

การใช้ประโยชน์จากวัชพืชน้ำในการหมักย่อยร่วมกับมูลสุกร
ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ
Utilization of Aquatic Weeds as Co-digestion with
Swine Manure for Biogas Production

จำเนียร ชมภู¹, สุนัดดา ไชยสิทธิ์² และวนิดา สืบสายพรหม²
Jamnian Chompoo¹, Sunadda Chaiyasit² and Wanida Suebsaiprom²

บทคัดย่อ

การจัดการของเสียด้วยแนวคิดของเสียเหลือศูนย์ หรือ zero waste ด้วยการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นสิ่งที่ควรนำมาปรับใช้ในการจัดการของเสียทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดการน้ำเสีย และของเหลือทิ้งภายในฟาร์มสุกร วัชพืชน้ำเป็นวัตถุดิบอย่างหนึ่งที่ช่วยบำบัดน้ำทั้งในฟาร์มสุกร การผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับวัชพืชน้ำยังเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้จึงทำการประเมินประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งด้านคุณภาพและปริมาณ รวมถึงความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปแบบของ biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total solid (TS) และ total volatile solid (TVS) จากการหมักย่อยร่วมระหว่างมูลสุกรกับวัชพืชน้ำชนิดต่างๆ จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ สาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายพวงกะโหลก จอก และแหนแดง ในอัตราส่วนของมูลสุกรต่อวัชพืชน้ำ 3.75:1.25, 2.5:2.5 และ 0:5 เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดที่เติมเข้าระบบ พบว่าการหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับสาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายพวงกะโหลก จอก และแหนแดง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่อัตราส่วน 3.75: 1.25 เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดที่เติมเข้าระบบ พืชน้ำทั้ง 4 ชนิด สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุด เท่ากับ 1.36, 1.40, 1.30 และ 1.28 ลิตร/วัน ตามลำดับ และได้ผลผลิตของก๊าซมีเทนเฉลี่ย 51.04, 46.94, 46.01 และ 49.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับการหมักมูลสุกรเพียงอย่างเดียว สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์นั้นพบว่า การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโหลกที่ทุกอัตราส่วนมีประสิทธิภาพการกำจัด BOD ได้ดีกว่าการหมักย่อยร่วมมูลสุกรกับจอกและแหนแดง ในขณะที่การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับสาหร่ายพวงกะโหลกที่อัตราส่วน 3.75:1.25 มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ดีที่สุด

คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ การหมักย่อยร่วม มูลสุกร พืชน้ำ

Abstract

Zero waste model should be applied in the management of agricultural waste, especially, water and residue waste from swine farms that can be used for biogas production. Aquatic weeds can be used for waste water treatment. Biogas production by co-digestion of swine manure and aquatic plants is an interesting method for waste management in swine farms. This study was carried out with the aim to assess the efficiency of biogas production and ability to remove organic matter in the forms of biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total solid (TS) and total volatile solid (TVS) of co-digestion between swine manure and four aquatic weeds including *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle, *Ceratophyllum demersum* L., *Pistia stratiotes* L. and *Azolla pinnata* R.Br., The results showed that *H. verticillata*, *C. demersum*, *P. stratiotes* and *A. pinnata* had high efficiency to produce biogas. At the ratio of 3.75: 1.25%TS,

¹ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

²ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

all these four plants gave biogas of 1.36, 1.40, 1.30 and 1.28 L/day and methane of 51.04, 46.94, 46.01 and 49.97%, respectively. However, the amount of biogas and methane produced from these plants were not statistically different from pure swine manure. For the removal of organic matter, co-digestion of swine manure with *H. verticillata* and *C. demersum* showed higher efficiency of BOD removal than the co-digestion with *P. statiotetes* and *A. pinnata*. The co-digestion of swine manure with *C. demersum* at ratio of 3.75:1.25 showed highest COD removal efficiency.

