การหมักมูลฝอยอินทรีย์จากเศษอาหารโดยใช้ถังหมักอย่างง่ายสำหรับบ้านเรือน

Composting of Household organic waste using self-assemble simple composting bin

ภานุ คะนอง[1*], จุฑามาศ แก้วมณี[2]
[1,2] หลักสูตรวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
[*] Email address: panuh.k@yru.ac.th (Corresponding Author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของการหมักมูลฝอยอินทรีย์ โดยใช้ถังหมักที่ประดิษฐ์ขึ้นขนาด 25 ลิตร ทำการหมักโดยใช้วัสดุหมักรวมเท่ากับ 10 kg ประกอบด้วยมูลฝอยอินทรีย์สังเคราะห์ร่วมกับใบไม้แห้ง ในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 วัสดุหมักรวมเริ่มต้น มีค่า pH เท่ากับ 5.57 ค่าความชื้นเท่ากับ 64.30% และค่าคาร์บอนทั้งหมดต่อไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 34.38 จากการวิจัยพบว่าอุณหภูมิการหมักสูงสุดเท่ากับ 41.1°C ซึ่งมีค่าไม่สูงมากนัก อาจเป็นผลมาจากปริมาณอากาศหมุนเวียนภายในถังหมักที่ต่ำและสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ปลายท่อถังหมักที่ต่ำ เมื่อทำการหมักจนถึง 30 วัน พบว่าวัสดุหมักมีค่า pH เท่ากับ 7.80 ค่าความชื้นเท่ากับ 71.43% และค่าคาร์บอนทั้งหมดต่อไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 14.43 และยังพบว่าค่าความชื้นสุดท้ายภายในถังหมักมีค่าสูง เนื่องจากอุณหภูมิในการหมักที่ต่ำ จึงเกิดการระบายความชื้นออกสู่ภายนอกถังหมักน้อย ดังนั้นปุ๋ยหมักที่ได้จึงควรนำมาผึ่งลม เพื่อให้มีค่าความชื้นลดลงและผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยหมักก่อนนำไปใช้เป็นปุ๋ยหมักหรือวัสดุปรับปรุงดิน

คำสำคัญ: ถังหมักปุ๋ย มูลฝอยอินทรีย์ เศษอาหาร

Abstract

The aim of this research was to study influences of various parameters on food waste composing using a self-assemble composting bin of 25 liters. The waste using in the study was 10 kg. Then, the synthetic food waste and dry leaves were mixed at a ratio of 1:3. The initial properties: pH, moisture content and the total carbon to total nitrogen ratio were 5.57, 64.30 and 34.38, respectively. It was found that the maximum composting temperature was 41.1 °C, which was quite low. This can be attributed to a low air circulation in the composting pile which was observed by measuring the oxygen concentration at exhausted gas. After 30 days of composting, the compost material exhibited a pH of 7.80, moisture content of 71.43%, and total carbon to nitrogen ratio of 14.43. The result also showed a high final moisture content of the composting pile which was due to overall pile temperature was low and less moisture released to outside of the composting bin. Therefore, it is recommended to dry the compost material before using as compost or soil amendment in order to achieve a lower moisture content that can be met the compost standard requirement.

Keywords: Composting bin, Organic waste, Food waste

1. บทนำ

มูลฝอยที่เกิดขึ้นจากการดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน มีแนวโน้มที่จะเพิ่มและสร้างปัญหาขึ้นทุกวัน จากข้อมูลปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั่วประเทศไทยในปี 2563 มีปริมาณ 25.37 ล้านตันหรือประมาณ 69,507 ตันต่อวัน มูลฝอยที่เกิดขึ้นถูกนำไปกำจัดเพียง 17.49 ล้านตันหรือคิดเป็น 68.94% ในขณะที่ยังมีมูลฝอยที่ไม่ถูกนำไปกำจัดหลงเหลืออยู่อีก 7.88 ล้านตันหรือคิดเป็น 31.06% (กรมควบคุมมลพิษ, 2564) จึงทำให้เกิดปัญหาทั้งทางด้านงบประมาณในการจัดเก็บและงบประมาณในการนำไปกำจัดด้วยวิธีการต่าง ๆ เมื่อพิจารณามูลฝอยดังกล่าวพบว่าเป็นมูลฝอยอินทรีย์มากกว่าร้อยละ 60 (Chvajarernpun

et al., 2006) ซึ่งสามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ดังนั้นแนวทางในการแก้ปัญหามูลฝอยที่ผลิตในแต่ละวันที่มีจำนวนมากนี้ นอกจากจะต้องรณรงค์เกี่ยวกับการลดการเกิดมูลฝอยแล้ว ยังต้องส่งเสริมการคัดแยกมูลฝอยอินทรีย์ที่ต้นทาง เช่น บ้านเรือนหรือ ณ แหล่งกำเนิด เพื่อนำมาหมักปุ๋ย ซึ่งจะเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาที่ปลายทางของการกำจัดมูลฝอยด้วยวิธีอื่น ๆ แบบไม่สิ้นสุด ซึ่งในแต่ละวิธีจะต้องใช้งบประมาณดำเนินการในแต่ละครั้งที่สูง เช่น ขนถ่าย เทกอง ฝังกลบ เป็นต้น

การหมักปุ๋ย คือ กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นวัสดุเพื่อปรับปรุงดินหรือปุ๋ย โดยแบคทีเรียที่ใช้อากาศในการหายใจ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณมูลฝอยที่จะนำไปกำจัดให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 50 (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) แต่การหมักมูลฝอยอินทรีย์ในแต่ละบ้านเรือนหรือ ณ แหล่งกำเนิดมูลฝอย ยังไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากข้อจำกัดหลายประการได้แก่ ขาดความรู้ความเข้าใจในกระบวนการหมัก ขาดอุปกรณ์และเครื่องมือที่จะใช้ในการหมัก ขาดพื้นที่ที่เหมาะสมที่จะใช้ในการหมักกรณีอยู่ในชุมชนเมือง อีกทั้งยังพบปัญหาเรื่องระยะเวลาการหมักที่ยาวนาน เนื่องจากส่วนใหญ่เป็นการหมักแบบเทกองที่ไม่ถูกหลักวิชาการ ตลอดจนปัญหาเรื่องทัศนียภาพที่ไม่สวยงาม อีกทั้งมีสัตว์คุ้ยเขี่ยกองหมัก งานวิจัยนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพของต้นแบบถังหมักปุ๋ยอย่างง่ายที่ออกแบบขึ้น สำหรับนำไปหมักมูลฝอยอินทรีย์จากเศษอาหารในแต่ละบ้านเรือน นอกจากจะช่วยลดมูลฝอยอินทรีย์ในแต่ละบ้านเรือนแล้ว ยังสามารถนำปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการทำเกษตรอินทรีย์ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในการหมักมูลฝอยอินทรีย์จากบ้านเรือนโดยใช้ถังหมักอย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุหมัก

ใช้วัสดุหมักเริ่มต้นเป็นมูลฝอยอินทรีย์สังเคราะห์ ประกอบด้วย เศษผัก เศษผลไม้ เศษเนื้อปรุงสุกและเศษข้าว ที่มีอัตราส่วนผสมร้อยละ 20, 30, 25, 25 โดยน้ำหนักเปียก ตามลำดับ โดยผสมมูลฝอยอินทรีย์สังเคราะห์กับวัสดุหมักร่วม คือ ใบไม้แห้งในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 และกำหนดปริมาณวัสดุหมักรวมเท่ากับ 10 kg ทำการปรับความชื้นของวัสดุหมักรวมให้ได้ประมาณ 60% ตามค่าแนะนำช่วงความชื้นที่เหมาะสมต่อการหมัก คือ 40 ถึง 65% (Polprasert, 1989) โดยทำการผสมและเติมครั้งเดียว จากนั้นเก็บตัวอย่างวัสดุหมักรวมมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นซึ่งประกอบด้วย ค่า pH ค่าความชื้น ค่าคาร์บอนทั้งหมด ค่าไนโตรเจนทั้งหมด ค่าคาร์บอนทั้งหมดต่อค่าไนโตรเจนทั้งหมด สมบัติทางกายและเคมีของวัสดุหมักรวมเริ่มต้น แสดงไว้ในตารางที่ 1

2.2 ลักษณะของถังหมัก

ถังหมักที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีลักษณะเป็นถังสองชั้น ภายนอกทำมาจากพลาสติกที่มีขนาด 25 ลิตร โดยเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว จำนวน 8 รู ในตำแหน่งโดยรอบถังพลาสติก สูงจากก้นถัง 2 นิ้ว ในลักษณะตรงข้ามกัน ถังหมักมีฝาเปิดและปิดถังทำด้วยพลาสติก ที่เจาะรูตรงกลาง เพื่อให้สามารถสอดท่อพลาสติกกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 1.5 นิ้ว ซึ่งทำหน้าที่ในการระบายอากาศภายในถังและด้านข้างของถังติดตั้งวาล์วสูงจากก้นถัง 1 นิ้ว เพื่อระบายน้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นภายในถัง ภายในถังหมักชั้นในเป็นลักษณะตะกร้าพลาสติก โดยติดตั้งท่อพลาสติกกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ในแนวยืน ที่มีการเจาะรูจำนวนมากรอบท่อพลาสติกกลม ซึ่งท่อพลาสติกกลมดังกล่าวนี้จะติดตั้งบริเวณแกนกลางของตะกร้าพลาสติก เพื่อทำหน้าที่ในการระบายอากาศเข้าออกภายในถังหมักกับภายนอก ภาพวาดแสดงส่วนประกอบของถังหมักและภาพถังหมักที่ใช้ แสดงดังภาพที่ 1 และ 2

ภาพที่ 1 ภาพวาดแสดงส่วนประกอบของถังหมัก

ภาพที่ 2 แสดงถังหมักที่ใช้

2.3 การดำเนินการหมักและวิเคราะห์ผล

ระหว่างการหมัก สุ่มเก็บตัวอย่างวัสดุหมักจากระดับบนสุด กลางและล่างสุดของถังหมัก นำมาผสมคลุกเคล้า เพื่อหาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ได้แก่ ค่า pH ค่าความชื้น ค่าคาร์บอนทั้งหมด ค่าไนโตรเจนทั้งหมด ทำการวัดอุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักทุกชั่วโมง ด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบบันทึกข้อมูลได้ รุ่น DIGICON DP-74SD วัดปริมาณความชื้นของวัสดุหมักด้วยการอบแห้งที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ASTM-D2974) วัดค่า pH ด้วยการนำวัสดุหมักไปละลายในน้ำกลั่น ในสัดส่วน 1 ต่อ 10 (AOAC 973.04) แล้วทำการวัดด้วยเครื่อง pH มิเตอร์ ดำเนินการหมักปุ๋ยจนกว่าอุณหภูมิของกองหมักจะกลับสู่อุณหภูมิแวดล้อมและคงที่ โดยจะทำการหมักซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล

3. ผลการวิจัย

3.1 สมบัติทางกายและทางเคมีเริ่มต้นและสุดท้ายของวัสดุหมัก

ค่าพารามิเตอร์ในการหมักประกอบด้วย ค่า pH ค่าความชื้น ค่าคาร์บอนทั้งหมด ค่าไนโตรเจนทั้งหมดและค่าคาร์บอนทั้งหมดต่อค่าไนโตรเจนทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 1

