

การหมักไบโอเอทานอลของน้ำหวานของต้นจากด้วยยีสต์ขนมปัง Bioethanol Fermentation of Nipa Sap with Baker's Yeast

กนกกานต์ ศรีนุ่น* สนิทาญ จงคง และ ศิรินันท์ พ่วงทิ
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่
Email : sri.kanokkan@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอเอทานอลจากน้ำหวานสดจากต้นจากโดยใช้ยีสต์ขนมปัง ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ มีองค์ประกอบของน้ำตาล แร่ธาตุ และสารอาหาร ที่เหมาะสมต่อการหมักเอทานอลโดยไม่ต้องมีการเติมสารอาหารเพิ่ม เริ่มศึกษาด้วยการปรับสภาพน้ำหวานจาก โดยปรับค่าพีเอชเป็น 4.9 ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 54 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที ก่อนหมัก แล้วจึงออกแบบการทดลอง และหาสภาวะการหมักที่เหมาะสมด้วย Response Surface Methodology (RSM) ตัวแปรสำคัญที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้น (ร้อยละ 10 - 30 โดยน้ำหนัก) ค่าพีเอชเริ่มต้น (4.5 - 6.5) ปริมาณยีสต์ (0.01 - 1 กรัม ต่อสารละลายน้ำหวาน 100 กรัม) อุณหภูมิ (28 - 40 องศาเซลเซียส) และเวลา (10 - 144 ชั่วโมง) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ น้ำตาล ทั้งหมดเริ่มต้นที่ร้อยละ 21.5 โดยน้ำหนัก พีเอชเป็น 6.2 เติมยีสต์ 0.9 กรัม อุณหภูมิ 35.6 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 77 ชั่วโมง ซึ่งให้ผลผลิตที่มีความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 82.4 กรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของ ผลได้ของเอทานอลคือ 99.5

คำสำคัญ:

น้ำหวานจาก ไบโอเอทานอล การหมัก ยีสต์ขนมปัง

Abstract

Bioethanol production from nipa sap with baker's yeast was studied in this work. Nipa sap is a source of sugars, minerals and nutrients which is suitable as a raw material for the ethanol fermentation without nutrient supplementation. The sap was firstly pretreated with pH 4.9 at 54 °C for 25 min before fermentation. Response Surface Methodology (RSM) was employed to design experimental conditions of the fermentation and to optimize the conditions. The

important variables investigated were initial total sugar concentration (10 – 30 wt%), initial pH (4.5 – 6.5), yeast amount (0.01 – 1 g), temperature (28 – 40 °C) and time (10 – 144 hours). An optimal condition achieved 82.4 g/L ethanol concentration with 99.5 ethanol yield was using 21.5 wt% initial total sugar with pH 6.2 and 0.9 g yeast at 35.6 °C for 77 hours.

Keywords:

nipa sap, bioethanol, fermentation, baker's yeast

1. คำนำ

ไบโอเอทานอล คือ เชื้อเพลิงเหลวที่ได้รับความนิยมทั่วโลก เนื่องจากมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันเบนซิน (แก๊สโซลีน) ซึ่งสามารถนำเอทานอลมาใช้ผสมหรือใช้ทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมเบนซินได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังเป็นพลังงานสะอาด สามารถช่วยลดปัญหามลภาวะทางอากาศ และช่วยสร้างความยั่งยืนทางเศรษฐกิจ โดยเฉพาะด้านภาคการเกษตรและภาคการขนส่ง ปัจจุบันสหรัฐอเมริกาและบราซิลเป็นทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค เอทานอลรายใหญ่ที่สุดของโลก ขณะที่ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตอันดับที่ 9 และเป็นผู้บริโภคอันดับที่ 11 ของโลก [1] ไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีวัตถุดิบที่เอื้อต่อการผลิตเอทานอล เช่น อ้อย กากน้ำตาล และมันสำปะหลัง แต่พบว่าต้นทุนการผลิตเอทานอลของไทยยังสูง เนื่องจากราคาวัตถุดิบสูง และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิตสูง อีกทั้งอ้อยและมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบเพื่อการบริโภค และสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่มีความจำเป็นได้มากมาย ดังนั้นแนวทางในการแก้ไขปัญหาราคาวัตถุดิบที่สูง คือ ต้องมองหาวัตถุดิบอื่นเพิ่มเติมที่มีศักยภาพเพียงพอต่อการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตเอทานอล งานวิจัยนี้จึงขอเสนอวัตถุดิบที่คนไทยมองข้ามไป คือ “น้ำหวานสดจากต้นจาก”

ต้นจากเป็นพืชที่ปลูกง่าย ขยายพันธุ์เร็ว สามารถแตกกอ มีอายุยืนเป็นร้อยปี เจริญเติบโตได้ทั่วไปบริเวณชายฝั่งทะเล ป่าชายเลน และบริเวณที่ลุ่มน้ำทะเลท่วมถึงเป็นครั้งคราว เช่น สงขลา นครศรีธรรมราช ระยอง ตรัง สมุทรสาคร และสมุทรสงคราม ป่าจากเป็นพืชที่มีคุณค่าทั้งทางนิเวศวิทยา เนื่องจากเป็นที่วางไข่ เป็นแหล่งอนุบาลสัตว์น้ำ เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ทะเลมากมาย และยังช่วยป้องกันการกัดเซาะของชายฝั่ง และมีคุณค่าทางเศรษฐกิจ เนื่องจากต้นจากสามารถให้ผลิตภัณฑ์หรือแปรรูปผลผลิตได้มากมาย ป่าจากเป็นแหล่งทำมาหากินดั้งเดิมมาแต่บรรพบุรุษ แต่ในระยะ 20 ปี ที่ผ่านมา คนส่วนใหญ่หันไปสนใจการทำนากุ้งจึงทำลายป่าจาก แต่ประสบปัญหาขาดทุน ปัจจุบันจึงมีนากุ้งถูกทิ้งร้างในจังหวัดสงขลา และนครศรีธรรมราชนับแสนไร่ ไม่สามารถใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้ [2] เนื่องจากดินมีความเค็ม แต่พบว่าต้นจากสามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่นาุ้งร้าง เนื่องจากเป็นพืชที่ดูดเกลือ และช่วยปรับระบบนิเวศให้ดินกลับมาใช้ประโยชน์ได้ดี [3] นอกจากนี้ต้นจากยังมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับต้นอ้อย คือ ต้นจากเจริญเติบโตได้เองโดยธรรมชาติ ไม่ต้องใช้ยากำจัดวัชพืชหรือยาฆ่าแมลง ไม่ต้องใส่ปุ๋ย ไม่ต้องรดน้ำ ไม่ต้องใช้เครื่องจักรและไฟฟ้าในการเก็บเกี่ยวน้ำหวาน ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลได้ และสามารถให้น้ำตาลมากกว่าอ้อยถึง 2 เท่า [4]

ยีสต์ขนมปัง (*Saccharomyces cerevisiae*)
เป็นยีสต์แห้งมีชื่อทางการค้าคือ Fermipan brown
ซื้อจากร้านอาณาจักรเบเกอรี่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

2.2 การเตรียมน้ำหวานจาก

นำน้ำหวานจากมากรองผ่านผ้าขาวเพื่อกำจัดของแข็งปนเปื้อน ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) เป็น 4.9 ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 54 องศาเซลเซียส โดยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Oil bath) เป็นเวลา 25 นาที [8]

2.3 การหมักโดยไม่เติมสารอาหาร

นำหวานหลังผ่านขั้นตอนการเตรียมนำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น เพื่อปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาลทั้งหมดตามที่ต้องการศึกษา เทสารละลายน้ำหวานปริมาณ 100 กรัม (ปริมาณเท่ากันสำหรับการทดลอง) ลงในขวดหมักรูปชมพู่ขนาดความจุ 250 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เติมน้ำยีสต์ขนมปังตามที่ต้องการศึกษา ป้อนก๊าซเฉื่อยไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศในขวดหมัก ก่อนปิดขวดด้วยฝาจุยกยาง ซึ่งสอดหลอดแก้วบรรจุน้ำสำหรับป้องกันอากาศเข้าขวด แต่อนุญาตให้ก๊าซออกจากขวดได้ (ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดในระหว่างการหมัก) วางขวดหมักใน Incubator shaker (LabTech, LSI-3016A, South Korea) เขย่าด้วยอัตรา 80 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิ และเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ตามสภาวะการหมัก ดังแสดงในตารางที่ 2

ผลผลิตหลังการหมักถูกนำมากรองผ่านผ้าขาวและ syringe filter เพื่อให้ได้ของเหลวใสก่อนนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ น้ำตาลทั้งหมดและเอทานอล

2.4 การวิเคราะห์

ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ถูกวิเคราะห์ด้วย Dinitrosalicylic acid (DNS) method [9] และความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมดถูกวิเคราะห์ด้วย Modified phenol sulfuric method [5] โดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer (UV, HP8453 with Chem - Station software)

ความเข้มข้นของเอทานอลถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gas chromatography (GC 6890 with auto injector, HP-FFAP polyethylene glycol TPA column and flame ionization detector, Hewlett Packard, USA) โดยป้อนสาร (Injector) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 4.2 psi ก๊าซตัวพา คือ ฮีเลียมที่มีอัตราการไหล 44.2 มิลลิลิตรต่อนาที เครื่องตรวจจับ (Detector) รักษาอุณหภูมิที่ 250 องศาเซลเซียส มีก๊าซเผาไหม้คือ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอากาศ ไหลด้วยอัตรา 30, 25 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ อุณหภูมิเตาอบ (Oven) ถูกรักษาไว้ที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอีก 2 นาที และต่อจากนั้นคงที่ที่ 230 องศาเซลเซียส และเตรียมกราฟสารละลายมาตรฐานเพื่อใช้เทียบประมาณค่าความเข้มข้นของเอทานอลด้วยสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 25, 50, 75, 100 และ 150 กรัมต่อลิตร

ร้อยละของผลได้ของเอทานอลเชิงทฤษฎีคำนวณโดยสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละของผลได้ของเอทานอล} = \frac{\{ \text{เอทานอลที่ได้รับในการหมัก (กรัมต่อลิตร)} / [(0.511 \times \text{น้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)}) + (0.538 \times \text{น้ำตาลนอนรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)})] \} \times 100\% \quad (1)}$$

2.5 การออกแบบสภาวะการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสมด้วย Response Surface Methodology (RSM)

RSM เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ทางสถิติที่สามารถลดจำนวนการทดลอง และลดระยะเวลาในการทดลองออก โดยช่วยออกแบบสภาวะการทดลอง และหาสภาวะที่เหมาะสมของค่าตัวแปรดำเนินการในกระบวนการต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย [11]

00000000000000000000000000000000

หลังจากผ่านขั้นตอนการเตรียมยังสามารถเพิ่มปริมาณ
 ยีสต์ธรรมชาติที่สามารถช่วยในการเกิดเอทานอลได้
 ด้วย เนื่องจากเป็นการเตรียมโดยพิจารณาปัจจัยที่ส่ง
 ผลต่อการทำงานของยีสต์และจุลินทรีย์ เพื่อสนับสนุน
 การทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ที่มีอยู่แล้วใน
 น้ำหวานจาก ซึ่งช่วยให้เกิดการย่อยแป้งหรือคาร์โบไฮเดรต
 ที่ละลายในน้ำหวานให้มีโมเลกุลเล็กลง หรือกลายเป็น
 น้ำตาล และการผลิตอาจลดปริมาณการเติมยีสต์ได้
 เพียงแต่ต้องทราวิธีกรหรือสภาวะที่เหมาะสมในการ
 ควบคุมจุลินทรีย์ธรรมชาติให้ทำงานได้อย่างเหมาะสม
 ซึ่งในขั้นตอนการหมักจะดำเนินการแบบไม่เติมสาร
 อาหาร ถือเป็นการใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบที่มี
 อยู่แล้วในน้ำหวานได้อย่างสูงสุด และสามารถช่วยลด
 ต้นทุนของการผลิตเอทานอล

3.2 สภาวะที่เหมาะสมของการหมักและการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรอิสระต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล

ผลการหมักแสดงด้วยร้อยละของผลได้ของเอทานอลโดยผลการทำนายจาก RSM และผลจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะและผลการหมัก

การทดลองที่	สภาวะการหมัก					ร้อยละของผลได้ของเอทานอล	
	น้ำตาลทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พีเอช	ยีสต์ (กรัม)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	ผลการทำนาย	ผลการทดลอง
1	10	5.5	0.1	34	77	59.3	53.0
2	15	5	0.1	31	44	52.3	60.3
3	15	6	0.01	31	44	74.4	74.2
4	15	6	0.1	31	111	80.0	76.0
5	15	5	0.01	31	111	89.9	89.7
6	15	6	0.1	37	44	33.5	39.4
7	15	5	0.01	37	44	39.1	39.0
8	15	6	0.01	37	111	30.6	30.4

ข้อมูลจากตารางที่ 2 นำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ทำนายอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล แสดงดังสมการที่ (2) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (The analysis of variance (ANOVA) ของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อผลได้ของเอทานอลแสดงไว้ดังตารางที่ 3

ร้อยละของผลได้ของเอทานอล =
 $-934.700 - 23.430 \times \text{น้ำตาล} + 380.210 \times \text{พีเอช} - 1084.900 \times \text{ยีสต์} + 8.947 \times \text{อุณหภูมิ} + 2.861 \times \text{เวลา} - 0.092 \times \text{น้ำตาล} \times \text{น้ำตาล} - 18.600 \times \text{พีเอช} \times \text{พีเอช} - 72.080 \times \text{ยีสต์} \times \text{ยีสต์} + 0.305 \times \text{อุณหภูมิ} \times \text{อุณหภูมิ} - 0.002 \times \text{เวลา} \times \text{เวลา} + 3.966 \times \text{น้ำตาล} \times \text{พีเอช} +$

$13.400 \times \text{น้ำตาล} \times \text{ยีสต์} + 0.127 \times \text{น้ำตาล} \times \text{อุณหภูมิ} - 0.018 \times \text{น้ำตาล} \times \text{เวลา} + 4.544 \times \text{พีเอช} \times \text{ยีสต์} - 6.672 \times \text{พีเอช} \times \text{อุณหภูมิ} - 0.195 \times \text{พีเอช} \times \text{เวลา} + 30.650 \times \text{ยีสต์} \times \text{อุณหภูมิ} - 2.424 \times \text{ยีสต์} \times \text{เวลา} - 0.026 \times \text{อุณหภูมิ} \times \text{เวลา}$ (2)

โดยที่ น้ำตาล คือ น้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก) พีเอช คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ยีสต์ คือ ปริมาณยีสต์ที่เติม (กรัม) อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิในการหมัก (องศาเซลเซียส) และเวลา คือ เวลาในการหมัก (ชั่วโมง)

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ตัวแปร	สัมประสิทธิ์	P-value
Intercept	-934.700	0.109
น้ำตาล	-23.430	0.020
พีเอช	380.210	0.006
ยีสต์	-1084.900	0.183
อุณหภูมิ	8.947	0.618
เวลา	2.861	0.041
น้ำตาล*น้ำตาล	-0.092	0.264
พีเอช*พีเอช	-18.600	0.041
ยีสต์*ยีสต์	-72.080	0.150
อุณหภูมิ*อุณหภูมิ	0.305	0.189
เวลา*เวลา	-0.002	0.361
น้ำตาล*พีเอช	3.966	0.003
น้ำตาล*ยีสต์	13.400	0.176
น้ำตาล*อุณหภูมิ	0.127	0.440
น้ำตาล*เวลา	-0.018	0.232
พีเอช*ยีสต์	4.544	0.961
พีเอช*อุณหภูมิ	-6.672	0.003
พีเอช*เวลา	-0.195	0.200
ยีสต์*อุณหภูมิ	30.650	0.076
ยีสต์*เวลา	-2.424	0.109
อุณหภูมิ*เวลา	-0.026	0.297
R = 0.973, R ² = 0.947, R ² adjusted = 0.813, Standard Error = 9.372, F = 7.082, F Signif = 0.004		

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R² = 0.947 (ตารางที่ 3) มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงให้เห็นถึงว่าแบบจำลองดังสมการที่ (2) สามารถใช้ทำนายร้อยละของผลได้ของ

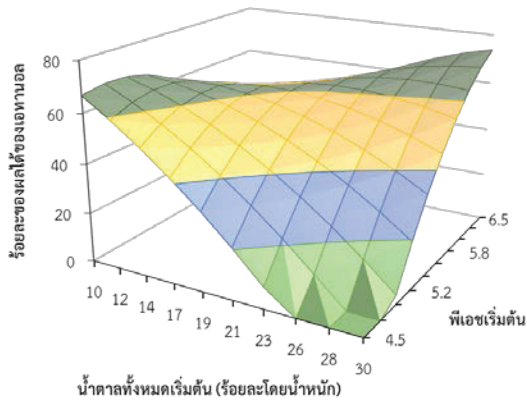
เอทานอลได้อย่างเหมาะสม และค่า F Signif (0.004) มีค่าน้อยกว่า P-value ช่วยยืนยันว่าสมการแบบจำลองสามารถทำนายผลการทดลองได้ดี โดยค่า P (P-value) ที่น้อยกว่า 0.05 แสดงถึงความมีนัยสำคัญของอิทธิพลในการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร ทั้งอิทธิพลเฉพาะตัวของแต่ละตัวแปร (Individual effect) อิทธิพลกำลังสอง (Quadratic effect) และอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ของตัวแปร (Interaction effect)

ผลจากตารางที่ 3 สรุปได้ว่ามีเพียงอุณหภูมิและปริมาณยีสต์ที่ไม่มีความสำคัญต่อผลได้ของเอทานอลเนื่องจากช่วงอุณหภูมิ 28 – 40 องศาเซลเซียส ที่นำมาศึกษา เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการหมัก การเปลี่ยนแปลงค่าภายในช่วงจึงมีอิทธิพลน้อย และการเพิ่มปริมาณยีสต์มีผลน้อยเนื่องจากในน้ำหวานมียีสต์ธรรมชาติอยู่แล้ว ขณะที่ตัวแปรอื่นๆ มีอิทธิพลมาก และสามารถเรียงลำดับความสำคัญของตัวแปรได้ดังนี้

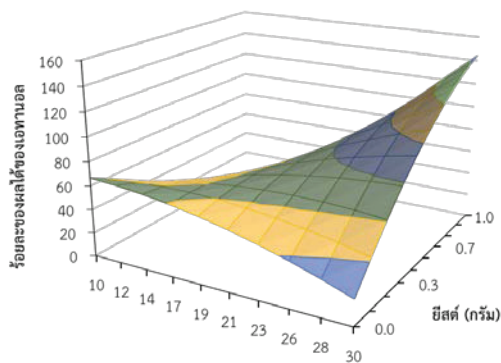
พีเอช > น้ำตาล > เวลา > ยีสต์ > อุณหภูมิ

ผลของปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังภาพที่ 1 – 10 ซึ่งเป็นกราฟพื้นผิวสามมิติที่สร้างมาจากสมการที่ (2) ในแต่ละกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปร ที่มีอิทธิพลต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ มีค่าคงที่ที่ค่ากลาง ซึ่งค่ากลางของตัวแปรคือ ร้อยละ 20, 5.5, 0.1 กรัม 34 องศาเซลเซียส และ 77 ชั่วโมง สำหรับน้ำตาล เริ่มต้น พีเอช ยีสต์ อุณหภูมิ และเวลา ตามลำดับ จากภาพที่ 1 – 4 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นทั้งหมดทำให้ร้อยละของผลได้ของเอทานอลมากขึ้น แต่ไม่ควรเพิ่มความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 26 โดยค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการหมักน้ำหวานจากคือ ช่วง 5.8 – 6.3 (ภาพที่ 1 และ 5 – 7) การเพิ่มปริมาณยีสต์มากขึ้นจะให้ผลได้ของเอทานอล

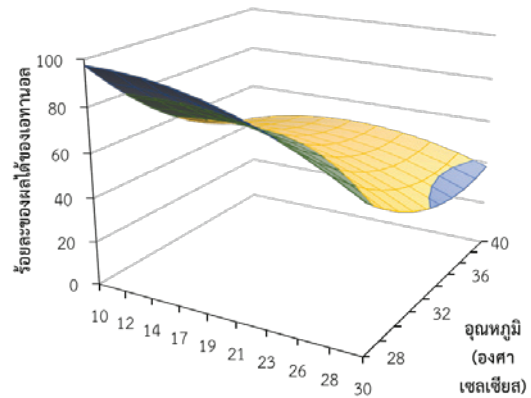
มากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดมากกว่าร้อยละ 28 (ภาพที่ 2) ยีสต์สามารถทำงานได้ดีในช่วงพีเอช 5.2 – 6.3 (ภาพที่ 5) และอุณหภูมิช่วง 36 – 40 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 8) โดยหากต้องการใช้เวลาในการหมักน้อยต้องใช้ปริมาณยีสต์มาก (ภาพที่ 9) แม้ว่าปริมาณยีสต์จะมีอิทธิพลต่อผลได้ของเอทานอลน้อย แต่หากต้องการได้ร้อยละผลได้สูงต้องใช้ยีสต์ในปริมาณที่เพียงพอคือ มากกว่า 0.1 กรัม สังเกตได้จากการกำหนดยีสต์ที่ค่ากลาง (0.1 กรัม) ต้องใช้ระยะเวลานานในการหมัก (ภาพที่ 10)



ภาพที่ 1 อิทธิพลของน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้นและพีเอชเริ่มต้นต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล

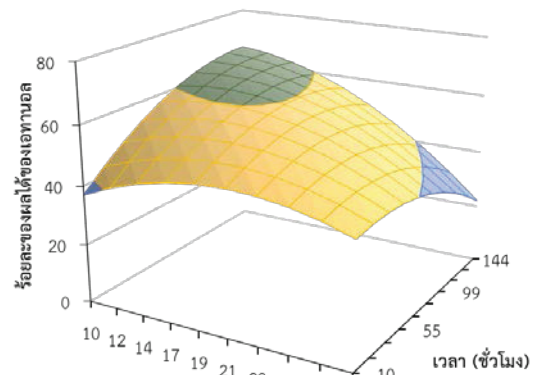


ภาพที่ 2 อิทธิพลของน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้นและปริมาณยีสต์ต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล



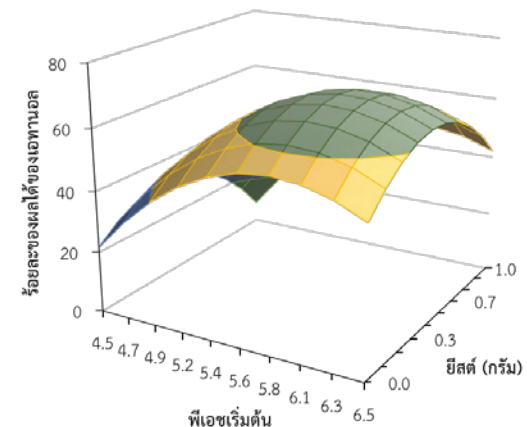
น้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาพที่ 3 อิทธิพลของน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้นและอุณหภูมิต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล

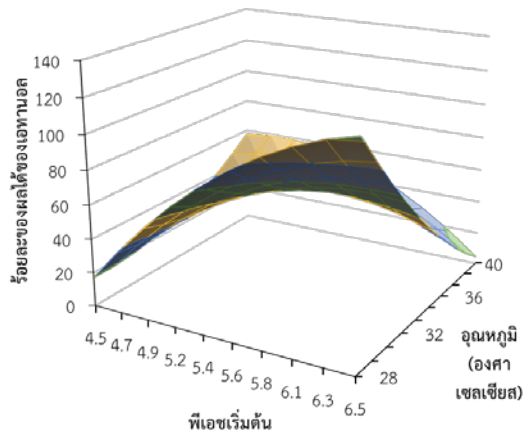


น้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

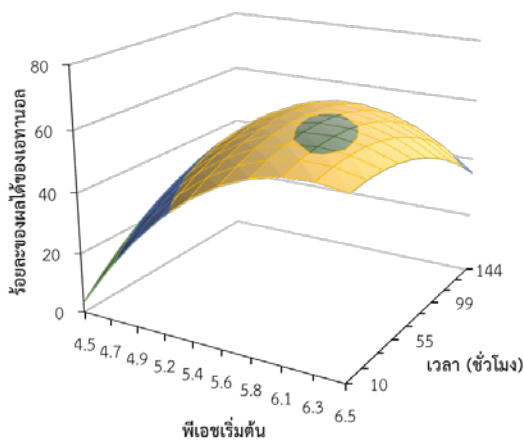
ภาพที่ 4 อิทธิพลของน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้นและเวลาต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล



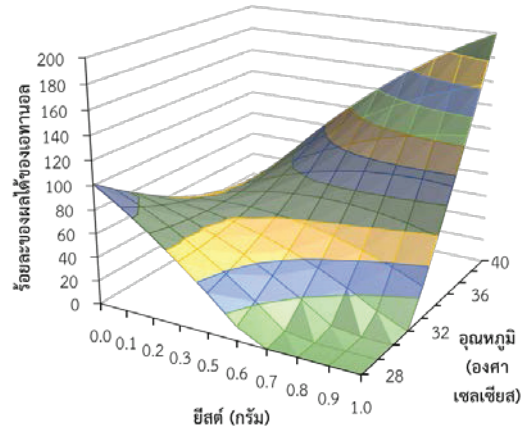
ภาพที่ 5 อิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นและปริมาณยีสต์ต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล



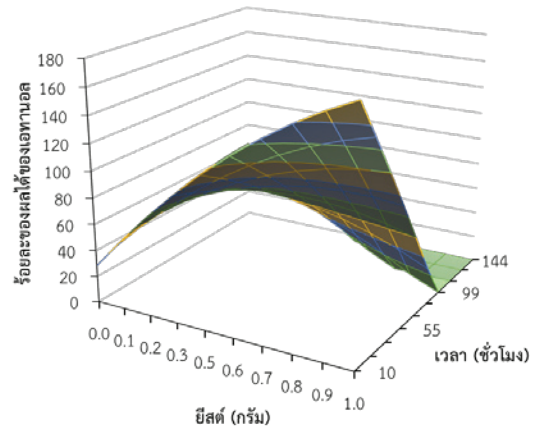
ภาพที่ 6 อิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นและยูนทึมต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล



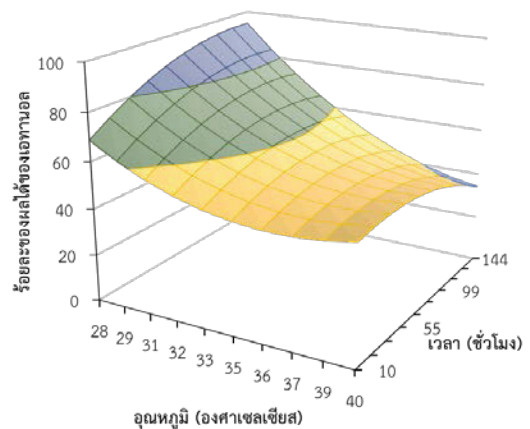
ภาพที่ 7 อิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นและเวลาต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล



ภาพที่ 8 อิทธิพลของยีสต์และยูนทึมต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล



ภาพที่ 9 อิทธิพลของยีสต์และเวลาต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล



ภาพที่ 10 อิทธิพลของยูนทึมและเวลาต่อร้อยละของผลได้ของเอทานอล

จากสมการที่ (2) ทำนายว่าสามารถได้ร้อยละของผลได้ของเอทานอลเป็น 100 เมื่อทำการหมักโดยใช้น้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้นที่ร้อยละ 21.5 ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 6.2 ปริมาณยีสต์ขนมปัง 0.9 กรัม (ต่อสารละลายน้ำหวาน 100 กรัม) ควบคุมอุณหภูมิที่ 35.6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 77 ชั่วโมง ซึ่งจากผลจากทดลองจริงภายใต้สภาวะนี้สามารถได้ร้อยละของผลได้ของเอทานอลเป็น 99.5 (หรือร้อยละการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลเป็น 99.5) ที่ความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 82.4 กรัมต่อลิตร ซึ่งวิธีการผลิตนี้สามารถให้ผลได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีการศึกษาศักยภาพของการใช้น้ำหวานจากเป็นสารป้อนสำหรับการผลิตเอทานอล ซึ่งได้ร้อยละการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลคือ 95.5 [7] และแนวทางการผลิตตามการศึกษานี้ น่าจะสามารถช่วยลดต้นทุนรวมของการผลิตเอทานอลได้ เนื่องจากสามารถลดการใช้พลังงานในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ใช้อุณหภูมิในการดำเนินการต่ำ ช่วยลดปัญหาการบูดงายของน้ำหวาน และดำเนินการหมักด้วยการเติมยีสต์ปริมาณน้อย และไม่มี การเติมสารอาหารเพิ่ม

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้ช่วยยืนยันถึงความเป็นไปได้ในการใช้น้ำหวานจากสตรับเป็นวัตถุดิบทางเลือกเพื่อการผลิตเอทานอล จากผลการผลิตแบบกะด้วยการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนการหมัก โดยสภาวะที่เหมาะสมของการหมักคือ ใช้น้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้นที่ร้อยละ 21.5 โดย

