



การพัฒนาการย่อยสลายของเศษก้านและใบลำไยในสภาวะไร้ออกซิเจน เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและผลพลอยได้ Anaerobic Digestion Development of Leaves and Petioles of Longan Waste Residue to Generate Biogas and By Products

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง^{1*}, นภารัตน์ สุทธินันท์, ปิยะนันท์ ธนันไชย¹ และ อุกฤษฏ์ เมืองขวัญใจ¹
 Klinpratoom Panyaping^{1*}, Naparat Sutinan², Piyanan Tananchai³ and Ukrit Muangkhanjai⁴

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาชีพ เชียงใหม่

* Correspondent author: klinpratoomp@yahoo.com, klin41@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาการย่อยสลายเศษก้านและใบลำไยทั้งใบเขียว (สด) และน้ำตาล (แห้ง) ด้วยอัตราส่วนที่ต่างกัน 3 อัตราส่วน ในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งให้ผลพลอยได้ คือ ก๊าซชีวภาพและอื่น ๆ โดยใช้ถังหมักแบบไม่มีการกวน ขนาด 200 ลิตรที่ออกแบบขึ้นในโรงงาน และใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากมูลสุกรเป็นเชื้อตั้งต้น หมักร่วมกับน้ำกากส่า จำนวน 3 ชุดทดลอง ในระหว่างเดือนตุลาคม 2552- มิถุนายน 2553 ผลการทดลองพบว่า ชุดที่ 2 (อัตราส่วนสด: แห้ง 3:1) ให้ก๊าซชีวภาพมากที่สุด ในระยะเวลา 14 วัน (544 ลิตร) เฉลี่ยประมาณ 40 ลิตร/วัน โดยมีก๊าซมีเทนมากที่สุด 34% ชุดที่ 1 (อัตราส่วนสด: แห้ง 4:0) ให้ก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกับชุดที่ 2 (498.5 ลิตร) และชุดที่ 3 (อัตราส่วนสด: แห้ง 2:2) ให้ก๊าซชีวภาพน้อยที่สุด (247.5 ลิตร) และได้ปุ๋ยน้ำชีวภาพที่ดีมีธาตุอาหารสำคัญ คือ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของทุกชุดการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกัน (> 92%) เมื่อปรับปรุงถังหมักให้สมบูรณ์ขึ้น ชุดที่ 2 ซึ่งมีอัตราการกำจัดซีโอดีสูงสุด ถูกนำมาใช้ทำการเดินระบบ พบว่าให้ปริมาณก๊าซชีวภาพในฤดูฝนน้อยกว่าเดิมในฤดูหนาว

Abstract

The purpose of this study was to develop anaerobic digestion in three different ratios of green (fresh) and brown (dry) leaves and petioles of longan waste residue in order to obtain by products; biogas and other. The low rate digester 200 liters (l) was designed to use for this study. The pig sludge was used as starter for the digestion process of longan waste residue by mixing with the spent wash liquor. Three sets of experiment were carried out during October 2009-June 2010. It was found that the 2nd set (ratio fresh: dry 3:1) produced the maximum quantity of biogas in 14 days (544 l). The quantity of biogas generated was about 40 liters/day consisting of CH₄ 34%. The quantity of biogas from the 1st set (ratio fresh: dry 4:0) (498.5 l) was similar to that in the 2nd set. The 3rd set (ratio fresh: dry 2:2) produced the minimum quantity of biogas (247.5 l). The good quality of liquid compost

that contained essential nutrients; N, P, and K was also obtained. %COD removal from all sets of experiment was in the same range (> 92%). The 2nd set that presented the highest %COD removal was used to operate in the improved digester. It could produce biogas in rainy season, but less than the previous experiments in winter season.

คำสำคัญ: การย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน เศษก้านและใบลำไย ผลพลอยได้

Keywords: anaerobic digestion, leaves and petioles of longan waste residue, by products

1. บทนำ

ปัจจุบันพืชไม้ผล เช่น ลำไย มีการปลูกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในประเทศไทย (1) โดยเฉพาะในเขตภาคเหนือ คือ จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน การขยายตัวดังกล่าวมีส่วนทำให้เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากเจ้าของสวนลำไยส่วนหนึ่ง ขาดการบริหารจัดการที่ดี ทำให้มีเศษก้านและใบลำไยที่เหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยวและร่วงหล่นถูกเผาในที่โล่ง ก่อให้เกิดปัญหาหมอกควันและมลพิษอากาศซึ่งมีผลต่อ คุณภาพชีวิตและสิ่งแวดล้อม จึงมีแนวคิดในการจัดการใช้ประโยชน์จากสิ่งเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร ดังกล่าว รวมทั้งทางอุตสาหกรรมเกษตรในพื้นที่ เช่น น้ำกากสำ เป็นต้น ซึ่งจากผลการศึกษาศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนของเศษก้านและใบลำไยในสภาวะไร้ออกซิเจนที่ผ่านมา (2) พบว่า ให้ก๊าซมีเทนได้สูงถึงร้อยละ 50 สิ่งเศษเหลือดังกล่าว มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเปลี่ยนรูปให้เป็น พลังงาน โดยการหมักย่อยในสภาวะไร้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงเพื่อทำให้เกิดการออกซิไดซ์ในถังปฏิกรณ์แบบปิดซึ่งเหมาะกับของเสียที่อยู่ในรูปน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีหรือซีโอดีสูง ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนก๊าซหุงต้ม รวมทั้งได้ปุ๋ยน้ำที่ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน มีความเหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่เขตร้อน เช่น ประเทศไทย

ในการศึกษาครั้งนี้ มุ่งเน้นการพัฒนาการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนของสิ่งเศษเหลือพวกเศษก้านและใบลำไย และน้ำกากสำ ซึ่งใช้เป็นวัสดุหมักร่วม ด้วยถังหมักแบบไม่มีการกวน (Low rate) ขนาด 200 ลิตรที่ได้ ออกแบบขึ้นใช้เพื่อให้ได้ก๊าซและปุ๋ยน้ำชีวภาพที่ทราบทั้ง

ปริมาณและชนิดของก๊าซ และคุณภาพของน้ำปุ๋ย รวมทั้งประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของถังหมัก ตลอดจนทำการปรับปรุงถังหมักให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ก่อนนำไปขยายผลเพื่อการศึกษาและประยุกต์ใช้งานต่อไป

2. วิธีการวิจัย

ประกอบด้วย รายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการเก็บตัวอย่าง

