Engng.J.CMU.(2019) 26 (1), 181–192

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

ผลของระยะเวลากักเก็บต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักแห้งจากมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบรองพื้น

Effect of Retention Time on Dry Basis Biogas Production from Broiler Manure with Rice Husk Bedding

นรายุทธ วงค์สมุทร์[1*] รสสุคนธ์ จะวะนะ[2] และ พฤกษ์ อักกะรังสี[3]

Narayut Wongsamut[1*], Rotsukon Jawana[2] and Pruk Aggarangsi[3]

[1,3]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

[2]สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 155 ม.2 ต.แม่เหียะ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50100

[1,3]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
239 HuayKaewRoad, Suthep, Muang, Chiang Mai, 50200
[2]Energy Research and Development Institute - Nakornping Chiang Mai University
155 M.2, Mae Hia, Muang, Chiang Mai 50100
*Corresponding author: narayut_benz@hotmail.com
Telephone Number: 08-9191-2950

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงผลของระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบรองพื้นโดยการหมักแบบแห้ง ซึ่งใช้ถังหมักที่มีใบพัดกวนขนาด 1,000 ลิตร และได้ทำการควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดเข้าระบบเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยศึกษาที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบรองพื้นที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.239±0.016 และ 0.249±0.016 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ โดยสัดส่วนก๊าซมีเทนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 48.9±0.6 และ 52.0±0.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 45.17±2.76 และ 79.55±8.88 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 53.76±3.57 และ 84.32±8.37 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ระยะเวลากักเก็บ 60 วัน มีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน 2,409±208 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถควบคุมไม่ให้ส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนได้ แต่ที่ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน ตรวจพบปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนสูงถึง 4,017±221 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจมีความเสี่ยงต่อเสถียรภาพของระบบได้

คำสำคัญ: ระยะเวลากักเก็บ/ การหมักแบบแห้ง/ มูลไก่เนื้อ/ ก๊าซชีวภาพ

ABSTRACT

This article focuses on finding design and operating conditions of dry fermentation biogas system using broiler manure mixed with rice husk bedding as input substrate. The research was conducted in 1000-liter plug-flow dry anaerobic reactors with horizontal paddle agitator. Total solid content of input for this experiment was controlled at 25% with reactor retention time of 30 and 60 days. The results for

Received 14 July 2017
Revised 4 December 2017
Accepted 20 December 2017

biogas yield at retention time of 30 and 60 days were $_{0.2}39_{\pm}0.016$ and $_{0.2}49_{\pm}0.016$ Nm^3/kg VS_{added} with average CH_4 content of 48.9±0.6% and 52.0±0.9% respectively. The removal efficiency of total solids were 45.17±2.76% and 79.55±8.88% for the retention time of 30 and 60 days respectively and corresponding the removal efficiency of volatile solids were 53.76±3.57% and 84.32±8.37%. In addition for the retention time at 60 days, the measured NH_3-N is in the range of $2,409_{\pm}208$ mg/l which shall not affect methanogen microorganism activity compared to $4,017_{\pm}221$ mg/l for 30-day retention time which can lead to process inhibition.
Keywords: Retention Time/ Dry Fermentation/ Broiler Manure/ Biogas

1. บทนำ

ประเทศไทยมีปัญหาการขาดความมั่นคงทางด้านพลังงาน จึงต้องมีการนำเข้าน้ำมันและก๊าซธรรมชาติจากประเทศเพื่อนบ้าน อีกทั้งมีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในประเทศค่อนข้างสูง ทำให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นจำนวนมาก และส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมโดยตรง ดังนั้นพลังงานทดแทนจึงเป็นพลังงานทางเลือกที่ประเทศไทยต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงาน ซึ่งในปัจจุบันภาครัฐได้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล พลังงานก๊าซชีวภาพ และพลังงานลม เป็นต้น

