การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะโดยกระบวนการชีวภาพแบบไร้อากาศ 2 ขั้นตอน

PRODUCTION OF METHANE GAS FROM SOLID WASTES BY A TWO-STAGE ANAEROBIC PROCESS

สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์ **สมชาย เจียมธีรสกุล**

Suthirak Sujarittanonta **Somchai Jeamteerasakul**

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนขยะสดเป็นก๊าซมีเทนด้วยวิธีย่อยสลายแบบไร้อากาศ 2 ขั้นตอน ใช้ระยะเวลาในการหมักขยะสดนาน 3.49, 5.17, 11.39 และ 15.91 วัน ให้อัตราการป้อนสารอาหารระหว่าง 0.18–0.80 กก. ของของแข็งระเหยที่ใส่ต่อลบ.ม.–วัน ปรากฏว่า ได้ปริมาณก๊าซต่อถังหมักเป็น 0.052–0.228 ปริมาตร/ปริมาตร–วัน มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ 58.98–66.91% โดยที่ระยะเวลาในการหมัก 8.47 วันจะให้ปริมาณก๊าซต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ใส่สูงที่สุด คือ 0.300 ล.มีเทน/ก.ของของแข็งระเหยที่ใส่ และมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนสูงด้วย นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดซีโอดีทั้งหมดได้ 59.63–94.38% สามารถกำจัดของเสียทั้งหมดได้ 70.62–97.79%

ABSTRACT

This study is to investigate the possibility of conversion of garbage to methane gas by a two-stage anaerobic digestion. Biogas product can be used as an energy source. The results of the study at various retention time of 3.49, 5.17, 11.39 and 15.91 days and the substrate concentration between 0.18 – 0.80 kg volatile solid added/m^3-day indicated that the total value of gas yield expressed in volume of gas per volume of reactor was between 0.052 – 0.228 and the composition of methane gas was between 58.98 – 66.91%. For retention

time of 8.47 days, the gas yield was optimum at 0.300 l(CH_4)/g volatile solid added and also the composition of methane gas was also high. The percentage of total COD removal was between 59.63 – 94.38% and the total solid removal was between 70.62 – 97.79%.

คำนำ

จากการศึกษาของสำนักรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร ได้คาดคะเนว่าในปี พ.ศ. 2543 ปริมาณขยะภายในเขตกรุงเทพมหานครจะมีประมาณ 5,540 ตัน/วัน[2] ปัญหาที่จะตามมาก็คือการกำจัดขยะเหล่านี้ เพราะการกำจัดโดยวิธีธรรมดา เช่น การนำไปถมและการเผาอาจจะไม่เพียงพอกับปริมาณขยะที่เกิดขึ้น และหาพื้นที่ที่จะถมได้ยาก ขยะที่อยู่ใกล้ชุมชนทำให้เกิดกลิ่นเหม็นและเกิดโรคติดต่อ ถ้าจะกำจัดโดยวิธีนำขยะไปทำปุ๋ยก็ไม่คุ้มกับการลงทุนเพราะผลผลิตที่ได้ไม่เป็นที่นิยมของตลาด สำหรับการเผานั้นเป็นการลดปริมาณขยะที่ได้ผลประมาณ 70–80% แต่กระบวนการนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง และทำให้เกิดมลภาวะ ดังนั้นจึงได้ทำการค้นคว้าหาวิธีที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเผาขยะให้กลายเป็นแหล่งของพลังงานทดแทน[1] ซึ่งวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและน่าจะศึกษาก็คือการนำขยะมาย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.25–0.67 ล./ก. ของของแข็งระเหย*ที่ใส่เข้าไป และมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ 51.5–62.0%[2] แต่พบว่าการควบคุมระบบเป็นไปได้ยากเพราะมีแบคทีเรีย 2 ชนิด คือชนิดสร้างกรดและชนิดสร้างมีเทนอยู่ร่วมกัน ดังนั้น ถ้าสามารถแยกแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดนี้ออกจากกันได้ก็จะทำให้การควบคุมระบบเป็นไปได้ง่ายขึ้นและสามารถนำไปใช้ในงานระดับอุตสาหกรรมได้

การทดลองนี้ได้ใช้วิธีการย่อยสลายแบบใหม่โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ แบคทีเรียชนิดสร้างกรดหมักแยกถังกับแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน การหมักจึงมี 2 ขั้นตอน โดยแบ่งหลักการทำงานเป็น 3 ช่วง[4] คือ ช่วงที่ 1 การแตกสลายโพลีเมอร์ (polymer break down) เป็นการแตกสลายโมเลกุลใหญ่ ๆ ให้กลายเป็นสารประกอบอย่างง่ายในสารละลาย ช่วงที่ 2 การสร้างกรด (acid production) เป็นการย่อยสลายโมเลกุลย่อยที่ได้จากช่วงแรกให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ โดยใช้แบคทีเรียชนิดสร้างกรด (acetogenic bacteria) ในการย่อยสลาย และช่วงที่ 3 การสร้างมีเทน (methane production) เป็นการใช้แบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซ (methanogenic bacteria) ย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่ได้จากช่วงการสร้างกรดให้กลายเป็นก๊าซมีเทนเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป สำหรับการสร้างก๊าซมีเทนในระบบย่อยสลายแบบ 2 ขั้นตอนนี้ จะสิ้นสุดกระบวนการที่การหมักก๊าซมีเทน

