

ศักยภาพการผลิตเอทานอลและก๊าซชีวภาพจากน้ำคั้นทางปาล์มและลำต้นปาล์มน้ำมัน

Potential of Ethanol and Biogas Production from Oil Palm Frond Juice and Oil Palm Trunk Juice

ทัศนีย์ ศรีมาชัย^{1,2} ชัยยุทธ มีงาม³ สมพงษ์ โอทอง⁴ เกียรติศักดิ์ รัตนดิлок ณ ภูเก็ต^{1,2*}

¹ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา วิทยาเขตสตูล

อำเภอละงู จังหวัดสตูล 91110

² ศูนย์การเรียนรู้และถ่ายทอดนวัตกรรมชุมชน “ทุ่งใหญ่สารภีโมเดล” มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา วิทยาเขตสตูล

อำเภอละงู จังหวัดสตูล 91110

³ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

⁴ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง จังหวัดพัทลุง 93210

Tussanee Srimachai^{1,2} Chaiyoot Meengam³ Sompong O-Thong⁴ Kiattisak Rattanadilok Na Phuket^{1,2*}

¹ College of Innovation and Management, Songkhla Rajabhat University, Satun Campus, Satun 91110

² Community Innovation Learning and Transfer Center “Thung Yai Sarapee Model”

Songkhla Rajabhat University, Satun campus, Satun 91100

³ Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla 90000

⁴ Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung 93210

*Corresponding author Email: panpong1@hotmail.com

(Received: May 22, 2023; Revised: August 12, 2023 ; Accepted: October 1, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาศักยภาพการผลิตเอทานอลและก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) จากน้ำคั้นทางปาล์ม (Oil palm frond juice, OPFJ) และน้ำคั้นต้นปาล์ม (Oil palm trunk juice, OPTJ) โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae* เพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือก ผลการทดลองพบว่าในช่วง 48 ชั่วโมงแรกของการหมัก ปริมาณกลูโคสถูกใช้ไปอย่างรวดเร็ว เพื่อผลิตเป็นเอทานอล โดยปริมาณกลูโคสใน OPFJ ลดลงจาก 31.26 เหลือ 5.09 g/L และ OPTJ ลดลงจาก 58.65 เหลือ 4.95 g/L ซึ่งปริมาณกลูโคสถูกใช้ไปเพื่อผลิตเอทานอลจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-state) ที่ชั่วโมงที่ 96 ของกระบวนการหมัก สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดจาก OPTJ และ OPFJ เท่ากับ 31.28 และ 11.50 g/L ตามลำดับ จากการคำนวณ Ethanol yield พบว่า การผลิตเอทานอลจาก OPTJ ให้ yield สูงกว่า OPFJ โดย Ethanol yield ของ OPTJ มีค่าเท่ากับ 0.48 g-ethanol/g-glucose ส่วน OPFJ มีค่าเพียง 0.39 g-ethanol/g-glucose เท่านั้น เนื่องจากประสิทธิภาพการหมัก (Fermentation efficiency) ของ OPTJ สูงถึง 93.42% ในขณะที่ประสิทธิภาพการหมักของ OPFJ มีค่าเพียง 72.14% การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ โดยใช้เทคนิค Biochemical methane potential (BMP) ผลการทดลองพบว่าปริมาณมีเทนสะสมสูงสุดของ OPFJ และ OPTJ มีค่าเท่ากับ 997 และ 1,068 mL ที่ 71.53 และ 71.18% มีเทน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก สอดคล้องกับค่าผลผลิตมีเทน (yield) ก็มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าเท่ากับ 314 และ 336 mL CH₄/g VS จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำกากส่าของ OPFJ และ

OPTJ มีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยพบประชากรอาร์เคียกลุ่ม 3 จินัส คือ *Methanobacterium* sp., *Methanofollis* sp., และ *Methanosaeta* sp.

