



ผลกระทบของอัตราการเติมและอุณหภูมิของอากาศที่เข้าต่อประสิทธิภาพการย่อยสลาย
ของเปลือกผลไม้ในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ
The Effect of Flow Rate and Temperature of Inlet Air on the Degradation
Efficiency of Fruit Peels in Active Composting Bin

ตรีรัตน์ เจริญกุล
Trerat Jaroenkul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Environmental Engineering
Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ผลกระทบของอัตราการเติมและอุณหภูมิของอากาศที่เข้าต่อประสิทธิภาพการย่อยสลาย
ของเปลือกผลไม้ในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ

The Effect of Flow Rate and Temperature of Inlet Air on the Degradation
Efficiency of Fruit Peels in Active Composting Bin

ตรีรัตน์ เจริญกุล

Trerat Jaroenkul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Environmental Engineering
Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของอัตราการเติมและอุณหภูมิของอากาศที่เข้าสู่ประสิทธิภาพการ ย่อยสลายของเปลือกผลไม้ในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ
ผู้เขียน	นายตรีรัตน์ เจริญกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีรัตน์ สุกุลรัตน์)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์)

.....กรรมการ
(ดร.วิสา คงนคร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา จุติดำรงค์พันธ์)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.จรงค์ ผลประเสริฐ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีรัตน์ สุกุลรัตน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างู่งสูง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีรัตน์ สกุรัตน์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....
(นายตรีรัตน์ เจริญกุล)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายตรีรัตน์ เจริญกุล)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของอัตราการเติมและอุณหภูมิของอากาศที่เข้าต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายของเปลือกผลไม้ในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ
ผู้เขียน	นายตรีรัตน์ เจริญกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาผลกระทบของอัตราการเติมและอุณหภูมิของอากาศที่เข้าต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายของเปลือกผลไม้ในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ โดยเปลือกผลไม้ รวม 8 กิโลกรัม ประกอบด้วย มะม่วง กัลยาดม แดงโม สับปะรด มะละกอ ส้มโอ แก้วมังกร และส้ม ผสมกับไบโอดีปแท่งสับละเอียด ปริมาณ 4 กิโลกรัม โดยมีค่า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และความชื้นเริ่มต้น เท่ากับ 32 และ ร้อยละ 55 ตามลำดับ ทำการหมักในถังพลาสติกกลม ขนาด 60 ลิตร จากการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายระหว่างการให้อากาศเข้าตามธรรมชาติ และการเติมอากาศที่อัตรา 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมของน้ำหนักเปียก พบว่าเมื่ออัตราการเติมอากาศสูงขึ้น ทำให้การย่อยสลายของสารอินทรีย์และอุณหภูมิของวัสดุหมักสูงขึ้นตามลำดับ แต่อัตราการเติมอากาศที่สูงเกินไปทำให้อุณหภูมิของวัสดุหมักลดลงจากการพาความร้อนของวัสดุหมักออกมา และพบว่า อัตราการเติมอากาศที่ 0.7 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมของน้ำหนักเปียก ทำให้วัสดุหมักมีการลดลงของมวลสูงสุด คือ ร้อยละ 23.1 และคุณภาพของวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการย่อยสลาย ผ่านตามมาตรฐานของการเป็นปุ๋ยที่กำหนดไว้ ยกเว้น ค่าปริมาณฟอสฟอรัส ส่วนการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายเมื่อเติมอากาศที่มีอุณหภูมิของบรรยากาศ 45 55 และ 65 องศาเซลเซียส เข้าถึงหมักด้วยอัตราการเติมอากาศที่ 0.7 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมของน้ำหนักเปียก พบว่า เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าถึงหมักสูงขึ้น ทำให้การย่อยสลายของสารอินทรีย์สูงขึ้น แต่หากอุณหภูมิของอากาศที่เติมสูงเกินไปทำให้การย่อยสลายของสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากทำให้แบคทีเรียลดลง และพบว่าเมื่อเติมอากาศที่มี อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ทำให้วัสดุหมักมีการลดลงของมวลสูงสุด คือร้อยละ 27.7 ซึ่งมากกว่าการเติมอากาศที่อุณหภูมิต่ำ และคุณภาพของวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการย่อยสลาย ผ่านตามมาตรฐานของการหมักปุ๋ยที่กำหนดไว้ ยกเว้น ค่าปริมาณฟอสฟอรัส เช่นกัน ดังนั้นจากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าถังหมักที่มีการเติมอากาศที่มีอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 0.7 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมของน้ำหนักเปียก เป็นสภาวะที่ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงสุด และวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการย่อยสลายที่ได้ควรเพิ่มฟอสฟอรัสเพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการเป็นปุ๋ยก่อนนำไปใช้งาน

Thesis Title	The effects of flow rate and temperature of inlet air on the degradation efficiency of fruit peels in active composting bin
Author	Mr. Trerat Jaroenkul
Major Program	Environmental Engineering
Academic Year	2017

ABSTRACT

The aim of research was to study the effects of flow rate and temperature of inlet air on the degradation efficiency of fruit peels in active composting bin. Organic wastes, 8 kg in total, consisting of mango, banana, watermelon, pineapple, papaya, grapefruit and orange peels were mixed with 4 kg of shredded leaves. Initial C/N ratio and moisture content of composting materials were 32 and 55%, respectively. Small HDPE plastic bin size 60-liter was used as a composting bin. In the first experiment, the efficiencies of degradation between passive aeration and active aeration at rates of 0.3, 0.5, 0.7 and 0.9 L/min-kg W_w were compared. The results showed that increasing air flow rate resulted in increasing degradation and composting materials temperature. However, too high air flow rate reduced mixture temperature due to heat loss. It was found that the air flow rate at 0.7 L/min-kg W_w gave the highest mass reduction at 23.1%. The quality of final product met the standard of compost, except phosphorus. In the second experiment, the efficiencies of degradation when inlet air temperature was at ambient, 45, 55 and 65 °C with flow rate 0.7 L/min-kg W_w were compared. The results showed that increasing temperature of inlet air result in higher the degradation and composting materials temperature. But too high inlet air temperature reduced the degradation due to the decrease of some microorganisms. The result showed that inlet temperature of 55 °C gave the highest mass reduction at 27.7 %, higher than the inlet air at ambient temperature. The quality of compost material also met the standard of compost, except phosphorus. In conclusion, the inlet air of 55 °C with flow rate at 0.7 L/min-kg W_w was the optimal conditions resulting in the highest organic degradation but phosphorus should be added to the final product in order to meet the compost standard before use.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีรัตน์ สกุศลรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีในการทำการวิจัย รวมถึงการเอาใจใส่ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง ของผู้วิจัยจนสามารถทำให้การวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.จรงค์ ผลประเสริฐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ จุฑิตำรงค์พันธ์ และ ดร.วิสา คงนคร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลามาร่วมเป็นคณะกรรมการสอบ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.วฤทธิ์ วิชกุล คณาจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการออกแบบอุปกรณ์สำหรับการทดลอง แก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ประจำสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุก ๆ ท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้

ขอขอบพระคุณ คุณอมรรัตน์ หวลกะสิน และ คุณเพ็ญภา ทองประไพ นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่คอยแนะนำและให้การช่วยเหลือการใช้เครื่องมือ และการทดลอง

ขอขอบพระคุณ คุณสุพิศ นนทะสร นักวิชาการอุดมศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่คอยช่วยเหลือติดต่อประสานงานต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมปอง – คุณแม่กรรณิกา เจริญกุล และครอบครัว สำหรับความเอาใจใส่ ความห่วงใย แก่ผู้วิจัย รวมทั้งคอยสนับสนุนเงินทุนในการศึกษามาตลอด

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณงบประมาณแผ่นดิน ปี2559 ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิจัยครั้งนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกความช่วยเหลือจากทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้ ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมด จึงขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ตรีรัตน์ เจริญกุล

สารบัญ

บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาคผนวก	(11)
สารบัญรูปภาพ	(13)
อักษรย่อและสัญลักษณ์	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 งานตรวจเอกสาร	2
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	23
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	23
1.6 ขอบเขตการวิจัย	24
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	25
2.1 วัสดุ อุปกรณ์	27
2.2 วิธีการทดลอง	32
2.3 การเก็บตัวอย่างวัสดุหมัก	36
2.4 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวัสดุหมัก	37
2.5 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพและประสิทธิภาพของวัสดุหมัก	39
บทที่ 3 ผลการทดลองและวิจารณ์	40
3.1 การทดลองที่ 1 หาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ	40
3.1.1 คุณสมบัติของวัสดุหมักเบื้องต้นของการทดลองที่ 1	40
3.1.2 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆของการทดลองที่ 1	42
3.1.2.1. อุณหภูมิ	42
3.1.2.2. ปริมาณก๊าซออกซิเจน	43
3.1.2.3. ความชื้น	44
3.1.2.4. ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด	46
3.1.2.5. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	47

3.1.2.6. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	49
3.1.2.7. ความเป็นกรด-ด่าง	51
3.1.2.8. ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม	53
3.1.3. คุณภาพและประสิทธิภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก	54
3.2 การทดลองที่ 2 ผลของอุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการย่อยสลาย	59
3.2.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสมแล้วของการทดลองที่ 2	59
3.2.2 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆของการทดลองที่ 2	59
3.2.2.1. อุณหภูมิ	60
3.2.2.2. ปริมาณก๊าซออกซิเจน	62
3.2.2.3. ความชื้น	63
3.2.2.4. ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด	64
3.2.2.5. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	65
3.2.2.6. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	67
3.2.2.7. ความเป็นกรด-ด่าง	68
3.2.2.8. ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม	69
3.2.3. คุณภาพและประสิทธิภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก	71
บทที่ 4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	76
4.1 บทสรุป	76
4.2 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก ก.	85
ภาคผนวก ข.	88
ภาคผนวก ค.	91
ภาคผนวก ง.	106
ภาคผนวก จ.	128
ประวัติผู้เขียน	129

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1-1 จุลินทรีย์ชนิดต่างๆภายในกองหมักปุ๋ย	12
ตารางที่ 2-1 น้ำหนักของวัสดุหมักที่ใช้สำหรับการทดลอง	28
ตารางที่ 2-2 อัตราการเติมอากาศเข้าถังหมักในการทดลองที่ 1	32
ตารางที่ 2-3 อุณหภูมิของอากาศที่เติมเข้าภายในถังหมักของการทดลองที่ 2	34
ตารางที่ 2-4 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์	33
ตารางที่ 2-4 เกณฑ์ที่ใช้สำหรับประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก	37
ตารางที่ 2-5 รายละเอียดของการเก็บตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์	38
ตารางที่ 2-6 เกณฑ์ที่ใช้สำหรับประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก	39
ตารางที่ 3-1 น้ำหนักของเปลือกผลไม้และคุณสมบัติเบื้องต้น	40
ตารางที่ 3-2 ลักษณะของคุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมัก	41
ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสมแล้วของการทดลองที่ 1	41
ตารางที่ 3-4 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด	47
ตารางที่ 3-5 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	49
ตารางที่ 3-6 ปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	51
ตารางที่ 3-7 ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม	54
ตารางที่ 3-8 คุณภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก	55
ตารางที่ 3-9 ระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของพืช	56
ตารางที่ 3-10 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสมแล้วของการทดลองที่ 2	59
ตารางที่ 3-11 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด	65
ตารางที่ 3-12 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	66
ตารางที่ 3-13 ปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	68
ตารางที่ 3-14 ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม	70
ตารางที่ 3-15 คุณภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก	72

สารบัญตารางภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่ ก-1	น้ำหนักของวัสดุหมักสำหรับการหมัก	85
ตารางภาคผนวกที่ ก-2	การคำนวณร้อยละการลดลงของมวล	86
ตารางภาคผนวกที่ ค-1	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ของการทดลองที่ 1	91
ตารางภาคผนวกที่ ค-2	ปริมาณก๊าซออกซิเจนของการทดลองที่ 1	93
ตารางภาคผนวกที่ ค-3	ความชื้น (%) ของการทดลองที่ 1	94
ตารางภาคผนวกที่ ค-4	ความเป็นกรด-ด่าง ของการทดลองที่ 1	95
ตารางภาคผนวกที่ ค-5	อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 1	96
ตารางภาคผนวกที่ ค-6	ไนโตรเจนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 1	97
ตารางภาคผนวกที่ ค-7	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	98
ตารางภาคผนวกที่ ค-8	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ของการทดลองที่ 2	99
ตารางภาคผนวกที่ ค-9	ปริมาณก๊าซออกซิเจนของการทดลองที่ 2	100
ตารางภาคผนวกที่ ค-10	ความชื้น (%) ของการทดลองที่ 2	101
ตารางภาคผนวกที่ ค-11	ความเป็นกรด-ด่าง ของการทดลองที่ 2	102
ตารางภาคผนวกที่ ค-12	อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 2	103
ตารางภาคผนวกที่ ค-13	ไนโตรเจนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 2	104
ตารางภาคผนวกที่ ค-14	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	105
ตารางภาคผนวกที่ ง-1	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบความเป็นกรดต่างของวัสดุหมัก การทดลองที่ 1	106
ตารางภาคผนวกที่ ง-2	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าความชื้นของวัสดุหมัก การทดลองที่ 1	107
ตารางภาคผนวกที่ ง-3	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าไนโตรเจนทั้งหมดของ ของวัสดุหมักการทดลองที่ 1	108
ตารางภาคผนวกที่ ง-4	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจนของวัสดุหมักการทดลองที่ 1	109
ตารางภาคผนวกที่ ง-5	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าปริมาณฟอสฟอรัสของ วัสดุหมักการทดลองที่ 1	110
ตารางภาคผนวกที่ ง-6	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าปริมาณโพแทสเซียมของ วัสดุหมักการทดลองที่ 1	111
ตารางภาคผนวกที่ ง-7	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุหมัก การทดลองที่ 1	112

ตารางภาคผนวกที่ ง-8	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบความเป็นกรดต่างของวัสดุหมัก การทดลองที่ 2	113
ตารางภาคผนวกที่ ง-9	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าความชื้นของวัสดุหมัก การทดลองที่ 2	115
ตารางภาคผนวกที่ ง-10	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของ วัสดุหมักการทดลองที่ 2	117
ตารางภาคผนวกที่ ง-11	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบปริมาณอัตราส่วนคาร์บอน ต่อไนโตรเจนทั้งหมดของวัสดุหมักการทดลองที่ 2	119
ตารางภาคผนวกที่ ง-12	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสของ วัสดุหมักการทดลองที่ 2	121
ตารางภาคผนวกที่ ง-13	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบปริมาณโพแทสเซียม ของวัสดุหมักการทดลองที่ 2	122
ตารางภาคผนวกที่ ง-14	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุหมัก การทดลอง ที่ 2	124
ตารางภาคผนวกที่ ง-15	การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าดัชนีการงอกของเมล็ด การทดลองที่ 2	126

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1-1 กองหมักแบบพลิกกลับกอง (Turned Windrow Composting)	4
รูปที่ 1-2 กองหมักแบบใช้เครื่องเติมอากาศ (Aerated Static Pile Composting)	5
รูปที่ 1-3 ถังหมักในแนวตั้ง (Vertical Flow Reactor)	6
รูปที่ 1-4 ถังหมักในแนวนอนและวางเอียง (Horizontal and Inclined Flow Reactor)	6
รูปที่ 1-5 ถังหมักแบบไม่มีการเคลื่อนที่ (Non Flow Reactor)	7
รูปที่ 1-6 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมัก	8
รูปที่ 1-7 ถังหมักปุ๋ยที่ใช้ในงานวิจัยของประเทศเกาหลี	17
รูปที่ 1-8 ถังหมักปุ๋ยที่ใช้ศึกษาสมดุลของความร้อนของการหมักมูลของสัตว์ปีกกับชี้เลี้ยง	18
รูปที่ 1-9 ถังหมักปุ๋ยที่ใช้ศึกษาผลกระทบของอัตราการเติมอากาศ	19
รูปที่ 1-10 ถังหมักที่ใช้ศึกษาผลของจำนวนท่อในแนวตั้ง	20
รูปที่ 1-11 ขนาดท่อและรูที่ใส่ในกองหมัก	20
รูปที่ 1-12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการหมัก	21
รูปที่ 1-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ CH_4 CO_2 O_2 อุณหภูมิและเวลาในการหมัก	22
รูปที่ 1-14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจุลินทรีย์ อุณหภูมิและเวลาในการหมัก	23
รูปที่ 2-1 แผนดำเนินงานทั้งหมด	26
รูปที่ 2-2 ลักษณะของเปลือกผลไม้ที่ย่อยขนาดแล้ว	27
รูปที่ 2-3 ลักษณะของใบไม้แห้งที่ย่อยขนาดแล้ว	28
รูปที่ 2-4 ถังหมักสำหรับการทดลอง	29
รูปที่ 2-5 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง	30
รูปที่ 2-6 แผนภาพการทดลองที่ 1	31
รูปที่ 2-7 แผนภาพการทดลองที่ 2	31
รูปที่ 2-8 แผนการดำเนินการทดลองที่ 1	33
รูปที่ 2-9 แผนผังการทดลองที่ 2	35
รูปที่ 2-10 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างวัสดุหมัก	36
รูปที่ 3-1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหมัก	43
รูปที่ 3-2 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนภายในถัง	44
รูปที่ 3-3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุหมัก	45
รูปที่ 3-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของวัสดุหมัก	46
รูปที่ 3-5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของวัสดุหมัก	48
รูปที่ 3-6 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมัก	50

รูปที่ 3-7 การลดลงของมวลการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุหมัก	52
รูปที่ 3-8 ลักษณะของสีของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก	56
รูปที่ 3-9 การลดลงของมวล	57
รูปที่ 3-10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหมัก	60
รูปที่ 3-11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรีย	61
รูปที่ 3-12 ความสัมพันธ์ของปริมาณแบคทีเรียและอุณหภูมิสูงสุดของวัสดุหมัก	61
รูปที่ 3-13 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนภายในถัง	62
รูปที่ 3-14 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในถัง	63
รูปที่ 3-15 การเปลี่ยนแปลง ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของวัสดุหมัก	64
รูปที่ 3-16 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของวัสดุหมัก	66
รูปที่ 3-17 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมัก	67
รูปที่ 3-18 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุหมัก	69
รูปที่ 3-19 ลักษณะของสีของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก	73
รูปที่ 3-20 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีการงอกของเมล็ดกับค่าการนำไฟฟ้า	74
รูปที่ 3-21 การลดลงของมวลวัสดุหมัก	75

อักษรย่อและสัญลักษณ์

cm	=	Centimeter คือ เซนติเมตร
CH ₄	=	Methane คือ ก๊าซมีเทน
CO ₂	=	Carbon Dioxide คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
C/N ratio	=	Carbon to nitrogen ratio คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
d	=	Day คือ วัน
dS/m	=	Deci siemes per meter คือ หน่วยที่ใช้วัดค่าการนำไฟฟ้า
EC	=	Electrical Conductivity คือ ค่าการนำไฟฟ้า
GI	=	Germination Index คือ ดัชนีการงอกของเมล็ดพืช
HDPE	=	High density polyethylene คือ โพลีเอทิลีนที่มีค่าความหนาแน่นสูง
H ₂ S	=	Hydrogen Sulfide คือ แก๊สไข่เน่า
Kg	=	Kilogram คือ กิโลกรัม
K ₂ O	=	Potassium oxide คือ ปริมาณโพแทสเซียมในรูป K ₂ O
L	=	Litre คือ ลิตร
m	=	Meter คือ เมตร
min	=	Minute คือ นาที
mm	=	Millimeter คือ มิลลิเมตร
m ³	=	Cubic meter คือ ลูกบาศก์เมตร
NaCl	=	Sodium chloride คือ เกลือ
NH ₃	=	Ammonia คือ แอมโมเนีย
O ₂	=	Oxygen คือ ก๊าซออกซิเจน
OH ⁻	=	Hydroxide ions คือ ไอออนประจุลบ ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนและไฮโดรเจน
OM	=	Organic Matter คือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ
P ₂ O ₅	=	คือ ปริมาณฟอสฟอรัส
SO ₄ ⁻²	=	Sulfate ion คือ ซัลเฟตไอออน
%	=	percent คือ เปอร์เซ็นต์หรือร้อยละ
°C	=	Degree of Celsius คือ องศาเซลเซียส เป็นหน่วยวัดอุณหภูมิ
W _w	=	Wet Weight น้ำหนักเปียก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขยายตัวทางเศรษฐกิจ และการเพิ่มขึ้นของประชากรได้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านสภาวะแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาของปริมาณมูลฝอยซึ่งนับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆทั้งในระดับชุมชน จนถึงระดับประเทศ รวมทั้งประเทศไทย ซึ่งมีปริมาณมูลฝอยที่เพิ่มขึ้นทุกปี โดยในปี 2560 มีปริมาณมูลฝอย 27.40 ล้านตัน หรือประมาณ 75,046 ตันต่อวัน ซึ่งรัฐบาลได้ให้ความสำคัญกับแนวทางการบริหารจัดการมลพิษจาก มูลฝอย โดยเป้าหมายสูงสุดของยุทธศาสตร์ ได้แก่ การส่งเสริมให้มีการลด ใช้ซ้ำ และนำกลับมาใช้ใหม่ (กรมควบคุมมลพิษ 2561) รวมทั้งการใช้ประโยชน์จากมูลฝอยอินทรีย์ในรูปแบบของปุ๋ยหมัก ซึ่งจากการพิจารณาสัดส่วนของมูลฝอยทั้งหมด พบว่ามีมูลฝอยอินทรีย์ประมาณร้อยละ 60 หรือประมาณ 16.44 ล้านตัน มูลฝอยที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากจึงทำให้เกิดปัญหาด้านการจัดการที่ตักค้ำ ส่งผลให้เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลง พาหะนำโรค ส่งกลิ่นเหม็นก่อให้เกิดความรำคาญ โดยปริมาณมูลฝอยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นมีการนำกลับมาใช้ประโยชน์ในส่วนของปุ๋ยอินทรีย์เพียง 1.26 ล้านตัน (กรมควบคุมมลพิษ 2561) ซึ่งมูลฝอยที่ไม่ได้นำกลับมาใช้ประโยชน์ ถูกจัดการโดยการฝังกลบ ซึ่งเป็นวิธีการจัดการที่ไม่ยั่งยืนและยังส่งผลกระทบต่อปัญหาของการจัดการพื้นที่ในการฝังกลบ มูลฝอยอินทรีย์เมื่อถูกย่อยสลายจะทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก เกิดสภาพความเป็นกรดในดินเมื่อถูกฝนชะเป็นน้ำชะมูลฝอย ซึ่งอาจเกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งปัญหาเหล่านี้เกิดขึ้นได้ทุกพื้นที่ที่มีหลุมฝังกลบรวมทั้งพื้นที่ในการจัดการมูลฝอยของเทศบาลเมืองคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ดังนั้นแนวทางแก้ไขปัญหามาจากมูลฝอยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นควรส่งเสริมให้มีการ ลด คัดแยก และใช้ประโยชน์ ณ แหล่งกำเนิด โดยนำมูลฝอยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นมาหมักทำเป็นปุ๋ยหรือวัสดุปรับปรุงดิน และใช้ประโยชน์ให้มากที่สุดก่อนการกำจัด ณ หลุมฝังกลบ

การหมักปุ๋ยเป็นการบำบัดมูลฝอยอินทรีย์ที่นิยมใช้ในการลดปริมาณมูลฝอยอินทรีย์ที่เข้าหลุมฝังกลบ เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของหลุมฝังกลบและลดมลพิษ ขั้นตอนในกระบวนการปฏิบัติง่าย สามารถควบคุมปัญหามลพิษได้ง่าย และได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของปุ๋ยอินทรีย์มาใช้ประโยชน์ในการเกษตรกรรม โดยการหมักปุ๋ย ณ แหล่งกำเนิด หรือบ้านเรือนมักใช้ถังหมักขนาดเล็กเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายคือ อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่างของกองหมัก อัตราการเติมอากาศ อัตราส่วนของ C/N และขนาดของวัสดุหมัก (Kumar et al. 2010 อ้างโดย Li et al. 2013) โดยการทำให้อุณหภูมิในกองหมักสูงอยู่ในช่วง thermophilic ขึ้นอยู่กับการมีปริมาณอากาศภายในถังหมักอย่างพอเพียง จึงได้มีการพัฒนากระบวนการหมักแบบแอกทีฟ หรือใช้เครื่องเติมอากาศซึ่งช่วยให้มีอากาศไหลเข้ากองหมักได้อย่างต่อเนื่องและเพียงพอ อย่างไรก็ตามหากอัตราการเติมของอากาศเข้าสู่สูงเกินไปอาจทำให้สูญเสียความร้อนภายในกองไปกับอากาศที่ไหลออกได้เช่นกัน (Bari et al. 2012) ดังนั้นการหาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมเพื่อให้อุณหภูมิของวัสดุหมักคงอยู่ในช่วง thermophilic อย่างต่อเนื่อง จึงมีความสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของวัสดุหมักในถังหมักขนาดเล็กมักสูงไม่ถึง 55 - 65 องศาเซลเซียส ตามทฤษฎี (Stentiford 1996 อ้างถึงโดย Li

et al. 2013) หรือแม้อุณหภูมิในกองหมักสูงถึงตามทฤษฎี แต่ไม่สามารถรักษาระดับของอุณหภูมินี้ไว้ได้นาน เนื่องจากถังหมักขนาดเล็กมีค่าการสูญเสียความร้อนที่สะสมภายในถังหมักสูงกว่าถังหมักขนาดใหญ่ ทำให้อุณหภูมิของวัสดุหมักต่ำและรักษาอุณหภูมิไว้ได้ไม่นาน และหากป้อนอากาศที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิภายในกองหมักอาจทำให้อุณหภูมิภายในกองลดต่ำลงได้ (สุชินันท์ เกียรติภักดิ์ 2555) ดังนั้นหากสามารถนำอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจากภายนอกป้อนเข้าสู่ในถังหมักอาจช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศภายนอกที่เติมเข้าสู่ถังหมักต่อประสิทธิภาพการหมักในถังหมักขนาดเล็ก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงหาอัตราการเติมอากาศเข้าถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักขนาดเล็กและศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้าถังหมักแบบเติมอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายของมูลฝอยอินทรีย์

1.2 งานตรวจเอกสาร

1.2.1 ปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมัก เป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งในสภาพของแข็ง ที่ได้จากการนำวัสดุอินทรีย์จากพืช และสัตว์ทางการเกษตร และจากชุมชนมาผลิตด้วยวิธีการทำให้ขึ้น สับ บด ร่อน และผ่านกรรมวิธีการหมักอย่างสมบูรณ์ จนแปรสภาพจากรูปเดิม ซึ่งกระบวนการหมักเป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยา โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์บางชนิดภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งจะย่อยสลายสารอินทรีย์จนกลายเป็นปุ๋ยที่มีลักษณะ นุ่ม ยุ่ย ขาดจากกันได้ง่าย มีอุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศ (กรมวิชาการเกษตร 2548)

1.2.2 วัสดุหมัก

วัสดุที่ใช้ในการทำปุ๋ยหมักมีลักษณะเป็นของแข็ง หรือกึ่งของแข็ง เช่นมูลสัตว์ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร วัสดุจากอุตสาหกรรม และวัสดุจากบ้านเรือน เป็นต้น วัสดุเหล่านี้หลังจากผ่านกระบวนการหมักที่เสร็จสมบูรณ์ จะมีคุณสมบัติในการปรับปรุงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของดิน และคุณสมบัติทางด้านองค์ประกอบทางเคมีของดิน ทำให้ดินเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ทำให้ดินมีความโปร่ง เพิ่มความพรุนแก่ดิน ช่วยให้ดินอุ้มน้ำและดูดซึมธาตุอาหารของพืชดีขึ้น ช่วยเป็นแหล่งอาหารรองให้แก่ดินซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

1.2.3 กระบวนการหมัก

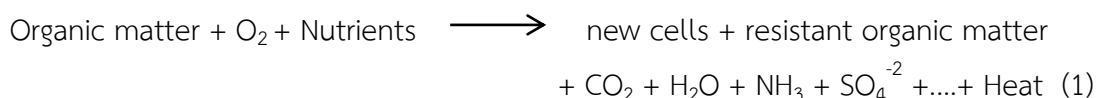
การหมักเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม มีอุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณสารอาหาร ความเป็นกรด-ด่าง และปัจจัย

อื่นๆ เพื่อช่วยให้จุลินทรีย์ทำงานได้ดีขึ้น ในช่วงแรกของการหมักจะมีความร้อนเกิดขึ้นภายในกองหมัก ซึ่งเป็นความร้อนที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายโดยในช่วงแรกจะย่อยสลายอย่างรวดเร็ว จนปริมาณสารอาหารลดลง ทำให้การย่อยสลายเริ่มช้าลง จนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียรไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอีกต่อไป (ทัศนีย์ แก้วมรกฏ 2557)

1.2.4 ประเภทของการหมัก

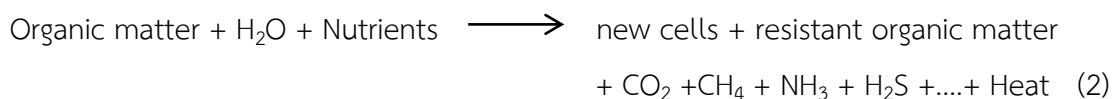
การหมักสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การหมักประเภทใช้อากาศ และการหมักประเภทไม่ใช้อากาศ

1.2.4.1 การหมักประเภทใช้อากาศ (Aerobic Composting) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ที่ใช้ก๊าซออกซิเจน การหมักในลักษณะนี้จะมีอัตราการย่อยสลายเร็ว มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อนซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันของอินทรีย์คาร์บอนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (Yamada and Kawase 2005) ข้อดีของการหมักโดยการใช้อากาศ คือ ไม่มีกลิ่น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในกองหมักค่อนข้างสูงพอที่จะสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ และลดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียที่ระเหยสู่อากาศ (ธีระพงษ์ และคณะ. 2547) โดยจุลินทรีย์เมื่อได้รับสารอาหารและก๊าซออกซิเจนแล้วเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ ดังสมการที่ 1 (Tchobanoglous et al. 1993)



ซึ่งจากสมการที่ 1 สารอินทรีย์นั้น ได้แก่ โปรตีน กรดอะมิโน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน เป็นต้น หลังจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ประเภทใช้อากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ เซลล์ใหม่ วัสดุหมักที่เสถียร ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความร้อน เมื่อเซลล์ใหม่ตายลงก็จะกลายเป็นวัสดุหมักที่เสถียร

1.2.4.2 การหมักประเภทไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Composting) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศโดยจุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งการหมักในลักษณะนี้เรียกอีกอย่างว่า “Cold process” เนื่องจากอุณหภูมิภายในกองใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก การสิ้นสุดของการหมักนานกว่าการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน คุณภาพปุ๋ยที่ได้ค่อนข้างต่ำ และอาจส่งกลิ่นเหม็นรบกวนจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 2 (Tchobanoglous et al. 1993)



ซึ่งจากสมการที่ 2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ก๊าซมีเทน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ กรดอินทรีย์ และคาร์บอนไดออกไซด์

1.2.5 รูปแบบการหมัก

การทำปุ๋ยหมักสามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้คือการหมักแบบไม่ใช้ถังปฏิกริยา และการหมักในถังปฏิกริยา

1.2.5.1 การหมักแบบไม่ใช้ถังปฏิกริยา (Nonreactor Processes)

เป็นการหมักแบบกองไว้กับพื้น แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่มีการพลิกกลับกอง และแบบกองแถวเติมอากาศโดยใช้เครื่องเติมอากาศ ดังแสดงในรูป 1-1

1. แบบพลิกกลับกอง (Turned Windrow Composting)

เป็นรูปแบบที่นิยม เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายไม่ยุ่งยาก โดยวัสดุจะถูกนำมากองเป็นแถวแล้วพลิกตามระยะเวลาที่เหมาะสม โดยใช้เครื่องจักรกล หรือใช้คน สำหรับการให้อากาศแก่กองหมักซึ่งเป็นการให้อากาศตามธรรมชาติโดยให้วัสดุหมักสัมผัสกับอากาศ โดยพลิกกลับเป็นช่วง ๆ เช่น ทุก 2-4 วัน หรือทุก 7 วัน (Tiquia et al. 1997) ให้อากาศสามารถเข้าได้อย่างทั่วถึงภายในวัสดุหมัก เพื่อเร่งปฏิกริยาการย่อยสลายและป้องกันการเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ

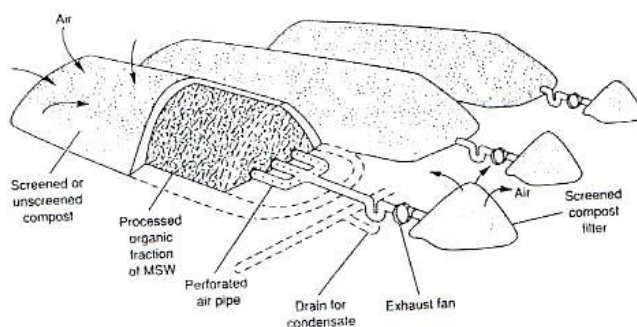


รูปที่ 1-1 กองหมักแบบพลิกกลับกอง (Turned Windrow Composting)

ที่มา: <https://www.biocycle.net/2015/01/14/organics-recycler-services-midwest-region/>

2. แบบกองเติมอากาศ (Aerated Static Pile Composting)

วิธีการนี้ใช้สำหรับใช้หมักกากตะกอนน้ำเสียซึ่งมีความชื้นสูง แต่ก็สามารถใช้กับวัสดุหมักที่เป็นสารอินทรีย์อื่นๆได้ การเติมอากาศจะเป็นการเติมอากาศโดยใช้เครื่องเติมอากาศ ใช้ได้ทั้งการดูดอากาศและเป่าอากาศเข้าไปผ่านท่ออากาศใต้กองหมัก โดยไม่มีการพลิกกลับกอง อากาศที่เติมเข้าไปจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในกระบวนการหมัก



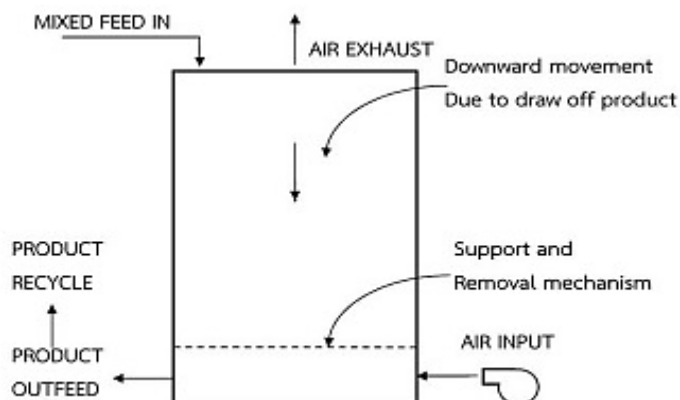
รูปที่ 1-2 กองหมักแบบใช้เครื่องเติมอากาศ (Aerated Static Pile Composting)

ที่มา: Tchobanoglous et al. (1993)

1.2.5.2 การหมักในถังปฏิกริยา (Reactor Processes)

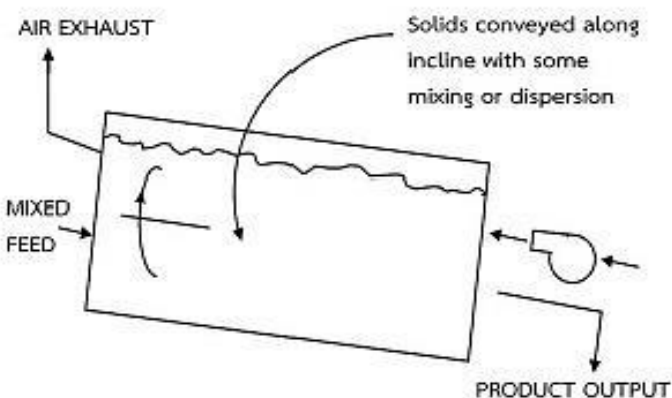
การหมักแบบนี้แบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่

1. ถังหมักแบบป้อนวัสดุหมักในแนวตั้ง (Vertical Flow Reactor) วัสดุหมักจะถูกป้อนสู่ถังหมักและนำวัสดุที่ได้ที่แล้วออกมาในแนวตั้ง ทิศทางการเคลื่อนที่อาจเป็นจากล่างขึ้นบนหรือจากบนลงล่าง โดยทั่วไปวัสดุหมักจะถูกป้อนแบบต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องก็ได้



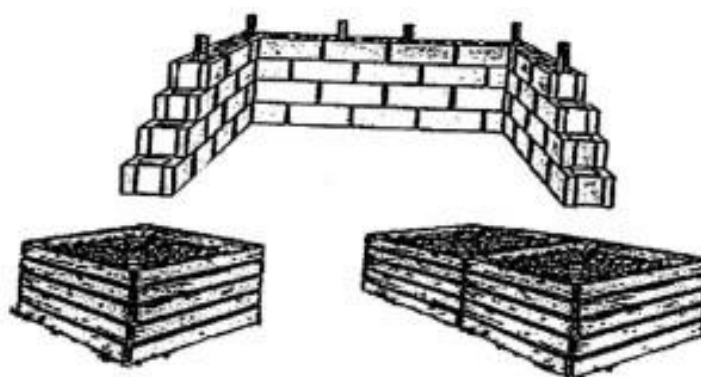
รูปที่ 1-3 ถังหมักในแนวตั้ง (Vertical Flow Reactor)
ที่มา: Haug (1993)

2. ถังหมักแบบป้อนวัสดุหมักในแนวนอนและวางเอียง (Horizontal and Inclined Flow Reactor) โดยการหมักแบบนี้วัสดุจะเคลื่อนที่ในแนวนอน ถังหมักจะเคลื่อนที่ด้วยแกนหมุนหรือสายพาน



รูปที่ 1-4 ถังหมักในแนวนอนและวางเอียง (Horizontal and Inclined Flow Reactor)
ที่มา: Haug (1993)

3. ถังหมักแบบไม่มีการเคลื่อนที่ (Non Flow Reactor) โดยทั่วไปจะป้อนวัสดุด้วยการเทใส่ลงในถังหมักที่เป็นกล่อง จากนั้นทำการหมักต่อไปเป็นเวลา 7 - 14 วัน เมื่อหมักตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วจะนำวัสดุหมักที่ได้ออกมาบ่มจนได้ที่ ก็จะนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 1-5 ถังหมักแบบไม่มีการเคลื่อนที่ (Non Flow Reactor)

ที่มา: Haug (1993)

