



รายงานผลงานวิจัย
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

เรื่อง

การผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารด้วยระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุน
Food Waste Composting by Rotary Drum In-Vessel System

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระพงษ์ สว่างปัญญางกูร

2552



รายงานผลงานวิจัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

เรื่อง

การผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารด้วยระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุน
FOOD WASTE COMPOSTING BY ROTARY DRUM IN-VESSEL SYSTEM

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย

ประจำปี 2551

จำนวน 246,000 บาท

หัวหน้าโครงการ

นายธีระพงษ์

สว่างปัญญากร

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

1 / กุมภาพันธ์ / 2552

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารด้วยระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุน ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2551 ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วย การได้รับความช่วยเหลือสนับสนุนจากหน่วยงานและบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย สำนัก วิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความช่วยเหลือ และบริการงานด้านเอกสารด้วยดีตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธีระพงษ์ สว่างปัญญากร

ผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	(ก)
สารบัญภาพ	(ข)
บทคัดย่อ	1
คำนำ	2
การตรวจเอกสาร	5
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	6
อุปกรณ์และวิธีการ	7
ผลการวิจัย	9
วิจารณ์ผลการวิจัย	30
สรุปผลการวิจัย	31
เอกสารอ้างอิง	32
ภาคผนวก	33



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แผนการทดลอง	8
2	ผลการวิเคราะห์ปัญหาหลักของการทำงานแบบทีละครั้ง	21
3	แผนการทดลองใหม่	22
4	ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหาหลักเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปัญหามินิทีเรีย	23
	ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551	
5	ค่าความชื้นของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 1	34
6	ค่าความชื้นของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 2	34
7	ค่าความชื้นของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 3	34
8	ค่าความชื้นของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 4	35
9	ค่าอุณหภูมิของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 1	35
10	ค่าอุณหภูมิของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 2	36
11	ค่าอุณหภูมิของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 3	37
12	ค่าอุณหภูมิของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 4	38

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การประกอบแผ่นเหล็กให้เป็นผนังของถังหมุน	10
2	การประกอบชุดโครงขาตั้งถังหมุน	11
3	การประกอบถังหมุนเข้ากับโครงขาตั้ง	11
4	โซ่และชุดลูกล้อประกอบการทำงานของถัง	12
5	แผ่นพลิกวัสดุภายในถัง	12
6	ชุดเกียร์ทดรอบ	13
7	ฝาถังแบบโปร่งเพื่อให้มีการถ่ายเทของอากาศ	13
8	ชุดปรับระดับตามความยาวของถัง	14
9	ระบบถังหมุน ณ ศูนย์สาธิตการผลิตปุ๋ยหมักระบบกองเดิมอากาศแม่ใจ 70 ปี	14
10	เศษอาหารภายในถังหมุน	16
11	การนำวัสดุเข้าในถังหมุน	16
12	การเปียกชื้นมากเกินไปของวัสดุทำให้มีกลิ่นเหม็น	17
13	การเกิดเป็นก้อนกลมขนาดใหญ่จากผลของการที่วัสดุแห้งเกินไป และการพลิกกลับภายในถัง	17
14	ลักษณะภายในก้อนกลมที่มีกลิ่นเหม็นเนื่องจากเกิดการย่อยสลาย แบบไม่ใช้ออกซิเจน	18
15	การนำวัสดุที่ยังไม่เสถียรไปเข้ากระบวนการเดิมอากาศ	19
16	สภาพวัสดุภายในถังแบบทีละครั้งที่มีความเสถียรพร้อมจะเป็นปุ๋ยหมัก	20
17	การนำปุ๋ยหมักที่เสถียรมาทำให้แห้งภายในช่องพลาสติก	20
18	ปุ๋ยหมักที่แห้งแล้วและนำไปผ่านเครื่องย่อยเพื่อทำให้มีขนาดเล็กสม่ำเสมอ	21
19	ค่าความชื้นของวัสดุภายในถังของแต่ละตัวรับ	23
20	ค่าอุณหภูมิภายในถังหมุนของตัวรับที่ 1	24
21	ค่าอุณหภูมิภายในถังหมุนของตัวรับที่ 2	24
22	ค่าอุณหภูมิภายในถังหมุนของตัวรับที่ 3	25
23	ค่าอุณหภูมิภายในถังหมุนของตัวรับที่ 4	25
24	การวัดอุณหภูมิวัสดุภายในถังหมุน	26
25	เศษอาหารจากร้านอาหารที่ใช้เป็นวัตถุดิบ	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	มูลโคที่ใช้เป็นแหล่งจุลินทรีย์และไนโตรเจน	27
27	เศษใบไม้ที่ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพูนโครงสร้าง	27
28	วัสดุภายในถังหมุน	28
29	วัสดุในถังหมุนที่อายุ 15 วัน	28
30	การทำให้ปุ๋ยอินทรีย์ที่ออกมาจากถังหมุนแห้ง	29
31	ปุ๋ยอินทรีย์ที่แห้งสนิทพร้อมที่จะนำไปตีป่นให้มีขนาดเล็กสม่ำเสมอ	29
32	อุปกรณ์ตัดไฟ	30



การผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารด้วยระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุน FOOD WASTE COMPOSTING BY ROTARY DRUM IN-VESSEL SYSTEM

ธีระพงษ์ สว่างปัญญากร¹
TEERAPONG SAWANGPANYANGKURA

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารด้วยระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุนในระดับจำลองสภาพจริง เพื่อให้ได้เกณฑ์การออกแบบคือ สัดส่วนผสมที่เหมาะสมของวัตถุดิบ ถึงปฏิกิริยาเป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร ยาว 2.4 เมตร ทำจากเหล็กแผ่นหนา 3 มม. มีรูที่ฝาปิดเปิดหัวท้ายเพื่อเป็นทางเข้าออกของอากาศ ตัวถังหมุนรอบแกนในแนวระดับด้วยความเร็วประมาณ 10 รอบต่อนาที ด้วยระบบทดเกียร์และมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ผ่นภายในติดตั้งใบกวน วัตถุดิบเป็นเศษอาหาร มูลโค และเศษกระดาษใช้แล้วของคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ผ่านเครื่องย่อย จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า เศษกระดาษทำให้วัสดุภายในถังหมุ่นมีโครงสร้างที่ไม่เหมาะสมและการควบคุมความชื้นทำได้ยาก จึงได้ปรับแผนการทำงานใหม่ให้มีความถี่ของการหมุ่นคงที่คือ หมุ่น 30 นาทีหยุด 2 ชั่วโมง และเปลี่ยนวัสดุเพิ่มความพรุนจากเศษกระดาษเป็นเศษใบไม้แห้ง ทำงานแบบทีละครั้ง การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ดำรับ คือ เศษอาหารต่อมูลโคต่อเศษใบไม้ 1 : 0.5 : 3 1 : 0.5 : 4 1 : 0.5 : 5 และ 1 : 0.5 : 6 (โดยปริมาตร) วัสดุอยู่ในถังหมุ่น 15 วัน หลังจากนั้นนำออกไปทำให้แห้งและนำไปตีป่นให้มีขนาดเล็ก แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าธาตุอาหาร มีการวัดค่าอุณหภูมิภายในถัง 3 จุดวันละครั้ง

การทดลองตามแผนงานใหม่เริ่มเดือนพฤศจิกายน 2551 จนถึงเดือนมกราคม 2552 พบว่าการทดลองทุกดำรับยังคงมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวขณะทำการหมุ่น แต่เมื่อนำออกจากถังหมุ่นและเป็นปุ๋ยหมักแล้วก็ไม่มีกลิ่นใด ๆ โดยตัวอย่างปุ๋ยหมักจากการทดลองดำรับที่ 2 ที่มีอัตราส่วนเศษอาหารต่อมูลโคต่อเศษใบไม้ 1 : 0.5 : 4 เป็นค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551

คำนำ

การคัดแยกและนำประโยชน์กลับคืนเศษอาหารในขยะมูลฝอยเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการจัดการของเสียในชุมชนแบบบูรณาการ สามารถลดปริมาณขยะมูลฝอยที่จะต้องจัดการได้มากถึงประมาณร้อยละ 30-50 อันจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการ ลดการเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพในหลุมฝังกลบที่เป็นสาเหตุของการเกิดน้ำชะขยะและก๊าซฝังกลบที่มีความเป็นพิษสูงได้ รวมทั้งลดกลิ่นเหม็นของขยะมูลฝอยในระหว่างการจัดการของเสียที่เป็นผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพ อันเป็นสาเหตุหนึ่งของการต่อต้านการจัดการขยะมูลฝอยโดยชุมชนต่าง ๆ

ปัจจุบัน ชุมชนชนบทส่วนใหญ่ได้รับการณรงค์และส่งเสริมให้คัดแยกเศษอาหารเพื่อทำปุ๋ยหมักชีวภาพไปใช้ในงานเกษตรกรรม ซึ่งเป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน และพบว่าขยะมูลฝอยที่จะต้องจัดการมีปริมาณลดลง และในหลายชุมชนสามารถมีการจัดการขยะมูลฝอยแบบบูรณาการได้

แต่ในบางชุมชนเมืองที่ไม่มีพื้นที่ทางการเกษตรกรรม กลับพบว่าการนำเศษอาหารมาทำปุ๋ยหมักชีวภาพก่อให้เกิดปัญหาต่อหน่วยงานที่รับผิดชอบ กล่าวคือไม่มีผู้มาขอรับปุ๋ยหมักชีวภาพที่ผลิตได้เพื่อนำไปใช้ในงานเกษตรกรรม ส่งผลให้การจัดการขยะมูลฝอยเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ

แนวทางหนึ่งที่สามารถนำไปใช้แก้ปัญหามจัดการเศษอาหารของชุมชนเมืองคือ นำไปทำปุ๋ยหมักหรือปุ๋ยอินทรีย์ (Compost) ซึ่งเป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะใช้ออกซิเจน โดยการนำไปทำปุ๋ยหมักในถังปิดเติมอากาศ (In-Vessel System) ซึ่งชาติ และคณะ (2545) ได้ทำการทดลองใช้ถังหมักมูลฝอยจากตลาดสดและแหล่งท่องเที่ยวแบบเติมอากาศขนาด 2,000 ลิตร หมักร่วมกับใบไม้แห้งในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ใช้อัตราการเติมอากาศ 0.8 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยต่อวัน มีระยะเวลาการหมัก 30 วัน ค่าความชื้นระหว่างหมักมีค่าร้อยละ 40-80 พบว่า ค่าอุณหภูมิขึ้นสูงสุดอยู่ในช่วง 55-70 องศาเซลเซียสที่เวลา 7-8 วัน วัสดุหมักที่ได้มีปริมาณธาตุอาหารส่วนใหญ่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยหมักของกรมส่งเสริมการเกษตรและกรมพัฒนาที่ดิน

นอกจากนี้ ชีระพงษ์ และคณะ (2548) ได้ทำการวิจัยการหมักปุ๋ยจากเศษอาหารด้วยระบบถังปิดเติมอากาศแบบแนวตั้ง (Vertical In-Vessel System) เพื่อหาช่วงเวลาการเติมอากาศที่เหมาะสม วัตถุดิบประกอบด้วยเศษอาหารต่อวัสดุเพิ่มความพรุน (Bulking Agent) ที่ทำจากเศษกิ่งไม้ผ่านเครื่องย่อย (Wood Chips) ในสัดส่วน 4 : 1 โดยปริมาตร เพื่อให้วัสดุเพิ่มความพรุนเป็นแหล่ง

ของคาร์บอน ดูดซับความชื้น และช่วยลดการอัดแน่นภายในถัง ดังปฏิกิริยาเป็นถังคอนกรีตสำเร็จรูป เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร สูง 2.6 เมตร มีฝาปิด เต็มวัตถุดิบที่ด้านบนวันละ 60 ลิตร และลำเลียง ออกที่ก้นถังวันละ 30 ลิตร พัดลมโบลเวอร์ (Blower) เป็นแบบกรงกระรอกมอเตอร์ 3 แรงม้า การ ทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตำรับคือ เต็มอากาศ 15 นาทีหยุด 1 ชั่วโมง เต็มอากาศ 15 นาทีหยุด 2 ชั่วโมง และเต็มอากาศ 15 นาทีหยุด 30 นาที ทำการทดลองจนครบระยะเวลาตำรับละ 30 วัน หลังจากนั้นนำปุ๋ยหมักที่ได้ไปบ่ม (Cure) ให้แห้งในที่ร่ม พบว่า มีปริมาณน้ำเกิดขึ้นเฉลี่ยวันละ 2.18, 2.82 และ 0.52 ลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ย 5.31, 3.78 และ 3.83 มีค่า C/N Ratio 16.03, 19.52 และ 20.64 มีเกรดปุ๋ย ($N-P_2O_5-K_2O$) 3.12-1.19-1.25, 2.47-1.30-0.76 และ 2.47-1.0-0.29 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) เฉลี่ย 16.12, 13.65 และ 9.84 เดซิซีเมนต่อเมตร และมี ค่าไฟฟ้า 0.77, 0.43 และ 1.27 บาทต่อกิโลกรัมวัตถุดิบของการทดลองตำรับที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ วัตถุดิบมีปริมาตรลดลงเฉลี่ยร้อยละ 65.4 ปุ๋ยหมักที่ทำให้แห้งแล้วและร่อนแยกออกจาก วัสดุเพิ่มความพรุนมีขนาดเล็กละเอียด มีปริมาณธาตุอาหารส่วนใหญ่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ย อินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร

ถึงแม้ว่าผลการวิจัยการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารในระบบถังปิดเติมอากาศแบบแนวตั้ง ของ ธีระพงษ์ และคณะ (2548) จะมีความเป็นไปได้ในการนำไปขยายผลให้ชุมชนเมืองนำไปใช้ผลิต ปุ๋ยหมักจากเศษอาหารเพื่อแก้ปัญหาการจัดการขยะมูลฝอย แต่ก็ยังมีข้อด้อยบางประการ คือ

- 1) ภายในระบบไม่มีกลไกที่ใช้พลิกกลับวัสดุ ทำให้การเติมอากาศแก่จุลินทรีย์เป็นไปอย่าง ไม่ทั่วถึงและมีการอัดตัวแน่นตามแนวตั้ง ทำให้เกิดการย่อยสลายในสภาวะใช้ออกซิเจนไม่สมบูรณ์
- 2) ระบบนี้จำเป็นต้องใช้วัสดุเพิ่มความพรุน (Wood Chips) เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอน ช่วย พยุงโครงสร้าง และดูดซับความชื้น ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าและแรงงานในการย่อยกิ่งไม้ ในขณะที่ แหล่งคาร์บอนและดูดซับความชื้นอื่น เช่น กระดาษรีไซเคิลที่ผ่านเครื่องย่อย เป็นต้น ที่หาได้ง่ายแต่ ไม่สามารถนำมาใช้ได้ เพราะจะทำให้เกิดการอัดตัวเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้น การวิจัยเพื่อหาแนวทางเลือกในการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารที่สามารถแก้ไขข้อด้อย ของระบบถังปิดเติมอากาศแบบแนวตั้งข้างต้น โดยทำการศึกษาการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหาร ด้วยระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุน (Rotary Drum In-Vessel System) ที่ใช้เศษใบไม้หรือ กระดาษรีไซเคิลที่ผ่านเครื่องย่อย เป็นวัสดุเพิ่มความพรุนเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับกิจกรรมการ ย่อยสลายของจุลินทรีย์ และดูดซับความชื้น ที่มีการพลิกกลับภายในถังหมุนแนวนอน ซึ่งข้อดีของ ระบบนี้คือ

- 1) มีการพลิกกลับของวัสดุจากการหมุน ทำให้การเติมอากาศแก่ระบบเป็นไปอย่างทั่วถึง

2) เนื่องจากไม่เกิดการอัดตัวภายในถัง จึงสามารถเปลี่ยนวัสดุเพิ่มความพรุนจากเศษไม้เป็นกระดาษรีไซเคิลที่ผ่านเครื่องย่อยได้ เป็นการนำประโยชน์กลับคืนจากกระดาษใช้แล้วได้อีกทางหนึ่ง

3) สามารถติดตั้งฉนวนกันความร้อนให้กับถังปฏิกิริยา เพื่อให้มีอุณหภูมิภายในถังเหมาะสมกับการย่อยสลายของจุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนประเภทชอบความร้อนสูง (Thermophilic Micro-organisms) ซึ่งจะช่วยให้การผลิตปุ๋ยหมักแล้วเสร็จในเวลาอันสั้น ประมาณ 2-3 สัปดาห์

4) การทำงานของระบบสอดคล้องกับการเกิดเศษอาหารที่เกิดต่อเนื่องทุกวันในสภาพจริง การศึกษาจะมุ่งเน้นการใช้วัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น ให้มีการทำงานที่ง่าย ชุมชนสามารถนำไปผลิตซ้ำได้ ประหยัดพลังงาน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate Technology) การคัดแยกเศษอาหารตั้งแต่ต้นทางที่แหล่งเกิด (Source Separation) ออกจากกระแสน้ำเสีย (Waste Stream) และนำประโยชน์กลับคืนในรูปของปุ๋ยหมัก จะช่วยลดปัญหาการเกิดน้ำชะขยะและก๊าซหุ้มฝักกลบภายในหลุมฝังกลบที่เป็นพิษต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และช่วยลดปัญหาการบริหารจัดการขยะมูลฝอยในชุมชนเมืองที่เริ่มทวีความรุนแรงในปัจจุบันได้

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยแบบ C&D (Copy and Development) ซึ่งระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุนนี้เป็นองค์ความรู้ที่มีอยู่แล้วในต่างประเทศ การนำมาวิจัยและพัฒนาต่อยอดให้ได้องค์ความรู้หรือนวัตกรรมใหม่ที่เหมาะสมและสอดคล้องกับบริบทของชนบทไทย จะทำให้สามารถช่วยแก้ปัญหาให้กับชุมชนเมืองได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ ผู้วิจัยมีองค์ความรู้และมีความเข้าใจอย่างลึกซึ้งในกระบวนการทำปุ๋ยหมักด้วยการเติมอากาศ (ธีระพงษ์, 2549) โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลงานวิจัยระบบกองเติมอากาศที่มุ่งเน้นการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษพืช ได้รับรางวัลรองชนะเลิศอันดับ 2 ด้านสังคมของการประกวดนวัตกรรมแห่งชาติ ปี 2549 จัดโดยสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

การตรวจเอกสาร

การทำปุ๋ยหมักแบบอัตราเร่ง (High Rate Composting) เพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักในเวลาอันสั้น ประมาณ 1 เดือน จำเป็นต้องมีการควบคุมปัจจัยสิ่งแวดล้อมในระบบให้เหมาะสมต่อการย่อยสลาย

โดยจุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนจนกว่าการย่อยสลายจะสิ้นสุด ปัจจัยหลักที่สำคัญมีดังนี้ (ธีระพงษ์, 2549ข)

1. มีความชื้นพอดี จุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนต้องการความชื้นที่เหมาะสม การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะหยุดชะงักถ้าวัตถุดิบแห้งเกินไปหรือมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 8-12 ความชื้นที่เหมาะสมคือร้อยละ 45-55

2. มีจุลินทรีย์มากพอ การย่อยสลายจะเกิดได้รวดเร็วถ้าในระบบมีจุลินทรีย์อยู่มาก แหล่งจุลินทรีย์ที่หาได้ง่าย ได้แก่ มูลสัตว์ทุกชนิด ปุ๋ยหมักที่เพิ่งหมักเสร็จ หรือหัวเชื้อ พด 1 เป็นต้น จุลินทรีย์ที่อยู่ในกองปุ๋ยจะมีการพัฒนาจำนวนและคัดเลือกสายพันธุ์ตามธรรมชาติ มีการทำงานเป็นระบบนิเวศ ประกอบด้วย รา แบคทีเรีย แอคติโนมัยซิส และโรติเฟอร์ เป็นต้น

