

การเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากเส้นใยปาล์ม

โดยการปรับสภาพด้วยเอทานอล

ENHANCING THE POTENTIAL OF METHANE PRODUCTION

FROM OIL PALM FIBER BY ETHANOL PRETREATMENT

อรสา นานาน¹ สุพัตรา ชูเปีย¹ บุญญา ชาญนอก² พลากร บุญใส³ และสุชีวรรณ ยอยรูโรบ^{1*}

Orasa Naban¹, Supattra Choopia¹, Boonya Charnnok², Palakorn Boonsai³

and Sucheewan Yoyrurub^{1*}

บทคัดย่อ

เส้นใยปาล์มเป็นชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่น่าสนใจ แต่มีข้อจำกัดที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบ ทำให้การย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ยาก งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอทานอล ร้อยละ 10, 30 และ 50 ควบคุมอุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 30 นาที ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของเอทานอลที่เหมาะสมในการปรับสภาพเส้นใยปาล์มเพื่อผลิตก๊าซมีเทน คือ ร้อยละ 50 เนื่องจากลิกนินสามารถละลายในเอทานอลได้ดี ทำให้โครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพอยู่สภาวะที่เหมาะสมต่อการหมัก ที่สภาวะดังกล่าวมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ 161.8 ± 6.2 L CH₄/kgVS ซึ่งสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ปรับสภาพถึงร้อยละ 52.2 สามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ถึง 2.1 เท่า นอกจากนี้การแยกลิกนินออกจากของเหลวจากกระบวนการปรับสภาพเพื่อผลิตสารมูลค่าสูง และการกลั่นเอทานอลกลับมาใช้ใหม่ เป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่าเส้นใยปาล์มลดของเสียและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

คำสำคัญ: มีเทน การปรับสภาพด้วยเอทานอล การหมักแบบกะ เส้นใยปาล์ม

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

¹Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University, Mueang District, Songkhla Province 90000

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

²Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai District, Songkhla Province 90110

³คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210

³Faculty of Science, Thaksin University, Pa Phayom District, Phatthalung Province 93210

*corresponding author e-mail: sucheewan.yo@skru.ac.th

Received: 26 August 2021; Revised: 15 October 2021; Accepted: 21 October 2021

DOI: <https://doi.org/10.14456/lsej.2021.17>

Abstract

Oil Palm Fiber (OPF) is an interesting lignocellulose biomass but the limitation is the lignin component. It is difficult to decompose in anaerobic conditions for biogas production. This research aimed to study the effect of ethanol pretreatment (10-30% of ethanol) on the potential of methane production from oil palm fiber. Palm fiber pretreatment was performed at 190°C for 30 minutes. The results showed that the optimum concentration in ethanol pretreatment to enhance the potential methane from the palm fiber was 50% due to lignin was highly soluble in ethanol then the structure of pretreated OPF to be in optimum condition for fermentation. This pretreatment condition provided the highest potential methane of 161.8±6.2 LCH₄/kgVS which accounted for 52.2% higher than untreated oil palm fiber. In addition, this pretreatment condition can increase the potential of methane production by 2.1 times. Finally, valorizing lignin and recycling ethanol should be performed to achieve economic feasibility, reduce waste and be more environmentally friendly.

Keywords: Methane, Ethanol pretreatment, Batch digestion, Oil palm fiber

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพกำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการลดลงของปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้ทุกประเทศให้ความสนใจกับการผลิตพลังงานทดแทน โดยใช้วัตถุดิบที่มีอยู่ภายในประเทศ ในปี พ.ศ. 2558 กระทรวงพลังงานได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกปี พ.ศ.2558-2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015) เพื่อกำหนดกรอบและทิศทางการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศ โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเป็นร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย ภายในปี พ.ศ. 2579 ภายใต้ต้นทุนพลังงานที่เหมาะสม และสร้างความพึงพอใจให้กับทุกภาคส่วนที่จะใช้พลังงานทดแทนเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีเป้าหมายจะผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ 600 เมกะวัตต์ (Ministry of Energy, 2015)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีของเสียและเศษวัสดุต่าง ๆ จากภาคเกษตรกรรมอยู่ทั่วไป เช่น เศษวัสดุที่เป็นพืชผลทางการเกษตร มูลสัตว์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่พบได้ทั่วไป เช่น น้ำเสีย ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสีย ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เป็นต้น การนำของเสียทั้งจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ปัจจุบันปาล์มน้ำมันได้กลายเป็นพืชที่มีความสำคัญมากขึ้นเรื่อย ๆ ในประเทศไทย โดยเฉพาะในภาคใต้

การผลิตน้ำมันจากปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ผลที่ตามมา คือ วัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตมีเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยในกระบวนการผลิตปาล์มน้ำมันนั้นได้ปาล์มน้ำมันดิบประมาณร้อยละ 18-22 ซึ่งจะถูกนำไปแปรรูปเป็นน้ำมันสำหรับบริโภคหรือใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง และมีของเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการสกัดน้ำมันมากกว่าร้อยละ 70-80 ได้แก่ ทะลายเปล่า เส้นใยปาล์ม กากสัลด รวมถึงน้ำที่อยู่ในทะลายปาล์ม (Jungniyom, 2008) ของเสียเหล่านี้เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในด้านปัญหามูลฝอยที่กองสะสมในพื้นที่โรงงานในปริมาณมากทำให้เกิดการหมักในสภาพไร้อากาศ ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และเมื่อฝนตกจะเกิดการชะล้างน้ำมันที่หลงเหลือในมูลฝอยเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำได้อีกด้วย

เส้นใยปาล์มเป็นส่วนเปลือกนอกของผลปาล์ม และเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีราคาถูก ในขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มมีเศษเหลือทิ้งจำพวกเส้นใยปาล์มเป็นจำนวนมาก มักนำไปทิ้งในพื้นที่เกษตร และกลายเป็นที่วางไข่ของด้วงแรด ซึ่งเป็นแมลงที่กัดกินยอดปาล์มและยอดมะพร้าว ปัจจุบันโรงงานได้นำเส้นใยปาล์มไปเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีข้อเสียเนื่องจากเส้นใยปาล์มมีโพแทสเซียมสูง จึงก่อให้เกิดของเสียในรูปของเถ้าและตะกอนเป็นจำนวนมาก และเถ้าที่เกิดขึ้นมีขนาดอนุภาคเล็ก น้ำหนักเบา ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดผลกระทบต่อด้านมลพิษทางอากาศ เส้นใยปาล์มประกอบด้วย เซลลูโลส ร้อยละ 39.1 ± 0.8 เฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 22 ± 1.2 และลิกนิน ร้อยละ 23 ± 0.7 (O-thong et al., 2012) เส้นใยปาล์มมีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูง มีแนวโน้มเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ แต่มีข้อจำกัด คือ ลิกนินซึ่งเป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช เป็นส่วนที่มีความแข็งแรงทำให้เอนไซม์จากจุลินทรีย์ไม่สามารถเข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสได้ กระบวนการย่อยสลายก็จึงเกิดขึ้นได้ยาก (Piakong, 2014) ดังนั้น การผลิตก๊าซชีวภาพจากเส้นใยปาล์มจึงจำเป็นต้องทำลายโครงสร้างโดยการปรับสภาพเส้นใยปาล์มก่อน เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

การปรับสภาพทางกายภาพมักเป็นการปรับสภาพขั้นต้นเพื่อลดขนาดชีวมวล จากนั้นป้อนชีวมวลเข้าสู่การปรับสภาพขั้นปลาย การปรับสภาพทางชีวภาพเป็นวิธีการที่จัดสถานะให้เชื้อจุลินทรีย์ย่อยสลายโครงสร้างชีวมวลบางส่วน เพื่อเพิ่มความสามารถการย่อยสลายในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ แม้ว่าวิธีการนี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่มีอัตราการย่อยสลายค่อนข้างต่ำและต้องการเวลา การปรับสภาพนาน (Polprasert, 2014) ทำให้ระบบปรับสภาพมีขนาดใหญ่ ส่วนการปรับสภาพด้วยความร้อนร่วมกับสารเคมีกรดหรือด่างเป็นที่นิยม เพราะดำเนินการปรับสภาพได้เร็ว แต่มีข้อจำกัด คือ เกิดของเสียที่กรดและด่างที่ต้องกำจัด นอกจากนี้ยังมีการปรับสภาพด้วยความร้อนร่วมกับสารทำลายอินทรีย์ เช่น เอทานอล เมทานอล อะซิโตน เป็นต้น การปรับสภาพด้วยเอทานอลมีจุดเด่น คือ หมุนเวียนกับมาใช้ใหม่ได้ด้วยการกลั่นหรือแยกด้วยเมมเบรน และไม่เป็นสารพิษ Roy et al. (2020) พบว่าสารละลายที่มีส่วนผสมของน้ำและเอทานอลช่วยเพิ่มศักยภาพในการละลายลิกนินในชีวมวลลิกนินในเซลลูโลส และยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและลดการขัดขวางเซลลูโลสในขั้นตอนไฮโดรไลซิสอีกด้วย ในขณะที่ Sema et al.

