



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์



การผลิตไบโอเอทานอลจากเปลือกกล้วยประดับด้วยยีสต์ขนมปัง
และการผลิตเยื่อกระดาษจากของเสียในกระบวนการ
Production of bio-ethanol using baker's yeast
and production of pulp from the residue
in the ethanol production process

ผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินาฏ จงคง

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2557 - 2558 รหัสโครงการวิจัย ENG570103S



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตไบโอเอทานอลจากเปลือกสับประรดด้วยยีสต์ขนมปัง
และการผลิตเยื่อกระดาษจากของเสียในกระบวนการ
Production of bio-ethanol using baker's yeast
and production of pulp from the residue
in the ethanol production process

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินินาฏ จงคง

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2557 – 2558 รหัสโครงการวิจัย ENG570103S

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทนำ	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
วัตถุประสงค์ สารเคมี และอุปกรณ์	3
1. วัตถุประสงค์	3
2. สารเคมี	3
3. อุปกรณ์	4
ระเบียบวิธีวิจัย	6
1. การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเปลือกสับปะรด	6
2. การปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรด แบ่งการศึกษาด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 4 แบบ	6
3. การหมักเอทานอลด้วยยีสต์ขนมปัง	7
4. การขยายขนาดการหมัก	8
5. การทำแผ่นเยื่อกระดาษอย่างง่ายจากกากผลผลิตส่วนของแข็งหลังการหมัก	8
6. เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของการผลิตแต่ละวิธี	10
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย	11
1. ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเปลือกสับปะรด	11
2. ผลการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรด จากการศึกษาด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 4 แบบ	11
3. ผลการหมักเอทานอลด้วยยีสต์ขนมปัง	42
4. ผลการเพิ่มขนาดการหมัก	61
5. ผลการทำแผ่นเยื่อกระดาษอย่างง่ายจากกากผลผลิตส่วนของแข็งหลังการหมัก	63
6. ผลการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการผลิตแต่ละวิธี	73
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	81
1. สรุปผลการวิจัย	81
2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม	83
บรรณานุกรม	84
ภาคผนวก (วิธีการวิเคราะห์)	86
เอกสารแนบ (การเผยแพร่ผลงานวิจัย)	90

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบเปลือกสับปะรด	11
2 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการปรับปรุงสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ โดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดในผลผลิตหลังการย่อย	12
3 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการปรับปรุงสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ ร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังหมดอายุ โดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลทั้งหมดในผลผลิตหลังการย่อย	15
4 สภาวะการทดลองและผลการปรับปรุงสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดโดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส	23
5 ผลการออกแบบสภาวะด้วย RSM และผลของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยด้วยการใช้ เอนไซม์กลูโคสอะไมเลส	30
6 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการปรับปรุงสภาพเปลือกสับปะรดด้วยน้ำเปล่า โดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับปรุงสภาพด้วยไมโครเวฟ	34
7 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการย่อยเปลือกสับปะรดด้วยน้ำเปล่า และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการย่อยโดยคลื่นไมโครเวฟ	37
8 แสดงชนิดของน้ำตาลและปริมาณน้ำตาลในผลผลิตหลังการปรับปรุงสภาพและย่อยด้วยวิธีต่างๆ	39
9 สภาวะการทดลองและผลการหมักผลผลิตหลังการปรับปรุงสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ ที่เกิดขึ้นเองบนเปลือกสับปะรด	42
10 สภาวะการทดลองและผลการหมักเปลือกสับปะรดหลังผ่านการปรับปรุงสภาพและย่อยโดยใช้ จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองบนเปลือกสับปะรดและขนมปังหมดอายุ	47
11 สภาวะการทดลองและผลการหมักเปลือกสับปะรดหลังผ่านการปรับปรุงสภาพและย่อยโดยใช้ เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและกลูโคสอะไมเลส	52
12 แสดงสภาวะการทดลองและผลการหมักผลผลิตหลังผ่านการปรับปรุงสภาพและย่อยโดย การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	57
13 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสของวัตถุดิบและของแข็งหลังการหมักด้วยวิธี AOAC 1990	63
14 ผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับกระบวนการโซดาด้วย RSM และผลของปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่ได้หลังกระบวนการโซดา	65
15 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเปลือกสับปะรด ผลผลิตของแข็งหลังการหมักเอทานอล และผลผลิตเอโซดา	67
16 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแผ่นเยื่อที่ได้	71
17 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ กระดาษสา กระดาษห่อพัสดุ กระดาษห่อของขวัญ และกระดาษ A4 (ผลิตภัณฑ์กระดาษที่มีขายในท้องตลาด) กับแผ่นเยื่อกระดาษที่ผลิตได้	71
18 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดด้วยวิธีต่างๆ	73
19 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการหมักเอทานอลของเปลือกสับปะรด ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพและย่อยด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากทั้ง 4 วิธี	74

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
20 แสดงราคาวัตถุดิบ สารเคมี และสาธารณูปโภค ที่ใช้ประกอบการคำนวณ ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต	75
21 ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจาก กระบวนการใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95)	75
22 ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจาก กระบวนการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์บนขนมปังเลยวันหมดอายุ ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95)	76
23 ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจาก กระบวนการปรับสภาพและย่อยด้วยเอนไซม์ ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95)	77
24 ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจาก กระบวนการปรับสภาพและย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95)	78
25 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตเอทานอลด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ทั้ง 4 แบบ	78
26 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการผลิตทั้ง 4 แบบ	79
27 เปรียบเทียบผลผลิตเอทานอลที่ได้จากการใช้วัตถุดิบชนิดต่างๆ	80

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1 ลักษณะของวัตถุดิบเปลือกสับปะรด	3
2 ภาพแสดงชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรด	4
3 แสดงภาพขวดหมัก	5
4 แสดงเปลือกสับปะรดผสมน้ำสะอาดในถัง 3 คอ ขนาด 2 ลิตร ก่อนการปรับสภาพโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	7
5 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ของเวลาและปริมาณเปลือกสับปะรดที่ผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผ่านการย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ ภายใต้อุณหภูมิห้อง (26 – 32 องศาเซลเซียส) และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 84 – 92	13
6 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ของเวลาและปริมาณเปลือกสับปะรดที่ผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ผ่านการย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ ภายใต้อุณหภูมิห้อง และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 84 – 92	13
7 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักของขนมปังหมดอายุต่อเปลือกสับปะรดและระยะเวลาเลยวันหมดอายุของขนมปังที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้ปริมาณวัตถุดิบผสม (ขนมปังผสมเปลือกสับปะรด) 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 8 วัน	16
8 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัตถุดิบผสม (ขนมปังผสมเปลือกสับปะรด) ต่อ น้ำ 1 ลิตร และระยะเวลาเลยวันหมดอายุของขนมปังที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขนมปังหมดอายุต่อเปลือกสับปะรดเป็น 1:6 และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 8 วัน	17
9 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย และระยะเวลาเลยวันหมดอายุของขนมปังที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขนมปังหมดอายุต่อเปลือกสับปะรดเป็น 1:6 และปริมาณวัตถุดิบผสม 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร	18
10 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัตถุดิบผสมต่อ น้ำ 1 ลิตร และอัตราส่วนขนมปังต่อเปลือกสับปะรด (1:กรัม) ที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้ขนมปังหมดอายุไปแล้ว 4 วัน และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 8 วัน	19
11 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย และอัตราส่วนขนมปังต่อเปลือกสับปะรด (1:กรัม) ที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้ขนมปังหมดอายุไปแล้ว 4 วัน และปริมาณวัตถุดิบผสม 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร	20

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
12 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย และปริมาณวัตถุดิบผสมต่อน้ำ 1 ลิตร ที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้ขนมปังหมดอายุไปแล้ว 4 วัน และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของขนมปังหมดอายุต่อเปลือกสับปะรดเป็น 1:6	21
13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณเปลือกสับปะรด ต่อ น้ำ 1 ลิตร ที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยเป็นเวลา 150 นาที	22
14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยเป็นเวลา 150 นาที	24
15 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยและ ปริมาณเปลือกสับปะรดที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์ 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และพีเอช 6.3	24
16 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยและ ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และพีเอช 6.3	25
17 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณเปลือกสับปะรดที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด พีเอช 6.3 และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 150 นาที	25
18 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และปริมาณเปลือกสับปะรด ที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส พีเอช 6.3 และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 150 นาที	26
19 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร พีเอช 6.3 และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 150 นาที	26
20 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยที่มีผลต่อ น้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด	27
21 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 150 นาที	27

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
22 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยและอุณหภูมิที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด และพีเอช 6.3	28
23 กราฟพื้นผิวสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อย ที่มีผลต่อผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลส 80 U และพีเอช 4.5	29
24 กราฟพื้นผิวสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลส 80 U ที่ระยะเวลาในการย่อย 6 ชั่วโมง	31
25 ผลของพีเอชและปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลสต่อปริมาณผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อดำเนินการย่อย ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ ใช้ปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลสเพิ่มขึ้นในช่วงพีเอช 3.5 - 3.9 (เอนไซม์ 40- 120 U)	31
26 กราฟพื้นผิวสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและระยะเวลาในการย่อย ที่มีผลต่อ ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลส 80 U	32
27 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการย่อยและปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และพีเอช 4.5	32
28 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่มีผลต่อ น้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ระยะเวลาในการย่อย 6 ชั่วโมง และพีเอช 4.5	33
29 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและเวลาที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ในผลผลิตหลังการปรับสภาพมีการใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร	35
30 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับปะรดในน้ำ 1 ลิตรและเวลาที่มีผลต่อ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพมีการใช้กำลังไฟฟ้า 495 วัตต์	36
31 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับปะรดในน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพโดยใช้เวลา 12 นาทีในการปรับสภาพ	36
32 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและเวลาในการย่อยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ในผลผลิตหลังการย่อย	38
33 SEM ที่กำลังขยาย 40 และ 500 เท่า ของ (ก) วัตถุดิบเปลือกสับปะรด (ข) เปลือกที่ผ่านการย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ (ค) เปลือกที่ผ่านการย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังหมดอายุ (ง) เปลือกที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ และ (จ) เปลือกที่ผ่านการย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ	41
34 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยีสต์และพีเอชที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล โดยหมักที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 5 วัน	43
35 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณยีสต์ขนมปังในการหมักที่มีผลต่อ ปริมาณเอทานอล โดยใช้พีเอช 5.5 และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน	44

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
52 กราฟโครงสร้างแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยีสต์ และอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยทำการหมักที่พีเอช 5.5 และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน	58
53 กราฟโครงสร้างแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยทำการหมักที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 5 วัน	58
54 กราฟโครงสร้างแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยหมักที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และพีเอช 5.5	59
55 กราฟโครงสร้างแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล เมื่อใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน	59
56 กราฟโครงสร้างแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล หมักโดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และพีเอช 5.5	60
57 กราฟโครงสร้างแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลา และพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	60
58 แบบร่างชุดเครื่องมือสำหรับดำเนินการหมักโดยมีถังหมักขนาด 5 ลิตร	62
59 แสดงชุดเครื่องมืออุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสำหรับดำเนินการหมักโดยมีถังหมักขนาด 5 ลิตร	62
60 แสดงชุดเครื่องมือสำหรับกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์เอทานอลสร้างขึ้นด้วยงบประมาณจากงานวิจัย ก่อนหน้านี้ (โครงการ “การผลิตเอทานอลจากเมล็ดขนุน” ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2553-2554)	63
61 พื้นผิวสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไซโตเดียมไฮดรอกไซด์กับ อุณหภูมิต่อปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่เวลา 60 นาที	65
62 พื้นผิวสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไซโตเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลา ต่อปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	66
63 พื้นผิวสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ต่อปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่ใช้สารละลาย 2 โมลาร์	66
64 แสดงขั้นตอนการทำแผ่นเยื่อ	69
65 แสดงการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแผ่นเยื่อ	70
66 ลักษณะของกระดาษที่นำมาศึกษาคุณสมบัติเพื่อใช้เปรียบเทียบกับแผ่นเยื่อกระดาษที่ผลิตได้	72

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงเพราะได้รับความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน
ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ช่วยเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำ
วิจัย และขอบคุณบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกใน
การดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย นางสาวอักษรภักดิ์ เต็งรัง และนายภูเบศร์ พงศ์สุวรรณ
ขอขอบพระคุณพี่อ๋าและพี่หญิง พี่สาวแสนดีที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ
ด้าน

และที่สำคัญที่สุด ขอขอบพระคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย
จากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2557-2558 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่
ENG570103S

สินินาฏ จงคง
กันยายน 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยใช้เปลือกสับปะรดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัตถุดิบ ขั้นตอนการปรับสภาพและย่อยใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติคือแบคทีเรียที่ขึ้นบนเปลือกสับปะรดและราที่ขึ้นบนขนมปังจากเศษขนมปังหมดอายุ เปรียบเทียบกับการย่อยด้วยเอนไซม์และการย่อยด้วยความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ และขั้นตอนการหมักใช้ยีสต์ขนมปัง ทำการออกแบบการทดลอง และศึกษาปัจจัยต่างๆ ด้วย Response Surface Methodology (RSM) โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 กระบวนการหลัก ดังนี้

กระบวนการแรกคือ การปรับสภาพและย่อยวัตถุดิบ แบ่งการศึกษาด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 4 แบบ วิธีแรกคือ การปรับสภาพและย่อยโดยจุลินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่บนเปลือกสับปะรด ศึกษาการใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 100 – 160 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ระยะเวลาในการเกิดการย่อยทางชีวภาพ 3 – 14 วัน ภายใต้อุณหภูมิห้องและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 84 – 92 วิธีที่สองคือ การใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติบนเปลือกสับปะรดร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังเลยวันหมดอายุ ศึกษาปริมาณเปลือกสับปะรด 100 – 160 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ระยะเวลาเลยวันหมดอายุของขนมปัง 1 – 7 วัน อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขนมปังต่อเปลือก 1:3 – 1:9 และระยะเวลาในการย่อยทางชีวภาพ 3 – 14 วัน วิธีที่สามคือ การใช้เอนไซม์ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกการปรับสภาพโดยแอลฟา-อะไมเลส ศึกษาปริมาณเปลือกสับปะรด 100 – 160 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ปริมาณแอลฟา-อะไมเลส 100 – 240 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด ความเป็นกรดต่าง 5.5 – 7.0 อุณหภูมิ 70 – 100 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 1 – 4 ชั่วโมง ขั้นตอนที่สองการย่อยโดยกลูโคส-อะไมเลส ศึกษาปริมาณกลูโคส-อะไมเลส 40 – 120 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด ความเป็นกรดต่าง 3.5 – 5.5 อุณหภูมิ 40 – 70 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 4 – 8 ชั่วโมง วิธีที่สี่คือ การให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟ ศึกษาปริมาณเปลือกสับปะรด 100 – 160 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ระดับการให้ความร้อน 90 – 900 วัตต์ และระยะเวลา 5 – 20 นาที กระบวนการที่สองคือ การหมักเอทานอล นำผลผลิตหลังการย่อยด้วยสภาวะที่เหมาะสมของทั้ง 4 วิธี มาทำการหมัก โดยศึกษาความเป็นกรด-ต่าง 4.5 – 6.5 ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละโดยน้ำหนัก 2 – 8 อุณหภูมิห้อง 30 – 40 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 2 – 8 วัน แล้วนำสภาวะการหมักที่เหมาะสมมาทำการขยายขนาดจากการหมักด้วยขวดหมักขนาด 250 มิลลิลิตร เป็นหมักในชุดถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร กระบวนการที่สามคือ นำน้ำหมักที่ได้จากการหมักด้วยสภาวะที่เหมาะสม มากลั่นให้มีความบริสุทธิ์ของเอทานอลมากกว่าร้อยละ 95 โดยปริมาตร ด้วยเครื่องกลั่นแบบ Packed-column distillation unit

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยและการหมัก วิธีแรก คือใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 141 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร เป็นระยะเวลา 5 วัน จะได้น้ำตาลรีดิวซ์ 0.58 กรัมต่อลิตร และหมักด้วยยีสต์ขนมปังร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความเป็นกรด-ต่าง 4.5 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 8 วัน จะได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 5.38 โดยปริมาตร สภาวะที่เหมาะสมวิธีที่สอง คือใช้ขนมปังที่หมดอายุแล้ว 5 วัน อัตราส่วนขนมปังต่อเปลือกสับปะรด 1:3 ปริมาณขนมปังผสมเปลือกสับปะรด 153 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ใช้ระยะเวลา 1 วัน จะได้น้ำตาลรีดิวซ์ 2.07 กรัมต่อลิตร และหมักด้วยยีสต์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความเป็นกรด-ต่าง 6.4 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน จะได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 4.07 โดยปริมาตร วิธีที่สาม คือใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 188 U ต่อกรัม ปริมาณเปลือกสับปะรด 160 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ต่าง 5.5 ควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง และย่อยต่อด้วยเอนไซม์กลูโคสอะไมเลส 120 U ต่อกรัม ความเป็นกรด-ต่าง 3.5 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 48.16 กรัม

ต่อลิตร และหมักโดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ความเป็นกรด-ด่าง 5.5 อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน จะได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 1.10 โดยปริมาตร และวิธีที่สี่ คือ ปริมาณเปลือกสับประรด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ เป็นเวลา 12 นาที สามารถให้ผลผลิตปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 13.18 กรัมต่อลิตร และหมักที่ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 วัน ทำให้ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 6.65 โดยปริมาตร และผลการเพิ่มขนาดการหมักด้วยการหมักสภาวะนี้พบว่าได้ปริมาณผลผลิตเอทานอลร้อยละ 6.67 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

และการศึกษาการสร้างมูลค่าเพิ่มและลดของเสียในกระบวนการผลิตเอทานอล ด้วยการนำผลผลิตส่วนของแข็งเหลือทิ้งหลังขั้นตอนการหมักเอทานอลมาผลิตเป็นแผ่นเยื่อกระดาษอย่างง่ายและวัตถุดิบสมบัติทางกายภาพของกระดาษที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับกระดาษสา กระดาษห่อพัสดุ กระดาษห่อของขวัญ และกระดาษพิมพ์เขียน (A4) คือ ค่าน้ำหนักมาตรฐาน ค่าความหนา ค่าการดูดซับน้ำ และค่าความต้านทานแรงดึง โดยเลือกศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดคือ ความต้านทานการซึมน้ำ ด้วยการเติมสารส้มและชันสน ผลพบว่าเยื่อที่ได้เมื่อมีการใส่สารเติมในอัตราส่วนของ เยื่อ:ยางสน:สารส้ม เป็น 3:1.4:2 สามารถมีค่าการดูดซับน้ำใกล้เคียงกับกระดาษทั้ง 4 ประเภท โดย และผลผลิตแผ่นเยื่อโซดาที่ไม่มีการเติมสารกันซึมสามารถถูกพัฒนาเพื่อใช้ทดแทนกระดาษสาได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกัน

Abstract

The ethanol, alternative energy, productions using pineapple peels as a raw material were studied in this work. Natural microorganisms (decay), mold on bread, enzymes and microwave heating were operated for comparison in the pretreatment - hydrolysis processes. And baker's yeast was employed for the fermentation process. The optimum conditions of the 2 processes were investigated by Response Surface Methodology (RSM).

The first process, pretreatment – hydrolysis, the peels were carried out by 4 different methods. For the first method, the peels were decomposed by natural microorganisms using 100 – 160 g peel to 1 L water for 3 – 14 days at an ambient temperature with 84 – 92 %relative humidity. For the second method, the decay was done by natural microorganism together with mold on bread. The studied factors were 100 – 160 g/L for 1 – 7 days of time from the expiration date of the bread with 1:3 – 1:9 weight ratios of bread to peel and 3 – 14 days of decomposition time. The third enzyme method was divided into 2 steps. The first step, the peels of 100 – 160 g/L were pretreated by alpha-amylase of 100 – 240 U/g with pH of 5.5 – 7.0 at 70 – 100 °C for 1 – 4 h. Then the second step, the pretreated peels were hydrolyzed by gluco-amylase of 40 – 120 U/g with pH of 3.5 – 5.5 at 40 – 70 °C for 4 – 8 h. Lastly, the fourth method, the peels were pretreated and hydrolyzed by microwave heating using 100 – 160 g peels/L at 90 – 900 W microwave power for 5 – 20 min. For the second process, the hydrolysates from each 4 optimums were fermented with pH of 4.5 – 6.5 using yeast amount of 2 – 8 %w at an ambient, 30 – 40 °C for 2 – 8 days. After that the optimal fermentations were scaled up from 250 ml to 5 L capacities. And the third process, the optimal fermentation liquid (broth) would be purified to reach more than 95%v ethanol product by a packed column distillation unit.

The optimum results for the pretreatment-hydrolysis and fermentation, the first method was using the peels of 141 g/L for a decay time of 5 days that provided 0.58 g/L reducing sugar, and the fermentation using 2 %w yeast with 4.5 pH at 40 °C for 8 days gave 5.38 %v ethanol product. For the second method, using 1:3 weight ratios of bread to peel (mixture) with 153 g of mixture raw/L and 5 days of bread age from the expiration date for 1 day of decomposition time, provided 2.07 g/L reducing sugar, and using 3 %w yeast with 6.4 pH at 30 °C for 8 days in the fermentation would get 4.07 %v ethanol. The third method, using 160 g peel/L, 188 U alpha-amylase/ g peel with 5.5 pH at 70 °C for 4 h followed by using 120 U gluco-amylase/g with 3.5 pH at 70 °C for 4 h, provided 48.16 g/L reducing sugar, and 6 %w yeast with 5.5 pH at 35 °C for 5 days gave 1.10 %v ethanol. Lastly the fourth method, using 132 g peel/L at 90 W for 12 min, provided 13.18 g/L reducing sugar, and 8 %w yeast with 6.5 pH at 30 °C for 2 days gave 6.65 %v

ethanol. In addition, the fermentation in 5 L reactor could reach 6.67 %v ethanol for the optimal microwave method.

Moreover, the solid waste after the ethanol fermentation was developed to be used as raw material for pulp production. Physical properties of the pulp-sheet which were basic weight, thickness, Cobb value (water absorption) and tensile strength were determined to compare with mulberry paper, wrapping paper, gift wrap paper and writing paper (A4). An only water absorption resistance was significantly investigated to improve the physical quality of the sheet by adding aluminium sulfate (alum) and rosin. The optimum pulp-sheet production was using a weight ratio of 3:1.4:2 of pulp to alum to rosin. The water resistance property of the 4 pulp-sheets was similar to the 4 paper types. Moreover, the soda pulp-sheet may be applied instead of the mulberry paper with similar properties.

บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม แหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถช่วยแก้ปัญหาวิกฤตการณ์ด้านน้ำมันเชื้อเพลิงได้อย่างเหมาะสมที่สุดควรมาจากผลผลิตและของเหลือใช้ทางการเกษตร (ชีวมวล) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สามารถปลูกใหม่ได้ไม่มีวันหมด เอทานอลเป็นพลังงานสะอาดที่สามารถใช้ทดแทน ใช้ผสม หรือใช้เป็นสารเติมเพิ่มค่าออกเทน (Ethyl Tertiary Butyl Ether: ETBE) ให้น้ำมันเบนซินได้เป็นอย่างดี แม้แต่การผลิตไบโอดีเซลก็ควรใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นแอลกอฮอล์แทนเมทานอลเพื่อเป็นพลังงานหมุนเวียนได้อย่างแท้จริง เอทานอลสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบชีวมวลที่มีองค์ประกอบหลักประเภทน้ำตาล แป้ง และ/หรือเซลลูโลส แต่วัตถุดิบที่มีปริมาณมากและยังมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยคือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบประเภทเซลลูโลสที่มีอุปสรรคสำคัญในการผลิตคือใช้เทคโนโลยีที่ยังยาก ต้องใช้สารเคมีและสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่สูง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ส่งผลให้ต้นทุนรวมของการผลิตสูง จึงยังไม่สามารถพัฒนาไปสู่เชิงพาณิชย์ได้ การผลิตไบโอเอทานอลมี 3 ขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกคือการปรับสภาพวัตถุดิบเพื่อขจัดองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลสออก เช่น ลิกนิน และเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของวัตถุดิบให้พร้อมสำหรับการย่อย โดยทั่วไปจะใช้สารละลายต่างหรือเอนไซม์ร่วมกับการให้ความร้อน [1-2] ขั้นตอนที่สองคือการย่อยเซลลูโลสหรือแป้งไปเป็นน้ำตาล โดยทั่วไปจะใช้สารละลายกรดหรือเอนไซม์ร่วมกับการให้ความร้อน [2-4] ขั้นตอนที่สามคือการหมักน้ำตาลเพื่อเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ โดยทั่วไปจะใช้ยีสต์บริสุทธิ์ประเภท *Saccharomyces cerevisiae* [5-6] ซึ่งปัญหาสำคัญสำหรับงานวิจัยในปัจจุบันคือ การหาวิธีการปรับสภาพและย่อยวัตถุดิบให้เป็นน้ำตาลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางในการผลิตเอทานอลแบบต้นทุนการผลิตต่ำ ด้วยการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบอย่างคุ้มค่าและไม่มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการ โดยพัฒนาการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับปะรด ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ราคาถูกหรือแทบจะไม่มีราคา (สามารถช่วยลดปริมาณขยะสดที่ต้องบำบัดของชุมชน) และเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณมาก สังเกตได้จากข้อมูลผลผลิตสับปะรดกระป๋อง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2553 มีปริมาณถึง 40.2 พันตัน [7] และสังเกตได้จากร้านค้าผลไม้ภายในชุมชน มีสับปะรดขายตลอดทั้งปี (จ.สงขลา) แต่ปัจจุบันยังมีการนำเปลือกสับปะรดมาใช้ประโยชน์น้อย ที่เห็นได้ชัดมีเพียงการนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ นอกจากนี้เปลือกสับปะรดยังมีองค์ประกอบสำคัญของน้ำตาลกลูโคส ซูโครส และฟรุกโตสสูง [8] เพียงพอสำหรับเป็นอาหารเบื้องต้นในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ที่จะช่วยในการผลิตไบโอเอทานอลได้ การศึกษาขั้นตอนการปรับสภาพและการย่อยจะใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติคือแบคทีเรียที่ขึ้นบนเปลือกสับปะรด และราที่ขึ้นบนขนมปังจากเศษขนมปังหมดอายุ เปรียบเทียบกับการย่อยด้วยเอนไซม์ และการย่อยด้วยความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ แล้วทำการหมักด้วยยีสต์ขนมปัง ซึ่งเป็นการศึกษาด้วยการประยุกต์ใช้ภูมิปัญญาท้องถิ่น ใช้วัตถุดิบที่ผลิตได้เองในประเทศ ดำเนินการผลิตอย่างง่ายลดการใช้พลังงาน และจะศึกษาพัฒนาการนำผลผลิตเหลือทิ้งหลังการหมักมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตแผ่นเยื่อกระดาษ ทำให้ไม่มีของเสียในกระบวนการ สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับทั้งเปลือกสับปะรดและของเสียเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตเบเกอรี่ และเป็นเทคโนโลยีที่ถ่ายทอดสู่ชุมชนได้ง่าย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากเปลือกส้มแปรรูป
2. เพื่อศึกษาการสร้างมูลค่าเพิ่มให้ผลผลิตเหลือทิ้งหลังการหมักด้วยการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นเยื่อกระดาษอย่างง่าย
3. เพื่อวิเคราะห์วิธีการและต้นทุนการผลิตที่เหมาะสมกับชุมชนและความเป็นไปได้ในการขยายผลสู่เชิงพาณิชย์

วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

เปลือกสับประดพันธ์ญี่ปุ่นแล จากร้านสับประดญี่ปุ่นแล หลังห้างสรรพสินค้าเทสโก้โลตัส สาขาหน้ามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของวัตถุดิบเปลือกสับประด

2. สารเคมี

2.1 สารเพื่อการทดลอง

- (1) โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate) ยี่ห้อ McGarrett บริษัท เจอาร์เอฟแอนด์บี จำกัด
- (2) กรดอะซิติก (Acetic acid) ความบริสุทธิ์ 99.7% (AR1002-P4L Meet A.S.C. Specification)
- (3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) Laboratory Grade บริษัท Merck
- (4) กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) Laboratory Grade บริษัท Merck
- (5) เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -Amylase from *Aspergillusoryzae*) บริษัท Sigma-Aldrich
- (6) เอนไซม์กลูโคอะไมเลส (Amyloglucosidase from *Aspergillusniger*) บริษัท Sigma-Aldrich
- (7) ยีสต์ขนมปัง (Baker's yeast) ชื่อทางการค้า Fermipan Brown

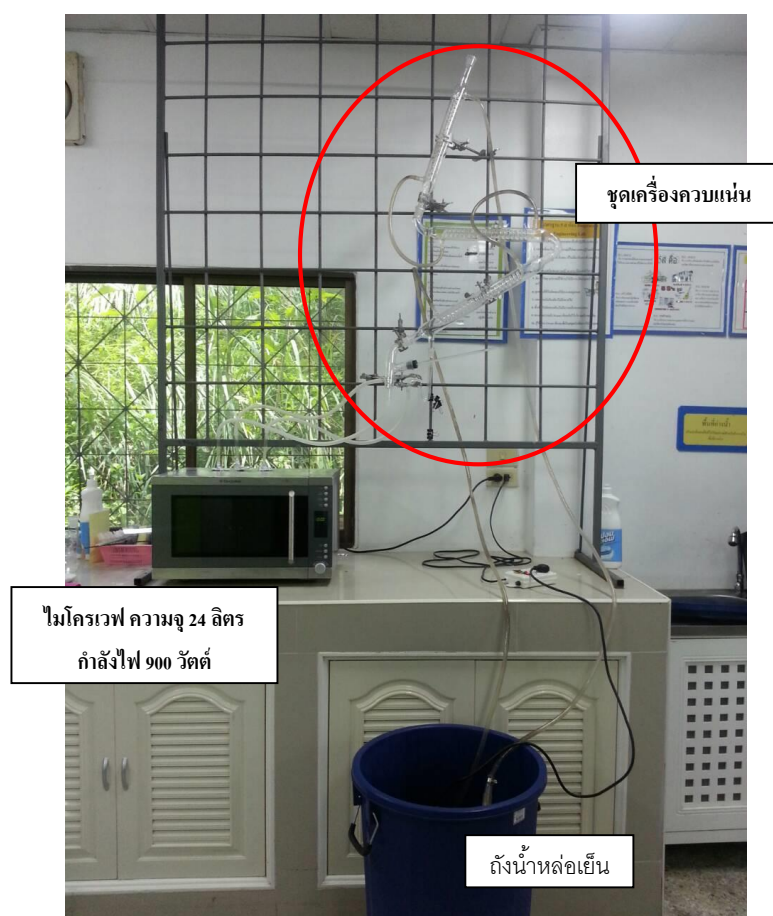
2.2 สารเพื่อการวิเคราะห์

- (1) ฟีนอล (Phenol) (Laboratory Grade) บริษัท PanreacSintesis
- (2) 3,5-Dinitrosalicylic acid (Laboratory Grade) บริษัท Sigma
- (3) โซเดียมโปแตสเซียมทาร์เตรต (Sodium potassium-tartrate) Laboratory Grade บริษัท ซีอีจี จำกัด
- (4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) Laboratory Grade บริษัท Merck
- (5) โซเดียมซัลไฟท์ (Sodium sulfite) Laboratory Grade บริษัท Merck
- (6) กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) Laboratory Grade บริษัท Merck
- (7) สารละลายแอมโมเนีย 25 เปอร์เซ็นต์ บริษัท ซีอีจี จำกัด
- (8) กลูโคส (Laboratory Grade) บริษัท Ajax Finechem
- (9) เอทานอล (Commercial Grade) ความบริสุทธิ์ 99.9% บริษัท Sigma-Aldrich

3. อุปกรณ์

3.1 อุปกรณ์เพื่อการทดลอง

- (1) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ใช้สำหรับชั่งตัวอย่างและสารเคมี
- (2) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- (3) เครื่องปั่น/บด (Blender): Moulinex รุ่น MoulinetteS
- (4) เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifuge)
- (5) ชุดปรับสภาพและย่อย ประกอบด้วยอุปกรณ์ไมโครเวฟ Panasonic รุ่น NN-S215MF ขนาด 24 ลิตร 1000 วัตต์ (กำลังไฟฟ้าที่ส่งให้อาหาร 900 วัตต์) แสดงดังรูปที่ 2 ชุดเคื่องมือที่ได้จากการสร้างชุดการทดลองของ โครงการวิจัยหัวข้อ “การปรับสภาพและย่อยแกนข้าวโพดด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อการผลิตเอทานอล” ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย (ทุนครูณจารย์) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีการศึกษา 2555 รหัสโครงการ ENG550325S



รูปที่ 2 ภาพแสดงชุดให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟสำหรับการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรด [9]

(6) ชุดขวดหมัก (Air-locked bottle) ขนาด 250 ml แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงภาพขวดหมัก

(7) ตู้บ่ม (Incubator): Sheldon Manufacturing, Inc. สำหรับรักษาอุณหภูมิขณะทำการหมัก

3.2 อุปกรณ์เพื่อการวิเคราะห์

- (1) UV-Visible Spectrophotometer รุ่น HP 8453 เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด ขั้นตอนในการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ก
- (2) Gas chromatography (GC) รุ่น HP 6890 flame ionization detector ยี่ห้อ Agilent เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากกระบวนการหมัก โดยใช้เทคนิคการแยกสารที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวออกจากกันโดยสารตัวอย่างที่มีเอทานอลจะถูกฉีดเข้าสู่ระบบ ต่อจากนั้นจะระเหยกลายเป็นไอ สุดท้ายจะถูกพาด้วยก๊าซเฉื่อยซึ่งเป็น mobile phase ไปยังคอลัมน์ ซึ่งเป็น stationary phase เพื่อทำการแยกสารออกจากกัน สารที่แยกได้จะถูกบันทึก เพื่อทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นต่อไป วิธีการวิเคราะห์ แสดงดังภาคผนวก ก

ระเบียบวิธีการวิจัย

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเปลือกสับประรด

บดเปลือกสับประรดให้ละเอียดจนมีขนาดไม่เกิน 3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องบด Moulinex รุ่น MoulinetteS นำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี โดยส่งตัวอย่างวิเคราะห์ที่ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อการส่งออก (ADCET) คณะอุตสาหกรรมเกษตร และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2. การปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรด แบ่งการศึกษาด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 4 แบบ ดังนี้

2.1 การใช้จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติบนเปลือกสับประรด มีขั้นตอนการศึกษาคือ

นำเปลือกสับประรดมาหั่นและบดให้มีขนาดไม่เกิน 3 มิลลิเมตร ผสมน้ำสะอาด (น้ำต้มสุก) ใส่ในถุงดำ รีดอากาศออกแล้วปิดปากถุง เก็บถุงไว้ในถังปิดฝา และวางถังไว้ในที่มืดและชื้น เพื่อเร่งการเกิดแบคทีเรีย ภายใต้อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิเฉลี่ยทุกฤดูกาลของจังหวัดสงขลาอยู่ในช่วง 26 – 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่แบคทีเรียสามารถทำงานได้ดี) ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 84 – 92 (เป็นช่วงความชื้นที่ได้เคยทำการศึกษาตลอดทั้งปี ณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี) โดยปัจจัยสำคัญที่ทำการศึกษาคือ การเตรียมวัตถุดิบ 100 – 160 กรัมต่อลิตร (เปลือกสับประรดบดต่อน้ำสะอาด) ระยะเวลาในการเกิดแบคทีเรียและเกิดการย่อยทางชีวภาพ 3 - 14 วัน แล้วนำผลผลิตในแต่ละวันไปทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หรือน้ำตาลกลูโคส (Reducing Sugar) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total Sugar) ด้วยเครื่อง UV Visible Spectrophotometer (UV) (วิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก)

2.2 การใช้จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองบนเปลือกสับประรดร่วมกับจุลินทรีย์ที่เกิดบนขนมปังหมดอายุมีขั้นตอนการศึกษาคือ

นำเปลือกสับประรดและขนมปังหมดอายุ (หมดอายุแล้วไม่เกิน 1 สัปดาห์) มาหั่นและบดรวมกัน ผสมน้ำสะอาด ใส่ในถุงดำ รีดอากาศออกแล้วปิดปากถุง เก็บถุงไว้ในถังปิดฝา และวางถังไว้ในที่มืดและชื้น เพื่อเร่งการเกิดแบคทีเรีย ภายใต้อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิเฉลี่ยทุกฤดูกาลของจังหวัดสงขลาอยู่ในช่วง 26 – 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่แบคทีเรียสามารถทำงานได้ดี) ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 84 – 92 โดยปัจจัยสำคัญที่ทำการศึกษาคือ การเตรียมวัตถุดิบ 100 – 160 กรัมต่อลิตร (เปลือกสับประรดบดต่อน้ำสะอาด) อายุของขนมปัง หมดวันหมดอายุแล้ว 1 – 7 วัน ปริมาณขนมปังต่อเปลือกสับประรดที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1 ต่อ 3 ถึง 1 ต่อ 9 และระยะเวลาในการย่อย 3 – 14 วัน แล้วนำผลผลิตในแต่ละวันไปทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หรือน้ำตาลกลูโคส (Reducing Sugar) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total Sugar) ด้วยเครื่อง UV

2.3 การใช้เอนไซม์ โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอน คือ

2.3.1 การปรับสภาพและย่อยแป้งในวัตถุดิบให้มีโมเลกุลเล็กลง (Liquefaction) โดยใช้เอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลส

ปัจจัยที่ศึกษาในขั้นตอนนี้คือ การเตรียมวัตถุดิบ 100 – 160 กรัมต่อลิตร (เปลือกสับประรดบดต่อน้ำสะอาด) อุณหภูมิ 70 – 100 องศาเซลเซียส ปริมาณเอนไซม์ 100 – 240 U ต่อกรัมเปลือกสับประรด ระยะเวลา 1 – 4 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็น 5.5 – 7.0

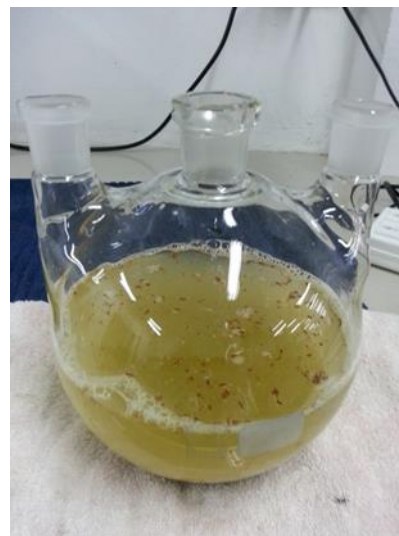
2.3.2 การย่อยแป้งต่อจากขั้นตอน 2.3.1 ให้กลายเป็นน้ำตาล โดยใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลส

ปัจจัยที่ศึกษาในขั้นตอนนี้คือ อุณหภูมิ 40 – 70 องศาเซลเซียส ปริมาณเอนไซม์ 40 – 120 U ต่อกรัม เปลือกสับประรดบด และเวลาในการย่อย 4 – 8 ชั่วโมง ที่ pH เป็น 3.5 – 5.5 แล้วนำผลผลิตที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคส (Glucose content) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total Sugar) ด้วยเครื่อง UV

