

น้ำหมักจุลินทรีย์เพื่อการจัดการขยะกระดาษที่ไม่สามารถรีไซเคิล: ทางเลือกสีเขียวเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

ธนศัญญ์ จันทรเด่นดวง^{1*}, วีรวัชร ฉวีนิล¹, ทิพย์อาภรณ์ บุปผาชาติ², พิระพงศ์ โภคพันธ์², ขมณัฏฐ์ชา บุญมี²,
และ จุฑารัตน์ ใจงาม¹

¹โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย ปทุมธานี ตำบลบ่อเงิน อำเภอลาดหลุมแก้ว จังหวัดปทุมธานี

²ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

* Corresponding author: thanasit.cha@pccp.ac.th

บทคัดย่อ

การบริโภคผลิตภัณฑ์กระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การจัดการของเสียจากกระดาษกลายเป็นประเด็นที่สำคัญ งานวิจัยนี้ศึกษาการย่อยสลายของกระดาษที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ ได้แก่ กล่องอาหารเยื่อชานอ้อย กล่องพิซซ่าที่มีหมึกพิมพ์ และกระดาษห่อข้าวมันไก่ที่มีพลาสติกเคลือบด้านเดียว ในถังหมักขยะอินทรีย์ขนาด 16 ลิตร โดยใช้จุลินทรีย์ในมูลวัวแห้งเป็นจุลินทรีย์หลัก และเสริมประสิทธิภาพโดยเติมจุลินทรีย์น้ำขาวข้าว จุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา และจุลินทรีย์หน่อกล้วย ผลการวิเคราะห์น้ำหมักจุลินทรีย์พบว่าจุลินทรีย์หน่อกล้วยมีความหนาแน่นมากที่สุด รองลงมาคือจุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา จุลินทรีย์น้ำขาวข้าว และมูลวัวแห้งตามลำดับ กล่องอาหารเยื่อชานอ้อยย่อยสลายได้ 100% ภายใน 4–5 สัปดาห์ กระดาษห่อข้าวมันไก่ (เฉพาะส่วนกระดาษ) ย่อยสลายได้หมดในระบบที่ใช้ไตรโคเดอร์มาเสริมประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามพบว่าในระบบอื่นมีเศษกระดาษตกค้างติดกับฟิล์มพลาสติกบางส่วน สำหรับกระดาษกล่องพิซซ่าที่มีหมึกพิมพ์มีอัตราการย่อยสลายช้าที่สุดคือ 88–94% ภายใน 8 สัปดาห์ จุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มามีประสิทธิภาพเร่งการย่อยสลายกระดาษได้สูงสุด รองลงมาคือจุลินทรีย์หน่อกล้วย และจุลินทรีย์น้ำขาวข้าว ตามลำดับ ปุ๋ยหมักที่ได้ถูกนำมาทดสอบสมบัติทางเคมีและผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมด้วยการทดสอบความเป็นพิษที่มีต่อการงอกและการเจริญเติบโตพืช

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงศักยภาพการจัดการขยะกระดาษบางประเภทที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ เพื่อเปลี่ยนเป็นวัสดุปรับปรุงดินที่ปลอดภัยสำหรับใช้ทางการเกษตร เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยลดปัญหาการกำจัดขยะกระดาษได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การย่อยสลาย / ขยะกระดาษ / จุลินทรีย์น้ำขาวข้าว / จุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา / จุลินทรีย์หน่อกล้วย

Microbial Fermented Bio-Extract for the Biodegradation of Non-Recyclable Paper Waste: A Sustainable Waste Management Strategy

Thanasit Chandenduang^{1*}, Teerawat Chaweenin¹, Tiparporn Bubpachat², Peeraphong Pokphat²,
Chomnutcha Boonmee², and Jutarat Jaingam¹

¹Princess Chulabhorn Science High School Pathum Thani, Thailand

²National Metal and Materials Technology Center, Thailand Science Park (TSP), Pathum Thani, Thailand

* Corresponding author: thanasit.cha@pccp.ac.th

Abstract

The increasing consumption of paper products has led to a growing concern over the management of paper waste, especially those that cannot be recycled. This study investigates the biodegradation properties of non-recyclable paper waste, namely bagasse-based food containers (P1), ink-printed pizza boxes (P2), and plastic-coated chicken rice wrappers (P3) using microbial fermented bio-extracts in 16-liter organic waste composting bins. Dried cow manure (C) was served as the primary microbial source, while the efficiency was enhanced with the addition of microbial fermented bio-extracts from rice rinse water (R), *Trichoderma* spp. (T), and banana shoot (B). Microbial analysis revealed that banana shoot microbes exhibited the highest density, followed by *Trichoderma*, rice rinse water microbes, and cow manure, respectively. Complete decomposition of bagasse containers was achieved within 4–5 weeks. The paper component of the chicken rice wrappers was fully degraded in the *Trichoderma*-enhanced system; however, small amount of residual paper was adhered to the plastic film in other systems. The ink-printed pizza boxes exhibited the slowest degradation rate, ranging from 88% to 94% within 8 weeks. *Trichoderma* demonstrated the highest efficiency in accelerating paper decomposition, followed by banana shoot microbes and rice rinse water microbes. The resulting compost was evaluated for chemical properties and phytotoxicity through germination and plant growth tests.

The results demonstrate the potential of microbial fermented bio-extracts as an effective and environmentally friendly method for converting certain types of non-recyclable paper waste into safe soil amendments suitable for agricultural use, thereby offering a sustainable solution for paper waste management.

Keywords: Biodegradation / Paper waste / Rice rinse water microbes / *Trichoderma* / Banana shoot microbes

1. บทนำ

ปัญหาขยะกระดาษเป็นปัญหาที่พบได้ทั่วไปในหลายประเทศ โดยเฉพาะในเมืองใหญ่ที่มีการบริโภค และใช้กระดาษเป็นส่วนประกอบหลักในปริมาณมาก เช่นการพิมพ์ การใช้เอกสารในสำนักงาน การทำการตลาด และการบรรจุภัณฑ์ ส่งผลให้ปริมาณขยะกระดาษเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลจากสมาคมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษไทยระบุว่าไทยมีการใช้งานกระดาษ 75 กิโลกรัม/คน/ปี [1] และเป็นองค์ประกอบสำคัญหนึ่งของขยะมูลฝอย ขยะกระดาษบางชนิดเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ แต่ก็มีขยะกระดาษบางประเภทที่ไม่นิยมนำมารีไซเคิลเนื่องจากใช้กระบวนการที่ซับซ้อนทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ เช่น กระดาษเคลือบพลาสติก เช่น กระดาษห่อข้าวมันไก่ และกล่องนมมีพลาสติกเคลือบเพื่อกันน้ำและความชื้น กระดาษที่สกปรกหรือเปื้อนน้ำมัน เช่น กล่องกระดาษที่เปื้อนอาหาร น้ำมัน หรือสารเคมี ซึ่งขยะกระดาษเหล่านี้มักถูกทิ้งรวมกับขยะรีไซเคิลอื่นส่งผลกระทบและก่อปัญหาในระบบรีไซเคิล ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์กระดาษรีไซเคิลลดลง หรือถูกทิ้งรวมกับขยะทั่วไปเพื่อส่งไปบ่อฝังกลบขยะ ทำให้มีการใช้พื้นที่ในบ่อฝังกลบและย่อยสลายได้ช้าในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนตามมาได้ หากนำไปเผาจะทำให้เกิดก๊าซและฝุ่นละออง PM 2.5 ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ กรมควบคุมมลพิษรายงานค่าเฉลี่ยองค์ประกอบของขยะมูลฝอยในของประเทศไทยปี พ.ศ. 2564 ว่ามีขยะกระดาษเป็นองค์ประกอบประมาณ 7.27% โดยน้ำหนัก เมืองใหญ่หรือเมืองท่องเที่ยว เช่น กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ ภูเก็ต และชลบุรี มีขยะกระดาษที่ถูกส่งเข้าสถานีกำจัดขยะมูลฝอยในสัดส่วนสูงถึง 12.14, 11.01, 10.62, และ 10.06% โดยน้ำหนักของขยะทั้งหมดตามลำดับ นอกจากนี้ยังรายงานว่าขยะกระดาษในเขตกรุงเทพมหานครประกอบด้วยกระดาษที่สามารถรีไซเคิลได้เพียง 2.50 % ในขณะที่มีกระดาษที่รีไซเคิลไม่ได้อยู่ถึง 9.64% [2]

ปริมาณขยะอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นปัญหาสำคัญหนึ่งของโลก มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกทำให้เกิดความต้องการด้านอาหารเพิ่มขึ้นซึ่งเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเกษตรที่ต้องการผลิตผลผลิตให้สูงขึ้น แนวทางหนึ่งที่จะส่งเสริมการปรับปรุงคุณภาพดินปลูกเพื่อการเกษตรคือการทำปุ๋ยหมักในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) Ballardo C. และคณะ ได้รายงานผลวิจัยเพื่อเพิ่มมูลค่าปุ๋ยหมักที่ได้จากการหมักขยะอินทรีย์ ด้วยการเพิ่มสมบัติช่วยกำจัดแมลงโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ *Bacillus thuringiensis* (BT) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่มีประโยชน์ สามารถนำมาใช้กำจัดแมลงศัตรูพืช โดยเติมลงในถังหมักขยะอินทรีย์ และทำการเปรียบเทียบคุณภาพของปุ๋ยหมักที่ได้จากถังหมักที่เติมเชื้อและไม่เติมเชื้อ พบว่าปุ๋ยหมักที่ได้จากการหมักทั้ง 2 แบบ มีสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด แต่การเติมเชื้อ BT ส่งผลต่อความหลากหลายของจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมักที่ได้มากกว่า [3] Ahmed, S. และคณะ ทำการศึกษาการย่อยสลายของกระดาษหลายชนิดในปุ๋ยหมักและมูลไก่ พบว่ากระดาษต่างชนิดกันมีการย่อยสลายที่แตกต่างกัน โดยกระดาษรีไซเคิล กระดาษมัน และกระดาษพิมพ์แบบไม่มีหมึกย่อยสลายได้หมดภายใน 14 16 และ 18 วันตามลำดับ ในขณะที่กระดาษพิมพ์แบบมีหมึกย่อยสลายไม่หมดภายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ 21 วัน [4] Alvarez, J. V. L. และคณะ ทำการทดสอบการย่อยสลายของตัวอย่างกระดาษ 6 ชนิดคือ กระดาษขาว กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษรีไซเคิลแบบฟอกสี กระดาษทิชชู กระดาษกล่อง และกระดาษคราฟท์สีน้ำตาล ด้วยวิธีการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายตัวอย่างด้วยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนในระบบการหมักขยะอินทรีย์ที่ควบคุมสภาวะเลียนแบบการหมักปุ๋ยระดับอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิ 58 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วัน พบว่ากระดาษทั้ง 6 ชนิดย่อยสลายได้ในช่วง 36-65% โดยกระดาษขาวย่อยสลายได้สูงที่สุดที่ 65% รองลงมาคือกระดาษ รีไซเคิล และกระดาษกล่องย่อยสลายได้ 61% และ 51% ตามลำดับ ในขณะที่กระดาษทิชชูย่อยสลายได้ 50% เนื่องจากจับตัวกันเป็นก้อน

ในถังหมักทำให้พื้นที่ผิวในการสัมผัสจุลินทรีย์ลดลง กระดาษหนังสือพิมพ์ย่อยสลายได้ 43% และกระดาษคราฟท์สีน้ำตาลย่อยสลายได้น้อยที่สุดคือ 36% [5]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการเร่งการย่อยสลายทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์กระดาษในระบบหมักขยะอินทรีย์ในถังหมักขนาดเล็กของกระดาษ 3 ชนิด ได้แก่ กระดาษเยื่อขานอ้อย (P1) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในบ้านและศูนย์อาหารในปัจจุบัน กระดาษกล่องพิชซ่า (P2) ที่เลอะคราบอาหารและมีหมึกพิมพ์อยู่ในปริมาณมาก และกระดาษห่อข้าวมันไก่ (P3) ซึ่งมีฟิล์มพลาสติกเคลือบ ใช้แหล่งจุลินทรีย์ธรรมชาติที่มีราคาถูก หาซื้อหรือเตรียมเองได้ง่าย 4 ชนิดคือ มูลวัวแห้ง (C) จุลินทรีย์น้ำขาวข้าว (R) จุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา (T) และจุลินทรีย์หน่อกล้วย (B) ทำการติดตามพฤติกรรมของการย่อยสลายของกระดาษแต่ละชนิดที่ถูกเร่งการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน คำนวณ % การย่อยสลายจากน้ำหนักที่หายไป วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและความเป็นพิษที่มีต่อพืชอ้างอิงข้อกำหนดตามมาตรฐาน EN 13432:2000 [6] ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่ได้รับการยอมรับระดับนานาชาติสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ในระบบหมักขยะอินทรีย์ องค์ความรู้ที่ได้จากโครงการนี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ และจัดการบรรจุภัณฑ์กระดาษเพื่อเปลี่ยนเป็นปุ๋ยหมักนำกลับมาใช้ประโยชน์ สร้างมูลค่าให้กับทรัพยากรได้เต็มศักยภาพใช้ทรัพยากรชีวภาพอย่างคุ้มค่า ช่วยลดขยะและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายและคำนวณอัตราการย่อยสลายของกระดาษ 3 ประเภท ภายใต้สภาวะการหมักขยะอินทรีย์ในถังหมักขนาดเล็ก
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย ในการเร่งกระบวนการย่อยสลายของกระดาษและขยะอินทรีย์
3. เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของปุ๋ยหมักที่ได้จากการย่อยสลายของกระดาษร่วมกับขยะอินทรีย์

3. ขอบเขตของการศึกษา

1. กระดาษที่ใช้ คือ กล่องอาหารเยื่อขานอ้อย (P1) กระดาษกล่องพิชซ่าที่มีหมึกพิมพ์ (P2) และกระดาษห่อข้าวมันไก่ที่มีพลาสติกเคลือบ 1 ด้าน
2. จุลินทรีย์ที่ใช้ คือ มูลวัวแห้ง (C) ใช้เป็นจุลินทรีย์หลัก และจุลินทรีย์น้ำขาวข้าว (R) จุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา (T) และจุลินทรีย์หน่อกล้วย (B) เป็นจุลินทรีย์เสริมประสิทธิภาพ
3. ใช้ถังหมักทำจากพลาสติกฝาปิดขนาด 16 ลิตร เเจาะรูจำนวน 5 แถว แถวละ 8 รู เป็นถังหมัก ทำการหมักที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Ambient temperature)

