# การผลิตกรดกลูโคนิกในรูปโซเดียมกลูโคเนตโดย *Aspergillus niger* G153 ที่ตรึงในชิ้น และแผ่นพอลิยูรีเทนโฟม

นางสาว เยาวภา ทองอร่าม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาจุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม ภาควิชาจุลชีววิทยา
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-883-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# PRODUCTION OF GLUCONIC ACID IN THE FORM OF SODIUM GLUCONATE BY *Aspergillus niger* G153 IMMOBILIZED IN CUBE AND SHEET OF POLYURETHANE FOAM

MISS. YAOWAPAR TONGARAM

A thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for the Degree of Master of Science in Industrial Microbiology
Department of Microbiology
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1997

ISBN 974-638-883-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตกรดกลูโคนิกในรูปโซเดียมกลูโคเนตโดย *Aspergillus niger* G153 ที่ตรึงในชิ้นและแผ่นพอลิยูรีเทนโฟม

โดย นางสาว เยาวภา ทองอร่าม

ภาควิชา จุลชีววิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ กรรณิกา จันทรสอาด

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กาญจณา จันทองจีน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ กรรณิกา จันทรสอาด)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

..... กรรมการ
(ดร. สุจิมา รักษาศีล)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

เยาวภา ทองอร่าม :การผลิตกรดกลูโคนิกในรูปโซเดียมกลูโคเนตโดย Aspergillus niger G153 ที่ตรึงในพอลิยูรีเทนโฟม (PRODUCTION OF GLUCONIC ACID IN THE FORM OF SODIUM GLUCONATE BY Aspergillus niger G153 IMMOBILIZED IN CUBE AND SHEET OF POLYURETHANE FOAM) อ. ที่ปรึกษา : รศ. กรรณิกา จันทรสอาด, 140 หน้า. ISBN 974-638-883-5.

ได้ศึกษาการผลิตกรดกลูโคนิกในรูปโซเดียมกลูโคเนตด้วยสายใยตรึงของ Aspergillus niger G153 ในชิ้นและแผ่นพอลิยูรีเทนโฟม พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดกลูโคนิกในคอลัมน์แก้วที่มีการให้อากาศด้านล่างด้วยสายใยตรึงของ Aspergillus niger G153 ในชิ้นพอลิยูรีเทนโฟม คือ ใช้สปอร์ความหนาแน่นเท่ากับ $1.0-2.5 \times 10^{8}$ สปอร์ต่อ พอลิยูรีเทนโฟม 1 กรัม ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อการผลิตกรดกลูโคนิกที่มีน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเสต 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 15 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที และใช้น้ำหนักแห้งของกล้าเชื้อสายใยตรึง 9.125 กรัมต่อลิตร ซึ่งให้ผลผลิต 315.54 กรัมต่อลิตร ในชั่วโมงที่ 74 ของการผลิต ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดกลูโคนิกด้วยสายใยตรึงของ Aspergillus niger G153 ในแผ่นพอลิยูรีเทนโฟม คือ ใช้สปอร์ความหนาแน่น $5.0-12.5 \times 10^{6}$ สปอร์ต่อพอลิยูรีเทนโฟม 1 แผ่น หนัก 0.05 กรัม ใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเสต 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 20 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที และใช้น้ำหนักแห้งของกล้าเชื้อสายใยตรึง 2.87 กรัมต่อลิตร ซึ่งให้ผลผลิต 296.7 กรัมต่อลิตร ในชั่วโมงที่ 80 ของการผลิต

ภาควิชา จุลชีววิทยา ลายมือชื่อนิสิต เยาวภา ทองอร่าม

สาขาวิชา จุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กรรณิกา จันทรสอาด

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม —

## C826622 : MAJOR INDUSTRIAL MICROBIOLOGY
KEY WORD: Aspergillus niger G153/ GLUCONIC ACID/ IMMOBILIZED MYCELIA / POLYURETHANE FOAM

YAOWAPAR TONGARAM : PRODUCTION OF GLUCONIC ACID IN THE FORM OF SODIUM GLUCONATE BY Aspergillus niger G153 IMMOBILIZED IN CUBE AND SHEET OF POLYURETHANE FOAM. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF. KANNIKA CHANTARASA-ARD, 140 pp. ISBN 974-638-883-5.

Production of gluconic acid in the form of sodium gluconate by immobilized Aspergillus niger G153 mycelia in polyurethane foam cube and sheet were studied in glass bubble column. The suitable conditions for gluconic acid production by the immobilized mycelia in polyurethane foam cube were as follows : 1.0-2.5x$10^8$ spores per 1 gram of polyurethane foam, the production medium containing 300 g/l. of glucose in starch hydrolysate, 15 vvm. aeration rate and 9.125 g/l. of the mycelia as inoculum which gave 315.54 g/l. of gluconic acid within 74 hours. For gluconic acid production by the immobilized mycelia in polyurethane foam sheet, the conditions which yielded 296.7 g/l. within 80 hours were 5.0-12.5x$10^6$ spores per 1 sheet of polyurethane foam (0.05 g.), 300 g/l. of glucose in starch hydrolysate in the production medium, 20 vvm. aeration rate and 2.87 g/l. of the mycelia as inoculum.

ภาควิชา จุลชีววิทยา ลายมือชื่อนิสิต เยาวภา ทองอร่าม.

สาขาวิชา จุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม —

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีโดยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ กรรณิกา จันทรสอาด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษา ให้คำแนะนำ ตลอดจนช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการ และคณะกรรมการทุกท่าน ที่กรุณาตรวจสอบ แก้ไขต้นฉบับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ชินอิจิ คิโนชิตะ (Prof. Dr. Shinishi Kinoshita) แห่งมหาวิทยาลัย ฮ็อกไกโด ประเทศญี่ปุ่นที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในงาน วิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัท อายิโนะโมะโต๊ะ (ประเทศไทย) จำกัด ที่กรุณาเอื้อเฟื้อ แป้ง มันสำปะหลังที่ย่อยแล้วให้ใช้ตลอดการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณสุนันท์ รังษีกาญจน์ส่อง ที่ช่วยให้คำแนะนำ และทำการวิเคราะห์ กรดกลูโคนิกโดยเครื่อง HPLC

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนงาน วิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจเป็น อย่างมากในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ คุณวิฑูรย์ พยัคฆ์รัตน์ ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งใน การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ คุณวรวิทย์ เหลืองดิลก คุณเทพนาฏ พุ่มไพบูลย์ ที่ให้กำลังใจและ ความช่วยเหลือในการทำสไลด์ และบันทึกภาพ เพื่อใช้ในการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อบำรุง คุณแม่อารี ทองอร่าม คุณยายฉ่อง วันทองเจริญ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้กำลังใจและสนับสนุนด้านการเรียนของลูกตลอดมา จนวิทยา นิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

# สารบัญ


หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ช

สารบัญรูป..... ฌ

บทที่

1. บทนำ..... 1

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย..... 33

3. ผลการวิจัย..... 52

4. สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย..... 107

รายการอ้างอิง..... 121

ภาคผนวก..... 134

ประวัติผู้เขียน..... 140

# สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1. ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าประเทศไทยของกรดกลูโคนิก อนุพันธุ์ และ เอสเทอร์ของกรด..... 3
2. ตัวอย่างสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกรดกลูโคนิก..... 9
3. ตัวอย่างวัสดุตรึงชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้ตรึงเซลล์ หรือสายใยรา..... 14
4. ตัวอย่างการใช้จุลินทรีย์ที่ตรึงในพอลิยูรีเทนโฟมโดยวิธีทำให้เซลล์ หรือสายใยเจริญเพื่อผลิตสารผลิตภัณฑ์ต่างๆ..... 18
5. การเติบโตของสายใยตรึงในชิ้น PUF ในการผลิตกรดกลูโคนิกในคอลัมน์ ที่มีการให้อากาศด้านล่างเมื่อแปรผันความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสตั้งต้น..... 60
6. การเติบโตของสายใยตรึงในชิ้น PUF ในการผลิตกรดกลูโคนิกในคอลัมน์ ที่มีการให้อากาศด้านล่าง เมื่อแปรผันอัตราการให้อากาศต่างๆกัน..... 61
7. การเติบโตของสายใยตรึงในชิ้น PUF ในการผลิตกรดกลูโคนิกในคอลัมน์ที่มี การให้อากาศด้านล่าง เมื่อแปรผันน้ำหนักแห้งกล้าเชื้อสายใยตรึงต่างๆกัน..... 70
8. การเติบโตของกล้าเชื้อสายใยตรึงระหว่างการผลิตกรดกลูโคนิกในขวดเขย่า เมื่อแปรผันอายุของกล้าเชื้อสายใยตรึงต่างๆกัน..... 75
9. การเติบโตของน้ำหนักแห้งสายใยตรึงในแผ่น PUF เมื่อแปรผันความหนาแน่น สปอร์ตรึงต่างๆ กัน..... 79
10. การเติบโตของสายใยตรึงในแผ่น PUF ในการผลิตกรดกลูโคนิกในคอลัมน์ที่มี การให้อากาศด้านล่าง เมื่อแปรผันอัตราการให้อากาศต่างๆ กัน..... 86
11. การเติบโตของสายใยตรึงในแผ่น PUF ในการผลิตกรดกลูโคนิกในคอลัมน์ แก้วที่มีการแปรผันน้ำหนักของกล้าเชื้อสายใยตรึงต่างๆ กัน..... 92
12. แสดงผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ..... 119

# สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1. ขั้นตอนการเกิดกรดกลูโคนิกจากน้ำตาลกลูโคส ..... 4
2. วัสดุที่ใช้ในการตรึงในงานวิจัย ..... 36
3. การผลิตกรดกลูโคนิกในคอลัมน์แก้วที่มีการให้อากาศด้านล่าง ..... 39
4. การผลิตกรดกลูโคนิกจากสายใยตรึงในชิ้น PUF ในคอลัมน์แก้วที่มีการให้อากาศด้านล่าง เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้วที่มีน้ำตาลกลูโคส 50 กรัมต่อลิตร ..... 53
5. การผลิตกรดกลูโคนิกจากสายใยตรึงในชิ้น PUF ในคอลัมน์แก้วที่มีการให้อากาศด้านล่าง เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้วที่มีน้ำตาลกลูโคส 250 กรัมต่อลิตร ..... 56
6. การผลิตกรดกลูโคนิกจากสายใยตรึงในชิ้น PUF ในคอลัมน์แก้วที่มีการให้อากาศด้านล่าง เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้วที่มีน้ำตาลกลูโคส 300 กรัมต่อลิตร ..... 57
7. การผลิตกรดกลูโคนิกจากสายใยตรึงในชิ้น PUF ในคอลัมน์แก้วที่มีการให้อากาศด้านล่าง เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้วที่มีน้ำตาลกลูโคส 350 กรัมต่อลิตร ..... 58
8. เปรียบเทียบปริมาณกรดกลูโคนิกสูงสุดที่ผลิตได้ เมื่อแปรผันความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสตั้งต้น เป็น 250 300 350 กรัมต่อลิตร ..... 59
9. การผลิตกรดกลูโคนิกเมื่อใช้ความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้วเท่ากับ 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 12.5 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที ..... 62
10. การผลิตกรดกลูโคนิกเมื่อใช้ความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้วเท่ากับ 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 10 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที ..... 63

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

11. การผลิตกรดกลูโคนิกเมื่อใช้ความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นใน แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้วเท่ากับ 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 7.5 ลิ ตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที .....64
12. เปรียบเทียบผลผลิตกรดกลูโคนิกและเวลาที่ใช้ผลิตเมื่อผลิตในคอลัมน์แก้ว ที่มีการให้อากาศด้านล่างโดยสายใยตรึงในชิ้น PUF แปรผันอัตราการให้ อากาศเป็น 15 12.5 10 7.5 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที..... 65
13. การผลิตกรดกลูโคนิกจากสายใยตรึงในชิ้น PUF ในคอลัมน์แก้วที่มีการให้ อากาศด้านล่าง น้ำหนักแห้งกล้าเชื้อสายใยตรึง เท่ากับ 9.125 กรัมต่อลิตร.....67
14 การผลิตกรดกลูโคนิกจากสายใยตรึงในชิ้น PUF ในคอลัมน์แก้วที่มีการให้ อากาศด้านล่าง น้ำหนักแห้งกล้าเชื้อสายใยตรึง เท่ากับ 12.3 กรัมต่อลิตร.....68
15. เปรียบเทียบผลผลิตกรดกลูโคนิกและเวลาที่ใช้ผลิตเมื่อผลิตในคอลัมน์แก้ว ที่มีการให้อากาศด้านล่าง แปรผันน้ำหนักแห้งกล้าเชื้อสายใยตรึง เท่ากับ 6.225 9.125 12.3 กรัมต่อลิตร..... 69
16. เปรียบเทียบผลผลิตกรดกลูโคนิกในรูปโซเดียมกลูโคเนต และรูปแคลเซียม กลูโคเนตและการใช้น้ำตาลเพื่อการผลิตกรดโดยสายใยตรึงในชิ้น PUF.....72
17. การเติบโตของ *Aspergillus niger* G153 ที่ตรึงในแผ่น PUF เมื่อเพาะเลี้ยง ในอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อทำให้สปอร์ตรึงงอกในช่วงเวลาต่างๆกัน.....74
18. ผลผลิตกรดกลูโคนิกและน้ำตาลกลูโคสที่ใช้ เมื่อผลิตกรดกลูโคนิกโดยใช้กล้า เชื้อสายใยตรึงอายุต่างๆกัน วัสดุตรึงคือ แผ่น PUF ทำการผลิตบนเครื่องเขย่า ด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที.....76
19. ผลผลิตกรดกลูโคนิกและน้ำตาลกลูโคสที่ใช้เมื่อเพาะเลี้ยงสปอร์ตรึงในแผ่น PUF เป็นเวลา 48 ชั่วโมงโดยแปรผันความหนาแน่นสปอร์ตรึงเป็น $10^7$ $10^6$ $10^5$ $10^4$ สปอร์ในระดับขวดเขย่า.....78

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

20. ค่าน้ำหนักของสายใยที่ตรึงในแผ่น PUF ขนาด 4.4 เซนติเมตร$^2$ จำนวน 10 แผ่น ..... 80

21. การผลิตกรดกลูโคนิกด้วยสายใยตรึงในแผ่น PUF ใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้ว 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 15 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที ..... 82

22. การผลิตกรดกลูโคนิกด้วยสายใยตรึงในแผ่น PUF ใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้ว 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 20 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที ..... 83

23. การผลิตกรดกลูโคนิกด้วยสายใยตรึงในแผ่น PUF ใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้ว 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 25 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที ..... 84

24. เปรียบเทียบผลผลิตกรดกลูโคนิกและเวลาที่ใช้ในการผลิต โดยสายใยตรึงในแผ่น PUF เมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้ว 300 กรัมต่อลิตร เมื่อแปรผันอัตราการให้อากาศ 15 20 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที ..... 85

25. การผลิตกรดกลูโคนิกด้วยสายใยตรึงในแผ่น PUF เมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้ว 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 20 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที น้ำหนักแห้งกล้าเชื้อสายใยตรึง 6.15 กรัมต่อลิตร ..... 88

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

26. การผลิตกรดกลูโคนิกด้วยสายใยตรึงในแผ่น PUF เมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้ว 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 20 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที น้ำหนักแห้งกล้าเชื้อสายใยตรึง 2.87 กรัมต่อลิตร ..... 89
27. การผลิตกรดกลูโคนิกด้วยสายใยตรึงในแผ่น PUF เมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้ว 300 กรัมต่อลิตร อัตราการให้อากาศ 20 ลิตรต่อลิตรอาหารเลี้ยงเชื้อต่อนาที น้ำหนักแห้งกล้าเชื้อสายใยตรึง 1.64 กรัมต่อลิตร ..... 90
28. เปรียบเทียบผลผลิตกรดกลูโคนิกและเวลาที่ใช้ในการผลิตโดยสายใยตรึงในแผ่น PUF ความเข้มของน้ำตาลกลูโคสตั้งต้นในแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้ว 300 กรัมต่อลิตร แปรผันน้ำหนักแห้งกล้าเชื้อสายใยตรึง 9.08 6.15 2.87 1.64 กรัมต่อลิตร ..... 91
29. เปรียบเทียบผลผลิตกรดกลูโคนิกในรูปโซเดียมกลูโคเนตจากสายในตรึงในชิ้นและแผ่น PUF ผลิตในคอลัมน์แก้วที่มีการให้อากาศด้านล่างภายใต้ภาวะที่เหมาะสม ..... 93
30. เปรียบเทียบผลผลิตกรดกลูโคนิกในรูปโซเดียมกลูโคเนตโดยสายใยอิสระ และสายใยตรึงในชิ้น PUF ภายใต้ภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิต ..... 95
31. โครมาโตแกรมแสดงจุดหลอมเหลวของเกลือโซเดียมมาตราฐานและเกลือโซเดียมกลูโคเนตที่ผลิตได้จาก *Aspergillus niger* G153 ..... 96
32. HPLC โครมาโตแกรมของกรดอินทรีย์เมื่อใช้ Zorbox-C8 คอลัมน์ ..... 98
33. HPLC โครมาโตแกรมของกรดอินทรีย์เมื่อใช้ Zorbox-C18 คอลัมน์ ..... 98
34. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนส่องกราดของชิ้น PUF ที่มีกล้าเชื้อสายใยตรึงเจริญอยู่ ..... 100

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

35. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนส่องกราดของชิ้น PUF ที่มีสายใยตรึงที่ผ่านการผลิตกรดกลูโคนิก 1 ครั้ง กำลังขยาย 35 เท่า..... 101
36. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนส่องกราดของชิ้น PUF ขนาด 0.20 เซนติเมตร$^3$ กำลังขยาย 100 เท่า..... 102
37. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนส่องกราดของชิ้น PUF ขนาด 0.20 เซนติเมตร$^3$ กำลังขยาย 1000 เท่า..... 103
38. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนส่องกราดของแผ่น PUF ขนาด 4.4 เซนติเมตร$^2$ กำลังขยาย 35 เท่า..... 104
39. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนส่องกราดของแผ่น PUF ขนาด 4.4 เซนติเมตร$^2$ ที่มีกล้าเชื้อสายใยตรึงซึ่งผ่านการผลิตกรดกลูโคนิก 1 ครั้ง กำลังขยาย 35 เท่า..... 105
40. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนส่องกราดของแผ่น PUF ขนาด 4.4 เซนติเมตร$^2$ กำลังขยาย 1000 เท่า..... 106