2.4 การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

2.4.1 ศึกษาการปรับสภาพ

นำเปลือกสับประรดขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร และน้ำสะอาดใส่ในโถแก้ว 3 คอ ขนาดความจุ 2 ลิตร แสดงดังรูปที่ 4 นำไปให้ความร้อนด้วยชุดปรับสภาพและย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟทำการออกแบบสถานะการทดลองด้วย RSM และมีปัจจัยสำคัญที่ศึกษาคือ ปริมาณวัตถุดิบ 100–160 กรัมต่อลิตร (เปลือกสับประรดต่อน้ำสะอาด) ระดับการให้ความร้อน 100–900 วัตต์ และระยะเวลา 5–20 นาที แล้วนำผลผลิตที่ได้มาทำการกรองแยกของแข็งและของเหลวด้วยผ้ากรอง ก่อนนำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ด้วยเครื่อง UV



รูปที่ 4 แสดงเปลือกสับประรดผสมน้ำสะอาดในโถแก้ว 3 คอ ขนาด 2 ลิตร ก่อนการปรับสภาพโดยให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

2.4.2 ศึกษาการย่อย

นำผลผลิตหลังการปรับสภาพด้วยสถานะที่เหมาะสม ตามข้อ 2.4.1 มาทำการย่อยต่อ (ให้ความร้อนอีกครั้ง) โดยปัจจัยสำคัญที่ศึกษาคือ ระดับการให้ความร้อน 100–900 วัตต์ และระยะเวลา 5–20 นาที แล้วนำผลผลิตที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ด้วยเครื่อง UV

3. การหมักเอทานอลด้วยยีสต์ขนมปัง มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

นำผลผลิตหลังการย่อยด้วยสถานะที่เหมาะสมจากกิจกรรมที่ 2.1 – 2.4 มาหมักในขวดหมัก (Air-locked flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เติมยีสต์ขนมปัง และเติมก๊าซไนโตรเจน (Anaerobic process) เพื่อไล่ออกซิเจนออกจากขวดหมัก

ปัจจัยสำคัญที่ศึกษา คือระยะเวลาในการหมัก 2 – 8 วัน ร้อยละโดยน้ำหนักของยีสต์ต่อเปลือกสับประรดบด 2 – 8 ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 4.5 – 6.5 ภายใต้อุณหภูมิห้อง 30 35 และ 40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำผลผลิตที่ได้ไปกรองแยกเอาผลผลิตส่วนของเหลว แล้วนำไปเหวี่ยงแยก เพื่อนำของเหลวใสไปวิเคราะห์

ปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วยเครื่อง UV Visible Spectrophotometer และปริมาณเอทานอลด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC)

4. การขยายขนาดการผลิตด้วยถังปฏิกรณ์

สร้างถังหมักขนาด 5 ลิตร สำหรับวิธีการผลิตที่เหมาะสม ทดลองใช้ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นและปรับปรุงให้สามารถดำเนินการได้ดี และนำผลผลิตหลังหมักมาทดลองเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการกลั่นจนได้ผลผลิตเอทานอลมีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95

4.1 ถังหมักขนาด 5 ลิตร

เลือกใช้ stainless steel เป็นวัสดุในการสร้าง โดยมีความจุขนาด 5 ลิตร ลักษณะของถังจะมีผนังชั้นนอกสำหรับบรรจุน้ำไหลวนรอบตัวถังเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในถัง ส่วนฝาปิดจะทำจากพลาสติกชนิดพอลิโพรเพลีนที่ทนต่อการกัดกร่อน ระบบของถังหมักจะประกอบด้วยชุดควบคุมต่างๆ ได้แก่ ชุดควบคุมค่าพีเอช ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และชุดควบคุมอุณหภูมิ

4.2 เครื่องกลั่นความจุ 5 ลิตร

การสร้างชุดเครื่องกลั่นความจุ 5 ลิตร จะทำจากแก้วเพื่อให้มองเห็นการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในระหว่างการกลั่น ชนิดของแพ็ค (Packing) จะทำจากแก้วเช่นเดียวกันเพื่อให้ทนทานต่อการกัดกร่อน การออกแบบสร้างจะคล้ายกับเครื่องกลั่นแบบแพ็คคอลัมน์ความจุ 2 ลิตร (เครื่องสร้างจากทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ปี 2553-2554 โครงการ “การผลิตเอทานอลจากกากเมล็ดขนุน”)

4.3 ทดลองเพิ่มขนาดการผลิตโดยใช้ชุดเครื่องมือที่สร้างขึ้น

นำเปลือกสับประดะที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 2 มาดำเนินการด้วยชุดถังหมักความจุ 5 ลิตร ด้วยสภาวะการหมักที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 3. แล้วทำการเก็บตัวอย่างนำไปวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละโดยปริมาตรของเอทานอล และนำน้ำหมักที่ได้มาเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการกลั่นให้ได้ผลผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95

5. การทำแผ่นเยื่อกระดาษอย่างง่ายจากกากผลผลิตส่วนของแข็งหลังการหมัก

การผลิตกระดาษอย่างง่ายมีขั้นตอนหลักอยู่ 3 ขั้นตอน คือ การผลิตเยื่อ การเตรียมน้ำเยื่อ และการทำแผ่น ผู้วิจัยสนใจนำส่วนของแข็งหลังการหมักเอทานอลจากเปลือกสับประดะมาเป็นวัตถุดิบ ซึ่งการใช้ผลผลิตเหลือทิ้งนี้อาจจะลดขั้นตอนการผลิตเยื่อได้หนึ่งขั้นตอน และเข้าสู่ขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อได้เลย โดยขั้นตอนการศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้ [10]

5.1 นำส่วนของแข็งหลังการหมักมาอบแห้งจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เก็บในโถสุญญากาศความชื้นจนเป็นอุณหภูมิห้อง แล้วนำมาวิเคราะห์หาร้อยละของผลผลิตเส้นใย ปริมาณเซลลูโลส และปริมาณลิกนินที่หลงเหลือ

การวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในวัตถุดิบและผลผลิตเยื่อ ด้วยวิธี AOAC 1990 [11] มีขั้นตอนดังนี้

- (1) นำตัวอย่าง 1 กรัม เติมสารละลาย acid detergent 100 มิลลิลิตร และ Decahydronaphthalene 2 มิลลิลิตร
- (2) ต้มตัวอย่างให้เดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- (3) เตรียม crucible สำหรับกรองตัวอย่าง โดยนำ crucible ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำตัวอย่างมาวางใน crucible

- (4) ล้างตัวอย่างด้วยน้ำเปล่าและอะซิโตนอย่างละ 2 รอบ
- (5) นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักหลังอบ
- (6) หยดกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 72 โดยน้ำหนัก ให้ตัวอย่างชุ่มตลอดเวลา เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำร้อนจนเป็นกลาง นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลงและบันทึกค่าน้ำหนัก
- (7) เผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่เหลือ แล้วคำนวณหาองค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลส ดังสมการต่อไปนี้

ร้อยละของปริมาณลิกนิน (L) = $(w_2 - w_1) \times 100 / \text{น้ำหนักตัวอย่าง}$

ร้อยละ Acid Detergent Fiber (ADF) = $(w_3 - w_4) \times 100 / \text{น้ำหนักตัวอย่าง}$

ร้อยละของปริมาณเซลลูโลส = ADF - L

โดยที่ w_1 = น้ำหนัก crucible เปล่า

w_2 = น้ำหนัก crucible + ตัวอย่างหลังต้มด้วยสารละลาย acid detergent

w_3 = น้ำหนัก crucible + ตัวอย่างหลังอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่

w_4 = น้ำหนัก crucible + ตัวอย่างหลังเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง

5.2 เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยให้เหมาะกับการทำแผ่นกระดาษ ทำได้โดยการผสมสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อให้ได้กระดาษที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ซึ่งสารเติมแต่งพื้นฐานที่จะทำการศึกษาค้นคว้าได้แก่ สารกันซึม เป็นสารเติมเพื่อลดการซึมผ่านของน้ำหรือของเหลว และป้องกันการทำให้เส้นใยหลุดจากกระดาษได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกดพิมพ์ โดยสารกันซึมที่จะนำมาใช้คือ ยางสนธรรมชาติหรือชันสน (Gum Rosin) และต้องเติมสารส้ม (Aluminum sulfate: Alum) ไปพร้อมกัน เพื่อช่วยให้การทำงานของชันสนดียิ่งขึ้น ซึ่งสารส้มจะช่วยลดความเป็นกรดและเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันการดูดซึมน้ำของชันสนได้ ทำการศึกษาโดย

นำผลผลิตเยื่อที่ได้จากกิจกรรมที่ 5.1 มาคำนวณหาปริมาณเยื่อที่ต้องการใช้ทั้งหมด (กำหนดให้กระดาษที่ต้องการผลิตมีเส้นใย 100 กรัมต่อตารางเมตร) โดยนำเยื่อมาละลายน้ำ 500 มิลลิลิตร ต่อกระดาษ 1 แผ่น และปรับความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าประมาณ 6 - 7 ทำการปั่นกระจายเยื่อด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้เป็นเวลา 2 นาที แล้วเติมยางสนและสารส้ม ทำการศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเยื่อต่อสารส้มต่อยางสนเป็น 3:1.4:0.5 ถึง 3:1.4:2.0 ทำการกวนผสมน้ำเยื่อแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่น โดยกรองแยกน้ำออกด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ แล้วนำแผ่นเยื่อพร้อมกระดาษกรองไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (ทำการสังเกตหาระยะเวลาแห้งจนมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10) เมื่อแห้งก็ค่อยๆ ลอกแผ่นเยื่อออกจากกระดาษกรอง แล้วนำแผ่นเยื่อที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ

5.3 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเยื่อกระดาษที่ผลิตได้จากข้อที่ 5.2 ดังนี้

- ความแข็งแรงของกระดาษ (Tensile Strength)
- น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (Basis Weight)
- ความหนาของกระดาษ (Thickness)
- ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษ (Cobb value)

และประเมินคุณภาพแผ่นเยื่อกระดาษที่ผลิตได้ว่าจะสามารถนำไปพัฒนาใช้ประโยชน์เป็นผลิตภัณฑ์กระดาษประเภทใด

6. เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของการผลิตแต่ละวิธี

ทำการประเมินต้นทุนการผลิต เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากกระบวนการผลิตทั้ง 4 แบบ เพื่อเลือกกระบวนการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับปะรดที่เหมาะสมกับชุมชนและคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ที่สุดหรือมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเปลือกสับประรด

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบเปลือกสับประรด

องค์ประกอบ	วิธีทดสอบ	ผลการทดสอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
โปรตีน	AOAC (Kjeldahl Method)	1.42
ไขมันดิบ	AOAC (Soxhlet extraction Method)	0.08
ความชื้น	AOAC (Loss on drying at 95-100°C)	84.89
เถ้า	AOAC	0.84
เส้นใยดิบ	Fiber analyzer (ANKOM200)	10.20
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด	Calculation	12.77

หมายเหตุ: วิเคราะห์โดยศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อการส่งออก (ADCET) คณะอุตสาหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผลการทดลองดังตารางที่ 1 สามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่า เปลือกสับประรดมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate) ซึ่งรวมเส้นใยอยู่ด้วย คิดเป็นร้อยละ 84.51 (เมื่อคำนวณด้วยฐานแห้ง) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในการเป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตเอทานอล และองค์ประกอบอื่นที่จะเป็นอุปสรรคสำหรับการย่อยเพื่อผลิตน้ำตาลมีอยู่ปริมาณน้อย คือ เถ้า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ ลิกนิน

2. ผลการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรด จากการศึกษาด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 4 แบบ

2.1 ผลการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเองบนเปลือกสับประรด

การปรับสภาพและย่อยมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ แต่การใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติอาจทำได้ น้ำตาลรีดิวซ์น้อยเนื่องจากต้องใช้เวลาที่ยาวนานกว่าวิธีอื่น โดยน้ำตาลที่จุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนเป็นเอทานอลได้นอกจากกลูโคส (ในที่นี้คือน้ำตาลรีดิวซ์) แล้วยังมีฟรุคโตสและซูโครสด้วย (ซึ่งในการวิเคราะห์ของงานนี้จะอยู่ในประเภทน้ำตาลนอนรีดิวซ์) จึงต้องวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (น้ำตาลรีดิวซ์รวมกับนอนรีดิวซ์) เป็นข้อมูลประกอบ อย่างไรก็ตามเพื่อสามารถเปรียบเทียบผลกับการย่อยด้วยวิธีอื่นการตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสมยังคงเลือกสภาวะซึ่งให้ผลผลิตมีน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด โดยผลการออกแบบสภาวะการทดลองด้วย RSM (Respond Surface Methodology) และผลการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรดด้วยจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 2

ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ (อัตราส่วนเปลือกสับประรดต่อน้ำ 1 ลิตร และเวลา) ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการย่อยแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าผลผลิตหลังการย่อยมีน้ำตาลรีดิวซ์ปริมาณมากขึ้นเมื่อใช้เปลือกสับประรดในช่วงไม่เกิน 160 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร และระยะเวลาในช่วง 1 – 7 วัน และมีน้ำตาลรีดิวซ์ปริมาณมากที่สุด (0.5-0.6 กรัมต่อลิตร) เมื่อใช้เปลือกสับประรดในช่วง 130 – 150 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร สำหรับ

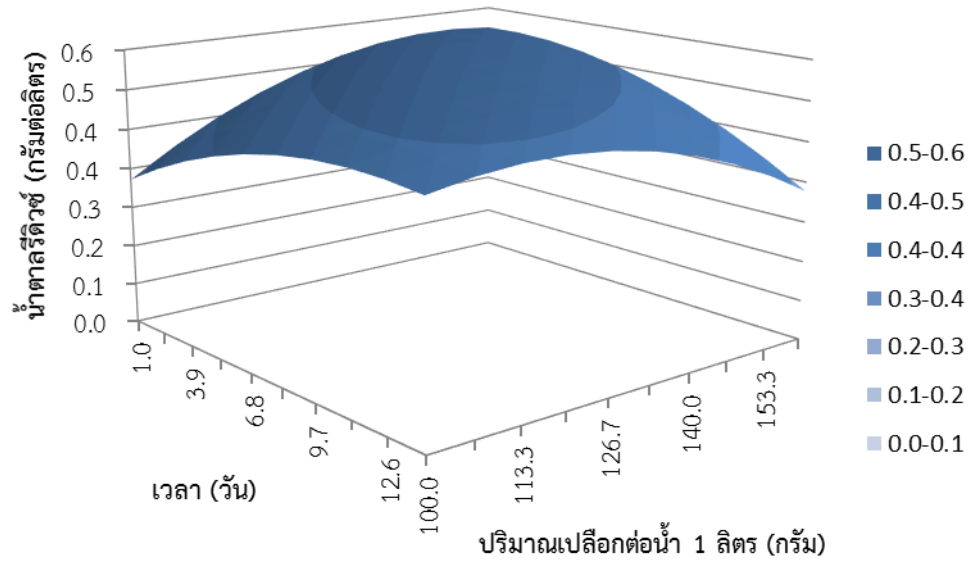
ระยะเวลาในช่วง 3 – 6 วัน และผลของปัจจัยต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (น้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลนอนรีดิวซ์: reducing and non-reducing sugars) แสดงดังรูปที่ 6 ผลการศึกษาพบว่าเป็นการทำนองเดียวกับการเกิดน้ำตาลรีดิวซ์ แต่ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่น่าพอใจต้องใช้เวลาในการย่อยมากกว่าคือในช่วง 7 – 11 วัน

ตารางที่ 2 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติโดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดในผลผลิตหลังการย่อย

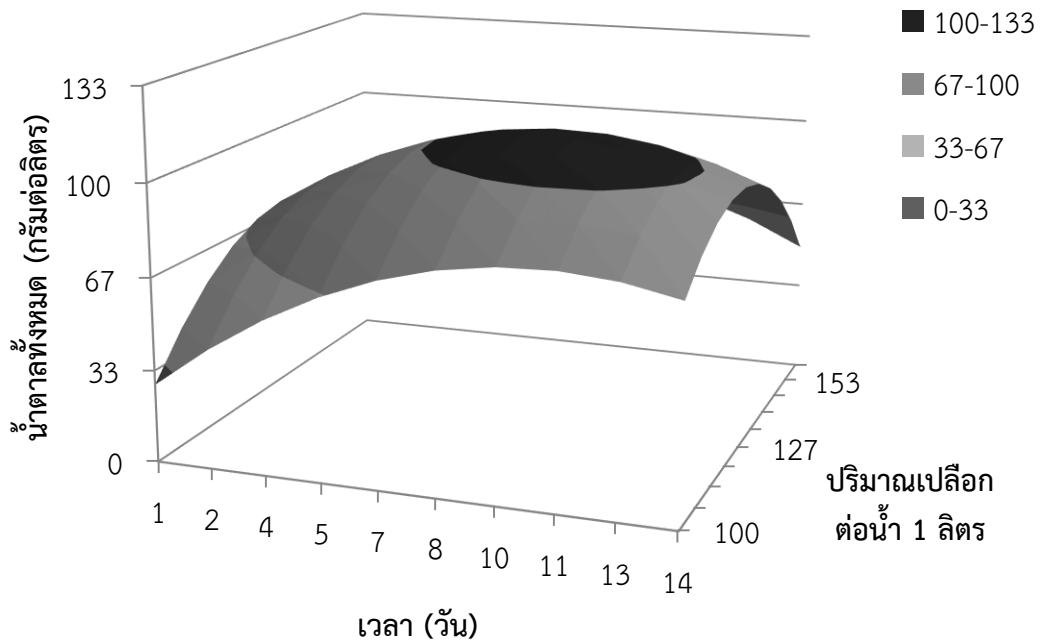
การทดลองที่	สภาวะการทดลอง		ผลการทดลอง	
	เวลา (วัน)	ปริมาณเปลือก (กรัม) สับปะรดในน้ำ 1 ลิตร	น้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	น้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)
1	3	109	0.48	45.31
2	8	130	0.59	86.59
3	8	130	0.59	135.43
4	12	109	0.53	80.05
5	8	130	0.58	96.62
6	8	160	0.53	84.03
7	3	151	0.59	60.90
8	14	130	0.51	104.50
9	12	151	0.44	71.03
10	1	130	0.52	88.55
11	8	100	0.46	94.45

จากผลการทำนายสภาวะการย่อยที่เหมาะสมโดย RSM เพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด คือ การย่อยด้วยจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติบนเปลือกสับปะรด โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 141 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ภายใต้อุณหภูมิห้อง ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 84 – 92 เป็นเวลา 5 วัน ได้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ 0.59 กรัมต่อลิตร ซึ่งภายใต้สภาวะนี้ผลการทดลองจริงได้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ 0.58 กรัมต่อลิตร และน้ำตาลทั้งหมด 135.43 กรัมต่อลิตร โดยผลที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกับผลของการทำนาย จึงสรุปได้ว่าสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่เหมาะสม

จากรูปที่ 5 แสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ พบว่า ปัจจัยที่มีผลมากที่สุด คือ ปริมาณเปลือกสับปะรด รองลงมาคือ ระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย โดยจากกราฟพื้นผิวพบว่า การมีปริมาณเปลือกสับปะรดที่มากขึ้นไม่ได้ช่วยให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่สูงขึ้น ทั้งนี้ยังขึ้นกับการทำงานของจุลินทรีย์ที่อยู่บนเปลือกสับปะรดด้วยว่าจะทำงานได้ดีในช่วงเวลาใด



รูปที่ 5 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ของเวลาและปริมาณเปลือกสัปดาห์ที่ผลต่อปริมาณน้ำตาสรีดิวซ์ ที่ผ่านการย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ ภายใต้อุณหภูมิห้อง (26 – 32 องศาเซลเซียส) และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 84 – 92



รูปที่ 6 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ของเวลาและปริมาณเปลือกสัปดาห์ที่ผลต่อปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ที่ผ่านการย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ ภายใต้อุณหภูมิห้อง และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 84 – 92

2.2 ผลการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปรดด้วยจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองบนเปลือกสับปรดร่วมกับจุลินทรีย์ที่เกิดบนขนมปังหมดอายุ

ผลการออกแบบสภาวะการทดลองด้วย RSM และผลการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติและรา บนขนมปังแสดงดังตารางที่ 3

ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ คือ ระยะเวลาเลยวันหมดอายุของขนมปังหมดอายุ อัตราส่วนขนมปังหมดอายุต่อเปลือกสับปรด ปริมาณวัตถุดิบผสม (เปลือกสับปรดผสมขนมปังหมดอายุ) ต่อน้ำ 1 ลิตร และระยะเวลาในการปรับสภาพพร้อมกับการย่อย ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในผลผลิตหลังการย่อยแสดงดังรูปที่ 7(ก) – 12(ก) และรูปที่ 7(ข) – 12(ข) ตามลำดับ โดยทั้ง 27 การทดลองที่แสดงดังตารางที่ 3 ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 84 – 92 เช่นเดียวกับกับหัวข้อที่ 2.1

ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆพบว่า อายุขนมปังมีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด (รูปที่ 7 – 9) โดยมีแนวโน้มของปัจจัยไม่แน่นอน ผลของน้ำตาลมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงไม่แน่นอน อาจขึ้นอยู่กับราหรือจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบนขนมปังและที่เกิดบนเปลือกสับปรด (ราที่ขึ้นบนขนมปัง คือ ราจำพวก *Rhizopus sp.* และเชื้อราที่สามารถเจริญเติบโตได้บนขนมปังมีหลายจำพวก เช่น *Aspergillus sp.* และ *Penicillium sp.* ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นราที่สามารถย่อยเซลลูโลสได้) มีการทำงานหรือมีเมทาบอลิซึมที่เปลี่ยนไปตามอายุของขนมปังที่ใช้ แต่สามารถสรุปได้ว่าควรใช้อายุขนมปังที่มีระยะเวลาเลยวันหมดอายุไปแล้ว 4 - 5 วัน (รูปที่ 7(ก) 8(ก) และ 9(ก)) จะให้ผลผลิตมีน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าที่ระยะอื่นๆ และหากต้องการให้มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงควรใช้ขนมปังที่มีระยะเวลาเลยวันหมดอายุไปแล้ว 1 - 2 วัน (รูปที่ 7(ข) 8(ข) และ 9(ข))

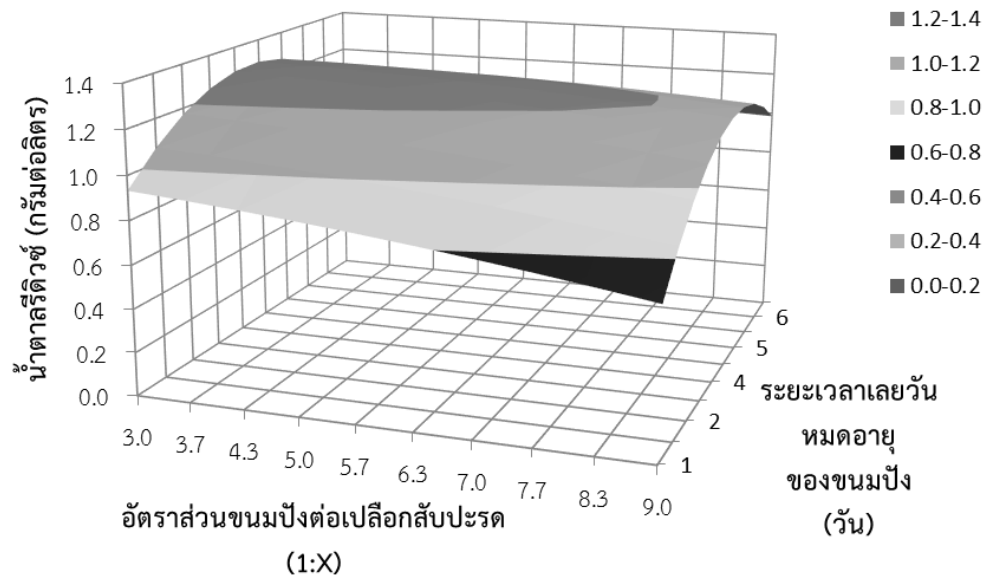
ส่วนอิทธิพลของอัตราส่วนขนมปังหมดอายุต่อเปลือกสับปรด ปริมาณวัตถุดิบผสมต่อน้ำ 1 ลิตร และระยะเวลาในการปรับสภาพพร้อมกับการย่อย มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเป็นแนวโน้มเดียวกัน ดังนี้

เมื่อใช้อัตราส่วนขนมปังต่อเปลือกสับปรดโดยใช้ปริมาณเปลือกมากขึ้นจะให้ผลผลิตมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดน้อยลง อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:3 – 1:4 (รูปที่ 7, 10 และ 11)

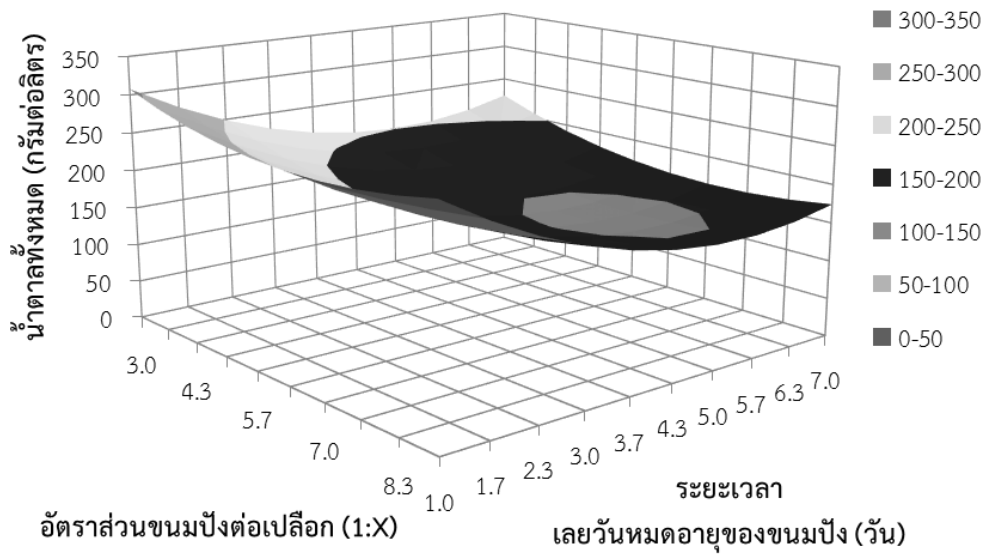
ปริมาณวัตถุดิบผสมต่อน้ำ 1 ลิตร เมื่อใช้วัตถุดิบผสมมากขึ้น (ความเข้มข้นมากขึ้น) จะให้ผลผลิตมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดมากขึ้น และช่วงที่เหมาะสมคือ วัตถุดิบ 127 – 153 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร (รูปที่ 8, 10 และ 12) และผลของระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย ควรใช้เวลาแค่ 1 – 2 วัน การใช้ระยะเวลานานขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ผลผลิตมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดมากขึ้น (รูปที่ 9, 11 และ 12) ซึ่งปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือระยะเวลาเลยวันหมดอายุของขนมปัง โดย RSM ได้ทำนายสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นบนเปลือกสับปรดร่วมกับที่เกิดขึ้นบนขนมปังหมดอายุ มีสภาวะเหมาะสมที่ทำให้เกิดจุลินทรีย์ธรรมชาติช่วยให้เกิดการย่อยคือ การใช้ขนมปังที่มีระยะเวลาเลยวันหมดอายุไปแล้ว 5 วัน วัตถุดิบผสมด้วยอัตราส่วนขนมปังต่อเปลือกสับปรดเป็น 1:3 ที่ปริมาณของวัตถุดิบผสมเป็น 153 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ปรับสภาพและย่อยภายใต้อุณหภูมิห้อง ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 84 – 92 เป็นเวลา 1 วัน สามารถให้ผลผลิตมีปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์จากการทดลอง 2.07 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 3 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังหมดอายุ โดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดในผลผลิตหลังการย่อย

การทดลอง ที่	สภาวะการทดลอง				ผลการทดลอง	
	อายุขนมปัง หมดอายุ แล้วเป็น เวลา (วัน)	อัตราส่วน ขนมปังต่อ เปลือกสับปรด (กรัมต่อกรัม)	ปริมาณ เปลือกสับปรด ผสมขนมปัง (กรัม) ต่อน้ำ 1 ลิตร	เวลา (วัน)	น้ำตาล รีดิวซ์ (กรัมต่อ ลิตร)	น้ำตาล ทั้งหมด (กรัมต่อ ลิตร)
1	1	1:6.0	130	8	0.79	300.51
2	6	1:4.5	145	4	1.51	137.59
3	4	1:6.0	160	8	1.10	126.12
4	4	1:6.0	130	8	1.23	155.63
5	4	1:6.0	130	8	1.23	150.27
6	6	1:7.5	115	11	1.11	194.26
7	3	1:7.5	145	11	1.04	185.88
8	4	1:6.0	100	8	0.87	161.75
9	6	1:4.5	145	11	1.11	172.81
10	4	1:9.0	130	8	1.18	164.57
11	3	1:4.5	145	4	1.39	207.78
12	3	1:7.5	145	4	1.16	262.40
13	3	1:4.5	115	11	1.09	176.01
14	6	1:4.5	115	4	1.16	112.49
15	3	1:7.5	115	4	1.05	120.59
16	6	1:7.5	145	4	1.37	136.91
17	4	1:3.0	130	8	1.34	297.21
18	3	1:4.5	115	4	1.18	183.30
19	4	1:6.0	130	8	1.28	165.49
20	6	1:4.5	115	11	1.07	168.31
21	7	1:6.0	130	8	1.12	213.63
22	3	1:4.5	145	11	1.07	211.80
23	3	1:7.5	115	11	1.10	241.80
24	4	1:6.0	130	14	1.50	238.77
25	6	1:7.5	115	4	1.16	128.46
26	6	1:7.5	145	11	1.08	138.65
27	4	1:6.0	130	1	1.83	389.34

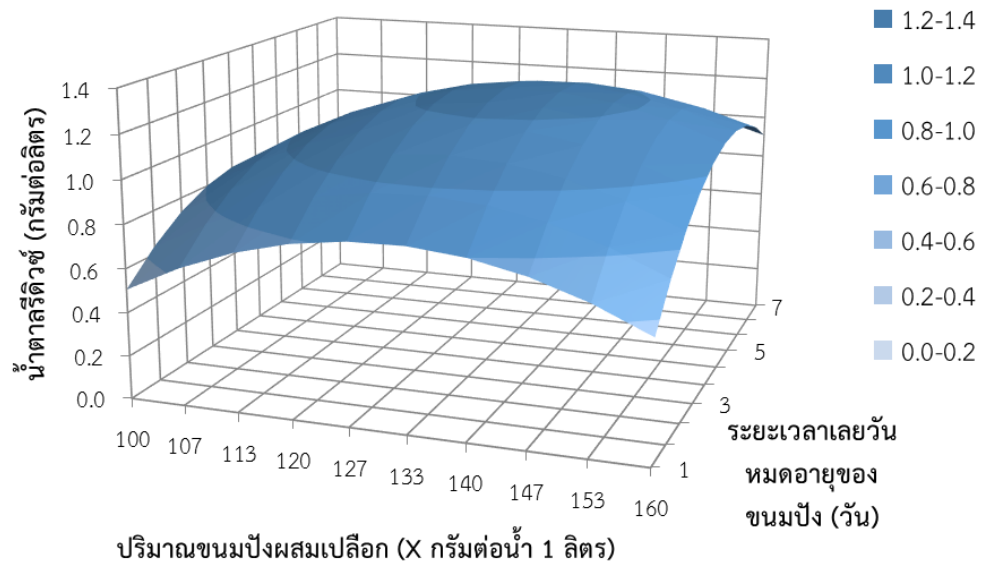


(ก)

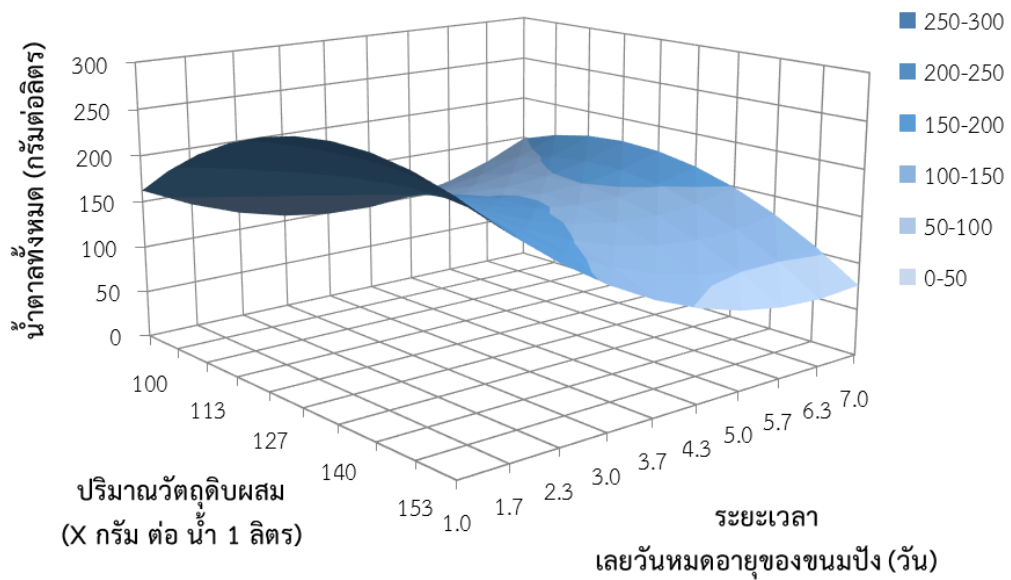


(ข)

รูปที่ 7 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักของขนมปังหมดอายุต่อเปลือกสับปะรด และระยะเวลาเลยวันหมดอายุของขนมปังที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้ปริมาณวัตถุดิบผสม (ขนมปังผสมเปลือกสับปะรด) 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 8 วัน

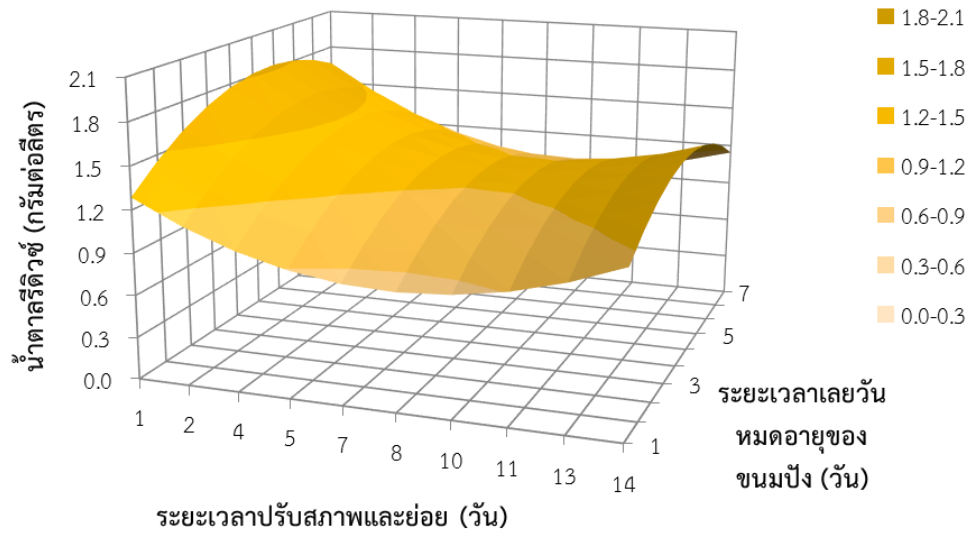


(ก)

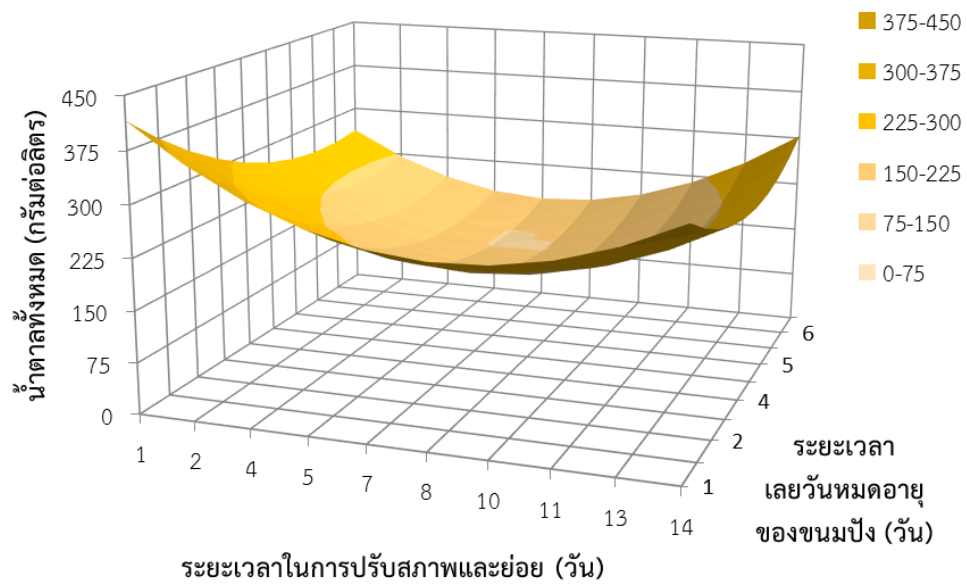


(ข)

รูปที่ 8 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัตถุดิบผสม (ขนมปังผสมเปลือกสับปะรด) ต่อ น้ำ 1 ลิตร และระยะเวลาเลยวันหมดอายุของขนมปังที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขนมปังหมดอายุต่อเปลือกสับปะรดเป็น 1:6 และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 8 วัน

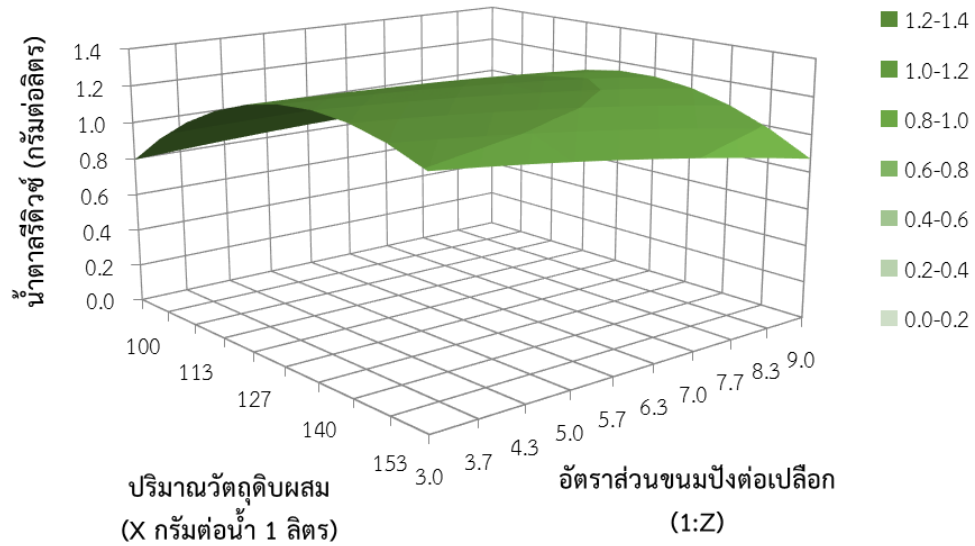


(ก)

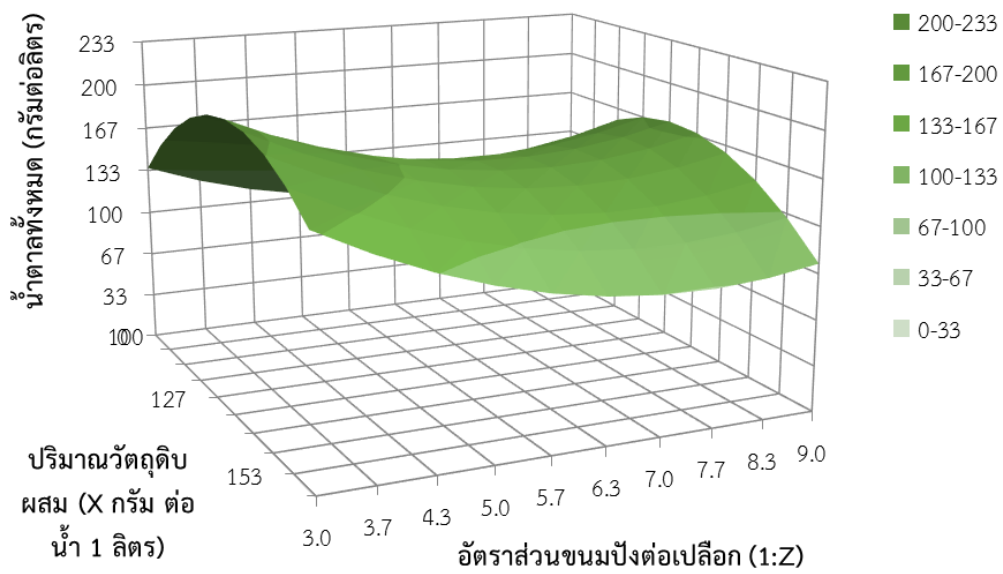


(ข)

รูปที่ 9 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับปรุงและย่อย และระยะเวลาเลยวันหมดอายุของขนมปังที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ในผลผลิตหลังการปรับปรุงและย่อย โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของขนมปังหมดอายุต่อเปลือกสับปะรดเป็น 1:6 และปริมาณวัตถุดิบผสม 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร

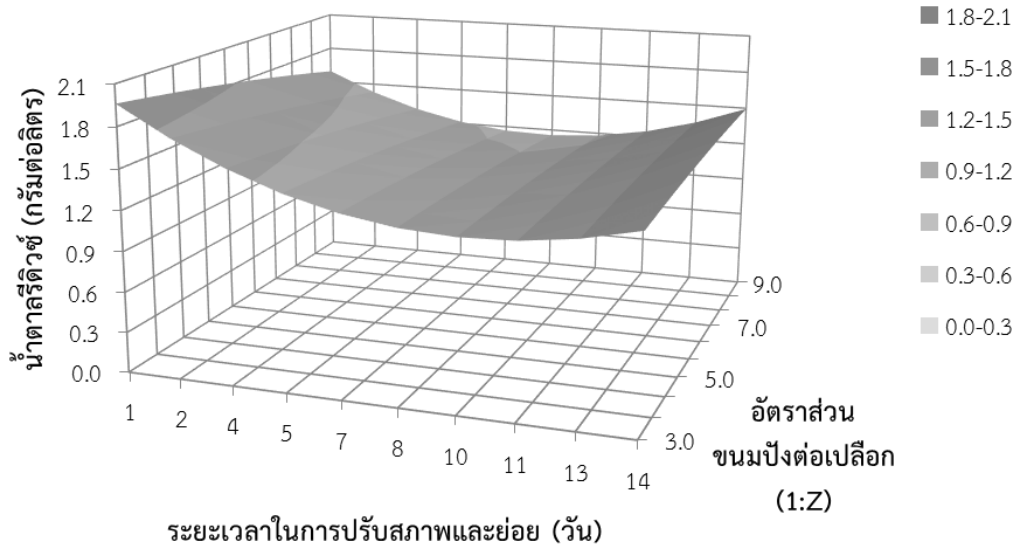


(ก)

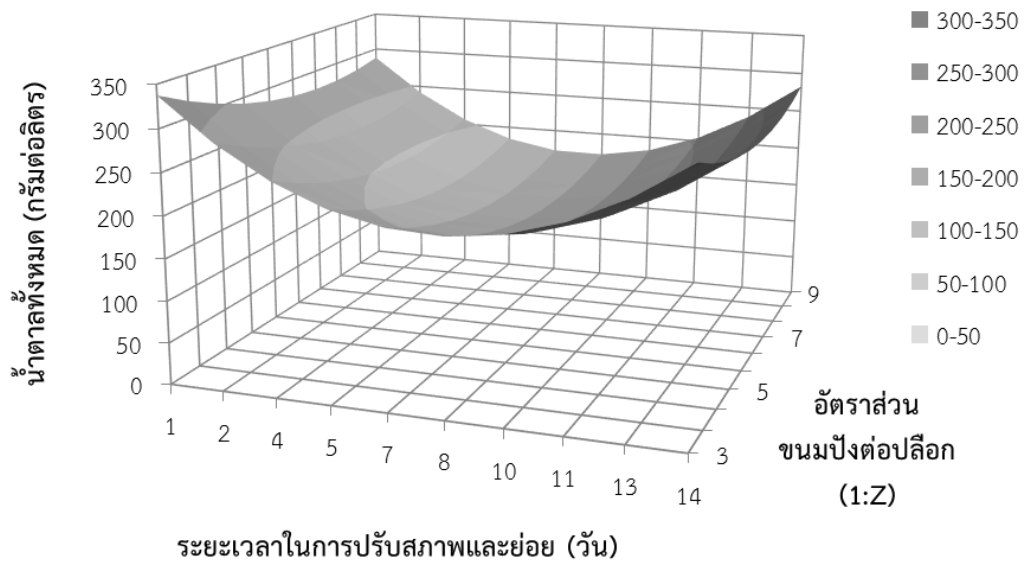


(ข)

รูปที่ 10 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัตถุดิบผสมต่อน้ำ 1 ลิตร และอัตราส่วนขนมปังต่อเปลือกสับปะรด (1:กรัม) ที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้ขนมปังหมดอายุไปแล้ว 4 วัน และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 8 วัน

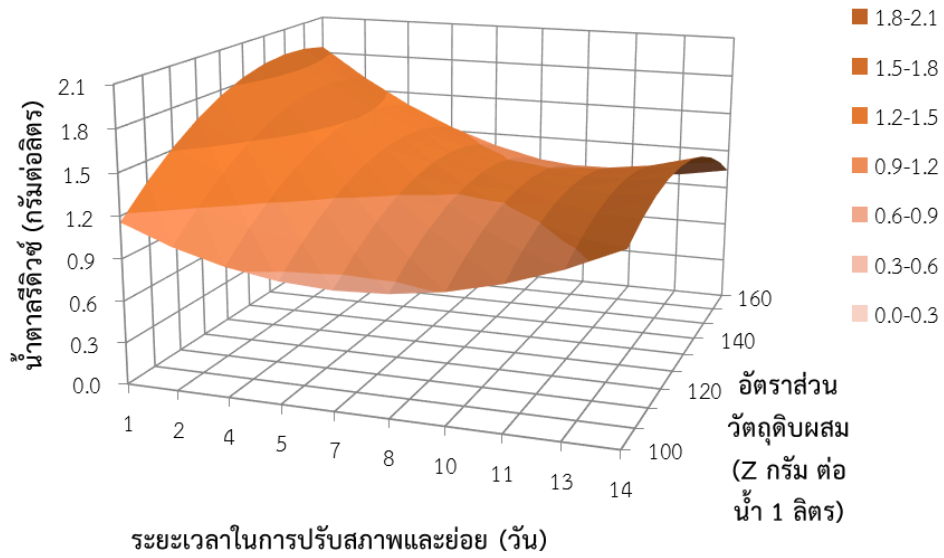


(ก)

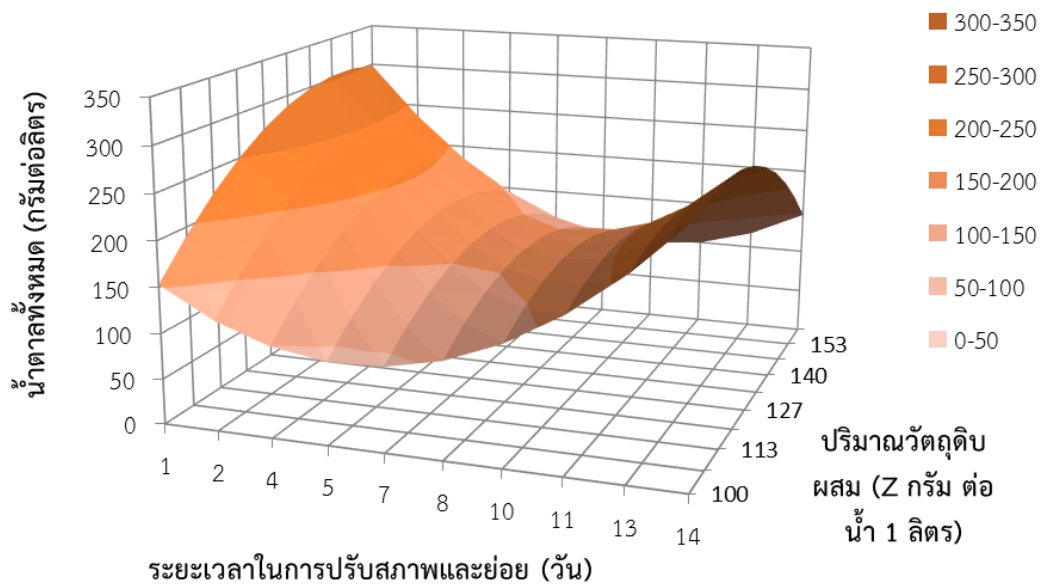


(ข)

รูปที่ 11 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย และอัตราส่วนขนมปังต่อเปลือกเปลือกสับปะรด (1:กรัม) ที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้ขนมปังหมดอายุไปแล้ว 4 วัน และปริมาณวัตถุดิบผสม 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร



(ก)



(ข)

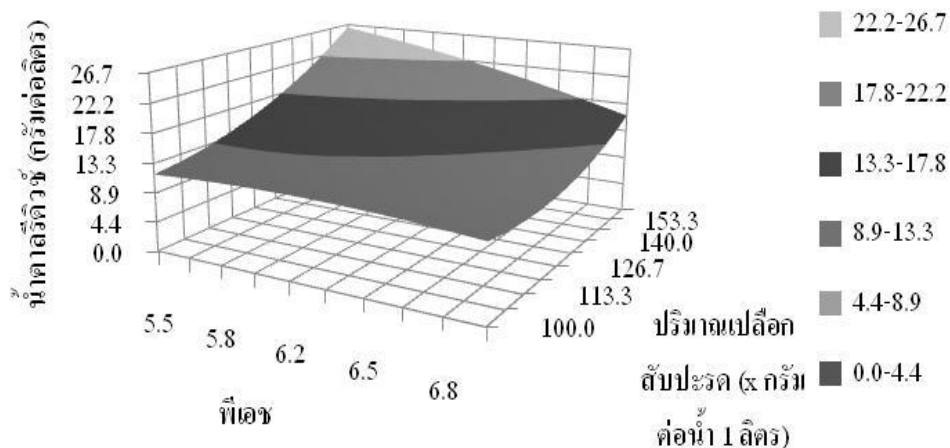
รูปที่ 12 แสดงกราฟพื้นผิวของปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย และปริมาณวัตถุติบผสมต่อน้ำ 1 ลิตร ที่มีผลต่อ (ก) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และ (ข) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อย โดยใช้ขนมปังหมดอายุไปแล้ว 4 วัน และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของขนมปังหมดอายุต่อเปลือกสับปะรดเป็น 1:6

2.3 ผลการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปรดด้วยเอนไซม์ ผลการศึกษามี 2 ขั้นตอน คือ

2.3.1 การปรับสภาพและย่อยเบื้องต้นโดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส

จากการการออกแบบสภาวะการทดลองโดย RSM ที่มีปัจจัยในการศึกษา 5 ปัจจัย คือ ปริมาณเปลือกสับปรด (A, กรัมต่อลิตร) อุณหภูมิ (B, องศาเซลเซียส) ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (C, U ต่อกรัม) ระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย (D, นาที) และพีเอช (E) ตัวแปรตาม (ผลตอบสนอง) คือ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร) แสดงสภาวะการทดลองและผลการทดลองในตารางที่ 4 เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ตามหลัก Analysis of variance (ANOVA) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Essential regression แสดงดังสมการที่ (1) ซึ่งค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกัน มีค่า $R^2 = 0.929$ และอิทธิพลของทั้ง 5 ปัจจัย ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ถูกอธิบายด้วยกราฟพื้นผิวสามมิติ แสดงดังภาพประกอบที่ 13 - 22

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)} = & -160.21 + 35.41A + 0.211B + 0.04391C + 0.213D + 48.94E \\ & + 3047.1 A^2 + 0.00308B^2 - 0.000818C^2 + 0.000283D^2 - 1.614E^2 - 2.167AB + 1.060AC + \\ & 0.06481AD - 107.78 AE - 0.00126BC + 0.00276 BD - 0.140BE - 7.53968E-05CD + \\ & 0.03667CE - 0.08481DE \end{aligned} \quad (1)$$

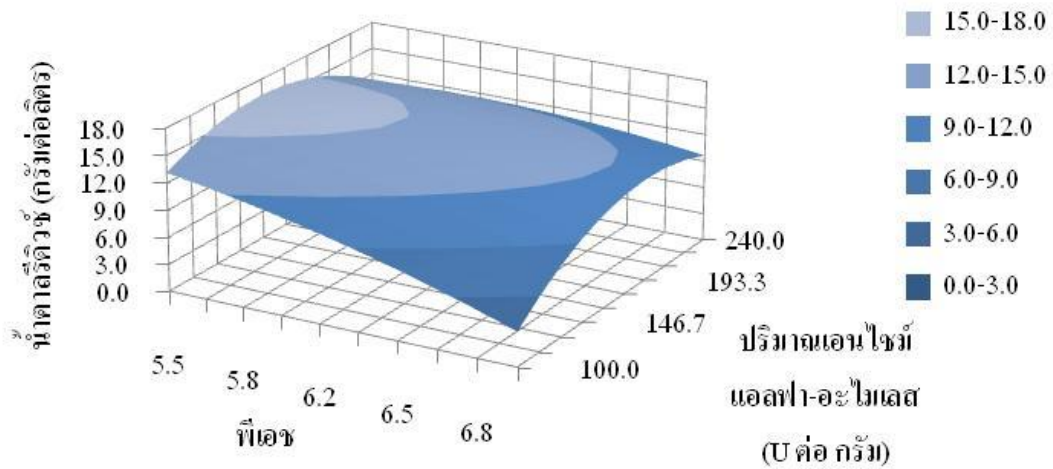


รูปที่ 13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณเปลือกสับปรด ต่อ น้ำ 1 ลิตร ที่มีผลต่อ น้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปรด อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยเป็นเวลา 150 นาที

ผลของพีเอชและปริมาณเปลือกสับปรดต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปรด อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยเป็นเวลา 150 นาที แสดงดังรูปที่ 13 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเหมาะสมอยู่ในช่วงพีเอช 5.5-6.2 โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปรดที่อยู่ในช่วง 153.3-160 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร เพราะหากใช้พีเอชที่น้อยกว่า 5.5 ซึ่งมีความเป็นกรดมากเกินไป อาจทำให้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ทำงานได้ไม่ดี จึงส่งผลให้ผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ในปริมาณน้อย

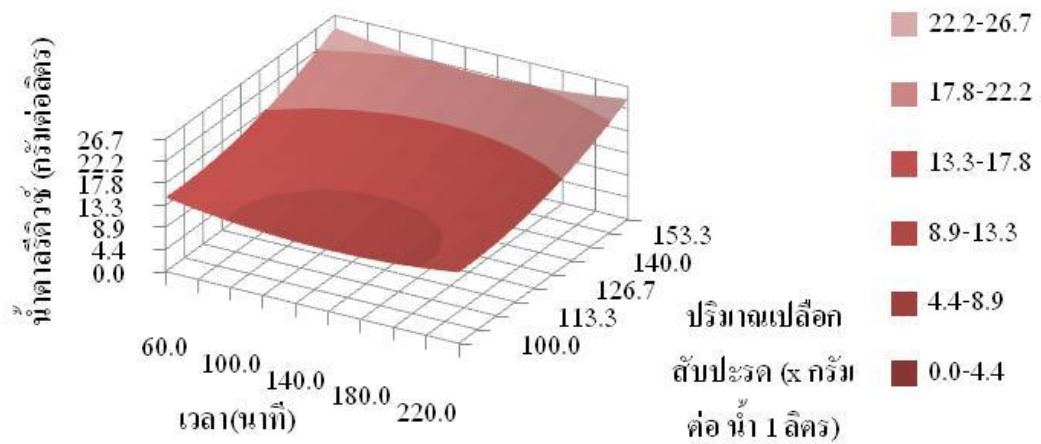
ตารางที่ 4 สภาวะการทดลองและผลการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปรดโดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส

ลำดับที่	ปริมาณเปลือกสับปรด (กรัมต่อลิตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (U ต่อกรัม)	ระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย (นาที)	พีเอช	ปริมาณน้ำตาล (กรัมต่อลิตร)	
						น้ำตาลรีดิวซ์	น้ำตาลทั้งหมด
1	115	93	205	105	6.6	9.60	493.05
2	130	85	100	150	6.3	9.61	608.93
3	130	85	170	150	6.3	12.42	653.75
4	115	93	135	195	6.6	8.41	413.76
5	115	78	205	195	6.6	10.63	586.17
6	130	85	170	150	7.0	12.82	559.86
7	145	93	135	195	5.9	20.01	332.48
8	100	85	170	150	6.3	13.22	490.01
9	145	93	135	105	6.6	11.44	308.88
10	130	85	170	60	6.3	17.51	446.82
11	145	78	205	105	6.6	21.02	326.82
12	145	93	205	195	6.6	12.74	449.91
13	115	93	205	195	5.9	13.22	293.45
14	160	85	170	150	6.3	22.03	499.26
15	130	85	170	240	6.3	16.81	416.97
16	130	70	170	150	6.3	19.04	385.00
17	130	100	170	150	6.3	12.13	419.50
18	130	85	240	150	6.3	12.11	418.44
19	145	93	205	105	5.9	15.61	384.99
20	115	78	205	105	5.9	13.44	433.20
21	130	85	170	150	6.3	12.32	388.06
22	115	78	135	195	5.9	14.83	420.41
23	145	78	205	195	5.9	21.91	365.37
24	130	85	170	150	6.3	17.42	289.36
25	145	78	135	105	5.9	19.21	323.52
26	115	78	135	105	6.6	14.13	335.65
27	145	78	135	195	6.6	12.74	395.95
28	130	85	170	150	5.5	15.11	395.59
29	115	93	135	105	5.9	10.52	445.89



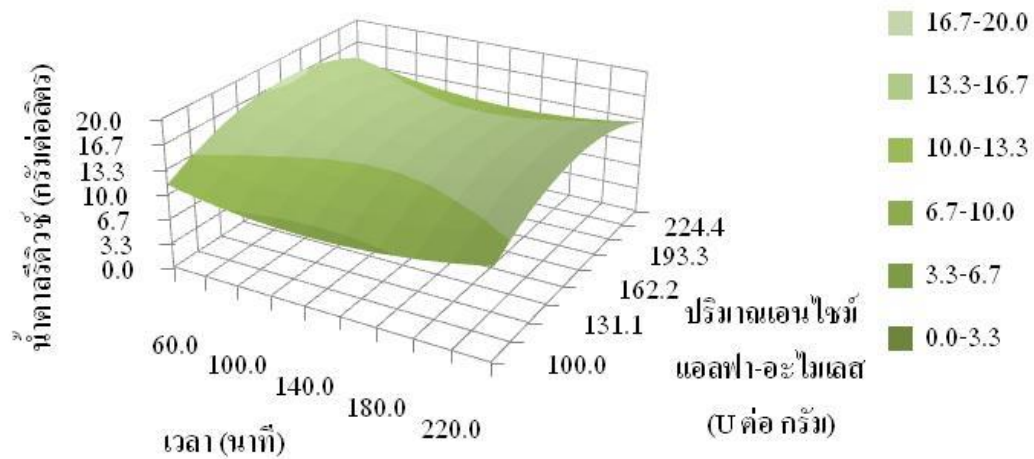
รูปที่ 14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิซ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยเป็นเวลา 150 นาที

ผลของพีเอชและปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิซ แสดงดังรูปที่ 14 พบว่าปริมาณผลผลิตน้ำตาลรีดิซมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีพีเอชอยู่ในช่วง 5.5-6.0 และปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 125-193.3 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 13



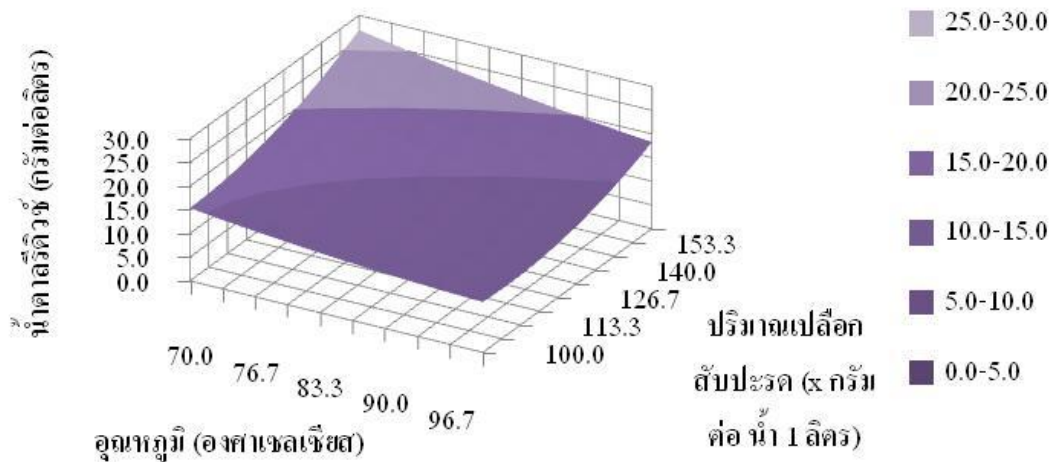
รูปที่ 15 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยและปริมาณเปลือกสับปะรดที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิซ โดยที่ใช้ปริมาณเอนไซม์ 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสและพีเอช 6.3

ผลของระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยและปริมาณเปลือกสับปะรดที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิซ แสดงดังรูปที่ 15 พบว่าปริมาณผลผลิตน้ำตาลรีดิซมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ใน 2 ช่วง คือ เมื่อระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 60-100 นาที และ 180-240 นาที โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 153.3-160 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร



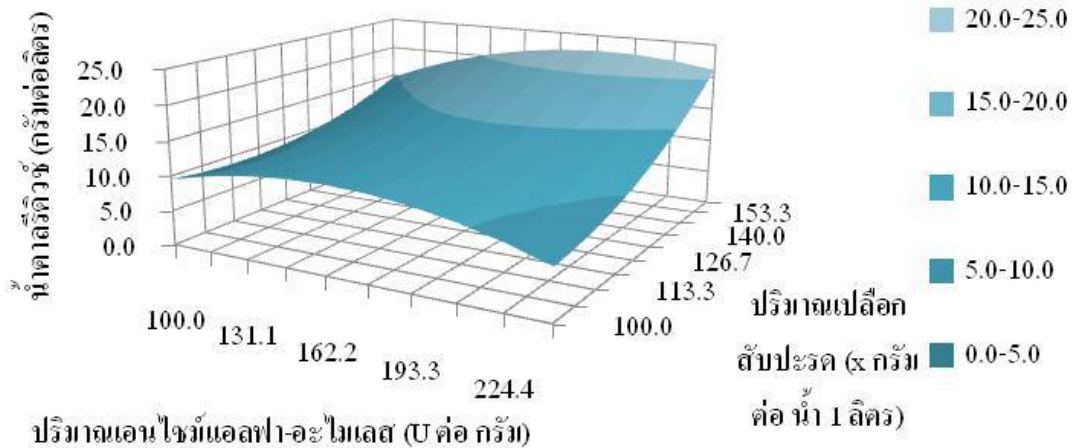
รูปที่ 16 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยและปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และพีเอช 6.3

ผลของระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยและปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 16 พบว่า ปริมาณผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 60-70 นาที และปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 162.2-193.3 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด เพราะหากใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่น้อยจนเกินไป จะทำให้ไม่เพียงพอต่อการย่อยคาร์โบไฮเดรตและเซลลูโลส จึงส่งผลให้น้ำตาลรีดิวซ์ในปริมาณน้อย



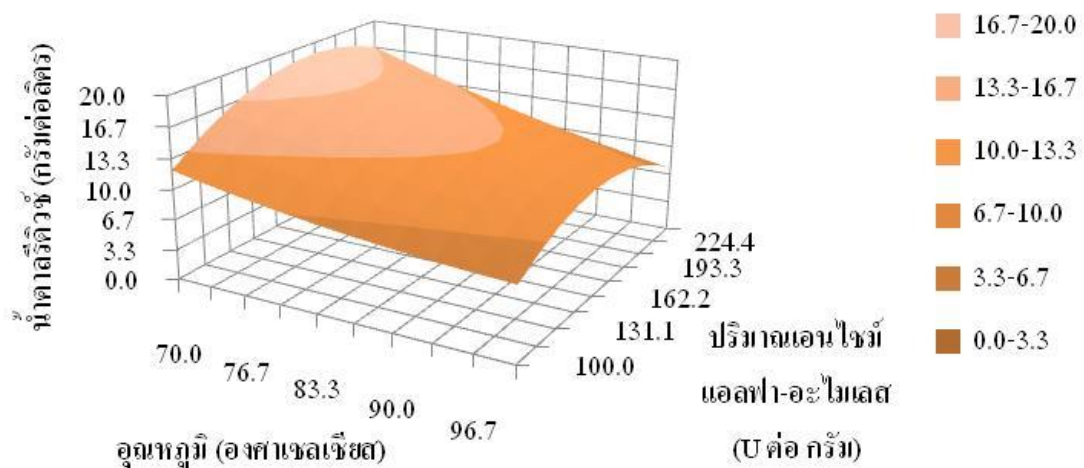
รูปที่ 17 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณเปลือกสับปะรดที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด พีเอช 6.3 และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 150 นาที

ผลของอุณหภูมิและปริมาณเปลือกสับปะรดต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 17 พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าที่เหมาะสมเมื่อใช้อุณหภูมิ 70-75 องศาเซลเซียส และปริมาณเปลือกสับปะรด 153.3-160 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 15



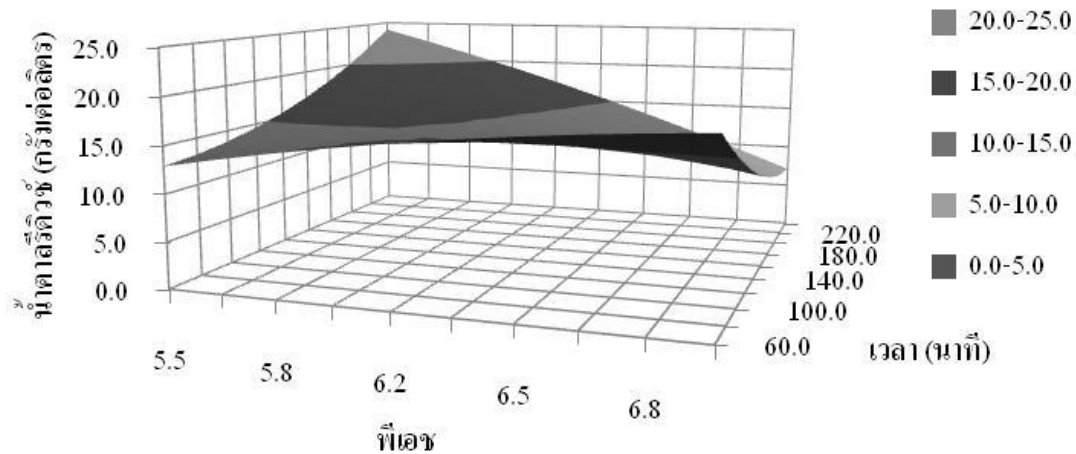
รูปที่ 18 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและปริมาณเปลือกสับปะรดที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส พีเอช 6.3 และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 150 นาที

ผลของปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและปริมาณเปลือกสับปะรดต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 18 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 146.7-240 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด และปริมาณเปลือกสับปะรด 153.3-160 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร



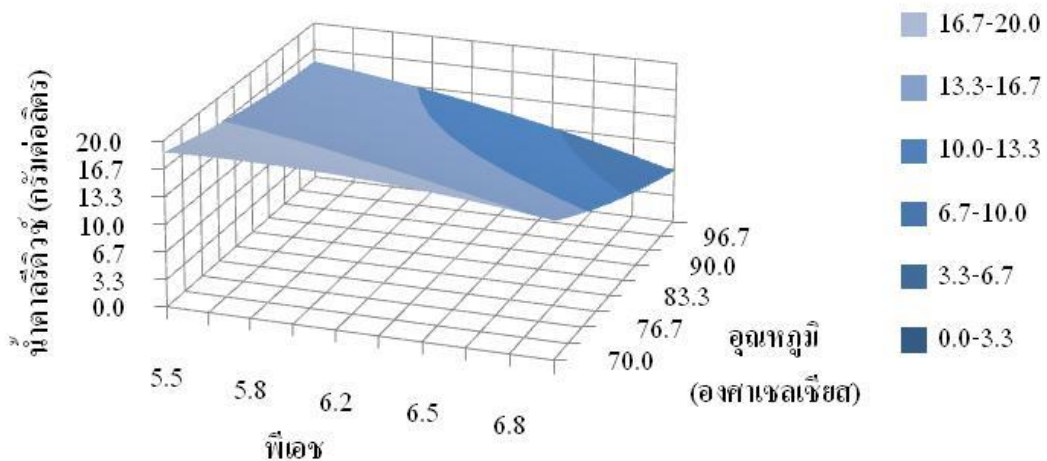
รูปที่ 19 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้อุณหภูมิเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร พีเอช 6.3 และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 150 นาที

ผลของอุณหภูมิและปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 19 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าที่เหมาะสมเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 70-75 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เพราะหากใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้ไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และควรใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 130-240 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด



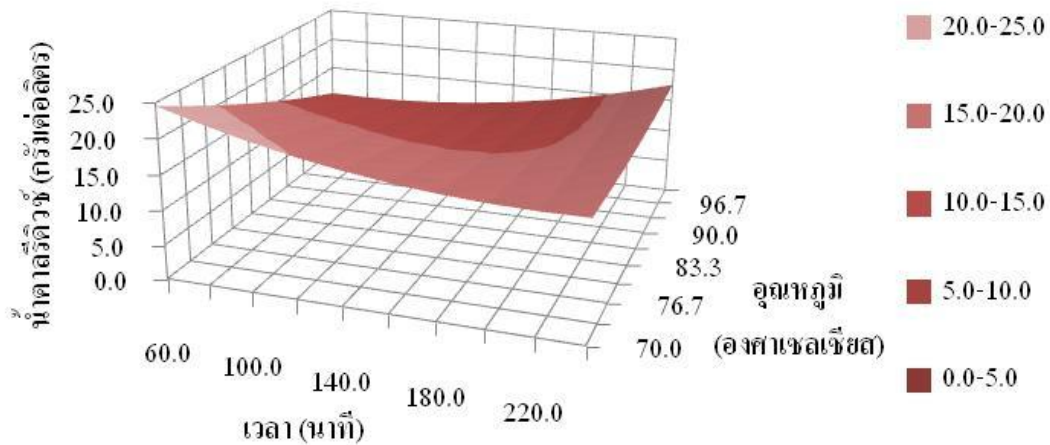
รูปที่ 20 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด

ผลของพีเอชและระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 20 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าที่เหมาะสมเมื่อดำเนินการที่พีเอช 5.5-5.8 ที่ระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 200-240 นาที



รูปที่ 21 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 150 นาที

ผลของพีเอชและอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 21 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าที่เหมาะสมที่พีเอช 5.5-7.0 และใช้อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 22 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 130 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 170 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด และพีเอช 6.3

ผลของระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อยและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 22 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 60-120 นาที และใช้อุณหภูมิ 70-76.7 องศาเซลเซียส

จากผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดโดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส คือ ใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 160 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 188 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด พีเอช 5.5 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย 4 ชั่วโมง จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ตามการทำนาย คือ 34.17 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อทำการทดลองจริงจะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 27.37 กรัมต่อลิตร และได้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 630.56 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการทำนายแต่มีค่ามากกว่าจาก 29 การทดลองในตารางที่ 4 จึงถือได้ว่าสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

ปัจจัยที่มีผลมากที่สุด เมื่อสังเกตจากแนวโน้มของกราฟพื้นผิวที่แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ คือ พีเอช รองลงมา คือ อุณหภูมิ ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ปริมาณเปลือกสับปะรด และระยะเวลาในการปรับสภาพและย่อย เนื่องจากเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส สามารถทำงานได้ดีในสภาวะการทดลองที่เป็นกรด ซึ่งพีเอชที่เหมาะสม อยู่ที่ประมาณ 5.5 หากมีค่าพีเอชที่มากกว่าหรือน้อยกว่า 5.5 จะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ลดลง ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้น

2.3.2 การย่อยผลผลิตที่ได้จากข้อ 2.3.1 ให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคสโดยใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลส

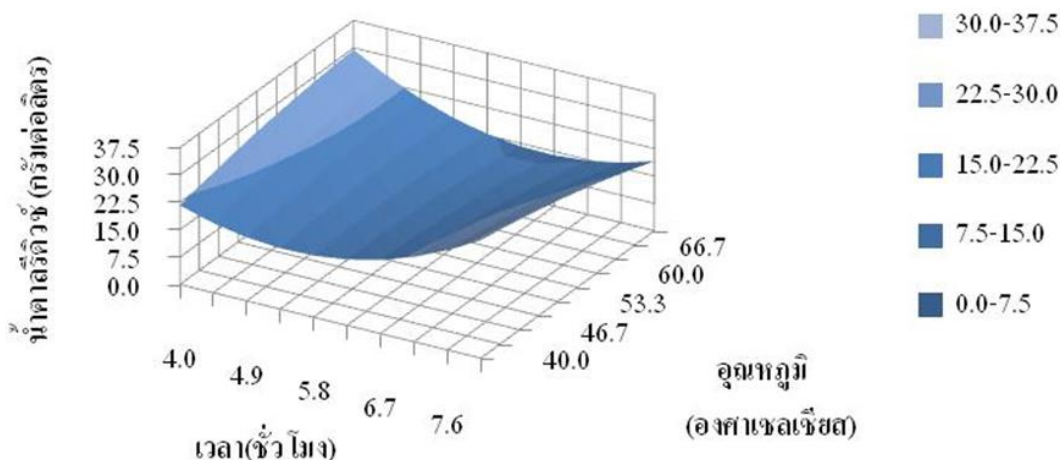
จากการออกแบบสภาวะการทดลองโดย RSM ด้วยปัจจัยที่ต้องการศึกษา 4 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ ปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลส พีเอช และระยะเวลาในการย่อย และผลผลิตที่ต้องการคือปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ดังแสดงสภาวะการทดลองและผลการทดลองในตารางที่ 5 พบว่า สภาวะที่ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด คือ การ

ทดลองที่ 7 โดยใช้อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ปริมาณเอนไซม์กลูโคสไมเลส 80 U พีเอช 4.5 และระยะเวลาในการย่อย 4 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 27.59 กรัมต่อลิตร

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ตามหลัก Analysis of variance (ANOVA) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Essential regression แสดงดังสมการที่ (2) ซึ่งค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกัน ด้วยค่า $R^2 = 0.912$ และอิทธิพลของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ถูกอธิบายด้วยกราฟพื้นผิวสามมิติ แสดงดังรูปที่ 23 - 28

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)} = & 66.85 + 1.007(B) + 0.362(F) - 25.98(G) - 4.776(E) - \\ & 0.00566(B)^2 + 0.000447(F)^2 + 2.404(G)^2 + 0.215(E)^2 + 0.00619(B)(F) - \\ & 0.176(B)(G) + 0.01853(B)(E) - 0.02493(F)(G) - 0.133(F)(E) + 1.956(G)(E) \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ B คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
 F คือ ปริมาณเอนไซม์กลูโคสไมเลส (U)
 G คือ ระยะเวลาในการย่อย (ชั่วโมง)
 E คือ พีเอช (pH)

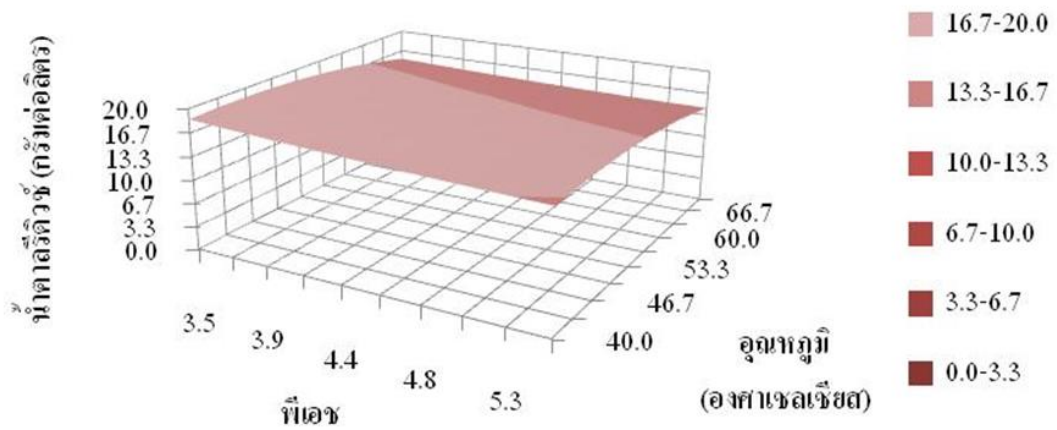


รูปที่ 23 กราฟพื้นผิวสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อย ที่มีผลต่อผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์กลูโคสไมเลส 80 U และพีเอช 4.5

ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อยต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อทำการย่อยโดยใช้เอนไซม์กลูโคสไมเลส 80 U และพีเอชเป็น 4.5 แสดงดังรูปที่ 23 พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการย่อยมากขึ้น (ในช่วง 40 - 70 องศาเซลเซียส) แต่การใช้ระยะเวลาในการย่อยนานขึ้นไม่ได้ช่วยให้เกิดน้ำตาลรีดิวซ์มากขึ้น ระยะเวลาเพียง 4 ชั่วโมง ก็เพียงพอต่อการย่อย (เมื่อใช้เอนไซม์ 80 U)

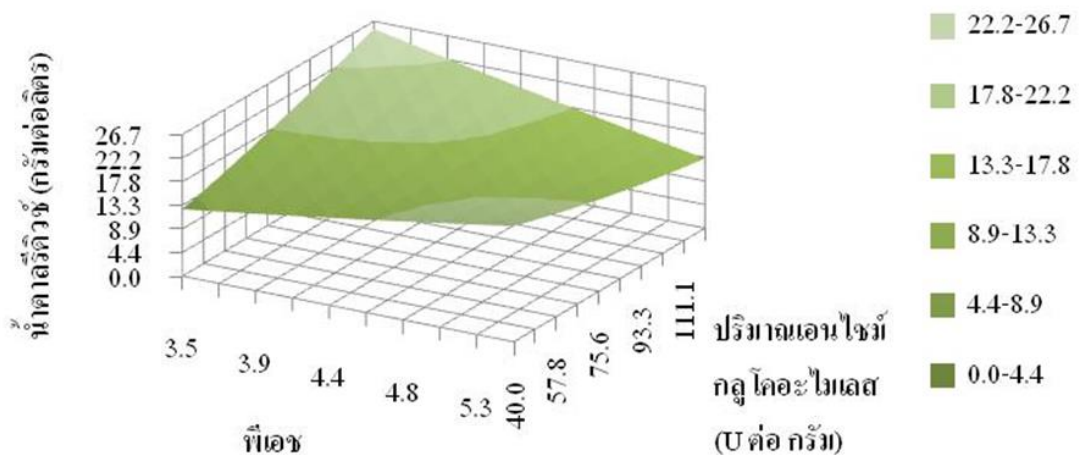
ตารางที่ 5 ผลการออกแบบสภาวะด้วย RSM และผลของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยด้วยการใช้เอนไซม์
กลูโคอะไมเลส

การทดลอง ที่	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ปริมาณเอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลส (U)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	พีเอช	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	
					ผลการทดลอง จริง	ผลการ ทำนาย
1	48	100	7	4.0	21.43	21.45
2	48	100	5	5.0	16.75	16.25
3	55	80	6	5.5	16.33	16.75
4	48	60	5	4.0	19.08	18.93
5	48	100	7	5.0	19.67	19.87
6	63	100	7	4.0	17.98	19.19
7	55	80	4	4.5	27.59	26.85
8	63	60	5	4.0	17.81	18.23
9	63	60	7	4.0	14.34	14.66
10	55	80	6	4.5	18.11	17.26
11	40	80	6	4.5	15.51	17.34
12	48	60	7	4.0	21.63	20.64
13	48	100	5	4.0	21.59	21.74
14	48	60	7	5.0	25.73	24.38
15	55	120	6	4.5	20.68	18.98
16	63	100	5	5.0	17.93	19.53
17	70	80	6	4.5	16.92	14.65
18	63	100	5	4.0	23.56	24.74
19	55	40	6	4.5	15.72	16.98
20	48	60	5	5.0	19.36	18.77
21	55	80	6	4.5	16.08	17.26
22	63	60	5	5.0	18.52	18.34
23	63	60	7	5.0	18.23	18.69
24	55	80	8	4.5	26.61	26.91
25	55	80	6	4.5	17.60	17.26
26	63	100	7	5.0	17.91	17.89
27	55	80	6	3.5	19.07	18.21



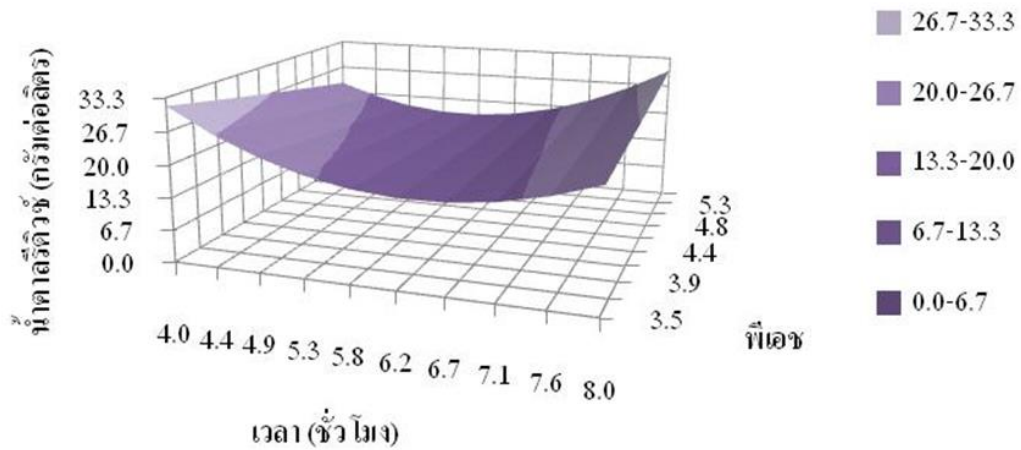
รูปที่ 24 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อผลผลิตน้ำตาลรีดิวิซ์ โดยใช้ปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลส 80 U ที่ระยะเวลาในการย่อย 6 ชั่วโมง

ผลของค่าฟิเอชและอุณหภูมิต่อปริมาณผลผลิตน้ำตาลรีดิวิซ์ เมื่อทำการย่อยโดยใช้ปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลส 80 U ที่ระยะเวลาในการย่อย 6 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 24 พบว่าสามารถได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ที่เหมาะสม เมื่อใช้ช่วงค่าฟิเอชเป็น 3.5 - 4.5 และที่ช่วงอุณหภูมิ 45 - 55 องศาเซลเซียส



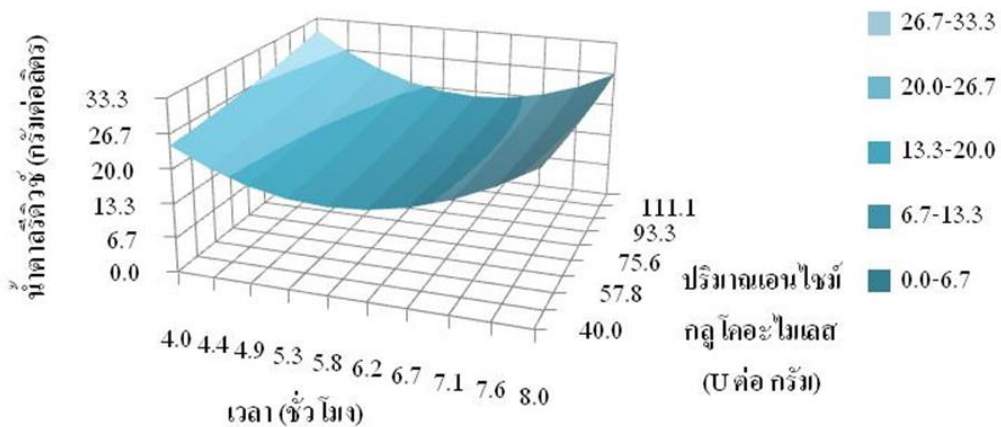
รูปที่ 25 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิเอชและปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ที่มีผลต่อผลผลิตน้ำตาลรีดิวิซ์ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการย่อย 6 ชั่วโมง

รูปที่ 25 ผลของฟิเอชและปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลสต่อปริมาณผลผลิตน้ำตาลรีดิวิซ์ เมื่อดำเนินการย่อยที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์กลูโคอะไมเลสเพิ่มขึ้นที่ช่วงฟิเอช 3.5 - 3.9 (เอนไซม์ 40- 120 U)



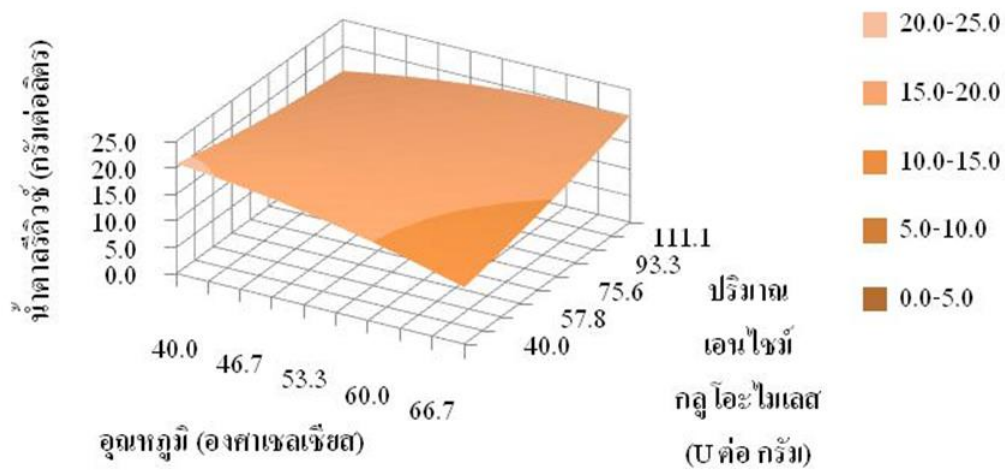
รูปที่ 26 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและระยะเวลาในการย่อย ที่มีผลต่อผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และปริมาณเอนไซม์กลูโคสไมเลส 80 U

ผลของระยะเวลาในการย่อยและพีเอชต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 26 พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อย 4 ชั่วโมง และพีเอช 3.5 พบว่าได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในปริมาณเหมาะสมในช่วงการดำเนินการพีเอชสอดคล้องกับรูปที่ 25 คือ ช่วงพีเอชต่ำ 3.5 – 3.9 และช่วงเวลาเพียง 4.0 – 4.4 ชั่วโมง



รูปที่ 27 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการย่อยและปริมาณเอนไซม์กลูโคสไมเลสที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และพีเอช 4.5

ผลของระยะเวลาในการย่อยและปริมาณเอนไซม์กลูโคสไมเลสต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 27 พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเหมาะสมเมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อยช่วงเดียวกันกับรูปที่ 26 คือ 4.0 - 4.4 ชั่วโมง โดยผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเอนไซม์ในช่วงเวลานี้



รูปที่ 28 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณเอนไซม์กลูโคสไมเลสที่มีผลต่อน้ำตาลรีดิวซ์ โดยใช้ระยะเวลาในการย่อย 6 ชั่วโมง และพีเอช 4.5

ผลของอุณหภูมิและปริมาณเอนไซม์กลูโคสไมเลสต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 28 พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าเหมาะสมเมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิ 40-45 องศาเซลเซียส และปริมาณเอนไซม์กลูโคสไมเลส 40-50 U

จากสมการที่ (2) สามารถทำนายสภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้เอนไซม์กลูโคสไมเลส 120 U ต่อกรัม เปลือกสับปะรด พีเอช 3.5 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาในการย่อย 4 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการทำนาย 46.83 กรัมต่อลิตร ซึ่งจากการทดลองจริงได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 48.16 กรัมต่อลิตร

2.4 ผลการปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การปรับสภาพคือการทำให้วัตถุดิบประเภทเซลลูโลสหรือคาร์โบไฮเดรตมีความพร้อมในการถูกย่อยเป็นน้ำตาล โดยใช้สารละลายต่างพร้อมกับการให้ความร้อน งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการปรับสภาพเปลือกสับปะรด ด้วยการใช้คลื่นไมโครเวฟแทนการให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบธรรมดา ซึ่งจะสามารถช่วยลดระยะเวลาในกระบวนการปรับสภาพ เพื่อสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมได้ งานวิจัยอื่นๆพิจารณาผลได้ของการปรับสภาพโดยต้องการได้ผลผลิตที่มีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุด แต่งานวิจัยนี้จะพิจารณาหาสภาวะของการปรับสภาพที่ได้น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) มากที่สุด เนื่องจากการวิเคราะห์องค์ประกอบเปลือกสับปะรดพบว่าคาร์โบไฮเดรตมากกว่าเซลลูโลสและเป็นองค์ประกอบที่มากที่สุด (ตารางที่ 1) และจากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าหากเลือกสภาวะเหมาะสมซึ่งให้ปริมาณเซลลูโลสหรือน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) มากที่สุด ผลผลิตหลังการย่อยจะได้น้ำตาลรีดิวซ์ (วัตถุดิบสำหรับการใช้หมักเป็นเอทานอล) น้อยกว่าการเลือกสภาวะที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากตั้งแต่ขั้นตอนการปรับสภาพ [9] และเนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่มีขั้นตอนการล้างน้ำหลังการปรับสภาพจึงสามารถรักษาน้ำตาลรีดิวซ์ไว้ได้โดยผลการออกแบบสภาวะการทดลองด้วย RSM และผลการปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแสดงดังตารางที่ 6

2.4.1 ผลการปรับสภาพ

ตารางที่ 6 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการปรับสภาพเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่าโดยวิธี RSM และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟ

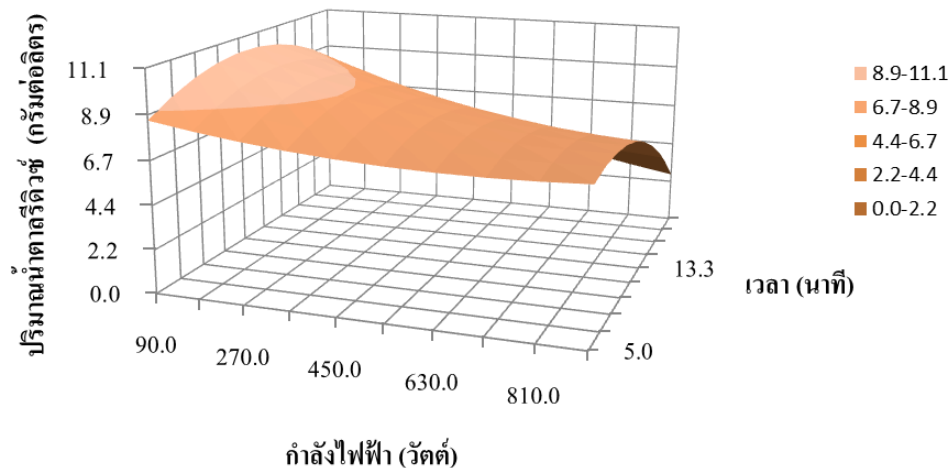
การทดลองที่	ปริมาณเปลือกสับประรดในน้ำ 1 ลิตร (กรัมต่อลิตร)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	
				ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	148	720	17	6.23	5.66
2	130	900	13	5.44	6.70
3	112	720	17	4.25	3.35
4	112	720	8	6.41	5.41
5	148	270	8	9.30	8.57
6	148	270	17	8.03	7.49
7	130	90	13	9.29	10.00
8	130	450	20	4.33	5.21
9	112	270	8	8.42	7.25
10	130	450	13	8.29	8.27
11	148	720	8	9.09	8.25
12	130	450	13	8.29	8.27
13	112	270	17	7.50	6.69
14	130	450	13	8.29	8.27
15	100	450	13	2.74	4.26
16	160	450	13	6.26	7.06
17	130	450	5	6.17	7.60

ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ คือปริมาณวัตถุดิบ (เปลือกสับประรด) ต่อ น้ำ 1 ลิตร (p; กรัมต่อลิตร) ระดับการให้ความร้อน (w; วัตต์) และระยะเวลาในการปรับสภาพ (t; นาที) ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพแสดงดังรูปที่ 29 – 31 โดยทั้ง 17 การทดลองที่แสดงดังตารางที่ 6 จากผลการทดลองที่ได้จากการทำนายโดยโปรแกรม RSM ถูกใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับร้อยละผลได้ของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่มากที่สุด แบบจำลองของสมการการทดลอง Quadratic Model สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์กับปัจจัยต่างๆแสดงดังสมการที่ (3) และทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างชุดคำตอบกับชุดของตัวแปรต้นที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)} = & -51.49 + 0.827(p) - 0.01743(w) + 1.393(t) - 0.00298(p)(p) + \\ & 3.49212E-06(w)(w) - 0.03381(t)(t) + 0.000111(p)(w) - 0.00413(p)(t) \\ & - 0.000371(w)(t) \end{aligned} \quad (3)$$

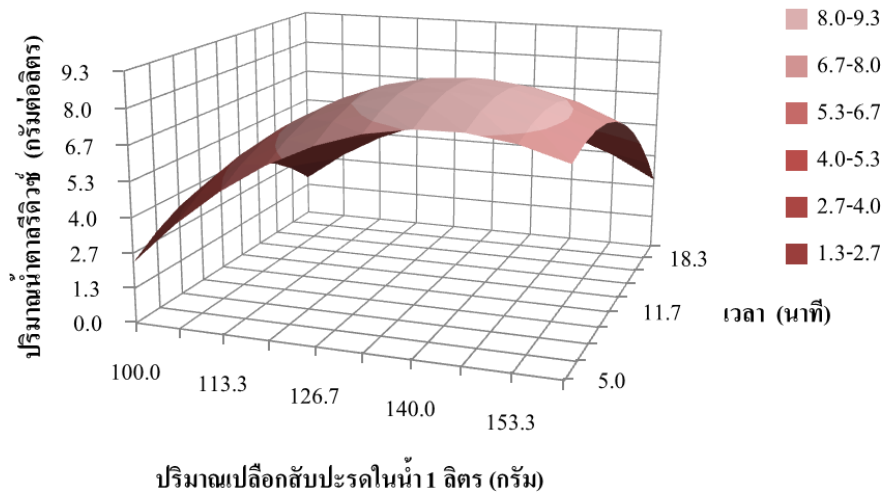
จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (3) สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่สภาวะต่างๆ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองและเพื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองว่าเหมาะสมหรือไม่ ผลการดำเนินการทดลองดังตารางที่ 6 ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแบบจำลอง มีค่าเท่ากับ 0.913 ซึ่งจะบอกความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ได้

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยปริมาณเปลือกสับประรดในน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า และระยะเวลาในการปรับสภาพที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ได้นำเสนอในรูปของกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เพื่อคาดคะเนแนวโน้มของปัจจัย ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 29 – 31



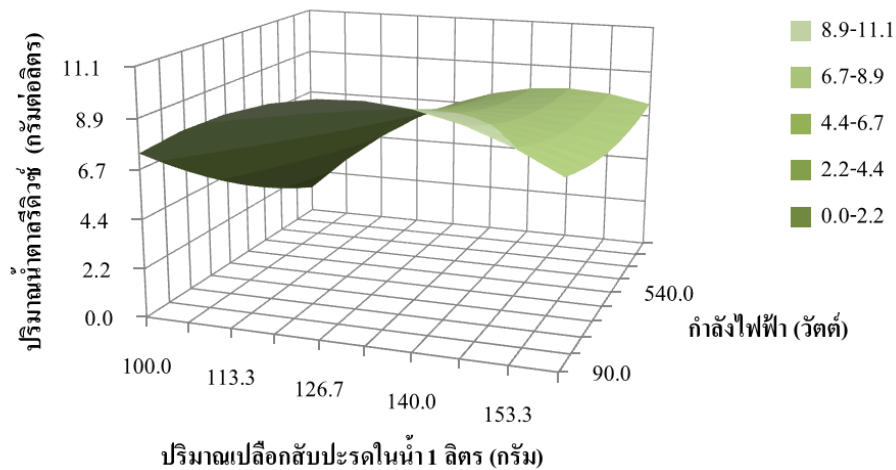
รูปที่ 29 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและเวลาที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพมีการใช้ปริมาณเปลือกสับประรด 130 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

ผลของกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาในการปรับสภาพต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 29 พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อให้กำลังไฟฟ้าในช่วงระดับต่ำ (90-120 วัตต์) สำหรับระยะเวลาการปรับสภาพ 10-15 นาที จะให้ผลผลิตเป็นปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด (8.9-11.1 กรัมต่อลิตร)



รูปที่ 30 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรและเวลาที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพมีการใช้กำลังไฟฟ้า 495 วัตต์

ผลของปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตร และระยะเวลาในการปรับสภาพต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 30 พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อวัตถุดิบมากขึ้น (100-130 กรัมต่อลิตร) (ความเข้มข้นมากขึ้น) ในช่วงเวลา 5-15 นาที และจะให้ผลผลิตปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด (8-9 กรัมต่อลิตร) เมื่อใช้ปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรที่เหมาะสม คือ 130-150 กรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 6-13 นาที ที่กำลังไฟฟ้า 495 วัตต์



รูปที่ 31 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตรและกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการปรับสภาพโดยใช้เวลา 12 นาทีในการปรับสภาพ

ผลของปริมาณเปลือกสับประดในน้ำ 1 ลิตร และระยะเวลาในการปรับสภาพต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 31 พบว่ากำลังไฟฟ้าและปริมาณเปลือกสับประด ที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด (10.0-12.0 กรัมต่อลิตร) คือ 90-130 วัตต์ และ 130-140 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลพบว่าปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือ

ระยะเวลาในการปรับสภาพ เนื่องจากเมื่อพิจารณากราฟพื้นผิว (รูปที่ 29 - 30) พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 12 นาที ปริมาณผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จะเพิ่มขึ้นด้วย และจะลดทันทีเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นหลังจาก 12 - 20 นาที โดย RSM ได้ทำนายสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟคือ ปริมาณเปลือกสับประด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 12 นาที ผลการทำนายได้ผลผลิตมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 12.09 กรัมต่อลิตร และผลการทดลองจริงคือ 13.18 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์เป็น 99.85 กิโลกรัมต่อ 1 ตันเปลือกสับประด

2.4.2 ผลการย่อย

ขั้นตอนการย่อยมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยย่อยคาร์โบไฮเดรตและเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ ด้วยการทำปฏิกิริยากับน้ำ และการตัดสับเลือกสภาวะที่เหมาะสมคือสภาวะซึ่งได้ผลผลิตมีน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด โดยงานวิจัยอื่นที่ผ่านมา ก่อนทำขั้นตอนการย่อยจะต้องแยกผลผลิตหลังการปรับสภาพเฉพาะส่วนของแข็งไปทำการล้างน้ำจมน้ำล้างเป็นกลาง แล้วนำมาแช่ในสารละลายกรด (ตัวเร่งปฏิกิริยา) พร้อมการให้ความร้อน แต่งานวิจัยนี้ไม่มีขั้นตอนการล้างน้ำเนื่องจากต้องการรักษาน้ำตาลรีดิวซ์ (ละลายได้ดีในน้ำ) ที่ได้ในขั้นตอนการปรับสภาพไว้จึงนำผลผลิตที่ได้หลังการปรับสภาพทั้งหมดมาทำการให้ความร้อนต่อ

ผลการออกแบบสภาวะการทดลองด้วย RSM และผลการย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับการย่อยเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่า และผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการย่อยโดยคลื่นไมโครเวฟ

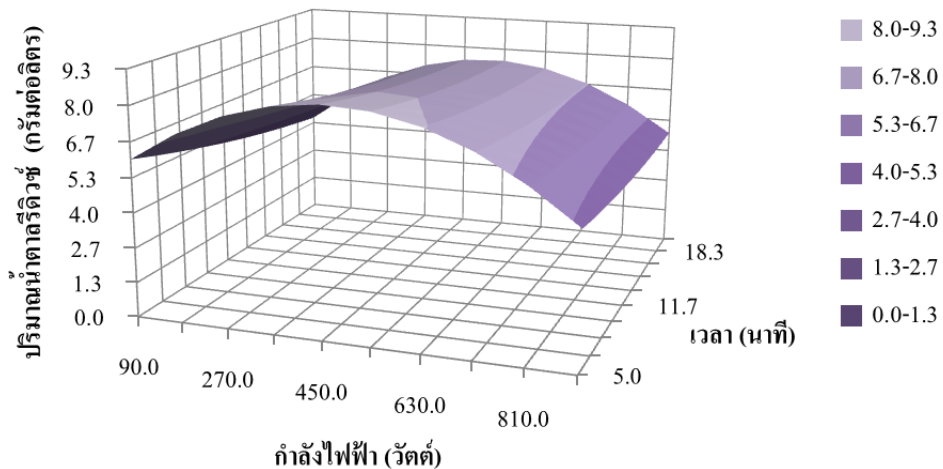
การทดลองที่	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	
			ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	270	18	5.26	6.26
2	450	20	7.68	7.20
3	450	13	7.56	7.73
4	720	18	6.77	6.70
5	90	13	5.34	4.57
6	450	5	8.73	8.34
7	900	13	4.57	4.83
8	720	7	7.27	7.15
9	450	13	7.84	7.73
10	450	13	8.13	7.73
11	270	7	6.38	7.30

ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆคือระดับการให้ความร้อน (w; วัตต์) และระยะเวลาในการย่อย (t; นาที) ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการย่อยแสดงดังรูปที่ 32 โดยทั้ง 11 การทดลองแสดงดังตารางที่ 7 เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ตามหลัก ANOVA ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติในการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แล้วนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Essential regression สามารถสร้างแบบจำลองสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆในการย่อยดังสมการที่ (4)

$$\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)} = 5.675 + 0.01626(w) - 0.222(t) - 1.8194E-05(w)(w) + 0.00368(t)(t) + 0.000120(w)(t) \quad (4)$$

ผลการทดลองพบว่า กำลังไฟฟ้ามักมีผลมากกว่าระยะเวลาในการย่อย จากการที่นำค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทดลองและค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการทำนายมาพล็อตกราฟ จะได้ R² คิดเป็น 0.937 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 2 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยกำลังไฟฟ้า และระยะเวลาในการย่อยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ได้นำเสนอในรูปกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) ของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและเวลาในการย่อยที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการย่อย

ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ (กำลังไฟฟ้า และเวลา) ที่มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในผลผลิตหลังการย่อยแสดงดังรูปที่ 32 ผลการศึกษาพบว่าผลผลิตหลังการย่อยมีน้ำตาลรีดิวซ์ปริมาณมากขึ้นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในช่วง 90-600 วัตต์ แต่เวลาในการย่อยส่งผลน้อยมากต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกำลังไฟฟ้าที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เหมาะสมอยู่ในช่วง 360-630 วัตต์

ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือกำลังไฟฟ้า พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่ามากที่สุด (8.70 กรัมต่อลิตร) เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 450 วัตต์ และลดลงเมื่อมีการเพิ่มกำลังไฟฟ้ามากขึ้นอีก (>450 วัตต์) ในขณะที่เวลาส่งผลน้อยในการเพิ่มหรือลดของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ RSM ได้ทำนายสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟคือ กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ

5 นาที สามารถให้ผลผลิตจากการทดลองจริงมีปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 8.70 กรัมต่อลิตร โดยผลการทำนายได้ผลผลิตมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 8.36 กรัมต่อลิตร และมีผลได้ของน้ำตาลรีดิวซ์เป็น 65.91 กิโลกรัม ต่อ 1 ตันเปลือกสับปะรด

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยด้วย น้ำเปล่า โดยในขั้นตอนการปรับสภาพ (จะใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 12 นาที) สามารถให้ผลผลิตปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 13.18 กรัมต่อลิตร และในขั้นตอนการย่อย (ใช้กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 5 นาที) สามารถให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 8.70 กรัมต่อลิตรซึ่งพบว่า การปรับสภาพ (การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ) เพียงครั้งเดียวสามารถให้ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากกว่าการนำไปย่อยต่อ (ให้ความร้อนซ้ำส่งผลให้โมเลกุลน้ำตาลเปลี่ยนรูป) ดังนั้นใน ขั้นตอนของการปรับสภาพ และย่อยด้วยน้ำเปล่า งานวิจัยนี้จะสนใจศึกษาเฉพาะขั้นตอนของการปรับสภาพ เท่านั้น ซึ่งเป็นการปรับสภาพพร้อมการย่อยในขั้นตอนเดียว (มีการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงครั้งเดียว) เพื่อเป็นการประหยัดเวลา พลังงาน และต้นทุนในการผลิต

2.5 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณน้ำตาลของผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยทั้ง 4 วิธี

ตารางที่ 8 แสดงชนิดของน้ำตาลและปริมาณน้ำตาลในผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยด้วยวิธีต่างๆ

ลำดับ ที่	ตัวอย่างผลผลิต	ชนิดและปริมาณน้ำตาล (% w/v) \pm SD			
		ฟรุคโตส	กลูโคส	ซูโครส	รวม
1	ปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดด้วยการใช้จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติบนเปลือกสับปะรด	0.34 \pm 0.02	0.41 \pm 0.03	0.53 \pm 0.01	1.28 \pm 0.03
2	ปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดด้วยการใช้จุลินทรีย์บนขนมปังเลยวันหมดอายุแล้ว 5 วัน	0.22 \pm 0.01	0.45 \pm 0.03	3.86 \pm 0.02	4.53 \pm 0.03
3	ปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดด้วยการใช้เอนไซม์	0.57 \pm 0.03	0.84 \pm 0.03	0.51 \pm 0.01	1.92 \pm 0.03
4	ปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	0.24 \pm 0.01	0.25 \pm 0.01	0.34 \pm 0.01	0.83 \pm 0.01
5	ปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ	0.26 \pm 0.01	0.24 \pm 0.01	0.35 \pm 0.04	0.85 \pm 0.01

ส่งวิเคราะห์ที่: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

จากตารางที่ 8 พบว่า การปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดโดยใช้เอนไซม์จะให้ปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (ฟรุคโตสและกลูโคส) มากที่สุด เนื่องจากเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่จำเพาะเจาะจงช่วยเพิ่มปริมาณ

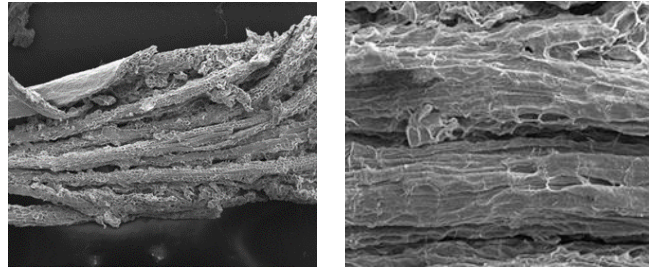
น้ำตาลให้เกิดมากกว่าวิธีอื่น และรองลงมาคือการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดโดยการใช้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติบนเปลือกสับปะรด และการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับปะรดโดยใช้จุลินทรีย์บนขนมปังที่หมดอายุแล้วร่วมด้วย แต่เมื่อคิดผลรวมของน้ำตาลทั้งหมด โมโนและได-แซคคาไรด์ คือ ทั้งฟรุคโตส กลูโคส และซูโครส ที่ซิงยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*) สามารถหมักเป็นเอทานอลได้ พบว่าการปรับสภาพและย่อยด้วยวิธีการใช้อุณหภูมิธรรมชาติร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังเลยวันหมดอายุ สามารถให้น้ำตาลมากที่สุด โดยแนวคิดการศึกษานี้เกิดจากปัญหาการมีขนมปังเหลือทิ้งจากร้านค้าเบเกอรี่และโรงงานผลิตขนมปัง ซึ่งแทนที่จะทิ้งก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ และผลการวิเคราะห์ของน้ำตาลนี้จึงเป็นสิ่งสนับสนุนความคุ้มค่าของวิธีการผลิตซึ่งมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการใช้เอนไซม์ส่วนการปรับสภาพด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ และการย่อยเปลือกสับปะรดด้วยโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟซ้ำจะให้ปริมาณน้ำตาลโมโนแซ็กคาไรด์คือ กลูโคสและฟรุคโตส และไดแซ็กคาไรด์ คือ ซูโครส ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนซ้ำอีกครั้งไม่ได้ส่งผลให้ได้ผลผลิตน้ำตาลเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนและเวลาในการผลิตจึงควรลดขั้นตอนเหลือแค่ขั้นตอนให้ความร้อนด้วยน้ำเปล่าครั้งเดียวหรือที่เรียกว่าปรับสภาพพร้อมการย่อยในครั้งเดียว

ผลการปรับสภาพและย่อยด้วยสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละวิธีพบว่าการใช้อุณหภูมิธรรมชาติให้ผลผลิตน้ำตาลมากกว่าการย่อยแบบให้ความร้อน แต่อย่างไรก็ตามการตรวจสอบว่าวิธีการใดเหมาะสมจะต้องทำการหมักเปรียบเทียบผลได้ของเอทานอลก่อน เนื่องจากขณะทำการหมักยีสต์ยังสามารถหมักน้ำตาลซูโครสเป็นเอทานอลได้ และต้องคำนึงถึงผลได้สุทธิและต้นทุนการผลิตรวมด้วย

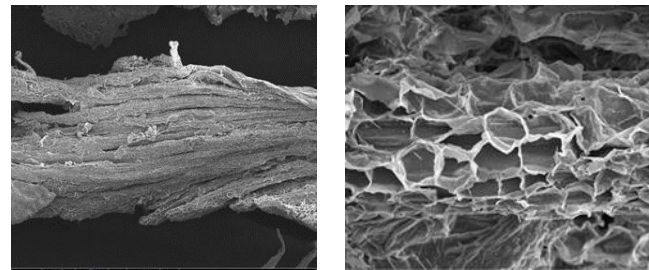
2.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบและผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยของแต่ละวิธี

ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบและผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยของแต่ละวิธีถูกสังเกตด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) ที่ 15 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 40 และ 500 แสดงดังรูปที่ 33.1 – 33.5

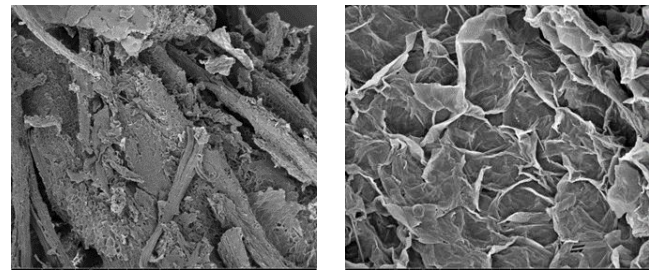
ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วย SEM ของวัตถุดิบเปลือกสับปะรด (รูปที่ 33.1) เปรียบเทียบกับผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ (รูปที่ 33.2) ผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติบนเปลือกสับปะรดร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังเลยวันหมดอายุ (รูปที่ 33.3) ผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยด้วยเอนไซม์ (รูปที่ 33.4) และผลผลิตหลังการปรับสภาวะและย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ (รูปที่ 33.5) พบว่าวัตถุดิบก่อนผ่านกระบวนการ มีลักษณะพื้นผิวเรียบ แข็ง ส่วนประกอบต่างๆ ของเปลือกสับปะรดรวมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยลักษณะเส้น แต่เมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพและย่อย พื้นผิวของเปลือกสับปะรดจะมีลักษณะเปื่อย นุ่มขึ้น พื้นผิวจะเกิดช่องว่าง และมีลักษณะแตกแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าลิกนินเป็นตัวเชื่อมโครงสร้างของเส้นใย เมื่อถูกกำจัดออกก็จะเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยหรือเซลลูโลส และเมื่อสังเกตผลผลิตหลังการย่อยแต่ละแบบจะพบว่าที่ย่อยด้วยเอนไซม์ จะมีลักษณะผิวขรุขระ เกิดการฉีกขาดหลายตำแหน่งอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นลักษณะที่บางส่วนของพื้นผิวหรือเส้นใยบางส่วนถูกย่อย (กลายเป็นน้ำตาล) ขณะที่วิธีย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีลักษณะขรุขระนอกของเส้นใย (ไม่ได้เปื่อยแล้วเกิดเป็นช่องว่างเหมือนเอนไซม์) ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้เอนไซม์เกิดการย่อยได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ



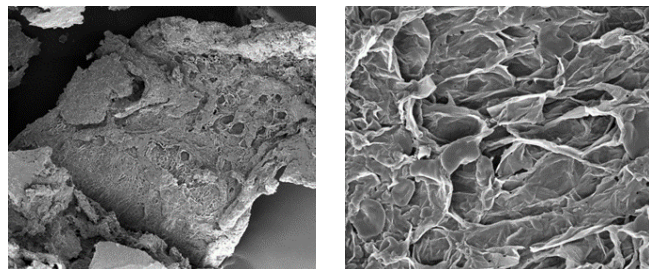
(ก)



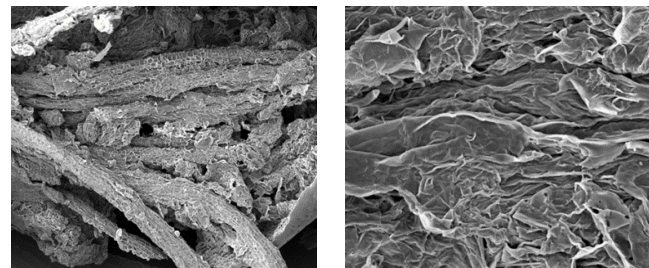
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 33 SEM ที่กำลังขยาย 40 และ 500 เท่า ของ (ก) วัสดุดิบเปลือกสับปะรด (ข) เปลือกที่ผ่านการย่อยด้วย จุลินทรีย์ธรรมชาติ (ค) เปลือกที่ผ่านการย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังหมดอายุ (ง) เปลือกที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ และ (จ) เปลือกที่ผ่านการย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ
 ส่งวิเคราะห์ที่: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3. ผลการหมักเอทานอลด้วยยีสต์ขนมปัง

3.1 ผลการหมักเปลือกสับประรดหลังผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ

ตารางที่ 9 สภาวะการทดลองและผลการหมักผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองบนเปลือกสับประรด

ลำดับที่	เวลา (วัน)	ปริมาณยีสต์ขนมปัง (% โดยน้ำหนัก)	พี เอช	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณเอทานอล (% โดยปริมาตร)	
					ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	7	4	5	33	2.86	2.80
2	8	5	5.5	35	2.86	2.83
3	7	7	6	38	3.10	3.11
4	7	4	6	33	2.03	2.04
5	4	4	6	33	2.81	2.62
6	5	5	5.5	35	2.60	2.62
7	4	7	5	33	2.89	2.77
8	5	2	5.5	35	2.44	2.61
9	5	8	5.5	35	2.57	2.43
10	4	4	5	38	2.90	2.72
11	7	7	5	33	2.30	2.40
12	4	7	5	38	2.45	2.57
13	4	4	5	33	2.85	2.97
14	5	5	5.5	40	3.29	3.37
15	5	5	5.5	35	2.66	2.62
16	7	4	5	38	3.57	3.52
17	4	4	6	38	2.66	2.68
18	5	5	6.5	35	2.50	2.53
19	7	7	6	33	1.98	2.01
20	5	5	5.5	35	2.61	2.62
21	5	5	4.5	35	2.96	2.96
22	7	4	6	38	3.13	3.08
23	2	5	5.5	35	2.75	2.81
24	7	7	5	38	3.15	3.18
25	4	7	6	38	3.01	2.91
26	5	5	5.5	30	2.58	2.53
27	4	7	6	33	2.61	2.78

การออกแบบโดย RSM ซึ่งมีตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปร คือ ระยะเวลาในการหมัก ปริมาณยีสต์ขนมปัง พีเอช และอุณหภูมิ ตัวแปรตามคือปริมาณเอทานอล แสดงสถานะและผลการหมักในตารางที่ 9 โดยทำการหมักผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยด้วยสภาวะเหมาะสมโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับปะรด คือ ใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 141 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร เป็นระยะเวลา 5 วัน จะได้น้ำตาลรีดิวซ์ 0.58 กรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 135.43 กรัมต่อลิตร

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (ตารางที่ 9) ไปวิเคราะห์ตามหลัก ANOVA ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายสภาวะในการหมักเอทานอลจากผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยโดยการให้จุลินทรีย์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเองบนเปลือกสับปะรด มีค่า $R^2=0.926$ แสดงดังสมการที่ (5)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเอทานอล (\% โดยปริมาตร)} = & 44.68 - 1.644 (H) - 0.613 (I) - 3.771 (J) - 1.535 (K) + 0.022 \\ & (H)^2 - 0.011 (I)^2 + 0.123 (J)^2 + 0.013 (K)^2 - 0.022 (H)(I) - 0.135 (H)(J) + 0.065 \\ & (H)(K) + 0.123 (I)(J) + 0.004 (I)(K) + 0.064 (J)(K) \end{aligned} \quad (5)$$

โดยที่ H คือ ระยะเวลาหมัก (วัน)

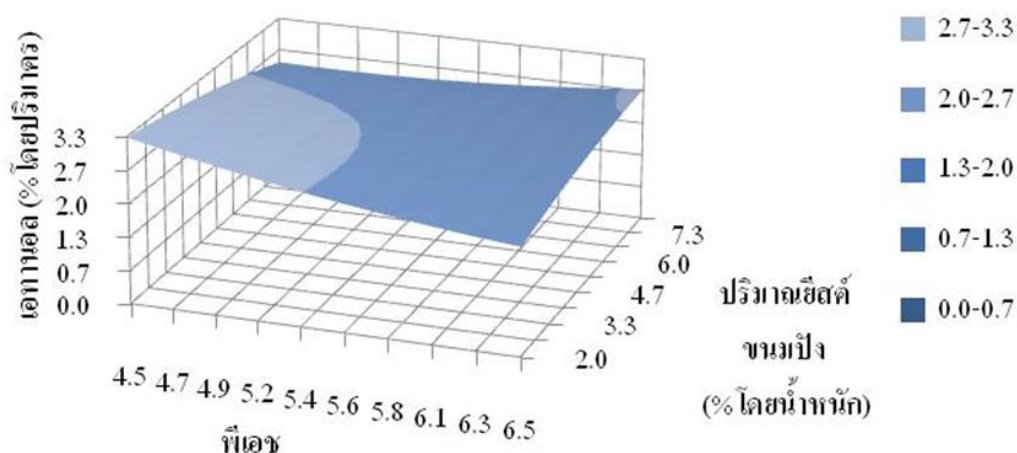
I คือ ปริมาณยีสต์ขนมปัง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

J คือ พีเอชเริ่มต้น

K คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

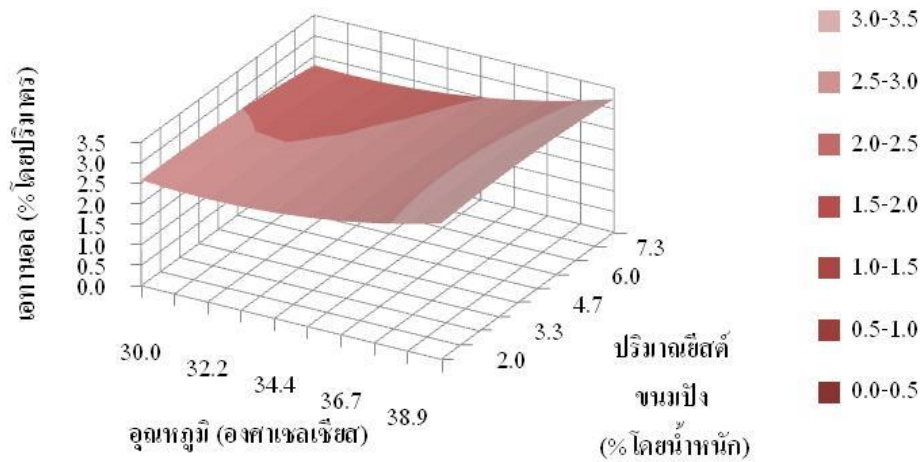
ผลของปัจจัยสำคัญที่มีต่อปริมาณผลผลิตเอทานอลจากการหมักเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยโดยจุลินทรีย์ธรรมชาติบนเปลือกสับปะรด

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 4 ปัจจัย ซึ่งประกอบด้วย ระยะเวลาในการหมัก ปริมาณยีสต์ขนมปัง พีเอช และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล ได้นำเสนอในรูปของกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) ของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย แสดงดังรูปที่ 34 - 39



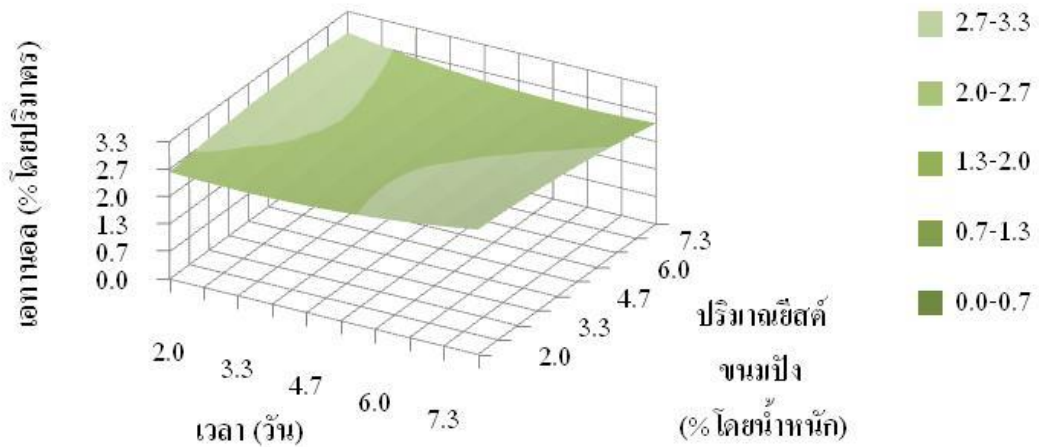
รูปที่ 34 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยีสต์และพีเอชที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล โดยหมักที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 5 วัน

ผลของปริมาณยีสต์ขนมปังและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 34 พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเหมาะสมเมื่อทำการหมักโดยใช้ปริมาณยีสต์ร้อยละ 2 - 6 และพีเอช 4.5 - 5.2



รูปที่ 35 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณยีสต์ขนมปังในการหมักที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้พีเอช 5.5 และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

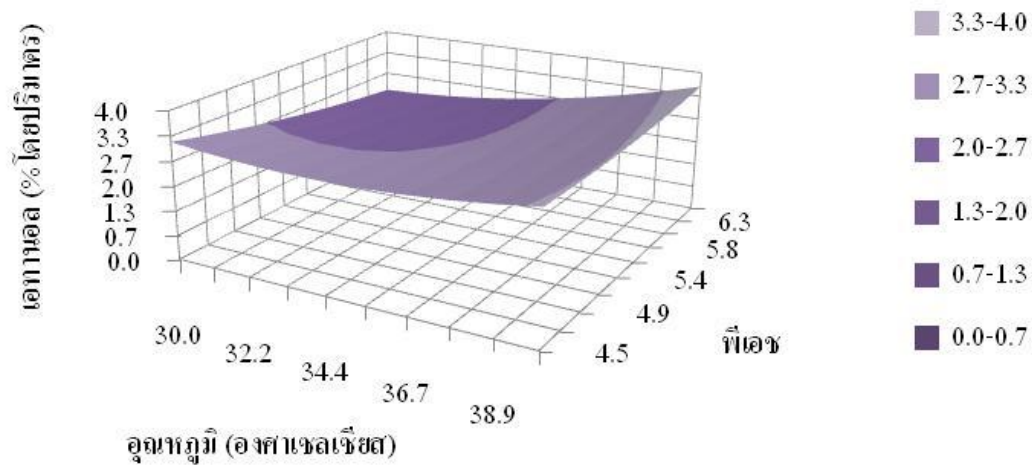
ปัจจัยของอุณหภูมิและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 35 พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ขณะที่ปริมาณยีสต์มีผลน้อยมาก การเพิ่มปริมาณยีสต์ไม่ได้ช่วยให้ปริมาณผลผลิตเอทานอลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 36 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักและปริมาณยีสต์ขนมปังในการหมักที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และพีเอช 5.5

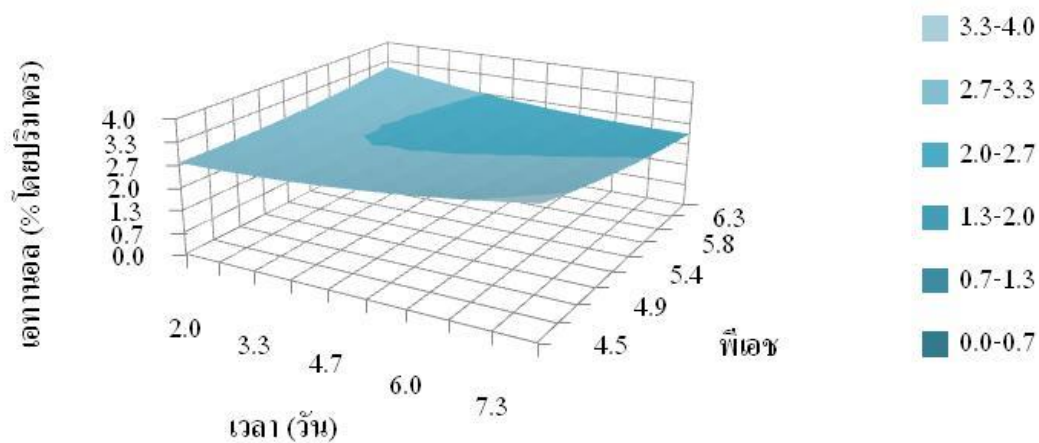
ปัจจัยของระยะเวลาในการหมักและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 36 พบช่วงที่เหมาะสมในการดำเนินการหมัก 2 ช่วง คือ ระยะเวลาในการหมัก 2 - 3 วัน โดยใช้ปริมาณยีสต์

ขนมปังร้อยละ 4.0 - 8.0 โดยน้ำหนัก และที่ระยะเวลา 6 - 8 วัน โดยใช้ปริมาณยีสต์ร้อยละ 2.0 - 4.0 สิ่งนี้บ่งบอกว่าการเพิ่มปริมาณยีสต์สามารถช่วยลดระยะเวลาในการหมักได้



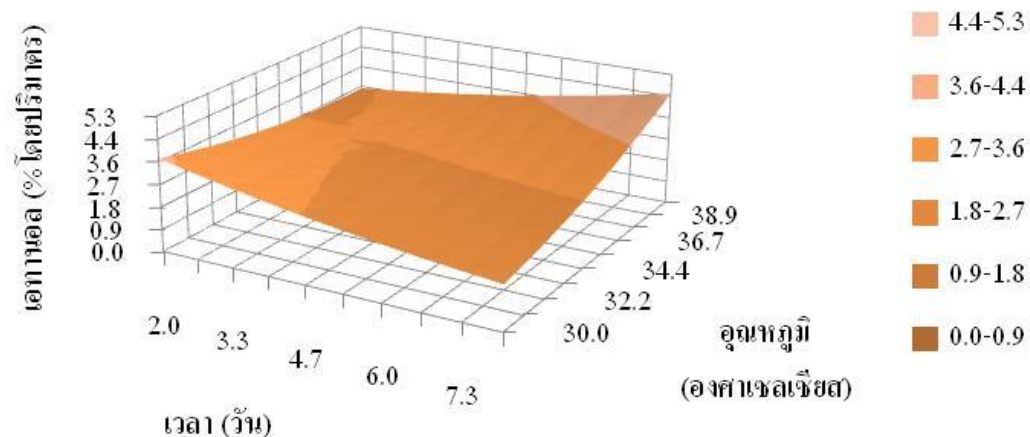
รูปที่ 37 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ปัจจัยของอุณหภูมิและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 37 พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อหมักที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 30 - 40 องศาเซลเซียส โดยที่พบการดำเนินการที่เหมาะสมด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ด้วยช่วงพีเอชเป็นกรดคือ 4.0 - 4.5



รูปที่ 38 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักและพีเอชในการหมักที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ปัจจัยของระยะเวลาในการหมักและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 38 พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการหมักมากขึ้น และสภาวะการดำเนินการหมักที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7 - 8 วัน และพีเอช 4.0 - 4.5



รูปที่ 39 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และพีเอช 5.5

ปัจจัยของระยะเวลาในการหมักและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 39 พบว่า ปริมาณเอทานอลมีปริมาณเหมาะสมเมื่อทำการหมักที่ระยะเวลา 6 - 8 วัน และอุณหภูมิ 38 - 40 องศาเซลเซียส

RSM ทำนายสถานะที่เหมาะสมในหมักเอทานอลจากวัตถุดิบที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ คือ การใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พีเอช 4.5 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส หมักเป็นเวลา 8 วัน โดยสมการที่ (5) ทำนายปริมาณผลผลิตเอทานอลเป็นร้อยละ 5.48 โดยปริมาตร ซึ่งจากการทดลองจริงจะได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 5.38 โดยปริมาตร มีค่าน้อยกว่าผลการทำนายเล็กน้อยแต่เป็นค่าที่มากกว่าผลทั้ง 27 การทดลองในตารางที่ 9 สถานะนี้จึงเป็นสถานะการหมักที่เหมาะสมสำหรับการหมักเปลือกที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ

3.2 การหมักผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยโดยจุลินทรีย์ธรรมชาติร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังเลยวันหมดอายุ

การออกแบบการทดลองด้วย RSM ที่มีตัวแปรอิสระ 4 ปัจจัย คือ ระยะเวลาในการหมัก (H, วัน) ปริมาณยีสต์ขนมปัง (I, ร้อยละโดยน้ำหนัก) พีเอชเริ่มต้น (J) และอุณหภูมิ (K, องศาเซลเซียส) ตัวแปรตามคือปริมาณเอทานอล ดังแสดงในตารางที่ 10 โดยทำการหมักผลผลิตที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยโดยใช้ขนมปังที่หมดอายุแล้วด้วยสถานะเหมาะสม คือ ใช้ขนมปังที่หมดอายุแล้ว 5 วัน อัตราส่วนขนมปังต่อเปลือกสับปะรด 1:3 ปริมาณขนมปังผสมเปลือกสับปะรด 153 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ใช้ระยะเวลาในการย่อย 1 วัน จะได้น้ำตาลรีดิวซ์ 2.07 กรัมต่อลิตร และน้ำตาลทั้งหมด 389.33 กรัมต่อลิตร

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (ตารางที่ 10) ไปวิเคราะห์ตามหลัก ANOVA สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ และทำนายผลผลิตเอทานอลจากการหมักผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยโดยจุลินทรีย์ธรรมชาติร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังหมดอายุ แสดงดังสมการที่ (6) โดยมีความแม่นยำตรง $R^2=0.903$

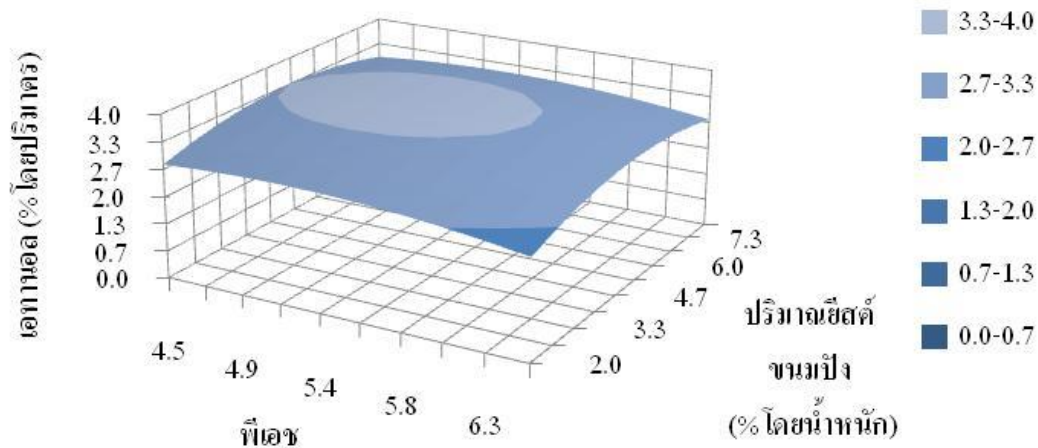
$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเอทานอล (ร้อยละโดยปริมาตร)} = & -64.420 + 1.294 (H) + 0.822 (I) + 4.315 (J) + 3.291 (K) - \\ & 0.041 (H)^2 - 0.050 (I)^2 - 0.247 (J)^2 - 0.045 (K)^2 - 0.087 (H) (I) + 0.096 (H) (J) \\ & - 0.030 (H) (K) + 0.013 (I) (J) + 0.002 (I) (K) - 0.066 (J) (K) \end{aligned} \quad (6)$$

ตารางที่ 10 สภาวะการทดลองและผลการหมักเปลือกสับประรดหลังผ่านการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองบนเปลือกสับประรดและขนมปังหมดอายุ

ลำดับที่	เวลา (วัน)	ปริมาณยีสต์ขนมปัง (%น้ำหนัก)	พีเอช	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณเอทานอล (%โดยปริมาตร)	
					ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	7	4	5	33	3.88	3.90
2	8	5	5.5	35	3.03	2.89
3	7	7	6	38	1.31	1.56
4	7	4	6	33	3.90	4.04
5	4	4	6	33	3.63	3.45
6	5	5	5.5	35	3.44	3.43
7	4	7	5	33	3.90	4.08
8	5	2	5.5	35	3.04	2.85
9	5	8	5.5	35	3.39	3.10
10	4	4	5	38	1.63	2.12
11	7	7	5	33	3.90	3.59
12	4	7	5	38	2.71	2.64
13	4	4	5	33	3.78	3.60
14	5	5	5.5	40	1.32	0.45
15	5	5	5.5	35	3.47	3.43
16	7	4	5	38	2.02	1.98
17	4	4	6	38	1.27	1.65
18	5	5	6.5	35	3.40	3.03
19	7	7	6	33	3.87	3.77
20	5	5	5.5	35	3.38	3.43
21	5	5	4.5	35	3.43	3.33
22	7	4	6	38	1.57	1.79
23	2	5	5.5	35	3.56	3.23
24	7	7	5	38	1.13	1.71
25	4	7	6	38	1.83	2.21
26	5	5	5.5	30	3.75	4.14
27	4	7	6	33	3.86	3.97

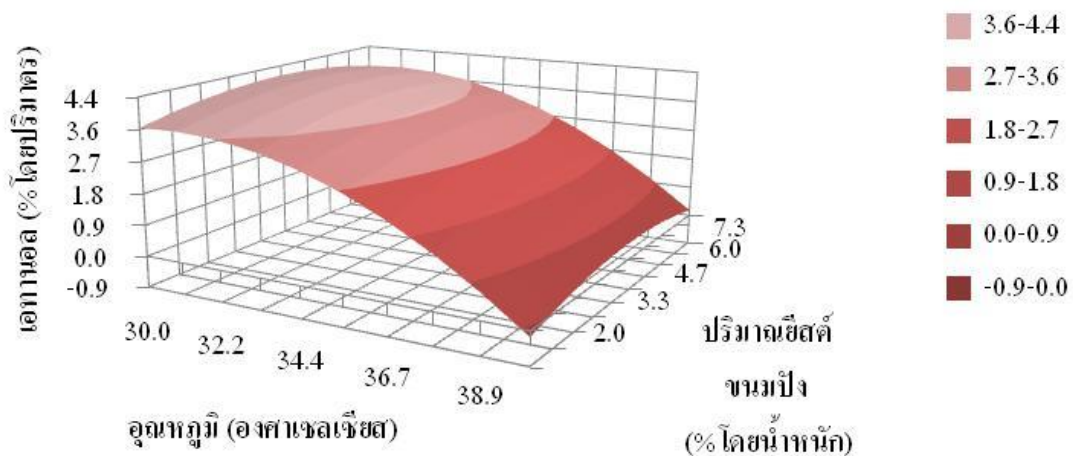
ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลที่ได้จากการหมักสับปะรดหลังผ่านการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองบนเปลือกสับปะรดและขนมปังหมดอายุ

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 4 ปัจจัย ที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล ถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟพื้นผิวสามมิติ (Surface plot) แสดงดังรูปที่ 40 - 45



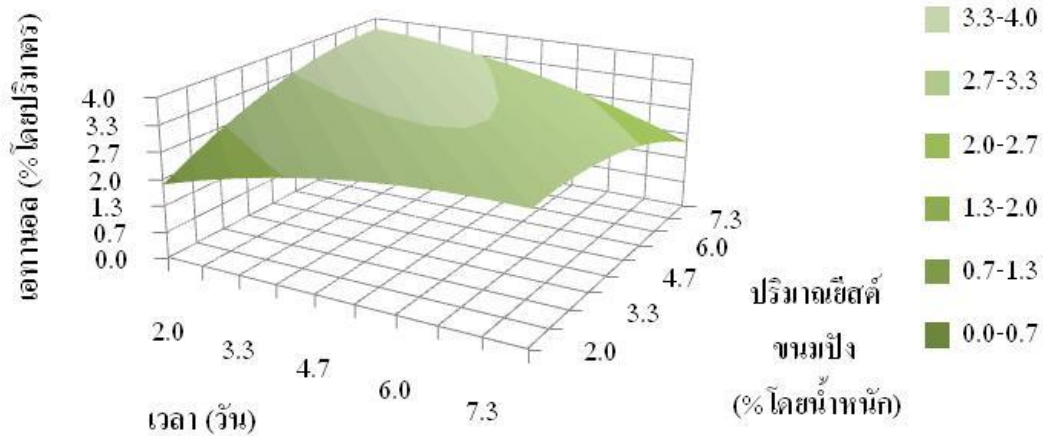
รูปที่ 40 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณยีสต์ขนมปังในการหมักที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ปัจจัยของค่าพีเอชและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 40 พบว่าการหมักควรดำเนินการที่มีค่าความเป็นกรด ช่วงพีเอช 4.5 - 5.5 และปริมาณยีสต์ขนมปังที่ค่ากลางของปัจจัยคือ ร้อยละ 5.5 - 6.5 โดยน้ำหนัก โดยการใช้ยีสต์มากกว่าร้อยละ 6.5 ไม่ได้ช่วยให้เกิดผลผลิตเอทานอลเพิ่มขึ้น



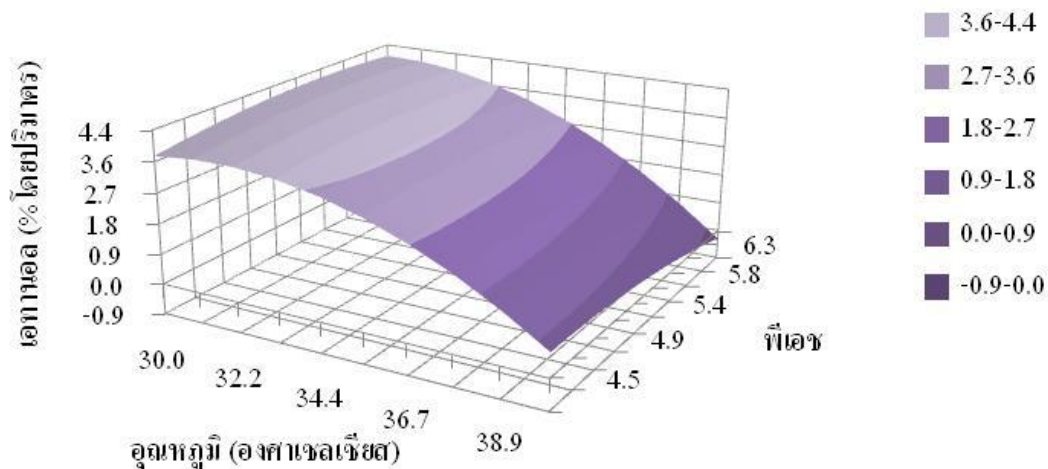
รูปที่ 41 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณยีสต์ขนมปังในการหมักที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้พีเอช 5.5 และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ปัจจัยของอุณหภูมิและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 41 พบว่า ปัจจัยของอุณหภูมิมีผลต่อการหมักอย่างชัดเจน โดยควรดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ 30 องศาเซลเซียส และปริมาณยีสต์มีผลน้อยต่อการได้ผลผลิตเอทานอล ซึ่งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณยีสต์ที่เหมาะสมต่อการหมักคือ ร้อยละ 3.5 – 4.5



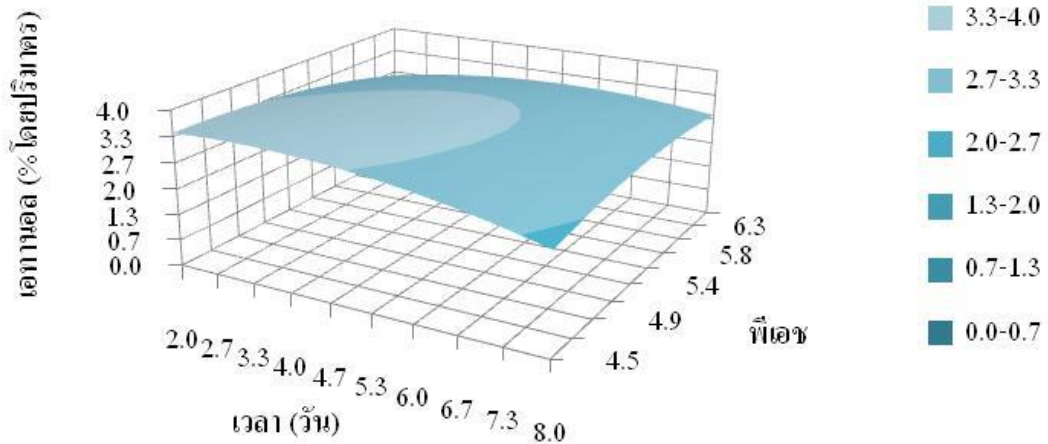
รูปที่ 42 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และพีเอช 5.5

ปัจจัยของระยะเวลาในการหมักและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 42 พบช่วงการหมักที่เหมาะสมคือ ปริมาณยีสต์ร้อยละ 5.0 - 8.0 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาในการหมัก 2 - 4 วัน เวลานานขึ้นมากกว่า 4 วัน ไม่ได้ช่วยให้ได้ผลผลิตเอทานอลมากขึ้น



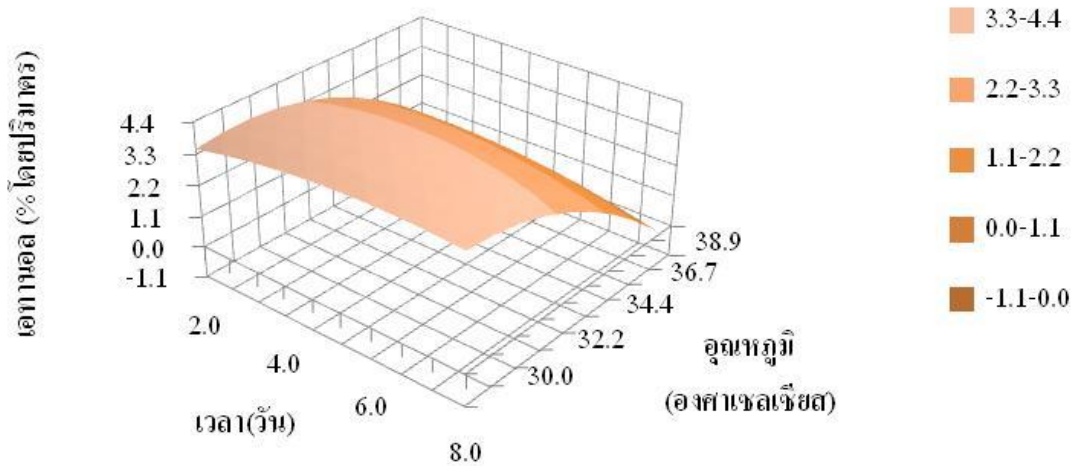
รูปที่ 43 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและพีเอชในการหมักที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ปัจจัยของอุณหภูมิและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 43 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการหมักอย่างชัดเจนเช่นเดียวกับรูปที่ 42 โดยอุณหภูมิสูงขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ได้ผลผลิตเอทานอลมากขึ้น ที่อุณหภูมิเพียง 30 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลที่เหมาะสม โดยพีเอชส่งผลน้อยมากต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล และพบว่าที่การหมัก 30 องศาเซลเซียส ควรใช้พีเอช 4.5 – 5.5



รูปที่ 44 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ปัจจัยของระยะเวลาในการหมักและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 44 พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการหมัก 2 - 4 วัน ด้วยพีเอช 4.5-5.4



รูปที่ 45 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และพีเอช 5.5

ผลของระยะเวลาในการหมักและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 45 พบว่าผลของอุณหภูมิเป็นเช่นเดียวกันกับรูปที่ 44 และ 45 และเวลามีผลน้อยต่อการหมัก นั่นคือสามารถได้ปริมาณเอทานอลที่เหมาะสมเมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 2 – 8 วัน

สภาวะการหมักที่เหมาะสมของเปลือกที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นบนขนมปังที่เลยวันหมดอายุโดย RSM ทำนายคือ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณยีสต์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พีเอช 4.4 เป็นระยะเวลา 8 วัน ทำให้ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 4.51 โดยปริมาตร และเมื่อทำการทดลองจริงทำให้ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 4.07 โดยปริมาตร

3.3 ผลการหมักผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยโดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและกลูโคอะไมเลส

จากการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม RSM ที่มีตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปร คือ ระยะเวลาในการหมัก (H, วัน) ปริมาณยีสต์ขนมปัง (I, ร้อยละโดยน้ำหนัก) พีเอชเริ่มต้น (J) และอุณหภูมิ (K, องศาเซลเซียส) ตัวแปรตามหรือผลผลิตที่ต้องการคือปริมาณเอทานอล แสดงสภาวะการทดลองและผลการทดลองในตารางที่ 11 โดยทำการหมักผลผลิตที่ต้องการคือปริมาณเอทานอล แสดงสภาวะการทดลองและผลการทดลองในตารางที่ 11 โดยทำการหมักผลผลิตหลังผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยเอนไซม์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส คือ ใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 188 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด ปริมาณเปลือกสับปะรด 160 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร พีเอช 5.5 ควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 27.37 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 630.56 กรัมต่อลิตร และย่อยต่อด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส 120 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด พีเอช 3.5 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 48.16 กรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 549.35 กรัมต่อลิตร

พบว่า จากตารางที่ 11 สภาวะที่ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด คือ การทดลองที่ 6 โดยใช้ระยะเวลาในการหมัก 5 วัน ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พีเอช 5.5 อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 1.37 โดยปริมาตร เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ตามหลัก ANOVA เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงดังสมการที่ (7) ซึ่งค่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกัน มีค่าความแม่นยำ $R^2 = 0.906$

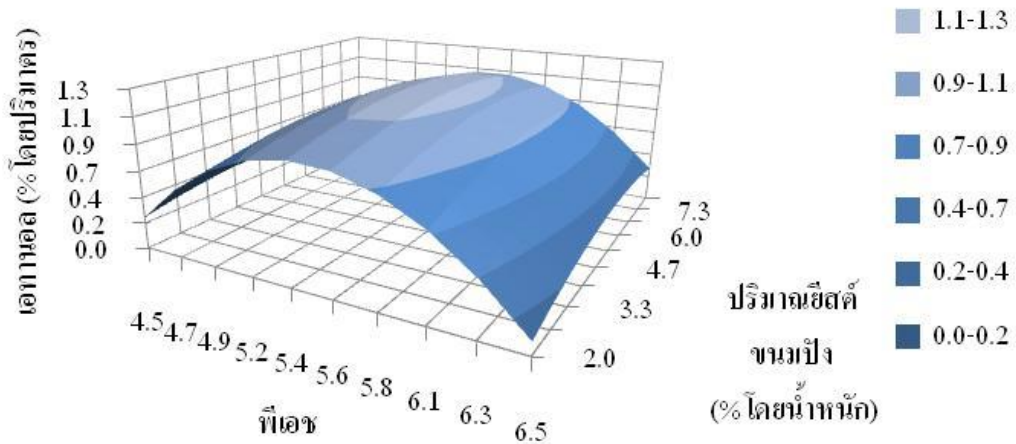
$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเอทานอล (ร้อยละโดยปริมาตร)} = & - 71.38 + 0.589 (H) - 0.02577(I) + 9.027 (J) + 2.633(K) - \\ & 0.04736(H)^2 - 0.01619 (I)^2 - 0.796(J)^2 - 0.03720(K)^2 - 0.00868 (H)(I) - \\ & 0.01984(H)(J) + 0.00157(H)(K) + 0.01614(I)(J) + 0.00455(I)(K) - 0.00817(J)(K) \end{aligned} \quad (7)$$

ตารางที่ 11 สภาวะการทดลองและผลการหมักเปลือกสับประรดหลังผ่านการปรับสภาพและย่อยโดยใช้เอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลสและกลูโคสอะไมเลส

ลำดับที่	เวลา (วัน)	ปริมาณยีสต์ขนมปัง (%)	พีเอช	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณเอทานอล (%)	
					ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	7	4	5	33	0.59	0.64
2	8	5	5.5	35	0.91	0.81
3	7	7	6	38	0.59	0.67
4	7	4	6	33	0.56	0.57
5	4	4	6	33	0.52	0.52
6	5	5	5.5	35	1.37	1.18
7	4	7	5	33	0.54	0.56
8	5	2	5.5	35	1.01	0.99
9	5	8	5.5	35	1.24	1.09
10	4	4	5	38	0.57	0.57
11	7	7	5	33	0.55	0.59
12	4	7	5	38	0.56	0.67
13	4	4	5	33	0.49	0.53
14	5	5	5.5	40	0.45	0.33
15	5	5	5.5	35	1.08	1.18
16	7	4	5	38	0.68	0.71
17	4	4	6	38	0.45	0.52
18	5	5	6.5	35	0.44	0.35
19	7	7	6	33	0.51	0.57
20	5	5	5.5	35	1.09	1.18
21	5	5	4.5	35	0.51	0.42
22	7	4	6	38	0.55	0.60
23	2	5	5.5	35	0.78	0.70
24	7	7	5	38	0.66	0.73
25	4	7	6	38	0.65	0.67
26	5	5	5.5	30	0.23	0.18
27	4	7	6	33	0.51	0.60

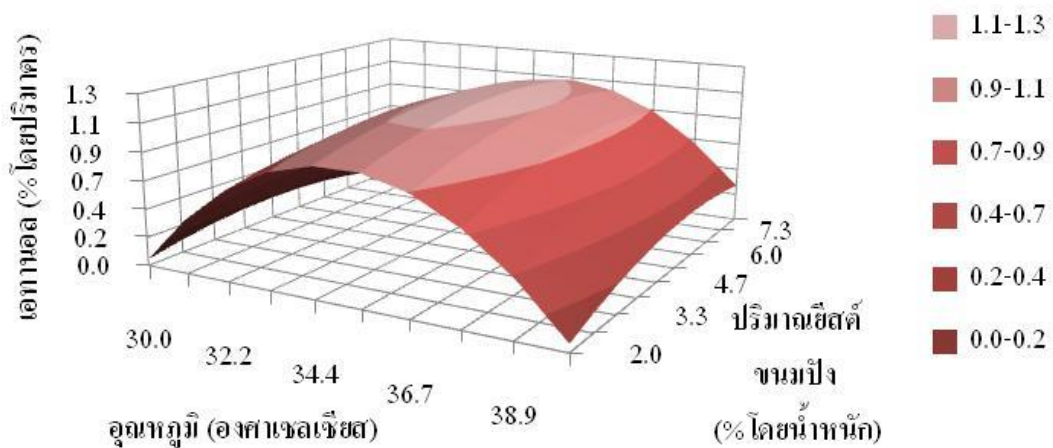
**ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลที่ได้จากการหมักเปลือกสับประดหลังผ่านการปรับสภาพและ
ย่อยด้วยการใช้เอนไซม์**

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัวแปร ที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลถูกอธิบายด้วยกราฟ
พื้นผิวสามมิติ แสดงดังรูปที่ 46 - 51



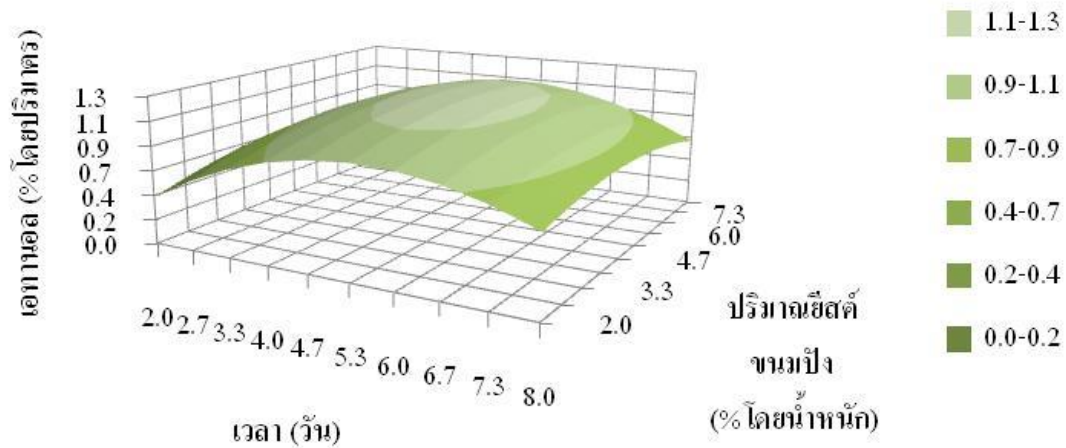
รูปที่ 46 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณเอนไซม์ขมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล
โดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ผลของพีเอชและปริมาณเอนไซม์ขมปังที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตเอทานอล แสดงดังรูปที่ 46 พบว่าปริมาณ
เอทานอลมีค่าเหมาะสมเมื่อใช้พีเอชในช่วง 5.2-5.6 ซึ่งเมื่อพีเอชต่ำกว่า 5.2 และสูงกว่า 5.6 จะทำให้ปริมาณเอทา
นอลมีค่าลดลง และปริมาณเอนไซม์ขมปังที่ควรใช้ในช่วงร้อยละ 4.0-6.0 โดยน้ำหนัก สอดคล้องกับงานวิจัยของวร
ลักษณ์ คงจินตมาณี (2556) [12] ซึ่งทำการศึกษาการหมักแกนข้าวโพดที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์และหมักด้วย
เอนไซม์ขมปัง พบสภาวะที่เหมาะสมคือ พีเอช 5.3 ด้วยการใชเอนไซม์ขมปังร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ระยะเวลาในการ
หมัก 6 วัน



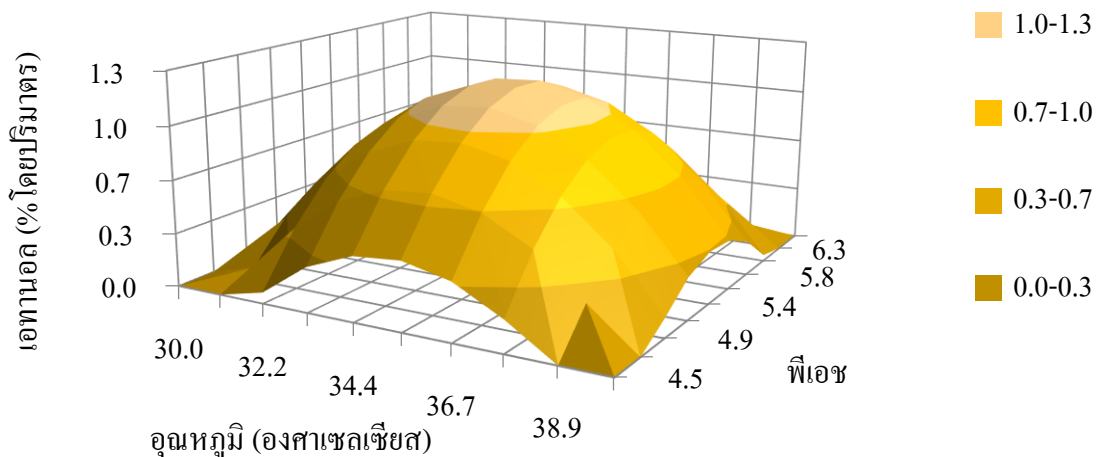
รูปที่ 47 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณเอนไซม์ขมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล
โดยทำการหมักที่พีเอช 5.5 และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ผลของอุณหภูมิและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 47 พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเหมาะสมเมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิ 32-35 องศาเซลเซียส ซึ่งหากอุณหภูมิต่ำกว่า 32 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า 35 องศาเซลเซียส ปริมาณผลผลิตเอทานอลที่ได้จะมีค่าลดลง และปริมาณยีสต์ขนมปังควรอยู่ในช่วงร้อยละ 4.0-6.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับรูปที่ 46



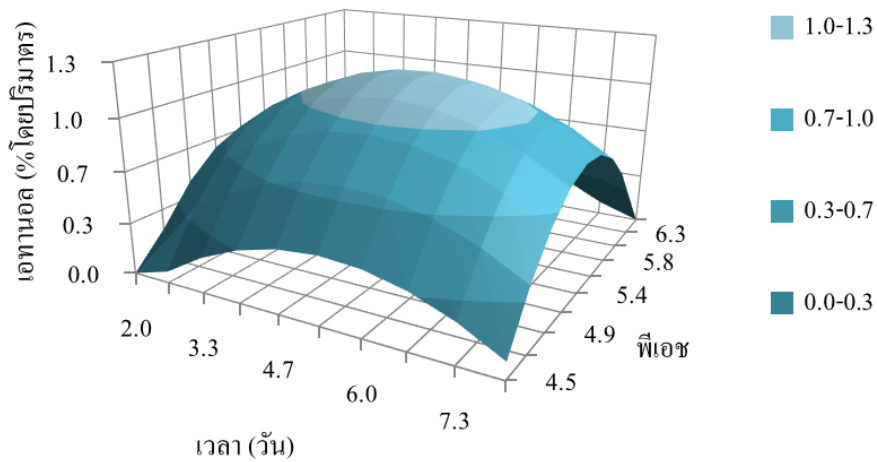
รูปที่ 48 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และพีเอช 5.5

ผลของระยะเวลาในการหมักและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 48 พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการหมัก 4-5 วัน และปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 4.0-5.5 โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลที่สูงที่สุด ผลของปริมาณยีสต์ยังคงได้ช่วงที่เหมาะสมเช่นเดียวกับรูปที่ 46 - 47



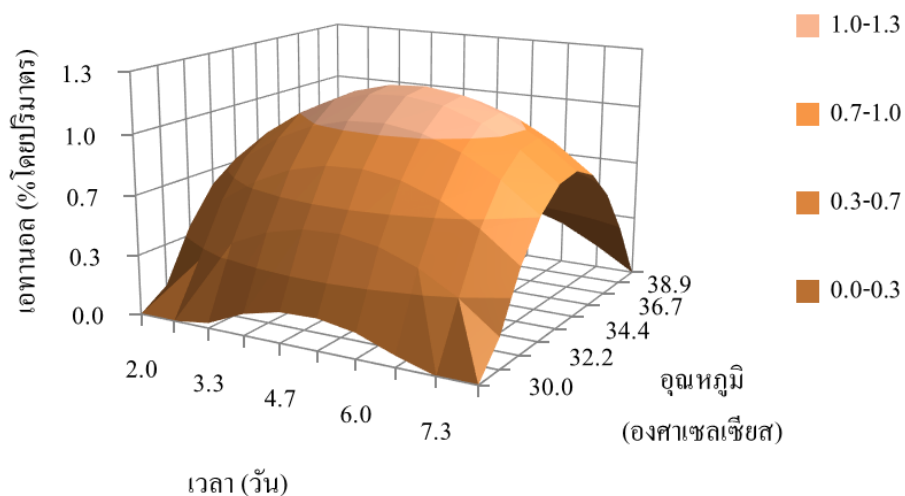
รูปที่ 49 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ผลของอุณหภูมิและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 49 พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่ามากที่สุดเมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิระหว่าง 32-35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงเดียวกับการศึกษาตามรูปที่ 47 และพีเอชระหว่าง 5.0-6.0 เป็นช่วงเดียวกันกับผลในรูปที่ 46 ยืนยันได้ว่าช่วงอุณหภูมิและพีเอชดังกล่าวนี้เป็นช่วงที่เหมาะสมสามารถให้ผลผลิตเอทานอลสูงสุดสำหรับการหมักด้วยการใช้ยีสต์ร้อยละ 5 เป็นเวลา 5 วัน



รูปที่ 50 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ผลของระยะเวลาในการหมักและพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 50 พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการหมัก 4 วัน และพีเอชอยู่ในช่วง 5.0-5.8



รูปที่ 51 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และพีเอช 5.5

ผลของระยะเวลาในการหมักและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 51 พบว่าที่ระยะเวลาในการหมัก 4 วัน และอุณหภูมิ 33-37 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ได้ปริมาณเอทานอลที่มากที่สุด (1.0 - 1.3%)

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักเอทานอลด้วยยีสต์ขนมปัง ที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยโดยใช้ เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และกลูโคอะไมเลส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอล คือ ใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก พีเอช 5.5 อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน จากผลการทำนายได้ปริมาณผลผลิตเอทานอลร้อยละ 1.19 โดยปริมาตร และเมื่อทำการทดลองจริงจะได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 1.10 โดยปริมาตร

จากผลการหมักเปลือกหลังผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยเอนไซม์ พบว่าแม้การย่อยด้วยเอนไซม์จะให้ปริมาณน้ำตาลมากกว่าวิธีอื่น แต่เมื่อนำมาหมักเป็นเอทานอลต่อกลับได้ปริมาณผลผลิตเอทานอลน้อยกว่าวิธีอื่น (การย่อยด้วยจุลินทรีย์ธรรมชาติ และการย่อยจุลินทรีย์บนขนมปังหมดอายุ) อาจมีสาเหตุมาจากการหมักเกิดภาวะท่วมวัตถุดิบน้ำตาลคือมีความเข้มข้นของน้ำตาลของปริมาณน้ำตาลมากเกินไปจนมีผลต่อผนังเซลล์ยีสต์เกิดการออสโมซิสทำให้จุลินทรีย์ตายหรือทำงานได้ไม่ดี ซึ่งอาจแก้ปัญหานี้ได้ด้วยการเจือจางปริมาณน้ำตาลให้อยู่ในช่วงปริมาณที่เหมาะสมก่อนทำการหมักคือไม่เกินร้อยละ 25

3.4 การหมักผลผลิตจากการปรับสภาพและย่อยโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากการออกแบบโดย RSM ที่มีตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปร คือ ระยะเวลาในการหมัก (H, วัน) ปริมาณยีสต์ขนมปัง (I, ร้อยละโดยน้ำหนัก) พีเอชเริ่มต้น (J) และอุณหภูมิ (K, องศาเซลเซียส) ตัวแปรตามคือปริมาณผลผลิตเอทานอล ดังแสดงในตารางที่ 12 โดยทำการหมักผลผลิตหลังผ่านการปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟด้วยสภาวะเหมาะสม คือ ปริมาณเปลือกสับปะรด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 12 นาที สามารถให้ผลผลิตปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 13.18 กรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 276.35 กรัมต่อลิตร

จากผลการหมักเอทานอลสามารถให้แบบจำลองสำหรับอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ดังสมการที่ (8)

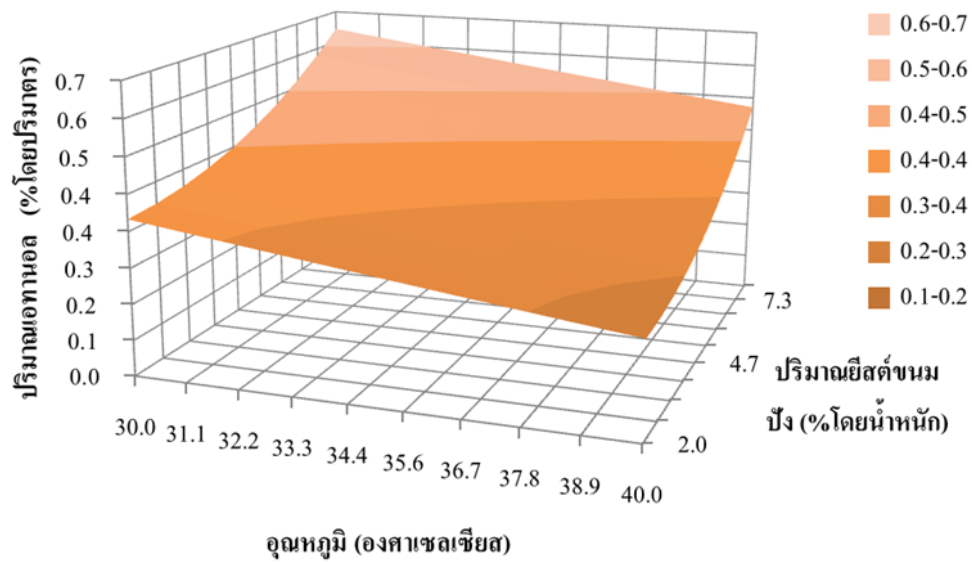
$$\begin{aligned} \text{ปริมาณเอทานอล (ร้อยละ)} = & 58.45 - 1.548(H) - 3.668(I) - 5.998(J) - 0.330(K) + 0.026*(H)^2 + \\ & 0.004(I)^2 + 0.840(G)^2 + 0.073(J)^2 + 0.071(H)(I) - 0.120(H)(J) - 0.006(H)(K) + \\ & 0.222(I)(J) - 0.005(I)(K) - 0.023(J)(K) \end{aligned} \quad (8)$$

ผลการทดลองพบว่า ค่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าความแม่นยำ $R^2 = 0.935$ แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง (R^2 adjusted = 0.858) จากข้อมูลแบบจำลองที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับค่าปริมาณเอทานอลในรูปของกราฟโครงร่าง (contour plot) ได้ดังรูปที่ 52 - 57

ตารางที่ 12 แสดงสภาวะการทดลองและผลการหมักผลผลิตหลังผ่านการปรับสภาพและย่อยโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

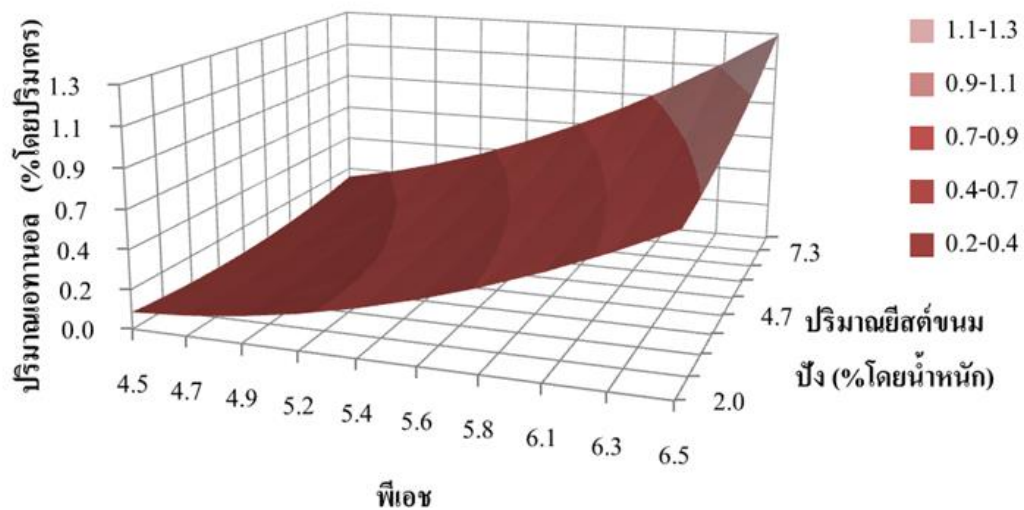
การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (วัน)	พีเอช	ปริมาณยีสต์ขนมปัง (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณเอทานอล (%โดยปริมาตร)	
					ผลการทดลอง	ผลการทำนาย
1	30	5	5.5	5	4.949	5.142
2	33	7	6.0	7	5.149	5.011
3	33	7	6.0	4	5.053	4.891
4	33	7	5.0	7	4.620	4.410
5	33	7	5.0	4	4.103	4.169
6	33	4	6.0	7	5.033	5.050
7	33	4	6.0	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
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

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณเอทานอลที่ได้จากการหมักผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ



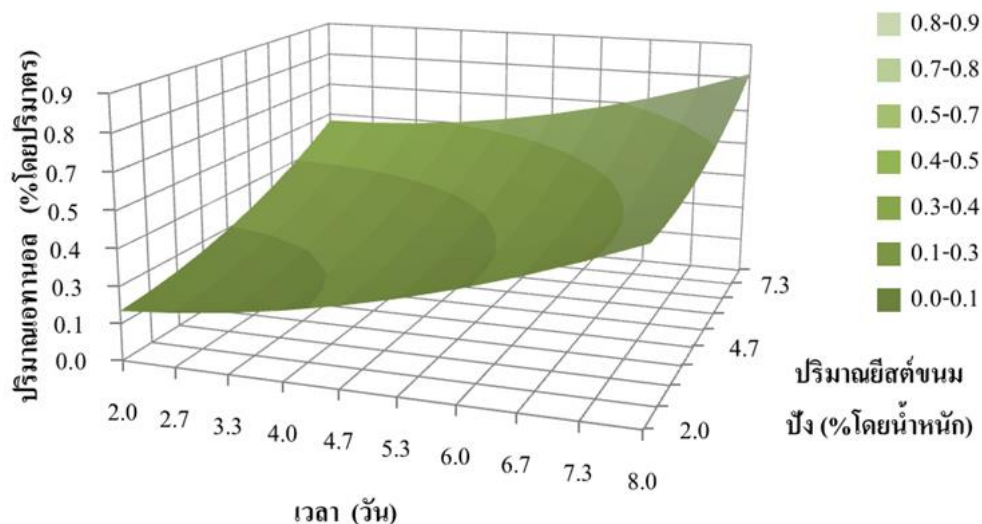
รูปที่ 52 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยีสต์ และอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยทำการหมักที่พีเอช 5.5 และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ผลของปริมาณยีสต์ขนมปัง และอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 52 พบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด (5.8-6.2 %โดยปริมาตร) การหมักด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ไม่ได้ช่วยให้ได้ปริมาณผลผลิตเอทานอลมากขึ้น และปริมาณยีสต์ขนมปังที่ส่งผลให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด พบว่าอยู่ที่ช่วงร้อยละ 7.3-8.0 โดยน้ำหนัก



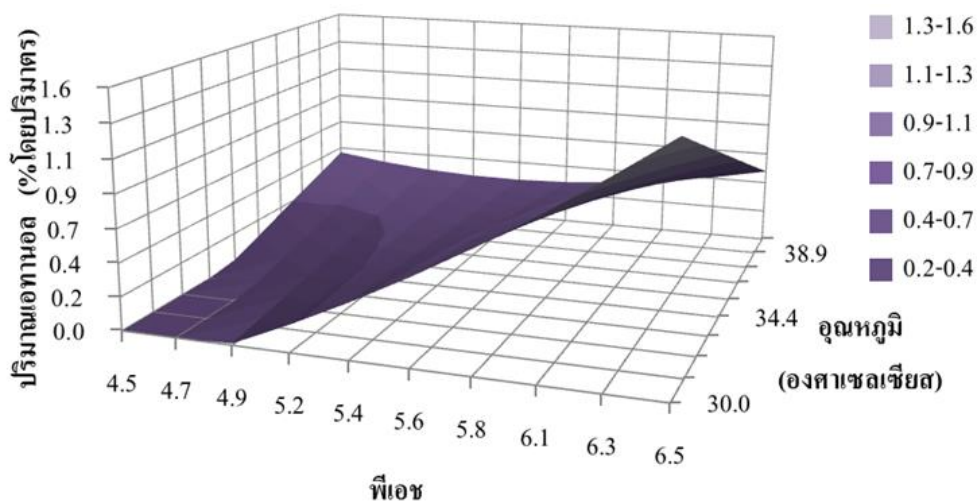
รูปที่ 53 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยทำการหมักที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 5 วัน

ผลของพีเอช และปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 53 พบว่าร้อยละปริมาณยีสต์ขนมปังควรใช้ช่วง 7.3-8.0 โดยน้ำหนัก ได้ผลทำนองเดียวกันกับการศึกษาปฏิสัมพันธ์ตามรูปที่ 52 โดยจะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด (5.3-6.0 %โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลาหมัก 5 วัน และพีเอชที่ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลมากที่สุดคือ พีเอช 4.5-4.7



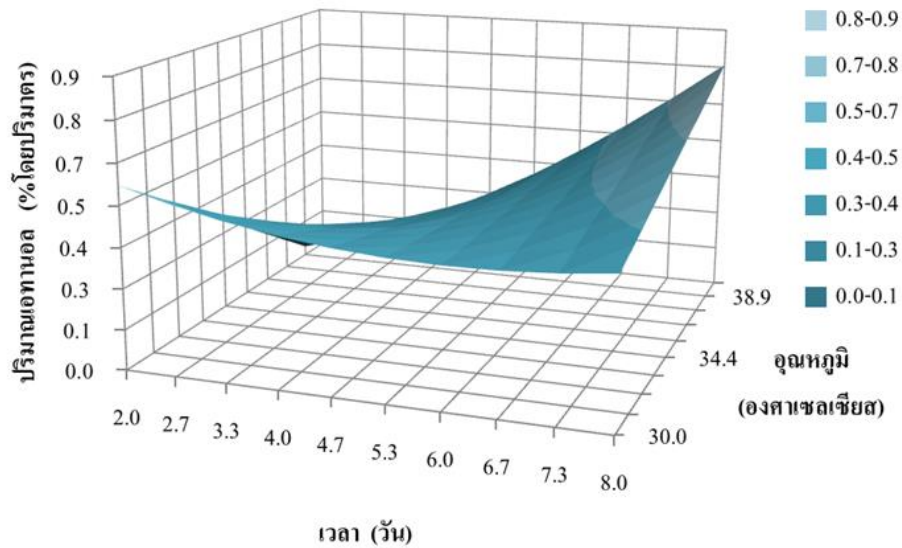
รูปที่ 54 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยหมักที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และพีเอช 5.5

ผลของเวลา และปริมาณยีสต์ขนมปังที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 54 พบว่าควรดำเนินการหมักโดยใช้ร้อยละปริมาณยีสต์ขนมปังที่ 7.3-8.0 จะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด (4.5-5.3 %โดยปริมาตร) ที่การหมักอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และพีเอช 5.5 แต่เวลาในการหมักมีผลต่อปริมาณเอทานอลน้อยมาก การเพิ่มเวลาไม่ได้ช่วยให้เกิดเอทานอลเพิ่มขึ้น



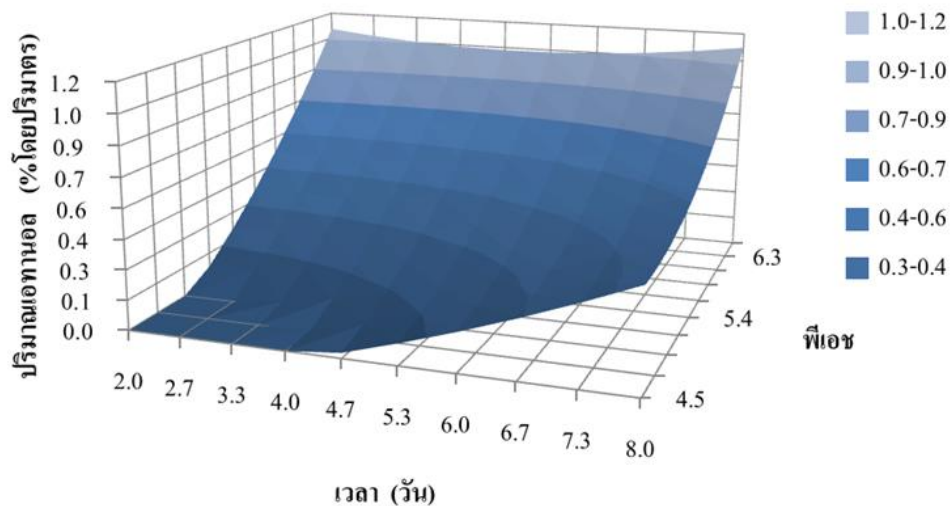
รูปที่ 55 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล เมื่อใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน

ผลของพีเอชและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 55 พบว่าอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เหมาะต่อการทำงานของยีสต์ จะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุด (6.2 %โดยปริมาตร) โดยพีเอชที่ส่งผลให้ ปริมาณเอทานอลมากที่สุดพบว่าอยู่ที่ช่วง 6.3-6.5 ช่วงเดียวกับการศึกษาปฏิสัมพันธ์ดังรูปที่ 53



รูปที่ 56 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล หมักโดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และพีเอช 5.5

ผลของระยะเวลาในการหมักและอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 56 พบว่าปริมาณ เอทานอลมีค่าเหมาะสมเมื่อใช้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการหมัก 2-3 วัน โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปัง ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และพีเอช 5.5 ให้เอทานอลในช่วง 5.3-6.2 %โดยปริมาตร



รูปที่ 57 กราฟพื้นผิวแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลา และพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล โดยใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ผลของระยะเวลาในการหมัก และพีเอชที่มีผลต่อปริมาณเอทานอล แสดงดังรูปที่ 57 พบว่าปริมาณเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น (5.3-6.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) เมื่อใช้ระยะเวลาในการหมัก 2-3 วัน ที่พีเอช 4.5-4.7 ยีสต์ขนมปังร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

เนื่องจากเมื่อพิจารณากราฟโครงร่าง (รูปที่ 52 - 57) พบว่าการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของปริมาณยีสต์กับทั้ง 3 ปัจจัย (พีเอช อุณหภูมิ และเวลา) มีแนวโน้มทำนองเดียวกัน และจากสมการที่ (8) สามารถทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการหมักคือการดำเนินการหมักที่พีเอชเริ่มต้น 6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และทำการหมักเป็นระยะเวลา 2 วัน จะทำให้ได้ปริมาณเอทานอลจากการทำนายคือร้อยละ 7.09 โดยปริมาตร และเมื่อทำการทดลองจริงภายใต้สภาวะนี้พบว่าได้ปริมาณเอทานอล 6.65 %โดยปริมาตร ซึ่งเป็นวิธีการผลิตที่ให้ปริมาณผลผลิตเอทานอลมากที่สุดในการศึกษาของงานวิจัยนี้

จึงสรุปได้ว่ากระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับประรดคือการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ใช้ปริมาณเปลือกสับประรด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพพร้อมการย่อย 12 นาที สามารถให้ผลผลิตปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 13.18 กรัมต่อลิตร และนำผลผลิตหลังการย่อยมาทำการหมักต่อด้วยสภาวะเหมาะสมที่กล่าวข้างต้น

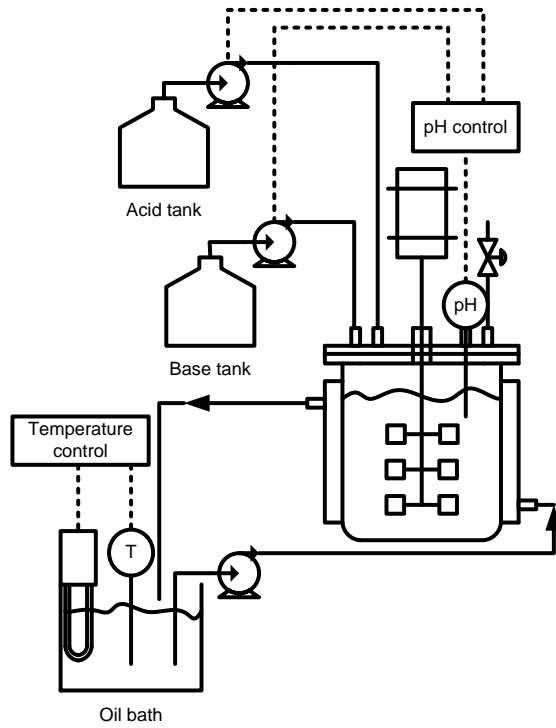
4. ผลการเพิ่มขนาดการหมักด้วยถังปฏิกรณ์

การออกแบบสร้างชุดเครื่องมือสำหรับดำเนินการหมักโดยมีถังหมักขนาด 5 ลิตร แสดงแบบร่างของเครื่องมืออุปกรณ์หลักดังรูปที่ 58 และชุดเครื่องมือที่สร้างขึ้นจริงแสดงดังรูปที่ 59

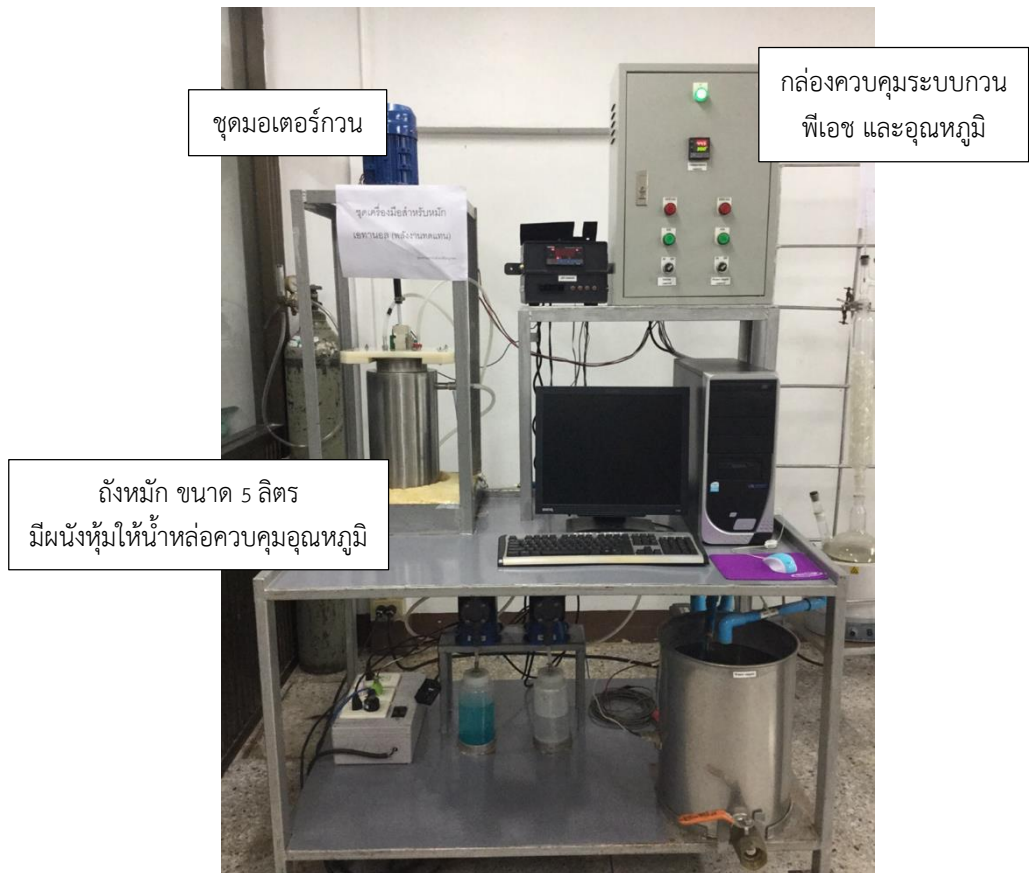
การทดลองใช้ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นและปรับปรุงให้สามารถดำเนินการได้ดี ดำเนินการโดยนำผลผลิตที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยสภาวะที่เหมาะสมด้วยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟดังที่กล่าวไว้ข้างต้น มาทำการหมักด้วยสภาวะที่เหมาะสมคือ ปรับพีเอชเริ่มต้นและควบคุมเป็น 6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หมักเป็นระยะเวลา 2 วัน พบว่าได้ปริมาณผลผลิตเอทานอลร้อยละ 6.67 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการทดลองขนาดเล็กที่ใช้ขวดหมักขนาด 250 มิลลิลิตร (ร้อยละ 6.65)

ผลผลิตหลังการหมักถูกแยกเอาเฉพาะส่วนของเหลวไปเพิ่มความบริสุทธิ์เอทานอลเป็นไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 โดยกลั่นด้วยชุดเครื่องกลั่นแบบ Packed-Column มีความสูงของคอลัมน์ 50 เซนติเมตร บรรจุ Packing ขนาดชั้นละ 0.5 นิ้ว กลั่นไอน้ำผ่าน Molecular sieve ชนิด 4A ชุดเครื่องกลั่นแสดงดังรูปที่ 60 กลั่นโดยใช้อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่น้ำหมัก 85 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ เพื่อหาระยะเวลาในการได้ผลผลิตเอทานอลปริมาณ 1 ลิตร ซึ่งพบว่าใช้เวลาในการกลั่นประมาณ 30 นาที ด้วยกำลังไฟฟ้า 600 วัตต์

สรุปการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับประรดซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน การปรับสภาพพร้อมการย่อยด้วยน้ำเปล่าให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และหมักด้วยยีสต์ขนมปัง (Baker's Yeast) สามารถให้ผลผลิตเอทานอลได้มากที่สุด 1,134 ลิตรต่อตัน มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 11.36 บาทต่อลิตร



รูปที่ 58 แบบร่างชุดเครื่องมือสำหรับดำเนินการหมักโดยมีถังหมักขนาด 5 ลิตร



รูปที่ 59 แสดงชุดเครื่องมืออุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสำหรับดำเนินการหมักโดยมีถังหมักขนาด 5 ลิตร



รูปที่ 60 แสดงชุดเครื่องมือสำหรับกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์เอทานอล
 สร้างขึ้นด้วยงบประมาณจากงานวิจัยก่อนหน้านี้
 (โครงการ “การผลิตเอทานอลจากเมล็ดขนุน” ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2553-2554) [13]

5. ผลการทำแผ่นเยื่อกระดาษอย่างง่ายจากกากผลผลิตส่วนของแข็งหลังการหมัก

5.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสในวัตถุดิบเปลือกสับประดและผลผลิตของแข็งหลังการหมักเอทานอล

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลสของวัตถุดิบและของแข็งหลังการหมักด้วยวิธี AOAC 1990

องค์ประกอบในวัตถุดิบ	เปลือก สับประดสด	เปลือกสับประดที่ผ่าน การหมักเอทานอล
ปริมาณเส้นใยทั้งหมด (ร้อยละโดยมวล)	40	53
ปริมาณเส้นใยเซลลูโลส (ร้อยละโดยมวล)	10	13

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 13 พบว่า ร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณเส้นใยเซลลูโลสและปริมาณเส้นใยทั้งหมดในเปลือกสับประดหลังผ่านการหมักเอทานอล (ของแข็งเหลือทิ้ง) หลังการปรับสภาพและย่อยด้วยวิธีเหมาะสม คือ การปรับสภาพเปลือกสับประดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ ใช้ปริมาณเปลือกสับประด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 12 นาที มีค่ามากกว่าเปลือกสับประดสด ซึ่งกระบวนการผลิตเอทานอลคือกระบวนการเปลี่ยนแป้งและเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาล

และหมักน้ำตาลเป็นเอทานอล ผลแสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตเอทานอลเปลี่ยนองค์ประกอบของเซลลูโลสได้ไม่ทั้งหมด จึงควรมีการนำมาใช้ประโยชน์ต่อ โดยการนำผลผลิตเหลือทิ้งนี้มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อ (เพื่อใช้สำหรับการผลิตกระดาษ) มีข้อดีคือการผ่านกระบวนการผลิตเอทานอลเป็นการช่วยกำจัดองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลสออกไปด้วยซึ่งสามารถช่วยลดสารเคมี อุณหภูมิ หรือเวลาในการผลิตเยื่อได้ นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มและลดของเสียในกระบวนการผลิตเอทานอลได้อีกด้วย แต่ค่าปริมาณเซลลูโลสของเปลือกหลังหมักที่ร้อยละ 13 น่าจะไม่เหมาะสมต่อการใช้เป็นเยื่อกระดาษ (จากประสบการณ์งานวิจัยโครงการ “การผลิตเยื่อกระดาษจากเปลือกกล้วยสดและจากผลผลิตของแข็งเหลือทิ้งหลังกระบวนการหมักเอทานอลจากเปลือกกล้วยสด” ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2555) [14] จึงควรผ่านขั้นตอนการผลิตเยื่อเพิ่มตามวิธีการผลิตเยื่อกระดาษทั่วไป คือกระบวนการโซดา

5.1.1 การผลิตเยื่อเซลลูโลสด้วยกระบวนการโซดา มีขั้นตอนดังนี้

- (1) ออกแบบสภาวะการทดลองโดยใช้ response surface methodology (RSM) ตัวแปรสำคัญซึ่งมีผลต่อปริมาณเซลลูโลสที่ศึกษาคือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา
- (2) อบเปลือกสับปรดหลังผ่านการหมักแล้ว ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เหลือความชื้นไม่เกินร้อยละ 10
- (3) ต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายเป็น 1:10 โดยทำการทดลองตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบด้วย RSM แสดงดังตารางที่ 14
- (4) แยกผลผลิตเยื่อ (ส่วนของแข็ง) ที่ได้ไปล้างด้วยน้ำจนเป็นกลาง และอบจนมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10
- (5) วิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส

5.1.2 ผลการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการโซดา

ตารางที่ 14 แสดงผลการออกแบบสภาวะการทดลองในการผลิตเยื่อจากของแข็งเหลือทิ้งซึ่งถูกออกแบบด้วยวิธี Central composite design โดยโปรแกรม RSM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโซดา มีตัวแปรอิสระ 3 ตัว คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (C; โมลต่อลิตร) อุณหภูมิ (T; องศาเซลเซียส) และเวลา (t; นาที) ประกอบด้วย 17 การทดลอง

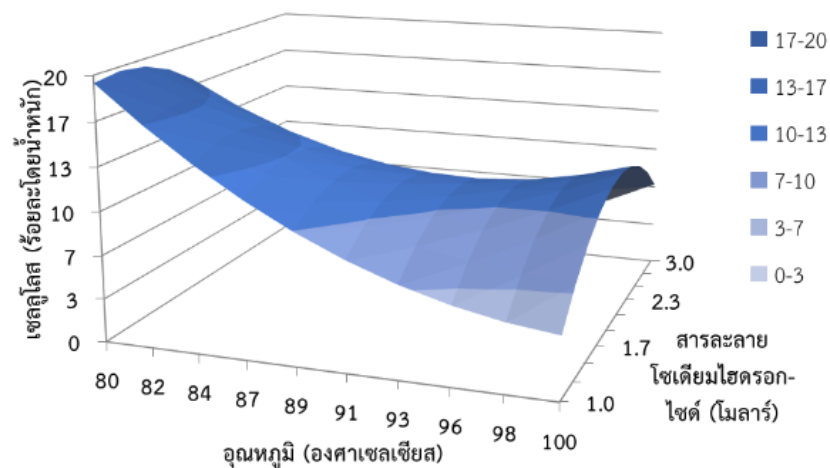
ผลการทดลองในตารางที่ 14 พบว่า สภาวะที่ได้ปริมาณผลผลิตเซลลูโลสมากที่สุด คือ การทดลองที่ 13 โดยใช้สารละลายความเข้มข้น 1.4 โมลาร์ อุณหภูมิ 84 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 นาที ได้ปริมาณผลผลิตเซลลูโลสร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ตามหลัก Analysis of variance (ANOVA) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่ได้จากสภาวะต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Essential regression ได้ผลแสดงดังสมการที่ (9) ซึ่งค่าปริมาณเซลลูโลสที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกัน มีค่า $R^2 = 0.9$ และอิทธิพลของตัวแปรทั้ง 3 ที่มีผลต่อปริมาณเซลลูโลสถูกอธิบายด้วยกราฟพื้นผิวสามมิติ แสดงดังรูปที่ 61 - 63

$$\text{ร้อยละของปริมาณเซลลูโลส} = 368.3 - 33.8 * C - 6.2 * T - 0.9 * t - 5.5 * C^2 + 0.1 * T^2 + 0.5 * C * T + 0.2 * C * t \quad (9)$$

ตารางที่ 14 ผลการออกแบบสภาวะการทดลองสำหรับกระบวนการโซดาด้วย RSM และผลของปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่ได้หลังกระบวนการโซดา

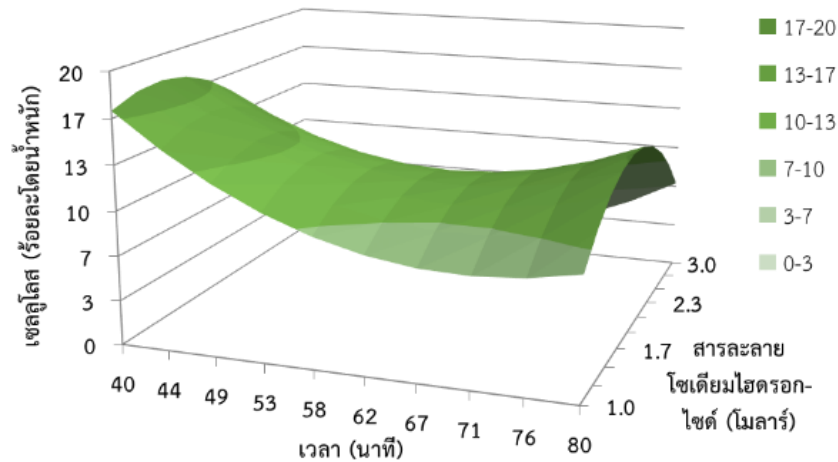
การทดลองที่	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ผลผลิตเซลลูโลส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	2	90	60	11
2	2	100	60	10
3	2	90	40	15
4	1	90	60	6
5	2.6	84	72	10
6	2.6	96	72	9
7	2	90	60	11
8	2	80	60	15
9	2.6	84	48	8
10	3	90	60	2
11	2.6	96	48	10
12	2	90	80	12
13	1.4	84	48	20
14	1.4	84	72	17
15	1.4	96	72	10
16	1.4	96	48	14
17	2	90	60	11

5.1.3 ผลของปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการโซดา



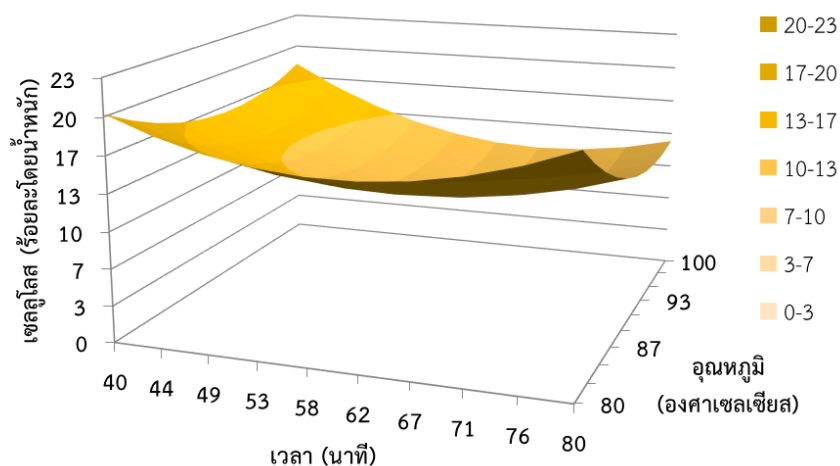
รูปที่ 61 พื้นผิวสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับอุณหภูมิต่อปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่เวลา 60 นาที

จากรูปที่ 61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับอุณหภูมิต่อปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่เวลา 60 นาที พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายและการเพิ่มอุณหภูมิไม่ได้ช่วยให้เกิดปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยควรดำเนินการภายใต้ช่วงความเข้มข้นต่ำ 1.0 – 1.4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 80 – 82 องศาเซลเซียส จึงจะให้ปริมาณเซลลูโลสสูงร้อยละ 17 – 20



รูปที่ 62 พื้นผิวสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาต่อปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาต่อปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่าแนวโน้มของความเข้มข้นเป็นเช่นเดียวกับความสัมพันธ์จากรูปที่ 61 และการให้ความร้อนเป็นเวลานานขึ้นก็ไม่ได้ช่วยให้เกิดปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยสามารถได้ปริมาณเซลลูโลสที่เหมาะสมเมื่อดำเนินการภายใต้ช่วงความเข้มข้นต่ำ 1.0 – 1.4 โมลาร์ เป็นเวลา 40 – 50 นาที



รูปที่ 63 พื้นผิวสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาต่อปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่ใช้สารละลาย 2 โมลาร์

จากรูปที่ 63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาต่อปริมาณผลผลิตเซลลูโลสที่ใช้สารละลาย 2 โมลาร์ พบว่าการดำเนินการในช่วงอุณหภูมิ 80 – 82 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 – 50 นาที สามารถให้ผลผลิตเซลลูโลสสูงสุดร้อยละ 17 – 20

จากสมการที่ (9) และรูปที่ 61 - 63 จะพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณเซลลูโลสคือ $C > T > t$ และผลการทำนายสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการโซดานี้คือ ใช้สารละลายความเข้มข้น 1.1 โมลาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที สามารถให้ปริมาณเซลลูโลสจากการทดลองจริงเป็นร้อยละ 21

5.1.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบเปลือกสับประรด ผลผลิตของแข็งหลังการหมักเอทานอล และผลผลิตเยื่อโซดา

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเปลือกสับประรดสด กากของเปลือกสับประรดที่ผ่านกระบวนการหมักเอทานอลด้วยสถานะที่เหมาะสม (ข้อ 3 การปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรดด้วยน้ำเปล่า โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ใช้ปริมาณเปลือกสับประรด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพพร้อมการย่อย 12 นาที และดำเนินการหมักที่พีเอชเริ่มต้น 6.5 ปริมาณยีสต์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และทำการหมักเป็นระยะเวลา 2 วัน) และผลผลิตเยื่อที่ได้จากการนำผลผลิตส่วนของแข็งหลังการหมักมาผ่านกระบวนการโซดาด้วยสถานะที่เหมาะสม (ข้อ 5.1.2 คือการใช้สารละลายความเข้มข้น 1.1 โมลาร์ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที) แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเปลือกสับประรด ผลผลิตของแข็งหลังการหมักเอทานอล และผลผลิตเยื่อโซดา

องค์ประกอบ/ ผลการวิเคราะห์ในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนัก	วัตถุดิบ เปลือกสับประรด	กากสับประรดหลังหมัก	เยื่อโซดา
Protein	0.64	0.55	16.49
Crude Fat	0.08	0.21	0.65
Moisture	82.56	86.04	4.37
Ash	0.81	0.86	4.66
Total Carbohydrate	15.91	15.85	73.83
Crude Fiber	13.70 (79)	12.34 (88)	91.92 (96)
ประเภทเส้นใย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
Soluble dietary fiber	0.18	0.07	2.96
Insoluble dietary fiber	5.92	9.88	78.98

หมายเหตุ ผลวิเคราะห์โดยศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมศาสตร์เพื่อการส่งออก คณะอุตสาหกรรมเกษตร
ค่าใน (...) คือค่าที่คำนวณในฐานแห้ง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบเปลือกสับประรด กากเปลือกสับประรดหลังผ่านการหมัก และเยื่อโซดา ซึ่งแสดงดังตารางที่ 15 สามารถช่วยสนับสนุนความเป็นไปได้ของกรอบแนวความคิดของผู้วิจัย คือ ผลผลิต

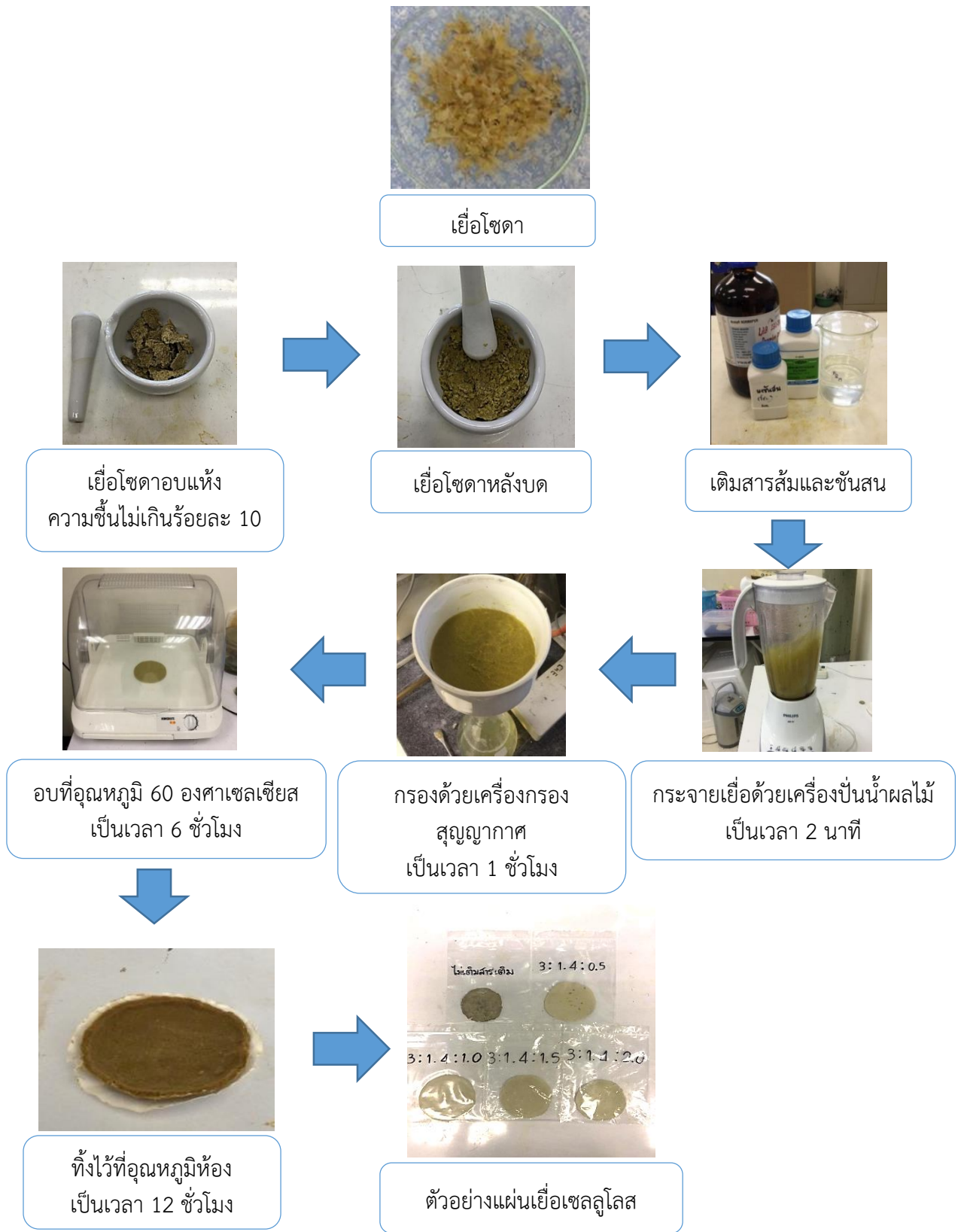
ของแข็งเหลือทิ้งหลังกระบวนการหมักเอทานอลน่าจะสามารถูกเพิ่มมูลค่าด้วยการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอือ
กระดาษได้

โดยผู้วิจัยได้สังเกตว่าขั้นตอนของการปรับสภาพวัตถุดิบเพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับกระบวนการผลิตเอ
ทานอลมีจุดประสงค์คล้ายกันกับขั้นตอนการผลิตเอือกระดาษ คือต้องการขจัดลิกนินและสิ่งปนเปื้อนออกจาก
วัตถุดิบ และจากการสังเกตพบว่าหลังขั้นตอนการหมักเอทานอลจะยังคงมีผลผลิตของแข็งเหลือทิ้ง (ที่ต้องทำการ
แยกออกจากผลผลิตส่วนเหลวก่อนนำของเหลวนี้ไปกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลในขั้นตอนต่อไป) โดย
ผลผลิตส่วนของแข็งเหลือทิ้งนี้ยังคงมีองค์ประกอบของเส้นใยอยู่ จึงควรมีการนำมาใช้ประโยชน์

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเส้นใยดิบ (Crude Fiber) ในฐานแห้งจะเห็นได้ชัดว่าเปลือกหลังการหมักมีเส้นใย
เพิ่มขึ้น แต่เพื่อให้การผลิตแผ่นเอือได้ดีหรือให้มีความใกล้เคียงในเรื่องคุณสมบัติพื้นฐานของกระดาษยังต้องผ่าน
กระบวนการโซดาเพื่อกำจัดองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลสออกให้มากที่สุด ในการผลิตเอือต้องการผลได้เป็น
ปริมาณเซลลูโลส เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์กระดาษที่มีคุณภาพ สามารถปรับปรุง
คุณสมบัติด้วยสารเติมให้เป็ผลติภัณฑ์กระดาษหลากหลายชนิดได้ง่ายขึ้น โดยเซลลูโลสคือเส้นใยประเภทไม่
ละลายในกรด (Insoluble dietary fiber) ผลในตารางยืนยันว่าแม้ผลผลิตของแข็งหลังการหมักจะมีเส้นใย
ปริมาณมากแต่ก็ต้องทำกระบวนการโซดาเพื่อให้ได้เส้นใยที่เป็นเซลลูโลส อย่างไรก็ตามการใช้ผลผลิตเอือทิ้งหลัง
การหมักเพื่อการผลิตเอือก็สามารถเป็นทางเลือกในการสร้างมูลค่าเพิ่มในกระบวนการผลิตเอทานอลได้ และ
สามารถลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเอือกระดาษโดยอาจลดการใช้สารเคมี ลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
และลดระยะเวลาในการผลิตกระดาษได้ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตรวมน่าจะต่ำกว่าการผลิตจากเปลือกสับประรดสด

5.2 ผลการปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยเซลลูโลสให้เหมาะกับการทำแผ่นเอือ

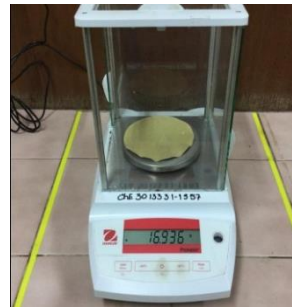
การปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นที่สำคัญที่สุดของการทำแผ่นเอือกระดาษคือการปรับปรุงสมบัติความต้าน
การซีมน้ำ งานวิจัยนี้เลือกใช้สารเติมประเภทสารกันซีมนที่เป็นสารธรรมชาติคือชันสน และผสมสารส้ม โดยชันสน
เป็นสารกันซีมนซึ่งจะทำหน้าที่ได้ดีเมื่อมีสารส้มมาช่วยเป็นสารเชื่อมหรือสารยึดระหว่างเอือ ช่วยในการประสาน
เอือเพื่อให้สามารถผลิตเป็นแผ่นเอือเซลลูโลสหรือแผ่นเอือกระดาษได้ แสดงขั้นตอนการทำแผ่นเอือดังรูปที่ 64
และการตรวจสอบความเหมาะสมของปริมาณหรืออัตราส่วนในการใช้สารส้มและชันสนคือการทดสอบคุณสมบัติ
พื้นฐานของแผ่นเอือ เช่น น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา ค่าการดูดซีมน้ำ และความต้านทานแรงดึง แสดงภาพ
ประกอบการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานดังรูปที่ 65 และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 16



รูปที่ 64 แสดงขั้นตอนการทำแผ่นเยื่อ



ความหนามาตรฐาน



น้ำหนักมาตรฐาน



ค่าการดูดซึมน้ำ



ความต้านทานแรงดึง

รูปที่ 65 แสดงการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแผ่นเยื่อ

จากตารางที่ 16 เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นที่สำคัญของกระดาษคือ ความต้านทานการซึมน้ำ จึงได้ทดลองใช้สารเติมประเภทสารกันซึม ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ ยางสน (Rosin) ผสมกับสารส้ม (Alum) เพื่อช่วยให้แผ่นเยื่อกระดาษมีการดูดซึมน้ำได้น้อยลง ค่านี้เป็นสมบัติสำคัญที่สามารถปรับปรุงได้ง่าย โดยหากแผ่นเยื่อมีการดูดซึมน้ำที่สูงจะส่งผลให้มีความแข็งแรงลดลง จากการศึกษาพบว่า การใส่สารเติมการดูดซึมน้ำของแผ่นเยื่อมีค่าน้อยลงเมื่อใส่สารเติมมากขึ้น แสดงว่าสารเติมทั้งสองช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความต้านทานการซึมน้ำของเยื่อได้จริง

สำหรับค่าความต้านทานแรงดึง พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นเยื่อมีค่าน้อย เนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาศึกษาเป็นพีชล์มลูก ที่มีเส้นใยอ่อน ไม่แข็งแรง จึงเป็นแนวโน้มที่เป็นไปได้ และเมื่อมีการเติมสารเติมมากขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง เนื่องจากเมื่อมีการใส่สารเติมลงไปมีผลให้อัตราส่วนของเยื่อมีปริมาณน้อยลง จึงทำให้ความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อมีการใส่สารเติมมากขึ้น ดังนั้นต้องมีการใส่สารเติมประเภทเพิ่มความต้านทานแรงดึง เช่น แป้งดัดแปรประจุบวก เป็นต้น แต่ผู้วิจัยต้องการศึกษาแค่ความเป็นไปได้ในการทำแผ่นเยื่อกระดาษอย่างง่ายจากผลผลิตเหลือทิ้งหลังกระบวนการหมักเอทานอล และยังไม่ได้มุ่งที่จะทำการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์กระดาษประเภทใด จึงแค่ทำการวัดค่าไว้เพื่อสามารถใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาเพิ่มเติมได้ต่อไป

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแผ่นเยื่อที่ได้

เยื่อต่อชั้นสนต่อ สารส้ม (อัตราส่วนโดย น้ำหนัก)	น้ำหนัก มาตรฐาน (กรัม)	ความหนา (มิลลิเมตร)	การดูดซึมน้ำ (กรัมต่อตาราง มิลลิเมตร)	ความต้านทานแรงดึง (นิวตันต่อตาราง มิลลิเมตร)
3:1.4:2.0	2.52	13.18	1.18×10^{-4}	0.96
3:1.4:1.5	2.28	12.47	1.33×10^{-4}	2.45
3:1.4:1.0	2.22	11.70	3.06×10^{-4}	3.12
3:1.4:0.5	2.19	11.53	8.05×10^{-4}	4.00
ไม่ใส่สารเติม	1.55	8.82	9.09×10^{-4}	10.70

ตารางที่ 17 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ กระดาษสา กระดาษห่อพัสดุ กระดาษห่อของขวัญ และ กระดาษ A4 (ผลิตภัณฑ์กระดาษที่มีขายในท้องตลาด) กับแผ่นเยื่อกระดาษที่ผลิตได้

ประเภทกระดาษ	น้ำหนัก มาตรฐาน (กรัม)	ความหนา (มิลลิเมตร)	การดูดซึมน้ำ (กรัมต่อตาราง มิลลิเมตร)	ความต้านทานแรงดึง (นิวตันต่อตาราง มิลลิเมตร)
กระดาษสา	0.29	0.11	0.22×10^{-4}	9.917
กระดาษห่อพัสดุ	1.15	0.17	0.87×10^{-4}	37.059
กระดาษห่อของขวัญ	0.82	0.07	0.66×10^{-4}	25.865
กระดาษ A4 (70 gram)	0.83	0.11	1.09×10^{-4}	41.654
แผ่นเยื่อโซดา (ไม่ใส่สารเติม)	1.55	8.82	9.09×10^{-4}	10.70
แผ่นเยื่อโซดา (ใส่สารเติมอัตราส่วน 3:1.4:2)	2.52	13.18	1.18×10^{-4}	0.96

หมายเหตุ อัตราส่วนสารเติม 3:1.4:2 คืออัตราส่วนของ เยื่อ:สารส้ม:ชั้นสน

เนื่องจากไม่สามารถหามาตรฐานหรือเกณฑ์ในการตัดสินว่าเยื่อกระดาษที่ผลิตขึ้นสามารถนำมาพัฒนาหรือปรับปรุงไปเป็นกระดาษประเภทใดได้บ้าง จึงได้นำกระดาษที่มีขายในท้องตลาดมาวัดคุณสมบัติทั้ง 4 คุณสมบัติตามที่ได้ศึกษาด้วยแผ่นเยื่อที่ผลิตได้ คือ น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงดึง โดยเลือกศึกษาประเภทกระดาษที่ผลผลิตของงานวิจัยน่าจะสามารถพัฒนาเป็นได้ คือ กระดาษสา กระดาษห่อพัสดุ กระดาษห่อของขวัญ และกระดาษพิมพ์เขียน (กระดาษ A4, 70 gram) ลักษณะของกระดาษแต่ละประเภท

แสดงดังรูปที่ 66 (1) - (4) และผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติของกระดาษทั้ง 4 ประเภท เปรียบเทียบกับแผ่นเยื่อที่ผลิตได้ แสดงดังตารางที่ 17



(1) กระดาษสา



(2) กระดาษห่อพัสดุ



(3) กระดาษห่อของขวัญ



(4) กระดาษพิมพ์เขียน

ภาพประกอบที่ 66 ลักษณะของกระดาษที่นำมาศึกษาคุณสมบัติ
เพื่อใช้เปรียบเทียบกับแผ่นเยื่อกระดาษที่ผลิตได้

จากตารางที่ 17 พบว่าแผ่นเยื่อโซดาที่ไม่ใส่สารเติมสามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทนกระดาษสาได้ เนื่องจากมีความต้านทานแรงดึงใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นค่าที่น่าจะจำเป็นต่อลักษณะการใช้งานของกระดาษสามากที่สุด โดยลักษณะการใช้งานของกระดาษสาค่าการดูดซึมน้ำอาจจะมีผลไม่มากนัก ส่วนค่าความหนาและน้ำหนักมาตรฐานสามารถปรับปรุงได้โดยใช้เครื่องมืออัตโนมัติทำแผ่นกระดาษเหมือนในอุตสาหกรรม (แต่งานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าเนื่องจากทำแผ่นด้วยมือ) การเติมสารกันซึมมากขึ้นสามารถช่วยลดค่าการดูดน้ำได้มากขึ้น (มีความต้านทานการซึมน้ำมากขึ้น) โดยหากเติมปริมาณชั้นสนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (มากกว่า 3:1.4:2) จะสามารถมีค่าการดูดซึมน้ำเหมือนกับค่าของกระดาษทั้ง 4 ชนิดได้

ดังนั้นหากจะพัฒนาเยื่อโซดาให้เป็น กระดาษห่อพัสดุ กระดาษห่อของขวัญ และกระดาษพิมพ์เขียน ต้องใส่สารเติมเพิ่มความต้านทานแรงดึง หรือนำเยื่อโซดาไปผสมกับเยื่อเซลลูโลสชนิดอื่นที่มีเส้นใยให้ความแข็งแรงมากกว่า เช่น เยื่อปอสา เยื่อยูคาลิปตัส และเยื่อไม้ต่างๆ สำหรับการปรับปรุงค่าน้ำหนักมาตรฐานและความหนานอกจากการผ่านเครื่องอัดรีดแล้ว สามารถทำได้โดยเปลี่ยนวิธีการผลิตเยื่อหรือใช้สภาวะของกระบวนการโซดาภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส [15-17] ก็จะทำให้ปริมาณเซลลูโลสที่มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลสและลดองค์ประกอบอื่นได้แล้ว ก็จะทำให้น้ำหนักมาตรฐานและความหนาลดลง เนื่องจากปริมาณเยื่อที่ต้องใช้ในการทำกระดาษต่อหนึ่งแผ่นจะลดลง

6. ผลการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการผลิตแต่ละวิธี

6.1 ผลการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอล

ตารางที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรดด้วยวิธีต่างๆ

วิธี/สภาวะ การปรับสภาพและ ย่อยที่เหมาะสม	จุลินทรีย์ ธรรมชาติบน เปลือกสับประรด	จุลินทรีย์ธรรมชาติ และบนขนมปัง หมดอายุ	เอนไซม์	คลื่นไมโครเวฟ
การปรับสภาพ	- เปลือก 141 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร - ไม่ปรับพีเอช - อุณหภูมิห้อง - 120 ชั่วโมง	- เปลือก 115 กรัม และขนมปัง 38 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร - ไม่ปรับพีเอช - อุณหภูมิห้อง - 24 ชั่วโมง	- เปลือก 160 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร - พีเอช 5.5 - 70 องศาเซลเซียส - 4 ชั่วโมง - แอลฟาอะไมเลส 188 U/g	- เปลือก 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร - ไม่ปรับพีเอช - กำลังไฟ 90 วัตต์ (\cong 100 องศาเซลเซียส) - 12 นาที (0.2 ชั่วโมง)
การย่อย			- พีเอช 3.5 - 70 องศาเซลเซียส - 4 ชั่วโมง - กลูโคอะไมเลส 120 U/g	
ผลผลิตน้ำตาล รีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)	0.58	2.07	48.16	13.18

จากตารางที่ 18 การเปรียบเทียบผลการย่อยทั้ง 4 วิธี พบว่าการใช้เอนไซม์สามารถให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุดแต่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มจากวิธีอื่นคือมีการใช้สารเคมีในการปรับพีเอช ใช้เอนไซม์ และการให้ความร้อน และวิธีที่ให้ปริมาณน้ำตาลรองลงมาคือการย่อยด้วยการให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟซึ่งมีการใช้พลังงานในการให้ความร้อนต่ำกว่าใช้เวลาน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาร่วมกับตารางที่ 19 พบว่า การปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับประรดทำให้ได้ปริมาณเอทานอลที่มากที่สุด เนื่องจากในขั้นตอนการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับประรด และการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับประรดร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังที่เลยวันหมดอายุ ไม่ได้ใช้ความร้อนในการปรับสภาพและย่อย จึงทำให้ยังคงมีจุลินทรีย์และยีสต์หลงเหลืออยู่ ซึ่งจุลินทรีย์และยีสต์เหล่านี้สามารถที่นำมาช่วยย่อยคาร์โบไฮเดรตและเซลลูโลสให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ต่อในขั้นตอนการหมักซึ่งจะเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลได้ในปริมาณที่มากขึ้น โดยสามารถเติมยีสต์ขนมปังในปริมาณน้อย ซึ่งต่างจากการปรับสภาพและย่อยโดยใช้เอนไซม์ ที่มีการให้ความร้อนตั้งแต่การปรับสภาพ และให้ความร้อนต่อในขั้นตอนการย่อยหรือการให้ความร้อนในขั้นตอนเดียวด้วยไมโครเวฟ ก็ส่งผลให้จุลินทรีย์และยีสต์ที่ติดมากับเปลือกสับประรดไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ จึงต้องเติมปริมาณยีสต์ขนมปังมากกว่าวิธีธรรมชาติ

และจากผลของการหมักผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับปะรดร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังที่เลยวันหมดอายุ พบว่า ปริมาณเอทานอลที่ได้มีปริมาณที่น้อยกว่าการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับปะรด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์บนขนมปังที่เลยวันหมดอายุแล้วซึ่งคือรา สามารถช่วยในการย่อยไม่ได้ช่วยให้ได้ปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้น และการหมักผลผลิตที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์จะให้เอทานอลน้อยด้วยเหตุผลในเรื่องความเข้มข้นของน้ำตาลเบื้องต้นที่สูงเกินไปสำหรับการหมักดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นซึ่งวิธีเอนไซม์หากได้มีการศึกษาเพิ่มเติมด้วยการเจือจางน้ำตาลก่อนการหมักให้มีความเข้มข้นในช่วงที่เหมาะสมอาจจะเป็นวิธีการผลิตที่เหมาะสม แต่สำหรับการดำเนินการทดลองในงานวิจัยนี้ การหมักผลผลิตหลังการย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถให้ปริมาณผลผลิตเอทานอลสูงที่สุดแม้จะต้องเติมยีสต์ขนมปังมากกว่าวิธีอื่นแต่ใช้พลังงานและระยะเวลาสั้นกว่าวิธีอื่น

ตารางที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการหมักเอทานอลของเปลือกสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากทั้ง 4 วิธี

วิธีการปรับสภาพและย่อย /สภาวะการหมักที่เหมาะสม	โดยใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติบนเปลือกสับปะรด	โดยใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติและบนขนมปังหมดอายุ	โดยใช้เอนไซม์	โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ
ปริมาณยีสต์ขนมปัง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2	3	6	8
พีเอชเริ่มต้น	4.5	6.4	5.5	6.5
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	40	30	35	30
ระยะเวลาในการหมัก (วัน)	8	8	5	2
ปริมาณผลผลิตเอทานอล (ร้อยละโดยปริมาตร)	5.38	4.07	1.10	6.65

6.2 ผลการประมาณต้นทุนการผลิต และเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการผลิตแต่ละแบบ

การผลิตเอทานอลโดยใช้เปลือกสับปะรดเป็นวัตถุดิบ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนการผลิต คือ การปรับสภาพและย่อย การหมัก และการกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์ โดยสามารถแบ่งกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันได้เป็น 4 แบบ ซึ่งมีวิธีการปรับสภาพและย่อยวัตถุดิบแตกต่างกัน 4 วิธี ส่งผลให้ได้สภาวะการหมักที่เหมาะสมแตกต่างกันในแต่ละวิธี แต่มีสภาวะในการกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์ผลผลิตเอทานอลเหมือนกัน จึงสามารถประมาณต้นทุนการผลิตและเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียระหว่างกระบวนการผลิตทั้ง 4 แบบ ดังนี้

การประมาณต้นทุนการผลิตของกระบวนการผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง (เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95) นั้น จำเป็นต้องทราบรายละเอียดของแต่ละกระบวนการผลิต เช่น ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้แต่ละกระบวนการ ระยะเวลาที่ใช้ และราคาต่อหน่วยของวัตถุดิบ (จากสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตแต่ละแบบ) การคำนวณค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนในกระบวนการผลิตเอทานอลโดยกำหนดให้ผลิตเอทานอลความบริสุทธิ์เป็นร้อยละ

95 ปริมาณ 1 ลิตร โดยชนิดและราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต แสดงดังตารางที่ 20 ค่าใช้จ่ายของการผลิตแต่ละแบบแสดงดังตารางที่ 21 - 24 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของแต่ละแบบแสดงดังตารางที่ 25 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการผลิตแต่ละแบบแสดงดังตารางที่ 26 และตารางที่ 27 แสดงการเปรียบเทียบผลได้ของผลผลิตเอทานอลจากการผลิตที่ใช้วัตถุดิบต่างๆ

ตารางที่ 20 แสดงราคาวัตถุดิบ สารเคมี และสาธารณูปโภค ที่ใช้ประกอบการคำนวณค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต

สารเคมี	ราคาต่อหน่วย	สารเคมี	ราคาต่อหน่วย
เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส	0.08 บาทต่อกรัม	โซเดียมไบคาร์บอเนต	0.007 บาทต่อกรัม
เอนไซม์กลูโคอะไมเลส	0.13 บาทต่อกรัม	ยีสต์ขนมปัง	0.065 บาทต่อกรัม
สารละลายแอมโมเนีย	7.40 บาทต่อลิตร	น้ำ	0.013 บาทต่อลิตร
กรดซัลฟูริก	0.014 บาทต่อกรัม	ไฟฟ้า	1.7 บาทต่อหน่วย
กรดอะซิติก	0.02 บาทต่อกรัม		

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

อัตราแลกเปลี่ยน 1 US = 32.8 บาท

อัตราค่าน้ำ คัดเฉลี่ยราคาในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (การประปานครหลวง, 30ก.ย. 57)

อัตราค่าไฟฟ้า คัดเฉลี่ยราคาในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่, 30 ก.ย. 57)
1 หน่วย คือ กิโลวัตต์.ชั่วโมง

ตารางที่ 21 ประเมินการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากกระบวนการใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติ ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95)

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ค่าใช้จ่าย (บาท)
1. การปรับสภาพและย่อย		
- เปลือกสับประรด	1,407.04 กรัม	-
- น้ำ	9.98 ลิตร	0.13
2. การหมัก		
- ยีสต์ขนมปัง	28.14 กรัม	1.83
- สารละลายแอมโมเนีย (ปรับ pH)	0.12 ลิตร	0.89
- ไฟฟ้า	10.43 หน่วย	17.74
3. การกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์เอทานอลเป็นร้อยละ 95		
- ไฟฟ้า	1.60 หน่วย	2.72
รวม		23.31

หมายเหตุ ไม่คิดราคาวัตถุดิบเปลือกสับประรด (วัสดุเหลือใช้และเหลือทิ้งสำหรับอุตสาหกรรมสับประรดกระป๋อง)

ตารางที่ 22 ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากกระบวนการปรับสภาพและย่อยด้วยจุลินทรีย์บนขนมปังเลยวันหมดอายุ ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95)

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ค่าใช้จ่าย (บาท)
1. การปรับสภาพและย่อย		
- เปลือกสับปะรด	1,640 กรัม	-
- ขนมปัง	545.72 กรัม	-
- น้ำ	14.29 ลิตร	0.20
2. การหมัก		
- ยีสต์ขนมปัง	49.20 กรัม	3.37
- สารละลายแอมโมเนีย (ปรับ pH)	0.14 ลิตร	1.11
- ไฟฟ้า	10.43 หน่วย	17.74
3. การกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์เอทานอลเป็นร้อยละ 95		
- ไฟฟ้า	1.60 หน่วย	2.72
รวม		25.14

หมายเหตุ ไม่คิดราคาวัตถุดิบขนมปัง (วัสดุเหลือใช้และเหลือทิ้งสำหรับอุตสาหกรรมเบเกอรี่)

ตารางที่ 23 ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากกระบวนการปรับสภาพและย่อยด้วยเอนไซม์ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95)

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ค่าใช้จ่าย (บาท)
1. การปรับสภาพ		
- เปลือกสับปะรด	10,133.34 กรัม	-
- น้ำ	63.33 ลิตร	0.82
- สารละลายแอมโมเนีย (ปรับ pH)	0.24 ลิตร	1.78
- เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส	63.33 กรัม	5.07
- ไฟฟ้า	0.72 หน่วย	1.22
2. การย่อย		
- กรดซัลฟูริก (ปรับ pH)	139.33 กรัม	1.95
- เอนไซม์กลูโคอะไมเลส	15.83 กรัม	2.06
- ไฟฟ้า	0.72 หน่วย	1.22
3. การหมัก		
- ยีสต์ขนมปัง	608.00 กรัม	39.52
- สารละลายแอมโมเนีย (ปรับ pH)	0.22 ลิตร	1.63
- ไฟฟ้า	4.01 หน่วย	6.82
4. การกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์เอทานอลเป็นร้อยละ 95		
- ไฟฟ้า	1.60 หน่วย	2.72
รวม		64.81

ตารางที่ 24 ประมาณการของปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมีต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากกระบวนการปรับสภาพและย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังการผลิตเอทานอล 1 ลิตร (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95)

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ค่าใช้จ่าย (ราคา)
1. การปรับสภาพ		
— เปลือกสับปะรด	882 กรัม	-
— น้ำเปล่า	6.7 ลิตร	0.08
— ไฟฟ้า	0.12 หน่วย	0.20
2. การหมัก		
— ยีสต์ขนมปัง	70.56 กรัม	4.58
— แอมโมเนีย 25% (ปรับ pH)	0.335 ลิตร	2.47
— ไฟฟ้า	0.77 หน่วย	1.31
3. การกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์เอทานอลเป็นร้อยละ 95		
— ไฟฟ้า	1.60 หน่วย	2.72
รวม		11.36

หมายเหตุ ไม่คิดราคาวัตถุดิบเปลือกสับปะรด (วัสดุเหลือใช้และเหลือทิ้งสำหรับอุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋อง)

ตารางที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตเอทานอลด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ทั้ง 4 แบบ

รายการ	การปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับปะรด	การปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์บนขนมปังที่หมดอายุแล้ว	การปรับสภาพและย่อยโดยใช้เอนไซม์	กระบวนการปรับสภาพและย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ
ต้นทุนในการผลิต (บาท/ลิตร)	23.31	25.14	64.81	11.36

ตารางที่ 26 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการผลิตทั้ง 4 แบบ

ขั้นตอนการผลิต	รูปแบบการผลิตที่ผ่านการย่อยด้วย	ข้อดี	ข้อเสีย
การปรับสภาพและย่อย	จุลินทรีย์ธรรมชาติบนเปลือก	- ไม่ต้องใช้สารเคมีในการย่อย	- ใช้ระยะเวลาในการย่อย
	จุลินทรีย์บนเปลือกร่วมกับบนขนมปัง	- ขั้นตอนการดำเนินการย่อยไม่ยุ่งยาก - ใช้อุณหภูมิห้องช่วยประหยัดพลังงาน	- ได้น้ำตาลรีดิวซ์น้อย
	เอนไซม์	- ใช้เวลาไม่นาน - ปฏิกริยามีความจำเพาะเจาะจง ทำให้ได้ผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ที่สูง	- เอนไซม์เก็บรักษายาก ซึ่งต้องแช่เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส - ราคาสูง - ใช้สารในการปรับความเป็นกรดต่างมาก
การหมัก	คลีนไมโครเวฟ	- ใช้เวลาน้อยที่สุด - ประหยัดพลังงาน - ไม่ต้องใช้สารเคมีในการย่อย	-
	จุลินทรีย์ธรรมชาติบนเปลือก	- ใช้ปริมาณยีสต์น้อย	- ระยะเวลาในการหมัก - อุณหภูมิสูงกว่าวิธีอื่น
	จุลินทรีย์บนเปลือกร่วมกับบนขนมปัง	- ใช้ปริมาณยีสต์น้อย	- ระยะเวลาในการหมัก
	เอนไซม์	-	- ใช้ยีสต์ปริมาณมาก - ใช้สารในการปรับพีเอชมาก
	คลีนไมโครเวฟ	- ใช้อุณหภูมิต่ำในการหมักช่วยประหยัดพลังงาน - ได้ปริมาณเอทานอลมาก	- ใช้ปริมาณยีสต์ค่อนข้างมาก

ตารางที่ 27 เปรียบเทียบผลผลิตเอทานอลที่ได้จากการใช้วัตถุดิบชนิดต่างๆ

วัตถุดิบ (วิธีการปรับสภาพและย่อย)	ผลผลิต (ลิตรต่อตัน)	อ้างอิง
เปลือกสับปะรด (จุลินทรีย์บนเปลือกสับปะรด)	710	งานวิจัยนี้
เปลือกสับปะรด (จุลินทรีย์บนเปลือกสับปะรดร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังเลยวันหมดอายุ)	610	
เปลือกสับปะรด (เอนไซม์)	99	
เปลือกสับปะรด (น้ำเปล่าและคลื่นไมโครเวฟ)	1,134	
เปลือกกล้วย (จุลินทรีย์บนเปลือกกล้วย)	480	สินินาฏ (2555) [18]
แกนข้าวโพด (เอนไซม์)	466	วรลักษณ์ (2556) [12]
แกนข้าวโพด (สารอินทรีย์และคลื่นไมโครเวฟ)	616	สินินาฏ (2557) [9]
เปลือกกล้วย (สารอินทรีย์และคลื่นไมโครเวฟ)	403	สินินาฏ (2555) [18]
อ้อย (สารอินทรีย์และเครื่องให้ความร้อน)	70	Suthamma (2007) [19]
มันสำปะหลัง (สารอินทรีย์และเครื่องให้ความร้อน)	160	
กากน้ำตาล (สารอินทรีย์และเครื่องให้ความร้อน)	240	

หลังจากได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหมักแล้ว จะนำผลผลิตส่วนของเหลวจากการหมักที่ได้ไปทำการเพิ่มความบริสุทธิ์ เพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 โดยจะทำการกลั่นโดยใช้เครื่องกลั่นแบบ Packed-Column ที่มีความสูง 50 เซนติเมตร กลั่นไอน้ำผ่าน Molecular sieve ชนิด 4A บรรจุ Packing ขนาด 0.5 นิ้ว ใช้อุณหภูมิในการกลั่น 85 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ เพื่อหาระยะเวลาในการกลั่นเอทานอลให้บริสุทธิ์ร้อยละ 95 ปริมาณ 1 ลิตร พบว่า ใช้ระยะเวลาในการกลั่นประมาณ 30 นาที ที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการประมาณการค่าไฟฟ้าสำหรับการกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์

การเปรียบเทียบผลผลิตที่ได้และต้นทุนในการผลิตเอทานอลทั้ง 4 วิธี แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 21 - 26 พบว่าการปรับสภาพและย่อยโดยใช้คลื่นไมโครเวฟและหมักด้วยยีสต์ขนมปัง ให้ผลผลิตที่มากที่สุด 1,134 ลิตรต่อตัน มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 11.36 บาทต่อลิตร รองลงมาคือการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ตามธรรมชาติที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับปะรด คือ 710.71 ลิตรต่อตัน และใช้ต้นทุนในการผลิต 23.31 บาทต่อลิตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าการปรับสภาพและย่อยโดยใช้เอนไซม์ คือ 64.81 บาทต่อลิตร และการใช้เอนไซม์ยังให้ผลผลิตเอทานอลที่น้อยกว่า คือ 98.68 ลิตรต่อตัน โดยสามารถสรุปได้ว่า ควรเลือกใช้การปรับสภาพและย่อยโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เพราะได้ผลผลิตเอทานอลที่สูง และต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ และจากตารางที่ 27 จะเห็นได้ว่าวัตถุดิบเปลือกสับปะรดมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเอทานอล เนื่องจากสามารถให้ผลได้เอทานอลมากกว่าวัตถุดิบอื่นๆ

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกสับปะรด

สามารถสรุปได้ว่า เปลือกสับปะรดมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate) ซึ่งรวมเส้นใยอยู่ด้วย คิดเป็นร้อยละ 84.51 (เมื่อคำนวณด้วยฐานแห้ง) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในการเป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตเอทานอล และองค์ประกอบอื่นที่ เช่น เถ้า จะเป็นอุปสรรคสำหรับการย่อยเพื่อผลิตน้ำตาลมีอยู่ปริมาณน้อย

1.2 การปรับสภาพและย่อย

1.2.1 การปรับสภาพและย่อยโดยการใช้จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติบนเปลือกสับปะรด

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับปะรด คือ ใช้ปริมาณเปลือกสับปะรด 141 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร เป็นระยะเวลา 5 วัน จะได้น้ำตาลรีดิวซ์ 0.58 กรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 135.43 กรัมต่อลิตร

1.2.2 การปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติบนเปลือกสับปะรดร่วมกับจุลินทรีย์บนขนมปังที่เลยวันหมดอายุ

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยโดยใช้ขนมปังที่หมดอายุแล้ว คือ ใช้ขนมปังที่หมดอายุแล้ว 5 วัน อัตราส่วนขนมปังต่อเปลือกสับปะรด 1:3 ปริมาณขนมปังผสมเปลือกสับปะรด 153 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร ใช้ระยะเวลาในการย่อย 1 วัน จะได้น้ำตาลรีดิวซ์ 2.07 กรัมต่อลิตร และน้ำตาลทั้งหมด 389.33 กรัมต่อลิตร

1.2.3 การปรับสภาพและย่อยโดยใช้เอนไซม์

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยโดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส คือ ใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส 188 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด ปริมาณเปลือกสับปะรด 160 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร พีเอช 5.5 ความเข้มข้นอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 27.37 กรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 630.56 กรัมต่อลิตร และย่อยต่อด้วยเอนไซม์กลูโคสอะไมเลส 120 U ต่อกรัมเปลือกสับปะรด พีเอช 3.5 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 48.16 กรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 549.35 กรัมต่อลิตร

1.2.4 การปรับสภาพพร้อมการย่อยด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเปลือกสับปะรดด้วยน้ำเปล่าโดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ คือ ปริมาณเปลือกสับปะรด 132 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ และเวลาในการปรับสภาพ 12 นาที สามารถให้ผลผลิตปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ 13.18 กรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 276.35 กรัมต่อลิตร

1.3 การหมัก

1.3.1 การหมักผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยโดยการใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติบนเปลือกสับปะรด

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับปะรด และหมักโดยใช้ยีสต์ขนมปัง คือ ใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พีเอช 4.5 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 8 วัน จะได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 5.38 โดยปริมาตร

1.3.2 การหมักผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ธรรมชาติบนเปลือกสับประรดร่วมกับ จุลินทรีย์บนขนมปังที่เลยวันหมดอายุ

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยโดยใช้ขนมปังที่หมดอายุแล้ว 1-7 วัน และหมักโดยใช้ยีสต์ ขนมปัง คือ ใช้ปริมาณยีสต์ขนมปังร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พีเอช 6.4 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 8 วัน จะได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 4.07 โดยปริมาตร

1.3.3 การหมักผลผลิตหลังการปรับสภาพและย่อยโดยใช้เอนไซม์

สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพและย่อยโดยใช้เอนไซม์ และหมักโดยใช้ยีสต์ขนมปัง คือ ใช้ปริมาณ ยีสต์ขนมปังร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก พีเอช 5.5 อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน จะได้ ปริมาณเอทานอลร้อยละ 1.10 โดยปริมาตร

1.3.4 การหมักผลผลิตหลังผ่านการปรับสภาพและย่อยเปลือกสับประรดด้วยคลื่นไมโครเวฟ

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

1.4 การผลิตแผ่นเยื่อ

แผ่นเยื่อโซดาที่ไม่ใส่สารเติมสามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทนกระดาษสาได้ เนื่องจากมีความ ด้านทานแรงดึงใกล้เคียงกัน และหากต้องการพัฒนาเป็น กระดาษห่อพัสดุ กระดาษห่อของขวัญ และ กระดาษพิมพ์เขียน ต้องใส่สารเติมเพิ่มความต้านทานแรงดึง

1.5 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย และการประมาณต้นทุนการผลิตเอทานอล

จากการประเมินต้นทุนเบื้องต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1.5.1 การปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์ตามธรรมชาติที่มีอยู่แล้วบนเปลือกสับประรด และหมักด้วย ยีสต์ขนมปัง (Baker's Yeast) สามารถผลิตเอทานอลได้มากที่สุด 710.71 ลิตรต่อตัน มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 23.31 บาทต่อลิตร

1.5.2 การปรับสภาพและย่อยโดยใช้จุลินทรีย์จากขนมปังที่เลยวันหมดอายุ และหมักด้วยยีสต์ขนมปัง (Baker's Yeast) ได้ผลผลิตเอทานอลมากที่สุด 609.76 ลิตรต่อตัน มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 25.14 บาทต่อลิตร

1.5.3 การปรับสภาพด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ย่อยด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส และหมักโดยใช้ยีสต์ ขนมปัง (Baker's Yeast) ให้ผลผลิตเอทานอลมากที่สุด 98.68 ลิตรต่อตัน มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 64.81 บาทต่อ ลิตร

1.5.4 การหมักเปลือกสับประรดด้วยการใช้ยีสต์ขนมปังที่ผ่านการปรับสภาพและย่อยด้วยน้ำเปล่าให้ ผลผลิตเอทานอลได้มากที่สุด 1,134 ลิตรต่อตัน มีค่าใช้จ่ายในการผลิต 11.36 บาทต่อลิตร

วิธีที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับประรดด้วยกระบวนการตามงานวิจัยนี้คือ การใช้วิธีการ ปรับสภาพและการย่อยด้วยน้ำเปล่าพร้อมการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และหมักด้วยยีสต์ขนมปัง เนื่องจากให้ปริมาณผลผลิตเอทานอลที่สูง ค่าใช้จ่ายต่ำ เพิ่มมูลค่าให้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร สามารถสร้าง ทางเลือกใหม่ในการผลิตเอทานอลด้วยเทคโนโลยีแบบพึ่งตนเองได้อย่างคุ้มค่า มีต้นทุนการผลิตต่ำ ปลอดภัยต่อ ผู้ผลิต เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีการใช้กรด-ด่าง ไม่เกิดของเสียในกระบวนการ และมีความเป็นไปได้ ในเชิงพาณิชย์ เหมาะต่อการผลิตระดับอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการปรับสภาพและย่อยด้วย จุลินทรีย์ธรรมชาติบนเปลือกสับประรดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการผลิตระดับชุมชน เนื่องจากดำเนินการ

ผลิตง่าย แม้จะมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าในขั้นตอนการหมักมากกว่าวิธีไมโครเวฟ แต่หากดำเนินการผลิตด้วยปริมาณมากขึ้นจะสามารถลดค่าใช้จ่ายต่อหน่วยผลผลิตเอทานอลได้

2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

2.1 การปรับสภาพและย่อยโดยใช้เอนไซม์ ควรศึกษาการเจือจางปริมาณผลผลิตน้ำตาลก่อนที่จะนำไปหมักเป็นเอทานอล

2.2 ศึกษาการนำต่าง-กรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ มาใช้ในขั้นตอนการปรับสภาพและย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อช่วยในการเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

2.3 ศึกษาการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบชนิดอื่นๆ

2.4 ศึกษาการใช้ยีสต์ชนิดอื่น หรือทำการแยกหรือต่อเชื้อยีสต์เอง

2.5 ศึกษาวิธีการหมักแบบกึ่งกะ (Semi-bath) ซึ่งอาจจะให้ผลผลิต และผลได้ที่ดีขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] ศิริพงษ์ เปรมจิต บุญพริก ภูมิรา และ วงพร เปรมจิต (2550) “การผลิตเอทานอลโดยใช้ปอสา (Paper Mulberry) เป็นวัสดุหมักด้วยกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง (SSF)” การประชุมเชิงวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3 ปี 2550
- [2] Gaspar, M., Kalman, G. and Reczey, K. (2007) “Corn fiber as a raw material for hemicellulose and ethanol production” *Process Biotechnology* 2007; 42: 1135-1139
- [3] ระวีวรรณ แก้วเกล้า (2537) “การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2537 สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] ยุทธศักดิ์ สุขการี “สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากเส้นใยปาล์มโดยใช้วิธี Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF)” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2551 สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [5] เกศมณี ตาดทอง ชนิษฐา สุกุลวา นฤมล เป้นอินทร์ และวีรยา คำภา (2545) “การผลิตเอทานอลจากเปลือกสับปะรด” 2545 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏนครสวรรค์ (Available online: <http://tdc.thailis.or.th/tdc/browse.php?option=show...>, 5/5/10)
- [6] Sorahi, A., Keikhosro, K., Morteza, K. and Mohammad, J. T. (2009) “Ethanol production by mucor indicus and Rhizopus oryzae from ricestraw by separate hydrolysis and fermentation” *Biomass and Bioenergy* 2009; 33: 828-833
- [7] ธนาคารแห่งประเทศไทย (2553) “การผลิตสับปะรดกระป๋อง” รายงานอุตสาหกรรม เดือนกรกฎาคม 2553 ของหน่วยวิจัยธนาคารกรุงเทพ (Available online: <http://bangkokbank.com>, 2/7/54)
- [8] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2554) “ผลผลิตสับปะรด” (Available online: <http://agri.dit.go.th>, 6/9/54).
- [9] สีนินาฏ จงคง (2557) รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การปรับปรุงและย่อยแกนข้าวโพดด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อการผลิตเอทานอล” ทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย (ทุนดุษฎีจารย์) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2555 รหัสโครงการ ENG550365S
- [10] กัญญ์สิรี จุฑามณี และวีรยุทธ ศรีสุข (2548) “การผลิตกระดาศจากเส้นใยตาลโตนด” วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2548
- [11] AOAC 1990 in *Official Methods of Analysis*. The Association of Official Analytical Chemists. 15th, Virginia, Arlington (1990).
- [12] วรลักษณ์ คงจินตามณี (2556) “การผลิตเอทานอลจากแกนข้าวโพด” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2556
- [13] สีนินาฏ จงคง (2555) รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การผลิตเอทานอลจากเมล็ดขนุน” ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2553-2554 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

- [14] สนิทนาฏ จงคง (2555) รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การผลิตเยื่อกระดาษจากเปลือกกล้วยสดและจากผลผลิตของแข็งเหลือทิ้งหลังกระบวนการหมักเอทานอลจากเปลือกกล้วยสด” ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2555 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [15] M.J. Feria, J.C. Garcia, M.J. Diaz and L. Lopez. (2012). Optimization the soda-AQ process for cellulose pulp production and energy content of black liquor from *L. leucocephala* K360. *Bioresource Technology*, 120: 173-179.
- [16] F. Feehi, S. Das, Y. Moussaoui, E. Elaloui and J.G. Yanez. (2014). Paper for *Stipagrostis pungens*. *Industrial Crops and Products*, 59: 109-114.
- [17] M. Danila, D. Carvalho, A. Perez, J.C. Glacia, J.L. Colodette, F. Lopez and M.J. Diaz. (2014). Ethanol-soda pulping of sugarcane bagasse and straw. *Cellulose Chemistry and Technology*, 48 (3-4): 355-364.
- [18] สนิทนาฏ จงคง (2555) รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การประยุกต์ใช้ภูมิปัญญาชาวบ้านเพื่อการผลิตเอทานอลจากเปลือกกล้วย” ทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2555 รหัสโครงการ ENG550105S
- [19] S. Yoosin, C. Sorapipatana. (2007). A Study of Ethanol Production Cost for Gasoline Substitution in Thailand and Its Competitiveness. *J. Sci. Tech. Res.*, 12: 69-79.

ภาคผนวก

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 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น สารละลายจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองส้มใส

1.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคสเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในสารตัวอย่าง

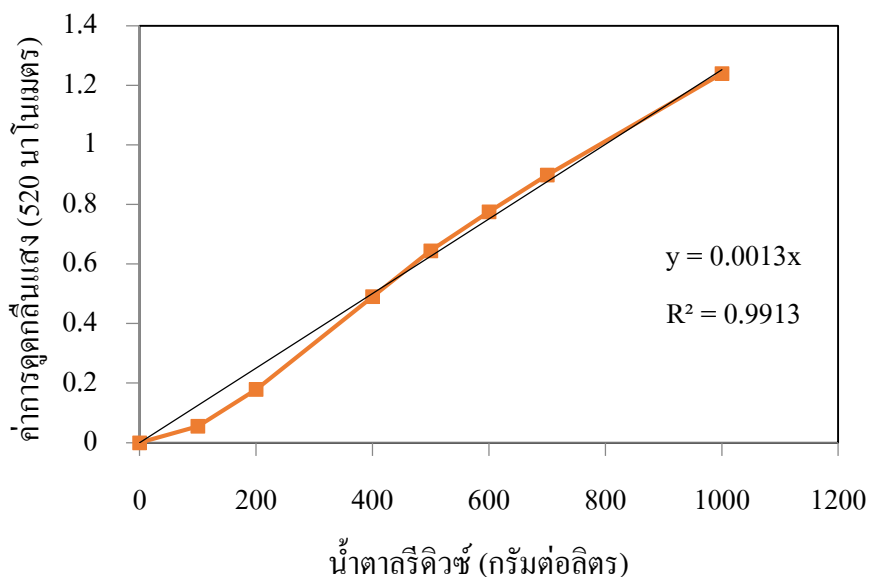
1.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกลูโคส

(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 โดยปิเปต 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 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 ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

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 จากนั้นปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 10 มิลลิลิตร

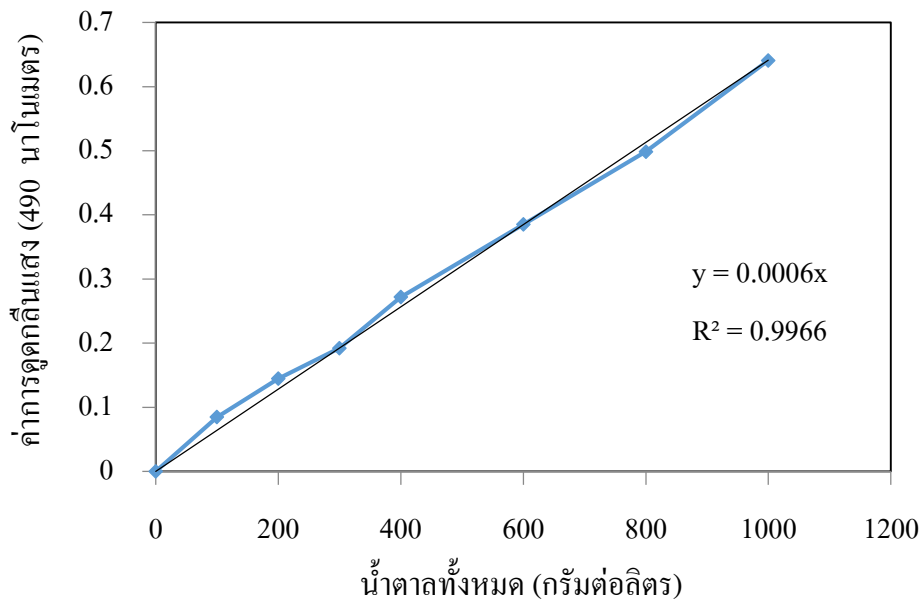
2.2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์สารละลายกลูโคสเพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

- (1) ปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูโคสความเข้มข้นต่างๆ ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง
- (2) ปิเปตสารละลาย 5 เปอร์เซ็นต์ฟีนอล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เขย่าให้เข้ากัน
- (3) ปิเปตสารละลาย 98 เปอร์เซ็นต์กรดซัลฟูริก 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เขย่าให้เข้ากัน
- (4) นำสารตัวอย่างไปให้ความร้อนด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30

นาที

- (5) นำสารตัวอย่างแช่ในน้ำแข็งประมาณ 5 นาที

(6) นำสารตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV 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 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที
- (5) นำสารตัวอย่างแช่ในน้ำแข็งประมาณ 5 นาที

(6) นำสารตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV ที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

3. การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการหมัก

3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้

- (1) 99.9 เปอร์เซ็นต์ เอทานอล
- (2) เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography, GC)

3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเอทานอล

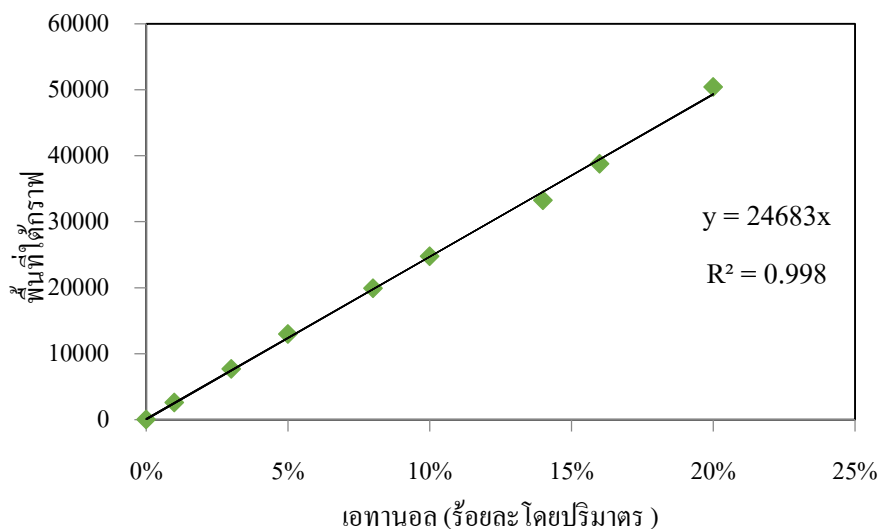
เตรียมสารละลายมาตรฐานเอทานอลความเข้มข้น 0, 1, 3, 5, 8, 10, 14, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตรต่อปริมาตร) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปิเปต 99.9 เปอร์เซ็นต์ เอทานอล ปริมาณ 1, 3, 5, 8, 10, 14, 16, และ 20 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

3.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายเอทานอลเพื่อใช้วิเคราะห์หาความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของเอทานอล

นำสารละลายมาตรฐานเอทานอลความเข้มข้นต่างๆไปตรวจวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ที่สภาวะดังตารางที่ ก-1 จากนั้นนำค่าพื้นที่ใต้พีค ที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ ก-3

ตารางที่ ก-1 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลอง

Unit	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

เอกสารแนบ

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

1) บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Advanced Materials Research, Vols. 941-944 (2014) pp. 1060-1064

2) บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Advanced Materials Research, Vols. 941-944 (2014) pp. 1056-1059

3) ภาพประกอบหลักฐานการถ่ายทอดเทคโนโลยีในงาน สัปดาห์วิทยาศาสตร์ ประจำปี 2557 โดยผู้วิจัยได้จัดการอบรมและแข่งขันการตอบปัญหาเกี่ยวกับพลังงานเอทานอล โดยได้ทำการให้ความรู้แก่นักเรียน ครูอาจารย์ และผู้สนใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตเอทานอล

Optimizing Clarification of Pineapple peel

Ugsornphak Tengrang^{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

^augsornphak_ja@hotmail.com, ^bcsininart@yahoo.com

Keywords: Pineapple peels, Alpha-amylase, Clarification, Enzymatic hydrolysis

Abstract. Alpha-amylase is a potentially useful enzyme for the pretreatment and pre-hydrolysis (clarification) of pineapple peel. The clarified products contain sufficient glucose content for ethanol fermentation. The influences of quantity of the peel to water (10-16 %w: weight of peel to weight of water), alpha-amylase amount (100-240 U/g: U of amylase to g of peel), pH value (5.5-7.0), temperature (70-100°C) and time (60-240 min) were investigated by RSM (Response surface methodology). To obtain 31.8 g/L of the highest glucose concentration, the clarification is to be performed by 16 %w peel to water, 188 U amylase/g, 5.5 pH at 70°C for 240 min.

Introduction

An interesting alternative energy source from biomass is ethanol [1,2], because its properties are similar to those of benzene fuels. The production cost of ethanol can be reduced with low-cost feedstocks that are agricultural products or residues (e.g. corncob, banana peel and pineapple peel) [3,4]

Alpha-amylase enzyme is widely employed in many industries which aim to hydrolyze a starchy biomass. The agricultural residues, as raw materials for the ethanol production, are mainly composed of cellulose and starch that can be effectively hydrolyzed into reducing sugars for fermentation by enzymes namely alpha-amylase and gluco-amylase [5]

Clarification process is the pretreatment and pre-hydrolysis before fermentation for the ethanol production that is studied in this research. We are intended to consider the optimal condition (quantity of peel to water, enzyme amount, pH value, temperature and time) for clarification process of the pineapple peel (an agricultural residue) by using RSM.

Materials and Chemicals

Pineapple peels from *Phu Lea* pineapple, Phuket species, that is cultivated in Nang Lea district, Chiang Rai province. The nutritive values per 100 g of the peel are 84.5 g total carbohydrate, 9.4 g protein, 5.6 g ash and 0.5 g crude fat on a dry basis. This peel was obtained from a fresh fruit shop in Hat Yai district, Songkhla province, Thailand.

Alpha-amylase from *Aspergillus oryzae* (30 U/mg) was purchased from S.M. CHEMICAL SUPPLIES CO.LTD. (Catalog# 10065-10G).

Ammonia solution (25%v) used for adjusting the pH of the studied mixture and DNS (3,5-dinitrosalicylic acid) used for analyzing the reducing sugar of the clarification products were purchased from C.E.G. Science & Service Limited Partnership.

Pretreatment and Clarification

The pineapple peel was firstly cut to small pieces and then crushed to a size of 2-3 mm. The crushed peel in clean water was clarified using the alpha-amylase enzyme under various conditions in 250 mL screw-capped bottles, which were immersed into an oil bath for controlling a temperature. The investigating variables for the clarification were 10-16 %w of peel to water, 100-240 U/g of alpha-amylase amount (U of amylase to g of peel), and 5.5-7.0 of initial pH by ammonia solution buffer, 70-100°C of temperature and 60-240 min of time. After the investigation in each condition, the

clear liquid in the clarified products was obtained from filtering through fabric, and then the glucose (reducing sugar) concentration in the liquid product was analyzed by UV-Vis spectrophotometer.

Analytical Method

DNS method [6] was used to determine the glucose concentration in the clarified products on spectrophotometer (model HP 8453 with UV-Visible ChemStation software) at $\lambda = 520$ nm. A previous calibration was applied for determining the glucose concentration.

Experimental design and Optimization

An optimal variable level was determined using central composite design (CCD) for the clarification process. Independent variables, that were investigated, were %w of peel to water (X_1 , g/g), alpha-amylase amount (X_2 , U/g), initial pH (X_3), temperature (X_4 , °C), and time (X_5 , min). A dependent output variable was glucose concentration in the product (Y , g/L). From Table 1, 29 experiments were carried out to optimize the variables level for an optimal condition of the clarification process.

Result and Discussion

Optimization of the five variables

Table 1 CCD experiment conditions and glucose concentration results from experiment and RSM prediction

Run no.	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Experimental	Predicted
						glucose concentration [g/L]	
1	16	170	6.3	85	150	22.0	21.9
2	12	205	6.6	93	105	9.6	10.4
3	13	170	7.0	85	150	12.8	10.7
4	15	135	6.6	93	105	11.4	11.9
5	13	170	6.3	85	150	17.4	14.4
6	13	100	6.3	85	150	9.6	9.4
7	13	170	5.5	85	150	15.1	16.2
8	12	205	6.6	78	195	10.6	11.4
9	15	135	5.9	93	195	20.0	19.6
10	15	205	5.9	93	105	15.6	15.4
11	12	135	5.9	78	195	14.8	14.7
12	13	170	6.3	100	150	12.1	11.7
13	15	205	5.9	78	195	21.9	21.7
14	13	170	6.3	85	60	17.5	16.8
15	13	240	6.3	85	150	12.1	11.3
16	12	135	6.6	78	105	14.1	14.8
17	15	205	6.6	93	195	12.7	13.2
18	12	135	6.6	93	195	8.4	9.0
19	15	205	6.6	78	105	21.0	21.7
20	13	170	6.3	85	150	12.3	14.4
21	15	135	5.9	78	105	19.2	19.0
22	13	170	6.3	85	240	16.8	16.5
23	15	135	6.6	78	195	12.7	13.2
24	12	135	5.9	93	105	10.5	10.4
25	13	170	6.3	70	150	19.0	18.4
26	10	170	6.3	85	150	13.2	12.3
27	12	205	5.9	93	195	13.2	13.1
28	12	205	5.9	78	105	13.4	13.5
29	13	170	6.3	85	150	12.4	14.4

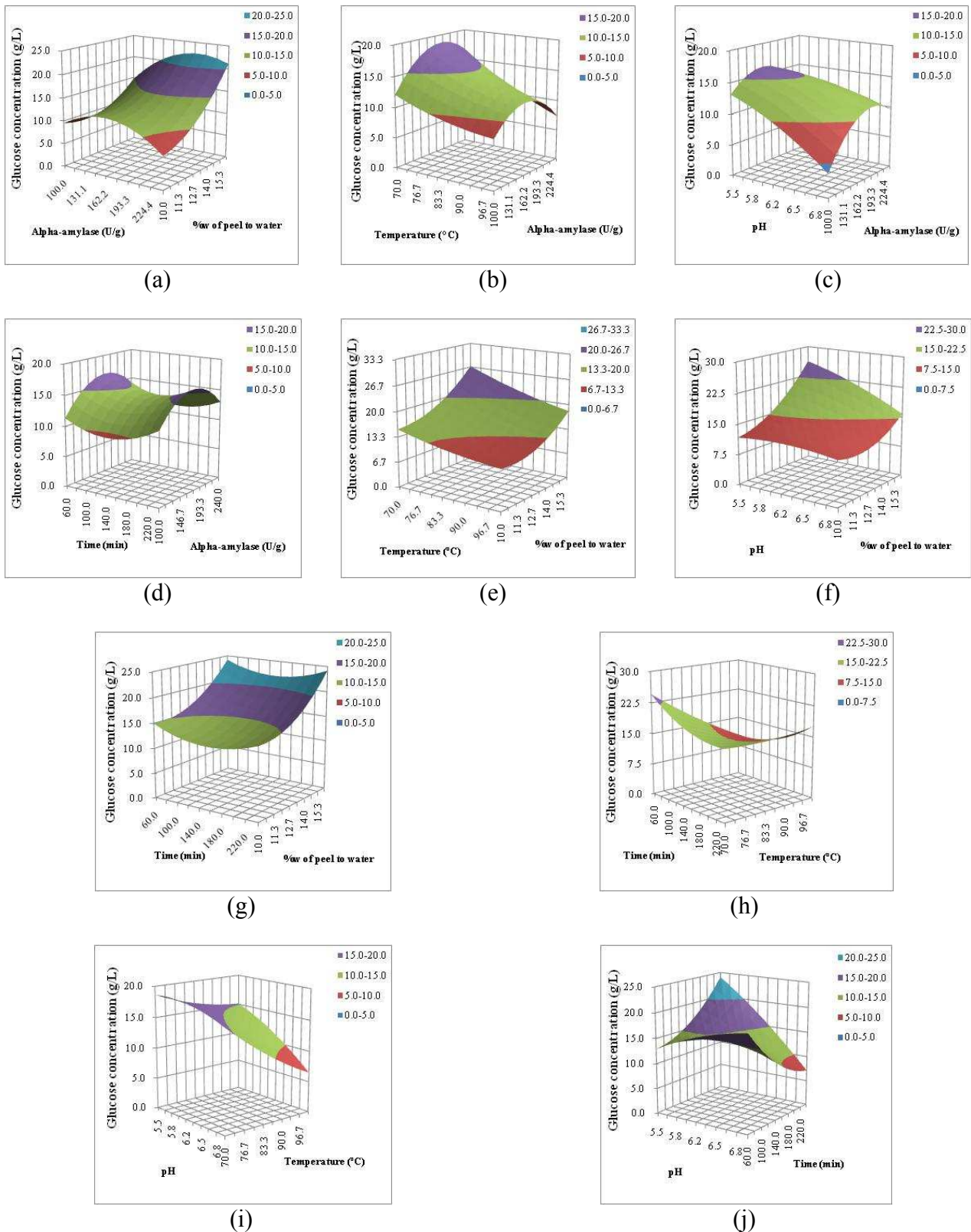


Fig. 1 Response surface plots of (a) %w of peel to water and alpha-amylase amount; (b) temperature and alpha-amylase amount; (c) pH and alpha-amylase amount; (d) time and alpha-amylase amount; (e) temperature and %w of peel to water; (f) pH and %w of peel to water; (g) time and %w of peel to water; (h) time and temperature; (i) pH and temperature; (j) pH and time.

The effects of %w of peel to water, temperature, amylase amount, time and initial pH on glucose concentration in the clarified products can be utilized to generate response surfaces which can be fitted with Eq. 1.

$$Y = -160.21 + 35.41X_1 + 0.04391X_2 + 48.94X_3 + 0.211X_4 + 0.213X_5 + 3047.1X_1^2 - 0.00082X_2^2 - 1.614X_3^2 + 0.0031X_4^2 + 0.00028X_5^2 + 1.06X_1X_2 - 107.78X_1X_3 - 2.167X_1X_4 + 0.0648X_1X_5 + 0.03667X_2X_3 - 0.00126X_2X_4 - 0.000076X_2X_5 - 0.140X_3X_4 - 0.08481X_3X_5 + 0.00276X_4X_5 \quad (1)$$

From Eq. 1, the variable coefficients of X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , and X_5 point the priority of the variables. These are more than those of the interaction coefficients of X_1X_2 , X_1X_3 , X_1X_4 , X_1X_5 , X_2X_3 , X_2X_4 , X_2X_5 , X_3X_4 , X_3X_5 and X_4X_5 , and those of X_1^2 , X_2^2 , X_3^2 , X_4^2 and X_5^2 which are a linear relationships rather than curves.

In Table 1, the experimental values of glucose concentration conform with the RSM predicted values that the regression equation shows the determination coefficient (R^2) = 0.929.

The interaction effects of %w of peel to water and alpha-amylase amount

The investigation of the effect of %w of peel to water (or starch concentration) and alpha-amylase amount on clarification process, experiments were carried out at %w of peel to water ranging from 10 to 16 and quantities of amylase ranging from 100 to 240 U/g for 150 min with an initial pH of 6.3 at a temperature of 85°C. For all %w of peel to water the glucose concentration in the clarified product was increased with increasing amount of peel. The optimum conversion was achieved with alpha-amylase amount ranging from 140-240 U/g at %w of peel to water the ranging from 15 to 16 (Fig. 1(a)).

The interaction effects of temperature and alpha-amylase amount

Fig. 1(b) shows the effect of temperature and alpha-amylase amount on glucose concentration. The clarification experiments were performed at various temperatures in the range of 70-100°C and amylase amount of 100-240 U/g for 150 min at a 13 %w of peel to water with a pH 6.3. It was found that there was no improvement of glucose concentration with increasing temperature. Similarly, further increase of enzyme amount more than 210 U/g did not increase the concentration of glucose. The fair optimum temperature and enzyme amount were given as in the range of 70-80°C and 130-240 U/g, respectively.

The interaction effects of pH value and alpha-amylase amount

In order to study the effect of initial pH and amylase amount on the clarification process, the pH used in this process was varied at 5.5, 5.9, 6.3, 6.6 and 7.0 as the amylase amount was varied at 100, 135, 170, 205, and 240 U/g for 150 min with a 13 %w of peel to water at 85°C. The results indicated that the conversion rate were reduced rapidly with increasing pH value. In contrast, the raising of glucose concentration would be obtained with increasing amylase amount (Fig. 1(c)). To get an optimum glucose concentration the clarification should be operated at a pH in the range of 5.5-6.2 and an amount of amylase in the range of 100-208 U/g.

The interaction effects of time and alpha-amylase amount

Fig. 1(d) shows the effects of time (60-240 min) and alpha-amylase amount (100-240 U/g) on the clarification process at 85°C with a 13 %w of peel to water and a pH of 6.3. The results implied that the clarification should be not carried out for a time in the range of 85-140 min. However, it should be carried out with an amount of amylase in the range of 120-225 U/g to achieve a high concentration of glucose.

The interaction effects of temperature and %w of peel to water

The clarification was investigated at various temperatures ranging from 70-100°C and %w of peel to water ranging from 10 to 16 for 150 min using an amylase amount of 170 U/g and a pH of 6.3. It can be seen in Fig. 1(e) that the glucose concentration was raised when the %w of peel to water was increased. But temperature was to be decreased. To reach the maximum content, this process may be operated at 70°C with a 16 %w of peel to water.

The interaction effects of pH and %w of peel to water

Glucose concentration of the clarification process in relation with initial pH value and %w of peel to water is shown in Fig. 1(f). The optimum conversion was achieved with the pH value in the range of 5.5-6.5 and %w of peel to water in the range of 15-16 for 150 min at 85°C and an amylase amount of 170 U/g. In addition, the results indicated that further increase of pH value (> 6.5) did not increase the concentration of glucose.

The interaction effects of time and %w of peel to water

Fig.1(g) shows the effects of time and %w of peel to water on glucose concentration at 170 U amylase/g, 6.3 pH value and 85°C. The formation of glucose was increased when quantity of peel to water was increase. However, the increase of time did not increase the concentration of glucose.

The interaction effects of time and temperature

The glucose concentration in relation with time and temperature at 13 %w of peel to water, 170 U amylase/g and 6.3 pH is show in Fig. 1(h). The optimum concentration of glucose may be gotten at a mild operating condition (70°C for 60 min).

The interaction effects of pH and temperature

Fig. 1(i) shows the effects of pH value and temperature on glucose concentration at 13 %w of peel to water, 170 U amylase/g for 150 min. The formation of sugar content would be increased when pH and temperature were reduced. This alpha-amylase enzyme could be active with relatively acidic condition (pH~5.5).

The interaction effects of pH and time

Effects of pH value and time on glucose concentration are shown in Fig. 1(j) at 13 %w of peel to water, 170 U amylase/g and 85°C. The pre-hydrolysis yield was increased with an increase in time. But the yield was decreased when the pH value was increased. The clarification should be operated with a pH in the range of 5.5-5.8 for a time in the range of 200-240 min.

Summary

The clarification process for the ethanol production from pineapple peel before saccharification and fermentation processes was optimized by RSM to determine an optimal condition. From the investigation of the 5 important variables (%w of peel to water, alpha-amylase amount, pH value, temperature and time), the highest glucose concentration in the clarified product, which is obtained from the experiment using 16 %w of peel to water, 188 U/g amylase amount, 5.5 pH value at 70°C for 240 min, is 31.8 g/L. This glucose result demonstrates that the clarification pretreatment and pre-hydrolysis, of starch in the peel with alpha-amylase is sufficient for the ethanol fermentation that may not have to go through the saccharification with gluco-amylase.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support from the NRCT (National Research Council of Thailand) 2014, Contract No. ENG5701035, Prince of Songkla University.

References

- [1] M. Balata, H. Balat, C. Oz, Progress in bioethanol processing, Prog. Energy Combust. Sci. 34 (2008) 551-573.
- [2] E. Gnansounou, Production and use of lignocellulosic bioethanol in Europe: Current situation and perspectives, Bioresour. Technol. 101 (2010) 4842-4850.
- [3] J.S. Oscar and A.C. Carlos, Trends in biotechno- logical production of fuel ethanol from different feed- stocks, Bioresour. Technol. 99 (2008) 5270-5295.
- [4] C.E. Wyman, Twenty Year of Trials, Tribulation, and Research Progress in Bioethanol Technology, Appl. Biochem. Biotechnol. 91-93 (2001) 5-21.
- [5] C.N. Hamelinck, G.V. Hooijdonk, A.P.C. Faaij, Ethanol from lignocellulosic bio-mass: techno economic performance in short-, middle-, and long-term, Biomass Bioenerg. 28 (2005) 384-410.
- [6] G.L. Miller, Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar, Anal. Chem. 31 (1959) 426-428

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.

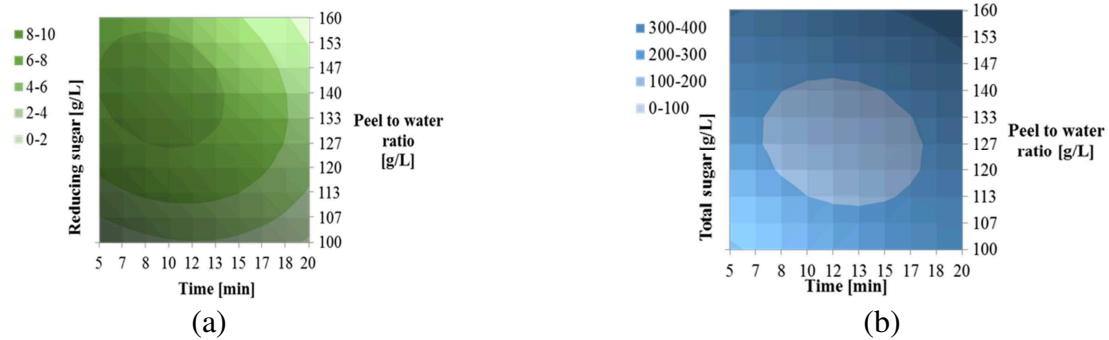


Fig. 1 Contour plots of peel water ratio and time on (a) reducing sugar content and (b) total sugar content at 495 watt.

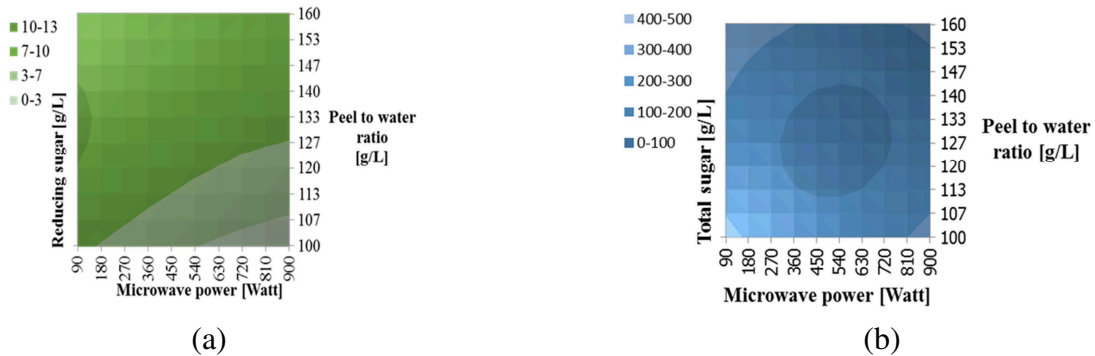


Fig. 2 Contour plots of peel water ratio and microwave power on (a) reducing sugar content and (b) total sugar content for 11 min.

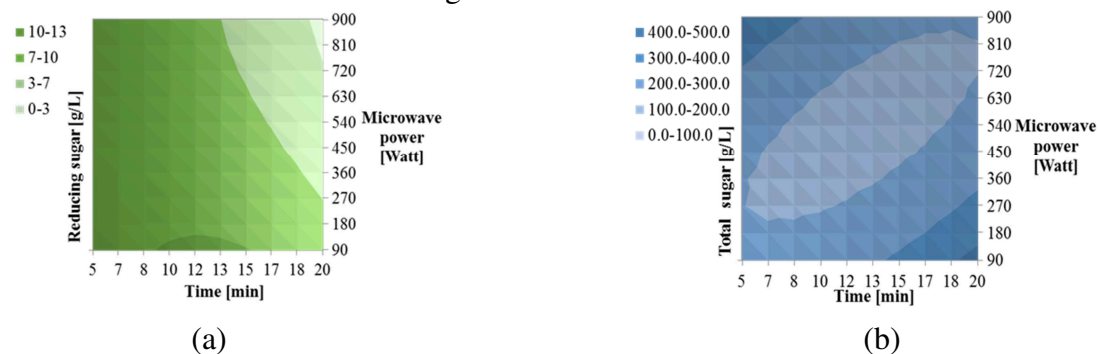


Fig. 3 Contour plots of microwave power and time on (a) reducing sugar content and (b) total sugar content at 130 g/L of peel to water ratio.

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. ENG5701035, 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.

ภาพประกอบแสดงการถ่ายทอดเทคโนโลยี
“การอบรมและแข่งขันการตอบคำถามทางด้านการผลิตพลังงานเอทานอล”
ในงานสัปดาห์วิทยาศาสตร์ ปี 2557