3. มีออกซิเจนภายในกองปุ๋ยเพียงพอ การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนจะมีปฏิกิริยาที่รวดเร็วกว่าจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนหลายเท่า การหมักปุ๋ยแบบอัตราเร่งจึงมุ่งเน้นให้มีการเติมออกซิเจนแก่ระบบให้มีออกซิเจนอย่างเพียงพออยู่เสมอ โดยเติมอากาศด้วยพัดลมโบรเวอร์ (Blower) เป็นครั้ง ๆ

4. มีอุณหภูมิสูงภายในกองปุ๋ย ปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จะให้ความร้อนออกมา ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์กลุ่มเทอร์โมฟิลิก (Thermophiles) ที่ชอบอุณหภูมิสูงและส่วนใหญ่เป็นพวกรา (Fungi) จะพัฒนาตัวเองขึ้นมาและย่อยสลายวัตถุดิบได้เร็วมาก และเมื่อค่าอุณหภูมิลดต่ำลงเป็น 45-60 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์กลุ่มเมโซฟิลิก (Mesophiles) ที่ชอบความร้อนปานกลางซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียและรา ก็จะเข้ามาทำหน้าที่ย่อยสลายแทน

5. ขนาดของวัตถุดิบ วัตถุดิบที่จะนำมาหมักปุ๋ยควรถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงพอสมควร ให้มีขนาดเล็กประมาณ 1-3 นิ้ว เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ แต่ถ้าวัตถุดิบถูกย่อยจนมีขนาดเล็กเกินไปจนไม่มีการระบายอากาศที่ดี จะทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชะงักลงได้

6. ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัตถุดิบ ธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนมีความสำคัญต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ เพราะจุลินทรีย์ต้องการทั้งสองธาตุในการเมทาบอลิซึมเพื่อให้ได้พลังงานและสร้างเซลล์ใหม่ โดยปกติแล้วคาร์บอนจะได้จากเศษพืชและเศษกระดาษ ส่วนไนโตรเจนจะได้จากเศษอาหารและมูลสัตว์ การผลิตปุ๋ยหมักระบบเติมอากาศต้องการค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ใน ช่วง 20:1 ถึง 25:1 (Diaz et al, 1993) วัตถุดิบที่มีค่าสัดส่วนแตกต่างกันไปจากนี้ มีแนวโน้มที่การย่อยสลายจะช้าลง

การควบคุมให้ภายในระบบมีปัจจัยดังกล่าวครบถ้วนอยู่เสมอ พร้อมกับการพลิกกอง เติมอากาศ และบรรจุวัสดุให้อยู่ภายในถังปฏิกิริยาแบบปิดเพื่อป้องกันกลิ่นและแมลงวัน จะมีความ

เหมาะสมกับการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหาร ซึ่งกระบวนการย่อยสลายจะเสร็จสิ้นในเวลาประมาณ 2-3 สัปดาห์ หลังจากนั้นจะนำไปป้อน (Cure) ในที่ร่มโดยการทิ้งไว้ให้แห้งสนิทเพื่อให้จุลินทรีย์สงบตัวอีกประมาณ 2-3 สัปดาห์ แล้วจึงนำไปบรรจุกระสอบเพื่อใช้ประโยชน์ได้

Cawthon (1997) ศึกษาการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารที่รวบรวมได้จากโรงอาหารของมหาวิทยาลัย Texas A&M University-Commerce ด้วยปฏิกริยาระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุน (In-Vessel Rotary Drum Composter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ฟุต ยาว 6 ฟุต มีเศษกระดาษที่ผ่านเครื่องย่อยเป็นวัสดุเพิ่มความพรุน เศษอาหาร 700 ปอนด์และเศษกระดาษ 80 ปอนด์ถูกป้อนเข้าไปในถังครั้งแรก หลังจากนั้นเศษกระดาษถูกป้อนทุกวันจนวัสดุมีความพรุนพอดีและมีความชื้นประมาณร้อยละ 50 ถังหมุนด้วยความเร็ว 3 รอบต่อชั่วโมง ภายในวันที่ 7 เศษกระดาษถูกเติมทั้งสิ้น 200 ปอนด์ อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกเกิดในวันที่ 12 ด้วยค่าอุณหภูมิ 160 องศาฟาเรนไฮต์ พบว่า การเกิดอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกขึ้นอยู่กับความพรุนของวัสดุภายในถังปฏิกริยา

Smith et al (2006) ศึกษาการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารจากคอกด้วยถังปฏิกริยาระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุน การทดลองเป็นแบบทีละครั้ง (Batch) แบ่งออกเป็น 3 ดำรับ คือ เศษไม้กับเศษอาหารในสัดส่วน 2:1 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ วัสดุดิบมีค่าความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างเป็นกรดประมาณ 4.5 พบว่า ค่าระดับออกซิเจนภายในถังส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าร้อยละ 5 อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (มากกว่า 45 องศาเซลเซียส) เกิดภายในวันที่ 2-5 และความเป็นกรด-ด่างค่อย ๆ มีค่าสูงขึ้นจนอยู่ในช่วง 5.0-7.5 การทดลองดำรับที่สองซึ่งมีสัดส่วนเศษไม้ต่อเศษอาหาร 3:1 เป็นการทดลองที่ให้ผลดีที่สุด เพราะให้ค่าอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกเกิดขึ้นเร็วที่สุดและรักษาค่าระดับอุณหภูมิสูงได้ดีที่สุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อวิจัยและพัฒนาการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารวันละ 100 ลิตร ด้วยระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุนในระดับจำลองสภาพจริง (Pilot Scale) เพื่อให้ได้เกณฑ์การออกแบบ คือ สัดส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างเศษอาหารกับเศษใบไม้

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยมีแนวทางการดำเนินงานดังนี้

1. ประกอบติดตั้งถังปฏิกรณ์หมุน 1 ชุด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร ยาว 2.4 เมตร ทำจากเหล็กแผ่น มีฝาปิดเปิดเพื่อนำวัสดุใส่ประจำวันได้ หมุนรอบแกนในแนวระดับด้วยความเร็วรอบประมาณ 10 รอบต่อนาที ด้วยระบบทดเกียร์และมอเตอร์ขนาดไม่เกิน 3 แรงม้า ผนังภายในติดตั้งใบกวน

2. นำเศษอาหารจากร้านค้าที่อยู่โดยรอบมหาวิทยาลัยหรือจากหน่วยงานอื่นที่มีปัญหาการจัดการเศษอาหาร มาใส่ในถังวันละ 100 ลิตร พร้อมกับเศษใบไม้ในสัดส่วนที่กำหนดในตารางที่ 1 และมูลโควันละ 1 กิโลกรัม รักษาความชื้นภายในถังให้อยู่ในช่วงร้อยละ 45-55 วัดอุณหภูมิภายในถังวันละ 1 ครั้ง

ตารางที่ 1 แผนการทดลอง

การทดลองที่ 1 เศษอาหารต่อเศษกระดาษ 1 : 1	
ตำรับที่ 1	เติมอากาศ 15 นาที หยุด 1 ชั่วโมง
ตำรับที่ 2	เติมอากาศ 15 นาที หยุด 2 ชั่วโมง
ตำรับที่ 3	เติมอากาศ 15 นาที หยุด 3 ชั่วโมง
การทดลองที่ 2 เศษอาหารต่อเศษกระดาษ 2 : 1	
ตำรับที่ 1	เติมอากาศ 15 นาที หยุด 1 ชั่วโมง
ตำรับที่ 2	เติมอากาศ 15 นาที หยุด 2 ชั่วโมง
ตำรับที่ 3	เติมอากาศ 15 นาที หยุด 3 ชั่วโมง
การทดลองที่ 3 เศษอาหารต่อเศษกระดาษ 3 : 1	
ตำรับที่ 1	เติมอากาศ 15 นาที หยุด 1 ชั่วโมง
ตำรับที่ 2	เติมอากาศ 15 นาที หยุด 2 ชั่วโมง
ตำรับที่ 3	เติมอากาศ 15 นาที หยุด 3 ชั่วโมง

3. เมื่อกระบวนการหมักปุ๋ยเสร็จสิ้น (พิจารณาจากการที่วัตถุดิบเปลี่ยนเป็นสีคล้ำ น้ำหนักเบา อ่อนนุ่ม และไม่มีกลิ่น) นำไปพักในที่ร่มให้แห้งเพื่อให้จุลินทรีย์สงบตัว (Stabilization Period) แล้วนำปุ๋ยหมักที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าสภาพนำไฟฟ้า ค่าความเป็นกรดและด่าง ธาตุอาหารไนโตรเจน

ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร และทำการวิเคราะห์ค่าให้จ่ายเพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่า

4. การทดลองกระทำที่ศูนย์สาธิตการผลิตปุ๋ยหมักระบบกองเดิมอากาศ แม่โจ้ 70 ปี ทำการทดลองจนครบกำหนด 12 เดือน แล้ววิเคราะห์ วิจัย และสรุปผล

5. จัดการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการให้แก่ผู้บริหารองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตจังหวัด เชียงใหม่ซึ่งกำลังมีปัญหารุนแรงในการจัดการขยะมูลฝอย จำนวน 50 คน

6. รายงานผลการวิจัย นำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับประเทศอย่างน้อย 1 ครั้ง

7. จัดทำเป็นข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมโยงกับเว็บไซต์ www.compost.mju.ac.th เพื่อให้ผู้สนใจเข้าถึงข้อมูลได้ง่าย

8. ยื่นขอจดทะเบียนอนุสิทธิบัตร

9. เมื่อปิดโครงการ ยังคงให้มีการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารอย่างต่อเนื่องที่ศูนย์สาธิต โดยใช้ทรัพยากรและศักยภาพของศูนย์สาธิตฯ ให้บริการวิชาการแก่ชุมชนต่าง ๆ ในระยะยาว

10. แสวงหาแหล่งทุนอื่นในอนาคตเพื่อการถ่ายทอดเทคโนโลยี เช่น ขอรับการสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เป็นต้น ซึ่งศูนย์สาธิตฯ นี้ ก็เป็น 1 ใน 14 ศูนย์เรียนรู้การเกษตรของมหาวิทยาลัยที่ได้รับการสนับสนุนจาก สวทช. ในปี 2549 ด้วยเช่นกัน

สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูลคือ ศูนย์สาธิตการผลิตปุ๋ยหมักระบบกองเดิมอากาศ แม่โจ้ 70 ปี

ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้เริ่มดำเนินการในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 โดยได้เริ่มประกอบและติดตั้งชุดถังหมุน (Rotary Drum) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.70 เมตร ยาว 2.4 เมตร วางบนฐานโครงเหล็กที่มีลูกล้อเหล็กสามารถเคลื่อนย้ายได้ ตัวถังทำจากแผ่นเหล็กหนา 3 มม. หมุนรอบตัวได้ด้วยมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ไฟ 220 โวลต์ การหมุนของถังถูกปรับให้หมุนช้าลงจนมีค่าประมาณ 10 รอบต่อนาทีด้วยชุดเกียร์ทดรอบ การทำงานของถังจะกำหนดด้วยอุปกรณ์ตัดไฟ (Timer) ภายในถังมีแผ่นเหล็กกันเพื่อใช้พลิกกลับวัสดุภายในถัง ด้านหัวท้ายเป็นฝาแผ่นเหล็กที่เปิดปิดนำวัสดุเข้าออกและบุด้วยแผ่นเหล็กแบบโป่งเพื่อให้อากาศเข้าออกและกันแมลงวันได้ ระดับตามความยาวของถังจะถูกปรับให้เอียงได้ด้วยชุดเกลียวปรับระดับ ตัวถังมีช่องรู (Port) สำหรับเก็บค่าอุณหภูมิภายในถัง 3 แห่ง ภาพที่ 1-9 แสดงการประกอบติดตั้งชุดถังหมุน การประกอบแล้วเสร็จในเดือนมิถุนายน 2551



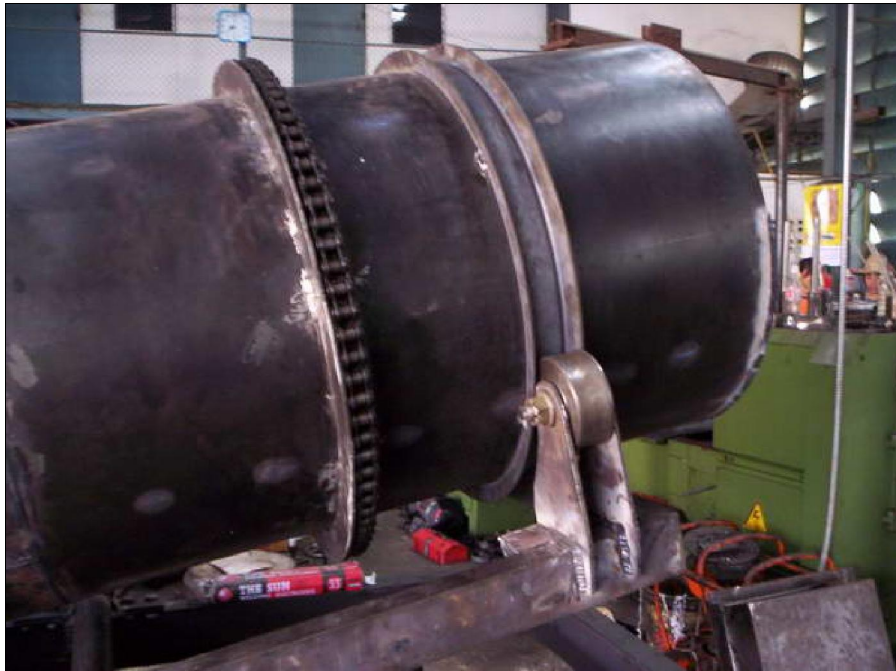
ภาพที่ 1 การประกอบแผ่นเหล็กให้เป็นผนังของถังหมุน



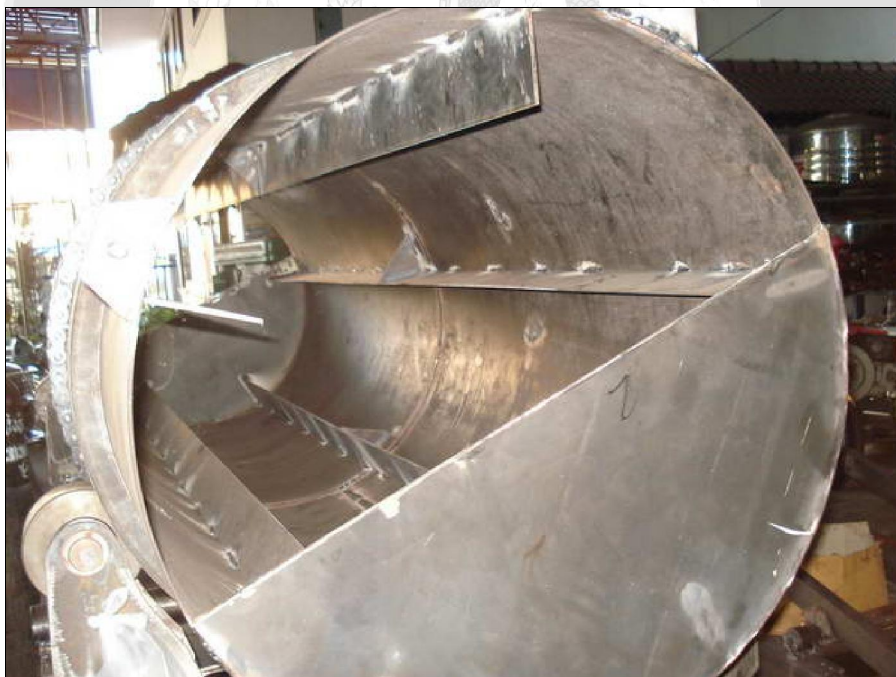
ภาพที่ 2 การประกอบชุดโครงขาตั้งถังหมุน



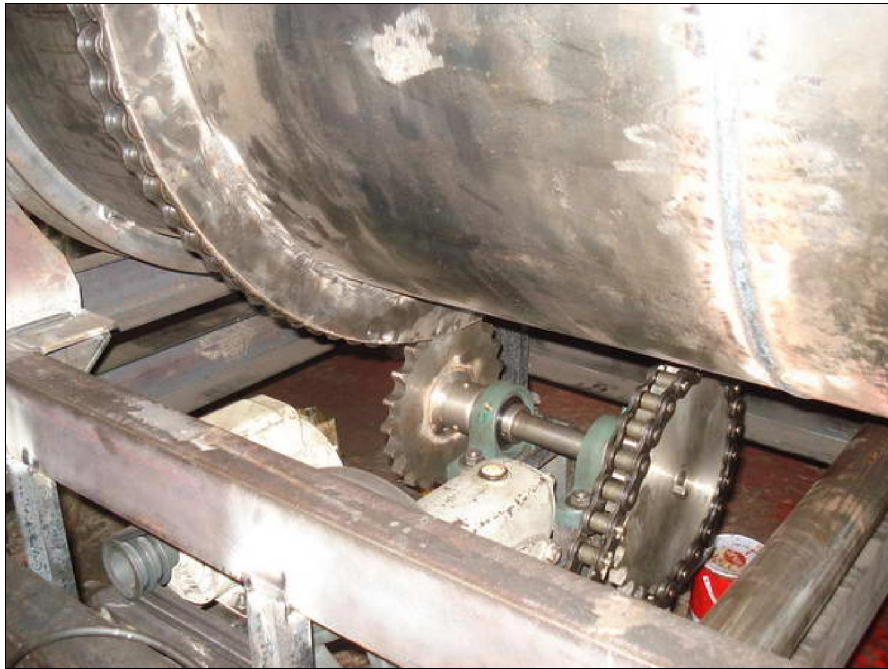
ภาพที่ 3 การประกอบถังหมุนเข้ากับโครงขาตั้ง



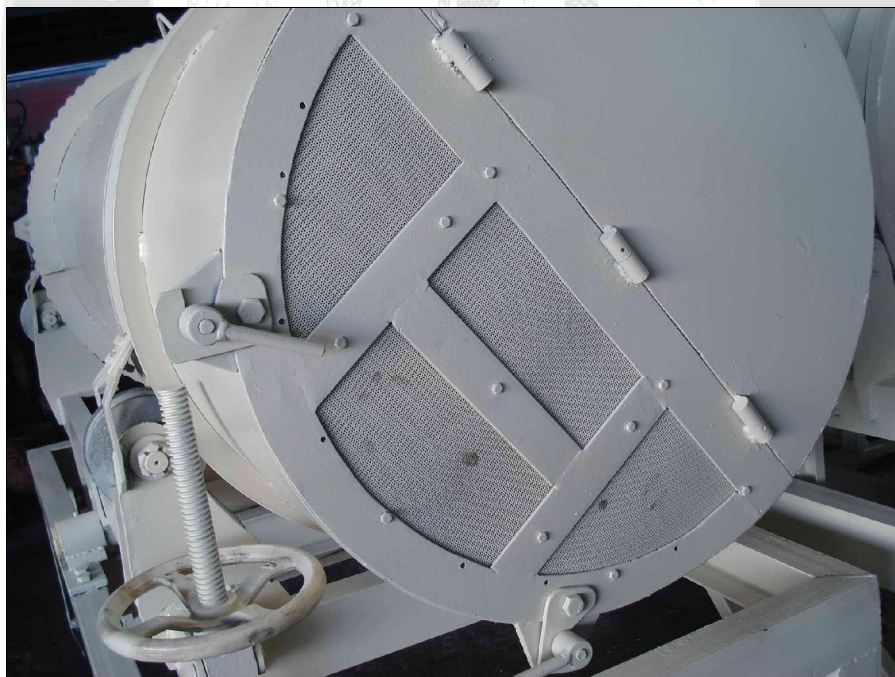
ภาพที่ 4 ไซ้และชุดลูกล้อประกอบการหมุนของถัง



