การทำปุ๋ยหมักจากเศษใบจามจุรีกับเศษผักผลไม้ด้วยระบบภาชนะปิดขนาดเล็ก

นายไพฑูรย์ พัชรบำรุง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Composting of *Samanea saman (Jacquin) Merrill* Leave Waste with Vegetable-Fruit Waste by Small Scale In-vessel System

Mr. Paitoon Patcharabamrung

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำปุ๋ยหมักจากเศษใบจามจุรีกับเศษผักผลไม้ด้วยระบบภาชนะปิดขนาดเล็ก
โดย	นายไพฑูรย์ พัชรบำรุง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจียมไชยศรี)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ไพฑูรย์ พัชรบำรุง : การทำปุ๋ยหมักจากเศษใบจามจุรีกับเศษผักผลไม้ด้วยระบบภาชนะปิดขนาดเล็ก. (Composting of *Samanea saman (Jacquin) Merrill* Leave Waste with Vegetable-Fruit Waste by Small Scale In-vessel System) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.มนัสกร ราชากรกิจ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองทำปุ๋ยหมักระบบภาชนะปิดแบบใช้อากาศขนาดห้องปฏิบัติการที่ขนาด 1.25 ลิตร ด้วยของเสียอินทรีย์ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้แก่ เศษผักผลไม้ (VFW) เศษใบจามจุรี (LW) และเศษกิ่งไม้ (WW) ร่วมกับปุ๋ยหมักสมบูรณ์ (MC) จากการทำปุ๋ยหมักภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดที่ซึ่งมีการเติมอากาศที่แตกต่างกัน ได้แก่ ชุดการทดลอง A ซึ่งไม่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ ชุดการทดลอง B ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 8 รอบต่อวัน ชุดการทดลอง C ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวันและชุดการทดลอง D ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน และ 5 อัตราส่วนวัตถุดิบที่แตกต่างกัน ได้แก่ การทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมี VFW เป็นหลัก การทดลองอัตราส่วนที่ 2 ซึ่งมี LW เป็นหลัก การทดลองอัตราส่วนที่ 3 ซึ่งมี WW เป็นหลัก การทดลองอัตราส่วนที่ 4 ซึ่งมี VFW และ LW ในปริมาตรเท่ากันและการทดลองอัตราส่วนที่ 5 ซึ่งมี VFW LW และ WW ในปริมาตรเท่ากัน รวมทั้งสิ้น 20 การทดลอง ภายในระยะเวลา 20 วัน และใช้เกณฑ์คุณภาพเบื้องต้น เกณฑ์คุณภาพและการสูญเสียน้ำหนักในการวัดคุณภาพของปุ๋ยหมัก ผลการทดลองพบว่า การทดลองที่ 4 และชุดการทดลอง B มีผลทำให้ปุ๋ยหมักจากการทดลองผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นครบทุกตัวแปรมากที่สุด การทดลองที่ 4 และชุดการทดลอง A มีผลทำให้ปุ๋ยหมักจากการทดลองผ่านเกณฑ์คุณภาพมากที่สุด และส่วนการทดลองที่ 1 และชุดการทดลอง A มีผลทำให้ปุ๋ยหมักจากการทดลองมีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด สรุปผลการทดลองได้ว่า อัตราส่วนวัตถุดิบที่เป็น VFW และ LW ในปริมาตรเท่ากัน และชุดการทดลองที่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวันนั้น มีผลทำให้ปุ๋ยหมักจากการทดลองมีคุณภาพมากที่สุด

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา 2562 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

6070269721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORD: compost, composting, forced aeration, In-vessel aeration

Paitoon Patcharabamrung : Composting of *Samanea saman (Jacquin) Merrill* Leave Waste with Vegetable-Fruit Waste by Small Scale In-vessel System . Advisor: Assoc. Prof. MANASKORN RACHAKARAKIJ, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D.

This research explored composting by In-vessel aeration system carried out in laboratory-scale reactor of 1.25 liters. Organic feedstocks used in experiments were collected from Chulalongkorn university cafeterias and grounds: vegetable and fruit waste (VFW), rain tree leave waste (LW) and wood waste (WW), together with mature compost (MC) from Chulalongkorn university composting facility. The experiments were carried out in four sets that have different aeration runs per day: set A with no aeration runs, set B with 8 aeration runs, set C with 4 aeration runs and set D with 2 aeration runs. There are five different material ratios; namely, ratio 1 having mainly VFW; ratio 2 having mainly LW; ratio 3 having mainly WW; ratio 4 having VFW and LW in equal volume; and ratio 5 having VFW, LW and WW in equal volume. In total, there were 20 runs within 20 days. Using preliminary quality criteria, quality criteria and weight loss percentage, the results showed that ratio 4 and set B produced composts that passed all the parameters in the preliminary quality criteria the most. Ratio 4 and set A produced compost that passed most of the quality criteria while ratio 1 and set A produced compost that had the most weight loss. In conclusion, ratio 4 and set C was found to produce compost that had the best quality.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature .....
Academic Year: 2019 Advisor's Signature .....
Co-advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ชาติ เจียมไชยศรี รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และรองศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในเรื่องการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี เครื่องมือวิเคราะห์และสถานที่ทำการทดลอง ขอขอบคุณสำนักระบบบริหารกายภาพ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรี เศษกิ่งไม้และปุ๋ยหมักสมบูรณ์ ขอชอบคุณโรงอาหารวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เศษผักผลไม้ และขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนทุกท่านที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

ไพฑูรย์ พัชรบำรุง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

..... ค

บทคัดย่อภาษาไทย..... ค

..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ง

กิตติกรรมประกาศ..... จ

สารบัญ..... ฉ

สารบัญภาพ..... ฌ

สารบัญตาราง..... ฑ

บทที่ 1 1

1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์..... 1

1.2 คำสำคัญ (Key Word)..... 1

1.3 บทนำ..... 1

บทที่ 2 4

2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 4

2.2 ขอบเขตของงานวิจัย..... 4

2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5

บทที่ 3 6

3.1 การจัดการของเสียภายภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย..... 6

3.2 ของเสียที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 11

3.2.1 เศษผักผลไม้ 11

3.2.2 เศษใบจามจุรี..... 13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.3 สถานการณ์การจัดการของเสียภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 16
3.3 การทำปุ๋ยหมัก (Composting) 19
3.3.1 จุลินทรีย์ (Microorganism) 20
3.3.2 ประเภทกลไกการแปรสภาพเป็นปุ๋ยหมัก 21
3.3.3 กลไกการสูญเสียความร้อนภายในการทำปุ๋ยหมัก 23
3.3.4 ระบบการทำปุ๋ยหมัก 25
3.3.5 ตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้อง 29
3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 32
บทที่ 4 60
4.1 การกำหนดตัวแปร 60
4.2 การออกแบบการทดลอง 62
4.3 วัสดุอุปกรณ์และวัตถุดิบ 77
4.4 ระบบหมัก 79
4.5 วิธีการตรวจวัด 81
4.6 วิธีการชี้วัด 90
บทที่ 5 95
5.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี 99
5.2 การชี้วัดคุณภาพ 152
บทที่ 6 161
6.1 สรุป 161
6.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 162
6.3 ข้อเสนอแนะ 162
บทที่ 7 163
7.1 ที่มาและความสำคัญ 163

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7.2 ระบบทำปุ๋ยหมักขนาด 50 ลิตร 163
7.3 การออกแบบอัตราส่วนการทดลอง 167
บรรณานุกรม 168
ประวัติผู้เขียน 176
ภาคผนวก-ก-วิธีวิเคราะห์ตัวแปรในวิทยานิพนธ์ 177
ภาคผนวก-ข-ข้อมูลผลการวิเคราะห์ตัวแปรในวิทยานิพนธ์ 192
ภาคผนวก-ค-ภาพเครื่องมือวัดตัวแปรและการวัดตัวแปรในวิทยานิพนธ์ 251

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 3-1 ปริมาณเศษอาหารในโรงอาหาร 17 แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำรวจช่วงเดือนธันวาคม 2559 12
ภาพที่ 3-2 ใบจามจุรี 14
ภาพที่ 3-3 ดอกจามจุรี 15
ภาพที่ 3-4 ผลหรือฝักจามจุรี 15
ภาพที่ 3-5 ต้นจามจุรี 16
ภาพที่ 3-6 กองปุ๋ยหมักแบบท่อแถว (Static Pile) ณ อาคารวิทยพัฒนา 17
ภาพที่ 3-7 ถังทำปุ๋ยหมัก ณ อาคารวิทยพัฒนา 18
ภาพที่ 3-8 กลไกการแปรสภาพชีวมวลเป็นปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศ 19
ภาพที่ 3-9 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ 22
ภาพที่ 3-10 กลไก 3 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียความร้อนในกองปุ๋ยหมักช่วง Thermophilic.. 23
ภาพที่ 3-11 ตัวอย่างแสดงปฏิกิริยาต่างๆที่สัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในระบบการทำปุ๋ยหมัก 25
ภาพที่ 3-12 ตัวอย่างกองแถว 1 แถวของระบบกองแถว 26
ภาพที่ 3-13 ตัวอย่างกองแถว 1 แถวของระบบท่อแถว 27
ภาพที่ 3-14 ตัวอย่างระบบภาชนะปิดแบบแนวตั้ง (Vertical) 28
ภาพที่ 3-15 ตัวอย่างระบบภาชนะปิดแบบแนวนอน (Horizontal) 28
ภาพที่ 3-16 ตัวอย่างระบบภาชนะปิดแบบถังหมุน (Rotary Drum) 29
ภาพที่ 3-17 ปัญหาและแนวทางแก้ไขสำหรับช่วงออกซิเจนสะสมในปุ๋ยหมัก 31

ภาพที่ 4-1 ระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักในแต่ละหนึ่งชุดการทดลอง 80
ภาพที่ 4-2 ระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักในแต่ละหนึ่งการทดลอง 80

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4-3 ระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักขนาด 1.25 ลิตร 81
ภาพที่ 4-4 ตัวอย่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาการทำปุ๋ยหมัก 89
ภาพที่ 4-5 ตัวอย่างพีเอชที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาการทำปุ๋ยหมัก 89
ภาพที่ 4-6 แผนผังการดำเนินงานวิจัย 94

ภาพที่ 5-1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง A-1 99
ภาพที่ 5-2 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง A-2 100
ภาพที่ 5-3 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง A-3 100
ภาพที่ 5-4 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง A-4 101
ภาพที่ 5-5 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง A-5 101
ภาพที่ 5-6 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง B-1 102
ภาพที่ 5-7 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง B-2 102
ภาพที่ 5-8 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง B-3 103
ภาพที่ 5-9 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง B-4 103
ภาพที่ 5-10 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง B-5 104
ภาพที่ 5-11 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง C-1 104
ภาพที่ 5-12 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง C-2 105
ภาพที่ 5-13 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง C-3 105
ภาพที่ 5-14 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง C-4 106
ภาพที่ 5-15 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง C-5 106
ภาพที่ 5-16 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง D-1 107
ภาพที่ 5-17 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง D-2 107
ภาพที่ 5-18 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง D-3 108
ภาพที่ 5-19 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง D-4 108

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 5-20 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง D-5 109
ภาพที่ 5-21 พีเอชก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง 111
ภาพที่ 5-22 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชต่อเวลา 112
ภาพที่ 5-23 อุณหภูมิก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง 113
ภาพที่ 5-24 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลา 114
ภาพที่ 5-25 ความชื้นสะสมก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง 118
ภาพที่ 5-26 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสะสมต่อเวลา 119
ภาพที่ 5-27 สภาพการนำไฟฟ้าก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในชุดทุกการทดลอง 121
ภาพที่ 5-28 การเปลี่ยนแปลงของสภาพการนำไฟฟ้าต่อเวลา 122
ภาพที่ 5-29 อินทรียวัตถุก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง 124
ภาพที่ 5-30 คาร์บอนอินทรีย์ก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง 125
ภาพที่ 5-31 ไนโตรเจนทั้งหมดก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง 128
ภาพที่ 5-32 ฟอสฟอรัส (P_2O_5) ก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง 130
ภาพที่ 5-33 โพแทสเซียม (K_2O) ก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง 133
ภาพที่ 5-34 อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกการทดลอง 135
ภาพที่ 5-35 ค่าการสูญเสียน้ำหนักก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกการทดลอง 140
ภาพที่ 5-36 ค่าความพรุนก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกการทดลอง 143

ภาพที่ 7-1 แบบร่างระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักถังหมุนขนาด 50 ลิตร (มุมมองด้านหน้า) 164
ภาพที่ 7-2 แบบร่างระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักถังหมุนขนาด 50 ลิตร (มุมมองด้านข้าง) 165
ภาพที่ 7-3 แบบร่างระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักถังหมุนขนาด 50 ลิตร (มุมมองด้านบน) 166
ภาพที่ 7-4 แบบร่างระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักถังหมุนขนาด 50 ลิตร (มุมมองภายใน) 166

ภาพที่ ค-1 เครื่องวัดความเร็วลม รุ่น GM816 Anemometer 253

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ ค-2 การวัดความเร็วลม 253
ภาพที่ ค-3 เครื่องวัดพีเอช รุ่น Mettler Toledo 254
ภาพที่ ค-4 การวัดพีเอช 254
ภาพที่ ค-5 เทอร์โมมิเตอร์ดิจิตอล รุ่น TP300 255
ภาพที่ ค-6 การวัดอุณหภูมิ 255
ภาพที่ ค-7 เครื่องวัดความชื้นในดิน รุ่น DMM001 256
ภาพที่ ค-8 การวัดความชื้นสะสมสำหรับตัวแปรระหว่างการหมัก 256
ภาพที่ ค-9 การวัดความชื้นสะสมสำหรับตัวแปรก่อนและหลังหมัก (ก่อนอบ) 257
ภาพที่ ค-10 การวัดความชื้นสะสมสำหรับตัวแปรก่อนและหลังหมัก (หลังอบ) 257
ภาพที่ ค-11 เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า รุ่น ECM003 258
ภาพที่ ค-12 การวัดสภาพการนำไฟฟ้า 258
ภาพที่ ค-13 การวัด OM และ OC ด้วย Walkey and Black method (ก่อนไตเตรต) 259
ภาพที่ ค-14 การวัด OM และ OC ด้วย Walkey and Black method (ระหว่างไตเตรต) 259
ภาพที่ ค-15 การวัด OM และ OC ด้วย Walkey and Black method (หลังไตเตรต) 260
ภาพที่ ค-16 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง A และวัตถุดิบหมัก 261
ภาพที่ ค-17 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง A และวัตถุดิบหมัก (ต่อ) 262
ภาพที่ ค-18 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง B 263
ภาพที่ ค-19 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง B (ต่อ) 263
ภาพที่ ค-20 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง C 264
ภาพที่ ค-21 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง C (ต่อ) 264
ภาพที่ ค-22 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง D 265
ภาพที่ ค-23 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง D (ต่อ) 265
ภาพที่ ค-24 การวัดดัชนีการงอกของเมล็ด (ก่อนบ่ม) 266

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ ค-25 การวัดดัชนีการงอกของเมล็ด (หลังบ่ม)..... 266

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลแผนงาน โครงการย่อยและกิจกรรมของแผนงานที่ 5 ของแผนปฏิบัติการของเสียจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 6

ตารางที่ 3-2 ปริมาณเศษอาหารในโรงอาหาร 17 แห่ง สำรวจช่วงเดือนธันวาคม 2559 13

ตารางที่ 4-1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง 60

ตารางที่ 4-2 อัตราส่วนโดยลิตรน้ำหนักเปียกสำหรับงานวิจัย 62

ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบการทดลองทำปุ๋ยหมักที่สอดคล้องกับงานวิจัย 64

ตารางที่ 4-4 สัดส่วนองค์ประกอบเคมีทั่วไปของของวัตถุดิบสำหรับทำปุ๋ยหมักในการทดลอง 65

ตารางที่ 4-5 องค์ประกอบเคมีที่ไม่มีน้ำของวัตถุดิบ (กิโลกรัม) 66

ตารางที่ 4-6 องค์ประกอบเคมีที่มีน้ำของวัตถุดิบ (กิโลกรัม) 67

ตารางที่ 4-7 องค์ประกอบเคมีที่มีน้ำของวัตถุดิบ (โมล) 67

ตารางที่ 4-8 องค์ประกอบเคมีที่มีน้ำของวัตถุดิบ ที่อัตรา N = 1 68

ตารางที่ 4-9 ค่าองค์ประกอบเคมีของแต่ละการทดลองอัตราส่วนที่ 1 - 5 69

ตารางที่ 4-10 มวลของ CHON และ O_2 เพื่อการคำนวณหา O_2 ที่ใช้ไปกับกระบวนการทำปุ๋ยหมัก 70

ตารางที่ 4-11 ข้อมูลปริมาตรอากาศและอัตราอากาศสำหรับแต่ละอัตราส่วน 72

ตารางที่ 4-12 ค่า Bulking Density ของวัตถุดิบ 72

ตารางที่ 4-13 ค่าตัวแปรจากการคำนวณในทุกอัตราส่วน 75

ตารางที่ 4-14 ข้อมูลชุดการทดลองทำปุ๋ยหมัก 76

ตารางที่ 4-15 ตัวแปรและการวัดตัวแปร 81

ตารางที่ 4-16 รูปแบบข้อมูลตัวแปรของวัตถุดิบหมัก 86

ตารางที่ 4-17 รูปแบบข้อมูลตัวแปรของวัสดุหมักเริ่มต้น 86

ตารางที่ 4-18 รูปแบบข้อมูลตัวแปรของปุ๋ยหมักสุดท้าย 88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-19 รูปแบบข้อมูลตัวแปรเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นของปุ๋ยหมักสุดท้าย..... 90
ตารางที่ 4-20 เกณฑ์ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักกลุ่ม B ของสภาคุณภาพปุ๋ยหมักแคลิฟอร์เนียร์..... 92
ตารางที่ 4-21 รูปแบบข้อมูลตัวแปรตามเกณฑ์คุณภาพและค่าการสูญเสียน้ำหนักของปุ๋ยหมักสุดท้าย
..... 93

ตารางที่ 5-1 ข้อมูลตัวแปรเฉลี่ยของวัตถุดิบสำหรับการทำปุ๋ยหมัก..... 95
ตารางที่ 5-2 ข้อมูลตัวแปรเฉลี่ยของวัสดุหมักเริ่มต้น..... 96
ตารางที่ 5-3 ข้อมูลตัวแปรเฉลี่ยของปุ๋ยหมักสุดท้าย..... 97
ตารางที่ 5-4 ข้อมูลตัวแปรเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นของปุ๋ยหมักสุดท้าย..... 137
ตารางที่ 5-5 ข้อมูลตัวแปรตามเกณฑ์คุณภาพและค่าการสูญเสียน้ำหนักของปุ๋ยหมักสุดท้าย 152

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในวัตถุดิบหมัก 194
ตารางที่ ข-2 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในวัสดุหมักเริ่มต้นในชุดการทดลอง A..... 195
ตารางที่ ข-3 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในวัสดุหมักเริ่มต้นในชุดการทดลอง B..... 196
ตารางที่ ข-4 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในวัสดุหมักเริ่มต้นในชุดการทดลอง C..... 197
ตารางที่ ข-5 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในวัสดุหมักเริ่มต้นในชุดการทดลอง D..... 198
ตารางที่ ข-6 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A..... 199
ตารางที่ ข-7 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A..... 202
ตารางที่ ข-8 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A... 205
ตารางที่ ข-9 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A
..... 208
ตารางที่ ข-10 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B..... 211
ตารางที่ ข-11 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B 214
ตารางที่ ข-12 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B. 217

Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B 220
ตารางที่ ข-14 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C..... 223
ตารางที่ ข-15 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C..... 226
ตารางที่ ข-16 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C. 229
ตารางที่ ข-17 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C 232
ตารางที่ ข-18 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D..... 235
ตารางที่ ข-19 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C..... 238
ตารางที่ ข-20 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D. 241
ตารางที่ ข-21 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D 244
ตารางที่ ข-22 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยของปุ๋ยหมักสุดท้ายในชุดการทดลอง A..... 247
ตารางที่ ข-23 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยของปุ๋ยหมักสุดท้ายในชุดการทดลอง B..... 248
ตารางที่ ข-24 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยของปุ๋ยหมักสุดท้ายในชุดการทดลอง C..... 249
ตารางที่ ข-25 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยของปุ๋ยหมักสุดท้ายในชุดการทดลอง D..... 250

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย : การทำปุ๋ยหมักจากเศษใบจามจุรีกับเศษผักผลไม้ด้วยระบบภาชนะปิดขนาดเล็ก

ภาษาอังกฤษ : Composting of *Samanea saman (Jacquin) Merrill* Leave Waste with Vegetable-Fruit Waste by Small Scale In-vessel System

1.2 คำสำคัญ (Key Word)

เศษใบจามจุรี	(*Samanea saman (Jacquin) Merrill* Leave Waste)
เศษผักผลไม้	(Vegetable-Fruit Waste)
อัตราการเติมอากาศ	(Aeration Rate)
การทำปุ๋ยหมัก	(Composting)
ปุ๋ยหมัก	(Compost)

1.3 บทนำ

จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ มีปริมาณมูลฝอยประเทศไทยในช่วงปี 2559 มีปริมาณมูลฝอยชุมชน 27.04 ล้านตัน และในช่วงปี 2560 มีปริมาณมูลฝอยชุมชน 27.40 ล้านตัน ซึ่งมากกว่าประมาณร้อยละ 1.26 เมื่อเทียบกับปี 2559 คณะรักษาความสงบแห่งชาติ (คสช.) ได้กำหนดให้ขยะเป็นวาระแห่งชาติและเห็นชอบแผน roadmap การจัดการขยะมูลฝอยและของเสียอันตรายที่เสนอโดยกรมควบคุมมลพิษในวันที่ 26 สิงหาคม 2557 ซึ่งทางจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้จัดทำแผนปฏิบัติการ การจัดการขยะมูลฝอยและขยะอันตรายอย่างยั่งยืนในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (โครงการจุฬาฯ Zero Waste) เพื่อเป็นต้นแบบ การจัดการขยะและขยะอันตรายในพื้นที่เมือง แต่แผนปฏิบัติการก็ยังไม่บรรลุผลตามตัวชี้วัด หนึ่งในนั้นคือแผนงานที่ 5 ปรับปรุงและพัฒนารูปแบบการจัดการขยะอินทรีย์ โครงการเพิ่มการใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์และจัดทำเป็นแหล่งเรียนรู้ (สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม, 2560)

ทั้งนี้ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมีของเสียเกิดขึ้นในแต่ละวันที่ยังไม่สามารถหาทางจัดการได้ที่แหล่งกำเนิดเองอย่างเหมาะสมในปัจจุบันเนื่องจากปัญหาที่กล่าวไว้ข้างต้น ได้แก่ เศษผักผลไม้ที่เกิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากโรงอาหารในแต่ละวัน ใบจามจุรีและกิ่งไม้ที่เกิดขึ้นจากการร่วงโรยตามธรรมชาติและการตัดแต่งต้นไม้ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยโดยเฉพาะต้นจามจุรี ที่เป็นต้นไม้ประจำมหาวิทยาลัย

การบำบัดของเสียชีวมวลมีหลายวิธีการ อาทิ การทำแก๊สชีวภาพ การเผา การทำปุ๋ยหมัก โดยแต่ละวิธีการมีการทำที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งมีเป้าหมายเดียวกันคือลดของเสียที่เกิดขึ้นก่อนการทิ้ง ทั้งนี้ การเลือกใช้วิธีการใดขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง อาทิ องค์ประกอบของของเสีย ความรู้ความชำนาญของผู้ดำเนินการ งบประมาณ พื้นที่ ซึ่งรวมไปถึงข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธีการ เช่น การทำแก๊สชีวภาพสามารถผลิตแก๊สมีเทน (CH_4) ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายแต่มีข้อจำกัดเรื่องต้องการระบบขนาดใหญ่และระยะเวลาที่ยาวนานเพื่อให้ได้ซึ่งผลผลิตที่สามารถใช้งานได้ต่อเนื่อง การเผาสามารถลดมวลของเสียได้ในปริมาณมากแต่มีข้อจำกัดเรื่องราคาก่อสร้างและการดำเนินการ การทำปุ๋ยหมักสามารถผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อการเกษตรได้แต่มีข้อจำกัดเรื่องการพิจารณาอัตราส่วนของวัตถุดิบ (Rao และคณะ, 2017)

การทำปุ๋ยหมักเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการบำบัดของเสียชีวมวลต่างๆ อาทิ เศษอาหาร เศษพืช เศษผัก เศษผลไม้ ให้กลายเป็นปุ๋ยหมักที่มีแร่ธาตุและคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์แก่ดิน และยังลดของเสียชีวมวลที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ในด้านการลดค่าใช้จ่ายในด้านการจัดการของเสียชุมชน (Muntjeer และคณะ, 2009) โดยการทำปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศนั้นสามารถดำเนินการได้ง่ายกว่าการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศที่ต้องใช้ความรู้ความชำนาญในการคุมระบบมากกว่า และโดยเฉพาะแบบใช้อากาศระบบปิด ที่มีข้อดีเพิ่มเติมที่สามารถคุมระบบได้มากกว่าและเกิดการรบกวนน้อยกว่าแบบระบบเปิด (Mohapatra, 2013) อย่างไรก็ตาม การทำปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศระบบปิด (In-Vessel) สำหรับขนาดจริง (Full Scale) และขนาดนำร่อง (Pilot Scale) มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูงและขั้นตอนดำเนินการซับซ้อนกว่าการทำปุ๋ยหมักระบบกองแถว (Windrow) และท่อแถว (Static-piles) จึงต้องมีการทดลองทำปุ๋ยหมักขนาดห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการต่อยอดไปสู่ขนาดนำร่องหรือขนาดใช้งานจริงได้ เพื่อประสิทธิภาพในการจัดการบำบัดของเสีย

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองทำปุ๋ยหมักระบบภาชนะปิดแบบใช้อากาศขนาดห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ขนาด 1.25 ลิตร และขนาด 50 ลิตร ด้วยเศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกันและรอบเติมอากาศที่ต่างกัน และมีหัวเชื้อเป็นปุ๋ยหมักสมบูรณ์จากอาคารวิทยพัฒนา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ที่สุดจากการทดลองขนาด 1.25 ลิตรเพื่อใช้ทดลองในขนาด 50 ลิตร เพื่อหาอัตราส่วนของเสียที่เหมาะสมสำหรับการทำปุ๋ยหมักด้วยใช้ของเสียที่เกิดขึ้นภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคาดว่าสามารถใช้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดการของเสียได้ในอนาคตเพื่อการประยุกต์ใช้ติดตั้งระบบทำปุ๋ยหมักในแหล่งกำเนิดของเสีย (On-site) ได้อย่างยั่งยืน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2

วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของเสียและรอบการเติมอากาศที่แตกต่างกันที่ทำให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพมากที่สุด
2. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของการทำปุ๋ยหมักแบบเติมอากาศที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของเสียและรอบการเติมอากาศที่แตกต่างกัน

2.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ระบบเป็นแบบใช้อากาศ ขนาดห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) 2 ขนาด ได้แก่ ขนาด 1.25 ลิตร ซึ่งทั้ง 2 ขนาดเป็นแบบทีละเท (Batch)
2. ตัวแปรต้น คือ น้ำหนักเศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้
3. ตัวแปรควบคุม คือ น้ำหนักของวัสดุเริ่มต้นสำหรับขนาด 1.25 ลิตร เท่ากับ 0.5 กิโลกรัม น้ำหนักเปียกและน้ำหนักปุ๋ยหมักสมบูรณ์เท่ากับ 0.125 กิโลกรัมน้ำหนักเปียก น้ำหนักของวัสดุเริ่มต้นสำหรับขนาด 50 ลิตร เท่ากับ 20 กิโลกรัมน้ำหนักเปียกและน้ำหนักปุ๋ยหมักสมบูรณ์เท่ากับ 5 กิโลกรัมน้ำหนักเปียก ค่าพีเอช 5.5-8.0 อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศปกติ ความชื้นสะสมร้อยละ 50-60 ระยะเวลาการหมักภายใน 20 วัน อัตราอากาศที่ 0.75 ลิตรต่อนาที และต้องไม่พบพลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่น ๆ
4. ตัวแปรตามได้แก่ ค่าพีเอช อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) อินทรียวัตถุ (ร้อยละ) สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร) ความชื้นสะสม (ร้อยละ) คาร์บอนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก) ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก) ฟอสฟอรัส (P_2O_5) (ร้อยละของน้ำหนัก) โพแทสเซียม (K_2O) (ร้อยละของน้ำหนัก) อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (ร้อยละ) และค่าการสูญเสียน้ำหนักของปุ๋ยหมัก (ร้อยละ น้ำหนักเปียก)

2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ปุ๋ยหมักที่เป็นไปตามแนวทางของมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมักเกรด 1 ของกรมพัฒนาที่ดิน
2. เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่คาดว่าเป็นประโยชน์สำหรับการจัดการของเสียโดยเฉพาะเพื่อการประยุกต์ใช้ติดตั้งระบบบำบัดของเสียในแหล่งกำเนิดของเสีย (On-site)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การจัดการของเสียภายภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ใช้แผนปฏิบัติการของเสียจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการจัดการของเสีย เนื่องจากการจัดการของเสียภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมีความหลากหลายเพราะความหลากหลายของประเภทของของเสีย ซึ่งมีทั้งสิ้น 6 แผนงาน และแผนงานที่เป็นที่มาของงานวิจัยนี้คือแผนงานที่ 5 ซึ่งแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลแผนงาน โครงการย่อยและกิจกรรมของแผนงานที่ 5 ของแผนปฏิบัติการของเสียจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แผนงาน	โครงการย่อย	กิจกรรม
5. ปรับปรุงและพัฒนารูปแบบการจัดการขยะอินทรีย์ที่เหมาะสม	5.1 โครงการปรับปรุงระบบการเก็บรวบรวมขยะเศษอาหารเพื่อส่งเข้าระบบการผลิตแก๊สชีวภาพ (biogas) และให้เป็นแหล่งเรียนรู้	1. สำรวจ รวบรวมข้อมูลปัจจุบันของระบบผลิตแก๊สชีวภาพที่มีอยู่ทั้ง 4 แห่ง (สถานที่ตั้ง ปริมาณเศษอาหารที่รับได้และที่รับจริงในแต่ละวัน ปริมาณการผลิตต่อวัน ผลการดำเนินงานที่ผ่านมาและปัญหาอุปสรรคที่พบ) 2. แต่งตั้งคณะทำงานโดยจัดให้มีบุคลากรประจำดูแลระบบ 3. ปรับปรุงระบบการผลิตให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน 4. จัดอบรมคณะทำงานทั้งในส่วนทฤษฎีและปฏิบัติ 5. บริหารจัดการให้เกิดประโยชน์สูงสุด (รวบรวมเศษอาหารให้ได้มากพอและสามารถจัดสรรแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ให้ร้านค้าที่ต้องการ) 6. จัดทำเป็นแหล่งเรียนรู้ (พัฒนาองค์ความรู้และทักษะของเจ้าหน้าที่ที่ดูแลให้เป็นวิทยากรประจำแหล่งเรียนรู้)

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลแผนงาน โครงการย่อยและกิจกรรมของแผนงานที่ 5 ของแผนปฏิบัติการของเสีย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ต่อ)

แผนงาน	โครงการย่อย	กิจกรรม
	5.2 โครงการเพิ่มการใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์และจัดทำเป็นแหล่งเรียนรู้	1. สำรวจปริมาณขยะเศษอาหารที่นอกเหนือจากปริมาณที่รวบรวมเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 2. เลือกสถานที่และรูปแบบการจัดการขยะเศษอาหาร (ทดลองในพื้นที่จำกัด ได้แก่ โรงอาหาร สวน สำนักงาน จามจุรีสแควร์ I'm park และ CU Terrace) 3. พัฒนาโรงผลิตปุ๋ยหมักและ/หรือน้ำหมักและติดตั้งเครื่องผลิตไบโอดีเซล 4. แต่งตั้งคณะทำงานโดยจัดให้มีบุคลากรประจำดูแลโรงหมักปุ๋ยและเครื่องผลิตไบโอดีเซล 5. จัดอบรมคณะทำงานทั้งในส่วนทฤษฎีและปฏิบัติ 6. จัดทำเป็นแหล่งเรียนรู้

ที่มา: (สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม, 2560)

การผลิตแก๊สชีวภาพขนาดนำร่องและขนาดจริงนั้นต้องใช้งบประมาณสูง เนื่องจากต้องคำนึงถึงการก่อสร้าง ปรับปรุงและซ่อมแซมระบบ แม้ว่าทางมหาวิทยาลัยจะมีเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพ 4 เครื่องตามแหล่งกำเนิดของเสียในพื้นที่ของมหาวิทยาลัย ได้แก่ โรงอาหารอาคารมหิตลาธิเบศ โรงอาหารจุลจักรพงษ์ โรงอาหารหอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและตลาดสามย่าน แต่ไม่สามารถใช้งานได้ในปัจจุบันเนื่องจากชำรุดและไม่มีผู้รับช่วงดำเนินการต่อ (สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม, 2560)

โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการย่อยที่ 5.1 ของแผนงานที่ 5 2 งานวิจัย ดังนี้

อรวรรณ วัฒนยมนาพร (2553) ได้ศึกษาการหมักร่วมของเศษอาหารกับตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบ 2 ขั้นตอนสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพ ประกอบด้วยถังหมักกรด และถังหมักแก๊ส โดยแบ่ง การทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของเศษอาหารกับตะกอนน้ำเสียชุมชนในระดับห้องปฏิบัติการ ที่อัตราส่วนระหว่างเศษอาหารกับตะกอนน้ำ

เสียชุมชน เท่ากับ 1:1 3:1 5:1 7:1 และขยะเศษอาหารเพียงอย่างเดียว เป็นเวลา 45 วัน และการศึกษาผลของระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ในภาคสนาม ด้วยการนำอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองระดับห้องปฏิบัติการมาทดลองในเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่ 16 19 และ 24 วัน เป็นเวลา 110 วัน

การทดลอง	อัตราส่วน (โดยปริมาตร)	
	เศษอาหาร	ตะกอนน้ำเสียชุมชน
1	1	1
2	3	1
3	5	1
4	7	1
5	เพียงอย่างเดียว (1)	0

พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 87.99-90.37 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 68.87-74.83 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 70.09-77.89 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 71.27-81.96 โดยที่อัตราส่วน 7:1 มีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 90.37 ปริมาณแก๊สชีวภาพทั้งหมดเท่ากับ 1,504 มิลลิลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH_4) ร้อยละ 60.4 ส่วนผลการทดลองในขนาดภาคสนามโดยใช้อัตราส่วนของขยะเศษอาหารกับตะกอนน้ำเสียชุมชน 7:1 ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 16 19 และ 24 วัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 85.42-88.67 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 68.03-73.11 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 71.03-73.68 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 69.52-71.94 โดยที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 24 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 88.67 ปริมาณแก๊สชีวภาพทั้งหมดเท่ากับ 1,029.17 ลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH_4) ร้อยละ 64.3 ส่วนที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 16 วัน มีประสิทธิภาพกำจัด COD ร้อยละ 87.40 แต่มีปริมาณแก๊สชีวภาพทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 1,704.59 ลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH_4) ร้อยละ 48.4

Ratanatamskul และ Manpetch (2016) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศโดยเปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศต้นแบบที่พัฒนาแล้ว 2 ระบบ คือ ระบบ 1 ระยะ (single stage) ขนาด 2500 ลิตร ดำเนินแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous) คุมอุณหภูมิระบบไว้ที่ 35 ± 2 องศาเซลเซียส และระบบ 2 ระยะ (two-stage) แบ่งเป็นถังกรดขนาด 1000 ลิตรและถังแก๊สมีเทน (CH_4) ขนาด 2500 ลิตร โดยทั้ง 2 ระบบใช้เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 30 วันและเติมวัสดุหมักแบบทีละเท 1 ครั้งต่อ 2 วัน ที่ 20 กิโลกรัมน้ำหนักเปียก โดยวัสดุหมักมาจากวัตุดิบเป็นของเสียภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้แก่ เศษอาหารจากโรงอาหารและเศษใบจามจุรีที่เป็นของเสียสีเขียวภายในมหาวิทยาลัย ระยะเวลาการหมักเท่ากับ 112 วัน

ชุดการทดลอง	การทดลอง	อัตราส่วน (โดยร้อยละน้ำหนักเปียก)	
		เศษอาหาร	เศษใบจามจุรี
ระบบ 1 ระยะ	1	85	15
	2	90	10
	3	95	5
	4	100	0
ระบบ 2 ระยะ	1	85	15
	2	90	10
	3	95	5
	4	100	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พบว่า โดยรวมระบบ 2 ระยะมีประสิทธิภาพโดยรวมมากกว่าระบบ 1 ระยะ โดยมีค่าการลดคาร์บอนอินทรีย์และของแข็งระเหยง่ายประมาณร้อยละ 82-85.9 มีค่าการลด COD อยู่ที่ร้อยละ 79.67-85.25 สามารถผลิตแก๊สชีวภาพเท่ากับ 0.195 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม COD ที่ถูกกำจัด หรือ 15.36 ลูกบาศก์เมตรต่อวันสำหรับรอบการเติมวัสดุทีละเท 20 กิโลกรัม โดยที่อัตราส่วนเศษอาหารกับเศษใบจามจุรี เท่ากับร้อยละ 100:0 ทำให้เกิดแก๊สชีวภาพปริมาณและมีสัดส่วนแก๊สมีเทน (CH_4) มากที่สุดในทั้ง 2 ระบบ โดยระบบ 1 ระยะ เท่ากับ 0.834 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของเสียอินทรีย์ต่อวัน และสัดส่วนแก๊สมีเทน (CH_4) เท่ากับร้อยละ 66.59 ± 4.16 สำหรับระบบ 2 ระยะ เท่ากับ 0.41 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของเสียอินทรีย์ต่อวันและสัดส่วนแก๊สมีเทน (CH_4) เท่ากับร้อยละ 66.49 ± 4.07 ซึ่งในระบบ 2 ระยะในอัตราส่วนเศษอาหารกับเศษใบจามจุรีเท่ากับร้อยละ 95:5

นั้นมีความเหมาะสมที่สุด โดยมีค่าการลด COD อยู่ที่ร้อยละ 85.74 ผลิตแก๊สชีวภาพได้ 3.194 ± 0.189 ลูกบาศก์เมตรสุทธิต่อวัน และมีสัดส่วนแก๊สมีเทน (CH_4) เท่ากับร้อยละ 61.03 ± 1.98 ซึ่งมีความเป็นไปได้สำหรับการติดตั้งและเดินระบบในสถานที่เดียวกันกับแหล่งกำเนิดของเสีย (On-site) สำหรับการประยุกต์ใช้ในอาคารสูงเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกจากของเสียอินทรีย์

ซึ่งทั้ง 2 งานวิจัยนี้บ่งชี้ว่าการทำแก๊สชีวภาพในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยไม่สามารถต่อยอดและลดของเสียในมหาวิทยาลัยได้อย่างทั่วถึง เพราะการดำเนินการมีความซับซ้อน ใช้ระยะเวลาประมาณ 110 วันถึงจะเริ่มเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเศษใบจามจุรีนั้นอาจมีความเหมาะสมต่อการทำปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศ เพราะการทำแก๊สชีวภาพเป็นการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีกลุ่มจุลินทรีย์ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนการทำปุ๋ยหมักนั้นไม่ต้องคำนึงถึงความอ่อนไหวของกลุ่มจุลินทรีย์เท่ากับกลุ่มจุลินทรีย์ของการทำแก๊สชีวภาพ (Rao และคณะ, 2017)

จากความเห็นและข้อมูลที่ได้ศึกษาเพิ่มเติมจากสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สรุปว่า การจัดการของเสียเพื่อใช้การผลิตแก๊สชีวภาพนั้นเป็นการจัดการที่ไม่เหมาะสม ดังนี้

- ระบบมีความซับซ้อน: เนื่องจากเป็นการหมักแบบไร้อากาศที่ทำให้ต้องใช้ผู้ชำนาญระบบมาดำเนินการ เพราะถ้าไม่เหมาะสม ระบบจะต้องใช้เวลานานกว่าจะเริ่มเดินระบบใหม่ได้
- ไม่มีผู้ดำเนินการต่อ: สำหรับโรงอาหารมหิตลาธิเบศและจุลจักรพงศ์นั้น ในช่วงเริ่มต้นมีนิสิตบัณฑิตศึกษาเป็นผู้ดูแล แต่เมื่อจบการศึกษาแล้ว ไม่สามารถหาผู้ดูแลระบบต่อเนื่องได้ จึงจำเป็นต้องงดการเดินระบบลง
- การปรับปรุงซ่อมแซมไม่แล้วเสร็จ: ตั้งแต่ปีงบประมาณ 2560 นั้น มีหลายระบบ เช่น ที่หอพักนิสิตจุฬาฯ ยังอยู่ในขั้นตอนการปรับปรุง จึงยังกลับมาใช้งานไม่ได้

ในกรณีที่ผู้ทำวิจัยเลือกทำวิจัยจากการทดลองการทำปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศประเภทภาชนะปิดในระบบขนาดเล็กนั้น เนื่องจากมีข้อดีเมื่อเทียบกับการผลิตแก๊สชีวภาพ ดังนี้

- คุมระบบง่าย : เนื่องจากมีขนาดเล็กและควบคุมการเดินระบบได้มากกว่าประเภทกองแถวและประเภทท่อแถว ทำให้มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานจริงในแต่ละสถานที่ได้มากกว่าขนาดใหญ่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- หาคนรับช่วงต่อง่าย : เมื่อเทียบกับการผลิตแก๊สชีวภาพแล้ว ไม่จำเป็นถึงต้องหาผู้ชำนาญเฉพาะทางมาควบคุมระบบ
- ลดค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสีย : หากเป็นระบบขนาดใหญ่ จะต้องใช้ค่าขนส่งและค่ากักเก็บของเสียที่จะป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งของเสียดังกล่าวนี้เป็นของเสียที่เน่าเสียเร็วใกล้แหล่งกำเนิด จะสามารถประหยัดได้ทั้งค่าใช้จ่ายในเรื่องการขนส่งและการกักเก็บของเสีย (Muntjeer และคณะ, 2009)

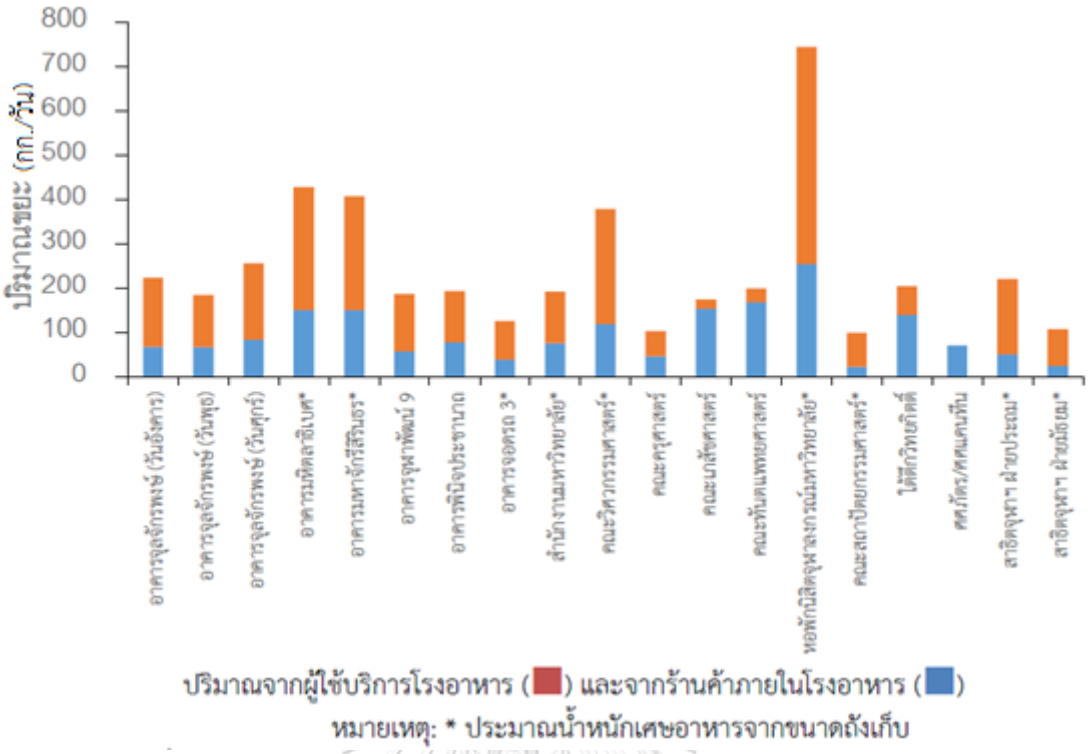
3.2 ของเสียที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.2.1 เศษผักผลไม้

เศษผักผลไม้ในที่นี้ หมายถึง ชิ้นส่วนจากผักและผลไม้ที่ไม่เป็นที่ต้องการหลังจากการเตรียมอาหารภายในโรงอาหารของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเศษอาหารในที่นี้หมายถึง อาหารจากการรับประทานที่ไม่เป็นที่ต้องการหลังการใช้บริการโรงอาหารของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทั้งนี้ ข้อมูลปริมาณของเสียเศษอาหารในภาพที่ 3-1 จะอยู่ในรูปรวมกันระหว่างเศษผักผลไม้และเศษอาหาร ไม่มีความแม่นยำของข้อมูลปริมาณเศษผักผลไม้กับเศษอาหารว่ามีปริมาณเท่าใดแยกกันอย่างชัดเจน แต่สามารถบ่งชี้ให้เห็นถึงปัญหาเรื่องของเศษอาหารที่มีโอกาสเป็นจุดเสี่ยงมลพิษจากขยะภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยปริมาณขยะเศษอาหารจากโรงอาหารตามสถานที่ทั้งหมด 17 แห่งนี้ ได้จากการเก็บข้อมูลในเดือนธันวาคม 2559 (ช่วงเปิดเทอม) อยู่ที่ประมาณ 4,079 กิโลกรัมต่อวัน หรือ 816 ตันต่อปี (ประมาณด้วย 200 วันทำการ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3-1 ปริมาณเศษอาหารในโรงอาหาร 17 แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำรวจช่วงเดือนธันวาคม 2559

(สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม, 2560)

จากภาพที่ 3-1 พบว่ามีอยู่ 4 จุดที่มีโอกาสเป็นจุดเสี่ยงเพราะมีปริมาณเศษอาหารที่เทียบกับจุดอื่นที่เหลือแล้วมีปริมาณมากกว่าอย่างชัดเจน โดยเรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ หอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (700 กิโลกรัมต่อวัน) อาคารมหิตลาธิเบศ (400 กิโลกรัมต่อวัน) อาคารมหาจักรีสิรินธร (390 กิโลกรัมต่อวัน) และคณะวิศวกรรมศาสตร์ (350 กิโลกรัมต่อวัน) หากไม่มีการจัดการอย่างเหมาะสม ก็จะเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษจากขยะได้ในภายภาคหน้า โดยแสดงข้อมูลปริมาณเศษอาหารในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ปริมาณเศษอาหารในโรงอาหาร 17 แห่ง สำรวจช่วงเดือนธันวาคม 2559

ตำแหน่งโรงอาหาร	เศษอาหาร (กิโลกรัมต่อวัน)		
	จากในโรงอาหาร	จากร้านค้าภายในโรงอาหาร	รวม
อาคารจุลจักรพงษ์*	142	65	207
อาคารมหิตลาธิเบศ	250	150	400
อาคารมหาจักรีสิรินธร	240	150	390
อาคารจุฬาพัฒน์ 9	125	50	175
อาคารพินิจประชานาถ	100	75	175
อาคารจอดรถ 3	75	25	100
สำนักงานมหาวิทยาลัย	100	75	175
คณะวิศวกรรมศาสตร์	250	100	350
คณะครุศาสตร์	40	40	80
คณะเภสัชศาสตร์	10	150	160
คณะทันตแพทย์ศาสตร์	20	160	180
หอพักนิสิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	550	150	700
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์	60	20	80
ใต้ตึกวิทยกิตติ์	50	125	175
ศศภัตร/ศศแคนทีน	0	50	50
สาธิตจุฬาฯ ฝ่ายประถม	150	25	175
สาธิตจุฬาฯ ฝ่ายมัธยม	50	25	75

* หมายเหตุ: คิดรวมเฉลี่ย 3 วัน วันอังคาร วันพุธและวันศุกร์

ที่มา: (สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม, 2560)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.2 เศษใบจามจุรี

เศษใบจามจุรีในที่นี้ หมายถึง ใบจามจุรีที่ได้จากการตัดแต่งต้นจามจุรีและ/หรือร่วงหล่นจากต้นจามจุรีลงพื้นตามธรรมชาติ โดย จามจุรี (Raintree) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Samanea saman (Jacquin) Merrill* (องค์การสวนพฤกษศาสตร์, 2554)

จามจุรีเป็นพันธุ์ไม้พื้นเมืองของประเทศในทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งมีการนำเข้ามาปลูกทั่วประเทศในเขตร้อนชื้นและไทย ซึ่งในไทยถูกปลูกในฐานะไม้ประดับ กระจายพันธุ์ได้เองตามริมน้ำและที่ราบลุ่มทั่วประเทศไทย โดยจามจุรีถูกนำมาปลูกในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยตั้งแต่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยถูกก่อตั้งขึ้น

ซึ่งจามจุรีมีส่วนประกอบ ดังนี้

1) ใบ มีลักษณะเป็นแบบขนนก 2 ชั้นเรียงสลับ ใบประกอบย่อยชั้นที่ 1 มี 2-5 คู่เรียงตรงข้ามกัน ใบย่อยชั้นที่ 2 มีใบเป็นรูปไข่ถึงรูปรี ขอบใบเรียบและหลังใบเกลี้ยง โดยมีความไวต่อแสงสูง คือ จะเปิดใบเมื่อมีแสงและจะปิดใบเมื่อไม่มีแสง (ภาพที่ 3-2)

ภาพที่ 3-2 ใบจามจุรี
(องค์การสวนพฤกษศาสตร์, 2554)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) ดอก มีลักษณะเป็นช่อกระจุกแน่น ออกตามใบที่ปลายของกิ่ง กลีบดอกเป็นหลอดปลายแยก 5 แฉก ที่โคนดอกสีขาว ปลายดอกสีชมพู (ภาพที่ 3-3)

ภาพที่ 3-3 ดอกจามจุรี
(องค์การสวนพฤกษศาสตร์, 2554)

3) ผล มีลักษณะเป็นฝักแบนยาว โดยฝักอ่อนสีเขียว เมื่อแก่แล้วจะมีสีน้ำตาล เนื้อในนิ่ม สีดำ รสหวาน เมล็ดสีน้ำตาลเข้มจำนวนประมาณ 15-25 เมล็ด (ภาพที่ 3-4)

ภาพที่ 3-4 ผลหรือฝักจามจุรี
(องค์การสวนพฤกษศาสตร์, 2554)

4) กิ่งและต้น ต้นมีลักษณะเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางถึงใหญ่ สูงประมาณ 10-20 เมตร เปลือกนอกเป็นเกล็ดแข็งขรุขระเรียงแตกเป็นร่องยาวสีน้ำตาลดำ เปลือกในสีน้ำตาลอ่อนหรือชมพู กิ่งแตกสาขาเป็นทรงพุ่มครึ่งวงกลม อาจกว้างได้ถึง 30 เมตร เป็นไม้ผลัดใบ ทั้งนี้ เนื้อไม้ถูกนำมาใช้ทำเครื่องเรือน แกะสลัก ส่วนต้นใช้เลี้ยงครั่งไม้ (ภาพที่ 3-5)

ภาพที่ 3-5 ต้นจามจุรี
(องค์การสวนพฤกษศาสตร์, 2554)

3.2.3 สถานการณ์การจัดการของเสียภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4.1 การทำปุ๋ยหมัก

เจ้าหน้าที่สำนักระบบกายภาพ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (เจ้าหน้าที่สำนักระบบกายภาพ, 2561) ให้การสัมภาษณ์ว่า จามจุรีเป็นไม้ผลัดใบ ทำให้เกิดใบร่วงหล่นและยังมีผลและกิ่งที่ร่วงหล่นลงมาด้วย ทั้งนี้ จามจุรียังถูกตัดแต่งโดยพนักงานของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเพื่อให้เกิดทัศนียภาพที่สวยงามทั้งในยามปกติและยามเทศกาล ทำให้เกิดปริมาณของเสียจากจามจุรีที่เป็นทั้งใบ (ส่วนใหญ่จะเป็นใบจามจุรีแห้ง) กิ่งและผลมากกว่าการร่วงตามธรรมชาติ โดยมีปริมาณของของเสียดังกล่าวโดยเฉพาะใบและกิ่ง ประมาณ 70-80 กิโลกรัมต่อวัน

ซึ่งก่อนที่จะมีการจัดการของเสียด้วยการทำปุ๋ยหมัก ทางจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้จัดการของเสียจากจามจุรีในส่วนของใบด้วยการส่งใบจามจุรีและกิ่งไม้ไปโรงหมักปุ๋ยอินทรีย์อ่อนนุช (ตั้งอยู่แขวงประเวศ เขตประเวศ กรุงเทพมหานคร) ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการดังกล่าวประมาณ 1500 บาทต่อเดือน ในขณะที่การจัดการทำปุ๋ยหมักของอาคารวิทยพัฒนา นั้นสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดการได้ต่ำกว่า 1500 บาทต่อเดือน และได้ปุ๋ย

หมักมาใช้งานภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทางจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยยังได้จัดการของเสียด้วยการทำน้ำหมักชีวภาพจากของเสียชีวมวล

การทำปุ๋ยหมักของอาคารวิทยพัฒนา เป็นการทำปุ๋ยหมักแบบท่อแถว (Static Pile) และถังโอ่งพลาสติกสีน้ำเงินขนาด 200 ลิตร ซึ่งสำหรับแบบท่อแถวจะทำด้วยของเสียต่างๆ และวัตถุดิบที่ได้จากภายในและภายนอกจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้แก่ ใบจามจุรี กิ่งไม้ เศษอาหาร เศษผักผลไม้ แก้วพลาสติกชีวภาพของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กากน้ำตาล กากกาแฟ มะพร้าวสับและดินร่วน ซึ่งแบ่งเป็น 4 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะไม่จำกัดความกว้างของกอง แต่จะแบ่งความยาวกองเป็นเมตรต่อเมตร เช่น 14 เมตร เป็นต้น แล้วจึงเริ่มทำปุ๋ยหมัก โดยจะรดน้ำเพื่อควบคุมความชื้นแบบวันเว้นวัน (รดน้ำ 30 นาที) และพลิกกองในวันเดียวกัน คุมกลิ่นด้วยน้ำหมักชีวภาพจากเปลือกส้ม ซึ่งใช้เวลาประมาณ 90 วัน จึงจะได้ปุ๋ยหมักสมบูรณ์

ส่วนสำหรับถังหมักนั้นจะเจาะรูไว้เปิดปิดได้และระบายอากาศไว้ฝั่งตรงข้าม ใช้เศษกิ่งไม้ไว้ชั้นล่างและชั้นบนเพื่อการระบายอากาศและกดทับชั้นกลาง ซึ่งชั้นกลางจะเป็นเศษอาหารและเศษผักผลไม้ผสมคลุกเคล้ารวมกัน โดยใช้เวลาประมาณ 90 วันจึงได้ปุ๋ยหมักสมบูรณ์เช่นกัน ซึ่งปุ๋ยหมักจากทั้ง 2 แบบและหลายสูตรที่ต่างกัน เมื่อนำไปใช้ปลูกต้นไม้แล้วพบว่ามีประสิทธิภาพไม่ต่างกันมาก

โดยการทำปุ๋ยหมักแบบท่อแถวและถังหมักนั้น ได้แสดงไว้ในภาพที่ 3-6 และภาพที่ 3-7 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 3-6 กองปุ๋ยหมักแบบท่อแถว (Static Pile) ณ อาคารวิทยพัฒนา

ภาพที่ 3-7 ถังทำปุ๋ยหมัก ณ อาคารวิทยพัฒนา

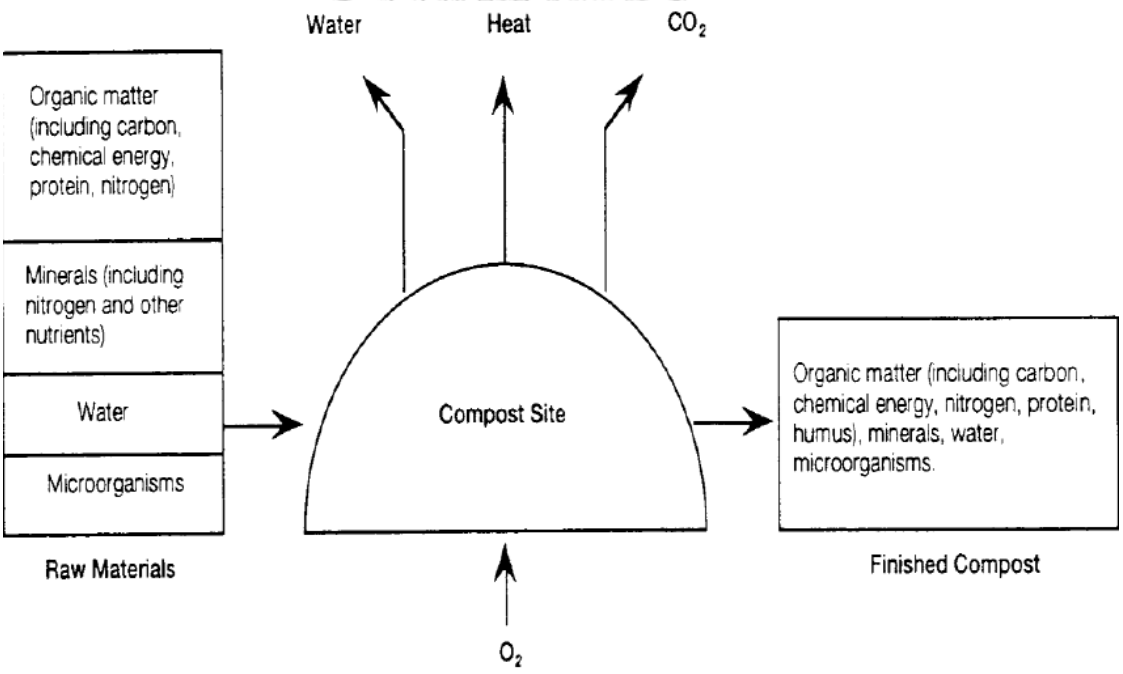
3.2.4.2 เศษอาหารและเศษผักผลไม้ในโรงอาหาร

คณะผู้ประกอบการร้านค้าโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (คณะผู้ประกอบการร้านค้าโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์, 2561) ให้การสัมภาษณ์ว่า เศษอาหารที่เกิดขึ้นในโรงอาหารดังกล่าวมีผู้มารับซื้อไปเป็นอาหารเลี้ยงสุกรและมีถังแยกใส่เศษอาหารโดยเฉพาะ ส่วนเศษผักผลไม้ที่เกิดขึ้นมีประมาณไม่เกิน 10 กิโลกรัมต่อวัน (ช่วงเปิดเทอม) แม้ว่าแต่ละผู้ประกอบการได้คัดแยกประเภทขยะแล้วก็ตาม แต่ทางจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยไม่มีระบบถังแยกโดยเฉพาะให้ จึงได้ทิ้งรวมในถังรวมกับขยะอื่นๆ ทั้งที่สามารถรีไซเคิลและไม่สามารถรีไซเคิลได้ เช่น ถุงพลาสติก ขวดพลาสติก หลอดพลาสติก เป็นต้น โดยทางทางกรุงเทพมหานครเป็นผู้ดำเนินการ ทำให้เกิดปัญหาขยะตกค้างเน่าเหม็นและเป็นแหล่งพาหะนำโรค โดยเฉพาะหนู ซึ่งเป็นผลเสียต่อทั้งผู้ประกอบการร้านค้าและทางจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทั้งนี้ ทางคณะผู้ให้การสัมภาษณ์ได้ให้ความเห็นว่าโรงอาหารแห่งอื่นในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยก็มีการจัดการและประสบปัญหาที่คล้ายคลึงกัน โดยในปัจจุบัน ปัญหานี้ยังไม่ได้รับการแก้ไขอย่างจริงจัง

3.3 การทำปุ๋ยหมัก (Composting)

เป็นกระบวนการที่ควบคุมการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์กับสารชีวมวลต่างๆ อย่างเช่น เศษอาหาร เศษใบไม้ เศษผักผลไม้และมูลสัตว์ ให้แปรสภาพเป็นวัตถุที่คล้ายกับฮิวมัสและสภาพคงที่ ที่ซึ่งเรียกว่า ปุ๋ยหมัก (Compost) หรือ สารปรับปรุงดิน (Soil Amendment) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบใช้อากาศ มีหลักการคล้ายกับการย่อยสลายทางธรรมชาติแต่เพิ่มประสิทธิภาพด้วยการกวนผสมสารชีวมวลและวัตถุดิบอื่นๆเพื่อเพิ่มการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อย่างเหมาะสมที่สุด ผลประโยชน์จากการทำปุ๋ยหมักด้วยของเสียชีวมวลนั้นสามารถใช้ประโยชน์จากมูลสัตว์ ลดกลิ่น ลดแมลงพาหะนำโรคและลดเมล็ดวัชพืชและเชื้อโรค ซึ่งปุ๋ยหมักนี้สามารถนำไปเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเพาะปลูกพืชและความอุ้มน้ำของดิน อีกทั้งยังปราศจากกลิ่นและเก็บไว้ได้นาน และหากมีคุณภาพดี จะสามารถนำไปใช้ได้ทั้งทางการค้าและการเกษตร (United States Department of Agriculture, 2000) ซึ่งได้แสดงกลไกการทำปุ๋ยหมักในภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 กลไกการแปรสภาพชีวมวลเป็นปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศ
(National Programme on Technology Enhanced Learning, 2012)

3.3.1 จุลินทรีย์ (Microorganism)

3.3.1.1 แบคทีเรีย (Bacteria)

เป็นจุลินทรีย์กลุ่มหลักในช่วงระยะแรกของการทำปุ๋ยหมัก ซึ่งมีบทบาทมากในการย่อยสลายเริ่มต้นจนถึงระยะสุดท้าย (ระยะเย็นตัวหรือ Cooling Phase) และมีจำนวนมากในระบบทำปุ๋ยหมัก แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วและแปรสภาพธาตุอาหารให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถใช้ได้ เช่น น้ำตาลโมเลกุลไม่ซับซ้อน เป็นต้น แบคทีเรียบางชนิดสามารถย่อยเซลลูโลสได้ โดยแบคทีเรียจะทำงานได้ดีที่สุดที่ช่วงพีเอช 6.00-8.00 และมีความสามารถในการทนความชื้นต่ำได้ต่ำกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ แบคทีเรียบางชนิดสามารถทนสภาวะแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการดำรงชีพได้ เช่น ทนอุณหภูมิสูง ทนความชื้นต่ำ เป็นต้น และเมื่อพบกับสภาวะแวดล้อมที่เอื้ออำนวยต่อการดำรงชีพแล้ว แบคทีเรียก็จะกลับมาทำงานอีกครั้ง (United States Department of Agriculture, 2000)

3.3.1.2 ฟังไจ (Fungi)

ฟังไจหรือเชื้อรา เป็นจุลินทรีย์ที่มีรวมกลุ่มและแปรสภาพเป็นเส้นใย ซึ่งจะปรากฏในช่วงท้ายของการย่อยสลาย ซึ่งฟังไจส่วนใหญ่นั้นจะย่อยสลายวัตถุดิบที่เป็นไม้และวัตถุดิบชนิดอื่นที่ทนทานต่อการถูกย่อยสลาย เช่น ขี้ผึ้ง ลิกนิน เพคติน เป็นต้น โดยฟังไจมีความทนทานต่อความชื้นต่ำและพีเอชต่ำได้สูงกว่าแบคทีเรีย แต่เนื่องจากฟังไจส่วนใหญ่เป็นพวกต้องการใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโต จึงมีความทนทานต่อสภาวะออกซิเจนต่ำได้ต่ำ ซึ่งฟังไจไม่สามารถอยู่รอดได้ที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไปได้และในขณะที่อุณหภูมิสูงนั้นเป็นที่จำเป็นสำหรับการทำลายเชื้อโรคในการทำปุ๋ยหมัก จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมเพื่อประโยชน์ในการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ (United States Department of Agriculture, 2000)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3.1.3 แอคติโนไมซิสต์ (Actinomycetes)

เป็นแบคทีเรียจำพวกหนึ่งเนื่องจากโครงสร้างและขนาด แต่ก็มีความคล้ายคลึงกับฟังไจเนื่องจากเป็นเส้นใยและสามารถย่อยสลายวัตถุดิบที่ประเภทเดียวกันกับที่ฟังไจย่อยสลายได้ ซึ่งแอคติโนไมซิสต์สามารถย่อยสลายน้ำตาล แป้ง เซลลูโลส โปรตีน กรดอะมิโนและ

ลิกนิน ทั้งนี้ แอคติโนไมซิสต์จะเป็นชนิดเด่นในช่วงท้ายของการทำปุ๋ยหมักเมื่อสารที่ย่อยสลายง่ายถูกย่อยสลายจนหมดแล้ว ความชื้นลดลงและค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกรดลดลง (United States Department of Agriculture, 2000)

3.3.2 ประเภทกลไกการแปรสภาพเป็นปุ๋ยหมัก

เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะที่เหมาะสมให้กลายเป็นสารอนินทรีย์ที่มีแร่ธาตุและสภาพที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงดิน โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบหลัก ดังนี้

3.3.2.1 แบบใช้อากาศ (Aerobic)

เป็นแบบที่ใช้ออกซิเจนในอากาศและจุลินทรีย์ประเภทใช้อากาศเป็นองค์ประกอบของการย่อยสลาย โดยมีสูตรเคมีทั่วไปดังนี้ (United States Department of Agriculture, 2000)

สารอินทรีย์ + O_2 + จุลินทรีย์ --> จุลินทรีย์ + สารที่ไม่ย่อยสลาย (ปุ๋ยหมัก) + CO_2 + H_2O + NH_3 + ความร้อน (3.1)

3.3.2.2 แบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic)

เป็นแบบที่ไม่ใช้ออกซิเจนในอากาศและจุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้อากาศเป็นองค์ประกอบของการย่อยสลาย โดยมีสูตรเคมีทั่วไปดังนี้ (National Programme on Technology Enhanced Learning, 2012)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารอินทรีย์ + จุลินทรีย์ --> จุลินทรีย์ + สารที่ไม่ย่อยสลาย (ปุ๋ยหมัก) + CO_2 + CH_4 + NH_3 + H_2O + ความร้อน (3.2)

ซึ่งมี 4 ขั้นตอนหลักดังนี้

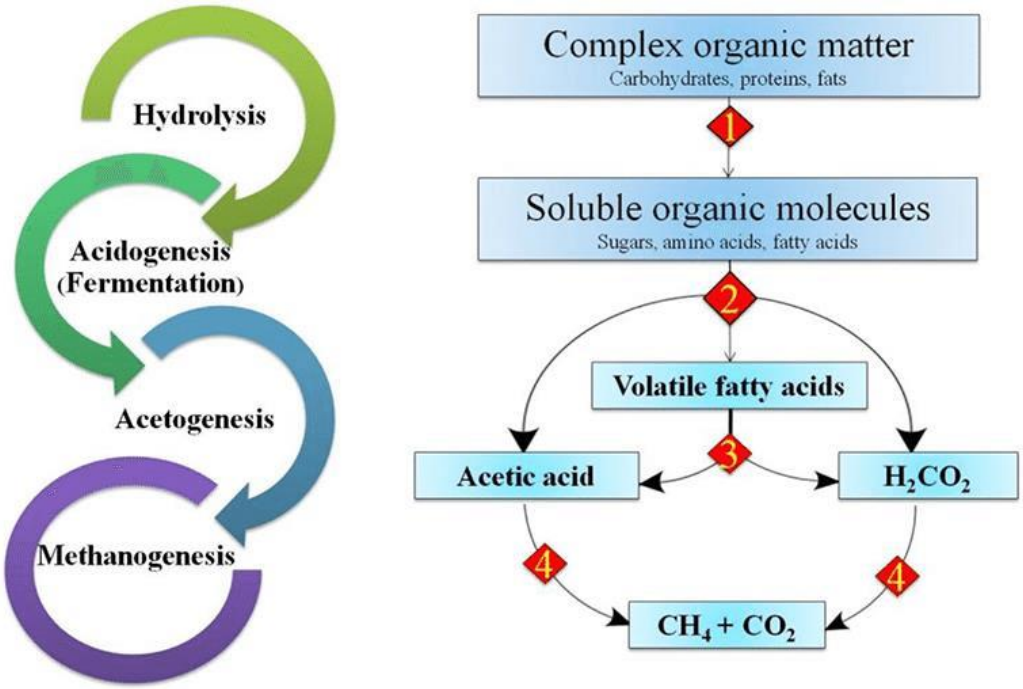
1) การย่อยสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) เป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนสารโมเลกุลโครงสร้างซับซ้อนอย่างพวก โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ให้กลายเป็นสารโมเลกุลซับซ้อนน้อยลงอย่างพวกน้ำตาล กรดอะมิโนและกรดไขมัน

2) การหมัก (Fermentation) หรือ อะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) เป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนสารโมเลกุลซับซ้อนน้อยลงอย่างพวก น้ำตาล กรดอะมิโนและกรดไขมัน ให้กลายเป็นกรดอะซีติก กรดไขมันระเหยง่าย แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

3) อะซีโตเจเนซิส (Acetogenesis) เป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่าย ให้กลายเป็นกรดอะซีติก แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

4) เมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) เป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนกรดอะซีติก และ H_2 ให้กลายเป็นแก๊สมีทน (CH_4) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

ซึ่งได้แสดงกระบวนการการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศไว้ในภาพที่ 3-9

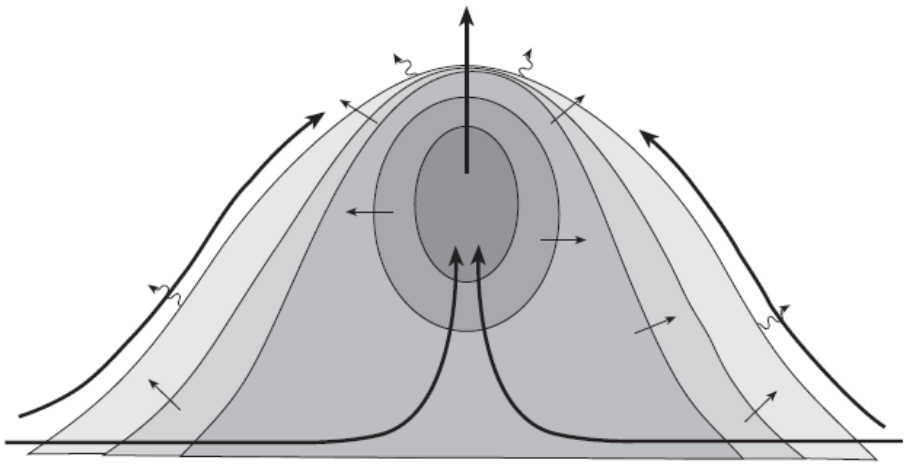


ภาพที่ 3-9 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ
(Dussadee และคณะ, 2016)

แบบไม่ใช้อากาศจะใช้เวลาในการแปรสภาพสารให้กลายเป็นปุ๋ยหมักได้ช้ากว่าแบบไม่ใช้อากาศ มีความยากในการดำเนินระบบมากกว่า แต่ใช้งบประมาณน้อยกว่า

3.3.3 กลไกการสูญเสียความร้อนภายในการทำปุ๋ยหมัก

ความร้อนเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระหว่างการหมัก ซึ่งสมดุลความร้อนเกิดจากกลไก 3 ชนิด ได้แก่ การนำ การพาและการแผ่รังสีดังภาพที่ 3-10 โดยการนำหมายถึงพลังงานที่ถูกเปลี่ยนไประหว่างอะตอมกับอะตอมด้วยการสัมผัสโดยตรงระหว่างอนุภาค ที่จุดยอดของกองปุ๋ยหมัก การนำจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนสู่โมเลกุลอากาศโดยรอบ ยิ่งเครื่องปฏิกรณ์หรือกองปุ๋ยหมักมีขนาดเล็ก ก็ยิ่งมีอัตราพื้นที่ต่อปริมาตรมากขึ้น ทำให้ดีกรีการสูญเสียความร้อนจากการนำ โดยฉนวนกันความร้อนจะช่วยการสูญเสียความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ทำปุ๋ยหมักขนาดเล็กได้ (Cornell Waste Management Institute, no date)



ภาพที่ 3-10 กลไก 3 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียความร้อนในกองปุ๋ยหมักช่วง Thermophilic (Cornell Waste Management Institute, no date)

หมายเหตุ:

การนำ

การพา

การแผ่รังสี

ซึ่งระยะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในระบบการทำปุ๋ยหมักจะแบ่งออกเป็น 4 ระยะ (Phase) ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ดังนี้ (Bernal และคณะ, 2017)

1) Initial Mesophilic: เป็นระยะแรกที่อุณหภูมิเริ่มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเริ่มมีปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ ปกติเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วงประมาณ 10-40 องศาเซลเซียส และอาจเพิ่มสูงสุดถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายเริ่มปรับตัวให้เข้ากับสภาวะหมักช่วงนี้เนื่องจากเป็นระยะที่พีเอชค่อนไปทางกรด ทำให้มีพวกแบคทีเรียและเชื้อรา (Fungi) อยู่มาก

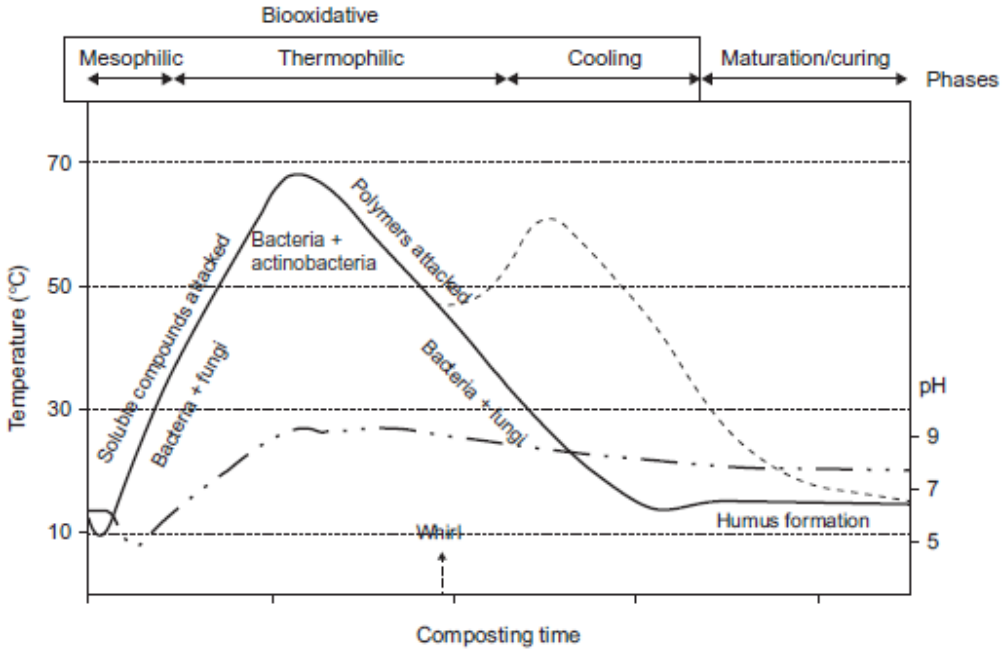
2) Thermophilic: เป็นระยะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงสุดเนื่องจากปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ดำเนินไปอย่างเต็มที่ ปกติเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วงประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส และอาจเพิ่มสูงขึ้นจนมากกว่า 70 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ย่อยที่ง่ายไปมากแล้ว และระยะนี้พีเอชค่อนไปทางกลาง ทำให้มีพวกแบคทีเรียกลุ่ม Thermophilic อาศัยอยู่มาก และพวกแอคติโนแบคทีเรีย (Actinobacteria) ที่สามารถย่อยสารอินทรีย์ย่อยยากอย่างเซลลูโลส

3) Cooling Mesophilic: เป็นระยะที่อุณหภูมิลดลงจนอยู่ช่วง Mesophilic ประมาณ 35-45 องศาเซลเซียสจนไปถึงอุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป เนื่องจากสารอินทรีย์ย่อยได้เริ่มหมดไป ทำให้จุลินทรีย์เริ่มหมดไปด้วยเช่นกันแต่ก็ยังมีกิจกรรมทำให้เกิดการคายความร้อนอยู่ ระยะนี้พีเอชยังอยู่ในช่วงกลาง และมีพวกแบคทีเรียและเชื้อราอาศัยอยู่มาก

4) Curing/Maturation: เป็นระยะที่อุณหภูมิอยู่ในช่วงสภาพแวดล้อมทั่วไป เนื่องจาก หากสมบูรณ์จะไม่มีสารอินทรีย์ที่ย่อยทางชีวภาพ ซึ่งหมายถึงไม่มีจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายอีกต่อไปทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน โดยสภาพปุ๋ยหมักจะคล้ายกับฮิวมัสตามธรรมชาติ และพีเอชอยู่ช่วง 6.0-8.0

โดยแสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไว้ในภาพที่ 3-11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3-11 ตัวอย่างแสดงปฏิกิริยาต่างๆที่สัมพันธ์กับเวลาและอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในระบบการทำปุ๋ยหมัก

(Bernal และคณะ, 2017)

หมายเหตุ:

