

การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์กากตะกอนดีแคนเตอร์
และกลีเซอรอลดิบ
ในกระบวนการหมักร่วมก๊าซชีวภาพ

ENHANCEMENT OF UTILIZATION OF DECANTER CAKE
AND CRUDE GLYCEROL
IN BIOGAS CO-FERMENTATION

กัญญิกา กิตติพงษ์พัฒนา สุวิมล กาญจนสุธา* และ สุภาวดี ผลประเสริฐ

ภาควิชาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพมหานคร 10400

Kantika Kittipongpattana, Suwimon Kanchanasuta* and Supawadee Polprasert

Department of Environmental Health Sciences, Faculty of Public Health,

Mahidol University, Bangkok 10400

*E-mail: suwimon.kan@mahidol.ac.th, nookimlung@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการจัดการของเสียให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยขั้นแรกเป็นการหมักร่วมระหว่างกากตะกอนดีแคนเตอร์และกลีเซอรอลดิบ จากนั้นเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพในขั้นที่ 2 การทดลองแบ่งออกเป็น 1) กระบวนการหมักร่วมแบบกึ่งต่อเนื่องในถังหมักขนาด 20 ลิตร พบว่าที่ความเข้มข้นกลีเซอรอลเท่ากับร้อยละ 1.5 โดยมีเวลาต่อปริมาตร ระยะเวลาการกักเก็บ (Hydraulic Retention Time, HRT) 2 วัน ได้ปริมาณผลผลิตสูงสุดเท่ากับ 43.33 ลิตรไฮโดรเจนต่อกิโลกรัมของแข็งทั้งหมด อัตราการผลิตสูงสุดเท่ากับ 0.89 ลิตรไฮโดรเจนต่อปริมาตรถังหมักต่อวัน และปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.11 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมของแข็งทั้งหมด 2) การปรับสภาพเบื้องต้นน้ำหมักจากขั้นที่ 1 ด้วยวิธีโอโซนเนชั่น และการใช้ไอน้ำร้อนต่อกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน พบว่าน้ำหมักที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยไอน้ำร้อนให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการปลดปล่อยน้ำตาล ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นรวมถึงการกำจัดของเสียในรูปของแข็งทั้งหมดและชีโอดีทั้งหมด งานวิจัยนี้แสดงถึงความเป็นไปได้ของ

กระบวนการปรับปรุงสภาพโดยใช้ไอน้ำร้อนซึ่งสามารถนำไปใช้งานจริงได้ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่มีไอน้ำร้อนเป็นผลผลิตพลอยได้จากระบวนการสกัด ซึ่งท้ายที่สุดจะสามารถพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในการหมักขั้นที่2 ต่อไป

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ กลีเซอรอลดิบ กากตะกอนดีแคนเตอร์ การหมักร่วม การปรับปรุงสภาพเบื้องต้น

ABSTRACT

This study focuses on the optimization of biogas production and the maximization of waste management efficiency. Co-digestion of decanter cake and crude glycerol (GLC) on biohydrogen fermentation was carried out in the first stage and then the effluent was collected and pretreated for the batch fermentation in the second stage. This work was divided into 2 parts. 1) The semi-continuous fermentation in 20 L reactor showed the optimal HRT of 2 days could maintain the fermentation process and dilute the acidity condition. The maximum yield of hydrogen production of 43.33 L/kgTS_{added}, hydrogen production rate of 0.89 L/L.d and energy recovery of 0.11 kWh/kgTS_{added} were obtained from the controlled HRT of 2 days with 1.5% GLC co-digestion. 2) Pre-treatment of hydrogenic effluent from the single stage of biogas fermentation by ozonation and thermal steam were conducted in 100 mL serum bottles (working volume of 80 mL). Thermal steam pre-treatment of hydrogenic effluent strongly resulted in the overall two-stage fermentation process. Results showed that the maximum methane production (P) of 385 mL in the second stage was observed at the condition of hydrogenic effluent pretreated by thermal steam. This work demonstrated the practical pretreatment by thermal steam, byproduct from the Palm Oil Mill, to improve the efficiency of biogas production in the second stage.

Keywords: biogas, crude glycerol, decanter cake, co-digestion, pre-treatment

บทนำ

ปัจจุบันความตระหนักในด้านแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การขยับตัวของราคาเชื้อเพลิงเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อเศรษฐกิจโดยตรงต่อประเทศที่ต้องพึ่งพาแหล่งเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ นอกจากนี้

แหล่งเชื้อเพลิงดังกล่าวยังเป็นแหล่งที่ใช้แล้วหมดไปและที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงก่อให้เกิดแนวคิดในการหาแหล่งเชื้อเพลิงที่เป็นแหล่งพลังงานแบบยั่งยืนเพื่อทดแทนแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ซึ่งแหล่งพลังงานทดแทนใหม่นั้นจะต้องเป็นแหล่งพลังงานที่หมุนเวียนได้และไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

