JPAGS
Journal of Physics & General Science

ผลของปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวัน

Effect of Compost from Organic Waste and Fly Ash of Biomass Power Plants together with Organic Waste Materials on Growth of Sunflower Sprouts

ปิยะรักษ์ ประดับเพชรรัตน์[1*] อัลอามีน อับดุลอาลีม[2] อานัส ทิ้งผอม[2] โนอาห์ บูงอสายู[2] ปัทมา พิศภักดิ์[2] และอดุลย์สมาน สุขแก้ว[3]

Piyaruk Pradabphetrat[1*], Al-amin Abdul-alim[2], Arnas Thingphom[2], Noah Bungosayu[2], Pattama Pisapak[2] and Adulsman Sukkaew[3]

[1]สาขาวิชาสาธารณสุขศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา

[1]Program in Public Health, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala

[2]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา

[2]Program in General Science, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala

[3]สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา

[3]Program in Renewable Energy Technology, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala

*Corresponding author e-mail: piyaruk.p@yru.ac.th

(Received: October 1, 2022, Revised: October 31, 2022, Accepted: November 21, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ที่แตกต่างกัน และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยหมักต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวัน โดยนำขยะอินทรีย์ในครัวเรือน เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล ใบไม้แห้ง มาหมักร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ในท้องถิ่น ซึ่งแบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุม 2) ขี้เลื่อย 3) ขุยมะพร้าว และ 4) แกลบ แล้วเติมกากน้ำตาลในถังพลาสติก ขนาด 50 ลิตร ผลการศึกษา พบว่า จากการหมักเป็นระยะเวลา 30 วัน วัสดุหมักส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลและร่วนซุย ยกเว้นชุดควบคุมซึ่งไม่มีวัสดุอินทรีย์เหลือใช้มีสีเทาดำและเปียก โดยทั้ง 4 ชุดการทดลองมีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ดังนั้น วัสดุหมักที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม เมื่อนำปุ๋ยหมักที่ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวัน พบว่า การใส่ปุ๋ยหมักที่มีขุยมะพร้าวส่งผลให้ต้นอ่อนทานตะวันมีความสูงและความกว้างใบสูงที่สุด ขณะที่การใส่ปุ๋ยหมักที่มีขี้เลื่อยส่งผลให้ต้นอ่อนทานตะวันมีความยาวใบสูงที่สุด สรุปได้ว่า การเติมขุยมะพร้าวและขี้เลื่อยเป็นวัสดุหมักตัวกลางช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวันได้

คำสำคัญ: ปุ๋ยหมัก ขยะอินทรีย์ เถ้าลอย โรงไฟฟ้าชีวมวล ต้นอ่อนทานตะวัน

ABSTRACT

This research aims to study the physical and chemical properties of compost from organic wastes and fly ash of biomass power plants together with different organic waste materials and to study its efficiency on the growth of sunflower sprouts. The study was conducted by composting household organic waste, fly ash from the biomass power plant, dry leaves, and adding local organic waste materials which were divided into 4 experimental treatments: 1) control treatment, 2) sawdust, 3) coconut coir dust, and 4) rice husks. Molasses was then added to 50-liter plastic tanks. The results showed that after 30

days of fermentation, most of the fermented materials were brown and crumbly except for the control treatment, which did not contain the organic waste material, which was gray-black and wet. All 4 experimental treatments found that the phosphorus and potassium content met the organic fertilizer standard of the Department of Agriculture, Thailand. Hence, the compost could be used as a soil amendment material to increase phosphorus and potassium. After that, the compost was tested for the growth efficiency of sunflower sprouts, it was found that the application of compost containing coconut coir dust resulted in the sunflower sprouts having the highest leaf height and width. While composting with sawdust resulted in sunflower sprouts having the highest leaf length. It can be concluded that the addition of coconut coir dust and sawdust as fermentation materials increased the growth of sunflower sprouts.

Keywords: compost, organic waste, fly ash, biomass power plant, sunflower sapling

บทนำ

วิกฤตการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนที่มีปริมาณมากและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ซึ่งมีการกองทิ้งสะสมตกค้างในพื้นที่ต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก โดยไม่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อชีวิต ทรัพย์สิน และสุขภาพอนามัยของคนโดยรอบพื้นที่ จากรายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2564 พบว่า มีปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนเกิดขึ้น ประมาณ 24.98 ล้านตัน โดยมีอัตราการเกิดขยะมูลฝอยเฉลี่ย 1.03 กิโลกรัม/คน/วัน [1] ซึ่งขยะอินทรีย์เป็นขยะที่พบมากที่สุด การคัดแยกขยะและใช้ประโยชน์จากขยะอินทรีย์เป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณขยะมูลฝอย เช่น การทำปุ๋ยหมักอินทรีย์ น้ำหมักชีวภาพสำหรับการใช้บำรุงดินเพื่อการเกษตร การผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อทดแทนพลังงานเชื้อเพลิง และเป็นอาหารสัตว์ [2] เนื่องจากนโยบายการสนับสนุนให้ใช้พลังงานทดแทนเพื่อแก้ปัญหาวิกฤตการณ์พลังงานและปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงทำให้โรงไฟฟ้าชีวมวลมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [3] วิธีการหนึ่งที่สามารถนำเถ้าลอยซึ่งเป็นสิ่งที่เหลือจากการเผาไหม้สารอินทรีย์หรือชีวมวลกลับมาใช้ประโยชน์ คือ การนำมาใช้เป็นวัสดุหมักร่วมในกระบวนการทำปุ๋ยหมัก [4] ซึ่งทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น ช่วยให้อุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในระหว่างการผลิตปุ๋ยหมักมีค่าเพิ่มขึ้น รวมถึงมีปริมาณธาตุอาหารหลักเพิ่มมากขึ้น [5]

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำขยะอินทรีย์ที่เหลือทิ้งจากครัวเรือน ได้แก่ เศษอาหาร เศษผักและผลไม้มาหมักทำปุ๋ยร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ในท้องถิ่น ได้แก่ ขี้เลื่อย ขุยมะพร้าว แกลบ และเถ้าลอยซึ่งเป็นส่วนเหลือทิ้งของโรงไฟฟ้าชีวมวล เพื่อช่วยในการผลิตปุ๋ยหมักจากวัตถุดิบที่สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาสูตรปุ๋ยหมักที่ส่งเสริมการเพาะปลูกพืชในชุมชนสู่การผลิตพืชแบบปลอดภัยและลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้เป็นการนำวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ที่มีอยู่มาสร้างมูลค่าเพิ่มและนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการจัดการขยะมูลฝอยชุมชนอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

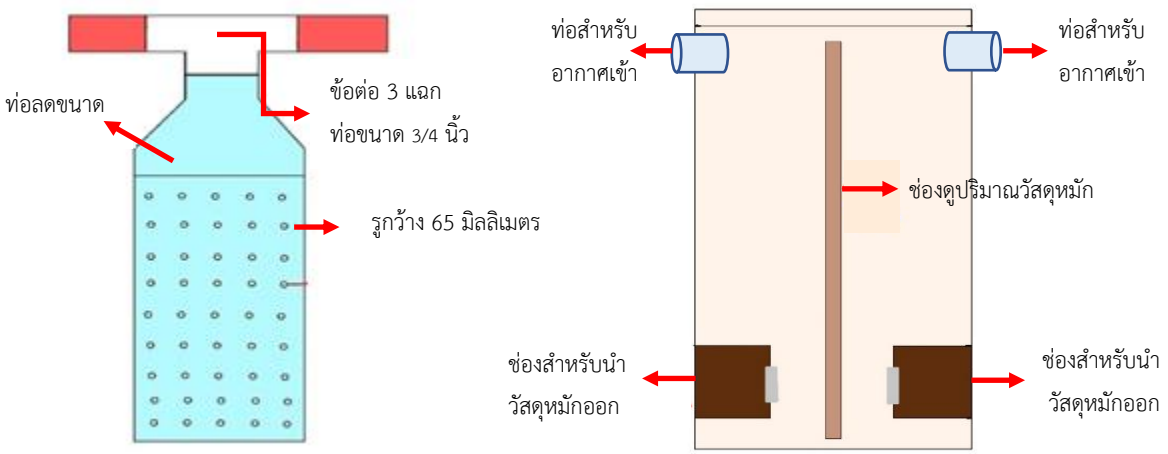
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักที่ผลิตจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ที่แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวัน

วิธีการวิจัย

1) การออกแบบถังหมักขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวล การศึกษานี้ใช้ถังพลาสติกขนาด 50 ลิตร กว้าง 40 เซนติเมตร และสูง 45 เซนติเมตร บริเวณขอบฝาถังหมักทำการเจาะรูจำนวน 2 ช่อง ภายในติดตั้งท่อ PVC พร้อมด้ามหมุน

ซึ่งประกอบเป็นรูปตัว T โดยรอบท่อ PVC ขนาด 6 นิ้ว มีการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.3 เซนติเมตร ให้ท่อ PVC ขนาด ¾ นิ้ว ซึ่งเป็นส่วนด้ามหมุนยื่นออกมานอกถังหมัก เพื่อให้อากาศภายนอกสามารถถ่ายเทเข้าสู่ภายในถังหมักปุ๋ยได้ตลอดเวลา เป็นการรักษาสภาพแวดล้อมของการหมักปุ๋ยให้เป็นแบบใช้ออกซิเจน บริเวณด้านข้างของตัวถังเจาะเป็นช่องขนาด 5 x 20 เซนติเมตร และติดพลาสติกใสด้านในถังหมักเพื่อใช้ในการตรวจสอบปริมาณปุ๋ยหมัก โดยเติมวัสดุหมักลงไปในถัง บริเวณด้านบนของถังหมัก ส่วนด้านล่างของตัวถังเจาะเป็นช่องเปิด-ปิดขนาด 15 x 30 เซนติเมตร ติดบานพับและที่ล็อค เพื่อนำปุ๋ยหมักออกจากถังหมัก ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ถังหมักปุ๋ย

2) องค์ประกอบของวัสดุหมัก ได้ทำการศึกษาโดยใช้ขยะอินทรีย์หรือขยะย่อยสลายได้ภายในครัวเรือน (เศษผักและผลไม้) ผสมกับเถ้าลอยที่ใช้เป็นสารด่างนำมาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลในพื้นที่จังหวัดยะลา เติมวัสดุหมักตัวกลางที่แตกต่างกัน (วัสดุอินทรีย์เหลือใช้ที่หาได้ในท้องถิ่น ได้แก่ ขี้เลื่อย ขุยมะพร้าว และแกลบ) เพื่อเพิ่มความพรุนในกองปุ๋ยหมัก และเติมใบไม้แห้งซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อช่วยดูดซับน้ำภายในถังหมัก ลดความแน่นและให้อากาศผ่านเข้าไปในปุ๋ยหมักได้สะดวกยิ่งขึ้น ในอัตราส่วน 1:1:1:1 หลังจากนั้นเติมกากน้ำตาล 1 ช้อนโต๊ะ เพื่อเป็นแหล่งอาหารให้กับจุลินทรีย์ โดยควบคุมความชื้นเริ่มต้นของวัสดุหมักให้อยู่ในช่วง 50-60 % ซึ่งมี 4 ชุดการทดลอง ดังนี้

- ชุดการทดลองที่ 1 (ชุดควบคุม) คือ ขยะอินทรีย์ + เถ้าลอย + ใบไม้แห้ง + กากน้ำตาล
- ชุดการทดลองที่ 2 คือ ขยะอินทรีย์ + เถ้าลอย + ขี้เลื่อย + ใบไม้แห้ง + กากน้ำตาล
- ชุดการทดลองที่ 3 คือ ขยะอินทรีย์ + เถ้าลอย + ขุยมะพร้าว + ใบไม้แห้ง + กากน้ำตาล
- ชุดการทดลองที่ 4 คือ ขยะอินทรีย์ + เถ้าลอย + แกลบ + ใบไม้แห้ง + กากน้ำตาล

3) การผลิตปุ๋ยหมักและการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก มีขั้นตอนดังนี้

- ทำการสับขยะอินทรีย์ (เศษผักและผลไม้) ให้มีขนาด 0.5-1.5 นิ้ว โดยประมาณ เพื่อให้การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เป็นไปได้ง่ายและดียิ่งขึ้น แล้วจึงนำขยะอินทรีย์ผสมคลุกเคล้ากับเถ้าลอย วัสดุหมักตัวกลาง (ขี้เลื่อย ขุยมะพร้าว และแกลบ) ใบไม้แห้ง และเติมกากน้ำตาลลงไป

- นำวัสดุหมักใส่ลงบริเวณช่องเปิดด้านบนของถังหมัก ปิดฝาและหมุนด้ามหมุน PVC ที่ยื่นออกมานอกถังหมักเพื่อทำการคนหรือกวนส่วนผสมให้เข้ากันทุกวัน อย่างน้อยวันละ 1-2 ครั้ง ทุก ๆ วัน ครั้งละประมาณ 3-5 นาที เพื่อปรับสภาพภายในถังหมักไม่ให้มีออกซิเจนน้อยเกินไป ซึ่งจะทำให้กระบวนการย่อยสลายเปลี่ยนไปเป็นแบบไร้อากาศได้

- สังเกตและเก็บตัวอย่างทุก ๆ 2 วัน จากช่องเปิด-ปิดบริเวณด้านล่างของตัวถัง รวมถึงจดบันทึกข้อมูล เช่น อุณหภูมิภายในถังหมักปุ๋ย ปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) กลิ่นเหม็น เป็นต้น ซึ่งอุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 15 - 40 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิในช่วงเริ่มต้นจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ และค่อย ๆ ลดลงในภายหลังจนคงที่แสดงว่ากระบวนการหมักปุ๋ยได้เสร็จสมบูรณ์แล้ว

- นำวัสดุหมักใส่ในถังหมักทุกวันจนมีปริมาณ ¾ ของถังหมักปุ๋ย จึงยุติการป้อนวัสดุหมัก และหมักต่อไปจนครบระยะเวลา 30 วัน นำปุ๋ยหมักที่ได้ออกจากถังหมัก แล้วสุ่มตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี รวมถึงปริมาณธาตุอาหารหลักจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความชื้น ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณธาตุอาหารหลักสำหรับการเจริญเติบโตพืช คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม

4) การศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยหมักต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวันที่ปลูกในกระถาง ซึ่งต้นอ่อนทานตะวันเป็นพืชโตไวและมีระยะเวลาเก็บเกี่ยวน้อย โดยเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของการเพาะปลูกจากการใช้ปุ๋ยหมักที่ผลิตได้ ออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD) โดยมีทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ดินผสมกับปุ๋ยหมักที่ผลิตจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้จากข้อ 3 ในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งใช้เมล็ดต้นอ่อนทานตะวันจำนวน 25 เมล็ดต่อชุดการทดลอง และทำ 3 ซ้ำ โดยบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต ได้แก่ จำนวนการงอกของต้นอ่อนทานตะวัน ความสูงของลำต้นที่งอกเหนือพื้นดิน ความยาวและความกว้างใบของต้นอ่อนทานตะวันที่อายุ 7 วัน และ 15 วัน ซึ่งกระถางเพาะปลูกทั้งหมดดำเนินการในพื้นที่แบบเปิด โดยมีการควบคุมปริมาณน้ำให้เป็นไปตามธรรมชาติของพื้นที่ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการหาค่าเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (standard error) สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (coefficient of variation) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยโดยใช้ LSD Multiple Comparison Test ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95 % ด้วยโปรแกรม SPSS version 23.0

ผลการวิจัยและอภิปราย

1) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมักที่ผลิตจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ที่แตกต่างกัน จากการนำขยะอินทรีย์หรือขยะย่อยสลายได้ภายในครัวเรือน ได้แก่ เศษผักและผลไม้ มาหมักทำปุ๋ยร่วมกับเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล ใบไม้แห้ง และวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ที่หาได้ในท้องถิ่น ได้แก่ ขี้เลื่อย ขุยมะพร้าว และแกลบ โดยกระบวนการใช้ออกซิเจน (aerobic decomposition) เพื่อให้ได้ผลผลิตเป็นวัตถุอินทรีย์ ที่เป็นประโยชน์สำหรับพืช เมื่อครบระยะเวลาการหมัก 30 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นชุดควบคุม วัสดุหมักเปลี่ยนเป็นสีดำเข้มและเปียก มีกลิ่นเหม็นแต่ไม่รุนแรง และชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งใช้ขุยมะพร้าวเป็นวัสดุหมักตัวกลางเปลี่ยนเป็นสีดำ มีความชื้น จับตัวเป็นก้อน ไม่มีกลิ่นเหม็น ส่วนชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้ขี้เลื่อยเป็นวัสดุหมักตัวกลางและชุดการทดลองที่ 4 ซึ่งใช้แกลบเป็นวัสดุหมักตัวกลางเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม มีความ ร่วนซุย ไม่มีกลิ่นเหม็น นอกจากนี้พบว่า ในระหว่างกระบวนการหมักทำปุ๋ยในถังหมักมีกลิ่นเหม็นหรือกลิ่นไข่เน่าในระยะแรก เนื่องจากในถังหมักมีออกซิเจนไม่เพียงพอต่อกิจกรรมการย่อยสลาย ทำให้การหมักแบบใช้อากาศเปลี่ยนเป็นการหมักแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งมีสาเหตุจากวัสดุหมักมีความชื้นมากเกินไปหรืออัดตัวแน่นจนเกินไป ทำให้อากาศไม่สามารถผ่านเข้าไปได้ มีแนวทางในการแก้ไขโดยการพลิกกลับปุ๋ยหมักเพื่อให้เกิดการถ่ายเทอากาศภายในถังหมัก และในกรณีที่วัสดุหมักมีความชื้นมากเกินไปจะต้องเติมวัตถุดิบประเภทหญ้าแห้ง หรือใบไม้แห้ง หรือกิ่งไม้แห้ง ซึ่งจะช่วยดูดซับน้ำที่มีมากเกินไปภายในถังหมัก เพื่อลดความแน่นและให้อากาศผ่านเข้าไปในปุ๋ยหมักได้สะดวกยิ่งขึ้น รวมถึงวัสดุหมักมีกลิ่นเหม็นคล้ายแอมโมเนีย เนื่องจากมีปริมาณของวัตถุดิบที่เป็นแหล่งคาร์บอนไม่เพียงพอ แก้ไขได้โดยการเติมวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบหลัก [2], [6]-[9]

อุณหภูมิของทุกชุดการทดลองมีการเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 2-7 ของการหมัก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงแรกเนื่องจากจุลินทรีย์มีการเผาผลาญและเจริญเติบโตมากขึ้นในระยะแรกของการหมัก ทำให้เกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์มากขึ้น [10]-[12] และเกิดกระบวนการการคายความร้อนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ [13] ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมภายในปุ๋ยหมัก เมื่อการหมักผ่านไประยะเวลาหนึ่งอุณหภูมิของปุ๋ยหมักจะค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากจุลินทรีย์บางส่วนเริ่มตายลง ปริมาณสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายจนหมด ทำให้อุณหภูมิลดต่ำลงจนกระทั่งอุณหภูมิเริ่มคงที่เมื่อเกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์แล้ว โดยใช้ระยะเวลาในการหมักประมาณ 30 วัน อุณหภูมิของปุ๋ยหมักเริ่มคงที่และใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง [4], [11] ตลอดการทดลองชุดการทดลองที่ 1-4 มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 30.76, 30.91, 30.96 และ 31.46 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของชุดการทดลองที่ 1-4 มีค่าเท่ากับ 70.26, 69.26, 69.06 และ 69.4 % ตามลำดับ พบว่า ความชื้นของวัสดุหมักมีค่าสูง เนื่องจากวัสดุที่นำมาหมักเป็นเศษผักผลไม้ซึ่งเป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีความชื้นสูง อาจนำไปสู่สภาวะไร้อากาศ ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น [14], [15] โดยกระบวนการหมักที่มีค่าความชื้นภายในถังหมักสูงขึ้นมาก เนื่องจากวัสดุหมักเกิดการคายความชื้นออกมาจากปฏิกิริยาการย่อยสลาย และเห็นได้ว่าอัตราการคายน้ำเกิดขึ้นสูงในช่วงเดียวกับวันที่อุณหภูมิในถังหมักสูงหรือเป็นวันที่มีกิจกรรมการย่อยสลายสูง หลังจากนั้น ความชื้นจะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งการลดลงของความชื้นระหว่างการหมักเป็นดัชนีตัวหนึ่งที่แสดงถึงกิจกรรมการย่อยสลาย เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการย่อยสลายนำไปสู่การระเหยของน้ำในวัสดุหมัก และการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ [10], [16], [17] ค่าความเป็นกรด-ด่างของทุกชุดการทดลองมีค่าลดลงในช่วงแรกของการหมักและมีความเป็นกรด เนื่องจากกิจกรรมการย่อยสลายจุลินทรีย์ของสารอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตก่อให้เกิดกรดอินทรีย์ หลังจากนั้น ค่าความเป็นกรด-ด่างจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ความเป็นกลาง ซึ่งเกิดจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกถูกใช้ไปและมีการปลดปล่อยแอมโมเนียจากกระบวนการย่อยสลายโปรตีน [10], [16] การที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุหมักอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางแสดงว่าวัสดุหมักนั้นเจริญเต็มที่ [17] เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นเนื่องจากจุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายมากขึ้นและมีการปล่อยแอมโมเนียสูงขึ้น [10] โดยชุดการทดลองที่ 1-4 มีค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยเท่ากับ 6.31, 6.74, 7.35 และ 6.64 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 ที่กำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง 5.5-8.5 [18] ดังนั้น จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับปรุงดินได้

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก นำวัสดุหมักออกจากถังหมักและนำตัวอย่างวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักกับค่ามาตรฐานของปุ๋ยหมัก (ตารางที่ 1) พบว่า วัสดุหมักที่ได้หลังสิ้นสุดการหมักทั้ง 4 ชุดการทดลองมีปริมาณความชื้น ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดเป็นไปตามมาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ที่กรมวิชาการเกษตรกำหนดไว้ [18] ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุหมักที่ใช้ขุยมะพร้าว แกลบ และขี้เลื่อยเป็นตัวกลางในการหมัก และชุดการทดลองที่ไม่มีวัสดุหมักตัวกลาง มีปริมาณความชื้น 32.54, 30.94, 12.52 และ 9.35 % ตามลำดับ ซึ่งชุดการทดลองที่ใช้ขุยมะพร้าวเป็นตัวกลางมีปริมาณความชื้นสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ เนื่องจากขุยมะพร้าวมีน้ำหนักเบา ลักษณะเป็นเส้นใย มีความสามารถในการดูดซับและอุ้มน้ำได้ดี ซึ่งอาจทำให้มีการระบายน้ำและระบายอากาศได้น้อย [19] จากการศึกษา พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 ของกรมวิชาการเกษตร ซึ่งวัสดุหมักทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าความเป็นด่าง เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุหมักขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการหมัก [11] ดังนั้น การนำเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลมาเป็นวัสดุหมักร่วมกับขยะอินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการปรับสภาพดินที่เป็นกรด เนื่องจากเถ้าลอยดังกล่าวมีค่าความเป็นด่างสูงมาก หรืออาจนำไปปรับลดค่าความเป็นด่างลงแล้วนำไปผสมกับอินทรียวัตถุอื่น ๆ ผลิตเป็นปุ๋ยหรือดินชีวภาพ [5], [20] ค่าการนำไฟฟ้าเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้ เนื่องจากเกลือที่ละลายน้ำจะแตกตัวให้ประจุบวกและลบ ส่งผลให้น้ำมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าแปรผันตรงกับปริมาณเกลือที่ละลายน้ำ ดังนั้น ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ ทำให้เกิดกระบวนการมิเนอเรไลเซชัน ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์และ

ปลดปล่อยแร่ธาตุที่ละลายน้ำได้ ทำให้ปริมาณเกลือที่ละลายน้ำได้มากขึ้น [4] จากการศึกษา พบว่า ชุดการทดลองที่ 4 ซึ่งใช้แกลบเป็นวัสดุหมักตัวกลางมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 6 เดซิซีเมนต์/เมตร จากการศึกษาเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นชุดควบคุม มีปริมาณร้อยละอินทรียวัตถุและอินทรียคาร์บอนต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ อาจเป็นเพราะจุลินทรีย์มีกระบวนการย่อยสลายที่มากกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ [21] และชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้ขี้เลื่อยเป็นวัสดุหมักตัวกลางมีปริมาณร้อยละอินทรียวัตถุและอินทรียคาร์บอนสูงที่สุด ซึ่งหมายถึง ปุ๋ยหมักชนิดนี้สามารถส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้คุณภาพการเพาะปลูกและผลผลิตของเกษตรกรมีคุณภาพสูง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ [18] ที่กำหนดให้มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดไม่น้อยกว่า 1 % โดยน้ำหนัก ซึ่งอาจเกิดจากการสูญเสียไนโตรเจนในกระบวนการหมักปุ๋ยที่มีการระเหยของแอมโมเนีย (NH_3-volatilization) อย่างรวดเร็ว เนื่องจากคุณลักษณะของวัสดุหมักเริ่มต้น ความชื้น และอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสูญเสียไนโตรเจน ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ค่อนข้างสูง (pH > 8) ยังช่วยกระตุ้นการปล่อยแอมโมเนียด้วย นอกจากนี้ ปริมาณการเติมอากาศจะส่งผลกระทบต่อไนโตรเจน โดยพบว่า ถ้ามีการเพิ่มปริมาณอากาศมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียจากสภาวะของเหลวกลายเป็นก๊าซแอมโมเนียได้ง่ายขึ้น โดยปัจจัยปริมาณและช่วงระยะเวลาในการเติมอากาศนั้นจะส่งผลต่อเสถียรภาพของการหมักมากที่สุด [22] ฟอสฟอรัสในสารอินทรีย์มีความสำคัญต่อกระบวนการหมัก โดยฟอสฟอรัสเป็นปริมาณสารอาหารที่จุลินทรีย์ใช้ในกระบวนการ หมักปุ๋ยซึ่งใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ปริมาณฟอสฟอรัสของปุ๋ยหมักจะอยู่ในรูปของไดฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) [22] จากการศึกษา พบว่า ทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยปริมาณร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (ไม่น้อยว่า 0.5 % โดยน้ำหนัก) [18] ซึ่งเห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่ไม่มีวัสดุหมักตัวกลาง (มีเพียงใบไม้แห้งเท่านั้น) มีปริมาณร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดมากกว่าชุดการทดลองอื่น เนื่องจากจุลินทรีย์มีการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารเพื่อช่วยในการเจริญเติบโต ส่วนค่าเฉลี่ยปริมาณร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดของทั้ง 4 ชุดทดลอง มีค่าเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (ไม่น้อยว่า 0.5 % โดยน้ำหนัก) [18] ดังนั้น วัสดุหมักที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมได้

