การควบคุมอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนในสารป้อนเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตของพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต จาก Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 ในถังปฏิกรณ์ชีวมวลแบบกึ่งต่อเนื่อง

นาย ศิริพงษ์ วิงวอน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-635-016-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17362404

CONTROL OF CARBON-TO-NITROGEN RATIO IN FEED FOR INCREASING OF POLY-β-HYDROXYBUTYRATE PRODUCTIVITY FROM Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 IN THE FED-BATCH BIOREACTOR

Mr. Siripong Vingvon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Chemical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1996

ISBN 974-635-016-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนในสารป้อนเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตของพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตจาก Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 ในถังปฏิกรณ์ชีวมวลแบบกึ่งต่อเนื่อง
โดย	นาย ศิริพงษ์ วิงวอน
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สังศรี กุลปรีชา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สุวัฒนา พวงเพิกศึก)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ศิริพงษ์ วิงวอน : การควบคุมอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนในสารป้อนเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตของพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตจาก Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 ในถังปฏิกรณ์ชีวมวลแบบกึ่งต่อเนื่อง (CONTROL OF CARBON-TO-NITROGEN RATIO IN FEED FOR INCREASING OF POLY-β-HYDROXYBUTYRATE PRODUCTIVITY FROM Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 IN THE FED-BATCH BIOREACTOR)
อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์, 130 หน้า. ISBN 974-635-016-1

ได้ศึกษากระบวนการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC17697 แบบกึ่งต่อเนื่องเพื่อเพิ่มอัตราผลผลิตของพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต จากผลการหมักแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าฟรุกโตสเป็นแหล่งคาร์บอนที่ดีกว่ากลูโคส ภาวะที่เหมาะสมต่อการหมักอยู่ที่ความเข้มข้นฟรุกโตส 8 กรัม/ลิตร (ในระดับขวดแก้วทรงกรวย) และ 9 กรัม/ลิตร (ในระดับถังหมัก) และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0 ในการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องได้แบ่งกระบวนการเพาะเลี้ยงออกเป็นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนเพิ่มปริมาณเซลล์ และขั้นตอนเพิ่มปริมาณ PHB ในขั้นตอนแรกทำการควบคุมอัตราการเติมสารป้อน ให้ความเข้มข้นของน้ำตาล ฟรุกโตสคงที่ที่ 9 กรัม/ลิตร โดยใช้ค่าความเข้มข้นของน้ำตาลฟรุกโตสที่ได้จากการวิเคราะห์แบบออฟไลน์ (off-line analysis) พบว่าสามารถเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ได้ถึง 53.28 กรัม/ลิตร ในระยะเวลา 31 ชั่วโมง คิดเป็นอัตราผลผลิตเซลล์ 1.72 กรัม/ลิตร-ชั่วโมง ในช่วงสร้างผลิตภัณฑ์ ได้ใช้สารป้อนที่มีค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ 30, 150, และสารป้อนที่มีแต่เพียงคาร์บอนเพียงอย่างเดียว พบว่าสารป้อนที่มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 150 ได้ปริมาณพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตสะสมภายในเซลล์ 17.92 % โดยน้ำหนักเซลล์แห้ง ด้วยอัตราผลผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต 0.22 กรัม/ลิตร-ชั่วโมง

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C616958 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: CARBON AND NITROGEN RATIO, FED-BATCH BIOREACTOR, PHB, Alcaligenes eutrophus
SIRIPONG VINGVON : CONTROL OF CARBON-TO-NITROGEN RATIO IN FEED FOR INCREASING OF POLY-β-HYDROXYBUTYRATE PRODUCTIVITY FROM Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 IN THE FED-BATCH BIOREACTOR. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHIRAKARN MUANGNAPOH, Dr.Ing. 130 pp. ISBN 974-635-016-1

Alcaligenes eutrophus ATCC17697 was cultivated by fed-batch culture technique to increase poly-β-hydroxybutyrate (PHB) productivity. The results of batch fermentation at 30 °c showed that fructose, as carbon source, was better than glucose. The optimum condition for batch fermentation is fructose concentration 8.0 g/l (in flask) and 9.0 g/l (in fermenter) and pH of 7.0. In fed-batch fermentation, the cultivation was divided to two stages. The first was growth stage and the second was production stage. In the first stage, feed rate was controlled to maintain fructose concentration at 9.0 g/l by off-line fructose concentration analysis. The experimental results showed that high cell concentration of 53.28 g/l was obtained at 31 hour and the cell productivity was 1.72 g/l-hr. In the production stage, feeding nutrient of which C/N mole ratio were controlled at 30, 150, and infinite (only carbon in feed). These experiments showed that at C/N mole ratio of 150, the percent PHB accumulation in cell and PHB productivity were of 17.92 % dry weight and 0.22 g/l-hr, respectively.