ภาพที่ 5 แผ่นพลิกวัสดุภายในถัง



ภาพที่ 6 ชุดเกียร์ครอบ



ภาพที่ 7 ฝาถังแบบโปร่งเพื่อให้มีการถ่ายเทของอากาศ



ภาพที่ 8 ชุดปรับระดับตามความยาวของถัง



ภาพที่ 9 ระบบถังหมน ณ ศูนย์สาธิตการผลิปุ๋ยหมักระบบกองเดิมอากาศ แม่ใจ 70 ปี

เมื่อการประกอบติดตั้งชุดถังหมุนแล้วเสร็จ ได้นำไปติดตั้ง ณ ศูนย์สาธิตการผลิตปุ๋ยหมักระบบกองเดิมอากาศ แม่โจ้ 70 ปี หลังจากนั้นในเดือนกรกฎาคม 2551 ถึงเดือนตุลาคม 2551 โครงการวิจัยได้ทำการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Study) ในการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารเพื่อศึกษาผลการทำงาน (Performance) ของถังหมุนเนื่องจากยังไม่เคยทำการทดลองมาก่อน โดยทำการทดลองตามแผนงานในตารางที่ 1 โดยใช้เศษอาหารที่รวบรวมจากร้านอาหารในมหาวิทยาลัยมุลโค และเศษกระดาษใช้แล้วที่ผ่านการย่อยของคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การทดลองเบื้องต้นได้ข้อสรุปดังนี้

1. การใช้เศษกระดาษที่ผ่านการย่อยมาใช้เป็นวัสดุเพิ่มความพรุน มีข้อเสียคือ ได้ทำให้วัสดุภายในถังมีโครงสร้างที่ไม่เหมาะสม แทนที่จะช่วยให้มีความพรุนหรือช่วยซับความชื้นตามสมมติฐาน แต่กลับทำให้วัสดุรวมตัวกันและมีความเหนียว อากาศไม่สามารถเข้าถึงจุลินทรีย์ได้สะดวก ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นเปรี้ยวขึ้นทั่วบริเวณ ซึ่งเป็นผลการทำงานที่ไม่พึงประสงค์ และจากการทดลองใช้ใบไม้แห้งเป็นวัสดุเพิ่มความพรุน พบว่า มีความเหมาะสมกว่า วัสดุภายในถังมีความพรุนที่ดีขึ้นและกลิ่นเหม็นได้ลดลงบ้าง
2. การควบคุมความชื้นภายในถังหมุนให้มีค่าเหมาะสมทำได้ยาก เศษอาหารมักจะมี ความชื้นสูงอยู่แล้ว การเติมน้ำเพื่อปรับระดับความชื้นที่ต้องการทำได้ยาก เพราะหากเปียกชื้นเกินไปการย่อยสลายจะเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ส่งกลิ่นเหม็น (ภาพที่ 10-12) แต่หากแห้งเกินไป วัสดุมีแนวโน้มที่จะกอดตัวเป็นก้อนกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-25 เซนติเมตร (ภาพที่ 13-14) โดยมีสาเหตุร่วมกับผลของการพลิกกลับวัสดุภายในถัง ก้อนกลมที่มีขนาดใหญ่จะมีการย่อยสลายภายในก้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ทำให้เกิดการส่งกลิ่นเหม็นอีก



ภาพที่ 10 เศษอาหารภายในถังหมุน



ภาพที่ 11 การนำวัสดุเข้าในถังหมุน



ภาพที่ 12 การเปื้อกขึ้นมากเกินไปของวัสดุทำให้มีกลิ่นเหม็น



ภาพที่ 13 การเกิดเป็นก้อนกลมขนาดใหญ่จากผลของการที่วัสดุแห้งเกินไปและการพลิกกลับ
ภายในถัง



ภาพที่ 14 ลักษณะภายในก้อนกลมที่มีกลิ่นเหม็นเนื่องจากเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

3. การแปรผันความถี่ของการหมุนตามตารางที่ 1 ไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของวัสดุภายในถัง

4. ในการเติมวัสดุเข้าในถังหมุนแบบต่อเนื่อง (Continuous) หรือเติมเข้าทุกวันทีื่อด้านหนึ่งและเอาออกทุกวันทีื่อด้านหนึ่ง ในอัตราวันละประมาณ 50 ลิตร ทำให้มีเวลาเก็บกัก (Retention Time) 4 วัน พบว่า กระบวนการภายในถังหมุนได้ทำลายกลิ่นและการดึงดูดแมลงวัน แต่วัสดุยังไม่เสถียร จำเป็นต้องนำไปเข้ากระบวนการของระบบกองเติมอากาศอีก 30 วัน (ภาพที่ 15) โดยไม่มีการส่งกลิ่นหรือดึงดูดแมลงวันใด ๆ สำหรับการทดสอบเบื้องต้นนี้ ยังไม่มีการนำตัวอย่างปุยหมักไปวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปุยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร



ภาพที่ 15 การนำวัสดุที่ยังไม่เสถียรไปเข้ากระบวนการเติมอากาศ

5. ในการเติมวัสดุเข้าในถังหมุนแบบทีละครั้ง (Batch) ครั้งละประมาณ 200 ลิตรและอยู่ในถังประมาณ 30 วัน วัสดุมีความเสถียรใกล้เป็นปุ๋ยหมัก กล่าวคือ มีลักษณะเบา นุ่ม สีดำคล้ำ หลังจากนั้นนำเอาออกจากถังและทำให้แห้งภายในช่องพลาสติก ซึ่งภายในระยะ 7 วันแรกของการอยู่ในช่องพลาสติกปุ๋ยหมักจะมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวเล็กน้อย (ภาพที่ 16-18) แต่หลังจากนั้นก็ไม่มีกลิ่นแต่ประการใด เมื่อแห้งดีแล้วได้นำไปผ่านเครื่องย่อยเศษพืชเพื่อตีป่นให้มีขนาดเล็กสม่ำเสมอ ผลการวิเคราะห์ปุ๋ยหมักพบว่าตัวอย่างปุ๋ยหมักมีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ปี 2551 ตามตารางที่ 2 ยกเว้นค่าความชื้น ซึ่งเกิดจากการนำตัวอย่างที่ไม่แห้งดีพอไปวิเคราะห์จึงทำให้มีค่าความชื้นสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 16 สภาพวัสดุภายในถังแบบที่ละครั้งที่มีความเสถียรพร้อมจะเป็นปุ๋ยหมัก



ภาพที่ 17 การนำปุ๋ยหมักที่เสถียรมาทำให้แห้งภายในเข่งพลาสติก



ภาพที่ 18 ปุ๋ยหมักที่แห้งแล้วและนำไปผ่านเครื่องย่อยเพื่อตีให้มีขนาดเล็กสม่ำเสมอ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปุ๋ยหมักของการทำงานแบบทีละครั้ง

ค่าพารามิเตอร์	เกณฑ์กำหนด	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2
ความชื้น (ร้อยละ)	ไม่เกิน 30	48.3	32.6
อินทรีย์วัตถุ (ร้อยละ)	ไม่น้อยกว่า 20	36.3	35.9
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	-	6.93	7.02
อัตราส่วน C/N	ไม่เกิน 20 : 1	14.1	12.8
ค่าการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมน/เมตร)	ไม่เกิน 10	4.89	4.56
ธาตุอาหารหลัก (ร้อยละ)			
	- N ไม่น้อยกว่า 1.0	2.58	2.81
	- P_2O_5 ไม่น้อยกว่า 0.5	1.67	1.60
	- K_2O ไม่น้อยกว่า 0.5	1.68	1.69

ดังนั้น เพื่อให้เกิดผลดีต่อโครงการวิจัย จึงได้เปลี่ยนแปลงแผนการทำงานเป็นไปตามตารางที่ 3 โดยมีความถี่ของการหมุนคองที่ คือ หมุน 30 นาทีหยุด 2 ชั่วโมง มีการทำงานเป็นแบบทีละครั้งโดยไม่มีการเติมน้ำเพื่อปรับความชื้น เพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมระหว่างเศษอาหาร มูลโค และใบไม้แห้งที่เหมาะสม วัสดุอยู่ในถังหมุน 30 วัน หลังจากนั้นนำไปทำให้แห้งในเซ่งพลาสติก เมื่อแห้ง

ดีแล้วนำไปผ่านเครื่องย่อยเศษพืชเพื่อตีปนให้มีขนาดเล็ก แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าธาตุอาหารปุ๋ยหมัก โดยมีการวัดค่าอุณหภูมิภายในถัง 3 จุดวันละครั้ง เพื่อนำค่าเฉลี่ยมาพล็อตเป็นกราฟ

ตารางที่ 3 แผนการทดลองใหม่

ตำรับที่ 1	เศษอาหารต่อมูลโคต่อเศษใบไม้ 1 : 0.5 : 3 (โดยปริมาตร)
ตำรับที่ 2	เศษอาหารต่อมูลโคต่อเศษใบไม้ 1 : 0.5 : 4 (โดยปริมาตร)
ตำรับที่ 3	เศษอาหารต่อมูลโคต่อเศษใบไม้ 1 : 0.5 : 5 (โดยปริมาตร)
ตำรับที่ 4	เศษอาหารต่อมูลโคต่อเศษใบไม้ 1 : 0.5 : 6 (โดยปริมาตร)

การทดลองตามแผนงานใหม่นี้ได้เริ่มในเดือนพฤศจิกายน 2551 จนถึงเดือนมกราคม 2552 มีการหมუნของถังคังที่ คือ หมุน 30 นาทีหยุด 2 ชั่วโมง โดยการใช้อุปกรณ์ดังกล่าว มีการทำงานเป็นแบบทีละครั้งโดยไม่มีการเติมน้ำเพื่อปรับความชื้น แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ตำรับตามตารางที่ 3 เพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมระหว่างเศษอาหาร มูลโค และใบไม้แห้งที่เหมาะสม เศษอาหารมีปริมาณครั้งละ 100 ลิตรและอยู่ในถังหมุน 15 วัน หลังจากนั้นนำไปทำให้แห้งในเชิงพลาสติก เมื่อแห้งดีแล้วนำไปผ่านเครื่องย่อยเศษพืชเพื่อตีปนให้มีขนาดเล็ก แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าธาตุอาหารปุ๋ยหมัก โดยมีการวัดค่าอุณหภูมิภายในถัง 3 จุดวันละครั้ง เพื่อนำค่าเฉลี่ยมาพล็อตเป็นกราฟ

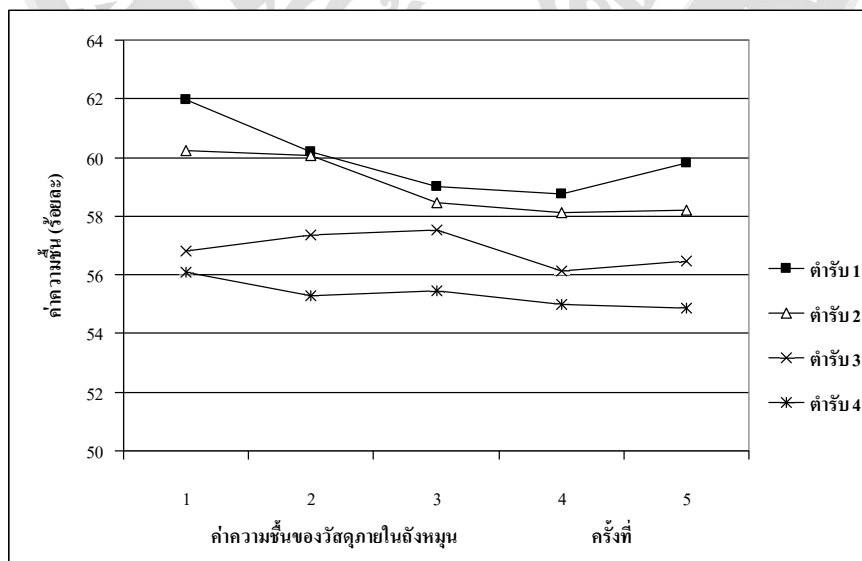
ผลการทดลองพบว่า วัสดุภายในถังไม่มีการเกิดเป็นก้อนกลมอีก แต่การทดลองทุกตำรับยังคงมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวเล็กน้อยออกมาจากถังเมื่อมีการหมุน และพบว่าวัสดุภายในถังหมุนมีความชื้นอยู่ตลอดเวลา 15 วันของการทดลองแต่ละตำรับโดยไม่ต้องเพิ่มความชื้นอีก แสดงถึงสภาวะการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจเป็นเพราะรูเปิดที่ฝาหัวท้ายของถังให้ปริมาณอากาศที่ไม่เพียงพอต่อการย่อยสลาย หรืออาจเป็นเพราะว่าเศษอาหารมีลักษณะทางกายภาพที่หลากหลายและมีธรรมชาติที่ยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ แตกต่างจากลักษณะของเศษพืชที่มักจะมี ความชื้นต่ำและมีไฟเบอร์มากกว่าซึ่งง่ายต่อการย่อยสลายมากกว่า

ภายหลังจากวัสดุอยู่ในถังหมุน 15 วันแล้วนำออกมาทำให้แห้ง แล้วตีปนด้วยเครื่องย่อยเศษพืชให้มีขนาดเล็กสม่ำเสมอ แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าธาตุอาหาร จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยหมัก (ดังแสดงในตารางที่ 4) พบว่า ตัวอย่างปุ๋ยหมักจากการทดลองตำรับที่ 2 ที่มีอัตราส่วนเศษอาหารต่อมูลโคต่อเศษใบไม้ 1 : 0.5 : 4 เป็นค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีทุกค่าเป็นไปตามที่มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551 กำหนด ส่วนการทดลองตำรับอื่นพบว่า ค่าส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์กำหนด ยกเว้นค่าการนำไฟฟ้าเท่านั้นที่ไม่ผ่านเกณฑ์

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยหมักเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการ
เกษตร พ.ศ. 2551

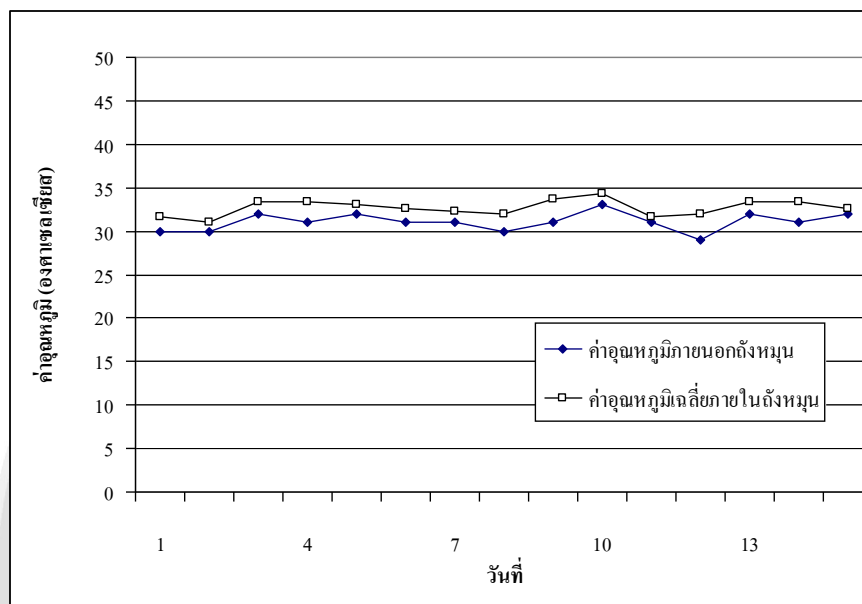
ค่าพารามิเตอร์	เกณฑ์กำหนด	ตำรับ 1	ตำรับ 2	ตำรับ 3	ตำรับ 4
ความชื้น (ร้อยละ)	ไม่เกิน 30	29.19	25.11	19.15	5.87
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	ไม่น้อยกว่า 20	65.97	45.59	47.76	52.77
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	-	7.52	7.45	7.05	6.98
อัตราส่วน C/N	ไม่เกิน 20:1	9.24	15.87	18.01	17.89
ค่าการนำไฟฟ้า (เดซิซีเมนต่อเมตร)	ไม่เกิน 10	10.01	7.15	14.88	11.56
ธาตุอาหารหลัก (ร้อยละ)	- N ไม่น้อยกว่า 1.0	3.30	1.81	1.63	1.75
	- P ₂ O ₅ ไม่น้อยกว่า 0.5	1.30	1.75	1.33	1.13
	- K ₂ O ไม่น้อยกว่า 0.5	1.47	1.14	1.67	1.11

ในการตรวจวัดค่าความชื้นของวัสดุภายในถังทุก 5 วัน พบว่า ค่าความชื้นภายในถังมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 54-62 ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ธีระพงษ์ (2549) แนะนำในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์จากเศษพืชแบบระบบกองเดิมอากาศคือ ร้อยละ 45-55 มาตรฐานเปียก โดยจากภาพที่ 19 พบว่า การทดลองตำรับที่มีส่วนผสมของเศษใบไม้มากกว่าจะให้ค่าความชื้นของวัสดุต่ำกว่า ซึ่งเกิดจากการที่เศษใบไม้ช่วยซับความชื้นและพยุ่งโครงสร้างของวัสดุภายในถัง อันจะช่วยให้ระบายความชื้นได้ดีกว่า

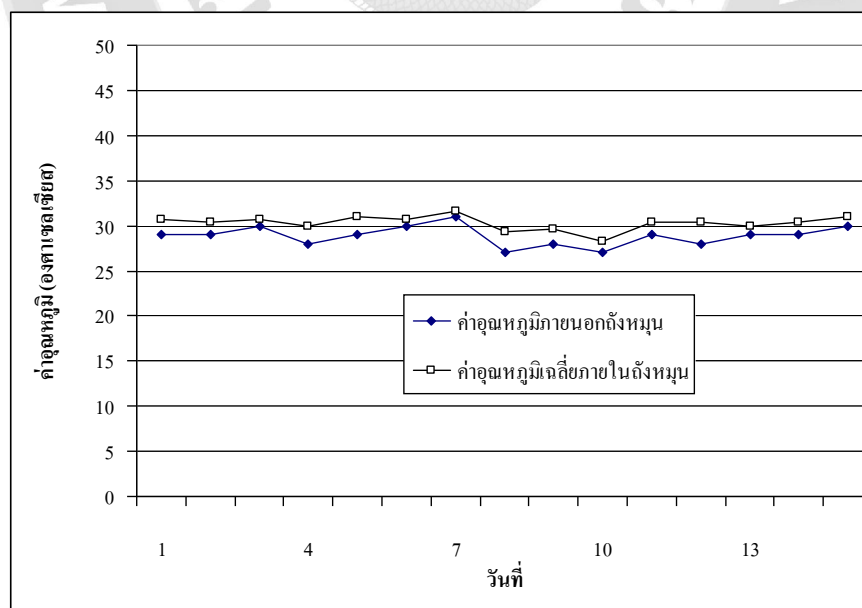


ภาพที่ 19 ค่าความชื้นของวัสดุภายในถังของแต่ละตำรับ

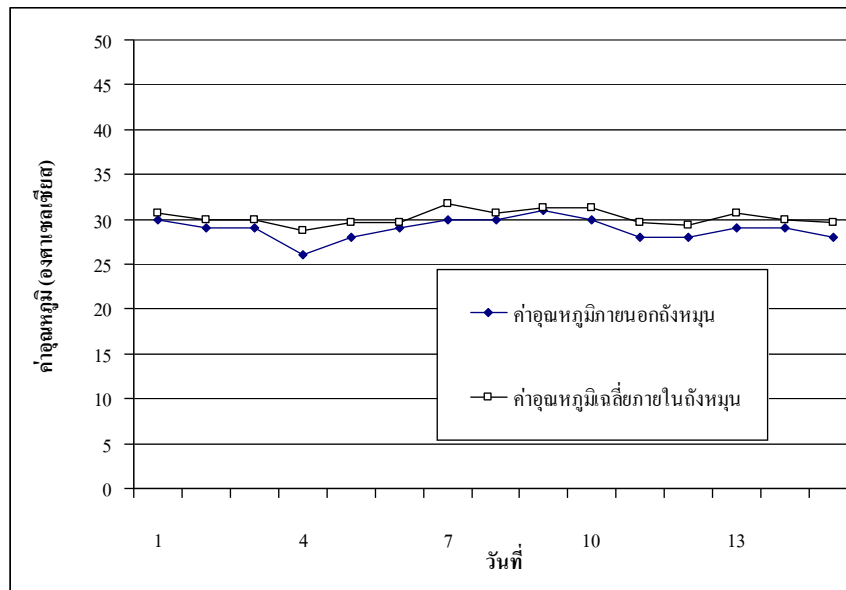
ภาพที่ 20 – 23 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในถังหมวนเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิภายนอกของการทดลองที่ 1 – 4 ซึ่งพบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในถังทุกค่ามีค่าสูงกว่าภายนอก ซึ่งเกิดจากการคายความร้อนออกมาจากปฏิกิริยาการย่อยสลายของจุลินทรีย์ แต่เนื่องจากความสูงของวัสดุภายในถังหมวนมีค่าไม่สูงมากจึงไม่สามารถเก็บความร้อนเอาไว้ภายในวัสดุได้



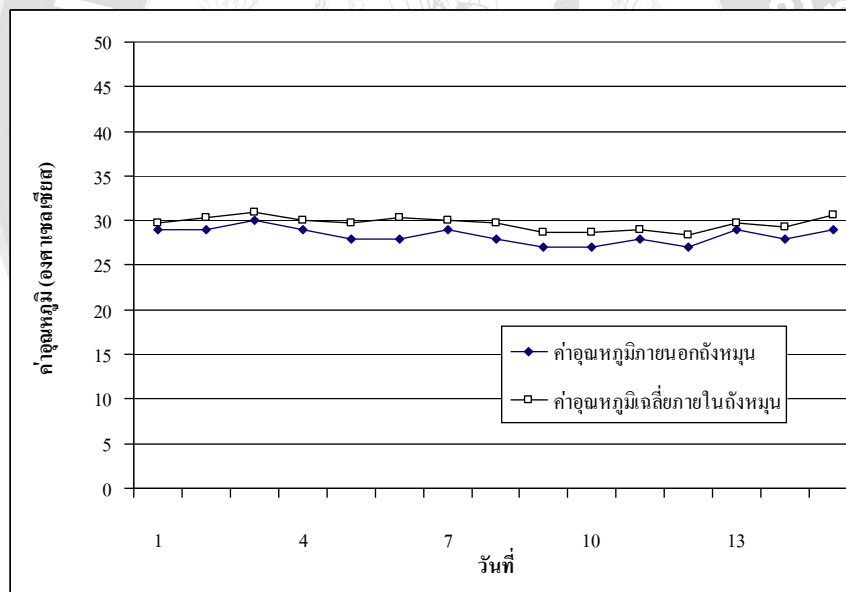
ภาพที่ 20 ค่าอุณหภูมิภายในถังหมวนของดำรับที่ 1



ภาพที่ 21 ค่าอุณหภูมิภายในถังหมวนของดำรับที่ 2



ภาพที่ 22 ค่าอุณหภูมิภายในถังหมุนของตัวรับที่ 3



ภาพที่ 23 ค่าอุณหภูมิภายในถังหมุนของตัวรับที่ 4

ภาพที่ 24 - 32 แสดงการนำเศษอาหารมาผลิตเป็นปุ๋ยหมักหรือปุ๋ยอินทรีย์ด้วยถังหมุนแบบทีละครั้ง มีเวลาเก็บกัก 15 วัน เมื่อครบเวลาเก็บกักก็นำออกมาทิ้งให้แห้งภายในเข่งพลาสติกประมาณ 10 วัน หลังจากนั้นนำไปตีป่นในเครื่องย่อยเศษพืช ก็จะได้ปุ๋ยอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กสม่ำเสมอ เบา และไม่มียุง



ภาพที่ 24 การวัดอุณหภูมิวัสดุภายในถังหมุน



ภาพที่ 25 เศษอาหารจากร้านอาหารที่ใช้เป็นวัตถุดิบ



ภาพที่ 26 มูลโคที่ใช้เป็นแหล่งจุลินทรีย์และไนโตรเจน



ภาพที่ 27 เศษใบไม้ที่ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพยุบโครงสร้าง



ภาพที่ 28 วัสดุภายในถังหมุน



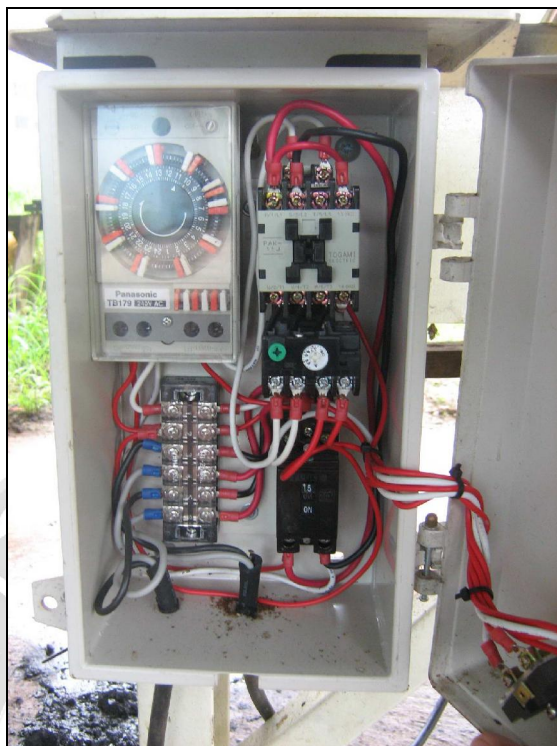
ภาพที่ 29 วัสดุในถังหมุนที่อายุ 15 วัน



ภาพที่ 30 การทำให้ปุ๋ยอินทรีย์ที่ออกมาจากถังหมุนแห้ง



ภาพที่ 31 ปุ๋ยอินทรีย์ที่แห้งสนิทพร้อมที่จะนำไปตีปนให้มีขนาดเล็กสม่ำเสมอ



ภาพที่ 32 อุปกรณ์ตัดไฟ

องค์ความรู้จากการทำวิจัยครั้งนี้จะช่วยให้มีทางเลือกใหม่ในการจัดการเศษอาหารที่เกิดในชุมชน ช่วยลดผลกระทบที่เกิดต่อสิ่งแวดล้อมจากการไม่นำเศษอาหารไปฝังกลบร่วมกับของเสียชุมชนอื่นในหลุมฝังกลบ และได้ปุ๋ยหมักคุณภาพดีไว้ใช้ซึ่งมีราคาในท้องตลาดกิโลกรัมละ 4-5 บาทเป็นการสร้างมูลค่าให้กับของเสีย โดยการนำไปใช้ในสภาพจริงอาจทำได้โดยการขยายขนาดของถังหมุนให้สอดคล้องกับปริมาณเศษอาหารที่ต้องการนำมาผลิตเป็นปุ๋ยหมัก นอกจากนี้ องค์ความรู้นี้ยังอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารบางประเภทที่มีกลิ่นหรือดึงดูดแมลงวัน เช่น ของเสียประเภทเครื่องในสัตว์ ของเสียประเภทเปลือกผลไม้สุก หรือเศษเปลือกกุ้ง เป็นต้น ได้อีกด้วย

วิจารณ์ผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำเศษอาหารมาผลิตเป็นปุ๋ยหมักภายในถังหมุน โดยได้ประกอบและติดตั้งถังหมุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร ยาว 2.4 เมตร มีฝาปิดหัวท้ายที่มีรูโปร่งให้อากาศเข้าออกได้ การถือของการหมุนของถังหมุนถูกควบคุมโดยอุปกรณ์ตัดไฟ ถังหมุนใช้มอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าและถูกปรับความเร็วรอบด้วยชุดทดเกียร์เพื่อให้มีความเร็วประมาณ 10 รอบต่อนาที

เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารในถังหมุนมาก่อนจึงทำให้ต้องมีการปรับแผนการทดลองที่กำหนดไว้ โดยจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าการใช้เศษกระดาษที่ผ่านเครื่องย่อยนำมาใช้เป็นวัสดุเพิ่มความพรุนได้ทำให้วัสดุภายในถังหมุนมีความเหนียวจนไม่สามารถย่อยสลายได้ดีจึงได้เปลี่ยนเป็นใช้เศษใบไม้แทน และยังพบว่าการแปรผันความถี่ของการหมุนตามแผนงานที่กำหนดไม่มีความสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของวัสดุภายในถัง และนอกจากนี้ ยังพบว่าการควบคุมระดับความชื้นภายในถังหมุนยังทำได้ยากทำให้เกิดสภาพการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นขึ้น

อย่างไรก็ตาม หลังจากที่ได้ปรับแผนการวิจัยใหม่ โดยให้มีความถี่ในการหมุนคงที่คือ หมุน 30 นาทีและหยุด 2 ชั่วโมง และให้วัสดุมีเวลาเก็บกักภายในถังหมุน 15 วัน แบ่งการทดลองโดยการแปรผันอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบออกเป็น 4 ตำรับ พบว่า อัตราส่วนผสมของการทดลองตำรับที่ 2 ที่มีเศษอาหารต่อมูลโคและเศษใบไม้ มีความเหมาะสมที่สุดคือ 1 : 0.5 : 4 โดยปริมาตร โดยภายหลังจากเก็บกักภายในถังหมุน 15 วัน นำออกมาทำให้แห้งแล้วตีบดให้มีขนาดเล็ก ตัวอย่างปุ๋ยหมักมีค่าเป็นไปตามค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551 กำหนด

จากการที่อากาศสามารถเข้าไปในถังหมุนได้แบบ Passive เฉพาะทางฝาปิดหัวท้าย ทำให้มีปริมาณอากาศภายในถังหมุนไม่พอเพียงต่อกิจกรรมการย่อยสลาย ดังนั้น การทดลองทุกตำรับจึงยังคงมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวของวัสดุภายในถังหมุนทุกครั้งที่มีการหมุนของถัง แต่เมื่อหยุดการหมุนของถังก็ไม่พบว่ามีการส่งกลิ่นออกมา ซึ่งสอดคล้องกับ Smith et al (2006) และ Diaz (1993) ที่กล่าวว่าการผลิตปุ๋ยหมักภายในถังหมุนมักจะไม่สามารถทำให้ไม่มีกลิ่นได้ อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยหมักที่ออกมาจากถังหมุนและทำให้แห้งพบว่าไม่มีกลิ่นใด ๆ และไม่มีการดึงดูดแมลงวัน จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบถังปิดแบบถังหมุนมีศักยภาพที่จะนำประโยชน์กลับคืนจากเศษอาหาร ช่วยแก้ปัญหาการจัดการของเสียในชุมชน และได้ปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดีตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารด้วยระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุนในระดับจำลองสภาพจริง เพื่อให้ได้เกณฑ์การออกแบบคือ สัดส่วนผสมที่เหมาะสมของวัตถุดิบ ถึงปฏิกิริยาเป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร ยาว 2.4 เมตร ทำจากเหล็กแผ่นหนา 3 มม. วางบนโครงสร้างที่มีลูกล้อ มีรูที่ฝาปิดเปิดหัวท้ายเพื่อเป็นทางเข้าออกของอากาศ ตัวถังหมุนรอบแกนในแนวระดับด้วยความเร็วประมาณ 10 รอบต่อนาที ด้วยระบบทดเกียร์และมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ผนังภายในติดตั้งใบกวน วัตถุดิบเป็นเศษอาหาร มูลโค และเศษกระดาษใช้แล้วของคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ผ่านเครื่องย่อยจากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า เศษกระดาษทำให้วัสดุภายในถังหมักมีโครงสร้างที่ไม่เหมาะสมและการควบคุมความชื้นทำได้ยาก จึงได้ปรับแผนการทำงานใหม่ให้มีความถี่ของการหมักคังคือ หมัก 30 นาทีหยุด 2 ชั่วโมง และเปลี่ยนวัสดุเพิ่มความพูนจากเศษกระดาษเป็นเศษใบไม้แห้ง ทำการทดลองแบบทำงานทีละครั้ง (Batch) การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ตำรับ คือ เศษอาหารต่อมูลโคต่อเศษใบไม้ 1 : 0.5 : 3 1 : 0.5 : 4 1 : 0.5 : 5 และ 1 : 0.5 : 6 (โดยปริมาตร) วัสดุมีค่าเวลาเก็บกัก 15 วัน หลังจากนั้นนำออกไปทำให้แห้งภายในเข่งพลาสติก นำไปตีป่นให้มีขนาดเล็กโดยการผ่านเครื่องย่อยเศษพืช แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าธาตุอาหาร มีการวัดค่าอุณหภูมิภายในถัง 3 จุดวันละครั้ง

การทดลองตามแผนงานใหม่เริ่มเดือนพฤศจิกายน 2551 จนถึงเดือนมกราคม 2552 พบว่า การทดลองทุกตำรับยังคงมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวขณะทำการหมัก แต่เมื่อนำออกจากถังหมักและเป็นปุ๋ยหมักแล้วก็ไม่กลิ่นใด ๆ กับไม่มีการดึงดูดแมลงวัน โดยตัวอย่างปุ๋ยหมักจากการทดลองตำรับที่ 2 ที่มีอัตราส่วนเศษอาหารต่อมูลโคต่อเศษใบไม้ 1 : 0.5 : 4 เป็นค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2551

องค์ความรู้จากการทำวิจัยนี้จะช่วยให้มีทางเลือกใหม่ในการจัดการเศษอาหารที่เกิดในชุมชน ช่วยลดผลกระทบที่เกิดต่อสิ่งแวดล้อมจากการไม่นำเศษอาหารไปฝังกลบร่วมกับของเสียชุมชนอื่นในหลุมฝังกลบ และได้ปุ๋ยหมักคุณภาพดีไว้ใช้ซึ่งมีราคาในท้องตลาดกิโลกรัมละ 4-5 บาท เป็นการสร้างมูลค่าให้กับของเสีย ซึ่งนำไปใช้ในสภาพจริงอาจทำได้โดยการขยายขนาดของถังหมักให้สอดคล้องกับปริมาณเศษอาหารที่ต้องการนำมาผลิตเป็นปุ๋ยหมัก นอกจากนี้ องค์ความรู้นี้ยังอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารบางประเภทที่มีกลิ่นหรือดึงดูดแมลงวัน เช่น ของเสียประเภทเครื่องในสัตว์ หรือของเสียจากอุตสาหกรรมอาหารประเภทเศษเปลือกกุ้ง เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- ธีระพงษ์ สว่างปัญญางกูร สุริยัน เชื้อตุ่น และ อัครเดช สองสีขวา. 2548. การหมักปุ๋ยจากเศษอาหาร ด้วยระบบถังปิดเติมอากาศ. คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ธีระพงษ์ สว่างปัญญางกูร. 2549ก. การจัดการสิ่งแวดล้อมในชีวิตประจำวัน. เอกสารประกอบคำสอนวิชา อก 101 วิศวกรรมในชีวิตประจำวัน. คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ธีระพงษ์ สว่างปัญญางกูร. 2549ข. คู่มือการผลิตปุ๋ยหมักแบบไม่พลิกกลับกอง : ระบบกองเติมอากาศ. กรุงเทพฯ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 48 หน้า.
- Cawthon D. 1997. In-vessel Composting of Institutional Food Service Waste. Online: <http://www.tamu-commerce.edu/agscience/res-dlc/food/dlc-food.htm>
- Diaz L.F., Savage G.M., Eggerth L.L. and Golueke C.G., 1993. Composting and Recycling Municipal Solid Waste. Lewis Publishers. USA.
- Smith D., D. Cawthon, J. Slon, T. Freeman, 2006. In-Vessel, Mechanical Rotating Drum Composting of Institutional Feed Residuals. Online: http://www.ars.usda.gov/research/publications/Publications.htm?seq_no_115=179569



ตารางที่ 5 ค่าความชื้นของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 1

ครั้งที่	วันที่	% ความชื้น
1	10/10/51	61.96
2	14/10/51	60.19
3	17/10/51	59.02
4	21/10/51	58.75
5	25/10/51	59.81

ตารางที่ 6 ค่าความชื้นของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 2

ครั้งที่	วันที่	% ความชื้น
1	29/10/51	60.23
2	1/11/51	60.07
3	5/11/51	58.45
4	8/11/51	58.14
5	12/11/51	58.22

ตารางที่ 7 ค่าความชื้นของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 3

ครั้งที่	วันที่	% ความชื้น
1	15/11/51	56.81
2	19/11/51	57.37
3	22/11/51	57.54
4	26/12/51	56.13
5	29/12/51	56.49

ตารางที่ 8 ค่าความชื้นของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 4

ครั้งที่	วันที่	% ความชื้น
1	3/12/51	56.11
2	6/12/51	55.27
3	10/12/51	55.46
4	13/12/51	54.98
5	17/12/51	54.87

ตารางที่ 9 ค่าอุณหภูมิของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 1

ครั้งที่	วันที่	อุณหภูมิ ภายนอก	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย
1	8/10/51	30	32	31	32	31.67
2	9/10/51	30	30	32	31	31.00
3	10/10/51	32	33	33	34	33.33
4	11/10/51	31	35	32	33	33.33
5	13/10/51	32	33	33	33	33.00
6	14/10/51	31	32	34	32	32.67
7	15/10/51	31	33	31	33	32.33
8	16/10/51	30	32	32	32	32.00
9	17/10/51	31	32	34	35	33.67
10	18/10/51	33	34	34	35	34.33
11	20/10/51	31	31	32	32	31.67
12	21/10/51	29	31	33	32	32.00
13	22/10/51	32	32	34	34	33.33
14	24/10/51	31	33	33	34	33.33
15	25/10/51	32	33	32	33	32.67

ตารางที่ 10 ค่าอุณหภูมิของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 2

ครั้งที่	วันที่	อุณหภูมิ ภายนอก	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย
1	27/10/51	29	31	30	31	30.67
2	28/10/51	29	30	31	30	30.33
3	29/10/51	30	31	30	31	30.67
4	30/10/51	28	30	31	29	30.00
5	31/10/51	29	31	31	31	31.00
6	1/11/51	30	31	31	30	30.67
7	3/11/51	31	32	31	32	31.67
8	4/11/51	27	29	29	30	29.33
9	5/11/51	28	29	30	30	29.67
10	6/11/51	27	28	28	29	28.33
11	7/11/51	29	30	31	30	30.33
12	8/11/51	28	29	31	31	30.33
13	10/11/51	29	30	30	30	30.00
14	11/11/51	29	31	30	30	30.33
15	12/11/51	30	31	31	31	31.00

ตารางที่ 11 ค่าอุณหภูมิของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 3

ครั้งที่	วันที่	อุณหภูมิ ภายนอก	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย
1	13/11/51	30	31	30	31	30.67
2	14/11/51	29	30	30	30	30.00
3	15/11/51	29	30	30	30	30.00
4	17/11/51	26	28	29	29	28.67
5	18/11/51	28	29	29	30	29.67
6	19/11/51	29	30	30	29	29.67
7	20/11/51	30	31	32	32	31.67
8	21/11/51	30	31	30	31	30.67
9	22/11/51	31	31	32	31	31.33
10	24/11/51	30	31	32	31	31.33
11	25/11/51	28	29	30	30	29.67
12	26/11/51	28	29	29	30	29.33
13	27/11/51	29	30	31	31	30.67
14	28/11/51	29	30	30	30	30.00
15	29/11/51	28	29	30	30	29.67

ตารางที่ 12 ค่าอุณหภูมิของวัสดุภายในถังหมุน การทดลองดำรับที่ 4

ครั้งที่	วันที่	อุณหภูมิ ภายนอก	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	เฉลี่ย
1	1/12/51	29	29	30	30	29.67
2	2/12/51	29	31	30	30	30.33
3	3/12/51	30	31	31	31	31.00
4	4/12/51	29	30	30	30	30.00
5	5/12/51	28	29	30	30	29.67
6	6/12/51	28	32	29	30	30.33
7	8/12/51	29	30	30	30	30.00
8	9/12/51	28	30	30	29	29.67
9	10/12/51	27	29	28	29	28.67
10	11/12/51	27	28	28	30	28.67
11	12/12/51	28	29	29	29	29.00
12	13/12/51	27	28	28	29	28.33
13	15/12/51	29	29	30	30	29.67
14	16/12/51	28	29	30	29	29.33
15	17/10/51	29	30	31	31	30.67