ก๊าซไฮโดรเจนได้รับการคาดการณ์ว่าจะเป็นพลังงานแห่งอนาคตเนื่องจากมีค่าพลังงานความร้อนต่อน้ำหนักสูงกว่าก๊าซชนิดต่าง ๆ (เช่น โพรเพน และมีเทน) ที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ถึง 2.7 เท่า (Ramachandran & Raghu, 1998) และการเปลี่ยนไฮโดรเจนให้เป็นพลังงานไม่ปลดปล่อยสิ่งที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนตรัสออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดย ผลิตภัณฑ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากการเปลี่ยนไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงก็คือ ไอน้ำ ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าไฮโดรเจนเป็นพลังงานสะอาด นอกจากนี้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของไฮโดรเจนในรถยนต์ต้นแบบจะมีค่าสูงกว่าการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันปิโตรเลียมถึง 50% (Ramachandran and Raghu, 1998) ข้อดีของก๊าซไฮโดรเจนอีกประการก็คือสามารถที่จะทำให้อยู่ในรูปของแข็ง (metal hydride) ได้ (Billings, 1991)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีวัตถุดิบชีวมวลเป็นจำนวนมากรวมถึงของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการเกษตรเหล่านี้มีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้เทคโนโลยีชีวภาพได้ อาทิ กากชีวะรอลดิบและกากตะกอนดีแคนเตอร์เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์มดิบและอุตสาหกรรมต่อเนื่องผลิตไบโอดีเซล ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากหลายปาล์มสดที่ใช้ในการผลิต 1 ตัน จะก่อให้เกิดกากตะกอนดีแคนเตอร์ 42 กิโลกรัมซึ่งเป็นสารชีวมวลที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์มากถึง 89 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนอยู่ 48 และ 19 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งตามลำดับ (Onwueme and Singh, 1991) และมีค่า COD อยู่ 880 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (Paepatung, 2009) ส่วนกากชีวะรอลดิบเป็นของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมต่อเนื่องการผลิตไบโอดีเซล การผลิตไบโอดีเซลเกิดจากการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันและไขมัน รวมไปถึงน้ำมันที่ผ่านการใช้งานจะได้กากชีวะรอลที่มีความบริสุทธิ์ต่ำกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลผลิตรวมด้วยประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตไบโอดีเซลทั้งหมด กากชีวะรอลที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ต่ำ ประกอบด้วย กากชีวะรอล 58-82% เอทานอลหรือเมทานอล 1-2% น้ำ 10-13% โซเดียมคลอไรด์ 6-8% สารประกอบอินทรีย์ (เมทิลเอทิลเอสเทอร์) และกรดไขมันอิสระที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาและยังคงเหลืออยู่ 1-2% (Cvengros & Povazance, 1996) ในกระบวนการทำกากชีวะรอลให้บริสุทธิ์นั้นต้องผ่านกระบวนการแยกสารอินทรีย์และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออก ทำให้มีขั้นตอนและมีค่าใช้จ่ายสูงมากขึ้น ในกรณีโรงงานขนาดใหญ่กากชีวะรอลดิบจะถูกทำให้บริสุทธิ์มากขึ้นเพื่อจัดจำหน่าย

แต่สำหรับผู้ผลิตขนาดเล็ก เช่น อุตสาหกรรมขนาดเล็ก การผลิตไบโอดีเซลจากชุมชน การทำให้กลีเซอรอลบริสุทธิ์จะมีต้นทุนที่สูง จึงเลือกที่จะขายต่อไปยังโรงงานที่ทำกลีเซอรอลบริสุทธิ์โดยตรง แต่เนื่องจากปัจจุบันมีการขยายตัวของโรงงานผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจำนวนมาก ทำให้มีกลีเซอรอลดิบมากเกินความต้องการของตลาดที่ต้องการ ส่งผลทำให้ราคากลีเซอรอลดิบต่ำลง บางโรงงานกำจัดกลีเซอรอลโดยการเผา จะทำให้กลีเซอรอลกลายเป็นอะโครลีนซึ่งเป็นสารประกอบระเหยได้ที่เป็นพิษและเป็นอันตรายต่อร่างกาย ดังนั้นจึงต้องหาแนวทางการจัดการที่นำไปใช้ประโยชน์อย่างเช่นการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อให้เกิดการจัดการที่เหมาะสมขึ้นได้ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากกลีเซอรอลดิบ โดยใช้กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Fountoulakis & Manios, 2009) และงานวิจัยหลายชิ้นได้ใช้กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมย่อยกับสารตั้งต้นอื่น โดยในงานวิจัยของ Fountoulakis et al. (2009) จะใช้กลีเซอรอลร่วมย่อยกับขยะมูลฝอยจากเทศบาล และอุตสาหกรรมเกษตร Limsuk et al. (2011) ใช้เศษอาหารหมักร่วมกับกลีเซอรอล Amon et al. (2006) และ Astals et al. (2011) จะใช้มูลสุกรหมักร่วมกับกลีเซอรอลเพื่อผลิตเป็นก๊าซมีเทน

และเมื่อศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นของกลีเซอรอลดิบด้วยความร้อนจากไอน้ำและโอโซนก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนเอกสารพบว่าข้อดีของการปรับปรุงสภาพด้วยไอน้ำร้อน การปรับปรุงสภาพด้วยไอน้ำร้อนมีความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากไอน้ำร้อนเป็นผลผลิตพลอยได้ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ที่สามารถนำมาใช้ได้โดยไม่เพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิต ส่วนข้อดีของการบำบัดเบื้องต้นด้วยโอโซนเนชั่น คือจะไม่เพิ่มความเข้มข้นของเกลือและไม่ทิ้งสารออกซิแดนซ์ตกค้างอยู่ภายหลังการบำบัด (Goel et al., 2003 และ Weemaes et al., 2000) รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิไดซ์หมู่ฟังก์ชันของกลีเซอรอล ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น กรดอะซิติกและกรดฟอร์มิก ซึ่งง่ายต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพต่อไป ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่มีการใช้กระบวนการโอโซนในการปรับปรุงสารตั้งต้นที่เป็นของเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก เช่น Arriunbaatar et al. (2014) ได้ทำการศึกษาผลของการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นของขยะเศษอาหารโดยใช้ความร้อนและวิธีโอโซนเนชั่นในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน พบว่าทั้งกระบวนการปรับปรุงสภาพด้วยความร้อนและโอโซนเนชั่นสามารถเพิ่มผลผลิตมีเทนได้เมื่อเปรียบเทียบกับหมักเศษอาหารที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพเบื้องต้น Pisutpisal et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียปาล์มด้วยวิธีการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นด้วยโอโซนเนชั่น พบว่าค่าผลผลิตก๊าซไฮโดรเจน อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียปาล์มที่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่น

มีค่าสูงกว่าน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้น

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการนำกลีเซอรอลดิบและกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาหมักร่วมกันเพื่อผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมหมุน (Continuous stirred tank reactor, CSTR) นอกจากนี้ผู้วิจัยยังมีการนำส่วนของเหลวที่ผ่านการหมักจากขั้นตอนที่ 1 มาใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมักในขั้นตอนที่ 2 เพื่อผลิตเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งจะสามารถลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ต้องนำไปกำจัด และเพิ่มมูลค่ากลีเซอรอลดิบและกากตะกอนดีแคนเตอร์ ถือเป็นการจัดการของเสียทั้งระบบให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

วัสดุและอุปกรณ์

1. กลีเซอรอลดิบ (Crude Glycerol, GLC)

กลีเซอรอลดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์มาจากบริษัท ตรังน้ำมันปาล์ม จำกัด ซึ่งมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล (รูปที่ 1) วิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกลีเซอรอลแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 กลีเซอรอลดิบ

2. กากตะกอนดีแคนเตอร์ (Decanter cake, DC)

กากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์มาจากบริษัท สุขสมบุญร น้ำมันปาล์ม จำกัด (อ.หนองใหญ่ จ.ชลบุรี) โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1

3. เชื้อจุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นจุลินทรีย์เชื้อผสมที่ได้มาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) จากบริษัทเสริมสุข จำกัด (มหาชน) จังหวัดปทุมธานี เชื้อจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม

4. ขวดหมักขนาด 100 มิลลิลิตร และรีแอกเตอร์ขนาด 20 ลิตร

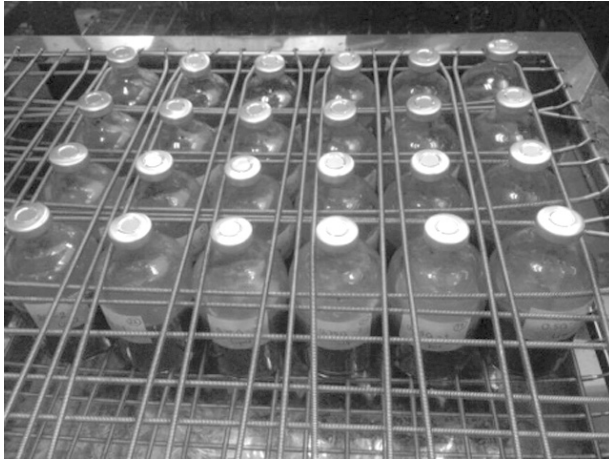
ขวดหมักที่ใช้ในการทดลองเป็นขวดหมักขนาด 100 มิลลิลิตร ปากขวดปิดด้วยยางซิลิโคนและหุ้มด้วยฝาอะลูมิเนียม ปริมาตรที่ใช้สำหรับการทดลองเท่ากับ 80 มิลลิลิตร

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของกลีเซอรอลดิบและกากตะกอนดีแคนเตอร์ (Kanchanasuta and Pisutpaisal, 2016)

Parameter	Crude glycerol	Decanter cake
Total solids (TS)	NA	197,670 mg/kg
Total volatile solids	NA	169,740 mg/kg
Total COD	443,262 mg/kg	NA
Soluble COD	115,248 mg/kg	NA
Total carbon	NA	47.35 %ww ⁻¹
Total nitrogen	NA	4.34 %ww ⁻¹
Cellulose	NA	50.07 %ww ⁻¹
Hemicellulose	NA	30.74 %ww ⁻¹
Lignin	NA	10.40 %ww ⁻¹
pH	8.76	NA
Conductivity	529 μscm^{-1}	NA
FOG	5,222 mgL^{-1}	NA
Methanol	0.36 %vv ⁻¹	NA
TOC	414,666 mgL^{-1}	NA

NA = Not Analyzed

ส่วนรีแอกเตอร์ชนิดกวนผสมหมุน (CSTR) ขนาด 20 ลิตรทำจากสแตนเลส โดยเจาะช่องตรงกลางเป็นอะคริลิกใส มีตู้ควบคุมสภาวะต่างๆ ของระบบหมัก ซึ่งได้แก่ชุดควบคุมอุณหภูมิและความเร็วรอบ โดยรีแอกเตอร์จะถูกต่อเข้ากับเครื่องวัดแก๊สอัตโนมัติแบบแทนทีน้ำ (gas counter) และมีช่องสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊สและของเหลวเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 2 ขวดเซรามิคขนาด 100 มิลลิลิตร
และ รีแอกเตอร์แบบกวนผสมหมุน (CSTR) ขนาด 20 ลิตร

ตารางที่ 2 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างที่พารามิเตอร์ต่าง ๆ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง
พีเอช (pH)	ใช้ pH meter (Mettler Toledo รุ่น LE 409, Ohio, USA)
ของแข็ง (Solids)	วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน (APHA and WEF, 1992)
ซีโอดี (COD)	วิเคราะห์ด้วยวิธีรีฟลักซ์ปิดแบบเทียบสีตามวิธีมาตรฐาน (APHA and WEF, 1992)
ปริมาณกลีเซอรอล	วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน Chromatropic acid method (Handel, 1961)
กรดอินทรีย์ระเหย (VFA)	วิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Shimadzu GC-2010 Gas Chromatograph, Japan)

