ประสิทธิภาพของบ่อหมักก๊าซชีวภาพแบบ Hybrid Covered Lagoon ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขุน

The efficiency of Hybrid Covered lagoon biogas digester in wasted water treatment of fattening pig farm

ชิตพล คงศิลา[1], วีระพล แก้วก่า[1] และ ธีระกุล นิลนนท์[2,*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
[2]สาขาวิชาเทคนิคการสัตวแพทย์และการพยาบาลสัตว์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
Chittapol Kongsila[1], Weerapol Kaewka[1] and Theerakul Nilnont[2,*]
[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University.
[2]Department of Veterinary Technology and Veterinary Nursing, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University.

(Received: June 1, 2022; Revised: October 3, 2022; Accepted: October 3, 2022)

*ผู้ประสานงาน : ธีระกุล นิลนนท์ อีเมล์: theerakul_nil@yahoo.com

บทคัดย่อ

การผลิตสุกรโดยเฉพาะสุกรขุนมีความสำคัญทั้งในด้านการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นพื้นที่ที่มีการเลี้ยงสุกรหนาแน่น มีจำนวนสุกรประมาณ 2,472,365 ตัว และมีจำนวนเกษตรกรผู้เลี้ยงสุกร ประมาณ 76,928 ราย น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมการผลิตสุกรขุนถือว่าเป็นปัญหาทางด้านมลพิษทางกลิ่นและเชื้อก่อโรคต่างๆ ซึ่งกรมควบคุมมลพิษมีการควบคุมเกณฑ์มาตรฐานของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีเพื่อการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาปรับใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสียและการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นพลังงานสะอาด สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้เป็นอย่างดี วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon เพื่อบำบัดน้ำทิ้งจากกิจกรรมการผลิตสุกรขุนเพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงในฟาร์มในอนาคต โดยทำการศึกษาและเก็บข้อมูลในฟาร์มสุกรขุนในพื้นที่ อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา เพื่อออกแบบและติดตั้งระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบ่อบำบัดเพื่อทดสอบหาค่า BOD และ COD ผลการศึกษาพบว่า ระบบบ่อบำบัด Hybrid Covered Lagoon สามารถรองรับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขุนได้ประมาณ 700 ลบ.ม./วัน เมื่อวัดด้วย Mass flow meter และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 240 ลบ.ม./วัน น้ำที่ผ่านการบำบัดจาก

ระบบนี้เป็นน้ำที่มีค่า BOD เท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานและบ่งชี้ถึงความสะอาดของน้ำ และมีค่า COD เท่ากับ 725 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีระดับที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 2 เท่าและไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณสารอินทรีย์ในระบบที่มากเกินไป

คำสำคัญ: ระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon การบำบัดน้ำเสีย ก๊าซชีวภาพ ฟาร์มสุกรขุน

ABSTRACT

Swine production, especially fattening pig, is importance for domestic consumer and pork product export. The density of swine production in North eastern part of Thailand is high with the number 2,472,365 of pigs and 76,928 of farms. Wasted water from swine production activities such as pen cleaning is water pollution problem with bad odor and highly infectious pathogens. Pollution control department of Thailand has set up and controlled the standard level of wasted water form swine production. Nowadays, wasted water treatment technologies were applied for solved problem and produced biogas. The objectives of this study were to improve wasted water treatment and produce biogas by design and set up the Hybrid Covered lagoon biogas digester system. Data and water samples collection was obtained from fattening pig farm in Huai Thalaeng district, Nakhon Ratchasima province. Water samples were analyzed for BOD and COD in order to assess the water quality using the waste water standard value described by Pollution Control Department. The results indicated the capacity of the Hybrid Covered lagoon biogas digester system was about 700 cubic meters per day and could produce biogas 240 cubic meters per day by using mass flow meter. BOD of water sample after treatment was 60 milligram per liter which pass the standard level and indicated good water quality, however COD of 725 milligram per liter was not passed with 2 times over the standard level which indicated high level of organic matter in water.

Keywords: Hybrid Covered Lagoon, wasted water treatment, biogas, fattening pig farm

1. บทนำ

การเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างมาก โดยเฉพาะสุกรเป็นสัตว์ที่นิยมเลี้ยงเพื่อบริโภคภายในประเทศและเป็นสินค้าปศุสัตว์ส่งออกที่สำคัญ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นพื้นที่ที่มีการเลี้ยงสุกรหนาแน่น โดยมีจำนวนสุกรประมาณ 2,472,365 ตัว และมีจำนวนเกษตรกรผู้เลี้ยงสุกร ประมาณ 76,928 ราย โดยจังหวัดนครราชสีมา เป็นจังหวัดที่มีการเลี้ยงสุกรมากที่สุด มีจำนวนสุกรประมาณ 358,042 ตัว และมีเกษตรกรผู้เลี้ยงสุกรกว่า 8,000 ราย [3] ระบบการเลี้ยงสุกรมีมูลสุกรที่ต้องทิ้งในแต่ละวันปริมาณมากและส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในชุมชน เช่น แมลงวัน กลิ่นเหม็น น้ำเน่าเสีย ซึ่งเป็นเหตุให้ในแต่ละฟาร์มต้องมีการจัดการเกี่ยวกับมูลสุกร น้ำเสีย กลิ่น ไม่ให้ไปรบกวนชุมชนรอบข้าง ทั้งนี้การเลี้ยงสุกรโดยทั่วไปยังประกอบด้วยกระบวนการจัดการต่างๆ ทั้งด้านพ่อแม่พันธุ์ อาหาร โรงเรือน รวมถึงการสุขาภิบาลต้องดี เพื่อให้สัตว์อยู่อย่างสบาย ปลอดภัยจากเชื้อโรคต่างๆ การทำคอกให้สะอาดและการจัดการของเสียเป็นสิ่งสำคัญ โดยของเสียหลักที่เกิดจากฟาร์มสุกร แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นมูลสุกรและเศษอาหารที่ตกค้างในคอก อีกส่วนหนึ่งเกิดจากการล้างคอกด้วยน้ำ และปัสสาวะสุกรซึ่งจะกลายเป็นน้ำเสีย สามารถแบ่งกลุ่มฟาร์มสุกรเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ฟาร์มขนาดใหญ่ (เทียบเท่าจำนวนสุกรมากกว่า 5,000 ตัว หรือมากกว่า 600 หน่วยปศุสัตว์; LU) ฟาร์มขนาดกลาง (เทียบเท่าจำนวนสุกร 500-5,000 ตัว หรือ 60-600 หน่วยปศุสัตว์; LU) และฟาร์มขนาดเล็ก (เทียบเท่าจำนวนสุกร 50-500 ตัว หรือ 6-60 หน่วยปศุสัตว์; LU) โดยกิจกรรมการเลี้ยงสุกรขุนก่อให้เกิดน้ำเสียโดยวัดเป็นค่าความสกปรกของน้ำเสีย ซึ่งกรมควบคุมมลพิษกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ได้แก่ ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) มีค่า ≤ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์เพื่อสลายสารอินทรีย์ด้วยสารเคมี (Chemical Oxygen Demand; COD) มีค่า ≤ 350 มิลลิกรัมต่อลิตร [2] ในปัจจุบัน มีระบบที่ใช้ในการจัดการของเสียให้มีประสิทธิภาพและได้ผลตอบแทนที่ดีจากการจัดการของเสีย คือระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยหลักการทำงานของระบบจะอาศัยกระบวนการในการหมักและย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ซึ่งมีกระบวนการคือ ของเสียจากสุกร เช่น มูลและน้ำเสียจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์และย่อยให้เล็กลงจนกลายเป็นก๊าซชีวภาพ โดยเชื้อแบคทีเรีย ก๊าซชีวภาพที่ผลิตออกมาจะมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ก๊าซมีเทน (methane; CH_4) ประมาณร้อยละ 60-70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide; CO_2) ร้อยละ 30-50 และก๊าซอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย (ammonia; NH_3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide; H_2S) และไอน้ำ [5] อย่างไรก็ตาม ด้วยสภาพการเลี้ยงสุกรของฟาร์มสุกรขุนของเกษตรกรในพื้นที่ ซึ่งส่วนใหญ่มีบ่อรับน้ำเสียจากฟาร์มเป็นแบบบ่อดิน จำนวน 1 บ่อ ที่ไม่มีการคลุมบ่อด้วยวัสดุคลุมบ่อ (รูปที่ 1) ทำให้เกิดมลภาวะทางด้านกลิ่น เกิดปัญหาด้านแมลงรบกวน รวมทั้งเกิดปัญหาด้าน

การรั่วไหลของน้ำทิ้งจากฟาร์มที่ยังไม่ผ่านการบำบัดในบ่อ ส่งผลให้ฟาร์มไม่ผ่านมาตรฐานฟาร์มของกรมปศุสัตว์ และมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มปศุสัตว์

รูปที่ 1 แสดงลักษณะและสภาพของบ่อรับน้ำเสียแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นบ่อดิน 1 บ่อ ที่ไม่มีการคลุมบ่อ

ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบบ่อหมักก๊าซชีวภาพและบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon จำนวน 1 ระบบ ที่มีขนาดความจุบ่อตกตะกอน (บ่อที่ 1) 300 ลูกบาศก์เมตร และขนาดความจุบ่อหมัก covered lagoon (บ่อที่ 2) 400 ลูกบาศก์เมตร ทดแทนบ่อดินที่ไม่มีการคุลมบ่อแบบเดิมที่เป็นมลพิษทางกลิ่นและไม่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ และ เพื่อการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขุนด้วยระบบบ่อบำบัดแบบ Hybrid Covered Lagoon ที่มีคุณภาพน้ำทิ้งตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยมีค่า BOD ≤ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) และมีค่า COD ≤ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในฟาร์มสุกร

การผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะแยกตามแหล่งที่มาของน้ำเสีย ได้แก่ ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ (Farm/manure waste) ของเสียจากอุตสาหกรรม (Industrial waste) และ ขยะมูลฝอยและครัวเรือน (Municipal Solid Waste, MSW/Household) ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจะใช้กระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic process) ภายในบ่อหมัก โดย

เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์โดยเฉพาะในฟาร์มสุกร และน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม ในปัจจุบันถือได้ว่ามีความแพร่หลาย เนื่องจากสามารถได้ประโยชน์ถึงสองทาง คือ การบำบัดน้ำเสีย และการผลิตก๊าซชีวภาพ [5]

ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ในอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์ที่ใช้ในประเทศไทยที่นิยมมี 7 ระบบ ได้แก่ 1) ระบบฝาครอบแช่ในบ่อมูล (Floating drum digester) 2) ระบบฝาครอบแช่ในน้ำ (Separate Floating drum digester) 3) บ่อหมักแบบโดมคงที่ (Fixed dome digester) 4) บ่อ UASB : Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket 5) บ่อแบบ H-UASB (High suspension solid-Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket) 6) บ่อหมักแบบราง (Plug Flow digester) และ 7) บ่อแบบ Covered lagoon [3] ระบบ Covered Anaerobic Lagoon Digester หรือระบบ covered lagoon คือ ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพชนิดหนึ่งที่อาศัยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจน หรือที่เรียกว่า Anaerobic Bacteria ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะไร้อากาศจากโครงสร้างบ่อระบบปิด ซึ่งคลุมด้วยแผ่นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น และกันน้ำ เพื่อทำหน้าที่สร้างภาวะไร้อากาศและช่วยกักเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรีย จุดเด่นของระบบนี้ คือ ราคาติดตั้งและบำรุงรักษาถูก ไม่ซับซ้อน โดยระบบนี้สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ทั้ง 3 ด้าน คือ ด้านกายภาพ ชีวภาพ และเคมี กล่าวคือ ช่วยลดความขุ่น, กลิ่น, สี, ลดค่า BOD และ COD นอกจากนี้ยังได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (CH_4), ก๊าซคาร์บอนไดอ็อกไซด์ (CO_2), ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), ก๊าซแอมโมเนีย (NH_4) และไอน้ำ (H_2O) ฯลฯ ซึ่งก๊าซชีวภาพนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงานได้ เมื่อทำการกรองก๊าซที่ไม่ต้องการออกไป [13]

ส่วนระบบ Hybrid Covered Lagoon เป็นระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ covered lagoon รูปแบบหนึ่งเช่นกัน โดยมีการพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้ครั้งแรกในโครงการ Methane Capture and Combustion from Swine Manure Treatment Facilities, Bulan Island, Indonesia หรือโครงการกำจัดก๊าซเรือนกระจกจากระบบบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ณ เกาะ Pulau Bulan ประเทศอินโดนีเซีย ตั้งแต่ พ.ศ.2551 ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราขั้นต่ำโดยเฉลี่ยที่มากกว่า 40,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จากการวัดและบันทึกค่าด้วย Mass Flow Meter ที่เชื่อถือได้ในความแม่นยำและถูกต้อง ส่งผลให้ระบบดังกล่าวได้รับความสนใจ และใช้เป็นต้นแบบสำหรับกิจการฟาร์มสุกรในประเทศอื่นๆ ทั้งนี้ประเทศไทย มีการนำระบบ Hybrid Covered Lagoon มาเผยแพร่ครั้งแรก เมื่อต้นปี พ.ศ.2554 สามารถแก้ปัญหาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในฟาร์มสุกรแบบเดิม ได้แก่ 1) ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพที่ไม่คงที่ ซึ่งปริมาณก๊าซจะค่อยๆ ลดลงตามปริมาณตะกอนที่สะสมภายในบ่อหมักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง 2) ปัญหาตะกอนที่ตกค้างในระบบและมีขั้นตอนการจัดการตะกอนที่ยุ่งยาก

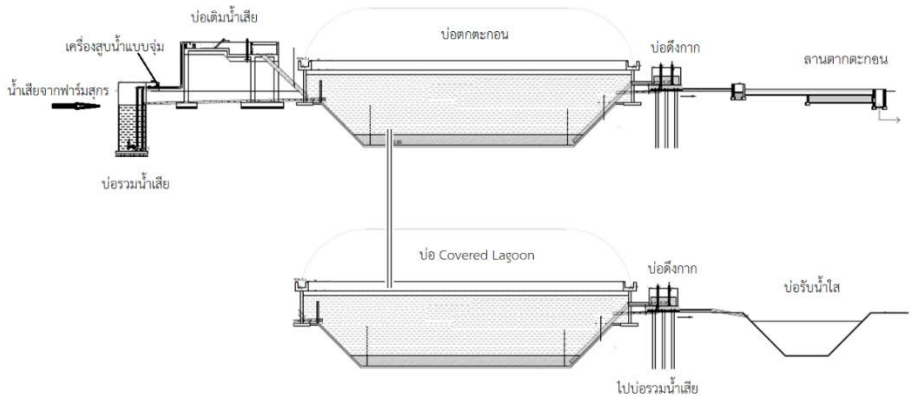
ส่งผลให้มีความเสียหายของบ่อก๊าซอย่างต่อเนื่องจากการเปิดผ้าคลุมบ่อเพื่อลอกตะกอนที่เต็มบ่อ 3) ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพบางระบบใช้เวลาในการก่อสร้างที่ยาวนาน เนื่องจากการมีโครงสร้างที่ซับซ้อน และไม่สอดคล้องกับความชำนาญของช่างก่อสร้างในท้องถิ่น และมีขั้นตอนการเดินระบบที่ยุ่งยาก ต้องใช้แรงงานที่มีทักษะในการดูแลระบบ 4) มีการใช้พื้นที่เพื่อทำระบบบำบัดน้ำขั้นสุดท้ายที่ค่อนข้างมาก 5) มีการใช้เงินลงทุนในการก่อสร้างที่ค่อนข้างสูง และ 6) ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากตะกอนได้ เนื่องจากตะกอนตกค้างอยู่ในบ่อที่ปิด และไร้ระบบชักกากที่มีประสิทธิภาพ [6]

2.2 แนวคิดการพัฒนาและปรับปรุงระบบบ่อหมักก๊าซชีวภาพแบบ Hybrid Covered lagoon

จากสภาพของบ่อดินแบบ covered lagoon แบบเดิม ที่มีอายุการใช้งานค่อนข้างนาน ทำให้ให้บ่อดินมีความตื้นเขินและชำรุดจากการสะสมของตะกอนที่ก้นบ่อเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการกักเก็บก๊าซชีวภาพในบ่อต่ำ รวมทั้งน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดออกจากบ่อตกตะกอนเบา มีคุณภาพไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ทั้งนี้การพัฒนาและปรับปรุงบ่อหมักก๊าซชีวภาพและระบบบำบัดน้ำเสีย ควรมีคุณลักษณะ คือ การก่อสร้างง่ายและรวดเร็ว ไม่ซับซ้อน มีการลงทุนต่ำ สามารถเดินระบบต่างๆ ได้ง่าย ค่าซ่อมบำรุงต่ำ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาตรมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ covered lagoon แบบเดิม โดยการพัฒนาและปรับปรุงบ่อหมักก๊าซชีวภาพและระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) โดยระบบนี้สามารถควบคุมตะกอนหนักกับตะกอนเบาให้แยกออกจากกันได้ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon ประกอบด้วยบ่อบำบัดน้ำเสียจำนวน 2 บ่อ คือ 1) บ่อตกตะกอนหนัก ทำหน้าที่ผลิตก๊าซชีวภาพ และกักเก็บตะกอนหนัก ทำให้ไม่เกิดการสะสมหรือรบกวนการทำงานของจุลินทรีย์ในบ่อตกตะกอนเบา ในขั้นตอนถัดไป โดยตะกอนที่ระบายออกมาจากบ่อตกตะกอนจะไหลผ่านทางระบบท่อชักกาก ซึ่งระบบท่อชักกากในบ่อนี้เป็นการระบายตะกอนที่ทับถมบริเวณก้นบ่อออกสู่ลานตากตะกอนภายนอก โดยอาศัยแรงดันสถิตของน้ำ (Static Head) ซึ่งหมายถึงความสูงของระดับน้ำเสียไปจนถึงระดับที่ปล่อยตะกอนออก ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบน้ำ จึงเป็นระบบที่ประหยัดพลังงาน และช่วยรักษาเสถียรภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นจุดเด่นที่สำคัญอย่างหนึ่งของระบบ Hybrid Covered Lagoonและ 2) บ่อตกตะกอนเบา ทำหน้าที่รวบรวมตะกอนเบาจากบ่อตกตะกอนหนัก ซึ่งเป็นตะกอนที่สามารถย่อยโดยจุลินทรีย์ได้ดี และสามารถผลิตก๊าซได้ในปริมาณมาก มีปริมาณตะกอนตกค้างน้อยและสามารถระบายตะกอนออกจากระบบได้ง่าย น้ำที่ออกจากระบบมีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร (ค่า Biochemical Oxygen Demand; BOD ≤ 100 และค่า

Chemical Oxygen Demand; COD ≤ 400) [2] เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำทิ้งในบ่อดินแบบ cover lagoon แบบเดิม

รูปแบบการทำงานของระบบ คือ เมื่อน้ำทิ้งจากการล้างคอกสุกรขุนไหลเข้ามายังบ่อรวมน้ำเสียจะถูกเครื่องสูบน้ำแบบจุ่ม (Submersible Pumps) ส่งต่อมายังบ่อเติมน้ำเสีย จากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งไปยังบ่อตกตะกอน (บ่อที่ 1) โดยในบ่อตกตะกอนนี้จะมีการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้น ทั้งนี้ เมื่อก๊าซชีวภาพในบ่อตกตะกอนมีปริมาณมากเกินไป บริเวณด้านข้างของบ่อตกตะกอนจะมีถังลดแรงดันปล่อยก๊าซชีวภาพออกไปเพื่อไม่ให้วัสดุคลุมบ่อขาด ตะกอนหนักจากบ่อตกตะกอนจะถูกระบายออกโดยผ่านทางระบบท่อชักกากไปสู่บ่อดึงกากและไหลต่อไปยังลานตากตะกอนภายนอก ขณะที่ตะกอนเบาหรือน้ำเสียจะถูกส่งต่อไปยังบ่อตกตะกอนเบา (บ่อที่ 2) ซึ่งตะกอนเบาและน้ำเสียที่ผ่านการย่อยโดยจุลินทรีย์ จะไหลออกจากบ่อตกตะกอนเบา โดยผ่านทางระบบท่อชักกากของบ่อตกตะกอนเบาไปสู่บ่อดึงกาก น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากบ่อตกตะกอนเบา จะไหลต่อไปยังบ่อรับน้ำใสภายนอก ส่วนตะกอนเบาหรือน้ำเสียบางส่วนจากบ่อดึงกากของบ่อตกตะกอนเบา จะถูกเครื่องสูบน้ำแบบจุ่มส่งต่อมายังบ่อรวมน้ำเสีย เพื่อนำเข้าสู่ระบบการย่อยโดยจุลินทรีย์และผลิตก๊าซชีวภาพอีกครั้ง ทำให้บ่อหมักก๊าซชีวภาพและระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่มากขึ้นและระบบการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2 แสดงภาพร่างแสดงการพัฒนาและปรับปรุงบ่อหมักก๊าซชีวภาพและระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon

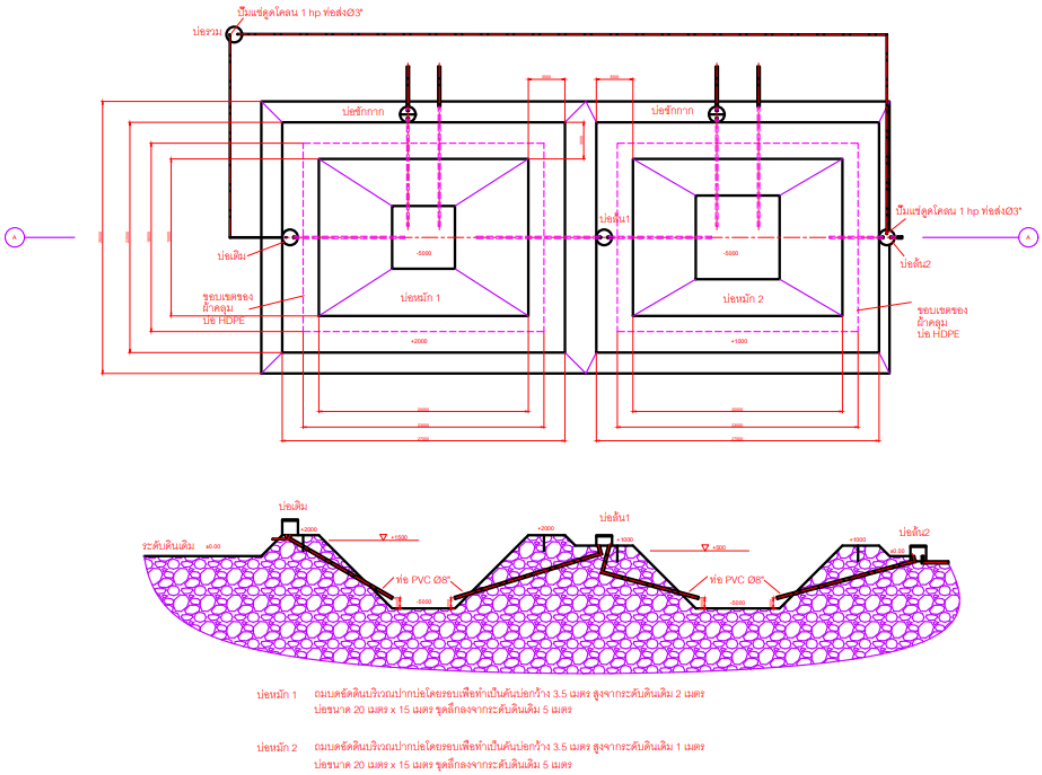
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาข้อมูลฟาร์มเบื้องต้น

ทำการพัฒนาและปรับปรุงบ่อหมักก๊าซชีวภาพและระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon ในฟาร์มเลี้ยงสุกรขุน พื้นที่อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา โดยศึกษาข้อมูลและรายละเอียดการดำเนินการข้อมูลพื้นฐานด้านการผลิต ซึ่งข้อจำกัดของฟาร์มที่มีบ่อรับน้ำเสียจากฟาร์มเป็นแบบบ่อดิน จำนวน 1 บ่อ ที่ไม่มีการคลุมบ่อ เป็นบ่อค่อนข้างเก่า มีตะกอนทับถมเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้บ่อเกิดการตื้นเขินด้วยตะกอนต่างๆ ที่สะสม และเนื่องจากไม่มีการคลุมบ่อด้วยวัสดุคลุมบ่อแบบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE) ทำให้เกิดมลภาวะทางด้านกลิ่นแก่ชุมชนโดยรอบและเกิดปัญหาด้านแมลงวันรบกวน รวมทั้งเกิดปัญหาด้านการรั่วไหลของน้ำทิ้งจากฟาร์มที่ยังไม่ผ่านการบำบัดในบ่อ ส่งผลให้ฟาร์มไม่ผ่านมาตรฐานฟาร์มของกรมปศุสัตว์ และมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มปศุสัตว์

3.2 แนวคิดการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพน้ำเสีย การก่อสร้างและติดตั้งระบบบ่อหมักก๊าซชีวภาพและบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered lagoon

แนวคิดการพัฒนาและปรับปรุงบ่อหมักก๊าซชีวภาพและบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon ซึ่งเป็นระบบผลิตก๊าซชีวภาพและระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) โดยระบบนี้ประกอบด้วยบ่อหมักจำนวน 2 บ่อ คือ 1) บ่อตกตะกอนหนัก (บ่อหมัก 1) ทำหน้าที่ผลิตก๊าซชีวภาพและกักเก็บตะกอนหนัก เพื่อลดการสะสมหรือรบกวนการทำงานของจุลินทรีย์ในบ่อตกตะกอนเบาในขั้นตอนถัดไป บ่อตกตะกอนหนักสามารถระบายตะกอนที่สะสมอยู่ก้นบ่อผ่านทางระบบท่อชักกาก ออกสู่ลานตากตะกอนภายนอก โดยอาศัยแรงดันของก๊าซชีวภาพและแรงดันสถิตของน้ำ (Static Head) ซึ่งหมายถึงระดับความสูงของผิวน้ำเสียในบ่อสูงกว่าระดับผิวน้ำที่ตำแหน่งชักท่อออก ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบน้ำ ซึ่งเป็นระบบที่ประหยัดพลังงาน และช่วยรักษาเสถียรภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นจุดเด่นที่สำคัญอย่างหนึ่งของระบบ Hybrid Covered Lagoon 2) บ่อตกตะกอนเบา (บ่อหมัก 2) ทำหน้าที่รวบรวมตะกอนเบาที่ไหลมาจากบ่อตกตะกอนหนัก ซึ่งเป็นตะกอนที่สามารถย่อยโดยจุลินทรีย์ได้ดี สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณมาก บ่อตกตะกอนเบาจะมีปริมาณตะกอนตกค้างน้อยและสามารถระบายตะกอนออกจากระบบได้ง่าย น้ำที่ออกจากระบบมีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร (ค่า Biochemical Oxygen Demand; BOD ≤ 100 และค่า Chemical Oxygen Demand; COD ≤ 400) [2] เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำทิ้งในบ่อดินแบบ cover lagoon แบบเดิม ที่มีสีดำคล้ำ (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 แสดงแบบแปลนการพัฒนาและปรับปรุงบ่อหมักก๊าซชีวภาพและบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon

ขั้นตอนการก่อสร้างและติดตั้งระบบบ่อหมักก๊าซชีวภาพและบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered lagoon มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การดำเนินการขุดบ่อหมักแทนบ่อน้ำทิ้งเดิม จำนวน 2 บ่อ คือ 1) บ่อตกตะกอนหนัก ถมบดอัดดินบริเวณปากบ่อโดยรอบเพื่อทำเป็นคันบ่อกว้าง 3.5 เมตร สูงจากระดับดินเดิม 2 เมตร บ่อขนาด 20 เมตร x 15 เมตร ขุดลึกลงจากระดับดินเดิม 5 เมตร และ 2) บ่อตกตะกอนเบา ถมบดอัดดินบริเวณปากบ่อโดยรอบเพื่อทำเป็นคันบ่อกว้าง 3.5 เมตร สูงจากระดับดินเดิม 1 เมตร บ่อขนาด 20 เมตร x 15 เมตร ขุดลึกลงจากระดับดินเดิม 5 เมตร พร้อมกับติดตั้งบ่อเติม บ่อชักกาก และบ่อล้นบริเวณโดยรอบคันบ่อ (**รูปที่ 4 ก)**

2) ดำเนินการขุดร่องทั้งสี่ด้านของคันบ่อห่างจากขอบบ่อ 1.5 เมตร ลึก 0.5 เมตร เพื่อถมขอบของแผ่น HDPE ป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพออกจากระบบผ่านรอยเชื่อมต่อทั้งสี่ด้าน (**รูปที่ 4 ข)**

3) ดำเนินการคลุมก้นบ่อด้วยแผ่น HDPE หนา 1 มิลลิเมตร ป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วซึมของน้ำและก๊าซชีวภาพออกจากระบบผ่านก้นบ่อ (**รูปที่ 4 ค)**

(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

(จ)

(ฉ)

รูปที่ 4 การก่อสร้าง และติดตั้งระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid cover lagoon

4) ดำเนินการเติมน้ำที่ก้นบ่อให้ท่วมปลายท่อเติม และท่อชักกาก ก่อนคลุมปากบ่อด้วยแผ่น HDPE ป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพออกจากระบบผ่านทางท่อเติม และท่อชักกาก (**รูปที่ 4 ง)**

5) ดำเนินการคลุมปากบ่อด้วยแผ่น HDPE หนา 1.5 มิลลิเมตร พร้อมกับถมขอบของแผ่น HDPE ป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพออกจากระบบผ่านรอยเชื่อมต่อทั้งสี่ด้าน (**รูปที่ 4 จ)**

6) ดำเนินการติดตั้งระบบสูบน้ำหมุนเวียนขนาด 1 แรงม้า (hp) ท่อลำเลียงขนาด 3 นิ้ว เพื่อหมุนเวียนระบบน้ำเสียกลับมาเข้าระบบการหมักก๊าซชีวภาพและระบบบำบัดน้ำเสียอีกครั้ง (**รูปที่ 4 ฉ)**

3.3 การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered lagoon

ดำเนินการเก็บตัวอย่างตามวิธีของกรมควบคุมมลพิษ (2563) มีวิธีการโดยย่อดังนี้ เก็บตัวอย่างจากจุดระบายน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมหรือภายนอกฟาร์มแบบจ้วง (grab sampling) จำนวน 2 ขวด โดยขวดที่ 1 สำหรับตรวจวัดค่า COD โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาณ 3 ใน 4 ส่วนใส่ขวดชนิด High Density Polyethylene (HDPE) ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) ปริมาณ 2 มิลลิลิตรเพื่อเก็บรักษาสภาพตัวอย่าง ขวดที่ 2 เพื่อตรวจวัดค่า BOD โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียเต็มขวด Polyethylene ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เก็บรักษาสภาพตัวอย่างและป้องกันแสงสว่างในกล่องน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 4 °C [12] จากนั้นทำการส่งตรวจวิเคราะห์คุณภาพ ณ ห้องปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ภายใน 24 ชั่วโมง นำผลการตรวจคุณภาพตัวอย่างน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร กรมควบคุมมลพิษ เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered lagoon

4. ผลการวิจัยและอธิปรายผล

4.1 ประสิทธิภาพและผลสำเร็จของระบบบ่อหมักก๊าซชีวภาพและบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered lagoon

ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบ hybrid cover lagoon เกิดขึ้นจากทั้งบ่อตกตะกอนทั้ง 2 บ่อ ประกอบด้วยบ่อตกตะกอนหนัก (บ่อหมักที่ 1) มีขนาดกว้าง 15 เมตร ยาว 20 เมตร ลึก 5 เมตร และบ่อตกตะกอนเบา (บ่อหมักที่ 2) มีขนาดกว้าง 15 เมตร ยาว 20 เมตร ลึก 5 เมตร มีขนาด

ความจุบ่อตกตะกอน (บ่อที่ 1) 300 ลบ.ม. และขนาดความจุบ่อหมัก covered lagoon (บ่อที่ 2) 400 ลบ.ม. โดยฟาร์มสุกรขุนซึ่งมีจำนวนสุกรขุนทั้งหมดประมาณ 700 ตัว สุกรขุนมีน้ำหนักเฉลี่ย 100 กิโลกรัมต่อตัว หน่วยปศุสัตว์ 140 LU สามารถรองรับน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขุนได้ประมาณ 700 ลบ.ม./วัน เมื่อวัดด้วย Mass flow meter พบว่าระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered lagoon สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 240 ลบ.ม./วัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาและติดตั้งระบบบ่อ Hybrid Cover Lagoon แบบโครงสร้างคอนกรีตของโรงงานน้ำมันปาล์ม โดยการส่งเสริมของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและมีความคุ้มค่าในการลงทุน [7] เมื่อนำไปเป็นเชื้อเพลิงในระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ระบบ Biogas Fuel Generator ในอนาคต คาดว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เพียงพอต่อการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดพิกัด 30 kVA หากเดินเครื่องตลอด 24 ชั่วโมง สามารถลดค่าไฟฟ้าลงได้ประมาณ 1,300 บาท/วัน (ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยละ 3.71 บาท) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการนำเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงมาผลิตกระแสไฟฟ้า โดยพบว่า มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเท่ากับ 35.44% ที่ระดับการจ่ายกำลังไฟฟ้าทดสอบแบบเต็มกำลัง และการนำเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงจะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ คือ มีอัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน 6.925 อัตราการคืนทุนภายใน 80.45% และมีระยะเวลาคืนทุน 1.35 ปี [4]

4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered lagoon

บ่อหมักก๊าซชีวภาพและระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ โดยคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบนี้เป็นน้ำที่มีค่า BOD เท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และมีค่าต่ำกว่าการศึกษาของ ภิรมณ์ และ สิริลักษณ์ (2554) [6] ซึ่งพบว่า ค่า BOD จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรขนาดกลางมีค่าเฉลี่ย 108 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยค่า BOD จะแสดงให้เห็นถึงปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ กล่าวคือ ถ้าน้ำเสียมีค่า BOD ต่ำ เมื่อถูกทิ้งลงในแหล่งน้ำจะไม่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำดังกล่าว เนื่องจากแบคทีเรียต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายน้อย แต่ถ้าน้ำเสียมีค่า BOD สูง เมื่อถูกทิ้งลงในแหล่งน้ำจะทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลงมากจนทำให้ปลาหรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในแหล่งน้ำนั้นไม่สามารถอยู่ได้ ส่วนค่า COD มีค่าเท่ากับ 725 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า COD จากการศึกษาของ ภิรมณ์ และ สิริลักษณ์ (2554) [6] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 164 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และมีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐาน โดยค่า COD คือ ค่าวัดความเน่าเสียของน้ำเสียที่เกิดจากสารเคมี โดยค่า

COD จะแสดงให้เห็นถึงปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์เพื่อให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งจากการเก็บตัวอย่างส่งตรวจ อาจจะเกิดเนื่องจากตัวอย่างน้ำที่ส่งตรวจหาค่า COD มีลักษณะขุ่น มีตะกอนดินมาก ซึ่ง ค่า COD ที่สูงขึ้นอาจมีปัจจัยมาจากตะกอนดินบริเวณที่เก็บตัวอย่างมีมากเกินไป [7] และสอดคล้องกับการศึกษาของ สุมนชาติและวีระพัฒ (2550) โดยค่า BOD เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณความสกปรกของน้ำเสีย และค่า COD แสดงให้เห็นว่าในน้ำเสียมีสารอินทรีย์ในปริมาณสูง [9] โดยทั่วไปน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมีค่า COD เฉลี่ย 4,000–7,000 mg/L [2]