——: เส้นปฏิกิริยาของการทำปุ๋ยหมักประเภทท่อแถว

·····: เส้นปฏิกิริยาของการทำปุ๋ยหมักประเภทกองแถว

– · –: เส้นบ่งชี้ช่วงปฏิกิริยาและช่วงพีเอชที่เปลี่ยนไป

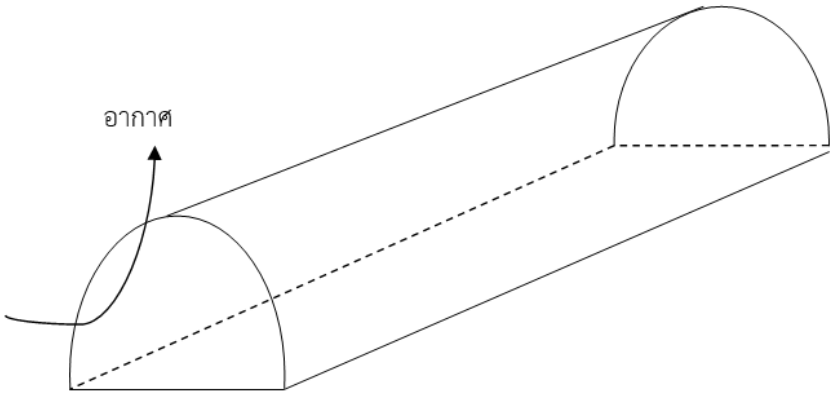
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.4 ระบบการทำปุ๋ยหมัก

แบ่งออกเป็น 3 ระบบหลัก ดังนี้ (National Programme on Technology Enhanced Learning, 2012)

3.3.4.1 ระบบกองแถว (Windrow)

เป็นระบบเก่าแก่ที่สุด โดยจะแบ่งกองปุ๋ยหมักไว้หลายแถว พลิกกองโดยใช้คนหรือเครื่องจักรในการพลิกกอง ใช้เวลาในการทำปุ๋ยหมักนานตั้งแต่หลายสัปดาห์จนถึงหลายปี ซึ่งแสดงตัวอย่างไว้ในภาพที่ 3-13



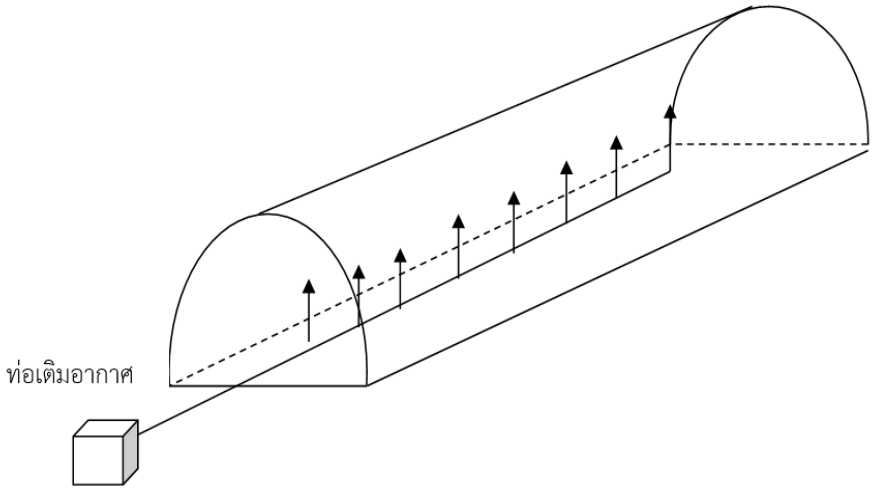
ภาพที่ 3-12 ตัวอย่างกองแถว 1 แถวของระบบกองแถว
ดัดแปลงจาก (National Programme on Technology Enhanced Learning, 2012)

โดยระบบนี้จะต้องตั้งอยู่บนพื้นแข็งราบเรียบและไม่มีการซึมผ่านของน้ำชะ ขนาดและรูปร่างของกองแถวจะขึ้นกับขนาดอนุภาค อุณหภูมิ ความพรุนและความชื้นของวัตถุดิบที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก รวมถึงปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของออกซิเจน

3.3.4.2 ระบบท่อแถว (Static Piles)

เป็นระบบที่ต่อยอดจากระบบกองแถว พลิกกองโดยใช้คนหรือเครื่องจักรในการพลิกกองเหมือนกัน แต่มีความถี่ในการพลิกกองน้อยกว่าและใช้พื้นที่น้อยกว่า เพราะมีการเติมอากาศแบบบังคับ เพื่อเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายของจุลินทรีย์แบบใช้อากาศ ใช้เวลาในการทำปุ๋ยหมักนานประมาณสัปดาห์ถึงหลายสัปดาห์ ซึ่งใช้งบประมาณมากกว่าแบบกองแถว เพราะใช้ในการติดตั้งระบบเติมอากาศ ซึ่งแสดงตัวอย่างไว้ในภาพที่ 3-13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



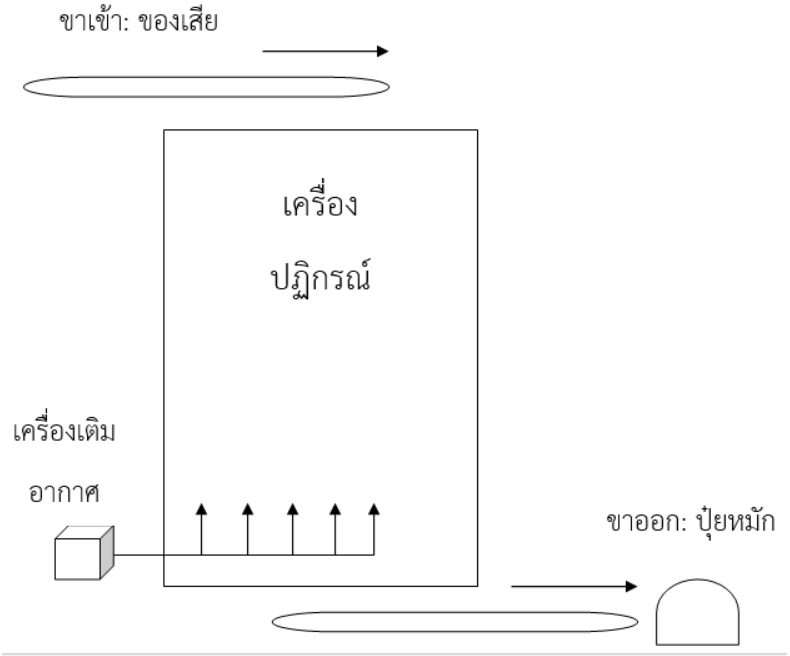
ภาพที่ 3-13 ตัวอย่างกองแถว 1 แถวของระบบท่อแถว
ดัดแปลงจาก (National Programme on Technology Enhanced Learning, 2012)

3.3.4.3 ระบบภาชนะปิด (In-Vessel)

เป็นระบบที่สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมในระบบได้ง่าย ทำให้สามารถกำหนดคุณภาพปุ๋ยหมักได้มากกว่า 2 ระบบแรกและใช้เวลาในการทำปุ๋ยหมักสั้นกว่า 2 ระบบแรก แต่ใช้งบประมาณและความรู้ความชำนาญมากกว่า โดยทำปุ๋ยหมักในภาชนะปิดหรือเกือบปิด โดยมี 3 ประเภทย่อย ดังนี้

3.3.4.3.1 แบบแนวตั้ง (Vertical)

ประเภทนี้โดยทั่วไปจะสร้างภาชนะทรงกระบอกตั้งฉากกับพื้น ใส่วัตถุดิบจากด้านบน เติมอากาศจากด้านใดก็ได้ที่ทำให้ออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านวัตถุดิบหมักได้อย่างสะดวก (นิยมเติมจากด้านบนและด้านข้าง เพราะหากเติมจากด้านล่างจะเกิดปัญหาน้ำชะอุดตันช่องเติมอากาศ) และปล่อยให้เกิดการแปรสภาพเป็นปุ๋ยหมักอยู่ภายในระบบ จนได้ปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์แล้วลงสู่ด้านล่าง ซึ่งแสดงตัวอย่างไว้ในภาพที่ 3-14

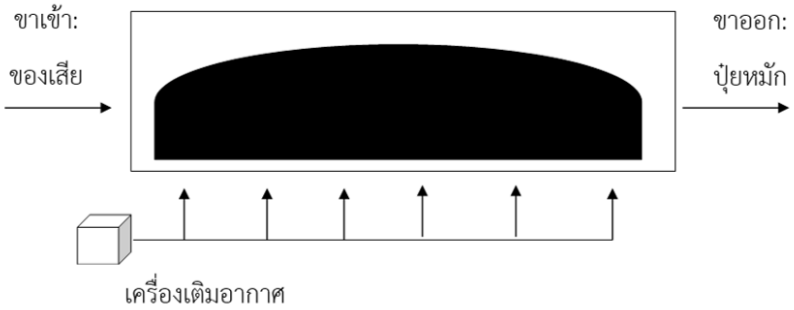


ภาพที่ 3-14 ตัวอย่างระบบภาชนะปิดแบบแนวตั้ง (Vertical)
ดัดแปลงจาก (National Programme on Technology Enhanced Learning, 2012)

3.3.4.3.2 แบบแนวนอน (Horizontal)

ประเภทนี้โดยทั่วไปจะสร้างภาชนะทรงกระบอกตั้งระนาบกับพื้น ใส่วัตถุดิบจากด้านหน้า เติมอากาศจากด้านใดก็ได้ที่ทำให้ออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านวัตถุดิบหมักได้อย่างสะดวก (นิยมเติมจากด้านบนและด้านข้าง เพราะหากเติมจากด้านล่างจะเกิดปัญหาน้ำชะอุดตันช่องเติมอากาศ) และปล่อยให้เกิดการแปรสภาพเป็นปุ๋ยหมักอยู่ภายในระบบ จนได้ปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์แล้วจะออกไปสู่ด้านหน้า ซึ่งแสดงตัวอย่างไว้ในภาพที่ 3-15

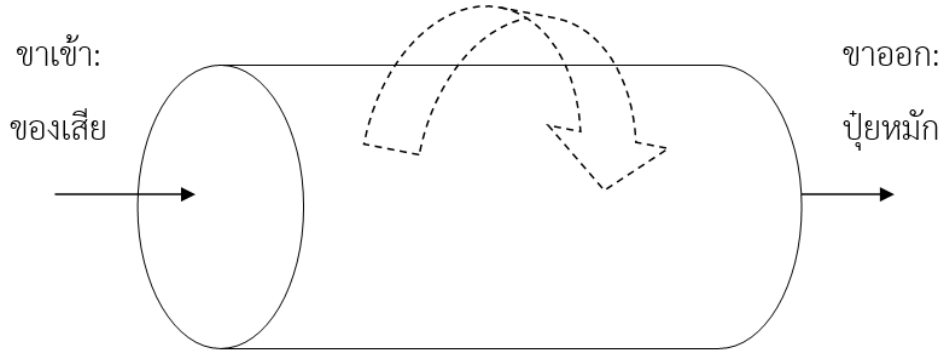
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 3-15 ตัวอย่างระบบภาชนะปิดแบบแนวนอน (Horizontal)
ดัดแปลงจาก (National Programme on Technology Enhanced Learning, 2012)

3.3.4.3.3 แบบถังหมุน (Rotary Drum)

ประเภทนี้โดยทั่วไปจะสร้างภาชนะทรงกระบอกตั้งระนาบกับพื้นและออกแบบคล้ายกับแบบแนวนอน แต่ใช้การหมุนตัวถังเพื่อคลุกเคล้า เติมอากาศจากด้านใดก็ได้ที่ทำให้ออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านวัตถุดิบหมักได้อย่างสะดวก (อาจเติมด้านข้าง ด้านบนหรือเติมในแกนหมุนถังหมุนภายในระบบ) ซึ่งแสดงตัวอย่างไว้ในภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 ตัวอย่างระบบภาชนะปิดแบบถังหมุน (Rotary Drum)
ดัดแปลงจาก (National Programme on Technology Enhanced Learning, 2012)

3.3.5 ตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้อง

เป็นตัวแปรที่บ่งชี้ว่าปฏิกิริยาของปุ๋ยหมักนั้นดำเนินไปอย่างราบรื่นหรือก่อให้เกิดปุ๋ยหมักสมบูรณ์แล้วหรือไม่ อย่างไร ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.5.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิใช้บ่งชี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการทำปุ๋ยหมักที่ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งอุณหภูมิแปรผันตามการเติมอากาศ ถ้าหากเติมอากาศมากเกินไป อุณหภูมิภายในระบบจะต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสม (ประมาณ 45-60 องศาเซลเซียส) ทำให้การย่อยสลายช้าลง เนื่องจากน้ำระเหยเร็วเกินไป แต่หากเติมอากาศน้อยเกินไป ก็จะทำให้น้ำระเหยช้าเกินไปเกินสภาวะไร้อากาศ (United States Department of Agriculture, 2000)

3.3.5.2 ความชื้นสะสม (Moisture Content)

ความชื้นเริ่มต้นทั่วไปที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 โดยน้ำหนัก เพราะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีและไม่ปิดกั้นการไหลของอากาศ ซึ่งการย่อยสลายของจุลินทรีย์จะดำเนินไปอย่างรวดเร็วเมื่อมีผิวน้ำบางล้อมรอบอนุภาคปุ๋ยหมัก ทั้งนี้หากความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 35 การย่อยสลายของจุลินทรีย์จะหยุดชะงักเพราะผิวน้ำล้อมรอบหายไป (แห้งเกินไป) แต่ถ้าหากมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 65 จะทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศ การย่อยสลายช้าลง (ชื้นเกินไป) และธาตุอาหารไหลไปกับน้ำชะ (Cornell Waste Management Institute, no date)

3.3.5.3. พีเอช (pH)

ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทำปุ๋ยหมักอยู่ที่ 5.5-8.0 (Cooperband, 2002) โดยพีเอชที่เหมาะสมที่สุดถูกคุมโดยคาร์บอนอนินทรีย์ทั้งหมด กรดอินทรีย์ แคลเซียมและแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งมูลสัตว์และตะกอนน้ำเสียโดยทั่วไปมีคาร์บอนอนินทรีย์ทั้งหมดและแคลเซียมในปริมาณมากที่ซึ่งมีค่าพีเอชที่ไม่เป็นกรดมาก ในขณะที่ของเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะจากน้ำมันมะกอกและโรงหมักไวน์ และรวมไปถึงเศษอาหารนั้นมีค่าพีเอชค่อนไปทางกรดมาก ทำให้เมื่อการทำปุ๋ยหมักจากการนำของเสียที่ค่อนข้างเป็นกรดนี้มาผสมกับมูลสัตว์หรือตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียนั้นประสบความสำเร็จเพราะการผสมนี้จะช่วยควบคุมการสูญเสียไนโตรเจนจากการระเหยของ NH_3 ที่จะเกิดค่าพีเอชขึ้นสูงที่มากกว่า 7.5 ขึ้นไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.5.4 อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน

เป็นตัววัดความสมดุลธาตุอาหารที่เป็นที่ยอมรับและง่ายที่สุดสำหรับกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งช่วงอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอัตราการแปรสภาพเป็นปุ๋ยหมักและการสูญเสียไนโตรเจนคือ 25-35 (Cooperband, 2002) ซึ่งหากมีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีมากเกินไป การย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมักก็จะช้าลงเนื่องจากมีอินทรีย์วัตถุมากเกินไปที่จุลินทรีย์จะย่อยสลายทันเพราะไนโตรเจนไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่จะมาย่อยสลายชีวมวล แต่หากอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีน้อยเกินไป การสูญเสียไนโตรเจนก็เกิดเช่นกัน โดยส่วนใหญ่เกิดจากการระเหยของแอมโมเนีย (NH_3) การเกิด

ปลดปล่อยไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (N_2) ซึ่งก่อให้เกิดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกินความจำเป็นต่อเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ ซึ่งทั้ง 2 กรณีนี้จะส่งผลให้ปุ๋ยหมักด้อยค่าทางการเกษตรและส่งผลกระทบด้านลบต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างวัตถุดิบที่มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงนั้น ได้แก่ วัตถุดิบอย่างเศษผักผลไม้ ขี้เลื่อยและใบไม้ทั่วไป ส่วนตัวอย่างวัตถุดิบที่มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ ได้แก่ ส่วนตะกอนน้ำเสีย มูลสัตว์ปีกสดและใบจามจุรีที่มีปริมาณโปรตีนในใบสูง ซึ่งแสดงว่ามีธาตุไนโตรเจนอยู่ในปริมาณมาก (เปรมสุดา จิ๋วนอก, 2550)

3.3.5.5. ออกซิเจน (Oxygen: O_2)

ออกซิเจนจำเป็นต่อเมตาบอลิซึมและการหายใจของจุลินทรีย์แบบใช้อากาศและออกซิไดซ์สารชีวโมเลกุลในวัตถุดิบที่เป็นของเสียให้กลายเป็นธาตุอาหาร พลังงานและคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้าไม่มีออกซิเจนอย่างเพียงพอ กระบวนการก็จะกลายเป็นสภาวะไร้อากาศซึ่งก่อให้เกิดแก๊สที่ส่งกลิ่นไม่พึงประสงค์อย่างเช่นแก๊สไข่เน่า (H_2S) ฉะนั้นจึงต้องมีการออกแบบระบบให้มีการเติมอากาศ (อากาศมี O_2 เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 23.2 โดยมวลน้ำหนัก) อย่างเพียงพอด้วยการเติมอากาศแบบธรรมชาติ (Passive Aeration) หรือแบบบังคับ (Forced Aeration หรือ Active System) อย่างใดอย่างหนึ่งได้ (United States Department of Agriculture, 2000) ดังภาพที่ 3-17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Aeration Percentage	Problem		Solutions
<5%	Low aeration	Insufficient water evaporation, generating excessive moisture and anaerobiosis environment	Volteo de la mezcla y/o adición de material estructurante que permita la aireación .
5% - 15% ideal range			
>15%	Excessive aeration	Drop in temperature and evaporation of water, causing the decomposition process to stop due to lack of water	Chop the material in order to reduce porous size and hence, aeration. Moisture should be regulated by adding water or fresh material or with more water content (fruit and vegetative scraps, grass, liquid manure and others).

ภาพที่ 3-17 ปัญหาและแนวทางแก้ไขสำหรับช่วงออกซิเจนสะสมในปุ๋ยหมัก

(Pantoja และคณะ, 2015)

หมายเหตุ: Aeration Percentage หมายถึง ร้อยละความเข้มข้นของออกซิเจนที่อิ่มตัวในระบบ

3.3.5.6. ความพรุน (Porosity)

ความพรุนคือช่องว่างระหว่างของมวลสารหรืออนุภาคสารรวมกัน เกิดจากการลดขนาดอนุภาคให้มีขนาดเล็กลง ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวของมวลสารดังกล่าวขึ้น โดยค่าความพรุนสัมพันธ์กับค่า Bulking Density ซึ่งค่าความพรุนในที่นี้คือค่าความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (Air-filled Porosity: AFP) ซึ่งค่าความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ของวัสดุหมักเริ่มต้นที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 35-45 (Paul, 2009) ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้มีการถ่ายเทอากาศในตัวปุ๋ยหมักระหว่างการหมัก ซึ่งเอื้อต่อการทำงานของจุลินทรีย์สภาวะใช้อากาศและเพิ่มคาร์บอนและไนโตรเจนที่พร้อมใช้งาน ฉะนั้น สารเพิ่มปริมาณ (Bulking Agent) ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่อย่างเช่น เศษไม้ ลูกสนหรือซังข้าวโพดนั้นเป็นที่นิยมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเติมอากาศ หากสารเพิ่มปริมาณไม่ถูกย่อยสลาย สามารถนำกลับมาทำปุ๋ยหมักใหม่ได้ การเกษตร (United States Department of Agriculture, 2000)

3.3.5.7. หัวเชื้อ (Inoculum)

เป็นแหล่งจุลินทรีย์ที่ช่วยย่อยสลายชีวมวลและอาจมีธาตุอาหารที่เหมาะสมสำหรับการทำปุ๋ยหมัก ซึ่งหัวเชื้อที่นิยมจะมาจากมูลสัตว์อย่างเช่นมูลโคที่มีแบคทีเรียที่ช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ (Bharti และคณะ, 2018) และตะกอนน้ำเสียที่มีทั้งแบคทีเรียที่ช่วยย่อยสลายและธาตุอาหารที่เหมาะสมสำหรับทำปุ๋ยหมัก (Asses และคณะ, 2018)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พูนศักดิ์ จันทร์จำปี (2541) ได้ศึกษาการทำปุ๋ยหมักด้วยเศษอาหารตลาดสด (MW) เศษอาหารร้านอาหาร (FW) และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ เปลือกข้าว (RH) ขี้เลื่อย (SD) ใบไม้แห้ง (DL) และเปลือกถั่วลิสง (PS) โดยใช้เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรียชนิด *Bacillus Bacteria* ผสมเป็นวัสดุหมักที่มีปริมาตรประมาณ 200 ลิตรในถังหมุนขนาด 300 ลิตร โดยในทุกอัตราส่วนจะถูกคุมความชื้นไว้ที่ร้อยละ 55-65 ซึ่งวัสดุหมักจะถูกผสมและทำให้มีอุณหภูมิสูง 75 องศาเซลเซียส ในเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุหมักที่ผ่านถังหมุนไปทำปุ๋ยหมักต่อด้วยระบบกล่องขนาด 550 ลิตร เป็นเวลา 30 วัน หรือเมื่ออุณหภูมิวัสดุหมักอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส จึงนำไปบ่มต่อที่โรงบ่มเป็นเวลา 60 วัน หรือเมื่ออุณหภูมิวัสดุหมักไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีก

รอบการทดลอง	กล่องที่	อัตราส่วน (โดยปริมาตร)
1	1	MW + SD + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ไม่ใช้ถังหมุน)
	2	MW + SD + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ใช้ถังหมุน)
	3	FW + RH + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ใช้ถังหมุน)
	4	FW + SD + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ใช้ถังหมุน)
	5	FW + RH + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ใช้ถังหมุน)
2	1	MW + PS + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ใช้ถังหมุน)
	2	MW + DL + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ใช้ถังหมุน)
	3	MW + RH + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ใช้ถังหมุน)
	4	FW + PS + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ใช้ถังหมุน)
	5	FW + DL + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ใช้ถังหมุน)
	6	MW + FW + RH + DL + SD + PS + เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย (ใช้ถังหมุน)

พบว่า ทุกอัตราส่วนในกล่องหมักสามารถเข้าสู่ช่วงเทอร์โมฟิลิคได้เป็นเวลานานและมีออกซิเจนในช่วงร้อยละ 3.5-16.3 ซึ่งบ่งบอกถึงสภาวะมีอากาศ ไม่พบกลิ่นเน่าเหม็น ความชื้นสะสมจากเริ่มต้นร้อยละ 51-64 เหลืออยู่ที่ร้อยละ 22-51 ซึ่งใบไม้แห้งช่วยเก็บกักความชื้นได้ดีกว่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดอื่น เมื่อสิ้นสุดการหมัก ร้อยละอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้น 25-70 เหลืออยู่ที่ร้อยละ 18-53 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจากเริ่มต้น 15-51 meq/100g (น้ำหนักแห้ง) จนอยู่ที่ 43-95 meq/100g (น้ำหนักแห้ง) อัตราส่วนที่ใช้ใบไม้แห้งและขี้เลื่อยมีการลดลงของขนาดอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่เปลือกข้าวและเปลือกถั่วลิสงมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย การลดลงของมวลเมื่อเทียบโดยน้ำหนักแห้งอยู่ที่ร้อยละ 30-50 และไม่พบเชื้อโรคอันตราย ได้แก่ *Staphylococcus*, *Salmonella*, *Shigella*, *Cholera* และ *Steptococcus* แต่พบไข่พยาธิ *Stongyloides stercoralis* สรุปได้ว่าการทำปุ๋ยหมักโดยใช้ถังหมุนทำให้มีประสิทธิภาพดีกว่าไม่ใช้ถังหมุน เศษอาหารร้านอาหารมีการย่อยสลายดีกว่าเศษอาหารตลาด ฤดูกาลไม่มีผลต่อการย่อยสลายของปุ๋ยหมักและอัตราส่วนในกล่องที่ 6 รอบการทดลองที่ 2 เป็นอัตราส่วนที่ทำให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภัทรา วงษ์พันธกมล (2547) ได้ศึกษาหาประสิทธิภาพของเชื้อจุลินทรีย์ อีเอ็ม(Effective Microorganism: EM) ในการย่อยสลายสานอินทรีย์ประเภทเศษผักและเศษใบไม้แห้ง โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุด ชุดละ 3 การทดลอง ได้แก่ ชุดที่ 1 เศษผักและใบไม้แห้งสับและน้ำกลั่น ชุดที่ 2 เศษผักและใบไม้แห้งสับและ EM1 (จากบริษัท อีเอ็ม คิวเซ จำกัด) ชุดที่ 3 เศษผักและใบไม้แห้งสับและEM2 (จาก หจก. หนองบัวอุบล) และชุดที่ 4 เศษผักและใบไม้แห้งสับและ DMO (จาก แม่ปิงเกษตรธรรมชาติ) ทำในระบบถังหมักแบบใช้อากาศ ตัวถังทำจากพลาสติกปริมาตร 0.53 ลูกบาศก์เมตร เจาะรูขนาด 3-5 เซนติเมตรบริเวณรอบๆถัง ความชื้นของถังหมักจะถูกควบคุมไว้ที่ร้อยละ 50-60 พลิกกลับ 1 ครั้งต่อ 3 วัน

ชุดการทดลองที่	อัตราส่วนวัสดุ (โดยปริมาตร)					
	เศษผัก	เศษใบไม้แห้ง	น้ำกลั่น	EM1	EM2	DMO
1	1	1	0.6	-	-	-
2	1	1	-	0.6	-	-
3	1	1	-	-	0.6	-
4	1	1	-	-	-	0.6

เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 45 วัน พบว่าอุณหภูมิในถังหมักอยู่ในช่วง 21.7-22.2 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชจะอยู่ในช่วง 7.7-8.0 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน จะอยู่ในช่วง 28.59-31.40 การลดลงของมวลจะอยู่ในช่วงร้อยละ 46.62-59.39 แร่ธาตุอาหารหลักไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส : โพแทสเซี่ยม ชุดที่ 1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.35 : 0.11 : 2.36 ชุดที่ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.26 : 0.14 : 3.36 ชุดที่ 3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.35 : 0.17 : 2.78 ชุดที่ 4 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.26 : 0.19 : 3.30 คณะผู้วิจัย ได้สรุปว่า จุลินทรีย์ DMO มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ดีที่สุด

เจนวิทย์ กรอบทอง (2548) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีจากการเปรียบเทียบสารเร่ง 2 ชนิด คือ สารไบโอนิค และ แบคทีเรีย Thermophilic ที่มีผลต่อกระบวนการทำปุ๋ยหมักจากเศษวัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง ได้แก่ เศษลำไย เศษสับปะรด เศษสลัดผลไม้และเศษขิงดอง ซึ่งทุกชุดการทดลองได้ปรับอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนไว้ที่ 25 ด้วยการเติมปุ๋ยยูเรียลงในกองและคุมความชื้นไว้ที่ร้อยละ 55-65 ซึ่งทำการผสมวัตถุดิบหมักให้คลุกเคล้ากันในถัง

หมุนปริมาตร 0.30 ลูกบาศก์เมตร และสำหรับ สำหรับสารไบโอนิค จะผสมที่อุณหภูมิบรรยากาศปกติเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ส่วนแบคทีเรีย Thermophilic จะผสมที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปหมักในกล่องหมัก 30 วัน และบ่มในโรงบ่มจนได้เป็นปุ๋ยหมักสมบูรณ์เป็นเวลาประมาณ 60-90 วัน

การทดลอง	กองที่	วัสดุผสม	
ใช้ถังหมุนและกระทำการที่อุญหภูมิบรรยากาศ	1	เศษลำใย	ใบไม้แห้ง สารไบโอนิค
	3	เศษสับปะรด	ใบไม้แห้ง สารไบโอนิค
	5	เศษผลไม้จากฟรุตสลัด	ใบไม้แห้ง สารไบโอนิค
	7	เศษขิงดอง	ใบไม้แห้ง สารไบโอนิค
ใช้ถังหมุนและควบคุมอุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส	2	เศษลำใย	ใบไม้แห้ง เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย
	4	เศษสับปะรด	ใบไม้แห้ง เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย
	6	เศษผลไม้จากฟรุตสลัด	ใบไม้แห้ง เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย
	8	เศษขิงดอง	ใบไม้แห้ง เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย

พบว่า ทุกชุดการทดลองสามารถทำปุ๋ยหมักได้อย่างดีดังขั้นตอนที่กล่าวมา ยกเว้น เศษขิงดองกับใบไม้แห้ง (ชุดที่ 7 และ 8) เนื่องจากไม่เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ส่วนชุดที่ 1-6 นั้น สามารถไปถึงอุณหภูมิช่วง Thermophilic ในระหว่างการหมักในกล่องเป็นระยะเวลานาน ไม่พบกลิ่นเหม็นเน่า ความชื้นลดลงจากร้อยละ 57-77 เหลือร้อยละ 39-67 ช่วงพีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5-6 และอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นมีค่า 14-23 ส่วนการเปรียบเทียบสารเร่ง พบว่า ค่าพีเอชสุดท้ายอยู่ที่ช่วง 6.9-7.6 และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสุดท้ายมีค่า 9-13 เพราะการเติมปุ๋ยยูเรียจึงทำให้ค่านี้ลดลง ส่วนการลดลงของมวล ทุกชุดมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้นชุดที่ 7 และ 8 เมื่อเปรียบเทียบจากน้ำหนักแห้งมีค่าในช่วงร้อยละ 21-38 และชุดการทดลองที่ใช้สารเร่งเป็นแบคทีเรีย Thermophilic นั้นจะลดมวลไปมากกว่าสารไบโอนิคร้อยละ 2-5 เมื่อสิ้นสุดการหมักไม่พบเชื้อโรคที่เป็นอันตราย และระยะเวลาที่เกิดปุ๋ยหมักสมบูรณ์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยตั้งแต่ชุดที่ 1-6 ใช้เวลา 129 131 86 86 92 และ 86 ตามลำดับ ทางผู้วิจัยได้สรุปว่าสำหรับสารเร่งทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และระยะเวลาที่ใช้ในการหมักมีความใกล้เคียงกัน

คะนอง ผลสงเคราะห์ (2549) ได้ศึกษาการแก้ปัญหาขยะและหาแนวทางการจัดการขยะภายในมหาวิทยาลัยนเรศวรวิทยาเขตสารสนเทศพะเยา ด้วยการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารที่มี 51.52

ร้อยละ ของขยะทั้งหมด และคัดแยกขยะเพื่อจำหน่ายขยะขายได้ที่มีร้อยละ 36.33 ซึ่งผลของการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารและจำหน่ายขยะขายได้ ทำให้เหลือขยะที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ร้อยละ 21.15 ของขยะทั้งหมด ในการศึกษาทดลองการทำปุ๋ยหมักจะศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเศษอาหารต่อเศษกิ่งไม้ น้ำหนักวัดสุหมักในแต่ละอัตราส่วนเท่ากับ 350 กิโลกรัมน้ำหนักเปียก โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลอง ทำปุ๋ยหมักด้วยระบบท่อแถวเติมอากาศแบบไม่บังคับ โดยวางกองปุ๋ยหมักบนไม้ Pallet แต่ละกองปุ๋ยหมักมีขนาดความกว้าง ความยาวและความสูงเท่ากับ 1 x 1 x 0.8 เมตร เติมอากาศด้วยท่อ PVC เพื่อการระบายอากาศ คุมความชื้นสะสมไว้ที่ร้อยละ 50-70 ระยะเวลาการหมักภายใน 90 วัน สำหรับการหาคัดแยกขยะเพื่อนำหน่ายขยะขายได้ทำการศึกษาข้อมูลพื้นฐานการจัดการขยะ ได้แก่ แหล่งกำเนิดขยะ ปริมาณขยะและอัตราการเกิดขยะ องค์ประกอบทางกายภาพของขยะและสุ่มตัวอย่างด้วยวิธีการสั่มตัวอย่างแบบกลุ่ม ความจุของภาชนะรองรับขยะ สภาพปัญหาที่เกิดขึ้นในพื้นที่กำจัดขยะในปัจจุบันและแนวทางการจัดการขยะที่เหมาะสม

การทดลอง	อัตราส่วน (โดยน้ำหนักเปียก)		จำนวนการทำซ้ำ (กอง)
	เศษอาหาร	เศษกิ่งไม้	
1	1	1	3
2	2	1	3
3	4	1	3
4	8	1	3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับการทดลองทำปุ๋ยหมัก พบว่า อัตราส่วนที่ 1:1 2:1 และ 4:1 สามารถเข้าสู่การย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ในวันที่ 75 85 และ 87 วัน ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนที่ 8:1 ไม่สามารถเข้าสู่การย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ภายใน 90 วัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมียังไม่คงที่ อัตราส่วนที่ 2:1 และ 4:1 มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีลักษณะใกล้เคียงกัน ค่าพีเอชของทุกอัตราส่วนอยู่ที่ประมาณ 7.0 ในอัตราส่วนที่ 1:1 2:1 และ 4:1 มีค่าไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน และในทุกอัตราส่วนมีค่าโลหะหนักไม่เกินมาตรฐานดิน ส่วนสำหรับการหาแนวทางการจัดการขยะ พบว่าขยะที่ถูกส่งมากำจัดไม่ได้รับการคัดแยกก่อนทิ้งอย่างจริงจัง และหากมีการคัดแยกขยะที่แหล่งกำเนิด จะช่วยลดเวลาในการคัดแยกขยะและเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดแยกขยะ จึงเสนอให้มีการรณรงค์คัดแยกขยะที่แหล่งกำเนิดอย่างต่อเนื่องและ

จริงจัง ซึ่งควรจัดให้มีโครงการให้ทั้งนิสิตและบุคลากรในมหาวิทยาลัยคัดแยกขยะที่ขายได้แล้วนำไปจำหน่าย และสนับสนุนโครงการที่ช่วยลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้น เช่น โครงการธนาคารขยะ โครงการประกวดสิ่งประดิษฐ์จากวัสดุเหลือใช้ เป็นต้น

ธันวดี ศรีธาวิรัตน์ (2549) ได้ศึกษากระบวนการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ เศษผัก ผักตบชวา และฟางข้าว โดยการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ 1) การศึกษาองค์ประกอบของเศษอาหารและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 2) การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปุ๋ยหมัก 3) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ และ 4) การศึกษาปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมัก ทดลองในบ่อหมักวงท่อซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร ในกระบวนการทำปุ๋ยหมักได้ควบคุมอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นประมาณ 30:1 และควบคุมความชื้นตลอดระยะเวลาการหมักให้อยู่ในช่วงร้อยละ 50-60

กองที่	วัสดุผสม
1	เศษอาหาร 1 กิโลกรัม ฟางข้าว 4 กิโลกรัม
2	เศษอาหาร 1 กิโลกรัม เศษผัก 4 กิโลกรัม
3	เศษอาหาร 1 กิโลกรัม ผักตบชวา 4 กิโลกรัม

จากการศึกษาคุณสมบัติของเศษอาหารและวัสดุหมัก พบว่าปริมาณเศษอาหารต่อวัสดุหมักที่เหมาะสมเท่ากับ 1 : 4 โดยได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และชีวภาพที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมัก ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ พบว่าปริมาณความชื้นตลอดระยะเวลาการหมักมีการเปลี่ยนแปลงคล้างคลึงกัน เมื่อสิ้นสุดการหมักที่ 90 วัน พบว่ามีเศษผัก ผักตบชวา และฟางข้าวมีปริมาณความชื้นเท่ากับ 44.43 42.85 และ 40.02 ร้อยละ ตามลำดับ อุณหภูมิในทุกชุดการทดลองมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยในช่วง 21 วันแรก โดยอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสูงขึ้น และช่วงสุดท้ายของการหมักอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักใกล้เคียงกับอุณหภูมิของบรรยากาศ มีค่าอยู่ในช่วง 29.9-32.5 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชในกองปุ๋ยหมักในช่วง 20 วันแรก ของการหมักมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 4.30-5.30 โดยในวันที่ 90 ของการหมัก ค่าพีเอชมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยฟางข้าว ผักตบชวา และเศษผักมีค่าอยู่ในช่วง 7.20-7.56 7.11-7.20 และ 6.75-7.07 การเปลี่ยนแปลงทางเคมี พบว่าปริมาณคาร์บอนมีแนวโน้มค่อยๆลดลงตลอดระยะเวลาของการหมัก โดยในวันที่ 90 ของการหมักปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 30.50-31.15 ปริมาณไนโตรเจนมีแนวโน้มค่อยๆเพิ่มขึ้น โดยผักตบชวามีปริมาณไนโตรเจนมากที่สุดคืออยู่ในช่วงร้อยละ 2.07-3.28 ส่วนเศษผักและฟางข้าวมีปริมาณ

ไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 1.64-2.35 และร้อยละ 0.11-1.77 ตามลำดับ อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนในเวลาของการหมักมีแนวโน้มลดลง โดยในวันที่ 90 ของการหมัก อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนของผักตบชวามีค่าต่ำที่สุดคือ 11.53 ส่วนฟางข้าวและเศษผักมีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 17.57 และ 13.94 ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเศษผักมีปริมาณฟอสฟอรัสมากที่สุดคืออยู่ในช่วงร้อยละ 0.06-0.08 ส่วนฟางข้าวและผักตบชวามีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงร้อยละ 0.01-0.03 และร้อยละ 0.01-0.02 ตามลำดับ ปริมาณโพแทสเซียมมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยฟางข้าวมีปริมาณโพแทสเซียมมากที่สุดคือ อยู่ในช่วงร้อยละ 0.22-0.53 ส่วนผักตบชวาและเศษผักมีปริมาณโพแทสเซียมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.18-0.48 และร้อยละ 0.17-0.28 ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ประเภท Mesophilic มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและมีค่าสูงสุดในวันที่ 77 ของการหมัก ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 7.50x10/2-8.80x10/13 ซีเอฟยู/กรัม หลักจากนั้นมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จนสิ้นสุดการหมัก โดยในทุกชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันคือ 7.00x10/11-2.40x10/12 ซีเอฟยู/กรัม รูปแบบการเจริญเติบโตของ Thermophilic microorganisms มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกัน โดยพบว่ามีปริมาณสูงสุดในวันที่ 14 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3.80x10/11-2.00x10/12 ซีเอฟยู/กรัม แล้วค่อย ๆ ลดลงหลังจากวันที่ 21 ของการหมัก และเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ อีกครั้ง โดยในวันที่ 90 ฟางข้าวมีค่าเท่ากับ 2.00x10/12 ซีเอฟยู/กรัม ผักตบชวามีค่าเท่ากับ 1.00x10/12 ซีเอฟยู/กรัม และเศษผักมีค่า เท่ากับ 3.20x10/11 ซีเอฟยู/กรัม ตามลำดับ การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในปุ๋ยหมัก พบว่าปุ๋ยหมักที่ได้จากผักตบชวามีปริมาณไนโตรเจนสูงสุดคือร้อยละ 2.70 ส่วนเศษผักและฟางข้าวมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.18-1.77 โดยปุ๋ยหมักทุกชุดการทดลองมีไนโตรเจนสูงกว่ามาตรฐาน และพบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมต่ำกว่ามาตรฐานปุ๋ยของกรมพัฒนาที่ดิน ดังนั้นในการใช้งานควรมีการปรับปรุงปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน

สุภา อุ่นสกุล (2549) ทดลองนำเศษอาหารมาทำปุ๋ยหมัก ภาชนะถังพลาสติกขนาด 10 ลิตร ที่มีกระถางรองก้นเพื่อไม่ให้มีน้ำขัง แล้วเปรียบเทียบระหว่าง 3 กลุ่ม คือ 1. กลุ่มควบคุม ไม่เติมปุ๋ย 2. กลุ่มที่เติม ปุ๋ยคอก 100 กรัมต่อเศษอาหาร 1 กิโลกรัม และ 3. เติมหัวเชื้อปุ๋ยหมักเพชร-วิทย์-1 100 กรัม ต่อเศษอาหาร 1 กิโลกรัม โดยนำวัสดุบรรจุใส่ถุงปุ๋ย ถุงละ 1 กิโลกรัม 4 ถุง วางถุงลงบนกระถางที่รองก้นถัง ปิดฝาถัง ทำเช่นเดียวกัน 4 ซ้ำ วันต่อไปนำวัสดุมาใส่เติมถังทุกวัน วันละ 1 กิโลกรัม จนครบ 7 วัน หลังจากแต่ละกลุ่มย่อยสลายแล้ว นำออกมาพึ่งแดดให้แห้ง สับให้ละเอียดและเก็บไว้

ทดสอบกลิ่นด้วยอาสาสมัครดมกลิ่น 20 คน คุณภาพปุ๋ยหมักด้วยการส่งตัวอย่างให้กรมวิทยาศาสตร์บริการวิเคราะห์หาไนโตรเจน โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส และ คาร์บอน และดัชนีการงอกของเมล็ดด้วยกล้าข้าวโพดอายุ 7 วัน จำนวน 30 ต้นที่คัดเลือกจากการเพาะจากถุงพลาสติกสีดำบรรจุดินร่วนปนแกลบในอัตราส่วน 1:1 จำนวน 50 ต้น

กลุ่มที่	จำนวนการทดลอง	วัสดุ
1	4	เศษอาหาร 1 กิโลกรัม
2	4	เศษอาหาร 1 กิโลกรัม ปุ๋ยคอก 100 กรัม
3	4	เศษอาหาร 1 กิโลกรัม หัวเชื้อปุ๋ยหมักเพชรวิทย์ 100 กรัม

พบว่าเศษอาหารที่หมักด้วยหัวเชื้อปุ๋ยหมัก เพชร-วิทย์-1 ย่อยสลายได้เร็ว (14 วัน) และ ไม่มีกลิ่นรบกวน รองลงมาคือกลุ่มที่หมักด้วยปุ๋ยคอก (21 วัน) และกลุ่มควบคุม (35 วัน) ตามลำดับ แต่ทั้ง 2 กลุ่มนี้มีกลิ่นเหม็นเน่า จากการส่งตัวอย่างปุ๋ยที่หมักด้วยหัวเชื้อ เพชร-วิทย์-1 ไปที่กรมวิทยาศาสตร์บริการพบว่า ประกอบด้วยธาตุอาหาร ไนโตรเจนร้อยละ 2.5 ฟอสเฟตทั้งหมด (P_2O_5) เท่ากับร้อยละ 2.1 โพแทชเซี่ยมที่ละลายน้ำ (K_2O) เท่ากับร้อยละ 0.2 และคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 40.3 ส่วนสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 16 : 1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปุ๋ยคอกพบว่า ธาตุไนโตรเจน ฟอสเฟตและคาร์บอนมากกว่าปุ๋ยคอก ส่วนโพแทชเซี่ยมน้อยกว่าปุ๋ยคอก เมื่อทดลองปลูกข้าวโพด โดยเปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยคอก การใส่ปุ๋ยหมักจากเศษอาหารและกลุ่มควบคุมซึ่งไม่ใส่ปุ๋ย พบว่าข้าวโพดที่ใส่ปุ๋ยหมักจากเศษอาหารเจริญเติบโตได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย ความสูงและน้ำหนักแห้งสูงกว่ากลุ่มที่ใส่ปุ๋ยคอกและกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ครรชิต เงินคำคง และ ลดาวัลย์ วัฒนะจีระ (2550) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมีต่อกระบวนการทำปุ๋ยหมัก และคุณภาพของปุ๋ยหมักจากการทำปุ๋ยหมักระบบกองแถวจากเศษผักและเศษใบไม้แห้ง ซึ่งใช้วัตถุดิบหมักในสัดส่วนเศษใบไม้แห้งต่อเศษผักในอัตราส่วน 1 : 7 น้ำหนักเปียก ผสมหัวเชื้ออีเอ็มเป็นตัวเร่ง โดยแบ่งเป็น 3 ชุดการทดลองที่ระดับความสูงของกองปุ๋ยหมักแตกต่างกัน คือ ชุดที่ 1 เท่ากับ 0.4, ชุดที่ 2 เท่ากับ 0.8 และชุดที่ 3 เท่ากับ 1.0 เมตร ตามลำดับ โดยพลิกกลับกองทุกๆ 7 วัน คุมความชื้นในชุดการทดลองให้อยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 ไว้ตลอดการทดลอง และอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 26.07/1

ชุดการทดลอง	วัสดุผสม	ความสูงของกองปุ๋ยหมัก (เมตร)	ขนาดฐานของกองปุ๋ยหมัก (เมตร)
1	เศษใบไม้แห้ง เศษผัก หัวเชื้ออีเอ็ม	0.4	1.2 x 1.2
2	เศษใบไม้แห้ง เศษผัก หัวเชื้ออีเอ็ม	0.8	1.2 x 1.2
3	เศษใบไม้แห้ง เศษผัก หัวเชื้ออีเอ็ม	1.0	1.2 x 1.2

พบว่าชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสูงถึง 40 และ 42.5 องศาเซลเซียส ส่วนชุดที่ 3 สามารถสูงถึง 46 องศาเซลเซียส ซึ่งทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่าพีเอชที่แสดงถึงสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการทำปุ๋ยหมักอย่างต่อเนื่อง ส่วนอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เปลี่ยนแปลงในชุดที่ 2 และ ชุดที่ 3 แสดงถึงสภาวะที่เหมาะสมมากกว่าชุดที่ 1 และทุกชุดการทดลองสามารถลดมวลขยะได้ร้อยละ 78-84 โดยน้ำหนัก สรุปว่า ชุดที่ 1 มีความเหมาะสมทางกายภาพและเคมีที่สุด และมีคุณภาพปุ๋ยหมักที่ดีที่สุด

เปรมสุดา จิ๋วนอก (2550) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของลักษณะทางกายภาพ เคมีและชีวภาพของปุ๋ยหมักที่มีแหล่งไนโตรเจนต่างกันกับระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสมบูรณ์ต่างกัน โดยทำปุ๋ยหมักด้วยวัตถุดิบที่เป็นแหล่งคาร์บอน ได้แก่ ใบจามจุรีและผักตบชวาในอัตราส่วน 20 : 10 กิโลกรัมน้ำหนักเปียก กับแหล่งไนโตรเจนที่แตกต่างกัน ได้แก่ ปุ๋ยยูเรีย เศษปลานิลสด มูลสุกรและกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานไก่สดแช่เย็น (กากตะกอน) โดยคุมสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 30:1 หมักปุ๋ยหมักในถังพลาสติกปริมาตร 0.79 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งทำการเจาะรูที่ตัวถังและทำท่อเจาะรูเสียบตรงกลางถังเพื่อการระบายอากาศ ทำการควบคุมความชื้นที่ร้อยละ 50-60 ด้วยการรดน้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS และใช้มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 ตามประกาศกรมวิชาการเกษตรเป็นเกณฑ์สำหรับการประเมินคุณสมบัติของปุ๋ยหมัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชุดการทดลองที่	วัสดุผสม
1	ใบไม้แห้ง ผักตบชวา ปุ๋ยยูเรีย
2	ใบไม้แห้ง ผักตบชวา ปุ๋ยยูเรีย
3	ใบไม้แห้ง ผักตบชวา เศษปลานิลสด
4	ใบไม้แห้ง ผักตบชวา เศษปลานิลสด

ชุดการทดลองที่	วัสดุผสม
5	ใบไม้แห้ง ผักตบชวา มูลสุกร
6	ใบไม้แห้ง ผักตบชวา มูลสุกร
7	ใบไม้แห้ง ผักตบชวา กากตะกอน
8	ใบไม้แห้ง ผักตบชวา กากตะกอน

พบว่าปุ๋ยหมักทุกการทดลองนั้นสามารถนำไปใช้งานได้แม้ว่าจะมีธาตุอาหารหลักที่ต่ำกว่าเกณฑ์ แหล่งไนโตรเจนที่แตกต่างมีความสัมพันธ์ต่อการย่อยสลายสมบูรณ์และปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม แต่ไม่มีความสัมพันธ์ต่อระยะเวลาการย่อยสลายสมบูรณ์ เพราะจากการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในปุ๋ยยูเรีย มูลสุกร เศษปลานิลสดและกากตะกอนที่มีค่าร้อยละ 46 2.81 2.53 และ 2.03 ตามลำดับ แต่ระยะเวลาในการย่อยสลายสมบูรณ์ของปุ๋ยยูเรีย มูลสุกร เศษปลานิลสดและกากตะกอนที่มีค่า 49 70 56 และ 60 วัน ตามลำดับ

สุทธี พลรักษา (2552) ได้ศึกษาการทำปุ๋ยหมักจากผักตบชวาผสมมูลโคโดยใช้สารเร่งชีวภาพ เพื่อศึกษาคุณลักษณะตัวเร่งชีวภาพที่นำมาใช้ในการทดลอง และเพื่อศึกษาเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก ปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม และค่าพีเอชในปุ๋ยหมักที่ได้จากผักตบชวาผสมมูลโคโดยใช้สารเร่งชีวภาพในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งทำปุ๋ยหมักแบบบ่ออิฐบล็อกขนาดความกว้าง ความยาวและความสูง เท่ากับ 1 x 1 x 1 เมตร พร้อมท่อพลาสติก PVC ขนาดกว้าง 6 นิ้ว ยาว 1 เมตรเจาะรูรอบท่อ 120 รูๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตรใส่ในบ่อหมักๆ ละ 1 ท่อและท่อขนาดกว้าง 1 นิ้วยาว 12 นิ้ว ใช้เป็นท่อระบายน้ำที่ด้านล่างของบ่อหมัก จำนวน 2 ท่อ มีหลังคาป้องกันฝนและแสงแดดจำนวน 9 บ่อ โดยใช้ผักตบชวาผสมมูลโคในอัตราส่วน 3:1 ทำการหมักแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งการเปรียบเทียบจะแบ่งเป็น 3 อัตราส่วน คือ (A1) บ่อที่ใส่สารเร่งชีวภาพอัตราส่วน 0 (A2) บ่อที่ใส่สารเร่งชีวภาพอัตราส่วน 1 : 100 และ (A3) บ่อที่ใส่สารเร่งชีวภาพอัตราส่วน 1 : 50 แต่ละอัตราส่วนดำเนินการ 3 ซ้ำ ควบคุมความชื้นให้อยู่ในช่วงร้อยละ 50–70 วัดอุณหภูมิและความชื้นทุกวัน พลิกกลับกองปุ๋ยหมักทุก 10 วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การทดลอง	อัตราส่วน			จำนวนการทำซ้ำ
	ผักตบชวา(กิโลกรัมน้ำหสักสด)	มูลโค (กิโลกรัมน้ำหนักเปียก)	สารเร่งชีวภาพ	
A1	99	33	0	3
A2	99	33	1:100	3
A3	99	33	1:50	3

พบว่า สารเร่งชีวภาพที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลมีกลิ่นหอมหมักดองวัดค่าพีเอชได้เท่ากับ 3.5 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ย่อยเซลลูโลสได้เท่ากับ 1.2 x 107 CFU/ml จากนั้นนำสารเร่งชีวภาพที่ได้ไปใช้เป็นสารเร่งปุ๋ยหมัก เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการทำปุ๋ยหมัก บ่อหมักที่ใส่สารเร่งชีวภาพอัตราส่วน 1 : 50 (A3) เร็วที่สุด รองลงมาคือบ่อหมักที่ใส่สารเร่งชีวภาพอัตราส่วน 1: 100 (A2) และช้าที่สุดคือบ่อหมักที่ไม่ใส่สารเร่งชีวภาพ (A1) โดยใช้เวลาหมักเฉลี่ยเท่ากับ 51.7, 54.3 และ 62.3 วัน ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการหมักแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($p<0.05$) ส่วนปริมาณธาตุอาหารหลัก (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) และค่าพีเอชของปุ๋ยหมักในบ่อ A1, A2 และ A3 ไม่แตกต่างกัน ($p> 0.05$) แต่อัตราส่วนของสารเร่งชีวภาพไม่มีผลต่อปริมาณของธาตุอาหารหลัก และค่าพีเอชในปุ๋ยหมักจากผักตบชวาผสมมูลโค จึงควรมีการส่งเสริมให้เกษตรกรนาสารเร่งชีวภาพไปใช้ในการลดระยะเวลาการทำปุ๋ยหมักต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Adhikari และคณะ (2009) ได้ค้นหาประสิทธิภาพของสารเพิ่มปริมาณ (Bulking Agent) ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เศษฟางข้าวสาลีสับ เศษฟางสับและเศษไม้ ร่วมกันกับเศษอาหาร (ซึ่งในที่นี้คือเศษผักผลไม้) ใน 3 สัดส่วนที่แตกต่างกันด้วยการทำปุ๋ยหมักประเภทภาชนะปิดแนวระนาบขนาด 3 ลิตร เป็นเวลา 10 วันและสำรวจช่วงอุณหภูมิและพีเอช จากนั้น นำไปทำบ่มในภาชนะปิดแนวตั้งเป็นเวลา 56 วันเพื่อวัดมวลที่สูญเสีย ธาตุอาหารสุดท้ายและประเมินระดับการย่อยสลาย

ชุดการทดลอง	การทดลองที่	อัตราส่วน (โดยน้ำหนักเปียก)
เศษอาหาร : เศษฟางข้าวสับ	1	2.0:1
	2	2.5:4
	3	3.4:1
	4	5.0:1
	5	8.9:1

ชุดการทดลอง	การทดลองที่	อัตราส่วน (โดยน้ำหนักเปียก)
เศษอาหาร : เศษฟางสับ	1	1.8:1
	2	3.3:1
	3	8.6:1
เศษอาหาร : เศษไม้	1	1.5:1
	2	2.9:1
	3	7.8:1

พบว่ามีแค่สัดส่วนระหว่าง เศษอาหารกับเศษฟางข้าวสาลีสับและเศษฟางสับที่สามารถเข้าถึงช่วง Thermophilic ภายใน 10 วัน ด้วยสัดส่วนกิโลกรัมน้ำหนักเปียกของเศษอาหาร:เศษฟางข้าวสาลีสับ 8.9:1 และ เศษอาหาร:เศษฟางสับ 8.6:1 ซึ่งหลังจากการบ่ม 56 วัน สองสัดส่วนดังกล่าวถูกย่อยสลายอย่างดีจนแถบไม่หลงเหลือเค้าโครงสารชีวมวลดั้งเดิมและไนโตรเจนทั้งหมดของปุ๋ยหมักเกินสารชีวมวลดั้งเดิม ในขณะที่สัดส่วนที่ใช้เศษไม้ถูกย่อยสลายต่ำที่สุดเนื่องจากเมื่อเกิดปุ๋ยหมักสุดท้ายยังเห็นเศษไม้อยู่และมีไนโตรเจนทั้งหมดต่ำกว่าสารชีวมวลเริ่มต้น แต่ในทุกชุดหมักของแต่ละสารเพิ่มปริมาณนั้นมีไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมดและโพแทสเซียมทั้งหมดอยู่ในช่วงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นปุ๋ยหมัก

Kalamdhad และ Kazmi (2009) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมีและชีวภาพของการทำปุ๋ยหมักระบบถังหมุนขนาด 250 ลิตร เจาะรู 2 รูเพื่อการระบายน้ำชะและเปิดช่องครึ่งหนึ่งไว้ทั้ง 2 ข้างของตัวถังเพื่อสร้างสภาวะมีอากาศ โดยใช้วัสดุหมักจากอัตราส่วนผสมของเสียอินทรีย์ที่แตกต่างกัน 3 อัตราส่วน ได้แก่ การทดลอง A (เศษหญ้า เศษผักและเศษอาหาร) การทดลอง B (มูลโค เศษผักและขี้เลื่อย) และการทดลอง C (มูลโค เศษอาหาร เศษผัก เศษกระดาษและขี้เลื่อย) และทุกการทดลองผสมมูลสัตว์ ซึ่งใส่วัสดุหมักเป็นร้อยละปริมาตร 70 ของปริมาตรถัง มีการกวนผสมด้วยมือ 4 รอบต่อวันในทุกวันของการทำปุ๋ยหมัก

การทดลอง	อัตราส่วน (โดยกิโลกรัมน้ำหนักเปียก)							น้ำหนักรวม (กก.น้ำหนักเปียก)
	เศษหญ้า	เศษผัก	เศษอาหาร	มูลโค	ขี้เลื่อย	เศษกระดาษ	มูลสัตว์	
A	15	15	10	0	0	0	5	45
B	0	20	0	25	10	0	5	60
C	0	10	25	18	10	4	5	72

พบว่าการทดลอง B ที่มีค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 22 นั้นสามารถทำให้เกิดปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพสูงที่สุดและย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์เร็วที่สุดภายใน 20 วัน ซึ่งปุ๋ยหมักสมบูรณ์ที่ 20 วันมีไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 2.11 ฟอสฟอรัสทั้งหมด 3.25 กรัม/กิโลกรัม คาร์บอนอินทรีย์ร้อยละ 24.82 และความชื้นสะสมร้อยละ 44 มีค่า BOD เท่ากับ 107 มิลลิกรัม/ลิตร ค่า COD เท่ากับ 454 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่า TC เท่ากับ 454 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าจำนวน Fecal streptococci เท่ากับ 120 Bacteria g^{-1} dw มีค่าจำนวน Fecal Coliform เท่ากับ 85 Bacteria g^{-1} dw และมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 1.658 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร การทดลอง C ที่มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 30:1 นั้น มีไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 4.34 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด 2.42 กรัม/กิโลกรัม คาร์บอนอินทรีย์ร้อยละ 35.29 และความชื้นสะสมร้อยละ 56.67 มีค่า BOD เท่ากับ 342 มิลลิกรัม/ลิตร ค่า COD เท่ากับ 538.56 มิลลิกรัม/ลิตร แต่มีเชื้อโรคมากที่สุด คือ มีค่า TC เท่ากับ $2.3x10^5$ มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าจำนวน Fecal streptococci เท่ากับ $2.1x10^4$ Bacteria g^{-1} dw มีค่าจำนวน Fecal Coliform เท่ากับ $2.5x10^4$ Bacteria g^{-1} dw และมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 1.53 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร และการทดลอง A มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 15:1 นั้น มีไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 2.08 ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด 4.62 กรัม/กิโลกรัม คาร์บอนอินทรีย์ร้อยละ 24.96 และความชื้นสะสมร้อยละ 53.68 มีค่า BOD เท่ากับ 205 มิลลิกรัม/ลิตร ค่า COD เท่ากับ 505.53 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่า TC เท่ากับ 15 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าจำนวน Fecal streptococci เท่ากับ 210 Bacteria g^{-1} dw มีค่าจำนวน Fecal Coliform เท่ากับ 10 Bacteria g^{-1} dw และมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 4.84 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร แต่ไม่สามารถเข้าสู่การย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ภายใน 20 วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Muntjeer และคณะ (2009) ได้ศึกษาปัจจัยทางกายภาพเคมีและชีวภาพบางตัวที่มีผลต่อกระบวนการทำปุ๋ยหมักเป็นเวลา 7 วันต่อรอบการเติมตามช่วงพื้นที่ตัวถังหมัก (Zone) และค้นหาวิธีการบ่มที่เหมาะสมที่สำหรับในช่วง 3 ฤดูกาล (1 ฤดูหนาว 2 ฤดูใบไม้ผลิ และ 3 ฤดูร้อน) ของการหมักระบบกองแถวและระบบปุ๋ยมูลไส้เดือนดินภายในเวลา 20 วัน จากระบบถังหมุนเติมต่อเนื่องแบบเติมอากาศตลอดเวลาขนาด 3.5 ลูกบาศก์เมตร ด้วยเศษผัก มูลโค เศษใบไม้แห้งและขี้เลื่อย ซึ่งในแต่ละการทดลองมีน้ำหนักของวัสดุรวมเท่ากับ 40 กิโลกรัม

วิธีการการบ่ม	การทดลองที่ (ฤดู)
การทำปุ๋ยหมักแบบกองแถว (M1)	1
	2
	3
การทำปุ๋ยหมักด้วยไส้เดือนดิน (M2)	1
	2
	3

พบว่าในระหว่างการทำปุ๋ยหมัก พบอุณหภูมิในช่วงพื้นที่เติม (Inlet Zone) 60-70 องศาเซลเซียส ช่วงกลาง (Middle Zone) 50-60 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงกลางนี้มีการย่อยสลายสูงสุดในถังหมัก ตัวแปรต่างๆอย่างคาร์บอนอินทรีย์ อัตราคาร์บอนต่อไนโตเจน การเปลี่ยนแปลงของ CO_2 และโคลิฟอร์มมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญภายในเวลาไม่กี่วัน และปุ๋ยหมักในถังหมักมีค่าไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 2.6 กับฟอสฟอรัสทั้งหมด 6 กรัม/กิโลกรัมภายในสัปดาห์ สำหรับการบ่มนั้น ระบบปุ๋ยมูลไส้เดือนดินมีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากค่า GI ของตัวอย่างที่มากกว่าตัวอย่างของระบบกองแถว

สุธีรา สุนทรารักษ์ (2553) ได้ศึกษาปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ เศษผัก ฟางข้าว ผักตบชวาและเศษใบจามจุรี แบ่งเป็น 4 การทดลอง โดยทำปุ๋ยหมักในบ่อคอนกรีต คุมค่าความชื้นสะสมร้อยละ 50-60 ระยะเวลา 90 วัน และทดสอบคุณภาพปุ๋ยหมักในแปลงทดลองพันธุ์ข้าวเหนียว กข 6 ที่แตกต่างกัน 4 แปลง ได้แก่ ดินเดิม ดินเดิมกับปุ๋ยคอก (อัตรา 2 ตันต่อไร่) กินเดิมกับปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-18 (อัตรา 0.03 ตันต่อไร่) และดินเดิมกับปุ๋ยหมักจากการทดลองที่มีคุณภาพดีที่สุด (อัตรา 0.06 ตันต่อไร่)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การทดลอง	อัตราส่วน (โดยกิโลกรัมน้ำหนักเปียก)				
	เศษอาหาร	เศษผัก	เศษฟางข้าว	เศษผักตบชวา	เศษใบจามจุรี
1	40	40	0	0	0
2	40	0	40	0	0
3	40	0	0	40	0
4	40	0	0	0	40

พบว่า ปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษใบจามจุรี มีคุณภาพดีกว่าปุ๋ยหมักในทุกแปลงทดลอง ทั้งในด้านลักษณะภายนอกและปริมาณธาตุอาหารหลัก เนื้อปุ๋ยหมักมีลักษณะอ่อนนุ่ม ยุ่ยขาดง่าย มีกลิ่นคล้ายดิน สีของวัสดุหมักมีสีน้ำตาลเข้มและมีการย่อยสลายได้ดีกว่าทุกกรรมวิธีทั้ง ๆ ที่ไม่มีการตัดย่อยเศษวัสดุก่อนทำการหมัก อีกทั้งมีปริมาณธาตุอาหารหลัก จัดอยู่ในเกณฑ์สูงกว่ากรรมวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแม้ว่าจะมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่น้อยกว่าปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับผักตบชวา แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ จึงสรุปได้ว่า ปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษใบจามจุรีสามารถใช้ประโยชน์ทางการเกษตรโดยการนำมาทำเป็นปุ๋ยหมักเพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดีขึ้นได้

Arslan และคณะ (2011) ได้ค้นหาผลของอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมที่สุดเพื่อความสำเร็จของการทำปุ๋ยหมักและการทำปุ๋ยหมักระดับเศรษฐกิจ โดยทำปุ๋ยหมักด้วยเศษผักผลไม้ ขี้เลื่อยและตะกอนน้ำเสียในสัดส่วน 3.75 : 1.75 : 1.75 กิโลกรัมน้ำหนักเปียก ระบบภาชนะปิดขนาด 1.5 ลิตรจำนวน 6 ถังปฏิกรณ์ซึ่งเติมอากาศที่แตกต่างกัน (0.37 0.49 0.62 0.74 0.86 และ 0.99 ลิตรต่อนาที กิโลกรัมของแข็งระเหย) เป็นเวลา 20 วัน และทำการวัดค่าตัวแปรความชื้น อุณหภูมิ ค่าพีเอช สภาพการนำไฟฟ้า อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน และเซลลูโลส

การทดลองที่	อัตราส่วนวัสดุ (กิโลกรัมน้ำหนักเปียก)			อัตราอากาศ (ลิตรต่อนาที)
	เศษผักผลไม้	ขี้เลื่อย	ตะกอนน้ำเสีย	
1	3.75	1.75	1.75	0.37
2				0.49
3				0.62
4				0.74
5				0.86
6				0.99

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

พบว่าถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราการเติมอากาศสูงสุดจะมีความชื้นต่ำกว่าถังอื่นๆ สำหรับถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำสุดนั้นจะเข้าสู่อุณหภูมิช่วง Thermophilic ก่อนและคงอยู่ในช่วงนั้นหลายวัน ช่วงพีเอชที่แตกต่างกันไม่มีนัยสำคัญสำหรับอัตราการเติมอากาศ สภาพการนำไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ถังที่เติมอากาศ 0.62 ลิตรต่อนาที กิโลกรัมของแข็งระเหยและเซลลูโลสในตอนท้ายมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้อาจกล่าวได้ว่าที่อัตราการเติมอากาศ 0.62 ลิตรต่อ

นาที กิโลกรัมของแข็งระเหยนั้นเหมาะสมที่สุดสำหรับการทำปุ๋ยหมักจากเศษผักผลไม้แบบบังคับเติมอากาศ

นริสรา พานพ่วง และ และ สาวิตรี จันทรานุรักษ์ (2555) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชที่มีอยู่ในปุ๋ย 3 ชนิด คือ ปุ๋ยหมักธรรมชาติ ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินโดยใช้ไส้เดือนดิน *Eudrilus eugeniae* และปุ๋ยหมักพด.1 ที่ใช้วัสดุหมักเริ่มต้นเป็นมูลโคกับเศษผัก (เปลือกแตงโม) ในอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก โดยทำปุ๋ยมูลไส้เดือนดินในกล่องพลาสติกทึบขนาดความกว้าง 27 เซนติมตร ยาว 37 เซนติเมตร และสูง 17 เซนติเมตร เจาะรูที่ฝาด้านบนเพื่อให้มีการระบายอากาศ

การทดลอง	อัตราส่วน (โดยน้ำหนักแห้ง)		วัตถุดิบอื่น (100 กรัม)
	มูลโค	เศษผัก	
ปุ๋ยหมักธรรมชาติ	3	1	ไม่มี (ควบคุม)
ปุ๋ยพด. 1	3	1	ปุ๋ยหมักพด. 1
ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน	3	1	ไส้เดือนดิน *Eudrilus eugeniae*

พบว่า ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสเฟตทั้งหมด ปริมาณอินทรียวัตถุ และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนมากที่สุดในปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน ซึ่งแตกต่างจากปุ๋ยหมักธรรมชาติ และปุ๋ยหมัก พด.1 อย่างมีนัยสำคัญรองลงมา คือ ปุ๋ยหมักธรรมชาติ และปุ๋ยหมัก พด.1 ตามลำดับ ส่วนปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดพบว่าปุ๋ยทั้งสามชนิดมีปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยปุ๋ยหมัก พด.1 ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและปุ๋ยหมักธรรมชาติ มีค่าร้อยละปริมาณโพแทสทั้งหมด 3.69 3.38 และ 3.10 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Jiang และคณะ (2015) ได้ศึกษาการลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการทำปุ๋ยหมักและลดการใช้พลังงานในกระบวนการทำปุ๋ยหมักขนาดนำร่อง วัตถุดิบเป็นมูลสุกรกับซังข้าวโพดในอัตราส่วน 7 ต่อ 1 ในกล่องไม้ขนาด 1.21 ลูกบาศก์เมตร กว้าง 1.08 เมตร ยาว 0.8 เมตร สูง 1.4 เมตร โดยเติมอัตราการเติมอากาศแบบบังคับที่แตกต่างกัน โดยแบ่งเป็น 5 การทดลอง คือ เติมอากาศแบบต่อเนื่อง (การทดลอง C0, C1, C2 และ C3 ในอัตราการเติมอากาศ 0, 0.18, 0.36, และ 0.54 ลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อนาที ตามลำดับ) และไม่ต่อเนื่อง (การทดลอง I1 ในอัตราการเติมอากาศเฉลี่ย 0.36 ลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อนาที โดยเติม 40 นาที เว้น 20 นาที) ระยะเวลาภายใน 70 วันสำหรับแต่ละการทดลอง พลิกกองทุก 14 วัน ซึ่งวัดแก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) และแก๊สไนตรัส (N_2O) และพลังงานที่ใช้ไป

การทดลอง	อัตราส่วน (มวลน้ำหนักเปียก)		อัตราการเติมอากาศ (ลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งต่อนาที)	วิธีการเติมอากาศ (แบบบังคับ)
	มูลสุกร	ซังข้าวโพด		
C0	7	1	0	ไม่เติม
C1			0.18	แบบต่อเนื่อง
C2			0.36	แบบต่อเนื่อง
C3			0.54	แบบต่อเนื่อง
I1			0.54	แบบไม่ต่อเนื่อง (เติม 40 นาที หยุด 20 นาที)

พบว่าอัตราการเติมอากาศและการเติมอากาศมีผลกระทบต่อการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกอย่างมีนัยสำคัญ โดยในการทดลองที่เติมอากาศต่อเนื่องที่อัตราการเติมอากาศที่สูง (C2 และ C3) แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) และแก๊สไนตรัส (N_2O) จะถูกปลดปล่อยสูง แต่ลดการปลดปล่อยของแก๊สมีเทน (CH_4) ส่วนในการทดลองที่มีการเติมอากาศต่อเนื่องที่อัตราการเติมอากาศต่ำและไม่เติมอากาศหรือเติมอากาศแบบไม่บังคับ (C1 และ C0) แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) และแก๊สไนตรัส (N_2O) จะถูกปลดปล่อยต่ำ แต่เพิ่มการปลดปล่อยของแก๊สมีเทน (CH_4) ส่วนการเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องจะลดการปลดปล่อยแอมโมเนีย (NH_3) และแก๊สมีเทน (CH_4) แต่เพิ่มการปลดปล่อยแก๊สไนตรัส (N_2O) ซึ่งการเติมอากาศแบบต่อเนื่องทำให้เกิดอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกสูงกว่าแบบไม่บังคับเติมอากาศ แม้ว่าจะเร่งกระบวนการให้เสร็จสมบูรณ์เร็วขึ้น แต่ไม่เพิ่มคุณภาพของปุ๋ยหมักสุดท้าย เทียบกับการเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องที่สามารถเพิ่มออกซิเจน (O_2) ในระบบและลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกโดยรวมได้ร้อยละ 17.8 และสามารถลดได้ถึงร้อยละ 47.4 ตามลำดับ หากการทำปุ๋ยหมักเสร็จสมบูรณ์ภายใน 36 วัน

Chadwick และคณะ (2016) ได้ศึกษาผลของอัตราการเติมอากาศกับการทำปุ๋ยหมักจากตะกอนน้ำเสียที่มีผลต่อความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักและการปลดปล่อยของแก๊สเรือนกระจก โดยทำปุ๋ยหมักด้วยตะกอนน้ำเสียที่รีดน้ำแล้วและยังไม่ผ่านการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศกับซังข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 85 : 15 โดยน้ำหนักเปียก ตามลำดับ และมีมวลวัสดุหมักเริ่มต้นเท่ากับ 40 กิโลกรัม ซึ่งทำปุ๋ยหมักในเครื่องทำปุ๋ยหมักระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory-scale) ขนาด 60 ลิตร

เป็นเวลา 35 วัน ซึ่งมีระบบควบคุมสภาวะในการทำปุ๋ยหมักให้เป็นระบบปิด ซึ่งอัตราการเติมอากาศนั้น มี 3 อัตรา ได้แก่ 0.1 0.2 และ 0.3 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

การทดลองที่	อัตราส่วนวัสดุ (กิโลกรัมน้ำหนักเปียก)		อัตราอากาศ (ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)	จำนวนทำการทดลองซ้ำ
	ตะกอนน้ำเสีย	ซังข้าวโพด		
1	34	6	0.1	3
2			0.2	3
3			0.3	3

พบว่าในอัตราที่ 0.1 และ 0.2 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง นั้นมีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักและความเป็นฮิวมัสในดีกรีสูงและถึงเกณฑ์สาธารณสุข โดยไม่ความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ 0.3 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง นั้นมีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักและความเป็นฮิวมัสในดีกรีต่ำและไม่ถึงเกณฑ์สาธารณสุข สำหรับการปลดปล่อยแก๊สนั้น ที่ 0.1 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง มีการปลดปล่อยแก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สไนตรัส (N_2O) มากที่สุดและมีการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกรวมสูงที่สุด ส่วนที่ 0.2 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง มีการปลดปล่อยแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) สูงที่สุด และที่ 0.3 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สูงที่สุดและมีการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกรวมต่ำที่สุด ซึ่งส่งผลให้ทางผู้ทำวิจัยคณะนี้ได้แนะนำว่าอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับการทำปุ๋ยหมักตะกอนน้ำเสีย คือ 0.2 ลิตรต่อนาทีต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Ratanatamskul และ Taeporamaysamai (2016) ได้ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพเพื่อประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์จากการทดลองทำปุ๋ยหมักร่วมด้วยระบบมูลไส้เดือนดิน โดยใช้ไส้เดือนดินสายพันธุ์ *Eudrilus eginiae* ผสมกับจุลินทรีย์ โดยใช้วัสดุหมักเป็นของเสียอินทรีย์ 4 ชนิด ได้แก่ มูลโคแห้ง ของเสียจากครัว ตะกอนน้ำเสีย และเศษผักตลาด แบ่งออกเป็น 7 การทดลอง โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ขนาด คือ ขนาดเริ่มต้นที่ทดลองทำปุ๋ยหมักด้วยกองปุ๋ยหมักระบบปุ๋ยมูลไส้เดือนดินในถังพลาสติกขนาดประมาณ 32 ลิตร มีการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ค่าตัวแปร 3 ซ้ำในแต่ละการทดลอง และขนาดที่สองที่ทดลองทำปุ๋ยหมักด้วยถังปฏิกรณ์ปุ๋ยหมักระบบปุ๋ยมูลไส้เดือนดินต้นแบบขนาดประมาณ 260 ลิตร ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ทำปุ๋ยหมักนี้ติดตั้งและเดินระบบในสถานที่

เดียวกันกับแหล่งกำเนิดของเสีย (On-site) ภายในอาคารที่มีการถ่ายเทอากาศดี โดยระยะเวลาของการทดลองทั้ง 2 ระยะเท่ากับ 60 วัน และตรวจวัดทุก 10 วัน

การทดลอง	อัตราส่วนโดยปริมาตร (ร้อยละ)				ไส้เดือนดิน (กรัม)
	มูลโคแห้ง	ของเสียจากครัว	ตะกอนน้ำเสีย	เศษผักตลาด	
Tr1	100	0	0	0	108
Tr2	20	80	0	0	108
Tr3	20	0	80	0	108
Tr4	20	0	0	80	108
Tr5	50	25	0	25	108
Tr6	20	40	0	40	108
Tr7	20	40	40	0	108

พบว่าในทั้ง 2 ขนาดการทดลอง ปุ๋ยหมักในทุกการทดลองยกเว้น Tr6 และ Tr7 นั้นมีค่าธาตุอาหารสูงกว่าปุ๋ยหมักทั่วไป ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ทำปุ๋ยหมักระบบมูลไส้เดือนดินที่พัฒนาแล้วจะสามารถผลิตปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพได้ตามมาตรฐานปุ๋ยหมัก เครื่องปฏิกรณ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการทำปุ๋ยหมักร่วมและสร้างผลประโยชน์แก่พื้นที่อยู่อาศัยได้จริงเนื่องจากความมีประสิทธิภาพสูงของกระบวนการย่อยสลายด้วยไส้เดือนดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Neugebauer และ Sołowiej (2017) ได้ค้นหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดระหว่างของเสียจากครัว (ผลไม้ตระกูลส้ม เปลือกผัก ไขมันและอื่นๆ) กับของเสียจากสวน ใช้ปุ๋ยหมัก 2 กิโลกรัมเป็นตัวเร่งในแต่ละการทดลอง ในแต่ละสัปดาห์จะเติมวัสดุหมักตามอัตราส่วน 3 กิโลกรัมน้ำหนักเปียกทดลองในระบบหลุมขนาด 0.5 ลูกบาศก์เมตรและระบบถังขนาด 0.5 ลูกบาศก์เมตร เติมอากาศแบบธรรมชาติ (Passive Aeration) รวม 12 การทดลอง เป็นเวลา 123 วัน โดยสนใจการปลดปล่อย NH_3 และอุณหภูมิ และไม่ดัดแปลงอัตราคาร์บอนต่อไนโตเจนและความพรุน

ระบบการทำปุ๋ยหมัก	การทดลองที่	อัตราส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)	
		ของเสียจากสวน	ของเสียจากครัว
หลุม	1	100	0
	2	80	20
	3	60	40
	4	40	60
	5	20	80
	6	0	100
ระบบการทำปุ๋ยหมัก	การทดลองที่	อัตราส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)	
		ของเสียจากสวน	ของเสียจากครัว
ถัง	1	100	0
	2	80	20
	3	60	40
	4	40	60
	5	20	80
	6	0	100

พบว่าอัตราส่วนที่เข้าถึงช่วงอุณหภูมิสูงสุดได้ในกองปุ๋ยหมักนั้นคือของเสียจากครัวร้อยละ 40 กับของเสียจากสวนร้อยละ 60 ส่วนสัดส่วนที่มีการปลดปล่อย NH_3 สะสมมากที่สุดที่พบในกองปุ๋ยหมักในระบบหลุมและระบบถังคืออัตราส่วนของเสียจากสวน ร้อยละ 0 และอัตราส่วนที่มีการปลดปล่อย NH_3 สะสมน้อยที่สุดที่พบในระบบหลุมและระบบถังคืออัตราส่วนของเสียจากสวนร้อยละ 100 และร้อยละ 60 ซึ่งในช่วงระยะแรกของทุกกองปุ๋ยหมักเกิดกระบวนการทำปุ๋ยหมักที่สำเร็จภายใน 8 สัปดาห์นับจากเริ่มการทดลอง และองค์ประกอบทางเคมีในปุ๋ยหมักเทียบเท่ากับมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมักของโปแลนด์

