉพาะกระบวนการแบบไม่ใช้ออกซิเจนเท่านั้น [1]

การหมักสามารถแบ่งได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน การแบ่งตามปริมาณน้ำหรือของเหลวที่เติม การหมักอาจแบ่งย่อยได้เป็น กระบวนการหมักแบบแห้งหรือการหมักบนอาหารแข็ง (solid-state fermentation) กระบวนการหมักในสภาพกึ่งเหลว (submerge culture) และกระบวนการหมักในอาหารเหลว (liquid culture) [2]

การหมักแบบแห้งดีกว่าการหมักในสภาพกึ่งเหลวและการหมักในอาหารเหลวในด้านการประหยัดเนื้อที่ และให้ผลที่ดีกว่าในแง่ของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ต่อน้ำหนักของสารตั้งต้นที่ใช้ ทั้งยังไม่ต้องใช้เทคโนโลยีที่สูงและมีราคาแพง เป็นต้น[3] การหมักแบบแห้งสามารถนำไปใช้ในการผลิตเอนไซม์ อาหารสัตว์ ยารักษาโรค ยาฆ่าแมลง กรดอินทรีย์ต่างๆ และเมดิซีน เป็นต้น [4-9]

โดยทั่วไปในกระบวนการหมักแบบแห้ง ปริมาณน้ำมีความสำคัญมากและขาดไม่ได้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์จะใช้น้ำในรูปของน้ำอิสระ ในขบวนการเมตาบอลิซึมซึ่งจะมีความร้อนเกิดขึ้นและทำให้เกิดการระเหยของน้ำ ดังนั้น ในการหมักแบบนี้ปริมาณน้ำและอุณหภูมิจึงมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามปริมาณของน้ำ และอุณหภูมิโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จำเป็นและเป็นทางออกในการศึกษาเกี่ยวกับระบบที่มีความยุ่งยากในการติดตามตัวแปรต่างๆ เช่นในระบบที่ศึกษาอยู่นี้ [10]

ระบบที่ศึกษา

ระบบที่ใช้ในกระบวนการหมักแบบแห้งนั้นมีหลายแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน สำหรับโครงงานนี้ได้เลือกใช้ถังหมักแบบแพคเบต โดยมีสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตเช่น มันสำปะหลัง ชั่งข้าวโพด เป็นแหล่งอาหารและน้ำของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่นำมาศึกษาได้แก่ *Rhizopus oligosporus* การศึกษามีสมมติฐานให้อาหารที่อยู่ในเบตมีลักษณะเป็นทรงกลมที่เท่ากันและเหมือนกัน วางซ้อนกันอยู่บนฐานที่มีการเจาะรู (perforation) ให้อากาศไหลผ่านทางด้านล่างของแพคเบต เพื่อเป็นที่ให้อากาศผ่าน ถังหมักนี้วางอยู่ในห้องที่มีอุณหภูมิคงที่หรือมีระบบหล่อเย็นที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ การให้อากาศมีความสำคัญนอกจากเป็นแหล่งออกซิเจนของจุลินทรีย์พวกใช้ออกซิเจนแล้วยังช่วยระบายความร้อนในแพคเบต โดยทั่วไปหลังจากที่ดำเนินการหมักไปได้ระยะหนึ่ง อุณหภูมิของเบตจะสูงมากมีผลให้จุลินทรีย์หยุดการเจริญเติบโตหรือตายได้ และอากาศจะช่วยพาความร้อนถ่ายเทออกจากระบบ จากเหตุผลดังกล่าว อัตราการไหลของอากาศมักถูกควบคุมให้คงที่เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ โดยให้มีการสูญเสียน้ำในอาหารเลี้ยงเชื้อน้อยที่สุด

ข้อสมมติฐาน

ข้อสมมติฐานต่างๆ ข้างล่างนี้มีเพื่อให้ระบบมีความซับซ้อนน้อยลงและง่ายต่อการศึกษา ได้แก่

1. ระบบเป็น Pseudo-homogeneous
2. คุณสมบัติทางความร้อนและฟิสิกส์ของเบตมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการหมัก
3. ไม่มีความเร็วของอากาศขึ้นในแนวแกน r และ θ
4. ความเร็วของอากาศขึ้นในแนวระนาบมีค่าคงที่ตลอดความกว้างของถังหมัก
5. ขนาดและความพรุนของอาหารแข็งมีค่าคงที่ตลอดการหมัก
6. มีการแพร่ของอากาศขึ้นในแนวแกน r และแนวแกน z เท่านั้น
7. ปริมาณน้ำที่สนใจอยู่ในรูปของไอน้ำเท่านั้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ประกอบไปด้วยสมการ 3 ชุดได้แก่ ชุดสมการการเจริญเติบโต ชุดสมการการถ่ายโอนความร้อน และชุดสมการการถ่ายโอนมวล แต่ละชุดสมการมีรายละเอียดดังนี้

ชุดสมการการเจริญเติบโต (Growth Model)

การศึกษานี้ให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ *R. Oligosporus* เป็นความสัมพันธ์ตาม Logistic model [3,11] ดังสมการ

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m X \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)$$

ที่สภาวะเริ่มต้น $t = 0$, $X = X_0$

โดยที่

- X = ความเข้มข้นชีวมวลที่เวลาใดๆ (g-biomass/kg-substrate)
- X_0 = ความเข้มข้นชีวมวลที่เวลาเริ่มต้น (g-biomass/kg-substrate)
- X_m = ความเข้มข้นชีวมวลที่ค่าสูงสุด (g-biomass/kg-substrate)
- μ_m = ความเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (1/h)
- t = เวลาที่ใช้ในการหมัก (h)

สำหรับค่าความเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของ *R. Oligosporus* จากการศึกษาที่เคยทำมาแล้วของ Mitchell พบว่า มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของระบบในรูปของสมการ Quadratic ดังนี้

$$\mu_m = -39.599427 + 0.25667T - 0.000415T^2$$

ในการศึกษานี้ถือว่าค่า Maintenance Heat มีค่าน้อยมาก และความร้อนที่ใช้ระหว่างการเจริญเติบโตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเกิดชีวมวล ดังสมการต่อไปนี้

$$q = \frac{dX}{dt} \rho g$$

โดยที่

- q = ความร้อนของระบบที่เกิดขึ้นจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (W/m³)
- ρ = ความหนาแน่นของ Substrate (kg/m³)
- g = ค่า Metabolic heat yield coefficient (J/g-biomass)

ชุดสมการการถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer Model)

การถ่ายโอนความร้อนภายในถังหมักแพคเบตมี 2 ลักษณะคือ[3] การถ่ายเทความร้อนแบบการนำของของแข็งภายในแพคเบต ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เป็นไปอย่างช้าๆ เพราะค่าการนำความร้อนของวัสดุมีค่าต่ำมาก และการถ่ายเทความร้อนแบบการพาของอากาศที่ไหลเข้าทางด้านล่างของถัง จากการดูดพลังงานรอบถังหมักจะทำให้สมการของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ในเบตดังนี้

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{k}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q$$

ที่สภาวะเริ่มต้น $t = 0$, $T = T_i$ และสภาวะขอบเขตดังนี้

$$z = 0, T = T_a$$

$$z = H, \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

$$r = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

$$r = R_0, T = T_w$$

เมื่อ

$$C_p = \text{ค่าความร้อนจำเพาะของของแข็งในเบต (J/kg.K)}$$

$$T = \text{อุณหภูมิของระบบ (K)}$$

$$V_z = \text{Superficial air velocity (m/s)}$$

$$z = \text{ความสูงของเบต (m)}$$

$$k = \text{ค่านำความร้อนของของแข็งในเบต (W/m}^2\text{.K)}$$

$$r = \text{รัศมีของเบต (m)}$$

ชุดสมการการถ่ายโอนมวลของน้ำ

ปริมาณน้ำในถังแพคเบตเปลี่ยนแปลงดังนี้กล่าวคือ การใช้น้ำขณะที่เกิดขบวนการเมตาโบลิซึมเพื่อการเจริญเติบโต $\frac{1}{Y_{X/W}} \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)$ การใช้น้ำในการรักษาสภาพ (mX) การพาน้ำใหม่เข้ามาโดยอากาศที่ไหลเข้าทางด้านล่างของถัง $V_z \frac{\partial C_W}{\partial z}$ การแพร่ของน้ำภายในเบตทั้งตามแนวรัศมีและในแนวความสูง

ของถัง $D_W \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_W}{\partial r} \right) \right)$ และ $\frac{\partial^2 C_W}{\partial z^2}$ หรือการสูญเสียน้ำโดยการระเหยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบ (C_W) และจากข้อสมมติที่ให้ระบบเป็น Pseudo-homogeneous สมการที่ได้จากการทำดุลน้ำในถังแพคเบดจึงมีรูปดังนี้

$$\frac{\partial C_W}{\partial t} = \frac{1}{Y_{X/W}} \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) + mX - V_z \frac{\partial C_W}{\partial z} + D_W \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_W}{\partial r} \right) \right) \right] + \left(\frac{\partial^2 C_W}{\partial z^2} \right) + C_W$$

สภาวะเริ่มต้นได้แก่ $t = 0$, $C_W = C_{WO}$

และมีสภาวะขอบเขตดังนี้

$$z = 0 , C_W = C_{WO}$$

$$z = H , \frac{\partial C_W}{\partial z} = 0$$

$$r = 0 , \frac{\partial C_W}{\partial r} = 0$$

$$r = R_0 , \frac{\partial C_W}{\partial r} = 0$$

โดยที่

C_W = ค่าความเข้มข้นของน้ำในสถานะก๊าซ (kg/m³)

C_{WO} = ค่าความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นในสถานะก๊าซ (kg/m³)

$Y_{X/W}$ = ค่า Yield coefficient of biomass and water (kg-water/kg-biomass)

m = ค่า Maintanance water (kg-water/kg-biomass/h)

D_W = สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ

การทำแบบจำลองให้ง่ายขึ้น

เพื่อให้สมการง่ายในการแก้ปัญหด้วย MATLAB™ จึงมีการลดรูปสมการโดยตัดเทอมของการถ่ายโอนความร้อนโดยการนำออกไป ทั้งนี้ จากการประมาณค่าพบว่า การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา มีค่ามากกว่าการถ่ายโอนความร้อนโดยการนำถึง 1000 เท่า ในทำนองเดียวกัน ชุดสมการการถ่ายโอนมวลน้ำถูกลดรูปโดยการตัดเทอมการแพร่ออกไป สมการการถ่ายโอนความร้อนจึงลดรูปเหลือ

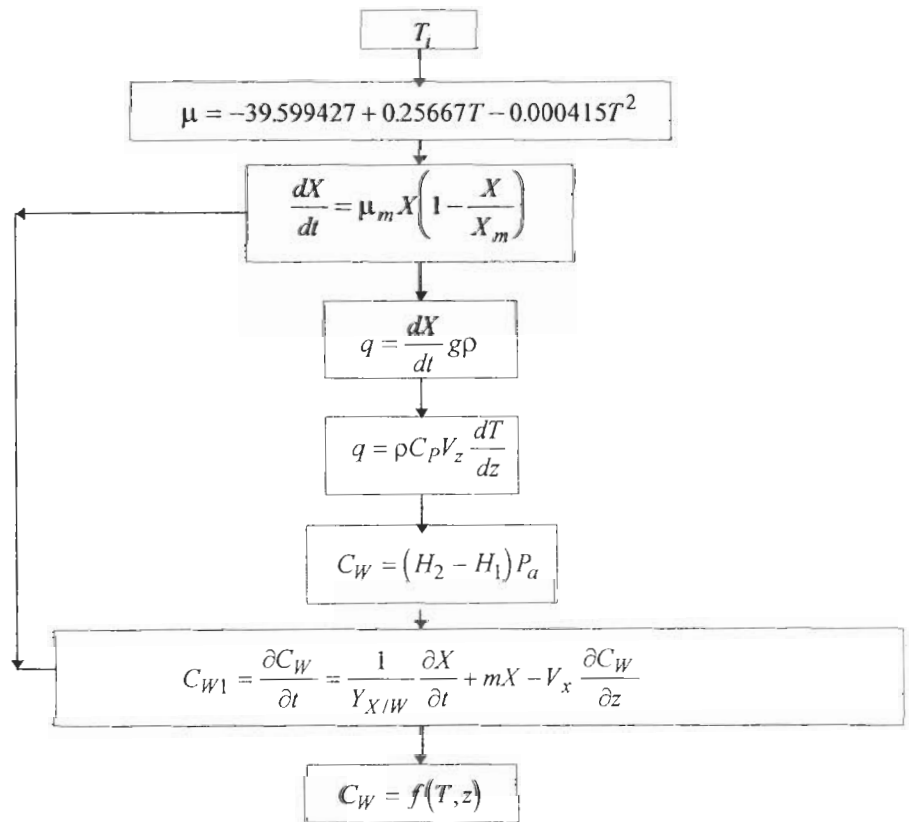
$$\rho C_P \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q$$

และสมการการถ่ายโอนมวลน้ำได้รูปเป็น

$$\frac{\partial C_W}{\partial t} = \frac{1}{Y_{X/W}} \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right) + mX - V_z \frac{\partial C_W}{\partial z} + C_W$$

การแก้ปัญหาโดยใช้ MATLAB™

ชุดสมการดังกล่าวข้างต้นสามารถหาคำตอบได้โดยใช้ MATLAB™ เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ แผนภาพข้างล่างนี้แสดงลำดับการคำนวณอย่างคร่าวๆ เริ่มต้นต้องใส่ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของเบด (T_i) เพื่อคำนวณค่าความเจริญเติบโตจำเพาะ (μ_m) และอัตราการเจริญเติบโตของ *R. oligosporus* ($\frac{dX}{dt}$) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเจริญเติบโต (q) จากนั้นจึงคำนวณ อุณหภูมิและความชื้นของเบด เมื่อได้ค่าอุณหภูมิและความชื้นของเบดค่าใหม่ นำกลับไปเพื่อคำนวณซ้ำ



รูปที่ 1 Flow chart แสดงการคำนวณที่เวลาคงที่ค่าหนึ่ง

สมการทั้งหมดที่ได้นำเสนอไปแล้วข้างต้นจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ MATLAB™ ดังนี้

Equation	Symbolic equation	Equation in MATLAB™ forms
$dX/dt = \mu_m \cdot X \cdot (1 - (X/X_m))$	$dsolve('DX = \mu_m \cdot X \cdot (1 - X/X_m)', 'X(0) = 5')$	$X = -X_m / (-1 - 3.846153846153846e-2 \cdot \exp(\mu_m \cdot \text{time}) \cdot (5 \cdot X_m - 26))$
$\rho \cdot Cp \cdot Vz \cdot (\partial T / \partial z) = q$	$dsolve(' \rho \cdot Cp \cdot Vz \cdot DT - q = 0', 'T(0) = 308')$	$T2 = q / Vz / \rho / Cp \cdot z + 308;$
$\partial Cw / \partial t = (1/Y_{x/w}) \cdot \partial X / \partial t + m \cdot X - Vz \cdot \partial Cw / \partial z$	$dsolve('(1/Y) \cdot b + m \cdot X - Vz \cdot DCw = 0', 'Cw(0) = 0.03861')$	$Cw = (-1/Vz \cdot z \cdot (1/Y) \cdot b - 1/Vz \cdot z \cdot m \cdot X + 3.861e-2)$

โดยกำหนดให้ $b = \partial X / \partial t$

ผลการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ช่วง กล่าวคือ ช่วงแรกจะเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิ ความเข้มข้นชีวมวลและปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาต่างๆ ของการหมักที่ระดับความสูงต่างๆ ของเบตดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าที่เวลาของการหมัก 40 และ 100 ชั่วโมง อุณหภูมิของเบตมีค่าสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับที่ 40 และ 100 ชั่วโมงของการหมักนี้ ทำการศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้งสามดังกล่าวข้างต้น ความเร็วอากาศสามค่าดังนี้ 0.0001, 0.001 และ 0.05 m/s ผลของการศึกษาแสดงในรูปที่ 3 และ 4

จากสมการการเจริญเติบโตจำเพาะพบว่าจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วง 300-310°K และ μ_m มีค่าเป็นศูนย์ที่ อุณหภูมิ 325.5°K ในกรณีนี้ที่อุณหภูมิมากกว่า 325.5°K ค่า μ_m จะติดลบ ผลที่ได้คือความเข้มข้นของชีวมวลลดลง

จากรูปที่ 2ก ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะความสูง ณ เวลาต่างๆ ของแพคเบตพบว่า

- เมื่อระยะความสูงของแพคเบตเพิ่มขึ้น อุณหภูมิภายในจะสูงขึ้น เพราะในขณะที่อากาศชั้นไหลผ่านแพคเบตได้นำความร้อนออกไปด้วย อย่างไรก็ตาม ในขณะที่อากาศชั้นไหลผ่านชั้นต่างๆ ของเบตจะสะสมความร้อนมีผลให้อุณหภูมิของอากาศชั้นสูงขึ้น การพาความร้อนจึงไม่ดีเหมือนข้างล่างของเบตที่อากาศชั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิจึงสูงสุดที่ด้านบนของแพคเบต

- ที่ระยะเวลามากขึ้นอุณหภูมิของระบบจะสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณของราที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการคายความร้อนออกมาได้มากขึ้น แต่หลังจากเวลา 40 ชั่วโมง อุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อย เนื่องจากอัตราการเจริญเติบโตของราลดลง จึงมีการคายความร้อนออกมาน้อยลง ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้สัมพันธ์กับอัตราการเจริญเติบโตของรา จะเห็นว่าช่วงอุณหภูมิของการศึกษานี้ไม่กว้างนัก ประมาณ 308°K เนื่องจากการศึกษานี้ทำให้ความเร็วอากาศคงที่ที่ 0.001 m/s ซึ่งเป็นช่วงที่มีการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ผลของความเร็วอากาศที่มีต่ออุณหภูมิของเบต จะทำการศึกษาในลำดับต่อไป

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของรากับระยะความสูง ณ เวลาต่างๆ ของแพคคอลัมน์ ในรูปที่ 2ข สรุปได้ดังนี้

- เมื่อความสูงมากขึ้นเรื่อยๆ ปริมาณของราจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ
- ที่ระยะเวลานานขึ้นมีผลทำให้เกิดการสะสมความร้อนมากขึ้น ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

และจากการติดตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับระยะความสูง ณ เวลาต่างๆ ของแพคเบต (รูปที่ 2ค) พบว่า