ก๊าซชีวภาพถือเป็นพลังงานทดแทนอีกทางเลือกหนึ่งที่เกิดจากการหมักย่อยสลายสารอินทรีย์หรือของเสียโดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งปัจจุบันมีการนำก๊าซชีวภาพมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โรงงานอุตสาหกรรม และสถานประกอบการต่างๆ เป็นต้น โดยสามารถใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในการขนส่ง การผลิตกระแสไฟฟ้า การทำความร้อนหรือความเย็นได้อีกด้วย เนื่องจากพลังงานจากก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานที่สะอาดและช่วยลดปัญหามลภาวะด้านสิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน จากข้อมูลแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (AEDP2015) ของกระทรวงพลังงาน ระบุในปี พ.ศ. 2557 ได้มีการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่มาจากน้ำเสียและของเสียต่างๆ มีปริมาณ 311.50 เมกะวัตต์ ซึ่งในแผนพัฒนาพลังงาน 15 ปี ได้วางเป้าหมายไว้ว่าภายในปี พ.ศ. 2579 ประเทศไทยต้องมีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่มาจากน้ำเสียและของเสียต่างๆ เพิ่มจากเดิมเป็น 600 เมกะวัตต์ [1]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม สัตว์ปีก เช่น ไก่เนื้อ จึงจัดว่าเป็นหนึ่งในสัตว์เศรษฐกิจของประเทศไทย จากข้อมูลของสำนักงานปศุสัตว์จังหวัดระบุว่าในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีการเพาะเลี้ยงไก่เนื้อจำนวน 261,431,345 ตัว [2] โดยของเสียที่ได้คือมูลไก่เนื้อที่ปนกับวัสดุที่ใช้รองพื้น เพื่อช่วยดูดซับความชื้นจากน้ำที่หกและมูลไก่ ช่วยให้ไก่ไม่สัมผัสมูลที่ขับถ่ายออกโดยตรง ส่วนมากการเลี้ยงไก่เนื้อในประเทศไทยจะใช้แกลบเป็นวัสดุรองพื้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี หาง่ายในท้องถิ่นและมีราคาถูก ซึ่งของเสียจากผลผลิตทางการเกษตรและจากกิจกรรมทางปศุสัตว์สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานก๊าซชีวภาพได้ แต่พบว่ามูลสัตว์ปีก ควรมีการปรับสภาพเบื้องต้นก่อนนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับหมักก๊าซชีวภาพ เนื่องจากมูลสัตว์ปีกมีปริมาณไนโตรเจนสูง โดยเฉพาะมูลไก่เนื้อหากเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน และแอมโมเนียมไอออนที่ความเข้มข้นมากกว่า 1,500 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อาจยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ [3] วิธีการลดปัญหาการยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากความเป็นพิษของแอมโมเนีย สามารถทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การเจือจางมูลไก่ด้วยน้ำเพื่อลดความเข้มข้นให้อยู่ในระดับร้อยละ 0.5-3 ของปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งจากงานวิจัยของอิษฎ์วร และคณะ [4] ที่พบว่าอัตราการเจือจางมูลไก่เนื้อด้วยน้ำที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพคือ 1:3 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก ส่งผลให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

เท่ากับ 0.341 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.166 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของระยะเวลากักเก็บต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบรองพื้น โดยควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เข้าระบบ และอัตราการกวน ให้คงที่ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง ด้วยเทคโนโลยีการหมักแบบแห้งในระดับนำร่อง (Pilot scale) เพื่อนำองค์ความรู้และข้อมูลที่ได้ไปขยายผลและประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับฟาร์มไก่เนื้อได้ต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 มูลไก่เนื้อ

มูลไก่เนื้อที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ นำมาจากยะคำป้อฟาร์ม อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน โดยมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบรองพื้นถูกลดขนาดด้วยมือ และแยกสิ่งเจือปน เช่น ขนไก่ ก้อนหิน หรือกรวดออกก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS), ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (VS), ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน (NH_3-N) เป็นต้น เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการศึกษาขั้นต่อไป

2.1.2 ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบแห้งขนาด 1,000 ลิตร

ถังหมักแบบแห้งใช้ในการเดินระบบสำหรับศึกษาผลของระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำมาจากเหล็กหนา 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.7 เมตร ความยาว 3 เมตร ด้านในมีใบพัดกวน ซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1.5 กิโลวัตต์ (2 แรงม้า) และชุดเกียร์ทดรอบในการขับเคลื่อนเพลา และมีกล่องควบคุมระบบไฟฟ้าเพื่อใช้ตั้งเวลาในการกวนแบบอัตโนมัติ โดยด้านขวาของถังหมักมีทางป้อนวัตถุดิบแบบหมุนมือ ส่วนด้านซ้ายของถังหมักมีวาล์วเปิดระบายน้ำเสียและกากของวัตถุดิบแบบหมุนมือ ด้านล่างของถังหมักมีวาล์วระบายน้ำเสียและตะกอน ส่วนด้านบนของถังหมักจะติดตั้งท่อก๊าซเพื่อส่งก๊าซผ่านไปยังมิเตอร์วัดปริมาตรก๊าซ และมีจุดเก็บก๊าซตัวอย่างสำหรับต่อกับเครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ เพื่อตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 วิธีการทดลอง

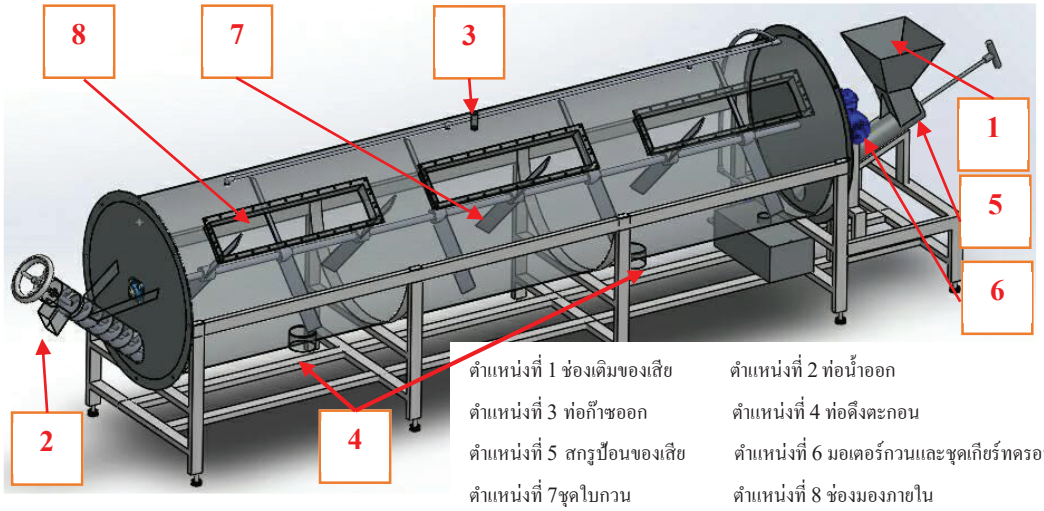
ระบบหมักแบบแห้งในสภาวะแบบไร้ออกซิเจนเป็นระบบที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเข้าระบบอยู่ระหว่างร้อยละ 20-40 [5] ในการดำเนินการศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมด้วยถังหมักแบบแห้งขนาด 1,000 ลิตร ปริมาตรการหมัก 700 ลิตร ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาโดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยได้ป้อนมูลไก่เนื้อเข้าระบบทุกวัน ซึ่งปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบมูลไก่เนื้อที่ใช้ทดลองได้ควบคุมให้มีค่าร้อยละ 25 ด้วยการเจือจางด้วยน้ำ หรือโดยประมาณที่อัตราส่วนมูลไก่เนื้อต่อน้ำเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก [4] ซึ่งได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของมูลไก่เนื้อที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน ตามลำดับ [4] และควบคุมการกวน 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยทำการทดลองจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (RSD) ไม่เกิน 10%

ตารางที่ 1 ความถี่ในการตรวจวัด ตำแหน่งที่เก็บน้ำตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ตำแหน่งที่	ความถี่ (ต่อสัปดาห์)	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือที่ใช้
องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (%)	3	7	Gas Data รุ่น GFM406

ตารางที่ 1 (ต่อ) ความถี่ในการตรวจวัด ตำแหน่งที่เก็บน้ำตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ตำแหน่งที่	ความถี่ (ต่อสัปดาห์)	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือที่ใช้
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (m^3)	3	7	Gas meter
ค่าพีเอช, pH	1,2,4	7	pH meter HORIBA รุ่น pH 11
ปริมาณกรดไขมันระเหย, VFA (mg/L)	2	2	Titration Method
ปริมาณของแข็งทั้งหมด, TS (mg/L)	1,2	2	Gravimetric Method
ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด, VS (mg/L)	1,2	2	Gravimetric Method
สภาพความเป็นด่าง, Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)	2	2	Titration Method
ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน, NH_3-N (mg/L)	1,2	2	Titration Method
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด, TKN (mg/L)	1,2	2	Macro Kjeldahl Method



รูปที่ 1 ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบแห้งขนาด 1,000 ลิตร

2.3 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผล

หลังจากเริ่มต้นเดินระบบโดยการเติมเชื้อตั้งต้นที่นำมาจากจุดดึงกากตะกอนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักรางจากมูลไก่ไข่ปริมาตร 300 ลิตร จากนั้นป้อนมูลไก่เนื้อผสมกับน้ำเข้าระบบแบบต่อเนื่องปริมาณ 11.67 กิโลกรัมต่อวัน สังเกตให้ระดับน้ำในถังหมักแบบแห้งอยู่ในระดับน้ำออกจึงหยุดป้อน จากนั้นปล่อยทิ้งไว้หนึ่งสัปดาห์เพื่อให้จุลินทรีย์ปรับตัวให้เคยชินกับของเสียในสภาวะแบบไร้ออกซิเจน [6] จึงเริ่มทำการป้อนวัตถุดิบเข้าระบบวันละครั้งเพื่อศึกษาระยะเวลากักเก็บที่ 60 วัน ซึ่งในการเตรียมมูลไก่เนื้อที่ได้จากฟาร์มแต่ละรอบการเลี้ยงนั้นได้ทำการส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดก่อนทุกครั้ง เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณมูลไก่เนื้อและน้ำที่ใช้ในการเจือจางให้มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด

เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงปรับเพิ่มโหลดเพื่อศึกษาระยะเวลากักเก็บ 30 วัน ที่มีอัตราการป้อนมูลไก่เนื้อผสมกับน้ำเข้าระบบทุกวันปริมาณ 23.30 กิโลกรัมต่อวัน โดยควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดให้เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์เช่นกัน

ในการดูแลและติดตามระบบได้ทำการตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ เช่น ก๊าซมีเทน (CH_4), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ก๊าซออกซิเจน (O_2), ก๊าซอื่นๆ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือก๊าซไข่เน่า (H_2S) พร้อมทั้งบันทึกค่าตัวเลขมิเตอร์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ซึ่งมีท่อก๊าซออกในตำแหน่งที่ 3 (รูปที่ 1) เพื่อเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละวัน และทำการเก็บตัวอย่างของเสียจากจุดเก็บจำนวน 2 จุด ด้วยความถี่ 2 ครั้งต่อสัปดาห์ คือ น้ำเข้าระบบ (ก่อนป้อนเข้าตำแหน่งที่ 1) และน้ำออกระบบ (ตำแหน่งที่ 2) โดยการหมุนวาล์วทางระบายน้ำเสียด้วยมือ เพื่อนำกากตะกอนออกมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และคำนวณหาปริมาณแอมโมเนียอิสระของน้ำออกระบบ ซึ่งจะแทนค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และค่าพีเอช (pH) ของน้ำออกระบบ ในสมการที่ 1 ซึ่งในแต่ละการทดลองได้ทำการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (RSD) ไม่เกิน 10% เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มไก่เนื้อต่อไป

$$\text{Free ammonia } (mg/l) = \frac{TKN}{\frac{1+10^{-pH}}{10^{-pK}}} \quad (1)$$

เมื่อ

TKN	คือปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (มก./ล.)
pH	คือค่าพีเอชที่วัดได้จากน้ำออกระบบ
pK	มีค่าเท่ากับ 9.3 อ้างอิงที่อุณหภูมิ 35 ºC

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากผลการเดินระบบเพื่อหาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน ซึ่งได้ใช้ระยะเวลาทำการทดลองทั้งหมด 46 และ 90 วัน ตามลำดับ จึงได้พิจารณาประสิทธิภาพของระบบจากพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ปริมาณกรดไขมันระเหย (VFA) สภาพความเป็นด่าง (Alk) ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน (NH_3-N) ปริมาณแอมโมเนียอิสระของน้ำออกระบบ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ อัตราก๊าซชีวภาพ และอัตราการผลิตก๊าซมีเทน เป็นต้น

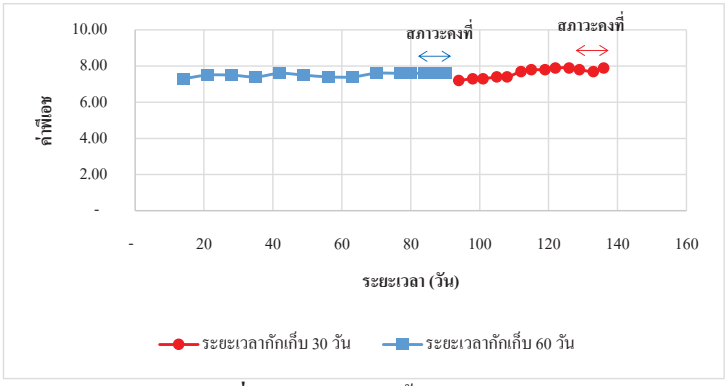
3.1 ค่าพีเอช สภาพความเป็นด่าง และปริมาณกรดไขมันระเหย

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน ค่าพีเอชน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.2±0.1 และ 8.2±0.1 ส่วนค่าพีเอชของน้ำออกระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.8±0.1 และ 7.6±0.0 ตามลำดับ (รูปที่ 2) ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้ง 2 การทดลองมีค่าพีเอชของน้ำออกใกล้เคียงกัน และไม่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.6 – 7.4 [7]

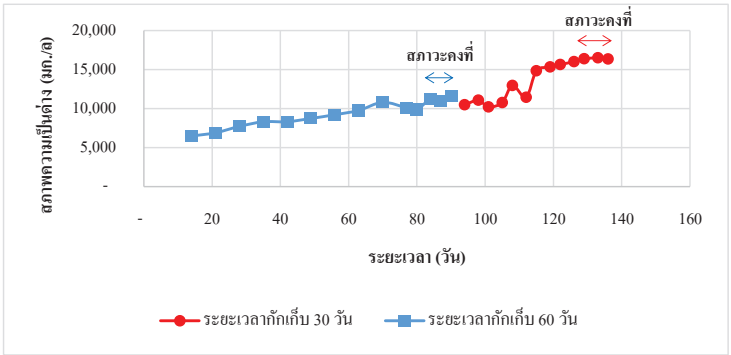
สภาพความเป็นด่างเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช [7] จากผลการทดลองพบว่าสภาพความเป็นด่างของน้ำออกระบบที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16,414±78 และ 11,268±311 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 3) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสภาพความเป็นด่างที่สภาวะคงที่มีค่าสูงขึ้นกว่าช่วงแรกที่เริ่มต้นเดินระบบ เนื่องจากในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมีการผลิตกรดไขมันระเหย เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ [8] จากการที่ค่าสภาพความเป็นด่างของระบบสูงขึ้นตามปริมาณกรดไขมันระเหย แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ในระบบมีเสถียรภาพในการรักษาค่าพีเอชของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ ดังนั้นสภาพความ

เป็นด่างจะถูกนำมาพิจารณาประสิทธิภาพของระบบร่วมกับปริมาณกรดไขมันระเหย

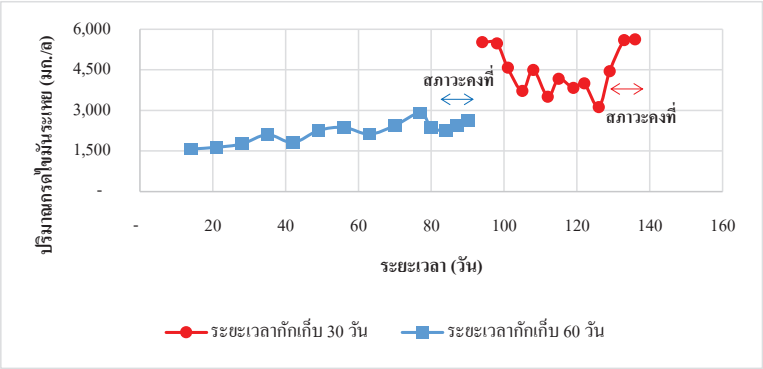
สภาวะการเกิดกรดไขมันระเหยในระบบบ่งบอกให้รู้ถึงความสามารถในการย่อยสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ผลิตกรด สภาวะที่เหมาะสมและไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน และยังส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพอีกด้วย [9] ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยเป็นตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนกว่าตัวแปรอื่นๆ หากมีการเปลี่ยนสภาวะของการเดินระบบ เช่น ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ชนิดของสารอินทรีย์ และอุณหภูมิ เป็นต้น [10] และจากรูปที่ 4 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกระบบที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5,223±678 และ 2,438±189 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกที่ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 60 วัน เนื่องจากระยะเวลากักเก็บที่สั้นลง ซึ่งได้มีการป้อนของเสียเข้าสู่ระบบมากขึ้น ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบสูงขึ้นส่งผลให้ขั้นตอน Acidogenesis ในกระบวนผลิตก๊าซชีวภาพมีการผลิตกรดไขมันระเหยสูงขึ้น [8] ดังนั้นในการพิจารณาประสิทธิภาพของระบบควรพิจารณาอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/Alk) เนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ถึงการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบหมักย่อย หากมีค่ามากกว่า 0.40 แสดงว่าระบบอาจมีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอต่อการรักษาค่าพีเอชที่เหมาะสมได้ จึงอาจส่งผลให้ระบบล้มเหลวได้ [11] จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/Alk) ของการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.32±0.04 และ 0.22±0.01 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน มีค่าไม่เกิน 0.40 จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนในระบบหมักย่อย



รูปที่ 2 ค่าพีเอชของน้ำออกระบบ



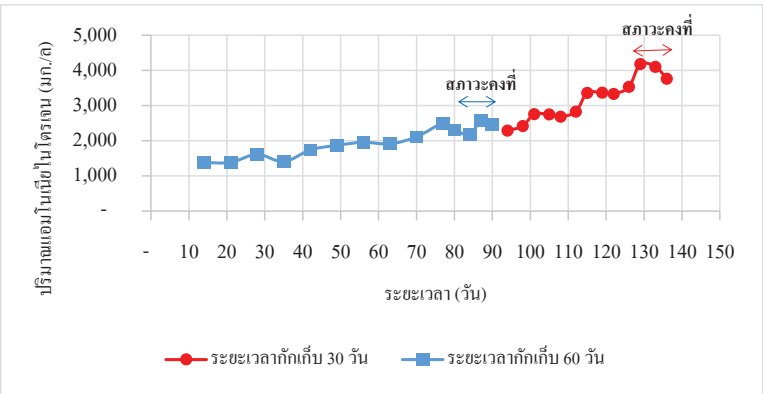
รูปที่ 3 สภาพความเป็นด่างของน้ำออกระบบ



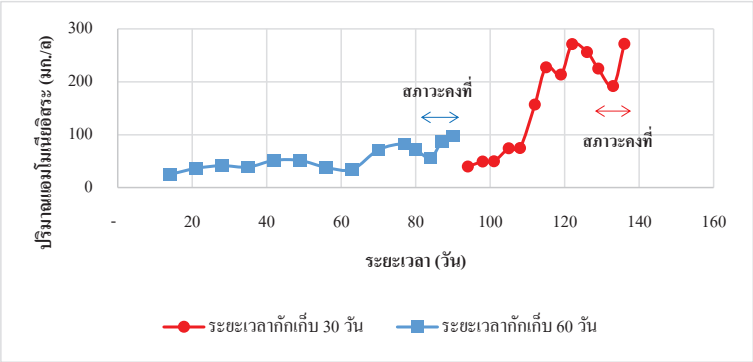
รูปที่ 4 ปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกระบบ

3.2 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน

มูลไก่เนื้อจัดเป็นมูลสัตว์ที่มีปริมาณไนโตรเจนค่อนข้างสูง เมื่อปริมาณไนโตรเจนเปลี่ยนอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีค่ามากกว่า 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ประกอบกับค่าพีเอชของระบบสูง อาจยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนในระบบได้ [3] แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เข้าระบบ อุณหภูมิ และระยะเวลากักเก็บอีกด้วย [12] จากผลการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน พบว่าน้ำออกระบบมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 4,017±221 และ 2,409±208 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่า 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตรดังแสดงในรูปที่ 5 แต่เมื่อคำนวณหาปริมาณแอมโมเนียอิสระจากสมการที่ 1 พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 230±40 และ 80±22 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 6) ตามลำดับ ซึ่งปริมาณแอมโมเนียอิสระเริ่มยับยั้งการทำงานจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนในระบบที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร [13] จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน มีปริมาณแอมโมเนียอิสระสูงกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ยังไม่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ โดยสังเกตได้จากอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/Alk) มีค่าไม่เกิน 0.4 แสดงให้เห็นได้ว่าระบบมีระยะเวลากักเก็บนานเพียงพอ และมีบัฟเฟอร์เพียงพอต่อการรักษาค่าพีเอชที่เหมาะสมได้จึงไม่ส่งผลให้ระบบเกิดการสะสมตัวของปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนแต่อย่างใด



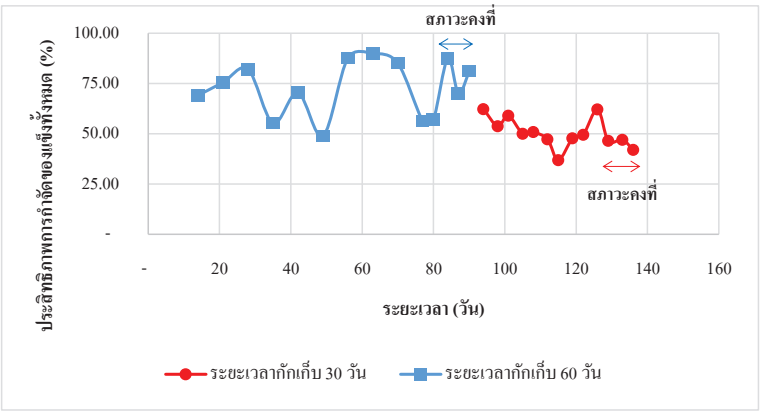
รูปที่ 5 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำออกระบบ



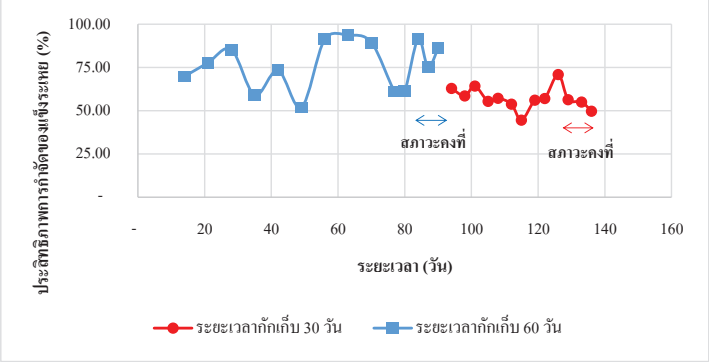
รูปที่ 6 ปริมาณแอมโมเนียอิสระของน้ำออกระบบ

3.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์

ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 45.17±2.76 และ 79.55±8.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 7) และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 53.76±3.57 และ 84.32±8.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 8) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหยของการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 60 วัน มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน เนื่องจากในกระบวนการหมักย่อยที่มีระยะเวลากักเก็บนานมากพอ จะทำให้จุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับของเสียได้ทั่วถึงมากกว่าการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บสั้นๆ [14] ทำให้ระยะเวลากักเก็บที่สูงขึ้นทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่สูง



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมด



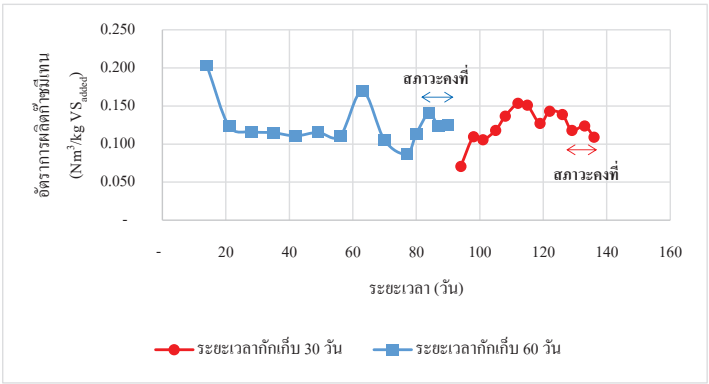
รูปที่ 8 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหย

3.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพ อัตราการผลิตก๊าซมีเทน และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

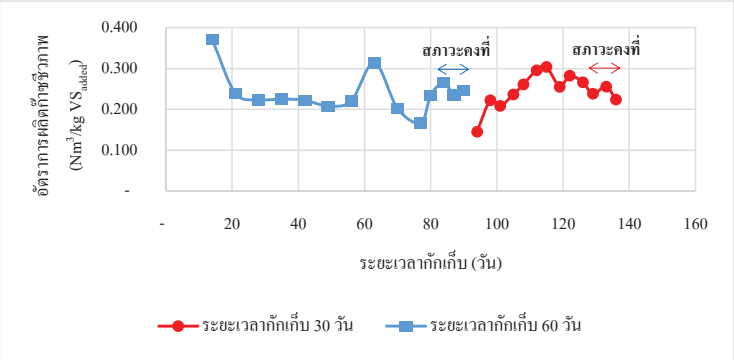
ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคืออัตราการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทนในระบบได้ โดยมูลไก่เนื้อที่ใช้ทดลองซึ่งมีแกลบปนอยู่เป็นจำนวนมาก และแกลบประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน จึงทำให้ย่อยสลายได้ยาก ทั้งนี้ในการเลือกระยะเวลาการกักเก็บที่เหมาะสมหรือระยะเวลากักเก็บที่ไม่สั้นเกินไป อาจส่งผลให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ ถ้าเลือกใช้ระยะเวลากักเก็บที่ต่ำหรือสั้นเกินไป ต้องมีการดึงกากตะกอนออกระบบในปริมาณมาก อาจส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถหลุดปนออกมาได้

จากการทดลองเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าการทดลองระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน ทำให้ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.117±0.007 และ 0.130±0.009 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ (รูปที่ 9) และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.239±0.016 และ 0.249±0.016 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ (รูปที่ 10) และมีสัดส่วนก๊าซมีเทน 48.9±0.6 และ 52.0±0.9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อปริมาณมูลไก่เนื้อมีค่าเท่ากับ 181±11 และ 182±8 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อตัน สำหรับการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของศักรินทร์ [15] ซึ่งใช้เทคโนโลยีการหมักแบบเปียก (ตารางที่ 2) จะเห็นได้ว่าผลจากการศึกษาครั้งนี้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่มากกว่าและยังช่วยลดการใช้น้ำในการผสมมูลไก่เนื้อเพื่อเดินระบบ จึงมีความเหมาะสมในการนำไปขยายผลใช้งานได้จริง



รูปที่ 9 อัตราการผลิตก๊าซมีเทน



รูปที่ 10 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อกับงานวิจัยอื่นๆ

อ้างอิง	ศักรินทร์ (2555)			การศึกษานี้	
ระยะเวลากักเก็บ (วัน)	40	80	40	30	60
รูปแบบการทดลอง	ASBR (TS 5.5%)	ASBR (TS 11%)	CSTR (TS 5.5%)	หมักแบบแห้ง (TS 25%)	หมักแบบแห้ง (TS 25%)
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ($Nm^3/kg\ VS_{added}$)	0.140±0.015	0.058±0.004	0.112±0.01	0.239±0.016	0.249±0.016

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมต่อก๊าซชีวภาพแบบหมักแห้งของมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบรองพื้น โดยทำการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน ซึ่งควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดของมูลไก่เนื้อที่ใช้ทดลองให้มีค่าร้อยละ 25 ด้วยการเจือจางด้วยน้ำให้คงที่ตลอดระยะเวลาทดลอง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ผลการทดลองพบว่าการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วันมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.239±0.016 และ 0.249±0.016 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ และมีสัดส่วนก๊าซมีเทนเท่ากับ 48.9±0.6 และ 52.0±0.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 45.17±2.76 และ 79.55±8.88 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 53.76±3.57 และ 84.32±8.37 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน ตามลำดับ

ระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ระยะเวลากักเก็บ 60 วัน เนื่องจากระบบมีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในระดับที่ยังไม่ส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ และมีปริมาณแอมโมเนียอิสระอยู่ในระดับที่ไม่ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน ทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน อีกทั้งการเลือกระยะเวลากักเก็บ 60 วัน ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่สูงกว่า และยังช่วยลดปัญหาการหลุดของจุลินทรีย์ที่ปนมากับของเสียออกระบบ เพราะที่ระยะเวลากักเก็บ 60 วันมีการดึงของเสียออกระบบ (น้ำออก)ในปริมาณที่น้อยกว่า

เมื่อนำผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อโดยการหมักแบบแห้งไปเปรียบเทียบกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อโดยการหมักแบบเปียกซึ่งเดินระบบแบบ ASBR และ CSTR [15] พบว่าการศึกษาครั้งนี้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่า และยังสามารถลดปริมาณน้ำ

ที่ต้องนำมาผสมมูลไก่เนื้อก่อนป้อนเข้าระบบ ดังนั้นการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อด้วยเทคโนโลยีการหมักแบบแห้ง จึงสามารถนำไปขยายผลประยุกต์ใช้งานจริงได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ให้ทุนสนับสุนนหนุนโครงการวิจัย และขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านพลังงาน ที่สนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579. กระทรวงพลังงาน, 2558; 7-15.

[2] สำนักงานปศุสัตว์อำเภอ. ข้อมูลเกษตรกรผู้เลี้ยงไก่. กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ, ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, กรมปศุสัตว์, 2558.

[3] McCarty, P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. Public works, 1964; 95(9): 107-112.

[4] อิษฏ์วร ปานผดุง รสสุคนธ์ จะวะนะ และ สิริชัย คุณภาพดีเลิศ. การกำจัดแอมโมเนียในมูลไก่เนื้อด้วยการไล่แบบสุญญากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ, การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15, สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2559.

[5] Nizami, A.S. and Murphy, J.D. What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010; 14(6): 1558-1568.

[6] ไพเชษฐ์ ธรรมภาณ. ผลของระยะเวลากักเก็บน้ำของถังปฏิกิริยาสร้างกรดต่อการบำบัดน้ำเสียมูลสุกรโดยกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2541.

[7] สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม, 2553.

[8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ขั้นตอนและปฏิกิริยาการเกิดก๊าซชีวภาพ. กระทรวงพลังงาน, 2540.

[9] Ahring, B. K., Sandberg, M., Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995; 43(3): 559–565.

[10] Bolzonella, D., Battistoni, P., Mata-Alvarez, J. and Cecchi, F. Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes: Process Behavior in Transient Conditions, *Water Science and Technology*, 2003; 48(4): 1-8.

[11] Zickefoose, C. and Hayes, R.B. Anaerobic Sludge Digestion: Operations Manual, 1976; EPA 430/9-76-001.

[12] Laclos, F.H., Desbois, S. and Saint-Joly, C. Anaerobic Digestion of Municipal Solid Organic Waste:Valorga Full-scale Plant in Tilburg, The Netherlands. *Water Science and Technology*, 1997; 36(6-7): 457-462.

[13] McCarty, P.L, and McKinney, R.E. Salt toxicity in anaerobic digestion. *Journal water pollution control federation*, 1961; 33(4): 399-415.

[14] นิลวรรณ ไชยทนุ และ พฤกษ์ อักกะรังสี. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ของการใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องในสภาวะเทอร์โมฟิลิกเพื่อบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2552; 16 (3): 74-84

[15] ศักรินทร์ หมูเทพ. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อด้วยระบบถังกวนสมบูรณ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมพลังงาน, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555.

[16] Abouelenien, F., Nakashimada, Y., and Nishio, N. Dry mesophilic fermentation of chicken manure for production of methane by repeated batch culture. *Journal of bioscience and bioengineering*, 2009; 107(3): 293-295.

[17] Abouelenien, F., Fujiwara, W., Namba, Y., Kosseva, M., Nishio, N., and Nakashimada, Y. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle. *Bioresource technology*, 2010; 101(16): 6368-6373.

[18] Bujoczek, G., Oleszkiewicz, J., Sparling, R., and Cenkowski, S. High solid anaerobic digestion of chicken manure. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000; 76(1): 51-60.

[19] Liu, Z. G., Zhou, X. F., Zhang, Y. L., and Zhu, H. G. Enhanced anaerobic treatment of CSTR-digested effluent from chicken manure: the effect of ammonia inhibition. *Waste managemen*t, 2012; 32(1): 137-143.

[20] Ndon, U. J., and Dague, R. R. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic sequencing batch reactor treatment of low-strength wastewater. *Water Research*, 1997; 31(10): 2455-2466.

[21] Polprasert, C. Organic Waste Recycling, John Willey&Sons Inc. New York, 1989.