ธันนิดา กงทอง (2561) ได้ทดลองทำปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไส้เดือนดินเพื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารหลักของปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไส้เดือนดินจากการย่อยสลายขยะกระดาษและขยะอินทรีย์โดยใช้ไส้เดือนดินต่างชนิดกัน 2 สายพันธุ์ ได้แก่ ไส้เดือนดินพันธุ์ท้องถิ่น *Pheretima peguana* (PP) หรือ ขี้ตาแร่ และสายพันธุ์ *Eudrilus eugeniae* ชื่อสามัญ African Night Crawler (AF) ขยะอินทรีย์เตรียมโดยนำขยะสด (ส่วนใหญ่เป็นเศษผักและเศษอาหาร) และใบไม้แห้ง (ผสมในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) ผสมกับมูลสัตว์ อัตราส่วน 2:1 ส่วนขยะกระดาษ นำมาบดละเอียดผสมกับมูลสัตว์อัตราส่วน 2:1 นำขยะทั้ง 2 ชนิด พรมด้วยจุลินทรีย์ Effective Microorganisms (EM) 50 มิลลิลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ต่อลิตร แล้วพลิกกลับปุ๋ยทุกๆ 3 วัน จนกระทั่งเป็นปุ๋ยหมัก ส่วนปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน จัดเตรียมพื้นที่เลี้ยงโดยนำดินร่วนใส่ลงไปในถัง ให้สูง 6 นิ้ว (น้ำหนัก 13 กิโลกรัม) แล้วทำการพรมน้ำ ให้มีความชื้นโดยประมาณร้อยละ 70-80 นำไส้เดือนดินใส่ถัง 0.2 กิโลกรัมต่อถัง (ถังละ 1 สายพันธุ์) หลังจากนั้นเตรียมอาหารสำหรับเลี้ยงไส้เดือนดิน โดยนำขยะสดและใบไม้แห้ง (ผสมในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) และเศษกระดาษ มาบดละเอียด พรมด้วยจุลินทรีย์ EM 50 มิลลิลิตรต่อลิตร หมักไว้เป็นอาหารสำหรับเลี้ยงไส้เดือนดิน โดยนำอาหารใส่ในถังเลี้ยงไส้เดือนดินที่ความหนา 2 เซนติเมตร (น้ำหนัก 1 กิโลกรัม) ระยะเวลาที่จะเก็บมูลไส้เดือนดิน 2 เดือน ในขณะที่น้ำหมักมูลไส้เดือนดินเตรียมโดยนำมูลไส้เดือนดินจำนวน 0.5 กิโลกรัม ผสมกากน้ำตาล 100 มิลลิลิตร น้ำ 1 ลิตร และจุลินทรีย์ 50 มิลลิลิตร หมักที่ระยะเวลา 14 วัน งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองและวิเคราะห์ในระดับห้องปฏิบัติการ

ชุดการทดลอง	การทดลอง	อัตราส่วน (โดยน้ำหนักเปียก)				EM (มิลลิลิตรต่อลิตร)
		ขยะสด	ขยะกระดาษ	ใบไม้แห้ง	มูลสัตว์	
ปุ๋ยหมัก	ชยะอินทรีย์	1	0	1	1	50
	ขยะกระดาษ	0	2	0	1	50
ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน	สายพันธุ์ PP + ขยะอินทรีย์	1	0	1	1	50
	สายพันธุ์ PP + ขยะกระดาษ	0	2	0	1	50
	สายพันธุ์ AF + ขยะอินทรีย์	1	0	1	1	50
	สายพันธุ์ AF + ขยะกระดาษ	0	2	0	1	50

พบว่า ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช อินทรียวัตถุ และ ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์มีมากกว่าปุ๋ยหมักจากขยะกระดาษเท่ากับร้อยละ 0.993, ร้อยละ 0.039, ร้อยละ 2.180, ร้อยละ 18.755 และ 25.350 Cmol/kg ตามลำดับ ในขณะที่ปุ๋ยหมักจากขยะกระดาษ มีค่าการนำไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 14.610 dS/m ค่าพีเอชของปุ๋ยหมักทั้ง 2 ชนิด มีค่าพีเอชใกล้เคียงกัน ประมาณ 8.25-8.26 เมื่อศึกษาค่าธาตุอาหารหลักของปุ๋ยมูลไส้เดือนดินจากการย่อยสลายขยะกระดาษและขยะอินทรีย์ พบว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช อินทรียวัตถุ ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก และค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน AF จากขยะอินทรีย์ มีค่ามากที่สุด เท่ากับร้อยละ 0.440, ร้อยละ 0.031, ร้อยละ 0.352, ร้อยละ 11.770, 16.275 Cmol/kg และ 1.200 dS/m ตามลำดับ ในขณะที่ค่าพีเอชของปุ๋ยมูลไส้เดือนดินทั้ง 4 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 7.347-7.667 เมื่อศึกษาธาตุอาหารหลักของน้ำหมักมูลไส้เดือนดินที่ย่อยสลายกระดาษและขยะอินทรีย์ พบว่า TKN, อินทรียวัตถุ และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน AF จากขยะกระดาษมีค่ามากที่สุด เท่ากับร้อยละ 0.025, ร้อยละ 1.487 และ 14.330 dS/m ตามลำดับ ในขณะที่น้ำหมักมูลไส้เดือนดิน AF จากขยะอินทรีย์ มีค่าร้อยละฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และค่าร้อยละโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช มากที่สุดเท่ากับ 0.034 และ 0.278 ตามลำดับ ค่าพีเอชของน้ำหมักมูลไส้เดือนดินทั้ง 4 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 4.693-5.293

Asses และคณะ (2018) ได้ศึกษาหาการทำปุ๋ยหมักระหว่างตะกอนน้ำเสียกับของเสียชีวมวล 2 ชนิด ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง P1 และ P2 ด้วยตะกอนน้ำเสีย ของเสียโรงงานน้ำมันมะกอก (ในรูปของแข็งและของเหลว) และของเสียสีเขียว(เศษพืช) โดยทำปุ๋ยหมักในถังไม้กว้าง 0.8 เมตร ยาว 1 เมตรและหนา 0.9 เมตร ขนาด 720 ลิตร เติมอากาศโดยการพลิกกอง เป็นเวลา 60 วันต่อชุดการทำปุ๋ยหมัก เพื่อหาว่าชุดการทดลองใดที่สามารถเพิ่มคุณภาพแก่ผลผลิตทางเกษตร ด้วยการวัดค่าตัวแปรทางกายภาพเคมีและชีวภาพเพื่อวัดคุณภาพปุ๋ยหมัก วัดค่าดัชนีการงอกกับเมล็ดข้าวโพดและเมล็ดมะเขือเทศเพื่อวัดความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก และการใช้ปุ๋ยหมักร่วมกับพีท (Peat) ในสัดส่วนร้อยละ 30 และ 50 (ปริมาตรต่อปริมาตร) ในกระถาง 0.5 ลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การทดลอง	อัตราส่วนวัสดุ (ร้อยละ โดยมวลน้ำหนักเปียก)			
	ตะกอนน้ำเสีย	ของเสียโรงงานน้ำมันมะกอกในรูปของแข็ง	ของเสียโรงงานน้ำมันมะกอกในรูปของแข็ง	ของเสียสีเขียว
P1	50	25	25	-
P2	50	-	-	50

พบว่าทั้ง 2 ชุดมีเชื้อโรคลดลงอย่างมากและมีคุณภาพใกล้เคียงกับมาตรฐานปุ๋ยหมักระดับการค้า สำหรับค่าดัชนีการงอกของเมล็ดข้าวโพดและเมล็ดมะเขือเทศนั้นต่างผ่านเกณฑ์ทั้ง 2 ชุด (ได้

ค่าดัชนีการงอกมากกว่าร้อยละ 50) โดย P1 คือร้อยละ 79.68 และ 97.36 ตามลำดับ ส่วน P2 คือ ร้อยละ 74.45 และ 81.45 ตามลำดับ และการใช้ปุ๋ยหมักร่วมกับพืชในทั้ง 2 สัดส่วนนั้นช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของทั้งข้าวโพดและมะเขือเทศโดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Bharti และคณะ (2018) ได้ค้นหาวัตถุดิบชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดในท้องถิ่น (ภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือของอินเดีย) สำหรับการใช้งานเป็นสารเพิ่มปริมาณในการทำปุ๋ยหมักร่วมกับเศษผักและมูลโค ได้แก่ ผักตบชวา เศษพืชตัดแต่งสวนและขี้เลื่อย ซึ่งมีมวลของเสียรวม 100 กิโลกรัม โดยทำปุ๋ยหมักในระบบถังหมุนขนาด 550 ลิตรเป็นเวลา 30 วัน จากในระบบถังหมุน 7 วันเพื่อการแปรชีวมวลเป็นปุ๋ยหมักดิบและระบบกองแถว 23 วันเพื่อการบ่มให้เป็นปุ๋ยหมัก

การทดลอง	วัสดุผสม	อัตราส่วน (โดยน้ำหนัก)
T1	เศษผัก มูลโค ขี้เลื่อย	6:3:1
T2	เศษผัก มูลโค ผักตบชวา	6:3:1
T3	เศษผัก มูลโค เศษพืชตัดแต่งส่วน	6:3:1

พบว่าขี้เลื่อยเป็นสารเพิ่มปริมาณที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในท้องถิ่นดังกล่าวเนื่องจากการทดลองที่มีขี้เลื่อยเป็นส่วนผสม (T1) มีค่าสูงสุดของดัชนีการงอก (Germination Index: GI) อยู่ที่ร้อยละ 110 รองลงมาคือเศษพืชตัดแต่งสวนที่มีค่า GI อยู่ที่ร้อยละ 90 และผักตบชวาที่มีค่า GI อยู่ที่ร้อยละ 85

Garg และคณะ (2019) ได้สืบค้นศักยภาพในระบบการทำปุ๋ยหมักแบบถังแบบกระจายไม่มีศูนย์กลางระดับครัวเรือน ในการบำบัดของเสียย่อยสลายได้แบบเปียกจากครัวเรือน (HWBW) จากแหล่งกำเนิดของเสียซึ่งเป็นการบำบัดในแบบต่อเนื่องและจากการทำปุ๋ยหมักด้วย HWBW ของเสียจากสวนที่ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหญ้าที่ถูกตัดและใบไม้ (GW) และของเสียผสมด้วย HWBW และ GW ด้วยอัตราส่วน 8:1 โดยน้ำหนัก ร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ทางการค้า (EM1) ที่แตกต่างกัน และมีองค์ประกอบต่างกัน ซึ่งแบ่งเป็น 6 อัตราส่วน ได้แก่ D1 D2 D3 D4 D5 และ D6 ซึ่ง D1 ถึง D4 มีการเติม HWBW ที่ 6 กิโลกรัมน้ำหนักเปียก ส่วน D5 ถึง D6 มีการเติม HWBW ที่ 2.5 กิโลกรัมน้ำหนักเปียก ด้วยการทำปุ๋ยหมักด้วยถังด้วยถังจากการรีไซเคิลในแนวตั้งในปริมาตร 100 ลิตร (ขนาดสูง 0.55 เมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.48 เมตร) ซึ่งมี 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 ซึ่งไม่มีการเจาะรูรอบถัง และแบบที่ 2 ซึ่งมีการเจาะรูขนาด 10 มิลลิเมตรรอบถังเพื่อการเติมอากาศประเภทไม่บังคับ

โดยหลังจากผ่านช่วงการทำงานของการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมัก จะนำออกมาเก็บไว้ในที่เก็บกักเพื่อให้วัสดุหมักกลายเป็นปุ๋ยหมักเป็นเวลา 14 วัน โดยถือว่าปุ๋ยหมักที่มีขนาดอนุภาคละเอียดน้อยกว่า 4 มิลลิเมตรนั้นเป็น ‘ปุ๋ยหมักสุดท้าย’ และมีการทดสอบความเป็นพิษของพืชด้วยเมล็ดต้นเทียนแดงด้วยการผสมของดินท้องถิ่นและปุ๋ยหมักที่ได้จากแต่ละการทดลองที่อัตราส่วน 90:10 (ดินปุ๋ยหมักร้อยละ 10) 80:20 (ดินปุ๋ยหมักร้อยละ 20) และ 70:30 (ดินปุ๋ยหมักร้อยละ 30)

องค์ประกอบ	การทดลอง					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
ระยะเวลารอบการเติม HWBW (วัน)	12	12	12	12	15	15
รูรอบถัง	x	/	/	/	/	/
การพลิกกอง	x	/	/	/	/	/
การเติม EM1 (ครั้ง)	x	x	4	1	1	1
การเติม GW	x	x	x	x	x	/

โดย / แทนทำตามองค์ประกอบ และ x แทนไม่ทำตามองค์ประกอบ

พบว่าทุกการทดลองได้ปุ๋ยหมักสมบูรณ์ที่ระยะเวลา 30-36 วัน ทุกการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมอากาศและรอบการพลิกกองนั้นเป็นสิ่งจำเป็นในการผลิตปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดี การเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมสามารถลดระยะเวลาในการทำให้ของเสียในระบบทำปุ๋ยหมักเสถียร ระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 36 วัน พบว่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่าสูงกว่า 55 องศาเซลเซียสในการทดลอง D2 ถึง D6 และมีปุ๋ยหมักสุดท้ายที่ร้อยละ 18-20 ของปุ๋ยหมักที่ได้ ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อพืชแสดงให้เห็นว่าดินปุ๋ยหมักร้อยละ 20 จากการทดลอง D2 ถึง D6 นั้นมีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นสารปรับสภาพดินหรือปุ๋ยสำหรับต้นเทียนแดงได้ อีกทั้งยังพบว่าการเติมหัวเชื้อตั้งแต่เริ่มแรกกระบวนการทำปุ๋ยหมักมีความเพียงพอต่อการทำให้ช่วงการทำงานของการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมักสำเร็จได้ภายใน 30 วัน และจากผลการทดลองข้างต้นทำให้คณะผู้ดำเนินวิจัยชุดนี้ได้เสนอว่าแบบถังนั้นสามารถเป็นทางเลือกที่เป็นได้สำหรับการผลิตปุ๋ยหมักจาก HWBW โดยสามารถบำบัด HWBW ได้ 2-3 กิโลกรัมต่อวัน

Han และคณะ (2019) ได้สืบค้นศักยภาพของปุ๋ยหมักสมบูรณ์ที่มีผลต่อการลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกระหว่างการทำปุ๋ยหมักด้วยของเสียจากครัว (ซึ่งมีเศษผักและเศษผลไม้เป็นส่วนใหญ่

ที่ร้อยละ 41.5 และร้อยละ 38.2 ตามลำดับ) ร่วมกับซังข้าวโพดที่ซึ่งใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณที่อัตราส่วนของเสียครัวต่อซังข้าวโพด 17:3 โดยน้ำหนักเปียก และปุ๋ยหมักสมบูรณ์ถูกเพิ่มเข้ามาผสมลงในกองปุ๋ยหมักหรือคลุมกองปุ๋ยหมักที่ปริมาณร้อยละ 10 ของวัตถุดิบหมักโดยน้ำหนักเปียก และมีอัตราส่วนควบคุมที่ซึ่งไม่มีการเพิ่มปุ๋ยหมักสมบูรณ์ลงไปในกองปุ๋ยหมักเพื่อการเปรียบเทียบ โดยทดลองทำปุ๋ยหมักด้วยเครื่องปฏิกรณ์ทำปุ๋ยหมักทรงกระบอกแบบแนวตั้งขนาด 60 ลิตร (ขนาดสูง 0.6 เมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.36 เมตร) ที่หุ้มด้วยเหล็กกล้าสแตนเลสเพื่อเป็นฉนวนเก็บกักความร้อนและติดตั้งระบบการเติมอากาศประเภทบังคับที่ซึ่งสามารถปรับให้เติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องได้โดยอัตโนมัติจากด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยระยะเวลาการเติมอากาศ 30 นาทีและระยะเวลาเว้นการเติมอากาศ 30 นาที ตลอดระยะเวลา 35 วัน ที่อัตราอากาศ 0.4 ลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง

อัตราส่วน	วัตุดิบ		
	ของเสียจากครัว (อัตราส่วนโดยน้ำหนักเปียก)	ซังข้าวโพด (อัตราส่วนโดยน้ำหนักเปียก)	ปุ๋ยหมัก (ร้อยละของวัตถุดิบหมักโดยน้ำหนักเปียก)
ควบคุม	17	3	0
ปกคลุม	17	3	10
ผสม	17	3	10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พบว่าปุ๋ยหมักสมบูรณ์ส่งผลต่อกระบวนการทำปุ๋ยหมักอย่างมีนัยยะสำคัญในด้านการบรรเทาการปลดปล่อยของแก๊สเรือนกระจก ซึ่งการปลดปล่อยของแก๊สเรือนกระจกในอัตราส่วนที่มีปุ๋ยหมักสมบูรณ์ร่วมอยู่ด้วยนั้นมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอัตราส่วนผสมที่มีการลดลงของแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) แก๊สมีเทน (CH4) และแก๊สไนตรัส (N_2O) ถึงร้อยละ 58.0 ร้อยละ 44.8 และร้อยละ 73.6 ตามลำดับ โดยไนโตรเจนอาจถูกเก็บกักไว้ซึ่งทำให้เพิ่มธาตุอาหารไนโตรเจนและดัชนีการงอกของเมล็ดในปุ๋ยหมัก นอกจากนี้ การปลดปล่อยของแก๊สเรือนกระจกทั้งหมดระหว่างการทำปุ๋ยหมักของอัตราส่วนผสมนั้นถูกลดลงถึงร้อยละ 69.2 และอัตราส่วนปกคลุมนั้นมีการลดลงของการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกต่ำกว่าอัตราส่วนผสมโดยถูกลดลงเพียงร้อยละ 37.4

Hu และคณะ (2019) ได้ประเมินกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการทำปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศ จากการทำปุ๋ยหมักด้วยตะกอนน้ำเสียชุมชนและขี้เลื่อยร่วมกับปุ๋ยหมักสมบูรณ์

โดยแบ่งออกเป็น 2 อัตราส่วน คือ กอง A ซึ่งมีอัตราส่วนเป็นตะกอนน้ำเสียชุมชนและขี้เลื่อยที่ร้อยละ 75 และร้อยละ 25 ตามลำดับ และกอง B ซึ่งมีอัตราส่วนเป็นตะกอนน้ำเสียชุมชน ขี้เลื่อยและปุ๋ยหมักสมบูรณ์ที่ร้อยละ 75 ร้อยละ 12.5 และร้อยละ 12.5 ตามลำดับ โดยทดลองทำปุ๋ยหมักด้วยเครื่องปฏิกรณ์ทำปุ๋ยหมักแบบแนวตั้งขนาด 280 ลิตร (ขนาดสูง 1.2 เมตรและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 เมตร) ที่ทำห่อหุ้มด้วยแผ่นยางหนา 3 เซนติเมตรเพื่อเป็นฉนวนความร้อนและติดตั้งเครื่องเป่าอากาศไว้ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยอัตราอากาศ 0.5 ลิตรต่อนาทีกิโลกรัมที่ 0-2 วัน (ก่อนการทำปุ๋ยหมักถึงวันที่ 2 ของการทำปุ๋ยหมัก) และอัตราอากาศ 1.87 ลิตรต่อนาทีกิโลกรัมที่ 3-10 (วันที่ 3 ถึงวันที่ 10 ของการทำปุ๋ยหมัก) วัน โดยมีระยะเวลาในการเติมอากาศ 3 นาที และระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 17 นาที ตลอดระยะเวลาการทดลอง 10 วัน

อัตราส่วน	วัตถุดิบ		
	ตะกอนน้ำเสียชุมชน (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)	ขี้เลื่อย (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)	ปุ๋ยหมักสมบูรณ์ (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)
กอง A	75	25	0
กอง B	75	12.5	12.5

พบว่าปุ๋ยหมักสมบูรณ์มีผลทำให้ลดอัตราความร้อน ช่วง Thermophilic อุณหภูมิสูงสุดและการย่อยสลายอินทรียวัตถุ โดยไม่มีผลต่อพีเอชและดัชนีการงอกของเมล็ดอย่างมีนัยยะสำคัญ ที่อัตราส่วนซึ่งมีปุ๋ยหมักสมบูรณ์ (กอง B) ในช่วง Initial mesophilic นั้นมีเอนไซม์ cellulase peroxidase arylsulfatase และ urease เพิ่มขึ้น ส่วนในช่วง Cooling นั้นมีเอนไซม์ urease เพิ่มขึ้น แต่มีเอนไซม์ cellulase peroxidase protease และ arylsulfatase ลดลง และไม่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่ช่วง Thermophilic โดยปุ๋ยหมักสมบูรณ์มีผลทำให้เพิ่มความหลากหลายของแบคทีเรียในระหว่างช่วง Initial mesophilic และช่วง Thermophilic แต่มีลดความหลากหลายของฟังไจตลอดการทำปุ๋ยหมัก โดยเพิ่มความเป็นแบบเดียวกันของชุมชนแบคทีเรียและส่งผลต่อโครงสร้างของชุมชนแบคทีเรียและชุมชนฟังไจ ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานของจุลินทรีย์บางกลุ่มและการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้คณะผู้ทำวิจัยชุดนี้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ว่าสามารถนำปุ๋ยหมักสมบูรณ์มาใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณแทนที่ขี้เลื่อยได้ถึงร้อยละ 50% เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำปุ๋ยหมัก

Cheng และคณะ (2020) ได้ประเมินผลของอัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันที่มีผลต่อตัวแปรทางกายภาพและเคมีและศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มแบคทีเรียและการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ระหว่างการทำปุ๋ยหมัก จากการทำปุ๋ยหมักด้วยมูลโคและฟางด้วยอัตราส่วนเท่ากัน (1:1)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

และที่ 3 อัตราส่วนการเติมอากาศที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.45 0.68 และ 0.90 ลิตรต่อนาทีกิโลกรัมน้ำหนักเปียก โดยทดลองทำปุ๋ยหมักด้วยเครื่องปฏิกรณ์ทำปุ๋ยหมักแบบแนวตั้งขนาด 60 ลิตรและติดตั้งระบบการเติมอากาศประเภทบังคับที่ซึ่งสามารถปรับให้เติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องได้โดยอัตโนมัติ ด้วยระยะเวลาในการเติมอากาศ 5 นาทีและระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 45 นาทีตลอดระยะเวลา 60 วัน

อัตราส่วน	อัตราการเติมอากาศ (ลิตรต่อนาทีกิโลกรัมน้ำหนักเปียก)
A10	0.45
A15	0.68
A20	0.90

พบว่าอัตราการเติมอากาศที่สูงมีผลทำให้เพิ่มเอนไซม์ cellulase urease alkaline และ acid phosphatase แต่มีผลทำให้ลดเอนไซม์ invertase และ catalase โดยเอนไซม์ cellulase alkaline phosphatase และ catalase นั้นเป็นเอนไซม์หลักที่ส่งผลต่อกระบวนการทำปุ๋ยหมัก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทางชีวภาพได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการเติมอากาศที่สูงนั้นยังมีผลทำให้เพิ่มความเป็นแบบเดียวกันของชุมชนแบคทีเรียในช่วง Thermophilic แต่มีผลทำให้ลดช่วง Curing/Mature อัตราการเติมอากาศที่แตกต่างกันส่งผลต่อโครงสร้างชุมชนแบคทีเรียและอิทธิพลต่อความสัมพันธ์ระหว่างเอนไซม์และการทำงานของแบคทีเรีย การคุมอุณหภูมิ ความชื้นสะสมและสภาพการนำไฟฟ้าในเฉพาะเจาะจงของแต่ละช่วงระยะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินั้นมีผลต่อความสำเร็จของชุมชนแบคทีเรีย สรุปได้ว่า อัตราการเติมอากาศ 0.68 ลิตรต่อนาทีกิโลกรัมน้ำหนักเปียกนั้นมีความเป็นไปได้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการทำปุ๋ยหมักด้วยมูลโคและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตทางการเกษตรได้อย่างพร้อมกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Cui และคณะ (2020) ได้ศึกษาผลของการเติมอากาศประเภทไม่ต่อเนื่องต่อการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกและความสำเร็จของชุมชนแบคทีเรียระหว่างการทำปุ๋ยหมักด้วยการทำปุ๋ยหมักแบบเติมอากาศขนาดใหญ่ซึ่งมีการคลุมของเมมเบรน จากการทำปุ๋ยหมักด้วยมูลไก่และเศษเห็ดที่อัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนักเปียกและทุกอัตราส่วนมีการเพิ่มสารหัวเชื้อจากบริษัท Leading Bio-agricultural Co. ในประเทศจีนจำนวน 75 กิโลกรัม โดยทดลองทำปุ๋ยแบบท่อแถวซึ่งมีขนาดกองประมาณกว้าง 6 เมตร ยาว 20 เมตรและสูง 1.8 เมตร คลุมด้วยเมมเบรนที่มีแกนเป็น polytetrafluoroethylene ที่จะปล่อยให้ไอน้ำระเหยออกไปได้แต่ไม่ปล่อยให้สารมีกลิ่นออกไปได้ และติดตั้งระบบการเติมอากาศประเภทบังคับด้วยท่อเติมอากาศข้างใต้กองปุ๋ยหมัก ที่ซึ่งสามารถปรับให้เติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งแบ่งเป็น 2 อัตราส่วนตามการเติมอากาศที่แตกต่างกัน ได้แก่ ระยะเวลาในการเติม

อากาศ 10 นาทีและระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 10 นาที (อัตราส่วน 10-10 ซึ่งเป็นอัตราส่วนควบคุม) และ ระยะเวลาในการเติมอากาศ 10 นาทีและระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 30 นาที (อัตราส่วน 10-30 ซึ่งเป็นอัตราส่วนทดลอง) ตลอดระยะเวลา 36 วัน และมีการคุมอุณหภูมิตลอดการทดลองอยู่ที่ช่วงร้อยละ 50-60

อัตราส่วน	การเติมอากาศ	
	ระยะเวลาในการเติมอากาศ (นาที)	ระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ (นาที)
10-10	10	10
10-30	10	30

พบว่าการปลดปล่อยของแก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สไนตรัส (N_2O) ที่ซึ่งถูกปลดปล่อยออกสู่ด้านนอกเมมเบรนในอัตราส่วนควบคุม (อัตราส่วน 10-10) ที่ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 9.68 และร้อยละ 47.1 ตามลำดับเมื่อเทียบกับอัตราส่วนทดลอง (อัตราส่วน 10-30) และมีค่าศักยภาพการก่อภาวะโลกร้อนที่ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 9.77 เมื่อเทียบกับอัตราส่วนทดลอง จากผลการทดสอบด้วย Wilcoxon rank-sum ได้บ่งชี้ให้เห็นว่าแบคทีเรียในไฟลัม Tenericutes เป็นไฟลัมที่แตกต่างจากจุลินทรีย์ในไฟลัมอื่นอย่างมีนัยยะสำคัญในระหว่าง 2 อัตราส่วน และมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายเซลลูโลส จากผลการวิเคราะห์สัดส่วนของความแปรปรวนได้บ่งชี้ให้เห็นว่าอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนนั้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อการกระจายตัวของชุมชนแบคทีเรีย ที่ซึ่งหากมีค่าอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำก็จะทำให้แหล่งคาร์บอนไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้อัตราความร้อนช้าลงและลดระยะเวลาของช่วง Thermophilic โดยนอกจากนี้ ยังพบว่า *Pseudogracilibacillus* และ *Tepidimicrobium* นั้นมีความสัมพันธ์ต่ออัตราการปลดปล่อยแก๊สไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ตามลำดับ ดังนั้น ระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศในการทำปุ๋ยหมักโดยมีเมมเบรนปกคลุมนั้นอาจจะเป็นประโยชน์ต่อยุทธศาสตร์สำหรับการจำกัดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกและมีผลต่อโครงสร้างชุมชนแบคทีเรีย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 การกำหนดตัวแปร

การทดลองนี้ต้องการศึกษาตัวแปรทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก ซึ่งแสดงตัวแปรดังกล่าวไว้ในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ประเภทตัวแปร	ค่าตัวแปร	ค่าที่เลือกใช้
ตัวแปรต้น	รอบการเดินระบบ	2 4 และ 8 รอบ
	ปริมาตรของวัตถุดิบสำหรับขนาด 1.25 ลิตร	0 0.2 0.3 และ 0.6 ลิตรน้ำหนักเปียก
	น้ำหนักของวัตถุดิบสำหรับขนาด 50 ลิตร	0 8 12 และ 24 ลิตรน้ำหนักเปียก
ตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิเริ่มต้น	อุณหภูมิบรรยากาศปกติ
	ความชื้นสะสม	ร้อยละ 50-60
	ค่าพีเอช	5.5-8.0
	ปริมาตรวัสดุหมักเริ่มต้นสำหรับขนาด 1.25 ลิตร	0.8 ลิตรน้ำหนักเปียก
	ปริมาตรวัสดุหมักเริ่มต้นสำหรับขนาด 50 ลิตร	32 ลิตรน้ำหนักเปียก
	อัตราการเติมอากาศ	0.75 ลิตรต่อนาที
	ระยะเวลาการทำปุ๋ยหมักต่อการทดลอง	ภายใน 20 วัน
ตัวแปรตาม	ค่าพีเอช	
	อุณหภูมิ	
	อินทรียวัตถุ (ร้อยละ)	
	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)	
	ความชื้นสะสม (ร้อยละ)	
	คาร์บอนทั้งหมด (ร้อยละ)	
	ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)	
	ฟอสฟอรัสทั้งหมด (P_2O_5) (ร้อยละของน้ำหนัก)	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

ประเภทตัวแปร	ค่าตัวแปร	ค่าที่เลือกใช้
ตัวแปรตาม	โพแทสเซียมทั้งหมด (K_2O) (ร้อยละของน้ำหนัก) อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (ร้อยละ) ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)	

เหตุผลสำหรับค่าที่เลือกใช้สำหรับตัวแปรทั้ง 3 สามชนิดนั้น ได้แก่

ตัวแปรต้น เป็นตัวแปรที่มีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมและศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีสำหรับการทำปุ๋ยหมักในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.2 และ 4.3

ตัวแปรควบคุม มีดังนี้

- อุณหภูมิเริ่มต้น: สาเหตุที่เลือกไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศปกติ เพราะการเตรียมวัสดุหมักเริ่มต้นโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ สามารถทำให้เกิดปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดีได้โดยไม่ต้องควบคุมอุณหภูมิ (สุภา อุ่นสกุล (2549) ; Arslan และคณะ (2011) ; ธันนิดา กงทอง (2561) ; Bharti และคณะ (2018))
- ความชื้นสะสม: ที่เลือกไว้ร้อยละ 50-60 เพราะเป็นช่วงความชื้นเริ่มต้นที่เหมาะสม
- ค่าพีเอช: ที่เลือกไว้ 5.5-8.0 เพราะเป็นช่วงค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม
- น้ำหนักวัสดุหมักเริ่มต้นสำหรับขนาด 1.25 ลิตร: ที่เลือกไว้ 0.5 กิโลกรัมน้ำหนักเปียก เพราะต้องการปริมาตรวัสดุหมักไม่เกินร้อยละ 70 เมื่อผสมรวมกันในภาชนะทำปุ๋ยหมัก (Kalamdhad และ Kazmi, 2009) ทั้งนี้ ได้เปลี่ยนเป็น 0.8 ลิตรน้ำหนักเปียกแทนเพราะมีอุปสรรคเรื่องวัสดุหมักเริ่มต้นล้นภาชนะทำปุ๋ยหมัก
- อัตราเติมอากาศ: ที่เลือกไว้ 0.75 ลิตรต่อนาที เพราะเครื่องเติมอากาศที่ให้อัตราอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาทีนั้นสามารถหาซื้อได้สะดวก รวมถึงเป็นอัตราอากาศที่ใกล้เคียงกับอัตราอากาศที่เหมาะสมสำหรับการทำปุ๋ยหมักระบบภาชนะปิดแบบบังคับเติมอากาศด้วยเศษผักผลไม้และตะกอนน้ำเสีย คือ 0.62 ลิตรต่อนาที (Arslan และคณะ, 2011)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- ระยะเวลาการทำปุ๋ยหมักต่อการทดลอง: ที่เลือกไว้ภายใน 20 วัน เพราะเป็นช่วงเวลาที่หลายงานวิจัยพบว่า สามารถเกิดการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ได้สำหรับการทำปุ๋ยหมักด้วยเศษผัก ซึ่งเป็นวัตถุดิบใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ (Kalamdhad และ Kazmi (2009) ; Muntjeer และคณะ (2009) ; Arslan และคณะ (2011))

ตัวแปรตาม เป็นตัวแปรที่ใช้ชี้วัดคุณภาพปุ๋ยหมักในงานวิจัยนี้เพื่อบ่งชี้ว่าอัตราส่วนใดที่เหมาะสมที่สุดและใช้ประกอบการวิเคราะห์ สรุปและอภิปรายผลการทดลอง ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.5 และ 4.6

4.2 การออกแบบการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทำปุ๋ยหมักในขนาดห้องปฏิบัติการ 2 ขนาด ได้แก่ ขนาด 1.25 ลิตร และขนาด 50 ลิตร โดยมีการคำนวณปริมาตรอากาศที่ต้องการสำหรับการทดลองขนาด 1.25 ลิตร ซึ่งแต่ละการทดลองสำหรับขนาด 1.25 ลิตร จากนั้นหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดมาทดลองทำปุ๋ยหมักในขนาด 50 ลิตร โดยการทดลองทุกขนาดจะทำการทดลองละ 3 ซ้ำ ซึ่งอัตราส่วนโดยน้ำหนักเปียกของวัตถุดิบสำหรับงานวิจัย จะดัดแปลงมาจากงานวิจัยอื่นที่มีความเกี่ยวข้องกับงาน ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 อัตราส่วนโดยลิตรน้ำหนักเปียกสำหรับงานวิจัย

การทดลองที่	เศษผักผลไม้*	เศษใบจามจุรี*	เศษกิ่งไม้*	ปุ๋ยหมักสมบูรณ์*	อ้างอิง
1	0.6	0	0	0.2	(สุภา อุ่นสกุล, 2549) (สุธีรา สุนทรารักษ์, 2553) (Arslan และคณะ, 2011)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักเปียกสำหรับงานวิจัย (ต่อ)

การทดลองที่	เศษผักผลไม้*	เศษใบจามจุรี*	เศษกิ่งไม้*	ปุ๋ยหมักสมบูรณ์*	อ้างอิง
2	0	0.6	0	0.2	(สุภา อุ่นสกุล, 2549) (สุธีรา สุนทรารักษ์, 2553) (Arslan และคณะ, 2011)
3	0	0	0.6	0.2	(สุภา อุ่นสกุล, 2549) (สุธีรา สุนทรารักษ์, 2553) (Arslan และคณะ, 2011)
4	0.3	0.3	0	0.2	(สุภา อุ่นสกุล, 2549) (สุธีรา สุนทรารักษ์, 2553) (Arslan และคณะ, 2011)
5	0.2	0.2	0.2	0.2	(พูนศักดิ์ จันทร์จำปี, 2541) (สุภา อุ่นสกุล, 2549) (สุธีรา สุนทรารักษ์, 2553) (Arslan และคณะ, 2011)

* หมายเหตุ: หน่วยเป็นลิตรน้ำหนักเปียก

เหตุผลที่ใช้อัตราส่วนดังนี้ เนื่องจากในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมีของเสียที่เป็นเศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้ที่มีปริมาณที่เสี่ยงต่อการก่อให้เกิดแหล่งสะสมของเสียซึ่งจะก่อมลพิษจากขยะได้ โดยเฉพาะเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีที่ซึ่งมีความเหมาะสมที่สำหรับการทำปุ๋ยหมัก และมีหลายงานวิจัยที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ดังนี้

Arslan และคณะ (2011) ได้ทดลองทำปุ๋ยหมักแบบบังคับเติมอากาศด้วยเศษผักผลไม้ ขี้เลื่อยและตะกอนน้ำเสีย โดยมีอัตราส่วนเป็น เท่ากับร้อยละ 50 25 และ 25 กิโลกรัมน้ำหนักเปียกตามลำดับ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้เศษกิ่งไม้แทนขี้เลื่อย และเลือกใช้ปุ๋ยหมักสมบูรณ์แทนตะกอนน้ำเสีย

เศษใบจามจุรีนั้นสามารถหมักร่วมกับเศษอาหารทำให้เกิดปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดี (สุทธี พลรักษา, 2552) ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้เศษผักผลไม้แทนเศษอาหาร ส่วนปุ๋ยหมักสมบูรณ์นั้นมีความ

เหมาะสมต่อการเป็นหัวเชื้อให้แก่วัสดุหมักเริ่มต้น เนื่องจากสามารถเร่งการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ได้ (สุภา อุ่นสกุล, 2549) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ผสมปุ๋ยหมักสมบูรณ์ลงในทุกอัตราส่วน

และการทำปุ๋ยหมักโดยใช้วัตถุดิบหลายชนิดผสมกันโดยมีใบไม้แห้งเป็นองค์ประกอบนั้นทำปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดีได้ (พูนศักดิ์ จันทร์จำปี, 2541)

ซึ่งได้เปรียบเทียบการทดลองทำปุ๋ยหมักที่สอดคล้องกับงานวิจัย ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบการทดลองทำปุ๋ยหมักที่สอดคล้องกับงานวิจัย

หัวข้อ	งานวิจัย				
	พูนศักดิ์ จันทร์จำปี (2541)	สุภา อุ่นสกุล (2549)	สุธีรา สุนทรารักษ์ (2553)	Arslan และคณะ (2011)	งานวิจัยนี้
ประเภท	-ถังหมุนเปิด 300 ลิตร -กล่องหมักเปิด 550 ลิตร -โรงบ่มเปิด	-ถังพลาสติกขนาด 10 ลิตร	-บ่อคอนกรีตเปิดไม่ทราบขนาด	-ภาชนะปิดแนวตั้งขนาด 1.5 ลิตร	-ภาชนะปิดแนวตั้ง 1.25 ลิตร -ถังหมุนปิด 50 ลิตร
วัตถุดิบ	-เศษอาหาร -เปลือกข้าว -ขี้เลื่อย -ใบไม้แห้ง -เปลือกถั่วลิสง -เทอร์โมฟิลิคแบคทีเรีย	-เศษอาหาร -ปุ๋ยคอก -หัวเชื้อปุ๋ยเพชร-วิทย์-1	-เศษอาหาร -เศษผัก -ฟางข้าว -ผักตบชวา -เศษใบจามจุรี	-เศษผักผลไม้ -ขี้เลื่อย -ตะกอนน้ำเสีย	-เศษผักผลไม้ -เศษใบจามจุรี -เศษกิ่งไม้ -ปุ๋ยหมักสมบูรณ์
ระยะเวลาต่อ 1 การทดลอง (วัน)	90	35	90	20	20
การเติมอากาศ	ไม่บังคับ	ไม่บังคับ	ไม่บังคับ	บังคับ: ต่อเนื่อง	บังคับ: ไม่ต่อเนื่อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.1 ค่าองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณปริมาตรอากาศที่ต้องการและอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel 2007 ในการช่วยคำนวณ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 โดยคำนวณ

ได้จากสมการหาปริมาตรอากาศที่ต้องการสำหรับระบบปิดและการคำนวณค่า C (คาร์บอน) H (ไฮโดรเจน) O (ออกซิเจน) และ N (ไนโตรเจน) ซึ่งได้แสดงค่าสัดส่วนดังกล่าวไว้ในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 สัดส่วนองค์ประกอบเคมีทั่วไปของของวัตถุดิบสำหรับทำปุ๋ยหมักในการทดลอง

วัตถุดิบ	ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง				อ้างอิง
	C	H	O	N	
เศษผักผลไม้	48.50	6.20	39.50	1.40	(Tchobanoglous และคณะ, 1993)
เศษใบจามจุรี	44.60	7.80	34.37	4.33	(Charoenchang และคณะ, 2003) (Gupta และคณะ, 2018)
เศษกิ่งไม้	43.54	3.59	51.70	1.00	(Sulaiman และคณะ, 2018)
ปุ๋ยหมักสมบูรณ์	29.65	3.97	16.57	2.60	(Adhikari และคณะ, 2009) (Razmjoo และคณะ, 2015)

ซึ่งมีมวลน้ำหนักเปียกเท่ากับ 0.5 กิโลกรัม และมวลน้ำหนักแห้งเท่ากับ 0.2 กิโลกรัม ซึ่งขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้ (Tchobanoglous และคณะ, 1993)

ขั้นที่ 1: คำนวณหาองค์ประกอบเคมีที่ไม่มีน้ำ เพื่อหาองค์ประกอบเคมีที่มีน้ำต่อไป

ตัวอย่าง เศษผักผลไม้ :

C = (48.5 x 0.2 กิโลกรัม) / 100 = 0.0970 กิโลกรัม

H = (6.20 x 0.2 กิโลกรัม) / 100 = 0.0124 กิโลกรัม

O = (39.50 x 0.2 กิโลกรัม) / 100 = 0.0790 กิโลกรัม

N = (1.40 x 0.2 กิโลกรัม) / 100 = 0.0028 กิโลกรัม

ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-5 องค์ประกอบเคมีที่ไม่มีน้ำของวัตถุดิบ (กิโลกรัม)

วัตถุดิบ	องค์ประกอบเคมีที่ไม่มีน้ำ (กิโลกรัม)			
	C	H	O	N
เศษผักผลไม้	0.0970	0.0124	0.0790	0.0028
เศษใบจามจุรี	0.0892	0.0156	0.0687	0.0087
เศษกิ่งไม้	0.0871	0.0072	0.1034	0.0020
ปุ๋ยหมักสมบูรณ์	0.0593	0.00794	0.03314	0.0052

ขั้นที่ 2: คำนวณหาองค์ประกอบเคมีที่มีน้ำ เพื่อหาโมลขององค์ประกอบเคมีที่มีน้ำต่อไป โดยค่า H กับ O จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการมีมวลน้ำ (H_2O) โดยสามารถหามวล H และมวล O ได้ดังนี้

$$\text{น้ำหนัก } H \text{ (กรัม)} = \text{โมลน้ำ } (2\text{กรัม/โมล})\ x \frac{\text{น้ำหนักน้ำ (กรัม)}}{\text{มวลโมเลกุลน้ำ } (18 \text{ กรัม/โมล})}$$

$$\text{น้ำหนัก } H \text{ (กรัม)} = 2 \text{ โมล } x \frac{300 \text{ (กรัม)}}{18 \text{ (กรัม/โมล)}}$$

$$\text{น้ำหนัก } H = 33.3 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนัก } O \text{ (กรัม)} = \text{โมลออกซิเจน } (16\text{กรัม/โมล})\ x \frac{\text{น้ำหนักน้ำ (กรัม)}}{\text{มวลโมเลกุลน้ำ}(18 \text{ กรัม/โมล})}$$

$$\text{น้ำหนัก } O \text{ (กรัม)} = 16 \text{ โมล } x \frac{300 \text{ (กรัม)}}{18 \text{ (กรัม/โมล)}}$$

$$\text{น้ำหนัก } O = 266.7 \text{ กรัม}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากนั้น คำนวณหามวล H และมวล O ที่มีน้ำต่อไป

ตัวอย่าง เศษผักผลไม้ :

H = 0.0124 + 0.0333 = 0.0457 กิโลกรัม

O = 0.0790 + 0.2667 = 0.3457 กิโลกรัม

ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 องค์ประกอบเคมีที่มีน้ำของวัตถุดิบ (กิโลกรัม)

วัตถุดิบ	องค์ประกอบเคมีที่มีน้ำ (กิโลกรัม)			
	C	H	O	N
เศษผักผลไม้	0.0970	0.0457	0.3457	0.0028
เศษใบจามจุรี	0.0892	0.0489	0.3354	0.0087
เศษกิ่งไม้	0.0871	0.0405	0.3701	0.0020
ปุ๋ยหมักสมบูรณ์	0.0593	0.0412733	0.2998067	0.0052

ขั้นที่ 3: คำนวณหาโมลขององค์ประกอบเคมีที่มีน้ำ เพื่อหาทำการนอร์มอลไรซ์ค่าองค์ประกอบเคมีต่อไป ซึ่งกำหนดให้น้ำหนักอะตอมของ C = 12 กิโลกรัม/โมล, H = 1 กิโลกรัม/โมล, O = 16 กิโลกรัม/โมล และ N = 14 กิโลกรัม/โมล

ตัวอย่าง เศษผักผลไม้ :

C = 0.0970 กิโลกรัม / 12 กิโลกรัม/โมล = 0.0081 โมล

H = 0.0124 กิโลกรัม / 1 กิโลกรัม/โมล = 0.0457 โมล

O = 0.0790 กิโลกรัม / 16 กิโลกรัม/โมล = 0.0216 โมล

N = 0.0028 กิโลกรัม / 14 กิโลกรัม/โมล = 0.0002 โมล

ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 องค์ประกอบเคมีที่มีน้ำของวัตถุดิบ (โมล)

วัตถุดิบ	องค์ประกอบเคมีที่มีน้ำ (โมล)			
	C	H	O	N
เศษผักผลไม้	0.0081	0.0457	0.0216	0.0002
เศษใบจามจุรี	0.0085	0.0489	0.0210	0.0004
เศษกิ่งไม้	0.0080	0.0405	0.0231	1.43×10^{-5}
ปุ๋ยหมักสมบูรณ์	0.0049	0.0413	0.0187	0.0004

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นที่ 4: ทำการนอร์มอลไรซ์ค่าองค์ประกอบเคมี ด้วยอัตรา N = 1

ตัวอย่าง เศษผักผลไม้ :

C = 0.0081 โมล / 0.0002 = 40.5 โมล

H = 0.0457 โมล / 0.0002 = 228.5 โมล

O = 0.0216 โมล / 0.0002 = 108.0 โมล

N = 0.0002 โมล / 0.0002 = 1.0 โมล

ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 องค์ประกอบเคมีที่มีน้ำของวัตถุดิบ ที่อัตรา N = 1

วัตถุดิบ	องค์ประกอบเคมีที่มีน้ำ ที่อัตรา N = 1			
	C	H	O	N
เศษผักผลไม้	40.4	228.5	108.0	1.0
เศษใบจามจุรี	12.0	79.1	33.9	1.0
เศษกิ่งไม้	50.8	283.6	161.9	1.0
ปุ๋ยหมักสมบูรณ์	13.3	111.1	50.4	1.0

ขั้นที่ 5 การหาองค์ประกอบทางเคมีของแต่ละอัตราส่วน

ตัวอย่าง การทดลองอัตราส่วนที่ 5 :

C = [(C เศษผักผลไม้ x น้ำหนักเศษผักผลไม้) + (C เศษใบจามจุรี x น้ำหนักใบจามจุรี) + (C เศษกิ่งไม้ x น้ำหนักเศษกิ่งไม้) + (C ตะกอนน้ำเสีย x น้ำหนักตะกอนน้ำเสีย)] / น้ำหนักสารหมักรวม

= [(40.4/1x 0.125) + (12/1x 0.125) + (50.8/1x 0.125) + (7.4/1x 0.125)] / 0.5

= 27.7

สำหรับค่า H O และ N ใช้สมการเหมือนกัน ยกเว้นเปลี่ยนตัวแปรเป็น H O และ N ของแต่ละวัตถุดิบ

โดยค่าองค์ประกอบเคมี C H O และ N ของแต่ละอัตราส่วนได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-9 ค่าองค์ประกอบเคมีของแต่ละการทดลองอัตราส่วนที่ 1 - 5

การทดลองอัตราส่วนที่	C	H	O	N
1	32.2	192.8	91.3	1.0
2	10.9	80.6	35.7	1.0
3	40.0	234.0	131.7	1.0
4	21.5	136.7	63.5	1.0
5	29.1	175.6	88.6	1.0

4.2.2 การเติมอากาศ

ตัวอย่าง: หาปริมาตรอากาศที่ใช้สำหรับการทำปุ๋ยหมักแบบภาชนะปิดด้วยการบังคับเติมอากาศด้วยสารหมัก 0.50 กิโลกรัม องค์ประกอบสัดส่วนเคมีของปุ๋ยหมักเท่ากับ $C_{27.7} H_{169.1} O_{86.2} N$ และกำหนดสภาพดังต่อไปนี้

1. ความชื้นสะสม (MC) = ร้อยละ 60 (มวลสารแห้ง (DM) = ร้อยละ 40)
2. ของแข็งระเหยง่าย (VS) = 0.9179 x ของแข็งทั้งหมด (TS)
3. VS ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ (BVS) = 0.62 x VS
4. ประสิทธิภาพการแปรสภาพ BVS ที่คาดหวัง (Exp BVS) = ร้อยละ 90
5. เวลาในการทำปุ๋ยหมัก (t) = 20 วัน
6. ร้อยละออกซิเจนที่ต้องการ = 20, 35, 25, 15, 5, 5, ..., 5 (1, 2, 3, 4, 5, 6, ..., 20 วัน)
7. NH_3 หายไปกับบรรยากาศ (ไม่คิด NH_3)
8. สัดส่วน O_2 ในอากาศ = ร้อยละ 23.2 โดยมวล
9. น้ำหนักเฉพาะของอากาศ = 1.202 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
10. ค่า Safety Factor = 2 (เผื่อไว้ให้สัดส่วน O_2 ในอากาศไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ในเชิงปฏิบัติ)

ซึ่งเลือกใช้ค่า VS เท่ากับ 0.9179 เพราะต้องการปริมาตรอากาศที่ต้องการให้เพียงพอสำหรับการย่อยสลายวัตถุดิบมีมีแนวโน้มถูกย่อยสลายสูงสุดได้ (เศษผักผลไม้) และใช้ค่า BVS เท่ากับ 0.62 เพราะเป็นค่าที่ได้จากการทดลองทำปุ๋ยหมักระบบภาชนพปิดแบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ถังหมุนด้วยของเสียอินทรีย์ชุมชน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในงานวิจัยนี้ (Baptista, 2009)

การคำนวณจะใช้โปรแกรม Microsoft Excel 2007 ช่วยในการคำนวณ ซึ่งมีตัวอย่างการคำนวณดังนี้ (Tchobanoglous และคณะ, 1993)

ขั้นที่ 1: หามวล BVS

มวล BVS = น้ำหนักปุ๋ยหมัก x มวลสารแห้ง (DM) x VS x BVS

= 0.50 กิโลกรัม x 0.40 x 0.9179 x 0.62

= 0.1138 กิโลกรัม

ขั้นที่ 2: หามวล ExpBVS

มวล ExpBVS = มวล BVS x ExpBVS

= 0.1138 กิโลกรัม x 0.90

= 0.1024 กิโลกรัม

ขั้นที่ 3: หาสัดส่วน O_2 ที่ต้องใช้

กำหนดให้ a = 27.7 , b = 228 , c = 108 , d = 1 หา O_2 ได้จากสมการดังนี้:

$$C_a H_b O_c N_d + (4a+b-2c-3d)O_2 / 4 \rightarrow aCO_2 + (b-3d)H_2O / 2 + dNH_3 \quad (4.1)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คำนวณหามวลของ CHON และ O_2 เพื่อนำมาคำนวณหา O_2 ที่ใช้ไปกับกระบวนการทำปุ๋ยหมัก ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 มวลของ CHON และ O_2 เพื่อการคำนวณหา O_2 ที่ใช้ไปกับกระบวนการทำปุ๋ยหมัก

CHON (กิโลกรัม)	O_2 (กิโลกรัม)	CO_2 (กิโลกรัม)	H_2O (กิโลกรัม)	NH_3 (กิโลกรัม)
1894.7	104.5	1218.8	166.1	17
1894.7	836	1218.8	1494.9	17
ปริมาณ O_2 ที่ต้องการ (กิโลกรัม O_2 / กิโลกรัม มวล ExpBVS)				
0.441231				

จากตาราง ปริมาณ O_2 ที่ต้องการสำหรับตัวอย่างนี้ เท่ากับ 0.441231 กิโลกรัมO_2/กิโลกรัมมวล ExpBVS

ขั้นที่ 4: หาปริมาตรอากาศที่ต้องใช้ (หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร)

$$\text{ปริมาตรอากาศที่ต้องใช้} = \frac{\text{มวล } \mathbf{ExpBVS \times O2} \text{ ที่ต้องการ}}{\text{สัดส่วน } \mathbf{O2} \text{ ในอากาศ } \boldsymbol{x} \text{ น้ำหนักเฉพาะของอากาศ}}$$

$$\frac{0.0972 \times 0.441231}{0.232 \; x \; 1.202}$$

= 0.162081 ลูกบาศก์เมตร

ขั้นที่ 5: หาอัตราอากาศที่ต้องใช้

อัตราอากาศ = (ปริมาตรอากาศที่ต้องใช้ x ค่า Safety Factor x ออกซิเจนที่ต้องการสูงสุดต่อวัน) / (1440 นาที/วัน)

= (0.162081 ลูกบาศก์เมตร x 2 x 0.35/วัน) / (1440 นาที/วัน)

= 7.8789 x 10^{-5} ลูกบาศก์เมตร/นาที

= 0.0788 ลิตร/นาที หรือ 113.4720 ลิตร/วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยปริมาตรอากาศที่ต้องการและอัตราอากาศของแต่ละอัตราส่วนได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ข้อมูลปริมาตรอากาศและอัตราอากาศสำหรับแต่ละอัตราส่วน

การทดลอง อัตราส่วนที่	ปริมาตรอากาศที่ต้องใช้ (ลิตร)	อัตราอากาศ	
		(ลิตรต่อนาที)	(ลิตรต่อวัน)
1	142.766	0.0694	99.93594
2	63.97711	0.0311	47.78397
3	71.881	0.034942	50.31665
4	97.376	0.047335	68.16311
5	106.929	0.05198	74.85051
สูงสุด	142.766	0.0694	99.93594
ต่ำสุด	63.97711	0.0311	47.78397
เฉลี่ย	96.585822	0.0469554	68.210036

4.2.3 การคำนวณค่าความพรุน

เพื่อให้ทุกอัตราส่วนมีความพรุนที่เหมาะสมต่อการทำปุ๋ยหมักแบบเติมอากาศ โดยค่า Bulking Density ของวัตถุดิบ ในตารางที่ 4-12 ดังนี้

ตารางที่ 4-12 ค่า Bulking Density ของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	ค่า Bulking Density (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	อ้างอิง
เศษผักผลไม้	410	Adhikari และคณะ (2009)
เศษใบจามจุรี	243	(United States Department of Agriculture, ออนไลน์, 2000)
เศษกิ่งไม้	769	(United States Department of Agriculture, ออนไลน์, 2000)
ปุ๋ยหมักสมบูรณ์	630	Adhikari และคณะ (2009)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คำนวณจากหลักการวัสดุหมักเริ่มต่นที่คลุกเคล้าเข้ากันดีเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จะได้สมการดังนี้

$$\text{BD รวม} = \frac{\text{ผลรวม } (\text{ค่า } \boldsymbol{BD} \text{แต่ละวัตถุดิบ } \boldsymbol{x} \text{ น้ำหนักวัตถุดิบ})}{\text{น้ำหนักวัสดุหมักรวมในแต่ละการทดลอง}}$$

ตัวอย่าง:

$$\text{BD รวม} = \frac{[410x0.125]+[243x0.125]+[769x0.125]+[838x0.125]}{0.5}$$

$$= \frac{282.5}{0.5}$$

= 565 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากนั้นนำค่า BD ที่ได้มาคำนวณหาค่าความพรุนที่อากาศสามารถแทรกเข้าไปได้ โดยมีสมการดังนี้ (Mancebo และ Hettiaratchi, 2015)

$$\text{TP} = 1 - \frac{BDxWs}{PD}$$

$$\text{AFP} = TP - \frac{BD(1-Ws)}{Pw}$$

โดย

TP = ความพรุนทั้งหมด

BD = ค่า Bulking Density (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

Ws = ค่า Solid Content (ร้อยละ) ซึ่งเท่ากับร้อยละ 40 (กำหนดความชื้นสะสมที่ร้อยละ 60)

PD = ค่า Particle Density (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

Pw = ค่าความหนาแน่นของน้ำ (997 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

AFP = ค่าความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ)

ตัวอย่าง:

ขั้นที่ 1: หาค่า TP

$$\text{TP} = 1 - \frac{565\ x\ 0.4}{565}$$

= 0.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นที่ 2: หาค่า AFP

$$\text{AFP} = 0.6 - \frac{565(1-0.4)}{997}$$

$$= 0.2599$$

4.2.4 การกำหนดอัตราส่วน

วัตถุดิบทั้งหมดจะนำมาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันดีให้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นคุมความชื้นเริ่มต้นให้อยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 (ด้วยการรีดน้ำและรดน้ำเพิ่ม) และปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 5.5-8.0 หากค่าพีเอชไม่อยู่ในช่วงดังกล่าว (ด้วยปุ๋ยหมักสมบูรณ์)

ในการทดลอง จะมีการเติมอากาศเป็นรอบการเติมอากาศ การพลิกกองและการวัดตัวแปร โดยมีความหมายของคำศัพท์ดังนี้

- รอบการเติมเดินระบบ หมายถึง ระยะเวลาที่มีทั้งการเติมอากาศด้วยการเดินเครื่องเติมอากาศเป่าให้อากาศเข้าไปในภาชนะหมักปุ๋ยในระยะเวลาหนึ่งและหยุดการเติมอากาศด้วยการหยุดเดินเครื่องเติมอากาศให้อากาศเข้าไปในภาชนะหมักปุ๋ยในระยะเวลาหนึ่ง
- การพลิกกอง หมายถึง สำหรับระบบขนาด 1.25 ลิตร จะเปิดฝาปิดภาชนะหมักปุ๋ยหมักแล้วใช้ทัพพีสแตนเลสกวน ผสมและพลิกกองวัตถุดิบหมักให้เข้ากัน แล้วปิดฝาปิดภาชนะหมักปุ๋ยหมัก ส่วนระบบขนาด 50 ลิตร จะใช้การหมุนแกนกวนผสมตามที่ออกแบบไว้
- การวัดตัวแปร หมายถึง เปิดฝาภาชนะหมักปุ๋ยหมัก แล้วใช้เครื่องมือวัดตัวอย่างในภาชนะหมักปุ๋ย หรือนำตัวอย่างปุ๋ยหมักออกมาวัดตัวแปรหรือส่งตัวอย่างให้สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อพัฒนาที่ดินเป็นผู้ตรวจวัด

จากการคำนวณเพื่อหาค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน ค่าปริมาตรอากาศที่ต้องการ และค่า Bulking Density ทางผู้ดำเนินงานวิจัยได้ออกแบบการทดลองออกเป็น 5 อัตราส่วน โดยแต่ละอัตราส่วนมีปริมาตรรวมเท่ากับ 0.8 ลิตรน้ำหนักเปียก ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 ค่าตัวแปรจากการคำนวณในทุกอัตราส่วน

การทดลอง อัตราส่วนที่	เศษผัก ผลไม้*	เศษใบ จามจุรี*	เศษ กิ่งไม้*	ปุ๋ยหมัก สมบูรณ์*	C/N	AFP (ร้อยละ)	ปริมาตรอากาศ ที่ต้องการ (ลิตร)
1	0.6	0	0	0.2	37.8	2.15	142.766
2	0	0.6	0	0.2	13.1	59.47	63.97711
3	0	0	0.6	0.2	27.9	40.62	71.881
4	0.3	0.3	0	0.2	35.2	62.14	97.376
5	0.2	0.2	0.2	0.2	34.3	55.27	106.929

หมายเหตุ:

* หน่วยเป็นลิตรน้ำหนักเปียก C/N คือ อัตราค่าบอนต่อไนโตรเจน APF คือ ค่าความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ)

เนื่องจากที่เติมอากาศแต่ละเครื่องให้อัตราอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที หรือ 1080 ลิตรต่อวัน ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังนี้

ความเร็ว (v) = 1 เมตรต่อวินาที

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อสายยางพลาสติก (d) = 0.4 เซนติเมตร

อัตราอากาศ (Q) , พื้นที่ (A)

$$A = \pi \times d^2 / 4 \quad (4.2)$$

$$= 3.14 \times (0.4 \times 10^{-2}\ m)^2 / 4$$

$$= 1.256 \times 10^{-5}\ m^2$$

$$Q = v \times A \quad (4.3)$$

$$= 1\ m/s \times 1.256 \times 10^{-5}\ m^2$$

$$= 1.256 \times 10^{-5}\ m^3/s$$

$$= 1.256 \times 10^{-2}\ L/s$$

$$= 0.75\ L/min$$

แต่จากการคำนวณปริมาตรอากาศที่ต้องใช้สำหรับการทำปุ๋ยหมักระบบปิด พบว่าปริมาตรอากาศที่ต้องการและอัตราการเติมอากาศแตกต่างกันในทุกอัตราส่วนโดยน้ำหนักเปียก และอัตราอากาศของเครื่องปั๊มเติมอากาศเท่ากับ 0.75 ลิตรต่อนาที หรือ 1080 ลิตรต่อวัน ทำให้ผู้ดำเนินงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิจัยเลือกปริมาตรอากาศที่ต้องใช้ที่มากที่สุด คือ 199.5 ลิตร ฉะนั้น จึงเลือกเติมอากาศ 266 นาทีต่อวัน ทางผู้ดำเนินการวิจัยจึงได้แบ่งการเติมอากาศแบบที่แตกต่างกัน มีเวลาการเติมอากาศในแต่ละวันเท่ากัน คือ 266 นาทีต่อวัน ซึ่งเป็นการเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการเติมอากาศที่สามารถลดแก๊สเรือนกระจกโดยรวมและเพิ่ม O_2 ในระบบได้ (Jiang และคณะ, 2015) โดยแบ่งรอบการเดินระบบเป็น 4 ชุดการทดลอง ดังนี้

- A: ไม่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ ที่สภาพแวดล้อมปกติ
- B: จำนวนรอบในการเติมอากาศ 8 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 24 นาที และระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 36 นาที (แต่ละรอบเท่ากับ 60 นาที)
- C: จำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 48 นาที และระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 72 นาที (แต่ละรอบเท่ากับ 120 นาที)
- D: จำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 96 นาที และระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 144 นาที (แต่ละรอบเท่ากับ 240 นาที)

โดยมีข้อมูลของทั้ง 20 การทดลองในตารางที่ 4-14 ดังนี้

ตารางที่ 4-14 ข้อมูลชุดการทดลองทำปุ๋ยหมัก

ชุดการทดลอง	การทดลองอัตราส่วนที่	เศษผักผลไม้*	เศษใบจามจุรี*	เศษกิ่งไม้*	ปุ๋ยหมักสมบูรณ์*	รวม*
A	1	0.6	0	0	0.2	0.8
	2	0	0.6	0	0.2	0.8
	3	0	0	0.6	0.2	0.8
	4	0.3	0.3	0	0.2	0.8
	5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8
B	1	0.6	0	0	0.2	0.8
	2	0	0.6	0	0.2	0.8
	3	0	0	0.6	0.2	0.8
	4	0.3	0.3	0	0.2	0.8
	5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-14 ข้อมูลชุดการทดลองทำปุ๋ยหมัก (ต่อ)

ชุดการทดลอง	การทดลองอัตราส่วนที่	เศษผักผลไม้*	เศษใบจามจุรี*	เศษกิ่งไม้*	ปุ๋ยหมักสมบูรณ์*	รวม*
C	1	0.6	0	0	0.2	0.8
	2	0	0.6	0	0.2	0.8
	3	0	0	0.6	0.2	0.8
	4	0.3	0.3	0	0.2	0.8
	5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8
D	1	0.6	0	0	0.2	0.8
	2	0	0.6	0	0.2	0.8
	3	0	0	0.6	0.2	0.8
	4	0.3	0.3	0	0.2	0.8
	5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8

* หมายเหตุ: หน่วยเป็นลิตรน้ำหนักเปียก

เวลาการปฏิบัติการสำหรับการทำปุ๋ยหมักมีทั้งหมด 8 ชั่วโมงต่อวันช่วงเช้าถึงเย็น ดังนี้

- ชั่วโมงที่ 1 เติมอากาศสำหรับการทดลอง B
- ชั่วโมงที่ 2 เติมอากาศสำหรับการทดลอง B C และ D
- ชั่วโมงที่ 3 เติมอากาศสำหรับการทดลอง B
- ชั่วโมงที่ 4 เติมอากาศสำหรับการทดลอง B และ C พลิกกองและวัดค่าตัวแปรต่างๆ
- ชั่วโมงที่ 5 เติมอากาศสำหรับการทดลอง B
- ชั่วโมงที่ 6 เติมอากาศสำหรับการทดลอง B C และ D
- ชั่วโมงที่ 7 เติมอากาศสำหรับการทดลอง B
- ชั่วโมงที่ 8 เติมอากาศสำหรับการทดลอง B และ C

4.3 วัสดุอุปกรณ์และวัตถุดิบ

4.3.1 สำหรับทำระบบหมักระบบภาชนะปิดขนาด 1.25 ลิตร

- เครื่องเติมอากาศ Mega 6000 15 เครื่อง (แต่ละเครื่องให้อัตราการเติมอากาศ 0.75 ลิตรต่อนาที)

- โหลแก้วใสมีฝา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 เซนติเมตร สูง 16.4 เซนติเมตร ปริมาตร 1250 มิลลิลิตร จำนวน 15 โหล
- เทปใส 1 ม้วน
- สายยางพลาสติกใส 3/4 นิ้ว 12 เมตร
- ฟิวเจอร์บอร์ด กว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร จำนวน 15 แผ่น
- ตะปู 1 ตัว
- แผ่นฉนวนกันความร้อนโฟมโพลีเอธิลีน กว้าง 0.9 เมตร ยาว 10 เมตร หนา 0.001 เมตร 1 ม้วน
- น้ำยากันแมลง 1 ขวด
- กระป๋องพลาสติก 1 กระป๋อง
- ทัพพีแสตนเลส 1 ด้าม

4.3.2 สำหรับวัดตัวแปร

- เครื่องวัดความเร็วลม รุ่น GM816 Anemometer
- เครื่องวัดความชื้นในดิน รุ่น DMM001
- เครื่องวัดพีเอช รุ่น Mettler Toledo
- เทอร์โมมิเตอร์ดิจิตอล รุ่น TP300
- เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า รุ่น ECM003

4.3.3 สำหรับทำปุ๋ยหมัก

4.3.3.1 เศษผักผลไม้

ได้จากเศษผักผลไม้ที่ได้จากร้านค้าโรงอาหารวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แล้วบดย่อยให้เล็กลง เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับปุ๋ยหมัก

4.3.3.2 เศษใบจามจุรี

ได้จากการเก็บรวบรวมใบจามจุรีที่ถูกตัดแต่งต้นไม้และเก็บกวาดใบไม้ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คัดเลือกแต่ใบที่แห้ง แล้วแยกหิน กรวด กิ่งและวัตถุดิบอื่นที่ไม่ใช่ใบไม้ออก แล้วบดย่อยให้เล็กลง เป็นแหล่งไนโตรเจนและสารเพิ่มปริมาณสำหรับปุ๋ยหมัก

4.3.3.3 เศษกิ่งไม้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ได้จากการเก็บรวบรวมกิ่งไม้ที่ถูกตัดแต่งต้นไม้ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยช่วงเวลาเปิดเทอม แล้วแยกหิน กรวด กิ่งและวัตถุดิบอื่นที่ไม่ใช่กิ่งไม้ออก แล้วบดย่อยให้มีขนาดเล็กลง เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับปุ๋ยหมักและสารเพิ่มปริมาณแก่วัสดุหมักเริ่มต้น

4.3.3.4 ปุ๋ยหมักสมบูรณ์

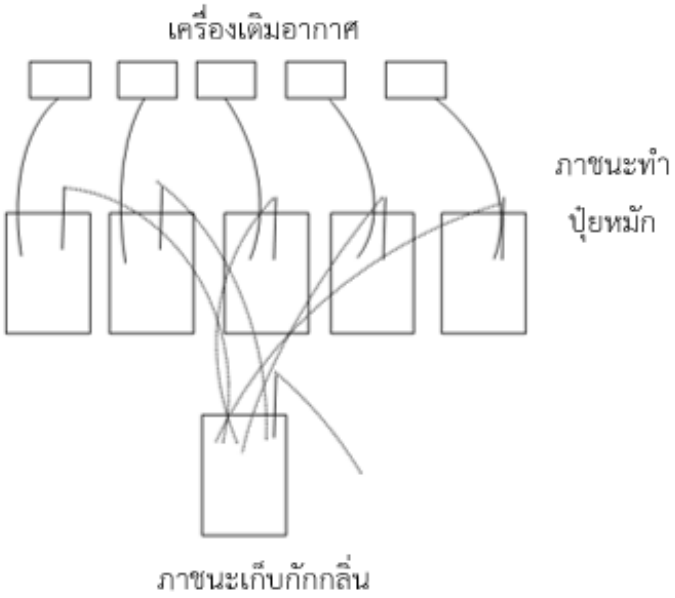
เป็นปุ๋ยหมักจากอาคารวิทยพัฒนา เพื่อเป็นหัวเชื้อและแหล่งไนโตรเจนสำหรับปุ๋ยหมัก

4.4 ระบบหมัก

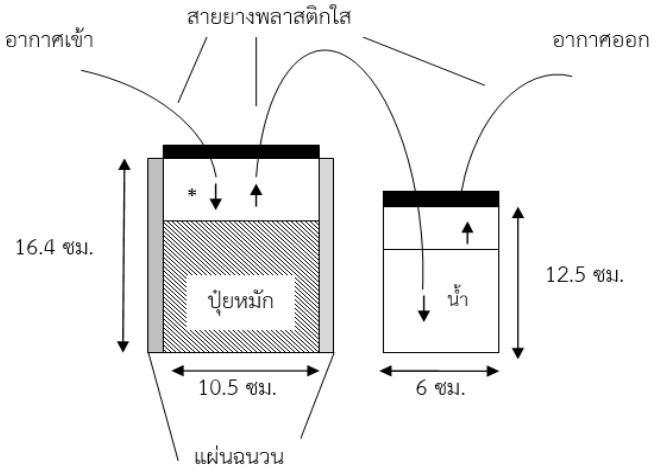
เป็นการทดลองระบบภาชนะปิดขนาด 1.25 ลิตร ซึ่งดัดแปลงจากงานของ Arslan และคณะ (2011) เป็นภาชนะเป็นโหลแก้วขนาด 1.25 ลิตร มีฝาเปิดปิดเป็นฟิวเจอร์บอร์ดเจาะรูขนาด 3/4 นิ้ว ตรงกลางไว้ 2 รูเพื่อให้สามารถเติมอากาศ และอีกรูเพื่อกรองกลิ่นและระบายน้ำที่เกิดจากการทำปุ๋ยหมัก ส่วนระบบเติมอากาศจะเป็นเครื่องเติมอากาศ Mega 6000 5 เครื่อง ซึ่งแต่ละเครื่องเติมอากาศที่อัตรา 0.75 ลิตรต่อนาที สู่แต่ละชุดการทดลองทั้ง 5 การทดลอง โดยต่อสู่รูตรงกลางแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดที่ปิดปากโหลแก้วที่หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ส่วนรูถ่ายเทอากาศนั้นจะต่อเข้ากับสายยางพลาสติกใส ที่จะต่อเข้าสู่ขวดพลาสติกบรรจุน้ำไว้เพื่อลดกลิ่นรบกวน

สำหรับการทดลองทำปุ๋ยหมัก จะทดลองพร้อมกัน 3 ซ้ำในแต่ละชุดการทดลอง เนื่องจากมี 15 การทดลอง

โดยภาพอธิบายชุดการทดลองได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-1 การทดลองในแต่ละหนึ่งการทดลองได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-2 และระบบการทดลองสำหรับการทดลองได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-1 ระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักในแต่ละหนึ่งชุดการทดลอง



ภาพที่ 4-2 ระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักในแต่ละหนึ่งการทดลอง

หมายเหตุ: สำหรับ A จะไม่มีอากาศเข้าจากการเติมอากาศ

ภาพที่ 4-3 ระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักขนาด 1.25 ลิตร

4.5 วิธีการตรวจวัด

ใช้เพื่อหาค่าตัวแปรที่สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดวัตถุประสงค์และผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ซึ่งมีตัวแปรและวิธีการวัดตัวแปร ดังตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-15 ตัวแปรและการวัดตัวแปร

ตัวแปร	การวัด
ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	วัดด้วย GM816 Anemometer
พีเอช	วัดด้วย pH meter Mettler Toledo
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	วัดด้วย เทอร์โมมิเตอร์ดิจิตอล รุ่น TP300
อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ) และคาร์บอนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)	วัดด้วย Walkley and Black method
อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน	คาร์บอนทั้งหมด/ไนโตรเจนทั้งหมด
สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร)	วัดด้วยเครื่อง Electrical Conductivity meter
ความชื้นสะสม (ร้อยละ)	วัดด้วยการอบไล่ความชื้นที่ 105 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง หรือน้ำหนักคงที่สำหรับก่อนและหลังการทำปุ๋ยหมัก , วัดด้วยเครื่องวัดความชื้นสะสมในดิน รุ่น DMM008 สำหรับระหว่างทำปุ๋ยหมัก
ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)	วัดด้วยวิธีของ Kjeldahl
ฟอสฟอรัส (P_2O_5) (ร้อยละของน้ำหนัก)	วัดด้วยวิธี Spectrophotometric Molybdonvanadophosphate
โพแทสเซียส (K_2O) (ร้อยละของน้ำหนัก)	วัดด้วยวิธี Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopic
น้ำหนัก (กิโลกรัมน้ำหนักเปียก)	ชั่งตัวอย่างในเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (ร้อยละ)	ดัชนีการงอกของเมล็ด

ที่มา: (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553), (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560), (California Compost Quality Council, 2001), (Incorporated Administrative Agency, 2018) และ (กลุ่มงานวิเคราะห์ปุ๋ย, 2541)

โดยทุกตัวแปรในตารางที่ 4-15 ยกเว้น ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัส (P_2O_5) และโพแทสเซียส (K_2O) นั้นทางผู้ดำเนินงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์เองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และบันทึกค่าตัวแปรที่เฉลี่ยจากการเฉลี่ย 3 ซ้ำที่ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยหมักได้ ส่วนไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัส (P_2O_5) และโพแทสเซียส (K_2O) นั้น ได้ส่งตัวอย่างปุ๋ยหมักให้ทางสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน (ซึ่งตั้งอยู่ที่ซอยพหลโยธิน 41 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร) เป็นผู้วิเคราะห์ค่าตัวแปร 3 ตัวแปรนี้เนื่องจากความพร้อมของอุปกรณ์สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่มีมากกว่าห้องปฏิบัติการในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ซึ่งแต่ละตัวแปรมีการวัดตัวแปร ดังนี้

1) ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

วัดด้วย GM816 Anemometer ด้วยการใช้เครื่องวัดนี้วัดอากาศที่ออกมาจากเครื่องเติมอากาศ Mega 6000 ในตอนมีสายยางพลาสติกใส่สายยางพลาสติกใส 3/4 นิ้วที่รูเป่าอากาศ แล้วทำการเปิดเครื่องวัดตัวแปร รอจนกว่าตัวเลขจะนิ่ง แล้วบันทึกค่าไว้

2) พีเอช

วัดด้วย pH meter Mettler Toledo ด้วยการทำการปรับเทียบ pH meter ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ตามวิธีการที่ระบุในคู่มือ pH meter ที่ใช้ จากนั้นชั่งตัวอย่างจำนวน 10 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของปุ๋ยต่อน้ำ 1:5) แล้วคนด้วยแท่งแก้ว ตั้งทิ้งไว้ประมาณครึ่งชั่วโมง แล้วทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วย pH – meter โดยนำอิเล็กโทรด (Electrode) จุ่มลงในสารละลายตัวอย่าง เมื่อตัวเลขที่แสดงผลคงที่ อ่านค่าความเป็นกรด-ด่าง และบันทึกผล (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

3) อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ทำการวัดค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ดิจิตอล รุ่น TP300 โดยนำปลายเครื่องมือจุ่มลงในวัสดุหมักหรือปุ๋ยหมัก เมื่อตัวเลขที่แสดงผลคงที่ อ่านค่าอุณหภูมิ และบันทึกผล

4) อินทรียวัตถุ (ร้อยละ) และคาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละของน้ำหนัก)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วัดด้วย Walkley and Black method ด้วยการไตเตรทด้วยสารละลาย Ferrous sulfate กับสารละลายตัวอย่างจนได้สารละลายสีเขียว และเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นน้ำตาลปนแดง แสดงว่าถึงจุดยุติ บันทึกผล (หมายเหตุ ทำแบลงค์ (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่าง เตรียมและวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง) (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560)

5) อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ด้วยการการนำค่าคาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละของน้ำหนัก) มาหารด้วยค่าไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)

6) สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร)

ชั่งตัวอย่างวัสดุหมักหรือปุ๋ยหมัก 10 กรัม เทลงในบีกเกอร์ แล้วเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:5) จากนั้นใช้แท่งแก้วคนเป็นเวลา 30 วินาที ทิ้งไว้ให้ตกตะกอนจนเกิดชั้นน้ำใสด้านบน จุ่มปลายเครื่องวัดที่ปรับค่ามาตรฐานแล้วลงในน้ำใสลึก 2 เซนติเมตร อย่าให้โดนชั้นตะกอนด้านล่าง เมื่อบันทึกค่าเสร็จแล้ว ล้างปลายเครื่องมือด้วยน้ำกลั่นและซับให้แห้งด้วยกระดาษชำระ ก่อนเก็บหรือวัดตัวอย่างใหม่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

7) ความชื้นสะสม (ร้อยละ)

สำหรับก่อนและหลังการทำปุ๋ยหมัก วัดด้วยการอบไล่ความชื้นที่ 105 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง หรือน้ำหนักคงที่ สำหรับก่อนและหลังการทำปุ๋ยหมัก ชั่งตัวอย่างจำนวน 3.xxxx กรัม ใส่ขวดชั่งสาร (Weighing bottle) หรือ บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนักไว้ นำตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจากทศนิยมตำแหน่งที่ 2 นำตัวอย่างออกมาใส่โถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก (Incorporated Administrative Agency, 2018)

สำหรับระหว่างการทำปุ๋ยหมัก วัดด้วยเครื่องวัดความชื้นสะสมในดิน รุ่น DMM008 สำหรับระหว่างทำปุ๋ยหมัก ด้วยการจุ่มปลายเครื่องวัดลงในเครื่องมือลงในภาชนะบรรจุปุ๋ยหมัก โดยให้ปลายลึกลงไปอยู่บริเวณตรงกลางภาชนะที่บรรจุ รอให้ตัวเลขหยุดนิ่ง แล้วบันทึกค่า เมื่อบันทึกค่าเสร็จแล้ว ล้างปลายเครื่องมือด้วยน้ำกลั่นและซับให้แห้งด้วยกระดาษชำระก่อนเก็บหรือวัดตัวอย่างใหม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

8) ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)

วัดด้วยวิธีของ Kjeldahl โดยการย่อยตัวอย่างปุ๋ยด้วยกรดซัลฟุริก (Sulfuric acid) เข้มข้น กรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) และโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate) โดยมีโพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulfate) และคอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate) เป็นสารเร่งปฏิกิริยา แล้วนาไปกลั่นด้วยด่าง โดยใช้กรดบอริก (Boric acid) ดักจับแอมโมเนีย วิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนโดยไตเตรทสารละลายกรดบอริกที่มีแอมโมเนีย (Ammonia) ละลายอยู่ด้วยสารละลายกรดเกลือมาตรฐาน (Hydrochloric acid) (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560)

9) ฟอสฟอรัส (P_2O_5) (ร้อยละของน้ำหนัก)

วัดด้วยวิธี Spectrophotometric Molybdonvanadophosphate โดยการใช้กรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid) และกรดไนตริก (Nitric acid) อัตราส่วน 1 ต่อ 1 ในการย่อยตัวอย่างเพื่อให้ฟอสฟอรัสในตัวอย่างปุ๋ยอยู่ในรูปสารละลายฟอสเฟต จากนั้นทำให้เกิดสีกับสารละลายโมลิบโดวานาเดต (Molybdovanadate) วัดหาปริมาณฟอสฟอรัสด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560)

10) โพแทสเซียส (K_2O) (ร้อยละของน้ำหนัก)

วัดด้วยวิธี Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopic โดยการวัดหาปริมาณความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมา (Intensive of emission) เมื่อสารละลายถูกเผาจนแตกตัวเป็นอะตอม ปริมาณความเข้มของแสงจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณของโพแทสเซียมในสารละลาย (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

11) น้ำหนัก (กิโลกรัมน้ำหนักเปียก)

ชั่งตัวอย่างปุ๋ยหมักในเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง เพื่อใช้ในการคำนวณการสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) ซึ่งจะคำนวณด้วยสมการดังนี้

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ)} = \frac{\text{มวลวัสดุหมักเริ่มต้น (กิโลกรัม)} - \text{มวลปุ๋ยหมักสุดท้าย (กิโลกรัม)}}{\text{มวลวัสดุหมักเริ่มต้น (กิโลกรัม)}} \times 100 \quad (4.2)$$

12) ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (ร้อยละ)

วัดด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด กรองตัวอย่าง 3.3 มิลลิกรัมต่อน้ำ 33 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) เขย่า 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 จากนั้นใส่น้ำตัวอย่างในจานเพาะ (บีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร) จานเพาะละ 3 มิลลิลิตร 10 จานเพาะ สำหรับจานควบคุมใส่น้ำกลั่นในจานเพาะ

จานเพาะละ 3 มิลลิลิตร 10 จานเพาะ และแต่ละจานเพาะมีเมล็ดถั่วเขียว 10 เมล็ดต่อจาน บ่มจานเพาะไว้ในที่มืดระหว่างอุณหภูมิบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบันทึกข้อมูลจำนวนเมล็ดที่งอกทั้งหมดต่อจาน และวัดความยาวของรากของเมล็ดที่งอกทั้งหมดต่อจาน แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาดัชนีการงอกของเมล็ด ตามสูตร (กลุ่มงานวิเคราะห์ปุ๋ย, 2541)

$$\text{ดัชนีการงอกของเมล็ด} = \frac{\mathbf{AxBx100}}{\mathbf{CxD}} \qquad (4.1)$$

A = ร้อยละ ของเมล็ดที่งอกในจานเพาะที่เติมน้ำตัวอย่าง

B = ความยาวรากเฉลี่ยในจานเพาะที่เติมน้ำตัวอย่าง (เซนติเมตร)

C = ร้อยละ ของเมล็ดที่งอกในจานเพาะที่เติมน้ำกลั่น

D = ความยาวรากเฉลี่ยในจานเพาะที่เติมน้ำกลั่น (เซนติเมตร)

โดยแบ่งออกเป็น 3 ตัวแปรตามช่วงการหมัก ดังนี้

4.5.1 ตัวแปรเริ่มต้นและตัวแปรสุดท้าย

การเก็บตัวอย่างสำหรับวัดค่าตัวแปรนี้ จะเก็บวัดจากวัตถุดิบหมักสำรองและวัสดุหมักเริ่มต้นสำรอง (สำรองไว้ 0.8 ลิตรน้ำหนักเปียกสำหรับทั้งวัตถุดิบหมัก 4 ชนิดและทุกการทดลอง 20 การทดลอง) เพื่อวัดตัวแปรต่างๆ ดังตารางที่ 4-16 ทั้งนี้ ตัวแปรเริ่มต้นและตัวแปรสุดท้ายเป็นตัวแปรทางกายภาพเคมีของปุ๋ยหมักสุดท้ายที่ได้จากการทดลองทำปุ๋ยหมักเพื่อเป็นข้อมูลในการชี้วัดสัดส่วนใดที่เหมาะสม และมีการเปลี่ยนแปลงไปของค่าตัวแปรในวัสดุเริ่มต้นเท่าไรและอย่างไร การเก็บตัวอย่างจะเก็บเหมือนตัวแปรเริ่มต้น ส่วนเวลาการเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักโดยจะเกณฑ์ความสอดคล้องที่ออกแบบไว้ในหัวข้อ 4.6 โดยตัวแปรเริ่มต้นนั้นเป็นตัวแปรทางกายภาพเคมีของวัตถุดิบหมักและวัสดุเริ่มต้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ว่าสาเหตุที่ทำให้ปุ๋ยหมักในแต่ละการทดลองถึงได้ผ่านเกณฑ์แตกต่างกัน และตัวแปรสุดท้ายนั้นจะมีรูปแบบการเก็บข้อมูลเหมือนกัน ยกเว้น ตัวแปรเริ่มต้น ที่จะไม่บันทึกค่าการสูญเสียน้ำหนัก (WL) และค่าความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (GI) ดังตารางที่ 4-17 และตารางที่ 4-18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-16 รูปแบบข้อมูลตัวแปรของวัตถุดิบหมัก

ตัวแปร	เศษผักผลไม้	เศษใบจามจุรี	เศษกิ่งไม้	ปุ๋ยหมักสมบูรณ์
พีเอช				
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)				
อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน				
สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเซนติเมตร)				
ความชื้นสะสม (ร้อยละ)				
คาร์บอนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)				
ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)				
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)				
โพแทสเซียมทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)				
น้ำหนัก (กิโลกรัมน้ำหนักเปียก)				
ความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ)				

ตารางที่ 4-17 รูปแบบข้อมูลตัวแปรของวัสดุหมักเริ่มต้น

การทดลอง	ตัวแปร													
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	AFP
A-1											-		-	
A-2											-		-	
A-3											-		-	
A-4											-		-	
A-5											-		-	
B-1											-		-	
B-2											-		-	
B-3											-		-	
B-4											-		-	
B-5											-		-	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-17 รูปแบบข้อมูลตัวแปรของวัสดุหมักเริ่มต้น (ต่อ)

การทดลอง	ตัวแปร													
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	AFP
C-1											-		-	
C-2											-		-	
C-3											-		-	
C-4											-		-	
C-5											-		-	
D-1											-		-	
D-2											-		-	
D-3											-		-	
D-4											-		-	
D-5											-		-	

หมายเหตุ:

pH คือ พีเอช , T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) , OM คือ อินทรียวัตถุ (ร้อยละ) , C/N คือ อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน , EC คือ สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเซนติเมตร) , %MC คือ ความชื้นสะสม (ร้อยละ) , OC คือ คาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละของน้ำหนัก) , N คือ ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก) , P คือ ฟอสฟอรัส (ร้อยละของน้ำหนัก) , K คือ โพแทสเซียม (ร้อยละของน้ำหนัก) , GI คือ ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่วัดด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด (ร้อยละ) , W คือ น้ำหนัก (กิโลกรัม) , WL คือ การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) และ AFP คือ ความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-18 รูปแบบข้อมูลตัวแปรของปุ๋ยหมักสุดท้าย

การทดลอง	ตัวแปร													
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	AFP
A-1														
A-2														
A-3														
A-4														
A-5														
B-1														
B-2														
B-3														
B-4														
B-5														
C-1														
C-2														
C-3														
C-4														
C-5														
D-1														
D-2														
D-3														
D-4														
D-5														

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

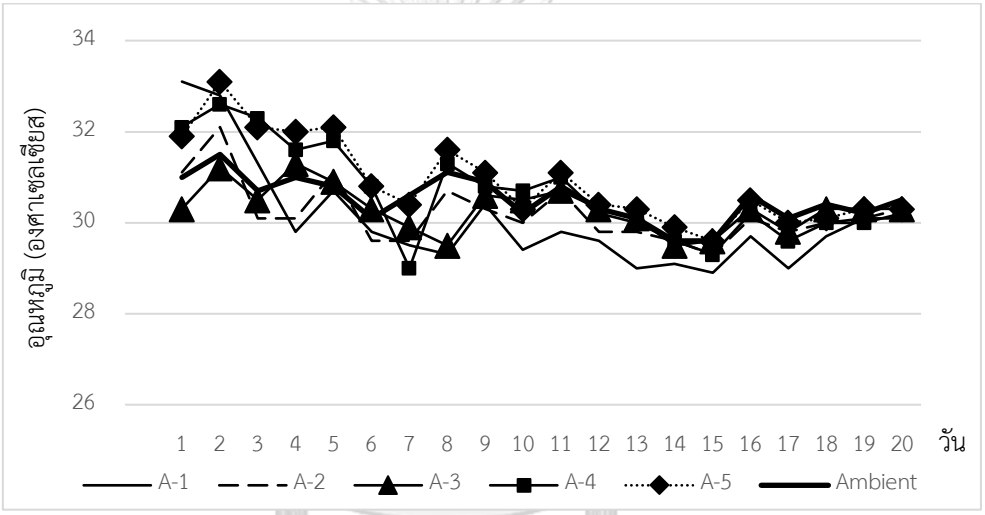
หมายเหตุ:

pH คือ พีเอช , T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) , OM คือ อินทรียวัตถุ (ร้อยละ) , C/N คือ อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน , EC คือ สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเซนติเมตร) , %MC คือ ความชื้นสะสม (ร้อยละ) , OC คือ คาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละของน้ำหนัก) , N คือ ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก) , P คือ ฟอสฟอรัส (ร้อยละของน้ำหนัก) , K คือ โพแทสเซียม (ร้อยละของน้ำหนัก) , GI

คือ ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่วัดด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด (ร้อยละ) , W คือ น้ำหนัก (กิโลกรัม) , WL คือ การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) และ AFP คือ ความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ)

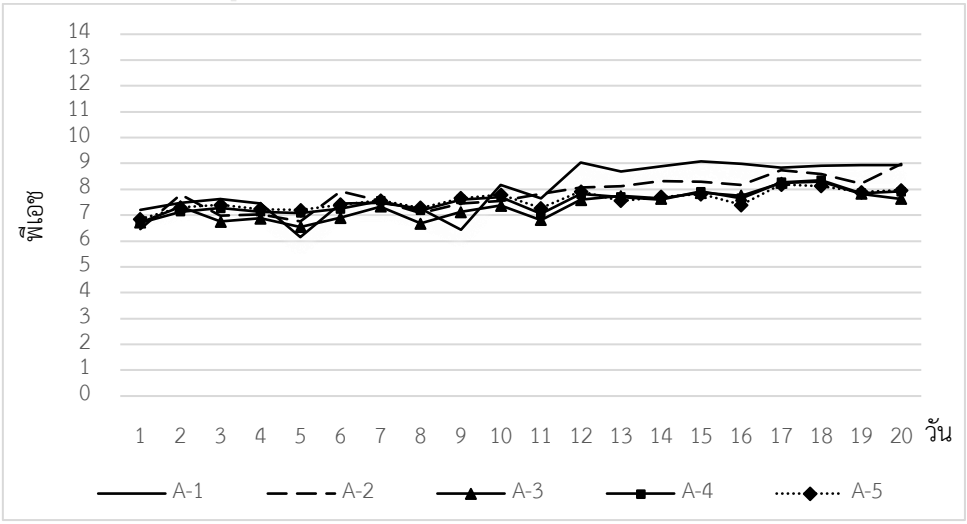
4.5.2 ตัวแปรระหว่างการหมัก

เป็นตัวแปรกายภาพและเคมีที่บันทึกเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ค่าพีเอช อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และ ความชื้นสะสม (ร้อยละ) โดยข้อมูลจะอยู่ในรูปของกราฟที่ผู้ดำเนินงานวิจัยได้ทำขึ้นเองจากโปรแกรม Microsoft Excel 2016 ซึ่งมีตัวอย่างดังภาพที่ 4-4 และภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-4 ตัวอย่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาการทำปุ๋ยหมัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4-5 ตัวอย่างพีเอชที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาการทำปุ๋ยหมัก

4.6 วิธีการชี้วัด

4.6.1 เกณฑ์บ่งชี้คุณภาพเบื้องต้นของปุ๋ยหมัก

เป็นข้อมูลประกอบการชี้วัดคุณภาพของปุ๋ยหมักสุดท้ายในแต่ละการทดลอง ซึ่งสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเวลา 3 วัน นับจากวันที่วัดอุณหภูมิล่าสุดเป็นวันที่ 1 กรณีวันที่วัดอุณหภูมิล่าสุดเป็นวันที่ 18 และ 19 ให้รอเพิ่มเป็นวันที่ 20 และ 21

หากถึงวันที่ 20 นับจากเริ่มการทดลองแล้วอุณหภูมิยังมีการเปลี่ยนแปลง ให้เก็บตัวอย่างวิเคราะห์ค่าตัวแปรสุดท้ายทันที

ใช้ข้อมูลในตารางที่ 4-13 ประกอบการพิจาณาความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักร่วมกับอุณหภูมิ หากการทดลองใดมีอุณหภูมิใน 3 วันคงที่และสอดคล้องกับเกณฑ์ แสดงว่าปุ๋ยหมักจากการทดลองนั้นย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ สามารถเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักเพื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรสุดท้าย และยุติการทำปุ๋ยหมักในการทดลองนั้นภายในวันที่ 20 ได้

เพื่อหาว่า ในแต่ละปุ๋ยหมักของการทดลองใดนั้นมีความสอดคล้องกับเกณฑ์ชี้วัดคุณภาพอย่างไร โดยใช้เกณฑ์ที่ดัดแปลงจากเกณฑ์ของกรมพัฒนาที่ดิน ถ้าตัวแปรใดสอดคล้องกับเกณฑ์ จะใส่เครื่องหมาย " / " ไว้ แต่ถ้าไม่สอดคล้อง ก็จะใส่เครื่องหมาย “ x ”

ตารางที่ 4-19 รูปแบบข้อมูลตัวแปรเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นของปุ๋ยหมักสุดท้าย

การทดลอง	ตัวแปร		
	สีน้ำตาลเข้มหรือดำ	กลิ่นดินธรรมชาติ	เนื้อปุ๋ยหมักยุ่ย ขาดจากกันง่าย เป็นเนื้อเดียวกันและไม่แข็งกระด้าง
A-1			
A-2			
A-3			
A-4			
A-5			

ตารางที่ 4-19 รูปแบบข้อมูลตัวแปรเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นของปุ๋ยหมักสุดท้าย (ต่อ)

การทดลอง	ตัวแปร		
	สีน้ำตาลเข้มหรือดำ	กลิ่นดินธรรมชาติ	เนื้อปุ๋ยหมักยุ่ย ขาดจากกันง่าย เป็นเนื้อเดียวกันและไม่แข็งกระด้าง
B-1			
B-2			
B-3			
B-4			
B-5			
C-1			
C-2			
C-3			
C-4			
C-5			
D-1			
D-2			
D-3			
D-4			
D-5			

ที่มา: ดัดแปลงจาก ฉัตรชัย จันทร์เด่นดวง (2550) และ กรมพัฒนาที่ดิน (ม.ป.ป.)

4.6.2 เกณฑ์บ่งชี้ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก

ใช้การวัดดัชนีการงอกของเมล็ด (Seed Germination) โดยเลือกเกณฑ์ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักกลุ่ม B สำหรับงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 4-20 โดยใช้เมล็ดถั่วเขียวในการวัดค่าดัชนีการงอกของเมล็ด ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้จะประยุกต์มาจาก Mature Rating ในตารางที่ 4-20 จากที่ 80-90% เป็นความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักจะผ่านเกณฑ์ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 80% (≥ 80%) ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานปุ๋ยหมักเกรด 1 ของกรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พัฒนาที่ดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, ม.ป.ป.) ที่มีเกณฑ์ย่อยสลายสมบูรณ์ที่ไม่น้อยกว่า 80% และมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560) ที่มีเกณฑ์ย่อยสลายสมบูรณ์ที่มากกว่า 80%

ตารางที่ 4-20 เกณฑ์ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักกลุ่ม B ของสภาคุณภาพปุ๋ยหมักแคลิฟอร์เนียร์

Maturity Indices for Group B				
Method	Units	Rating		
		Very Mature	Mature	Immature
NH_4-N : NO_3-N Ratio*	No unit	< 0.5	0.5 - 3.0	> 3.0
Total NH3-N	ppm (dry basis)	< 100	100 – 500	> 500
VOA	ppm (dry basis)	< 200	200 – 1000	> 1000
Seed Germination	% of control**	> 90	80 – 90	< 80
Plant Trials	% of control	> 90	80 – 90	< 80

*ถ้าระดับของ NH_4-N หรือ NO_3-N มีค่า < 250 ppm, ค่า NH_4-N : NO_3-N Ratio จะมีความน่าเชื่อถือน้อยลง , **ควบคุมเฉพาะน้ำหรือดินกระถางเท่านั้น

ที่มา: ดัดแปลงจาก California Compost Quality Council (2001)

4.6.3 เกณฑ์ชี้วัดคุณภาพของปุ๋ยหมัก

เป็นเกณฑ์ที่ใช้ชี้วัดวัตถุประสงค์และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ สำหรับงานวิจัยนี้จะไม่มีตัวแปรโลหะหนัก ปริมาณหินและกรวด พลาสติก ขนาดอนุภาคและอยู่ในเกณฑ์ เพราะวัตถุดิบที่นำมาทำปุ๋ยหมักอันได้แก่เศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรี เศษกิ่งไม้และปุ๋ยหมักสมบูรณ์นั้นมีตัวแปรดังกล่าว (ยกเว้นขนาดอนุภาค) ในปริมาณที่น้อยมากหรือไม่พบ ส่วนขนาดอนุภาคนั้นเป็นเพราะวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิดมีขนาดอนุภาคเล็กจนไม่มีความจำเป็นต้องวัดขนาดอนุภาค

การชี้วัดว่าการทดลองใดมีปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพมากที่สุดนั้น จะวัดที่เกณฑ์คุณภาพเบื้องต้น เกณฑ์คุณภาพและค่าการสูญเสียน้ำหนัก ถ้าการทดลองใดผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นไม่ครบ 3 ตัวแปร ปุ๋ยหมักในการทดลองนั้นจะถือว่ามีคุณภาพน้อยกว่าการทดลองที่มีคุณภาพรองลงมาจากการทดลองนั้นแม้ว่าจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักและผ่านเกณฑ์ชี้วัดคุณภาพมากที่สุด และถ้ามีอย่างน้อย 2 การทดลองที่มีค่าผ่านทั้ง 3 เกณฑ์มากที่สุดเท่ากัน ให้ถือว่าการทดลองทั้งหมดนั้นมีคุณภาพมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยดัดแปลงจากมาตรฐานปุ๋ยหมักเกรด 1 ของกรมพัฒนาที่ดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, ม.ป.ป.) มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2548) และดัชนีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักของสภาคุณภาพปุ๋ยหมักแคลิฟอร์เนียร์ (California Compost Quality Council, 2001) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4-21

ตารางที่ 4-21 รูปแบบข้อมูลตัวแปรตามเกณฑ์คุณภาพและค่าการสูญเสียน้ำหนักของปุ๋ยหมักสุดท้าย

การทดลอง	**ตัวแปร**									
	ตามเกณฑ์คุณภาพ									**การสูญเสียน้ำหนัก**
	pH	OM	C/N	EC	%MC	N	P	K	GI	WL
เกณฑ์	**5.5 - 8.5**	**≥ 30**	**≤ 20**	**≤ 10**	**≤ 30**	**≥ 1**	**≥ 0.5**	**≥ 0.5**	**≥ 80**	**มากที่สุด**
A-1										
A-2										
A-3										
A-4										
A-5										
B-1										
B-2										
B-3										
B-4										
B-5										
C-1										
C-2										
C-3										
C-4										
C-5										
D-1										
D-2										
D-3										
D-4										
D-5										

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยมีแผนและระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยดังภาพที่ 4-6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4-6 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 5

ผลการทดลองและอภิปราย

เป็นผลการทดลองสำหรับชุดการทดลองขนาด 1.25 ลิตร โดยค่าที่บันทึกนั้นจะเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำในทุกชุดการทดลองหรือวัตถุดิบหมัก และวัสดุหมักเริ่มต้นจะไม่มีการบันทึกค่าการสูญเสียน้ำหนัก (WL) และดัชนีการงอกของเมล็ด (GI) ไว้เนื่องจากวัสดุหมักเริ่มต้นยังไม่มีการสูญเสียน้ำหนักจากการทำปุ๋ยหมักและมีดัชนีการงอกของเมล็ดที่ใช้สำหรับปุ๋ยหมักสุดท้ายเท่านั้น ดังตารางที่ 5-1 ตารางที่ 5-2 และตารางที่ 5-3 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-1 ข้อมูลตัวแปรเฉลี่ยของวัตถุดิบสำหรับการทำปุ๋ยหมัก

ตัวแปร	วัตถุดิบหมัก			
	VFW	LW	WW	MC
พีเอช	5.51	7.10	7.07	6.46
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.6	32.2	31.0	30.4
อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)	57.64	55.52	55.40	35.40
อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน	13.70	18.61	11.94	12.00
สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเซนติเมตร)	1.259	0.611	1.157	0.657
ความชื้นสะสม (ร้อยละ)	63.5	33.6	33.8	41.7
คาร์บอนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)	33.43	32.20	32.13	20.53
ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)	2.44	1.73	2.69	2.95
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)	0.94	0.59	0.57	0.60
โพแทสเซียมทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)	2.05	0.85	1.03	0.36
น้ำหนัก (กิโลกรัมน้ำหนักเปียก)	0.904	0.104	0.114	0.504
ความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ)	49.54	52.05	55.23	35.43

หมายเหตุ: VFW คือ เศษผักผลไม้ , LW คือ เศษใบจามจุรี , WW คือ เศษกิ่งไม้ และ MC คือ ปุ๋ยหมักสมบูรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5-2 ข้อมูลตัวแปรเฉลี่ยของวัสดุหมักเริ่มต้น

การทดลอง	ตัวแปร													
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	OC	N	P	K	GI	W	WL	AFP
A-1	6.56	34.0	55.07	11.79	1.600	61.2	31.94	2.71	0.86	0.97	-	0.404	-	48.37
A-2	6.37	31.0	54.48	12.93	1.300	53.7	31.60	2.46	0.74	0.55	-	0.104	-	52.11
A-3	6.65	31.0	54.87	13.05	1.060	52.4	31.82	2.44	0.54	0.84	-	0.114	-	50.23
A-4	5.66	32.4	54.84	12.93	1.550	55.7	31.81	2.46	0.66	1.57	-	0.304	-	53.89
A-5	5.82	32.3	54.90	12.02	1.940	53.7	31.84	2.65	0.73	1.15	-	0.384	-	56.38
B-1	5.72	28.3	44.56	11.48	1.510	76.9	25.84	2.25	0.69	1.88	-	0.350	-	53.36
B-2	5.77	26.2	60.52	19.61	1.430	59.6	35.10	1.79	0.30	0.82	-	0.190	-	57.04
B-3	6.50	29.1	44.89	18.34	1.100	58.8	26.04	1.42	0.25	0.71	-	0.250	-	57.65
B-4	6.08	29.7	58.36	17.53	1.500	60.3	33.84	1.93	0.20	0.97	-	0.242	-	64.92
B-5	6.07	27.7	63.02	13.54	1.871	61.6	36.55	1.93	0.50	1.42	-	0.275	-	55.70
C-1	5.62	29.6	45.90	14.16	1.720	58.3	26.62	1.88	0.52	1.63	-	0.402	-	45.43
C-2	5.94	29.5	45.03	16.22	0.677	55.6	26.12	1.61	0.58	0.87	-	0.200	-	65.98
C-3	6.40	30.6	34.16	14.83	0.527	53.5	25.96	1.75	0.26	0.93	-	0.222	-	49.67
C-4	5.74	30.5	45.90	11.68	1.610	57.7	26.62	2.28	0.55	1.38	-	0.312	-	57.37
C-5	5.85	30.3	45.83	13.49	0.882	53.7	26.58	1.97	0.34	0.99	-	0.257	-	58.47
D-1	5.71	30.1	62.41	18.39	1.130	61.4	36.22	1.97	0.29	1.71	-	0.431	-	44.66
D-2	6.19	30.2	61.26	30.90	0.596	51.8	35.53	1.15	0.02	0.74	-	0.201	-	59.20
D-3	6.41	31.3	58.21	16.39	1.380	50.9	33.76	2.06	0.03	0.92	-	0.283	-	48.28
D-4	5.65	31.6	53.53	15.37	1.160	52.1	31.05	2.02	0.04	1.04	-	0.332	-	50.89
D-5	5.65	31.6	54.24	18.95	1.100	54.4	31.46	1.66	0.04	0.99	-	0.302	-	57.26

หมายเหตุ:

pH คือ พีเอช , T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) , OM คือ อินทรียวัตถุ (ร้อยละ) , C/N คือ อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน , EC คือ สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเซนติเมตร) , %MC คือ ความชื้นสะสม (ร้อยละ) , OC คือ คาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละของน้ำหนัก) , N คือ ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก) , P คือ ฟอสฟอรัส (ร้อยละของน้ำหนัก) , K คือ โพแทสเซียม (ร้อยละของน้ำหนัก) , GI คือ ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่วัดด้วยดัชนีการงอกของ

เมล็ด (ร้อยละ) , W คือ น้ำหนัก (กิโลกรัม) , WL คือ การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) และ AFP คือ ความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ)

ตารางที่ 5-3 ข้อมูลตัวแปรเฉลี่ยของปุ๋ยหมักสุดท้าย

การทดลอง	ตัวแปร													
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	OC	N	P	K	GI	W	WL	AFP
A-1	9.14	30.0	48.76	9.59	0.640	70.8	28.28	2.95	0.90	2.19	67	0.295	27.08	1.49
A-2	8.02	30.3	48.72	10.20	0.384	61.4	28.26	2.77	0.81	0.85	79	0.099	4.81	43.66
A-3	7.63	30.5	48.62	9.53	0.502	51.7	28.20	2.96	0.65	0.86	95	0.116	-1.75	39.02
A-4	7.98	29.9	48.90	9.95	1.130	70.0	28.36	2.85	0.72	1.16	116	0.270	11.31	16.75
A-5	8.05	30.3	48.81	9.90	0.582	72.1	28.31	2.86	0.88	1.15	93	0.163	15.89	40.39
B-1	8.76	31.1	43.14	10.17	2.320	67.4	25.02	2.46	0.60	1.99	72	0.216	38.29	2.15
B-2	7.99	31.1	50.70	11.86	0.598	58.2	29.41	2.48	0.47	0.85	89	0.160	15.79	59.47
B-3	7.79	31.5	48.42	18.12	0.455	57.4	28.08	1.55	0.21	0.67	98	0.219	12.40	40.62
B-4	8.04	30.8	34.21	7.72	1.280	70.1	19.84	2.57	0.49	1.36	119	0.195	19.42	62.14
B-5	7.94	30.7	23.85	5.22	1.570	59.6	13.83	2.65	0.46	1.26	96	0.205	25.45	55.27
C-1	8.24	30.4	40.78	10.33	3.260	81.9	23.65	2.29	0.63	2.12	89	0.220	45.27	1.92
C-2	8.50	30.9	35.71	8.12	0.393	56.4	20.71	2.55	0.10	1.00	103	0.152	24.00	53.36
C-3	8.33	31.3	36.88	9.77	0.317	54.9	21.39	2.19	0.22	0.93	106	0.195	12.16	48.52
C-4	8.34	30.8	32.47	3.27	1.580	74.9	18.83	2.70	0.47	1.96	105	0.223	28.53	31.12
C-5	8.47	31.1	38.97	9.46	0.620	55.5	22.60	2.39	0.24	1.51	90	0.175	31.91	37.11
D-1	7.67	30.9	44.09	11.95	2.740	76.8	25.57	2.14	0.10	2.21	61	0.281	34.80	2.75
D-2	8.05	30.4	42.43	12.75	0.335	53.1	24.61	1.93	0.16	0.74	95	0.171	14.93	40.08
D-3	7.74	30.9	42.60	14.28	0.460	52.0	24.71	1.73	0.15	1.05	87	0.265	6.36	34.54
D-4	8.54	30.9	40.60	11.49	0.701	72.9	23.55	2.05	0.26	1.53	85	0.275	17.17	15.97
D-5	8.27	31.3	42.03	10.74	0.561	50.0	24.38	2.27	0.23	1.10	82	0.239	20.86	37.93

หมายเหตุ:

pH คือ พีเอช , T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) , OM คือ อินทรียวัตถุ (ร้อยละ) , C/N คือ อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน , EC คือ สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเซนติเมตร) , %MC คือ ความชื้นสะสม (ร้อยละ) , OC คือ คาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละ ของน้ำหนัก) , N คือ ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ ของน้ำหนัก) , P คือ ฟอสฟอรัส (ร้อยละ

ของน้ำหนัก) , K คือ โพแทสเซียม (ร้อยละ ของน้ำหนัก) , GI คือ ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่วัดด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด (ร้อยละ) , W คือ น้ำหนัก (กิโลกรัม) , WL คือ การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) และ AFP คือ ความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ)

โดยจะมีการอธิบายคำ 2 คำ เพื่อความสะดวกในการเข้าใจเนื้อหา ดังต่อไปนี้

การทดลองอัตราส่วนที่ หมายถึง ทุกการทดลองที่มีอัตราส่วนวัตถุดิบที่เหมือนกัน 5 ชุดตามอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยมีทั้งหมด 5 ชุด ได้แก่ การทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลัก (A-1 B-1 C-1 และ D-1) การทดลองอัตราส่วนที่ 2 ซึ่งมีเศษใบจามจุรีเป็นหลัก (A-2 B-2 C-2 และ D-2) การทดลองอัตราส่วน 3 ซึ่งมีเศษกิ่งไม้เป็นหลัก (A-3 B-3 C-3 และ D-3) การทดลองอัตราส่วนที่ 4 ซึ่งมีเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากัน (A-4 B-4 C-4 และ D-4) และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 ซึ่งมีเศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้ในปริมาตรเท่ากัน (A-5 B-5 C-5 และ D-5)

ชุดการทดลองที่ หมายถึง ทุกการทดลองที่มีการเติมอากาศที่เหมือนกัน 4 ชุดตามการเติมอากาศที่แตกต่างกัน โดยมีทั้งหมด 4 ชุด ได้แก่ ชุดการทดลอง A ซึ่งไม่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ (A-1 A-2 A-3 A-4 และ A-5) ชุดการทดลอง B ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 8 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 24 นาทีและระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 36 นาที (B-1 B-2 B-3 B-4 และ B-5) ชุดการทดลอง C ซึ่งมีการเติมอากาศที่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 48 นาทีและระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 72 นาที (C-1 C-2 C-3 C-4 และ C-5) และชุดการทดลอง D ซึ่งมีการเติมอากาศที่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 96 นาทีและระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 144 นาที (D-1 D-2 D-3 D-4 และ D-5)

ซึ่งค่าตัวแปรจากตารางที่ 5-1 ตารางที่ 5-2 และตารางที่ 5-3 จะใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีและการชี้วัดคุณภาพของปุ๋ยหมักในการทดลอง ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี

5.1.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

หลังจากทดลองทำปุ๋ยหมัก 20 วันในทุกชุดการทดลองขนาด 1.25 ลิตร พบว่าในทุกการทดลองของอัตราส่วนที่ 1 การทดลองอัตราส่วนที่ 4 และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ทุกการทดลองของอัตราส่วนที่ 2 และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 5-1 ถึงภาพที่ 5-20

(ก) (ข)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 5-1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง A-1
(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-2 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง A-2

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-3 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง A-3

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-4 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง A-4

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-5 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง A-5

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-6 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง B-1

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-7 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง B-2

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-8 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง B-3

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-9 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง B-4

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-10 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง B-5

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-11 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง C-1

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-12 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง C-2

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-13 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง C-3

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-14 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง C-4

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-15 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง C-5

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-16 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง D-1

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-17 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง D-2

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-18 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง D-3

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-19 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง D-4

(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

(ก) (ข)

ภาพที่ 5-20 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของการทดลอง D-5
(ก) ก่อนการทดลอง (ข) หลังการทดลอง

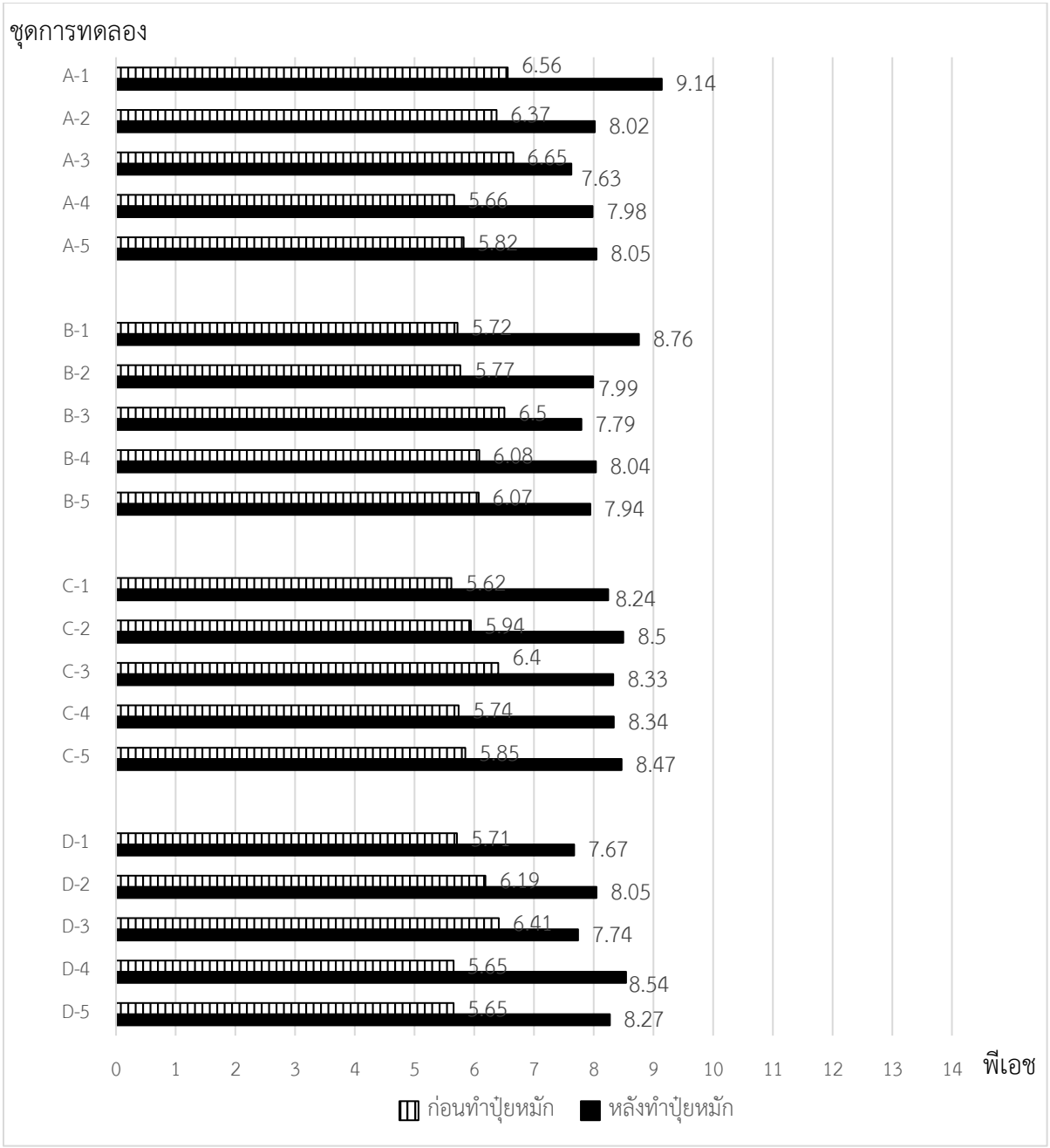
โดยอัตราส่วนวัตถุดิบที่มีเศษผักผลไม้ร่วมอยู่ด้วยนั้น จะมีการถูกย่อยสลายจนมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเศษผักผลไม้เป็นวัตถุดิบที่ถูกย่อยสลายได้ง่าย จึงมีผลทำให้ปุ๋ยหมักในทุกการทดลองของการทดลองของอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลัก การทดลองอัตราส่วนที่ 4 ซึ่งมีเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากัน และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 ซึ่งมีเศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้ในปริมาตราเท่ากันนั้น มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เศษใบจามจุรีซึ่งแม้จะเป็นวัตถุดิบที่ย่อยสลายง่ายแต่ถ้าขาดสารอาหาร (อย่างเช่นเศษผักผลไม้) ที่เหมาะสมร่วมด้วยนั้น ก็จะทำให้ปุ๋ยหมักสุดท้ายไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัดหลังจากทำการปุ๋ยหมักเสร็จสิ้น ส่วนเศษกิ่งไม้นั้นเป็นวัตถุดิบที่ถูกย่อยสลายได้ยาก เพราะไม้เป็นวัตถุดิบที่มีสารย่อยสลายทางชีวภาพยากอย่างลิกนินและเพคทิน จึงมีผลทำให้ปุ๋ยหมักในทุกการทดลองของการทดลองของอัตราส่วนที่ 2 ซึ่งมีเศษใบจามจุรีเป็นหลัก และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 ซึ่งมีเศษกิ่งไม้เป็นหลักนั้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Adhikari และคณะ (2009) ที่ซึ่งพบว่าอัตราส่วนที่มีเศษอาหาร (ในที่นี้เศษผักผลไม้ ซึ่งเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกันกับงานวิจัยนี้) ร่วมกับเศษไม้นั้น (ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใกล้เคียงกับเศษกิ่งไม้

ในงานวิจัยนี้) ถูกย่อยสลายต่ำที่สุดเนื่องจากปุ๋ยหมักสุดท้ายหลังจากการทำปุ๋ยหมักนั้นยังเห็นเศษไม้อยู่ ในขณะที่อัตราส่วนที่มีเศษอาหารไม่มีเศษไม้ร่วมอยู่ด้วยนั้น (เศษอาหารร่วมกับเศษฟางข้าวสาลีสับ และเศษอาหารร่วมกับเศษฟางหญ้าสับ ซึ่งเศษฟางข้าวสาลีสับและเศษฟางหญ้าสับนั้นมีความใกล้เคียงกับเศษใบจามจุรีในงานวิจัยนี้) ถูกย่อยสลายได้ดีจนไม่เหลือเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิม ในขณะที่การเติมอากาศที่แตกต่างกันนั้นไม่มีผลอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากในทุกชุดการทดลองซึ่งมีการเติมอากาศที่แตกต่างกัน 4 แบบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในรูปแบบใกล้เคียงกัน

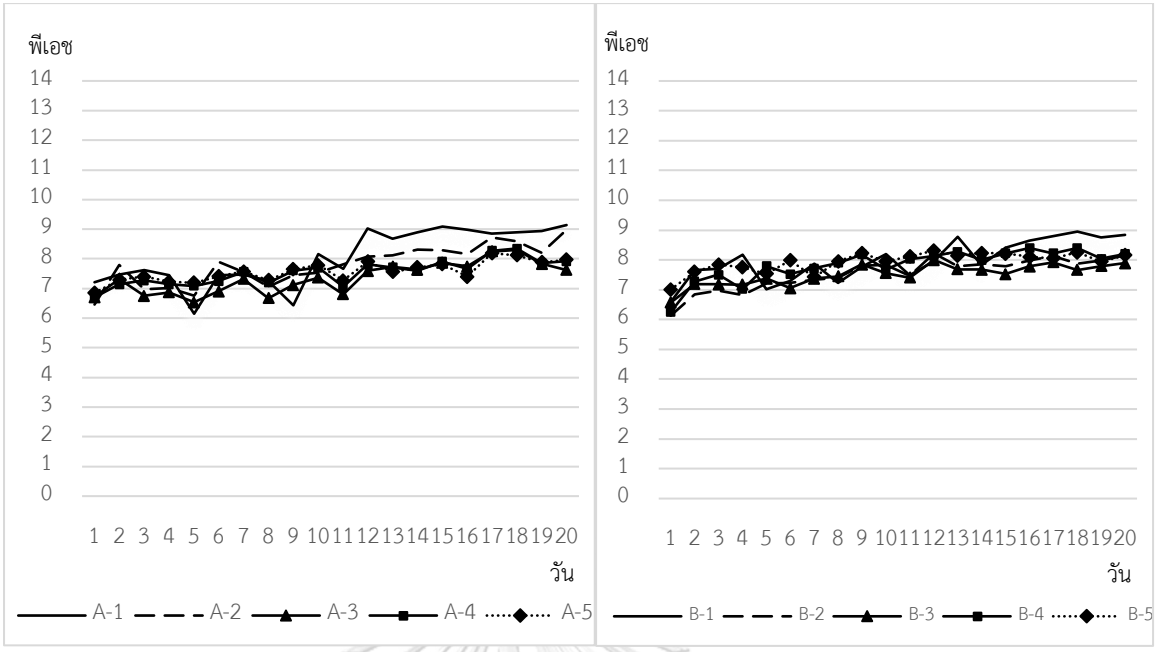
5.1.2 พีเอช

พีเอชเริ่มต้นของทุกการทดลองมีค่าค่อนไปทางกรด (น้อยกว่า 7.0) เนื่องจากวัสดุหมักเริ่มต้นเป็นชีวมวลย่อยสลายง่ายโดยเฉพาะเศษผักผลไม้ ที่จากตารางที่ 5-1 พบว่าเศษผักผลไม้มีค่าพีเอชน้อยที่สุดใน 4 วัตถุดิบหมัก (5.51) ซึ่งจะเกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและกรดอะซีติกตามกระบวนการหมัก (National Programme on Technology Enhanced Learning, 2012) ทำให้จุลินทรีย์สามารถนำกรดไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายได้ ส่งผลให้ค่าพีเอชสุดท้ายเพิ่มขึ้นจนค่อนไปทางเบส (มากกว่า 7.5) ดังภาพที่ 5-21 และภาพที่ 5-22 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของภัทรา วงษ์พันธกมล (2547) ที่มีค่าพีเอชของปุ๋ยหมักสุดท้ายของทุกอัตราส่วนอยู่ในช่วง 7.7-8.0 ซึ่งมีช่วงพีเอชที่ค่อนไปทางเบสเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ พบว่าอัตราส่วนวัตถุดิบและการเติมอากาศที่แตกต่างกันนั้นไม่มีผลต่อค่าพีเอชอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากทุกการทดลองมีแนวโน้มที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นทีละน้อยเช่นเดียวกัน

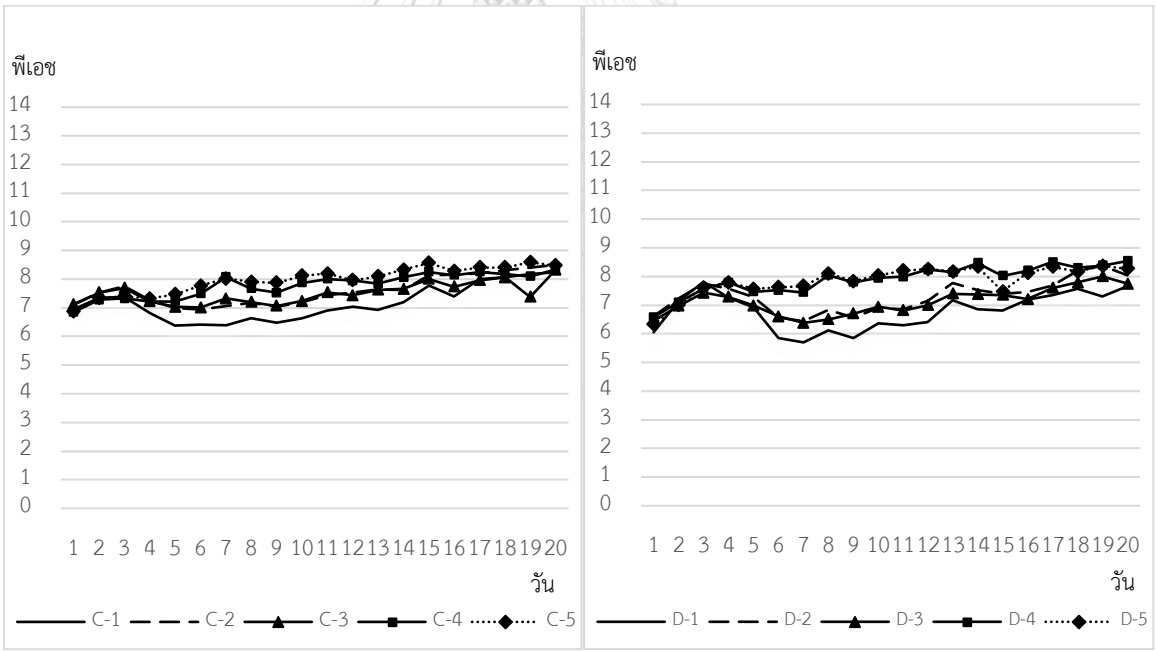
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 5-21 พีเอชก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง



(ก) (ข)



(ค) (ง)

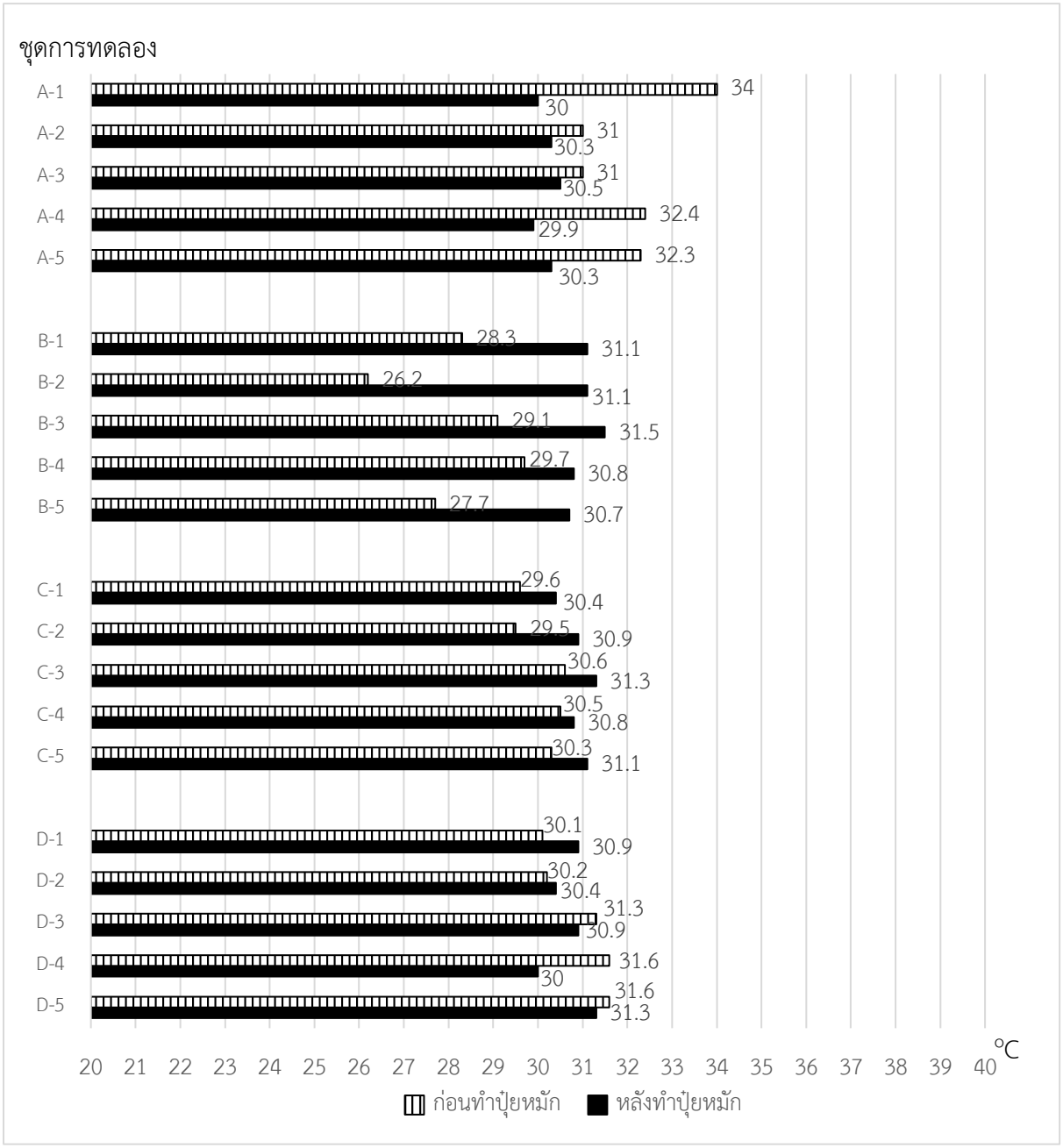
ภาพที่ 5-22 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชต่อเวลา

(ก) ชุดการทดลอง A (ข) ชุดการทดลอง B (ค) ชุดการทดลอง C และ (ง) ชุดการทดลอง D

โดย Ambient หมายถึง สภาวะบรรยากาศแวดล้อม และ ^{o}C หมายถึง อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

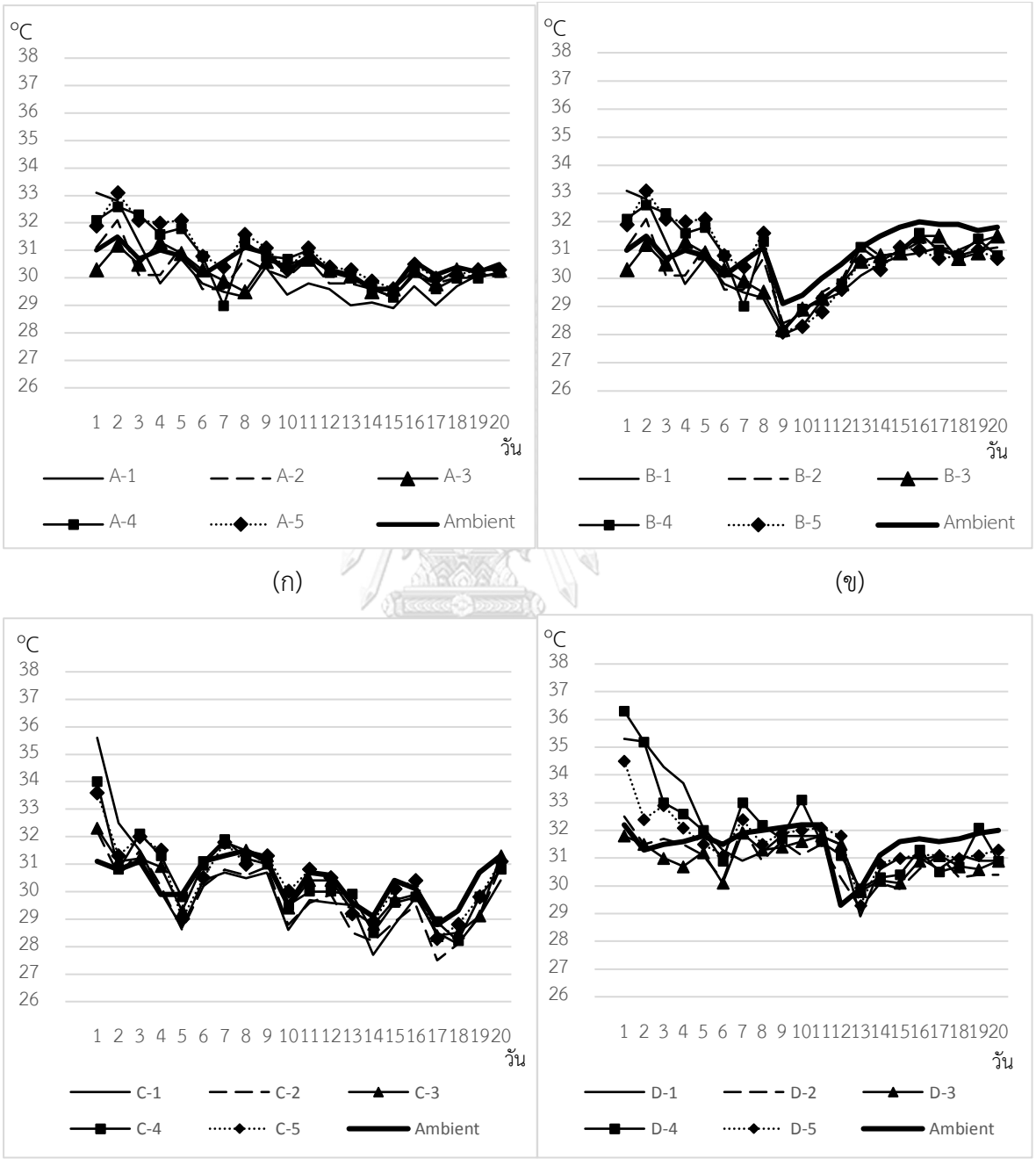
5.1.3 อุณหภูมิ

พบว่าอุณหภูมิของทุกการทดลองอยู่ในช่วงระยะแรกของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกระบวนการย่อยสลายเป็นปุ๋ยหมัก คือ Initial Mesophilic (10-40 องศาเซลเซียส) โดยความต่างระหว่างอุณหภูมิก่อนการทดลองต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 7.8 องศาเซลเซียส (26.2-34.0 องศาเซลเซียส) และความต่างระหว่างอุณหภูมิหลังการทดลองต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 1.4 องศาเซลเซียส (29.9--31.3 องศาเซลเซียส) ดังภาพที่ 5-23



ภาพที่ 5-23 อุณหภูมิก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง

และในระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 1 ถึง 20 วันนั้น ล้วนมีแนวโน้มไม่คงที่ในทุกการทดลองและมีแนวโน้มไปตามอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมนั้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างการทำปุ๋ยหมัก ดังภาพที่ 5-24



(ก) (ข)

(ค) (ง)

ภาพที่ 5-24 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลา

(ก) ชุดการทดลอง A (ข) ชุดการทดลอง B (ค) ชุดการทดลอง C และ (ง) ชุดการทดลอง D

โดย Ambient หมายถึง สภาวะบรรยากาศแวดล้อม และ °C หมายถึง อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

โดยอุณหภูมิของทุกการทดลองส่วนใหญ่ในวันที่ 1 มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อม โดยเฉพาะชุดการทดลอง C และชุดการทดลอง D ที่มีค่าสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามวลวัสดุหมักเริ่มต้นยังอยู่ในสภาพรอย่อยสลาย ต่อมาอุณหภูมิของทุกการทดลองส่วนใหญ่ในชุดการทดลอง A และชุดการทดลอง B ลดลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมในวันที่ 7 และอุณหภูมิของทุกการทดลองส่วนใหญ่ในชุดการทดลอง C และชุดการทดลอง D ลดลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมในวันที่ 5 และวันที่ 6 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการย่อยสลายของวัสดุหมักเริ่มต้นจนมีน้ำชะออกมาจนมีผลทำให้อุณหภูมิลดลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อม

ต่อมาอุณหภูมิของทุกการทดลองส่วนใหญ่ในชุดการทดลอง A มีค่าเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมตั้งแต่วันที่ 9 จนถึงวันที่ 20 ยกเว้นการทดลองอัตราส่วน A-1 ที่มีต่ำกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเข้าสู่สภาวะปฏิกิริยาคงที่ของชุดการทดลอง A อุณหภูมิของทุกการทดลองส่วนใหญ่ในชุดการทดลอง B ยังคงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมตั้งแต่วันที่ 7 จนถึงวันที่ 20 ยกเว้นการทดลอง B-4 ที่มีค่าเพิ่มขึ้นสูงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมในวันที่ 8 แล้วต่อมาค่อยลดลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมตั้งแต่วันที่ 9 จนถึงวันที่ 20 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเข้าสู่สภาวะปฏิกิริยาคงที่ของชุดการทดลอง B แต่การทดลอง B-4 ซึ่งยังคงไม่คงที่ก่อนวันที่ 9 อุณหภูมิของทุกการทดลองส่วนใหญ่ในชุดการทดลอง C มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมตั้งแต่วันที่ 8 จนถึงวันที่ 17 ยกเว้นการทดลอง C-1 และการทดลอง C-2 ที่มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อม จนกระทั่งทุกการทดลองส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมตั้งแต่วันที่ 17 ถึงวันที่ 20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดลองส่วนใหญ่ในชุดการทดลอง C ยังไม่มีแนวโน้มการเข้าสู่สภาวะปฏิกิริยาคงที่ ส่วนการทดลอง C-1 และการทดลอง C-2 นั้นมีแนวโน้มการเข้าสู่สภาวะปฏิกิริยาคงที่ และอุณหภูมิของทุกการทดลองส่วนใหญ่ในชุดการทดลอง D มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมตั้งแต่วันที่ 7 จนถึงวันที่ 20 ยกเว้นการทดลอง D-4 ที่มีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 7 และลดลงจนต่อมาก็เพิ่มขึ้นอีกในวันที่ 10 และต่อจากนั้นก็ลดลงจนใกล้เคียงอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดลองส่วนใหญ่ในชุดการทดลอง D มีแนวโน้มการเข้าสู่สภาวะปฏิกิริยาคงที่ และการทดลอง D-4 นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในปฏิกิริยาความร้อนมากที่สุดในชุดการทดลอง D นั้น อาจมาจากปฏิกิริยาความร้อนที่ยังไม่คงที่มากที่สุดในชุดการทดลอง D

ซึ่งอุณหภูมิของทุกการทดลองอยู่ในช่วงระยะแรกของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกระบวนการย่อยสลายเป็นปุ๋ยหมัก คือ Initial Mesophilic (10-40 องศาเซลเซียส) โดยความต่างระหว่างอุณหภูมิก่อนการทดลองต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 7.8 องศาเซลเซียส (26.2-34.0 องศาเซลเซียส) และความต่างระหว่างอุณหภูมิหลังการทดลองต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 1.4 องศาเซลเซียส (29.9--31.3 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นระยะแรกของระยะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกระบวนการทำปุ๋ยหมัก (Bernal และคณะ, 2017) ดังภาพที่ 5-23 และ 5-24 จะพบว่าปุ๋ยหมักสุดท้ายมีความเสถียรขึ้นจากการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องจากความต่างของอุณหภูมิหลังการทดลองมีค่าต่ำกว่าความต่างของอุณหภูมิก่อนการทดลอง

ทั้งนี้ พบว่าการไม่มีการไปสู่ระยะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอันดับต่อไปอันได้แก่ Thermophilic (40-60 องศาเซลเซียส) Cooling Mesophilic (35-45 องศาเซลเซียส) และ Curing/Maturation (อุณหภูมิช่วงสภาพแวดล้อมทั่วไป) เพราะมีการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอกภาชนะทำปุ๋ยหมักจากการวัดค่าตัวแปรระหว่างการทดลองตามกลไกการสูญเสียความร้อนภายในการทำปุ๋ยหมัก (Cornell Waste Management Institute, no date) ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยของ Kalamdhad และ Kazmi (2009) และ Arslan และคณะ (2011) ที่พบว่าอุณหภูมิของทุกการทดลองสามารถเข้าสู่ช่วง Initial Mesophilic Thermophilic Cooling Mesophilic และ Curing/Maturation ตามลำดับที่ภายในเวลา 20 วัน เนื่องจากไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอกภาชนะทำปุ๋ยหมักจากการวัดค่าตัวแปรระหว่างการทดลอง ทั้งนี้การเติมอากาศที่มีความถี่สูงนั้นจะช่วยมีผลทำให้อุณหภูมิในการทดลองส่วนใหญ่ต่ำกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมเนื่องจากเร่งการย่อยสลายจนเข้าสู่สภาวะปฏิกิริยาคงที่ได้เร็ว จึงมีผลทำให้ชุดการทดลอง B ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 8 รอบต่อวันนั้น สามารถเร่งการย่อยสลายจนเข้าสู่สภาวะปฏิกิริยาคงที่ได้เร็วที่สุดและมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสภาวะบรรยากาศแวดล้อมโดยรวมมากที่สุด ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยของ Cui และคณะ (2020) ที่พบว่าการทดลองที่มีความถี่ในการเติมอากาศสูงกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

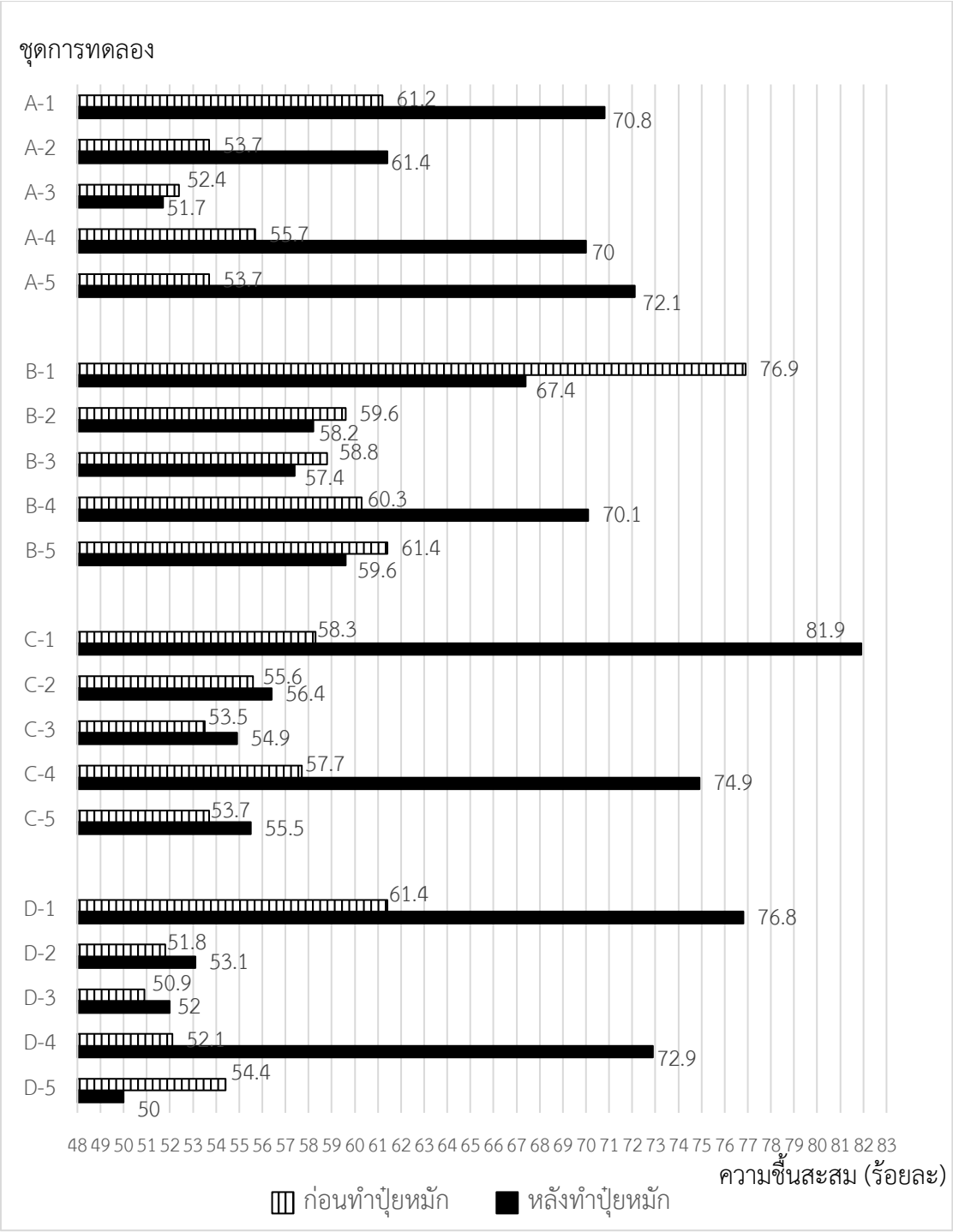
(การทดลองที่มีระยะเวลาในการเติมอากาศ 10 นาทีและระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 10 นาที) จะมีอุณหภูมิโดยรวมสูงกว่าการทดลองที่มีความถี่ในการเติมอากาศต่ำกว่า (การทดลองที่มีระยะเวลาในการเติมอากาศ 10 นาทีและระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 30 นาที) เนื่องจากการเติมอากาศที่มีความถี่สูงกว่าในงานวิจัยของ Cui และคณะจะมีปริมาตรอากาศที่เติมมีมากกว่าการเติมอากาศที่มีความถี่ต่ำกว่า ซึ่งต่างจากงานวิจัยนี้ที่ทุกการเติมอากาศที่มีความถี่ต่างกันนั้นจะมีปริมาตรอากาศที่เติมเท่ากัน แต่ทั้งนี้ไม่พบการทดลองใดที่สามารถช่วยเร่งให้เข้าสู่ช่วง Thermophlilic ได้ จึงสามารถอภิปรายได้ว่าอัตราส่วนวัตถุดิบและการเติมอากาศที่แตกต่างกันนั้นไม่มีผลต่อค่าอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด

5.1.4 ความชื้นสะสม

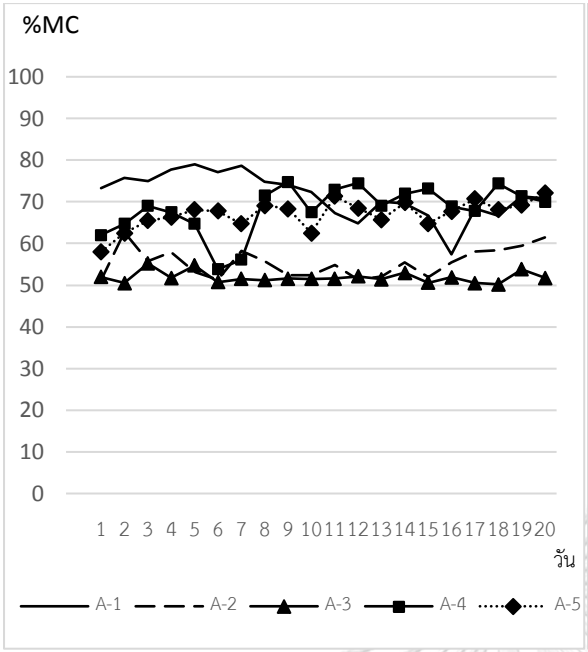
ความชื้นสะสมของทุกการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้น A-3 B-1 B-2 B-3 B-5 และ D-5 ที่มีค่าลดลง ดังภาพที่ 5-25 และ 5-26

จากตารางที่ 5-2 และตารางที่ 5-3 พบว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีความชื้นเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 15.53) การทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 9.78) การทดลองอัตราส่วนที่ 5 ความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 3.50) การทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสี่ (ร้อยละ 2.10) และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 ความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.10) และชุดการทดลอง A มีความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 9.86) ชุดการทดลอง C มีความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 8.96) ชุดการทดลอง D มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 6.84) และชุดการทดลอง B มีความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุดหรือลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ -0.86)

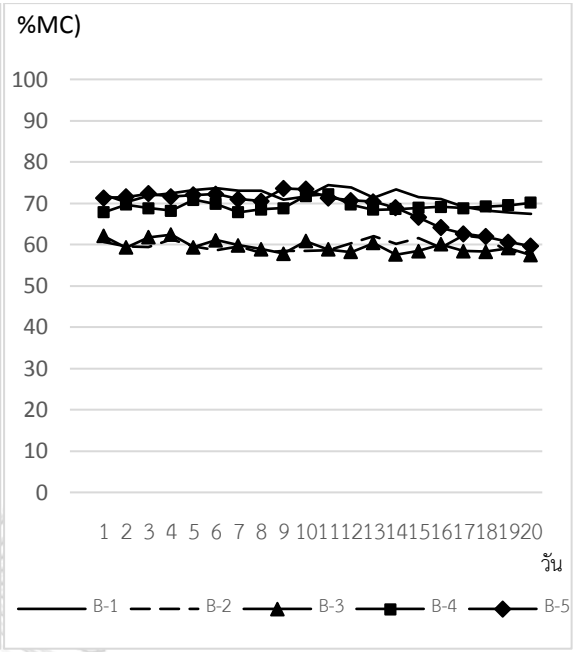
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



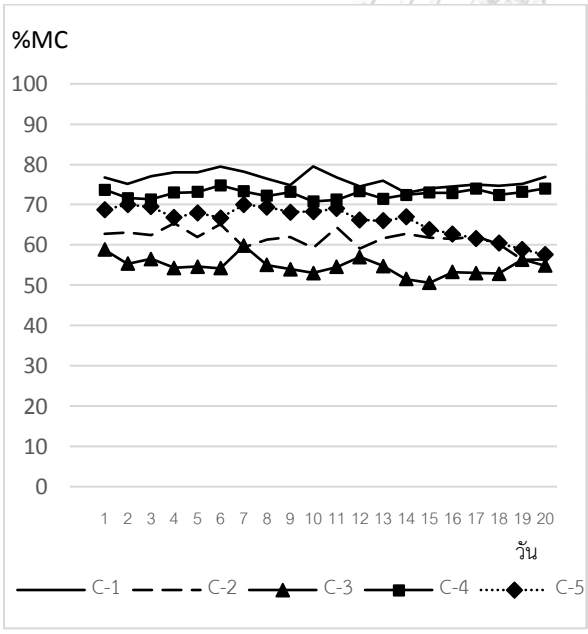
ภาพที่ 5-25 ความชื้นสะสมก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง



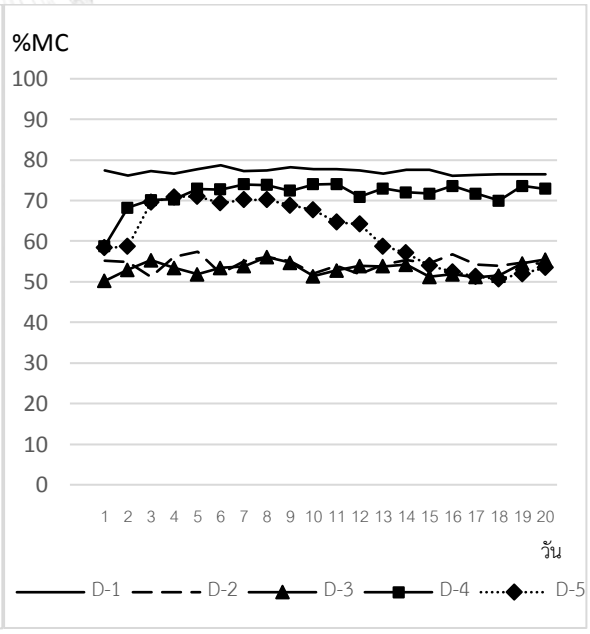
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 5-26 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสะสมต่อเวลา

(ก) ชุดการทดลอง A (ข) ชุดการทดลอง B (ค) ชุดการทดลอง C และ (ง) ชุดการทดลอง D

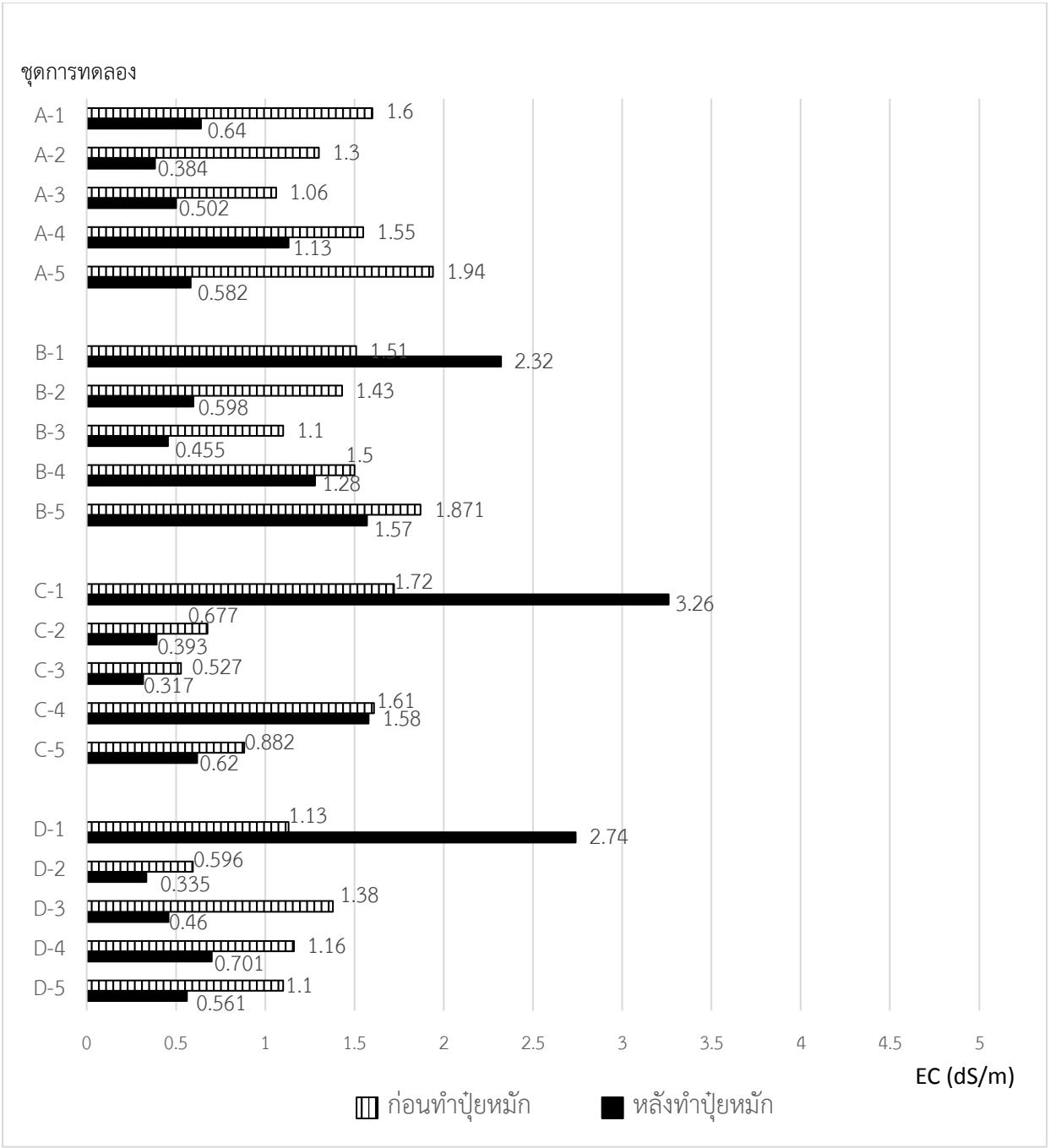
โดย %MC หมายถึง ความชื้นสะสม (ร้อยละ)

ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดความชื้นสะสมและความชื้นภายในมวลวัตถุดิบหมักที่มีการย่อยสลายระหว่างกระบวนการหมักนั้นชะละลายออกมา โดยเฉพาะเศษผักผลไม้ที่มีความชื้นสะสมสูง และอัตราส่วนที่มีความสมดุลของสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณจะมีผลทำให้เร่งการย่อยสลาย จึงมีผลทำให้การทดลองส่วนใหญ่ในการทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arslan และคณะ (2011) ที่ซึ่งพบว่า 5 ใน 6 การทดลองที่มีการเติมอากาศต่างกันแต่มีอัตราส่วนเหมือนกันนั้น คือ เศษผักผลไม้:ขี้เลื่อย:ตะกอนน้ำเสีย ซึ่งมีเศษผักผลไม้นั้นเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกันกับงานวิจัยนี้และมีความสมดุลระหว่างสารอาหาร (เศษผักผลไม้) และสารเพิ่มปริมาณ (ขี้เลื่อย) เช่นเดียวกันกับการทดลองอัตราส่วนที่ 4 ในงานวิจัยนี้นั้น มีความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นหลังการทำปุ๋ยหมักเสร็จสิ้นในวันที่ 20 เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Arslan และคณะ (2011) และลดลงเนื่องจากอากาศที่มีความถี่สูงจะทำให้ความชื้นลดลงสูง จึงส่งผลให้ชุดการทดลอง B ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 8 รอบต่อวันนั้น มีความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุดหรือลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cui และคณะ (2020) ที่พบว่าการทดลองที่มีความถี่ในการเติมอากาศสูงกว่า (การทดลองที่มีระยะเวลาในการเติมอากาศ 10 นาทีและระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 10 นาที) จะมีความชื้นต่ำกว่าการทดลองที่มีความถี่ในการเติมอากาศต่ำกว่า (การทดลองที่มีระยะเวลาในการเติมอากาศ 10 นาทีและระยะเวลาในการเว้นการเติมอากาศ 30 นาที)

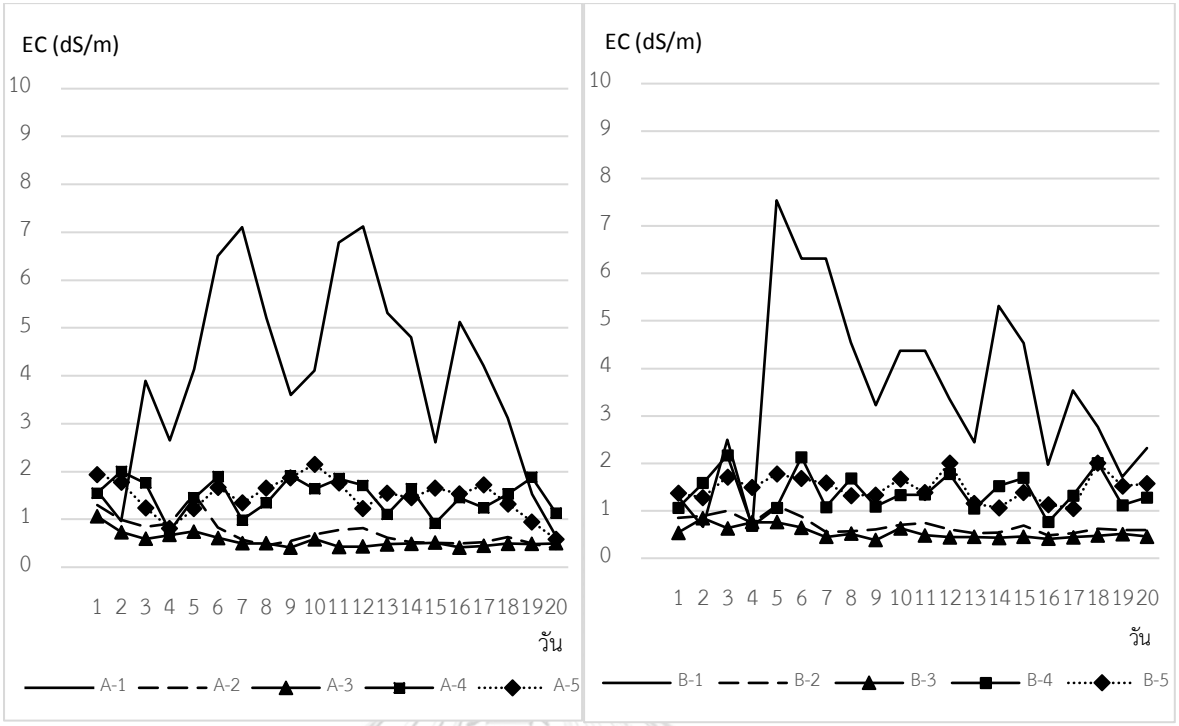
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1.5 สภาพการนำไฟฟ้า

