190918

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

190918

รหัสโครงการ [SUT3-304-50-24-30]

รายงานการวิจัย

การศึกษาการผลิตแอซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล (เอบีอี) จากมันสำปะหลังโดยกระบวนการหมัก

Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) Production from Cassava by Fermentation process

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
190918

รหัสโครงการ [SUT3-304-50-24-30]

รายงานการวิจัย

การศึกษาการผลิตแอซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล (เอบีอี) จากมันสำปะหลังโดยกระบวนการหมัก

Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) Production from Cassava by Fermentation process

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ [SUT3-304-50-24-30]

รายงานการวิจัย

การศึกษาการผลิตแอซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล (เอบีอี) จากมันสำปะหลังโดยกระบวนการหมัก

Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) Production from Cassava by Fermentation process

คณะวิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร กาญจนทวี

สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายอภิชัย สาวิสิทธิ์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย จนทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้แล้วเสร็จสมบูรณ์ด้วยความเรียบร้อย รวมทั้งขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อนุญาตให้ใช้สถานที่ ตลอดถึงความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัย ท้ายที่สุดขอขอบคุณนายอภิชัย สาวิสิทธิ์ (ผู้ช่วยวิจัย) เจ้าหน้าที่และนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาทุกคนที่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องและให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนทร กาญจนทวี

การศึกษาการผลิตแอซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล (เอบีอี) จากมันสำปะหลังโดยกระบวนการหมัก

สุนทร กาญจนทวี

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)

190918

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้มันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนร่วมกับยีสต์ที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์เป็นแหล่งไนโตรเจน เพื่อผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ แอซิโตน บิวทานอลและเอทานอลด้วยกระบวนการหมักแบบกะ โดยใช้แบคทีเรีย *Clostridium acetobutylicum* TISTR 1462 การทดลองได้ทำการศึกษาผลของการควบคุมค่า pH ที่แตกต่างกันในช่วง pH 4.5-6.5 รวมทั้งทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังในช่วง 20-80 g/L ตลอดจนศึกษาผลของการใช้แหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนที่แตกต่างกันที่มีต่อการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ จากผลการทดลองพบว่า แบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 สามารถใช้แป้งมันสำปะหลังในการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทียบเท่ากับการใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน โดยการทดลองแบบกะที่ไม่มีการควบคุม pH สามารถผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ทั้งหมด 14.33 g/L ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับการผลิตโดยใช้น้ำตาลกลูโคสที่ผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ทั้งหมด 15.39 g/L นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้เอนไซม์ย่อยแป้งมันสำปะหลังก่อนนำไปทำการหมัก ทำให้ได้น้ำตาลมอลโตสและน้ำตาลกลูโคสเกิดขึ้นนั้นไม่ได้มีผลช่วยให้การผลิตตัวทำละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการหมักที่ไม่ได้ย่อยด้วยเอนไซม์ ขณะที่การย่อยด้วยกรดก่อนนำไปทำการหมัก พบว่าให้ผลผลิตที่น้อยกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์ 19.48% ส่วนการทดลองที่มีการควบคุมค่า pH ในช่วงที่มีการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ (Solventogenic phase) พบว่าที่ pH 5.5 มีการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์สูงสุด 20.08 g/L นอกจากนี้ยังพบว่าการควบคุมค่า pH ที่สูงกว่า 6.0 ขึ้นไปจะมีการผลิตกรดอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ และมีการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังพบว่าการควบคุมค่า pH ที่ 5.25 มีการผลิตแอซิโตนสูงสุดถึง 6.78 g/L ทั้งนี้การทดลองที่มีการควบคุม pH ให้ความเข้มข้นสุดท้ายของตัวทำละลายอินทรีย์สูงกว่าที่ไม่มีการควบคุมค่า pH ประมาณ 1.5 เท่า จากผลของความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองในช่วง 20-80 g/L พบว่าความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังที่ 60 g/L มีการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์สูงสุด คือ 14.33 g/L การใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของแป้งมันสำปะหลังที่ต่ำกว่า 30 g/L จะทำให้เกิดการผลิตกรดอินทรีย์มากกว่าการ

190918

ผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ สำหรับผลของการใช้แหล่งไนโตรเจนที่ต่างกันที่มีผลต่อการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ พบว่าการใช้สารสกัดจากยีสต์ที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์เป็นแหล่งไนโตรเจน ทำให้มีการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ 18.46 g/L ซึ่งใกล้เคียงกันกับการหมักที่ใช้ยีสต์สกัดทางการค้า ซึ่งผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ได้ 20.86 g/L