4. วิธีการศึกษา

4.1 การเตรียมแหล่งจุลินทรีย์

4.1.1 มูลวัวแห้ง

ชั่งมูลวัวแห้ง 10 กรัม ใส่ขวดแก้วขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำละลาย 0.85% NaCl ปริมาตร 90 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 15 นาทีก่อนนำมาใช้ศึกษาลักษณะและปริมาณของจุลินทรีย์

4.1.2 จุลินทรีย์น้ำข้าวข้าว

ตวงน้ำข้าวข้าว 2,000 มิลลิลิตรใส่ในบีกเกอร์ เทน้ำตาลทราย 120 กรัม คนให้ละลาย เติมนมเปรี้ยวปีทาเก้น 170 มิลลิลิตร คนให้ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน เทใส่ขวดเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง 2 สัปดาห์ก่อนนำไปใช้งาน เปิดระบายแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเป็นระยะ

4.1.3 จุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา

ตวงน้ำสะอาด 2,000 มิลลิลิตรใส่ในบีกเกอร์ ผสมกากน้ำตาล 100 มิลลิลิตร คนให้ละลายเข้ากัน จากนั้นเติมผงไตรโคเดอร์มา ฮาร์เซียนัม (*Trichoderma harzianum*) 1.5 กรัม คนให้ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน เทใส่ขวดเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง 2 สัปดาห์ ก่อนนำไปใช้งาน เปิดระบายแก๊สที่เกิดขึ้นภายในเป็นระยะ

4.1.4 จุลินทรีย์หน่อกล้วย

สับหน่อกล้วยเป็นชิ้นเล็กๆ หนัก 2 กิโลกรัม ใส่ถังพลาสติก ซังกากน้ำตาลประมาณ 660 กรัมใส่ลงในถัง ผสมให้เข้ากัน ปิดฝาทันที หมักทิ้งไว้ 2 สัปดาห์ กรองเฉพาะส่วนที่เป็นของเหลวใส่ขวด

4.2 ศึกษาลักษณะและปริมาณของจุลินทรีย์

4.2.1 ศึกษาลักษณะของจุลินทรีย์ด้วยวิธีการย้อมแกรม (Gram Staining)

ทำการเขี่ยน้ำหมักจุลินทรีย์ที่เตรียมได้ลงบนสไลด์ที่สะอาด ทิ้งให้แห้ง จากนั้นตรึงตัวเซลล์ด้วยการผ่านเปลวไฟ 2-3 รอบอย่างรวดเร็วให้เซลล์แห้งติดกับแผ่นกระจกสไลด์ หยด Ammonium oxalate crystal violet บนเชื้อที่เขี่ยไว้นานประมาณ 1 – 2 นาที แล้วเทสีทิ้ง หยดสารละลายไอโอดีนตามลงไปนานประมาณ 2 นาที แล้วเททิ้ง สารละลายไอโอดีนจะช่วยให้เซลล์ย้อมติดสีได้ดีขึ้น ล้างสี (Decolorized) ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95% และน้ำกลั่น หยดสี Safranin บนเชื้อนานประมาณ 15-30 วินาที ล้างสีด้วยน้ำกลั่น นำแผ่นสไลด์ที่เตรียมได้ไปศึกษาเซลล์จุลินทรีย์ผ่านทางกล้องจุลทรรศน์ซึ่งแบคทีเรียแกรมบวก (Gram Positive) จะย้อมติดสีน้ำเงินม่วง ของ Crystal violet ส่วนแบคทีเรียแกรมลบ (Gram Negative) จะย้อมติดสีแดง ของ Safranin

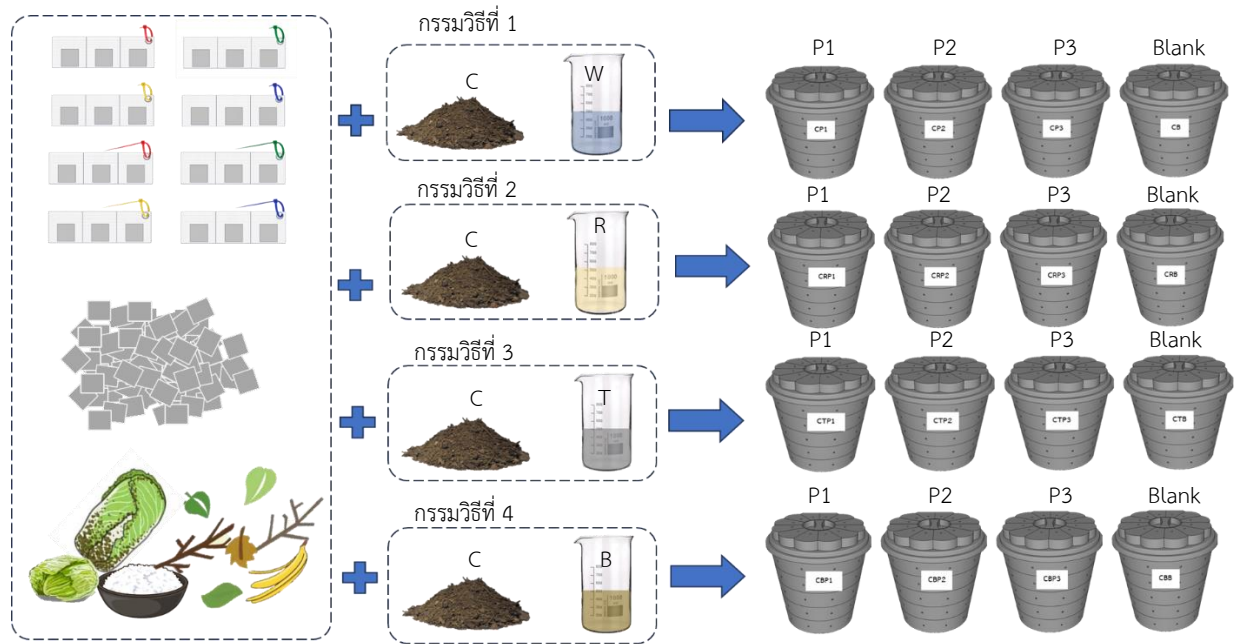
4.2.2 ตรวจนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคการ spread plate