---

* ของแข็งระเหย (volatile solid) = สารอาหารที่สามารถย่อยสลายกลายเป็นก๊าซได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ถังหมักกรด (acid reactor) ทำด้วยพลาสติกอะครีลิก (acrylic plastic) หนา 3 มม. ลักษณะเป็นกระบอกสี่เหลี่ยมจตุรัส ขนาดกว้าง 30 ซม. ตอนล่างเป็นกรวย ความลึกรวม 60 ซม. ปริมาตรปรับได้ตามช่องทางออกระดับต่าง ๆ ซึ่งการทดลองนี้ใช้ปริมาตร 30 ล. ฝาปิดมีปะเก็นยางเพื่อกันการรั่วซึมและผนึกด้วยกาวซิลิโคน ขณะทดลองใช้เครื่องสูบแบบหอยโข่งสูบน้ำจากก้นถังแล้วเวียนกลับเข้าตรงกลางถังเพื่อให้เกิดการกวนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งควบคุมโดยเครื่องตั้งเวลาให้ทำงาน 3 ชม. หยุด 1 ชม. สลับกันเพื่อไม่ให้มอเตอร์ทำงานหนักเกินไป นอกจากนี้ภายในถังยังได้ติดตั้งชุดกวน โดยใช้ใบพัดเพื่อตีตะกอนลอย (scum) ที่จะเกิดสะสมอยู่ที่ผิวบนให้แตกออกเพื่อให้การไหลของน้ำเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

ถังตกตะกอน (clarifier) ทำด้วยพลาสติกอะครีลิกใสหนา 3 มม. ลักษณะเป็นกระบอกสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาดกว้าง 15 ซม. ตอนล่างเป็นกรวย ลึกรวม 55 ซม. มีฝาปิดพร้อมปะเก็นยาง เหนือกรวยตอนล่างมีแผ่นกั้นเจาะรูเพื่อทำหน้าที่ดักตะกอนให้อยู่ตอนล่าง มีช่องทางออกระดับต่าง ๆ เพื่อปรับปริมาตรตามต้องการ

ถังหมักก๊าซ (methane reactor) ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม หนา 2 มม. รูปทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 39 ซม. ลึก 65 ซม. ปริมาตร 50 ล. ภายในถังเดินท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{3}{8}$ นิ้ว เจาะรูตลอดความยาวและมีปลายปิดที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (perforated pipe) สำหรับการกวนโดยใช้เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่งสูบน้ำจากก้นถังและผ่านเข้าท่อทองแดงที่ขดอยู่ก้นถัง น้ำจะไหลขึ้นทางรูที่เจาะไว้ ใช้เครื่องควบคุมตั้งเวลาทำงาน 3 ชม. หยุด 1 ชม. สลับกัน

เครื่องตั้งเวลา (timer) ใช้ในการควบคุมเวลาการทำงานของเครื่องสูบที่ป้อนสารอาหาร 3 เครื่อง และใช้ควบคุมเวลาทำงานของเครื่องสูบสำหรับกวนในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซอีก 2 เครื่อง

เครื่องสูบสำหรับป้อนสารอาหารและเวียนตะกอน (substrate feed & recirculation pump) ใช้ในการป้อนสารอาหารเข้าสู่ถังหมักกรด และการเวียนตะกอนของเสีย (sludge) กลับจากถังตกตะกอน ใช้เครื่องสูบแบบสายรีด (peristaltic pump) ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้ 6–600 รอบ/นาที และต่อได้หลายหัวพร้อมกัน สำหรับการป้อนสารอาหารเข้าสู่ถังหมักก๊าซ ใช้เครื่องสูบแบบสายรีดที่ปรับความเร็วรอบด้วยชนิดเชิงตัวเลข

เครื่องสูบสำหรับกวน (mixing pump) ใช้เครื่องสูบแบบหนีศูนย์กลาง หรือที่เรียกว่าเครื่องสูบแบบหอยโข่งขนาดเล็กและขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด $\frac{1}{4}$ แรงม้า ความเร็วรอบประมาณ 1,400 รอบ/นาที

มอเตอร์สำหรับกวนสารอาหาร (stirring motor) ใช้มอเตอร์ขนาดเล็กและมีเครื่องทดความเร็ว

รอบให้เหลือประมาณ 100 รอบ/นาที

เครื่องบดขยะ (blender) ใช้สำหรับบดขยะที่สับให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้ว สามารถปรับความเร็วได้ 2 จังหวะ

เครื่องวัดปริมาตรก๊าซ (gas meter) ใช้สำหรับวัดผลรวมของปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน โดยก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกส่งมาตามสายยางจากฝาของถังหมักก๊าซ ผ่านขวดที่ใส่น้ำเพื่อปรับความดัน แล้วไหลผ่านมาทางด้านล่างของเครื่องวัด

วิธีการ

การเตรียมสารอาหาร ใช้ขยะซึ่งส่วนใหญ่เป็นเศษพืชผัก ผลไม้ ซึ่งเหมาะที่จะหมักเป็นกรดระเหย (volatile acid) นำขยะมาเลือกเศษกระดาษและถุงพลาสติกออก ใช้มีดสับขยะจนละเอียด แล้วจึงบดด้วยเครื่องบดความเร็วสูง ขณะบดต้องเติมน้ำบ่อย ๆ บดจนขยะละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงเก็บไว้ในตู้เย็นเพื่อป้องกันปฏิกิริยาทางชีวเคมี ขยะที่เตรียมได้แต่ละครั้งสามารถเก็บไว้ใช้ได้นาน 3–5 วัน เมื่อจะทำการทดลองก็นำขยะที่เตรียมไว้นี้มาเติมน้ำประปาให้เจือจางจนมีค่าซีโอดีประมาณ 5,000 มก./ล. และจะใช้ปริมาณนี้เป็นมาตรฐานตลอดการทดลอง นำขยะที่เจือจางแล้วนี้ใส่ในถังที่ติดชุดเครื่องกวนเพื่อเตรียมการป้อนสารอาหารต่อไป

การป้อนสารอาหาร ใช้วิธีการป้อนแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi continuous) โดยใช้เครื่องสูบแบบสาย–รีดที่ควบคุมด้วยเครื่องตั้งเวลาเพื่อให้ได้ปริมาตรตามระยะเวลาการหมักที่กำหนดไว้ สำหรับถังหมักกรดที่มีขนาดความจุ 30 ล. กำหนดให้มีระยะเวลาการหมัก 0.88 และ 0.89 วัน ดังนั้น อัตราการป้อนสารอาหารเป็น 33.91 และ 33.71 ล./วัน ตามลำดับ น้ำส่วนที่ล้นจากถังหมักกรดจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนและตะกอนจะไหลเวียนกลับเข้าสู่ถังหมักกรดในอัตราเดียวกับอัตราการป้อนสารอาหาร (อัตราการเวียนกลับ 100%) โดยการใช้เครื่องสูบแบบสายรีดตัวเดียวกันที่สามารถต่อได้หลายหัว ใช้เครื่องสูบแบบสายรีดอีก 2 ตัวสูบน้ำใสส่วนบนออกจากถังตกตะกอนเข้าสู่ถังหมักก๊าซ 2 ใบ โดยใช้เครื่องตั้งเวลาควบคุม ถังหมักก๊าซใบแรกมีขนาด 50 ล. ใช้ระยะเวลาการหมัก 2.61 และ 4.28 วัน ดังนั้น อัตราการจ่ายน้ำจากถังตกตะกอนจะเท่ากับ 19.17 และ 11.69 ล./วัน ตามลำดับ ส่วนถังหมักก๊าซใบที่ 2 มีขนาด 52.3 ล. ใช้ระยะเวลาการหมัก 10.50 และ 15.03 วัน อัตราการจ่ายน้ำจะเท่ากับ 4.98 และ 3.48 ล./วัน ตามลำดับ

ระยะเวลาในการหมัก (retention time) ระยะเวลาที่ใช้ในการหมักกรดจะคงที่คือ 0.88–0.89 วัน ส่วนระยะเวลาในการหมักก๊าซนั้นต่าง ๆ กัน คือตั้งแต่ 2–20 วัน เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดก๊าซสูงสุด

การทดลอง นำขยะที่เตรียมไว้ซึ่งมีค่าซีโอดีประมาณ 5,000 มก./ล. หมักในถังหมักกรด 0.88 และ 0.89 วัน แล้วผ่านเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกน้ำส่วนที่ใสเข้าสู่ถังหมักก๊าซ หมักเป็นระยะเวลา

2–20 วัน การทดลองแบ่งเป็น 2 ชุด คือ ชุดการทดลองที่ 1 ใช้ระยะเวลาในการหมักกรด 0.89 วัน และใช้เวลาในการหมักก๊าซในถังใบที่ 1 เท่ากับ 4.28 วัน ถังใบที่ 2 เท่ากับ 10.50 วัน ส่วนชุดการทดลองที่ 2 ใช้ระยะเวลาในการหมักกรด 0.88 วัน และระยะเวลาการหมักก๊าซในถังใบที่ 1 เท่ากับ 2.61 วัน ถังใบที่ 2 เท่ากับ 15.03 วัน และระหว่างการหมักจะทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ตามวิธีการของ American Public Health Association[3]

ผล

การเปลี่ยนแปลงภายในถังหมักกรดและถังตกตะกอน

สภาวะสมดุลของระบบการทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 ระยะเวลาการหมักก๊าซ 4.28 และ 10.50 วัน ชุดการทดลองที่ 2 ระยะเวลาการหมักก๊าซเท่ากับ 2.61 และ 15.03 วัน พบว่าในชุดการทดลองที่ 1 ค่าพีเอชของสารอาหารก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าเฉลี่ยต่ำ คือ 5.02 ในถังหมักกรดคือ 5.28 และเพิ่มขึ้นในถังตกตะกอนเป็น 5.50 ในชุดการทดลองที่ 2 ค่าพีเอชของสารอาหาร คือ 4.76 และเมื่อป้อนสารอาหารเข้าสู่ถังหมักกรดค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นเป็น 5.28 และ 5.73 ในถังตกตะกอน ส่วนปริมาณของกรดระเหยในถังกวนคือ 917.75 มก./ล. จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นในถังหมักกรดเป็น 946.00 มก./ล. ในชุดการทดลองที่ 1 แต่ในชุดการทดลองที่ 2 ปริมาณของกรดระเหยในถังกวนคือ 729.20 มก./ล. ซึ่งจะลดลงในถังหมักกรดเป็น 579.70 มก./ล. และจะลดลงในถังตกตะกอนเป็น 826.63 มก./ล. และ 517.00 มก./ล. ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

สำหรับค่าซีโอดี พบว่าชุดการทดลองที่ 1 ค่าซีโอดีรวมของสารอาหารก่อนป้อนสู่ระบบเป็น 4681.88 มก./ล. และค่าซีโอดีละลาย 1418.75 มก./ล. เมื่ออยู่ในถังหมักกรดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 9732.63 และ 1460.88 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนค่าซีโอดีรวมในถังตกตะกอนจะลดลงเหลือ 2655.25 มก./ล. ซีโอดีละลายเหลือ 1245.88 มก./ล. (ตารางที่ 1) ชุดการทดลองที่ 2 ค่าซีโอดีรวมของสารอาหารเป็น 4908.38 มก./ล. ค่าซีโอดีละลาย 1549.38 มก./ล. และในถังหมักกรดจะเพิ่มขึ้นเป็น 5915.57 มก./ล. และ 1267.43 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนถังตกตะกอนจะมีค่าซีโอดีรวม 2173.57 มก./ล. ค่าซีโอดีละลาย 1273.43 มก./ล. นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของการทดลองทั้งหมดมีเปอร์เซ็นต์สูงมากคือ 59.63–94.38% สำหรับซีโอดีรวม และ 83.62–93.58% สำหรับซีโอดีละลาย (ตารางที่ 2)

ในชุดการทดลองที่ 1 ปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน อินทรีย์ไนโตรเจน และไนโตรเจนรวมของสารอาหารก่อนป้อนเข้าสู่ระบบคือ 47.34, 113.83 และ 161.17 มก./ล. จะเพิ่มขึ้นเป็น 73.20, 183.11 และ 256.31 มก./ล. ในถังหมักกรด ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ 2 จะมีปริมาณ

แอมโมเนียไนโตรเจน อินทรีย์ไนโตรเจน และไนโตรเจนรวมในสารอาหารคือ 71.76, 119.04 และ 190.81 มก./ล. เพิ่มขึ้นในถังหมักกรดเป็น 94.00, 137.52 และ 231.62 มก./ล. ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 1 ปริมาณก๊าซในถังหมักกรดจะไม่เกิดขึ้นแต่จะเกิดขึ้นเล็กน้อยในชุดการทดลองที่ 2 สามารถวัดได้โดยมีอัตราการเกิดของก๊าซทั้งหมด 8.73 ล./วัน หรือ 291 ล./ลบ.ม.ของถังหมัก ก๊าซที่ได้ประกอบด้วยก๊าซมีเทน 55% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25% และก๊าซไนโตรเจน 20%

การเปลี่ยนแปลงภายในถังหมักก๊าซที่ใช้ระยะเวลาในการหมักก๊าซต่าง ๆ กัน

พีเอชจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 6.42–6.89 โดยพีเอชจะมีค่าสูงสุดคือ 6.89 ที่ระยะเวลาการหมัก 10.50 วัน และความเป็นด่างคิดจากปริมาณ $CaCO_3$ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักคือ 659.10 มก./ล. ที่ 2.61 วัน เพิ่มขึ้นเป็น 753.10 มก./ล. ที่ 15.03 วัน ส่วนปริมาณของกรดระเหยจะลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น จากปริมาณ 90.30 มก./ล. ที่ 2.61 วัน จะลดลงเหลือ 49.60 มก./ล. ที่ 15.03 วัน (ตารางที่ 3)

ซีโอดีรวมและซีโอดีละลายจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น จากค่าซีโอดีรวม 1139.71 มก./ล. ค่าซีโอดีละลาย 253.86 มก./ล. ที่ระยะเวลาการหมัก 2.61 วัน จะมีค่าลดลงเป็น 276.00 มก./ล. และ 99.43 มก./ล. ที่ 15.03 วัน ตามลำดับ (ตารางที่ 3) เปอร์เซ็นต์การกำจัดของซีโอดีรวมมีค่าสูงสุดเป็น 87.30% ซึ่งจะต่ำกว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงสุดของซีโอดีละลายคือ 92.19% โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดของซีโอดีละลายจะเท่ากับ 80.06, 82.49, 89.96 และ 92.19% และของซีโอดีรวมเท่ากับ 47.56, 28.82, 79.23 และ 87.30% ที่ระยะเวลาการหมัก 2.61, 4.28, 10.50 และ 15.03 วัน ตามลำดับ (รูปที่ 1)

ส่วนปริมาณไนโตรเจนรวมค่อนข้างจะคงที่ตลอดระยะเวลาการหมักก๊าซ คือ 121.05, 152.31, 117.21 และ 121.40 มก./ล. ที่ 2.61, 4.28, 10.50 และ 15.03 วัน ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ซึ่งจะมีปริมาณน้อยกว่าในถังหมักกรด (256.31 และ 231.62 มก./ล.) ปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น คือ 42.20, 66.33, 22.54 และ 18.07 มก./ล. เมื่อหมัก 2.61, 4.28, 10.50 และ 15.03 วัน ตามลำดับ ส่วนแอมโมเนียไนโตรเจนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อหมักนานขึ้น คือ 78.85, 85.98, 94.67 และ 103.33 มก./ล. ที่ 2.61, 4.28, 10.50 และ 15.03 วัน ตามลำดับ (ตารางที่ 3)

ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้จากการทดลองจะลดลงตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น คือ 10.31, 9.11, 4.86 และ 1.98 ล./วัน ที่ 2.61, 4.28, 10.50 และ 15.03 วัน ตามลำดับ โดยที่อัตราการผลิตก๊าซนั้นจะเพิ่มขึ้นในระยะแรกจนถึงจุดสูงสุดแล้วจะลดลงเมื่อระยะเวลานานขึ้น และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซได้สูงสุดคือ 32.90 ล./วัน เมื่อหมัก 10.50 วัน และที่ระยะเวลาเดียวกันนี้จะมีการผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดเช่นกัน คือ 22.67 ล./วัน (รูปที่ 2) โดยมีอัตราการผลิตก๊าซทั้งหมดเท่ากับ 18.25, 26.24, 32.90 และ 19.28 ล./วัน และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 11.56, 18.60, 22.67 และ 11.72 ล./วัน ที่ระยะเวลา

2.61, 4.28, 10.50 และ 15.03 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าสัดส่วนสูงสุดของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้คือ 70.89% ที่ 4.28 วัน และต่ำสุดคือ 60.77% ที่ 15.03 วัน จากการคำนวณอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อกรัมของซีโอดีที่ใช้ไปพบว่า เมื่อคำนวณจากค่าซีโอดีรวมจะมีความผิดพลาดสูงมาก จึงได้นำค่าซีโอดีละลายที่ใช้ไปในถังหมักก๊าซมาคำนวณ ได้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดคือ 0.600 ล.ก๊าซมีเทน/ก. ซีโอดีที่ถูกใช้ไปที่ระยะเวลาการหมัก 6–10 วัน เป็นตัวแทนประสิทธิภาพที่แท้จริงของการหมักก๊าซ (รูปที่ 3)

วิจารณ์

ความเป็นด่าง และพีเอชของระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น เพราะเมื่อป้อนสารอาหารเข้าสู่ระบบ อาหารจะถูกย่อยสลายไปเรื่อย ๆ เกิดแอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นแอมโมเนียมคาร์บอเนตมีสภาพเป็นบัฟเฟอร์ ความเป็นด่างและพีเอชจึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้นและกรดระเหยจะสลายให้แอมโมเนียเช่นเดียวกัน

ปริมาณของกรดระเหยในถังหมักกรดชุดการทดลองที่ 1 จะมีมากกว่าในสารอาหารก่อนป้อนเข้าสู่ระบบ แสดงว่าอัตราการผลิตกรดระเหยมีมากกว่าอัตราการสลายไป ส่วนชุดการทดลองที่ 2 ปริมาณของกรดระเหยในถังหมักกรดจะน้อยกว่าในสารอาหารเริ่มต้น แสดงว่าอัตราการสลายของกรดระเหยมีมากกว่าอัตราการผลิต จึงทำให้ปริมาณของกรดระเหยหายไป ซึ่งอาจจะเกิดจากสภาพของสารอาหารที่ใช้ในการทดลองหรือเกิดการหมักก๊าซมีเทนขึ้น เพราะเกิดก๊าซมีเทนถึง 55% แสดงว่ามีแบคทีเรียชนิดผลิตก๊าซมีเทนอาศัยอยู่ภายในถังหมักกรด จึงย่อยสลายกรดระเหยให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ปริมาณกรดจึงลดลงเมื่อสารอาหารเข้าสู่กระบวนการหมักก๊าซ ปริมาณของกรดระเหยจะสลายไปเป็นก๊าซมีเทนมากที่สุด ปริมาณของกรดระเหยที่ถูกย่อยสลายสูงขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น

ค่าซีโอดีในถังหมักกรดจะมีค่าสูงกว่าซีโอดีของสารอาหารก่อนป้อนเข้าสู่ระบบ เพราะมีการเวียนตะกอนจากถังตกตะกอนกลับมายังถังหมักกรดจึงเกิดการสะสมของตะกอนและมวลจุลชีพในถังหมักกรดเพิ่มขึ้น ส่วนค่าซีโอดีภายในถังตกตะกอนจะลดลงอย่างมาก เพราะเป็นส่วนของน้ำใสที่ได้จากการแยกตะกอนออกแล้ว สำหรับค่าซีโอดีภายในถังหมักก๊าซจะลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักนานขึ้น แต่ที่ระยะเวลา 4.28 วัน มีค่าสูงผิดปกติเนื่องจากมีตะกอนจุลชีพเกิดขึ้นมากจึงทำให้ค่าซีโอดีสูงขึ้นด้วย เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีจะสูงขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้นโดยค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีละลายจะสูงกว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีรวม และการกำจัดซีโอดีจะเกิดขึ้นสูงสุดในกระบวนการหมักก๊าซ โดยเฉพาะซีโอดีละลายจะถูกกำจัดภายในถังหมักก๊าซทั้งหมด

ปริมาณไนโตรเจนในระบบค่อนข้างคงที่ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และปริมาณไนโตรเจนในถัง

หมักก๊าซจะน้อยกว่าในถังหมักกรด เพราะสารอาหารในถังหมักก๊าซได้มาจากส่วนของน้ำใสในถังตกตะกอน และภายในถังหมักก๊าซจะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นก๊าซไนโตรเจนและปริมาณของอินทรีย์ไนโตรเจนจะลดลงตามระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น เพราะมีการย่อยสลายอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนเป็นก๊าซไนโตรเจน ปริมาณของอินทรีย์ไนโตรเจนจึงลดลงเรื่อย ๆ

ก๊าซที่เกิดขึ้นในถังหมักกรดนั้นมีปริมาณน้อยเพราะเป็นการย่อยสลายแบบไร้อากาศ แบบสัมผัส ของแบคทีเรียชนิดผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งที่จริงแล้วกระบวนการนี้ไม่น่าจะทำให้เกิดก๊าซขึ้นได้ แต่การทดลองนี้มีก๊าซเกิดขึ้น แสดงว่ามีแบคทีเรียชนิดผลิตก๊าซมีเทนปะปนอยู่กับแบคทีเรียชนิดสร้างกรดระเหย จากกระบวนการหมักก๊าซจะเห็นว่า อัตราการผลิตก๊าซจะเพิ่มขึ้นจนถึงอัตราสูงสุดที่ระยะเวลาการหมักระยะหนึ่งแล้วจึงค่อย ๆ ลดลงและเมื่อระยะเวลานานขึ้น อัตราการผลิตก๊าซต่อปริมาตรของถังหมักก๊าซจะลดลงอย่างสม่ำเสมอ จากการคำนวณอัตราการผลิตก๊าซมีเทนในรูปของกรัมซีโอดีที่ถูกใช้ไป ไม่สามารถนำค่าซีโอดีรวมมาคำนวณได้ เพราะมีตะกอนเซลล์เกิดขึ้น ทำให้ค่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซสูงมากซึ่งความจริงแล้วปริมาณของซีโอดีถูกใช้ไปน้อยมากจึงได้มีการคำนวณประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้ค่าซีโอดีละลาย จะได้ค่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก

สรุป

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าขยะเปียกที่บดละเอียดและเจือจางให้มีค่าซีโอดีประมาณ 5,000 มก./ล. สามารถหมักเป็นก๊าซมีเทนได้ปริมาณก๊าซอยู่ระหว่าง 0.280–0.439 ล./ก. ของของแข็งระเหยที่ใส่เข้าไป องค์ประกอบก๊าซมีเทน 58.98–66.91% การกำจัดซีโอดีของระบบมีค่า 59.63–94.38% การกำจัดของแข็งอยู่ระหว่าง 70.62–97.79% อัตราการเกิดก๊าซมีเทนสูงสุดคือ 0.300 ล.มีเทน/ก. ของของแข็งระเหยที่ระยะเวลาการหมัก 8.47 วัน

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ วีรวรรณ ปัทมาภิรัต และคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และขอขอบคุณศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน ที่ให้ทุนอุดหนุน

เอกสารอ้างอิง

1. ธรรมิกรักษ์, สวัสดิ์. การเก็บและกำจัดขยะมูลฝอยในเมืองใหญ่. รายงานโครงการวิจัยเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2520.
2. โอภาสวัตชัย, ศักดิ์ชัย. การย่อยสลายและการผลิตก๊าซชีวภาพของขยะแบบไร้ออกซิเจน โดยแบคทีเรียชนิดชอบความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2527.
3. American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. Washington, D.C., 1975.
4. National Research Council. Methane Generation from Human, Animal and Agricultural Wastes. National Academy of Science, Washington, D.C., 1977.

ตารางที่ 1. แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง

	ชุดการทดลอง	สารอาหาร	ถังหมักกรด	ถังตกตะกอน	ถังหมักก๊าซใบที่ 1	ถังหมักก๊าซใบที่ 2
พีเอช	1	5.20	5.28	5.50	6.77	6.89
	2	4.76	5.60	5.73	6.42	6.55
ความเป็นด่าง ($CaCO_3$)	1	468.13	508.38	530.25	637.00	697.38
มก./ล.	2	369.90	520.11	521.44	659.10	753.10
กรดระเหย (CH_3COOH)	1	917.75	946.00	826.63	84.50	45.38
มก./ล.	2	729.20	579.70	571.00	90.30	43.60
ซีโอดีรวม มก./ล.	1	4681.88	9732.63	2655.25	1890.13	551.38
ซีโอดีละลาย มก./ล.		1418.75	1460.88	1245.88	281.13	125.13
ซีโอดีรวม มก./ล.	2	4908.38	5915.57	2173.57	1139.71	276.00
ซีโอดีละลาย มก./ล.		1549.38	1267.43	1273.43	253.86	99.43
แอมโมเนียไนโตรเจน มก./ล.		47.34	73.20		85.98	94.67
อินทรีย์ไนโตรเจน มก./ล.	1	113.83	183.11		66.33	22.54
ไนโตรเจนรวม มก./ล.		161.17	256.31		152.31	117.21
แอมโมเนียไนโตรเจน มก./ล.		71.76	94.10		78.85	103.33
อินทรีย์ไนโตรเจน มก./ล.	2	119.04	137.52		42.20	18.07
ไนโตรเจนรวม มก./ล.		190.81	231.62		121.04	121.41
ปริมาตรก๊าซ ล./วัน					9.11	4.86
% มีเทน					๖๐.๘๙	68.91
% คาร์บอนไดออกไซด์	1				17.58	17.21
% ออกซิเจน					1.63	2.26
% ไนโตรเจน (N_2)					9.86	11.51
ปริมาตรก๊าซ ล./วัน			8.37		10.31	1.98
% มีเทน			55.00		63.33	60.77

ตารางที่ 1. (ต่อ)

	ชุดการทดลอง	สารอาหาร	ถังหมักกรด	ถังตกตะกอน	ถังหมักก๊าซใบที่ 1	ถังหมักก๊าซใบที่ 2
% คาร์บอนไดออกไซด์	2				16.06	16.30
% ออกซิเจน					1.33	2.37
% ไนโตรเจน					17.26	18.23

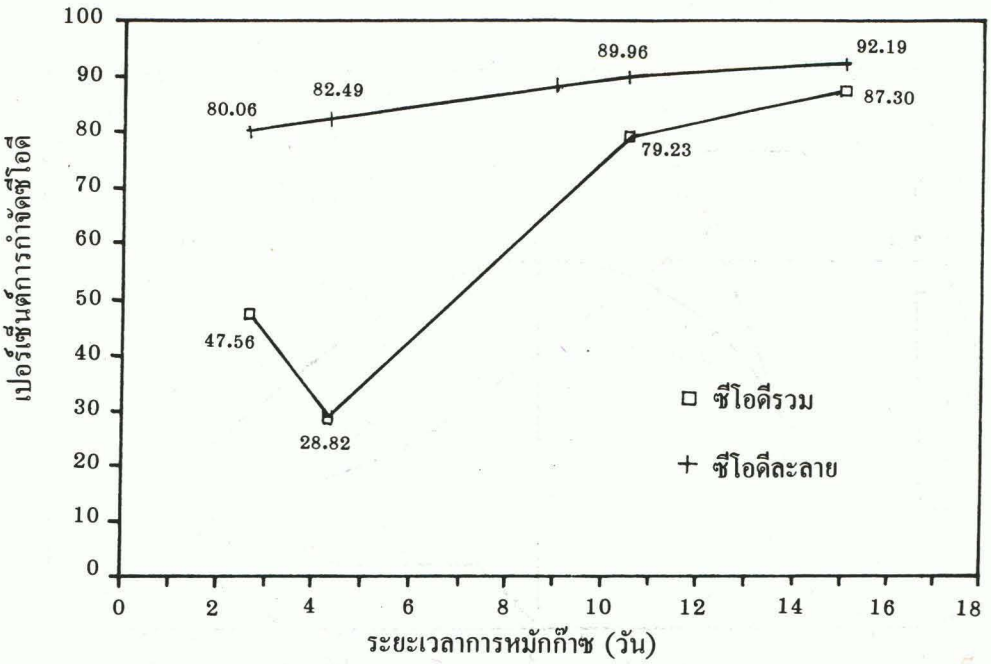
หมายเหตุ ชุดการทดลองที่ 1 ระยะเวลาหมักกรด = 0.89 วัน
ระยะเวลาหมักในถังหมักก๊าซใบที่ 1 = 4.28 วัน
ระยะเวลาหมักในถังหมักก๊าซใบที่ 2 = 10.50 วัน
ชุดการทดลองที่ 2 ระยะเวลาหมักกรด = 0.88 วัน
ระยะเวลาหมักในถังหมักก๊าซใบที่ 1 = 2.61 วัน
ระยะเวลาหมักในถังหมักก๊าซใบที่ 2 = 15.03 วัน

ตารางที่ 2. แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีของระบบที่ระยะเวลาการหมักต่าง ๆ กัน

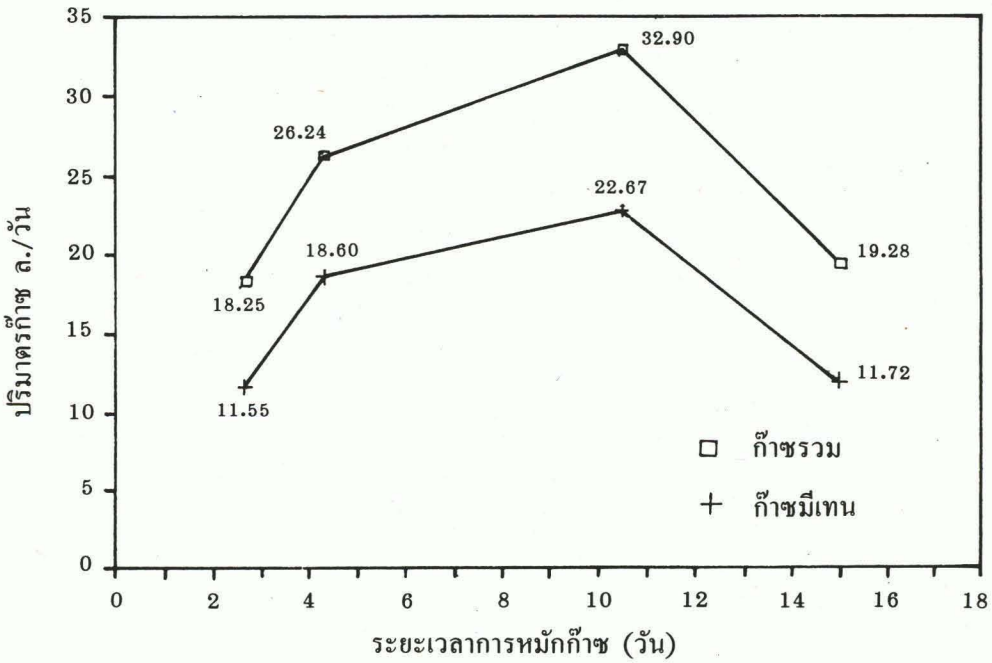
ซีโอดี	สารอาหาร (ก่อนเข้าสู่ระบบ)		ระยะเวลาการหมักกรดและก๊าซ			
			3.49	5.17	11.39	15.91
ซีโอดีรวม ชุดการทดลองที่ 1	4681.88	สารอาหาร (ออกจากระบบ)		1890.13	551.38	
ชุดการทดลองที่ 2	4908.38		1139.71			276.00
(มก./ล.)		%การตกค้าง	23.22	40.37	11.78	5.62
		%การกำจัด	76.78	59.63	88.22	94.38
ซีโอดีละลาย ชุดการทดลองที่ 1	1418.75	สารอาหาร (ออกจากระบบ)		218.13	125.13	
ชุดการทดลองที่ 2	1549.38		253.86			99.43
(มก./ล.)		%การตกค้าง	16.38	15.37	8.82	6.42
		%การกำจัด	83.62	84.63	91.18	93.58