Keywords: biogas, co-digestion, swine manure, aquatic plant

คำนำ

มูลสุกรและน้ำเสียที่ออกจากฟาร์มสุกรในแต่ละวันมีจำนวนมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในชุมชน เช่น แมลงวัน กลิ่นเหม็น น้ำเน่าเสีย เป็นเหตุให้แต่ละฟาร์มต้องมีการจัดการปัญหาเหล่านี้ ไม่ให้ไปรบกวนชุมชนรอบข้าง (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) กระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน (anaerobic digestion) จึงถูกนำมาใช้สำหรับบำบัดของเสียภายในฟาร์ม และได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถนำมาใช้ทดแทนก๊าซหุงต้มและผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553; กัมปนาท และคณะ, 2553) การผลิตก๊าซชีวภาพควบคู่กับการบำบัดน้ำเสียด้วยพืชน้ำเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากระบบนี้สามารถบำบัดสารอินทรีย์ในกลุ่มไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และสารพิษชนิดอื่นๆ ได้แก่ สารในกลุ่มโลหะหนัก สารตกค้างยาวนาน สารในกลุ่มยาและฮอร์โมน เป็นระบบที่ดูแลรักษาง่าย ค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบต่ำ และไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญในการดูแลระบบ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) การเลือกชนิดและควบคุมปริมาณพืชน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียให้เหมาะสม จึงเป็นการช่วยหมุนเวียนธาตุอาหารและออกซิเจนภายในน้ำ หากขาดการควบคุมจะมีปริมาณพืชน้ำเกินความจำเป็นจนกลายเป็นวัชพืช เกิดการตายและทับถมกันของพืชน้ำ ส่งผลให้บ่อบำบัดเกิดการตื้นเขิน แหล่งน้ำมีความสกปรก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554) โดยพืชน้ำที่กำจัดออกจากระบบบำบัดน้ำเสียยังสามารถนำไปหมักย่อยร่วมกับมูลสุกรเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ เรียกกระบวนการหมักระหว่างวัตถุดิบสองชนิดนี้ว่า การหมักย่อยร่วม (co-digestion) เป็นกระบวนการหมักย่อยร่วมกันระหว่างวัตถุดิบสองชนิดหรือมากกว่า ซึ่งในอดีตกระบวนการหมักแบบไร้อากาศใช้วัตถุดิบเพียงชนิดเดียวทำให้ได้ปริมาณของก๊าซมีเทนน้อย (Parawira *et al.*, 2004) โดยที่หลักเกณฑ์พื้นฐานสำหรับการเลือกวัตถุดิบจะประกอบด้วย วัตถุดิบหลักส่วนใหญ่เป็นพวกมูลสัตว์หรือกากตะกอน และวัตถุดิบรองเป็นพวกที่มีเส้นใยในปริมาณที่สูง เนื่องจากเส้นใยจะมีสารประกอบพวกเซลลูโลสในปริมาณที่มากส่งผลให้เกิดก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น (Hong and David, 2007) การทดลองนี้จึงมีสมมุติฐานว่าการใช้วัชพืชน้ำหมักย่อยร่วมกับมูลสุกรจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้น เนื่องจากพืชมีการปรับสมดุลปริมาณสารอาหารในระบบ ทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงขึ้น ช่วยเจือจางสารพิษที่มีผลต่อจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน ส่งผลให้ได้ปริมาณมีเทนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้มูลสุกรเป็นวัตถุดิบเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การนำวัชพืชน้ำมาหมักย่อยร่วมกับมูลสุกรด้วยระบบหมักก๊าซชีวภาพนอกจากจะใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาภาวะจากมูลสุกรแล้วยังเป็นวิธีการที่ช่วยกำจัดวัชพืชน้ำเพื่อนำมาวัชพืชมาใช้ประโยชน์แบบผสมผสานอีกวิธีหนึ่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์

สำหรับมูลสุกรที่ใช้ในการทดลอง เป็นมูลของสุกรขุน (ความชื้นเฉลี่ย 37 เปอร์เซ็นต์) จากฟาร์มเกษตรกร บริเวณใกล้เคียงมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน เตรียมเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากตะกอนจุลินทรีย์จากบ่อน้ำทิ้ง

โดยเติมมูลสุกรผสมเข้มข้น ทุกๆ 7 วัน ก่อนเริ่มการทดลองอย่างน้อย 30 วัน เพื่อเป็นจุลินทรีย์เริ่มต้นในการผลิตก๊าซมีเทนของทุกๆ สิ่งทดลอง โดยใช้ 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด

2. วัตถุดิบและการเตรียมตัวอย่าง

การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหมักย่อยร่วมระหว่างมูลสุกรกับวัชพืชน้ำ 4 ชนิด ได้แก่ สาหร่ายหางกระรอก (*Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle) สาหร่ายพวงกะโหลก (*Ceratophyllum demersum* L.) จอก (*Pistia stratiotes* L.) และแหนแดง (*Azolla pinnata* R.Br.) ดำเนินการโดยล้างทำความสะอาดวัชพืชน้ำเพื่อเอาตะกอนดินออก วางในตะกร้าเพื่อให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 10 นาที นำไปหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ และบดละเอียดด้วยเครื่องปั่น อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างมูลสุกรกับวัชพืชน้ำทั้ง 4 ชนิด ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดที่เติมเข้าระบบในถังหมักขนาด 4.3 ลิตร จำนวน 13 ชุด ประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุที่ใช้ในการหมัก 12 สิ่งทดลอง กับ 1 ชุดควบคุม ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยแต่ละสิ่งทดลองมีการเตรียมอินทรีย์วัตถุดิบต้นโดยผสมวัชพืชน้ำ มูลสุกร และน้ำ ตามอัตราส่วน (Table 1) วิเคราะห์สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของอินทรีย์วัตถุ (C/N ratio) ที่นำเข้าสู่ระบบ ตามวิธีของ Wakley and Black (1934) ด้วยเครื่อง CN analyser นอกจากนี้วิเคราะห์ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของอินทรีย์วัตถุที่นำเข้าสู่ระบบด้วยวิธีของ Van Soest (1963)

ทำการปั่นส่วนผสมทั้งหมดด้วยเครื่องปั่นหนักในที่ไร้อากาศ เป็นเวลา 3 วันก่อนเริ่มการทดลอง เพื่อคลุกเคล้าตะกอน น้ำ และสารอินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์สัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง และทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดก๊าซเร็วและมากขึ้น นอกจากนี้ยังป้องกันการตกตะกอนและตะกอนลอย ซึ่งตะกอนอาจไปขัดขวางช่องทางการระบายของเหลวและก๊าซจากถังหมัก

Table 1 The ratio of organic matters from 5%TS and C/N ratio of each treatment.

Treatments		Ratio of organic matters	
		manure: aquatic weed	C/N ratio
T1 (control)	Swine manure	5:0	12.16
T2	Swine manure: <i>H. verticillata</i>	3.75:1.25	13.46
T3	Swine manure: <i>H. verticillata</i>	2.5:2.5	15.12
T4	Swine manure: <i>H. verticillata</i>	0:5	20.29
T5	Swine manure: <i>C. demersum</i>	3.75:1.25	11.91
T6	Swine manure: <i>C. demersum</i>	2.5:2.5	11.67
T7	Swine manure: <i>C. demersum</i>	0:5	11.17
T8	Swine manure: <i>P. stratiotes</i>	3.75:1.25	13.66
T9	Swine manure: <i>P. stratiotes</i>	2.5:2.5	15.67
T10	Swine manure: <i>P. stratiotes</i>	0:5	22.73
T11	Swine manure: <i>A. pinnata</i>	3.75:1.25	12.56
T12	Swine manure: <i>A. pinnata</i>	2.5:2.5	13.07
T13	Swine manure: <i>A. pinnata</i>	0:5	13.96

3. การติดตั้งและการดำเนินของระบบ

การทดลองนี้ใช้ถังหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous) ดัดแปลงจากขวดน้ำพลาสติกขนาด 5 ลิตร ปริมาตรการใช้งานจริง 4.3 ลิตร บริเวณปากขวดเป็นท่อสำหรับเติมวัตถุดิบเข้าระบบ โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาวประมาณ 25 เซนติเมตร ต่อเข้าในถังให้ปลายของท่ออยู่สูงจากก้นถัง 10 เซนติเมตร ปากขวดปิดด้วยฝาให้สนิทป้องกันอากาศเข้า บริเวณด้านหน้าของขวดเป็นท่อน้ำล้น โดยใช้ท่อ PVC ขนาด 3/8 นิ้ว ต่อกันเป็นรูปตัวยู ปลายท่อด้านในเปิด ด้านนอกปิดด้วยจุกยาง บริเวณด้านหนึ่งของถังหมักที่ระดับเหนือน้ำ เชื่อมด้วยสายยางเข้าสู่ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ ซึ่งเก็บก๊าซชีวภาพด้วยหลักการการแทนที่น้ำ โดยใช้ขวดน้ำขนาด 5 ลิตร นำมาวางนอน บริเวณปากขวดมีสายยางจำนวน 2 เส้น ที่ใช้เป็นทางเข้าของก๊าซที่ออกจากถังหมัก และทางออกของน้ำที่ออกจากระบบเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อนำน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยก๊าซออกจากระบบเก็บก๊าซ (Figure1) ปริมาณน้ำส่วนนี้คือปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นด้วยกระบอกตวง



Figure 1 Semi-continuous digestion and biogas collection system.

เติมเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากมูลสุกร 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรถังหมัก แล้วเติมสารอินทรีย์ที่เตรียมไว้ให้เต็มระบบทุก ๆ 3 วัน ครั้งละ 0.43 ลิตร ทำการจดบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นแต่ละวันจากระบบเก็บก๊าซ (มีหน่วยเป็นลิตร/วัน) จากนั้นใช้หลอดสูญญากาศเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอน ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (Shimadzu GC-8A, Japan) แบบ thermal conductivity detector (TCD) โดยใช้คอลัมน์ Porapak Q 80/100 mesh column (ความยาว 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 มิลลิเมตร ชั้นเคลือบหนา 0.25 ไมโครเมตร) มีก๊าซฮีเลียม เป็น carrier gas ไหลในอัตราเร็ว 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ injector และ detector (70 eV) เท่ากับ 60 และ 150°C ตามลำดับ นอกจากนี้เก็บตัวอย่างน้ำมูลสุกรผสมก่อนเข้าระบบ และน้ำล้นที่ออกจากระบบทางท่อน้ำล้นของแต่ละถังหมักที่ช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลายของระบบ (1, 30 และ 60 วันหลังจากเริ่มระบบ ตามลำดับ) เพื่อทำการวิเคราะห์ค่า biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total solid (TS) และ total volatile solid (TVS) ของตัวอย่างน้ำในระบบหมักโดยวิธี Standard Methods (American Public Health Association, 1998) และวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter สำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ ดำเนินระบบทั้งสิ้น 90 วัน

4. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติตามแผนการทดลอง Completely Randomized Design (CRD) โดยใช้โปรแกรม R และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ ($p=0.01$)

ผลการทดลองและวิจารณ์

องค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบ

ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนไนโตรเจนต่อคาร์บอนของอินทรีย์วัตถุที่เติมเข้าในระบบ พบว่า C/N ratio ของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบอยู่ในช่วง 11.17-22.73 โดย T10 และ T4 มีค่า C/N ratio สูงเท่ากับ 22.73 และ 20.29 ตามลำดับ (Table 2) ซึ่ง Jia *et al.* (2011) รายงานว่า C/N ratio ที่สามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพได้ในช่วง 8-30 ถ้า C/N ratio สูงมาก ไนโตรเจนจะถูกแบคทีเรียเมทาโนเจนนำไปใช้เพื่อเสริมโปรตีนให้ตัวเองและจะหมดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ได้ก๊าซชีวภาพน้อย แต่ถ้า C/N ratio ต่ำมาก ไนโตรเจนที่มีอยู่มากไปเกาะกันเป็นแอมโมเนีย แอมโมเนียจะไปเพิ่มค่า pH ในระบบ หากค่า pH สูงถึง 8.5 จะเป็นพิษกับแบคทีเรีย ทำให้แบคทีเรียเมทาโนเจนลดลง นอกจากนี้ถ้า C/N ratio ที่อยู่นอกเหนือจากช่วง 8-30 จะทำให้มีสัดส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้เป็นก๊าซอื่นๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553) ดังนั้นอินทรีย์วัตถุที่ใช้หมักย่อยร่วมในการทดลองนี้มีค่า C/N ratio ที่สามารถทำให้เกิดผลผลิตก๊าซชีวภาพได้

Table 2 Characteristics of organic matter added to the system.

	Treatment	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
T1	Swine manure (5:0)	0.79	0.21	0.26
T2	Swine manure: <i>H. verticillata</i> (3.75:1.25)	0.86	0.50	0.24
T3	Swine manure: <i>H. verticillata</i> (2.50:2.50)	0.94	0.78	0.23
T4	Swine manure: <i>H. verticillata</i> (0:5)	1.09	1.36	0.19
T5	Swine manure: <i>C. demersum</i> (3.75:1.25)	0.80	0.41	0.17
T6	Swine manure: <i>C. demersum</i> (2.5:2.5)	0.81	0.62	0.28
T7	Swine manure: <i>C. demersum</i> (0:5)	0.83	1.02	0.31
T8	Swine manure: <i>P. statioties</i> (3.75:1.25)	0.84	0.40	0.24
T9	Swine manure: <i>P. statioties</i> (2.5:2.5)	0.80	0.59	0.22
T10	Swine manure: <i>P. statioties</i> (0:5)	1.01	0.96	0.19
T11	Swine manure: <i>A. pinnata</i> (3.75:1.25)	0.85	0.37	0.41
T12	Swine manure: <i>A. pinnata</i> (2.5:2.5)	0.91	0.52	0.56
T13	Swine manure: <i>A. pinnata</i> (0:5)	1.03	0.84	0.86

นอกจากนี้ผลผลิตก๊าซชีวภาพยังขึ้นอยู่กับประเภทของลิกโนเซลลูโลสภายในอินทรีย์วัตถุด้วย ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยลิกโนเซลลูโลสที่เพิ่มเข้าไปจากพืชเป็นส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่จุลินทรีย์จะย่อยเป็นกรดอินทรีย์ และเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ (นคร, 2553) จากผลการวิเคราะห์สารอินทรีย์ตั้งต้นที่เติมเข้าระบบ (Table 2) พบว่า อัตราส่วนมูลสุกรต่อวัชพืชน้ำทุกชนิดลดลง ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะเพิ่มขึ้น โดยสิ่งทดลองที่หมักพืชน้ำเพียงวัตถุดิบเดียวจะมีองค์ประกอบดังกล่าวสูงกว่าสิ่งทดลองที่มีมูลสุกรผสมอยู่ ส่วนปริมาณลิกนินพบว่าเมื่ออัตราส่วนของมูลสุกรต่อสาหร่ายหางกระรอกและจอกลดลงปริมาณของลิกนินจะลดลง ในขณะที่อัตราส่วนของมูลสุกรต่อสาหร่ายพวงหรีดและแห่นางดำลดลงปริมาณของลิกนินจะเพิ่มขึ้น จากรายงานของ

Hong and David (2007) พบว่าวัตถุดิบรองที่เส้นใยมีสารประกอบของพวกเซลลูโลสในปริมาณที่สูงจะส่งผลให้การเกิดก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น

ปริมาณก๊าซทั้งหมด (total gas production)

ปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ได้จากการแทนที่น้ำ โดยวัดปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่ในแต่ละวันเมื่อคิดค่าเฉลี่ยของก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวันภายใต้สภาวะทดลอง (Table 3) พบว่า ชุดควบคุมที่หมักมูลสุกรอย่างเดียว (T1) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสูง 1.42 ลิตร/วัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับการหมักย่อยร่วมกับมูลสุกรอัตราส่วนต่างๆ และการหมักมูลสุกรเพียงอย่างเดียว ในขณะที่การหมักจอกและແແແเพียงวัตถุดิบเดียว มีการผลิตก๊าซทั้งหมดลดลงน้อยกว่าการหมักย่อยร่วมกับมูลสุกรที่อัตราส่วนสูง (3.75:1.25)

โดยที่การหมักสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโหลกเพียงอย่างเดียว พบว่าปริมาณผลผลิตก๊าซทั้งหมดที่ได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับหมักย่อยร่วมกับมูลสุกรอัตราส่วนต่างๆ และการหมักมูลสุกรเพียงอย่างเดียว ในขณะที่การหมักจอกและແແແเพียงวัตถุดิบเดียว มีการผลิตก๊าซทั้งหมดลดลงน้อยกว่าการหมักย่อยร่วมกับมูลสุกรที่อัตราส่วนสูง (3.75:1.25)

Table 3 The amount and composition of biogas formed in semi-continuous system.

Treatment		Gas produced (L/day)	Biogas composition	
			%CH ₄	%CO ₂
T1	Swine manure (5:0)	1.42 a ^{1/}	49.88 a	13.60 c
T2	Swine manure: <i>H. verticillata</i> (3.75:1.25)	1.36 a	51.04 a	14.02 c
T3	Swine manure: <i>H. verticillata</i> (2.50:2.50)	1.30 a	50.30 a	14.76 bc
T4	Swine manure: <i>H. verticillata</i> (0:5)	1.24 a	46.46 a	13.62 c
T5	Swine manure: <i>C. demersum</i> (3.75:1.25)	1.40 a	46.94 a	13.34 c
T6	Swine manure: <i>C. demersum</i> (2.5:2.5)	1.34 a	49.78 a	13.47 c
T7	Swine manure: <i>C. demersum</i> (0:5)	1.35 a	46.23 a	12.70 c
T8	Swine manure: <i>P. statioties</i> (3.75:1.25)	1.30 a	46.01 a	17.56 b
T9	Swine manure: <i>P. statioties</i> (2.5:2.5)	1.02 b	39.26 b	20.90 a
T10	Swine manure: <i>P. statioties</i> (0:5)	0.86 bc	38.23 b	23.64 a
T11	Swine manure: <i>A. pinnata</i> (3.75:1.25)	1.28 a	49.79 a	13.34 c
T12	Swine manure: <i>A. pinnata</i> (2.5:2.5)	0.99 b	52.21 a	13.58 c
T13	Swine manure: <i>A. pinnata</i> (0:5)	0.81 c	51.85 a	14.72 bc
CV (%)		0.30	16.86	27.60

^{1/}Means in the same column followed by a common latter are not significantly different at $p < 0.01$ by Duncan's multiple range test.

ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ มีองค์ประกอบหลักของก๊าซมีเทนประมาณ 50-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 30-50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ออกซิเจน และไนโตรเจน (สถานเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ, 2551) ปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งต้องพิจารณาร่วมกับสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทน(CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) (Table 3) พบว่า T12 มีปริมาณก๊าซมีเทนสูงเฉลี่ย 52.21% มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับ T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T11 และ T13 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 49.88, 51.04, 50.30, 46.46, 46.94, 49.78, 46.23, 46.01, 49.79 และ 51.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วน T9 และ T10 พบว่า มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นน้อยแตกต่างสถิติเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากจอกมีสาร phytochemical ในกลุ่ม phenol เท่ากับ 2.42 กรัม/จอก 100 กรัม (Daboor *et al.*, 2012) โดยสารกลุ่มนี้มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแกรมลบ เช่น *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Shigella sp.* และ *Salmonella sp.* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Rabah *et al.*, 2010)

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซทั้งหมด พบว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แปรผกผันกับปริมาณก๊าซมีเทน โดยสิ่งทดลองที่มีส่วนประกอบของจอกสูง ได้แก่ T9 และ T10 มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าสิ่งทดลองอื่นๆ แตกต่างทางสถิติเฉลี่ย 20.90 และ 23.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการผลิตก๊าซชีวภาพไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ หากมีในปริมาณสูงส่งผลให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนต่ำมากจนอยู่ในระดับที่จุดไฟติดยากโดยปกติแล้วก๊าซชีวภาพที่มีปริมาณก๊าซมีเทนมากกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ สามารถจุดติดไฟได้ (พลภักดี, 2557) แต่ปริมาณก๊าซมีเทน ที่ยอมรับได้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ในการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ควรอยู่ในช่วง 55-60 เปอร์เซ็นต์ หากต้องการนำไปใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจะต้องปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพ ให้มีปริมาณก๊าซมีเทนให้เข้มข้นเสียก่อน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) นอกจากนี้ สุนัดดา และคณะ (2558) ได้ศึกษาการหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับพืชน้ำ 6 ชนิด ได้แก่ สาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายพวงกะโหลก แหนแดง ผักตบชวา และแพลงพวยน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองพบว่าพืชที่มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงจากการหมักย่อยร่วมกับมูลสุกร คือ สาหร่ายหางกระรอก จอก และแหนแดง เท่ากับ 0.182, 0.173 และ 0.176 L/gTS_{inf} ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่ามูลสุกรเพียงอย่างเดียว

ค่า pH ของน้ำมูลสุกรผสมที่เข้าและออกจากระบบ

จากผลการทดลอง Table 4 พบว่า น้ำมูลสุกรผสมที่เข้าสู่ระบบมีค่า pH อยู่ในช่วง 5.42-6.76 เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมีการหมักวัตถุดิบก่อนเข้าระบบเป็นระยะเวลา 3 วัน ทำให้ค่า pH ของน้ำมูลสุกรผสมที่เข้าสู่ระบบมีสภาพเป็นกรด โดยในระยะแรกของกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพมีขั้นตอนการสร้างกรดที่เรียกว่า acidogenesis และ acetogenesis ที่เปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กเป็นกรดอินทรีย์ (มิ่งคง และคณะ, 2554) โดยสิ่งทดลองที่มีมูลสุกรผสม ได้แก่ T1, T2, T3, T5, T6, T8, T9, T11 และ T12 มีค่า pH เฉลี่ยสูงกว่าสิ่งทดลองที่หมักด้วยวัชพืชน้ำเพียงอย่างเดียว และการหมักย่อยร่วมระหว่างมูลสุกรกับจอกใน T8, T9 และ T10 มีสภาพเป็นกรดเฉลี่ยสูงเท่ากับ 5.87, 5.42 และ 5.70 ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากระบบมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.60-7.13 โดยค่า pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วง 6.80-7.20 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) จากผลการทดลอง พบว่า T9 และ T10 มีค่า pH ต่ำกว่าสิ่งทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เฉลี่ย 6.76 และ 6.60 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลผลิตในการหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับจอก โดยปริมาณจอกที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า pH ของระบบลดลง และส่งผลต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถอยู่ได้ในสภาพ pH 7.8-8.2 (Ertem, 2011) ค่า pH ของน้ำมูลสุกรที่หมักย่อยร่วมกับสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโหลกในทุกรอบอัตราส่วนก่อนเข้าระบบจะมีค่าอยู่ในช่วง 6.14-6.76 และหลังออกจากระบบอยู่ในช่วง 7.00-7.13 ซึ่ง Fang and Yu (2002) รายงานว่า ค่า pH 6 มีความเหมาะสมแก่การสร้างกรดของจุลินทรีย์ และโดยส่วนใหญ่ น้ำที่ถูกบำบัดที่ออกที่ออกจากระบบจะมีค่า pH เฉลี่ย 6.9-7.2 เนื่องจากกิจกรรมของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นเป็นกลางหรือเป็นเบสเล็กน้อย (Bryant, 1991) เมื่อถึงหมักไร้อากาศตลอดการทดลองอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์

ที่สร้างก๊าซมีเทนสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และเหมาะสมต่อการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ การเกิดก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณที่สูง

Table 4 The pH value of influent and effluent mixture and the removal efficiency of organic matters in system.

Treatment		pH		organic removed (%)			
		influent	effluent	BOD	COD	TS	TVS
T1	Swine manure (5:0)	6.64 a ^{1/}	6.98 b	80.54 a	88.74 ab	73.38 a	74.10 ab
T2	Swine manure: <i>H. verticillata</i> (3.75:1.25)	6.37 b	7.00 b	88.02 a	88.53 a-c	78.33 a	82.40 a
T3	Swine manure: <i>H. verticillata</i> (2.50:2.50)	6.29 bc	7.02 ab	84.69 a	82.14 a-d	70.51 a	75.34 ab
T4	Swine manure: <i>H. verticillata</i> (0:5)	5.89 e	7.04 ab	83.03 a	66.69 b-d	58.97 b	68.59 a-c
T5	Swine manure: <i>C. demersum</i> (3.75:1.25)	6.76 a	7.06 ab	85.40 a	90.30 a	78.88 a	83.87 a
T6	Swine manure: <i>C. demersum</i> (2.5:2.5)	6.26 b-d	7.09 ab	78.93 ab	81.09 a-d	77.52 a	75.43 ab
T7	Swine manure: <i>C. demersum</i> (0:5)	6.14 d	7.13 a	84.81 a	81.99 a-d	57.71 b	68.77 a-c
T8	Swine manure: <i>P. statioties</i> (3.75:1.25)	5.87 e	6.96 b	59.58 cd	66.39 cd	57.47 b	65.44 bc
T9	Swine manure: <i>P. statioties</i> (2.5:2.5)	5.42 g	6.76 c	63.57bc	66.65 b-d	49.02 b	54.48 c
T10	Swine manure: <i>P. statioties</i> (0:5)	5.70 f	6.60 d	63.50 bc	74.91 a-d	52.33 b	65.90 bc
T11	Swine manure: <i>A. pinnata</i> (3.75:1.25)	6.21 cd	7.02 ab	72.53 a-c	78.25 a-d	69.85 a	73.85 ab
T12	Swine manure: <i>A. pinnata</i> (2.5:2.5)	5.93 e	7.08 ab	75.45 a-c	65.12 d	48.73 b	53.78 c
T13	Swine manure: <i>A. pinnata</i> (0:5)	5.88 e	7.04 ab	47.89 d	32.06 e	28.03 c	33.79d
CV (%)		1.81	1.52	31.36	34.80	18.76	21.67

^{1/} Means in the same column followed by a common latter are not significantly different at $p < 0.01$ by Duncan's multiple range test.

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากระบบ

สารประกอบอินทรีย์ในรูป BOD, COD, TS และ TVS เป็นค่าสำคัญที่ใช้ตรวจวัดประสิทธิภาพของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า BOD และ COD เป็นปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแสดงถึงลักษณะทางเคมี ส่วนค่า TS และ TVS เป็นปริมาณของแข็งที่ถึงแสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2554) จากผลการทดลองพบว่า การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโดน ที่ทุกอัตราส่วนมีประสิทธิภาพการกำจัด BOD ได้ดีกว่าการหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับจอกและແຮນແຮງ ในขณะที่การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับสาหร่ายพวงกะโดนที่อัตราส่วน 3.75:1.25 มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ดีที่สุด สำหรับประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ พบว่า การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับสาหร่ายหางกระรอก และสาหร่ายพวงกะโดนที่อัตราส่วน 3.75:1.25 และ 2.5:2.5 และการหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับແຮນແຮງที่อัตราส่วน 3.75:1.25 กำจัด TS ออกจากระบบได้ดีไม่แตกต่างทางสถิติ กับชุดควบคุม นอกจากนี้ประสิทธิภาพการกำจัด TVS ออกจากระบบ พบว่า การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโดนที่ทุกๆ อัตราส่วน มีประสิทธิภาพการกำจัด TVS ออกจากระบบได้ดี ไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งค่า pH จะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบ จากการศึกษาของ Jung *et al.* (2000) พบว่า ค่า pH ในช่วง 6.0-7.0 จะเหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์พวก acidogenic bacteria ในการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD และ BOD เพิ่มขึ้น 50-80 และ 90% นอกจากนี้ Dyan *et al.* (2015) ได้ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD ของจุลินทรีย์ในระดับค่า pH 6, 7 และ 8 พบว่า จุลินทรีย์ทำงานได้ดีที่ค่า pH เท่ากับ 6 ซึ่งสามารถกำจัด COD ได้ 72.39% และมีประสิทธิภาพ

ลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น (pH 8) เท่ากับ 63.85%

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับสาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายพวงกะโหลก และแหนแดงที่อัตราส่วนต่างๆ และจอกที่อัตรา 3.75:1.25 สามารถที่จะผลิตก๊าซชีวภาพได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับหมักด้วยมูลสุกรเพียงอย่างเดียว โดยที่การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับสาหร่ายหางกระรอกและสาหร่ายพวงกะโหลกมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ดีกว่าจอกและแหนแดง ดังนั้นสำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็กที่มีปริมาณมูลสุกรไม่มากแต่ต้องการที่จะผลิตก๊าซชีวภาพให้ได้ในปริมาณเท่ากับมูลสุกรเพียงอย่างเดียว สามารถที่จะใช้วัชพืชน้ำเหล่านี้หมักร่วมแทนได้ หรือในกรณีที่บริเวณท้องถิ่นมีวัชพืชน้ำเหล่านี้อยู่มากก็สามารถที่จะใช้เป็นวัตถุดิบเพียงอย่างเดียวในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากรายงานของ ชิตชนก (2554) พบว่า การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับใบยางพารา 50% ในระบบแบบพีทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นจาก 41% เป็น 58% และได้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 0.06 L/kg TS_{removed} เป็น 0.38 L/kg TS_{removed} เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้มูลสุกรเพียงชนิดเดียวในการหมัก ส่วน Xie *et al.* (2011) ได้ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนในการหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับหญ้าหมัก พบว่า การหมักย่อยร่วมอัตราส่วน 1:1 จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตรา 0:1 นอกจากนี้ Cuertos *et al.* (2011) รายงานว่า การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับข้าวโพดในสัดส่วน 50% จะให้ผลผลิตก๊าซมีเทนที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ข้าวโพดหมักร่วม 25 และ 75%

สรุป

จากผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า สาหร่ายหางกระรอก สาหร่ายพวงกะโหลก จอก และแหนแดง มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาหมักย่อยร่วมกับมูลสุกรเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับสาหร่ายหางกระรอก และสาหร่ายพวงกะโหลก ที่อัตราส่วน 3.75:1.25 ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งด้านคุณภาพและปริมาณ รวมถึงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากระบบได้ดีใกล้เคียงกับการหมักมูลสุกรเพียงวัตถุดิบเดียว อย่างไรก็ตาม การคัดเลือกพืชน้ำเพื่อนำไปใช้ประโยชน์นั้น ควรคัดเลือกจากปริมาณของพืชที่สามารถหาได้ในแต่ละท้องถิ่น และใช้ปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้นในกรณีที่มูลสุกรไม่เพียงพอต่อระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถใช้พืชน้ำทั้งสี่ชนิดนี้ทดแทนมูลสุกรตามอัตราส่วนที่เหมาะสมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2558 และทุนอุดหนุนงานวิจัยพืชไร่นา 2560 ซึ่งเป็นโครงการสนับสนุนและส่งเสริมการวิจัยของภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่มอบทุนอุดหนุนสำหรับการทำงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณภาควิชาสัตวบาล และภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2546. คู่มือการเลือกใช้การดูแลและบำรุงรักษาระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรตามแบบมาตรฐานกรมปศุสัตว์. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2553. คู่มือปฏิบัติงานการผลิตและใช้ก๊าซชีวภาพอย่างปลอดภัยสำหรับฟาร์มปศุสัตว์. สำนักวิจัย ค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรุงเทพฯ.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงาน เกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2554. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

- กัมปนาท วิจิตรศรีกมล เอมอร อังสุรัตน์ วนิดา สืบสายพรหม หนูจันทร์ มาตา ทรัพย์ ดอกไม้เทศ อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ จุฬารัตน์ วัฒนะ และพัฒนา อนุรักษพงศ์. 2553. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ : การจัดการของเสียสำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็กและขนาดกลาง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชิตชนก คงแดง. 2554. การผลิตก๊าซชีวภาพจากใบยางพาราโดยการหมักร่วมกับมูลสุกรสำหรับใช้ในครัวเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- นคร ทิพยาวงศ์. 2553. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- พลภักดิ์ นิตยน้อยสืบ. 2557. ประมวลความรู้การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ (โค-กระบือ) แบบถุงพลาสติก พีวีซี. แหล่งที่มา: <http://pvlo-nan.dld.go.th/th/index.pap/2013-10-29-02-52-51/29-2013-11-15-08-36-17/411-2014-06-26-08-57-18,24> เมษายน 2559.
- มงคล ดำรงศรี สุธา ชาวเอียร และ สุทรวดี ศิริยานนท์. 2554. การบำบัดน้ำเสีย. ใน กรมโรงงานอุตสาหกรรม, ผู้รวบรวม. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.
- ศรารัตน์ ลิ้มปูลย์. 2540. วัชพืชน้ำกับการควบคุม. กรีนสตาร์ไบโอเคมีสท์, กรุงเทพฯ.
- สุนัดดา ไชยสิทธิ์ จำเนียร ชมภู และวนิดา สืบสายพรหม. 2558. การหมักย่อยร่วมของมูลสุกรกับพีชน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ. น. 263-272. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 11 วันที่ 17-19 มิถุนายน พ.ศ. 2558. โรงแรมบางแสน เฮอริเทจ, ชลบุรี.
- American Public Health Association, American Water Works Association and water Environment Federation. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed. United Book Press, Inc, Baltimore.
- Bryant, M.P. 1991. Microbial methane production-theoretical aspects. Journal of Animal Science 48: 193-201.
- Cuetos, M.J., C. Fernández, X. Gómez and A. Morán. 2011. Anaerobic co-digestion of swine manure with energy crop residues. Biotechnology and Bioengineering 16: 1044-1052.
- Daboor, S.M., S.M. Budge, A.E. Ghaly, M.S. Brooks and D. Dave. 2012. Isolation and activation of collagenase from fish processing waste. Advances in Bioscience and Biotechnology 3: 191-203.
- Dyan, M.O., G.P. Putra, B. Budiyo, S. Sumardiono and T.D. Kusworo. 2015. The effect of pH and operation mode for COD removal of slaughterhouse wastewater with anaerobic batch reactor. Waste Technology 3: 7-13.
- Ertem, F. C. 2011. Improving Biogas Production by Anaerobic Digestion of Different Substrates - Calculation of Potential Energy Outcomes. M.E. Thesis, Halmsted University.
- Fang, H.H.P. and H.Q. Yu. 2001. Mesophilic acidification of gelatinaceous wastewater. Journal of Biotechnology 93: 99-108.
- Hong, W.Y. and E.B. David. 2007. Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. Bioresource Technology 98: 130-134.
- Jia, L., J. Zuo, L. Gan, P. Li, F. Liu, K. Wang, L. Chen and H. Gan. 2011. Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China. Journal of Environmental Sciences 23: 1403-1408.
- Jung, J.Y., S.M. Lee, P.K. Shin and Y.C. Chung. 2000. Effect of pH phase separated anaerobic digestion. Biotechnology and Bioengineering 5: 456-459.
- Parawira, W., M. Murtp, R. Zvauya and B. Mattiasson. 2004. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. Renewable Energy 29: 1811-1823.
- Rabah, A. B., S. B. Oyeleke, S. B. Manga, L. G. Hassan and U. J. J. Ijah. 2010. Microbiological and physico-chemical assessment of soil contaminated with abattoir effluents in Sokoto Metroplis, Nigeria. Science World Journal 5: 1-4.
- Van Soest, P.J. 1963. Use of determination of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. Journal of the Association of Official Analytical Chemists 46: 829-835.
- Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37: 29-37.
- Wei, W. 2007. Anaerobic co-digestion of biomass for methane production: recent research achievements. Iowa State University.
- Xie, S., P.G. Lawlor, J.P. Frost, Z. Hu and X. Zhan. 2011. Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of concentrated pig manure and grass silage. Bioresource Technology 10: 5728-5733