วิธีการทดลอง

กระบวนการหมักร่วมก๊าซไฮโดรเจนจากกากตะกอนดีแคนเตอร์และกลีเซอรอลดิบแบบกึ่งต่อเนื่องในถังรีแอกเตอร์แบบกวนสมบูรณ์ (CSTR) ขนาด 20 ลิตร โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมักโดยแปรผันระยะเวลาพักเก็บ (HRT) เท่ากับ 4 วัน และ 2 วัน ตามลำดับ ในกระบวนการหมักที่ระยะเวลาพักเก็บ (HRT) เท่ากับ 4 วัน จะทำการหมักร่วมระหว่างกากตะกอนดีแคนเตอร์เท่ากับร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด และกลีเซอรอลความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการเติมเชื้อจุลินทรีย์จากภายนอกจำนวน 4 ลิตร ผสมให้ได้ปริมาณ 16 ลิตร ใส่ลงในถังรีแอกเตอร์ขนาด 20 ลิตร ในกระบวนการผลิตจะควบคุมพีเอชไว้ที่ 7 โดยใช้ 3N NaOH หรือ 3N HCl ในการปรับพีเอช ทำการหมักที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ทำการปรับสภาวะแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจน ทำการเปลี่ยนอาหารใหม่จำนวน 4 ลิตรทุกวัน และเก็บตัวอย่างส่วนของเหลวในแต่ละวันเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับในกระบวนการหมักที่ระยะเวลาพักเก็บ (HRT) เท่ากับ 2 วัน จะทำการหมักร่วมระหว่างกากตะกอนดีแคนเตอร์เท่ากับร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตรของแข็งทั้งหมด และกลีเซอรอลความเข้มข้น 1 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการเติมเชื้อจุลินทรีย์จากภายนอกจำนวน 4 ลิตร การปรับสภาวะในกระบวนการหมักเหมือนกระบวนการหมักที่ระยะเวลาพักเก็บ (HRT) เท่ากับ 4 วัน ทำการเปลี่ยนอาหารใหม่จำนวน 8 ลิตรทุกวัน และทำการเก็บตัวอย่างส่วนของเหลวทั้งหมดที่เหลือจากส่วนของที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์นำไปเก็บไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นตอนที่ 2 ในการตรวจวัดพารามิเตอร์จะทำการวัดปริมาตรก๊าซโดยใช้เครื่อง gas counter ทุก ๆ 1 วัน ตัวอย่างของเหลวที่เก็บในแต่ละวันจะนำไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ซีไอดี กลีเซอรอล น้ำตาลทั้งหมด และ volatile fatty acid (VFAs) ส่วนการทดลองในขั้นตอนที่ 2 จะนำตัวอย่างส่วนของเหลวที่ได้จากกระบวนการหมักขั้นตอนที่ 1 มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทดลองในขั้นตอนที่ 2 โดยแปรผันสภาวะการทดลองโดยการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการไอโซเนชั่นและการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อน ทำการเติมไอโซนด้วยเครื่องเติมไอโซน 250 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง เป็นเวลา 20 และ 60 นาที กระบวนการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนเป็นเวลา 90 นาที แล้วนำส่วนของเหลวที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วไปหมักต่อในกระบวนการหมักก๊าซมีเทนแบบแบทช์ (Batch Fermentation) ในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรตัวอย่างเท่ากับ 80 มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะการหมักแบบควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียสในตู้ควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaker incubator) ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที (rpm) เปรียบเทียบกับกระบวนการหมักที่ไม่มีการปรับสภาพน้ำหมัก โดยแต่ละสภาวะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

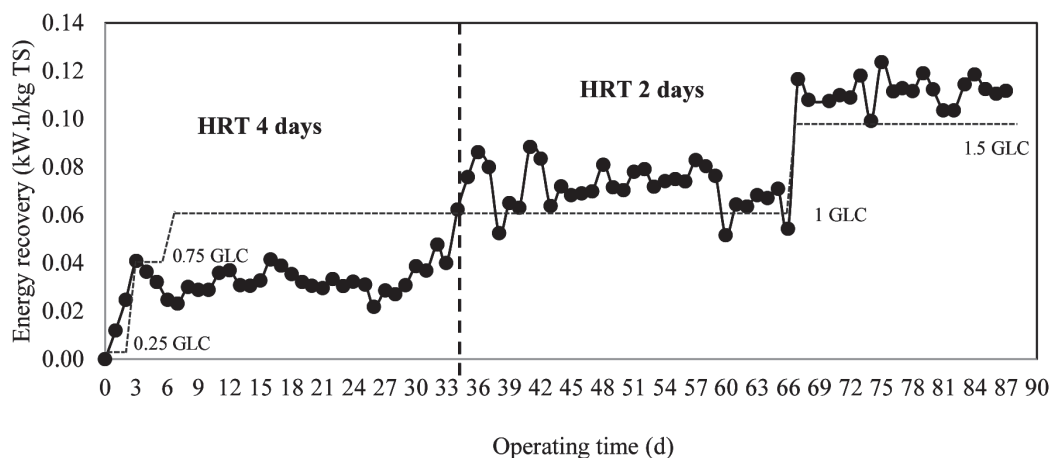
ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการทดลองในถังหมักขนาด 20 ลิตรโดยระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง ที่สภาวะความเข้มข้นของแข็งทั้งหมดร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตรร่วมกับกลีเซอรอลดิบที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 และ 1.5 โดยมวลต่อปริมาตร โดยมีการเติมเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มในระบบ ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมักที่ HRT 2 และ 4 วัน ซึ่งจะนำค่าผลผลิตก๊าซไฮโดรเจน อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และค่าปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่ได้จากการคำนวณในถังหมักขนาด 20 ลิตร ผลการทดลองพบว่าในช่วงการหมักระยะที่ 1 (HRT 4 วัน และความเข้มข้นกลีเซอรอลร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร : วันที่ 1-33) มีค่าร้อยละก๊าซไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 33 - 44 โดยปริมาตร มีค่าสูงที่สุดในวันที่ 16 ที่ร้อยละ 44 โดยปริมาตร ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 2,860 - 5,474 มิลลิลิตร โดยมีค่าการผลิตสูงสุดในวันที่ 16 ในช่วงการหมักระยะที่ 2 (HRT 2 วัน และความเข้มข้นกลีเซอรอลร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร : วันที่ 34 - 65) มีค่าร้อยละก๊าซไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 34-49 โดยปริมาตร มีค่าสูงที่สุดในวันที่ 44 ที่ร้อยละ 49 โดยปริมาตร ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 6,806 - 11,644 มิลลิลิตร โดยมีค่าการผลิตสูงสุดในวันที่ 41 ในช่วงการหมักระยะสุดท้าย (HRT 2 วัน และความเข้มข้นกลีเซอรอลร้อยละ 1.5 โดยมวลต่อปริมาตร : วันที่ 66-87) ผลการทดลองพบว่า มีค่าร้อยละก๊าซไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 34 - 44 โดยปริมาตร มีค่าสูงที่สุดในวันที่ 75 ที่ร้อยละ 44 โดยปริมาตร ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 13,074 - 16,301 มิลลิลิตร โดยมีค่าการผลิตสูงสุดในวันที่ 75 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 50.9 ลิตรไฮโดรเจนต่อกิโลกรัมของแข็งทั้งหมด เมื่อเทียบปริมาณผลผลิตที่ผลิตได้ในระยะการหมักช่วงที่ 1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.8 ลิตรไฮโดรเจนต่อกิโลกรัมของแข็งทั้งหมด และปริมาณผลผลิตที่ระยะการหมักช่วงที่ 2 และ 3 มีแนวโน้มสูงขึ้นเป็น 30.0 และ 43.3 ลิตรไฮโดรเจนต่อกิโลกรัมของแข็งทั้งหมดตามลำดับ (ตารางที่ 3) และจากการคำนวณปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหน่วยกิโลวัตต์.ชั่วโมง พบว่า มีปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.12 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัมของแข็งทั้งหมด ในช่วงสุดท้ายของการหมักวันที่ 75 (รูปที่ 3)

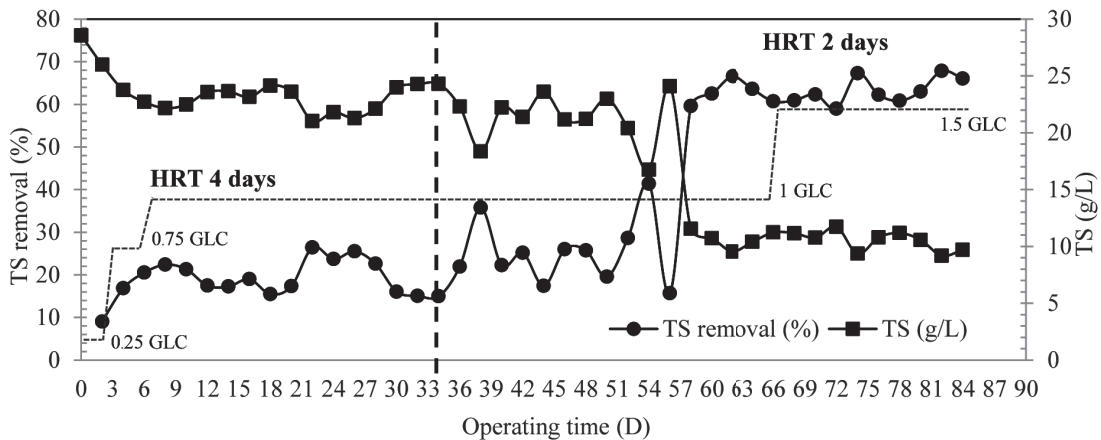
ตารางที่ 3 สรุปเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตก๊าซไฮโดรเจน และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังหมักขนาด 20 ลิตร

condition	Yield	Productivity	Energy recovery	
	L/kgTS _{added} d	L/L.d	kWh/kgTS _{added} d	kWh/L.d(x10 ⁻³)
HRT 4 d				
1%GLC	14.77	0.3	0.04	0.7
HRT 2 d				
1%GLC	30.02	0.61	0.07	1.5
1.5%GLC	43.33	0.89	0.11	2.2

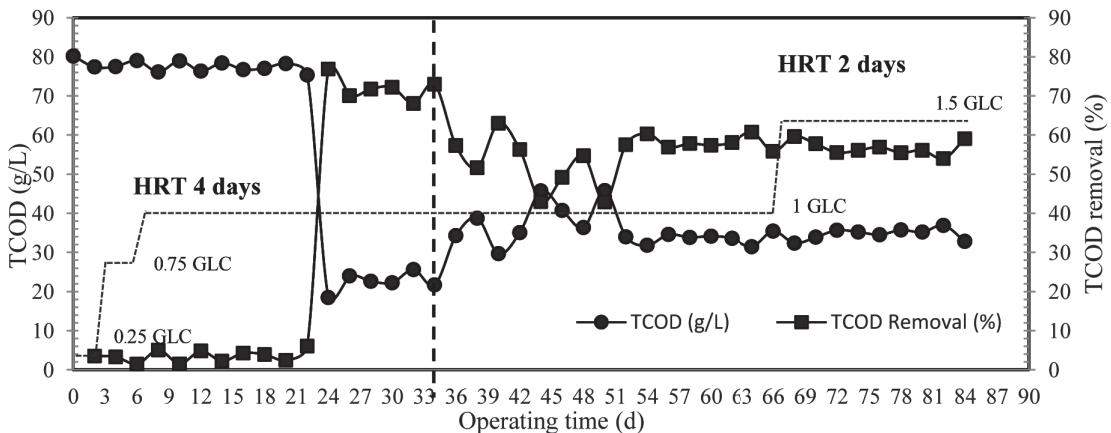
ประสิทธิภาพการกำจัดของเสียในรูปของของแข็งทั้งหมดพบว่า มีแนวโน้มที่สูงขึ้นที่ระยะการหมักในช่วงที่ 2 และ 3 โดยมีการกำจัดของแข็งทั้งหมดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 67 ในวันที่ 74 และวันที่ 82 ของการหมัก (รูปที่ 4) ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้มีแนวโน้มลดลงในช่วงการหมักที่ 2 เมื่อลดระยะเวลาการกักเก็บ (HRT) เท่ากับ 2 วัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงการหมักที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่ 3 เช่นกัน โดยปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกใช้มีค่าสูงสุดอยู่ที่ระยะการหมักในช่วงที่ 3 เมื่อปรับลดระยะเวลาการกักเก็บ HRT เท่ากับ 2 วัน และความเข้มข้นกลีเซอรอลในกระบวนการหมักรวมเท่ากับร้อยละ 1.5 โดยมวลต่อปริมาตร ส่วนการกำจัดชีโอดีทั้งหมดมีค่าสูงสุดที่ระยะการหมักในช่วงที่ 1 ในวันที่ 24 -34 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 58 (รูปที่ 5)



รูปที่ 3 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณจากกระบวนการหมักในถังหมักขนาด 20 ลิตร



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดจากกระบวนการหมัก
ในถังหมักขนาด 20 ลิตร



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งหมดจากกระบวนการหมัก
ในถังหมักขนาด 20 ลิตร

เมื่อพิจารณา เปรียบเทียบปริมาณผลผลิตไฮโดรเจนจากการวิจัยครั้งนี้ กับการวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าปริมาณผลผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักร่วมกากตะกอนดีแคแเตอร์และกลีเซอรอลดิบ มีค่าสูงกว่า กระบวนการหมักไฮโดรเจนจากวัตถุดิบอื่น ๆ เช่น เศษอาหาร น้ำเสียจากโรงงาน และของเสียจากภาคเกษตรกรรม เป็นต้น (ตารางที่ 4) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้กระบวนการหมักร่วมระหว่างกากตะกอนดีแคแเตอร์กับกลีเซอรอลดิบ กากตะกอนดีแคแเตอร์เป็นทั้งวัตถุดิบ และแหล่งของเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก ส่วนกลีเซอรอลดิบจะมีผล

โดยตรงต่อการรักษาระดับค่าพีเอชในถังหมัก ส่งผลให้กระบวนการไฮโดรไลซิสและกระบวนการหมักโดยรวมมีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนสูงกว่ากระบวนการหมักที่ใช้วัตถุดิบเพียงอย่างเดียวเป็นสารตั้งต้น (Limsuk et al., 2011)

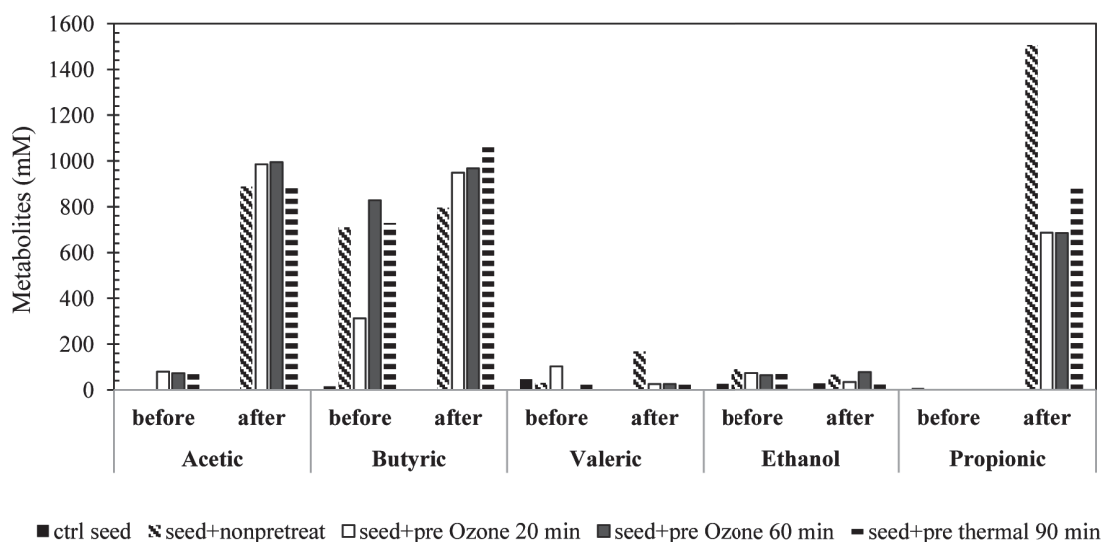
ตารางที่ 4 สรุปเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักกับงานวิจัยที่ผ่านมา

สารตั้งต้น	กระบวนการผลิต	อุณหภูมิ (°C)	ค่าปริมาณผลผลิต	เอกสารอ้างอิง
กากตะกอนดีแคนเตอร์ และกลีเซอรอลดิบ	Semi-continuous	55	43.3 L/kg _{TS}	ผลการวิจัยครั้งนี้ Cheng et al., 2016
กากตะกอนน้ำเสีย	CSTR	35	38.8 L/kg _{VS}	Fountoulakis et al., 2009
น้ำเสียจากการผลิต	CSTR	35	0.65 L/kg _{VS}	Fu et al., 2017
น้ำมันมะกอก +				Liu et al., 2006
น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ +				Pakarinen et al., 2011
กลีเซอรอลดิบ				Rafeenia et al., 2017
ของเสียจากโรงผลิตเหล้า	Batch	37	14.8 L/kg _{VS}	Seong et al., 2014
ของเสียจากครัวเรือน	CSTR	37	43 L/kg _{VS}	Zhu et al., 2008
หญ้าให้อาหารสัตว์	Batch	55	6.46 L/kg _{VS}	
เศษอาหาร	Batch	35	5.3 L/kg _{VS}	
น้ำเสียจากบ่อเกรอะ	Semi-continuous	-	2.52 L/kg _{VS}	
และน้ำเสียจากครัวเรือน				
ของเสียจากมันฝรั่ง	CSTR	-	30 L/kg _{TS}	

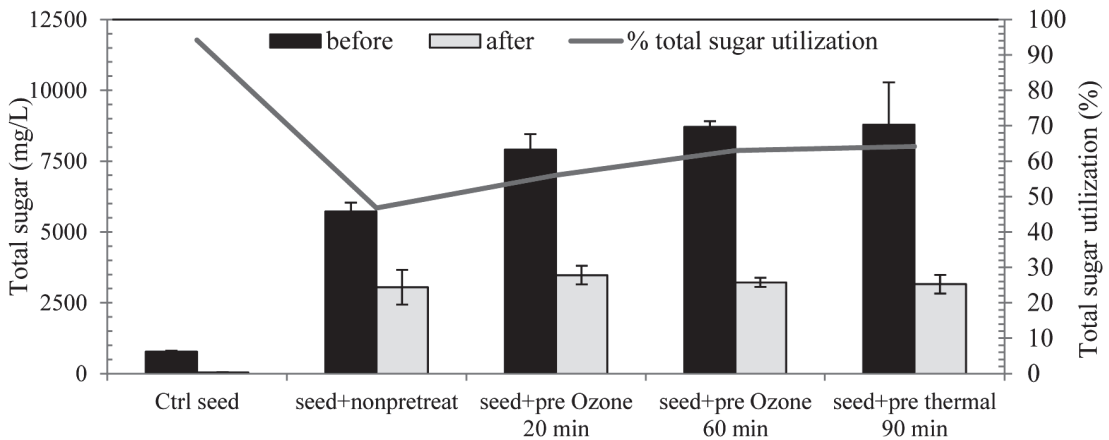
การทดลองในขั้นตอนที่ 2 การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพโดยรวมเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองทางเลือกให้กับอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่มีในส่วนกระบวนการผลิตต่อเนื่องไบโอดีเซล รวมถึงการจัดการของเสียให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด การทดลองนี้ได้ถูกออกแบบเพื่อเปรียบเทียบผลการปรับสภาพเบื้องต้นน้ำหมักจากขั้นตอนที่ 1 ด้วยวิธีโอโซนเนชั่น และวิธีการใช้ไอน้ำร้อน กับน้ำหมักที่ไม่ผ่านการปรับสภาพในกระบวนการหมักก๊าซมีเทนในขั้นตอนที่ 2 โดยได้เลือกสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา (Kanchanasuta et al., 2017) ที่ให้ค่าการปลดปล่อยน้ำตาลสูงที่สุด ได้แก่ การเติมโอโซนด้วยเครื่องเติมโอโซนที่กำลังการผลิต 250 มิลลิกรัมโอโซนต่อชั่วโมง เป็นระยะเวลา 20 และ 60 นาที เปรียบเทียบกับการใช้ไอน้ำร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 90 นาที ผลการทดลองพบว่า ที่สภาวะการหมักน้ำหมักที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำร้อนเป็นเวลา 90 นาที ให้ค่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด

รองลงมาคือ ที่สภาวะการหมักของเสียที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีไอโซเนชั่นเป็นเวลา 20 และ 60 นาที ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (P) ที่สภาวะการหมักของเสียที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนจากไอน้ำร้อนมีค่าเท่ากับ 385 มิลลิลิตร ซึ่งมากกว่าประมาณ 2 เท่าของค่าผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดที่ได้จากสภาวะการหมักของเสียที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (184 มิลลิลิตร) ประสิทธิภาพการกำจัดของเสียในรูปของการกำจัดของแข็งทั้งหมดพบว่า ที่สภาวะการหมักน้ำหมักที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีไอโซเนชั่นเป็นเวลา 20 นาที มีค่าสูงสุด รองลงมาคือการหมักน้ำหมักที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนจากไอน้ำร้อน การหมักน้ำหมักที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีไอโซเนชั่นเป็นเวลา 60 นาที ในขณะที่ ค่าการกำจัดชีโอดีทั้งหมดมีค่าสูงสุดที่สภาวะการหมักน้ำหมักที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผลการทดลองแสดงถึงความสามารถในการกำจัดของเสียในกระบวนการหมักแบบสองขั้นตอน ในสภาวะปกติที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ จุลินทรีย์ในระบบจะทำหน้าที่ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ยังหลงเหลืออยู่ในขวดหมักและเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซมีเทนในขั้นตอนสุดท้าย รวมถึงการใช้ กรดอินทรีย์ระเหยง่ายโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นก๊าซมีเทนต่อไป ซึ่งจากผลดังกล่าวเมื่อพิจารณาจากค่าพีเอชที่ลดลงต่ำกว่า 5 และปริมาณกรดอะซิติก และ กรดโพรพาโนอิกที่ถูกผลิตขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่น ๆ สภาวะดังกล่าวไม่เหมาะสม ต่อการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน (methanogens) โดยทั่วไปกลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิต มีเทนจะทำงานได้ในช่วงค่าพีเอชที่แคบ ประมาณ 6.8-7.2 ดังนั้นจากสภาวะดังกล่าวจึงเป็นไปได้ ว่ากลุ่มเมทาโนเจนไม่สามารถที่จะดูดซึมกรดอะซิติกไปใช้ นอกจากนั้นกลุ่มจุลินทรีย์ชนิด hydrolytic bacteria จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ยังคงเหลืออยู่ในกระบวนการหมักกรด และเนื่องจากสภาวะการหมักมีค่าพีเอชที่ลดลง จึงส่งผลต่อวิถีการผลิตกรดโพรพาโนอิกซึ่งเป็น สารรีดิคซ์ที่สามารถปรับสมดุลของโปรตอนในระบบหมักได้ จะเห็นได้จากค่าความเข้มข้นของ กรดโพรพาโนอิกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุกสภาวะการหมักโดยมีค่าสูงสุดที่สภาวะ การหมักของเสียที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ภาวะเช่นนี้ส่งผลโดยตรงต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นอีกชนิดหนึ่งในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) เช่นเดียวกันกับการผลิตกรดอะซิติกและกรดบิวทิริกซึ่งมีแนวโน้มการผลิตที่สูงขึ้นภายหลัง กระบวนการหมักก๊าซมีเทน (รูปที่ 6) ในขณะที่ค่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยภายหลัง กระบวนการปรับสภาพพบว่ามีค่าที่เพิ่มขึ้นในทุกสภาวะการทดลองโดยมีค่าสูงสุดที่สภาวะ การปรับสภาพน้ำหมักด้วยความร้อนจากไอน้ำร้อน (รูปที่ 7) เช่นเดียวกันกับค่าการใช้น้ำตาล ทั้งหมดที่สภาวะดังกล่าวมีค่าสูงสุด จึงสามารถสรุปได้ว่าภายใต้การหมักขั้นที่ 2 น้ำหมัก ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยไอน้ำร้อนให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพ การปลดปล่อยน้ำตาลซึ่งสามารถถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมัก ผลผลิตก๊าซ มีเทนที่เกิดขึ้น รวมถึงการกำจัดของเสียในรูปของแข็งทั้งหมดและชีโอดีทั้งหมด อีกทั้งการ

ปรับสภาพด้วยความร้อนจากไอน้ำร้อนยังมีความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์เนื่องจากไอน้ำร้อนถือเป็นผลผลิตพลอยได้ชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการปรับสภาพได้ จากผลการศึกษาทั้งหมดจะเห็นว่ากระบวนการหมักแบบ 2 ขั้นตอนร่วมกับการปรับสภาพของเสียที่ผ่านขั้นตอนแรกด้วยวิธีการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนส่งผลทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดของเสียและการเพิ่มแหล่งพลังงานสำรองทางเลือกสำหรับโรงงาน อย่างไรก็ตามข้อเสนอแนะเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตแหล่งพลังงานสำรองและพัฒนาไปสู่การจัดการของเสียอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและโรงงานต่อเนื่องผลิตไบโอดีเซลควรมีการนำเอาผลการศึกษาไปประยุกต์ให้เข้ากับระบบบำบัดน้ำเสีย (POME) หรือระบบผลิตก๊าซชีวภาพเดิมเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่อไป



รูปที่ 6 สารเมตาบอไลต์ที่เกิดจากการหมักของเสียที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีแตกต่างกัน



รูปที่ 7 น้ำตาลทั้งหมดและประสิทธิภาพการใช้น้ำตาลทั้งหมดที่เกิดจากการหมักของเสีย
ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีแตกต่างกัน

สรุป

จากการศึกษาการพัฒนากระบวนการหมักร่วมของผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกี่ยวเนื่องกัน ระหว่างอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม และอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ในรูปก๊าซไฮโดรเจน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการหมักก๊าซไฮโดรเจนในถังหมักขนาด 20 ลิตร ด้วยรูปแบบการหมักร่วมกากตะกอนดีแคนเตอรืกับกลีเซอรอลดิบ พบว่าค่าผลผลิตก๊าซไฮโดรเจน อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณในถังหมักขนาด 20 ลิตรภายใต้สภาวะการหมักที่ควบคุม HRT เท่ากับ 2 วัน และความเข้มข้นกลีเซอรอลในกระบวนการหมักร่วมเท่ากับร้อยละ 1.5 โดยมวลต่อปริมาตร มีค่าสูงสุด และเนื่องจากของเสียที่ผ่านกระบวนการหมักก๊าซไฮโดรเจนในขั้นตอนที่ 1 ยังคงมีค่าสารอินทรีย์ตกค้างในปริมาณสูง จึงได้ศึกษาการนำของเสียจากกระบวนการหมักก๊าซไฮโดรเจนไปบำบัดหรือใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อ โดยการใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมักก๊าซมีเทนในขั้นตอนที่ 2 โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน ระหว่างการหมักของเสียที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ของเสียที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีโอโซนเนชั่น และของเสียที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อน ผลการทดลองพบว่า ภายใต้การหมักแบบสองขั้นตอนโดยของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยไอน้ำร้อนให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการปลดปล่อยน้ำตาล ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น รวมถึงการกำจัดของเสียในรูปของแข็งทั้งหมดและซีไอดีทั้งหมด

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการพัฒนากาารวิจัยการเกษตร จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ร่วมกับสำนักงานพัฒนากาารวิจัยการเกษตร (สวก.) ทุนมุ่งเป้าเพื่อพัฒนาประเทศ กลุ่มปาล์มน้ำมัน ประจำปีงบประมาณ 2559

เอกสารอ้างอิง

- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Pötsch, E. & Zollitsch, W. (2006). Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: effects of dairy systems and of glycerine supplementation. **International Congress Series.** 1293, 217-220.
- Ariunbaatar, J., Panico, A., Frunzo, L., Esposito, G., Lens, P.N. & Pirozzi, F. (2014). Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pre-treatment methods. **Journal of environmental management.** 146, 142-149.
- Astals, S., Nolla-Ardèvol, V. & Mata-Alvarez, J. (2012). Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate. **Bioresource Technology.** 110, 63-70.
- Billings R.E. (1991). The hydrogen worldview. **American Academy of Science.** 5, 66–76.
- Cheng J., Ding L., Lin R., Liu M., Zhou J. & Cen K. (2016). Physicochemical characterization of typical municipal solid wastes for fermentative hydrogen and methane co-production. **Energy Conversion and Management.** 117, 297–304.
- Cvengrus, J. & Povazanec, F., (1996) Production and Treatment of Rapeseed Oil Methyl Ester as Alternative Fuels for Diesel Engines. **Bioresource Technology.** 55, 145-152.
- Fountoulakis, M.S. & Manios, T. (2009). Enhanced methane and hydrogen production from municipal solid waste and agro-industrial by-products co-digested with crude glycerol. **Bioresource technology.** 100(12), 3043-3047.
- Fu, S.F., Xu, X.H., Dai, M., Yuan, X.Z. & Guo, R.B. (2017). Hydrogen and methane production from vinasse using two-stage anaerobic digestion. **Process Safety and Environmental Protection.** 107, 81-86.
- Goel, R., Tokutomi, T., Yasui, H. & Noike, T. (2003). Optimal process configuration for anaerobic digestion with ozonation. **Water Science and Technology.** 48(4), 85-96.

- Kanchanasuta S. & Pisutpaisal N. (2016). Waste utilization of palm oil decanter cake on biogas fermentation. **International Journal Hydrogen Energy**. 41(35), 15661-15666.
- Kanchanasuta S., Kittipongpattana K. & Pisutpaisal N. (2017). Improvement of biohydrogen fermentation by co-digestion of crude glycerol with palm oil decanter cake. **Chemical Engineering Transactions**. 57, 1963-1968.
- Limsuk, S., Peantum, P. & Petiraksakul, A. (2011). Biogas production from food waste added with crude glycerin produced from biodiesel production. **Engineering and Applied Science Research**. 38(2), 101-110.
- Liu, D., Liu, D., Zeng, R. J. & Angelidaki, I. (2006). Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process. **Water Research**. 40(11), 2230-2236.
- Onwueme, I.C. & Sinha, T.D. (1991). **Field crop production in tropical Africa: principles and practice**. CTA.
- Paepatung N., Nopharatana A. & Songkasiri W. (2009). Bio-methane Potential of Biological Solid Materials and Agricultural Wastes. **Journal of Energy and Environment**. 10(1), 19-27.
- Pakarinen, O., Kaparaju, P. & Rintala, J. (2011). The effect of organic loading rate and retention time on hydrogen production from a methanogenic CSTR. **Bioresource technology**. 102(19), 8952-8957.
- Pisutpaisal, N., Tanikkul, P. & Phoochinda, W. (2014). Improvement of Mesophilic Biohydrogen Production from Palm Oil Mill Effluent Using Ozonation Process. **Energy Procedia**. 50, 723-728.
- Rafeenia, R., Giroto, F., Peng, W., Cossu, R., Pivato, A., Raga, R. & Lavagnolo, M.C. (2017). Effect of aerobic pre-treatment on hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion process using food waste with different compositions. **Waste Management**. 59, 194-199.
- Ramachandran R. & Raghu, K.M. (1998). An overview of industrial used of hydrogen. **International Journal Hydrogen Energy**. 23(7), 593-598.
- Seong, C.Y., Yoon, C.H. & Seo, G.T. (2014). Effect of food waste mixing on hydrogen gas production in anaerobic digestion of brown water from urine diversion toilet. **Journal of Korean Society of Environmental Engineers**. 36(12), 865-872.

- Weemaes, M., Grootaerd, H., Simoens, F., Huysmans, A. & Verstraete, W. (2000). Ozonation of sewage sludge prior to anaerobic digestion. **Water Science and Technology**. 42(9), 175-178.
- Zhu, H., Stadnyk, A., Béland, M. & Seto, P. (2008). Co-production of hydrogen and methane from potato waste using a two-stage anaerobic digestion process. **Bioresource Technology**. 99(11), 5078-5084.
-