



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง การออกแบบและพัฒนาถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมต้นแบบสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรขนาดเล็ก

Design and Development of Prototype of Mixed Anaerobic Digester for Biogas Production from Small Pig Farm

โครงการย่อยภายใต้โครงการ: การจัดการและการใช้ประโยชน์ของเสียจากฟาร์มสุกรขนาดเล็กแบบครบวงจร

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2555

จำนวน 400,000 บาท

หัวหน้าโครงการ นายสุปน ชื่นบาล

ผู้ร่วมโครงการ นางศิริภรณ์ ชื่นบาล

นางสาวฉนิษน ธรรมรักษ์

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

19 กันยายน 2556

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การออกแบบและพัฒนาถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมต้นแบบสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรขนาดเล็ก ซึ่งอยู่ในชุดโครงการ การจัดการและใช้ประโยชน์ของเสียของฟาร์มสุกรขนาดเล็กแบบครบวงจร ได้สำเร็จลุล่วง โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปี 2555 ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ และฟาร์มสุกรคณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านสถานที่ทำการวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ค
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	31
วิธีการทดลอง	34
ผลการทดลองและวิจารณ์	38
สรุปผลการทดลอง	69
ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1	ปริมาณสิ่งขับถ่ายของสัตว์ต่าง ๆ ในแต่ละวัน
ตารางที่ 2	ปริมาณสิ่งขับถ่ายของสัตว์และคนคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักตัว
ตารางที่ 3	จำนวนการสุกรในปี 2546 – 2554
ตารางที่ 4	ชนิดการขับถ่ายของสุกรในแต่ละวัน
ตารางที่ 5	ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร
ตารางที่ 6	มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร
ตารางที่ 7	ค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ของแบบที่เรียสร้างกรด
ตารางที่ 8	แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจากฟาร์มสุกร
ตารางที่ 9	ข้อมูลวิเคราะห์น้ำเสีย
ตารางที่ 10	ผลการวิเคราะห์น้ำเสียจากฟาร์มสุกรเบื้องต้น
ตารางที่ 11	แสดงค่าเจดาคัลไนโตรเจนของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม
ตารางที่ 12	แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซมีเทน

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1	แสดงจำนวนสุกรแยกตามประเภทในปี 2554
ภาพที่ 2	แสดงจำนวนสุกรในปี 2546-2550
ภาพที่ 3	กระบวนการแอนแอโรบิก
ภาพที่ 4	การย่อยสลายของไพโรเวท
ภาพที่ 5	กระบวนการเมทาโนเจเนซิส
ภาพที่ 6	การกวนแบบหมุนเวียนก๊าซ และท่อส่ง (Gas Recycle and Draft Tube)
ภาพที่ 7	การกวนแบบใบพัดและท่อส่ง (Impeller and Draft Tube)
ภาพที่ 8	การกวนแบบใบพัด (Impeller)
ภาพที่ 9	การติดตั้งและการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ
ภาพที่ 10	ถังหมักไร้อากาศ
ภาพที่ 11	ถังหมักไร้อากาศและระบบเก็บก๊าซชีวภาพ
ภาพที่ 12	ระบบเก็บก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำ
ภาพที่ 13	เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (BIOGAS 5000)
ภาพที่ 14	ลักษณะฟาร์มต่างๆที่คณะวิจัยทำการสำรวจ
ภาพที่ 15	แบบชุดควบคุม
ภาพที่ 16	แบบชุดทดลอง
ภาพที่ 17	แบบชุดควบคุมถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม
ภาพที่ 18	แบบชุดทดลองถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม
ภาพที่ 19	บ่อพักน้ำเสีย
ภาพที่ 20	ซีโอดีในน้ำทิ้งของถังไร้อากาศแบบกวนผสมที่ระยะการกวนต่างกัน ที่มีการกวนต่างกัน
ภาพที่ 21	บีโอดีในน้ำทิ้งของถังไร้อากาศแบบกวนผสมที่ระยะการกวนต่างกัน ที่มีการกวนต่างกัน

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 22	ปริมาณของแข็งแขวนลอย และของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายทั้งหมด ในน้ำทิ้งของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน	59
ภาพที่ 23	ค่าความเป็นด่างในน้ำทิ้งของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม ที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน	62
ภาพที่ 24	ค่า pH ของน้ำทิ้งในถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม ที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน	64
ภาพที่ 25	ก๊าซชีวภาพและการผลิตก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม ที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน	66

การออกแบบและพัฒนาถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมต้นแบบสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ
จากฟาร์มสุกรขนาดเล็ก

Design and Development of Prototype of Mixed Anaerobic Digester for Biogas
Production from Small Pig Farm

ฐปน ชื่นบาล¹, ศิราภรณ์ ชื่นบาล¹ และ นิชมน ธรรมรักษ์²

Tapana Cheunban¹, Siraporn Cheunban¹ and Nichamon Thamaragsa²

¹คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

²สถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการกวนที่มีต่อการหมักแบบไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพและการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในระดับอุตสาหกรรม โดยใช้ถังหมักขนาด 1000 ลิตร โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดคือ กวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้ง (ครั้งละ 30 นาที) และ(ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน เติมน้ำเสียจากฟาร์มสุกรหมักจนเกิดแก๊สจึงเริ่มเติมน้ำเสียวันละ 100 ลิตรทุกถึงตลอดการทดลอง จากนั้นทำการตรวจวัดปริมาณแก๊สชีวภาพ ซีโอดี pH ของแฉ่งแขวนลอย ของแฉ่งระเหยง่าย และสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ผลการทดลองพบว่า ถึงปฏิกรณ์ที่มีการกวนวันละ 8 ครั้ง มีประสิทธิภาพในลดค่าซีโอดีสูงสุดร้อยละ 79.3 และผลิตก๊าซชีวภาพได้ 202 ลิตรต่อวัน โดยมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนร้อยละ 80.6 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การกวนผสมมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

คำสำคัญ: การหมักแบบไร้อากาศ ถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม ก๊าซชีวภาพ น้ำเสียจากฟาร์มสุกร

Abstract

The objective of this research is to study the effect of mixing on anaerobic digestion, biogas production and swine wastewater treatment in pilot scale. Four sets of experiments were performed using swine wastewater feed and gas began to fill up 100 liters of water a day in the different mixing 2, 4 and 8 times a day (30 min/times) and (control) unmix were performed in 1000 liters bioreactor .Bioreactor were started up by swine wastewater 6 liters, and operated biogas produced. After that, swine wastewater was feed to all reactors 1liter per day throughout experiment. The parameters of gas production, the COD, pH, SS, VSS and methane content were analyzed. The results showed that reactor with 8 times mixing had highest COD removal of 79.3 % and averages of biogas production of 202 liter per day, the methane yield average of 80.6%. The results confirmed efficiency that the mixing had affected to biogas production and swine wastewater treatment efficiency.

Key words: Anaerobic Digestion, Mixed tank, Biogas, Swine Wastewater

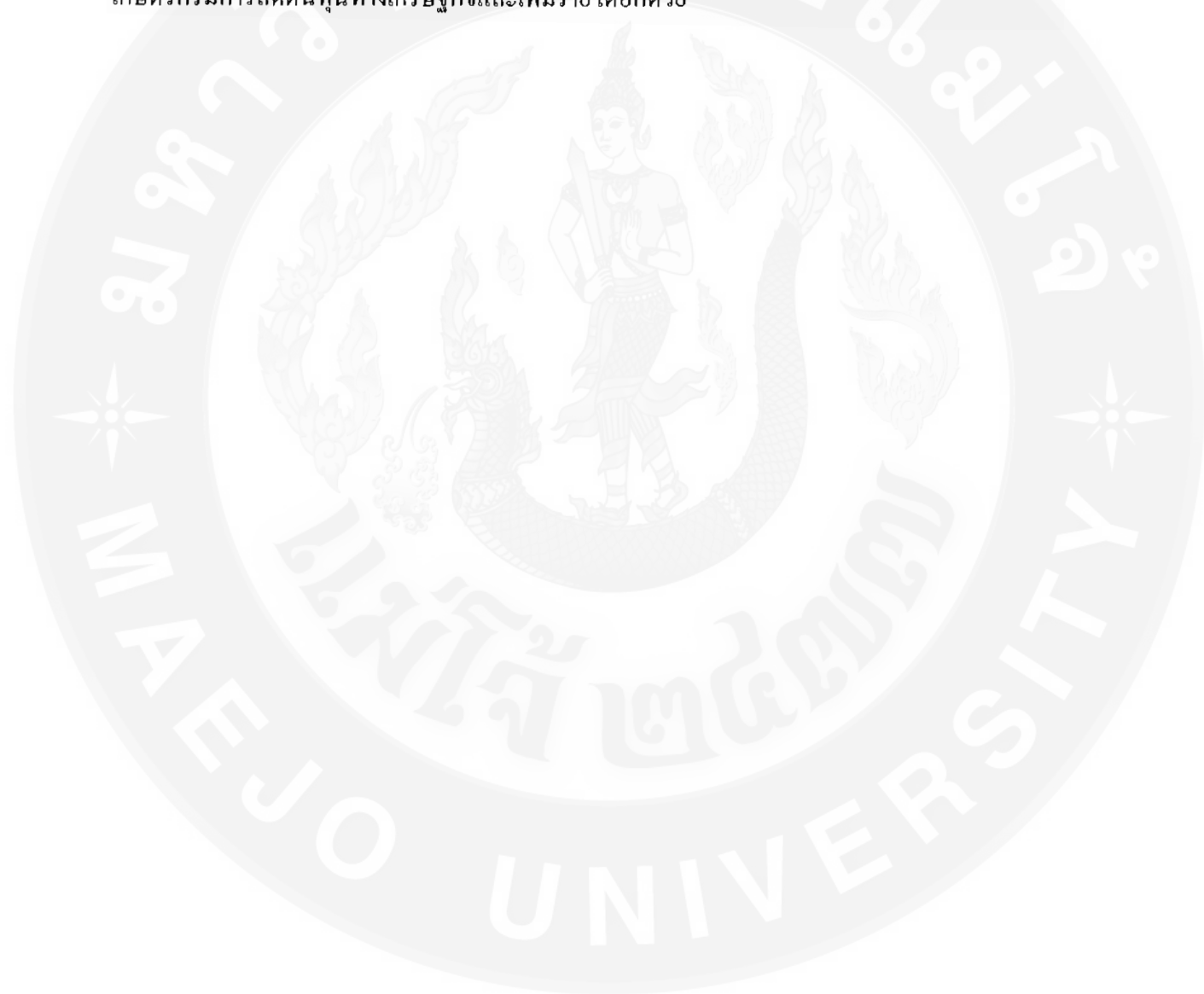
คำนำ

ปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรด้วยวิธีการพัฒนากันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางธรรมชาติที่อาศัยการทำงานของสิ่งมีชีวิต ทั้งพืชและจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ เพื่อช่วยในการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ระบบก๊าซชีวภาพเป็นวิธีการหนึ่งที่นอกจากระบบจะทำให้มีคุณภาพดีขึ้นแล้ว ผลพลอยได้อีกประการหนึ่งคือ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนพลังงานอื่นได้ด้วย เป็นการลดปัญหากลิ่นเหม็น ก๊าซพิษ แหล่งเพาะเชื้อโรค และมลภาวะสิ่งแวดล้อม เป็นการจัดการปัญหามลภาวะอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน พลังงานที่ได้สามารถนำไปใช้ในฟาร์มทำให้เกิดการหมุนเวียนสามารถนำไปใช้ได้อย่างสม่ำเสมอ ส่วนมูลสุกรที่เหลือจากการหมักสามารถนำไปเป็นปุ๋ยได้อย่างดีหรือจำหน่ายแก่ฟาร์มอื่น

การหมักไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) เป็นการทำงานของแบคทีเรียชนิดไม่ใช้อากาศ ในการบำบัดน้ำเสีย โดยสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายได้ (biodegradable) ประมาณ 80-90 % จะถูกทำลายเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) ซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) การทดลองนี้เพื่อพัฒนาระบบถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม (Mixed Anaerobic Digestion) ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในการลดมลสารอินทรีย์และได้ก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบขนาดที่เหมาะสมกับการรับค่าภาระระบบบรรจุสารอินทรีย์ (Organic Loading rate) ที่เดิมเข้าระบบ คือสารอินทรีย์ที่ต้องการบำบัด อีกทั้งทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของระบบและทราบถึงคุณภาพน้ำล้นที่ออกมาจากถังหมัก (Effluent) ที่ภาระค่าบรรจุต่างๆ ต่อไป

คณะผู้วิจัยได้ทำศึกษาการออกแบบและสร้างถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม ซึ่งจะดำเนินการศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการทำงาน เช่น ระยะเวลาการเก็บกักที่เหมาะสม รูปแบบและเวลาการที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งมูลสุกรและกำจัดของเสียจากฟาร์มสุกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยถังหมักต้นแบบนี้จะออกแบบให้เหมาะสมสำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็กหรือสุกรที่เลี้ยงเป็นปริมาณน้อยในครัวเรือน โดยเป็นระบบที่ใช้งานได้ง่าย มีราคาไม่สูงมากนัก ให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในระดับครัวเรือน โดยระบบนี้จะสามารถกำจัดของเสียจากฟาร์มสุกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ลดปัญหากลิ่นและของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวันได้เป็นอย่างดี

การทดลองนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบจากการจำลองของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม (Mixed Anaerobic Digestion) จะเป็นแนวทางหนึ่งในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกในอนาคต ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น ทำให้สามารถลดการสูญเสียพลังงานได้ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนและสามารถส่งเสริมให้เกษตรกรมีการลดต้นทุนทางเศรษฐกิจและเพิ่มรายได้อีกด้วย



วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมได้
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนได้
3. สามารถลดปัญหาการขาดแคลนการใช้พลังงานในอนาคต
4. เพื่อช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนและจัดการของเสียในแต่ละวันได้

การตรวจเอกสาร

1. การเลี้ยงสุกรในประเทศไทย

การเลี้ยงสุกรเป็นอาชีพหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของไทย และสุกรเป็นสินค้าเกษตรกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ ทั้งทางด้านการผลิต การบริโภค และการค้าระหว่างประเทศ แต่การเลี้ยงสุกรในปัจจุบันได้ก่อให้เกิดปัญหาและอุปสรรคตามมาหลายประการ ทั้งในด้านการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสุกรให้ได้มาตรฐานความปลอดภัยต่อผู้บริโภค และปัญหาการก่อกวนภาวะที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมอันเนื่องมาจากมูลสัตว์และของเสียต่างๆ ที่เกิดจากกิจกรรมการเลี้ยงสุกรภายในฟาร์ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากฟาร์มที่ยังไม่สามารถกำจัดของเสียเหล่านี้ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ทำให้เกิดปัญหามลภาวะทั้งภายในฟาร์มเองและชุมชนใกล้เคียง จนกลายเป็นปัญหาค่คุณภาพชีวิตและสิ่งแวดล้อม จากสาเหตุดังกล่าวก่อให้เกิดการพัฒนาเปลี่ยนแปลงระบบการเลี้ยงไปสู่ระบบฟาร์มมาตรฐาน ซึ่งทำให้สัตว์แพทย์มิได้มีบทบาทเพียงแค่การดูแลสุขภาพสัตว์เท่านั้น ยังต้องมีความรู้ในเรื่องขององค์ประกอบ การจัดการฟาร์ม รวมถึงการจัดการสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในการป้องกันมิให้เกิดการแพร่ระบาดของโรคสู่ภายนอก (กรมปศุสัตว์, 2546) อันเป็นหน้าที่ของสัตวแพทย์ผู้ควบคุมฟาร์มและเจ้าหน้าที่ในฐานะผู้ตรวจรับรองในระบบฟาร์มมาตรฐาน(อดิสร, 2549)

ปัจจุบันฟาร์มเลี้ยงสุกรมักจะประสบปัญหาทางด้านการสุขาภิบาล ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสภาพแวดล้อม บริเวณรอบ ๆ ฟาร์ม ไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียมูลสุกร และกลิ่น ไม่เพียงแต่จะรบกวนชุมชนที่อยู่ใกล้ ๆ แล้ว ยังเป็นแหล่งเพาะเชื้อโรคแมลงวันและยุง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อทั้งสุกรเองและคนด้วย ดังนั้นผู้ที่กำลังก่อตั้งฟาร์มสุกรนอกจากจะต้องเลือกทำเลที่จะตั้งฟาร์มให้เหมาะสมและกำหนดแผนและนโยบายการจัดการเกี่ยวกับของเสียต่าง ๆ จากฟาร์มสุกรให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดปัญหากับสภาพแวดล้อมรอบ ๆ ฟาร์ม

ตารางที่ 1 ปริมาณสิ่งขับถ่ายของสัตว์ต่าง ๆ ในแต่ละวัน

ชนิดสัตว์ที่ขับถ่าย	นน.ตัว(กก.)	ความชื้น(%)	ปริมาตร(ลิตร/วัน)
โคนม	450-650	90	57
โคเนื้อ	200 - 450	90	27
แม่สุกรท้องว่าง	90-120	90	4
สุกรขุน อาหารแห้ง	90-120	90	12
สุกรขุน อาหารเหลว (4 :1)	40-75	90	4
ไก่ไข่ (1000 ตัว)			
- มูลสด	2000	70	115
- มูลแห้ง	2000	30	49
ไก่เนื้อ (1000 ตัว)			
- มูล + วัสดุรองพื้น	1000	30	36

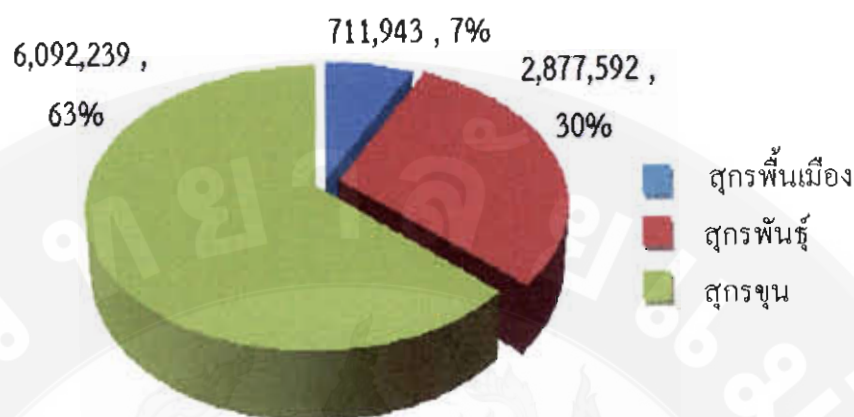
ที่มา: ปัญหามลภาวะในฟาร์มเลี้ยงสัตว์และการบำบัด สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ <http://teenet.cmu.ac.th/btc/farmpollution03.php#0203>

ตารางที่ 2 ปริมาณสิ่งขับถ่ายของสัตว์และคนคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักตัว

ชนิดสัตว์	สิ่งขับถ่ายตาม		ในสิ่งขับถ่ายสด		นน.ตัว(กก.)
	นน.ตัว				
	มูล(%)	ฉี่ (%)	TS (%)	VS (%)	
โค	5	4 - 5	16	13	135 - 800
กระบือ	5	4 - 5	14	12	340 - 420
สุกร	2	3	16	12	30 - 75
แพะ-แกะ	3	1 - 1.5	30	20	30 - 100
ไก่/สัตว์ปีก	4.5	-	25	17	1.5 - 2
คน	1	2	20	15	50 - 80

ที่มา: Werner et al. (1989)

จากการแบ่งขนาดฟาร์มเลี้ยงสุกรเป็น 3 ขนาดคือ ขนาดเล็กที่เลี้ยงสุกรน้อยกว่า 500 ตัว ขนาดกลางที่เลี้ยงตั้งแต่ 500-5000 ตัว และฟาร์มขนาดใหญ่ที่เลี้ยงเกินกว่า 5000 ตัวขึ้นไป มีรายงานถึงปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีค่า BOD และ COD ซึ่งสูงถึง 3000 และ 7000 มิลลิกรัม/ลิตร ในฟาร์มขนาดใหญ่ นับว่าเป็นน้ำที่สกปรกมาก ซึ่งเกษตรกรควรมีระบบบำบัดน้ำเสียภายในฟาร์มที่มีประสิทธิภาพ สามารถกำจัดของเสียภายในฟาร์มและน้ำทิ้งปล่อยสู่สาธารณะเป็นไปตามกฎเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำเสียเหล่านี้มีธาตุอาหารต่างๆ อยู่มาก ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการเกษตรที่เหมาะสม เช่น ใช้เป็นปุ๋ยบำรุงดิน ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตพืชเป็นอย่างมากและยังไม่สร้างปัญหาให้เกิดขึ้นกับชุมชนรอบๆฟาร์มอีกด้วย



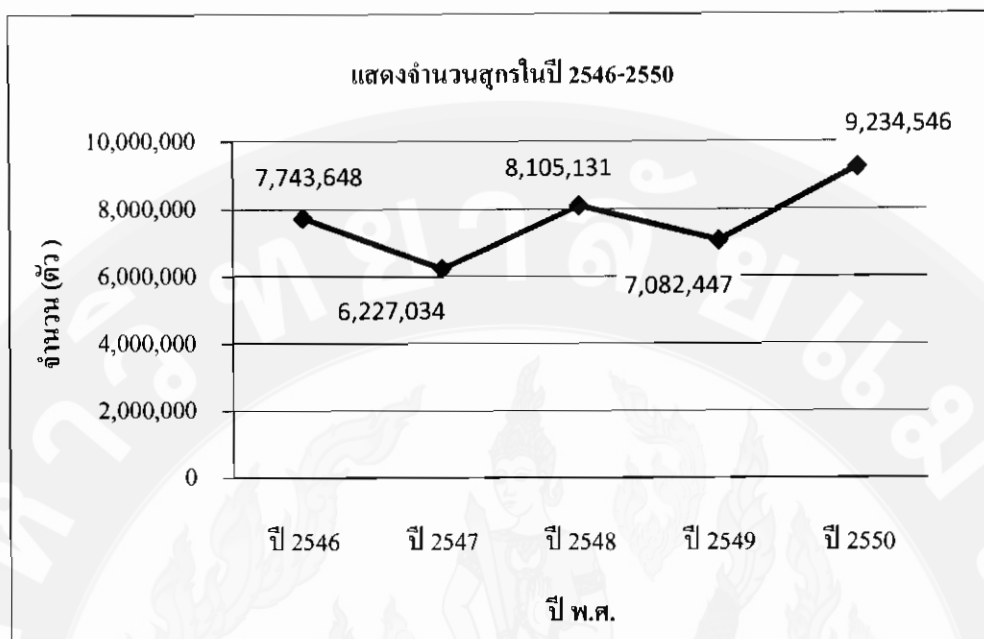
ภาพที่ 1 แสดงจำนวนสุกรแยกตามประเภทในปี 2554

ที่มา: สรุปข้อมูลและสถิติจำนวนสุกรและเกษตรกรผู้เลี้ยงประจำปี 2554, กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ ศูนย์สารสนเทศ กรมปศุสัตว์ จาก <http://www.thaiswine.org/tabid/234/Default.aspx>

ตารางที่ 3 จำนวนการสุกรในปี 2546 - 2554

ปี พ.ศ.	2546	2547	2548	2549	2550
ภาคเหนือ	1,230,600	826,357	1,249,358	997,873	1,774,734
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	1,366,772	1,028,625	1,505,338	1,367,743	1,693,707
ภาคกลาง	454,362	394,121	532,897	341,220	641,999
ภาคตะวันออก	1,495,410	1,771,926	1,853,453	747,383	1,553,053
ภาคตะวันตก	2,605,098	1,781,612	2,449,967	3,147,300	2,843,084
ภาคใต้	592,007	424,393	514,158	480,928	727,969
รวมทั้งประเทศ	7,743,648	6,227,034	8,105,131	7,082,447	9,234,546

ที่มา: สรุปข้อมูลและสถิติจำนวนสุกรและเกษตรกรผู้เลี้ยงประจำปี 2554, กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ ศูนย์สารสนเทศ กรมปศุสัตว์ จาก <http://www.thaiswine.org/tabid/234/Default.aspx>



ภาพที่ 2 แสดงจำนวนสุกรในปี 2546-2550

ที่มา: สรุปข้อมูลและสถิติจำนวนสุกรและเกษตรกรผู้เลี้ยงประจำปี 2554, กลุ่มสารสนเทศและสถิติ ศูนย์สารสนเทศ กรมปศุสัตว์ จาก <http://www.thaiswine.org/tabid/234/Default.aspx>

2. ลักษณะน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ในฟาร์มสุกรของเสียเกิดขึ้นในรูปแบบต่าง ๆ คือ เศษอาหาร มูล ปัสสาวะ น้ำล้างคอกก๊าซต่าง ๆ และสารระเหยที่มีกลิ่นจากการสลายตัวของมูลและปัสสาวะที่ขับถ่ายแล้วปริมาณของ สิ่งขับถ่ายและลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นในฟาร์มแต่ละวัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดของฟาร์มหรือจำนวนสัตว์ขุนคอก ลักษณะอาหารและวิธีการให้อาหาร ขนาด ชนิดของสัตว์และประเภทสัตว์ที่เลี้ยง ลักษณะโรงเรือนและระบบการจัดการของเสีย วิธีการทำความสะอาดคอกและปริมาณน้ำที่ใช้ล้างหรือทำความสะอาด โดยปริมาณสิ่งขับถ่ายของสุกรในแต่ละวันจะแตกต่างกันตามขนาดของสุกรด้วย เช่น แม่สุกรกับสุกรขุนที่มีน้ำหนักเท่ากัน คือ 90 - 120 กิโลกรัม จะขับถ่ายของเสียเท่ากับ 4 และ 12 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ (ตารางที่ 1) และเมื่อเปรียบเทียบกับ การขับถ่ายของสัตว์ชนิดอื่นปรากฏว่าสุกรขับถ่ายมากกว่าม้าและโค กระบือถึงสองเท่า (เมื่อคิดต่อหน่วยน้ำหนัก) (นิพนธ์, 2526) ขณะที่กรมปศุสัตว์ (2533) รายงานว่า ส่วนประกอบทางเคมีและปริมาณมูลสุกรที่ขับถ่าย

ออกมาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ อายุ น้ำหนักตัว พันธุ์ อาหาร ปริมาณน้ำที่กิน ความสามารถในการย่อยอาหาร สิ่งแวดล้อมและการจัดการเกี่ยวกับของเสีย ซึ่งลักษณะน้ำเสียของ ฟาร์มสุกร โดยทั่วไป แสดงไว้ดังตารางที่ 2 และตารางที่ 4

น้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะมีความเข้มข้นสูงมาก ทั้งในรูปของบีโอดีและธาตุอาหาร (ธงชัย, 2544) ซึ่งเมื่อปล่อยน้ำเสียลงสู่แม่น้ำ จะทำให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน จากการมีธาตุอาหาร ในโตรเจน และ/หรือฟอสฟอรัสมากเกินไปในแหล่งน้ำปิด ในประเทศไทยพบปัญหายูโทรฟิเคชัน หรือสาหร่ายสะพรั่ง ที่เรียกกันว่า จีปลาวาพ ในหลายพื้นที่แล้ว เช่น ศรีราชา ชะอำ หัวหิน กว๊านพะเยา บึงแก่นนคร (ขอนแก่น) เมื่อต้นปี พ.ศ. 2543 เกิดปัญหาแพลงตอนพืชสะพรั่งขึ้นที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดสมุทรปราการ เป็นบริเวณกว้างกว่า 3 กิโลเมตร ตามชายฝั่งทะเลปากแม่น้ำ (ธงชัย, 2544) จึงได้มีการควบคุมการปล่อยน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยกรมควบคุมมลพิษ เพื่อให้มีการบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งมาตรฐานน้ำทิ้งมีค่ากำหนด ดังแสดงในตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 4 ชนิดการขับถ่ายของสุกรในแต่ละวัน

ชนิดสัตว์ที่ขับถ่าย	น้ำหนักตัว (กิโลกรัม)	ร้อยละของความชื้น	ปริมาตร (ลิตรต่อวัน)
แม่สุกรท้องว่าง	90-120	90	4
สุกรขุน อาหารแห้ง	90-120	90	12
สุกรขุน อาหารเหลว (4:1)	40-75	90	4

ที่มา: สถานเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2549: ระบบออนไลน์) จาก

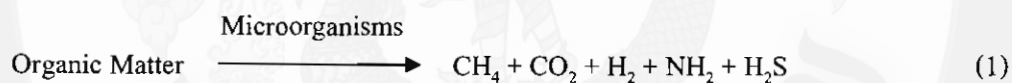
เมื่อของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ที่มีสารอินทรีย์ในระดับสูงไหลลงแหล่งน้ำ จะมีกลไกทางธรรมชาติในการบำบัดสารอินทรีย์เกิดขึ้น คือ จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในน้ำเพื่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียมากขึ้น ทำให้ออกซิเจนในแหล่งน้ำถูกใช้ในการย่อยสลายและสารเคมีเชิงซ้อนที่เป็นส่วนประกอบอยู่ จะถูกเปลี่ยนเป็นสารออกไซด์เชิงเดี่ยวจำพวก CO_2 , NO , SO_4 , PO_4^{+} และสารอื่น ๆ ออกซิเจนจึงน้อยลงตามลำดับจนหมด ส่งผลให้ปลาและสัตว์น้ำอื่น ๆ ขาดออกซิเจนที่จำเป็นต่อชีวิตและตายในที่สุด ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ต่ำจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันต่ำ และเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันสูงขึ้น (Adave *et al.*, 2008) การปนเปื้อนของไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมไอออนหรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) ก็เพิ่มการใช้ ออกซิเจนโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรีย เพื่อเปลี่ยน $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ เป็นไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรต (NO_3^-) ในขบวนการไนตริฟิเคชัน ส่วน Blue-Green Algae ที่ได้รับไนโตรเจนสูงในน้ำที่ไหลช้า สามารถเป็นพิษต่อผู้ใช้น้ำได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

3. การบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

ระบบบำบัดน้ำเสียมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจนกับระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน การบำบัดแบบไร้ออกซิเจนถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอาหารและสารอินทรีย์ในปริมาณที่สูงที่มีของแข็งอยู่ด้วย และระหว่างกระบวนการบำบัดก็จะผลิตก๊าซมีเทนขึ้นโดยไม่ต้องใช้พลังงาน (Feng *et al.*, 2007) และผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วย เช่น น้ำเสียจากฟาร์มสุกรแต่ปัจจุบันมีการพัฒนารูปแบบของถังปฏิกริยาขึ้นมาเรื่อยๆจนสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่า BOD ต่ำๆ เช่นน้ำเสียจากชุมชน (เกรียงศักดิ์, 2539) เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนเป็นระบบที่ไม่ต้องมีการเติมอากาศ จึงทำให้ประหยัดพลังงานและยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปของพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อนได้อีกด้วย (สุวิมล, 2548) ซึ่งองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซต่างๆ คือ มีเทน (CH_4) ประมาณร้อยละ 60-70 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 30-40 ไฮโดรเจน ประมาณร้อยละ 5- 10 และแก๊สอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน (N_2) ประมาณร้อยละ 2-3 และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ประมาณร้อยละ 1-2 (จตุพร และคณะ, 2548)

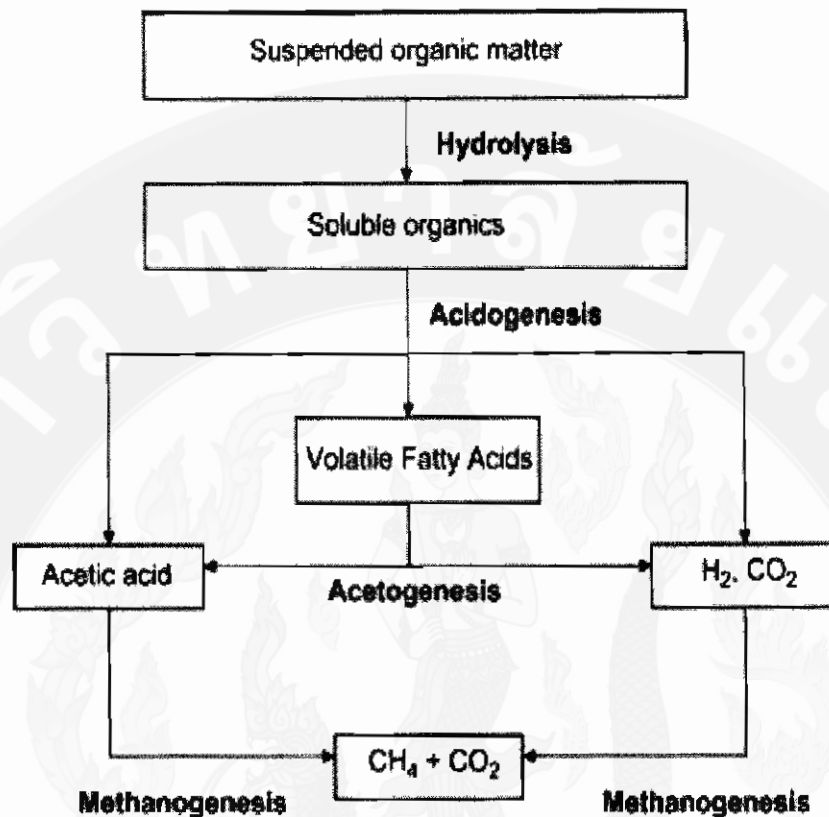
กระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) หมายถึง การเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียหรือในสลัดจ์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมักหมายถึงการย่อยแบบไม่ใช้อากาศนั่นเอง โดยสารอินทรีย์ที่อยู่ในของเสียจะถูกกำจัดไปพร้อมกับการผลิตพลังงาน ซึ่งของเสียจากปศุสัตว์และสุกรเป็นแหล่งที่ผลิตก๊าซชีวภาพที่มีความสำคัญมากกว่าของเสียอื่นๆ (Hansen *et al.*, 1997) ซึ่งก๊าซมีเทนเป็นผลผลิตของกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนนี้เสมอ (สุชาติ, 2536) และยังสามารถกำจัดสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้อีกด้วย (Ndegwa *et al.*, 2007)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพในสภาพที่ไม่ใช้ออกซิเจน โดยจุลินทรีย์ที่มีความสามารถใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจะย่อยสลายสารอินทรีย์ ผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการประกอบด้วยก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆซึ่งเป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพดังสมการ (1)



4. กระบวนการแอนแอโรบิก (Anaerobic Digestion)

กระบวนการแอนแอโรบิก คือ กระบวนการทางจุลชีววิทยาใน ย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการแอนแอโรบิก คือ ก๊าซชีวภาพและสารอินทรีย์ที่เหลือ จากการย่อยสลาย ซึ่งก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่ติดไฟได้ง่ายมีองค์ประกอบหลักได้แก่ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Teodorita, *et al.*, 2008)



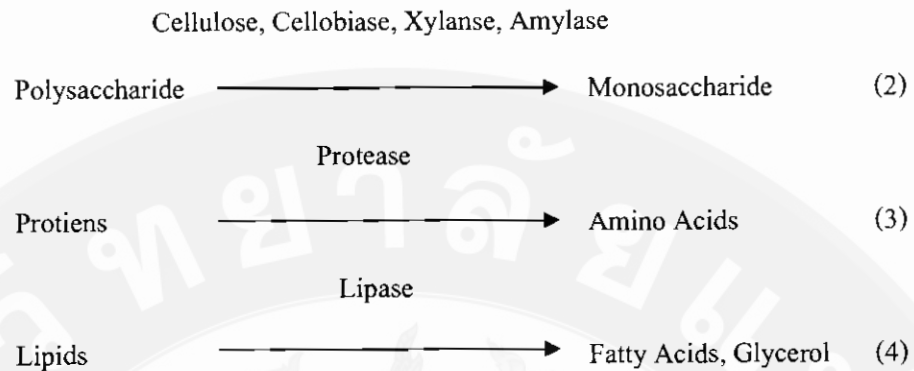
ภาพที่ 3 กระบวนการแอนแอโรบิก

ที่มา: Lise, et al., 2008

4.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการแอนแอโรบิก

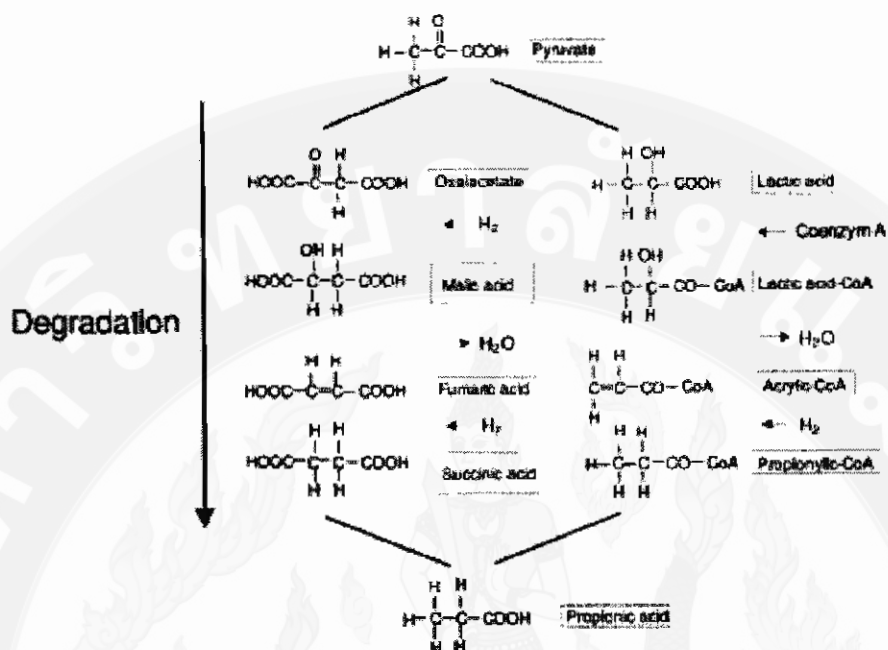
4.1.1 ไฮโดรไลซิส (Hydolysis)

การย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ (พอลิเมอร์) ให้เป็นโมเลกุลเดี่ยว (โมโนเมอร์) โดยขั้นตอนไฮโดรไลซิสจะทำการย่อย คาร์โบไฮเดรต ไขมัน กรดนิวคลีอิก โปรตีน เปลี่ยนเป็นกลูโคส กลีเซอรอล เพป्टิน ไขมัน โดยกลุ่มแบคทีเรีย Hydrolytic ที่ใช้เอนไซม์ Hydrolytic เพื่อเปลี่ยนสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่เป็นสารเชิงเดี่ยวและสารละลาย (Teodorita, *et al.*, 2008) ดังสมการ (2), (3), (4)



4.1.2 อะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

โมโนเมอร์จากขั้นตอนไฮโดรไลซิสถูกแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรด (Acid Forming Bacteria) นำไปใช้ โดยสารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์สายโซ่สั้น กลุ่มโมเลกุลที่ประกอบด้วยคาร์บอน 1-5 อะตอม (กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทริก กรดวาเลริก) แอลกอฮอล์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังภาพ 4 ความเข้มข้นของสารตัวกลางในการสร้างไฮโดรเจนไอออนมีผลต่อชนิดของการเกิดผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนอะซิโดเจเนซิสและความดันย่อยของไฮโดรเจนที่สูงส่งผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ลดลง



ภาพที่ 4 การย่อยสลายของไพรูเวต

ที่มา: Teodorita, *et al.*, 2008

4.1.3 อะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis)

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของ อะซิโดเจเนซิสไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรีย สร้างมีเทน (Methanogenic) ได้โดยตรงแต่ในขั้นตอนของอะซิโดเจเนซิสจะทำการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายและแอลกอฮอล์เป็นอาหารสำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทน เช่น อะซิเตต ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ขั้นตอนอะซิโดเจเนซิสและขั้นตอนเมทาโนเจเนซิสทำงานขนานกันและเอื้อประโยชน์แก่กัน (Teodorita, *et al.*, 2008)

4.1.4 เมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis)

ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมาจากการเมทาโนเจเนซิสโดยผลิตจากแบคทีเรีย Methanogenic โดยปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ 70 เปอร์เซ็นต์ มาจากอะซิเตตและที่เหลือ 30 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลผลิตจากการเปลี่ยนร่วมกันของก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการ (5), (6)

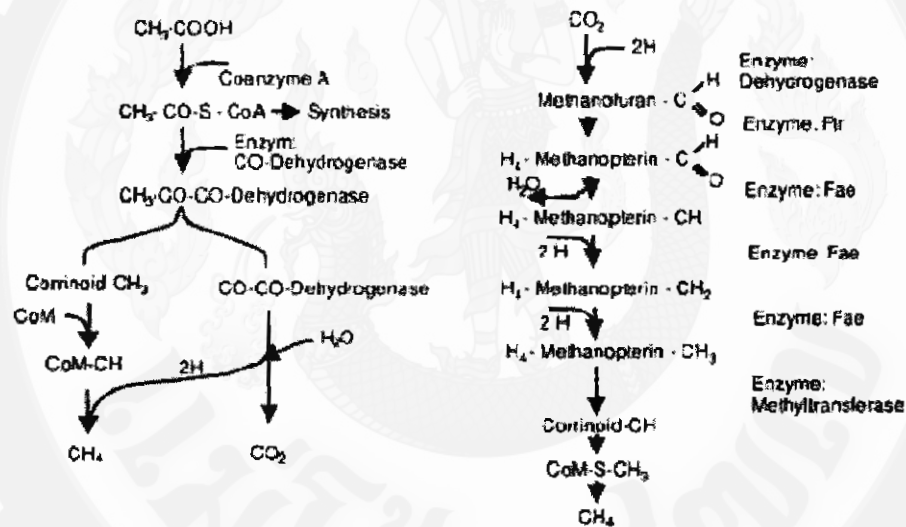
Methanogenic Bacteria



Methanogenic Bacteria



เมทาโนเจนซิสเป็นขั้นตอนที่จำเป็นในกระบวนการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก และเป็นปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่ช้าสุดในกระบวนการ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กระบวนการเมทาโนเจนซิส

ที่มา: Teodorita, et al., 2008

5. สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อกระบวนการแอนแอโรบิก

ในกระบวนการแอนแอโรบิกประกอบด้วยจุลินทรีย์หลายกลุ่มซึ่งทำงานร่วมกันและมีสภาพแวดล้อมความต้องการที่แตกต่างกันไปในการเจริญเติบโต การย่อยสลายสารอินทรีย์ รวมทั้งการผลิตก๊าซมีเทน โดยสภาพแวดล้อมต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการแอนแอโรบิกมีดังนี้

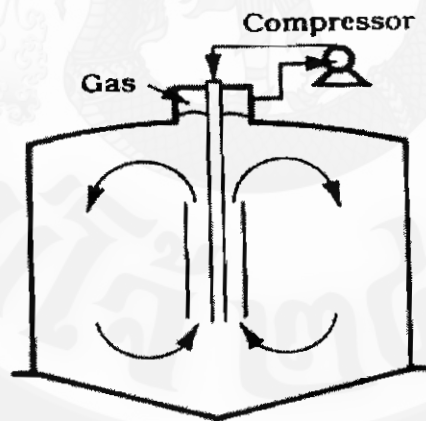
1. สภาพไร้ออกซิเจน: น้ำเสียในระบบจะต้องไม่มีออกซิเจนอยู่เลย คือ เท่ากับศูนย์ เนื่องจากออกซิเจนเป็นอันตรายต่อพวกจุลชีพผลิตมีเทน (Methane Forming Bacteria)
2. ค่าความกรด-ด่าง (pH): ค่าความกรด-ด่างที่เหมาะสมในถังหมักอยู่ในช่วง 6.6-8.6 หากมีค่าต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสภาวะเป็นกรดจะเป็นอันตรายต่อพวกจุลชีพผลิตมีเทน
3. อุณหภูมิ (Temperature): การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน มีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงเมโสฟิลิก ระหว่าง 30-38 C° และช่วงเทอร์โมฟิลิก ระหว่าง 48 - 57 C°
4. ธาตุอาหาร (Nutrient): ในน้ำเสียควรมีธาตุอาหารพอเพียงแก่การเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งทั่วไป ต้องการธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในอัตราส่วน 11 % และ 2 % ของแบคทีเรียตามลำดับโดยทั่วไปค่าบีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (BOD : N : P) จะเท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 ซึ่งต่ำกว่าระบบแบบใช้ออกซิเจนที่ต้องการธาตุอาหารในอัตราส่วน 100 : 5 : 1
5. สารพิษ (Toxic Substance): ในระบบบำบัดต้องไม่มีสารพิษต่อจุลชีพในระบบ เช่น โลหะหนักต่างๆ เกลืออนินทรีย์ แอมโมเนีย ซัลไฟด์ ซึ่งความรุนแรงของสารพิษกับชนิดและความเข้มข้น ของสารนั้น ๆ

การกวน (Mixing)

การกวนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนจำเป็นต่อการบำบัดน้ำเสียเพื่อให้จุลินทรีย์ในน้ำเสียได้สัมผัสน้ำเสียได้อย่างทั่วถึง ข้อดีของการเกิดการกวนที่ดี คือ ป้องกันการเกิดไฟฟ้า (Scum) ที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบ สามารถรักษาสภาวะแวดล้อมในระบบได้สม่ำเสมอ และสามารถทำให้ขั้นตอนการสร้างมีเทนเป็นไปได้ด้วยดีไม่ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ หากการกวนไม่เพียงพออาจมีการตกตะกอนบางส่วนซึ่งทำให้ปริมาณใช้งานของถังปฏิกรณ์และระยะเวลาเก็บลดลง การกวนที่มากเกินไปจะทำให้แบคทีเรียในระบบสัมผัสกับสารอาหารได้ดีจนอาจเกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณที่สูงเกินไปจนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนในระบบ

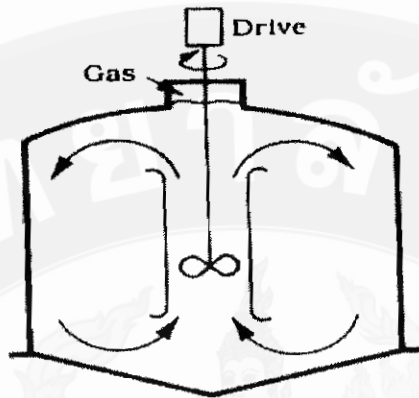
การกวนผสม: สำหรับการย่อยตะกอนแบบอัตราสูง (High Rate Digester) การกวนผสมจะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการทำงานของระบบ โดยจะต้องให้ตะกอนสามารถกระจายตัวไปอย่างทั่วถึง ซึ่งทำให้การเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอาหารสามารถเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น การกวนผสมภายในถังย่อยตะกอนสามารถทำได้หลายลักษณะ เช่น

- การกวนผสมด้วยก๊าซ (Gas Mixing) เป็นรูปแบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน โดยก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยจะถูกดูดออกจากส่วนเก็บก๊าซด้านบนของถังและสูบล้อกลับเข้าสู่บริเวณกลางถังในส่วนของตะกอนเหลว
- การกวนผสมโดยใช้ใบพัดและท่อส่ง (Draft Tube Propeller Mixers)
- การกวนผสมโดยใช้ใบพัด (Propeller Mixers) นิยมใช้ในด้านแบบฝาปิดตายตัว
- การใช้เครื่องสูบ (Pump) มักใช้กับถังย่อยตะกอนขนาดเล็ก



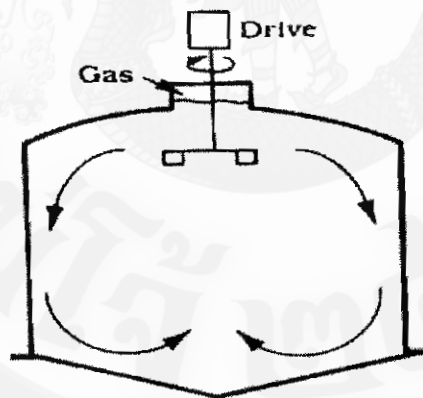
ภาพที่ 6 การกวนแบบหมุนเวียนก๊าซ และท่อส่ง (Gas Recycle and Draft Tube)

ที่มา : Reynolds and Richards (1995)



ภาพที่ 7 การกวนแบบใบพัดและท่อส่ง (Impeller and Draft Tube)

ที่มา : Reynolds and Richards (1995)



ภาพที่ 8 การกวนแบบใบพัด (Impeller)

ที่มา : Reynolds and Richards (1995)

ถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม (Mixing tank)

ถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมเป็นระบบบำบัดไร้ออกซิเจนแบบจุลินทรีย์แขวนลอย (Anaerobic Suspended Growth Process) อย่างง่าย และเป็นพื้นฐานในการพัฒนาสู่ระบบบำบัดไร้ออกซิเจนแบบอื่นๆ ต่อไป นับได้ว่าเป็นกระบวนการที่เก่าแก่ที่สุด ระยะแรกถูกใช้สำหรับการปรับเสถียรตะกอน (Sludge Stabilization) เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนจนกระทั่งปัจจุบันยังมีการใช้งานโดยกระบวนการนี้อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมบางแห่ง ซึ่งบำบัดแบบไร้ออกซิเจน (Metcalf and Eddy, 1991)

1. ลักษณะและการทำงานของถังปฏิกรณ์กวน

ถังปฏิกรณ์แบบกวนประกอบด้วยถังกวนผสม ซึ่งอาจเป็นถังกลม ถังสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าก็ได้ ซึ่งรูปทรงของถังกวนผสมต้องสัมพันธ์ต่อการกวนผสม เพราะการกวนผสมเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อกระบวนการนี้ และมักถูกสมมติว่าของเหลวที่รวมกันอยู่ในถังได้รับการกวนผสม นั่นคือผสมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างคงที่ตลอดทั่วทั้งถัง น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าถังปฏิกรณ์เพื่อกวนผสมกับตะกอนหัวเชื้อที่อยู่ภายในถังและทำปฏิกิริยากันจนได้น้ำออกที่มีเนื้อเดียวกันกับของเหลวที่อยู่ภายในถัง ส่วนในทางปฏิบัติการกวนที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อการกวนผสมนั้นเพียงพอสำหรับของเหลวที่ไม่มีความหนืดจนเกินไป (Reynolds and Richards, 1995) ก๊าซที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะถูกนำออกจากถังปฏิกิริยาทางท่อนำก๊าซที่ติดตั้งอยู่บนฝาถัง การกวนผสมภายในถังอาจทำได้โดยใช้เครื่องจักรกลแบบใบพัด การใช้เครื่องสูบน้ำหมุนเวียนหรือการกวนผสมด้วยก๊าซที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเป็นก๊าซชีวภาพ โดย Metcalf and Eddy (1991) ได้แนะนำอัตราการกวนผสมต่อปริมาตรถังด้วยก๊าซใช้ค่าในช่วง $4.5 - 5.0 \times 10^{-3} \text{ ม}^3/\text{ม}^3\cdot\text{นาที่}$ และการกวนผสมด้วยเครื่องจักรกลใช้ค่าในช่วง $4.93 - 7.88 \times 10^{-3} \text{ กิโลวัตต์/ม}^3$ ประโยชน์ของการกวนผสมมีดังนี้

1. ป้องกันการแยกชั้นทางความร้อนและรักษาสภาพคงที่ทางอุณหภูมิตลอดทั่วทั้งถังปฏิกิริยา โดยการรักษาสภาพทางเคมีและกายภาพให้เท่ากันทั้งหมด
2. ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างจุลินทรีย์และน้ำเสียเข้า

3. เกิดการกระจายอย่างรวดเร็วของกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์และลดผลกระทบอันเนื่องมาจากสารพิษที่เข้ามาสู่ระบบให้น้อยที่สุด
4. ป้องกันการเกิดฝ้าไขและการตกตะกอนทับถมของดินตะกอน กรวด ทรายและอนุภาคของแข็งที่เข้ามาปนน้ำเสีย

2. ข้อดีและข้อเสีย ของถังปฏิกรณ์แบบกวน

ข้อดี

1. เหมาะกับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยในระดับที่สูง
2. เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง
3. ถังปฏิกรณ์แบบนี้สามารถรักษาความคงที่ของสารอาหาร อุณหภูมิและพีเอชให้เท่ากันทั่วทั้งถังปฏิกรณ์
4. ถังปฏิกรณ์แบบนี้ง่ายต่อการเฝ้าตรวจ
5. สารพิษในน้ำเสียซึ่งมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จะถูกเจือจางให้มีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุด
6. การกวนผสมที่ดีภายในถังปฏิกรณ์จะช่วยลดการไหลลัดวงจร และการสะสมตัวของปริมาณของน้ำเสียที่เป็นจุดอับการกวน
7. ไม่เกิดการจมตัวของจุลินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน

ข้อเสีย

1. ต้องการปริมาตรของถังปฏิกรณ์ที่มาก เพื่อรักษาเวลาเก็บกักของแข็ง (Solids Retention Time, SRT) ให้เพียงพอ
2. การกวนผสมเป็นเรื่องที่ยากสำหรับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยสูง
3. ประสิทธิภาพในการบำบัดอาจต่ำ เนื่องจากน้ำเสียที่ยังไม่ได้รับการย่อยสลายและจุลินทรีย์หลุดออกไปที่ทางออกของถังปฏิกรณ์
4. เสถียรภาพของถังปฏิกรณ์อาจถูกจำกัดโดยเวลาเก็บกักของแข็งที่ต่ำ

2.5 การออกแบบถังถังหมักไร้อากาศ

การออกแบบถังหมักไร้อากาศที่เหมาะสม ยังไม่ปรากฏแน่ชัดในปัจจุบัน แต่ที่มีการใช้งานอยู่ในทุกวันนี้เป็นถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีการกวนผสมอย่างสม่ำเสมอจึงดูแลรักษายากในส่วนใบกวนหรือเครื่องสูบกวนที่ใช้ในการกวนผสม และเนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดสามารถทำงานได้ดีและอัตราการทำงานสูงกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจึงทำให้ แบคทีเรียชนิดนี้มีมากและอาจทำให้สร้างกรดได้ดีขึ้น เมื่อระบบมีค่า pH ต่ำลง (ช่วง 5.8 – 6.2) เวลาเก็บกักที่ต้องการขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางโครงสร้างที่ซับซ้อนของสารอินทรีย์ อุณหภูมิและความต้องการระดับของการสร้างกรด ซึ่งปกติจะอยู่ในช่วง 6-24 ชั่วโมง Georgia *et al.* (1988) ได้เสนอค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ (Biogenetic Coefficient) ไว้ดังตารางที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 7 ค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ของแบคทีเรียสร้างกรด

ค่าคงที่ทางจลนศาสตร์	หน่วย	พิสัย
μ_m	ต่อวัน	12 – 85
K_s	มก.ซีโอดี/ล.	10 – 10000
k_d	ต่อวัน	0.01 – 6.6

ที่มา : Georgia. *et al.* (1988)

ก๊าซชีวภาพ

"ก๊าซชีวภาพ" เป็นก๊าซผสมประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 60-65% โดยปริมาตร ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 34-39% และก๊าซอื่น ๆ ประมาณ 1% เช่น ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นต้น

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการหมักย่อยของเสียโดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ของเสียเหล่านั้น ได้แก่ ของเสียจาก สุกร โค ไก่ หรือ ของเสียจากภาคอุตสาหกรรมเกษตร และขยะ เช่น โรงงานผลิต แป้งมันสำปะหลัง โรงงานน้ำมันปาล์ม และโรงงานเอทานอล เป็นต้น ซึ่งในประเทศไทยนับว่ามี ของเสียเหล่านี้อยู่มาก ปัจจุบันพบว่าการปล่อยทิ้งของเสียดังกล่าวบางส่วนลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง สาธารณะ ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ก่อนหน้านี้ได้มีการบำบัดโดยใช้วิธีการเติมอากาศ ซึ่งก็ต้อง ใช้พลังงานไฟฟ้าทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการบำบัด ดังนั้นระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ จึงมี ประโยชน์ในการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดการปล่อยน้ำเสียลงสู่แม่น้ำ สาธารณะ ลดกลิ่นเหม็น ได้ปุ๋ยชีวภาพไปใช้ในการเกษตร ได้พลังงานทดแทน และยังช่วยลดภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย โดย รูปแบบและลักษณะของการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนที่ นิยมโดยทั่วไปมี อยู่ 3 ลักษณะ คือ

1. นำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ในเตาหุงต้มในครัวเรือน เชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงใน การอบแห้ง และใช้กับเครื่องกกสุกสุกร

2. นำก๊าซชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้า ได้แก่ ใช้กับชุดเครื่องยนต์ สันดาปภายใน ต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) หรือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) โดยผลิตพลังงานไฟฟ้า เพื่อใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับกิจกรรมการเลี้ยงสัตว์ภายในฟาร์ม หรือสามารถนำไปขับเครื่องสูบน้ำโดยตรง หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการต้นกำลัง การนำก๊าซ ชีวภาพไปใช้ในเครื่องยนต์นั้น สามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) เช่น รถยนต์ ที่เราใช้กันอยู่ได้ทุกชนิด ซึ่งในขณะนี้การใช้ก๊าซชีวภาพกับเครื่องยนต์สันดาป ภายใน จะมีอยู่ 4 รูปแบบด้วยกัน คือ

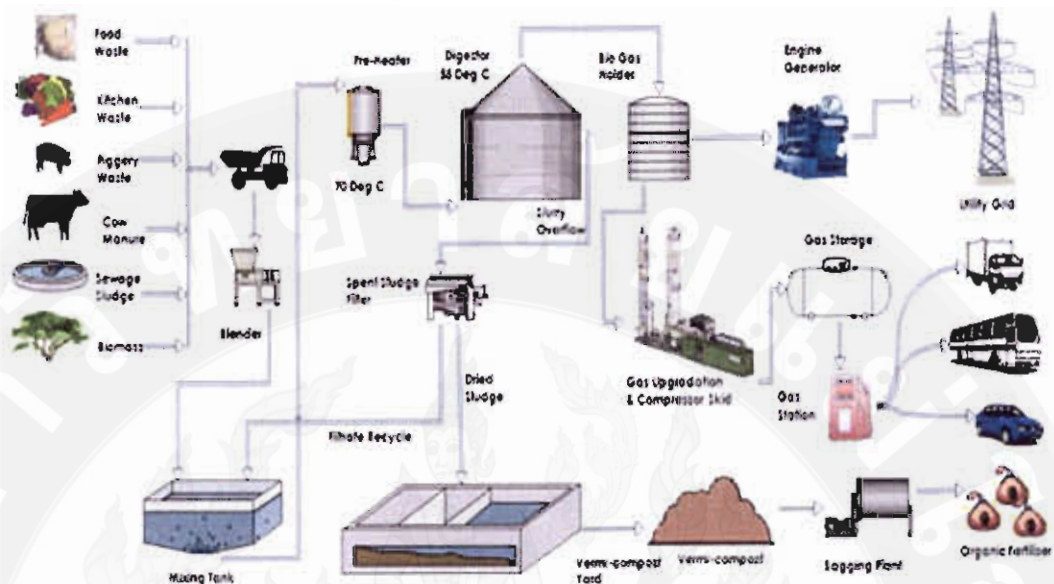
2.1 เครื่องยนต์เบนซิน หรือ ดีเซลขนาดเล็ก ได้แก่ เครื่องตัดหญ้า เครื่องยนต์ต้นกำลังขนาด 5-12 แรงม้า นำมาดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพร่วมกับน้ำมันเบนซินหรือดีเซล โดยการทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ประมาณ 80-90 %

2.2 เครื่องยนต์ดีเซลขนาดกลาง นำมาดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพ ร่วมกับน้ำมันดีเซลโดยการทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ประมาณ 80%

2.3 เครื่องยนต์เบนซิน หรือ ดีเซล ขนาดกลางและใหญ่ นำมาดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้ 100 % มีประสิทธิภาพประมาณ 20-25%

2.4 เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพโดยเฉพาะ (เครื่องนำเข้าจากต่างประเทศ) มีประสิทธิภาพประมาณ 40%

3. การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในการผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System) จะเป็นการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้า และความร้อนร่วมกันซึ่งเป็นระบบที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ การใช้เชื้อเพลิงให้มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งรูปแบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมกับความร้อนนี้อาศัยหลักการนำความร้อน ที่เกิดขึ้นจากระบบการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้ากลับมาผลิตเป็นพลังงานความร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น การใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นเครื่องต้นกำลังสำหรับผลิตพลังงานกล /ไฟฟ้า จะเกิดความร้อนในน้ำหล่อเย็นและส่วนของไอเสียเครื่องยนต์ การนำเอาความร้อนทั้งเหล่านี้กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการใช้พลังงานจากก๊าซชีวภาพดังกล่าวเพิ่ม ขึ้นสูงถึง 70-80% โดยการนำความร้อนทั้งดังกล่าวมาใช้ในการอบแห้ง หรือระบบทำความเย็นแบบดูดซึม



ภาพที่ 9 การติดตั้งและการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ

ที่มา: <http://www.rengasindia.com/products.php>

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Moonil *et al.* 2001 ศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการและประสิทธิภาพของการหมักเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศชนิด CSTR ที่อุณหภูมิ Mesophilic (35°C) กับ Thermophilic (55°C) ซึ่งหาค่าความแตกต่างของปริมาณก๊าซที่ผลิตได้เมื่อแต่ละถังปฏิกรณ์มีการเติมน้ำเสียแตกต่างกัน 4 แบบ ดังนี้ 1) เติมน้ำเสียวันละ 1 ครั้ง 2) เติมน้ำเสียต่อเนื่อง 3) เติมน้ำเสียวันละ 1 ครั้ง 2 สถานะ 4) เติมน้ำเสีย 1 ครั้งแต่ไม่มีการกวน โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 35 และ 55°C มีสัดส่วนของแข็ง 4% TS ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ไม่ว่าจะเติมน้ำเสียด้วยวิธีใดกับถังชนิดไหนก็ตาม การทดลองที่อุณหภูมิ 55°C จะเกิดก๊าซชีวภาพมากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 35°C ในทุกๆ การทดลอง

Ortega, Barrington and Guiot, (2008) ศึกษากระบวนการแอนแอโรบิกสำหรับบำบัดขยะอาหาร โดยทำการเปลี่ยนจุลินทรีย์จากมีโซฟิลิกเป็นเทอร์โมฟิลิกแบบทันทีทันใด การทดลองใช้ถังปฏิกิริยาขนาด 5 L มีใบกวน ขยะอาหารที่ใช้ในการทดลองได้ผ่านกระบวนการคัดแยกและตัดเป็นชิ้น โดยขยะอาหารที่มีขนาดชิ้นใหญ่ที่สุดเท่ากับ 4.75 mm ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ช่วงการทดลอง คือ C1 ถึง C4 (C คือ ช่วงการทดลอง) โดยมีขั้นตอนการเปลี่ยนอุณหภูมิของจุลินทรีย์จาก 35 °C เป็น 55 °C แบบทันทีให้เป็นช่วง C0 ในขั้นตอนการทดลองช่วง C1 – C3 ได้มีการเปลี่ยน F/M ดังนี้ 0.12, 1.15 และ 4.43 g VS g⁻¹ VSS แต่ละช่วงการทดลองใช้เวลา 21 วัน คือเริ่มแรกจะทำการเลี้ยงตะกอนเชื้อจุลินทรีย์เป็นเวลา 21 วัน โดยทำการปรับอุณหภูมิจาก 35 °C เป็น 55 °C ในวันที่ 13 ของการทดลองและทำการเลี้ยงเชื้อต่อเนื่องครบ 21 วัน นา ตะกอนเชื้อจุลินทรีย์มาทำการทดลอง C1 – C4 โดยศึกษาภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.2 – 1.4 L_{STP} g⁻¹ VS_{fed} และสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.1 – 0.84 L_{STP} CH₄ g⁻¹ VS_{fed}

Forster-Carneiro, Perez and Romero, (2008) ศึกษากระบวนการแอนแอโรบิกในการย่อยขยะอินทรีย์จากชุมชนที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกโดยทำการศึกษาขยะ 3 ชนิด คือขยะอาหาร ขยะชุมชนที่ผ่านกระบวนการคัดแยกจากเครื่องหมุนเหวี่ยง (Trommel Screen) ขยะที่ผ่านการคัดให้มีขนาดเล็กถึง 2 – 6 mm โดยทำการทดลองเป็นระบบแบตช์ ซึ่งถังปฏิกิริยามีขนาด 1.1 L และมีการกวนผสมที่อุณหภูมิ 55 °C โดยใส่ขยะลงในถังปฏิกิริยา 20 %TS และจุลินทรีย์ 30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตร ให้มีปริมาตรรวมในถังปฏิกิริยา 65 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่า ขยะอาหารมีการย่อยสลาย 34%VS สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.18 LCH₄ g⁻¹ VS ขยะชุมชนที่ผ่านการคัดแยกจากเครื่องหมุนเหวี่ยงสามารถย่อยสลายได้ 79.5 %VS สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.08 LCH₄ g⁻¹ VS และขยะที่ผ่านการคัดให้มีขนาดเล็กมีการย่อยสลายของขยะ 73.7 %VS ผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.05 LCH₄ g⁻¹ VS

Khursheed *et al.* 2005 ศึกษาผลของการกวนที่มีต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ในการทดลองจะใช้ถังชนิด CSTR ด้วยถังขนาด 3.7 ลิตร และใช้มูลวัวที่เป็นของเหลวผสมกับมูลวัวที่เป็นของแข็งเป็นวัตถุดิบอัตราส่วนการผสมระหว่างมูลวัวที่เป็นของแข็งต่อมูลวัวที่เป็นของเหลว จะแบ่งออกเป็น 3 อัตราส่วนคือ 5%, 10% และ 15% ของวัตถุดิบทั้งหมดการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองไว้ที่ 35 °C และค่า HRT 16.2 วัน เปรียบเทียบกันระหว่าง การหมักโดยไม่มีการกวน พบว่าในกรณีของการใช้มูลวัวที่มีสัดส่วนมากขึ้น 5% 10% และ 15% TS จะทำให้ผลิตก๊าซได้มากขึ้นตามลำดับ และการทดลองที่มีการกวน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าการหมักที่ไม่มีการกวนประมาณ 10–30% และผลของการกวนจะมีความสำคัญในกระบวนการหมักอย่างมากเมื่อวัตถุดิบที่ใช้มีส่วนผสมของของแข็งในปริมาณที่มากขึ้น

Karim *et al.* 2005. 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%

Schimedell และคณะ (1996) พบว่าการหมักแบบไร้อากาศของของเสียจากเทศบาล (Municipal Solid Waste) ว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด TVS มีค่า 50% ที่สภาวะคงที่ (Steady State) Klass (1984) พบว่าการหมักแบบไร้อากาศที่ใช้สารอาหารจากตะกอนในระบบเลี้ยงตะกอนดำเนินการเดิมเข้าสู่ชุดการทดลองทุกวันมีการอย่างสม่ำเสมอ อุณหภูมิ 35 °C และมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6.7-7.2 มีประสิทธิภาพในการกำจัด TVS ที่ 25.1-49.0% Karim พบว่าการกวนมีผลต่อประสิทธิภาพในการหมักของถังหมักกวนผสมแบบ Mixed Anaerobic Digestion ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยเฉลี่ยที่ 71.1 - 77.3 % และชุดการทดลองที่ไม่มีการกวน กวน 2 ครั้งต่อวัน กวน 4 ครั้งต่อวัน กวน 8 ครั้งต่อวันสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่ 0.263 0.317 0.330 และ 0.362 ลิตรต่อวัน โดยมีสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่ 43.9 – 71.5 % ตามลำดับ

Nallthambi, (1997) ได้จัดทำรายงานรวบรวมงานวิจัยอื่นๆ (Review) โดยคำนวณอยู่ในอัตราการผลิตก๊าซมีเทน ต่อปริมาณของแฉ่งระเหย เนื่องจากของแฉ่งระเหยคือตัวแทนของสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายกลายเป็นอาหารของแบคทีเรียเพื่อผลิตกลายเป็นก๊าซมีเทน และการคำนวณอัตราการผลิตก๊าซมีเทน ต้องขึ้นอยู่กับการทดลองในแต่ละระบบ เนื่องจากมีการควบคุมตัวแปรของสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบที่แตกต่างกัน

ธนวัฒน์, (2553) ผลผลิตของก๊าซมีเทนที่คำนวณเทียบกับปริมาณค่าของแฉ่งที่เข้าสู่ระบบ ได้ที่สภาวะเข้าสู่สมดุลสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ $0.163 - 0.286 \text{ m}^3\text{STP kg}^{-1} \text{ total solid}$ ค่าผลผลิตของก๊าซมีเทนสามารถผลิตได้ต่ำกว่า $0.1 \text{ m}^3 \text{ STP kg}^{-1} \text{ total solid}$ และนำผลผลิตของก๊าซมีเทนเทียบกับปริมาณของแฉ่งระเหยที่เข้าสู่ระบบ โดยที่ของแฉ่งระเหย (Volatile Solid, VS) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.3% สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ $0.208 - 0.357 \text{ m}^3\text{STP kg}^{-1} \text{ Volatile Solid}$

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

1. มูลสุกรขุนจากฟาร์มคณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่โจ้
2. ขวดรูปชมพู่ (Flask) ขนาด 100 ลบ.ซม.
3. ขวดรูปชมพู่ (Flask) ขนาด 250 ลบ.ซม.
4. บีกเกอร์ (Beaker)
5. กระบอกตวง (Cylinder)
6. ปิเปต (Pipette)
7. ไมโครปิเปต (Micropipette)
8. ถังหมัก ขนาด 7 ลิตร
9. สายยางขนาดเล็ก
10. วาล์วพลาสติก
11. ขวดเก็บตัวอย่างน้ำ ขนาด 1000 มล.
12. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.
13. ปากคีบ
14. บิวเรตต์ ขนาด 50 มล.
15. หลอด COD ขนาด 20X150 มม.
16. ลูกยางปิเปต
17. ขวด BOD ขนาด 300 มล.
18. กรวยแก้ว

สารเคมี

1. น้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์
2. สารละลายมาตรฐาน กรดซัลฟูริก 0.05 โมล / ลบ.คม.
3. สารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.10 โมล / ลบ.คม.
4. สารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์อินดิเคเตอร์
5. สารละลายเมทิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์
6. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 0.1 โมล /ลบ.คม.
7. สารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดโครเมต 0.0167 โมลาร์
8. กรดซัลฟูริกเข้มข้นที่ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต
9. สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์
10. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.10 โมลาร์
11. สารละลายแมงกานีสซัลเฟต
12. อัลคาไรต์-ไอโอไดค์-เอไซด์รีเอเจนต์
13. กรดซัลฟูริกเข้มข้น
14. น้ำแข็ง
15. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.0250 โมล / ลบ.คม.
16. Sodium Hydroxide 32 %
17. Mixed Indicator
18. สารละลาย Boric Acid 4%
19. Mixed Catalyst
20. Hydrochloric Acid 0.05 N

เครื่องมือ

1. เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction Pump)
2. กรวยบูชเนอร์ และขวดกรอง
3. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
5. โถดูดความชื้น
6. คุ้ความคุมอุณหภูมิ
7. ตู้บ่ม (Indicator) $20 \pm 1^\circ\text{C}$
8. เครื่องย่อยสาร
9. เครื่องกำจัดไปกรด
10. เครื่องกลั่นสาร

วิธีการทดลอง

1. ถังหมักไร้อากาศ (Anaerobic Reactor)

ถังหมักขนาด 1000 ลิตร จำนวน 2 ถัง ด้านบนถัง มีฝาอัดแน่นด้วยกาวซิลิโคน ฝาของถังหมักเชื่อมด้วยท่อ PVC เพื่อให้เชื่อมกับระบบเก็บก๊าซชีวภาพ ส่วนด้านบนทางด้านหน้าและด้านหลังต่อเป็นท่อน้ำเข้า (Influent) และท่อน้ำออก (Effluent) โดยใช้ท่อ PVC และขนาดเดียวกันมีการนำน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเข้าโดยใช้ระบบปั๊มทางด้านหน้าของถังหมัก



ภาพที่ 10 ถังหมักไร้อากาศ

2. ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ (Biogas Collection System)

ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ ประกอบไปด้วยถังเก็บก๊าซชีวภาพ ด้านหน้าใช้แถบวัดมีสเกลบอกหน่วยเซนติเมตร ส่วนบนเจาะรูทำเป็นข้อต่อด้วยท่อ PVC สวมเข้ากับ T-Joint Connector เป็นสามทาง ทางหนึ่งต่อกับสายยาง Latex อีกทางหนึ่งต่อท่อ PVC เพื่อใช้สำหรับปล่อยก๊าซออกจากระบบ (Gas Releasing) ระบบเก็บก๊าซนี้ยังประกอบไปด้วยวาล์วใช้เปิด-ปิด ก๊าซที่เกิดขึ้นเพื่อเก็บก๊าซไปวิเคราะห์ ในการเก็บตัวอย่างทำโดยการแทนที่น้ำแสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 11 ถังหมักไร้อากาศและระบบเก็บก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 12 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำ

2.1. การตรวจสอบคุณลักษณะน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเบื้องต้นและการเก็บรักษาน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้จากคณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่โจ้เป็นน้ำที่ใช้ในการล้างฟาร์มสุกรโดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งในช่วงเช้าหลังจากมีการล้างคอกของสุกร ลักษณะน้ำทิ้งจะมีมูลของสุกรไหลรวมกับน้ำทิ้งเป็นของเหลว (Slurry) กึ่งของแข็ง การเก็บรักษาจะเก็บไว้โดยแช่เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรจะถูกนำมาวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อสภาพแวดล้อม คือ BOD COD ปริมาณของแข็งแขวนลอย ค่าความเป็นด่าง pH และอุณหภูมิ

2.2 การดำเนินการทดลอง (Experimental Produce)

การทดลองเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบสภาพถังหมักให้ใช้ได้จริง โดยการตรวจสอบรอยรั่วของถังหมักตามบริเวณต่างๆของถังหมักที่มีการต่อหรือเชื่อมให้ติดกันซึ่งจะใช้น้ำทิ้งเดิมเข้าไปในถังหมักแล้วสังเกตการรั่วซึมจากทุกด้านส่วนการตรวจสอบการรั่วของก๊าซที่อาจเกิดขึ้นจะใช้น้ำสบู่ป้ายตามจุดที่มีการเชื่อมติดแล้วสังเกตการเกิดฟองที่เกิดขึ้นเมื่อมีการรั่วของก๊าซ ส่วนการตรวจสอบการแทนที่น้ำของก๊าซจะทำโดยการเป่าลมเข้าทางสายยางนำก๊าซ การเชื่อมต่อของถังหมักและระบบเก็บก๊าซชีวภาพจะใช้กาวชนิดต่างๆ ได้แก่ กาวซิลิโคน น้ำยาประสานท่อ เมื่อจัดตั้งระบบเรียบร้อยแล้วดำเนินการทดลองเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมตัวอย่าง การทดลองจริง และการวิเคราะห์ตัวอย่าง รายละเอียดในขั้นตอนต่างๆเป็นดังนี้