เตรียมสารละลายเชื้อที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยชั่งมูลวุ้นแห้ง 10 กรัม แยกใส่ขวดแก้วขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำสะอาด 0.85% NaCl ปริมาตร 90 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที สำหรับน้ำหมักจุลินทรีย์ที่เป็นของเหลว ทำการเตรียมโดยเขี่ยของเหลวให้เข้ากันแล้วใช้ปิเปตดูดมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำสะอาด 0.85% NaCl 9 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันดี จะได้สารละลายความเข้มข้น 10^{-1} จากนั้นทำเจือจางที่ละ 10 เท่า ทำ spread plate โดยดูดสารละลายเชื้อที่ความเข้มข้น 10^{-3} - 10^{-6} ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรลงอาหารเลี้ยงเชื้อ NA สำหรับทำการนับปริมาณแบคทีเรีย และอาหาร PDA สำหรับการนับปริมาณเชื้อรา ใช้แท่งแก้ว spreader เกลี่ยสารละลายเชื้อให้กระจายทั่วผิวหน้าของอาหาร บ่มเชื้อบนจานอาหาร NA ที่ 30 องศาเซลเซียส และบ่มเชื้อบนจานอาหาร PDA ที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นับและคำนวณจำนวนโคโลนี (Colony forming units (CFU)) โดยใช้สมการ $CFU/g \text{ or } CFU/ml = \frac{\text{จำนวนโคโลนีที่นับได้จากจานอาหาร}}{\text{ระดับความเจือจาง} \times \text{ปริมาตรที่ปิเปตมา}} (0.1)$

4.3 เตรียมกระดาศทดสอบ

4.3.1 ตัดตัวอย่างกระดาศเห็ดขานอ้อย (P1) กระดาศกล่องพิชซ่า (P2) และกระดาศห่อข้าวมันไก่ (P3) ขนาด 2.5x2.5 ตารางเซนติเมตร ชนิดละ 1,300 ชิ้น

4.3.2 เตรียมถุงตาข่ายใส่กระดาษตัวอย่างชนิดละ 32 ถุง แต่ละถุงแบ่งเป็น 3 ช่อง ซึ่งน้ำหนักกระดาษตัวอย่างแต่ละชิ้นก่อนใส่ลงในถุงตาข่าย สำหรับใส่ในถังหมัก 4 กรรมวิธี ถึงละ 8 ถุง ทำรหัส 1 – 8 บนถุงตาข่ายสำหรับเก็บออกจากถังหมักสัปดาห์ละ 1 ถุง ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเตรียมถังหมัก 4 กรรมวิธี 1) ใช้มูลวัวแห้งเป็นแหล่งจุลินทรีย์หลัก (C) 2) ใช้มูลวัวแห้งร่วมกับจุลินทรีย์น้ำขาวข้าว (CR) 3) ใช้มูลวัวแห้งร่วมกับจุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา (CT) และ 4) ใช้มูลวัวแห้งร่วมกับจุลินทรีย์หน่อกล้วย (CB); W = น้ำเปล่า

P1 = กระดาษเยื่อขานอ้อย P2 = กล่องฟิซซ่า และ P3 = กระดาษห่อข้าวมันไก่

4.4 กระบวนการหมัก

4.4.1 กรรมวิธีที่ 1 ใช้มูลวัวแห้ง (C) เป็นแหล่งจุลินทรีย์หลัก

เตรียมวัสดุหมักโดยซึ่งวัสดุหมักเลียนแบบขยะอินทรีย์ในครัวเรือนประกอบด้วยข้าวสวยประมาณ 6 กิโลกรัม เปลือกผลไม้ ประมาณ 7 กิโลกรัม เศษผักหั่นหยาบประมาณ 7 กิโลกรัม ใบไม้แห้ง ประมาณ 1 กิโลกรัม กิ่งไม้สับหยาบ 4 กิโลกรัม และมูลวัวแห้ง 7 กิโลกรัม ใส่ลงในกระบะคลุมผสมให้เข้ากันเติมน้ำประปา 2 ลิตร คลุกผสมให้เข้ากันอีกครั้ง ได้วัสดุหมักผสมประมาณ 34 กิโลกรัม แบ่งวัสดุหมักที่ผสมเข้ากันแล้วออกมาประมาณ 8 กิโลกรัม ใส่ลงถังหมักขนาด 16 ลิตรที่เจาะรูระบายอากาศไว้จำนวน 4 ถัง ถึงใบที่ 1 ใส่ตัวอย่างกระดาษเยื่อขานอ้อย (P1) จำนวน 300 ชิ้น และถุงตาข่ายที่ใส่ตัวอย่างกระดาษเยื่อขานอ้อยที่ทราบน้ำหนักตั้งต้นจำนวน 8 ถุง ใส่รหัสถังหมัก CP1 ถึงใบที่ 2 และ 3 ทำชั้นตอนเดิมแต่เปลี่ยนตัวอย่างกระดาษเยื่อขานอ้อย เป็นกระดาษกล่องฟิซซ่า (P2) และกระดาษห่อข้าวมันไก่ (P3) ตามลำดับ และใส่รหัสถังหมักเป็น CP2 และ CP3 ส่วนถังใบที่ 4 ใส่ถังหมักรหัส CB เป็นถัง แบลงค์ (ไม่ใส่ตัวอย่างกระดาษ) ปุ๋ยหมักที่ได้จากถังนี้จะใช้เป็นปุ๋ยหมักควบคุมในการศึกษาผลของการย่อยกระดาษต่อคุณภาพของปุ๋ยหมักเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของปุ๋ยหมักที่มีและไม่มีกระดาษ

4.4.2 กรรมวิธีที่ 2 ใช้มูลวัวแห้งเสริมประสิทธิภาพด้วยจุลินทรีย์น้ำขาวข้าว (CR)

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.4.1 แต่ใช้จุลินทรีย์น้ำขาวข้าว 1,000 มิลลิลิตร ผสมน้ำประปาให้เป็น 2 ลิตรแทนการใช้น้ำประปาอย่างเดียว ระบุรหัสถังหมัก CRP1, CRP2, CRP3 และ CRB ตามลำดับ

4.4.3 กรรมวิธีที่ 3 ใช้มูลวัวแห้งเสริมประสิทธิภาพด้วยจุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา (CT)

เตรียมวัสดุหมักเช่นเดียวกับข้อ 4.4.1 แต่ใช้จุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา 1,000 มิลลิลิตร ผสมน้ำประปาให้เป็น 2 ลิตรแทนการใช้น้ำประปาอย่างเดียว ระบุรหัสถังหมัก CTP1, CTP2, CTP3 และ CTB ตามลำดับ

4.4.4 กรรมวิธีที่ 4 ใช้มูลวัวแห้งเสริมประสิทธิภาพด้วยจุลินทรีย์หน่อกล้วย (CB)

เตรียมวัสดุหมักเช่นเดียวกับข้อ 4.4.1 แต่ใช้จุลินทรีย์หน่อกล้วย 1,000 มิลลิลิตร ผสมน้ำประปาให้เป็น 2 ลิตรแทนการใช้น้ำประปาอย่างเดียว ระบุรหัสถังหมัก CBP1, CBP2, CBP3 และ CBB ตามลำดับ

4.5 การย่อยสลายของกระดาษ

ติดตามวัดอุณหภูมิภายในถังหมัก และเก็บตัวอย่างในถุงตาข่ายออกจากถังหมักจำนวน 1 ถุงทุกสัปดาห์ คลุกส่วนผสมในถังหมัก หากแห้งเกินไปให้เติมน้ำ ซึ่งตัวอย่างแต่ละชิ้น คำนวณ เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายจากน้ำหนักตัวอย่างที่หายไป โดยใช้สมการ % การย่อยสลาย = $\frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100$ เมื่อ W_0 = น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย หน่วยเป็นกรัม W_1 = น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย หน่วยเป็นกรัม ทำความสะอาดตัวอย่างที่เก็บได้โดยแช่และเขย่าถุงตาข่ายเบา ๆ ในน้ำประมาณ 1 นาที อบตัวอย่างให้แห้ง เก็บตัวอย่างใส่ถุงซิปล็อค

