Engng.J.CMU.[2009] 16 (3), 74-84

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ของการใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องในสภาวะเทอร์โมฟิลิกเพื่อบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

Efficiency and Economic Analysis of Thermophilic CSTR Anaerobic Digester in Treating Swine Wastewater

นิลวรรณ ไชยทนุ[1] และ พฤกษ์ อักกะรังสี[2]

Ninlawan Chaitanoo[1] and Pruk Aggarangsi[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

[1,2]Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200, Thailand

E-mail : kunpruk@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากมูลสุกร โดยใช้กระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศในถังหมักย่อยแบบกวนต่อเนื่อง (Completely Stirred Tank Reactor) ในช่วงอุณหภูมิสูง (Thermophilic ที่ 55±2 ^{O}C) โดยทำการออกแบบและจัดสร้างระบบต้นแบบ ขนาด 1 m^3 ใช้กรรมวิธีการเติมน้ำเสียแบบครั้งคราว (Batch Feeding) เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบอุณหภูมิปกติและไม่มีการกวน ซึ่งใช้กันอยู่ทั่วไป โดยควบคุมน้ำเสียตั้งต้นให้มีสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ที่ 2% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าประมาณของน้ำเสียในฟาร์มสุกรในประเทศไทย โดยในการทดลองเปลี่ยนระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (HRT) ระหว่าง 4 ถึง 6 วัน ในขณะที่ค่าสำหรับการออกแบบระบบก๊าซชีวภาพแบบอื่น ๆ ที่มีการกวนผสม และทำงานในช่วงอุณหภูมิต่ำ (Mesophilic 25-35 ^{O}C) จำเป็นต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 6 วันสำหรับประเทศไทย จากนั้นทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ค่า COD pH VFA และสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองพบว่า ระบบใช้ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียเพียง 4 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดของเสียถึง 84% ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4.8 กก.สารอินทรีย์/ม^3-วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เฉลี่ย 1006 ลิตร/วัน โดยมีสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 65.6% ผลการทดลองสรุปได้ว่า ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนต่อเนื่องในช่วงอุณหภูมิสูงมีประสิทธิภาพในการหมักย่อยสูงกว่าระบบก๊าซชีวภาพแบบอื่น แต่หากนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรซึ่งมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำจะไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สมควรนำไปใช้กับของเสียที่มีความเข้มข้นของชีวมวลสูง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright©by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved

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 ^{O}C) to swine farms in Thailand. The experiment concerns the design and construction of a prototype single-stage 1 m^3 temperature-controlled batch-feeding CSTR digester. The waste water is controlled to contain

2% total solid (TS) which equal to an average of swing 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, VFA 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 , OLR 4.8 kg.COD/m^3-day can be the experiment digester yields maximum biogas production rate of 1006 L/day at average 65.6% Methane content. The results confirm that thermophilic CSTR reactor operate at higher efficiency compared to other available systems. Economic analysis shows that swine waste to increase biogas yield to be feasible.

1. บทนำ

ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาจำนวนสุกรในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งฟาร์มในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่จะใช้ระบบบำบัดแบบบ่อหรือบ่อหมักราง (Channel Digester) ซึ่งจะต้องใช้พื้นที่มาก การควบคุมจึงทำได้ยาก การบำบัดขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ทำให้ระบบบำบัดขาดประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพต่ำ อีกทั้งน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงจะมีการย่อยสลายได้ช้าทำให้ต้องใช้เวลานานในการหมักย่อย [1] ซึ่งบ่อหมักรางสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) ได้เพียง 4 กก.สารอินทรีย์/$ม^3$-วัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 6 วัน [2] ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพแบบถังกวนต่อเนื่อง (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR) จะก่อประโยชน์อย่างมาก ทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและการอนุรักษ์พลังงาน และในอนาคตยังสามารถรองรับของเสียที่มีความเข้มสูง ๆ (เช่น ฟาง หญ้า และของเสียอุตสาหกรรม เป็นต้น) ในปริมาณที่มากขึ้น เพื่อความคุ้มค่ากับการลงทุนต่อผลประโยชน์ที่ได้รับ เนื่องจากถังชนิดนี้สามารถรับปริมาณของเสียที่มีความเข้มข้นสูงได้มาก เพราะมีกระบวนการกวนที่ช่วยให้เชื้อจุลินทรีย์กับตะกอนสัมผัสกันอย่างทั่วถึง จึงเป็นการบำบัดของเสียที่มีความเข้มข้นสูงให้ย่อยสะลายได้ง่ายและเร็วขึ้น ซึ่งในการบำบัดนั้นทำให้เกิดก๊าซชีวภาพอีกด้วย [3] แต่ปัญหาของระบบก๊าซชีวภาพที่สำคัญอีกอย่างคือ อุณหภูมิภายในของบ่อหมักไม่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ เนื่องจากอุณหภูมิภายในบ่อหมักจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมและมีความแปรปรวนตามอุณหภูมิของสภาพอากาศภายนอก ทำให้อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายในบ่อหมักต่ำ ระยะเวลาในการหมักยาวนานขึ้น การสร้างระบบก๊าซชีวภาพจึงจำเป็นต้องออกแบบให้มีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถรองรับน้ำเสียที่เกิดขึ้นและมีเวลาอยู่ในบ่อหมักนานพอสำหรับจะเกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์ ทำให้ระบบก๊าซชีวภาพในปัจจุบันมีค่าลงทุนที่สูงมากซึ่งเป็นอุปสรรคที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพไม่แพร่หลาย

จากงานวิจัยของ Moonil et al. [5] ศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการและประสิทธิภาพของการหมักเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศชนิด CSTR ที่อุณหภูมิ mesophilic (35^{O}C) กับ thermophilic (55^{O}C) ซึ่งหาค่าความแตกต่างของปริมาณก๊าซที่ผลิตได้เมื่อแต่ละถังปฏิกรณ์มีการเติมน้ำเสียแตกต่างกัน 4 แบบ ดังนี้ 1) เติมน้ำเสียวันละ 1 ครั้ง 2) เติมน้ำเสียต่อเนื่อง 3) เติมน้ำเสียวันละ 1 ครั้ง 2 สถานะ 4) เติมวันละ 1 ครั้งแต่ไม่มีการกวน โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 35 และ 55^{O}C มีสัดส่วนของแข็ง 4%TS ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ไม่ว่าจะเติมน้ำเสียด้วยวิธีใดกับถังชนิดไหนก็ตาม การทดลองที่อุณหภูมิ 55^{O}C จะเกิดก๊าซชีวภาพมากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 35^{O}C ในทุกๆ การทดลอง นอกจากนี้ Khursheed et al. [6] ศึกษาผลของการกวนที่มีต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ในการทดลองจะใช้ถังชนิด CSTR ด้วยถังขนาด 3.7 ลิตร และใช้มูลวัวที่เป็นของเหลวผสมกับมูลวัวที่เป็นของแข็งเป็นวัตถุดิบ อัตราส่วนการผสมระหว่างมูลวัวที่เป็นของแข็งต่อมูลวัวที่เป็นของเหลว จะแบ่งออกเป็น 3 อัตราส่วนคือ 5%, 10% และ 15% ของวัตถุดิบทั้งหมด

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved

การควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองไว้ที่ 35 ^{O}C และค่า HRT 16.2 วัน เปรียบเทียบกันระหว่าง การหมักโดยไม่มีการกวน พบว่าในกรณีของการใช้มูลวัวที่มีสัดส่วนมากขึ้น 5% 10% และ 15%TS จะทำให้ผลิตก๊าซได้มากขึ้นตามลำดับ และการทดลองที่มีการกวน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าการหมักที่ไม่มีการกวนประมาณ 10–30% และผลของการกวนจะมีความสำคัญในกระบวนการหมักอย่างมากเมื่อวัตถุดิบที่ใช้ มีส่วนผสมของของแข็งในปริมาณที่มากขึ้น

จะเห็นได้ว่าทั้งการกวนและอุณหภูมิ ต่างก็เป็นปัจจัยสำคัญในการช่วยเสริมกันให้การหมักย่อยสารอินทรีย์เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบและจัดสร้างต้นแบบระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่อง ซึ่งมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการบำบัดของเสียในฟาร์มสุกร เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และรับภาระของเสียได้มากขึ้น รวมไปถึงกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถนำมาผลิตเป็นปุ๋ยที่มีคุณภาพดีเพื่อการเกษตรอีกด้วย [4] และศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนเมื่อเทียบกับผลผลิตที่ได้ ซึ่งจะใช้เป็นประโยชน์ต่อฟาร์มเลี้ยงสัตว์หรือโรงงานอุตสาหกรรมได้ในอนาคต อีกทั้งสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการประยุกต์ใช้ระบบต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

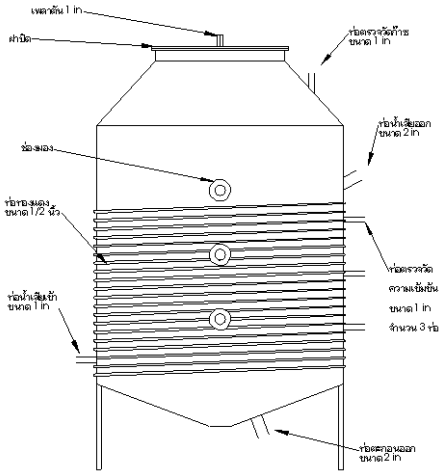
2.1 วัตถุดิบ

ในการเริ่มทำการทดลองวัตถุดิบตั้งต้น จะใช้เชื้อตั้งต้น (Seed) และน้ำเสียมูลสุกรที่ทำการผสมมูลสุกรกับน้ำที่ความเข้มข้น 2% แล้ว (มูลสุกรที่เป็นของแข็งประมาณ 20 กก.ต่อน้ำ 1000 ลิตร) ผสมกันอย่างละครึ่ง จากนั้นในทุกครั้งก่อนการเติมน้ำเสีย ทำการผสม โดยใช้ตารางชั่งในการวัดปริมาณ และทำการเก็บรักษามูลสุกรสดไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ (0 – 4^{O}C) ก่อนนำไปใช้งาน โดยการวิเคราะห์น้ำเสียตั้งต้นมีค่า COD 19149 มก./ล. pH 6.66

