การผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตโดย Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 ในถังปฏิกรณ์ชีวมวลร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน

นาย อภิชาติ แสงรุ่งเรืองกิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-634-995-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 17607965

PRODUCTION OF POLY-β-HYDROXYBUTYRATE BY Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 IN A BIOREACTOR COUPLING WITH MICROFILTRATION

Mr. Apichart Sangrungruengkit

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 974-634-995-3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตโดย Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 ในถังปฏิกรณ์ชีวมวลร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน
โดย	นาย อภิชาติ แสงรุ่งเรืองกิจ
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ส่งศรี กุลปรีชา)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ สุวัฒนา พวงเพิกศึก)

.....กรรมการ

(อ.ดร. สมประสงค์ ศรีชัย)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

อภิชาติ แสงรุ่งเรืองกิจ : การผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรตโดย Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 ในถังปฏิกรณ์ชีวมวลร่วมกับไมโครฟิลเตรชัน (PRODUCTION OF POLY-β-HYDROXYBUTYRATE BY Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 IN A BIOREACTOR COUPLING WITH MICROFILTRATION) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์, 106 หน้า. ISBN 974-634-995-3

ระบบไมโครฟิลเตรชันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต โดย Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 ในถังปฏิกรณ์ชีวมวลที่ภาวะการปฏิบัติงานต่างๆ จากการศึกษาคุณลักษณะการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันของเยื่อแผ่นเซรามิกนี้ แสดงให้เห็นว่า ควรปฏิบัติการที่ความดันขาเข้า 0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อัตราเร็วในกระแสเวียนกลับ 0.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองจากการหมักที่ 30 องศาเซลเซียส พบว่าฟรุกโตสเป็นแหล่งคาร์บอนที่ดีกว่ากลูโคส ภาวะการหมักที่เหมาะสมในระบบการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง อยู่ที่ความเข้มข้นฟรุกโตส 8-9 กรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.0 โดยให้ค่าการสะสม PHB 16.99 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเซลล์แห้ง เมื่อนำระบบไมโครฟิลเตรชันมาใช้ร่วมกับการหมัก พบว่าที่อัตราการเจือจาง 0.3 ต่อชั่วโมง ให้อัตราผลผลิตเซลล์สูงสุด (1.384 กรัมต่อลิตร-ชั่วโมง) และความเข้มข้นเซลล์สูงสุด (88.01 กรัมต่อลิตร) หลังจากนั้นเซลล์ที่ผลิตได้นี้จะถูกกระตุ้นให้สร้าง PHB โดยการป้อนสารอาหารที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนระหว่าง 0-150 การทดลองเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 32.77 ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสะสม PHB และอัตราผลผลิต PHB เท่ากับ 47.83 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเซลล์แห้ง และ 0.66 กรัมต่อลิตร-ชั่วโมง ตามลำดับ โดยสรุปการประยุกต์ใช้ทั้งสองระบบร่วมกัน สามารถเพิ่มอัตราผลผลิต PHB

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

...เวอร์ชันย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C616715 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: PHB/ A. eutrophus/ MICROFILTRATION/ BIOREACTOR/ AMMONIUM SULPHATE LIMITATION
APICHART SANGRUNGRUENGKIT : PRODUCTION OF POLY-β-HYDROXYBUTYRATE BY Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 IN A BIOREACTOR COUPLING WITH MICROFILTRATION.
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.CHIRAKARN MUANGNAPOH, Dr. Ing.
106 pp. ISBN 974-634-995-3