- แบบจำลองถังหมักพลาสติก แบบไม่มี การกวน (Low rate) ที่ออกแบบขึ้นใช้ขนาด 200 ลิตร
- เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น ซึ่งเก็บแบบจิ้งจกจากถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียแบบ H-UASB จาก ฟาร์มสุกร ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัย เชียงใหม่
- เครื่องย่อยเศษกิ่งไม้และใบไม้แบบหมุน สับ ผลิตภัณฑ์ของมทร. ล้านนา เชียงใหม่
- น้ำกากสำ ซึ่งใช้เป็นวัสดุหมักร่วม ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างแบบจิ้งจกจากโรงงานสุรา
- เศษก้านและใบลำไยสดและแห้ง ซึ่งเก็บจากสวนลำไย

2.2 ตัวอย่าง พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ ตัวอย่าง

รายละเอียดตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ มีดังนี้คือเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น น้ำกากสำ น้ำเสียจากเศษก้านและใบลำไยก่อนหมัก น้ำเสียรวมก่อนและหลังสิ้นสุด การเดินระบบหมัก น้ำปุ๋ยที่ได้จากการย่อยสลาย และก๊าซชีวภาพ ดังตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1. ตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด

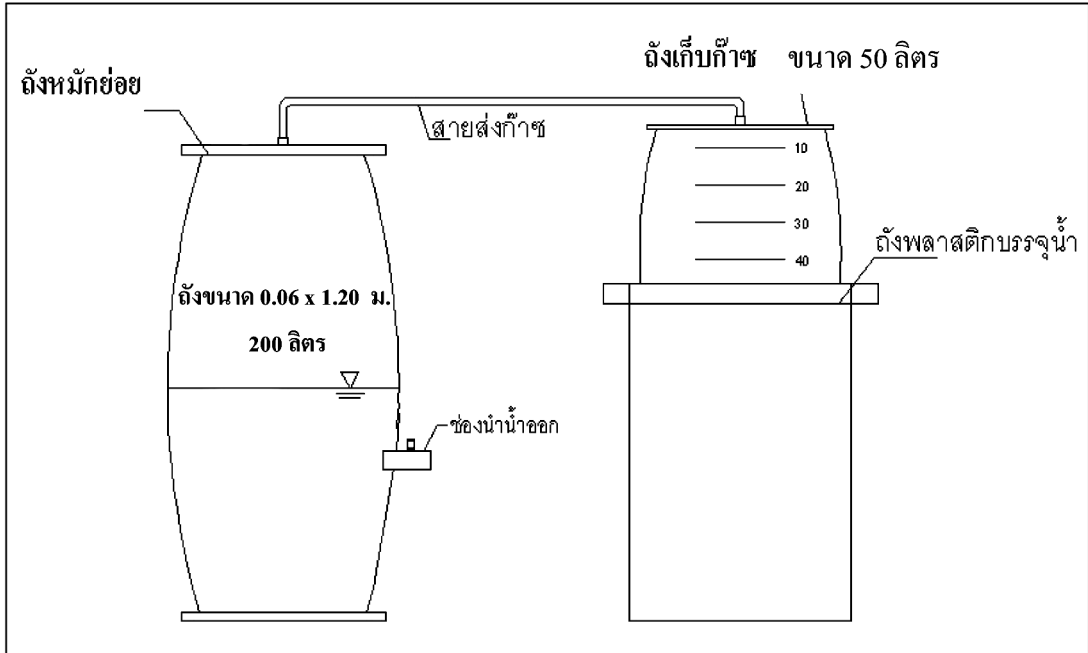
รายการ	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์	ช่วงเวลาเก็บตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
ตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น	pH VS MLVSS COD	หลังทำการเก็บ	1
ตัวอย่างน้ำกากส่า	pH COD	หลังทำการเก็บ	1
ตัวอย่างน้ำเสียจากเศษก้านและใบลำไยก่อนหมัก	pH COD VS	ก่อนทำการหมัก	1
ตัวอย่างน้ำเสีรวมก่อนและหลังเดินระบบหมัก	pH COD	ก่อน-หลังหมัก	6
ตัวอย่างปุ๋ยน้ำที่ได้จากการย่อยสลาย	pH N: P: K	หลังทำการหมัก	3
ตัวอย่างก๊าซชีวภาพ	CH ₄ CO ₂ O ₂ H ₂ S และอื่นๆ	หลังทำการหมัก	6

ตารางที่ 2. วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างของแต่ละชุดทดลอง

พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)	Close Reflux, Titrimetric Method
ของแข็งระเหยของตะกอนจุลินทรีย์ (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids, MLVSS)	Total Suspended Solid Dried at 103-105°C (Gravimetric method)
ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	Gravimetric method, Dried at 103-105°C
ไนโตรเจน (N) : ฟอสฟอรัส (P) : โพแทสเซียม (K)	Kjeldahl, Vanadomolybdic acid และ Atomic Absorption Spectrometry Method ตามลำดับ
ค่าพีเอช หรือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	Electrometric โดย pH meter; Sartorius: Model PB-20
ก๊าซมีเทน (CH ₄) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂) ออกซิเจน (O ₂) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	วัดที่ Standard Temperature & Pressure (STP) โดย Biogas analyzer; Geotech: Model Biogas check

2.3 วิธีการเตรียมระบบและทดลอง ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การออกแบบและสร้างถังหมักขนาด 200 ลิตร ซึ่งใช้หมักสิ่งเศษเหลือ (3) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. ชุดถังหมักย่อยเสก้านและโบล่าโยที่ใช้กับชุดทดลองที่ 1-3

ส่วนที่ 2 การเตรียมระบบและทำการเดินระบบ ใช้การเติมสารอินทรีย์แบบเป็นครั้ง (Batch Process) โดยนำน้ำกากส่า มาหาค่าพีเอช ซีโอดี และนำเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น มาหาค่าพีเอช ซีโอดี และของแข็งจำพวก VS (Volatile Solids) และ MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids) ตามวิธีมาตรฐาน APHA AWWA และ WEF (4) จากนั้นคำนวณหาค่าปริมาณน้ำกากส่าด้วยสูตร F/Mratio เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำกากส่าที่ใช้ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น และทำการเตรียมเสก้านและโบล่าโยสดและแห้ง ซึ่งบดให้ละเอียด มีขนาดประมาณ 0.5-1 ซม² มาใส่ในถังหมักที่ได้เติมน้ำกากส่าและเชื้อจุลินทรีย์ไว้ จำนวน 3 ชุดทดลอง ด้วยอัตราส่วนของเสก้านและโบล่าโยสด: แห้ง เท่ากับ 4:0, 3:1 และ 2:2 ตามลำดับ ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นและน้ำกากส่า ดังตารางที่ 4 และตรวจวัดค่าพีเอช เพื่อให้ได้ค่าเป็นกลาง ก่อนทำการเดินระบบทำการทดลองชุดละ 2 ชั่วโมง โดยเติมน้ำกากส่าครั้งละ 2 ลิตร ทุก 2 วัน พร้อมทั้งสังเกตและบันทึกผลการย่อยสลายโดยวัดพีเอชของน้ำเสียที่เปิดออกจากก๊อกน้ำ ซึ่งคิดตั้งไว้ส่วนล่างของถังหมักและวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการแทนที่ในน้ำทุกวัน ช่วงเวลาตอนเย็น และเก็บก๊าซ เมื่อสิ้นสุด

การเดินระบบ (ในการศึกษานี้คือ ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น มีภาวะเพิ่มขึ้นและมีช่วงลดลง และเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงไม่เกินค่าสูงสุดของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ ส่วนปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นหลังจากตั้งระบบทิ้งไว้อีก 3-5 วัน มีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์นั้น ไม่น่ามานับรวมในระบบ เพราะอาจเกิดจากสิ่งปนเปื้อนในเชื้อตั้งต้นและน้ำกากส่า) ทำการเปิดฝาดัง และนำปุ๋ยน้ำที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์หาค่าธาตุอาหารที่สำคัญ คือ ไนโตรเจน (N): ฟอสฟอรัส (P): โพแทสเซียม (K) ส่วนปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในถังเก็บก๊าซ นำไปบรรจุในถุงเก็บก๊าซขนาด 1 ลิตร เพื่อทำการตรวจวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการหมักที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐานด้วยเครื่องวัดก๊าซ ซึ่งสามารถวัดก๊าซมีเทนได้สูงสุด 50% ที่ระดับความคลาดเคลื่อนในการวัด 1% จำนวน 2 ชั่วโมง ผลการทดลองข้างต้นและทำการปรับปรุงถังหมักให้มีการป้อนน้ำกากส่าโดยไม่รบกวนการทำงานของระบบ โดยเลือกชุดทดลองที่ดีที่สุดมาทำการทดลองเดินระบบใหม่เพื่อหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จำนวน 2 ครั้งๆ ละ 2 ชั่วโมง โดยทำการเดินระบบแบบเป็นครั้ง

2.4 วิธีการคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูล

2.4.1 ทำการวิเคราะห์และคำนวณเพื่อการออกแบบและเดินระบบหมักจากสูตรต่อไปนี้ (5-6)

สูตรการคำนวณ หาค่า F/M ซึ่งใช้เป็นตัวควบคุมการเดินระบบ ดังสมการที่ 1

$$F/M \text{ ratio} = \frac{Q_w \times COD_w}{Q_s \times MLVSS_s} \dots\dots(1)$$

เมื่อ Q_w = ปริมาณน้ำเสียเข้าระบบ (น้ำกากส่า) ลิตร (l)

Q_s = ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ ลิตร (l)

COD_w = ค่าซีโอดีของน้ำกากส่า กรัมต่อลิตร (g/l)

$MLVSS_s$ = ของแข็งระเหยของตะกอนจุลินทรีย์กรัมต่อลิตร (g/l)

F/M ratio = สัดส่วนระหว่างอาหารต่อจำนวนจุลินทรีย์ เท่ากับ 0.4 (7)

2.4.2 ทำการคำนวณหาค่าปริมาณซีโอดี (COD) ที่ถูกกำจัดและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%CODremoval) เมื่อสิ้นสุดการเดินระบบ ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned} & \text{ปริมาณซีโอดี (COD) ที่ถูกกำจัด} \\ & = COD_{t,0} - COD_{t,t} \\ & \text{ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%CODremoval)} \\ & = \frac{COD_{t,0} - COD_{t,t}}{COD_{t,0}} \times 100 \dots\dots(2) \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ $COD_{t,0}$ = ค่าซีโอดีเริ่มต้นของระบบกรัมต่อลิตร (g/l)

ตารางที่ 3. ลักษณะสมบัติทางเคมีของวัสดุหมัก

ตัวอย่าง	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์			
	COD _t (กรัม/ลิตร)	VS (กรัม/ลิตร)	MLVSS (กรัม/ลิตร)	pH
ตะกอนจุลินทรีย์	42.60	28.00	41.78	7.15
น้ำกากส่า	304.00	-	-	4.02
เศษก้านและใบลำไย*	95.90	45.43	-	5.01

หมายเหตุ *ค่าซีโอดีหาโดยใช้อัตราส่วนผสมของเศษก้านและใบลำไยสดบดละเอียด : น้ำ 1,000 กรัม : 8,000 กรัม

$COD_{t,t}$ = ค่าซีโอดีเมื่อสิ้นสุดการทดลองกรัมต่อลิตร (g/l)

2.4.3 นำข้อมูลผลการทดลองทั้งหมดที่รวบรวมได้ มาหาค่าเฉลี่ย ค่าร้อยละ และแสดงค่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในรูปของกราฟและตาราง

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ผลการหมักย่อยสลายเศษก้านและใบลำไยในสภาวะไร้ออกซิเจน ทำให้เกิดผลพลอยได้ในรูปพลังงานคือ ก๊าซชีวภาพและธาตุอาหารบำรุงดิน คือ น้ำปุ๋ยชีวภาพและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของถังหมัก รวมทั้งพัฒนาปรับปรุงถังหมักให้มีการหมักที่สมบูรณ์ขึ้น ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ลักษณะสมบัติทางเคมีขององค์ประกอบที่ใช้ในการย่อยสลายเศษก้านและใบลำไย

3.1.1 ลักษณะทางเคมีของวัสดุหมัก

ลักษณะทางเคมีของวัสดุหมักที่ทำ การวิเคราะห์มีดังนี้ ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี หรือค่าซีโอดีรวม ค่าของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS) ค่าของแข็งระเหยของตะกอนจุลินทรีย์ (MLVSS, Mixed Liquor Volatile Suspended Solids) และค่าพีเอช ดังตารางที่ 3.

3.1.2 ผลการคำนวณหาส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองย่อยสลายเศษก้านและใบลำไย ที่เหมาะกับการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน เมื่อแทนค่าในสูตรทำให้ได้ปริมาณน้ำกากส่าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จำนวน 2 ลิตรต่อครั้งทุก 2 วัน โดยมีส่วนผสมของวัสดุหมักต่างๆ ดังตารางที่ 4.

