การเพิ่มโปรตีนมันสำปะหลังโดยวิธีการหมักอาหารแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้น

นาย สีหนาถ ชาญณรงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

หลักสูตรเทคโนโลยีทางชีวภาพ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2530

ISBN 974-568-413-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

013060

i 10295616

PROTEIN ENHANCED CASSAVA BY SOLID STATE FERMENTATION IN FIXED BED BIOREACTOR

Mr. Srihanart Charnnarong

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Program Biotechnology

Graduate School

Chulalongkorn University

1988

ISBN 974-568-413-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มโปรตีนมันสำปะหลังโดยวิธีการหมักอาหารแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้น

โดย นาย สีหนาถ ชาญณรงค์

หลักสูตร เทคโนโลยีชีวภาพ

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.เพียรพรรค ทัศคร
รองศาสตราจารย์ ดร.นลิน นิลอุบล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ วินิจ ขำวิวรรธน์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เพียรพรรค ทัศคร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ส่งศรี กุลปรีชา)

ลีหนาถ ชาญณรงค์ : การเพิ่มโปรตีนมันสำปะหลังโดยวิธีการหมักอาหารแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้น (PROTEIN ENHANCED CASSAVA BY SOLID STATE FERMENTATION IN FIXED BED BIOREACTOR) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร.เพียรพรรค ทัศคร และ รศ.ดร.นลิน นิลอุบล, 163 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มโปรตีนให้กับมันสำปะหลังโดยวิธีการหมักในอาหารแข็งด้วย Rhizopus oligosporus TISTR 3001 (NRRL 2170) ซึ่งจะศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์ของราเพื่อใช้เป็นเชื้อเริ่มต้น รวมทั้งปัจจัยทางกายภาพอื่นที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีน

ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์โดยใช้อาหารแข็ง 3 ชนิดคือ ปลายข้าวเจ้าผสมรำหยาบ ปลายข้าวเจ้าผสมรำละเอียด และปลายข้าวเจ้าผสมกากถั่วเหลือง พบว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์สำหรับอาหารแข็งทั้ง 3 ชนิดข้างต้น จะมีค่าประมาณ 34.7, 33.1 และ 34.7% ตามลำดับ และอัตราส่วนที่เหมาะสมของอาหารแข็งทั้ง 3 ชนิดคือ 9:1 อาหารทั้ง 3 ชนิดสามารถให้สปอร์สูงสุดใกล้เคียงกันคือ $4.8\text{-}4.9\times10^{8}$ สปอร์/กรัม อาหาร

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมันในกล่องหมักซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 100% หมักที่อุณหภูมิ 37 °ซ และมีการให้อากาศในอัตรา 3.86×10^{-4} ม^3/วินาที/กิโลกรัม มันแห้ง พบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นมันที่เหมาะสมคือ 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นของมันหมักที่เหมาะสมจะมีค่าประมาณ 65% ความสูงของชั้นหมักที่เหมาะสมคือ 15 มม. และปริมาณสปอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง ผลการหมักสามารถให้มันหมักที่มีปริมาณโปรตีน 0.12-0.15 กรัม/กรัม มันแห้งเริ่มต้น ในเวลา 30 ชั่วโมง

ผลการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นซึ่งมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกบรรจุถาดใส่มันหมักไว้ภายใน และให้อากาศชื้นที่มีอุณหภูมิ 37 °ซ ไหลผ่าน พบว่าอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมันคือ 0.76×10^{-4} ม^3/วินาที/กิโลกรัม มันแห้ง ซึ่งสามารถให้ปริมาณโปรตีนสูงสุดคือ 0.12 กรัม/กรัม มันแห้งเริ่มต้น มีอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดคือ 3.83×10^{-7} กิโลกรัม/วินาที/กิโลกรัม มันแห้ง และมีค่าความถี่ในการถ่ายเทมวลสูงสุดคือ 1.78×10^{-4} หน่วย/วินาที ภายในเวลา 30 ชั่วโมง

ผลการหมักในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ถาดหมัก 3 ชั้น และให้อากาศในอัตรา 0.79×10^{-4} ม^3/วินาที/กิโลกรัม มันแห้ง พบว่าจะให้ปริมาณโปรตีนสูงสุดของมันหมักทั้ง 3 ถาด ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.11 กรัม/กรัม มันแห้งเริ่มต้น มีอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดคือ 3.79×10^{-7} กิโลกรัม/วินาที/กิโลกรัม มันแห้ง และมีค่าความถี่ในการถ่ายเทมวลสูงสุดคือ 1.46×10^{-4} หน่วย/วินาที ในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก นอกจากนี้เมื่อให้อากาศในอัตรา 0.97×10^{-4} ม^3/วินาที/กิโลกรัม มันแห้ง พบว่าผลที่ได้ไม่ต่างจากผลการทดลองข้างต้น ผลการหมักในเครื่องปฏิกรณ์นี้จะให้ปริมาณโปรตีนสูงสุด 0.11 กรัม/กรัม มันแห้งเริ่มต้น โดยสามารถเพิ่มโปรตีนให้กับมันประมาณ 6 เท่าของมันเส้นก่อนหมัก (0.018 กรัม/กรัม มันแห้งเริ่มต้น) ในเวลา 30 ชั่วโมง

ภาควิชา เทคโนโลยีทางชีวภาพ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางชีวภาพ

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

SRIHANART CHARNNARONG : PROTEIN ENHANCED CASSAVA BY SOLID STATE FERMENTATION IN FIXED BED BIOREACTOR. THESIS ADVISOR : PIENPAK TASAKORN, Ph.D. AND ASSO. PROF. NALINE NILUBOL, Ph.D., 163 pp.

This study was to enhance cassava protein by fungal solid state fermentation using Rhizopus oligosporus TISTR 3001 (NRRL 2710). The optimum conditions for inoculum spore productions and the optimum conditions for protein enhancement of cassava were determined.

It was found that the optimum moisture content for spore production when using broken rice with coarse rice bran, broken rice with fine rice bran and broken rice with soybean meal were 34.7, 33.1 and 34.7% respectively and the optimum ratio for all substrates was 9:1. The highest amount of spore production from all kinds of substrate was almost the same ($4.8-4.9 \times 10^8$ spores/g dry substrate).

The optimum conditions for protein enhancement of cassava were investigated in the fermentation chamber. It was found that the optimum particle size, initial moisture content, substrate height and inoculum size were 3 mm. in diameter, 65%, 15 mm. thick and 2.5×10^6 spores/g dry matter respectively. The fermentation, under these conditions with $37^{\circ}C$, 100% relative humidity of air and an aeration rate of 3.86×10^{-4} m^3/sec/kg dry matter resulted in protein-enhanced cassava containing 0.12-0.15 g/g initial dry matter in 30 hours.

Effect of an aeration rate on the enhancement of protein was studied in a fixed bed bioreactor. A tray with fermented cassava was packed in a cylindrical reactor. Air heated to $37^{\circ}C$ and humidified at 100% relative humidity flowed through it. It was found that an aeration rate of 0.76×10^{-4} m^3/sec/kg dry matter appeared to be suitable; the maximum protein content of enhanced cassava, the value of rate of CO_2 evolution and the frequency of mass transfer were observed to be 0.12 g/g initial dry matter, 3.18×10^{-7} kg/sec/kg dry matter and 1.78×10^{-4} unit/sec in 30 hours respectively.

Finally, when the fermentaiton was carried out by using 3 trays that slid into a reactor at an aeration rate of 0.79×10^{-4} m^3/sec/kg dry matter the maximum protein content produced in all trays which did not differ in quantity, the value of rate of CO_2 evolution and the frequency of mass transfer were observed to be 0.11 g/g initial dry matter, 3.79×10^{-7} kg/sec/kg dry matter and 1.46×10^{-4} unit/sec in 30 hours respectively. Similar results were obtained with the fermentation at an aeration rate of 0.97×10^{-4} m^3/sec/kg. dry matter. This process could increase protein content about 6 folds giving a final protein content of 0.11 g/g initial dry matter relative to the initial protein content of 0.018 g/g initial dry matter in 30 hours.

