สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญ	ฉ
สารบาญตาราง	ญ
สารบาญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 บทบาทด้านพลังงาน	2
1.3 เอทานอล	3
1.4 การใช้พลังงานจากชีวมวล	5
1.5 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล	7
1.6 ฟางข้าว	9
1.7 กระบวนการผลิตเอทานอล	9
1.7.1 เอทานอลที่ผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์เคมี	9
1.7.2 เอทานอลที่ผลิตจากกระบวนการหมัก	10
1.8 ชนิดของวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเอทานอล	11
1.8.1 วัตถุดิบประเภทน้ำตาล	12
1.8.2 วัตถุดิบประเภทแป้ง	14
1.8.3 วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส	16
1.9 การปรับสภาพชีวมวล	17
1.10 การย่อยเซลลูโลส	19
1.10.1 เอนไซม์ที่ใช้ในปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลส	21

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
1.11 กระบวนการหมักเอทานอล	23
1.12 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์	24
1.12.1 อุณหภูมิ (Temperature)	24
1.12.2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	24
1.12.3. ความเข้มข้นของซับสเตรท (Substrate)	24
1.12.4. ปริมาณเอนไซม์	24
1.12.5. ผลของสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme Inhibitor)	24
1.12.6. การติดเชื้อปนเปื้อน	24
1.13 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสียสภาพของเอนไซม์	25
1.14 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง	25
1.15 เทคโนโลยีในการย่อยเซลลูโลสและการหมักพร้อมกัน	26
1.16 ผลกระทบเชิงเศรษฐศาสตร์และสังคมของการผลิตเอทานอลจากฟางข้าว	27
1.17 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
1.18 วัตถุประสงค์ของโครงการ	31
1.19 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา เชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์	32
1.20 ขอบเขตงานวิจัย	32
บทที่ 2 วิธีการทดลอง	33
2.1 วัสดุ สารเคมี และอุปกรณ์	33
2.1.1 วัสดุ	33
2.1.2 สารเคมี	33
2.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์	34
2.2 วิธีการทดลอง	36
2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ	36
2.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร	37

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	37
2.2.4 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน และหาปริมาณซัลเฟอร์	37
2.2.4.1 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน	37
2.2.4.2 วิธีหาปริมาณซัลเฟอร์ในสารตัวอย่าง	38
2.2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	39
2.2.6 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา	40
2.3 การปรับสภาพวัตถุดิบ	40
2.4 การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์	40
2.5 การหมักน้ำตาลกลูโคส	41
2.5.1 สภาวะที่ใช้ในการหมักน้ำตาลกลูโคส	41
2.5.2 การเพาะเลี้ยงเชื้อ และการหมัก	42
2.6 การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว	43
2.7 วิเคราะห์หาปริมาณเอทานอล	43
2.7.1 การทำกราฟมาตรฐานเอทานอล	43
2.7.2 การวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลในตัวอย่าง	43
2.8 สรุปวิธีการทดลองในงานวิจัย	44
บทที่ 3 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	48
3.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของฟางข้าว	48
3.2 องค์ประกอบทางเคมีและสัณฐานวิทยาของฟางข้าวก่อนและหลังทำการปรับสภาพ	49
3.2.1 การปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำ	49
3.2.2 การปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	53

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 สรุปเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนและหลังทำการปรับสภาพด้วยไอน้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	59
3.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในของเหลวที่ได้จากการปรับสภาพฟางข้าว	64
3.4 การผลิตเอทานอลจากน้ำตาลกลูโคส	65
3.5 การผลิตเอทานอลจากฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้ว	72
บทที่ 4 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	81
4.1 สรุปผลการทดลอง	81
4.2 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม	86
ภาคผนวก	91
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของฟางข้าว	92
ภาคผนวก ข การคำนวณหาค่าความร้อนและปริมาณซัลเฟอร์ของฟางข้าว	94
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว	96
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์	101
ภาคผนวก จ การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ	102
ภาคผนวก ฉ กราฟมาตรฐานเอทานอล	104
ภาคผนวก ช การคำนวณปริมาณไอน้ำที่ใช้ในการปรับสภาพฟางข้าว	112
ภาคผนวก ซ การคำนวณการเปลี่ยนหน่วยเอทานอล	115
ภาคผนวก ฌ การประมาณค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเอทานอลจากฟางข้าว	116
ประวัติผู้เขียน	123

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอล	4
1.2 ผลผลิตเอทานอลจากชีวมวล	12
1.3 ตัวอย่างมอโนแซคคาไรด์	14
1.4 ตัวอย่างพอลิเซ็กคาไรด์ที่สำคัญ	16
2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	33
2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย	34
2.3 ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย	41
2.4 การทดลองเพื่อเลือกสภาวะที่สามารถผลิตเอทานอลจากน้ำตาลกลูโคสได้ให้ได้ปริมาณสูงสุด	41
3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของฟางข้าว	48
3.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนและหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำ	49
3.3 เปรียบเทียบสภาวะการปรับสภาพชีวมวลด้วยไอน้ำ	50
3.4 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนและหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 %wt/v	54
3.5 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวก่อนและหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 และ 3 %wt/v	57
3.6 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวของการปรับสภาพทุกสภาวะ	59
3.7 ร้อยละการลดลงขององค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวหลังการปรับสภาพ	61
3.8 เปรียบเทียบผลการปรับสภาพชีวมวลด้วยไอน้ำและ/หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ	63
3.9 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในของเหลวที่ได้จากการปรับสภาพฟางข้าว	64
3.10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสของแต่จุลินทรีย์แต่ละชนิด	66

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
3.11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์ทำงานร่วมกับแบคทีเรีย	67
3.12 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์ทำงานร่วมกับรา	68
3.13 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสของแบคทีเรียทำงานร่วมกับรา	69
3.14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์ทำงานร่วมกับแบคทีเรียและรา	70
3.15 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวโดยใช้แบคทีเรีย *Pumilus* ในกระบวนการ SSF	73
3.16 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวของแบคทีเรียแต่ละชนิดในกระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที	74
3.17 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลของการหมักฟางข้าวของแบคทีเรีย *Pumilus* ในกระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำการเขย่า	76
3.18 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลของการหมักฟางข้าวของแบคทีเรีย *Pumilus* ในกระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำการเขย่า	77
3.19 เปรียบเทียบปริมาณเอทานอลกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	79
ฉ-1 ปริมาณพื้นที่ใต้กราฟของสารละลายมาตรฐานเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ	110
ฌ-1 ค่าพลังงานไฟฟ้าตามหน่วยที่ใช้งาน	116
ฌ-2 ค่าวัตถุดิบและสารเคมี	116
ฌ-3 ค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียในการปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2%wt/v ที่อุณหภูมิ 75-90oC เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	117
ฌ-4 ค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพฟางข้าว 1 กิโลกรัม	117
ฌ-5 ค่าใช้จ่ายในการเตรียมอาหารเลี้ยงยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* V1116 (S1)	118

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ฌ-6 ค่าใช้จ่ายในการเตรียมอาหารเลี้ยงรา *Mucor Indicus* (M)	118
ฌ-7 ค่าใช้จ่ายในการเตรียมอาหารเลี้ยงแบคทีเรีย *Zymomonas sp.* TISTR1102 (Z1)	119
ฌ-8 ค่าใช้จ่ายในการเตรียมอาหารเลี้ยงแบคทีเรีย *Pumilus*	119
ฌ-9 ค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียในการเขย่าขวดรูปชมพู่ขณะเลี้ยงจุลินทรีย์เป็นเวลา 30 ชั่วโมง	119
ฌ-10 ค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียในการหมักฟางข้าวที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน	119
ฌ-11 ค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียในการใช้เครื่องปั่นแยกตะกอนเซลล์	120
ฌ-12 ค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียในการใช้เครื่องวอร์เทซ (Vortex)	120
ฌ-13 ค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียในการใช้เครื่องออโต้เครป (Autoclave)	121
ฌ-14 ค่าใช้จ่ายในการหมักฟางข้าว 1 กิโลกรัม	121
ฌ-15 รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในกระบวนการหมักฟางข้าว 1 กิโลกรัม	122

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป	หน้า
1.1 วัฏจักรของการเกิดชีวมวล	6
1.2 โครงสร้างของเซลลูโลส	7
1.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	8
1.4 โครงสร้างของลิกนิน	8
1.5 แผนภูมิโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง	11
1.6 กระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อย	13
1.7 สูตรโมเลกุลเหมือนกันแต่สูตรโครงสร้างแตกต่างกัน	14
1.8 การจัดเรียงตัวขององค์ประกอบทางเคมีฟางข้าว	17
1.9 แผนผังกระบวนการปรับสภาพชีวมวล	18
1.10 ตำแหน่งที่เอนไซม์เอ็นโดกลูคาเนสเข้าทำปฏิกิริยาแบบสุ่ม	22
1.11 ตำแหน่งที่เอนไซม์เอ็กโซกลูคาเนสเข้าทำปฏิกิริยา	22
1.12 ตำแหน่งที่เอนไซม์เบต้า-กลูโคสิเดสเข้าทำปฏิกิริยา	23
2.1 เครื่องบด	36
2.2 เครื่องร่อนคัดขนาด	36
2.3 ฟางข้าว	37
2.4 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)	39
2.5 เครื่องผลิตไอน้ำ	40
2.6 แผนผังสรุปงานวิจังานวิจัย	45
3.1 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวก่อนปรับสภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	51
3.2 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	52

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.3 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	5
3.4 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	53
3.5 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	55
3.6 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	56
3.7 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 6 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 %wt/v โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	56
3.8 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 %wt/v โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	57
3.9 สัณฐานวิทยาของฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 %wt/v โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	58
3.13 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการปรับสภาพฟางข้าวสภาวะต่างๆ	65
3.14 ตะกอนเซลล์	66
3.15 สารละลายน้ำตาลกลูโคสหลังเติมตะกอนเซลล์	66
3.16 ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้แต่จุลินทรีย์แต่ละชนิด	67
3.17 ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้ยีสต์ทำงานร่วมกับแบคทีเรีย	68
3.18 ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้ยีสต์ทำงานร่วมกับรา	69
3.19 ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้แบคทีเรียทำงานร่วมกับรา	70
3.20 ปริมาณเอทานอลจากการหมักน้ำตาลกลูโคสโดยใช้ยีสต์ทำงานร่วมกับแบคทีเรีย และรา	71

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.21 การหมักฟางข้าวในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียสและทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที	73
3.22 ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวของแบคทีเรียแต่ละชนิดในกระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที	75
3.23 ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวของแบคทีเรีย *Pumilus* ในกระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส จากการเขย่า และไม่เขย่า	76
3.24 การหมักฟางข้าวในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสโดยไม่ทำการเขย่า	77
3.25 ปริมาณเอทานอลจากการหมักฟางข้าวของแบคทีเรียแต่ละชนิดในกระบวนการ SSF ณ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และไม่ทำการเขย่า	78
ฉ-1 หลักการทำงานของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี	105
ฉ-2 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานเอทานอล โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี	109
ฉ-3 กราฟมาตรฐานสารละลายเอทานอล	111

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved