

การพัฒนากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมของเชื้อจุลินทรีย์ มูลไก่ และหญ้าเนเปียร์
ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวน

Development of the Biogas Production System from a Co-digestion of Inoculums Chicken
Manure and Napier grass in Covered Lagoon with Circulating

ชุตินา คุณภักดี (Chutima Khunpakdee)* ดร.กัลยกร ขวัญมา (Dr.Kulyakorn Khuanmar)**

สุภาวดี ยอดทองดี (Supawadee Yodthongdee)***

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมของเชื้อจุลินทรีย์ มูลไก่ และหญ้าเนเปียร์ ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวน โดยถังหมักก๊าซชีวภาพต้นแบบขนาด 250 ลิตร เพื่อการหมักร่วมระหว่าง เชื้อจุลินทรีย์ มูลไก่ และหญ้าเนเปียร์ เป็นการหมักแบบต่อเนื่องที่ปริมาตรการหมัก 220 ลิตร อัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อมูลไก่ต่อหญ้าเนเปียร์ เท่ากับ 59.7 : 6.02 : 34.28 %TS ของแข็งทั้งหมด (TS) เท่ากับ 2.5 % จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 38 วัน ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดถึง 81.5 ลิตรต่อวัน ประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 74.8 มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีถึงร้อยละ 65 รวมทั้งระบบยังสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ $0.17 \text{ m}^3 \cdot \text{CH}_4/\text{kg} \cdot \text{VS}$ และมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน 0.21 และ $0.18 \text{ m}^3/\text{kgCOD removed}$ ตามลำดับ

ABSTRACT

The purpose of this research was to develop the biogas production system from covered lagoon with circulating waste in a 250 L. pilot scale reactor. At the digestion used inoculums, chicken manure co-digested with napier grass. The fermentation volume was 220 l. The ratios of inoculums : chicken manure : napier grass was 59.7 : 6.02 : 34.28 % total solid (TS). The TS was 2.5% a hydraulic retention time (HRT) of 38 day, The maximum biogas production of 81.5 l/day, methane content of 74.8 %, COD removal efficiencies of 65%, and $0.17 \text{ m}^3 \cdot \text{CH}_4/\text{kg} \cdot \text{VS}$ of methane were achieved. The efficiency of biogas and methane production were 0.21 and $0.18 \text{ m}^3/\text{kgCOD removed}$, respectively.

คำสำคัญ: การหมักร่วม พลังงานทดแทน

Keywords: Co-digestion, Renewable Energy

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ปัจจุบันโลกมีความต้องการใช้พลังงานมากขึ้นเราจึงต้องหาพลังงานทดแทนมาใช้ ก๊าซชีวภาพเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งมีของเสียที่มีคุณสมบัติที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการหมักเป็นจำนวนมาก อาทิเช่น มูลสัตว์ เศษอาหาร น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ รวมถึง พืชพลังงานอย่างหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่มีอัตราการผลิตก๊าซถึง 0.4 ลิ./ก. อีกทั้งมีค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วงค่อนข้างสูงประมาณ 54.66 จึงเหมาะกับการนำมูลสัตว์ซึ่งมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำมาใช้เป็นวัตถุดิบหมักร่วม เพื่อให้ได้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม (คู่มือเทคโนโลยีพลังงานก๊าซชีวภาพ, 2557) ในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกมูลไก่มาเป็นส่วนผสมร่วม เนื่องจากมูลไก่มีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ คือ 7.6 (Wilawan et al., 2014) และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทน 0.145 m³ CH₄/kg.VS (ศูนย์บริการข้อมูลโครงการศึกษาวิจัย ต้นแบบวิสาหกิจชุมชนพลังงานสีเขียวจากพืชพลังงาน, 2556) อีกทั้งเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในปัจจุบันมีให้เลือกใช้หลากหลายตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันไป ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อขยายผลการทดลองจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมาเป็นขนาดของถังหมักที่ใช้ได้จริงในครัวเรือน โดยออกแบบการทดลองให้เป็นการหมักร่วม (Co-digestion) ลักษณะของถังหมักเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (Two-stage Digester) ซึ่งสามารถรองรับของเสียที่มีค่าสารอินทรีย์ได้สูงกว่าการหมักแบบขั้นตอนเดียว (Weiland, P, 2010)

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ Janejadkarn and Chavalrit (2014) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยวิธีการหมักแบบต่อเนื่อง พบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าที่เหมาะสมคือ 2% มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.57 kg. VS/m³.day ผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 0.529 m³/kg VS added และปริมาณก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.242 m³/kg VS added Wilawan et al. (2014) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หมักร่วมกับมูลไก่ พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.27±0.01 L CH₄/kg.VS ที่อัตราส่วนระหว่างหญ้าต่อมูลไก่เท่ากับ 50:50% จักรพันธ์ (2553) ศึกษาการใช้กระบวนการย่อยสลายร่วมในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียฟาร์มสุกรร่วมกับหญ้าเนเปียร์และเศษอาหาร โดยใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งระเหยของน้ำเสียฟาร์มสุกรกับหญ้าเนเปียร์และเศษอาหารเท่ากับ 70:30 และ 40:60 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียว โดยทำการทดลองถึงปฏิกิริยาแบบ ASBR ที่ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน พบว่า การหมักน้ำเสียฟาร์มสุกรร่วมกับหญ้าเนเปียร์ มีค่า pH อยู่ในช่วง 7.01–7.38 ได้อัตราการเกิดก๊าซมีเทน 0.629 (± 0.16) L.CH₄/g.VS และผลการทดลองที่ใช้ น้ำเสียฟาร์มสุกรหมักร่วมกับเศษอาหารพบว่า ค่า pH ของน้ำที่ผ่านเข้าระบบอยู่ในช่วง 6.87–7.17 ทำให้ได้อัตราการเกิดก๊าซมีเทน 0.486 (± 0.24) L.CH₄/g.VS และเมื่อเปรียบเทียบการทดลองทั้งสองกับผลที่ได้จากการทดลองที่ใช้ น้ำเสียฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียว พบว่า ได้อัตราการเกิดก๊าซมีเทน 0.240 (± 0.02) L.CH₄/g.VS ซึ่งการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียฟาร์มสุกรกับหญ้าเนเปียร์ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด พาริตา พรหมมา (2557) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และหญ้าอาลาฟีด โดยศึกษา 5 อัตราส่วนระหว่างหญ้าเนเปียร์ต่อเชื้อจุลินทรีย์ คือ 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 และ 3:1 ปริมาตร 5 ลิตร ทำการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นเวลา 45 วัน พบว่า อัตราส่วนของหญ้าต่อเชื้อจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุดสำหรับหญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และหญ้าอาลาฟีด คือ 1:3, 1:2 และ 1:2 ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 22.45, 26.25 และ 24.29 ลิตร คิดเป็นผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.37, 0.53 และ 0.47 ลิตรก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยจากนั้นทำการทดลองหมักหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และหญ้าอาลาฟีด อัตราส่วนระหว่างหญ้าต่อเชื้อจุลินทรีย์ 1:2 ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.1 ปริมาตร 1 ลิตร เป็นเวลา 36 วัน พบว่ามีปริมาณ

ก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 2.46 และ 6.97 ลิตร และมีร้อยละของก๊าซมีเทนเท่ากับร้อยละ 45.3 และ 52.3 สำหรับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และหญ้าอาลาฟีด ตามลำดับ

วิธีการวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อจุลินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นเชื้อจุลินทรีย์จากบ่อผลิตก๊าซชีวภาพของศรีวิโรจน์ฟาร์ม จังหวัดขอนแก่น หากไม่สามารถวิเคราะห์หรือทำการทดลองได้ทันทีเชื้อจุลินทรีย์นี้จะถูกเก็บไว้ในห้องที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์

มูลไก่ มูลไก่ที่ใช้เป็นมูลไก่ได้จากฟาร์มไก่ศรีวิโรจน์ฟาร์ม จังหวัดขอนแก่น ซึ่งจะนำมาตากให้แห้งเพื่อความสะดวกต่อการเก็บรักษา

หญ้าเนเปียร์ หญ้าเนเปียร์ที่ใช้เป็นหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 มีระยะเวลาการตัด 45 วันขึ้นไป ซึ่งได้ทำการเตรียมหญ้าโดยการบดละเอียดให้มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.5-2 เซนติเมตร หากไม่สามารถวิเคราะห์หรือทำการทดลองได้ทันทีหญ้าเนเปียร์นี้จะถูกเก็บไว้ในที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
1. ความชื้น (Moisture)	Gravimetric Method
2. ของแข็งทั้งหมด (Total Solid; TS)	Gravimetric Method
3. ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid; VS)	Gravimetric Method
4. ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)	Close Reflux Method
5. ไนโตรเจนทั้งหมด (Nitrogen, N)	Kjedahl Method
6. คาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon, C)	คำนวณจากค่า VS
7. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	คำนวณจากค่าคาร์บอนหารด้วยไนโตรเจน

การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของเชื้อจุลินทรีย์ มูลไก่ และหญ้าเนเปียร์ โดยทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ความชื้น (Moisture) ของแข็งทั้งหมด (Total Solid; TS) ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid, VS) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ไนโตรเจนทั้งหมด (Nitrogen, N) คาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon, C) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ซึ่งถูกตรวจวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ APHA AWWA, WEE (2005) และ AOAC (1995) แสดงรายละเอียด ดังตารางที่ 1

ถังหมักต้นแบบก๊าซชีวภาพระบบเปิดแบบน้ำวน

สำหรับการวิจัยนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักร่วมในถังหมักต้นแบบขนาด 250 ลิตร ถังหมักต้นแบบที่ใช้ในการทดลองศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทนในรูปแบบการหมักร่วม (Co-digestion) ลักษณะของถังหมักเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (Two-stage Digester) ดังภาพที่ 1 แสดงถังหมักต้นแบบทำจากสแตนเลส เลสหนา 1.5 มิลลิเมตร สูง 0.25 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของถังหมักทั้งหมด 1.5 เมตร มีปริมาตร 250 ลิตร โดยถังหมักแบ่งเป็น 2 ชั้น มีเส้นผ่าศูนย์กลาง

ดังในตารางที่ 1 ติดตั้งวาล์วเปิดปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว จำนวน 1 ตัว ไว้ที่ก้นถัง เพื่อใช้เป็นที่ระบายตะกอนภายในถังหมักคั่นแบบ ติดตั้งเครื่องตั้งเวลา(Timer switch) เพื่อกำหนดเวลาทำงานของปั๊มโดยกำหนดให้ปั๊มทำงานทุก 3 ชั่วโมงครั้งละ 15 นาที และที่ฝาบนของถังหมักคั่นแบบมีการติดตั้งท่อก๊าซซึ่งเป็นสายยางซิลิโคนใต้อ่างน้ำที่นำก๊าซไปยังถังเก็บและวัดปริมาณก๊าซ

ถังเก็บและวัดปริมาณก๊าซเป็นถังพลาสติกขนาด 30 ลิตร ดำเนินการ โดยต่อสายยางซิลิโคนเพื่อนำก๊าซมาจากถังหมักคั่นแบบแบบต่อเนื่อง โดยใช้หลักการแทนที่น้ำในการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น และวัดก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นโดยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี

การดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองในถังหมักก๊าซชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวนเป็นการทดลองโดยนำค่าที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนสูงสุดจากถังหมักแบบขึ้นตอนเดียว ขนาด 20 ลิตร มาทดลองในถังหมักก๊าซชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวน ขนาด 250 ลิตรมีปริมาตรในการทดลอง 220 ลิตร การทดลองจะใช้อัตราส่วนของวัตถุดิบ ปริมาณของแข็งในถังหมัก ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิที่ทำให้ผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดที่ได้จากทดลองในถังหมักแบบขึ้นตอนเดียว ขนาด 20 ลิตร ซึ่งการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองการ 2 ขั้นตอน (Two-stage Digester) คือเป็นการเติมของเสียปริมาตร 10 ลิตรแบบต่อเนื่องทุกวันเป็นเวลา 38 วัน ที่บริเวณช่องเติมวัตถุดิบซึ่งอยู่ข้างขึ้นนอกของถังหมักซึ่งเป็นส่วนที่สร้างกรดอินทรีย์จะมีเชื้อจุลินทรีย์สร้างกรด ของเสียที่เติมเข้าไปจะไปดันให้ของเสียเดิมไหลล้นจากวงขึ้นนอกข้างขึ้นในของถังหมักซึ่งเป็นส่วนที่สร้างก๊าซมีเทนมีเชื้อจุลินทรีย์พวกสร้างก๊าซมีเทน และต้องดึงกากตะกอนของเสียภายในถังเท่ากับปริมาตรที่เติมเข้าไปที่วาล์วเปิดปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ที่ก้นถังทุกครั้งที่เติมของเสียใหม่เข้าไปในถังหมัก จะทดลองจนกว่าปริมาณก๊าซมีเทนนิ่ง ซึ่งจะมีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทุก 2 วัน ซึ่งถูกตรวจวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ APHA AWWA and WEE (2005) และ AOAC (1995) ดังตารางที่ 2 ยกเว้นปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะตรวจวัดทุกวัน

ตารางที่ 2 วิธีวิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของถังหมักคั่นแบบก๊าซชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวน ขนาด 250 ลิตร

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการวัด
1. ของแข็งทั้งหมด (Total Solid; TS)	Gravimetric Method	2 วัน
2. ของแข็งระเหย (Volatile Solid; VS)	Gravimetric Method	2 วัน
3. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	pH Meter	2 วัน
4. ความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk)	Titration Method	2 วัน
5. กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA)	Titration Method	2 วัน
6. ซีโอดี (COD)	Close Reflux Method	2 วัน
7. ไนโตรเจนทั้งหมด (Nitrogen, N)	Kjedahl Method	2 วัน
8. คาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon, C)	คำนวณจากค่า VS	2 วัน
9. ปริมาณก๊าซชีวภาพ	แทนที่น้ำ	ทุกวัน
10. องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	Gas Chromatography (TCD)	ทุกวัน

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยวัตถุดิบจำนวน 3 ประเภท คือ เชื้อจุลินทรีย์ มูลไก่ และหญ้าเนเปียร์ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบ (สุภาวดี ,2558)

พารามิเตอร์	องค์ประกอบทางเคมี		
	เชื้อจุลินทรีย์	มูลไก่*	หญ้าเนเปียร์**
1. ความชื้น (Moisture)	-	9.88%	82.87%
2. ของแข็งทั้งหมด (Total Solid; TS)	77,460.00 มก./ล.	901,153.00 มก./กก.	171,258.00 มก./กก.
3. ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid; VS)	49,670.00 มก./ล.	598,892.00 มก./กก.	141,064.00 มก./กก.
4. ซีโอดี (COD)	12,511.00 มก./ล.	9,957.00 มก./กก.	4,213.00 มก./กก.
5. คาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon; C)	4.67%	33.27%	7.84%
6. ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Carbon; N)	0.69%	2.99%	0.18%
7. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน(C/N ratio)	6.73	11.14	43.48

หมายเหตุ: * หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง, **หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเปียก

จากตารางที่ 3 พบว่ามูลไก่และหญ้าเนเปียร์มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) เท่ากับ 901,153 มก./กก.และ 171,258 มก./กก. ตามลำดับ และมีปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) เท่ากับ 598,892 มก./กก. และ 141,064 มก./กก. ตามลำดับ โดยของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์จะถูกใช้เป็นส่วนอาหารของจุลินทรีย์ในการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งโดยการเดินระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนความเข้มข้นของแข็งไม่ควรเกิน 10%TS และจะควบคุมของแข็งในระบบไม่ให้เกิน 5%TS (สำนักงานวิจัยและค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) นอกจากนี้การศึกษาของ Wilawan (2013) รายงานว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของหญ้าเนเปียร์มีค่า 199,943 มก./กก. และปริมาณของแข็งระเหยง่ายของหญ้าเนเปียร์มีค่า 182,005 มก./กก. ส่วนมูลไก่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) เท่ากับ 416,680 มก./กก. และมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 305,330 มก./กก. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหยง่ายของหญ้าเนเปียร์มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนมูลไก่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากมูลไก่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นมูลไก่แห้ง ส่วนมูลไก่ที่ใช้ในการศึกษาของ Wilawan (2014) เป็นมูลไก่สด

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจน (C/N ratio) พบว่ามูลไก่และหญ้าเนเปียร์มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 33.27% และ 7.84% ตามลำดับ และมีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 2.99% และ 0.18% ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของมูลไก่และหญ้าเนเปียร์ได้เท่ากับ 11.14 และ 43.48 ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยของ Wilawan (2014) รายงานว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของมูลไก่มีค่าต่ำ คือ 7.6 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของหญ้าเนเปียร์มีค่าสูง คือ 43.60 แสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องปรับสภาพอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัตถุดิบเพื่อให้วัตถุดิบมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ คือ 20-30:1 ซึ่งทำได้โดยผสมระหว่างหญ้าเนเปียร์กับวัตถุดิบชนิดอื่นที่มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ ซึ่งในที่นี้ใช้มูลไก่ ซึ่งมูลไก่มีไนโตรเจนต่ำ การที่

จำเป็นต้องปรับสภาพอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัตถุดิบให้เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีความสำคัญต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เพราะคาร์บอนและไนโตรเจนเป็นสารอาหารหลักของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจุลินทรีย์จะนำคาร์บอนและไนโตรเจนไปสร้างโปรตีนโพลีพลาซิมของเซลล์และสร้างบัพเฟอร์ให้กับระบบ

ผลการทดลองในถังหมักต้นแบบก๊าซชีวภาพระบบบ่ปิดแบบน้ำวน

การทดลองในถังหมักต้นแบบซึ่งมีรูปแบบของถังหมักเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (Two-stage Digester) มีปริมาตรการหมัก 220 ลิตร เป็นการทดลองโดยนำค่าที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนสูงสุดจากถังหมักแบบขั้นตอนเดียว ขนาด 20 ลิตร มาทดลอง เพื่อยืนยันการทดลองว่าสามารถนำไปใช้ได้จริงในระดับครัวเรือน โดยผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลองของถังหมักต้นแบบก๊าซชีวภาพระบบบ่ปิดแบบน้ำวนและถังหมักต้นแบบ แบบขั้นตอนเดียว

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์			
		ถังหมักก๊าซชีวภาพระบบบ่ปิดแบบน้ำวน		ถังหมักแบบขั้นตอนเดียว	
		เริ่มต้นเดินระบบ	สิ้นสุดการเดินระบบ	เริ่มต้นเดินระบบ	สิ้นสุดการเดินระบบ
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	8	7.9	8.00	7.82
ของแข็งทั้งหมด (Total Solid; TS)	mg/l	28,739	13,635	24,610	17,440
ของแข็งระเหย (Volatile Solid; VS)	mg/l	16,328	6,300	10,377	4,209
ความเป็นด่าง (Alkalinity; Alk)	mg/l	36,000	31,827	2,831.25	2,212.50
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA)	mg/l	3,500	2,274	456.25	262.50
ซีโอดี (COD)	mg/l	17,740	6,255	24,900	7,024
ไนโตรเจนทั้งหมด (Nitrogen; N)	%	-	3.7	0.03	0.02
คาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon; C)	%	-	54.6	0.58	0.29
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	-	-	19	21.34	18.12
ก๊าซชีวภาพ	l	-	81.5	-	23
ก๊าซมีเทน	%	-	74.8	-	74.56

การวิเคราะห์ข้อมูลได้เลือกช่วงวันที่ 10-38 เนื่องจากเป็นช่วงที่ระบบเสถียรและเกิดก๊าซมีเทนคงที่

ความเป็นกรด - ด่าง (pH)

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นตัวบ่งบอกถึงการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวภาพจะเกิดได้ดีที่ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 6.5 – 8.2 จากการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่อนข้างสูงอาจจะเกิดจากมูลไก่และเชื้อจุลินทรีย์ที่มี NH_3 อยู่ในปริมาณมาก จึงปรับให้มีค่าเท่ากับ 8.00 (ค่าค่อนข้างสูงปรับค่าได้ยากเนื่องจากใช้ในปริมาณมาก) เพื่อปรับสภาพการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดและกลุ่มผลิตมีเทนให้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบ พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อช่วงระยะเวลาที่เกิดก๊าซมีเทนครั้งที่ (วันที่ 10-38) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.9 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ได้ทุกสภาวะการทดลอง การที่ระบบสามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ได้ทุกสภาวะการทดลอง ส่วนหนึ่งอาจเนื่องมาจากส่วนผสมของเสียที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ที่ประกอบด้วยเชื้อจุลินทรีย์และมูลไก่ที่มีความเข้มข้นของ NH_3 สูงถึง 5,490.8 มก./ล. และ 579.6 มก./ล ตามลำดับ ซึ่งสามารถเพิ่มสภาพต่างในถังปฏิกรณ์ได้ และอีกอาจเนื่องมาจากการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบ

กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

กรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสมดุลของการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายกับจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ระดับปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะมีค่าต่ำและค่อนข้างคงที่ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์กรดอินทรีย์ระเหยง่ายในถังหมักก๊าซชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวน พบว่า เมื่อช่วงระยะเวลาที่เกิดก๊าซมีเทนครั้งที่ (วันที่ 10-38) กรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะมีค่าเฉลี่ยของระบบเท่ากับ 2,274 มก./ล และสิ้นสุดการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักที่ 38 วัน ซึ่งค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายของระบบเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพโดยมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไม่เกิน 2,000 มก./ล (การผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียฟาร์มปศุสัตว์และโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในบางช่วง เนื่องจากถังหมักมีขนาดใหญ่ทำให้ควบคุมระบบยากแต่จุลินทรีย์สร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและจุลินทรีย์สร้างมีเทนในถังปฏิกรณ์ก็ยังสามารถทำงานได้อย่างสมดุลและมีประสิทธิภาพ

ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของของเสียในระบบ ความเป็นด่างในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต และมีค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ซึ่งอยู่ในช่วง 2,000–3,000 มิลลิกรัมของ CaCO_3 /ลิตร (Metcalf & Eddy, 2004)จากการทดลองพบว่า เมื่อช่วงระยะเวลาที่เกิดก๊าซมีเทนครั้งที่ (วันที่ 10-38) ความเป็นด่างจะมีค่าเฉลี่ยของระบบเท่ากับ 31,827 มิลลิกรัมของ CaCO_3 /ลิตร และสิ้นสุดการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักที่ 38 วัน แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นด่างในระบบ ของถังหมักต้นแบบก๊าซชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวน มีค่าสูงส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) สามารถยืนยันได้จากอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นด่าง (VFA/Alkalinity) ของของเสีย ซึ่งจากการทดลองพบว่า ช่วงระยะเวลาที่เกิดก๊าซมีเทนครั้งที่ (วันที่ 10-38) มีอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นด่างเท่ากับ 0.07 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีสภาพต่างอยู่ในระดับที่สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดี (McCarty, 1964) โดยความเป็นด่างส่วนใหญ่จะมาจากมูลไก่และเชื้อจุลินทรีย์ที่มี NH_3 อยู่มากทำให้เกิดสภาพต่างมาก

ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่าย

จากการทดลองพบว่า ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบมีของแข็งทั้งหมด (TS) เท่ากับ 28,739 มก./ล.

(2.87 0%TS) ซึ่งประกอบด้วยของแข็งระเหยง่าย เท่ากับ 16,328 มก./ล. (1.63%) และเมื่อช่วงระยะเวลาที่เกิดก๊าซมีเทนครั้งที่ (วันที่ 10-38) มีค่าของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 13,635 มก./ล. (1.36%) ซึ่งประกอบด้วย

ของแข็งระเหยง่าย เท่ากับ 6,300 mg/l (0.63%) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าร้อยละ 52.6 และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 61 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

ซีโอดี (COD)

ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี แสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งที่อยู่ในรูปของอนุภาคของแข็งและสารละลายเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในระบบได้โดยตรง ผลการทดลองพบว่า ค่าสารอินทรีย์ที่เข้าระบบในรูปซีโอดีทั้งหมดมีความเข้มข้นอยู่ที่ 17,740 มก./ล. และเมื่อช่วงระยะเวลาที่เกิดก๊าซมีเทนคงที่ (วันที่ 10-38) ความเข้มข้นของซีโอดีลดลงมีค่าเท่ากับ 6,255 มก./ล. แสดงว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีถึงร้อยละ 65 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในช่วงที่ใช้ไม่เกินความสามารถในการทำงานของกระบวนการหมักของถังหมักต้นแบบ ก๊าซชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวน

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)

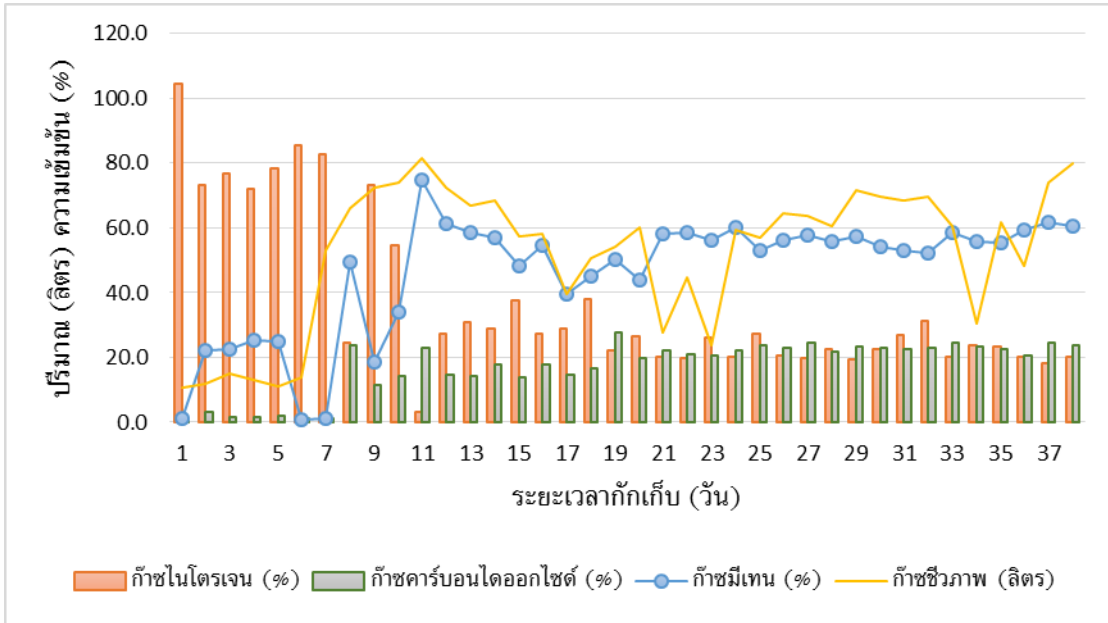
จากการทดลอง พบว่า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของระบบ มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 19:1 ซึ่งคล้อยกับงานวิจัยของ Wilawan (2014) ที่ได้ทำการทดลองหาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทนจากมูลไก่และหญ้าเนเปียร์ พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทน คือ 20:1 และสอดคล้องกับทฤษฎีการเกิดก๊าซชีวภาพ คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมควรมีค่า 20-30:1

ปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

การเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเป็นตัวบ่งชี้ถึงการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี โดยเฉพาะส่วนที่ย่อยสลายได้ยากได้แก่ เส้นใยของหญ้ามักมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซและประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในระบบถังหมักต้นแบบ ก๊าซชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวน ขึ้นอยู่กับระดับการกวนน้ำโดยใช้ปั๊มสูบน้ำวนภายในถังหมัก อุณหภูมิ และระยะเวลาที่เก็บที่เหมาะสม

จากการทดลองพบว่าที่เวลากักเก็บน้ำ 38 วัน เกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด คือ 81.5 ลิตรต่อวัน ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 74.8 (60.23 ลิตร) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 23.9 (18.60 ลิตร) และก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 20.3 (2.65 ลิตร) ดังภาพที่ 3 และจากการศึกษาของ จักรพันธ์ หมั่นจี่ (2553) ที่ทำการศึกษากำหนดอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียฟาร์มสุกรและหญ้าเนเปียร์ พบว่าในระยะเวลาที่เก็บ 10 วัน ได้ก๊าซมีเทนร้อยละ 74.00 ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกันและใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากการทดลองในถังหมักต้นแบบซึ่งมีค่า 81.5 ลิตร และ 74.8% ตามลำดับ กับปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากการทดลองในถังหมักต้นแบบซึ่งมีค่า 23.00 ลิตร และ 74.56% ตามลำดับ กับปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากการออกแบบการทดลองซึ่งมีค่า 118 มิลลิลิตร (21.24 ลิตร) และ 75.05% ตามลำดับ พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบรวมปัจจัยส่วนผสมหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทน ได้จริงในถังหมักต้นแบบ แบบขั้นตอนเดียว และถังหมักต้นแบบ ก๊าซชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวน



ภาพที่ 3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพของถังหมักต้นแบบ ก๊าซชีวภาพระบบบ่อบปิดแบบน้ำวน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย จากปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ พบว่า ระยะเวลาที่เกิดก๊าซมีเทนคงที่ (วันที่ 10-38) ให้อัตราการเกิดก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ $0.17 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$ และมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนถึง 0.21 และ $0.18 \text{ m}^3/\text{kg COD removed}$ ตามลำดับ

สรุปผลการวิจัย

การทดลองในถังหมักต้นแบบซึ่งมีรูปแบบถังหมักเป็นแบบระบบบ่อบปิดแบบน้ำวน ขนาด 250 ลิตร มีปริมาตรการหมักที่ 220 ลิตร พบว่าที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 38 วัน ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดถึง 81.5 ลิตร ต่อวัน ประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 74.8 โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 7.9 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ 2,274 มก./ล. ความเป็นด่างเท่ากับ 31,827 มิลลิกรัมของ $\text{CaCO}_3/\text{ลิตร}$ อัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นด่างเท่ากับ 0.07 และมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 19:1 นอกจากนี้ยังพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าร้อยละ 52.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 61 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีถึงร้อยละ 65 รวมทั้งระบบยังสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ $0.17 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$ และมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน 0.21 และ $0.18 \text{ m}^3/\text{kg COD removed}$ ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์ค่าก๊าซมีเทนจากการทดลอง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลคือก๊าซมีเทนร้อยละ 75.05 และยังพบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองในถังหมักต้นแบบขั้นตอนเดียวคือก๊าซมีเทนร้อยละ 74.56 จึงยืนยันได้ว่าการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองทางสถิติเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทน สามารถใช้ได้จริงในถังหมักต้นแบบก๊าซชีวภาพระบบบ่อบปิดแบบน้ำวน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ประเภทอุดหนุนทั่วไป ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2556 ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย อุปกรณ์เครื่องมือ ในการทดสอบและ

ขอขอบคุณบริษัทศรีวิโรจน์ฟาร์ม อำเภอชุมแพ จังหวัดขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อวัตถุดิบในการทดลอง และขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย นายทัษุทช บุญมาโฮม ที่ได้ทุ่มเทแรงกายแรงใจทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- โครงการถ่ายทอดและเผยแพร่การใช้พลังงานก๊าซชีวภาพ. คู่มือเทคโนโลยีพลังงานก๊าซชีวภาพ. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน; 2557.
- จักรพันธ์ หมั่นจี. การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยการย่อยสลายร่วมกับหญ้าเนเปียร์และเศษอาหาร โดยตั้งปฏิกรณ์เอเอสปีอาร์. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม]. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2553
- ฟาริดา พรหมมา. การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์. ว.วิทยาศาสตร์ลาดกระบัง, 23(2), 30-50; 2557.
- สำนักงานวิจัยและค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. การผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียฟาร์มปศุสัตว์และโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักงาน; 2556.
- ศุภาวดี ขอดทองดี. การหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทนจากมูลไก่และหญ้าเนเปียร์ในถังหมักแบบขึ้นตอนเดียว โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบรวมปัจจัยส่วนผสม [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม]. ขอนแก่น: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2558.
- APHA AWWA, WEF. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, (21 st ed). US; 2005.
- AOAC. Official Methods of Analysis. 12th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC; 1995.
- Janejadkam A, Chavalrit O. Biogas production from Napier grass (Pakchong1) (*Pennisetum purpureum* × *Pennisetum americanum*). Advanced Materials Research, 856, 327-332; 2014.
- McCarty P.L. Anaerobic waste treatment fundamental part I, Chemistry and Microbiology part 2, Environmental Requirement and Control part 3, Toxic Materials and their Control. Public Works, 9, 107-111; 1964.
- Metcalf R, and Eddy M.A.. wastewater engineering - treatment and reuse. 4th ed. [n.p.]; 2004.
- Weiland P. Biogas production : current state and perspectives; Appl. Microbiol. Biotechnol., 85, 849-860; 2010.
- Wilawan W, Pholchan P, Aggarangsi P. Biogas production from co-digestion of *Pennisetum purpureum* cv. Pakchong 1 Grass and layer chicken manure using completely stirred tank. Energy Procedia, 52, 216-222; 2014.