การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว

นางสาวระวีวรรณ แกล้วกล้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ.2538

ISBN 974-631-370-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 16185352

ETHANOL PRODUCTION FROM RICE STRAW

MISS RAWEEWAN KLAEWKLA

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Chemical Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-631-370-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว

โดย นางสาวระวีวรรณ แกล้วกล้า

ภาควิชา เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ บารมี

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรณู ถาวโรฤทธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุณยเกียรติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ บารมี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรณู ถาวโรฤทธิ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. สุเมธ ชวเดช)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ระวีวรรณ แกล้วกล้า :การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว (ETHANOL PRODUCTION FROM RICE STRAW) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ชูชาติ บารมี, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.เรณู ถาวโรฤทธิ์, 171 หน้า. ISBN 974-631-370-3

เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในฟางข้าว ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอล โดยปกติเซลลูโลสจะอยู่รวมกับส่วนประกอบอื่น ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับเอนไซม์ในปฏิกิริยาการย่อย ดังนั้นในการผลิตจะต้องทำการแยกส่วนประกอบดังกล่าวออกจากโครงสร้างของฟางข้าว ในขั้นการปรับสภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยพบว่าวิธีการปรับสภาพวิธีที่ดีที่สุด คือ การแช่ฟางในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที จะได้ตะกอนฟางที่มีเซลลูโลสประกอบอยู่ 94.46 % เฮมิเซลลูโลส 1.24 % และลิกนิน 2.16 % จากฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งมีส่วนประกอบคือ เซลลูโลส 59.47 % เฮมิเซลลูโลส 4.31 % และลิกนิน 21.73 % ตะกอนฟางที่ได้นำไปย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อเซลลูโลสเท่ากับ 500 ไมโครลิตรต่อกรัมเซลลูโลสน้ำหนักแห้ง ในสารละลายโซเดียมซิเตรทบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.05 โมลาร์ ที่มีค่าสภาพความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.0 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการย่อย 16 ชั่วโมง ที่สภาวะดังกล่าวสามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 557.07 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลลูโลส ซึ่งคิดเป็นค่าการเปลี่ยนเทียบกับปริมาณเซลลูโลสเท่ากับ 49.58 % สารละลายน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้หลังจากเติมสารอาหารที่จำเป็น และปรับค่าสภาพความเป็นกรด-ด่าง ให้เหมาะสมกับการเจริญของเชื้อยีสต์ Saccharomyces cerevisiae สายพันธุ์ TISTR 5013 แล้ว นำไปหมักที่อุณหภูมิห้อง ในสภาวะแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นเวลา 4 วัน จะได้เอทานอลเข้มข้น 1.3 % โดยปริมาตร ซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นให้สูงขึ้นได้เมื่อนำไปกลั่น

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต ระวีวรรณ แกล้วกล้า

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C425665 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEY WORD: RICE STRAW / ENZYME / FERMENTATION / ETHANOL

RAWEEWAN KLAEWKLA : THESIS ADVISER : ASSOC.PROF.SHOOSHAT BARAME PhD. THESIS COADVISER : ASST.PROF.RANU THAWARORITH. 171 pp.
ISBN 974-631-370-3

Cellulose, the important component in rice straw, can be used as a precursor in the production of ethanol. The other components in rice straw such as hemicellulose and lignin are the inhibitors of the reaction between cellulose and enzyme in enzymatic hydrolysis. These must be separated in the pretreatment step. The straw was treated with 2.0 M NaOH for 24 hours at room temperature and refluxed at 70°C for 90 minutes. The treated straw contained 94.46 % cellulose, 1.24 % hemicellulose and 2.16 % lignin, compared with the untreated straw, which contained 59.47 % cellulose, 4.31 % hemicellulose and 21.73 % lignin. The pretreated straw residue was subjected to cellulose hydrolysis at enzyme-to-cellulose ratio of 500 µl : 1 g, in 0.05 M sodium acetate buffer at pH 4.0 and then heated in a shaking waterbath at 55°C for 16 hours to produce the reducing sugar to support the fermentation. The reducing sugar yield was 557.07 mg. per 1 g. of cellulose corresponding to 49.58 % of conversion based on cellulose. After the addition of the essential nutrients of yeast growth (Saccharomyces cerevisiae strain TISTR 5013) the reducing sugar solution was fermented at room temperature by anaerobic condition for 4 days. The yield of ethanol was 1.3 % by volume which can be concentrated by distillation.

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.ชูชาติ บารมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรณู ถาวโรฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ในการให้คำปรึกษาและ ข้อคิดเห็นต่างๆ

ขอขอบคุณบริษัท เอสโซ่ และบัณฑิตวิทยาลัย ในการให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณ คุณนิชิต จงคำนึงสุข และบริษัทอีสเอเชียติ๊ก มหาชน ในการให้ความอนุเคราะห์เอนไซม์เซลลูเลส ขอขอบคุณ คุณสุภาพ อัจฉริยศรีนงค์ เจ้าหน้าที่วิจัยของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ในการให้คำปรึกษาการเลือกใช้อีสต์ที่เหมาะสมในการหมัก

ขอขอบคุณมารดา พี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนของภาควิชาเคมีเทคนิค และภาควิชาเทคโนโลยีทางการอาหาร ที่ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

ระวีวรรณ แกล้วกล้า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ฆ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่ 1. บทนำ	1
บทที่ 2. วารสารปริทัศน์	3
-ส่วนประกอบในเซลล์พืช	3
1.เซลลูโลส	3
ก.โครงสร้างทางกายภาพ	3
ข.ส่วนประกอบทางเคมีของเซลลูโลส	10
2.เฮมิเซลลูโลส	12
3.ลิกนิน	15
-กระบวนการผลิต	17
1.การปรับสภาพวัตถุดิบ	18
1.1 วิธีทางกายภาพ	18
1.2 วิธีทางเคมี	19
1.3 วิธีทางเคมีฟิสิกส์	20
1.4 วิธีทางชีวภาพ	20
2.การย่อย	22
2.1 การย่อยด้วยสารเคมี	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

(1) การย่อยด้วยกรด..... 26

(2) การย่อยด้วยด่าง..... 26

2.2 การย่อยด้วยเอนไซม์..... 26

2.2.1 ชนิดและตำแหน่งทำงานของเอนไซม์..... 29

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์..... 31

1) อุณหภูมิ..... 31

2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง..... 31

3) ความเข้มข้นของสับสเตรท..... 31

4) ปริมาณเอนไซม์..... 31

5) ผลของสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์.... 31

(5.1) การยับยั้งแบบผันกลับได้..... 31

(5.1.1)การยับยั้งแบบแข่งขัน..... 32

(5.1.2)การยับยั้งแบบ uncompetitive 32

(5.1.3)การยับยั้งแบบไม่แข่งขัน..... 33

(5.2) การยับยั้งแบบไม่ผันกลับ..... 33

6) ผลของโลหะต่างๆ..... 34

2.2.3 จลนพลศาสตร์ของการย่อยเซลลูโลสด้วยเอนไซม์.... 35

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสียสภาพของเอนไซม์..... 42

2.2.5 สมบัติของสับสเตรทที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์.. 42

3.การผลิตเอทานอล..... 43

3.1 ปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการหมัก..... 43

3.1.1 ยีสต์..... 43

3.1.2 อาหาร..... 44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง..... 45

3.1.4 อุณหภูมิ..... 45

3.1.5 อากาศ..... 46

3.2 กลไกการหมัก..... 46

-งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 47

1.Han และ Callihan (1974)..... 47

2.Detroy และคณะ (1981)..... 48

3.Detroy และคณะ (1982)..... 51

4.สุภาพร ชาติวรพงศา (พ.ศ.2536)..... 53

บทที่ 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง..... 56

-เครื่องมือ..... 56

-สารเคมีและอุปกรณ์..... 60

1.สารเคมีและอุปกรณ์ในการปรับสภาพฟางข้าว..... 60

2.สารเคมีและอุปกรณ์ในการย่อยเซลลูโลส..... 64

3.สารเคมีและอุปกรณ์ในการผลิตเอทานอล..... 64

-วิธีการทดลอง..... 65

1.การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพฟางข้าว..... 65

2.การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อย..... 67

3.การศึกษาการผลิตเอทานอลจากสารละลายน้ำตาลที่ได้จากฟางข้าว ด้วยเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae*..... 69

-วิธีวิเคราะห์..... 70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4. ผลการทดลอง	77
-การปรับสภาพฟางข้าว	77
-การย่อย	92
-การผลิตเอทานอล	101
บทที่ 5. วิจารณ์ผลการทดลอง	104
-การปรับสภาพฟางข้าว	104
1.การปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	104
2.การปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส	105
3.การปรับสภาพด้วยสารละลายแอลกอฮอล์	105
4.การปรับสภาพด้วยสารละลายเอทานอลร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	106
-การย่อย	107
1.การหาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมในการย่อยเซลลูโลส	107
2.การหาค่าอุณหภูมิ ที่เหมาะสมในการย่อยเซลลูโลส	107
3.การหาค่าอัตราส่วนของเอนไซม์ต่อสับสเตรท ที่เหมาะสมในการย่อยเซลลูโลส	107
4.การหาเวลา ที่เหมาะสมในการย่อยเซลลูโลส	108
-การผลิตเอทานอล	112
บทที่ 6. สรุปและข้อเสนอแนะ	113
-สรุป	113
-ข้อเสนอแนะ	114

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง..... 116

ภาคผนวก

ก.การวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส..... 124

ข.การวิเคราะห์ปริมาณลิกนิน..... 128

ค.การวิเคราะหุปริมาณเถ้า..... 130

ง.การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น..... 131

จ.การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์..... 132

ฉ.การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์ค่าความสามารถในการทำงานของเอนไซม์..... 137

ช.ผลการวิเคราะห์สารละลายกลูโคสมาตรฐาน..... 139

ซ.การวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องอิบูลลิโอมิเตอร์..... 143

ฌ.การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพ..... 145

ญ.การเตรียมสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์..... 146

ฎ.ปริมาณส่วนประกอบในตะกอนฟาง หลังการปรับสภาพ ด้วยวิธีต่างๆ... 149

ฏ.การหาค่าอัตราเร็วของปฏิกิริยา จากผลการย่อยเซลลูโลส..... 156

ฐ.การเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากการย่อยเซลลูโลส กับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการคำนวณ..... 158

ฑ.เมตาโบลิซึมภายในเซลล์ยีสต์..... 159

ฒ.การคำนวณค่าการเปลี่ยนของน้ำตาลรีดิวซ์เป็นเอทานอล เทียบกับค่าที่ควรผลิตได้ตามทฤษฎี..... 164

ณ.ภาพรวมการผลิต..... 168

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรบางชนิด..... 4

2.2 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียในการย่อยด้วยกรด..... 27

2.3 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียในการย่อยด้วยเอนไซม์..... 28

2.4 ผลการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ..... 47

2.5 การปรับสภาพฟางข้าวสาลีและการย่อยด้วยเอนไซม์..... 49

2.6 การผลิตกลูโคสและเอทานอลจากฟางข้าวสาลี ที่ผ่านการปรับสภาพโดยวิธีทางเคมี..... 51

2.7 ผลการปรับสภาพฟางข้าวสาลีโดยวิธีต้มกับไอน้ำ..... 52

2.8 ผลการปรับสภาพฟางข้าวสาลีโดยวิธีของ Chen และ Anderson... 52

2.9 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้จากการย่อยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยเอนไซม์เซลลูเลส และ เบต้า-กลูโคสิเดส..... 54

4.1 ผลการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ..... 79

4.2 ผลการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 83

4.3 ผลการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเข้มข้น และเวลาต่างๆ..... 85

4.4 ผลการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ 89

4.5 ผลการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้เอทานอลร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์..... 90

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.6 ผลการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้เอทานอลร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้วต่างๆ..... 91

4.7 ผลการย่อยฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่ pH ค่าต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อเซลลูโลสเท่ากับ 300 ไมโครลิตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 93

4.8 ผลการย่อยฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่ pH เท่ากับ 4.0 โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อเซลลูโลสเท่ากับ 300 ไมโครลิตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 95

4.9 ผลการย่อยฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่ pH เท่ากับ 4.0 โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อเซลลูโลสค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 97

4.10 ผลการย่อยฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่ pH เท่ากับ 4.0 โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อเซลลูโลสเท่ากับ 500 ไมโครลิตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ..... 99

4.11 ผลการผลิตเอทานอล จากน้ำตาลที่ผลิตได้จากฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ..... 101

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบในเซลล์พืช..... 5

2.2 ภาคตัดขวางของเส้นใยเซลลูโลส..... 6

2.3 ภาคตัดขวางของไมโครไฟบริล..... 8

2.4 การเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส..... 8

2.5 ก.ภาคตัดขวางการเรียงตัวของไมโครไฟบริลของเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นที่สอง..... 9

2.5 ข.บริเวณเซลลูโลสผลึก และบริเวณเซลลูโลสอสัณฐาน..... 9

2.6 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของลูกโซ่เซลลูโลส..... 11

2.7 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส..... 11

2.8 สูตรโครงสร้างของไซโลส..... 13

2.9 สูตรโครงสร้างโพลิเมอร์ไซแลน..... 13

2.10 ก.สูตรโครงสร้างหกเหลี่ยมของ 4-เมทิล-ดี-กลูโคยูโรนิค..... 14

2.10 ข.สูตรเคมีของกรดยูโรนิค ที่เป็นส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส..... 14

2.10 ค.สูตรโครงสร้างของกรดยูโรนิค ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 6 อะตอม... 14

2.11 แสดงโมเลกุลลิกนิน..... 15

2.12 หน่วยโมโนเมอร์ และพันธะในโมเลกุลลิกนิน..... 16

2.13 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตเอทานอลจากฟางข้าว..... 17

2.14 แสดงเครื่องมือในการปรับสภาพ โดยใช้ไอน้ำ..... 19

2.15 แผนภาพแสดงวิธีการต่างๆ ที่ใช้ในการปรับสภาพวัตถุดิบ..... 21

2.16 กลไกปฏิกิริยาการย่อยด้วยสารละลายกรด..... 24

2.17 สมการปฏิกิริยาการย่อยของน้ำตาลเฮกโซส ด้วยสารละลายกรด..... 25

2.18 สมการปฏิกิริยากการย่อยน้ำตาลเพนโตส ด้วยสารละลายกรด..... 25

2.19 โครงสร้างเซลลูโลส และตำแหน่งที่เอนไซม์ชนิดต่างๆ เข้าทำปฏิกิริยา 29

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงการย่อย และการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์..... 30

2.21 กราฟแสดงการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์..... 34

2.22 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสับสเตรท, เอนไซม์อิสระ, สารประกอบเชิงซ้อนของเอนไซม์กับสับสเตรท และสารผลิตภัณฑ์ ของปฏิกิริยา ตามเวลาที่ปฏิกิริยาดำเนินไป..... 36

2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสับสเตรทกับอัตราเร็วของปฏิกิริยา..... 38

2.24 กราฟที่ได้จากสมการของ Michaelis และ Menten..... 39

2.25 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการย่อย และการหมัก..... 50

3.1 เครื่องบดฟางข้าว..... 57

3.2 ตู้อบ..... 58

3.3 เครื่องอังน้ำอุ่นแบบมีตัวเขย่า..... 58

3.4 หม้อนึ่งความดันไอน้ำ..... 59

3.5 ก.เครื่องอีบูลลิโอมิเตอร์..... 61

3.5 ข.สเกลมาตรฐาน สำหรับอ่านค่าความเข้มข้นของเอทานอล ในหน่วยเปอร์เซนต์โดยปริมาตร..... 62

3.6 เครื่องปั่นเหวี่ยงแบบตั้งโต๊ะ..... 63

3.7 แผนภาพแสดงการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 71

3.8 แผนภาพแสดงการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส..... 72

3.9 แผนภาพแสดงการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแอลกอฮอล์..... 73

3.10 แผนภาพแสดงการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแอลกอฮอล์ ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์..... 74

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงการปรับสภาพฟางข้าวด้วยแอลกอฮอล์ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส..... 75

3.12 แผนภาพแสดงการศึกษาการย่อย..... 76

4.1 ปริมาณเซลลูโลสในฟางข้าวที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ..... 80

4.2 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวที่ปรับสภาพด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ..... 81

4.3 ปริมาณลิกนินในฟางข้าวที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ..... 82

4.4 ปริมาณเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในฟางข้าวที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ 84

4.5 ปริมาณเซลลูโลสในฟางข้าวที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่เวลาต่างๆ..... 86

4.6 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวที่ปรับสภาพ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่เวลาต่างๆ..... 87

4.7 ปริมาณลิกนินในฟางข้าวที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่เวลาต่างๆ..... 88

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ จากการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่ pH ค่าต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อเซลลูโลสเท่ากับ 300 ไมโครลิตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 94

4.9 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ จากการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่ pH เท่ากับ 4.0 โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อเซลลูโลสเท่ากับ 300 ไมโครลิตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 96

4.10 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ จากการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่ pH เท่ากับ 4.0 โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อเซลลูโลสค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 98

4.11 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ จากการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ ในสารละลายโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ ที่ pH เท่ากับ 4.0 โดยใช้อัตราส่วนของเอนไซม์ต่อเซลลูโลสเท่ากับ 500 ไมโครลิตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ..... 100

4.12 ปริมาณน้ำตาลที่ลดลง ในระหว่างการหมัก ที่เวลาต่างๆ..... 102

4.13 ปริมาณเอทานอลที่เพิ่มขึ้น ในระหว่างการหมัก ที่เวลาต่างๆ..... 103

5.1 กราฟแสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ ของการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าว ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส..... 108

5.2 กราฟแสดงค่า log[P] ที่เวลาใดๆ ของการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าว ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส..... 109

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 16 ของการย่อยเซลลูโลสในฟางข้าว กับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการคำนวณ..... 111