ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
245504

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การผลิตกรดแอล-แลกติกจากกากมันสำปะหลังโดยเชื้อรา *Rhizopus oryzae* ในระดับนำร่อง

โดย

ณัฏฐา ทองจุล
วาสนา โตเลี้ยง
ศิริพร อุ่นแอบ

มีนาคม 2555

b00279429

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
245504

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การผลิตกรดแอล-แลกติกจากกากมันสำปะหลังโดยเชื้อรา *Rhizopus oryzae* ในระดับนำร่อง

โดย

ณัฏฐา ทองจุล
วาสนา โตเลี้ยง
ศิริพร อุ่นแอบ

มีนาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความร่วมมือของคณะผู้วิจัย เงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ที่อนุเคราะห์สถานที่ และบุคลากรด้านเทคนิคเพื่อสนับสนุนงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นายนวกร โชติศุภอนันต์ ที่ได้เริ่มดำเนินการศึกษาวิจัยการหมักกรดแอล-แลกติกในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต ผลงานวิจัยเบื้องต้นของคุณนวกรนับว่ามีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการต่อยอดในงานวิจัยนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท เอี่ยมบูรพา จำกัด และบริษัท แป้งมันเอี่ยมเฮงอุตสาหกรรม จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์ตัวอย่างกากมันสำปะหลังสดเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ และบริษัทสยามวิคตอรี่เคมิคอล จำกัด ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยกากมันสำปะหลัง

ชื่อโครงการวิจัย การผลิตกรดแอล-แลกติกจากกากมันสำปะหลังโดยรา *Rhizopus oryzae* ในระดับนำร่อง

ชื่อผู้วิจัย อาจารย์ ดร.ณัฏฐา ทองจุล อาจารย์ วาสนา โตเลี้ยง นางสาวศิริพร อุ่นแอบ

เดือนและปีที่ทำวิจัยสำเร็จ กันยายน พ.ศ. 2554

245504

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากมันสำปะหลังสดมาใช้ในการผลิตกรดแอล-แลกติกโดยราเส้นใย *R. oryzae* โดยเริ่มจากการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อจะนำไปใช้ในการออกแบบขยายสเกล โดยทำการหมักกรดแลกติกด้วยกลูโคส จากผลการทดลอง พบว่า ได้อัตราการผลิตกรดแลกติกจากกลูโคสสูงสุดที่อัตราการปั่นกวน 700 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ในการทดลองอีกส่วน ได้นำกากมันสำปะหลังสดที่ได้มาหาเทคนิคในการปรับสภาพที่เหมาะสมก่อนที่นำไปย่อยต่อด้วยเอนไซม์ จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อนำกากมันสำปะหลังมาปรับสภาพโดยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันก่อนนำไปย่อยต่อด้วยเอนไซม์เซลลูเลส และอะไมเลส จะทำให้ได้ปริมาณแป้งที่ดึงออกมาจากกากมันสำปะหลังสดได้มากที่กว่าเมื่อเทียบกับการปรับสภาพกากมันสำปะหลังด้วยความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกับเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป โดยภาวะในการปรับสภาพและการย่อยที่ได้กลูโคสสูงสุดที่ 0.6 กรัมกลูโคสต่อกรัมกากมันสำปะหลังแห้ง คือ การปรับสภาพด้วยความร้อนสูงภายใต้ความดันนาน 15 นาที โดยใช้สารละลายกากมันสำปะหลังในน้ำ (20 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง) จากนั้นนำกากมันที่ผ่านการปรับสภาพแล้วไปย่อยต่อด้วยเซลลูเลส (33.15 ยูนิตต่อกรัมกากมันแห้ง) นาน 6 ชั่วโมง และอะไมเลส (16.8 ยูนิตต่อกากมันแห้ง) นาน 15 นาที นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดลองนำสารละลายกากมันสำปะหลังที่ได้จากการปรับสภาพและย่อยด้วยเอนไซม์ที่ภาวะต่างๆ กันมาใช้ในการหมักกรดแลกติกเทียบกับการหมักโดยกลูโคส และแป้ง ซึ่งพบว่า สารละลายที่ได้จากการปรับสภาพกากมันสำปะหลังด้วยความร้อนสูงภายใต้ความดันแล้วนำไปย่อยด้วยเอนไซม์ และสารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์สามารถนำมาใช้หมักกรดแลกติกได้ดีเทียบเคียงกับการใช้กลูโคสและแป้งเป็นแหล่งคาร์บอน นอกจากนี้ ยังมีการคำนวณเพื่อออกแบบขยายสเกลการหมักกรดแลกติกจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพระดับ 5 ลิตร ไปเป็นระดับ 90 ลิตร โดยใช้เกณฑ์คงที่ในการคำนวณ 4 เกณฑ์ ได้แก่ ค่า Reynold's number (Re_i) ความเร็วปลายใบพัดกวน (u_i) กำลังมอเตอร์ต่อปริมาตร (P/V) และอัตราการไหลวนของน้ำหมักภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (F_i/V) เพื่อหาภาวะที่จะนำไปทดลองในการหมักกรดแลกติกในถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 90 ลิตรต่อไป

Project Title Pilot scale production of L-lactic acid from raw cassava pulp by *Rhizopus oryzae*

Name of the Investigators Nuttha Thongchul, Ph.D., Vasana Tolieng, Siriporn Ounaeb

Year September 2011

245504

Abstract

This research studied the possibility of using cassava pulp to produce L-lactic acid by filamentous fungus *R. oryzae*. Firstly, the optimal operating condition required in scale up calculation was determined during lactic acid fermentation by glucose. The result showed that the best suited operating condition was at 700 rpm and 0.5 vvm air. At this operating condition, the highest lactic acid yield and productivity were accomplished. The other experiment performed in this research was to determine the appropriate pretreatment process prior to the enzymatic hydrolysis of cassava pulp in order to achieve high glucose recovery from cassava pulp. It was found that only steam pretreatment under high temperature and pressure was sufficient for pretreating cassava pulp. Using steam pretreatment with the addition of NaOH did not ease enzymatic hydrolysis of the pretreated pulp. More glucose was recovered from the hydrolysis of steam pretreated cassava pulp. The highest glucose recovery yield achieved was 0.6 g glucose per g dry pulp when pretreated the cassava pulp with steam for 15 min followed by hydrolyzing with cellulase (33.15 unit per g dry pulp) for 6 h and amylase (16.8 unit per g dry pulp) for 15 min. Later the cassava pulp hydrolysates prepared by different techniques were used as the carbon source in lactic acid fermentation. The fermentation results were compared with those using glucose and soluble starch as the carbon source. It was observed that the hydrolysates obtained from steam pretreatment followed by enzymatic hydrolysis and the enzyme treated hydrolysate gave the comparable lactic acid yield and productivity to glucose and soluble starch. In addition, scale up calculation was performed for predicting the operating condition in the large scale culture using the data obtained from glucose fermentation in the 5 L bioreactor. 4 criteria were used in the calculation. Those included Reynolds' number (Re_i), impeller tip speed (u_i), power input per unit volume (P/V), and mixing time (F_l/V).

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อภาษาไทย	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iv
สารบัญ	v
รายการตารางประกอบ	vii
รายการภาพประกอบ	viii
รายการสัญลักษณ์	xiii
บทนำ	1
การสำรวจแนวความคิดและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
วัตถุประสงค์ของโครงการ	6
วิธีการวิจัย	6
การหาอัตราการกวนและการให้อากาศที่เหมาะสมในการหมักกรดแอล-แลกติกในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิตขนาด 5 ลิตร	6
สายพันธุ์ การเก็บรักษาสายพันธุ์ การเตรียมหัวเชื้อ และอาหารเลี้ยงเชื้อ	6
การหมักกรดแอล-แลกติกในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต	7
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน	7
ค่าจลนพลศาสตร์ของการหมัก	8
การหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับเตรียมกากมันสำปะหลัง	8
การปรับสภาพกากมันสำปะหลังก่อนการย่อยโดยเทคนิค physicochemical pretreatment	9
การย่อยเซลลูโลสและแป้งจากกากมันสำปะหลังที่ปรับสภาพแล้ว	9
การหมักกรดแอล-แลกติกจากสารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง	10
การคำนวณหาปัจจัยทางวิศวกรรมที่เหมาะสมต่อการหมักกรดแอล-แลกติก	11
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	11
การหมักกรดแอล-แลกติกในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต	11
การปรับสภาพกากมันสำปะหลังโดยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน	12

หน้า

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล (ต่อ)
การปรับสภาพกากมันสำปะหลังโดยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกับการใช้สารละลายแอลคาไลน์ 13
การย่อยกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน 13
การย่อยกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกับสารละลายแอลคาไลน์ 14
การหมักกรดแอล-แลกติกแบบเซลล์ตรึงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิตจากแหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ 15
ลักษณะสัณฐานของ *R. oryzae* ที่ตรึงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต 15
จลนพลศาสตร์ของการหมักกรดแอล-แลกติกจากแหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ โดย *R. oryzae* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต 18
ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยของ *R. oryzae* บนวัสดุตรึงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต 23
ปัจจัยทางวิศวกรรมที่เหมาะสมต่อการหมักกรดแอล-แลกติก 25
ข้อสรุป 28
ข้อเสนอแนะ 29
บรรณานุกรม 29

รายการตารางประกอบ

		หน้า
ตารางที่ 1	ปริมาณเซลล์ของ *R. oryzae* ในการหมักด้วยกลูโคส และอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในกระบวนการที่อัตราการปั่นกวนและอัตราการให้อากาศต่างๆ กัน ภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต	34
ตารางที่ 2	ผลของการปั่นกวนและการให้อากาศต่อการผลิตกรดแอล-แลกติกโดยเซลล์ตรึงของ *R. oryzae* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต	34
ตารางที่ 3	ผลของการปั่นกวนและการให้อากาศต่อการผลิตผลิตภัณฑ์พลอยได้เอทานอลโดยเซลล์ตรึงของ *R. oryzae* ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต	34
ตารางที่ 4	เปรียบเทียบการผลิตกรดแอล-แลกติกในการหมักแบบเซลล์ตรึงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิตที่ภาวะต่างๆ (ปริมาตรอาหารเริ่มต้น 3 ลิตร)	35

รายการภาพประกอบ

		หน้า
รูปที่ 1	ลักษณะสัณฐานของ *R. oryzae* ที่ตรึงบนผ้าขนหนูในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต	36
รูปที่ 2	จลนพลศาสตร์ของการหมักกรดแอล-แลกติกจากกลูโคสโดยเซลล์ตรึงของ *R. oryzae* บนผ้าขนหนูในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิตที่ควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พีเอช 6.0 ความเร็วการปั่นกวน 700 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรต่อปริมาตรต่อนาที	37
รูปที่ 3	yield ของกลูโคส (กรัมต่อกรัมกากมันแห้ง) ในสารละลายที่แยกออกมาภายหลังการปรับสภาพด้วย (ก) การใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน (steam pretreatment) และ (ข) การใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกับการใช้สารละลายแอลคาไลน์ (steam with combination of alkaline treatment)	38
รูปที่ 4	yield ของกลูโคสภายหลังการย่อยกากมันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน ความเข้มข้นของกากมัน 5% จากนั้นนำมาทำการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส และอะไมเลส (ก) อะไมเลส 16.8 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 15 นาที (ข) อะไมเลส 16.8 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 30 นาที (ค) อะไมเลส 33.6 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 15 นาที (ง) อะไมเลส 33.6 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 30 นาที	39
รูปที่ 5	yield ของกลูโคสภายหลังการย่อยกากมันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน ความเข้มข้นของกากมัน 6.7% จากนั้นนำมาทำการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส และอะไมเลส (ก) อะไมเลส 16.8 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 15 นาที (ข) อะไมเลส 16.8 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 30 นาที (ค) อะไมเลส 33.6 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 15 นาที (ง) อะไมเลส 33.6 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง	40
รูปที่ 6	yield ของกลูโคสภายหลังการย่อยกากมันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน ความเข้มข้นของกากมัน 20% จากนั้นนำมาทำการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส และอะไมเลส (ก) อะไมเลส 16.8 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 15 นาที (ข) อะไมเลส 16.8 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 30 นาที (ค) อะไมเลส 33.6 ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 15 นาที (ง) อะไมเลส 33.6	41

หน้า

รูปที่ 6 (ต่อ)	ยูนิตต่อกรัมกากแห้ง 30 นาที	
รูปที่ 7	yield ของกลูโคสภายหลังการย่อยกากมันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.5 N) ความเข้มข้นของกากมัน 6.7% จากนั้นนำมาทำการย่อยต่อด้วยเซลลูเลสที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยอะไมเลสที่ 100 องศาเซลเซียส	42
รูปที่ 8	ลักษณะสัณฐานของ *R. oryzae* ที่ถูกตรึงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 6.0 อัตราการกวน 700 รอบต่อนาที การให้อ๋ากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ในระยะการเจริญเติบโตที่เวลาการหมัก 48 ชั่วโมง ของการใช้แหล่งคาร์บอน 6 ชนิด ได้แก่ (ก) กลูโคส (ข) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ค) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน (ง) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกับสารละลายแอลคาไลน์ (จ) สารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด และ (ฉ) สารละลายแป้ง	43
รูปที่ 9	ลักษณะสัณฐานของ *R. oryzae* ที่ถูกตรึงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 6.0 อัตราการกวน 700 รอบต่อนาที การให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ในระยะการสร้างผลิตภัณฑ์ที่เวลาการหมัก 96 ชั่วโมง ของการใช้แหล่งคาร์บอน 6 ชนิด ได้แก่ (ก) กลูโคส (ข) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ค) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน (ง) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกับสารละลายแอลคาไลน์ (จ) สารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด และ (ฉ) สารละลายแป้ง	44

หน้า

รูปที่ 10 ลักษณะการยึดเกาะของเซลล์บนเบดสถิตด้านนอก (ลูกศรสีดำ) และด้านใน (ลูกศรสีแดง) ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 6.0 อัตราการกวน 700 รอบต่อนาที การให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ของการใช้แหล่งคาร์บอน 6 ชนิด ได้แก่ (ก) กลูโคส (ข) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ค) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน (ง) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกับสารละลายแอลคาไลน์ (จ) สารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด และ (ฉ) สารละลายแป้ง 45

รูปที่ 11 ความหนาของเซลล์ของ *R. oryzae* (เส้นสีแดง) ที่ถูกตรึงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 6.0 อัตราการกวน 700 รอบต่อนาที การให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ของการใช้แหล่งคาร์บอน 6 ชนิด ได้แก่ (ก) กลูโคส (ข) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ค) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน (ง) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกันสารละลายแอลคาไลน์ (จ) สารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด และ (ฉ) สารละลายแป้ง 46

รูปที่ 12 ลักษณะเซลล์ *R. oryzae* ที่ตรึงอยู่ด้านในของเบดสถิตในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบดสถิต อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 6.0 อัตราการกวน 700 รอบต่อนาที การให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ของการใช้แหล่งคาร์บอน 6 ชนิด ได้แก่ (ก) กลูโคส (ข) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ค) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการ 47

หน้า

รูปที่ 12 (ต่อ)	ปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน (ง) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกับสารละลายแอลคาไลน์ (จ) สารละลายที่ได้จากการย่อยการมันสำปะหลังด้วยกรด และ (ฉ) สารละลายแป้ง	
รูปที่ 13	จลนพลศาสตร์ของกระบวนการหมักกรดแลกติกโดย R. oryzae อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 6.0 อัตราการกวน 700 รอบต่อนาที การให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ของแหล่งคาร์บอน 6 ชนิด ได้แก่ (ก) กลูโคส (ข) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ (ค) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน (ง) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกับสารละลายแอลคาไลน์ (จ) สารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด และ (ฉ) สารละลายแป้ง	48
รูปที่ 14	ลักษณะของเซลล์ *R. oryzae* บริเวณด้านในของเบดสถิตที่กำลังขยาย 350 เท่า โดยใช้ (ก) กลูโคส (ข) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ค) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน (ง) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันพร้อมกับสารละลายแอลคาไลน์ (จ) สารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด และ (ฉ) สารละลายแป้งเป็นแหล่งคาร์บอนในการหมัก	49
รูปที่ 15	ลักษณะของเซลล์ *R. oryzae* บริเวณด้านในของเบดสถิตที่กำลังขยาย 750 เท่า โดยใช้ (ก) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน (ค) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน	50

หน้า

รูปที่ 15 (ต่อ)	พร้อมกับสารละลายแอลคาไลน์ (ง) สารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด และ (จ) สารละลายแป้ง เป็นแหล่งคาร์บอนในการหมัก	
รูปที่ 16	ลักษณะของเซลล์ *R. oryzae* บริเวณด้านในของเบดสถิตที่กำลังขยาย 3,500 เท่า โดยใช้ (ก) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน พร้อมกับสารละลายแอลคาไลน์ และ (ข) สารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด เป็นแหล่งคาร์บอนในการหมัก	51
รูปที่ 17	ลักษณะโครงสร้างของ (ก) เส้นใยผ้าฝ้าย และลักษณะการยึดเกาะของเซลล์ *R. oryzae* บนเส้นใยผ้าฝ้ายชนิดผ้าขนหนูบริเวณด้านนอกของเบดสถิตที่กำลังขยาย 350 เท่า โดยใช้ (ข) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ค) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน (ง) สารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดัน พร้อมกับสารละลายแอลคาไลน์ (จ) สารละลายที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด และ (ฉ) สารละลายแป้ง เป็นแหล่งคาร์บอนในการหมัก	52

รายการสัญลักษณ์

$K_L a$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน
C_L	ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำหมัก
OUR	oxygen uptake rate
$Y_{p/s}$	อัตราการผลิตผลิตภัณฑ์ต่อแหล่งอาหารที่ใช้
$Y_{x/s}$	อัตราการสร้างเซลล์ต่อแหล่งอาหารที่ใช้
Re_i	ค่า Reynolds' number
u_i	ความเร็วปลายใบพัดกวน
P/V	กำลังมอเตอร์ต่อปริมาตร
F_l/V	อัตราการไหลวนของน้ำหมักภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ
P	กำลังมอเตอร์
P_a	กำลังมอเตอร์ในภาวะที่มีการให้อากาศ
F_l	อัตราการไหลของน้ำหมัก
N_i	อัตราเร็วรอบของใบพัดกวน
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดกวน