บทที่ 4

ระบบการหมักอาหารแข็ง

4.1 กระบวนการหมักอาหารแข็ง

กระบวนการหมักอาหารแข็ง(solid state fermentation) หมายถึง กระบวนการที่จุลินทรีย์เจริญเติบโตบนอาหารแข็งที่ไม่ได้อยู่ในสภาพแขวนลอยในของเหลว(Cannel& Moo Young,1980:2-7) น้ำที่มีอยู่ทั้งหมดจะอยู่ในรูปความชื้นซึ่งจะซึมติดอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ ในระบบเช่นนี้ปริมาณความชื้นหรือน้ำที่จุลินทรีย์นำมาใช้จึงค่อนข้างต่ำ ทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้หมักด้วยแบคทีเรียหรือยีสต์ ส่วนใหญ่จะเหมาะสมกับการใช้เชื้อรา

กระบวนการหมักอาหารแข็งที่ใช้กันมีอยู่ 3 แบบคือ (Hesseltine 1977:24)

(1) เกิดขึ้นตามธรรมชาติ กล่าวคือวัตถุดิบวางอยู่บนถาด หรือในภาชนะเปิด เมื่อทำการเพาะเลี้ยงเชื้อลงไป จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตเฉพาะบนผิววัตถุดิบนั้น เช่น กระบวนการผลิตโคจิ

(2) เกิดขึ้นคล้ายแบบแรก แต่ในบางครั้งมีการพลิกกลับวัตถุดิบจากด้านล่างขึ้นมาอยู่ด้านบน เช่น กระบวนการผลิตปุ๋ยหมัก

(3) เกิดขึ้นภายในถังหมักที่มีการกวนอย่างสม่ำเสมอ นิยมใช้กับวัตถุดิบที่มีรูปร่างเป็นเม็ด เมื่อทำการเพาะเลี้ยงเชื้อลงไป จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตทั่วบริเวณผิวของเม็ดวัตถุดิบนั้น เช่น กระบวนการเพิ่มโปรตีนในอาหารสัตว์ (Gibbon , Westby and Robbs 1984 : 1098)

4.2 การออกแบบระบบการหมักอาหารแข็ง

การทำให้ระบบการหมักอาหารแข็งดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด มีปัจจัยที่ต้องพิจารณาดังนี้

4.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบในระบบการหมักอาหารแข็งนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของวัตถุดิบให้อยู่ในสภาพที่จุลินทรีย์จะย่อยและใช้ประโยชน์ได้ง่าย ทั้งทางกายภาพและเคมี

สำหรับคุณสมบัติทางด้านกายภาพนั้น ขนาดของวัตถุดิบต้องพอดี ถ้าเล็กเกินไปทำให้ชั้นหมักไม่มีความพรุนเพียงพอแก่การถ่ายเทมวลและความร้อน แต่ถ้าใหญ่เกินไปทำให้ยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และประสิทธิภาพของการใช้วัตถุดิบต่ำ นอกจากนี้ความชื้นของวัตถุดิบจะต้องอยู่ในระดับต่ำ เพื่อช่วยลดการปนเปื้อนจากยีสต์และแบคทีเรีย แต่ถ้าความชื้นเริ่มต้นต่ำเกินไปก็จะยับยั้งการเจริญของเชื้อราเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำสูง (water surface tension) ทำให้อัตราการพองตัวของวัตถุดิบต่ำ เป็นสาเหตุให้กิจกรรมของเอนไซม์ และการถ่ายเทมวลของสารอาหารไปยังจุลินทรีย์ไม่มีประสิทธิภาพ (Laukevics , Apsite and Viesturs 1984:1465-1474)

ส่วนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีนั้นเกิดขึ้นจากการให้ความร้อน เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่ติดมากับวัตถุดิบ และเปลี่ยนสภาพวัตถุดิบให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ที่จะใช้ได้ นั่นคือการทำให้แป้งดิบเปลี่ยนเป็นแป้งสุก (gelatinization)