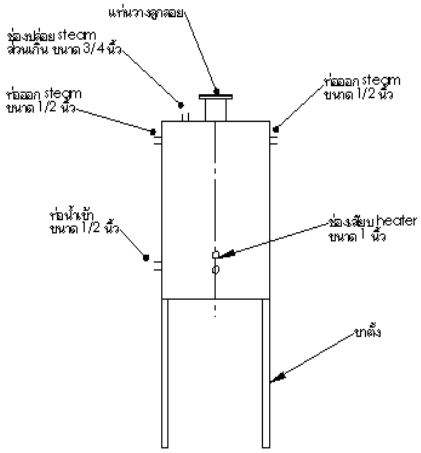
2.2 การออกแบบระบบบ่อหมัก CSTR

เครื่องต้นแบบบ่อหมักก๊าซชีวภาพแบบกวนสมบรูณ์ ขนาด 1 m^3 โดยโครงสร้างของตัวบ่อเป็นรูปทรงกระบอก สูง 1.7 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.15 เมตร ทำจาก Stainless steel304 ประกอบด้วย หอตรวจวัดปริมาณก๊าซ วาล์วระบายตะกอนออก เส้นทางป้อนวัตถุดิบเข้าสู่บ่อหมัก วาล์วระบายน้ำเสีย ช่องทางเก็บตัวอย่างตะกอน ช่องมองตะกอน ชุดกวนประกอบด้วยใบพัด (ลักษณะ Pitched-blade 45^{o} turbine มีใบพัดทั้งหมด 4 ใบ) และเพลาทำจาก Stainless steel304 ส่งกำลังด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า ผ่านชุดเฟืองทด ซึ่งมีความเร็วรอบ 96 rpm เป็นความเร็วรอบที่ดีที่สุดเมื่อวิเคราะห์จากความเข้มข้นของปริมาณตะกอนและเวลา อุณหภูมิของน้ำเสียภายในบ่อหมักมีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้งบ่อ และหม้อไอน้ำทำจาก Stainless steel304 ผลิตไอน้ำโดยใช้ Heater ไฟฟ้าขนาด 2500 W ให้ความร้อนแก่น้ำเสียโดยใช้ไอน้ำแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านท่อทองแดงขนาด 3/4 นิ้ว ที่พันรอบบ่อหมักสู่น้ำเสีย โดยทั้งตัวบ่อหมักและหม้อไอน้ำมีการหุ้มฉนวนชนิด Aeroflex ตราช้าง ขนาด 0.6 x 4 เมตร หนา 50 มิลลิเมตร รอบตัวบ่อ ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ไม่เกิน 100^{O}C เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิในบ่อ โดยที่ระบบสามารถทำความร้อนให้น้ำเสียได้ถึงอุณหภูมิ 60 ^{O}C โดยใช้เวลาเฉลี่ย 31 ชั่วโมง ระบบสามารถคงอุณหภูมิและเดินระบบต่อเนื่องได้ติดต่อกัน [7] ซึ่งลักษณะของบ่อหมักของแข็งแบบไร้ออกซิเจนชนิดถังกวนต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 1 และลักษณะของหม้อไอน้ำแสดงดังรูปที่ 2

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright©by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved



รูปที่ 1 ลักษณะของบ่อหมักของแข็งแบบไร้ออกซิเจนชนิดถังกวนต่อเนื่อง



รูปที่ 2 ลักษณะของหม้อไอน้ำ

2.3 อุปกรณ์

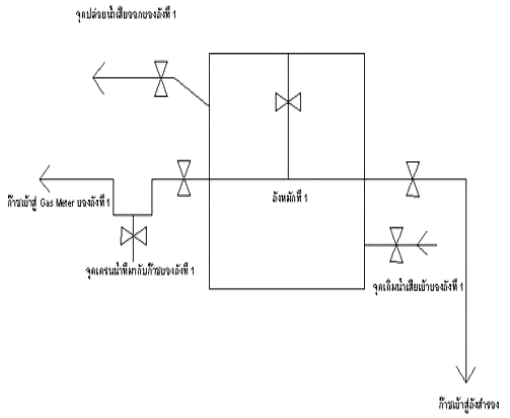
เครื่องต้นแบบบ่อหมักก๊าซชีวภาพแบบกวนต่อเนื่อง ขนาด 1 m^3 บ่อเติมน้ำเสีย บ่อสำรองก๊าซ บ่อรวมน้ำเสีย เครื่องวัดปริมาณก๊าซ ระบบท่อส่งก๊าซ ระบบทำความร้อน และระบบความคุมไฟฟ้า ซึ่งลักษณะของระบบแสดงดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 ระบบบ่อหมักของแข็งแบบไร้ออกซิเจนชนิดถังกวนต่อเนื่อง

2.4 การทำงานของระบบ

น้ำเสียที่ใช้ในการบำบัดจะถูกสูบเข้าสู่บ่อหมักทางด้านล่างของบ่อ ใบพัดที่ติดตั้งอยู่ภายในบ่อจะทำการกวนน้ำเสียที่ความเร็วรอบ 96 rpm ระบบให้ความร้อนจะทำงานโดยการนำไอน้ำจากหม้อไอน้ำผ่านไปยังท่อทองแดงซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดอยู่กับตัวบ่อ น้ำเสียจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามที่ได้กำหนดไว้ (อุณหภูมิปกติ ถึง 55 ^{O}C) เมื่ออุณหภูมิสูงตามที่ต้องการเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่อยู่ในบ่อหมัก (สาย Thermocouple Type K) จะทำงาน โดยการสั่งให้โซลินอยวาล์ว ซึ่งเป็นวาล์วปล่อยไอน้ำจากหม้อไอน้ำให้ไหลเข้าสู่ท่อทองแดงนั้น ปิดไม่ให้ไอน้ำเข้าสู่ท่อทองแดง เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ และเมื่ออุณหภูมิภายในบ่อหมักตกลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ ก็จะสั่งให้เปิดโซลินอยด์วาล์ว เพื่อนำไอน้ำเข้าสู่ท่อทองแดง เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนแก่น้ำเสีย ในขณะนั้นจะเกิดก๊าซชีวภาพขึ้นในบ่อหมัก ก๊าซที่ได้จะไหลมาตามท่อส่งก๊าซ ในตอนแรกส่วนหนึ่งจะเข้าสู่บ่อสำรองก๊าซจนเต็ม เพื่อก๊าซที่สำรองไว้จะไหลเข้ามาแทนที่น้ำเสียที่ถูกปล่อยออกทางด้านบนในบ่อหมัก ป้องกันการเกิดสภาวะสุญญากาศ เนื่องจากเป็นระบบปิด จากนั้นก๊าซจะไหลผ่านเข้าสู่เครื่องวัดปริมาณก๊าซ เพื่อวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของระบบ จากนั้นจะปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ทำเช่นนี้เป็นวัฏจักร จนครบกำหนดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved



รูปที่ 4 แสดงภาพจำลองของระบบบ่อหมักของแข็งแบบไร้ออกซิเจนชนิดถังกวนต่อเนื่อง

2.5 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ตามค่า HRT คือ 6 และ 4 วัน อัตราการป้อนน้ำเสีย 0.17 และ 0.25 m^3/day โดยมีน้ำหนักสดของมูลสุกรที่เติมในส่วนผสม 3.4 และ 5 กก. น้ำหนักสด/วัน ตามลำดับในครั้งแรก ทำการเติมน้ำเสียเข้าสู่บ่อหมัก 1 m^3 ทั้ง 2 บ่อ โดยผสมน้ำเสียกับเชื้อตั้งต้นอย่างละครึ่ง เพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยาให้กับระบบ ทำการเปิดระบบควบคุมไฟฟ้าทั้งระบบกวน และระบบความร้อน โดยเปิดทิ้งไว้ตลอดเวลา จนกว่าความร้อนในบ่อหมักทั้งสองมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงสภาวะที่ต้องการคือ 55^{O}C โดยบ่อหมักเพิ่มอุณหภูมิได้วันละ 7^{O}C จากนั้นเริ่มทำการเติมน้ำเสียวันละ 1 ครั้ง ในปริมาณของแต่ละค่า HRT ทำการเติมน้ำเสียปริมาณ 0.17 m^3/day ในบ่อหมักที่ 1 และ 0.25 m^3/day ในบ่อหมักที่ 2 โดยก่อนเติมน้ำเสียทุกครั้งจะทำการจดบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากเครื่องวัดก๊าซทั้ง 2 บ่อ ซึ่งเป็นปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นของวันก่อนหน้า และในวันถัดไปจึงเริ่มปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วของวันก่อนหน้าออก โดยทำการปิดการกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และลำเลียงน้ำเสียออกใช้เวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นจึงทำการเติมน้ำเสียเข้าสู่บ่อหมักเช่นเดิม โดยใช้เวลาอีกประมาณ 30 นาที เมื่อเติมน้ำเสียเข้าสู่บ่อหมักเสร็จจึงเปิดการกวนทำงานตามปกติ และเวลาที่เหลืออีก 21 ชั่วโมง เป็นเวลาของการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำเสียกับจุลินทรีย์ในบ่อหมัก ซึ่งใน 1 วัฏจักรของการเติมน้ำเสียแบบวันละครั้งใช้เวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง จากนั้นปฏิบัติซ้ำเช่นเดิมจนเสร็จสิ้นการทดลอง ในระหว่างการทดลองได้ทำการตรวจวัด ปริมาณก๊าซชีวภาพด้วย Gas meter ค่าซีโอดี (COD, Chemical Oxygen Demand) ด้วยวิธี Closed Reflux ค่า pH ด้วย pH meter และสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพด้วย Gas collector [8] เพื่อดูแนวโน้มของประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดของเสีย และเพื่อเป็นการตรวจสอบสถานะภาพภายในระบบขณะบำบัด

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ตารางที่ 1 ผลของพารามิเตอร์จากการทดลองโดยเฉลี่ย

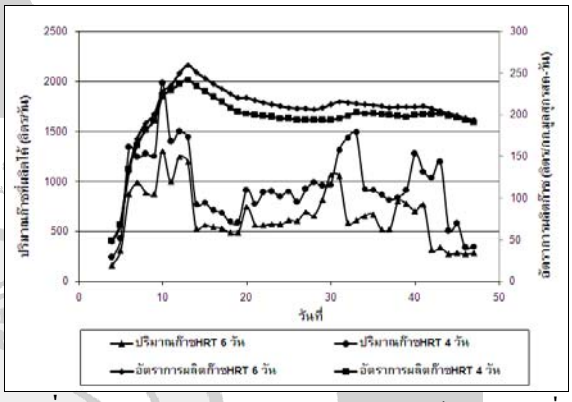
HRT (วัน)	OLR (กก./ม^3-วัน)	COD_{out} (มก./ล.)	pH_{out}	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย (%)					Gas (ลิตร/วัน)	Gas (ลิตร/กก.มูลสุกรสด-วัน)	Eff. (%)
				CH_4	CO_2	O_2	N_2	H_2S			
4	4.8	1805	6.9	65.6	15.2	1.1	2.3	0.15	1006	195	84
6	3.3	1567	7	65.9	17.9	1.1	1.9	0.14	676	206	82

Copyright©by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved

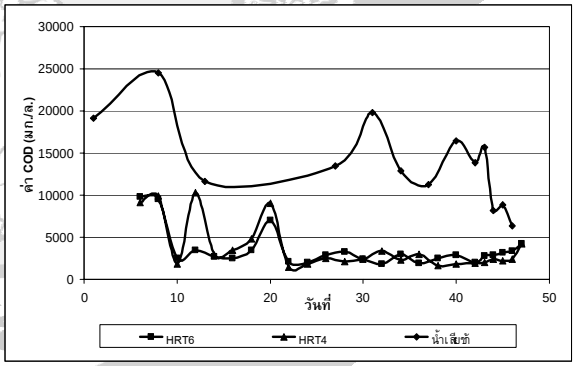
3. ผลการทดลอง และวิจารณ์

3.1 ผลการทดลอง

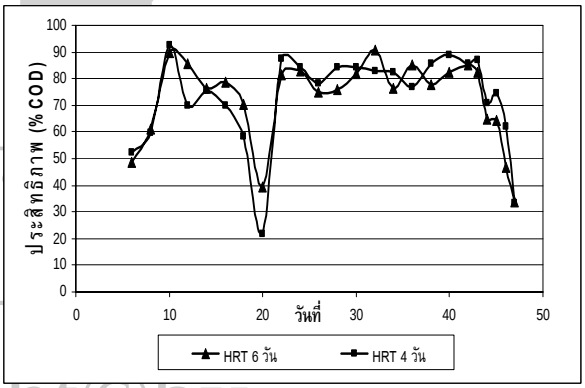
จากการทำการทดลองที่ค่า HRT 6 และ 4 วัน พร้อมกันในวันแรกผสมน้ำเสียกับเชื้อตั้งต้นอย่างละครึ่ง พบว่าใช้เวลาในการปรับตัว 4 วัน (เกิดก๊าซที่บ่อสำรองก๊าซเต็มและอุณหภูมิในบ่อหมักถึง 55^{O}C) จากนั้นเริ่มทำการเติมน้ำเสียในครั้งต่อไปในวันที่ 5 ทำซ้ำทุกวันจนสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 47 และระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ใช้เวลา 22 วัน ที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีคงที่ จากการทดลองพบว่า ระบบหมักแบบกวนสมบูรณ์สามารถรับภาระของสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ทำให้ระยะเวลาเก็บกักลดลง จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 6 วัน สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ 3.3 กก./ม^3-วัน และที่ระยะเวลาเก็บกัก 4 วัน สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้นถึง 4.8 กก./ม^3-วัน โดยจากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงแรกระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 162 และ 243 ลิตร/วัน จากนั้นค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนคงที่ที่ 676 และ 1006 ลิตร/วัน โดยมีอัตราการผลิตก๊าซเฉลี่ยเท่ากับ 206 และ 195 ลิตร/กก.มูลสุกรสด-วัน มีสัดส่วนของ CH_4 ในก๊าซชีวภาพเท่ากับ 65.9 และ 65.6% สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 6 และ 4 วัน ตามลำดับ และระบบยังสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีปริมาณสารอินทรีย์ลดลง จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า น้ำเสียก่อนการบำบัดจะมีค่า COD อยู่ประมาณ 19,000 มก./ล. ซึ่งในช่วงแรกระบบยังสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีค่าลดลงได้ไม่มาก แต่หลังจากระบบเริ่มมีความเสถียรภาพ ระบบสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ลงไปได้มากจนค่า COD คงที่ที่เพียง 1805 และ 1567 มก./ล. เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 82 และ 84% สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 6 และ 4 วัน ตามลำดับ ซึ่งดูได้จากรูปที่ 7 และระบบยังมีสภาวะที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียจำพวกไม่ใช้ออกซิเจนในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยดูจากค่า pH ของระบบโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 7 และ 6.9 สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 6 และ 4 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของระบบในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการลดลงของค่า COD ของระบบในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในแต่ละการทดลอง

3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบ CSTR กับระบบบ่อหมักที่นิยมใช้กันทั่วไป

สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบต้นแบบ CSTR กับระบบบ่อหมักที่นิยมใช้กันทั่วไป ที่ระยะเวลาเก็บกักที่ดีที่สุดของระบบนั้นๆ เพื่อใช้เป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved

ฐานข้อมูลสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลวิเคราะห์เปรียบเทียบต่อการตัดสินสำหรับผู้ที่จะก่อสร้างและลงทุนกับระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยบ่อหมักแบบ CSTR มีประสิทธิภาพในการรับวัตถุดิบได้มากที่สุด เนื่องจากมีระยะเวลาเก็บกักที่ดีที่สุด 4 วัน ซึ่งน้อยกว่าระยะเวลาเก็บกักของระบบบ่อหมักแบบอื่นๆ ทำให้สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้นกว่าบ่อหมักที่ใช้ระยะเวลาในการบำบัดมาก ซึ่งสามารถรับวัตถุดิบอื่นที่มีความหนาแน่นมากกว่ามาหมักแทนหรือหมักร่วมกันกับมูลสุกรเพียงอย่างเดียวได้ จึงสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าระบบบ่อหมักอื่น ๆ อีกทั้งยังทำให้ประหยัดพื้นที่ในการสร้างระบบผลิตก๊าซให้เล็กลงอีกด้วย ถึงแม้ระบบบ่อหมักรางจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD ได้มากกว่าเพียงเล็กน้อยที่ระยะเวลาที่ดีที่สุด 6 วันก็ตาม แต่ก็ยังมีความสามารถในการรับวัตถุดิบน้อยกว่าบ่อหมักแบบ CSTR และระยะเวลาเก็บกักที่ดีที่สุดที่ทำให้รับวัตถุดิบและเกิดก๊าซชีวภาพได้มากที่สุดรองลงมาเป็นบ่อหมักแบบ Fixed Dome และ Cover Lagoon โดยประเมินที่บ่อหมักขนาด 1 m^3 ไม่ได้คิดวิเคราะห์ความยากง่ายของระบบนั้นๆ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบ CSTR กับระบบบ่อหมักที่นิยมใช้กันทั่วไปสำหรับบ่อหมักขนาด 1 m^3 [2] [9], [10]

ประเภทบ่อหมัก	HRT (วัน)	%COD removal	OLR (กก.สารอินทรีย์/m^3-วัน)	Gas Production (ลิตร/วัน)	ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kWh/ปี)
CSTR	4	84	4.8	1006	7300
Channel Digester	6	85	4	460	67.5
Fixed Dome	8	-	2.6	260	-
Cover Lagoon	10	-	0.6	38	-

3.3 วิเคราะห์ความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์นั้น จะคิดจากการลงทุน (ต้นทุน + ค่าบำรุงรักษา + ค่าไฟฟ้า) และผลตอบแทน (ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้) จากการทดลองทั้ง 2 การทดลองนี้ พบว่า มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการต้มน้ำในหม้อไอน้ำ จากมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกวน จากปั๊มสูบน้ำเสียและจากปั๊มน้ำที่สูบเข้าหม้อไอน้ำ ในระยะเวลา 47 วัน ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 1410 kWh ต่อ 1 การทดลอง โดยทั้ง 2 การทดลองใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากัน โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้หลัก ๆ ในระบบคือ พลังงานจากมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการกวนและพลังงานจากการต้มน้ำด้วยหม้อไอน้ำ คิดเป็นสัดส่วนการใช้พลังงานจากการกวนต่อ 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 m^3 อายุการใช้งาน 20 ปี ระบบแบบ CSTR จะผลิตก๊าซชีวภาพที่ราคาลิตรละ 0.075 และ 0.11 บาท สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน ตามลำดับ โดยคิดหาผลตอบแทนและความคุ้มทุนจากการขายก๊าซชีวภาพ

