

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



246184



สารคดีบางกอกน้อยสองฝั่งเจ้าพระยาวิถีชีวิตชาวบางกอกน้อย และ กาดน้ำพาด

นายคณเดช จันทะนันท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาโท สาขาวิชาศิลปกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาศิลปกรรมศิลป์

คณะศิลปกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2553

600251946

การศึกษาจลนพลศาสตร์การหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย และ กากน้ำตาล

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



นายคมเดช งามสมจิตร วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2553

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(รศ.ดร.ธารังรัตน์ มุ่งเจริญ)

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(ผศ.ดร.วีระ โลหะ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....

(รศ.ดร.สมนึก จารุติลกุล)

กรรมการ

.....

(ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ เมฆวิจิตรแสง)

กรรมการ



ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาจลนพลศาสตร์การหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย และ กากน้ำตาล
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายคมเดช งามสมจิตร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วีระ โลหะ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2553

บทคัดย่อ

246184

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณกากน้ำตาลต่อการผลิตเอทานอลของยีสต์ ที่ทำการทดลองเป็นแบบกะ ในช่วงความเข้มข้นของน้ำตาล 120-260 กรัมต่อลิตร พบว่าที่ค่าความเข้มข้นน้ำตาล 230 กรัมต่อลิตร สามารถหมักเอทานอลได้สูงสุดเท่ากับ 69.72 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้น้ำอ้อยเป็นสารอาหารตั้งต้นพบว่าที่ความเข้มข้นน้ำตาล 230 กรัมต่อลิตร สามารถหมักเอทานอลได้สูงสุดเท่ากับ 86.31 กรัมต่อลิตร เนื่องจากน้ำกากส่าที่กลั่นเอาเอทานอลออกไปแล้วยังคงมีปริมาณน้ำตาล และสารอาหารอื่นเหลืออยู่ จึงนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาลแทนน้ำ พบว่าที่ปริมาณน้ำกากส่า 70 เปอร์เซ็นต์ สามารถหมักเอทานอลได้สูงสุดเท่ากับ 65.53 กรัมต่อลิตร แต่ใช้เวลาหมักนาน 354 ชั่วโมง จากการศึกษาทางจลนพลศาสตร์การหมักเอทานอลด้วย logistic model พบว่าค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) เท่ากับ 1.923-7.574 กรัมต่อลิตร ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) เท่ากับ 4.840-26.866 กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ยีสต์ และค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.025-0.106 กรัมเซลล์ยีสต์ต่อกรัมน้ำตาล

คำสำคัญ : เอทานอล / จลนพลศาสตร์การหมัก / ยีสต์ / น้ำอ้อย / กากน้ำตาล / น้ำกากส่า

Thesis Title	Kinetic Study for Ethanol Fermentation from Sugar cane and Molasses
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Komdet Ngamsomjit
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Veara Loha
Program	Master of Engineering
Field of Study	Chemical Engineering
Department	Chemical Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2553

Abstract

246184

In this research, the initial sugar concentrations between 120 and 260 g/L of molasses were used for the ethanol fermentation. The maximum ethanol production from molasses fermentation was 69.72 g/L at the initial sugar concentration of 230 g/L. Similarly, the maximum ethanol production from sugar cane fermentation was 86.31 g/L at the initial sugar concentration of 230 g/L. The waste water from distillation of ethanol broth called slop still comprised of reducing sugar and other nutrients. Therefore, the slop could be added to the concentrated molasses to reduce the ethanol manufacture cost. The addition of 70% slop to dilute molasses gave the maximum ethanol concentration of 65.53 g/L for the fermentation duration of 354 hrs. The logistic model was used for the ethanol fermentation kinetics. The logistic model parameters were the maximum concentration of yeast cells (X_m) of 1.923-7.574 g/L, the yield coefficient of ethanol per cell ($Y_{p/x}$) of 4.840-26.866 g ethanol/g yeast cell, and the yield coefficient of yeast from nutrients ($Y_{x/s}$) of 0.025-0.106 g yeast cell/g sugar.