(2016) ได้รายงานว่าการเพิ่มปริมาณเอทานอลช่วยเพิ่มผลผลิตโฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 96.55 นอกจากนี้ Chamnok et al. (2020) พบว่า การปรับสภาพเศษไม้ยางพาราด้วยตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 170-210°C มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินและเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเอทานอล ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์ เข้าไปไฮโดรไลซ์พันธะระหว่างลิกนินกับเฮมิเซลลูโลส ทำให้จุลินทรีย์เข้าย่อยสลายเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น เป็นวิธีการปรับสภาพที่มีข้อเสียน้อยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Zhao et al., 2009) โดยมุ่งศึกษาความเข้มข้นของเอทานอลไม่เกินร้อยละ 50 ซึ่งไม่สูงจนเกินไปและมีความเป็นไปได้เชิงอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามการปรับสภาพด้วยเอทานอลยังสามารถนำเอทานอลกลับมาใช้ใหม่ในการปรับสภาพในครั้งต่อไปได้ เป็นการลดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และยังได้ลิกนินที่มีความบริสุทธิ์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้อีกด้วย (Chamnok et al., 2020) ในการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนใช้เทคโนโลยีการหมักร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากโรงงานปาล์มน้ำมัน โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย 1) เพื่อศึกษาหาความเข้มข้นของเอทานอลที่เหมาะสมที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยปาล์ม และ 2) เพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอทานอล

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมวัสดุหมัก

เส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม นำมาผึ่งแดดอย่างน้อย 48 ชั่วโมง คัดขนาดเส้นใยปาล์ม 1-2 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 1 (Figure 1) โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 2 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 45°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำหนักของเส้นใยปาล์มคงที่

รวบรวมหัวเชื้อจุลินทรีย์จากบ่อหมักก๊าซชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท ปาล์มไทยพัฒนา จำกัด จังหวัดสตูล เลือกใช้ส่วนที่เป็นตะกอนหัวเชื้อจุลินทรีย์โดยตั้งทิ้งไว้ประมาณ 48 ชั่วโมง และเทส่วนที่เป็นน้ำใสทิ้ง จากนั้นเก็บหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องและปราศจากแสงเป็นเวลา 40 วัน ก่อนใช้งาน

สารอาหารสำหรับการหมัก คือ Stock solution ประกอบด้วย NH_4Cl 1.4 กรัม/ลิตร K_2HPO_4 1.25 กรัม/ลิตร $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.5 กรัม/ลิตร $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.05 กรัม/ลิตร yeast extract 0.5 กรัม/ลิตร trace element solution 5 มิลลิลิตร/ลิตร และ Buffer Solution ประกอบด้วย NaHCO_3 50 กรัม/ลิตร

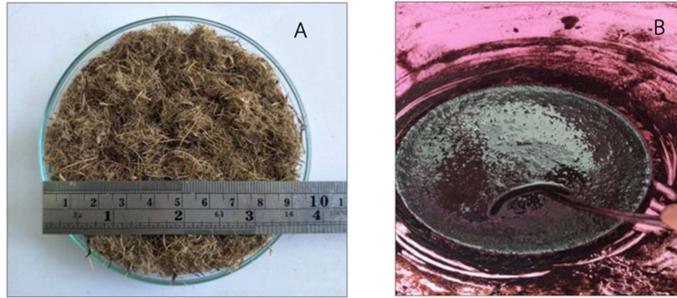


Figure 1 Oil palm fiber (OPF) and Inoculum
A) Oil palm fiber (OPF) 1-2 mm B) Inoculum

วิธีการวิจัย

วิเคราะห์เส้นใยปาล์มและหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยเอทานอล ได้แก่ ของแข็งทั้งหมด (Total Solids: TS) และของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids: VS) โดยวิธี Gravimetric method ซึ่งอธิบายใน National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Sluiter et al., 2008) ปริมาณไนโตรเจน (N) โดยวิธี Kjeldahl method ปริมาณฟอสฟอรัส (P) โดยวิธี Bray II method และ ปริมาณโพแทสเซียม (K) โดยวิธี Flame photometric method

ปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเอทานอลความเข้มข้น ร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยการผสมเส้นใยปาล์ม 15 กรัม กับสารละลายเอทานอลในแต่ละความเข้มข้น 250 มิลลิลิตร จากนั้นบรรจุใน stainless vessel ขนาด 500 มิลลิลิตร ปิดฝา แล้วนำไปต้มในเครื่อง Hydrothermal reactor ควบคุมอุณหภูมิ 19°C เป็นเวลา 30 นาที เมื่อทำการปรับสภาพเสร็จสิ้นแล้ว ทำการกรองแยกของแข็งกับของเหลว ล้างของแข็งด้วย น้ำกลั่นปราศจากไอออนจนมีพีเอชเป็นกลาง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่

ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอทานอล โดยวิธี Biochemical Methane Potential (BMP) ระดับห้องปฏิบัติการและหมักแบบกะ ทำการหมัก ก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพแล้ว 3:1 gVS/gVS (Dechruga et al., 2013) เริ่มดำเนินการทดลองโดยผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ 1.5 gVS และเส้นใยปาล์ม 0.5 gVS ในขวดหมัก ขนาด 120 มิลลิลิตร จากนั้นเติม Buffer solution 6.0 มิลลิลิตร Stock solution 0.6 มิลลิลิตร และปรับ ปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนส่วนผสมมีปริมาตร 60 มิลลิลิตร ปรับพีเอช ให้อยู่ในช่วง 6.8-7.2 ด้วย 10% HCl ซึ่งเป็นช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการหมักในสภาวะไร้อากาศ ปิดฝาขวดหมัก ต่อเข็ม และทริเวอร์ แล้วนำขวดหมักเข้าตู้บ่มที่อุณหภูมิ 35±1°C เขย่าขวดหมัก 3 ครั้ง/วัน (9.00 น. 12.00 น. และ 16.00 น.) โดยเขย่าครั้งละ 1 นาที เพื่อให้หัวเชื้อจุลินทรีย์ได้สัมผัสกับผิววัสดุหมักมากยิ่งขึ้น (Boonsai et al., 2020) วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันด้วย Glass syringe จนไม่เกิดก๊าซชีวภาพแล้ว รายละเอียด ขั้นตอนการทดลองดังตารางที่ 1 (Table 1)

วิเคราะห์ปริมาณ CH_4 โดยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu Model GC-14 คอลัมน์ WG-100 เส้นผ่านศูนย์กลาง ¼ มิลลิเมตร ความยาว 1.8 เมตร Detector แบบ Thermal Conductivity Detector อุณหภูมิของ Colum oven , Injection port, Detector port 60°C ก๊าซมาตรฐานที่ใช้คือ ก๊าซผสม มีเทน 60% ไนโตรเจน 5% คาร์บอนไดออกไซด์ 35% จำนวนผลผลิตของมีเทนที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ (1) (Charnok et al., 2020) และเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้โดยใช้โปรแกรม SPSS version 28 ด้วยเทคนิค ANOVA

$$CH_4 \text{ yield (L/kgVS)} = \frac{\text{Volume of } CH_4 \text{ substrate} - \text{Volume of } CH_4 \text{ blank}}{\text{mass of VS}_{\text{substrate}}} \quad (1)$$

Table 1 Inoculum and OPF ratios

Treatment	Inoculum: OPF ratios	Inoculum (g VS)	Untreated OPF (g VS)	Pretreated OPF (g VS)
Untreated OPF	3:1	1.5	0.5	0.0
Ethanol 10% (ET10)	3:1	1.5	0.0	0.5
Ethanol 30% (ET30)	3:1	1.5	0.0	0.5
Ethanol 50% (ET50)	3:1	1.5	0.0	0.5

ผลการวิจัย

ปริมาณของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยง่าย

เส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ร้อยละ 99.4±0.2 ของแข็งระเหยง่าย (VS) ร้อยละ 85.6±2.4 การปรับสภาพด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 30 และ 50 มีผลให้ของแข็งระเหยง่ายเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ร้อยละ 92.2, 92.3 และ 90.5) โดยการปรับสภาพในแต่ละความเข้มข้นมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ค่าของแข็งระเหยง่ายมีแนวโน้มลดลงเมื่อปรับสภาพด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 การปรับสภาพด้วยเอทานอลปริมาณมากมีส่วนส่งเสริมการทำลายโครงสร้างชีวมวลได้มาก จึงทำให้ค่าของแข็งระเหยง่ายลดลงด้วย ดังตารางที่ 2 (Table 2) ของแข็งระเหยง่ายเป็นส่วนที่จุลินทรีย์ย่อยสลายเป็นก๊าซชีวภาพ การสูญเสียของแข็งระเหยง่ายในระหว่างการปรับสภาพจึงไม่เป็นผลดีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้น การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเอทานอลควรควบคุมความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 50

Table 2 Total solids and volatile solids of OPF

Condition	TS (%)	VS (%)	N (%)	P (%)	K (%)
Untreated OPF (UnOPF)	99.4±0.2 ^b	85.6±2.4 ^a	0.72±0.07 ^b	7.58±0.55 ^c	3.18±0.03 ^a
	93.9*	81.8*	1.49*		
Pretreatment					
Ethanol 10% (ET10)	97.2±0.9 ^a	92.2±0.8 ^b	0.66±0.06 ^b	3.65±0.12 ^b	0.11±0.01 ^b
Ethanol 30% (ET30)	97.3±0.4 ^a	92.3±0.4 ^b	0.64±0.03 ^b	3.35±0.06 ^{ab}	0.06±0.01 ^a
Ethanol 50% (ET50)	96.8±0.7 ^a	90.5±0.6 ^b	0.20±0.02 ^a	2.92±0.06 ^a	0.05±0.01 ^a

Remark $p < 0.05$ *Chaikitkaew et al. (2015)

นอกจากนี้ การปรับสภาพด้วยเอทานอลยังทำให้สีของเส้นใยปาล์มเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการความร้อนและเอทานอลที่มีส่วนทำลายโครงสร้างชีวมวล ดังภาพที่ 2 (Figure 2)



Figure 2 Characteristics of OPF before and after pretreatment with ethanol.

A) Untreated OPF B) Ethanol 10% C) Ethanol 30% D) Ethanol 50%

การเปลี่ยนแปลงธาตุอาหาร ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม

ความร้อนและเอทานอลทำลายโครงสร้างเส้นใยปาล์มจนทำให้เกิดการชะไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมออกจากชีวมวล จากผลการศึกษาในตารางที่ 2 (Table 2) พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลส่งเสริมความรุนแรงในการทำลายโครงสร้างลิกนิน ซึ่งเชื่อมต่อกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเส้นใยปาล์ม ทำให้ปริมาณธาตุทั้งสามลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 50

ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเป็นธาตุที่มีปริมาณมากในเส้นใยปาล์ม การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้น ร้อยละ 10 มีผลทำให้ปริมาณธาตุทั้งสองลดลง ร้อยละ 51.9 และ 96.5 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เส้นใยปาล์มมีไนโตรเจนปริมาณน้อยแต่กำจัดออกมาได้ยากกว่า ที่ความเข้มข้นเอทานอล ร้อยละ 10 ปริมาณไนโตรเจนลดลงเพียงร้อยละ 8.3 ผลการศึกษาแสดงว่า การปรับสภาพด้วยเอทานอลมีแนวโน้มสูญเสีย

ธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ไนโตรเจนเป็นธาตุที่สำคัญต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบหมัก ดังนั้น การตกค้างไนโตรเจนในเส้นใยปาล์มบางส่วนจึงเป็นผลดีต่อการหมักด้วย

ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน

เส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอทานอลทุกความเข้มข้นให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ แสดงว่าการทำลายโครงสร้างเส้นใยปาล์มด้วยเอทานอลมีส่วนส่งเสริมศักยภาพการผลิตมีเทน เพราะการทำลายโครงสร้างลิกนินด้วยเอทานอลทำให้เอนไซม์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ในขวดหมักเข้าถึงเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ดี ส่งผลให้กระบวนการหมักในขั้นสุดท้าย คือ methanogenesis เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ

จากภาพที่ 3 (Figure 3) แสดงพฤติกรรมของการเกิดผลผลิตก๊าซมีเทน ปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อหมักครบ 6-7 วัน เท่ากับ 41.8 ± 1.3 , 56.3 ± 1.9 และ 67.1 ± 1.7 LCH₄/kgVS ที่ความเข้มข้นเอทานอล ร้อยละ 10, 30 และ 50 ตามลำดับ หลังจากนั้นผลผลิตก๊าซมีเทนลดลงอย่างต่อเนื่อง และหลังจากการหมัก 21 วัน พบว่าก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อธิบายได้ว่า ในช่วงระยะแรกของการหมักเกิดการย่อยสลายชีวมวลที่ย่อยได้ง่าย นั่นก็คือ ส่วนที่ถูกทำลายจากการปรับสภาพ สำหรับส่วนที่เหลือนั้น (ส่วนย่อยยาก) จำเป็นต้องใช้เวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนานกว่า จึงทำให้เกิดผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง แสดงว่าการปรับสภาพยังไม่สามารถทำลายโครงสร้างทุกส่วนของเส้นใยปาล์ม

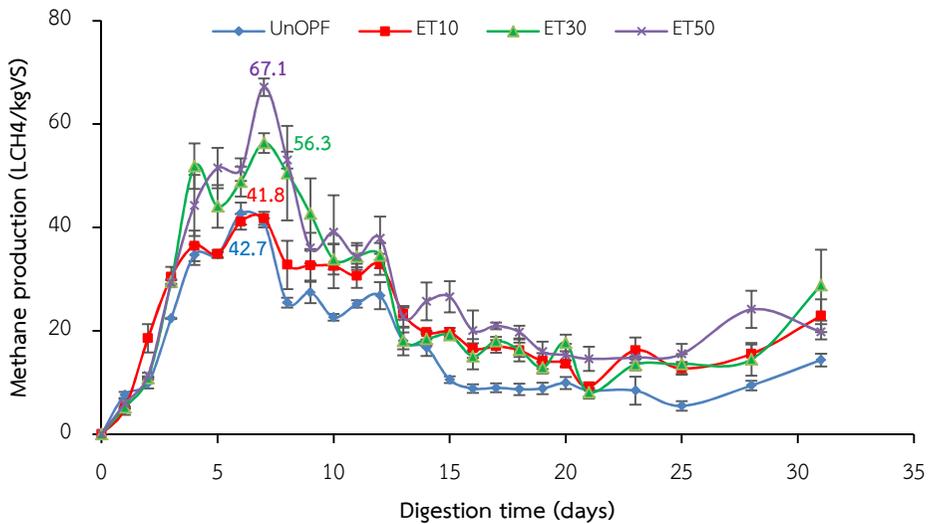


Figure 3 Daily methane production after ethanol pretreatment at various concentrations

การเพิ่มความรุนแรงในการปรับสภาพส่งเสริมความสามารถการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจากภาพที่ 4 (Figure 4) ปริมาณมีเทนสะสมจากการปรับสภาพที่สภาวะต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 7 วันแรกของการหมัก หลังจากนั้นปริมาณมีเทนสะสมเริ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนจนกระทั่งครบเวลาการหมัก (31 วัน) การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเอทานอล ร้อยละ 50 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม

สูงที่สุด เท่ากับ 161.8 ± 6.2 L CH₄/kgVS รองลงมา ได้แก่ การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเอทานอล ร้อยละ 30 และ 10 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม 133.0 ± 6.0 และ 97.5 ± 0.9 L CH₄/kgVS ตามลำดับ ดังภาพที่ 5 (Figure 5) ผลผลิตมีเทนที่ได้มีค่าสูงกว่าเส้นใยปาล์มที่ยังไม่ปรับสภาพ (77.3 ± 1.9 L CH₄/kgVS) เท่ากับ 2.1 1.7 และ 1.3 เท่า ตามลำดับ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

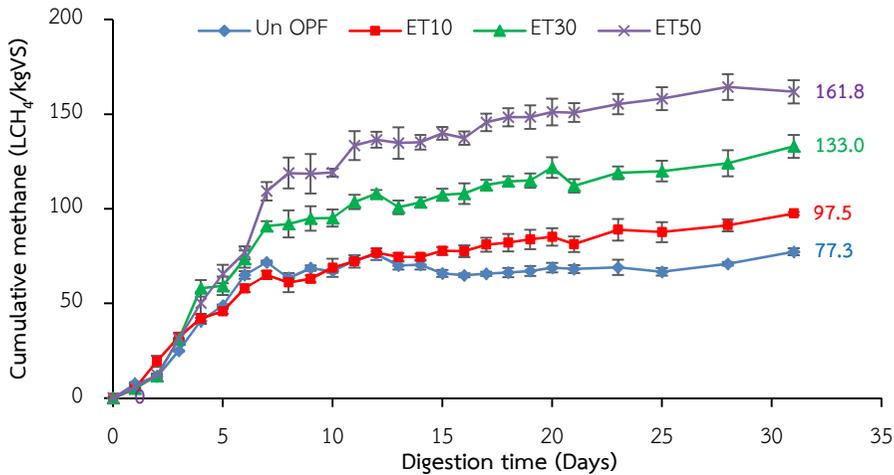


Figure 4 Cumulative methane after ethanol pretreatment at various concentrations

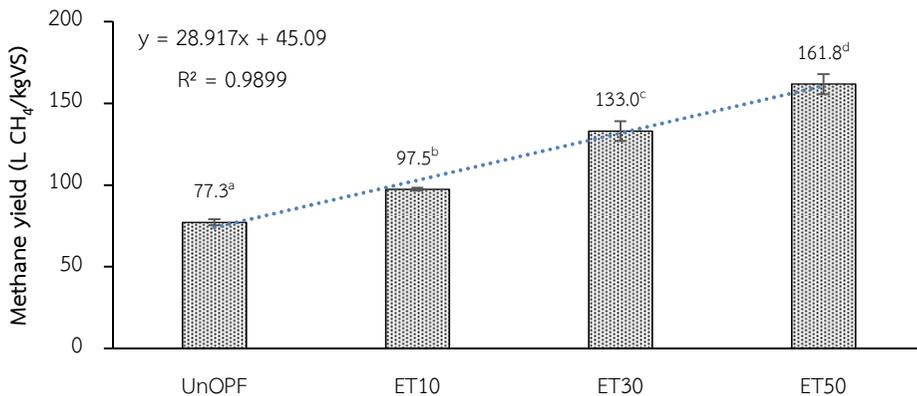


Figure 5 Methane yield after ethanol pretreatment at various concentrations

อภิปรายผล

การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มีผลต่อการลดลงของปริมาณ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ในเส้นใยปาล์ม ซึ่งไนโตรเจนเป็นสารอาหารสำหรับการสังเคราะห์โปรตีน และฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่มีส่วนสำคัญสำหรับการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก โดยทั่วไปปริมาณธาตุอาหารเหล่านี้มีปริมาณเพียงพอและไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารใด ๆ ลงไปใน