4.2.2 <u>การเติมเชื้อเริ่มต้น</u>

การเติมจุลินทรีย์เข้าสู่ระบบก่อนเริ่มต้นการหมักจะใช้สปอร์ แต่ในบางครั้งอาจใช้เส้นใยที่งอกจากสปอร์มาแล้วประมาณ 8 - 12 ชั่วโมง เพื่อลดระยะเวลาในการหมักให้สั้นลง (Kronenberg & Hanaya 1984:433-438) ปริมาณเชื้อเริ่มต้น(inoculum size) ที่ใช้ขึ้นกับชนิดและปริมาณวัตถุดิบ นอกจากนี้สารแขวนลอยของสปอร์จะใช้เป็นการปรับความชื้นในขั้นสุดท้ายก่อนที่จะเข้าสู่ห้องหมัก

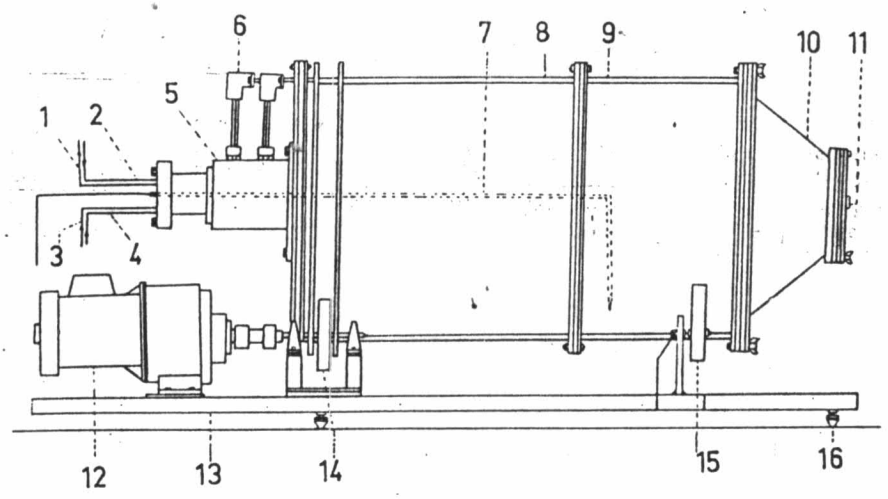
4.2.3 <u>เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการหมักอาหารแข็ง</u>

เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการหมักอาหารแข็งที่มีใช้กันแพร่หลายมีอยู่ประมาณ 6 ชนิด (Lonsane , Ghildyal and Ramkrishna 1985:258-265) คือ

(1) <u>Rotating drum fermenter</u>

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีรูปร่างทรงกระบอก หมุนรอบตัวในแนวนอน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ และการพลิกกลับตลอดทั่วชั้นหมัก สามารถปรับความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 1 รอบ/นาที จนถึง 188 รอบ/นาที มีการให้อากาศชื้นแก่ชั้นหมัก โดยการไหลผ่านท่อที่เจาะรูเล็ก ๆ ตลอดความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้เป็นไปอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ มักจะมีปัญหาเรื่องการควบคุมอุณหภูมิและเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ไดอะแกรมของ drum fermenter โดยที่ 1,2:Jacket ; 3:Air inlet ;4:Addition solution input ; 5:Moving gasket ; 6:Legris join ; 7:Temperature prove ; 8:Fixed tank section ; 9:Removable tank section (stainless steel) ; 10: Cone made of plexiglass ; 11:Stopper ; 12:Rotation driving motor ; 13:Subframe ; 14:Rubbered driving wheel ; 15:Rubbered wheel ; 16:Adjustable base



รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของ drum fermenter

(2) Tray fermenter

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีรูปร่างเป็นถาดสี่เหลี่ยม วัตถุดิบจะถูกนำไปใส่บนถาด ที่ด้านล่างถาดเป็นตะแกรง โดยความสูงของชั้นหมักประมาณ 1 - 2 นิ้ว ภายในเครื่องปฏิกรณ์นี้ถาดจะถูกวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ มีการให้อากาศชื้น และควบคุมอุณหภูมิตามสภาวะที่เหมาะสม

ข้อดีคือสะดวกต่อการใช้งาน และผลผลิตมีคุณภาพสม่ำเสมอ

ข้อเสียคือใช้พื้นที่มากในการหมัก

(3) Column fermenter

เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์มักทำด้วยแก้วหรือพลาสติก มีการให้อากาศชื้นเข้าทั้งทางด้านบนและด้านล่างของคอลัมน์ การควบคุมอุณหภูมิทำได้โดยการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์