4.6 คุณภาพของปุ๋ยหมัก

4.6.1 วิเคราะห์ความชื้น (moisture content) ของปุ๋ยหมัก

ซึ่งตัวอย่างปุ๋ยหมักประมาณ 10 กรัมลงถ้วยครุชีเบลที่ทราบน้ำหนัก และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำถ้วยออกมาใส่โถดูดความชื้นจนเย็น ซึ่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง คำนวณ % ความชื้นโดย โดยสมการ % ความชื้น = $\frac{(W_{wet} - W_{dry})}{W_{wet}} \times 100$ (เมื่อ W_{wet} = น้ำหนักปุ๋ยหมักก่อนอบ หน่วยเป็นกรัม W_{dry} = น้ำหนักปุ๋ยหมักหลังอบ หน่วยเป็นกรัม)

4.6.2 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (EC)

ซึ่งตัวอย่างปุ๋ยหมัก 30 กรัม ใส่ขวดพลาสติกมีฝาปิด จำนวน 3 ขวด เติมน้ำ DI 30 มิลลิลิตร ปิดฝา เขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที แล้ววางทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง นำสารละลายส่วนบนมาทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่อง pH meter (ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 785 DMP Titrino) และ เครื่อง EC meter (TOA-DKK รุ่น MM42DP) ตามลำดับ

4.6.3 วิเคราะห์ค่า C/N

อบตัวอย่างปุ๋ยหมักให้แห้ง บดให้ละเอียดก่อนนำไปวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ด้วยเครื่อง TOC (Total organic carbon, Shimadzu Scientific) และ ปริมาณธาตุไนโตรเจน (N) ด้วยเทคนิค Kjeldahl method (GERHARDT รุ่น Vap45S) คำนวณค่า C/N

4.6.4 ศึกษาความเป็นพิษต่อพืชของปุ๋ยหมัก

เตรียมดินปลูกพืชด้วยการผสมดินกับปุ๋ยหมักเข้มข้น 25% โดยน้ำหนัก โดยใช้ปุ๋ยหมักที่หมักครบระยะเวลา 8 สัปดาห์ จำนวน 125 กรัม ผสมกับดินปลูกต้นไม้ 375 กรัม เติมน้ำ 500 มิลลิลิตร คลุกผสมให้เข้ากัน จากนั้นแบ่งดินผสมที่ได้ น้ำหนัก 80 กรัม ใส่ในกระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว จำนวน 6 กระถาง ทดสอบการงอกของพืชโดยใช้เมล็ดข้าวฟ่าง (พืชใบเลี้ยงเดี่ยว)

และเมล็ดถั่วเขียว (พีชใบเลี้ยงคู่) อย่างละ 3 กระถาง โดยหว่านเมล็ดกระถางละ 10 เมล็ด แล้วโรยผิวหน้าด้วยเพอร์ไลต์บาง ๆ เพื่อรักษาความชื้นจากนั้นนำกระถางทั้งหมดวางในห้องควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ $22\pm 1^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $70\pm 5\%\text{RH}$ มีรอบการให้แสง 16 ชั่วโมง และช่วงมืด 8 ชั่วโมง ความเข้มแสง $350\pm 50 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ ในช่วงความยาวคลื่น 400–800 นาโนเมตร รดน้ำทุก 1–2 วัน โดยเติมน้ำ 10 มิลลิลิตรที่ถาดรองกระถาง และพ่นละอองน้ำบาง ๆ บนผิวดิน หลังจากทดสอบครบ 5 วัน ทำการนับจำนวนเมล็ดที่งอก แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การงอก (% Germination) ด้วยสมการ $\% \text{การงอก} = \frac{A}{10} \times 100$ (เมื่อ A = จำนวนเมล็ดที่งอก) หลังจากทดสอบครบ 19 วัน ทำการตัดลำต้นส่วนที่อยู่เหนือดิน ใส่ถุงกระดาษ แล้วอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักแห้งของพีช ในการพิจารณาผลของปุ๋ยหมักที่มีกระดาศย่อยสลายอยู่อ้างอิงเกณฑ์กำหนดของมาตรฐาน EN 13432 หาก % การงอก และมวลแห้ง (มวลชีวภาพ) หรืออย่างใดอย่างหนึ่งของพีชที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยหมักที่มีตัวอย่างกระดาศย่อยสลายมีค่าน้อยกว่า 90% ของการปลูกโดยใช้ปุ๋ยหมักที่ไม่มีกระดาศ (ถึงแปลงค์ ที่ได้จากกรรมวิธีเดียวกัน) ถือว่ามีความเป็นพีช [6]

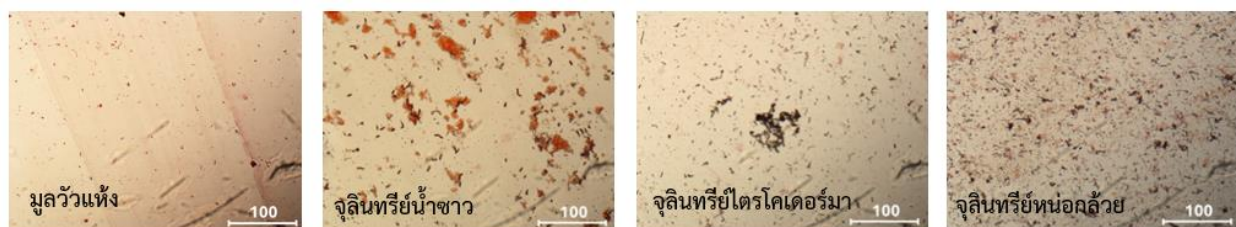
4.7 สถิติที่ใช้ในการศึกษา

ผลการทดลองถูกนำเสนอในรูปแบบค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean±SD) ดำเนินการในโปรแกรม Microsoft Excel 2019 โดยใช้ฟังก์ชัน AVERAGE และ STDEV การแสดงผลข้อมูลในรูปกราฟใช้ค่าเฉลี่ย และมีแถบค่าคลาดเคลื่อน (Error bars) ซึ่งแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

5.1 ผลการเตรียมน้ำหมักจุลินทรีย์ ศึกษาคุณสมบัติและปริมาณจุลินทรีย์

การเตรียมน้ำหมักจุลินทรีย์ใช้ระยะเวลาหมัก 14 วัน ได้น้ำหมักจุลินทรีย์น้ำขาวขาวสีขาวขุ่น น้ำหมักจุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มามีสีน้ำตาลเข้ม และน้ำหมักจุลินทรีย์หน่อกล้วยมีสีน้ำตาลเข้ม ผลการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่าน้ำหมักจุลินทรีย์หน่อกล้วยมีความหนาแน่นของจุลินทรีย์สูงที่สุด รองลงมาคือน้ำหมักไตรโคเดอร์มา น้ำขาวขาว และมูลวัวแห้งตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 น้ำหมักจุลินทรีย์น้ำขาวขาวและมูลวัวแห้งพบแบคทีเรียทั้งแกรมบวก (Gram-positive) และแกรมลบ (Gram-negative) ในขณะที่น้ำหมักไตรโคเดอร์มาพบลักษณะเส้นใยของเชื้อรา (hyphae) ทั้งแบบเส้นสั้นและเส้นยาว สำหรับน้ำหมักหน่อกล้วยพบแบคทีเรียทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบโดยส่วนใหญ่เป็นกลุ่มแกรมบวกที่ติดสีม่วงของ Crystal violet