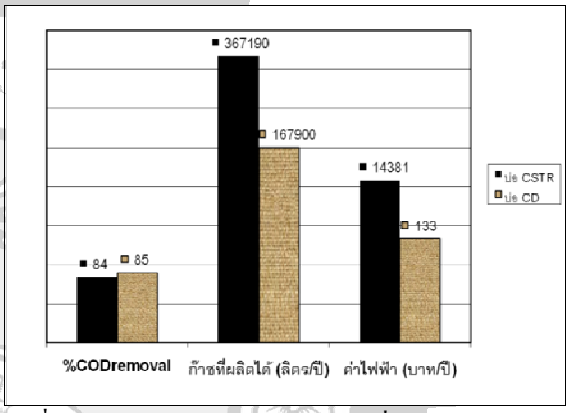
ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved

เท่ากับราคาก๊าซหุงต้ม กับ การนำเอาก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มาเป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าใช้ในระบบ มีผลดังนี้

- ถ้าขายก๊าซชีวภาพที่สามารถผลิตได้เท่ากับราคาก๊าซหุงต้มในท้องตลาดที่ราคาปัจจุบัน โดยถังขนาด 15 กิโลกรัม ราคา 280 บาท หรือ 18.7 บาท/กก. [11] 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 m^3 ซึ่งจากการทดลองทั้งหมด 47 วัน ระบบสามารถผลิตก๊าซได้เพียง 42 และ 29 m^3 สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน ตามลำดับ หมายความว่า ระบบมีความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยกว่า ปริมาณความต้องการที่จะใช้ก๊าซชีวภาพผลิตไฟฟ้าใช้ในระบบ

และจากข้อมูลในตารางที่ 2 นำมาแสดงเป็นกราฟแท่งเปรียบเทียบข้อมูลของแต่ละบ่อหมัก ได้ดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า ถึงแม้ว่าระบบบ่อหมักแบบ CSTR จะมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD และปริมาณก๊าซที่ผลิตได้มากกว่าระบบบ่อหมักรางแบบทั่วไป แต่ระบบหมักแบบ CSTR จำเป็นที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมากเข้ามาใช้ในระบบเพื่อช่วยในการหมักย่อย ซึ่งใช้ปริมาณไฟฟ้าถึงปีละ 1858.1 kWh คิดเป็นจำนวนเงิน 14,381 บาท/ปี แต่ระบบบ่อหมักรางใช้ปริมาณไฟฟ้าเพียงปีละ 67.5 kWh คิดเป็นจำนวนเงิน 133 บาท/ปี ดังนั้น เมื่อเทียบจำนวนเงินที่ต้องเสียไปกับพลังงานไฟฟ้าเพื่อแรกกับผลผลิตหรือก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ระบบแบบ CSTR จะมีความคุ้มค่าน้อยกว่าระบบบ่อหมักราง ที่สัดส่วนก๊าซที่ผลิตได้ต่อค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่าย เท่ากับ 1 : 0.04 คือ เสียค่าไฟฟ้า 0.04 บาท ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ 1 ลิตร แต่ระบบแบบบ่อหมักรางเสียเงินแค่เพียง 1 : 0.0008 คือ เสียค่าไฟฟ้า 0.0008 บาท ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ 1 ลิตร



รูปที่ 8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองที่ค่า HRT 4 วัน ระหว่างระบบบ่อ CSTR กับบ่อ CD

3.4 แนวทางปรับปรุงเพื่อความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

จากผลการทดลองทั้งหมด จะเห็นได้ว่าผลผลิตที่ได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยบ่อหมักแบบ CSTR ที่ควบคุมอุณหภูมิในช่วง Thermophillic (55^OC) ขนาด 1 m^3 จะไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่จะเสียไปกับค่าไฟฟ้า อาจเป็นเพราะระบบนี้เป็นขนาดทดลองมีขนาดเล็ก ซึ่งทำให้มีความสามารถในการเก็บความร้อนได้น้อยกว่าจึงคายความร้อนเร็วกว่าระบบใหญ่ ซึ่งถ้าหากนำระบบนี้ไปใช้งานจริงโดยมีการขยายขนาดระบบ ระบบขนาดใหญ่อาจมีความสามารถในการเก็บความร้อนได้ดีกว่า เพราะฉะนั้นจึงทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าในการต้มน้ำที่หม้อไอน้ำได้มากกว่าก็เป็นได้ และอาจมีการปรับเปลี่ยนวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักย่อยของเสียในการเกิดก๊าซชีวภาพนั้น จากมูลสุกรที่มีความหนาแน่นน้อยเปลี่ยนเป็นวัตถุดิบอื่นที่มีความหนาแน่นสูงกว่า หรือมีค่า COD ที่สูงกว่า เพื่อทำให้เกิดก๊าซชีวภาพที่มากกว่าเดิม เช่น ขยะอินทรีย์ เศษอาหาร หรือขยะของเสียที่เกิดจากโรงงานเกษตรหรืออุตสาหกรรม และเศษวัชพืชที่เหลือใช้ทางการเกษตรในบริเวณใกล้เคียงฟาร์มสุกร เพื่อเป็นสารอินทรีย์ในการหมักย่อย [12] อาจจะทำให้ระบบนี้มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากระบบแบบ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved

CSTR สามารถรับปริมาณ TS ได้ถึง 20%TS และปริมาณ OLR ได้ถึง 20 กก.COD/ม.^{3}-วัน [7] โดยตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมามีผลการศึกษาดังนี้

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [12] ได้ทำการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากของเสียร่วมกับน้ำเสียฟาร์มสุกร พบว่าของเสียทั้ง 5 ชนิด มีศักยภาพในการเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับน้ำเสียฟาร์มสุกร ได้แก่ เศษอาหารที่อัตราส่วน 60 : 40%VS กลีเซอรีนที่อัตราส่วน 5 : 95%VS หญ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วน 30 : 40 %VS ฟางข้าวที่อัตราส่วน 60 : 40 %VS และต้นข้าวโพดที่อัตราส่วน 60 : 50 %VS ซึ่งมีค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักย่อยเฉพาะน้ำเสียฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียว คือ 0.605 0.530 0.589 0.527 และ 0.477 m^3 CH_4 kg^{-1} VS_{added} ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 5 - 25% เทียบกับค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียฟาร์มสุกรที่อัตราส่วน 100 %VS เท่ากับ 0.452 m^3 CH_4 kg^{-1} VS_{added}

Lindorfer et al. [13] ได้ทำการศึกษาในโรงงานที่ทำการหมักย่อยระหว่างมูลสัตว์ (Manure) กับพืชการเกษตร (Energy Crop) พบว่าการหมักย่อยร่วมดังกล่าวสามารถเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากขึ้นถึงหนึ่งเท่าตัว ส่งผลให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากเดิม 500 kW เป็น 1,000 kW โดยใช้ถังหมักย่อยเดิม

Forster et al. [14] ได้ทำการศึกษาผลของการหมักย่อยร่วมแบบต่อเนื่อง โดยทำการศึกษาการหมักย่อยร่วมระหว่างตะกอนปศุสัตว์ (cattle slurry) กับเศษพืชผักและผลไม้ และผสมกับมูลไก่ ซึ่งผลของงานวิจัยพบว่าการหมักย่อยร่วมในอัตราส่วนผสมของเศษผักผลไม้ 50% มีการเกิดการย่อยสลายร่วมในรูปแบบมีเทนยิลด์ได้ดีและการหมักร่วมระหว่างตะกอนปศุสัตว์กับมูลไก่ พบว่าไม่ประสบผลสำเร็จซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกทำให้ค่ามีเทนยิลด์ลดลง

Prasad et al. [15] ได้ศึกษาการกวนตะกอนในการหมักมูลสัตว์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพของการกวนตะกอนแบบต่อเนื่อง แบบ intermittent (กวน 2 ชั่วโมง หยุด 2 ชั่วโมง) และ minimal (กวน 10 นาที หยุด 10 นาที) พบว่าการกวนตะกอนทั้ง 3 วิธี สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากกว่าการหมักที่ไม่มีการกวนตะกอน โดยการกวนตะกอนแบบ intermittent ให้ก๊าซมีเทนมากกว่าการกวนแบบต่อเนื่อง 1.3% และการกวนตะกอนแบบ minimal ให้ก๊าซมีเทนมากกว่าการกวนแบบต่อเนื่อง 12.5%

จากงานวิจัยข้างต้น แสดงให้เห็นว่าผลของการกวนในระบบ และการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ส่งผลต่อความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพมาก โดยการกวนตะกอนแบบ minimal ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุด ดังนั้นแนวทางปรับปรุงเพื่อให้คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มากที่สุด จะทำการคิดที่ระบบมีการกวนตะกอนแบบ minimal (กวน 10 นาที หยุด 10 นาที) จากนั้นจึงจะคิดหาปริมาณของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่น้อยที่สุด ที่จะทำให้มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

3.5 วิเคราะห์ความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์จากแนวทางปรับปรุง

เมื่อนำมาวิเคราะห์หาราคาผลิตก๊าซชีวภาพอีกครั้ง โดยคิดจากวิธีที่ดีที่สุดจากการทดลองของ Prasad et al. (2007) คือทำการกวนแบบ minimal (กวน 10 นาที หยุด 10 นาที) พบว่า ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในส่วนของระบบกวนตะกอน โดยคำนวณจากกำลังมอเตอร์และเวลาเปิดใช้งานคือ 257 kWh ซึ่งจากเดิมทำการกวนต่อเนื่องวันละ 22 hr. ใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 470 kWh ทำให้ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในระบบทั้งหมดลดลงเหลือเพียง 683 kWh ดังนั้น ที่ระบบบ่อหมักขนาด 1 m^3 อายุการใช้งาน 20 ปี จะใช้ต้นทุนในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ราคาลิตรละ 0.06 และ 0.09 บาท เมื่อหาผลตอบแทนสุทธิ โดยการขายก๊าซชีวภาพเท่ากับราคาก๊าซหุงต้มเช่นเดิม ทำให้ทราบว่ายังขาดทุนเป็นจำนวนเงิน 9,639 และ 10,518 บาท/ปี สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลของการลดปริมาณ

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved

การใช้ไฟฟ้าจากการกวนมีผลต่อการลดต้นทุนผลิตก๊าซชีวภาพและเพิ่มผลตอบแทนสุทธิน้อยมาก

หากทำการเพิ่มปริมาณอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ให้มากขึ้นแต่ไม่ให้เกินค่าที่ระบบแบบ CSTR ปกติ (ไม่มีการให้ความร้อน) ยอมรับได้คือ 20 กก.COD/ม.^{3}-วัน เพื่อให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เพิ่มขึ้น โดยจากเดิมที่ได้ทำการทดลองไว้ คือ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4.8 กก.COD/ม.^{3}-วัน สามารถผลิตก๊าซได้ 1006 ลิตร/วัน และที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3.4 กก.COD/ม.^{3}-วัน สามารถผลิตก๊าซได้ 676 ลิตร/วัน สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน ตามลำดับ จากการคำนวณด้วยวิธี trial and error ทำให้ทราบว่าเพื่อที่จะให้เกิดความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์แล้ว ต้องใช้ปริมาณอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์อย่างน้อยที่สุดคือ 31 และ 33 กก.COD/ม.^{3}-วัน สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน ที่จะทำให้เกิดก๊าซชีวภาพได้มากพอคือรายรับมากพอที่จะหักกับค่าใช้จ่ายได้พอดีหรือเท่าทุนพอดี ซึ่งคิดจากการขายก๊าซชีวภาพเท่ากับราคาก๊าซหุงต้มเช่นเดิมที่ราคา 0.0086 บาท/ลิตร แต่ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จากการคำนวณดังกล่าวมีค่าเกินมาตรฐานที่ระบบแบบ CSTR ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบ CSTR โดยมีการควบคุมอุณหภูมิช่วง Thermophilic นี้ จะไม่มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งไม่เหมาะสมในบ่อหมักขนาด 1 m^3 แต่อาจจะเหมาะสมในขนาดบ่อหมักที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากผลิตก๊าซได้มากขึ้นก็เป็นได้