คำสำคัญ: กระบวนการหมักแอซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล, มันสำปะหลัง, แบคทีเรีย *Clostridium acetobutylicum*, การผลิตตัวทำละลายอินทรีย์, กระบวนการหมักแบบกะ

190918

Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) Production from Cassava by Fermentation process

Sunthorn Kanchanatawee

School of Biotechnology, Institute of Agricultural Technology,

Suranaree University of Technology

Abstract (ภาษาอังกฤษ)

The main objective of this study was to demonstrate the feasibility of using cassava materials as carbon sources supplemented with spent brewer's yeast extract as a nitrogen source for acetone, butanol and ethanol (ABE) fermentation by *Clostridium acetobutylicum* TISTR 1462 in batch culture. The solvents production was performed with different pH controlled strategies (pH 4.5-6.5). The effects of cassava starch concentrations on the solvents production were investigated in the range of 20~80 g/L as well as the effects of different types of carbon sources and nitrogen sources. The results showed that *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 was capable of producing solvents efficiently from cassava materials, comparable to when glucose was used. The batch experiment with uncontrolled pH of cassava starch resulted in 14.33 g/L of total solvents as compared with 15.39 g/L of total solvents when glucose was used. Moreover, it was found that enzymatic pretreatment of the gelatinized cassava starch yielding maltose and glucose prior to the fermentation did not improve solvents production as compared with direct fermentation of the gelatinized starch, while the lower solvents production (19.48%) was observed when cassava materials was hydrolyzed with acid prior to the fermentation. In the experiment with pH controlled during solventogenic phase, the highest total solvents production (20.08 g/L) was obtained with a controlled pH of 5.5. At controlled pH 6.0 or higher, the fermentation produced mainly organic acids with a small amount of solvents. It was also found that the highest acetone production (6.78 g/L) was obtained at controlled pH 5.25. Using the appropriated pH control strategy, the final solvents concentration obtained was almost 1.5 times higher than that obtained under fermentation with uncontrolled pH. Within the range of cassava starch concentration investigated (20-80 g/L), the highest total solvents production (14.33 g/L) was obtained at 60 g/L initial cassava starch

190918

concentration. The fermentation performance using initial cassava concentrations lower than 30 g/L was acidogenic rather than solventogenic. For the effect of various nitrogen sources, it revealed that the fermentation performance using spent brewer's yeast extract as a nitrogen source resulted in 18.46 g/L solvents production, comparable to that obtained in fermentation using commercial yeast extract (20.86 g/L).

Keyword: Acetone-Butanol-Ethanol fermentation, Cassava materials, *Clostridium acetobutylicum*, Solventogenesis, Batch fermentation

คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย

ABE	=	Acetone-Butanol-Ethanol
ATP	=	Adenosine 5'-tri-phosphate
BYE	=	Spent brewer's yeast extract
BTU	=	British thermal unit
CYE	=	Commercial yeast extract
CoA	=	Coenzyme A
ºC	=	Degree Celsius
K	=	Degree Kelvin
g	=	Gram (s)
g/L	=	Gram (s) per Liter
g/mL	=	Gram (s) per milliliter
h	=	Hour (s)
L	=	Liter (s)
M	=	Molar
mg	=	Milligram (s)
mg/L	=	Milligram (s) per liter
mg/mL	=	Milligram (s) per milliliter
min	=	Minute (s)
mL	=	Milliliter (s)
mm	=	Millimeter (s)
mmHg	=	Millimeter (s) of mercury
MW	=	Molecular weight
NAD	=	Nicotinamide adenine dinucleotide (Oxidized form)
NADH	=	Reduced form of Nicotinamide adenine dinucleotide
OD_{600}	=	Optical density at 600 nm
Pa	=	Pascal
rpm	=	Revolutions per minute
RVP	=	Reid vapor pressure
STP	=	Standard Temperature and Pressure

คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

µL	=	Micro liter (s)
% (w/v)	=	Percentage weight by volume
% (v/v)	=	Percentage volume by volume
SEM	=	Scanning Electron Microscope
DAPI	=	4,6-diamidino-2-phenylindole dihydrochloride
PI	=	Propidium iodide
nm	=	Nanometer
µM	=	Micro molar (s)
µm	=	Micro meter (s)
mV	=	Millivolt (s)

สารบัญเรื่อง

หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....ง
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย.....ฉ
สารบัญเรื่อง .....ซ
สารบัญตาราง .....ฎ
สารบัญภาพ .....ฎ
บทที่
1 บทนำ.....1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.4 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิด 3
2 การทบทวนวรรณกรรม 4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับบิวทานอล 4
2.2 บิวทานอลในแง่ของการเป็นสารเชื้อเพลิง 4
2.3 บิวทานอลกับการประยุกต์ใช้ 5
2.4 การสังเคราะห์บิวทานอลด้วยวิธีทางเคมี 7
2.5 การผลิตบิวทานอลจากกระบวนการหมัก 8
2.6 กระบวนการผลิตตัวทำละลาย แอซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล (เอบีอี) ด้วยกระบวนการหมัก 9
2.6.1 ประวัติและที่มาของกระบวนการเอบีอี.....9
2.6.2 จุลลินทรีย์ 9
2.6.3 รูปแบบของกระบวนการหมัก.....11
2.7 ชีวเคมีของกระบวนการหมัก 12
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหมัก 15
2.8.1 แหล่งของสารตั้งต้นและความเข้มข้น 15

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

2.8.2 อุณหภูมิ 16
2.8.3 ออกซิเจน 16
2.8.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และผลิตภัณฑ์กรดในขั้นตอนสุดท้าย 16
2.9 การใช้วัตถุดิบประเภทแป้งในกระบวนการหมักแอซิโตน บิวทานอล และเอทานอล 17
3 วัสดุที่ใช้ในการวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย 21
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย 21
3.1.1 มันสำปะหลัง 21
3.1.2 สารสกัดจากยีสต์ที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์.....21
3.1.3 แบคทีเรีย 22
3.1.4 อาหารเลี้ยงเชื้อ 22
3.1.5 สารเคมีที่ใช้ 23
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 24
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย 24
3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของมันสำปะหลัง 25
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างมันสำปะหลังโดยการย่อยด้วยเอนไซม์ 25
3.2.2.1 แป้งมัน (Cassava starch) และมันเส้น (Cassava chip) 25
3.2.2.2 กากมัน (Cassava pulp) 25
3.2.3 การเตรียมมันสำปะหลังโดยการย่อยด้วยกรด 25
3.2.4 การเตรียมสปอร์ของแบคทีเรีย Clostridia และการเก็บรักษา 26
3.2.5 การเตรียมกล้าเชื้อ (Inoculum preparation) 27
3.2.6 สภาวะของกระบวนการหมัก 28
3.2.6.1 การหมักในขวดทดลอง (Erlenmeyer flask) ขนาด 250-mL 28
3.2.6.2 การหมักโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 2-L 29
3.3 วิธีการวิเคราะห์ผลการวิจัย 31
3.3.1 การหาความเข้มข้นของเซลล์แบคทีเรีย 31
3.3.2 การวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH) 31
3.3.3 การย้อมเซลล์แบคทีเรียด้วยสี DAPI และ PI 32

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก 32
3.3.5 การวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ 33
4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย 34
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบจากมันสำปะหลัง 34
4.2 การเตรียมตัวอย่างมันสำปะหลังโดยการย่อยด้วยเอนไซม์และกรดเจือจาง.....35
4.3 ผลของการควบคุมค่า pH ในระยะที่มีการสร้างตัวทำละลายอินทรีย์ (Solventogenic phase) ต่อการสร้างตัวทำละลายแอซิโตน บิวทานอล และเอทานอล 36
4.4 อิทธิพลของความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังต่อการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ 44
4.5 อิทธิพลของแหล่งไนโตรเจนที่แตกต่างกันต่อการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ 50
4.6 อิทธิพลของวัตถุดิบจากมันสำปะหลังประเภทต่างๆ ต่อการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ 51
5 บทสรุป 57
5.1 สรุปผลการวิจัย 57
5.2 ข้อเสนอแนะ 58
5.3 อุปสรรค 59
บรรณานุกรม 60
ภาคผนวก 66
ภาคผนวก ก 67
ภาคผนวก ข 68
ประวัติผู้วิจัย 73
ประวัติผู้ร่วมวิจัย 74

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ลักษณะทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของบิวทานอล 6

2.2 สรุปการผลิตสารตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยแบคทีเรีย *Clostridium* spp. โดยใช้วัตถุดิบจากแป้งในกระบวนการหมักแบบกะ 20

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบจากมันสำปะหลัง.....35

4.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิง (Reducing sugars) ของตัวอย่างมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์.....36

4.3 ประสิทธิภาพของการหมักโดยใช้น้ำตาลกลูโคส 50 g/L ของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 ภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมค่า pH ที่แตกต่างกันในระยะการสร้างตัวทำละลายอินทรีย์ (Solventogenic phase) 41

4.4 ประสิทธิภาพการหมักโดยใช้แป้งมันสำปะหลังความเข้มข้นต่างๆ ของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 46

4.5 ประสิทธิภาพการหมักโดยใช้วัตถุดิบมันสำปะหลังประเภทต่างๆ ของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 53

4.6 ความสามารถของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* spp. ในการใช้วัตถุดิบ ประเภทต่างๆ เพื่อการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ 56

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

2.1 วิธีการสังเคราะห์บิวทานอลด้วยวิธีทางเคมี 8

2.2 ลักษณะรูปร่างของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) 10

2.3 วงจรชีวิตของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* sp. 11

2.4 วิถีทางชีวเคมีของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* 14

3.1 รูปร่างลักษณะของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....27

3.2 ลักษณะโคโลนีของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 ที่ได้จากการ Pour plate ของสารละลายสปอร์ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากการบ่มที่ 35 °C นาน 24 ชั่วโมง 27

3.3 การเพาะเลี้ยงแบคทีเรียจากสารละลายสปอร์ 28

3.4 การหมักด้วยขวดทดลองขนาด 250-mL 29

3.5 การหมักด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 2-L สำหรับการทดลองที่ควบคุมค่า pH ของน้ำหมัก 30

4.1 รูปแบบวิถีกระบวนการหมักโดยใช้น้ำตาลกลูโคสของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462; น้ำตาลกลูโคสที่ใช้ 50 g/L 37

4.2 การเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 ในขณะที่หมักด้วยน้ำตาลกลูโคส 50 g/L ที่ย้อมด้วย 1 mg/mL ของ DAPI (4, 6-diamidino-2-phenylindole) และ PI (Propidium idodide) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ชนิด Fluorescent microscope ซึ่งเซลล์สีแดงที่เห็นแสดงถึงเซลล์ที่ตายแล้ว โดยติดสีแดงของ PI และเซลล์สีน้ำเงินแสดงถึงเซลล์ที่ยังมีชีวิตอยู่ ซึ่งติดสีน้ำเงินของ DAPI 38

4.3 วิถีการหมักของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 ที่ใช้น้ำตาลกลูโคส 50 g/L เป็นแหล่งคาร์บอนหลักในการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ 41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.4 การเปรียบเทียบระหว่างค่าผลผลิตที่ได้ (Yield) และค่าอัตราการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ทั้งหมด (Productivity) ของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 ที่มีการควบคุมค่า pH ของน้ำหมักแตกต่างกันในกระบวนการหมักแบบกะ 43

4.5 วิถีการหมักของแป้งมันสำปะหลัง (Gelatinized cassava starch) ความเข้มข้น 60 g/L ที่ยังไม่ได้ผ่านการย่อยด้วยแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 45

4.6 การเปรียบเทียบระหว่างค่าผลผลิตที่ได้ (Yield) และค่าอัตราการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ทั้งหมด (Productivity) ของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 ที่ใช้แป้งมันสำปะหลังความเข้มข้นต่างๆ เป็นแหล่งอาหารหลักในกระบวนการหมักแบบกะ 50

4.7 การเปรียบเทียบแหล่งไนโตรเจนที่แตกต่างกัน ต่อการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบกะของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 ที่ควบคุมค่า pH ของน้ำหมักที่ pH 5.5 51

1ข ความสัมพันธ์ระหว่าง Optical density (OD) และน้ำหนักเซลล์แห้ง (dry cell weight) ของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* TISTR 1462 68

2ข กราฟสารละลายมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากเครื่อง HPLC 68

3ข กราฟสารละลายมาตรฐานของน้ำตาลมอลโตสที่ได้จากเครื่อง HPLC 69

4ข กราฟสารละลายมาตรฐานของกรดบิวทิริกที่ได้จากเครื่อง HPLC 69

5ข กราฟสารละลายมาตรฐานของกรดอะซิติกที่ได้จากเครื่อง HPLC 70

6ข กราฟสารละลายมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคสที่วิเคราะห์ด้วยวิธี DNS 70

7ข กราฟสารละลายมาตรฐานของบิวทานอลที่ได้จากเครื่อง GC.....71

8ข กราฟสารละลายมาตรฐานของเอทานอลที่ได้จากเครื่อง GC.....71

9ข กราฟสารละลายมาตรฐานของแอซิโตนที่ได้จากเครื่อง GC.....72