ระบบเพื่อหมักก๊าซชีวภาพ (Kongdang, 2011) ประกอบกับการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศมีความต้องการปริมาณธาตุอาหารเหล่านี้น้อย ตะกอนจุลินทรีย์โดยทั่วไปจะมีธาตุอาหารเหล่านี้ในระดับที่สมดุลเพียงพอ ดังนั้นการลดลงของธาตุอาหารดังกล่าวไม่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากนัก ในขณะที่เดียวกันโพแทสเซียมเป็นธาตุที่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งถ้ามีความเข้มข้นที่เหมาะสมจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ แต่ถ้ามีมากเกินไปจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ โดยปริมาณโพแทสเซียม ร้อยละ 1.2 จะมีผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์อย่างรุนแรง (McCarty, 1964) ดังนั้นการปรับสภาพด้วยเอทานอลด้วยเอทานอลทุกความเข้มข้นทำให้ปริมาณโพแทสเซียมมีปริมาณลดลงมากกว่าร้อยละ 96 และมีปริมาณโพแทสเซียมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.05-0.11 จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลในการปรับสภาพเส้นใยปาล์ม ผลผลิตปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยเอทานอล ร้อยละ 50 ผลิตก๊าซมีเทนได้สูงที่สุด (161.8 ± 6.2 L CH₄/kgVS) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมจากเส้นใยปาล์มที่มีการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และหมักร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 166.42 L CH₄/kgVS (Chaipa & Asavavisithchai, 2016) แต่ได้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงกว่าการปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยน้ำร้อน ที่ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดที่อุณหภูมิในการปรับสภาพ 140°C เท่ากับ 101.5 L CH₄/kgVS (Boonsai et al., 2020)

สำหรับเส้นใยปาล์มที่ปรับสภาพด้วยเอทานอล ร้อยละ 30 และ 10 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมรองลงมาตามลำดับ อาจเป็นไปได้ว่า เอทานอลส่งผลกระทบต่อการจัดลิกนินในเส้นใยปาล์ม เนื่องจากลิกนินสามารถละลายในเอทานอลได้ดี (Zhao et al., 2017) ทำให้โครงสร้างของเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอทานอลให้อยู่สภาวะที่เหมาะสมต่อการหมัก จุลินทรีย์เข้าย่อยสลายเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

แม้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลมีความสัมพันธ์ต่อการเพิ่มผลผลิตมีเทนสูงถึงร้อยละ 98.99 ($R^2 = 0.9899$) ดังภาพที่ 5 (Figure 5) แต่จากการผลการศึกษาในตารางที่ 2 (Table 2) พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มการสูญเสียของแข็งระเหยง่าย นอกจากการปรับสภาพแล้ว การหมักด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ dry digestion เป็นอีกแนวทางที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมีเทนจากชีวมวลลิกนินเซลลูโลสที่ย่อยยาก จึงเป็นที่น่าสนใจศึกษาต่อไปในการใช้กระบวนการปรับสภาพด้วยเอทานอลร่วมกับการหมักในระบบ dry digestion เพื่อเพิ่มผลผลิตมีเทนจากเส้นใยปาล์ม

นอกจากนี้ควรมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเซลลูโลส ลิกนิน ในเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอทานอล และสิ่งที่น่าสนใจคือการแยกลิกนินออกจากของเหลวที่ได้จากกระบวนการปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเอทานอล เพื่อให้ได้ลิกนินบริสุทธิ์ที่มีมูลค่าสูงได้ต่อไป และหากมีการกลั่นตัวทำละลายอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ด้วยการกลั่นหรือแยกด้วยเมมเบรน จะทำให้มีของเสียน้อยลงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

สำหรับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในด้านค่าความร้อนที่ได้จากการผลิตมีเทน พบว่าการปรับสภาพด้วยเอทานอล ร้อยละ 50 มีผลผลิตก๊าซมีเทน 59.02 ± 2.24 L CH₄/kg fresh เมื่อคำนวณเป็นค่าความร้อนมีเทนที่ได้จากชีวมวล 1 ton fresh พบว่าได้ค่าความร้อน เท่ากับ 2,319 MJ/ton fresh (ค่าความร้อนมีเทน 55 MJ/kgCH₄) ซึ่งทดแทนก๊าซหุงต้มได้ 46 kg คิดเป็นมูลค่า 1,110 บาท/ton fresh (ราคา LPG ที่ 360 บาท/15 kg) ลิกนินที่ได้จากกระบวนการปรับสภาพสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มเติมได้โดยการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง เช่น การใช้เป็นสารยึดติด สารเชื่อมติด สารเคลือบ ในอุตสาหกรรมกระดาษ อาจใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความคงทน (Stewart, 2008) หรือใช้สำหรับผลิตเชื้อเพลิงและพลังงานภายในโรงงานอุตสาหกรรมได้ (Yonsuwan, 2010) หากพัฒนาเป็นการหมักแบบต่อเนื่องจะสามารถพัฒนาต่อยอดให้เกิดขึ้นในระดับอุตสาหกรรมได้

สรุปผลการวิจัย

การปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเอทานอล ร้อยละ 50 เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเส้นใยปาล์ม มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมากกว่าเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สามารถผลิตก๊าซมีเทนสะสมได้สูงสุด เท่ากับ 161.8 ± 6.2 L CH₄/kgVS ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ร้อยละ 52.2 เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ สามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ถึง 2.1 เท่า

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์เส้นใยปาล์มและหัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานปาล์มน้ำมัน บริษัท ปาล์มไทยพัฒนา จำกัด ตำบลอุโดเจริญ อำเภอกวนกาหลง จังหวัดสตูล ทำให้งานวิจัยสำเร็จจุล่งด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Boonsai P, Charnnok B, Yoyrurob S. Improvement of digestibility of methane production from oil palm fiber by hydrothermal pretreatment. Life Sciences and Environment Journal 2020;21(2):311-321.
- Chaipa S, Asavavisthchai S. Biogas production from palm fiber and empty fruit bunch by using sludge from anaerobic wastewater treatment system. Proceeding of the 13th KU-KPS Conference; 2016.
- Charnnok B, Sawangkeaw R, Chaiprapat S. Integrated process for the production of fermentable sugar and methane from rubber wood. Bioresource Technology 2020;302:122785.
- Dechruga S, Kantachote D, Chaiprapat S. Effect of inoculum to substrate ratio, substrate mix ratio and inoculum source on batch co-digestion of grass and pig manure. Bioresource Technology 2013; 146:101-108.
- Jungniyom T. Zero-waste process in oil palm extraction industries. Hatyai Academic Journal 2008; 6(2):159-164.

- Kongdang C, Suksaroj C, Chungsiriporn J. Biogas production by anaerobic batch co-digestion of pig manure and rubber leaves. Proceeding of the 5th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011), Phuket; 2011, 114-118.
- McCarty PL. Anaerobic waste treatment fundamentals-part two: environmental requirements and control. Public Works; 1964.
- Ministry of energy. Alternative Energy Development Plan: AEDP2015. 2015. Available at: <http://www.eppo.go.th/images/policy/pdf/aedp2015.pdf>. Accessed March 3, 2020.
- Noparat P. Organosolv pretreatment of oil palm trunk for enzymatic hydrolysis. The Journal of Applied Science 2018;17(1):75-86.
- O-thong, Boe K, Angelidaki I. Thermophilic anaerobic co-digestion of oil palm empty fruit bunches with palm oil mill effluent for efficient biogas. Applied Energy 2012;93:648-654.
- Piakong P. Study of xylose production from oil palm empty fruit bunch. Master of Engineering in Chemical Engineering, Prince of Songkla University; 2014.
- Polprasert S. Pretreatment of lignocellulosic materials for ethanol production. Thai Science and Technology Journal 2014;22(5):641-649.
- Roy R, Rahman MS, Raynie DE. Recent advances of greener pretreatment technologies of lignocellulose. Current Research in Green and Sustainable Chemistry 2020;3:100035.
- Serna LD, Alzate CO, Alzate CC. Supercritical fluids as a green technology for the pretreatment of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology 2016;199:113-120.
- Sluiter A, Hames B, Hyman D, Payne C, Ruiz R, Scarlata C. et al. Determination of total solids in biomass and total dissolved solids in liquid process samples. National Renewable Energy Laboratory (NREL); 2008.
- Stewart D. Lignin as a base material for materials applications: Chemistry, application and economics. Industrial crops and products 2008;27(2):202-207.
- Yonsuwan D. Optimization of lignin concentration in black liquor using electrochemical and physical processes. Interdisciplinary Program of Environmental Science, Graduate School of Chulalongkorn University; 2010.
- Zhao X, Cheng K, Liu D. Organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis. Applied Microbiology and Biotechnology 2009;82:815-827.
- Zhao X, Li S, Wu R, Liu D. Organosolv fractionating pre-treatment of lignocellulose biomass for efficient enzymatic saccharification: chemistry, kinetics, and substrate structures. Biofuels, Bioproducts and Biorefining 2017;11(3):567-590