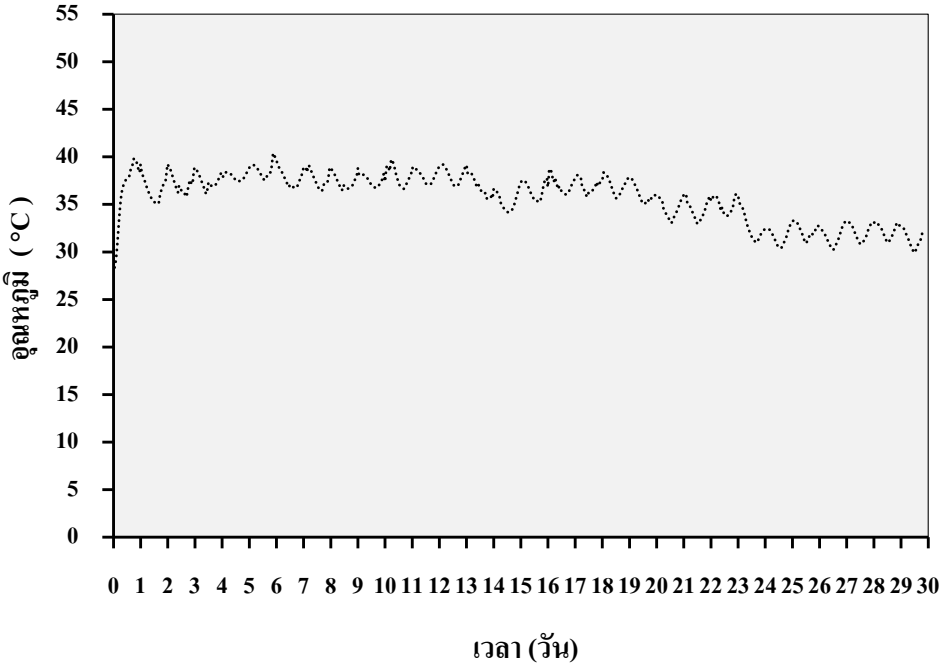
ตารางที่ 1 สมบัติทางกายและทางเคมีเริ่มต้นของวัสดุหมัก

พารามิเตอร์การหมัก	ค่าเริ่มต้น	ค่าสุดท้าย
ค่า pH	5.57 ± 0.24	7.80 ± 0.47
ค่าความชื้น (%)	64.30 ± 0.76	71.43 ± 1.38
ค่าคาร์บอนทั้งหมด (%)	42.64 ± 1.85	39.67 ± 1.26
ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (%)	1.24 ± 1.28	2.75 ± 0.54
ค่าคาร์บอนทั้งหมดต่อค่าไนโตรเจนทั้งหมด	34.38 ± 0.48	14.43 ± 0.70

จากตารางที่ 1 พบว่าค่า pH เริ่มต้นของวัสดุหมักมีค่าเป็นกรดอ่อน แต่เมื่อการหมักดำเนินไป ก็จะได้ค่า pH สุดท้ายที่เหมาะสมคือ ประมาณ 7 (Rynk, 1992) สำหรับค่าความชื้นเริ่มต้น จะอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการหมักนั้นคือ อยู่ในช่วง 50 ถึง 70% (Polprasert, 1989) แต่ค่าความชื้นสุดท้ายยังสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณปุ๋ยหมักของกรมวิชาการเกษตร ปี 2555 ที่จะต้องไม่เกิน 30% ในส่วนของค่าคาร์บอนทั้งหมดต่อไนโตรเจนทั้งหมด เริ่มต้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการหมัก คือ 25 ถึง 50 (Tchobanoglous et al., 1993) และค่าสุดท้ายถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณปุ๋ยหมักของกรมวิชาการเกษตร ปี 2555 คือ ไม่เกิน 20

