



รูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ยแบบพาสซีฟ
Effective Air Inlet and Outlet Pattern for Passive Composting Bin

ตะวัน ลั่นกองพูล
Tawan Lankongpoon

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ รูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ยแบบแพสซีฟ
ผู้เขียน นาย ตะวัน ลั่นกองพล
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีรัตน์ สกุรัตน์) (ดร.วิสา คงนคร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิยา เกาศล)

.....กรรมการ
(ดร.พิริยุตม์ วรรณพฤษ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พนาลี ชีวกิตาการ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีรัตน์ สกุรัตน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรีรัตน์ สกุรัตน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นาย ตะวัน ลั่นทองพูล)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นาย ตะวัน ลั่นทองพล)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	รูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ยแบบแพลสซีฟ
ผู้เขียน	นาย ตะวัน ลั่นกองพูล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักมูลฝอยอินทรีย์แบบแพลสซีฟ โดยทำการหมักมูลฝอยอินทรีย์ร่วมกับใบไม้แห้งในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนักเปียก ซึ่งประกอบด้วย 3 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1 หารูปแบบทางเข้าของอากาศที่ดีที่สุดสำหรับถังหมักโพนขนาด 39 ลิตร เมื่อเติมวัสดุหมักแบบกะ การทดลองที่ 2 หารูปแบบทางออกของอากาศที่ดีที่สุดสำหรับถังหมักโพนขนาด 39 ลิตร เมื่อเติมวัสดุหมักแบบกะ และการทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพการหมักเมื่อนำรูปแบบทางเข้าและทางออกที่ได้จากการทดลองที่ 1 และ 2 มาใช้กับถังหมักพลาสติกขนาด 120 ลิตร โดยเติมมูลฝอยแบบต่อเนื่อง 21 วัน

จากการทดลองที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบทางเข้าอากาศ 4 รูปแบบ พบว่า ถังหมักที่มีท่อในแนวนอนด้านล่างถึงเพื่อให้อากาศเข้าและกระจายตัวภายในถังให้ประสิทธิภาพการหมักที่ดีที่สุด เนื่องจากทำให้จุลินทรีย์ทั่วทั้งถังหมักได้รับอากาศเพียงพอ โดยทำให้วัสดุหมักถูกย่อยสลายทั้งหมดในเวลาเร็วที่สุด 25 วัน และวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า C/N 18.68, pH 6.97, ธาตุอาหารหลัก 4.97% และ GI 144.79% ส่วนการทดลองที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบทางออกอากาศ 4 รูปแบบ โดยใช้รูปแบบทางเข้าอากาศที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 พบว่า ถังหมักที่มีท่อทางออกอากาศอยู่ด้านบนและมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าทางเข้าอากาศให้ประสิทธิภาพการหมักที่ดีที่สุด เนื่องจากทำให้อากาศไหลออกจากถังหมักได้ช้ากว่า ส่งผลให้จุลินทรีย์สัมผัสกับอากาศได้มากกว่า โดยทำให้วัสดุหมักถูกย่อยสลายได้ทั้งหมดในเวลาเร็วที่สุด 27 วัน และวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า C/N 21.09, pH 7.49, ธาตุอาหารหลัก 5.30% และ GI 97.01% และเมื่อนำรูปแบบทางเข้าและทางออกของอากาศที่ได้ไปใช้กับถังหมักพลาสติกขนาด 120 ลิตร พบว่า วัสดุหมักถูกย่อยสลายได้ทั้งหมดเช่นกันในเวลา 90 วัน โดยวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า C/N 15.46, pH 5.21, ธาตุอาหารหลัก 3.59% และ GI 93.97%

ดังนั้น ถังหมักที่มีท่อในแนวนอนด้านล่างเพื่อให้อากาศเข้าและกระจายตัวภายในถัง และมีท่อทางออกของอากาศในแนวตั้งอยู่ด้านบนถังหมักและมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าทางเข้าอากาศ ทำให้วัสดุหมักย่อยสลายได้ทั้งหมด เมื่อเติมวัสดุหมักทั้งแบบกะ และ แบบต่อเนื่อง และวัสดุหลังการ

(6)

หมักมีค่า C/N pH และ ธาตุอาหารหลัก ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ย แต่ยังคงมีค่าความชื้นสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งควรนำมาผึ่งลมหรือผสมกับดินปลูกเพื่อลดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน

Thesis Title Effective Air Inlet and Outlet Pattern for passive composting bin
Author Mr. Tawan Lankongpoon
Major Program Environmental Engineering
Academic Year 2016

ABSTRACT

The objective of this research is to determine an effective air inlet and outlet pattern for a passive composting bin. Synthesis organic wastes and dry leaves with 2:1 wet weight ratio were composed. Three experiments were set up to (1) determine the best air inlet pattern for foam box size 39 L under batch process, (2) determine the best air outlet pattern for foam box size 39 L under batch process and (3) investigate the performance when composting in plastic bin size 120 L with the best air inlet and outlet patterns from the first and second experiment respectively under continuous process.

The first experiment, when four air inlet patterns were compared, showed that the composting bin that has a horizontal pipe at the bottom for letting air in and distributing air inside the bin achieved the best performance because microorganisms throughout the composting bin received sufficient air. The composting material was entirely decomposed in 25 days, the fastest, and C/N of the final product was 18.68, pH was 6.97, macronutrients were 4.97% and germination index was 144.79%. The second experiment, when four air outlet patterns were compared and the best air inlet pattern from the first experiment was used, showed that the composting bin that has a vertical pipe for letting air out on the top of the bin with less cross sectional area than air inlet pipe achieved the best performance because air velocity is slower allowing microorganisms to expose more to the air. The composting material was entirely decomposed in 27 days, the fastest, and C/N of the final product was 21.09, pH was 7.49, macronutrients were 5.30% and germination index was 97.01%. After that, the organic waste was composted in plastic bin size 120 L, the organic waste was also entirely decomposed in 90 days. C/N of the final

product was 15.46, pH was 5.21, macronutrients were 3.59 and germination index was 93.97%.

Therefore, the composting bin that has a horizontal pipe at the bottom for letting air in and distributing air inside the bin and has a vertical pipe for letting air out on the top of the bin with less cross sectional area than air inlet pipe can achieve a complete degradation of entire composting materials under batch and continuous processes. C/N, pH and macronutrients of the final product of all three experimnts meets the fertilizer standard except the moisture content. So that, the final product should be curred or mixed with soil to decrease moisture content before being added to the plants.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัสรัตน์ สกุศลรัตน์ ที่ให้ความกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.วิสา คงคล ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, รอง ศาสตราจารย์ ดร.ธนิยา เกาศล และ ดร.พิริยุตม์ วรรณพฤษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ ข้อเสนอแนะและแนวทางที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา สมาชิกในครอบครัวล้นกองพูล และเชียววิชัย สำหรับทุนการศึกษาและสนับสนุนช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และเป็นกำลังใจในการต่อสู้กับปัญหา และอุปสรรคต่าง ๆ มาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณทุนศิษย์ก้นกุฏิ ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปี งบประมาณ 2556 และทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ เลขที่สัญญา ENG-56-2-7-20-0190-S ที่ให้ทุนสนับสนุนจากในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ชาย ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการเก็บสะสมไปไม้แห้ง เพื่อนำมาใช้ทำการ ทดลองครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำ การทดลอง และการใช้ห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกความช่วยเหลือจากทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงในนี้ ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมด จึงขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ตะวัน ล้นกองพูล

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(13)
รายการตารางภาคผนวก	(14)
รายการรูป	(15)
สัญลักษณ์และอักษรย่อ	(18)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 บทตรวจเอกสาร	2
1.2.1 วัสดุหมัก	2
1.2.2 กระบวนการหมัก	2
1.2.3 ปุ๋ยหมัก	4
1.2.4 วัสดุปรับปรุงดิน	4
1.2.5 รูปแบบการหมัก	5
1.2.6 ระยะของการหมัก	7
1.2.7 ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อการหมัก	8
1.2.8 มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์	11
1.2.9 การประเมินการได้ที่ของวัสดุหมัก	11
1.2.10 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก	13
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ	18
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	18
1.6 ขอบเขตของการวิจัย	18
บทที่ 2 วิธีการวิจัย	19
2.1 วัสดุที่ใช้ในการหมัก	19
2.2 การเตรียมวัสดุหมัก	20
2.2.1. การทดลองที่ 1 และ 2	20
2.3 รูปแบบถังหมัก	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1. ถังหมักสำหรับการทดลองที่ 1	21
2.3.1.1. อัตราการไหลเข้าของอากาศและออกซิเจนในถังหมักป้อนจากการ คำนวณ	25
2.3.2. ถังหมักสำหรับการทดลองที่ 2	26
2.4 การดำเนินการหมัก	30
2.5 การเก็บตัวอย่างวัสดุหมักเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติ	30
2.6 คุณสมบัติและวิธีการที่ทำการวิเคราะห์	31
2.7 การเลือกรูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสม	33
2.8 การทดลองที่ 3 นำรูปแบบทางเข้าและออกของอากาศมาใช้งานในถังหมักขนาด 120 L	34
2.9 สรุปแผนการดำเนินการทดลองทั้งหมด	37
บทที่ 3 ผลการทดลองและวิจารณ์	38
3.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมัก	38
3.2 การทดลองที่ 1 ผลของรูปแบบทางเข้าของอากาศต่อคุณภาพวัสดุหมักในกล่องโฟม	39
3.2.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสม (เติมวัสดุหมักแบบกะ)	39
3.2.2 การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหมักผสมระหว่างการหมัก	41
3.2.2.1. การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่าง	41
3.2.2.2. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	42
3.2.2.3. การเปลี่ยนแปลงของความชื้น	43
3.2.2.4. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด	45
3.2.2.5. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจน	46
3.2.2.6. การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	48
3.2.2.7. คุณภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก	50
3.2.2.8. รูปแบบทางเข้าของอากาศที่เหมาะสม	53
3.3 การทดลองที่ 2 ผลของรูปแบบทางออกของอากาศต่อคุณภาพวัสดุหมักในกล่องโฟม	53
3.3.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสม (เติมวัสดุหมักแบบกะ)	53
3.3.2 การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหมักระหว่างการหมัก	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2.1. การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่าง	55
3.3.2.2. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	56
3.3.2.3. การเปลี่ยนแปลงของความชื้น	58
3.3.2.4. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด	59
3.3.2.5. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจน	61
3.3.2.6. การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	63
3.3.2.7. คุณภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก	64
3.3.2.8. รูปแบบทางออกของอากาศที่เหมาะสม	66
3.4 การทดลองที่ 3 นำรูปแบบทางเข้าและออกของอากาศมาใช้งานในถังหมักขนาด 120 L	67
3.4.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสม	67
3.4.2 การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหมักระหว่างการหมัก	68
3.4.2.1. การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่าง	69
3.4.2.2. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	69
3.4.2.3. การเปลี่ยนแปลงของความชื้น	71
3.4.2.4. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด	72
3.4.2.5. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจน	73
3.4.2.6. การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	74
3.4.2.7. คุณภาพวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก	75
บทที่ 4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	78
4.1 บทสรุป	78
4.2 ข้อเสนอแนะ	79
เอกสารอ้างอิง	80
ภาคผนวก ก.	86
ภาคผนวก ข.	87
ภาคผนวก ค.	91
ประวัติผู้เขียน	110

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1-1 การเปรียบเทียบการหมักแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ	4
ตารางที่ 1-2 สรุปสาระสำคัญจากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
ตารางที่ 2-1 รายละเอียดและแนวคิดของรูปแบบทางเข้าของอากาศแต่ละแบบ	25
ตารางที่ 2-2 สรุปรายละเอียดและแนวคิดของรูปแบบทางออกของอากาศแต่ละแบบ	30
ตารางที่ 2-3 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์	32
ตารางที่ 2-4 วิธีการวิเคราะห์แต่ละพารามิเตอร์	33
ตารางที่ 2-5 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของวัสดุหมัก	34
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักแต่ละชนิด	38
ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติของวัสดุหมักผสมของการทดลองที่ 1	40
ตารางที่ 3-3 การลดลงของปริมาณสารอินทรีย์ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	43
ตารางที่ 3-4 TOC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	46
ตารางที่ 3-5 TKN ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	48
ตารางที่ 3-6 C/N ratio ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	49
ตารางที่ 3-7 คุณภาพวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก	51
ตารางที่ 3-8 การนำไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อค่าเจริญเติบโตของพืช	52
ตารางที่ 3-9 สีวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักในการทดลองที่ 1	52
ตารางที่ 3-10 คุณสมบัติของวัสดุหมักผสมของการทดลองที่ 2	54
ตารางที่ 3-11 สารอินทรีย์ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	58
ตารางที่ 3-12 TOC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	61
ตารางที่ 3-13 TKN ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	62
ตารางที่ 3-14 C/N ratio ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	64
ตารางที่ 3-15 คุณภาพวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก	65
ตารางที่ 3-16 สีวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักของการทดลองที่ 2	66
ตารางที่ 3-17 คุณสมบัติของวัสดุหมักเริ่มต้น	68
ตารางที่ 3-18 คุณภาพวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก	75

รายการตารางภาคผนวก

	หน้า
ตารางภาคผนวกที่ ค-1 อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 1	91
ตารางภาคผนวกที่ ค-2 MC (%) ของการทดลองที่ 1	92
ตารางภาคผนวกที่ ค-3 TOC (%) ของการทดลองที่ 1	93
ตารางภาคผนวกที่ ค-4 TKN (%) ของการทดลองที่ 1	94
ตารางภาคผนวกที่ ค-5 C/N ratio ของการทดลองที่ 1	95
ตารางภาคผนวกที่ ค-6 pH ของการทดลองที่ 1	96
ตารางภาคผนวกที่ ค-7 อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 2	97
ตารางภาคผนวกที่ ค-8 MC (%) ของการทดลองที่ 2	98
ตารางภาคผนวกที่ ค-9 TOC (%) ของการทดลองที่ 2	99
ตารางภาคผนวกที่ ค-10 TKN (%) ของการทดลองที่ 2	100
ตารางภาคผนวกที่ ค-11 C/N ratio ของการทดลองที่ 2	101
ตารางภาคผนวกที่ ค-12 pH ของการทดลองที่ 2	102
ตารางภาคผนวกที่ ค-13 อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 3	103
ตารางภาคผนวกที่ ค-14 MC (%) ของการทดลองที่ 3	105
ตารางภาคผนวกที่ ค-15 TOC (%) ของการทดลองที่ 3	106
ตารางภาคผนวกที่ ค-16 TKN (%) ของการทดลองที่ 3	107
ตารางภาคผนวกที่ ค-17 C/N ratio ของการทดลองที่ 3	108
ตารางภาคผนวกที่ ค-18 pH ของการทดลองที่ 3	109

รายการรูป

	หน้า
รูปที่ 1-1 รูปแบบการหมักแบบไม่ใช้ถังหมัก	5
รูปที่ 1-2 รูปแบบการหมักแบบใช้ถังหมัก	6
รูปที่ 1-3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการหมัก	7
รูปที่ 1-4 ขนาดช่องทางระบายอากาศ	8
รูปที่ 2-1 มูลฝอยอินทรีย์สังเคราะห์	19
รูปที่ 2-2 ใบไม้แห้งที่นำมาใช้เป็นวัสดุหมัก	20
รูปที่ 2-3 ขนาดถังหมัก	21
รูปที่ 2-4 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 1	21
รูปที่ 2-5 ทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 1 ต้นแบบจริง	22
รูปที่ 2-6 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 2	22
รูปที่ 2-7 ทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 2 ต้นแบบจริง	22
รูปที่ 2-8 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 3	23
รูปที่ 2-9 ทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 3 ต้นแบบจริง	23
รูปที่ 2-10 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 4	23
รูปที่ 2-11 ทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 4 ต้นแบบจริง	24
รูปที่ 2-12 รูปตัดด้านหน้าและข้างถังควบคุม	24
รูปที่ 2-13 ถังควบคุม ต้นแบบจริง	24
รูปที่ 2-14 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางออกของอากาศรูปแบบที่ 1	26
รูปที่ 2-15 ทางออกของอากาศรูปแบบที่ 1 ต้นแบบจริง	27
รูปที่ 2-16 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางออกของอากาศรูปแบบที่ 2	27
รูปที่ 2-17 ทางออกของอากาศรูปแบบที่ 2 ต้นแบบจริง	27
รูปที่ 2-18 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางออกของอากาศรูปแบบที่ 3	28
รูปที่ 2-19 ทางออกของอากาศรูปแบบที่ 3 ต้นแบบจริง	28
รูปที่ 2-20 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางออกของอากาศรูปแบบที่ 4	28
รูปที่ 2-21 ทางออกของอากาศรูปแบบที่ 4 ต้นแบบจริง	29

รายการรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2-22 รูปตัดด้านหน้าและข้างถังควบคุม	29
รูปที่ 2-23 ถังควบคุม ต้นแบบจริง	29
รูปที่ 2-24 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างในถังหมัก	31
รูปที่ 2-25 รูปตัดด้านหน้าและข้างถังหมักของการทดลองที่ 3	35
รูปที่ 2-26 ถังหมักของการทดลองที่ 3 ต้นแบบจริง	35
รูปที่ 2-27 มูลฝอยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจริง	36
รูปที่ 2-28 แผนการดำเนินการทดลองทั้งหมด	37
รูปที่ 3-1 pH ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	41
รูปที่ 3-2 อุณหภูมิในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	42
รูปที่ 3-3 MC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	44
รูปที่ 3-4 TOC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	45
รูปที่ 3-5 TKN ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	47
รูปที่ 3-6 C/N ratio ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1	49
รูปที่ 3-7 ถังหมักที่มีอากาศเข้าและกระจายตัวในแนวนอน	53
รูปที่ 3-8 pH ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	56
รูปที่ 3-9 อุณหภูมิในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	57
รูปที่ 3-10 MC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	59
รูปที่ 3-11 อินทรีย์คาร์บอนในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	60
รูปที่ 3-12 TKN ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	62
รูปที่ 3-13 C/N ratio ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2	63
รูปที่ 3-14 เปรียบเทียบลักษณะการเติมอากาศของถังหมักโฟม	67
รูปที่ 3-15 ถังหมักในการทดลองที่ 3	68
รูปที่ 3-16 pH ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 3	69
รูปที่ 3-17 อุณหภูมิในวัสดุหมักของการทดลองที่ 3	70
รูปที่ 3-18 MC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 3	72

รายการรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3-19 TOC และ TKN ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 3	73
รูปที่ 3-20 C/N ratio ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 3	74
รูปที่ 3-21 สีและกลิ่นของวัสดุหมักในการทดลองที่ 3	76
รูปที่ 3-22 เปรียบเทียบลักษณะการเติมอากาศของถังหมักพลาสติกขนาด 120 L	77
รูปที่ ข-1 การหาค่า GI ของเมล็ดถั่วเขียวหลังสิ้นสุดการบ่ม	90

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

Cap	= Capita คือ รายคน หรือ รายหัว
CO ₂	= Carbon Dioxide คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
C/N ratio	= carbon to nitrogen ratio คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
d	= Day คือ วัน
dS/m	= deci siemens per meter คือ หน่วยที่ใช้วัดค่าการนำไฟฟ้า
EC	= Electrical Conductivity คือ ค่าการนำไฟฟ้า
g	= Grams คือ กรัม
GI	= Germination Index คือ ดัชนีการงอกของเมล็ดพืช
K ₂ O	= Potassium oxide คือ ปริมาณโพแทสเซียมในรูป K ₂ O
kg	= Kilogram คือ กิโลกรัม
L	= Litre คือ ลิตร
m	= Meter คือ เมตร
MC	= Moisture Content คือ ความชื้น
mm	= Millimeter คือ มิลลิเมตร
min	= Minute คือ นาที
NH ₃	= Ammonia คือ แอมโมเนียในรูปของก๊าซ
NH ₄ ⁺	= Ammonium คือ แอมโมเนียมในรูปของสารละลาย
P ₂ O ₅	= Phosphoric acid คือ ฟอสฟอรัสในรูปของ P ₂ O ₅
pH	= ค่าความเป็นกรดต่าง
SA:V	= Surface Area to Volume คือ อัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร
SD	= Standard Deviation คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Temp	= Temperature คือ อุณหภูมิ
TOC	= Total Organic Carbon คือ ปริมาณคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด
TKN	= Total Kjeldahl Nitrogen คือ ปริมาณไนโตรเจน
\bar{x}	= Mean คือ ค่าเฉลี่ย
%	= percent คือ เปอร์เซ็นต์หรือร้อยละ
°C	= Degree of Celsius คือ องศาเซลเซียส เป็นหน่วยวัดอุณหภูมิ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ประเทศไทยมีประชากรเพิ่มขึ้นทุกปีส่งผลให้มีปริมาณมูลฝอยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2559 มีปริมาณมูลฝอยเกิดขึ้น 26.17 ล้านตัน เฉลี่ยประมาณ 71,702 ตันต่อวัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) จากการพิจารณาองค์ประกอบมูลฝอยทั้งหมด พบว่าเป็นมูลฝอยอินทรีย์ประมาณร้อยละ 60 (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) และการจัดการมูลฝอยอินทรีย์เหล่านี้ในปัจจุบันคือการฝังกลบ ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการจัดการที่ไม่ยั่งยืน (Elango et al., 2009) เพราะในอนาคตจะหาสถานที่ในการทำหลุมฝังกลบยากมากขึ้น

ดังนั้นการหมักจึงเป็นวิธีการจัดการมูลฝอย (Shahudin et al., 2011) ที่สำคัญเพื่อช่วยลดมูลฝอยอินทรีย์ที่ต้องส่งไปหลุมฝังกลบและได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของปุ๋ยหรือก๊าซกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งเป็นการยืดอายุการใช้งานหลุมฝังกลบ ลดพลังงาน ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และลดการเกิดก๊าซเรือนกระจกที่มาจากหลุมฝังกลบ ซึ่งการหมักมีด้วยกัน 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้อากาศ และประเภทที่ไม่ใช้อากาศ ในส่วนของการหมักประเภทที่ใช้อากาศแยกออกเป็น 2 แบบคือ แบบแอคทีฟ (Active) หรือแบบใช้เครื่องเติมอากาศเข้าไปในวัสดุหมัก ซึ่งมีข้อดีคือ ใช้ระยะเวลาในการหมักสั้น แต่มีข้อเสียคือ ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศเข้าไปในวัสดุหมัก (Rynk, 1992) และแบบที่ 2 คือแบบแพสซีฟ หรือแบบการให้อากาศไหลเข้าไปในวัสดุหมักตามธรรมชาติ ในแบบนี้มีข้อดีคือ ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศ แต่มีข้อเสียคือ ใช้ระยะเวลาในการหมักนานกว่าแบบแรก ซึ่งการหมักแบบแอคทีฟ (Active) เหมาะสำหรับกลุ่มชาวบ้านที่ต้องการสร้างรายได้ เพราะมีค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศ (ธีระพงษ์ สว่างปัญญากร, 2549) ส่วนการหมักแบบแพสซีฟ เหมาะสำหรับการหมักในบ้านเรือนที่อยู่ในรูปของถังหมัก (นคร สุรียานนท์, 2552) เพราะทำได้ง่ายไม่มีค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศ แต่การหมักแบบแพสซีฟ ใช้ระยะเวลาในการหมักนาน (Rynk, 1992) ดังนั้นจึงควรได้รับการพัฒนาเพื่อลดระยะเวลาหมักต่อไป

อย่างไรก็ตามในอดีตได้มีการศึกษาวิจัยการหมักแบบแพสซีฟ เพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก โดยศึกษาขนาดของรูเจาะบนท่อและแนวการวางท่อเพื่อระบายอากาศเข้าถังหมัก (Ogunwande and Osunade, 2011) การติดฉนวนกันความร้อนที่ตัวถังหมัก (Adhikari et al., 2009) และจำนวนท่อทางเข้าของอากาศในถังหมัก (Sylla et al., 2003) เพื่อเข้ามาช่วยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ดีขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการหมักลดลง แต่ยังไม่มีการศึกษาวิจัยถึงรูปแบบ

ทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักแบบแพสซีฟ เพื่อลดระยะเวลาการหมัก ซึ่งสามารถเปลี่ยนมูลฝอยอินทรีย์กลายเป็นปุ๋ยหมักหรือวัสดุปรับปรุงดินได้มากขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษารูปแบบทางเข้าและออกของอากาศสำหรับถังหมักแบบแพสซีฟ โดยใช้มูลฝอยอินทรีย์หมักร่วมกับใบไม้แห้ง เพื่อลดระยะเวลาการหมักสำหรับนำไปใช้กับบ้านเรือน

1.2 บทตรวจเอกสาร

1.2.1 วัสดุหมัก

วัสดุหมักที่ใช้ในการหมักส่วนมากจะเป็นวัสดุที่ไม่ต้องการและถูกนำไปทิ้งให้เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งแบ่งออกได้เป็นดังนี้

1) วัสดุทางการเกษตร คือ วัสดุที่ไม่ต้องการและถูกทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ชังข้าวโพด ต้นข้าวโพด ต้นมันสำปะหลัง ทางปาล์ม ยอดอ้อย เป็นต้น

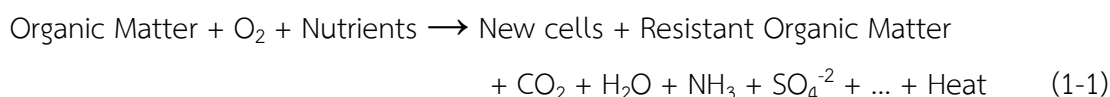
2) วัสดุทางอุตสาหกรรม คือ วัสดุที่ไม่ต้องการและถูกทิ้งทางอุตสาหกรรม ได้แก่ กากขานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาล เปลือกผลไม้จากโรงงานผลิตผลไม้กระป๋อง ทะลายปาล์มจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม เศษเนื้อสัตว์จากโรงงานผลิตอาหารแช่แข็ง และกากตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

3) วัสดุจากบ้านเรือน ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นเศษวัสดุที่เหลือจากการนำไปปรุงอาหาร เศษอาหารที่เหลือจากการรับประทานและใบไม้แห้งที่ร่วงจากต้นไม้ที่ปลูกไว้เป็นร่มเงารอบ ๆ บริเวณบ้าน เป็นต้น

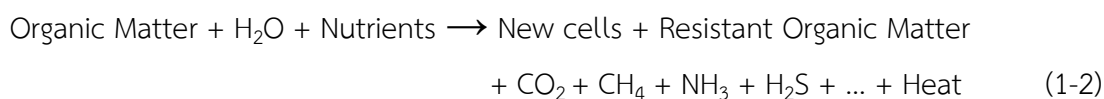
1.2.2 กระบวนการหมัก

เป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ ทำให้สารอินทรีย์ที่มีความเสถียรย่อยสลายได้ยากสามารถย่อยสลายได้ ซึ่งจะมีการทำงานร่วมกันของกลุ่มสิ่งมีชีวิต โดยในกระบวนการหมักนี้จะใช้อินทรีย์สารเป็นสารตั้งต้น ในช่วงแรกวัสดุหมักจะมีขนาดใหญ่ และเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว จนเมื่อวัสดุหมักมีขนาดเล็กลง ทำให้การย่อยสลายเริ่มช้าลงที่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียรไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอีกต่อไป (ศิรินทรา วันดี, 2552) การหมักแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การหมักแบบใช้อากาศ และการหมักแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการปฏิกิริยาทางชีวเคมีดังต่อไปนี้

1. การหมักแบบใช้อากาศ เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศ สามารถแสดงปฏิกิริยาการย่อยสลายได้ดังสมการที่ 1-1 (Tchobanoglous et al., 1993) จากสมการ สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เป็นต้น หลังจากการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศ จะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่คือ เซลล์ที่เกิดใหม่ วัสดุหมักที่เสถียร ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยเซลล์ที่เกิดใหม่เมื่อตายลงจะถูกย่อยสลายกลายเป็นวัสดุหมักที่เสถียร



2. การหมักแบบไม่ใช้อากาศ เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ สามารถแสดงปฏิกิริยาการย่อยสลายได้ดังสมการที่ 1-2 (Tchobanoglous et al., 1993) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศจะได้ผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ คือ น้ำ กากตะกอนจุลินทรีย์ และก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นก๊าซชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้



เมื่อเปรียบเทียบวิธีการหมักระหว่างแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศดังแสดงในตารางที่ 1-1 พบว่าการหมักแบบใช้อากาศมีระยะเวลาในการหมักสั้นกว่าแบบไม่ใช้อากาศ นอกจากนี้ยังมีปัญหาในเรื่องกลิ่นน้อย ฆ่าเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ดี และที่สำคัญไม่มีตะกอนจุลินทรีย์ที่ต้องนำไปกำจัด

ตารางที่ 1-1 การเปรียบเทียบการหมักแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ

ลักษณะที่ใช้เปรียบเทียบ	การหมักแบบใช้อากาศ	การหมักแบบไม่ใช้อากาศ
ผลิตภัณฑ์หลัก	ปุ๋ย, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ, ความร้อน	ก๊าซมีเทน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ, กรดอินทรีย์, ก๊าซไข่เน่า, ตะกอนจุลินทรีย์
อัตราการย่อยสลาย	เร็ว	ช้า
กลิ่น	น้อย	มาก
ความชื้น	40-50%	88-92%
การฆ่าเชื้อโรค	ดี	ปานกลาง
การจัดการขั้นต่อไป	ไม่จำเป็น	ต้องจัดการตะกอนจุลินทรีย์

ที่มา: Haug (1993); Polprasert (1996) อ้างถึงใน บัญญัติน โฉลกานันท์ และคณะ (2553)

1.2.3 ปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักคือ ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ได้หรือทำมาจากวัสดุอินทรีย์ โดยผลิตด้วยกรรมวิธีทำให้ชื้น สับ หมัก บด ร้อน สกัด หรือด้วยวิธีการอื่น และวัสดุหมักหรือวัสดุอินทรีย์ถูกย่อยสลายสมบูรณ์ด้วยจุลินทรีย์ เป็นตัวทำการย่อยสลายให้ได้เป็นธาตุที่มีลักษณะค่อนข้างคงรูป อ่อนนุ่ม เปื่อยยุ่ย ไม่แข็งกระด้าง มีสีน้ำตาลปนดำ และมีประโยชน์ที่นำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพของดิน เช่น ทำให้ดินโปร่ง มีผลทำให้การระบายน้ำและอากาศในดินดีขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

1.2.4 วัสดุปรับปรุงดิน

วัสดุปรับปรุงดิน คือ วัสดุใด ๆ ที่ใส่ลงในดิน แล้วทำให้คุณสมบัติของดินมีความเหมาะสมในการเพาะปลูก แต่ไม่ได้ใช้แทนปุ๋ย ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท (กรมพัฒนาที่ดิน, 2559) ได้แก่

1) วัสดุปรับปรุงดินทางกายภาพ เพื่อช่วยให้ดินกักเก็บน้ำและระบายอากาศได้ดีขึ้น มีโครงสร้างของดินที่ร่วนซุย ได้แก่ แกลบ ชี้เลื่อย เศษซากพืช วัสดุสังเคราะห์ปรับปรุงดิน เป็นต้น

2) วัสดุปรับปรุงดินทางเคมี เพื่อช่วยปรับค่า pH ของดินให้มีความเหมาะสม ทำให้มีความสามารถดูดซับธาตุอาหารของพืชได้ดีขึ้น ลดความเป็นพิษของธาตุที่เป็นพิษต่อพืชในดิน ได้แก่

วัสดุป้อนทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ เช่น ยิปซัม กำมะถันผง เศษซากวัสดุอินทรีย์ เบนโทไนต์ ภูไมต์ ซีโอไลต์ เป็นต้น

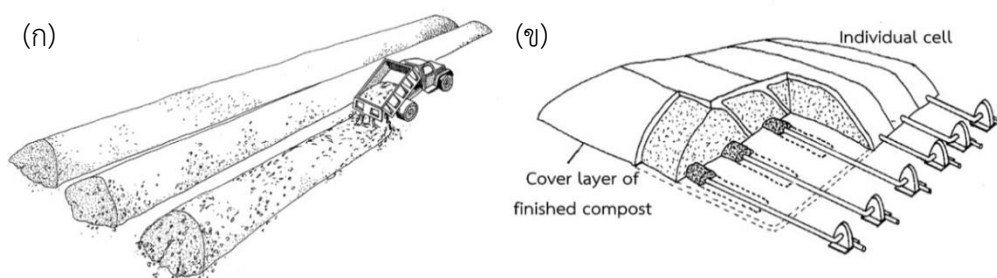
1.2.5 รูปแบบการหมัก

การหมักสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ (Haug, 1993) ดังนี้

1) การหมักแบบไม่ใช้ถังหมัก (Nonreactor Process) เป็นการหมักแบบกองไว้บนพื้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 1-1 ได้แก่

1.1) แบบพลิกกลับกองวัสดุหมัก ซึ่งวัสดุหมักจะกองบนพื้นราบตามแนวยาว และถูกพลิกกลับเป็นช่วง ๆ เช่น ทุก 2-4 วัน หรือทุก 7 วัน (Tiquia et al., 1997) ให้อากาศสามารถเข้าได้อย่างทั่วถึงภายในวัสดุหมัก เพื่อเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายและป้องกันการเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่าการหมักแบบกองแถว (Windrow Composting)

1.2) แบบไม่พลิกกลับกองวัสดุหมัก หรือเรียกว่าการหมักแบบกองสถิตเติมอากาศ (Aerated Static Pile Composting) วัสดุหมักจะกองไว้อยู่กับที่และมีการเติมอากาศผ่านเข้าไปในวัสดุหมักโดยผ่านทางท่ออากาศที่วางอยู่ใต้กองวัสดุหมักในลักษณะจุดหรือพ่นอากาศเข้าไป