- เมื่อระยะความสูงของแพคเบตเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำจะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากเมื่อมีปริมาณรามากขึ้นทำให้มีการใช้ปริมาณน้ำมากขึ้น
- เมื่อระยะเวลานานขึ้น ปริมาณน้ำที่อยู่ใต้น้ำน้อยลง เนื่องจากปริมาณรามากขึ้นทำให้มีการใช้น้ำมากขึ้น ซึ่งรานำน้ำไปใช้ในการเจริญเติบโตและในการเพิ่มปริมาณรา แต่จะพบว่า ที่เวลา 80 และ 100 ชั่วโมงปริมาณน้ำในถังจะมีมากกว่าที่เวลา 60 ชั่วโมง เนื่องจากว่า เมื่อเวลานานขึ้น อัตราการเจริญเติบโตของราจะลดลง และน้ำที่ราใช้ในการเจริญเติบโตมีผลมากกว่าน้ำที่ใช้ในการเพิ่มจำนวนรา ดังนั้น ปริมาณน้ำในถังที่เวลา 80 และ 100 ชั่วโมงจึงมีมากกว่าที่เวลา 60 ชั่วโมง

จากผลในรูปที่ 3ก และ 4ก ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะความสูง ณ ความเร็วต่างๆ ที่เวลา 40 และ 100 ชั่วโมงในแพคคอลัมน์จะพบว่า

- เมื่อให้ความเร็วของอากาศขึ้นขาเข้าลดลง อุณหภูมิภายในแพคเบตจะเพิ่มขึ้นเพราะที่ความเร็วต่ำจะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนและการพาความร้อนภายในแพคเบตต่ำด้วย เป็นผลทำให้เกิดการสะสมความร้อนภายในขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิภายในแพคเบตสูงขึ้น
- ที่ความเร็วของอากาศขึ้นขาเข้าต่ำมากๆ เช่น ความเร็ว 0.0001 m/s ที่ระยะความสูงต่างๆ จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิมากแสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะความสูงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิก็คจะ

เพิ่มขึ้น (จากสมการการเจริญเติบโตจำเพาะ) แต่เมื่อความเร็วของอากาศขึ้นสูงเข้าสูงขึ้น เช่น ความเร็ว 0.05 m/s และ 0.001 m/s ที่ระยะความสูงต่างๆ จะมีความแตกต่างของ อุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนภายในแพคเบตได้ดีขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับระยะความสูง ณ ความเร็วต่างๆ ที่เวลา 40 และ 100 ชั่วโมงในแพคเบต (รูปที่ 3ข และ 4ข) จะพบว่า เมื่อความเร็วของอากาศขึ้นเท่ากับ 0.05 และ 0.001 m/s ปริมาณน้ำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อระยะความสูงเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเร็วของอากาศขึ้นเท่ากับ 0.0001 m/s ปริมาณน้ำจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการสะสมความร้อน มีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตของราลดลง ที่ระยะเวลา 40 ชั่วโมงพบว่าที่ระยะความสูง 0.9 เมตรความเข้มข้นของราจะมีค่าต่ำสุด

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับระยะความสูง ณ ความเร็วต่างๆ ที่เวลา 40 และ 100 ชั่วโมงในแพคเบต (รูปที่ 3ค และ 4ค) พบว่า เมื่อให้ความเร็วของอากาศขึ้นเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำที่อยู่ในถังลดลงที่ระยะความสูงเพิ่มขึ้นเป็นเพราะมีการใช้น้ำในการเจริญเติบโตของรา เปรียบเทียบผลเมื่อความเร็วของอากาศขึ้นเพิ่มขึ้น จาก 0.05 m/s เป็น 0.0001 m/s พบว่า ปริมาณน้ำจะมีค่าต่ำสุดเมื่อ V_z มีค่าต่ำสุดซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิของระบบที่ค่าสูงสุด ที่อุณหภูมิของระบบมีค่าสูงสุดจะมีผลให้รามีการเจริญเติบโตได้น้อยลง และมีการระเหยของน้ำมากขึ้น ที่เวลา 40 ชั่วโมงปริมาณน้ำจะเพิ่มมากขึ้นหลังจากระยะ 0.4 เมตร (รูป 3ค) เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีผลทำให้ปริมาณราลดลง เป็นผลทำให้เกิดการระเหยลดลงนั่นเอง

สรุป

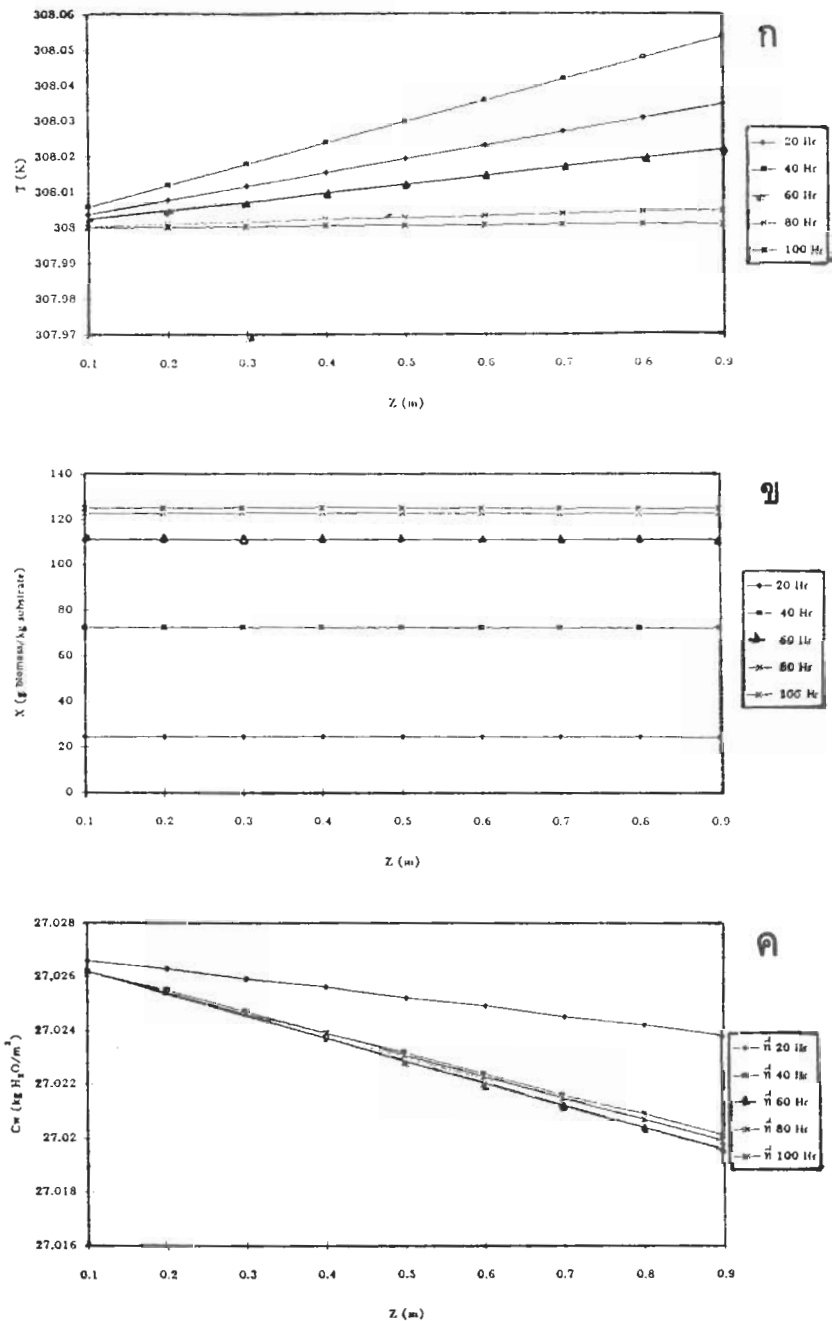
การศึกษานี้แม้จะเป็นการแก้ปัญหาในเชิงมิติเดียวแต่เป็นประโยชน์มากในการศึกษาการหมักบนอาหารแข็ง ช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์ทางการถ่ายโอนความร้อนและมวลซึ่งสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในรูปของความเข้มข้นชีวมวล โดยทั่วไปในการหมักย่อมต้องการความเข้มข้นของชีวมวลมาก ฉะนั้นผลจากการศึกษานี้สามารถนำมาเป็นแนวทางในการควบคุมความเร็วของอากาศให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชีวมวลสูงสุดโดยใช้พลังงานต่ำสุด

เอกสารอ้างอิง

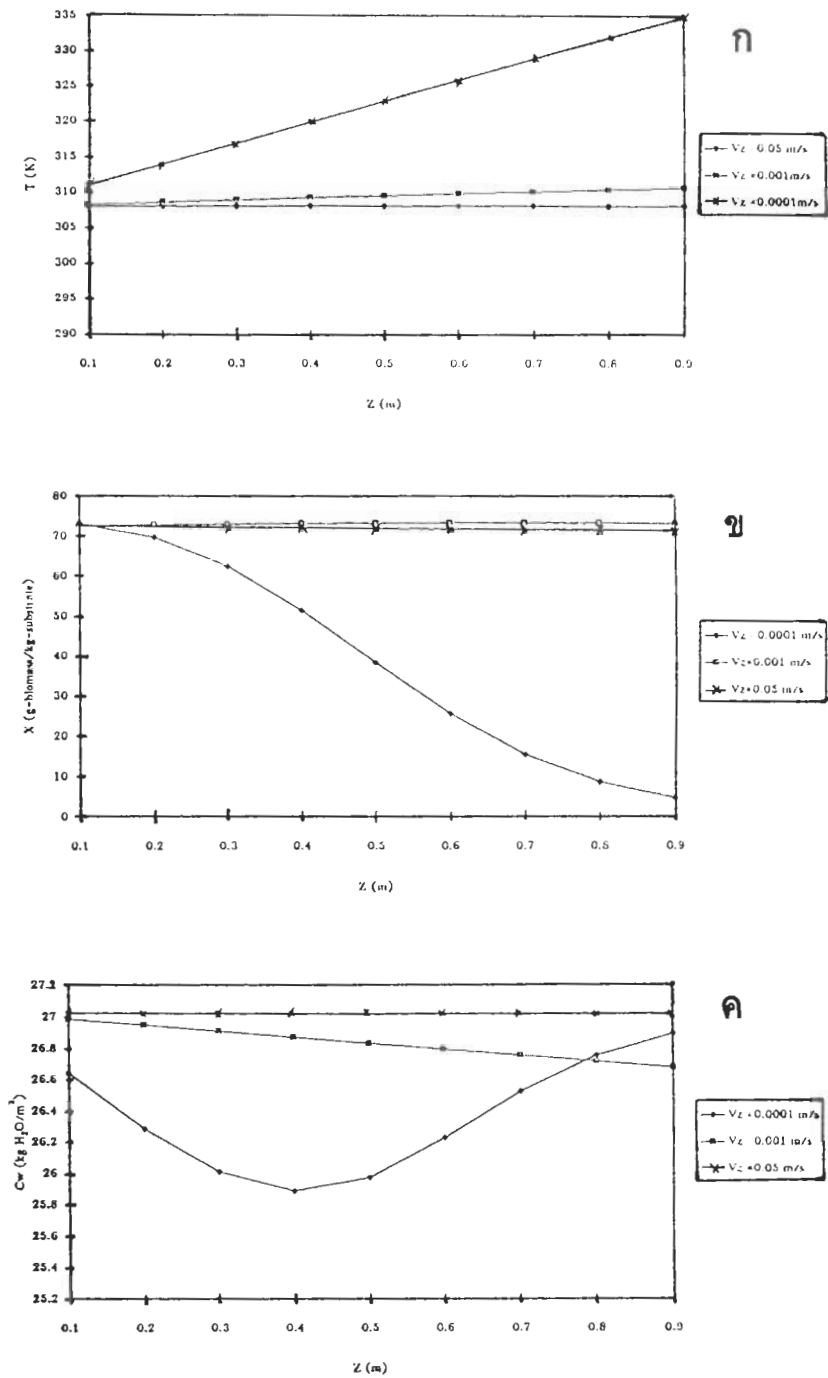
1. สมใจ คิริโกค. 2537. *เทคโนโลยีการหมัก*. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.

2. วราวุฒิ ครุสง. 2538. **จุลชีววิทยาในกระบวนการแปรรูปอาหาร**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ โอเดียนสโตร์.
3. Sangsurasak P. and Mitchell D.A. **The investigation of transient multidimensional heat transfer in solid-state fermentation**; *The Chemical Engineering Journal*, 60, p.199-204, 1995a.
4. Deschapmps F., Giuliano C., Asther M., Huet M.C. and Roussos S. **Cellulase production by *Trichoderma harzianum* in static and mixed solid-state fermentation reactors under non-aseptic conditions**; *Biotechnol. Bioeng.*, 27, p. 1385-1388, 1985.
5. Grajek W. **Production of D-xylanases by thermophilic fungi using different methods of culture**; *Biotechnol. Lett.*, 9(5), p. 353-356, 1987.
6. Malathi S and Chakraborty R. **Production of alkaline protease by a new *Aspergillus flavus* isolate under solid-substrate fermentation conditions for use as a depilation agent**; *Applied & Environ. Microb.*, 57, p. 712-716, 1991.
7. Ikasari L. and Mitchell D.A. **Protease production by *Rhizopus oligosporus* in solid-state fermentation**; *World J. Microb. & Biotechnol.*, 10, p. 320-324, 1994.
8. Johns M.R. and Stuart D.M., **Production of pigments by *Monascus purpureus* in solid culture**; *J. Indust. Microb.*, 8, p.23-28, 1991.
9. Silman R.W., Canway H.F., **Anderson R.A. and Bagley E.B., Production of aflatoxin in corn by a large-scale solid-state fermentation process**; *Biotechnol. Bioeng.*, 21, p. 1799-1808, 1979.
10. Sangsurasak P. **Heat transfer model of packed bed bioreactors in solid-state fermentation**; PhD thesis, The University of Queensland, Queensland, Australia, 1996.

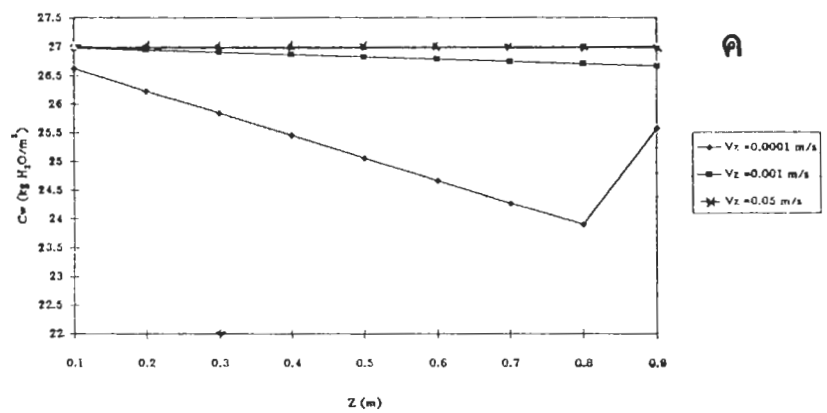
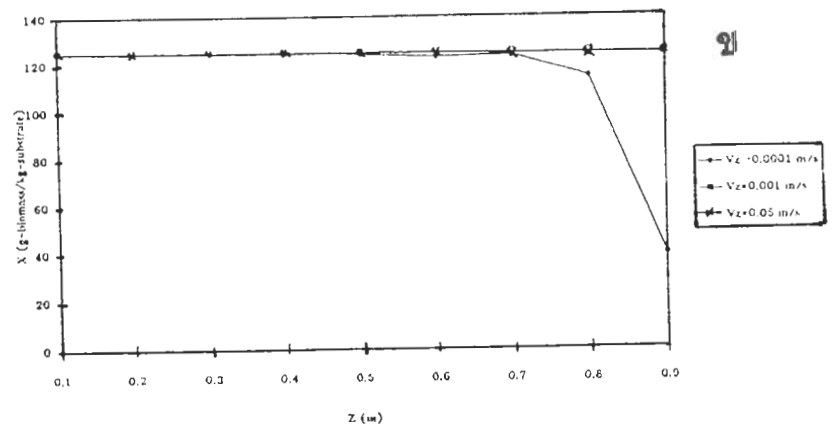
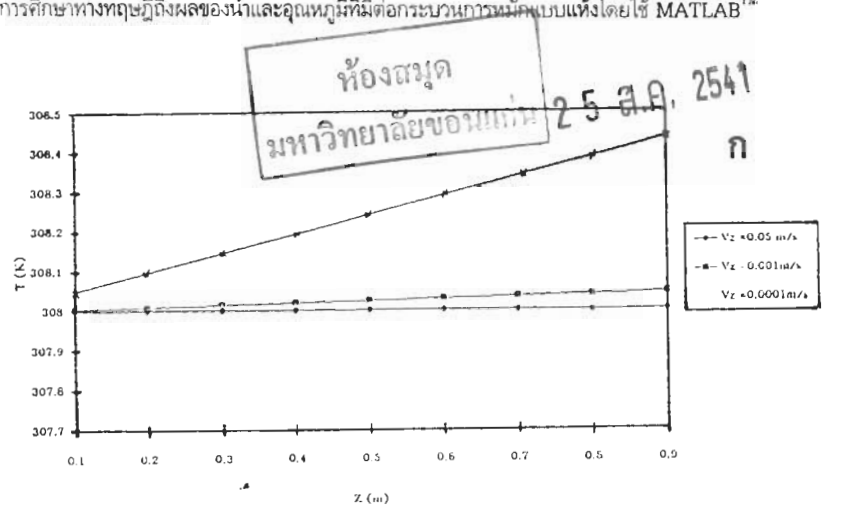
11. Sangsurasak P. and Mitchell D.A. *Incorporation of death kinetics into a 2-dimensional dynamic heat transfer model for solid-state fermentation*; *Journal of Chemical Technological Biotechnology*, 64, 253-260, 1995b.



รูปที่ 2 แสดงอุณหภูมิ (ก) ความเข้มข้นของชีวมวล (ข) และปริมาณน้ำ (ค) ที่ระดับความสูงต่างๆ ของเบด ในช่วงเวลาของการหมักที่ 20 40 60 80 และ 100 ชั่วโมง ความเร็วอากาศขึ้นคงที่ที่ 0.001 m/s



รูปที่ 3 แสดงอุณหภูมิ (ก) ความเข้มข้นของไอน้ำ (ข) และปริมาณน้ำ (ค) ที่ระดับความสูงต่างๆ ของเบด เมื่อความเร็วของอากาศเท่ากับ 0.05 m/s, 0.001 m/s, และ 0.0001 m/s ที่เวลาการหมัก 40 ชั่วโมง



รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิ (ก) ความเข้มข้นของชีวมวล (ข) และปริมาณน้ำ (ค) ที่ระดับความสูงต่างๆ ของเบด เมื่อความเร็วของอากาศเท่ากับ 0.05 m/s, 0.001 m/s และ 0.0001 m/s ที่เวลาการหมัก 100 ชั่วโมง