การผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลด้วยวิธีการหมักแบบต่อเนื่องและเวียนกลับเซลล์โดยใช้ SACCHAROMYCES CEREVISIAE

นายจีรัณ กิ่งแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4643-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21885154

ETHANOL PRODUCTION FROM MOLASSES BY CONTINUOUS FERMENTATION WITH CELL RECYCLE USING SACCHAROMYCES CEREVISIAE

Mr. Jeerun Kingkaew

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4643-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลด้วยวิธีการหมักแบบต่อเนื่องและเวียนกลับเซลล์โดยใช้ SACCHAROMYCES CEREVISIAE
โดย	นายจีรัณ กิ่งแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีรุ้ง ปรีชานนท์)

..... กรรมการ

(คุณ ปราโมทย์ ธรรมรัตน์)

จีรัณ กิ่งแก้ว : การผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลด้วยวิธีการหมักแบบต่อเนื่องและเวียนกลับเซลล์โดยใช้ SACCHAROMYCES CEREVISIAE. (ETHANOL PRODUCTION FROM MOLASSES BY CONTINUOUS FERMENTATION WITH CELL RECYCLE USING SACCHAROMYCES CEREVISIAE) อ. ที่ปรึกษา: ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์, 96 หน้า. ISBN 974-17-4643-1.

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการประยุกต์การหมักแบบต่อเนื่องและมีการเวียนกลับเซลล์ เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล โดยใช้ยีสต์ตกตะกอน *Saccharomyces cerevisiae* M30 โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกทำการศึกษาในขวดเขย่ารูปชมพู่เพื่อหาความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตั้งต้นที่เหมาะสมในการหมัก พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ ตั้งต้น 110 และ 220 กรัมต่อลิตร เหมาะสมสำหรับการผลิตเซลล์และเอทานอลตามลำดับ ส่วนที่สองทำการหมักแบบไม่ต่อเนื่องและต่อเนื่องในถังหมักปริมาตรการใช้งาน 7 ลิตร เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการหมักแบบไม่ต่อเนื่องและต่อเนื่อง โดยพบว่าในการหมักแบบต่อเนื่อง จุดที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลคือที่อัตราการเจือจาง 0.026 ต่อชั่วโมง มีอัตราการผลิตเอทานอลเป็น 5.99 กรัมต่อลิตรชั่วโมง (ความเข้มข้นของเอทานอล 32.54 กรัมต่อลิตร) และส่วนสุดท้ายทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักแบบต่อเนื่องและมีการเวียนกลับของเซลล์ พบว่าภายใต้สภาวะในการเพาะเลี้ยงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอลของ *S. cerevisiae* M30 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส อัตราการเจือจาง 0.026 ต่อชั่วโมง โดยที่อัตราการเวียนกลับเซลล์ 0.031 ลิตรต่อชั่วโมงมีอัตราการผลิตเอทานอลเป็น 13.35 กรัมต่อลิตรชั่วโมง (ความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 72.94 กรัมต่อลิตร)

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการผลิตเอทานอล พบว่าการหมักแบบต่อเนื่องและมีการเวียนกลับเซลล์จะให้อัตราการผลิตเอทานอลสูงกว่าการหมักแบบต่อเนื่องแบบไม่มีการเวียนกลับเซลล์ และการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง 2.3 และ 7 เท่า ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2546

4370254021: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ETHANOL PRODUCTION/ SACCHAROMYCES CEREVISIAE / CONTINUOUS FERMENTATION / CELL RECYCLE / MOLASSES

JEERUN KINGKAEW: ETHANOL PRODUCTION FROM MOLASSES BY CONTINUOUS FERMENTATION WITH CELL RECYCLE USING SACCHAROMYCES CEREVISIAE. THESIS ADVISOR: MUENDUEN PHISALAPHONG, Ph.D., 96 pp.

ISBN 974-17-4643-1.

The objective of this thesis is to study the application of continuous fermentation with cell recycle for improved ethanol production rate by *Saccharomyces cerevisiae* M30 using molasses as carbon source. The study was divided into three parts. The first part was performed in shaking flasks to study the optimum initial reducing sugar concentration for the fermentation. It was found that initial reducing sugar at 110 and 220 gL^{-1} in medium optimized the growth and the ethanol production rate respectively. The second part was studied in 7 liter reactor to compare between the batch and the continuous processes.The optimum ethanol production rate was attained at 5.99 g $L^{-1}hr^{-1}$ (32.54 gL^{-1} of ethanol) from continuous process at a dilution rate of 0.026 hr^{-1}. The final part was to investigate the optimum conditions for continuous with cell recycle system. Under the cell recycle system, ethanol productivity at 13.35 $gL^{-1}hr^{-1}$ was achieved with ethanol concentration of 72.94 gL^{-1} at dilution rate of 0.026 $hr^{-1}$and recycle volumetric flow rate of 0.031 Lhr^{-1}. The ethanol productivity was about 2.3 and 7 folds compared to those from the continuous and the batch process respectively.

Department Chemical Engineering Student's signature.....

Field of study Chemical Engineering Advisor's signature.....

Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษาที่มีคุณค่าต่อการพัฒนางานวิจัย การตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีรุ้ง ปรีชานนท์ และ คุณ ปราโมทย์ ธรรมรัตน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้เสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์และแก้ไขเพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่สุณี (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) สำหรับความช่วยเหลือในการวิเคราะห์เอทานอล คุณกิจชัย(โก้) สำหรับความช่วยเหลือในการทำเครื่องมือต่างๆ รวมถึง อาจารย์ พี่ๆน้องๆในห้องวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี และสิ่งแวดล้อม ทุกๆท่านที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัย

ขอขอบคุณ อาจารย์ และพี่ ๆ ในโครงการปรับปรุงการผลิตแอลกอฮอล์ของโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา สำหรับกากน้ำตาล เชื้อจุลินทรีย์ และ ข้อมูล ต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยนี้มากๆ

งานวิจัยชิ้นนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้เลยถ้าปราศจากความสนับสนุน ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจ จาก คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนญาติพี่น้องในครอบครัว และเพื่อนทุก ๆ คน จนทำให้ผู้วิจัยทำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฌ
สารบัญรูป.....ฎ
สัญลักษณ์.....ฑ

บทที่

1.บทนำ.....1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....6
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....7
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....8
2.1 เอทานอล.....8
2.2 กระบวนการหมัก.....9
2.2.1 การหมักแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบกะ.....10
2.2.2 การหมักแบบต่อเนื่อง.....16
2.2.3 การหมักต่อเนื่องแบบมีการเวียนกลับเซลล์.....18
2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 22
2.3.1 การศึกษาวิจัยในส่วนของการหาและการพัฒนาเชื้อจุลินทรีย์....22
2.3.2 การศึกษาวิจัยในส่วนของการพัฒนาการผลิต.....23
3. อุปกรณ์ เคมีภัณฑ์ และวิธีดำเนินการทดลอง.....26
3.1 อุปกรณ์และเคมีภัณฑ์.....26
3.1.1 อุปกรณ์.....26
3.1.2 สารเคมี.....27
3.2 เชื้อจุลินทรีย์.....27

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ หน้า

3.3 อาหารเลี้ยงเชื้อ....28
3.4 วิธีการเก็บรักษาเชื้อจุลินทรีย์....28
3.5 ขั้นตอนการทดลอง....29
3.6 การวัดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์....36
3.7 การหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์....37
3.8 การหาปริมาณเอทานอล....37
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง....38
4.1 การหมักแบบไม่ต่อเนื่องในขวดเขย่ารูปชมพู่....38
4.2 การหมักแบบไม่ต่อเนื่องในถังหมักขนาด 7 ลิตร....43
4.3 การหมักแบบต่อเนื่องชนิดหนึ่งขั้นตอนในถังหมักขนาด 7 ลิตร....47
4.4 การหมักต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนและการหมักแบบต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนที่มีการเวียนกลับเซลล์....50
4.5 การหมักแบบต่อเนื่องชนิดหนึ่งขั้นตอนต่อกับถังตกตะกอนเพื่อเวียนกลับเซลล์....54
5.สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ....59
5.1 สรุปผลการทดลอง....59
5.2 ข้อเสนอแนะ....61

รายการอ้างอิง....62
ภาคผนวก....69
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน....70
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง....76
ภาคผนวก ค วิธีวิเคราะห์ต่างๆ....90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....96

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ปริมาณเอทานอลที่ได้จากการใช้วัตถุดิบ ต่างๆกันในปริมาณ 1 ตัน มาผ่านกระบวนการผลิตที่เหมาะสม....4

2.1 แสดงตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอทานอลได้....23

5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลสรุปที่ได้จากทดลองหมักด้วยวิธีต่างๆโดยใช้ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตั้งต้นร้อยละ 22 โดยปริมาตราต่อปริมาตร pH เริ่มต้น 5.0 อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส....60

ข1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในขวดเขย่ารูปชมพู่ที่มีความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตั้งต้นร้อยละ 3 – 25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร....77

ข2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์ตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในขวดเขย่ารูปชมพู่ที่มีความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตั้งต้นร้อยละ 3 – 25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร....78

ข3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเอทานอลตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในขวดเขย่ารูปชมพู่ที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ตั้งต้นร้อยละ 3 – 25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร....79

ข4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ , เอทานอล และน้ำหนักเซลล์แห้งตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในถังหมักขนาด 7 ลิตร ครั้งที่ 1....80

ข5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ , เอทานอล และน้ำหนักเซลล์แห้งตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในถังหมักขนาด 7 ลิตร ครั้งที่ 2....80

ข6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงเซลล์ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเอทานอล และความเข้มข้นของเอทานอลตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องของ *S. cerevisiae* M30โดยใช้กากน้ำตาล ใช้ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นร้อยละ 22 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร....81

ข7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ , เอทานอล และน้ำหนักเซลล์แห้ง ตามเวลา ที่ได้จากการหมักต่อเนื่องในถังหมักขนาด 7 ลิตร ชนิดหนึ่งขั้นตอน....82

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ข8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตามเวลาที่ได้จากการหมักต่อเนื่องสองขั้นตอนและการหมักแบบต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนที่มีการเวียนกลับเซลล์.....83

ข9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์แห้งตามเวลา ที่ได้จากการหมักต่อเนื่องสองขั้นตอนและการหมักแบบต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนที่มีการเวียนกลับเซลล์ 84

ข10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเอทานอลตามเวลาที่ได้จากการหมักต่อเนื่องสองขั้นตอนและการหมักแบบต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนที่มีการเวียนกลับเซลล์.....85

ข11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตามเวลาที่ได้จากการหมักต่อเนื่องชนิดหนึ่งขั้นตอนต่อกับถังตกตะกอนเพื่อเวียนกลับเซลล์.....86

ข12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์แห้งตามเวลาที่ได้จากการหมักต่อเนื่องชนิดหนึ่งขั้นตอนต่อกับถังตกตะกอนเพื่อเวียนกลับ 87

ข13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ตามเวลาที่ได้จากการหมักต่อเนื่อง ชนิดหนึ่งขั้นตอนต่อกับถังตกตะกอนเพื่อเวียนกลับเซลล์.....88

ข14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของเซลล์อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอล และความเข้มข้นของเอทานอลตามเวลาที่ได้จากกาหมักแบบไม่ต่อเนื่องของ *S. cerevisiae* M30โดยใช้กากน้ำตาลใช้ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นร้อยละ 22 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร....89

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 แสดงขบวนการผลิตเอทานอล.....5

2.1 แสดงวิถีการเกิดเอทานอลจากน้ำตาลกลูโคส.....9

2.2 แสดงภาพจำลองของถังปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่อง.....10

2.3 แสดงการเจริญของจุลินทรีย์ที่เพาะเลี้ยงในระบบหมักแบบไม่ต่อเนื่อง.....12

2.4 แสดงผลของความเข้มข้นของสารอาหารเริ่มต้นต่อปริมาณเซลล์สูงสุด.....13

2.5 แสดงผลของความเข้มข้นของสารอาหารที่เหลือต่ออัตราการเจริญจำเพาะของจุลินทรีย์.....14

2.6 แสดงภาพจำลองของถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....16

2.7 แสดงภาพจำลองของถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องแบบหมุนวนเชื้อ.....18

3.1 แสดงภาพถ่ายเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญบนอาหารโปเตโตเดร็กโทรสเอการ์แบบแข็งเอียง.....29

3.2 แสดงภาพถ่ายหัวเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น.....30

3.3 ภาพถ่ายแสดงการหมักในขวดเขย่ารูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร 31

3.4 แสดงการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในถังหมักขนาด 7 ลิตร.....32

3.5 แสดงการหมักแบบต่อเนื่องชนิดหนึ่งขั้นตอน ในถังหมักขนาด 7 ลิตร.....33

3.6 แสดงการหมักต่อเนื่องในถังหมักขนาด 7 ลิตร แบบสองขั้นตอน.....35

3.7 แสดงการหมักต่อเนื่องในถังหมักขนาด 7 ลิตร แบบสองขั้นตอนและมีการเวียนกลับเซลล์.....35

4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในขวดเขย่ารูปชมพู่ที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นร้อยละ 3 ,5,8,11และ15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 39

4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์ ตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในขวดเขย่ารูปชมพู่ที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นร้อยละ 3 ,5,8,11และ15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....39

4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอทานอล ตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในขวดเขย่ารูปชมพู่ที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นร้อยละ 3 ,5,8,11และ15 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในขวดเขย่ารูปชมพู่ที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นร้อยละ 17,20,21,22,23,24 และ 25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....40

4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำวนวนเซลล์ตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในขวดเขย่ารูปชมพู่ที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นร้อยละ 17,20,21,22,23,24 และ 25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 41

4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอทานอลตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในขวดเขย่ารูปชมพู่ที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 17,20,21,22,23,24 และ 25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....41

4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ , เอทานอล และน้ำหนักเซลล์แห้งตามเวลา ที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในถังหมักขนาด 7 ลิตร ครั้งที่ 1 43

4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ , เอทานอล และน้ำหนักเซลล์แห้ง ตามเวลา ที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องในถังหมักขนาด 7 ลิตร ครั้งที่ 2 44

4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอล และความเข้มข้นของเอทานอลตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องของ *S. cerevisiae* M30โดยใช้กากน้ำตาลใช้ความเข้มข้นน้ำตาลตั้งต้นต้นร้อยละ 22 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....45

4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตเซลล์ต่อปริมาณน้ำตาลที่ถูกใช้ไป($Y_{X/S}$) และปริมาณผลผลิตเอทานอลต่อปริมาณน้ำตาลที่ถูกใช้ไป($Y_{P/S}$)ตามเวลาที่ได้จากการหมักแบบไม่ต่อเนื่องของ *S. cerevisiae* M30 โดยใช้กากน้ำตาล ใช้ความเข้มข้นน้ำตาลตั้งต้นร้อยละ 22 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร....46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ , เอทานอล และน้ำหนักเซลล์แห้งตามเวลาที่ได้จากการหมักต่อเนื่องในถังหมักขนาด 7 ลิตร ชนิดหนึ่งขั้นตอน..... 48

4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตามเวลาที่ได้การหมักต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนและการหมักแบบต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนที่มีการเวียนกลับเซลล์ 50

4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์แห้งตามเวลาที่ได้จากการหมักต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนและการหมักแบบต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนที่มีการเวียนกลับเซลล์.....51

4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตามเวลาที่ได้จากการหมักต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนและการหมักแบบต่อเนื่องชนิดสองขั้นตอนที่มีการเวียนกลับเซลล์.....52

4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ตามเวลา ที่ได้จากการหมักต่อเนื่องชนิดหนึ่งขั้นตอนต่อกับถังตกตะกอนเพื่อเวียนกลับเซลล์.....54

4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์แห้งตามเวลาที่ได้จากการหมักต่อเนื่องชนิดหนึ่งขั้นตอนต่อกับถังตกตะกอนเพื่อเวียนกลับเซลล์.....55

4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเอทานอลตามเวลาที่ได้จากการหมักต่อเนื่องชนิดหนึ่งขั้นตอนต่อกับถังตกตะกอนเพื่อเวียนกลับเซลล์.....56

ก1 กราฟมาตรฐานสำหรับหาปริมาณเซลล์ (จากค่าการดูดกลืนแสง) 71

ก2 กราฟมาตรฐานสำหรับหาน้ำหนักเซลล์แห้ง (จากค่าการดูดกลืนแสง).....72

ก3 กราฟมาตรฐานสำหรับหาน้ำหนักเซลล์แห้ง (จากปริมาณเซลล์).....73

ก4 กราฟมาตรฐานสำหรับหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 74

ก5 กราฟมาตรฐานสำหรับหาปริมาณเอทานอล 75

สัญลักษณ์

e	ฐานล็อกธรรมชาติ(natural logarithm)
q_p	อัตราการสร้างผลิตภัณฑ์จำเพาะ (กรัมผลิตภัณฑ์ต่อกรัมเซลล์ · ชั่วโมง)
t	เวลา (ชั่วโมง)
μ	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ต่อชั่วโมง)
μ_{max}	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (ต่อชั่วโมง)
D	อัตราการเจือจาง (ต่อชั่วโมง)
F	อัตราการป้อนสารอาหาร (ลิตรต่อชั่วโมง)
F_0	อัตราการป้อนสารอาหารเริ่มต้น (ลิตรต่อชั่วโมง)
F_r	อัตราการเวียนกลับ (ลิตรต่อชั่วโมง)
F_w	อัตราการปล่อยออก (ลิตรต่อชั่วโมง)
Ks	ค่าคงที่อิ่มตัว (กรัมต่อลิตร)
P	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (กรัมต่อลิตร)
P_0	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)
S	ความเข้มข้นของสารอาหาร (กรัมต่อลิตร)
S_0	ความเข้มข้นของสารอาหารเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)
S_{SS}	ความเข้มข้นของสารอาหารที่สภาวะคงที่ (กรัมต่อลิตร)
V	ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (ลิตร)
X	ความเข้มข้นของเซลล์ (กรัมต่อลิตร)
X_0	ความเข้มข้นของเซลล์ เริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)
X_{eff}	ความเข้มข้นเซลล์ออกจากถังตกตะกอนทางด้านบน (กรัมต่อลิตร)
X_r	ความเข้มข้นเซลล์ออกจากถังตกตะกอนด้านล่าง (กรัมต่อลิตร)
$Y_{x/s}$	ผลได้ของเซลล์ต่อสารอาหาร (กรัมเซลล์ต่อกรัมอาหาร)
$Y_{P/s}$	ผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่อสารอาหาร (กรัมเซลล์ต่อกรัมอาหาร)