

ต้นแบบของการใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องในสภาวะเทอร์โมฟิลิก สำหรับบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

Prototype of Thermophilic CSTR Anaerobic Digester for Treating Swine Wastewater

นิลวรรณ ไชยทนต์, พญกษ อักกะรังสี¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

ติดต่อ: E-mail: kunpruk@gmail.com, โทรศัพท์: (053) 942007, โทรสาร: (053) 903760

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากมูลสุกรโดยใช้กระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศในถังหมักย่อยแบบกวนต่อเนื่อง (Completely Stirred Tank Reactor) ในช่วงอุณหภูมิสูง (Thermophilic ที่ 55 ± 2 °C) โดยทำการออกแบบและจัดสร้างระบบต้นแบบ ขนาด 1 m³ ใช้กรรมวิธีการเติมน้ำเสียแบบครั้งคราว (Batch Feeding) เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบอุณหภูมิปกติและไม่มีการกวน ซึ่งใช้กันอยู่ทั่วไป โดยควบคุมน้ำเสียตั้งต้นให้มี ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ 2% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าประมาณของน้ำเสียในฟาร์มสุกรในประเทศไทย โดยในการทดลองเปลี่ยนระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (HRT) ระหว่าง 4 ถึง 6 วัน ในขณะที่ค่าสำหรับการออกแบบระบบก๊าซชีวภาพแบบอื่น ๆ ที่มีการกวนผสม และทำงานในช่วงอุณหภูมิปกติ (Mesophilic 25-35 °C) จำเป็นต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 6 วันสำหรับประเทศไทย จากนั้นทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ค่า COD pH และสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองพบว่า ระบบใช้ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียเพียง 4 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดของเสียถึง 84% ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 4.8 กก.สารอินทรีย์/ม³-วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เฉลี่ย 1006 ลิตร/วัน สรุปได้ว่า ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนต่อเนื่องในช่วงอุณหภูมิสูงมีประสิทธิภาพในการหมักย่อย สูงกว่าระบบก๊าซชีวภาพแบบอื่น แต่หากนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรซึ่งมีอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำจะไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สมควรนำไปใช้กับของเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง

คำหลัก: ระบบกวนต่อเนื่อง, ก๊าซชีวภาพ, การหมักแบบไร้อากาศ, เทอร์โมฟิลิก, น้ำเสียจากมูลสุกร

ABSTRACT

The primary objective of this study is to identify the potential of applying a completely stirred tank reactor (CSTR) anaerobic digestion technology operating at thermophilic (55 ± 2 °C) temperature to swine farms in Thailand. The experiment concerns the design and construction of a prototype single-stage 1 m³ temperature-controlled batch-feeding CSTR digester. The wastewater is controlled to

contain 2% organic substances which equal to an average of swine waste in Thailand. The experiment is set to vary the system hydraulic retention time between 4 to 6 days where 6 days is the minimum design criteria for non-mixing biogas systems operating at ambient temperature of Thailand. The resulting parameters collected for comparison includes gas production, COD, pH and biogas methane content. The result shows that hydraulic retention time (HRT) of 4 days is supplemental for the digester to maintain 84% COD removal efficiency with maximum OLR 4.8 kg.COD/m³-day. The experiment digester yields maximum biogas production rate of 1006 L/day. The results confirm that thermophilic CSTR reactor operate at higher efficiency compared to other available systems for swine. Economic analysis also shows that swine waste should be mixed with other carbon source such as biomass and energy crops to increase biogas yield to be feasible.

Keywords: CSTR, Biogas, Anaerobic Digester, Thermophilic, Swine Waste

1. บทนำ

ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาจำนวนสุกรในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งฟาร์มในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่จะใช้ระบบบำบัดแบบบ่อ หรือบ่อหมักราง (Channel Digester) ซึ่งจะต้องใช้พื้นที่มาก การควบคุมจึงทำได้ยาก การบำบัดขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ทำให้ระบบบำบัดขาดประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพต่ำ อีกทั้งน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงจะมีการย่อยสลายได้ช้าทำให้ต้องใช้เวลานานในการหมักย่อย [1] ซึ่งบ่อหมักรางสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) ได้เพียง 4 กก.สารอินทรีย์/ม³-วัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 6 วัน [2] ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ แบบถังกวนต่อเนื่อง (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR) จะก่อประโยชน์อย่างมาก ทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและการอนุรักษ์พลังงาน และในอนาคตยังสามารถรองรับของเสียที่มีความเข้มข้นสูง ๆ (เช่น ฟาง หญ้า และของเสียอุตสาหกรรม เป็นต้น) ในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อความคุ้มค่ากับการลงทุนต่อผลประโยชน์ที่ได้รับ เนื่องจากถังชนิดนี้สามารถรับปริมาณของเสียที่มีความเข้มข้นสูงได้มาก เพราะมีกระบวนการกวนที่ช่วยให้เชื้อจุลินทรีย์กับตะกอนสัมผัสกันอย่างทั่วถึง

จึงเป็นการบำบัดของเสียที่มีความเข้มข้นสูงให้ย่อยสลายได้ง่ายและเร็วขึ้น ซึ่งในการบำบัดนั้นทำให้เกิดก๊าซชีวภาพอีกด้วย [3] แต่ปัญหาของระบบก๊าซชีวภาพที่สำคัญอีกอย่างคือ อุณหภูมิภายในของบ่อหมักไม่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ เนื่องจากอุณหภูมิภายในบ่อหมักจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมและมีความแปรปรวนตามอุณหภูมิของสภาพอากาศภายนอก ทำให้อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายในบ่อหมักต่ำระยะเวลาในการหมักยาวนานขึ้น การสร้างระบบก๊าซชีวภาพจึงจำเป็นต้องออกแบบให้มีขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถรองรับน้ำเสียที่เกิดขึ้นและมีเวลาอยู่ในบ่อหมักนานพอสำหรับจะเกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์ ทำให้ระบบก๊าซชีวภาพในปัจจุบันมีค่าลงทุนที่สูงมากซึ่งเป็นอุปสรรคที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพไม่แพร่หลาย จะเห็นได้ว่าทั้งการกวนและอุณหภูมิต่างก็เป็นปัจจัยสำคัญในการช่วยเสริมกันให้การหมักย่อยสารอินทรีย์เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบและจัดสร้างต้นแบบระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่อง ซึ่งมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการบำบัดของเสียในฟาร์มสุกร เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ให้ปริมาณก๊าซ

ที่ผลิตได้มีมากขึ้น รับภาระของเสียได้มากขึ้น รวมไปถึงกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถนำมาผลิตเป็นปุ๋ยที่มีคุณภาพดีเพื่อการเกษตรอีกด้วย [4] และในอนาคตสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการประยุกต์ใช้ระบบต่อไป

2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพ คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 50 - 70% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30 - 50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ [3]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Moonil et al. (2001) ศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการและประสิทธิภาพของการหมักเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศชนิด CSTR ที่อุณหภูมิ mesophilic (35°C) กับ thermophilic (55°C) ซึ่งหาความแตกต่างของปริมาณก๊าซที่ผลิตได้เมื่อแต่ละถังปฏิกรณ์มีการเติมน้ำเสียแตกต่างกัน 4 แบบ ดังนี้ 1) เติมน้ำเสียวันละ 1 ครั้ง 2) เติมน้ำเสียต่อเนื่อง 3) เติมน้ำเสียวันละ 1 ครั้ง 2 สถานะ 4) เติมน้ำเสียวันละ 1 ครั้งแต่ไม่มีการกวน โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 35 และ 55°C มีสัดส่วนของแข็ง 4 %TS ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ไม่ว่าจะเติมน้ำเสียด้วยวิธีใดก็ตามถึงชนิดไหนก็ตาม การทดลองที่อุณหภูมิ 55°C จะเกิดก๊าซชีวภาพมากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 35°C ในทุก ๆ การทดลอง [5]

Khursheed et al. (2005) ศึกษาผลของการกวนที่มีต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ในการทดลองจะใช้ถังชนิด CSTR ด้วยถังขนาด 3.73 ลิตร และใช้มูลวัวที่เป็นของเหลวผสมกับมูลวัวที่เป็นของแข็งเป็น

วัตถุดิบ อัตราส่วนการผสมระหว่างมูลวัวที่เป็นของแข็งต่อมูลวัวที่เป็นของเหลวจะแบ่งออกเป็น 3 อัตราส่วนคือ 50, 100 และ 150 g/L (ใช้มูลวัวที่เป็นของแข็งเท่ากับ 5%, 10% และ 15% ของวัตถุดิบทั้งหมด) การทดลองนี้ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองไว้ที่ 35°C และ ค่า HRT 16.2 วัน มีการดำเนินการที่คล้ายกันระหว่าง การหมักโดยไม่มีการกวน และการหมักโดยมีการกวน การหมักมูลสัตว์ในกรณีของการใช้มูลวัว 5% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในอัตราวันละ 0.84 – 0.94 L/L ปริมาตรถัง ซึ่งก๊าซมีเทนที่ได้อยู่ที่ 0.26 – 0.28 $\text{L}_{\text{CH}_4}/\text{g}$ อย่างไรก็ตามผลของการกวนจะมีความสำคัญในกระบวนการหมักอย่างมากเมื่อวัตถุดิบที่ใช้ มีส่วนผสมของของแข็งในปริมาณที่มากขึ้น (10% และ 15%) การหมักมูลสัตว์ในกรณีของการใช้มูลวัว 10% และ 15% โดยมีการกวนจะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าการหมักที่ไม่มีการกวนประมาณ 10 – 30% [6]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะเห็นได้ว่ามีเทคนิคที่สามารถนำมาใช้เพื่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพหลายวิธี โดยค่าอุณหภูมิภายในบ่อหมักและการกวนจะมีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาถึงหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนต่อเนื่องโดยมีการควบคุมอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิสูง เพื่อศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและความคุ้มค่าในการลงทุน ซึ่งจะได้ใช้เป็นประโยชน์ต่อฟาร์มเลี้ยง สัตว์หรือโรงงานอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