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำในการพัฒนางานวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. ส่งศรี กุลปรีชา รองศาสตราจารย์ สุวัฒนา พวงเพิกศึก และ อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความสนใจ และให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้

เนื่องจากทุนที่ใช้ดำเนินงานวิจัยชิ้นนี้ บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนงานวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเคมี จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ที่ได้คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปมิได้เลย หากไม่ได้รับความช่วยเหลืออย่างเต็มที่จากคุณ จันทพร ปุณณรัตนกุล และคุณ ศุภวัฒน์ ขาวอ่อน

สุดท้ายผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งคอยให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฌ
สารบัญภาพ.....ญ
สัญลักษณ์.....ฌ
บทที่
1. บทนำ.....1
วัตถุประสงค์.....4
2. ตรวจเอกสาร.....5
2.1 พอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต.....5
2.1.1 คุณลักษณะของพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต.....5
2.1.2 การสังเคราะห์พอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต.....6
2.1.3 กระบวนการผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต.....8
2.1.4 การผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต
จาก Aicaligenes eutrophus.....9
2.1.5 การผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตจากเชื้อจุลินทรีย์
ในกลุ่ม Methylotrophs.....10
2.1.6 การผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตจาก Escherichia coli
ที่ผ่านการดัดแปลงสารพันธุกรรม.....11
2.1.7 การสกัดแยกพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต
และทำให้บริสุทธิ์.....12
2.1.8 การประยุกต์ใช้พอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต.....13
2.2 การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง.....14
3. ทฤษฎี.....16
ทฤษฎีการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง หรือการหมักแบบแบตช์
ชนิดที่มีการเติมสารป้อน.....16
3.1 ลักษณะโดยทั่วไป.....16
3.2 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง.....17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 วิธีการควบคุมการเติมสารป้อนของกระบวนการหมัก
แบบกึ่งต่อเนื่อง....20
3.4 การควบคุมการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องเพื่อให้ได้
อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด....21
4. อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย....23
4.1 อุปกรณ์ และเคมีภัณฑ์....23
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย....23
4.1.2 โปรแกรมใช้งาน Cellmax.exe และ Model.exe....25
4.1.3 เคมีภัณฑ์....37
4.1.4 เชื้อจุลินทรีย์....38
4.1.5 อาหารเลี้ยงเชื้อ....38
4.2 วิธีดำเนินงานวิจัย....39
4.2.1 การเก็บรักษาเชื้อจุลินทรีย์....39
4.2.2 การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์....40
4.2.3 การเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus
ATCC17697 ในแบบไม่ต่อเนื่อง....40
4.2.4 การเพิ่มอัตราผลผลิตเซลล์โดยอาศัยการเพาะเลี้ยง
แบบกึ่งต่อเนื่อง....43
4.2.5 วิธีการหาน้ำหนักเซลล์แห้ง....44
4.2.6 วิธีการหาปริมาณน้ำตาลฟรุคโตสในน้ำหมัก....44
4.2.7 วิธีการหาปริมาณแอมโมเนียมไอออน....45
4.2.8 วิธีการหาปริมาณพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต....45
5. ผลการทดลอง วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง....48
5.1 ผลการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus
ATCC17697 แบบไม่ต่อเนื่อง....48
5.1.1 ผลการทดลองหาชนิด และปริมาณของแหล่งคาร์บอนเริ่มต้น
ที่เหมาะสมต่อเชื้อจุลินทรีย์....48
5.1.2 ผลการทดลองหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อเชื้อ
จุลินทรีย์....51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.3 ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน เริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต.....55
5.1.4 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC17697.....58
5.1.5 การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการควบคุมการเติมสารป้อน.....61
5.2 ผลการเพาะเลี้ยงในแบบควบคุมความเข้มข้นของสารอาหารเพื่อให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะในช่วงเจริญเติบโตมีค่าสูงสุดตลอดเวลา.....64
5.3 ผลการเพิ่มอัตราพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตในช่วงสร้างผลิตภัณฑ์โดยให้สารป้อนที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนคงที่.....74
5.4 สรุปผลการทดลอง.....81
5.5 ข้อเสนอแนะ.....82
รายการอ้างอิง.....83
ภาคผนวก ก. 85
ภาคผนวก ข. 90
ภาคผนวก ค. 100
ประวัติผู้แต่ง.....130