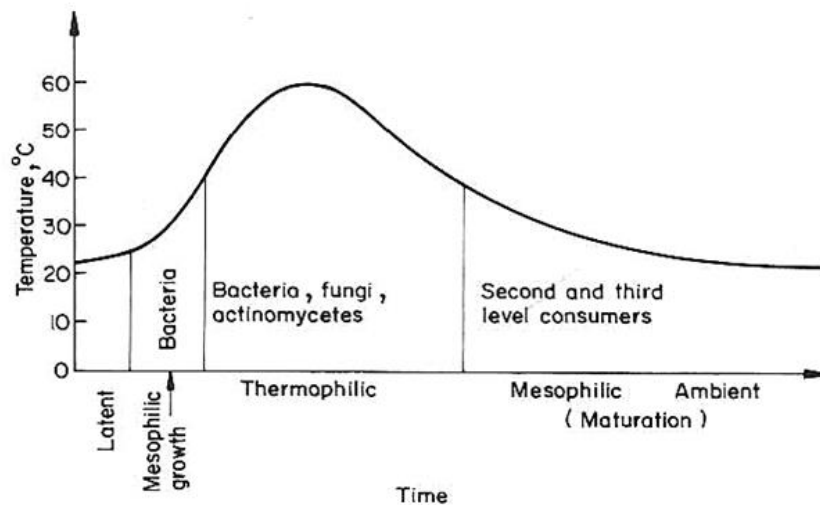
1.2.6. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหมัก

1.2.6.1. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยทางกายภาพที่เป็นเครื่องบ่งชี้กิจกรรมการย่อยสลายวัสดุโดยจุลินทรีย์ เมื่อสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น ออกซิเจน ขนาดของกองปุ๋ย และอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ในกองปุ๋ยหมักเหมาะสม ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตและทำหน้าที่ย่อยสลายวัตถุดิบได้ดี โดยอุณหภูมิ 45 - 55 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมต่อการย่อยสลายทางชีวภาพสูง อุณหภูมิสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส จะสามารถทำลายโรคพืชซึ่งอาจปนเปื้อนมากับวัสดุหมัก (Polprasert, 1996) ถ้าหากอุณหภูมิเกิน 70 องศาเซลเซียส ก็จะเกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้อัตราการย่อยสลายลดลง (Sylla, et al., 2003)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะดังแสดงใน

รูป1-6



รูปที่ 1-6 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมัก

ที่มา: Polprasert (1989)

1. ระยะปรับตัว (Latent Phase) คือ ระยะเริ่มต้นในการหมักปุ๋ย ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้เวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมและค่อยๆเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์
2. ระยะเมโซฟิลิก (Mesophilic Phase) คือ ระยะที่จุลินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นมีการย่อยสารอินทรีย์ทำให้เกิดพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาย่อยสลายของจุลินทรีย์ ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้จะอยู่ที่ 25 - 40 องศาเซลเซียส และจุลินทรีย์หลักที่ทำหน้าที่ในระยะนี้คือ จุลินทรีย์กลุ่มเมโซฟิลิกแบคทีเรีย
3. ระยะเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic Phase) คือระยะที่อุณหภูมิสูงขึ้นจนมีค่ามากกว่า 40 องศาเซลเซียส ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มเมโซฟิลิกแบคทีเรียค่อยๆตาย ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรียเข้ามาแทนที่เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 50 - 65 องศาเซลเซียส และเมื่อปริมาณสารอินทรีย์ลดลงจากการย่อยสลายทำให้เกิดพลังงานความร้อนน้อยลง จะทำให้ในกองหมักปุ๋ยอุณหภูมิลดลง
4. ระยะได้ที่ (Maturation Phase) คือระยะที่อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักลดลงจนมาถึงช่วงอุณหภูมิเมโซฟิลิก ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มเมโซฟิลิกแบคทีเรียเริ่มย่อยสลายสารอินทรีย์อีกครั้งจนอุณหภูมิลดลงมาเท่ากับอุณหภูมิห้อง

1.2.6.2. การเติมอากาศหรือการระบายอากาศ

การเติมอากาศหรือการระบายอากาศมีความสำคัญต่อการหมัก คือ เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้เพียงพอต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในกองหมักให้เหมาะสม และเพื่อระเหยหรือกำจัดน้ำออกจากสารอาหารที่มีความชื้นมากเกินไป (Haug 1993)

การเติมอากาศที่เพียงพอระหว่างการหมักเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเป็นการเติมออกซิเจนให้แก่จุลินทรีย์ และยังช่วยระเหยน้ำเพื่อควบคุมความชื้น หากมีการเติมอากาศมากเกินไปจะส่งผลทำให้กองหมักมีอุณหภูมิต่ำเกินไป หรือหากมีการเติมอากาศที่น้อยเกินไปจะทำให้ภายในกองหมักเกิดสภาพไร้ออกซิเจน ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง

1.2.6.3. ความชื้น

ความชื้นมีความสำคัญในการหมัก คือ ใช้ในการละลายสารอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตและการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ และใช้ในการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนในกองหมัก ซึ่งข้อจำกัดของความชื้นในการหมักคือ การที่มีความชื้นต่ำหรือสูงเกินไป ถ้าหากความชื้นภายในกองปุ๋ยมีความเหมาะสม การถ่ายเทออกซิเจนภายในกองหมักจะเกิดได้ดี จุลินทรีย์สามารถนำออกซิเจนไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นเร็ว และอุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักก็จะสูง ถ้าหากความชื้นในกองหมักมีค่าต่ำเกินไปจะมีผลให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียเกิดขึ้นน้อยโดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิของกองหมักมีค่าสูง ในขณะที่ถ้าความชื้นภายในกองมีค่าสูงเกินไปจะมีผลทำให้การถ่ายเทอากาศเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากช่องว่างระหว่างวัสดุหมักลดลง ทำให้เกิดสภาพไร้อากาศ (Miller 1992)

โดยค่าความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการหมักควรมีค่าประมาณร้อยละ 50 - 60 (Rabbani et al. 1983) และค่าความชื้นที่ต่ำที่สุดที่จะยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์คือ ประมาณร้อยละ 30 - 35 (Stentiford 1996) หากค่าความชื้นสูงกว่า ร้อยละ 65 อาจจะทำให้เกิดสภาพไร้อากาศ (Bernal et al. 2009)

1.2.6.4. ความเป็นกรด-ด่าง

ความเป็นกรด-ด่าง มีความสำคัญต่อการย่อยสลายในกองหมัก เนื่องจากจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความสามารถที่จะเจริญเติบโตที่ความเป็นกรด-ด่าง แตกต่างกันไป เช่น แบคทีเรียไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ในสิ่งแวดล้อมที่มีความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่า 3 และที่สูงกว่า 10.5 นอกจากนี้แบคทีเรียและแอกติโนมัยซีตจะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงความเป็นกรด-ด่าง ที่เป็นกลาง (Miller 1992)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ระหว่าง 6 - 9 (Miller 1992) จะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ในระหว่างการหมักมีค่าสูง วัสดุหมักเริ่มต้นโดยทั่วไปมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6 ซึ่งในช่วงแรกค่าความเป็นกรด-ด่าง ของการหมักจะลดลงทำให้การย่อยสลายจะเกิดช้าลง เมื่อระยะเวลาในการหมักเพิ่มขึ้นค่าความเป็นกรด-ด่าง จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน หลังจากนั้นค่าความเป็นกรด-ด่าง ของการหมักจะตกลงมา เนื่องจากปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันลดลง โดยทั่วไปแล้วการหมักไม่จำเป็นต้องมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้น ยกเว้นวัสดุหมักเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด-ด่าง สูงหรือต่ำมากเกินไปจะทำให้ส่งผลต่อกระบวนการหมักทำให้ในช่วงแรกเกิดการย่อยสลายได้ช้ามาก จึงควรจะต้องมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง (Haug 1993)

1.2.6.5. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมัก จะบอกถึงความยากง่ายของการย่อยสลาย (ทัศนีย์ แก้วมรกต 2557) โดยจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายอินทรีย์สารจะใช้คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงาน และใช้ในไนโตรเจนเพื่อสร้างส่วนประกอบของเซลล์ในกระบวนการหมัก ถ้าหากในกองหมักมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงคือปริมาณไนโตรเจนไม่เพียงพอ จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ช้าส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายจะเกิดขึ้นช้ามาก แต่ถ้าวัสดุหมักมีค่า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำคือ มีปริมาณไนโตรเจนมาก จะทำให้การเจริญเติบโตและการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อาจส่งผลให้ปริมาณของอากาศมีไม่เพียงพอต่อจุลินทรีย์ และถ้าหากปริมาณไนโตรเจนมีมากเกินไปจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซแอมโมเนีย (ทัศนีย์ แก้วมรกต 2557) โดยทั่วไปอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25 - 50 (Tchobanoglous et al. 1993) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ดีที่สุดในการผลิตปุ๋ยหมัก อยู่ในช่วง 25 - 30 (Huang et al. 2004)

1.2.6.6. ขนาดของวัสดุหมัก

ขนาดของวัสดุหมักมีความสำคัญ โดยทั่วไปวัสดุหมักมีขนาดเล็กจะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าวัสดุหมักที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากวัสดุหมักขนาดเล็กจะช่วยให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นซึ่งง่ายต่อจุลินทรีย์ที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยา ขนาดของวัสดุหมักควรน้อยกว่า 5 เซนติเมตร (ทัศนีย์ แก้วมรกต 2557) นอกจากนี้การย่อยขนาดของวัสดุหมักให้เล็กลงยังช่วยให้กองปุ๋ยมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีสภาพเป็นฉนวนซึ่งสามารถช่วยรักษาอุณหภูมิภายในกองหมักไว้ได้ (Gray et al. 1971) แต่ถ้าหากขนาดของวัสดุหมักมีขนาดเล็กเกินไปจะส่งผลต่อความพรุนซึ่งจะทำให้อากาศไม่สามารถซึมผ่านได้

1.2.6.7. จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในระหว่างการการหมักปุ๋ยหมักได้แก่ เชื้อรา แบคทีเรีย และแอกติโนมัยซีท (Ashraf et al. 2007 และ Rebolledo et al. 2008) ดังแสดงในตารางที่ 1-1

1. เชื้อรา ในกองหมักปุ๋ยหมักจะสามารถพบราได้เสมอ แต่ละชนิดและปริมาณของราจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุหมัก ความเป็นกรด-ด่าง ความชื้น และอุณหภูมิ ในระยะแรกของการหมักจะพบราพวก *Geotrichum candidum* และ *Aspergillus fumigatus* ต่อมาเมื่ออุณหภูมิของกองหมักเพิ่มขึ้นถึง 45-55 องศาเซลเซียส จะตรวจพบราพวก *Cladosporium sp.*, *Aspergillus sp.* และ *Mucor sp.* และที่อุณหภูมิสูงกว่านี้อาจพบราพวก *Penicillium duponti*

2. แบคทีเรียพบมากที่สุดในช่วงแรกของการหมักปุ๋ย และสามารถตรวจพบได้ทุกระยะของกระบวนการหมัก ซึ่งปริมาณของแบคทีเรียขึ้นอยู่กับวัสดุหมักที่นำมาใช้และสภาพแวดล้อมของกระบวนการหมัก โดยในช่วงที่ตรวจพบเมโซฟิลิกแบคทีเรีย ได้แก่ Nitrogen-Fixers, Sulfur-Oxidizers, Hydrogen-Oxidizer, Nitrifiers, and Producers of Extracellular Polysaccharides Bacterial Humin ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุหมักเริ่มลดลง และในช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุหมักมีค่า 60-80 องศาเซลเซียส จะพบเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรียพวก *Thermus thermophilus*, *Thermus aquaticus*, *Hydrogenobactor app.* และ *Heterotrophic Sporeforming Bacilli* (Beffa et al. 1996)

3. แอกติโนมัยซีท โดยทั่วไปจุลินทรีย์ชนิดนี้จะมีอัตราการเจริญช้ากว่าแบคทีเรียและเชื้อรา โดยปกติจะเจริญได้ในสภาวะที่มีอากาศถ่ายเทดี เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดนี้เป็นพวกที่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต ซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นจุดสีขาวๆ คล้ายหินปูนบนกองปุ๋ยหมักหลังจากอุณหภูมิสูงสุดแล้ว ซึ่งแอกติโนมัยซีทที่มักพบเสมอ คือ *Thermoactinomyces sp.* และ *Thermomonospora sp.* (Finstein 1986) ซึ่งเป็นพวกที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังพบ *Streptomyces sp.* และ *Micropolyspora sp.* ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในกองปุ๋ยหมักที่มีอุณหภูมิสูง

ตารางที่ 1-1 จุลินทรีย์ชนิดต่างๆภายในกองหมักปุ๋ย

เชื้อรา		แบคทีเรีย	แอกติโนมัยซิส
อุณหภูมิต่ำ	อุณหภูมิสูง		
<i>Alternaria tennis</i>	<i>Aspergillus fumigatus</i>	<i>Achmobacter sp.</i>	<i>Micromonospora vulgaris</i>
<i>Aspergillus amstelodami</i>	<i>Chaetomium</i>	<i>Angiocooccus sp.</i>	<i>Nocardai brasilensis</i>
<i>Cephalosporium sp.</i>	<i>Humicola insolens</i>	<i>Bacillus subittis</i>	<i>Streptomyces therofuscus</i>
<i>Cladosporium Herbarum</i>	<i>H. lanuginisa</i>	<i>G. stearothermophilus</i>	<i>S. thermophilus</i>
<i>Coprinus cinereus</i>	<i>Mucor posillus</i>	<i>Cellfacicula sp.</i>	<i>S. thermoviolaceus</i>
<i>Geotrichum candidum S.</i>	<i>Penicillium duponti</i>	<i>cellulomonas sp.</i>	<i>Thermovulgairs</i>
<i>Paecilomyces</i>	<i>Sporotrichum thermophile</i>	<i>Myxococcus virescens</i>	<i>Thermoactinomyces vulgaris</i>
<i>Scopularriopsis Brevicatis</i>	<i>Talaromyces thermophilis</i>	<i>M. fulvus</i>	<i>Thermomonosporacuvaria</i>
<i>Trichoderma viridae</i>		<i>Polyangium sp.</i>	<i>T. fusca</i>
		<i>Pseudomonas sp.</i>	<i>Thermopolysporapolyspo-ra</i>
		<i>Sorangium sp.</i>	<i>Streptoporagium sp.</i>
		<i>Sporocytophaya sp.</i>	
		<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	
		<i>T.denitrificans</i>	

ที่มา :กรมพัฒนาที่ดิน (2537)

1.2.7. มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์

มาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2555 ได้กำหนดไว้ในพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ.2518 (กรมวิชาการเกษตร 2561) มีดังนี้

1. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 ของน้ำหนัก ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P_2O_5) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ของน้ำหนัก และโพแทสเซียมทั้งหมด (Total K_2O) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ของน้ำหนัก หรือมีปริมาณธาตุอาหารหลักรวมกันไม่ต่ำกว่าร้อยละ 2.0 ของน้ำหนัก
2. ปริมาณอินทรีย์วัตถุรับรอง (Organic Matter; OM) ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 20 ของน้ำหนัก
3. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ไม่เกิน 20:1
4. ต้องเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ย่อยสลายสมบูรณ์
5. ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) ไม่เกิน 10 dS/m
6. ปริมาณเกลือ (NaCl) ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
7. ขนาดของปุ๋ย ไม่เกิน 12.5×12.5 mm
8. ปริมาณหิน กรวด ขนาดตั้งแต่ 5 mm ขึ้นไป ไม่เกินร้อยละ 2 ของน้ำหนัก
9. ความชื้นไม่เกินร้อยละ 30 ของน้ำหนัก
10. ต้องไม่พบพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม หรือโลหะอื่น ๆ
11. ปริมาณสารเป็นพิษไม่เกินกว่าที่รัฐมนตรีประกาศกำหนด

1.2.8. การประเมินการได้ที่ของปุ๋ยหมัก

การได้ที่ของปุ๋ยหมัก (Compost stability) มีความสำคัญต่อการนำปุ๋ยหมักที่ได้จากการหมักไปใช้ ซึ่งหากนำปุ๋ยหมักที่ยังไม่ได้ที่ไปใช้ จะส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อดินและพืช เช่น ปริมาณไนโตรเจนที่จำเป็นไม่เพียงพอต่อการดำรงชีพของพืช ปุ๋ยหมักที่ยังไม่ได้ที่จะทำให้เกิดการย่อยสลายต่อในดินและจะทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในดินลดลง ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการงอกของเมล็ด (Seed germination) และเกิดเป็นสารเป็นพิษจำพวกเอธิลีนออกไซด์ แอมโมเนียและกรดอินทรีย์ ส่งผลให้พืชลดอัตราการเกิดเมตาโบลิซึม ลดการดูดซึมสารอาหาร ลดการหายใจของราก (Jimenez and Garcia 1989) โดยวิธีประเมินการได้ที่ของปุ๋ยหมักมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.2.8.1. การประเมินการได้ที่ทางกายภาพ

1. สีและกลิ่น

วัสดุหมักที่ได้ที่แล้วจะมีสีสีดำหรือน้ำตาลดำ เนื่องจากสีของฮิวมัส (Jimenez and Garcia 1989) และปุ๋ยหมักที่ได้ที่แล้วอาจมีสีเทาหรือวงสีขาวเนื่องจากการเจริญเติบโตของแอคติโนมัยซิส (Polprasert 1989)

กลิ่นจะค่อยๆลดลงตั้งแต่ช่วงแรกของการหมัก และกลิ่นเหม็นจะหายไปเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก (Jimenez and Garcia 1989) ซึ่งเมื่อการหมักได้ที่หรือเสร็จสมบูรณ์แล้ว

กลืนเหม็นหายไปถึงแม้จะมีการพลิกกลับกองหมักอีก (Haug 1980) ซึ่งกลิ่นที่ได้จะคล้ายกลิ่นดินจากธรรมชาติ

2. อุณหภูมิ

กองหมักที่ได้ที่แล้วอุณหภูมิจะต้องมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงและคงที่ถึงแม้ว่าจะมีการพลิกกลับกองหมัก (Jimenez and Garcia 1989) ซึ่งอุณหภูมิจะลดลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิของบรรยากาศเป็นสิ่งที่บ่งชี้ได้ว่าการหมักเกือบเสร็จสมบูรณ์แล้ว หากพลิกกลับกองแล้วกองหมักยังมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าปุ๋ยหมักยังไม่ได้ที่ (Haug 1993) ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถบอกถึงการได้ที่ของปุ๋ยหมักได้ โดยปุ๋ยหมักที่ได้ที่แล้วจะต้องมีอุณหภูมิภายในกองเท่ากับอุณหภูมิห้อง (Barberis and Nappi 1996)

1.2.8.2. การประเมินการได้ที่ทางเคมี

1. ความเป็นกรด-ด่าง

วัสดุหมักโดยทั่วไปในช่วงเริ่มต้นของการหมักค่าความเป็นกรด-ด่างจะลดลงจนมีค่าประมาณ 5 และอาจมีค่าต่ำกว่านี้หากเป็นวัสดุหมักชนิดอื่น ซึ่งค่าที่ลดลงเกิดจากจุลินทรีย์ผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุหมัก หลังจากนั้นความเป็นกรด-ด่าง มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอาจจะอยู่ในช่วง 7 - 8 หรืออาจสูงกว่า หากค่าความเป็นกรด-ด่างสูงหรือมีค่าเป็นกรดแสดงว่าการหมักยังไม่ได้ที่ซึ่งอาจจะใช้ระยะเวลาในการหมักน้อยไป หรืออาจเกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Jimenez and Garcia 1989) ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุหมักที่ได้ที่ควรอยู่ในช่วง 5.0 - 8.0 (Tchobanoglous and Kreith 2002)

2. ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

โดยทั่วไปวัสดุหมักที่ย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์หรือได้ที่แล้วค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน จะอยู่ในช่วง 15-20 (Tchobanoglous and Kreith 2002) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุหมัก หากวัสดุหมักมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่น้อยกว่า 20 อาจเนื่องจากวัสดุหมักเริ่มต้นมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงซึ่งอาจหมายความว่าปุ๋ยหมักที่ได้ที่นั้นอาจยังไม่ได้ที่ โดยค่าการได้ที่ของปุ๋ยหมักอาจจะใช้สัดส่วนระหว่างค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่จุดสิ้นสุดการย่อยสลายด้วยค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่จุดเริ่มต้น (C/N final: C/N initial) โดยค่าที่ได้ต้องน้อยกว่า 0.75 (Jimenez and Garcia 1989 อ้างโดย ตะวัน ลั่นกองกุล 2560) ถ้าหากวัสดุหมักมีสารอินทรีย์คาร์บอนบางส่วนอยู่ในรูปย่อยสลายได้ยาก อาจจะทำให้ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน มีค่าประมาณ 25-30 (Harrison 2008)

3. ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเค็มของเกลือที่ละลายในน้ำ โดยในวัสดุหมักที่เสร็จสมบูรณ์หรือได้ที่แล้วค่าการนำไฟฟ้าควรมีค่าไม่เกิน 10 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร หากนำวัสดุหมักที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงเกินกำหนดไปใช้อาจจะส่งผลกระทบต่อดินและพืช ซึ่งจะมีผลต่อการเจริญเติบโตและการดูดน้ำและสารอาหารไปใช้ของพืชได้

1.2.8.3. การประเมินการได้ที่ทางชีวภาพ

1. ดัชนีการงอกของเมล็ด

การประเมินการได้ที่ของวัสดุหมักทางชีวภาพสามารถประเมินได้ด้วยการตรวจวัดค่าดัชนีการงอกของเมล็ด โดยทั่วไปค่าดัชนีการงอกของเมล็ดต้องมามีค่ามากกว่า ร้อยละ 50 ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ว่าปุ๋ยนั้นได้ที่แล้วและไม่เป็นอันตรายต่อพืช (Huang et al. 2004) แต่สำหรับในประเทศไทยตามประกาศของกรมวิชาการเกษตรได้กำหนดค่าดัชนีการงอกของเมล็ดไว้ว่า วัสดุหมักที่ได้ที่แล้วควรมีค่ามากกว่า ร้อยละ 80 (กรมวิชาการเกษตร 25561)

2. การนับจำนวนจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญของการย่อยสลายในทุกระยะของการหมัก ได้แก่ รา แบคทีเรีย และแอกติโนมัยซีท โดยจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถเจริญเติบโตได้ดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยในช่วงอุณหภูมิภายในกองหมัก 45-55 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงที่มีอัตราการย่อยสลายสูงสุด ทำให้พบจุลินทรีย์ ประเภท รา แบคทีเรีย และแอกติโนมัยซีท เป็นจำนวนมาก ดังนั้นการตรวจสอบการนับจำนวนจุลินทรีย์ในแต่ละช่วง ก็จะสามารถทราบถึงจำนวนการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจุลินทรีย์ได้ ซึ่งจะนำมาช่วยในการพิจารณาการได้ที่ของปุ๋ยได้

1.2.9. ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักที่ย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์หรือได้ที่แล้ว เป็นวัสดุหมักที่ทนต่อการย่อยสลายเมื่อใส่ลงในดิน ปุ๋ยหมักจะย่อยสลายช้า ซึ่งเป็นจุดเด่นอย่างหนึ่งของปุ๋ยหมัก เนื่องจากปุ๋ยหมักจะสามารถปรับปรุงดินให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม โดยประโยชน์ของปุ๋ยหมักมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (วัลลภ พรหมทอง 2542)

1. ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน
2. ช่วยปรับคุณสมบัติของดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช
3. ช่วยเพิ่มกิจกรรมและปริมาณของจุลินทรีย์ในดิน
4. ช่วยเพิ่มธาตุอาหารและอินทรีย์วัตถุที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

ให้กับดิน

5. ช่วยปรับโครงสร้างของดินให้ดียิ่งขึ้น
6. ช่วยให้ดินมีการระบายน้ำและถ่ายเทของอากาศได้ดีขึ้น
7. ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ปุ๋ยเคมีให้กับพืชและลดการใช้ปุ๋ยเคมี
8. เป็นปุ๋ยที่ไม่เป็นอันตรายต่อดินและพืช ถึงแม้จะใช้ติดต่อกันเป็นเวลานาน
9. ทำให้ธาตุอาหารบางอย่างสามารถละลายได้ดี จึงทำให้พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้

มากขึ้น

10. ช่วยกำจัดขยะมูลฝอยและวัชพืชในไร่นาให้หมดไปเป็นการควบคุมสภาพแวดล้อม

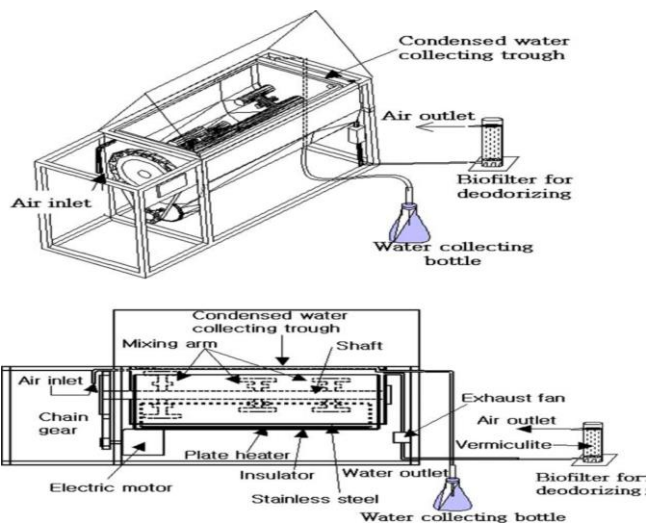
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ อัตราการไหลของอากาศและรูปแบบถัง

ชนกพร หนูหอม (2544) ศึกษาการทำปุ๋ยหมักจากมูลสุกรสดและฟางหญ้า บดละเอียดโดยใช้ระบบอัดอากาศโดยแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองแรกมีกองหมักปุ๋ย 6 กอง โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) 20:1, 30:1 และ 40:1 อย่างละ 2 กอง (กองแรกมีการป้อนอากาศ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมต่อวันของของแข็งระเหยทั้งหมด 24 ชั่วโมง ต่อวัน และอีกกองไม่มีการป้อนอากาศ) ส่วนในชุดการทดลองที่สอง ให้ค่าเริ่มต้นของคาร์บอนต่อ ไนโตรเจน (C/N) 20:1 ของแต่ละกองเท่ากัน แต่มีการป้อนอากาศในเวลาที่แตกต่างกัน คือ 6 ชั่วโมง 12 ชั่วโมง และ 18 ชั่วโมงต่อวันตามลำดับ จากการทดลองพบว่ากองปุ๋ยที่มีการป้อนอากาศ 24 ชั่วโมงต่อวันและสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้น 20:1 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการทำปุ๋ยหมัก จากมูลสุกรและฟางหญ้าบดละเอียด

ชาติ เจริญไชยศรี และคณะ (2546) ศึกษาการหมักมูลฝอยตลาดสดกับเศษพืชในถัง ขนาด 100 ลิตรเพื่อหาอัตราส่วนมูลฝอยตลาดสดกับเศษพืชและปริมาณอากาศที่เหมาะสม แบ่ง ออกเป็น 3 ชุดการทดลอง อัตราการเติมอากาศแตกต่างกัน คือ 0.4 0.8 และ 1.2 ลูกบาศก์เมตรต่อ กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อวัน โดยแต่ละแบบกำหนดอัตรามูลฝอยต่อเศษพืชเท่ากับ 1:1, 2:1 และ 8:1 พบว่า มีการลดลงของปริมาณของแข็งระเหยเฉลี่ยร้อยละ 51.44, 50.65 และ 42.25 ที่อัตราการเติม อากาศเท่ากับ 0.4, 0.8 และ 1.2 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยต่อวัน ตามลำดับ โดยที่ อัตราส่วนมูลฝอยต่อเศษพืช 1:1, 2:1 และ 8:1 มีการลดลงของปริมาณของแข็งระเหยเฉลี่ยร้อยละ 51.44, 47.37 และ 48.12 ตามลำดับ โดยอัตราส่วน 1:1 และอัตราการเติมอากาศ 0.4 ลูกบาศก์เมตร ต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยต่อวัน มีการลดลงของของแข็งระเหยสูงสุดคือ ร้อยละ 70.49

Seo et al. (2004) ศึกษาผลกระทบของการเติมไส้เดือนปุ๋ยหมักจากเศษอาหาร เกาหลี โดยถังหมักแบ่งซึ่งเป็น 3 กรณี คือ 1. ปุ๋ยหมักที่นำกลับมาหมักอย่างเดียว 2. เศษอาหารกับ ปุ๋ยหมักที่นำกลับมาหมัก 3. เศษอาหารกับปุ๋ยหมักที่นำกลับมาหมัก และไส้เดือน เพื่อเปรียบเทียบ อัตราการย่อยสลาย โดยได้ออกแบบถังขนาด 700 x 310 x 950 มิลลิเมตร. ดังแสดงในรูปที่ 1-7 มี การป้อนอากาศในอัตรา 5 ลิตรต่อนาที่ เป็นเวลา 10 นาที ทุกๆ 1 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า อัตราการย่อยสลาย ปุ๋ยหมักที่นำกลับมาหมักอย่างเดียวกับ เศษอาหารกับปุ๋ยหมักที่นำกลับมา หมัก และไส้เดือนมีอัตราการย่อยสลาย ร้อยละ 35.8 และเศษอาหารกับปุ๋ยหมักที่นำกลับมาหมักมี อัตราการย่อยสลาย ร้อยละ 29.4 ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าการเติมไส้เดือนผสมในกองหมักไม่ได้มี ความสำคัญต่อการลดลงของน้ำหนักร้อยละและอัตราการย่อยสลายของเศษอาหาร

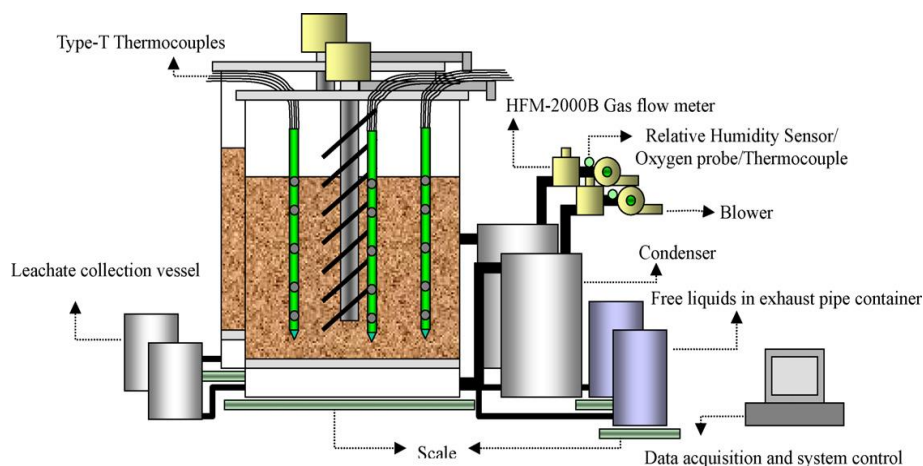


รูปที่ 1-7 ถังหมักปุ๋ยที่ใช้ในงานวิจัยของประเทศเกาหลี

ที่มา: Seo et al. (2004)

Zhu et al. (2004) ได้ทำการทดลองหมักมูลสุกร โดยทำการทดลองในถังหมักเปรียบเทียบกับวิธีการเติมอากาศโดยใช้เครื่องเติมอากาศ เติมอากาศแบบแพสซีฟ และเติมแบบธรรมชาติ โดยได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ พบว่า วิธีการเติมอากาศทั้ง 3 แบบสามารถทำให้งองหมักมีเสถียรภาพได้และอุณหภูมิภายในกองหมักสูงถึงช่วงเทอร์โมฟิลิก เป็นเวลานานพอที่จะฆ่าเชื้อโรคได้ ส่วนการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ ไนโตรเจนไนโตรเจน ไนไตรท์ไนโตรเจน แอมโมเนียไนโตรเจน ความเป็นกรด-ด่าง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ดัชนีการงอกของเมล็ด สารอินทรีย์คาร์บอน ในแต่ละกองมีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนอุณหภูมิภายในกองหมักมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงเทอร์โมฟิลิก แล้วลดลงมาจนถึงอุณหภูมิห้องเหมือนกัน แต่อุณหภูมิภายในกองหมักแต่ละกองมีค่าแตกต่างกันในแต่ละวัน

Ahn et al. (2006) ศึกษาสมดุลความร้อนในการหมักมูลของสัตว์ปีกกับขี้เลื่อยโดยใช้อัตราการไหลที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาความเหมาะสมระหว่างอัตราการป้อนของอากาศและการสูญเสียความร้อน โดยใช้ถังขนาด 900 l จำนวน 2 ใบ ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm เป็นตัวนำอากาศเข้ามา ดังแสดงในรูปที่ 1-8 ในการหมักมูลของสัตว์ปีกกับขี้เลื่อยโดยมีอัตราการป้อนอากาศ 2 รูปแบบ คือ อัตราการป้อนอากาศสูงในช่วง (0.39-0.52 l/min kg VS) และช่วงอัตราการป้อนอากาศต่ำในช่วง (0.07-0.2 l/min kg VS) ผลการศึกษาพบว่าอัตราการป้อนอากาศสูงมีน้ำระเหยไป 37-60 % ซึ่งมีการสูญเสียความร้อนมากกว่าอัตราการป้อนอากาศต่ำ



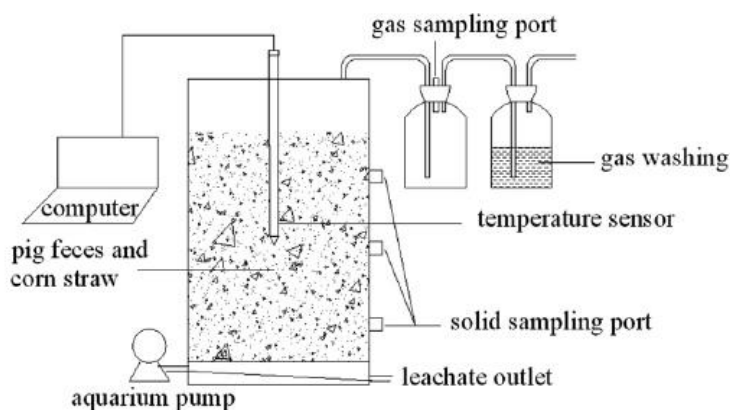
รูปที่ 1-8 ถังหมักปุ๋ยที่ใช้ศึกษาสมดุลของความร้อนของการหมักมูลของสัตว์ปีกกับขี้เลื่อย
ที่มา: Ahn et al. (2006)

Gao et al. (2009) ศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศที่ต่างกันในการหมักมูลไก่กับขี้เลื่อย โดยใช้ถังหมักมีปริมาตร 600 l และแบ่งเป็นกอง A กอง B และกอง C ซึ่งอัตราการไหลของการหมัก 0.3, 0.5, 0.7 l/min-kg OM อุณหภูมิที่สูงที่สุดในวันที่ 4, 3, 2 อยู่ที่ 65, 68, 60 °C, C/N ratio 17.1, 16.2, 18.3 เพื่อหาอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่สุดในการหมัก พบว่าอัตราการเติมอากาศที่ 0.5 l/min-kg เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทางการเกษตร

Bari and Koenig. (2012) ศึกษาผลกระทบของอัตราการป้อนของอากาศในกองหมักปุ๋ย โดยรูปแบบที่นำมาวิเคราะห์มีเงื่อนไขที่ต่างกันอย่างคือ สภาพแวดล้อม แบบร้อนและแบบเย็น โดยมีอัตราของการป้อนอากาศ 2 ช่วงได้แก่ อัตราการป้อนอากาศต่ำในช่วง (1.5-3.0 m³/m²-h) และอัตราการป้อนอากาศสูงในช่วง (4.5-6.0 m³/m²-h) ผลจากการศึกษารูปแบบของอัตราการป้อนอากาศ แบบอัตราการป้อนอากาศต่ำจะเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่เย็น และแบบอัตราการป้อนอากาศสูงจะเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ร้อน

Guo et al. (2012) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพและการได้ที่ของปุ๋ยหมักจากมูลสุกร และลำต้นข้าวโพด โดยใช้ถังหมักสแตนเลสมีขนาด 60 l สูง 0.6 m และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 0.36 m คุ้มด้วยสแตนเลส 2 ชั้นที่มีฉนวนกันความร้อน เพื่อลดการสูญเสียความร้อน มีการป้อนอากาศจากด้านล่างของถัง และระบายน้ำชะมูลฝอย ดังแสดงในรูปที่ 1-9 โดยมีอัตราเติมอากาศที่ 0.24, 0.48, 0.72 l/min-kg อัตราส่วน C/N 15, 18, 21 และความชื้น 65%, 70%, 75% เพื่อ

ต้องการค่าที่เหมาะสมสำหรับการหมักปุ๋ยจากมูลสุกร และลำต้นข้าวโพด ผลจากการศึกษาพบว่า อัตราการปล่อยอากาศที่เหมาะสมต่อเสถียรภาพและการได้ตัวของปุ๋ยหมักจากมูลสุกร และลำต้นข้าวโพด คือ 0.48 l/min-kg อัตราส่วน C/N คือ 18 และความชื้น 65 - 75%

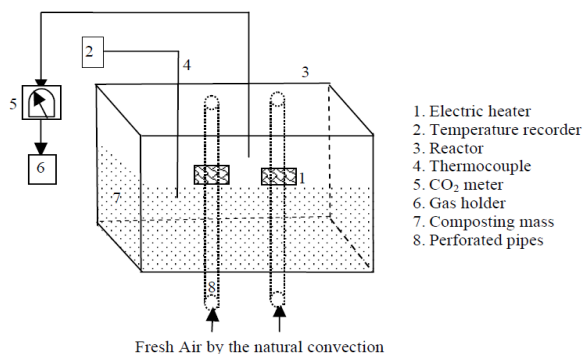


รูปที่ 1-9 ถังหมักปุ๋ยที่ใช้ศึกษาผลกระทบของอัตราการเติมอากาศ

ที่มา: Guo et al. (2012)

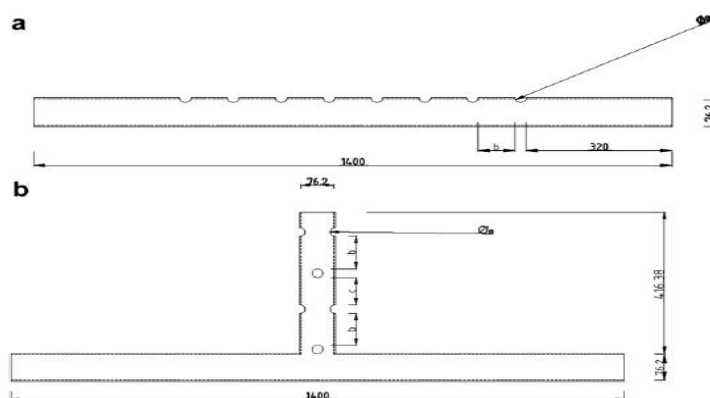
1.3.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ การวางแผนของท่อและการเจาะรูระบายอากาศ

Sylla et al. (2003) ศึกษาผลกระทบของจำนวนท่อในแนวตั้งต่ออัตราการหมัก ผลกระทบของจำนวนท่อและอัตราการย่อยสลาย ผลที่ได้คือ ถัง A , B , C มีอุณหภูมิสูงสุด คือ 54.9, 57.9 และ 65 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนสุดท้ายที่ 86, 90 และ 96 % มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการหมัก (k) 0.004, 0.006 และ 0.009 hr⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งจำนวนท่อที่เพิ่มมีผลอย่างมากต่อการเติมอากาศแบบธรรมชาติ โดยรูปแบบการฝังท่อแสดงดังรูปที่ 1-10 โดยทำการหมักของเสี่ยอินทรีย์ (อาหารสุนัข) ผสมกับเศษไม้และหัวเชื้อ โดยใช้ถังหมักทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า 3 ถัง สูง 300 mm ยาว 200 mm ฝังท่อตามแนวดิ่ง จำนวนท่อ 2 ท่อ 4 ท่อ และ 6 ท่อ ท่อมีระยะห่าง 20 cm , 10 cm และ 6 cm โดยให้เป็นถัง A , B , C ตามลำดับ เพื่ออธิบาย



รูปที่ 1-10 ถังหมักที่ใช้ศึกษาผลของจำนวนท่อในแนวตั้ง
ที่มา: Sylla et al. (2003)

Ogunwande and Osunade. (2011) ศึกษาการวางแนวท่อและขนาดของการเจาะรูท่ออากาศโดยทำการหมักมูลไก่ผสมขี้เลื่อย โดยทำองหมักเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูจำนวน 6 กอง ที่ฐานมีขนาด 1.2 m x 1.1 m สูง 0.72 m มีแนววางท่อในแนวนอน และแนวตั้ง โดยใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 mm ดังแสดงในรูปที่ 4 มีขนาดรูเจาะที่ท่อ 3 ขนาด คือ 15, 25 และ 35 mm. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลาย ผลที่ได้คือท่อในแนวนอน ขนาดรู 15 mm และ 35 mm มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมด และท่อในแนวนอน ขนาดรู 25 mm. สามารถรักษาความร้อนภายในกองได้ระยะนานที่สุด โดยรูปแบบขนาดท่อและรู ดังแสดงดังรูปที่ 1-11



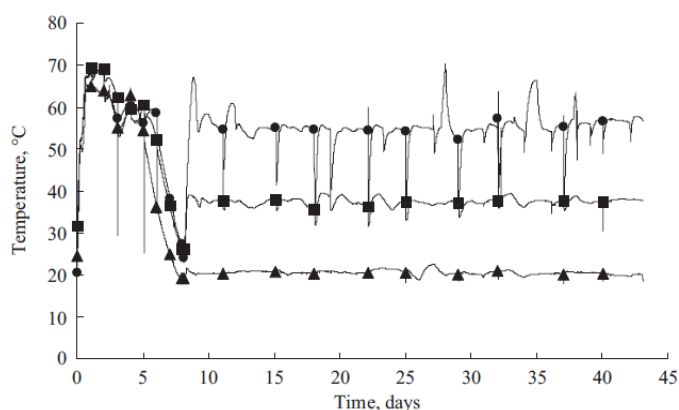
รูปที่ 1-11 ขนาดท่อและรูที่ใส่ในกองหมัก
ที่มา: Ogunwande and Osunade (2011)

1.3.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิในการหมัก

Tiquial et al. (1998) ศึกษาผลของอุณหภูมิในฤดูต่างๆของปุ๋ยหมักจากมูลสุกรของประเทศฮ่องกง โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลองคือ ฤดูร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 28 องศาเซลเซียส และฤดูหนาวมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 17 องศาเซลเซียส พบว่าชุดการทดลองที่ทำการทดลองในช่วงฤดูร้อนเกิดกระบวนการหมักดีกว่า เนื่องจากอุณหภูมิของฤดูร้อนมีความเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ดีกว่า ทำให้ชุดการทดลองที่หมักในช่วงฤดูร้อนดีกว่าฤดูหนาว

Miyatake et al. (2000) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่สูงของกองหมักปุ๋ยต่อกิจกรรมของเอนไซม์ และความหลากหลายของแบคทีเรียจากมูลสัตว์ โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 54, 60, 63, 66 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่ 54 องศาเซลเซียส กิจกรรมของแบคทีเรียทำงานได้ดีกว่าอุณหภูมิต่ำอื่น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 63 องศาเซลเซียส ความหลากหลายของแบคทีเรียจะลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 66 องศาเซลเซียส ความหลากหลายของแบคทีเรียจะกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้ง

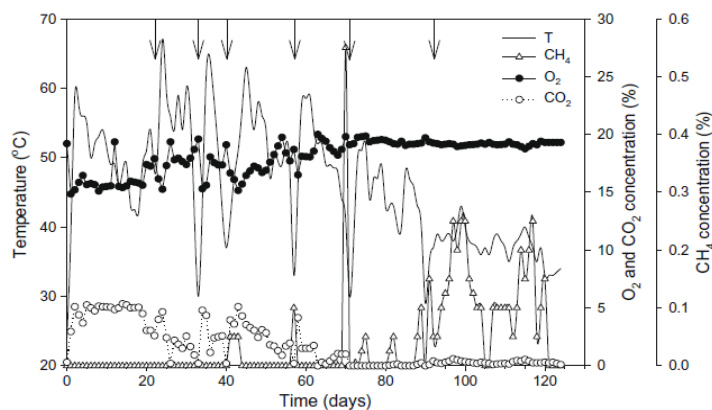
Saludes and Iwabuchi. (2007) ศึกษาการย่อยสลายของมูลของโคนมโดยการเปรียบเทียบจากการให้ความร้อนและรักษาความร้อนก่อนนำมูลของโคนมมาหมัก ที่ 20, 37 และ 55 องศาเซลเซียส เพื่อลำดับให้เห็นถึงความสำคัญของอุณหภูมิในช่วงของ thermophilic และ mesophilic ในการเพิ่มขอบเขตของการย่อยสลายสารอินทรีย์ จากการศึกษาพบว่าปุ๋ยหมักที่ 55 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่สูง ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณการใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียที่สูงและจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการหมัก ดังแสดงดังรูปที่ 1-12



รูปที่ 1-12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการหมัก

ที่มา: Saludes and Iwabuchi (2007)

Chroni and Kyriacou. (2009) ศึกษาการหมักปุ๋ยแบบกอง เพื่อเปรียบเทียบ อุณหภูมิแต่ละช่วงของกองหมัก จากการทดลองพบว่าจำนวนของแบคทีเรียมีมากที่สุดในช่วงของ thermophilic และหลังจากนั้นอุณหภูมิการหมักจะลดลงสู่สภาวะปกติหลังการการหมักสิ้นสุดโดยมี ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 1-13

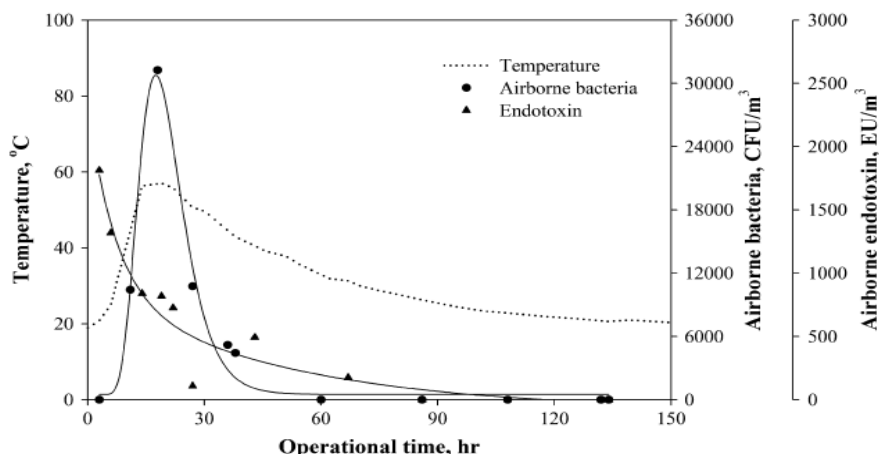


รูปที่ 1-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ CH_4 CO_2 O_2 อุณหภูมิและเวลาในการหมัก
ที่มา: Chroni and Kyriacou (2009)

1.3.4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ในการหมัก

วริดา คชนะนม (2552) ศึกษาการทำปุ๋ยหมักทะเลาเปลาปาเลมน้ำมัน พบว่า ในช่วงแรก แบคทีเรียจะเจริญได้ดีกว่า และย่อยสลายสารอาหารเป็นโมเลกุลสั้น ซึ่งตลอดเวลาของการหมักจะมีแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic bacteria) สูงกว่าแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิสูง (thermophilic bacteria) จากนั้นเชื้อราจะนำไปใช้ในการย่อยสลายเซลลูโลส ซึ่งเชื้อราจะลดลงในช่วงแรก เนื่องจากต้องปรับสภาพให้เข้ากับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีการเจริญเติบโตช้า จากนั้นปริมาณจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยจะพบเชื้อราที่ชอบอุณหภูมิสูง (thermophilic fungi) สูงกว่า เชื้อราที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง (mesophilic fungi) และแอกติโนมัยซิสมิแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย

Kang and Kim. (2013) ศึกษาการหมักปุ๋ยจากมูลสุกร เพื่อเปรียบเทียบปริมาณ จุลินทรีย์ของการหมัก โดยจำลองถังหมักมูลฝอยที่วางในแนวตั้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการซึ่งทำ ด้วยสแตนเลส จากการศึกษพบว่าจุลินทรีย์จะมีปริมาณมากที่สุดในช่วงอุณหภูมิของการหมักที่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1-14



รูปที่ 1-14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจุลินทรีย์ อุนทุมิและเวลาในการหมัก
ที่มา: Kang and Kim (2013)

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. หาค่าอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของการย่อยสลายในถังหมักแบบเติมอากาศ
2. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายภายในถังหมักแบบเติมอากาศ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถลดปริมาณมูลฝอยอินทรีย์ของชุมชนเทศบาลเมืองคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
2. สามารถลดปริมาณพื้นที่ในการกำจัดมูลฝอยอินทรีย์
3. สามารถผลิตวัสดุปรับปรุงดินหรือปุ๋ยหมัก เพื่อนำมาใช้กับหน่วยงานหรือชุมชนที่ต้องการใช้
4. สามารถนำรูปแบบของการหมักมาปรับใช้กับชุมชน บ้านเรือนหรือ หน่วยงานราชการที่มีปริมาณมูลฝอยอินทรีย์เกิดขึ้นสูง
5. สามารถสร้างรายได้หากมีการรวมกลุ่มในการผลิตปุ๋ยหมักจากมูลฝอยอินทรีย์
6. สามารถจัดสร้างเป็นศูนย์การเรียนรู้ของชุมชน เพื่อแนะนำ และให้ความรู้แก่ประชาชนในการ แก้ไขปัญหาของปริมาณมูลฝอยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นสูง เพื่อ ลด คัดแยกและนำกลับมาใช้ประโยชน์

1.6 ขอบเขตการวิจัย

1. เลือกใช้มูลฝอยอินทรีย์ประเภทเปลือกผลไม้ 8 ชนิด ประกอบด้วย เปลือกมะม่วง เปลือกแตงโม เปลือกกล้วย เปลือกสัปปะรด เปลือกมะละกอ เปลือกส้มโอ เปลือกส้ม และเปลือกแก้วมังกร ซึ่งเป็นผลไม้ที่เกิดขึ้นทุกฤดูกาล หรือจากร้านขายผลไม้ทั่วไปของเทศบาลเมืองคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

2. เลือกใช้ไบโม่แห้งเป็นวัสดุหมักร่วมเก็บจากพื้นที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ เนื่องจากบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์มีต้นไบโม่เยอะสามารถนำไบโม่แห้งที่ร่วงตามพื้นมาใช้ในการหมักได้ เพื่อลดปริมาณไบโม่ที่ต้องจัดเก็บและนำไปกำจัดที่หลุมฝังกลบ

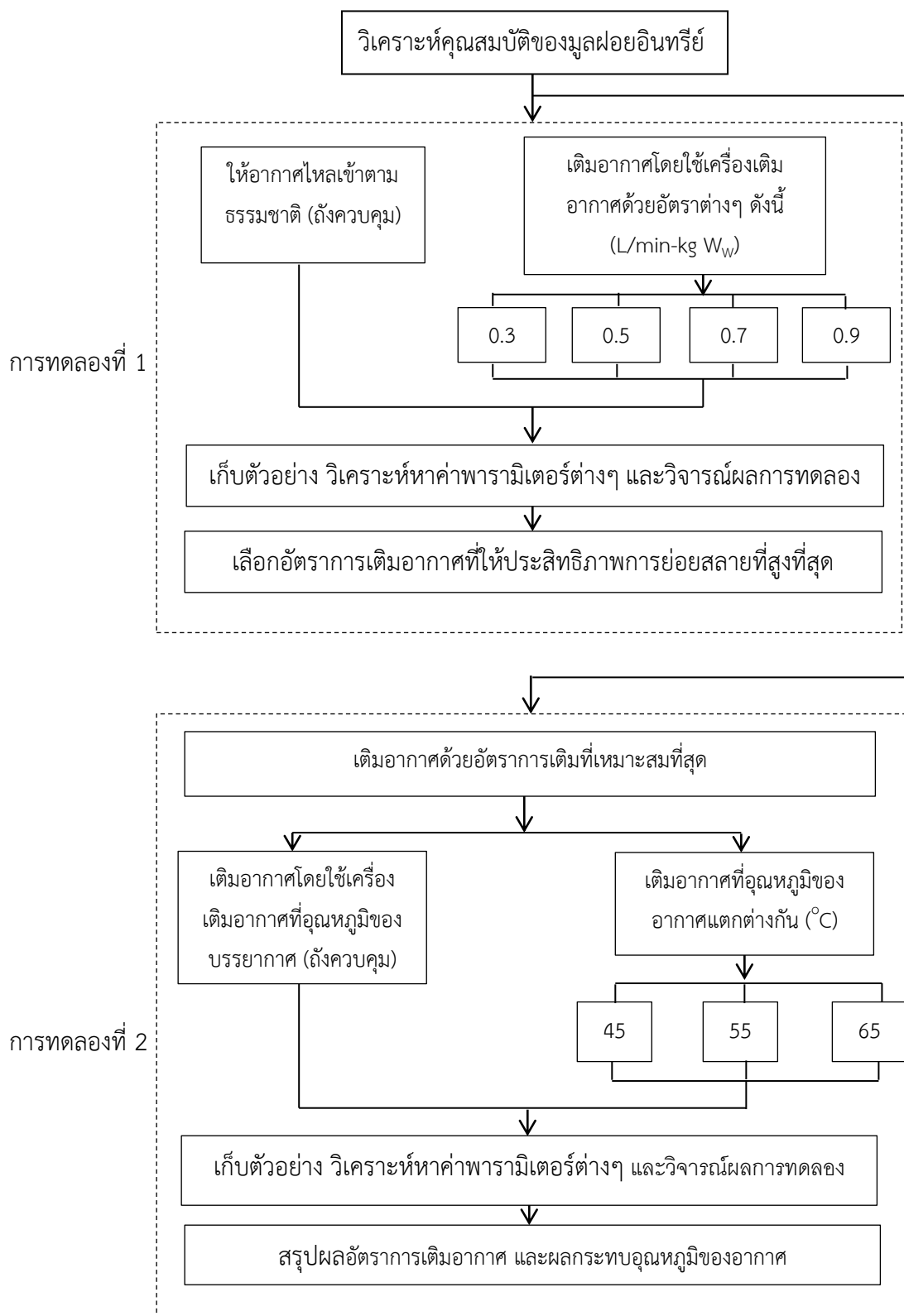
3. แต่ละการทดลองทำการทดลอง 2 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย แต่ทำการทดลองไม่พร้อมกัน เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลอง

4. อัตราการเติมอากาศคิดจากปริมาณมูลฝอยทั้งหมดโดยน้ำหนักเปียกเพื่อให้สะดวกกับการนำไปใช้จริงของชุมชน

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษหาอัตราการเติมอากาศและผลกระทบอุณหภูมิของอากาศที่เติมเข้าถังหมักขนาดเล็ก แบ่งได้เป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1 หาค่าอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ และการทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบอุณหภูมิของอากาศที่เติมเข้าด้วยอัตราที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 ต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายภายในถังหมักแบบเติมอากาศ เพื่อหารูปแบบการป้อนอากาศเข้าถังหมักขนาดเล็กที่ให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายที่เหมาะสมที่สุด โดยแผนการดำเนินงานทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 แผนดำเนินงานทั้งหมด

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

2.1.1 วัสดุ

2.1.1.1. มูลฝอยอินทรีย์

วัสดุหมักที่นำมาใช้สำหรับการทดลองที่ 1 และ 2 เป็นมูลฝอยอินทรีย์ประเภทเปลือกผลไม้จากเทศบาลเมืองคอหงส์ ซึ่งประกอบด้วย เปลือกมะม่วง เปลือกแตงโม เปลือกกล้วย เปลือกสัปปะรด เปลือกมะละกอ เปลือกส้มโอ เปลือกส้ม และเปลือกแก้วมังกร ซึ่งเป็นผลไม้ที่เกิดขึ้นทุกฤดูกาล โดยทำการย่อยหรือลดขนาดให้เล็กกว่า 5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2-2 เพื่อให้เกิดการถ่ายเทของอากาศที่เพียงพอและง่ายต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์และเพิ่มพื้นที่ผิว (ภาวนา ลิกขนานนท์ 2544)



รูปที่ 2-2 ลักษณะของเปลือกผลไม้ที่ย่อยขนาดแล้ว

2.1.1.2. ไข่ไม้แห้ง

วัสดุหมักร่วมหรือไข่ไม้แห้งเป็นวัสดุหมักที่ช่วยปรับค่าความชื้นของวัสดุหมักหลักให้มีค่าความชื้นลดลง วัสดุหมักร่วมที่นำมาใช้สำหรับการทดลองที่ 1 และ 2 รวบรวมมาจากบริเวณโดยรอบคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยทำการย่อยให้มีขนาดประมาณ 1 นิ้ว เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศให้แก่วัสดุหมักและเพื่อให้เกิดการย่อยสลายที่ง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-3 โดยใช้เครื่องย่อยวัสดุหมักในการย่อย ดังแสดงในรูป 2-5 (ค)



รูปที่ 2-3 ลักษณะของใบไม้แห้งที่ย่อยขนาดแล้ว

2.1.1.3. วัสดุหมักผสม

วัสดุหมักผสมประกอบด้วยมูลฝอยอินทรีย์ประเภทเปลือกผลไม้ที่ย่อยขนาดแล้ว ปริมาณ 8 กิโลกรัมประกอบด้วย เปลือกมะม่วง กล้วย แดงโม สับปะรด มะละกอ ส้มโอ ส้ม และแก้วมังกร ดังแสดงในตาราง 2-1 ผสมกับใบไม้แห้งที่ย่อยขนาดแล้วปริมาณ 4 กิโลกรัม (อัตราส่วน 2 ต่อ 1) (มติ เหมพัฒนา 2553) เพื่อควบคุมค่าความชื้น

ตารางที่ 2-1 น้ำหนักของวัสดุหมักที่ใช้สำหรับการหมัก

ตัวอย่าง	น้ำหนักมูลฝอยอินทรีย์ จากเทศบาล (kg)	สัดส่วนน้ำหนัก %	น้ำหนักที่ใช้หมักจริง (kg)
1. เปลือกมะม่วง	22.7	18.78	1.5
2. เปลือกกล้วย	16.5	13.65	1.1
3. เปลือกแดงโม	19.7	16.29	1.3
4. เปลือกสับปะรด	20.5	16.96	1.4
5. เปลือกมะละกอ	16.0	13.23	1.1
6. เปลือกส้มโอ	8.9	7.36	0.6
7. เปลือกส้ม	11.4	9.43	0.8
8. เปลือกแก้วมังกร	5.2	4.30	0.3
รวม	120.9	100	8.1

2.1.2 อุปกรณ์การทดลอง

1. ถังหมักทำจากพลาสติกโพลีโพรพิลีน ชนิด HDPE ดังแสดงในรูปที่ 2-4 ขนาด 60 ลิตร สูง 60 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 37 เซนติเมตร ภายในถังติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ และแผ่นสแตนเลสเจาะรูรองมูลฝอย โดยมีท่ออากาศเข้าด้านหน้าถัง และ ด้านล่างของถังมี วาล์วเปิดปิดไว้ระบายน้ำชะและมีปีกเกอร์ไว้เก็บรวบรวมน้ำชะ



รูปที่ 2-4 ถังหมักสำหรับการทดลอง

2. เครื่องเติมอากาศ ยี่ห้อ PUMA รุ่น PP – 32P
3. วาล์วควบคุมอัตราการไหล ยี่ห้อ Flowtech Z – 7002 สามารถควบคุมอัตราการป้อนได้ในช่วง 0-25 L/min
4. เครื่องย่อยวัสดุหมัก
5. เครื่องฮีตเตอร์ และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ
6. ตู้ควบคุมฮีตเตอร์
7. คอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูล



(ก) เครื่องเติมอากาศ



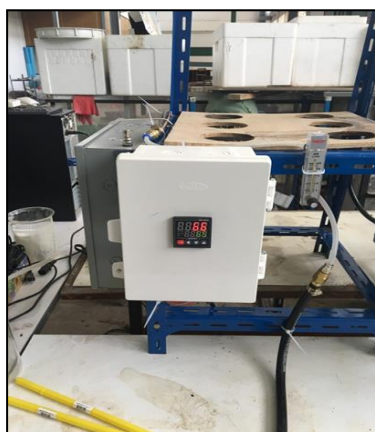
(ข) วาล์วควบคุมอัตราการไหล



(ค) เครื่องย่อยวัสดุหมัก



(ง) เครื่องฮีตเตอร์ และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



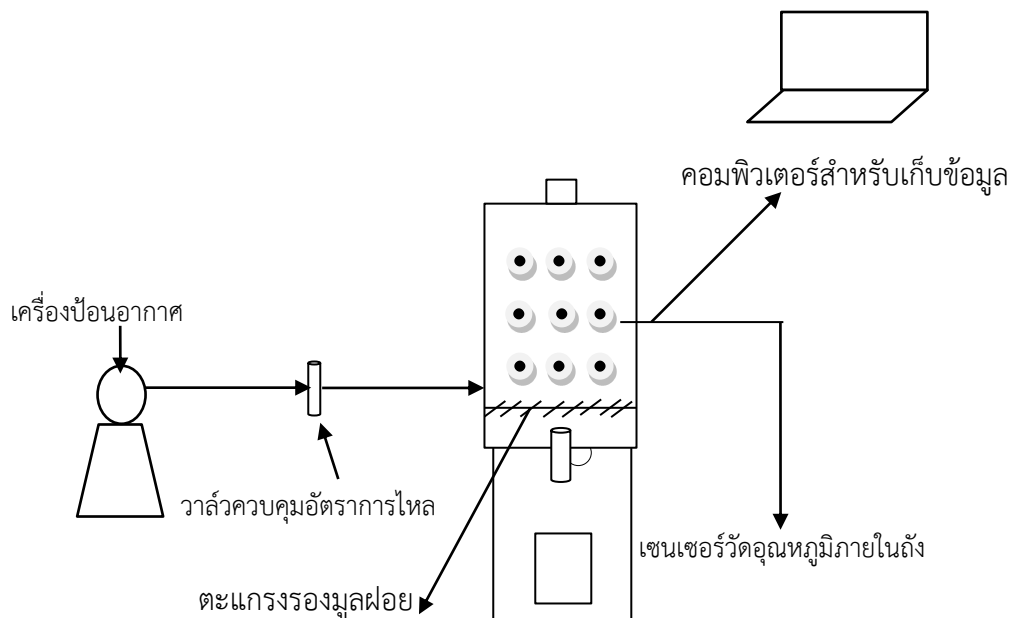
(จ) ตู้ควบคุมฮีตเตอร์



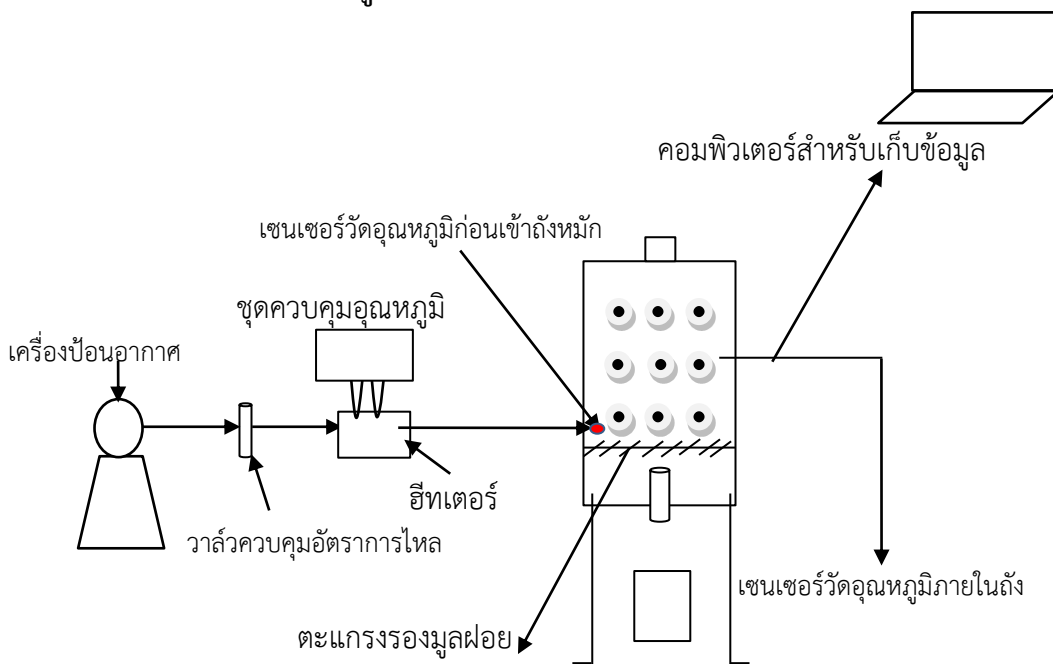
(ฉ) คอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูล

รูปที่ 2-5 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

โดยระบบถังหมักของการทดลองที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2-6 และ 2-7 ตามลำดับ



รูปที่ 2-6 แผนภาพการทดลองที่ 1



รูปที่ 2-7 แผนภาพการทดลองที่ 2

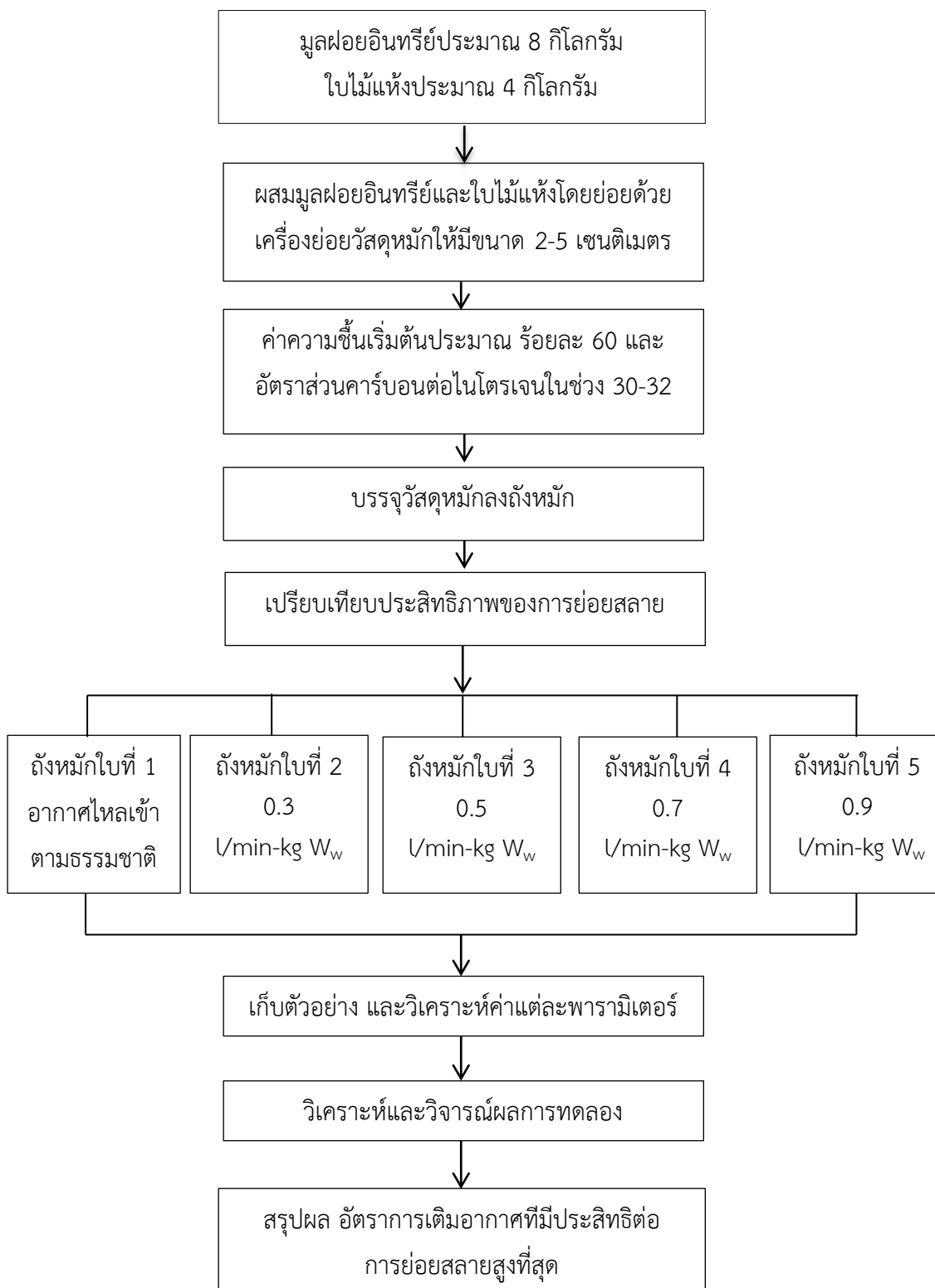
2.2 วิธีการทดลอง

แผนการดำเนินการทดลองที่ 1 เพื่อหาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของการย่อยสลายในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ ดังแสดงในรูป 2-8 โดยทำการเติมวัสดุหมักที่ผสมแล้ว 12 กิโลกรัม ลงในถังหมักเพียงครั้งเดียวและไม่มีการกลับกองตลอดระยะเวลาการหมักจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ ระหว่างการดำเนินการหมักได้ป้อนอากาศเข้าถังหมักในอัตราที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-2 โดยเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงแรก จากนั้นเติมอากาศนาน 10 นาที ทุกๆ ต้นชั่วโมง เนื่องจากการเติมอากาศลักษณะนี้สามารถทำให้การลดลงของวัสดุหมักมีค่าสูง (Seo et al. 2004)

ตารางที่ 2-2 อัตราการเติมอากาศเข้าถังหมักในการทดลองที่ 1

ถังหมัก	อัตราการเติมอากาศเข้าในถังหมัก (L/min-kg)
A ₀	0
A _{0.3}	0.3
A _{0.5}	0.5
A _{0.7}	0.7
A _{0.9}	0.9

หมายเหตุ ถัง A₀ คือ หมักแบบ Passive ให้อากาศไหลเข้าตามธรรมชาติหรือเป็นถังควบคุม



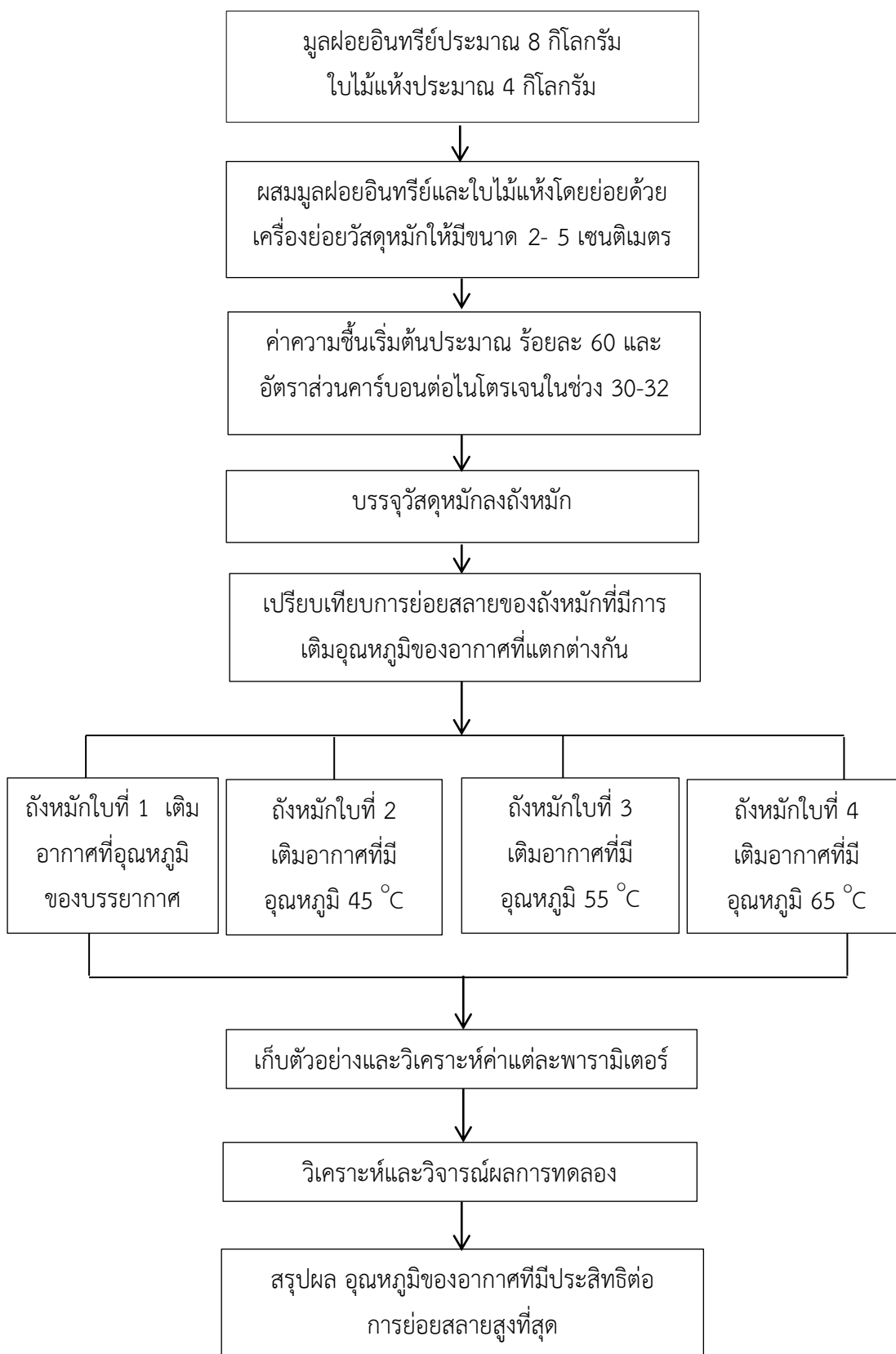
รูปที่ 2-8 แผนการดำเนินการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศที่เติมเข้าถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายภายในถังหมัก โดยเติมวัสดุหมักเหมือนกับการทดลองที่ 1 และไม่มีการกลับกอง ระหว่างการดำเนินการหมักได้ป้อนอากาศที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-3 และแผนการดำเนินการทดลองที่ 2 แสดงในรูป 2-9

ตารางที่ 2-3 อุณหภูมิของอากาศที่เติมเข้าภายในถังหมักของการทดลองที่ 2

ถังหมัก	อุณหภูมิของอากาศที่เข้าในถังหมัก (°C)
T_A	อุณหภูมิของบรรยากาศ
T_{45}	45
T_{55}	55
T_{65}	65

หมายเหตุ ถัง T_A เติมอากาศที่อุณหภูมิของบรรยากาศ หรือเป็นถังควบคุม



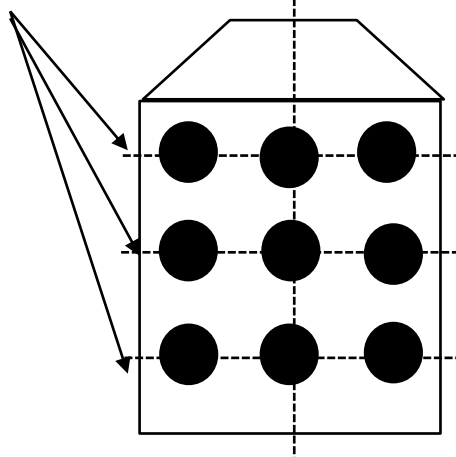
รูปที่ 2-9 แผนผังการทดลองที่ 2

2.3 การเก็บตัวอย่างวัสดุหมัก

1. เมื่อผสมเปลือกผลไม้และใบไม้แห้งแล้วเก็บตัวอย่างวัสดุหมักก่อนบรรจุลงในถังหมักโดยการสุ่ม 5 จุด จุดละประมาณ 40 กรัม รวมกันประมาณ 200 กรัม แล้วนำมาผสมให้เข้ากัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความชื้น จำนวนของแบคทีเรีย ความเป็นกรด-ด่าง อินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน ทั้งหมด โปแทสเซียมทั้งหมด และฟอสฟอรัสทั้งหมด

2. ระหว่างการหมักเก็บตัวอย่างมูลฝอยในถังหมัก 9 จุด ในระดับบน กลาง และล่าง ของถังหมัก ดังแสดงในรูปที่ 2-10 ระดับละ 3 จุด คือ ซ้าย กลาง และขวา จุดละประมาณ 5-10 กรัม รวมกันประมาณ 40-70 กรัม เพื่อนำไปวิเคราะห์ ค่าความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง อินทรีย์คาร์บอน และไนโตรเจนทั้งหมด โดยเก็บตัวอย่างทุกวัน จนกว่าอุณหภูมิของกองหมักกลับสู่อุณหภูมิบรรยากาศ จึงเปลี่ยนการเก็บตัวอย่างเป็นทุกๆ 4 วัน จนอุณหภูมิคงที่ โดยการเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หา จำนวนของแบคทีเรียจะเก็บตัวอย่างเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุหมักอยู่ในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงสุด หรือเก็บตัวอย่างเพื่อไปวิเคราะห์ในวันที่ 1, 2 และ 3 ของการทดลอง

ระดับและตำแหน่งของวัสดุหมัก



ระดับและตำแหน่งของการสุ่มเก็บตัวอย่าง

(มุมมองด้านข้าง)

รูปที่ 2-10 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างวัสดุหมัก

2. หลังจากการหมักเสร็จสิ้นทำการสุ่มเก็บตัวอย่างมูลฝอย โดยเก็บตัวอย่างโดยการสุ่ม 5 จุด จุดละประมาณ 40 กรัม ให้ได้ประมาณ 200 กรัม เพื่อนำไปวิเคราะห์ ค่าความชื้น

ความเป็นกรด-ด่าง จำนวนของแบคทีเรีย อินทรีย์คาร์บอน โปแทสเซียมทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า และดัชนีการงอกของเมล็ด

2.4 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวัสดุหมัก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางด้านเคมี กายภาพ และชีวภาพ ของตัวอย่างมูลฝอย ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2-4 และความถี่ของการเก็บตัวอย่างดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-4 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
1. ความเป็นกรด-ด่าง	pH meter	คู่มือวิเคราะห์ดินและพืช
2. คาร์บอนทั้งหมด (%)	Walkley & Black Method	(จำเป็น ทองอ่อน 2547)
3. ไนโตรเจนทั้งหมด (%)	Kjeldahl Method	
4. อัตราส่วน คาร์บอนต่อไนโตรเจน	การคำนวณ	-
5. ค่าการนำไฟฟ้า (dS m^{-1})	Electrical Conductivity meter	คู่มือวิเคราะห์ดินและพืช (จำเป็น ทองอ่อน 2547)
6. ธาตุอาหาร ฟอสฟอรัสทั้งหมด (%) โปแทสเซียม (%)	AAS Spectrophotometric Method	*AOAC, 1998 ส่งวิเคราะห์ที่ Central Lab คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
7. ความชื้น (%)	Gravimetric method	เทคนิควิเคราะห์น้ำ น้ำเสีย และมูลฝอย (อุดมผล พีชนิไพบุลย์ และ โรสนา กาชอ 2551)
8. จำนวนแบคทีเรีย	Standard plate count method	**BAM, 2001 ส่งวิเคราะห์ที่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
9. ดัชนีการงอก	Germination Index method	สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ 2548
10. สีและกลิ่น	ลักษณะทางกายภาพของวัสดุหมัก	Jimenez and Garcia 1989

หมายเหตุ * AOAC ย่อมาจาก Association of Official Analytical Chemists

** BAM ย่อมาจาก Bacteriological Analytical Manual

ตารางที่ 2-5 รายละเอียดของการเก็บตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	ความถี่			จำนวนตัวอย่างต่อครั้งที่วิเคราะห์
	ก่อนเข้าถึงหมัก	ระหว่างการหมัก	สิ้นสุดการหมัก	
1. ความเป็นกรด-ด่าง*	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง	2
2. คาร์บอนทั้งหมด* (%)	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง	2
3. ไนโตรเจนทั้งหมด* (%)	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง	2
4. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน*	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง	2
5. ค่าการนำไฟฟ้า (dS m ⁻¹)	1 ครั้ง	-	1 ครั้ง	2
6. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (%)	1 ครั้ง	-	1 ครั้ง	2
7. โปแทสเซียม (%)	1 ครั้ง	-	1 ครั้ง	2
8. ปริมาณออกซิเจน (%)	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง	2
9. อุณหภูมิ (°C)	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง	2
10. การลดลงของมวล (%)	1 ครั้ง	-	1 ครั้ง	2
11. ความชื้น* (%)	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง	2
12. จำนวนแบคทีเรีย**	1 ครั้ง	-	1 ครั้ง	2
13. ดัชนีการงอก	-	-	1 ครั้ง	2
14. สีและกลิ่น	-	-	1 ครั้ง	

หมายเหตุ * เมื่ออุณหภูมิของวัสดุหมักเข้าใกล้อุณหภูมิห้อง จึงเปลี่ยนการเก็บตัวอย่างเป็นทุกๆ 4 วัน

** เก็บตัวอย่างในช่วงที่อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วง 2 - 3 วันแรก

โดยค่าดัชนีการงอกของเมล็ด คำนวณจากร้อยละของจำนวนเมล็ดที่งอก และความยาวรากรวมของเมล็ดที่งอก ในน้ำตัวอย่าง ต่อ ร้อยละของจำนวนเมล็ดที่งอก และความยาวรากรวมของเมล็ดที่งอก ในน้ำกลั่น ดังแสดงในสมการที่ 3 โดยร้อยละของความงอก คำนวณได้จากจำนวนเมล็ดที่งอกทั้งหมด ต่อ จำนวนเมล็ดทั้งหมดในงาน ดังแสดงในสมการที่ 4 และวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ข.

$$\text{ค่าดัชนีการงอกของเมล็ดพืช (\%)} = \frac{(\% \text{ความงอก} \times \text{ความยาวราก} \times 100) \text{ น้ำตัวอย่าง}}{(\% \text{ความงอก} \times \text{ความยาวราก}) \text{ น้ำกลั่น}} \quad (3)$$

$$\% \text{ ความงอก} = \frac{(\text{จำนวนเมล็ดที่งอก} \times 100)}{\text{จำนวนเมล็ดทั้งหมด}} \quad (4)$$

2.5 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพและประสิทธิภาพของวัสดุหมัก

ในการศึกษาอัตราการเติมอากาศและอุณหภูมิของอากาศที่เข้าในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ ได้ใช้หลักเกณฑ์ในการประเมินคุณภาพของวัสดุหมักหลังจากสิ้นสุดกระบวนการหมัก ดังแสดงในตารางที่ 2-6 โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ ค่าความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง ไนโตรเจนทั้งหมด อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ฟอสฟอรัสทั้งหมด โพแทสเซียมทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า สีและกลิ่น และดัชนีการงอกของเมล็ด ตามลำดับ และหากวัสดุหมักผ่านเกณฑ์ทั้งหมด จะเปรียบเทียบจากการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม SPSS และใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis Of Varaince : ANOVA) ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลตัวอย่าง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบทางเดียว (One Way ANOVA) ซึ่งกำหนดค่าระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติ (Level of statistical significance, α) มีค่าเท่ากับ 0.05 และส่วนของประสิทธิภาพของวัสดุหมักจะประเมินจากร้อยละการลดลงของของมวล หากค่าการลดลงสูงแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายเกิดขึ้นสูง

ตารางที่ 2-6 เกณฑ์ที่ใช้สำหรับประเมินคุณภาพปุ๋ยหมัก

พารามิเตอร์	เกณฑ์กำหนด	หน่วย	เอกสารอ้างอิง
1. ความชื้น	< 30	%	กรมวิชาการเกษตร (2561)
2. คาร์บอนทั้งหมด	< 20	%	กรมวิชาการเกษตร (2561)
3. ไนโตรเจนทั้งหมด	> 1	%	กรมวิชาการเกษตร (2561)
4. อัตราส่วน คาร์บอนต่อไนโตรเจน	< 20 : 1	-	กรมวิชาการเกษตร (2561)
5. ความเป็นกรด-ด่าง	5.5-8.5		กรมวิชาการเกษตร (2561)
6. ฟอสฟอรัสทั้งหมด	> 0.5	%	กรมวิชาการเกษตร (2561)
7. โพแทสเซียม	> 0.5	%	กรมวิชาการเกษตร (2561)
8. ค่าการนำไฟฟ้า	< 10	dS/m	กรมวิชาการเกษตร (2561)
9. สีและกลิ่น	ลักษณะทางกายภาพของวัสดุหมัก		Jimenez and Garcia 1989
10. ดัชนีการงอก	> 80	%	กรมวิชาการเกษตร (2561)

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

บทนี้นำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลกระทบของอัตราการเติมอากาศและอุณหภูมิของอากาศที่เติมเข้าสู่ต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายภายในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ

3.1 การทดลองที่ 1 หาอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ

3.1.1 คุณสมบัติของวัสดุหมักเบื้องต้นของการทดลองที่ 1

วัสดุหมักที่ใช้สำหรับการทดลองที่ 1 ประกอบด้วยเปลือกผลไม้ มะม่วง กกล้วย แดงโม สับปะรด มะละกอ ส้มโอ ส้ม และแก้วมังกร ซึ่งเป็นผลไม้ที่พบได้ทุกฤดูกาลและเปลือกผลไม้พบได้ทั่วไปตามตลาดทั่วไป รวมทั้งตลาดศรีตรัง เทศบาลเมืองคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นตลาดที่อยู่ใกล้สถานศึกษา และแหล่งชุมชนจึงมีปริมาณมูลฝอยอินทรีย์รวมทั้งเปลือกผลไม้ที่เกิดขึ้นสูง โดยมีคุณสมบัติดังแสดงใน ตารางที่ 3-1 พบว่า เปลือกแดงโม มะละกอ และ แก้วมังกร มีค่าความชื้นสูงมากกว่าร้อยละ 50-60 ส่วนเปลือก มะม่วง สับปะรด ส้มโอ และ ส้ม มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงกว่า ร้อยละ 30-32

ตารางที่ 3-1 น้ำหนักของเปลือกผลไม้และคุณสมบัติเบื้องต้น

เปลือกผลไม้	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	พารามิเตอร์			
		ความชื้น (ร้อยละ)	อินทรีย์คาร์บอน (ร้อยละ)	ไนโตรเจน (ร้อยละ)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
มะม่วง	1.50	51.59 ± 3.44	35.28 ± 0.48	0.71 ± 0.01	49.21 ± 1.67
กล้วย	1.09	64.73 ± 1.78	25.76 ± 5.69	0.94 ± 0.00	31.69 ± 6.06
แดงโม	1.30	77.95 ± 1.15	29.52 ± 0.34	2.10 ± 0.00	13.94 ± 0.13
สับปะรด	1.36	69.16 ± 0.65	27.87 ± 2.73	0.81 ± 0.01	36.79 ± 3.69
มะละกอ	1.06	77.15 ± 0.71	34.62 ± 2.35	1.49 ± 0.00	24.35 ± 0.89
ส้มโอ	0.59	47.05 ± 2.45	37.92 ± 2.27	1.00 ± 0.01	36.31 ± 1.73
ส้ม	0.75	52.35 ± 1.60	55.69 ± 0.63	1.26 ± 0.00	43.33 ± 0.05
แก้วมังกร	0.34	77.27 ± 0.38	26.62 ± 2.99	1.43 ± 0.00	20.09 ± 2.09

และเมื่อผสมเปลือกผลไม้ทุกชนิดเข้าด้วยกัน พบว่า มีค่าความชื้นรวมร้อยละ 66.0 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.20 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 30.0 ดังแสดงในตารางที่ 3-2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความชื้นสูงกว่าค่าเริ่มต้นที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 50-60 (Hamoda et al. 1998) จึงได้ทำการผสมกับใบไม้แห้งตามคุณสมบัติในตารางที่ 3-2 เพื่อลดค่าความชื้น และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศให้แก่วัสดุหมัก

ตารางที่ 3-2 ลักษณะของคุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมัก

วัสดุหมัก	พารามิเตอร์				
	ความชื้น (ร้อยละ)	ความเป็นกรด-ด่าง	อินทรีย์คาร์บอน (ร้อยละ)	ไนโตรเจน (ร้อยละ)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
เปลือกผลไม้ผสม	66.0 ± 0.64	4.20 ± 0.03	34.9 ± 2.57	1.16 ± 0.0	30.0 ± 2.21
ใบไม้แห้ง	4.38 ± 0.15	5.70 ± 0.11	30.5 ± 0.79	0.75 ± 0.01	40.8 ± 0.29

โดยคุณสมบัติของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบหลังจากผสมเปลือกผลไม้กับใบไม้แห้งแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 3-3 ซึ่งพบว่า ค่าความชื้นเริ่มต้นไม่เกินร้อยละ 60 ส่วนค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นมีค่าระหว่าง 30-33 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 25-50 (Tchobanoglous et al. 1993) แต่ค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นอยู่ในช่วง 4.00-4.33 ซึ่งไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมระหว่าง 5.5-9.0 (Rynk 1992) อย่างไรก็ตามไม่ได้ต่ำกว่า 3 ซึ่งจุลินทรีย์สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ (Miller 1992) จึงไม่ได้มีการปรับค่าเริ่มต้น

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสมแล้วของการทดลองที่ 1

ถังหมัก	พารามิเตอร์		
	ความชื้น (ร้อยละ)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ความเป็นกรด-ด่าง
A ₀	55.22 ± 1.51	30.71 ± 0.77	4.03 ± 0.06
A _{0.3}	54.42 ± 1.24	32.20 ± 0.03	4.27 ± 0.05
A _{0.5}	54.82 ± 2.31	31.72 ± 1.55	4.21 ± 0.08
A _{0.7}	52.98 ± 1.64	32.13 ± 0.45	4.29 ± 0.04
A _{0.9}	53.73 ± 0.41	30.70 ± 0.88	4.33 ± 0.12

3.1.2 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆของการทดลองที่ 1

เมื่อทำการหมักมูลฝอยอินทรีย์โดยเปรียบเทียบผลของอัตราการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการย่อยสลาย ระหว่าง

ถึงที่ 1 A_0 หมักแบบ Passive ให้อากาศเข้าตามธรรมชาติ (ถังควบคุม)

ถึงที่ 2 $A_{0.3}$ เติมอากาศที่อัตรา 0.3 L/min

ถึงที่ 3 $A_{0.5}$ เติมอากาศที่อัตรา 0.5 L/min

ถึงที่ 4 $A_{0.7}$ เติมอากาศที่อัตรา 0.7 L/min

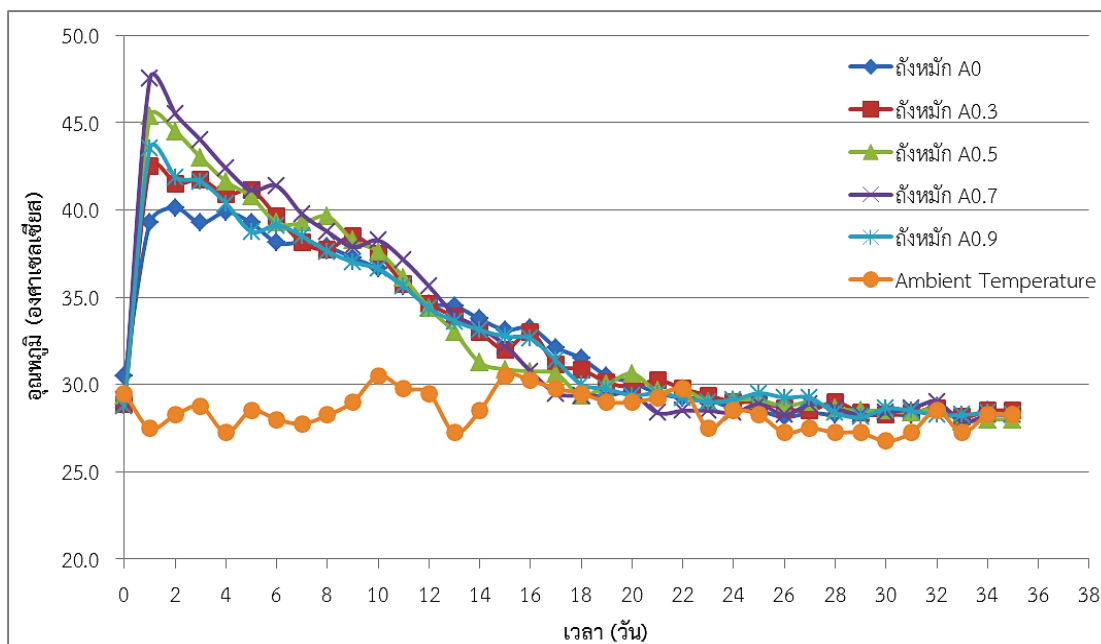
ถึงที่ 5 $A_{0.9}$ เติมอากาศที่อัตรา 0.9 L/min

พบว่าตั้งแต่เริ่มต้นจนอุณหภูมิภายในถังลดลงกลับมาสู่อุณหภูมิห้องหรือแสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักได้สิ้นสุดลง (Polprasert 1996 อ้างโดย สุชินันท์ เกียรติภักดิ์ 2555) มีการเปลี่ยนแปลงของแต่ละพารามิเตอร์ภายในถังหมักดังต่อไปนี้

3.1.2.1 อุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหมัก ดังแสดงในรูปที่ 3-1 พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_0 , $A_{0.3}$, $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าใกล้เคียงกันคือ 30.5°C , 28.9°C , 29.4°C , 29.1°C และ 28.8°C ตามลำดับ จากนั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงสุดในช่วงวันที่ 2-3 ของการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากช่วงเริ่มต้นของการหมักมีปริมาณสารอาหารที่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ที่ใช้สำหรับการเจริญเติบโต (สุชินันท์ เกียรติภักดิ์ 2555) และอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละถัง คือ 40.1°C , 42.5°C , 45.4°C , 47.5°C และ 43.5°C ตามลำดับ หรือ ถังหมัก $A_{0.7}$ มีอุณหภูมิของวัสดุหมักสูงที่สุด หลังจากนั้นอุณหภูมิภายในถังจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนคงที่ โดยมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องตั้งแต่วันที่ 17 ของการทดลอง ซึ่งอุณหภูมิของวัสดุหมักในถังทั้ง 5 ใบเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักอยู่ที่ประมาณ 28.0°C

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของวัสดุหมัก พบว่า อุณหภูมิสูงสุดของวัสดุหมักสัมพันธ์กับอัตราการเติมอากาศ คือเมื่ออัตราการเติมอากาศสูงขึ้นทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังหมักมากขึ้น ส่งผลให้จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศเพิ่มจำนวนมากขึ้น และมีการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงขึ้น ตามลำดับ ส่งผลให้อุณหภูมิของวัสดุหมักสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าอุณหภูมิสูงสุดของ ถังหมัก $A_{0.9}$ กลับต่ำกว่า ถังหมัก $A_{0.7}$ แสดงให้เห็นว่าอัตราการเติมอากาศที่สูงเกินไปจะมีผลทำให้อุณหภูมิของวัสดุหมักลดลง เนื่องจากจะพาความร้อนที่สะสมภายในกองหมักออกไปด้วย (ธนาวุฒิ หนูทองแก้ว 2555)



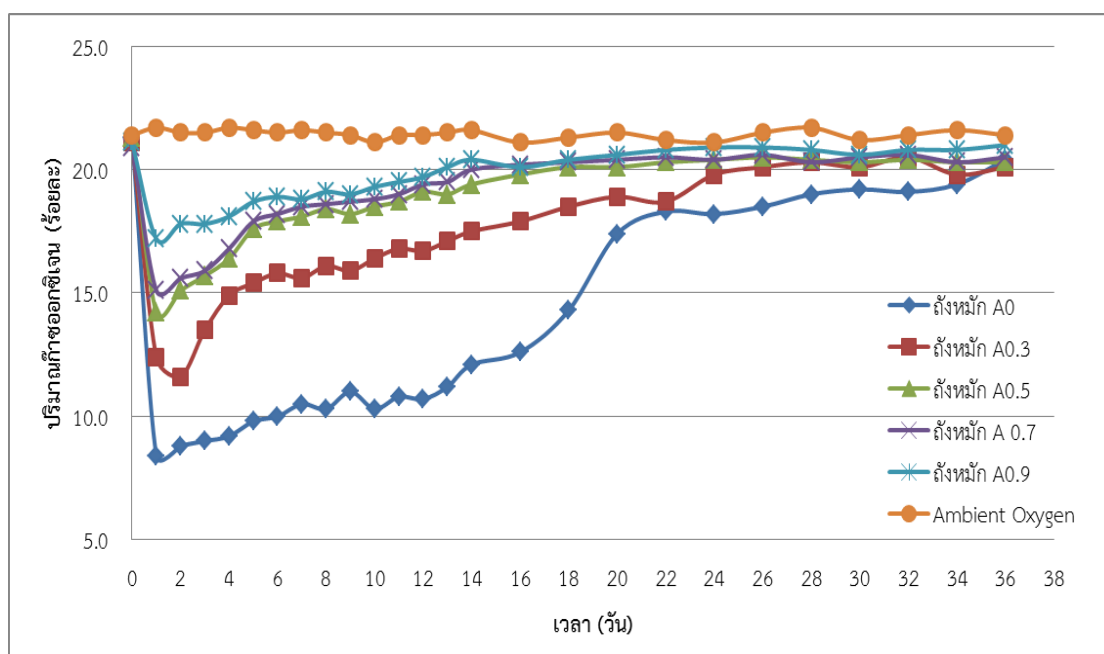
รูปที่ 3-1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหมัก

อย่างไรก็ตามพบว่า อุณหภูมิของหมักของทุกถังสูงไม่ถึง 55 - 65 °C ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถทำลายเชื้อโรคได้ (Polprasert 1989) อาจเนื่องจากถึงหมักมีขนาดเล็ก ซึ่งโดยส่วนใหญ่พบว่าถึงหมักขนาดเล็กมักมีอุณหภูมิของวัสดุหมักประมาณ 40 - 45 °C ในขณะที่ถึงหมักขนาดใหญ่มีอุณหภูมิของวัสดุหมักประมาณ 55 - 60 °C เนื่องจากมีค่าการสูญเสียความร้อนสูงกว่าถึงขนาดใหญ่ (Cornell 2016 อ้างโดย ตะวัน ลั่นทองพูล 2560) และนอกจากนี้อาจเนื่องจากถึงหมักสำหรับการทดลองไม่มีฉนวนหุ้มภายนอกถัง จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากขึ้นได้

3.1.2.2 ปริมาณก๊าซออกซิเจน

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถึงหมัก ดังแสดงในรูปที่ 3-2 พบว่า ปริมาณออกซิเจนเริ่มต้นของถึงหมัก A₀, A_{0.3}, A_{0.5}, A_{0.7} และ A_{0.9} มีค่าใกล้เคียงกันคือ 21.3, 21.1, 20.9, 21.1 และ 21.4 ตามลำดับ (โดยทั่วไปอากาศมีออกซิเจนร้อยละ 21 ในสภาวะปกติ) หลังจากนั้นปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถึงหมักลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 2 - 3 ของการทดลอง จนเหลือร้อยละ 8.4, 11.4, 14.2, 15.1 และ 17.2 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เหลือภายในถึงหมักสัมพันธ์กับอุณหภูมิของวัสดุหมัก คือเมื่อปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เหลือภายในถึงหมักลดลงในช่วงแรกสูง อุณหภูมิของวัสดุหมักเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์ใช้งานก๊าซออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงในช่วงแรก นอกจากนี้ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เหลือภายในถึงหมักยังสัมพันธ์กับอัตราการเติมอากาศ คือเมื่ออัตราการเติมอากาศที่เข้าไปในถังมีปริมาณสูงทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เหลือภายในถังมีปริมาณสูงกว่าอัตราการเติมอากาศที่ต่ำกว่า หลังจากนั้นปริมาณออกซิเจนภายในถึงหมักมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ใช้ปริมาณออกซิเจนน้อยลง การย่อยสลายลดลงสัมพันธ์กับอุณหภูมิของวัสดุหมักภายในถังหมักที่เริ่มลดลง จนกระทั่งปริมาณออกซิเจนภายในถังหมักกลับมาใกล้เคียงกับร้อยละ 21 แสดงว่าการย่อยสลายได้สิ้นสุดลง ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่กลับสู่ร้อยละ 21 สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่กลับสู่อุณหภูมิภายนอก (พุนศักดิ์ จันทร์จำปี 2541)



รูปที่ 3-2 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนภายในถัง

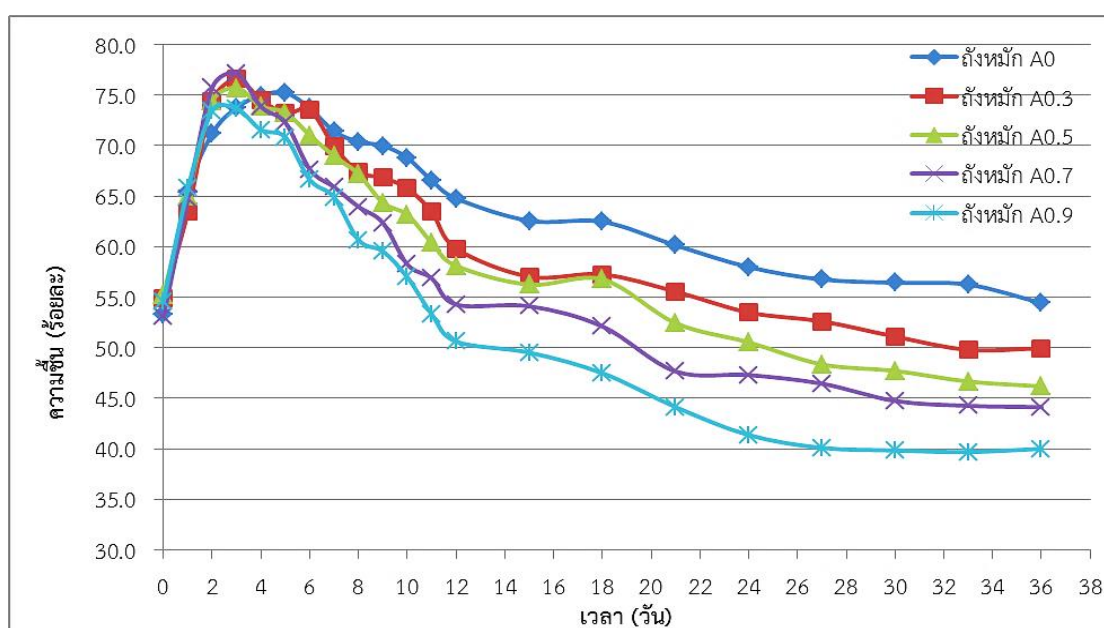
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังหมัก พบว่า ถังหมัก A_0 ซึ่งให้อากาศเข้าตามธรรมชาติ (ถังควบคุม) มีปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังหมักในช่วงวันที่ 2-3 ของการทดลองต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 8.4 โดยปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เพียงพอต่อการใช้งานของจุลินทรีย์ คือ ร้อยละ 10 (Polprasert 1996) แสดงให้เห็นว่า ถังหมัก A_0 มีปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานของจุลินทรีย์ ในขณะที่ถังใบบ่ออื่นๆ มีปริมาณก๊าซออกซิเจนมากกว่าร้อยละ 10 ตลอดระยะเวลาการหมัก

3.1.2.3 ความชื้น

การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในถังหมัก ดังแสดงในรูป 3-3 พบว่า ค่าความชื้นเริ่มต้นของถังหมัก A_0 , $A_{0.3}$, $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าใกล้เคียงกันคือร้อยละ 53.3, 54.9, 55.2, 53.0 และ 54.6 ตามลำดับ จากนั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในช่วงของวันที่ 2 - 4 ของการทดลองเป็น 75.2, 76.6,

75.7, 77.2 และ 73.4 ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิภายในกองที่สูงขึ้น เนื่องจากความร้อนจากการย่อยสลายของวัสดุหมักภายในกองส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการหมัก ซึ่งความร้อนภายในกองที่สูงทำให้เกิดการระเหยที่สูง และเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำตกลงกลับสู่ภายในถัง (นิติ เหมพัฒน์ 2553) ทำให้ความชื้นภายในกองสูงในช่วงที่เกิดอุณหภูมิสูง และเนื่องจากทางออกของอากาศมีขนาดเล็ก ทำให้การระบายของอากาศหรือความชื้นเกิดขึ้นน้อย จากนั้นค่าความชื้นมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการหมัก

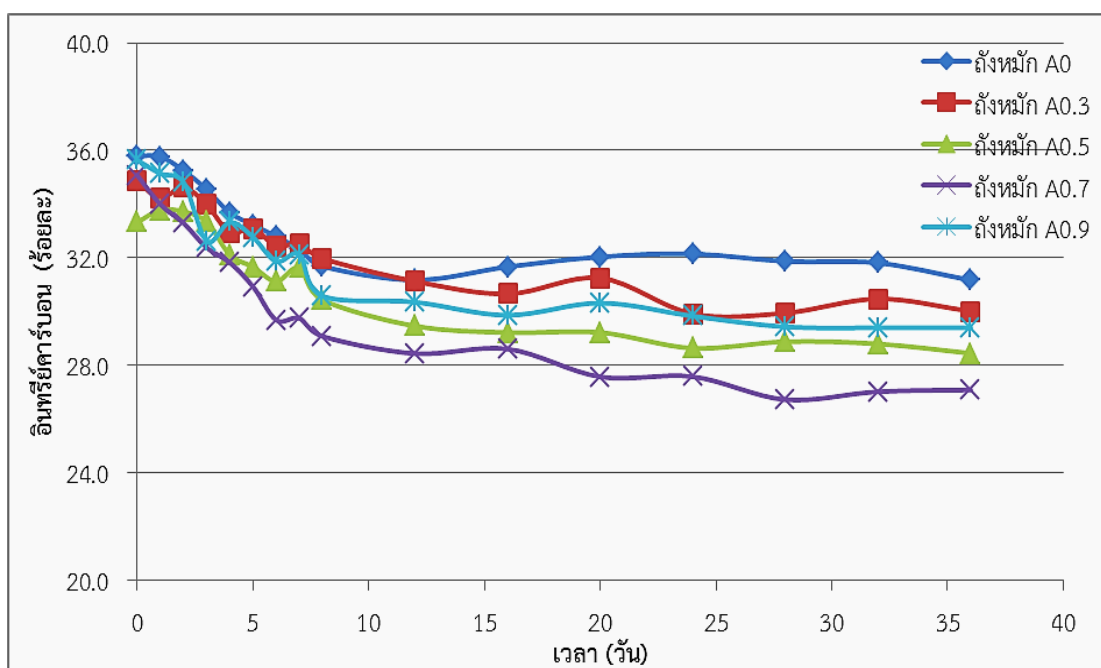
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นภายในถังหมัก พบว่า ค่าความชื้นหลังสิ้นสุดกระบวนการหมักของถังหมัก A₀, A_{0.3}, A_{0.5}, A_{0.7} และ A_{0.9} มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 54.4, 50.0, 46.2, 44.1 และ 40.0 ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับอัตราการเติมของอากาศ เนื่องจากถังหมักที่มีอัตราการเติมอากาศที่สูงจะช่วยระบายความชื้นได้สูงกว่าถังหมักที่เติมอากาศน้อยกว่า นอกจากนี้สัมพันธ์กับอัตราการเติมของอากาศแล้ว ยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิภายในกองเนื่องจากความชื้นที่เกิดขึ้นจะช่วยระเหยน้ำภายในกอง แต่ค่าที่ได้ยังสูงเกินมาตรฐานตามพระราชบัญญัติปุ๋ยที่กำหนดไว้ไม่เกิน ร้อยละ 30 ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากความร้อนหรืออุณหภูมิภายในถังหมักสูงไม่ถึง 55 °C ส่งผลให้การระเหยของน้ำลดลง ความชื้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักยังมีค่าสูง (ทัศนีย์ แก้วมรกฏ 2557) และเนื่องจากทางออกของอากาศมีขนาดเล็กจึงทำให้ความชื้นระบายออกจากถังได้ช้า ดังนั้นจึงได้เปิดฝาถังหมักทิ้งไว้ 20 วัน เพื่อลดค่าความชื้นภายในถังพบว่า ค่าความชื้นลดลงทุกถังซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 36.2, 32.6, 29.7, 26.8 และ 25.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3-3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุหมัก

3.1.2.4 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 3-4 พบว่า ค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเริ่มต้นของถังหมัก A_0 , $A_{0.3}$, $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าเท่ากับร้อยละ 35.8, 34.8, 33.3, 35.1 และ 35.6 ตามลำดับ และลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 3 - 8 ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ เจนวิทย์ กรอบทอง (2544), อานุกาภาพ แก้วทอง (2541), อนุวัฒน์ เฟื่องจันทร์ (2546) โดยสาเหตุที่อินทรีย์คาร์บอนลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์จนกระทั่งได้โมเลกุลขนาดเล็กเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานเพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่และดำรงชีพ แล้วจึงปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น (สิริวรรณ นิสสัยกล้า 2553) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของถังหมัก A_0 , $A_{0.3}$, $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าเท่ากับร้อยละ 31.2, 30.0, 28.4, 27.1 และ 29.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3-4 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของวัสดุหมัก

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 3-4 พบว่า ถังหมัก $A_{0.7}$ มีการลดลงของอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดมากที่สุด คือ ร้อยละ 22.8 รองลงมาคือ ถังหมัก $A_{0.9}$, $A_{0.5}$, $A_{0.3}$ และ A_0 คือ ร้อยละ 17.5, 14.5, 13.9 และ 12.9 ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการเติมอากาศและอุณหภูมิสูงสุดของการหมัก แสดงให้เห็นว่าอัตราการเติมของอากาศที่สูงขึ้นทำให้เกิดอุณหภูมิภายในกองสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายปริมาณอินทรีย์คาร์บอนได้สูงขึ้น แต่อัตราการเติมอากาศของถัง $A_{0.9}$ สูงเกินไปส่งผลให้อุณหภูมิภายในกองน้อยกว่า ถัง $A_{0.7}$ จึงทำให้

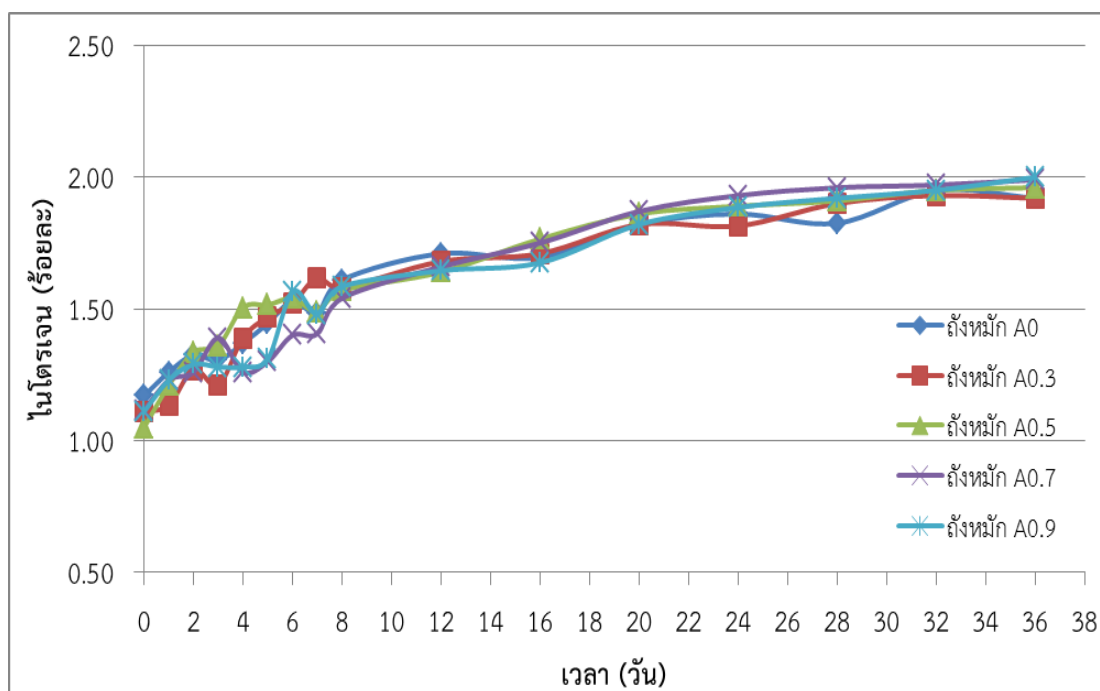
ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดย่อยสลายได้น้อยกว่า ซึ่งถึงหมัก $A_{0.7}$ เกิดการย่อยสลายสูงสุดทำให้อุณหภูมิภายในกองเกิดขึ้นสูงสุดส่งผลให้ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนภายในถึงลดลงสูงสุด

ตารางที่ 3-4 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

ถึงหมัก	ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (%)		ร้อยละการลดลง	อุณหภูมิสูงสุด (°C)
	เริ่มต้นกระบวนการหมัก	สิ้นสุดกระบวนการหมัก		
A_0	35.8 ± 1.55	31.2 ± 0.65	12.9 ± 1.94	40.1 ± 0.18
$A_{0.3}$	34.3 ± 0.78	30.0 ± 0.42	13.9 ± 3.11	42.5 ± 1.41
$A_{0.5}$	33.3 ± 1.59	28.4 ± 0.23	14.5 ± 4.76	45.4 ± 0.53
$A_{0.7}$	35.1 ± 1.23	27.1 ± 1.10	22.8 ± 0.41	47.5 ± 0.35
$A_{0.9}$	35.6 ± 0.79	29.4 ± 0.43	17.5 ± 0.63	43.5 ± 0.71

3.1.2.5 ปริมาณไนโตรเจน

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณร้อยละไนโตรเจนของวัสดุหมักภายในถึงหมัก ดังแสดงในรูปที่ 3-5 พบว่า ค่าร้อยละของไนโตรเจนเริ่มต้นของถึงหมัก A_0 , $A_{0.3}$, $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ เท่ากับ 1.17, 1.11, 1.05, 1.12 และ 1.11 ตามลำดับ จากนั้นปริมาณร้อยละของไนโตรเจนของวัสดุหมักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ เจนวิทย์ กรอบทอง (2544), อานูภาพ แก้วกอง (2541), อนุวัฒน์ เฟื่องจันทร์ (2546) จนสิ้นสุดกระบวนการหมัก มีค่าร้อยละของไนโตรเจน เท่ากับ 1.92, 1.93, 1.95, 1.97 และ 1.99 ตามลำดับ



รูปที่ 3-5 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของวัสดุหมัก

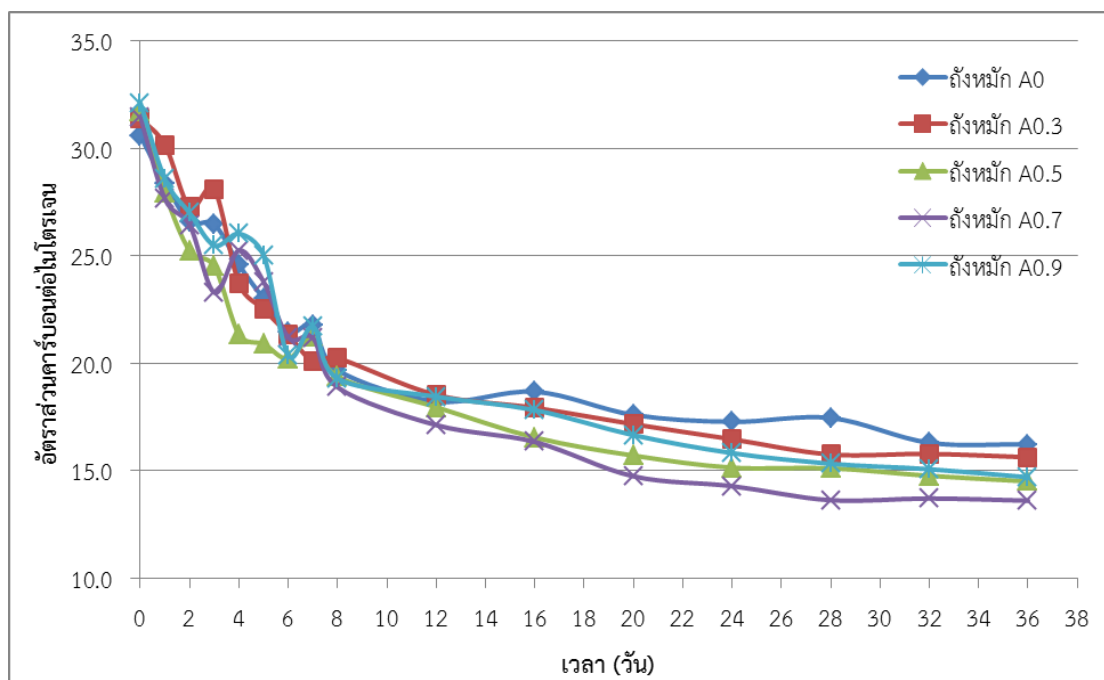
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของวัสดุหมัก พบว่า ปริมาณไนโตรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับอัตราการเติมอากาศ คือเมื่ออัตราการเติมอากาศสูงขึ้นทำให้ปริมาณไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราการเติมอากาศสูงขึ้น ปริมาณก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้การสูญเสียไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียที่ระเหยสู่อากาศลดลง (ธีระพงษ์ และคณะ 2547) ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนเกิดการสูญเสียคาร์บอนไปในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้น้ำหนักในกองปุ๋ยหมักลดลง ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนต่อมวลน้ำหนักเพิ่มขึ้น (Yamada and Kawase 2005) ซึ่งค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักของทั้ง 5 ถัง ดังแสดงในตารางที่ 3-5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3-5 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

ถังหมัก	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%)		ร้อยละการเพิ่มขึ้น (%)
	เริ่มต้นกระบวนการหมัก	สิ้นสุดกระบวนการหมัก	
A ₀	1.17 ± 0.01	1.92 ± 0.03	39.1 ± 1.19
A _{0.3}	1.11 ± 0.01	1.93 ± 0.03	42.2 ± 0.31
A _{0.5}	1.05 ± 0.00	1.95 ± 0.02	46.2 ± 0.00
A _{0.7}	1.12 ± 0.02	1.97 ± 0.03	43.1 ± 1.07
A _{0.9}	1.11 ± 0.01	1.99 ± 0.03	44.2 ± 0.08

3.1.2.6 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 3-6 พบว่า ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นของถังหมัก A₀, A_{0.3}, A_{0.5}, A_{0.7} และ A_{0.9} มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 30.6, 31.4, 31.7, 31.5 และ 32.1 ตามลำดับ ซึ่งค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 1-8 ของการทดลอง และสอดคล้องกับการศึกษาของ เจนวิทย์ กรอบทอง (2544), อานุกาพ แก้วทอง (2541), อนุวัฒน์ เฟื่องจันทร์ (2546) โดยสาเหตุที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ย่อยสลายอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนลดลง และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนของวัสดุหมักมีค่าลดลงจนมีค่าคงที่ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 16.2, 15.6, 14.5, 13.8 และ 15.1 ตามลำดับ โดยค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าลดลงจากการเริ่มต้นการหมัก



รูปที่ 3-6 อัตราส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์ของวัสดุหมัก

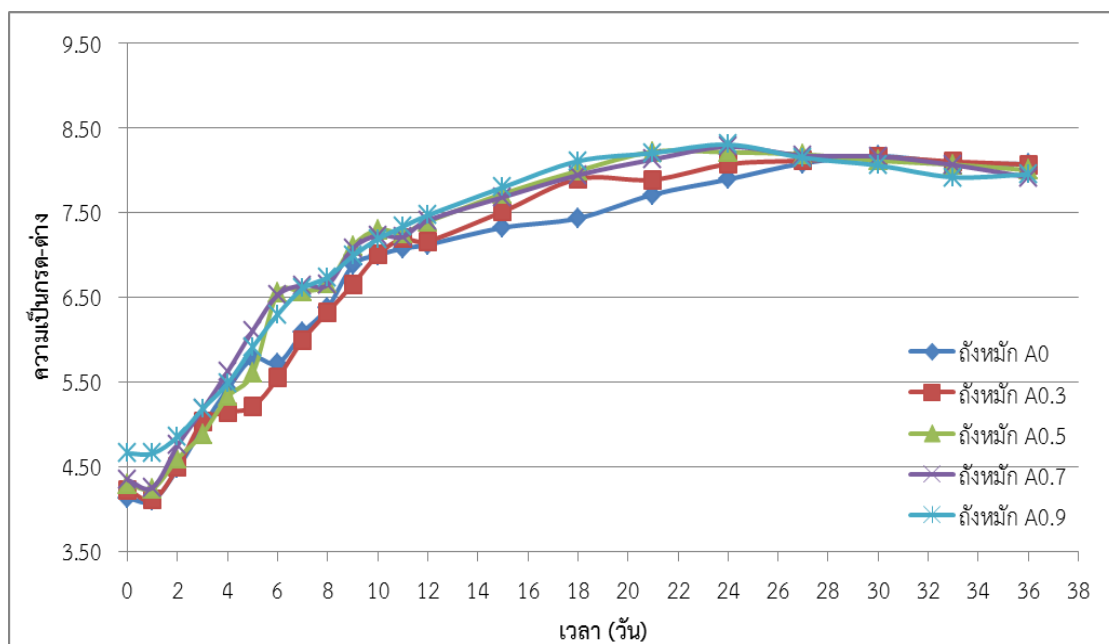
เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์ในตารางที่ 3-6 พบว่า ถึงหมัก $A_{0.7}$ มีร้อยละการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด คือ ร้อยละ 56.7 รองลงมาคือ ถึงหมัก $A_{0.5}$, $A_{0.9}$, $A_{0.3}$ และ A_0 คือ 54.2, 54.2, 50.2 และ 46.9 ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการเติมอากาศและอุณหภูมิสูงสุดของการหมัก คือเมื่อ อัตราการเติมอากาศที่สูงขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในถึงหมักสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดได้สูงและปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อัตราการเติมอากาศของถึงหมัก $A_{0.9}$ สูงเกินไปส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดของการหมักน้อยกว่า ถึงหมัก $A_{0.7}$ และ $A_{0.5}$ จึงทำให้ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดย่อยสลายได้น้อยกว่า ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์ของถึงหมัก $A_{0.9}$ จึงน้อยกว่าถึงหมัก ถึงหมัก $A_{0.7}$ และ $A_{0.5}$

ตารางที่ 3-6 ปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

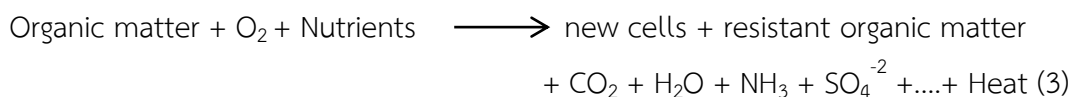
ถังหมัก	ปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน			อุณหภูมิสูงสุด (°C)
	เริ่มต้นกระบวนการหมัก	สิ้นสุดกระบวนการหมัก	ร้อยละการลดลง	
A ₀	30.6 ± 0.95	16.2 ± 0.46	46.9 ± 0.15	40.1 ± 0.18
A _{0.3}	31.4 ± 1.10	15.6 ± 0.10	50.2 ± 2.07	42.5 ± 1.41
A _{0.5}	31.7 ± 1.52	14.5 ± 0.12	54.3 ± 2.55	45.4 ± 0.53
A _{0.7}	31.5 ± 0.51	13.8 ± 0.55	56.2 ± 1.05	47.5 ± 0.35
A _{0.9}	32.1 ± 1.12	15.1 ± 0.42	53.0 ± 0.28	43.5 ± 0.71

3.1.2.7 ความเป็นกรด-ด่าง

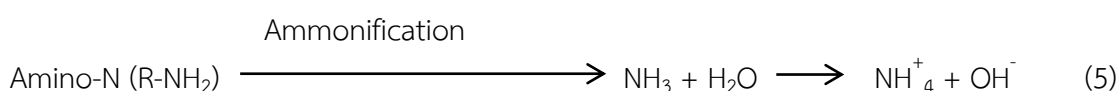
การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง ของวัสดุหมักภายในถัง ดังแสดงในรูปที่ 3-7 พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ของถังหมัก A₀, A_{0.3}, A_{0.5}, A_{0.7} และถังหมัก A_{0.9} มีค่าเท่ากับ 4.13, 4.23, 4.30, 4.34 และ 4.66 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ สรพรรณ อมตธรรม (2546) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น อยู่ในช่วง 3.4-4.8 และไม่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น เนื่องจากไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียที่เกิดจากกระบวนการหมักสามารถปรับค่าความเป็นกรด-ด่างได้ ดังสมการที่ 3



รูปที่ 3-7 การเปลี่ยนแปลงค่าความความเป็นกรด-ด่างของวัสดุหมัก



จากปฏิกิริยาการย่อยสลาย ประกอบด้วย สารอินทรีย์ และ สารอาหาร ประกอบด้วย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โดยจุลินทรีย์ใช้ก๊าซออกซิเจนในกระบวนการหายใจ และย่อยสลายสารอินทรีย์ และธาตุอาหาร จนได้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แอมโมเนีย ความร้อน ซึ่งจากผลการทดลองค่าความความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกเกิดจากกระบวนการ Mineralization ซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนไนโตรเจนอินทรีย์ให้เป็นไนโตรเจนอนินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ *heterotroph* จะผลิตเอนไซม์ *proteinases* และ *peptidases* ซึ่งทำหน้าที่ย่อยโปรตีน และ เอนไซม์ *chitanases* และ *kinases* ทำหน้าที่ย่อยส่วนที่ไม่ใช่โปรตีนให้เป็นแอมโมเนียและ NH_4^+ ซึ่งมีสภาวะเป็นด่าง ดังสมการที่ 4 และ 5 (Pierzynski et al . 2000 อ้างโดย นิสากร ทัดแก้ว 2555)



จากสมการที่ 3 จะเห็นได้ว่ามี CO_2 เกิดขึ้นด้วย ซึ่งมีผลให้ความเป็นกรดต่างต่ำ ค่าแอมโมเนียที่เกิดขึ้นมีปริมาณที่สูงกว่าจึงทำให้ความเป็นกรดเพิ่มขึ้น แต่ ammonium ions (NH_4^+) ที่เกิดขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3-4 และ 3-5 ที่ร้อยละการลดลงของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนน้อยกว่าร้อยละการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ต่าง โดยในช่วงแรกค่าความเป็นกรด-ต่างของวัสดุหมักมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วสัมพันธ์กับอัตราการเติมอากาศ คือเมื่ออัตราการเติมอากาศสูงความเป็นกรด-ต่างมีค่าสูงขึ้น ทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนมีค่าสูง ส่งผลให้จำนวนจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศเพิ่มสูงขึ้น โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ก๊าซออกซิเจนในการเจริญเติบโตและการย่อยสลาย เมื่อมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ของวัสดุหมักค่าความเป็นกรด-ต่าง จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ จากนั้นค่าความเป็นกรด-ต่าง มีค่าใกล้เคียงกันหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จนในช่วงวันที่ 27 ของการทดลอง ค่าความเป็นกรด-ต่างมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งค่าความเป็นกรด-ต่าง หลังสิ้นสุดกระบวนการหมักของถังหมัก A_0 , $A_{0.3}$, $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าเท่ากับ 8.07, 8.07, 8.00, 7.92 และ 7.95 ตามลำดับ

3.1.2.8 ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม

ค่าปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดเมื่อเริ่มต้นการหมัก ดังแสดงในตารางที่ 3-7 พบว่า ค่าร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดเริ่มต้นของถังหมัก A_0 , $A_{0.3}$, $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 0.24, 0.19, 0.22, 0.19 และ 0.22 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น จนสิ้นสุดกระบวนการหมัก เท่ากับ ร้อยละ 0.31, 0.30, 0.31, 0.31 และ 0.29 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนลดลงเพราะการสูญเสียคาร์บอนในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสทั้งหมดต่อน้ำหนักของปุ๋ยหมักมีค่าสูงขึ้น (พูนศักดิ์ จันทรจำปี 2541) โดยปริมาณฟอสฟอรัสไม่มีการสูญเสียในรูปของการระเหยแต่จะสูญเสียโดยการชะละลายเพียงเล็กน้อย เนื่องจากฟอสฟอรัสจะตกตะกอนเป็นของแข็งที่ละลายน้ำได้ยากทำให้ปริมาณของฟอสฟอรัสมีค่าเพิ่มขึ้น (ทัศนีย์ แก้วมรกฏ 2557)

ค่าปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดเมื่อเริ่มต้นการหมัก ดังแสดงในตารางที่ 3-7 ค่าร้อยละของปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดเริ่มต้นของถังหมัก A_0 , $A_{0.3}$, $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าใกล้เคียงกันคือ 2.97, 2.48, 2.52, 2.57 และ 2.53 ตามลำดับ และมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก เท่ากับ 3.49, 3.25, 3.21, 3.02 และ 2.94 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้นำหนักในกองปุ๋ยหมักลดลง ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดต่อมวลน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้น (Yamada and Kawase 2006)

ตารางที่ 3-7 ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม

ถังหมัก	พารามิเตอร์			
	ปริมาณร้อยละ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (เริ่มต้น)	ปริมาณร้อยละ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (สิ้นสุด)	ปริมาณร้อยละ โพแทสเซียมทั้งหมด (เริ่มต้น)	ปริมาณร้อยละ โพแทสเซียมทั้งหมด (สิ้นสุด)
A ₀	0.24 ± 0.01	0.31 ± 0.01	2.97 ± 0.01	3.49 ± 0.01
A _{0.3}	0.19 ± 0.00	0.30 ± 0.01	2.48 ± 0.04	3.25 ± 0.05
A _{0.5}	0.22 ± 0.01	0.31 ± 0.01	2.52 ± 0.01	3.21 ± 0.04
A _{0.7}	0.19 ± 0.01	0.31 ± 0.02	2.57 ± 0.02	3.02 ± 0.07
A _{0.9}	0.22 ± 0.00	0.29 ± 0.01	2.53 ± 0.01	2.94 ± 0.04

3.1.3 คุณภาพและประสิทธิภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก

คุณภาพวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการย่อยสลาย ดังแสดงในตารางที่ 3-8 เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งประกอบด้วย ค่าความชื้น สีและกลิ่น พบว่า ค่าความชื้นของวัสดุหมัก ถังหมัก A_{0.5}, A_{0.7} และ A_{0.9} มีค่าใกล้เคียงกัน และผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ส่วนสีและกลิ่นของวัสดุหมัก มีลักษณะเป็นน้ำตาลปนสีดำและกลิ่นคล้ายดินทั้งหมด ซึ่งใช้วิธีการจากการสังเกต ดังแสดงในรูปที่ 3-8 ซึ่งปุ๋ยหมักที่ได้ที่แล้วมีสีน้ำตาลปนดำ หรือสีดำเพียงอย่างเดียวอาจเนื่องมาจากสีของฮิวมัส (Jimenez and Garcia 1989)

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งประกอบด้วย ค่าความเป็นกรดต่าง ไนโตรเจนทั้งหมด อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณโพแทสเซียม และค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ถังหมักทุกใบมีค่าใกล้เคียงกัน และผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

ตารางที่ 3-8 คุณภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก

คุณภาพของวัสดุหมัก	เกณฑ์กำหนด	หน่วย	ผลการทดลอง				
			A ₀	A _{0.3}	A _{0.5}	A _{0.7}	A _{0.9}
1. ความชื้น	< 30	%	36.2	32.6	29.7	26.8	25.5
2. ความเป็นกรดต่าง	5.5-8.5	-	8.07	8.07	8.00	7.92	7.95
3. ไนโตรเจนทั้งหมด	> 1	%	1.92	1.93	1.95	1.97	1.99
4. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	< 20:1	-	16.7	15.8	14.5	13.8	15.1
5. ปริมาณฟอสฟอรัส	> 0.5	%	0.31	0.30	0.31	0.31	0.29
6. ปริมาณโพแทสเซียม	> 0.5	%	3.49	3.25	3.21	3.02	2.94
7. ค่าการนำไฟฟ้า	< 10	dS/m	1.61	1.61	1.70	1.50	1.92
8. สีและกลิ่น	-	-	สีน้ำตาล	สีน้ำตาล	สีดำ	สีดำ	สีดำ
			ปนดำ	ปนดำ	ทั้งหมด	ทั้งหมด	ทั้งหมด
			กลิ่น	กลิ่น	กลิ่น	กลิ่น	กลิ่น
			คล้ายดิน	คล้ายดิน	คล้ายดิน	คล้ายดิน	คล้ายดิน

หมายเหตุ กรมวิชาการเกษตร (2561)

ถังหมัก A₀ถังหมัก A_{0.3}ถังหมัก A_{0.5}ถังหมัก A_{0.7}ถังหมัก A_{0.9}

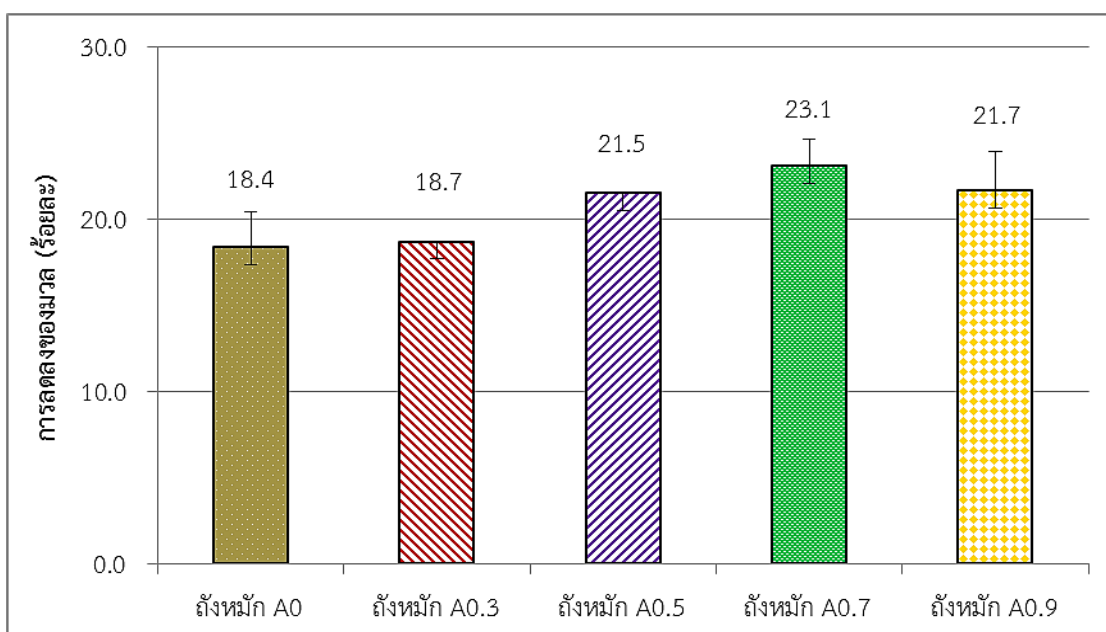
รูปที่ 3-8 ลักษณะของสีของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก

ตารางที่ 3-9 ระดับความเค็มที่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช

ระดับความเค็ม	ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)	ผลกระทบต่อนพืช
ไม่เค็ม	0-2	ไม่กระทบต่อการปลูกพืช
เค็มน้อย	2-4	พืชที่ไวต่อความเค็มมีการเจริญเติบโตลดลง
เค็มปานกลาง	4-8	พืชทนความเค็มเจริญเติบโตได้ดี
เค็มมาก	8-16	พืชทนความเค็มบางชนิดเติบโตได้ดี
เค็มมากที่สุด	>16	พืชทุกชนิดไม่สามารถเติบโตได้

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2553)

เมื่อพิจารณาการลดลงของมวล โดยเปรียบเทียบจากน้ำหนักแห้งของวัสดุหมัก ก่อนและหลังหมักของถังหมัก A_0 , $A_{0.3}$, $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ ดังแสดงในรูปที่ 3-9 พบว่า ร้อยละการลดลงของมวล เท่ากับ 18.4, 18.7, 21.5, 23.1 และ 21.7 ตามลำดับ โดยการลดลงของมวลสัมพันธ์กับอัตราการเติมของอากาศ คือเมื่ออัตราการเติมของอากาศสูงขึ้นทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนสูงขึ้น แต่ถังหมัก $A_{0.9}$ มีอัตราการเติมอากาศที่สูงเกินไป ทำให้อุณหภูมิสูงสุดภายในวัสดุหมักลดลง การย่อยสลายของจุลินทรีย์จึงลดลง ส่งผลให้การลดลงของมวลลดลงน้อยกว่าถังหมัก $A_{0.7}$



รูปที่ 3-9 การลดลงของมวล

ดังนั้นจากวัตถุประสงค์ในการหาค่าอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศและการวิเคราะห์ทางสถิติ One Way ANOVA ดังแสดงในภาคผนวก ง พบว่า ค่าเฉลี่ยของความเป็นกรดต่างของถังหมัก $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าเฉลี่ยของความชื้นของถังหมัก $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าเฉลี่ยของไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมัก $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของถังหมัก $A_{0.7}$ มีค่าที่ดีที่สุด ค่าเฉลี่ยของปริมาณฟอสฟอรัสของถังหมัก $A_{0.5}$ และ $A_{0.7}$ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าเฉลี่ยของปริมาณโพแทสเซียมของถังหมัก $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าเฉลี่ยของค่าการนำ

ไฟฟ้าของถังหมัก $A_{0.5}$, $A_{0.7}$ และ $A_{0.9}$ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถังหมัก $A_{0.7}$ มีค่าการนำไฟฟ้าน้อยที่สุด. ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณของเกลือที่ละลายน้ำได้ ดังแสดงในตารางที่ 3-9 ซึ่งสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของพืช แสดงให้เห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าของถังหมัก $A_{0.7}$ จะส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืชน้อยที่สุด และค่าเฉลี่ยการลดลงของมวลของถังหมักที่มีอัตราการเติมอากาศที่ $0.7 \text{ l/min-kg } W_w$ หรือถังหมัก $A_{0.7}$ มีค่าการลดลงของมวลสูงสุดคือ ร้อยละ 23.1 จึงเลือกอัตราการเติมอากาศที่ $0.7 \text{ l/min-kg } W_w$ ไปใช้ต่อในการทดลองที่ 2

3.2 การทดลองที่ 2 ผลของอุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการย่อยสลาย

3.2.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสมแล้วของการทดลองที่ 2

คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสมระหว่างเปลือกผลไม้และใบไม้แห้งของแต่ละถังหมักของการทดลองที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสมแล้วของการทดลองที่ 2

ถังหมัก	พารามิเตอร์		
	ความชื้น (ร้อยละ)	ความเป็นกรด-ด่าง	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
T _A	55.8 ± 1.35	4.34 ± 0.06	32.2 ± 0.33
T ₄₅	54.4 ± 1.15	4.60 ± 0.11	32.8 ± 0.59
T ₅₅	55.5 ± 1.07	4.23 ± 0.21	30.6 ± 0.81
T ₆₅	54.3 ± 2.00	4.60 ± 0.16	29.4 ± 0.93

พบว่า ค่าความชื้น เริ่มต้นมีค่าไม่เกินร้อยละ 60 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 50 - 60 (Hamoda et al. 1998) ส่วนค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 25-50 (Tchobanoglous et al. 1993) และค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นอยู่ในช่วง 4.23-4.60 ซึ่งต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมเล็กน้อยแต่ไม่ต่ำกว่า 3 ซึ่งแบคทีเรียสามารถอยู่ได้ จึงไม่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

3.2.2 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆของการทดลองที่ 2

เมื่อทำการหมักมูลฝอยอินทรีย์โดยการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิของอากาศที่เติมเข้าระบบต่อประสิทธิภาพการย่อยสลาย ระหว่าง

ถังที่ 1 T_A เติมอากาศที่อุณหภูมิของบรรยากาศ

ถังที่ 2 T₄₅ เติมอากาศที่มีอุณหภูมิ 45 °C

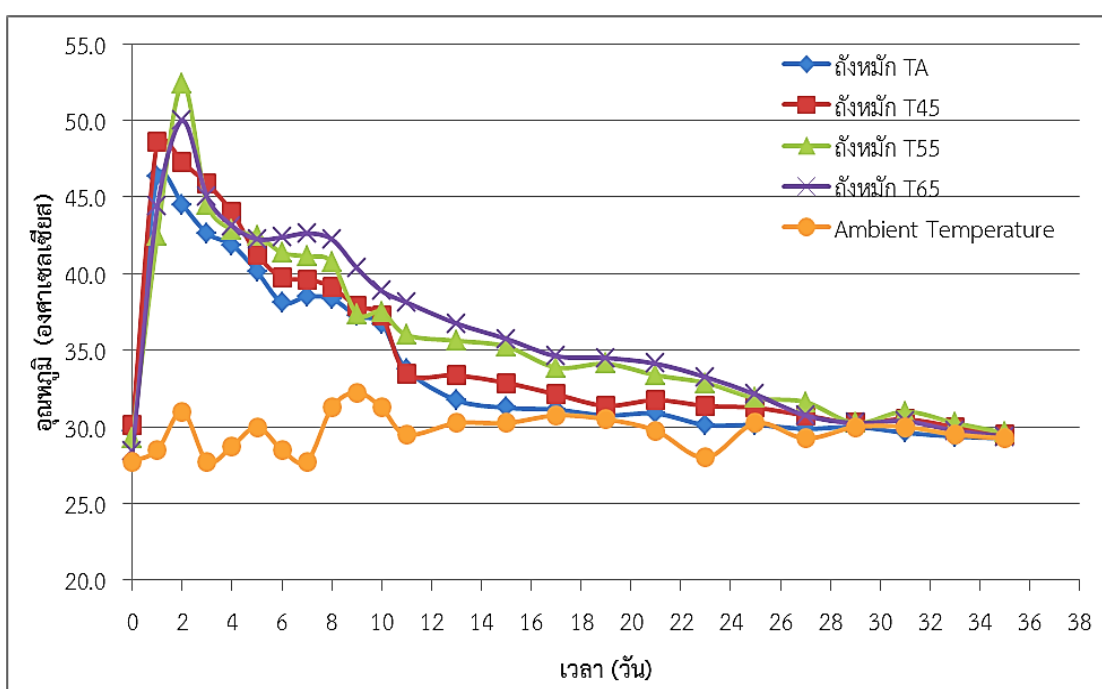
ถังที่ 3 T₅₅ เติมอากาศที่มีอุณหภูมิ 55 °C

ถังที่ 4 T₆₅ เติมอากาศที่มีอุณหภูมิ 65 °C

โดยทุกถังมีการเติมอากาศด้วยอัตรา 0.7 L/min-kg W_w มีการเปลี่ยนแปลงของแต่ละพารามิเตอร์ภายในถังหมักดังต่อไปนี้

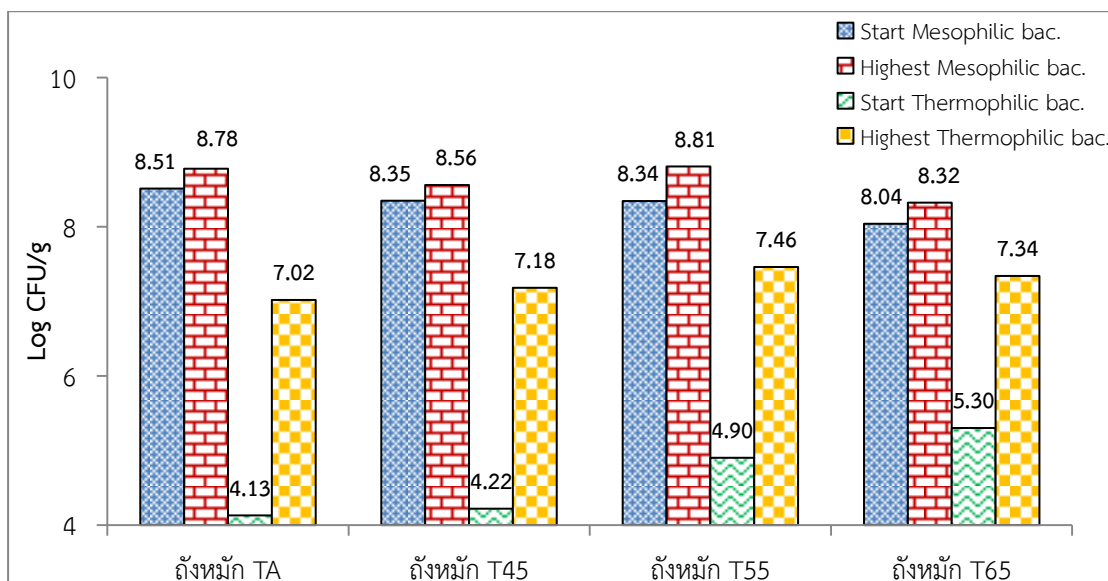
3.2.2.1 อุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหมัก ดังแสดงในรูปที่ 3-10 พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าใกล้เคียงกันคือ 29.8°C , 30.1°C , 29.3°C และ 28.4°C ตามลำดับ จากนั้นอุณหภูมิของวัสดุหมักมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 2 - 3 ของการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ และอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละถัง คือ 46.4°C , 48.6°C , 52.4°C , และ 50.0°C ตามลำดับ หลังจากนั้นอุณหภูมิของวัสดุหมักจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนคงที่และใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ซึ่งอุณหภูมิของวัสดุหมักในถังทั้ง 4 ใบเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักอยู่ที่ประมาณ 29°C



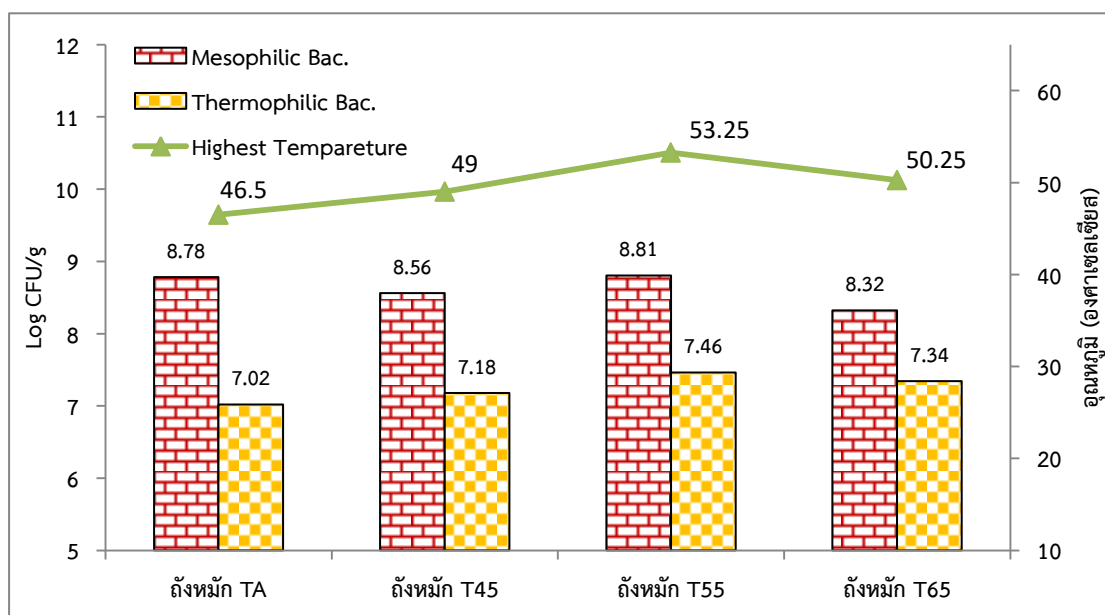
รูปที่ 3-10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหมัก

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหมัก พบว่า อุณหภูมิสูงสุดของวัสดุหมักสัมพันธ์กับการเติมอุณหภูมิของอากาศ คือเมื่อการเติมอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิของวัสดุหมักสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากปริมาณของแบคทีเรียเพิ่มสูงขึ้น โดยปริมาณของแบคทีเรียเมโซฟิลิกและปริมาณของแบคทีเรียเทอร์โมฟิลิก ดังแสดงในรูป 3-11 เมื่อปริมาณของแบคทีเรียเพิ่มสูงขึ้น ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์สูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของวัสดุหมักสูงขึ้น โดยถังหมัก T_{55} มีอุณหภูมิของวัสดุหมักสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณแบคทีเรียเมโซฟิลิก และแบคทีเรียเทอร์โมฟิลิกสูงกว่าถังหมักอื่น



รูปที่ 3-11 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรีย

แต่พบว่าอุณหภูมิวัสดุหมักของถึงหมัก T₆₅ กลับต่ำกว่า ถึงหมัก T₅₅ ดังแสดงในรูปที่ 3-12 เนื่องจากปริมาณของแบคทีเรียเทอร์โมฟิลิก มีปริมาณน้อยกว่า ถึงหมัก T₅₅ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของอากาศที่สูงเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ แต่อุณหภูมิวัสดุหมักของถึงหมัก T₅₅ ยังคงมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิวัสดุหมักของถึงหมัก T₄₅ เนื่องจากปริมาณของแบคทีเรียเทอร์โมฟิลิกมีปริมาณที่สูงกว่าถึงหมัก T₄₅

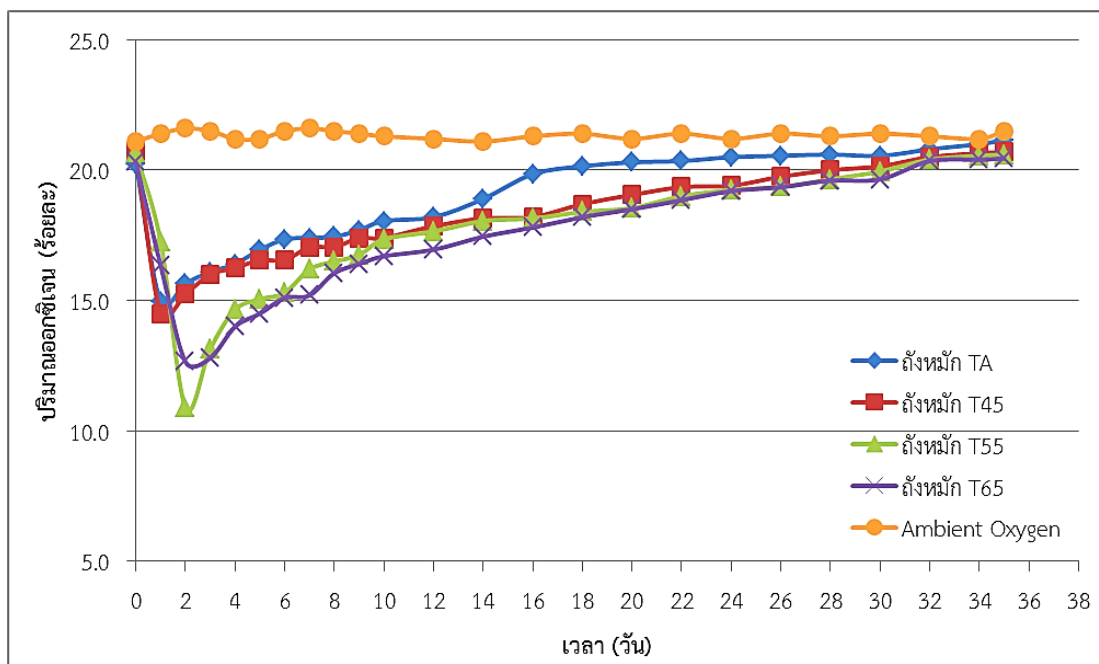


รูปที่ 3-12 ความสัมพันธ์ของปริมาณแบคทีเรียและอุณหภูมิสูงสุดของวัสดุหมัก

อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในกองหมักของทุกถังสูงไม่ถึง 55°C ถึงแม้ว่าจะมีการเติมอากาศร้อนเข้าไปภายในถัง อาจเนื่องจากถังหมักมีขนาดเล็ก เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 แต่การเติมอากาศที่มีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิของบรรยากาศส่งผลให้อุณหภูมิภายในถังหมักสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Tiquial et. al, (1998) โดยได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในฤดูกาลต่างๆ ของประเทศฮ่องกงในการทำปุ๋ยหมักจากสักร โดยพบว่าชุดการทดลองที่ทำในช่วงฤดูร้อนซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 28°C เกิดกระบวนการหมักได้ดีกว่าชุดการทดลองที่มีอุณหภูมิเฉลี่ย 17°C

3.2.2.2 ปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังหมัก

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังหมัก ดังแสดงในรูปที่ 3-13 พบว่า ปริมาณก๊าซออกซิเจนเริ่มต้นของถังหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าปริมาณร้อยละของก๊าซออกซิเจน ใกล้เคียงกันคือ 20.3, 20.7, 20.7 และ 20.3 ตามลำดับ (โดยทั่วไปอากาศมีออกซิเจนร้อยละ 21) หลังจากนั้นปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังหมักลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 2-3 ของการทดลอง เท่ากับ 15.4, 14.5, 10.9 และ 12.7 ตามลำดับ



รูปที่ 3-13 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนภายในถัง

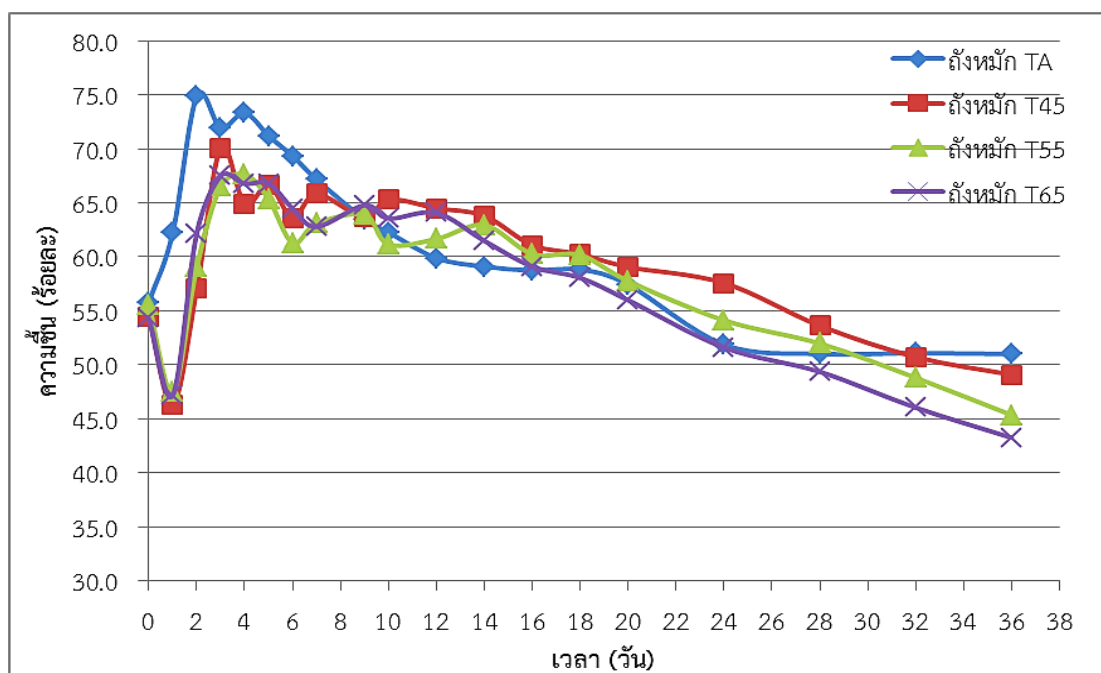
ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เหลือภายในถังหมักสัมพันธ์กับการเติมอุณหภูมิของอากาศ คือเมื่อการเติมอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เหลือภายในถังลดลง เมื่ออัตราการเติมอุณหภูมิของอากาศเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณของแบคทีเรียเมโซฟิลิกและแบคทีเรียเทอร์โมฟิล

ลิกเพิ่มสูงขึ้น การใช้งานปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังจึงเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นปริมาณก๊าซออกซิเจนกลับเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ใช้ปริมาณก๊าซออกซิเจนน้อยลง การย่อยสลายลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิภายในกองเริ่มลดลง จนกระทั่งปริมาณออกซิเจนภายในถังหมักกลับมาใกล้เคียงร้อยละ 21 แสดงว่าการย่อยสลายได้สิ้นสุดลงและอุณหภูมิของวัสดุหมักใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังหมัก พบว่า ถังหมัก T₅₅ มีปริมาณก๊าซออกซิเจนลดลงสูงสุด รองลงมาคือ ถังหมัก T₆₅, T₄₅ และ T_A ซึ่งถังหมักทุกใบมีปริมาณก๊าซออกซิเจนมากกว่าร้อยละ 10 ซึ่งเพียงพอต่อการทำงานของจุลินทรีย์

3.2.2.3 ความชื้น

การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในถังหมัก ดังแสดงในรูป 3-14 พบว่า ค่าความชื้นเริ่มต้นของถังหมัก T_A, T₄₅, T₅₅ และ T₆₅ มีค่าใกล้เคียงกันคือ ร้อยละ 55.8, 54.4, 55.5 และ 54.3 ตามลำดับ โดยถังหมัก T₄₅, T₅₅ และ T₆₅ มีค่าความชื้นลดลงในช่วงวันแรกของการหมักเหลือร้อยละ 46.3, 47.5 และ 47.2 ซึ่งอาจเนื่องจากอุณหภูมิของอากาศที่เดิมเข้าสู่ภายในถังหมักส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำสูงในช่วงวันแรกทำให้ค่าความชื้นเริ่มต้นของการหมักลดลง แต่สำหรับถังหมัก T_A ค่าความชื้นเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 เนื่องจากความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ได้ผลผลิตภัณฑ์ คือ น้ำ จากนั้นค่าความชื้นของถังหมักทุกใบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงวันที่ 2 - 5 ของการทดลองเป็น 74.9, 70.1, 67.7 และ 67.5 ตามลำดับ

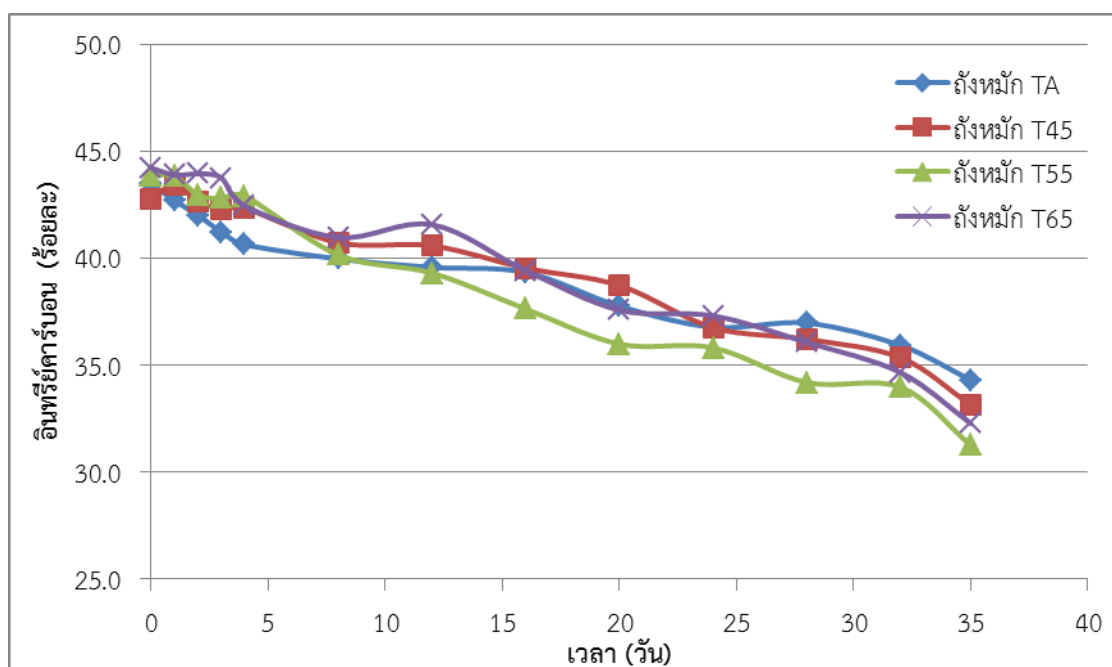


รูปที่ 3-14 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในถัง

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นของวัสดุหมัก พบว่า ค่าความชื้นเมื่อสิ้นสุดของกระบวนการหมักของถังหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 51.0, 49.1, 45.3 และ 43.2 ตามลำดับ โดยความชื้นที่ลดลงสัมพันธ์กับอัตราการเติมอนุกรมของอากาศ คือเมื่อการเติมอนุกรมของอากาศสูงจะช่วยให้ระเหยน้ำได้ดีกว่า แต่ค่าความชื้นหลังสิ้นสุดกระบวนการหมักยังมีค่าสูงเกินมาตรฐาน ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากทางออกของอากาศมีขนาดเล็กเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ส่งผลให้การระเหยของน้ำที่จะออกจากภายในถังเกิดขึ้นน้อยส่งผลให้อุณหภูมิและความชื้นในถังหมักยังคงสูงเกินมาตรฐาน ดังนั้นจึงได้ทำการเปิดฝาถังหมักทิ้งไว้หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการหมัก พบว่า ค่าความชื้นลดลงทุกถังซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.7, 28.7, 26.0 และ 23.7 ตามลำดับ

3.2.2.4 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 3-15 พบว่า ค่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเริ่มต้นของถังหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าเท่ากับร้อยละ 43.5, 42.8, 43.9 และ 44.2 ตามลำดับ และมีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงเวลาของการหมัก เนื่องจากกระบวนการหมักจุลินทรีย์ต้องการคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์เพื่อเป็นแหล่งพลังงานในการสร้างเซลล์ใหม่ (นคร สุรียานนท์ 2552) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของถังหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าเท่ากับร้อยละ 34.3, 33.1, 31.3 และ 32.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3-15 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของวัสดุหมัก

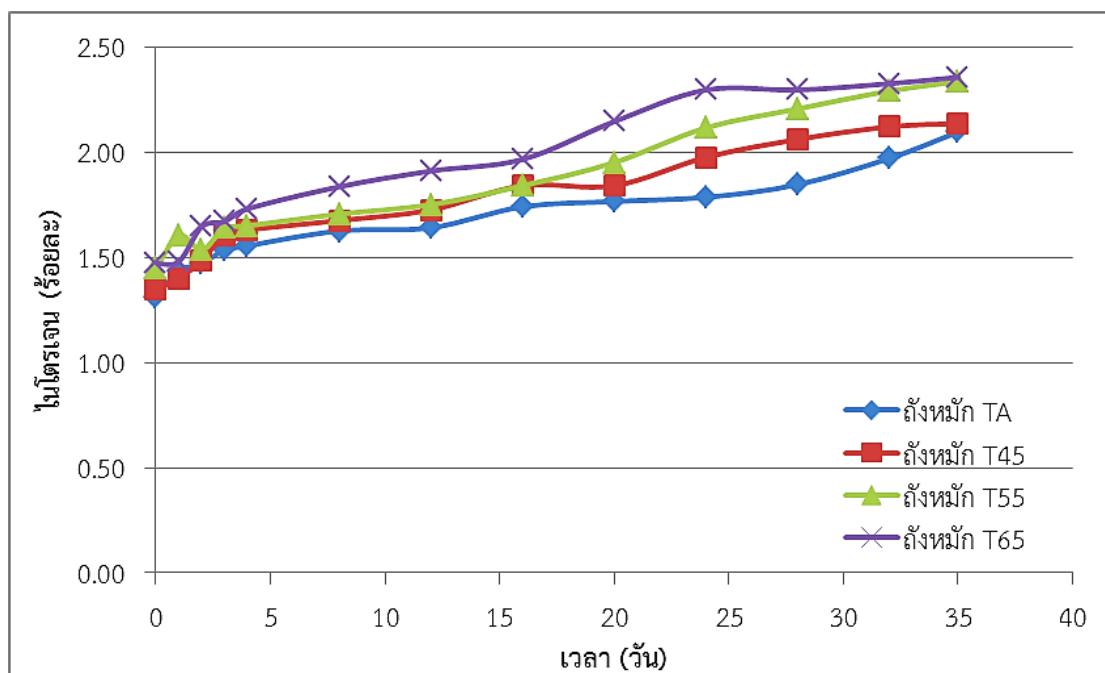
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 3-11 พบว่า ถังหมัก T₅₅ มีร้อยละการลดลงของอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดมากที่สุด คือ 28.7 รองลงมาคือถัง T₆₅, T₄₅ และ T_A คือ 27.0, 22.5, และ 21.1 ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับการเติมอุณหภูมิของอากาศ คือ เมื่อการเติมอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นทำให้อินทรีย์คาร์บอนลดลงมาก เนื่องจากการเติมอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นทำให้ปริมาณของแบคทีเรียเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะแบคทีเรียเทอร์โมฟิลิค ทำให้เกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของสารอินทรีย์ของวัสดุหมักลดลง แต่การเติมอุณหภูมิของอากาศของถัง T₆₅ สูงเกินไป ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อปริมาณแบคทีเรียทำให้ปริมาณลดลง ทำให้ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดย่อยสลายได้น้อยกว่า ถัง T₅₅ ซึ่งร้อยละการลดลงของอินทรีย์คาร์บอนสัมพันธ์กับอุณหภูมิสูงสุดของวัสดุหมัก คือเมื่อปริมาณการลดลงของอินทรีย์คาร์บอนมีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิของวัสดุหมักจะสูงขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 3-11 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

ถังหมัก	ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (%)		ร้อยละการลดลง	อุณหภูมิสูงสุด (°C)
	เริ่มต้นกระบวนการหมัก	สิ้นสุดกระบวนการหมัก		
T _A	43.5 ± 0.88	34.3 ± 0.83	21.1 ± 0.31	46.4 ± 0.18
T ₄₅	42.8 ± 0.66	33.1 ± 1.36	22.5 ± 4.38	48.6 ± 0.53
T ₅₅	43.9 ± 0.94	31.3 ± 1.18	28.7 ± 4.22	52.4 ± 1.24
T ₆₅	44.2 ± 0.54	32.2 ± 1.58	27.0 ± 2.69	50.0 ± 0.35

3.2.2.5 ปริมาณไนโตรเจน

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณร้อยละไนโตรเจนของวัสดุหมักภายในถังหมัก ดังแสดงในรูปที่ 3-16 พบว่า ค่าร้อยละของไนโตรเจนเริ่มต้นของถังหมัก T_A, T₄₅, T₅₅ และ T₆₅ เท่ากับ 1.31, 1.35, 1.45 และ 1.47 ตามลำดับ และปริมาณร้อยละของไนโตรเจนของวัสดุหมักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 1 จนสิ้นสุดกระบวนการหมัก มีค่าร้อยละของไนโตรเจน เท่ากับ 2.03, 2.12, 2.30 และ 2.33 ตามลำดับ



รูปที่ 3-16 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของวัสดุหมัก

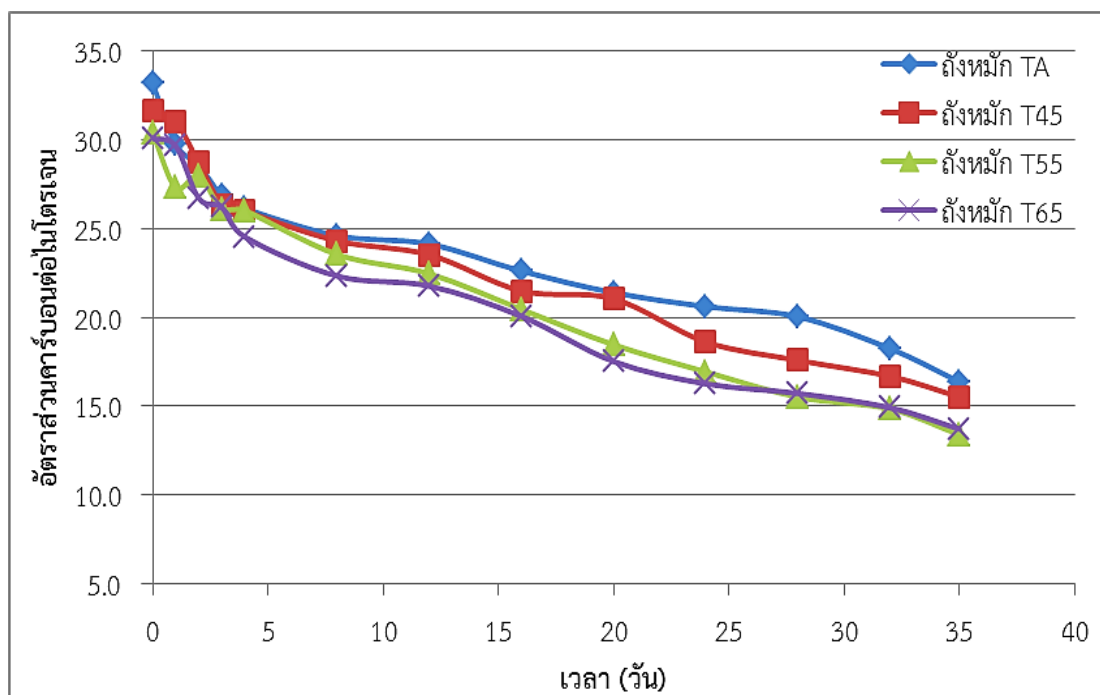
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของวัสดุหมัก ดังแสดงในตารางที่ 3-12 พบว่า ปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับการเติมอุณหภูมิของอากาศ คือเมื่อการเติมอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้นทำให้ปริมาณไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของแบคทีเรียเพิ่มขึ้น การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้การสูญเสียไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียที่ระเหยสู่อากาศลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ส่งผลให้น้ำหนักในกองปุ๋ยหมักลดลง ทำให้ปริมาณไนโตรเจนต่อมวลน้ำหนักเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3-12 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

ถึงหมัก	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%)		ร้อยละการเพิ่มขึ้น (%)
	เริ่มต้นกระบวนการหมัก	สิ้นสุดกระบวนการหมัก	
T _A	1.31 ± 0.01	2.03 ± 0.07	37.5 ± 0.89
T ₄₅	1.35 ± 0.07	2.11 ± 0.02	36.8 ± 3.10
T ₅₅	1.45 ± 0.02	2.30 ± 0.04	38.1 ± 1.85
T ₆₅	1.47 ± 0.01	2.33 ± 0.04	37.6 ± 1.54

3.2.2.6 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 3-17 พบว่า ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นของถังหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าใกล้เคียงกันคือ 32.2, 31.7, 30.4 และ 30.1 ตามลำดับ ซึ่งค่ามีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 1 - 8 ของการทดลอง โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสัมพันธ์กับอัตราการเติมออกซิเจนของอากาศ คือเมื่ออัตราการเติมออกซิเจนของอากาศสูงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะลดลงมาก เมื่ออัตราการเติมออกซิเจนของอากาศสูงทำให้ปริมาณของแบคทีเรียโดยเฉพาะแบคทีเรียเทอร์โมฟิลิกที่ชอบความร้อยสูงมีปริมาณสูงขึ้น ทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนลดลงสูงในช่วงแรก และไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น (สุชินันท์ เกียรติภักดิ์ 2555) ส่งผลให้อัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนของวัสดุหมักมีค่าลดลงจนมีค่าคงที่เมื่อกระบวนการหมักเสร็จสิ้นสมบูรณ์ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 1 เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของถังหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าเท่ากับ 16.8, 15.8, 13.6 และ 13.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3-17 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมัก

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนหลังสิ้นสุดกระบวนการหมัก ดังแสดงในตารางที่ 3-13 พบว่า ค่าร้อยละการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ของถังหมัก T_{55} สูงที่สุดคือ 55.8 รองลงมาคือ ถังหมัก T_{65} , T_{45} และ T_A มีค่าเท่ากับ 54.4, 50.9 และ 50.7 ตามลำดับ ซึ่งร้อยละการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสัมพันธ์กับออกซิเจนสูงสุดของวัสดุ

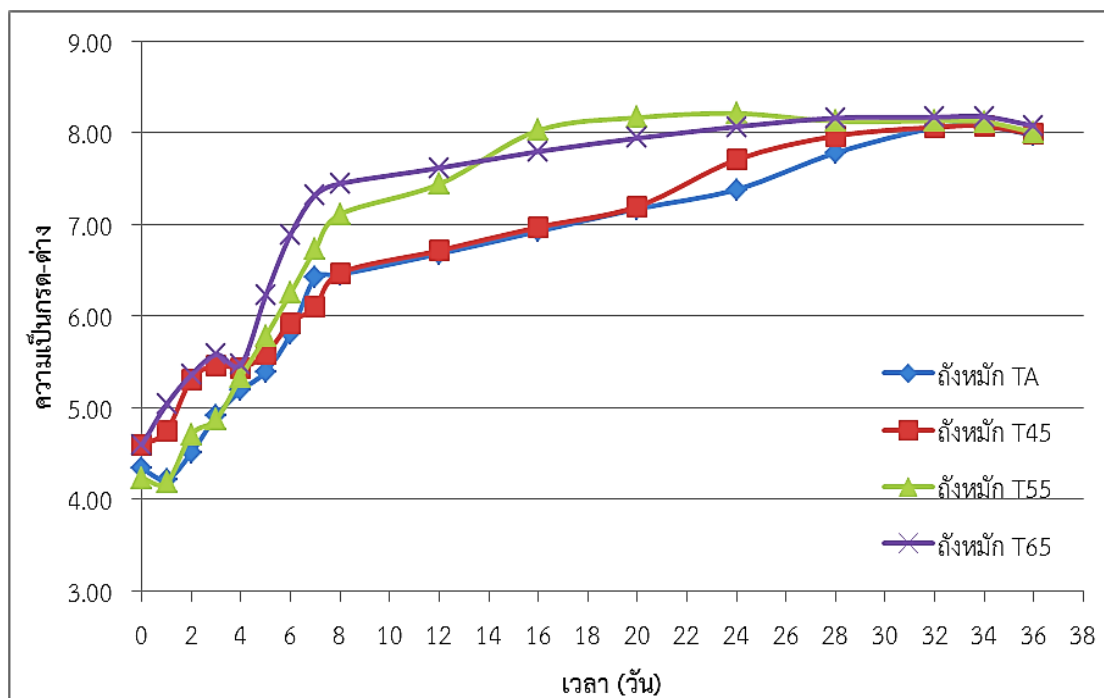
หมัก คือเมื่ออุณหภูมิของวัสดุหมักสูงขึ้นร้อยละการลดลงจะมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ได้ปล่อยความร้อนออกมาส่งผลให้อุณหภูมิของวัสดุหมักเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 3-13 ปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ถังหมัก	ปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน		ร้อยละการลดลง	อุณหภูมิสูงสุด (°C) ของวัสดุหมัก
	เริ่มต้นกระบวนการหมัก	สิ้นสุดกระบวนการหมัก		
T _A	33.2 ± 1.03	16.8 ± 0.54	50.7 ± 0.50	46.4 ± 0.18
T ₄₅	31.7 ± 2.51	15.8 ± 0.50	50.9 ± 0.58	48.6 ± 0.53
T ₅₅	30.4 ± 1.10	13.6 ± 0.45	55.8 ± 3.91	52.4 ± 1.24
T ₆₅	30.1 ± 0.08	13.8 ± 0.53	54.4 ± 2.80	50.0 ± 0.35

3.2.2.7 ความเป็นกรด-ด่าง

การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง ของวัสดุหมัก ดังแสดงในรูปที่ 3-18 พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นของถังหมัก T_A, T₄₅, T₅₅ และ T₆₅ มีค่าเท่ากับ 4.34, 4.60, 4.23 และ 4.60 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นใกล้เคียงกับการทดลองที่ 1 และไม่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 จากนั้นค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นช่วงวันที่ 30 ของการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่าง ปรับลงเล็กน้อยจากนั้นหลังจากวันที่ 26 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 3-18 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุหมัก

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุหมัก โดยในช่วงแรกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วสัมพันธ์กับอัตราการเติมอุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้น คือเมื่อการเติมอุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น ความเป็นกรด-ด่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยอุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณของแบคทีเรียเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะแบคทีเรียเทอร์โมฟิลิกที่ชอบอุณหภูมิสูง เมื่อแบคทีเรียเพิ่มสูงขึ้นการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่าง หลังสิ้นสุดกระบวนการหมักของถังหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าเท่ากับ 7.93, 8.00, 8.06 และ 8.07 ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงหลังของการหมักปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันลดลง ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลง (ธนาวุฒิ หนูทองแก้ว 2555)

3.2.2.8 ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม

ค่าปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดเมื่อเริ่มต้นการหมัก ดังแสดงในตารางที่ 3-14 พบว่าค่าร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดเริ่มต้นของถังหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.19, 0.20, 0.16 และ 0.18 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น จนสิ้นสุดกระบวนการหมัก ค่าร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด เท่ากับ 0.38, 0.42, 0.40 และ 0.42 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดของวัสดุหมัก พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักเพิ่มขึ้น คือเมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนลดลงเพราะการสูญเสียคาร์บอนในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสทั้งหมดต่อน้ำหนักของปุ๋ยหมักมีค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ซึ่งอัตราการเติมอุณหภูมิของอากาศไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด เนื่องจากฟอสฟอรัสไม่มีการสูญเสียในรูปของการระเหยแต่จะสูญเสียโดยการชะละลายเพียงเล็กน้อย เนื่องจากฟอสฟอรัสจะตกตะกอนเป็นของแข็งที่ละลายน้ำได้ยาก

ค่าปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดเริ่มต้นการหมัก ดังแสดงในตารางที่ 3-14 พบว่า ค่าร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดเริ่มต้นของถังหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าใกล้เคียงกันคือ 2.70, 2.57, 2.63 และ 2.74 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น จนสิ้นสุดกระบวนการหมัก ค่าร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด เท่ากับ 3.21, 3.07, 3.09 และ 3.10 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดของวัสดุหมัก พบว่า ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักเพิ่มขึ้น คือเมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้นำหนักในกองปุ๋ยหมักลดลง ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดต่อมวลน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

ตารางที่ 3-14 ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม

ถังหมัก	พารามิเตอร์			
	ปริมาณร้อยละ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (เริ่มต้น)	ปริมาณร้อยละ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (สิ้นสุด)	ปริมาณร้อยละ โพแทสเซียมทั้งหมด (เริ่มต้น)	ปริมาณร้อยละ โพแทสเซียมทั้งหมด (สิ้นสุด)
T_A	0.19 ± 0.02	0.38 ± 0.02	2.70 ± 0.02	3.21 ± 0.05
T_{45}	0.20 ± 0.01	0.42 ± 0.02	2.57 ± 0.02	3.07 ± 0.03
T_{55}	0.16 ± 0.01	0.40 ± 0.03	2.63 ± 0.02	3.09 ± 0.06
T_{65}	0.18 ± 0.01	0.42 ± 0.03	2.74 ± 0.01	3.10 ± 0.05

3.2.3 คุณภาพและประสิทธิภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก

คุณภาพวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการย่อยสลาย ดังแสดงในตารางที่ 3-15 เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งประกอบด้วย ค่าความชื้น สีและกลิ่น พบว่า ค่าความชื้นของวัสดุหมัก ถึงหมัก T_A , T_{45} , T_{55} และ T_{65} มีค่าใกล้เคียงกัน และผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ส่วนสีและกลิ่นของถังหมักทุกใบ มีลักษณะเป็นสีดำทั้งหมดและกลิ่นคล้ายดิน ดังแสดงในรูปที่ 19

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งประกอบด้วย ค่าความเป็นกรดต่าง ไนโตรเจนทั้งหมด อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณโพแทสเซียม และค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ถังหมักทุกใบมีค่าใกล้เคียงกันแต่ถังหมัก T_{55} มีค่าการนำไฟฟ้าและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนน้อยที่สุด ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของพืช หากมีปริมาณสูงจะส่งผลให้พืชเจริญเติบโตไม่ดี แสดงให้เห็นว่า ค่าการนำไฟฟ้าของถังหมัก T_{55} จะส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืชน้อยที่สุด และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนเหลือ น้อย ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์น้อยลง การใช้งานปริมาณของไนโตรเจนที่มีอยู่ในวัสดุหมัก ก็ลดลง ซึ่งหากปริมาณอินทรีย์คาร์บอนมีปริมาณสูง จุลินทรีย์ยังคงย่อยสลายสารอินทรีย์และใช้งาน ปริมาณไนโตรเจน หากปริมาณไนโตรเจนในวัสดุหมักมีไม่เพียงพอกับการใช้งานของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์จะหันไปใช้ปริมาณไนโตรเจนจากสิ่งรอบตัว คือ ดิน ในกรณีที่ปริมาณไนโตรเจนในดินไม่เพียงพอ ซึ่งจุลินทรีย์สามารถสกัดไนโตรเจนมาใช้ได้ก่อน ส่วนพืชจะได้ใช้หลังจากจุลินทรีย์ใช้เหลือ จึงทำให้เกิดการขาดไนโตรเจนในพืช

ตารางที่ 3-15 คุณภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก

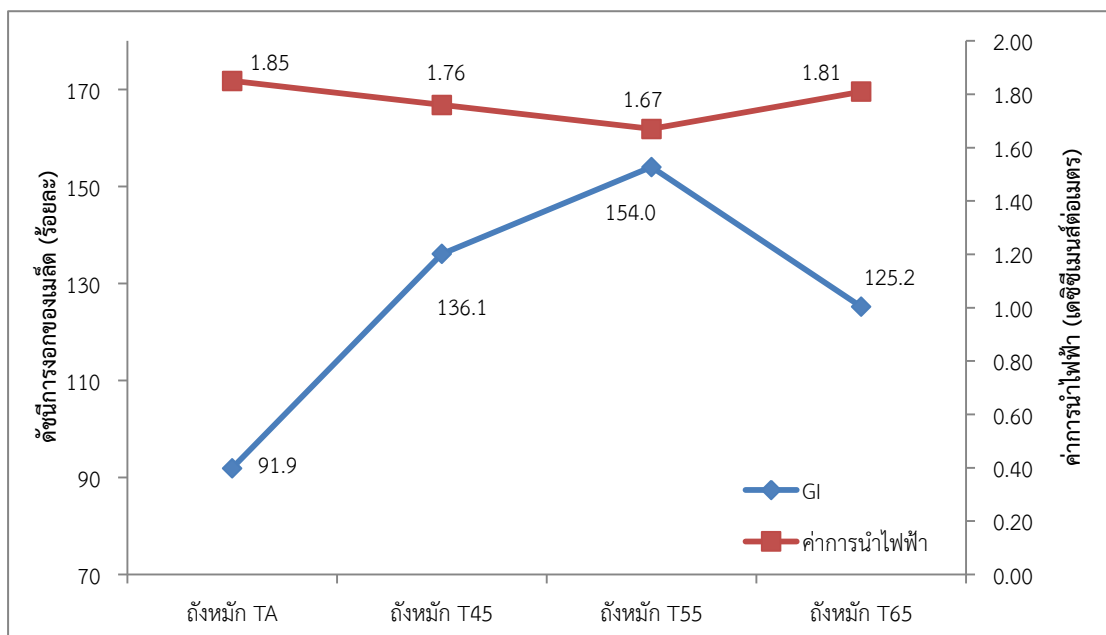
คุณภาพของวัสดุหมัก	เกณฑ์กำหนด	หน่วย	ผลการทดลอง			
			T _A	T ₄₅	T ₅₅	T ₆₅
1. ความชื้น	< 30	%	29.7	28.7	26.0	23.7
2. ความเป็นกรดต่าง	5.5-8.5	-	7.93	8.00	8.10	8.10
3. ไนโตรเจนทั้งหมด	> 1	%	2.03	2.11	2.30	2.32
4. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	< 20:1	-	16.8	15.8	13.6	13.8
5. ปริมาณฟอสฟอรัส	> 0.5	%	0.38	0.42	0.40	0.42
6. ปริมาณโพแทสเซียม	> 0.5	%	3.21	3.07	3.09	3.10
7. ค่าการนำไฟฟ้า	< 6	dS/m	1.85	1.76	1.67	1.80
8. สีและกลิ่น	-	-	สีดำทั้งหมด กลิ่นคล้ายดิน	สีดำทั้งหมด กลิ่นคล้ายดิน	สีดำทั้งหมด กลิ่นคล้ายดิน	สีดำทั้งหมด กลิ่นคล้ายดิน
9. ดัชนีการงอกของเมล็ด	80	%	91.9	136.5	154.0	125.8

ถังหมัก T_Aถังหมัก T₄₅ถังหมัก T₅₅ถังหมัก T₆₅

รูปที่ 3-19 ลักษณะของสีของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางชีวภาพ คือ ค่าดัชนีการงอกของเมล็ด พบว่า ทุกถังหมักมีค่าผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ซึ่งถังหมัก T₅₅ มีค่าดัชนีการงอกที่สูงสุด โดยดัชนีการงอกของเมล็ดพืชสัมพันธ์กับการเติมอุณหภูมิของอากาศ คือเมื่ออัตราการเติมอุณหภูมิของอากาศสูงค่าดัชนีการงอกของเมล็ดจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อการเติมอุณหภูมิของอากาศสูงทำให้ปริมาณของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น การย่อยสลายของสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น หรือเกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ เมื่อนำวัสดุไปใช้งานหรือปรับปรุงดินจะทำให้สมบัติต่างๆของดินดีขึ้น หากการย่อยสลายไม่สมบูรณ์จะมีผลไปยังอัตราการงอกของรากพืชทำให้พืชเจริญเติบโตไม่ดี (Fernandez et al. 2008) ซึ่งค่าดัชนีการงอกของเมล็ดพืช ทางกรมวิชาการเกษตรได้กำหนดให้ค่าดัชนีการงอกต้องสูงกว่าร้อยละ 80 แต่ถังหมัก T₆₅ มีค่าดัชนีการงอกต่ำกว่าถังหมัก T₅₅ และ T₄₅ ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจาก ค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งค่าดัชนีการงอกของเมล็ดพืชสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้า แสดงว่า ดัชนีการงอกของเมล็ดจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าการนำไฟฟาลดลง (ศุภากร ดวนใหญ่ และคณะ 2558) ดังแสดงในรูป 3-20 และเมื่อค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น

ดัชนีการงอกของเมล็ดจะลดลง หากปุ๋ยอินทรีย์มีค่าการนำไฟฟ้าสูง เมื่อนำไปใช้งานปริมาณเกลือที่ละลายออกมามากเป็นอันตรายต่อดินและพืช (ยงยุทธ และคณะ 2556)

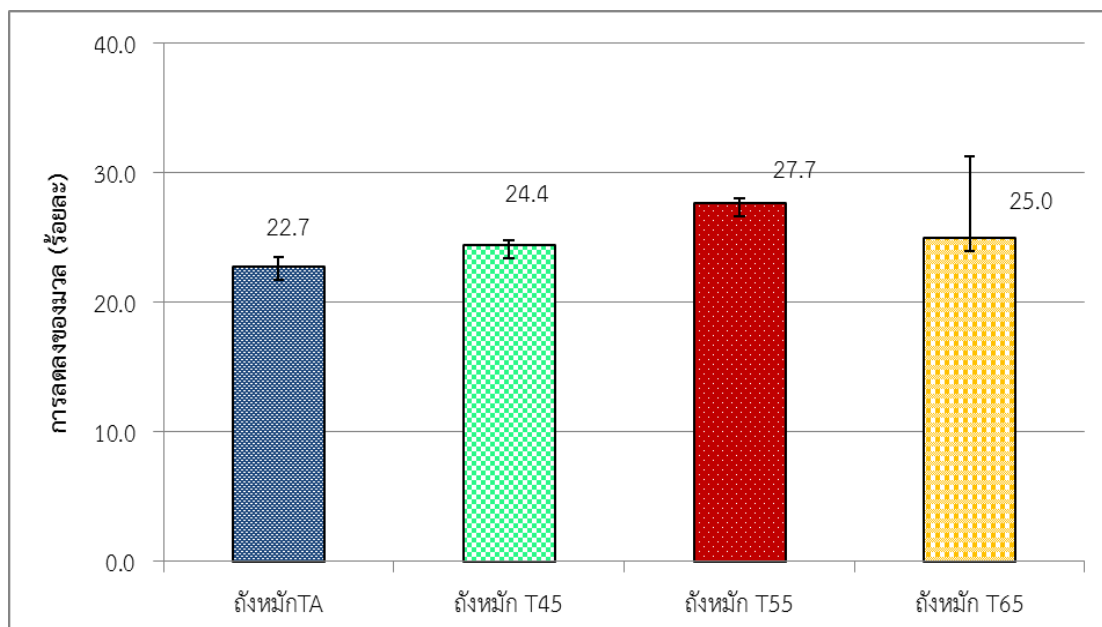


รูปที่ 3-20 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีการงอกของเมล็ดกับค่าการนำไฟฟ้า

ซึ่งค่าการนำไฟฟ้า คือค่าความเค็มที่เกลือสามารถละลายได้ โดยค่าการนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดขึ้นอยู่กับ คลอไรด์ ไนเตรต ซัลเฟต แคลเซียมและแมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม ความเป็นกรด-ด่าง และสภาพการนำไฟฟ้า ซึ่งจากการทดลองได้วิเคราะห์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และโพแทสเซียม (กรมทรัพยากรธรณี 2554) ซึ่งค่าของแต่ละถึงหมักมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาคผนวก ง. แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าการนำไฟฟ้า อาจเกิดจาก คลอไรด์ ไนเตรต ซัลเฟต แคลเซียมและแมกนีเซียม และโซเดียม

เมื่อพิจารณาการลดลงของมวล โดยเปรียบเทียบจากน้ำหนักแห้งของวัสดุหมักก่อน และหลังหมักของถึงหมัก T_A, T₄₅, T₅₅ และ T₆₅ ดังแสดงในรูปที่ 3-21 พบว่า ร้อยละการลดลงของมวล เท่ากับ 22.7, 24.4, 27.7 และ 25.0 ตามลำดับ ซึ่งถึงหมัก T₅₅ มีการลดลงของมวลสูงที่สุด โดยการลดลงของมวลสัมพันธ์กับการเติมอุณหภูมิของอากาศ เมื่อการเติมอุณหภูมิของอากาศสูงทำให้ปริมาณของแบคทีเรียสูงขึ้น เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สูง ทำให้อินทรีย์คาร์บอนลดลง แต่ถึงหมัก T₆₅ มีการลดลงของมวลน้อยกว่าถึงหมัก T₅₅ เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศที่สูงเกินส่งผลกระทบ

ต่อการทำกิจกรรมและการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ทำให้ปริมาณของจุลินทรีย์ลดลง ส่งผลให้การย่อยของสารอินทรีย์ลดลง จึงทำให้การลดลงของมวลของถังหมัก T₆₅ มีค่าน้อยกว่า ถังหมัก T₅₅



รูปที่ 3-21 การลดลงของมวลวัสดุหมัก

ดังนั้นจากวัตถุประสงค์ของผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศที่เข้าถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศต่อการย่อยสลาย พบว่า ถังหมัก T₅₅ หรือถังหมักที่มีการเติมอุณหภูมิของอากาศที่ 55 °C ด้วยอัตราการเติมอากาศที่ 0.7 l/min-kg W_w ส่งผลให้คุณภาพของวัสดุหมัก ซึ่งประกอบด้วย ค่าความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า และค่าดัชนีการงอกของเมล็ด ผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ และถังหมัก T₅₅ มีการลดลงของมวลสูงสุดคือ ร้อยละ 27.7 เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศทำให้ปริมาณของแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิสูงมีจำนวนเพิ่มสูงขึ้น ทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นสูงกว่าถังหมักอื่น

อย่างไรก็ตามจากการทดลองจะเห็นได้ว่าต้องมีการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งเมื่อพิจารณา ค่าลงทุนและค่าดำเนินการ ดังแสดงในภาคผนวก จ. พบว่ามีค่าใช้จ่ายรายเดือนสูงกว่ารายรับ เนื่องจากการทดลองนี้ใช้ถังหมักขนาดเล็กทำให้ได้ปริมาณปุ๋ยน้อย ดังนั้นการพิจารณาหาแนวทางการใช้พลังงานทดแทนอื่นๆ แทนพลังงานไฟฟ้า เช่นพลังงานจากโซลาร์เซลล์ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการดำเนิน และหากพิจารณาถึงการลดค่าขนส่งและค่ากำจัดมูลฝอยเหล่านี้ด้วยอาจจะมีความคุ้มค่ามากขึ้นสำหรับชุมชน

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

การศึกษาผลกระทบของอัตราการเติมและอุณหภูมิของอากาศที่เข้าต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายของเปลือกผลไม้ในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ โดยถังหมักปุ๋ยมีขนาด 60 ลิตร สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายของอัตราการเติมอากาศที่เข้าถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ โดยศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ สามารถสรุปได้ว่า อัตราการเติมอากาศที่เข้าถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ เมื่ออัตราการเติมสูงขึ้น ทำให้การย่อยสลายของสารอินทรีย์สูงขึ้น หากอัตราการเติมอากาศสูงเกินไป ทำให้การย่อยสลายลดลง เนื่องจากความร้อนของวัสดุหมักเกิดการสูญเสียไปกับอากาศที่เติมสูงเกินไป แต่ถ้าอัตราการเติมอากาศน้อยเกินไป ทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนมีน้อย ส่งผลปริมาณของจุลินทรีย์ที่ใช้ ออกซิเจนมีน้อย ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายของอัตราการเติมอากาศของแต่ละถังหมัก พบว่าอัตราการเติมอากาศที่ 0.7 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมของน้ำหนักเปียกของน้ำหนักเปียก มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งทำให้อุณหภูมิของวัสดุหมักสูงกว่าอัตราอื่นๆ คือ 47.5 องศาเซลเซียส และมีการลดลงของมวลสูงที่สุด คือ ร้อยละ 23.1 และเมื่อเปรียบเทียบกับถังหมักที่ให้อากาศไหลเข้าแบบธรรมชาติ พบว่า อุณหภูมิสูงสุดของวัสดุหมักเกิดขึ้นเพียง 40.1 องศาเซลเซียส ส่วนการลดลงของมวลต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 18.4 สาเหตุเนื่องจากปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในถังหมักมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการใช้งานของจุลินทรีย์ จึงทำให้การย่อยสลายของสารอินทรีย์เกิดขึ้นน้อย และค่าความชื้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักมีค่าสูงกว่าเกณฑ์กำหนด