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ cover lagoon แบบบ่อดินแบบเดิม และระบบ Hybrid covered lagoon

พารามิเตอร์วัดคุณภาพน้ำทิ้ง	**บ่อตกตะกอนแบบเดิม**	**ระบบบ่อ Hybridge covered lagoon**
ค่า BOD	285 mg/L	60 mg/L
ค่า COD	1,875 mg/L	725 mg/L
การสะสมของตะกอนในบ่อ	มาก	น้อย
การชักตะกอนออกจากบ่อ	ทำได้ยาก/ทำไม่ได้	ทำได้ง่าย

5. สรุปผลการวิจัย

การปรับปรุงประสิทธิภาพบ่อหมักก๊าซชีวภาพและบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon เพื่อรองรับระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ (Biogas Fuel Generator) ในการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขุน ของเกษตรกรผู้เลี้ยงสุกรขุนระบบเกษตรพันธสัญญา (Contract farming) อ.ห้วยแถลง จ.นครราชสีมา พบว่ามีประสิทธิภาพสามารถบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขุนให้ดีขึ้นได้ จากค่า BOD ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร และค่า COD ที่มีแนวโน้มลดลง รวมทั้งใช้เพื่อหมักก๊าซชีวภาพ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการผลิตและการกักเก็บก๊าซชีวภาพ จะช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรให้ดีขึ้น รวมทั้งเพิ่มกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้ฟาร์มมีแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ในระบบการผลิตไฟฟ้าที่จะติดตั้งในอนาคต

การศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยการติดตั้งระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบ Hybrid Covered Lagoon ซึ่งเป็นฟาร์มสุกรขนาดกลาง พบว่า มีดัชนีคุณภาพน้ำที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คือ ค่า BOD ส่วนค่า COD ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยปริมาณเฉลี่ยค่า COD ที่วัดได้จากการศึกษาครั้งนี้ถือว่าไม่สูงหากเทียบกับค่าเฉลี่ยทั่วไป อย่างไรก็ตามค่าพิสัยสูงสุดที่ตรวจวัดได้ในฟาร์มขนาดเล็กและ

ขนาดกลาง 8,239 และ 17,120 mg/L ประเมินได้ว่าฟาร์มสุกรบางฟาร์มประสบปัญหาด้านการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำ

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมควบคุมมลพิษ. (มปป.). **คู่มือการจัดทำรูปแบบการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในเชิงพาณิชย์**. สืบค้นจากhttps://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2020/05/pcdnew-2020-05-20_02-42-38_108096.pdf

[2] กรมควบคุมมลพิษ. (2564). **ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งก้าเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร** สืบค้นจาก https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2021/01/pcdnew-2021-01-07_04-00-19_938559.pdf

[3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2565). **การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์**. สืบค้นจากhttps://webkc.dede.go.th/testmax/node/188

[4] นรารัชต์พร นวลสวรรค์ และ วนัสพรรัศม์ สวัสดี (2561). การผลิตก๊าซชีวภาพจากเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสีย.**วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,** 14(1), 75-80.

[5] ประวิทย์ สุแก้ว. (2555). **ความก้าวหน้าของระบบก๊าซชีวภาพในประเทศไทย**. สืบค้นจาก http://www.greenthaibiogas.com/DetailPackage.aspx?id=600106&showpackid=300035&contype=ListLerning

[6] ภิรมย์ นนทะสร และ สิริลักษณ์ สายหงส์ (2554) คุณภาพน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในพื้นที่ภาคตะวันตก ระหว่างปี 2551–2553. **วารสารศูนย์วิจัยและพัฒนาการสัตวแพทย์ภาคเหนือตอนล่าง**, 8(29), 1-9.

[7] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2564). **9 ปีคุ้มทุนก๊าซชีวภาพ ณ บจก.นามหงส์พาวเวอร์** สืบค้นจาก https://erdi.cmu.ac.th/?p=3754

[8] สุมนชาติ แสงปัญญา และวีระพัฒ เพ็งพา. (2550). การศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในจังหวัดขอนแก่น. **วารสารปศุสัตว์เขต 4**, 11(24), 74-83.

[9] สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2564). **ข้อมูลจำนวนเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์และปศุสัตว์ ปี2564**. สืบค้นจาก https://opendata.nesdc.go.th/dataset/d7681470-0120-47ab-8315-5cd28b9539c8/resource/1b116b37-ce19-415d-ae04-dd734add184f/download/-2564.pdf

[10] สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. (2563). **เรื่องวิธีปฏิบัติสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำ**. สืบค้นจาก https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2020/05/pcdnew-2020-05-19_04-54-21_964107.pdf

[11] Baird R.B., Eaton A.D., Eugene W.R. (2017). **Standard methods for the examination of Water and Wasted water 23rd Edition**. American Public Health Association®.

[12] Chen, Huihui & Wan, Jingjing & Chen, Kaifei & Luo, Gang & Fan, Jiajun & Clark, James & Zhang, Shicheng. (2016). Biogas production from hydrothermal liquefaction wastewater (HTLWW): Focusing on the microbial communities as revealed by high-throughput sequencing of full-length 16S rRNA genes. **Water Research**, 106, 101-116.