ตารางที่ 4. ปริมาณส่วนผสมของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบ

ชุดที่	ตะกอนจุลินทรีย์ (ลิตร)	น้ำกากส่า (ลิตร)	เศษก้านและใบลำไยสดบด (กรัม)	เศษก้านและใบลำไยแห้งบด (กรัม)
1	40	2	5,000	0
2	40	2	3,750	1,250
3	40	2	2,500	2,500

หมายเหตุ กำหนดให้ MLVSS เป็นตัวแปรต้น เพื่อหาปริมาณน้ำกากส่าที่ใช้ทดลอง ค่าที่ใช้คือ 40 ลิตร เนื่องจากข้อจำกัดของชุดทดลอง ซึ่งบรรจุได้ทั้งหมด 200 ลิตร น้ำกากส่าเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบ มีปริมาณที่ใช้ทั้งหมด 10 ลิตร

3.1.3 ผลการหมักย่อยสลายเศษก้านและใบลำไยของแต่ละชุดทดลอง ลำไย เมื่อได้ทำการเตรียมชุดทดลองแล้ว หรือก่อนเดินระบบ และเมื่อสิ้นสุดการเดินระบบ ดังตารางที่ 5.

ลักษณะสมบัติทางเคมีของวัสดุหมักที่ตรวจวัดได้ จากการเดินระบบย่อยสลายเศษก้านและใบ

ตารางที่ 5. ค่าเฉลี่ยพีเอช (pH) และซีไอดี (COD) ที่แสดงผลการทำงานจากระบบหมัก

ชุดทดลอง	pH เข้าระบบ	pH ออกระบบ	COD เข้าระบบ (กรัม/ลิตร)	COD ออกระบบ (กรัม/ลิตร)	COD ที่ถูกกำจัด คือ (CODเข้า - CODออก) (กรัม/ลิตร)
ชุดที่ 1	6.22	6.42	127.50	9.22	118.28
ชุดที่ 2	6.23	6.30	125.26	8.98	116.29
ชุดที่ 3	6.27	6.56	125.53	9.05	116.47

หมายเหตุ ชุดที่ 1 อัตราส่วนสด:แห้ง 4:0 ชุดที่ 2 อัตราส่วนสด:แห้ง 3:1 และชุดที่ 3 อัตราส่วนสด:แห้ง 2:2

พบว่าค่าพีเอชของตัวอย่างก่อนเข้าระบบแต่ละชุดทดลอง มีค่าเป็นกรดอ่อน-ค่อนข้างเป็นกลาง ค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน อยู่ในช่วง 6.5-7.5 ซึ่งค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 7.0 ส่วนค่าพีเอชซึ่งจุลินทรีย์ที่สร้างกรดสามารถอาศัยอยู่ได้ในช่วง 5.0-8.0(8) จึงไม่ต้องทำการปรับค่าพีเอชก่อนเดินระบบ ส่วนค่าซีไอดีก่อนเข้าระบบหมักของแต่ละชุดทดลอง มีค่าสูงมาก แต่เมื่อสิ้นสุดการหมักแล้ว พบว่า ชุดที่ 2 (อัตราส่วนสด:แห้ง 3:1) ซึ่งให้ปริมาณก๊าซมากที่สุด (ตาราง

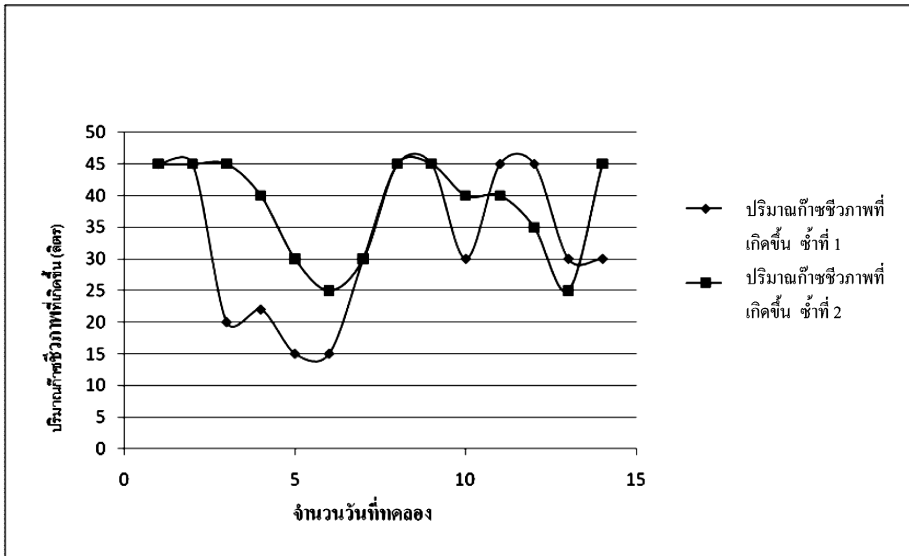
ที่ 6) สามารถกำจัดค่าซีไอดีได้สูงสุด 116.29 กรัมต่อลิตร และในถังหมักมีลักษณะเป็นสารละลายสีน้ำตาลเข้ม

3.1.4 ผลของปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายเศษก้านและใบลำไย

การย่อยสลายเศษก้านและใบลำไย ทำการทดลองระหว่างเดือนธันวาคม 2552- มกราคม 2553 จำนวน 3 ชุด ใช้เวลานานชุดละ 14 วัน ในการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นระบบถูกทิ้งไว้เพื่อให้

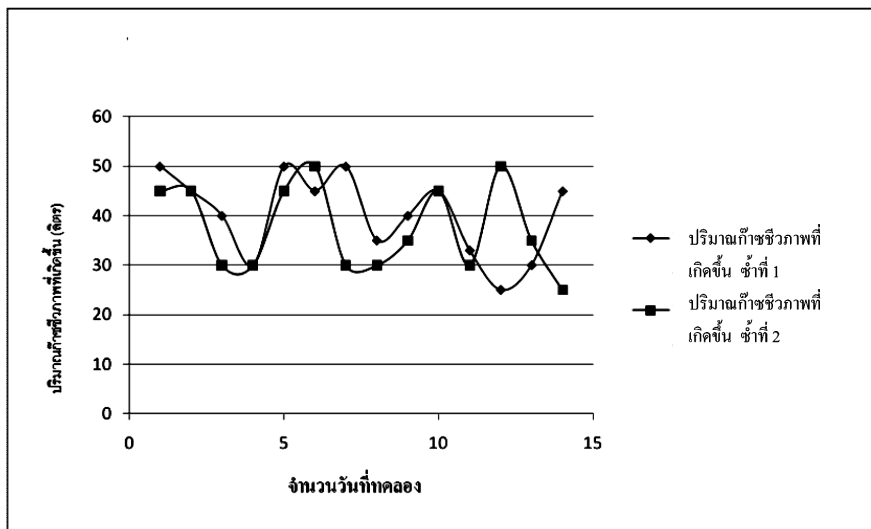
แน่ใจว่าสารอินทรีย์ที่ถูกเติมแบบเป็นครั้งถูกย่อยหมดจนไม่มีก๊าซเกิดขึ้น ซึ่งใช้เวลาอีก 3-5 วัน ซึ่งก๊าซส่วนที่ไม่นับรวมนี้ (<10%) เป็นก๊าซที่อาจมาจากสิ่งปนเปื้อนในเชื้อจุลินทรีย์และน้ำกากส่า พบว่าชุดที่ 2 (อัตราส่วนสค: แห่ง 3:1) มีก๊าซชีวภาพมากที่สุด 544 ลิตร เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 38-40 ลิตร/วัน รองลงมาคือ ชุดที่ 1 (อัตราส่วนสค: แห่ง 4:0) 498.5 ลิตร เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 33-38 ลิตร/วัน และชุดที่ 3 (อัตราส่วนสค: แห่ง 2:2) 247.5 ลิตร เฉลี่ย 18 ลิตร/

วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการทำงานของจุลินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาย่อยสลายแบบ Hydrolysis, Acetogenesis และ Methanogenesis ทำให้เกิดก๊าซขึ้น สอดคล้องกับทฤษฎีการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (9) นอกจากนี้ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นต่างกันยังมีส่วนมาจากการป้อนวัสดุหมักรวมเข้าสู่ระบบ ระหว่างเดินระบบ ดังรูปที่ 2.-4.



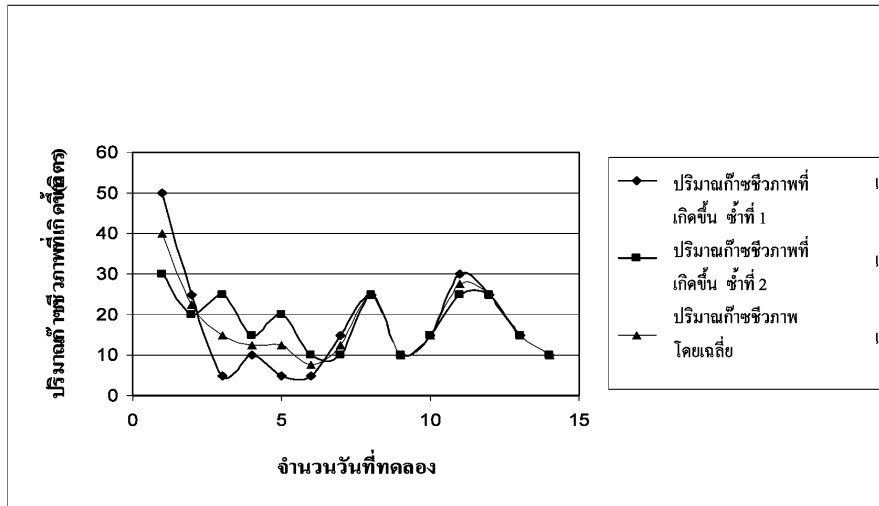
หมายเหตุ ชุดที่ 1 หลังสิ้นสุดการทดลอง ระบบถูกทิ้งไว้อีก 3-5 วัน ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพ จึงลดลงเข้าใกล้ศูนย์

รูปที่ 2. ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดที่ 1 (อัตราส่วนสค: แห่ง 4:0)



หมายเหตุ ชุดที่ 2 หลังสิ้นสุดการทดลอง ระบบถูกทิ้งไว้อีก 3-5 วัน ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพ จึงลดลงเข้าใกล้ศูนย์

รูปที่ 3. ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดที่ 2 (อัตราส่วนสค: แห่ง 3:1)



หมายเหตุ ชุดที่ 3 หลังสิ้นสุดการทดลอง ระบบถูกทิ้งไว้อีก 2-3 วัน ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพ จึงลดลงเป็นศูนย์

รูปที่ 4. ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดที่ 3 (อัตราส่วนสัด: แห่ง 2:2)

จากรูปที่ 2. พบว่าในช่วงวันที่ 8-9 และ 11-12 เป็นช่วงที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ ให้เปลี่ยนเป็นกรด และก๊าซมีเทนตามลำดับ (9) เนื่องจากยังมีจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนอยู่ในระบบจำนวนมาก แต่ปริมาณก๊าซที่ได้มีการผันแปรอย่างมาก มีส่วนสำคัญจากการเปิดฝาถังเพื่อป้อนน้ำกากส่า ซึ่งมีส่วนให้ออกซิเจนจากภายนอกเข้าสู่ระบบและปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในถังออกนอกระบบ อย่างไรก็ตาม น้ำกากส่าที่ป้อนเข้าระบบ ช่วยปรับสภาพการทำงานจากระบบให้ดีขึ้น โดยมีค่าพีเอชสูงขึ้นจนเป็นกลาง ทำให้เกิดการย่อยสลายเพิ่มขึ้น หากปรับปรุงวิธีการป้อนน้ำกากส่า และวัดสภาพการทำงานจากระบบโดยการวัดค่าพีเอชทุกวัน จะช่วยปรับให้ระบบมีการทำงานดีขึ้น ซึ่งจะลดการผันแปรของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น ส่วนรูปที่ 3. พบว่าในช่วงวันที่ 5-7 และ 11-12 จุลินทรีย์ทำงานและมีก๊าซเกิดขึ้นอย่างผันแปรเช่นเดียวกับชุดที่ 1 และจากรูปที่ 4. แสดงให้เห็นว่าในช่วงวันที่ 11-12 มีก๊าซเกิดขึ้น ด้วยเหตุผลเดียวกับ ชุด

ที่ 1-2 แต่มีปริมาณค่อนข้างน้อย เพราะมีกรดเกิดขึ้นและจุลินทรีย์ที่สร้างกรด มีมากกว่าจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน ซึ่งจุลินทรีย์ดังกล่าว เจริญเติบโตได้ดีและทนทานกว่าจุลินทรีย์สร้างมีเทน ซึ่งมักใช้กรด อะซิติกเป็นสารตั้งต้น ส่วนกรดไขมันระเหยง่าย ที่ได้จากการย่อยสารอินทรีย์ มีหลายชนิด และบางชนิดจุลินทรีย์สร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ จึงทำให้เกิดก๊าซได้น้อย (9) และในช่วงวันที่ 1-2 มีก๊าซเกิดขึ้นมาก อาจมาจากตะกอนจุลินทรีย์ในถังหมักถูกกวนอย่างต่อเนื่อง เมื่อเติมวัสดุหมักร่วมลงในระบบ จึงช่วยปรับสภาพการทำงานจากระบบให้ดีขึ้น มีส่วนให้ก๊าซชีวภาพเกิดได้เร็ว

3.1.5 ผลการวิเคราะห์ชนิดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลอง

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น พบว่ามีองค์ประกอบต่างๆ กัน คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และก๊าซอื่นๆ ซึ่งมีปริมาณของก๊าซแต่ละชนิดดังตารางที่ 6.

ตารางที่ 6. ค่าเฉลี่ยของชนิดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่วิเคราะห์ได้จากการตรวจวัด

ก๊าซชีวภาพ	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ก๊าซชีวภาพจากศูนย์ส่งเสริมชีวมวล*
CH ₄ (%)	33.20	34.10	32.15	50-70
CO ₂ (%)	43.40	43.20	45.10	30-50
O ₂ (%)	2.35	2.45	2.45	-
อื่นๆ** (%)	20.05	20.30	20.30	-
รวม (%)	100	100	100	100
H ₂ S ฟิธีเอ็ม (ppm)	2689	2691	2691	ไม่เกิน 10,000

หมายเหตุ * เป็นก๊าซชีวภาพที่ถูกนำมาเป็นเกณฑ์เปรียบเทียบ (10)

** อื่น ๆ ได้แก่ ก๊าซแอมโมเนีย และไอน้ำ

พบว่าชุดที่ 1 (อัตราส่วนสัด: แห่ง 4:0) มีก๊าซมีเทนมากที่สุด 34.2% เนื่องจากชุดที่ 1 ใช้วัสดุหมักเป็น เศษก้านและใบลำไยสดทั้งหมด ซึ่งมีธาตุอาหารเป็นคาร์บอนสูง เมื่อผ่านการย่อยสลายจึงให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงกว่าชุดที่ 2 (อัตราส่วนสัด: แห่ง 3:1) และชุดที่ 3 (อัตราส่วนสัด: แห่ง 2:2) ซึ่งใช้วัสดุหมักทั้งสดและแห้งผสมกัน โดยปกติเศษแห้งมีธาตุคาร์บอนน้อยกว่าเศษสด และเมื่อเทียบค่าที่ตรวจได้กับค่าของก๊าซชีวภาพจากศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล (10) พบว่าทุกชุด มีก๊าซมีเทนน้อยกว่า ค่าที่ใช้เทียบ ซึ่งอาจเนื่องจากการตรวจวัด ทำเมื่อใกล้สิ้นสุดการทดลอง และระบบอาจอยู่ในช่วงการปรับสภาพจากการสร้างกรดมาสร้างก๊าซมีเทนก่อนเข้าสู่ช่วงท้ายของการเดินระบบ ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าค่อนข้างมากแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ ซึ่งก๊าซดังกล่าว รวมทั้งไอน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา แสดงว่ามีการออกซิไดซ์ที่สมบูรณ์ของสิ่งเศษเหลือในถังหมัก ไอน้ำและก๊าซแอมโมเนียที่เกิดจากการย่อยสลายของเชื้อและน้ำกากส่าที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ จัดอยู่ในรูปอื่นๆที่มีค่าสูง

ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก็มาจากซัลเฟตในถังหมัก ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในน้ำกากส่าที่ถูกย่อยสลายด้วย

3.1.6 ผลของคุณภาพปุ๋ยน้ำชีวภาพที่ได้จากการทดลอง

ปกติปุ๋ยน้ำชีวภาพ คือ ผลผลิตที่ได้จากการหมักกากวัสดุเหลือทิ้งกับเชื้อจุลินทรีย์ และเติมกากน้ำตาล ซึ่งมีสารอาหารมาก และเป็นสิ่งที่ขายได้ ปริมาณธาตุอาหารที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิด และอัตราส่วนของเศษวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการหมัก (11) ในการศึกษานี้ ใช้ น้ำกากส่าซึ่งมีสารอาหารน้อยกว่าและเป็นสิ่งเหลือทิ้งที่มีความเป็นกรดสูงแทน แต่ช่วยในการย่อยสลายสิ่งเศษเหลือในถังหมักได้ดี ทำให้ได้ปุ๋ยน้ำชีวภาพ ภายหลังเสร็จสิ้นการหมักโดยมีสัดส่วนของไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส : โพแทสเซียม ในปริมาณที่ต่างกัน เมื่อเทียบกับลักษณะสมบัติที่ดีของน้ำสกัดชีวภาพจากพืช ซึ่งได้จากการหมักเศษพืชผักสด (12) เนื่องจากในประเทศไทย ยังไม่มีค่ามาตรฐานปุ๋ยน้ำชีวภาพ ดังตารางที่ 7-8.

ตารางที่ 7. ปริมาณและธาตุอาหารที่ได้จากปุ๋ยน้ำชีวภาพของแต่ละชุดทดลอง

ชุดทดลอง	อัตราส่วนเศษก้านและใบ ลำไย สด:แห้ง	ไนโตรเจนทั้งหมด (N) (%)	ฟอสฟอรัส ทั้งหมด (P) (%)	โพแทสเซียม ทั้งหมด (K) (%)
ชุดที่ 1	4:0	0.19	0.17	0.24
ชุดที่ 2	3:1	0.19	0.07	0.23
ชุดที่ 3	2:2	0.17	0.16	0.22

ตารางที่ 8. คุณสมบัติทั่วไปของน้ำสกัดชีวภาพเปรียบเทียบกับปุ๋ยน้ำที่ได้จากการเดินระบบ

คุณสมบัติ	น้ำสกัดชีวภาพ จากเศษพืช ผักสด*	ปุ๋ยน้ำชีวภาพที่ได้จากการทดลอง		
		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
พีเอช (pH)	6-7	6.41	6.30	6.56
C/N ratio	½ - 70/1	-	-	-
ไนโตรเจน %	0.03-1.66	0.19	0.19	0.17
ฟอสฟอรัส %	ไม่พบเลย - 0.4	0.17	0.07	0.16
% Water soluble K ₂ O	0.05	0.24	0.23	0.22

ที่มา * (12)

พบว่าทุกชุดทดลอง มีค่าพีเอช 6-7 ซึ่งอยู่ในช่วงใกล้ความเป็นกลางและมีค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสใกล้เคียงกับสมบัติน้ำหมักชีวภาพที่ดี และมีค่าโพแทสเซียมที่ละลายในน้ำสูงกว่าน้ำหมักชีวภาพที่ดี ซึ่งมีส่วนมาจากน้ำกากสำ มีโพแทสเซียมมาก ทำให้น้ำปุ๋ยที่ได้ เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

3.1.7 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสาร

อินทรีย์ในรูปซีโอดีของแต่ละชุดทดลอง

ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีจากการย่อยเศษก้านและใบลำไย สามารถนำมาพิจารณาเลือกชุดทดลองที่เหมาะสมในการเดินระบบหมัก ดังตารางที่ 9.

ตารางที่ 9. ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของแต่ละชุดทดลอง

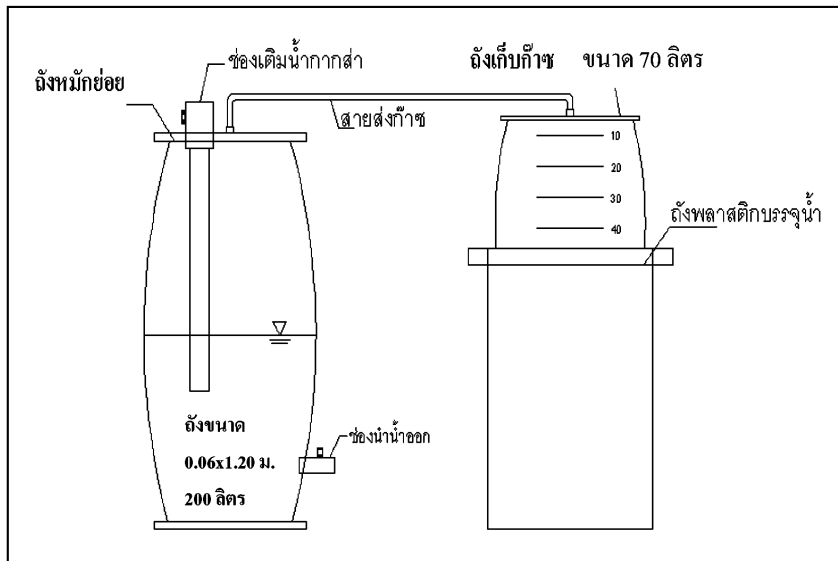
ชุดทดลองที่	ค่าซีโอดี		ประสิทธิภาพการ กำจัดซีโอดี (%COD removal)	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ทั้งหมด (ลิตร/14 วัน)
	ก่อนเดินระบบ (กรัม/ลิตร)	หลังเดินระบบ (กรัม/ลิตร)		
1	127.50	9.22	92.76	544
2	125.26	8.98	92.83	498.5
3	125.53	9.05	92.78	247.5

หมายเหตุ ชุดที่ 1 อัตราส่วนสด:แห้ง 4:0 ชุดที่ 2 อัตราส่วนสด:แห้ง 3:1 และชุดที่ 3 อัตราส่วนสด:แห้ง 2:2

พบว่าชุดที่ 1 (อัตราส่วนสด :แห้ง 4:0) และชุดที่ 2 (อัตราส่วนสด:แห้ง 3:1) มีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีสูงใกล้เคียงกัน (> 92%) และมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไม่ต่างกัน เมื่อพิจารณาอัตราการกำจัดซีโอดีที่ได้ นับว่ามีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาสภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนในสภาวะและอุณหภูมิที่ต่างกันของเศษก้านและใบลำไยสด (2)

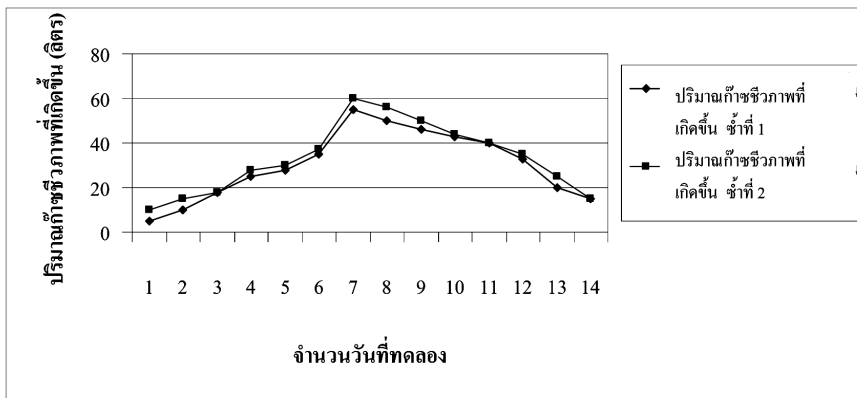
3.1.8 ผลการหมักในระบบถังหมักที่พัฒนาแล้ว

ชุดที่ 2 (อัตราส่วนสด:แห้ง 3:1) ซึ่งมีอัตราการกำจัดซีโอดี 92.83% ถูกนำมาใช้ในแบบจำลองถังหมักที่ได้ปรับปรุงให้เป็นระบบปิดที่สมบูรณ์ขึ้น (รูปที่ 5) สามารถตรวจวัดสภาพการย่อยสลายขณะเดินระบบได้ทุกวัน รวมทั้งก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นแต่ละวัน และมีการเติมวัสดุหมักร่วม คือ น้ำกากส่า ได้โดยไม่รบกวนระบบ ในระหว่างเดือนพฤษภาคม-มิถุนายน 2553 ซึ่งอยู่ในช่วงเข้าสู่ฤดูฝน

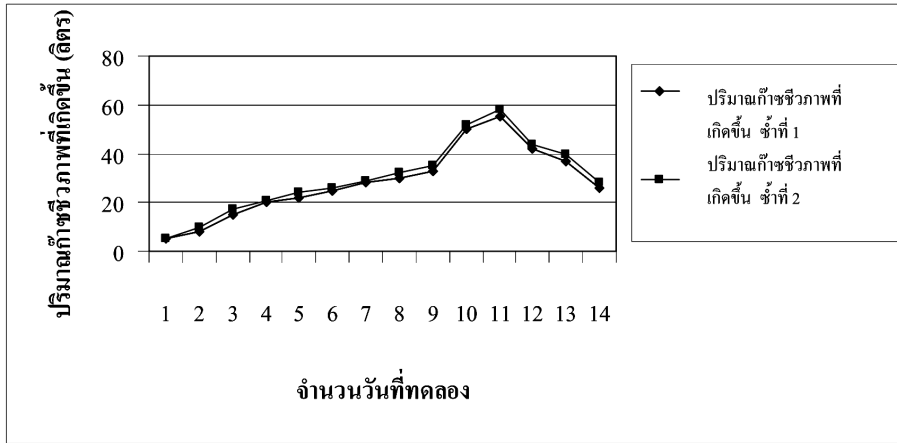


รูปที่ 5. ชุดถังหมักย่อยเศษก้านและใบลำไยที่พัฒนาให้มีความสมบูรณ์ขึ้น

ผลการเดินระบบที่ได้พัฒนาแล้ว (รูปที่ 5) พบว่าได้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 6.-7.



รูปที่ 6. ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองในถังหมักที่พัฒนาแล้ว ครั้งที่ 1



รูปที่ 7. ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองในถังหมักที่พัฒนาแล้ว ครั้งที่ 2

ผลการเดินระบบครั้งที่ 1 ซึ่งมีค่าพีเอช ขณะเดินระบบอยู่ระหว่าง 4.2-7.81 และมีอุณหภูมิภายในระบบระหว่าง 32- 47 องศาเซลเซียส พบว่าก๊าซที่เกิดขึ้น มีค่าเฉลี่ยรวมมากที่สุด 443 ลิตร ค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 55-60 ลิตร ในวันที่ 7 และมีค่าลดลงต่ำสุด 15 ลิตร ในวันที่ 14 และมีค่าเฉลี่ย 31.64 ลิตร/วัน ส่วนการเดินระบบครั้งที่ 2 ซึ่งมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 4.52-7.10 และมีอุณหภูมิภายในระบบอยู่ระหว่าง 32.2-45.3 องศาเซลเซียส พบว่าก๊าซที่เกิดขึ้น มีค่าเฉลี่ยรวม 409 ลิตร ค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 55-58 ลิตร ในวันที่ 11 และค่าลดลงต่ำสุดอยู่ระหว่าง 26-28 ลิตร ในวันที่ 14 และมีค่าเฉลี่ย 29.14 ลิตร/วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของชุดทดลองครั้งที่ 2 มีค่าน้อยกว่าครั้งที่ 1 และน้อยกว่าค่าที่ได้จากถังหมักที่ศึกษาก่อนหน้านี้ ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูหนาว อุณหภูมิ จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญของการย่อยสลาย ซึ่งแตกต่างกันตามฤดูกาล สอดคล้องกับ Speece (13) ที่กล่าวว่าอุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาย่อยสลายของจุลินทรีย์โดยตรง ที่อุณหภูมิสูง (50-55 องศาเซลเซียส) จุลินทรีย์ทำงานได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (38-42 องศาเซลเซียส) ถังหมักเดิมที่ได้พัฒนาแล้วเมื่อใช้งานในช่วงฤดูฝนให้ก๊าซชีวภาพได้ต่ำกว่าในช่วงฤดูอื่น จึงควรเพิ่มเทคนิคที่ช่วยในการย่อยให้ดีขึ้น เช่น การเติมตัวกลางเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์ย่อยสลายได้มากขึ้น เป็นต้น

4. สรุป

ผลการศึกษาโดยสรุปมีดังนี้

- 1) ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีของวัสดุหมักทำให้คำนวณหาสัดส่วนของวัสดุหมักซึ่งใช้ในการย่อยสลายเศษก้านและใบลำไย ในถังหมักขนาด 200 ลิตรได้ คือ ตะกอนจุลินทรีย์ 40 ลิตร น้ำกากสำ 2 ลิตร และเศษก้านและใบลำไยทิ้งสดและแห้งที่อัตราส่วนต่างกัน รวม 5,000 กรัม
- 2) ก๊าซและปุ๋ยน้ำชีวภาพที่ได้ทุกชุด มีชนิดและองค์ประกอบของก๊าซมีเทน > 30% และมี % ของธาตุอาหารหลักของพืช คือไนโตรเจน: ฟอสฟอรัส: โพแทสเซียม 0.17-0.19: 0.07-1.17: 0.22-0.24
- 3) ชุดที่ 2 (อัตราส่วนสด: แห้ง 3:1) มีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดมากที่สุด 544 ลิตรในเวลา 14 วัน เฉลี่ย 45 ลิตร/วัน ซึ่งเป็นก๊าซมีเทนมากที่สุด 34% และมีอัตราการกำจัดซีโอดี 92.83%
- 4) ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของชุดที่ 1 (อัตราส่วนสด: แห้ง 4:0) และชุดที่ 2 (อัตราส่วนสด: แห้ง 3:1) เหมาะสมในการใช้เดินระบบเนื่องจากให้ก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกัน มีชนิดและองค์ประกอบของก๊าซและปุ๋ยน้ำชีวภาพไม่ต่างกัน
- 5) ถังหมักที่พัฒนาเป็นระบบปิดที่สมบูรณ์ขึ้น สามารถวัดสภาพการทำงานของระบบได้ดี เมื่อนำไป

ใช้งาน ควรคำนึงถึงฤดูกาล ซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิขณะหมัก (7)
และควรศึกษาผลของตัวกลางในการหมัก

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมทร.ล้านนาเชียงใหม่ที่
ให้ทุน และผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้คำแนะนำที่ดีต่อบทความนี้ (8)

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Manochai P, Kaosumen Y, Srithontip C, Changjeraja S. Technology for Longan Production. 1st ed. Bangkok: Physics Center; 2004. Thai.
- (2) Rattanaporn C, Praradee A. An Evaluation of Biochemical Methane Potential of Petioles and Leaves of Longan Waste [B. Envi. Eng. Thesis]. Chiang Mai: Rajamangala University of Technology Lanna; 2009. Thai.
- (3) Sukwanitch K, Kaewkau A, Panyaping K. The Use of Biogas Technology for Food Waste Digestion. Proceedings of the 1st Rajamangala's Engineering Academy; 2007 Apr. 23-25; Chiang Mai: Thailand; 2007. P. 40-46. Thai.
- (4) APHA, AWWA, WEF. Standard method of the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. Washington: APHA; 2005.
- (5) ERDI. Curriculum of Waste Water Treatment System Design for Primary Biogas Production. 1st ed. Chiang Mai: Chiang Mai University; 2008. Thai.
- (6) Details on F/M ratio [Internet]. 2005 Nov 5 [Updated 2010 Mar 30; cited 2010 Mar 31]. Available from: <http://dep.state.pa.us/dep/deputate/watersps/redesign/calculator/FMDetails.htm>
- (7) Industrial Sanitary Work, Public Health Division, Health Office, Bangkok. Activated Sludge Treatment System [Internet]. 2009. [Updated 2012 Feb 12]. Available from: http://www.trueplookpanya.com/true/knowledge_detail.phpMmul_content_id=162&mul_source_id=2614
- (8) Diaz LF, Savage GM, Eggerth LL, Golueke CG. Composting and Recycling Municipal Solid Waste. Florida: Lewis Publishers; 1993.
- (9) Mackenzie LD, Cornwell DA. Introduction to Environmental Engineering. 4th ed. Singapore: Mc-Graw-Hill; 2008.
- (10) Center of Biomass Energy Promotion, Foundation for Energy and Environment. Biogas [Internet]. 2005 [Updated 2010 Mar 30; cited 2010 Mar 31]. Available from: <http://www.efc.or.th/pdf/biogas.pdf>
- (11) Liquid Compost. [Internet]. 2010 Mar 30 [Updated 2012, Mar 27; cited 2009 Dec 26]. Available from: <http://reh1.netfirms.com/puy.htm>
- (12) Bio-liquor Extracted from Plant [Internet]. 2007 Apr 5 [Updated 2012 Mar 31; cited 2012 Mar 31]. Available from: <http://mueang.nakhonpathom.doae.go.th/2007/nrams>
- (13) Speece RE. Anaerobic Biotechnology. Tennessee: Archae Press; 1996.