4.1.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายของผลกระทบอุณหภูมิของอากาศที่เข้าถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ โดยศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ สามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าถังหมักสูงขึ้น ทำให้การย่อยสลายของสารอินทรีย์สูงขึ้น ส่งผลให้การลดลงของมวลสูงขึ้น แต่หากอุณหภูมิของอากาศที่เข้าถังหมักสูงเกินไป ทำให้การย่อยสลายของสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปส่งผลให้จุลินทรีย์บางชนิดไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ จึงทำให้การลดลงของมวลลดลง แต่หากอุณหภูมิของอากาศที่เข้าถังหมักต่ำลง ทำให้การย่อยสลายของสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ชอบอุณหภูมิสูงจะมีปริมาณน้อยลง ทำให้อุณหภูมิของวัสดุหมักลดลง และการลดลงของมวลมีค่าลดลง และพบว่า อุณหภูมิของ

อากาศที่เข้าถังหมัก ที่ 55 องศาเซลเซียส ทำให้อุณหภูมิสูงสุดของวัสดุหมักมีสูงค่ากว่าถังหมักอื่น คือ 52.4 องศาเซลเซียส และมีการลดลงของมวลสูงสุด คือ ร้อยละ 27.7 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถังหมักที่เติมอากาศที่อุณหภูมิบรรยากาศ พบว่า อุณหภูมิสูงสุดของวัสดุหมักเกิดขึ้นเพียง 46.4 องศาเซลเซียส ส่วนการลดลงของมวลมีค่า เท่ากับ ร้อยละ 22.7 สาเหตุเนื่องจากปริมาณของแบคทีเรียเทอร์โมฟิลิกมีปริมาณน้อยกว่า ถังหมักที่มีการเติมอุณหภูมิของอากาศสูง ซึ่งเมื่อปริมาณของจุลินทรีย์มีน้อยกว่า จึงทำให้การย่อยสลายของสารอินทรีย์มีค่าลดลง

ดังนั้นจากการศึกษาผลกระทบของอัตราการเติมและอุณหภูมิของอากาศที่เข้าต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายของเปลือกผลไม้ในถังหมักปุ๋ยแบบเติมอากาศ แสดงให้เห็นว่าการเติมอากาศที่เข้าถังหมักที่ 55 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 0.7 ลิตรต่อนาที่ต่อกิโลกรัมของน้ำหนักเปียก เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดทำให้มีการย่อยสลายที่เพิ่มขึ้น การลดลงของมวลเพิ่มขึ้นและคุณภาพปุ๋ยที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อพืชและดิน

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาขนาดทางออกของอากาศเพื่อช่วยลดความชื้นในการหมักเนื่องจากช่วงแรกของการหมักเกิดปริมาณของความชื้นสูง
2. การวิเคราะห์หาปริมาณของแบคทีเรียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นวิธีการที่ไม่สามารถจำแนกชนิดของแบคทีเรีย ดังนั้นจึงควรศึกษาวิธีการที่สามารถหาปริมาณและสามารถจำแนกชนิดของแบคทีเรียได้พร้อมกัน
3. จากการทดลองใช้ถังหมักขนาดเล็กส่งผลให้ปริมาณมูลฝอยที่ลดลงมีปริมาณที่น้อย หากนำไปใช้จริงจะมีการลงทุนที่สูงซึ่งอาจจะไม่คุ้มทุน แต่หากปรับมาใช้ถังที่มีขนาดใหญ่ขึ้น อาจส่งผลให้เกิดการลงทุนที่คุ้มกว่า นอกจากจะสามารถลดปริมาณมูลฝอยที่ต้องถูกนำไปกำจัด ณ หลุมฝังกลบได้สูงขึ้นแล้ว ยังได้วัสดุปรับปรุงดินมาใช้งานทางเกษตรได้อีกด้วย
4. จากการทดลองใช้พลังงานสำหรับกระบวนการหมักที่สูง หากใช้พลังงานทดแทนได้ก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการลงได้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2560. รายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ.2559. ส่วน
ขยะมูลฝอยและสิ่งปฏิกูล, สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2561. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2560. กรมควบคุมมลพิษ
กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมทรัพยากรธรณี 2554. การศึกษาตัวอย่างน้ำและดินทางเคมี โครงการพัฒนาการพื้นที่เค็ม ภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ สำนักวิเคราะห์วิจัยทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือการพัฒนาที่ดิน สำหรับหมอดินอาสาและเกษตรกร. กรมพัฒนาที่ดิน.
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมวิชาการเกษตร. 2548. คู่มือวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์. กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและ
สหกรณ์.
- กรมวิชาการเกษตร. 2561 การขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์. (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
http://www.doa.go.th/ard/index.php?option=com_content&view=article&id=45:rule&catid=36:rule.8/5/2561
- กรรณก ทรัพย์อุดม. 2554. ผลของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและความชื้นที่มีต่อสมรรถนะการ
หมักขยะอินทรีย์ในครัวเรือนโดยการเติมอากาศแบบแพสซีฟ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เจนวิทย์ กรอบทอง. 2544. การเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย กับสารไบโอเนค ในการ
ทำปุ๋ยหมักจากวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม อาหารกระป๋อง และไปไม้แห้ง. วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- จำเป็น ทองอ่อน. 2547. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. คณะทรัพยากรธรรมชาติ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

- ชาติ เจียมไชยศรี และพิกุลทอง ตั้งบุชาเกียรติ 2546. อัตราส่วนของมูลฝอยตลาดสดกับเศษพืชและปริมาณอากาศที่เหมาะสมในการทำปุ๋ยหมักโดยใช้ถังหมักแบบปิด. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชุตินิพนธ์ ชูพุดชา 2553. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนจากปุ๋ยอินทรีย์กับการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักคะน้า (*Brassica oleracea*) ในระบบเกษตรอินทรีย์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ชนกพร หนูหอม 2544. การทำปุ๋ยหมักจากมูลสุกรโดยใช้ระบบอัดอากาศ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ทัศนีย์ แก้วมรกฏ. 2557. การผลิตปุ๋ยหมักจากเศษหอมแดง กระดุกโคเฟา และมูลแพะ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธีรพงษ์ สว่างปัญญากร, เสมอขวัญ ตันติกุล และชนวิวัฒน์ นิตศน์วิจิตร. 2547. การหมักปุ๋ยด้วยระบบการเติมอากาศ. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ธนาวุฒิ หนูทองแก้ว. 2555. การใช้ประโยชน์จากกากตะกอนและน้ำทิ้งหลังการผลิตก๊าซชีวภาพผสมกับวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เพื่อผลิตปุ๋ยหมักและเอนไซม์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- นิตติ เหมพัฒน์. 2553. รูปแบบถังหมักปุ๋ยสำหรับขยะอินทรีย์จากบ้านเรือน. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- นิตสาร ทัดแก้ว. 2555. การหมักปุ๋ยด้วยเปลือกไข่ มูลวัวและขี้เลื่อยที่มีการเติมอากาศแบบแพสซีฟ. วิทยานิพนธ์มหา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาลัยเชียงใหม่.
- พูนศักดิ์ จันทร์จำปี. 2541. การหมักปุ๋ยจากเศษอาหารและวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรแบบเทอร์โมฟิลิคโดยใช้ถังหมัก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ยงยุทธ โอสดสภา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และ ชวลิต ฮงประยูร. 2556. ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน. พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศุภากร ดวนใหญ่, จริญญา วงศ์ตรี, ปรียาภรณ์ บุญขาย, สงกรานต์ มะลิสอน และ วรณรัตน์ ชูติบุตร.

2558. ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้า ของปุ๋ยอินทรีย์ที่มีต่อดัชนีการงอก. กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร. กรมวิชาการเกษตร.

สรพรรณ อมตธรรม. 2546. ผลของการให้ความร้อนในการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารโดยใช้เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สิริวรรณ นิสสัยกล้า. 2553. ผลของการเติมหัวเชื้อต่อสมรรถนะการหมักขยะอินทรีย์ในครัวเรือนโดยใช้การเติมอากาศแบบแพสซีฟ. วิทยานิพนธ์มหา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาลัยเชียงใหม่.

สุชินันท์ เกียรติภักดิ์. 2555. การใช้ประโยชน์จากหอยเชอร์รี่สำหรับการทำปุ๋ยหมัก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.9503). 2548. มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ: ปุ๋ยหมัก. สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพฯ

ตะวัน ลั่นทองกุล. 2560. รูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ยแบบแพสซีฟ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.

อนุวัฒน์ เฟื่องจันทร์. 2546. ผลของการกวน และเติมอากาศในการทำปุ๋ยหมักจากขยะในครัวเรือนโดยใช้เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อานุภาพ แก้วกรอง. 2541. การผลิตปุ๋ยหมักจากเศษหญ้า เศษใบไม้แห้ง และกากตะกอนน้ำเสียด้วยวิธีการแบบมีการระบายอากาศ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อุดมผล พิชนไพบุลย์ และ โรสนา กาซอ 2552. เทคนิควิเคราะห์น้ำ น้ำเสียและมูลฝอย. สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Ahn, H.K., Richard, T.L., Choi, H.L., 2007. Mass and thermal balance during composting of a poultry manure - Wood shavings mixture at different aeration rates. Process Biochemistry., 42(2), 215-223.

- Ashraf, R., Shahid, F. and Ali, T.A. 2007. Association of fungi bacteria and actinomycetes with different composts. *Pak. J. Bot.*, 39(6), 2141-2151.
- Barberis, R. and Nappi, P. 1996. Evaluation of Compost Stability. In de Bertoldi, M. et al., *The Science of Composting : Part 1* (pp. 175-183), London: Blackie Academic & Professional
- Bari, Q.H., Koenig, A., 2012. Application of a simplified mathematical model to estimate the effect of forced aeration on composting in a closed system. *Waste Management.*, 32(11), 2037-2045.
- Beffa, T., Blanc, M., Marilley, L., Fisher, J.L., Lyon, P.F. Aragno, M. 1996. Taxonomic and metabolic microbial diversity during composting. in M. D. Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi (Ed.), *The Science of Composting : Part 1* (pp. 149-161), London: Blackie Academic & Professional
- Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Moral, R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444-5453.
- Chaoui, I., Zibiliske, M. and Ohno, T. 2003. Effects of earthworm casts and compost on solid microbial activity and plant nutrient availability. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 295-302
- Chroni, C., Kyriacou, A., 2009. Microbial characterization during composting of biowaste. *Waste Management.*, 29(5), 1520-1525.
- Gao, M., Li, B., Yu, A., Liang, F., Yang, L., Sun, Y., 2010. The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust. *Bioresource Technology.*, 101(6), 1899-1903.
- Gray, K.R., Sherman, K. and Biddlestone, A.J., 1971. A review of composting, Part I. *Process Biochem*, 6(6): 32-36.

- Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., Shen, Y. 2012. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology*, 112, 171-178.
- Hamoda, M. F., Abu Qdais, H. A., & Newham, J. 1998. Evaluation of municipal solid waste composting kinetics. *Resources, Conservation and Recycling*, 23(4), 209–223.
- Harrison, R.B. 2008. Composting and Formation of Humic Substances. in: *Encyclopedia of Ecology*, (Ed.) S.E.J.D. Fath, Academic Press. Oxford, pp. 713-719.
- Haug, R.T. 1993. *The practical handbook of compost engineering*. CRC Press.
- Huang, G.F., Wong, J.W.C., Wu, Q.T., Nagar, B.B. 2004. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. *Waste Management*, 24(8), 805-813.
- Jimenez, E., & Perez Garcia, V. 1989. Evaluation of city refuse compost maturity: a review. *Biological Wastes*, 27(2), 115–142.
- Kang, W., Kim, I.h., 2013. Effect of temperature on bacterial emissions in composting of swine manure. *Waste Management*, 34, 1006-1011.
- Li, Z., Lu, H., Ren, L., & He, L. (2013). Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. *Chemosphere*, 93(7), 1247–1257.
- Liao, P. H., Vizcarra, A. T., & Lo, K. V. 1994. Composting of salmon-farm mortalities. *Bioresource Technology*, 47(1), 67–71.
- Miller, F.C., 1992. Compost as a process base on the control of ecologically selective factor. In Miller, F.C., *Soil Microbiology* (pp515-544), NJ: Marcel Dekker.
- Miyatake, F. and Iwabuchi, K. 2000. Effect of high compost temperature on enzymatic activity and species diversity of culturable bacteria in cattle manure compost. *Bioresource Technol.* 96 : 1821-1825

- Ogunwande, G.A., Osunade, J.A., 2011. Passive aeration composting of chicken litter : Effects of aeration pipe orientation and perforation size on losses of compost elements. *Journal of Environmental Management.*, 92(1), 85-91.
- Polprasert, C. 1989. *Organic Waste Recycling*. Environmental Engineering Division, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Polprasert, C. 1996. *Organic Waste Recycling*, John Wiley & Son, 2nd edition, England
- Rabbani, K.R., Jindal R., Kubota H. and Obeng, L., 1983. Environmental sanitation reviews :composting of domestic refuse, Environmental sanitation information center, Asian Institute of Technology, No 11/11, October. Thailand
- Rasapoor, M., Nasrabadi, T., Kamali, M., Hoveidi, H. 2009. The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management*, 29(2), 570-573.
- Rynk, R., 1992. *On-farm Composting Handbook: Northeast Regional Agricultural Engineering Service*. New York.
- Rebollido, R, Matinez, J, Aguilera, Y, Melchor, K, Koerner, R. and Stegmann, R., 2008. Microbial populations during composting process of organic fraction of municipal solid waste. *Applied Eco and Envi Res.*, 6(3):61-67.
- Saludes, R. B., Iwabuchi, K., 2007. Composting of dairy cattle manure using a thermophilic–mesophilic sequence. *Biosystems Engineering.*, 98, 198-205.
- Seo, J.Y., Heo, J.S., Kim, T.H., Joo, W.H., Crohn, D.M., 2004. Effect of vermiculite addition on compost produced from Korean food wastes. *Waste Management.*, 24(10), 981-987.
- Sylla, Y.B., Watanabe, T., Cho, K.J., Kuroda, M. 2003. Effect of the number of the vertical pipes for the passive aeration on the composting rate. *Journal of Water and Environment Technology*, 1(2), 225-232.

- Sylla, Y.B., Kuroda, M., Yamada, M., Matsumoto, N. 2006. Feasibility study of a passive aeration reactor equipped with vertical pipes for compost stabilization of cow manure. *Waste management & research*, 24(5), 456-464.
- Stentiford, E.T., 1996. Composting Control: Principle and Practise. In de Bertoldi, M. et al., *The Science of Composting: Past I* (pp. 49-59), London: Chapman&Hall
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S. 1993. *Integrated solid waste management : engineering principles and management issues*. McGraw-Hill, Inc.
- Tchobanoglous, G., Kreith, F. 2002. *Handbook of Solid Waste Management*. McGraw-Hill Education.
- Tiquia, S.M., Tam, N.F.Y., Hodgkiss, I.J. 1996. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. *Environmental Pollution*, 93(3), 249-256.
- Tiquia, S.M., Tam, N.F.Y., Hodgkiss, I.J. 1997. Effects of turning frequency on composting of spent pig-manure sawdust litter. *Bioresource Technology*, 62(1-2), 37-42.
- Tiquia, S.M., Tam, N.F.Y., Hodgkiss, I.J. 1998. Change in chemical properties during composting of spent pig litter at different moisture contents. *Ecosyst. Environ.* 67 : 79-89.
- Yamada, Y., Kawase, Y. 2006. Aerobic composting of waste activated sludge: Kinetic analysis for microbiological reaction and oxygen consumption. *Waste Management*, 26(1), 49-61.
- Zhu, N., Deng, C., Xiong, Y., Qian, H. 2004. Performance characteristics of three aeration systems in the swine manure composting. *Bioresource Technology*, 95(3), 319-326.

ภาคผนวก ก.

วิธีการคำนวณ

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 น้ำหนักของวัสดุหมักสำหรับการหมัก

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (kg)	สัดส่วนน้ำหนัก %	น้ำหนักที่ใช้หมักจริง (kg)
1. เปลือกมะม่วง	22.70	18.78	1.50
2. เปลือกกล้วย	16.50	13.65	1.09
3. เปลือกแตงโม	19.70	16.29	1.30
4. เปลือกสับปะรด	20.50	16.96	1.36
5. เปลือกมะละกอ	16.00	13.23	1.06
6. เปลือกส้มโอ	8.90	7.36	0.59
7. เปลือกส้ม	11.40	9.43	0.75
8. เปลือกแก้วมังกร	5.20	4.30	0.34
รวม	120.9	100	8

ก1 การคำนวณหาน้ำหนักเปลือกผลไม้แต่ละชนิด

ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำหนักของเปลือกผลไม้ที่สำรวจจากเทศบาลเมืองคอหงส์ 191.9 กิโลกรัม คัดแยกเป็นผลไม้ที่ออกผลทุกฤดูกาล มีน้ำหนัก 120.9 กิโลกรัม แบ่งออกเป็น เปลือก มะม่วง กล้วย แตงโม สับปะรด มะละกอ ส้มโอ ส้ม และแก้วมังกร

$$\text{สัดส่วนของเปลือกผลไม้แต่ละชนิด (\%)} = \frac{\text{เปลือกผลไม้ (Kg)}}{\text{น้ำหนักรวมเปลือกผลไม้ (Kg)}} \times 100$$

เช่น

$$\begin{aligned} \text{สัดส่วนของเปลือกมะม่วง} &= \frac{22.70 \text{ Kg}}{120.9 \text{ Kg}} \times 100 \\ &= 18.78 \% \end{aligned}$$

กำหนดปริมาณของ น้ำหนักเปลือกผลไม้รวม 8 กิโลกรัม แล้วคำนวณหาปริมาณของ น้ำหนักของแต่ละชนิด

เช่น

$$\begin{aligned} \text{เปลือกมะม่วง} &= \frac{18.78 \% \times 8 \text{ Kg}}{100 \%} \\ &= 1.50 \text{ Kg} \end{aligned}$$

ก2 การคำนวณหาการร้อยละการลดลงของมวล

ตารางภาคผนวกที่ ก-2 การคำนวณร้อยละการลดลงของมวล

ตัวอย่างการคำนวณจากถังหมัก A₀

วัสดุหมัก	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ความชื้น (ร้อยละ)
เริ่มต้น	12.2	54.2
หยิบไปวิเคราะห์	1.3	64.8
เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก	9.1	53.1

หมายเหตุ ความชื้นของวัสดุหมักที่หยิบไปวิเคราะห์เป็นค่าความชื้นเฉลี่ยรวมที่หยิบไปวิเคราะห์

คำนวณหาน้ำหนักแห้งของวัสดุหมักเริ่มต้น

$$\begin{aligned} 100 \% - 54.2 \% &= 45.9 \% \\ \frac{12.2 \text{ Kg} \times 45.9 \%}{100 \%} &= 5.6 \text{ Kg} \end{aligned}$$

คำนวณหาน้ำหนักแห้งของวัสดุหมักที่หยิบไปวิเคราะห์

$$\begin{aligned} 100 \% - 64.8 \% &= 35.2 \% \\ \frac{1.3 \text{ Kg} \times 35.2 \%}{100 \%} &= 0.46 \text{ Kg} \end{aligned}$$

คำนวณหาน้ำหนักแห้งของวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก

$$100 \% - 53.1 \% = 46.9 \%$$

$$\frac{9.1 \text{ Kg} \times 46.9 \%}{100 \%} = 4.3 \text{ Kg}$$

คำนวณหาน้ำหนักแห้งที่หายไป

$$5.6 \text{ Kg} - 0.46 \text{ Kg} - 4.3 \text{ Kg} = 0.9 \text{ Kg}$$

คำนวณหาร้อยละการลดลงของมวล

$$\frac{0.9 \text{ Kg}}{5.6 \text{ Kg} - 0.46 \text{ Kg}} \times 100 \% = 16.9 \%$$

ภาคผนวก ข.

วิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์ความชื้น (อุดมผล พีชนิไพบูลย์ และ โรสนา กาซอ 2552)

วัสดุและอุปกรณ์

1. ตู้อบ (Hot air oven)
2. ถ้วยอะลูมิเนียม
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก

วิธีดำเนินการ

1. ทำการสุ่มตัวอย่างประมาณ 50 กรัม ใส่ถ้วยอะลูมิเนียม แล้วชั่งน้ำหนัก
2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 75 - 100 องศาเซลเซียส 3-4 วัน
3. นำใส่โถตู้ดูดความชื้น เป็นเวลา 20 นาที แล้วชั่งน้ำหนัก

$$\text{คำนวณหาความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

2. การวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (จำเป็น อ่อนทอง, 2547)

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม
2. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง
3. หลอดเหยียงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
4. กระจกตวงขนาด 25 มิลลิลิตร

วิธีดำเนินการ

1. ชั่งตัวอย่าง 5 กรัม ใส่หลอดเหยียงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ทำให้ได้สัดส่วนตัวอย่างต่อน้ำกลั่น 1 : 5
3. ปิดฝาและเขย่าประมาณ 1 นาที ทิ้งไว้ 30 นาที แล้วจึงวัดค่าความเป็นกรด-ด่างส่วนที่เป็นน้ำใส (Supernatant)

3. การวิเคราะห์การนำไฟฟ้า (จำเป็น อ่อนทอง, 2547)

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม
2. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
3. หลอดเหยียงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
4. กระจกตวงขนาด 25 มิลลิลิตร
5. เทอร์โมมิเตอร์

วิธีดำเนินการ

1. ชั่งตัวอย่าง 6 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงพลาสติก ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำปราศจากไอออนลงไป 30 มิลลิลิตร
3. ปิดฝาและเขย่าทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
4. นำไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

4. การวิเคราะห์ดัชนีการงอกของเมล็ดพืช (Germination Index; GI) (มกอช.9503, 2548)

วัสดุและอุปกรณ์

1. เมล็ดพันธุ์ฝักที่มีความงอกไม่ต่ำกว่า 75% เช่น ถั่วเขียว ฝักกาดเขียว ข้าวโพด
2. จานเพาะเมล็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร
3. กระดาษกรองเบอร์ 42 ขนาด 9 เซนติเมตร

วิธีดำเนินการ

1. ชั่งตัวอย่างใส่ในน้ำกลั่น โดยมีสัดส่วนตัวอย่างต่อน้ำกลั่น 1:10 เขย่าประมาณ 180 ครั้งต่อ นาที นาน 1 ชั่วโมง แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง
2. วางเมล็ดพันธุ์ฝัก จำนวน 10 เมล็ด ต่อ 1 จานเพาะเมล็ด
3. ใส่น้ำตัวอย่างที่สกัดได้ในจานเพาะเมล็ด จานละ 3 มิลลิลิตร และใส่น้ำกลั่นในจานเพาะเมล็ดควบคุม จานละ 3 มิลลิลิตร
4. บ่มจานเพาะเมล็ดในที่มืด ที่อุณหภูมิ 28-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. เก็บรวบรวมข้อมูลค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดที่งอกทั้งหมดต่อจาน (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์) และวัดความยาวของรากแต่ละเมล็ดที่งอกแล้วหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ ข-1 การงอกของเมล็ด

$$\text{ค่าดัชนีการรอกของเมล็ดพืช (\%)} = \frac{(\% \text{ความงอก} \times \text{ความยาวราก} \times 100) \text{ น้ำตัวอย่าง}}{(\% \text{ความงอก} \times \text{ความยาวราก}) \text{ น้ำกลั่น}}$$

$$\% \text{ ความงอก} = \frac{(\text{จำนวนเมล็ดที่งอก} \times 100)}{\text{จำนวนเมล็ดทั้งหมด}}$$

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลดิบจากผลการทดลอง

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 1

วัน	อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 1					อุณหภูมิ บรรยากาศ
	A ₀	A _{0.3}	A _{0.5}	A _{0.7}	A _{0.9}	
0	30.5 ± 0.71	28.9 ± 0.18	29.4 ± 0.18	29.1 ± 0.18	28.8 ± 0.35	29.50
1	39.3 ± 1.77	42.5 ± 1.41	45.4 ± 0.53	47.5 ± 0.35	43.5 ± 0.71	27.50
2	40.1 ± 0.18	41.5 ± 0.71	44.5 ± 0.35	45.5 ± 0.71	41.9 ± 0.53	28.25
3	39.3 ± 0.35	41.8 ± 0.00	43.0 ± 1.06	44.0 ± 0.71	41.6 ± 1.94	28.75
4	39.9 ± 0.18	40.9 ± 0.88	41.6 ± 0.53	42.4 ± 0.53	40.4 ± 1.94	27.25
5	39.3 ± 0.35	41.1 ± 0.18	40.8 ± 0.71	41.1 ± 0.88	38.8 ± 0.71	28.50
6	38.1 ± 0.18	39.6 ± 0.18	39.3 ± 0.71	41.4 ± 0.88	39.1 ± 0.53	28.00
7	38.1 ± 0.18	38.1 ± 0.53	39.3 ± 0.71	39.8 ± 0.35	38.5 ± 1.41	27.75
8	37.9 ± 0.18	37.8 ± 2.12	39.6 ± 0.18	38.8 ± 1.06	37.6 ± 0.53	28.25
9	37.3 ± 0.35	38.5 ± 0.00	38.3 ± 0.35	37.9 ± 0.88	37.0 ± 0.35	29.00
10	36.6 ± 1.24	37.5 ± 0.35	37.6 ± 1.24	38.3 ± 0.35	36.6 ± 1.24	30.50
11	35.6 ± 0.88	35.8 ± 0.35	36.1 ± 0.18	37.1 ± 0.53	35.6 ± 1.24	29.75
12	34.6 ± 1.24	34.6 ± 0.53	34.4 ± 0.53	35.6 ± 1.59	34.4 ± 0.53	29.50
13	34.5 ± 1.06	33.9 ± 1.24	33.0 ± 0.35	34.0 ± 2.12	33.6 ± 0.18	27.25
14	33.8 ± 0.35	33.0 ± 0.00	31.3 ± 0.35	33.3 ± 0.71	33.1 ± 0.18	28.50
15	33.1 ± 0.53	32.0 ± 0.71	30.9 ± 0.88	32.3 ± 0.71	32.8 ± 0.00	30.50
16	33.3 ± 0.35	33.0 ± 0.71	30.8 ± 0.35	30.8 ± 0.35	32.6 ± 0.18	30.25
17	32.1 ± 0.53	31.1 ± 0.18	30.6 ± 1.59	29.5 ± 0.35	31.4 ± 0.18	29.75
18	31.5 ± 0.35	30.9 ± 0.53	29.4 ± 0.88	29.4 ± 0.18	30.0 ± 0.00	29.50
19	30.5 ± 0.35	30.1 ± 1.24	30.0 ± 0.35	29.4 ± 0.18	29.8 ± 0.18	29.00
20	30.1 ± 0.18	29.9 ± 1.24	30.6 ± 2.30	29.5 ± 0.00	29.4 ± 0.18	29.00
21	29.5 ± 0.35	30.3 ± 0.71	29.6 ± 0.53	28.4 ± 0.53	29.5 ± 0.00	29.25
22	29.3 ± 0.35	29.8 ± 0.35	29.8 ± 1.06	28.5 ± 0.35	29.3 ± 0.35	29.75
23	29.1 ± 0.18	29.4 ± 0.53	29.0 ± 0.00	28.5 ± 0.00	29.0 ± 0.18	27.50
24	28.6 ± 0.18	29.0 ± 0.35	29.1 ± 0.18	28.4 ± 0.53	29.1 ± 0.35	28.50
25	28.5 ± 0.00	29.0 ± 1.06	29.1 ± 0.53	28.9 ± 0.18	29.5 ± 0.71	28.25

26	28.1 ± 0.18	28.6 ± 0.18	28.8 ± 0.00	28.3 ± 0.00	29.3 ± 0.35	27.25
27	28.4 ± 0.18	28.5 ± 0.35	29.0 ± 0.35	28.9 ± 0.18	29.3 ± 0.53	27.50
28	28.3 ± 0.71	29.0 ± 0.35	28.6 ± 0.18	28.6 ± 0.18	28.4 ± 0.53	27.25
29	28.4 ± 0.18	28.4 ± 0.18	28.5 ± 0.00	28.3 ± 0.00	28.1 ± 0.18	27.25
30	28.4 ± 0.18	28.3 ± 0.00	28.5 ± 0.35	28.4 ± 0.18	28.6 ± 0.18	26.75
31	28.3 ± 0.35	28.4 ± 0.18	28.4 ± 0.18	28.6 ± 0.18	28.5 ± 0.35	27.25
32	28.8 ± 0.00	28.6 ± 0.18	28.6 ± 0.88	29.0 ± 0.35	28.3 ± 0.00	28.50
33	28.1 ± 0.18	28.1 ± 0.18	27.9 ± 0.18	27.9 ± 0.18	28.3 ± 0.71	27.25
34	28.5 ± 0.00	28.5 ± 0.00	28.0 ± 0.35	28.3 ± 0.35	28.4 ± 0.53	28.25
35	28.4 ± 0.18	28.5 ± 0.35	28.0 ± 0.71	28.3 ± 0.00	28.3 ± 0.35	28.25

ตารางภาคผนวกที่ ค-2 ปริมาณก๊าซออกซิเจนของการทดลองที่ 1

วัน	ปริมาณก๊าซออกซิเจน (%) ของการทดลองที่ 1					ออกซิเจนในบรรยากาศ
	A ₀	A _{0.3}	A _{0.5}	A _{0.7}	A _{0.9}	
0	21.3	21.1	21.3	20.9	21.1	21.4
1	8.4	12.4	14.2	15.1	17.2	21.7
2	8.8	11.6	15.1	15.6	17.8	21.5
3	9	13.5	15.7	15.9	17.8	21.5
4	9.2	14.9	16.4	16.8	18.1	21.7
5	9.8	15.4	17.6	17.9	18.7	21.6
6	10	15.8	17.9	18.2	18.9	21.5
7	10.5	15.6	18.1	18.5	18.8	21.6
8	10.3	16.1	18.4	18.6	19.1	21.5
9	11	15.9	18.2	18.7	19	21.4
10	10.3	16.4	18.5	18.8	19.3	21.1
11	10.8	16.8	18.7	19	19.5	21.4
12	10.7	16.7	19.1	19.4	19.7	21.4
13	11.2	17.1	19	19.5	20.1	21.5
14	12.1	17.5	19.4	20	20.4	21.6
16	12.6	17.9	19.8	20.2	20.1	21.1
18	14.3	18.5	20.1	20.3	20.4	21.3
20	17.4	18.9	20.1	20.4	20.6	21.5
22	18.3	18.7	20.3	20.5	20.8	21.2
24	18.2	19.8	20.4	20.4	20.9	21.1
26	18.5	20.1	20.5	20.6	20.9	21.5
28	19	20.3	20.4	20.3	20.8	21.7
30	19.2	20.1	20.3	20.5	20.6	21.2
32	19.1	20.5	20.4	20.6	20.8	21.4
34	19.4	19.8	20.3	20.3	20.8	21.6
36	20.4	20.1	20.3	20.5	21	21.4

ตารางภาคผนวกที่ ค-3 ความชื้น (%) ของการทดลองที่ 1

วัน	ความชื้น (%) ของการทดลองที่ 1				
	A_0	$A_{0.3}$	$A_{0.5}$	$A_{0.7}$	$A_{0.9}$
0	53.3 ± 1.25	54.9 ± 1.85	55.2 ± 2.88	53.0 ± 1.73	54.6 ± 1.67
1	65.4 ± 1.27	63.4 ± 0.98	65.0 ± 0.49	64.8 ± 0.82	65.8 ± 2.14
2	71.2 ± 0.90	74.4 ± 1.14	74.4 ± 1.08	75.8 ± 2.77	73.4 ± 1.56
3	73.8 ± 0.60	76.6 ± 1.07	75.7 ± 0.44	77.2 ± 1.28	73.7 ± 0.83
4	75.0 ± 1.75	74.5 ± 0.73	73.9 ± 2.36	73.8 ± 1.75	71.6 ± 0.15
5	75.2 ± 1.13	73.2 ± 1.37	73.3 ± 0.77	72.3 ± 1.23	70.8 ± 0.59
6	73.7 ± 1.46	73.5 ± 3.05	71.0 ± 1.41	67.6 ± 0.88	66.6 ± 2.11
7	71.4 ± 1.53	69.9 ± 0.70	69.0 ± 2.01	65.9 ± 1.34	64.9 ± 2.25
8	70.4 ± 1.19	67.4 ± 1.43	67.2 ± 3.37	63.9 ± 0.45	60.6 ± 2.00
9	70.0 ± 0.29	66.8 ± 0.95	64.3 ± 3.09	62.3 ± 1.94	59.5 ± 0.45
10	68.8 ± 1.10	65.8 ± 2.37	63.2 ± 1.26	58.2 ± 2.73	57.0 ± 0.86
11	66.5 ± 1.11	63.4 ± 1.71	60.4 ± 1.69	56.9 ± 2.01	53.3 ± 1.61
12	64.8 ± 1.03	59.8 ± 0.52	58.1 ± 2.48	54.3 ± 1.69	50.6 ± 1.21
15	62.6 ± 0.72	57.0 ± 0.75	56.2 ± 1.22	54.1 ± 2.99	49.5 ± 3.23
18	62.5 ± 0.48	57.3 ± 1.52	56.8 ± 2.10	52.1 ± 3.33	47.5 ± 1.04
21	60.1 ± 1.28	55.6 ± 1.01	52.4 ± 2.33	47.7 ± 3.94	44.1 ± 2.68
24	58.0 ± 2.17	53.5 ± 0.99	50.5 ± 2.64	47.3 ± 3.09	41.4 ± 1.14
27	56.8 ± 2.25	52.6 ± 0.68	48.4 ± 3.30	46.4 ± 3.12	40.1 ± 1.35
30	56.4 ± 0.96	51.1 ± 0.04	47.7 ± 2.00	44.7 ± 2.16	39.8 ± 0.83
33	56.2 ± 2.38	49.8 ± 0.73	46.7 ± 0.60	44.3 ± 1.12	39.7 ± 0.80
36	54.4 ± 1.85	50.0 ± 1.30	46.2 ± 0.42	44.1 ± 1.56	40.0 ± 0.23
56	35.1 ± 2.42	32.5 ± 2.11	29.5 ± 1.43	26.4 ± 1.82	25.2 ± 1.13

ตารางภาคผนวกที่ ค-4 ความเป็นกรด-ด่าง ของการทดลองที่ 1

วัน	ความเป็นกรด-ด่าง ของการทดลองที่ 1				
	A_0	$A_{0.3}$	$A_{0.5}$	$A_{0.7}$	$A_{0.9}$
0	4.13 ± 0.13	4.23 ± 0.06	4.30 ± 0.12	4.34 ± 0.07	4.66 ± 0.11
1	4.10 ± 0.04	4.11 ± 0.02	4.24 ± 0.06	4.25 ± 0.01	4.66 ± 0.22
2	4.48 ± 0.08	4.49 ± 0.10	4.60 ± 0.12	4.75 ± 0.14	4.85 ± 0.10
3	4.97 ± 0.01	5.04 ± 0.12	4.89 ± 0.08	5.18 ± 0.37	5.18 ± 0.03
4	5.42 ± 0.15	5.14 ± 0.16	5.33 ± 0.08	5.62 ± 0.34	5.48 ± 0.00
5	5.78 ± 0.09	5.21 ± 0.09	5.60 ± 0.20	6.11 ± 0.30	5.91 ± 0.03
6	5.72 ± 0.28	5.55 ± 0.09	6.55 ± 0.10	6.53 ± 0.35	6.30 ± 0.02
7	6.08 ± 0.23	6.00 ± 0.08	6.57 ± 0.21	6.64 ± 0.01	6.60 ± 0.11
8	6.38 ± 0.11	6.33 ± 0.26	6.66 ± 0.11	6.65 ± 0.32	6.74 ± 0.18
9	6.88 ± 0.02	6.65 ± 0.31	7.11 ± 0.05	7.08 ± 0.23	6.99 ± 0.05
10	7.00 ± 0.06	7.00 ± 0.23	7.30 ± 0.39	7.23 ± 0.03	7.19 ± 0.06
11	7.08 ± 0.09	7.19 ± 0.10	7.26 ± 0.28	7.21 ± 0.11	7.33 ± 0.03
12	7.12 ± 0.20	7.16 ± 0.23	7.39 ± 0.41	7.41 ± 0.08	7.47 ± 0.04
15	7.32 ± 0.03	7.51 ± 0.03	7.72 ± 0.21	7.68 ± 0.10	7.80 ± 0.09
18	7.43 ± 0.03	7.90 ± 0.06	7.99 ± 0.08	7.94 ± 0.08	8.11 ± 0.05
21	7.71 ± 0.03	7.89 ± 0.04	8.22 ± 0.09	8.13 ± 0.04	8.20 ± 0.08
24	7.89 ± 0.10	8.07 ± 0.07	8.21 ± 0.04	8.28 ± 0.04	8.30 ± 0.04
27	8.08 ± 0.08	8.11 ± 0.01	8.19 ± 0.05	8.17 ± 0.06	8.15 ± 0.04
30	8.17 ± 0.06	8.15 ± 0.06	8.11 ± 0.06	8.16 ± 0.01	8.06 ± 0.04
33	8.09 ± 0.09	8.10 ± 0.07	8.07 ± 0.05	8.06 ± 0.03	7.92 ± 0.04
36	8.07 ± 0.16	8.07 ± 0.06	8.00 ± 0.04	7.92 ± 0.08	7.95 ± 0.04

ตารางภาคผนวกที่ ค-5 อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 1

วัน	อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 1				
	A_0	$A_{0.3}$	$A_{0.5}$	$A_{0.7}$	$A_{0.9}$
0	35.8 ± 1.55	34.8 ± 0.78	33.3 ± 1.59	35.1 ± 1.23	35.6 ± 0.79
1	35.8 ± 3.33	34.2 ± 0.18	33.8 ± 1.66	34.0 ± 0.48	35.1 ± 0.94
2	35.2 ± 3.04	34.6 ± 0.10	33.7 ± 2.71	33.3 ± 0.69	34.8 ± 0.15
3	34.5 ± 0.37	34.0 ± 0.60	33.3 ± 2.45	32.4 ± 0.32	32.6 ± 0.82
4	33.7 ± 0.74	32.9 ± 0.08	32.1 ± 1.29	31.8 ± 0.59	33.3 ± 0.67
5	33.2 ± 0.95	33.1 ± 0.86	31.7 ± 1.07	30.9 ± 1.17	32.8 ± 0.47
6	32.8 ± 1.00	32.4 ± 0.66	31.1 ± 0.59	29.7 ± 0.54	31.9 ± 1.19
7	32.3 ± 0.67	32.5 ± 0.04	31.6 ± 0.75	29.8 ± 0.49	32.1 ± 0.40
8	31.7 ± 0.59	32.0 ± 0.18	30.4 ± 0.05	29.1 ± 0.81	30.6 ± 1.87
12	31.2 ± 0.61	31.1 ± 1.95	29.5 ± 0.35	28.4 ± 0.24	30.3 ± 1.21
16	31.7 ± 0.05	30.7 ± 2.33	29.2 ± 0.13	28.6 ± 0.57	29.9 ± 1.05
20	32.0 ± 1.18	31.2 ± 0.93	29.2 ± 0.26	27.6 ± 0.66	30.3 ± 0.69
24	32.1 ± 1.05	29.9 ± 2.54	28.6 ± 0.24	27.6 ± 0.38	29.8 ± 0.53
28	31.9 ± 1.09	29.9 ± 0.36	28.9 ± 0.04	26.7 ± 0.45	29.4 ± 0.53
32	31.8 ± 1.42	30.5 ± 0.19	28.8 ± 0.27	27.0 ± 1.15	29.4 ± 0.30
36	31.2 ± 0.65	30.0 ± 0.42	28.4 ± 0.23	27.1 ± 1.10	29.4 ± 0.43