2.2.1. การเตรียมตัวอย่าง (Sample Preparation) เก็บตัวอย่างน้ำเสียมูลสุกรจากจากฟาร์มคณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่โจ้ วัดค่า pH ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids: SS) ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (Volatile Suspended Solids: VS) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD), แอลคาไลน์ (mg/l as CaCO_3) บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD) pH และ สภาพต่าง

2.2.2 ทำการหมักน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในระยะเริ่มต้นของการหมัก (Start Up) เพื่อให้มีเชื้อแบคทีเรียอยู่ในระบบ ทำโดยการหมักน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในถังปิดที่ต่อกับท่อน้ำเข้า ขนาดถังประมาณ 1000 ลิตร การหมักเป็นไปโดยการเติมครั้งเดียว (Batch) ด้วยความเข้มข้นของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร 100 % หมักจนเกิดก๊าซชีวภาพปริมาณสูงสุด หลังจากนั้นจะเติมน้ำทิ้งด้วยปริมาตร 100 ลิตร/วัน เพื่อรักษาระยะเวลาเก็บกัก (θ) การเติมน้ำเสียของฟาร์มสุกร (Feeding) เข้าระบบในระยะนี้เป็นการให้อาหารแก่แบคทีเรียในถังหมักทั้งสอง ขณะทำการเติมน้ำเสียของฟาร์มสุกรเข้าระบบจะเป็นการถ่ายเอาน้ำทิ้ง (Effluent) ออกมาด้วยปริมาตร 100 ลิตร/วัน ให้เท่ากับที่เติมเข้าไปในระบบ

เป็นการรักษาปริมาตรการใช้งานของถังหมักให้คงที่ 100 ลิตร สังเกตปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นจากการแทนที่น้ำในระบบเก็บก๊าซชีวภาพ (Gas Collector)

2.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างจากระบบ

ตัวอย่างจากระบบแบ่งออกเป็น ตัวอย่างน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและตัวอย่างก๊าซชีวภาพซึ่งน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรจะแบ่งเป็น น้ำที่เข้าระบบ (Influent) และน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (Effluent) การวิเคราะห์ตัวอย่างจะทำ 3 ครั้ง / อาทิตย์ (จันทร์ พุธ ศุกร์) เพื่อติดตามความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ

2.3.1 การทำงานของระบบ

หมักน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในสภาพไร้อากาศ อุณหภูมิ 29 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุด คือ กวนวันละ 2 4 และ 8 ครั้ง (ครั้งละ 30 นาที) และไม่มีการกวน (ชุดควบคุม) หมักจนเกิดก๊าซและทำการป้อนของน้ำเสียเข้าถังหมักวันละ 100 ลิตรตลอดการทดลอง

2.3.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ตัวอย่างน้ำทิ้งก่อนที่จะถูกนำเข้าสู่ระบบ และน้ำทิ้งจะนำมาวิเคราะห์ BOD COD ของแข็งแขวนลอย ค่า pH และสภาพความเป็นด่าง โดยการวิเคราะห์แต่ละตัวอย่างในแต่ละตัวแปรจะวิเคราะห์ทั้งหมด 2 ข้าง ข้อมูลที่ได้จะนำมาไปเปรียบเทียบกันและจะได้ประสิทธิภาพของระบบ

2.3.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซชีวภาพ ในแต่ละวันจะบันทึกก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในรูปก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Total Gas) จากสเกลข้างระบบเก็บก๊าซชีวภาพแล้วนำมาคำนวณเป็นปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นในหน่วย ลิตร/วัน และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (BIOGAS 5000)



ภาพที่ 13 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (BIOGAS 5000)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. รวบรวมของเสียและเก็บตัวอย่างที่เกิดขึ้นจากฟาร์มสุกรขนาดเล็กและผู้เลี้ยงสุกรระดับครัวเรือน

สำรวจฟาร์มสุกรในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยเน้นฟาร์มสุกรขนาดเล็ก ผลการสำรวจข้อมูลในเบื้องต้นก่อนการปรับปรุงและทดสอบระบบบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยเฉพาะฟาร์มสุกรขนาดเล็กนั้น พบว่า ฟาร์มขนาดเล็กส่วนมากจะมีการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียตามแบบที่มีการแนะนำมาแล้วก็ตาม แต่ก็พบว่าหลายแห่งไม่สามารถที่จะบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากการสำรวจพบว่าปัญหาหลักๆ ที่เกิดขึ้น 2 ด้าน คือ ด้านเทคนิคและด้านการจัดการ

ด้านเทคนิคที่พบจะประกอบไปด้วย การก่อสร้างระบบไม่เพียงพอกับน้ำเสียที่เกิดขึ้น และระดับการไหลหรือความลาดเอียงของท่อน้ำเสียของระบบหลายๆ แห่งไม่เหมาะสม เช่น ระดับพื้นของตัวอาคารของฟาร์มสุกรมีระดับที่ใกล้เคียงหรือต่ำกว่าท่อน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบ ทำให้น้ำเสียไม่สามารถเข้าสู่ระบบได้อย่างเต็มที่ เกิดการไหลย้อนกลับ และเกิดการอุดตัน

ด้านการจัดการ ปัญหาที่พบจะเป็นในเรื่องของการมีส่วนร่วมของเจ้าของฟาร์ม โดยเฉพาะการดูแลและบำรุงรักษาระบบให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ เช่น การดักตะกอนออกจากบ่อแยกตะกอน อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่เหมาะสม เป็นต้น

คณะผู้วิจัยได้ทำการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลองค์ประกอบของกากตะกอนและน้ำส้วนที่ผ่านการหมักแบบไร้อากาศของฟาร์มสุกรทั่วไป โดยได้ทำการดำเนินการเก็บข้อมูลฟาร์มสุกรในบริเวณ อำเภอสันทราย สันป่าตอง และอำเภอแม่วาง พบว่าในบริเวณ อำเภอสันทรายส่วนใหญ่จะเป็นฟาร์มสุกรขนาดเล็ก จำนวนสุกรที่เลี้ยงมีประมาณ 10 – 100 ตัว ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นสุกรขุน ส่วนในอำเภอสันป่าตองและอำเภอแม่วางพบว่าฟาร์มสุกรมีขนาดใหญ่ซึ่งมีสุกรขุนจำนวน 300 – 800 ตัว ซึ่งมีบางฟาร์มที่มีระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และมีการนำก๊าซที่ผลิตได้ไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงเรือน แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าแต่ละพื้นที่ยังไม่มีการนำมูลสุกรไปใช้ประโยชน์ในแง่เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ทั้งกากตะกอนและน้ำส้วนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะปล่อยทิ้งในบริเวณรอบๆ ฟาร์มเท่านั้นซึ่งลักษณะและองค์ประกอบเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 7



1.ฟาร์ม นายจำรัส อุ่มนาง
221 ม. 9 ต.หนองแห่ย์ อ.สันทราย
จ.เชียงใหม่ 50290
จำนวนหมู 16 ตัว

2.ฟาร์มนางสุดใจ วันสอน
ม. 9 ต.หนองแห่ย์ อ.สันทราย
จ.เชียงใหม่ 50290
จำนวนหมู 11 ตัว



3.ฟาร์มนายประพันธ์ ขยัน
40/1 ม.9 ต.หนองแห่ย์ อ.สันทราย
จ.เชียงใหม่ 50290
จำนวนหมู 21 ตัว

4.ฟาร์มนางคำไธ สนธิ
120 ม.10 ต.หนองแห่ย์ อ.สันทราย
จ.เชียงใหม่ 50290
จำนวนหมู 11 ตัว แม่พันธุ์ 1 ตัว



5. ฟาร์ม นางแดง พรหมมินทร์
332/4 ต.หนองจ้อม อ.สันทราย
จ.เชียงใหม่ 50290
จำนวนหมู 250 ตัว แม่พันธุ์ 30 ตัว

6. ฟาร์มนางบัวเขียว ปัญญา
98 ม.3 ต.คอนเปา อ.แม่วาง
จ.เชียงใหม่ 50360
จำนวนหมู 800 ตัว



7. ฟาร์มนางเย็น คำปัน
25 ม.3 ต.คอนเปา อ.แม่วาง
จ.เชียงใหม่ 50360
จำนวนหมู 800 ตัว

8. ฟาร์มนายทองอินทร์ คำปัน
83 ม.3 ต.คอนเปา อ.แม่วาง
จ.เชียงใหม่ 50360
จำนวนหมู 130 ตัว



9. ฟาร์มนายสมพร ภิวงศ์
101/2 ม.3 ต.คอนเปา อ.แม่วาง
จ.เชียงใหม่ 50360
จำนวนหมู 200 ตัว

10. ฟาร์มนางศรีเพ็ญ ไหมใจ
81/1 ม.3 ต.คอนเปา อ.แม่วาง
จ.เชียงใหม่ 50360
จำนวนหมู 200 ตัว

ภาพที่ 14 ลักษณะฟาร์มต่างๆที่คณะผู้วิจัยทำการสำรวจ

1.2 วิเคราะห์ลักษณะของเสีย

ตารางที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ชื่อฟาร์ม	จำนวนหมูที่เลี้ยง (ตัว)	pH	SS (mg / l)	COD (mg / l)	BOD (mg /dm3)	TKN (mg / L)
จำรัส	16	6.3	1260	16800	5100	516.8
สุคใจ	11	7.3	8590	24000	9600	958.0
ประพันธ์	21	7.1	730	8000	3750	731.1
คำใส	11 ตัว แม่พันธุ์ 1	6.8	4590	18400	12300	895.0
แดง	250	7.4	6930	5600	1050	491.6
บัวเขียว	800	7.2	1120	4000	840	605.1
เย็น	600	7.3	990	2400	540	441.2
ทองอินทร์	130	7.9	1390	4800	2550	1285.8
สมพร	200	7.1	5980	6400	3000	630.3
ศรีเพ็ญ	200	7.2	1380	3200	1920	642.9

2. การออกแบบถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม

การออกแบบถังหมักไร้อากาศที่เหมาะสม ยังไม่ปรากฏแน่ชัดในปัจจุบัน แต่ที่มีการใช้งานอยู่ในทุกวันนี้เป็นถังหมักกวนผสมที่มีการกวนผสมอย่างสม่ำเสมอจึงดูแลรักษายากในส่วนใบกวนหรือเครื่องสูบกวนที่ใช้ในการกวน และเนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดสามารถทำงานได้ดีและอัตราการทำงานสูงกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจึงทำให้แบคทีเรียชนิดนี้มีมากและอาจทำให้สร้างกรดได้ดีขึ้น เมื่อระบบมีค่าพีเอชต่ำลง (ช่วง 5.8 – 6.2) เวลาเก็บกักที่ต้องการขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางโครงสร้างที่ซับซ้อนของสารอินทรีย์ อุณหภูมิและความต้องการระดับของการสร้างกรด ซึ่งปกติจะอยู่ในช่วง 6-24 ชั่วโมง Georgia et al. (1988) ดังแสดงในภาพที่ 15 และภาพที่ 16

นำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ฟาร์มจะนำมาใช้ในการออกแบบถังหมักกวนผสม เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ข้อมูลวิเคราะห์น้ำเสีย

พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด	หน่วย	แหล่งข้อมูลน้ำเสีย
pH	-	7.2
BOD	mg/l.	5,000
COD	mg/l.	7,000
SS	mg/l.	368
TDS	mg/l.	5,600

รายการการคำนวณ

คุณสมบัติของน้ำทิ้ง

จากระบบบำบัดน้ำเสีย

BOD ₅	20	mg/l
SS	100	mg/l
อัตราการไหล	100	l/day

คุณสมบัติของน้ำเสีย

ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

BOD ₅	5000	mg/l
COD	7000	mg/l
CODs	6,000	mg/l
VSS	1500	mg/l
SS	550	mg/l
TSS	750	mg/l
อัตราการไหล	100	l/day
Temperature	25	°C

ข้อกำหนดในการออกแบบ

y	0.08	gVSS/g COD
kd	0.03	gVSS/g VSS day
Lorg	1	kg sCOD/ m ³ .day
μm	0.25	g VSS/g VSS.day
fd	0.15	g VSS celldebris/g VSS biomass decay
Ks	900	
COD/TSS ratio	1.8	

Reactor volumn effectiveness factor = 85 percent

1. ปริมาณเก็บกักน้ำเสีย

Anaerobic Tank (1 ลูกบาศก์เมตร)

$$\begin{aligned}
 V &= QSo/ Lorg \\
 &= 0.1 \text{ m}^3/\text{day} \times 7,000 \text{ mg/l} / 1 \text{ kg sCOD/ m}^3.\text{day} \\
 &= 0.7 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

ใช้ปริมาตรบ่อ ขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร

ตรวจสอบอัตราการไหลขึ้น $A = Q/v$

$$3.14 = 0.1 \text{ m}^3 / v$$

$$v = 0.1 \text{ m}^3 / (3.14 \text{ m}^2 \times 8 \text{ hr})$$

$$v = 0.004 \text{ m/hr}$$

2. คำนวณหาระยะเวลากักเก็บตะกอน

กำหนดประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 75 %

$$\begin{aligned} \text{SRT} &= \left\{ \frac{\mu \text{m Se} - \text{kd}^{-1}}{(\text{Ks} + \text{Se})} \right\} \\ &= \left\{ \frac{0.2 \times 1000 - 0.03^{-1}}{900 + 1000} \right\} \\ &= 13.29 \text{ d} \end{aligned}$$

Design with safety factor 1.5

$$\text{SRT} = 19.94 \text{ d}$$

ปริมาณ TSS ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ = 0.2×550

$$= 110 \text{ mg/l}$$

$$S_o - S = 7,000 - 1,000 - 110 \times 1.8$$

$$= 5,802 \text{ mg/l}$$

$$P_{x,tss} = QY(S_o - S) / (1 + k_d \text{SRT})^{0.85}$$

$$+ f_d k_d QY(S_o - S) \text{SRT} / (1 + (k_d \text{SRT})^{0.85})$$

$$+ Q(\text{Non degradable TSS})$$

$$= 0.1 \times 0.08 \times (5,802) / (1 + 0.03 \text{SRT})^{0.85}$$

$$+ 0.15 \times 0.03 \times 0.1 \times 0.08 \times (5,802) \text{SRT} / (1 + 0.03 \text{SRT})^{0.85}$$

$$+ 0.1 \times 110$$

$$= 34.18 + 30.66 + 11$$

$$= 75.84 \text{ g/day}$$

ปริมาณบ่อที่ต้องการ = $P_{x,tss} \text{SRT} / X_{tss}$

กำหนด X_{tss} เท่ากับ 2500 mg/l

$$V = 75.84 \text{ g/day} \times 19.94 \text{ d} / 2500 \text{ mg/l}$$

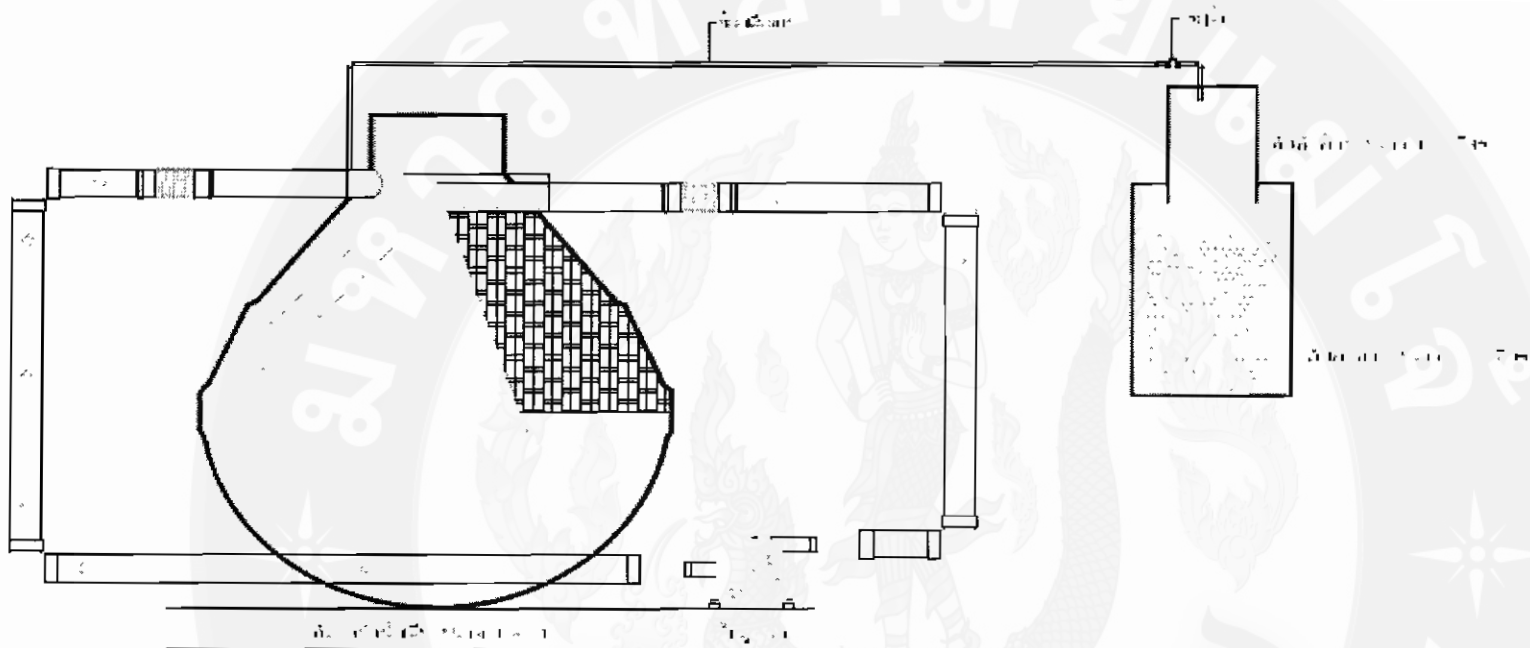
$$= 0.61 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

3. Methane gas production

At 25 C, CH₄ the volume of methane is 0.2 m³/kg COD

$$\begin{aligned}\text{Total CH}_4 \text{ production rate} &= 0.2 \times 5,802 \times 0.1 \\ &= 116.04 \text{ l/day}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Total gas production rate} &= \frac{116.04 \text{ l/day}}{0.60 \text{ m}^3 \text{CH}_4 / \text{m}^3 \text{gas}} \\ &= 193.4 \text{ m}^3/\text{day}\end{aligned}$$



ITEM NO.	DESCRIPTION	UNIT	QTY	TOTAL QTY	REMARKS	REVISION		DATE	BY
						NO.	DESCRIPTION		
1	Motor	HP	1	1					
2	Pump	HP	1	1					
3	Electric Motor	HP	1	1					
4	Water	HP	1	1					
5	Oil	HP	1	1					
6	Grease	HP	1	1					
7	Washers	HP	1	1					
8	Nuts	HP	1	1					
9	Seals	HP	1	1					
10	Washers	HP	1	1					
11	Nuts	HP	1	1					
12	Seals	HP	1	1					
13	Washers	HP	1	1					
14	Nuts	HP	1	1					
15	Seals	HP	1	1					
16	Washers	HP	1	1					
17	Nuts	HP	1	1					
18	Seals	HP	1	1					
19	Washers	HP	1	1					
20	Nuts	HP	1	1					
21	Seals	HP	1	1					
22	Washers	HP	1	1					
23	Nuts	HP	1	1					
24	Seals	HP	1	1					
25	Washers	HP	1	1					
26	Nuts	HP	1	1					
27	Seals	HP	1	1					
28	Washers	HP	1	1					
29	Nuts	HP	1	1					
30	Seals	HP	1	1					
31	Washers	HP	1	1					
32	Nuts	HP	1	1					
33	Seals	HP	1	1					
34	Washers	HP	1	1					
35	Nuts	HP	1	1					
36	Seals	HP	1	1					
37	Washers	HP	1	1					
38	Nuts	HP	1	1					
39	Seals	HP	1	1					
40	Washers	HP	1	1					
41	Nuts	HP	1	1					
42	Seals	HP	1	1					
43	Washers	HP	1	1					
44	Nuts	HP	1	1					
45	Seals	HP	1	1					
46	Washers	HP	1	1					
47	Nuts	HP	1	1					
48	Seals	HP	1	1					
49	Washers	HP	1	1					
50	Nuts	HP	1	1					
51	Seals	HP	1	1					
52	Washers	HP	1	1					
53	Nuts	HP	1	1					
54	Seals	HP	1	1					
55	Washers	HP	1	1					
56	Nuts	HP	1	1					
57	Seals	HP	1	1					
58	Washers	HP	1	1					
59	Nuts	HP	1	1					
60	Seals	HP	1	1					
61	Washers	HP	1	1					
62	Nuts	HP	1	1					
63	Seals	HP	1	1					
64	Washers	HP	1	1					
65	Nuts	HP	1	1					
66	Seals	HP	1	1					
67	Washers	HP	1	1					
68	Nuts	HP	1	1					
69	Seals	HP	1	1					
70	Washers	HP	1	1					
71	Nuts	HP	1	1					
72	Seals	HP	1	1					
73	Washers	HP	1	1					
74	Nuts	HP	1	1					
75	Seals	HP	1	1					
76	Washers	HP	1	1					
77	Nuts	HP	1	1					
78	Seals	HP	1	1					
79	Washers	HP	1	1					
80	Nuts	HP	1	1					
81	Seals	HP	1	1					
82	Washers	HP	1	1					
83	Nuts	HP	1	1					
84	Seals	HP	1	1					
85	Washers	HP	1	1					
86	Nuts	HP	1	1					
87	Seals	HP	1	1					
88	Washers	HP	1	1					
89	Nuts	HP	1	1					
90	Seals	HP	1	1					
91	Washers	HP	1	1					
92	Nuts	HP	1	1					
93	Seals	HP	1	1					
94	Washers	HP	1	1					
95	Nuts	HP	1	1					
96	Seals	HP	1	1					
97	Washers	HP	1	1					
98	Nuts	HP	1	1					
99	Seals	HP	1	1					
100	Washers	HP	1	1					

ภาพที่ 16 แบบชุดทดลอง

3. สร้างชุดถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม

จากการสำรวจฟาร์มสุกร และการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียมูลสุกร ผู้วิจัยจึงได้มีการสร้างถังหมักไร้อากาศตามลักษณะรายการของคุณลักษณะของน้ำเสียที่แสดงในเบื้องต้น ซึ่งในการสร้างถังหมักไร้อากาศแบบกวนจะมีน้ำเสีย และตะกอนจุลินทรีย์ผสมกันดีทั่วทั้งถังตลอดเวลาที่มีการกวนเข้ามาเกี่ยวข้อง (ภาพที่ 17 และภาพที่ 18) โดยน้ำทิ้งที่ออกจากถังหมักกวนผสมจะมีลักษณะเหมือนกับน้ำที่อยู่ในถังหมักที่มีการไหลเข้า-ออกของอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีการไหลวนกลับ

ปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรด้วยวิธีการทางชีวภาพมีการพัฒนากันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางธรรมชาติที่อาศัยการทำงานของสิ่งมีชีวิต ทั้งพืชและจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ เพื่อช่วยให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น ระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจนอกจากระบบจะทำให้มีคุณภาพดีขึ้นแล้ว ผลพลอยได้อีกประการหนึ่งคือ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนพลังงานชนิดอื่นได้ด้วย

ดังนั้นการออกแบบและสร้างถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมต้นแบบจึงเหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งอยู่ในรูปของสารอินทรีย์และธาตุอาหาร อีกทั้งยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการบำบัดน้ำเสีย ส่วนน้ำทิ้งของถังหมักไร้อากาศที่ผ่านการบำบัดยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ และผลิตสุดท้ายเป็นสารปรับสภาพดิน (Soil Conditioner) หรือปุ๋ยน้ำอินทรีย์ได้อีกด้วย



ภาพที่ 17 แบบชุดควบคุมถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม



ภาพที่ 18 แบบชุดทดลองถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม

4. การตรวจคุณภาพน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเบื้องต้น

ในการทดลอง ได้เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมี ได้แก่ อุณหภูมิ บีโอดี ซีโอดี ค่าของแข็งแขวนลอย ค่าของแข็งระเหยง่าย สภาพค่าง และ pH



ภาพที่ 19 บ่อพักน้ำเสีย

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์น้ำเสียจากฟาร์มสุกรเบื้องต้น

	น้ำเสียมูลสุกร
COD (mg/l)	7200
BOD (mg/l)	4080
pH	7.2
SS (mg/l)	1335
VSS (mg/l)	1150
alkalinity (mg/l as CaCO ₃)	1480

5. การเริ่มต้นเดินระบบ

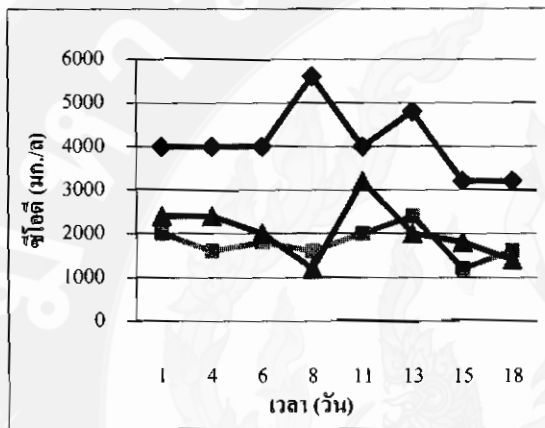
เริ่มต้นเดินระบบการทดลองสำหรับถังหมักกวนผสม (Start Up) ซึ่งตะกอนที่ใช้ในการเริ่มต้นระบบเป็นกากตะกอนจากถังหมักแบบไร้อากาศของฟาร์มแดง พรหมมินทร์ โดยนำกากตะกอนปริมาตร 40 ลิตร ซึ่งมีค่าของแข็งแขวนลอยและของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 18,975 และ 15,180 มก./ล. ตามลำดับ เติมน้ำในถังหมักกวนขนาด 1000 ลิตร จากนั้นเติมน้ำเสียจนครบปริมาตร ทิ้งไว้เพื่อปรับสภาพเป็นเวลา 10 วัน หลังจากนั้นจึงเริ่มเดินระบบ โดยทำการป้อนน้ำเสียเข้าระบบปริมาณ 100 ลิตรต่อวัน และได้ทำการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง คือ ชุดควบคุม (ไม่มีการกวน) กวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้ง ครั้งละ 30 นาที ในแต่ละการทดลองทำการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยพิจารณาจากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

เมื่อเริ่มป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบ พบว่าในช่วงแรกของการเริ่มต้นระบบการแปรผันของค่าซีโอดี ค่อนข้างสูง เนื่องจากตะกอนยังปรับสภาพไม่ได้ แต่หลังจากนั้นระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะที่คงที่ ตั้งแต่วันที่ 8 ถึงวันที่ 30 ของการเริ่มต้นระบบ และมีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีได้เฉลี่ย ร้อยละ 56.70 หลังจากนั้นจึงได้เพิ่มการกวนเข้าไปยังถังหมักกวนโดยกวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้ง ซึ่งพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 59.6, 70.4, และ 75.0 และ pH ของน้ำทิ้งในแต่ละถังหมักมีค่าเฉลี่ยประมาณ 7.0 -7.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับการดำรงชีพของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ขณะที่ (McCarry, 1964, Bryant, M.P., 1979) พบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมแก่การสร้างมีเทนอยู่ในช่วง 6.5-7.5

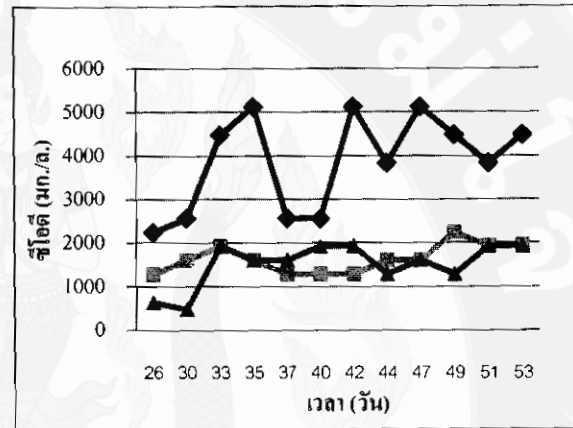
6. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ

6.1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

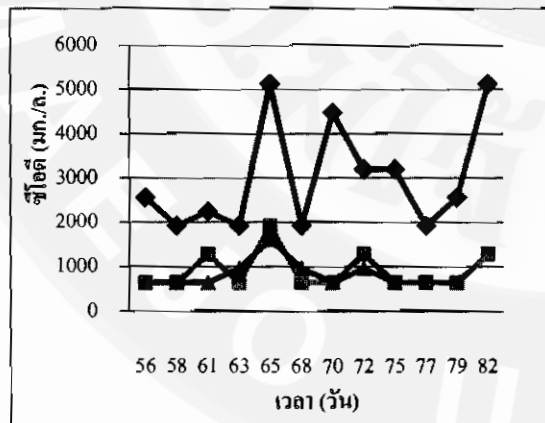
การแปรผันค่าซีโอดีของน้ำทิ้งในถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนต่างกันตลอดการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 20



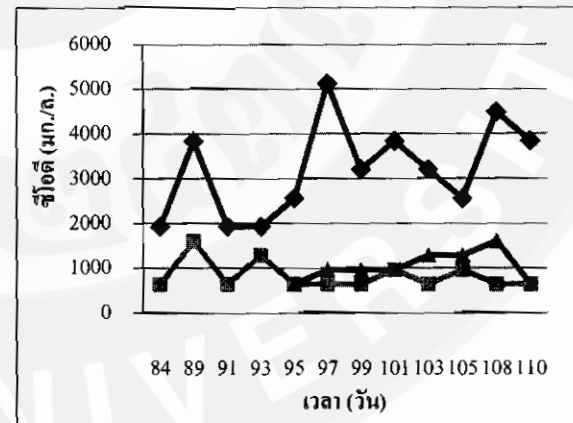
ก. ไม่มีการกวน



ข. กวนวันละ 2 ครั้ง



ค. กวนวันละ 4 ครั้ง



ง. กวนวันละ 8 ครั้ง

◆ น้ำเข้า □ ชุดทดลอง ▲ ชุดควบคุม

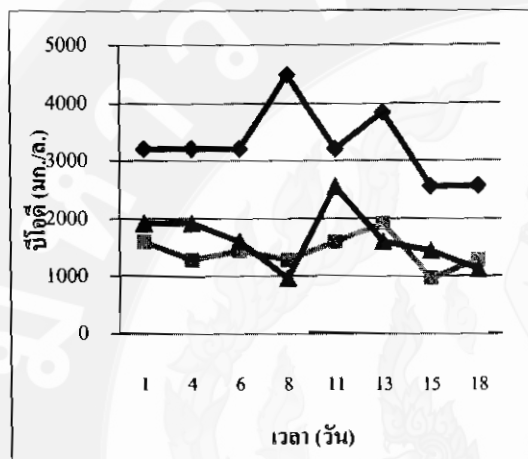
ภาพที่ 20 ซีโอดีในน้ำทิ้งของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน

การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดซึ่งสัมพันธ์กับค่าซีไอดีของน้ำทิ้งในถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกันจะเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยซีไอดีของแค่ถังหมัก พบว่า (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน ถังหมักกวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้งต่อวัน มีค่าเฉลี่ยซีไอดีของน้ำที่ออกจากระบบเท่ากับ 1775, 2033, 1133 และ 1033 มก./ล. ตามลำดับ จากกราฟ พบว่าน้ำเข้าระบบมีค่าเฉลี่ยซีไอดีที่สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำเข้ามีซีไอดีในรูปของแข็งแขวนลอยที่สูง ความสัมพันธ์ของน้ำเข้าและน้ำออก และความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยซีไอดีของชุดการทดลองคือ (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน กวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้งต่อวัน แสดงดังภาพที่ 20 ซึ่งการดำเนินระบบของถังหมักจะป้อนน้ำเสียเข้าตลอดเวลาเพื่อรักษาความเสถียรของระบบ เพื่อให้ระบบมีความเสถียรต่อการบำบัดน้ำเสียที่ถูกป้อนเข้าในแต่ละวัน

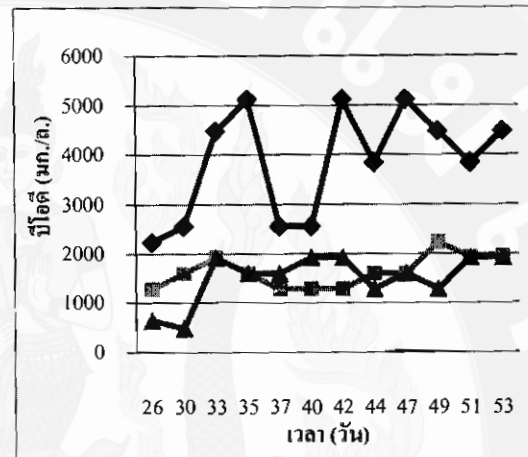
จากภาพที่ 20 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของน้ำทิ้งในถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีร้อยละ 56.7, 59.6, 70.4 และ 79.3 ตามลำดับ โดยที่เมื่อดำเนินระบบของถังหมักที่มีการกวน 8 ครั้งต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีได้สูงสุด (Cheng *et.al*, 2002) โดยทั่วไปการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศจะใช้ระยะเวลาพักเก็บประมาณ 10-40 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารอินทรีย์ Feng *et.al*, (2007) พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร ที่การหมักมูลสุกรในวันที่ 42 ของการทดลอง โดยกำจัดซีไอดีได้ร้อยละ 65 กำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยได้ร้อยละ 60 ซึ่งระยะเวลาการพักเก็บในการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศที่นาน จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสารอินทรีย์สูงขึ้นด้วย

6.2 ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี

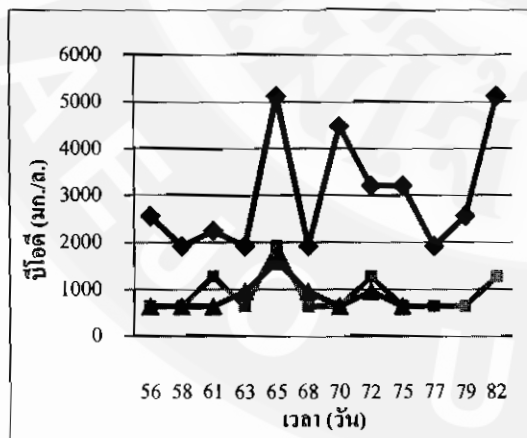
การแปรผันค่าบีโอดีของน้ำทิ้งในถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนต่างกัน แสดงได้ดังภาพที่ 21



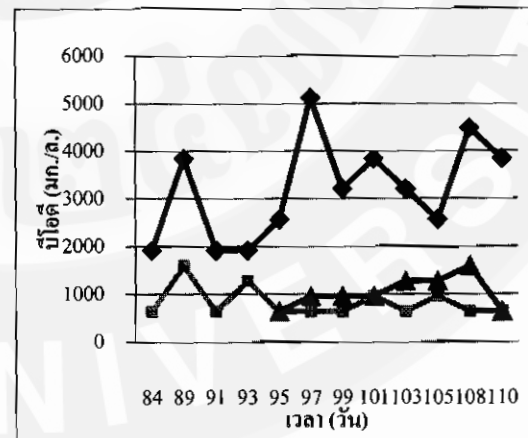
ก. ไม่มีการกวน



ข. กวนวันละ 2 ครั้ง



ค. กวนวันละ 4 ครั้ง



ง. กวนวันละ 8 ครั้ง

◆ น้ำเข้า ■ น้ำออก ▲ ตะกอน

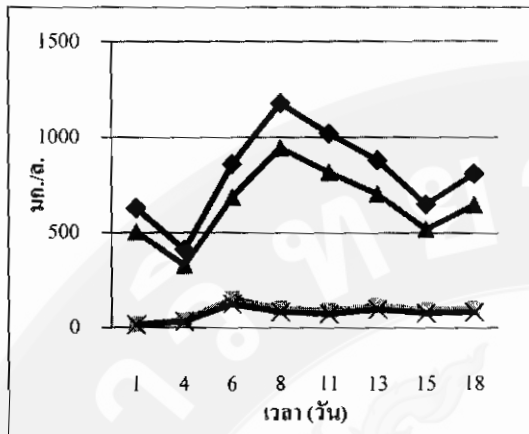
ภาพที่ 21 บีโอดีในน้ำทิ้งของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนต่างกัน

การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดซึ่งสัมพันธ์กับค่าบีโอดีในถังหมักไร้อากาศแบบ กวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกันจะเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยชีโอดีของแต่ละถังหมัก พบว่า (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน ถังหมักกวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้งต่อวัน มีค่าเฉลี่ยบีโอดีของน้ำที่ ออกจากระบบเท่ากับ 1420, 1628, 907 และ 827 มก./ล. ตามลำดับ จากกราฟ พบว่าน้ำเข้าระบบมี ค่าเฉลี่ยบีโอดีที่สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำเข้ามีบีโอดีในรูปของสารอินทรีย์ที่สูง ความสัมพันธ์ของน้ำ เข้าและน้ำออก ของชุดการทดลองคือ (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน กวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้งต่อวัน แสดงดังภาพที่ ซึ่งการดำเนินระบบของถังหมักจะป้อนน้ำเสียเข้าตลอดเวลาเพื่อรักษาความเสถียร ของระบบ

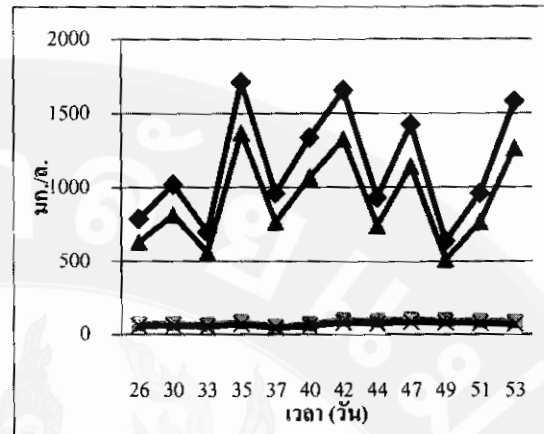
จากภาพที่ 21 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีของถังหมักไร้อากาศแบบกวน ผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีร้อยละ 56.7, 57.9, 69.9 และ 74.2 ตามลำดับ โดยที่ถังหมักที่มีการกวนวันละ 8 ครั้งมีประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีได้สูงสุด คือ 3200 มก./ล. เหลือ 827 มก./ล. ซึ่งพบว่าเมื่อมีการกวนมีประสิทธิภาพที่ทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับ สารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้เกิดก๊าซเร็วขึ้นและมากขึ้น

6.3 ของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย

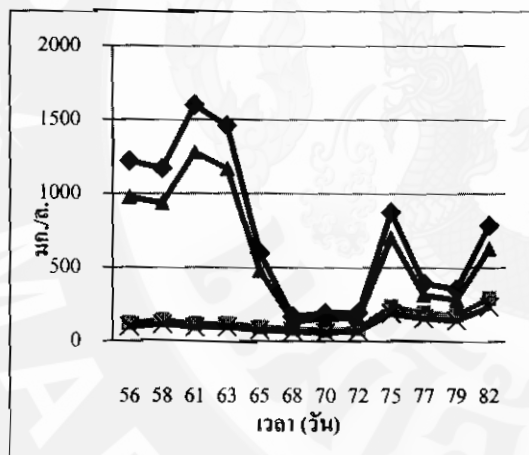
ในการเริ่มต้นระบบตะกอนหัวเชื้อจะเกิดการปรับสภาพตะกอนที่บำบัดหรือปรับสภาพ ไม่ได้จะถูกชะล้าง (Wash Out) ออกจากระบบ เมื่อเข้าสู่สถานะสมดุลของแข็งแขวนลอยจะมีค่า น้อยลงและเกิดการสะสมของตะกอนในถัง การสังเกตว่าถังกวนผสมมีประสิทธิภาพในการทำงาน สามารถดูได้จากปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ปนออกมากับน้ำทิ้ง การแปรผันของแข็งแขวนลอย และของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในช่วงเริ่มต้นเดินระบบแสดงไว้ในภาพที่ 22



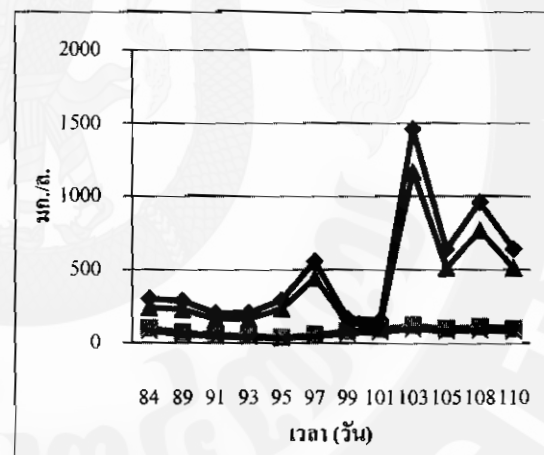
ก. (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน



ข. กวนวันละ 2 ครั้ง



ค. กวนวันละ 4 ครั้ง



ง. กวนวันละ 8 ครั้ง

◆ SS น้ำเข้า □ SS ชุดการทดลอง
 ▲ VSS น้ำเข้า × VSS ชุดการทดลอง

ภาพที่ 22 ปริมาณของแข็งแขวนลอย และของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายทั้งหมดในน้ำทิ้งของ

ถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน

ผลการศึกษาพบว่าในช่วงแรกของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมทั้ง 4 ชุด คือ (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน ถังหมักที่มีการกวนวันละ 2,4 และ 8 ครั้ง มีค่าของแข็งแขวนลอยและค่าของแข็งแขวนลอยระเหยปนออกมากับน้ำทิ้งในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการกวนในแต่ละถังหมัก ส่วนในถังหมักที่ 1 (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน พบว่ามีการหลุดออกมาของตะกอนในช่วงแรกเนื่องจากจุลินทรีย์ยังมีการปรับสภาพจึงทำให้มีตะกอนแขวนลอยปนออกมากับน้ำที่ทิ้งจากระบบ ซึ่งมีปริมาณของแข็งแขวนลอยและปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายเฉลี่ยเท่ากับ 90.3 และ 72.2 มก./ล. ตามลำดับ

จากภาพที่ 22 พบว่าค่าของแข็งแขวนลอย และของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในน้ำทิ้งของถังหมักที่มีการกวนวันละ 2,4 และ 8 ครั้ง มีค่าที่ต่างกัน เนื่องจากปริมาณน้ำที่เข้าระบบมีอัตราของแข็งที่สูง และมีอัตราการกวนในถังหมักที่ต่างกัน ซึ่งเป็นผลต่อการฟุ้งกระจายทำให้ชั้นตะกอนฟุ้งกระจายและหลุดออกจากระบบ ทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยของถังหมักที่มีการกวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้ง เท่ากับ 85.0, 146.8 และ 83.7 มก./ล. และค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายมีค่าเท่ากับ 68.0, 117.5 และ 66.9 มก./ล. ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งร้อยละ 86.3, 92.5, 80.4 และ 82.9 โดยพบว่าเมื่อเมื่อดำเนินระบบของถังหมักที่มีการกวนวันละ 2 ครั้งๆละ 30 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด และ ถังหมักที่มีการกวนวันละ 4 ครั้งๆละ 30 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำสุด เนื่องจากในถังหมักมีการสะสมของตะกอนค่อนข้างมากทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งลดลง

6.4 เจดาคัลไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นเป็นธาตุอาหารหลักที่แบคทีเรียต้องนำไปใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนเพื่อสร้างเซลล์ร่วมกับคาร์บอน หากมีน้อยเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาย่อยสลายเกิดช้า แต่ถ้ามักเกินไปจะทำให้มีการสูญเสียไนโตรเจนได้ (Kapetanios, E.G. *et al.*, 1993) ดังนั้นในกระบวนการหมักจึงต้องรักษาระดับไนโตรเจนที่เหมาะสม

ตารางที่ 11 แสดงค่าเจดาคัลไนโตรเจนของของถึงหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน

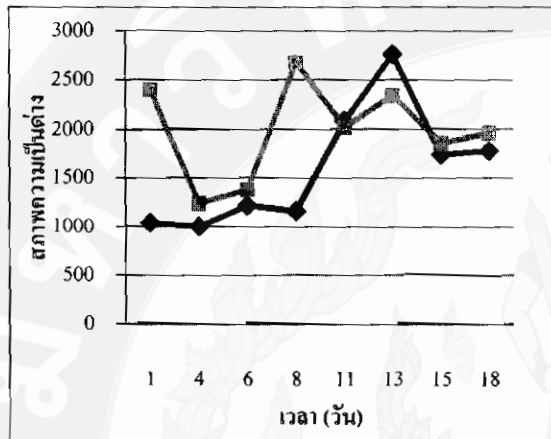
ถังหมักกวน	น้ำเข้า			น้ำออก		
	TKN (มก./ล.)	อุณหภูมิ (°C)	pH	TKN (มก./ล.)	อุณหภูมิ (°C)	pH
ไม่มีการกวน	274.5	29.0	7.1	251.1	29.1	7.0
กวน 2 ครั้ง/วัน	323.3	29.2	7.0	263.6	29.3	6.9
กวน 4 ครั้ง/วัน	295.3	29.2	7.3	252.4	29.2	6.8
กวน 8 ครั้ง/วัน	295.6	28.7	7.6	252.4	29.1	6.8

จากตารางที่ 11 จะเห็นได้ว่าค่าเจดาคัลไนโตรเจนของน้ำเข้า มีค่าที่สูงเนื่องจากไนโตรเจนที่มีอยู่ในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะอยู่ในรูปของ แอมโมเนียไนโตรเจนและไนเตรตโดยไนโตรเจนทั้งหมดจะประกอบด้วยสารไนโตรเจนที่มีอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ ซึ่งมีผลทำให้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรมีปริมาณไนโตรเจนที่ค่อนข้างสูง และตลอดระยะเวลาในการทดลองค่า pH ของแต่ละถังหมักจะมีค่าประมาณ 6.8-7.3 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเข้าและน้ำทิ้งของทุกๆถังหมักอยู่ในช่วงที่แบคทีเรียสร้างมีเทนได้ดี ซึ่งค่าไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับฟาร์มสุกรจะมีไนโตรเจนในรูป TKN ไม่เกิน 120 มก./ล. หรือ 200 มก./ล. (กรมควบคุมมลพิษ, 2555)

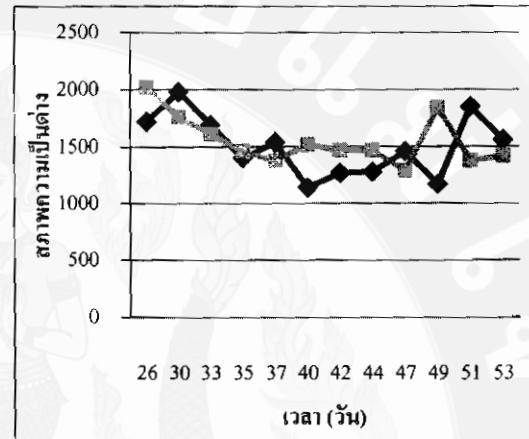
การพิจารณาผลการทดลองจากมลสารอินทรีย์ที่เข้าและออกจากระบบในค่าของ อุณหภูมิ บีโอดี ซีโอดี ค่าของแข็งแขวนลอย ค่าของแข็งระเหยง่าย สภาพความเป็นด่าง และค่า pH โดยค่าที่นำมาประกอบพิจารณาผลเพื่อเป็นตัวแทนของตัวแปรต่างๆ จะเป็นค่าจากสภาวะคงที่ ของถังหมักที่มีการกวนต่างกัน เนื่องจากค่ามลสารอินทรีย์ที่ออก (Effluent) ในรูปของตัวแปรดังกล่าวจะคงที่สม่ำเสมอ ผลการทดลองเห็นได้ว่าระบบไร้อากาศที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน มีประสิทธิภาพในการกำจัด บีโอดี ซีโอดี ค่าของแข็งแขวนลอย ค่าของแข็งระเหยง่าย สภาพด่าง และค่า pH มีแนวโน้มในทางเดียวกัน

6.5 สภาพความเป็นต่าง

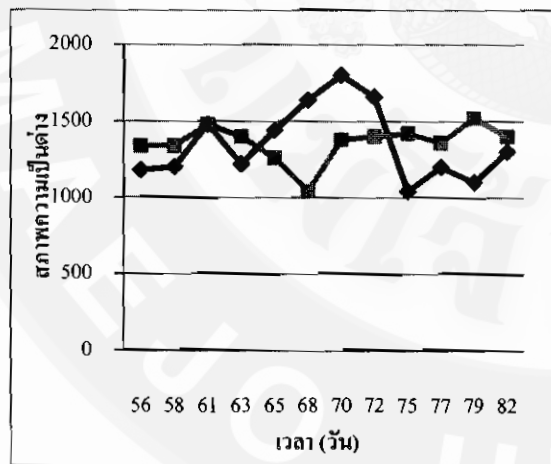
สภาพความเป็นต่างในน้ำทิ้งของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกันแสดงดังภาพที่ 23



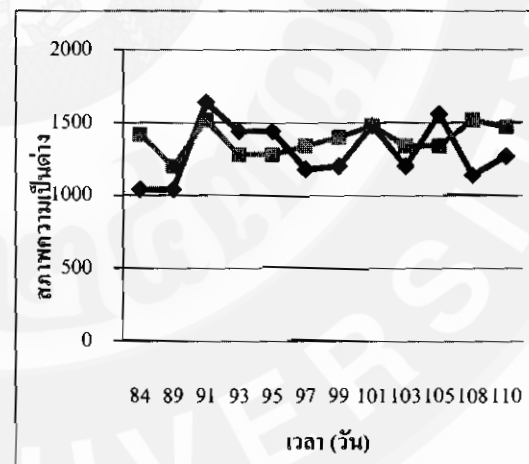
ก. ไม่มีการกวน



ข. กวนวันละ 2 ครั้ง



ค. กวนวันละ 4 ครั้ง



ง. กวนวันละ 8 ครั้ง

◆ น้ำเข้า ■ ซุคทดลอง

ภาพที่ 23 ค่าความเป็นต่างในน้ำทิ้งของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน

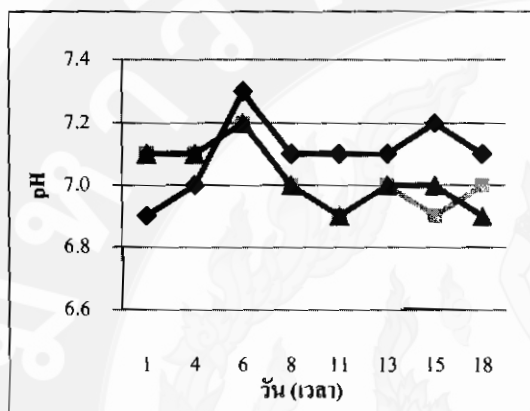
จากความสัมพันธ์ของกราฟในภาพที่ 23 สภาพความเป็นด่างที่วิเคราะห์คิดอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) พบว่ามีปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำเสียในถังหมัก คือ (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน กวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้งต่อวัน เฉลี่ยอยู่ที่ 1985, 1552, 1361 และ 1382 มก./ล. ซึ่งมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายในถังหมักจนได้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยและแอมโมเนีย จากนั้นกรดอินทรีย์ระเหยจะถูกใช้ไปเป็นสารอาหารของแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนในถังหมักก๊าซ ทำให้แอมโมเนียเหลือมากขึ้นและทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำกลายเป็นแอมโมเนียไบคาร์บอเนตหรือสภาพด่างไบคาร์บอเนตปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดจึงอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าในถังหมักกวนนั้นเกิดเกิดเป็นบัฟเฟอร์โดยจะช่วยป้องกันแบคทีเรียสร้างมีเทนให้มีความสามารถต่อกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งถือว่าเป็นสภาพที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพที่ถึงหมัก

ส่วนถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนวันละ 4 และ 8 ครั้ง มีค่าเป็นด่างซึ่งมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากภายในระบบมีการสะสมของกรดอินทรีย์ที่ค่อนข้างสูง

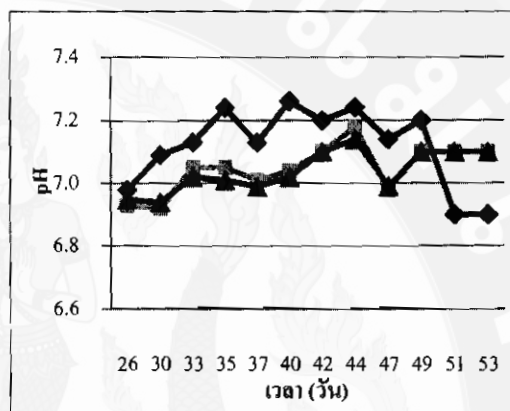
สภาพความเป็นด่างของน้ำทิ้งในถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ให้แก่วัสดุ โดยจะมีหน้าที่ในการสะเทินคาร์บอนไดออกไซด์และกรดไขมันระเหยง่ายในระบบเพื่อให้ค่า pH เป็นกลาง ดังนั้นสภาพความเป็นกรดเป็นด่างจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรียสองพวกทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้วระบบการหมักแบบไร้อากาศควรมีค่าความเป็นด่างทั้งหมดประมาณ 1000-5000 มก.ล. ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (Metcalf and Eddy, 1991) และจากรายงานการวิจัยของสาขาสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ (2530: 12) ค่าความเป็นด่างในระบบการหมักเป็นตัวเลขที่บ่งชี้ถึงเสถียรของระบบ ถ้าระบบมีความเป็นด่างสูงแสดงว่าระบบการหมักมี Buffering Capacity สูงในการรักษาค่า pH ให้คงอยู่ได้นานต่อการเพิ่มปริมาณกรดใดๆ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างที่ต่ำ ก็จะแสดงว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ในปริมาณค่อนข้างสูง ในระบบจำเป็นต้องเพิ่มความระมัดระวังในการควบคุมการทำงานของระบบการหมัก เพราะมีแนวโน้มที่จะเป็นกรดได้ง่าย ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการระบบการหมักประมาณ 1000-3000 มก./ล. ถ้าความเป็นด่างสูงเกินไปอาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อแบคทีเรียได้

6.6 ค่า pH และอุณหภูมิ

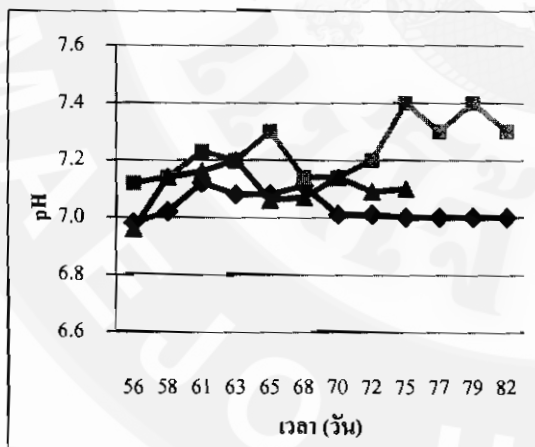
ค่า pH ของน้ำในระบบและน้ำทิ้งในถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน แสดงดังภาพที่ 24