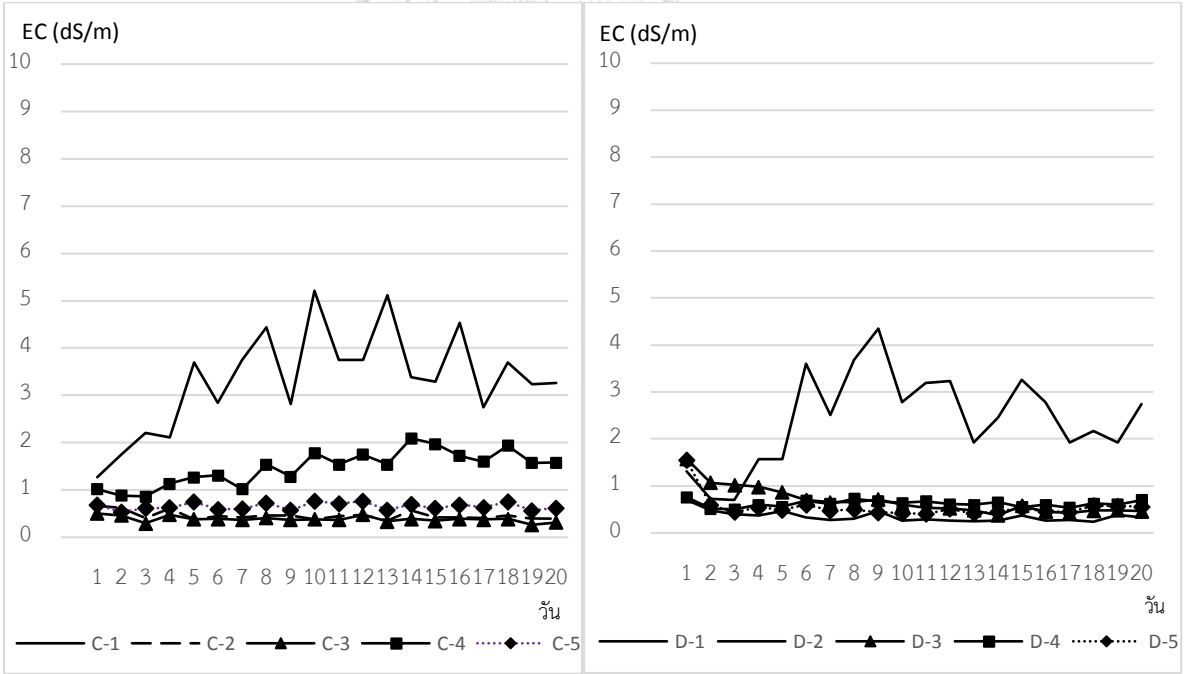
สภาพการนำไฟฟ้าของทุกชุดการทดลองมีค่าลดลง ยกเว้นการทดลอง B-1 C-1 และ D-1 มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ การทดลองส่วนใหญ่ไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเห็นได้ชัดยกเว้นการทดลองอัตราส่วนที่ 1 (A-1 B-1 C-1 และ D-1) ดังภาพที่ 5-27 และ 5-28



ภาพที่ 5-27 สภาพการนำไฟฟ้าก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในชุดทุกการทดลอง
โดย EC (dS/m) หมายถึง สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)



(ก) (ข)



(ค) (ง)

ภาพที่ 5-28 การเปลี่ยนแปลงของสภาพการนำไฟฟ้าต่อเวลา

(ก) ชุดการทดลอง A (ข) ชุดการทดลอง B (ค) ชุดการทดลอง C และ (ง) ชุดการทดลอง D

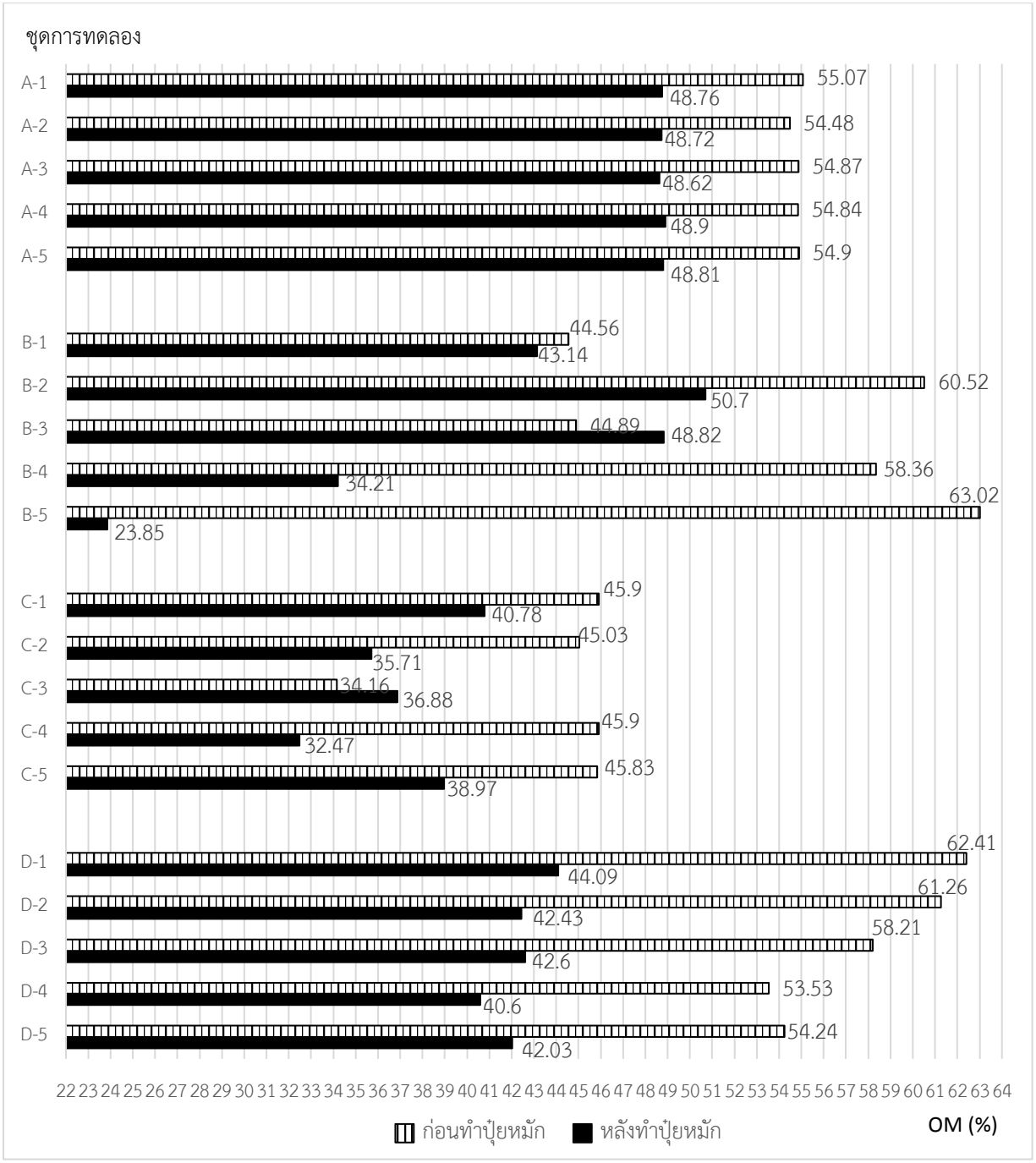
โดย EC (dS/m) หมายถึง สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)

ซึ่งลดลงเนื่องจากสอดคล้องกับค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น โดยในสภาพที่ค่อนข้างเป็นเบสจะทำให้สภาพการนำไฟฟ้าลดลง ส่วนที่เพิ่มขึ้นนั้นอาจมาจากความเข้มข้นของเกลือแร่ที่ละลายออกมาอยู่ในรูปของไอออนอย่างเช่นฟอสเฟตไอออน ($P_3O_4^-$) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เพิ่มขึ้นจากการถูกย่อยสลายของมวลวัสดุหมักเริ่มต้น ทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (Arslan และคณะ, 2011) โดยเฉพาะเศษผักผลไม้ที่มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเริ่มต้นสูงที่สุดใน 4 วัตถุดิบ และการเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างไม่เป็นแนวโน้มชัดเจนในทุกการทดลองนั้นมาจากการวัดตัวแปรพวกตัวอย่างปุ๋ยหมักซึ่งเป็นของแข็งนั้นจะมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ต่ำกว่าของเหลว ส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนสูง ทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลักนั้น มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าในการทดลองมีการเพิ่มขึ้นและลดลงมากกว่าการทดลองอัตราส่วนที่เหลือ 4 แบบอย่างเห็นได้ชัด และพบว่าการเติมอากาศที่แตกต่างกันนั้นไม่มีผลอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกันสำหรับทุกชุดการทดลอง และมีการทดลองส่วนใหญ่มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าลดลงหลังทำปุ๋ยหมัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kalamdhad และ Kazmi (2009) ที่พบว่าในปุ๋ยหมักมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นและมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าลดลงหลังทำปุ๋ยหมักภายในระยะเวลา 20 วันเช่นเดียวกัน

5.1.6 อินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์

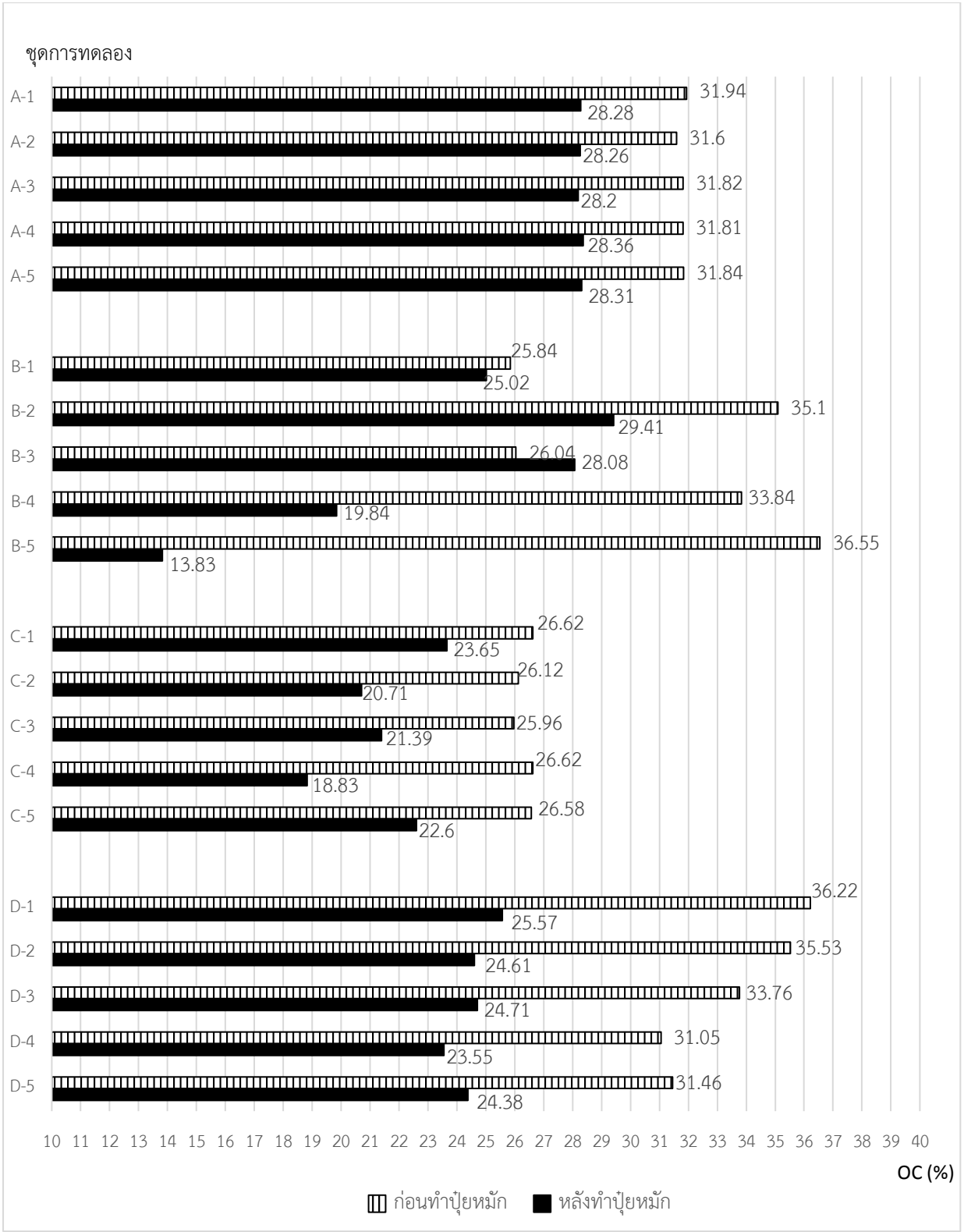
อินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ของทุกการทดลองมีค่าลดลง ยกเว้น B-3 และ C-3 ที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ B-4 และ B-5 ที่มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 5-29 และภาพที่ 5-30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 5-29 อินทรียวัตถุก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง

โดย OM (%) หมายถึง อินทรียวัตถุ (ร้อยละ)



ภาพที่ 5-30 คาร์บอนอินทรีย์ก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง

โดย OC (%) หมายถึง คาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละของน้ำหนัก)

จากตารางที่ 5-2 และตารางที่ 5-3 พบว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 16.08 และร้อยละ 9.33 ของน้ำหนักตามลำดับ) การทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 14.11 และร้อยละ 8.19 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) การทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 10.93 และร้อยละ 6.34 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) การทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสี่ (ร้อยละ 7.79 และร้อยละ 4.52 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 3.80 และร้อยละ 2.21 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) และชุดการทดลอง D มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 15.58 และร้อยละ 9.04 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) ชุดการทดลอง B มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 14.13 และร้อยละ 8.19 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) ชุดการทดลอง C มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 6.40 และร้อยละ 3.71 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) และชุดการทดลอง A มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 6.07 และร้อยละ 3.52 ของน้ำหนักตามลำดับ)

ส่วนที่ลดลงนั้นเนื่องจากถูกใช้ไปในกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งจุลินทรีย์นำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน (เปรมสุดา จิ๋วนอก (2550) ; Kalamdhad และ Kazmi (2009) ; Muntjeer และคณะ (2009)) ซึ่งอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมทั้งเรื่องสารอาหารอย่างเช่นเศษผักผลไม้และความพรุนจากสารเพิ่มปริมาณอย่างเช่นเศษใบจามจุรีหรือเศษกิ่งไม้นั้นจะทำให้การย่อยสลายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเพิ่มการนำค่าอินทรีย์และคาร์บอนอินทรีย์ไปใช้เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเปรมสุดา จิ๋วนอก (2550) ที่พบว่าทุกการทดลองมีความเหมาะสมทั้งเรื่องสารอาหาร(แหล่งไนโตรเจน 4 ชนิดที่ต่างกันและผักตบชวา)และสารเพิ่มปริมาณนั้น (ใบจามจุรี ซึ่งเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกันบกับงานวิจัยนี้) มีค่าอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลง ฉะนั้น จึงมีผลทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 5 ซึ่งมีเศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้ในปริมาตรเท่ากันนั้นมีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด ในขณะที่การเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ต่อเนื่องมีส่วนช่วยเร่งในการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมัก (Jiang และคณะ, 2015) ซึ่งเพิ่มการนำค่าอินทรีย์และคาร์บอนอินทรีย์ไปใช้เป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ จึงมีผลทำให้ชุดการทดลอง D ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 96 นาทีและระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 144 นาทีนั้นมีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด

ส่วนที่เพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากการลดลงของน้ำหนักแห้งสุทธิจากการระเหยของน้ำ โดยเศษกิ่งไม้เป็นชีวมวลย่อยสลายยาก ทำให้การย่อยสลายไม่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้จุลิทรีย์ไม่สามารถนำอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ไปใช้งานได้น้อย จึงมีผลทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 3 ซึ่งมีเศษกิ่งไม้เป็นหลักนั้นมีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (โดยเฉพาะ B-3 และ C-3 ที่มีค่าลดลง) ในขณะที่การเติมอากาศที่แตกต่างนั้นไม่มีผลอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีรูปแบบของการลดลงที่ใกล้เคียงกันสำหรับทุกชุดการทดลอง

ส่วนที่ทุกการทดลองในชุดการทดลอง A มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์เริ่มต้นและอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์สุดท้ายใกล้เคียงกัน รวมไปถึงการลดลงในแบบที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งต่างจากการทดลองใน 3 ชุดการทดลองที่เหลือ (ทั้งนี้ ชุดการทดลอง D ก็มีรูปแบบใกล้เคียงกับชุดการทดลอง A) เนื่องจากวัตถุดิบที่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวันนั้นมีค่าองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีไม่เหมือนกันในทุกวัน

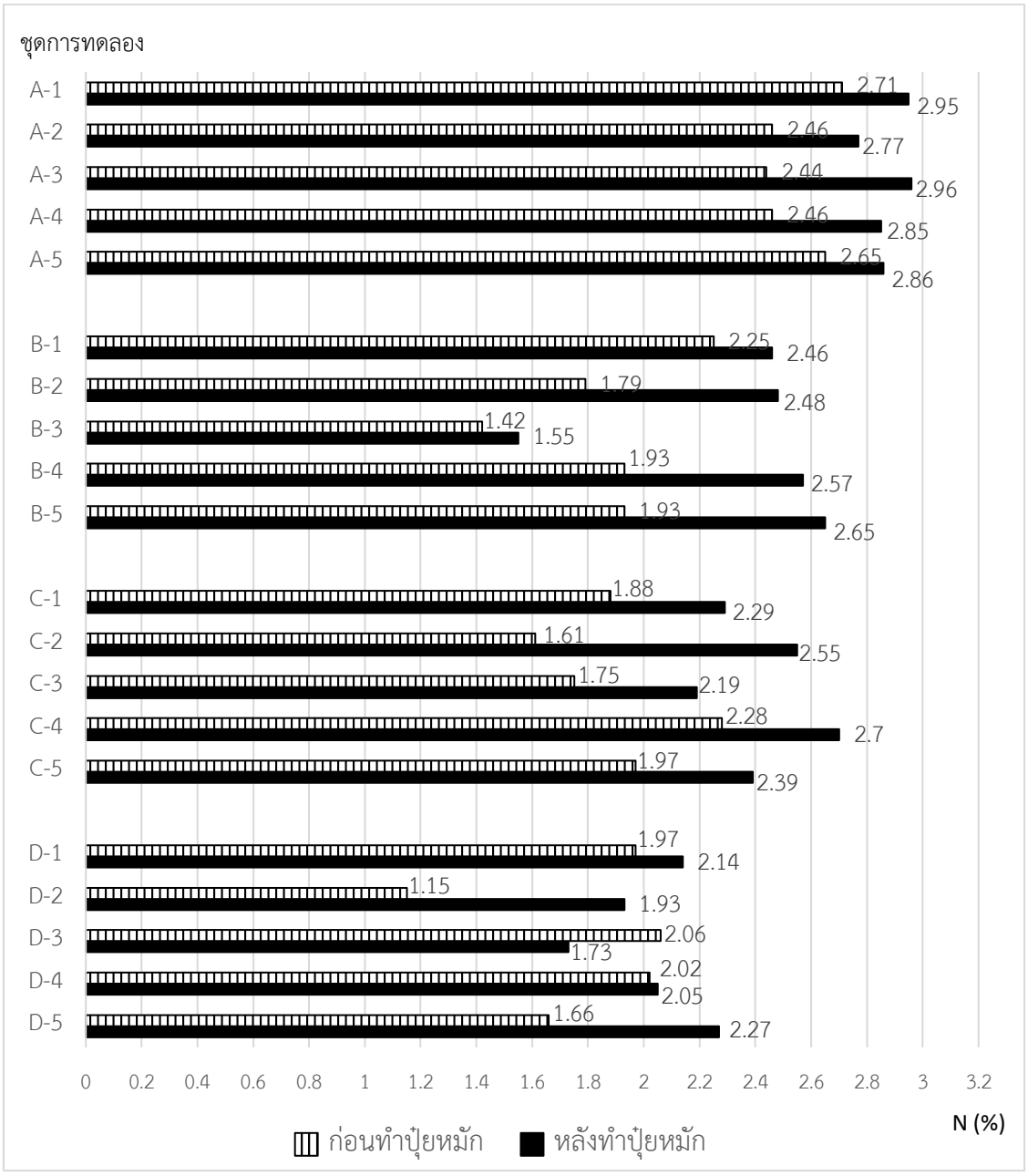
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1.7 ไนโตรเจนทั้งหมด

ไนโตรเจนทั้งหมดในทุกการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้น D-3 ที่มีค่าลดลง ดังภาพที่ 5-31

จากตารางที่ 5-2 และตารางที่ 5-3 พบว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 0.68 ของน้ำหนัก) การทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 0.49 ของน้ำหนัก) การทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 0.37 ของน้ำหนัก) การทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสี่ (ร้อยละ 0.26 ของน้ำหนัก) และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ย

รวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.19 ของน้ำหนัก) และชุดการทดลอง C มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 0.53 ของน้ำหนัก) ชุดการทดลอง B มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 0.49 ของน้ำหนัก) ชุดการทดลอง A มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 0.33 ของน้ำหนัก) และชุดการทดลอง D มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.25 ของน้ำหนัก)



ภาพที่ 5-31 ไนโตรเจนทั้งหมดก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง
โดย N (%) หมายถึง ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)

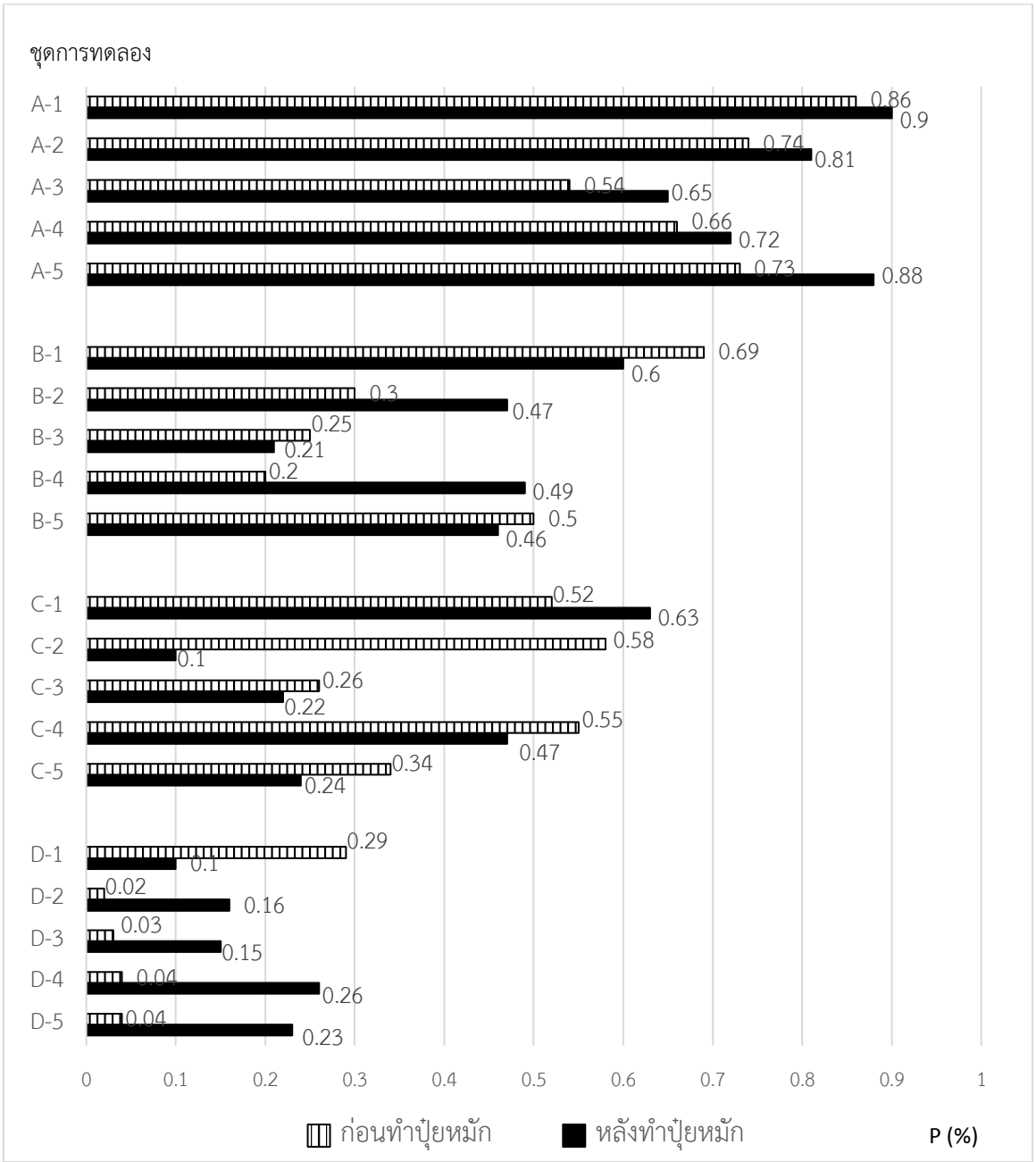
ส่วนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงของน้ำหนักแห้งสุทธิจากการระเหยของน้ำและการกลายเป็นแก๊ส CO_2 (Kalamdhad และ Kazmi (2009) ; Muntjeer และคณะ (2009)) โดยจามจุรีนั้นเป็นไม้ที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่าไม้ทั่วไปเนื่องจากมีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนสูง จึงมีปริมาณไนโตรเจนในมวลจามจุรีสูง (เปรมสุดา จิ๋วนอก, 2550) จึงมีผลให้การทดลองอัตราส่วนที่ 2 ซึ่งมีเศษใบจามจุรีเป็นหลักนั้นมีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุธีรา สุนทรารักษ์ (2553) ที่พบว่าอัตราส่วนระหว่างเศษอาหารและเศษใบจามจุรีนั้น (วัตถุดิบชนิดเดียวกันกับงานวิจัยนี้) มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นมากที่สุด ในขณะที่การเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องนั้นมีผลช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมัก (Jiang และคณะ, 2015) ซึ่งช่วยเพิ่มการลดลงของน้ำหนักเปียกสุทธิ (ซึ่งเชื่อมโยงถึงการลดลงของน้ำหนักแห้งสุทธิด้วย) จึงมีผลทำให้ชุดการทดลอง C ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 48 นาทีและระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 72 นาทีนั้นมีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด

ส่วนที่ลดลงเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ตัวแปร หรืออาจมาจากการหายไปในรูปของแก๊สไนโตรเจนระเหยง่าย (Kalamdhad และ Kazmi (2009) ; Bharti และคณะ (2018)) ซึ่งกิ่งไม้เป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ (ในกรณีไม่มีกิ่งจามจุรีเป็นสัดส่วนหลัก) จึงมีผลให้การทดลองอัตราส่วนที่ 3 ซึ่งมีเศษกิ่งไม้เป็นหลักนั้นมีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด ในขณะที่การเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องนั้นมีผลช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมัก (Jiang และคณะ, 2015) ซึ่งอาจมีผลทำให้ไนโตรเจนในวัตถุดิบหายไปในรูปของแก๊ส NH_3 และแก๊สไนโตรเจนระเหยง่ายได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด ชุดการทดลอง D ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 96 นาทีและระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 144 นาทีนั้นมีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.8 ฟอสฟอรัส (P_2O_5)

ฟอสฟอรัสในทุกการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ B-2 และ B-4 ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้น B-1 B-3 B-5 C-2 C-3 C-4 C-5 และ D-1 ที่มีค่าลดลง ของน้ำหนัก ดังภาพที่ 5-32



ภาพที่ 5-32 ฟอสฟอรัส (P_2O_5) ก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง
โดย P (%) หมายถึง ฟอสฟอรัส (P_2O_5) (ร้อยละของน้ำหนัก)

จากตารางที่ 5-2 และตารางที่ 5-3 พบว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 0.12 ของน้ำหนัก) การทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 0.05 ของน้ำหนัก) การทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 0.04 ของน้ำหนัก) การทดลองอัตราส่วนที่ 2 และการทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุดเท่ากัน (ร้อยละ -0.03 ของน้ำหนัก) และชุดการทดลอง D มีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 0.10 ของน้ำหนัก) ชุดการทดลอง A มีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 0.09 ของน้ำหนัก) ชุดการทดลอง B มีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 0.06 ของน้ำหนัก) และชุดการทดลอง C มีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ -0.12 ของน้ำหนัก)

ส่วนที่เพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากกระบวนการ Mineralization จากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Kalamdhad และ Kazmi (2009) ; Muntjeer และคณะ (2009)) ซึ่งอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมทั้งเรื่องสารอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอย่างเช่นเศษผักผลไม้และความพรุนจากสารเพิ่มปริมาณอย่างเช่นเศษใบจามจุรีกับเศษกิ่งไม้นั้น จะช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมักขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเปรมสุดา จิ๋วนอก (2550) ที่พบว่าทุกการทดลองมีความเหมาะสมทั้งเรื่องสารอาหาร (แหล่งไนโตรเจน 4 ชนิดที่ต่างกันและผักตบชวา) และสารเพิ่มปริมาณนั้น (ใบจามจุรี ซึ่งเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกันบกับงานวิจัยนี้) มีฟอสฟอรัสทั้งหมดเพิ่มขึ้น จึงมีผลทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 4 ซึ่งมีเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากันนั้นมีการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด ในขณะที่การเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องนั้นมีผลช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมัก (Jiang และคณะ, 2015) ซึ่งอาจเพิ่มกระบวนการ Mineralization จากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ จึงมีผลทำให้ชุดการทดลอง D ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 96 นาทีและระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 144 นาทีนั้นมีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด

ส่วนที่ลดลงนั้นอาจมาจากความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ตัวแปร หรืออาจมาจากกระบวนการ Mineralization จากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์และการบริโภคธาตุฟอสฟอรัสของจุลินทรีย์ในกระบวนการ (Kalamdhad และ Kazmi, 2009) มีผลช่วยเร่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กระบวนการ Mineralization จากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ จึงมีผลทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลัก และการทดลองอัตราส่วนที่ 2 ซึ่งมีเศษใบจามจุรีเป็นหลักนั้นมีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยน้อยที่สุดหรือลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด ในขณะที่การเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องนั้นมีผลช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมัก (Jiang และคณะ, 2015) ซึ่งอาจเพิ่มกระบวนการ Mineralization จากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์และการบริโภคธาตุฟอสฟอรัสของจุลินทรีย์ในกระบวนการ จึงมีผลทำให้ชุดการทดลอง C ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 48 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 72 นาทีนั้นมีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุดหรือลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด

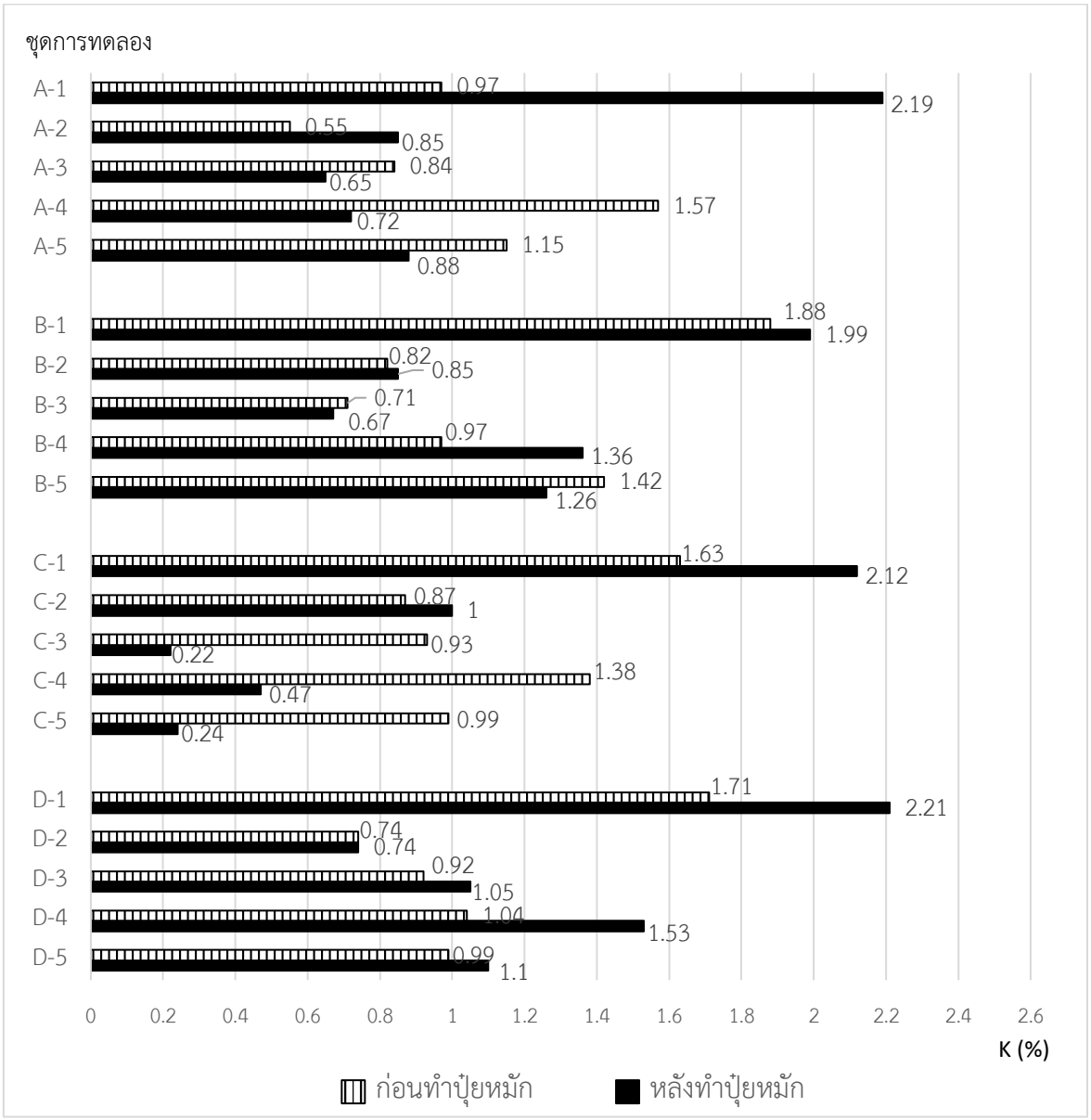
และส่วนที่ฟอสฟอรัสเริ่มต้นในชุดการทดลอง D นั้นมีค่าน้อยกว่าอีก 3 ชุดการทดลองที่เหลืออย่างเห็นได้ชัดเป็นส่วนใหญ่นั้น (D-2 D-3 D-4 และ D-5 มีค่าไม่ถึงร้อยละ 0.1 ของน้ำหนัก) อาจมาจากความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ตัวแปร หรือวัตถุดิบในรอบการทดลองของชุดนี้นั้นมีค่าฟอสฟอรัสน้อยกว่าวัตถุดิบในรอบการทดลองของชุดการทดลอง 3 ชุดที่เหลือเนื่องจากวัตถุดิบที่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวันนั้นมีค่าองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีไม่เหมือนกันในทุกวัน

5.1.9 โพแทสเซียม (K_2O)

โพแทสเซียมในทุกการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ A-1 C-1 และ D-1 ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้น A-3 A-4 A-5 B-3 B-5 C-3 C-4 และ C-5 ที่มีค่าลดลงและ D-2 ที่มีค่าเท่าเดิม ดังภาพที่ 5-33

จากตารางที่ 5-2 และตารางที่ 5-3 พบว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 0.58 ของน้ำหนัก) การทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 0.12 ของน้ำหนัก) การทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ -0.20 ของน้ำหนัก) การทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นทั้งหมดเฉลี่ยเป็นอันดับสี่ (ร้อยละ -0.22 ของน้ำหนัก) และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ -0.23 ของน้ำหนัก) และชุดการทดลอง D มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด

(ร้อยละ 0.25 ของน้ำหนัก) ชุดการทดลอง B มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 0.07 ของน้ำหนัก) ชุดการทดลอง A มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 0.04 ของน้ำหนัก) และชุดการทดลอง C มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ -0.35 ของน้ำหนัก)



ภาพที่ 5-33 โพแทสเซียม (K_2O) ก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกชุดการทดลอง
โดย K (%) หมายถึง โพแทสเซียม (K_2O) (ร้อยละของน้ำหนัก)

ซึ่งส่วนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการ Mineralization จากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Kalamdhad และ Kazmi (2009) ; Muntjeer และคณะ (2009)) และการ

ลดลงของน้ำหนักแห้งสุทธิจากการระเหยของน้ำที่จะเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมในปุ๋ยหมัก ซึ่งอัตราส่วนที่มีเศษผักผลไม้เป็นหลักนั้นจะมีโพแทสเซียมในปริมาณที่สูง โดยจากตารางที่ 5-1 พบว่าเศษผักผลไม้มีโพแทสเซียมมากที่สุดใน 4 วัตถุดิบ (ร้อยละ 2.05 ของน้ำหนัก) จึงมีผลทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลักนั้นมีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด ในขณะที่การเติมอากาศที่แตกต่างกันไม่มีผลอย่างเห็นได้ชัด

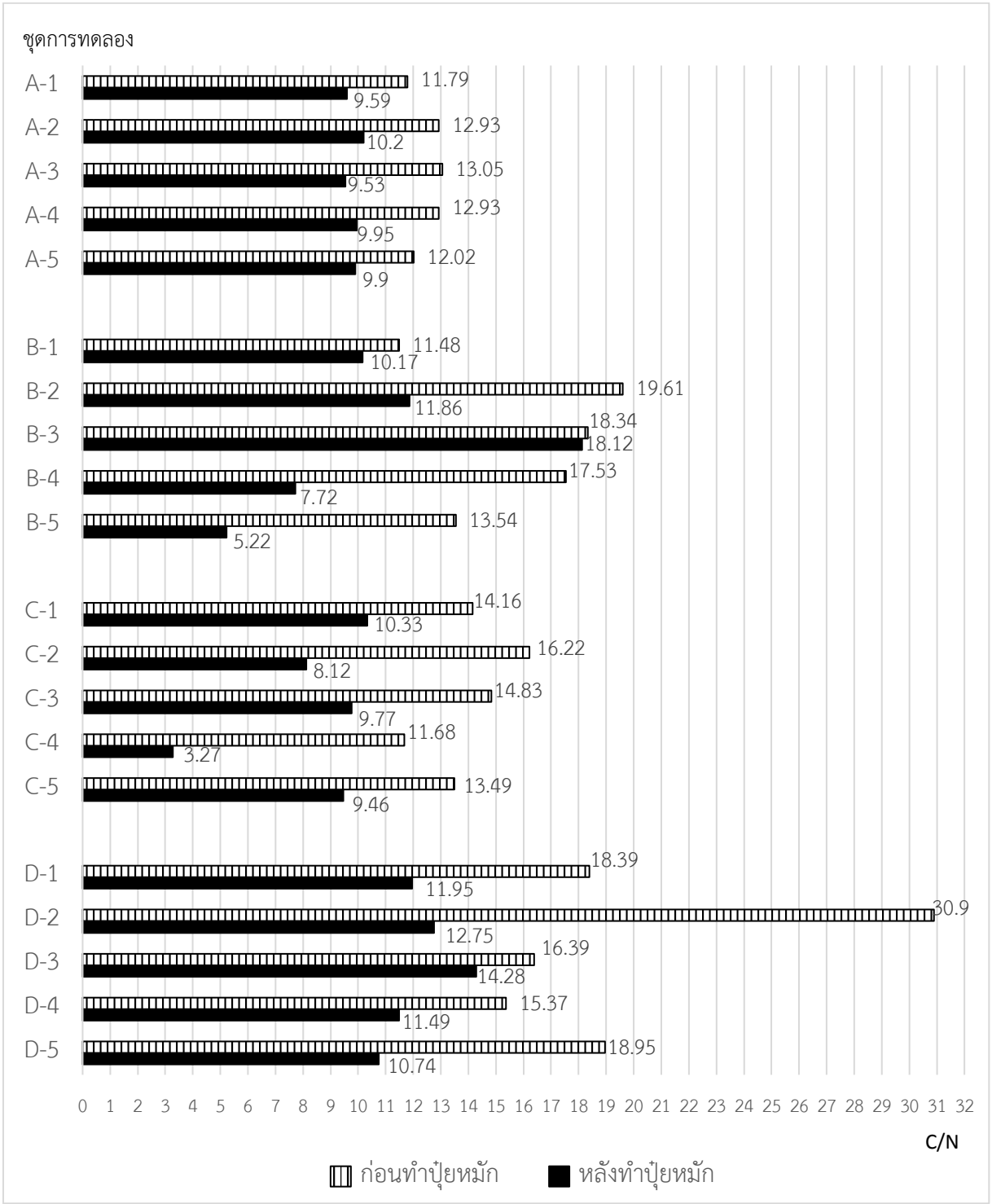
ส่วนที่ลดลงเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ตัวแปร หรืออาจมาจากการถูกตรึงและถูกดูดซับจากกระบวนการทำปุ๋ยหมักที่เปลี่ยนโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ (K_2O) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ถูกละลายน้ำโดยง่าย (ปัญจาภา ส่งเสริม, 2559) ซึ่งอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมทั้งเรื่องสารอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอย่างเช่นเศษผักผลไม้และความพรุนจากสารเพิ่มปริมาณอย่างเช่นเศษใบจามจุรีกับเศษกิ่งไม้นั้น จะช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมักขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเปรมสุดา จิ๋วนอก (2550) ที่พบว่าทุกการทดลองมีความเหมาะสมทั้งเรื่องสารอาหาร (แหล่งไนโตรเจน 4 ชนิดที่ต่างกันและผักตบชวา) และสารเพิ่มปริมาณนั้น (ใบจามจุรี ซึ่งเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกันกับงานวิจัยนี้) มีโพแทสเซียมทั้งหมดลดลง จึงมีผลทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 5 ซึ่งมีเศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้ในปริมาตรเท่ากันนั้นมีการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุดหรือลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด ในขณะที่การเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องนั้นมีผลช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมัก (Jiang และคณะ, 2015) จึงมีผลทำให้ชุดการทดลอง C ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 48 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 72 นาทีนั้นมีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุดหรือลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด

ส่วนที่มีค่าเท่าเดิมนั้นอาจมาจากความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ตัวแปร โดยการทดลองนั้นไม่มีการย่อยสลายหรือมีการย่อยสลายที่น้อยมากจากการทำปุ๋ยหมัก จนส่งผลให้ค่าสุดท้ายที่วิเคราะห์ได้ไม่มีความแตกต่างกับค่าเริ่มต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.10 อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน

อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนในทุกการทดลองมีค่าลดลง ดังภาพที่ 5-34



ภาพที่ 5-34 อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกการทดลอง โดย C/N หมายถึง อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน

จากตารางที่ 5-2 และตารางที่ 5-3 พบว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (9.18) การทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (6.27) การทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (5.67) การทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยมากเป็นอันดับสี่ (3.45) และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (2.73) และชุดการทดลอง D มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (7.76) ชุดการทดลอง C มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (5.89) ชุดการทดลอง B มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (5.48) และชุดการทดลอง A มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (3.26)

ซึ่งลดลงเนื่องจากการใช้คาร์บอนเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ในกระบวนการทำปุ๋ยหมักซึ่งทำให้คาร์บอนอินทรีย์ลดลง และการลดลงของน้ำหนักแห้งสุทธิจากการระเหยของน้ำและการกลายเป็นแก๊ส CO_2 ซึ่งทำให้ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมทั้งเรื่องสารอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอย่างเช่นเศษผักผลไม้และความพรุนจากสารเพิ่มปริมาณอย่างเช่นเศษใบจามจุรีกับเศษกิ่งไม้นั้น จะช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมักขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arslan และคณะ (2011) ที่พบว่าทุกการทดลองมีความเหมาะสมทั้งเรื่องสารอาหาร (เศษผักผลไม้ ซึ่งเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกันกับงานวิจัยนี้) และสารเพิ่มปริมาณนั้น (ขี้เลื่อย) มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง ทั้งนี้ จากตารางที่ 5-1 พบว่าเศษใบจามจุรีเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมทั้งเรื่องสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณ เนื่องจากมีค่าความพรุนที่มากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 52.05) และอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สูงที่สุด (18.61) จึงมีผลทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 2 ซึ่งมีเศษใบจามจุรีเป็นหลักนั้นมีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด ในขณะที่การเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องนั้นมีผลช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมัก (Jiang และคณะ, 2015) จึงมีผลทำให้ชุดการทดลอง D ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 96 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 144 นาทีนั้นมีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงรวมมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.11 ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก

ดัชนีการงอกของเมล็ดในทุกการทดลองมีค่าผ่านเกณฑ์คุณภาพ (ดัชนีการงอกของเมล็ด ≥ ร้อยละ 80) ยกเว้น A-1 A-2 และ B-1 ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลองที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นไม่ครบ 3 ตัวแปร ดังตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 ข้อมูลตัวแปรเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นของปุ๋ยหมักสุดท้าย

การทดลอง	ตัวแปร		
	สีน้ำตาลเข้มหรือดำ	กลิ่นดินธรรมชาติ	เนื้อปุ๋ยหมักยุ่ย ขาดจากกันง่าย เป็นเนื้อเดียวกันและไม่แข็งกระด้าง
A-1	/	X	X
A-2	/	X	X
A-3	/	X	X
A-4	/	/	X
A-5	/	/	X
B-1	X	X	X
B-2	X	X	X
B-3	X	X	X
B-4	/	/	/
B-5	/	/	/
C-1	X	X	X
C-2	X	X	X
C-3	X	X	X
C-4	/	/	/
C-5	/	/	X
D-1	/	X	X
D-2	/	X	X
D-3	/	X	X
D-4	/	/	X
D-5	/	/	X

หมายเหตุ: ในช่องตัวแปรใดที่มีเครื่องหมาย (/) และสี เทา หมายถึงตัวแปรนั้นผ่านเกณฑ์ ส่วนเครื่องหมาย (X) ในช่องตัวแปรใด หมายถึงตัวแปรนั้นไม่ผ่านเกณฑ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 5-3 พบว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 106.25) การทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 96.5) การทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 91.5) การทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสี่ (ร้อยละ 90.25) และการทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีค่ามีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 72.25) และชุดการทดลอง C มีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 98.6) ชุดการทดลอง B มีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 94.8) ชุดการทดลอง A มีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 90) และชุดการทดลอง D มีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 82)

อัตราส่วนที่มีเศษผักผลไม้เป็นองค์ประกอบหลักนั้นมีผลทำให้ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากขาดความเหมาะสมในเรื่องขาดความพรุนที่เหมาะสมจากการขาดสารเพิ่มปริมาณอย่างเช่นเศษใบจามจุรี เพราะจากตารางที่ 5-2 แสดงให้เห็นว่าทุกการทดลองของการทดลองอัตราส่วนที่ 1 (ยกเว้น D-1 ที่มีค่า AFP ที่ร้อยละ 44.66) นั้นแม้จะมีค่าความพรุนเริ่มต้นที่ไม่อยู่ในช่วงค่า AFP ที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 35-45 ที่เมื่อสูงกว่าร้อยละ 45 นั้นจะทำให้ระบบเสี่ยงต่อการขาดความชื้นสะสมสำหรับการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบ (Paul, 2009) และมีค่าความชื้นสะสมเริ่มต้นไม่อยู่ในช่วงค่าความชื้นสะสมที่เหมาะสมสำหรับวัสดุหมักเริ่มต้นซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 (ยกเว้น C-1 ที่มีความชื้นสะสมเริ่มต้นร้อยละ 58.31) ทำให้เกิดสภาวะ Anaerobic จากการย่อยสลายที่ทำให้มวลวัสดุหมักมีขนาดเล็กลงจนตวามพรุนลดลงและความชื้นออกมาจากมวลเพิ่มขึ้น จนไม่เกิดกระบวนการทำปุ๋ยหมักต่อไป ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยของ Bharti และคณะ (2018) ที่วัสดุหมักเริ่มต้นของการทดลอง T1 T2 และ T3 แม้จะมีค่าความชื้นสะสมเริ่มต้นไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 แต่เพราะมีความเหมาะสมของสารอาหาร (เศษผัก) และสารเพิ่มปริมาณ (ขี้เลื่อย ผักตบชวา และเศษพืชตัดแต่งสวน) ซึ่งมีผลทำให้ค่าดัชนีการงอกของเมล็ดมากกว่าร้อยละ 90 ในทั้ง 3 การทดลองซึ่งถือว่าผ่านเกณฑ์คุณภาพ (เกณฑ์คุณภาพสำหรับความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักด้วยดัชนีการงอกของเมล็ดสำหรับงานวิจัยของผู้ดำเนินงานวิจัยนั้นอยู่ที่อย่างน้อยร้อยละ 80) จึงมีผลทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 4 ซึ่งเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากันนั้นมีความ

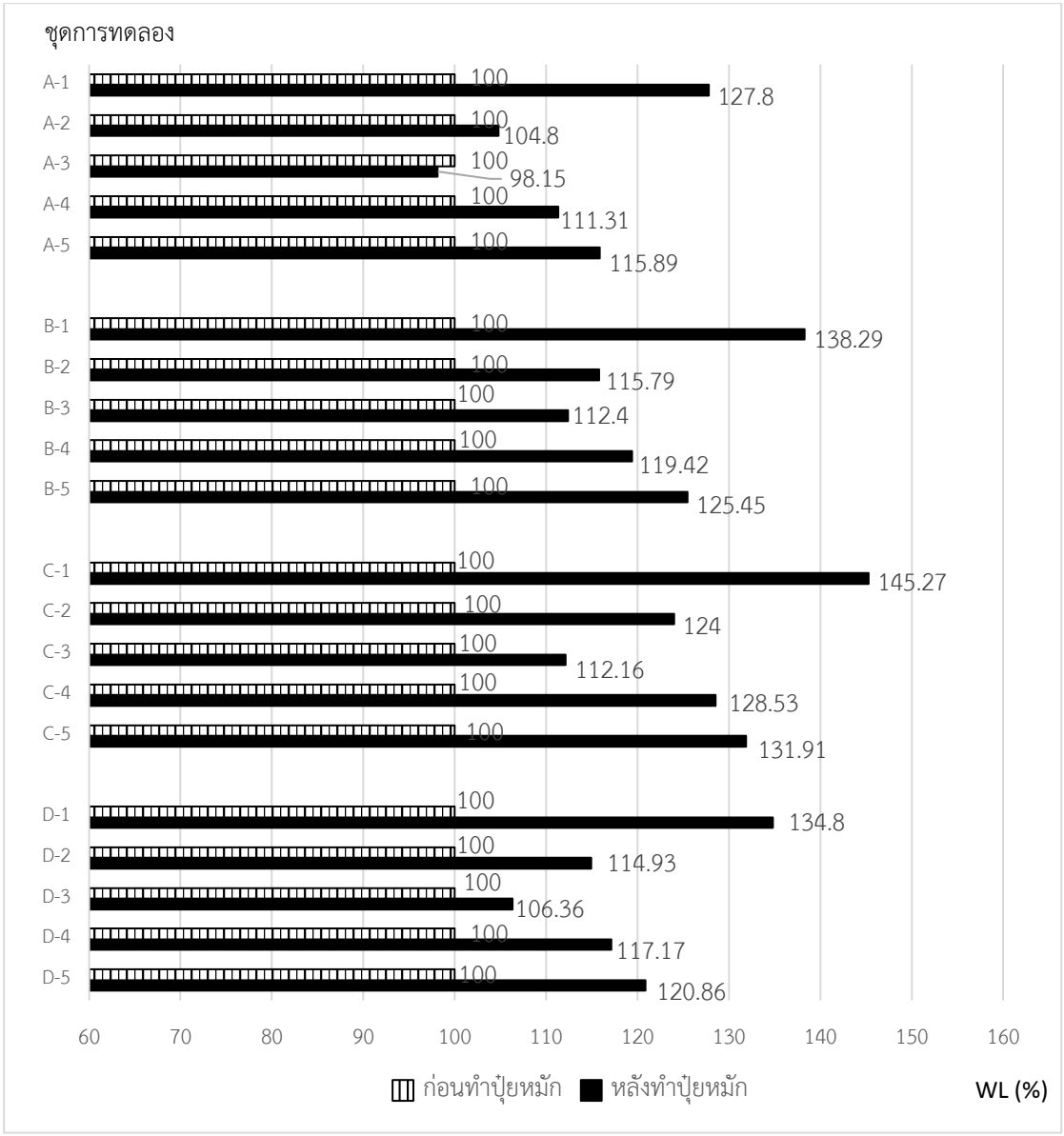
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมมากที่สุด และการทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลักนั้นมีค่ามีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด ในขณะที่การเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องนั้นมีผลต่อการเพิ่มความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (Jiang และคณะ, 2015) จึงมีผลทำให้ชุดการทดลอง C ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 48 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 72 นาทีนั้นมีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักมากที่สุด แม้ว่าชุดการทดลอง D ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 96 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 144 นาทีนั้นจะมีความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักน้อยที่สุดก็ตาม

5.1.12 การสูญเสียน้ำหนัก

จากตารางที่ 5-3 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักในทุกการทดลองมีค่าเป็นบวก ยกเว้น A-3 ที่มีค่าเป็นลบ โดยการทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 36.36) การทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 23.53) การทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 19.11) การทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสี่ (ร้อยละ 14.88) และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 7.29) และชุดการทดลอง C มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 28.37) ชุดการทดลอง B มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 22.27) ชุดการทดลอง D มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 18.82) และชุดการทดลอง A มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 11.33) ดังภาพที่ 5-35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 5-35 ค่าการสูญเสียน้ำหนักก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกการทดลอง

โดย WL (%) หมายถึง การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ)

ค่าการสูญเสียน้ำหนัก เท่ากับ ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังทำปุ๋ยหมัก (ร้อยละ) – 100 (ร้อยละ)

ซึ่งสาเหตุที่มีค่าเป็นบวกเนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำและของแข็งชีวมวลระเหยง่ายไปกับกระบวนการทำปุ๋ยหมัก โดยมีการสูญเสียของน้ำมากกว่า โดยเฉพาะเศษผักผลไม้ที่เป็นชีวมวลที่ถูกย่อยสลายง่าย ซึ่งต่างจากเศษกิ่งไม้ที่เป็นชีวมวลที่ถูกย่อยสลายยากเพราะไม้เป็นวัตถุดิบที่มีสารย่อยสลายทางชีวภาพยากอย่างลิกนินและเพคทิน จึงส่งผลให้การทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นองค์ประกอบหลักนั้นมีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด และการทดลอง

อัตราส่วนที่ 3 ซึ่งมีเศษกิ่งไม้เป็นองค์ประกอบหลักนั้นมีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Adhikari และคณะ (2009) ที่ซึ่งพบว่าอัตราส่วนที่มีเศษอาหาร (ในที่นี้เศษผักผลไม้ ซึ่งเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกันกับงานวิจัยนี้) ร่วมกับเศษไม้นั้นถูกย่อยสลายต่ำที่สุด เนื่องจากเมื่อเกิดปุ๋ยหมักสุดท้ายยังเห็นเศษไม้อยู่ ในขณะที่อัตราส่วนที่มีเศษอาหารไม่มีเศษไม้ร่วมอยู่ด้วยนั้น (เศษอาหารร่วมกับเศษฟางข้าวสาลีสับและเศษอาหารร่วมกับเศษฟางสับ) ถูกย่อยสลายได้ดีจนไม่เหลือเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิม และการสูญเสียน้ำหนักนั้นส่วนใหญ่มาจากการสูญเสียน้ำไปกับกระบวนการทำปุ๋ยหมัก ในขณะที่การเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องจะมีผลทำให้วัสดุหมักเกิดการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าการเติมอากาศประเภทไม่บังคับเติมอากาศ เนื่องจากการการเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่องมีส่วนช่วยเร่งในการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมักมากกว่าการเติมอากาศประเภทไม่บังคับเติมอากาศ (Jiang และคณะ, 2015) จึงส่งผลให้ชุดการทดลอง C ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 48 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 72 นาทีนั้นมีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด และชุดการทดลอง A ซึ่งไม่มีจำนวนรอบการเติมอากาศนั้นมีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด

ส่วนที่มีค่าเป็นลบเนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของน้ำแต่ของแข็งชีวมวลระเหยง่ายไม่เกิดการสูญเสียไปกับกระบวนการทำปุ๋ยหมัก

5.1.13 ความพรุน (AFP)

จากตารางที่ 5-3 พบว่าความพรุนของทุกการทดลองมีค่าลดลง ยกเว้น A-2 และ B-2 ที่มีค่าเพิ่มขึ้น

โดยการทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 48.88) การทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 25.27) การทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 14.30) การทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสี่ (ร้อยละ 10.98) และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 10.78) และชุดการทดลอง D มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 25.80) ชุดการทดลอง C มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับที่สอง (ร้อยละ 20.98) ชุดการทดลอง A มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวม

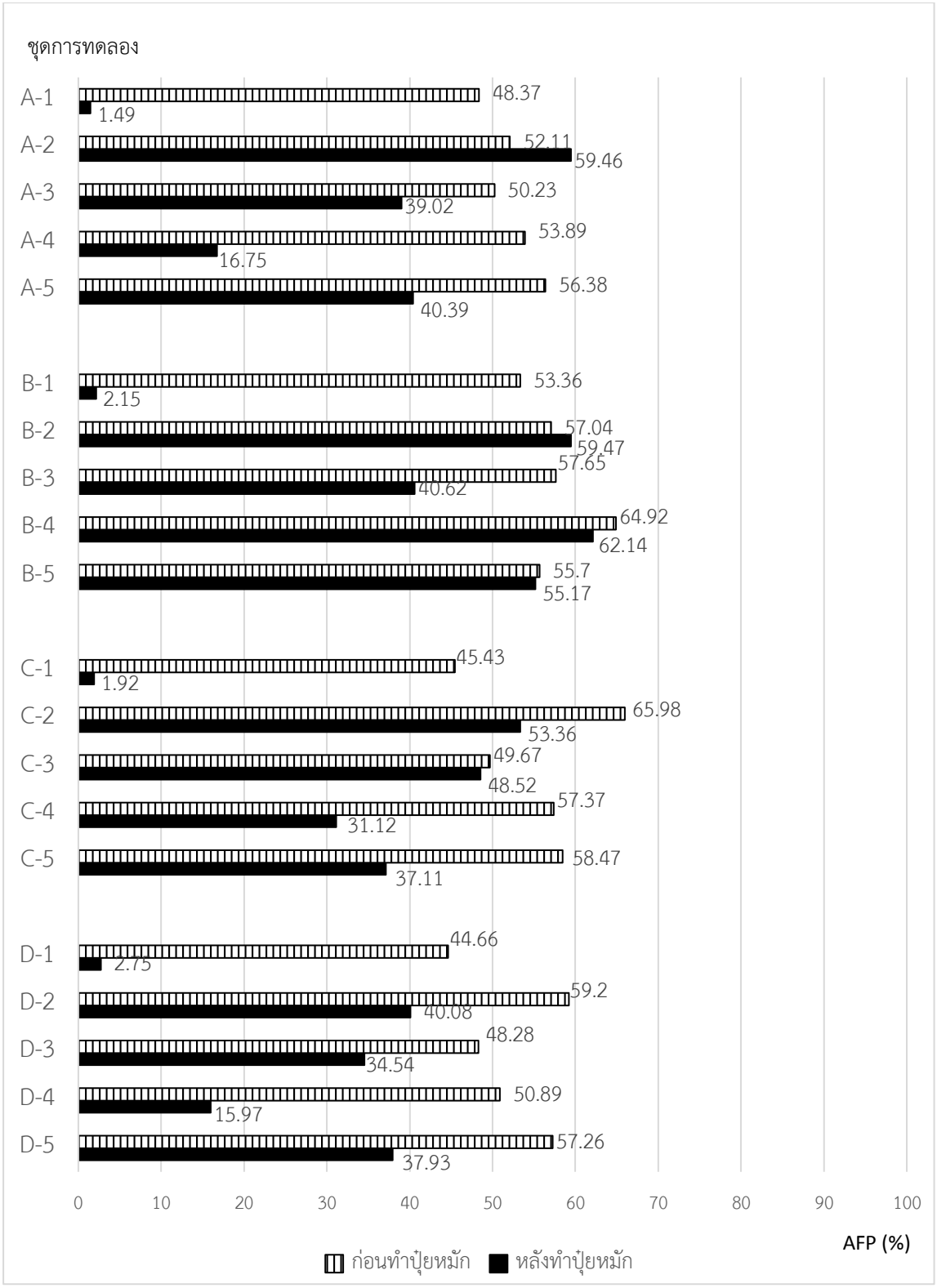
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

มากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 20.77) และชุดการทดลอง B มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 13.82) ดังภาพที่ 5-36

ซึ่งค่าความพรุนลดลงเนื่องจากวัสดุหมักเริ่มต้นเป็นชีวมวลที่ถูกย่อยสลายได้ โดยเมื่อมวลถูกย่อยสลายแล้วมวลจะมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ความพรุนลดลง โดยเฉพาะเศษผักผลไม้ที่เป็นชีวมวลที่ถูกย่อยสลายง่าย ซึ่งต่างจากเศษกิ่งไม้ที่เป็นชีวมวลที่ถูกย่อยสลายยาก โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Adhikari และคณะ (2009) (โดยที่กล่าวถึงในงานวิจัยของ Adhikari นี้คือค่า Bulking Density ที่มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นแต่สามารถใช้บ่งชี้ถึงความพรุนได้ โดย Bulking Density จะแปรผกผันกับค่า AFP คือ หากค่า Bulking Density สูง ค่า AFP จะต่ำ) ที่ซึ่งพบว่าอัตราส่วนที่มีเศษอาหาร (ในที่นี้เศษผักผลไม้ ซึ่งเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกันกับงานวิจัยนี้) ร่วมกับเศษไม้นั้นถูกย่อยสลายต่ำที่สุดเนื่องจากเมื่อเกิดปุ๋ยหมักสุดท้ายยังเห็นเศษไม้อยู่ ซึ่งมีค่า Bulking Density ลดลง (AFP เพิ่มขึ้น) ในขณะที่อัตราส่วนที่มีเศษอาหารไม่มีเศษไม้ร่วมอยู่ด้วยนั้น (เศษอาหารร่วมกับเศษฟางข้าวสาลีสับและเศษอาหารร่วมกับเศษฟางสับ) ถูกย่อยสลายได้ดีจนไม่เหลือเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิม ซึ่งมีค่า Bulking Density เพิ่มขึ้น (AFP ลดลง) จึงส่งผลให้การทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นองค์ประกอบหลักนั้นมีความพรุนลดลงมากที่สุด และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 ซึ่งมีเศษกิ่งไม้เป็นองค์ประกอบหลักนั้นมีความพรุนลดลงน้อยที่สุด ในขณะที่การเติมอากาศที่มีจำนวนรอบการเติมอากาศสูงเกินไปนั้นอาจมีผลทำให้ลดความเร็วในการย่อยสลายของจุลินทรีย์เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบปรับตัวได้ช้า ทำให้ชุดการทดลอง B ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 8 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 24 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 36 นาทีนั้นความพรุนลดลงน้อยที่สุด และชุดการทดลอง D ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 96 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 144 นาทีนั้นมีความพรุนลดลงมากที่สุด

ส่วนที่ค่าความพรุนเพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าตัวแปร โดยการทดลองนั้นไม่มีการย่อยสลายหรือมีการย่อยสลายที่น้อยมากจากการทำปุ๋ยหมัก จนส่งผลให้ค่าสุดท้ายที่วิเคราะห์ได้ไม่มีความแตกต่างกับค่าเริ่มต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 5-36 ค่าความพรุนก่อนและหลังทำปุ๋ยหมักในทุกการทดลอง

โดย AFP (%) หมายถึง ความพรุนที่อากาศสามารถแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ)

5.1.14 การวิเคราะห์เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง

พิจารณาจากข้อมูลในข้อ 5.1.1 ถึง 5.1.13 เพื่ออภิปรายให้เห็นว่าการลดมวลของเสีย (การสูญเสียน้ำหนัก) จากการทำปุ๋ยหมักนั้นทำให้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยแบ่งเป็นทางกายภาพ อันได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ พีเอช อุณหภูมิ ความชื้นสะสม สภาพการนำไฟฟ้าและความพรุน ทางเคมี อันได้แก่ อินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน และทางชีวภาพ คือ ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่วัดด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด

5.1.14.1 ลักษณะทางกายภาพ

5.1.14.1.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

การทดลองอัตราส่วนที่ 1 การทดลองอัตราส่วนที่ 4 และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้องการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวก จึงสอดคล้องการทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 36.36) เนื่องจากมีเศษผักผลไม้เป็นหลักและเศษผักผลไม้นั้นเป็นชีวมวลย่อยสลายง่ายซึ่งทำให้มวลลดลงได้สูง และการทดลองอัตราส่วนที่ 2 และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพอย่างเห็นได้ชัด จึงสอดคล้องกับการทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 7.29) เนื่องจากมีเศษกิ่งไม้เป็นหลักและเศษกิ่งไม้นั้นเป็นชีวมวลย่อยสลายยากซึ่งทำให้มวลลดลงได้ต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1.14.1.2 พีเอช

ทุกการทดลองหลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาพค่อนข้างเป็นกรด (ต่ำกว่า 7.00) เป็นค่อนข้างเป็นเบส (สูงกว่า 7.50) ซึ่งสอดคล้องการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวก เนื่องจากพีเอชเพิ่มขึ้นเนื่องจากจุลินทรีย์นำกรดไปใช้และมวลมีการลดลงระหว่างการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยหมัก

5.1.14.1.3 อุณหภูมิ

ทุกการทดลองหลังการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง Initial Mesophilc (10-40 องศาเซลเซียส) ซึ่งไม่สอดคล้องการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวก เพราะตลอดการทดลองนั้นไม่พบระยะต่อไปของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขั้นต่อไปเป็นขั้น

เป็นต้น(ระยะ Thermophilic ที่ 40-60 องศาเซลเซียส จนไปถึงระยะ Curing/Maturing ที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิสภาวะบรรยกาศแวดล้อม) ในขณะมวลมีการลดลงจนสามารถวัดค่าการสูญเสียน้ำหนักได้หลังการทดลอง

5.1.14.1.4 ความชื้นสะสม

ทุกการทดลองส่วนใหญ่นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการความชื้นภายในมวลวัตถุดิบหมักที่มีการย่อยสลายระหว่างกระบวนการหมักนั้นชะละลายออกมานั้นสอดคล้องการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวกเนื่องจากการสูญเสียชีวมวลระเหยง่ายและน้ำ ซึ่งจะมีการสูญเสียของน้ำมากกว่า แต่โดยรวมคือมีการสูญเสียของมวลต่ำ จึงสอดคล้องกับการทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีความชื้นเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 15.53) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 19.11) เนื่องจากมีเศษผักผลไม้ซึ่งมีความชื้นสะสมสูงและเป็นชีวมวลย่อยสลายง่าย และมีความสมดุลของสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณจะมีผลทำให้เร่งการย่อยสลาย จึงมีผลทำให้ความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นสูง และชุดการทดลอง A มีความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุดและสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 11.33) เนื่องจากชุดการทดลอง A ไม่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ ฉะนั้นจึงไม่มีส่วนในการช่วยลดความชื้นสะสมและลดมวลเท่ากับชุดการทดลอง B ชุดการทดลอง C และชุดการทดลอง D ที่เป็นการเติมอากาศที่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 8 รอบต่อวัน 4 รอบต่อวันและ 2 รอบต่อวันตามลำดับ ทำให้ความชื้นสะสมโดยรวมเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สรุป ความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นในขณะที่มีการสูญเสียน้ำหนักต่ำ ความชื้นสะสมออกมาจากมวลจากวัตถุดิบที่มีความชื้นสะสมสูงและย่อยสลายง่าย และการเติมอากาศที่ไม่มีความถี่ในการเติมอากาศ ซึ่งมีผลทำให้การลดลงของมวลต่ำและความชื้นสะสมสูญเสียไปจากระบบต่ำ

และการทดลองบางส่วนนั้นมีค่าลดลงเนื่องจากการความชื้นภายในมวลวัตถุดิบหมักมีการระเหยออกนอกระบบทำปุ๋ยหมักจากการทำปุ๋ยหมักและการเติมอากาศ โดยการเติมอากาศที่มีความถี่สูงซึ่งมีผลทำให้ลดความชื้นสะสมสูงนั้นสอดคล้องการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวกเนื่องจากการสูญเสียชีวมวลระเหยง่ายและน้ำ ซึ่งจะมีการสูญเสียของน้ำมากกว่า และโดยรวมคือมีการสูญเสียของมวล จึงสอดคล้องกับ การ

ทดลองอัตราส่วนที่ 3 ความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.10) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 7.29) เนื่องจากเศษกิ่งไม้มีความชื้นสะสมต่ำและเป็นชีวมวลย่อยสลายยาก ทำให้ความชื้นสะสมลดลง และชุดการทดลอง B มีความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุดหรือลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ -0.86) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 22.27) เนื่องจากชุดการทดลอง B เป็นการเติมอากาศที่มีความถี่สูงที่สุด (จำนวนรอบในการเติมอากาศ 8 รอบต่อวัน) จึงส่งผลทำให้ความชื้นสะสมลดลงสูงที่สุด และทำให้มวลลดลงสูงเนื่องจากความชื้นระเหยออกจากมวลสูง

สรุป ความชื้นสะสมลดลงในขณะที่มีการสูญเสียน้ำหนักสูง จากวัตถุดิบที่มีความชื้นสะสมต่ำและย่อยสลายยาก และการเติมอากาศที่มีความถี่ในการเติมอากาศสูง ซึ่งส่งผลให้มีการลดลงของมวลต่ำสำหรับกรณีวัตถุดิบที่มีความชื้นสะสมต่ำและย่อยสลายยาก และความชื้นสะสมสูญเสียไปจากระบบสูงสำหรับกรณีการเติมอากาศที่มีความถี่ในการเติมอากาศสูง

5.1.14.2.5 สภาพการนำไฟฟ้า

ทุกการทดลองส่วนใหญ่มีค่าลดลงและส่วนใหญ่ไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเห็นได้ การทดลองส่วนใหญ่จึงไม่มีความสอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวก ถึงแม้การทดลองอัตราส่วนที่ 1 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ทั้งนี้เป็นเพราะการทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีเศษผักผลไม้เป็นหลักที่มีสภาพการนำไฟฟ้าสูง ซึ่งไม่มีความสอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักแต่อย่างใด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.14.2.6 ความพรุน

ทุกการทดลองส่วนใหญ่มีค่าลดลงเนื่องจากมวลมีขนาดเล็กลงเพราะมีการย่อยสลายระหว่างกระบวนการหมักนั้นสอดคล้องการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวกเนื่องจากมีการย่อยสลายจนมวลลดลงที่ซึ่งทำให้มวลมีขนาดเล็กลง ซึ่งมีผลทำให้ความพรุนลดลง จึงสอดคล้องกับการทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 48.88) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 36.36) เนื่องจากมีเศษผักผลไม้เป็นหลักและเป็นชีวมวลย่อยสลายง่าย ทำให้มวลลดลงสูง ทำให้ความชื้นลดลงสูง และชุดการทดลอง D มีความพรุนลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด

(ร้อยละ 25.80) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 18.82) เนื่องจากชุดการทดลอง D มีความถี่ในการเติมอากาศต่ำ (จำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน) นั้นจะมีการเร่งการย่อยสลายต่ำกว่าการเติมอากาศที่มีความสมดุลในการเติมอากาศ ซึ่งก็คือชุดการทดลอง C ที่ค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 28.37) ซึ่งมีผลทำให้มวลมีขนาดเล็กลงจากการย่อยสลายจนมีความพรุนลดสูงแต่มวลลดลงต่ำ

สรุป ความพรุนลดลงในขณะที่มีการสูญเสียน้ำหนัก โดยเฉพาะจากวัตถุดิบที่ย่อยสลายง่าย ที่ทำให้ความพรุนลดลงสูง และการเติมอากาศที่มีความถี่ในการเติมอากาศต่ำ ซึ่งส่งผลให้มีความพรุนลดลงสูงแต่มีการลดลงของมวลต่ำ

5.1.14.2 ทางเคมี

5.1.14.2.1 อินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์

การทดลองส่วนใหญ่มีค่าลดลงเนื่องจากการใช้คาร์บอนของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายนั้นสอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักในทุกกเนื่องจากการย่อยสลายซึ่งทำให้มีมวลลดลง สอดคล้องกับการทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 16.08 และร้อยละ 9.33 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 23.53) เนื่องจากมีความสมดุลระหว่างสารอาหาร (เศษผักผลไม้) และสารเพิ่มปริมาณ (เศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้) ที่ถึงแม้จะมีความสมดุลน้อยกว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 4 ที่มีสารอาหาร (เศษผักผลไม้) และสารเพิ่มปริมาณ (เศษใบจามจุรี) ในปริมาตรเท่ากัน จึงส่งผลทำให้เร่งการย่อยสลาย ซึ่งเพิ่มการใช้คาร์บอนของจุลินทรีย์และเพิ่มการลดลงของมวล และชุดการทดลอง D มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 15.58 และร้อยละ 9.04 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 18.82) เนื่องจากชุดการทดลอง D มีความถี่ในการเติมอากาศต่ำ (จำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน) นั้นจะมีการเร่งการย่อยสลายต่ำกว่าการเติมอากาศที่มีความสมดุลในการเติมอากาศ ซึ่งก็คือชุดการทดลอง C ที่ค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อย

ละ 28.37) ซึ่งมีผลทำให้เพิ่มการใช้คาร์บอนของจุลินทรีย์จนมีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดสูงแต่มวลลดลงต่ำ

สรุป อินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงในขณะที่มีการสูญเสียน้ำหนักโดยเฉพาะจากอัตราส่วนที่มีความสมดุลระหว่างสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณซึ่งเร่งการย่อยสลายและเพิ่มการใช้คาร์บอนของจุลินทรีย์สูง ทำให้อินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงสูง และการเติมอากาศที่มีความถี่ในการเติมอากาศต่ำ ซึ่งส่งผลให้มีอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ลดลงสูงแต่มีการลดลงของมวลต่ำ

5.1.14.2.2 ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม

สำหรับไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมของทุกการทดลองส่วนใหญ่นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงของน้ำหนักแห้งสุทธินั้นสอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวกเนื่องจากการลดลงของมวลระหว่างการทำปุ๋ยหมักที่ทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ด้วยสาเหตุจากปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัสหรือโพแทสเซียมที่แต่เดิมมีสูงอยู่ในวัตถุดิบ ความสมดุลระหว่างสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณ กระบวนการ Mineralization ของจุลินทรีย์ และการเติมอากาศประเภทบังคับแบบไม่ต่อเนื่องที่มีส่วนช่วยเร่งการย่อยสลาย จึงสอดคล้องกับการทดลองอัตราส่วนที่ 2 ที่มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 0.68 ของน้ำหนัก) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสี่ (ร้อยละ 14.88) เนื่องจากมีเศษใบจามจุรีเป็นหลักซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนสูงที่เมื่อเกิดการลดลงของมวลและทำให้ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นสูง การทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 0.12 ของน้ำหนัก) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 19.11) เนื่องจากมีความสมดุลระหว่างสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณซึ่งช่วยเพิ่มการย่อยสลายทำให้การลดมวลเพิ่มขึ้นและทำให้ฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นสูง การทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 0.58 ของน้ำหนัก) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 36.36) เนื่องจากมีเศษผักผลไม้เป็นหลักซึ่งมีปริมาณโพแทสเซียมสูงและเป็นชีวมวลย่อยสลายง่ายที่ทำให้เกิดการลดลงของมวลสูงและทำให้โพแทสเซียมเพิ่มขึ้นสูง และชุดการทดลอง C มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 0.53 ของน้ำหนัก) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

มากที่สุด (ร้อยละ 28.37) ชุดการทดลอง D มีฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 0.10 ของน้ำหนัก และร้อยละ 0.25 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 18.82) ซึ่งเป็นการเติมอากาศประเภทบังคับแบบไม่ต่อเนื่องทำให้เร่งการย่อยสลายซึ่งทำให้เพิ่มการลดลงของมวลและทำให้เพิ่มความเข้มข้นสำหรับทั้ง 3 ตัวแปร ทำให้ทั้ง 3 ตัวแปรมีค่าเพิ่มขึ้น โดยชุดการทดลอง C มีผลทำให้เร่งการย่อยสลายจนเพิ่มความเข้มข้นของไนโตรเจนสูง และชุดการทดลอง D นั้นมีผลทำให้เร่งการย่อยสลาย หรืออาจมาจากมีผลทำให้เร่งกระบวนการ Mineralization ซึ่งมีผลทำให้ทั้งฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเพิ่มขึ้น

สรุป ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นในขณะที่มีการสูญเสียน้ำหนักสูงเป็นหลัก ซึ่งมีผลทำให้ความเข้มข้นของทั้ง 3 ตัวแปรเพิ่มขึ้น และฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการ Mineralization ซึ่งมีผลทำให้ความเข้มข้นของทั้ง 2 ตัวแปรเพิ่มขึ้น

สำหรับไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมของการทดลองบางส่วนที่มีค่าลดลงเนื่องจากการลดลงของน้ำหนักแห้งสุทธินั้นสอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวกเนื่องจากการลดลงของมวลระหว่างการทำปุ๋ยหมักที่ทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มขึ้นไม่มากเท่ากับกรณีที่มีค่าเพิ่มขึ้นจนทำให้โดยรวมแล้วมีค่าลดลง ด้วยสาเหตุจากความคลาดเคลื่อนของการวัดตัวแปร กระบวนการ Mineralization ของจุลินทรีย์และการเปลี่ยนรูปที่ละลายน้ำได้ง่ายเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ยาก ที่ทำให้ค่าทั้ง 3 ตัวแปรมีค่าลดลงหลังการทดลอง จึงสอดคล้องการทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.19 ของน้ำหนัก) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 7.29) เนื่องจากมีเศษกิ่งไม้เป็นหลักและเป็นชีวมวลย่อยสลายยากที่ทำให้เกิดการลดลงของมวลต่ำและทำให้ความเข้มข้นไนโตรเจนเพิ่มขึ้นต่ำ การทดลองอัตราส่วนที่ 1 และการทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ -0.03 ของน้ำหนัก) และแตกต่างกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุดและเป็นอันดับสามตามลำดับ (ร้อยละ 36.36 ของน้ำหนัก และร้อยละ 19.11 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) เนื่องจากมีการย่อยสลายทำให้เกิดกระบวนการ Mineralization ของจุลินทรีย์ที่มีผลทำให้เพิ่มการบริโภคธาตุฟอสฟอรัส หรืออาจมาจาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ความคลาดเคลื่อนของการวัดตัวแปร ซึ่งมีผลทำให้ฟอสฟอรัสลดลง และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ -0.23 ของน้ำหนัก) และสอดคล้องกับการที่มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 23.53) เนื่องจากมีความสมดุลระหว่างสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณซึ่งช่วยเพิ่มการย่อยสลายทำให้เร่งกระบวนการ Mineralization ของจุลินทรีย์ที่มีผลทำให้เพิ่มการบริโภคธาตุฟอสฟอรัส หรืออาจมาจากความคลาดเคลื่อนของการวัดตัวแปร ซึ่งมีผลทำให้ฟอสฟอรัสลดลง และชุดการทดลอง D มีไนโตรเจนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.25 ของน้ำหนัก) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 18.82) ชุดการทดลอง C มีฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยรวมน้อยที่สุดตามลำดับ (ร้อยละ -0.35 ของน้ำหนัก และร้อยละ -0.12 ของน้ำหนัก ตามลำดับ) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 28.37) โดยชุดการทดลอง D มีผลทำให้เร่งการย่อยสลายซึ่งเพิ่มการหายไปในรูปของแก๊สไนโตรเจนระเหยง่าย หรืออาจมาจากความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ตัวแปร จึงทำให้ไนโตรเจนลดลง และชุดการทดลอง C นั้นมีผลทำให้เร่งการย่อยสลาย หรืออาจมาจากมีผลทำให้เร่งการบริโภคฟอสฟอรัสของจุลินทรีย์ในกระบวนการ Mineralization และเร่งการเปลี่ยนโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปละลายน้ำได้ง่ายเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ยาก ซึ่งมีผลทำให้ทั้งฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมลดลง

สรุป ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมโดยรวมลดลงในขณะที่มีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นต่ำเป็นหลัก ซึ่งมีผลทำให้ความเข้มข้นของทั้ง 3 ตัวแปรโดยรวมลดลง และฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นต่ำหรือลดลงเนื่องจากกระบวนการ Mineralization ซึ่งมีผลทำให้ความเข้มข้นของทั้ง 2 ตัวแปรโดยรวมลดลง

5.1.14.2.3 อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ทุกการทดลองมีค่าลดลงเนื่องจากการลดของอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์จากการใช้คาร์บอนของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายและการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนจากการลดลงของน้ำหนักแห้งสุทธินั้นสอดคล้องการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวกเนื่องจากการลดลงของมวลระหว่างการทำปุ๋ยหมักที่ทำให้โดยรวมนั้นมีความเข้มข้นของคาร์บอนลดลง(สำหรับอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์) และความเข้มข้นของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น(สำหรับไนโตรเจนทั้งหมด) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีอัตรา

คาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (9.18) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสี่ (ร้อยละ 14.88) เนื่องจากมีเศษใบจามจุรีเป็นหลักที่มีปริมาณไนโตรเจนสูง ที่เมื่อเกิดการย่อยสลายแล้วจะมีการลดลงของคาร์บอนจากการใช้คาร์บอนของจุลินทรีย์ระหว่างการลดลงของมวลในกระบวนการย่อยสลายและการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนสูงระหว่างการลดลงของมวล จึงมีผลทำให้มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง และชุดการทดลองชุดการทดลอง D มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเฉลี่ยรวมมากที่สุด (7.76) และสอดคล้องกับการที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 18.82) เนื่องจากชุดการทดลอง D มีความถี่ในการเติมอากาศต่ำ (จำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน) นั้นจะมีการเร่งการย่อยสลายต่ำกว่าการเติมอากาศที่มีความสมดุลในการเติมอากาศ ซึ่งก็คือชุดการทดลอง C ที่ค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 28.37) ซึ่งมีผลทำให้ไนโตรเจนลดลงต่ำจนความเข้มข้นของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นและคาร์บอนลดลงสูงจนความเข้มข้นของคาร์บอนต่ำจากกระบวนการย่อยสลาย จึงมีผลทำให้มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง

สรุป อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงในขณะที่มีการสูญเสียน้ำหนัก โดยเฉพาะจากอัตราส่วนที่มีไนโตรเจนสูง ที่เมื่อมีการย่อยสลายแล้วคาร์บอนจะลดลงจากการใช้คาร์บอนของจุลินทรีย์และไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจากการชะออกมาจากมวล ทำให้อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง และการเติมอากาศที่มีความถี่ในการเติมอากาศต่ำ ซึ่งช่วยเร่งการย่อยสลายทำให้ลดคาร์บอนและเพิ่มไนโตรเจน ซึ่งส่งผลให้มีอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.14.3 ลักษณะทางชีวภาพ (ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่วัดด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด)

การทดลองส่วนใหญ่มีค่าผ่านเกณฑ์คุณภาพ (ดัชนีการงอกของเมล็ด ≥ ร้อยละ 80) ซึ่งไม่สอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนักของทุกการทดลองส่วนใหญ่ที่มีค่าเป็นบวก เนื่องจากพบว่าการทดลองบางส่วนที่มีค่าไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพนั้นมาจากการทดลองส่วนใหญ่ที่เป็นการทดลองอัตราส่วนที่ 1 (A-1 B-1 และ D-1) ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลัก ที่ซึ่งเมื่อมีการย่อยสลายแล้วจะมีการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ต่ำ เนื่องจากเกิดสภาวะ Anaerobic เพราะความชื้นสะสมสูงและความพรุนลดลงสูงตอนหลังการทดลอง จนทำให้มีค่าไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ

5.2 การชี้วัดคุณภาพ

ตารางที่ 5-5 ข้อมูลตัวแปรตามเกณฑ์คุณภาพและค่าการสูญเสียน้ำหนักของปุ๋ยหมักสุดท้าย

การทดลอง	ตัวแปร									
	ตามเกณฑ์คุณภาพ									การสูญเสียน้ำหนัก
	pH	OM	C/N	EC	%MC	N	P	K	GI	WL
เกณฑ์	5.5 - 8.5	≥ 30	≤ 20	≤ 10	≤ 30	≥ 1	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 80	มากที่สุด
A-1	9.14	48.76	9.59	0.640	70.8	2.95	0.90	2.19	67	7.08
A-2	8.02	48.72	10.20	0.384	61.4	2.77	0.81	0.85	79	4.81
A-3	7.63	48.62	9.53	0.502	51.7	2.96	0.65	0.86	95	-1.75
A-4	7.98	48.90	9.95	1.130	70.0	2.85	0.72	1.16	116	11.31
A-5	8.05	48.81	9.90	0.582	72.1	2.86	0.88	1.15	93	15.89
B-1	8.76	43.14	10.17	2.320	67.4	2.46	0.60	1.99	72	38.29
B-2	7.99	50.70	11.86	0.598	58.2	2.48	0.47	0.85	89	15.79
B-3	7.79	48.42	18.12	0.455	57.4	1.55	0.21	0.67	98	12.40
B-4	8.04	34.21	7.72	1.280	70.1	2.57	0.49	1.36	119	19.42
B-5	7.94	23.85	5.22	1.570	59.6	2.65	0.46	1.26	96	25.45
C-1	8.24	40.78	10.33	3.260	81.9	2.29	0.63	2.12	89	45.27
C-2	8.50	35.71	8.12	0.393	56.4	2.55	0.10	1.00	103	24.00
C-3	8.33	36.88	9.77	0.317	54.9	2.19	0.22	0.93	106	12.16
C-4	8.34	32.47	3.27	1.580	74.9	2.70	0.47	1.96	105	28.53
C-5	8.47	38.97	9.46	0.620	55.5	2.39	0.24	1.51	90	31.91
D-1	7.67	44.09	11.95	2.740	76.8	2.14	0.10	2.21	61	34.80
D-2	8.05	42.43	12.75	0.335	53.1	1.93	0.16	0.74	95	14.93
D-3	7.74	42.60	14.28	0.460	52.0	1.73	0.15	1.05	87	6.36
D-4	8.54	40.60	11.49	0.701	72.9	2.05	0.26	1.53	85	17.17
D-5	8.27	42.03	10.74	0.561	50.0	2.27	0.23	1.10	82	20.86

หมายเหตุ: pH คือ พีเอช , OM คือ อินทรียวัตถุ (ร้อยละ) , C/N คือ อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน , EC คือ สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเซนติเมตร) , %MC คือ ความชื้นสะสม (ร้อยละ) , N คือ ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก) , P คือ ฟอสฟอรัส (ร้อยละของน้ำหนัก) , K คือ โพแทสเซียม (ร้อยละของน้ำหนัก) , GI คือ ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่วัดด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด (ร้อยละ) และ WL คือ การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ)

ช่องตัวแปรสี เทา หมายถึง ตัวแปรในช่องนั้นผ่านเกณฑ์

โดยจะอภิปรายตาม 3 เกณฑ์เป็นหลัก ดังนี้

5.2.1 เกณฑ์คุณภาพเบื้องต้น

จากตารางที่ 5-4 และตารางที่ 5-5 พบว่า

การทดลองอัตราส่วนที่ 4 ผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นรวมมากที่สุด (10 ตัวแปร) การทดลองอัตราส่วนที่ 5 ผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นรวมเป็นอันดับสอง (9 ตัวแปร) และการทดลองอัตราส่วนที่ 1 การทดลองอัตราส่วนที่ 2 และการทดลองที่ 3 ผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นรวมเท่ากันเป็นอันดับสุดท้าย (2 ตัวแปร) และชุดการทดลอง A และชุดการทดลอง D ผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นรวมมากที่สุดเท่ากัน (7 เกณฑ์) ชุดการทดลอง B ผ่านเกณ์รวมมากรองลงมาจากชุดการทดลอง A และชุดการทดลอง D (6 ตัวแปร) และชุดการทดลอง C ผ่านตัวแปรมากเป็นอันดับสุดท้าย (5 ตัวแปร) ทั้งนี้ พบว่าการทดลองส่วนใหญ่ไม่ผ่านตัวแปรเนื้อปุ๋ยหมักมากที่สุด โดยยกเว้น B-4 B-5 และ C-4 รองลงมาคือการทดลองส่วนใหญ่จะไม่ผ่านตัวแปรกลิ่นปุ๋ยหมัก โดยยกเว้นทุกการทดลองในอัตราส่วนที่ 4 และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 และอันดับสุดท้ายคือการทดลองส่วนใหญ่จะผ่านเกณฑ์สีปุ๋ยหมัก ยกเว้นการทดลอง B-1 B-2 B-3 C-1 C-2 และ C-3 ที่ไม่ผ่านเกณฑ์

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 4 ซึ่งมีเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากันซึ่งมีความสมดุลของสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณนั้นมีนั้นมีผลทำให้องค์ประกอบความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (สี กลิ่น เนื้อ) มีคุณภาพโดยรวมมากที่สุด ส่วนการเติมอากาศที่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศน้อยและไม่มีจำนวนรอบการเติมอากาศนั้นมีผลทำให้ปุ๋ยหมักมีองค์ประกอบความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (สี กลิ่น เนื้อ) มีคุณภาพสูง ทำให้ชุดการทดลอง A ซึ่งไม่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ และชุดการทดลอง D ซึ่งมีจำนวนรอบใน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การเติมอากาศ 2 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 96 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 144 นาทีนั้นมีผลทำให้องค์ประกอบความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (สี กลิ่น เนื้อ) มีคุณภาพโดยรวมมากที่สุด

สำหรับกรณีที่ไม่ผ่านเกณฑ์นั้นจะได้ว่า ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ตัวแปรกลิ่นปุ๋ยหมักเป็นส่วนใหญ่มากที่สุด โดยยกเว้น B-4 B-5 และ C-4 นั้น เนื่องจากการทดลองอัตราส่วนที่ 4 และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 นั้นมีความสมดุลระหว่างสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณ และชุดการทดลอง B และ C นั้นเป็นการเติมอากาศประเภทไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีส่วนช่วยเร่งการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ให้เนื้อปุ๋ยหมักยุ่ย ขาดจากกันง่าย เป็นเนื้อเดียวกันและไม่แข็งกระด้าง จึงช่วยทำให้เพิ่มการผ่านเกณฑ์ตัวแปรเนื้อปุ๋ยหมัก ส่วนที่การทดลองส่วนใหญ่จะไม่ผ่านตัวแปรกลิ่นปุ๋ยหมัก โดยยกเว้นทุกการทดลองในอัตราส่วนที่ 4 และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 นั้น เนื่องจากการทดลองอัตราส่วนที่ 4 และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 นั้นมีความสมดุลระหว่างสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณซึ่งมีส่วนช่วยเร่งการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ให้กลิ่นของปุ๋ยหมักคล้ายกับกลิ่นดินธรรมชาติ จึงช่วยทำให้เพิ่มการผ่านเกณฑ์ตัวแปรกลิ่นปุ๋ยหมัก และการทดลองส่วนใหญ่จะผ่านเกณฑ์สีปุ๋ยหมัก ยกเว้นการทดลอง B-1 B-2 B-3 C-1 C-2 และ C-3 นั้น เนื่องจากการทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลัก การทดลองอัตราส่วนที่ 2 ซึ่งมีเศษใบจามจุรีเป็นหลักและการทดลองอัตราส่วนที่ 3 ซึ่งมีเศษกิ่งไม้เป็นหลักนั้นขาดความสมดุลระหว่างสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณ ทำให้มีการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ช้าเพราะขาดสารอาหารสำหรับกรณีการทดลองอัตราส่วนที่ 2 และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 และเพราะขาดสารเพิ่มปริมาณ ถึงแม้ว่าชุดการทดลอง B และชุดการทดลอง C นั้นจะมีส่วนช่วยเร่งการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์เนื่องจากเป็นการเติมอากาศประเภทบังคับแบบไม่ต่อเนื่องก็ตาม อาจเป็นเพราะวัตถุดิบในแต่ละรอบการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันทำให้ผลการวิเคราะห์ตัวแปรต่างกัน

ทั้งนี้ มีการทดลอง 3 การทดลองที่ผ่านเกณ์คุณภาพเบื้องต้นครบ 3 ตัวแปร ได้แก่ B-4 B-5 และ C-4 เนื่องจากการทดลองอัตราส่วนที่มีความสมดุลของสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณนั้นจะมีผลทำให้ปุ๋ยหมักมีการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ได้ดีขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 4 ซึ่งมีเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากันที่ซึ่งมีความสมดุลของสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณนั้นมีผลทำให้ปุ๋ยหมักมีองค์ประกอบชองความ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สมบูรณ์ของปุ๋ยหมักครบ 3 ตัวแปรมากที่สุด ส่วนการเติมอากาศประเภทบังคับแบบไม่ต่อเนื่องนั้นมีผลต่อการเร่งย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ของการทำปุ๋ยหมัก ทำให้ชุดการทดลอง B ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 8 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 24 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 36 นาทีนั้นทำให้ปุ๋ยหมักมีองค์ประกอบชองความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักครบ 3 ตัวแปรมากที่สุด

5.2.2 เกณฑ์คุณภาพ

จากตารางที่ 5-4 และตารางที่ 5-5 พบว่า

การทดลองอัตราส่วนที่ 3 ผ่านเกณฑ์คุณภาพและการทดลองที่ 4 ผ่านเกณฑ์คุณภาพรวมมากที่สุด (29 ตัวแปร) การทดลองอัตราส่วนที่ 2 และการทดลองอัตราส่วนที่ 5 ผ่านเกณฑ์คุณภาพรวมเท่ากันเป็นอันดับสอง (28 ตัวแปร) และการทดลองอัตราส่วนที่ 1 ผ่านเกณฑ์คุณภาพรวมเป็นอันดับสุดท้าย (26 ตัวแปร) และชุดการทดลอง A ผ่านเกณฑ์คุณภาพรวมมากที่สุด (37 ตัวแปร) ชุดการทดลอง C ผ่านเกณฑ์รวมมากเป็นอันดับสอง (36 ตัวแปร) ชุดการทดลอง B และชุดการทดลอง D ผ่านเกณฑ์รวมมากเป็นอันดับสุดท้าย (33 ตัวแปร) และพบว่าความชื้นสะสมในทุกการทดลองไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพและฟอสฟอรัสในทุกการทดลองส่วนใหญ่ยกเว้นชุดการทดลอง A ที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 3 ซึ่งมีเศษกิ่งไม้เป็นหลัก และการทดลองอัตราส่วนที่ 4 ซึ่งมีเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากันนั้น ซึ่งอาจเป็นเพราะการไม่เกิดสภาวะ Anaerobic และมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรระหว่างการทำปุ๋ยหมักที่ทำให้ตัวแปรหลังการทดลองผ่านเกณฑ์คุณภาพหลายเกณฑ์สำหรับกรณีการทดลองอัตราส่วนที่ 3 และมีความสมดุลของสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณสำหรับการทดลองอัตราส่วนที่ 4 นั้นมีผลทำให้มีคุณภาพโดยรวมมากที่สุดเท่ากัน ส่วนการเติมอากาศที่ไม่มีจำนวนรอบการเติมอากาศนั้นมีผลทำให้ปุ๋ยหมักนั้นทำให้ตัวแปรผ่านเกณฑ์คุณภาพเป็นส่วนใหญ่ (โดยเฉพาะทุกการทดลองในชุดการทดลอง A ที่มีฟอสฟอรัสผ่านเกณฑ์คุณภาพ ในขณะที่การทดลองส่วนใหญ่ใน 3 ชุดการทดลองที่ฟอสฟอรัสไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ) ทำให้ชุดการทดลอง A ซึ่งไม่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศนั้นมีผลทำให้ตัวแปรคุณภาพโดยรวมมากที่สุด ส่วนสาเหตุที่ตัวแปรความชื้นสะสมไม่ผ่านเกณฑ์ในทุกการทดลองนั้นเนื่องจากไม่มีการระบายความชื้น

ออกจากระบบ (จากทั้งการระเหยของน้ำและน้ำชะออกจากภาชนะทำปุ๋ยหมัก) ถึงขนาดจนทำให้ผ่านเกณฑ์คุณภาพ (ความชื้นสะสม ≤ ร้อยละ 30) และสาเหตุที่ฟอสฟอรัสในทุกการทดลองส่วนใหญ่ยกเว้นชุดการทดลอง A ที่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพนั้นเนื่องจากการเติมอากาศประเภทบังคับแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งก็คือชุดการทดลอง B ชุดการทดลอง C และชุดการทดลอง D นั้นมีส่วนช่วยเร่งการย่อยสลายและเพิ่มการบริโภคของฟอสฟอรัสสูงทำให้ฟอสฟอรัสลดลงสูงกว่าการเติมอากาศประเภทไม่บังคับซึ่งชุดการทดลอง A

ทั้งนี้ มี 4 การทดลองที่ผ่านเกณฑ์คุณภาพมากที่สุดเท่ากันที่ 8 ตัวแปร ได้แก่ A-3 A-4 A-5 และ C-1 ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการเติมอากาศประเภทบังคับแบบไม่ต่อเนื่องนั้นมีผลทำให้ฟอสฟอรัสลดลงจนทำให้ปุ๋ยหมักสุดท้ายในทุกการทดลองส่วนใหญ่ของชุดการทดลอง B ชุดการทดลอง C และชุดการทดลอง D นั้นไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพ และแสดงให้เห็นว่าการเติมอากาศที่ไม่มีจำนวนรอบการเติมอากาศนั้นมีผลทำให้ปุ๋ยหมักนั้นทำให้ตัวแปรผ่านเกณฑ์คุณภาพมากที่สุด

5.2.3 การสูญเสียน้ำหนัก

การทดลองอัตราส่วนที่ 1 มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 31.36) การทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 23.53) การทดลองอัตราส่วนที่ 4 มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 19.11) การทดลองอัตราส่วนที่ 2 มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสี่ (ร้อยละ 14.88) และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 7.29) และชุดการทดลอง C มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุด (ร้อยละ 28.37) ชุดการทดลอง B มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสอง (ร้อยละ 22.27) ชุดการทดลอง D มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากเป็นอันดับสาม (ร้อยละ 18.82) และชุดการทดลอง A มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยรวมน้อยที่สุด (ร้อยละ 7.49) ทั้งนี้ C-1 มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดที่ร้อยละ 45.27 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลัก และชุดการทดลอง C ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 48 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 72 นาทีนั้นมีผลทำให้ลดมวลของเสียจากการทำปุ๋ยหมักได้มากที่สุด

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลักซึ่งเป็นชีวมวลย่อยสลายง่าย ทำให้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเฉลี่ยมากที่สุด ส่วนการเติมอากาศที่มีความสมดุลในการเติมอากาศนั้นมีส่วนช่วยเร่งการย่อยสลายสูงซึ่งทำให้มวลลดลงสูง ทำให้ชุดการทดลอง C ซึ่งมีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบนั้นมีผลทำให้มีค่าการสูญเสียน้ำหนักรวมเฉลี่ยมากที่สุด และพบว่า C-1 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด (ร้อยละ 45.27)

5.2.4 การชี้วัดคุณภาพ

เนื่องจากการทดลองใดมีปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพมากที่สุดนั้น จะวัดที่เกณฑ์คุณภาพเบื้องต้น เกณฑ์คุณภาพและค่าการสูญเสียน้ำหนัก ถ้าการทดลองใดผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นไม่ครบ 3 ตัวแปร ปุ๋ยหมักในการทดลองนั้นจะถือว่ามีคุณภาพน้อยกว่าการทดลองที่มีคุณภาพรองลงมาจากการทดลองนั้นแม้ว่าจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักและผ่านเกณฑ์ชี้วัดคุณภาพมากที่สุด และถ้ามีอย่างน้อย 2 การทดลองที่มีค่าทั้ง 3 เกณฑ์มากที่สุดเท่ากัน ให้ถือว่าการทดลองทั้งหมดนั้นมีคุณภาพมากที่สุด ฉะนั้น แม้ว่า C-1 จะผ่านเกณฑ์คุณภาพ 8 ตัวแปรและมีการสูญเสียน้ำหนักที่ร้อยละ 45.27 แต่ไม่ผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นครบทุกตัวแปร ทำให้ C-1 ไม่ใช่การทดลองที่มีคุณภาพมากที่สุด

ฉะนั้น C-4 ที่ซึ่งผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นครบทุกตัวแปร ผ่านเกณฑ์คุณภาพ 7 ตัวแปรและมีการสูญเสียน้ำหนักที่ร้อยละ 28.53 นั้น จึงมีคุณภาพมากที่สุด เนื่องจากชุดการทดลอง C ที่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวันนั้นมีความสมดุลในการเติมอากาศที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลอง B ที่จำนวนรอบในการเติมอากาศ 8 รอบต่อวันนั้นมีความถี่ในการเติมอากาศสูงและชุดการทดลอง D ที่จำนวนรอบในการเติมอากาศ 2 รอบต่อวันนั้นมีความถี่ในการเติมอากาศต่ำ จึงส่งผลให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพสูงที่สุด ทำให้ชุดการทดลอง C ซึ่งเป็นการเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศไม่ต่อเนื่องที่มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 48 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 72 นาทีนั้นจึงเป็นการเติมอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ และการทดลองอัตราส่วนที่ 4 เป็นเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากัน เนื่องจากเศษผักผลไม้เป็นวัตถุดิบที่ย่อยสลายง่าย เศษใบจามจุรีมีความพรุนสูงและย่อยสลายง่าย ส่วนเศษกิ่งไม้เป็นวัตุดิบที่ย่อยสลายยากและปุ๋ยหมักสมบูรณ์เป็นหัวเชื้อที่ช่วยเร่งกระบวนการทำปุ๋ยหมัก ทำให้อัตราส่วนที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

มีเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในสัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากันและใช้ปุ๋ยหมักสมบูรณ์เป็นหัวเชื้อนั้นจึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้

สำหรับกรณีที่การทดลองอัตราส่วนอื่นและชุดการทดลองอื่นที่ไม่ส่งผลทำให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพมากที่สุด เนื่องจากการทดลองอัตราส่วนที่ 1 ซึ่งมีเศษผักผลไม้เป็นหลัก การทดลองอัตราส่วนที่ 2 ซึ่งมีเศษใบจามจุรีเป็นหลัก และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 ซึ่งมีเศษกิ่งไม้เป็นหลักนั้นขาดความสมดุลระหว่างสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณ จนทำให้การย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ดำเนินไปได้ด้วยช้าหรือไม่เกิดการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์เนื่องจากขาดสารเพิ่มปริมาณสำหรับกรณีการทดลองอัตราส่วนที่ 1 จนไม่เกิดการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์เพราะเมื่อเกิดการย่อยสลายแล้วเกิดสภาวะ Anaerobic เพราะความพรุนลดลงสูง (AFP ต่ำกว่าร้อยละ 3.00 ในการทดลอง A-1 B-1 C-1 และ C-1 หลังการทดลอง) และความชื้นสะสมเพิ่มขึ้นสูง (ความชื้นสะสมสูงกว่าร้อยละ 60 ในการทดลอง A-1 B-1 C-1 และ C-1 หลังการทดลอง) ฉะนั้นการทดลองอัตราส่วนที่ 1 การทดลองอัตราส่วนที่ 2 และการทดลองอัตราส่วนที่ 3 จึงส่งผลให้ปุ๋ยหมักไม่มีคุณภาพมากที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้

และส่วนการทดลองอัตราส่วนที่ 5 ซึ่งมีเศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้ในปริมาตรเท่ากันนั้นแม้จะมีความสมดุลระหว่างสารอาหารและสารเพิ่มปริมาณเหมือนกับการทดลองอัตราส่วนที่ 4 ซึ่งมีเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากันนั้น เนื่องจากการทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีเศษกิ่งไม้โดยกิ่งไม้เป็นชีวมวลย่อยสลายยาก ทำให้เมื่อมีการย่อยสลายแล้วยังเหลือเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิมอยู่ (เศษกิ่งไม้) ในการทำปุ๋ยหมักภายในระยะเวลา 20 วัน ซึ่งคาดว่าหากเพิ่มระยะเวลาในการทำปุ๋ยหมักมากกว่า 20 วันนั้น อาจทำให้การทดลองอัตราส่วนที่ 5 มีการย่อยสลายแล้วไม่เหลือเค้าโครงวัตถุดิบดั้งเดิมอยู่ (เศษกิ่งไม้) ซึ่งผู้ดำเนินงานวิจัยคาดว่าอาจใช้เวลาอย่างน้อย 24 วันจึงจะย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของคะนอง ผลสงเคราะห์ (2549) ที่พบว่า อัตราส่วนที่ 1:1 (เศษอาหาร : เศษกิ่งไม้ ซึ่งเศษกิ่งไม้เป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกันกับงานวิจัยนี้) สามารถเข้าสู่การย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ในวันที่ 75 จากเวลาทำปุ๋ยหมักภายใน 90 วัน ซึ่งต้องใช้เวลามากกว่า 20 วัน ฉะนั้นการทดลองอัตราส่วนที่ 5 จึงส่งผลให้ปุ๋ยหมักไม่มีคุณภาพมากที่สุด

สำหรับกรณีที่ชุดการทดลอง A ซึ่งไม่มีจำนวนรอบการเติมอากาศ ชุดการทดลอง B ซึ่งมีจำนวนรอบการเติมอากาศ 8 รอบต่อวัน และชุดการทดลอง D ซึ่งมีจำนวนรอบการเติม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อากาศ 2 รอบต่อวันนั้นไม่ส่งผลทำให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพมากที่สุด เนื่องจากชุดการทดลอง A นั้นมีส่วนช่วยเร่งการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ต่ำกว่าชุดการทดลอง C ที่เป็นการเติมอากาศประเภทไม่บังคับ ในขณะที่ชุดการทดลอง C เป็นการเติมอากาศประเภทบังคับแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งมีผลทำให้เร่งการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ และสำหรับชุดการทดลอง B และชุดการทดลอง D นั้นแม้จะเป็นเป็นการเติมอากาศประเภทบังคับแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งมีผลทำให้เร่งการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์เช่นเดียวกันกับชุดการทดลอง C เพราะชุดการทดลอง B และชุดการทดลอง D นั้นไม่มีความสมดุลในการเติมอากาศสำหรับงานวิจัยนี้ เพราะชุดการทดลอง B มีความถี่ในการเติมอากาศสูงเกินไปและชุดการทดลอง D มีความถี่ในการเติมอากาศต่ำเกินไปเมื่อเทียบกับชุดการทดลอง C ฉะนั้นชุดการทดลอง A ชุดการทดลอง B และชุดการทดลอง D จึงส่งผลให้ปุ๋ยหมักไม่มีคุณภาพมากที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้

ทั้งนี้ หากพิจารณาในด้านการจัดการ การทดลอง C-4 นั้นมีคุณภาพของปุ๋ยหมักมากที่สุดและถือว่ามีความเหมาะสมที่สุดสำหรับด้านงานวิจัย โดยผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นครบทุกตัวแปร ผ่านเกณฑ์คุณภาพ 7 ตัวแปรและมีการสูญเสียน้ำหนักที่ร้อยละ 28.53 นั้น แต่เพราะเป็นการเติมอากาศประเภทบังคับที่ต้องบังคับการเติมอากาศให้ดำเนินไปได้อย่างคงที่ จึงต้องใช้ไฟฟ้าในการเติมอากาศ (เติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศ) ทำให้ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายสำหรับค่าไฟฟ้าสำหรับการเติมอากาศ ฉะนั้นการทดลอง C-4 จึงอาจไม่เหมาะสมสำหรับด้านการจัดการ ทำให้ผู้ดำเนินงานวิจัยพิจารณาการทดลองในชุดการทดลอง A ซึ่งเป็นการเติมอากาศประเภทไม่บังคับที่ไม่ต้องบังคับการเติมอากาศให้ดำเนินไปได้อย่างคงที่ จึงไม่ต้องใช้ไฟฟ้าในการเติมอากาศ (เติมอากาศด้วยอากาศจากธรรมชาติ) ซึ่งพบว่าการทดลอง A-4 นั้นมีคุณภาพของปุ๋ยหมักที่พอใช้และถือว่ามีความเหมาะสมที่สุดสำหรับด้านการจัดการ โดยผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นไม่ครบทุกตัวแปร (ไม่ผ่านเกณฑ์ตัวแปรเนื้อปุ๋ยหมัก) ผ่านเกณฑ์คุณภาพ 8 ตัวแปรและมีการสูญเสียน้ำหนักที่ร้อยละ 11.31 นั้น เพราะการทดลอง A-4 มีเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากันซึ่งไม่มีเศษกิ่งไม้ โดยเศษกิ่งไม้นั้นเป็นชีวมวลย่อยสลายยากและเมื่อเกิดการย่อยสลายแล้วทำให้เกิดสภาพรบกวนต่ำ จึงสามารถเก็บกักเศษกิ่งไม้ไว้ได้นานกว่าเศษผักผลไม้ และเศษกิ่งไม้นั้นเป็นวัตถุดิบที่มีการเตรียมที่ไม่สะดวกที่สุดใน 4 วัตถุดิบ เพราะกิ่งไม้เป็นของแข็งที่มีความแข็งสูง จึงทำให้บดย่อยยาก แล้วทำให้เครื่องบดย่อยเสี่ยงต่อการชำรุดระหว่างทำการบดย่อยเพื่อให้ได้เศษกิ่งไม้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในขณะที่เศษใบจามจุรีมีการเตรียมวัตถุดิบที่สะดวกกว่าเศษกิ่งไม้ เพราะใบจามจุรีเป็นของแข็งที่มีความแข็งต่ำกว่ากว่าเศษกิ่งไม้ จึงทำให้บดย่อยง่ายกว่า แล้วทำให้เครื่องบดย่อยไม่เสี่ยงต่อการชำรุดเท่ากับกรณีบดย่อยกิ่งไม้ ทำให้เศษกิ่งไม้ไม่มีความเหมาะสมสำหรับเป็นวัตถุดิบทำปุ๋ยหมักสำหรับด้านการจัดการ

ฉะนั้น การทดลอง C-4 นั้นมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับด้านงานวิจัยเนื่องจากมีคุณภาพของปุ๋ยหมักมากที่สุด ส่วนการทดลอง A-4 มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับด้านการจัดการเนื่องจากคุณภาพของปุ๋ยหมักพอใช้และไม่ต้องใช้ไฟฟ้าสำหรับการทำปุ๋ยหมัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 6
สรุป

6.1 สรุป

1. การทดลอง C-4 มีคุณภาพปุ๋ยหมักมากที่สุด โดยการทดลอง C-4 ผ่านเกณฑ์คุณภาพเบื้องต้นครบทุกตัวแปร (3 ตัวแปร) ผ่านเกณฑ์คุณภาพ 7 ตัวแปร และมีการสูญเสียน้ำหนักที่ร้อยละ 28.53 เนื่องจากการทดลองอัตราส่วนที่ 4 เป็นเศษผักผลไม้และเศษใบจามจุรีในปริมาตรเท่ากันนั้น มีความสมดุลระหว่างสารอาหาร (เศษผักผลไม้) และสารเพิ่มปริมาณ (เศษใบจามจุรี) จึงส่งผลให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพมากที่สุดและเป็นอัตราส่วนวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ และชุดการทดลอง C มีจำนวนรอบในการเติมอากาศ 4 รอบต่อวัน ระยะเวลาในการเติมอากาศ 48 นาที และระยะเวลาในการเว้นเติมอากาศ 72 นาทีนั้น มีความสมดุลที่สุดทั้งในด้านจำนวนรอบในการเติมอากาศ ระยะเวลาการเติมอากาศและจำนวนรอบในการเติมอากาศ จึงส่งผลให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพมากที่สุดและเป็นการเติมอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้

2. อัตราส่วนวัตถุดิบและการเติมอากาศที่แตกต่างกันนั้นมีผลต่อตัวแปรต่างกัน ดังนี้

2.1 ตัวแปรทางกายภาพ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ สภาพการนำไฟฟ้า ความชื้นสะสม การสูญเสียน้ำหนักและความพรุน โดยพีเอชและอุณหภูมินั้นไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดโดยมีผลจากทั้งอัตราส่วนวัตถุดิบและการเติมอากาศที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการนำไฟฟ้านั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดโดยมีผลจากอัตราส่วนวัตถุดิบที่แตกต่างกันแต่ไม่มีผลจากการเติมอากาศที่แตกต่างกัน และความชื้นสะสม การสูญเสียน้ำหนักและความพรุนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดโดยมีผลจากทั้งอัตราส่วนวัตถุดิบและการเติมอากาศที่แตกต่างกัน

2.2 ตัวแปรทางเคมี ได้แก่ อินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัส (P_2O_5) โพแทสเซียม (K_2O) และอัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน โดยตัวแปรทางเคมีทุกตัวนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดโดยมีผลจากทั้งอัตราส่วนวัตถุดิบและการเติมอากาศที่แตกต่างกัน

2.3 ตัวแปรทางชีวภาพ คือ ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก (วัดด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด) นั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดโดยมีผลจากทั้งอัตราส่วนวัตถุดิบและการเติมอากาศที่แตกต่างกัน

6.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ปุ๋ยหมักจากการทดลอง C-4 นั้นเป็นปุ๋ยหมักที่เป็นไปตามแนวทางของมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมักเกรด 1 ของกรมพัฒนาที่ดินที่สุด เนื่องจากเป็นปุ๋ยหมักที่คุณภาพมากที่สุดในงานวิจัยนี้

2. ระบบทำปุ๋ยหมักระบบภาชนะปิดขนาดเล็กมีความเหมาะสมต่อการติดตั้งในพื้นที่โรงอาหารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเฉพาะโรงอาหารที่มีของเสียเกิดขึ้นเป็นปริมาณที่เสี่ยงต่อการเป็นจุดเสี่ยงมลพิษจากขยะอย่างเช่นโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ เนื่องจากเศษผักผลไม้เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงอาหารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนเศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้นั้นเกิดขึ้นทั่วพื้นที่มหาวิทยาลัย จึงสามารถรวบรวมวัตถุดิบทั้ง 2 นี้เข้ามาทำปุ๋ยหมักที่พื้นที่ติดตั้งระบบทำปุ๋ยหมักได้โดยสะดวก และหัวเชื้อซึ่งเป็นปุ๋ยหมักสมบูรณ์นั้นสามารถผลิตเองได้จากระบบทำปุ๋ยหมักที่ติดตั้งในแหล่งกำเนิดของเสีย

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. ขนาดของระบบทำปุ๋ยหมักที่ 1.25 ลิตรนี้ยังไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ (Full-Scale) เนื่องจากยังไม่ได้ทำการทดลองที่เป็นการทำปุ๋ยหมักที่ขนาด 50 ลิตรตามแผนผังงานวิจัยซึ่งสำคัญในประเด็นเรื่องการต่อยอดไปสู่ขนาดนำร่อง (Pilot-Scale) และใช้งานจริงได้ แต่ผลการทดลองจากการทดลองขนาด 1.25 ลิตรนั้นเพียงพอต่อการตอบวัตถุประสงค์ได้ครบถ้วนแล้ว

2. งานวิจัยนี้ไม่ได้นำการเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบต่อเนื่องมาร่วมทดลอง จึงไม่ได้เห็นผลของความแตกต่างระหว่างการเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบต่อเนื่องและการเติมอากาศประเภทบังคับเติมอากาศแบบไม่ต่อเนื่อง

3. งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการวัดขนาดอนุภาคของตัวอย่างปุ๋ยหมักด้วยวิธีการร่อน (Sieving) จึงไม่ได้เห็นขนาดที่บ่งชี้ให้เห็นถึงตัวแปรเนื้อปุ๋ยหมักและความพรุนอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความจำกัดด้านอุปกรณ์วัดตัวแปร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 7
บทประยุกต์ทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

7.1 ที่มาและความสำคัญ

การทำปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศระบบปิด (In-Vessel) สำหรับขนาดจริง (Full Scale) และขนาดนำร่อง (Pilot Scale) มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูงและขั้นตอนดำเนินการซับซ้อนกว่าการทำปุ๋ยหมักระบบกองแถว (Windrow) และท่อแถว (Static-piles) จึงต้องมีการทดลองทำปุ๋ยหมักขนาดห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการต่อยอดไปสู่ขนาดนำร่องหรือขนาดใช้งานจริงได้ เพื่อประสิทธิภาพในการจัดการบำบัดของเสีย

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองทำปุ๋ยหมักระบบภาชนะปิดแบบใช้อากาศขนาดห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ขนาด 1.25 ลิตร และขนาด 50 ลิตร ด้วยเศษผักผลไม้ เศษใบจามจุรีและเศษกิ่งไม้ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกันและรอบเติมอากาศที่ต่างกัน และมีหัวเชื้อเป็นปุ๋ยหมักสมบูรณ์จากอาคารวิทยพัฒนา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองขนาด 1.25 ลิตรเพื่อใช้ทดลองในขนาด 50 ลิตร และผู้ดำเนินงานวิจัยได้ออกแบบบแบบร่างระบบทำปุ๋ยหมักขนาด 50 ลิตร ทั้งนี้ ยังไม่ได้ทำการทดลองที่เป็นการทำปุ๋ยหมักที่ขนาด 50 ลิตรตามแผนผังงานวิจัยซึ่งสำคัญในประเด็นเรื่องการต่อยอดไปสู่ขนาดนำร่อง (Pilot-Scale) และใช้งานจริงได้ และผลการทดลองจากการทดลองขนาด 1.25 ลิตรนั้นเพียงพอต่อการตอบวัตถุประสงค์ได้ครบถ้วนแล้ว

ฉะนั้น ทางผู้ดำเนินงานวิจัย จึงได้นำข้อมูลระบบทำปุ๋ยหมักขนาด 50 ลิตรและภาพแบบร่างระบบทำปุ๋ยหมักขนาด 50 ลิตรไว้ในบทประยุกต์ทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นข้อมูลที่คาดว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับการต่อยอดงานวิจัยในภายภาคหน้า

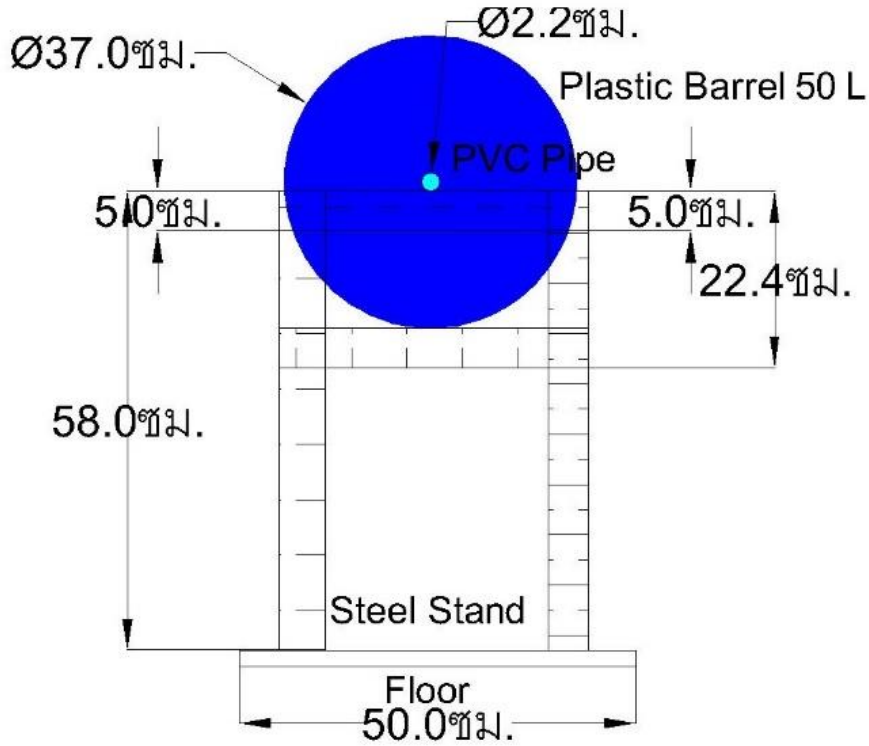
7.2 ระบบทำปุ๋ยหมักขนาด 50 ลิตร

ดัดแปลงจากงานของ Kalamdhad และ Kazmi (2009) เป็นระบบภาชนะปิดแบบถังหมุนซึ่งตัวถังเป็นพังโอ่งพลาสติกมีขนาด 50 ลิตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 37 เซนติเมตร ยาว 57 เซนติเมตร ตั้งไว้บนโครงขาตั้งเหล็กฉากสูง 58 เซนติเมตร กว้าง 71.5 เซนติเมตร ทำฝาเปิดปิดถังกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 37 เซนติเมตร มีแกนกวนผสมและเติมอากาศตรงกลางถัง ทำจากท่อพีวีซีขนาด ½

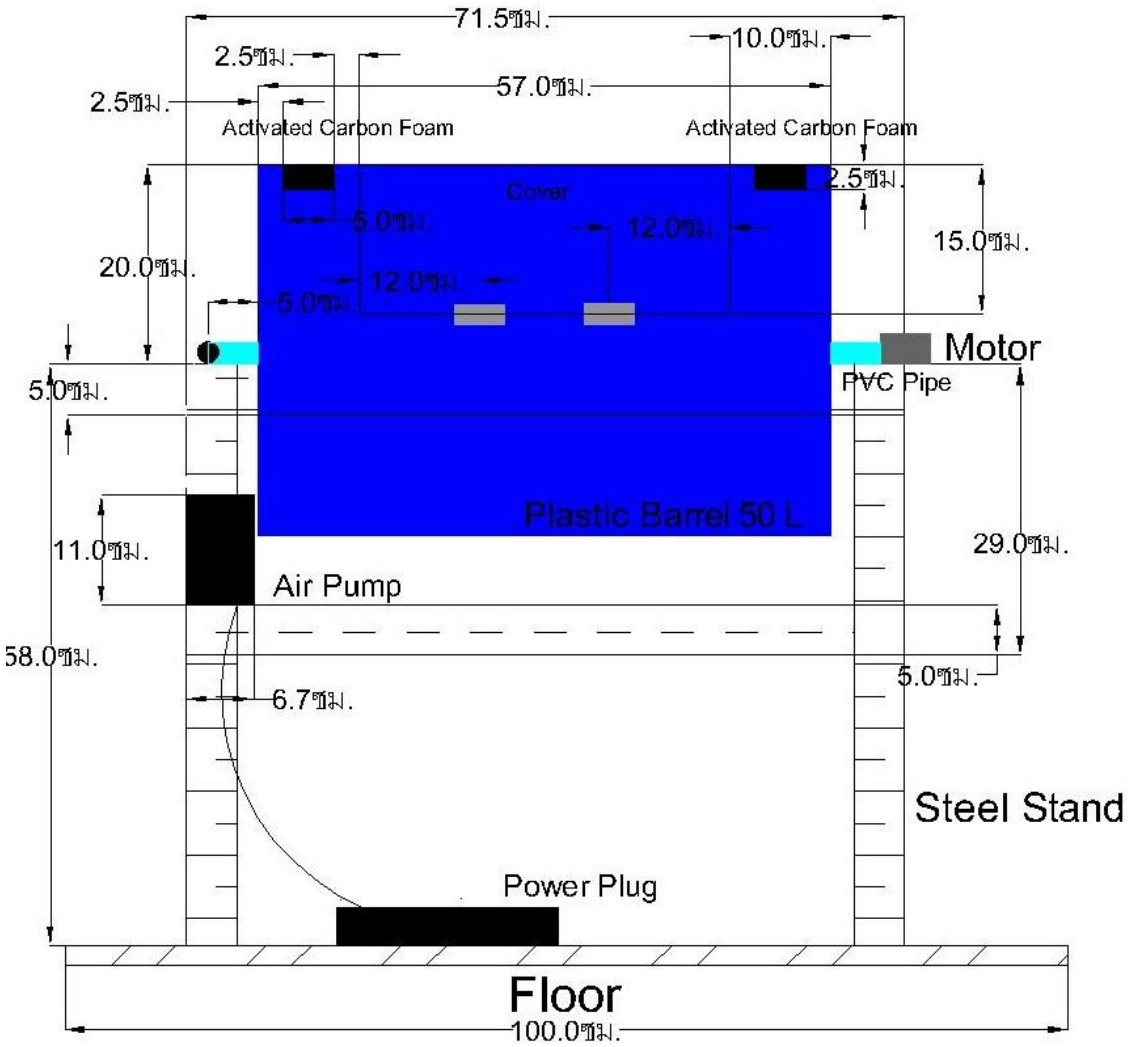
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นิ้ว โดยแกนยื่นนอกถังข้างละ 5 เซนติเมตร สำหรับติดตั้งมอเตอร์ไว้หมุนแกนเพื่อกวนผสมและติดตั้งเครื่องเติมอากาศ Mega 6000 เพื่อเติมอากาศ ข้างฝาถังทั้ง 2 ข้างจะเจาะรูขนาด 0.4 เซนติเมตรและปิดด้วยแผ่นกรองคาร์บอนสำหรับดูดกลิ่นและความชื้น เพื่อการระบายอากาศและลดกลิ่นรบกวน ดังภาพที่ 7-1 ภาพที่ 7-2 และภาพที่ 7-3

ซึ่งใบพัดกวนผสมจะใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนา 3 มิลลิเมตร กว้าง 4.5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ติดในแนวเฉียง ส่วนท่อเติมอากาศจะใช้ท่อพีวีซีขนาด 1/2 นิ้วเจาะรูขนาด 0.4 เซนติเมตร 1 รู ทั้งท่อเติมอากาศและแผ่นอะลูมิเนียมติดเข้ากับข้อต่อพีวีซี 3 ทางขนาด 1/2 นิ้ว ซึ่งข้อต่อจะต่อกับท่อพีวีซี ½ นิ้วและด้านบนจะมีการถ่ายเทอากาศจากเครื่องเติมอากาศให้ไหลเวียนสู่ท่อเติมอากาศได้ โดยท่อเติมอากาศและใบพัดกวนผสมจะห่างจากตัวถัง 3 เซนติเมตรเพื่อกันการเสียดสีระหว่างทดลองปุ๋ยหมัก ดังภาพที่ 7-4

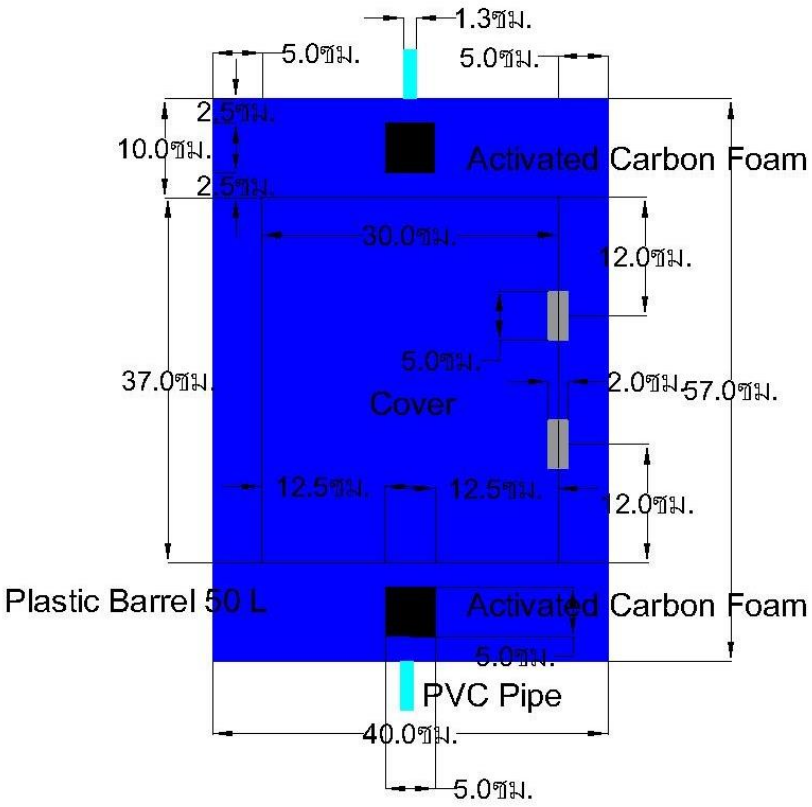


ภาพที่ 7-1 แบบร่างระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักถังหมุนขนาด 50 ลิตร (มุมมองด้านหน้า)

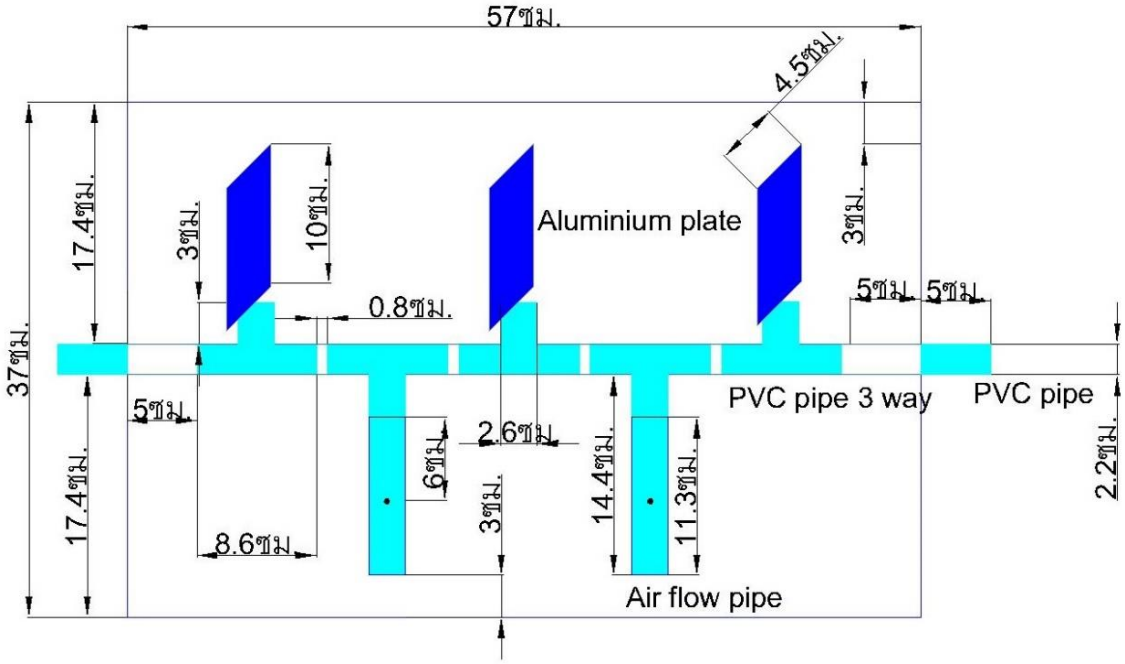


ภาพที่ 7-2 แบบร่างระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักถังหมุนขนาด 50 ลิตร (มุมมองด้านข้าง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 7-3 แบบร่างระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักถังหมุนขนาด 50 ลิตร (มุมมองด้านบน)



ภาพที่ 7-4 แบบร่างระบบการทดลองทำปุ๋ยหมักถังหมุนขนาด 50 ลิตร (มุมมองภายใน)

โดยมีวัสดุอุปกรณ์สำหรับทำระบบหมักระบบภาชนะปิดแบบถังหมุนขนาด 50 ลิตร ดังนี้

- ถังโอ่งพลาสติกขนาด 50 ลิตร 1 ใบ
- เหล็กฉาก และ ตัวรองเหล็กฉาก
- สายยางพลาสติก ขนาดท่อ 0.4 เซนติเมตร
- ไขขวง สว่าน น็อตและตะปูควง
- เครื่องเติมอากาศ Mega 6000 1 เครื่อง
- ประแจเบอร์ 10 จำนวน 1 ด้าม
- ตลับลูกปืนและตัวยึดตลับลูกปืน
- ท่อพีวีซี 3 ทาง ขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 5 ชิ้น
- ท่อพีวีซี ขนาด 1/2 นิ้ว ยาว 4 เมตร จำนวน 1 ชิ้น
- แผ่นอะลูมิเนียม กว้างและยาว 30 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร จำนวน 1 แผ่น
- มอเตอร์ AC 220 V ความเร็วรอบ 2.5 รอบต่อนาที จำนวน 1 ตัว

7.3 การออกแบบอัตราส่วนการทดลอง

เป็นอัตราส่วนเดียวกันจากการทดลองที่ทำให้ปุ๋ยหมักมีคุณภาพมากที่สุดในการทดลองขนาด 1.25 ลิตรและขยายขนาด 40 เท่า คือ เดิมมีปริมาตรวัสดุหมัก 0.8 ลิตรและขยายขนาดเป็น 32 ลิตร (อิงจากขนาด 1.25 ลิตร เป็นขนาด 50 ลิตร) ตัวอย่างเช่น การทดลอง C-4 ซึ่งมีเศษผักผลไม้ 0.3 ลิตร เศษใบจามจุรี 0.3 ลิตรและปุ๋ยหมักสมบูรณ์ 0.2 ลิตร รวม 0.8 ลิตร และเมื่อขยายขนาดก็จะได้เศษผักผลไม้ 12 ลิตร เศษใบจามจุรี 12 ลิตรและปุ๋ยหมักสมบูรณ์ 8 ลิตร รวม 32 ลิตร (ลิตรในที่นี้คือลิตรในสภาพวัสดุน้ำหนักเปียก) ส่วนการดำเนินการทดลอง จะดำเนินเช่นเดียวกันกับการทดลองขนาด 1.25 ลิตร ยกเว้นการพลิกกอง 1 ครั้งต่อวัน เนื่องจากสำหรับการทดลองขนาด 50 ลิตรนั้นมีการกวนผสมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าตลอดระยะเวลาในการทำการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. กรุงเทพมหานคร: กรมพัฒนาที่ดิน.

กรมพัฒนาที่ดิน. (ม.ป.ป.). มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์(ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูง)ของกรมพัฒนาที่ดิน [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www1.ldd.go.th/ldd/Fertilizer/Organic_Fertilizer.pdf [19 มีนาคม 2561]

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2548). ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.agriinfo.doae.go.th/year52/knowledge/km_13-01-52.doc

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2560). ประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เรื่อง กำหนดกรรมวิธีการตรวจวิเคราะห์ปุ๋ยเคมี พ.ศ. ๒๕๕๙ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2560/E/002/24.PDF [22 มีนาคม 2561]

กลุ่มงานวิเคราะห์ปุ๋ย. 2541. คู่มือวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์. กรุงเทะมหานคร: กองเกษตรเคมี กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

คณะผู้ประกอบการร้านค้าโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สัมภาษณ์. 23 พฤศจิกายน 2561.

ครรชิต เงินคำคง ลดาวัลย์ วัฒนะจีระ. (2550). การทำปุ๋ยหมักจากเศษใบไม้แห้งและเศษผักโดยวิธีการหมักแบบกองแถว. (วิศวกรรมศาสตรดุษดีบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษดีบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.

คะนอง ผลสงเคราะห์. (2549). การศึกษาการจัดการและการทำปุ๋ยหมักจากขยะ โดยระบบกองแบบ Passively Aerated Windrow ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพะเยา. (วืศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยนเรศวรวิทยาเขตสารสนเทศพะเยา.

เจนวิทย์ กรอบทอง. (2548). การเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมฟิลิคแบคทีเรียกับสารไบโอนิคในการทำปุ๋ยหมัก จากวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหารกระป๋องและใบไม้แห้ง. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เจ้าหน้าที่สำนักระบบกายภาพ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สัมภาษณ์. 29 ตุลาคม 2561.

ฉัตรชัย จันทร์เด่นดวง. (2550). การทำปุ๋ยหมัก. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ. 48(กันยายน-มกราคม 2550):

48-54.

ธันนิดา กงทอง. (2561). การศึกษาธาตุอาหารหลักของปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไส้เดือนจากการย่อยสลายกระดาษและขยะอินทรีย์. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยสารคาม.

ธันวดี ศรีธาวิรัตน์. (2549). การศึกษากระบวนการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. (วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต), มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม.

นริสรา พานพ่วง และ สาวิตรี จันทรานุรักษ์. (2555). "การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชในปุ๋ยหมักธรรมชาติ ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน โดยไส้เดือนดิน *Eudrilus eugeniae* และปุ๋ยหมักพด.1" เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการ การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50. หน้าที่. 442-447. สืบค้นจาก http://www.lib.ku.ac.th/KUCONF/2556/KC5009020.pdf

ปัญจาภา ส่งเสริม. (2559). การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมระหว่างกระบวนการหมัก: การเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยหมักมูลหมูและปุ๋ยหมักมูลไก่. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยศิลปากร.

เปรมสุดา จิ๋วนอก. (2550). ความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งไนโตรเจนกับเวลาการย่อยของปุ๋ยหมัก. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พูนศักดิ์ จันทร์จำปี. (2541). การหมักปุ๋ยจากเศษอาหารและวัสดุเหลือใช้การเกษตรแบบเทอร์โมฟิลิคโดยใช้ถังหมุน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ภัทรา วงษ์พันธกมล. (2547). การหาประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์จากเศษผักและเศษใบไม้แห้งของเชื้อจุลินทรีย์เร่งปุ๋ยหมัก. (วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.

สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม. 2560. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการพัฒนาต้นแบบการจัดการขยะมูลฝอยและขยะอันตรายในพื้นที่เมือง (จุฬาฯ zero waste). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุทธี พลรักษา. (2552). การทำปุ๋ยหมักจากผักตบชวาผสมมูลวัวโดยใช้สารเร่งชีวภาพ. (ธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

สุธีรา สุนทรารักษ์. (2553). "การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร" เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการ การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48. หน้าที่. 173-180. สืบค้นจาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

https://kukr.lib.ku.ac.th/db/index.php?/BKN/search_detail/result/12238

สุภา อุ่นสกุล. (2549). การทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหาร. (วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต), มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์.

องค์การสวนพฤกษศาสตร์. (2554). ฐานข้อมูลพรรณไม้ จามจุรี [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.qsbg.org/Database/Botanic_Book%20full%20option/search_detail.asp?botanic_id=2331 [24 กันยายน 2561]

อรวรรณ วัฒนยมนาพร. (2553). การหมักร่วมของขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Adhikari, B. K., Barrington, S., Martinez, J., and King, S. (2009). Effectiveness of three bulking agents for food waste composting. *Waste Management, 29*(1), 197-203. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.001

Arslan, E. I., Ünlü, A., and Topal, M. (2011). Determination of the Effect of Aeration Rate on Composting of Vegetable-Fruit Wastes. *CLEAN - Soil, Air, Water, 39*(11), 1014-1021. doi:10.1002/clen.201000537

Asses, N., Farhat, A., Cherif, S., Hamdi, M., and Bouallagui, H. (2018). Comparative study of sewage sludge co-composting with olive mill wastes or green residues: Process monitoring and agriculture value of the resulting composts. *Process Safety and Environmental Protection, 114*, 25-35. doi:https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.006

Baptista, M. (2009). Modelling of the kinetics of municipal solid waste composting in full-scale mechanical biological treatment plants. (Doctor of Philosophy in Sanitary Engineering Doctoral Thesis), New University of Lisbon.

Bernal, M. P., Sommer, S. G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., and Michel, F. C. 2017. Chapter Three - Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits. 144, Academic Press.

Bharti, A., Rich, N., and Kumar, S. (2018). Effect of bulking agents and cow dung as inoculant on vegetable waste compost quality. *Bioresource Technology, 252*,

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

83-90. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.080

California Compost Quality Council. (2001). Compost Maturity Index [Online]. http://compostingcouncil.org/wp/wp-content/uploads/2014/02/2-CCQC-Maturity-Index.pdf [23 March 2018]

Chadwick, D., Chen, S., Du, L., He, S., Li, G., Luo, W., . . . Zhang, D. (2016). Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting. *Waste Management, 56*, 403-410. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.017

Charoenchang, N., Juntongjin, K., Pattaragulwanit, K., Pinphanichakarn, P., and Thaniyavarn, S. (2003, 2003). *Utilization of Agricultural Materials to Enhance Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil*.

Cheng, H., Ding, J., Ge, M., Li, R., Shen, Y., Meng, H., . . . Zhou, J. (2020). Effect of aeration rates on enzymatic activity and bacterial community succession during cattle manure composting. *Bioresource Technology, 304*, 122928. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122928

Cooperband, L. (2002). The Art and Science of Composting [Online]. https://www.cias.wisc.edu/wp-content/uploads/2008/07/artofcompost.pdf [17 June 2018]

Cornell Waste Management Institute. (no date). The Science of Composting Chapter 1 [Online]. http://cwmi.css.cornell.edu/chapter1.pdf [17 June 2018]

Cui, R., Gong, X., Han, L., Huang, G., Kan, Z., Ma, S., . . . Xiong, J. (2020). Effects of intermittent aeration on greenhouse gas emissions and bacterial community succession during large-scale membrane-covered aerobic composting. *Journal of Cleaner Production, 266*, 121551. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121551

Dussadee, N., Unpaprom, Y., and Ramaraj, R. 2016. Chapter 8 Grass Silage for Biogas Production.

Garg, A., Kumar, R., and Manu, M. K. (2019). Decentralized composting of household wet biodegradable waste in plastic drums: Effect of waste turning, microbial inoculum and bulking agent on product quality. *Journal of Cleaner Production, 226*, 233-241. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.350

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Gupta, A., Thengane, S. K., and Mahajani, S. (2018). CO2 gasification of char from lignocellulosic garden waste: Experimental and kinetic study. *Bioresource Technology, 263*, 180-191. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.097

Han, Y., Li, G., Li, Y., Luo, W., Qian, W., and Yang, F. (2019). Performance of mature compost to control gaseous emissions in kitchen waste composting. *Science of The Total Environment, 657*, 262-269. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.030

Hu, B., Ma, C., Wei, M.-B., Zhang, H.-Z., and Zhao, J.-H. (2019). Influence of matured compost inoculation on sewage sludge composting: Enzyme activity, bacterial and fungal community succession. *Bioresource Technology, 294*, 122165. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122165

Incorporated Administrative Agency. 2018. Testing Methods for Fertilizers (2018). Japan: Food and Agricultural Materials Inspection Center.

Jiang, T., Li, G., Tang, Q., Ma, X., Wang, G., and Schuchardt, F. (2015). Effects of aeration method and aeration rate on greenhouse gas emissions during composting of pig feces in pilot scale. *Journal of Environmental Sciences, 31*, 124-132. doi:https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.12.005

Kalamdhad, A. S.Kazmi, A. A. (2009). Rotary drum composting of different organic waste mixtures. *Waste Management & Research, 27*(2), 129-137.

Mancebo, U.Hettiaratchi, J. P. A. (2015). Rapid assessment of methanotrophic capacity of compost-based materials considering the effects of air-filled porosity, water content and dissolved organic carbon. *Bioresource Technology, 177*, 125-133. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.058

Mohapatra, P. K. 2013. Textbook of Environmental Biotechnology. New Delhi: I. K. International Pvt Ltd.

Muntjeer, A., S., K. A., A., K. A., Meena, K., and K., S. Y. (2009). Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves. *Bioresource Technology, 100*(24), 6442-6450. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.030

National Programme on Technology Enhanced Learning. (2012). Lecture7 Recovery of Biological Conversion Products: Compost and Biogas [Online]. https://nptel.ac.in/courses/120108005/module7/lecture7.pdf [17 June 2018]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Neugebauer, M.Sołowiej, P. (2017). The use of green waste to overcome the difficulty in small-scale composting of organic household waste. *Journal of Cleaner Production, 156*, 865-875. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.095

Pantoja, A., Martinez, M. M., and Roman, P. 2015. Farmer 's Compost Handbook Experience in Latin America. Santiago: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Paul, J. (2009). The Theory and Operation of Composting [Online]. http://www.transformcompostsystems.com/articles/Basics%20of%20Composting%20June%202009.pdf [27 May 2019]

Rao, M. N., Sultana, R., and Kota, S. H. 2017. Chapter 2 - Municipal Solid Waste. Butterworth-Heinemann.

Ratanatamskul, C.Manpetch, P. (2016). Comparative assessment of prototype digester configuration for biogas recovery from anaerobic co-digestion of food waste and rain tree leaf as feedstock. *International Biodeterioration & Biodegradation, 113*, 367-374. doi:https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.05.008

Ratanatamskul, C.Taeporamaysamai, O. (2016). Co-composting of various organic substrates from municipal solid waste using an on-site prototype vermicomposting reactor. *International Biodeterioration & Biodegradation, 113*, 357-366. doi:https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.05.009

Razmjoo, P., Pourzamani, H., Teiri, H., and Hajizadeh, Y. 2015. Determination of an empirical formula for organic composition of mature compost produced in Isfahan-Iran composting plant in 2013. 4,

Sulaiman, S. A., Roslan, R., Inayat, M., and Yasin Naz, M. (2018). Effect of blending ratio and catalyst loading on co-gasification of wood chips and coconut waste. *Journal of the Energy Institute, 91*(5), 779-785. doi:https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.05.003

Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Virgil, S. A. 1993. Integrated Solid Waste Management : Engineering Principle and Management Issues. 2. Singapore: McGraw-Hill Inc.

United States Department of Agriculture. (2000). Part 637 Environmental Engineering National Engineering Handbook Chapter 2 [Online].

