

การศึกษาความเหมาะสมของการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลทรายดิบ และกากน้ำตาล

Feasibility Study of Ethanol Production from Raw Sugar and Molasses

บุญช่วย ปานอินทร์ และวรณี แพงจันทิก*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

จิตติ มังคละศิริ

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Boonchuay Pan-in and Woranee Paengjuntuek*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University,

Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Jitti Mungkalasiri

National Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology

Development Agency (NSTDA), Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

เนื่องจากความต้องการใช้กากน้ำตาลเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ราคากากน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเหมาะสมในการนำน้ำตาลทรายดิบมาเป็นทางเลือกในการผลิตเอทานอล เนื่องจากน้ำตาลทรายดิบมีสมบัติความหวานและความบริสุทธิ์สูงกว่ากากน้ำตาล แต่น้ำตาลทรายดิบมีราคาสูงกว่ากากน้ำตาล ด้วยเหตุนี้จึงได้หาสัดส่วนปริมาณการใช้กากน้ำตาลทรายดิบที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพการหมัก และวิเคราะห์สัดส่วนการใช้กากน้ำตาลต่อน้ำตาลทรายดิบในการหมักเอทานอลที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนการผสมกากน้ำตาล 80 % กับน้ำตาลทรายดิบ 20 % จะให้ประสิทธิภาพการหมักสูงถึง 82.71 % นอกจากนี้เมื่อเติมเอนไซม์เข้าไปในการหมักด้วยจะทำให้ประสิทธิภาพการหมักเพิ่มสูงขึ้นเป็น 84.27 % ที่สัดส่วนวัตถุดิบกากน้ำตาล 40 % กับน้ำตาลทรายดิบ 60 % และเมื่อเพิ่มสารอาหารเลี้ยงเชื้อเข้าไปในการหมักด้วยจะทำให้ประสิทธิภาพการหมักเพิ่มสูงมากขึ้นเป็น 85.98 % ที่สัดส่วนวัตถุดิบกากน้ำตาล 20 % กับน้ำตาลทรายดิบ 80 %

คำสำคัญ : กากน้ำตาล; น้ำตาลทรายดิบ; ประสิทธิภาพการหมัก; เอทานอล

*ผู้รับผิดชอบบทความ : pworanee@engr.tu.ac.th

Abstract

Due to the increasing demand of molasses as the raw material for ethanol production led to the higher price of molasses. Therefore, this research studied the optimization of applying raw sugar as an alternative raw material for ethanol production. Since the raw sugar have better sweetness and pure quality than the molasses. However, the raw sugar more expensive than molasses. For that reason, it is necessary to study the optimum proportion of raw sugar by considering the value of fermentation efficiency by analyzing the ratio of molasses to raw sugar in conditions of ethanol fermentation. The results showed that the mixture ratio of 80% molasses and 20% raw sugar gained the fermentation efficiency at 82.71 %. With the addition of enzyme, it would enhance the fermentation efficiency up to 84.27 % at a ratio of 40 % molasses and 60 % raw sugar. Moreover, by adding the ferment nutrients it could enhance the fermentation efficiency to 85.98 %. The optimum proportion of raw material for fermentation is 20 % molasses and 80 % raw sugar.

Keywords: ethanol; fermentation efficiency; molasses; raw sugar

1. บทนำ

เนื่องจากการใช้พลังงานในภาคขนส่งที่เพิ่มมากขึ้นของประเทศไทย ปัจจุบันพบว่าประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นส่วนมาก เนื่องจากไม่สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตปิโตรเลียมภายในประเทศได้ทันกับความต้องการใช้งาน และเพื่อการพัฒนาไปสู่สังคมคาร์บอนต่ำ (low carbon society) [1] รัฐบาลจึงได้มอบหมายให้กระทรวงพลังงานจัดทำแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (alternative energy development plan, AEDP) ให้มีปริมาณการใช้เป็น 25 % ภายในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564) โดยในรายงานได้ระบุงรอบและทิศทางการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทย เพื่อสร้างความมั่นคงด้านพลังงานภายในประเทศ ซึ่งหนึ่งในกรอบการดำเนินงานที่สำคัญ คือ การตั้งเป้าหมายของการนำพลังงานเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคการขนส่ง เพื่อ

ทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมัน โดยได้กำหนดเป้าหมายของการผลิตเอทานอลภายในปี พ.ศ. 2564 คือ 9 ล้านลิตร/วัน คิดเป็นปริมาณการผลิตที่เพิ่มขึ้น 6.92 % จากปริมาณการผลิตเอทานอลในปี พ.ศ. 2555 ดังแสดงใน Figure 1 [2]

ปัจจุบันโรงงานผลิตเอทานอลภายในประเทศส่วนมากใช้มันสำปะหลัง (cassava) และกากน้ำตาล (molasses) เป็นวัตถุดิบ [3,4] ซึ่งจากการตั้งเป้าหมายในการผลิตเอทานอลที่เพิ่มมากขึ้นนั้น ทำให้ปริมาณความต้องการวัตถุดิบเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากมันสำปะหลังจัดเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สามารถนำมาแปรรูปเพื่อเป็นอาหารของสิ่งมีชีวิตได้ ทำให้ไม่เหมาะสมมากนักที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพลังงานทดแทน [5] ดังนั้นการพัฒนาอุตสาหกรรมเอทานอลจึงมุ่งเน้นการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ ซึ่งอุตสาหกรรมเอทานอลที่ผลิตจากกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบมีกำลังการผลิตสูงถึง 87.8

% ของกำลังการผลิตเอทานอลจากอุตสาหกรรมเอทานอลทั้งหมดในประเทศไทย [6]

สถานการณ์ทั้งหมดที่ได้กล่าวมาส่งผลกระทบต่อความต้องการใช้กากน้ำตาลในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ราคากากน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น โดยราคาขายกากน้ำตาลจะอ้างอิงจากราคาขายส่งออกของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (Office of Agricultural Economic) โดยปัจจุบันราคากากน้ำตาลเท่ากับ 4

บาท/กิโลกรัม [7] ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำวัตถุดิบอื่น ๆ มาใช้ในการผลิตเอทานอล ตัวอย่าง เช่น งานวิจัยของ Gnansounou และคณะ (2005) [8] ศึกษาการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลที่สกัดจากข้าวฟ่างหวานหรือจากเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในกากข้าวฟ่างหวาน ผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าข้าวฟ่างหวานเป็นพืชที่สามารถผลิตทั้งน้ำตาลและเชื้อเพลิงที่เป็นเอทานอลได้

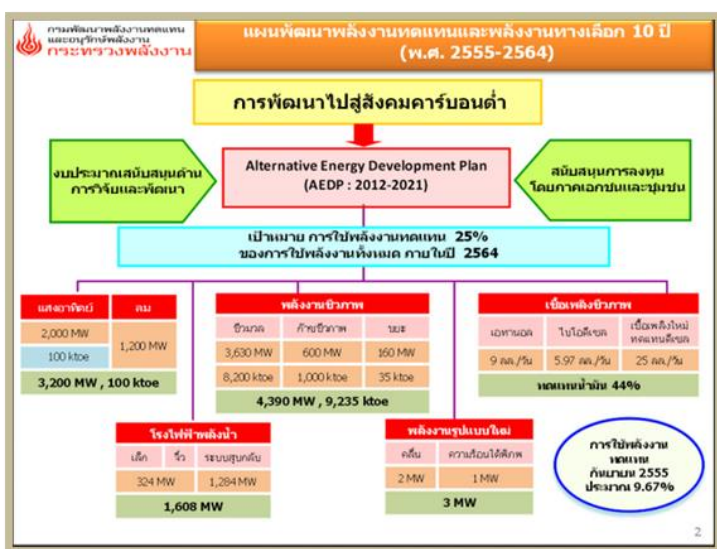


Figure 1 Alternative Energy Development Plan (AEDP) in 2012-2021 [2]

เป็นอย่างดี นอกจากนี้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่น ๆ เช่น ชังข้าวโพดและเปลือกข้าว เป็นพืชที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลได้เช่นกัน งานวิจัยของศิริพงษ์ และคณะ [9] ศึกษาการผลิตเอทานอลด้วยการใช้ปอสา (paper mulberry) โดยจุดประสงค์หลักของการวิจัยนี้ คือ เพื่อเป็นการวิจัยขั้นต้นที่จะนำปอสา มาใช้เป็นวัสดุหมักสำหรับการผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน และคัดแยก (จากปอสา) ที่สามารถสร้างเอทานอลเซลลูโลสได้ที่อุณหภูมิสูงจากธรรมชาติ และงานวิจัยของกนกวรรณ และคณะ [10] ศึกษาการผลิตเอทานอลจากลำไยอบแห้งที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งเป็น

วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เนื่องจากลำไยอบแห้งที่ไม่ได้มาตรฐานจะถูกระงับการส่งออกและล้นตลาด เกิดปัญหาราคาตกต่ำไม่ต่างจากพืชเศรษฐกิจตัวอื่น ๆ โดยทั่วไปจะกำจัดโดยการเผาทำลายหรือนำไปฝังงานวิจัยนี้จึงทดลองนำมาผลิตเป็นเอทานอลเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ผลการศึกษาพบว่าเอทานอลที่ได้นั้นสามารถนำไปใช้ผสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อผลิตเป็นก๊าซโซฮอล (gasohol) ได้ ซึ่งการศึกษาของแต่ละงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบที่มีสมบัติหวานสามารถนำมาผลิตเอทานอลได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำน้ำตาลทรายดิบ (raw sugar) มาเป็นทางเลือกในการ

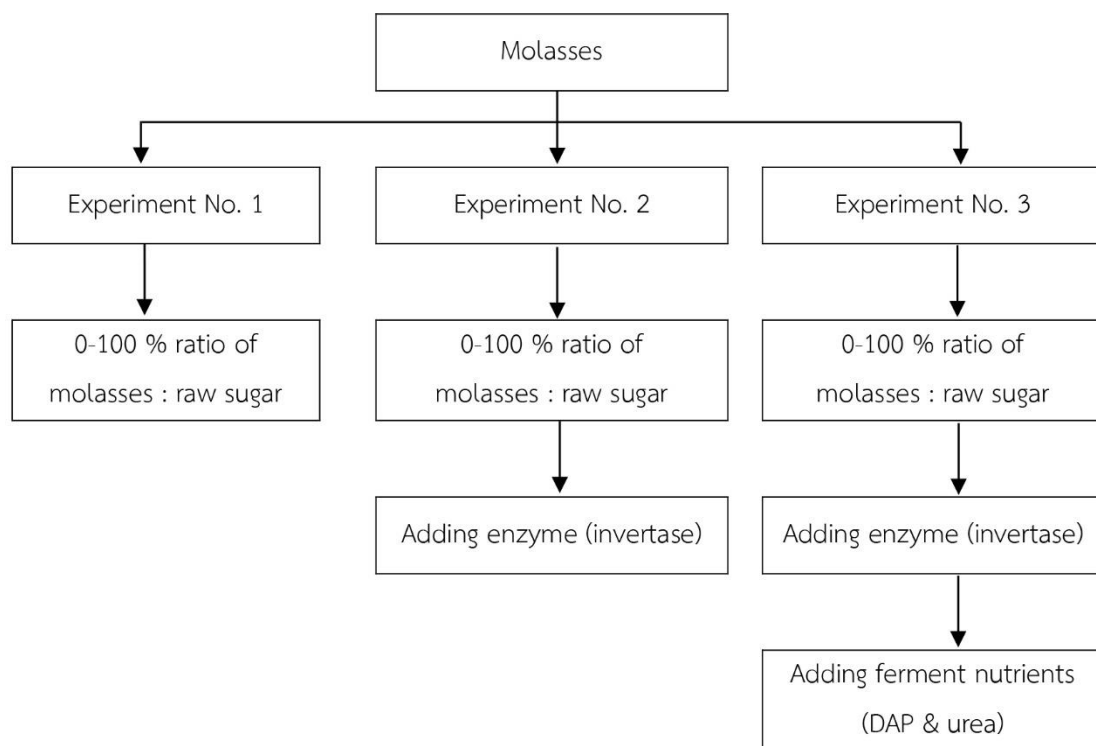
Table 1 Properties of molasses and raw sugar

	% Brix	% Purity	% FS
Molasses	80-85	30-35	42-50
Raw sugar	100	98	100

ผลิตเอทานอล เนื่องจากราคาน้ำตาลทรายดิบที่ลดต่ำลง ปัจจุบันราคาน้ำตาลทรายดิบเท่ากับ 10.5 บาท/กิโลกรัม [11] และการทดลองเบื้องต้นพบว่าน้ำตาลทรายดิบมีสมบัติ ความหวาน และความบริสุทธิ์สูงกว่ากากน้ำตาล [12] ดังแสดงใน Table 1 อย่างไรก็ตาม น้ำตาลทรายดิบนั้นมีราคาสูงกว่ากากน้ำตาล เหตุนี้จึงต้องศึกษาหาสัดส่วนปริมาณการใช้น้ำตาลทรายดิบที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพการหมัก และค่า % แอลกอฮอล์ที่ได้

2. วิธีการศึกษา

วิเคราะห์สัดส่วนการผสมกากน้ำตาลต่อน้ำตาลทรายดิบในการหมักเอทานอลที่ 6 สภาวะ ประกอบไปด้วยสัดส่วน 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, 0:100 และแบ่งชุดการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำน้ำตาลทรายดิบมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลเป็น 3 รูปแบบ ดังแสดงใน Figure 2 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พิจารณาน้ำตาลทรายดิบที่ค่าความเข้มข้น 60 % ของน้ำตาลที่ละลายอยู่ในสารละลาย (60 % Brix) เพื่อต้องการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวสำหรับการนำมาเป็นวัตถุดิบผสมกับกากน้ำตาล และวิเคราะห์ผลการทดลองโดยการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (3 Lab) ต่อการวิเคราะห์แต่ละสัดส่วน

**Figure 2** Experimental designs for ethanol production from molasses and raw sugar

รายละเอียดการทดลองในแต่ละรูปแบบ มีดังนี้

การทดลองแบบที่ 1 (experiment No. 1) :
การผสมน้ำตาลทรายดิบกับกากน้ำตาลตามสัดส่วนที่กำหนด

การทดลองแบบที่ 2 (experiment No. 2) :
การผสมน้ำตาลทรายดิบกับกากน้ำตาลตามสัดส่วนที่กำหนด และเติมเอนไซม์ invertase เพื่อเพิ่มความสามารถให้กับยีสต์ในการนำน้ำตาลมาเป็นอาหาร และเปลี่ยนรูปน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ [12]

การทดลองแบบที่ 3 (experiment No. 3) :
การผสมน้ำตาลทรายดิบกับกากน้ำตาลตามสัดส่วนที่กำหนด และเติมเอนไซม์ invertase กับสารอาหาร ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และยูเรีย (urea) เพื่อเพิ่มสารอาหารให้กับน้ำตาลทรายดิบ [12]

ซึ่งการทดลองทั้ง 3 รูปแบบ ประกอบไปด้วย 3 ส่วน ดังนี้

2.1 การเลี้ยงกล้าเชื้อ (starter) ด้วยกากน้ำตาล

เพื่อให้ได้เชื้อจุลินทรีย์ที่แข็งแรงและมีปริมาณมากเพียงพอสำหรับการหมัก รวมทั้งปราศจากการปนเปื้อนของจุลินทรีย์อื่น ๆ ที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงและควบคุมสภาวะการหมักต่าง ๆ ดังนี้ อัตราการให้อากาศ (aeration rate) ที่ 0.5-1 % ของปริมาณน้ำหมัก ค่าความเป็นกรด/ด่าง (pH) ที่ 4.2-4.5 อุณหภูมิระหว่างการหมักที่ 30-35 องศาเซลเซียส และกวนกล้าเชื้ออย่างต่อเนื่อง [12,13] พร้อมทั้งเติมยีสต์แห้ง (dried yeast หรือ powder yeast) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถใช้น้ำตาลเป็นอาหารเพื่อการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ และในขณะเดียวกันทำให้เกิดการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ด้วย โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

2.1.1 เตรียมอาหารปริมาณ 33 ลิตร โดยชั่งกากน้ำตาลปริมาณ 6,600 กรัม ละลายด้วยน้ำ 26.4

ลิตร

2.1.2 เติมสารอาหารและสารเคมี ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) 12 กรัม ยูเรีย (urea) 28.6 กรัม โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (SMBS) 3.3 กรัม Effymoll 0.17 กรัม Etamon 0.17 กรัม และปรับ pH เท่ากับ 4.20

2.1.3 เติมยีสต์แห้ง 110 กรัม และให้อากาศกับกล้าเชื้อ

2.1.4 วิเคราะห์ค่าสมบัติของกล้าเชื้อทุก ๆ 3 ชั่วโมง จนกว่า % residual sugar ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณน้ำตาลที่เหลือสุดท้ายที่เชื้อยีสต์ไม่สามารถนำไปใช้เป็นอาหารได้ มีค่าน้อยกว่า 1.50 %

2.2 การเติมวัตถุดิบผสมกากน้ำตาลและน้ำตาลทรายดิบตามสัดส่วนที่กำหนด

การทดลองรูปแบบที่ 2 (experiment No. 2) จะเพิ่มขั้นตอนการเติมเอนไซม์ invertase และสำหรับการทดลองรูปแบบที่ 3 (experiment No. 3) จะเพิ่มขั้นตอนการเติมเอนไซม์ invertase กับสารอาหาร DAP และยูเรีย โดยปริมาณการเติมสารอาหารนั้น จะพิจารณาเทียบกับปริมาณสารอาหารในสารละลายในกรณีการหมักด้วยกากน้ำตาลเพียงอย่างเดียว (0 % raw sugar)

2.3 การตรวจวัดสมบัติของน้ำหมัก

วิเคราะห์สมบัติที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง ได้แก่ ค่า pH (ใช้เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง, pH meter) ค่า % Brix (ใช้ refractometer) ค่า specific gravity (ใช้ hydrometer) ค่า % residual sugar [การไตเตรทกับสารละลายเฟห์ลิง (Fehling's solution) โดยใช้ methylene blue เป็น indicator (method ICUMSA)] และ ค่า % alcohol (ใช้ Ebulliometer) ตามเวลาที่กำหนดทุก ๆ 3 ชั่วโมง จนกว่า % residual sugar ของน้ำหมักจะมีค่าน้อยกว่า 1.50 %

2.4 การหาประสิทธิภาพของการหมักและค่า % แอลกอฮอล์ตามทฤษฎี

สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 คือ ประสิทธิภาพการหมัก (fermentation efficiency) = [% แอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักจริง ÷ % แอลกอฮอล์ (ตามทฤษฎี)] × 100 % และสมการที่ 2 คือ % แอลกอฮอล์ตามทฤษฎี (alcohol theory) = (ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด × % fermentable sugar × 0.644) ÷ ปริมาณน้ำหมักทั้งหมด [14] โดยกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ของ fermentable sugar (% FS) ของกากน้ำตาล (molasses) ที่ 48.0 % FS และของน้ำตาลทรายดิบ (raw sugar) ที่ 60 % FS

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำน้ำตาลทรายดิบมาทดแทนการใช้กากน้ำตาล โดยการวิเคราะห์จากประสิทธิภาพของการหมัก และค่า % แอลกอฮอล์ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการหมักที่ได้จากการเตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างกากน้ำตาลกับน้ำตาลทรายดิบจากการทดลองแบบที่ 1 (experiment No. 1) แสดงดัง Table 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า % แอลกอฮอล์ และประสิทธิภาพการหมักเอทานอลที่เตรียมจากกากน้ำตาลเพียงอย่างเดียว (100 : 0) จะมีค่าเท่ากับ 8.92 และ 83.18 % ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าค่า % แอลกอฮอล์ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี (10.72 %) เนื่องจากในกระบวนการหมักจะมีน้ำตาลบางส่วนถูกยีสต์นำไปใช้ในการเจริญเติบโตเพื่อเพิ่มปริมาณเซลล์ และยังมีบางส่วนถูกนำไปใช้สังเคราะห์ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้แก่ carbon dioxide, succinic acid, glycerol และ fusel oil เป็นต้น [15] ซึ่งการคำนวณตามทฤษฎีไม่ได้พิจารณาส่วนนี้ และเมื่อเริ่มผสมน้ำตาลทรายดิบ ด้วยสัดส่วนกากน้ำตาล 80 % กับน้ำตาลทรายดิบ 20 %

(80 : 20) พบว่าการลดลงของปริมาณกากน้ำตาลนั้นจะส่งผลให้การหมักมีประสิทธิภาพต่ำลงด้วย ซึ่งค่า % แอลกอฮอล์ และประสิทธิภาพการหมักเอทานอลที่ได้จากการเตรียมวัตถุดิบที่สัดส่วน 80 : 20 นั้น มีค่าเท่ากับ 8.87 และ 82.71 % ตามลำดับ นอกจากนั้น แนวโน้มของ % แอลกอฮอล์ และประสิทธิภาพการหมักยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมน้ำตาลทรายดิบ เนื่องจากยีสต์ไม่สามารถใช้น้ำตาลดิบเป็นอาหารเพื่อการเจริญเติบโตและเปลี่ยนรูปเป็นแอลกอฮอล์ได้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้ทดลองเติมเอนไซม์ invertase (experiment No. 2) เพื่อช่วยให้ยีสต์ใช้น้ำตาลทรายดิบเป็นอาหารเพื่อการเจริญเติบโตได้ง่ายขึ้น [16] ซึ่งผลการทดลองดัง Table 3 แสดงให้เห็นว่าการเติมเอนไซม์ invertase นั้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการหมักได้ดีขึ้น โดยจากผลการทดลองพบว่า การหมักที่สัดส่วนกากน้ำตาล 40 % และน้ำตาลทรายดิบ 60 % (40 : 60) มีประสิทธิภาพการหมักสูงเท่ากับ 84.27 % เนื่องจากเอนไซม์ invertase ที่เติมเข้าไปจะช่วยให้การเปลี่ยนน้ำตาลได้บางส่วน ทำให้ยีสต์สามารถใช้น้ำตาลได้ง่ายขึ้น