คำสำคัญ: เอทานอล ก๊าซชีวภาพ น้ำคั้นทางปาล์ม น้ำคั้นลำต้นปาล์ม

ABSTRACT

This research aimed to study the potential of ethanol and biogas production from oil palm frond juice (OPFJ) and oil palm trunk juice (OPTJ) performed using *S. cerevisiae* for alternative energy. The amount of glucose consumed quickly to produce ethanol in 48 hrs. The amount of glucose in OPFJ decreased from 31.26 to 5.09 g/L, and OPTJ decreased from 58.65 to 4.95 g/L. The amount of glucose consumed to produce ethanol until steady-state at 96 hours of fermentation processes. The highest ethanol yield from OPTJ and OPFJ was 31.28 and 11.50 g/L, respectively. The calculation of ethanol yield found that the ethanol yield from OPTJ was higher than that of OPFJ. The ethanol yield of OPTJ was 0.48 g-ethanol/g-glucose, while OPFJ was only 0.39 g-ethanol /g-glucose due to fermentation efficiency. The fermentation efficiency of OPTJ was as high as 93.42%, while the fermentation efficiency of OPFJ was only 72.14%. Biogas production from distillery slop of OPFJ and OPTJ used the biochemical methane potential (BMP) technique. The maximum accumulated methane production of OPFJ and OPTJ were 997 and 1,068 ml at 71.53 and 71.18% of methane composition, which were very similar. Corresponding to methane yield (Yield) was equal to 314 and 336 ml CH₄/g VS. The experimental results showed that OPFJ and OPTJ of distillery slop have the potential to be used as raw materials for biogas production. Three Genera of archaea dominant founding were *Methanobacterium* sp., *Methanofollis* sp., and *Methanosaeta* sp.

Keyword: Ethanol, biogas, oil palm trunk juice, oil palm frond juice.

1. บทนำ

ประเทศไทยและนานาประเทศกำลังก้าวไปสู่เศรษฐกิจหมุนเวียนและการพัฒนาที่ยั่งยืน การกำจัดของเสียและการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนมีความสำคัญต่อการบริโภคในอนาคตและความเป็นอยู่ที่ดีของประชาชน แผนปฏิบัติการเศรษฐกิจ Bio-Circular Green (BCG) เป็นตัวอย่างที่ดีของการเคลื่อนไหวเพื่อสร้างนวัตกรรมและเพื่อขับเคลื่อนเศรษฐกิจสู่สภาวะ “New Normal” ในอนาคต รูปแบบ BCG มีความจำเป็นสำหรับประเทศไทยเนื่องจากแนวคิดของเศรษฐกิจหมุนเวียนสามารถช่วย

ให้การใช้ทรัพยากรธรรมชาติมีประสิทธิภาพสูงสุด [1] แนวคิดของเสียเป็นศูนย์ (Zero-waste) เป็นรูปแบบหนึ่งของ BCG ที่มุ่งเน้นไปที่การผลิตสินค้าที่ไม่มีของเสียรวมถึงวัสดุต้นทางและการจัดการของเสีย ซึ่งก็คือการเปลี่ยนของเสียหรือขยะเป็นวัตถุดิบแทนเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม เช่น การผลิตเป็นพลังงานทดแทนประเภทเอทานอลหรือก๊าซชีวภาพ ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้พลังงานทดแทนในรูปเอทานอลนั้นมีปัญหาหลักๆ ได้แก่ ปัญหาทางด้านวัตถุดิบ ปัจจุบันในการผลิตไบโอเอทานอลมีการใช้วัตถุดิบประเภทอ้อยและมันสำปะหลังเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นวัตถุดิบ

ประเภทหลักที่เป็นแหล่งอาหารของมนุษย์ [2] หากนำมาผลิตไบโอเอทานอลเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงในประเทศก็จะสามารถลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศได้เป็นจำนวนมาก แต่คงเป็นเรื่องยากที่จะนำอ้อยและมันสำปะหลังมาผลิตเอทานอลทั้งหมดได้ เนื่องจากเป็นการเบียดเบียนแหล่งอาหารของคนและส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางด้านอาหารของประเทศได้ จึงควรมีแหล่งวัตถุดิบแหล่งใหม่ที่นำมาทดแทนวัตถุดิบดังกล่าว เพื่อให้เกิดความมั่นคงทางด้านอาหารและพลังงานไปพร้อมๆ กัน วัตถุดิบอีกอย่างที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก คือ วัสดุชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในภาคใต้ เนื่องจากรัฐบาลได้ให้ความสำคัญในเรื่องการส่งเสริมพื้นที่ปลูกเพิ่มเป็น 10 ล้านไร่ภายในปี พ.ศ. 2572 เพื่อเพิ่มปริมาณวัตถุดิบทะลายปาล์มที่จะป้อนเข้าสู่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เพื่อให้มีน้ำมันดิบสำหรับการแปรรูปเป็นไบโอดีเซล (Biodiesel) โดยอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมีวัสดุเศษเหลือที่เป็นชีวมวลชีวภาพประเภทวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) จำนวนมาก โดยเฉพาะลำต้นปาล์มน้ำมันที่ถูกตัดทิ้งหลังจากต้นปาล์มน้ำมันมีอายุมากกว่า 25 ปี และทางใบปาล์มน้ำมันที่ตัดทิ้งทุกๆ 2 สัปดาห์ หรือพร้อมกับการเก็บเกี่ยวผลปาล์มน้ำมัน ในแต่ละปีจะมีลำต้นปาล์มน้ำมันถูกโค่นทิ้งประมาณ 20,000-45,000 ไร่ โดยมีชีวมวลลำต้นปาล์มน้ำมันประมาณ 400,000- 900,000 ลำต้น และชีวมวลจากทางใบปาล์มน้ำมันประมาณ 7,050,000 ตัน [3] ซึ่งในปัจจุบันชีวมวลดังกล่าวยังไม่ได้ถูกนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในเชิงอุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของชีวมวลจากส่วนต่างๆ ของลำต้นปาล์มน้ำมันและทางใบปาล์มน้ำมัน พบว่า มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส (Cellulose) ร้อยละ 40-50 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ร้อยละ 20-35 และลิกนิน (Lignin) ร้อยละ 16-29 [3]. โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนของลำต้นปาล์มน้ำมันมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 34 โดยเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำตาลเพนโตสและน้ำตาลเฮกซอส

หากมีการนำมาผ่านกระบวนการแปรรูปหรือกระบวนการปรับสภาพที่เหมาะสมจะสามารถนำไปใช้เป็นซับสเตรต (Substrate) ในกระบวนการหมักเพื่อผลิตเป็นไบโอเอทานอล (Bioethanol) ได้

นอกจากนี้ น้ำเสียจากกระบวนการกลั่นเอทานอลหรือน้ำกากส่า (Distillery wastewater) สามารถผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) ได้ โดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งนอกจากจะเป็นการบำบัดน้ำเสียแล้วยังใช้เป็นพลังงานทดแทนด้วย ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (Methane; CH_4) ประมาณร้อยละ 50-70 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 30-50 ส่วนก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนร้อยละ 65 ให้ค่าความร้อน 22,400 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร [4] เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีส่วนประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน จึงทำให้มีคุณสมบัติจุดติดไฟได้ดีและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ ได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตเอทานอลและก๊าซชีวภาพจากน้ำคั้นทางปาล์มและลำต้นปาล์มน้ำมัน ซึ่งปัจจุบันยังมีการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ในปริมาณที่น้อย โดยเอทานอลและก๊าซชีวภาพจากชีวมวลของปาล์มน้ำมันจะเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญในการสนับสนุนเศรษฐกิจ BCG ของประเทศต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ (Raw material)

ใช้ลำต้นปาล์มน้ำมันและทางปาล์มน้ำมันสดช่วงอายุ 25-30 ปี จากเกษตรกรในอำเภอควนกาหลง จังหวัดสตูล ทำการปอกเปลือกและตัดเป็นชิ้นประมาณ 50-100 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถนำเข้าเครื่องสับได้ (Chipper)

2.2 การผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นต้นปาล์ม (Oil palm trunk juice, OPTJ) และน้ำคั้นทางปาล์ม (Oil palm frond juice, OPFJ)

- นำตัวอย่างลำต้นปาล์มน้ำมันและทางปาล์มน้ำมันสดที่ผ่านเครื่องสับ มาหีบเพื่อคั้นน้ำโดยใช้เครื่องหีบแบบ

สกรูอัด (Screw press) ที่ใช้สำหรับบีบน้ำจากลำต้นปาล์มน้ำมันและทางปาล์มโดยเฉพาะ หลังจากนั้นนำน้ำคั้นที่ผ่านการบีบมาผ่านการกรองอีกครั้ง แล้วนำไปเก็บรักษาในห้องเย็นที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อคงสภาพก่อนนำไปทำการทดลองในกระบวนการหมัก (Fermentation) ต่อไป

2. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ OPTJ และ OPFJ เช่น กลูโคส, ฟรุคโตส, ซูโครส, โปรตีน, ไนโตรเจน และค่าพีเอช เป็นต้น

3. ศึกษาศักยภาพการผลิตเอทานอลจากกระบวนการหมักน้ำคั้นจากลำต้นปาล์มน้ำมัน (OPTJ) และทางปาล์มน้ำมัน (OPFJ)

นำตัวอย่างน้ำคั้นจากลำต้นปาล์มน้ำมัน (OPTJ) และทางปาล์มน้ำมัน (OPFJ) ในข้อ 2 เดิมเชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* ร้อยละ 10 (v/v) Yeast extract ร้อยละ 1 (v/v) (10.0 กรัมต่อลิตร) ไปหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ทำการกวนที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในซีรัม (Serum) ขนาด 500 ml โดยเก็บตัวอย่างนำไปวิเคราะห์ที่เวลา 0, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณเอทานอล

2.3 การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

น้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ คือน้ำเสียจากถังหมักขนาด 200 ลิตร ในห้องปฏิบัติการ หลังกระบวนการกลั่น (Distillation) เพื่อให้ได้เอทานอล 95%

1. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ เช่น pH, COD, กรดไขมันระเหยง่าย (VFA), ปริมาณไนโตรเจน (TKN), ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด (TS), ปริมาณของของแข็งระเหยง่าย (VS), โปรตีน (Protein), คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate), ไขมัน (Lipids) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

2. ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ โดยใช้เทคนิค Biochemical methane potential (BMP)

ทำการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในขวดน้ำเกลือขนาด 500 ml ในปริมาตรใช้งาน 200 ml เติมน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นด้วย NaHCO_3 ให้อยู่ในช่วง 7-7.5 และเติมกล้ำเชื้อเริ่มต้นร้อยละ 80 (มีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (Volatile suspended solids: VSS) 15 กรัมต่อลิตร) ของปริมาตรทดลอง โดยใช้อัตราส่วนน้ำกากส่าต่อกล้ำเชื้อร้อยละ 20 : 80 ผสมให้เข้ากันดี จากนั้นเติมแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 80 : 20 เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ภายในขวดน้ำเกลืออยู่ในสภาวะไร้อากาศ ปิดขวดน้ำเกลือด้วยจุกยางและฝาลูมิเนียมด้วย Hand Crimper นำไปบ่มที่สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วัน โดยระหว่างกระบวนการหมักจะทำการตรวจวัดผลผลิตมีเทนโดยการวัดปริมาตรการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำ [5] และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี [6]

2.4 ศึกษาโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์

ศึกษาโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (PCR-DGGE) [7].

2.5 วิธีวิเคราะห์ (Analytical methods)

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำกากส่าวิเคราะห์โดยใช้วิธีของ Standard method [8]

2. วิเคราะห์น้ำตาล (Total sugars) วิเคราะห์โดยใช้ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น LC-10Avp ใช้ Refractive Index Detector at 50°C, Column (SH1011, 8.0x300 nm, Shodex), 0.04 N H_2SO_4 และ Deionised water เป็น Mobile phase ที่อัตราการไหล 0.8 ml/min และใช้เวลาในการฉีดตัวอย่าง 15 นาที

3. วิเคราะห์เอทานอล โดยใช้วิธี Dichromate reagent method

4. วิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยใช้ Gas chromatography (GC-8A Shimadzu equipped with a thermal conductivity detector) และ 2.0 m packed column (Shin-Carbon ST 100/120 Restex)

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของ OPFJ และ OPTJ

องค์ประกอบทางเคมีของ OPFJ และ OPTJ แสดงดังตารางที่ 1 ปริมาณของน้ำคั้นของ OPFJ และ OPTJ หลังด้วยเครื่องหีบแบบสกรูอัด (Screw press) มีค่าเท่ากับ 550 ml/kg OPF และ 950 ml/kg OPT น้ำตาลกลูโคสที่เป็นองค์ประกอบของ OPFJ และ OPTJ มีความเข้มข้นเท่ากับ 31.26 และ 65.65 mg/l ตามลำดับ จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสใน OPTJ มีค่ามากกว่า OPFJ ประมาณ 2 เท่า แสดงว่า OPTJ มีความหวานมากกว่า OPFJ สังเกตได้จากสีของน้ำคั้น ดังรูปที่ 1. Yasin et al. [9] รายงานว่า ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสใน OPFJ เท่ากับ 23 g/l ความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสมีความสำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) ของ *S. cerevisiae* ในการผลิตเป็นเอทานอล ถ้าปริมาณน้ำตาลกลูโคสสูงก็จะถูกเปลี่ยนเป็นเอทานอลในปริมาณที่สูงเช่นเดียวกัน นอกจากน้ำตาลกลูโคสแล้ว OPFJ และ OPTJ ยังมีองค์ประกอบของน้ำตาลฟรุคโตสและซูโครส ซึ่งใน OPFJ มีค่าเท่ากับ 4.69 และ 2.81 g/l และใน OPTJ มีค่าเท่ากับ 12.66 และ 8.25 g/l ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2) OPFJ และ OPTJ มีความเข้มข้นของโปรตีนและไนโตรเจน อยู่ในช่วง 3.75-4.58 และ 0.47-0.65 g/l และมีค่า pH เท่ากับ 4.43 และ 4.48 ซึ่งมีความเหมาะสมกับการผลิตเอทานอลโดยใช้เชื้อ yeast เนื่องจากค่า pH ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของ yeast ในการผลิตเอทานอลอยู่ในช่วงประมาณ 4-5[10]



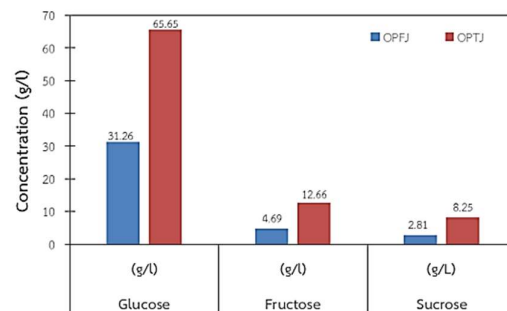
(A)

(B)

รูปที่ 1 ลักษณะของน้ำคั้นจากชีวมวลปาล์มน้ำมัน (A) OPTJ และ (B) OPFJ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ OPFJ และ OPTJ ที่อายุปาล์ม 25-30 ปี

Type of juice	Volume of OPFJ (ml/kg)	Glucose (g/l)	Fructose (g/l)	Sucrose (g/L)	Protein (g/l)	Total nitrogen (mg/l)	pH
OPFJ	550	31.26	4.69	2.81	3.75	0.47	4.43
OPTJ	950	65.65	12.66	8.25	4.58	0.65	4.87



รูปที่ 2 เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลของ OPFJ และ OPTJ ที่อายุปาล์ม 25-30 ปี

3.2 การผลิตเอทานอลจาก OPFJ และ OPTJ

รูปที่ 3 แสดงการผลิตเอทานอลจาก OPFJ และ OPTJ โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae* ผลการทดลองพบว่า ในช่วง 48 ชั่วโมงแรกของการหมัก ปริมาณกลูโคสถูกใช้ไปอย่างรวดเร็ว เพื่อผลิตเป็นเอทานอล โดยปริมาณกลูโคสใน OPFJ ลดลงจาก 31.26 เหลือ 5.09 g/l และ OPTJ ลดลงจาก 65.65 เหลือ 4.95 g/l ซึ่งปริมาณกลูโคสถูกใช้ไปเพื่อผลิตเอทานอลจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-state) ที่ชั่วโมงที่ 96 ของกระบวนการหมัก โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae* สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดจาก

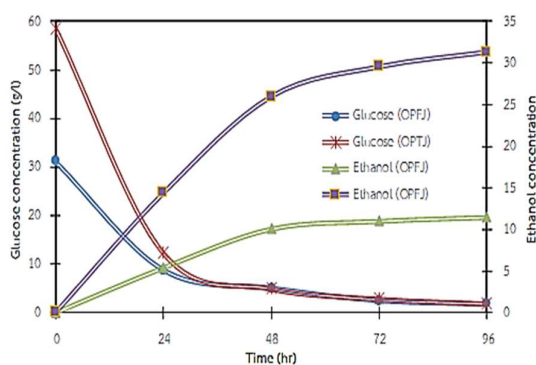
OPTJ ซึ่งผลิตได้ 31.28 g/L แต่ผลิตจาก OPFJ ได้เพียง 11.50 g/L เนื่องจากปริมาณกลูโคสเริ่มต้นใน OPTJ สูงกว่า OPFJ ประมาณ 2 เท่า จึงส่งผลให้เชื้อ *S. cerevisiae* ผลิตเอทานอลจาก OPTJ ได้ปริมาณสูงกว่า จากการคำนวณ Ethanol yield พบว่า การผลิตเอทานอลจาก OPTJ ให้ Yield สูงกว่า OPFJ โดย ethanol yield ของ OPTJ มีค่าเท่ากับ 0.48 g-ethanol/g-glucose ส่วน OPFJ มีค่าเพียง 0.39 g-ethanol/g-glucose เท่านั้น

เนื่องจากประสิทธิภาพการหมัก (fermentation efficiency) ของ OPTJ สูงถึง 93.42% ในขณะที่ประสิทธิภาพการหมักของ OPFJ มีค่าเพียง 72.14% ดังแสดงในตารางที่ 2 Abdullah et al. [11] รายงานว่า Ethanol yield จากการหมัก OPFJ มีค่าเท่ากับ 0.38 g-ethanol/g-glucose ซึ่งใกล้เคียงกับ Ethanol yield ในการทดลองนี้

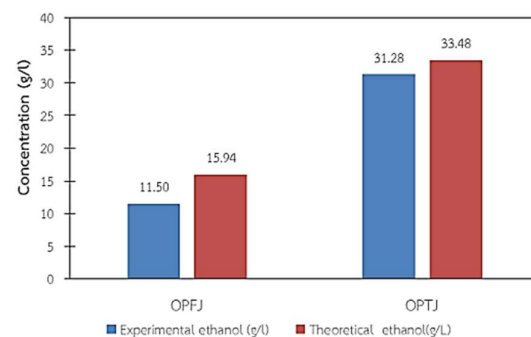
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความแตกต่างของการผลิตเอทานอลระหว่าง OPFJ และ OPTJ โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae*

Media	Sugar Utilization (%)	Max.ethanol Concentration (g/l)	Ethanol Productivity (g/L.hr)	Fermentation time (hr)	Ethanol yield (g-ethanol/g-glucose)	Fermentation Efficiency (%)	Reference
OPFJ	94.23	11.50	0.12	96	0.39	72.14	This Study
OPTJ	96.72	31.28	0.33	96	0.48	93.42	This Study
OPF juice	86.39	18.67	0.25	72	0.38	74.51	[11]
Sugar beet juice	100.00	59.89	0.77	78	0.43	78.80	[12]
Sugarcane juice	98.00	67.00	0.93	72	0.40	78.43	[13]
Sweet sorghum juice	100.00	72.43	1.01	72	0.48	94.60	[14]

*Theoretical yield of ethanol is 0.51 g-ethanol/g-glucose



รูปที่ 3 การใช้น้ำตาลกลูโคสและการผลิตเอทานอลในกระบวนการหมักแบบกะ (Batch) โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae* ของ OPFJ และ OPTJ



รูปที่ 4 เปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับค่าทางทฤษฎีของ OPFJ และ OPTJ

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี ผลการทดลองพบว่า การผลิตเอทานอลจาก OPTJ ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากถึง 93.43% ส่วน OPFJ ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีเพียง 72.15% (รูปที่ 4) แสดงว่า เชื้อ *S. cerevisiae* สามารถใช้น้ำตาลใน OPTJ ได้ดีกว่า OPFJ สรุปการผลิตเอทานอลจาก OPFJ และ OPTJ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบอื่นที่ใช้ *S. cerevisiae* ชนิดเดียวกันถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2 ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า OPFJ และ OPTJ มีศักยภาพในการเป็นวัตถุดิบที่สมบูรณ์สำหรับการหมักเอทานอล และไม่ใช่วัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้เป็นอาหารสำหรับมนุษย์ จึงมีความน่าสนใจเนื่องจากเป็นของเสียที่เกิดจากการเกษตรประเภทปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของภาคใต้ จึงมีวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นเอทานอลได้ตลอดทั้งปี

3.3 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

น้ำกากส่าของเหลวที่เหลือทิ้งจากกระบวนการกลั่นเอทานอล มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม อุณหภูมิสูง ความเป็นกรดสูง ส่งผลให้ค่าพีเอชต่ำ ค่าซีไอดีสูง เป็นน้ำเสียจึงต้องมีการจัดการอย่างเหมาะสมและถูกต้องเพื่อลดปัญหาล้างแฉะ แต่ น้ำกากส่ามีความเข้มข้นของซีไอดีสูง มีศักยภาพสูงสามารถหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพมาทดแทนน้ำมันเตาได้ คุณสมบัติทางเคมีของน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ แสดงข้อมูลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ ที่ใช้ในการทดลอง

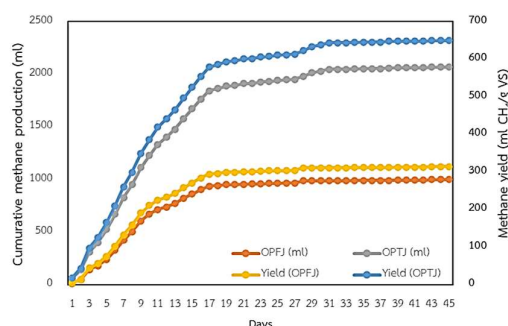
องค์ประกอบ	OPFJ	OPTJ
pH	4.6	5.0
COD (g/L)	130	176
VFA (g/L)	3.85	6.65
TKN (g/L)	11	15.55
TS (g/L)	21	36
VS (g/L)	15	21
Protein (g/L)	9.8	11.28
Carbohydrate (g/L)	75.85	84.58
Lipids (g/L)	3.55	6.76
C/N ratio	12	15

3.4 การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

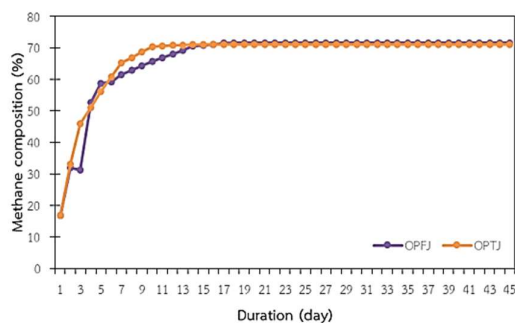
ปริมาณมีเทนสะสม ผลผลิตมีเทน (yield) และร้อยละปริมาณก๊าซมีเทน (%) ที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ แสดงดังรูปที่ 5-6 ผลการทดลองพบว่าปริมาณมีเทนสะสมสูงสุดของ OPFJ และ OPTJ มีค่าเท่ากับ 997 และ 1,068 ml ดังแสดงในรูปที่ 5 (ซ้าย) สอดคล้องกับค่าผลผลิตมีเทน (yield) ที่มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าเท่ากับ 314 และ 336 ml CH₄/g VS ดังรูปที่ 5 (ขวา) ที่ร้อยละปริมาณก๊าซมีเทน 71.53 และ 71.18% มีเทน ตามลำดับ (รูปที่ 6) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนหาได้จากการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันมาเขียนกราฟปริมาณมีเทนสะสมตามระยะเวลาที่ทำการทดลอง (รูปที่ 5) และนำมาคำนวณหาค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Specific Methane Yield) ในรูปแบบของสารอินทรีย์ระเหยเข้า ดังสมการที่ 1 [15]

$$\text{Specific Methane Yield} = \frac{\text{ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด (ml)}}{\text{ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยเข้า (mg)}} \quad (1)$$

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ มีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 5 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม(ซ้าย) และผลผลิตมีเทน (methane yield)(ขวา) จากกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ



รูปที่ 6 ร้อยละปริมาณก๊าซมีเทนจากกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

ตารางที่ 4 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

ตัวอย่าง	Final pH	Total biogas (ml)	CH ₄ (ml)	CH ₄ yield (mlCH ₄ /g VS)	COD Efficiency (%)
OPTJ	7.33	1,465	1,068	336	78
OPFJ	6.96	1,401	997	314	72

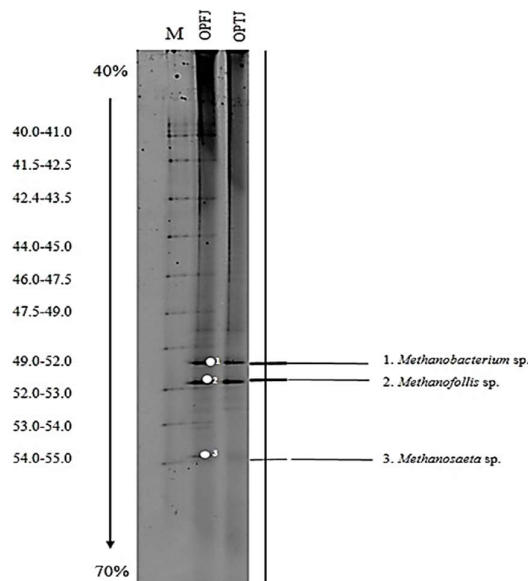
3.5 ผลการศึกษาโครงสร้างอาร์เคียในกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ เป็นก๊าซชีวภาพ

ผลการศึกษาโครงสร้างประชากรอาร์เคียในกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ พบว่าพบประชากรอาร์เคียกลุ่ม 3 จินัส คือ *Methanobacterium sp.*, *Methanofollis sp.*, และ *Methanosaeta sp.* ประชากรที่โดดเด่นอยู่ 2 จินัส คือ *Methanobacterium sp.* และ *Methanofollis sp.* (รูปที่ 7) ซึ่งสร้างมีเทนจากหมู่เมทิลในโมเลกุลอะซิเตท โดยพบเกิดมีเทนจากกลุ่มนี้มากกว่าร้อยละ 70

4. สรุป

การผลิตเอทานอลจาก OPFJ และ OPTJ โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae* พบว่าปริมาณกลูโคสถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วเพื่อผลิตเป็นเอทานอลจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady-state) ที่ชั่วโมงที่ 96 ของกระบวนการหมัก โดยที่เชื้อ *S.*

cerevisiae สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดจาก OPFJ และ OPTJ เท่ากับ 11.50 g/L และ 31.28 g/L ให้ผลผลิตเอทานอล (ethanol yield) ของ OPFJ และ OPTJ เท่ากับ 0.39 g-ethanol/g-glucose และ 0.48 g-ethanol/g-glucose เนื่องจากประสิทธิภาพการหมัก (fermentation efficiency) ของ OPTJ สูงถึง 93.42% ในขณะที่ประสิทธิภาพการหมักของ OPFJ มีค่าเพียง 72.14% OPTJ มีศักยภาพในการการผลิตเอทานอลมากกว่า OPFJ เนื่องจากปริมาณกลูโคสเริ่มต้นใน OPTJ สูงกว่า OPFJ ประมาณ 2 เท่า การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ มีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับค่าผลผลิตมีเทน (methane yield) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 314 และ 336 ml CH₄/g VS แสดงให้เห็นว่าน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ มีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดังนั้น OPFJ และ OPTJ จึงเป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรที่น่าสนใจมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นอุตสาหกรรมด้านพลังงานทดแทนที่สนับสนุนการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ BCG โมเดลของประเทศไทยได้



รูปที่ 7 โครงสร้างประชากรอาร์เคียจากกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีทุกคน ทั้งด้านข้อเสนอแนะทางวิชาการ แรงงาน หรืออำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือ สถานที่วิจัย สดุดทัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาและมหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง ที่ได้สนับสนุนสถานที่ทำวิจัยและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยทำให้โครงการวิจัยนี้สามารถดำเนินการแล้วเสร็จ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R.G.J. Edyveana, W. Apiwatanapiwatb, P. Vaithanomsatb, A. Boondaengb, P. Janchaib and S. Sophonthammaphat, “The Bio-Circular Green Economy model in Thailand – A comparative Review”, *Agriculture and Natural Resources*, vol. 57, pp. 51-64, 2023.
- [2] M. Shafiel, M.M. Kabir, H. Zilouei, I.H. Horvath and K. Karimi, “Techno-economical study of biogas production improved by steam explosion pretreatment”, *Bioresource Technology*, vol. 148, pp. 53–60, 2013.
- [3] M.A.K.M. Zahari, M.R. Zakaria, H.H. Ariffin, M.N. Mokhtar, J. Salihon, Y. Shirai and M.A. Hassan, “Renewable sugars from oil palm frond juice as an alternative novel fermentation feedstock for value-added products”, *Bioresource Technology*, vol. 110, pp. 566–571, 2012.
- [4] M. Wasterholm, M. Hansson and A. Schnurer, “Improved biogas production from whole stillage by co-digestion with cattle manure”, *Bioresource Technology*, vol. 114, pp. 314-319, 2012.
- [5] I. Angelidaki and L. Ellegaard, “Co-digestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants, status and future trends”, *Appl Biochem Biotech*, vol.109, pp. 95-105, 2003.
- [6] S. O-Thong, A. Hniman, P. Prasertsan and T. Imai, “Biohydrogen production from cassava starch processing wastewater by thermophilic mixed cultures”, *Int J Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 3409-3416, 2011.
- [7] K. Kongjan, S. O-Thong and I. Angelidaki, “Biohydrogen production from desugared molasses (DM) using thermophilic mixed cultures immobilized on heat treated anaerobic sludge granules”, *Hydrogen energy*, vol. 36, pp. 14261-14269, 2011.
- [8] E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton and L.E. Clesperi, “Standard methods for the examination of water and wastewater (22th ed).” Washington DC.: American Public Health Association, 2012.
- [9] N.H.M. Yasin, M. Furkuzaki, T. Maeda, Miyazaki, T. Miyasaki, C.M.H.C. Maail, H. Ariffin and T.K. Wood, “Biohydrogen production from oil palm frond juice and sewage sludge by a metabolically engineered *Escherichia coli* strain”, *International journal of hydrogen energy*, vol. 38, pp. 10277-10283, 2013.
- [10] G. Reed and T.W. Nagodawithana, *Yeast Technology*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

- [11] S.S.S. Abdullah, Y. Shirai, E.K. Bahrin and M.A. Aassan, “Fresh oil palm frond juice as a renewable, non-food, non cellulose and complete medium for direct bioethanol production”, *Industrial Crops and Products*, vol. 63, pp. 357–361, 2015.
- [12] C.L. Ramos, W.F. Duarte, A.L. Freire, D.R. Dias, E.C.A. Eleutherio and R.F. Schwan, “Evaluation of stress tolerance and fermentative behavior of indigenous *Saccharomyces cerevisiae*”, *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 44, pp. 935-944, 2013.
- [13] X. Wu, S. Staggenborg, J.L. Prophet, W.L. Rooney, J. Yu, D. Wang, “Features of sweet sorghum juice and their performance in ethanol fermentation”, *Industrial Crops and Products*, vol. 31, pp. 164-170, 2010.
- [14] M. Pavlecic, I. Vrana, K. Vibovec, P. Horvat, B. Santek, “Ethanol production from different intermediates of sugar beet processing”, *Food Technology & Biotechnology*, vol. 48, pp. 362-367, 2010.
- [15] Energy Research and Development Institute Nakornping, Chiang Mai University. “Biochemical methane potential (BMP) analysis document”, 2011.