4. สรุป

4.1 เปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน

4.1.1 ด้านศักยภาพพลังงาน

ถ้าคำนึงถึงปริมาณพลังงานที่ได้ต่อโหลดที่เข้าสู่ระบบในปริมาณที่เท่ากัน การทดลองที่ค่า HRT 6 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย 85% ซึ่งมากกว่าการทดลองที่ค่า HRT 4 วัน ทำได้น้อยกว่าเล็กน้อยที่ 84% และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพต่อมูลสุกร 1 กก. ได้ถึง 206 และ 195 ลิตร/กก.มูลสุกรสด สำหรับการทดลองที่ค่า HRT 4 และ 6 วัน ตามลำดับ เนื่องจากมูลสุกรที่เติมลงไปมีปริมาณน้อยกว่า และในกระบวนการหมักมีระยะเวลานานมากพอที่ทำให้เชื้อแบคทีเรียสัมผัสกับมูลสุกรได้ทั่วถึงมากกว่าการทดลองที่ค่าระยะเวลาเก็บกักน้อย ๆ

4.1.2 ด้านความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

ถ้าคำนึงถึงความสะดวก เวลา และพื้นที่ที่จำกัดสำหรับการนำไปใช้ในฟาร์มจริง การทดลองที่ค่า HRT 4 วัน จะมีความเหมาะสมมากกว่าการทดลองที่ค่า HRT 6 วัน เนื่องจากสามารถรับโหลดได้มากกว่า ดังนั้น จึงสามารถลดขนาดระบบบ่อหมัก และลดระยะเวลาในการบำบัดได้เร็วขึ้น รับน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดได้เร็วและมากขึ้น ในขณะที่การทดลองที่ค่า HRT 6 วัน จะต้องมีระบบบำบัดที่ใหญ่กว่า เพื่อที่จะรองรับน้ำเสียที่เกิดขึ้น เนื่องจากสามารถรับน้ำเสียในแต่ละวันได้น้อยกว่า จึงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบมากกว่า

4.2 เปรียบเทียบระบบ CSTR กับ ระบบบ่อหมักราง

จากการทดลองพบว่า ระบบแบบ CSTR มีประสิทธิภาพและศักยภาพในการผลิตพลังงานทดแทนในฟาร์มสูงกว่า แต่ก็เนื่องจากมีมูลค่าการลงทุนและค่าพลังงานไฟฟ้าสูงกว่า จึงคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์น้อยกว่า แต่สำหรับการนำไปใช้ในฟาร์มจริงระบบบ่อบำบัดจำเป็นต้องรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ให้ได้ในปริมาณมากถึงจะทำให้มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ และเพื่อเป็นการลดมลพิษต่อชุมชนในระยะเวลาที่รวดเร็ว ระบบ CSTR สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ถึง 20 กก.COD/ม.^{3}-วัน แต่ระบบบ่อหมักรางรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้เพียง 4 กก.COD/ม.^{3}-วัน ดังนั้น ระบบ CSTR จึงมีความเหมาะสมมากกว่าระบบบ่อหมักรางถ้าสามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าลงทุนได้ถูกลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Faculty of Engineering Chiang Mai University All Rights Reserved

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ ทุนวิจัย และให้คำปรึกษาของผู้เชี่ยวชาญในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

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] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 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, Department of Civil & Environmental Engineering, Vanderbilt University of USA

[6] Khursheed et al. (2005). Anaerobic Digestion of animal waste: Effect of mode of mixing, Chemical Reaction Engineering Laboratory (CREL), Department of Chemical Engineering, Washington University, St. Loui

[7] นายภานุพงศ์ ไชยคำ และคณะ (2551). *ต้นแบบถังหมักย่อยแบบกวนสมบูรณ์*, ปริญญานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[8] ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเบื้องต้น (2552). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน : โครงการพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมและประชาสัมพันธ์ความรู้ด้านก๊าซชีวภาพ

[9] โครงการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ขนาดเล็ก (2552). ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีสำหรับฟาร์มขนาดเล็ก, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.erdi.or.th/biogas/index.php?p=smallfarm2 (20 สิงหาคม 2552)

[10] แผ่นดินทอง (2552). บทวิเคราะห์เปลี่ยนมูลหมูเป็นกระแสไฟฟ้าขอบ่อหมักแบบ Cover Lagoon, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.pandintong.com/ViewContent.php?ContentID=671 (20 สิงหาคม 2552)

[11] 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)

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved

[12] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน (สวพ.) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2552). โครงการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในรูปแบบการหมักย่อยร่วมโดยถังปฏิกรณ์ UASB และ CSTR เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ.

[13] Lindorfer et al. (2007). “The impact of increasing energy crop addition on process performance and residual methane potential in anaerobic digestion”. Institute of Water Science & Technology, Technical University of Denmark.

[14] Forster et al. (2002). “Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure”. Institute of Biomass and Bioenergy, School of Civil Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, UK

[15] Prasad et al. (2007). “Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies”. Institute of Environment and Resources, Technical University of Denmark.

ลิขสิทธิ์คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright©by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Rights Reserved