น้ำหนัก พีเอชเป็น 6.2 เติมยีสต์ 0.9 กรัม ที่อุณหภูมิ 35.6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 77 ชั่วโมง ซึ่งให้ผลผลิตที่มีความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 82.4 กรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละผลได้เชิงทฤษฎีของเอทานอล คือ 99.5 อย่างไรก็ตามหากมีการต่อยอดทำการวิจัยพัฒนาทั้งด้านการปลูกต้นจาก การเก็บเกี่ยวน้ำหวาน และการผลิตเอทานอลเชิงการค้าแบบครบวงจร อาจทำให้น้ำหวานจากกลายเป็นสารป้อนสำคัญในการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนการวิจัยจากทุนงบประมาณแผ่นดินของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เลขที่สัญญา ENG580589S บัณฑิตวิทยาลัย และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] คมสันต์ ศรีคงเพชร. 2555 เอทานอล: โอกาสและความท้าทายของพลังงานไทย เศรษฐกรอาวุโส. ธนาคารแห่งประเทศไทย สำนักงานภาคตะวันออก เชียงเหนือ. Available online: [http:// www.bot.or.th/Thai/EconomicCondition/Thai/Northeast/Research/Article-2555_Ethanol_opportunity.pdf](http://www.bot.or.th/Thai/EconomicCondition/Thai/Northeast/Research/Article-2555_Ethanol_opportunity.pdf). (1/4/2559).

[2] ปรัชญา. 2555. เพาะพันธุ์ ต้นจาก. Available online: <http://www.bloggang.com/viewblog.php?id=prachaya555&group=39>. (3/4/2559).

[3] นพรัตน์ บำรุงรักษ์. 2553. ม.อ. ส่งเสริมปลูก ‘ต้นจาก’ ในนาทุ่งร้างที่ปากพนัง ช่วยฟื้นสภาพดินเค็ม ให้คุณค่าทางนิเวศและทางเศรษฐกิจ. สถาบันทรัพยากร ทะเลและชายฝั่ง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Available online: <http://www.psu.ac.th/node/3055>. (3/4/2559).

[4] Tsuji K., Ghazalli N.F. and Ariffin Z. 2011. Biological and ethnobotanical characteristics of Nipa Palm (*Nypa fruticans* Wurmb.): A Review. *Sains Malaysiana*. 40 (12), 1407–1412.

[5] Germec M., Turhan I., Karhan M. and Demirci A. 2015. Ethanol production via repeated-batch fermentation from carob pod extract by using *Saccharomyces cerevisiae* in biofilm reactor. *Fuel*. 161, 304–311.

[6] Gumienka M., Szczepanska-Alvarez A., Szwengiel A., Szambelan K., Lasik-Kurdys M., Czarnecki Z. and Sitarski A. 2016. The impact of sugar beet varieties and cultivation conditions on ethanol productivity. *Biomass and Bioenergy*. 85, 228–234.

[7] Tamunaidu P., Matsui N., Okimuri Y. and Saka S. 2013. Nipa (*Nypa fruticans*) sap as a potential feedstock for ethanol production. *Biomass and Bioenergy*. 52, 96–102.

[8] ศิรินันท์ พ่วงพี. 2559. “การผลิตไบโอเอทานอลจากน้ำหวานจากด้วยกระบวนการแบบกะ.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[9] Miller G.L. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*. 31, 420–428.

[10] Dubois M., Gilles K.A., Atmelton G.K., Rabers P.A. and Smith F. 1956. Calorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*. 28, 50–56.

[11] Khuri A.I. and Mukhopadhyay. 2010. Response surface methodology. *WIREs Computational Statistics*. 2, 128–149.

[12] พรณวิไล กิ่งสุวรรณรัตน์. 2545. “การผลิตเอทานอลจากเหง้ามันสำปะหลัง.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[13] วรลักษณ์ คงจินดาภูมิ. 2556. “การผลิตเอทานอลจากแกนข้าวโพด.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[14] Lü j. and Zhou P. 2011. Optimization of microwave-assisted FeCl₃ pretreatment conditions of rice straw and utilization of *Trichoderma viride* and *Bacillus pumilus* for production of reducing sugars. *Bioresource Technology*. 102, 6966–6971.

- [15] รัตนา ชูหว่าง. (2556). วัตถุดิบทางเลือกใหม่ สำหรับผลิตไบโอเอทานอล วารสารวิจัย มข. สาขาวิชา เทคโนโลยีอุตสาหกรรมยางพารา ปีที่ 18 ฉบับที่ 5
- [16] Raitaa M., Ibenegbuc C., Champredab V., Szambelan. and Leak D.J. 2016. Production of ethanol by thermophilic oligosaccharide utilising *Geobacillus thermoglucosidasius* TM242 using palm kernel cake as a renewable feedstock. *Biomass and Bioenergy*. 95, 45-54.
- [17] Watson K. 1987. Temperature relations. A.H. Rose and J.S. Harrison, editors. *The yeasts*. 2nd ed, London, Academic Press.