

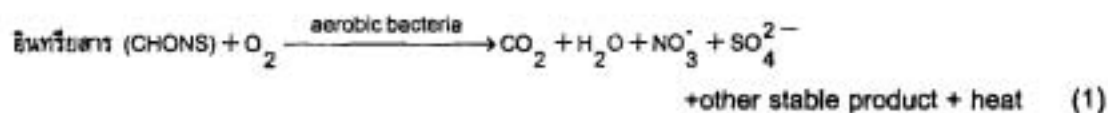
บทที่ 10

การหมักทำปุ๋ย

การหมักทำปุ๋ยจากขยะอินทรีย์ เป็นการย่อยสลายอินทรีย์สารโดยกระบวนการทางชีววิทยาของจุลินทรีย์เป็นตัวการย่อยสลายให้แปรสภาพเป็นแร่ธาตุที่มีลักษณะค่อนข้างคงรูป มีสีน้ำตาลค่อนข้างแห้ง และสามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน กระบวนการหมักทำปุ๋ยสามารถแบ่งเป็น 2 กระบวนการ คือกระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Decomposition) ซึ่งเป็นการสร้างสภาวะที่จุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยใช้ออกซิเจนย่อยสลายอาหารแล้วเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และกลายสภาพเป็นแร่ธาตุเป็นกระบวนการที่ไม่เกิดก๊าซกลิ่นเหม็น ส่วนอีกกระบวนการเป็นกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Decomposition) เป็นการสร้างสภาวะให้เกิดจุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยไม่ใช้ออกซิเจน เป็นตัวช่วยย่อยสลายอาหาร และแปรสภาพกลายเป็นแร่ธาตุกระบวนการนี้มักเกิดก๊าซที่มีกลิ่นเหม็น เช่น ก๊าซไข่เน่า (Hydrogen Sulfide: H₂S) แต่กระบวนการนี้มีผลดีที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซมีเทน (Methane gas) ซึ่งเป็นก๊าซที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงได้^[1]

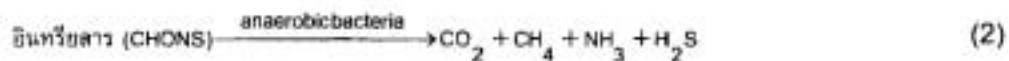
การหมักแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic decomposition)^[17]

การทำปุ๋ยหมักวิธีนี้ เป็นการหมักที่อาศัยการย่อยสลายวัสดุที่ย่อยสลายได้ โดยการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ซึ่งจะให้ผลผลิตขั้นสุดท้ายดังสมการที่ (1) นี้



การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic decomposition)

การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุของจุลินทรีย์ ชนิดที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะให้ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย (Final products) ดังสมการที่ (2) นี้



ผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นในส่วนที่เป็นก๊าซฟุ้งกระจายหายไป 80-90% ของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ กลายเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กระบวนการนี้เกิดขึ้นช้ากว่าการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนมาก^[2] ประมาณ 2-6 เดือน หรือ 1 ปี

ปฏิกิริยาชีวเคมีในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน^[10] ดังนี้

ขั้นที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการแตกสลายพอลิเมอร์ (Polymer breakdown) ในขั้นนี้ สารประกอบอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อนทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น เซลลูโลส โปรตีน และไขมัน จะถูกเอนไซม์ที่ขับออกมาจากเซลล์ที่เรีย ด้แก่ Cellulolytic, Proteolytic, Lipolytic ซึ่งเอนไซม์ Cellulolytic จะทำหน้าที่ขึ้นวิกฤตที่สุด คือ ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนแตกตัวออกเป็นสารประกอบอย่างง่าย ๆ สารละลายและสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ซับซ้อน และละลายน้ำได้ เช่น กรดไขมัน กรดอะมิโน น้ำตาล กลูโคส ในขั้นกระบวนการนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายเท่านั้น ยังไม่มีการกำจัดสารอินทรีย์ในขั้นตอนนี้

ขั้นที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่ละลายน้ำ ที่สร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียประเภทที่ดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ (Facultative bacteria) หรือพวกที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีพ (Anaerobic bacteria) ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานโดยกระบวนการเฟอร์เมนเตชัน (Fermentation) ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดโวลลาไทล์ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดบิวไทริก (Butyric acid) กรดวาเลริก (Valeric acid) แบคทีเรียจำพวกนี้เรียกว่า แบคทีเรียพวกสร้างกรด (Acid former หรือ Non-methanogenic bacteria) ซึ่งชนิดของแบคทีเรียแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้น และสภาพแวดล้อมของปฏิกิริยาด้วย

ขั้นที่ 3 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis)

กรดโวลลาไทล์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) จะถูกเปลี่ยนโดยแบคทีเรียโฮโมอะซิโตเจนิค (Homoacetogenic bacteria) ให้เป็นอะซิเตท (Acetate) ฟอ

เมท (Formate) ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างมีเทนปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงการสะสมของกรดโวลลาไทล์และไฮโดรเจน ในปริมาณที่สูงพอจะยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทนได้

ขั้นที่ 4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก ซึ่งเป็นผลปฏิกิริยาของแบคทีเรียที่สร้างกรดและไฮโดรเจนจะถูกใช้โดยแบคทีเรียอีกประเภทหนึ่ง เพื่อสร้างมีเทนแบคทีเรียประเภทนี้ เรียกว่า แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ซึ่งมีการเจริญเติบโตช้า ดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนเท่านั้น (Strictly anaerobic bacteria) และมีความไวต่อออกซิเจนมาก นอกจากนี้ยังมีความไวต่อค่าพีเอช และมีจำนวนประชากรต่ำแบคทีเรียที่สร้างมีเทนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกสร้างมีเทนจากไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ ได้คาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์ และได้พลังงานจำนวนมากจากไฮโดรเจน