ตารางที่ 3. แสดงผลที่ได้จากการทดลองภายในถังหมักก๊าซที่ระยะเวลาการหมักต่าง ๆ กัน

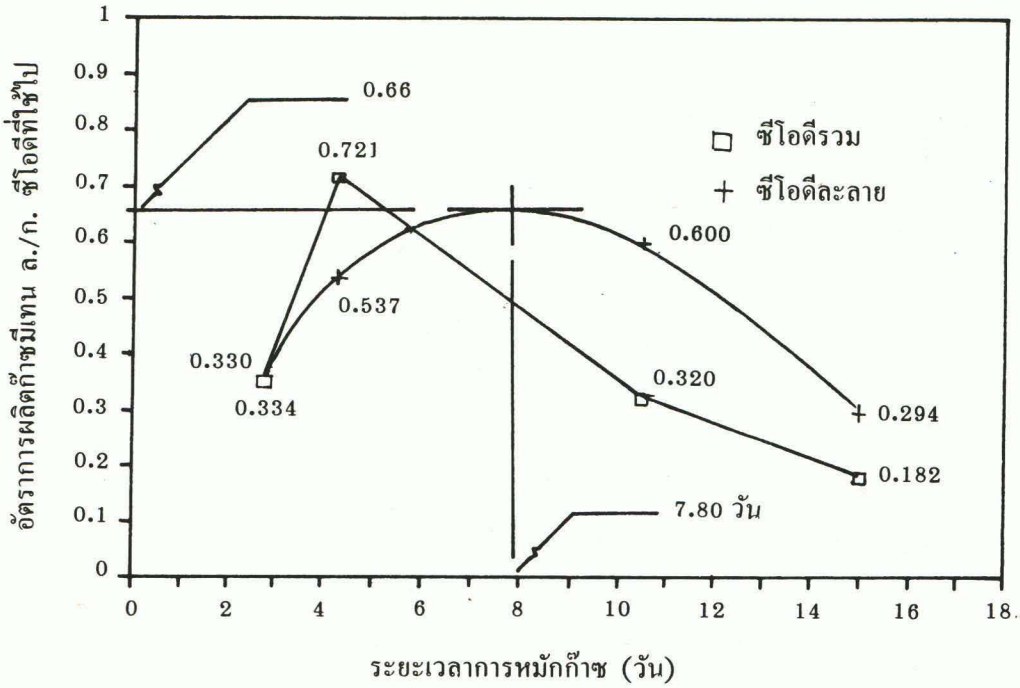
	ระยะเวลาการหมัก/(วัน)			
	2.61	4.28	10.50	15.03
ปริมาตรถังหมัก (ล.)	50.00	50.00	52.30	52.30
พีเอช	6.42	6.77	6.89	6.55
ความเป็นด่าง ($CaCO_3$) มก./ล.	659.10	637.00	697.38	753.10
กรดระเหย (CH_3COOH) มก./ล.	90.30	84.50	45.38	43.60
ซีโอดีรวม มก./ล.	1139.71	1890.13	551.38	276.00
ซีโอดีละลาย มก./ล.	253.86	218.13	125.13	99.43
แอมโมเนียไนโตรเจน มก./ล.	78.85	85.98	94.67	103.33
อินทรีย์ไนโตรเจน มก./ล.	42.20	66.33	22.54	18.07
ไนโตรเจนรวม มก./ล.	121.04	152.31	117.21	1210.41
ปริมาตรก๊าซรวม ล./วัน	10.31	9.11	4.86	1.98
% มีเทน	63.33	70.89	68.91	60.77
% คาร์บอนไดออกไซด์	16.06	17.58	17.21	16.30
% ออกซิเจน	1.33	1.63	2.26	2.37
% ไนโตรเจน	17.26	9.86	11.51	18.23
ปริมาตรก๊าซมีเทน ล./วัน	6.53	6.46	3.35	1.20
อัตราการผลิตก๊าซรวม (ปริมาตร/ปริมาตร–วัน)	0.206	0.182	0.093	0.038
อัตราการผลิตก๊าซมีเทน (ปริมาตร/ปริมาตร–วัน)	0.131	0.129	0.064	0.023
อัตราการผลิตก๊าซมีเทน –ซีโอดีรวม	0.330	0.721	0.320	0.182
(ล./ก.ซีโอดีที่ใช้ไป) –ซีโอดีละลาย	0.334	0.537	0.600	0.294



รูปที่ 1. แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีรวมและซีโอดีละลายภายในถังหมักก๊าซที่ระยะเวลาการหมักต่าง ๆ กัน



รูปที่ 2. แสดงอัตราการผลิตก๊าซรวมที่ระยะเวลาการหมักก๊าซต่าง ๆ กัน



รูปที่ 3. แสดงอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อกรัมของซีโอดีที่ใช้ไปในระยะเวลาการหมักก๊าซต่าง ๆ กัน