

## การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากเซลลูโลส

กุลธิดา สว่างพล<sup>1\*</sup> วารุณี เตีย<sup>2</sup> และ ภาวิณี ชัยประเสริฐ<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

### บทคัดย่อ

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญในประเทศไทย แต่วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำพวกลิกโนเซลลูโลส ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์มากนัก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำพวกลิกโนเซลลูโลส โดยเริ่มจากการคัดเลือกแหล่งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรพวกลิกโนเซลลูโลสที่มีศักยภาพสูง จากนั้นเลือกกระบวนการปรับสภาพ กระบวนการไฮโดรไลซิส และถึงปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงตามลำดับ การผลิตไฟฟ้าพิจารณาที่เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ 5 ขนาดที่อยู่ในช่วงประมาณ 200 ถึง 2,000 กิโลวัตต์ การคิดต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วยแบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีมีการปรับสภาพและไม่มีการปรับสภาพวัตถุดิบตั้งต้น ผลการประเมินพบว่า ฟางข้าว ยอดและใบอ้อยมีศักยภาพสูง จึงนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ และได้เลือกวิธีปรับสภาพแบบระเบิดด้วยไอน้ำและกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์สำหรับการเปลี่ยนวัตถุดิบตั้งต้นไปเป็นน้ำตาล กรณีมีการปรับสภาพวัตถุดิบตั้งต้น ใช้ถึงปฏิกิริยาแบบ UASFF ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ค่าขนาดต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วยของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพขนาด 187 ถึง 1,966 กิโลวัตต์ ได้ 9.29 ถึง 4.77 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับฟางข้าว และ 11.29 ถึง 6.21 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับยอดและใบอ้อย ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการปรับสภาพมีต้นทุนค่อนข้างสูงจึงส่งผลต่อการคำนวณต้นทุนไฟฟ้าสูงกว่าอัตราค่ารับซื้อไฟฟ้า (รวมอัตราส่วนเพิ่ม) สำหรับกรณีไม่มีการปรับสภาพวัตถุดิบตั้งต้น เลือกใช้ถึงปฏิกิริยาแบบกวนต่อเนื่อง (CSTR) ในการผลิตก๊าซชีวภาพ การคำนวณต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วยของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพขนาด 187 ถึง 1,966 กิโลวัตต์ ได้ 8.17 ถึง 4.55 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับฟางข้าว และ 9.37 ถึง 5.39 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับฟางข้าว ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราค่ารับซื้อไฟฟ้าเช่นกัน เพื่อเป็นการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่ได้จากชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส อัตรารับซื้อไฟฟ้าควรจะมีค่าสูงกว่าค่าต้นทุนไฟฟ้า ดังนั้น อัตราส่วนเพิ่ม สำหรับก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส ควรจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ให้ในปัจจุบัน

**คำสำคัญ :** ก๊าซชีวภาพ / การระเบิดด้วยไอน้ำ / เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ / ลิกโนเซลลูโลส

\* Corresponding author : E-mail : bkboing11@gmail.com

1 นักศึกษาปริญญาโท คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

2 รองศาสตราจารย์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

3 รองศาสตราจารย์ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

## A Feasibility Study of Power Generation Using Biogas from Cellulosic Materials

Kultida Sawangpol<sup>1\*</sup>, Warunee Tia<sup>2</sup>, and Pawinee Chairasert<sup>3</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, ThungKhru, Bangkok 10140

### Abstract

Biomass is an important renewable energy resource in Thailand, but some lignocellulosic agricultural residues are still not utilized. Thus, this research aimed to evaluate the feasibility of electricity generation using biogas produced from lignocellulosic agricultural residues. The study firstly identified high potential lignocellulosic resources, and then searched for high-efficiency pretreatment methods, hydrolysis processes and biogas reactors. Six different sizes of biogas engines, ranging from 200 to about 2,000 kW were used in this feasibility study. Levelized unit costs of electricity generation were evaluated both in the cases of pretreated and non-pretreated lignocellulosic feedstocks. The results showed that rice straw and sugarcane tops and leaves have high potential as lignocellulosic feedstocks for biogas production. In this study, steam explosion and enzymatic hydrolysis processes were selected for converting the feedstocks to sugar. Upflow anaerobic sludge-fixed film (UASFF) reactor was selected for feedstock pretreatment. Levelized unit costs from the calculation for the cases of 187 kW to 1,966 kW biogas engines were 9.29 Baht/kWh to 4.77 Baht/kWh for rice straw and 11.29 Baht/kWh to 6.21 Baht/kWh for sugarcane top and leaves, respectively. Due to the relatively high cost of the pretreatment process, the calculated electricity unit costs were higher than the electricity buyback rate (including the adder rate). In the case of non-pretreated feedstocks, the continuous stirred-tank reactor (CSTR) was selected for biogas production. When using non-pretreated rice straw and sugarcane top and leaves as feedstocks, the calculated levelized unit costs of 187 kW to 1,966 kW biogas engines were 8.17 Baht/kWh to 4.55 Baht/kWh for rice straw and 9.37 Baht/kWh to 5.39 Baht/kWh for sugarcane top and leaves, respectively, which were also higher than the electricity buyback rate. To promote the power generation from biogas produced from lignocellulosic biomass, the buyback rate should cover the levelized unit cost. Thus, the adder rate for biogas produced from lignocellulosic biomass should be higher than the current one.

**Keywords :** Biogas / Biogas Engine / Lignocellulose / Steam Explosion

---

\* Corresponding author : E-mail : bkboing11@gmail.com

<sup>1</sup> Master's degree student, school of energy environment and materials.

<sup>2</sup> Associate Professor, school of energy environment and materials.

<sup>3</sup> Associate Professor, school of bioresources and technology.

## 1. บทนำ

เชื้อเพลิงฟอสซิลยังคงมีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของประชากรและการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศต่างๆ ทั่วโลก แต่เนื่องจากปัญหาหาค่าน้ำมันที่ปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] อีกทั้งปัญหาปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่คาดการณ์ว่ากำลังจะหมดไป ทำให้ทุกประเทศที่นำเข้าและใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงหลักได้ตระหนักถึงปัญหาการขาดแคลนพลังงานที่กำลังจะเกิดขึ้น ดังนั้น พลังงานทางเลือกจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาพลังงานในอนาคต [2]

ก๊าซชีวภาพจัดอยู่ในพลังงานหมุนเวียนและเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้ลดปัญหาพลังงานที่กำลังจะเกิดขึ้นได้ [3, 4] เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีผลผลิตด้านชีวมวลที่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ [5] ในปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้จากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตร ชยะมูลฝอย และฟาร์มเลี้ยงสัตว์ อย่างไรก็ตามประเทศไทยยังมีวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตรที่น่าสนใจอีกจำนวนมาก [6] ที่สามารถนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ แต่ต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าและศักยภาพที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตได้อาทิเช่น ต้นทุนการผลิต ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ ปริมาณของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิต และผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น [1, 7]

ก๊าซชีวภาพที่มาจากวัตถุดิบที่เหลือใช้ทางการเกษตรที่มีลักษณะเป็นเส้นใยในรูปของโพลีแซคาไรด์ขนาดใหญ่ประกอบด้วย น้ำตาลกลูโคสจับกันเป็นสายยาว [8] หาก

ผ่านกระบวนการย่อยแล้วจะได้เซลลูโลส สามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ [7, 9, 10, 11] อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากเซลลูโลสยังต้องคำนึงถึงศักยภาพต้นทุน และความคุ้มค่าในการผลิตเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งผลิตก๊าซชีวภาพที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ [7] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากเซลลูโลส รวมทั้งหาแนวทางส่งเสริมการผลิตไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานจากชีวมวลในประเทศอีกทั้งเป็นการเพิ่มทางเลือกของการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีความหลากหลาย และช่วยเพิ่มคุณค่าของวัตถุดิบทางการเกษตรให้มีมูลค่าสูงขึ้นจนสามารถพัฒนาไปเป็นแหล่งพลังงานเชิงพาณิชย์ได้

## 2. วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากเซลลูโลสแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การเลือกประเภทชีวมวล (2) การศึกษาวิธีปรับสภาพชีวมวล (3) การประเมินปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ และ (4) การประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้า

### 2.1 การเลือกชีวมวล (Biomass)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาชีวมวล 2 ชนิดที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาจาก ปริมาณชีวมวลที่เหลือใช้มากที่สุดและองค์ประกอบทางเคมีของลิกโนเซลลูโลสที่มีในชีวมวลมากที่สุด 5 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 1 งานวิจัยนี้ จึงได้เลือกฟางข้าว, ใบและยอดอ้อยเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยเฉลี่ยของลิกโนเซลลูโลสที่มีในชีวมวลเหลือใช้ประจำปี พ.ศ. 2553 [5, 12, 27-35]

ชนิดของชีวมวล	ชีวมวลเหลือใช้ ( $\times 10^3$ WB)	ชีวมวลเหลือใช้ ( $\times 10^3$ DM <sup>**</sup> )	เซลลูโลส ( $\times 10^3$ DM <sup>**</sup> )	เฮมิเซลลูโลส ( $\times 10^3$ DM <sup>**</sup> )	ลิกนิน ( $\times 10^3$ DM <sup>**</sup> )
ฟางข้าว	26,141.19	23,866.91	8,962.02	6,109.93	4,343.78
ยอดและใบอ้อย	13,840.28	8,705.54	2,964.24	2,067.56	1,693.23
ชานอ้อย	4,315.69	2,157.85	894.43	525.44	468.25
แกลบ	3,578.31	3,209.74	897.12	718.98	625.90
ลำต้น ยอด และ ใบข้าวโพด	2,662.15	726.77	258.37	146.44	122.82

หมายเหตุ \*WB คือ Wet Basis (ฐานมวลเปียก), \*\*DM คือ Dry Matter (มวลแห้ง)

## 2.2 การเลือกวิธีการปรับสภาพ (Pretreatment)

การปรับสภาพเป็นการช่วยให้เอนไซม์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิสเข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้ดีขึ้น โดยการทำลายโครงสร้างที่แข็งแรงของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส รวมทั้งลดขนาดผลึกของเซลลูโลสและลดการเกิด Degree of Polymerization ของเซลลูโลส [13] เพื่อให้ได้น้ำตาลปริมาณมาก วิธีการปรับสภาพมี 3 วิธี ได้แก่

1) วิธีการปรับสภาพทางกายภาพ (Physical Pretreatment) เป็นการย่อยโดยวิธีการกลโดยการหั่น ตัด หรือบด เพื่อลดขนาดผลึกของลิกนินเซลลูโลส เพิ่มพื้นที่ให้เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้นและลดอัตราการเกิดเส้นใยของกระบวนการ Polymerization [14]

2) วิธีการปรับสภาพทางเคมี (Chemical Pretreatment) เป็นการปรับสภาพโดยใช้สารเคมีในการเข้าทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบในชีวมวล ได้แก่ การปรับสภาพด้วยต่างเจือจาง [15, 16] การปรับสภาพด้วยกรดเข้มข้นและกรดเจือจาง เช่น กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เข้าไปละลายส่วนของเฮมิเซลลูโลสในชีวมวล ข้อเสียเกิดด้วยยับยั้ง เช่น Furfural และ HMF อีกทั้งยังเกิดความเป็นพิษและกัดกร่อนอุปกรณ์ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและการซ่อมบำรุง [17, 18]

3) วิธีการปรับสภาพทางเคมีกายภาพ (Physico-Chemical Pretreatment) ได้แก่ การปรับสภาพแบบ Steam Explosion (Autohydrolysis) วิธีการนี้ใช้ไอน้ำอิมพัลส์ที่ความดันสูงกับชีวมวลที่อาจจะบด หรือตัดให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นลดความดันลงอย่างรวดเร็ว ส่งผล

ให้ เฮมิเซลลูโลสถูกย่อยและลิกนินเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง [14, 16, 18, 19] และการปรับสภาพแบบ Liquid Hot Water (LHW) เป็นการนำความดันรวมกับน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 160-240 °C เพื่อละลายเฮมิเซลลูโลส แต่ต้องใช้น้ำในปริมาณมากและใช้พลังงานสูง จึงไม่สามารถพัฒนาไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ [20, 21]

การปรับสภาพทั้ง 3 วิธี สามารถสรุปโดยเปรียบเทียบลักษณะการทำงานและค่าใช้จ่ายได้ดังตารางที่ 2 [14, 22] การคัดเลือกวิธีการปรับสภาพ 1 วิธีเพื่อใช้ในงานวิจัยพิจารณาได้ ดังนี้

- การเพิ่มพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาสูง
- การแยกองค์ประกอบต่างๆ ของชีวมวลออกจากกันได้ดี เช่น การแยกลิกนินออกจากชีวมวลการละลายหรือการแยกเฮมิเซลลูโลสออกจากชีวมวล
- ค่าการลงทุนและค่าการดำเนินงานในการปรับสภาพต่ำ

และจากงานวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากลิกนิน-เซลลูโลสของบริษัท The Swedish Gas Center (SGC) ประเทศสวีเดน [7] ได้รวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการปรับสภาพชีวมวลด้วยวิธีต่างๆ พบว่า การปรับสภาพด้วยวิธี Steam Explosion เป็นการปรับสภาพที่ส่งผลให้เกิดก๊าซชีวภาพในปริมาตรสูงที่สุด จากการพิจารณาดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการปรับสภาพแบบ Steam Explosion มาใช้แยกองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ในรูปของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวมกันเป็น VS (Volatile Solid) ก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

**ตารางที่ 2** เปรียบเทียบลักษณะการทำงานและเงินค่าใช้จ่ายของการปรับสภาพแต่ละวิธี [14, 22]

Pretreatment (ลักษณะการทำปฏิกิริยา)	เพิ่มพื้นที่ เข้าทำ ปฏิกิริยา	การกำจัด ลิกนิน	การเปลี่ยน โครงสร้างลิกนิน	ปริมาณ น้ำตาลที่ เกิดขึ้น	การลงทุน	ค่าการ ดำเนินงาน
1. Physical Pretreatment						
Mechanical (-)	สูง	-	-	ต่ำมาก	ต่ำ	สูง
2. Chemical Pretreatment						
Dilute Acid - แยกเฮมิเซลลูโลส (หลัก) - เปลี่ยนโครงสร้างลิกนิน (รอง)	สูง	ปานกลาง	สูง	สูงมาก	ปานกลาง	ต่ำ
Conc. Acid - ย่อยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส	สูง	ปานกลาง	สูง	สูงมาก	สูง	ปานกลาง
Alkaline - แยกลิกนิน (หลัก) และเฮมิเซลลูโลส (รอง)	สูง	ปานกลาง	สูง	สูงมาก	ต่ำมาก	-
3. Physico-Chemical Pretreatment						
Steam Explosion - แยกเฮมิเซลลูโลส (หลัก) - เปลี่ยนโครงสร้างลิกนิน (รอง)	สูง	ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
LHW (แยกเฮมิเซลลูโลส)	สูง	ปานกลาง	สูง	สูงมาก	ต่ำ	-

### 2.3 การประเมินการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas)

การผลิตก๊าซชีวภาพในงานวิจัยใช้ค่า Volatile Solid (VS) ในการคำนวณปริมาตรก๊าซที่ผลิตได้จากปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นดั่งปฏิกรณ์แบบไม่ใช้อากาศซึ่งเป็นระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย งานวิจัยนี้ ได้เลือกประเภทของดั่งปฏิกรณ์โดยพิจารณาจากข้อกำหนด ดังนี้

- มีอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ต่อวัน (OLR) สูง
- ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ต่อวัน (HRT) ต่ำ
- เปอร์เซ็นต์การเกิดก๊าซมีเทนต่อวัน (%CH<sub>4</sub>) สูง

จากข้อมูลงานวิจัยของ Poh [23] ที่ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของดั่งปฏิกรณ์ 8 แบบสำหรับการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ Cover Lagoon, Completely Stirred Tank Reactor (CSTR), Anaerobic Contact (AC), Anaerobic Filter/Fixed Film (AF), Anaerobic Fluidized Bed (AFB), Anaerobic Baffled Reactor (ABR), Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) และ Upflow Anaerobic Sludge Fixed-Film (UASFF,

Hybrid Reactor) พบว่า ดั่งปฏิกรณ์แบบลูกผสม UASFF, Hybrid Reactor [23, 24] เป็นดั่งที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและมีเสถียรภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ UASB และ AF แบบทำงานระบบเดียว การเลือกดั่งปฏิกรณ์ที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้พิจารณาจากเสถียรภาพของระบบและผลกระทบจากการป้อนสารอินทรีย์ชีวมวลเข้าสู่ระบบ ดังนั้น จึงเลือกดั่งปฏิกรณ์ 2 แบบเปรียบเทียบกันระหว่างดั่งปฏิกรณ์แบบ UASFF, Hybrid Reactor ที่มีการปรับสภาพแบบ Steam Explosion เพื่อลดขนาดสารอินทรีย์ก่อนเข้าสู่ระบบ เนื่องจากมีข้อเสียเรื่องการอุดตันหากมีการเดินระบบในระยะเวลาอันยาวนาน และดั่งปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่นิยมใช้กับสารอินทรีย์ชีวมวล ที่ไม่มีการปรับสภาพ เนื่องจากเป็นการกวนผสมกันระหว่างสารอินทรีย์ของเหลวและของแข็งกับจุลินทรีย์ภายในถังกวนผสม มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของดั่งปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3 และใช้สมมติฐานด้านเทคนิคของดั่งปฏิกรณ์ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งดั่งปฏิกรณ์แบบ UASFF

ตารางที่ 3 ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพ [23]

ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การกวนผสมของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ภายในถังเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ</li> <li>- รับของเสียที่มีสิ่งที่เป็นพิษเจือปนได้ดี</li> <li>- เนื่องจากการกวนผสมช่วยเจือจางสารพิษนั้น</li> <li>- การตรวจวัดและควบคุมระบบไม่ยุ่งยาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นของของแข็งไม่ควรเกิน 10% TS มิฉะนั้นการกวนผสมอาจเกิดขึ้นไม่ได้</li> <li>- ถังปฏิกรณ์ต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อแก้ปัญหาเชื้อจุลินทรีย์ในระบบลดลง เนื่องจากเกิดการหลุดออกนอกระบบได้ง่าย</li> <li>- มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการใช้พลังงานในการกวนผสม</li> <li>- น้ำเสียที่ออกจากระบบยังคงมีค่าความสกปรกสูงอยู่</li> <li>- มักมีปัญหาเรื่องการขำรดของอุปกรณ์ใบกวน</li> </ul>
UASFF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีปริมาณ OLR สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ USAB และ Anaerobic Filtration แบบทำงานระบบเดียว</li> <li>- สามารถเก็บกักชีวมวลได้สูงกว่า</li> <li>- การเดินระบบมีความเสถียรสูง</li> <li>- มีความสามารถในการทนต่อ Shock Loading ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีปัญหาเกี่ยวกับการอุดตัน</li> <li>- มีค่า OLR ต่ำกว่าเมื่อบำบัดน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอย</li> </ul>

ตารางที่ 4 สมมติฐานด้านเทคนิคของถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพแบบ UASFF และ CSTR [23, 36-38]

ประเภทถังปฏิกรณ์	OLR (kg COD/m <sup>3</sup> -day)	HRT (วัน)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> /kg VS)	ปริมาตรก๊าซมีเทน (m <sup>3</sup> /kg VS)	%CH <sub>4</sub> (%)	ค่า LHV ของ CH <sub>4</sub> (kJ/m <sup>3</sup> )
UASFF	11.58	3	0.628	0.377	60	21,535.69
CSTR	2.17	19	0.520	0.260	50	18,958.83

#### 2.4 การประเมินหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ

งานวิจัยนี้ เลือกเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยอ้างอิงข้อมูลของบริษัท CAT Metro จำนวน 5 รุ่น แบ่งตามขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า ได้แก่ 187, 770, 1136, 1551 และ 1966 kW โดยให้แต่ละรุ่นเดินเต็มพิกัด สามารถประเมินหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่ป้อนเข้าเครื่องยนต์ต่อวันได้ ดังสมการ

$$f = \frac{Q \times 3600 \times 24}{\eta \times LHV} \quad (1)$$

เมื่อ  $f$  = ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ป้อนเข้าเครื่องยนต์ต่อวัน (m<sup>3</sup>/วัน)

$Q$  = อัตราความร้อนที่ป้อนเข้าเครื่องยนต์ (kJ/S)

$\eta$  = ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ (ทศนิยม)

LHV = ค่าความร้อนต่ำของก๊าซชีวภาพ (kJ/m<sup>3</sup>)

คำนวณหาขนาดถังปฏิกรณ์แบบ UASFF, Hybrid Reactor จากการป้อนชีวมวลหลังการปรับสภาพที่อยู่ในรูปของ COD และการหาขนาดถังปฏิกรณ์แบบ CSTR จากการป้อนชีวมวลในรูปของ VS ได้ดังสมการที่ 2 และ 3

$$V_1 = \frac{COD}{OLR} \times SF \quad (2)$$

เมื่อ  $V_1$  = ขนาดถังปฏิกรณ์แบบ UASFF, Hybrid Reactor (m<sup>3</sup>)

COD = ปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD ที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ต่อวัน (kg COD/วัน)

OLR = อัตราการรับภาระสารอินทรีย์ต่อวัน (kg COD/m<sup>3</sup>-วัน)

SF = Safety Factor (20%)



$$\text{หรือ } V_2 = \frac{VS}{OLR} \times SF \quad (3)$$

เมื่อ  $V_2$  = ขนาดถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ( $m^3$ )

VS = ปริมาณสารอินทรีย์ในรูป Volatile Solid ที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ต่อวัน (kg VS/วัน)

OLR = อัตราการรับภาระสารอินทรีย์ต่อวัน (kg VS/ $m^3$ -วัน)

SF = Safety Factor (20%)

จากปริมาณ COD หรือ VS ที่ต้องป้อนเข้าถังปฏิกรณ์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ จึงต้องคำนวณหาปริมาณสารอินทรีย์ที่มีในชีวมวลจากสมการ

$$m_{VS} = C \times P \times H \quad (4)$$

เมื่อ  $m_{VS}$  = ปริมาณ Volatile Solid ในชีวมวล (kg/kg DM)

C = ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในชีวมวล (kg/kg DM)

P = ประสิทธิภาพการปรับสภาพเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (%)

H = ประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (%)

โดยที่ 1 kg VS = 1.05 kg COD

การหาปริมาณชีวมวลที่ต้องใช้ผลิตก๊าซชีวภาพให้เพียงพอต่อการผลิตไฟฟ้าใน 1 วัน โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4 และ 7 ในการคำนวณ ดังสมการที่ 5

$$m_b = \frac{f}{m_{VS} \times B} \quad (5)$$

เมื่อ  $m_b$  = ปริมาณชีวมวล (kg DM/วัน)

B = ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อสารอินทรีย์สำหรับถังปฏิกรณ์แบบ UASFF มีค่า 0.63 ( $m^3$ /kg VS) สำหรับถังแบบ CSTR มีค่า 0.52 ( $m^3$ /kg VS)

สมมติฐานประสิทธิภาพของการปรับสภาพแบบ Steam Explosion ได้จากงานวิจัยของ Viola [25] และ

ประสิทธิภาพของเอนไซม์ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสจากงานวิจัยของ Ohgren et al. [26] ที่ใช้เอนไซม์ Celluclast 15 FPU/g cellulose มาคำนวณมีค่า ดังนี้

- การปรับสภาพชีวมวลของเซลลูโลส = 99.24%
- การปรับสภาพชีวมวลของเฮมิเซลลูโลส = 86.10 %
- การย่อยเซลลูโลสของเอนไซม์ = 74%
- การย่อยเฮมิเซลลูโลสของเอนไซม์ = 67%

ต้นทุนระบบผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ 15 ปี ประกอบด้วย ค่าการก่อสร้างและติดตั้งระบบปรับสภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และระบบผลิตไฟฟ้า ค่าชีวมวลในแต่ละปี ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา โดยต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยไฟฟ้า (LEC: Levelized Electricity Cost) มาจากต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าที่มีการปรับค่าใช้จ่าย และเงินทุนรายปีให้เป็นมูลค่าเงินที่เท่ากันทุกปีจากเงินปัจจุบันหารด้วยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ คำนวณได้จากสมการที่ 6

$$LEC = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{M_t + F_t}{(1+r)^t} + I_0}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (6)$$

เมื่อ LEC = ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ปรับเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (บาท/kWh)

$M_t$  = ค่าดำเนินการและบำรุงรักษาในปีที่ t (บาท)

$F_t$  = ค่าเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าปีที่ t (บาท)

$I_0$  = เงินลงทุนระบบในปีที่ 0 (บาท)

$E_t$  = ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีที่ t (kWh/ปี)

r = อัตราส่วนลด (ทศนิยม)

สมมติฐานที่ใช้ในการประเมินการผลิตไฟฟ้ามีดังนี้

- อายุการใช้งานของระบบผลิตไฟฟ้า 15 ปี
- จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อปี 8,400 ชั่วโมง/ปี หรือ 350 วัน/ปี [7]
- การเดินเครื่องของโรงผลิตไฟฟ้า 24 ชั่วโมง/วัน
- ค่า LHV ของก๊าซชีวภาพที่มีเทน 60% เท่ากับ 21,535.69  $kJ/m^3$

- ค่า LHV ของก๊าซชีวภาพที่มีเทน 50% เท่ากับ  
17,958.83 kJ/m<sup>3</sup>

- เงินลงทุนและค่าดำเนินการบำรุงรักษาของ  
ระบบปรับสภาพ

- เงินลงทุนของระบบปรับสภาพ

$$P = 2.7m_0 + 38.2 \quad (7)$$

เมื่อ P = เงินลงทุนระบบปรับสภาพ (บาท)

ค่า O&M = 5.5% ของราคาปรับสภาพ

- เงินลงทุนและค่าดำเนินการบำรุงรักษาของ  
ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ค่าก่อสร้างถึงปฏิกรณ์แบบ UASFF = 3,000

บาท/m<sup>3</sup>

ค่าก่อสร้างถึงปฏิกรณ์แบบ CSTR = 2,800  
บาท/m<sup>3</sup>

ค่าO&Mของระบบก๊าซชีวภาพแบบUASFF=5%  
ของราคาก่อสร้างระบบก๊าซชีวภาพแบบ UASFF

ค่าO&Mของระบบก๊าซชีวภาพแบบCSTR=3%  
ของราคาก่อสร้างระบบก๊าซชีวภาพแบบ CSTR

- ข้อมูลเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายของเครื่องยนต์  
แสดงดังตารางที่ 5

- ค่าจ้างคนงานของระบบผลิตไฟฟ้ารวมทั้งหมด  
แสดงดังตารางที่ 6 โดยกำหนดค่าจ้างพนักงานตามความ

เหมาะสมของค่าแรงในภาคเอกชนที่กรมแรงงานกำหนดไว้

- ราคาชีวมวลแสดงดังตารางที่ 7

**ตารางที่ 5** ข้อมูลเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ

ขนาดเครื่องยนต์ ก๊าซชีวภาพ	Electrical Efficiency	ค่าเครื่อง	ค่า O&M	ค่า O&M Major overhaul ตลอดอายุการใช้งาน	Major overhaul
(kW)	(%)	(บาท)	(บาท/ปี)	(บาท/ปี)	(ปี)
187	29.4	5,038,416	20,477	73,624	5
770	31.9	10,864,085	84,315	194,924	5
1136	37.9	14,485,446	124,392	211,204	7
1551	39.1	21,980,090	169,835	303,407	7
1966	39.4	28,341,090	215,277	387,895	7

ที่มา : ข้อมูลจากผู้จำหน่ายเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ Caterpillar บริษัท CAT Metro

**ตารางที่ 6** ค่าแรงพนักงานของโรงไฟฟ้ารวมทั้งระบบตามขนาดเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพใน 1 ปี [39]

ขนาดเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ (kW)	187	770	1136	1551	1966
ค่าใช้จ่ายพนักงาน (บาท/ปี)	2,610,000	3,174,000	3,834,000	4,956,000	5,076,000



**ตารางที่ 7** ราคาชีวมวล

ชนิดชีวมวล	ค่ารวบรวมและค่าชีวมวล (บาท/ตัน)	ค่าขนส่งขนาดรถบรรทุก 7 ตัน ระยะทางไม่เกิน 100 km (บาท/ตัน)	ค่าวัตถุดิบตั้งต้น (บาท/ตัน)
ฟางข้าว	950	400	1,350
ยอดและใบอ้อย	840	400	1,240

**3. ผลการวิเคราะห์****3.1 ปริมาณ Volatile Solid ของชีวมวลจากการปรับสภาพ**

ปริมาณ VS (Volatile Solid) ของฟางข้าว และ ยอดและใบอ้อยที่ใช้การปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสแบบ Steam Explosion ก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบ UASFF

เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณที่ต้องการใน 1 วัน ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4 เป็นปริมาณ VS ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสแสดงผลในตารางที่ 8 ฟางข้าวมีปริมาณ VS สูงกว่ายอดและใบอ้อย เนื่องจากฟางข้าวมีปริมาณของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูงกว่ายอดและใบอ้อย

**ตารางที่ 8** ผลการคำนวณค่า VS และค่า COD จากปริมาณน้ำตาลในชีวมวลทั้ง 2 ชนิด (kg/kg DM)

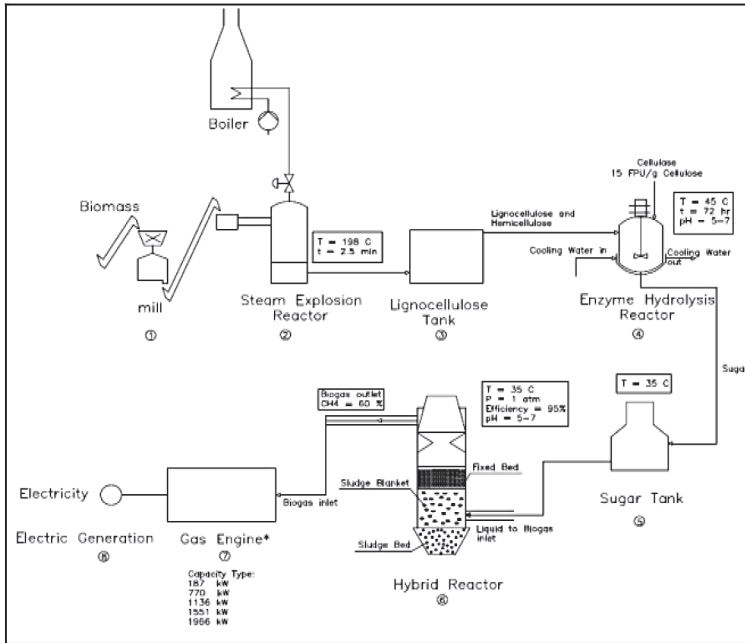
วิธีปรับสภาพ	ชนิดชีวมวล วัตถุดิบตั้งต้น	ค่า COD จาก เซลลูเลส	ค่า COD จาก เฮมิเซลลูโลส	ค่า COD จาก Acetic Acid	ค่า COD รวม	ค่า VS* รวม
Steam Explosion	ฟางข้าว	295.4	158.0	10.1	463.5	441.4
	ยอดและใบอ้อย	267.9	146.9	10.1	424.9	404.7

\*1 kg VS = 1.05 kg COD (จากการคำนวณ)

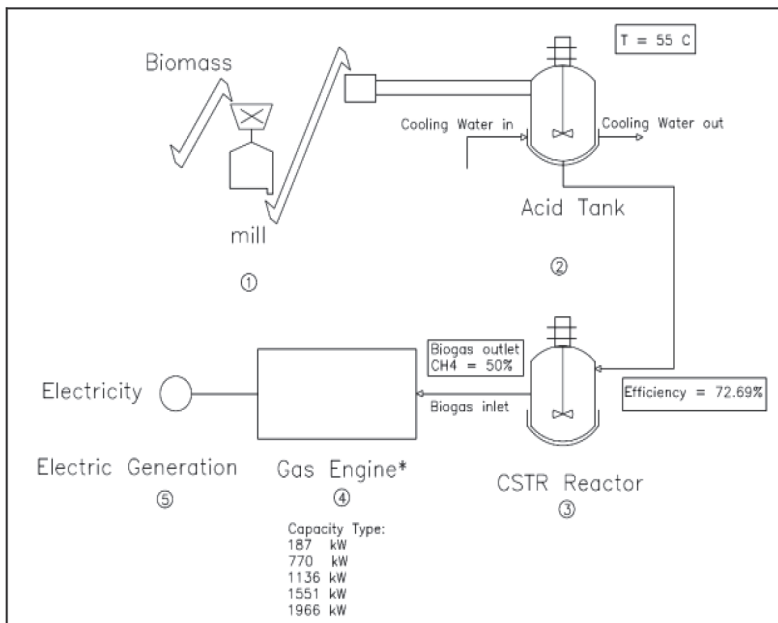
**3.2 ผลการวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ**

ระบบการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพกรณีที่มีการปรับสภาพแบบ Steam Explosion แสดงได้ดังรูปที่ 1 และกรณีไม่มีการปรับสภาพแสดงดังรูปที่ 2 และผลการคำนวณหาปริมาณชีวมวลและปริมาตรก๊าซชีวภาพ

ที่ต้องการใช้ผลิตไฟฟ้าที่เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพขนาดต่างๆ แสดงในตารางที่ 9 ถึงปฏิกรณ์แบบ CSTR ใช้ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์นานถึง 19 วัน เนื่องจากมีอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ต่ำเพียง 2.17 kg COD/m<sup>3</sup>-day ทำให้ต้องมีขนาดถังปฏิกรณ์ใหญ่กว่าถังปฏิกรณ์แบบ UASFF



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์แบบ UASFF ที่มีการปรับสภาพชีวมวลด้วยวิธี Steam Explosion



รูปที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่ไม่มีการปรับสภาพชีวมวล

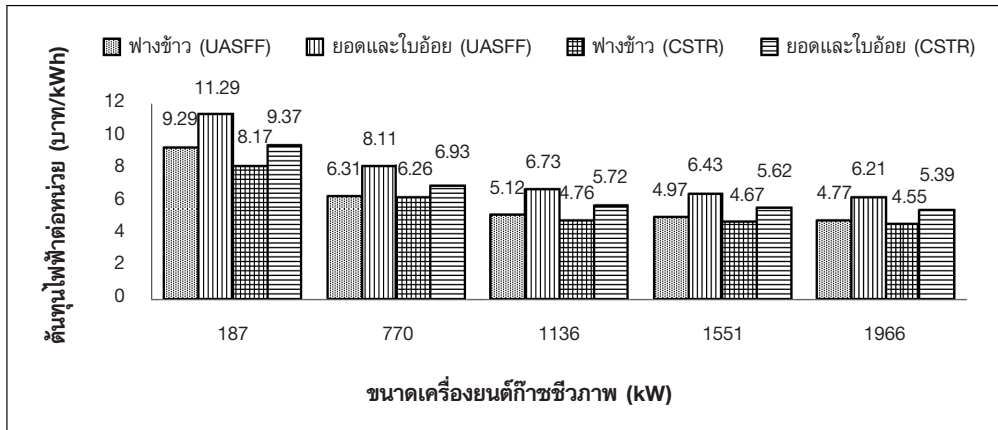
**ตารางที่ 9** ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ ปริมาณชีวมวล ปริมาณก๊าซชีวภาพ และขนาดถังปฏิกรณ์แต่ละประเภทที่ต้องใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพใน 1 วัน

ประเภทถังปฏิกรณ์	ประเภทชีวมวล	ขนาดเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ (kW)	ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kWh/วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> /วัน)	ขนาดถังปฏิกรณ์ (m <sup>3</sup> )	ปริมาณชีวมวล (ตัน/วัน)
UASFF	ฟางข้าว	187	4,488	2,551.8	470	11
		770	18,480	9,684.0	1,800	41
		1136	27,264	12,025.2	2,200	51
		1551	37,224	15,914.4	2,900	67
		1966	47,184	20,019.0	3,700	84
	ยอดและใบอ้อย	187	4,488	2,551.8	470	17
		770	18,480	9,684.0	1,800	65
		1136	27,264	12,025.2	2,200	81
		1551	37,224	15,914.4	2,900	107
		1966	47,184	20,019.0	3,700	135
CSTR	ฟางข้าว	187	4,488	2,899.20	4,200	10
		770	18,480	11,000.20	16,000	37
		1136	27,264	13,659.70	20,000	46
		1551	37,224	18,077.50	26,000	61
		1966	47,184	22,740.00	33,000	76
	ยอดและใบอ้อย	187	4,488	2,899.20	4,200	13
		770	18,480	11,000.20	16,000	51
		1136	27,264	13,659.70	20,000	63
		1551	37,224	18,077.50	26,000	84
		1966	47,184	22,740.00	33,000	106

### 3.3 ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า (Levelized Cost of Electricity)

ผลการคำนวณหาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย แสดงได้ดังรูปที่ 3 พบว่า การใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบตั้งต้น มีต้นทุนต่ำกว่ายอดและใบอ้อย และการใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่ไม่มีการปรับสภาพชีวมวล มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้า

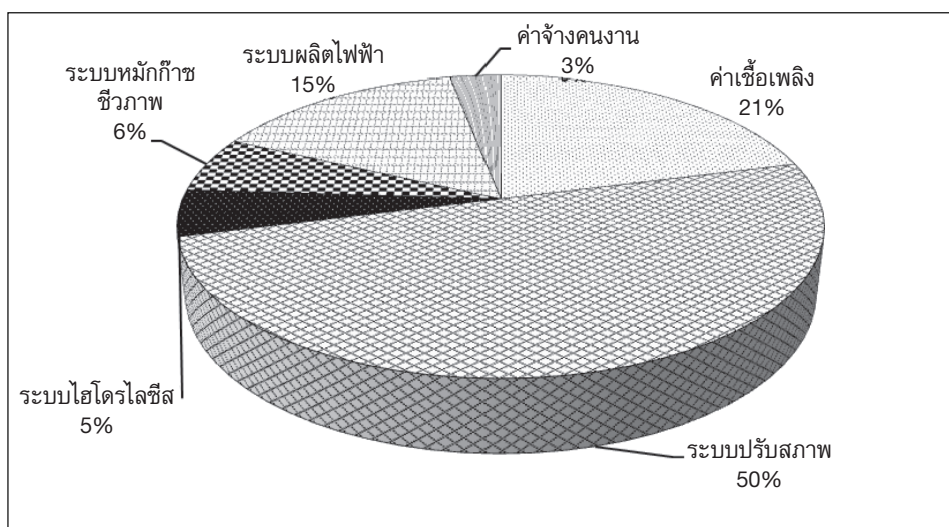
ต่ำกว่าการใช้ถังปฏิกรณ์แบบ UASFF ที่มีการปรับสภาพชีวมวล ถึงแม้ว่าถังปฏิกรณ์แบบ CSTR จะต้องใช้ขนาดใหญ่กว่าแต่เนื่องจากต้นทุนการปรับสภาพค่อนข้างสูงจึงทำให้การใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่ไม่มีการปรับสภาพชีวมวลมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่ต่ำกว่า



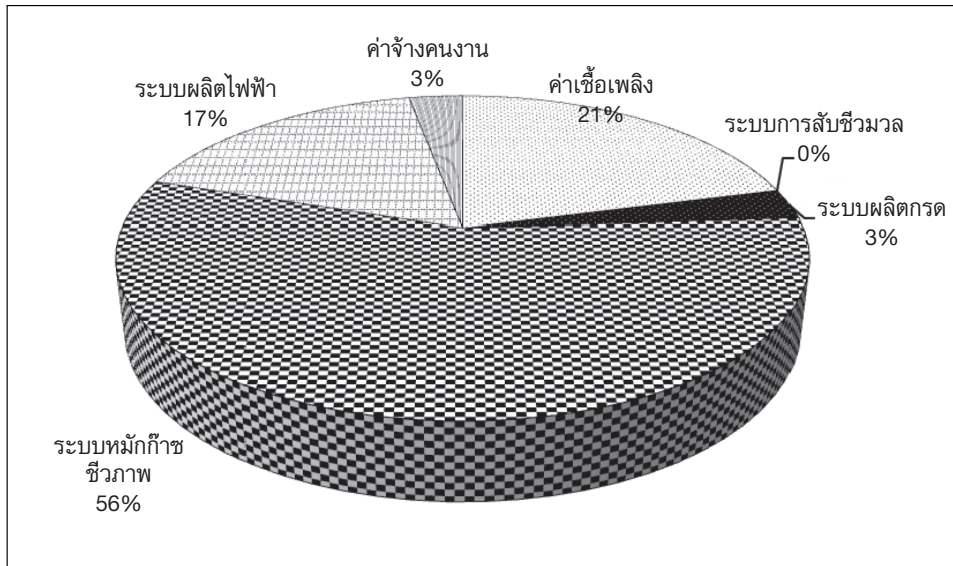
รูปที่ 3 ต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วยที่ผลิตจากก๊าซชีวภาพโดยใช้วัตถุดิบฟางข้าวและยอดและใบอ้อยของดังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด

ระบบผลิตไฟฟ้าขนาด 1966 kW ที่ใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบและใช้ดังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่ไม่มีการปรับสภาพชีวมวลมีต้นทุนต่ำสุด คือ 4.55 บาท/kWh และที่มีต้นทุนสูงสุดได้แก่ระบบผลิตไฟฟ้าขนาด 187 kW ที่ใช้ใบและยอดอ้อยเป็นวัตถุดิบ และใช้ดังปฏิกรณ์แบบ UASFF ที่มีการปรับสภาพชีวมวลมีต้นทุนสูงสุด คือ 11.29 บาท/kWh เมื่อพิจารณาสัดส่วนของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของทั้ง 2 ระบบดังแสดงในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 พบว่า ต้นทุน

การปรับสภาพชีวมวลด้วยวิธี Steam Explosion ของดังปฏิกรณ์แบบ UASFF มีสัดส่วนค่อนข้างสูงประมาณ 50-60% ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด สำหรับกรณีใช้ดังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่ไม่มีการปรับสภาพชีวมวล พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้ามากที่สุด คือ ระบบดังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีค่าประมาณ 48-56% ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด



รูปที่ 4 สัดส่วนของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพของดังปฏิกรณ์แบบ UASFF ที่มีการปรับสภาพชีวมวลด้วยวิธี Steam Explosion



รูปที่ 5 สัดส่วนต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่ไม่มีการปรับสภาพชีวมวล

#### 4. สรุป

การประเมินศักยภาพของชีวมวลในประเทศ 2 ชนิดที่นำมาผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตไฟฟ้า โดยเลือกจากปริมาณที่เหลือจากการใช้ประโยชน์และปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสที่ พบว่า พางข้าว ยอดและใบอ้อยมีศักยภาพสูงที่สุด ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่ใช้พางข้าวเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพมีต้นทุนต่ำกว่ายอดและใบอ้อย ระบบผลิตไฟฟ้าที่ผลิตก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่ไม่มีการปรับสภาพชีวมวลมีต้นทุนต่ำกว่าถังปฏิกรณ์แบบ UASFF ที่มีการปรับสภาพชีวมวล ต้นทุนส่วนใหญ่ของระบบผลิตไฟฟ้าที่ผลิตก๊าซชีวภาพ จากถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่ไม่มีการปรับสภาพชีวมวลอยู่ที่ค่าระบบถังปฏิกรณ์แบบ CSTR เนื่องจากไม่มีการปรับสภาพ จึงต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่มาก ขณะที่ต้นทุนของระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถังปฏิกรณ์แบบ UASFF ที่มีการปรับสภาพชีวมวลอยู่ที่ค่าระบบปรับสภาพ อย่างไรก็ตาม การปรับสภาพชีวมวลก่อนเข้าบ่อหมักสามารถช่วยลดขนาดปริมาตรบ่อหมักได้มาก ดังนั้น จึงช่วยลดปัญหาข้อจำกัดของพื้นที่ที่ต้องการได้

ในอนาคตแนวโน้มของราคาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบ UASFF และระบบ CSTR อาจต่ำลง หากในประเทศมีการสนับสนุนและพัฒนาเทคโนโลยีด้านระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้เหมาะสมกับการใช้งานภายในประเทศ ซึ่งจะลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศที่ต้องมีการเสียภาษี และหากมีการจัดการที่ดีด้านวัตถุดิบที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง รวมทั้งมีงานวิจัยสนับสนุนการนำมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานทดแทน อาจส่งผลให้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีมูลค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้มีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้ามากนัก เพราะอยู่ในสัดส่วนที่ต่ำหากเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงราคาของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้น ราคาไฟฟ้าต่อหน่วยจะแปรผันตามราคาของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนพัฒนาพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ได้สนับสนุนมอบทุนอุดหนุนแก่การวิจัยนี้ ขอขอบคุณคุณสมเกียรติ ชวิศเจริญวงศ์ บริษัทเมโทรแคตที่อนุเคราะห์ข้อมูลเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ ตลอดจนอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ของผู้วิจัยทุกท่านจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Zieminski, K., and Frac, M., 2012, "Methane Fermentation Process as Anaerobic Digestion of Biomass: Transformations, Stages and Micro-organisms", *African Journal of Biotechnology*, Vol. 11, pp. 4127-4139.
2. Mahar, R.B., n.d., "Coverting Waste Agricultural Biomass into Energy Source", *Economic and Environmental Feasibility and Recommendation on Policies for the Pilot Scale Project of Biogas Plant, Institute of Environmental Engineering and Management Mehran University of Engineering and Technology Jamshoro, Pakistan*, pp. 2-4.
3. Holm-Nielsen, J.B., Seadi, T.A., and Oleskowicz-Popiel, P., 2009, "The Future of Anaerobic Digestion and Biogas Utilization", *Bioresource Technology*, Vol. 100, pp. 5478-5484.
4. Pakarinen, A., Maijala, P., Stoddard, F.L., Santanen, A., Tuomainen, P., Kymalainen, M., and Viikari, L., 2011, "Evaluation of Annual Bioenergy Crops in the Boreal Zone for Biobag and Ethanol Production", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 35, pp. 3071-3078.
5. Annop N., 2008, "Final Report of Evaluation of Technology and potential of Agricultural Waste and Energy crop for Biogas Production in Thailand", *Pilot Plant Development and Training Institute, National Research Council of Thailand*, pp.1-67. (In Thai)
6. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, 2005, "Final Report of Biogas Database", *The Energy and Environmental Engineering Center, Faculty of Engineering, Kasetsart University (Bangken Campus)*, pp.6-90. (In Thai)
7. Odhner, P.B., Horvath, G.IS., Kabir, H.B.M.M., Schabbauer, H.B.A., and Grontmij, 2012, "Biogas from Lignocellulosic Biomass," *Report SGC 247 The Swedish Gas Center*, pp. 1-20.
8. Biomass Clearing House, 2006, "Biomass Edition 1", *Biomass Clearing House, Energy for Environment Foundation, Bangkok*, pp. 1-3. (In Thai)
9. Steffen, R., Szolar, O., and Braun, R., 1998, "Feedstock for Anaerobic Digestion", *Institute for Agrobiotechnology Tulln University of Agricultural Sciences Vienna*, pp. 2-20.
10. Karagiannidis, A., and Perkoulidis, G., 2009, "A multi-criteria Ranking of Different Technologies for the Anaerobic Digestion for Energy Recovery of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes", *Bioresource Technology*, Vol. 100, pp. 2355-2360.
11. Klimiuk, E., Pokoj, T., Budzynski, W., and Dubis, B., 2010, "Theoretical and Observed Biogas Production from Plant Biomass of Different Fiber Contents", *Bioresource Technology*, Vol. 101, pp. 9527-9535.
12. Department of Alternative Energy Department and Efficiency, 2008-2010, "Thailand Alternative Energy Situation 2008-2010", *Department of Alternative Energy Department and Efficiency, Ministry of Energy*, pp.23-28. (In Thai)
13. Zheng, Y., Pan, Z., and Zhang, R., 2009, "Overview of Biomass Pretreatment for Cellulosic Ethanol Production", *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 51-68.
14. Alvira, P., Tomus-Pejtes, E., Ballesteros, M., and Negro, M.J., 2010, "Pretreatment Technologies for an Efficient Bioethanol Production Process Based on Enzymatic Hydrolysis: A review", *Bioresource Technology*, Vol. 101, No. 13, pp. 4851-4861.
15. McMillan, J.D., 1994, "Pretreatment of Lignocellulosic Biomass", *American Chemical Society Symposium Series*, Vol. 566, No. 15, pp. 292-324.



16. Sun, Y., and Cheng, J., 2002, "Hydrolysis of Lignocellulose Material for Ethanol Production: A review", *Bioresource Technology*, Vol. 83, No. 1, pp. 1-11.
17. Brodeur G., Yau, E., Badal, K., Collier, J., Ramachandran, K.B., and Ramakrishnan, S., 2011, "Chemical and Physicochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A review", *Enzyme Research*, Vol. 2011, No. 1, pp. 1-17.
18. Talebnia, F., Karakashev, D., and Angelidaki, I., 2010, "Production of Bioethanol from Wheat Straw: An Overview on Pretreatment, Hydrolysis and Fermentation", *Bioresource Technology*, Vol. 101, No. 13, pp. 4744-4753.
19. W.R., Converse, A.O., and Grethlein, H.E., 1986, "Effect of Steam Explosion Pretreatment on Pore Size and Enzymatic Hydrolysis of Poplar", *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 8, No. 5, pp. 274-280.
20. Hendriks, A.T.W.M., and Zeeman, G., 2009, "pretreatment to Enhance the Digestibility of Lignocellulosic Biomass", *Bioresource Technology*, Vol. 100, No. 1, pp. 10-18.
21. Balat, M., 2011, "Production of Bioethanol from Lignocellulosic Materials via the Biochemical Pathway: A review", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 2, pp. 858-875.
22. Hensen, A.M.J., Beentink, H.H., Scott, E.L., and Sanders, J.P.M., 2010, "Comparison of Dilute Mineral and Organic Acid Pretreatment for Enzyme Hydrolysis of Wheat Straw", *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 46, No. 2, pp. 126-131.
23. Poh, P.E., and Chong, M.F., 2009, "Development of Anaerobic Digestion Methods for Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment", *Bioresource Technology*, Vol. 100, No. 1, pp. 1-9.
24. Banjaporn S., 1998, "Performance of an Anaerobic Hybrid Reactor Combining a Filter and a Sludge Bed", *Master Degree Science (Biotechnology)*, King Mongkuts University of Technology Thonburi Bangkok (Thailand) Graduate School, pp. 10-17. (In Thai)
25. Viola, E., Zimbardi, F., Cardinale, M., Cardinale, G., Braccio, G., and Gambacorta, E., 2008, "Processing Cereal Straws by Steam Explosion in a Pilot Plant to Enhance Digestibility in Ruminants", *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 4, pp. 681-689.
26. Öhgren, K., Bura, R., Lesnicki, G., Saddler, J., and Zacchi, G., 2007, "A Comparison between Simultaneous Saccharification and Fermentation and Separate Hydrolysis and Fermentation Using Steam-Pretreated Corn Stover", *Process Biochemistry*, Vol. 42, No. 5, pp. 834-839.
27. Pravet, T., and Pramote S., 2009, "Potential Evaluation of Agricultural Materials for Cellulosic Ethanol", *Research Information Repository*, pp. 8-51. (In Thai)
28. Najafpour, S.C., Carrere, H., Filho, R.M., and Costa, A.C., 2006, "Production of Bioethanol, Methane and Heat from Sugarcane Bagasse in a Biorefinery Concept", *Bioresource Technology*, Vol. 102, pp. 7887-7895.
29. Paoli, F.D., Bauer, A., Leonhartberger, C., Amon, B., and Amon, T., 2011, "Utilization of By-Products from Ethanol Production as Substrate for Biogas Production", *Bioresource Technology*, Vol. 102, pp. 6621-6624.
30. Aguilar-Rivera, N., and De Jesus-Merales, J., 2010, "Edible Mushroom *Pleurotus Ostreatus* Production on Cellulosic Biomass of Sugar Cane", *Sugar Tech*, Vol. 12, pp. 176-178.
31. Seabra, J.E.A., Tao, L., Chum, H.L., and Macedo, C., 2010, "A Techno-Economic Evaluation of the Effects of Centralized Cellulosic Ethanol and Co-Products Refinery Options with Sugarcane Mill Clustering", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 34,



pp.1065-1078.

32. Ohgren, K., Bura, R., Saddler, J., and Zacchi, G., 2007, "Effect of Hemicellulose and Lignin Removal on Enzymatic Hydrolysis of Steam Pretreated Corn Stover", *Bioresource Technology*, Vol. 98, pp. 2503-2510.

33. Teghammar, A., Karimi, K., Horvath, I.S., and Taherzadeh, M.J., 2012, "Enhanced Biogas Production from Rice Straw, Triticale Straw and Softwood Spruce by NMMO Pretreatment", *Biomass and Bioenergy*, Vol. 36, pp. 116-120.

34. Varga, E., Reczey, K., and Zacchi, G., 2004, "Optimization of Steam Pretreatment of Corn Stover to Enhance Enzymatic Digestibility", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol. 114, pp. 509-523.

35. Zhong, W., Zhang, Z., Qiao, W., Fu P., and Liu, M., 2011, "Comparison of Chemical and Biological Pretreatment of Corn Straw for Biogas Production by Anaerobic Digestion", *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 1875-1879.

36. Energy Research and Development Intitute-Nakornping Chiang Mai University, 2011, "Biogas Production from Argicultural Products", [Online], Available: <http://cstr.erd.or.th> [20 June 2011]. (In Thai)

37. Bauer, A.M., 2009, "Pretreatment of Cane Bagasse with Alkaline Hydrogen Peroxide for Enzymatic Hydrolysis of Cellulose and Ethanol Fermentation", *Journal of Environmental Science and Health*, Vol. 24, No. 4, pp. 421-433.

38. Boyle, W.C., 1976, "Energy Recovery from Sanitary Landfills-a Review", In *Schlegel, H.G. and Barnea, J. (Eds.), Microbial Energy Conversion, Pergamon Press Oxford*, pp. 119-138.

39. Ministry of Labour, 2010, "Recommendations modes private sector employment," [Online], Available: [http://www.mol.go.th/sites/default/files/prakadwages\\_\\_feb0310\\_\\_2.pdf](http://www.mol.go.th/sites/default/files/prakadwages__feb0310__2.pdf) [20 June 2011]. (In Thai)