ตารางภาคผนวกที่ ค-6 ไนโตรเจนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 1

วัน	ไนโตรเจนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 1				
	A_0	$A_{0.3}$	$A_{0.5}$	$A_{0.7}$	$A_{0.9}$
0	1.17 ± 0.01	1.11 ± 0.01	1.05 ± 0.00	1.12 ± 0.02	1.11 ± 0.01
1	1.26 ± 0.00	1.14 ± 0.01	1.21 ± 0.01	1.23 ± 0.01	1.23 ± 0.00
2	1.33 ± 0.01	1.27 ± 0.01	1.34 ± 0.05	1.26 ± 0.03	1.29 ± 0.04
3	1.31 ± 0.01	1.21 ± 0.01	1.36 ± 0.00	1.39 ± 0.01	1.28 ± 0.00
4	1.37 ± 0.01	1.39 ± 0.01	1.51 ± 0.02	1.26 ± 0.01	1.28 ± 0.03
5	1.45 ± 0.01	1.47 ± 0.01	1.52 ± 0.01	1.30 ± 0.00	1.31 ± 0.01
6	1.53 ± 0.00	1.52 ± 0.00	1.54 ± 0.00	1.40 ± 0.01	1.57 ± 0.01
7	1.49 ± 0.01	1.62 ± 0.03	1.49 ± 0.01	1.41 ± 0.02	1.48 ± 0.01
8	1.61 ± 0.00	1.58 ± 0.01	1.57 ± 0.01	1.54 ± 0.03	1.59 ± 0.01
12	1.71 ± 0.01	1.68 ± 0.01	1.64 ± 0.01	1.66 ± 0.03	1.65 ± 0.01
16	1.70 ± 0.02	1.71 ± 0.01	1.77 ± 0.02	1.75 ± 0.00	1.68 ± 0.01
20	1.82 ± 0.01	1.82 ± 0.00	1.86 ± 0.01	1.87 ± 0.00	1.82 ± 0.00
24	1.86 ± 0.01	1.82 ± 0.04	1.89 ± 0.00	1.93 ± 0.01	1.89 ± 0.01
28	1.83 ± 0.04	1.90 ± 0.01	1.91 ± 0.00	1.96 ± 0.01	1.92 ± 0.01
32	1.95 ± 0.04	1.93 ± 0.01	1.95 ± 0.01	1.97 ± 0.01	1.95 ± 0.01
36	1.92 ± 0.01	1.92 ± 0.01	1.96 ± 0.00	1.99 ± 0.00	2.00 ± 0.03

ตารางภาคผนวกที่ ค-7 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

วัน	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักของการทดลองที่ 1				
	A_0	$A_{0.3}$	$A_{0.5}$	$A_{0.7}$	$A_{0.9}$
0	30.6 ± 0.95	31.4 ± 1.10	31.7 ± 1.52	31.5 ± 0.51	32.1 ± 1.12
1	28.4 ± 2.65	30.2 ± 0.03	27.9 ± 1.70	27.6 ± 0.71	28.6 ± 0.76
2	26.6 ± 2.15	27.3 ± 0.23	25.2 ± 1.09	26.4 ± 1.14	27.0 ± 0.77
3	26.5 ± 0.42	28.1 ± 0.82	24.5 ± 1.80	23.3 ± 0.01	25.5 ± 0.64
4	24.6 ± 0.80	23.7 ± 0.30	21.3 ± 1.16	25.3 ± 0.75	26.0 ± 0.05
5	23.0 ± 0.77	22.5 ± 0.80	20.9 ± 0.81	23.8 ± 0.90	25.0 ± 0.63
6	21.4 ± 0.65	21.3 ± 0.43	20.2 ± 0.39	21.2 ± 0.17	20.4 ± 0.85
7	21.8 ± 0.56	20.1 ± 0.33	21.2 ± 0.70	21.2 ± 0.67	21.7 ± 0.47
8	19.7 ± 0.36	20.2 ± 0.30	19.4 ± 0.21	18.9 ± 0.87	19.3 ± 1.27
12	18.2 ± 0.51	18.5 ± 1.32	18.0 ± 0.06	17.1 ± 0.15	18.4 ± 0.81
16	18.7 ± 0.26	17.9 ± 1.51	16.6 ± 0.13	16.3 ± 0.32	17.8 ± 0.55
20	17.6 ± 0.51	17.2 ± 0.51	15.7 ± 0.02	14.7 ± 0.35	16.7 ± 0.38
24	17.3 ± 0.43	16.5 ± 1.08	15.1 ± 0.13	14.3 ± 0.30	15.8 ± 0.34
28	17.5 ± 0.26	15.8 ± 0.07	15.1 ± 0.02	13.6 ± 0.33	15.3 ± 0.39
32	16.3 ± 0.37	15.8 ± 0.21	14.8 ± 0.24	13.7 ± 0.68	15.1 ± 0.26
36	16.2 ± 0.46	15.6 ± 0.10	14.5 ± 0.12	13.6 ± 0.55	14.7 ± 0.42

ตารางภาคผนวกที่ ค-8 อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 2

วัน	อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 2				อุณหภูมิบรรยากาศ
	T _A	T ₄₅	T ₅₅	T ₆₅	
0	29.8 ± 0.71	30.1 ± 0.53	29.3 ± 0.71	28.4 ± 0.53	27.8
1	46.4 ± 0.18	48.6 ± 0.53	42.5 ± 1.06	44.4 ± 0.88	28.5
2	44.5 ± 0.71	47.3 ± 0.71	52.4 ± 1.24	50.0 ± 0.35	31.0
3	42.6 ± 0.18	45.9 ± 0.53	44.5 ± 1.06	45.0 ± 0.35	27.8
4	41.9 ± 0.18	44.0 ± 1.77	42.9 ± 0.53	43.1 ± 0.88	28.8
5	40.1 ± 1.59	41.3 ± 1.77	42.5 ± 0.35	42.3 ± 0.00	30.0
6	38.1 ± 0.18	39.8 ± 0.71	41.4 ± 0.18	42.4 ± 0.53	28.5
7	38.5 ± 0.00	39.6 ± 0.18	41.1 ± 0.18	42.6 ± 0.53	27.8
8	38.4 ± 0.18	39.1 ± 0.18	40.8 ± 0.00	42.3 ± 0.71	31.3
9	37.3 ± 0.71	37.9 ± 0.53	37.4 ± 1.59	40.4 ± 0.18	32.3
10	36.8 ± 0.00	37.3 ± 0.35	37.5 ± 0.35	38.9 ± 0.88	31.3
11	33.8 ± 1.06	33.5 ± 1.06	36.0 ± 0.35	38.1 ± 0.18	29.5
13	31.8 ± 0.71	33.4 ± 0.53	35.6 ± 0.18	36.8 ± 0.71	30.3
15	31.3 ± 0.35	32.9 ± 0.88	35.3 ± 0.00	35.8 ± 0.71	30.3
17	31.1 ± 0.18	32.1 ± 0.53	33.9 ± 0.53	34.6 ± 0.18	30.8
19	30.8 ± 0.00	31.4 ± 0.53	34.1 ± 0.18	34.5 ± 0.35	30.5
21	30.9 ± 0.88	31.8 ± 0.71	33.4 ± 0.18	34.1 ± 0.18	29.8
23	30.1 ± 0.18	31.4 ± 0.88	32.9 ± 0.18	33.3 ± 0.00	28.0
25	30.1 ± 0.18	31.3 ± 0.35	31.9 ± 0.53	32.1 ± 0.18	30.3
27	29.9 ± 0.18	30.8 ± 0.35	31.6 ± 0.18	30.8 ± 0.35	29.3
29	30.0 ± 0.35	30.3 ± 0.00	30.3 ± 0.00	30.3 ± 0.00	30.0
31	29.6 ± 0.18	30.5 ± 0.00	31.0 ± 0.35	30.4 ± 0.18	30.0
33	29.4 ± 0.18	30.0 ± 0.00	30.3 ± 0.35	29.8 ± 0.00	29.5
35	29.3 ± 0.35	29.5 ± 0.35	29.6 ± 0.18	29.4 ± 0.18	29.3

ตารางภาคผนวกที่ ค-9 ปริมาณก๊าซออกซิเจนของการทดลองที่ 2

จำนวนวัน	ปริมาณก๊าซออกซิเจน (%) ของการทดลองที่ 2			
	T _A	T ₄₅	T ₅₅	T ₆₅
0	20.3	20.8	20.7	20.4
1	15.1	14.2	17.1	16.5
2	15.8	14.7	10.6	12.1
3	16.2	15.8	13.8	12.7
4	16.6	16.1	15.2	14.3
5	17.1	16.4	15.1	14.8
6	17.5	16.2	15.4	15.0
7	17.7	16.7	16.6	15.3
8	17.4	16.9	16.7	16.4
9	17.8	17.4	16.9	16.6
10	18.2	17.3	17.5	16.9
12	18.3	17.8	17.8	16.8
14	19.1	18.1	18.2	17.5
16	20.3	18.3	18.2	17.8
18	20.5	18.8	18.5	18.1
20	20.4	19.2	18.7	18.4
22	20.6	19.6	19.2	18.8
24	20.5	19.5	19.4	19.1
26	20.7	19.9	19.4	19.2
28	20.6	20.1	19.8	19.5
30	20.6	20.2	20.1	19.4
32	20.9	20.8	20.6	20.5
34	21.1	20.9	20.8	20.7
35	21.2	20.8	20.7	20.6

ตารางภาคผนวกที่ ค-10 ความชื้น (%) ของการทดลองที่ 2

วัน	ความชื้น (%) ของการทดลองที่ 2			
	T _A	T ₄₅	T ₅₅	T ₆₅
0	55.8 ± 1.35	54.4 ± 1.15	55.5 ± 1.07	54.3 ± 2.00
1	62.2 ± 2.86	46.3 ± 3.78	47.5 ± 1.90	47.2 ± 2.95
2	74.9 ± 0.27	57.0 ± 1.61	59.1 ± 1.13	62.2 ± 0.42
3	72.0 ± 1.02	70.1 ± 0.18	66.5 ± 1.95	67.5 ± 1.52
4	73.3 ± 0.21	64.9 ± 3.84	67.7 ± 0.89	66.8 ± 0.40
5	71.2 ± 0.65	66.7 ± 2.15	65.3 ± 1.96	66.8 ± 0.77
6	69.3 ± 1.57	63.6 ± 1.94	61.3 ± 1.18	64.5 ± 0.88
7	67.2 ± 1.95	65.8 ± 0.76	63.1 ± 3.98	62.8 ± 2.46
9	63.5 ± 1.14	63.6 ± 0.80	63.9 ± 3.56	64.8 ± 6.14
10	62.3 ± 0.98	65.3 ± 1.32	61.1 ± 2.40	63.5 ± 3.36
12	59.9 ± 0.86	64.5 ± 0.91	61.7 ± 4.47	64.1 ± 5.63
14	59.1 ± 0.68	63.8 ± 1.32	62.9 ± 5.42	61.5 ± 4.52
16	58.7 ± 0.31	61.1 ± 2.58	60.3 ± 2.80	59.1 ± 1.80
18	58.8 ± 0.37	60.2 ± 0.15	60.2 ± 4.19	58.0 ± 2.23
20	57.4 ± 1.82	59.1 ± 0.12	57.8 ± 3.50	56.0 ± 2.60
24	51.9 ± 2.31	57.6 ± 0.96	54.1 ± 1.50	51.6 ± 0.76
28	51.0 ± 2.50	53.6 ± 0.91	52.0 ± 0.25	49.3 ± 0.28
32	51.1 ± 1.35	50.7 ± 0.95	48.8 ± 0.76	46.0 ± 1.44
36	51.0 ± 0.97	49.1 ± 0.21	45.3 ± 0.99	43.2 ± 1.96
56	29.5 ± 0.93	29.0 ± 1.29	25.7 ± 1.57	23.6 ± 2.01

ตารางภาคผนวกที่ ค-11 ความเป็นกรด-ด่าง ของการทดลองที่ 2

วัน	ความเป็นกรด-ด่าง ของการทดลองที่ 2			
	T _A	T ₄₅	T ₅₅	T ₆₅
1	4.34 ± 0.06	4.60 ± 0.11	4.23 ± 0.21	4.60 ± 0.16
2	4.22 ± 0.03	4.75 ± 0.17	4.19 ± 0.04	5.04 ± 0.11
3	4.51 ± 0.23	5.31 ± 0.04	4.71 ± 0.04	5.36 ± 0.17
4	4.91 ± 0.04	5.47 ± 0.06	4.88 ± 0.08	5.58 ± 0.03
5	5.19 ± 0.04	5.44 ± 0.06	5.34 ± 0.11	5.48 ± 0.09
6	5.40 ± 0.11	5.59 ± 0.04	5.78 ± 0.08	6.23 ± 0.21
7	5.81 ± 0.05	5.93 ± 0.06	6.25 ± 0.14	6.89 ± 0.30
8	6.43 ± 0.16	6.10 ± 0.08	6.73 ± 0.20	7.32 ± 0.13
9	6.46 ± 0.25	6.47 ± 0.16	7.11 ± 0.33	7.45 ± 0.11
10	6.68 ± 0.13	6.72 ± 0.15	7.44 ± 0.40	7.62 ± 0.04
14	6.93 ± 0.08	6.97 ± 0.07	8.03 ± 0.40	7.80 ± 0.11
18	7.17 ± 0.01	7.20 ± 0.08	8.17 ± 0.02	7.94 ± 0.00
22	7.38 ± 0.04	7.71 ± 0.18	8.21 ± 0.04	8.07 ± 0.08
26	7.78 ± 0.04	7.97 ± 0.15	8.13 ± 0.06	8.16 ± 0.07
30	8.06 ± 0.08	8.06 ± 0.06	8.13 ± 0.01	8.17 ± 0.01
32	8.07 ± 0.03	8.07 ± 0.08	8.12 ± 0.04	8.18 ± 0.06
35	7.98 ± 0.05	7.99 ± 0.05	8.01 ± 0.13	8.08 ± 0.08

ตารางภาคผนวกที่ ค-12 อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 2

วัน	อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 2			
	T _A	T ₄₅	T ₅₅	T ₆₅
0	43.5 ± 0.88	42.8 ± 0.66	43.9 ± 0.94	44.2 ± 0.54
1	42.7 ± 1.29	43.4 ± 1.87	43.8 ± 0.05	43.9 ± 0.44
2	42.0 ± 0.69	42.6 ± 1.76	43.0 ± 0.64	43.9 ± 0.35
3	41.2 ± 1.38	42.3 ± 1.82	42.8 ± 0.98	43.8 ± 0.93
4	40.6 ± 1.36	42.3 ± 2.17	42.9 ± 1.85	42.4 ± 0.22
8	40.0 ± 1.17	40.7 ± 0.74	40.2 ± 0.49	41.0 ± 1.32
12	39.6 ± 1.03	40.6 ± 0.25	39.3 ± 0.15	41.6 ± 0.38
16	39.3 ± 0.52	39.5 ± 0.23	37.6 ± 0.66	39.4 ± 1.10
20	37.8 ± 1.05	38.7 ± 0.18	36.0 ± 1.15	37.6 ± 1.17
24	36.8 ± 0.88	36.8 ± 0.91	35.8 ± 0.54	37.3 ± 0.27
28	37.0 ± 0.18	36.2 ± 0.02	34.2 ± 1.42	36.1 ± 0.33
32	35.9 ± 0.53	35.4 ± 0.08	34.0 ± 0.46	34.7 ± 0.76
35	34.3 ± 0.83	33.1 ± 1.36	31.3 ± 1.18	32.3 ± 1.58

ตารางภาคผนวกที่ ค-13 ไนโตรเจนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 2

วัน	ไนโตรเจนทั้งหมด (%) ของการทดลองที่ 2			
	T _A	T ₄₅	T ₅₅	T ₆₅
0	1.31 ± 0.01	1.35 ± 0.07	1.45 ± 0.02	1.47 ± 0.01
1	1.44 ± 0.01	1.40 ± 0.03	1.61 ± 0.02	1.48 ± 0.03
2	1.47 ± 0.01	1.49 ± 0.02	1.54 ± 0.06	1.65 ± 0.01
3	1.54 ± 0.02	1.61 ± 0.02	1.64 ± 0.01	1.67 ± 0.01
4	1.56 ± 0.04	1.63 ± 0.01	1.65 ± 0.04	1.73 ± 0.01
8	1.63 ± 0.02	1.68 ± 0.01	1.71 ± 0.01	1.84 ± 0.01
12	1.64 ± 0.03	1.73 ± 0.02	1.75 ± 0.01	1.91 ± 0.01
16	1.74 ± 0.00	1.84 ± 0.01	1.84 ± 0.01	1.97 ± 0.01
20	1.77 ± 0.02	1.84 ± 0.01	1.95 ± 0.01	2.15 ± 0.05
24	1.79 ± 0.02	1.98 ± 0.01	2.12 ± 0.02	2.30 ± 0.06
28	1.85 ± 0.01	2.06 ± 0.03	2.21 ± 0.02	2.30 ± 0.02
32	1.97 ± 0.01	2.12 ± 0.01	2.29 ± 0.01	2.33 ± 0.01
35	2.10 ± 0.01	2.14 ± 0.01	2.34 ± 0.04	2.36 ± 0.04

ตารางภาคผนวกที่ ค-14 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

วัน	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักของการทดลองที่ 2			
	T _A	T ₄₅	T ₅₅	T ₆₅
0	33.2 ± 1.03	31.7 ± 2.15	30.4 ± 1.10	30.1 ± 0.08
1	29.7 ± 1.05	31.0 ± 1.97	27.3 ± 0.39	29.7 ± 0.27
2	28.6 ± 0.75	28.7 ± 1.60	28.0 ± 1.58	26.7 ± 0.10
3	26.9 ± 1.27	26.4 ± 1.49	26.1 ± 0.37	26.2 ± 0.33
4	26.1 ± 0.28	26.0 ± 1.56	26.0 ± 1.79	24.5 ± 0.33
8	24.6 ± 0.40	24.3 ± 0.34	23.5 ± 0.39	22.3 ± 0.63
12	24.1 ± 0.21	23.5 ± 0.44	22.5 ± 0.10	21.8 ± 0.04
16	22.6 ± 0.30	21.5 ± 0.29	20.5 ± 0.20	20.1 ± 0.63
20	21.4 ± 0.34	21.0 ± 0.26	18.5 ± 0.45	17.5 ± 0.95
24	20.6 ± 0.25	18.6 ± 0.52	16.9 ± 0.43	16.3 ± 0.57
28	20.0 ± 0.18	17.6 ± 0.25	15.5 ± 0.79	15.7 ± 0.29
32	18.2 ± 0.14	16.7 ± 0.15	14.8 ± 0.29	14.9 ± 0.37
35	16.4 ± 0.34	15.5 ± 0.58	13.4 ± 0.71	13.7 ± 0.88

ภาคผนวก ง.

ผลการทดสอบทางด้านสถิติโดย One-way-ANOVA

เมื่อวิเคราะห์จากเกณฑ์ที่กำหนดไว้ พบว่า ถังหมัก A₀ และ A_{0.3} มีค่าความชื้นที่ไม่ผ่านตามเกณฑ์ ดังนั้นการวิเคราะห์คุณภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก โดยใช้วิธีทางสถิติแบบ One Way ANOVA เพื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์ต่างๆของวัสดุหมัก โดยเปรียบเทียบจากถังหมัก A_{0.5}, A_{0.7} และ A_{0.9} ดังแสดงในตาราง ภาคผนวก ง. มีรายละเอียดดังนี้

ตารางภาคผนวกที่ ง-1 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบความเป็นกรดต่างของวัสดุหมักการทดลองที่ 1

ANOVA						
พารามิเตอร์		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ความเป็นกรดต่าง	Between Groups	.014	2	.007	1.355	.306
	Within Groups	.046	9	.005		
	Total	.060	11			

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของความเป็นกรดต่าง พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-2 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าความชื้นของวัสดุหมักการทดลองที่ 1

ANOVA						
พารามิเตอร์		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ความชื้น	Between Groups	37.152	2	18.576	16.710	.001
	Within Groups	10.005	9	1.112		
	Total	47.157	11			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
ความชื้น	A _{0.5}	A _{0.7}	2.8500*	.7455	.004	1.163	4.537
		A _{0.9}	4.2250*	.7455	.000	2.538	5.912
	A _{0.7}	A _{0.5}	-2.8500*	.7455	.004	-4.537	-1.163
		A _{0.9}	1.3750	.7455	.098	-.312	3.062
	A _{0.9}	A _{0.5}	-4.2250*	.7455	.000	-5.912	-2.538
		A _{0.7}	-1.3750	.7455	.098	-3.062	.312

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของความชื้น พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.5} และ A_{0.7} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.5} และ A_{0.9} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.7} และ A_{0.9} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-3 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าไนโตรเจนทั้งหมดของวัสดุหมักการทดลองที่ 1

ANOVA						
พารามิเตอร์		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ไนโตรเจน	Between Groups	.003	2	.002	3.526	.074
	Within Groups	.004	9	.000		
	Total	.008	11			

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของไนโตรเจนทั้งหมด พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวก ง-4 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักการทดลองที่ 1

ANOVA						
พารามิเตอร์		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	Between Groups	3.395	2	1.698	9.504	.006
	Within Groups	1.607	9	.179		
	Total	5.003	11			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
ความเป็นกรดต่าง	A _{0.5}	A _{0.7}	.08250	.05048	.137	-.0317	.1967
		A _{0.9}	.05000	.05048	.348	-.0642	.1642
	A _{0.7}	A _{0.5}	-.08250	.05048	.137	-.1967	.0317
		A _{0.9}	-.03250	.05048	.536	-.1467	.0817
	A _{0.9}	A _{0.5}	-.05000	.05048	.348	-.1642	.0642
		A _{0.7}	.03250	.05048	.536	-.0817	.1467

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.5} และ A_{0.7} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.5} และ A_{0.9} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.7} และ A_{0.9} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-5 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าปริมาณฟอสฟอรัสของวัสดุหมักการทดลองที่ 1

ANOVA						
พารามิเตอร์		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ฟอสฟอรัส	Between Groups	.002	2	.001	4.682	.040
	Within Groups	.002	9	.000		
	Total	.003	11			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
ฟอสฟอรัส	A _{0.5}	A _{0.7}	.00500	.00957	.614	-.0167	.0267
		A _{0.9}	.02750*	.00957	.018	.0058	.0492
	A _{0.7}	A _{0.5}	-.00500	.00957	.614	-.0267	.0167
		A _{0.9}	.02250*	.00957	.043	.0008	.0442
	A _{0.9}	A _{0.5}	-.02750*	.00957	.018	-.0492	-.0058
		A _{0.7}	-.02250*	.00957	.043	-.0442	-.0008

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของปริมาณฟอสฟอรัส พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าปริมาณฟอสฟอรัสเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.5} และ A_{0.7} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าปริมาณฟอสฟอรัสเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.5} และ A_{0.9} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าปริมาณฟอสฟอรัสเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.7} และ A_{0.9} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-6 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าปริมาณโพแทสเซียมของวัสดุหมักการทดลองที่ 1

ANOVA						
พารามิเตอร์		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
โพแทสเซียม	Between Groups	.149	2	.074	27.905	.000
	Within Groups	.024	9	.003		
	Total	.172	11			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
โพแทสเซียม	A _{0.5}	A _{0.7}	.18750 *	.03648	.001	.1050	.2700
		A _{0.9}	.26500 *	.03648	.000	.1825	.3475
	A _{0.7}	A _{0.5}	-.18750 *	.03648	.001	-.2700	-.1050
		A _{0.9}	.07750	.03648	.063	-.0050	.1600
	A _{0.9}	A _{0.5}	-.26500 *	.03648	.000	-.3475	-.1825
		A _{0.7}	-.07750	.03648	.063	-.1600	.0050

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของปริมาณโพแทสเซียม พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าปริมาณโพแทสเซียมเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.5} และ A_{0.7} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าปริมาณโพแทสเซียมเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.5} และ A_{0.9} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าปริมาณโพแทสเซียมเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.7} และ A_{0.9} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-7 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุหมักการทดลองที่ 1

ANOVA						
พารามิเตอร์		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ค่าการนำไฟฟ้า	Between Groups	.353	2	.177	15.306	.001
	Within Groups	.104	9	.012		
	Total	.457	11			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
ค่าการนำไฟฟ้า	A _{0.5}	A _{0.7}	.20000 *	.07594	.027	.0282	.3718
		A _{0.9}	-.22000 *	.07594	.018	-.3918	-.0482
	A _{0.7}	A _{0.5}	-.20000 *	.07594	.027	-.3718	-.0282
		A _{0.9}	-.42000 *	.07594	.000	-.5918	-.2482
	A _{0.9}	A _{0.5}	.22000 *	.07594	.018	.0482	.3918
		A _{0.7}	.42000 *	.07594	.000	.2482	.5918

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าการนำไฟฟ้า พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.5} และ A_{0.7} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.5} และ A_{0.9} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก A_{0.7} และ A_{0.9} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

เมื่อวิเคราะห์จากเกณฑ์ที่กำหนดไว้ พบว่า ทุกถังหมักผ่านตามเกณฑ์ ดังนั้นการวิเคราะห์คุณภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก โดยใช้วิธีทางสถิติแบบ One Way ANOVA เพื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์ต่างๆของวัสดุหมัก โดยเปรียบเทียบจากทุกถังหมัก ดังแสดงในตาราง ภาคผนวก ง. มีรายละเอียดดังนี้

ตารางภาคผนวกที่ ง-8 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบความเป็นกรดต่างของวัสดุหมักการทดลองที่ 2

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ความเป็นกรดต่าง	Between Groups	.050	3	.017	3.958	.036
	Within Groups	.050	12	.004		
	Total	.100	15			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
ความเป็นกรดต่าง	T _A	T ₄₅	-.06750	.04576	.166	-.1672	.0322
		T ₅₅	-.12500*	.04576	.018	-.2247	-.0253
		T ₆₅	-.14250*	.04576	.009	-.2422	-.0428
	T ₄₅	T _A	.06750	.04576	.166	-.0322	.1672
		T ₅₅	-.05750	.04576	.233	-.1572	.0422
		T ₆₅	-.07500	.04576	.127	-.1747	.0247
	T ₅₅	T _A	.12500*	.04576	.018	.0253	.2247
		T ₄₅	.05750	.04576	.233	-.0422	.1572
		T ₆₅	-.01750	.04576	.709	-.1172	.0822
	T ₆₅	T _A	.14250*	.04576	.009	.0428	.2422
		T ₄₅	.07500	.04576	.127	-.0247	.1747
		T ₅₅	.01750	.04576	.709	-.0822	.1172

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของความเป็นกรดต่าง พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{45} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{55} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{65} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{55} และ T_{65} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-9 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าความชื้นของวัสดุหมักการทดลองที่ 2

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ความชื้น	Between Groups	88.212	3	29.404	29.490	.000
	Within Groups	11.965	12	.997		
	Total	100.177	15			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
ความชื้น	T _A	T ₄₅	.9250	.7061	.215	-.613	2.463
		T ₅₅	3.6500*	.7061	.000	2.112	5.188
		T ₆₅	5.9750*	.7061	.000	4.437	7.513
	T ₄₅	T _A	-.9250	.7061	.215	-2.463	.613
		T ₅₅	2.7250*	.7061	.002	1.187	4.263
		T ₆₅	5.0500*	.7061	.000	3.512	6.588
	T ₅₅	T _A	-3.6500*	.7061	.000	-5.188	-2.112
		T ₄₅	-2.7250*	.7061	.002	-4.263	-1.187
		T ₆₅	2.3250*	.7061	.006	.787	3.863
	T ₆₅	T _A	-5.9750*	.7061	.000	-7.513	-4.437
		T ₄₅	-5.0500*	.7061	.000	-6.588	-3.512
		T ₅₅	-2.3250*	.7061	.006	-3.863	-.787

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของความชื้น พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{45} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{55} และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-10 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของวัสดุหมักการทดลองที่ 2

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ไนโตรเจน	Between Groups	.248	3	.083	35.224	.000
	Within Groups	.028	12	.002		
	Total	.276	15			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
ไนโตรเจน	T _A	T ₄₅	-.08250*	.03423	.033	-.1571	-.0079
		T ₅₅	-.27000*	.03423	.000	-.3446	-.1954
		T ₆₅	-.29500*	.03423	.000	-.3696	-.2204
	T ₄₅	T _A	.08250*	.03423	.033	.0079	.1571
		T ₅₅	-.18750*	.03423	.000	-.2621	-.1129
		T ₆₅	-.21250*	.03423	.000	-.2871	-.1379
	T ₅₅	T _A	.27000*	.03423	.000	.1954	.3446
		T ₄₅	.18750*	.03423	.000	.1129	.2621
		T ₆₅	-.02500	.03423	.479	-.0996	.0496
	T ₆₅	T _A	.29500*	.03423	.000	.2204	.3696
		T ₄₅	.21250*	.03423	.000	.1379	.2871
		T ₅₅	.02500	.03423	.479	-.0496	.0996

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของไนโตรเจนทั้งหมด พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{45} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{55} และ T_{65} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-11 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนทั้งหมดของวัสดุหมักการทดลองที่ 2

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	Between Groups	29.137	3	9.712	37.748	.000
	Within Groups	3.087	12	.257		
	Total	32.224	15			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	T _A	T ₄₅	.9250*	.3587	.024	.144	1.706
		T ₅₅	3.2000*	.3587	.000	2.419	3.981
		T ₆₅	2.9500*	.3587	.000	2.169	3.731
	T ₄₅	T _A	-.9250*	.3587	.024	-1.706	-.144
		T ₅₅	2.2750*	.3587	.000	1.494	3.056
		T ₆₅	2.0250*	.3587	.000	1.244	2.806
	T ₅₅	T _A	-3.2000*	.3587	.000	-3.981	-2.419
		T ₄₅	-2.2750*	.3587	.000	-3.056	-1.494
		T ₆₅	-.2500	.3587	.499	-1.031	.531
	T ₆₅	T _A	-2.9500*	.3587	.000	-3.731	-2.169
		T ₄₅	-2.0250*	.3587	.000	-2.806	-1.244
		T ₅₅	.2500	.3587	.499	-.531	1.031

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{45} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{55} และ T_{65} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-12 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสของวัสดุหมักการทดลองที่ 2

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ฟอสฟอรัส	Between Groups	.004	3	.001	2.423	.116
	Within Groups	.007	12	.001		
	Total	.011	15			

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของปริมาณฟอสฟอรัส พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-13 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบปริมาณโพแทสเซียมของวัสดุหมักการทดลองที่ 2

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
โพแทสเซียม	Between Groups	.049	3	.016	6.663	.007
	Within Groups	.030	12	.002		
	Total	.079	15			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
โพแทสเซียม	T _A	T ₄₅	.14500*	.03518	.001	.0684	.2216
		T ₅₅	.12000*	.03518	.005	.0434	.1966
		T ₆₅	.11000*	.03518	.009	.0334	.1866
	T ₄₅	T _A	-.14500*	.03518	.001	-.2216	-.0684
		T ₅₅	-.02500	.03518	.491	-.1016	.0516
		T ₆₅	-.03500	.03518	.339	-.1116	.0416
	T ₅₅	T _A	-.12000*	.03518	.005	-.1966	-.0434
		T ₄₅	.02500	.03518	.491	-.0516	.1016
		T ₆₅	-.01000	.03518	.781	-.0866	.0666
	T ₆₅	T _A	-.11000*	.03518	.009	-.1866	-.0334
		T ₄₅	.03500	.03518	.339	-.0416	.1116
		T ₅₅	.01000	.03518	.781	-.0666	.0866

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของปริมาณโพแทสเซียม พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าปริมาณโพแทสเซียมเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{45} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าปริมาณโพแทสเซียมเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าปริมาณโพแทสเซียมเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าปริมาณโพแทสเซียมเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{55} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าปริมาณโพแทสเซียมเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{65} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าปริมาณโพแทสเซียมเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{55} และ T_{65} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-14 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุหมักการทดลองที่ 2

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ค่าการนำไฟฟ้า	Between Groups	.070	3	.023	10.918	.001
	Within Groups	.026	12	.002		
	Total	.096	15			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
ค่าการนำไฟฟ้า	T _A	T ₄₅	.09000*	.03274	.018	.0187	.1613
		T ₅₅	.18000*	.03274	.000	.1087	.2513
		T ₆₅	.04750	.03274	.172	-.0238	.1188
	T ₄₅	T _A	-.09000*	.03274	.018	-.1613	-.0187
		T ₅₅	.09000*	.03274	.018	.0187	.1613
		T ₆₅	-.04250	.03274	.219	-.1138	.0288
	T ₅₅	T _A	-.18000*	.03274	.000	-.2513	-.1087
		T ₄₅	-.09000*	.03274	.018	-.1613	-.0187
		T ₆₅	-.13250*	.03274	.002	-.2038	-.0612
	T ₆₅	T _A	-.04750	.03274	.172	-.1188	.0238
		T ₄₅	.04250	.03274	.219	-.0288	.1138
		T ₅₅	.13250*	.03274	.002	.0612	.2038

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าการนำไฟฟ้า พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{45} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{65} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{65} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{55} และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ตารางภาคผนวกที่ ง-15 การวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าดัชนีการรอกของเมล็ดการทดลองที่ 2

ANOVA						
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ดัชนีการรอก	Between Groups	8194.572	3	2731.524	23.938	.000
	Within Groups	1369.305	12	114.109		
	Total	9563.877	15			

Multiple Comparisons							
LSD							
Dependent Variable	(I) Condition	(J) Condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
ดัชนีการรอก	T _A	T ₄₅	-44.5250*	7.5534	.000	-60.983	-28.067
		T ₅₅	-62.0500*	7.5534	.000	-78.508	-45.592
		T ₆₅	-33.8750*	7.5534	.001	-50.333	-17.417
	T ₄₅	T _A	44.5250*	7.5534	.000	28.067	60.983
		T ₅₅	-17.5250*	7.5534	.039	-33.983	-1.067
		T ₆₅	10.6500	7.5534	.184	-5.808	27.108
	T ₅₅	T _A	62.0500*	7.5534	.000	45.592	78.508
		T ₄₅	17.5250*	7.5534	.039	1.067	33.983
		T ₆₅	28.1750*	7.5534	.003	11.717	44.633
	T ₆₅	T _A	33.8750*	7.5534	.001	17.417	50.333
		T ₄₅	-10.6500	7.5534	.184	-27.108	5.808
		T ₅₅	-28.1750*	7.5534	.003	-44.633	-11.717

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าดัชนีการงอกของเมล็ด พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ค่าดัชนีการงอกของเมล็ดเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{45} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าดัชนีการงอกของเมล็ดเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าดัชนีการงอกของเมล็ดเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_A และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าดัชนีการงอกของเมล็ดเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{55} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าดัชนีการงอกของเมล็ดเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{45} และ T_{65} พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ค่าดัชนีการงอกของเมล็ดเฉลี่ยของวัสดุหมักภายในถังหมัก T_{55} และ T_{65} พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ภาคผนวก จ.

การคิดต้นทุนการผลิตในกระบวนการหมักสามารถจำแนกเป็นค่าอุปกรณ์และค่าไฟฟ้า ในการคำนวณต้นทุนการผลิตเป็นการคำนวณอย่างง่ายไม่รวมค่าเสื่อมราคา ค่าดอกเบี้ย ค่าเสียโอกาส ฯลฯ สามารถจำแนกได้ดังนี้

ต้นทุนการผลิต

ถังโพลีเอทิลีนขนาด 60 ลิตร	300	บาท
ชุดอุปกรณ์ควบคุมความร้อน	6,700	บาท
ตู้สร้างความร้อน	920	บาท
วาล์วควบคุมอัตราการเติมอากาศ	4,173	บาท
สายลม	150	บาท
เครื่องตั้งเวลาอัตโนมัติ	415	บาท
รวม	12,658	บาท/12 กิโลกรัม

ค่าดำเนินการ (คำนวณเฉพาะค่าไฟฟ้า)

ฮีทเตอร์แบบครีป	0.6	กิโลวัตต์
เครื่องเติมอากาศ	1	กิโลวัตต์
ระยะเวลา	15	วัน
เปิดระบบ	4	ชั่วโมงต่อวัน

อัตราปกติ ปริมาณการใช้พลังงานไม่ไฟฟ้าเกินกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

ส่วนที่ 1 ค่าพื้นฐานไฟฟ้า

ค่าพลังงานไฟฟ้า	318.57	บาท
ค่าบริการ	8.19	บาท
รวมค่าไฟฟ้าฐาน	326.76	บาท

ส่วนที่ 2 ค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft)

จำนวนพลังงานไฟฟ้า x ค่า Ft	-15.26	บาท
----------------------------	--------	-----

ส่วนที่ 3 ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%

(ค่าไฟฟ้าฐาน + ค่า Ft) x 7/100	21.81	บาท
--------------------------------	-------	-----

รวมเงินค่าไฟฟ้า	333.31	บาท/12 กิโลกรัม
-----------------	--------	-----------------

รายรับต่อ 1 ถังหมัก (6 กิโลกรัม)

จำหน่ายปุ๋ยหมัก กิโลกรัมละ 5 บาท

30

บาท

หมายเหตุ ค่าไฟฟ้าอ้างอิงจาก

<https://www.pea.co.th/webapplications/CheckRate/checkrate.html>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายตรีรัตน์ เจริญกุล	
รหัสประจำนั้กศึกษา	5610120056	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา

ทุนบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2556
 ทุนอุดหนุนวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2557
 ทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2559

การตีพิมพ์และเผยแพร่ผลงาน

ตรีรัตน์ เจริญกุล และ จีรัตน์ สกุรัตน์. 2559. ประสิทธิภาพการย่อยสลายมูลฝอยอินทรีย์ในถังหมักขนาดเล็กแบบเติมอากาศ. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 15 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร. ระหว่างวันที่ 11 – 13 พฤษภาคม 2559.

ตรีรัตน์ เจริญกุล และ จีรัตน์ สกุรัตน์. 2559. ประสิทธิภาพการย่อยสลายมูลฝอยอินทรีย์ในถังหมักขนาดเล็กแบบเติมอากาศ. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย. ปีที่ 30 ฉบับที่ 3 กันยายน – ธันวาคม 2559.