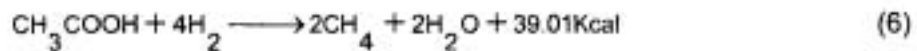
แบคทีเรียชนิดนี้สามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นอาหาร (Substrate) เพียงอย่างเดียวได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากว่ากรดฟอร์มิก สามารถเปลี่ยนไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย



แบคทีเรียชนิดที่สอง สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก จากการทดลองที่ใช้กัมมันภาพรังสีเป็นตัววัดร่องรอย ได้พบว่ามีเทนส่วนใหญ่ได้จากการแตกตัวของกรดอะซิติก ดังนี้



แต่อย่างไรก็ดียังมีข้อสงสัยว่าปฏิกิริยา (5) นี้จะสามารถให้พลังงานพอเพียงในการดำรงชีวิตของเซลล์หรือไม่ (ทั้งนี้เพราะตามทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์อาจพิสูจน์ได้ว่าสมการ (5) ได้พลังงานไม่พอเพียงในการดำรงชีวิตของเซลล์) การเปลี่ยนอะซิเตตให้เป็นมีเทนอาจเกิดขึ้นได้ด้วยปฏิกิริยาที่มีไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน ดังนี้



ในปฏิกิริยาอันนี้กรดอะซิติกเป็นสารตัวสุดท้าย ในการรับอิเล็กตรอนจากไฮโดรเจน พลังงานที่ได้สูงกว่าที่ได้จากสมการที่ (6) มากและเชื่อว่าพอเพียงกับการดำรงชีวิตของเซลล์

เฟสของการหมัก (Phases of Composting) ⁽²⁷⁾

ในกระบวนการหมัก จุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายมวลสารอินทรีย์ และสร้าง คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ความร้อน และชีวมีต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่คงตัวเมื่อเสร็จจากการหมัก ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม กระบวนการหมักเกิดขึ้น 4 เฟส ดังแสดงในภาพที่ 1 ดังนี้

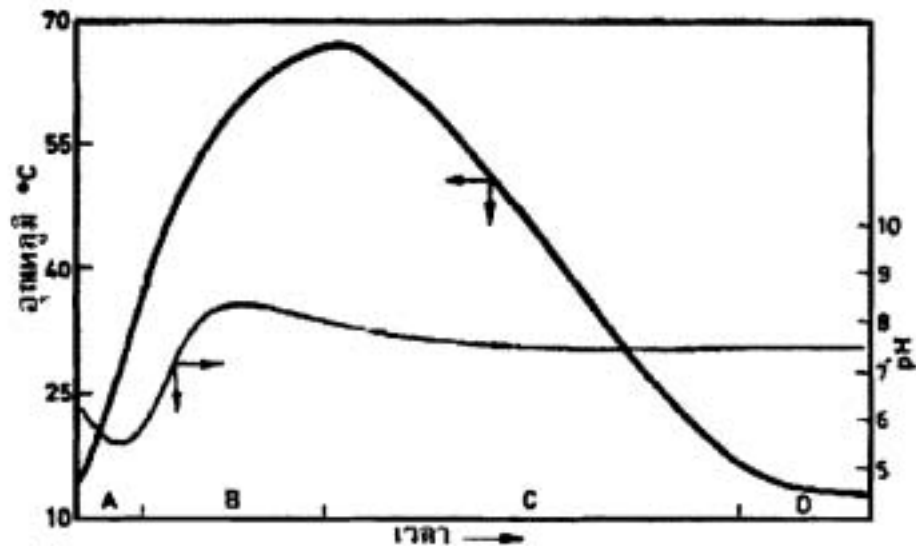
1) เมโซฟิลิก (mesophilic) หรือเป็นเฟสที่มีอุณหภูมิปกติ ซึ่งเกิดขึ้นหลักจากการหมักไปแล้ว 2 วัน

2) เทอร์โมฟิลิก (thermophilic) หรือเป็นเฟสที่มีอุณหภูมิสูง เกิดขึ้นหลังจากผ่านไป 2-3 วัน ถึง หลายเดือน และ เฟสสุดท้าย