Microfiltration system was applied to production of poly-β-hydroxybutyrate by Alcaligenes eutrophus ATCC 17697 in a bioreactor various operating conditions. From the study of microfiltration characteristics of this ceramic membrane showed that operating conditions should be at 0* kg_f/m^2 and 0.4 m^3/hr for inlet pressure and recirculation rate respectively. From the fermentation results, we found that fructose, as carbon source, is better than glucose. Optimum condition for batch fermentation at 30 °C is fructose concentration of 8.0-9.0 g/l and pH of 7.0 with percent PHB accumulation in cell of 16.99% (by cell dry weight). When microfiltration system was applied to fermentation, at it was found that at dilution rate of 0.3 hr^{-1} give maximum cell productivity (1.384 g/l-hr) and maximum cell concentration (88.01 g/l). After that these cells were stimulated to produce PHB by feeding nutrients which were controlled C/N ratio from 0-150 (by mole).These experiments showed that at C/N ratio of 32.77, the percent PHB accumulation in cell and PHB productivity are of 47.83% (by cell dry weight) and 0.66 g/l-hr respectively. In conclusion, the couple application of both systems could enhance PHB productivity.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำในการพัฒนางานวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.ส่งศรี กุลปรีชา รองศาสตราจารย์ สุวัฒนา พวงเพิกศึก และ อ.ดร.สมประสงค์ ศรีชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความสนใจ และให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

เนื่องจากทุนวิจัยในครั้งนี้ บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวทช.) และภาควิชาวิศวกรรมเคมี จึงขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ โดยเฉพาะเพื่อนสมาชิกห้องวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจแก่ผู้วิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งคอยให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยในการทำงานวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ญ

สารบัญรูป.....ฐ

สัญลักษณ์.....ด

บทที่

1.บทนำ.....1

วัตถุประสงค์.....2

ขอบเขตการศึกษา.....3

2.ตรวจเอกสาร.....4

ความเป็นมา.....4

การเพิ่มอัตราผลผลิตโดยใช้เทคนิคไมโครฟิลเตรชัน.....13

การผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต.....14

คุณสมบัติของพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต.....17

3.ทฤษฎี.....19

การกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน.....19

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

กลไกการไหลผ่านเยื่อแผ่น.....20
ความสามารถในการกักเก็บของเยื่อแผ่น.....28
การหมักแบบต่อเนื่องที่มีการเวียนเซลล์กลับ.....28
4.อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....33
อุปกรณ์.....33
สารเคมี.....34
เชื้อจุลินทรีย์.....35
อาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์.....35
วิธีการเก็บรักษาเชื้อจุลินทรีย์.....36
ระบบการเวียนเซลล์กลับ.....37
ขั้นตอนการทดลอง.....37
การวัดการเจริญของเชื้อ.....46
วิธีหาปริมาณน้ำตาลฟรุกโตส.....46
วิธีหาปริมาณไนโตรเจนในสารละลาย.....47
การวิเคราะห์ปริมาณพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต.....48
5. ผลการทดลอง วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง.....50
ผลการทดลอง และวิเคราะห์.....50
สรุปผลการทดลอง.....83

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ข้อเสนอแนะ.....85

เอกสารอ้างอิง.....86

ภาคผนวก.....92

ประวัติผู้แต่ง.....106

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 สรุปการผลิต PHB จากเชื้อจุลินทรีย์ และสารอาหารชนิดต่างๆ.....12

2.2 แสดงคุณสมบัติของ PHB เปรียบเทียบกับพอลิโพรไพลีน.....18

4.1 แสดงตัวแปรที่ศึกษาในระบบไมโครฟิลเตรชันคือ ความดัน อัตราการไหลในกระแสเวียนเซลล์กลับ และความเข้มข้นของสารละลาย.....38

5.1 แสดงค่า ln C_b และค่าเพอมิเอชันฟลักซ์.....55

5.2 ผลการเจริญเติบโตของเชื้อ *A. eutrophus* ในถังหมักแบบต่อเนื่องที่มีเวียนเซลล์กลับ ที่อัตราการเจือจางต่างๆ 75

5.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิต PHB ในถังหมักแบบต่อเนื่องที่มีเวียนเซลล์กลับ.....81