ให้อยู่ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ หรือโดยการใช้น้ำที่ถูกควบคุมอุณหภูมิให้ไหลผ่าน jacket รอบ ๆ คอลัมน์ เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มักพบตามห้องปฏิบัติการวิจัยเท่านั้น

(4) Covered pan fermenter

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีรูปร่างเป็นถาดขนาดเล็ก มีเส้นผ่าศูนย์กลางเพียง 7 นิ้ว สูง 4 นิ้ว ด้านบนมีฝาปิด ด้านล่างเป็นตะแกรง เหมาะสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิและการให้อากาศเป็นไปได้ง่าย

ข้อดีคือ เชื้อจุลินทรีย์เจริญเติบโตอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผลผลิตมีคุณภาพสม่ำเสมอ

(5) Butler-type corn storage bin fermenter

เครื่องปฏิกรณ์แบบ Butler มีผู้นำไปประยุกต์ใช้กับการผลิตแอฟลาท็อกซิน (aflatoxin) ในข้าวโพด ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์คล้ายถังกวน (mixer) วัตถุดิบที่นำมาหมักจะถูกกวนด้วยใบพัด เพื่อให้เกิดการผสมอย่างทั่วถึง มีการควบคุมอุณหภูมิ การให้อากาศ และการสเปรย์น้ำเพื่อปรับความชื้นของชั้นหมัก

ข้อเสียคือการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ไม่สม่ำเสมอทั่วถังหมัก และการรักษาระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมทั่วถังหมักทำได้ยาก

(6) Conveyor fermenter

เครื่องปฏิกรณ์แบบสายพานลำเลียง ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการต่าง ๆ ดังนี้

(1) การเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัตถุดิบ เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อน เช่น ฟางข้าวจะมีการให้อุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 85 °ซ เป็นเวลา 15 นาที

(2) การลดอุณหภูมิของวัตถุดิบลงจนถึงค่าที่ต้องการ เช่น การใช้อากาศเย็น

(3) การเติมเชื้อจุลินทรีย์ โดยการสเปรย์สารแขวนลอยของสปอร์ หรือเติมเชื้อแห้ง (dry inoculum) ลงบนวัตถุดิบอย่างต่อเนื่อง

(4) การหมัก จะอยู่ในห้องหมักที่มีการให้อากาศชื้น และมีการ ควบคุมอุณหภูมิ

(5) การอบแห้ง โดยการใช้ลมร้อนให้ไหลผ่านในทิศทางขนานกับ

วัตถุดิบเคลื่อนที่ (co-current) หรือทิศทางสวนทางกับวัตถุดิบเคลื่อนที่ (counter-current)

4.2.4 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในการดำเนินการหมัก (Daubress & Ntishirwa 1987 : 962-968)

(1) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ มีค่าอยู่ระหว่าง 90 - 97 %

(2) อุณหภูมิในตู้หมัก อุณหภูมิที่ราส่วนใหญ่เจริญได้ดีคือ 25-32°ซ

(3) พีเอช (pH) ราส่วนใหญ่เจริญได้ดีที่พีเอชอยู่ในช่วงความเป็นกรด คือ 3.0 - 5.0 ดังนั้นจึงใช้เกลือแอมโมเนียม หรือยูเรีย (urea) เป็นตัวปรับพีเอชและเป็นแหล่งไนโตรเจนให้กับจุลินทรีย์ด้วย

(4) ออกซิเจน (oxygen) ราเป็นจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนสำหรับการเจริญเติบโต ดังนั้นจึงมีการจ่ายอากาศให้กับชั้นหมัก

(5) ความชื้นของชั้นหมัก ราส่วนใหญ่เจริญได้ดี ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60 - 70 %

4.3 กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง

มีหลักการดำเนินงานที่ต่อเนื่องตั้งแต่การนำวัตถุดิบเข้าเครื่องหมัก จนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องหมัก ดังตัวอย่างต่อไปนี้

4.3.1 ในการผลิตเอทานอลจากหัวผักกาด(fodder beets) (Gibbon , Westby and Robbs 1984:1098-1197) แสดงในรูปที่ 4.2 มีขั้นตอนดังนี้

(1) การทำความสะอาดหัวผักกาดโดยล้างด้วยน้ำ มีการลำเลียงเป็นระบบสายพาน ก่อนเข้าเครื่องหมัก (continuous solid-phase fermenter)

(2) ส่งต่อเข้าเครื่องลดขนาดวัตถุดิบ ซึ่งประกอบอยู่ส่วนบนเครื่องหมัก เป็นเครื่องบดแบบฆ้อน (hammer mill) มีการปรับค่าพีเอชให้ได้เท่ากับ 4.0-5.0

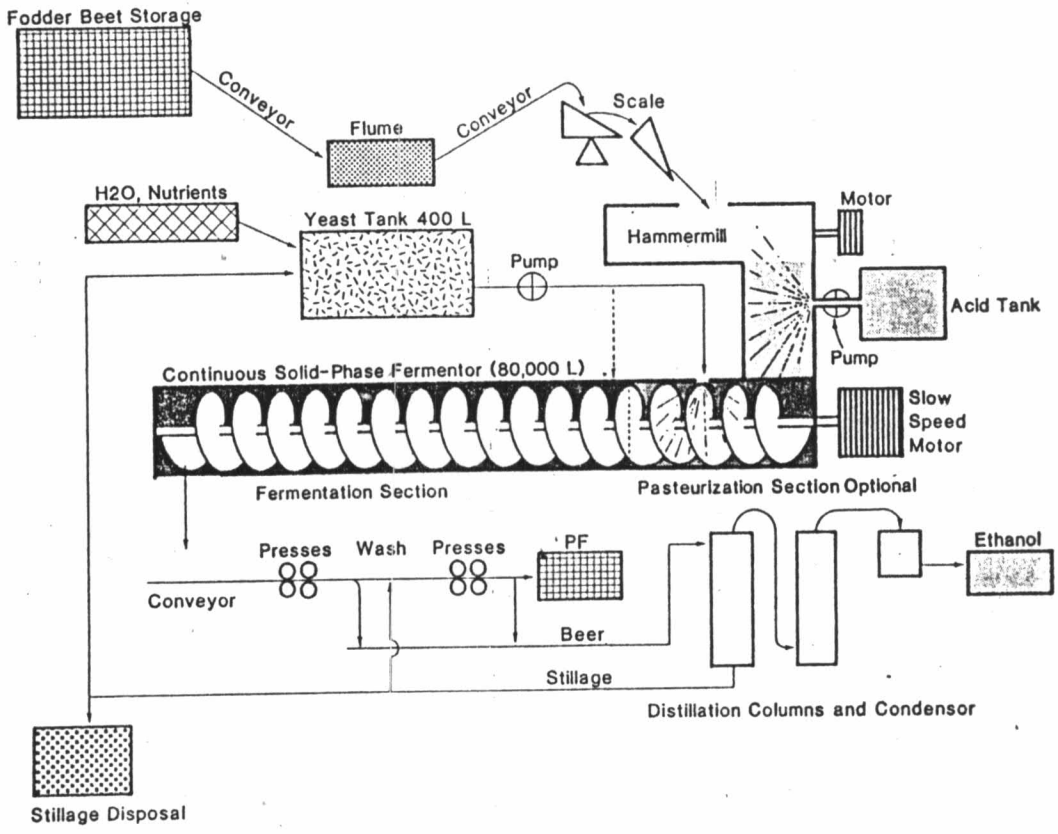
(3) การทำลายเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อน โดยใช้อุณหภูมิ 70°ซ - 80°ซ เป็นเวลา 3 - 12 ชั่วโมง

(4) การเติมเชื้อจุลินทรีย์ โดยการสเปรย์สารแขวนลอยของยีสต์ลงบนวัตถุดิบ

(5) การหมัก ใช้ระยะเวลา 36-72 ชั่วโมง ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องหมัก (fermenter)

(6) ทำการลดขนาดโดยใช้ roller mills

(7) ทำการกลั่นในหอกลั่น เพื่อให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์ 95 % ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.2 แสดงกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องของเอทานอลจากหัวผักกาด