3.2 อุณหภูมิของวัสดุหมัก

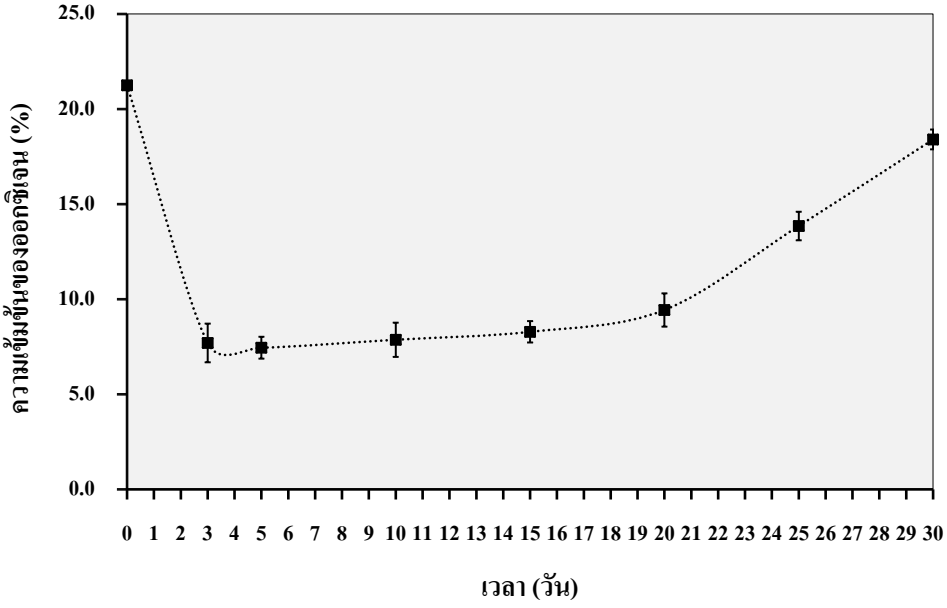
จากกราฟของอุณหภูมิในภาพที่ 3 พบว่าอุณหภูมิของวัสดุหมักในช่วงเริ่มต้นมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิการหมักทั้งหมดอยู่ในช่วง 29.3 ถึง 41.1°C ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดตลอดการหมักคือ 41.1°C และอุณหภูมิสูงสุดของการหมักเกิดขึ้นหลังจากการหมักเป็นเวลา 6 วัน โดยช่วงอุณหภูมิการหมักส่วนใหญ่อยู่ในช่วงเมโซฟิลิก คือ 15 ถึง 45°C (Singleton, 2004) และในช่วงสุดท้ายของการหมักอุณหภูมิของวัสดุหมักจะค่อยๆ ลดลงจนถึงอุณหภูมิสภาวะแวดล้อม คือ ที่ประมาณ 30°C และคงที่จนสิ้นสุดหมักเป็นเวลา 30 วัน



ภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการหมัก

3.3 ความเข้มข้นของออกซิเจน

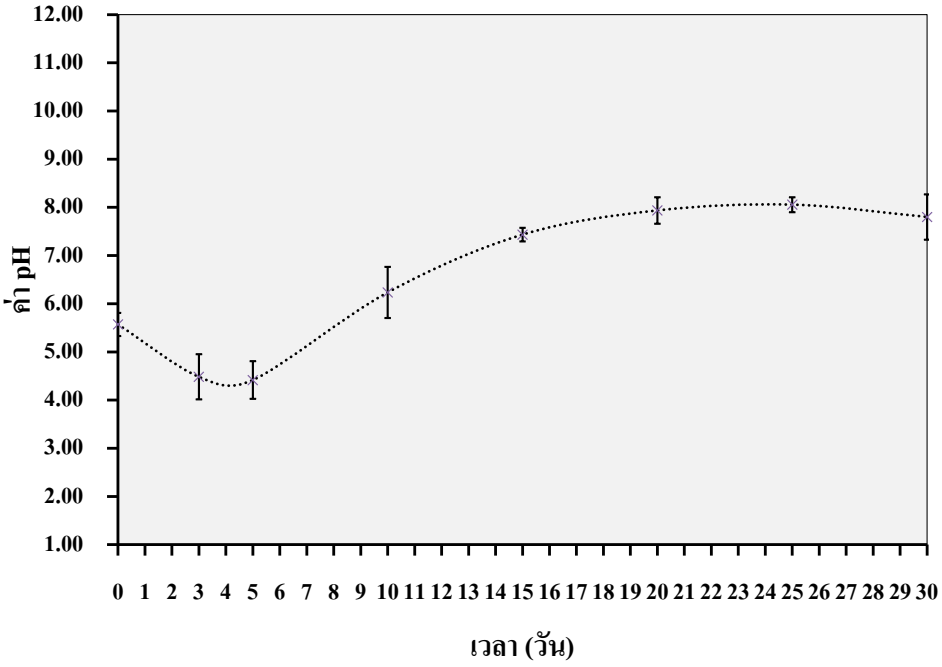
จากกราฟความเข้มข้นของออกซิเจน บริเวณท่อปล่อยก๊าซไอเสีย ด้านบนถังหมัก ในภาพที่ 4 พบว่า ในช่วงเริ่มต้นการหมัก ความเข้มข้นของออกซิเจน จะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงจนถึงระดับต่ำสุดในวันที่ 5 คือ 7.5% หลังจากนั้นความเข้มข้นของออกซิเจนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงระดับปกติทั่วไปในบรรยากาศ คือประมาณ 21%



ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนกับเวลาในการหมัก

3.4 ค่า pH ของวัสดุหมัก

กราฟแสดงค่า pH เทียบกับเวลาในการหมักในภาพที่ 5 พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการหมัก ค่า pH จะมีค่าลดลงจนถึงจุดต่ำสุด คือ ประมาณ 4.42 หลังจากนั้นค่า pH จะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดและเริ่มคงที่ประมาณ 15 วัน และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงจนสิ้นสุดการหมัก



ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับเวลาในการหมัก

4. อภิปรายผลการวิจัย

จากกราฟเฉลี่ยของอุณหภูมิในภาพที่ 3 พบว่าอุณหภูมิการหมักส่วนใหญ่อยู่ในช่วงเมโซฟิลิก 15 ถึง 45°C (Singleton, 2004) นั้นคือ 29.3 ถึง 41.1°C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กุลยา สาริชีวินและฐนียา รังสีสุริยะชัย (2559) ที่ทำวิจัยเรื่อง การทำปุ๋ยหมักจากของเสียอินทรีย์โดยใช้ถังและไม่เติมอากาศ ซึ่งมีอุณหภูมิการหมักในช่วง 31.0 ถึง 40.0°C โดยปกติเทอร์โมฟิลิกเฟส จะมีช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 45°C (Mbuligwe et al. 2002, Wang et al. 2013 และ Haynes and Zhou 2016) แต่เนื่องจากอุณหภูมิของการหมัก มีค่าสูงสุดเพียง 41.1°C ดังนั้นในกรณีนี้จึงถือว่าช่วงเทอร์โมฟิลิกเฟส ไม่เกิดขึ้น ในส่วนของความเข้มข้นของออกซิเจนที่ลดลงเหลือ 7.5% ถือว่าเป็นระดับที่ต่ำมาก เนื่องจากค่าแนะนำความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ในการหมัก ควรรักษาให้อยู่ในช่วงระหว่าง 10 ถึง 18% (v/v) เพื่อรักษาประสิทธิในกระบวนการหมักทางชีวภาพไว้ (Magalhaes et al., 1993) จากการทดลองยังพบว่าความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงจาก 21% เป็น 7.5 ในช่วงวันที่ 5 ของการหมักและมีความสัมพันธ์กับแนวโน้มของอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในวันเดียวกันของการหมัก ดังแสดงไว้ก่อนหน้านี้ในภาพที่ 3 และจากภาพที่ 4 ยังพบอีกว่าการบริโภคออกซิเจนโดยจุลินทรีย์นั้น มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับอุณหภูมิของการหมัก โดยปริมาณการบริโภคออกซิเจนเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการหมักสูงขึ้นและการบริโภคออกซิเจนลดลงเมื่ออุณหภูมิการหมักลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yamada และ Kawase (2006) นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากระดับต่ำสุด ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงระดับสภาวะแวดล้อมปกติ ในวันที่ 30 เมื่อพิจารณาจากกราฟค่า pH ยังพบว่าค่า pH มีค่าค่อนข้างต่ำในช่วงเริ่มต้นการหมักถึงวันที่ 10 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ฐนียา รังษีสุริยะชัย และกุลยา สาริชีวิน (2561) ที่กล่าวว่าในช่วงเริ่มต้นการหมัก วัสดุหมักจะมีสภาพเป็นกรดอ่อน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความเข้มข้นของออกซิเจนในการหมักที่มีค่าค่อนข้างต่ำหรือมีความเข้มข้นที่ไม่เหมาะสมต่อการหมักแบบใช้อากาศ จึงอาจจะทำให้บางส่วนของวัสดุหมักเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้นได้ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าหากปริมาณอากาศหรือออกซิเจนมีค่าต่ำเกินไป กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนก็อาจจะเกิดขึ้นได้ เนื่องจากสังเกตได้ชัดเจนจากสภาวะความเป็นกรดที่เกิดขึ้นเป็นเวลาหลายวัน ซึ่งจะทำให้เกิดก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่เป็นผลิตภัณฑ์ใน

ปฏิกิริยาการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ ดังนั้นการเติมอากาศที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการทำปุ๋ยหมักที่มีประสิทธิภาพ

5. เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2547). *รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2546*. กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมควบคุมมลพิษ. (2564). *รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2563*. กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กุลยา สาริชีวินและฐนียา รังสีสุริยะชัย. (2559). *การทำปุ๋ยหมักจากของเสียอินทรีย์โดยใช้ถังเติมอากาศ*. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, 14(1), 25-33.

ฐนียา รังสีสุริยะชัยและกุลยา สาริชีวิน. (2561). *การศึกษาการหมักปุ๋ยจากเศษอินทรียวัตถุด้วยการเติมอากาศร่วมกับการใช้ครูดเอมไซม์.* วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, 16(2), 1-12.

Chvajarernpun, A., Piyapanpong, S. and Thongkaimook, A. (2006). *Waste management: Realization of waste to energy and beyond in the meeting of Thailand partnership for development*: January, 26. Bangkok.

Haynes, R.J.; and Zhou, Y.F. (2016). *Comparison of the chemical, physical and microbial properties of composts produced by conventional composting or vermicomposting using the same feed stocks*. Environmental Science and Pollution Research, 23, 10763-10772.

Magalhaes, A.M.T., Shea, P.J., Jawson, M.D., Wicklund, E.A. and Nelson, D.W. (1993). *Practical simulation of composting in the laboratory. Waste Management and Research*. 11, 143-154.

Mbuligwe, S.E., Kassenga, G.R., Kaseva, Y.E. and Chaggu, E.J. (2002). *Potential and constraints of composting domestic solid waste in developing countries: findings from a pilot study in Dares Salaam, Tanzania*. Resources, Conservation and Recycling. 36, 45-59.

Polprasert, C. (1989). *Organic waste recycling*: John Wiley & Sons, Chichester. New York. Brisbane. Toronto. Singapore.

Rynk, R. (1992). *On-farm Composting Handbook*: Northeast Regional Agricultural Engineering Service. New York.

Singleton, P. (2004). *Bacteria in biology, biotechnology and medicine*: John Wiley & Sons, Chichester, England.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S. (1993). *Integrated solid waste management*: McGraw-Hill series in engineering principles and management issues. Singapore.

Wang, K., Li, W., Li, Y., Gong, X., Wu, C. and Ren, N. (2013). *The modelling of combined strategies to achieve thermophilic composting of sludge in cold region*. International Biodeterioration and Biodegradation. 85, 608-616.

Yamada, Y. and Kawase, Y. (2006). *Aerobic composting of waste activated sludge: Kinetic analysis for microbiological reaction and oxygen consumption*. *Waste Management*, 26, 49-61.