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่พบว่า มีการสังเคราะห์และสะสม
พอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต.....6
2.2 การประยุกต์ใช้สารในกลุ่มพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตในงานด้านต่าง ๆ ที่เป็นไปได้.....13
3.1 กระบวนการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องประเภทต่าง ๆ จำแนกตามวิธีการควบคุม
การเติมสารป้อน.....20
5.1 แสดงผลการใช้แบบจำลองการเพาะเลี้ยงในแบบกึ่งต่อเนื่องทดลองหาค่าความเข้มข้น
สารอาหารในสารป้อนที่เหมาะสม.....63
5.2 แสดงผลการใช้แบบจำลองการเพาะเลี้ยงในแบบกึ่งต่อเนื่องทดลองหาค่าพารามิเตอร์
สำหรับการควบคุมที่เหมาะสม.....64
5.3 แสดงผลการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC17697 ในแบบ
ควบคุมให้ความเข้มข้นของน้ำตาลฟรุคโตสคงที่ ที่ 9 กรัม/ลิตร.....68
5.4 แสดงข้อมูลสรุปผลการเพิ่มอัตราผลผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตในช่วง
สร้างผลิตภัณฑ์โดยให้สารป้อนมีค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนคงที่.....75

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงสูตรโครงสร้างของ 3-hydroxybutyric acid เมื่อเป็นโมโนเมอร์.....5
2.2 แสดงผลิตภัณฑ์จากอะซิทิลโคเอ ในภาวะที่มีอาหารสมดุล และในภาวะไม่สมดุล แบบมีคาร์บอนมากเกินพอ.....7
2.3 แสดงกลไกการควบคุมการสังเคราะห์และการย่อยสลายพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต....8
3.1 กระบวนการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง.....17
3.2 กระบวนการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องชนิดมีการป้อนข้อมูลย้อนกลับ.....21
3.3 แสดงแผนภูมิสายงานการควบคุมความเข้มข้นของสารอาหารในแบบที่มีการพิจารณาค่าอัตราการเจริญเติบโตของจุลชีพเป็นข้อมูลย้อนกลับ เพื่อควบคุมให้ได้ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดตลอดเวลา ของ Agrawal และคณะ. 22
4.1 แสดงรูปโปรแกรม Cellmax.exe เมื่อเรียกขึ้นใช้งาน.....29
4.2 แสดงหน้าจอที่แสดงขึ้นเมื่อผู้ใช้เลือกกดปุ่ม " Configuration ".....31
4.3 แสดงหน้าจอที่แสดงขึ้นเมื่อผู้ใช้เลือกกดปุ่ม " Batch setup ".....32
4.4 แผนภาพแสดงการทดลองเพาะเลี้ยง Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 แบบกึ่งต่อเนื่องโดยวัดปริมาณเซลล์เพื่อใช้เป็นข้อมูลย้อนกลับ.....43
4.5 แสดงภาพถ่ายแสดงการผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตในถังหมักแบบกึ่งต่อเนื่องในถังหมักขนาด 3 ลิตร.....47
4.6 แสดงภาพถ่ายแสดงการผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตในถังหมักแบบกึ่งต่อเนื่องในถังหมักขนาด 3 ลิตร.....47
5.1 เปรียบเทียบปริมาณเซลล์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงด้วยแหล่งคาร์บอนต่างๆ ที่อายุการเพาะเลี้ยง 48 ชั่วโมง.....49
5.2 เปรียบเทียบค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหารที่ได้จากการเพาะเลี้ยงด้วยแหล่งคาร์บอนต่างๆ ที่อายุการเพาะเลี้ยง 48 ชั่วโมง.....50
5.3 เปรียบเทียบปริมาณ PHB ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงด้วยแหล่งคาร์บอนต่างๆ ที่อายุการเพาะเลี้ยง 48 ชั่วโมง.....52
5.4 แสดงปริมาณเซลล์ และปริมาณ PHB ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 แบบไม่ต่อเนื่องในขวดแก้วทรงกรวยที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มตั้งแต่ 6.0 ถึง 8.0.....53
5.5 แสดงผลได้เซลล์ และผลได้ PHB จากสารอาหารของการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 แบบไม่ต่อเนื่องในขวดแก้วทรงกรวยที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มตั้งแต่ 6.0 ถึง 8.0.....54

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.6 แสดงปริมาณเซลล์ และปริมาณ PHB ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 แบบไม่ต่อเนื่องในขวดแก้วทรงกรวยที่มีค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนตั้งแต่ 8 จนถึงไม่มีไนโตรเจนในอาหารเลี้ยงเชื้อ....56

5.7 แสดงค่าผลได้ของการเพาะเลี้ยงแบบไม่ต่อเนื่องในขวดแก้วทรงกรวยที่มีค่าที่มีค่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนตั้งแต่ 8 จนถึงไม่มีไนโตรเจนในอาหารเลี้ยงเชื้อ....57

5.8 แสดงการเจริญของเชื้อ Alcaligenes eutrophus ATCC17697 ในถังหมักแบบไม่ต่อเนื่อง เมื่อแปรผันปริมาณฟรุคโตสเริ่มต้นต่าง ๆ กัน....59

5.9 แสดงค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ค่าผลได้จากสารอาหาร และค่าอัตราผลผลิตเมื่อใช้ปริมาณน้ำตาลฟรุคโตสเริ่มต้นต่าง ๆ กัน....60

5.10 เปรียบเทียบผลการจำลองการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 แบบไม่ต่อเนื่องในถังหมักที่มีการให้อากาศ ควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้คงที่ และควบคุมไม่ให้สร้างผลิตภัณฑ์ กับผลการเพาะเลี้ยงจริงที่ภาวะเดียวกัน....62

5.11 เปรียบเทียบค่าปริมาณเซลล์ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องเทอร์บิดิมิเตอร์ และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เก็บจากถังหมัก....65

5.12 แสดงขั้นตอนการทำงานควบคุมการเติมสารป้อนโดยอาศัยข้อมูลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์....66

5.13 แสดงข้อมูลปริมาณเซลล์จากโปรแกรม cellmax.exe และปริมาณเซลล์ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง....69

5.14 แสดงผลการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC17697 โดยใช้โปรแกรม Cellmax.exe ควบคุมการเติมสารป้อน....70

5.15 แสดงผลการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC17697 แบบกึ่งต่อเนื่อง โดยให้คาร์บอนเพียงอย่างเดียวในสารป้อนในช่วงสร้างผลิตภัณฑ์....71

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.16 แสดงผลการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC17697 แบบกึ่งต่อเนื่อง โดยให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของสารป้อนในช่วงสร้างผลิตภัณฑ์เท่ากับ 150 72

5.17 แสดงผลการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Alcaligenes eutrophus ATCC17697 แบบกึ่งต่อเนื่อง โดยให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของสารป้อนในช่วงสร้างผลิตภัณฑ์เท่ากับ 30 73

5.18 แสดงปริมาณ PHB ที่สะสมไว้ภายในเซลล์เมื่อแปรผันค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของสารป้อน 77

5.19 แสดงค่าอัตราส่วนโดยโมลของคาร์บอนต่อไนโตรเจนในถังหมักที่ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงต่าง ๆ 78

5.20 แสดงปริมาณเซลล์รวม, ปริมาณ PHB, และปริมาณเซลล์ที่ไม่มี PHB ที่อายุการเพาะเลี้ยงต่าง ๆ 79

5.21 แสดงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซที่ไหลออกจากถังหมักกับค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ (% โดยน้ำหนัก) 80

สัญลักษณ์

f	อัตราการเติมสาร, ลิตร/ชั่วโมง
F	อัตราการเติมสารป้อน, ลิตร/ชั่วโมง
K_c	ค่าเกนสำหรับการควบคุมแบบ Proportional
K_i	ค่าสัมประสิทธิ์การยับยั้ง, กรัม/ลิตร
K_m	ค่าสัมประสิทธิ์การอิ่มตัว, กรัม/ลิตร
m	ค่าสัมประสิทธิ์การดำรงชีพ, กรัม/กรัม-ชั่วโมง
q_{Fruc}	ค่าอัตราการใช้น้ำตาล, กรัม/ชั่วโมง
S	ความเข้มข้นสารอาหาร, กรัม/ลิตร
S_f	ความเข้มข้นสารอาหารในสารป้อน, กรัม/ลิตร
t	อายุการเพาะเลี้ยง, ชั่วโมง
U_m	ค่าอัตราการเจริญสูงสุด, 1/ชั่วโมง
V	ปริมาตรอาหารเลี้ยงเชื้อภายในถังหมัก, ลิตร
X	ความเข้มข้นเชื้อจุลินทรีย์, กรัม/ลิตร
$Y_{x/s}$	ค่าผลได้เซลล์จากสารอาหาร, กรัม/กรัม
μ	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ, 1/ชั่วโมง
vap	การระเหย