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงวิถีการสังเคราะห์ PHB จากสารตัวกลางของวัฏจักรเครปส์	7
2.2	แสดงการผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตและกระบวนการรีโคเวอรี	15
3.1	ลักษณะการกรองของเยื่อแผ่นในระบบไมโครฟิลเตรชัน	20
3.2	แสดงเกรเดียนต์ของความเข้มข้น	21
3.3	แสดงเกรเดียนต์ของความเข้มข้นหลังจากเกิดเจลโพลาไรเซชัน	23
3.4	แสดงการเปรียบเทียบการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น และการกรองแบบไหลผ่านเยื่อแผ่น	24
3.5	แสดงความสัมพันธ์ของความดันในการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น	24
3.6	การหมักแบบต่อเนื่องที่มีการเวียนเซลล์กลับ	29
4.1	แสดงลักษณะของตัวกรองเซรามิก (type 1M-1)	37
4.2	แสดงระบบของไมโครฟิลเตรชัน	39
4.3	แสดงเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญบนอาหารแข็งเอียง	41
4.4	แสดงการเตรียมหัวเชื้อตั้งต้น ในขวดแก้วทรงกรวยขนาด 500 มิลลิลิตร	43
4.5	ภาพถ่ายแสดงการผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต ในถังปฏิกรณ์ชีวมวลด้วยไมโครฟิลเตรชัน	43
4.6	แผนภาพแสดงการผลิตพอลิ-บีตา-ไฮดรอกซีบิวทิเรต ในถังปฏิกรณ์ชีวมวลด้วยไมโครฟิลเตรชัน	44

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.1 แสดงผลของค่าเฉลี่ยของค่าความดันขับผ่านเยื่อแผ่นต่อเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำกรอง และน้ำหมักที่ความเข้มข้นเซลล์ต่างๆ.....51

5.2 แสดงผลของค่าเฉลี่ยของค่าความดันขับผ่านเยื่อแผ่นต่อเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำกรอง และน้ำหมักที่ความเข้มข้นเซลล์ต่างๆ.....52

5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์กับอัตราการไหลในกระแสเวียนเซลล์กลับ ของน้ำหมักที่ความเข้มข้นเซลล์ต่างๆ.....54

5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์กับความเข้มข้นเซลล์.....55

5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์กับ ln C_b.....56

5.6 แสดงผลการเจริญ และการสร้าง PHB ของเชื้อ *A. eutrophus* เมื่อใช้ฟรุกโตสเป็นแหล่งคาร์บอน.....58

5.7 แสดงผลการเจริญ และการสร้าง PHB ของเชื้อ *A. eutrophus* เมื่อใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน.....59

5.8ก แสดงผลการเปรียบเทียบการเจริญของ *A. eutrophus* เมื่อใช้กลูโคส และฟรุกโตสเป็นแหล่งคาร์บอน.....60

5.8ข แสดงผลการเปรียบเทียบการสร้าง PHB ของ *A. eutrophus* เมื่อใช้กลูโคส และฟรุกโตสเป็นแหล่งคาร์บอน.....61

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.8ค แสดงผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นของ PHB ของเชื้อ *A. eutrophus* เมื่อใช้กลูโคส และฟรุกโตสเป็นแหล่งคาร์บอน.....63

5.9ก แสดงผลของค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของอาหารเลี้ยงต่อการเจริญและการสร้าง PHB ของเชื้อ *A. eutrophus*.....64

5.9ข แสดงผลของค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของอาหารเลี้ยงต่อความเข้มข้นของ PHB ของเชื้อ *A. eutrophus*.....65

5.10 ผลของการแปรผันอัตราส่วนโดยมวลระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีต่อการเจริญและการสร้าง PHB ของเชื้อ *A. eutrophus*.....67

5.11 แสดงการเจริญของเชื้อ *A. eutrophus* ในถังหมักแบบไม่ต่อเนื่องเมื่อแปรผันปริมาณฟรุกโตสเริ่มต้นต่างๆ กัน.....69

5.12 แสดงค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ผลได้ของเซลล์จากสารอาหารและอัตราผลผลิตเซลล์ เมื่อแปรผันปริมาณฟรุกโตสเริ่มต้นต่างๆ กัน.....70

5.13 การเจริญของเชื้อ *A. eutrophus* ในถังหมักแบบต่อเนื่องที่มีการเวียนเซลล์กลับที่อัตราการเจือจางต่างๆ.....72

5.14 แสดงการเจริญของเชื้อ *A. eutrophus* อัตราผลผลิตเซลล์ อัตราผลผลิต PHB และความเข้มข้นของ PHB ที่อัตราการเจือจางต่างๆ.....74

5.15 แสดงการเจริญของเชื้อ *A. eutrophus* ในถังหมักที่มีการเวียนเซลล์กลับและการสะสม PHB ที่ C/N ratio เท่ากับ 8.....77

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.16 แสดงการเจริญของเชื้อ *A. eutrophus* ในถังหมักที่มีการเวียนเซลล์กลับ และการสะสม PHB ที่ C/N ratio เท่ากับ 32.77.....78

5.17 แสดงการเจริญของเชื้อ *A. eutrophus* ในถังหมักที่มีการเวียนเซลล์กลับ และการสะสม PHB ที่ C/N ratio เท่ากับ 159.82.....79

5.18 ผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ออัตราการผลิตเซลล์ อัตราการผลิต PHB และอัตราการใช้สารอาหาร.....80

5.19 แสดงเปอร์เซ็นต์ PHB ที่สะสมในเซลล์เมื่อทำการแปรผันอัตราส่วนโดยมวลระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน.....82

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

c	=	แฟคเตอร์ความเข้มข้น (-)
C	=	ความเข้มข้นของสารละลาย (g/l)
C_1, C_2	=	ค่าคงที่ของรูปทรงของช่อง (-)
C_3, C_4	=	ค่าคงที่ของรูปทรงของช่อง (-)
C_b	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายป้อน (g/l)
C_g	=	ความเข้มข้นของเจล (g/l)
C_p	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเพอมิเอต (g/l)
C_w	=	ความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวเยื่อแผ่น (g/l)
d	=	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (m)
d_1	=	ความสูงของช่องของของเหลวเหนือเยื่อแผ่น (m)
D	=	อัตราการเจือจาง (hr^{-1})
D_v	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)
F	=	อัตราการป้อนสารอาหาร (m^3/hr)
f	=	แฟคเตอร์ที่ขึ้นกับค่า Reynolds number
J	=	อัตราฟลักซ์ของการกรอง (m^3/m^2-hr)
k	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (m/s)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์ (ต่อ)

K	=	อัตราการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ (hr^{-1})
L	=	ความยาวของตัวกรอง (m)
m	=	อัตราการใช้สารอาหารเพื่อการยังชีพ (hr^{-1})
P_f	=	ความดันด้านสารละลายเพอมิเอต (kg/cm^2)
P_i	=	ความดันขาเข้าของสารละลาย (kg/cm^2)
P_o	=	ความดันขาออกของสารละลาย (kg/cm^2)
P	=	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (g/l)
P_o	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (g/l)
Δp	=	ผลต่างของความดันขาเข้าและขาออกของสารละลาย (kg_f/cm^2)
ΔPTM	=	ค่าเฉลี่ยของความดันขับผ่านเยื่อแผ่น (kg_f/cm^2)
Q	=	อัตราการไหล (m^3/hr)
R_G	=	ความต้านทานเนื่องจากการเกิดเจลโพลาไรเซชัน (m^{-1})
R_M	=	ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น (m^{-1})
S	=	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (g/l)
S_o	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น (g/l)
v	=	ความเร็ว (m/s)
V	=	ปริมาตรถังหมัก (m^3)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์ (ต่อ)

X	=	ความเข้มข้นของเซลล์ (g/l)
X_o	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์ (g/l)
μ	=	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (hr^{-1})
μ_1	=	ความหนืด (kg/m.s)
ν	=	อัตราการสร้างผลิตภัณฑ์จำเพาะ (hr^{-1})
α	=	อัตราส่วนของกระแสเวียนกลับ (-)
δ	=	ความหนาของชั้นขอบเขต (m)
γ	=	อัตราการตายจำเพาะ (hr^{-1})
σ	=	สัมประสิทธิ์ของการกักเก็บของเยื่อแผ่น (-)
$Y_{p/s}$	=	ผลได้ของผลิตภัณฑ์จากสารอาหาร (g/g)
$Y_{x/s}$	=	ผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร (g/g)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย