



การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับปะรด
Microwave Application for the Ethanol Production from Pineapple Peels

ภูเบศร์ พงศ์สุวรรณ
PhubetPongsuwan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับปะรด
ชื่อผู้เขียน นายภูเบศร์ พงศ์สุวรรณ
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินาฏ จงคง)	(รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)
กรรมการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินาฏ จงคง)
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)	(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)
กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์)
กรรมการ
	(ดร.สุรัสวดี กังสนันท์)

บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมี

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินาฏ จงคง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายภูเบศวร์ พงศ์สุวรรณ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายภูเบศร์ พงศ์สุวรรณ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้คลื่น ไมโครเวฟเพื่อการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับปะรด
ผู้เขียน	นายภูเบศวร์พงศ์สุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้เปลือกสับปะรดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัตถุดิบหลักเพื่อผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนแบบต้นทุนการผลิตต่ำ โดยศึกษาการปรับสภาพและย่อยที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ การใช้น้ำเปล่าเปรียบเทียบกับการใช้ด่าง-กรดอินทรีย์ (โซเดียมไบคาร์บอเนตกับกรดอะซิติก) ในขั้นตอนของการปรับสภาพและย่อยพร้อมการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และศึกษาการหมักโดยใช้ยีสต์ขนมปัง (Baker's yeast) ทำการออกแบบการทดลอง และศึกษาปัจจัยต่างๆ ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM)

วิธีที่หนึ่ง การปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่า แบ่งเป็นการปรับสภาพด้วยน้ำ ซึ่งปัจจัยที่สนใจศึกษาคือปริมาณเปลือกสับปะรด 100–160 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 100–900 วัตต์ และระยะเวลา 5–20 นาที และศึกษาการย่อย ให้ความร้อนต่อ (ด้วยน้ำเปล่าเค็ม) ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษาคือกำลังไฟฟ้า 100–900 วัตต์ และระยะเวลา 5–20 นาทีพบสภาวะที่เหมาะสมคือ การให้ความร้อนเพียงขั้นตอนเดียวเป็นการปรับสภาพพร้อมการย่อย โดยใช้เปลือกสับปะรด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ที่กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ เป็นเวลา 12 นาที ให้ผลผลิตเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ 13.180 กรัมต่อลิตร และวิธีที่สอง การปรับสภาพและย่อยด้วยด่าง-กรดอินทรีย์ ซึ่งแบ่งการศึกษาเป็นขั้นตอนการปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง (เบกกิ้งโซดา) โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ ปริมาณเปลือกสับปะรด 100–160 กรัมต่อสารละลายด่าง 1 ลิตร ด้วยสารละลายด่างความเข้มข้น 1.0–2.5 โมลาร์ที่กำลังไฟฟ้า 100–900 วัตต์ เป็นเวลา 2–20 นาที และศึกษาการย่อยต่อด้วยสารละลายกรดอะซิติก โดยมีปัจจัยคือ ความเข้มข้นของสารละลายกรด 0.5–2.0 โมลาร์ที่กำลังไฟฟ้า 100–900 วัตต์ ระยะเวลา 2–20 นาที พบว่าที่เหมาะสมคือ การปรับสภาพโดยใช้เปลือก 140 กรัมต่อสารละลายด่าง 1 ลิตร ด้วยสารละลายด่างความเข้มข้น 1.59 โมลาร์ ที่กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์เป็นเวลา 10 นาที ให้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ 8.520

กรัมต่อลิตร และย่อยต่อด้วยสารละลายกรดอะซิดิกเข้มข้น 0.5 โมลาร์กำลังไฟฟ้า 900 วัตต์และใช้เวลาในการย่อย 11 นาทีได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 7.850 กรัมต่อลิตร

จากนั้นนำผลผลิตที่ได้จากปรับสภาพและย่อยด้วยสภาวะที่เหมาะสมมาทำการหมักด้วยยีสต์ขนมปังโดยปัจจัยที่ศึกษาคือพีเอชเริ่มต้น 4.5-6.5 ร้อยละโดยน้ำหนักของยีสต์ต่อเปลือกสับประรด 2-8 ภายใต้อุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 2-8 วัน ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหมักที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่าคือ พีเอชเริ่มต้น 6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และทำการหมักเป็นระยะเวลา 2 วัน ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 6.650 โดยปริมาตร และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหมักที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยด่าง-กรดอินทรีย์คือ พีเอชเริ่มต้น 6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และทำการหมักเป็นระยะเวลา 2 วัน ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 1.990 โดยปริมาตร

สำหรับการประมาณต้นทุนการผลิตเอทานอลของทั้ง 2 วิธี พบว่าการปรับสภาพและย่อยด้วยด้วยน้ำเปล่า และหมักด้วยยีสต์ขนมปัง มีค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอล(ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95) 11.19 บาทต่อลิตร สามารถให้ผลผลิตเอทานอล 1,134 ลิตรต่อตันเปลือกสับประรด และการปรับสภาพและย่อยด้วยด่าง-กรดอินทรีย์ และหมักด้วยยีสต์ขนมปัง มีค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอล 56.58 บาทต่อลิตร สามารถให้ผลผลิตเอทานอล 252 ลิตรต่อตันเปลือกสับประรด ซึ่งวิธีแรกคือ การปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่าสามารถให้ผลได้ และมีต้นทุนการผลิตที่สามารถถูกพัฒนาต่อยอดเพื่อการผลิตเชิงการค้าได้

Thesis Title	Microwave Application for the Ethanol Production from Pineapple Peels
Author	Mr.PhubetPongsuwan
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2014

ABSTRACT

Pineapple peels, An agricultural residue, were used as the feedstock for the ethanol fuel (renewable energy) production that could reduce waste from the production two pretreatment and hydrolysis processes by using pure water and using alkali-acid organics (Sodium bicarbonate-acetic) were compared. Then fermentation using baker's yeast was also studied. Experiments were designed and investigated by Response Surface Methodology (RSM).

The first water pretreatment-hydrolysis method could be divided to water pretreatment step that studied factors were pineapple peel amount of 100-160 g to 1 L of water at 100-900 watt microwave power for 5-20 min and hydrolysis step that the pretreated products were heated at 100-900 watt for 5-20 min. The results indicated that the pretreatment and hydrolysis using pure water without a reagent could be done in a single step that proceeded with 132 g of peel to 1 L of water at 90 watt for 12 min. This provided 13.180 g/L of reducing sugar product. For the second organic alkali pretreatment-acid hydrolysis method, important factors for the pretreatment were peel amount of 100-160 g to 1 L of alkali solution (baking soda solution) with alkali concentration of 1.0-2.5 M at power of 100-900 watt for 2-20 min, and the important hydrolysis factors were acetic acid concentration of 0.5-2.0 M at 100-900 watt for 2-20 min. The optimal pretreatment was using 140 g peel to 1 L alkali solution with 1.59 M alkali concentration at 450 watt for 10 min. This could be obtained 8.520 g/L reducing sugar, then the pretreated products were hydrolyzed with 0.5 M acetic concentration at 900 watt for 11 min that achieved 7.850 g/L reducing sugar.

After that the optimal pretreatment-hydrolysis products were fermented by baker's yeast. Significant were investigated with 4.5-6.5 of initial pH using 2-8 %w of yeast at 30-40 °C for 2-8 day. They were found that the optimum for water method was 6.5 pH, 8 %w yeast, 30 °C and 2 day which gave 6.650 %v ethanol product, and the optimum for alkali-acid method was 6.5 pH, 8 %w yeast, 30 °C and 2 day which provided 1.990 %v ethanol.

In addition, production costs of 2 methods were estimated. The 95 %v ethanol production using pure water method expended 11.19 baht/L and yielded 1,134 L/ton (L ethanol to ton peel). As using alkali-acid method was 56.58 baht/L and 252 L/ton. It was shown that the first method could be developed into commercial production.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	2
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	4
2.1 สัมประรด	4
2.2 เอทานอล	7
2.3 โซเดียมไบคาร์บอเนต	12
2.4 กรดอะซิติก	17
2.5 คลื่นไมโครเวฟ	19
2.6 ยีสต์ขนมปัง	21
2.7 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว	23
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	30
3.1 วัสดุ	30
3.2 อุปกรณ์	31
3.3วิธีการทดลอง	35
3.3.1 ศึกษาองค์ประกอบของเปลือกสับประรด	35
3.3.2 ศึกษาการปรับสภาพ และย่อยด้วยน้ำเปล่า พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	35
3.3.3 ศึกษาการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรด ด้วยเบส และกรดอินทรีย์	37

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.3.4 การหมักเอทานอลด้วยยีสต์ขุ่นมับัง	39
3.3.5 ขยายขนาดชุดเครื่องมือในการปรับสภาพ และย่อยโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ขนาดความจุประมาณ 40 ลิตร	40
3.3.6 ประมาณต้นทุนการผลิตเอทานอลจากสภาวะที่เหมาะสม	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	41
4.1 องค์ประกอบในเปลือกสับประรด	41
4.2 การปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	42
4.3 การย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	49
4.4 การปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้งโซดา) พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	53
4.5 การย่อยเปลือกสับประรดด้วยสารละลายกรดอะซิติก พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	62
4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลผลิต	69
4.6.1 ปริมาณน้ำตาลในผลผลิตเปลือกสับประรด	69
4.6.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ และผลผลิต	70
4.7 การหมักเปลือกสับประรดด้วยยีสต์ขุ่นมับัง	72
4.7.1 การปรับสภาพ และย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	72
4.7.2 การปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรดด้วยเบส และกรดอินทรีย์พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	81

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.8 การขยายขนาดชุดเครื่องมือในการปรับสภาพและย่อยพร้อมการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นขนาดความจุประมาณ 40 ลิตร	91
4.8.1 การขยายขนาดชุดเครื่องมือเป็นความจุประมาณ 40 ลิตร	91
4.8.2 การทดลองใช้ชุดเครื่องมือที่มีความจุประมาณ 40 ลิตร	93
4.9 ผลการประเมินต้นทุนการผลิตเบื้องต้น	94
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	99
5.1 สรุปผลการทดลอง	99
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม	100
เอกสารอ้างอิง	101
ภาคผนวก	105
ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์	106
ภาคผนวก ข ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	112
ภาคผนวก ค บทความที่เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ	124
ประวัติผู้เขียน	129

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกสับปรดคิดเป็นร้อยละของ วัตถุแห้งร้อยละ 96.28	7
4-1	แสดงองค์ประกอบของเปลือกสับปรด	41
4-2	แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการปรับสภาพ เปลือกสับปรดด้วยน้ำเปล่าโดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ในผลผลิตหลังการปรับสภาพ	43
4-3	แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการย่อย เปลือกสับปรดด้วยน้ำเปล่าโดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ในผลผลิตหลังการย่อย	50
4-4	แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการปรับสภาพ เปลือกสับปรดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้งโซดา) โดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพ	54
4-5	แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการย่อย เปลือกสับปรดด้วยสารละลายกรดอะซิติกโดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพ	63
4-6	แสดงผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในขั้นตอนการปรับสภาพ และย่อยด้วยสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละวิธี	67
4-7	แสดงชนิดของน้ำตาลและปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการปรับสภาพ และย่อยด้วยวิธีต่างๆ	69
4-8	แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการหมักเปลือกสับปรด ด้วยการใช้ยีสต์ขนมปังที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปรด ด้วยน้ำเปล่า	73

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-9	แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการหมักเปลือกสับประรด ด้วยการใช้ยีสต์ขนมปังที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรด ด้วยเบสและกรดอินทรีย์	82
4-10	เปรียบเทียบผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้หลังการปรับสภาพ และย่อย โดยชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดความจุ 25 ลิตร และชุดขนาดความจุ 40 ลิตร	93
4-11	สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตเอทานอลของแต่ละกระบวนการผลิต	94
4-12	แสดงราคาวัตถุดิบ สารเคมี และสาธารณูปโภคที่ใช้ประมาณการคำนวณ ค่าใช้จ่ายในการผลิต	95
4-13	ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่าย ในการผลิตเอทานอลจากกระบวนการปรับสภาพและย่อย ด้วยน้ำเปล่า ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร	96
4-14	ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่าย ในการผลิตเอทานอลจากกระบวนการปรับสภาพและย่อย ด้วยสารอินทรีย์ ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร	97
4-15	เปรียบเทียบผลผลิตเอทานอลที่ได้จากการใช้วัตถุดิบชนิดต่างๆ ผ่านการปรับสภาพ และย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ	97
ก-1	แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี(GC)111	
ข-1	แสดงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด ที่ได้จากการปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	112
ข-2	แสดงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด ที่ได้จากการย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	114

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-3	แสดงปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์และน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการปรับสภาพ เปลือกสับประดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้ง โซดา) โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	116
ข-4	แสดงปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์และน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการย่อย เปลือกสับประดด้วยสารละลายกรดอะซิติก โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	118
ข-5	แสดงปริมาณเอทานอลที่ได้จากการปรับสภาพและย่อย เปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	120
ข-6	แสดงปริมาณเอทานอลที่ได้จากการปรับสภาพและย่อย เปลือกสับประดด้วยเบสและกรดอ่อนอินทรีย์ โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	122

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า	
1-1	แผนผังสรุปขอบเขตของงานวิจัย	3
2-1	แผนผังแสดงโครงสร้างอุตสาหกรรมสับประรดไทย	5
2-2	แสดงกระบวนการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้งและน้ำตาล	9
2-3	โครงสร้างของเส้นใยพืชก่อนและหลังปรับสภาพ	10
2-4	สูตรโครงสร้างทางเคมีของโซเดียมไบคาร์บอเนต	13
2-5	โซเดียมไบคาร์บอเนตที่ในการงานวิจัย	14
2-6	แสดงการให้ความร้อนแบบธรรมดา	20
2-7	แสดงการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ	20
2-8	แสดงลักษณะทั่วไปและส่วนภายในเตาอบไมโครเวฟ	21
3-1	ลักษณะของเปลือกสับประรด	30
3-2	ภาพแสดงชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเบื้องต้นสำหรับการปรับสภาพ และย่อยเปลือกสับประรด	32
3-3	ตู้บ่ม (Incubator) ตู้หมักควบคุมอุณหภูมิ	33
3-4	เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รุ่น HP 8453	34
3-5	GC ยี่ห้อ Agilent รุ่น 6890	34
3-6	เปลือกสับประรดหลังบดขนาดไม่เกิน 3 มิลลิเมตร	35
3-7	แสดงเปลือกสับประรดผสมน้ำเปล่าในโถ 3 คอ ขนาด 2 ลิตร ก่อนการปรับสภาพโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	36
3-8	แสดงผลผลิตหลังการปรับสภาพด้วยน้ำเปล่าก่อนการย่อย	37
3-9	แสดงการเตรียมเปลือกสับประรด สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้งโซดา) และน้ำก่อนการปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟ	38
3-10	แสดงผลผลิตหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต	38
3-11	การหมักเอทานอลในขวดหมักขนาด 250 มิลลิลิตร	39

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	ภาพประกอบที่	หน้า
4-1	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและเวลาที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพมีการใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร	44
4-2	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับปะรดในน้ำ 1 ลิตรและเวลาที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพมีการใช้กำลังไฟฟ้า 495 วัตต์	46
4-3	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับปะรดในน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพโดยใช้เวลา 12 นาที ในการปรับสภาพ	48
4-4	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและเวลาในการย่อยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการย่อย	52
4-5	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีการใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตรและระยะเวลาในการปรับสภาพ 11 นาที	56
4-6	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับปะรดในน้ำ 1 ลิตร และสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 495 วัตต์และระยะเวลาในการปรับสภาพ 11 นาที	57
4-7	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้า 495 วัตต์ในการปรับสภาพ	58

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
<p>4-8 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับปะรดในน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์โดยใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.75 โมลาร์ และระยะเวลาในการปรับสภาพ 11 นาที</p>	59
<p>4-9 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.75 โมลาร์และปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร</p>	60
<p>4-10 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและเปลือกสับปะรดในน้ำ 1 ลิตรที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์โดยใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.75 โมลาร์และกำลังไฟฟ้าในการปรับสภาพ 495 วัตต์</p>	61
<p>4-11 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและสารละลายกรดอะซิติกที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ที่ระยะเวลาในการย่อย 11 นาที</p>	64
<p>4-12 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและสารละลายกรดอะซิติกที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ที่กำลังไฟฟ้าในการย่อย 495 วัตต์</p>	65
<p>4-13 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ที่สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1.25 โมลาร์</p>	66
<p>4-14 SEM ของวัตถุดิบเปลือกสับปะรดผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่า (ก) และผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยค่าง-กรดอินทรีย์ (ข) พร้อมการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังขยาย 40 500 และ 1000 เท่า</p>	71

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-15 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยีสต์ และอุณหภูมิขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้พีเอช5.5 และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน	75
4-16 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน	76
4-17 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลา และปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และพีเอช5.5	77
4-18 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปัง ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน	78
4-19 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลา และอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปัง ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และพีเอช5.5	79
4-20 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลา และพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปัง ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	80
4-21 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้พีเอช 5.5 และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน	84
4-22 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน	85

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-23	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และพีเอช 5.5
86	
4-24	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและระยะเวลาในการหมัก 5 วัน
87	
4-25	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และพีเอช 5.5
88	
4-26	กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส
89	
4-27	ชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรด ซึ่งมีตู้อุปกรณ์ปล่อยคลื่นไมโครเวฟความจุ 40 ลิตร
92	
4-28	ลักษณะโอบรรจุสารละลายที่มีการขยายขนาดความจุเพิ่มขึ้นจาก 2 ลิตร เป็น 5 ลิตร
92	
ก-1	กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์
107	
ก-2	กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด
109	
ก-3	กราฟมาตรฐานเอทานอล
111	
ข-1	ปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ของกระบวนการปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า
โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	113

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
ข-2	<p>ปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ของกระบวนการย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่า โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ</p>	115
ข-3	<p>ปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ของกระบวนการปรับสภาพเปลือกสับประด ด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้ง โซดา) โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ</p>	117
ข-4	<p>ปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ของการย่อยเปลือกสับประดด้วยสารละลายกรดอะซิติก โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ</p>	119
ข-5	<p>ปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ของกระบวนการหมักเปลือกสับประดด้วยการใช้ยีสต์ขนมปัง ที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่า</p>	121
ข-6	<p>ปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ของกระบวนการหมักเปลือกสับประดด้วยการใช้ยีสต์ขนมปัง ที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประดด้วยเบสและกรดอ่อนอินทรีย์</p>	123

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

พลังงานเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของโลก เนื่องจากมีความต้องการใช้พลังงานทุกภาคส่วนทั้งในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและการคมนาคมขนส่ง โดยเฉพาะน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งมีความต้องการใช้เป็นปริมาณมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ส่งผลให้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมของโลกมีปริมาณลดลง และมีแนวโน้มทางด้านราคาสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อประเทศไทยเป็นอย่างมาก เนื่องจากภาวะทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว จึงต้องมีการนำเข้าเชื้อเพลิงในปริมาณสูง ปัญหาดังกล่าวทำให้หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนช่วยกันหาหนทางแก้ไข ซึ่งการใช้พลังงานทางเลือกจะสามารถช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ เพื่อลดการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจากต่างประเทศ จึงได้มีการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนจากผลผลิตทางการเกษตร ที่เป็นทรัพยากรหลักของประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม แหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญของไทยคือ พลังงานจากชีวมวล ที่สามารถลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม (อัสมมา, 2555) และช่วยสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรได้อีกทางหนึ่ง พลังงานชีวมวลที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์มีอยู่ 2 ประเภทหลักคือ เอทานอล และไบโอดีเซล

เอทานอลสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลัก 3 ประเภท คือ แป้ง น้ำตาล และเซลลูโลส วัตถุดิบประเภทน้ำตาล ได้แก่ น้ำอ้อย กากน้ำตาล บีตรูท ข้าวฟ่างหวาน เป็นต้น วัตถุดิบประเภทแป้ง ได้แก่ ผลผลิตทางการเกษตรจำพวกธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ ข้าวฟ่าง และพวกพืชหัว เช่น มันสำปะหลัง มันฝรั่ง มันเทศ เป็นต้น และวัตถุดิบประเภทเซลลูโลส ส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากผลผลิตทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด รำข้าว เศษไม้ ขี้เลื่อย วัชพืช รวมทั้งของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานกระดาษ เป็นต้น (คณะกรรมการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร, 2545) โดยการผลิตเอทานอลมี 3 ขั้นตอนหลักคือ การปรับสภาพ (Pretreatment) การย่อย (Hydrolysis) และการหมัก (Fermentation) ซึ่งการปรับสภาพและการย่อยสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การใช้ กรด ด่าง จุลินทรีย์ เอนไซม์ เป็นต้น

งานวิจัยนี้สนใจการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีราคาถูกหรือแทบจะไม่มีราคา เพื่อจะสามารถช่วยลดต้นทุนรวมของการผลิตเอทานอล โดยผลผลิตเหลือทิ้งที่สนใจศึกษาคือ เปลือกสับประรด เนื่องจากเปลือกสับประรดมีองค์ประกอบของทั้งน้ำตาล แป้ง และ

เซลลูโลส ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งที่มีปริมาณมากในโรงงานอุตสาหกรรม การผลิตผลไม้กระป๋อง สังเกตได้จากข้อมูลผลผลิตสับปะรดกระป๋องและการส่งออกสับปะรดกระป๋องของประเทศไทยซึ่งมีอัตราเพิ่มขึ้นทุกปี (วิมลนาฏ, 2553) โดยเปลือกสับปะรดยังมีการนำไปใช้ประโยชน์ในปริมาณที่น้อยมาก จึงเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นเอทานอล โดยเน้นการศึกษาในขั้นตอนการปรับสภาพและย่อยโดยใช้สารละลายต่าง-กรด อินทรีย์ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อเป็นแนวทางในการลดการใช้พลังงาน และลดต้นทุนการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1 ศึกษาหากระบวนการ และสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดพร้อมการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ
- 2 ศึกษาหาสภาวะในการหมักเอทานอลจากเปลือกสับปะรดหลังการย่อยด้วยยีสต์ขนมปัง (Baker's Yeast)
- 3 ขยายขนาดชุดเครื่องมือในการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดความจุประมาณ 40 ลิตร

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

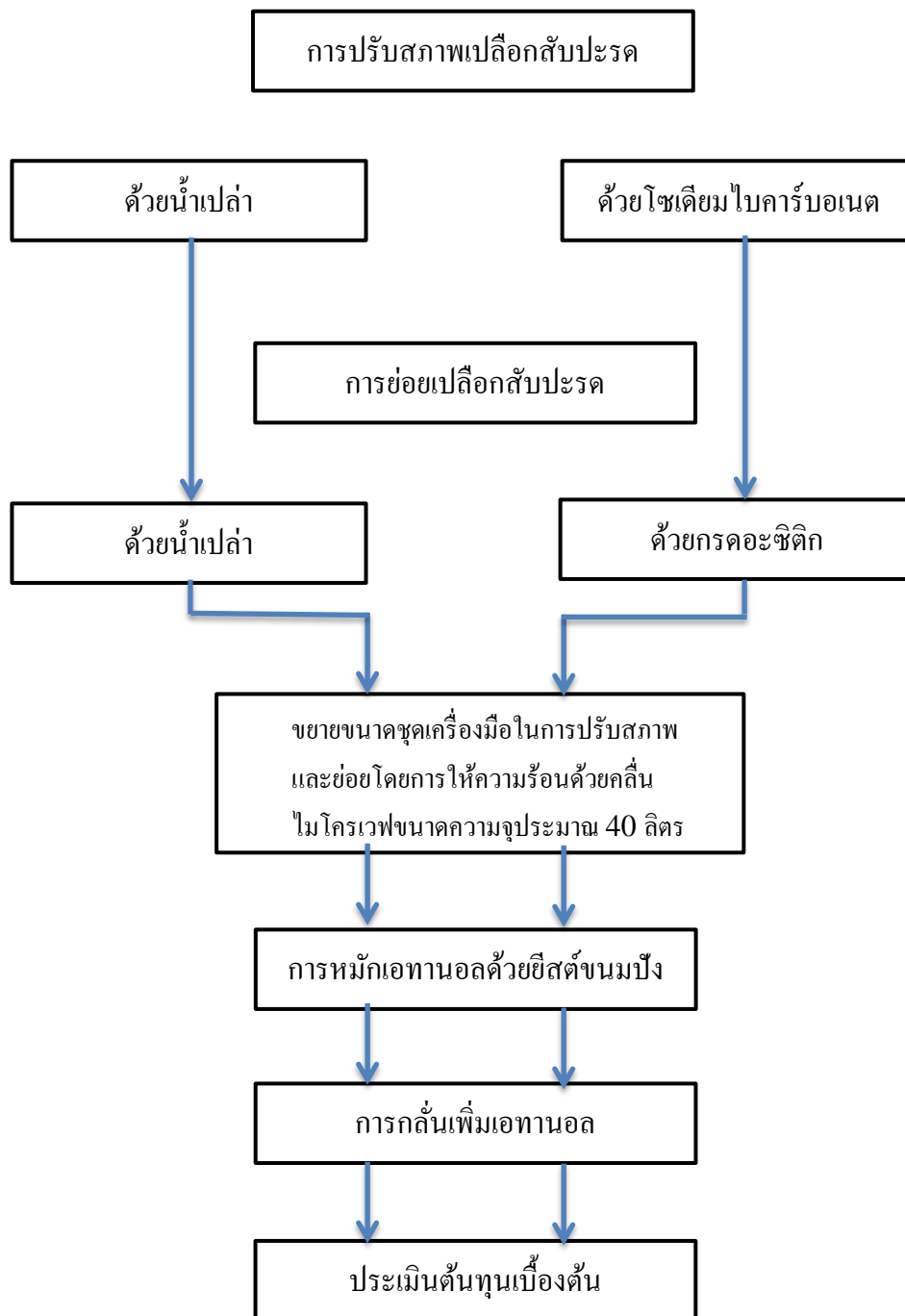
- 1 เพิ่มทางเลือกทางด้านวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล
- 2 สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเหลือทางการเกษตร (เปลือกสับปะรด)
- 3 ได้แนวทางใหม่ในการผลิตเอทานอล ด้วยกระบวนการประหยัดพลังงาน
- 4 ได้กระบวนการผลิตเอทานอลแบบต้นทุกการผลิตต่ำ คู่มีค่าทางเศรษฐศาสตร์
- 5 ลดขยะชุมชน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1 ใช้เปลือกสับปะรดเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเอทานอล
- 2 ใช้คลื่นไมโครเวฟในกระบวนการปรับสภาพ และย่อย
- 3 ใช้ยีสต์ขนมปัง (Baker's Yeast) แบบแห้งชนิดผงในการหมักเอทานอล
- 4 ขยายขนาดชุดเครื่องมือในการปรับสภาพ และย่อยโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดความจุประมาณ 40 ลิตร
- 5 ประมาณต้นทุนการผลิตเอทานอล

แผนผังสรุปขอบเขตของงานวิจัยแสดงดังภาพประกอบที่ 1-1

แผนผังสรุปขอบเขตของงานวิจัย



ภาพประกอบที่ 1-1 แผนผังสรุปขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สับปะรด

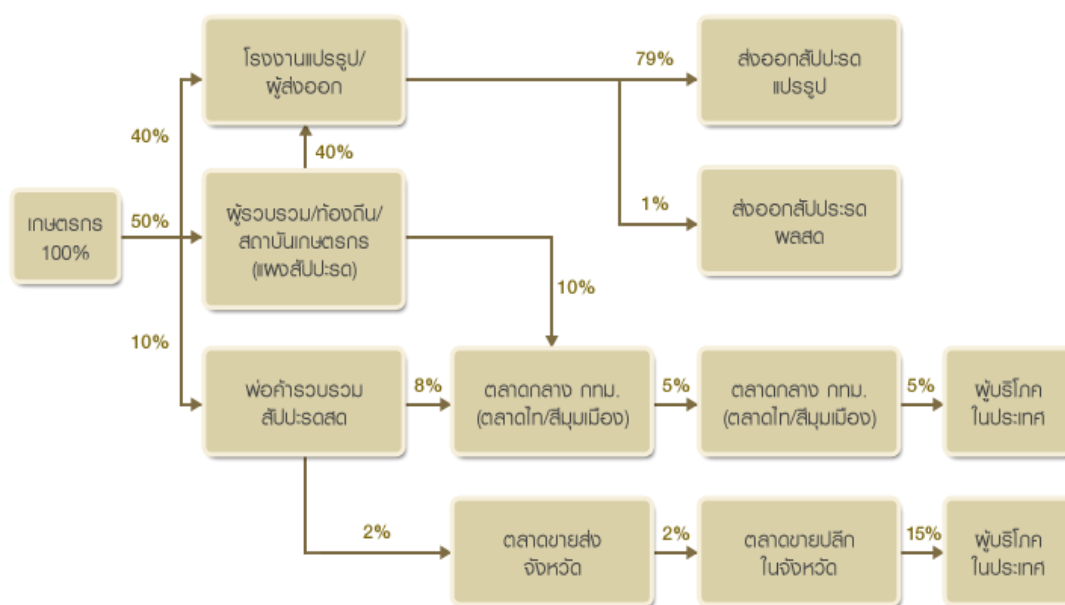
สับปะรดมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี และจัดว่าเป็นผลไม้เศรษฐกิจของบ้านเราด้วย แหล่งปลูกที่สำคัญมักจะอยู่ใกล้ๆ ทะเลเช่น ประจวบคีรีขันธ์ เพชรบุรี ชลบุรี หรือ อุดรดิษฐ์ ลำปาง พิชญ โลก เป็นต้น

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของสับปะรดสับปะรดมีชื่อวิทยาศาสตร์ (Scientific name) คือ *Ananascomosus(L.) Merr.* อยู่ในวงศ์ (Family) Bromeliaceaeสกุล (Genus) *Ananas* และมีชื่อสามัญ (Common name) คือ pineapple สับปะรดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวอายุหลายปีเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่มีความสูงประมาณ 100 เซนติเมตรมีลำต้นสั้นและกว้างบางส่วนอยู่ใต้ดินและบางส่วนอยู่เหนือดิน โดยส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินมักจะตั้งตรง รากเป็นระบบรากฝอย (fibrous root system) ใบสับปะรดมีลักษณะเรียวยาวและเป็นร่องโค้ง ไม่มีก้านใบมีการเรียงตัวของใบแบบเวียนรอบลำต้นซึ่งลักษณะใบของสับปะรดเช่นนี้มีความสำคัญในการดำรงชีวิตในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำน้อยโดยละอองฝนและน้ำค้างที่ตกลงมาสัมผัสกับพุ่มใบจะถูกรวบรวมมาไว้ที่ส่วนโคนต้นดอกออกเป็นช่อมีดอกย่อยประมาณ 100-200 ดอกต่อช่อดอกย่อยแต่ละดอกเป็นดอกสมบูรณ์เพศเกสรตัวเมียมีความยาวมากกว่าเกสรตัวผู้เล็กน้อยและมีขนาดสั้นกว่ากลีบดอกเล็กน้อยกลีบดอกมีสีขาวที่โคนและสีม่วงอมฟ้าที่ส่วนปลายรูปร่างของกลีบดอกเป็นแบบยาวรี กลีบดอกเจริญอยู่ชิดกันมากตั้งแต่โคนถึงปลายทำให้มีช่องเปิดเพียงเล็กน้อยการผสมเกสรต้องผสมข้ามต้นเท่านั้น (Self-incompatibility) แต่ผลสับปะรดสามารถเจริญได้โดยไม่ต้องผสมเกสร (parthenocarpy) ผลสับปะรดเป็นผลรวม (multiple fruit) ที่เกิดจากการเชื่อมติดกันของผนังรังไข่รูปร่างผลเป็นทรงกลมถึงทรงกรวยขึ้นกับขนาดของผล การขยายพันธุ์ของสับปะรดในเกษตรกรรมมักนิยมขยายพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยใช้ “ตะเกียง” ซึ่งเป็นส่วนตาที่เจริญเติบโตมาเป็นต้นสับปะรดเล็กๆ หรือใช้ “จุก” ซึ่งเป็นส่วนพุ่มเหนือผลในการขยายพันธุ์ หากได้รับการผสมข้ามต้นสับปะรดจะสร้างเมล็ดได้โดยเมล็ดจะมีขนาดยาวประมาณ 3-5 มิลลิเมตรกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตรมีเปลือกเมล็ดแข็งหนาสีน้ำตาล (ธัญญารัตน์, 2557)

2.1.2. ความสำคัญในเชิงพีชเศรษฐกิจ

สับปะรดเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยโดยในปัจจุบันไทยส่งออกสับปะรดกระป๋องเป็นอันดับหนึ่งของโลกและผลิตสับปะรดสดเป็นอันดับสองของโลกรองจากประเทศฟิลิปปินส์โดยในปี 2555 ไทยผลิตสับปะรดสดรวมทั้งประเทศได้ถึง 2.59 ล้านตันส่งออกสับปะรดกระป๋องและผลิตภัณฑ์สับปะรดคิดเป็นน้ำหนักราว 0.76 ล้านตันคิดเป็นมูลค่าถึง 24,604.2 ล้านบาทโดยผลผลิตราว 20 เปอร์เซ็นต์ใช้รับประทานสดภายในประเทศอีกประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์เป็นสับปะรดส่งออกและแปรรูปส่งออกโดย 98 เปอร์เซ็นต์ของการแปรรูปคือสับปะรดกระป๋องและน้ำสับปะรด ตลาดสำคัญของสับปะรดจากไทยคือสหรัฐอเมริกา เนเธอร์แลนด์ เยอรมัน แคนาดา ญี่ปุ่น และซาอุดีอาระเบีย



ภาพประกอบที่ 2-1 แผนผังแสดงโครงสร้างอุตสาหกรรมสับปะรดของประเทศไทย
(สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552)

ผลผลิตสับปะรดส่วนใหญ่ของประเทศไทยจะส่งเข้าโรงงานแปรรูป โดยจากแผนผังโครงสร้างอุตสาหกรรมสับปะรดไทยที่แสดงดังภาพประกอบที่ 2-1 ผู้ผลิตคั้นน้ำหรือเกษตรกรจะส่งผลผลิตสับปะรดสดในสามช่องทางคือ การส่งให้โรงงานโดยตรงคิดเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ ของสับปะรดทั้งหมดที่ผลิตในประเทศ ซึ่งมักจะเป็นพื้นที่ที่ใกล้โรงงานแปรรูปสับปะรด ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จะส่งให้กับกลุ่มพ่อค้าคนกลางที่ทำหน้าที่จัดหาวัตถุดิบส่งโรงงาน จะเป็นสับปะรดปอกและสับแล้วให้แก่โรงงานสับปะรดขนาดเล็กที่ผลิตสับปะรดกระป๋องแบบหั่นชิ้นละขนาด และอีกประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ขายให้แก่พ่อค้าคนกลางเพื่อนำไปขายเป็นสับปะรดสด อย่างไรก็ตามผลผลิตทั้งหมดที่ส่งเข้าโรงงานแปรรูปจะคิดเป็นประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ของผลผลิตทั้งหมด โดย

ความต้องการของผลผลิตจากเกษตรกรทางอุตสาหกรรมแปรรูปสับปะรดกระป๋องเป็นผู้กำหนด ซึ่งจะถูกกำหนดมาจากลูกค้าอีกทอดหนึ่ง เนื่องจากอุตสาหกรรมแปรรูปสับปะรดยังคงนิยมผลิตตามคำสั่ง (Made-to-order)

หากวิเคราะห์ตามเส้นทางเหล่านี้จะพบว่า แหล่งผลิตใบสับปะรดคือ แหล่งเพาะปลูกในพื้นที่ของเกษตรกรเอง ซึ่งจะพบใบสับปะรดจำนวนมาก โดยต้นสับปะรดหนึ่งต้นมีส่วนองค์ประกอบของสับปะรดทั้งต้นคิดเป็นน้ำหนักผล 37.35 เปอร์เซ็นต์ ใบ 38.78 เปอร์เซ็นต์ จุก 7.77 เปอร์เซ็นต์ ส่วนของต้น ก้านผลและหน่อเท่ากับ 12.863.08 และ 0.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (สมบัติและคณะ, 2539 อ้างโดย จินดา สนิทวงศ์ ณ อยุธยา, 2547) แสดงว่าในปี 2555 ประเทศไทยมีใบสับปะรดเป็นผลผลิตพลอยได้ไม่ต่ำกว่า 2.5 ล้านตัน

เมื่อวิเคราะห์เส้นทางของสับปะรดสู่ผู้บริโภค พบว่า แหล่งผลิตที่ใหญ่ที่สุดคือ พื้นที่เพาะปลูกของเกษตรกร แต่เนื่องจากพื้นที่ปลูกของเกษตรกรในประเทศไทยเป็นพื้นที่ขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ทั่วไป ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการเก็บรวบรวมสูง และปัญหาใหญ่ของการแปรรูปใบสับปะรดไปเป็นเส้นใยและเส้นด้ายเพื่อใช้ในการผลิตสิ่งทอคือ ใบสับปะรดจะต้องถูกขูดเอาเส้นใยภายใน 24 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตผ้าใยสับปะรดของประเทศไทยมีราคาสูง โดยปัจจุบันเส้นด้ายผลิตจากใยสับปะรดมีราคาขายที่กิโลกรัมละ 700 บาท

สิ่งที่ควรคำนึงถึงในการจัดการห่วงโซ่อุปทานของสิ่งทอจากใบสับปะรด ด้านต้นน้ำประกอบด้วย การเข้าถึงแหล่งผลิตที่มีประสิทธิภาพ การแปรรูปวัตถุดิบในขั้นต้นเพื่อขยายเวลารวบรวมวัตถุดิบ โดยการจัดการทางโลจิสติกส์ของวัตถุดิบมีความคุ้มค่ามากขึ้น ด้านกลางน้ำคือ การพัฒนาเส้นใยสับปะรดให้มีคุณสมบัติพิเศษสำหรับสิ่งทอเฉพาะทางที่ตอบสนองการขยายฐานของกลุ่มผู้บริโภค และด้านปลายน้ำคือ การพัฒนาผลิตภัณฑ์สิ่งทอจากใบสับปะรดให้มีความหลากหลายในเรื่องของการออกแบบและการใช้งานเพื่อตอบสนองความต้องการของกลุ่มผู้บริโภคที่มีอยู่แล้ว (ธัญญรัตน์, 2557)

2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรด

ส่วนต่างๆ ของสับปะรดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย การรับประทานสับปะรดนอกจากจะช่วยเพิ่มกากใยในระบบขับถ่ายแล้ว สับปะรดยังมีเอ็นไซม์ชื่อบรอมีลิน ซึ่งช่วยย่อยโปรตีนไม่ให้ตกค้างในลำไส้ มีวิตามินซี และเกลือแร่มากมาย ใบของสับปะรดสามารถนำมาทอผ้าและทำเป็นกระดาษได้เปลือกและแกนสับปะรดสามารถนำมาใช้เป็นอาหารเลี้ยงวัว หรือทำเป็นปุ๋ยหมักได้ เนื่องจากเปลือกสับปะรดมีแร่ธาตุต่างๆ ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น ไนโตรเจน (N) ร้อยละ 0.74 ฟอสฟอรัส (P) ร้อยละ 0.23 โพแทสเซียม (K) ร้อยละ 1.84 แคลเซียม (Ca) ร้อยละ 0.51 และแมกนีเซียม (Mg) ร้อยละ 0.04 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกสับปะรดแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกสับประดาคิดเป็นร้อยละของวัตถุแห้งร้อยละ 96.28 (บริษัท กุญบุรีผลไม้กระป๋อง จำกัด, 2553)

องค์ประกอบ	ร้อยละ	องค์ประกอบ	ร้อยละ
โปรตีน	6.37	แคลเซียม	0.33
ไขมัน	1.13	ฟอสฟอรัส	0.18
เส้นใย	20.60	ADF	25.67
เถ้า	6.62	NFE	65.28

*NFE (Nitrogen Free Extract) คือ คาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ง่ายเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งได้แก่ แป้งและน้ำตาล (อาจมีเฮมิเซลลูโลสและลิกนินปนอยู่)

[ร้อยละของ NFE = ร้อยละของวัตถุแห้ง – ร้อยละของเถ้า – ร้อยละของโปรตีน – ร้อยละของไขมัน – ร้อยละของเส้นใย]

ADF (Acid Detergent Fiber) คือ เซลลูโลส ลิกนิน กูติน สารที่ไม่ละลายในกรด และเถ้า

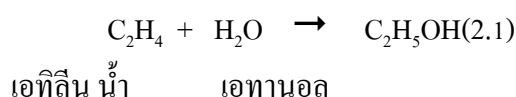
2.2 เอทานอล

เอทานอลหรือเอทิลแอลกอฮอล์ (สูตรเคมี C_2H_5OH) เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการนำเอาพืชประเภทเซลลูโลสและแป้งมาย่อยเป็นน้ำตาล แล้วทำการหมักน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์โดยใช้ยีสต์ เมื่อทำให้เป็นแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ 95% โดยการกลั่น ส่วนใหญ่ผลิตจากพืช สองประเภทคือ พืชประเภทน้ำตาล เช่น อ้อย บีทรูท และพืชประเภทแป้ง เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด เปลือกสับประด เป็นต้น

2.2.1 กระบวนการผลิตเอทานอล

กระบวนการผลิตเอทานอลสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

(1) การใช้กระบวนการทางเคมี ได้จากกระบวนการแคตาไลติกไฮเดรชัน (Catalytic Hydration) ใช้สารเอทิลีน (Ethylene) เป็นวัตถุดิบ เอทานอลที่ได้จะเรียกว่า เอทานอลสังเคราะห์ (Synthetic Ethanol) ดังสมการที่ 2.1



(2) การใช้กระบวนการทางชีวเคมีโดยใช้ผลผลิตทางการเกษตรที่มีองค์ประกอบประเภทแป้งน้ำตาลหรือเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบ อาศัยเอนไซม์ภายในเซลล์จุลินทรีย์ ซึ่งอาจจะเป็นยีสต์หรือแบคทีเรียในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเอทานอลที่ได้จะเรียกว่า ไบโเอทานอล (Bio-ethanol) (นคร, 2550)

2.2.1.1 การผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้ง มี 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1) การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบก่อนการหมักเป็นขั้นตอนแรกในการผลิตเอทานอลมีอยู่หลายรูปแบบ ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ เช่นวัตถุดิบที่เป็นกากน้ำตาล เพียงเจือจางด้วยน้ำเพื่อปรับความเข้มข้นให้เหมาะสม สามารถนำไปหมักได้เลย วัตถุดิบที่เป็นหัวมันสำปะหลัง แป้งหรือเซลลูโลส จะมีวิธีการจัดเตรียมค่อนข้างซับซ้อนก่อนจะนำไปผ่านกระบวนการย่อยให้เป็นน้ำตาลด้วยการใช้ คาง กรดหรือเอนไซม์ (น้ำย่อย) เพื่อทำให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมก่อนจะทำการหมักต่อไป

2) กระบวนการย่อย

กระบวนการย่อยเป็นการเปลี่ยนแปลงให้มีโครงสร้างโมเลกุลอยู่ในรูปน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (น้ำตาลกลูโคส) ต้องใช้กระบวนการทางเคมีและชีวเคมี กระบวนการที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ

1.1) Acid Hydrolysis เป็นวิธีการใช้กรดย่อยแป้งในการใช้กรดย่อยแป้งให้เป็นกลูโคส มีปัจจัยที่สำคัญคือ ความเข้มข้นของกรด ชนิดของกรด อุณหภูมิที่ใช้และความเข้มข้นของแป้ง ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อปริมาณกลูโคสที่จะได้รับ แม้ว่าการใช้กรดในการย่อยแป้งมันสำปะหลัง ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากกว่าร้อยละ 98.8 แต่เมื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการหมักเอทานอล ผลที่ได้ให้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลต่ำ (ประมาณร้อยละ 75 ของค่าผลผลิตทางทฤษฎี) ทั้งนี้เพราะผลผลิตจากการย่อยด้วยกรดมีหลายองค์ประกอบที่จุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ในการหมักเอทานอลได้

1.2) Enzymatic Hydrolysis เป็นวิธีการใช้เอนไซม์ในการย่อยแป้ง การใช้เอนไซม์ย่อยแป้งจะเป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากเป็นวิธีการที่สะดวกและประหยัดต้นทุนการผลิตให้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลสูง รวมทั้งไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้หัวมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบจะใช้เอนไซม์ 2 ชนิด ได้แก่ แอลฟา-อะไมเลส (α -Amylase) ในขั้นตอน Liquefaction และ กลูโคอะไมเลส (*Glucoamylase*) ในขั้นตอน Saccharification (จตุพร, 2557)

การย่อยสลายแป้งโดยใช้เอนไซม์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ Liquefaction และ Saccharification

(1) Liquefaction เมื่อใส่ น้ำเย็นลงไปผสมกับน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะคูดน้ำได้ปริมาณหนึ่ง ทำให้เม็ดแป้งมีความชื้นเพิ่มมากขึ้นแต่ไม่สามารถพองตัวได้เนื่องจากแป้งประกอบด้วยพันธะ 1,4 และ 1,6 แอลฟาไกลโคซิดิกที่ยึดจับกันอย่างหนาแน่น เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส ทำให้การจับตัวระหว่างโมเลกุลของแป้งคลายตัวลงเกิดปฏิกิริยารับน้ำและเกิดการพองตัวของเม็ดแป้ง ทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและใส เรียกว่า Gelatinization เมื่อให้ความร้อนต่อไปจนอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 100-105 องศาเซลเซียส (กล้าณรงค์, 2549) เอนไซม์

แอลฟาอะไมเลสจะทำการย่อยแป้งที่ตำแหน่ง 1,4 แอลฟาไกลโคซิดิกแบบสุ่ม ทำให้ความหนืดลดลงได้ผลผลิตเป็นมอลโตเดกซ์ตรินและโอลิโกแซคคาไรด์ขั้นตอนนี้เรียกว่า Liquefaction

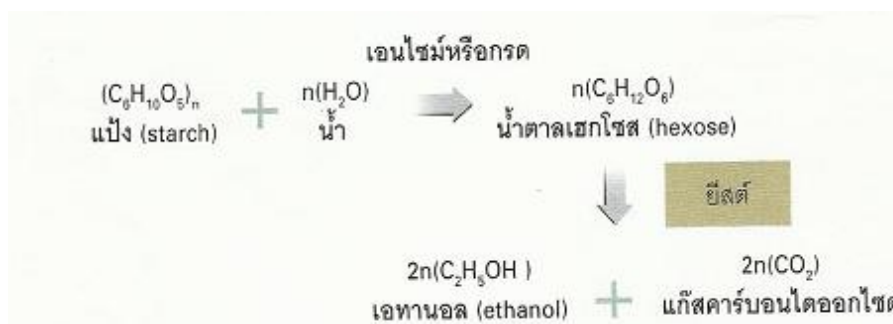
(2) Saccharification หลังจากทำขั้นตอน Liquefaction จนได้มอลโตเดกซ์ตรินและโอลิโกแซคคาไรด์แล้วเติมเอนไซม์กลูโคอะไมเลสเพื่อย่อยสลายพันธะ 1,4 และ 1,6 แอลฟาไกลโคซิดิกของโมเลกุลมอลโตเดกซ์ตริน และโอลิโกแซคคาไรด์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส(กถำณรงค์, 2549) จนได้กลูโคสออกมาขั้นตอนนี้เรียกว่า Saccharification

3) การหมัก

การหมักทำหลังจากเตรียมวัตถุดิบเรียบร้อยแล้ว นำมาเทลงในถังหมัก (Fermentor) ซึ่งอาจนำมาผ่านหรือไม่ผ่านขั้นตอนการฆ่าเชื้อก็ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของการหมักและวัตถุดิบที่ใช้ ถ้าเป็นกากน้ำตาลสามารถนำไปหมักเป็นแอลกอฮอล์โดยไม่ต้องทำการฆ่าเชื้อก่อน เป็นต้น

การหมักเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่เกิดจากการทำงานของเชื้อยีสต์ในการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสภายใต้สภาพที่ปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนเพียงเล็กน้อยให้เป็นแอลกอฮอล์โดยทั่วไปการหมักจะใช้เวลาประมาณ 2-3 วันเพื่อให้ได้แอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8-12 โดยปริมาตร

ตามทฤษฎียีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นแอลกอฮอล์ได้ร้อยละ 51.1 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 48.9 โดยน้ำหนักและมีความร้อนเกิดขึ้นตามสมการตามภาพประกอบที่ 2-2



ภาพประกอบที่ 2-2 กระบวนการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้งและน้ำตาล

ในทางปฏิบัติน้ำตาลเพียงร้อยละ 95 เท่านั้นที่จะเปลี่ยนไปเป็นแอลกอฮอล์ นอกจากนั้นยีสต์จะใช้สำหรับการเจริญเติบโตของตัวเองและเปลี่ยนเป็นผลพลอยได้อื่น

การหมักแอลกอฮอล์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

(1) การหมักแบบแบทช์ (Batch Fermentation) เป็นกระบวนการหมักผลิตภัณฑ์โดยอาศัยการเติมวัตถุดิบ สารอาหาร และหัวเชื้อ ลงไปในถังหมักเพียงครั้งเดียวตลอดกระบวนการ

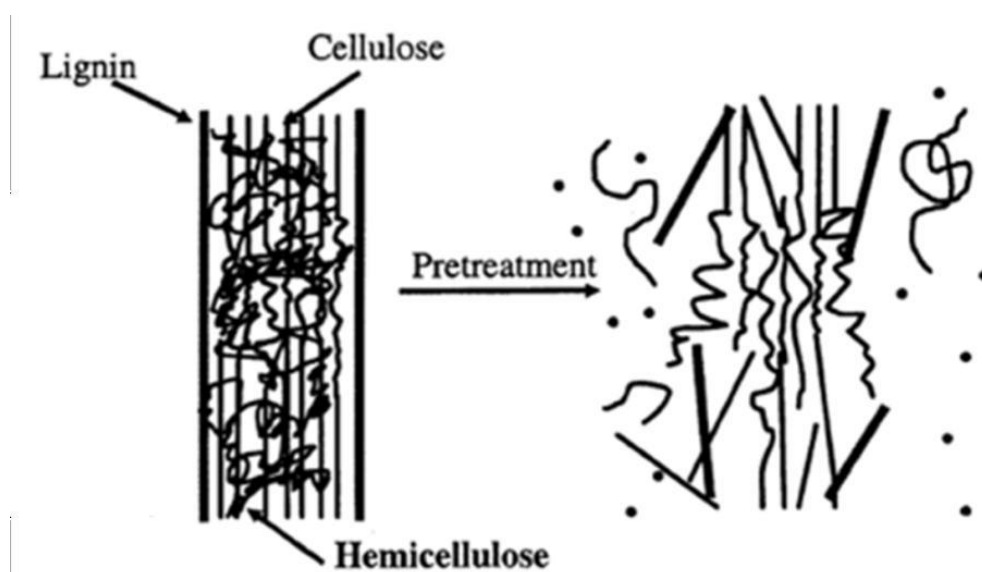
(2)การหมักแบบเฟดแบทช์ (Fed Batch Fermentation)เป็นกระบวนการที่มีการเติมวัตถุดิบและสารอาหารลงไปจนถึงหมักมากกว่า 1 ครั้งขึ้นไป เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถใช้วัตถุดิบและสารอาหารได้ในปริมาณสูงขึ้น

(3)การหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous Fermentation)เป็นกระบวนการหมักที่มีการเติมวัตถุดิบและสารอาหารเข้าไปในถังหมักแล้วแยกเอาผลิตภัณฑ์ออกมาตลอดเวลาทำให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้สูงสุดในระยะเวลาเท่ากันเมื่อเทียบกับการหมักทั้งสองชนิดที่กล่าวมา

2.2.1.2 การผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทเซลลูโลส มี 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1)การปรับสภาพ (Pre-treatment)

การปรับสภาพวัตถุดิบก่อนการหมัก เนื่องจากในกระบวนการหมักใช้เฉพาะเซลลูโลส จึงต้องแยกลิกนิน (Lignin)และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)ออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบก่อน (ภาพประกอบที่ 2-3) เพราะองค์ประกอบทั้งสองทำให้กระบวนการเกิดปฏิกิริยากับเอนไซม์ลดลง และเป็นอุปสรรคต่อการหมักอีกด้วยนอกจากนี้การปรับสภาพยังช่วยให้เซลลูโลสมีลักษณะอ่อนนุ่ม ส่งผลให้เอนไซม์เข้าถึงและทำปฏิกิริยาได้ดีวิธีการปรับสภาพแบ่งได้เป็น 4 วิธีคือ (Mosierและคณะ, 2009)



ภาพประกอบที่ 2-3 โครงสร้างของเส้นใยพืชก่อนและหลังปรับสภาพ(Chaula ,2014)

1.1) การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical Pretreatment)เป็นการลดขนาดของวัตถุดิบ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้นและทำให้เส้นใยเซลลูโลสแตกออก เช่น

การไม่/บด การใช้รังสี (Electron Beam Irradiation) การใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave Pretreatment)

1.2) การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Pretreatment) จะใช้สารละลายกรด เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน เพราะเฮมิเซลลูโลสและลิกนินสามารถย่อยสลายในสารละลายกรดได้ดีกว่าเซลลูโลสหรือใช้สารละลายเบสเพื่อเพิ่มปริมาณการละลายของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

1.3) การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมีฟิสิกส์ (Physico-Chemical Pretreatment) เป็นการใช่วิธีทางเคมีผสมผสานกับการใช้วิธีทางกายภาพ

1.4) การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological Pretreatment) เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างที่ซับซ้อนของเซลลูโลสให้อยู่ในรูปโซ่ตรงโดยการใช้น้ำเอนไซม์จากจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังช่วยลดความเป็นผลึก

2) การย่อย (Hydrolysis)

เนื่องจากวัสดูชนิดลิกโนเซลลูโลสมีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ดังนั้นเมื่อทำการย่อยเซลลูโลสจะได้น้ำตาลออกมา ถ้าการย่อยเกิดอย่างสมบูรณ์จะได้น้ำตาลกลูโคสอย่างเดียว แต่ถ้าไม่สมบูรณ์จะเกิดทั้งกลูโคสและโอลิโกแซคคาไรด์ ส่วนเฮมิเซลลูโลสจะได้น้ำตาลหลายชนิด ซึ่งจะขึ้นกับโครงสร้างของน้ำตาลในเฮมิเซลลูโลส สำหรับการย่อยมี 2 วิธีด้วยกันคือ

2.1) การย่อยทางเคมีเป็นวิธีการย่อยเซลลูโลสให้ได้กลูโคสเป็นผลิตภัณฑ์โดยตรงสามารถใช้กรดเข้มข้นหรือกรดเจือจาง ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 40 ขึ้นไป กรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 70 ขึ้นไป กรดซัลฟูริกเจือจางร้อยละ 1 เป็นต้น วิธีนี้ได้ผลผลิตค่อนข้างน้อยเนื่องจากน้ำตาลที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อ และกรดอาจทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลสทำให้ได้ผลผลิตที่ไม่ต้องการ และต้องย่อยที่อุณหภูมิสูงประมาณ 140-160 องศาเซลเซียสทำให้ปฏิกิริยาจะเกิดรุนแรงและไม่เฉพาะเจาะจง

2.2) การย่อยโดยใช้เอนไซม์ ซึ่งการย่อยด้วยวิธีเอนไซม์จะทำปฏิกิริยาย่อยสลายเซลลูโลสได้ผลผลิตเป็นน้ำตาล ส่วนใหญ่เอนไซม์ที่ใช้ในปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลสคือ เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) โดยการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์เป็นปฏิกิริยาที่จำเพาะเจาะจงและไม่รุนแรง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง แต่เนื่องจากใช้ระยะเวลาที่นานเมื่อเทียบกับวิธีการย่อยทางเคมี ส่วนใหญ่เป็นเอนไซม์ที่พบในจุลินทรีย์หลายชนิดทั้งรา และแบคทีเรียที่นิยมนำมาใช้คือ เซลลูเลสที่ได้จาก *Trichoderma viride* หรือภายหลังจัดอยู่ใน *T. reesei*

3) การหมัก (Fermentation)

กระบวนการหมักที่ใช้วัตถุดิบที่เป็นเซลล์โลสและแป้งจะเป็นกระบวนการเดียวกันคือเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ไม่มีอากาศ

2.2.2 คุณสมบัติของเอทานอล

1. เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ระเหยได้ จุดไฟติด มีพีเอชเป็นกลาง
2. มีจุดเดือดที่ 78 องศาเซลเซียส แต่สามารถระเหยได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำ
3. สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ เช่น อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม
4. ให้พลังความร้อนประมาณ 12,800 บีทียูต่อปอนด์

2.2.3 ประโยชน์จากเอทานอล

1. ใช้เป็นตัวทำละลาย (Solvent) ในอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์น้ำหอม และอื่นๆ
2. ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรค เช่น น้ำยาฆ่าเชื้อ
3. ใช้ผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ
4. ใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยนำเอทานอลกับน้ำมันเบนซิลออกเทน 91 ในอัตราส่วนเอทานอล 1 ส่วน กับน้ำมันเบนซิล 9 ส่วน เป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนารถยนต์ให้สามารถใช้ น้ำมันที่มีส่วนผสมของเอทานอล 20 เปอร์เซ็นต์เรียกว่า E20 สำหรับรถบางรุ่นสามารถใช้ น้ำมันเบนซิลที่มีส่วนผสมของเอทานอลถึง 85 เปอร์เซ็นต์เรียกว่า E85

2.2.3 อันตรายจากเอทานอลคุณภาพต่ำจะมีสารปนเปื้อนที่เป็นอันตรายดังนี้

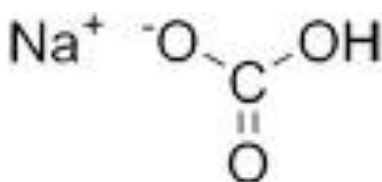
1. แอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลใหญ่หรือ Higher Alcohols ได้แก่ Amyl alcohol, Isobutyl alcohol และ 2-Phenyl ethanol สารเหล่านี้ เป็นสารกระตุ้นอาการแพ้ ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ ระบบประสาท เพิ่มความดัน และทำให้ปวดศีรษะ
2. แอลดีไฮด์ เป็นสารระคายเคืองเยื่อเมือก ทำให้น้ำตาไหล ระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ เพิ่มความดัน ปวดศีรษะ คลื่นเหียน อาเจียน และเป็นสารกระตุ้นอาการแพ้
3. สารฟิวเซลอยด์ ได้แก่ แอลกอฮอล์มวล โมเลกุลสูงๆ เช่น 1-Propanol, 1-butanol, 2-butanol, 2-methyl-1-butanol, 3-methyl-1-butanol, 3-pentanol และ 1-hexanol สารเหล่านี้ เป็นสารกระตุ้นอาการแพ้ เป็นสารเร่งการก่อมะเร็ง
4. เมทิลแอลกอฮอล์หรือเมทานอล เมทานอลในเลือดกับอาการที่ปรากฏ ดังนี้
 - (1) เมทานอลมากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร อาการที่ปรากฏ คือ ปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน
 - (2) เมทานอล 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อาการที่ปรากฏ คือ ตาพร่า ตามัว แพ้แสง ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ อ่อนเพลีย

(3) เมทานอล 100-150 มิลลิกรัมต่อลิตร อาการที่ปรากฏ คือ หายใจติดขัด โคม่า เกิดภาวะ สะสมกรดแลคติกสูงขึ้นจนขาดออกซิเจน

(4) เมทานอล 150-200 มิลลิกรัมต่อลิตร อาการที่ปรากฏ คือ เสียชีวิต

2.3 โซเดียมไบคาร์บอเนต

โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate) (มีชื่อเรียกอื่นว่า เบกกิ้งโซดาหรือเบกกิ้งโซดา (Baking Soda), ผงฟู (Baking Powder), โซเดียม-ไฮโดรเจนไบคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate), โซเดียมแอซิดคาร์บอเนต, ไบคาร์บอเนตออฟโซดา) มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวที่ละลายน้ำได้ดี มีความเป็นด่างเล็กน้อย เมื่อทำปฏิกิริยากับส่วนผสมที่เป็นกรดในส่วนผสมของเหลวก็จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จนทำให้เกิดฟองก๊าซมีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ NaHCO₃ (ภาพประกอบที่ 2-4) (กลาสเวเคมิกอล, 2553)



ภาพประกอบที่ 2-4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโซเดียมไบคาร์บอเนต

2.3.1 ผงฟู (พรีน็อคทอคอม, 2557)

ผงฟู คือ สารเคมีแห้งที่ช่วยทำให้ขนมขึ้นฟู นิยมนำมาใช้ในการอบขนมและดับกลิ่น โดยผงฟูจะมีอยู่หลากหลายชนิดด้วยกัน แต่โดยหลักๆ แล้วจะใช้กันอยู่แค่ 2 ชนิด ได้แก่

(1) เบกกิ้งโซดา (Baking Soda) มีชื่อทางเคมีว่า “โซเดียมไบคาร์บอเนต” (Sodium bicarbonate) จะสลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อน มีข้อเสียคือจะมีสารตกค้าง ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดรสเฝื่อนได้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยเติมกรดลงไปในส่วนผสมอาหารลงไปเพื่อทำให้สารตกค้างหมดไปได้ ตัวอย่างเช่น การเติมนมเปรี้ยว หรือโยเกิร์ต เป็นต้น (เมื่อสูตรใดใช้เบกกิ้งโซดาเป็นส่วนผสม ก็จะต้องมีส่วนผสมอื่นที่มีฤทธิ์เป็นกรดด้วยเสมอ และการทำส่วนผสมแทบทุกครั้งจะต้องใส่ของเหลวที่หลังสุดเสมอ เพื่อให้ก๊าซที่เกิดคงไว้มากพอก่อนเข้าเตา) โดยเบกกิ้งโซดาแบบนี้เราจะนิยมนำมาใช้กับขนมที่มีโกโก้หรือกาแฟ เป็นส่วนผสม เพราะทั้งโกโก้และกาแฟต่างก็มีค่าเป็นด่าง และเบกกิ้งโซดาก็มีค่าเป็นด่าง จึงทำให้เข้ากันได้ดี

(2) ผงฟู (Baking Powder) ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate) + สารที่มีฤทธิ์เป็นกรด (เช่น ครีมทาร์ทาร์ (Cream of tartar) ซึ่งเป็นผลึกผงสีขาวที่ทำมาจากกรดในผลองุ่น) + โซเดียมแอซิดไพโรฟอสเฟต (Sodium acid pyrophosphate) หรือ

สารเจือปนในอาหารที่ทำให้ความเป็นกรด + แป้งข้าวโพด (Corn Starch) (ภาพประกอบที่ 2-5) ทั้งนี้ก็เพื่อคงความเป็นกลางไว้ไม่ให้มันทำปฏิกิริยากัน (ป้องกันไม่ให้สารทั้งสองสัมผัสกันโดยตรง) นั่นคือ เมื่อเอาผงฟูใส่น้ำก็จะเกิดฟองก๊าซ (เพราะมีกรดที่พร้อมทำปฏิกิริยาอยู่แล้ว) ผงฟูชนิดที่โดนน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาทันที (ชนิดนี้เรียกว่า “ผงฟูกำลังหนึ่ง” หรือ Single-acting) ส่วนอีกแบบนั้นนอกจากจะเกิดปฏิกิริยาตอนผสมกับน้ำหรือของเหลวแล้ว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (เข้าเตาอบ) ก็จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นอีกครั้งหนึ่ง (ชนิดนี้เรียกว่า “ผงฟูกำลังสอง” หรือ Double-acting)

ทั้งผงฟู (Baking Powder) และเบกกิ้งโซดา (Baking Soda) ก็ล้วนแต่เป็นสารที่ช่วยทำให้ขนมขึ้นฟู แต่โดยมากแล้วจะนำมาใช้ในโอกาสที่แตกต่างกัน (เบกกิ้งโซดาจะหาซื้อได้ยากกว่าผงฟู) โดยผงฟูสามารถนำมาใช้แทนเบกกิ้งโซดาได้ แต่เบกกิ้งโซดาเดี่ยวๆ จะไม่สามารถนำมาใช้แทนผงฟูได้ แต่ต้องเพิ่มสารเป็นกรดเข้าไปด้วย (ผงฟู ก็คือ เบกกิ้งโซดา แต่ผงฟูจะมีปริมาณที่จะเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าเบกกิ้งโซดา 4 เท่า อธิบายได้ง่ายๆ คือ เบกกิ้งโซดา จะมีความเข้มข้นมากกว่าผงฟูประมาณ 4 เท่า ถ้าจะใช้ผงฟูแทนเบกกิ้งโซดา ก็ให้กะใช้ตามความเหมาะสม)

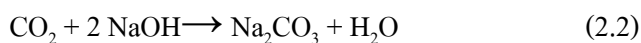


ภาพประกอบที่ 2-5 โซเดียมไบคาร์บอเนตที่ในการงานวิจัย

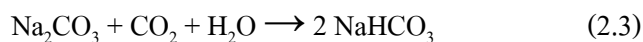
2.3.2 กระบวนการผลิตผงฟู

NaHCO_3 เตรียมได้จากกระบวนการโซลเวย์ (Solvay process) โดยใช้มีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมคาร์บอเนตและน้ำ ดังสมการที่ 2.2

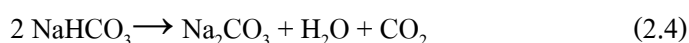


2. จากนั้นเติมคาร์บอนไดออกไซด์ให้ไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมคาร์บอเนต ก็จะได้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต หรือผงฟูตกตะกอนลงมาเมื่อมีความเข้มข้นมากเพียงพอต่อสมการที่ 2.3

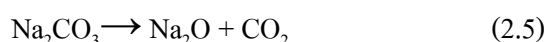


2.3.3 การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Thermal decomposition)

เมื่อผงฟูได้รับความร้อนมากกว่า 70 องศาเซลเซียส จะค่อยๆ สลายตัวไปเป็นโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปฏิกิริยาการสลายตัวนี้จะเกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 2.4



หากเผาโซเดียมคาร์บอเนตต่อที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ก็จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ 2.5



2.3.4 การนำไปใช้งาน (Applications)

ที่พบได้ทั่วไปคือ ใช้ในการทำอาหาร ทำเบเกอรี่ ซึ่งผงฟูนี้จะใช้เป็นแหล่งให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการสลายตัว ในขั้นตอนการอบเบเกอรี่ ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายใน ทั้งนี้สามารถผสมผงฟูเป็นส่วนประกอบของเบเกอรี่ชนิดต่างๆ และสามารถทิ้งส่วนผสมนี้ไว้โดยที่ไม่เกิดก๊าซ CO_2 ก่อนขั้นตอนการอบได้ นอกจากนี้ยังใช้ปรับสภาพสระว่ายน้ำ หรือตู้ปลาให้มีความเป็นกลาง เนื่องจากการเติมคลอรีนที่มากเกินไปทำให้สระว่ายน้ำมีความเป็นกรดมากเกินไป ผงฟูยังมีคุณสมบัติเป็น เบสอ่อน มีความสามารถในการทำความสะอาดและดูดซับกลิ่น สลายตัวให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่อได้รับความร้อนมากกว่า 70 องศาเซลเซียส

2.3.5 ประโยชน์ของโซเดียมไบคาร์บอเนต

(1) ใช้ผลิตภัณฑ์ผิวใหม่ให้สดใสมากยิ่งขึ้น ด้วยการใส่เบกกิ้งโซดา 3 ส่วน และน้ำ 1 ส่วน นำมาผสมกันใช้เช็ดถูบริเวณที่ต้องการ แล้วค่อยล้างออก

(2) การทำขนมปังให้ฟูน่ารับประทาน จะนิยมใช้ผงฟูหรือโซเดียมไบคาร์บอเนตมาใช้ในการทำขนมปังแทนการใช้ยีสต์ เพราะเมื่อผงฟูผสมกับน้ำก็จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่นเดียวกับการใช้ยีสต์ แต่ผลเสียของผงฟูก็คือ หากใส่มากเกินไปก็จะทำให้มีรสฝืดเหนียว และการฟูของขนมปังก็จะหยابกว่าการใช้ยีสต์ แต่มีข้อดีก็คือ ใช้ได้ง่ายกว่าและเก็บรักษาไว้ได้นานกว่า

(3) ใช้ดับไฟในกระทะ ในกรณีที่มีน้ำมันกระเด็นติดไฟในขณะที่ทำอาหาร หรือว่าไฟติดกระทะ หากเราใช้น้ำเทลงไปบนน้ำมันที่ร้อนๆ จะทำให้ไฟลุกมากยิ่งขึ้น (เนื่องจากน้ำมันกระเจา) แต่ถ้าเราใส่เบกกิ้งโซดาเทลงไปตรงๆ เบกกิ้งโซดาเมื่อถูกความร้อนก็จะปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา จึงช่วยทำให้ไฟลดน้อยลงได้

(4) ใช้ทำเป็นน้ำยาล้างสารพิษจากผักผลไม้ ด้วยการใส่เบกกิ้งโซดา 1/2 ช้อนโต๊ะผสมกับน้ำ 10 ลิตร แล้วนำผักผลไม้มาแช่ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที เสร็จแล้วค่อยล้างออกด้วยน้ำเปล่าอีก 2 ครั้ง วิธีนี้จะช่วยลดสารพิษตกค้างจากผักได้ถึง 90เปอร์เซ็นต์ (หากล้างไม่สะอาด การได้รับเบกกิ้งโซดาในปริมาณมากจนเกินไปก็อาจทำให้ท้องเสียได้)

(5) ใช้ทำน้ำยาทำความสะอาดเตาไมโครเวฟ ด้วยการใส่เบกกิ้งโซดา 4 ช้อนโต๊ะผสมกับน้ำอุ่นอีก 1 ลิตร แล้วนำมาผ้ามาชุบแล้วเช็ดทำความสะอาดภายในเตาไมโครเวฟ คราบสกปรกก็จะเช็ดออกได้อย่างง่ายดาย

(6) ผงฟูมีอนุภาคเล็กเป็นรูปทรงผลึกที่อ่อนนุ่ม จึงนำมาใช้ในการขัดถูได้ดี อีกทั้งยังช่วยลดกลิ่นเหม็น ความชื้น ฆ่าเชื้อโรค ปรับค่าความเป็นกรดด่าง และไม่กัดกร่อนผิวภาชนะ จึงสามารถนำมาใช้กับบ้านเรือนได้อย่างดี เช่น ใช้ทำความสะอาดหน้าต่างก็ให้ขจัดคราบสกปรกบนขอบและบานหน้าต่างด้วยฟองน้ำเปียกๆ ก่อนแล้วโรยด้วยผงฟูเล็กน้อย แล้วล้างด้วยฟองน้ำและเช็ดให้แห้ง ถ้าใช้ล้างหน้าต่างบานเกล็ดก็ให้ใช้น้ำอุ่นที่ผสมกับผงฟู 3/4 ถ้วยตวง ราดน้ำให้เปียกทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที แล้วใช้แปรงขัดออก ถ้าใช้ล้างหน้าต่างอลูมิเนียม ก็ให้ใช้แปรงเปียกๆ จุ่มลงในผงฟูแล้วเอามาขัดออก และใช้ฟองน้ำหรือผ้านุ่มๆ ล้างให้สะอาด หรือถ้าใช้ทำความสะอาดงานไม้ ฝาผนัง หรืออุปกรณ์เครื่องใช้ก็ได้เช่นกัน (ใช้ผงฟูผสมกับน้ำส้มสายชูและน้ำอุ่น) ถ้ามีรอยด่างเป็นวงหรือรอยจุกบนเฟอร์นิเจอร์ไม้ หากเกิดความร้อนบางครั้งก็อาจขัดออกได้ด้วยการผสมกับยาสีฟันและผงฟูอย่างละเท่ากัน แล้วใช้ผ้านุ่มๆ เช็ดออกอย่างเบาๆ และยังใช้ในผลิตภัณฑ์ขัดเงาได้อีกด้วย หากจำเป็น นอกจากนี้ยังใช้ขจัดคราบหยดน้ำมันพื้นไม้ได้อีกด้วย ด้วยการใส่ผงฟูกับผ้าจี้รวหมาดๆ แล้วเช็ดออก แต่จงจำไว้ว่าเครื่องเรือนที่ทำจากไม้ไม่ควรทำให้เปียก

(7) ใช้ปรับสภาพของสระว่ายน้ำหรือตู้ปลาให้มีความเป็นกลาง เนื่องจากการเติมคลอรีนมากเกินไปและทำให้สระว่ายน้ำมีความเป็นกรดมากเกินไป

(8) ใช้ล้างแปรงและหวี ด้วยการใส่เบกกิ้งโซดา 1 ช้อนชา นำมาผสมกับน้ำอุ่นในชามอ่างเล็กๆ แล้วนำแปรงหรือหวีมาแช่ทิ้งไว้ แล้วนำมาล้างอีกครั้งหนึ่ง วิธีนี้จะช่วยทำให้คราบต่างๆ ที่ติดอยู่ตามซอกหลุดออกมาได้โดยง่าย

(9) ใช้ดับกลิ่นอับของเสื้อผ้า ด้วยการใส่เบกกิ้งโซดาครึ่งถ้วยหรือประมาณ 8 ช้อนโต๊ะ นำมาผสมกับผงซักฟอกชนิดน้ำในปริมาณที่จะใช้ แทนที่จะใช้สารฟอกขาวชนิดคลอรีน 1 ถ้วยเต็มๆ แต่สามารถใช้เบกกิ้งโซดาเพียงครึ่งถ้วยเพื่อใช้แทนได้ ถึงแม้เบกกิ้งโซดาจะใช้ซักเสื้อผ้าได้ แต่ก็ไม่ได้มีประสิทธิภาพเท่ากับผงซักฟอก เบกกิ้งโซดาจึงเป็นเพียงส่วนเสริมที่นำมาใช้ทำให้ผ้าสะอาดมากขึ้นเท่านั้น

(10) ใช้ในการปรับสภาพวัตถุดิบทางการเกษตรเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการย่อยและการหมักต่อไป

2.4 กรดอะซิติก

กรดอะซิติกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กรดเอทานอิก (Ethanoic acid) มีสูตรทางเคมีคือ CH_3COOH เป็นกรดอินทรีย์ (Organic acid) ชนิดหนึ่งที่เป็นส่วนผสมของน้ำส้มสายชูและยังเป็นสารเคมีที่สำคัญในการทำปฏิกิริยาเคมี เพื่อผลิตสารอนุพันธ์ของกรดอะซิติก เช่น ไวนิลอะซิเตท (Vinyl acetate) กรดเทเรฟทาอิก (Terephthalic acid, TPA) อะซิเตทเอสเทอร์ (Acetate ester) และอะซิติกแอนไฮไดรด์ (Acetic anhydride) รวมถึงเซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น กรดอะซิติกสามารถผลิตได้จากกระบวนการทางเคมี ได้แก่ วิธีเมทานอลคาร์บอนิลเลชัน (Methanol carbonylation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรม วิธีเอทิลีนออกซิเดชัน (Ethylene oxidation) และวิธีอะซีทัลดีไฮด์ออกซิเดชัน (Acetaldehyde oxidation) และกระบวนการทางชีวภาพโดยการหมัก (Fermentation) โดยสองวิธีหลังนี้สามารถใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นได้ (ไทยอิตทอเรียล, 2555)

สำหรับปริมาณการผลิตกรดอะซิติกในประเทศไทย พบว่า ยังมีไม่เพียงพอต่อความต้องการทำให้ประเทศไทยต้องนำเข้ากรดอะซิติกจากต่างประเทศ โดยในปี 2548 มีปริมาณนำเข้า 90,761 ตัน มีมูลค่าประมาณ 2,500 ล้านบาท โดยกรดอะซิติกจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกรดเทเรฟทาอิก (TPA) สำหรับใช้ในการผลิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท (Polyethyleneterephthalate; PET) ที่ใช้ทำขวดพลาสติก ซึ่งมีความต้องการกรดอะซิติกประมาณ 157,200 ตันต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 80 ของปริมาณการใช้ทั้งหมด รองลงมาเป็นการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมสีและยา เป็นต้น (ศูนย์ข้อมูลวัตถุดิบอินทรีย์และเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ, 2557)

2.4.1 ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยาเคมี

- ความคงตัวทางเคมี : สารนี้มีความเสถียร
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : น้ำ ความร้อน สารออกซิไดซ์รุนแรง สารทำปฏิกิริยารุนแรงกับเบส
- สภาพที่ควรหลีกเลี่ยง : ความชื้น
- สารเคมีอันตรายจากการสลายตัว : เกิดควันของคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ อัลดีไฮด์และคีโตน
- อันตรายจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ : ไม่เกิดขึ้น

2.4.2 การเกิดอัตรักภัยและการระเบิด

- สารนี้เป็นของเหลวไวไฟ
- สารทำปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำ อาจเป็นอันตรายต่อบุคคล

2.4.3 การจัดเก็บ

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- เก็บสารไว้ที่อุณหภูมิห้องและแห้ง
- เก็บให้ห่างจากความร้อน เปลวไฟ อุณหภูมิสูง หลีกเลี่ยงน้ำ
- จัดให้มีฝักบัวอาบน้ำ และอ่างล้างหน้าในบริเวณที่มีการใช้ และเคลื่อนย้ายสาร

2.4.4 ประเภทของน้ำส้มสายชู

น้ำส้มสายชูจัดเป็นอาหารที่กำหนดคุณภาพหรือมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 204) พ.ศ.2543 เรื่อง น้ำส้มสายชู ประเภทของน้ำส้มสายชูนั้นแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

1. น้ำส้มสายชูหมัก คือ น้ำส้มสายชูที่ได้จากการหมัก เมล็ดธัญพืชเช่น ข้าวข้าวโพด ผลไม้ เช่น สับปะรด แอปเปิ้ล หรือ น้ำตาลกากน้ำตาล (molass) วัตถุดิบที่มี น้ำตาล (sugar) เช่น ผลไม้ต่างๆ เป็นอาหารของยีสต์ได้โดยตรง ส่วน วัตถุดิบที่มีสตาร์ช (starch) เช่น ข้าวจะต้องเปลี่ยนเป็น โมเลกุลของน้ำตาลก่อน

การผลิตน้ำส้มสายชูหมัก เป็นการหมัก สองขั้นตอน คือ การหมักน้ำตาล ให้เกิด แอลกอฮอล์ (alcoholic fermentation) โดยใช้ยีสต์ (yeast) ตามด้วยการหมักแอลกอฮอล์ให้เกิด กรดอะซิติก (acetic acid fermentation) ด้วยแบคทีเรียในกลุ่ม Acetobacter และ Gluconobacter ใน ภาวะที่มีออกซิเจน น้ำส้มสายชูที่หมัก จะใส ไม่มีตะกอน ยกเว้นตะกอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีกลิ่นหอมตามกลิ่นของวัตถุดิบ มีรสชาติดี มีรสหวานของน้ำตาลที่ตกค้างมีกลิ่นของวัตถุดิบที่ใช้ในการหมัก ความเข้มข้นขึ้นอยู่กับ ชนิดและปริมาณน้ำตาลของวัตถุดิบที่ใช้ในการหมัก และมีปริมาณ กรดน้ำส้ม (acetic acid) ไม่น้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์

2. น้ำส้มสายชูกลั่น เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเอทิลแอลกอฮอล์กลั่นเจือจาง (Dilute Distilled Alcohol) มาหมักกับเชื้อน้ำส้มสายชู หรือเมื่อหมักแล้วนำไปกลั่น (distillation) หรือได้จากการนำน้ำส้มสายชูหมักมากลั่น น้ำส้มสายชูกลั่นจะต้องมีลักษณะใส ไม่มีตะกอนและมีปริมาณกรดน้ำส้ม ไม่น้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์

3. น้ำส้มสายชูเทียม เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเอกรดน้ำส้ม (Acetic acid) ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นทางเคมี เป็นกรดอินทรีย์มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนมีความเข้มข้นประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์มาเจือจางจนได้ปริมาณกรด 4-7 เปอร์เซ็นต์ลักษณะใส ไม่มีสี กรดน้ำส้มที่นำมาเจือจางจะต้องมีความบริสุทธิ์สูงเหมาะสมที่จะนำมาเป็นอาหารได้และน้ำที่ใช้เจือจางต้องเหมาะสมที่จะใช้ดื่มได้

2.5 คลื่นไมโครเวฟ(ชวาน,2545)

2.5.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากถึง 2,450 ล้านรอบต่อวินาทีที่มีลักษณะคล้ายกับคลื่นวิทยุแต่มีความถี่ที่สูงกว่าหัวใจสำคัญของเตาไมโครเวฟคือตัวแม่กนิตรอนที่จะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟและคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นความถี่สูงไม่ใช่ว่ารังสีจึงไม่กระจาย

ระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟคลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้าสู่อาหารจากทุกทิศทางโดยรอบของผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายไปสู่อาหารเมื่อคลื่นไปกระทบอาหารทำให้โมเลกุลของอาหารเกิดการสั่นและเสียดสีกันก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว ลักษณะเช่นเดียวกับการที่เราใช้มือถูกันไปมาเร็วๆจะรู้สึกร้อนขึ้นมาทันที

จากคุณสมบัติเด่นของคลื่นไมโครเวฟที่ทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็วจึงเป็นการรักษาคุณค่าของอาหารไว้อย่างครบถ้วนไม่ว่าจะเป็นการหุงต้มอบนึ่งปิ้งย่างทอดและคุณสมบัติพิเศษที่ได้รับมากกว่าการประกอบอาหารด้วยวิธีดั้งเดิมหลายประการอาทิความสะอาดรวดเร็วประหยัดปลอดภัยและไร้เขม่าควันไฟ

2.5.2 คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเด่น 3 ประการคือ

1)การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟ สามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระจก ไม้ และพลาสติกได้เพราะภาชนะดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะจึงเป็นภาชนะที่ใช้ได้ดีในเตาไมโครเวฟ

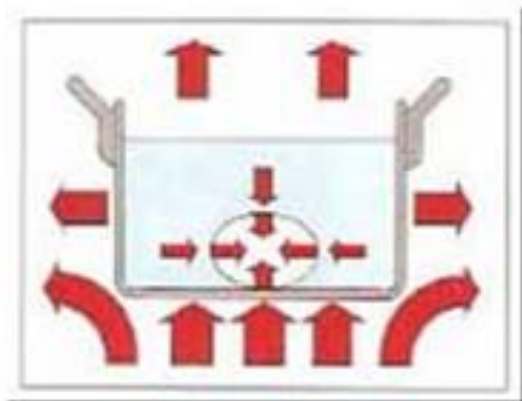
2)สะท้อนกลับ (Reflection) คลื่นไมโครเวฟเมื่อไปกระทบกับภาชนะที่เป็นโลหะ หรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทะลุผ่านภาชนะดังกล่าวได้ จะสะท้อนกลับหมด ดังนั้นอาหารที่ใส่ในภาชนะดังกล่าวก็จะไม่สุก

3)การดูดซึม (Absorption) ปกติอาหารโดยทั่ว ๆ ไป จะประกอบด้วยน้ำ โมเลกุลของน้ำในอาหาร จะดูดซึมคลื่นไมโครเวฟ ทำให้อาหารร้อนอย่างรวดเร็ว และอีกนัยหนึ่ง เมื่อโมเลกุลของน้ำดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวในทันที ไม่สะสมในอาหาร

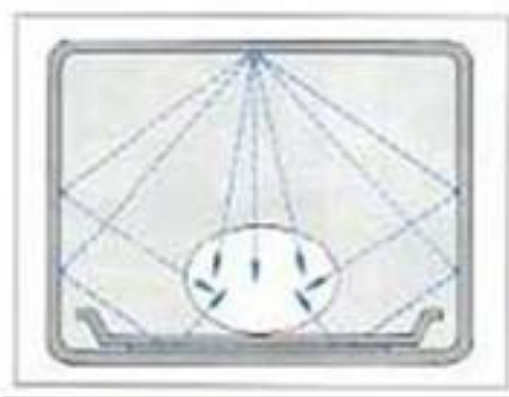
2.5.3 หลักการให้ความร้อน

การประกอบอาหารด้วยเตาไมโครเวฟนี้ แตกต่างจากการประกอบอาหารด้วยเตาอบธรรมดา (ดังภาพประกอบที่ 2-6) คือเตาอบธรรมดาให้พลังงานความร้อนโดยเปลวไฟแบบเตาอบแก๊สหรือความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อาหารสุกโดยการถ่ายเทความร้อนคือการนำ การพาและการแผ่รังสี แต่เตาไมโครเวฟ (ดังภาพประกอบที่ 2-7) ทำให้อาหารสุกโดยคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูง ทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่นๆต่อไป จนเกิด

เป็นพลังงานจลน์และพลังงานจลน์นี้เองจะกลายสภาพเป็นพลังงานความร้อน จึงทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็วและเร็วกว่าการประกอบอาหารด้วยระบบอื่นๆ โดยไม่เสียพลังงานความร้อน



ภาพประกอบที่ 2-6 แสดงการให้ความร้อนแบบธรรมชาติ



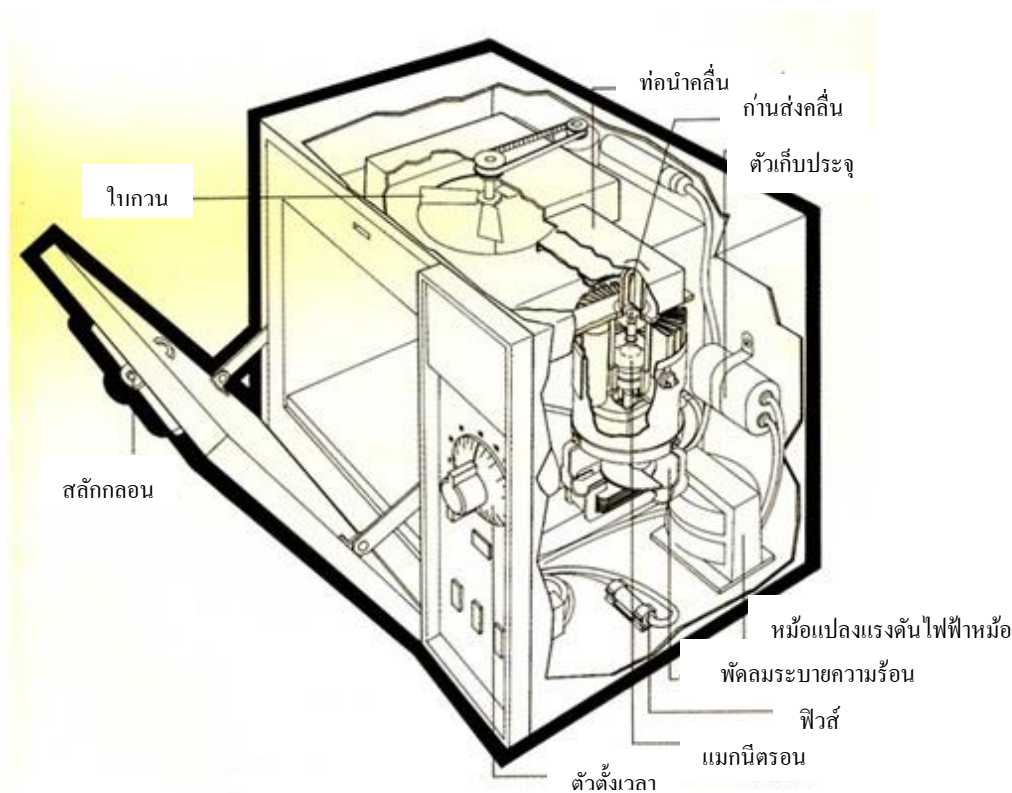
ภาพประกอบที่ 2-7 แสดงการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ

2.5.4 การรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ

อันตรายที่ได้รับจากคลื่นไมโครเวฟที่รั่วออกจากเตาอบไมโครเวฟ ตามกฎหมายของประเทศสหรัฐอเมริกา นั้นควบคุมการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟให้มีได้ไม่เกิน 1 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่ 5 เซนติเมตรจากเตาอบใหม่ (เตาอบเก่า นั้นให้มีได้ 5 เท่า) โดยปกติแล้วโอกาสที่เตาอบไมโครเวฟจะมีคลื่นรั่วออกมาเกินจากปริมาณที่กำหนดนี้จะมีน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับโทรศัพท์มือถือ (cellular phone) GSM ซึ่งแผ่คลื่นถึง 1 วัตต์ที่ 1800 เมกะเฮิรต์ซึ่งเท่ากับ 2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรที่ 5 เซนติเมตร ซึ่งอันตรายจากคลื่นจากโทรศัพท์มือถือนี้ยังไม่เป็นที่แน่ชัด และยังเป็นข้อถกเถียงกันอยู่

2.5.5 ขนาดความจุของเตาอบไมโครเวฟ

ขนาดความจุของเตาอบไมโครเวฟก็ถือเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกซื้อของผู้บริโภค เนื่องจากขนาดความจุจะสัมพันธ์กับระดับราคาและระดับการใช้พลังงานความจุที่มีขายในตลาด เริ่มต้นตั้งแต่ 17 ลิตรจนถึง 33 ลิตรมีระดับการใช้พลังงานตั้งแต่ 600 วัตต์ จนถึง 1450 วัตต์โดยขนาดความจุที่น้อยกว่าก็จะใส่ภาชนะและอาหารได้ไม่มากนักและกำลังวัตต์ที่ต่ำก็ต้องใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนที่นานขึ้นด้วยความจุที่ถือว่าเป็นที่นิยมกันคือความจุประมาณ 22-23 ลิตรซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานทั่วไปโดยลักษณะทั่วไป และส่วนประกอบภายในของเตาไมโครเวฟแสดงดังภาพประกอบที่ 2-8



ภาพประกอบที่ 2-8 แสดงลักษณะทั่วไปและส่วนภายในของเตาอบไมโครเวฟ
(ที่มา: <http://www.rmutphysics.com/charud/specialnews/5/microwave.>)

2.6 ยีสต์ขนมปัง (วานัสยา, 2545)

ยีสต์ขนมปัง (Baker's yeast) อยู่ในสารพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* เป็นยีสต์ที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากให้คุณภาพของขนมปังที่ดี แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1) ยีสต์สด (Fresh หรือ Compressed yeast) เกิดจากการนำยีสต์ขนมปังมาอัดเป็นก้อนคล้ายเนย ลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อนค่อนข้างขาว มีความชื้นประมาณร้อยละ 70 จึงควรเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 2-5 องศาเซลเซียส

2) ยีสต์แห้ง (Instant dry yeast) เป็นการนำยีสต์สดมาคั้นน้ำออกจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 5-10 ยีสต์แห้งที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดมีด้วยกัน 3 ประเภท คือยีสต์เม็ด เกิดจากการนำยีสต์สดมาอบแห้งแล้วอัดเป็นเม็ดกลมๆ ยีสต์ผง เกิดจากการนำยีสต์สดที่มีโปรตีนสูงมาทำแห้งอย่างรวดเร็ว Protective active yeast เป็นการนำยีสต์เม็ดมาเติมสารกันหืน ทำให้สามารถเก็บรักษาในสภาวะปกติได้

3) บัลค์ยีสต์ มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ มีวิธีการผลิตเช่นเดียวกับการผลิตคอมเพรสยีสต์ และมีองค์ประกอบเหมือนคอมเพรสยีสต์

4) แอททีฟดรายยีสต์ ยีสต์ขนมปังที่อยู่ในรูปของยีสต์แห้งที่วางไว้ในแชลล์อยู่ในระยะพักตัว และจะกลับมามีชีวิตปกติใหม่เมื่อทำให้มีความชุ่มชื้น ยีสต์ขนมปังแบบยีสต์แห้งที่วางไว้ในแชลล์จะมีความยาวกว่ายีสต์สด

เชื้อยีสต์สำหรับการหมักเอทานอลในอุตสาหกรรมขึ้นกับชนิดของคาร์โบไฮเดรตการหมัก แอลกอฮอล์จากน้ำตาลโดยทั่วไป มักจะเหมาะกับเชื้อยีสต์พวก *Saccharomyces* sp. สามารถหมักแอลกอฮอล์จากน้ำตาลแลคโตสได้ เชื้อ *C. utilis* ใช้หมักน้ำตาลทั้งจากโรงงานกระดาษ เนื่องจากเชื้อนี้สามารถใช้น้ำตาลเพนโตสได้ เชื้อ *Pachysolentannophilus* และ *Pichiastipitis* สามารถใช้น้ำตาลไซโลสในการหมักแอลกอฮอล์ได้ (สมหวัง และคณะ, 2534)

ยีสต์ทั้งหมดที่กล่าวมา มีความสามารถในการหมักน้ำตาลชนิดต่างๆ แต่พบว่า *Saccharomyces* sp. เป็นยีสต์ที่ทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่ไม่เหมาะสมได้ดีกว่ายีสต์ชนิดอื่น เป็นยีสต์ที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมการหมักน้ำตาลกลูโคส เป็นสายพันธุ์ที่ได้รับการคัดเลือกจนเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมการหมัก คุณสมบัติที่สำคัญคือสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสสูง มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลได้ดีและยังสามารถหมักน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตสแมนโนส ซูโครส มอลโทส กาแลคโตส และราฟฟิโนส เชื้อที่หมักแอลกอฮอล์จะสังเกตได้จากการเขย่าขวดจะปรากฏเป็นฟองเกิดขึ้นมาก *Saccharomyces* sp. เป็นเชื้อตัวสำคัญ เนื่องจากคุณสมบัติหลายอย่างที่ดีกว่าเชื้ออื่นๆ เซลล์ของ *Saccharomyces* sp. มีลักษณะรูปไข่ ทรงกลม หรือค่อนข้างทรงกระบอก และมีการแบ่งตัวแบบ multipolar budding

2.7 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว(Response surface methodology : RSM)(Bradley, 2007)

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบ RSM หรือ โครงสร้างพื้นผิว เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่มีประโยชน์ในการสร้างแบบหูน และวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากปัจจัยต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น เป็นการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและหาสถานะที่เหมาะสม ซึ่งจะประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักคณิตศาสตร์และสถิติ โดยหลักการนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดยประกอบขึ้นจากตัวแปรอิสระ ซึ่งอาจมีตัวแปรเดียวหรือหลายตัวแปร ในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรอิสระจากผลการทดลองสามารถนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ในรูปผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นผิว การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM มีขั้นตอนดังนี้

การกำหนดตัวแปรที่จะศึกษาประกอบด้วยตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งกระบวนการทางเคมีและชีวเคมีที่มีผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ มากมาย เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ความจำเป็นที่จะต้องเลือกตัวแปรบางตัวที่มีผลกระทบโดยตรง ในการทดลองมีความสำคัญที่ระบุตัวแปรอิสระ จะสามารถกำหนดทิศทางในการพัฒนาระดับความสำคัญของตัวแปรได้ เพราะจะเกี่ยวข้องต่อความสำเร็จในการหาสถานะที่เหมาะสมโดยตรง ผลการทดลองของตัวแปรอิสระแสดงในการพล็อตพื้นผิว (Surface plot) และมีการพล็อตแบบโครงร่าง (Contour plot) โดยการพล็อตแบบโครงร่างจะแสดงรูปร่างและตำแหน่งของการพล็อตพื้นผิวได้แม่นยำขึ้น การ Regression analysis แบบจำลองของสมการกำลังสอง (Quadratic equation) ดังสมการ(2.6)โดยที่ค่า Y เป็นตัวแปรตาม b_0, b_1, b_2, b_3 และ b_{ij} เป็นค่าสัมประสิทธิ์แบบจุดตัด (Intercept) สัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Interaction) ตามลำดับ ขณะที่ X_1 และ X_2 เป็นตัวแปรอิสระ สมการแบบจำลองคณิตศาสตร์จำนวน 3 ตัวแปร

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{23}X_2X_3 + b_{13}X_1X_3 \quad (2.6)$$

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองมีประโยชน์มากเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ การหาสถานะที่เหมาะสมด้วยวิธีดั้งเดิม ได้แก่ การออกแบบด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองมีจำนวนชุดการทดลองน้อยกว่าวิธีดั้งเดิม ซึ่งแบบดั้งเดิมนั้นจะมีจำนวนการทดลองที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ แต่วิธีการตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวมีความเป็นไปได้ที่พบผลกระทบภายใน (Interactive effect) จากตัวแปรอิสระจากกระบวนการทางชีวเคมี ในสมการอย่างง่ายของวิธีการตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวจะเพิ่มความเข้าใจผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ

จึงกล่าวได้ว่าเทคนิค RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์มากต่อการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการทางชีวเคมีและกระบวนการทางเคมี

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Li และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาการใช้ไมโครเวฟในการปรับสภาพซังข้าวโพด และใช้ CaCl_2 62.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยซังข้าวโพดถูกนำมาใช้ในการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟซึ่งทำการออกแบบด้วยโปรแกรม RSM แบบ Central Composite Design (CCD) และใช้ CaCl_2 เพิ่มประสิทธิภาพในการปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยมี CaCl_2 อุณหภูมิและเวลาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยของเอนไซม์จากซังข้าวโพด การย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้ถึง 85.90 เปอร์เซ็นต์ พื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) เพิ่มขึ้น 168.93 เปอร์เซ็นต์ดัชนีผลึกเซลลูโลส (CrI) ลดลง 13.91 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับซังข้าวโพดที่ไม่ปรับสภาพ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตกลูโคสที่มีการปรับสภาพด้วย CaCl_2 ที่อุณหภูมิ 162.10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที และอัตราส่วนที่เป็นของแข็งเป็นของเหลว 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ภายใต้เงื่อนไขมีอัตราส่วนการย่อยสลายของเอนไซม์ให้ได้เซลลูโลส 90.66 เปอร์เซ็นต์ และการนำกลับมาใช้ของกลูโคสเป็น 65.47 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการนี้เกิดได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียสที่จำเป็นสำหรับการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสภายใต้ความดันบรรยากาศ

Saravanan และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพขององค์ประกอบสำหรับเซลล์โดยใช้เชื้อรา *Trichoderma viride* ในการดำเนินการ การเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตเซลล์โดยใช้เปลือกสับปะรดเป็นวัตถุดิบได้ดำเนินการกับวิธีการทางสถิติในการออกแบบการทดลอง การตรวจคัดกรองของสารอาหารและอิทธิพลในการผลิตเซลล์ได้ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรม RSM การออกแบบของ Plackett-Burman ซึ่งพบว่า Avicel แป้งเค้กหัวเหลือง KH_2PO_4 และสารสกัดจากยีสต์มีผลดีสำหรับการผลิตเซลล์ ส่วนประกอบเหล่านี้จะเหมาะสมเมื่อมีความเข้มข้นของ Avicel 26.5 กรัมต่อลิตร แป้งเค้กหัวเหลือง 22.5 กรัมต่อลิตร KH_2PO_4 4.5 สารสกัดกรัมต่อลิตรและยีสต์ 12.3 กรัมต่อลิตร ได้เซลล์สูงสุด 8.61 IU ต่อมิลลิลิตร

Singh และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาฟางข้าวสาลี ซึ่งเป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่มีลิกโนเซลลูโลสมากที่สุด มีส่วนผสมของน้ำตาล จึงเหมาะสำหรับการผลิตเอทานอล ใช้เตาไมโครเวฟปรับสภาพฟางข้าวสาลีที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอลจากยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ซึ่งเป็นยีสต์ที่ผลิตเอทานอลได้ดีที่สุด โดยการย่อยด้วยเอนไซม์ได้ถูกทำการศึกษาโดยใช้กระบวนการทางสถิติแบบ Plackett-Burman design (PBD) เข้ามาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยตัวแปรที่มีความสำคัญ pH (4-7) อุณหภูมิ (20-40 องศาเซลเซียส) ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นทั้งหมด (TRS) (1-10%) และระดับเชื้อเริ่มต้น (1-5%) การศึกษาต่อไปโดย Box Behnken

design (BBD) สำหรับการผลิตเอทานอล ผลผลิตเอทานอลสูงสุดที่ได้รับ 15.6 กรัมต่อลิตร และ อัตราการผลิตเอทานอล 0.43 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมงภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอล เดียวกัน ถูกศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ และได้รับเอทานอลความเข้มข้น 16.4 กรัมต่อลิตร อัตรา การผลิตเอทานอล 0.45 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และสภาวะที่เหมาะสมคือที่พีเอช 5.5 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสระดับ inoculum 3.3 เปอร์เซ็นต์ และ TRS เพิ่มขึ้น 6.5 เปอร์เซ็นต์

Chen และคณะ (2012) ศึกษาประสิทธิภาพของชุดให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ถูกทดสอบ โดยการปรับสภาพด้วยเปลือกข้าวฟ่างหวานผลกระทบของความพรุน องค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาค การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และการประเมินการหมักเอทานอล โดยแบ่งเปลือกข้าวฟ่าง ออกเป็นสามกลุ่ม มีขนาดอนุภาค 9.5-18.0, 4-6 และ 1-2 มิลลิเมตรถูกปรับสภาพด้วย ammonium hydroxide (28 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของสารละลาย) และน้ำในอัตราส่วน 1:0, 5:8 ที่ 100, 115, 130, 145 และ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง วิธี Simon's stain พบว่าการเพิ่มขึ้นของความพรุนของเปลือกข้าวฟ่างหวานกับเปลือกข้าวฟ่างหวานที่ผ่านการปรับสภาพมีการกำจัดลิกนินมากที่สุด (46 เปอร์เซ็นต์) ที่ 160 องศาเซลเซียสกับอีก 90 เปอร์เซ็นต์ ของเซลลูโลสและ 73 เปอร์เซ็นต์ ของเฮมิเซลลูโลสยังคงอยู่ในเปลือกข้าวฟ่างหวาน ผลผลิตที่ดีที่สุดของน้ำตาลกลูโคสและผลผลิตเอทานอล (จากกลูโคสเท่านั้น) ในทุกสภาวะการปรับสภาพที่แตกต่างกันมีค่าเฉลี่ย 42/100 กรัม น้ำหนักแห้งของเปลือกข้าวฟ่างหวานและ 21/100 กรัม น้ำหนักแห้งของเปลือกข้าวฟ่างหวานตามลำดับ ที่ขนาดของเปลือกข้าวฟ่างหวาน 1-2 มิลลิเมตรที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Yi-Huang Chang และคณะ (2012) นำซังข้าวโพดที่ผ่านการอบแห้งไปบดให้ละเอียด ทำ การปรับสภาพโดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตรโดยน้ำหนักแกนข้าวโพดต่อ สารละลายกรดซัลฟิวริก 1 ต่อ 10 เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการปรับสภาพต่อด้วยเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที หลังจากการปรับสภาพนำส่วนที่เป็น ของแข็งไปแช่ในน้ำกลั่น บ่มใน Water bath ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้น นำมาย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส จะได้น้ำตาลรีดิวิซ์ 0.61 กรัมต่อหนึ่งกรัมของซังข้าวโพดแห้ง กลูโคส 0.36 กรัมต่อกรัมของซังข้าวโพดแห้ง และไซโลส 0.17 กรัมต่อกรัมของซังข้าวโพดแห้ง เมื่อ ทำการหมักแบบฟีดแบทช์ โดยใช้น้ำตาลกลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 2 และเติมน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 2 เข้าไปหลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ได้ผลผลิตเอทานอลความเข้มข้น 0.6 กรัม ต่อหนึ่งกรัมของน้ำตาลกลูโคส

Xu และคณะ (2011) ศึกษาการออกแบบโดยโปรแกรม RSM ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพการปรับสภาพฟางข้าวสาลีด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับการผลิตเอทานอล โดยสภาวะ การทดลองจะขึ้นอยู่กับผลการออกแบบการปรับสภาพด้วยโปรแกรม RSM ซึ่งปัจจัยที่ศึกษามี 4

ปัจจัยคือ อัตราส่วนของชีวมวล กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เวลาในการปรับสภาพ พลังงานคลื่นไมโครเวฟ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยมี 3 ความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมี การเรียกคืนเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และการตรวจสอบ ความเข้มข้นของเอทานอลโดยสถานะที่เหมาะสม พบว่าการปรับสภาพที่มีอัตราส่วนของชีวมวลต่อ สารละลายที่ 80 กรัมต่อกิโลกรัมความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 กิโลกรัมต่อ ตารางเมตร พลังงานคลื่นไมโครเวฟ 1000วัตต์สำหรับ 15 นาที ซึ่งได้รับการยืนยันว่าจะเป็นสถานะ ที่เหมาะสม ผลผลิตเอทานอลที่ได้ 148.93กรัมต่อกิโลกรัมของฟางข้าวสาลีที่

Guifen และคณะ (2010) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการปรับสภาพฟางข้าวด้วยกรด อินทรีย์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นตัวช่วย เริ่มจากการอบแห้งผ่านอากาศร้อนและบดให้มีขนาด 0.2 มิลลิเมตรโดยการร่อนตะแกรงเมช 60 นำฟางข้าวที่บดแล้วมาปรับสภาพด้วยกรดเข้มข้น และให้รังสี ไมโครเวฟ 100 ถึง 700 วัตต์ เป็นเวลา 2 ถึง 5 นาที โดยใช้กรด 2 ชนิดในการเปรียบเทียบ คือ กรดอะซิติก (Acetic acid) และกรดโพรไพโอริก (Propionic acid) จากนั้นนำมากรองแบบอัดความ ดันและวางผลิตภัณฑ์ที่ได้ในกล่องอบแห้งสุญญากาศ เพื่อให้ น้ำหนักคงที่ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการปรับ สภาพแล้ว (pH 4 ถึง 5) ย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส 4 มิลลิกรัม เวลา 9 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1 ต่อ 10 ถึง 1 ต่อ 25 จากนั้นนำไปวางใน water bath ที่อุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยา Saccharification ได้น้ำตาลรีดิวซ์เป็น ผลิตภัณฑ์ จากการทดลองพบว่า สถานะที่เหมาะสมที่ให้ น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดคือ ใช้กรดความเข้มข้น ร้อยละ 25 อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเป็น 1 ต่อ 15 ความเข้มข้นของคลื่นไมโครเวฟเป็น 230 วัตต์ และเวลาในการให้ความร้อน 5 นาที ได้อัตราส่วนการกำจัดลิกนินเป็นร้อยละ 46.10 และ 51.54 และได้ น้ำตาลร้อยละ 71.41 และ 80.08 เมื่อใช้กรดอะซิติกและกรดโพรไพโอริกตามลำดับ เมื่อ เทียบกับตัวอย่างแบบลค์ที่ให้ น้ำตาลเพียงร้อยละ 35.28 ดังนั้น กรดโพรไพโอริกให้ น้ำตาลรีดิวซ์ มากที่สุด และลำดับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปรับสภาพเรียงลำดับ ดังนี้ ความเข้มข้นของคลื่น ไมโครเวฟ > อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว > ความเข้มข้นของกรด > ระยะเวลาในการให้ความ ร้อน

Mingjia Zhang และคณะ (2010) นำซังข้าวโพดที่ผ่านการอบแห้งไปบดให้ละเอียด ทำการ ปรับสภาพโดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน โดยน้ำหนักแกน ข้าวโพดต่อสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 ต่อ 10 ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ทำ การปรับสภาพต่อโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดย น้ำหนักแกนข้าวโพดต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 ต่อ 6 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 6 ชั่วโมง ทำการหมักแบบเฟดแบทช์ โดยใช้แกนข้าวโพดร้อยละ 19 ในตอนเริ่มต้น จากนั้น

เติมแกนข้าวโพดร้อยละ 1.5 ทุกๆ 4 ชั่วโมง 4 ครั้ง ได้ผลผลิตเอทานอลความเข้มข้น 83.3 กรัมต่อลิตร

ณัฐฐิยา วัฒนกิจจานุกูล (2552) ปรับสภาพทะลายปาล์มที่ฉีกแล้ว โดยการตัดให้มีขนาดเล็กลง แล้วนำมาผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ในอัตราส่วนเท่ากับ 1 ต่อ 10 ต้มให้เดือดเป็นเวลา 30 นาที นำมากรองแยกทะลายปาล์มเปล่าออกจากของเหลว และนำส่วนที่เป็นของแข็งมาล้างด้วยน้ำให้สะอาดจนค่าพีเอชเป็นกลาง นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบดด้วย Hammer mill โดยใช้ตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร จึงนำมาร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดมากกว่า 16 เมชนำมาวิเคราะห์พบว่า หลังการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 44.1±0.1 เป็น 65.0±0.6 โดยน้ำหนัก คิดเป็นร้อยละ 47.56 เซมิเซลลูโลสลดลงจากร้อยละ 21.3±0.6 เป็น 10.6±0.4 โดยน้ำหนัก และลิกนินลดลงจากร้อยละ 13.7±0.5 เป็น 11.4±0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งคิดเป็นการลดลงของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินเท่ากับร้อยละ 50.18 และ 16.38 ตามลำดับ

ปริยารัตน์ โยวะผุย (2550) ได้ทำการศึกษาการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการทำให้น้ำตาลควบคู่กับการหมักจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ปริมาณแป้งที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลโดยใช้ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 0.25 แล้วนำไปย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส 166.7 มิลลิยูนิต ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติมเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส 333.33 มิลลิยูนิต ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงใส่ *S.cerevisiae* 5048 หมักไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 36 ชั่วโมง ได้ผลผลิตเอทานอล 0.832 กรัมต่อลิตร และ 0.891 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการหมักเพิ่มขึ้นปริมาณเอทานอลที่ได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย

ยุทธศักดิ์ สุบการี (2550) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากเส้นใยปาล์มด้วยวิธี SSF โดยทำการปรับสภาพเส้นใยปาล์มซึ่งมีขนาด 0.75-1.00 มิลลิเมตร ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถที่จะช่วยลดปริมาณลิกนินได้มากกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยสภาวะที่เหมาะสมต้องใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ต้มเป็นระยะเวลา 15 นาที จะได้ปริมาณเซลลูโลส 54.13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ช่วยลดปริมาณลิกนินได้ 44.14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งวิเคราะห์โดยนำเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพเติมสารละลาย Acid detergent และ Decahydronaphthalene ให้ความร้อนจนเดือดเป็นระยะเวลา 10 นาที และลดความร้อนลงอีกเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำสารตัวอย่างไปกรองและอบในครุชีเบิลจนน้ำหนักคงที่ เติมกรดซัลฟูริกลงในครุชีเบิลครั้งหนึ่ง นำไปกรองด้วยเครื่องดูดสุญญากาศ นำไปอบ

และเผา แล้วคำนวณปริมาณลิกนินและเซลลูโลสออกมา จากนั้นนำไปย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูโลส จากเชื้อ *Aspergillusniger*, *Trichodermareesei* และ *Trichodermaviride* ผลการทดลองพบว่า เอนไซม์จากเชื้อ *T.reesei* ให้น้ำตาลรีดิคซ์ และ เปอร์เซ็นต์ Saccharification สูงสุด โดยทำการวัดด้วย วิธี Dinitrosalicylic acid Reagent (DNS) และยังพบว่าเมื่อนำเอนไซม์จากเชื้อ *T. reesei* ผสมกับ เอนไซม์เบต้ากลูโคซิเดสจากเชื้อ *A. niger* สามารถไฮโดรไลซิสเส้นใยปาล์มได้น้ำตาลรีดิคซ์และ เปอร์เซ็นต์ Saccharification มากกว่าการใช้เซลลูโลสเพียงชนิดเดียว หลังจากนั้นทำการศึกษา สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลด้วยวิธี SSF เชื้อที่ใช้หมักคือ *Saccharomyces cerevisiae* โดยใช้เอนไซม์จากเชื้อ *T. reesei* ผสมกับเอนไซม์เบต้า-กลูโคซิเดสจากเชื้อ *A. niger* พบว่าที่เวลา 24 ชั่วโมง pH 5.0 อุณหภูมิการหมัก 35 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณเอทานอล 10.38 กรัมต่อลิตร และมี ผลผลิต 0.19 กรัมต่อลิตร

รัชดาภรณ์ เบนญวัฒน์นันท์ (2550) ได้ทำการศึกษาการผลิตเอทานอลจากหยวกกล้วยโดยใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ด้วยวิธีการหมักแบบกะ ทำการทดลองโดยการนำหยวกกล้วยซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักมาย่อยด้วยกรดเกลือเข้มข้น มีค่าพีเอช 4.5-5.0 เพื่อให้เซลลูโลส เปลี่ยนเป็นแป้งก่อนซึ่งใช้เวลาประมาณ 15-30 นาที หลังจากนั้นนำไปหมักด้วยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* และปรับความหวานที่ระดับความเข้มข้นของน้ำตาล 20 บริกซ์ทำการ หมักเป็นเวลา 5-7 วัน ใช้พีเอชในการหมัก 4.5-5.0 หลังจากนั้นนำเอทานอลที่ผลิตได้กลั่นด้วย เครื่อง Rotary evaporator ได้ปริมาณเอทานอลเฉลี่ย 676.76 มิลลิลิตรและเมื่อนำไปกลั่นลำดับส่วน ได้ผลผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 80.66

Zhu และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟางข้าวด้วยวิธีการใช้ไมโครเวฟร่วมกับการใช้ด่างซึ่งทำการตัดฟางข้าวให้มีความยาว 1 ถึง 2 เซนติเมตร และนำไปล้างทำความสะอาดด้วย น้ำ ตากแดดจนแห้งแล้วนำมาชั่งให้ได้น้ำหนัก 20 กรัม บรรจุลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร เติม โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ลงไปประมาณ 160 มิลลิลิตร นำบีกเกอร์ ดังกล่าวไปวางตรงกลางของเครื่องไมโครเวฟ โดยไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองคือไมโครเวฟรุ่น LG TIANJIN Model WD 700 มีความถี่ 2450 เมกะเฮิรตซ์ กระแสไฟที่ใช้เท่ากับ 700, 500 และ 300 วัตต์ ทำการทดลองเป็นเวลาตั้งแต่ 15 นาที จนถึง 2 ชั่วโมง จากนั้นนำส่วนที่เหลือมาล้างด้วยน้ำจนมี ค่าพีเอชเป็นกลาง นำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน แล้วนำไป บดให้มีขนาดเท่ากับ 10 ถึง 20 เมช หลังจากนั้นนำมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณขององค์ประกอบ หลักของฟางข้าว ซึ่งประกอบด้วย ความชื้น เซลลูโลส ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส จากการทดลอง พบว่าการเตรียมวัตถุดิบโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับด่าง ที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 700 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที และที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 300 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที จะช่วยเพิ่มปริมาณเซลลูโลสและสลาย

ลิกนินกับเฮมิเซลลูโลสได้มากที่สุดและยังช่วยลดปริมาณความชื้นของวัตถุดิบได้มากที่สุดอีกด้วย โดยเมื่อมีการเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนจะเป็นการเพิ่มปริมาณเซลลูโลส ลดปริมาณลิกนิน และความชื้น

เกศมณี ตาดทอง และคณะ (2546) ได้ทำการศึกษาการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับปะรด ทำการทดลองโดยแช่เปลือกสับปะรดที่บดแล้ว ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0-2.5 โมลาร์ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเปลือกสับปะรดต่อสารละลายเท่ากับ 1 ต่อ 10 ที่อุณหภูมิห้อง โดยให้สารละลายท่วมเปลือกสับปะรดตลอดเวลา แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วกรองด้วยผ้า เอาสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ออก แล้วเติมลงไปหมักโดยใช้กับความเข้มข้นเดียวกับที่แช่ ในอัตราส่วนเท่าเดิม นำไปต้มโดยเครื่องทำน้ำอุ่น ที่อุณหภูมิ 50–90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที พบว่าที่ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ แช่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 91.32 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 0.46 และลิกนินร้อยละ 4.09 แล้วนำเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพมาย่อยด้วยลูกแป้งในอัตราส่วนตะกอนเปลือกสับปะรดต่อลูกแป้งเป็น 1.5 ต่อ 0.1 ในน้ำ 7.5 มิลลิลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการวัดหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทุก 12-15 ชั่วโมง แล้วนำไปหมักด้วยเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ปริมาณร้อยละ 5 โดยปริมาตรของสารละลายน้ำตาล ที่พีเอชเริ่มต้น 5.0 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7 วัน ได้ผลผลิตเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 4.55 โดยปริมาตร

J.N. Nigam (1999) ได้ทำการศึกษาการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องจากสับปะรดเหลือใช้ ด้วย *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 24553 โดยปราศจากออกซิเจน ศึกษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ pH 4.5 ได้ผลผลิตเอทานอลสูงสุด (92.5เปอร์เซ็นต์ของทฤษฎี) ที่ได้อยู่ที่อัตราการเจือจาง 0.05 ต่อชั่วโมง ค่าสูงสุดสำหรับปริมาตรเอทานอล และผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพเป็น 3.75 กรัมต่อลิตร-ชั่วโมง และ 0.63 กรัมต่อลิตร-ชั่วโมง ตามลำดับ ผลผลิตเอทานอลสูงสุดที่เฉพาะเจาะจงและอัตราการดูดซึมน้ำตาล พบว่ามีค่า (0.98 กรัมเอทานอลต่อกรัมซับสเตรต-ชั่วโมง) และ (2.54 กรัม น้ำตาลต่อกรัมซับสเตรต-ชั่วโมง) ตามลำดับ

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ

3.1.1 วัตถุดิบ

เปลือกสับประดพันธ์กล้วยแดง จากร้านสับประดกล้วยแดง หลังห้างเทศโก้โลตัส สาขาหน้ามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลาแสดงดังภาพประกอบที่ 3-1



ภาพประกอบที่ 3-1 ลักษณะของเปลือกสับประด

3.1.2 โซเดียมไบคาร์บอเนต(Sodium bicarbonate)ยี่ห้อMcGarrettผลิตโดยบริษัท เจอาร์ เอฟแอนด์บี จำกัด

3.1.3กรดอะซิติก(Acetic acid) ความบริสุทธิ์ 99.7เปอร์เซ็นต์AR1002-P4L Meet A.S.C. Specification

3.1.4ยีสต์ขนมปัง (Baker's yeast) สายพันธุ์*Saccharomyces cerevisiae*ยี่ห้อFermipan Brown

3.1.5 สารเคมีเพื่อการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์

- (1) ฟีนอล(Phenol)Laboratory Grade ผลิตโดย PanreacSintesis
- (2) 3,5-Dinitrosalicylic acid Laboratory Grade ผลิตโดย Sigma
- (3) โซเดียมโปแตสเซียมทาร์เทรต(Sodium potassiumtartrate)Laboratory Grade
- (4) โซเดียมไฮดรอกไซด์(Sodium hydroxide) Laboratory Grade ผลิตโดย Merck
- (5) โซเดียมซัลไฟท์(Sodium sulfite)Laboratory Grade ผลิตโดย Merck

Grade ผลิตโดย Merck

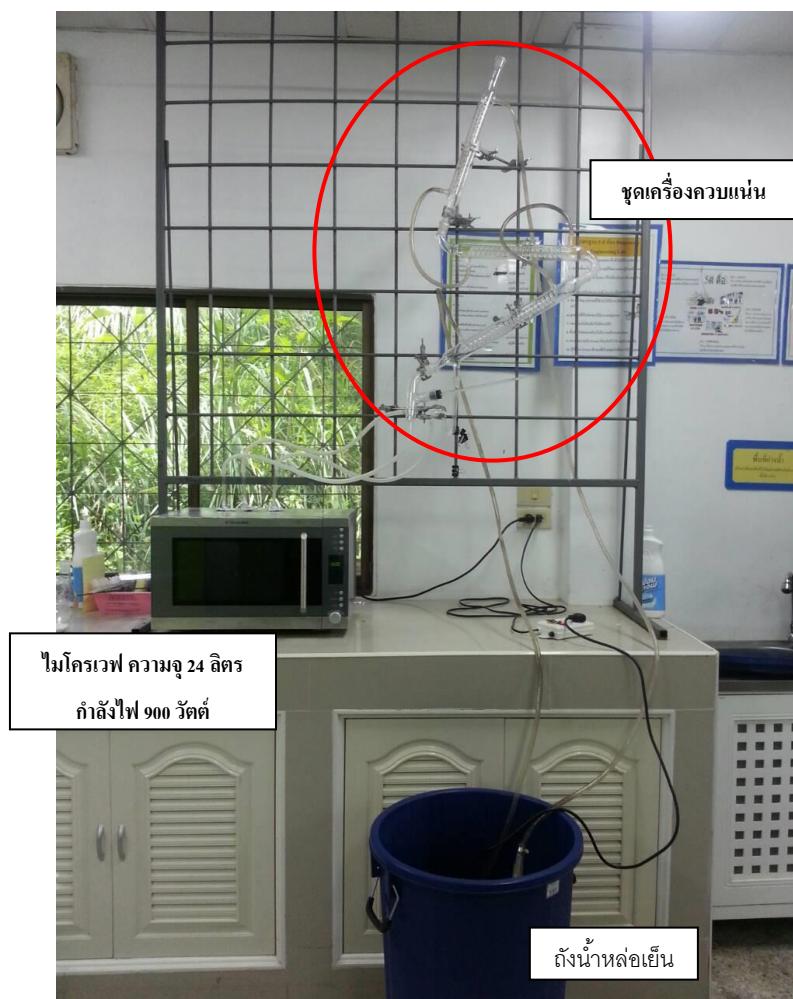
- (6) กลูโคส (Laboratory Grade) ผลิตโดย Ajax Finechem
- (7) เอทานอล (Commercial Grade) ความบริสุทธิ์ 99.9เปอร์เซ็นต์ ผลิตโดยSigma-Aldrich
- (8) สารละลายแอมโมเนีย 25 เปอร์เซ็นต์

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (1) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ใช้สำหรับชั่งตัวอย่างและสารเคมี
- (2) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- (3) เครื่องปั่น (Blender): Moulinex รุ่น MoulinetteS
- (4) เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifuge)

(5) ชุดปรับสภาพและย่อยด้วยไมโครเวฟ Panasonic รุ่น NN-S215MF ขนาด 24 ลิตร 1000 วัตต์ (กำลังไฟฟ้าที่ส่งให้อาหาร 900 วัตต์) แสดงดังภาพประกอบที่ 3-2 ได้จากการสร้างชุดการทดลองในงานวิจัยของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินาฏ จงคง โครงการวิจัยหัวข้อ “การปรับสภาพและย่อยแกนข้าวโพดด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อการผลิตเอทานอล” ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย (ทุนครุณาจารย์) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีการศึกษา 2555 รหัสโครงการ ENG550325S



ภาพประกอบที่ 3-2 ภาพแสดงชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเบื้องต้นสำหรับการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรด (สินินาฏ, 2557)

(6) ตู้ป้อน(Incubator): Sheldon Manufacturing, Inc.แสดงดังภาพประกอบที่ 3-3



ภาพประกอบที่ 3-3 ตู้ป้อน(Incubator) ตู้หมักควบคุมอุณหภูมิ

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.2.1 UV-Visible Spectrophotometer รุ่น HP 8453 เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดแสดงดังภาพประกอบที่ 3-4 โดยมีขั้นตอนในการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ก



ภาพประกอบที่ 3-4 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รุ่น HP 8453

3.2.2.2 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography, GC) รุ่น HP 6890 flame ionization detector เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากกระบวนการหมัก โดยใช้เทคนิคการแยกสารที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวออกจากกันโดยสารตัวอย่างที่มีเอทานอลจะถูกฉีดเข้าสู่ระบบ ต่อจากนั้นจะระเหยกลายเป็นไอ สุดท้ายจะถูกพาด้วยก๊าซเฉื่อยซึ่งเป็น mobile phase ไปยังคอลัมน์ซึ่งเป็น stationary phase เพื่อทำการแยกสารออกจากกัน สารที่แยกได้จะถูกบันทึก เพื่อทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นต่อไปแสดงดังภาพประกอบที่ 3-5 โดยมีสภาวะในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ ก-1



ภาพประกอบที่ 3-5 เครื่อง GC ยี่ห้อ Agilent รุ่น 6890

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาองค์ประกอบของเปลือกสับประรด

นำเปลือกสับประรดบดให้ละเอียดจนมีขนาดไม่เกิน 3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องบดMoulinex แสดงดังภาพประกอบที่ 3-6ส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อการส่งออก (ADCET) คณะอุตสาหกรรมเกษตร และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ นำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณความชื้น ปริมาณเส้นใย ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ซึ่งวิธีการวิเคราะห์แสดงรายละเอียดดังภาคผนวก ก



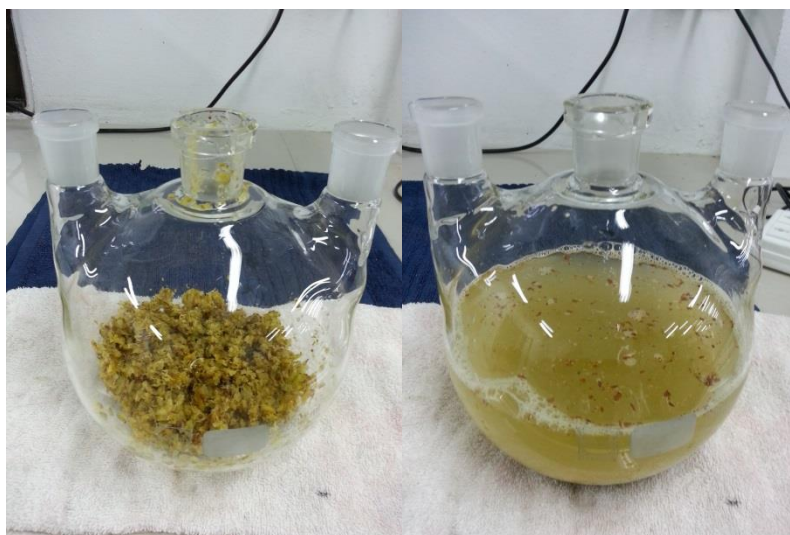
ภาพประกอบที่ 3-6 เปลือกสับประรดหลังบดขนาดไม่เกิน 3 มิลลิเมตร

3.3.2 ศึกษาการปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

3.3.2.1 ศึกษาการปรับสภาพ

นำเปลือกสับประรดบดขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร และน้ำสะอาดใส่ในโถแก้ว3 คอขนาด ความจุ 2 ลิตร แสดงดังภาพประกอบที่ 3-7นำไปให้ความร้อนด้วยชุดปรับสภาพและย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟทำการออกแบบสภาวะการทดลองด้วย RSMและมีปัจจัยสำคัญที่ศึกษาคือ ปริมาณ วัตถุดิบ 100–160 กรัมต่อลิตร (เปลือกสับประรดบดต่อน้ำสะอาด) ระดับการให้ความร้อน 100–900 วัตต์ และระยะเวลา 5–20 นาที แล้วนำผลผลิตที่ได้มาทำการกรองแยกของแข็ง และของเหลวด้วยผ้า

กรองก่อนนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ด้วยเครื่อง UV Visible Spectrophotometer (UV)



ภาพประกอบที่ 3-7 แสดงเปลือกสับประคผสมน้ำเปล่าใน โถ 3 คอ ขนาด 2 ลิตร ก่อนการปรับสภาพ โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

3.3.2.2 ศึกษาการย่อย

นำผลผลิตหลังการปรับสภาพด้วยสภาวะที่เหมาะสม (ภาพประกอบที่ 3-8) ตามข้อ 3.3.2.1 มาทำการย่อยต่อ โดยปัจจัยสำคัญที่ศึกษาคือ ระดับการให้ความร้อน 100–900 วัตต์ และระยะเวลา 5–20 นาที แล้วนำผลผลิตที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ด้วยเครื่อง UV

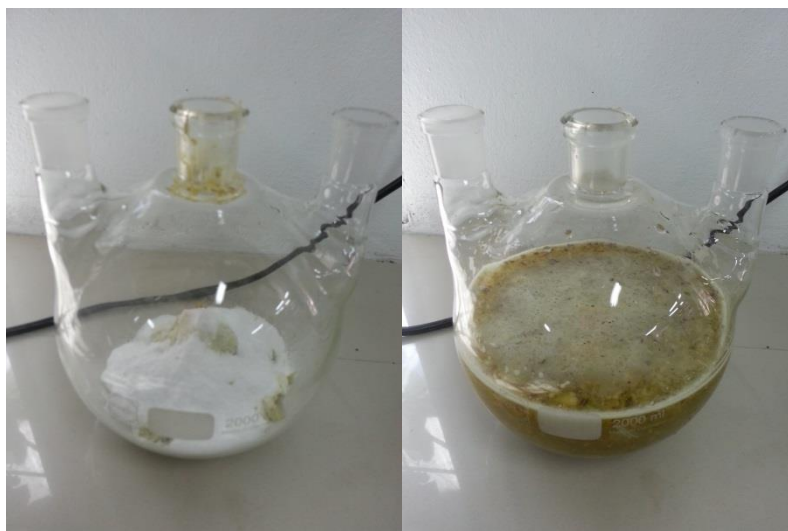


ภาพประกอบที่ 3-8 แสดงผลผลิตหลังการปรับสภาพด้วยน้ำเปล่าก่อนการย่อย

3.3.3 ศึกษาการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปรดด้วยเบสและกรดอินทรีย์

3.3.3.1 ศึกษาการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้งโซดา)

นำเปลือกสับปรดสด โซเดียมไบคาร์บอเนต และน้ำใส่ในโถแก้ว 3 คอ ความจุ 2 ลิตร (ภาพประกอบที่ 3-9) นำไปให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยปัจจัยสำคัญที่ศึกษาคือ ปริมาณวัตถุดิบ 100–160 กรัมต่อลิตร (เปลือกสับปรดสดต่อน้ำสะอาด) สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 1.0-2.5 โมลาร์ระดับการให้ความร้อน 100–900 วัตต์ และระยะเวลา 2–20 นาที แล้วนำผลผลิตที่ได้มาทำการกรองแยกของแข็ง และของเหลวด้วยผ้ากรองก่อนนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ด้วยเครื่อง UV



ภาพประกอบที่ 3-9 แสดงการเตรียมเปลือกสับประรด สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้งโซดา) และน้ำก่อนการปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟ

3.3.3.2 ศึกษาการย่อยด้วยสารละลายกรดอะซิติก

นำผลผลิตที่ได้จากการปรับสภาพด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.3.3.1 (ภาพประกอบ 3-10) มาเติมกรดอะซิติก และให้ความร้อนต่อ โดยปัจจัยสำคัญที่ศึกษาคือสารละลายกรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.5-2.0 โมลาร์ ระดับการให้ความร้อน 100-900 วัตต์ และระยะเวลา 2-20 นาที และนำผลผลิตส่วนของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดด้วยเครื่อง UV



ภาพประกอบที่ 3-10 แสดงผลผลิตหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต

3.3.4 การหมักเอทานอลด้วยยีสต์ขนมปัง

นำผลผลิตหลังการย่อยด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 3.3.2 และหัวข้อที่ 3.3.3 มาศึกษาการหมักในขวดหมัก (Air-locked flask) รูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร (ภาพประกอบที่ 3-11) ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เติมยีสต์ และเติมก๊าซไนโตรเจน (Anaerobic process) เพื่อไล่ออกซิเจนออกจากขวดหมัก แล้วปิดด้วยฝา Air-locked เพื่อป้องกันอากาศเข้า แต่ก๊าซที่เกิดจากการหมักไหลออกสู่ภายนอกได้

ปัจจัยสำคัญที่ศึกษา คือค่า pH เริ่มต้นที่ 4.5-6.5 ปริมาณยีสต์ต่อเปลือกสับประมาณ 2-8 ภายใต้อุณหภูมิห้อง 30-40 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการหมัก 2-8 วัน หลังจากนั้นนำผลผลิตที่ได้ไปกรองด้วยผ้าขาวบางแยกเอาเฉพาะผลผลิตส่วนของเหลว และกรองซ้ำด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อนำผลผลิตส่วนของเหลวไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วยเครื่อง UV และกรองซ้ำด้วย Syringe filter เพื่อหาปริมาณเอทานอลด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC)



ภาพประกอบที่ 3-11 การหมักเอทานอลในขวดหมักขนาด 250 มิลลิลิตร

3.3.5 ขยายขนาดชุดเครื่องมือในการปรับสภาพและย่อยโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดความจุประมาณ 40 ลิตร

อุปกรณ์หลักแสดงดังภาพประกอบที่ 4-2 ประกอบด้วยเครื่องปล่อยคลื่นไมโครเวฟขนาดความจุประมาณ 40 ลิตร สามารถให้กำลังไฟฟ้าขนาด 900 วัตต์ โดยเครื่องไมโครเวฟต่ออยู่กับชุดอุปกรณ์ควมแน่นขนาดความจุประมาณ 1.5 ลิตร ทำการทดลองขยายขนาดการปรับสภาพและย่อยวัตถุดิบในภาชนะบรรจุสารละลาย ขนาด 5 ลิตร ซึ่งมีท่อไอน้ำที่ระเหยจากสารละลายไปยังชุดเครื่องควมแน่น และควมแน่นกลับเข้าภาชนะบรรจุ ทำการทดลองใช้ชุดเครื่องมือ โดยนำสภาวะที่เหมาะสมในหัวข้อที่ 3.3.2 และหัวข้อที่ 3.3.3 มาทำการศึกษา

3.3.6 ประเมินต้นทุนการผลิตเอทานอล

ทำการประมาณต้นทุนการผลิตสำหรับการขยายการผลิตเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาสู่การผลิตเชิงการค้า

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบในเปลือกสับปะรด

ตารางที่ 4-1 แสดงองค์ประกอบของเปลือกสับปะรด (ที่มา: ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อส่งออก (ADCET) คณะอุตสาหกรรม)

องค์ประกอบ	วิธีทดสอบ	ผลการทดสอบ (ร้อยละโดยมวล)
โปรตีน	AOAC (Kjeldahl Method)	1.42
ไขมัน	AOAC (Soxhlet extraction Method)	0.08
ปริมาณความชื้น	AOAC (Loss on Drying at 95-100 °C)	84.89
เถ้า	AOAC	0.84
เส้นใย	Fiber analyzer (ANKOM200)	10.20
แป้ง (Total Carbohydrate)	Calculation	12.77
Energy	Calculation	57.48 kcal
น้ำตาลรีดิวซ์	AOAC (Lane&Eynon)	2.71
น้ำตาลทั้งหมด	AOAC (Lane&Eynon)	0.82

ผลการทดลองดังตารางที่ 4-1 สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าเปลือกสับปะรดมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate) ซึ่งรวมเส้นใยอยู่ด้วยคิดเป็นร้อยละ 84.51 (เมื่อคำนวณด้วยฐานแห้ง) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในการเป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตเอทานอลและองค์ประกอบอื่นที่จะเป็นอุปสรรคสำหรับการย่อยเพื่อผลิตน้ำตาลมีอยู่ปริมาณน้อยคือเถ้าซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของลิกนินจึงน่าจะทำการปรับสภาพและย่อยในการผลิตน้ำตาลสำหรับการหมักเอทานอลได้ง่าย

4.2 การปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

การปรับสภาพคือการทำให้วัตถุดิบประเภทเซลลูโลสหรือคาร์โบไฮเดรตมีความพร้อมในการถูกย่อยเป็นน้ำตาล โดยใช้สารละลายต่างพร้อมกับการให้ความร้อน งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการปรับสภาพเปลือกสับประรด ด้วยการใช้คลื่นไมโครเวฟแทนการให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบธรรมดา ซึ่งจะสามารถช่วยลดระยะเวลาในกระบวนการปรับสภาพ เพื่อสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมได้

งานวิจัยอื่นๆพิจารณาผลได้ของการปรับสภาพโดยต้องการได้ผลผลิตที่มีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุด แต่งานวิจัยนี้จะพิจารณาหาสภาวะของการปรับสภาพที่ได้น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) มากที่สุด เนื่องจากการวิเคราะห์องค์ประกอบเปลือกสับประรดพบว่ามียูคาร์โบไฮเดรตมากกว่าเซลลูโลสและเป็นองค์ประกอบที่มากที่สุด (ตารางที่ 4-1) และจากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าหากเลือกสภาวะเหมาะสมซึ่งให้ปริมาณเซลลูโลสหรือน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) มากที่สุด ผลผลิตหลังการย่อยจะได้น้ำตาลรีดิวซ์ (วัตถุดิบสำหรับการใช้หมักเป็นเอทานอล) น้อยกว่าการเลือกสภาวะที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากตั้งแต่ขั้นตอนการปรับสภาพ (สินินาญ, 2557) และเนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่มีขั้นตอนการล้างน้ำหลังการปรับสภาพจึงสามารถรักษาน้ำตาลรีดิวซ์ไว้ได้โดยผลการออกแบบสภาวะการทดลองด้วย RSM และผลการปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟแสดงดังตารางที่ 4-2

ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆคือปริมาณวัตถุดิบ (เปลือกสับประรด) ต่อ น้ำ 1 ลิตร (x; กรัมต่อลิตร) ระดับการให้ความร้อน (w; วัตต์) และระยะเวลาในการปรับสภาพ (t; นาที) ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพแสดงดังภาพประกอบที่ 4-2 ถึงภาพประกอบที่ 4-4 โดยทั้ง 17 การทดลองที่แสดงดังตารางที่ 4-2

จากผลการทดลองที่ได้จากการทำนายโดยโปรแกรม RSM ถูกใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับร้อยละผลได้ของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่มากที่สุด แบบจำลองของสมการการทดลอง Quadratic Model สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์กับปัจจัยต่างๆแสดงดังสมการที่ (4.1) และทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างชุดคำตอบกับชุดของตัวแปรต้นที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (ร้อยละ)} = & -51.49 + 0.827*x - 0.01743*w + 1.393*t - 0.00298*x*x + \\ & 3.49212E-06*w*w - 0.03381*t*t + 0.000111*x*w - 0.00413*x*t - 0.000371*w*t \end{aligned} \quad (4.1)$$

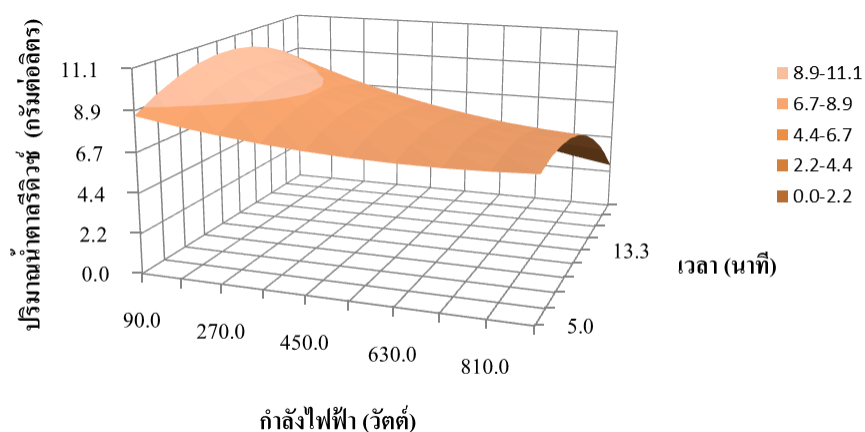
ตารางที่ 4-2 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการปรับสภาพเปลือกสับประดด้วย น้ำเปล่าโดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพ

การทดลองที่	ปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตร(กรัมต่อลิตร)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	
				ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	148	720	17	6.228	5.657
2	130	900	13	5.438	6.698
3	112	720	17	4.248	3.347
4	112	720	8	6.407	5.411
5	148	270	8	9.296	8.573
6	148	270	17	8.025	7.490
7	130	90	13	9.294	10.000
8	130	450	20	4.325	5.209
9	112	270	8	8.421	7.248
10	130	450	13	8.286	8.271
11	148	720	8	9.090	8.245
12	130	450	13	8.286	8.271
13	112	270	17	7.496	6.689
14	130	450	13	8.286	8.271
15	100	450	13	2.740	4.256
16	160	450	13	6.257	7.059
17	130	450	5	6.169	7.602

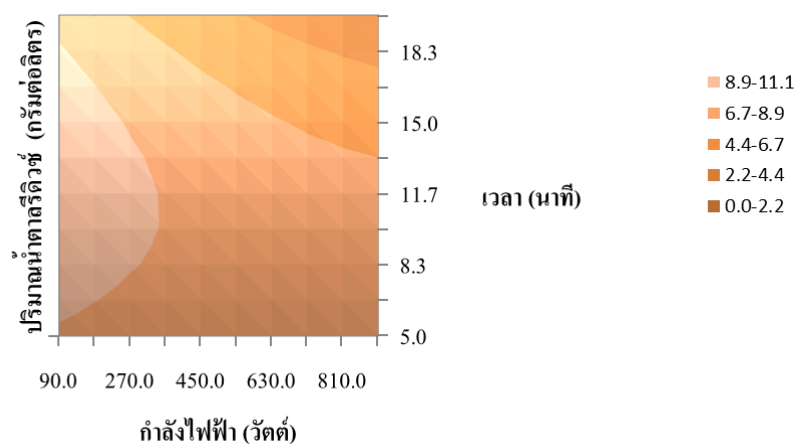
จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(4.1) สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่สภาวะต่างๆ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองและเพื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองว่าเหมาะสมหรือไม่ ผลการดำเนินการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-3 ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแบบจำลอง มีค่าเท่ากับ 0.913 ซึ่งค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 adjusted = 0.800 ที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งจะบอกความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ได้

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยปริมาณเปลือก สับปรดในน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า และระยะเวลาในการปรับสภาพที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ ได้นำเสนอในรูปของกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) และกราฟโครงร่าง (Contour plot) ของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เพื่อคาดคะเนดูแนวโน้มของปัจจัย ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะดังภาพประกอบที่ 4-1 ถึง ภาพประกอบที่ 4-3

(1) ผลของกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาในการปรับสภาพที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)

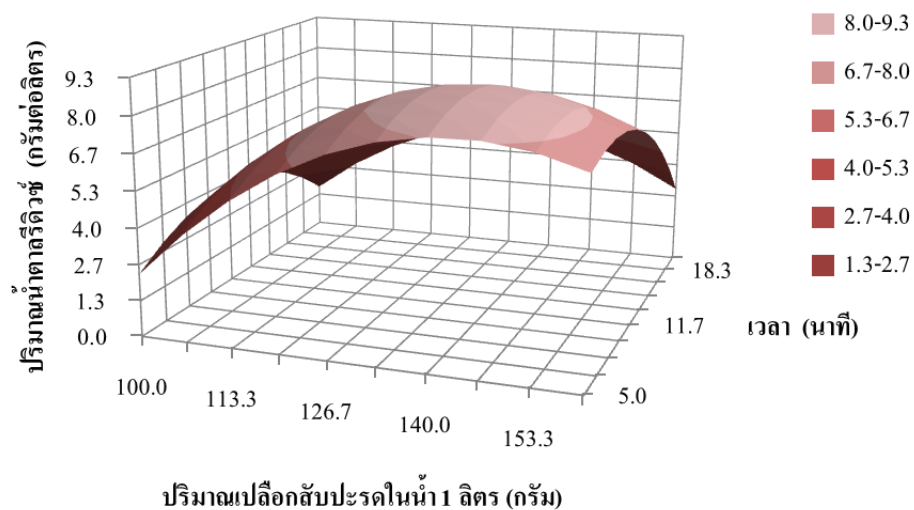


(ข)

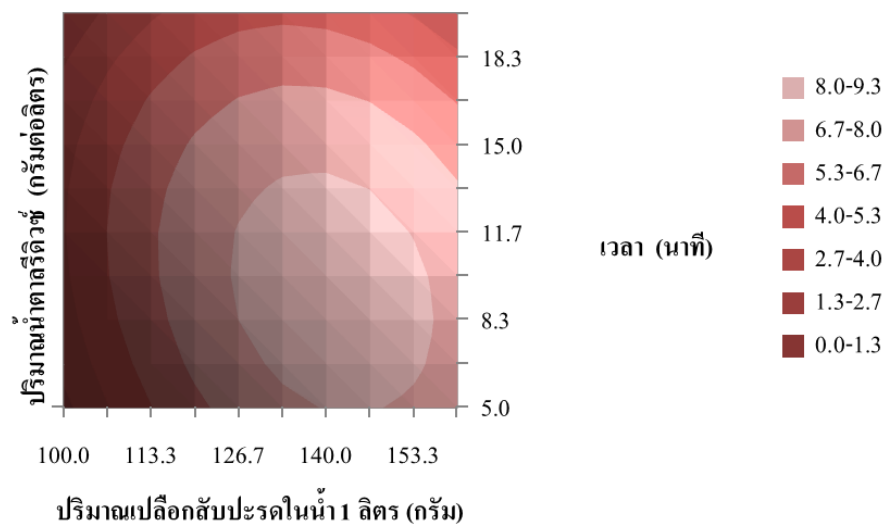
ภาพประกอบที่ 4-1 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า และเวลาที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพมีการใช้ปริมาณเปลือก สับปรด 130 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

ผลของกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาในการปรับสภาพต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-1 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อให้กำลังไฟฟ้าในระดับต่ำ (90-120 วัตต์) ช่วงเวลาการปรับสภาพ 10-15 นาที จะให้ผลผลิตเป็นปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด (10.0-12.0 กรัมต่อลิตร)

(2) ผลของปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรและระยะเวลาในการปรับสภาพที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)

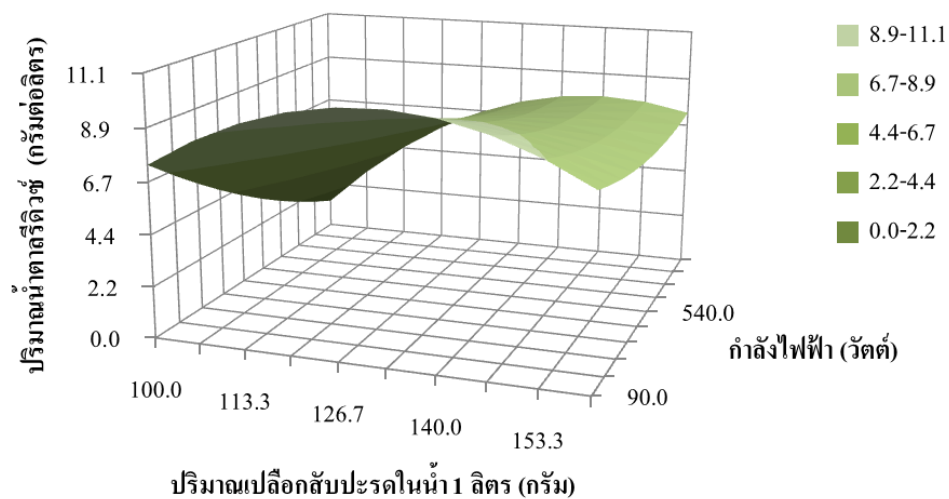


(ข)

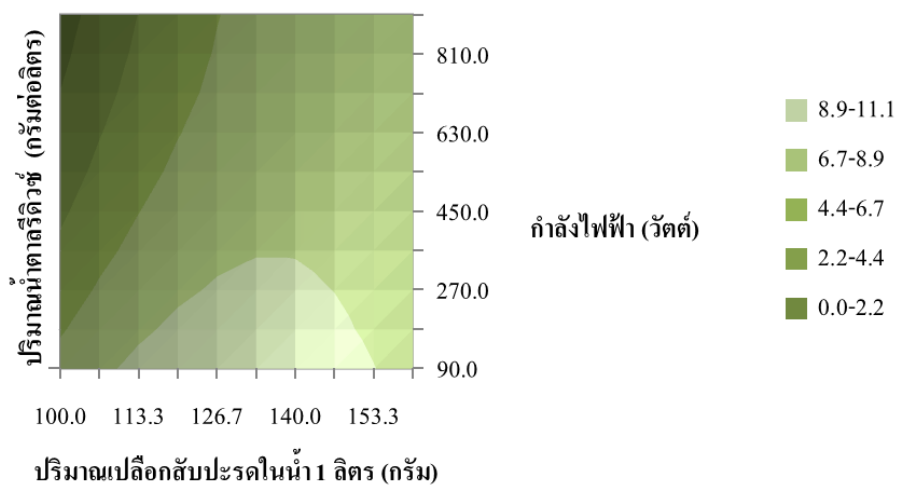
ภาพประกอบที่ 4-2 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรและเวลาที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพมีการใช้กำลังไฟฟ้า 495 วัตต์

ผลของปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรและระยะเวลาในการปรับสภาพต่อปริมาณ น้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-2 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อวัตถุดิบมากขึ้น(100-130 กรัมต่อลิตร) (ความเข้มข้นมากขึ้น) ในช่วงเวลา5-15 นาที และจะให้ ผลผลิตปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด (8-9 กรัมต่อลิตร) เมื่อใช้ปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรที่ เหมาะสม คือ 130-150 กรัมต่อลิตรในช่วงเวลา 6-13 นาที ที่กำลังไฟฟ้า 495 วัตต์

(3) ผลของปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้าในการปรับสภาพที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4-3 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพโดยใช้เวลา 12 นาทีในการปรับสภาพ

ผลของปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรและระยะเวลาในการปรับสภาพต่อปริมาณ น้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-3 (ก) และ (ข) พบว่ากำลังไฟฟ้า และปริมาณเปลือก สับประด ที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด(10.0-12.0 กรัมต่อลิตร)คือ 90-130 วัตต์ และ 130-140 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือระยะเวลาในการปรับสภาพ เนื่องจากเมื่อพิจารณากราฟพื้นผิว และการฟักร่าง (ภาพประกอบที่ 4-1 ถึงภาพประกอบที่ 4-3)พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 12 นาที ปริมาณผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ก็เพิ่มขึ้นด้วย และจะลดทันทีเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นต่อจากนี้โดย RSM ได้ทำนายสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับสภาพเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่าโดยการ ให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีสถานะที่เหมาะสมคือ ปริมาณเปลือกสับประด 132 กรัมต่อ น้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 12 นาที ผลการทำนายได้ผลิตมีปริมาณ น้ำตาลรีดิวซ์12.09กรัมต่อลิตร และผลการทดลองจริง 13.18 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีผลได้ของน้ำตาล รีดิวซ์เป็น 99.85 กิโลกรัมต่อ 1 ตันเปลือกสับประด

4.3การย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

ขั้นตอนการย่อยมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยย่อยคาร์โบไฮเดรตและเซลลูโลส ให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำ และการตัดสับเปลือกสับประดที่เหมาะสมคือสถานะซึ่ง ได้ผลผลิตมีน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด โดยงานวิจัยอื่นที่ผ่านมา ก่อนทำขั้นตอนการย่อยจะต้องแยก ผลผลิตหลังการปรับสภาพเฉพาะส่วนของแข็งไปทำการล้างน้ำจนน้ำล้างเป็นกลาง แล้วนำมาแช่ใน สารละลายกรด (ตัวเร่งปฏิกิริยา) พร้อมการให้ความร้อน แต่งานวิจัยนี้ไม่มีขั้นตอนการล้างน้ำ เนื่องจากต้องการรักษาน้ำตาลรีดิวซ์ (ละลายได้ดีในน้ำ) ที่ได้ในขั้นตอนการปรับสภาพไว้จึงนำ ผลผลิตที่ได้หลังการปรับสภาพทั้งหมดมาทำการให้ความร้อนต่อ

ผลการออกแบบสถานะการทดลองด้วย RSM และผลการย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่า โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟแสดงดังตารางที่ 4-3

ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆคือระดับการให้ความร้อน (w ; วัตต์)และระยะเวลาใน การย่อย(t ; นาที) ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการย่อยแสดงดังภาพประกอบที่ 4-4 โดยทั้ง11การทดลองแสดงดังตารางที่ 4-3

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ตามหลัก Analysis of variance (ANOVA) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติในการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แล้วนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Essential regression สามารถสร้างแบบจำลองสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆในการย่อยดังสมการที่ (4.2)

$$\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (ร้อยละ)} = 5.675 + 0.01626 * w - 0.222 * t - 1.8194E-05 * w * w + 0.00368 * t * t + 0.000120 * w * t \quad (4.2)$$

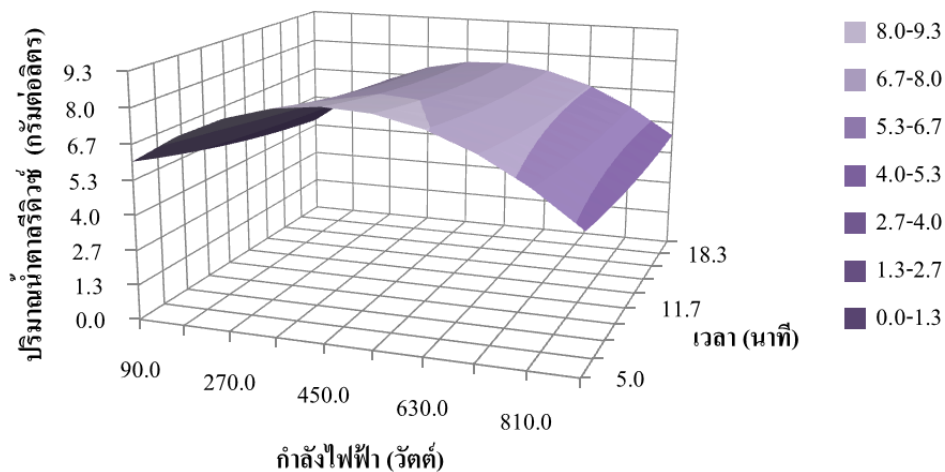
ตารางที่ 4-3 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่า โดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการย่อย

การทดลองที่	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	
			ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	270	18	5.261	6.257
2	450	20	7.676	7.201
3	450	13	7.555	7.728
4	720	18	6.765	6.695
5	90	13	5.344	4.566
6	450	5	8.734	8.344
7	900	13	4.567	4.826
8	720	7	7.269	7.151
9	450	13	7.844	7.728
10	450	13	8.130	7.728
11	270	7	6.376	7.301

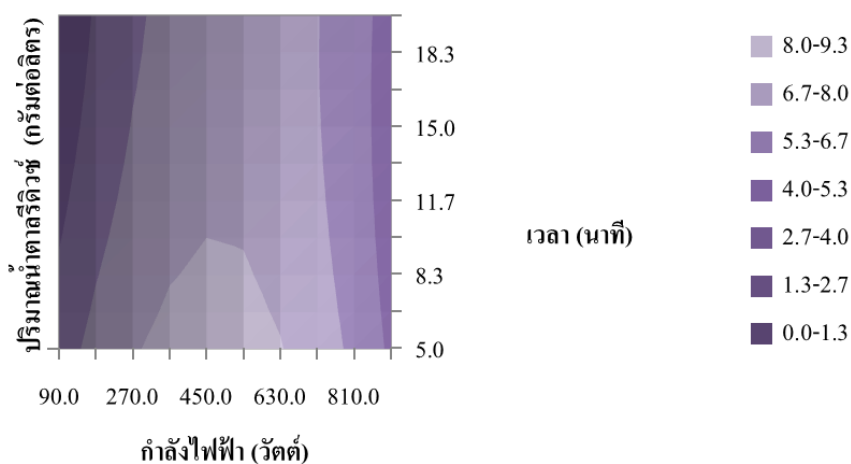
ผลการทดลองพบว่า กำลังไฟฟ้ามีผลมากกว่าระยะเวลาในการย่อย จากการที่นำค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลองและค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทำนายมาพล็อตกราฟ จะได้ R^2 คิดเป็น 0.937 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง (R^2 adjusted = 0.874) จากข้อมูลแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในรูปของกราฟพื้นผิวและกราฟโครงร่าง ได้ดังภาพประกอบที่ 4-4

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 2 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยกำลังไฟฟ้า และระยะเวลาในการย่อยที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ ได้นำเสนอในรูปของกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) และกราฟโครงร่าง (Contour plot) ของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ดังภาพประกอบที่ 4-4

(1) ผลของกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาในการย่อยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4-4 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า และเวลาในการย่อยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการย่อย

ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ (กำลังไฟฟ้า และเวลา) ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ในผลผลิตหลังการย่อยแสดงดังรูปที่ 4-4(ก) และ (ข) ผลการศึกษาพบว่าผลผลิตหลังการย่อยมี น้ำตาลรีดิวซ์ปริมาณมากขึ้นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในช่วง 90-600 วัตต์แต่เวลาในการย่อยไม่ได้ส่งผลต่อ

การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกำลังไฟฟ้าที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เหมาะสมอยู่ในช่วง 360-630วัตต์

ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อพิจารณากราฟพื้นผิว และกราฟโครงร่าง (ภาพประกอบที่ 4-4) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่ามากที่สุด (8.70 กรัมต่อลิตร) เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 450 วัตต์ และลดลงเมื่อมีการเพิ่มกำลังไฟฟ้ามากขึ้นอีก ในขณะที่เวลาส่งผลน้อยในการเพิ่มหรือลดของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ RSM ได้ทำนายสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีสภาวะที่เหมาะสมที่ดังนี้ กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 5 นาที สามารถให้ผลผลิตปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 8.70 กรัมต่อลิตร โดยผลการทำนายได้ผลผลิตมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 8.36 กรัมต่อลิตร และมีผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์เป็น 65.91 กิโลกรัมต่อ 1 ตันเปลือกสับประด

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ และย่อยด้วยน้ำเปล่า โดยในขั้นตอนการปรับสภาพ (จะใช้ปริมาณเปลือกสับประด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 12 นาที) สามารถให้ผลผลิตปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 13.18 กรัมต่อลิตร และในขั้นตอนการย่อย (ใช้กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 5 นาที) สามารถให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 8.70 กรัมต่อลิตรซึ่งพบว่าการปรับสภาพ (การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ) เพียงครั้งเดียวสามารถให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากกว่าการนำไปย่อยต่อ ดังนั้นในขั้นตอนของการปรับสภาพ และย่อยด้วยน้ำเปล่า งานวิจัยนี้จะสนใจศึกษาเฉพาะขั้นตอนของการปรับสภาพเท่านั้น (มีการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงครั้งเดียว) เพื่อเป็นการประหยัดเวลา พลังงาน และต้นทุนในการผลิต

4.4 การปรับสภาพเปลือกสับประดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้งโซดา) พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆคือปริมาณวัตถุดิบ (เปลือกสับประด) ต่อน้ำ 1 ลิตร (x; กรัมต่อลิตร) สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (C; โมลาร์) ระดับการให้ความร้อน (w; วัตต์) และระยะเวลาในการปรับสภาพ (t; นาที) ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-5 ถึงภาพประกอบที่ 4-10 โดยทั้ง 27 การทดลองแสดงดังตารางที่ 4-4

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ตามหลัก Analysis of variance (ANOVA) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติในการปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แล้วนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยใช้โปรแกรม Essential regression สามารถสร้างแบบจำลองสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆดังสมการที่ (4.3)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (ร้อยละ)} = & -103.57 + 0.03483*w + 26.62*C + 1.060*x + 1.429*t - 3.07705E- \\ & 05*w*w - 4.724*C*C - 0.00330*x*x - 0.04944*t*t - 0.00267*w*C + 1.91026E-05*w*x - \\ & 0.000179*w*t - 0.07443*C*x + 0.02417*C*t - 0.00252*x*t \quad (4.3) \end{aligned}$$

ตารางที่ 4-4 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการปรับสภาพเปลือกสับประดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้งโซดา) โดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพ

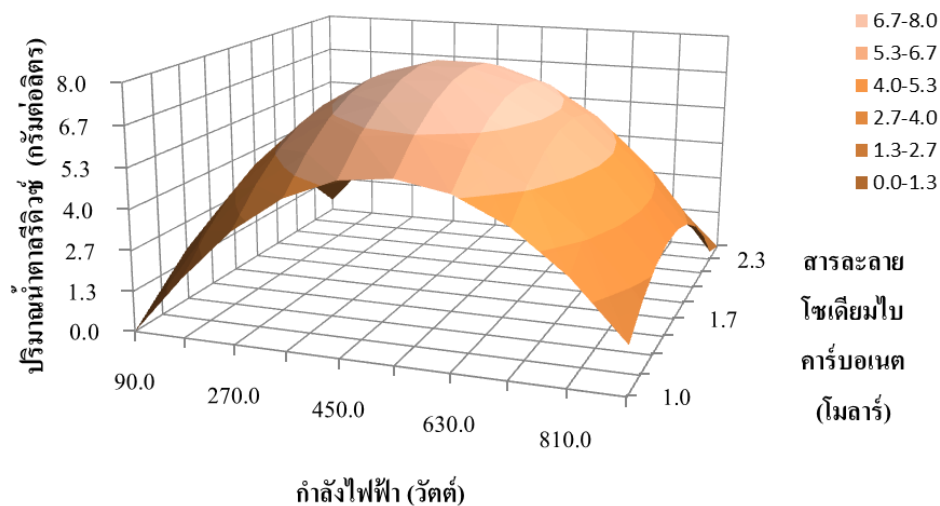
การทดลองที่	ปริมาณเปลือกสับประด (กรัมต่อลิตร)	สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (โมลาร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	
					ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	130	1.00	450	11	5.860	5.467
2	115	1.38	720	7	3.096	3.313
3	115	1.38	270	16	2.464	2.838
4	130	2.50	450	11	5.355	4.677
5	160	1.75	450	11	7.928	6.897
6	115	1.38	270	7	2.415	2.514
7	130	1.75	900	11	3.523	2.820
8	145	1.38	270	16	4.646	4.977
9	145	1.38	270	7	5.139	5.333
10	130	1.75	90	11	3.242	2.660
11	145	1.38	720	7	6.186	6.336
12	145	1.38	720	16	4.504	5.256
13	145	2.13	720	16	3.334	3.564
14	115	1.38	720	16	3.169	2.914
15	130	1.75	450	11	6.571	7.567
16	130	1.75	450	20	4.307	3.501

การทดลองที่	ปริมาณเปลือกสับประรด (กรัมต่อลิตร)	สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (โมลาร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	
					ผลการทดลอง	การทำนาย
17	115	2.13	720	7	2.982	3.133
18	100	1.75	450	11	3.491	3.452
19	130	1.75	450	11	7.496	7.567
20	130	1.75	450	11	8.419	7.567
21	115	2.13	270	7	3.396	3.235
22	145	2.13	270	16	3.659	4.186
23	145	2.13	270	7	3.668	4.380
24	115	2.13	270	16	3.461	3.723
25	145	2.13	720	7	4.239	4.481
26	115	2.13	720	16	2.430	2.897
27	130	1.75	450	2	4.213	3.949

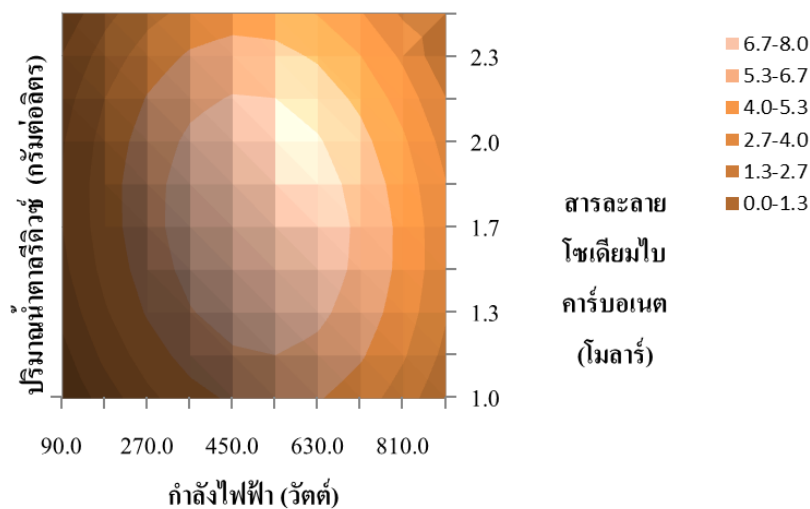
ผลการทดลองพบว่าสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตมีผลมากที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4-4 จากการที่นำค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลองและค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทำนายมาพล็อตกราฟ จะได้ R^2 เท่ากับ 0.935 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง (R^2 adjusted = 0.860) จากข้อมูลแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในรูปของกราฟพื้นผิวและกราฟโครงร่างได้ดังภาพประกอบที่ 4-5 ถึงภาพประกอบที่ 4-10

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยคือ ปริมาณวัตถุดิบ (เปลือกสับประรด) ต่อน้ำ 1 ลิตร สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตระดับการให้ความร้อน และระยะเวลาในการปรับสภาพที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ ได้นำเสนอในรูปของกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) และกราฟโครงร่าง (Contour plot) ของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ดังภาพประกอบที่ 4-5 ถึงภาพประกอบที่ 4-10

(1) ผลของกำลังไฟฟ้าและสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)



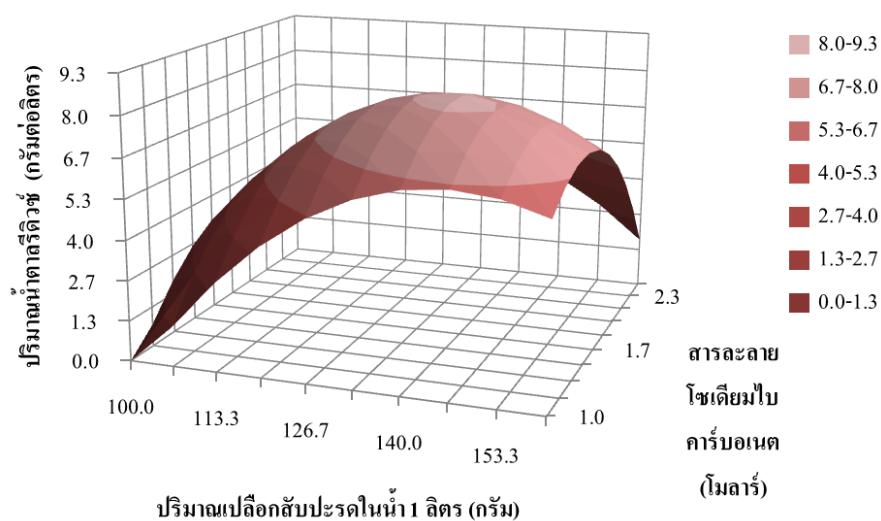
(ข)

ภาพประกอบที่ 4-5 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์มีการใช้ปริมาณเปลือกกล้วยประด 130 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตรและระยะเวลาในการปรับสภาพ 11 นาที

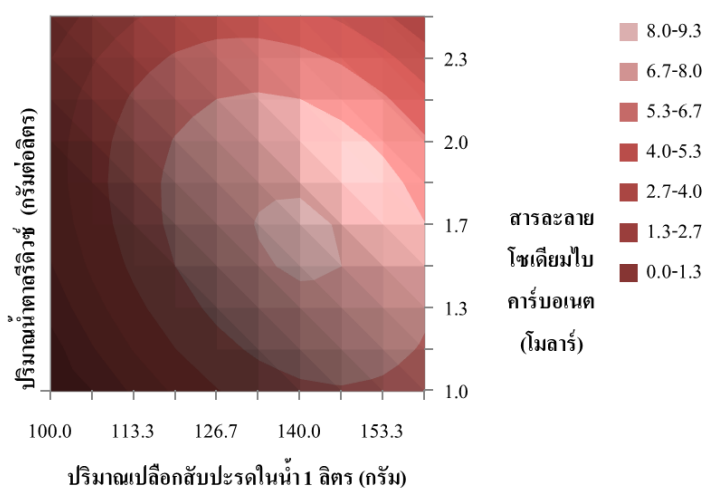
ผลของกำลังไฟฟ้าและสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-5 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าอยู่

ในช่วง 450-630วัตต์และสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตอยู่ในช่วง 1.7-2.2 โมลาร์ ซึ่งเป็นช่วงที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด (7.0-8.0 กรัมต่อลิตร)

(2) ผลของปริมาณเปลือกสับประรดในน้ำ 1 ลิตรและสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)

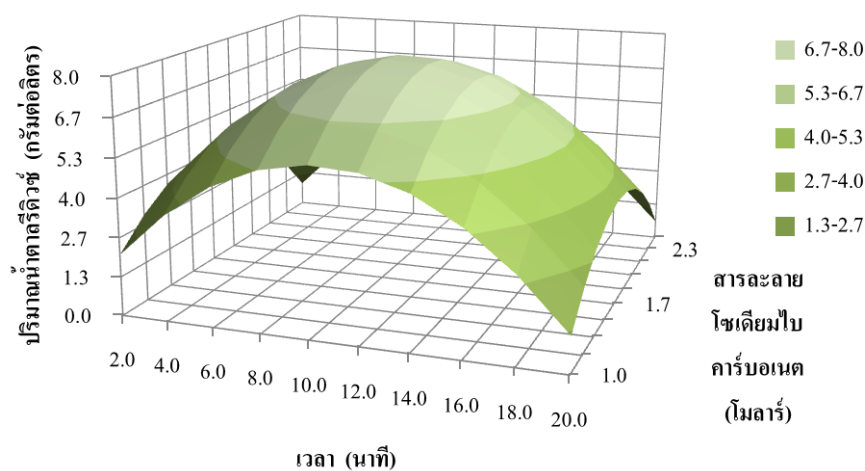


(ข)

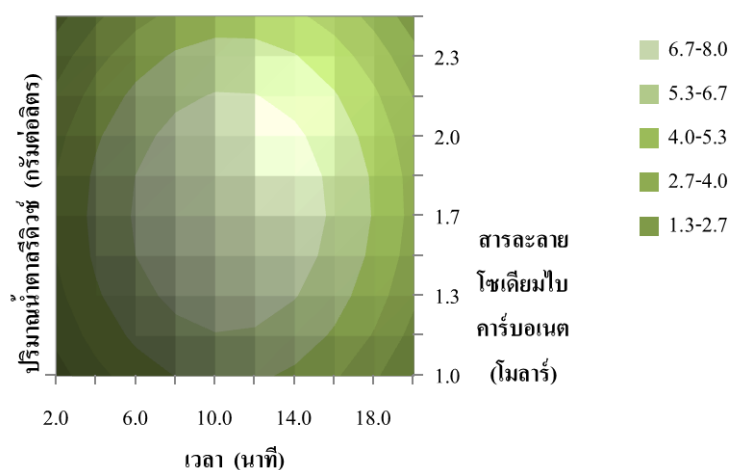
ภาพประกอบที่ 4-6 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับประรดในน้ำ 1 ลิตรและสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 495 วัตต์และระยะเวลาในการปรับสภาพ 11 นาที

ผลของปริมาณเปลือกสับประคในน้ำ 1 ลิตร และสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-6 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณ เพิ่มขึ้นเมื่อใช้เปลือกสับประคอยู่ในช่วง 130-150กรัมต่อน้ำ 1 ลิตรและควรรใช้ที่สารละลาย โซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.5-1.8 โมลาร์

(3) ผลของเวลาและสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)

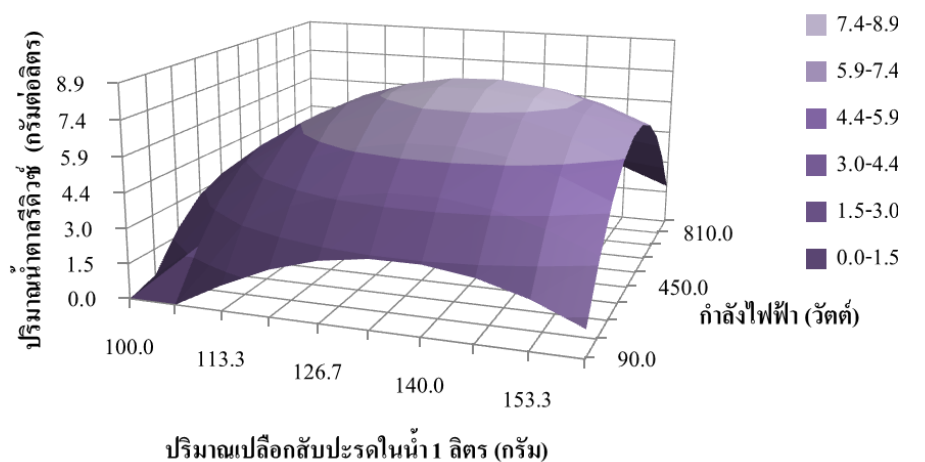


(ข)

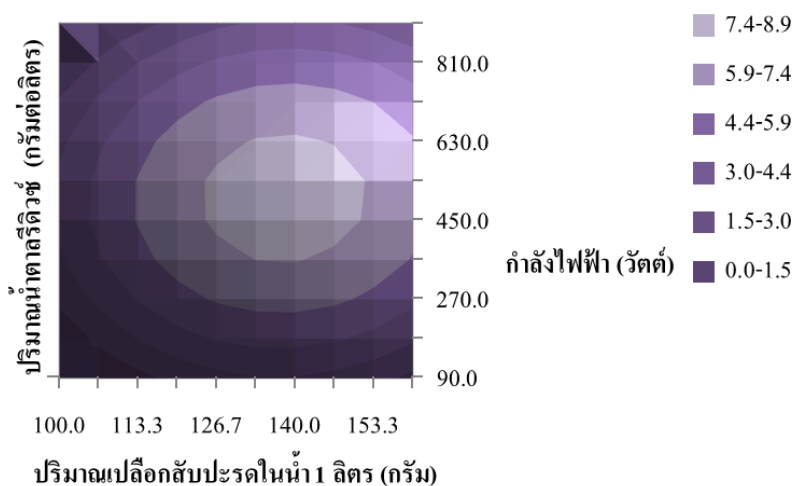
ภาพประกอบที่ 4-7 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและ สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับประค 130 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้า 495 วัตต์ในการปรับสภาพ

ผลของเวลาและสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-7 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น(8.0-9.0 กรัมต่อลิตร) เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตอยู่ในช่วง 1.7-2.2 โมลาร์ที่เวลาในการปรับสภาพ 10-14 นาที

(4) ผลของปริมาณเปลือกสับประรดในน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)

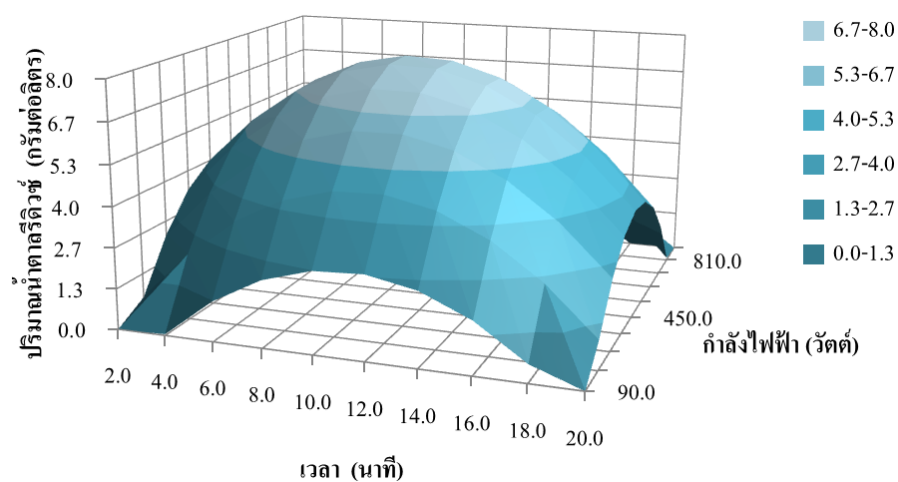


(ข)

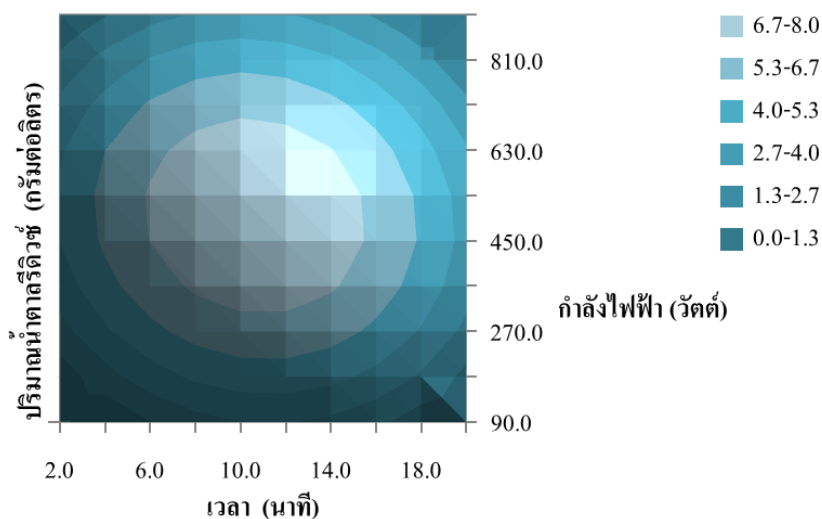
ภาพประกอบที่ 4-8 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับประรดในน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.75 โมลาร์และระยะเวลาในการปรับสภาพ 11 นาที

ผลของปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้าต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-8 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด (8.0-9.0 กรัมต่อลิตร) เมื่อใช้เปลือกสับประดอยู่ในช่วง 140-150 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้า 450-540 วัตต์

(5) ผลของเวลาและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)

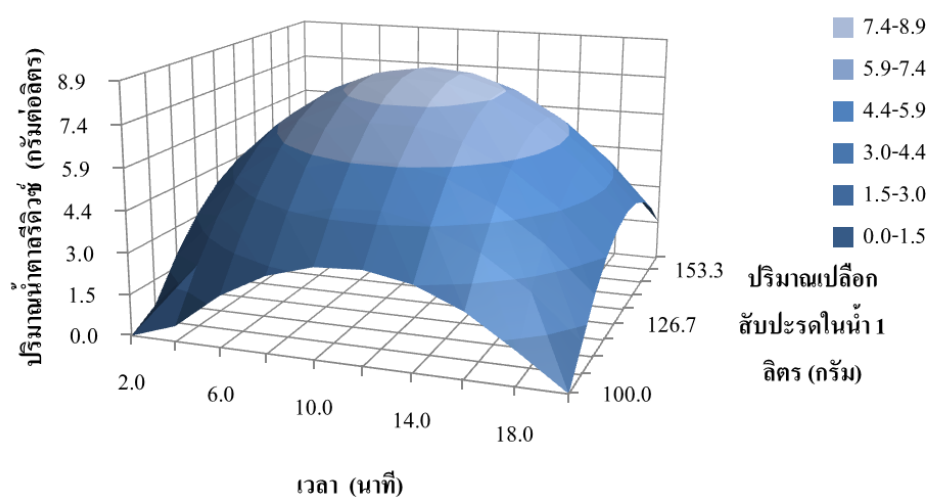


(ข)

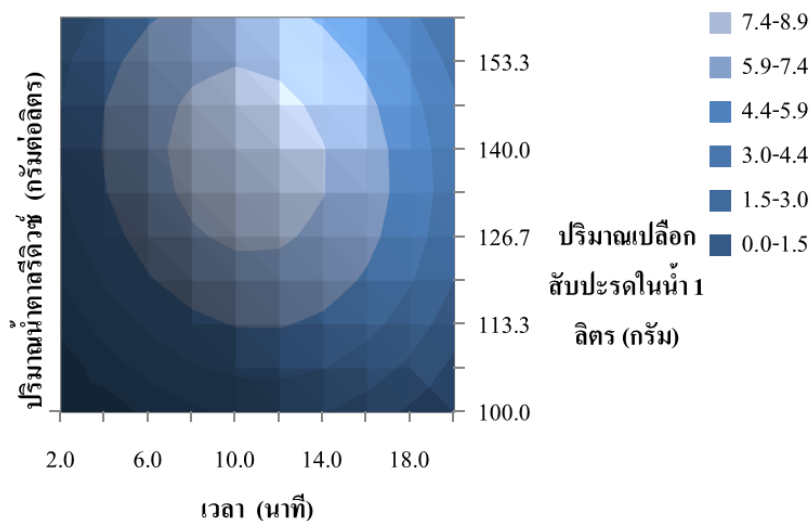
ภาพประกอบที่ 4-9 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.75 โมลาร์ และปริมาณเปลือกสับประด 130 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

ผลของเวลาและกำลังไฟฟ้าต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-9 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น(7.0-8.0 กรัมต่อลิตร) เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในช่วง 540-720วัตต์ที่เวลาในการปรับสภาพ 12-14 นาที

(6) ผลของเวลาและปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตร ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4-10 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.75 โมลาร์และกำลังไฟฟ้าในการปรับสภาพ 495 วัตต์

ผลของเวลาและเปลือกสับประรดในน้ำ 1 ลิตรต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-10 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงสุด (8.0-9.0 กรัมต่อลิตร) เมื่อใช้เปลือกสับประรดอยู่ในช่วง 130-140 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ที่เวลาในการปรับสภาพ 8-12 นาที

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้งโซดา) พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือ สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตเนื่องจากเมื่อพิจารณากราฟพื้นผิว และกราฟโครงร่าง (ภาพประกอบที่ 4-5 ถึงภาพประกอบที่ 4-10) พบว่ากราฟที่พล็อตระหว่างสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตกับปัจจัยอื่นๆ ทั้ง 3 ปัจจัย ให้ค่าสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ในขณะที่ปัจจัยอื่นๆ มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า และผลการทำนายสภาวะที่เหมาะสมแบบ CCD คือ ใช้เปลือกสับประรด 140 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.59 โมลาร์กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 450 วัตต์และใช้เวลาในการปรับสภาพ 10 นาที โดยผลการทำนายได้ผลผลิตปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 8.13 กรัมต่อลิตร และผลการทดลองจริง 8.52 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีผลได้น้ำตาลรีดิวซ์เป็น 60.86 กิโลกรัมต่อ 1 ตันเปลือกสับประรด

4.5 การย่อเปลือกสับประรดด้วยสารละลายกรดอะซิติกพร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

จากการทดลองโดยการออกแบบโดยใช้ โปรแกรม RSM ที่มีตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ สารละลายกรดอะซิติก (C; โมลาร์) กำลังไฟฟ้า (w; วัตต์) และระยะเวลาในการย่อย (t; นาที) ตัวแปรตามคือปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ดังแสดงในตารางที่ 4-5

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ตามหลัก Analysis of variance (ANOVA) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติในการปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แล้วนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Essential regression สามารถสร้างแบบจำลองสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆดังสมการที่ (4.4)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (ร้อยละ)} = & -4.323 + 0.01389*w - 1.650*C + 1.292*t - 3.05817E-06*w*w + \\ & 1.769*C*C - 0.04786*t*t - 0.00749*w*C - 0.000227*w*t - 0.07229*C*t \end{aligned} \quad (4.4)$$

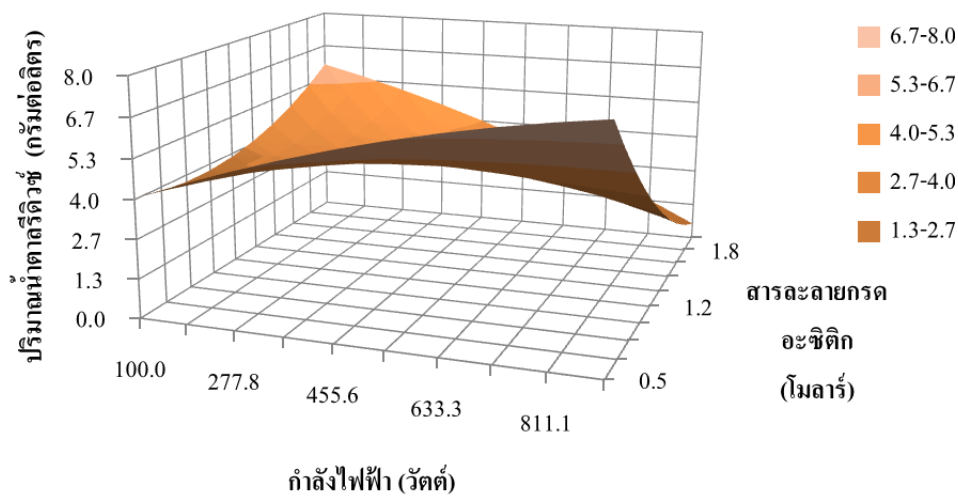
ตารางที่ 4-5แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการย่อยเปลือกสับประคด้วย
สารละลายกรดอะซิติกโดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพ

การทดลอง ที่	สารละลายกรด อะซิติก (โมลาร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	
				ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	1.25	100	11	3.680	3.973
2	0.80	262	6	2.290	2.451
3	0.80	262	16	4.066	3.745
4	1.70	262	6	2.819	2.809
5	1.70	262	16	3.453	3.413
6	0.50	500	11	6.551	6.373
7	2.00	500	11	4.030	3.722
8	1.25	500	2	0.410	0.138
9	1.25	500	20	0.428	0.488
10	1.25	500	11	3.930	4.052
11	1.25	500	11	4.024	4.052
12	1.25	500	11	4.117	4.052
13	0.80	738	6	3.743	4.129
14	0.80	738	16	3.912	4.269
15	1.70	738	6	0.643	1.310
16	1.70	738	16	0.574	0.759
17	1.25	900	11	3.932	3.153

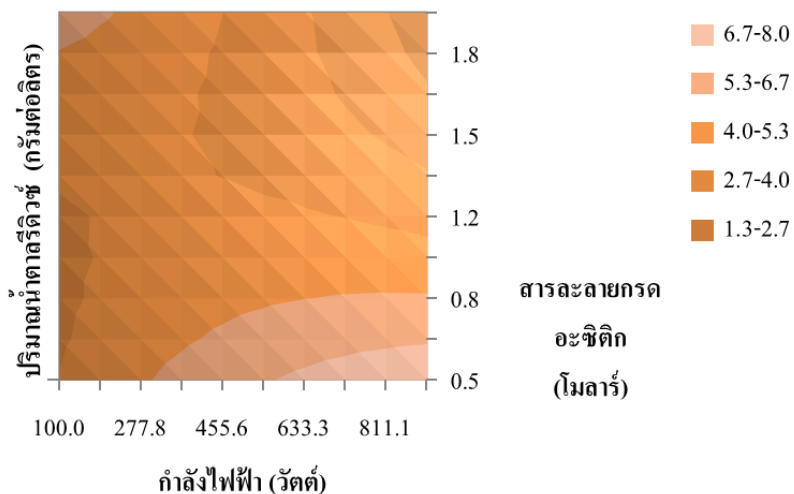
ผลการทดลองพบว่า เวลาในการย่อยมีผลมากที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4-5จากการที่นำค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลองและค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทำนายมาพล็อตกราฟ จะได้ R^2 มีค่าเท่ากับ 0.956 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง (R^2 adjusted = 0.899) จากข้อมูลแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในรูปของกราฟพื้นผิวและกราฟโครงร่างได้ดังภาพประกอบที่ 4-11 ถึงภาพประกอบที่ 4-13

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยคือ สารละลายกรดอะซิติกระดับการให้ความร้อน และระยะเวลาในการย่อยที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ ได้นำเสนอในรูปแบบของกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) และกราฟโครงร่าง (Contour plot) ของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ดังภาพประกอบที่ 4-11ถึงภาพประกอบที่ 4-13

(1) ผลของกำลังไฟฟ้าและสารละลายกรดอะซิติกที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)

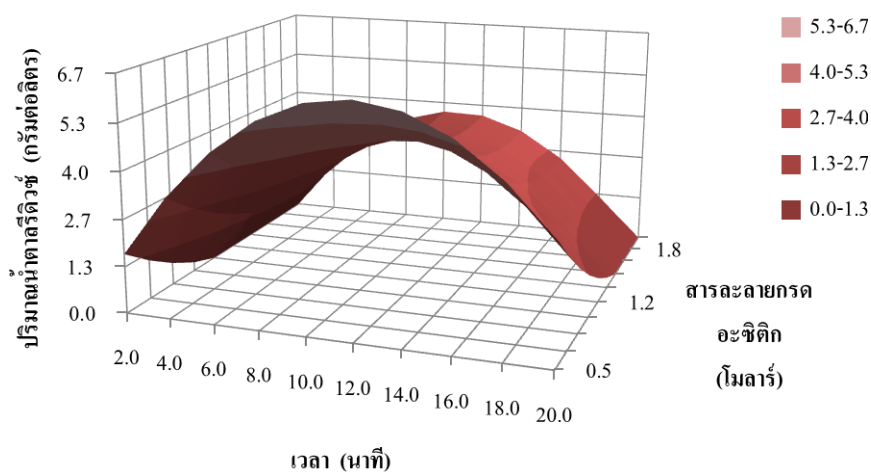


(ข)

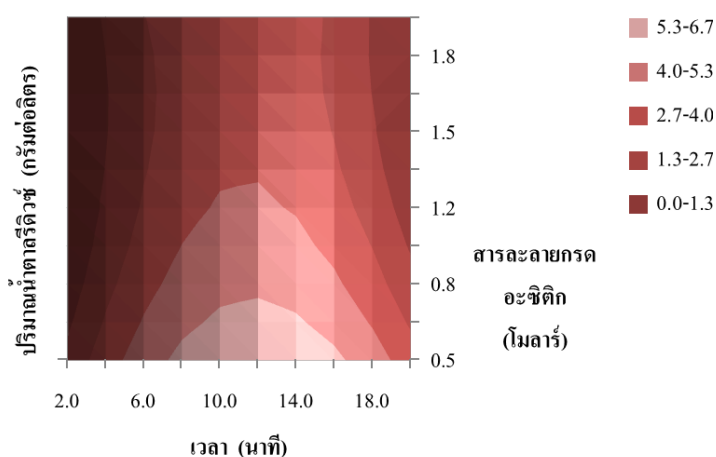
ภาพประกอบที่ 4-11 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและสารละลายกรดอะซิติกที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ที่ระยะเวลาในการย่อย 11 นาที

ผลของกำลังไฟฟ้าและสารละลายกรดอะซิติกต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-11(ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น(7.0-8.0 กรัมต่อลิตร) เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในช่วงสูงคือ 720-900 วัตต์ที่ความเข้มข้นสารละลายกรดอะซิติกต่ำ คือ 0.5-0.8 โมลาร์ และที่ช่วงกำลังไฟฟ้า 100-150 วัตต์ ความเข้มข้นสารละลายกรดอะซิติก 1.8-2.0 โมลาร์ ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเช่นกัน (7.0-8.0 กรัมต่อลิตร)

(2) ผลของเวลาและสารละลายกรดอะซิติกที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



(ก)

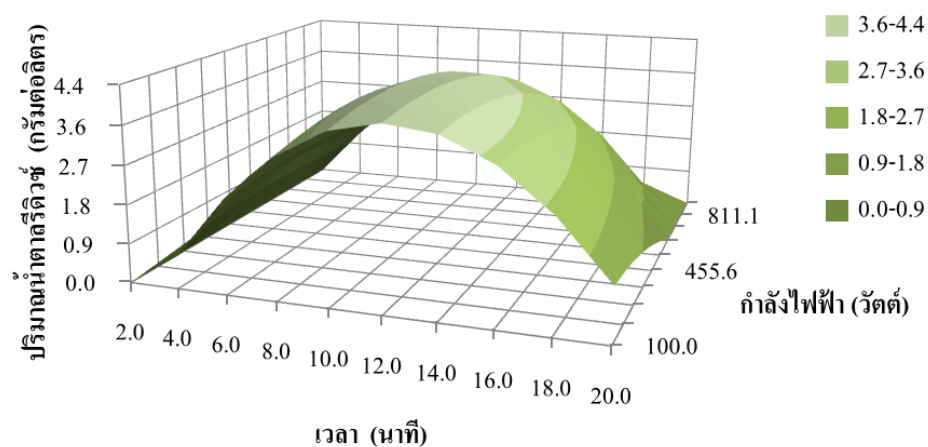


(ข)

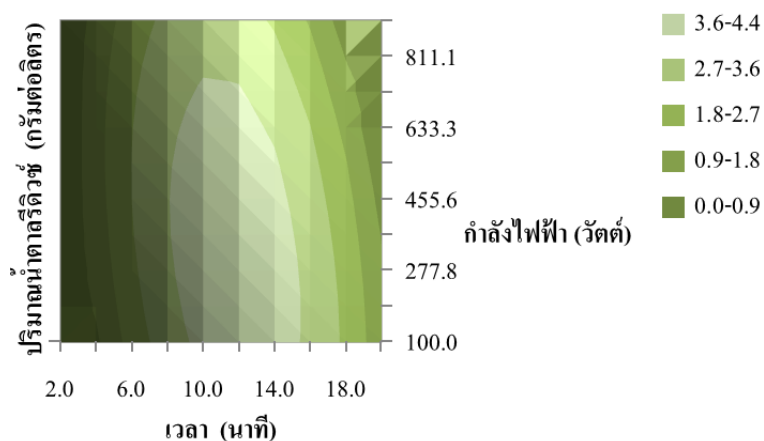
ภาพประกอบที่ 4-12 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและสารละลายกรดอะซิติกที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ที่กำลังไฟฟ้าในการย่อย 495 วัตต์

ผลของเวลาและสารละลายกรดอะซิติกต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-12 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวิซมีปริมาณสูงสุด (6.0-7.0กรัมต่อลิตร) เมื่อใช้ความเข้มข้นสารละลายกรดอะซิติกต่ำ คือ 0.5-0.8 โมลาร์ที่ระยะเวลา 10-14 นาที

(3) ผลของเวลาและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4-13 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวิซที่สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 1.25 โมลาร์

ผลของเวลาและกำลังไฟฟ้าต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-13 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น(4.0-4.5 กรัมต่อลิตร) เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในช่วง 450-720 วัตต์ที่ระยะเวลา 10-14 นาที

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยเปลือกสับประรดด้วยสารละลายกรดอะซิติกโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือ เวลาในการย่อย เนื่องจากเมื่อพิจารณากราฟพื้นผิว และกราฟโครงร่าง (ภาพประกอบที่ 4-11 ถึงภาพประกอบที่ 4-13) พบว่ากราฟที่พล็อตระหว่างเวลากับปัจจัยอื่นๆ ทั้ง 2 ปัจจัย จะให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นถึง 11 นาที และจะลดลงทันทีเมื่อเวลาดำเนินการต่อไป โดยปัจจัยอื่นๆ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์น้อยมากและผลการทำนายสภาวะที่เหมาะสมแบบ CCD คือ ใช้สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.5 โมลาร์กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 900 วัตต์และใช้เวลาในการย่อย 11 นาที โดยจากการทดลองจริงจะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 7.85 กรัมต่อลิตรและจากผลการทำนายได้ผลผลิตปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 7.72 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์เป็น 56.07 กิโลกรัมต่อ 1 ตันเปลือกสับประรด

ตารางที่ 4-6 แสดงผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในขั้นตอนการปรับสภาพ และย่อยด้วยสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละวิธี

ขั้นตอน	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	ผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์ (กิโลกรัมต่อ 1 ตันเปลือกสับประรด)
การปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	13.18	99.85
การย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	8.70	65.91
การปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตพร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	8.52	60.86
การย่อยเปลือกสับประรดด้วยสารละลายกรดอะซิติกพร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	7.85	56.07

จากตารางที่ 4-6 เมื่อทำการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพด้วยน้ำเปล่า และสารละลายต่าง โดยเมื่อใช้น้ำเปล่า (จะใช้ปริมาณเปลือกสับประรด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 12 นาที) สามารถให้ผลผลิตปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 13.18 กรัมต่อลิตร ซึ่งมากกว่าที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมของการใช้ สารละลายต่าง (ใช้เปลือกสับประรด 140 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.59 โมลาร์กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 450 วัตต์และใช้เวลาในการปรับสภาพ 10 นาที) คือให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 8.52 กรัมต่อลิตรเนื่องจากในกระบวนการปรับสภาพ พบว่าโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นด่างแก่ เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับเปลือกสับประรดซึ่งมีค่าความเป็นกรด จึงเกิดเป็นเกลือของด่างแก่ขึ้น ทำให้เกิดการขัดขวางการทำงานของสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการปรับสภาพแต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนการปรับสภาพยังไม่สามารถตัดสินได้ด้วยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เนื่องจากเป็นเพียงขั้นตอนการเตรียมความพร้อมในการย่อย

ในขั้นตอนการย่อยที่แตกต่างกันคือ การย่อยด้วยน้ำเปล่า (กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 5 นาที) สามารถให้ผลผลิตปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 8.70 กรัมต่อลิตร และการย่อยด้วยกรด (ใช้สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.5 โมลาร์กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 900 วัตต์และใช้เวลาในการย่อย 11 นาที) สามารถให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 7.85 กรัมต่อลิตร พบว่าการย่อยด้วยน้ำเปลาก็ยังให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่มากกว่าการย่อยด้วยกรด ซึ่งสาเหตุอาจสืบเนื่องจากกระบวนการปรับสภาพ เพราะในกระบวนการปรับสภาพมีการใช้ด่างแก่ แต่ในกระบวนการย่อยด้วยกรดอินทรีย์ พบว่ากรดที่ใช้เป็นกรดอ่อน เมื่อกรดอ่อนและด่างแก่เข้าทำปฏิกิริยากัน จึงเกิดเป็นเกลือของด่างแก่ขึ้น ซึ่งนอกจากจะไม่ช่วยในกระบวนการย่อยแล้ว ยังเข้าไปขัดขวางการทำงานของกรดอินทรีย์ในการย่อยอีกด้วยและการย่อยโดยการให้ความร้อนซ้ำของการใช้น้ำเปล่ากลับทำให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์ลดลง ซึ่งสาเหตุที่เป็นไปได้ อาจเกิดจากการให้ความร้อนซ้ำส่งผลให้น้ำตาลรีดิวซ์เปลี่ยนรูปเป็นน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ขึ้น คือ เปลี่ยนจากมอโนแซ็กคาไรด์เป็น ไดแซ็กคาไรด์หรือพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น เปลี่ยนจากกลูโคสเป็นซูโครส ซึ่งสังเกตได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายหรือซูโครสที่ต้องให้ความร้อนสูง และใช้เวลานานกว่าในการเปลี่ยนกลูโคส และฟรุกโตสไปเป็นซูโครส และพบว่าการใช้ด่างแก่และกรดอ่อนในงานวิจัยนี้ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อย เนื่องจากให้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์น้อยกว่าการไม่ใช้ด่าง-กรด แต่อย่างไรก็ตามเพื่อตรวจสอบว่า

การน้อยลงของน้ำตาลรีดิวซ์หลังการย่อยอาจเกิดจากการเปลี่ยนน้ำตาลรีดิวซ์เป็นน้ำตาลซูโครส จึงได้ทำการวิเคราะห์ชนิดของน้ำตาลซึ่งแสดงดังตารางที่ 4-7

4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลผลิต

4.6.1 ปริมาณน้ำตาลในผลผลิตเปลือกสับประรด

เพื่อหาข้อสนับสนุนผลของน้ำตาลรีดิวซ์ จึงได้มีการนำผลผลิตจากการปรับสภาพ และย่อยด้วยวิธีต่างๆ ไปวิเคราะห์หาชนิดของน้ำตาล และปริมาณของน้ำตาล แสดงดังตาราง 4-7

ตารางที่ 4-7 แสดงชนิดของน้ำตาลและปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการปรับสภาพและย่อยด้วยวิธีต่างๆ

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง	ชนิดน้ำตาลและปริมาณสาร (% w/v) \pm SD		
		ฟรุคโตส	กลูโคส	ซูโครส
1	ปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	0.24 \pm 0.01	0.25 \pm 0.01	0.34 \pm 0.01
2	ย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	0.26 \pm 0.01	0.24 \pm 0.01	0.35 \pm 0.04
3	ปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	0.28 \pm 0.03	0.33 \pm 0.01	1.65 \pm 0.01
4	ย่อยเปลือกสับประรดด้วยสารละลายกรดอะซิติก โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	-	-	8.26 \pm 0.35

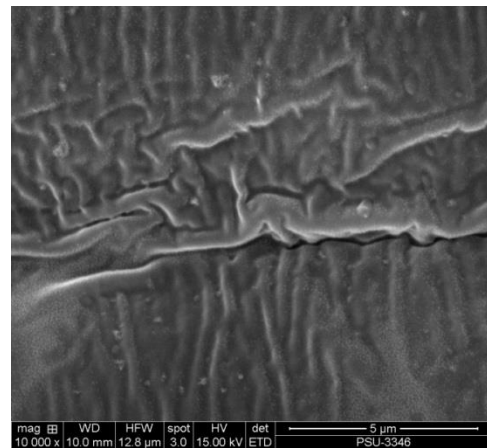
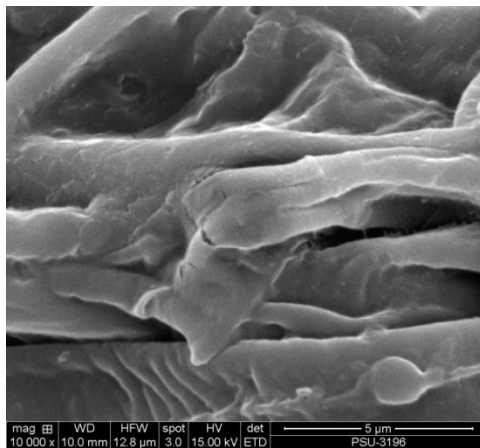
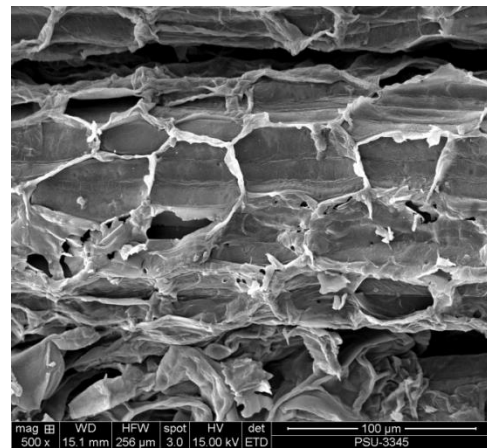
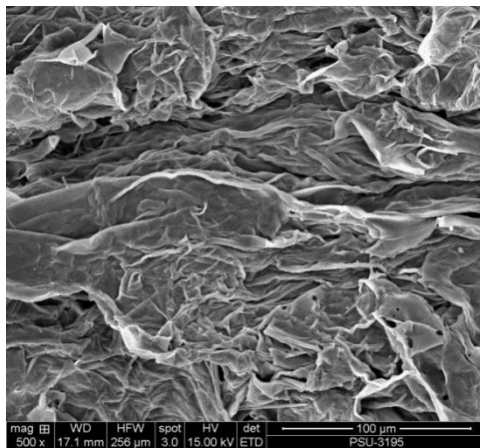
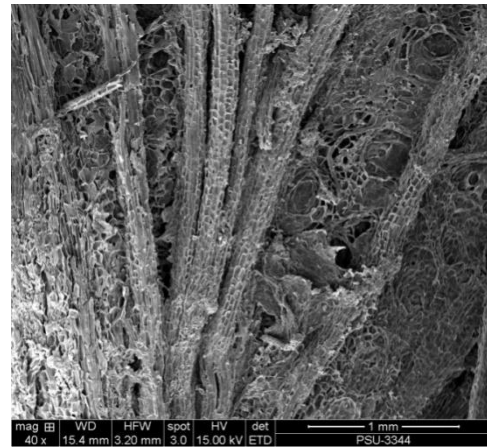
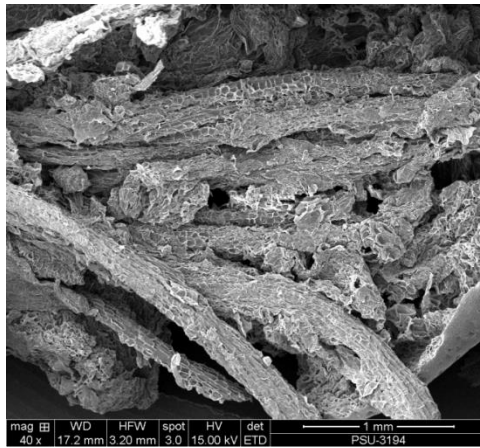
จากตารางที่ 4-7 สรุปได้ว่าการปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ และการย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟให้ปริมาณน้ำตาลมอโนแซ็กคาไรด์ คือ กลูโคสและฟรุคโตสและไดแซ็กคาไรด์ คือ ซูโครส ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนซ้ำอีกครั้งไม่ได้ส่งผลให้ได้ผลผลิตน้ำตาล

เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนและเวลาในการผลิตจึงลดขั้นตอนเหลือแค่ขั้นตอนให้ความร้อนด้วยน้ำเปล่าครั้งเดียวหรือที่เรียกว่าปรับสภาพพร้อมการย่อยในครั้งเดียว

ส่วนการใช้ด่างและกรดอินทรีย์ พบว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนมอโนแซ็กคาไรด์เป็นไดแซ็กคาไรด์จริงตามที่คาดการณ์ไว้ (ผลของลำดับที่ 4 ในตารางที่ 4-7) แต่อย่างไรก็ตามการตรวจสอบว่าวิธีการใดเหมาะสมจะต้องทำการหมักเปรียบเทียบผลได้ของเอทานอลก่อน เนื่องจากขณะทำการหมักยีสต์ยังสามารถหมักน้ำตาลซูโครสเป็นเอทานอลได้

4.6.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ และผลผลิต

ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ และผลผลิตถูกสังเกตด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) ที่ 15 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 40,500 และ 10,000 เท่า แสดงดังภาพประกอบ 4-14



(ก)

(ข)

ภาพประกอบที่ 4-14 แสดง SEM ของวัสดุดิบเปลือกสับปรดผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่า (ก) และผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยต่าง-กรดอินทรีย์ (ข) พร้อมการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังขยาย 40, 500 และ 10,000 เท่า

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วย RSM ของผลผลิตเปลือกสับประรดหลังการปรับสภาพ และย่อยด้วยน้ำเปล่า (ภาพประกอบที่ 4-14) เปรียบเทียบกับผลผลิตเปลือกสับประรดหลังการปรับสภาพ และย่อยด้วยด่างกรดอินทรีย์ พบว่า ลักษณะผิวของวัตถุดิบหลังการปรับสภาพ และย่อยด้วยมีลักษณะแตกออกจากกัน และมีช่องว่างอย่างเห็นได้ชัดแสดงให้เห็นว่าลิกนินเป็นตัวเชื่อมโครงสร้างของเส้นใย เมื่อถูกกำจัดออกก็จะเกิดเป็นช่องว่างระหว่างเส้นใย (เซลลูโลส) และเมื่อสังเกตที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ผลผลิตหลังการปรับสภาพ และย่อยด้วยน้ำเปล่ามีลักษณะเป็นรูหรือช่องว่างที่ใหญ่กว่าการใช้ด่างกรดอินทรีย์ ซึ่งลักษณะดังกล่าวบ่งบอกว่าการน้ำเปล่าช่วยย่อยเส้นใยให้เป็ง และน้ำตาลได้ดีกว่าการด่างกรดอินทรีย์

4.7 การหมักเปลือกสับประรดด้วยยีสต์ขนมปัง

4.7.1 การหมักผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

จากการทดลองโดยการออกแบบโดยใช้ โปรแกรม RSM ที่มีตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปร คือ พีเอช(pH)ปริมาณยีสต์ขนมปัง(Y; เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)อุณหภูมิ(T; องศาเซลเซียส) และระยะเวลาในการหมัก(t; วัน) ตัวแปรตามคือปริมาณเอทานอล ดังแสดงในตารางที่ 4-8

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ตามหลัก Analysis of variance (ANOVA) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติในการหาปริมาณเอทานอล แล้วนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Essential regression สามารถสร้างแบบจำลองสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆดังสมการที่ (4.5)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเอทานอล(ร้อยละ)} = & 58.45 - 1.548 * T - 3.668 * t - 5.998 * \text{pH} - 0.330 * Y + 0.02594 * T * T + \\ & 0.00351 * t * t + 0.840 * \text{pH} * \text{pH} + 0.07305 * Y * Y + 0.07088 * T * t - 0.120 * T * \text{pH} - 0.00590 * T * Y + \\ & 0.222 * t * \text{pH} - 0.00476 * t * Y - 0.02278 * \text{pH} * Y \quad (4.5) \end{aligned}$$

ตารางที่ 4-8แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการหมักเปลือกสับประดด้วยการใช้
ยีสต์ขมบั้งที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่า

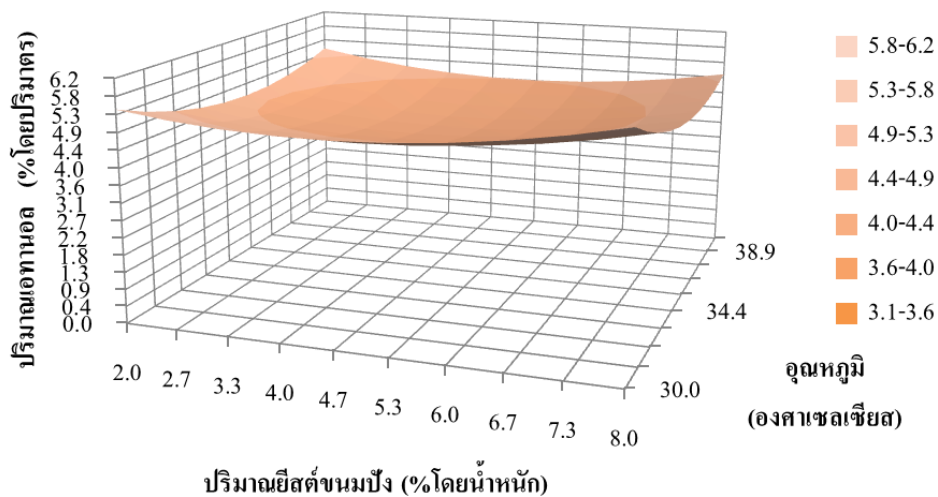
การทดลอง ที่	อุณหภูมิ (องศา- เซลเซียส)	เวลา (วัน)	พีเอช	ปริมาณยีสต์ ขมบั้ง (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเอทานอล (%โดยปริมาตร)	
					ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	30	5	5.5	5	4.949	5.142
2	33	7	6.0	7	5.149	5.011
3	33	7	6.0	4	5.053	4.891
4	33	7	5.0	7	4.620	4.410
5	33	7	5.0	4	4.103	4.169
6	33	4	6.0	7	5.033	5.050
7	33	4	6.0	4	4.932	4.939
8	33	4	5.0	7	5.211	5.063
9	33	4	5.0	4	4.999	4.832
10	35	8	5.5	5	4.082	4.335
11	35	2	5.5	5	3.925	4.025
12	35	5	6.5	5	4.851	4.936
13	35	5	4.5	5	4.505	4.773
14	35	5	5.5	8	4.480	4.767
15	35	5	5.5	2	4.491	4.557
16	35	5	5.5	5	4.083	4.093
17	35	5	5.5	5	4.123	4.093
18	35	5	5.5	5	4.072	4.093
19	38	7	6.0	7	4.840	4.828
20	38	7	6.0	4	4.873	4.849
21	38	7	5.0	7	4.952	4.773
22	38	7	5.0	4	4.869	4.673
23	38	4	6.0	7	4.094	3.856
24	38	4	6.0	4	3.856	3.887

การทดลอง ที่	อุณหภูมิ (องศา- เซลเซียส)	เวลา (วัน)	พีเอช	ปริมาณยีสต์ ขนมปัง (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเอทานอล (%โดยปริมาตร)	
					ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
25	38	4	5.0	7	4.432	4.415
26	38	4	5.0	4	4.359	4.325
27	40	5	5.5	5	4.291	4.452

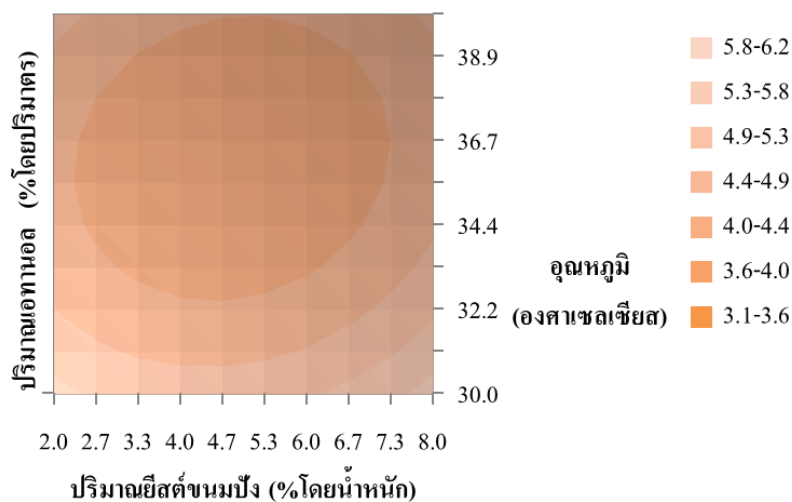
ผลการทดลองพบว่า ปริมาณยีสต์ขนมปังมีผลมากที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4-8 จากการที่นำค่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการทดลองและค่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการทำนายมาพล็อตกราฟ จะได้ R^2 มีค่าเท่ากับ 0.935 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง (R^2 adjusted = 0.858) จากข้อมูลแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับค่าปริมาณเอทานอลในรูปของกราฟพื้นผิวและกราฟโครงร่างได้ดังภาพประกอบที่ 4-15 ถึง ภาพประกอบที่ 4-20

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยคือ พีเอชปริมาณยีสต์ขนมปังอุณหภูมิ และระยะเวลาในการหมักที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลได้นำเสนอในรูปของกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) และกราฟโครงร่าง (Contour plot) ของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลดังภาพประกอบที่ 4-15 ถึง ภาพประกอบที่ 4-20

(1) ผลของปริมาณยีสต์ขนมปัง และอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)



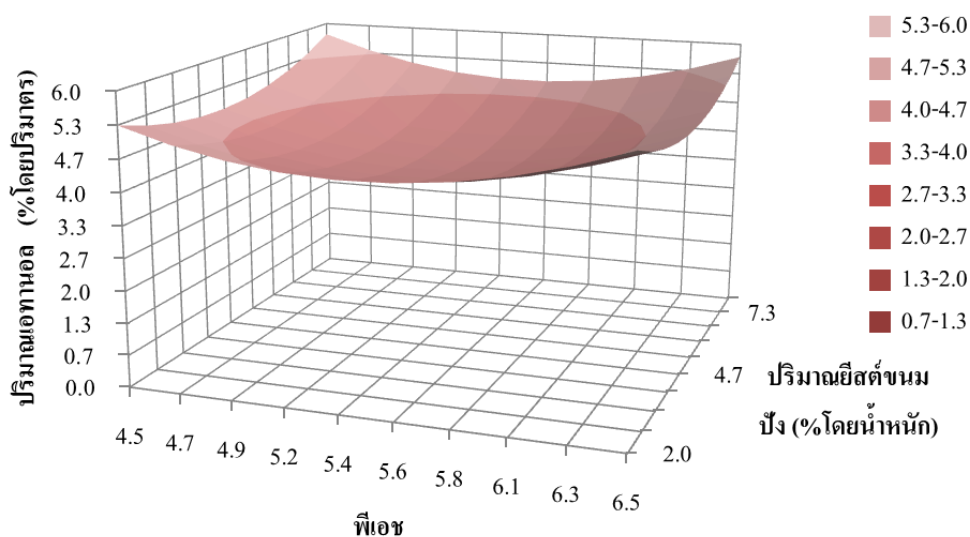
(ข)

ภาพประกอบที่ 4-15 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยีสต์ และอุณหภูมิขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้พีเอช5.5 และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

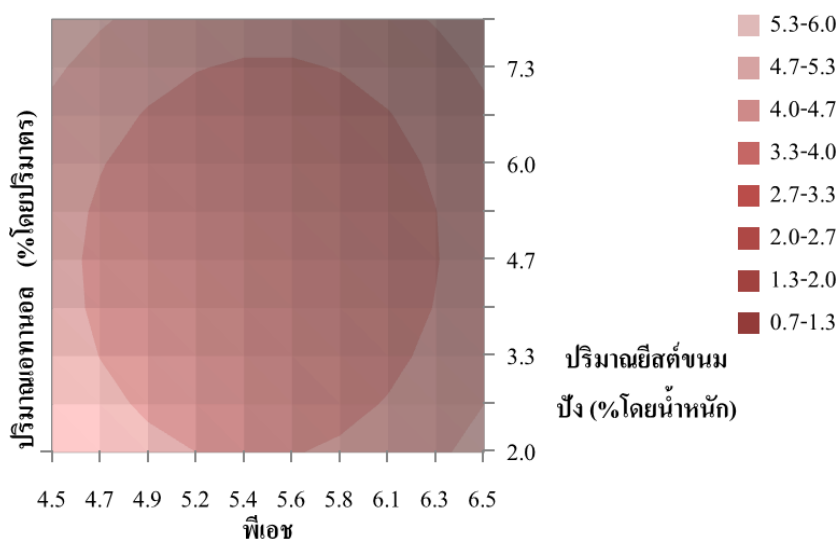
ผลของปริมาณยีสต์ขนมปัง และอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-15 (ก) และ (ข) พบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด(5.5-6.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) และเมื่ออุณหภูมิยิ่งเพิ่มสูงขึ้นก็จะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลที่ลดลง

โดยร้อยละปริมาณยีสต์ขบวนการที่ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลมากที่สุดพบว่าอยู่ที่ช่วง 7.3-8.0 โดย น้ำหนักและ 2.0-3.0 โดยน้ำหนัก

(2) ผลของพีเอชและปริมาณยีสต์ขบวนการที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)

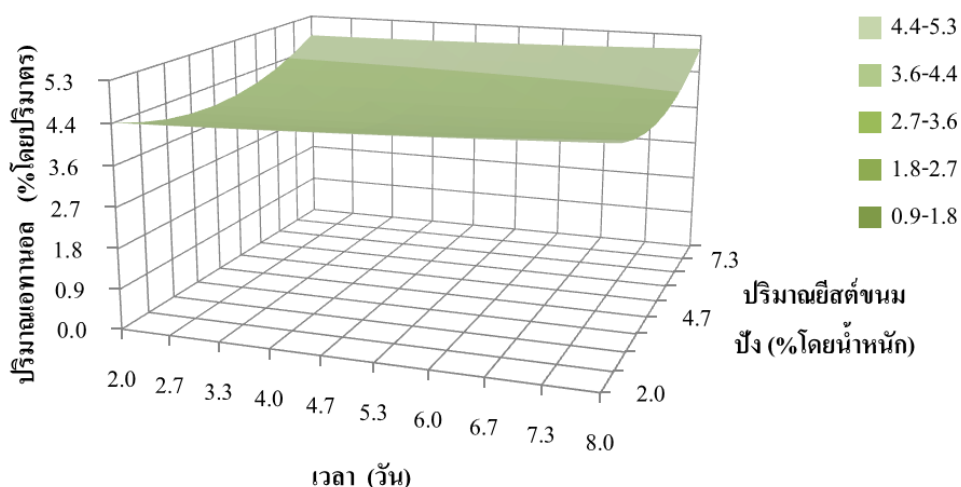


(ข)

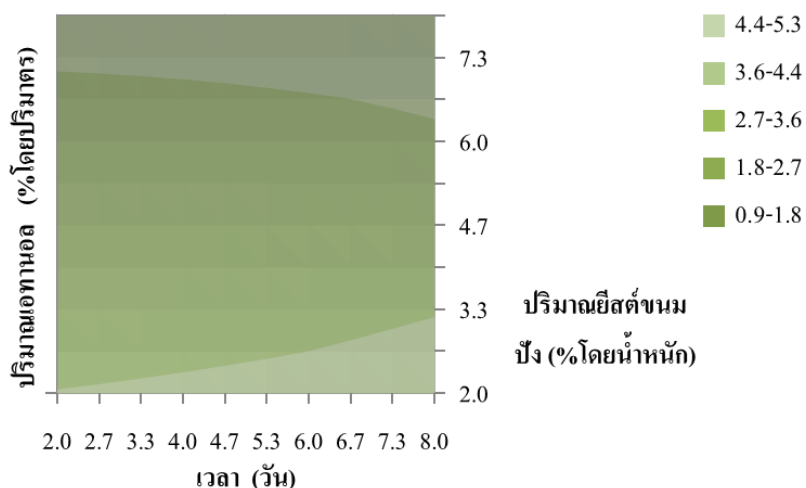
ภาพประกอบที่ 4-16 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและ ปริมาณยีสต์ขบวนการที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและระยะเวลาใน การหมัก 5 วัน

ผลของพีเอชและปริมาณยีสต์ขมบ่งที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-16(ก) และ (ข) พบว่าร้อยละปริมาณยีสต์ขมบ่งที่ 2.0-2.7 โดยน้ำหนัก และ 7.3-8.0 โดยน้ำหนักจะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด (5.0-6.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) โดยพีเอชที่ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลมากที่สุดพบว่าอยู่ที่ช่วงขอบคือ พีเอช 4.5-5.0 กับพีเอช 6.0-6.5

(3) ผลของเวลาและปริมาณยีสต์ขมบ่งที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)

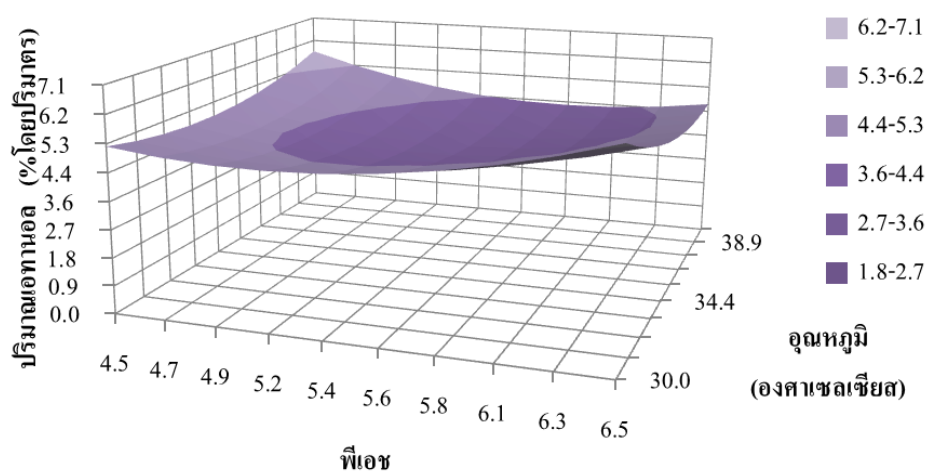


(ข)

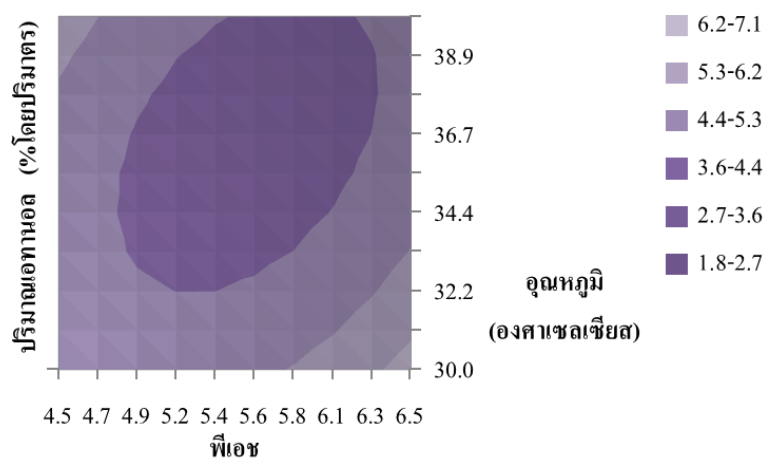
ภาพประกอบที่ 4-17 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณยีสต์ขมบ่งที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและพีเอช 5.5

ผลของเวลาและปริมาณยีสต์ขุ่นมัวซึ่งมีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-17 (ก) และ (ข) พบว่าร้อยละปริมาณยีสต์ขุ่นมัวที่ 2.0-2.7 โดยน้ำหนัก และ 7.3-8.0 โดยน้ำหนักจะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด (4.5-5.3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) โดยเวลาที่ในการหมักไม่ได้ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้นหรือลดลง

(4) ผลของพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)

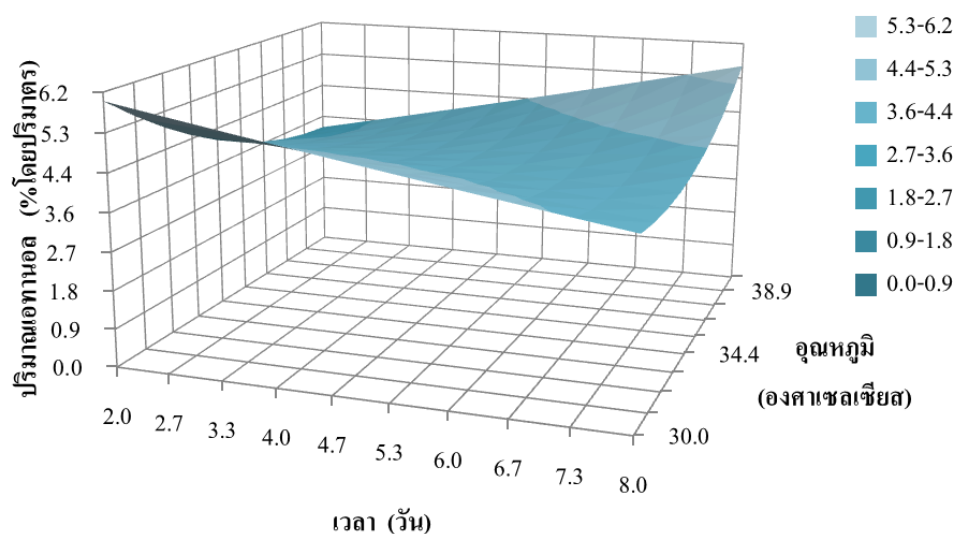


(ข)

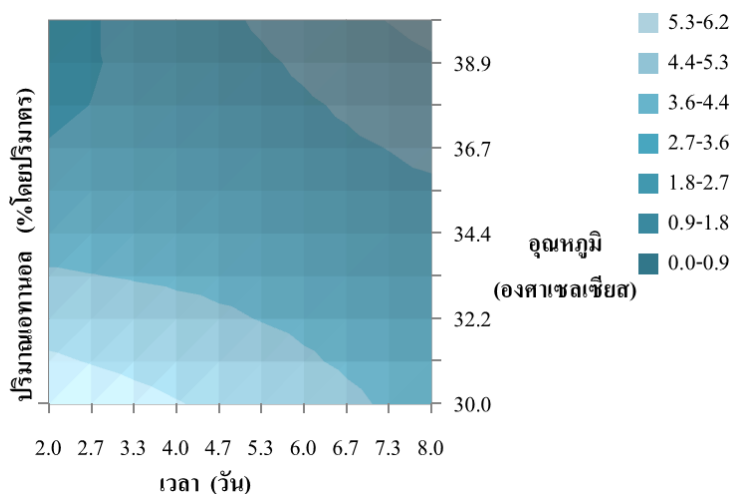
ภาพประกอบที่ 4-18 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขุ่นมัวร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ผลของพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-18 (ก) และ (ข) พบว่าอุณหภูมิที่ชอบ คือ 30 องศาเซลเซียสและ 40 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด (5.0-6.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) โดยพีเอชที่ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด พบว่าอยู่ที่ช่วงขอบคือ พีเอช 4.5 กับพีเอช 6.5

(5) ผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)

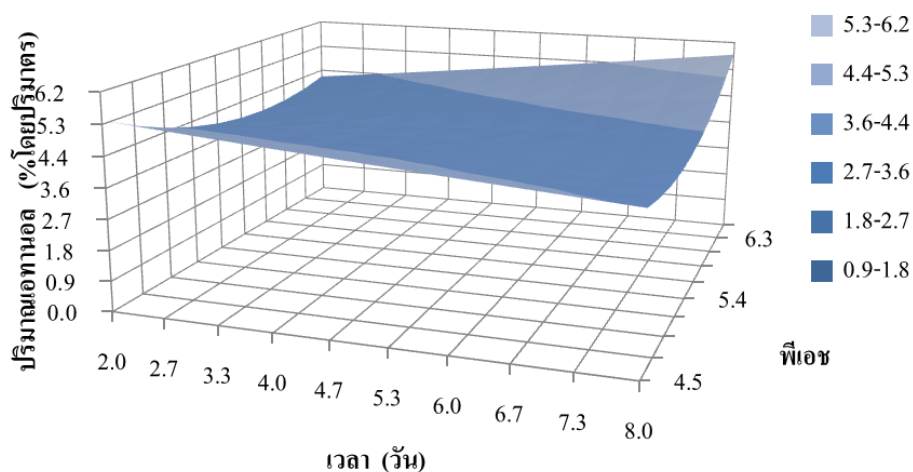


(ข)

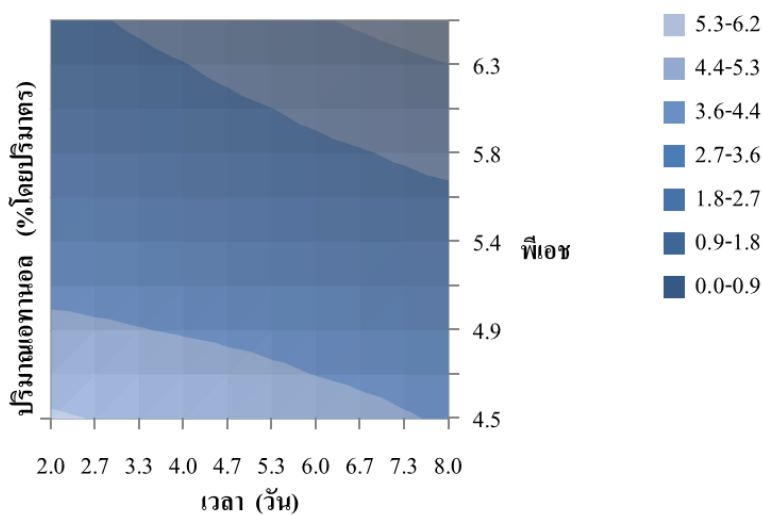
ภาพประกอบที่ 4-19 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และพีเอช 5.5

ผลของระยะเวลาในการหมักและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-19 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเหมาะสมเมื่อมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการหมัก 2-3 วันและที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน

(6) ผลเวลาและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4-20 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ผลของระยะเวลาในการหมักและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-20 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น (5.3-6.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) เมื่อใช้ระยะเวลาในการหมัก 2-3 วันพีเอช4.5-5.0 และที่ระยะเวลาในการหมัก 8 วัน พีเอช6.0-6.5

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมของหมักเอทานอลโดยใช้ยีสต์ขนมปัง ที่ผ่านการปรับสภาพ และย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่าพบว่า ปริมาณยีสต์ขนมปังมีผลมากที่สุดต่อการเพิ่มปริมาณเอทานอล เนื่องจากเมื่อพิจารณากราฟพื้นผิว และกราฟโครงร่าง (ภาพประกอบที่ 4-15 ถึง ภาพประกอบที่ 4-20) ซึ่งจากกราฟพบว่าปริมาณยีสต์มีแนวโน้มใกล้เคียงกันเมื่อพล็อตกราฟกับ ปัจจัยอื่นๆ ทั้ง 3 ปัจจัย โดยอาจเกิดจากการหมักเอทานอลผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่า เป็นกระบวนการที่ไม่มีสารเคมีมาเกี่ยวข้องในกระบวนการ จึงทำให้การทำงานของยีสต์แสดง ประสิทธิภาพได้มากที่สุด โดยควรจะดำเนินการหมักที่พีเอชเริ่มต้น6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดย น้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และทำการหมักเป็นระยะเวลา 2 วัน ทำให้ได้ปริมาณเอทานอล ร้อยละ 7.09โดยปริมาตร โดยเมื่อทำการทดลองจริงทำให้ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 6.65โดย ปริมาตรซึ่งมีผลได้ของเอทานอลเป็น 1,134 ลิตรต่อ 1 ตันเปลือกสับประด

4.7.2การหมักผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประดด้วยต่าง และกรดอินทรีย์พร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

จากการทดลองโดยการออกแบบโดยใช้ โปรแกรม RSM ที่มีตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปร คือ พีเอช(pH)ปริมาณยีสต์ขนมปัง(Y; เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อุณหภูมิ(T; องศาเซลเซียส) และ ระยะเวลาในการหมัก(t; วัน)ตัวแปรตามคือปริมาณเอทานอล ดังแสดงในตารางที่ 4-9

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ตามหลัก Analysis of variance (ANOVA) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติในการหาปริมาณเอทานอล แล้วนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Essential regression สามารถสร้างแบบจำลองสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆดังสมการที่ (4.6)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเอทานอล(ร้อยละ)} = & -10.86 + 0.359 * T - 0.257 * t + 1.736 * \text{pH} - 0.198 * Y + 6.33426 \text{E} - 05 * T * T \\ & + 0.00869 * t * t + 0.162 * \text{pH} * \text{pH} + 0.00713 * Y * Y + 0.01607 * T * t - 0.08342 * T * \text{pH} - 6.75961 \text{E} - \\ & 05 * T * Y - 0.05767 * t * \text{pH} - 0.00288 * t * Y + 0.03440 * \text{pH} * Y \quad (4.6) \end{aligned}$$

ตารางที่ 4-9 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการหมักเปลือกสับประดด้วยการใช้
ยีสต์ขนมปังที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประดด้วยเบสและกรดอินทรีย์

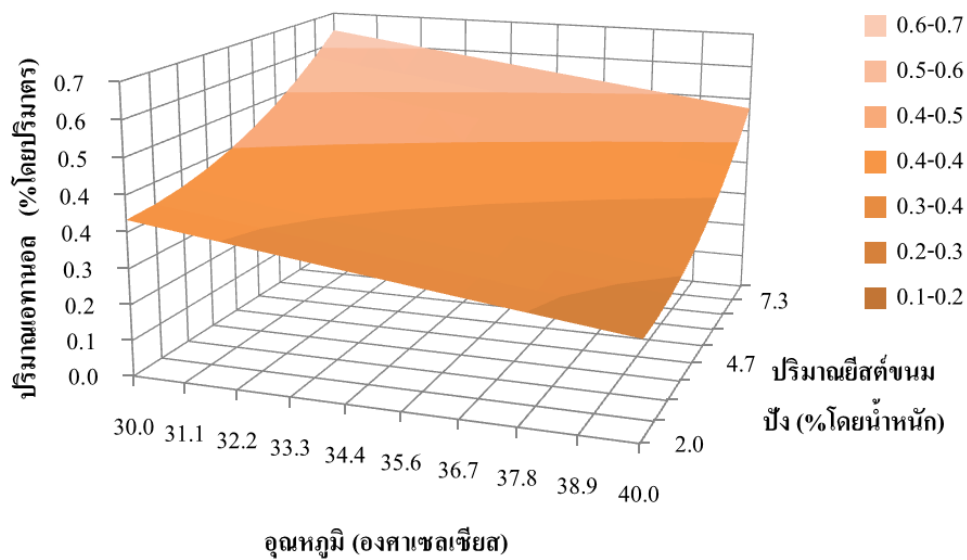
การทดลอง ที่	อุณหภูมิ (องศา- เซลเซียส)	เวลา (วัน)	พีเอช	ปริมาณยีสต์ ขนมปัง (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเอทานอล (%โดยปริมาตร)	
					ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	30	5	5.5	5	0.480	0.450
2	33	7	6.0	7	0.980	0.906
3	33	7	6.0	4	0.880	0.722
4	33	7	5.0	7	0.187	0.245
5	33	7	5.0	4	0.125	0.215
6	33	4	6.0	7	0.862	1.004
7	33	4	6.0	4	0.648	0.743
8	33	4	5.0	7	0.198	0.119
9	33	4	5.0	4	0.115	0.012
10	35	8	5.5	5	0.551	0.667
11	35	2	5.5	5	0.293	0.270
12	35	5	6.5	5	0.986	1.014
13	35	5	4.5	5	0.025	0.090
14	35	5	5.5	8	0.589	0.574
15	35	5	5.5	2	0.227	0.335
16	35	5	5.5	5	0.400	0.382
17	35	5	5.5	5	0.363	0.382
18	35	5	5.5	5	0.381	0.382
19	38	7	6.0	7	0.692	0.734
20	38	7	6.0	4	0.551	0.601
21	38	7	5.0	7	0.664	0.541
22	38	7	5.0	4	0.766	0.563
23	38	4	6.0	7	0.658	0.539
24	38	4	6.0	4	0.450	0.330

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)	พีเอช	ปริมาณยีสต์ขนมปัง (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเอทานอล (% โดยปริมาตร)	
					ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
25	38	4	5.0	7	0.026	0.123
26	38	4	5.0	4	0.022	0.067
27	40	5	5.5	5	0.210	0.333

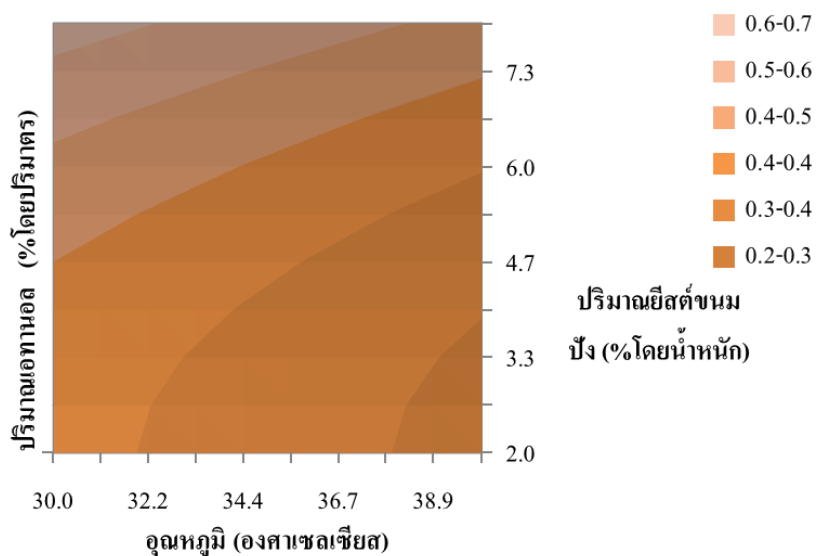
ผลการทดลองพบว่า พีเอชมีผลมากที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4-9 จากการทำค่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการทดลองและค่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการทำนายมาพล็อตกราฟ จะได้ R^2 มีค่าเท่ากับ 0.923 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง (R^2 adjusted = 0.833) จากข้อมูลแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับค่าปริมาณเอทานอลในรูปของกราฟพื้นผิวและกราฟโครงร่างได้ดังภาพประกอบที่ 4-21 ถึง ภาพประกอบที่ 4-26

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยคือ พีเอช ปริมาณยีสต์ขนมปัง อุณหภูมิ และระยะเวลาในการหมักที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลได้นำเสนอในรูปของกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) และกราฟโครงร่าง (Contour plot) ของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลดังภาพประกอบที่ 4-21 ถึง ภาพประกอบที่ 4-26

(1) ผลของอุณหภูมิและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)

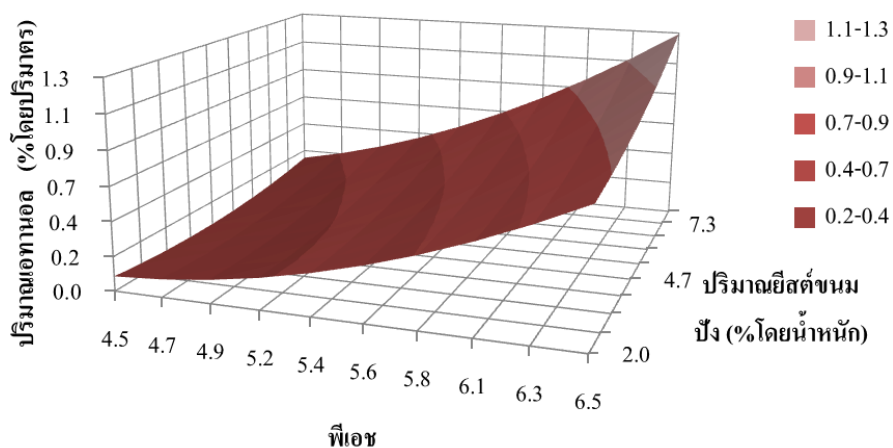


(ข)

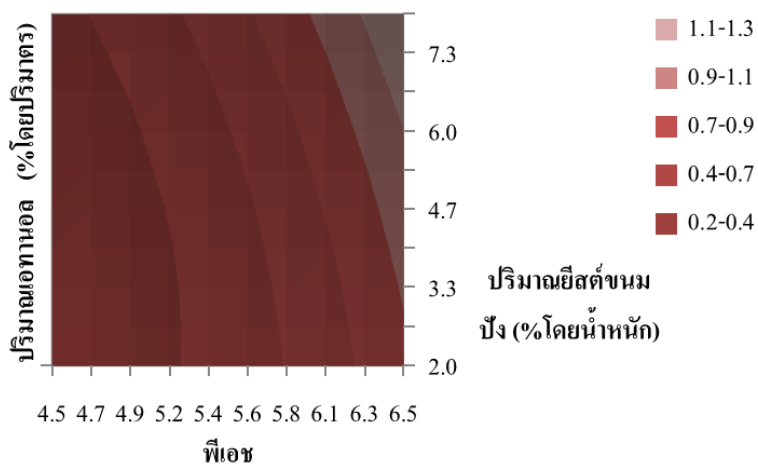
ภาพประกอบที่ 4-21 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้พีเอช 5.5 และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ผลของพีเอชและปริมาณยีสต์ขุ่นมัวที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-21 (ก) และ (ข) พบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด(0.6-0.7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) โดยร้อยละปริมาณยีสต์ขุ่นมัวที่ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลมากที่สุดอยู่ที่ ช่วง7.3-8.0 โดยน้ำหนัก

(2) ผลของพีเอชและปริมาณยีสต์ขุ่นมัวที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)

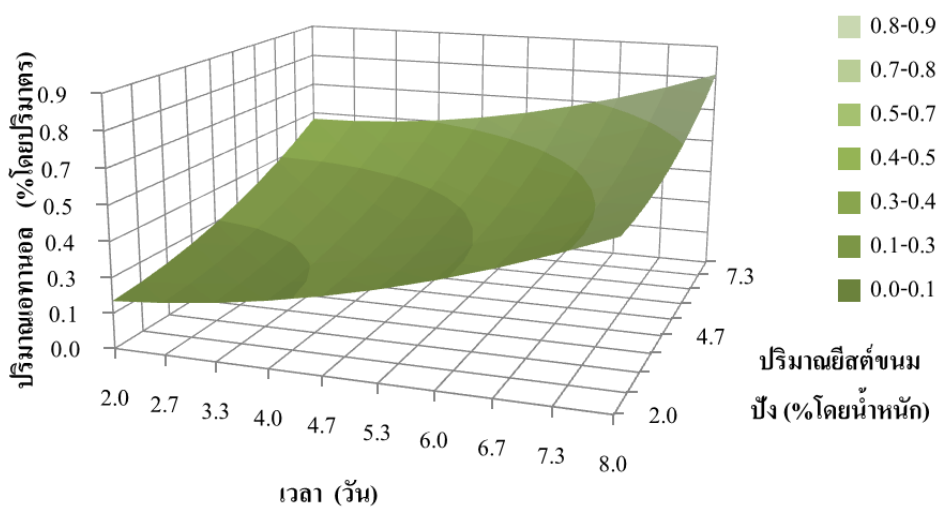


(ข)

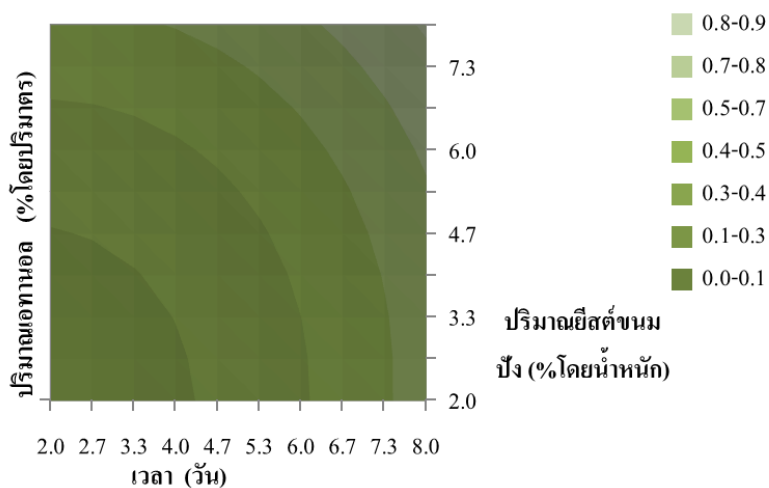
ภาพประกอบที่ 4-22 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณยีสต์ขุ่นมัวที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ผลของพีเอชและปริมาณยีสต์ขมบั้งที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-22 (ก) และ (ข) พบว่าร้อยละปริมาณยีสต์ขมบั้งในช่วง 7.3-8.0 โดยน้ำหนักจะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด(1.0-1.3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) โดยพีเอชที่ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลมากที่สุดคือ พีเอช6.5

(3) ผลของเวลาและปริมาณยีสต์ขมบั้งที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)

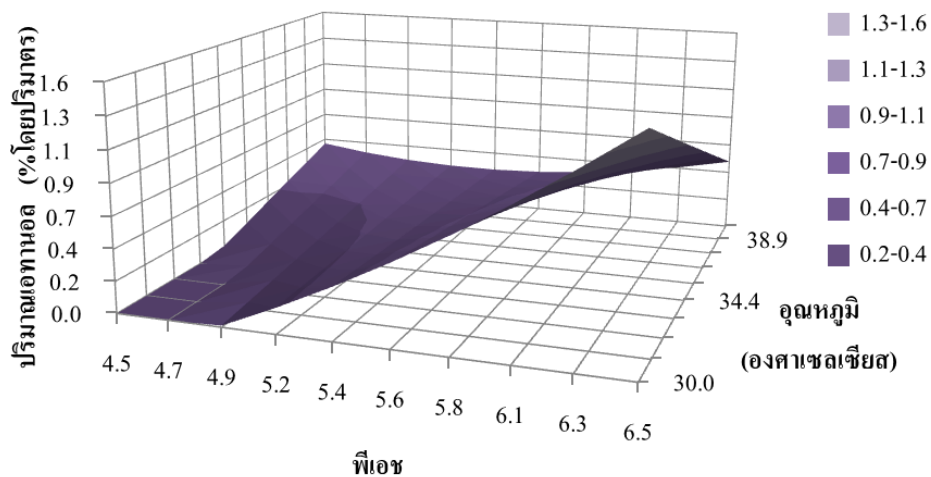


(ข)

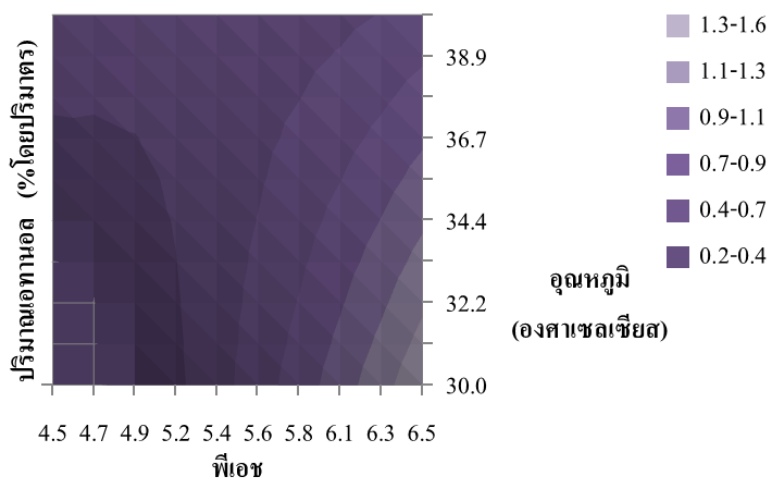
ภาพประกอบที่ 4-23 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณยีสต์ขมบั้งที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและพีเอช 5.5

ผลของเวลาและปริมาณยีสต์ขุ่นมัวที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-23 (ก) และ (ข) พบว่าร้อยละปริมาณยีสต์ขุ่นมัวในช่วง 7.3-8.0 โดยน้ำหนักจะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด (0.8-0.9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่เวลาในการหมัก 8 วัน

(4) ผลของพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)

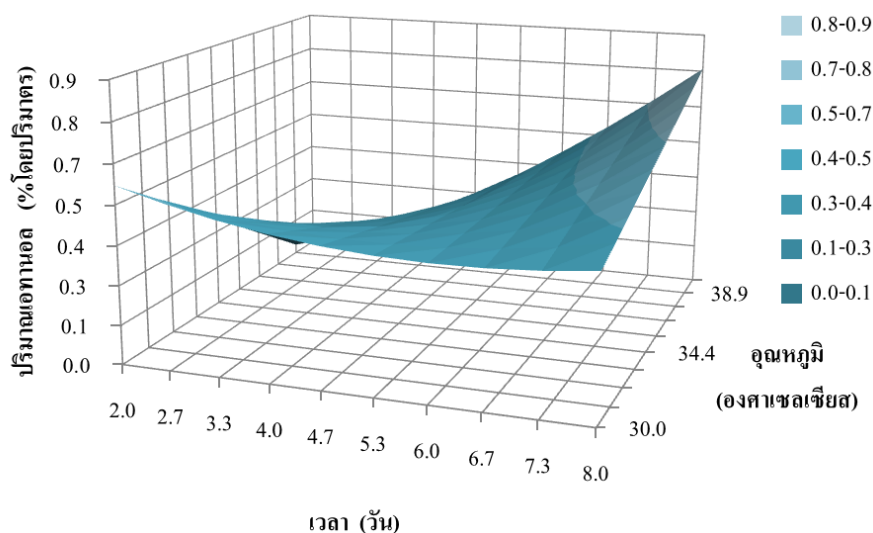


(ข)

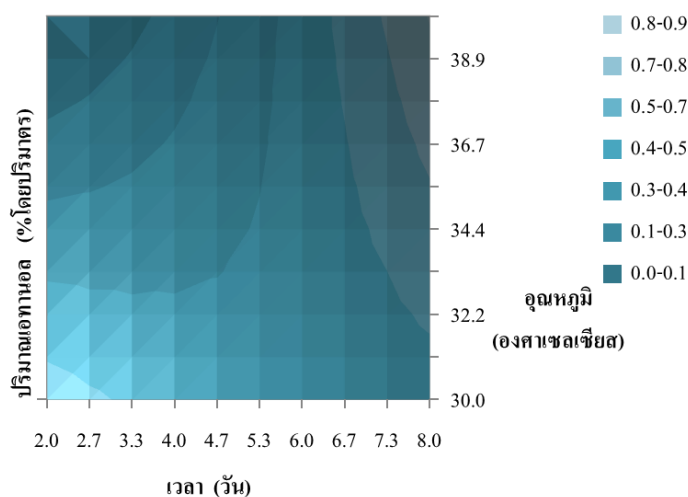
ภาพประกอบที่ 4-24 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขุ่นมัวร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ผลของพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-24 (ก) และ (ข) พบว่าอุณหภูมิค่า คือ 30 องศาเซลเซียสจะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด (1.0-1.6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) และพีเอชที่ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลมากที่สุดคือ พีเอช6.5

(5) ผลของเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)

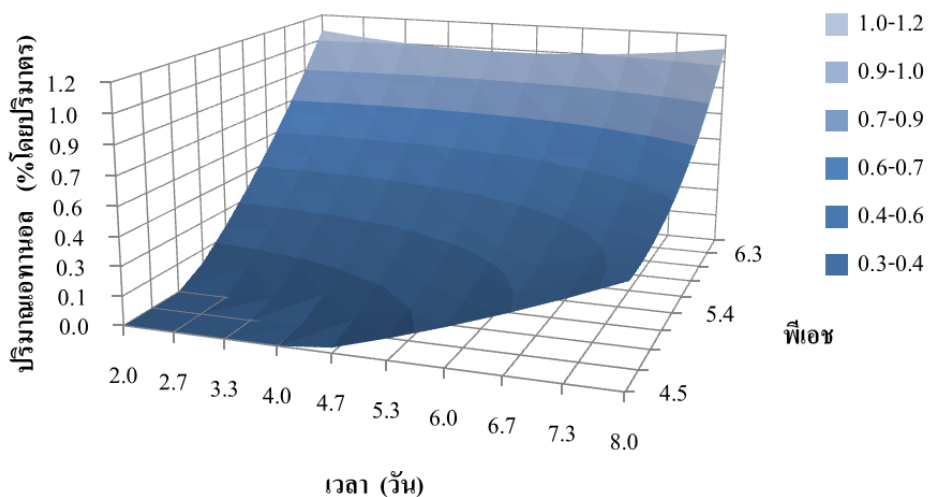


(ข)

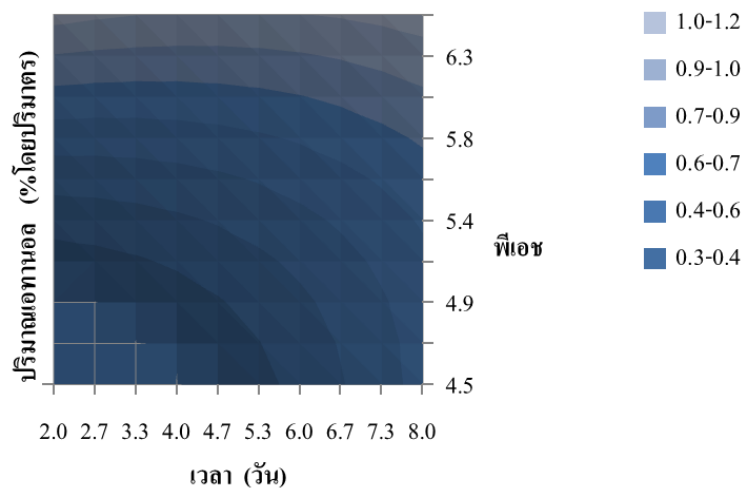
ภาพประกอบที่ 4-25 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้ปริมาณยีสต์ขุ่นมบั้งร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และพีเอช 5.5

ผลของระยะเวลาในการหมักและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-25 (ก) และ (ข) พบว่าอุณหภูมิที่ขอบ คือ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน และที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน ให้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด (0.8-0.9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)

(6) ผลเวลาและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4-26 กราฟพื้นผิว (ก) และกราฟโครงร่าง (ข) แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลโดยใช้ปริมาณยีสต์ขุ่นมบั้งร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ผลของระยะเวลาในการหมักและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังภาพประกอบที่ 4-26 (ก) และ (ข) พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น(1.0-1.2เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)ที่พีเอช5.5-6.5 โดยเวลาในการหมักไม่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดลงต่อปริมาณเอทานอล

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมของการหมักเอทานอลโดยใช้ยีสต์ขนมปัง ที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประดด้วยต่างกรดอินทรีย์พบว่า พีเอชมีผลมากที่สุดต่อการเพิ่มปริมาณเอทานอล เนื่องจากเมื่อพิจารณากราฟพื้นผิว และกราฟโครงร่าง (ภาพประกอบที่ 4-21 ถึง ภาพประกอบที่ 4-26) พบว่ากราฟที่พล็อตระหว่างพีเอชกับปัจจัยอื่นๆ ทั้ง 3 ปัจจัย ค่าพีเอชที่ได้มีแนวโน้มเดียวกัน คือ มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเกิดจากการหมักผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยต่าง-กรดอินทรีย์เป็นกระบวนการทางเคมี ส่งผลให้ค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอด ดังนั้นปัจจัยอื่นๆ จึงต้องขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในการดำเนินการ โดยควรจะดำเนินการหมักที่พีเอชเริ่มต้น6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และทำการหมักเป็นระยะเวลา 2 วัน ทำให้ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 2.15โดยปริมาตร โดยเมื่อทำการทดลองจริงทำให้ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 1.99โดยปริมาตรซึ่งมีผลได้ของเอทานอลเป็น 252 ลิตรต่อ 1 ตันเปลือกสับประด

เมื่อเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการหมักที่ได้จากการปรับสภาพและย่อยจากสองกระบวนการ พบว่าสภาวะในการหมักเป็นสภาวะเดียวกัน คือดำเนินการที่พีเอชเริ่มต้น 6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และทำการหมักเป็นระยะเวลา 2 วัน โดยผลการหมักด้วยยีสต์ขนมปังผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่าได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 6.65 โดยปริมาตร และผลการหมักด้วยยีสต์ขนมปังผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยต่างกรดอินทรีย์ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 1.99โดยปริมาตร ซึ่งปริมาณเอทานอลที่ได้มีค่าต่างกันมาก แต่อย่างไรก็ตามควรมีการประเมินทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นก่อนการสรุปว่าวิธีการแบบใดเหมาะสมกว่ากัน

4.8 การขยายขนาดชุดเครื่องมือในการปรับสภาพและย่อยพร้อมการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นขนาดความจุประมาณ 40 ลิตร

ชุดเครื่องมือประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ อุปกรณ์ (ตู้) ปล่อยคลื่นไมโครเวฟมีความจุประมาณ 40 ลิตร (เป็นขนาดใหญ่ซึ่งไม่มีจำหน่ายในท้องตลาด) และสร้างอุปกรณ์ (โถ) บรรจุสารที่ทำจากแก้วสำหรับทำการปรับสภาพและย่อยด้วยการให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะวางอยู่ในตู้ปล่อยคลื่นไมโครเวฟ โดยมีท่อนำไอน้ำจากอุปกรณ์บรรจุส่งไปยังชุดอุปกรณ์ควบแน่นเพื่อควบแน่นไอน้ำกลับมาในโถ

4.8.1 การขยายขนาดชุดเครื่องมือเป็นความจุประมาณ 40 ลิตร

หลังจากการศึกษาลักษณะการดำเนินการ ศึกษาการสร้างชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเบื้องต้น (ภาพประกอบที่ 3-2) และทดลองใช้งานเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดด้วยคลื่นไมโครเวฟแล้ว ทำให้สามารถขยายขนาดชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดใหญ่ขึ้นสำหรับขยายขนาดกำลังการผลิตและเพื่อเป็นต้นแบบสำหรับเป็นแนวทางการผลิตในเชิงการค้า ดังภาพประกอบที่ 4-27 แสดงชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดซึ่งมีตู้อุปกรณ์ปล่อยคลื่นไมโครเวฟความจุ 40 ลิตร ขนาดของตู้ไมโครเวฟ $0.40 \times 0.40 \times 0.25$ ลูกบาศก์เมตรชุดอุปกรณ์ควบแน่นขนาดความจุประมาณ 1.5 ลิตรและภาพประกอบที่ 4-28 แสดงลักษณะโถบรรจุสารละลายที่มีการขยายขนาดความจุเพิ่มขึ้นเป็น 5 ลิตร สำหรับการศึกษารายละเอียดกำลังการผลิต



ภาพประกอบที่ 4-27 ชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับการปรับสภาพและย่อยเปลือก
 สับปะรดซึ่งมีตู้อุปกรณ์ปล่อยคลื่นไมโครเวฟความจุ 40 ลิตร



ภาพประกอบที่ 4-28 ลักษณะโอบรรจุสารละลายที่มีการขยายขนาดความจุเพิ่มขึ้นจาก 2 ลิตร เป็น 5
 ลิตร

4.8.2 การทดลองใช้ชุดเครื่องมือที่มีความจุประมาณ 40 ลิตร

การขยายขนาดชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อเป็นต้นแบบสู่การผลิตเชิงการค้า ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากสามารถสร้างชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่มีประสิทธิภาพ สามารถดำเนินการได้ดีและให้ผลผลิตน้ำตาลหลังการปรับสภาพและย่อยใกล้เคียงกับชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเบื้องต้นที่ประยุกต์จากไมโครเวฟสำเร็จรูป และพบว่า การขยายขนาดกำลังการผลิต โดยใช้วัตถุดิบมากขึ้น (จากน้ำ 500 เป็น 2000 มิลลิลิตร) ทำให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์น้อยกว่าเล็กน้อย โดยตารางที่ 4-10 แสดงผลการเปรียบเทียบการปรับสภาพและย่อยโดยชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเบื้องต้นและชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟต้นแบบที่สร้างขึ้น และผลการขยายขนาดการผลิต ซึ่งชุดไมโครเวฟที่สร้างขึ้นขนาดความจุ 40 ลิตรนี้สามารถขยายขนาดการผลิตได้ถึงประมาณ 20 ลิตร โดยต้องใช้โอบรรจุสารละลายขนาด 30 ลิตร

ตารางที่ 4-10 เปรียบเทียบผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้หลังการปรับสภาพและย่อยโดยชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดความจุ 25 ลิตร และชุดขนาดความจุ 40 ลิตร

การปรับสภาพและ ย่อย	ปริมาณวัตถุดิบเปลือก สับประรดผสม สารละลาย (มิลลิลิตร)	ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	
		ชุดให้ความร้อนด้วย คลื่นไมโครเวฟ เบื้องต้นขนาดความจุ 25 ลิตร	ชุดให้ความร้อนด้วย คลื่นไมโครเวฟ ต้นแบบขนาดความจุ 40 ลิตร
น้ำเปล่า	500	11.600	10.732
	2000	-	10.191
โซเดียมไบคาร์บอเนต และกรดอะซิติก	500	12.239	11.323
	2000	-	10.810

4.9 ผลการประเมินต้นทุนการผลิตเบื้องต้น

ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้นและการประมาณต้นทุนการผลิตเอทานอลแสดงดังตารางที่ 4-11 ถึงตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-11 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะในกระบวนการผลิตเอทานอลระหว่างกระบวนการที่ใช้น้ำเปล่าและสารอินทรีย์ (โซเดียมไบคาร์บอเนตและกรดอะซิติก) ในการปรับสภาพและย่อย พบว่าภายใต้สภาวะที่เหมาะสมทั้งสองกระบวนการให้ผลผลิตเอทานอลในปริมาณที่แตกต่างกันมาก แม้ว่าในขั้นตอนการหมักทั้งสองกระบวนการได้สภาวะเหมาะสมที่เหมือนกันทั้งค่าพีเอช อุณหภูมิ ปริมาณยีสต์ และเวลาในการหมัก

ตารางที่ 4-11 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตเอทานอลของแต่ละกระบวนการผลิต

กระบวนการผลิต/สภาวะเหมาะสม	การปรับสภาพ	การย่อย	การหมัก	ผลผลิตเอทานอล (ร้อยละโดยปริมาตร, %v)
การใช้น้ำเปล่า	ปริมาณเปลือกสับประรด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 12 นาที		อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการหมักเป็นระยะเวลา 2 วัน พีเอช 6.5 และ ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก	6.65
การใช้สารอินทรีย์	เปลือกสับประรด 140 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร สารละลายต่าง ความเข้มข้น 1.59 โมลาร์ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 450 วัตต์ และใช้เวลาในการปรับสภาพ 10 นาที	สารละลายกรด ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 900 วัตต์ และใช้เวลาในการย่อย 11 นาที	อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการหมักเป็นระยะเวลา 2 วัน พีเอช 6.5 และ ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก	1.99

ตารางที่ 4-12 แสดงราคาวัตถุดิบ สารเคมี และสาธารณูปโภคที่ใช้ประมาณการคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิต

วัตถุดิบ สารเคมี และสาธารณูปโภค	ราคา (บาทต่อหน่วย)
โซเดียมไบคาร์บอเนต	0.007 บาทต่อกรัม
กรดอะซิติก	0.020 บาทต่อกรัม
น้ำเปล่า	0.013 บาทต่อลิตร
ยีสต์ขนมปัง	0.065 บาทต่อกรัม
สารละลายแอมโมเนีย	7.40 บาทต่อลิตร
ไฟฟ้า	1.700 บาทต่อหน่วย

หมายเหตุ ราคาวัตถุดิบและสารเคมี สืบค้นจาก www.Alibaba.com (30 ก.ย. 57)

อัตราแลกเปลี่ยน 1 US = 32.8 บาท

อัตราค่าน้ำ คิเคเฉลี่ยราคาระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐาน
และเหมืองแร่, 30 ก.ย. 57) 1 หน่วย คือ กิโลวัตต์*ชั่วโมง

ตารางที่ 4-13 ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากกระบวนการปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่า ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ค่าใช้จ่าย (ราคา)
1. การปรับสภาพ		
— เปลือกสับประรด	882 กรัม	-
— น้ำเปล่า	6.7 ลิตร	0.08
— ไฟฟ้า	0.018 หน่วย	0.03
2. การหมัก		
— ยีสต์ขนมปัง	70.56 กรัม	4.58
— แอม โมเนีย 25% (ปรับ pH)	0.335 ลิตร	2.47
— ไฟฟ้า	0.77 หน่วย	1.31
3. การกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์เอทานอลเป็นร้อยละ 95		
— ไฟฟ้า	1.60 หน่วย	2.72
รวม		11.19

หมายเหตุ ไม่คิดราคาวัตถุดิบเปลือกสับประรด (วัสดุเหลือใช้และเหลือทิ้งสำหรับอุตสาหกรรมสับประรดกระป๋อง)

ตารางที่ 4-14ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากกระบวนการปรับสภาพและย่อยด้วยสารอินทรีย์ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ค่าใช้จ่าย (ราคา)
1. การปรับสภาพ		
— เปลือกสับประรด	3975 กรัม	-
— โซเดียมไบคาร์บอเนต	3696 กรัม	25.87
— น้ำเปล่า	28 ลิตร	0.36
— ไฟฟ้า	0.075 หน่วย	0.13
2. การย่อย		
— กรดอะซิติก	3.08 กรัม	0.06
— ไฟฟ้า	0.165 หน่วย	0.28
3. การหมัก		
— ยีสต์ขนมปัง	318 กรัม	20.67
— แอมโมเนีย 25% (ปรับ pH)	0.7 ลิตร	5.18
— ไฟฟ้า	0.77 หน่วย	1.31
4. การกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์เอทานอลเป็นร้อยละ 95		
— ไฟฟ้า	1.60 หน่วย	2.72
รวม		56.58

ตารางที่ 4-15เปรียบเทียบผลผลิตเอทานอลที่ได้จากการใช้วัตถุดิบชนิดต่างๆผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ

วัตถุดิบ	ผลผลิต (ลิตรต่อตัน)	อ้างอิง
เปลือกสับประรด (น้ำเปล่า)	1,134	งานวิจัยนี้
เปลือกสับประรด (ค่ากรดอินทรีย์)	252	
แกนข้าวโพด (ใช้สารอินทรีย์)	346	ข้อมูลจาก สิรินาฏ และคณะ (2557)
แกนข้าวโพด (ใช้สารอินทรีย์)	616	

ผลผลิตจากการหมักถูกเพิ่มความบริสุทธิ์เอทานอลเป็นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 โดยกลั่นด้วยชุดเครื่องกลั่นแบบ Packed-Column มีความสูงของคอลัมน์ 50 เซนติเมตร บรรจุ Packing ขนาดชั้นละ 0.5 นิ้ว กลั่นไอน้ำผ่าน Molecular sieve ชนิด 4A ใช้อุณหภูมิในการให้ความร้อน 85 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ เพื่อหาระยะเวลาในการได้ผลผลิตเอทานอลปริมาณ 1 ลิตร ซึ่งพบว่าใช้เวลาในการกลั่นประมาณ 30 นาที ด้วยกำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ เป็นข้อมูลในการประมาณการค่าไฟฟ้าสำหรับการกลั่นที่แสดงในตารางที่ 4-12 และ 4-13

การผลิตเอทานอลโดยใช้เปลือกสับประรดเป็นวัตถุดิบ ประกอบด้วยขั้นตอน การปรับสภาพ การย่อย การหมัก และการกลั่น สามารถประมาณต้นทุนการผลิต (ตารางที่ 4-12 และ 4-13) ได้ดังนี้

(1) การปรับสภาพด้วยน้ำเปล่า ย่อยด้วยน้ำเปล่า และหมักด้วยยีสต์ขนมปัง (Baker's Yeast) ให้ผลผลิตเอทานอลได้มากที่สุด 1,134 ลิตรต่อตัน มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 11.19 บาทต่อลิตร

(2) การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตย่อยด้วยกรดอะซิติก และหมักด้วยยีสต์ขนมปัง (Baker's Yeast) ให้ผลผลิตเอทานอลได้มากที่สุด 252 ลิตรต่อตัน มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 56.58 บาทต่อลิตร

การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการผลิตเอทานอลโดยใช้น้ำเปล่า (1) และโดยใช้สารอินทรีย์ (2) พบว่า กระบวนการผลิตเอทานอลโดยใช้น้ำเปล่าเป็นกระบวนการที่ปลอดภัยต่อผู้ผลิต ให้ผลได้สูงกว่า และมีต้นทุนในการสร้างเครื่องมืออุปกรณ์ในการผลิตต่ำกว่าด้วย เนื่องจากการใช้น้ำเปล่าไม่ต้องใช้วัสดุทนกรดต่างราคาแพง และเมื่อประมาณต้นทุนการผลิต ลักษณะการดำเนินการเบื้องต้น และการเปรียบเทียบผลผลิตเอทานอลที่ได้จากเปลือกสับประรดของงานวิจัยนี้กับการผลิตจากวัตถุดิบอื่นๆ (ตารางที่ 4-14) พบว่ากระบวนการผลิตจากงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกสับปะรด

สามารถสรุปได้ว่า เปลือกสับปะรดมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate) ซึ่งรวมเส้นใยอยู่ด้วย คิดเป็นร้อยละ 84.51 (เมื่อกำหนดด้วยฐานแห้ง) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในการเป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตเอทานอล และองค์ประกอบอื่นที่จะเป็นอุปสรรคสำหรับการย่อยเพื่อผลิตน้ำตาลมีอยู่น้อยคือ เถ้า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของลิกนิน

5.1.2 การปรับสภาพพร้อมการย่อยเปลือกสับปะรดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ คือ ปริมาณเปลือกสับปะรด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 12 นาที สามารถให้ผลผลิตปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 13.18 กรัมต่อลิตร

5.1.3 การปรับสภาพเปลือกและย่อยสับปะรดด้วยสารละลายต่างขรรคอินทรีย์โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้งโซดา) คือ ใช้เปลือกสับปะรด 140 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้น 1.59 โมลาร์ ที่กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ และใช้เวลาในการปรับสภาพ 10 นาที โดยจากการทดลองจริงได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 8.52 กรัมต่อลิตร

และการย่อยด้วยสารละลายกรดอะซิติกสภาวะที่เหมาะสมคือ สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 900 วัตต์ และเวลาในการย่อย 11 นาที โดยจากการทดลองจริงจะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 7.85 กรัมต่อลิตร

5.1.4 การหมักด้วยยีสต์ขนมปัง

การหมักผลผลิตหลังผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่าพบสภาวะที่เหมาะสมคือ ดำเนินการหมักด้วยพีเอชเริ่มต้น 6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 วัน ทำให้ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 6.65 โดยปริมาตร

การหมักผลผลิตหลังผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรดด้วยต่าง-กรดอินทรีย์ สภาวะที่เหมาะสมคือ ดำเนินการหมักที่พีเอชเริ่มต้น 6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 วัน ทำให้ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 1.99 โดยปริมาตร

5.1.5 เปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตเอทานอล

(1) การหมักเปลือกสับประรดด้วยการใช้ยีสต์ขนมปังที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่าให้ผลผลิตเอทานอลได้มากที่สุด 1,134 ลิตรต่อตัน มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 11.19 บาทต่อลิตร

(2) การหมักเปลือกสับประรดด้วยการใช้ยีสต์ขนมปังที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกผ่านต่างและกรดอินทรีย์ให้ผลผลิตเอทานอลได้มากที่สุด 252 ลิตรต่อตัน มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 56.58 บาทต่อลิตร

จากการประมาณต้นทุนการผลิตเบื้องต้น พบว่าวิธีที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับประรดด้วยกระบวนการตามงานวิจัยนี้คือ การใช้วิธีการปรับสภาพและการย่อยด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และหมักด้วยยีสต์ขนมปัง เนื่องจากให้ปริมาณผลผลิตเอทานอลที่สูง เพิ่มมูลค่าให้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร สามารถสร้างทางเลือกใหม่ในการผลิตเอทานอลด้วยเทคโนโลยีแบบพึ่งตนเองได้อย่างคุ้มค่า มีต้นทุนการผลิตต่ำ ปลอดภัยต่อผู้ผลิต เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีการใช้กรด-ด่าง ไม่เกิดของเสียในกระบวนการ และมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ เหมาะต่อชุมชนและอุตสาหกรรม

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

5.2.1 ศึกษาการนำต่าง-กรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ มาใช้ในขั้นตอนการปรับสภาพ และย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อช่วยในการเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

5.2.2 ศึกษาการผลิตจากวัตถุดิบชนิดอื่นในการผลิตเอทานอล

5.2.3 ทดลองใช้ยีสต์ชนิดอื่น หรือทำการเพาะเลี้ยงเชื้อยีสต์เอง

5.2.4 ศึกษาวิธีการหมักแบบกึ่งกะ (Semi-bath) ซึ่งอาจจะให้ผลผลิต และผลได้ที่ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, ปฐมา จาตกานนท์, สิทธิโชค วัลลภาพิศย์ และสุทธิพันธุ์ แก้วสมพงษ์. 2549. การพัฒนาการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง โดยการปรับปรุงการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

เกษมณี ตาดทอง, ขนิษฐา สุกุลา, นฤมล เป็็นอินทร์ และวีรยา คำภา. 2546. การผลิตเอทานอล จากเปลือกสับปะรด. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสถาบันราชภัฏนครสวรรค์.

คณะกรรมการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. 2547. พลังงานทดแทนเอทานอล และไบโอดีเซล.

จตุพร ปานทอง. 2557. การประยุกต์ใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุในกระบวนการปรับสภาพ และย่อยเส้นใยปาล์มด้วยเอนไซม์เพื่อการผลิตเอทานอล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ชาญรัตน์ กงขุนเทียน. 2557. สับปะรด : ข้อมูลทั่วไปของสับปะรด. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นคร ทิพย์วงศ์. (2553). การผลิตเอทานอล: เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

ณัฐฐิยา วัฒนกิจจานุกุล. 2552. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้การย่อยสลายร่วมกับการหมัก. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: 1-53.

ปริยรัตน์ โยวะสุข. 2550. การศึกษาการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการทำให้น้ำตาลควบคู่กับการหมักจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- ยุทธศักดิ์ สุภการี. 2550. สภาพที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากเส้นใยปาล์มโดยวิธี Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF). คณะอุตสาหกรรมเกษตร. สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- รัชดาภรณ์ เบญจพัฒนานนท์. 2550. โครงการวิจัยการศึกษาการผลิตเอทานอลจากหยวกกล้วยโดยยีสต์ ด้วยวิธีการหมักแบบกะ. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย.
- วันสยา สุอังคะวาทีน. 2545. การเพิ่มอายุการเก็บรักษายีสต์ขนมปังแห้งด้วยสารกันหืน. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วิมลนาฏ ศรีโอพาร์. 2553. โครงสร้างอุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋องและการพยากรณ์แนวโน้มมูลค่าการส่งออกสับปะรดกระป๋องของประเทศไทย. คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สินีนารถ จงคง และชาคริต ทองอุไร. 2557. การปรับปรุงสภาพและย่อยแกนข้าวโพดด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อการผลิตเอทานอล. โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย (ทุนครุณาจารย์). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สมหวัง วีระวุฒิวงศ์, นवलพรรณ ณ ระนอง และคุณิ ธนะบริพัฒน์. 2534. การผลิตยีสต์ขนมปังจากน้ำกากสำ. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 7(2): 43-51.
- อัสมา หมาดหาล้า. 2555. การผลิตเอทานอลจากส่วนผสมเปลือกอ่อนของเต้าตาลโดนดและเปลือกส้ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กลาสเวเคมีคอล. 2553. โซเดียมไบคาร์บอเนต. เข้าถึงได้จาก: <http://glasswarechemical.com> (สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2556).

- ชวน คล้ายปาน. 2545. เตาอบไมโครเวฟ. เข้าถึงได้จาก: www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_2_2546_microwave.pdf (สืบค้นเมื่อวันที่ 8 มีนาคม 2556).
- ไทยอิตทอเรียล. 2555. ข้อมูลทั่วไปและความสามารถในการก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อมของกรดอะซิติก. เข้าถึงได้จาก: <http://www.thaieditorial.com> (สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2556).
- บริษัท กุญบุรีผลไม้มักระป๋อง จำกัด. 2553. ข้อมูลเปลือกสับปะรด. เข้าถึงได้จาก: <http://archive.wunjun.com/kuifeed/3/80.html> (สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2556).
- พรีน็อคอทคอม. 2557. เบคกิ้งโซดา (Baking Soda). เข้าถึงได้จาก: <http://frynn.com/เบคกิ้งโซดา/> (สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม 2557).
- ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ. 2557. กรดอะซิติก. เข้าถึงได้จาก: <http://gammaco.com/gammaco/th/3090020> (สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม 2557).
- Anita Singh, Narsi R. Bishnoi. 2013. Ethanol production from pretreated wheat straw hydrolyzate by *Saccharomyces cerevisiae* via sequential statistical optimization. 41: 221-226.
- Cong Chen, Dorin Boldor a, Giovanna Aita, Michelle Walker. 2012. Ethanol production from sorghum by a microwave-assisted dilute ammonia pretreatment. 110: 190-197.
- Guifen Gong, Danyu Liu, Yudong Huang. 2010. Microwave-assisted organic acid pretreatment for enzymatic hydrolysis of rice straw. *Biosystems engineer*. 107: 67-63.
- Hongqiang Li, Jian Xu. 2013. Optimization of microwave-assisted calcium chloride pretreatment of corn stover. 127: 112-118.
- J.N. Nigam. 1990. Continuous ethanol production from pineapple cannery waste. 72: 197-202.