Keywords : Ethanol / Fermentation Kinetics / Yeast / Sugar Cane / Molasses / Slops

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ ผศ.ดร. วีระ โลหะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ท่านได้กรุณาให้คำปรึกษาคำแนะนำอันมีค่าและข้อคิดเห็นต่างๆของงานด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้ช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมนึก จารุติลกกุล และผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ เมฆวิจิตรแสง ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาวินิจฉัย

ขอขอบคุณ นายสุภชัย บุญนำมา และ นายวิทยา บุตรทองมูล และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจคำแนะนำ และความช่วยเหลือที่ดี รวมถึง พี่ๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ของสถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบที่ให้ความสะดวกในการทำงานวิจัยด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณอาสุพจน์ งามสมจิตร ที่ให้การสนับสนุนในหลายๆด้าน ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่สาว กำลังใจ และคำชี้แนะอันมีค่าที่หาสิ่งใดเปรียบมิได้ ตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฐ
รายการสัญลักษณ์	ต

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
2. ทฤษฎี	8
2.1 อ้อย	8
2.2 กากน้ำตาล	11
2.3 เอทานอล	15
2.4 ยีสต์	18
2.4.1 การผลิตเอทานอลโดยยีสต์	19
2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการหมักเอทานอล	20
2.6 กระบวนการผลิตเอทานอล	23
2.7 จลนพลศาสตร์การหมักเอทานอล	25
3. แนวทางการดำเนินงานวิจัย	28
3.1 วัตถุดิบและสารเคมี	28
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	28

3.3	การเตรียมวัตถุดิบ	29
3.3.1	การเตรียมกล้ายีสต์ตั้งต้น	29
3.3.2	การเตรียมกากน้ำตาล	29
3.3.3	การเตรียมน้ำอ้อย	29
3.3.4	การเตรียมอาหารเสริม และเกลือแร่	30
3.4	ศึกษาการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมัก	30
3.5	ศึกษาการหมักเอทานอลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล	31
4.	ผลการทดลอง และวิจารณ์	32
4.1	ผลการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมัก	32
4.1.1	อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นต่อการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล	32
4.1.2	อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นต่อการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	38
4.2	การหมักเอทานอลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล	43
4.3	การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอล	51
4.3.1	จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล	52
4.3.2	จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล	56
4.3.3	จลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล	60
4.3.4	จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	65
4.3.5	จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	69
4.3.6	จลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	73
4.3.7	จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล	77
4.3.8	จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล	82

4.3.9	จลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล	86
5.	สรุปและข้อเสนอแนะ	91
5.1	ศึกษาการหมักเอทานอลด้วยกากน้ำตาล และน้ำอ้อย	91
5.2	ศึกษาการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล	92
5.3	ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอล	92
5.4	ข้อเสนอแนะ	94
	เอกสารอ้างอิง	95
	ภาคผนวก	101
ก	การวิเคราะห์	101
ข	ข้อมูลการทดลอง	105
ค	ตัวอย่างการคำนวณ	154
	ประวัติผู้วิจัย	157

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ปริมาณการปลูกอ้อยทั่วประเทศปีการเพาะปลูก 2552/53	9
2.2 องค์ประกอบต่างๆของน้ำอ้อย	11
2.3 องค์ประกอบต่างๆของกากน้ำตาล	14
2.4 สารประกอบไนโตรเจนต่างๆที่พบในกากน้ำตาล	15
4.1 ปริมาณเอทานอลสูงสุด น้ำหนักเซลล์แห้ง และปริมาณน้ำตาลที่เหลือของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ	37
4.2 ปริมาณเอทานอลสูงสุด น้ำหนักเซลล์แห้ง และปริมาณน้ำตาลที่เหลือของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ	42
4.3 ปริมาณเอทานอลสูงสุด น้ำหนักเซลล์แห้ง และปริมาณน้ำตาลที่เหลือของการหมักเอทานอลที่ผสมน้ำกากส่าในปริมาณต่างๆ	48
4.4 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล	52
4.5 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลของเซลล์ที่คำนวณจากสมการ 4.2 และ 4.3 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล	55
4.6 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล	57
4.7 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลที่คำนวณจากสมการ 4.4 และ 4.5 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล	59
4.8 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล	61
4.9 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่คำนวณจากสมการ 4.6 และ 4.7 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล	64
4.10 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	65

4.11	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตของเซลล์ที่คำนวณจากสมการ 4.8 และ 4.9 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของน้ำอ้อย	68
4.12	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	69
4.13	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลที่คำนวณจากสมการ 4.10 และ 4.11 ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	72
4.14	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	74
4.15	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์คำนวณจากสมการ 4.12 และ 4.13 ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	76
4.16	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	78
4.17	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตของเซลล์ที่คำนวณจากสมการ 4.14 และ 4.15 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	81
4.18	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	82
4.19	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลที่คำนวณจากสมการ 4.16 และ 4.17 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	85
4.20	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	87
4.21	ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่คำนวณจากสมการ 4.18 และ 4.19 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	89
ข.1	ปริมาณน้ำตาลในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร	106
ข.2	ปริมาณเซลล์ยีสต์ในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร	107
ข.3	ปริมาณเอทานอลในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร	108

[illegible]

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 การผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตร	17
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร	33
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 170 กรัมต่อลิตร	33
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 200 กรัมต่อลิตร	34
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 230 กรัมต่อลิตร	34
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 260 กรัมต่อลิตร	35
4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลกับ ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่ 120, 170, 200, 230 และ 260 กรัมต่อลิตร	37
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร	39
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 170 กรัมต่อลิตร	39
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 200 กรัมต่อลิตร	40

- 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 230 กรัมต่อลิตร 40
- 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 260 กรัมต่อลิตร 41
- 4.12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยกับ ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่ 120, 170, 200, 230 และ 260 กรัมต่อลิตร 42
- 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 43
- 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 44
- 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 44
- 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 46
- 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 46
- 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 47
- 4.19 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยใช้น้ำกากส่า 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 48
- 4.20 การเปรียบเทียบปริมาณการหมักเอทานอล โดยใช้น้ำกากส่า 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 49
- 4.21 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำหนักรวมของเซลล์แห้งสุดท้ายโดยใช้น้ำกากส่า 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 49

4.22	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลกับโดยใช้กาก สำ 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	50
4.23	การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนาย จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล	53
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) กับความเข้มข้น ของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล	53
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) กับความเข้มข้น ของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล	54
4.26	การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนาย ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.2 และ 4.3 ที่ความเข้มข้นของปริมาณ น้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล	55
4.27	การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายจาก แบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล	57
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) กับความเข้มข้นของ ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล	58
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการปรับตัวของการหมักเอทานอล (Δt) กับความ เข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล	58
4.30	การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วย ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.4 และ 4.5 ที่ความเข้มข้นของปริมาณ น้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล	60
4.31	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายจาก แบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล	61
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) กับความเข้มข้น ของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล	62
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับความเข้มข้นของปริมาณ น้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล	62
4.34	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วย ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.6 และ 4.7 ที่ความเข้มข้นของปริมาณ น้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล	64
4.35	การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนาย จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	66

4.36	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย	67
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย	67
4.38	การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.8 และ 4.9 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของน้ำอ้อย	68
4.39	การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	70
4.40	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย	71
4.41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการปรับตัวของการหมักเอทานอล (Δt) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย	71
4.42	การเปรียบเทียบการหมักเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.10 และ 4.11 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของน้ำอ้อย	72
4.43	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย	74
4.44	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย	75
4.45	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย	75
4.46	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.12 และ 4.13 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล	77
4.47	การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	78
4.48	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางจากน้ำตาล	79
4.49	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางจากน้ำตาล	80

4.50	การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.14 และ 4.15 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	81
4.51	การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	83
4.52	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางจากน้ำตาล	84
4.53	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการปรับตัวของการหมักเอทานอล (Δt) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางจากน้ำตาล	84
4.54	การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.16 และ 4.17 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	85
4.55	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	87
4.56	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางจากน้ำตาล	88
4.57	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางจากน้ำตาล	88
4.58	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.18 และ 4.19 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง	89
ก.1	ค่ามาตรฐานปริมาณน้ำตาลทั้งหมด กับค่าการดูดกลืนแสงที่ 490 nm.	102
ก.2	ค่ามาตรฐานปริมาณเซลล์ยีสต์ กับค่าการดูดกลืนแสงที่ 660 nm.	104
ค.1	การใช้ฟังก์ชัน solver ด้วยโปรแกรม excel	156

รายการสัญลักษณ์

m	=	ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (ต่อชั่วโมง)
P	=	ค่าปริมาณเอทานอล (กรัมต่อลิตร)
S	=	ความเข้มข้นของน้ำตาลที่เวลาใดๆ (กรัมต่อลิตร)
S_0	=	ความเข้มข้นของน้ำตาลที่เวลาเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)
t	=	เวลา (ชั่วโมง)
Δt	=	ค่าระยะการปรับตัวของการหมักเอทานอล (ชั่วโมง)
X	=	ความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ที่เวลาใดๆ (กรัมต่อลิตร)
X_m	=	ค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุด (กรัมต่อลิตร)
X_0	=	ความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ที่เวลาเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)
$Y_{P/X}$	=	ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ (กรัมผลิตภัณฑ์ต่อกรัมเซลล์ยีสต์)
$Y_{X/S}$	=	ค่าผลได้ของเซลล์ยีสต์จากสารอาหาร (กรัมเซลล์ยีสต์ต่อกรัมน้ำตาล)
μ_m	=	ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (ต่อชั่วโมง)