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs143_022229.pdf [21 January 2018]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ไพฑูรย์ พัชรบำรุง
วัน เดือน ปี เกิด	22 มิถุนายน 2537
สถานที่เกิด	สมุทรสาคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	71/1 หมู่ 8 ตำบลหนองสองห้อง อำเภอบ้านแพ้ว จังหวัดสมุทรสาคร 74120

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก-ก-วิธีวิเคราะห์ตัวแปรในวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์

หลักการ

ย่อยตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์เคมีด้วยกรดซัลฟุริก (Sulfuric acid) แล้วทำการออกซิไดซ์อินทรียคาร์บอนในตัวอย่างปุ๋ยด้วยกรดโครมิกที่มากเกินพอ จากนั้นไตเตรทกรดโครมิกที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาด้วยสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ผลวิเคราะห์ที่ได้จะมีค่าเป็นร้อยละ 77 ของอินทรียคาร์บอนที่มีอยู่จริง คำนวณหาปริมาณอินทรียวัตถุ โดยใช้สมมุติฐานของการหาปริมาณอินทรียวัตถุในดินซึ่งระบุว่าปริมาณอินทรียคาร์บอนจะคิดเป็น 58 ของอินทรียวัตถุในดิน

ขอบข่ายและวัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์หาค่าอินทรียวัตถุและคาร์บอนอินทรีย์(หรืออินทรียคาร์บอน) ด้วย Walkley and Black method

อุปกรณ์

- ขวดชมพู่ (Erlemeyer flask) ขนาด 125 มิลลิลิตร หรือ 250 มิลลิลิตร Dispenser ขนาด 10 มิลลิลิตร และ 20 มิลลิลิตร กระบอกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร และเครื่องกวน (magnetic stirrer)

สารเคมี

- สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 1.0 N กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) สารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate) 0.5 N และสารละลายออร์โทฟีแนนโทรลีน อินดิเคเตอร์

วิธีเตรียมน้ำยาเคมี

1.สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 1.0 N

ชั่งสาร $K_2Cr_2O_7$ (AR grade) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จำนวน 49.0247 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร คนให้ละลายหมด ถ่ายและล้างใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน

2.สารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 N

ชั่งสาร Fe $(NH_4)_2$ $(SO_4)_2$.$6H_2O$ จำนวน 139.0085 กรัม (หรือใช้ Ammonium ferrous sulfate จำนวน 196.07 กรัม) ใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 600 มิลลิลิตร คนให้ละลายหมด ถ่ายและล้างใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วเติม ร้อยละ 93 - 98 H_2SO_4 ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

3.สารละลาย O-phenanthroline ferrous sulfate indicator

ชั่ง O-phenanthroline จานวน 0.74 กรัม และ Ferrous sulfate จำนวน 0.35 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนจนละลายหมด

การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

- ชั่งตัวอย่างจานวน 0.1xxx – 0.5xxx กรัม ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 125 มิลลิลิตร หรือ 250 มิลลิลิตร แล้วปิเปตสารละลาย Potassium dichromate ปริมาณ 10 มิลลิลิตร เติมลงไปในตัวอย่าง จากนั้นเติมร้อยละ 93 - 98 H2SO4 ปริมาณ 15 มิลลิลิตร ลงไปในสารละลายตัวอย่างอย่างช้าๆ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดควัน 16 ชั่วโมง แล้วเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมสารละลาย O-phenanthroline ferrous sulfate ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

นำสารละลายตัวอย่างมาไตเตรทด้วยสารละลาย Ferrous sulfate จนได้สารละลายสีเขียวและเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นน้ำตาลปนแดง แสดงว่าถึงจุดยุติ บันทึกผล
(หมายเหตุ ทำแบลงค์ (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่าง เตรียมและวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง)

การคำนวณ

ร้อยละอินทรียคาร์บอน (OC) = $\frac{0.3896 \text{ x N x B(C}-D)}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)} x\ C}$

ร้อยละอินทรียวัตถุ (OM) = $\frac{\text{OC x 100}}{58}$

(Equivalent to soil)

โดยที่

B = ปริมาตรของ $K_2Cr_2O_7$ ที่เติมลงไปในตัวอย่าง และแบลงค์ (มิลลิลิตร)

C = ปริมาตรของ $FeSO_4.7H_2O$ ที่ไตเตรทพอดีกับ $K_2Cr_2O_7$ ในแบลงค์ (มิลลิลิตร)

D = ปริมาตรของ $FeSO_4.7H_2O$ ที่ไตเตรทพอดีกับ $K_2Cr_2O_7$ ในตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นเป็นนอร์มอลของสารละลายมาตรฐาน $K_2Cr_2O_7$

0.3896 = มิลลิกรัมสมมูลของคาร์บอน x ร้อยละการคืนกลับของการเปลี่ยนรูปของอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายเป็นอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

12 / 4000 = มิลลิกรัมสมมูลของคาร์บอน

77 / 100 = ร้อยละการคืนกลับของการเปลี่ยนรูปของ OC ที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายเป็น Total OC

58 / 100 = ค่าคงที่ตามสมมุติฐานของการหาปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

รายงานผลการวิเคราะห์

รายงานผลเป็นหน่วยร้อยละ (อินทรีย์วัตถุ) และร้อยละของน้ำหนัก (คาร์บอนอินทรีย์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ความชื้นสะสม

หลักการ

หาปริมาณความชื้นสะสมที่อยู่ในปุ๋ย

ขอบข่ายและวัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์หาค่าความชื้นในปุ๋ยเคมีด้วยวิธีการ Oven - drying ที่สภาวะอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สำหรับก่อนและหลังทำปุ๋ยหมัก และเครื่องวัดความชื้นในดินรุ่น DMM008 สำหรับระหว่างทำปุ๋ยหมัก

อุปกรณ์และสารเคมี

1. กรณีก่อนและหลังทำปุ๋ยหมัก

- เครื่องชั่งอย่างละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ตู้อบ (Hot air oven) โถดูดความชื้น (Desiccator) เครื่องแก้ว และวัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในการปฏิบัติการวิเคราะห์

2. กรณีระหว่างทำปุ๋ยหมัก

- เครื่องวัดความชื้นในดินรุ่น DMM008

วิธีการ

1. กรณีก่อนและหลังทำปุ๋ยหมัก

- ชั่งตัวอย่างจำนวน 3.xxxx กรัม ใส่ขวดชั่งสาร (Weighing bottle) หรือ บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนักไว้ นำตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจากทศนิยมตำแหน่งที่ 2
- นำตัวอย่างออกมาใส่โถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก

2. กรณีระหว่างทำปุ๋ยหมัก

- จุ่มปลายเครื่องวัดลงในเครื่องมือลงในภาชนะบรรจุปุ๋ยหมัก โดยให้ปลายลึกลงไปอยู่บริเวณตรงกลางภาชนะที่บรรจุ
- รอให้ตัวเลขหยุดนิ่ง แล้วบันทึกค่า
- เมื่อบันทึกค่าเสร็จแล้ว ล้างปลายเครื่องมือด้วยน้ำกลั่นและซับให้แห้งด้วยกระดาษชำระ ก่อนเก็บหรือวัดตัวอย่างใหม่

การคำนวณ

$$\text{ความชื้นสะสม (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}\ x\ 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}}$$

รายงานผลการวิเคราะห์

รายงานผลเป็นหน่วยร้อยละ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ไนโตรเจนทั้งหมด

หลักการ

ย่อยตัวอย่างปุ๋ยด้วยกรดซัลฟุริก (Sulfuric acid) เข้มข้น กรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) และโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulphate) โดยมีโพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulfate) และคอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate) เป็นสารเร่งปฏิกิริยา แล้วนาไปกลั่นด้วยด่าง โดยใช้กรดบอริก (Boric acid) ดักจับแอมโมเนีย วิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนโดยไตเตรทสารละลายกรดบอริกที่มีแอมโมเนีย (Ammonia) ละลายอยู่ด้วยสารละลายกรดเกลือมาตรฐาน (Hydrochloric acid)

ขอบข่ายและวัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตัวอย่างปุ๋ยด้วยวิธีการ Kjeldahl

อุปกรณ์และสารเคมี

1.อุปกรณ์

- Kjeldahl digestion and distillation apparatus
- เครื่องชั่งอย่างละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- ตู้อบ (Hot air oven)
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
- เครื่องแก้ว และวัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในการปฏิบัติการวิเคราะห์

2.สารเคมี

- Boric acid (H_3BO_3), AR grade
- Copper sulfate ($CuSO_4.5H_2O$), AR grade
- Ethyl alcohol 90 - 95ร้อยละ (C_2H_5OH), AR grade
- Hydrochloric acid 36 -38ร้อยละ (HCl), AR grade
- Methyl red, AR grade
- Methylene blue, AR grade
- Potassium sulfate (K_2SO_4), AR grade
- Salicylic acid [$C_6H_4(OH).COOH$], AR grade
- Sodium carbonate (Anhydrous Na_2CO_3), AR grade
- Sodium hydroxide (NaOH), Commercial grade หรือ AR grade
- Sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3.5H_2O$), AR grade
- Sulfuric acid 93 - 98ร้อยละ (H_2SO_4), AR grade
- Zinc granular, AR grade

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- สารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N

วิธีการ

1. การเตรียมรีเอเจนต์ (Reagent)

1.1 สารละลายกรดบอริกร้อยละ 4

ชั่งกรดบอริก จำนวน 40 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 2000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาณ 500 มิลลิลิตร นำไปต้มจนละลายหมด เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

1.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 50

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 500 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 2000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่ 800 มิลลิลิตร โดยทำการละลายให้หมดในตู้ดูดควัน เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

หมายเหตุ เตรียมให้มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินพอ

1.3 สารละลาย Mixed indicator

1) ชั่งเมทธิลเรด จำนวน 0.20 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร เติมเอทานอลร้อยละ 90 - 95 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

2) ชั่งเมทธิลินบลู จำนวน 0.10 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร เติมเอทานอลร้อยละ 90 - 95 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

3) นำสารละลายข้อ 1) และ 2) มาเทรวมกัน คนให้เข้ากัน

1.4 Mixed catalyst

ผสมคอปเปอร์ซัลเฟต และโพแทสเซียมซัลเฟต ในอัตราส่วน 1 : 9 โดยน้ำหนัก

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

2.1 สารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก 0.2 N

นำกรดไฮโดรคลอริก (ร้อยละ 36 - 38 HCl) จำนวน 86 มิลลิลิตร หรือสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มอล จำนวน 1000 มิลลิลิตร (1 Ampoule for 1000 ml) ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 5000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2.2 การหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก 0.2 N (Standardization)

1) ชั่งโซเดียมคาร์บอเนต ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จานวน 0.2xxx กรัม ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 500 มิลลิลิตร

2) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร หยดสารละลาย Mixed indicator 2 – 3 หยด จะได้สารละลายสีเขียวอ่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3) นำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก 0.2 N จนถึงจุดยุติ จะได้สารละลายสีชมพูม่วง บันทึกผล คำนวณหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ตามสูตร

$$N\ (HCl) = \frac{\text{น้ำหนักของ } Na_2CO_3\ (g) \times 1000}{52.99 \times \text{ปริมาตร } HCl\ (ml)}$$

52.99 = สมมูลของ Na_2CO_3

วิธีวิเคราะห์

1) ชั่งตัวอย่างจำนวน 0.3xxx-2.xxxx กรัม ใส่ Kjeldahl flask ขนาด 800 มิลลิลิตร

2) เติมกรดซาลิไซลิก จำนวน 2 กรัม เติมกรดซัลฟุริก (ร้อยละ 93 - 98 H2SO4) ปริมาณ 40 มิลลิลิตร เขย่า

ให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที และโซเดียมไธโอซัลเฟต จำนวน 5 กรัม

3) นำไปตั้งบนเตาสำหรับย่อยตัวอย่าง ทำการย่อยตัวอย่างโดยใช้ไฟปานกลาง จนกระทั่งได้สารละลายสีน้ำตาล ปิดไฟ และตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

4) เติม Mixed catalyst จำนวน 10 กรัม และทำการย่อยอีกครั้งจนได้สารละลายสีเขียวใส ปิดไฟทิ้งไว้ให้เย็น

5) เติมน้ำกลั่นปริมาณ 350 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 100 มิลลิลิตร และ Zinc granular จำนวน 5 กรัม

6) นำ Kjeldahl flask ต่อกับเครื่องกลั่น โดยให้ปลายเครื่องกลั่นจุ่มอยู่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายกรดบอริกปริมาณ 100 มิลลิลิตร และสารละลาย Mixed indicator ปริมาณ 4 - 5 หยด

7) ทำการกลั่นจนได้ปริมาตรของสารละลายใน Erlenmeyer flask ข้อ 6) ปริมาณ 350 มิลลิลิตร

8) นำสารละลายที่ได้ไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก 0.2 N บันทึกผล

9) ทำแบลงค์ (Blank) โดยไม่ใส่ตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง

การคำนวณ

$$\text{ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก)} = \frac{N(HCl) \times [ml(HCl) - ml(Blank)] \times 14.0067 \times 100}{wt.of\ sample\ (g) \times 1000}$$

14.0067 = น้ำหนักอะตอมของไนโตรเจน

รายงานผล

รายงานผลเป็นหน่วยร้อยละของน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หมายเหตุ : กรณีใช้กรดซัลฟุริกรองรับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการไตเตรท และเมทธิลเรดเป็นอินดิเคเตอร์

1. การเตรียมรีเอเจนต์ (Reagent)

1.1 สารละลายกรดซัลฟุริกเข้มข้น 1 N

นำกรดซัลฟุริก (ร้อยละ 93 – 98 H_2SO_4) จำนวน 27.5 มิลลิลิตร เทใส่ขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

1.2 เมทธิลเรดอินดิเคเตอร์

ละลายเมทธิลเรด 1 กรัม ด้วยเอทานอลร้อยละ 90 – 95 จำนวน 200 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

1.3 ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์

ละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1 กรัม ด้วยเอทานอลร้อยละ 90 - 95 จำนวน 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

2.1 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 N

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, ร้อยละ 99 AR grade) จำนวน 40 กรัม ในน้ำกลั่น คนให้เข้ากัน ปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร (เก็บในภาชนะพลาสติก)

2.2 การหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Standardization)

ชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนแทเลต (Potassium hydrogen phthalate : KHP, $KHC_8H_4O_4$) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นใน Desiccator จำนวน 5.xxx กรัม ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 2 – 3 หยด นำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนถึงจุดยุติ สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน บันทึกผล คำนวณหาความเข้มข้นจากสูตร

$$\text{สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (N)} = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{204.23 \times (V / 1000)}}$$

M = น้ำหนักโพแทสเซียมไฮโดรเจนแทเลต (กรัม)

V = ปริมาตรสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)

204.23 = น้ำหนักโมเลกุล KHP

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ฟอสฟอรัสทั้งหมด

หลักการ

ใช้กรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid) และกรดไนตริก (Nitric acid) อัตราส่วน 1 ต่อ 1 ในการย่อยตัวอย่างเพื่อให้ฟอสฟอรัสในตัวอย่างปุ๋ยอยู่ในรูปสารละลายฟอสเฟต จากนั้นทำให้เกิดสีกับสารละลายโมลิบโดวานาเดต (Molybdovanadate) วัดหาปริมาณฟอสฟอรัสด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส

ขอบข่ายและวัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในตัวอย่างปุ๋ย รายงานในรูป P_2O_5 โดยวิธีการ Spectrophotometric molybdovanadophosphate

อุปกรณ์และสารเคมี

1. อุปกรณ์

- Spectrophotometer
- เครื่องชั่งอย่างละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เตาระเหย หรือ Digestion block พร้อม tube
- เครื่องแก้ว และวัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในการปฏิบัติการวิเคราะห์

2. สารเคมี

- Ammonium metavanadate (NH_4VO_3), AR grade
- Ammonium molybdate [$(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$], AR grade
- Nitric acid ร้อยละ 69 - 70 (HNO_3), AR grade
- Perchloric acid ร้อยละ 69 - 72 ($HClO_4$), AR grade
- Potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4), AR grade

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิธีการ

1. การเตรียมรีเอเจนต์ (Reagent)

1.1 กรดผสม HNO_3 : $HClO_4$ อัตรา 1 : 1

ผสมร้อยละ 69 - 70 HNO_3 กับร้อยละ 69 - 72 $HClO_4$ ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยปริมาตร

1.2 สารละลาย Molybdovanadate

1) ชั่ง Ammonium molybdate 40 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำร้อน (น้ำกลั่น) ปริมาณ 400 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น

2) ชั่ง Ammonium metavanadate 2 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำร้อน (น้ำกลั่น) ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นเติมร้อยละ 69 - 72 $HClO_4$ ปริมาณ 450 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น เทสารละลายที่ได้ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 2000 มิลลิลิตร

3) ค่อยๆ รินสารละลายข้อ 1) ลงในสารละลายข้อ 2) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 2000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เขย่าให้เข้ากัน และถ่ายเก็บไว้ในขวดแก้วสีชา

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

2.1 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 1000 ppm

ชั่ง KH_2PO_4 ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จำนวน 1.0984 กรัม ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2.2 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 100 ppm

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 1000 ppm ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2.3 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ppm ใช้เป็น Working standard

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 100 ppm ปริมาณ 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

3. การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

- ชั่งตัวอย่างจำนวน 0.2xxx – 1.xxxx กรัม ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 125 มิลลิลิตร หรือใส่ Digestion tube

- เติมกรดผสม ปริมาณ 20 มิลลิลิตร นำไปย่อยบนเตาระเหย หรือ Digestion block ย่อยจนมีควันสีขาวเกิดขึ้นเหนือสารละลาย หรือสารละลายมีลักษณะสีใส ระวังอย่าให้สารละลายแห้ง ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30 – 40 นาที จากนั้นยกลงจากเตาระเหย หรือ Digestion block ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

- ถ่ายสารละลายตัวอย่าง และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ในกรณีที่สารละลายมีตะกอนขุ่น นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

Chulalongkorn University

4.วิธีวิเคราะห์

4.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างตามปริมาณความเข้มข้นให้อยู่ในช่วงการวัด ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลาย Molybdovanadate ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน และทิ้งไว้ 30 นาที

4.2 นำ Working standard 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ppm เติมสารละลาย Molybdovanadate ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน และทิ้งไว้ 30 นาที

4.3 นำสารละลายข้อ 4.1 และ 4.2 ไปวัดความเข้มของสีด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร บันทึกค่า Absorbance (A) หรือ Transmittance (ร้อยละ T)

4.4.4 หาค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสารละลายตัวอย่างกับกราฟมาตรฐาน ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัส กับ ค่า A หรือ ร้อยละT ของ Working standard

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละ P} = \frac{\text{ppm x dilution factor x 100}}{\text{wt.of sample(g) x 10\^6}}$$

ร้อยละ P_2O_5 = ร้อยละ P x 2.2914

โดยที่

ppm = ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$2.2914 = \frac{\text{น้ำหนักโมเลกุล } \mathbf{P_2O_5}}{\mathbf{2\ x}\ \text{น้ำหนักอะตอม } \mathbf{P}}$$

การรายงานผล

รายงานผลเป็นหน่วยร้อยละของน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โพแทสเซียมที่ละลายน้ำ

ขอบข่ายและวัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมที่ละลายน้ำในตัวอย่างปุ๋ย ด้วยวิธีการ Flame photometric รายงานในรูป K_2O

หลักการ

วัดหาปริมาณความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมา (Intensive of emission) เมื่อสารละลายถูกเผาจนแตกตัวเป็นอะตอม ปริมาณความเข้มของแสงจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณของโพแทสเซียมในสารละลาย

อุปกรณ์และสารเคมี

1. อุปกรณ์

- Flame photometer เครื่องเขย่า เครื่องชั่งอย่างละเอียด ทศนิยม 2 และ 4 ตาแหน่ง และเครื่องแก้ว และวัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในการปฏิบัติการวิเคราะห์

2. สารเคมี

- Calcium carbonate ($CaCO_3$), AR grade Hydrochloric acid ร้อยละ 36 – 38 (HCl), AR grade และสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม (K) 1000 ppm

วิธีการ

1. การเตรียมรีเอเจนต์ (Reagent)

1.1 สารละลาย Suppressor

1) ชั่ง $CaCO_3$ จานวน 12.5 กรัม ใส่บีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นปริมาณ 500 มิลลิลิตร เติมร้อยละ 36 – 38 HCl ปริมาณ 105 มิลลิลิตร ลงไปทีละน้อยจน $CaCO_3$ ละลายหมด

2) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1000 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

2.1 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 100 ppm

ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 1000 ppm ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ากลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2.2 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 10 ppm

ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 100 ppm ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2.3 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 0.5, 3, 6, 9, 12 และ 15 ppm ใช้เป็น Working standard

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 3, 6, 9, 12 และ 15 ppm : ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 100 ppm ปริมาณ 3, 6, 9, 12 และ 15 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

2) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 0.5 ppm : ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 10 ppm ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

3. การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

- ชั่งตัวอย่างจำนวน 0.25xx - 1.xxxx กรัม ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร
- เติมน้ำกลั่นปริมาณ 200 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องเขย่า 1 ชั่วโมง ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ถ้าสารละลายมีตะกอน กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

4. วิธีวิเคราะห์

1) ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลาย Suppressor ปริมาณ 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2) นำ Working standard 0, 0.5, 3, 6, 9, 12 และ 15 ppm เติมสารละลาย Suppressor ปริมาณ 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

3) นำสารละลายข้อ 1) และ 2) ไปวัดค่า Intensive of emission ด้วย Flame photometer

4) หาค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสารละลายตัวอย่างกับกราฟมาตรฐาน ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโพแทสเซียม กับค่า Intensive of emission ของ Working standard โดยเส้นกราฟมาตรฐานมีค่า R2 ไม่ต่ำกว่า 0.999

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคำนวณ

ร้อยละ K = $\frac{\text{ppm x dilution factor } x\ 100}{\text{wt.of sample(g) x 10\^6}}$

ร้อยละ K_2O = ร้อยละ K x 1.2046

โดยที่

ppm = ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างที่อ่านได้จาก กราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

1.2046 = $\frac{\text{น้ำหนักโมเลกุล } K_2O}{2 \text{ x น้ำหนักอะตอม } K}$

การรายงานผล

รายงานผลเป็นหน่วยร้อยละของน้ำหนัก

ดัชนีการงอกของเมล็ด

หลักการ

ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักสามารถวัดได้ด้วยการงอกของพืช โดยนิยมใช้เมล็ดพืชอย่างเช่น เมล็ดถั่วเขียว ด้วยสารละลายที่สกัดจากตัวอย่างปุ๋ยและน้ำกลั่นเพื่อเปรียบเทียบผลของการงอก

ขอบข่ายและวัตถุประสงค์

หาความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด (ถั่วเขียว)

อุปกรณ์และสารเคมี

- เมล็ดถั่วเขียว
- น้ำกลั่น
- บีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร

วิธีการ

- กรองตัวอย่าง 3.3 มิลลิกรัมต่อน้ำ 33 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1:10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) เขย่า 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1
- ใส่น้ำตัวอย่างในจานเพาะ (บีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร) จานเพาะละ 3 มิลลิลิตร 6 จานเพาะ (Blank 1 จานเพาะ และชุดการทดลองละ 5 จานเพาะ รวมเป็น 6 จานเพาะต่อชุดการทดลอง) สำหรับจานควบคุมใส่น้ำกลั่นในจานเพาะ จานเพาะละ 3 มิลลิลิตร 6 จานเพาะ และแต่ละจานเพาะมีเมล็ดถั่วเขียว 10 เมล็ดต่อจาน
- บ่มจานเพาะไว้ในที่มืดระหว่างอุณหภูมิบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- บันทึกข้อมูลจำนวนเมล็ดที่งอกทั้งหมดต่อจาน และวัดความยาวของรากของเมล็ดที่งอกทั้งหมดต่อจาน แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาดัชนีการงอกของเมล็ด ตามสูตร

$$\text{ดัชนีการงอกของเมล็ด} = \frac{\mathbf{AxBx100}}{\mathbf{CxD}}$$

A = ร้อยละ ของเมล็ดที่งอกในจานเพาะที่เติมน้ำตัวอย่าง

B = ความยาวรากเฉลี่ยในจานเพาะที่เติมน้ำตัวอย่าง (เซนติเมตร)

C = ร้อยละ ของเมล็ดที่งอกในจานเพาะที่เติมน้ำกลั่น

D = ความยาวรากเฉลี่ยในจานเพาะที่เติมน้ำกลั่น (เซนติเมตร)

การรายงานผล

รายงานผลหน่วยเป็นร้อยละ

การสูญเสียน้ำหนัก

หลักการ

มวลวัสดุหมักสามารถถูกลดลงจากการถูกย่อยสลายจากกระบวนการทำปุ๋ยหมัก ฉะนั้น ปุ๋ยหมักสุดท้ายจึงสามารถมีน้ำหนักลดลงจากน้ำหนักวัสดุหมักเริ่มต้น

ขอบข่ายและวัตถุประสงค์

หาการสูญเสียน้ำหนักด้วยร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก

อุปกรณ์และสารเคมี

- เครื่องชั่งสปริง

วิธีการ

ชั่งวัสดุหมักเริ่มต้นตอนก่อนทำปุ๋ยหมักและชั่งปุ๋ยหมักสุดท้ายตอนหลังทำปุ๋ยหมักด้วยตราชั่งสปริง บันทึกค่าทั้ง 2 แบบไว้

การคำนวณ

กรณีมวลวัสดุหมักเริ่มต้นเท่ากันในทุกการทดลอง

การสูญเสียน้ำหนัก (กิโลกรัม) = มวลวัสดุหมักเริ่มต้น (กิโลกรัม) - มวลปุ๋ยหมักสุดท้าย (กิโลกรัม)

กรณีกรณีมวลวัสดุหมักเริ่มต้น ไม่ เท่ากันในทุกการทดลอง

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ)} = \frac{\text{มวลวัสดุหมักเริ่มต้น (กิโลกรัม)} - \text{มวลปุ๋ยหมักสุดท้าย (กิโลกรัม)}}{\text{มวลวัสดุหมักเริ่มต้น (กิโลกรัม)}} \times 100$$

การรายงานผล

รายงานผลเป็นหน่วยกิโลกรัม (กรณีมวลวัสดุหมักเริ่มต้นเท่ากันในทุกการทดลอง) และร้อยละ (กรณีมวลวัสดุหมักเริ่มต้น ไม่ เท่ากันในทุกการทดลอง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก-ข-ข้อมูลผลการวิเคราะห์ตัวแปรในวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ชี้แจง

VFW คือ เศษผักผลไม้ , LW คือ เศษใบจามจุรี , WW คือ เศษกิ่งไม้ และ MC คือ ปุ๋ยหมักสมบูรณ์ , X_1 X_2 X_3 และ X_{avg} หมายถึง วัตถุดิบใดหรือการทดลองใด (X) ที่ 1 2 3 และเฉลี่ยตามลำดับ , pH คือ พีเอช , T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) , OM คือ อินทรียวัตถุ (ร้อยละ) , C/N คือ อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน , EC คือ สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเซนติเมตร) , %MC คือ ความชื้นสะสม (ร้อยละ) , OC คือ คาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละของน้ำหนัก) , N คือ ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก) , P คือ ฟอสฟอรัส (ร้อยละของน้ำหนัก) , K คือ โพแทสเซียม (ร้อยละของน้ำหนัก) , GI คือ ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่วัดด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด (ร้อยละ) , W คือ น้ำหนัก (กิโลกรัม) , WL คือ การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) , AFP คือ ความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ) , BD คือ Bulking Density (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และ Particle Density (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

วัตถุดิบหมักและวัสดุหมักเริ่มต้นจะไม่มีการบันทึกค่า GI และ WL

ค่าตัวแปร N P และ K นั้นมาจากทางกรมพัฒนาที่ดินเป็นผู้วิเคราะห์ และรายงานผลออกมาเป็นค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำโดยไม่มีค่าจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำในรายงานผล และค่า GI นั้นมาจากการเฉลี่ย 10 ซ้ำ (10 เมล็ดต่อ 1 จานเพาะ) ในสูตรดังนี้

$$\text{ดัชนีการงอกของเมล็ด} = \frac{\mathbf{AxBx100}}{\mathbf{CxD}}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A = ร้อยละ ของเมล็ดที่งอกในจานเพาะที่เติมน้ำตัวอย่าง

B = ความยาวรากเฉลี่ยในจานเพาะที่เติมน้ำตัวอย่าง (เซนติเมตร)

C = ร้อยละ ของเมล็ดที่งอกในจานเพาะที่เติมน้ำกลั่น

D = ความยาวรากเฉลี่ยในจานเพาะที่เติมน้ำกลั่น (เซนติเมตร)

ฉะนั้น จึงไม่มีข้อมูลผลการวิเคราะห์ 3 ซ้ำสำหรับ N P K C/N และ GI

ซึ่งข้อมูลตัวแปรของวัตถุดิบหมัก วัสดุหมักเริ่มต้นและปุ๋ยหมักสุดท้าย ได้นำมาแสดงไว้ในตารางที่ ข-1 ถึงตารางที่ ข-25

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในวัตถุดิบหมัก

วัตถุดิบ	ตัวแปร															
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	BD	PD	AFP
VFW_1	5.51	29.9	57.58	-	0.263	62.40	33.40	-	-	-	-	0.892	-	516.25	1069.26	49.62
VFW_2	5.50	29.7	57.68	-	0.259	62.52	33.45	-	-	-	-	0.910	-	519.00	1077.53	49.57
VFW_3	5.52	29.8	57.66	-	0.257	65.46	33.44	-	-	-	-	0.910	-	520.25	1084.36	49.55
VFW_{avg}	5.51	29.8	57.64	13.70	0.259	63.46	33.43	2.44	0.94	2.05	-	0.904	-	518.50	1077.05	49.54
LW_1	7.10	32.2	55.50	-	0.616	32.62	32.19	-	-	-	-	0.099	-	246.00	296.14	51.97
LW_2	7.11	32.2	55.58	-	0.617	34.61	32.23	-	-	-	-	0.110	-	248.15	299.10	51.88
LW_3	7.09	32.1	55.48	-	0.600	33.66	32.18	-	-	-	-	0.103	-	247.80	302.35	52.30
LW_{avg}	7.10	32.2	55.52	18.61	0.611	33.64	32.20	1.73	0.59	0.85	-	0.104	-	247.32	299.18	52.05
WW_1	7.05	30.8	54.55	-	1.159	35.73	31.63	-	-	-	-	0.114	-	345.25	550.88	54.15
WW_2	7.09	31.0	56.50	-	1.150	33.75	32.77	-	-	-	-	0.105	-	329.50	554.36	56.40
WW_3	7.07	31.2	55.15	-	1.162	31.80	31.99	-	-	-	-	0.123	-	336.25	546.11	55.14
WW_{avg}	7.07	31.0	55.40	11.94	1.157	33.76	32.13	2.69	0.57	1.03	-	0.114	-	337.00	550.45	55.23
MC_1	6.45	30.4	35.47	-	0.650	40.75	20.56	-	-	-	-	0.498	-	610.00	880.95	35.60
MC_2	6.45	30.3	35.39	-	0.660	41.74	20.53	-	-	-	-	0.504	-	619.00	884.80	34.76
MC_3	6.48	30.5	35.34	-	0.661	42.67	20.50	-	-	-	-	0.514	-	607.00	881.75	35.93
MC_{avg}	6.46	30.4	35.40	12.00	0.657	41.72	20.53	2.95	0.60	0.36	-	0.504	-	612.00	882.50	35.43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในวัสดุหมักเริ่มต้นในชุดการทดลอง A

วัตถุดิบ	ตัวแปร															
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	BD	PD	AFP
A-1_1	6.55	34.0	55.08	-	1.614	61.35	31.95	-	-	-	-	0.382	-	500.50	915.24	48.01
A-1_2	6.57	34.0	55.14	-	1.589	62.28	31.98	-	-	-	-	0.414	-	490.70	917.34	49.07
A-1_3	6.56	33.9	54.98	-	1.597	60.06	31.89	-	-	-	-	0.416	-	501.30	919.83	48.03
A-1_{avg}	6.56	34.0	55.07	11.79	1.600	61.23	31.94	2.71	0.86	0.97	-	0.404	-	497.50	917.47	48.37
A-2_1	6.35	31.2	54.64	-	1.311	55.67	31.69	-	-	-	-	0.105	-	258.00	320.76	53.00
A-2_2	6.37	31.0	54.44	-	1.288	53.74	31.58	-	-	-	-	0.097	-	254.00	308.95	51.83
A-2_3	6.39	30.9	54.36	-	1.301	51.54	31.53	-	-	-	-	0.110	-	253.00	310.55	52.19
A-2_{avg}	6.37	31.0	54.48	12.93	1.300	53.65	31.60	2.46	0.74	0.55	-	0.104	-	255.00	313.42	52.11
A-3_1	6.67	31.0	54.87	-	1.064	50.39	31.82	-	-	-	-	0.123	-	346.00	471.11	49.80
A-3_2	6.65	30.9	54.80	-	1.047	54.35	31.78	-	-	-	-	0.105	-	342.00	471.69	50.42
A-3_3	6.64	31.0	54.94	-	1.069	52.58	31.86	-	-	-	-	0.114	-	344.00	477.41	50.48
A-3_{avg}	6.65	31.0	54.87	13.05	1.060	52.44	31.82	2.44	0.54	0.84	-	0.114	-	344.00	473.37	50.23
A-4_1	5.67	32.4	54.85	-	1.541	54.54	31.81	-	-	-	-	0.314	-	425.00	829.22	53.92
A-4_2	5.66	32.4	54.89	-	1.548	55.69	31.84	-	-	-	-	0.256	-	424.88	826.44	53.87
A-4_3	5.64	32.3	54.78	-	1.561	56.78	31.77	-	-	-	-	0.314	-	425.12	827.71	53.87
A-4_{avg}	5.66	32.4	54.84	12.93	1.550	55.67	31.81	2.46	0.66	1.57	-	0.304	-	425.00	827.79	53.89
A-5_1	5.81	32.2	54.95	-	1.938	52.62	31.87	-	-	-	-	0.381	-	343.66	598.68	56.35
A-5_2	5.81	32.2	54.85	-	1.951	54.75	31.81	-	-	-	-	0.394	-	343.09	601.48	56.54
A-5_3	5.83	32.5	54.90	-	1.931	53.82	31.84	-	-	-	-	0.377	-	344.50	598.55	56.25
A-5_{avg}	5.82	32.3	54.90	12.02	1.940	53.73	31.84	2.65	0.73	1.15	-	0.384	-	343.75	599.57	56.38

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในวัสดุหมักเริ่มต้นในชุดการทดลอง B

วัตถุดิบ	ตัวแปร															
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	BD	PD	AFP
B-1_1	5.71	28.2	44.57	-	1.500	76.89	28.85	-	-	-	-	0.344	-	436.25	863.40	53.54
B-1_2	5.72	28.4	44.63	-	1.507	78.92	25.89	-	-	-	-	0.361	-	437.35	860.15	53.34
B-1_3	5.70	28.3	44.48	-	1.523	74.77	25.80	-	-	-	-	0.345	-	438.90	860.95	53.20
B-1_{avg}	5.72	28.3	44.56	11.48	1.510	76.86	25.84	2.25	0.69	1.88	-	0.350	-	437.50	861.50	53.36
B-2_1	5.78	26.3	60.34	-	1.411	60.54	35.00	-	-	-	-	0.201	-	237.00	330.48	57.05
B-2_2	5.76	26.3	60.51	-	1.451	58.54	35.10	-	-	-	-	0.181	-	238.00	332.25	57.02
B-2_3	5.77	26.1	60.71	-	1.428	59.78	35.20	-	-	-	-	0.188	-	237.50	331.32	57.03
B-2_{avg}	5.77	26.2	60.52	19.61	1.430	59.62	35.10	1.79	0.30	0.82	-	0.190	-	237.50	331.35	57.04
B-3_1	6.49	29.0	44.87	-	1.099	60.68	26.04	-	-	-	-	0.245	-	311.00	532.00	57.90
B-3_2	6.51	29.1	44.85	-	1.105	57.81	26.01	-	-	-	-	0.248	-	313.75	530.57	57.46
B-3_3	6.50	29.1	45.05	-	1.196	57.92	26.10	-	-	-	-	0.257	-	312.75	530.43	57.59
B-3_{avg}	6.50	29.1	44.89	18.34	1.100	58.77	26.04	1.42	0.25	0.71	-	0.250	-	312.50	531.00	57.65
B-4_1	6.06	29.8	58.39	-	1.496	60.32	33.87	-	-	-	-	0.239	-	303.17	717.98	64.86
B-4_2	6.09	29.7	58.27	-	1.511	59.45	33.79	-	-	-	-	0.248	-	301.83	716.67	64.99
B-4_3	6.08	29.7	58.42	-	1.493	61.22	33.87	-	-	-	-	0.239	-	302.50	716.95	64.92
B-4_{avg}	6.08	29.7	58.36	17.53	1.500	60.33	33.84	1.93	0.20	0.97	-	0.242	-	302.50	717.20	64.92
B-5_1	6.06	27.7	63.05	-	1.885	62.66	36.57	-	-	-	-	0.272	-	344.50	581.45	55.57
B-5_2	6.07	27.8	63.09	-	1.869	61.65	36.59	-	-	-	-	0.278	-	342.25	583.15	55.93
B-5_3	6.08	27.7	62.92	-	1.859	60.61	36.49	-	-	-	-	0.275	-	344.50	582.30	55.60
B-5_{avg}	6.07	27.7	63.02	13.54	1.871	61.64	36.55	1.93	0.50	1.42	-	0.275	-	343.75	582.30	55.70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในวัสดุหมักเริ่มต้นในชุดการทดลอง C

วัตถุดิบ	ตัวแปร															
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	BD	PD	AFP
C-1_1	5.63	29.6	45.81	-	1.701	59.24	26.57	-	-	-	-	0.401	-	502.00	824.55	45.44
C-1_2	5.62	29.5	46.02	-	1.728	57.41	26.69	-	-	-	-	0.409	-	503.00	830.75	45.51
C-1_3	5.62	29.7	45.87	-	1.731	58.28	26.60	-	-	-	-	0.396	-	502.50	829.84	45.54
C-1_{avg}	5.62	29.6	45.90	14.16	1.720	58.31	26.62	1.88	0.52	1.63	-	0.402	-	502.50	828.38	45.43
C-2_1	5.93	29.4	44.98	-	0.664	55.60	26.09	-	-	-	-	0.191	-	252.00	527.31	65.72
C-2_2	5.95	29.5	45.02	-	0.686	56.71	26.11	-	-	-	-	0.210	-	251.00	529.66	65.94
C-2_3	5.94	29.5	45.09	-	0.681	54.58	26.15	-	-	-	-	0.199	-	247.00	523.25	66.25
C-2_{avg}	5.94	29.5	45.03	16.22	0.677	55.63	26.12	1.61	0.58	0.87	-	0.200	-	250.00	526.74	65.98
C-3_1	6.42	30.4	34.10	-	0.517	54.46	19.78	-	-	-	-	0.220	-	276.50	330.88	49.93
C-3_2	6.39	30.8	34.18	-	0.543	53.38	19.82	-	-	-	-	0.229	-	276.50	330.13	49.86
C-3_3	6.41	30.6	34.20	-	0.521	52.54	19.83	-	-	-	-	0.217	-	279.50	330.82	49.38
C-3_{avg}	6.40	30.6	34.16	14.83	0.527	53.46	19.81	1.75	0.26	0.93	-	0.222	-	277.50	330.61	49.67
C-4_1	5.72	30.4	45.75	-	1.592	56.59	26.54	-	-	-	-	0.314	-	390.00	815.26	57.40
C-4_2	5.73	30.5	45.85	-	1.601	58.71	26.58	-	-	-	-	0.321	-	392.00	813.35	57.13
C-4_3	5.75	30.5	46.10	-	1.637	57.83	26.74	-	-	-	-	0.301	-	388.00	814.26	57.59
C-4_{avg}	5.74	30.5	45.90	11.68	1.610	57.71	26.62	2.28	0.55	1.38	-	0.312	-	390.00	814.29	57.37
C-5_1	5.84	30.1	45.75	-	0.886	55.60	26.54	-	-	-	-	0.258	-	320.25	578.59	58.59
C-5_2	5.86	30.5	45.96	-	0.891	51.70	26.66	-	-	-	-	0.265	-	321.41	578.65	58.44
C-5_3	5.85	30.3	45.78	-	0.869	53.68	26.55	-	-	-	-	0.248	-	322.09	578.08	58.33
C-5_{avg}	5.85	30.3	45.83	13.49	0.882	53.66	26.58	1.97	0.34	0.99	-	0.257	-	321.25	578.44	58.47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในวัสดุหมักเริ่มต้นในชุดการทดลอง D

วัตถุดิบ	ตัวแปร															
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	BD	PD	AFP
D-1_1	5.70	30.1	62.40	-	1.140	59.26	36.19	-	-	-	-	0.454	-	538.15	937.81	44.66
D-1_2	5.71	30.2	62.49	-	1.121	63.38	36.24	-	-	-	-	0.421	-	539.08	942.35	44.68
D-1_3	5.71	30.1	62.34	-	1.129	61.56	36.16	-	-	-	-	0.418	-	539.02	940.26	44.63
D-1_{avg}	5.71	30.1	62.41	18.39	1.130	61.40	36.22	1.97	0.29	1.71	-	0.431	-	538.75	940.14	44.66
D-2_1	6.20	30.4	61.11	-	0.594	50.51	35.44	-	-	-	-	0.209	-	260.75	417.22	59.31
D-2_2	6.18	30.0	61.25	-	0.584	51.78	35.53	-	-	-	-	0.205	-	261.50	415.87	59.11
D-2_3	6.20	30.3	61.42	-	0.610	52.96	35.62	-	-	-	-	0.189	-	261.50	416.80	59.17
D-2_{avg}	6.19	30.2	61.26	30.90	0.596	51.75	35.53	1.15	0.02	0.74	-	0.201	-	261.25	416.63	59.20
D-3_1	6.40	31.3	57.96	-	1.361	51.70	33.62	-	-	-	-	0.298	-	353.50	463.41	48.21
D-3_2	6.40	31.1	58.01	-	1.378	51.15	33.65	-	-	-	-	0.280	-	353.50	465.53	48.35
D-3_3	6.42	31.5	58.21	-	1.401	49.85	33.98	-	-	-	-	0.271	-	354.25	466.12	48.28
D-3_{avg}	6.41	31.3	58.21	16.39	1.380	50.90	33.76	2.06	0.03	0.92	-	0.283	-	353.75	465.02	48.28
D-4_1	5.64	31.7	53.45	-	1.142	52.39	31.00	-	-	-	-	0.330	-	416.00	688.22	50.79
D-4_2	5.66	31.6	53.69	-	1.154	51.14	31.15	-	-	-	-	0.312	-	414.00	687.45	51.00
D-4_3	5.65	31.6	53.45	-	1.184	52.65	31.00	-	-	-	-	0.354	-	415.00	687.82	50.89
D-4_{avg}	5.65	31.6	53.53	15.37	1.160	52.06	31.05	2.02	0.04	1.04	-	0.332	-	415.00	687.83	50.89
D-5_1	5.64	31.6	54.06	-	1.084	55.71	31.35	-	-	-	-	0.291	-	378.00	755.13	57.23
D-5_2	5.64	31.6	54.10	-	1.120	54.41	31.38	-	-	-	-	0.314	-	377.25	753.44	57.27
D-5_3	5.66	31.5	54.56	-	1.096	53.14	31.64	-	-	-	-	0.301	-	377.25	753.88	57.28
D-5_{avg}	5.65	31.6	54.24	18.95	1.100	54.42	31.46	1.66	0.04	0.99	-	0.302	-	377.50	754.15	57.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
1	1	7.22	6.48	6.71	6.68	6.85
	2	7.21	6.44	6.71	6.69	6.86
	3	7.21	6.46	6.70	6.70	6.85
	เฉลี่ย	7.21	6.46	6.71	6.70	6.85
2	1	7.46	7.80	7.33	7.14	7.28
	2	7.46	7.79	7.33	7.15	7.28
	3	7.48	7.78	7.33	7.13	7.30
	เฉลี่ย	7.47	7.79	7.33	7.14	7.29
3	1	7.61	6.96	6.74	7.26	7.41
	2	7.62	6.98	6.75	7.27	7.41
	3	7.62	6.98	6.76	7.29	7.38
	เฉลี่ย	7.62	6.97	6.75	7.27	7.40
4	1	7.44	7.02	6.87	7.14	7.24
	2	7.43	7.01	6.87	7.15	7.23
	3	7.45	7.02	6.87	7.13	7.23
	เฉลี่ย	7.44	7.02	6.87	7.14	7.23
5	1	6.17	6.75	6.54	7.08	7.20
	2	6.15	6.77	6.54	7.10	7.21
	3	6.14	6.76	6.53	7.09	7.19
	เฉลี่ย	6.15	6.76	6.54	7.09	7.20
6	1	7.48	7.91	6.91	7.24	7.41
	2	7.48	7.92	6.90	7.25	7.41
	3	7.47	7.91	6.90	7.25	7.40
	เฉลี่ย	7.48	7.91	6.90	7.25	7.41
7	1	7.26	7.55	7.34	7.56	7.57
	2	7.24	7.56	7.33	7.56	7.58
	3	7.25	7.57	7.33	7.55	7.57
	เฉลี่ย	7.25	7.56	7.33	7.56	7.57

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
8	1	6.43	7.05	6.68	7.20	7.27
	2	6.43	7.07	6.68	7.19	7.28
	3	6.42	7.09	6.68	7.18	7.28
	เฉลี่ย	6.43	7.07	6.68	7.19	7.28
9	1	8.17	7.44	7.10	7.60	7.64
	2	8.16	7.43	7.12	7.60	7.65
	3	8.18	7.44	7.13	7.63	7.65
	เฉลี่ย	8.17	7.44	7.12	7.61	7.65
10	1	8.37	7.54	7.36	7.71	7.78
	2	8.39	7.53	7.37	7.70	7.79
	3	8.38	7.55	7.37	7.70	7.79
	เฉลี่ย	8.38	7.54	7.37	7.70	7.79
11	1	7.67	7.81	6.82	7.07	7.29
	2	7.66	7.80	6.82	7.05	7.27
	3	7.66	7.81	6.80	7.06	7.26
	เฉลี่ย	7.66	7.81	6.81	7.06	7.27
12	1	9.02	8.07	7.60	7.82	7.90
	2	9.03	8.06	7.59	7.80	7.91
	3	9.03	8.07	7.59	7.81	7.91
	เฉลี่ย	9.03	8.07	7.59	7.81	7.91
13	1	8.70	8.13	7.74	7.70	7.58
	2	8.69	8.10	7.73	7.72	7.56
	3	8.68	8.11	7.75	7.70	7.55
	เฉลี่ย	8.68	8.11	7.74	7.71	7.56
14	1	8.90	8.30	7.64	7.61	7.71
	2	8.90	8.31	7.64	7.60	7.72
	3	8.88	8.31	7.64	7.60	7.70
	เฉลี่ย	8.89	8.31	7.64	7.60	7.71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
15	1	9.07	8.30	7.85	7.90	7.83
	2	9.09	8.30	7.87	7.91	7.81
	3	9.08	8.28	7.86	7.92	7.82
	เฉลี่ย	9.08	8.29	7.86	7.91	7.82
16	1	8.97	8.16	7.75	7.65	7.41
	2	8.98	8.15	7.75	7.66	7.40
	3	8.98	8.16	7.74	7.67	7.40
	เฉลี่ย	8.98	8.16	7.75	7.66	7.40
17	1	8.85	8.74	8.25	8.27	8.20
	2	8.85	8.72	8.24	8.28	8.20
	3	8.84	8.73	8.25	8.30	8.18
	เฉลี่ย	8.85	8.73	8.25	8.28	8.19
18	1	8.91	8.61	8.31	8.36	8.10
	2	8.90	8.60	8.30	8.34	8.13
	3	8.89	8.60	8.31	8.35	8.12
	เฉลี่ย	8.90	8.60	8.31	8.35	8.12
19	1	8.92	8.20	7.83	7.87	7.89
	2	8.96	8.22	7.83	7.85	7.88
	3	8.94	8.21	7.83	7.84	7.90
	เฉลี่ย	8.94	8.21	7.83	7.85	7.89
20	1	8.95	8.97	7.63	7.92	7.96
	2	8.93	8.98	7.64	7.92	7.97
	3	8.94	8.99	7.63	7.91	7.97
	เฉลี่ย	8.94	8.98	7.63	7.92	7.97

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	สภาพแวดล้อม
1	1	33.2	31.1	30.5	32.2	31.9	31.0
	2	33.1	31.1	30.3	32.0	31.8	31.0
	3	33.1	31.0	30.4	32.0	31.9	30.9
	เฉลี่ย	33.1	31.1	30.3	32.1	31.9	31.0
2	1	32.9	32.2	31.0	32.5	33.1	31.6
	2	32.7	32.1	31.4	32.5	33.0	31.5
	3	32.8	32.0	31.2	32.7	33.2	31.5
	เฉลี่ย	32.8	32.1	31.2	32.6	33.1	31.5
3	1	31.4	30.1	30.4	32.5	32.1	30.6
	2	31.2	30.2	30.5	32.3	32.2	30.7
	3	31.3	30.1	30.5	32.1	31.9	30.8
	เฉลี่ย	31.3	30.1	30.5	32.3	32.1	30.7
4	1	29.8	30.1	31.4	31.6	32.0	31.0
	2	29.7	30.1	31.2	31.5	32.1	31.3
	3	29.9	30.0	31.3	31.6	32.0	30.9
	เฉลี่ย	29.8	30.1	31.3	31.6	32.0	31
5	1	30.6	31.2	30.9	31.9	32.0	30.7
	2	30.6	31.0	30.8	31.8	32.1	30.8
	3	30.8	31.1	30.9	31.7	32.1	30.9
	เฉลี่ย	30.7	31.1	30.9	31.8	32.1	30.8
6	1	29.7	29.6	30.3	30.8	30.7	30.1
	2	29.8	29.5	30.3	30.7	30.8	30.0
	3	29.8	29.6	30.2	30.8	30.8	30.2
	เฉลี่ย	29.8	29.6	30.3	30.8	30.8	30.1
7	1	29.5	29.6	29.7	28.9	30.4	30.6
	2	29.4	29.7	30.1	29.1	30.4	30.5
	3	29.7	29.6	29.9	29.0	30.5	30.6
	เฉลี่ย	29.5	29.6	29.9	29.0	30.4	30.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	สภาพแวดล้อม
8	1	29.1	30.5	29.7	31.2	31.7	31.2
	2	29.3	30.9	29.5	31.3	31.5	31.1
	3	29.2	30.7	29.3	31.5	31.5	31.1
	เฉลี่ย	29.3	30.7	29.5	31.3	31.6	31.1
9	1	30.4	30.2	30.5	30.8	31.1	30.9
	2	30.4	30.2	30.6	30.8	31.2	30.8
	3	30.5	30.4	30.6	30.8	31.1	31.0
	เฉลี่ย	30.4	30.3	30.6	30.8	31.1	30.9
10	1	29.4	30.1	30.5	30.7	30.3	30.1
	2	29.5	30.0	30.4	30.8	30.3	30.2
	3	29.3	30.0	30.5	30.7	30.2	30.3
	เฉลี่ย	29.4	30.0	30.5	30.7	30.3	30.2
11	1	29.8	30.7	30.7	31.0	31.1	30.8
	2	29.7	30.7	30.8	31.0	31.2	30.7
	3	29.8	30.8	30.7	31.1	31.0	30.8
	เฉลี่ย	29.8	30.7	30.7	31.0	31.1	30.8
12	1	29.7	29.8	30.1	30.2	30.4	30.4
	2	29.5	29.7	30.4	30.1	30.4	30.3
	3	29.5	29.9	30.3	30.2	30.3	30.2
	เฉลี่ย	29.6	29.8	30.3	30.2	30.4	30.3
13	1	29.1	29.8	30.1	30.0	30.3	30.2
	2	29.1	29.8	30.0	30.0	30.4	30.1
	3	28.9	29.7	30.1	30.1	30.3	30.1
	เฉลี่ย	29.0	29.8	30.1	30.0	30.3	30.1
14	1	29.0	29.7	29.4	29.4	29.7	29.7
	2	29.1	29.5	29.5	29.8	29.7	29.6
	3	29.1	29.6	29.5	29.6	30.2	29.6
	เฉลี่ย	29.1	29.6	29.5	29.6	29.9	29.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	สภาพแวดล้อม
15	1	28.9	29.2	29.6	29.3	29.6	29.5
	2	28.8	29.3	29.7	29.3	29.7	29.6
	3	28.9	29.3	29.6	29.2	29.5	29.6
	เฉลี่ย	28.9	29.3	29.6	29.3	29.6	29.6
16	1	29.7	30.1	30.3	30.4	30.7	30.6
	2	29.7	30.2	30.3	30.0	30.4	30.5
	3	29.8	30.1	30.3	30.2	30.5	30.6
	เฉลี่ย	29.7	30.1	30.3	30.2	30.5	30.6
17	1	29.0	29.8	29.9	29.6	30.1	30.1
	2	28.9	29.7	29.8	29.5	30.0	30.1
	3	29.0	29.8	29.8	29.6	30.0	30.1
	เฉลี่ย	29.0	29.8	29.8	29.6	30.0	30.1
18	1	29.5	30.1	30.3	30.1	30.1	30.4
	2	29.7	30.0	30.4	30.0	30.0	30.5
	3	29.8	30.0	30.3	29.9	30.2	30.4
	เฉลี่ย	29.7	30.0	30.3	30.0	30.1	30.4
19	1	30.2	30.1	30.4	30.1	30.2	30.2
	2	30.0	30.0	30.2	29.9	30.3	30.2
	3	30.0	30.1	30.3	30.0	30.3	30.3
	เฉลี่ย	30.1	30.1	30.3	30.0	30.3	30.2
20	1	30.1	30.3	30.3	30.1	30.2	30.4
	2	30.1	30.4	30.4	30.2	30.3	30.5
	3	30.0	30.2	30.3	30.2	30.3	30.6
	เฉลี่ย	30.1	30.3	30.3	30.2	30.3	30.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
1	1	74.4	52.3	52.2	62.0	59.1
	2	72.2	50.2	54.0	63.1	57.0
	3	73.3	51.0	50.0	61.3	58.0
	เฉลี่ย	73.3	51.2	52.1	62.0	58.0
2	1	73.7	61.7	51.6	62.6	62.4
	2	77.9	62.8	49.3	64.7	63.5
	3	75.5	63.7	50.5	66.7	61.5
	เฉลี่ย	75.7	62.7	50.5	64.7	62.5
3	1	74.9	56.7	54.1	69.0	64.6
	2	73.8	55.8	56.2	69.0	66.4
	3	75.9	57.8	55.2	69.1	65.5
	เฉลี่ย	74.9	55.8	55.2	69.0	65.5
4	1	76.8	56.7	50.7	68.5	64.3
	2	78.7	57.9	52.6	66.5	67.4
	3	77.9	58.0	51.7	67.4	67.3
	เฉลี่ย	77.8	57.9	51.7	67.5	66.3
5	1	79.5	52.0	55.7	64.7	68.3
	2	79.1	54.2	54.8	64.6	69.0
	3	78.4	53.2	53.6	64.7	67.0
	เฉลี่ย	79.0	53.1	54.7	64.7	68.1
6	1	77.1	52.5	50.8	50.7	67.8
	2	77.3	51.2	50.6	55.8	67.8
	3	76.9	50.2	50.7	53.8	67.7
	เฉลี่ย	77.1	51.3	50.7	53.8	67.8
7	1	78.2	58.2	51.5	56.1	64.8
	2	79.0	58.1	51.5	56.1	63.7
	3	78.9	58.2	51.4	56.2	62.7
	เฉลี่ย	78.7	58.2	51.5	56.1	64.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
8	1	74.7	54.9	51.3	71.5	69.1
	2	75.8	56.7	52.3	70.4	70.2
	3	73.8	55.7	50.1	72.5	68.1
	เฉลี่ย	74.8	55.8	51.2	71.5	69.1
9	1	73.0	51.4	51.6	74.7	67.3
	2	74.5	53.3	51.5	75.0	69.3
	3	74.8	52.4	51.7	74.7	68.2
	เฉลี่ย	74.1	52.4	51.6	74.8	68.3
10	1	72.4	52.4	51.5	67.4	62.4
	2	72.5	52.3	51.5	67.6	62.5
	3	72.3	52.4	51.4	67.5	62.5
	เฉลี่ย	72.4	52.4	51.5	67.5	62.5
11	1	67.3	55.0	51.8	72.9	71.3
	2	67.3	54.9	51.6	73.0	71.2
	3	67.2	54.8	51.4	72.9	71.3
	เฉลี่ย	67.3	54.9	51.6	72.9	71.3
12	1	64.8	51.3	52.1	74.5	68.5
	2	64.8	51.5	52.2	74.5	68.5
	3	64.7	51.2	52.1	74.4	68.4
	เฉลี่ย	64.8	51.3	52.1	74.5	68.5
13	1	69.9	52.2	51.4	69.2	65.5
	2	70.1	52.1	51.4	69.1	65.9
	3	70.1	52.1	51.5	69.0	65.7
	เฉลี่ย	70.0	52.1	51.4	69.1	65.7
14	1	69.9	55.4	53.1	72.0	69.8
	2	69.6	55.6	53.0	71.8	69.8
	3	69.4	55.5	53.0	71.8	69.7
	เฉลี่ย	69.6	55.5	53.0	71.9	69.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
15	1	66.6	51.8	50.6	73.2	64.8
	2	66.4	51.9	50.5	73.1	64.7
	3	66.8	51.7	50.7	73.2	64.8
	เฉลี่ย	66.6	51.9	50.6	73.2	64.8
16	1	57.4	55.5	52.0	68.9	67.7
	2	57.3	55.4	51.9	68.9	67.6
	3	57.4	55.3	51.9	69.0	67.7
	เฉลี่ย	57.4	55.4	51.9	68.9	67.7
17	1	68.3	58.2	50.4	67.9	70.8
	2	68.5	58.1	50.7	67.8	70.5
	3	68.4	58.0	50.4	67.8	70.7
	เฉลี่ย	68.4	58.1	50.5	67.8	70.7
18	1	66.7	58.3	50.2	74.4	68.1
	2	66.6	58.5	50.1	74.6	68.3
	3	66.6	58.4	50.2	74.2	68.2
	เฉลี่ย	66.6	58.4	50.2	74.4	68.2
19	1	71.2	59.4	53.8	71.3	69.1
	2	71.2	59.5	53.7	71.3	69.2
	3	71.4	59.6	53.8	71.2	69.2
	เฉลี่ย	71.3	59.5	53.8	71.3	69.2
20	1	70.9	61.6	51.7	70.0	72.1
	2	70.7	61.4	51.8	70.1	72.1
	3	70.8	61.3	51.7	70.0	72.0
	เฉลี่ย	70.8	61.4	51.7	70.0	72.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
1	1	1.614	1.305	1.078	1.577	1.947
	2	1.611	1.314	1.046	1.545	1.931
	3	1.575	1.281	1.056	1.528	1.942
	เฉลี่ย	1.600	1.300	1.060	1.550	1.940
2	1	0.958	0.995	0.720	1.967	1.767
	2	0.951	0.978	0.725	2.014	1.775
	3	0.968	1.000	0.748	2.019	1.768
	เฉลี่ย	0.959	0.991	0.731	2.000	1.770
3	1	3.905	0.861	0.614	1.773	1.230
	2	3.894	0.816	0.590	1.749	1.251
	3	3.901	0.840	0.584	1.758	1.239
	เฉลี่ย	3.900	0.841	0.596	1.760	1.240
4	1	2.657	0.905	0.664	0.755	0.809
	2	2.638	0.924	0.669	0.760	0.817
	3	2.649	0.913	0.680	0.750	0.807
	เฉลี่ย	2.648	0.914	0.671	0.755	0.811
5	1	4.154	1.528	0.751	1.441	1.216
	2	4.136	1.541	0.737	1.450	1.225
	3	4.130	1.521	0.744	1.459	1.219
	เฉลี่ย	4.140	1.530	0.744	1.450	1.220
6	1	6.497	0.830	0.619	1.885	1.670
	2	6.487	0.845	0.628	1.901	1.681
	3	6.516	0.827	0.601	1.884	1.659
	เฉลี่ย	6.500	0.834	0.616	1.890	1.670
7	1	7.110	0.544	0.498	0.999	1.343
	2	7.098	0.598	0.514	0.971	1.328
	3	7.092	0.571	0.497	1.003	1.349
	เฉลี่ย	7.100	0.571	0.503	0.991	1.340

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
8	1	5.215	0.458	0.498	1.360	1.670
	2	5.186	0.441	0.488	1.345	1.647
	3	5.199	0.469	0.508	1.315	1.663
	เฉลี่ย	5.200	0.456	0.498	1.340	1.660
9	1	3.605	0.569	0.428	1.925	1.885
	2	3.614	0.542	0.407	1.906	1.868
	3	3.581	0.554	0.401	1.899	1.857
	เฉลี่ย	3.600	0.555	0.412	1.910	1.870
10	1	4.109	0.681	0.589	1.634	2.141
	2	4.102	0.684	0.577	1.647	2.152
	3	4.098	0.669	0.595	1.639	2.157
	เฉลี่ย	4.103	0.678	0.587	1.640	2.150
11	1	6.775	0.780	0.406	1.843	1.760
	2	6.780	0.794	0.438	1.854	1.748
	3	6.809	0.769	0.425	1.853	1.772
	เฉลี่ย	6.788	0.781	0.423	1.850	1.760
12	1	7.070	0.826	0.446	1.698	1.239
	2	7.240	0.800	0.426	1.704	1.234
	3	7.050	0.819	0.426	1.728	1.227
	เฉลี่ย	7.120	0.815	0.430	1.710	1.230
13	1	5.308	0.628	0.468	1.105	1.547
	2	5.322	0.603	0.478	1.098	1.531
	3	5.300	0.605	0.494	1.127	1.572
	เฉลี่ย	5.310	0.612	0.480	1.110	1.550
14	1	4.811	0.526	0.496	1.636	1.449
	2	4.817	0.511	0.499	1.657	1.442
	3	4.802	0.538	0.478	1.627	1.459
	เฉลี่ย	4.810	0.525	0.491	1.640	1.450

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง A (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
15	1	2.597	0.518	0.508	0.909	1.654
	2	2.628	0.506	0.525	0.918	1.669
	3	2.605	0.509	0.503	0.930	1.657
	เฉลี่ย	2.610	0.511	0.512	0.919	1.660
16	1	5.102	0.477	0.406	1.433	1.551
	2	5.138	0.502	0.431	1.469	1.515
	3	5.121	0.515	0.408	1.448	1.524
	เฉลี่ย	5.120	0.498	0.415	1.450	1.530
17	1	4.220	0.531	0.454	1.236	1.701
	2	4.204	0.517	0.448	1.258	1.736
	3	4.236	0.521	0.439	1.226	1.723
	เฉลี่ย	4.220	0.523	0.447	1.240	1.720
18	1	3.128	0.620	0.508	1.535	1.334
	2	3.121	0.649	0.487	1.510	1.301
	3	3.111	0.627	0.475	1.545	1.325
	เฉลี่ย	3.120	0.632	0.490	1.530	1.320
19	1	1.491	0.521	0.489	1.896	0.968
	2	1.544	0.487	0.500	1.875	0.950
	3	1.555	0.501	0.472	1.869	0.935
	เฉลี่ย	1.530	0.503	0.487	1.880	0.951
20	1	0.638	0.381	0.496	1.141	0.580
	2	0.646	0.374	0.498	1.115	0.574
	3	0.636	0.397	0.512	1.134	0.592
	เฉลี่ย	0.640	0.384	0.502	1.130	0.582

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
1	1	6.60	6.13	6.57	6.24	7.00
	2	6.60	6.13	6.58	6.24	7.01
	3	6.58	6.12	6.57	6.26	7.01
	เฉลี่ย	6.59	6.13	6.57	6.25	7.01
2	1	7.65	6.86	7.20	7.28	7.61
	2	7.66	6.85	7.19	7.28	7.60
	3	7.66	6.85	7.18	7.28	7.60
	เฉลี่ย	7.66	6.85	7.19	7.28	7.60
3	1	7.71	6.98	7.20	7.51	7.85
	2	7.70	6.99	7.17	7.51	7.85
	3	7.71	6.98	7.18	7.49	7.85
	เฉลี่ย	7.71	6.98	7.18	7.50	7.85
4	1	8.18	6.82	7.16	7.00	7.73
	2	8.18	6.83	7.17	7.03	7.75
	3	8.17	6.84	7.17	7.04	7.76
	เฉลี่ย	8.18	6.83	7.17	7.02	7.75
5	1	7.02	7.20	7.37	7.80	7.54
	2	7.02	7.20	7.36	7.79	7.55
	3	7.01	7.21	7.38	7.79	7.54
	เฉลี่ย	7.02	7.20	7.37	7.79	7.54
6	1	7.3	7.24	7.05	7.52	7.98
	2	7.3	7.23	7.05	7.53	7.99
	3	7.2	7.24	7.04	7.54	7.99
	เฉลี่ย	7.3	7.24	7.05	7.53	7.99
7	1	7.88	7.33	7.39	7.73	7.43
	2	7.88	7.33	7.37	7.72	7.43
	3	7.87	7.34	7.38	7.72	7.43
	เฉลี่ย	7.88	7.33	7.38	7.72	7.43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
8	1	7.24	7.42	7.44	7.91	7.95
	2	7.25	7.40	7.45	7.90	7.94
	3	7.24	7.40	7.45	7.89	7.95
	เฉลี่ย	7.24	7.41	7.45	7.90	7.95
9	1	7.75	7.81	7.85	8.18	8.22
	2	7.76	7.80	7.84	8.18	8.21
	3	7.76	7.80	7.85	8.19	8.22
	เฉลี่ย	7.76	7.80	7.85	8.18	8.22
10	1	8.19	7.84	7.56	7.69	7.95
	2	8.18	7.83	7.56	7.68	7.94
	3	8.20	7.84	7.56	7.70	7.95
	เฉลี่ย	8.19	7.84	7.56	7.69	7.95
11	1	7.48	7.47	7.42	8.02	8.11
	2	7.48	7.48	7.40	8.04	8.12
	3	7.47	7.47	7.41	8.02	8.12
	เฉลี่ย	7.48	7.47	7.41	8.03	8.12
12	1	7.95	8.22	8.00	8.40	8.32
	2	7.95	8.21	8.00	8.40	8.31
	3	7.94	8.22	8.01	8.39	8.32
	เฉลี่ย	7.95	8.22	8.00	8.40	8.32
13	1	8.78	7.78	7.69	8.03	8.14
	2	8.77	7.80	7.68	8.02	8.15
	3	8.79	7.80	7.70	8.03	8.15
	เฉลี่ย	8.78	7.79	7.69	8.03	8.15
14	1	7.83	7.85	7.67	8.13	8.23
	2	7.83	7.84	7.68	8.14	8.23
	3	7.82	7.85	7.68	8.14	8.22
	เฉลี่ย	7.83	7.85	7.68	8.14	8.23

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
15	1	8.41	7.78	7.53	8.27	8.21
	2	8.40	7.79	7.53	8.28	8.20
	3	8.41	7.79	7.53	8.29	8.21
	เฉลี่ย	8.41	7.79	7.53	8.28	8.21
16	1	8.64	7.99	7.77	8.00	8.11
	2	8.65	7.98	7.78	8.00	8.11
	3	8.65	7.80	7.78	8.00	8.10
	เฉลี่ย	8.65	7.99	7.78	8.00	8.11
17	1	8.81	8.14	7.92	8.23	8.04
	2	8.80	8.14	7.92	8.22	8.05
	3	8.82	8.13	7.93	8.22	8.06
	เฉลี่ย	8.80	8.14	7.92	8.22	8.05
18	1	8.95	7.87	7.66	8.41	8.26
	2	8.94	7.87	7.66	8.40	8.26
	3	8.95	7.86	7.65	8.40	8.25
	เฉลี่ย	8.95	7.87	7.66	8.4	8.26
19	1	8.76	7.80	7.80	8.03	7.94
	2	8.74	7.99	7.80	8.04	7.94
	3	8.77	7.99	7.77	8.04	7.93
	เฉลี่ย	8.76	7.99	7.79	8.04	7.94
20	1	8.85	8.15	7.89	8.20	8.16
	2	8.85	8.14	7.90	8.20	8.16
	3	8.84	8.15	7.89	8.21	8.16
	เฉลี่ย	8.85	8.15	7.89	8.20	8.16

สถาบันวิทยบริการ
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	สภาพแวดล้อม
1	1	33.1	31.1	30.4	32.2	31.9	31.0
	2	33.1	31.2	30.3	32.0	31.9	31.0
	3	33.0	31.1	30.2	32.1	31.8	31.1
	เฉลี่ย	33.1	31.1	30.3	32.1	31.9	31.0
2	1	32.9	32.1	31.1	32.7	33.1	31.6
	2	32.7	32.0	31.2	32.6	33.2	31.4
	3	32.7	32.1	31.2	32.5	33.1	31.5
	เฉลี่ย	32.8	32.1	31.2	32.6	33.1	31.5
3	1	31.2	30.0	30.5	32.3	32.1	30.7
	2	31.4	30.1	30.4	32.3	32.1	30.7
	3	31.2	30.1	30.5	32.2	32.0	30.6
	เฉลี่ย	31.3	30.1	30.5	32.3	32.1	30.7
4	1	29.8	30.0	31.2	31.6	32.1	30.9
	2	29.8	30.3	31.3	31.6	32.0	31.0
	3	29.7	30.0	31.3	31.7	32.0	31.1
	เฉลี่ย	29.8	30.1	31.3	31.6	32.0	31.0
5	1	30.7	31.1	30.9	31.9	32.0	30.8
	2	30.6	31.1	30.9	31.7	32.1	30.8
	3	30.7	31.0	30.9	31.7	32.1	30.8
	เฉลี่ย	30.7	31.1	30.9	31.8	32.1	30.8
6	1	29.8	29.5	30.3	30.8	30.8	30.1
	2	29.7	29.6	30.3	30.8	30.9	30.1
	3	29.9	29.6	30.2	30.7	30.8	30.2
	เฉลี่ย	29.8	29.6	30.3	30.8	30.8	30.1
7	1	29.4	29.6	30.0	29.1	30.4	30.6
	2	29.5	29.6	29.9	29.0	30.4	30.5
	3	29.6	29.5	29.9	29.0	30.5	30.6
	เฉลี่ย	29.5	29.6	29.9	29.0	30.4	30.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	สภาพแวดล้อม
8	1	29.3	30.7	29.4	31.3	31.6	31.1
	2	29.2	30.7	29.5	31.1	31.5	31.1
	3	29.3	30.6	29.6	31.5	31.6	31.0
	เฉลี่ย	29.3	30.7	29.5	31.3	31.6	31.1
9	1	28.0	28.4	28.2	28.1	28.1	29.0
	2	28.0	28.4	28.3	28.2	28.0	29.1
	3	28.0	28.5	28.2	28.1	28.2	29.1
	เฉลี่ย	28.0	28.4	28.2	28.1	28.1	29.1
10	1	28.2	28.7	28.9	28.9	28.2	29.3
	2	28.3	28.6	28.8	28.8	28.3	29.3
	3	28.3	28.7	28.7	28.9	28.4	29.5
	เฉลี่ย	28.3	28.7	28.9	28.9	28.3	29.4
11	1	29.2	29.6	29.3	29.1	28.8	30.0
	2	29.2	29.5	29.3	29.1	28.9	30.1
	3	29.1	29.4	29.2	29.3	28.8	30.0
	เฉลี่ย	29.2	29.5	29.3	29.2	28.8	30.0
12	1	29.5	29.9	29.9	30.0	29.7	30.5
	2	29.5	29.9	29.7	29.8	29.5	30.6
	3	29.4	29.8	29.7	29.6	29.5	30.5
	เฉลี่ย	29.5	29.9	29.8	29.8	29.6	30.5
13	1	30.1	31.3	30.7	31.2	30.4	31.0
	2	30.2	31.3	30.6	31.0	30.6	31.1
	3	30.0	31.2	30.5	31.0	30.8	31.1
	เฉลี่ย	30.1	31.3	30.6	31.1	30.6	31.1
14	1	30.5	30.8	30.9	30.5	30.5	31.5
	2	30.5	30.7	30.8	30.7	30.2	31.5
	3	30.4	30.8	30.8	30.6	30.2	31.4
	เฉลี่ย	30.5	30.8	30.8	30.6	30.3	31.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	สภาพแวดล้อม
15	1	30.8	30.9	30.9	31.0	31.1	31.9
	2	30.8	30.9	30.8	31.0	31.1	31.9
	3	30.7	31.0	30.9	31.0	31.2	31.6
	เฉลี่ย	30.8	30.9	30.9	31.0	31.1	31.8
16	1	30.9	31.3	31.5	31.6	31.0	32.1
	2	30.9	31.2	31.6	31.7	31.0	32.0
	3	30.8	31.3	31.4	31.6	31.1	32.0
	เฉลี่ย	30.9	31.3	31.5	31.6	31.0	32.0
17	1	31.1	31.1	31.4	31.1	30.6	31.9
	2	31.1	31.2	31.5	31.0	30.7	31.9
	3	31.0	31.1	31.6	30.9	30.7	32.0
	เฉลี่ย	31.1	31.1	31.5	31.0	30.7	31.9
18	1	30.8	31.0	30.9	30.9	30.8	31.9
	2	30.8	31.1	30.5	30.8	30.8	31.9
	3	30.7	31.0	30.7	30.8	30.7	31.9
	เฉลี่ย	30.8	31.0	30.7	30.8	30.8	31.9
19	1	31.0	31.3	30.7	31.4	31.0	31.7
	2	31.0	31.3	30.9	31.5	31.0	31.8
	3	31.1	31.2	30.8	31.4	31.0	31.5
	เฉลี่ย	31.0	31.3	30.9	31.4	31.0	31.7
20	1	31.1	31.5	31.5	30.7	30.7	31.8
	2	31.0	31.5	31.3	30.8	30.6	31.8
	3	31.1	31.4	31.6	30.8	30.7	31.9
	เฉลี่ย	31.1	31.5	31.5	30.8	30.7	31.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
1	1	72.5	61.6	62.3	66.9	71.3
	2	70.9	60.7	61.7	68.8	72.3
	3	72.9	59.7	62.3	67.8	70.2
	เฉลี่ย	72.1	60.7	62.1	67.8	71.3
2	1	70.2	59.6	59.2	70.7	71.5
	2	70.2	59.5	59.4	68.6	71.5
	3	70.3	59.6	59.3	69.7	71.4
	เฉลี่ย	70.2	59.6	59.3	69.7	71.5
3	1	71.8	58.4	61.7	68.8	72.3
	2	71.8	60.5	61.8	67.7	72.3
	3	71.9	59.4	61.8	69.9	72.3
	เฉลี่ย	71.8	59.4	61.8	68.8	72.3
4	1	72.4	60.6	62.3	68.3	72.5
	2	73.5	62.2	62.4	67.9	70.6
	3	71.4	60.2	62.4	68.4	71.6
	เฉลี่ย	72.4	61.2	62.4	68.2	71.6
5	1	72.3	60.6	59.4	70.8	72.1
	2	74.2	58.7	59.5	70.7	72.0
	3	73.2	59.6	59.4	70.8	72.0
	เฉลี่ย	73.2	59.6	59.4	70.8	72.0
6	1	73.6	58.3	61.3	69.7	71.0
	2	73.6	58.9	60.8	69.9	73.4
	3	73.5	58.6	61.2	69.8	72.2
	เฉลี่ย	73.6	58.6	61.1	69.8	72.2
7	1	72.3	58.5	59.2	67.8	71.1
	2	72.8	60.6	59.8	67.8	71.2
	3	74.2	59.7	60.4	67.8	70.7
	เฉลี่ย	73.1	59.6	59.8	67.8	71.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
8	1	73.2	58.0	59.2	69.2	69.5
	2	74.1	58.1	58.4	68.5	71.4
	3	75.0	57.9	59.1	67.8	70.5
	เฉลี่ย	73.1	58.0	58.9	68.5	70.5
9	1	70.5	59.0	59.1	68.8	73.6
	2	71.5	58.6	57.2	68.7	73.5
	3	70.4	57.9	57.1	68.8	73.6
	เฉลี่ย	70.8	58.5	57.8	68.8	73.6
10	1	71.7	57.6	60.7	71.7	72.4
	2	72.8	59.8	60.8	70.9	73.6
	3	70.6	58.4	60.8	72.8	74.2
	เฉลี่ย	71.7	58.4	60.8	71.8	73.4
11	1	74.4	58.7	58.9	73.0	70.3
	2	73.5	58.6	59.8	72.1	72.4
	3	75.4	58.6	57.7	71.5	71.2
	เฉลี่ย	74.4	58.6	58.8	72.2	71.3
12	1	73.7	60.3	59.4	69.2	71.8
	2	73.8	60.5	57.2	69.4	69.9
	3	73.8	60.4	58.0	70.5	70.7
	เฉลี่ย	73.8	60.4	58.2	69.7	70.7
13	1	71.2	62.1	59.99	68.4	70.3
	2	71.3	62.0	61.5	68.4	69.5
	3	71.3	62.0	69.8	68.4	71.4
	เฉลี่ย	71.3	62.0	60.4	68.4	70.4
14	1	73.3	58.7	57.6	69.4	68.8
	2	72.1	60.5	58.3	69.2	69.0
	3	74.8	61.4	56.9	67.2	68.9
	เฉลี่ย	73.4	60.2	57.6	68.6	68.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
15	1	71.5	61.5	57.3	68.8	66.6
	2	71.4	61.6	59.5	68.9	66.5
	3	71.5	61.6	58.4	68.9	66.6
	เฉลี่ย	71.5	61.6	58.4	68.9	66.6
16	1	70.9	59.1	60.0	68.2	64.1
	2	70.9	58.8	60.8	70.0	64.1
	3	71.5	60.0	59.5	69.1	64.1
	เฉลี่ย	71.1	59.3	60.1	69.1	64.1
17	1	69.0	61.4	58.0	69.0	62.6
	2	70.2	62.4	58.3	68.4	62.5
	3	68.1	62.8	58.9	68.9	62.6
	เฉลี่ย	69.1	62.2	58.4	68.8	62.6
18	1	68.2	61.5	59.2	67.1	61.2
	2	68.3	61.5	57.3	65.3	61.7
	3	68.2	61.4	58.3	69.2	62.8
	เฉลี่ย	68.2	61.5	58.3	69.2	61.9
19	1	68.8	58.5	59.8	69.4	60.6
	2	65.6	58.7	58.1	69.5	60.6
	3	68.7	57.4	59.4	69.5	60.5
	เฉลี่ย	67.7	58.2	59.1	69.5	60.6
20	1	67.4	59.3	57.0	70.3	59.4
	2	67.0	57.2	56.8	69.9	59.2
	3	67.8	58.2	58.4	70.1	60.2
	เฉลี่ย	67.4	58.2	57.4	70.1	59.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
1	1	1.240	0.855	0.537	1.101	1.355
	2	1.250	0.821	0.531	1.025	1.371
	3	1.410	0.862	0.546	1.054	1.384
	เฉลี่ย	1.300	0.846	0.538	1.060	1.370
2	1	0.655	0.933	0.849	1.619	1.320
	2	0.648	0.891	0.861	1.543	1.240
	3	0.674	0.864	0.825	1.578	1.280
	เฉลี่ย	0.659	0.896	0.845	1.580	1.280
3	1	2.496	1.005	0.611	2.171	1.750
	2	2.477	0.987	0.638	2.155	1.708
	3	2.497	0.987	0.638	2.184	1.672
	เฉลี่ย	2.490	0.993	0.629	2.170	1.710
4	1	0.645	0.784	0.742	0.664	1.477
	2	0.640	0.726	0.779	0.701	1.518
	3	0.659	0.725	0.759	0.678	1.475
	เฉลี่ย	0.648	0.745	0.760	0.681	1.490
5	1	7.508	1.101	0.755	1.049	1.690
	2	7.599	1.150	0.734	1.047	1.785
	3	7.513	1.079	0.791	1.084	1.835
	เฉลี่ย	7.540	1.110	0.760	1.060	1.770
6	1	6.211	0.854	0.674	2.145	1.698
	2	6.397	0.896	0.623	2.169	1.703
	3	6.352	0.884	0.647	2.076	1.639
	เฉลี่ย	6.320	0.878	0.648	2.130	1.680
7	1	6.344	0.587	0.512	1.055	1.890
	2	6.298	0.549	0.437	1.088	1.251
	3	6.318	0.532	0.398	1.097	1.599
	เฉลี่ย	6.320	0.556	0.449	1.080	1.580

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
8	1	4.558	0.532	0.544	1.669	1.345
	2	4.678	0.584	0.511	1.714	1.324
	3	4.414	0.576	0.502	1.657	1.281
	เฉลี่ย	4.550	0.564	0.519	1.680	1.320
9	1	3.441	0.677	0.377	1.094	1.471
	2	3.245	0.598	0.346	1.069	1.298
	3	2.974	0.540	0.417	1.107	1.221
	เฉลี่ย	3.220	0.605	0.380	1.090	1.330
10	1	4.457	0.714	0.615	1.378	1.780
	2	4.296	0.712	0.677	1.358	1.457
	3	4.357	0.689	0.610	1.254	1.773
	เฉลี่ย	4.370	0.705	0.634	1.330	1.670
11	1	4.980	0.725	0.482	1.341	1.375
	2	4.044	0.769	0.477	1.362	1.398
	3	4.086	0.741	0.487	1.317	1.367
	เฉลี่ย	4.370	0.745	0.482	1.340	1.380
12	1	3.354	0.596	0.449	1.738	2.047
	2	3.388	0.624	0.461	1.796	2.025
	3	3.338	0.616	0.410	1.806	1.958
	เฉลี่ย	3.360	0.612	0.440	1.780	2.010
13	1	2.472	0.547	0.437	1.068	1.169
	2	2.487	0.517	0.478	1.025	1.147
	3	2.361	0.529	0.435	1.027	1.134
	เฉลี่ย	2.440	0.531	0.450	1.040	1.150
14	1	5.254	0.569	0.415	1.527	1.045
	2	5.355	0.523	0.439	1.528	1.089
	3	5.321	0.540	0.433	1.505	1.046
	เฉลี่ย	5.310	0.544	0.429	1.520	1.060

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง B (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
15	1	4.524	0.696	0.478	1.670	1.375
	2	4.587	0.645	0.412	1.698	1.425
	3	4.479	0.723	0.475	1.702	1.370
	เฉลี่ย	4.530	0.688	0.455	1.690	1.390
16	1	1.998	0.445	0.425	0.778	1.147
	2	1.945	0.502	0.408	0.756	1.115
	3	1.967	0.499	0.400	0.749	1.128
	เฉลี่ย	1.970	0.482	0.411	0.761	1.130
17	1	3.555	0.587	0.478	1.347	1.079
	2	3.507	0.517	0.435	1.308	1.042
	3	3.528	0.495	0.425	1.305	1.029
	เฉลี่ย	3.530	0.533	0.446	1.320	1.050
18	1	2.765	0.613	0.465	2.047	1.998
	2	2.798	0.644	0.513	1.987	2.008
	3	2.747	0.597	0.456	1.996	2024
	เฉลี่ย	2.770	0.618	0.478	2.010	2.010
19	1	1.743	0.558	0.522	1.145	1.498
	2	1.756	0.612	0.499	1.085	1.541
	3	1.661	0.624	0.509	1.118	1.521
	เฉลี่ย	1.720	0.598	0.510	1.116	1.520
20	1	2.349	0.621	0.475	1.258	1.569
	2	2.328	0.587	0.423	1.284	1.602
	3	2.283	0.586	0.467	1.298	1.539
	เฉลี่ย	2.320	0.598	0.455	1.280	1.570

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
1	1	6.96	7.12	7.11	6.85	6.89
	2	6.95	7.13	7.11	6.84	6.88
	3	6.95	7.12	7.11	6.86	6.87
	เฉลี่ย	6.95	7.12	7.11	6.85	6.88
2	1	7.33	7.53	7.54	7.29	7.34
	2	7.35	7.54	7.54	7.27	7.35
	3	7.37	7.54	7.55	7.28	7.35
	เฉลี่ย	7.35	7.54	7.54	7.28	7.35
3	1	7.37	7.76	7.68	7.33	7.40
	2	7.36	7.76	7.68	7.32	7.41
	3	7.37	7.75	7.70	7.32	7.40
	เฉลี่ย	7.37	7.76	7.69	7.32	7.40
4	1	6.83	7.28	7.22	7.20	7.31
	2	6.84	7.27	7.23	7.24	7.32
	3	6.81	7.27	7.21	7.22	7.32
	เฉลี่ย	6.82	7.27	7.22	7.22	7.32
5	1	6.39	7..00	7.03	7.22	7.47
	2	6.38	7.10	7.04	7.21	7.47
	3	6.38	7.00	7.03	7.23	7.48
	เฉลี่ย	6.38	7.00	7.03	7.22	7.47
6	1	6.43	6.94	7.01	7.50	7.77
	2	6.42	6.95	7.01	7.49	7.78
	3	6.42	6.94	7.02	7.49	7.77
	เฉลี่ย	6.42	6.94	7.01	7.49	7.77
7	1	6.39	7.06	7.31	8.07	8.02
	2	6.40	7.07	7.32	8.06	8.02
	3	6.38	7.07	7.32	8.08	8.02
	เฉลี่ย	6.39	7.07	7.32	8.07	8.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
8	1	6.65	7.16	7.20	7.65	7.90
	2	6.63	7.19	7.20	7.69	7.91
	3	6.64	7.18	7.21	7.67	7.91
	เฉลี่ย	6.64	7.18	7.20	7.67	7.91
9	1	6.48	7.04	7.06	7.52	7.87
	2	6.47	7.03	7.08	7.52	7.87
	3	6.48	7.05	7.07	7.53	7.87
	เฉลี่ย	6.48	7.04	7.07	7.52	7.87
10	1	6.64	7.21	7.24	7.87	8.12
	2	6.63	7.21	7.25	7.88	8.12
	3	6.64	7.19	7.24	7.87	8.11
	เฉลี่ย	6.64	7.20	7.24	7.87	8.12
11	1	6.91	7.45	7.53	8.00	8.20
	2	6.90	7.46	7.54	8.00	8.19
	3	6.90	7.45	7.54	8.00	8.19
	เฉลี่ย	6.90	7.45	7.54	8.00	8.19
12	1	7.04	7.54	7.46	7.94	7.96
	2	7.05	7.53	7.42	7.95	7.95
	3	7.05	7.54	7.44	7.95	7.96
	เฉลี่ย	7.05	7.54	7.44	7.95	7.96
13	1	6.92	7.65	7.64	7.84	8.11
	2	6.93	7.64	7.62	7.84	8.10
	3	6.93	7.64	7.63	7.84	8.10
	เฉลี่ย	6.93	7.64	7.63	7.84	8.10
14	1	7.20	7.61	7.66	8.04	8.32
	2	7.20	7.61	7.67	8.08	8.33
	3	7.21	7.61	7.66	8.06	8.33
	เฉลี่ย	7.20	7.61	7.66	8.06	8.33

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
15	1	7.75	8.15	8.02	8.25	8.55
	2	7.79	8.14	8.01	8.25	8.56
	3	7.77	8.14	8.00	8.24	8.56
	เฉลี่ย	7.77	8.14	8.01	8.25	8.56
16	1	7.39	8.16	7.75	8.13	8.28
	2	7.39	8.17	7.73	8.14	8.29
	3	7.38	8.15	7.74	8.14	8.28
	เฉลี่ย	7.39	8.16	7.74	8.14	8.28
17	1	8.01	8.19	7.96	8.25	8.41
	2	8.01	8.20	7.96	8.25	8.41
	3	8.00	8.21	7.97	8.26	8.41
	เฉลี่ย	8.01	8.20	7.96	8.25	8.41
18	1	8.06	8.33	8.08	8.19	8.41
	2	8.07	8.31	8.05	8.18	8.40
	3	8.07	8.32	8.05	8.18	8.41
	เฉลี่ย	8.07	8.32	8.06	8.18	8.41
19	1	8.18	8.41	7.38	8.11	8.60
	2	8.19	8.41	7.38	8.10	8.59
	3	8.18	8.40	7.39	8.11	8.59
	เฉลี่ย	8.18	8.41	7.38	8.11	8.59
20	1	8.25	8.51	8.34	8.34	8.47
	2	8.24	8.50	8.33	8.34	8.47
	3	8.24	8.50	8.33	8.33	8.47
	เฉลี่ย	8.24	8.50	8.33	8.34	8.47