ภาควิชา เทคโนโลยีทางชีวภาพ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางชีวภาพ

ปีการศึกษา 2530 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เพียรพรรค ทัศคร และรองศาสตราจารย์ ดร.นลิน นิลอุบล ที่ได้กรุณาเป็นที่ปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้แนวความคิดอย่างดียิ่งในการทำวิทยานิพนธ์นี้ตลอดเวลา

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ วินิจ ขำวิวรรธน์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ส่งศรี กุลปรีชา ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ในคณะกรรมการบริหารหลักสูตรเทคโนโลยีทางชีวภาพทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและแนวความคิดตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เพียรพรรค ทัศคร ภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาฯ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นลิน นิลอุบล ผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์เคมีภัณฑ์ และความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของสถาบันทุก ๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้กรุณาให้ทุนอุดหนุนการวิจัยนี้ และกรมวิทยาศาสตร์ทหารบกที่ได้อนุมัติให้เข้ารับการศึกษาต่อในหลักสูตรนี้

ขอขอบคุณ คุณดวงกมล วิลาวรรณ คุณสิวลี บุญกัลยา และ คุณสุริยัน ไทยถาวร ตลอดจนนิสิตท่านอื่น ที่ได้มีส่วนช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ มารดา ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญรูป ..... ฎ

สารบัญตาราง ..... ฒ

คำย่อและสัญญลักษณ์ ..... ณ

บทที่

1. บทนำ .....

1.1 ระบบการหมักในอาหารแข็ง 1

1.1.1 ความหมายของระบบการหมักในอาหารแข็ง 1

1.1.2 การแบ่งประเภทของการหมักในอาหารแข็ง 1

1.1.3 ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อระบบการหมักในอาหารแข็ง . 3

1.1.4 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักในอาหารแข็ง 4

1.1.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักในอาหารแข็ง 8

1.1.6 การหมักมันสำปะหลังเพื่อเพิ่มโปรตีนโดยใช้ระบบการหมัก ในอาหารแข็ง 9

1.2 การออกแบบระบบการหมักในอาหารแข็ง 10

1.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับอาหารแข็ง 10

1.2.2 การเตรียมวัตถุดิบ 17

1.2.3 การเติมเชื้อเริ่มต้น 17

1.3 การพัฒนาทางทฤษฎีในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับ อาหารแข็ง 18

1.3.1 การถ่ายเทมวล 18

1.3.2 การถ่ายเทความร้อน 19

บทที่ หน้า

1.4 ข้อดี ข้อเสีย และปัญหาต่าง ๆ ของระบบการหมักในอาหารแข็ง 21
1.5 มันสำปะหลัง 23
1.5.1 การแบ่งชนิดของมันสำปะหลัง 23
1.5.2 คุณค่า ทางอาหารของมันสำปะหลัง 23
1.5.3 สารพิษในหัวมันสำปะหลัง 24
1.5.4 การลดปริมาณสารพิษในหัวมันสำปะหลัง 25
1.5.5 ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังที่ผลิตเป็นการค้าเพื่อใช้เลี้ยงสัตว์ 26
1.6 เหตุจูงใจในการทำวิจัย 26
1.7 วัตถุประสงค์ในการทำวิจัย 27
2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง 28
2.1 ชนิดของจุลินทรีย์และวิธีการเก็บรักษา 28
2.2 การเตรียมสปอร์ของ R. oligosporus เพื่อใช้เป็นเชื้อเริ่มต้น ในการหมักในกล่องหมัก 28
2.3 การศึกษาสภาพของอาหารที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์ของ R. oligosporus เพื่อใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นสำหรับการหมักในอาหาร แข็งในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้น 29
2.4 การเตรียมสปอร์ของ R. oligosporus เพื่อใช้เป็นเชื้อเริ่มต้น สำหรับการหมักอาหารแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้น .. 30
2.5 การเตรียมมันเส้นเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการหมัก 30
2.6 การประกอบกล่องหมักระดับห้องปฏิบัติการและระบบควบคุมต่าง ๆ 30
2.7 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง โปรตีนของมัน เมื่อหมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก . 33
2.8 การประกอบเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นในลักษณะถาดหมัก และระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมของการหมัก 35
2.9 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโปรตีนของมันเส้นเมื่อหมักด้วย R. oligosporus โดยการหมักในอาหารแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ ชีวภาพแบบตรึงชั้นในลักษณะถาดหมัก 41

บทที่ หน้า

3. ผลการทดลอง

3.1 การศึกษาสภาพของสารอาหารที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์ของ R. oligosporus เพื่อใช้เป็นเชื้อเริ่มต้น 43

3.1.1 ผลการหาชนิดของสารอาหารและความข้นที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์ 43

3.1.2 ผลการหาอัตราส่วนของอาหารแข็งทั้ง 3 ชนิด ที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์ 43

3.2 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมันเมื่อหมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก 46

3.2.1 ผลการศึกษาขนาดของชิ้นมันที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีน 46

3.2.2 ผลการศึกษาความชื้นเริ่มต้นของมันหมักที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีน 50

3.2.3 ผลการศึกษาความสูงของชั้นหมักที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีน 53

3.2.4 ผลการศึกษาปริมาณสปอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีน 61

3.3 ผลการศึกษาถึงอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมันในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้น เมื่อหมัก 1 ถาด 65

3.4 ผลการศึกษาถึงการเพิ่มโปรตีนให้กับมันในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นเมื่อหมัก 3 ถาด 73

3.4.1 ผลการหมักในถาดหมัก 3 ถาด เมื่อให้อากาศในอัตรา 0.79×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง 76

3.4.2 ผลการหมักในถาดหมัก 3 ถาด เมื่อให้อากาศในอัตรา 0.97×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง 80

4. อภิปรายผลการทดลอง 84

5. สรุปผลการทดลอง 93

หน้า

เอกสารอ้างอิง 96

ภาคผนวก 105

ก. อาหารเลี้ยงเชื้อ 106

ข. อุปกรณ์และเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง 108

ค. การคำนวณ 111

ง. ตารางแสดงผลการทดลอง 115

จ. วิธีการวัดค่าตัวแปรและวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน 159

ประวัติผู้เขียน 163

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	อิทธิพลของปัจจัยทางกายภาพที่มีต่อการหมักในอาหารแข็ง	5
1.2	เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ windrow	11
1.3	เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ windrow ในกระบวนการ metro system	11
1.4	เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ bed with recycle conditioned air ในการผลิตโคจิ	13
1.5	เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ rotating drum	13
1.6	เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ tower digester ชนิด Earp-Thomas tower digester	15
1.7	เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ stirred tank	15
1.8	เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ stirred bank ในกระบวนการ Fairfeild-Hardy system	16
1.9	เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ tray ในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส	16
1.10	การไฮโดรไลซ์สารประกอบไซยาจีนิคกลูโคไซด์	25
2.1	กล่องหมักพร้อมระบบควบคุมต่าง ๆ	31
2.2	ส่วนประกอบของกล่องหมัก	32
2.3	แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้น	36
2.4	แผนผังการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ ระบบควบคุม และการวิเคราะห์	38
2.5	ภาพถ่ายเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้น และระบบควบคุมต่าง ๆ	39
2.6	ภาพถ่ายเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้น และระบบควบคุมต่าง ๆ	39
3.1	จำนวนสปอร์ของ R. oligosporus จากอาหารแข็ง 3 ชนิด เมื่อผันแปรความชื้นของอาหาร	44
3.2	จำนวนสปอร์ของ R. oligosporus จากอาหารแข็ง 3 ชนิด เมื่อผันแปรอัตราส่วนของอาหาร	45

รูปที่ หน้า

3.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก เมื่อผันแปรขนาดของมันต่างกันในกล่องหมัก 47
3.4 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก เมื่อผันแปรขนาดของมันต่างกันในกล่องหมัก 48
3.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของมันหมัก เมื่อผันแปรขนาดของมันต่างกันในกล่องหมัก 49
3.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมันหมัก เมื่อผันแปรขนาดของมันต่างกันในกล่องหมัก 51
3.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก เมื่อผันแปรความชื้นเริ่มต้นต่างกันในกล่องหมัก 52
3.8 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก เมื่อผันแปรความชื้นเริ่มต้นต่างกันในกล่องหมัก 54
3.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมัก เมื่อผันแปรความชื้นเริ่มต้นต่างกันในกล่องหมัก 55
3.10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันหมัก เมื่อผันแปรความชื้นเริ่มต้นต่างกันในกล่องหมัก 56
3.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก เมื่อผันแปรความสูงของชั้นหมักต่างกันในกล่องหมัก 58
3.12 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก เมื่อผันแปรความสูงของชั้นหมักต่างกันในกล่องหมัก 59
3.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมัก เมื่อผันแปรความสูงของชั้นหมักต่างกัน ในกล่องหมัก 60
3.14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมันหมัก เมื่อผันแปรความสูงของชั้นหมักต่างกัน ในกล่องหมัก 62
3.15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก เมื่อผันแปรปริมาณสปอร์เริ่มต้นต่างกัน ในกล่องหมัก 63

รูปที่ หน้า

3.16 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก เมื่อผันแปรปริมาณสปอร์เริ่มต้นต่างกันในกล่องหมัก 64

3.17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมัก เมื่อผันแปรปริมาณสปอร์เริ่มต้นต่างกันในกล่องหมัก 66

3.18 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมันหมัก เมื่อผันแปรปริมาณสปอร์เริ่มต้นต่างกันในกล่องหมัก 67

3.19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่างกัน ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 69

3.20 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่างกัน ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 70

3.21 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมัก เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่างกัน ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 71

3.22 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมันหมัก เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่างกัน ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 72

3.23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมันหมัก เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่างกัน ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 74

3.24 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในการถ่ายเทมวล เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 75

3.25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน น้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ ความชื้นของมันหมัก และอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมันหมักทั้ง 3 ถาด เมื่อใช้อัตราการให้อากาศ 0.79×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 77

3.26 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมัก 3 ถาด เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศ 0.79×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 78

รูปที่ หน้า

3.27 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในการถ่ายเทมวล เมื่อหมัก 3 ถาด และใช้ปริมาณการไหลของอากาศ 0.79×10^{-4} และ 0.97×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 79

3.28 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน น้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ ความชื้นของมันหมัก และอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมันหมักทั้ง 3 ถาด เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศ 0.97×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 81

3.29 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมักทั้ง 3 ถาด เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศ 0.97×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 82

3.30 ภาพถ่ายมันหมักจากเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 83

3.31 ภาพถ่ายมันหมักจากเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ 83

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 จุลินทรีย์และผลิตภัณฑ์ในการหมักในอาหารแข็ง 6

1.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบการหมักในอาหารแข็งเมื่อเทียบกับการหมักอาหารเหลว 21

ง-1.1 ถึง ง-42 ตารางแสดงผลการทดลอง 115-158

คำย่อและสัญญลักษณ์

กก.	=	กิโลกรัม
$ม^3$	=	ลูกบาศก์เมตร
มล.	=	มิลลิลิตร
มม.	=	มิลลิเมตร
°ซ	=	องศาเซลเซียส
%	=	ร้อยละ
$k_s a_s$	=	ความถี่ในการถ่ายเทมวล (หน่วย/วินาที)
F	=	อัตราส่วนของความเข้มข้นของออกซิเจนที่ออก (C_{A_o}) กับความเข้มข้นของออกซิเจนที่เข้า (C_{A_i})
C_{A_o}	=	ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ (%)
C_{A_i}	=	ความเข้มข้นของออกซิเจนที่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (%)
V_s	=	ปริมาตรชั้นหมัก ($ม^3$)
Q	=	ปริมาณการไหลของอากาศ $ม^3$/วินาที/กก.
g	=	กรัม
kg	=	กิโลกรัม
sec	=	วินาที
m^3	=	ลูกบาศก์เมตร
mm	=	มิลลิเมตร