รูปที่ 1-1 รูปแบบการหมักแบบไม่ใช้ถังหมัก

(ก) การหมักแบบกองแถว (ข) การหมักแบบเป็นกองสถิตเติมอากาศ

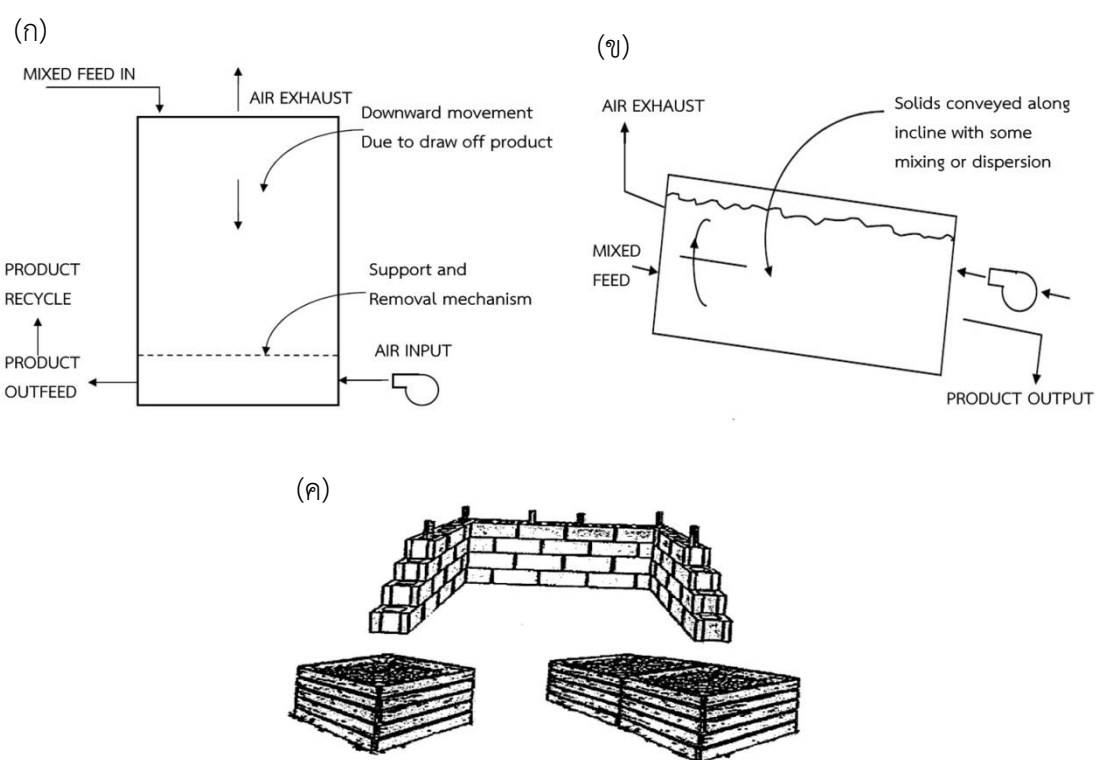
ที่มา: Rynk (1992)

2) การหมักแบบใช้ถังหมัก (Reactor Process) การหมักแบบนี้แบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 1-2 ได้แก่

1.1) ถังหมักแบบป้อนวัสดุหมักในแนวตั้ง (Vertical Flow Reactor) โดยการหมักแบบนี้วัสดุหมักจะเคลื่อนที่จากบนลงล่าง แบบต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องก็ได้

1.2) ถังหมักแบบป้อนวัสดุหมักในแนวนอนและวางเอียง (Horizontal and Inclined Flow Reactor) โดยการหมักแบบนี้วัสดุหมักจะเคลื่อนที่ในแนวนอน

1.3) ถังหมักแบบป้อนวัสดุหมักเพียงครั้งเดียว (Non Flow Reactor) โดยจะเติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียวด้วยการเทใส่ลงในถังหมักที่เป็นกล่อง หลังจากนั้นทำการหมักต่อไปเป็นเวลา 7-14 วัน เมื่อหมักตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วจะนำวัสดุหมักที่ได้ออกมาบ่มแบบกองแถวต่อจนได้ที่แล้วนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 1-2 รูปแบบการหมักแบบใช้ถังหมัก

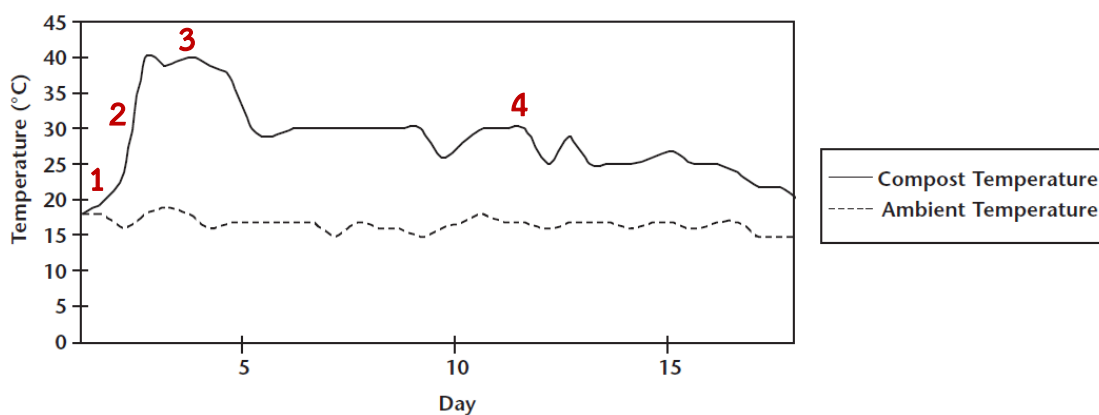
(ก) ถังหมักแบบป้อนวัสดุหมักในแนวตั้ง (ข) ถังหมักแบบป้อนวัสดุหมักในแนวนอนและวางเอียง

(ค) ถังหมักแบบป้อนวัสดุหมักเพียงครั้งเดียว

ที่มา: Haug (1993)

1.2.6 ระยะของการหมัก

ระยะของการหมักสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 1-3 ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ (Tchobanoglous and Kreith, 2002) ดังนี้



รูปที่ 1-3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการหมัก

ที่มา: Cornell (2016)

1) ระยะปรับตัว (Lag Phase) เป็นระยะการปรับตัวของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ให้เข้ากับลักษณะของวัสดุหมัก ซึ่งจุลินทรีย์จะทำการเพิ่มจำนวนเซลล์โดยการย่อยสลายน้ำตาล แป้ง เซลลูโลสที่ย่อยสลายได้ง่าย และกรดอะมิโน ที่มีอยู่ในวัสดุหมักแล้วปล่อยสารอาหารออกมา ซึ่งจากกิจกรรมการย่อยสลายวัสดุหมักของจุลินทรีย์ มีผลทำให้อุณหภูมิในวัสดุหมักเริ่มสูงขึ้น

2) ระยะเจริญเติบโต (Active Phase) เป็นระยะที่จุลินทรีย์ในวัสดุหมักจะเริ่มเจริญเติบโตและมีการเพิ่มจำนวนเซลล์มากขึ้น โดยมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในวัสดุหมัก

3) ระยะคงที่ (Plateau Phase) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้มีสารอาหารที่ได้จากการย่อยสลายวัสดุหมักมากเพียงพอให้จุลินทรีย์ใช้ในการเพิ่มจำนวนเซลล์ และเพิ่มระดับของกิจกรรมการย่อยสลายให้สูงขึ้นจนกว่าสารอาหารที่ได้จากการย่อยสลายเหลือน้อย โดยระดับกิจกรรมการย่อยสลายที่สูงขึ้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าอุณหภูมิเริ่มอยู่ในช่วงคงที่ ซึ่งอาจใช้ระยะเวลาสั้นหรือยาวนานอยู่กับวัสดุหมัก สภาพแวดล้อม และขั้นตอนในการหมัก

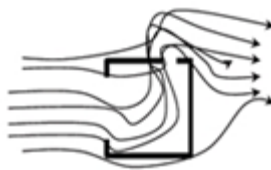
4) ระยะไต่ที่ (Maturation Phase) เมื่อสารอาหารที่ได้จากการย่อยสลายเริ่มหมด จึงเข้าสู่ระยะไต่ที่ ซึ่งในระยะนี้กิจกรรมต่าง ๆ ของจุลินทรีย์จะเริ่มลดลงตามลำดับ และอุณหภูมิภายในวัสดุหมักจะค่อย ๆ ลดลงจนอุณหภูมิเริ่มคงที่และใกล้เคียงกับอุณหภูมิของบรรยากาศโดยรอบ ซึ่งแสดงว่าวัสดุหมักถูกย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์

1.2.7 ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อการหมัก

การหมักคือ การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่ต้องการหมักโดยอาศัยกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่อยู่ในวัสดุหมัก ซึ่งการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการหมักดังต่อไปนี้

1) การระบายอากาศ (Aeration)

การระบายอากาศในวัสดุหมักมีผลต่อจุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศในการย่อยสลายวัสดุหมัก จึงต้องมีปริมาณอากาศที่เพียงพอเพื่อใช้ในการย่อยสลายและการเพิ่มจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์ ช่วยป้องกันการเกิดกลิ่นเหม็นเนื่องจากการเกิดสภาวะไร้อากาศ (Guo et al., 2012) อีกทั้งยังช่วยระเหยน้ำและระบายความร้อน เพื่อควบคุมความชื้นและอุณหภูมิให้มีความเหมาะสมในวัสดุหมัก ซึ่งการเพิ่มปริมาณอากาศให้แก่วัสดุหมักมีหลายวิธี ได้แก่ (1) การกลับกองวัสดุหมัก (2) การเพิ่มขนาดช่องทางระบายอากาศ โดยที่ช่องทางเข้าของอากาศที่ใหญ่กว่าช่องทางออกของอากาศทำให้อากาศที่เข้ามาได้มากขึ้นมีอากาศกระจายได้ทั่วแต่มีความเร็วของอากาศน้อยดังแสดงในรูปที่ 1-4 (ปรีศณี เมฆศรีสวัสดิ์, 2548) และ (3) การใช้เครื่องเติมอากาศ



รูปที่ 1-4 ขนาดช่องทางระบายอากาศ

ที่มา: มาลินี ศรีสุวรรณ (2543) อ้างถึงใน ปรีศณี เมฆศรีสวัสดิ์ (2548)

ทั้งนี้การระบายอากาศในวัสดุหมักขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด และปริมาณของวัสดุหมัก โดยช่วงแรกของการหมักจุลินทรีย์จะมีความต้องการอากาศสูง เพื่อใช้ในการย่อยสลายวัสดุหมักและเพิ่มจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์ หากวัสดุหมักมีความชื้นสูงจะมีการระบายอากาศได้น้อยลง จำเป็นต้องเพิ่มช่องทางระบายอากาศหรือการกลับกองวัสดุหมักเพื่อเพิ่มการระบายอากาศ หากใช้เครื่องเติม

อากาศก็ไม่จำเป็นต้องเพิ่มช่องระบายอากาศหรือกลับกองวัสดุหมักดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่ควรระวังไม่ให้ปริมาณอากาศที่เติมมีมากเกินไป จนส่งผลให้ความชื้นในวัสดุหมักลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้วัสดุหมักบางส่วนแห้งและอุณหภูมิในวัสดุหมักลดลง ซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้การย่อยสลายในวัสดุหมักเกิดขึ้นได้ช้าตามไปด้วย

2) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการหมัก เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ส่งผลให้ระดับความเข้มข้นของอัตราการย่อยสลายวัสดุหมักเพิ่มขึ้นด้วย (Khan et al., 2014) โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักมีด้วยกัน 2 ช่วงหลัก ๆ คือ ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic phase) มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 35-40 °C ซึ่งถือเป็นช่วงที่มีความหลากหลายของจุลินทรีย์อย่างมาก (Stentiford, 1996) และช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic phase) มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 40-70 °C (Ahmad et al., 2007) เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่ช่วงนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าวัสดุหมักที่ย่อยสลายง่ายได้ถูกย่อยสลายอย่างรวดเร็ว เพื่อให้มีสารอาหารเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Wang et al., 2013) และเป็นช่วงที่มีอัตราการย่อยสลายสูง (Harrison, 2008) อีกทั้งยังสามารถฆ่าเชื้อโรคในวัสดุหมักได้ (Richard, 2005) แต่หากเกิน 70 °C ก็จะเป็นการยับยั้งการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ มีผลทำให้อัตราการย่อยสลายลดลง (Sylla et al., 2003)

3) ขนาดวัสดุหมัก (Particle size)

ขนาดวัสดุหมักมีส่วนสำคัญที่ช่วยไม่ให้เกิดการหมักแบบไม่ใช้อากาศ เนื่องจากวัสดุหมักอัดกันแน่นจนอากาศไม่สามารถซึมผ่านได้ โดยวัสดุหมักที่เหมาะสมนำมาใช้ในการหมัก จะต้องไม่อัดแน่นไปด้วยวัสดุที่มีเส้นใย กิ่งไม้ที่ถูกตัด และขี้ข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งขนาดวัสดุหมักที่เหมาะสมคือ 1.3-5.0 cm ส่วนวัสดุหมักพวกพืชสีเขียว เช่น เศษผัก ผลไม้ และเศษหญ้าที่โดนตัด หากนำมาหมักควรจะมีขนาดไม่น้อยกว่า 5.0 cm (Tchobanoglous and Kreith, 2002)

4) ความชื้น (Moisture content)

ค่าความชื้น (Moisture Content; MC) ในวัสดุหมักจะถูกใช้ในการละลายสารอาหารเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานในการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Liang et al., 2003) MC ในวัสดุหมักควรมีค่าอยู่ในช่วง 40-65% (Rynk, 1992) และไม่ควรต่ำกว่า 40% (Lashermes et al., 2012) จนอาจทำให้วัสดุหมักแห้ง (Yamada and Kawase, 2006) และจุลินทรีย์ในวัสดุหมักตายลงเนื่องจากการขาดน้ำ มีผลทำให้อุณหภูมิไม่เพิ่มสูงขึ้น เพราะกิจกรรมการย่อยสลายวัสดุหมักของจุลินทรีย์ลดลง (Hamoda et al., 1998) หากความชื้นมากกว่า 65% อาจจะทำให้เกิดสภาวะไร้

อากาศได้ เนื่องจากน้ำที่มาจากความชื้นจะไปยับยั้งไม่ให้อากาศเคลื่อนที่เข้าไปในช่องว่างภายในวัสดุหมัก ซึ่งส่งผลกระทบต่อกรย่อยสลายวัสดุหมักของจุลินทรีย์ (Bernal et al., 2009) ทำให้อุณหภูมิและคุณภาพของวัสดุหมักที่ได้หลังเสร็จสิ้นการย่อยสลายมีค่าต่ำ

5) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

C/N ratio เป็นสิ่งสำคัญในการดำรงชีพของจุลินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์จะใช้ธาตุคาร์บอนจากการย่อยสลายของคาร์โบไฮเดรต เปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลย่อยง่าย กรดอินทรีย์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเข้าสู่เซลล์ เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน และใช้ธาตุไนโตรเจนจากการย่อยสลายของโปรตีน เปลี่ยนไปเป็นเปปไทด์ กรดอะมิโน สารประกอบแอมโมเนียม ก๊าซไนโตรเจนหรือแอมโมเนีย และเข้าสู่เซลล์เพื่อนำมาใช้สร้างเซลล์ (Golueke, 1972) โดยทั่วไป C/N ratio ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25-50 (Tchobanoglous et al., 1993) ซึ่งหมายความว่า จุลินทรีย์ต้องการนำธาตุคาร์บอนเข้าไปในเซลล์ 25-50 ซึ่งจำเป็นต้องนำเอาธาตุไนโตรเจนเข้าไป 1 จึงจะทำให้เกิดความสัมพันธ์ของธาตุทั้งสองในเซลล์ ส่งผลให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตและทำกิจกรรมในการย่อยสลายได้ดี แต่หากมีธาตุไนโตรเจนต่ำเกินไปจะมีอัตราการย่อยสลายช้า เนื่องจากมีธาตุไนโตรเจนไม่เพียงพอที่จุลินทรีย์จะนำมาสร้างเซลล์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโต และหากมีธาตุไนโตรเจนสูงเกินไปจะมีอัตราการย่อยสลายเร็ว เนื่องจากมีธาตุไนโตรเจนเพียงพอให้จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ ทำให้ปริมาณอากาศไม่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ จนอาจเกิดสภาวะไร้อากาศขึ้นภายในวัสดุหมัก นอกจากนี้ยังอาจสูญเสียธาตุไนโตรเจนในรูปของก๊าซ NH_3

6) ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

pH ที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ควรอยู่ในช่วงระหว่าง 5.5-9.0 (Rynk, 1992) แต่ในการหมักมีการปรับค่า pH ของวัสดุหมักให้อยู่ในช่วงดังกล่าวกันค่อนข้างน้อย เนื่องจากจุลินทรีย์เมื่อเริ่มย่อยสลายวัสดุหมักทำให้ค่า pH ลดลงในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการหมัก โดยจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายวัสดุหมักที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนที่ซับซ้อน (โพลีแซคคาไรด์ และเซลลูโลส) เพื่อเปลี่ยนให้เป็นกรดอินทรีย์ ทำให้ค่า pH ลดลงเป็น 4.5 หรือ 5.0 และอาจต่ำกว่านี้ในวัสดุหมักชนิดอื่น ๆ ซึ่งการสังเคราะห์กรดอินทรีย์จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการเพิ่มจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยที่กรดอินทรีย์ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้น หลังจากนั้นจะมีก๊าซ NH_3 เกิดขึ้น ทำให้วัสดุหมักมีค่า pH สูงถึง 8.0-9.0 และเมื่อวัสดุหมักถูกย่อยสลายจนได้ที่ค่า pH ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงความเป็นกลาง (Tchobanoglous and Kreith, 2002)

1.2.8 มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์

มาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2555 ได้กำหนดไว้ในพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ.2518 (กรมวิชาการเกษตร, 2557) มีดังนี้

- 1) ปริมาณไนโตรเจน (ในรูปของ TKN) ไม่น้อยกว่า 1.0 % ของน้ำหนัก ฟอสฟอรัสทั้งหมด (ในรูปของ P_2O_5) ไม่น้อยกว่า 0.5% ของน้ำหนัก และโพแทสเซียมทั้งหมด (ในรูปของ K_2O) ไม่น้อยกว่า 0.5% ของน้ำหนัก หรือมีปริมาณธาตุอาหารหลักรวมกันไม่ต่ำกว่า 2.0% ของน้ำหนัก
- 2) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter; OM) ไม่ต่ำกว่า 20% ของน้ำหนัก
- 3) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ไม่เกิน 20:1
- 4) การย่อยสลายที่สมบูรณ์ (Germination Index; GI) ไม่น้อยกว่า 80%
- 5) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) ไม่เกิน 10 dS/m
- 6) ปริมาณเกลือ (NaCl) ไม่เกิน 1% โดยน้ำหนัก
- 7) ขนาดของปุ๋ย ไม่เกิน 12.5×12.5 mm
- 8) ปริมาณหิน กรวด ขนาดตั้งแต่ 5 mm ขึ้นไป ไม่เกิน 2% ของน้ำหนัก
- 9) ความชื้นไม่เกิน 30% ของน้ำหนัก
- 10) ต้องไม่พบพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม หรือโลหะอื่น ๆ
- 11) ปริมาณสารเป็นพิษไม่เกินกว่าที่รัฐมนตรีประกาศกำหนด

1.2.9 การประเมินการได้ที่ของวัสดุหมัก

การได้ที่ของวัสดุหมัก มีความสำคัญต่อการนำวัสดุหมักไปใช้บำรุงดินหรือปลูกพืช เพราะหากวัสดุหมักยังไม่ได้ที่จะส่งผลกระทบต่อดินและพืชคือ ทำให้ออกซิเจนในดินลดลงนำไปสู่สภาวะไร้อากาศ ส่งผลกระทบต่อรากพืช ยับยั้งการเจริญเติบโตของเมล็ดพืช โดยผลผลิตสารพิษจำพวกแอมโมเนีย เอทีลินออกไซด์ และกรดอินทรีย์ จะไปทำปฏิกิริยากับพืช ทำให้ลดกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) การหายใจของราก และการดูดซึมของสารอาหาร (Jiménez and Garcia, 1989) ซึ่งการประเมินการได้ที่ของวัสดุหมักสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

1) ทางกายภาพ

1.1) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิในวัสดุหมักจะเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ช่วงเทอร์โมฟิลิกภายใน 2 วันของการหมักและจะรักษาระดับอุณหภูมิช่วงเทอร์โมฟิลิกไว้ประมาณ 4 วัน (Golueke, 1972) ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุหมักและประเภทของการหมัก โดยหลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ ซึ่ง

สามารถบอกได้ว่าวัสดุหมักได้ที่แล้ว แต่เพื่อให้เป็นการแน่ใจว่าวัสดุหมักได้ที่ในขณะที่วัสดุหมักยังมีอุณหภูมิขึ้น ๆ ลง ๆ อย่างคงที่ให้ทำการพลิกกลับกองวัสดุหมัก หากอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมแสดงว่าวัสดุหมักได้ที่เพียงพอแล้ว (Jiménez and Garcia, 1989)

1.2) สีและกลิ่น (Color and odor)

วัสดุหมักเมื่อได้ที่จะมีสีน้ำตาลดำหรือดำทั้งหมด (Jiménez and Garcia, 1989) โดยจะแตกต่างจากวัสดุหมักตอนเริ่มต้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และกลิ่นของวัสดุหมักจะต้องไม่มีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ โดยวัสดุหมักเมื่อได้ที่แล้วจะมีกลิ่นคล้ายดิน

2) ทางเคมี

2.1) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

วัสดุหมักที่ย่อยสลายสมบูรณ์แล้วมีค่า C/N ratio อยู่ในช่วง 15-20 (Tchobanoglous and Kreith, 2002) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุหมักที่นำมาหมักด้วย หากวัสดุหมักมีส่วนประกอบทางเคมีที่ย่อยสลายยาก จะทำให้ค่า C/N ratio ของวัสดุหมักที่ได้ที่แล้วสูงขึ้นไปอีกประมาณ 25-30 (Harrison, 2008) แต่ทั้งนี้ค่า C/N ratio ที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปคือ 20 (กรมวิชาการเกษตร, 2557) และในกรณีค่า C/N ratio เริ่มต้นหมักมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 ซึ่งมาจากค่าไนโตรเจนในวัสดุหมักสูง โดยสามารถหาการได้ที่ของปุ๋ยหมักได้จากสัดส่วน ระหว่างค่า C/N ratio เมื่อสิ้นสุดการหมักกับ C/N ratio เมื่อเริ่มต้นการหมัก ($C/N_{\text{final}} : C/N_{\text{initial}}$) โดยต้องมีค่าน้อยกว่า 0.75 (Jiménez and Garcia, 1989)

2.2) ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ในช่วงเริ่มต้นของการหมักค่า pH จะลดลงเป็น 4.5 หรือ 5.0 และอาจต่ำกว่านี้ในวัสดุหมักชนิดอื่น ๆ ซึ่งเกิดจากการผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุหมักโดยจุลินทรีย์และหลังจากนั้นค่า pH อาจสูงถึง 8.0 หรือ 9.0 เนื่องจากมีก๊าซ NH_3 เกิดขึ้นในวัสดุหมัก ทำให้วัสดุหมักกลับมาเป็นด่าง ซึ่งหลังจากวัสดุหมักได้ที่ควรมีค่า pH อยู่ในช่วง 5.0-8.0 (Tchobanoglous and Kreith, 2002)

2.3) การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC)

ค่า EC คือ ความเข้มข้นของเกลือที่ละลายอยู่ในวัสดุหมัก เมื่อนำวัสดุหมักไปใช้งานถ้าหากมีค่า EC มากจะทำให้รากพืชไม่สามารถดูดน้ำและสารอาหารไปใช้ได้ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) โดยวัสดุหมักที่ได้ที่แล้วควรมีค่าการนำไฟฟ้าไม่เกิน 10 dS/m (กรมวิชาการเกษตร, 2557)

3) ทางชีวภาพ

3.1) ดัชนีการงอกของเมล็ดพืช (Germination Index; GI)

การได้ที่ของวัสดุหมักทางชีวภาพสามารถทำได้โดยการประเมิน GI ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่อ่อนไหว ถ้าหากวัสดุหมักมีความเป็นพิษต่อพืชเกิดขึ้นหรือได้ที่แล้ว (Tiquia et al., 1996) โดยค่า GI 50% ถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่าไม่เป็นอันตรายต่อพืช (Huang et al., 2004) ซึ่งจากรายงานของ Huang et al. (2004) พบว่าค่า GI ในช่วง 50-70% เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับความเป็นพิษต่อพืชต่ำและวัสดุหมักได้ที่ แต่ในประเทศไทยตามประกาศของกรมวิชาการเกษตรได้กำหนดไว้ว่า วัสดุหมักที่ได้ที่แล้วควรมีค่า GI มากกว่า 80% (กรมวิชาการเกษตร, 2557)

1.2.10 ประโยชน์ของปุ๋ยหมัก

ประโยชน์ของปุ๋ยหมักแบ่งออกเป็น 3 ด้าน (นริลักษณ์ ชูรวเวช, 2548) ได้แก่

1) ด้านปรับปรุงคุณสมบัติของดิน

ปุ๋ยหมักเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช ซึ่งเป็นแหล่งของปุ๋ยไนโตรเจนที่สำคัญ และยังเป็นแหล่งรวมของธาตุอาหารอื่น ๆ อย่างครบถ้วน เมื่อปุ๋ยหมักสลายตัวจะมีค่าประจุเป็นลบสามารถดูดซับธาตุอาหารที่เป็นประจุบวกได้ เช่น NH_4^+ และ K^+ เป็นต้น โดยปุ๋ยหมักมีอิทธิพลต่อดินในการเปลี่ยนสีดินให้เป็นสีน้ำตาลถึงดำ ซึ่งถือได้ว่าเป็นดินที่มีสารอินทรีย์สูง อีกทั้งยังเพิ่มช่องว่างให้แกดินเพื่อให้มีการระบายอากาศและอุ้มน้ำในดินได้ดีขึ้น

2) ด้านเศรษฐกิจ

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยที่มีปริมาณธาตุอาหารน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีในอัตราส่วนที่เท่ากัน แต่ปุ๋ยเคมีนั้นมีราคาแพงกว่าปุ๋ยหมัก ดังนั้นเมื่อนำปุ๋ยหมักมาใช้ปลูกพืชแทนปุ๋ยเคมีหรือผสมกับปุ๋ยเคมีจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้

3) ด้านปรับปรุงสภาพแวดล้อม

การหมักปุ๋ยเป็นการช่วยลดมูลฝอยอินทรีย์ที่จะออกไปสู่สิ่งแวดล้อม เช่น การนำวัชพืชน้ำมาหมักช่วยทำให้สัตว์น้ำได้รับแสงแดดอย่างเต็มที่และเกิดสภาพสมดุลในการดำรงชีพของสัตว์น้ำ อีกทั้งการสัญจรทางน้ำก็สะดวกสบายยิ่งขึ้น เนื่องจากไม่มีวัชพืชน้ำมาขวางทางสัญจร เป็นต้น

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sundberg (2003) ได้ทำการศึกษาขนาดของถังหมักที่มีผลต่ออุณหภูมิ โดยใช้ถังหมัก 3 ใบ ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของถังหมัก (Surface Area to Volume; SA:V) ที่แตกต่างกันคือ 7.35, 81.13 และ 34.71 m^2/m^3 ตามลำดับ พบว่าถังหมักใบที่ 2 มี SA:V ของถังหมักมากที่สุด รองลงมาคือถังหมักใบที่ 3 และ 1 ส่งผลให้ถังหมักใบที่ 2 เกิดการสูญเสียอุณหภูมิออกสู่ภายนอกถังหมักมากที่สุด ทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิภายในถังหมักได้นานกว่าถังหมักใบอื่น

Sylla et al. (2003) ได้ศึกษาผลของจำนวนท่อเติมอากาศในแนวตั้งต่อการเปลี่ยนแปลงคาร์บอน โดยทำการหมักมูลฝอยอินทรีย์สังเคราะห์ (อาหารสุนัข) ผสมกับเศษไม้และหัวเชื้อ โดยใช้ถังหมัก 3 ถัง ขนาด $0.2 \times 0.2 \times 0.3$ m ฝังท่อตามแนวตั้ง จำนวนท่อ 2, 4 และ 6 ท่อ ซึ่งมีระยะห่าง 20, 10 และ 6 cm ตามลำดับ พบว่าจำนวนท่อ 2, 4 และ 6 ท่อ มีอุณหภูมิสูงสุด คือ 54.9, 57.9 และ 65 °C ตามลำดับ และหลังสิ้นสุดการหมักคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงที่ 86%, 90% และ 96% ตามลำดับ พบว่าจำนวนท่อที่เพิ่มทำให้คาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น

Barrington et al. (2003) ได้ทำการศึกษาอัตราการไหลเวียนของอากาศภายใต้การเติมอากาศแบบแพสซีฟ โดยทำการหมักเศษไม้ หญ้าแห้ง และฟางข้าว ในถังพลาสติกทรงกระบอก ขนาด 150 L สูง 0.95 m เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.4 m ด้านล่างมีช่องลมสูง 0.10 m และมีการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 m ซึ่ง 1 วัสดุหมักจะใช้ถังหมัก 3 ใบ ที่ความชื้น 60%, 65% และ 70% ตามลำดับ พบว่าในวัสดุหมักเริ่มต้นอัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 0.7-1.5 mg dry-air/s kg

Elango et al. (2009) ได้ทำการออกแบบถังหมักเพื่อใช้หมักมูลฝอยชุมชนที่ช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก เพื่อลดระยะเวลาในกระบวนการหมัก โดยถังหมักมีขนาด $1 \times 1 \times 1$ m คลุมด้วยลวดตาข่ายทั้ง 4 ด้าน มีใบกวน ยาว 1.5 m สร้างด้วยเหล็กเคลือบสารกันกัดกร่อน ติดตั้งไว้ด้านบนและด้านล่างในฝั่งตรงกันข้ามของถังหมัก โดยมีระยะห่าง 40 cm และติดตั้งท่อพลาสติกที่เจาะรูระบายอากาศที่บริเวณด้านข้างทั้ง 4 ด้านของถังหมัก โดยมีการเติมอากาศระหว่างการหมัก 13.8 kg/day เป็นเวลา 30 นาที พบว่าใช้เวลาในการหมักสั้นเพียง 40 วัน และมีปริมาณมูลฝอยลดลง 78%

Adhikari et al. (2009) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการหมักเศษอาหารกับฟางข้าว สาเล่สับ, ฟางสับ และเศษไม้ โดยใช้ท่อพลาสติกตั้งในแนวนอนยาว 1 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

0.3 m ผนังด้านในติดฉนวน มีท่อให้อากาศไหลเข้าทางด้านล่าง และอากาศไหลออกทางด้านบนของท่อพลาสติก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 mm และท่ออากาศไหลเข้าด้านล่างเจาะรูทุก 150 mm โดยมีการเติมวัสดุหมัก 2 ใน 3 ของท่อพลาสติก พบว่าจากการหมักมีเพียงฟางข้าวสาาลีสับ และฟางสับ เข้าสู่อุณหภูมิจากเทอร์โมฟิลิกภายใน 10 วัน เมื่อผสมกับเศษอาหารต่อฟางข้าวสาาลีสับ 8.9:1 และเศษอาหารต่อฟางสับ 8.6:1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเปียก

Ogunwande and Osunade (2011) ได้ศึกษาแนวการวางท่อ และขนาดของรูเจาะบนท่อต่อการสูญเสียธาตุอาหารในปุ๋ยหมัก โดยการหมักมูลไก่ผสมขี้เลื่อย เป็นกองหมักสี่เหลี่ยมคางหมูจำนวน 6 กอง ที่ฐานมีขนาด 1.2 x 1.1 m สูง 0.72 m มีแนววางท่อทั้งแนวนอนและแนวตั้ง โดยใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 mm มีขนาดรูเจาะที่ท่อ 3 ขนาด คือ 15, 25 และ 35 mm ตามลำดับ พบว่าการวางท่อในแนวนอน แนวตั้ง และขนาดรูเจาะทั้ง 3 ขนาด มีประสิทธิภาพในการป้องกันการสูญเสียคาร์บอนและฟอสฟอรัสทั้งหมด

Guo et al. (2012) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราการเติมอากาศ C/N ratio และค่าความชื้น (Moisture Content; MC) ต่อความเสถียรและการได้ที่ของวัสดุหมัก ด้วยการหมักมูลสุกร และลำต้นข้าวโพด โดยใช้ถังสแตนเลส ขนาด 60 L มีความสูง 0.6 m และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 0.36 m ทุ้มด้วยสแตนเลส 2 ชั้นที่มีฉนวนกันความร้อน เพื่อลดการสูญเสียความร้อน ด้านล่างมีปั๊มเติมอากาศและทางระบายน้ำชะ มีอัตราการเติมอากาศ 0.24, 0.48 และ 0.72 L/kg min โดยมี C/N ratio 15, 18 และ 21 และ MC 65%, 70% และ 75% ตามลำดับ พบว่ามีการสูญเสียออกซิเจนและไนโตรเจนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการเติมอากาศ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าอัตราการเติมอากาศเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความเสถียรของปุ๋ยหมัก ในขณะที่ C/N ratio มีส่วนสำคัญที่ทำให้ปุ๋ยหมักได้ที่ และผลของ MC ไม่มีนัยยะสำคัญต่อคุณภาพปุ๋ยหมักเมื่อได้ที่แล้ว

จากการศึกษางานวิจัยอื่น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ท่อระบายอากาศ เพื่อออกแบบถังหมักในการลดระยะเวลาในกระบวนการหมัก โดยมีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุหมัก อัตราส่วนของวัสดุหมัก และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการหมัก เพื่อนำมาหมักในลักษณะเป็นกองหมักหรือในถังหมักดังแสดงในตารางที่ 1-2 แม้ว่าจะไม่มีการวิจัยใดที่ศึกษาถึงรูปแบบทางระบายอากาศเข้าและออกสำหรับถังหมัก ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำประเด็นนี้มาเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อศึกษารูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับการหมักมูลฝอยอินทรีย์แบบแพสซีฟในถังหมักเพื่อลดระยะเวลาในการหมัก

ตารางที่ 1-2 สรุปสาระสำคัญจากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ขนาดถังหมัก (L)	ประเภทถังหมัก	ประเภทวัสดุหมัก	ประเภทการเติมวัสดุหมัก	ปริมาณวัสดุหมัก (kg)	C/N ratio		ระยะเวลาในการหมัก (วัน)	ลักษณะการเติมอากาศ
						ก่อน	หลัง		
ศิรินทรา วันดี (2552)	60	พลาสติก	ของเสียโรงงานผลิตยางแท่ง ตะกอนน้ำเสียชุมชนและผักตบชวา	ครั้งเดียว	20	30.70-36.75	17.37-26.10	30-60	ถังหมักมีรูเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm จำนวน 77 รู รอบถัง
วิธิตา คชนะแนม (2552)	75	พลาสติก	กากตะกอนดีแแคนเตอร์ ดินแดง ทะลายปาล์มน้ำมันและมูลไก่	ครั้งเดียว	8.67-14.58	35-40	20-28	90	ถังหมักมีรูเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm จำนวน 70 รู รอบถัง
นิตติ เหมพัฒน์ (2553)	75	โฟม	มูลฝอยอินทรีย์สังเคราะห์และใบไม้แห้ง	ครั้งเดียว	8	40.70	20.90	45	ถังหมักมีท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm จำนวน 3 ท่อ ด้านล่างถัง

ตารางที่ 1-2 สรุปสาระสำคัญจากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัยที่ใกล้เคียง	ขนาดถังหมัก (L)	ประเภทถังหมัก	ประเภทวัสดุหมัก	ประเภทการเติมวัสดุหมัก	ปริมาณวัสดุหมัก (kg)	C/N ratio		ระยะเวลาในการหมัก (วัน)	ลักษณะการเติมอากาศ
						ก่อน	หลัง		
สุชินันท์ เกียรติภักดิ์ (2555)	60	พลาสติก	หอยเชอรี่ ฟางข้าว มูลวัว และยูเรีย	ครั้งเดียว	-	30.28-31.77	16.90-18.37	60	ถังหมักมีรูเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm จำนวน 77 รู รอบถัง
Kaosol and Lerdratranataywee (2014)	60	พลาสติก	เศษอาหาร มูลโค และใบไม้แห้ง	ครั้งเดียว	-	25	12	45	ถังหมักมีรูเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm จำนวน 77 รู รอบถัง
อนุวัฒน์ เพ็ญจันทร์ (2546)	100	พลาสติก	เศษอาหารและใบไม้แห้ง	ต่อเนื่อง	25.71	37.6	18.9	80	ถังหมักใส่กระถางที่เจาะรูกระจายอากาศต่อกับสายยางให้อากาศเข้าด้านล่างถึง
นคร สุริยานนท์ (2552)	200	พลาสติก	เศษอาหารและใบไม้แห้ง	ต่อเนื่อง	52.8	42.34-64.13	14.78-15.99	120	ถังหมักเจาะช่องขนาด 5x10 cm จำนวน 16 ช่อง ด้านล่างถึง
สิริวรรณ นิสสัยกล้า (2553)	200	พลาสติก	เศษอาหาร, ใบไม้แห้ง EM พด.1 และปุ๋ยเก่า	ต่อเนื่อง	96	19.66-24.71	10.69-14.41	90	ถังหมักเจาะช่องขนาด 5x10 cm จำนวน 16 ช่อง ด้านล่างถึง
กรกนก ทรัพย์อุดม (2554)	200	พลาสติก	เศษอาหารและใบไม้แห้ง	ต่อเนื่อง	83.2	35.3	13.5	102	ถังหมักเจาะช่องขนาด 5x10 cm จำนวน 16 ช่อง ด้านล่างถึง

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

หารูปแบบทางเข้าและทางออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถึงหมักมูลฝอยอินทรีย์แบบแพสซีฟเพื่อลดระยะเวลาในการหมัก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เปลี่ยนมูลฝอยอินทรีย์ที่ต้องนำไปทิ้งให้กลายเป็นปุ๋ยหมักหรือวัสดุปรับปรุงดินเพื่อนำไปใช้ประโยชน์
- 2) ลดระยะเวลาในการหมักให้สั้นลง เพื่อเพิ่มปริมาณปุ๋ยหมักหรือวัสดุปรับปรุงดินจากมูลฝอยอินทรีย์ และลดมูลฝอยอินทรีย์ที่ต้องเข้าสู่หลุมฝังกลบ

1.6 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ โดยใช้มูลฝอยอินทรีย์หมักร่วมกับใบไม้แห้ง ในการศึกษาหารูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถึงหมักมูลฝอยอินทรีย์แบบแพสซีฟ

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

การศึกษารูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ยแบบแพสซีฟ ได้แบ่งเป็น 2 การทดลอง ดังนี้คือ การทดลองที่ 1 หารูปแบบทางเข้าของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ยแบบแพสซีฟ (เติมมูลฝอยแบบกะ) การทดลองที่ 2 หารูปแบบทางออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ยแบบแพสซีฟ (เติมมูลฝอยแบบกะ) โดยใช้รูปแบบทางเข้าของอากาศที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 3 นำรูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 และ 2 มาใช้งานกับถังหมักขนาด 120 L เพื่อดูประสิทธิภาพของการหมักเมื่อใช้ถังหมักขนาดที่ใหญ่ขึ้นและใช้มูลฝอยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจริง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการหมัก

1. มูลฝอยอินทรีย์

มูลฝอยอินทรีย์ที่นำมาใช้ในการทดลองที่ 1 และ 2 เพื่อหารูปแบบทางเข้าและทางออกของอากาศที่เหมาะสมตามลำดับ เป็นมูลฝอยอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นประกอบด้วย เศษผลไม้ เศษข้าว เศษผัก และเศษเนื้อปรงสุก ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของมูลฝอยอินทรีย์จากบ้านเรือน (นิตินิยมพัฒน์, 2553) โดยทำการตัดย่อยให้มีขนาดอยู่ในช่วง 1.3-5 cm เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสอากาศทำให้เกิดการย่อยสลายได้ง่ายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 มูลฝอยอินทรีย์สังเคราะห์

2. ใบไม้แห้ง

ใบไม้แห้งที่นำมาใช้สำหรับทั้ง 2 ทดลอง มาจากบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งทำการบดย่อยด้วยเครื่องย่อยใบไม้ให้มีขนาดอยู่ในช่วง 1.3-5 cm ก่อนนำมาใช้หมักดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ใบไม้แห้งที่นำมาใช้เป็นวัสดุหมัก

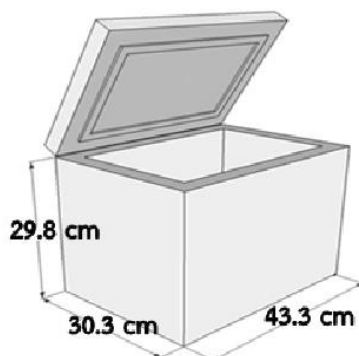
2.2 การเตรียมวัสดุหมัก

2.2.1. การทดลองที่ 1 และ 2

หมักมูลฝอยอินทรีย์ร่วมกับใบไม้แห้งในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนักเปียก ตามผลการศึกษาของ นิติ เหมพัฒน์ (2553) ที่ได้ทำการหมักมูลฝอยอินทรีย์สังเคราะห์ร่วมกับใบไม้แห้งพบว่าอัตราส่วน 2:1 ได้วัสดุปรับปรุงดินที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อพืช โดยใช้มูลฝอยอินทรีย์สังเคราะห์ปริมาณ 4 kg ประกอบไปด้วย เศษผลไม้ เศษข้าว เศษผัก และเศษเนื้อปรงสุก ในอัตราส่วน 83.25, 11.75, 3.75 และ 1.25% โดยน้ำหนักเปียก ตามลำดับ (หรือ 3.33, 0.47, 0.15 และ 0.05 kg ตามลำดับ) ผสมกับใบไม้แห้งปริมาณ 2 kg เพื่อให้ได้ C/N ratio อยู่ในช่วง 25-50 (Tchobanoglous et al., 1993) ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการหมักแบบใช้อากาศ

2.3 รูปแบบถังหมัก

ถังหมักที่นำมาใช้ในการทดลองที่ 1 และ 2 ทำมาจากกล่องโฟมที่มีขนาดภายใน กว้าง 30.3 cm ยาว 43.3 cm และสูง 29.8 cm ดังแสดงในรูปที่ 2-3 ความจุ 39 L ซึ่งเหมาะสมกับวัสดุหมักปริมาณ 6 kg จำนวนทั้งหมด 5 ใบ โดยเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm จำนวน 4 รู ที่แต่ละมุมด้านล่างของถังหมักเพื่อระบายน้ำชะเหมือนกันทุกใบ

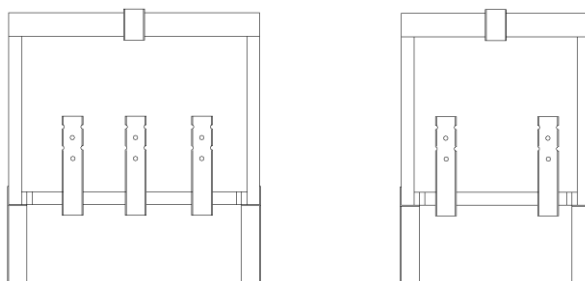


รูปที่ 2-3 ขนาดถังหมัก

2.3.1. ถังหมักสำหรับการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายมูลฝอยอินทรีย์ในถังหมักที่มีรูปแบบทางเข้าและกระจายตัวของอากาศ 4 รูปแบบ ซึ่งรูปแบบทางเข้าและกระจายของอากาศที่ใช้ดังกล่าวนี้ได้ดัดแปลงมาจากการศึกษาของ Sylla et al. (2003) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับจำนวนท่อโดยมีการวางท่อในแนวตั้ง และ Ogunwande and Osunade (2011) ได้ทำการศึกษาขนาดของรูที่เจาะบนท่อ และมีการวางท่อทั้งในแนวตั้งและนอน เพื่อให้การหมักปุ๋ยแบบแอสซิฟเกิดการย่อยสลายและรักษาธาตุอาหารได้ดี โดยแต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังนี้

1.1) ถังหมักรูปแบบที่ 1 (VV) อากาศเข้าและกระจายตัวตามท่อในแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 2-4 และรูปที่ 2-5 โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm ยาว 19 cm จำนวน 6 เส้น เป็นทางเข้าของอากาศ โดยเจาะรูบนท่อให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm จำนวน 8 รู แต่ละรูมีระยะห่างกัน 1 cm

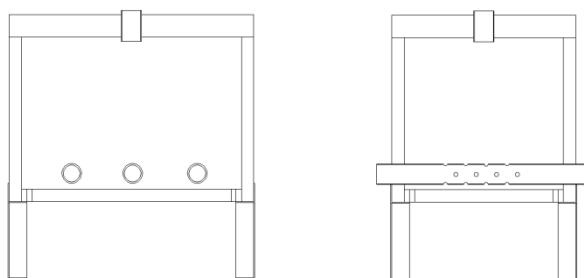


รูปที่ 2-4 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 1



รูปที่ 2-5 ทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 1 ต้นแบบจริง

1.2) ถังหมักรูปแบบที่ 2 (HH) อากาศเข้าและกระจายตัวตามท่อในแนวนอนดังแสดงในรูปที่ 2-6 และรูปที่ 2-7 โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm ยาว 42.2 cm จำนวน 3 เส้น เป็นทางเข้าของอากาศ โดยเจาะรูบนท่อให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm จำนวน 16 รู แต่ละรูมีระยะห่างกัน 1 cm

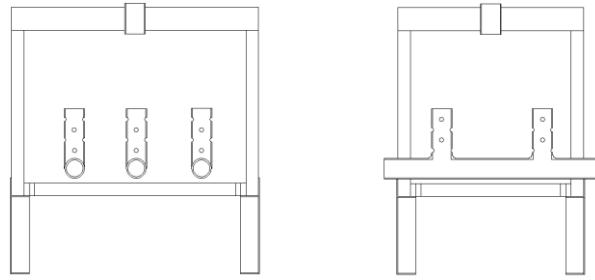


รูปที่ 2-6 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 2



รูปที่ 2-7 ทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 2 ต้นแบบจริง

1.3) ถังหมักรูปแบบที่ 3 (HV) อากาศเข้าแนวนอนและกระจายตัวตามท่อในแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 2-8 และรูปที่ 2-9 โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm ยาว 42.2 cm จำนวน 3 เส้น เป็นทางเข้าของอากาศ โดยแต่ละเส้นต่อกับท่อ PVC ในแนวตั้ง จำนวน 2 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm ยาว 8 cm เจาะรูบนท่อ PVC ที่ต่อในแนวตั้งให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm จำนวน 8 รู แต่ละรูมีระยะห่างกัน 1 cm

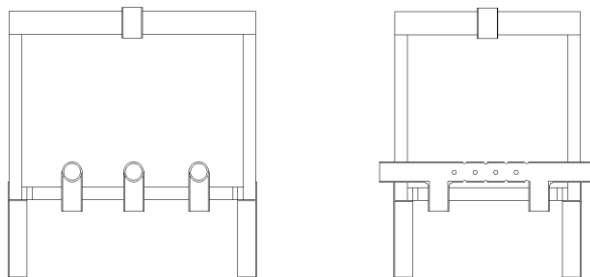


รูปที่ 2-8 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 3



รูปที่ 2-9 ทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 3 ต้นแบบจริง

1.4) ถังหมักรูปแบบที่ 4 (VH) อากาศเข้าแนวตั้งและกระจายตัวตามท่อในแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 2-10 และรูปที่ 2-11 โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm ยาว 8 cm จำนวน 6 เส้น เป็นทางเข้าของอากาศ โดยท่อพีวีซี 2 เส้น ต่อกับท่อ PVC ในแนวนอน จำนวน 1 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm ยาว 42.2 cm เจาะรูบนท่อ PVC ที่ต่อในแนวนอนให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm จำนวน 16 รู แต่ละรูมีระยะห่างกัน 1 cm

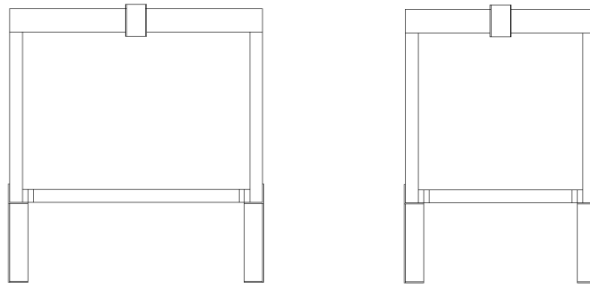


รูปที่ 2-10 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 4



รูปที่ 2-11 ทางเข้าของอากาศรูปแบบที่ 4 ต้นแบบจริง

1.5) ถังควบคุม (NN) ซึ่งไม่มีท่อให้อากาศเข้าและกระจายตัวด้านล่างถังหมัก โดยมีเพียงท่ออากาศด้านบนถังหมักเหมือนกัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกับถังหมักที่มีทางเข้าทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2-12 และรูปที่ 2-13



รูปที่ 2-12 รูปตัดด้านหน้าและข้างถังควบคุม



รูปที่ 2-13 ถังควบคุม ต้นแบบจริง

โดยรายละเอียดของทางเข้าของอากาศแต่ละรูปแบบ ดังสรุปในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 รายละเอียดและแนวคิดของรูปแบบทางเข้าของอากาศแต่ละแบบ

รูปแบบที่	ทิศทางการไหลเข้าและกระจายตัวของอากาศ	แนวคิด
1 (VV)	เข้าและกระจายตัวตามแนวตั้ง	จุลินทรีย์บริเวณตรงกลางอาจสัมผัสกับอากาศได้มาก
2 (HH)	เข้าและกระจายตัวตามแนวนอน	จุลินทรีย์อาจสัมผัสกับอากาศได้ทั่วถึงมากกว่าและอากาศอาจจะไหลเข้าได้สะดวกกว่า
3 (HV)	เข้าแนวนอนและกระจายตัวตามแนวตั้ง	จุลินทรีย์บริเวณตรงกลางอาจสัมผัสกับอากาศได้มากกว่าโดยอากาศอาจจะไหลเข้าได้สะดวกกว่า
4 (VH)	เข้าแนวตั้งและกระจายตัวตามแนวนอน	จุลินทรีย์อาจสัมผัสกับอากาศได้ทั่วถึงมากกว่า

2.3.1.1. อัตราการไหลเข้าของอากาศและออกซิเจนในถังหมักปฏิกายจากการคำนวณ

จากสูตรหาอัตราการไหลของอากาศของ Barrington et al (2003)

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = A \times C_d \times V$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดทางเข้าของอากาศ (m^2)

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหล

โดย $C_d = e^{-0.1547V}$ เมื่อ V ต่ำกว่า 2.75 m/s และ $e = 2.718$

$C_d = 0.64$ เมื่อ V สูงกว่า 2.75 m/s

V = ความเร็วของอากาศ (m/s)

อุณหภูมิของห้องโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 30 °C

ให้ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 30 °C = 1.16 kg/m^3 (Çengel Y.A. and M. A. Boles, 2015)

ความเร็วของอากาศ (V) อยู่ในช่วง 0.002-0.018 m/s (Mason and Milke, 2005a)

ให้ความเร็วของอากาศ (V) = 0.002 m/s เนื่องจากเป็นความเร็วของอากาศที่ต่ำสุดที่สามารถไหลผ่านวัสดุหมักได้

พื้นที่หน้าตัดทางเข้าของอากาศจำนวน 6 ช่อง มีรัศมี (r) = 0.02 m ต่อ 1 ช่อง

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดรวม (A)} &= \pi r^2 \\ &= 6 \times 3.142 \times (0.02)^2 \\ &= 0.0075 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$C_d = 0.998$$

ดังนั้นอัตราเร็วของอากาศไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดรวม

$$\begin{aligned} Q_{\text{Air}} &= 0.0075 \text{ (m}^2\text{)} \times 0.998 \times 0.002 \text{ (m/s)} \\ &= 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3\text{/s} \\ &= 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3\text{/s} \times 1.16 \text{ kg/m}^3 \\ &= 1.74 \times 10^{-5} \text{ kg/s} \\ &= 1.5 \text{ kg/d} \end{aligned}$$

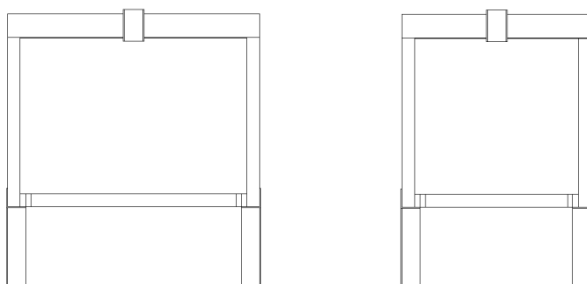
ออกซิเจนในอากาศมี 23 % = 0.23 kg O₂/ 1 kg Air (Huag, 1993)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Q_{\text{Oxygen}} &= 1.5 \text{ kg/d} \times 0.23 \\ &= 0.35 \text{ kg/d} \end{aligned}$$

2.3.2. ถังหมักสำหรับการทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายมูลฝอยอินทรีย์ในถังหมักที่มีรูปแบบทางออกของอากาศ 4 รูปแบบ โดยใช้รูปแบบทางเข้าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 โดยรูปแบบทางออกของอากาศดัดแปลงมาจากการศึกษาขนาดช่องเปิดทางเข้าออกของอากาศของ บัณฑิต เมฆศรีสวัสดิ์ (2548) ซึ่งกล่าวไว้ว่าความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าจะลดลง หากขนาดช่องทางเข้าใหญ่กว่าช่องทางออก แต่จะมีการกระจายได้ทั่วถึงกว่า โดยรายละเอียดของรูปแบบทางออกแต่ละรูปแบบ มีดังนี้

2.1) ถังหมักรูปแบบที่ 1 (PT) ทางออกของอากาศด้านบนถังหมัก มีพื้นที่หน้าตัด 12.57 cm² ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดของช่องทางเข้าของอากาศที่อยู่ด้านล่างถังหมักที่ได้จากการทดลองที่ 1 โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm ยาว 6 cm จำนวน 1 เส้น ใส่ไว้ในแนวตั้งบริเวณกึ่งกลางของฝาถังหมักด้านบนดังแสดงในรูปที่ 2-14 และรูปที่ 2-15

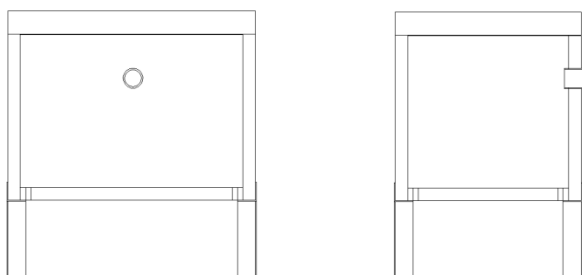


รูปที่ 2-14 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางออกของอากาศรูปแบบที่ 1



รูปที่ 2-15 ทางออกของอากาศรูปแบบที่ 1 ต้นแบบจริง

2.2) ถังหมักรูปแบบที่ 2 (PS) ทางออกของอากาศด้านข้างถังหมัก มีพื้นที่หน้าตัด 12.57 cm^2 ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดของช่องทางเข้าของอากาศที่อยู่ด้านล่างถังหมักที่ได้จากการทดลองที่ 1 โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm ยาว 6 cm จำนวน 1 เส้น เช่นกัน แต่แตกต่างจากรูปแบบที่ 1 ที่ใส่ท่อ PVC ในแนวนอนบริเวณด้านข้างของถังหมัก ต่ำกว่าฝาถังหมัก 6.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 2-16 และรูปที่ 2-17



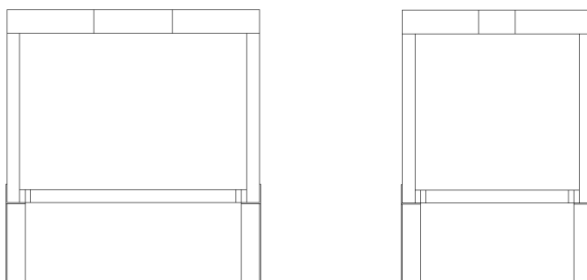
รูปที่ 2-16 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางออกของอากาศรูปแบบที่ 2



รูปที่ 2-17 ทางออกของอากาศรูปแบบที่ 2 ต้นแบบจริง

2.3) ถังหมักรูปแบบที่ 3 (CT) ทางออกของอากาศด้านบนถังหมัก มีพื้นที่ 75 cm^2 ซึ่งเท่ากับพื้นที่ช่องทางเข้าของอากาศที่อยู่ด้านล่างถังหมักที่ได้จากการทดลองที่ 1 โดยเจาะช่อง

สี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 5 cm ยาว 15 cm บริเวณกึ่งกลางของฝาถังหมักด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 2-18 และรูปที่ 2-19

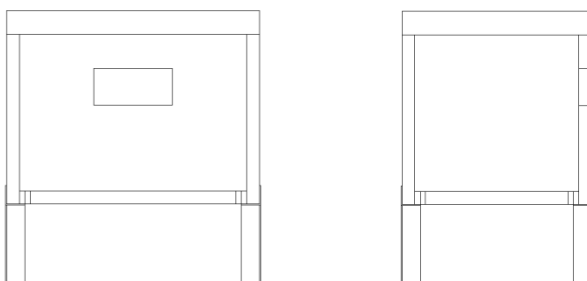


รูปที่ 2-18 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางออกของอากาศรูปแบบที่ 3

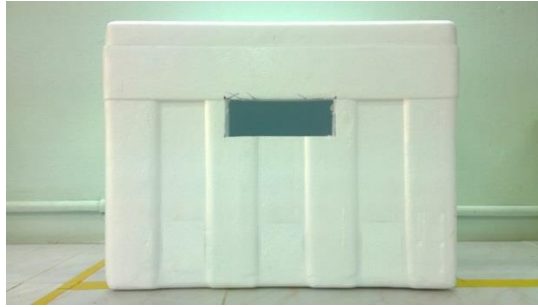


รูปที่ 2-19 ทางออกของอากาศรูปแบบที่ 3 ต้นแบบจริง

2.4) ถังหมักรูปแบบที่ 4 (CS) ทางออกของอากาศด้านข้างถังหมัก มีพื้นที่ 75 cm^2 ซึ่งเท่ากับพื้นที่ช่องทางเข้าของอากาศที่อยู่ด้านล่างถังหมักที่ได้จากการทดลองที่ 1 โดยเจาะช่องสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 5 cm ยาว 15 cm เช่นเดียวกับรูปแบบที่ 3 แต่แตกต่างกันที่ตำแหน่งเจาะอยู่ด้านข้างถังหมัก โดยต่ำกว่าฝาถังหมักด้านบน 6.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 2-20 และรูปที่ 2-21

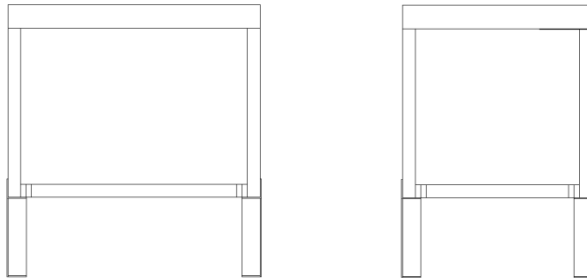


รูปที่ 2-20 รูปตัดด้านหน้าและข้างทางออกของอากาศรูปแบบที่ 4

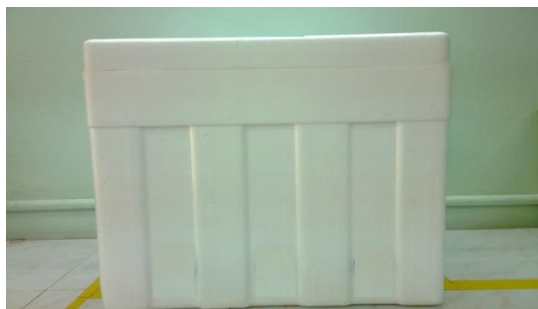


รูปที่ 2-21 ทางออกของอากาศรูปแบบที่ 4 ต้นแบบจริง

2.5) ถังควบคุม (No) ซึ่งไม่มีท่ออากาศหรือช่องเจาะด้านบนและข้างของถังหมัก มีเพียงช่องทางเข้าของอากาศที่อยู่ด้านล่างถังหมักที่ได้จากการทดลองที่ 1 เหมือนกันเท่านั้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกับถังหมักที่มีทางออกทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2-22 และรูปที่ 2-23



รูปที่ 2-22 รูปตัดด้านหน้าและข้างถังควบคุม



รูปที่ 2-23 ถังควบคุม ต้นแบบจริง

โดยมีรายละเอียดทางออกของอากาศแต่ละรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 สรุปรายละเอียดและแนวคิดของรูปแบบทางออกของอากาศแต่ละแบบ

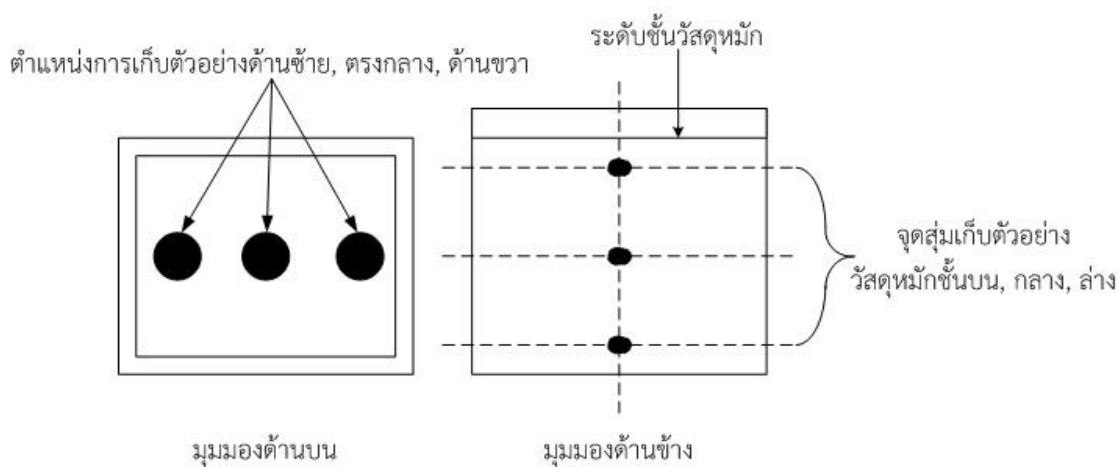
รูปแบบที่	ขนาดและทิศทางการไหลออก	แนวคิด
1 (PT)	มีพื้นที่หน้าตัดทางออกน้อยกว่าช่องทางเข้า และไหลออกในแนวตั้ง	อากาศอยู่ภายในถึงหมักได้นานและกระจายได้ทั่วถึง
2 (PS)	มีพื้นที่หน้าตัดทางออกน้อยกว่าช่องทางเข้า และไหลออกในแนวนอน	อากาศอยู่ภายในถึงหมักได้นาน กระจายได้ทั่วถึง และอาจไหลออกได้ช้ากว่า
3 (CT)	มีพื้นที่หน้าตัดทางออกเท่ากับช่องทางเข้า และไหลออกในแนวตั้ง	อากาศไหลเข้าในถึงหมักได้มากกว่า
4 (CS)	มีพื้นที่หน้าตัดทางออกเท่ากับช่องทางเข้า และไหลออกในแนวนอน	อากาศไหลเข้าในถึงหมักได้มากกว่า และอาจไหลออกได้ช้ากว่า

2.4 การดำเนินการหมัก

การทดลองที่ 1 และ 2 ทำการเติมวัสดุหมักที่ผสมแล้วปริมาณ 6 kg ลงในถังหมักเพียงครั้งเดียวและไม่มีการกลับกองวัสดุหมักตลอดการหมัก โดยทำการวัดอุณหภูมิและเก็บตัวอย่างวัสดุหมักไปวิเคราะห์ทุกวัน จนอุณหภูมิภายในวัสดุหมักลดลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องภายนอกถังหมัก แล้วจะเปลี่ยนเป็นเก็บตัวอย่างทุก 4 วัน และเก็บตัวอย่างไปจนกว่าอุณหภูมิกึ่งที่และไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการกลับกองวัสดุหมัก

2.5 การเก็บตัวอย่างวัสดุหมักเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติ

การทดลองที่ 1 และ 2 ทำการเก็บตัวอย่างโดยเปิดฝาถังหมักแต่ละครั้งจำนวน 3 ตำแหน่ง คือ ด้านซ้าย ตรงกลาง และด้านขวา ของถังหมักดังแสดงในรูปที่ 2-24 โดยแต่ละตำแหน่งสุ่มเก็บ 3 จุด คือ ด้านบน ตรงกลาง และด้านล่างของชั้นวัสดุหมัก แล้วนำตัวอย่างจากทั้ง 9 จุด มาผสมกันให้ได้ประมาณ 50 g ในแต่ละตำแหน่งเพื่อใช้เป็นตัวแทนของวัสดุหมัก



รูปที่ 2-24 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างในถังหมัก

2.6 คุณสมบัติและวิธีการที่ทำการวิเคราะห์

การทดลองที่ 1 และ 2 ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2-3 โดยอุณหภูมิ, ความชื้น (MC), อินทรีย์คาร์บอน (TOC), ไนโตรเจน (TKN), อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) และความเป็นกรด-ด่าง (pH) ทำการวิเคราะห์ทุกวัน และเปลี่ยนเป็นการวิเคราะห์ทุก 4 วัน เมื่ออุณหภูมิวัสดุหมักลดลงกลับเข้าใกล้อุณหภูมิห้อง ส่วนค่าฟอสฟอรัส (P_2O_5) และโพแทสเซียม (K_2O) ทำการวิเคราะห์เฉพาะช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการหมักเท่านั้น โดยค่าการนำไฟฟ้า (EC), สีและกลิ่น และดัชนีการออกของเมล็ดพืช (GI) ทำการวิเคราะห์หลังสิ้นสุดการหมักเท่านั้น

ตารางที่ 2-3 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	เริ่มต้น	ระหว่างการหมัก*	สิ้นสุด
ทางกายภาพ			
1. อุณหภูมิ	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง
2. ความชื้น (MC)	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง
3. สีและกลิ่น (Color and odor)	-	-	1 ครั้ง
ทางเคมี			
1. อินทรีย์คาร์บอน (TOC)	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง
2. ไนโตรเจน (TKN)	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง
3. ฟอสฟอรัส (P ₂ O ₅)	1 ครั้ง	-	1 ครั้ง
4. โพแทสเซียม (K ₂ O)	1 ครั้ง	-	1 ครั้ง
5. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง
6. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	1 ครั้ง	ทุกวัน	1 ครั้ง
7. การนำไฟฟ้า (EC)	-	-	1 ครั้ง
ทางชีวภาพ			
1. ดัชนีการงอกของเมล็ดพืช (GI)	-	-	1 ครั้ง

หมายเหตุ: * เมื่ออุณหภูมิวัสดุหมักลดลงกลับเข้าใกล้อุณหภูมิห้อง จึงเปลี่ยนเป็นเก็บตัวอย่างทุก 4 วัน

ตารางที่ 2-4 วิธีการวิเคราะห์แต่ละพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือ	เอกสารอ้างอิง
1. MC	Gravimetric Method	APHA et al. (1995)
2. TOC	Walkley & Black Method	จำเป็น อ่อนทอง (2547)
3. TKN	Kjeldahl Method	
4. P ₂ O ₅ 5. K ₂ O	AAS Spectrophotometric Method	
6. C/N ratio	นำค่า TOC จากข้อ 2 หาค่าด้วยค่า TKN จากข้อ 3	-
7. pH	pH meter	จำเป็น อ่อนทอง (2547)
8. EC	Electrical Conductivity Meter	
9. GI	Germination Index Method	สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2548)
10. Color and odor	ลักษณะทางกายภาพของวัสดุหมัก	Jiménez and Garcia (1989)

2.7 การเลือกรูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสม

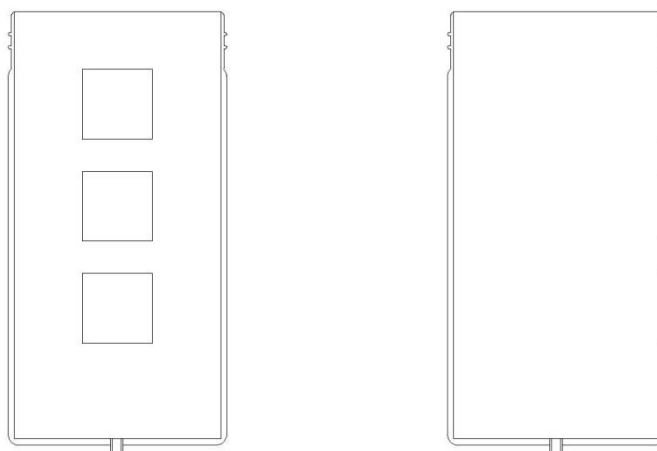
ในการหารูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ยแบบแพสซีฟ ได้ทำการเลือกจากคุณภาพของวัสดุหมักที่ได้หลังสิ้นสุดการหมัก ซึ่งลำดับแรกพิจารณาจากพารามิเตอร์ pH, MC, C/N ratio, ธาตุอาหารหลัก และ EC โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุหมักดังแสดงในตารางที่ 2-5 และหากผ่านเกณฑ์ทั้งหมด จะพิจารณาจากสีกลิ่น และ ค่า GI ตามลำดับ และหากผ่านเกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 2-5 ทั้งหมด จึงเปรียบเทียบจำนวนวันที่วัสดุหมักสิ้นสุดปฏิกิริยาย่อยสลาย หรือ จำนวนวันตั้งแต่เริ่มต้นหมักจนถึงวันที่อุณหภูมิวัสดุหมักลดกลับลงมาจากอุณหภูมิห้อง 2 °C โดยถังหมักที่มีจำนวนวันที่วัสดุหมักสิ้นสุดปฏิกิริยาย่อยสลายสั้นที่สุด จะถูกนำไปใช้ต่อในการทดลองที่ 2

ตารางที่ 2-5 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของวัสดุหมัก

พารามิเตอร์		เกณฑ์กำหนด	หน่วย	เอกสารอ้างอิง
pH		5-8	-	Tchobanoglous and Kreith (2002)
MC		≤30	%	กรมวิชาการเกษตร (2557)
C/N ratio		≤20:1	-	
TKN	ธาตุอาหารหลักรวม	≥2.0	%	
P ₂ O ₅				
K ₂ O				
EC		≤10	dS/m	
สีและกลิ่น		-	-	Jiménez and Garcia (1989)
GI		≥50	%	Huang et al. (2004)

2.8 การทดลองที่ 3 นำรูปแบบทางเข้าและออกของอากาศมาใช้งานในถังหมักขนาด 120 L

ถังหมักที่ใช้เป็นถังพลาสติกดังแสดงในรูปที่ 2-25 และรูปที่ 2-26 มีขนาดความจุ 120 L สูง 87 cm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 cm ซึ่งเป็นขนาดถังหมักรองรับมูลฝอยที่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นนิยมใช้ โดยทำการเจาะช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสจำนวน 3 ช่อง ขนาด 14 x 14 cm และติดบานพับและกลอนประตู เพื่อใช้เป็นช่องในการเก็บตัวอย่างวัสดุหมัก โดยให้มีระยะห่างระหว่างช่อง 6.5 cm ตรงกึ่งกลางด้านล่างของถังหมักเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27 cm เพื่อเป็นช่องทางระบายน้ำชะ โดยใช้รูปแบบทางเข้าที่ได้จากผลการทดลองที่ 1 และออกของอากาศที่ได้จากผลการทดลองที่ 2 เพื่อดูคุณภาพของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดตามเกณฑ์ในการหมักดังแสดงในตารางที่ 2-5 เมื่อทำการหมักในถังหมักที่มีความจุมากกว่าการทดลองที่ 1 และ 2 และ มีการเติมมูลฝอยจริงแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 2-25 รูปตัดด้านหน้าและข้างถังหมักของการทดลองที่ 3



รูปที่ 2-26 ถังหมักของการทดลองที่ 3 ต้นแบบจริง

ซึ่งใช้เศษอาหารจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ดังแสดงในรูปที่ 2-27 ผสมใบไม้แห้งที่มาจากบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 2-2 หมักรวมกันในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนักเปียก โดยใช้เศษอาหารปริมาณ 1.6 kg/day ผสมกับใบไม้แห้งปริมาณ 0.8 kg/day โดยน้ำหนักเปียก ซึ่งปริมาณเศษอาหารที่ใช้นำมาจากข้อมูลของ สำนักงานสถิติแห่งชาติ (2553) ที่ได้ระบุว่าจำนวนประชากรต่อ 1 ครัวเรือน โดยเฉลี่ยมีประมาณ 4 คน และมีอัตราการทิ้งมูลฝอยอยู่ที่ 0.683 kg/cap/day ดังนั้นมีมูลฝอยประมาณ 2.7 kg/day ซึ่งมีมูลฝอยอินทรีย์คิดเป็น 60% ของมูลฝอยทั้งหมด (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

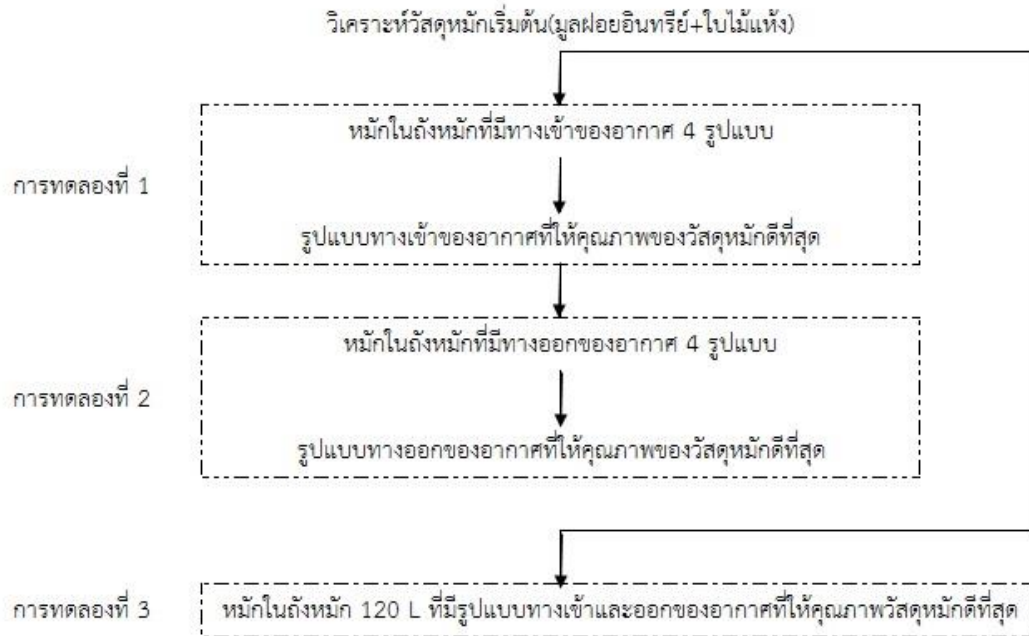


รูปที่ 2-27 มูลฝอยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจริง

โดยทำการเก็บตัวอย่างจากช่องฝาเปิดทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ ชั้นบน ชั้นกลาง และชั้นล่างของถังหมัก ดังแสดงในรูปที่ 2-25 แล้วนำมาผสมกันให้ได้ประมาณ 50 g เพื่อเป็นตัวแทนของวัสดุหมัก ซึ่งจะทำการเก็บค่าอุณหภูมิของวัสดุหมักทุกวันตั้งแต่เริ่มเติมวัสดุหมัก แต่จะเริ่มทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเมื่อวัสดุหมักเต็มถังหมัก เนื่องจากต้องการตัวอย่างวัสดุหมักจากช่องเก็บตัวอย่างทั้ง 3 ชั้น โดยทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าความชื้น (MC), อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) และ pH ทุก ๆ 4 วัน วิเคราะห์ค่าไนโตรเจน (TKN), อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ทุก ๆ 8 วัน วิเคราะห์ค่าฟอสฟอรัส (P_2O_5) และโพแทสเซียม (K_2O) ในวันแรกที่วัสดุหมักเต็มถังหมักและเมื่อสิ้นสุดการหมัก และวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า (EC), สีและกลิ่น และดัชนีการออกของเมิลด์พีช (GI) หลังสิ้นสุดการหมักเท่านั้น โดยวิธีการวิเคราะห์แต่ละคุณสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 2-4

2.9 สรุปแผนการดำเนินการทดลองทั้งหมด

แผนการดำเนินการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2-28



รูปที่ 2-28 แผนการดำเนินการทดลองทั้งหมด

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

บทนี้นำเสนอผลของรูปแบบทางเข้าและออกของอากาศในถังหมักแบบแพสซีฟแต่ละรูปแบบ ต่อคุณภาพของวัสดุหมัก ซึ่งประกอบด้วย คุณสมบัติของวัสดุหมัก การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหมักระหว่างการหมัก คุณภาพของวัสดุหมักที่ได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมัก

คุณสมบัติของวัสดุหมักแต่ละชนิดสำหรับการทดลองที่ 1 (ศึกษารูปแบบทางเข้าของอากาศ) และการทดลองที่ 2 (ศึกษารูปแบบทางออกของอากาศ) ซึ่งประกอบด้วย เศษผลไม้ (เปลือกกล้วย) เศษข้าว เศษผัก (ผักกาดขาว คื่นช่าย และกวางตุ้ง) และเศษเนื้อปรงสุก (เนื้อไก่) และไบโอดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักแต่ละชนิด

วัสดุหมัก	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์				
	pH	MC (%)	TOC (%)	TKN (%)	C/N ratio
เศษผลไม้	5.70	70.84	45.09	0.93	48.48
เศษข้าว	6.43	47.5	52.88	1.27	41.64
เศษผัก	5.95	69.22	40.41	4.27	9.46
เศษเนื้อปรงสุก	6.46	43.08	38.18	13.44	2.84
ไบโอดีเซล	4.64	4.04	41.93	1.03	40.71

3.2 การทดลองที่ 1 ผลของรูปแบบทางเข้าของอากาศต่อคุณภาพวัสดุหมักในกล่องโฟม

3.2.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสม (เติมวัสดุหมักแบบกะ)

ในการทดลองที่ 1 ได้สังเคราะห์มูลฝอยอินทรีย์ขึ้นตามขนาดของถังหมัก 39 L ที่สามารถรองรับมูลฝอยได้ประมาณ 6 kg ซึ่งประกอบด้วยเศษผลไม้ 3.33 kg เศษข้าว 0.47 kg เศษผัก 0.15 kg และเศษเนื้อปรงสุก 0.05 kg ตามอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างการหมักมูลฝอยอินทรีย์กับใบไม้แห้งแบบเติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียว (แบบกะ) ในกล่องโฟมของนิติ เหมพัฒนา (2553) ที่พบว่าอัตราส่วน 2:1 ช่วยให้การย่อยสลายของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ดีกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ โดยคุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสมในถังหมักแต่ละใบของการทดลองที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 3-2 พบว่า วัสดุหมักที่ผสมแล้วในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่า pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการหมักคือ 5.5-9.0 (Rynk, 1992) สำหรับค่า MC อยู่ระหว่างร้อยละ 42-49 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือร้อยละ 40-65 (Rynk, 1992) และค่า C/N ratio มีค่ามากกว่า 40 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักคือ 25-50 (Tchobanoglous et al., 1993)

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติของวัสดุหมักผสมของการทดลองที่ 1

ถังหมัก ใบที่	รูปแบบทางเข้า (ลักษณะอากาศเข้าและกระจายตัว)	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์วัสดุหมักผสมเริ่มต้น						
		pH	MC (%)	TOC (%)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	C/N ratio
1	VV	5.80	42.94	45.92	1.11	0.24	1.50	41.37
2	HH	5.51	46.38	41.05	0.99	0.22	1.50	41.46
3	HV	5.61	46.69	44.16	1.05	0.24	1.5	42.06
4	VH	5.57	48.28	41.29	1.11	0.24	1.57	41.70
5	NN	5.57	44.46	46.14	1.01	0.23	1.50	45.69

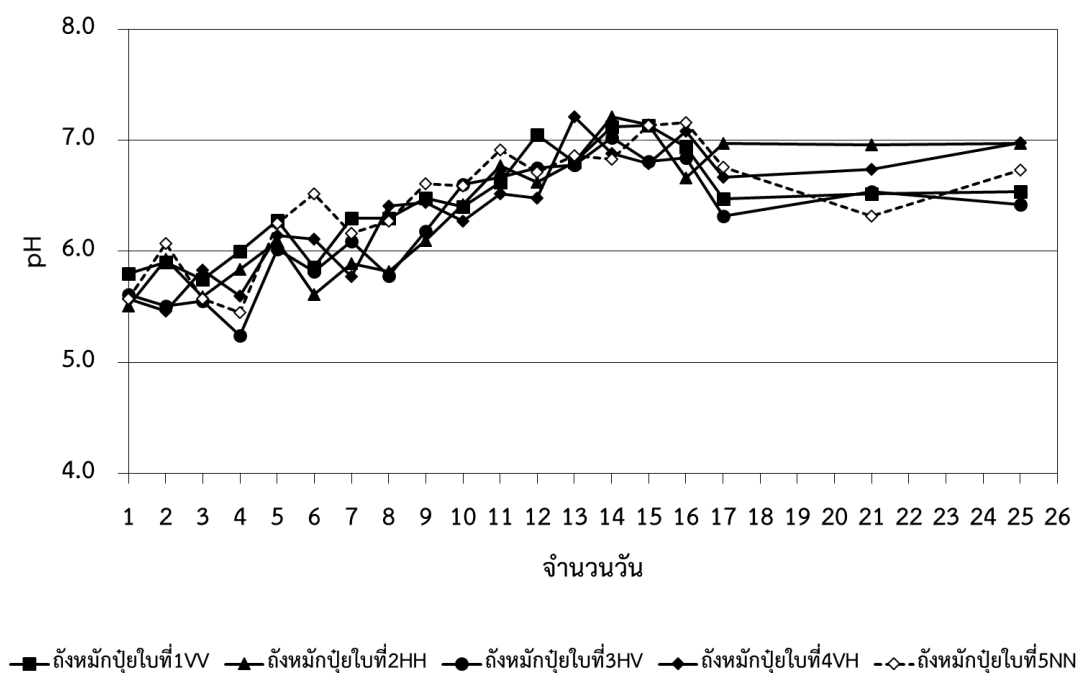
หมายเหตุ: สัญลักษณ์ VV คือ อากาศเข้าและกระจายตัวตามท่อในแนวตั้ง
 HH คือ อากาศเข้าและกระจายตัวตามท่อในแนวนอน
 HV คือ อากาศเข้าในแนวนอนและกระจายตัวตามท่อในแนวตั้ง
 VH คือ อากาศเข้าในแนวตั้งและกระจายตัวตามท่อในแนวนอน
 NN คือ ไม่มีท่อให้อากาศเข้าและกระจายตัวด้านล่างถังหมัก

3.2.2 การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหมักผสมระหว่างการหมัก

การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหมักในถังหมักที่มีรูปแบบทางเข้าของอากาศแตกต่างกัน 4 รูปแบบ ดังคำอธิบายในตารางที่ 2-1 (บทที่ 2) ได้ผลดังต่อไปนี้

3.2.2.1. การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่าง

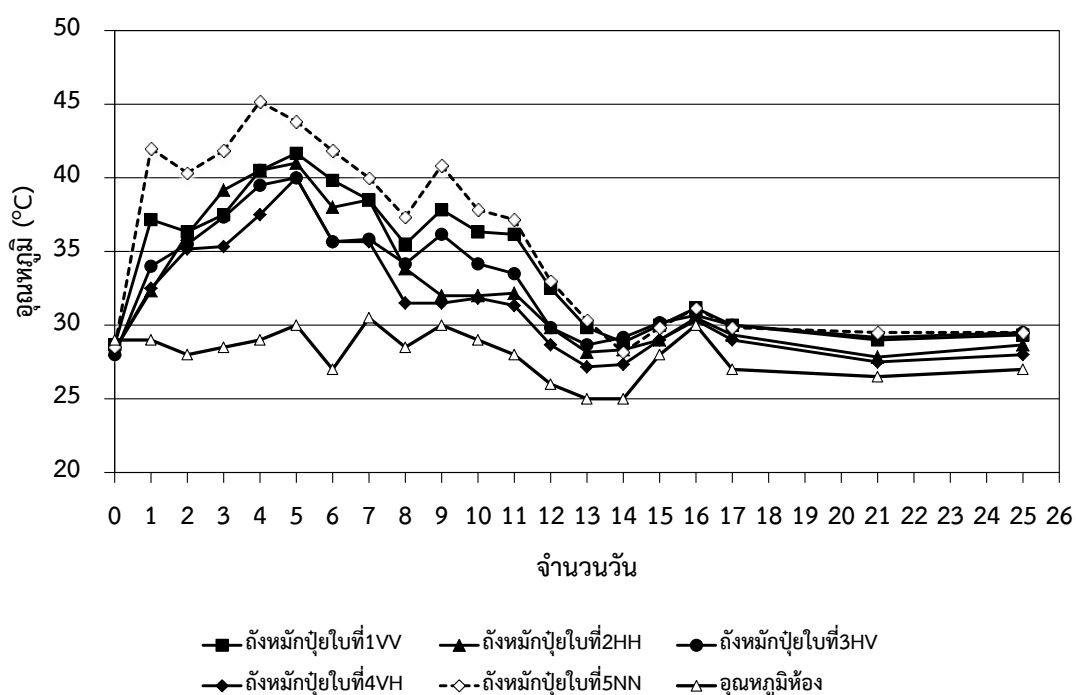
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุหมักผสมในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-1 พบว่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 13 วันแรกของการหมัก จนมีค่าใกล้เคียงความเป็นกลางจนสิ้นสุดการหมัก ซึ่งค่า pH ของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ หลังสิ้นสุดการหมักพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงที่แนะนำคือ 5.0-8.0 (Tchobanoglous and Kreith, 2002) โดยวัสดุหมักมีค่า pH เพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายโปรตีน และสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุหมักโดยจุลินทรีย์ จากนั้นกรดอะมิโนถูกย่อยสลายต่อกลายเป็นกรดไขมันและแอมโมเนีย (NH_3) หรือแอมโมเนียม (NH_4^+) โดยกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) และเมื่อถูกไฮโดรไลซิสกลายเป็น NH_3 มีการปล่อย OH^- จึงทำให้ pH เพิ่มขึ้น (DeLaune et al., 2004)



รูปที่ 3-1 pH ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

3.2.2.2. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหมักภายในถังหมักแต่ละใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-2 พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่าใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 28 °C จากนั้นอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดกระบวนการย่อยสลายภายในวัสดุหมัก และมีอุณหภูมิสูงสุดในวันที่ 4-5 ของการหมัก โดยอุณหภูมิสูงสุดของถังหมักใบที่ 1-5 คือ 41.8°C, 41.0°C, 41.0°C, 40.0°C และ 45.2 °C ตามลำดับ หลังจากนั้นอุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องจนคงที่ในอุณหภูมิห้องที่ระยะเวลา 16 วัน



รูปที่ 3-2 อุณหภูมิในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของวัสดุหมักในถังหมักทุกใบต่ำกว่า 50 °C ทั้งนี้เนื่องจากถังหมักมีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface Area to Volume; SA:V) ของถังหมักสูงจึงเกิดการสูญเสียความร้อน (Sundberg, 2003) โดยเกิดการถ่ายโอนความร้อนในรูปของนำความร้อน พาความร้อน แผลรังสีความร้อน (Conduction/Convection/Radiation; CCR) ได้มาก (Mason and Milke, 2005a) ซึ่งถังหมักขนาดเล็กโดยส่วนใหญ่ มีอุณหภูมิของวัสดุหมักประมาณ 40-45 °C เท่านั้น ในขณะที่ถังหมักขนาดใหญ่ มักมีอุณหภูมิในวัสดุหมัก 55-60 °C (Cornell, 2016) นอกจากนี้อาจเกิดจากค่า pH ในช่วงที่อุณหภูมิเริ่มเข้าสู่ช่วง Thermophilic (45 °C) ยังคงมีค่า pH ต่ำกว่า 6 ดังแสดงในรูปที่ 3-1 ส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่ม Thermophilic ทำงานได้ไม่เต็มที่ (Sundberg et al., 2004)

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ พบว่าถังหมักใบที่ 5 หรือ ถังควบคุมซึ่งไม่มีช่องทางเข้าของอากาศด้านล่างมีเพียงท่ออากาศด้านบนถังหมัก มีอุณหภูมิสูงกว่าถังหมักใบอื่น ๆ ซึ่งอาจเกิดจากการสูญเสียความร้อนของวัสดุหมักน้อยกว่าเนื่องจากการไหลเข้าของอากาศได้น้อยเพียง 0.35 kg/d (โดยปริมาณการไหลของอากาศดังแสดงในหัวข้อ 2.3.1.1) และค่า TOC ของวัสดุหมักในถังหมักควบคุมสูงกว่าถังหมักใบอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-2 จึงส่งผลให้เกิดความร้อนจากการย่อยวัสดุหมักได้สูงกว่า

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยวัสดุหมักของถังหมักที่มีช่องทางเข้าอากาศด้านล่างแต่ละรูปแบบ ตลอดระยะเวลา 16 วัน พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของถังหมักใบที่ 1 (34.3 °C) และ 3 (33 °C) สูงกว่า ถังใบที่ 2 (32.7 °C) และ 4 (31.6 °C) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทางเข้าของอากาศที่กระจายตัวตามแนวตั้ง (ถังหมักใบที่ 1 และ 3) ซึ่งทำให้จุลินทรีย์บริเวณตรงกลางสัมผัสกับอากาศได้มากกว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสูงกว่า และเกิดความร้อนในวัสดุหมักได้มากกว่า แต่อุณหภูมิของวัสดุหมักในถังหมักใบที่ 2 และ 4 ลดลงช้าใกล้อุณหภูมิห้องเร็วกว่าถังหมักใบที่ 1, 3 และ 5 และเหลือปริมาณวัสดุหมักน้อยกว่าดังแสดงในตารางที่ 3-3 โดยถังหมักใบที่ 5 ซึ่งไม่มีช่องทางเข้าของอากาศ มีการลดลงของสารอินทรีย์น้อยที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทางเข้าของอากาศที่กระจายตามแนวนอน (ถังหมักใบที่ 2 และ 4) ซึ่งทำให้จุลินทรีย์ในกองหมักสัมผัสกับอากาศได้ทั่วถึงมากกว่า ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ทั่วทั้งกองหมักมากกว่า แม้จะมีอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า ส่วนถังหมักใบที่ 5 แม้มีอุณหภูมิสูงกว่าถังหมักใบอื่น ๆ แต่เหลือวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าแม้มีอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าแต่ย่อยสลายสารอินทรีย์ได้น้อย

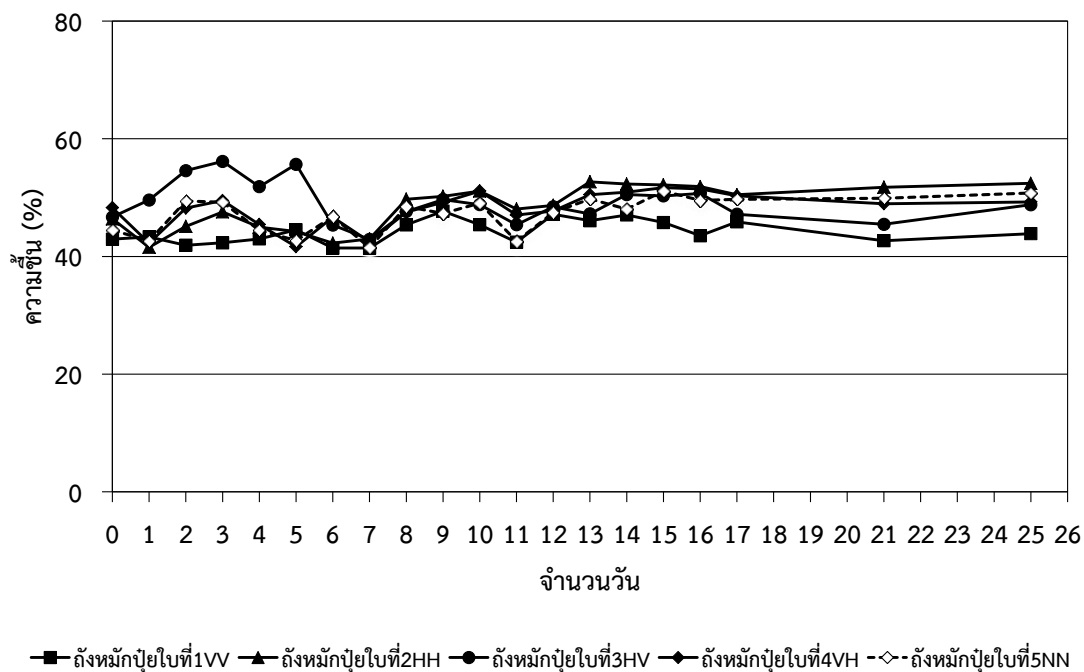
ตารางที่ 3-3 การลดลงของปริมาณสารอินทรีย์ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

ถังหมักใบที่	ปริมาณสารอินทรีย์ (kg)		% การลดลง
	เริ่มต้นหมัก	หลังหมัก	
1 (VV)	6.6	5.2	21.0
2 (HH)	6.6	5.1	23.0
3 (HV)	6.8	5.2	23.5
4 (VH)	6.9	5.2	24.6
5 (NN)	6.2	5.2	16.1

3.2.2.3. การเปลี่ยนแปลงของความชื้น

การเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้น (Moisture Content; MC) ของวัสดุหมักภายในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-3 พบว่า MC เริ่มต้นของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่า

ใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 42-49% ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และหลังสิ้นสุดการหมักของถังหมักใบที่ 1-5 คือ 43.9%, 52.4%, 48.8%, 49.3% และ 50.8% ตามลำดับ



รูปที่ 3-3 MC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

จะเห็นได้ว่า MC ของวัสดุหมักในถังหมักทุกใบเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าสูงกว่าตอนเริ่มต้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดจากอุณหภูมิของวัสดุหมักที่เกิดขึ้นในถังหมักทุกใบต่ำกว่า 50 °C ทำให้สูญเสีย MC ระหว่างการหมักน้อย และเมื่อเปรียบเทียบ MC ในวัสดุหมักของถังหมักที่มีทางเข้าของอากาศด้านล่างแต่ละรูปแบบ จะเห็นได้ว่า MC หลังสิ้นสุดการหมักของถังหมักใบที่ 1 (43.9%) และ 3 (48.8%) ต่ำกว่า ถังหมักใบที่ 2 (52.4%) และ 4 (49.3%) สอดคล้องกับอุณหภูมิเฉลี่ยในวัสดุหมักที่สูงกว่าจึงส่งผลให้ MC มีค่าต่ำกว่า

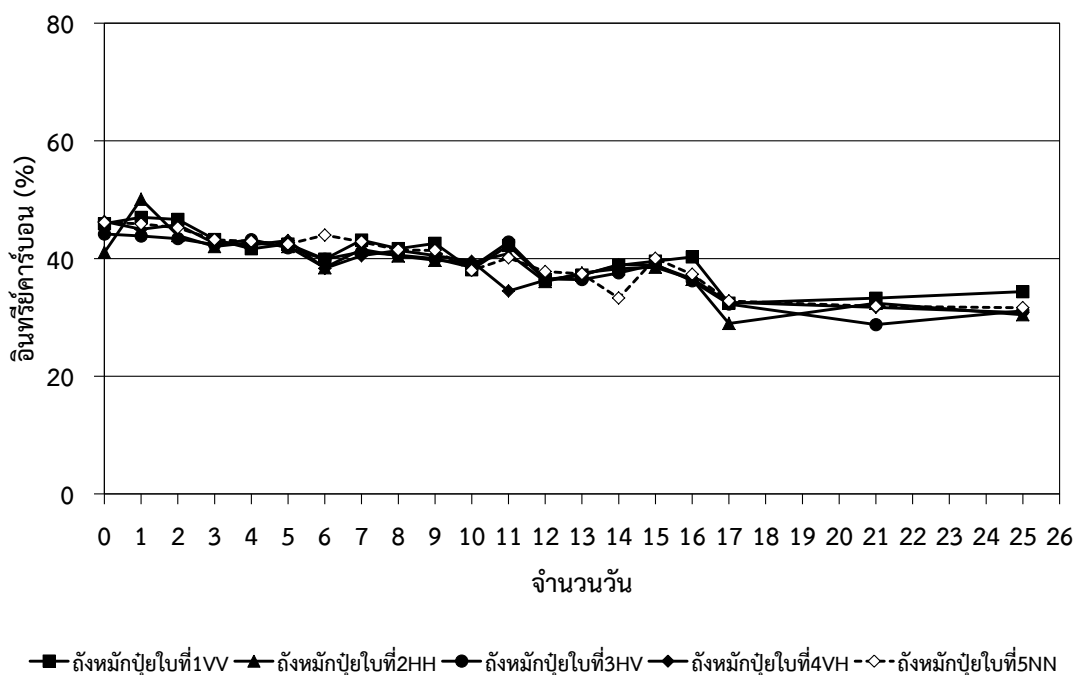
นอกจากนี้เป็นการหมักแบบให้อากาศไหลเข้าตามธรรมชาติซึ่งมีความเร็วของอากาศต่ำประมาณ 0.002-0.018 m/s (Mason and Milke, 2005b) ส่งผลให้ MC ระบายออกจากถังได้น้อย ทำให้ MC ในถังหมักลดลงได้น้อยกว่าแบบใช้เครื่องเติมอากาศ และเนื่องจากถังหมักและฝาเป็นโฟม ซึ่งเป็นฉนวนทำให้มีไอน้ำส่วนหนึ่งกระทบฝาบนของถังหมักและควบแน่นเป็นหยดน้ำกลับลงสู่วัสดุหมัก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ นิติ เหมพัฒน์ (2553) ที่ทำการหมักมูลฝอยอินทรีย์สังเคราะห์ร่วมกับใบไม้แห้ง ในกล่องโฟมเติมอากาศแบบธรรมชาติเช่นกัน มีอุณหภูมิของการหมัก

สูงสุดเพียง 53 °C พบว่ามีค่า MC หลังการหมักเท่ากับ 66.12% ซึ่งสูงกว่าในช่วงเริ่มต้นการหมัก (65%) เล็กน้อยเช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบ MC ในวัสดุหมักของถังหมักที่มีทางเข้าของอากาศด้านล่างแต่ละรูปแบบ จะเห็นได้ว่า MC หลังสิ้นสุดการหมักของถังหมักใบที่ 1 (43.9%) และ 3 (48.8%) ต่ำกว่า ถังหมักใบที่ 2 (52.%) และ 4 (49.3%) สอดคล้องกับอุณหภูมิเฉลี่ยในวัสดุหมักที่ถังหมักใบที่ 1 และ 3 สูงกว่า 2 และ 4

3.2.2.4. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon; TOC) ของวัสดุหมักภายในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-4 พบว่าค่า TOC เริ่มต้นของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ระหว่าง 41-47% จากนั้นค่า TOC มีค่าลดลงตามระยะเวลาของการหมัก



รูปที่ 3-4 TOC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

โดยค่า TOC ของถังหมักใบที่ 1-5 หลังสิ้นสุดการหมักคือ 34.37, 30.44, 31.12, 30.82 และ 31.66% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า TOC ของวัสดุหมักในถังหมักทุกใบเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าต่ำกว่าตอนเริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 3-4 เนื่องจากค่า TOC ถูกย่อยสลายเป็นก๊าซ CO₂

(Golueke, 1972) และสอดคล้องกับการทดลองของสรรพธรณ อมตธรรม (2546) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารผสมใบไม้กับผสมขี้เลื่อยโดยใช้เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรียพบว่าปุ๋ยหมักจากเศษอาหารผสมใบไม้กับผสมขี้เลื่อยมีค่า TOC หลังสิ้นสุดการหมักอยู่ในช่วง 50-54 และ 36-40% ซึ่งต่ำกว่าในช่วงแรกเริ่มต้นการหมักที่อยู่ในช่วง 56-60 และ 50-53% ตามลำดับ เนื่องจากมีการย่อยสลายเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ เพื่อนำสารอินทรีย์ไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในการสร้างเซลล์ใหม่

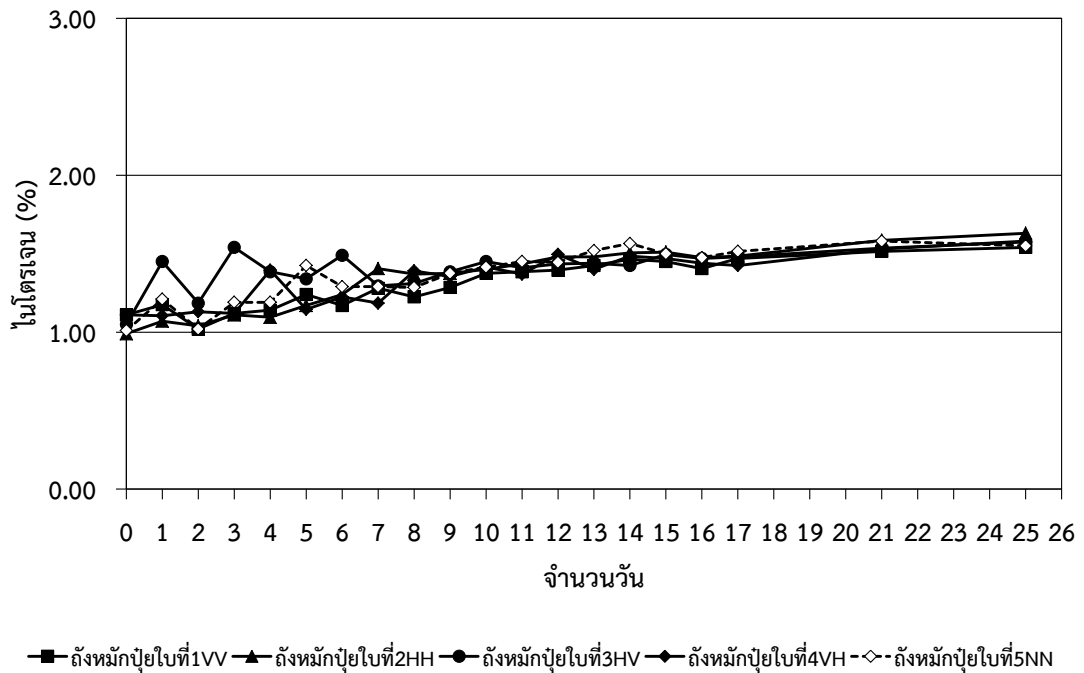
ตารางที่ 3-4 TOC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

ถังหมักใบที่	TOC (%)	
	เริ่มต้นหมัก	หลังหมัก
1 (VV)	45.92	34.37
2 (HH)	41.05	30.44
3 (HV)	44.16	31.12
4 (VH)	41.29	30.82
5 (NN)	46.14	31.66

เมื่อเปรียบเทียบค่า TOC ในวัสดุหมักของถังหมักที่มีทางเข้าอากาศด้านล่างแต่ละรูปแบบในตารางที่ 3-4 จะเห็นได้ว่าถังหมักใบที่ 2 และ 4 ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยของกองหมักต่ำกว่า แต่มี TOC เหลือน้อยกว่าถังใบที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งสนับสนุนว่ารูปแบบทางเข้าและกระจายตัวของอากาศที่ทำให้เกิดการกระจายอากาศอย่างทั่วถึงทั้งกองหมักทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากกว่ารูปแบบทางเข้าที่ทำให้เกิดอุณหภูมิของกองหมักสูงกว่า

3.2.2.5. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจน

การเปลี่ยนแปลงร้อยละของค่าไนโตรเจน (Total Kjeldahl Nitrogen; TKN) ของวัสดุหมักภายในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-5 พบว่าร้อยละของ TKN เริ่มต้นของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 0.9-1.2 ซึ่งปกติค่า TKN จะลดลงจากการที่ถูกจุลินทรีย์ดึงไปใช้เป็นสารอาหารในการสร้างเซลล์ และการสูญเสียในรูปก๊าซ NH_3 แต่จากกราฟนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการหมัก เนื่องมาจากร้อยละของ TOC ลดลง โดยการสูญเสียไปอยู่ในรูปของก๊าซ CO_2 (Kapetanios et al., 1993) จึงทำให้สัดส่วนของ TKN ในวัสดุหมักเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3-5 TKN ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

โดย TKN ของถังหมักใบที่ 1-5 หลังสิ้นสุดการหมักคือ 1.54%, 1.63%, 1.58%, 1.58% และ 1.55% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3-5 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของพูนศักดิ์ จันทรจำปี (2541) และอนุวัฒน์ เฟื่องจันทร์ (2546) ที่ได้ทำการหมักเศษอาหารผสมกับใบไม้แห้ง พบว่า มีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นหลังสิ้นสุดการหมักอยู่ในช่วง 1.55-3.00% และสอดคล้องกับการทดลองของสรรพรณ อมตธรรม (2546) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารผสมใบไม้กับผสมขี้เลื่อยโดยใช้เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย พบว่าปุ๋ยหมักจากเศษอาหารผสมใบไม้กับผสมขี้เลื่อยมีค่า TKN เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่องไปจนสิ้นสุดการหมักอยู่ในช่วง 3.0-3.4% ซึ่งสูงกว่าเริ่มต้นการหมักที่อยู่ในช่วง 1.5-2.0%