4.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักอาหารแข็ง

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักในระบบอาหารแข็ง จำแนกออกได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ชีวมวล (biomass) , เอนไซม์ (enzyme) ,กรดอินทรีย์(organic acid), เมตาบอไรท์ทุติยภูมิบางประเภทที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้น (secondary metabolite) เช่น สารพิษจากเชื้อรา(mycotoxin) และอาหารหมักพื้นเมือง(traditional fermented food)

ผลิตภัณฑ์จากการหมักที่เป็นชีวมวล พบว่ามีการใช้เทคนิคของกระบวนการหมักแบบนี้ในการเพิ่มคุณค่าทางอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรตีนให้แก่พืชผลทางการเกษตรต่าง ๆ ตัวอย่างได้แก่ การหมัก A.niger เพื่อเพิ่มโปรตีนให้กับมันสำปะหลังได้โปรตีนสูงขึ้นถึง 20 % ในการเพิ่มปริมาณโปรตีน ให้กับกากเส้นใยของมูลโค (cow manure fibre) โดยใช้

เชื้อ Chaetomium cellulolyticum พบว่าได้ปริมาณโปรตีน 11 - 12 % ในการเพิ่มโปรตีนให้กับฟางข้าวสาลี โดยใช้ Coprinus cinereus และ Monascus ruber เพื่อลดปริมาณลิกนิน (lignin) ซึ่งยับยั้งการเจริญของสัตว์และเพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีน การหมักเพื่อเพิ่มโปรตีนในกากหัวผักกาดหวานจากโรงงานน้ำตาล โดยใช้ Trichoderma album ได้โปรตีนเพิ่มขึ้นเป็น 18 - 20 % ผลผลิตที่ได้ย่อยง่าย และมีปริมาณกรดอะมิโนที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสัตว์ ในการเพาะเห็ดบนกองวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรเช่น ฟางนั้น เมื่อเชื้อเห็ดกำลังเจริญเส้นใยที่อยู่ภายในกองวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จะเปลี่ยนสารประกอบลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) เป็นดอกเห็ดซึ่งมีคุณค่าทางอาหารต่อการบริโภคของมนุษย์ ในขณะเดียวกันเส้นใยส่วนที่แทรกอยู่ภายในกองวัสดุเพาะเห็ดนั้นจะมีโปรตีนสูง และสามารถนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์

ในการที่จะเลือกชนิดของเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีปัจจัยต่างๆที่จะต้องพิจารณาดังนี้คือ วัตถุประสงค์และกำลังการผลิต เมื่อเลือกระบบของเครื่องปฏิกรณ์แล้ว ควรจะได้มีการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อทดสอบความเหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์ที่เลือกขึ้นมาและความเหมาะสมของจุลินทรีย์ที่ทำการหมัก หลังจากนั้นควรจะประเมินความเป็นไปได้ในเชิงการค้าทั้งในแง่ของการลงทุนและค่าใช้จ่ายในระหว่างดำเนินการหมัก การประเมินถึงความจำเป็นในการควบคุม และความต้องการของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมของการหมัก ประเมินความต้องการของวัตถุดิบที่จะใช้ในการหมักเพื่อกำหนดขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่จะสร้างขึ้น โดยอาศัยกำลังการผลิตเป็นเกณฑ์ พร้อมทั้งประเมินความต้องการของพลังงานต่างๆที่จะต้องใช้ระหว่างดำเนินการหมัก

4.5 การออกแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบต่อเนื่อง

4.5.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการเพิ่มปริมาณโปรตีน

ในการทำนายอัตราเพิ่มของจุลินทรีย์ สามารถทำได้โดยการใช้แบบจำลองทางคณิศาสตร์(Chapra and Canale 1985 : 162-164) ที่อยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล ดังนี้

$$\frac{dn}{dt} \propto n \qquad \text{.....(4.1)}$$

นั่นคืออัตราการเพิ่มของจุลินทรีย์ แปรผันกับจำนวนจุลินทรีย์ (n) เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณของจุลินทรีย์จะเพิ่มมากขึ้น และถูกจำกัดด้วยขนาดของพื้นที่ผิวของชั้นมันสำปะหลัง สมมุติให้ n_{max} เป็นจำนวนจุลินทรีย์สูงสุด ดังนั้น อัตราการเพิ่มของจุลินทรีย์จึงแปรผันกับที่ว่างบนผิวของชั้นมันด้วย กล่าวคือ

$$\frac{dn}{dt} \propto (n_{max} - n) \qquad \text{.....(4.2)}$$

ดังนั้น อาจเขียนได้ว่า

$$\frac{dn}{dt} = kn(n_{max} - n) \qquad \text{.....(4.3)}$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับปริมาณอาหาร

ปริมาณโปรตีนที่ได้จากจุลินทรีย์ย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนจุลินทรีย์ เพราะฉะนั้น

$$n = C_rP \qquad \text{.....(4.4)}$$

เมื่อ P คือปริมาณโปรตีนที่ได้จากจุลินทรีย์

C_r คือค่าคงที่

สมมติให้ M_c เป็นปริมาณโปรตีนสูงสุดที่ได้จากจุลินทรีย์ที่พึงจะมีได้บนชั้นมันสำปะหลัง ดังนั้นอัตราการเพิ่มของโปรตีนสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$\frac{dC_rP}{dt} = kC_rP\,(C_rM_c - C_rP)$$

$$\frac{dP}{dt} = kC_rP(M_c-P) \qquad \text{.....(4.5)}$$

ให้ $K_c = kC_r$

$$\frac{dP}{dt} = K_cP\,(M_c-P)$$

$$\left(\frac{M_c - P}{M_c}\right)\frac{dP}{dt} + \left(\frac{P}{M_c}\right)\frac{dP}{dt} = K_cP(M_c-P)$$

$$(M_c-P)^2\left[\left(\frac{1}{M_c-P}\right)\frac{dP}{dt} + \frac{P}{(M_c-P)^2}\frac{dP}{dt}\right] = K_cP(M_c-P)$$

$$\left[\frac{(M_c-P)^2}{M_c}\right]\frac{dP/(M_c-P)}{dt} = K_c\,P(M_c-P)$$

$$\frac{dP/(M_c-P)}{dt} = K_cM_c\left(\frac{P}{M_c-P}\right)$$

$$\frac{dP/(M_c-P)}{P/(M_c-P)} = K_cM_c\,dt$$

$$\ln\left(\frac{P}{(M_c-P)}\right) = K_cM_ct + \ln C \qquad \text{.....(4.6)}$$

ที่ $t = 0$, $P = P_o$

$$\ln \left(\frac{P_o}{M_c - P_o} \right) = \ln C$$

นั่นคือ

$$C = \frac{P_o}{M_c - P_o}$$

แทนค่า C ลงในสมการ (4.6) จะได้

$$\ln \left(\frac{P}{M_c - P} \right) = K_c M_c t + \ln \left(\frac{P_o}{M_c - P_o} \right)$$

$$\ln \left(\frac{P_o}{M_c - P_o} \right) - \ln \left(\frac{P}{M_c - P} \right) = -K_c M_c t$$

$$\ln \left[\frac{P_o/(M_c - P_o}{P/(M_c - P)} \right] = -K_c M_c t$$

นั่นคือ

$$\frac{P_o/(M_c - P_o)}{P/(M_c - P)} = \exp[-K_c M_c t]$$

$$\frac{P}{M_c - P} = \frac{P_o}{(M_c - P_o)\exp[-K_c M_c t]}$$

หรือ $$\frac{M_C - P}{P} = \frac{(M_C - P_o)\exp[-K_C M_C t]}{P_o}$$

$$\frac{M_C - 1}{P} = \frac{(M_C - P_o)\exp[-K_C M_C t]}{P_o}$$

$$\frac{M_C}{P} = 1 + \frac{(M_C - P_o)\exp[-K_C M_C t]}{P_o}$$

$$P = \frac{M_C}{1+\left(\frac{M_C - 1}{P_o}\right)\exp[-K_C M_C t]} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4.7)$$

ถ้าชั้นมันสำปะหลังมีโปรตีนอยู่ก่อนแล้วในปริมาณ P_C เพราะฉะนั้นปริมาณโปรตีนทั้งหมดที่เวลาใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.8)

$$P = P_C + \frac{M_C}{1+\left(\frac{M_C - 1}{(P_o)}\right)\exp[-K_C M_C t]} \quad \ldots\ldots\ldots (4.8)$$

จากสมการ (4.8) เรานำไปเขียนเป็นโปรแกรมภาษาเบสิก (BASIC) ได้ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ค.

จากข้อมูลของสีหนาท พบว่าค่า M_C เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 14.4 % โดยที่ค่า P_o มีค่าต่าง ๆ คือ 0.1, 0.2, 0.3% เป็นต้น เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (4.8) จะได้ค่า K_C เฉลี่ยเท่ากับ 29

จากค่า K_C เฉลี่ย, M_C, P_o นำไปคำนวณหาปริมาณโปรตีน ที่ควรจะผลิตได้ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพที่เวลาใด ๆ โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งได้แสดงไว้ในสมการ (4.8) ตัวอย่างเช่น กราฟรูปที่ 4.3 เมื่อกำหนด $K_C = 29$, $M_C = 14.4$ % และ $P_o = 0.1$ % ถ้าใช้เวลาหมักนาน 30 ชั่วโมง จะได้ปริมาณโปรตีน 12 %

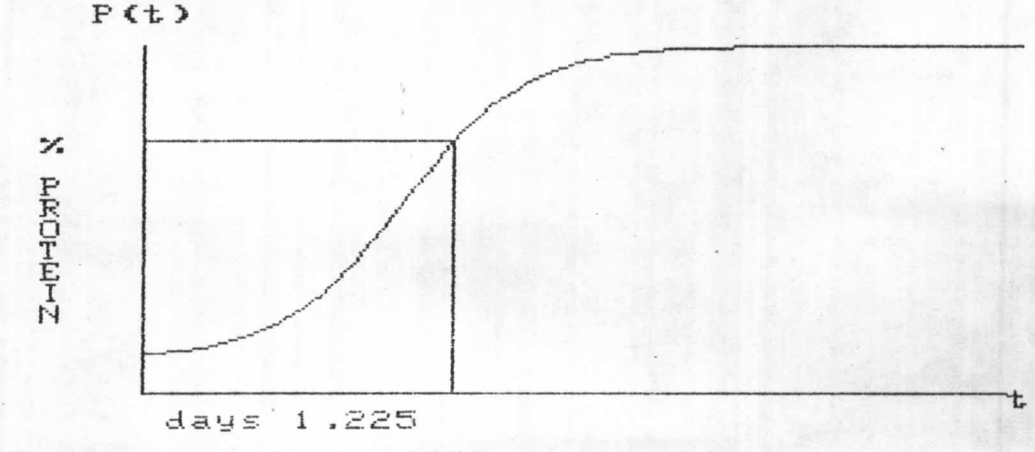
```
                    SOLUTION FOR PROTEIN PRODUCTION

 INITIAL TIME (day)                                    =  0
 FINAL TIME (day)                                      =  3.5
 INITIAL PROTEIN IN CASSAVA (kg protein/kg solid)=  .016
 INITIAL MICROBIAL PROTEIN (kg protein/kg solid) =  .002
 STEP - SIZE (day)                                     =  .25
 PRINT INTERVAL (day)                                  =  .25
 RATE CONSTANT (kg solid/kg protein-day)               =  29
 REQUIRED TOTAL PROTEIN (kg protein/kg solid)    =  .12
 MAXIMUM MICROBIAL PROTEIN (kg protein/kg solid) =  .144

Do you want to change these values (y/n) ?


 INITIAL MICROBIAL PROTEIN (kg protein/kg solid) =  .002
 STEP - SIZE (day)                                     =  .25
 PRINT INTERVAL (day)                                  =  .25
 RATE CONSTANT (kg solid/kg protein-day)               =  29
 MAXIMUM MICROBIAL PROTEIN (kg protein/kg solid) =  .144

 TIME (day)          TOTAL PROTEIN (kg/kg cassava)
    0                 .018
    .25               2.153951E-02
    .5                3.069483E-02
    .75               5.114112E-02
    1                 9.423758E-02
    1.25              .1201315
    1.5               .1502461
    1.75              .1534595
    2                 .1587243
    2.25              .1593644
    2.5               .1595785
    2.75              .1598513
    3                 .159963
    3.25              .1599869
    3.5               .1599954
Do you want a graph (y/n)
?
```



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโปรตีนกับเวลา

I10302116