- Jian Xu, Hongzhang Chen, Zso'fia Ka'da'r, Anne Belinda Thomsen, Jens Ejbye Schmidt, Huadong Peng. 2011. Optimization of microwave pretreatment on wheat straw for ethanol production. 35: 3859-3864.
- Mingjia Zhang, Fang Wang, Rongxin Su, Wei Qi, Zhimin He. 2010. Ethanol production from high dry matter corncob using fed-batch simultaneous saccharification and fermentation after combined pretreatment. *Bioresource Technology*. 101: 4959–4964.
- Mosier, N., Wyman C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapple, M. and Ladisch, M., R. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 96: 673-686.
- P. Saravanan, R. Muthuvelayudham, T. Viruthagiri. 2013. Enhanced Production of Cellulase from Pineapple Waste by Response Surface Methodology. Volume 2013 (2013), Article ID 979547, 8 pages.
- Shengdong Zhu. 2006. Microwave-assisted Alkali Pre-treatment of Wheat Straw and its Enzymatic Hydrolysis. *Biosystems Engineering*. 94: 437–442.
- Uran Bradley. 2007. THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY. Department of Mathematical Sciences Indiana University of South Bend.
- Yi-Huang Chang, Ku-Shang Chang, Cheng-Wei Huang, Chuan-Liang Hsu, Hung-Der Jang. 2012. Comparison of batch and fed-batch fermentation using corncob hydrolysis. 97 : 166-173.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) โดยวิธี Modified Dinitrosalicylic Acid (Miller, 1959)

1.1 การเตรียมสารละลาย Dinitrosalicylic Acid

ประกอบด้วยสารเคมีต่างๆดังต่อไปนี้

3,5-Dinitrosalicylic Acid	1% w/v
Phenol	0.2% w/v
Sodium potassium tartrate	20% w/v
Sodium hydroxyl	1% w/v
Sodium sulfite	0.05% w/v

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 400 มิลลิลิตร จากนั้นเติม Dinitrosalicylic Acid ปริมาณ 5 กรัม ฟีนอลปริมาณ 1 กรัม โซเดียมซัลไฟต์ปริมาณ 0.25 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 5 กรัม และโซเดียมโพแทสเซียมทาร์เทตปริมาณ 100 กรัม จากนั้นผสมให้เข้ากันด้วย Magnetic Stirrer ปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น สารละลายจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองส้มใส

1.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคสเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในสารตัวอย่าง

1.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูโคส

(1) เตรียม Stock สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยชั่งกลูโคสปริมาณ 0.1 กรัม จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

(2) เตรียมสารละลายมาตรฐานกลูโคสความเข้มข้น 100, 200, 300, 400, 500, 700, และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปิด Stock สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1, 2, 3, 4, 5, 7 และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 10 มิลลิลิตร

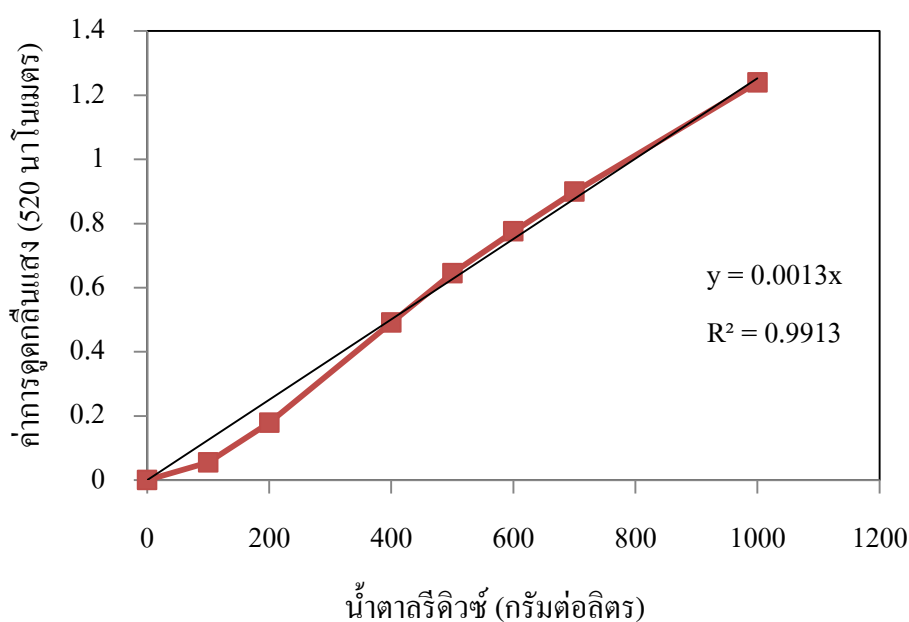
1.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์สารละลายกลูโคสเพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

(1) ปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูโคสความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

(2) ปิเปตสารละลาย Dinitrosalicylic Acid ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นนำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที

(3) นำสารตัวอย่างแช่ในน้ำแข็งประมาณ 5 นาที

(4) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงไปในสารตัวอย่าง เขย่าให้เข้ากัน และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ในแต่ละตัวอย่าง ไปสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพประกอบที่ ก-1



ภาพประกอบที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในสารตัวอย่าง

(1) ปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

(2) ปิเปตสารละลาย Dinitrosalicylic Acid ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นนำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที

(3) นำสารตัวอย่างแช่ในน้ำแข็งประมาณ 5 นาที

(4) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงไปในสารตัวอย่าง เขย่าให้เข้ากัน และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ในแต่ละตัวอย่าง ไปสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพประกอบที่ ก-1

2. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total Sugars) โดยวิธี Modified Phenol Sulfuric Method (Dubois et al., 1956)

2.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้

- (1) ปิเปต ขนาด 1 มิลลิลิตร และ 5 มิลลิลิตร
- (2) 5 เปอร์เซ็นต์ฟีนอล
- (3) 98 เปอร์เซ็นต์ กรดซัลฟูริก

2.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคสเพื่อใช้วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในสารตัวอย่าง

2.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายกลูโคสสำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

- (1) เตรียม Stock สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยชั่งกลูโคส 0.1 กรัม จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร
- (2) เตรียมสารละลายมาตรฐานกลูโคสความเข้มข้น 100, 200, 300, 400, 500, 700, และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปต Stock สารละลายกลูโคสความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1, 2, 3, 4, 5, 7 และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 10 มิลลิลิตร

2.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สารละลายกลูโคสเพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

- (1) ปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูโคสความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

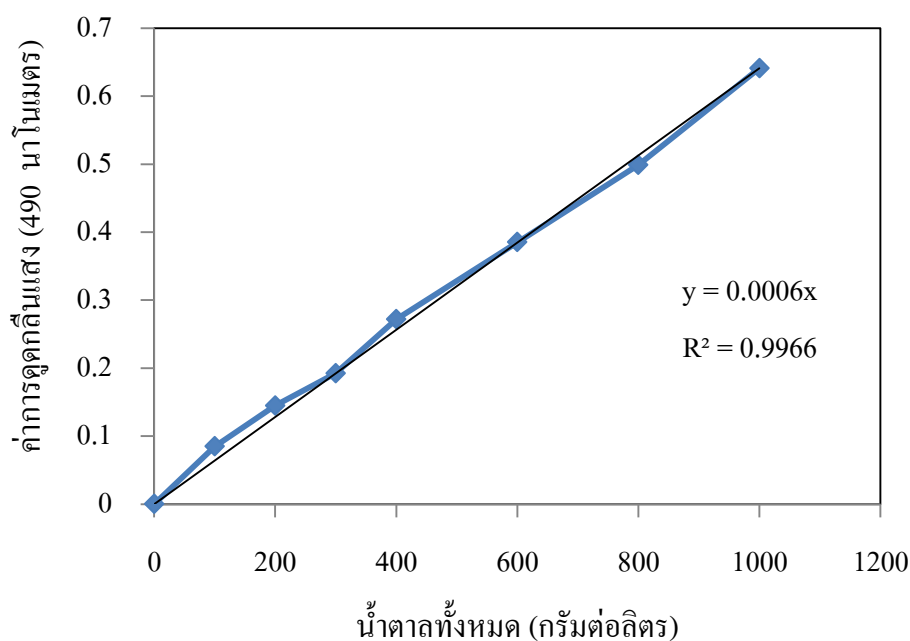
(2) ปิเปตสารละลาย 5 เปอร์เซ็นต์ฟีนอล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง
เขย่าให้เข้ากัน

(3) ปิเปตสารละลาย 98 เปอร์เซ็นต์กรดซัลฟูริก 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง
เขย่าให้เข้ากัน

(4) นำสารตัวอย่างไปให้ความร้อนด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส
เป็นระยะเวลา 30 นาที

(5) นำสารตัวอย่างแช่ในน้ำแข็งประมาณ 5 นาที

(6) นำสารตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ในแต่ละตัวอย่าง ไปสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพประกอบที่ ก-2



ภาพประกอบที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคสสำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด

2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในสารตัวอย่าง

- (1) ปิเปตสารตัวอย่าง ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง
- (2) ปิเปตสารละลาย 5 เปอร์เซ็นต์ฟีนอล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง
เขย่าให้เข้ากัน

(3) ปิเปตสารละลาย 98 เปอร์เซ็นต์กรดซัลฟูริก 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เขย่าให้เข้ากัน

(4) นำสารตัวอย่างไปให้ความร้อนด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที

(5) นำสารตัวอย่างแช่ในน้ำแข็งประมาณ 5 นาที

(6) นำสารตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ในแต่ละตัวอย่าง ไปสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพประกอบที่ ก-2

3. การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการหมัก

3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้

(1) 99.9 เปอร์เซ็นต์ เอทานอล

(2) เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography, GC)

3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเอทานอล

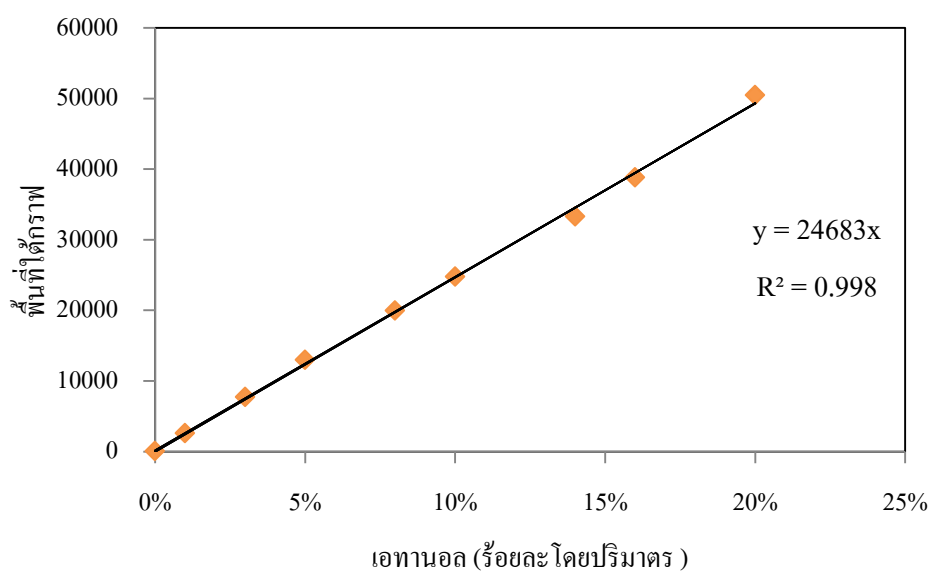
เตรียมสารละลายมาตรฐานเอทานอลความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 8, 10, 14, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตรต่อปริมาตร) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปิเปต 99.9 เปอร์เซ็นต์ เอทานอล ปริมาณ 1, 3, 5, 8, 10, 14, 16, และ 20 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

3.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายเอทานอลเพื่อใช้วิเคราะห์หาความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของเอทานอล

นำสารละลายมาตรฐานเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ ไปตรวจวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ที่สภาวะดังตารางที่ ก-1 จากนั้นนำค่าพื้นที่ใต้พีค ที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ ก-3

ตารางที่ ก-1 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)

	Condition
Inlet temperature	120 °C
Carrier gas	He, flow 44.6 ml/min, Split mode 2.0 min
Oven temperature	Initial temperature 120 °C held for 1 min 150 °C held for 3 min 200 °C held for 6.3 min
Column	HP-Innowax, length 30 m, internal diameter 0.32 mm and film thickness 0.25 μm



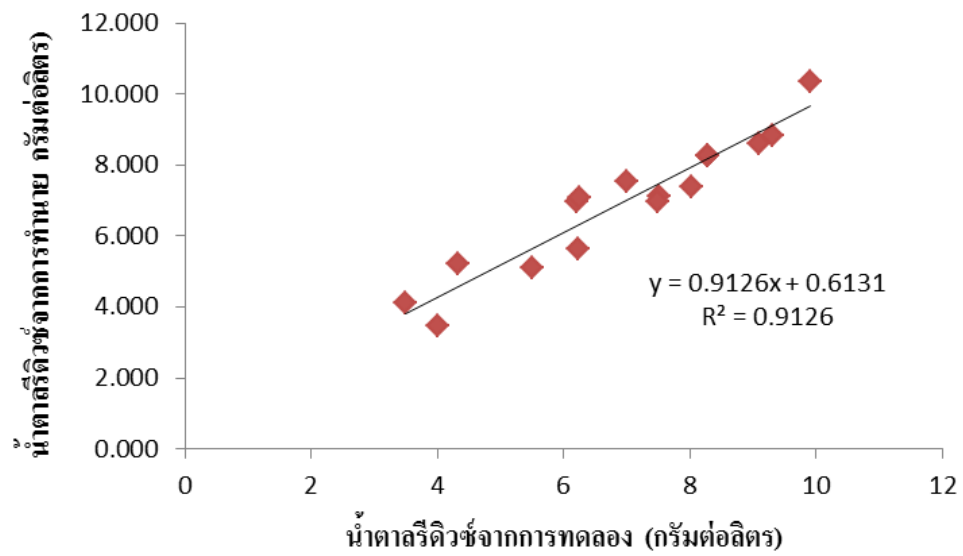
ภาพประกอบที่ ก-3 กราฟมาตรฐานเอทานอล

ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ข-1 แสดงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการปรับสภาพเปลือกสับประรด
ด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

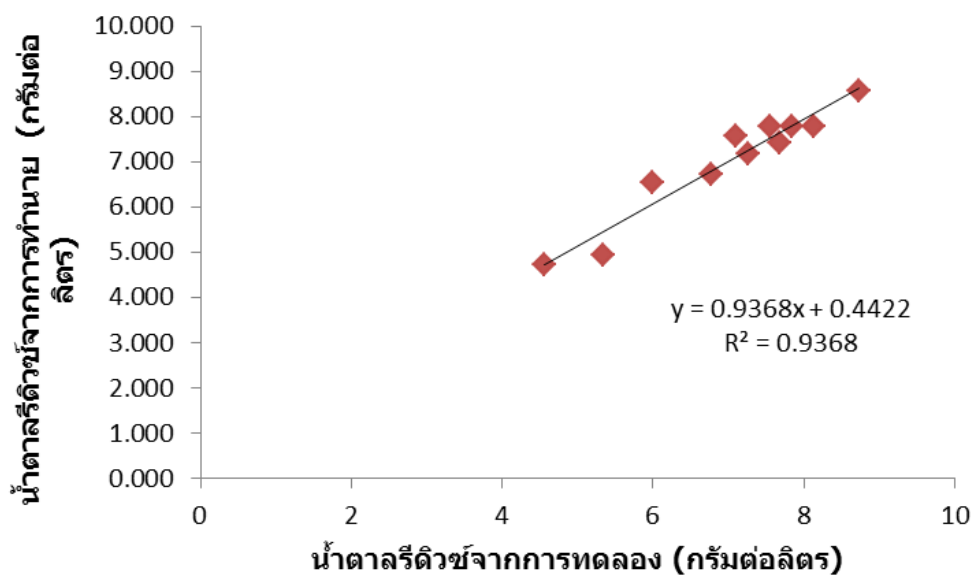
การทดลองที่	ปริมาณเปลือก สับประรดในน้ำ 1 ลิตร (กรัมต่อลิตร)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล รีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำตาล ทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)
1	148	720	17	6.2288	210
2	130	900	13	5.4385	260
3	112	720	17	4.2481	213
4	112	720	8	6.4077	250
5	148	270	8	9.2962	182
6	148	270	17	8.0250	244
7	130	90	13	9.2942	289
8	130	450	20	4.3250	234
9	112	270	8	8.4212	194
10	130	450	13	8.2865	178
11	148	720	8	9.0904	250
12	130	450	13	8.2865	178
13	112	270	17	7.4962	276
14	130	450	13	8.2865	178
15	100	450	13	2.7404	243
16	160	450	13	6.2577	315
17	130	450	5	6.1692	262



ภาพประกอบที่ ข-1 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำตาสรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ของกระบวนการปรับสภาพเปลือกสับประรด
ด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

ตารางที่ ข-2 แสดงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการย่อยเปลือกสับประดด้วย
น้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

การทดลองที่	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาล รีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำตาล ทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)
1	270	18	5.2615	248
2	450	20	7.6769	215
3	450	13	7.5558	178
4	720	18	6.7654	190
5	90	13	5.3442	219
6	450	5	8.7346	193
7	900	13	4.5671	173
8	720	7	7.2692	198
9	450	13	7.8442	193
10	450	13	8.1308	163
11	270	7	6.3769	209

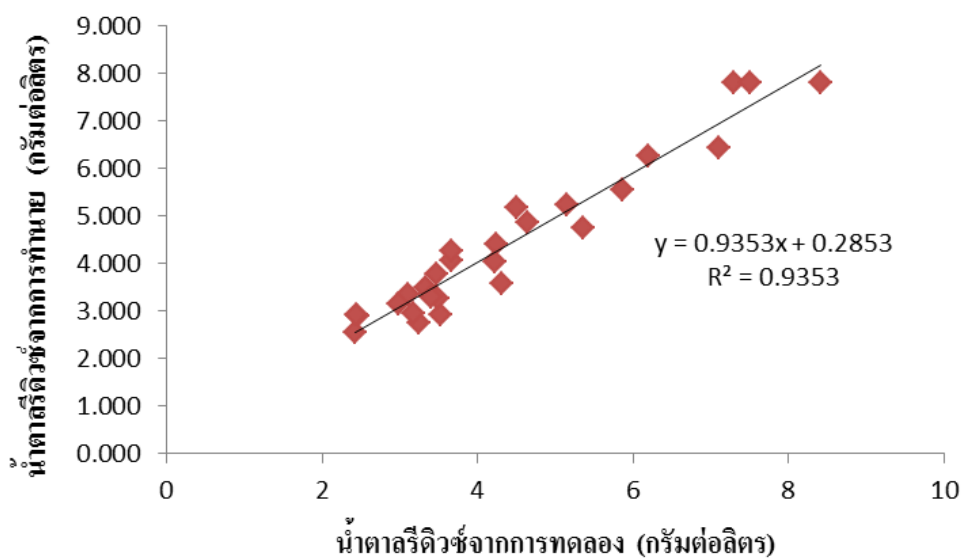


ภาพประกอบที่ ข-2 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำตาสรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ของกระบวนการย่อยเปลือกถั่วปรีดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

ตารางที่ ข-3 แสดงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดที่ได้จากการปรับสภาพเปลือกสับประดด้วย สารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้ง โซดา) โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

การทดลอง ที่	ปริมาณเปลือก สับประดในน้ำ 1 ลิตร (กรัมต่อลิตร)	สารละลาย โซเดียมไบ คาร์บอเนต (โมลาร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณ น้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณ น้ำตาล ทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)
1	130	1.00	450	11	5.8600	183
2	115	1.38	720	7	3.0969	248
3	115	1.38	270	16	2.4644	223
4	130	2.50	450	11	5.3558	229
5	160	1.75	450	11	7.9285	284
6	115	1.38	270	7	2.4150	147
7	130	1.75	900	11	3.5231	304
8	145	1.38	270	16	4.6463	200
9	145	1.38	270	7	5.1394	239
10	130	1.75	90	11	3.2423	351
11	145	1.38	720	7	6.1862	241
12	145	1.38	720	16	4.5048	222
13	145	2.13	720	16	3.3348	185
14	115	1.38	720	16	3.1692	196
15	130	1.75	450	11	6.5712	146
16	130	1.75	450	20	4.3077	360
17	115	2.13	720	7	2.9821	236
18	100	1.75	450	11	3.4919	173
19	130	1.75	450	11	7.4962	158
20	130	1.75	450	11	8.4192	171
21	115	2.13	270	7	3.3960	215
22	145	2.13	270	16	3.6592	223
23	145	2.13	270	7	3.6687	167

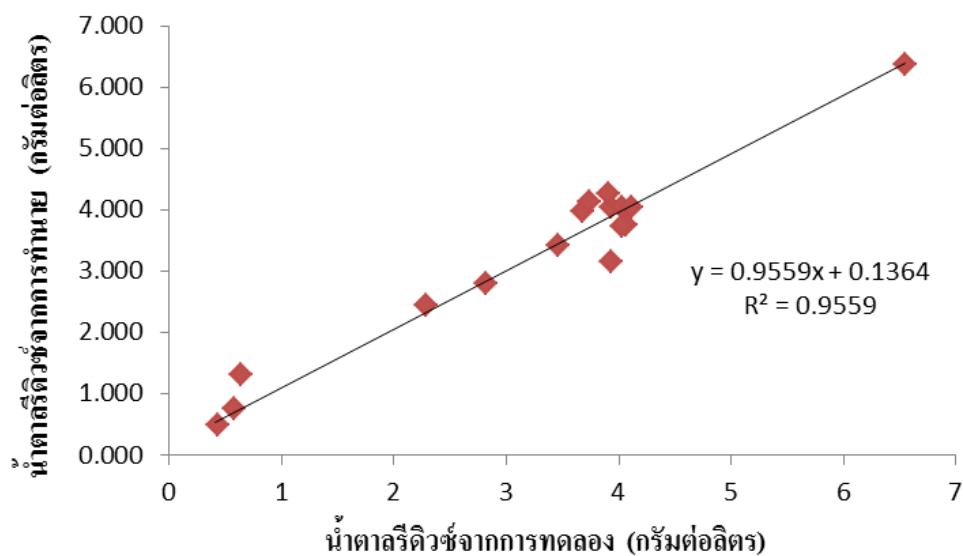
การทดลอง ที่	ปริมาณเปลือก สับประคในน้ำ 1 ลิตร (กรัมต่อลิตร)	สารละลาย โซเดียมไบ คาร์บอเนต (โมลาร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาทึ)	ปริมาณ น้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณ น้ำตาล ทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)
24	115	2.13	270	16	3.4615	255
25	145	2.13	720	7	4.2392	209
26	115	2.13	720	16	2.4302	193
27	130	1.75	450	2	4.2135	262



ภาพประกอบที่ ข-3 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ของกระบวนการปรับสภาพเปลือกสับประคด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (เบกกิ้ง โซดา) โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

ตารางที่ ข-4 แสดงปริมาณน้ำตาสรีวิซและน้ำตาทั้งหมดที่ได้จากการย่อยเปลือกสับประดด้วยสารละลายกรดอะซิติค โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

การทดลองที่	สารละลายกรดอะซิติค (โมลาร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาสรีวิซ (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำตาทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)
1	1.25	100	11	3.68077	168
2	0.80	262	6	2.29033	218
3	0.80	262	16	4.06615	164
4	1.70	262	6	2.81923	203
5	1.70	262	16	3.45385	229
6	0.50	500	11	6.55192	195
7	2.00	500	11	4.03077	211
8	1.25	500	2	0.41038	145
9	1.25	500	20	0.42846	241
10	1.25	500	11	3.93058	198
11	1.25	500	11	4.02423	214
12	1.25	500	11	4.11788	231
13	0.80	738	6	3.74327	392
14	0.80	738	16	3.91288	361
15	1.70	738	6	0.64385	180
16	1.70	738	16	0.57481	231
17	1.25	900	11	3.93269	164

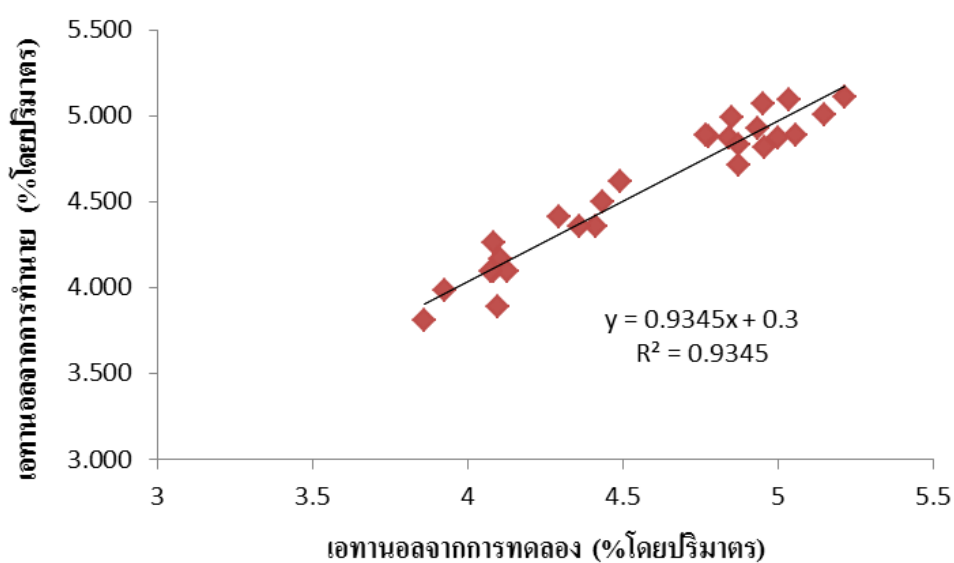


ภาพประกอบที่ ข-4 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำตาสรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรม Essential regression ของการย่อยเปลือกสับประดด้วยสารละลายกรดอะซิติก โดย
การให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

ตารางที่ ข-5 แสดงปริมาณเอทานอลที่ได้จากการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

การทดลอง ที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)	พีเอช	ปริมาณยีสต์ ขนมปัง (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเอทานอล (%โดยปริมาตร)
1	30	5	5.5	5	4.9498
2	33	7	6.0	7	5.14931
3	33	7	6.0	4	5.05317
4	33	7	5.0	7	4.62001
5	33	7	5.0	4	4.10396
6	33	4	6.0	7	5.03328
7	33	4	6.0	4	4.93253
8	33	4	5.0	7	5.21198
9	33	4	5.0	4	4.99921
10	35	8	5.5	5	4.0822
11	35	2	5.5	5	3.92501
12	35	5	6.5	5	4.8512
13	35	5	4.5	5	4.50516
14	35	5	5.5	8	4.4801
15	35	5	5.5	2	4.49146
16	35	5	5.5	5	4.08391
17	35	5	5.5	5	4.12397
18	35	5	5.5	5	4.07207
19	38	7	6.0	7	4.84068
20	38	7	6.0	4	4.87317
21	38	7	5.0	7	4.95278
22	38	7	5.0	4	4.86953
23	38	4	6.0	7	4.0947
24	38	4	6.0	4	3.85667

การทดลอง ที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)	พีเอช	ปริมาณยีสต์ ขนมปัง (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเอทานอล (%โดยปริมาตร)
25	38	4	5.0	7	4.43268
26	38	4	5.0	4	4.35939
27	40	5	5.5	5	4.2912

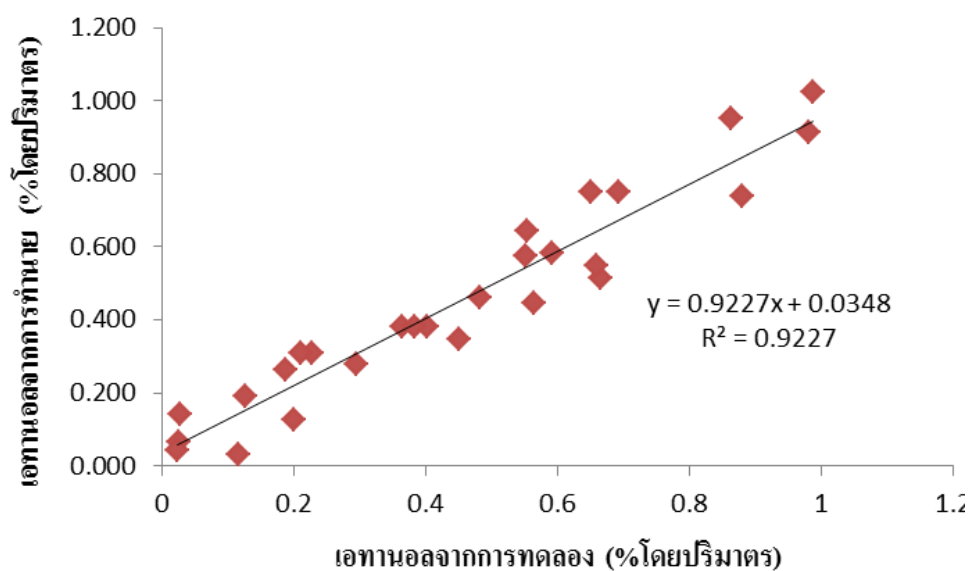


ภาพประกอบที่ ข-5 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำน่ายด้วยโปรแกรม Essential regression ของกระบวนการหมักเปลือกสับประรดด้วยการใช้ยีสต์ขนมปังที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า

ตารางที่ ข-6 แสดงปริมาณเอทานอลที่ได้จากการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประดด้วยเบสและกรดอ่อนอินทรีย์โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

การทดลอง ที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)	พีเอช	ปริมาณยีสต์ ขนมปัง (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเอทานอล (% โดยปริมาตร)
1	30	5	5.5	5	0.48093
2	33	7	6.0	7	0.98082
3	33	7	6.0	4	0.88022
4	33	7	5.0	7	0.18713
5	33	7	5.0	4	0.12559
6	33	4	6.0	7	0.86207
7	33	4	6.0	4	0.6489
8	33	4	5.0	7	0.19872
9	33	4	5.0	4	0.11518
10	35	8	5.5	5	0.55191
11	35	2	5.5	5	0.29303
12	35	5	6.5	5	0.98653
13	35	5	4.5	5	0.02535
14	35	5	5.5	8	0.58979
15	35	5	5.5	2	0.22703
16	35	5	5.5	5	0.40039
17	35	5	5.5	5	0.3632
18	35	5	5.5	5	0.38167
19	38	7	6.0	7	0.69289
20	38	7	6.0	4	0.55166
21	38	7	5.0	7	0.6647
22	38	7	5.0	4	0.76679
23	38	4	6.0	7	0.65898

การทดลอง ที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)	พีเอช	ปริมาณยีสต์ ขนมปัง (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเอทานอล (%โดยปริมาตร)
24	38	4	6.0	4	0.45075
25	38	4	5.0	7	0.0266
26	38	4	5.0	4	0.02297
27	40	5	5.5	5	0.21079



ภาพประกอบที่ ข-6 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำน่ายด้วยโปรแกรม Essential regression ของกระบวนการหมักเปลือกสับประดด้วยการใช้ยีสต์ขนมปังที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประดด้วยเบสและกรดอ่อนอินทรีย์

ภาคผนวก ค

บทความที่เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ



Optimization of microwave pretreatment without a reagent of pineapple peel

Phubet Pongsuwan^{1,a} and Sininart Chongkhong^{2,b*}

^{1,2}Department of Chemical engineering, Faculty of engineering,
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

^aphubet.g@hotmail.com, ^bcsininart@yahoo.com

Keywords: Pineapple peel, Pretreatment, Microwave

Abstract. The microwave pretreatment of pineapple peel for ethanol production was optimized by RSM (Response surface methodology). Three variables, which were studied, were peel to water ratio (100-160 g/L), microwave power (90-900 watt) and time (5-20 min). The optimal condition for reducing sugar production was 132 g/L peel to water ratio, 90 watt for 12 min that provide the 10.4 g/L of highest content. For total sugar production was 160 g/L ratio, 90 watt for 20 min that gave the optimum content of 579.9 g/L. This microwave pretreatment without a reagent could achieve the satisfied sugar content for ethanol fermentation that led to save time and energy consumption.

Introduction

Agricultural residues, the plentiful and unusable biomass in Thailand or other agricultural countries, can be used as alternative feedstocks for the ethanol production [1].

Peel of fruit, the residues left from canned fruit processing industries and fresh fruit shops, is the one of the agricultural residues. The production of fuel ethanol that used agricultural residues as raw materials requires the expensive pretreatment transforming the residues to fermentable sugars [2] because of a complex multi-component structure of the residues.

Microwave pretreatment is an efficient method [3,4] which can save energy consumption and can operate easily. Besides the hydrolysis of cellulosic materials in water solution could be enhanced by the microwave pretreatment.

The aim of this work has to evaluate the efficiency of microwave pretreatment of pineapple peel without the use of a reagent. The effects of peel to water ratio, microwave power and time on sugar contents in pretreated product would be investigated by RSM (Response Surface Methodology) [5].

Materials and Chemicals

Materials

Phu Lea pineapple peels (*Ananas comosus (L.) Merr.*) was obtained from a fresh fruit shop in Hat Yai, Songkhla, Thailand. It was cut and crushed to a size of 2-3 mm. The composition of the pineapple peel used for experiments are presented in Table 1.

DNS solution, that was the mixture of 1% dinitrosalicylic acid, 0.2% phenol, 1% sodium hydroxide, 0.05% sodium sulfite and 20% sodium potassium tartrate, was purchased from C.E.G. Science & Service Limited Partnership.

Table 1 Components of *Phu Lea* pineapple peels.

Components	Analytical Method	% w
Protein	AOAC (Kjeldahl Method)	1.42
Crude Fat	AOAC (Soxhlet extraction Method)	0.08
Moisture	AOAC (Loss on Drying at 95-100 °C)	84.89
Ash	AOAC	0.84
Crude Fiber	Fiber analyzer (ANKOM200)	10.20
Total Carbohydrate	Calculation	12.77
Energy	Calculation	57.48 kcal

Experimental Method

The crushed pineapple peel was pretreated in deionized water without a reagent (such as acid/alkali/enzyme). However, the peel heated by microwave method in the presence of water, could be pretreated and hydrolyzed in a single step. This step was carried out in 2 L beaker with peel amount of 100-160 g in 1 L of deionized water at microwave power of 90-900 watt by using a domestic microwave oven (LG TIANJIN Model WD 700 with a frequency of 2450 MHz) for 5-20 min. After the pretreatment and pre-hydrolysis, the product was filtered to separate the liquid fraction for analyzing reducing sugar and total sugar contents by UV-Vis Spectrophotometer.

Response Surface Analysis

The importance of peel to water ratio (X_1 , g/L), microwave power (X_2 , watt) and time (X_3 , min) was investigated by using the central composite design (CCD). A five-level, three-factor factorial central composite design led to 17 experimental runs (Table 2).

Table 2 Experimental conditions and sugar content.

Run no.	X_1	X_2	X_3	Reducing sugar	Total sugar
				[g/L]	
1	130	450	20	4.3	245.2
2	160	450	13	6.3	295.3
3	130	450	5	7.0	222.8
4	130	450	13	8.3	178.1
5	148	720	17	6.2	225.3
6	148	720	17	8.0	224.9
7	112	270	8	7.5	210.7
8	130	900	13	6.2	250.2
9	112	270	17	7.5	276.3
10	130	90	13	9.9	273.8
11	130	450	13	8.3	178.1
12	130	450	13	8.3	178.1
13	148	720	8	9.1	260.6
14	112	720	17	4.0	204.3
15	100	450	13	3.5	243.0
16	112	720	8	5.5	269.8
17	148	270	8	9.3	226.1

Analytical Method

Reducing sugar and total sugar were determined by DNS method [6] using a double beam UV-Vis spectrophotometer with UV-Visible ChemStation Software (Model: HP 8453).

Previous standard curves of the reducing sugar, assayed in the term of glucose, and the total sugar were applied for the determinations of the reducing sugar and total sugar contents in which the transmittance values were measured at 520 nm for the reducing sugar and at 490 nm for the total sugar on the spectrophotometer.

Results and Discussion

Components of the Pineapple Peel

The analytical analysis of the pineapple peel used in this study is shown in Table 1. A major significant content of the peel is 12.77% total carbohydrate in which is the combination of fiber and starch. This starch could be easily hydrolyzed with water to form the fermentable sugar or reducing sugar. As a result, the sugar contents could be considered to be the desired product for this pretreatment and pre-hydrolysis. Advantages of pretreatment with pure water without a reagent (acid or alkali) are the reductions of water consumption (No water washing step) and buffer use. In addition, the production without a water washing step could keep the sugars for the ethanol fermentation, that may not have to go through the hydrolysis step.



Fig. 1 Contour plots of peel water ratio and time on (a) reducing sugar content and (b) total sugar content at 495 watt.



Fig. 2 Contour plots of peel water ratio and microwave power on (a) reducing sugar content and (b) total sugar content for 11 min.



Fig. 3 Contour plots of microwave power and time on (a) reducing sugar content and (b) total sugar content at 130 g/L of peel to water ratio.

Effects of microwave pretreatment on sugar yield

The effects of peel to water ratio and time on reducing sugar content (Fig. 1(a)) and on total sugar content (Fig.1 (b)) for the pretreatment at 495 watt microwave power. The results showed that an optimum yield of reducing sugar could be obtained by using a ratio in the range of 130-150 g/L for 7-12 min while that of total sugar could be gotten by using a more ratio (150-160 g/L) and a more time (17-20 min).

The effects of peel to water ratio and microwave power on reducing sugar content (Fig. 2(a)) and total sugar content (Fig. 2(b)) for 11 min. These implied that the microwave pretreatment should operated at 90-130 watt with 130-140 g/L ratio that gave an optimum content of reducing sugar. However, a satisfied content of total sugar was not received when this process was performed at 110-140 g/L ratio for all microwave power.

The effects of microwave power and time on reducing sugar content (Fig. 3(a)) and total sugar content (Fig. 3(b)) at 130 g/L of peel to water ratio. To obtain an optimum content the pretreatment should be carried out at a microwave power in the range of 90-130 watt for a time in the range of 10-15 min for reducing sugar, and at a power ranging from 90-130 watt for a time ranging from 15-20 min or 800-900 watt for 5-7 min for total sugar. The total sugar results indicate that the use of high power led to the reduction of time while the use of low power led to the increase of time.

Optimization of Pretreatment Condition

Reducing sugar (glucose) content in the pretreated product is predicted by Eq. 1 that provides a 10.4 g/L of maximum glucose content with 132 g/L of peel to water ratio, 90 watt of microwave power for 12 min of pretreatment time.

$$\text{Reducing sugar content} = -51.49 + 0.827 * X_1 - 0.01743 * X_2 + 1.393 * X_3 - 0.00298 * X_1 * X_1 + 3.49212E-06 * X_2 * X_2 - 0.03381 * X_3 * X_3 + 0.000111 * X_1 * X_2 - 0.00413 * X_1 * X_3 - 0.000371 * X_2 * X_3 \quad (1)$$

The prediction equation of total sugar content is described as Eq. 2. To obtain the desired content the pretreatment is to perform with 160 g/L peel to water ratio, 90 watt power for 20 min that give the highest total sugar content of 579.9 g/L.

$$\text{Total sugar content} = 1867.6 - 25.12 * X_1 + 0.07555 * X_2 - 18.45 * X_3 - 0.09779 * X_1 * X_1 + 0.000512 * X_2 * X_2 + 0.940 * X_3 * X_3 - 0.00167 * X_1 * X_2 + 0.09128 * X_1 * X_3 - 0.03220 * X_2 * X_3 \quad (2)$$

The results indicated that the significant variable effected on both sugars were microwave power. To achieve an optimum sugar yield, the pretreatment had to operate at low power (90 watt).

For the influences of peel to water ratio and time on reducing sugar. The pretreatment needed an appropriate ratio and a sufficient time. Further increase of ratio (>132g/L) or time (>12 min) did not increase both sugar concentrations. However, total sugar was dependent on both ratio and time. Total sugar concentration was increased when ratio and time were increased.

Summary

The microwave pretreatment of pineapple peel using pure water without a reagent at atmospheric pressure could provide sufficient fermentable sugars for the ethanol production that may reduce hydrolysis step. The production cost of ethanol would be economically competitive with petroleum-based fuel with low cost feedstock (agricultural residue), less material use (no reagent and no washing water), save time and energy consumption (microwave heating).

Acknowledgements

The work was financially supported by NRCT (National Research Council of Thailand) 2014, Contract No. ENG57/01035, Prince of Songkla University.

References

- [1] J. Gabhane, S.P.M.P. William, A.Gadhe, R. Rath, A.N. Vaidya, S. Wate, Pretreatment of banana agricultural waste for bio-ethanol production: Individual and interactive effects of acid and alkali pretreatments with autoclaving, microwave heating and ultrasonication, *Waste Manage.* 34 (2014) 498-503.
- [2] M. Laser, D. Schulman, S.G. Allen, J. Lichwa, M.J.A. Jr, L.R. Lynd, A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol, *Bioresour Technol.* 81 (2002) 33-44.
- [3] S. Zhu, Y. Wu, Z. Yu, X. Zhang, C. Wang, F. Yu, S. Jin, Production of ethanol from microwave-assisted alkali pretreated wheat straw, *Process Biochem.* 41 (2006) 869-873.
- [4] Z. Hu, Z. Wen, Enhancing enzymatic digestibility of switchgrass by microwave-assisted alkali pretreatment, *Biochem. Eng.* 38 (2008) 369-378.
- [5] H. Li, J. Xu, Optimization of microwave-assisted calcium chloride pretreatment of corn stover, *Bioresour Technol.* 127 (2013) 112-118.
- [6] G.L. Miller, Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar, *Anal. Chem.* 31 (1959) 426-428.