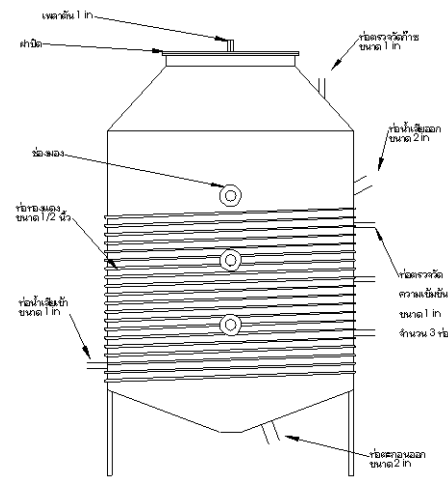
3.1 วัตถุดิบ

ในการเริ่มทำการทดลองวัตถุดิบตั้งต้น จะใช้เชื้อตั้งต้น (Seed) และน้ำเสียมูลสุกรที่ทำการผสมมูลสุกรกับน้ำที่ความเข้มข้น 2% แล้ว (มูลสุกรที่เป็นของแข็งประมาณ 20 กก.ต่อน้ำ 1000 ลิตร) ผสมกันอย่างละครึ่ง จากนั้นในทุกครั้งก่อนการเติมน้ำเสียทำการผสม โดยใช้ตารางซึ่งในการวัดปริมาณ และ

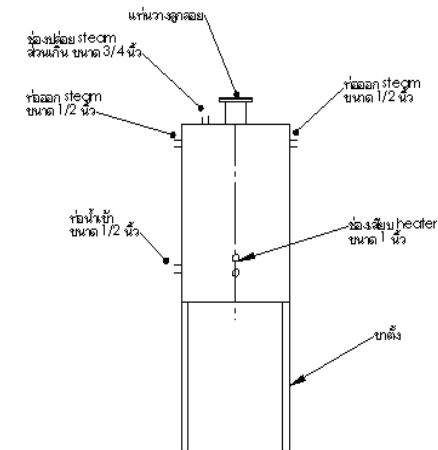
ทำการเก็บรักษามูลสุรสดไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ (0 – 4 °C) ก่อนนำไปใช้งาน โดยการวิเคราะห์น้ำเสียตั้งต้นมีค่า COD 19149 มก./ล. pH 6.66

3.2 การออกแบบระบบบ่อหมัก CSTR

เครื่องต้นแบบบ่อหมักก๊าซชีวภาพแบบกวน สมบูรณ์ ขนาด 1 m³ โดยโครงสร้างของตัวบ่อเป็นรูปทรงกระบอกสูง 1.7 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.15 เมตร ทำจาก Stainless steel 304 ประกอบด้วย หอตรวจวัดปริมาณก๊าซ วาล์วระบายตะกอนออก เส้นทางบ่อน้ำดับดับเข้าสู่บ่อหมัก วาล์วระบายน้ำเสีย ช่องทางเก็บตัวอย่างตะกอน ช่องมองตะกอน ชุดกวนประกอบด้วยใบพัด (ลักษณะ Pitched-blade 45° turbine) มีใบพัดทั้งหมด 4 ใบ และเพลาลำจาก Stainless steel 304 ส่งกำลังด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 1 แรงม้า ผ่านชุดเฟืองทด ซึ่งมีความเร็วรอบ 96 rpm เป็นความเร็วรอบที่ดีที่สุดเมื่อวิเคราะห์จาก ความเข้มข้นของปริมาณตะกอน และเวลา อุณหภูมิ ของน้ำเสียภายในบ่อหมักมีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้งบ่อ และหม้อไอน้ำทำจาก Stainless steel 304 ผลิตไอน้ำ โดยใช้ Heater ไฟฟ้าขนาด 2500 W ให้ความร้อน แก่น้ำเสียโดยใช้ไอน้ำแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านท่อ ทองแดงขนาด 3/4 นิ้ว ที่พันรอบบ่อหมักสู่น้ำเสีย โดยทั้งตัวบ่อหมักและหม้อไอน้ำมีการหุ้มฉนวนชนิด Aeroflex ตราช้าง ขนาด 0.6 x 4 เมตรหนา 50 มิลลิเมตร รอบตัวบ่อ ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ไม่ เกิน 100 °C เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิในบ่อ โดย ที่ระบบสามารถทำความร้อนให้น้ำเสียได้ถึงอุณหภูมิ 60 °C โดยใช้เวลาเฉลี่ย 31 ชั่วโมง ระบบสามารถคง อุณหภูมิและเดินระบบต่อเนื่องได้ติดต่อกัน [7] ซึ่ง ลักษณะของบ่อหมักของแข็งแบบไร้ออกซิเจนชนิด ถังกวนต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 1 และลักษณะของหม้อ ไอน้ำแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ลักษณะของบ่อหมักของแข็งแบบไร้ออกซิเจนชนิดถังกวนต่อเนื่อง



รูปที่ 2 ลักษณะของหม้อไอน้ำ

3.3 อุปกรณ์

เครื่องต้นแบบบ่อหมักก๊าซชีวภาพแบบกวน
ต่อเนื่องขนาด 1 ม³ บ่อเติมน้ำเสีย บ่อสำรองก๊าซ
บ่อรวมน้ำเสีย เครื่องวัดปริมาณก๊าซ ระบบท่อส่ง
ก๊าซ ระบบทำความร้อน และระบบควบคุมไฟฟ้า
ซึ่งลักษณะของระบบแสดงดังรูปที่ 3

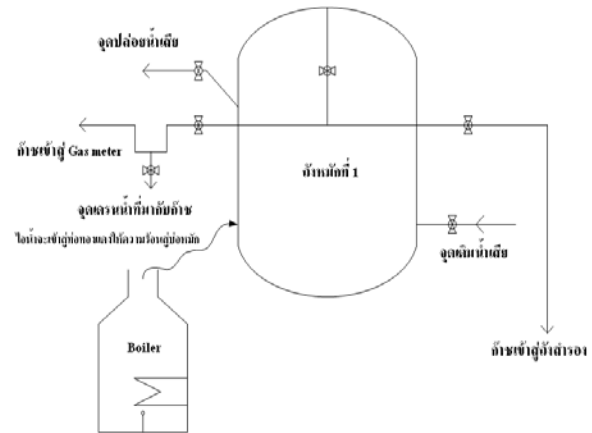


รูปที่ 3 ระบบบ่อหมักของแฉังแบบไร้ออกซิเจนชนิดถึงกวนต่อเนื่อง

3.4 การทำงานของระบบ

น้ำเสียที่ใช้ในการบำบัดจะถูกสูบเข้าสู่บ่อหมักทางด้านล่างของบ่อ ใบพัดที่ติดตั้งอยู่ภายในบ่อจะทำการกวนน้ำเสียด้วยความเร็วรอบ 96 rpm ระบบให้ความร้อนจะทำงานโดยการนำไอน้ำจากหม้อไอน้ำผ่านไปยังท่อทองแดงซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดอยู่กับตัวบ่อ น้ำเสียจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามที่ได้กำหนดไว้ (อุณหภูมิปกติ ถึง 55°C) เมื่ออุณหภูมิสูงตามที่ต้องการ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่อยู่ในบ่อหมัก (สาย Thermocouple Type K) จะทำงาน โดยการส่งให้โซลินอยด์วาล์ว ซึ่งเป็นวาล์วปล่อยไอน้ำจากหม้อไอน้ำให้ไหลเข้าสู่ท่อทองแดงนั้น ปิดไม่ให้ไอน้ำเข้าสู่ท่อทองแดง เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ และเมื่ออุณหภูมิภายในบ่อหมักตกลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ ก็จะส่งให้เปิดโซลินอยด์วาล์ว เพื่อนำไอน้ำเข้าสู่ท่อทองแดง เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนแก่น้ำเสีย ในขณะที่นั้นจะเกิดก๊าซชีวภาพขึ้นในบ่อหมัก ก๊าซที่ได้จะไหลมาตามท่อส่งก๊าซ ในตอนแรกส่วนหนึ่งจะเข้าสู่บ่อสำรองก๊าซจนเต็ม เพื่อก๊าซที่สำรองไว้จะไหลเข้ามาแทนที่น้ำเสียที่ถูกปล่อยออกทางด้านบนในบ่อหมัก ป้องกันการเกิดสถานะสูญญากาศ เนื่องจากเป็นระบบปิด จากนั้นก๊าซจะไหลผ่านเข้าสู่เครื่องวัดปริมาณก๊าซ เพื่อวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของระบบ จากนั้นจะ

ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ทำเช่นนี้เป็นวัฏจักร จนครบกำหนดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงภาพจำลองของระบบบ่อหมักของแฉังแบบไร้ออกซิเจนชนิดถึงกวนต่อเนื่อง