แต่เนื่องจากการเติมเอนไซม์ invertase จะช่วยให้ยีสต์มีความสามารถในการใช้น้ำตาลเป็นอาหารเพื่อการเจริญเติบโตได้ดีขึ้นเพียงเท่านั้น ไม่ได้ช่วยเพิ่มปริมาณสารอาหารในน้ำตาล ทำให้เมื่อสัดส่วนของกากน้ำตาลน้อยลง ยีสต์จึงขาดสารอาหารที่จะนำไปใช้งาน เพราะน้ำตาลทรายดิบไม่มีสารอาหาร ซึ่งจะเห็นได้จากแนวโน้มของประสิทธิภาพการหมักที่ลดลงอย่างรวดเร็ว (Table 3) เมื่อสัดส่วนการผสมน้ำตาลทรายดิบเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 60 % เป็นต้นไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเติมสารอาหารโดแอมโมเนียมฟอสเฟส และยูเรียเข้าไปในกระบวนการหมักตามระยะเวลาที่กำหนด (experiment No. 3) เพื่อเพิ่มสารอาหารในน้ำตาลทรายดิบ เพื่อให้ยีสต์สามารถนำไปใช้เป็นอาหาร

Table 2 Results of % alcohol and fermentation efficiency from experiment No. 1

% molasses : raw sugar	% alcohol				Fermentation efficiency			
	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3	Avg.	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3	Avg.
100:0	9.25	8.75	8.75	8.92	86.29	81.62	81.62	83.18
80:20	9.25	8.75	8.60	8.87	86.29	81.62	80.22	82.71
60:40	8.60	8.40	8.40	8.47	80.22	78.36	78.36	78.98
40:60	8.25	7.60	8.40	8.08	76.96	70.09	78.36	75.40
20:80	8.00	7.75	8.30	8.02	74.63	72.29	77.43	74.78
0:100	7.45	7.50	8.25	7.73	69.50	69.96	76.96	72.14

Table 3 Results of % alcohol and fermentation efficiency from experiment No. 2

% molasses : raw sugar	% alcohol				Fermentation efficiency			
	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3	Avg.	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3	Avg.
100:0	8.90	9.75	8.40	9.02	83.02	90.95	78.36	84.11
80:20	9.60	8.60	8.25	8.82	89.55	80.22	76.96	82.25
60:40	10.40	7.85	8.40	8.88	97.01	73.23	78.36	82.87
40:60	10.10	8.10	8.90	9.03	94.22	75.56	83.02	84.27
20:80	10.25	7.30	8.25	8.60	95.62	68.10	76.96	80.22
0:100	10.25	7.00	8.25	8.50	95.62	65.30	76.96	79.29

Table 4 Results of % alcohol and fermentation efficiency from experiment No. 3

% molasses : raw sugar	% alcohol				Fermentation efficiency			
	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3	Avg.	Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3	Avg.
100:0	8.45	9.30	9.25	9.00	78.82	86.75	86.29	83.96
80:20	8.45	9.60	9.40	9.15	78.82	89.55	87.69	85.35
60:40	8.80	9.25	9.25	9.10	82.09	86.29	86.29	84.89
40:60	9.10	9.25	9.25	9.20	84.89	86.29	86.29	85.82
20:80	9.35	9.10	9.20	9.22	87.22	84.89	85.82	85.98
0:100	8.80	9.25	9.00	9.02	82.09	86.29	83.96	84.11

ได้ โดยผลการทดลองแสดงได้ใน Table 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมสารอาหารเข้าไป ทำให้ยีสต์มีอาหารเพียงพอที่จะใช้ในการเจริญเติบโตได้ ทำให้ประสิทธิภาพการหมักมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของน้ำตาลทรายดิบที่ผสมเข้าไปในวัตถุดิบ เมื่อพิจารณาผลจากการทดลองทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าการทดลองแบบที่ 3 ที่สัดส่วน กากน้ำตาล 20 % และน้ำตาลทรายดิบ 80 % (20:80) จะให้ค่าประสิทธิภาพการหมักสูงที่สุด 85.98 % และค่า % แอลกอฮอล์ 9.22 %

เมื่อนำค่าประสิทธิภาพการหมักจากการทดลองทั้ง 3 แบบการทดลอง ที่สัดส่วนผสมระหว่าง

กากน้ำตาลและน้ำตาลทรายดิบต่าง ๆ มาแสดงกราฟเปรียบเทียบ สามารถแสดงได้ดัง Figure 3 โดยผลนั้นแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการทดลองแบบที่ 3 ซึ่งในกระบวนการหมักนั้นนอกจากจะหมักระหว่างกากน้ำตาลและน้ำตาลทรายดิบด้วยสัดส่วนต่าง ๆ แล้ว จะมีการเติมเอนไซม์ invertase และสารอาหารไดแอมโมเนียมฟอสเฟตและยูเรีย เข้าไปในกระบวนการหมักด้วย จะมีผลทำให้กระบวนการหมักมีค่าประสิทธิภาพการหมักสูงกว่าการหมักโดยไม่เติมเอนไซม์ และสารอาหารเข้าไปในกระบวนการ (experiment No. 1) หรือการหมักโดยเติมเพียงเอนไซม์ แต่ไม่เติมสารอาหาร (experiment No. 2)

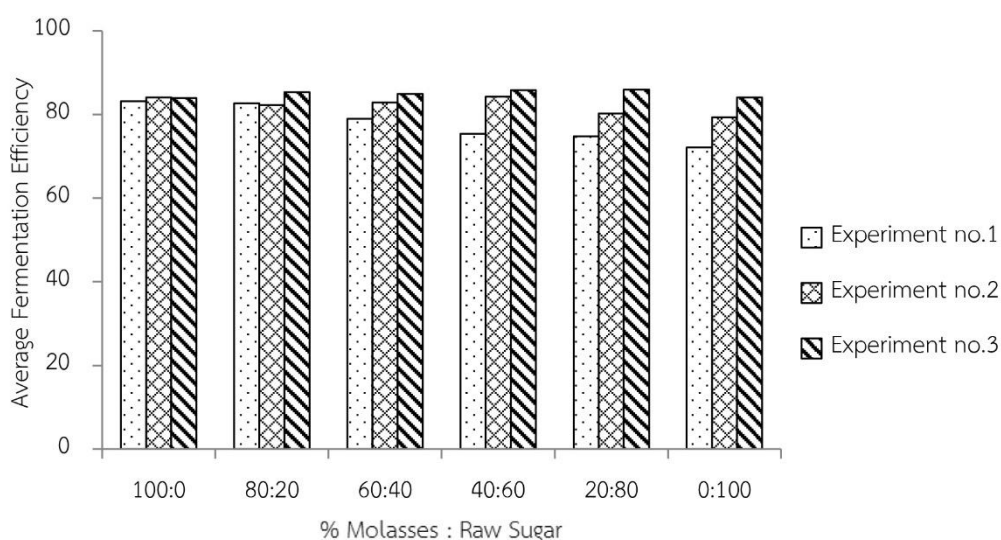


Figure 3 Fermentation efficiency of ethanol production from different percentages of molasses and raw sugar

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลด้วยน้ำตาลทรายดิบเพื่อเป็นทางเลือกของวัตถุดิบทดแทนกากน้ำตาลสำหรับการผลิตเอทานอลในประเทศไทย โดยเปรียบเทียบสมบัติของประสิทธิภาพการหมักที่ได้จากการผสมกากน้ำตาลและน้ำตาลทราย

ดิบด้วยสัดส่วนต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้พบว่าน้ำตาลทรายดิบสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบทดแทนกากน้ำตาลเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอลได้ แต่เนื่องจากยีสต์ไม่สามารถนำน้ำตาลทรายดิบมาใช้เป็นอาหารได้ จึงจำเป็นต้องเติมเอนไซม์ invertase เพื่อเพิ่มความสามารถให้กับยีสต์ในการนำน้ำตาลทรายดิบมาเป็นอาหารและเปลี่ยนรูป

น้ำตาลทรายดิบเป็นแอลกอฮอล์ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องเติมสารอาหารไดแอมโมเนียมฟอสเฟสและยูเรีย เนื่องจากน้ำตาลทรายดิบไม่มีสารอาหาร โดยผลจากการศึกษาพบว่าการผสมระหว่างกากน้ำตาล 20 % และน้ำตาลทรายดิบ 80 % สามารถให้ประสิทธิภาพการหมักได้สูงสุด คือ 85.98 % สูงกว่าการใช้กากน้ำตาลเพียงอย่างเดียวซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 83.96 %

โดยการผลิตแอลกอฮอล์ด้วยกากน้ำตาลเพียงอย่างเดียว (100:0) จะมีต้นทุนการผลิตประมาณ 9.46 บาทต่อลิตรแอลกอฮอล์ (ที่ความเข้มข้น 99.5 % alcohol) แต่เนื่องจากน้ำตาลทรายดิบมีความสะอาดและความบริสุทธิ์สูงกว่ากากน้ำตาลจึงสามารถผลิตเอทานอลที่มีประสิทธิภาพการหมักสูงได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากราคาของน้ำตาลทรายดิบมีมูลค่าสูงกว่ากากน้ำตาล และค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการเติมเอนไซม์ invertase กับสารอาหารไดแอมโมเนียมฟอสเฟสและยูเรีย ดังนั้นควรมีการศึกษาประเมินความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้มั่นใจว่านอกเหนือจากความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติจากการศึกษาภายในงานวิจัยนี้แล้ว การนำน้ำตาลทรายดิบมาทดแทนการใช้กากน้ำตาลยังมีความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ด้วย เพื่อเป็นหนึ่งในแนวทางที่จะสามารถนำไปใช้เพิ่มกำลังการผลิตเอทานอลตามแผน AEDP ที่ตั้งไว้ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และกองทุนวิจัย ประเภททุนวิจัยทั่วไป มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ นอกจากนี้ ขอขอบคุณ บริษัท เอกรัฐพัฒนา จำกัด กลุ่มบริษัท เกษตรไทยอินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลอง

6. รายการอ้างอิง

- [1] Silalertruksa, T. and Gheewala, S.H., 2009, Environmental sustainability assessment of bio-ethanol production in Thailand, Energy 34: 1933-1946.
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, มติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติครั้งที่ 6/2554 (ครั้งที่139) วันที่ 30 พฤศจิกายน 2554 ณ ห้องประชุม 501 ตึกบัญชาการ ทำเนียบรัฐบาล, แหล่งที่มา : <http://www.eppo.go.th/nepc/kpc/kpc-139.htm>, 24 ตุลาคม 2558.
- [3] Nguyen, T.L. and Gheewala, S.H., 2008, Fuel ethanol from cane molasses in Thailand: Environmental and cost performance, Energy Policy 36: 1589-1599.
- [4] Papong, S. and Malakul, P., 2010, Life-cycle and environmental analysis of bioethanol production from cassava in Thailand, Biores. Tech. 101: 5112-5118.
- [5] สุภาวดี ผลประเสริฐ, 2557, การปรับสภาพวัตถุดิบพวกกลีโคเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล, ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 22: 641-649.
- [6] สมาคมการค้าผู้ผลิตเอทานอลไทย, โรงงานผลิตเอทานอล, แหล่งที่มา : <http://www.thaiethanol.com>, 10 สิงหาคม 2558.
- [7] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, รายงานการขายกากน้ำตาล (โมลาส) ส่งออก (Export) นอกประเทศ, แหล่งที่มา : http://www.oae.go.th/ewtadmin/ewt/oae_baer/ewt_news.php, 10 สิงหาคม 2558.
- [8] Gnansounou, E., Dauriat, A. and Wyman,

- C.E., 2005, Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China, *Biores. Tech.* 96: 985-1002.
- [9] ศิริพงษ์ เปรมจิต, บุญทริก ภูมิรา และดวงพร เปรมจิต, 2550, การผลิตเอทานอลโดยใช้ปอสาเป็นวัสดุหมักด้วยกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 23-25 พฤษภาคม 2550 โรงแรมใบหยกสกาย, กรุงเทพฯ, 6 น.
- [10] กนกวรรณ รามชัย, วิบูลย์ ช่างเรือ, สัมพันธ์ ไชยเทพ และวันดี จอมภักดี, 2555, การผลิตเอทานอลจากลำไยอบแห้งที่มีคุณภาพต่ำ, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ระหว่างวันที่ 4-5 เมษายน 2555, เชียงใหม่, 5 น.
- [11] ธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์เพื่อการเกษตร, วิเคราะห์สถานการณ์สินค้าสถานการณ์และแนวโน้มสินค้าเกษตรที่สำคัญประจำเดือน, แหล่งที่มา : <http://www.baac.or.th/content-news.php>, 10 สิงหาคม 2558.
- [12] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558, คู่มือการอบรม หลักสูตรด้านการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลและก๊าซชีวภาพจากกระบวนการผลิตเอทานอล, เอกสารวิชาการ, กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ, 49 น.
- [13] Osman, M.E., khattab, O.H., Hammad, I.A. and El-Hussieny, N.I., 2011, Optimization of bio-fuel production by *Saccharomyces cerevisiae* isolated from sugar cane bagasse, *J. Amer. Sci.* 7: 485-492.
- [14] กนกวรรณ แก้วแกมเสือ, 2547, การศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการหมักกากน้ำตาลในโรงงาน บริษัท แสงโสม จำกัด จ.กาญจนบุรี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ, 85 น.
- [15] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2552, การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง, เอกสารวิชาการ, ส่วนบริหารจัดการข้อมูลและปรึกษาแนะนำ สำนักบริหารยุทธศาสตร์, กรุงเทพฯ, 155 น.
- [16] วรลักษณ์ คงจินตามณี, 2556, การผลิตเอทานอลจากแกนข้าวโพด, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 180 น.