ตารางที่ 1 คุณภาพของวัสดุหมักเมื่อยุติการหมักเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์

คุณภาพของวัสดุหมัก	ชุดการทดลองที่				เกณฑ์กำหนด
	1	2	3	4	
ความชื้น	9.35	12.52	32.54	30.94	ไม่เกิน 35 %
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	9.85	9.68	9.16	9.00	5.5-8.5
ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	13.21	9.78	10.59	5.39	ไม่เกิน 6 dS/m
ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM)	12.36	42.42	21.21	31.62	ไม่น้อยกว่า 30 %
ปริมาณอินทรียคาร์บอน (OC)	7.19	24.67	12.33	18.39	-
ไนโตรเจนทั้งหมด	0.38	0.35	0.31	0.30	ไม่น้อยกว่า 1 %
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	1.53	1.16	1.36	1.02	ไม่น้อยกว่า 0.5 %
โพแทสเซียมทั้งหมด	5.92	4.25	4.53	2.65	ไม่น้อยกว่า 0.5 %

หมายเหตุ ค่ามาตรฐานตามประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548 [18]

2) การทดสอบประสิทธิภาพของปุ๋ยหมักต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวัน จากผลการศึกษาทั้งหมดจำนวน 4 ชุดการทดลอง โดยทดสอบการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวัน ซึ่งแต่ละการทดลองมีส่วนผสมโดยน้ำหนักในกระถาง

ทดลอง ได้แก่ ดินผสมกับปุ๋ยหมักที่ผลิตจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ในอัตราส่วน 1:1 กำหนดให้เป็นชุดการทดลองที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีการควบคุมปริมาณการให้น้ำ จำนวนเมล็ดที่เพาะปลูก และระยะเวลาในการเพาะปลูกที่เท่ากัน

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของลักษณะของต้นอ่อนทานตะวันที่ทำการปลูกเป็นเวลา 7 วัน และ 15 วัน

ชุดการทดลอง	ค่าเฉลี่ยของลักษณะของต้นอ่อนทานตะวันที่ตรวจสอบ (n = 3)					
	ความสูง (ซม.)		ความกว้างใบ (ซม.)		ความยาวใบ (ซม.)	
	7 วัน	15 วัน	7 วัน	15 วัน	7 วัน	15 วัน
ชุดการทดลองที่ 1 (ไม่มีวัสดุหมักตัวกลาง)	6.77 ± 0.02*	13.95 ± 0.01*	1.31 ± 0.01*	1.35 ± 0.01*	2.11 ± 0.01*	2.83 ± 0.01*
ชุดการทดลองที่ 2 (ขี้เลื่อย)	7.64 ± 0.01*	14.56 ± 0.01*	1.47 ± 0.01*	1.50 ± 0.01*	2.63 ± 0.01*	3.41 ± 0.01*
ชุดการทดลองที่ 3 (ขุยมะพร้าว)	9.35 ± 0.01*	15.16 ± 0.02*	1.58 ± 0.01*	1.52 ± 0.01*	2.50 ± 0.01*	2.95 ± 0.01*
ชุดการทดลองที่ 4 (แกลบ)	7.88 ± 0.01*	13.89 ± 0.01*	1.34 ± 0.01*	1.44 ± 0.01*	2.55 ± 0.01*	3.02 ± 0.01*
C.V. (%)	12.26	3.75	8.15	4.78	8.58	7.36

*F-test: the mean difference is significant at the 0.05 level ($P \leq 0.05$)

จากการศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลร่วมกับวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวัน เมื่อพิจารณาผลการทดลองในวันที่ 7 และวันที่ 15 ของการเพาะปลูก พบว่าต้นอ่อนทานตะวันที่ปลูกด้วยดินกับปุ๋ยหมักในอัตราส่วน 1:1 ทั้ง 4 ชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งมีขุยมะพร้าวเป็นวัสดุหมักตัวกลางมีอัตราการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวันได้ดีกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ทั้งในด้านความสูงของต้นและความกว้างของใบต้นอ่อนทานตะวัน รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งมีขี้เลื่อยเป็นวัสดุหมักตัวกลางมีความยาวของใบต้นอ่อนทานตะวันมากที่สุด ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากการที่ปุ๋ยหมักในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 มีค่าโพแทสเซียมสูง (ตารางที่ 1) จึงเหมาะแก่การปลูกพืชที่เน้นให้โตเร็วและมีระยะเวลาเก็บเกี่ยวน้อย เช่น ต้นอ่อนทานตะวัน [23] ดังนั้น จึงสามารถใช้ดินและปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลหรือปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์ในการปลูกต้นอ่อนทานตะวันได้ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ปุ๋ยหมักที่ผลิตจากขยะอินทรีย์ผสมกับวัสดุหมักตัวกลางและดินในอัตราส่วน 1:1 สามารถช่วยเร่งการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวันได้ดีเมื่อพิจารณาจากการงอกของต้นอ่อนทานตะวันและปริมาณธาตุอาหารจำพวกโพแทสเซียมสูงในปุ๋ยหมัก

สรุปผลการวิจัย

ปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์และวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ในท้องถิ่นร่วมกับเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่มีความเหมาะสมและมีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งมีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ดังนั้น วัสดุหมักที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม เมื่อนำไปทดสอบโดยผสมกับดินปลูกสำหรับต้นอ่อนทานตะวัน พบว่า การใส่ปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์และเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลมีแนวโน้มส่งผลต่อการเจริญเติบโตของลำต้นและใบ โดยการใส่ปุ๋ย

หมักที่มีขุยมะพร้าวเป็นวัสดุหมักตัวกลางส่งผลให้ต้นอ่อนทานตะวันมีความสูงและความกว้างใบสูงที่สุด ขณะที่การใส่ปุ๋ยหมักที่มีขี้เลื่อยเป็นวัสดุหมักตัวกลางส่งผลให้ต้นอ่อนทานตะวันมีความยาวใบสูงมากสุด สรุปได้ว่า การเติมขุยมะพร้าวและขี้เลื่อยเป็นวัสดุหมักตัวกลางช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวันได้

จากการศึกษาในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการหมักปุ๋ยจากวัสดุธรรมชาติที่แตกต่างกัน เพื่อให้รู้ว่าวิธีการหมักแบบใดที่มีคุณภาพใกล้เคียงค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กรมวิชาการเกษตรกำหนดไว้ และให้ปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งในพื้นที่การเพาะปลูกของเกษตรกรอาจมีวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ ที่อาจเป็นประโยชน์ต่อพืช ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและทดลองเปรียบเทียบการทำปุ๋ยหมักจากวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ชนิดอื่น ๆ ในพื้นที่ เพื่อหาชนิดของวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติที่เหมาะสมต่อพืชมากที่สุดและเป็นการช่วยให้ปุ๋ยหมักที่ผลิตจากขยะอินทรีย์มีคุณภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ปุ๋ยหมักกับพืชเศรษฐกิจอื่น ๆ เช่น พืชผัก พืชไร่ และไม้ผลชนิดอื่น ๆ เพื่อศึกษาอัตราและผลของการใช้ปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์และวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ในท้องถิ่นร่วมกับเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวลที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชเพื่อการบำรุงดินในระยะยาวต่อไป

การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

คณะผู้วิจัยได้นำขยะอินทรีย์และวัสดุอินทรีย์เหลือใช้ในท้องถิ่นมาทำปุ๋ยหมักร่วมกับเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าชีวมวล เป็นการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากชุมชนมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุปรับปรุงดินที่มีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทิ้งในชุมชน รวมถึงเป็นการอนุรักษ์ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมควบคุมมลพิษ, *รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2564*. กรุงเทพฯ: เอพี คอนเน็กซ์, 2565.

[2] วัฒนณรงค์ มากพันธ์, เกษมสันติ์ คำบุญมา และปิยะ ขวดแก้ว, “ปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยหมักชนิดต่าง ๆ จากขยะอินทรีย์ในมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช,” *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, ปีที่ 20, ฉ. 2, น. 19-28, 2560.

[3] มะลิวัลย์ หฤทัยธนาสันติ์, เทพา ผุดผ่อง, เกษม หฤทัยธนาสันติ์ และยุทธนา บรรจง, “การพัฒนาปุ๋ยอินทรีย์เคมีจากเศษเหลือขี้เถ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลและวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตร,” ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51: สาขาพืช*, กรุงเทพฯ, 2553, น. 456-463.

[4] อทิตยาต์ ต๋าแปง และสมใจ กาญจนวงศ์, “ผลของการเติมเถ้าลอยชีวมวลต่อสมรรถนะการหมักของเสียจากสับปะรด,” ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 12: ตามรอยพระยุคลบาท เกษตรศาสตร์กำแพงแสน*, นครปฐม, 2558, น. 335-343.

[5] ญารวี นาจรัส, “ผลของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าชีวมวลต่อสมรรถนะการผลิตปุ๋ยอินทรีย์จากเศษการตัดแต่งต้นไม้ร่วมกับมูลวัว,” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2557.

[6] ธีระพงษ์ สว่างปัญญางกูร, “การผลิตปุ๋ยหมักจากเศษอาหารด้วยระบบถังปิดเติมอากาศแบบถังหมุน,” รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 2552.

[7] สุธีรา สุนทรารักษ์, “การศึกษาคุณภาพปุ๋ยหมักเศษอาหารร่วมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อการรับรองคุณภาพ,” ใน *การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 17 และการสัมมนาวิชาการเพื่อเผยแพร่งานวิจัยสู่ชุมชน ครั้งที่ 5*, บุรีรัมย์, 2559, น. 844-857.

[8] นันทวัน ฤทธิ์เดช, “ข้อควรพิจารณาก่อนทำปุ๋ยหมัก,” *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ปีที่ 41, ฉ. 3, น. 595-606, 2556.

[9] กรมควบคุมมลพิษ, *แนวทางในการพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่การออกแบบก่อสร้างและการจัดการสถานที่จัดการ ขยะมูลฝอยโดยการหมักปุ๋ย (สารบำรุงดิน),* พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ธนสิริ ปริ้นติ้ง, 2560.

[10] ตรีรัตน์ เจริญกุล และจรรีตน์ สกุลรัตน์, "ประสิทธิภาพการย่อยสลายมูลฝอยอินทรีย์ในถังหมักขนาดเล็กแบบเติมอากาศ," *วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย*, ปีที่ 30, ฉ. 3, น. 85-93, 2559.

[11] วรรณวิภา ไชยชาญ, ฌานิกา แซ่แง่ ชูกลิ่น, กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์, เจ๊ะอูยี เปาะเลาะ และทัพพสาร แต้ม-ประสิทธิ์, "การผลิตและคุณสมบัติของปุ๋ยหมักจากขยะอินทรีย์ในลังโฟม," *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, ปีที่ 11, ฉ. 3, น. 540-555, 2562.

[12] A. A. Kadir, S. N. M. Ismail and S. N. Jamaludin, "Food waste composting study from Makanan Ringan Mas," *Soft Soil Engineering International Conference 2015 (SEIC 2015) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 136, no. 1, 2016.

[13] จีมา ศรลัมพ์, ประกาศิต อุบลรัตน์ และโสพส มีสุขอนุกูล, "การออกแบบถังหมักขยะขนาดเล็กเพื่อการหมักขยะอินทรีย์จากครัวเรือน," *วารสารวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, ปีที่ 32, ฉ. 108, น. 63-70, 2562.

[14] Z. Li, H. Lu, L. Ren and L. He, "Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review," *Chemosphere*, vol. 93, no. 7, pp. 1247-1257, 2013.

[15] M. A. Vázquez, R. Plana, C. Pérez and M. Soto, "Development of technologies for local composting of food waste from universities," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 9, 2020.

[16] วรรณกุล บำรุงสาลี, "ถังหมักขยะเศษอาหารจากครัวเรือน," ใน *การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21*, สงขลา, 2554, น. 1-5.

[17] ภาณุพัฒน์ อุนเกษม, "การประเมินศักยภาพของปุ๋ยหมักจากใบสับปะรดในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตสับปะรดนางแล," วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม, 2562.

[18] กรมวิชาการเกษตร, (2565, 20 พฤษภาคม), ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548, [ออนไลน์]. จาก: http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2548/00172707.PDF

[19] เจนจิรา ชุมภูคา และสิริกาญจนา ตาแก้ว, "ผลของวัสดุปลูกต่อการงอกของเมล็ด การรอดชีวิต และการเจริญเติบโตของต้นกล้ามัลเบอร์รี่พันธุ์เวียดนาม GQ2," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 5, ฉ. 3, น. 283-295, 2559.

[20] มะลิวัลย์ หฤทัยธนาสันติ์, "โครงการสนับสนุนเพื่อการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการสถานีผลิตพลังงานสีเขียว Distributed-Green-Generation: DGG (โครงการศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการสร้างโรงไฟฟ้าชีว-มวลชุมชน 15 แห่ง) สถานีพลังงานชีวมวลชุมชน ต.นาหว้า อ.ภูเวียง จ.ขอนแก่น (CBES-2)," รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2556.

[21] ปิยะรักษ์ ประดับเพชรรัตน์, สะอุดี มะประสิทธิ์, มนกานต์ พิมเสน, จุฑามาศ แก้วมณี และวาริน นาราวิทย์, "ต้นแบบถังหมักขยะอินทรีย์ขนาดเล็ก เปลี่ยนขยะเศษอาหารให้เป็นปุ๋ย," รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, ยะลา, 2564.

[22] ฐนียา รังสีสุริยะชัย และกุลยา สาริชีวิน, "การศึกษาการหมักปุ๋ยจากเศษอินทรียวัตถุด้วยการเติมอากาศร่วมกับการใช้ครูดเอมไซม์," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี*, ปีที่ 16, ฉ. 2, น. 1-12, 2561.

[23] นิตย์ตะยา ผาสุขพันธุ์, น้ำฝน เอกตาแสง, ญาณสินี สุมา และธนิกา ส่องหล้า, "ผลของปุ๋ยอินทรีย์จากขยะเศษอาหารในการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวัน," *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, ปีที่ 26, ฉ. 2, น. 928- 940, 2564.