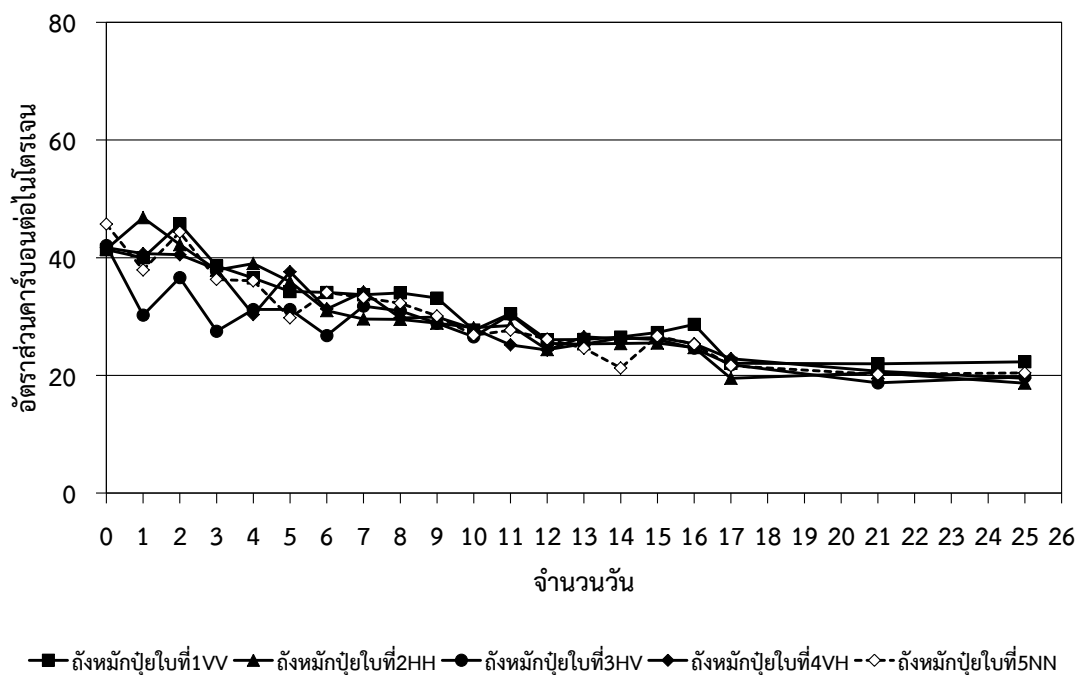
ตารางที่ 3-5 TKN ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

ถังหมักใบที่	TKN (%)	
	เริ่มต้นหมัก	หลังหมัก
1 (VV)	1.11	1.54
2 (HH)	0.99	1.63
3 (HV)	1.05	1.58
4 (VH)	1.11	1.58
5 (NN)	1.01	1.55

เมื่อเปรียบเทียบ TKN ในวัสดุหมักของถังหมักที่มีทางเข้าอากาศด้านล่างแต่ละรูปแบบ จะเห็นได้ว่า TKN หลังสิ้นสุดการหมักของถังหมักใบที่ 2 และ 4 สูงกว่าถังหมักใบที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งสอดคล้องกับ TOC ในวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักของถังหมักใบที่ 2 และ 4 ต่ำกว่าถังหมักใบที่ 1, 3 และ 5

3.2.2.6. การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ของวัสดุหมักภายในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-6 พบว่า C/N ratio เริ่มต้นของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ระหว่าง 41-47 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการหมัก จากนั้น C/N ratio มีค่าลดลงตามระยะเวลาของการหมัก เนื่องจาก TKN มีค่าเพิ่มขึ้นจากการที่ก๊าซ NH_3 ที่ระเหยออกมาสัมผัสกับไอน้ำหรือน้ำในวัสดุหมักทำให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารละลายคือ NH_4^+ และ TOC ลดลงจากการสูญเสียไปอยู่ในรูปของก๊าซ CO_2



รูปที่ 3-6 C/N ratio ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

เมื่อนำมาคำนวณหา C/N ratio ของถังหมักใบที่ 1-5 หลังสิ้นสุดการหมักได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3-6 และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่น พบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกับการศึกษาของอนุวัฒน์ เฟื่องจันทร์ (2546) ซึ่งได้ทำการทดลองทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่กับใบไม้แห้งโดยใช้วิธีการเติมอากาศแบบตามธรรมชาติและแบบใช้เครื่องเติมอากาศ พบว่าค่า C/N ratio ของวัสดุหมักตอนเริ่มต้นมีค่าอยู่ในช่วง 35.6-42.0 ซึ่งสูงกว่าค่า C/N ratio ของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักซึ่งอยู่ในช่วง 15.6-18.9

ตารางที่ 3-6 C/N ratio ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 1

ถังหมักใบที่	C/N ratio	
	เริ่มต้นหมัก	หลังหมัก
1 (VW)	41.37	22.32
2 (HH)	41.46	18.68
3 (HV)	42.06	19.76
4 (VH)	41.70	19.51
5 (NN)	45.69	20.42

จากการเปรียบเทียบ C/N ratio ในวัสดุหมักของถังหมักที่มีทางเข้าอากาศด้านล่าง แต่ละรูปแบบ จะเห็นได้ว่า C/N ratio หลังสิ้นสุดการหมักของถังหมักใบที่ 2 (18.86) และ 4 (19.51) ต่ำกว่าถังหมักใบที่ 1 (22.32), 3 (19.76) และ 5 (20.42) ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของ TOC และการเพิ่มขึ้นของ TKN ในวัสดุหมัก

3.2.2.7. คุณภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก

คุณภาพของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ในตารางที่ 2-5 ดังแสดงในตารางที่ 3-7 จะเห็นได้ว่าวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ หลังสิ้นสุดการหมักมีค่า pH และ ธาตุอาหารหลักผ่านเกณฑ์ที่กำหนด และค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของ พูนศักดิ์ จันทน์จำปี (2541), นคร สุริยานนท์ (2552) และนิติ เหมพัฒน์ (2553) ที่ทำการศึกษาการหมักเศษอาหารผสม กับใบไม้แห้งซึ่งมีธาตุอาหารหลักรวมกันอยู่ในช่วง 2.35-4.56% ยกเว้นค่า MC และ C/N ratio ของ ถังหมักบางถังที่ไม่ผ่านเกณฑ์กำหนด

ตารางที่ 3-7 คุณภาพวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก

พารามิเตอร์	เกณฑ์กำหนด	หน่วย	ถังหมักใบที่				
			1 (VV)	2 (HH)	3 (HV)	4 (VH)	5 (NN)
pH	5.0-8.0 ¹	-	6.54	6.97	6.42	6.98	6.73
MC	≤30 ²	%	43.9	52.4	48.8	49.3	50.8
C/N ratio	≤20:1 ²	-	22.32	18.68	19.76	19.51	20.42
TKN	ธาตุอาหารหลักรวม ≥2.0 ²	%	1.54	1.63	1.58	1.58	1.55
P ₂ O ₅			0.39	0.41	0.41	0.41	0.38
K ₂ O			2.59	2.93	2.61	2.61	2.54
EC	≤10 ²	dS/m	1.65	1.28	1.94	1.68	1.30
สีและกลิ่น ³	-	-	สีดำบางส่วน กลิ่นคล้ายดิน	สีดำทั้งหมด กลิ่นคล้ายดิน	สีดำบางส่วน กลิ่นคล้ายดิน	สีดำบางส่วน กลิ่นคล้ายดิน	สีดำทั้งหมด กลิ่นคล้ายดิน
GI	≥50 ⁴	%	66.01	144.79	91.56	76.31	135.42

หมายเหตุ ¹ คือ Tchobanoglous and Kreith (2002)

² คือ กรมวิชาการเกษตร (2557)

³ คือ Jiménez and Garcia (1989)

⁴ คือ Huang et al. (2004)

สำหรับค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) ของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ หลังสิ้นสุดการหมักมีค่าอยู่ในช่วง 1.28-1.94 dS/m ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนด โดยค่า EC ที่เกิดขึ้นคือ เกลือที่อยู่ในวัสดุหมักละลายออกมา (Sylla et al., 2006) และเมื่อเปรียบเทียบค่า EC ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชดังแสดงในตารางที่ 3-8 พบว่าวัสดุหมักที่ได้จากถังหมักทั้ง 5 ใบ สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อผลของการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากมีค่า EC ไม่เกิน 2 dS/m

ตารางที่ 3-8 การนำไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช

EC (dS/m)	ระดับความเค็ม	ผลกระทบต่อพืช
0-2	ไม่เค็ม	ไม่กระทบต่อการปลูกพืช
2-4	เค็มน้อย	พืชที่ไวต่อความเค็มมีการเจริญเติบโตลดลง
4-8	เค็มปานกลาง	พืชทนความเค็มเจริญเติบโตได้ดี
8-16	เค็มมาก	พืชทนความเค็มบางชนิดเจริญเติบโตได้ดี
>16	เค็มมากที่สุด	พืชทุกชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตได้

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2553)

สีและกลิ่นของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักควรมีลักษณะสีน้ำตาลเข้มหรือดำ (Zhu et al., 2004) เปื่อยยุ่ย ขาดจากกันได้ง่าย โดยต่างจากวัสดุหมักในตอนเริ่มต้นอย่างชัดเจน (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2553) และกลิ่นคล้ายดิน และจากการสังเกตดังแสดงในตารางที่ 3-9 พบว่ามีเพียงวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักภายในถังหมักใบที่ 2 และ 5 ที่มีลักษณะสีดำทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการกระจายอากาศอย่างทั่วถึง โดยวัสดุหมักในถังหมักใบที่ 2 มีการย่อยสลายอย่างสม่ำเสมอ ส่วนวัสดุหมักในถังหมักใบที่ 5 หรือถังควบคุมที่ไม่มีช่องทางเข้าของอากาศด้านล่าง อาจเกิดจากมีอุณหภูมิระหว่างการหมักสูงสุด จึงทำให้วัสดุหมักเกิดการย่อยสลายของวัสดุหมักได้ดี (Rasapoor et al., 2009)

ตารางที่ 3-9 สีวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักในการทดลองที่ 1



โดยพบว่าวัสดุหมักในถังหมักทุกใบมีค่าดัชนีการงอกของเมล็ดพืช (Germination Index; GI) มากกว่า 50 % ซึ่งถูกบ่งชี้ว่าไม่เป็นอันตรายต่อพืช (Huang et al., 2004) โดยถังหมักใบที่ 2, 3 และ 5 เท่านั้นที่มีค่า GI มากกว่า 80% ซึ่งถือว่าวัสดุหมักเป็นปุ๋ย (กรมวิชาการเกษตร, 2557) โดยถังหมักใบที่ 2 มีค่า GI มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า C/N ratio ที่เหลือน้อยที่สุดกับสีและกลิ่นที่มีสีดำและมีกลิ่นคล้ายดิน ซึ่งทำให้พืชดึงธาตุอาหารมาใช้ได้ง่าย เนื่องจากวัสดุหมักไม่เกิดการย่อยสลายอีกต่อไป

3.2.2.8. รูปแบบทางเข้าของอากาศที่เหมาะสม

จากคุณสมบัติของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักพบว่าถังหมักใบที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุหมักในตารางที่ 2-5 (บทที่ 2) มีค่า pH, C/N ratio, ธาตุอาหารหลัก, EC สีและกลิ่นที่มีสีดำทั้งหมดและกลิ่นคล้ายดิน และ GI ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด และอุณหภูมิของกองหมักลดกลับมาใกล้อุณหภูมิห้องเร็วที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถังหมักที่มีทางเข้าของอากาศในแนวนอนและมีท่อกระจายอากาศภายในถังอยู่ในแนวนอนด้านล่างถัง ดังแสดงในรูปที่ 3-7 ทำให้อากาศเข้าสู่กองหมักได้ทั่วถึง ส่งผลให้จุลินทรีย์ทั้งกองหมักได้รับอากาศเพียงพอ จึงทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งหมดได้เร็วกว่าถังหมักที่ท่ออากาศอยู่กลางกองหมัก ดังนั้น จึงเลือกรูปแบบอากาศเข้าและกระจายในแนวนอน เป็นทางเข้าของอากาศในการทดลองที่ 2



รูปที่ 3-7 ถังหมักที่มีอากาศเข้าและกระจายตัวในแนวนอน

3.3 การทดลองที่ 2 ผลของรูปแบบทางออกของอากาศต่อคุณภาพวัสดุหมักในกล่องโฟม

3.3.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสม (เติมวัสดุหมักแบบกะ)

คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสมในถังหมักแต่ละใบของการทดลองที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 คุณสมบัติของวัสดุหมักผสมของการทดลองที่ 2

ถังหมัก ใบที่	รูปแบบทางออก	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์วัสดุหมักผสมเริ่มต้น						
		pH	MC (%)	TOC (%)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	C/N ratio
1	PT	5.38	38.52	38.54	1.06	0.24	1.56	36.36
2	PS	5.21	40.27	37.16	1.17	0.26	1.60	31.76
3	CT	5.10	37.52	39.73	1.15	0.24	1.52	34.55
4	CS	5.21	36.57	39.93	0.97	0.25	1.63	41.17
5	No	5.23	40.58	36.60	1.09	0.25	1.54	33.58

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ PT คือ อากาศออกทางท่อด้านบนถังหมัก
 PS คือ อากาศออกทางท่อด้านข้างถังหมัก
 CT คือ อากาศออกทางช่องเจาะด้านบนถังหมัก
 CS คือ อากาศออกทางช่องเจาะด้านข้างถังหมัก
 No คือ ไม่มีท่ออากาศหรือช่องเจาะด้านบนและข้างของถังหมัก

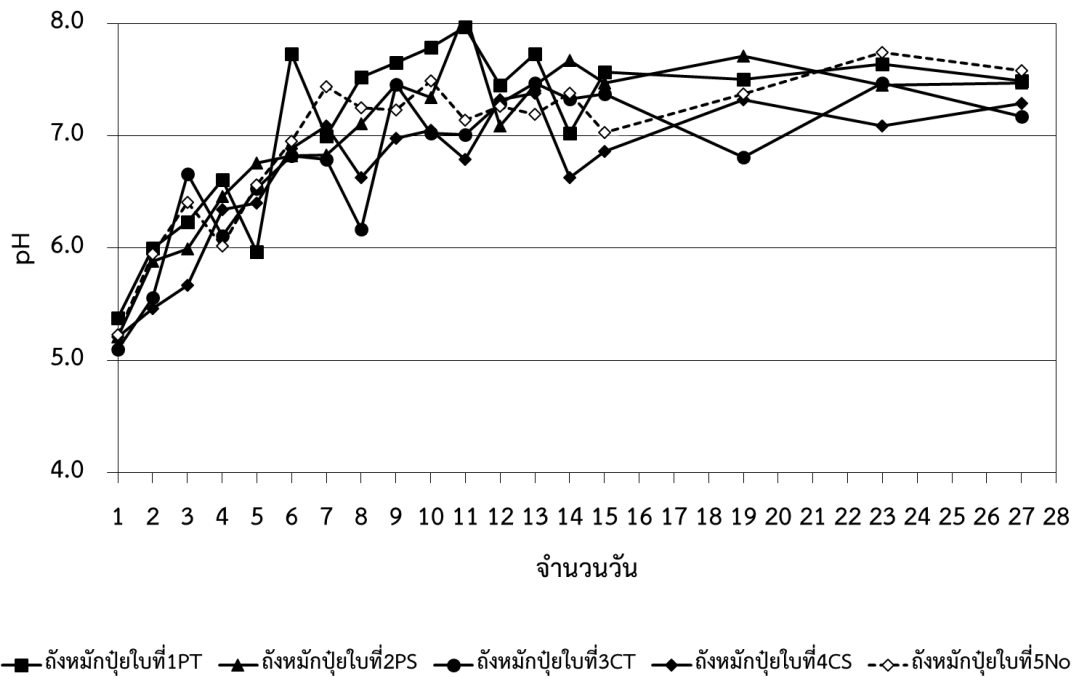
จากตารางที่ 3-10 พบว่าวัสดุหมักผสมแล้วในถังหมักทั้ง 5 ใบ มี pH ต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมเล็กน้อย เนื่องจากการศึกษาของ Diaz (1993) พบว่าเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่า pH ของวัสดุหมักมีค่าอยู่ในช่วงเป็นกรดเล็กน้อย เกิดจากในช่วงแรกจุลินทรีย์ได้ย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อน เช่น Polysaccharides และ Cellulose ไปเป็นกรดอินทรีย์ส่งผลให้มีค่า pH เป็นกรด ซึ่งสามารถกลับเข้าสู่สภาวะความเป็นกลางได้ระหว่างการหมัก โดยไม่จำเป็นต้องปรับค่า pH เมื่อเริ่มต้นการหมัก (Tchobanoglous and Kreith, 2002) ดังนั้นผู้วิจัยจึงไม่ได้ทำการปรับ pH ในช่วงเริ่มต้นการหมัก และพบว่าค่า MC ต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมเล็กน้อย แต่มีค่า C/N ratio อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการหมักคือ 25-50 (Tchobanoglous et al., 1993)

3.3.2 การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหมักระหว่างการหมัก

การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหมักในถังหมักที่มีรูปแบบทางออกของอากาศแตกต่างกัน 4 รูปแบบ ดังคำอธิบายในตารางที่ 2-2 (บทที่ 2) โดยมีทางเข้าของอากาศที่เข้าและกระจายตัวตามท่อในแนวนอนภายในถังหมัก ซึ่งเลือกจากผลการทดลองที่ 1 โดยได้ผลดังต่อไปนี้

3.3.2.1. การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่าง

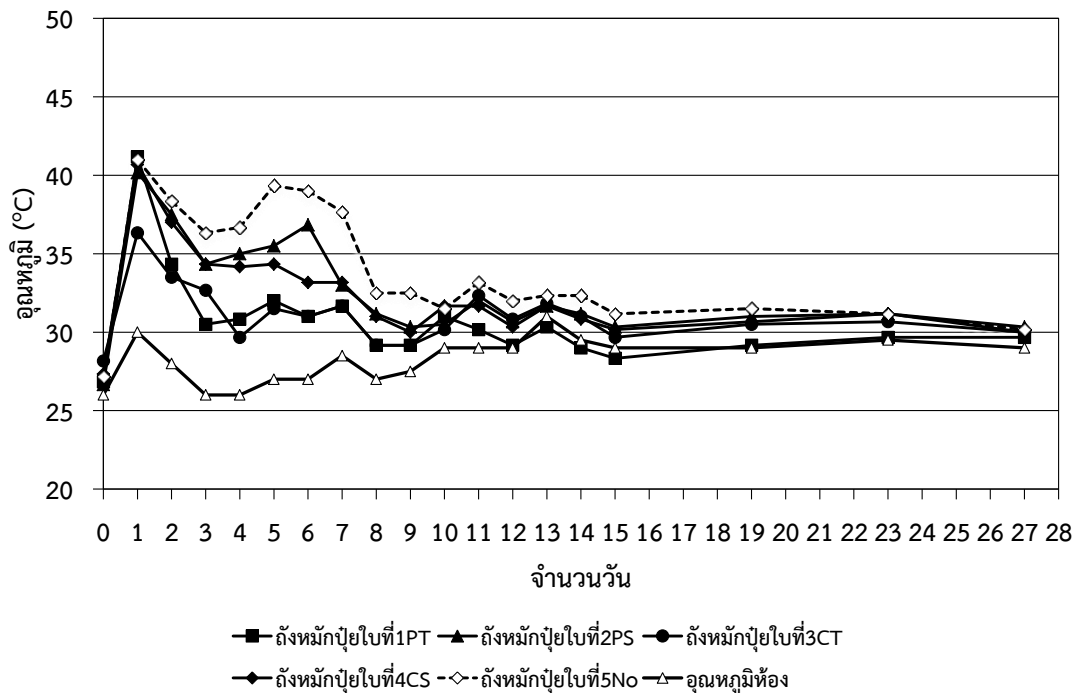
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-8 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 11 วันแรก ซึ่งในระหว่างการหมักที่เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นได้ดีที่มีค่า pH อยู่ในช่วงคือ 5.5-9.0 (Rynk, 1992) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองของถังหมักใบที่ 1-5 มีค่า pH อยู่ในช่วงที่แนะนำคือ 5.0-8.0 (Tchobanoglous and Kreith, 2002) เนื่องจากก๊าซ NH_3 ที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักช่วยปรับคุณสมบัติของวัสดุหมักให้เข้าใกล้ความเป็นกลาง (Haug, 1993) และจากงานวิจัย Gil et al. (2008) ได้พบว่าค่า pH ของปุ๋ยหมักเพิ่มสูงขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพของกองปุ๋ยหมักในระหว่างการเปลี่ยนสภาพสารอินทรีย์ไปเป็นแร่ธาตุ เช่น มีการสร้างแอมโมเนียจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ในกองปุ๋ยหมัก และการเปลี่ยนจากสารอินทรีย์ไนโตรเจนกลายเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) โดยสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีน กรดอะมิโน และเปปไทด์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดนี้เกิดมาจากกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์



รูปที่ 3-8 pH ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

3.3.2.2. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหมักภายในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-9 พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่าใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 27 °C จากนั้นอุณหภูมิมิมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดกระบวนการย่อยสลายภายในวัสดุหมัก และมีอุณหภูมิสูงสุดในวันที่ 1 ของการหมัก โดยอุณหภูมิสูงสุดของถังหมักใบที่ 1-5 คือ 41.2 °C, 41.2 °C, 36.3 °C, 40.7 °C และ 41.0 °C ตามลำดับ จากนั้นจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนคงที่ที่อุณหภูมิห้องในระยะเวลา 13 วัน



รูปที่ 3-9 อุณหภูมิในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

จะเห็นว่าอุณหภูมิของวัสดุหมักในถังหมักทุกใบต่ำกว่า 50 °C ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 1 และเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ พบว่าอุณหภูมิของถังหมักใบที่ 3 ต่ำกว่าถังหมักใบอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าทางออกของอากาศที่อยู่ด้านบนของถังหมัก ทำให้สูญเสียความร้อนจากวัสดุหมักได้มากกว่า ส่งผลให้มีอุณหภูมิในวัสดุหมักต่ำกว่า

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิวัสดุหมักของถังหมักที่มีทางออกของอากาศแต่ละรูปแบบ จะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของถังหมักใบที่ 5 สูงที่สุดเพราะไม่มีทางออกของอากาศทำให้อากาศถ่ายเทได้น้อย โดยถังหมักใบที่ 1 (30.69 °C) และ 3 (31.04 °C) ต่ำกว่า ถังใบที่ 2 (32.60 °C) และ 4 (32.28 °C) และอุณหภูมิของวัสดุหมักในถังหมักใบที่ 1 และ 3 ลดลงมากใกล้อุณหภูมิห้อง ในวันที่ 8 ของการหมัก ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุหมักในถังหมักใบที่ 2, 4 และ 5 ลดลงมากใกล้อุณหภูมิห้อง ในวันที่ 10, 12 และ 13 ของการหมักตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถังหมักใบที่ 1 และ 3 ย่อยสลายเร็วกว่า และพบว่าปริมาณสารอินทรีย์ลดลงมากกว่าถังหมักใบที่ 2 และ 4 ดังแสดงในตารางที่ 3-11 ดังนั้นผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทางออกของอากาศที่อยู่ด้านบนถังหมัก (ถังหมักใบที่ 1 และ 3) ส่งผลให้วัสดุหมักได้รับอากาศปริมาณมากพอ โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (รูปที่ 3-9) เนื่องจากอากาศไหลเข้าได้มาก ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็ว สูญเสียความร้อนออกภายนอกถังหมักได้มาก ทำให้ในวัสดุหมักมีความร้อนต่ำ ในขณะที่ทางออกของอากาศที่อยู่ด้านข้างของถังหมัก (ถังหมักใบที่ 2 และ 4) ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในวัสดุหมักสูงกว่า ส่งผลให้อากาศไหลออกได้

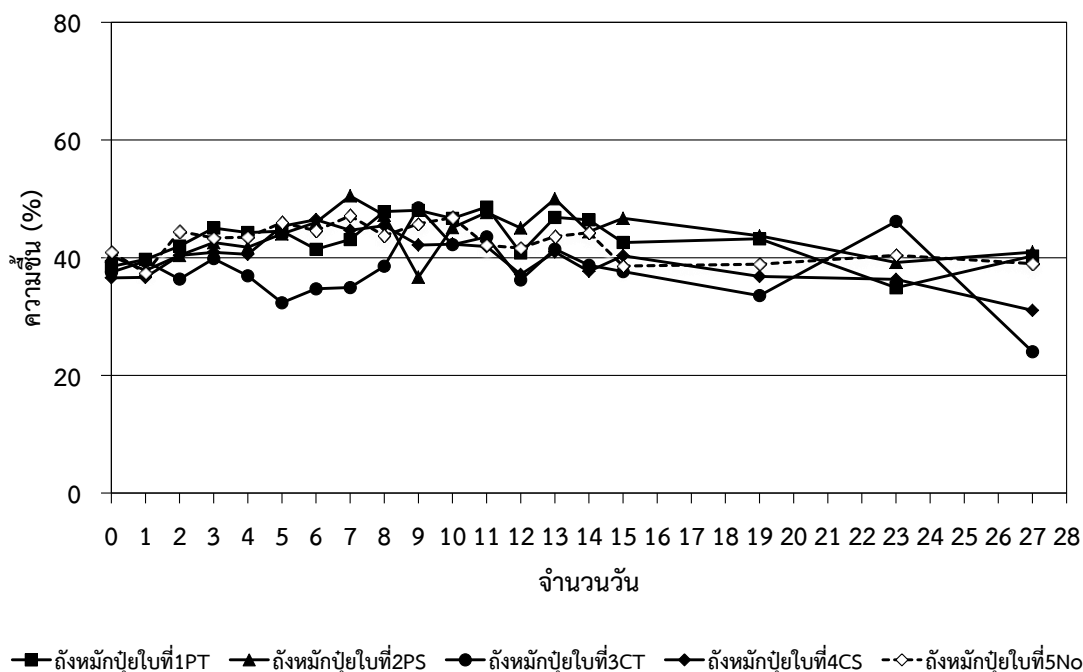
ข้า จึงมีอากาศอยู่ภายในวัสดุหมักได้มากกว่า มีผลต่ออุณหภูมิของวัสดุหมักมากกว่า แต่ทางออกของอากาศที่อยู่ด้านบนถังหมัก (ถังหมักใบที่ 1 และ 3) ซึ่งสร้างโอกาสการกระจายตัวของอากาศที่วัสดุหมักได้มากกว่า กลับเข้าไปใกล้อุณหภูมิห้องก่อนและมีร้อยละการลดลงมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 1 ซึ่งทางเข้าที่ทำให้อากาศไหลเข้าได้มาก ทำให้เกิดการย่อยสลายได้มากเป็นทางเข้าของอากาศที่มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าทางออกของอากาศ

ตารางที่ 3-11 สารอินทรีย์ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

ถังหมักใบที่	ปริมาณสารอินทรีย์ (kg)		% การลดลง
	เริ่มต้นหมัก	หลังหมัก	
1 (PT)	8.0	5.8	27.5
2 (PS)	7.8	6.2	20.5
3 (CT)	7.2	5.5	23.6
4 (CS)	7.6	5.8	23.7
5 (No)	8.2	6.8	17.1

3.3.2.3. การเปลี่ยนแปลงของความชื้น

การเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้น (Moisture Content; MC) ของวัสดุหมักภายในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-10 พบว่า MC เริ่มต้นของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 36-41% จากนั้นมีค่า MC สูงขึ้นในวัสดุหมัก โดยถังหมักใบที่ 1-5 หลังสิ้นสุดการหมักคือ 40.3%, 40.9%, 24.0%, 31.0% และ 39.0% ตามลำดับ



รูปที่ 3-10 MC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

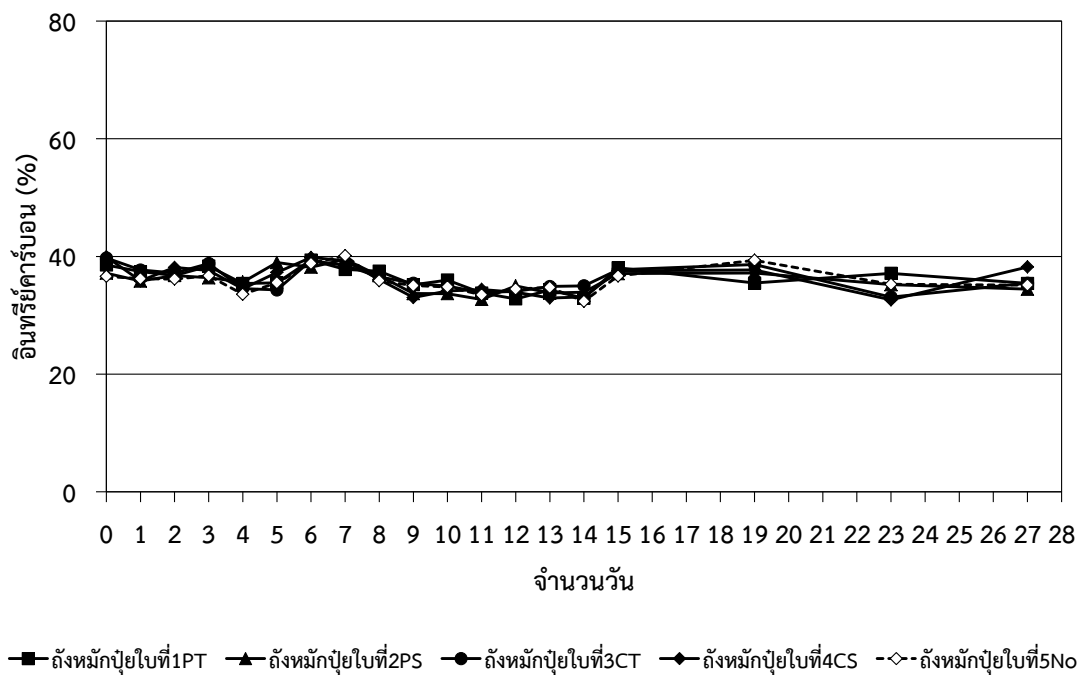
จะเห็นได้ว่า MC ของวัสดุหมักในถังหมักใบที่ 1, 2 และ 5 เมื่อสิ้นสุดการทดลองมี MC ใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้นหมัก ทั้งนี้อาจเกิดจากอุณหภูมิของวัสดุหมักในถังหมักทุกใบต่ำกว่า 50 °C และมีอากาศไหลเข้าตามธรรมชาติเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 นอกจากนี้ยังพบว่าในถังหมักใบที่ 1 และ 2 มีพื้นที่หน้าตัดทางออกของอากาศน้อยกว่าทางเข้า และถังหมักใบที่ 5 ไม่มีทางออกของอากาศ ส่งผลให้สูญเสีย MC ออกจากถังหมักได้น้อยกว่าถังหมักใบที่ 3 และ 4 ที่มีพื้นที่หน้าตัดทางออกของอากาศเท่ากับทางเข้า

อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดการทดลองของถังหมักที่มีทางออกของอากาศแต่ละรูปแบบ จะเห็นได้ว่า MC หลังสิ้นสุดการหมักของถังหมักใบที่ 2 (40.9%) และ 4 (31.0%) มากกว่าถังหมักใบที่ 1 (40.3%) และ 3 (24.0%) สอดคล้องกับอุณหภูมิเฉลี่ยในวัสดุหมักที่สูงกว่า เนื่องจากอากาศไหลออกช้า แต่จะสังเกตเห็นได้ว่า MC ของถังหมักใบที่ 1 และ 2 มากกว่าถังหมักใบที่ 3 และ 4 เกิดจากอากาศไหลออกได้ช้าทำให้สูญเสีย MC ได้น้อย

3.3.2.4. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon; TOC) ของวัสดุหมักภายในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-11 พบว่า TOC เริ่มต้นของ

วัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 37-40% จากนั้น TOC มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการหมัก เนื่องจากจุลินทรีย์ย่อยสลาย TOC มาใช้เป็นพลังงาน



รูปที่ 3-11 อินทรีย์คาร์บอนในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง TOC ของถังหมักใบที่ 1-5 มีค่า 35.42%, 34.43%, 35.46%, 38.21% และ 35.13% ตามลำดับ ซึ่งมีค่า TOC ลดลงจากค่าตอนเริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 3-12 เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 เนื่องจากค่า TOC ถูกเปลี่ยนสภาพไปอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ที่สามารถระเหยได้เช่น ก๊าซ CO_2 , NH_3 และความชื้น (ฉันทวี ศรีธาวรัตน์, 2547)

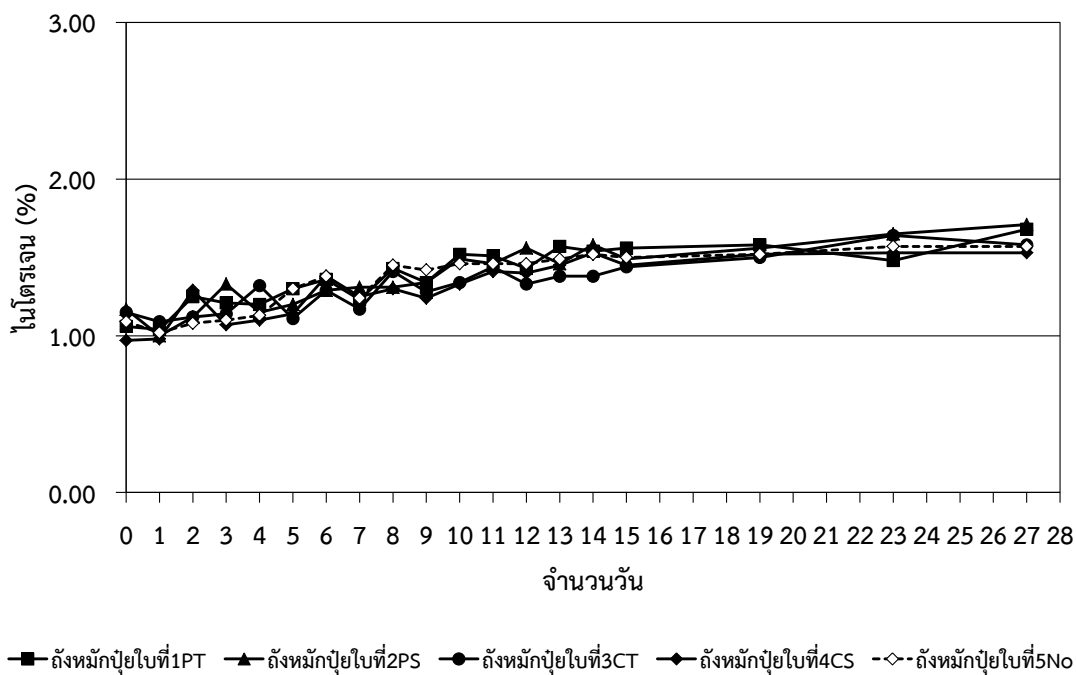
ตารางที่ 3-12 TOC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

ถังหมักใบที่	TOC (%)	
	เริ่มต้นหมัก	หลังหมัก
1 (PT)	38.54	35.42
2 (PS)	37.16	34.43
3 (CT)	39.73	35.46
4 (CS)	39.93	38.21
5 (No)	36.60	35.13

เมื่อเปรียบเทียบ TOC ในวัสดุหมักของถังหมักที่มีทางออกของอากาศแต่ละรูปแบบ จะเห็นได้ว่า TOC หลังสิ้นสุดการหมักพบว่า ถังหมักใบที่ 3 (35.46%) และ 4 (38.21%) สูงกว่าถังหมักใบที่ 1 (35.42%), 2 (34.43%) และ 5 (35.13%) อาจเนื่องมาจากมีค่า MC ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับถังหมักใบอื่น

3.3.2.5. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจน

การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจน (Total Kjeldahl Nitrogen; TKN) ของวัสดุหมัก ภายในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-12 พบว่า TKN เริ่มต้นของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 0.9-1.2% ซึ่งปกติค่า TKN จะลดลงจากการที่ถูกจุลินทรีย์ดึงไปใช้เป็นสารอาหารในการสร้างเซลล์ และการสูญเสียในรูปก๊าซ NH_3 แต่จากกราฟนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการหมัก ซึ่งมีสาเหตุมาจากค่า TOC ที่ลดลงจากการสูญเสียออกภายนอกถังหมักในรูปของก๊าซ CO_2 ตามระยะเวลาของการหมัก



รูปที่ 3-12 TKN ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

โดยค่า TKN ของถังหมักไบโอที่ 1-5 หลังสิ้นสุดการหมักคือ 1.68%, 1.71%, 1.58%, 1.53% และ 1.57% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า TKN ของวัสดุหมักในถังหมักทุกไบโอเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าสูงกว่าตอนเริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 3-13 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ 1

ตารางที่ 3-13 TKN ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

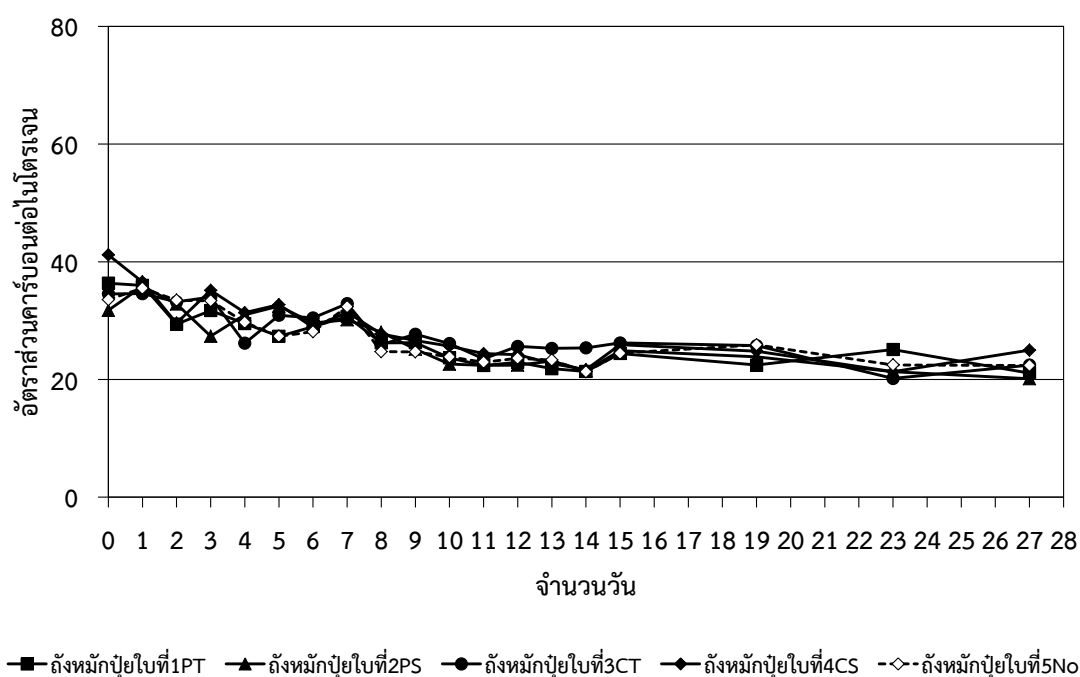
ถังหมักไบโอที่	TKN (%)	
	เริ่มต้นหมัก	หลังหมัก
1 (PT)	1.06	1.68
2 (PS)	1.17	1.71
3 (CT)	1.15	1.58
4 (CS)	0.97	1.53
5 (No)	1.09	1.57

และเมื่อเปรียบเทียบ TKN ในวัสดุหมักของถังหมักที่มีทางออกของอากาศแต่ละรูปแบบจะเห็นได้ว่า TKN หลังสิ้นสุดการหมักของถังหมักไบโอที่ 3 (1.58%) และ 4 (1.53%) ต่ำกว่าถัง

หมักใบที่ 1 (1.68%) และ 2 (1.71%) ซึ่งสอดคล้องกับ TOC ในวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักที่มีค่าสูงกว่า

3.3.2.6. การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ของวัสดุหมักภายในถังหมักทั้ง 5 ใบ ดังแสดงในรูปที่ 3-13 พบว่า C/N ratio เริ่มต้นของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 33-42 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการหมัก จากนั้น C/N ratio มีค่าลดลงตามระยะเวลาของการหมัก เนื่องจากถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายมาใช้เป็นพลังงานในการสร้างเซลล์



รูปที่ 3-13 C/N ratio ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

โดยเมื่อนำมาคำนวณหา C/N ratio ของถังหมักใบที่ 1-5 หลังสิ้นสุดการหมักพบว่ามีค่า 21.09, 20.14, 22.44, 24.98 และ 22.38 ตามลำดับ และเห็นได้ว่า C/N ratio ของวัสดุหมักในถังหมักทุกใบเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าต่ำกว่าตอนเริ่มต้นดังแสดงในตารางที่ 3-14 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการลดลงของค่า TOC ในวัสดุหมักมีมากกว่าการลดลงของค่า TKN เช่นเดียวกับงานวิจัยของวชิธา คนะนะแนม (2552) ได้ทำการศึกษาการหมักปุ๋ยจากทะเลาะเปลาปาเล่มน้ำมันแบบกลับกองพบว่าในระยะแรกค่า C/N ratio ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากช่วงแรกของการหมักจุลินทรีย์ทำการ

ย่อยสลายอย่างรวดเร็ว ทำให้อินทรีย์คาร์บอนลดลง มีผลทำให้ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำหนักรวมของปุ๋ย

ตารางที่ 3-14 C/N ratio ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 2

ถังหมักใบที่	C/N ratio	
	เริ่มต้นหมัก	หลังหมัก
1 (PT)	36.36	21.09
2 (PS)	31.76	20.14
3 (CT)	34.55	22.44
4 (CS)	41.17	24.98
5 (No)	33.58	22.38

จากการเปรียบเทียบ C/N ratio ในวัสดุหมักของถังหมักที่มีทางออกของอากาศแต่รูปแบบ จะเห็นได้ว่า C/N ratio หลังสิ้นสุดการหมักของถังหมักใบที่ 1 (21.09) และ 2 (20.14) ต่ำกว่าถังหมักใบที่ 3 (22.44), 4 (24.98) และ 5 (22.38) ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่า TOC และการเพิ่มขึ้นของค่า TKN ในวัสดุหมัก

3.3.2.7. คุณภาพของวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก

คุณภาพของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักดังแสดงในตารางที่ 3-15 จะเห็นได้ว่าวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ หลังสิ้นสุดการหมักมีค่า pH, C/N ratio และธาตุอาหารหลักผ่านเกณฑ์ โดยธาตุอาหารหลักของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ หลังสิ้นสุดการหมักมีปริมาณรวมมากกว่าตอนเริ่มต้นของการหมัก อาจเนื่องมาจากทางออกของอากาศในถังหมักทั้ง 5 ใบ สามารถลดการสูญเสียธาตุอาหารหลักได้มากกว่า TOC ในระหว่างการหมักได้ (Ogunwande and Osunade, 2011) ยกเว้นค่า MC ที่มีเพียงถังหมักใบที่ 3 ผ่านเกณฑ์กำหนดเนื่องจากวัสดุหมักในถังหมักแห่งนี้จากการย่อยสลายวัสดุหมักไม่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 3-15 คุณภาพวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก

พารามิเตอร์	เกณฑ์กำหนด	หน่วย	ถังหมักใบที่					
			1 (PT)	2 (PS)	3 (CT)	4 (CS)	5 (No)	
pH	5.0-8.0 ¹	-	7.49	7.47	7.17	7.29	7.58	
MC	≤30 ²	%	40.3	40.9	24.0	31.0	39.0	
C/N ratio	≤20:1 ²	-	21.09	20.14	22.44	24.98	22.38	
TKN	ธาตุ	≥2.0 ²	%	1.68	1.71	1.58	1.53	1.57
P ₂ O ₅	อาหาร			0.48	0.48	0.45	0.45	0.44
K ₂ O	หลักรวม			3.14	3.13	2.59	2.63	2.60
EC	≤10 ²	dS/m	1.03	0.89	1.22	1.10	0.83	
สีและกลิ่น ³	-	-	สีดำทั้งหมด กลิ่นคล้ายดิน	สีดำบางส่วน กลิ่นคล้ายดิน	สีดำบางส่วน กลิ่นคล้ายดิน	สีดำบางส่วน กลิ่นคล้ายดิน	สีดำบางส่วน กลิ่นคล้ายดิน	
GI	≥50 ⁴	%	97.01	80.15	31.58	86.87	73.54	

หมายเหตุ ¹ คือ Tchobanoglous and Kreith (2002)

² คือ กรมวิชาการเกษตร (2557)

³ คือ Jiménez and Garcia (1989)

⁴ คือ Huang et al. (2004)

สำหรับค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) ของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ หลังสิ้นสุดการหมักมีค่าอยู่ในช่วง 0.83-1.22 dS/m ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด เนื่องจากในวัสดุหมักที่นำมาหมักมีแร่ธาตุที่ละลายได้ เมื่อเกิดกระบวนการย่อยสลายมีการปลดปล่อยแร่ธาตุอาหารต่าง ๆ ออกมา (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) และเมื่อเปรียบเทียบค่า EC ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชดังแสดงในตารางที่ 3-8 พบว่าวัสดุหมักที่ได้จากถังหมักทั้ง 5 ใบ สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากมีค่า EC ไม่เกิน 2 dS/m

จากการสังเกตสีและกลิ่นของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักดังแสดงในตารางที่ 3-16 พบว่ามีเพียงวัสดุหมักในถังหมักใบที่ 1 เท่านั้นที่มีลักษณะของเนื้อวัสดุหมักเป็นสีดำทั้งหมด และกลิ่นคล้ายดิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการย่อยสลายของวัสดุหมักอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่ถังหมักใบที่ 2, 3, 4

และ 5 พบว่ามีลักษณะเนื้อวัสดุหมักบางส่วนมีสีน้ำตาล มีการย่อยสลายไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุหมักบางส่วนแห้งจนไม่เกิดการย่อยสลาย

ตารางที่ 3-16 สีวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักของการทดลองที่ 2



โดยพบว่าวัสดุหมักในถังหมักใบที่ 1, 2, 4 และ 5 มีค่าดัชนีการงอกของเมล็ดพืช (Germination Index; GI) มากกว่า 50% ซึ่งถือว่าวัสดุหมักที่ได้ไม่เป็นพิษต่อพืช (Huang et al., 2004) ในขณะที่วัสดุหมักในถังหมักใบที่ 3 มี GI ต่ำที่สุด และต่ำกว่า 50% ซึ่งสอดคล้องกับค่า MC ที่เหลือน้อยที่สุด จึงทำให้วัสดุหมักบางส่วนแห้งและมีความความเป็นพิษต่อพืชเนื่องจากวัสดุหมักถูกย่อยสลายไม่สมบูรณ์

3.3.2.8. รูปแบบทางออกของอากาศที่เหมาะสม

ในการหารูปแบบทางออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักแบบแพสซีฟได้ทำการเลือกจากคุณภาพของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุหมักในตารางที่ 2-5 (บทที่ 2) เมื่อพิจารณาคูณสมบัติของวัสดุหมักในถังหมักทั้ง 5 ใบ พบว่า pH, C/N ratio, ธาตุอาหารหลักและ EC มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นค่า MC ที่มีเพียงถังใบที่ 3 ที่ผ่านเกณฑ์ ซึ่งเมื่อพิจารณาสีและกลิ่นพบว่ามีเพียงถังหมักใบที่ 1 ที่มีสีดำทั้งหมดและกลิ่นคล้ายดิน สอดคล้องกับค่า GI ที่มีค่าสูงสุด ดังนั้นรูปแบบทางออกของอากาศที่อยู่ด้านบนถังหมัก และมีขนาดพื้นที่หน้าตัดทางออกของอากาศน้อยกว่าทางเข้าของอากาศ 0.006 m^2 ส่งผลให้อากาศเข้าได้มาก และกระจายตัวได้ทั่วกองหมัก ทำให้จุลินทรีย์ทั้งกองหมักได้สัมผัสกับอากาศ ทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่า

จากการทดลองที่ 1 และ 2 โดยสรุปพบว่า ถังหมักที่มีท่ออากาศเข้าและกระจายตัวในแนวนอนด้านล่างถัง และระบายอากาศออกทางด้านบนถังหมักตามท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าทางเข้าในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3-14 (ก) ใช้เวลาในการหมักวัสดุหมัก 6 kg ในถังขนาด 39 L จนเสร็จสิ้นปฏิกิริยาประมาณ 26 วัน ซึ่งน้อยกว่างานวิจัยของ นิตติ เหมพัฒน์ (2553) ซึ่งใช้กล่องโฟมและอัตราส่วนวัสดุหมักเหมือนกัน ในการหมักวัสดุหมัก 8 kg ใช้เวลาในการหมักประมาณ 45 วัน โดย

พบว่า ถังหมักในงานวิจัยของ นิติ เหมพัฒน์ (2553) มีทางเข้าอากาศในแนวนอนด้านล่างถึง เช่นเดียวกัน แต่มีทางออกอากาศด้านข้างถึงและมีพื้นหน้าตัดมากกว่าทางเข้า ดังแสดงในรูปที่ 3-14 (ข) แสดงให้เห็นว่า รูปแบบทางออกที่แตกต่างกันส่งผลต่อระยะเวลาในการหมัก

อย่างไรก็ตาม ปริมาณวัสดุหมักที่แตกต่างกันก็ส่งผลต่อระยะเวลาในการหมักเช่นกัน ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองที่ 3 ขึ้น โดยใช้ถังหมักขนาด 120 L ที่มีรูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่ดีที่สุดเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยใช้มูลฝอยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจริงเติมแบบต่อเนื่องจนเต็มถัง เพื่อดูประสิทธิภาพของการหมักเมื่อมีปริมาณมูลฝอยเพิ่มขึ้นและคุณสมบัติไม่คงที่



รูปที่ 3-14 เปรียบเทียบลักษณะการเติมอากาศของถังหมักโฟม
(ก) ถังหมักที่ได้ในการทดลองที่ 1 และ 2 (ข) ถังหมักของนิติ เหมพัฒน์ (2553)

3.4 การทดลองที่ 3 นำรูปแบบทางเข้าและออกของอากาศมาใช้งานในถังหมักขนาด 120 L

3.4.1 คุณสมบัติเริ่มต้นของวัสดุหมักผสม

การนำถังรองรับมูลฝอยที่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นใช้ขนาด 120 L มาใช้งานในการหมักปุ๋ยโดยใช้รูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่ได้จากผลการทดลองที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เพื่อดูคุณภาพของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักจากถังหมักที่มีขนาดความจุมากกว่าแต่รูปแบบทางเข้าและออกของอากาศยังคงเหมือนเดิม เมื่อเติมมูลฝอยที่เกิดขึ้นจริง โดยใช้มูลฝอยอินทรีย์เป็นเศษอาหารจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งนำมาผสมกับใบไม้แห้งในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 โดยน้ำหนักเปียก โดยมีมูลฝอยอินทรีย์ 1.6 kg ใบไม้แห้ง 0.8 kg รวมปริมาณ 2.4 kg ต่อการเติมวัสดุหมัก 1 ครั้งในแต่ละวัน คุณสมบัติของวัสดุหมักผสมที่เติมในแต่ละวันดังแสดงในตารางที่ 3-17 ซึ่งใช้เวลาในการเติมวัสดุหมักให้เต็มถังหมัก 22 วัน

ตารางที่ 3-17 คุณสมบัติของวัสดุหมักเริ่มต้น

วัสดุหมัก	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์						
	pH	MC (%)	TOC (%)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	C/N ratio
มูลฝอยอินทรีย์ผสมใบไม้แห้งอัตราส่วน 2:1	4.39	33.09	50.41	1.59	0.20	0.71	31.96
	±	±	±	±	±	±	±
	0.14	3.27	5.53	0.17	0.01	0.01	5.65

จากตารางที่ 3-17 พบว่า วัสดุหมักผสมที่เติมในถังหมักแต่ละวันมีค่า pH ต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมกับการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งในระหว่างกระบวนการหมักจะเกิดก๊าซ CO₂ และก๊าซ NH₃ ทำให้ค่า pH เข้าสู่สภาวะความเป็นกลางได้ จึงไม่จำเป็นต้องปรับค่า pH เมื่อเริ่มต้นการหมัก (Haug, 1993) และมีค่า MC ที่ต่ำ เนื่องจากมีการแยกของเหลวออกจากมูลฝอยอินทรีย์ก่อนนำมาผสมกับใบไม้แห้ง และเมื่อนำมูลฝอยอินทรีย์ผสมใบไม้แห้งในอัตราส่วน 2:1 ทำให้วัสดุผสมที่ได้มีค่า C/N ratio อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการหมักคือ 25-50 (Tchobanoglous et al., 1993)

3.4.2 การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหมักระหว่างการหมัก

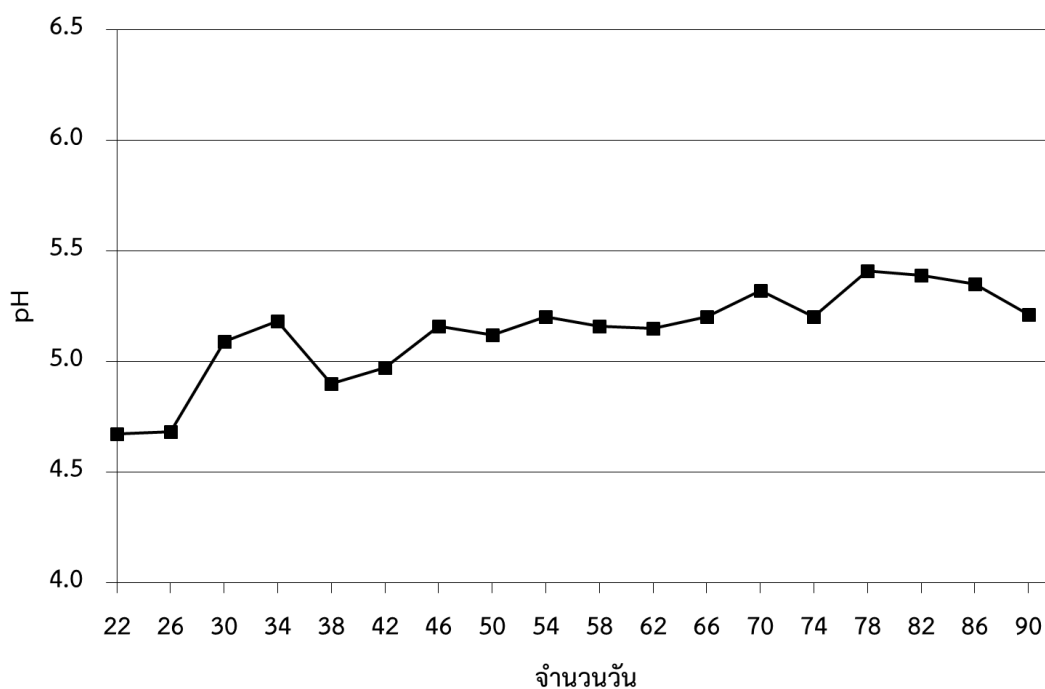
การเปลี่ยนแปลงของวัสดุหมักเมื่อเติมวัสดุหมักในถังพลาสติกขนาด 120 L ดังแสดงในรูปที่ 3-15 โดยมีทางเข้าของอากาศที่เข้าและกระจายตัวในแนวนอนจากการทดลองที่ 1 และทางออกของอากาศอยู่ด้านบนของถังหมักมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าทางเข้าของอากาศจากการทดลองที่ 2 ได้ผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 3-15 ถังหมักในการทดลองที่ 3

3.4.2.1. การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลให้ค่า pH ของวัสดุหมักเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3-16 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 22-34 และเริ่มคงที่ในช่วง 4.9-5.5 หลังจากวันที่ 42 โดยวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักมี pH อยู่ที่ 5.21 ซึ่งจะเห็นได้ว่า pH ระหว่างการหมักในช่วงวัสดุหมักเต็มถึงหมัก มีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ความเป็นกลางได้ช้า เนื่องจากวัสดุหมักที่ใช้เป็นมูลฝอยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจริงมีค่า pH เป็นกรด ประกอบกับในช่วงที่วัสดุหมักเริ่มถูกย่อยสลายก็มีการอินทรีย์เกิดขึ้น (Tchobanoglous and Kreith, 2002) แสดงให้เห็นว่าลักษณะของมูลฝอยอินทรีย์ที่ใช้ในการหมักนั้นมีผลต่อค่า pH โดยทั่วไปวัสดุหมักมีค่า pH อยู่ในช่วง 3.0-11.0 ก็สามารถนำมาหมักได้ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2540) อย่างไรก็ตามวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักมี pH อยู่ในช่วงที่แนะนำคือ 5.0-8.0 (Tchobanoglous and Kreith, 2002)

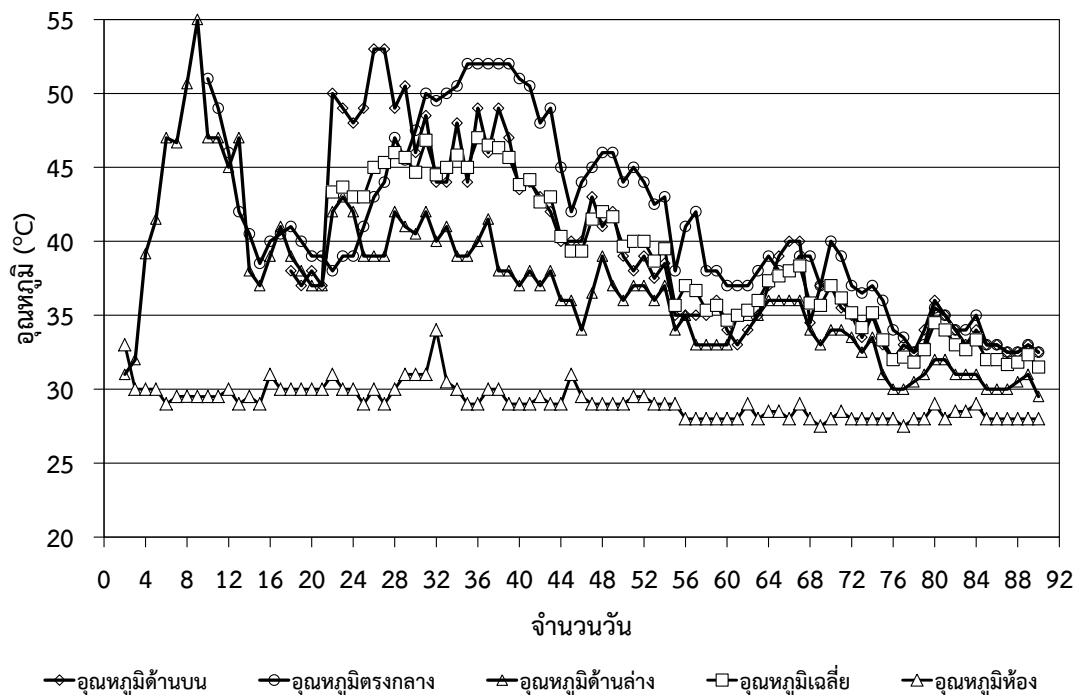


รูปที่ 3-16 pH ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 3

3.4.2.2. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจากรูปที่ 3-17 พบว่าอุณหภูมิของวัสดุหมักที่ตรวจวัดได้จากชั้นล่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะเห็นได้ว่าในวันที่ 9 มีอุณหภูมิสูงสุดคือ 55 °C และ

เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 15 วัน หลังจากนั้นอุณหภูมิชั้นล่างลดลงอย่างช้า ๆ หลังเติมวัสดุหมักเต็มถังหมักในวันที่ 22 จนสิ้นสุดการหมักในวันที่ 90 ของการทดลอง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของวัสดุหมักชั้นกลางซึ่งสามารถตรวจวัดได้ในวันที่ 10 มีอุณหภูมิเริ่มต้น 51 °C และลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 15 วัน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของวัสดุหมักชั้นล่าง ซึ่งจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิของวัสดุหมักชั้นกลางเริ่มต้นที่ 51 °C ซึ่งแตกต่างจากวัสดุหมักชั้นล่างที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 31 °C และอุณหภูมิชั้นกลางเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ อีกครั้ง เนื่องจากวัสดุหมักชั้นกลางถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายจนเกิดความร้อนขึ้น และเมื่อวัสดุหมักถูกเติมจนเต็มถังหมักในวันที่ 22 พบว่าอุณหภูมิชั้นกลางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีอุณหภูมิสูงสุด 52 °C ในระหว่างวันที่ 35-39 หลังจากนั้นอุณหภูมิชั้นกลางมีการลดลงอย่างช้า ๆ จนสิ้นสุดการหมักในวันที่ 90 ของการทดลอง



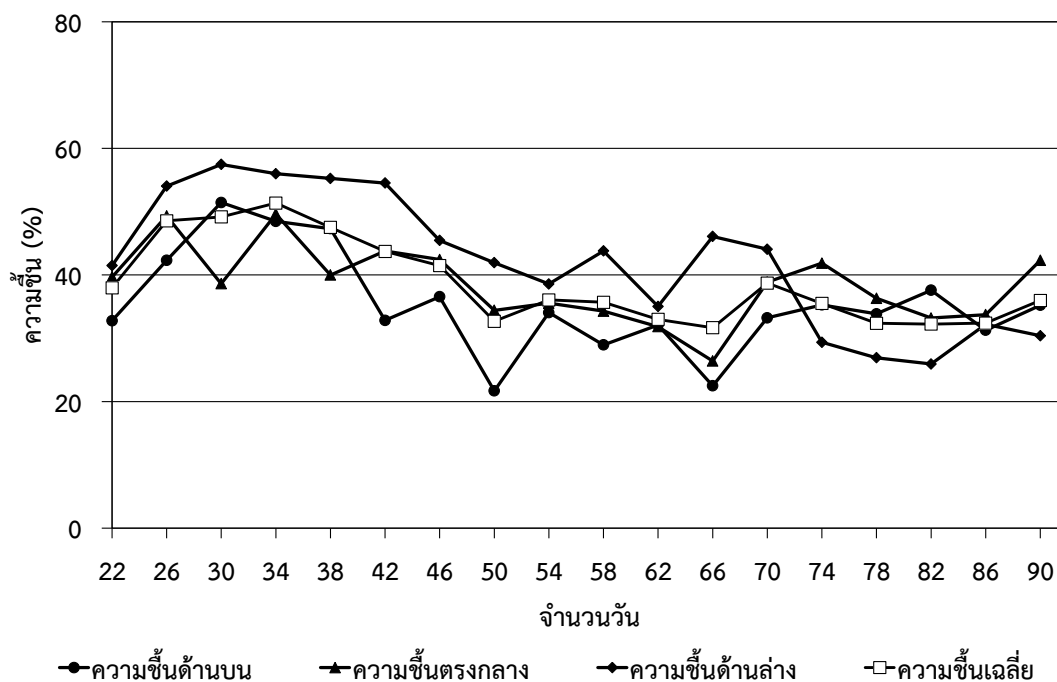
รูปที่ 3-17 อุณหภูมิในวัสดุหมักของการทดลองที่ 3

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของวัสดุหมักชั้นบนซึ่งสามารถตรวจวัดได้ในวันที่ 18 พบว่ามีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 38 °C ซึ่งได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของวัสดุหมักชั้นกลาง โดยอุณหภูมิของวัสดุหมักชั้นบนมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 22 และมีอุณหภูมิสูงสุดคือ 53 °C ในระหว่างวันที่ 26-27 ของการหมัก หลังจากนั้นอุณหภูมิของวัสดุหมักชั้นบนจะลดลงอย่างช้า ๆ จนสิ้นสุดการหมักในวันที่ 90 ของการทดลอง จะเห็นได้ว่าวัสดุหมักทั้ง 3 ชั้น มีอุณหภูมิสูงจนถึงระยะเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic phase) ที่มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 40-70 °C (Ahmad et al., 2007) สอดคล้องกับ

งานวิจัยของธันวดี ศรีธาวีรัตน์ (2547) ได้ทำการศึกษาการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร พบว่าอุณหภูมิในทุกชุดการทดลองเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกของการหมักคือ ช่วง Thermophilic phase เนื่องจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นเพราะในช่วงเริ่มต้นการหมักมีสารอาหารที่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเจริญเติบโต และในช่วง Thermophilic phase สามารถทำลายเชื้อโรคบางชนิดที่เป็นอันตรายในวัสดุหมักได้ (Richard, 2005) แสดงให้เห็นว่าปริมาณวัสดุหมักและขนาดของถังหมักส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงกว่าการที่ทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งในช่วงแรกหลังจากเติมวัสดุหมักเต็มถังหมัก อุณหภูมิชั้นบนมีค่าสูงกว่าชั้นกลาง แต่หลังจากวันที่ 29 เป็นต้นไป อุณหภูมิชั้นบนเริ่มต่ำกว่าชั้นกลาง เนื่องจากวัสดุหมักชั้นบนอยู่ใกล้กับทางออกของอากาศทำให้มีการสูญเสียอุณหภูมิได้ง่ายกว่าชั้นกลาง ส่วนชั้นกลางมีวัสดุหมักที่อยู่ระหว่างชั้นบนกับชั้นล่างเป็นฉนวนช่วยลดการสูญเสียอุณหภูมิในวัสดุหมัก โดยวัสดุหมักทั้ง 3 ชั้น มีอุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิห้องในวันที่ 76 ของการหมัก (รูปที่ 3-17) และสิ้นสุดการหมักในวันที่ 90

3.4.2.3. การเปลี่ยนแปลงของความชื้น

ความชื้น (Moisture Content; MC) เป็นค่าที่บ่งบอกปริมาณน้ำในวัสดุหมัก โดยทั่วไป MC ที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ยนั้นควรอยู่ในช่วง 40-65% ซึ่งในการทดลองนี้ไม่มีการปรับ MC จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเริ่มต้นการหมักมีค่า MC วัสดุหมักเฉลี่ยเท่ากับ 37.97% (รูปที่ 3-18) และหลังจากนั้น MC เฉลี่ยเพิ่มขึ้นสูงถึง 51.37% ภายใน 12 วัน หลังจากวัสดุหมักเต็มถัง (วันที่ 34 หลังจากเริ่มเติมวัสดุหมัก) เนื่องจากมีน้ำเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุหมัก หลังจากวันที่ 34 ของการหมัก ค่า MC มีการลดลงตามระยะเวลาการหมักจนมีค่า MC เฉลี่ยคงที่อยู่ที่ในช่วง 30-40%



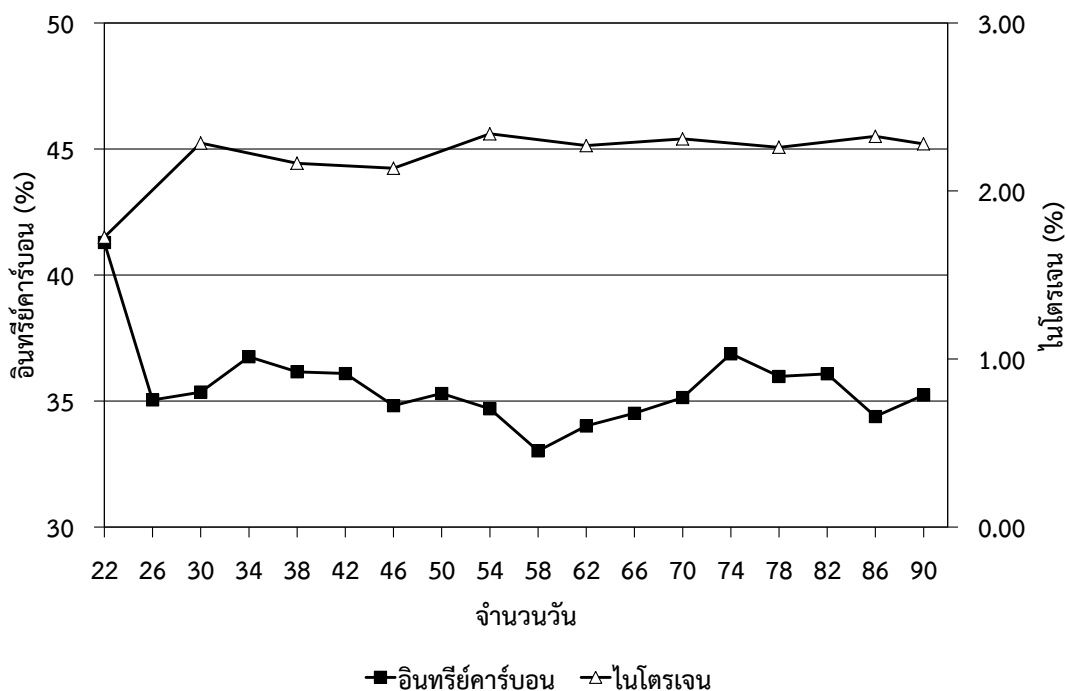
รูปที่ 3-18 MC ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 3

โดยหลังสิ้นสุดการหมัก พบว่าวัสดุหมักในถังหมักมีค่า MC เฉลี่ยอยู่ที่ 35.97% และจะเห็นได้ว่าค่า MC ในช่วงวันที่ 22-70 บริเวณชั้นล่างมีค่าสูงกว่าชั้นอื่น เนื่องจากมีน้ำที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายวัสดุหมักบางส่วนจากชั้นบนและชั้นกลางไหลลงมาประกอบกับอุณหภูมิบริเวณชั้นล่างในช่วงเวลานั้นต่ำกว่าชั้นอื่นดังแสดงในรูปที่ 3-17 ทำให้ระเหยน้ำได้น้อย ส่วนชั้นกลางถึงแม้ว่ามีอุณหภูมิสูงที่สุดสามารถระเหยความชื้นได้ดี ควรค่า MC ต่ำกว่าชั้นอื่น ๆ แต่เนื่องจากมีน้ำที่เกิดจากการย่อยสลายวัสดุหมักจากชั้นบนไหลผ่านลงมา ประกอบกับชั้นล่างระเหยน้ำขึ้นไปทำให้มีค่า MC ยังคงสูง และพบว่าชั้นบนมีค่า MC ต่ำสุด เนื่องจากค่า MC ระเหยออกจากถังหมักทางด้านบนได้ง่ายกว่าชั้นอื่น

3.4.2.4. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon; TOC) ของวัสดุหมักในถังหมักดังแสดงในรูปที่ 3-19 พบว่าเมื่อวัสดุหมักเต็มถังหมักในวันที่ 22 มีค่า TOC เฉลี่ย 41.3% และลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากผ่านไป 4 วัน (วันที่ 26 ของการหมัก) โดยมีค่า TOC เท่ากับ 35.05% และหลังจากวันที่ 26 ค่า TOC มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากการเติมมูลฝอยอินทรีย์ที่มีค่า TOC ไม่คงที่ และค่า TOC บางส่วนถูกย่อยสลายไปตั้งแต่วัสดุหมักไม่เต็มถังหมัก (ไม่มีการวิเคราะห์ค่า TOC ในช่วงที่มูลฝอยไม่เต็มถังหมัก) โดยหลังเสร็จสิ้น

การทดลองมีค่า TOC เท่ากับ 35.24% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า TOC ตั้งแต่วันที่ 26-90 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากค่า TOC ที่เหลือหลังจากวันที่ 26 อาจเป็นค่า TOC ที่ย่อยสลายได้ยากเช่น ลิกนิน และ เซลลูโลส เป็นส่วนใหญ่ (Sylla et al., 2006) ประกอบกับอุณหภูมิที่เริ่มลดลงกลับมาอยู่ในช่วง mesophilic ดังแสดงในรูปที่ 3-19 จึงทำให้เกิดการย่อยสลายของค่า TOC เป็นไปอย่างช้า ๆ



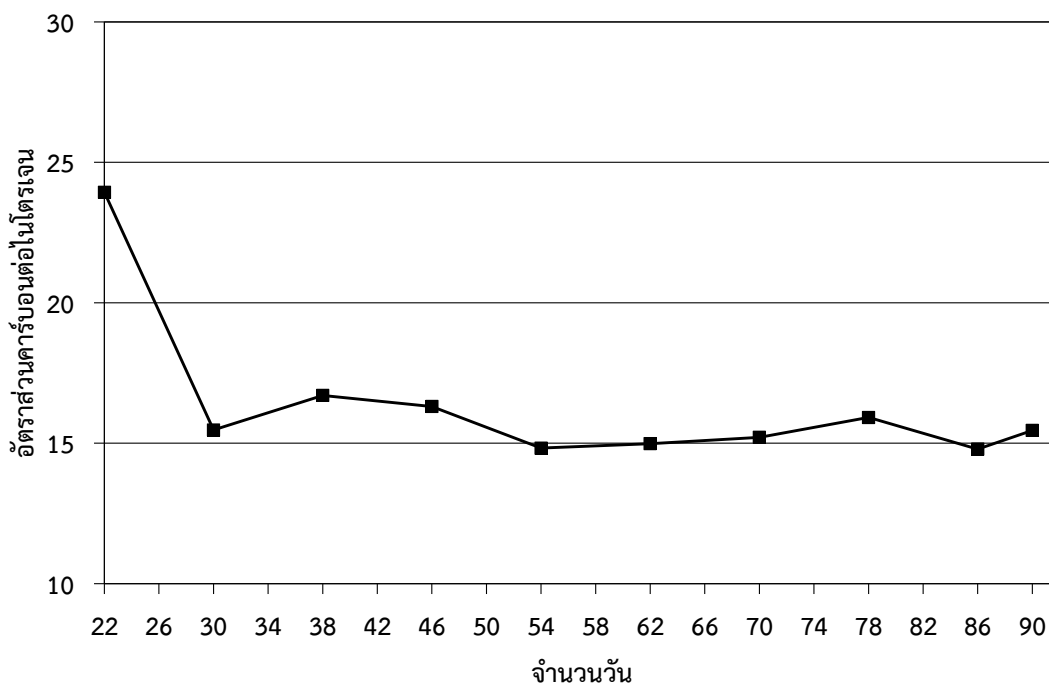
รูปที่ 3-19 TOC และ TKN ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 3

3.4.2.5. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจน

การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจน (Total Kjeldahl Nitrogen; TKN) ของวัสดุหมักในถังหมักดังแสดงในรูปที่ 3-19 พบว่าวันที่ 22 ซึ่งเป็นวันที่วัสดุหมักเต็มถังหมักมีค่า TKN เท่ากับ 1.73% และมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากผ่านไป 8 วัน (วันที่ 30 ของการหมัก) ซึ่งมีค่า TKN เท่ากับ 2.29% หลังจากวันที่ 30 ค่า TKN เริ่มมีค่าคงที่ในช่วง 2.1%-2.4% ซึ่งสอดคล้องกับค่า TOC ที่เกิดขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยในช่วงเวลาดังกล่าว จึงมีผลทำให้ TKN เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามไปด้วย ขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการย่อยสลายของวัสดุหมัก (รัตติญา พรหมแสง และคณะ, 2551) โดยหลังสิ้นสุดการทดลองพบว่าค่า TKN เท่ากับ 2.28%

3.4.2.6. การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) บ่งบอกถึงความยากง่ายในการย่อยสลาย จากผลการเปลี่ยนแปลงของค่า C/N ratio ของวัสดุหมักในถังหมักดังแสดงในรูปที่ 3-20 พบว่าเมื่อวัสดุหมักเต็มถังหมักในวันที่ 22 มีค่า C/N ratio เท่ากับ 23.93 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า C/N ratio ช่วงวัสดุเต็มถังหมักมีค่าน้อย เนื่องมาจากค่า C/N ratio บางส่วนในวัสดุหมักถูกย่อยสลายไปในช่วงเติมวัสดุหมัก แต่ยังคงลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากผ่านไป 8 วัน (วันที่ 30 ของการหมัก) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ ซึ่งอินทรีย์คาร์บอนถูกใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานและปลดปล่อยให้ธาตุอาหารออกมา และหลังจากวันที่ 30 ค่า C/N ratio มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยมีค่าอยู่ในช่วง 14-17 ซึ่งสอดคล้องกับค่า TOC และค่า TKN ที่เริ่มคงที่หลังจากวันที่ 30 โดยหลังสิ้นสุดการทดลองมีค่า C/N ratio เท่ากับ 15.46 เช่นเดียวกับงานวิจัยของบุญจรัตน์ โจลานันท์ และคณะ (2550) ได้ทำการหมักปุ๋ยจากวัสดุเหลือทิ้งของแม่บ้านผาแพน จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าค่า C/N ratio หลังจาก 10 วันผ่านไปมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 10-16 แสดงให้เห็นว่าวัสดุหมักเริ่มมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนถูกเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่คงตัวมากยิ่งขึ้น จึงทำให้การเปลี่ยนค่า C/N ratio ค่อนข้างคงที่จนสิ้นสุดกระบวนการหมัก



รูปที่ 3-20 C/N ratio ในวัสดุหมักของการทดลองที่ 3

3.4.2.7. คุณภาพวัสดุหมักหลังเสร็จสิ้นการหมัก

คุณภาพวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของวัสดุหมักในตารางที่ 2-5 (บทที่ 2) ดังแสดงในตารางที่ 3-18 จะเห็นได้ว่าวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักมีค่า pH, C/N ratio และธาตุอาหารหลักผ่านเกณฑ์ โดยธาตุอาหารหลักหลังสิ้นสุดการหมักมีปริมาณรวมมากกว่าตอนเริ่มต้นของการหมัก มีผลรวมของธาตุอาหารหลักหลังสิ้นสุดการหมักเท่ากับ 3.59% ซึ่งมากกว่าตอนเริ่มต้นของการหมักของวัสดุหมัก (หลังวัสดุหมักเต็มถังหมัก) เท่ากับ 2.63% ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่กรมวิชาการเกษตรกำหนดไว้ว่าธาตุอาหารหลักเมื่อสิ้นสุดการหมักควรมีค่ารวมกันมากกว่า 2% (กรมวิชาการเกษตร, 2557) อาจเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุอาหารหลักออกนอกถังหมักน้อยกว่า TOC ยกเว้นค่า MC ของวัสดุหมักในถังหมักที่ยังคงมีค่าสูงกว่าเกณฑ์

ตารางที่ 3-18 คุณภาพวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมัก

พารามิเตอร์		เกณฑ์กำหนด	หน่วย	ถังหมัก
				การทดลองที่ 3
pH		5.0-8.0 ¹	-	5.21
MC		≤30 ²	%	36.0
C/N ratio		≤20:1 ²	-	15.46
TKN	ธาตุอาหารหลักรวม	≥2.0 ²	%	2.28
P ₂ O ₅				0.24
K ₂ O				1.07
EC		≤10 ²	dS/m	6.25
สีและกลิ่น ³		-	-	สีดำทั้งหมดกลิ่นคล้ายดิน
GI		≥50 ⁴	%	93.97

หมายเหตุ ¹ คือ Tchobanoglous and Kreith (2002)

² คือ กรมวิชาการเกษตร (2557)

³ คือ Jiménez and Garcia (1989)

⁴ คือ Huang et al. (2004)

สำหรับค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) ของวัสดุหมักในถังหมักพลาสติกขนาด 120 L หลังสิ้นสุดการหมักมีค่าเท่ากับ 6.25 dS/m ซึ่งค่า EC ที่เกิดขึ้นคือ ความ

เข้มข้นของเกลือที่ละลายอยู่ในวัสดุหมัก ซึ่งมาจากการปรุงแต่งอาหารที่อยู่ในมูลฝอยอินทรีย์ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่า EC ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช พบว่าวัสดุหมักที่ได้มีความเค็มปานกลางสามารถนำไปใช้กับพืชทนความเค็มได้ หากจะนำไปใช้งานกับพืชไม่ทนความเค็มก่อนใช้งานควรมีการผสมดินเพื่อลดความเค็ม ทำให้เกิดสภาพของดินที่เหมาะสมต่อการดูดธาตุอาหารในดินไปใช้ได้ดีกว่า

สีและกลิ่นของวัสดุหมักหลังสิ้นสุดการหมักพบว่า มีลักษณะสีดำทั้งหมด และกลิ่นคล้ายดิน และต่างจากตอนเริ่มต้นหมักอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 3-21 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการย่อยสลายของวัสดุหมักอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งถือได้ว่าวัสดุหมักที่ได้มีความเสถียรแล้ว (Jiménez and Garcia, 1989)



รูปที่ 3-21 สีและกลิ่นของวัสดุหมักในการทดลองที่ 3

โดยพบว่าวัสดุหมักมีค่าดัชนีการงอกของเมล็ดพืช (Germination Index; GI) มากกว่า 50% ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อพืช (Huang et al., 2004) และมากกว่า 80% ถือได้ว่าวัสดุหมักเป็นปุ๋ย (กรมวิชาการเกษตร, 2557) โดยสอดคล้องกับค่า C/N ratio ที่ต่ำ กับสีวัสดุหมักที่มีสีดำและกลิ่นที่คล้ายดิน ซึ่งทำให้พืชดูดธาตุอาหารมาใช้ได้ง่ายเนื่องจากวัสดุหมักที่ได้มีความเสถียร ไม่เกิดการย่อยสลายอีกต่อไป ดังนั้นการหมักในถังขนาด 120 L ที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง Thermophilic ทำให้สามารถฆ่าเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ (Richard, 2005) และมีค่า C/N ratio ที่ต่ำกว่า 20 ทำให้ตั้งสารอาหารไปใช้ได้ง่าย ถึงแม้ว่าจะมีค่า EC ที่สูง

ดังนั้นการหมักมูลฝอยอินทรีย์ในถังหมักขนาด 120 L นั้นสามารถนำมาใช้งานสำหรับบ้านเรือนได้โดยการเติมมูลฝอยอินทรีย์ที่เกิดขึ้นทุกวันมาใช้ประโยชน์ ทำให้ไม่มีมูลฝอยอินทรีย์ตกค้าง เพื่อใช้ประโยชน์เป็นวัสดุปรับปรุงดินที่ใช้กับพืชทนเค็ม ซึ่งพบว่ามีคุณภาพของวัสดุหมักหลังสิ้นสุด มีคุณภาพดีและมีความปลอดภัยต่อการนำไปปรับปรุงคุณภาพดิน

โดยพบว่าถังหมักพลาสติกขนาด 120 L ที่มีอากาศเข้าและกระจายตัวตามท่อในแนวนอนด้านล่าง และระบายอากาศออกทางด้านบนถังหมักตามท่อ (ที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าทางเข้า) ในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3-22 (ก) ใช้เวลาในการหมักประมาณ 90 วัน ซึ่งน้อยกว่างานวิจัยของนคร สุรียานนท์ (2552) ดังแสดงในรูปที่ 3-22 (ข) ซึ่งใช้ถังพลาสติกและวัสดุหมักที่เกิดขึ้นจริงเหมือนกัน ในการหมักวัสดุหมักปริมาณเท่ากัน (มูลฝอยอินทรีย์ผสมใบไม้แห้งปริมาณ 52.8 kg) ใช้เวลาในการหมัก 120 วัน โดยพบว่า ถังหมักมีทางเข้าของอากาศเป็นช่องสี่เหลี่ยมรอบถังหมักด้านล่าง โดยไม่มีท่อกระจายอากาศเข้าไปในวัสดุหมัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การมีท่อกระจายอากาศในถังหมักส่งผลให้วัสดุหมักทั้งถังสัมผัสอากาศได้ดีกว่าถังที่ไม่มีท่อกระจาย จึงทำให้วัสดุหมักย่อยสลายได้เร็วกว่า



รูปที่ 3-22 เปรียบเทียบลักษณะการเติมอากาศของถังหมักพลาสติกขนาด 120 L

(ก) ถังหมักการทดลองที่ 3 (ข) ถังหมักของนคร สุรียานนท์ (2552)

โดยหากนำถังหมักในการทดลองที่ 3 ไปใช้งานจริงควรมีการเพิ่มช่องระบายวัสดุหมักเพื่อนำวัสดุหมักไปใช้งาน เพื่อทำให้เกิดการหมักแบบเติมวัสดุหมักแบบต่อเนื่อง และควรติดตั้งท่อระบายอากาศเพิ่มในถังหมัก เพื่อช่วยให้วัสดุหมักสามารถย่อยสลายได้เร็วยิ่งขึ้น

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

การศึกษารูปแบบทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักแบบแพสซีฟซึ่งได้แบ่งเป็น 3 การทดลอง สามารถสรุปผลการศึกษาได้ว่า

เมื่อหมักวัสดุหมักปริมาณ 6 กิโลกรัม ในกล่องโฟม แบบเดิมครั้งเดียว พบว่า ถังหมักที่มีทางเข้าและกระจายตัวของอากาศในแนวนอนด้านล่างถังหมัก และมีท่อกระจายอากาศในแนวนอนอยู่ด้านล่างภายในถังหมัก และมีทางออกของอากาศอยู่ด้านบนถังหมัก และมีขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าทางเข้าของอากาศ ทำให้ได้วัสดุปรับปรุงดินที่มีคุณภาพดีที่สุด และใช้เวลาในการย่อยสลายน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ทำให้อากาศเข้าในถังหมักได้มาก ถูกกักอยู่นาน และเกิดการกระจายได้ทั่วทั้งถัง ส่งผลให้จุลินทรีย์ได้รับอากาศที่เพียงพอและทั่วถึงทั้งถังหมัก จึงทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่า ถังที่ไม่มีท่อกระจายอากาศภายในถัง หรือ มีท่อกระจายอากาศอยู่กลางกองหมัก หรือ มีทางออกของอากาศอยู่ด้านข้าง หรือ มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าทางเข้าอากาศ แต่อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิสูงสุดของวัสดุหมักระหว่างการหมักยังคงต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นการหมักในปริมาณน้อยทำให้สูญเสียความร้อนสูง

โดยเมื่อทำการหมักโดยเติมวัสดุหมักวันละ 2.4 กิโลกรัม แบบต่อเนื่องทุกวัน จนมีวัสดุหมักรวมประมาณ 53 กิโลกรัม พบว่า อุณหภูมิสูงสุดของวัสดุหมักสูงถึง 50 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถฆ่าเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ และมีค่า C/N ratio ที่ต่ำกว่า 20 ทำให้ตั้งสารอาหารไปใช้ได้ง่าย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณมูลฝอยในกองหมักมีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของกองหมัก โดยเมื่อเติมมูลฝอยแบบต่อเนื่องลงในถังหมักที่มีทางเข้าอากาศและท่อกระจายอากาศในแนวนอนด้านล่างถัง และมีทางออกของอากาศด้านบนถัง โดยมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าทางเข้าอากาศ ยังคงให้ประสิทธิภาพการหมักเช่นเดียวกันกับการหมักแบบเดิมครั้งเดียวและมีปริมาณวัสดุหมักน้อยกว่า

อย่างไรก็ตาม พบว่าความชื้นในวัสดุหมักที่ได้ยังคงมีค่าสูงและไม่ผ่านเกณฑ์กำหนด เมื่อนำวัสดุหมักมาใช้งานควรมีการผึ่งลมหรือผสมกับดินปลูกเพื่อทำการลดความชื้นอีกครั้งก่อนนำไปใช้งาน

4.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการเตรียมวัสดุหมักควรทำให้วัสดุหมักเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อเพิ่มความถูกต้องของผลการทดลองจากการสุ่มเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

2) ควรมีการศึกษารูปทรงของถังหมักแบบแพสซีฟเพิ่มเติมเพื่อหารูปทรงถังหมักที่มีความเหมาะสมกับการหมักแบบแพสซีฟอย่างแท้จริง

3) ควรมีการศึกษาระยะห่างระหว่างทางเข้าและออกของอากาศที่เหมาะสมในถังหมักแบบแพสซีฟ

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2552. คู่มือการทำปุ๋ยหมักจากขยะมูลฝอย. ส่วนจัดการขยะมูลฝอยและสิ่งปฏิกูล
สำนักการจัดการกากของเสียและอันตราย. กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวง
ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- กรมควบคุมมลพิษ. 2559. ปริมาณมูลฝอยอินทรีย์และประโยชน์ของปุ๋ยหมัก. (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<http://www.pcd.go.th> (8 มิถุนายน 2559)
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2540. การจัดการดินและพืชเพื่อปรับปรุงดินอินทรีย์วัตถุต่ำ. คณะกรรมการกำหนด
มาตรการและจัดทำเอกสารอนุรักษ์ดินและน้ำและการจัดการดินกรมพัฒนาที่ดิน: กระทรวง
เกษตรและสหกรณ์.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือการพัฒนาที่ดิน สำหรับหมอดินอาสาและเกษตรกร. กรมพัฒนาที่ดิน.
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2559. ความหมายของวัสดุปรับปรุงดิน. (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<http://www.ddd.go.th> (15 มกราคม 2559)
- กรมวิชาการเกษตร. 2557. การขึ้นทะเบียนปุ๋ยอินทรีย์. (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
http://www.doa.go.th/ard/index.php?option=com_content&view=article&id=45:rule&catid=36:rule. (8 มิถุนายน 2557)
- กรรณก ทรัพย์อุดม. 2554. ผลของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและความชื้นที่มีต่อสมรรถนะการ
หมักขยะอินทรีย์ในครัวเรือนโดยการเติมอากาศแบบแอสซีฟ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- จำเริญ อ่อนทอง. 2547. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลา
นครินทร์
- ธเรศ ศรีสถิต. 2553 วิศวกรรมจัดการมูลฝอยชุมชน. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
กรุงเทพฯ.
- ฉันทวี ศรีธาวิรัตน์. 2547. การศึกษากระบวนการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษวัสดุเหลือทิ้ง
ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม.
- ธีระพงษ์ สว่างปัญญากร. 2549. คู่มือผลิตปุ๋ยหมักแบบไม่พลิกกลับกอง ระบบกองเติมอากาศ. คณะ
วิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ศูนย์สาธิตการผลิตปุ๋ยหมักระบบกอง
เติมอากาศ แม่โจ้ 70 ปี.

- นคร สุรียานนท์. 2552. ผลของการเติมอากาศแบบแพสซีฟต่อการทำปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์ครัวเรือน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นิติ เหมพัฒน์. 2553. รูปแบบถังหมักปุ๋ยสำหรับขยะอินทรีย์จากบ้านเรือน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- นริลักษณ์ ชูรวเวช. 2548. เอกสารวิชาการเรื่องความรู้เกี่ยวกับปุ๋ยอินทรีย์. สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร. กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- บุญจรัตน์ โจลานันท์ และณัฐชา วงศ์คำแดง. 2550. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการการศึกษาคุณภาพและการใช้ประโยชน์ของปุ๋ยหมักจากการหมักวัสดุเหลือทิ้งของบ้านแม่ผาแหน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- บุญจรัตน์ โจลานันท์ และสิริเทพ เต่าประยูร. 2553. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการการประยุกต์ใช้วัสดุเม็ดชนิดใหม่เป็นบัลกิ้งเอเจนท์สำหรับการหมักปุ๋ยอินทรีย์: พฤติกรรมจลนศาสตร์และคุณภาพของปุ๋ยหมัก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาและพระจอมเกล้าธนบุรี: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- ปรีศณี เมฆศรีสวัสดิ์. 2548. การออกแบบบ้านประหยัดพลังงานที่ใช้ธรรมชาติร่วมกับระบบปรับอากาศ (บ้านต้นแบบในเขตชานเมืองกรุงเทพมหานคร). วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- พูนศักดิ์ จันทร์จำปี. 2541. การหมักปุ๋ยจากเศษอาหารและวัสดุเหลือใช้การเกษตรแบบเทอร์โมฟิลิกโดยใช้ถังหมัก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- มาลินี ศรีสุวรรณ. 2543. การศึกษาความสัมพันธ์ของทิศทางการผสมกับการเจาะช่องเปิดที่ผนังอาคารสำหรับภูมิอากาศร้อนชื้นในประเทศไทย กรุงเทพฯ: คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- รัตติญา พรหมแสง, อรุณศิริ กำลั้ง และจันทร์จรัส วีรสาร. 2551. ผลของการปลดปล่อยไนโตรเจนจากการหมักมูลโคนม และมูลโคขุนต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตของผักกาดเขียวกวาดตั้ง. ว. ดินและปุ๋ย 31 : 118-126.
- วธิดา คະนะแนม. 2552. ผลของมูลไก่ กากตะกอนดีแคเนเตอร์ และดินแดงในการผลิตปุ๋ยหมัก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
- ศิรินทรา วันดี. 2552. การศึกษาการนำของเสียจากโรงงานผลิตยางแท่งมาหมักปุ๋ย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.
- สิริวรรณ นิสสัยกล้า. 2553. ผลของการเติมหัวเชื้อต่อสมรรถนะการหมักขยะอินทรีย์ในครัวเรือนโดยใช้การเติมอากาศแบบแพสซีฟ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- สุชินันท์ เกียรติภักดิ์. 2555. การใช้ประโยชน์จากหอยเชอร์รี่สำหรับการทำปุ๋ยหมัก. วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
- สรพพรรณ อมตธรรม. 2546. ผลของการให้ความร้อนในการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารโดยใช้เทอร์โมฟิล
ลิกแบคทีเรีย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.9503). 2548. มาตรฐานสินค้าเกษตร
และอาหารแห่งชาติ: ปุ๋ยหมัก. สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพฯ
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2553. ประมวลสถิติสำคัญของประเทศไทย 2012. สำนักงานสถิติแห่งชาติ
กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรุงเทพฯ
- อนุวัฒน์ เฟื่องจันทร์. 2546. ผลของการกวนและเติมอากาศในการทำปุ๋ยหมักจากขยะในครัวเรือนโดย
ใช้เทอร์โมฟิลลิกแบคทีเรีย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- Adhikari, B.K., Barrington, S., Martinez, J., King, S. 2009. Effectiveness of three bulking
agents for food waste composting. *Waste Management*, 29(1), 197-203.
- Ahmad, R., Jilani, G., Arshad, M., Zahir, Z., Khalid, A. 2007. Bio-conversion of organic
wastes for their recycling in agriculture: an overview of perspectives and
prospects. *Annals of Microbiology*, 57(4), 471-479.
- APHA, AWWA, WPCF. 1995. Standard Method for Examination of water and
wastewater. American Public Health Association, Washington, DC.
- Barrington, S., Choinière, D., Trigui, M., Knight, W. 2003. Compost convective airflow
under passive aeration. *Bioresource Technology*, 86(3), 259-266.
- 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.
- Çengel Y.A. and M. A. Boles. 2015 *Thermodynamics: An Engineering Approach* 8th
edition. McGraw-Hill Education, New York, USA.
- Cornell, U. 2016. Chapter 2 Composting Bioreactors and Bins. Cornell Waste
Management Institute.
- DeLaune, P., Moore, P., Daniel, T., Lemunyon, J. 2004. Effect of chemical and
microbial amendments on ammonia volatilization from composting poultry
litter. *Journal of Environmental Quality*, 33(2), 728-734.
- Diaz, L.F. 1993. *Composting and recycling municipal solid waste*. Lewis Publishers.

- Diaz, L.F. 2002. Composting of municipal solid waste. in: Handbook of Solid Waste Management, Second Edition, McGraw Hill Professional, Access Engineering.
- Elango, D., Thinakaran, N., Panneerselvam, P., Sivanesan, S. 2009. Thermophilic composting of municipal solid waste. *Applied Energy*, 86(5), 663-668.
- Gil, M.V., Carballo, M.T., Calvo, L.F. 2008. Fertilization of maize with compost from cattle manure supplemented with additional mineral nutrients. *Waste Management*, 28(8), 1432-1440.
- Golueke, C.G. 1972. *Composting: A Study of the Process and its Principles*. Rodale Press Emmaus, PA.
- 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(0), 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.
- Jiménez, E.I., Garcia, V.P. 1989. Evaluation of city refuse compost maturity: a review. *Biological Wastes*, 27(2), 115-142.
- Kaosol, T., Lerdratranataywee, W. 2014. Temple waste Utilization for Aerobic Co-composting. 3rd international conference on Environmental Engineering, Science and Management.
- Kapetanios, E., Loizidou, M., Valkanas, G. 1993. Compost production from Greek domestic refuse. *Bioresource Technology*, 44(1), 13-16.
- Khan, N., Clark, I., Sánchez-Monedero, M.A., Shea, S., Meier, S., Bolan, N. 2014. Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar. *Bioresource Technology*, 168(0), 245-251.

- Lashermes, G., Barriuso, E., Le Villio-Poitrenaud, M., Houot, S. 2012. Composting in small laboratory pilots: Performance and reproducibility. *Waste Management*, 32(2), 271-277.
- Liang, C., Das, K.C., McClendon, R.W. 2003. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 86(2), 131-137.
- Mason, I.G., Milke, M.W. 2005a. Physical modelling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems. *Waste Management*, 25(5), 481-500.
- Mason, I.G., Milke, M.W. 2005b. Physical modelling of the composting environment: A review. Part 2: Simulation performance. *Waste Management*, 25(5), 501-509.
- 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. 1996. *Organic waste recycling*. John Wiley & Sons Canada, Limited.
- 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.
- Richard, T.L. 2005. COMPOST. in: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, (Ed.) D. Hillel, Elsevier. Oxford, pp. 294-301.
- Rynk, R. 1992. *On-farm composting handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. Ithaca, New York, Cornell University.
- Shahudin, Z., Ahmad Basri, N.E., Zain, S.M., Afida, N., Basri, H., Mat, S. 2011. Performance Evaluation of Composter Bins for Food Waste at the Universiti Kebangsaan Malaysia. *Journal of Applied Sciences Research*, 7(7).
- Stentiford, E.I. 1996. *Composting Control: Principles and Practice*. in: *The Science of Composting*, (Eds.) M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi, Springer Netherlands, pp. 49-59.
- Sundberg, C. 2003. *Food waste composting– Effects of Heat, Acids and Size*. . Licentiate Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences.

- Sundberg, C., Smårs, S., Jönsson, H. 2004. Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource Technology*, 95(2), 145-150.
- 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.
- 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.
- Tchobanoglous, G., Kreith, F. 2002. *Handbook of Solid Waste Management*. McGraw-Hill Education.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. 1993. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. McGraw-Hill, Inc.
- 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.
- Wang, X., Selvam, A., Chan, M., Wong, J.W.C. 2013. Nitrogen conservation and acidity control during food wastes composting through struvite formation. *Bioresource Technology*, 147(0), 17-22.
- 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

Moisture content

$$\text{จากสูตร} \quad G = \frac{Q_1 M_1 + Q_2 M_2}{Q_1 M_1}$$

$$\text{น้ำหนักวัสดุหมัก (} Q_1 \text{)} = 6 \text{ kg}$$

$$\text{ความชื้นผสม (} M_1 \text{)} = 46.47 \%$$

$$\text{ความชื้นของน้ำ (} M_2 \text{)} = 100 \%$$

$$\text{ความชื้นรวมที่ต้องการ (} G \text{)} = 55 \%$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ต้องใส่น้ำเพิ่ม (} Q_2 \text{)} &= \frac{[Q_1 \times (M_1 - G)]}{(G - M_2)} \\ &= \frac{[6 \times (46.47 - 55)]}{(55 - 100)} \\ &= 1.14 \text{ kg} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข.

วิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์ความชื้น (APHA et al., 1995)

วัสดุและอุปกรณ์

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

วิธีดำเนินการ

1. ทำการสุ่มตัวอย่างประมาณ 50 กรัม ใส่ถ้วยอลูมิเนียม แล้วชั่งน้ำหนัก
2. นำไปอบที่อุณหภูมิ 70-100 องศาเซลเซียส 1-2 วัน จนน้ำหนักคงที่
3. นำใส่โถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก

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

2. การวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (จำเป็น อ่อนทอง, 2547)

วัสดุและอุปกรณ์

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

ส่วนที่เป็นน้ำใส (supernatant)

3. การวิเคราะห์การนำไฟฟ้า (จำเป็น อ่อนทอง, 2547)

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.01 กรัม
2. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

3. หลอดเหยียงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
4. กระบอกตวงขนาด 25 มิลลิลิตร
5. เทอร์โมมิเตอร์

วิธีดำเนินการ

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

4. การวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุ (จำเป็น อ่อนทอง, 2547)

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งความละเอียด 0.01 กรัม
2. ขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร
3. บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร
4. โวลุ่มเมตริกปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร
5. กระบอกตวงขนาด 10 และ 50 มิลลิลิตร
6. ขวดปรับปริมาตรขนาด 500 และ 1000 มิลลิลิตร

สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต 0.167 โมลาร์ (1 นอร์แมล) : สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate : $K_2Cr_2O_7$) (ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 3 ชั่วโมง) 49.04 กรัม ในน้ำปราศจากไอออนและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
2. เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซาไฮเดรต (FAS) 1 โมลาร์ (1 นอร์แมล) : ละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซาไฮเดรต (Ferrous ammonium sulfate hexahydrate : $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) 196.07 กรัม ในน้ำร้อนที่ปราศจากไอออนประมาณ 400 มิลลิลิตร วางให้เย็นแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป 15 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร
3. กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid) เข้มข้นอย่างน้อย 96% (96-98% w/w H_2SO_4)
4. เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroin indicator): ละลายฟีแนนโทโรลีนโมโนไฮเดรต (1, 10 O-phenantroline monohydrate) 1.485 กรัม ในน้ำที่ปราศจากไอออน และเติม FAS 1 โมลาร์ 8 มิลลิลิตร ก่อนปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

วิธีดำเนินการ

1. ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ขวดลูกชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ใช้ปิเปตดูดโพแทสเซียมไดโครเมท 10 มิลลิลิตร เติมลงไปขวดและแกว่งผสมให้เข้ากับตัวอย่าง ในขั้นนี้ให้ทำแบลนค์ (Blank) โดยเติมโพแทสเซียมไดโครเมท 10 มิลลิลิตร ลงในขวดที่ไม่มีตัวอย่างด้วย
3. นำไปเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร ภายในตู้ดูดควันโดยค่อย ๆ เทกรดลงด้านข้างขวดและทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที
4. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50 มิลลิลิตร แล้วหยดเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ลงไป 3-4 หยดแกว่งให้เข้ากัน
5. นำไปไตเตรทด้วย FAS (ควรไตเตรทแบลนค์ก่อน) จนกระทั่งถึงจุดยุติ (end point) โดยสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลปนแดง บันทึกปริมาตร FAS ที่ใช้

คำนวณหา

$$\text{อินทรีย์คาร์บอน (g/kg)} = \frac{3.896 M \times (VB - V)}{W}$$

$$\text{อินทรีย์วัตถุ (g/kg)} = \text{อินทรีย์คาร์บอน} \times 1.724$$

โดยที่ M คือ ความเข้มข้นของ FAS
 VB คือ ปริมาตรที่ใช้ไตเตรทแบลนค์
 V คือ ปริมาตรที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง
 W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

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

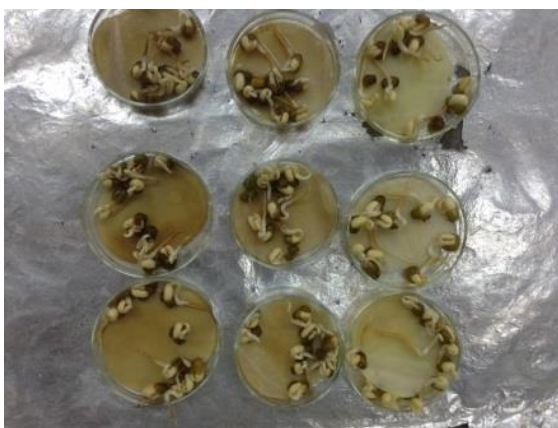
วัสดุและอุปกรณ์

1. เมล็ดพันธุ์ผักที่มีความงอกไม่ต่ำกว่า 75% เช่น ถั่วเขียว ผักกาดเขียว ข้าวโพด
2. จานเพาะเมล็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร
3. กระดาษกรองเบอร์ 42 ขนาด 9 เซนติเมตร

วิธีดำเนินการ

1. ชั่งตัวอย่างใส่ในน้ำกลั่น โดยมีสัดส่วนตัวอย่างต่อน้ำกลั่น 1:10 เขย่าประมาณ 180 ครั้งต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง
2. วางเมล็ดพันธุ์ผัก 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 การหาค่า GI ของเมล็ดถั่วเขียวหลังสิ้นสุดการบ่ม

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

น้ำตัวอย่าง

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลดิบจากผลการทดลอง

ตารางภาคผนวกที่ ค-1 อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 1

จำนวนวัน	อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 1					
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5	อุณหภูมิห้อง
0	28.7 ± 0.6	28.3 ± 1.2	28.0 ± 0.0	28.3 ± 0.6	28.5 ± 0.5	29.0
1	37.2 ± 1.0	32.3 ± 1.5	34.0 ± 0.9	32.5 ± 0.9	42.0 ± 1.0	29.0
2	36.3 ± 1.6	36.2 ± 0.8	35.5 ± 0.0	35.2 ± 0.3	40.3 ± 1.5	28.0
3	37.5 ± 1.3	39.2 ± 1.3	37.3 ± 1.5	35.3 ± 1.2	41.8 ± 2.4	28.5
4	40.5 ± 1.5	40.5 ± 1.3	39.5 ± 2.0	37.5 ± 1.7	45.2 ± 2.0	29.0
5	41.7 ± 1.2	41.0 ± 0.0	40.0 ± 1.0	40.0 ± 1.0	43.8 ± 1.9	30.0
6	39.8 ± 0.8	38.0 ± 0.0	35.7 ± 1.6	35.7 ± 1.4	41.8 ± 1.4	27.0
7	38.5 ± 0.9	38.5 ± 1.8	35.8 ± 1.6	35.7 ± 0.6	40.0 ± 2.0	30.5
8	35.5 ± 0.9	33.8 ± 1.6	34.2 ± 1.0	31.5 ± 1.7	37.3 ± 1.3	28.5
9	37.8 ± 0.3	32.0 ± 1.0	36.2 ± 1.5	31.5 ± 1.3	40.8 ± 0.3	30.0
10	36.3 ± 1.2	32.0 ± 0.9	34.2 ± 0.6	31.8 ± 1.0	37.8 ± 0.3	29.0
11	36.2 ± 0.3	32.2 ± 1.3	33.5 ± 0.9	31.3 ± 0.8	37.2 ± 0.3	28.0
12	32.5 ± 0.5	29.8 ± 1.0	29.8 ± 1.0	28.7 ± 0.6	33.0 ± 0.0	26.0
13	29.8 ± 1.0	28.2 ± 1.2	28.7 ± 1.0	27.2 ± 0.3	30.3 ± 0.6	25.0
14	28.8 ± 0.6	28.3 ± 0.8	29.2 ± 1.0	27.3 ± 1.3	28.2 ± 0.8	25.0
15	30.0 ± 1.0	29.0 ± 1.3	30.2 ± 0.8	29.0 ± 1.0	29.8 ± 0.8	28.0
16	31.2 ± 0.8	30.5 ± 0.5	30.7 ± 0.3	30.3 ± 0.8	31.2 ± 1.0	30.0
17	30.0 ± 0.5	29.3 ± 0.6	30.0 ± 0.0	29.0 ± 0.0	29.8 ± 0.3	27.0
21	29.0 ± 0.9	27.8 ± 0.8	29.2 ± 0.8	27.5 ± 0.5	29.5 ± 0.9	26.5
25	29.3 ± 0.8	28.7 ± 0.8	29.5 ± 0.5	28.0 ± 1.0	29.5 ± 1.0	27.0
เฉลี่ย	34.3 ± 0.8	32.7 ± 0.9	33.0 ± 0.9	31.6 ± 0.8	35.9 ± 1.0	28.0

ตารางภาคผนวกที่ ค-2 MC (%) ของการทดลองที่ 1

จำนวนวัน	MC (%) ของการทดลองที่ 1				
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
0	42.9 ± 6.5	46.4 ± 1.8	46.7 ± 1.6	48.3 ± 3.7	44.5 ± 1.4
1	43.3 ± 7.8	41.6 ± 1.9	49.6 ± 2.7	42.3 ± 3.1	42.6 ± 3.2
2	41.9 ± 4.4	45.1 ± 2.5	54.6 ± 1.0	48.2 ± 3.0	49.4 ± 2.9
3	42.3 ± 5.5	47.6 ± 4.2	56.1 ± 1.1	49.5 ± 6.1	49.2 ± 0.6
4	43.0 ± 1.5	45.0 ± 4.8	51.9 ± 5.8	45.4 ± 2.6	44.4 ± 5.1
5	44.5 ± 5.7	44.2 ± 3.5	55.7 ± 4.9	41.7 ± 6.0	42.7 ± 1.4
6	41.4 ± 1.6	42.3 ± 1.0	45.3 ± 2.5	46.7 ± 1.6	46.8 ± 2.6
7	41.4 ± 1.3	43.0 ± 2.5	42.9 ± 1.8	42.5 ± 7.3	41.5 ± 3.9
8	45.4 ± 1.3	49.7 ± 1.5	47.6 ± 0.4	47.5 ± 3.1	48.5 ± 2.9
9	47.7 ± 0.9	50.2 ± 1.8	49.7 ± 1.7	49.2 ± 5.0	47.3 ± 2.3
10	45.4 ± 2.2	51.1 ± 1.3	48.8 ± 3.0	51.1 ± 3.6	49.1 ± 3.4
11	42.4 ± 5.2	48.1 ± 0.6	45.4 ± 4.3	47.0 ± 3.7	42.6 ± 1.2
12	47.2 ± 4.9	48.7 ± 0.9	48.4 ± 2.9	47.7 ± 1.8	47.4 ± 6.1
13	46.1 ± 1.8	52.7 ± 2.1	47.2 ± 2.9	50.5 ± 1.0	49.8 ± 2.0
14	47.0 ± 4.0	52.3 ± 1.9	50.5 ± 1.2	50.9 ± 2.9	48.0 ± 1.2
15	45.8 ± 2.4	52.2 ± 4.0	50.3 ± 2.5	51.7 ± 2.9	51.1 ± 2.2
16	43.5 ± 1.5	51.9 ± 2.8	50.7 ± 2.5	51.5 ± 2.2	49.5 ± 2.5
17	45.9 ± 2.2	50.5 ± 2.1	47.2 ± 2.6	50.3 ± 2.1	49.7 ± 1.9
21	42.7 ± 2.8	51.8 ± 1.5	45.5 ± 1.0	49.0 ± 2.7	49.9 ± 2.4
25	43.9 ± 1.0	52.4 ± 0.5	48.8 ± 2.1	49.3 ± 4.8	50.8 ± 1.9

ตารางภาคผนวกที่ ค-3 TOC (%) ของการทดลองที่ 1

จำนวนวัน	TOC (%) ของการทดลองที่ 1				
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
0	45.9 ± 0.3	41.0 ± 0.7	44.2 ± 0.4	46.3 ± 0.5	46.1 ± 2.1
1	47.0 ± 1.4	50.1 ± 5.7	43.8 ± 1.2	45.0 ± 1.1	45.9 ± 1.4
2	46.6 ± 1.9	43.9 ± 2.6	43.4 ± 1.6	45.8 ± 0.9	45.2 ± 0.5
3	43.2 ± 0.6	42.0 ± 0.3	42.4 ± 0.8	42.6 ± 0.1	43.2 ± 0.6
4	41.7 ± 0.8	42.7 ± 2.0	43.2 ± 0.4	42.3 ± 0.6	42.9 ± 0.1
5	42.5 ± 0.3	42.0 ± 1.1	41.8 ± 1.8	43.1 ± 0.3	42.4 ± 0.9
6	39.9 ± 4.0	38.4 ± 1.0	39.9 ± 2.1	38.3 ± 1.4	44.0 ± 0.5
7	43.1 ± 4.5	41.6 ± 1.1	41.1 ± 1.9	40.5 ± 1.9	42.9 ± 0.8
8	41.7 ± 0.7	40.4 ± 0.1	40.6 ± 1.0	41.4 ± 0.8	41.5 ± 0.3
9	42.6 ± 1.3	39.7 ± 0.9	40.0 ± 1.2	40.5 ± 0.1	41.4 ± 0.4
10	38.1 ± 3.4	39.3 ± 0.6	38.5 ± 1.5	39.5 ± 0.1	38.0 ± 0.3
11	42.2 ± 1.8	40.8 ± 2.1	42.8 ± 4.5	34.5 ± 6.1	40.1 ± 0.1
12	36.4 ± 1.2	36.1 ± 1.2	36.5 ± 1.0	36.3 ± 0.8	37.8 ± 0.8
13	37.2 ± 0.4	37.6 ± 0.8	36.4 ± 0.2	37.2 ± 2.7	37.4 ± 0.4
14	38.9 ± 1.6	38.3 ± 1.4	37.6 ± 1.9	39.0 ± 0.7	33.3 ± 7.4
15	39.6 ± 1.4	38.5 ± 1.2	39.0 ± 0.3	38.8 ± 0.2	40.0 ± 0.3
16	40.3 ± 1.0	36.5 ± 0.3	36.2 ± 2.3	36.6 ± 0.6	37.3 ± 1.1
17	32.4 ± 0.3	29.0 ± 0.4	32.3 ± 1.7	32.6 ± 2.7	32.8 ± 1.0
21	33.3 ± 0.2	32.4 ± 0.9	28.8 ± 2.9	31.7 ± 0.3	31.9 ± 0.4
25	34.4 ± 0.6	30.4 ± 0.1	31.1 ± 2.9	30.8 ± 0.6	31.7 ± 0.8

ตารางภาคผนวกที่ ค-4 TKN (%) ของการทดลองที่ 1

จำนวนวัน	TKN (%) ของการทดลองที่ 1				
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
0	1.1 ± 0.00	1.0 ± 0.00	1.1 ± 0.00	1.1 ± 0.00	1.0 ± 0.00
1	1.2 ± 0.01	1.1 ± 0.00	1.5 ± 0.03	1.1 ± 0.01	1.2 ± 0.01
2	1.0 ± 0.00	1.0 ± 0.00	1.2 ± 0.01	1.1 ± 0.00	1.0 ± 0.00
3	1.1 ± 0.01	1.1 ± 0.00	1.5 ± 0.01	1.1 ± 0.01	1.2 ± 0.00
4	1.1 ± 0.01	1.1 ± 0.01	1.4 ± 0.02	1.4 ± 0.30	1.2 ± 0.00
5	1.2 ± 0.03	1.2 ± 0.01	1.3 ± 0.00	1.1 ± 0.01	1.4 ± 0.02
6	1.2 ± 0.00	1.2 ± 0.00	1.5 ± 0.00	1.2 ± 0.01	1.3 ± 0.03
7	1.3 ± 0.00	1.4 ± 0.01	1.3 ± 0.02	1.2 ± 0.01	1.3 ± 0.01
8	1.2 ± 0.01	1.4 ± 0.03	1.3 ± 0.00	1.4 ± 0.01	1.3 ± 0.01
9	1.3 ± 0.01	1.4 ± 0.01	1.4 ± 0.01	1.4 ± 0.01	1.4 ± 0.01
10	1.4 ± 0.01	1.4 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.4 ± 0.01	1.4 ± 0.01
11	1.4 ± 0.02	1.4 ± 0.01	1.4 ± 0.01	1.4 ± 0.00	1.5 ± 0.00
12	1.4 ± 0.01	1.5 ± 0.03	1.4 ± 0.01	1.5 ± 0.02	1.4 ± 0.01
13	1.4 ± 0.01	1.5 ± 0.00	1.4 ± 0.00	1.4 ± 0.00	1.5 ± 0.00
14	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.02	1.4 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.6 ± 0.01
15	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.01
16	1.4 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.4 ± 0.00	1.5 ± 0.01
17	1.5 ± 0.00	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.00	1.4 ± 0.04	1.5 ± 0.01
21	1.5 ± 0.01	1.6 ± 0.02	1.5 ± 0.02	1.5 ± 0.01	1.6 ± 0.01
25	1.5 ± 0.00	1.6 ± 0.00	1.6 ± 0.02	1.6 ± 0.00	1.6 ± 0.04

ตารางภาคผนวกที่ ค-5 C/N ratio ของการทดลองที่ 1

จำนวนวัน	C/N ratio ของการทดลองที่ 1				
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
0	41.37	41.46	42.06	41.70	45.69
1	40.00	46.80	30.23	40.69	37.92
2	45.73	42.23	36.60	40.49	44.34
3	38.61	37.88	27.51	38.00	36.30
4	36.54	39.02	31.20	30.33	36.07
5	34.25	35.92	31.21	37.61	29.78
6	34.10	31.00	26.77	31.28	34.10
7	33.69	29.59	31.77	34.16	33.23
8	34.03	29.52	30.98	29.77	32.27
9	33.14	28.88	28.87	29.90	30.09
10	27.71	28.10	26.56	27.92	26.83
11	30.49	28.46	30.35	25.17	27.67
12	26.07	24.38	25.45	24.30	26.15
13	26.11	25.37	25.30	26.55	24.60
14	26.52	25.42	26.36	26.23	21.26
15	27.28	25.51	26.09	26.43	26.68
16	28.66	24.72	24.63	25.39	25.30
17	22.06	19.51	21.81	22.85	21.64
21	21.96	20.44	18.74	20.72	20.18
25	22.32	18.68	19.76	19.51	20.42

ตารางภาคผนวกที่ ค-6 pH ของการทดลองที่ 1

จำนวนวัน	pH ของการทดลองที่ 1				
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
1	5.80	5.51	5.61	5.57	5.57
2	5.90	5.93	5.51	5.46	6.07
3	5.75	5.59	5.55	5.83	5.57
4	6.00	5.84	5.24	5.60	5.45
5	6.28	6.09	6.02	6.14	6.25
6	5.86	5.61	5.82	6.11	6.52
7	6.30	5.89	6.09	5.77	6.16
8	6.3	5.82	5.78	6.41	6.27
9	6.48	6.1	6.18	6.44	6.61
10	6.4	6.42	6.60	6.27	6.59
11	6.62	6.77	6.67	6.52	6.91
12	7.05	6.62	6.75	6.48	6.71
13	6.8	6.8	6.78	7.21	6.86
14	7.12	7.21	7.02	6.88	6.83
15	7.13	7.14	6.81	6.79	7.13
16	6.94	6.66	6.84	7.08	7.16
17	6.47	6.97	6.32	6.67	6.76
21	6.52	6.96	6.54	6.74	6.32
25	6.54	6.97	6.42	6.98	6.73

ตารางภาคผนวกที่ ค-7 อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 2

จำนวนวัน	อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 2					
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5	อุณหภูมิห้อง
0	26.8 ± 1.4	26.7 ± 1.2	28.2 ± 1.3	27.3 ± 1.5	27.2 ± 1.6	26.0
1	41.2 ± 0.8	40.2 ± 0.3	36.3 ± 2.0	40.7 ± 1.3	41.0 ± 1.0	30.0
2	34.3 ± 0.6	37.5 ± 2.3	33.5 ± 0.5	37.0 ± 1.0	38.3 ± 1.5	28.0
3	30.5 ± 1.5	34.3 ± 1.2	32.7 ± 0.6	34.3 ± 0.8	36.3 ± 1.3	26.0
4	30.8 ± 0.8	35.0 ± 1.0	29.7 ± 0.6	34.2 ± 0.8	36.7 ± 3.3	26.0
5	32.0 ± 0.5	35.5 ± 0.5	31.5 ± 1.3	34.3 ± 1.2	39.3 ± 2.9	27.0
6	31.0 ± 1.0	36.8 ± 2.5	31.0 ± 1.0	33.2 ± 0.8	39.0 ± 0.9	27.0
7	31.7 ± 1.2	33.0 ± 0.5	31.7 ± 1.0	33.2 ± 1.0	37.7 ± 0.6	28.5
8	29.2 ± 0.3	31.2 ± 0.3	29.2 ± 0.8	31.0 ± 1.0	32.5 ± 0.0	27.0
9	29.2 ± 0.8	30.3 ± 0.3	29.2 ± 0.6	30.0 ± 0.5	32.5 ± 0.0	27.5
10	31.0 ± 1.0	30.5 ± 0.0	30.2 ± 0.3	31.7 ± 0.6	31.5 ± 0.0	29.0
11	30.2 ± 0.3	32.0 ± 0.0	32.3 ± 0.6	31.7 ± 0.6	33.2 ± 0.6	29.0
12	29.2 ± 0.3	30.7 ± 1.2	30.8 ± 0.8	30.3 ± 0.3	32.0 ± 0.0	29.0
13	30.3 ± 0.6	31.7 ± 0.3	31.8 ± 0.3	31.7 ± 0.3	32.3 ± 0.3	31.0
14	29.0 ± 1.0	31.2 ± 0.3	31.0 ± 0.0	30.8 ± 0.3	32.3 ± 0.3	29.5
15	28.3 ± 0.6	30.3 ± 0.3	29.7 ± 0.8	30.2 ± 0.3	31.2 ± 0.6	29.0
19	29.2 ± 0.6	31.0 ± 0.0	30.5 ± 0.5	30.7 ± 0.3	31.5 ± 0.0	29.0
23	29.7 ± 0.3	31.2 ± 0.6	30.7 ± 0.3	31.2 ± 0.3	31.2 ± 0.3	29.5
27	29.7 ± 0.6	30.3 ± 0.3	30.0 ± 0.0	30.0 ± 0.0	30.2 ± 0.3	29.0
เฉลี่ย	30.6 ± 0.7	32.6 ± 0.6	31.0 ± 0.6	32.2 ± 0.6	33.9 ± 0.8	28.2

ตารางภาคผนวกที่ ค-8 MC (%) ของการทดลองที่ 2

จำนวนวัน	MC (%) ของการทดลองที่ 2				
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
0	38.5 ± 0.2	40.3 ± 1.2	37.5 ± 4.4	36.6 ± 3.1	41.0 ± 1.2
1	39.7 ± 0.9	37.8 ± 1.4	39.4 ± 3.0	36.6 ± 3.5	37.4 ± 2.0
2	42.0 ± 2.4	40.4 ± 2.9	36.4 ± 3.8	40.4 ± 3.8	44.5 ± 4.5
3	45.0 ± 7.0	42.6 ± 3.4	39.8 ± 1.2	40.9 ± 3.1	43.4 ± 2.5
4	44.3 ± 4.6	41.8 ± 4.6	36.9 ± 4.2	40.6 ± 3.7	43.5 ± 4.4
5	44.5 ± 2.6	44.0 ± 4.6	32.3 ± 2.1	45.3 ± 0.2	46.0 ± 3.3
6	41.4 ± 0.6	46.0 ± 2.0	34.7 ± 4.4	46.5 ± 1.6	44.6 ± 3.0
7	43.1 ± 5.5	50.5 ± 3.0	34.9 ± 5.4	44.7 ± 1.6	47.1 ± 2.0
8	47.8 ± 5.0	47.2 ± 3.0	38.5 ± 3.7	45.4 ± 2.5	43.7 ± 2.0
9	48.0 ± 2.9	36.7 ± 4.0	48.5 ± 1.4	42.2 ± 1.8	45.8 ± 3.1
10	46.7 ± 3.3	45.1 ± 5.3	42.2 ± 3.6	42.3 ± 1.8	46.8 ± 3.6
11	48.6 ± 2.9	47.7 ± 1.8	43.5 ± 5.1	41.9 ± 1.7	42.1 ± 2.7
12	40.8 ± 8.5	45.0 ± 4.7	36.2 ± 4.4	37.1 ± 4.3	41.6 ± 7.8
13	46.8 ± 3.3	50.0 ± 3.0	41.5 ± 4.9	41.0 ± 3.3	43.6 ± 1.2
14	46.4 ± 3.3	44.4 ± 2.1	38.7 ± 1.0	37.7 ± 3.4	44.3 ± 0.8
15	42.6 ± 1.2	46.7 ± 2.8	37.6 ± 4.5	40.3 ± 5.3	38.6 ± 1.4
19	43.2 ± 4.1	43.7 ± 3.5	33.6 ± 4.0	36.8 ± 2.5	38.9 ± 4.9
23	34.9 ± 2.3	39.2 ± 3.8	46.1 ± 3.8	36.3 ± 1.2	40.4 ± 1.4
27	40.3 ± 5.0	40.9 ± 3.5	24.0 ± 4.1	31.0 ± 4.0	39.0 ± 3.0

ตารางภาคผนวกที่ ค-9 TOC (%) ของการทดลองที่ 2

จำนวนวัน	TOC (%) ของการทดลองที่ 2				
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
0	38.5 ± 1.7	37.2 ± 0.2	39.7 ± 0.4	39.9 ± 0.5	36.6 ± 0.6
1	37.4 ± 1.3	35.8 ± 1.9	37.7 ± 0.7	35.8 ± 1.8	36.2 ± 0.1
2	36.8 ± 1.2	36.8 ± 0.8	37.2 ± 1.3	38.1 ± 0.3	36.1 ± 0.0
3	38.4 ± 2.1	36.4 ± 1.9	38.8 ± 1.1	37.6 ± 0.6	36.7 ± 0.5
4	35.4 ± 0.0	35.6 ± 0.7	34.5 ± 0.4	34.5 ± 2.4	33.6 ± 0.3
5	35.5 ± 0.7	39.0 ± 2.4	34.3 ± 3.1	37.3 ± 0.9	35.5 ± 1.9
6	39.4 ± 1.3	38.2 ± 0.9	39.3 ± 0.5	39.8 ± 0.8	38.8 ± 0.5
7	37.8 ± 0.4	39.5 ± 0.0	38.5 ± 1.4	39.3 ± 1.5	40.1 ± 0.6
8	37.5 ± 0.4	36.7 ± 1.8	36.5 ± 2.8	36.1 ± 2.0	35.9 ± 0.6
9	35.2 ± 0.5	33.7 ± 1.6	35.4 ± 1.4	33.0 ± 1.4	35.0 ± 0.1
10	36.0 ± 0.6	33.7 ± 0.0	35.0 ± 0.4	34.1 ± 0.9	34.8 ± 0.5
11	33.8 ± 0.2	32.7 ± 0.3	33.8 ± 0.1	34.4 ± 0.7	33.5 ± 1.5
12	32.8 ± 0.3	35.0 ± 2.0	34.1 ± 0.3	33.9 ± 0.5	34.5 ± 0.1
13	34.3 ± 1.7	33.8 ± 0.4	34.9 ± 1.0	32.9 ± 0.3	34.7 ± 0.5
14	32.9 ± 0.1	33.9 ± 1.1	35.0 ± 0.8	33.1 ± 0.8	32.4 ± 1.2
15	38.1 ± 0.0	37.1 ± 0.3	37.7 ± 1.2	37.6 ± 0.0	36.7 ± 1.4
19	35.5 ± 1.5	37.2 ± 0.1	38.6 ± 0.7	37.7 ± 0.7	39.3 ± 1.2
23	37.1 ± 0.4	35.2 ± 0.9	33.1 ± 1.9	32.6 ± 4.6	35.3 ± 1.3
27	35.4 ± 0.1	34.4 ± 0.3	35.5 ± 0.4	38.2 ± 0.8	35.1 ± 0.6

ตารางภาคผนวกที่ ค-10 TKN (%) ของการทดลองที่ 2

จำนวนวัน	TKN (%) ของการทดลองที่ 2				
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
0	1.1 ± 0.00	1.2 ± 0.00	1.2 ± 0.00	1.0 ± 0.00	1.1 ± 0.00
1	1.0 ± 0.00	1.0 ± 0.00	1.1 ± 0.00	1.0 ± 0.00	1.0 ± 0.02
2	1.3 ± 0.03	1.1 ± 0.01	1.1 ± 0.01	1.3 ± 0.05	1.1 ± 0.01
3	1.2 ± 0.00	1.3 ± 0.01	1.1 ± 0.02	1.1 ± 0.01	1.1 ± 0.02
4	1.2 ± 0.03	1.2 ± 0.01	1.3 ± 0.05	1.1 ± 0.01	1.1 ± 0.02
5	1.3 ± 0.02	1.2 ± 0.00	1.1 ± 0.02	1.1 ± 0.01	1.3 ± 0.00
6	1.4 ± 0.01	1.3 ± 0.01	1.3 ± 0.03	1.4 ± 0.00	1.4 ± 0.01
7	1.2 ± 0.04	1.3 ± 0.01	1.2 ± 0.04	1.2 ± 0.01	1.2 ± 0.04
8	1.4 ± 0.00	1.3 ± 0.02	1.4 ± 0.01	1.3 ± 0.01	1.5 ± 0.01
9	1.3 ± 0.00	1.3 ± 0.01	1.3 ± 0.02	1.2 ± 0.03	1.4 ± 0.01
10	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.3 ± 0.01	1.3 ± 0.01	1.5 ± 0.01
11	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.4 ± 0.02	1.4 ± 0.02	1.5 ± 0.00
12	1.4 ± 0.01	1.6 ± 0.01	1.3 ± 0.03	1.4 ± 0.00	1.5 ± 0.00
13	1.6 ± 0.01	1.5 ± 0.00	1.4 ± 0.05	1.4 ± 0.01	1.5 ± 0.00
14	1.5 ± 0.01	1.6 ± 0.00	1.4 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.01
15	1.6 ± 0.00	1.5 ± 0.02	1.4 ± 0.01	1.4 ± 0.01	1.5 ± 0.02
19	1.6 ± 0.02	1.6 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.5 ± 0.00
23	1.5 ± 0.02	1.7 ± 0.00	1.6 ± 0.01	1.5 ± 0.01	1.6 ± 0.00
27	1.7 ± 0.00	1.7 ± 0.00	1.6 ± 0.00	1.5 ± 0.00	1.6 ± 0.00

ตารางภาคผนวกที่ ค-11 C/N ratio ของการทดลองที่ 2

จำนวนวัน	C/N ratio ของการทดลองที่ 2				
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
0	36.36	31.76	34.55	41.17	33.58
1	35.98	35.82	34.59	36.58	35.51
2	29.40	32.83	33.19	29.56	33.47
3	31.71	27.35	34.03	35.15	33.37
4	29.51	31.00	26.17	31.36	29.71
5	27.34	32.47	30.91	32.71	27.33
6	28.96	29.59	30.47	28.86	28.13
7	30.73	30.14	32.88	31.43	32.35
8	26.23	28.03	25.92	27.74	24.74
9	26.27	25.15	27.69	26.63	24.68
10	23.68	22.61	26.10	25.67	23.84
11	22.38	22.40	23.51	24.39	22.93
12	22.93	22.44	25.63	24.23	23.61
13	21.85	23.14	25.29	22.72	23.31
14	21.37	21.47	25.37	21.66	21.30
15	24.40	24.88	26.21	25.91	24.45
19	22.45	23.85	25.75	24.82	25.88
23	25.09	21.33	20.18	21.32	22.46
27	21.09	20.14	22.44	24.98	22.38

ตารางภาคผนวกที่ ค-12 pH ของการทดลองที่ 2

จำนวนวัน	pH ของการทดลองที่ 2				
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
1	5.38	5.21	5.10	5.21	5.23
2	6.00	5.88	5.56	5.46	5.95
3	6.23	5.99	6.66	5.67	6.41
4	6.61	6.46	6.11	6.34	6.02
5	5.97	6.76	6.53	6.40	6.56
6	7.73	6.82	6.82	6.89	6.95
7	7.00	6.83	6.79	7.09	7.44
8	7.52	7.11	6.17	6.63	7.25
9	7.65	7.46	7.46	6.98	7.23
10	7.79	7.34	7.02	7.05	7.49
11	7.97	8.1	7.01	6.79	7.14
12	7.45	7.09	7.29	7.32	7.26
13	7.73	7.45	7.47	7.38	7.19
14	7.02	7.67	7.33	6.63	7.38
15	7.57	7.47	7.37	6.86	7.03
19	7.5	7.71	6.81	7.32	7.37
23	7.64	7.45	7.47	7.09	7.74
27	7.49	7.47	7.17	7.29	7.58

ตารางภาคผนวกที่ ค-13 อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 3

จำนวนวัน	การทดลองที่ 3	อุณหภูมิห้อง	จำนวนวัน	การทดลองที่ 3	อุณหภูมิห้อง
2	31.0 ± 0.0	33.0	25	43.0 ± 5.3	29.0
3	32.0 ± 0.0	30.0	26	45.0 ± 7.2	30.0
4	39.2 ± 2.3	30.0	27	45.3 ± 7.1	29.0
5	41.5 ± 0.9	30.0	28	46.0 ± 3.6	30.0
6	47.0 ± 2.0	29.0	29	45.7 ± 4.8	31.0
7	46.7 ± 2.1	29.5	30	44.7 ± 3.7	31.0
8	50.7 ± 2.5	29.5	31	46.8 ± 4.3	31.0
9	55.0 ± 1.7	29.5	32	44.5 ± 4.8	34.0
10	50.7 ± 3.5	29.5	33	45.0 ± 4.6	30.5
11	49.7 ± 3.1	29.5	34	45.8 ± 6.0	30.0
12	46.7 ± 2.1	30.0	35	45.0 ± 6.6	29.0
13	45.3 ± 2.9	29.0	36	47.0 ± 6.2	29.0
14	39.7 ± 2.9	29.5	37	46.5 ± 5.3	30.0
15	38.0 ± 2.6	29.0	38	46.3 ± 7.4	30.0
16	39.7 ± 1.2	31.0	39	45.7 ± 7.1	29.0
17	40.7 ± 2.5	30.0	40	43.8 ± 7.0	29.0
18	39.3 ± 1.5	30.0	41	44.2 ± 6.3	29.0
19	38.3 ± 1.5	30.0	42	42.7 ± 5.5	29.5
20	38.0 ± 1.0	30.0	43	43.0 ± 5.6	29.0
21	37.7 ± 1.2	30.0	44	40.3 ± 4.5	29.0
22	43.3 ± 6.1	31.0	45	39.3 ± 3.1	31.0
23	43.7 ± 5.0	30.0	46	39.3 ± 5.0	29.5
24	43.0 ± 4.6	30.0	47	41.5 ± 4.4	29.0

ตารางภาคผนวกที่ ค-13 อุณหภูมิ (°C) ของการทดลองที่ 3 (ต่อ)

จำนวนวัน	การทดลองที่ 3	อุณหภูมิห้อง	จำนวนวัน	การทดลองที่ 3	อุณหภูมิห้อง
48	42.0 ± 3.6	29.0	71	36.2 ± 2.6	28.5
49	41.7 ± 4.5	29.0	72	35.2 ± 1.8	28.0
50	39.7 ± 4.0	29.0	73	34.2 ± 2.1	28.0
51	40.0 ± 4.4	29.5	74	35.2 ± 1.8	28.0
52	40.0 ± 3.6	29.5	75	33.3 ± 2.5	28.0
53	38.7 ± 3.4	29.0	76	32.0 ± 2.0	28.0
54	39.5 ± 3.1	29.0	77	32.2 ± 1.9	27.5
55	35.7 ± 2.1	29.0	78	31.8 ± 1.2	28.0
56	37.0 ± 3.5	28.0	79	32.7 ± 1.5	28.0
57	36.7 ± 4.7	28.0	80	34.5 ± 2.2	29.0
58	35.3 ± 2.5	28.0	81	34.0 ± 1.7	28.0
59	35.7 ± 2.5	28.0	82	33.0 ± 1.7	28.5
60	34.7 ± 2.1	28.0	83	32.7 ± 1.5	28.5
61	35.0 ± 2.0	28.0	84	33.3 ± 2.1	29.0
62	35.3 ± 1.5	29.0	85	32.0 ± 1.7	28.0
63	36.0 ± 1.7	28.0	86	32.0 ± 1.7	28.0
64	37.3 ± 1.5	28.5	87	31.7 ± 1.4	28.0
65	37.7 ± 1.5	28.5	88	31.8 ± 1.2	28.0
66	38.0 ± 2.0	28.0	89	32.3 ± 1.2	28.0
67	38.3 ± 2.1	29.0	90	31.5 ± 1.7	28.0
68	35.8 ± 2.8	28.0	-	-	-
69	35.7 ± 2.3	27.5	-	-	-
70	37.0 ± 3.0	28.0	-	-	-

ตารางภาคผนวกที่ ค-14 MC (%) ของการทดลองที่ 3

จำนวนวัน	การทดลองที่ 3			จำนวนวัน	การทดลองที่ 3		
1	39.6	±	6.0	21	31.4	±	2.0
2	32.9	±	2.2	22	38.0	±	4.6
3	37.3	±	5.0	26	48.6	±	5.9
4	31.8	±	5.1	30	49.2	±	9.6
5	35.1	±	2.8	34	51.4	±	4.1
6	30.6	±	2.1	38	47.5	±	7.6
7	29.0	±	0.5	42	43.7	±	10.8
8	31.4	±	8.3	46	41.5	±	4.5
9	33.6	±	1.5	50	32.7	±	10.2
10	29.4	±	2.1	54	36.1	±	2.3
11	38.6	±	1.7	58	35.7	±	7.5
12	34.1	±	2.7	62	33.0	±	1.8
13	35.7	±	2.9	66	31.7	±	12.6
14	34.3	±	5.3	70	38.7	±	5.4
15	30.4	±	3.2	74	35.5	±	6.3
16	30.3	±	0.6	78	32.4	±	4.9
17	30.2	±	1.1	82	32.2	±	5.9
18	28.9	±	2.1	86	32.4	±	1.2
19	30.4	±	1.9	90	36.0	±	6.0
20	35.0	±	1.1	-	-		-

ตารางภาคผนวกที่ ค-15 TOC (%) ของการทดลองที่ 3

จำนวนวัน	การทดลองที่ 3			จำนวนวัน	การทดลองที่ 3		
1	58.6	±	0.0	21	44.6	±	0.5
2	46.8	±	3.6	22	41.3	±	1.3
3	49.3	±	0.0	26	35.0	±	0.1
4	57.8	±	0.3	30	35.4	±	2.8
5	52.1	±	0.8	34	36.8	±	2.1
6	46.4	±	0.0	38	36.2	±	0.3
7	50.8	±	1.3	42	36.1	±	0.4
8	50.4	±	0.0	46	34.8	±	0.2
9	60.2	±	0.0	50	35.3	±	1.2
10	55.1	±	3.3	54	34.7	±	0.0
11	53.4	±	0.1	58	33.0	±	0.1
12	55.7	±	0.0	62	34.0	±	0.3
13	51.4	±	5.6	66	34.5	±	0.3
14	51.2	±	6.9	70	35.1	±	0.4
15	57.0	±	0.0	74	36.9	±	0.7
16	51.4	±	3.1	78	36.0	±	0.6
17	43.3	±	0.0	82	36.1	±	1.6
18	45.0	±	2.8	86	34.4	±	0.3
19	44.7	±	1.1	90	35.2	±	0.1
20	42.8	±	0.3	-	-		

ตารางภาคผนวกที่ ค-16 TKN (%) ของการทดลองที่ 3

จำนวนวัน	การทดลองที่ 3
1	1.72±0.03
8	1.36±0.01
16	1.57±0.01
22	1.73±0.02
30	2.29±0.01
38	2.17±0.02
46	2.14±0.05
54	2.34±0.01
62	2.27±0.01
70	2.31±0.03
78	2.26±0.03
86	2.33±0.01
90	2.28±0.03

ตารางภาคผนวกที่ ค-17 C/N ratio ของการทดลองที่ 3

จำนวนวัน	การทดลองที่ 3
1	34.06
8	37.08
16	32.75
22	23.93
30	15.47
38	16.70
46	16.31
54	14.83
62	14.98
70	15.21
78	15.92
86	14.79
90	15.46

ตารางภาคผนวกที่ ค-18 pH ของการทดลองที่ 3

จำนวนวัน	การทดลองที่3	จำนวนวัน	การทดลองที่3
1	4.65	21	4.41
2	4.57	22	4.67
3	4.49	26	4.68
4	4.66	30	5.09
5	4.31	34	5.18
6	4.49	38	4.9
7	4.25	42	4.97
8	4.22	46	5.16
9	4.39	50	5.12
10	4.38	54	5.2
11	4.22	58	5.16
12	4.29	62	5.15
13	4.34	66	5.2
14	4.23	70	5.32
15	4.37	74	5.2
16	4.36	78	5.41
17	4.29	82	5.39
18	4.31	86	5.35
19	4.39	90	5.21
20	4.31		

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายตะวัน ลั่นกองพูล	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5510120039	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา

ทุนศิษย์ก้นกุฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต
หาดใหญ่ จ. สงขลา

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต
หาดใหญ่ จ. สงขลา

ทุนอุดหนุนการวิจัย จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ เลขที่สัญญา ENG-56-2-7-20-
0190-S

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ตะวัน ลั่นกองพูล, จรีรัตน์ สกุลรัตน์. 2557. รูปแบบทางเข้าของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ย
แบบแพสซีฟ. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 13.
ณ โรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ระหว่างวันที่ 26-28 มีนาคม
2557.

ตะวัน ลั่นกองพูล, จรีรัตน์ สกุลรัตน์. 2558. รูปแบบทางออกของอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังหมักปุ๋ย
แบบแพสซีฟ. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ครั้งที่ 1. "สหวิทยาการเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน
ณ โรงแรมเวียงอินทร์ จังหวัดเชียงราย ระหว่างวันที่ 23-24 มีนาคม 2558.