3.5 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ตามค่า HRT คือ 6 และ 4 วัน อัตราการป้อนน้ำเสีย 0.17 และ 0.25 ม³/วัน โดยมีน้ำหนักสดของมูลสุกรที่เติมในส่วนผสม 3.4 และ 5 กก./น้ำหนักสด/วัน ตามลำดับ ในครั้งแรกทำการเติมน้ำเสียเข้าสู่บ่อหมัก 1 ม³ ทั้ง 2 บ่อ โดยผสมน้ำเสียกับเชื้อตั้งต้นอย่างละครึ่ง เพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยาให้กับระบบ ทำการเปิดระบบควบคุมไฟฟ้าทั้งระบบกวน และระบบความร้อน โดยเปิดทิ้งไว้ตลอดเวลา จนกว่าความร้อนในบ่อหมักทั้งสองมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงสภาวะที่ต้องการคือ 55°C โดยบ่อหมักเพิ่มอุณหภูมิได้วันละ 7°C จากนั้นเริ่มทำการเติมน้ำเสียวันละ 1 ครั้ง ในปริมาณของแต่ละค่า HRT ทำการเติมน้ำเสียปริมาณ 0.17 ม³/วัน ในบ่อหมักที่ 1 และ 0.25 ม³/วัน ในบ่อหมักที่ 2 โดยก่อนเติมน้ำเสียทุกครั้งจะทำการจดบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากเครื่องวัดก๊าซทั้ง 2 บ่อ ซึ่งเป็นปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นของวันก่อนหน้า และในวันถัดไปจึงเริ่มปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วของวันก่อนหน้าออก โดยทำการปิดการกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และลำเลียงน้ำเสียออกใช้เวลาประมาณ 30

นาที่ จากนั้นจึงทำการเติมน้ำเสียเข้าสู่บ่อหมัก
 เช่นเดิม โดยใช้เวลาอีกประมาณ 30 นาที เมื่อเติมน้ำ
 เสียเข้าสู่บ่อหมักเสร็จจึงเปิดการกวนทำงาน
 ตามปกติ และเวลาที่เหลืออีก 21 ชั่วโมง เป็นเวลา
 ของการปฏิบัติกิจกรรมระหว่างน้ำเสียกับจุลินทรีย์ในบ่อ
 หมัก ซึ่งใน 1 วัฏจักรของการเติมน้ำเสียแบบวันละ
 ครั้ง ใช้เวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง จากนั้นปฏิบัติซ้ำ
 เช่นเดิมจนเสร็จสิ้นการทดลอง ในระหว่างการทดลอง
 ได้ทำการตรวจวัด ปริมาณก๊าซชีวภาพด้วย Gas
 meter ค่าซีโอดี (COD, Chemical Oxygen
 Demand) ด้วยวิธี Closed Reflux ค่า pH ด้วย pH
 meter และสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ ด้วย
 Gas collector [8] เพื่อดูแนวโน้มของประสิทธิภาพ
 ของระบบในการบำบัดของเสีย และเพื่อเป็นการ
 ตรวจสอบสถานะภาพภายในระบบขณะบำบัด

ตารางที่ 1 ผลของพารามิเตอร์จากการทดลองโดย
 เฉลี่ย

HRT (วัน)	OLR (กก. สารอินทรีย์/ ม ³ -วัน)	COD _{out} (มก./ล.)	pH _{out}	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย (%)					Gas (ลิตร/วัน)	Eff. (%)
				CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ S		
4	4.8	1805	6.9	65.6	15.2	1.1	2.3	0.15	1006	84
6	3.3	1567	7	65.9	17.9	1.1	1.9	0.14	676	82

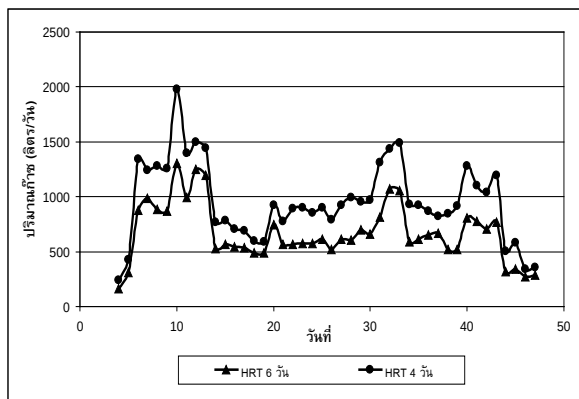
4. ผลการทดลอง และวิจารณ์

4.1 ผลการทดลอง

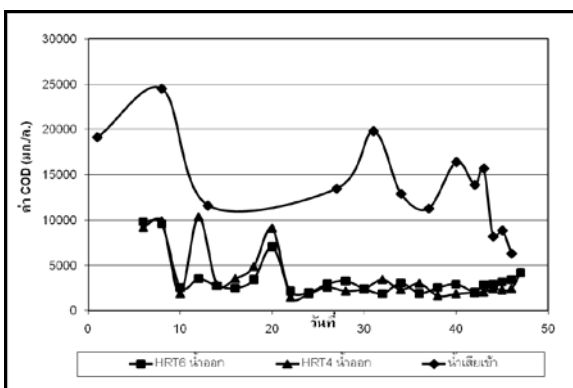
จากการทำการทดลองที่ค่า HRT 6 และ 4 วัน
 พร้อมกัน ในวันแรกผสมน้ำเสียกับเชื้อตั้งต้นอย่างละ
 ครั้ง พบว่า ใช้เวลาในการปรับตัว 4 วัน (เกิดก๊าซที่
 บ่อสำรองก๊าซเต็ม และอุณหภูมิในบ่อหมักถึง
 55 °C) จากนั้นเริ่มทำการเติมน้ำเสียในครั้งต่อไปใน
 วันที่ 5 ทำซ้ำทุกวันจนสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 47
 และระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ใช้เวลา
 22 วัน ที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี
 คงที่ จากการทดลองพบว่า ระบบหมักแบบกวน

สมบูรณ์สามารถรับภาระของสารอินทรีย์ได้มากขึ้น
 ทำให้ระยะเวลาเก็บกักลดลง จากตารางที่ 1 จะเห็น
 ว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 6 วัน สามารถรับภาระบรรทุก
 สารอินทรีย์ได้ 3.3 กก.สารอินทรีย์/ม³-วัน และที่
 ระยะเวลาเก็บกัก 4 วัน สามารถรับ ภาระบรรทุก
 สารอินทรีย์ได้มากขึ้นถึง 4.8 กก.สารอินทรีย์/ม³-วัน
 โดยจากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงแรกระบบ
 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 162 และ 243 ลิตร/วัน
 จากนั้นค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนคงที่ที่ 676 และ 1006 ลิตร/
 วัน มีสัดส่วนของ CH₄ ในก๊าซชีวภาพเท่ากับ 65.9
 และ 65.6% สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 6 และ 4
 วัน ตามลำดับ และระบบยังสามารถบำบัดน้ำเสียให้มี
 ปริมาณสารอินทรีย์ลดลง จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า
 น้ำเสียก่อนการบำบัดจะมีค่า COD อยู่ประมาณ
 19,000 มก./ล. ซึ่งในช่วงแรกระบบยังสามารถบำบัด
 น้ำเสียให้มีค่าลดลงได้ไม่มาก แต่หลังจากระบบเริ่มมี
 ความเสถียรภาพ

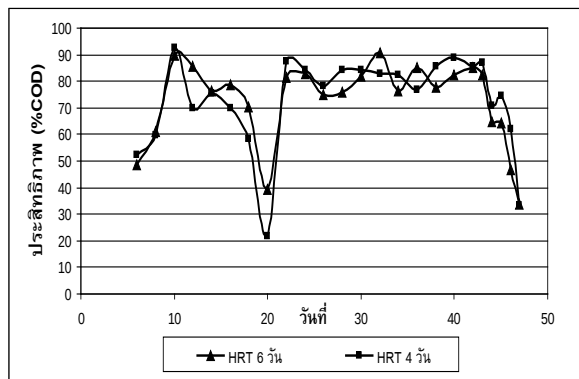
ระบบสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ลงไปได้มากจน
 ค่า COD คงที่ที่เพียง 1805 และ 1567 มก./ล.เมื่อคิด
 เป็นประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 82 และ
 84% สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 6 และ 4 วัน
 ตามลำดับ ซึ่งดูได้จากรูปที่ 7 และระบบยังมีสภาวะที่
 เหมาะสมต่อแบคทีเรียจำพวกไม่ใช้ออกซิเจนในการ
 ผลิตก๊าซชีวภาพ โดยดูจากค่า pH ของระบบโดย
 เฉลี่ยอยู่ที่ 7 และ 6.9 สำหรับการทดลองที่ค่า HRT
 6 และ 4 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของระบบในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการลดลงของค่า COD ของระบบในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในแต่ละการทดลอง

4.3 วิเคราะห์ความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์นั้น จะคิดจากการลงทุน (ต้นทุน + ค่าบำรุงรักษา + ค่าไฟฟ้า) และผลตอบแทน (ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้) จากการทดลองทั้ง 2 การทดลองนี้ พบว่า มีการใช้

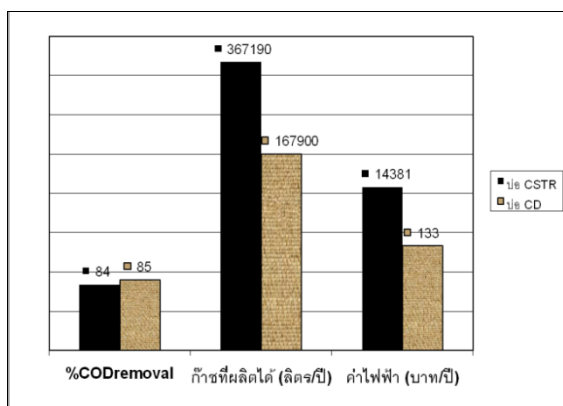
พลังงานไฟฟ้าจากการคั้นน้ำในหม้อไอน้ำ จากมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกวน จากปั๊มสูบน้ำเสียและจากปั๊มน้ำที่สูบน้ำเข้าหม้อไอน้ำ ในระยะเวลา 47 วัน ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 1410 kWh ต่อ 1 การทดลอง โดยทั้ง 2 การทดลองใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากัน โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้หลัก ๆ ในระบบคือ พลังงานจากมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกวนและพลังงานจากการคั้นน้ำด้วยหม้อไอน้ำ คิดเป็นสัดส่วนการใช้พลังงานจากการกวน ต่อ การให้ความร้อน คือ 1 : 2 ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดใน 1 การทดลอง ซึ่งระบบมีความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าจากหม้อไอน้ำจริงเพียง 50% [7] หรือ 470 kWh ต่อ 1 การทดลอง โดยอีก 50% ที่เหลือหายไปกับการเปิดหม้อไอน้ำให้ทำงานอยู่ตลอดเวลา แสดงว่าระบบต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงเพียง 940 kWh ดังนั้น ที่บ่อหมักขนาด 1 ม³ อายุการใช้งาน 20 ปี ระบบแบบ CSTR จะผลิตก๊าซชีวภาพที่ราคาดีดลด 0.075 และ 0.11 บาท สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน ตามลำดับ โดยคิดหาผลตอบแทนและความคุ้มค่าจากการขายก๊าซชีวภาพเท่ากับราคาก๊าซหุงต้ม กับการนำเอาก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มาเป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าใช้ในระบบ มีผลดังนี้

- ถ้าขายก๊าซชีวภาพที่สามารถผลิตได้เท่ากับราคาก๊าซหุงต้มในท้องตลาดที่ราคาปัจจุบัน โดยถึงขนาด 15 กิโลกรัม ราคา 280 บาท หรือ 18.7 บาท/กก. [9] คิดเป็นราคาขายก๊าซชีวภาพได้ 0.0086 บาท/ลิตร และเมื่อคำนวณหาผลตอบแทนสุทธิรายปีแล้ว จะทำให้ก๊าซที่ผลิตด้วยระบบ CSTR โดยควบคุมอุณหภูมิที่ช่วง Thermophilic จะไม่คืนทุนซึ่งขาดทุนเป็นจำนวนเงิน 13,571 และ 14,449 บาท/ปี สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน ตามลำดับ
- เมื่อคิดในกรณีที่นำเอาก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มาเป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าใช้ในระบบอย่างเพียงพอที่ปริมาณไฟฟ้า 940 kWh ต้องใช้ก๊าซชีวภาพถึง 157 ม³ ซึ่งจากการทดลองทั้งหมด 47 วัน

ระบบสามารถผลิตก๊าซได้เพียง 42 และ 29 ม³ สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน ตามลำดับหมายความว่า ระบบมีความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยกว่า ปริมาณความต้องการที่จะใช้ก๊าซชีวภาพผลิตไฟฟ้าใช้ในระบบ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบ CSTR กับระบบบ่อหมักที่นิยมใช้กันทั่วไปสำหรับบ่อหมักขนาด 1 ม³ [2]

ประเภทบ่อหมัก	HRT (วัน)	%COD removal	OLR (กก.สารอินทรีย์/ม ³ -วัน)	Gas Production (ลิตร/วัน)	ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kWh/ปี)
CSTR	4	84	4.8	1006	7300
Channel Digester	6	85	4	460	67.5



รูปที่ 8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองที่ค่า HRT 4 วัน ระหว่างระบบบ่อ CSTR กับบ่อ CD

จากข้อมูลในตารางที่ 2 นำมาแสดงเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบข้อมูลของแต่ละบ่อหมัก ได้ดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า ถึงแม้ว่าระบบบ่อหมักแบบ CSTR จะมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD และปริมาณก๊าซที่ผลิตได้มากกว่าระบบบ่อหมักแบบทั่วไป แต่ระบบหมักแบบ CSTR จำเป็นที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมากเข้ามาใช้ในระบบเพื่อช่วยในการหมักย่อย ซึ่งใช้ปริมาณไฟฟ้าถึงปีละ 1858.1 kWh คิดเป็นจำนวนเงิน 14,381 บาท/ปี แต่ระบบบ่อหมัก

รางใช้ปริมาณไฟฟ้าเพียงปีละ 67.5 kWh คิดเป็นจำนวนเงิน 133 บาท/ปี ดังนั้น เมื่อเทียบจำนวนเงินที่ต้องเสียไปกับพลังงานไฟฟ้าเพื่อ แลกกับผลผลิตหรือก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ระบบแบบ CSTR จะมีความคุ้มค่ากว่าระบบบ่อหมักแบบที่สัดส่วนก๊าซที่ผลิตได้ต่อค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่าย เท่ากับ 1 : 0.04 คือ เสียค่าไฟฟ้า 0.04 บาท ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ 1 ลิตร แต่ระบบแบบบ่อหมักแบบเสียเงินแค่เพียง

1 : 0.0008 คือ เสียค่าไฟฟ้า 0.0008 บาท ต่อ การผลิตก๊าซชีวภาพ 1 ลิตร

5. สรุป

5.1 เปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน

เมื่อคำนึงถึงความสะดวก เวลา และพื้นที่ที่จำกัด แล้ว สำหรับการนำไปใช้ในฟาร์มจริง การทดลองที่ค่า HRT 4 วัน จะมีความเหมาะสมมากกว่า การทดลองที่ค่า HRT 6 วัน เนื่องจากสามารถรับโพลิดได้มากกว่า ดังนั้นจึงสามารถลดขนาดระบบบ่อหมัก และลดระยะเวลาในการบำบัดได้เร็วขึ้น รับน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดได้เร็วและมากขึ้น ในขณะที่การทดลองที่ค่า HRT 6 วัน จะต้องมียระบบบำบัดที่ใหญ่กว่า เพื่อที่จะรองรับน้ำเสียที่เกิดขึ้น เนื่องจากสามารถรับน้ำเสียในแต่ละวันได้น้อยกว่า จึงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบมากกว่า

5.2 เปรียบเทียบระบบ CSTR กับ ระบบบ่อหมักราง

จากการทดลองพบว่า ระบบแบบ CSTR มีประสิทธิภาพและศักยภาพในการผลิตพลังงาน

ทดแทนในฟาร์มสูงกว่า แต่ก็เนื่องจากมีมูลค่าการลงทุนและค่าพลังงานไฟฟ้าสูงกว่า จึงคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์น้อยกว่า แต่สำหรับการนำไปใช้ในฟาร์มจริงระบบบ่อบำบัดจำเป็นต้องรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ให้ได้ในปริมาณมากถึงจะทำให้มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ และเพื่อเป็นการลดมลพิษต่อชุมชนในระยะเวลาที่รวดเร็ว ระบบ CSTR สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ถึง 20 กก.สารอินทรีย์/ม.³-วัน แต่ระบบบ่อบำบัดรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้เพียง 4 กก.สารอินทรีย์/ม.³-วัน ดังนั้นระบบ CSTR จึงมีความเหมาะสมมากกว่าระบบบ่อบำบัดถ้าสามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าลงทุนได้ถูกลง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทุนวิจัย และให้คำปรึกษาของผู้เชี่ยวชาญในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน. โครงการส่งเสริมเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ ปี 2551, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.thaibiogas.com/promotion/index.php?option=com_content&task=view&id=65&Itemid=43 (2 สิงหาคม 2551)
- [2] ฐานข้อมูลก๊าซชีวภาพ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2551). ผลการทำงานระบบก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://118.172.45.32/biogas/index.php>

- [3] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปี 2551. ทฤษฎีก๊าซชีวภาพ, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.erdi.or.th/knowledge3.php>
- [4] H. Hartmann and B. K. Ahring. (2005). The Future of Biogas Production, The Environmental Microbiology/Biotechnology Research Group, BioCentrum-DTU, Building 227, Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark
- [5] Moonil et al. (2001). Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic, Institute of Water Research, Vanderbilt University of USA
- [6] Khursheed et al. (2005). Anaerobic Digestion of animal waste: Effect of mode of mixing, Chemical Reaction Engineering Laboratory (CREL), Institute of Water Research, Washington University of USA
- [7] นายภานุพงศ์ ไชยคำ และคณะ (2551). ต้นแบบถังหมักย่อยแบบกวนสมบูรณ์, ปรินต์งานพิมพ์คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [8] ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเบื้องต้น (2552). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน : โครงการพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมและประชาสัมพันธ์ความรู้ด้านก๊าซชีวภาพ
- [9] Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Thailand (2008). เกี่ยวกับราคาก๊าซหุงต้ม, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.eppo.go.th/retail_LPG_prices.html (9 สิงหาคม 2552)