รูปที่ 2 จุลินทรีย์ในน้ำหมักจุลินทรีย์ ภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 200 เท่า (200X)

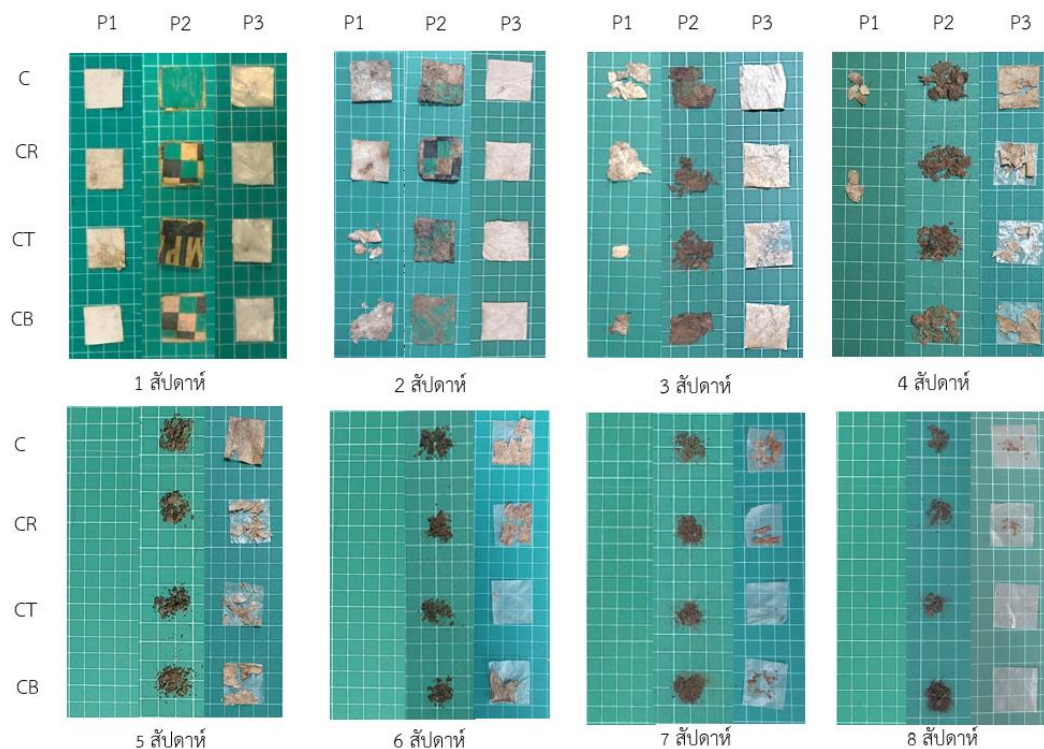
ผลการนับจำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตด้วยเทคนิค spread plate สรุปได้ว่ามูลวัวแห้งและจุลินทรีย์น้ำขาวขาวมีแบคทีเรียเป็นกลุ่มจุลินทรีย์หลัก ขณะที่น้ำหมักไตรโคเดอร์มา และหน่อกล้วย พบจุลินทรีย์ทั้งชนิดแบคทีเรียและรา โดยน้ำหมักหน่อกล้วยมีปริมาณจุลินทรีย์รวมสูงที่สุด รองลงมาคือ ไตรโคเดอร์มา มูลวัวแห้ง และน้ำขาวขาว ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการตรวจนับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตด้วยเทคนิค spread plate

แหล่งจุลินทรีย์	จำนวนจุลินทรีย์ (CFU/g หรือ CFU/ml)	
	อาหารเลี้ยงเชื้อ NA	อาหารเลี้ยงเชื้อ PDA
มูลวัวแห้ง	5.3×10^7	-
จุลินทรีย์น้ำข้าวข้าว	2.5×10^7	-
จุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา	1.3×10^7	5.3×10^7
จุลินทรีย์หน่อกล้วย	3.0×10^6	6.0×10^9

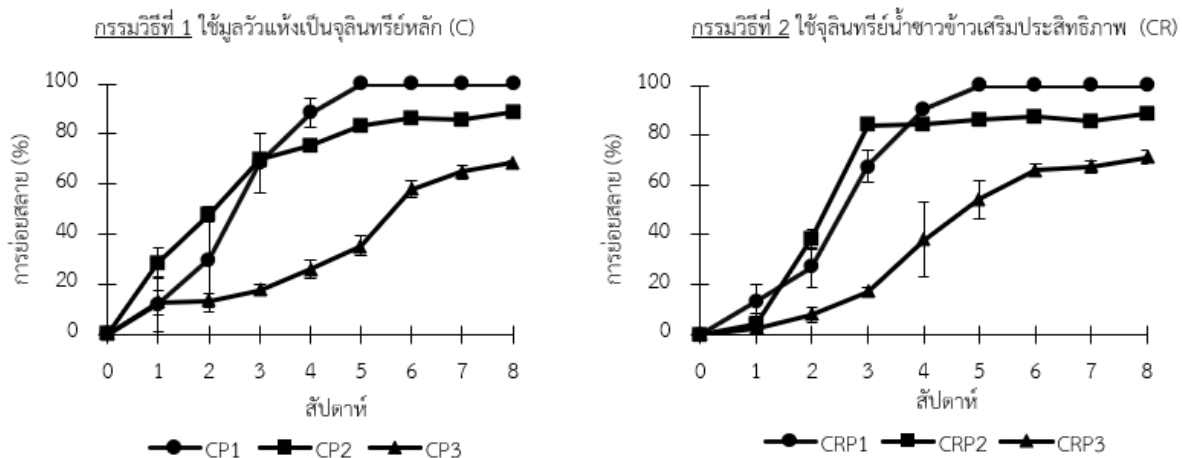
5.2 ผลการศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายของกระดาษในถังหมักขนาดเล็ก

การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายของกระดาษ 3 ชนิด ได้แก่ กระดาษเยื่อขานอ้อย (P1) กล่องกระดาษพิชซ่า (P2) และกระดาษห่อข้าวมันไก่ (P3) ภายใต้ระบบหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ในถังหมักขนาด 16 ลิตร ใช้ระยะเวลาการหมัก 8 สัปดาห์ กรรมวิธีที่ 1: ใช้มูลวัวแห้ง (C) เป็นแหล่งจุลินทรีย์หลัก กรรมวิธีที่ 2: เติมจุลินทรีย์จากข้าวสุกเป็นจุลินทรีย์เสริม (CR) กรรมวิธีที่ 3: เติมจุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มาเป็นจุลินทรีย์เสริม (CT) และกรรมวิธีที่ 4: เติมจุลินทรีย์จากหน่อกล้วยเป็นจุลินทรีย์เสริม (CB) ตัวอย่างกระดาษที่ทราบน้ำหนักถูกใส่ในถุงตาข่ายไนลอนและฝังร่วมกับขยะอินทรีย์ภายในถังหมัก ถึงสัปดาห์ที่ 8 ถัง ทำการเก็บตัวอย่างกระดาษทุกสัปดาห์โดยนำถุงตาข่ายออกจากถังหมักครั้งละ 1 ถัง นำตัวอย่างมาล้างทำความสะอาด อบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่ซึ่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณร้อยละของการย่อยสลายเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น รูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายกระดาษตัวอย่างระหว่างการย่อยสลายในถังหมักภายในระยะเวลา 8 สัปดาห์

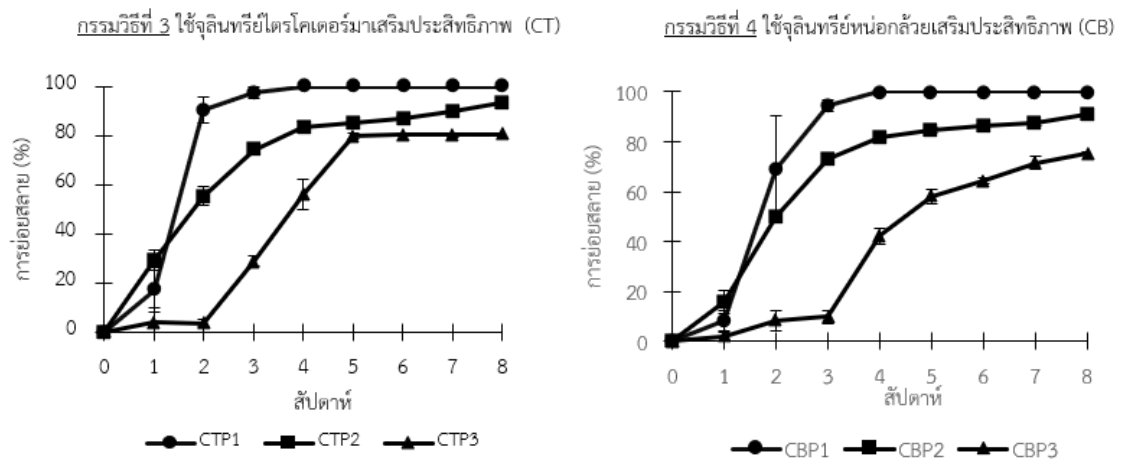


รูปที่ 3 กระดาษตัวอย่างหลังการทดสอบการย่อยสลายที่ระยะเวลาต่าง ๆ

รูปที่ 4 แสดงอัตราการย่อยสลายของกระดาษตัวอย่างพบว่ากระดาษเยื่อขานอ้อยสามารถย่อยสลายได้สมบูรณ์ (100%) ภายในระยะเวลา 4-5 สัปดาห์ การเสริมประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา (กรรมวิธีที่ 3) และจุลินทรีย์หน่อกล้วย (กรรมวิธีที่ 4) ช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายให้เกิดเร็วกว่าการใช้เพียงมูลวัวแห้งเป็นแหล่งจุลินทรีย์หลัก หรือการเสริมด้วยจุลินทรีย์น้ำข้าวข้าว (กรรมวิธีที่ 1 และ 2 ตามลำดับ) โดยลดระยะเวลาการย่อยสลายลงได้อย่างน้อย 1 สัปดาห์ ในขณะที่กระดาษกล่องพืชมะเขือเทศมีการเคลือบด้วยหมึกพิมพ์ 1 ด้านพบว่ากระดาษยังคงสภาพเป็นแผ่นในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการหมัก และเริ่มแตกตัวเป็นชิ้นขนาดเล็กในสัปดาห์ที่ 3 จากนั้นมีการย่อยสลายต่อเนื่องจนกลายเป็นผงละเอียดในสัปดาห์ที่ 5 อย่างไรก็ตามกระดาษกล่องพืชมะเขือเทศยังไม่สามารถย่อยสลายได้ทั้งหมดภายในระยะเวลา 8 สัปดาห์ เมื่อนำน้ำหนักร้อยละ 10 ของกระดาษที่เหลือมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเทียบกับน้ำหนักกระดาษตั้งต้น พบว่าในช่วง 2 สัปดาห์แรกกระดาษกล่องพืชมะเขือเทศย่อยสลายได้ประมาณ 50% โดยน้ำหนัก และเพิ่มขึ้นเป็น 75-85% ในช่วง 4 สัปดาห์แรก ส่วนในช่วงสัปดาห์ที่ 5-8 อัตราการย่อยสลายชะลอลงเหลือเพียงประมาณ 5-8 % ในช่วง 3 สัปดาห์สุดท้าย ส่งผลให้เมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 8 สัปดาห์ กระดาษกล่องพืชมะเขือเทศย่อยสลายรวมได้ประมาณ 89-93% โดยน้ำหนัก ในกรณีของกระดาษห่อข้าวมันไก่ ซึ่งเป็นกระดาษเคลือบฟิล์มพลาสติกบางหนึ่งด้านไม่พบการเปลี่ยนแปลงมากนักในช่วง 2 สัปดาห์แรก ด้านที่เป็นกระดาษเริ่มเกิดการแตกและย่อยสลายในช่วงสัปดาห์ที่ 3 และมีอัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงสัปดาห์ที่ 6 โดยเฉพาะในกรรมวิธีที่มีการเติมจุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา (กรรมวิธีที่ 3) พบว่าด้านที่เป็นกระดาษสามารถย่อยสลายได้หมด ส่วนกรรมวิธีอื่นยังพบเศษกระดาษหลงเหลือเล็กน้อย เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 8 สัปดาห์กระดาษห่อข้าวมันไก่มีอัตราการย่อยสลายรวมประมาณ 80% โดยน้ำหนัก โดยส่วนที่เป็นพลาสติกฟิล์มไม่สามารถย่อยสลายได้และตกค้างในถังหมักร่วมกับปุ๋ยหมักที่ได้



รูปที่ 4 กราฟแสดงอัตราการย่อยสลายของกระดาษตัวอย่าง



รูปที่ 4 กราฟแสดงอัตราการย่อยสลายของกระดาษตัวอย่าง (ต่อ)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมัก	ความชื้น (%)	pH	EC	C/N	พืชใบเลี้ยงเดี่ยว		พืชใบเลี้ยงคู่	
					% การงอก	% มวลชีวภาพ	% การงอก	% มวลชีวภาพ
CP1	71.03±0.06	7.48±0.02	5.64±0.66	9.38	100.00	97.22	100.00	107.23
CP2	72.19±0.23	7.64±0.06	5.39±0.28	10.57	100.00	94.44	96.67	116.87
CP3	73.55±0.92	7.62±0.10	6.08±0.21	10.48	100.00	113.89	96.67	100.00
CB	73.91±1.37	7.69±0.08	6.36±1.40	10.72	100.00	100.00	100.00	100.00
CRP1	71.59±0.72	7.38±0.08	7.11±1.19	10.29	100.00	91.55	103.44	98.99
CRP2	72.22±0.48	7.85±0.07	6.65±0.78	10.31	100.00	94.37	96.54	90.91
CRP3	72.06±1.65	7.50±0.13	7.16±1.30	10.08	100.00	97.18	96.54	91.92
CRB	72.30±0.42	7.55±0.03	6.14±0.43	9.70	100.00	100.00	100.00	100.00
CTP1	72.67±2.03	7.41±0.12	5.55±0.17	9.70	103.44	119.78	103.58	101.19
CTP2	71.67±1.17	7.79±0.08	5.84±1.20	9.53	96.54	92.31	107.15	94.05
CTP3	72.62±1.16	7.82±0.12	6.47±0.34	9.75	100.00	106.59	107.15	95.24
CTB	73.05±1.96	8.05±0.04	7.54±1.04	10.11	100.00	100.00	100.00	100.00
CBP1	72.27±0.54	7.09±0.04	5.29±0.63	9.94	100.00	102.35	103.44	119.78
CBP2	71.56±1.23	7.36±0.06	5.94±1.24	10.58	96.67	90.59	96.54	92.31
CBP3	72.06±0.81	7.35±0.02	6.24±0.81	10.34	100.00	91.76	100.00	106.59
CBB	72.28±1.32	7.29±0.01	5.72±0.81	9.84	100.00	100.00	100.00	100.00

ปุ๋ยหมักที่ได้จากกระบวนการหมักย่อยกระดาษร่วมกับขยะอินทรีย์เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์มีค่าความชื้นก่อนอบแห้งอยู่ในช่วง 71.03–73.55% การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของปุ๋ยหมักได้แก่ ค่า pH อยู่ในช่วง 7.09–8.05 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC) อยู่ระหว่าง 5.39–7.54 dS/m และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) อยู่ในช่วง 9.38–10.72 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามข้อกำหนดของกรมพัฒนาที่ดิน ในการประเมินความเป็นพิษต่อพืช (Phytotoxicity Test) โดยใช้

เมล็ดข้าวฟ่าง (พืชใบเลี้ยงเดี่ยว) และเมล็ดถั่วเขียว (พืชใบเลี้ยงคู่) เป็นพืชตัวแทน พบว่าอัตราการงอกของเมล็ดทั้งสองชนิดสูงกว่า 90% และต้นพืชที่งอกมีมวลชีวภาพใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุม (Blank compost) ที่ไม่ได้เติมกระดาศที่ใช้กรรมวิธีการผลิตเดียวกัน

6. สรุปผลการศึกษา

การวิจัยนี้ได้ประเมินประสิทธิภาพของน้ำหมักจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ในการเร่งการย่อยสลายกระดาศร่วมกับขยะอินทรีย์ในถังหมักขนาดเล็ก พบว่าการเติมน้ำหมักจุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา (CT) และหน่อกล้วย (CB) เป็นจุลินทรีย์เสริมประสิทธิภาพช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายกระดาศเห็ดขานอ้อย (P1) ให้สมบูรณ์ภายใน 4 สัปดาห์ ซึ่งเร็วกว่ากรรมวิธีที่ใช้มูลวัวแห้ง (C) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์หลักเพียงอย่างเดียว หรือใช้จุลินทรีย์จากน้ำข้าวข้าว (CR) เสริมประสิทธิภาพ สำหรับกระดาศกล่อ่งพืชชา (P2) ที่มีการเคลือบหมักพืพบว่ามีกระบวนการย่อยสลายประมาณ 89–93% ภายใน 8 สัปดาห์ โดยอัตราการย่อยสลายสูงในช่วง 4 สัปดาห์แรก และชะลอตัวลงในช่วงสัปดาห์ที่ 5–8 ทั้งนี้จะมาจากการที่กระดาศถูกเคลือบผิวด้วยหมักพืทำให้ผิวหน้าของกระดาศที่ถูกเคลือบย่อยสลายได้ช้าลง ในกรณีกระดาศห่อข้าวมันไก่ (P3) ซึ่งเคลือบฟิล์มพลาสติกบางหนึ่งด้านพบว่าด้านที่เป็นกระดาศย่อยสลายได้หมดภายใน 8 สัปดาห์ในกรรมวิธีที่มีการเติมจุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มาเป็นจุลินทรีย์เสริมประสิทธิภาพ ในขณะที่กรรมวิธีอื่นพบว่ามีเศษกระดาศเหลือติดกับฟิล์มพลาสติกเล็กน้อย ส่วนที่เป็นฟิล์มพลาสติกไม่สามารถย่อยสลายได้และยังคงตกค้างในปุ๋ยหมัก สรุปได้ว่าจุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มามีประสิทธิภาพเร่งการย่อยสลายกระดาศได้สูงสุด รองลงมาคือจุลินทรีย์หน่อกล้วย และจุลินทรีย์น้ำข้าวข้าวตามลำดับ ปุ๋ยหมักทุกสูตรมีคุณสมบัติทางเคมีได้แก่ ค่า pH EC และ C/N อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามข้อกำหนดของกรมพัฒนาที่ดิน ในการเพาะเมล็ดข้าวฟ่าง และเมล็ดถั่วเขียวพบว่ามีอัตราการงอกสูงกว่า 90% และมีมวลชีวภาพใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุม แสดงว่าปุ๋ยหมักมีการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ และไม่เป็นพิษต่อพืช ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปุ๋ยหมักที่ได้จากการย่อยสลายกระดาศร่วมกับขยะอินทรีย์ ใช้มูลวัวแห้งเป็นจุลินทรีย์หลักเสริมด้วยจุลินทรีย์จากน้ำข้าวข้าว จุลินทรีย์ไตรโคเดอร์มา และจุลินทรีย์หน่อกล้วย ไม่ส่งผลกระทบเชิงลบต่อการงอกของเมล็ดพืชและการเจริญเติบโตของพืชทั้งในกลุ่มพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ สะท้อนถึงความปลอดภัยและศักยภาพในการนำไปใช้ในระบบการเกษตรอย่างยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thairath Online (2566). กระดาศใช้แล้วของไทย ได้รับการคัดแยกเพียง 60% หวังปลูกฝัง "แยกขยะ" ให้ดียิ่งขึ้น, 14 สิงหาคม 2567. <https://www.thairath.co.th/futureperfect/articles/2709260>.
- [2] กรมควบคุมมลพิษ. (2565). การศึกษาองค์ประกอบของขยะมูลฝอย ปี 2564, 13 สิงหาคม 2567. <https://www.pcd.go.th/publication/26745/>.
- [3] Ballardo, C., Vargas, M., Sanchez, A., and Barrena, A., (2020). Adding value to home compost: Biopesticide properties through *Bacillus thuringiensis* inoculation. *Waste Management*, 106, 32-34.
- [4] Ahmed, S., Hall, A. M. & Ahmed, S. F., (2018). Biodegradation of Different Type of Paper in a Compost Environment. *Proceeding of the 5th International Conference on Natural Science and Technology (ICNST'18)*, Asian University for Woman: Bangladesh.
- [5] Alvarez, J. V. L., Aguilar, M. L., Bermúdez, P. A. & Chicote, B. L. (2009). Biodegradation of paper waste under controlled composting conditions. *Waste Management*, 29, 1514–1519.
- [6] EN 13432:2000 Packaging - Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging.
- [7] กรมพัฒนาที่ดิน. มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูง), 29 มกราคม 2568. http://www1.ddd.go.th/Ldd/Fertilizer/Organic_Fertilizer.pdf