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	สภาพแวดล้อม
1	1	35.5	32.2	32.3	33.9	33.6	31.1
	2	35.7	32.1	32.2	34.1	33.7	31.0
	3	35.6	32.2	32.3	34.0	33.6	31.2
	เฉลี่ย	35.6	32.2	32.3	34.0	33.6	31.1
2	1	32.5	30.6	31.1	30.8	31.3	30.6
	2	32.4	30.7	31.1	30.9	31.2	30.9
	3	32.5	30.6	31.0	30.7	31.3	30.8
	เฉลี่ย	32.5	30.6	31.1	30.8	31.3	30.8
3	1	31.4	31.6	31.2	31.9	32.1	31.1
	2	31.5	31.4	31.1	32.3	32.0	31.2
	3	31.5	31.5	31.2	32.1	32.0	31.1
	เฉลี่ย	31.5	31.5	31.2	32.1	32.0	31.1
4	1	30.0	30.1	30.8	31.2	31.5	30.1
	2	30.1	30.2	30.9	31.3	31.4	29.7
	3	29.9	30.2	31.0	31.3	31.5	29.9
	เฉลี่ย	30.0	30.2	30.9	31.3	31.5	29.9
5	1	28.8	28.5	29.3	29.8	29.0	29.8
	2	28.7	28.7	29.2	29.7	29.1	29.9
	3	28.7	28.6	29.3	29.8	29.0	29.9
	เฉลี่ย	28.7	28.6	29.3	29.8	29.1	29.9
6	1	30.3	30.2	31.1	31.1	30.5	31.1
	2	30.4	30.3	31.0	31.1	30.6	31.1
	3	30.4	30.2	31.0	31.0	30.4	31.1
	เฉลี่ย	30.4	30.2	31.0	31.1	30.5	31.1
7	1	30.9	30.7	31.9	32.0	31.9	31.3
	2	30.5	30.8	31.7	31.9	31.8	31.2
	3	30.7	30.8	31.8	31.9	31.8	31.3
	เฉลี่ย	30.7	30.8	31.8	31.9	31.8	31.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	สภาพแวดล้อม
8	1	30.4	30.7	31.5	31.2	31.0	31.4
	2	30.6	30.6	31.4	31.1	31.0	31.5
	3	30.5	30.6	31.5	31.3	31.1	31.6
	เฉลี่ย	30.5	30.6	31.5	31.2	31.0	31.5
9	1	30.7	30.9	31.3	31.0	31.3	31.1
	2	30.8	30.8	31.3	31.0	31.3	31.1
	3	30.6	30.9	31.2	31.1	31.2	31.2
	เฉลี่ย	30.7	30.9	31.3	31.0	31.3	31.1
10	1	28.7	28.9	29.5	29.3	30.1	29.4
	2	28.6	28.8	29.3	29.5	29.9	29.5
	3	28.6	28.8	29.4	29.1	30.0	29.5
	เฉลี่ย	28.6	28.8	29.4	29.5	30.0	29.5
11	1	29.7	29.6	30.2	30.0	30.8	30.7
	2	29.8	29.7	30.6	30.1	30.8	30.8
	3	29.7	29.6	30.4	30.0	30.9	30.6
	เฉลี่ย	29.7	29.6	30.4	30.0	30.8	30.7
12	1	29.5	29.9	30.4	30.0	30.5	30.6
	2	29.6	30.0	30.3	30.1	30.5	30.5
	3	29.6	29.9	30.4	30.0	30.4	30.6
	เฉลี่ย	29.6	29.9	30.4	30.0	30.5	30.6
13	1	29.4	28.6	29.1	29.9	29.0	29.6
	2	29.5	28.4	29.5	29.8	29.4	29.7
	3	29.5	28.5	29.3	29.9	29.2	29.6
	เฉลี่ย	29.5	28.5	29.3	29.9	29.2	29.6
14	1	27.6	28.2	28.8	28.5	28.9	29.1
	2	27.8	28.2	28.7	28.4	29.0	29.0
	3	27.7	28.1	28.8	28.6	28.9	29.1
	เฉลี่ย	27.7	28.2	28.8	28.5	28.9	29.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	สภาพแวดล้อม
15	1	28.8	29.0	29.8	29.5	30.2	30.4
	2	28.9	28.9	29.7	29.7	30.1	30.3
	3	28.8	28.9	29.7	29.6	30.1	30.4
	เฉลี่ย	28.8	28.9	29.7	29.6	30.1	30.4
16	1	29.9	29.3	30.0	30.0	30.5	30.1
	2	29.7	29.7	30.0	29.7	30.4	30.2
	3	29.8	29.5	29.8	29.7	30.4	30.1
	เฉลี่ย	29.8	29.5	29.9	29.8	30.4	30.1
17	1	28.5	27.5	28.4	28.9	28.2	28.7
	2	28.6	27.5	28.3	29.0	28.4	28.8
	3	28.5	27.7	28.4	28.9	28.3	28.8
	เฉลี่ย	28.5	27.5	28.4	28.9	28.3	28.8
18	1	28.0	28.0	28.5	28.3	28.7	29.3
	2	28.2	28.1	28.4	28.1	28.9	29.3
	3	28.1	28.1	28.5	28.2	28.8	29.3
	เฉลี่ย	28.1	28.1	28.5	28.2	28.8	29.3
19	1	29.1	29.2	29.0	29.7	29.9	30.7
	2	29.1	29.0	29.1	29.8	29.7	30.6
	3	29.0	29.1	29.1	29.8	29.8	30.7
	เฉลี่ย	29.1	29.1	29.1	29.8	29.8	30.7
20	1	30.4	31.0	31.3	30.7	31.2	31.3
	2	30.5	30.9	31.2	30.8	31.1	31.3
	3	30.3	30.9	31.3	30.8	31.1	31.3
	เฉลี่ย	30.4	30.9	31.3	30.8	31.1	31.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
1	1	76.1	62.5	58.9	73.5	68.8
	2	76.8	64.1	58.8	73.9	68.7
	3	77.2	61.8	58.8	73.7	68.6
	เฉลี่ย	76.7	62.8	58.8	73.7	68.8
2	1	75.6	63.1	55.6	71.5	70.0
	2	74.8	63.0	55.2	71.4	70.2
	3	75.2	63.0	55.1	71.9	69.8
	เฉลี่ย	75.2	63.1	55.3	71.6	70.0
3	1	77.5	62.3	56.5	71.2	69.8
	2	76.9	62.5	56.4	71.1	68.5
	3	76.9	62.7	56.5	71.6	70.2
	เฉลี่ย	77.1	62.5	56.5	71.3	69.5
4	1	78.0	65.3	54.3	73.2	66.8
	2	78.1	65.4	54.2	73.0	66.9
	3	78.2	65.4	54.3	72.9	66.8
	เฉลี่ย	78.1	65.4	54.3	73.0	66.8
5	1	78.2	63.1	54.5	73.2	67.3
	2	77.9	61.7	54.5	72.9	68.1
	3	77.9	61.2	54.8	73.2	68.2
	เฉลี่ย	78.0	62.0	54.6	73.1	68.0
6	1	79.3	65.2	54.2	74.8	66.5
	2	79.4	65.3	54.1	74.6	66.7
	3	79.4	65.2	54.3	75.0	66.9
	เฉลี่ย	79.4	65.2	54.2	74.8	66.7
7	1	78.4	59.6	59.7	73.5	70.0
	2	77.9	59.6	60.1	73.6	70.2
	3	78.3	59.3	59.6	72.8	69.8
	เฉลี่ย	78.2	59.5	59.8	73.3	70.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
8	1	76.4	61.4	54.8	72.2	69.4
	2	76.5	61.5	55.2	72.2	69.5
	3	76.5	61.4	55.0	72.3	69.3
	เฉลี่ย	76.5	61.4	55.0	72.2	69.4
9	1	74.6	62.3	54.0	72.8	68.0
	2	75.0	61.9	54.1	73.3	68.1
	3	74.8	61.8	53.9	73.2	68.1
	เฉลี่ย	74.8	62.0	54.0	73.1	68.1
10	1	79.2	59.2	53.0	70.6	68.3
	2	79.7	59.3	53.1	70.7	68.3
	3	79.6	59.3	53.0	70.8	68.2
	เฉลี่ย	79.5	59.3	53.0	70.8	68.3
11	1	76.7	64.3	54.5	71.2	69.1
	2	76.8	64.2	54.6	71.5	69.0
	3	76.8	64.3	54.4	70.9	68.9
	เฉลี่ย	76.8	64.3	54.5	71.2	69.0
12	1	74.3	59.3	57.1	73.3	66.2
	2	74.8	59.2	57.0	73.2	66.2
	3	74.7	58.8	57.0	73.3	66.1
	เฉลี่ย	74.6	59.1	57.0	73.3	66.2
13	1	76.0	61.5	54.9	71.6	66.1
	2	75.8	61.6	54.5	71.5	66.1
	3	75.9	61.7	55.0	71.5	65.9
	เฉลี่ย	75.9	61.6	54.8	71.5	66.0
14	1	72.9	62.9	51.5	72.4	67.0
	2	72.8	62.7	51.5	72.4	67.2
	3	72.9	62.8	51.4	72.4	66.5
	เฉลี่ย	72.9	62.8	51.5	72.4	66.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
15	1	74.0	61.9	50.4	73.1	63.8
	2	75.0	61.5	50.7	73.0	63.8
	3	73.0	62.0	50.7	73.0	63.9
	เฉลี่ย	74.0	61.8	50.6	73.0	63.8
16	1	74.6	61.7	53.4	72.9	62.8
	2	74.5	61.3	53.2	73.0	62.8
	3	74.6	61.5	53.3	72.9	62.5
	เฉลี่ย	74.6	61.5	53.3	72.9	62.7
17	1	75.2	62.1	53.0	74.0	61.5
	2	74.9	62.2	53.0	73.8	61.6
	3	74.9	62.1	53.1	73.9	61.6
	เฉลี่ย	75.0	62.1	53.0	73.9	61.6
18	1	74.7	60.2	52.9	72.3	60.4
	2	74.8	60.2	52.8	72.4	60.4
	3	74.7	60.3	53.0	72.5	60.5
	เฉลี่ย	74.7	60.2	52.9	72.4	60.4
19	1	75.2	56.1	56.5	73.0	58.8
	2	75.2	56.3	56.4	73.2	59.0
	3	75.3	55.9	56.4	73.0	58.9
	เฉลี่ย	75.2	56.3	56.4	73.1	58.9
20	1	76.7	56.2	54.8	74.0	57.5
	2	77.1	56.5	55.1	74.1	57.5
	3	76.9	56.5	54.8	74.0	57.5
	เฉลี่ย	76.9	56.4	54.9	74.0	57.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-17 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
1	1	1.277	0.654	0.514	1.007	0.688
	2	1.294	0.681	0.489	1.011	0.654
	3	1.239	0.654	0.503	1.042	0.689
	เฉลี่ย	1.270	0.663	0.502	1.020	0.677
2	1	1.748	0.641	0.456	0.861	0.576
	2	1.777	0.608	0.464	0.884	0.523
	3	1.725	0.638	0.478	0.907	0.521
	เฉลี่ย	1.750	0.629	0.466	0.884	0.540
3	1	2.211	0.452	0.311	0.873	0.598
	2	2.234	0.398	0.277	0.880	0.623
	3	2.185	0.371	0.288	0.842	0.609
	เฉลี่ย	2.210	0.407	0.292	0.865	0.610
4	1	2.124	0.625	0.496	1.125	0.604
	2	2.108	0.599	0.511	1.154	0.645
	3	2.098	0.621	0.430	1.114	0.620
	เฉลี่ย	2.110	0.615	0.479	1.131	0.623
5	1	3.715	0.363	0.359	1.249	0.752
	2	3.694	0.398	0.396	1.293	0.743
	3	3.691	0.391	0.385	1.268	0.740
	เฉลี่ย	3.700	0.384	0.380	1.270	0.745
6	1	2.807	0.436	0.367	1.309	0.544
	2	2.847	0.442	0.389	1.296	0.603
	3	2.864	0.475	0.408	1.325	0.623
	เฉลี่ย	2.840	0.451	0.388	1.310	0.590
7	1	3.725	0.407	0.345	1.035	0.598
	2	3.717	0.435	0.388	1.029	0.623
	3	3.805	0.412	0.374	0.996	0.579
	เฉลี่ย	3.750	0.418	0.369	1.020	0.600

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-17 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
8	1	4.452	0.482	0.424	1.516	0.727
	2	4.467	0.455	0.412	1.552	0.719
	3	4.401	0.461	0.394	1.552	0.744
	เฉลี่ย	4.440	0.466	0.410	1.540	0.730
9	1	2.835	0.442	0.341	1.269	0.585
	2	2.815	0.478	0.377	1.302	0.563
	3	2.780	0.469	0.398	1.275	0.571
	เฉลี่ย	2.810	0.463	0.372	1.282	0.573
10	1	5.222	0.398	0.356	1.787	0.756
	2	5.199	0.399	0.386	1.765	0.779
	3	5.209	0.355	0.398	1.788	0.745
	เฉลี่ย	5.210	0.384	0.380	1.780	0.760
11	1	3.777	0.462	0.379	1.530	0.691
	2	3.742	0.487	0.343	1.512	0.720
	3	3.731	0.409	0.394	1.578	0.737
	เฉลี่ย	3.750	0.446	0.372	1.540	0.716
12	1	3.775	0.469	0.455	1.745	0.750
	2	3.723	0.470	0.496	1.733	0.774
	3	3.752	0.486	0.483	1.772	0.756
	เฉลี่ย	3.750	0.475	0.478	1.750	0.760
13	1	5.108	0.349	0.343	1.567	0.602
	2	5.136	0.348	0.320	1.521	0.598
	3	5.086	0.356	0.351	1.532	0.546
	เฉลี่ย	5.110	0.351	0.338	1.540	0.582
14	1	3.385	0.556	0.408	2.100	0.685
	2	3.383	0.580	0.355	2.101	0.679
	3	3.402	0.589	0.398	2.069	0.712
	เฉลี่ย	3.390	0.575	0.387	2.090	0.692

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-17 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
15	1	3.310	0.452	0.325	1.950	0.635
	2	3.282	0.413	0.359	1.969	0.603
	3	3.278	0.398	0.357	1.991	0.598
	เฉลี่ย	3.290	0.421	0.347	1.970	0.612
16	1	4.521	0.403	0.358	1.696	0.669
	2	4.549	0.421	0.402	1.719	0.714
	3	4.520	0.448	0.401	1.745	0.687
	เฉลี่ย	4.530	0.424	0.387	1.720	0.690
17	1	2.748	0.401	0.361	1.613	0.653
	2	2.778	0.421	0.392	1.600	0.644
	3	2.724	0.396	0.375	1.587	0.605
	เฉลี่ย	2.750	0.406	0.376	1.600	0.634
18	1	3.720	0.469	0.395	1.956	0.754
	2	3.702	0.458	0.398	1.948	0.723
	3	3.678	0.438	0.368	1.916	0.758
	เฉลี่ย	3.700	0.455	0.387	1.940	0.745
19	1	3.238	0.390	0.252	1.563	0.578
	2	3.207	0.389	0.248	1.586	0.565
	3	3.245	0.412	0.292	1.561	0.555
	เฉลี่ย	3.230	0.397	0.264	1.570	0.566
20	1	3.251	0.418	0.322	1.597	0.611
	2	3.271	0.375	0.332	1.564	0.614
	3	3.258	0.386	0.298	1.564	0.635
	เฉลี่ย	3.260	0.393	0.317	1.580	0.620

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-18 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
1	1	6.04	6.62	6.45	6.57	6.33
	2	6.05	6.63	6.45	6.58	6.32
	3	6.05	6.62	6.47	6.58	6.32
	เฉลี่ย	6.05	6.62	6.46	6.58	6.32
2	1	7.15	7.23	6.96	7.11	7.01
	2	7.15	7.22	6.98	7.10	7.01
	3	7.14	7.23	6.97	7.10	7.02
	เฉลี่ย	7.15	7.23	6.97	7.10	7.01
3	1	7.80	7.75	7.42	7.56	7.62
	2	7.81	7.74	7.43	7.58	7.61
	3	7.81	7.76	7.43	7.60	7.61
	เฉลี่ย	7.81	7.75	7.43	7.58	7.61
4	1	7.26	7.54	7.30	7.80	7.79
	2	7.26	7.57	7.30	7.79	7.79
	3	7.27	7.56	7.28	7.79	7.80
	เฉลี่ย	7.26	7.56	7.29	7.79	7.79
5	1	6.94	7.27	6.98	7.45	7.57
	2	6.91	7.28	6.97	7.46	7.58
	3	6.92	7.28	6.98	7.46	7.56
	เฉลี่ย	6.92	7.28	6.98	7.46	7.57
6	1	5.83	6.56	6.61	7.51	7.62
	2	5.84	6.55	6.60	7.53	7.62
	3	5.84	6.56	6.60	7.52	7.62
	เฉลี่ย	5.84	6.56	6.60	7.52	7.62
7	1	5.71	6.44	6.39	7.43	7.67
	2	5.70	6.43	6.38	7.44	7.66
	3	5.70	6.44	6.38	7.44	7.67
	เฉลี่ย	5.70	6.44	6.38	7.44	7.67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-18 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
8	1	6.10	6.83	6.51	8.05	8.11
	2	6.11	6.84	6.50	8.06	8.10
	3	6.11	6.84	6.49	8.05	8.10
	เฉลี่ย	6.11	6.84	6.50	8.05	8.10
9	1	5.84	6.54	6.71	7.80	7.84
	2	5.85	6.56	6.70	7.81	7.82
	3	5.85	6.58	6.70	7.80	7.82
	เฉลี่ย	5.85	6.56	6.70	7.80	7.83
10	1	6.38	6.91	6.93	7.93	8.03
	2	6.37	6.93	6.94	7.94	8.03
	3	6.37	6.90	6.94	7.94	8.02
	เฉลี่ย	6.37	6.91	6.94	7.94	8.03
11	1	6.31	6.86	6.82	7.99	8.20
	2	6.31	6.86	6.82	7.99	8.20
	3	6.29	6.85	6.83	8.00	8.20
	เฉลี่ย	6.30	6.86	6.82	7.99	8.20
12	1	6.41	7.15	7.01	8.24	8.26
	2	6.40	7.15	7.00	8.23	8.25
	3	6.40	7.14	7.00	8.23	8.26
	เฉลี่ย	6.40	7.15	7.00	8.23	8.26
13	1	7.15	7.75	7.41	8.15	8.17
	2	7.17	7.79	7.40	8.14	8.17
	3	7.16	7.75	7.40	8.15	8.16
	เฉลี่ย	7.16	7.77	7.40	8.15	8.17
14	1	6.86	7.54	7.36	8.47	8.33
	2	6.86	7.50	7.40	8.48	8.34
	3	6.85	7.52	7.38	8.47	8.34
	เฉลี่ย	6.86	7.52	7.38	8.47	8.34

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-18 ข้อมูลพีเอชระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	พีเอชในการทดลอง				
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
15	1	6.80	7.40	7.34	8.03	7.49
	2	6.80	7.40	7.34	8.01	7.48
	3	6.81	7.41	7.36	8.02	7.48
	เฉลี่ย	6.80	7.40	7.35	8.02	7.48
16	1	7.21	7.44	7.22	8.21	8.12
	2	7.20	7.45	7.20	8.20	8.13
	3	7.20	7.45	7.21	8.20	8.12
	เฉลี่ย	7.20	7.45	7.21	8.20	8.12
17	1	7.34	7.69	7.59	8.51	8.34
	2	7.34	7.70	7.61	8.50	8.33
	3	7.34	7.69	7.60	8.50	8.33
	เฉลี่ย	7.34	7.69	7.60	8.50	8.33
18	1	7.56	8.21	7.80	8.31	8.17
	2	7.57	8.20	7.79	8.31	8.16
	3	7.57	8.20	7.79	8.29	8.17
	เฉลี่ย	7.57	8.20	7.79	8.30	8.17
19	1	7.30	8.37	8.00	8.38	8.37
	2	7.31	8.38	8.01	8.38	8.37
	3	7.31	8.37	8.00	8.38	8.36
	เฉลี่ย	7.31	8.37	8.00	8.38	8.37
20	1	7.66	8.04	7.74	8.54	8.27
	2	7.67	8.05	7.73	8.55	8.27
	3	7.68	8.05	7.74	8.54	8.27
	เฉลี่ย	7.67	8.05	7.74	8.54	8.27

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-19 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	สภาพแวดล้อม
1	1	35.2	32.7	31.6	36.2	34.5	32.2
	2	35.4	32.3	31.9	36.3	34.6	32.1
	3	35.3	32.5	31.8	36.3	34.5	32.2
	เฉลี่ย	35.3	32.5	31.8	36.3	34.5	32.2
2	1	35.1	31.6	31.4	35.2	32.4	31.2
	2	35.2	31.4	31.5	35.2	32.4	31.3
	3	35.2	31.5	31.5	35.3	32.5	31.3
	เฉลี่ย	35.2	31.5	31.5	35.2	32.4	31.3
3	1	34.2	31.9	31.1	33.1	32.9	31.4
	2	34.4	31.5	31.0	33.0	32.8	31.5
	3	34.3	31.7	30.9	33.0	32.9	31.5
	เฉลี่ย	34.3	31.7	31.0	33.0	32.9	31.5
4	1	33.6	31.5	30.8	32.5	32.2	31.6
	2	33.7	31.4	30.6	32.5	32.1	31.7
	3	33.7	31.5	30.7	32.7	32.1	31.6
	เฉลี่ย	33.7	31.5	30.7	32.6	32.1	31.6
5	1	32.0	31.1	31.2	32.0	31.4	31.7
	2	32.0	31.0	31.1	32.1	31.5	31.9
	3	32.3	31.2	31.2	32.0	31.5	31.8
	เฉลี่ย	32.1	31.1	31.2	32.0	31.5	31.8
6	1	31.2	30.3	30.1	30.9	31.1	31.5
	2	31.3	30.2	30.1	30.9	31.0	31.5
	3	31.3	30.2	30.2	30.8	31.1	31.4
	เฉลี่ย	31.3	30.2	30.1	30.9	31.1	31.5
7	1	30.9	32.0	32.0	33.1	32.4	31.8
	2	30.9	32.2	31.9	33.0	32.3	31.9
	3	30.8	32.1	31.9	33.0	32.5	31.9
	เฉลี่ย	30.9	32.1	31.9	33.0	32.4	31.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-19 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	สภาพแวดล้อม
8	1	31.1	30.7	31.2	32.2	31.5	32.1
	2	31.3	30.9	31.3	32.3	31.5	32.0
	3	31.2	31.0	31.3	32.2	31.4	32.0
	เฉลี่ย	31.2	30.9	31.3	32.2	31.5	32.0
9	1	31.7	31.7	31.3	31.7	32.0	32.0
	2	31.9	31.6	31.4	31.7	31.9	32.1
	3	31.8	31.5	31.4	31.8	31.9	32.1
	เฉลี่ย	31.8	31.6	31.4	31.7	31.9	32.1
10	1	31.8	31.1	31.5	33.0	32.1	32.3
	2	31.7	31.0	31.6	33.1	32.0	32.2
	3	31.8	31.2	31.6	33.1	32.0	32.2
	เฉลี่ย	31.8	31.1	31.6	33.1	32.0	32.2
11	1	31.8	31.6	32.0	31.5	32.0	32.1
	2	31.7	31.4	31.6	31.6	32.1	32.3
	3	31.8	31.5	31.8	31.6	32.1	32.2
	เฉลี่ย	31.8	31.5	31.8	31.6	32.1	32.2
12	1	31.6	30.3	31.6	31.1	31.8	29.3
	2	31.5	30.2	31.5	31.2	31.8	29.2
	3	31.5	30.3	31.5	31.0	31.9	29.3
	เฉลี่ย	31.5	30.3	31.5	31.1	31.8	29.3
13	1	29.1	29.0	29.7	29.9	29.3	29.9
	2	28.8	29.4	29.8	29.9	29.3	29.8
	3	28.8	29.2	29.8	30.0	29.4	29.9
	เฉลี่ย	28.9	29.2	29.8	29.9	29.3	29.9
14	1	30.6	30.2	30.2	30.4	30.9	31.1
	2	30.5	30.1	30.1	30.3	30.7	31.1
	3	30.6	30.1	30.2	30.3	30.8	31.1
	เฉลี่ย	30.6	30.1	30.2	30.3	30.8	31.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-19 ข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง C (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ในการทดลอง					
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	สภาพแวดล้อม
15	1	31.0	29.9	30.1	30.6	30.9	31.5
	2	31.1	29.9	30.1	30.3	31.1	31.6
	3	31.0	30.0	30.2	30.4	31.1	31.6
	เฉลี่ย	31.0	29.9	30.1	30.4	31.0	31.6
16	1	31.1	30.6	31.0	31.2	31.1	31.8
	2	31.0	30.5	30.8	31.3	31.0	31.7
	3	31.0	30.6	30.8	31.3	31.1	31.7
	เฉลี่ย	31.0	30.6	30.9	31.3	31.1	31.7
17	1	30.5	31.0	31.2	30.5	31.1	31.6
	2	30.5	31.2	31.1	30.4	31.1	31.7
	3	30.7	31.0	31.1	30.5	31.0	31.6
	เฉลี่ย	30.6	31.1	31.1	30.5	31.1	31.6
18	1	31.0	30.1	30.7	30.6	31.0	31.7
	2	31.1	30.5	30.6	30.7	31.0	31.7
	3	31.2	30.3	30.7	30.7	31.0	31.8
	เฉลี่ย	31.1	30.3	30.7	30.7	31.0	31.7
19	1	30.8	30.4	30.5	32.1	31.1	32.0
	2	30.9	30.5	30.6	32.0	31.1	31.9
	3	30.9	30.4	30.6	32.1	31.2	31.9
	เฉลี่ย	30.9	30.4	30.6	32.1	31.1	31.9
20	1	30.8	30.3	30.9	30.9	31.3	32.1
	2	30.9	30.4	30.8	30.9	31.3	32.0
	3	30.9	30.4	30.9	30.9	31.3	32.0
	เฉลี่ย	30.9	30.4	30.9	30.9	31.3	32.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-20 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
1	1	78.2	55.8	50.4	59.1	58.2
	2	77.6	54.7	50.3	57.4	57.5
	3	76.7	55.1	50.1	59.9	59.5
	เฉลี่ย	77.5	55.2	50.2	58.8	58.4
2	1	76.5	54.9	52.4	68.2	58.6
	2	76.2	54.8	52.8	69.3	58.1
	3	75.9	54.7	53.5	67.1	59.4
	เฉลี่ย	76.2	54.8	52.9	68.2	58.7
3	1	77.0	51.4	55.8	70.2	70.2
	2	78.1	51.6	55.4	70.5	68.9
	3	76.5	50.6	54.5	69.6	69.7
	เฉลี่ย	77.2	51.2	55.3	70.1	69.6
4	1	76.8	56.1	53.5	70.4	70.9
	2	75.9	56.2	53.4	70.3	71.0
	3	77.4	56.1	53.4	70.2	70.8
	เฉลี่ย	76.7	56.1	53.4	70.3	70.9
5	1	76.9	57.3	51.8	71.9	71.5
	2	78.7	57.4	51.7	74.0	71.1
	3	77.8	57.4	51.8	72.9	70.4
	เฉลี่ย	77.8	57.4	51.8	72.9	71.0
6	1	77.5	52.2	53.4	72.8	71..3
	2	78.9	52.0	53.3	70.7	67.5
	3	79.7	51.8	53.4	74.7	69.4
	เฉลี่ย	78.7	52.0	53.4	72.7	69.4
7	1	77.4	55.1	53.8	74.2	68.9
	2	77.3	55.2	53.7	73.6	70.4
	3	77.2	55.1	53.8	74.2	71.3
	เฉลี่ย	77.3	55.1	53.8	74.0	70.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-20 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
8	1	77.6	56.2	56.1	74.0	70.2
	2	77.4	56.3	56.2	72.9	70.5
	3	77.5	56.2	56.1	74.5	69.9
	เฉลี่ย	77.5	56.2	56.1	73.8	70.2
9	1	78.1	55.1	54.9	73.6	68.6
	2	78.2	55.1	54.5	72.7	68.0
	3	78.3	55.2	54.7	70.9	70.1
	เฉลี่ย	78.2	55.1	54.7	72.4	68.9
10	1	77.7	52.1	51.4	74.2	67.8
	2	77.8	52.2	51.4	74.8	67.8
	3	77.8	52.1	51.4	73.0	67.6
	เฉลี่ย	77.8	52.1	51.4	74.0	67.7
11	1	77.9	54.2	52.8	74.1	64.7
	2	77.5	53.8	52..9	74.2	64.7
	3	77.7	54.0	52.8	74.1	64.8
	เฉลี่ย	77.7	54.0	52.8	74.1	64.7
12	1	77.2	51.9	53.7	70.7	64.3
	2	77.6	51.8	54.0	70.9	64.1
	3	77.4	51.8	54.0	71.1	64.2
	เฉลี่ย	77.4	51.8	53.9	70.9	64.2
13	1	76.7	54.1	53.8	73.1	58.8
	2	76.5	54.2	53.9	72.9	58.8
	3	76.6	54.2	53.8	73.1	58.8
	เฉลี่ย	76.6	54.2	53.8	73.0	58.8
14	1	77.5	55.3	54.2	72.1	57.1
	2	77.6	55.2	54.3	72.0	57.2
	3	77.7	55.3	54.2	72.0	57.1
	เฉลี่ย	77.6	55.3	54.2	72.0	57.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-20 ข้อมูลความชื้นสะสมระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	ความชื้นสะสม (ร้อยละ) ในการทดลอง				
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
15	1	77.6	54.6	51.2	72.0	53.8
	2	77.5	54.7	51.2	71.5	54.1
	3	77.6	54.6	51.3	71.6	54.2
	เฉลี่ย	77.6	54.6	51.2	71.7	54.0
16	1	76.1	56.6	51.9	73.7	52.5
	2	76.0	56.7	51.8	73.8	52.4
	3	76.1	56.7	51.8	73.4	52.5
	เฉลี่ย	76.1	56.7	51.8	73.6	52.5
17	1	76.2	54.2	51.0	71.7	51.2
	2	76.1	54.3	51.1	71.6	51.4
	3	76.3	54.1	51.1	71.7	51.3
	เฉลี่ย	76.3	54.2	51.1	71.7	51.3
18	1	76.4	54.1	51.5	70.1	50.7
	2	76.6	54.0	51.5	70.0	50.8
	3	76.5	54.0	51.4	70,0	50.7
	เฉลี่ย	76.5	54	51.5	70.0	50.7
19	1	76.4	54.6	54.4	73.6	52.1
	2	76.6	54.8	54.5	73.5	52.0
	3	76.5	54.7	54.5	73.6	52.0
	เฉลี่ย	76.5	54.7	54.5	73.6	52.0
20	1	76.4	54.4	55.5	72.9	53.5
	2	76.5	54.4	55.6	73.0	53.5
	3	76.5	54.5	55.5	72.9	53.5
	เฉลี่ย	76.5	54.4	55.5	72.9	53.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-21 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
1	1	1.321	0.712	1.540	0.752	1.526
	2	1.287	0.712	1.602	0.771	1.550
	3	1.322	0.685	1.598	0.763	1.574
	เฉลี่ย	1.310	0.703	1.580	0.762	1.550
2	1	0.704	0.426	1.095	0.501	0.602
	2	0.735	0.523	1.068	0.512	0.590
	3	0.751	0.497	1.057	0.538	0.578
	เฉลี่ย	0.730	0.482	1.070	0.517	0.590
3	1	0.725	0.425	1.011	0.506	0.421
	2	0.695	0.388	1.005	0.513	0.452
	3	0.683	0.390	1.044	0.487	0.444
	เฉลี่ย	0.701	0.401	1.020	0.502	0.439
4	1	1.592	0.373	1.011	0.592	0.529
	2	1.576	0.361	0.990	0.625	0.577
	3	1.542	0.385	0.945	0.577	0.526
	เฉลี่ย	1.570	0.373	0.982	0.598	0.544
5	1	1.604	0.450	0.895	0.567	0.521
	2	1.570	0.450	0.877	0.502	0.457
	3	1.536	0.489	0.829	0.614	0.486
	เฉลี่ย	1.570	0.463	0.867	0.561	0.488
6	1	3.629	0.369	0.725	0.682	0.612
	2	3.558	0.309	0.700	0.646	0.563
	3	3.613	0.312	0.684	0.742	0.631
	เฉลี่ย	3.600	0.330	0.703	0.690	0.602
7	1	2.504	0.298	0.689	0.598	0.489
	2	2.541	0.275	0.641	0.621	0.438
	3	2.485	0.258	0.623	0.635	0.498
	เฉลี่ย	2.510	0.277	0.651	0.618	0.475

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-21 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
8	1	3.683	0.335	0.658	0.704	0.498
	2	3.645	0.305	0.642	0.774	0.472
	3	3.712	0.263	0.689	0.712	0.521
	เฉลี่ย	3.680	0.301	0.663	0.730	0.497
9	1	4.312	0.504	0.682	0.682	0.395
	2	4.360	0.469	0.716	0.677	0.445
	3	4.378	0.443	0.750	0.666	0.471
	เฉลี่ย	4.350	0.472	0.716	0.675	0.437
10	1	2.825	0.259	0.626	0.640	0.389
	2	2.767	0.247	0.615	0.612	0.512
	3	2.778	0.289	0.547	0.668	0.362
	เฉลี่ย	2.790	0.265	0.596	0.640	0.421
11	1	3.151	0.270	0.488	0.686	0.394
	2	3.218	0.287	0.587	0.647	0.425
	3	3.201	0.325	0.524	0.692	0.387
	เฉลี่ย	3.190	0.294	0.533	0.675	0.402
12	1	3.232	0.267	0.494	0.599	0.497
	2	3.214	0.225	0.566	0.609	0.509
	3	3.244	0.294	0.512	0.632	0.524
	เฉลี่ย	3.230	0.262	0.524	0.610	0.510
13	1	1.921	0.211	0.446	0.652	0.403
	2	1.896	0.305	0.489	0.598	0.403
	3	1.973	0.216	0.520	0.550	0.436
	เฉลี่ย	1.930	0.244	0.485	0.600	0.414
14	1	2.438	0.275	0.374	0.613	0.422
	2	2.489	0.232	0.385	0.647	0.482
	3	2.423	0.255	0.369	0.696	0.449
	เฉลี่ย	2.450	0.255	0.376	0.652	0.451

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-21 ข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าระหว่างการทำปุ๋ยหมัก 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยในชุดการทดลอง D (ต่อ)

วันที่	จำนวนที่	สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร) ในการทดลอง				
		D-1	D-2	D-3	D-4	D-5
15	1	3.251	0.325	0.568	0.576	0.498
	2	3.287	0.381	0.570	0.564	0.498
	3	3.242	0.401	0.593	0.519	0.591
	เฉลี่ย	3.260	0.369	0.577	0.553	0.529
16	1	2.787	0.263	0.485	0.588	0.440
	2	2.761	0.288	0.467	0.628	0.445
	3	2.822	0.235	0.410	0.578	0.489
	เฉลี่ย	2.790	0.262	0.454	0.598	0.458
17	1	1.949	0.258	0.411	0.569	0.463
	2	1.947	0.262	0.417	0.518	0.448
	3	1.894	0.296	0.435	0.521	0.427
	เฉลี่ย	1.930	0.272	0.421	0.536	0.446
18	1	2.134	0.242	0.451	0.648	0.545
	2	2.213	0.225	0.505	0.638	0.594
	3	2.163	0.247	0.469	0.601	0.598
	เฉลี่ย	2.170	0.238	0.475	0.629	0.579
19	1	1.921	0.405	0.481	0.609	0.588
	2	1.912	0.388	0.505	0.698	0.576
	3	1.957	0.374	0.469	0.617	0.543
	เฉลี่ย	1.930	0.389	0.485	0.608	0.569
20	1	2.785	0.335	0.467	0.689	0.558
	2	2.712	0.358	0.476	0.715	0.574
	3	2.723	0.312	0.437	0.699	0.551
	เฉลี่ย	2.740	0.335	0.460	0.701	0.561

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-22 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยของปุ๋ยหมักสุดท้ายในชุดการทดลอง A

วัตถุดิบ	ตัวแปร															
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	BD	PD	AFP
A-1_1	8.95	30.1	48.72	-	0.638	70.9	28.26	-	-	-	-	0.279	27.04	1013.00	1074.88	1.34
A-1_2	8.93	30.1	48.75	-	0.646	70.7	28.28	-	-	-	-	0.302	27.06	1010.00	1073.02	1.57
A-1_3	8.94	30.0	48.81	-	0.636	70.8	28.30	-	-	-	-	0.303	27.10	1011.00	1072.93	1.47
A-1_{avg}	8.94	30.1	48.76	9.59	0.640	70.8	28.28	2.95	0.90	2.19	67	0.295	27.08	1011.00	1073.61	1.49
A-2_1	8.97	30.3	48.69	-	0.381	61.6	28.24	-	-	-	-	0.099	4.81	267.00	435.22	59.32
A-2_2	8.98	30.4	48.75	-	0.374	61.4	28.28	-	-	-	-	0.092	4.79	266.00	436.15	59.60
A-2_3	8.99	30.2	48.72	-	0.397	61.3	28.26	-	-	-	-	0.105	4.83	267.25	435.85	59.39
A-2_{avg}	8.98	30.3	48.72	10.20	0.384	61.4	28.26	2.77	0.81	0.85	79	0.099	4.81	266.75	435.74	59.46
A-3_1	7.63	30.3	49.20	-	0.496	51.7	28.54	-	-	-	-	0.125	-1.69	364.75	373.98	39.04
A-3_2	7.64	30.4	48.66	-	0.498	51.8	28.22	-	-	-	-	0.107	-1.76	365.00	373.99	39.00
A-3_3	7.63	30.3	48.00	-	0.512	51.7	27.84	-	-	-	-	0.116	-1.80	365.25	374.69	39.03
A-3_{avg}	7.63	30.3	48.62	9.53	0.502	51.7	28.20	2.96	0.65	0.86	95	0.116	-1.75	365.00	374.22	39.02
A-4_1	7.92	30.1	48.74	-	1.141	70.0	28.27	-	-	-	-	0.279	11.25	927.84	1350.87	16.69
A-4_2	7.92	30.2	49.10	-	1.115	70.1	28.47	-	-	-	-	0.227	11.21	928.60	1351.01	16.62
A-4_3	7.91	30.2	48.86	-	1.134	70.0	28.34	-	-	-	-	0.278	11.47	925.22	1351.63	16.94
A-4_{avg}	7.92	30.2	48.90	9.95	1.130	70.0	28.36	2.85	0.72	1.16	116	0.270	11.31	927.22	1351.17	16.75
A-5_1	7.96	30.2	48.96	-	0.580	72.1	28.40	-	-	-	-	0.320	16.00	410.15	469.10	40.34
A-5_2	7.97	30.3	48.71	-	0.574	72.1	28.25	-	-	-	-	0.332	15.75	410.10	469.90	40.41
A-5_3	7.97	30.3	48.76	-	0.592	72.0	28.28	-	-	-	-	0.316	15.92	409.75	469.29	40.42
A-5_{avg}	7.97	30.3	48.81	9.90	0.582	72.1	28.31	2.86	0.88	1.15	93	0.323	15.89	410.00	469.43	40.39

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-23 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยของปุ๋ยหมักสุดท้ายในชุดการทดลอง B

วัตถุดิบ	ตัวแปร															
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	BD	PD	AFP
$B\text{-}1_1$	8.85	31.1	43.18	-	2.349	67.4	25.04	-	-	-	-	0.212	38.35	1081.00	1315.03	2.10
$B\text{-}1_2$	8.85	31.0	43.05	-	2.328	67.0	24.97	-	-	-	-	0.224	38.07	1079.00	1314.74	2.24
$B\text{-}1_3$	8.84	31.1	43.19	-	2.283	67.8	25.05	-	-	-	-	0.212	38.45	1080.00	1314.90	2.15
$B\text{-}1_{avg}$	8.85	31.1	43.14	10.17	2.320	67.4	25.02	2.46	0.60	1.99	72	0.216	38.29	1080.00	1314.89	2.15
$B\text{-}2_1$	8.15	31.5	50.66	-	0.621	59.3	29.38	-	-	-	-	0.170	15.56	265.25	436.33	59.72
$B\text{-}2_2$	8.14	31.5	50.42	-	0.587	57.2	29.24	-	-	-	-	0.152	16.01	267.14	435.68	59.40
$B\text{-}2_3$	8.15	31.4	51.02	-	0.586	58.2	29.61	-	-	-	-	0.152	15.80	267.62	435.21	59.30
$B\text{-}2_{avg}$	8.15	31.5	50.70	11.86	0.598	58.2	29.41	2.48	0.47	0.85	89	0.160	15.79	266.67	435.74	59.47
$B\text{-}3_1$	7.89	31.5	48.22	-	0.475	57.0	27.97	-	-	-	-	0.215	12.44	365.00	390.05	40.60
$B\text{-}3_2$	7.90	31.3	48.37	-	0.423	56.8	28.04	-	-	-	-	0.217	12.38	365.20	390.50	40.61
$B\text{-}3_3$	7.89	31.6	48.67	-	0.467	58.4	28.23	-	-	-	-	0.225	12.38	364.80	390.17	40.65
$B\text{-}3_{avg}$	7.89	31.5	48.42	18.12	0.455	57.4	28.08	1.55	0.21	0.67	98	0.219	12.40	365.00	390.24	40.62
$B\text{-}4_1$	8.20	30.7	34.20	-	1.258	70.3	19.84	-	-	-	-	0.193	19.15	432.00	1470.12	62.25
$B\text{-}4_2$	8.20	30.8	34.15	-	1.284	69.9	19.80	-	-	-	-	0.199	19.64	433.50	1471.25	62.13
$B\text{-}4_3$	8.21	30.8	34.28	-	1.298	70.1	19.88	-	-	-	-	0.192	19.47	434.50	1471.18	62.04
$B\text{-}4_{avg}$	8.20	30.8	34.21	7.72	1.280	70.1	19.84	2.57	0.49	1.36	119	0.195	19.42	433.33	1470.85	62.14
$B\text{-}5_1$	8.16	30.7	23.88	-	1.569	59.4	13.85	-	-	-	-	0.203	25.24	409.50	817.90	55.33
$B\text{-}5_2$	8.16	30.6	23.57	-	1.602	59.2	13.67	-	-	-	-	0.207	25.68	410.25	818.03	55.25
$B\text{-}5_3$	8.16	30.7	24.10	-	1.539	60.2	13.97	-	-	-	-	0.205	25.43	410.25	817.62	55.24
$B\text{-}5_{avg}$	8.16	30.7	23.85	5.22	1.570	59.6	13.83	2.65	0.46	1.26	96	0.205	25.45	410.00	817.85	55.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-24 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยของปุ๋ยหมักสุดท้ายในชุดการทดลอง C

วัตถุดิบ	ตัวแปร															
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	BD	PD	AFP
$C\text{-}1_1$	8.25	30.4	40.61	-	3.251	76.7	23.55	-	-	-	-	0.219	45.47	1099.00	1379.95	2.00
$C\text{-}1_2$	8.24	30.5	40.94	-	3.271	77.1	23.75	-	-	-	-	0.224	45.22	1100.40	1380.41	1.89
$C\text{-}1_3$	8.24	30.3	40.79	-	3.258	76.9	23.65	-	-	-	-	0.217	45.12	1100.60	1380.00	1.92
$C\text{-}1_{avg}$	8.24	30.4	40.78	10.33	3.260	76.9	23.65	2.29	0.63	2.12	89	0.220	45.27	1100.00	1380.12	1.92
$C\text{-}2_1$	8.51	31.0	35.69	-	0.418	56.2	20.70	-	-	-	-	0.145	23.95	277.26	368.17	53.20
$C\text{-}2_2$	8.50	30.9	36.04	-	0.375	56.5	20.90	-	-	-	-	0.160	24.02	276.60	367.91	53.28
$C\text{-}2_3$	8.50	30.9	35.40	-	0.386	56.5	20.53	-	-	-	-	0.151	24.03	275.22	368.88	53.59
$C\text{-}2_{avg}$	8.50	30.9	35.71	8.12	0.393	56.4	20.71	2.55	0.10	1.00	103	0.152	24.00	276.36	368.32	53.36
$C\text{-}3_1$	8.34	31.3	36.78	-	0.322	54.8	21.33	-	-	-	-	0.193	12.05	323.81	407.98	48.77
$C\text{-}3_2$	8.33	31.2	37.03	-	0.332	55.1	21.48	-	-	-	-	0.201	12.19	325.69	406.88	48.38
$C\text{-}3_3$	8.33	31.3	36.83	-	0.298	54.8	21.36	-	-	-	-	0.190	12.24	325.50	406.80	48.41
$C\text{-}3_{avg}$	8.33	31.3	36.88	9.77	0.317	54.9	21.39	2.19	0.22	0.93	106	0.195	12.16	325.00	407.22	48.52
$C\text{-}4_1$	8.34	30.7	32.33	-	1.597	74.0	18.75	-	-	-	-	0.225	28.45	743.45	1230.80	31.10
$C\text{-}4_2$	8.34	30.8	32.61	-	1.564	74.1	18.91	-	-	-	-	0.229	28.63	742.90	1231.77	31.17
$C\text{-}4_3$	8.33	30.8	32.47	-	1.564	74.0	18.83	-	-	-	-	0.215	28.51	743.55	1231.93	31.11
$C\text{-}4_{avg}$	8.34	30.8	32.47	3.27	1.580	74.0	18.83	2.70	0.47	1.96	105	0.223	28.53	743.30	1231.50	31.12
$C\text{-}5_1$	8.47	31.2	38.86	-	0.611	57.5	22.54	-	-	-	-	0.176	31.75	437.12	478.60	37.16
$C\text{-}5_2$	8.47	31.1	39.14	-	0.614	57.5	22.70	-	-	-	-	0.180	32.14	437.96	479.17	37.08
$C\text{-}5_3$	8.47	31.1	38.91	-	0.635	57.5	22.56	-	-	-	-	0.169	31.84	437.42	478.42	37.10
$C\text{-}5_{avg}$	8.47	31.1	38.97	9.46	0.620	57.5	22.60	2.39	0.24	1.51	90	0.175	31.91	437.50	478.73	37.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-25 ข้อมูลตัวแปรเริ่มต้น 3 ซ้ำและค่าเฉลี่ยของปุ๋ยหมักสุดท้ายในชุดการทดลอง D

วัตถุดิบ	ตัวแปร															
	pH	T	OM	C/N	EC	%MC	C	N	P	K	GI	W	WL	BD	PD	AFP
$D\text{-}1_1$	7.66	30.8	44.01	-	2.785	76.4	25.53	-	-	-	-	0.296	34.90	1003.95	1090.77	2.77
$D\text{-}1_2$	7.67	30.9	44.28	-	2.712	76.5	25.68	-	-	-	-	0.275	34.74	1004.48	1092.00	2.76
$D\text{-}1_3$	7.68	30.9	43.98	-	2.723	76.5	25.50	-	-	-	-	0.260	34.76	1004.17	1090.32	2.73
$D\text{-}1_{avg}$	7.67	30.9	44.09	11.95	2.740	76.5	25.57	2.14	0.10	2.21	61	0.281	34.80	1004.20	1091.03	2.75
$D\text{-}2_1$	8.04	30.3	42.42	-	0.335	54.4	24.60	-	-	-	-	0.178	14.82	380.25	410.00	40.01
$D\text{-}2_2$	8.05	30.4	42.49	-	0.358	54.4	24.65	-	-	-	-	0.174	15.05	380.50	410.50	40.03
$D\text{-}2_3$	8.05	30.4	42.38	-	0.312	54.5	24.58	-	-	-	-	0.161	14.92	379.25	410.82	40.25
$D\text{-}2_{avg}$	8.05	30.4	42.43	12.75	0.335	54.4	24.61	1.93	0.16	0.74	95	0.171	14.93	380.00	410.29	40.08
$D\text{-}3_1$	7.74	30.9	42.46	-	0.467	55.5	24.63	-	-	-	-	0.279	6.37	463.25	494.58	34.66
$D\text{-}3_2$	7.73	30.8	42.71	-	0.476	55.6	24.77	-	-	-	-	0.262	6.42	464.82	495.12	34.47
$D\text{-}3_3$	7.74	30.9	42.63	-	0.437	55.5	24.73	-	-	-	-	0.254	6.29	464.80	495.30	34.49
$D\text{-}3_{avg}$	7.74	30.9	42.60	14.28	0.460	55.5	24.71	1.73	0.15	1.05	87	0.265	6.36	464.29	495.00	34.54
$D\text{-}4_1$	8.54	30.9	40.52	-	0.689	72.9	23.50	-	-	-	-	0.273	17.21	917.10	1299.	16.57
$D\text{-}4_2$	8.55	30.9	40.57	-	0.715	73.0	23.53	-	-	-	-	0.258	17.15	916.15	1270.89	16.03
$D\text{-}4_3$	8.54	30.9	40.71	-	0.699	72.9	23.61	-	-	-	-	0.293	17.15	916.76	1270.16	15.96
$D\text{-}4_{avg}$	8.54	30.9	40.60	11.49	0.701	72.9	23.55	2.05	0.26	1.53	85	0.275	17.17	916.67	1270.32	15.97
$D\text{-}5_1$	8.27	31.3	41.96	-	0.558	53.5	24.34	-	-	-	-	0.231	20.75	474.00	574.36	38.45
$D\text{-}5_2$	8.27	31.3	42.11	-	0.574	53.5	24.43	-	-	-	-	0.248	20.89	480.59	574.78	37.63
$D\text{-}5_3$	8.27	31.3	42.02	-	0.551	53.5	24.37	-	-	-	-	0.238	20.94	479.41	573.31	37.70
$D\text{-}5_{avg}$	8.27	31.3	42.03	10.74	0.561	53.5	24.38	2.27	0.23	1.10	82	0.239	20.86	478.00	574.15	37.93

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก-ค-ภาพเครื่องมือวัดตัวแปรและการวัดตัวแปรในวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ชี้แจง

โดย VFW คือ เศษผักผลไม้ , LW คือ เศษใบจามจุรี , WW คือ เศษกิ่งไม้ และ SC คือ ปุ๋ยหมักสมบูรณ์ , pH คือ พีเอช , T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) , OM คือ อินทรียวัตถุ (ร้อยละ) , C/N คือ อัตราคาร์บอนต่อไนโตรเจน , EC คือ สภาพการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเซนติเมตร) , %MC คือ ความชื้นสะสม (ร้อยละ) , OC คือ คาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละของน้ำหนัก) , N คือ ไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนัก) , P คือ ฟอสฟอรัส (ร้อยละของน้ำหนัก) , K คือ โพแทสเซียม (ร้อยละของน้ำหนัก) , GI คือ ความสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักที่วัดด้วยดัชนีการงอกของเมล็ด (ร้อยละ) , W คือ น้ำหนัก (กิโลกรัม) , WL คือ การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ) และ AFP คือ ความพรุนที่อากาศแทรกเข้าไปได้ (ร้อยละ)

ซึ่งภาพประกอบเหล่านี้ เป็นข้อมูลที่ได้หลังจากการทดลองในการทดลองทำปุ๋ยหมักขนาด 1.25 ลิตร และสำหรับตัวแปรไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัส (P_2O_5) และโพแทสเซียม (K_2O) นั้น ผู้ดำเนินวิจัยไม่ได้ทำการวัดตัวแปรตนเอง เพราะส่งให้ทางสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดินรับไปวิเคราะห์ ฉะนั้นจึงไม่มีภาพประกอบเครื่องมือวัดตัวแปรและการวัดตัวแปรสำหรับ 3 ตัวแปรดังกล่าว แต่จะมีหลักฐานการส่งวิเคราะห์ของ 3 ตัวแปรดังกล่าวแทน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

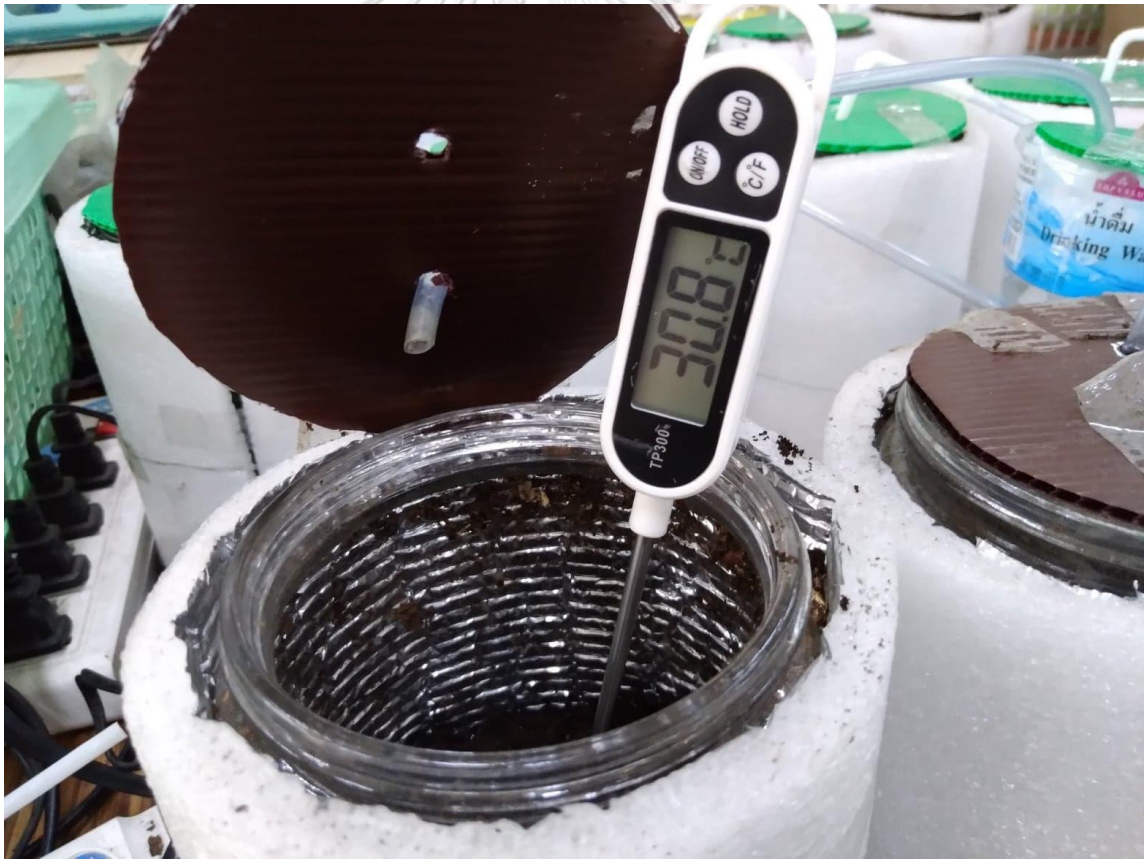
ภาพที่ ค-1 เครื่องวัดความเร็วลม รุ่น GM816 Anemometer

ภาพที่ ค-2 การวัดความเร็วลม

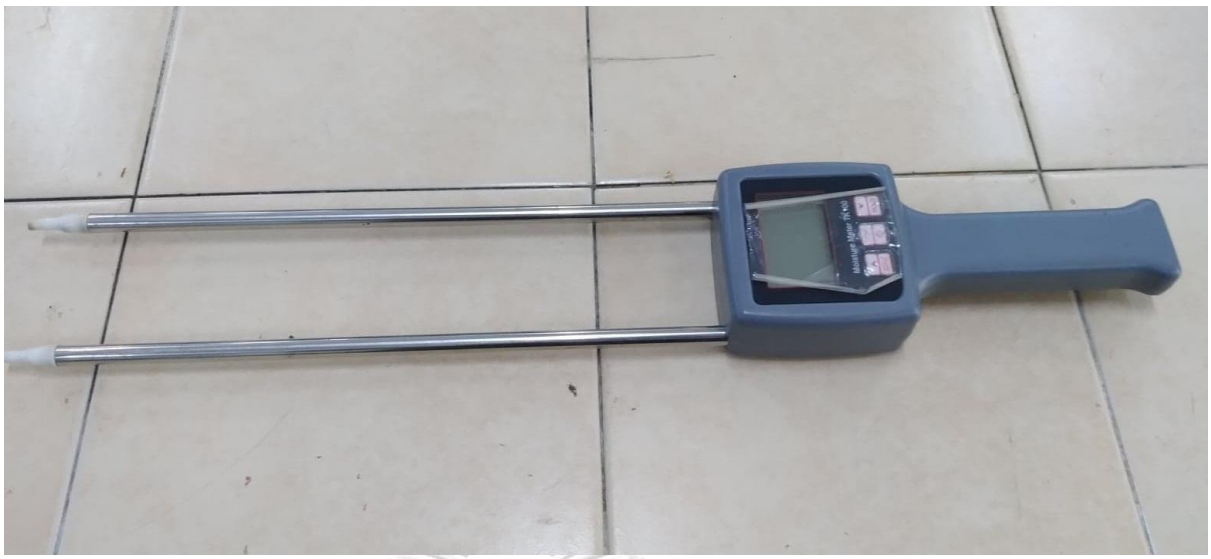
ภาพที่ ค-3 เครื่องวัดพีเอช รุ่น Mettler Toledo

ภาพที่ ค-4 การวัดพีเอช

ภาพที่ ค-5 เทอร์โมมิเตอร์ดิจิตอล รุ่น TP300



ภาพที่ ค-6 การวัดอุณหภูมิ

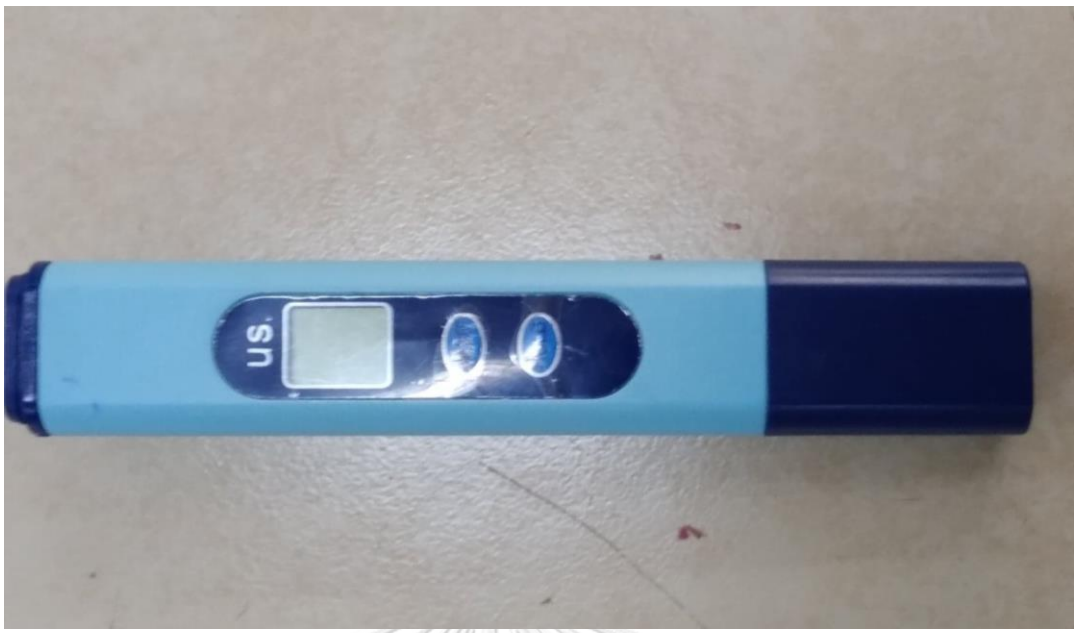


ภาพที่ ค-7 เครื่องวัดความชื้นในดิน รุ่น DMM001

ภาพที่ ค-8 การวัดความชื้นสะสมสำหรับตัวแปรระหว่างการหมัก

ภาพที่ ค-9 การวัดความชื้นสะสมสำหรับตัวแปรก่อนและหลังหมัก (ก่อนอบ)

ภาพที่ ค-10 การวัดความชื้นสะสมสำหรับตัวแปรก่อนและหลังหมัก (หลังอบ)



ภาพที่ ค-11 เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้า รุ่น ECM003

ภาพที่ ค-12 การวัดสภาพการนำไฟฟ้า

ภาพที่ ค-13 การวัด OM และ OC ด้วย Walkey and Black method (ก่อนไตเตรต)

ภาพที่ ค-14 การวัด OM และ OC ด้วย Walkey and Black method (ระหว่างไตเตรต)

ภาพที่ ค-15 การวัด OM และ OC ด้วย Walkey and Black method (หลังไตเตรต)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ที่ กษ 0821.06 / 959

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน

2003/61 ถ. พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์ 0-2561-3086 โทรสาร 0-2561-3521

ชนิดจำนวนตัวอย่าง สิ่งปรับปรุงดิน 14 ตัวอย่าง

เลขรับ 62-3568

เจ้าของตัวอย่าง นายโพธูรย์ พัธรบำรุง

ผู้ส่งตัวอย่าง นายโพธูรย์ พัธรบำรุง

แหล่งที่มาของตัวอย่าง แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม.

ดำเนินการโดย กลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ยและสิ่งปรับปรุงดิน

นายสุชาติ ชูนพอง

รักษาราชการแทน ผอ.กลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ยและสิ่งปรับปรุงดิน

25 กันยายน 2562

F62 : 2002-2015			รายการวิเคราะห์																
ลำดับ ต.ย.	เลขที่ ปฏิบัติการ	Code NO.	OM (% w/w)	OC (% w/w)	C/N ratio	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	pH (1:4)	EC (dS/m)	moisture (% w/w)	particle size	gravel > 5 mm	วัสดุแหลมคม	Na (%)	CaO (%)	MgO (%)	S (%)	GI (%)
1	62035257	VFW				2.44	0.94	2.05											
2	62035258	LW				1.73	0.59	0.85											
3	62035259	WW				2.69	0.57	1.03											
4	62035260	SC				2.95	0.60	0.36											
5	62035261	A-1 เริ่ม				2.71	0.89	0.97											
6	62035262	A-2 เริ่ม				2.46	0.74	0.55											
7	62035263	A-3 เริ่ม				2.44	0.54	0.84											
8	62035264	A-4 เริ่ม				2.46	0.66	1.57											
9	62035265	A-5 เริ่ม				2.65	0.73	1.15											
10	62035266	A-1 จบ				2.95	0.90	2.19											

งานวิจัย / โครงการ -

ผลวิเคราะห์นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
ห้ามนำไปโฆษณาเพื่อการใด ๆ ทั้งสิ้น

ภาพที่ ค-16 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง A และวัตถุดิบหมัก

ที่ กษ 0821.06 / 458

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน

2003/81 ถ. พหลโยธิน แขวงสามเสนนอก เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์ 0-2561-3088 โทรสาร 0-2561-3521

ชนิด/จำนวนตัวอย่าง ดิน/ปรับปรุงดิน 14 ตัวอย่าง

เลขรับ 62-3568

เจ้าของตัวอย่าง นายไพฑูรย์ พัธรบำรุง

ผู้ส่งตัวอย่าง นายไพฑูรย์ พัธรบำรุง

แหล่งที่มาของตัวอย่าง แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม.

ดำเนินการโดย กลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ยและดิน/ปรับปรุงดิน

นายสุทธิเดช ชุนทอง

รักษาราชการแทน ผอ.กลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ยและดิน/ปรับปรุงดิน

กันยายน 2562

F62 : 2002-2015			รายการวิเคราะห์																	
ลำดับ ต.ย.	เลขที่ ปฏิบัติการ	Code NO.	OM (% w/w)	OC (% w/w)	C/N ratio	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	pH (1:4)	EC (dS/m)	moisture (% w/w)	particle size	gravel > 5 mm	วัสดุแหลมคม	Na (%)	CaO (%)	MgO (%)	S (%)	Cl (%)	
11	62035267	A-2 จบ				2.77	0.81	0.85												
12	62035268	A-3 จบ				2.96	0.65	0.86												
13	62035269	A-4 จบ				2.85	0.72	1.16												
14	62035270	A-5 จบ				2.86	0.88	1.15												

งานวิจัย / โครงการ -

กลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ย และดิน
การวิเคราะห์นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น
ห้ามนำไปโฆษณาเพื่อการใด ๆ ทั้งสิ้น

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ ค-17 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง A และวัตถุดิบหมัก (ต่อ)

หมายเหตุ: A-1 เริ่ม ถึง A-5 เริ่ม คือ A-1 ถึง A-5 ในสภาพวัสดุหมักเริ่มต้น และ A-1 จบ ถึง A-5 จบ คือ A-1 ถึง A-5 ในสภาพปุ๋ยหมักสุดท้าย

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน
กรมพัฒนาที่ดิน
2003/61 ถ.พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทร 02-561-4179 โทรสาร 02-561-4179
อีเมล : osd_9@ldd.go.th

เรื่อง แจ้งผลการทดสอบปุ๋ยอินทรีย์
เรียน นายไพฑูรย์ พัชรปารุง

รายงานผลการทดสอบ

รายงานผลการทดสอบเลขที่: -
เลขที่ปฏิบัติการ: 6300966-6300975 (10 ตัวอย่าง)
ประเภทตัวอย่าง: ปุ๋ยอินทรีย์
รายละเอียดตัวอย่าง:
ชื่อผู้ขอบริการ: นายไพฑูรย์ พัชรปารุง
ที่อยู่ผู้รับผลวิเคราะห์: 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร

เลขรับที่: 63-0177
รหัสตัวอย่าง: ป.139-148
วันที่รับตัวอย่าง: 26 ธันวาคม พ.ศ. 2562
วันที่ทดสอบ: 26 ธันวาคม พ.ศ. 2562 ถึง 21 มกราคม พ.ศ. 2563
วันที่รายงานผล: 22 มกราคม พ.ศ. 2563

เลขที่ปฏิบัติการ	วิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์/สิ่งปรับปรุงดิน		
	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)
6300966	2.25	0.69	1.88
6300967	1.79	0.30	0.82
6300968	1.42	0.25	0.71
6300969	1.93	0.20	0.97
6300970	2.70	0.50	1.42
6300971	2.46	0.60	1.99
6300972	2.48	0.47	0.85
6300973	1.55	0.21	0.67

ลงชื่อ สิโรชา เหมือนสุดใจ
(นส.สิโรชา เหมือนสุดใจ)
เจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูล
27 ธันวาคม พ.ศ. 2562

ลงชื่อ
(นส.หทัยรัตน์ พิชัยณรงค์)
ผู้อำนวยการกลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน
21 มกราคม พ.ศ. 2563

ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาต
รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบเท่านั้น

ภาพที่ ค-18 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง B

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน
กรมพัฒนาที่ดิน
2003/61 ถ.พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทร 02-561-4179 โทรสาร 02-561-4179
อีเมล : osd_9@ldd.go.th

เรื่อง แจ้งผลการทดสอบปุ๋ยอินทรีย์
เรียน นายไพฑูรย์ พัชรปารุง

รายงานผลการทดสอบ

รายงานผลการทดสอบเลขที่: -
เลขที่ปฏิบัติการ: 6300966-6300975 (10 ตัวอย่าง)
ประเภทตัวอย่าง: ปุ๋ยอินทรีย์
รายละเอียดตัวอย่าง:
ชื่อผู้ขอบริการ: นายไพฑูรย์ พัชรปารุง
ที่อยู่ผู้รับผลวิเคราะห์: 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร

เลขรับที่: 63-0177
รหัสตัวอย่าง: ป.139-148
วันที่รับตัวอย่าง: 26 ธันวาคม พ.ศ. 2562
วันที่ทดสอบ: 26 ธันวาคม พ.ศ. 2562 ถึง 21 มกราคม พ.ศ. 2563
วันที่รายงานผล: 22 มกราคม พ.ศ. 2563

เลขที่ปฏิบัติการ	วิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์/สิ่งปรับปรุงดิน		
	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)
6300974	2.57	0.49	1.36
6300975	2.65	0.46	1.26

ลงชื่อ สิโรชา เหมือนสุดใจ
(นส.สิโรชา เหมือนสุดใจ)
เจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูล
27 ธันวาคม พ.ศ. 2562

ลงชื่อ
(นส.หทัยรัตน์ พิชัยณรงค์)
ผู้อำนวยการกลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน
21 มกราคม พ.ศ. 2563

ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาต
รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบเท่านั้น
End of report

ภาพที่ ค-19 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง B (ต่อ)

หมายเหตุ: 6300966 ถึง 6300970 คือ B-1 ถึง B-5 ในสภาพวัสดุหมักเริ่มต้น และ 6300966 ถึง 6300970 คือ B-1 ถึง B-5 ในสภาพปุ๋ยหมักสุดท้าย

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน
กรมพัฒนาที่ดิน
2003/61 ถ.พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทร 02-561-4179 โทรสาร 02-561-4179
อีเมล : osd_9@ldd.go.th

เรื่อง แจ้งผลการทดสอบปุ๋ยอินทรีย์
เรียน นายไพฑูรย์ พัชรปารุง

รายงานผลการทดสอบ

รายงานผลการทดสอบเลขที่: -
เลขที่ปฏิบัติการ: 6303781-6303790 (10 ตัวอย่าง)
ประเภทตัวอย่าง: ปุ๋ยอินทรีย์
รายละเอียดตัวอย่าง:
ชื่อผู้ขอบริการ: นายไพฑูรย์ พัชรปารุง
ที่อยู่ผู้รับผลวิเคราะห์: ต.หนองสองห้อง อ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร

เลขรับที่: 63-0633
รหัสตัวอย่าง: ป.493-502
วันที่รับตัวอย่าง: 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563
วันที่ทดสอบ: 2 - 30 มีนาคม พ.ศ. 2563
วันที่รายงานผล: 30 มีนาคม พ.ศ. 2563

เลขที่ปฏิบัติการ	วิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์/สิ่งปรับปรุงดิน		
	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)
6303781	1.88	0.52	1.63
6303782	1.61	0.58	0.87
6303783	1.75	0.26	0.93
6303784	2.28	0.55	1.38
6303785	1.97	0.34	0.99
6303786	2.29	0.63	2.12
6303787	2.55	0.10	1.00
6303788	2.19	0.22	0.93

ลงชื่อ สิโรชา เหมือนสุดใจ
(นางสาวสโรชา เหมือนสุดใจ)
เจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูล
2 มีนาคม พ.ศ. 2563

ลงชื่อ
(นางสาวหทัยรัตน์ พิชัยณรงค์)
ผู้อำนวยการกลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน
30 มีนาคม พ.ศ. 2563

ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาต
รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบเท่านั้น

ภาพที่ ค-20 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง C

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน
กรมพัฒนาที่ดิน
2003/61 ถ.พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทร 02-561-4179 โทรสาร 02-561-4179
อีเมล : osd_9@ldd.go.th

เรื่อง แจ้งผลการทดสอบปุ๋ยอินทรีย์
เรียน นายไพฑูรย์ พัชรปารุง

รายงานผลการทดสอบ

รายงานผลการทดสอบเลขที่: -
เลขที่ปฏิบัติการ: 6303781-6303790 (10 ตัวอย่าง)
ประเภทตัวอย่าง: ปุ๋ยอินทรีย์
รายละเอียดตัวอย่าง:
ชื่อผู้ขอบริการ: นายไพฑูรย์ พัชรปารุง
ที่อยู่ผู้รับผลวิเคราะห์: ต.หนองสองห้อง อ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร

เลขรับที่: 63-0633
รหัสตัวอย่าง: ป.493-502
วันที่รับตัวอย่าง: 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563
วันที่ทดสอบ: 2 - 30 มีนาคม พ.ศ. 2563
วันที่รายงานผล: 30 มีนาคม พ.ศ. 2563

เลขที่ปฏิบัติการ	วิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์/สิ่งปรับปรุงดิน		
	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)
6303789	2.70	0.47	1.96
6303790	2.39	0.24	1.51

ลงชื่อ สิโรชา เหมือนสุดใจ
(นางสาวสโรชา เหมือนสุดใจ)
เจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูล
2 มีนาคม พ.ศ. 2563

ลงชื่อ
(นางสาวหทัยรัตน์ พิชัยณรงค์)
ผู้อำนวยการกลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน
30 มีนาคม พ.ศ. 2563

ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาต
รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบเท่านั้น
End of report

ภาพที่ ค-21 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง C (ต่อ)

หมายเหตุ: 6303781 ถึง 6303785 คือ C-1 ถึง C-5 ในสภาพวัสดุหมักเริ่มต้น และ 6303786 ถึง 6303790 คือ C-1 ถึง C-5 ในสภาพปุ๋ยหมักสุดท้าย

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน
กรมพัฒนาที่ดิน
2003/61 ถ.พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทร 02-561-4179 โทรสาร 02-561-4179
อีเมล : osd_9@ldd.go.th

เรื่อง แจ้งผลการทดสอบปุ๋ยอินทรีย์
เรียน นายไพฑูรย์ พัชรปารุง

รายงานผลการทดสอบ

รายงานผลการทดสอบเลขที่: -
เลขที่ปฏิบัติการ: 6310099-6310108 (10 ตัวอย่าง)
ประเภทตัวอย่าง: ปุ๋ยอินทรีย์
รายละเอียดตัวอย่าง:
ชื่อผู้ขอบริการ: นายไพฑูรย์ พัชรปารุง
ที่อยู่ผู้รับผลวิเคราะห์: ต.หนองสองห้อง อ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร

เลขรับที่: 63-1531
รหัสตัวอย่าง: ป1195-1204
วันที่รับตัวอย่าง: 18 มิถุนายน พ.ศ. 2563
วันที่ทดสอบ: 18 มิถุนายน พ.ศ. 2563 ถึง 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2563
วันที่รายงานผล: 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2563

เลขที่ปฏิบัติการ	วิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์/สิ่งปรับปรุงดิน		
	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)
6310099	1.97	0.29	1.71
6310100	1.15	0.02	0.74
6310101	2.06	0.03	0.92
6310102	2.02	0.04	1.04
6310103	1.66	0.04	0.99
6310104	2.14	0.10	2.21
6310105	1.93	0.16	0.74
6310106	1.73	0.15	1.05

ลงชื่อ
(นางสาวปรางทิพย์ วะนะสุข)
เจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูล
19 มิถุนายน พ.ศ. 2563

ลงชื่อ
(นางสาวหทัยรัตน์ พิชัยณรงค์)
ผู้อำนวยการกลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน
10 กรกฎาคม พ.ศ. 2563

ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาต
รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบเท่านั้น

ภาพที่ ค-22 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง D

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน
กรมพัฒนาที่ดิน
2003/61 ถ.พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
โทร 02-561-4179 โทรสาร 02-561-4179
อีเมล : osd_9@ldd.go.th

เรื่อง แจ้งผลการทดสอบปุ๋ยอินทรีย์
เรียน นายไพฑูรย์ พัชรปารุง

รายงานผลการทดสอบ

รายงานผลการทดสอบเลขที่: -
เลขที่ปฏิบัติการ: 6310099-6310108 (10 ตัวอย่าง)
ประเภทตัวอย่าง: ปุ๋ยอินทรีย์
รายละเอียดตัวอย่าง:
ชื่อผู้ขอบริการ: นายไพฑูรย์ พัชรปารุง
ที่อยู่ผู้รับผลวิเคราะห์: ต.หนองสองห้อง อ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร

เลขรับที่: 63-1531
รหัสตัวอย่าง: ป1195-1204
วันที่รับตัวอย่าง: 18 มิถุนายน พ.ศ. 2563
วันที่ทดสอบ: 18 มิถุนายน พ.ศ. 2563 ถึง 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2563
วันที่รายงานผล: 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2563

เลขที่ปฏิบัติการ	วิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์/สิ่งปรับปรุงดิน		
	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)
6310107	2.05	0.26	1.53
6310108	2.27	0.23	1.10

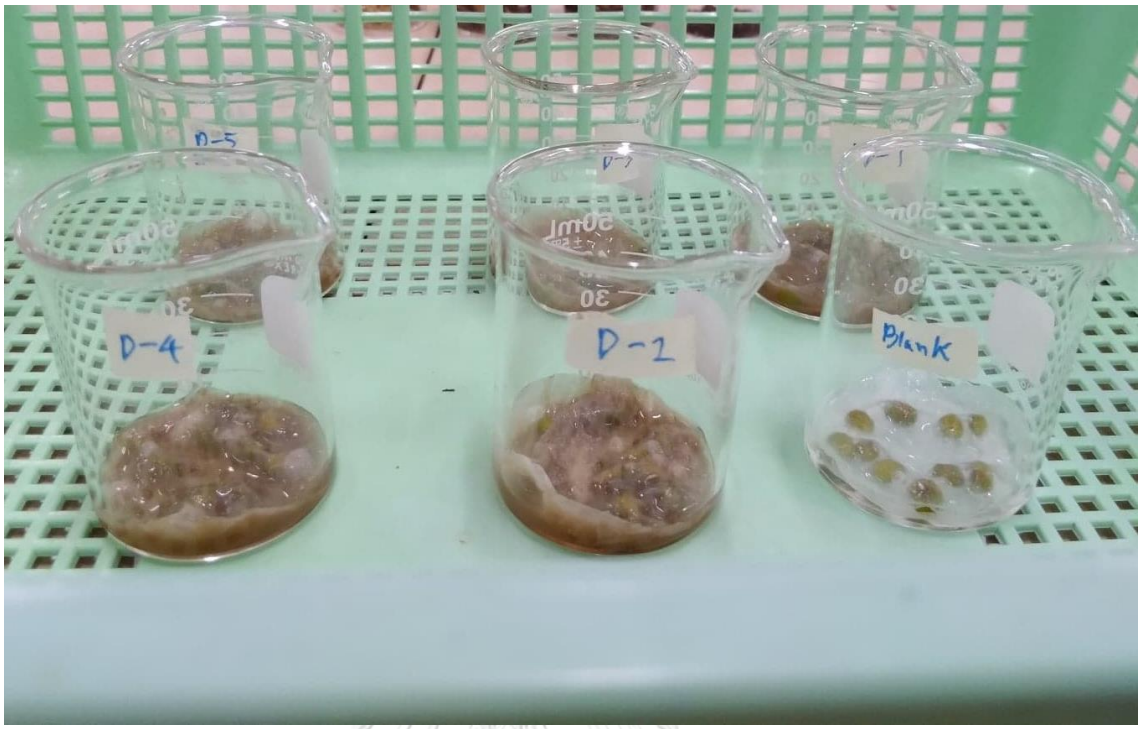
ลงชื่อ
(นางสาวปรางทิพย์ วะนะสุข)
เจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูล
19 มิถุนายน พ.ศ. 2563

ลงชื่อ
(นางสาวหทัยรัตน์ พิชัยณรงค์)
ผู้อำนวยการกลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน
10 กรกฎาคม พ.ศ. 2563

ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาต
รายงานนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบเท่านั้น
End of report

ภาพที่ ค-23 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ค่า N P K สำหรับชุดการทดลอง D (ต่อ)

หมายเหตุ: 6310099 ถึง 6310103 คือ D-1 ถึง D-5 ในสภาพวัสดุหมักเริ่มต้น และ 6310104 ถึง 6310108 คือ D-1 ถึง D-5 ในสภาพปุ๋ยหมักสุดท้าย



ภาพที่ ค-24 การวัดดัชนีการงอกของเมล็ด (ก่อนบ่ม)

ภาพที่ ค-25 การวัดดัชนีการงอกของเมล็ด (หลังบ่ม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University