

# รายงานการวิจัย

เรื่อง

การผลิตและการทำบริสุทธิ์ก๊าซมีเทนที่ได้จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้น้ำ  
เสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

**Production and Purification of Methane Produced from Anaerobic  
Digestion Using Wastewater and Residues of Palm oil Industry**

จัดทำโดย

ปิยะรัตน์ บุญแสวง

สุเมธ ไชยประพัทธ์

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมเกษตร  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

งบประมาณแผ่นดินประจำปี 2554-2555

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้การหมักร่วมของน้ำเสียกับวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม และกากตะกอนดีแคนเตอร์ ในสัดส่วน 0.5% (น้ำหนักแห้ง/ปริมาตรการหมัก) พบว่า เมื่อทำการหมักแบบกะเป็นเวลา 8 วัน การใช้น้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ให้ผลการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุด (0.360 มล. CH<sub>4</sub>/มก. VS<sub>removal</sub>) หลังจากนั้นทำการศึกษาการใช้กากตะกอนดีแคนเตอร์ร่วมกับน้ำเสีย (0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0% น้ำหนักแห้ง/ปริมาตรการหมัก) ในการหมักร่วมกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยทำการหมักแบบกะ พบว่า การใช้กากตะกอนดีแคนเตอร์หมักร่วมกับน้ำเสียในปริมาณ 0.5 % จะให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุดและมีปริมาณมากกว่าการใช้น้ำเสียอย่างเดียวในการผลิตก๊าซชีวภาพ และเมื่อใช้ปริมาณกากตะกอนที่มากขึ้นการผลิตก๊าซชีวภาพจะลดลง โดยเฉพาะที่ปริมาณกากตะกอน 1% สัดส่วนมีเทนลดลงเหลือ 5.4% และพีเอชลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนดีแคนเตอร์เตอร์ (Biochemical Methane Potential, BMP) พบว่าที่อัตราส่วน อัตราส่วนของหัวเชื้อต่อสารอาหาร (คิดในหน่วยของของแข็งระเหยง่าย) เท่ากับ 1 มีผลผลิตมีเทนที่ได้ เท่ากับ 0.304 มิลลิลิตรมีเทน/มิลลิกรัมของแข็งระเหยที่ ถูกกำจัด จากนั้นทำการศึกษาผลของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัม VS/ลิตร-วัน ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง ทำการทดลองในถังหมัก 1 ลิตร ปริมาตรหมักจริง 0.8 ลิตร ในถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม พบว่า อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 6.7 กรัม VS/ลิตร-วัน ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 15 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด เมื่อทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ในระบบการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยใช้การออกแบบการทดลองโดยใช้พื้นผิวตอบสนอง ศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ (30-55 °ซ) อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (5-9 มิลลิกรัมของแข็งระเหยได้/ลิตร-วัน) และอัตราการกวนผสม (0-100%) และมีผลตอบสนองคือ ปริมาณมีเทน ผลผลิตมีเทน และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี จากการทดลองสามารถสร้างสมการแบบจำลองได้ 3 สมการ และสามารถทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมีเทนและกำจัดซีโอดีได้ใกล้เคียงกัน คือ การเดินระบบที่อุณหภูมิ 40-43 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารอินทรีย์ เท่ากับ 6.5-6.9 กรัม VS/ลิตร-วัน และระยะเวลาการกวน 58-67% (กวน 13-16 ชั่วโมง/วัน) จากการเดินระบบในสภาวะที่เหมาะสม พบว่า สามารถผลิตปริมาณมีเทนได้ 68.5% มีผลผลิตมีเทนที่ได้ 0.392 มิลลิลิตรมีเทน/มิลลิกรัมของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี 85.1% และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายพบว่า มีความผิดพลาดน้อยมาก (< 2%) สุดท้ายทำการทดลองทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการโดยใช้คอลัมน์ ขนาด 1 ลิตร ภายในบรรจุวัสดุตัวกลางพลาสติก ทำการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสาร ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายโมโนเอทานอลเอมีน และน้ำปูนขาว และศึกษาอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 7.43 ลิตร/ชั่วโมง มีความเหมาะสมที่สุดต่อการทำปฏิกิริยาก๊าซมีเทน โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด 92.6% คิดเป็นการเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทนได้ 35% และลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์

### Abstract

This research focuses on enhancement of biogas production. Co-digestion of waste residues and wastewater cake from palm oil mill was investigated. Palm empty fruit bunch, palm pressed fiber and decanter cake 0.5% (dry w/v) were used. It was found that co-digestion of decanter cake and wastewater gave the highest methane yield ( $0.360 \text{ ml CH}_4/\text{ml VS}_{\text{removed}}$ ) after 8 days of batch fermentation. Afterward, the amount of decanter cake (0, 0.25, 0.50, 0.75 and 1.0% w/v) was studied for co-digestion with wastewater in batch fermentation. The result showed that the highest biogas production was found in the co-digestion of 0.5% w/v decanter cake and wastewater. This system also gave higher biogas production than the sole wastewater. The higher amount of decanter cake than 0.5% w/v resulted in the decrease of biogas production. Especially at 1 %w/v of decanter cake, the methane content of only 5.4% was obtained and pH rapidly decreased. Furthermore, the biochemical methane potential (BMP) of decanter cake was determined. The results indicated that the inoculum to substrate volatile solids ratios of 1.0 gave the methane yield of  $0.304 \text{ ml CH}_4/\text{mg VS}_{\text{removed}}$ . After that the effect of organic loading rate of 2.0, 4.5 and 6.7 gVS/l-day on biogas production in semi-continuous system was carried out in 1L CSTR reactor with working volume of 0.8 L. It was found that at organic loading rate of 6.7 gVS/l-day and hydraulic retention time of 15 days gave the highest biogas production. Afterward, the optimum condition for biogas production from co-digestion of decanter cake and wastewater was studied using response surface methodology. Three factors; temperature (30-55°C), organic loading rate (5-9 gVS/l-day, mixing rate (0-100%), were examined with methane content, methane yield and COD removal as responses. From the experiment, three mathematic models were constructed. The optimum condition predicted from 3 models was similar, which were organic loading rate of 6.5-6.9 gVS/l-day at 40-43 °C and mixing rate of 58-67% (mixing at 13-16 h/day). Under this circumstance condition, the methane content of 68.5%, the methane yield of  $0.392 \text{ ml CH}_4/\text{mg VS}_{\text{removed}}$  and COD removal of 85.1% was obtained. The error between experimental and predicted values was very low (< 2%). Finally, the purification of biogas in laboratory-scale was investigated using 1 L column with plastic media. The solutions of NaOH, Monoethanoamine (MEA) and CaO at various concentrations and gas flow rate were investigated. The results indicated that the NaOH 0.3M with 7.43 l/hr was suitable for purification of biogas. The highest methane content of  $92.6 \pm 0.1 \%$  was achieved, which was calculated as the increase of 35% of initial methane content and carbon dioxide was completely removed.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
สารบัญ	(4)
สารบัญตาราง	(6)
สารบัญภาพ	(7)
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
<b>บทที่ 2 บทตรวจเอกสาร</b>	<b>3</b>
2.1 ปาล์มน้ำมัน	3
2.2 ก๊าซชีวภาพ	6
2.3 การย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศ (co-digestion) จากน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือโรงงาน อุตสาหกรรมเกษตร	9
2.4 การทำปฏิสฤทธิก๊าซมีเทน	12
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย</b>	<b>16</b>
3.1 ลักษณะของน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	16
3.2 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพมีเทนโดยใช้น้ำเสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัด น้ำมันปาล์มโดยการวางแผนการทดลองแบบที่ละปัจจัย	16
3.3 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบโดยใช้การวางแผนการทดลองแบบใช้ปัจจัย ร่วมด้วยการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)	18
3.4 ศึกษาการทำปฏิสฤทธิก๊าซมีเทนที่ได้จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้น้ำเสียร่วมกับ วัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	20
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	<b>22</b>
4.1 ลักษณะของน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	22
4.2 ชนิดของวัสดุเศษเหลือที่เหมาะสมในการหมักร่วมกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยการหมักแบบกะ	23
4.3 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนหรือ Biochemical Methane Potential (BMP) ของกาก ตะกอนดีแคนเตอร์	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลของปริมาณกากตะกอนดีแคนเตอร์ในการหมักร่วมกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยการหมักแบบกะ	28
4.5 ผลของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบกึ่งต่อเนื่อง	31
4.6 สภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบโดยใช้การวางแผนการทดลองแบบใช้ปัจจัยร่วมด้วย การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)	34
4.7 การทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้น้ำเสียร่วมกับกาก ตะกอนดีแคนเตอร์	41
<b>บทที่ 5 บทสรุป</b>	48
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	50
<b>ภาคผนวก</b>	53

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ	13
ตารางที่ 2 ตัวแปรและระดับของแต่ละปัจจัยในการออกแบบพื้นผิวตอบสนองใช้การออกแบบ ส่วนประสมกลางแบบหมุนได้	19
ตารางที่ 3 ลักษณะของวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	22
ตารางที่ 4 ลักษณะของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม	22
ตารางที่ 5 ผลผลิตมีเทนและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และของแข็งเมื่อสิ้นสุดการหมัก ของน้ำเสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (0.5% นน.แห้ง/ปริ มาตรการหมัก)	26
ตารางที่ 6 ศักยภาพการผลิตมีเทนของกากตะกอนดีแคนเตอร์	27
ตารางที่ 7 ผลผลิตมีเทนและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และของแข็งเมื่อสิ้นสุดการหมัก ของน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ในระบบหมักแบบกะ	31
ตารางที่ 8 ผลผลิตมีเทนและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และของแข็งเมื่อสิ้นสุดการหมัก ของน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ในระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องที่ HRT = 15 วัน	33
ตารางที่ 9 ชุดการทดลองและค่าตอบสนองสำหรับการย่อยสลายแบบไร้อากาศน้ำเสียโรงงาน สกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 15 วันภายใต้ สภาวะคงที่	34
ตารางที่ 10 การประมาณค่า Coefficient และ $p$ -values	39
ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง โดยใช้ ANOVA	40

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม	20
ภาพที่ 2 คอลัมน์สำหรับการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ	21
ภาพที่ 3 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยของการหมักน้ำเสีย (POME) ร่วมกับวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้แก่ เส้นใยปาล์ม (PFP) ทะลายปาล์ม (EFB) และกากตะกอนดีแคนเตอร์ (decanter cake) (0.5% นน.แห้ง/ปริมาตรการหมัก)	24
ภาพที่ 4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการหมักน้ำเสีย(POME) ร่วมกับวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้แก่ เส้นใยปาล์ม (PFP) ทะลายปาล์ม (EFB) และกากตะกอนดีแคนเตอร์ (decanter cake) (0.5% นน.แห้ง/ปริมาตรการหมัก)	24
ภาพที่ 5 พีเอชในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสีย (POME) ร่วมกับวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้แก่ เส้นใยปาล์ม (PFP) ทะลายปาล์ม(EFB) และกากตะกอนดีแคนเตอร์ (decanter cake) (0.5% น้ำหนักแห้งต่อปริมาตรการหมัก)	25
ภาพที่ 6 ผลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อต่อกากตะกอนดีแคนเตอร์ (inoculums to substrate ratios; ISRs) ต่อปริมาณมีเทนสะสม	27
ภาพที่ 7 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสีย (POME) ร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ (decanter cake) ในระบบหมักแบบกะ	29
ภาพที่ 8 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสีย (POME) ร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ (decanter cake) ในระบบหมักแบบกะ	29
ภาพที่ 9 พีเอชในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสีย (POME) ร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ (decanter cake) ในระบบหมักแบบกะ	30
ภาพที่ 10 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ในระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องที่ OLR = 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน และ HRT = 15 วัน	32
ภาพที่ 11 พีเอชในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ในระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องที่ OLR = 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน และ HRT = 15 วัน	32
ภาพที่ 12 การกำจัดซีโอดีในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ในระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องที่ OLR = 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน และ HRT = 15 วัน	33

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 13 พื้นผิวตอบสนองสำหรับปริมาณมีเทนจาก Model 1 (A) ผลของ OLR และ อัตราการ กวนผสมที่ 43 °ซ; (B) ผลของอุณหภูมิและอัตราการกวนผสม ที่ OLR=7.0 กรัมVS/ ลิตร-วัน; (C) ผลของ OLR และอุณหภูมิ ที่อัตราการกวนผสม 50% จากการย่อยสลาย แบบไร้อากาศน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ ที่ ระยะเวลาเก็บกัก 15 วัน	36
ภาพที่ 14 พื้นผิวตอบสนองสำหรับผลผลิตมีเทนจาก Model 2 (A) ผลของ OLR และ อัตราการ กวนผสมที่ 43 °ซ; (B) ผลของอุณหภูมิและอัตราการกวนผสม ที่ OLR=7.0 กรัมVS/ ลิตร-วัน; (C) ผลของ OLR และอุณหภูมิ ที่อัตราการกวนผสม 50% จากการย่อยสลาย แบบไร้อากาศน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ ที่ ระยะเวลาเก็บกัก 15 วัน	37
ภาพที่ 15 พื้นผิวตอบสนองสำหรับการกำจัดซีโอดีจาก Model 3 (A) ผลของ OLR และ อัตรา การกวนผสมที่ 43 °ซ; (B) ผลของอุณหภูมิและอัตราการกวนผสม ที่ OLR=7.0 กรัม VS/ลิตร-วัน; (C) ผลของ OLR และอุณหภูมิ ที่อัตราการกวนผสม 50% จากการย่อย สลายแบบไร้อากาศน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ ที่ ระยะเวลาเก็บกัก 15 วัน	38
ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพของสารละลายเคมีในการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร	42
ภาพที่ 17 ร้อยละของการเพิ่มขึ้นสูงสุดของก๊าซมีเทนหลังจากการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพด้วย สารละลายเคมีโดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร	43
ภาพที่ 18 ประสิทธิภาพของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทำ บริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร	44
ภาพที่ 19 ร้อยละของการเพิ่มขึ้นสูงสุดของก๊าซมีเทนหลังจากการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร	45
ภาพที่ 20 ประสิทธิภาพของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ที่อัตรา การไหลต่างๆ ของการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร	46
ภาพที่ 21 ร้อยละของการเพิ่มขึ้นสูงสุดของก๊าซมีเทนหลังจากการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ที่อัตราการไหลต่างๆ โดยใช้ ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร	47