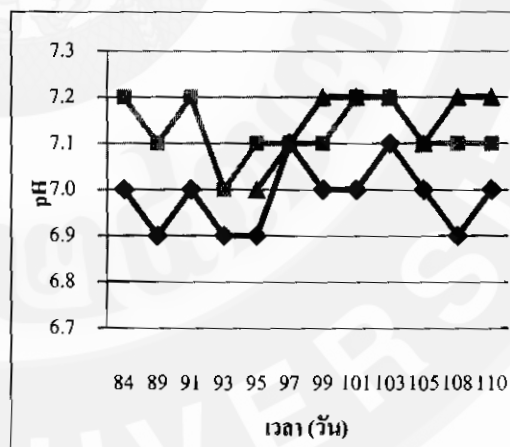
ก. ไม่มีการกวน



ข. กวนวันละ 2 ครั้ง



ค. กวนวันละ 4 ครั้ง



ง. กวนวันละ 8 ครั้ง

◆ น้ำเข้า □ ชุกลดลง ▲ ชุกลบคุม

ภาพที่ 24 ค่า pH ของน้ำทิ้งในถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน

จากภาพที่ 24 พบว่าค่า pH ในน้ำเข้าและน้ำทิ้งในถังหมักไร้อากาศแบบกวนทั้ง 4 ถังมีค่าแปรผันค่อนข้างสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่างของน้ำเสียที่เติมเข้าไปในระบบ โดยส่วนใหญ่ค่าออกของถังหมักกวนจะมีค่า pH เฉลี่ยที่ 6.9-7.2 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้เนื่องจากมีความเสถียรภาพของระบบและกิจกรรมของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นเป็นกลางหรือเป็นเบสเล็กน้อย ขณะที่ (McCarthy, 1964, Bryant, M.P., 1979) พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมแก่การสร้างมีเทนอยู่ในช่วง 6.5-7.5 และ Fang and Yu (2002) พบว่า ค่าที่เหมาะสมแก่การสร้างกรดเป็น 6 จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วง pH ในช่วง ค่า pH ที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดจะอยู่ในช่วงนี้ จุลินทรีย์ส่วนใหญ่มักจะอยู่ที่ช่วง 5-10 เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการกระบวนการไม่ใช้ออกาศควรอยู่ระหว่าง 6.8-7.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียมีเทน (กรมควบคุมมลพิษ)

ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดลองในถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมตลอดการทดลองนั้น อยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่จุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และเหมาะสมต่อการย่อยสลายภายใต้สภาวะที่ไร้อากาศ เพราะการเกิดก๊าซชีวภาพจะเกิดขึ้นได้ดีที่ 6.6-7.6 อาริยา (2546, 60-61) ค่า pH ในถังหมักไม่ควรต่ำกว่า 6.6 และต้องไม่สูงกว่า 8.3 เพราะจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ แต่ถ้าต่ำกว่า 5.3 จะเกิดการหลุดของจุลินทรีย์ออกจากระบบทำให้ระบบล้มเหลวได้

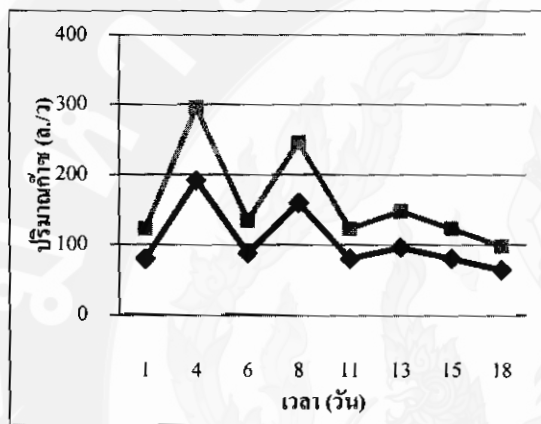
ค่าอุณหภูมิของถังหมักไร้อากาศแบบกวนทั้ง 4 ถัง พบว่าน้ำทิ้งของทั้ง 4 มีค่าที่ใกล้เคียงกันคือ 29 ± 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียในช่วงนี้มีการย่อยสลายสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิตลอดช่วงเริ่มต้นเดินระบบไม่ค่อยมีเปลี่ยนแปลงมากนัก จึงทำให้จุลินทรีย์ในถังหมักกรดอินทรีย์ และถังหมักก๊าซชีวภาพสามารถทำงานได้ดี

7. การผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซ

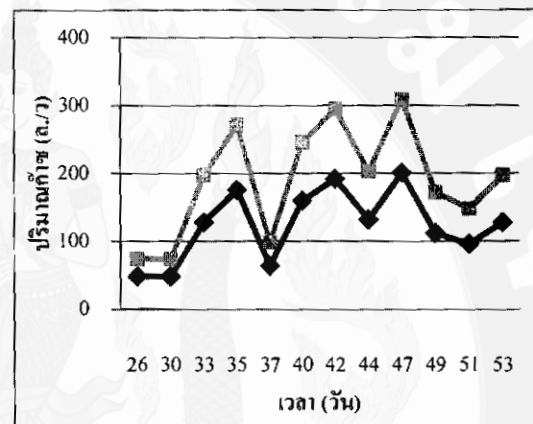
ในระหว่างการทดลองจะทำการบันทึกการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน โดยทำการบันทึกข้อมูลก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละวันคิดเป็นค่าเฉลี่ยก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละ

ละวันและทำการแยกองค์ประกอบของก๊าซ โดยพิจารณาจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด (Total Gas Production) และก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (Methane Production)

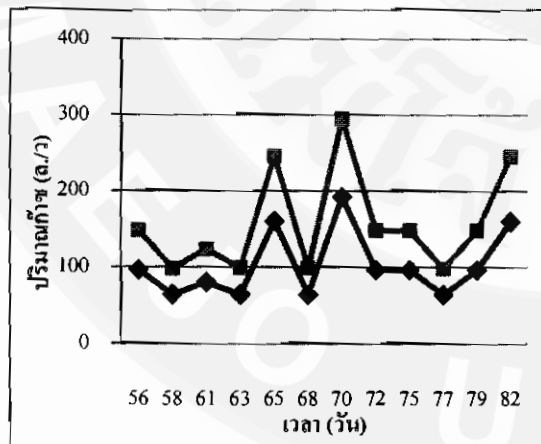
การผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีการกวนต่างกัน แสดงดังภาพที่ 25



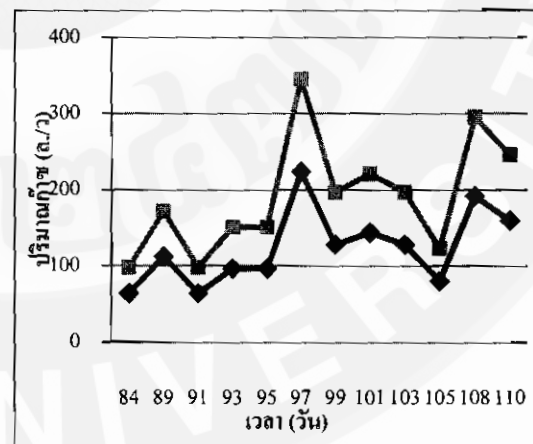
ก. ไม่มีการกวน



ข. กวนวันละ 2 ครั้ง



ค. กวนวันละ 4 ครั้ง



ง. กวนวันละ 8 ครั้ง

—◆— มีเทน -□- ก๊าซชีวภาพ

ภาพที่ 25 ก๊าซชีวภาพและการผลิตก๊าซมีเทนของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน

7.1 ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น (Total Gas Production)

ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของก๊าซต่างๆ คือ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ในแต่ละวัน จากผลการทดลองพบว่าในก๊าซชีวภาพมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 65.5 – 80.6 โดยช่วงเริ่มแรกของการทดลองปริมาณของก๊าซมีเทนจะต่ำเนื่องจากอยู่ในสภาวะการปรับตัวของแบคทีเรียในกลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทนและมีปริมาณของแบคทีเรียที่น้อย เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลที่พบว่าได้ องค์ประกอบของก๊าซ มีเทนมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ปริมาณก๊าซทั้งหมดได้จากการแทนที่น้ำโดยวัดปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่ในแต่ละวันจะได้ ปริมาณก๊าซชีวภาพในหน่วยลิตรต่อวัน เมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยของก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวันภายใต้ สภาวะการทดลอง พบว่า เมื่อดำเนินระบบโดยมีการกวนวันละ 8 ครั้งต่อวัน มีปริมาณก๊าซชีวภาพ เกิดขึ้นสูงสุด คือ 190.8 ลิตรต่อวัน และ ถึงหมักกวน (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน มีปริมาณก๊าซ ชีวภาพน้อยที่สุด คือ 143.1 ลิตรต่อวัน เนื่องจากระบบการหมักมีการปรับสภาพและเกิดการสะสม ของตะกอนทำให้ถังชุดควบคุมมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อย

จากภาพที่ 23 จะเห็นได้ว่าถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกันทั้ง 4 ถังมีการขึ้นลงของก๊าซชีวภาพตลอดเวลา เนื่องจากน้ำเสียที่เดิมเข้าสู่ระบบมีปริมาณของสารอินทรีย์ ที่ต่างกันทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันมีปริมาณที่ไม่คงที่ ซึ่งพบว่าร้อยละของก๊าซ มีเทนมีค่าระหว่างร้อยละ 65.5 – 80.6 แสดงให้เห็นถึงการทำงานสร้างมีเทนในถังหมักกวนที่มีการ กวนต่างกัน โดยการทำงานของระบบที่มีการกวนจะเป็นการทำให้สารอินทรีย์เกิดการกระจายตัวได้ อย่างทั่วถึงทำให้ระบบมีการย่อยสลายได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งแบคทีเรียสร้างมีเทนทำงานในถังหมัก กวนได้ดี ซึ่งเป็นผลมาจากค่า pH ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.9-7.2 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมกับการทำงาน ของแบคทีเรียสร้างมีเทน

ตารางที่ 12 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซมีเทน

ลักษณะสมบัติ	ไม่มีการ	กวนวันละ	กวนวันละ	กวนวันละ
	กวน	2 ครั้ง	4 ครั้ง	8 ครั้ง
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ล/ว)	143.05	184.59	166.15	190.75
ร้อยละองค์ประกอบก๊าซมีเทน	65.6	67.8	71.5	80.6
ปริมาณก๊าซมีเทน (ล./ว)	93	120	108	124

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการทำงานของถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสมที่มีระยะการกวนที่ต่างกัน เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน และสัดส่วนของก๊าซมีเทนมีความสำคัญ สัดส่วนที่สูงแสดงว่ามีประสิทธิภาพในการทำงานดี การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนก๊าซมีเทนบ่งบอกถึงความไม่เสถียรของระบบ ระบบที่มีปริมาณก๊าซมีเทนลดลงและมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นแทน สันนิษฐานได้ว่าการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนถูกยับยั้ง

7.2 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (Methane Production)

ปริมาณก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะการทดลอง แสดงได้จากตารางที่ 12 เมื่อนำมาคิดเป็นค่าเฉลี่ยของก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน โดยคำนวณที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure, STP) พบว่า เมื่อดำเนินระบบในถังหมักกวนที่มีการกวนวันละ 8 ครั้ง มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุด คือ 124 ลิตรต่อวัน และถังหมักกวน (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน มีปริมาณก๊าซมีเทนต่ำที่สุด คือ 93 ลิตรต่อวัน

สรุปผลการทดลอง

การศึกษากำจัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยระบบการหมักแบบไร้อากาศ ให้ประโยชน์ในการกำจัดสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของมลภาวะเป็นพิษ จากการบำบัดดังกล่าวจะได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ และเพื่อเป็นการพัฒนาขบวนการหมักให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในการทดลองนี้จึงมีการประยุกต์ใช้การกวนเข้ามาในถังหมักแบบไร้อากาศเพื่อช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีและสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยการทดลองได้ใช้ถังหมักขนาด 1000 ลิตร โดยการเติมน้ำเสียเข้าระบบวันละ 100 ลิตร คลอระยะเวลาการทดลอง ซึ่งในการศึกษากำจัดน้ำเสียได้แบ่งการทดลองเป็น 4 ชุดการทดลอง ประกอบด้วย ไม่มีการกวน (ชุดควบคุม) กวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้งๆละ 30 นาที

- ผลการศึกษาพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง สามารถลดสารอินทรีย์ในรูปของ บีโอดี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย จากน้ำเสียฟาร์มสุกรและเกิดก๊าซมีเทนซึ่งเป็นก๊าซเชื้อเพลิง และพบว่า ชุดการทดลองทั้ง 4 ชุด คือ (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน กวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้งๆละ 30 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 56.7, 57.9, 70.4 และ 79.3 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 56.7, 57.9, 69.9 และ 74.2

- ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยและของแข็งระเหยง่ายในแต่ละชุดการทดลองมีประสิทธิภาพดีและใกล้เคียงกันคือมากกว่า ร้อยละ 80

- ส่วนประกอบก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพโดยปริมาตรมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 65.6 – 80.6 โดย (ชุดควบคุม) ไม่มีการกวน กวนวันละ 2, 4 และ 8 ครั้ง มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ 146, 194, 167 และ 202 ลิตรต่อวัน

- การกวน เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนเพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้เกิดก๊าซเร็วขึ้นและมากขึ้น นอกจากนี้ยังป้องกันการตกตะกอนและตะกอนลอย (Scum) ซึ่งตะกอนอาจจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวจากถัง ซึ่งในการทดลองจะเห็นได้ว่า ถังหมักที่มีการกวนวันละ 8 ครั้งมี

ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารอินทรีย์ในรูปของ บีโอดี ซีโอดี ของแฉ่งแขวนลอย และของแฉ่งแขวนลอยระเหยง่ายได้ดี และยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนได้เป็นอย่างดี

- ค่า pH สำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบแบบไร้อากาศ เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรด และแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถทำงานร่วมกันได้ดีซึ่งมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.8 – 7.2 ซึ่งมีประสิทธิภาพต่อการสร้างมีเทนได้เป็นอย่างดี

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการพัฒนากระบวนการเก็บก๊าซมีเทนให้ง่ายและสะดวกต่อการนำไปใช้ประโยชน์ให้มากขึ้น
2. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อดูแลแนวโน้มในการสร้างกรด
3. ควรมีการศึกษาถึงขั้นตอนการสร้างมีเทน เพื่อจะนำมีเทนไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในฟาร์มสุกรมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2546ก. คู่มือการเลือกใช้และการบำรุงรักษาระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรตาม
แบบมาตรฐานกรมปศุสัตว์. สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ: กรุงเทพฯ. 33 น.

กรมปศุสัตว์. 2533. สรุปผลการฝึกอบรมเกษตรกร เรื่องการจัดการน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ประจำปี
งบประมาณ 2532-2533. กรมปศุสัตว์: กรุงเทพฯ. 23 น.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักเทคโนโลยี
สิ่งแวดล้อม: กรุงเทพฯ. 440 น.

การประยุกต์ใช้ในครัวเรือนในจังหวัดพัทลุง.จาก <http://e-net.sut.ac.th/download/ECI/ECI05.pdf>

[30 พฤศจิกายน 2555]

การผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ - ก๊าซชีวภาพ และการนำไปใช้

ประโยชน์ จาก : http://biogas.erd.or.th/biogasTech_sub_adv.php [30 พฤศจิกายน 2555]

โครงการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ขนาดเล็ก 2552. ประสิทธิภาพของ

เทคโนโลยี สำหรับฟาร์มขนาดเล็ก, จาก [http://www.erd.or.th/biogas/index.php?](http://www.erd.or.th/biogas/index.php?p=smallfarm2)
[p=smallfarm2](http://www.erd.or.th/biogas/index.php?p=smallfarm2) [30 พฤศจิกายน 2555]

เทพวิฑูรย์ ทองศรี. ผลกระทบของไนโตรเจนต่อสิ่งแวดล้อม.วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. ปีที่
60 ฉบับที่ 190. หน้า 12-14.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. สมาคมวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย : กรุงเทพฯ. 703 น.

ธนวัฒน์ ด้านวานิชกุล.2553. **จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอาหารในถังหมักแบบ กวนผสมสมบูรณ์**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชา วิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ: กรุงเทพฯ

นิพนธ์ จันทรโพธิ์. 2526. **การจัดการการเลี้ยงสุกร**. ขอนแก่น: ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะ เกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 124 น.

ปัญหาผลกระทบในฟาร์มเลี้ยงสัตว์และการบำบัด สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จาก <http://teenet.cmu.ac.th/btc/farmpollution03.php#0203>

วิณัฐชา สงวนไกรพงษ์.2551. **การเปรียบเทียบสมรรถนะในการสร้างกรดของน้ำเสียฟาร์มสุกร ด้วยถังปฏิกรณ์กวนผสมกับถังปฏิกรณ์ไหลตามกัน**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อดิสร จันทรประภาเลิศ. **การจัดการฟาร์มสุกร**.2549. สำนักพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้า ปศุสัตว์. ส่วนพัฒนาสิ่งแวดล้อมด้านปศุสัตว์

Bryant, M.P., 1991. Microbial Methane Production- Theoretical Aspects. **J.Animal Sci.**, 48, 193-201.

Dieter, D. and Angelika, S. 2008. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. 1st ed.

Mörlenbach :Strauss GmbH.

Fang, H.H.P. and Yu, H.Q. 2001, Mesophilic acidification of gelatinaceous wastewater,

journal of Biotechnology., Vol.93, pp 99 – 108.

Forster-Carneiro, T., Perez M. and Romero L.I. 2008. Thermophilic anaerobic digestion of

sourcesorted organic fraction of municipal solid waste. **Bioresource Technology**. 99: 6763–6770.

Georgia, D., Robert, M.S. and John, N.L. 1988, Anaerobic Acidogenesis of a Complex Wastewater, **Biotech. Bioeng.**, Vol.31, pp. 958-978.

Hansen, K.H., A.Irini and K. A. Birgite. 1997. Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. **Water research** 32: 5-12.

Karim, K., K. Thomas Klasson, R. Hoffmann, S. R. Dresche, D. W. DePaoli and M.H. Al-Dahhan. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing. **Bioresource Technology**. 96(14): 1607-1612.

Karim, K., R. Hoffmann, K. T. Klasson and M.H. Al-Dahhan. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. **Water Research** 39(15): 3597-3606.

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. Louis

Lise, A. et al. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**. 34: 755–781.

McCarty, P.L. , 1964. Anaerobic Waste Treatment Fundamental Part 1,2,3,4. **Public Works**.

Metcalf & Eddy. 1991, Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse. 3rd edition., **McGraw – Hill, Inc.**, Singapore. 1334 p.

Moonil et al. 2001. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic, **Department of Civil & Environmental Engineering**, Vanderbilt University of USA

Ortega, L., Barrington S. and Guiot S.R. 2008. Thermophilic adaptation of a mesophilic anaerobic sludge for food waste treatment. **Journal of Environmental Management.** 88: 517-525.

Reynolds T.D., Richards P.A. 1995, Unit Operation and Process in Environmental Engineering. 2nd edition, **PWS Publishing Co.**

Teodorita, A. S. et al. 2008. **Biogas Handbook.** Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg