

การศึกษาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียภายใต้กระบวนการธรรมชาติช่วยธรรมชาติ*

The study of gas producing from sludge of wastewater treatment system as generated through nature-by-nature processes

นพวรรณ เสมวิมล ^{**}

เกษม จันทรแก้ว ^{***}

บทคัดย่อ

การศึกษาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียภายใต้กระบวนการธรรมชาติช่วยธรรมชาติมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากตะกอนภายใต้สภาวะไร้อากาศ และปัจจัยด้านความชื้นที่ส่งผลต่อปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น โดยทำการหมักตะกอนในขวดแก้วสีชาขนาด 2.5 ลิตร บรรจุตะกอนสดที่คิดเป็นน้ำหนักแห้ง 200 กรัม ลงในแต่ละขวด แล้ววัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักโดยอาศัยหลักการ fluid displacement ทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากตะกอน 2 กลุ่ม คือ ตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี เป็นตัวแทนของตะกอนกลุ่มที่มีค่าคาร์บอนสูง และตะกอนจากระบบบำบัดของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี เป็นตัวแทนของตะกอนกลุ่มที่มีค่าคาร์บอนต่ำ ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาจากการหมักตะกอนจากระบบบำบัดของโครงการแหลมผักเบี้ยฯ เริ่มเกิดก๊าซขึ้นในวันที่ 2 ของการหมัก และมีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซสูงสุดในวันที่ 6 ของการหมักอยู่ที่ 70 มิลลิลิตรต่อวัน สามารถปลดปล่อยก๊าซรวมทั้งหมด (ระยะเวลา 10 วัน) 360.23 มิลลิลิตร คิดค่าเฉลี่ยเป็น 36.02 มิลลิลิตรต่อวัน โดยคิดเป็นปริมาณก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมาต่อน้ำหนักตะกอนแห้ง 1 กรัม ได้เท่ากับ 1.80 ส่วนปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาจากการหมักตะกอนจากโรงงานแป้งมัน มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซสูงสุดในวันที่ 1 อยู่ที่ 142.6 มิลลิลิตรต่อวัน สามารถปลดปล่อยก๊าซรวมทั้งหมด (ระยะเวลา 9 วัน) 649.97 มิลลิลิตร คิดค่าเฉลี่ยเป็น 72.2 มิลลิลิตรต่อวัน โดยคิดเป็นปริมาณก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมาต่อน้ำหนัก ตะกอนแห้ง 1 กรัม ได้เท่ากับ 3.25 มิลลิลิตร และผลจากการวิเคราะห์ชนิดและองค์ประกอบก๊าซโดยวิธีเก็บก๊าซจาก

* บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทศึกษาเรื่อง “เทคนิคการผลิตมวลชีวจากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียภายใต้กระบวนการธรรมชาติช่วยธรรมชาติเพื่อใช้ประโยชน์ด้านพลังงานและการผลิตวัสดุก่อสร้าง” โดยได้รับการสนับสนุนจากมูลนิธิชัยพัฒนา และโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ

** นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ E-mail: semvimol@gmail.com

*** ศาสตราจารย์ ดร. ประจักษ์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

chamber แล้วตรวจวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และมีเทนด้วยเครื่อง GC สำหรับก๊าซแอมโมเนียใช้เครื่อง IC พบว่า ตะกอนระบบบำบัดน้ำของโครงการแหลมผักเบี้ยฯ พบก๊าซมีเทนที่ความเข้มข้นสูงที่สุด 101,395 ppm รองลงมาคือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (360.27 ppm) และก๊าซแอมโมเนีย (36.22 ppm) ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันตะกอนจากโรงงานแป้งมัน พบก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ความเข้มข้นสูงที่สุด 9,900,837 ppm รองลงมา คือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (68,050 ppm) และก๊าซแอมโมเนีย (44.15 ppm) ตามลำดับ

Abstract

The study was aimed on determining the gas volume from sludge of Royal LERD Project (represent low carbon sludge) and sludge of cassava factory (represent high carbon sludge) in which the organic matters of both units were digested through the nature-by-nature process. The amount of oven-dry weight sludge about 200 grams was collected in the light brown glass bottle with 2.5-ml capacity. The fermentation of organic matters in sludge is the process to produce gases and being transferred to store in chamber by fluid displacement. The gases from Royal LERD Project sludge was occurred on the second day and the maximum on the sixth day with the rate of 70 ml/d and average of 36.02 ml/d (total 360.23 ml for 10 days) while cassava sludge found the maximum volume on the first day with the rate of 142.6 ml/d and average of 72.2 ml/d (total 649.97 ml for 9 days). In other words, the Royal LERD Project sludge can produce gas 1.8 ml per gram (oven dry weight) while the cassava sludge found gas 3.25 ml per gram (oven dry weight). Research results found gases of Royal LERD Project sludge on the range of methane concentration between 24,399 to 101,395 ppm, hydrogen sulfide 3.28 to 6.35 ppm, and ammonia 67.92 to 84.89 ppm, while the cassava sludge gas found methane concentration between 729,404-9,900,837 ppm, hydrogen sulfide 58.94 to 689,050 ppm, and ammonia 0 to 75.84 ppm.

บทนำ

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการธรรมชาติช่วยธรรมชาติ เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยหลักการทางชีวภาพในรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีความเหมาะสมกับลักษณะของน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ เช่น น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น ซึ่งการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักการทางชีวภาพนี้ ผลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในน้ำเสียมักมีกากตะกอนจุลินทรีย์เป็นผลผลิตตามมาด้วยเสมอ วิธีการกำจัดตะกอนโดยทั่วไปมี

อยู่หลายวิธี แต่ที่นิยม ได้แก่การฝังกลบ (landfill) การเผาในเตาเผาความร้อนสูง (incineration) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ก็จะมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและการกำจัดสูง ดังนั้น จึงมีความพยายามหาวิธีทางเลือกในการกำจัดกากตะกอน โดยการเปลี่ยนรูปกากตะกอนหรือของเสียอินทรีย์ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าในด้านต่างๆ การนำตะกอนมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงาน (waste to energy) ถือเป็นรูปแบบหนึ่งของการแปรรูปตะกอน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียภายใต้กระบวนการธรรมชาติช่วยธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในด้านพลังงาน คือ การนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การนำตะกอนไปหมักด้วยกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้ได้ก๊าซมีเทนออกมาเป็นพลังงานถึงร้อยละ 70 และร้อยละ 30 เป็นก๊าซที่ไม่เผาไหม้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น (เกรียงศักดิ์, 2539) และผลจากการนำตะกอนไปหมักแบบไร้อากาศจะทำให้สารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนรูปเป็นสารอนินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 75 (Prathap and Pual, 2007) ซึ่งการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสีย ถือได้ว่าเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์จากตะกอนในด้านพลังงานในอีกทางเลือกหนึ่ง

ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียภายใต้กระบวนการธรรมชาติช่วยธรรมชาติแบบไร้อากาศ และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นเพื่อให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากของเสียที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำผลการวิจัยไปต่อยอดเป็นแนวทางในการจัดการกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียที่มีความเหมาะสมกับประเทศไทยต่อไป

วิธีการศึกษา

การศึกษาก๊าซชีวภาพ (biogas) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากตะกอนแบบไร้อากาศ โดยทำการหมักตะกอนในขวดแก้วสีชาขนาด 2.5 ลิตร แล้ววัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก โดยอาศัยหลักการ fluid displacement หรือวิธี displacement bottle ของ Mullen (1976) และ Wight (1994) อ้างในอรอนงค์ (2541) ซึ่งเป็นการวัดปริมาณก๊าซจากการแทนที่น้ำในขวดด้วยการตวงโดยกระบอกตวงเพื่อให้ทราบปริมาณน้ำที่แน่นอน ซึ่งน้ำที่อยู่ในขวดจะถูกแทนที่ด้วยก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก ทำให้น้ำไหลออกมายังกระบอกตวง ดังนั้น ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักจะเท่ากับปริมาตรของน้ำที่อยู่ในกระบอกตวง โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากตะกอน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าคาร์บอนสูง และกลุ่มที่มีค่าคาร์บอนต่ำ โดยให้ตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรงมันบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี เป็นตัวแทนของตะกอนกลุ่มที่มีค่าคาร์บอนสูง และตะกอนจากบ่อดักตะกอน ระบบบำบัดของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี เป็นตัวแทนของตะกอนกลุ่มที่มีค่าคาร์บอนต่ำซึ่งมีขั้นตอนในการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาปริมาณความชื้นของตะกอนจากแหล่งต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณสัดส่วนระหว่างตะกอนกับน้ำโดยใช้สมการดังนี้

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \left(\frac{W1 - W2}{W2} \right) \times 100$$

เมื่อ $W1$ = น้ำหนักสดของตะกอน (กรัม)

$W2$ = น้ำหนักแห้งของตะกอน (กรัม)

2. กำหนดสัดส่วนการทดลองเพื่อหาความชื้นของตะกอนที่เหมาะสมต่อการเกิดก๊าซโดยเปรียบเทียบผลการทดลองจากปริมาณน้ำที่เกิดจากการแทนที่ของน้ำ โดยในการทดลองได้กำหนดให้น้ำหนักแห้งของตะกอนคงที่และแปรผันที่ปริมาณน้ำในตะกอน สามารถคำนวณปริมาณตะกอนสดที่ใช้ได้ดังนี้

$$\text{น้ำหนักสดของตะกอน (W1)} = \left(\frac{MW2}{100} \right) + W2$$

เมื่อ M = ปริมาณความชื้น (%)

$W2$ = น้ำหนักแห้งของตะกอน (กรัม)

เมื่อได้ค่าจากการคำนวณที่แน่นอนแล้ว นำมากำหนดการผันแปรความชื้นเป็น 5 สัดส่วนดังนี้ ความชื้นปกติ ความชื้นลดลงกว่าปกติ 2 เท่า ความชื้นลดลงกว่าปกติ 4 เท่า ความชื้นมากกว่าปกติ 2 เท่า และความชื้นมากกว่าปกติ 4 เท่า ตัวอย่างเช่น ตะกอนจากระบบบำบัดโครงการแหลมผักเบี้ยฯ คำนวณแล้วพบว่า $W1 = 7X$ จึงทำการแปรผันความชื้นเป็นดังนี้ $W1 = 3X, 5X, 7X, 9X$ และ $11X$ สำหรับ ตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมเป้งมัน คำนวณแล้วพบว่า $W1 = 11X$ จึงทำการแปรผันความชื้นเป็นดังนี้ $W1 = 7X, 9X, 11X, 13X$ และ $15X$ เป็นต้น

3. เมื่อกำหนดสัดส่วนตามความชื้นได้แล้ว ทำการบรรจุตะกอนสดลงในขวดแก้วสีชาขนาด 2.5 ลิตร ตามปริมาณและความชื้นที่กำหนดไว้ โดยสัดส่วนที่ลดปริมาณความชื้นลง ได้ใช้เครื่องรีดน้ำจากตะกอนออกตามปริมาณที่ได้กำหนดไว้ และสัดส่วนที่เพิ่มความชื้นมากกว่าปกติทำโดยใช้การเติมน้ำลงไป ในหน่วยทดลองเพื่อให้ได้ความชื้นตามปริมาณที่กำหนด ซึ่งในการวิจัยนี้กำหนดให้น้ำหนักแห้งของตะกอนเท่ากับ 200 กรัม ดังนั้น ปริมาณตะกอนสดจากระบบบำบัดโครงการฯ ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 1,400 กรัม และ ปริมาณตะกอนสดจากจากโรงงานอุตสาหกรรมเป้งมันที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 2,200 กรัม สำหรับตะกอนที่ความชื้นลดลงกว่าปกติ 2 เท่า ให้รีดน้ำออก 400 กรัม ความชื้นลดลงกว่าปกติ 4 เท่า ให้

รีดน้ำออก 800 กรัม ความชื้นมากกว่าปกติ 2 เท่า ให้เพิ่มน้ำ 400 กรัม และความชื้นมากกว่าปกติ 4 เท่า ให้เพิ่มน้ำ 800 กรัม

4. ปิดขวดโหลแก้วสีขาให้สนิทด้วยฝาซึ่งมีท่อยางซิลิโคนและเทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่เพื่อวัดอุณหภูมิภายในขวด จากนั้นใช้ซิลิโคนใส่หารอบฝาขวดเพื่อป้องกันการรั่วซึมของก๊าซออกสู่ภายนอก อันอาจทำให้ผลการวัดปริมาณก๊าซเกิดการคลาดเคลื่อนได้ และใช้กระดาษอลูมิเนียมฟอยล์ปิดขวดไว้เพื่อป้องกันแสงและเป็นการจำลองสภาพให้คล้ายการหมักโดยใช้ระบบปิด

5. เชื่อมต่อขวดที่บรรจุตะกอนกับขวดแก้วสีขาขนาด 2.5 ลิตร ที่บรรจุน้ำเปล่าเต็มขวด เพื่อวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น โดยอาศัยหลักการ fluid displacement หรือวิธี displacement bottle ของ Mullen (1976) และ Wight (1994) อ้างในอรอนงค์ (2541) ซึ่งเป็นการวัดปริมาณก๊าซจากการแทนที่น้ำในขวดด้วยการตวงโดยกระบอกตวงเพื่อให้ทราบปริมาณน้ำที่แน่นอน ซึ่งน้ำที่อยู่ในขวดจะถูกแทนที่ด้วยก๊าซที่เกิดจากกระบวนการหมัก ทำให้น้ำไหลออกมายังกระบอกตวง ดังนั้น ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักจะเท่ากับปริมาตรของน้ำที่อยู่ในกระบอกตวง ชุดการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1

6. ทำการจดบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ และปริมาณน้ำที่ออกมาในกระบอกตวงทุกชั่วโมง ในช่วงเวลา 07.00 – 17.00 น. ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ออกมาลดน้อยลง หรือไม่มี



รูปที่ 1 ชุดการทดลองหาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการหมักตะกอนในสภาวะไร้อากาศโดยอาศัยหลักการ fluid displacement

7. การวิเคราะห์ชนิดของก๊าซที่เกิดขึ้น นำตะกอนสดบรรจุลง chamber ปิดฝาที่มีการต่อกับ three way stopcock แล้วปิดทับด้วยพาราฟิล์ม ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการ settle down ของตะกอน จากนั้นเริ่มนับเป็นครั้งที่ 1 ของการเก็บตัวอย่าง ใช้ syringe ดูดอากาศจาก chamber ผ่านทาง three way stopcock วันละ 1 ครั้ง แล้วฉีดลง vacuum blood tube จากนั้นนำมาวิเคราะห์ชนิดของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซมีเทน (CH_4) ด้วยเครื่อง GC และวิเคราะห์ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ด้วยเครื่อง IC

ผลการศึกษา

1. ปริมาณความชื้นของตะกอน

ผลการศึกษาปริมาณความชื้นของตะกอน จากการสุ่มตัวอย่างตะกอนที่ต้องการทดลองมา ทำการชั่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้วบันทึกผล จากนั้นนำไปอบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณความชื้น ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณความชื้นของตะกอนที่จะนำมาใช้ในการทดลอง

ที่	ชนิดตัวอย่าง	น้ำหนักสด (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	ความชื้น (ร้อยละ)
1	ตะกอนจากระบบบำบัดโครงการ แหลมผักเบี้ยฯ	381.55	53.97	606.97
2	ตะกอนจากโรงงานแป่งมัน	443.71	36.35	1,120.66

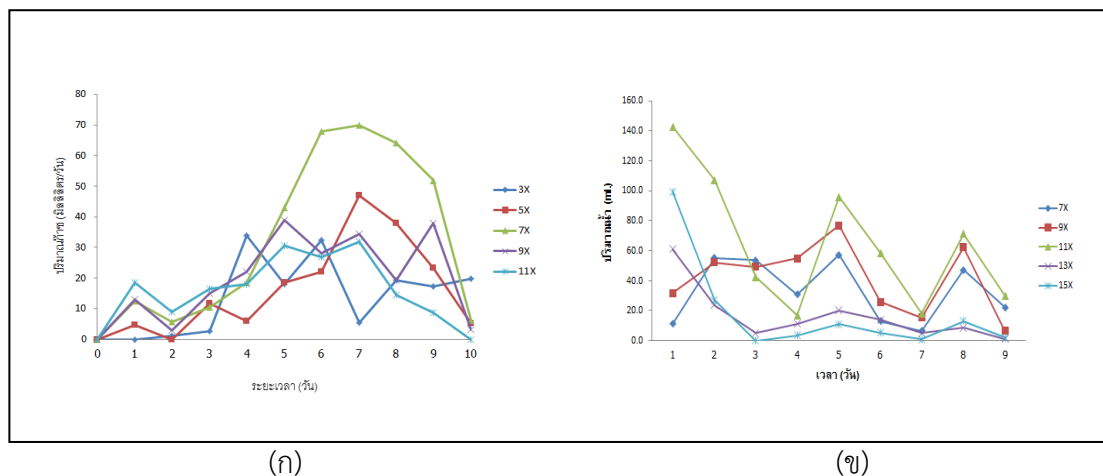
จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าตะกอนจากโรงงานแป่งมันซึ่งเป็นตัวแทนของตะกอนที่มีค่าคาร์บอนสูง มีค่าปริมาณความชื้นในเนื้อตะกอน คิดเป็น 11 เท่าของน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณความชื้นของตะกอนที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสีย ที่มีค่าความชื้นในเนื้อตะกอน คิดเป็นประมาณ 7 เท่าของน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้สัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของเนื้อตะกอน เนื่องจากตะกอนที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียมีลักษณะเป็นตะกอนเลน มีเนื้อละเอียดลักษณะคล้ายดินเลน ส่วนตะกอนที่มาจากโรงงานแป่งมันนั้น เป็นส่วนของตะกอนชั้นล่าง (Sludge Bed) ของระบบยูเอเอสบี ซึ่งเป็นชั้นตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการตกตะกอนสูงและมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง ลักษณะเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ จึงทำให้มีค่าปริมาณความชื้นสูง

2. ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการหมักกากตะกอนแบบไร้อากาศ

2.1 ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการหมักกากตะกอนแบบไร้อากาศ

การศึกษาปริมาณของก๊าซชีวภาพ (biogas) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักกากตะกอนแบบไร้อากาศ โดยอาศัยหลักการ fluid displacement ทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากตะกอน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าคาร์บอนสูง และกลุ่มที่มีค่าคาร์บอนต่ำ โดยให้ตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมแป่งมันบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี เป็นตัวแทนของตะกอนกลุ่มที่มีค่าคาร์บอนสูง และตะกอนจากบ่อดักตะกอน ระบบบำบัดของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี เป็นตัวแทนของตะกอนกลุ่มที่มีค่าคาร์บอนต่ำ โดยกำหนดให้น้ำหนักแห้งของตะกอนเท่ากับ 200 กรัม ทำการบรรจุตะกอนลงขวดแก้วสีชา ปิดฝาให้แน่น เพื่อให้เกิดสภาวะไร้อากาศ เนื่องจากธรรมชาติการทำงานของจุลินทรีย์ที่อยู่ใน

สภาวะไร้อากาศนั้น เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดพลังงาน โดยใช้สารอินทรีย์อื่นๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน ซึ่งผลจากการย่อยสลายด้วยกระบวนการหมักในสภาพไร้อากาศดังกล่าว จะทำให้ได้ก๊าซชนิดต่างๆ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศโดยการแทนที่น้ำ ผลการศึกษาที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยจากการหมักตะกอนในสภาวะไร้อากาศ
(ก) ตะกอนจากระบบบ่อบำบัด และ (ข) ตะกอนจากโรงงานแป้งมัน

หมายเหตุ

ตะกอนจากระบบบ่อบำบัดตามธรรมชาติ		ตะกอนจากโรงงานแป้งมัน	
3X	คือ ความชื้นลดลงกว่าปกติ 4 เท่า	7X	คือ ความชื้นลดลงกว่าปกติ 4 เท่า
5X	คือ ความชื้นลดลงกว่าปกติ 2 เท่า	9X	คือ ความชื้นลดลงกว่าปกติ 2 เท่า
7X	คือ ปริมาณความชื้นปกติของตะกอน	11X	คือ ปริมาณความชื้นปกติของตะกอน
9X	คือ ความชื้นมากกว่าปกติ 2 เท่า	13X	คือ ความชื้นมากกว่าปกติ 2 เท่า
11X	คือ ความชื้นมากกว่าปกติ 4 เท่า	15X	คือ ความชื้นมากกว่าปกติ 4 เท่า

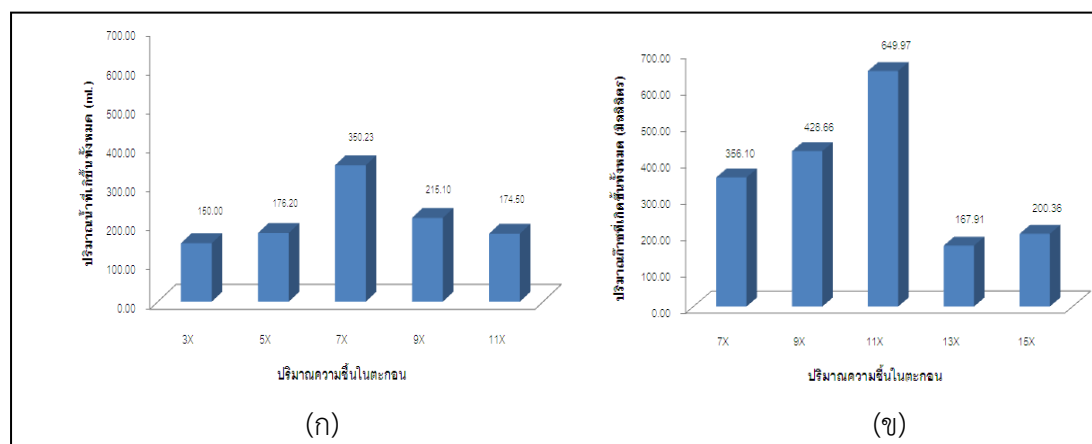
จากรูปที่ 2 เห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาจากการหมักตะกอนระบบบ่อบำบัด ซึ่งเป็นตัวแทนกลุ่มตะกอนที่มีค่าคาร์บอนต่ำ ในทุกการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่วันที่ 3 ของการทดลองเป็นต้นไป และสำหรับการทดลองที่ความชื้นปกติ (7X) พบว่า ปริมาณก๊าซจะสูงสุดในวันที่ 6 ของการทดลอง โดยมีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซสูงสุดในวันที่ 6 ของการทดลองอยู่ที่ 70 มิลลิลิตรต่อวัน คิดเป็นปริมาณก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมาต่อน้ำหนักตะกอนแห้ง 1 กรัม ได้เท่ากับ 0.35 มิลลิลิตร และเริ่มลดลงในวันที่ 8 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของอรอนงค์ (2541) ที่ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของจุลินทรีย์กับปริมาณการเกิดก๊าซในแต่ละวัน พบว่า กิจกรรมการย่อย

สลายของจุลินทรีย์จะเริ่มขึ้นในวันที่ 3 ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่วันที่ 3 ของการทดลองเป็นต้นไป และปริมาณก๊าซจะลดลงตามกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ลดลง

ส่วนปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาจากการหมักตะกอนโรงงานแป้งมัน ซึ่งเป็นตัวแทนกลุ่มตะกอนที่มีค่าความร้อนสูงเริ่มมีการปลดปล่อยก๊าซตั้งแต่วันที่ 1 ของการทดลอง สำหรับการทดลองที่มีค่าความชื้นปกติ (11X) และความชื้นสูง (13X และ 15X) พบว่า มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซลดลงในวันที่ 2 และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่วันที่ 4 ของการทดลองเป็นต้นไป และสำหรับที่ความชื้นต่ำกว่าปกติ (7X และ 9X) พบว่า ปริมาณก๊าซเกิดขึ้นตั้งแต่วันแรกของการทดลองและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสูงสุดในวันที่ 5 ของการทดลอง จากผลการศึกษาพบว่า การทดลองที่มีค่าความชื้นปกติ (11X) มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซสูงสุดในวันแรกของการทดลองอยู่ที่ 142.6 มิลลิลิตรต่อวัน คิดเป็นปริมาณก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมาต่อน้ำหนักตะกอนแห้ง 1 กรัม ได้เท่ากับ 0.71 มิลลิลิตร

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นกับปริมาณความชื้นในตะกอน

จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่า การทดลองหมักตะกอนที่ความชื้นปกติมีแนวโน้มในการปลดปล่อยก๊าซได้มากกว่าการทดลองที่ความชื้นอื่นๆ เมื่อนำผลการทดลองที่ปริมาณความชื้นปกติมาทำการเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาจากการหมักตะกอนจากโรงงานแป้งมัน ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข) ซึ่งเป็นตัวแทนกลุ่มตะกอนที่มีค่าคาร์บอนสูงมีค่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นสูงกว่าปริมาณก๊าซที่เกิดจากการหมักตะกอนจากระบบบำบัดซึ่งเป็นตัวแทนกลุ่มตะกอนที่มีค่าคาร์บอนต่ำ (รูปที่ 3 (ก)) โดยตะกอนจากโรงงานแป้งมันสามารถปลดปล่อยก๊าซรวมทั้งหมดได้ 649.97 มิลลิลิตร (ระยะเวลาทดลอง 9 วัน) คิดค่าเฉลี่ยเป็น 72.2 มิลลิลิตรต่อวัน โดยคิดเป็นปริมาณก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมาต่อน้ำหนักตะกอนแห้ง 1 กรัม ได้เท่ากับ 3.25 มิลลิลิตร ส่วนตะกอนจากระบบบำบัดสามารถปลดปล่อยก๊าซรวมทั้งหมดได้ 360.23 มิลลิลิตร (ระยะเวลาทดลอง 10 วัน) คิดค่าเฉลี่ยเป็น 36.02 มิลลิลิตรต่อวัน โดยคิดเป็นปริมาณก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมาต่อน้ำหนักตะกอนแห้ง 1 กรัม ได้เท่ากับ 1.80 มิลลิลิตร แสดงให้เห็นว่าตะกอนกลุ่มที่มีคาร์บอนสูงสามารถปลดปล่อยปริมาณก๊าซได้มากกว่าตะกอนกลุ่มที่มีคาร์บอนต่ำประมาณ 1 เท่า ผลการเปรียบเทียบข้อมูลทางสถิติโดยวิธี Duncan ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 ปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยจากการหมักตะกอนในสภาวะไร้อากาศในสภาพความชื้นที่ต่างกัน
(ก) ตะกอนจากระบบบำบัด และ (ข) ตะกอนจากโรงงานแป้งมัน

หมายเหตุ

ตะกอนจากระบบบำบัดตามธรรมชาติ		ตะกอนจากโรงงานแป้งมัน	
3X	คือ ความชื้นลดลงกว่าปกติ 4 เท่า	7X	คือ ความชื้นลดลงกว่าปกติ 4 เท่า
5X	คือ ความชื้นลดลงกว่าปกติ 2 เท่า	9X	คือ ความชื้นลดลงกว่าปกติ 2 เท่า
7X	คือ ปริมาณความชื้นปกติของตะกอน	11X	คือ ปริมาณความชื้นปกติของตะกอน
9X	คือ ความชื้นมากกว่าปกติ 2 เท่า	13X	คือ ความชื้นมากกว่าปกติ 2 เท่า
11X	คือ ความชื้นมากกว่าปกติ 4 เท่า	15X	คือ ความชื้นมากกว่าปกติ 4 เท่า

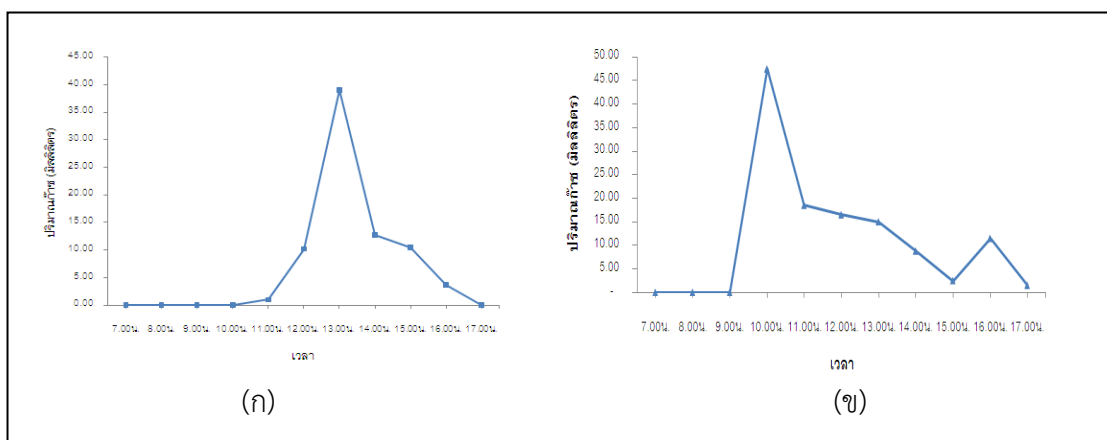
ตารางที่ 2 ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากหมักตะกอนที่ความชื้นต่างๆ

ปริมาณความชื้น	ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทดลอง (มิลลิลิตร)	
	ตะกอนจากระบบบำบัด	ตะกอนจากโรงงานแป้งมัน
ความชื้นลดลงกว่าปกติ 4 เท่า	150.00 ^a	356.1 ^{ab}
ความชื้นลดลงกว่าปกติ 2 เท่า	176.2 ^a	428.66 ^{ab}
ปริมาณความชื้นปกติของตะกอน	350.23 ^b	649.97 ^b
ความชื้นมากกว่าปกติ 2 เท่า	215.10 ^{ab}	167.91 ^a
ความชื้นมากกว่าปกติ 4 เท่า	174.50 ^a	200.36 ^a

หมายเหตุ a และ b แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

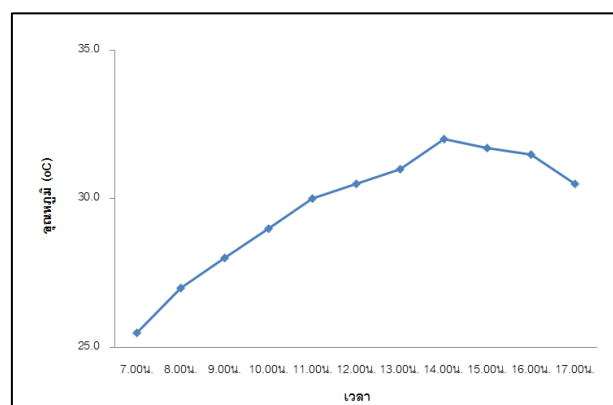
จากตารางที่ 2 ทำการเปรียบเทียบข้อมูลโดยวิธี Duncan พบว่า ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทดลองในหน่วยทดลองที่ใช้ปริมาณความชื้นปกติทั้งของตะกอนจากระบบบำบัดและโรงงานแปรงมัน มีความแตกต่างจากการทดลองที่ปริมาณความชื้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนแนวโน้มปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ได้รับการปรับค่าความชื้น พบว่า ตะกอนกลุ่มที่มีความร้อนต่ำ ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ความชื้นมากกว่าปกติ 2 เท่า มีแนวโน้มสูงกว่าการทดลองที่ความชื้นอื่นๆ ซึ่งตรงกันข้ามกับตะกอนกลุ่มที่มีความร้อนสูง พบว่า ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ความชื้นลดลงกว่าปกติ 2 เท่า มีแนวโน้มสูงกว่าการทดลองที่ความชื้นอื่นๆ

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิและช่วงเวลาในแต่ละวัน



รูปที่ 4 ปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยจากการหมักตะกอนในสภาวะไร้อากาศในแต่ละช่วงเวลา

(ก) ตะกอนจากระบบบำบัด และ (ข) ตะกอนจากโรงงานแปรงมัน



รูปที่ 5 อุณหภูมิอากาศภายนอกในแต่ละช่วงเวลา

จากรูปที่ 4 ปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อย และรูปที่ 5 อุณหภูมิอากาศภายนอก แสดงความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน แม้ว่าการทดลองจะทำในระบบปิดและมีการใช้กระดาษอลูมิเนียมฟอยล์ปิดขวดไว้เพื่อป้องกันแสงและเป็นการจำลองสภาพให้คล้ายการหมักในระบบปิด พบว่า อุณหภูมิอากาศภายนอกส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซออกจากระบบ เนื่องจากตามหลักทางฟิสิกส์แล้วอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันภายในระบบเพิ่มขึ้นด้วย โดยแรงดันที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวจะเป็นตัวผลักดันให้โมเลกุลของก๊าซที่เกิดขึ้นภายในระบบลอยตัวและเข้าไปแทนที่น้ำ ดังนั้น ช่วงเวลาที่เกิดก๊าซในระบบจึงเป็นช่วงอุณหภูมิของระบบสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และเป็นช่วงที่หน่วยทดลองได้รับแสงอย่างเต็มที่ โดยเฉพาะในช่วงเวลา 11.00-13.00 น.

3. ชนิดและองค์ประกอบก๊าซ

3.1 ตะกอนจากระบบบ่อบำบัด

(1) ก๊าซแอมโมเนีย พบการเกิดก๊าซในวันที่ 3-8 โดยมีความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซแอมโมเนียเท่ากับ 36.22 ppm ในวันที่ 6 ของการทดลอง ปัจจัยที่ทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนีย คือ การมีสารประกอบไนโตรเจน ไนเตรต และแอมโมเนีย ทั้งในน้ำและในตะกอนน้ำเสียซึ่งมาจากน้ำทิ้งชุมชน ซึ่งการสะสมของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในชั้นตะกอนเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา ammonification (ไพบูลย์, 2528; วิสา, 2550; Vanloon and Duffy, 2005) ทั้งนี้ปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยสัมพันธ์กับระยะเวลาที่น้ำเสียอยู่ในระบบและค่าปริมาณแอมโมเนียในน้ำด้วย

(2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบการเกิดก๊าซในทุกวันของการทดลอง โดยพบความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 360.27 ppm ในวันที่ 3 ของการทดลอง ปัจจัยที่ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์คือ การมีสารประกอบซัลไฟด์ในน้ำและการมี available sulfate ในตะกอนดินที่มาจากกากตะกอนสารประกอบซัลเฟอร์จากน้ำเสียชุมชนซึ่งเป็นแหล่งซัลเฟตสำหรับ sulfate reducing bacteria ซึ่งการสะสมของสารอินทรีย์ซัลเฟอร์ในชั้นตะกอนเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา dissimilatory sulfate reduction (สุบัญญัติ, 2548)

(3) ก๊าซมีเทน พบการเกิดก๊าซในทุกวันของการทดลอง โดยพบความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซมีเทนเท่ากับ 101,395 ppm ในวันที่ 6 ของการทดลอง ปัจจัยที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนคือ ปริมาณคาร์บอนในตะกอนที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เช่น แป้ง น้ำตาล และเซลลูโลส เป็นต้นซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับ methanogenic bacteria ซึ่งการสะสมของสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนยังไม่ถูกย่อยสลายทำให้แบคทีเรีย methanogenesis ทำงานได้ดี (Kelly and Chynoweth, 1981; Huttunen *et al.*, 2006)

3.2 ตะกอนจากโรงงานแปรงมัน

(1) ก๊าซแอมโมเนีย พบการเกิดก๊าซในวันที่ 3-8 โดยมีความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซแอมโมเนียเท่ากับ 44.15 ppm ในวันที่ 6 ของการทดลอง ปัจจัยที่ทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนียคือ น้ำเสียที่มี

องค์ประกอบโปรตีนในรากมันสำปะหลัง ซึ่งเพิ่มการสะสมของสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่มีความใหม่ในชั้นตะกอน เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา ammonification (วิสา, 2550, Vanloon and Duffy, 2005)

(2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบการเกิดก๊าซในทุกวันของการทดลอง โดยพบความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 68,050 ppm ในวันที่ 6 ของการทดลอง ปัจจัยที่ทำให้ตะกอนจากโรงงานแป้งมันเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้นสูงสุด คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย, ปริมาณ available sulfate ในตะกอนดิน และปริมาณสารประกอบซัลไฟด์ในน้ำที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา sulfate reduction ของแบคทีเรียกลุ่ม sulfate reducing bacteria (สุบัณฑิต, 2548)

(3) ก๊าซมีเทน พบการเกิดก๊าซในทุกวันของการทดลอง โดยพบความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซมีเทนเท่ากับ 9,900,837 ppm ในวันที่ 6 ของการทดลอง ปัจจัยที่ทำให้ตะกอนจากโรงงานแป้งมันเกิดก๊าซมีเทนความเข้มข้นสูงสุด คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและปริมาณคาร์บอนในตะกอนน้ำเสียที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา (Kelly and Chynoweth, 1981; Huttunen *et al.*, 2006)

สรุปผลการวิจัย

การนำกากตะกอนมาผลิตก๊าซชีวภาพและปัจจัยต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ พบว่าการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างมีความเป็นไปได้เนื่องจากสามารถผลิตก๊าซได้มากที่สุด คือ 360.23 มิลลิลิตร ต่อการหมักตะกอนที่น้ำหนักแห้ง 200 กรัม หรือคิดเป็นปริมาณก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมาต่อน้ำหนักตะกอนแห้ง 1 กรัม ได้เท่ากับ 1.80 มิลลิลิตรเมื่อเทียบกับการใช้ตะกอนจากโรงงานแป้งมัน ซึ่งสามารถผลิตก๊าซได้มากที่สุด คือ 649.97 มิลลิลิตร ต่อการหมักตะกอนที่น้ำหนักแห้ง 200 กรัม หรือคิดเป็นปริมาณก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมาต่อน้ำหนักตะกอนแห้ง 1 กรัม ได้เท่ากับ 3.25 มิลลิลิตร แสดงให้เห็นว่าตะกอนจากโรงงานแป้งมัน ซึ่งเป็นตัวแทนกลุ่มตะกอนที่มีค่าคาร์บอนสูงมีความสามารถในการผลิตก๊าซมากกว่าตะกอนกลุ่มที่มีค่าคาร์บอนต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากผลการศึกษาของซัชฎาพร (2555) ได้ศึกษาองค์ประกอบของตะกอนประกอบด้วย ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนจำแนกตามแหล่งกำเนิด พบว่า ตะกอนจากโรงงานแป้งมัน มีปริมาณคาร์บอน ร้อยละ 42.03 ไฮโดรเจน ร้อยละ 6.74 และไนโตรเจน 8.35 ส่วนตะกอนจากระบบบำบัดของโครงการแหลมผักเบี้ยฯ พบว่าปริมาณคาร์บอน ร้อยละ 8.33 ไฮโดรเจน ร้อยละ 2.08 และไนโตรเจน 0.97 และเนื่องจากปริมาณ การเกิดก๊าซสัมพันธ์กับกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเป็นตะกอนที่เกิดจากการย่อยสลายเสร็จสิ้นแล้ว หรืออาจเหลือส่วนของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก จึงทำให้ปริมาณก๊าซที่เกิดมีปริมาณน้อย ส่วนตะกอนจากโรงงานแป้งมันเป็นตะกอนที่เกิดจากกระบวนการเร่งทำให้ได้ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการตกตะกอนสูงและมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง ส่งผลเกิดก๊าซในปริมาณสูง

ผลจากการศึกษาพบว่าหากต้องการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอน สามารถนำตะกอนจากระบบมาใช้ได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนค่าความชื้น นอกจากนี้ อุณหภูมิอากาศภายนอกถือเป็นปัจจัยหลักที่จะช่วย

กระตุ้นกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และช่วยในการเพิ่มแรงดันให้แก่ระบบเพื่อให้ก๊าซเกิดการลอยตัวขึ้น เนื่องจากในการทดลองเป็นกระบวนการหมักในสภาวะไร้ออกซิเจน ก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาส่วนใหญ่เป็นออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย และมีเทน ซึ่งปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเหล่านี้จะขึ้นกับระยะเวลาในการหมัก และคุณภาพของวัตถุดิบที่ใช้ในการหมัก เนื่องจากปริมาณก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาจะสัมพันธ์กับกิจกรรมของจุลินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญ และองค์ประกอบของก๊าซที่ปลดปล่อยออกมาจะเปลี่ยนแปลงชนิดไปตามระยะเวลาในการหมัก และกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์

แนวโน้มของการเกิดก๊าซของตะกอนทั้งสองกลุ่มเทียบกับเวลาพบว่า เกิดปริมาณก๊าซสูงที่สุดเฉลี่ยในวันที่ 5 และ 6 และมีปริมาณลดลงตามเวลา จนถึงวันที่ 10 แทบจะไม่เกิดก๊าซ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดก๊าซแอมโมเนียคือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้แก่ ปริมาณ available sulfate ในตะกอนดินและปริมาณสารประกอบซัลไฟด์ในน้ำ และก๊าซมีเทนมีปัจจัยที่ส่งผล คือ ปริมาณร้อยละของคาร์บอนในตะกอนดินและปริมาณสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียส่วนปัจจัยที่ส่งผลต่อลำดับการเกิดก๊าซ คือ ค่า Redox potential ที่เกี่ยวข้องกับการเลือกตัวรับอิเล็กตรอนของแบคทีเรีย

ทั้งนี้ หากต้องการนำตะกอนจากระบบบำบัดมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงาน ด้วยการผลิตก๊าซชีวภาพ ควรเลือกตะกอนที่มีสารอินทรีย์หลงเหลืออยู่ในปริมาณมาก หรือใช้ตะกอนจากแหล่งที่น้ำเสียมีค่าการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในปริมาณสูง เพราะเมื่อนำไปหมักในสภาวะไร้อากาศ จะทำให้เกิดกิจกรรมการย่อยสลายได้อย่างต่อเนื่อง และควรควบคุมกระบวนการหมักให้เอื้อต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งจะทำให้ได้ก๊าซที่ออกมามีร้อยละของก๊าซมีเทนมากขึ้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงานในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ทดแทนพลังงานในรูปแบบอื่นได้

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์, 2539.

ชัชฎาพร มีศรี. “การเปลี่ยนแปลงชนิดและสัดส่วนของก๊าซที่มีกลิ่นจากตะกอนน้ำเสียชุมชนและตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2555.

ไพบุลย์ ประพฤติธรรม. เคมีของดิน. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2528.

วิษณุ มีอยู่ และคณะ. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ชุดโครงการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม เรื่อง โครงการศึกษาและพัฒนาการแปรรูปกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียให้เป็นเชื้อเพลิง. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2548.

วิสา ทรัพย์อินันต์. กระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็นก๊าซแอมโมเนีย (Ammonification) ในโรงงานพิมพ์ผ้าที่ใช้สีพิมพ์ชนิดรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) และผลกระทบ. กรุงเทพมหานคร: สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550.

สุบัณฑิต นิมรรัตน์. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

อรอนงค์ ผิวนิล. “การศึกษาก๊าซที่ปลดปล่อยจากการหมักขยะชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541.

ภาษาต่างประเทศ

Huttnen, Vaisanen T.S., Helisten S.K. and Martikainen P.J.. “Methane Fluxes at the Sediment-water Interface in Some Boreal Lakes and Reservoirs.” Boreal Environment Research.no. 11 (2006):27-34.

Kelly C.A., and Chynuweth D.P.. “The Contributions of Temperature and of the Input of Organic Matter to Controlling Rates of Sediment Methanogenesis.” Limnol.Oceanogr. no. 26 (1981): 891-897.

Prathap Parameswaran and Paul R. Anderson. “Biosolids mineralization in an anaerobic-aerobic combined reactor system.” Journal of Water Research.no. 41 (2007): 2739-2747.

Vanloon G.W. and Duffy S.J.. Environmental Chemistry. 2nd (ed.). New York: Oxford University Press Inc., 2005.

Wolf B.. The Fertile Triangle: The Interrelationship of Air, Water and Nutrient in Mixing Soil Productivity. New York: The Haworth Press Inc., 1999.