3) การเย็นตัว (cooling) หลังผ่านไปหลายเดือน หรือ

4) เฟสการบ่ม (maturing) เป็นเฟสนำปุ๋ยไปใช้งานเมื่อปุ๋ยคงตัว

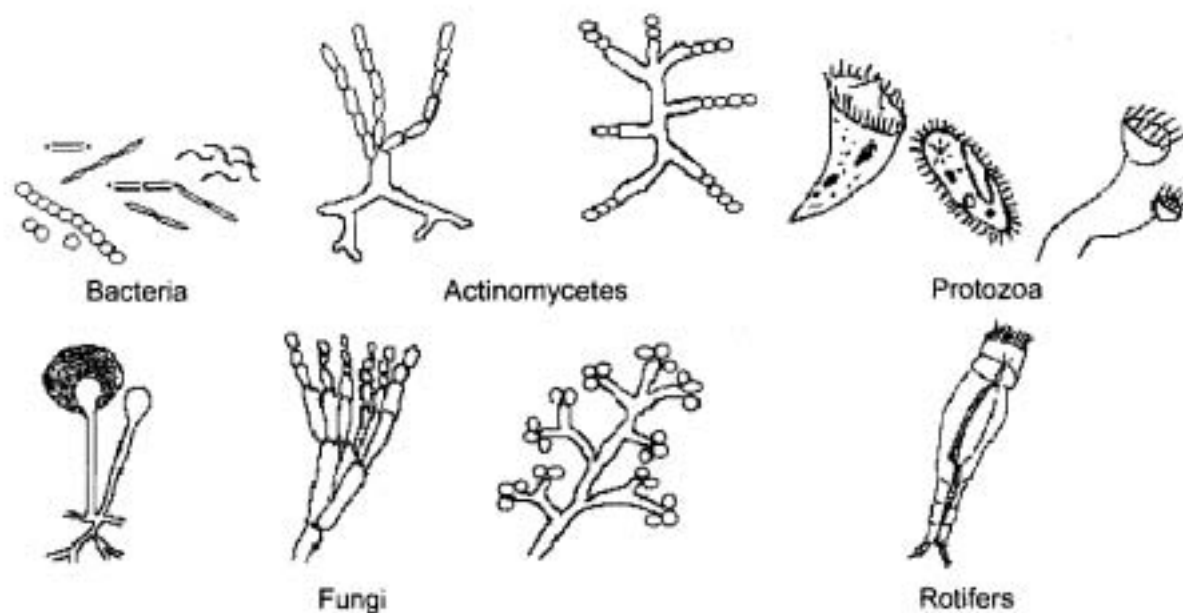
ประชากรของจุลินทรีย์ที่เป็นหลักในการหมักย่อยสลายในแต่ละเฟสของการหมัก การย่อยสลายในเบื้องต้นจะใช้จุลินทรีย์ประเภทเมโซฟิลิก ซึ่งทำการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างรวดเร็ว และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิ เหนือ 40 °C จุลินทรีย์ประเภทเมโซฟิลิกมีบทบาทน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จุลินทรีย์ประเภทเทอร์โมฟิลิก จะเข้ามามีบทบาทแทน อุณหภูมิ 55°C และสูงกว่า จุลินทรีย์หลายชนิดเป็นเชื้อโรคกับคนและพืชได้ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 65°C สามารถฆ่าจุลินทรีย์ได้หลายชนิดและทำให้อัตราการย่อยสลายถูกจำกัด การใช้อากาศในกระบวนการหมักและการผสมคอกเคड़ाทำให้อุณหภูมิต่ำลงถึงจุดที่ต้องการได้ ช่วงเฟสเทอร์โมฟิลิก อุณหภูมิที่สูงทำให้ย่อยสลายโปรตีน ไขมัน และ คาร์โบไฮเดรตที่ซับซ้อน คล้าย เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส โครงสร้างโมเลกุลหลักในต้นไม้ เมื่อสมบูรณ์อุณหภูมิก็จะลดลงสู่สภาวะปกติ และจุลินทรีย์ประเภทเมโซฟิลิกจะกลับมามีบทบาทอีกครั้ง และเข้าสู่เฟสสุดท้ายของการบ่มและเหลือมวลสารอาหารที่เป็นปุ๋ย



ภาพที่ 10-1 กิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีผลต่ออุณหภูมิ และค่า pH ที่แปรเปลี่ยนตามเวลา^[30]
 A = mesophilic, B = thermophilic, C = cooling, D = maturing.

จุลินทรีย์ย่อยสลายในกองปุ๋ยหมัก

จุลินทรีย์ในกองปุ๋ยหมัก เช่น แบคทีเรีย (Bacteria) รา (Fungi) แอคติโนมัยซีต (Actinomycetes) โปรโตซัว (Protozoa) โรติเฟอร์ (Rotifers) ดังแสดงในภาพที่ 2 มีบทบาทในการย่อยสลายสารอินทรีย์ จุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในกองปุ๋ยหมัก และเมื่อศึกษากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสในกองปุ๋ยหมักที่ทำจากขยะเทศบาล พบว่า เอนไซม์เซลลูเลสเพิ่มขึ้นเป็นลำดับตั้งแต่ 10 ถึง 100 หน่วยต่อกรัมของปุ๋ยหมักในช่วง 7 สัปดาห์ของการทำปุ๋ยหมัก ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณสารประกอบเซลลูโลสที่ลดลง และเมื่อศึกษารายละเอียดถึงกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดจากกองปุ๋ยหมัก พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสในช่วง 65-70 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองนี้แสดงว่า เอนไซม์เซลลูเลสเป็นเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารประกอบเซลลูโลสภายในกองปุ๋ยหมัก ถึงแม้จะมีอุณหภูมิถึง 50-60 องศาเซลเซียสก็ตาม จำนวนความหนาแน่นของจุลินทรีย์ขึ้นกับอุณหภูมิโดยสามารถสรุปดังแสดงในตารางที่ 1 แบคทีเรีย พบมากในทุกช่วงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเชื้อรา^[15]



ภาพที่10-2 จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการย่อยสลาย^[27]

ตารางที่ 10-1 ประชากรจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในการหมักแบบใช้อากาศ^[15]

จุลินทรีย์	No./Wet Gram Compost			จำนวนสปอร์ที่คัดแยก
	เมโซฟิลิก อุณหภูมิเริ่มต้น < 40 °C	เทอร์โมฟิลิก 40 - 70 °C	เมโซฟิลิก 70 °C - เย็นตัว	
แบคทีเรีย				
เมโซฟิลิก	10 ³	10 ⁶	10 ¹¹	6
เทอร์โมฟิลิก	10 ⁴	10 ⁹	10 ⁷	1
แอกติโนมัยซีด				
เทอร์โมฟิลิก	10 ⁴	10 ⁸	10 ⁵	14
เชื้อรา				
เมโซฟิลิก	10 ⁶	10 ³	10 ⁵	18
เทอร์โมฟิลิก	10 ³	10 ⁷	10 ⁶	16

เชื้อรา (Fungi)

เชื้อรารวมถึง Molds และยีสต์ (Yeasts) โดยรวมกันมีบทบาทในการย่อยสลายโครงสร้างที่ซับซ้อนของส่วนประกอบของพืช ในกระบวนการหมักทำปุ๋ยมักมีบทบาทสำคัญ เพราะสามารถย่อยสลายอินทรีย์สารที่เหนียว ๆ ได้ ทำให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายต่อได้

โดยส่วนมากเป็นเซลล์โลส แพร่กระจาย เต็มโตเป็นหลาย ๆ เซลล์มีลักษณะเป็นเส้นใย สามารถเติบโตได้ในสภาวะที่สารอินทรีย์แห้งมาก ๆ เป็นกรด หรือมีไนโตรเจนต่ำเกินกว่าที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้

ส่วนมากแล้วราจัดเป็นพวกที่เกิดขึ้นในสิ่งเน่าเปื่อยเพราะว่า รามีชีวิตได้บนสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้ว หรือวัตถุแห้ง และ พลังงานได้มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในต้นไม้ที่ตาย หรือสัตว์ที่ตายแล้ว สปีชีส์ของเชื้อราพบมากมายในช่วง เมโซฟิลิก (mesophilic) และ ช่วงเทอร์โมฟิลิก (thermophilic) ของกระบวนการหมักทำปุ๋ย เชื้อราที่มีชีวิตบนชั้นนอกของกองปุ๋ยหมักเพื่ออุณหภูมิสูง ราชำเป็นต้องใช้อากาศเพื่อเจริญเติบโตจากเส้นใยที่มองไม่เห็นจนเป็นสีเทาหรือสีขาวบนผิวของกองปุ๋ยหมัก

เชื้อราที่พบในกองหมักขยะ สามารถทนอุณหภูมิได้สูงเกินกว่า 45 ถึง 70 องศาเซลเซียส^[29] เช่น *Thermomonospora curvata*, *Aspergillus fumigatus*^[24] *Trichoderma* sp., *Geotrichum* sp., *Rhizopus* sp., *Penicillium* sp., และ *Cladosporium* sp. พบปริมาณเชื้อราในกองปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นจาก 10^5 เป็น 10^6 - 10^9 โคโลนีต่อปุ๋ยหมัก 1 กรัม^[22, 18] โดยเชื้อรา มีบทบาทสำคัญต่อการย่อยสลายสารเซลล์โลส และเอมิเซลล์โลส ดังนั้นกระบวนการย่อยสลายเซลล์โลส น่าจะเป็นกระบวนการที่กำหนดอัตราการย่อยสลายภายในกองปุ๋ยหมัก นอกจากจุลินทรีย์พวกเชื้อรา แอคติโนมัยซิส และแบคทีเรียจะมีบทบาทสำคัญต่อการย่อยสลาย

แบคทีเรีย (Bacteria)

ในกองปุ๋ยหมักพบแบคทีเรียซึ่งมีขนาดเล็กสุดของสิ่งมีชีวิตที่พบในกองปุ๋ย และพบถึง 80% ถึง 90% ของจำนวนจุลินทรีย์หลายพันล้านชีวิตในปุ๋ยหนึ่งกรัม แบคทีเรียมีบทบาทในการย่อยสลายมาก และ สร้างความร้อนให้แก่กองปุ๋ย สารอาหารถูกเอมไซม์ที่สร้างโดยแบคทีเรียย่อยสลาย แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์เซลล์เดี่ยว และโครงสร้างมีลักษณะเป็นแท่ง (rod-shaped bacilli) เป็นทรงกลม (sphere-shaped cocci) เป็นเกลียว (spiral-shaped spirilla) สามารถเคลื่อนไหวได้ด้วยพลังงานของตัวแบคทีเรียเอง ที่กระบวนการหมักเบื้องต้น (0-40 °C) พบเมโซฟิลิกแบคทีเรียเป็นหลัก และพบมากบนชั้นหน้าดิน อุณหภูมิที่เกิดขึ้นต่ำกว่า 40 °C เทอร์โมฟิลิกแบคทีเรียเป็นช่วงที่ดำเนินการต่อจากเมโซฟิลิก ประชากรของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เป็นส่วนหนึ่งของแบคทีเรียในกลุ่มบาซิลลัส (*Bacillus*) แบคทีเรียจะลดจำนวนลง หลังจาก 1-2 สัปดาห์ ความหลากหลายของแบคทีเรียในกลุ่ม bacilli พบมากที่อุณหภูมิในช่วง 50-55°C แต่ลดลงที่ 60°C หรือต่ำกว่า ไม่สภาพเปลี่ยนไปไม่เหมาะกับแบคทีเรียในกลุ่มนี้แบคทีเรียจะสร้างสปอร์ (Endospores) ความหนาของผนังสปอร์มีความสามารถทน

ความร้อน ความเป็น ความแห้ง หรือการขาดอาหารได้ แพร่กระจายไปทั่วสิ่งแวดล้อม และเจริญเติบโตเมื่อสภาวะแวดล้อมเหมาะสม

กองหมักที่มีอุณหภูมิสูงมักพบแบคทีเรียจีส *Thermus* อย่างเดียว และจุลินทรีย์เหล่านี้พบได้ในธรรมชาติ ที่มีอุณหภูมิสูง *Thermus* แบคทีเรียอาจพบในบริเวณน้ำพุร้อนธรรมชาติ

เมื่อกองปุ๋ยเย็นลง เมโซฟิลิกแบคทีเรียจะเกิดขึ้นเป็นหลักอีกครั้ง จำนวนและชนิดของเมโซฟิลิกแบคทีเรียที่เกิดขึ้นจะทำงานย่อยสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในกองปุ๋ย และอาจสร้างสปอร์ในช่วงบ่มนี้

แอกติโนมัยซิส (Actinomycetes)

ลักษณะของแอกติโนมัยซิสคล้ายเชื้อราแต่ความจริงแล้วเป็นแบคทีเรียในกลุ่มฟิลาเมนทัส (Filamentous) เหมือนแบคทีเรียแต่ไม่มีนิวเคลียส (Nuclei) เติบโตเป็นเส้นใยหลายเซลล์คล้ายเชื้อรา ในกระบวนการหมักแอกติโนมัยซิสมีบทบาทที่สำคัญต่อการย่อยสลายอินทรีย์สารที่ซับซ้อน เช่น เซลลูโลส (Cellulose) ลิกนิน (Lignin) ไคติน (Chitin) และ โปรตีน (Proteins) เอมไซม์ของแอกติโนมัยซิสเป็นสารเคมีที่สามารถย่อยสลายโมเลกุลที่เหนียวของกิ่งไม้ เปลือกไม้ หรือกระดาษหนังสือพิมพ์ ได้ บางสปีชีส์ เกิดในช่วงของ เทอร์โมฟิลิกและกลับมามีบทบาทในช่วงของการเย็นตัว และการบ่มของกองปุ๋ย ซึ่งเป็นช่วงสุดท้ายของการกลายเป็นปุ๋ยชีวมีส

แอกติโนมัยซิสมีรูปร่างยาวเป็นเส้นใยมีกิ่งก้านสาขา ดูคล้ายเส้นใยแมงมุมสีเทา แผ่กระจายคลุมทั้งกองปุ๋ย เส้นใยเหล่านี้จะพบตลอดในกระบวนการหมัก ในระดับลึกจากภายนอก 10 -15 เซนติเมตรของกองปุ๋ย บางครั้งมีรูปร่างเป็นวงกลมแผ่กระจายปกคลุมเป็นรัศมี

สำหรับเชื้อแอกติโนมัยซิส (Actinomycetes) ได้แก่กลุ่ม *Actinobifida* เป็นต้น เป็นจุลชีพชนิดหลายเซลล์ มีรูปร่างเป็นแบบแท่ง ดังแสดงในภาพที่ 2 และอยู่ในกลุ่มของ ฟิลาเมนทัส (filamentous) โดยเกือบทั้งหมดของจุลชีพในกลุ่มนี้จะเป็นชนิดแบบใช้ออกซิเจน

โปรโตซัว (Protozoa)

โปรโตซัวเป็นสัตว์ขนาดเล็กมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าเซลล์เดียว พบได้ในหยดน้ำในกองปุ๋ยหมัก มีบทบาทในการย่อยสลายน้อย โปรโตซัวใช้สารอินทรีย์เป็นอาหาร หรืออาจใช้แบคทีเรียเป็นอาหารซึ่งเป็นผู้บริโภคอันดับที่สองรองจากแบคทีเรีย และรา

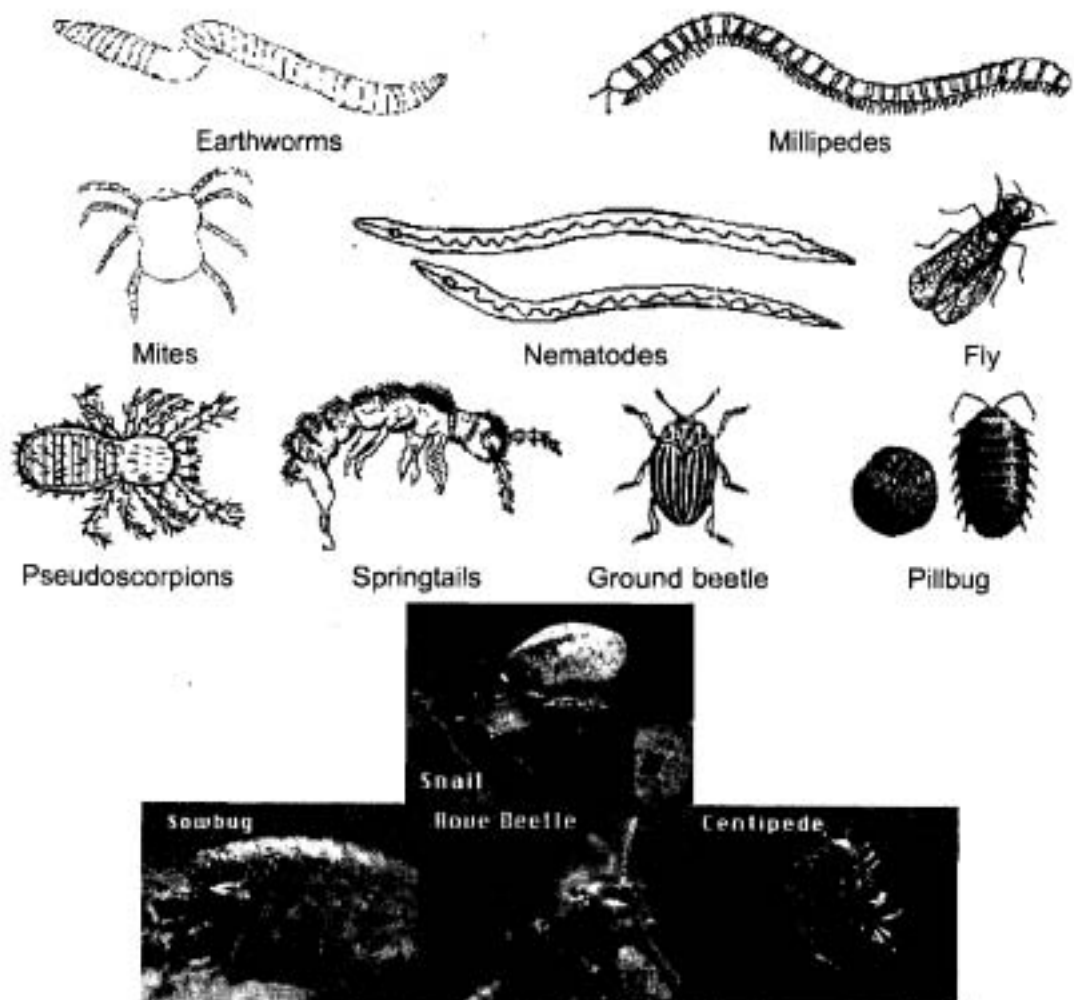
โรติเฟอร์ (Rotifers)

โรติเฟอร์เป็นสัตว์หลายเซลล์ที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าพบในฟิล์มน้ำในกองปุ๋ยหมัก เจริญเติบโตบนสารอินทรีย์ และกินแบคทีเรีย และรา

และในกองปุ๋ยหมักยังพบว่ามีสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ เช่น ไข่เดือนฝอย และ สัตว์จำพวกแมลง (insects) ซึ่งเป็นสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ดังแสดงในภาพที่ 3 สามารถพบได้ในกระบวนการหมัก แต่มีบทบาทน้อยกว่าเมื่อเทียบจุลินทรีย์ เมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยเปลี่ยนคาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ส่วนปุ๋ยที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย คาร์บอนบางส่วนเป็นสารอาหารของจุลินทรีย์เพื่อสร้างเซลล์ใหม่ เป็นการเพิ่มจำนวนประชากรจุลินทรีย์ ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการย่อยสลาย จุลินทรีย์จะตายเมื่อสารอินทรีย์ที่ต้องการลดน้อยลง หรือไม่เพียงพอต่อการดำรงชีพ ในขั้นตอนนี้ ปุ๋ยที่เป็นผลิตภัณฑ์จากกิจกรรมจากจุลินทรีย์มาจากหลากหลายชนิด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการหมัก^[20]

ห่วงโซ่อาหารที่ซับซ้อนทำงานในกองปุ๋ยหมัก ดังแสดงในภาพที่ 4 แสดงถึงผู้บริโภคลำดับที่ 1 ลำดับที่ 2 และลำดับที่ 3 โดยมีอาหารจากอินทรีย์สารที่มาจากเศษอาหาร รวมถึงเศษหญ้าใบไม้

ในตารางที่ 2 สารอินทรีย์จำพวกใบไม้ วัสดุเหลือจากพืชโดยถูกกินจากสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังเช่น กิ้งกือ (millipede) ทาก (Snails, slugs) สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังเหล่านี้ทำการฉีกส่วนพืช



ภาพที่ 10-3 แมลงสัตว์จำพวกไม่มีกระดูกสันหลังที่พบในกองปุ๋ยหมัก⁽²⁸⁾

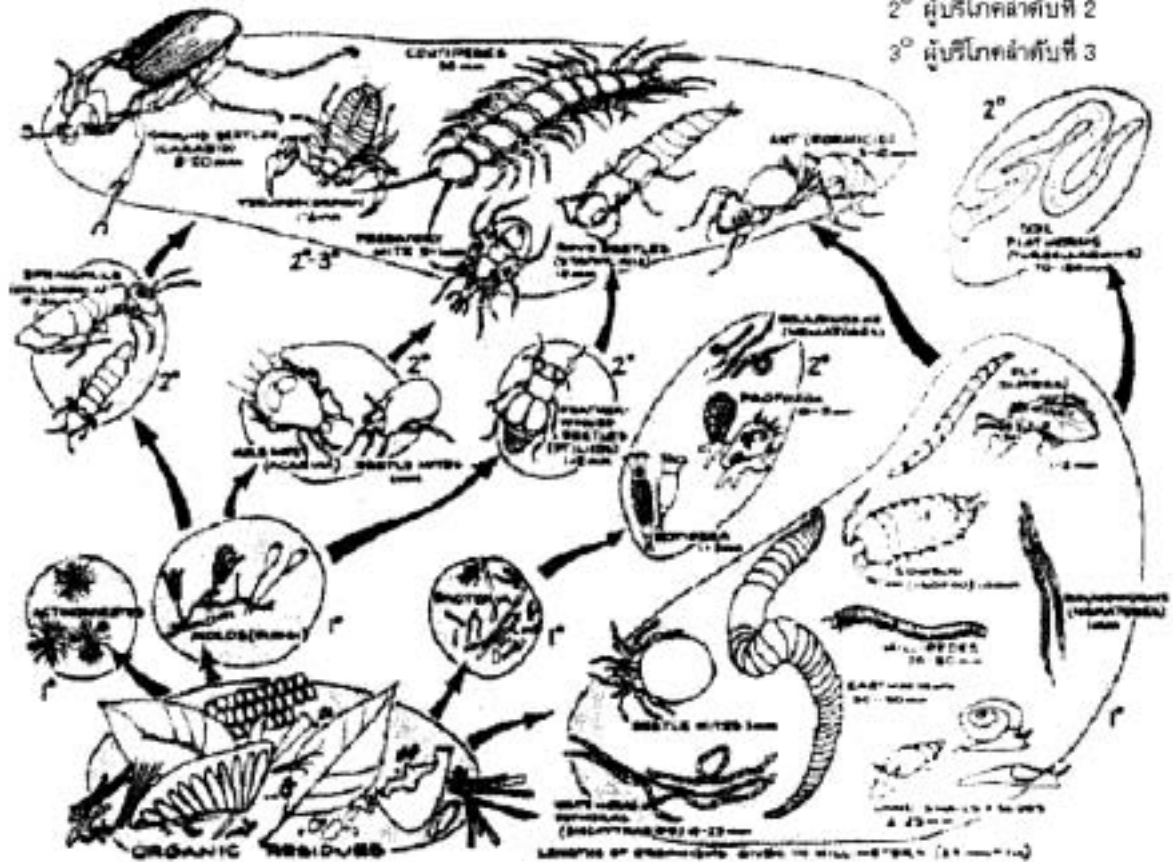
ตารางที่ 10-2 ชนิดของสิ่งมีชีวิตและสารอาหารในห่วงโซ่อาหาร ^[28]

ลำดับของผู้บริโภค	ชนิดของสิ่งมีชีวิตและสารอาหาร
Tertiary Consumers	(organisms that eat secondary consumers) centipedes, predatory mites, rove beetles, fomicid ants, carabid beetles
Secondary Consumers	(organisms that eat primary consumers) springtails, some types of mites, feather-winged beetles nematodes, protozoa, rotifera, soil flatworms
Primary Consumers	(organisms that eat organic residues) bacteria, fungi, actinomycetes, nematodes, some types of mites, snails, slugs, earthworms, millipedes, sowbugs, whiteworms
Organic Residues	leaves, grass clippings, other plant debris, food scraps, fecal matter and animal bodies including those of soil invertebrates

ทำให้พื้นที่เพิ่มขึ้นเป็นผลดีต่อการทำงานของรา แบคทีเรีย และแอคติโนมัยซิส ซึ่งจะถูกกินอีกทีในภายหลัง สัตว์จำพวกหนอนหลายชนิด รวมทั้ง ไส้เดือน (Earthworms) พยาธิตัวกลม (Nematodes) หนอนแดง (Red worms) และ Potworms ทำการกินและย่อยเศษผัก และถ่ายส่วนประกอบของอินทรีย์สารออกมาทำให้การย่อยสลายเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งพลิกพรวนเพิ่มอากาศให้กลับกองปุ๋ย และเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของอินทรีย์สาร สำหรับจุลินทรีย์ทำงานต่อ และเมื่อสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังตาย หรือถ่าย เป็นการเพิ่มสารอาหารเข้าไปในห่วงโซ่อาหารสำหรับสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ต่อไป

ทิศทางของห่วงโซ่อาหารเป็นไปตามลูกศร

- 1° ผู้บริโภคลำดับที่ 1
- 2° ผู้บริโภคลำดับที่ 2
- 3° ผู้บริโภคลำดับที่ 3



ภาพที่ 10-4 ห่วงโซ่อาหารในกองปุ๋ยหมัก (27)

พยาธิตัวกลม (Nematodes)

เป็นสัตว์ตัวเล็ก กลมยาว เป็นหนอนใสมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า มีจำนวนมากนับหลาย ๆ ล้านตัว สามารถประมาณได้ด้วยการส่องขยายด้วยเลนส์กล้องจุลทรรศน์ มีลักษณะคล้ายเส้นผมบาง ๆ เป็นตัวกินซากที่ช่วยย่อยเศษผัก กินแบคทีเรีย รา โปรโตซัว และพยาธิตัวกลมด้วยกันเอง หรืออาจเกาะที่รากพืชผัก

เห็บ ไว (Mites)

เห็บ หรือไรพบมากเป็นลำดับที่สองในกองปุ๋ยหมักที่เป็นสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง เป็นสัตว์ที่มีแปดขา สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า และบางชนิดไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า บางชนิดสามารถเกาะอยู่บนหลังของสัตว์ที่เคลื่อนที่เร็วที่เป็นสัตว์จำพวก Sowbugs, กิ้งกือ และแมลงปีกแข็ง อาศัยบนเศษใบไม้ ไม้ผุพัง และอินทรีย์สารอื่น ๆ บางชนิดกินรา บางชนิดเป็นผู้

ล่า และกินพยาธิตัวกลม ไข่ ตัวอ่อนของแมลง และพวกเดียวกัน บางชนิดอยู่อย่างอิสระ หรือ อาจเป็นพาราสิต (parasitic) (ภาพที่ 3)

Springtails

แมลงไร้ปีกตัวเล็ก ๆ กระโดดสูง พบมากในกองปุ๋ย เป็นแมลงตัวเล็กมากไม่มีปีก และสามารถกระโดดได้เมื่อถูกรบกวน สามารถวิ่งไถ และรอบ ๆ ของชั้นส่วนของปุ๋ยหมัก และมี โครงสร้างขาที่สามารถกระโดดได้ได้ช่องท้องมีส่วนที่ดันด้วยอากาศเมื่อมีการดันตอนจะ กระโดด เศษพืช เศษเมล็ดพืช และ เชื้อรา ในกองปุ๋ยถูกย่อย กินพยาธิตัวกลม และสิ่งมีชีวิตที่มี วิชาเป็นปล้อง เช่นพวกแมงมุม และทำความสะอาดหลังจากกินอาหารแล้ว (ภาพที่ 3)

ไส้เดือน (Earthworms)

ไส้เดือนมีหน้าที่ทำให้สารอินทรีย์ในกองปุ๋ยถูกแยกออกเป็นส่วน ๆ ทำการพลิกกลับ กองปุ๋ย และกินเศษดินพืชที่ตาย และแมลงที่ตาย ทำการพลิกให้อากาศแก่กองปุ๋ยทำให้ น้ำ สารอาหาร และออกซิเจนซึมไปทั่วกองปุ๋ย ดินหรืออินทรีย์สารถูกผ่านระบบย่อยของไส้เดือน ถูกย่อยและทำให้เป็นกลางด้วยน้ำย่อยที่มีสารประกอบของ แคลเซียมคาร์บอเนต ในส่วนที่เป็น กระเพาะอาหารของไส้เดือน ภายในกระเพาะอาหาร สารอินทรีย์ถูกย่อยเล็กลงกว่าเดิม เคลื่อนไปยังลำไส้เล็กถูกย่อยด้วยฮอร์โมน เอนไซม์ และสารย่อยอื่น ๆ ที่ย่อยสลายอย่าง ต่อเนื่อง วัสดุอินทรีย์ที่ผ่านออกมาจากตัวไส้เดือนเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งมีความละเอียดมีสมบัติ ทางสารอาหารแก่ต้นพืช (Casts) โดยสารที่ออกจากตัวไส้เดือนใหม่ ๆ พบแบคทีเรียสูง อินทรีย์สาร ประกอบด้วย ไนโตรเจน แคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่มี มากกว่าในดิน (ภาพที่ 3)

Slugs and snails

หาก และหอยหาก กินซากพืชซากสัตว์เป็นอาหาร อาศัยบนกองปุ๋ย แต่จะจัดการกับ ขยะที่ใหม่ และกองเศษพืช ดังนั้นจะพบในกองปุ๋ยหมักที่กองทับถมกันได้ (ภาพที่ 3)

ตะขาบ (Centipedes)

ตะขาบเป็นสัตว์เคลื่อนที่ได้เร็ว เป็นผู้ล่าพบมากในบริเวณส่วนบนตึกประมาณ 2-3 นิ้ว ของกองขยะ มีเล็บที่นำสะพรั่งแล้ว เป็นสัตว์มีพิษ ทำให้เป็นอัมพาตต่อหนอนเล็กสีแดง ตัวอ่อนของแมลง ตัวอ่อนไส้เดือน และพวกสัตว์มีวิชาเป็นปล้อง จำพวกแมลง และแมงมุม (ภาพที่ 3)

กิ้งกือ (Millipedes)

เป็นสัตว์เคลื่อนที่ช้า และมีปล้องทรงกระบอกมาก มีขาสองคู่ในแต่ละท่อนของร่างกาย กินส่วนต่าง ๆ ของพืชเป็นอาหาร และซากพืชซากสัตว์ รวมถึงมูลของสัตว์ (ภาพที่ 3)

Sow Bugs

Sow bugs เป็นแมลงที่มีลำตัวอ้วนกลมมีเปลือกบางปกคลุมช่วงท้องไว้ สามารถรักษาความชื้นไว้ได้ ช่วยย่อยเศษพืชได้อย่างช้า ๆ (ภาพที่ 3)

แมลงปีกแข็ง (Beetles)

แมลงปีกแข็งที่พบในกองปุ๋ยหมักมีหลายชนิด สำหรับชนิด Feather-winged กินสปอร์ของราเป็นอาหาร ส่วนแมลงปีกแข็งบนพื้นกินแมลง ทาก หอยทาก และสัตว์เล็ก ๆ อื่น ๆ เป็นอาหาร (ภาพที่ 3)

มด (Ants)

มดเลี้ยงเพลี้ยด้วย น้ำหวาน รา ไขมันพืช น้ำตาล เศษอาหาร หรือ แมลงอื่น และมดชนิดอื่น กองปุ๋ยหมักเป็นแหล่งอาหารของมด เป็นรังเป็นที่พักอาศัย มดให้ประโยชน์กับกองปุ๋ยหมักมาก โดยทำการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารพวก ฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียม รอบ ๆ โดยการนำมาของรา และสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ๆ

แมลงวัน (Flies)

ตลอดระยะเวลาของกระบวนการหมัก แมลงวันใช้กองปุ๋ยหมักในการวางไข่และให้ตัวอ่อนอาศัยเป็นแหล่งอาหาร แต่ไม่สามารถรอดได้ในช่วงอุณหภูมิของเทอร์โมฟิลิกได้ ตัวเต็มวัยกินเศษพืชผักได้ (ภาพที่ 3)

แมงมุม (Spiders)

แมงมุมกินแมลงและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังเล็ก ๆ เป็นอาหาร

Pseudoscorpions

เป็นสัตว์ผู้ล่าโดยเฉพาะเหยื่อที่อ่อนแอ มีพิษทำให้สัตว์เล็ก ๆ อัมพาต เหยื่อนั้นรวมถึงพยาธิตัวกลม เล็มไร ตัวอ่อน และไส้เดือนขนาดเล็ก (ภาพที่ 3)

Earwings

เป็นสัตว์ผู้ล่าขนาดใหญ่ ง่ายต่อการพบเห็นด้วยตาเปล่า เคลื่อนไหลเร็ว กินเศษพืชเป็นอาหาร บางชนิดเป็นผู้ล่า ส่วนมากกินเศษผัก หรือสารอินทรีย์

สภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมัก

สภาวะที่เหมาะสมและมีผลควบคุมการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ นอกจากจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ จุลินทรีย์ หัวเชื้อปุ๋ยหมักที่ใช้แล้ว ยังขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมทั้งทางกายภาพ และทางเคมี ซึ่งมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ด้วย^[32]

ปัจจัยทางกายภาพ (Physical factors)

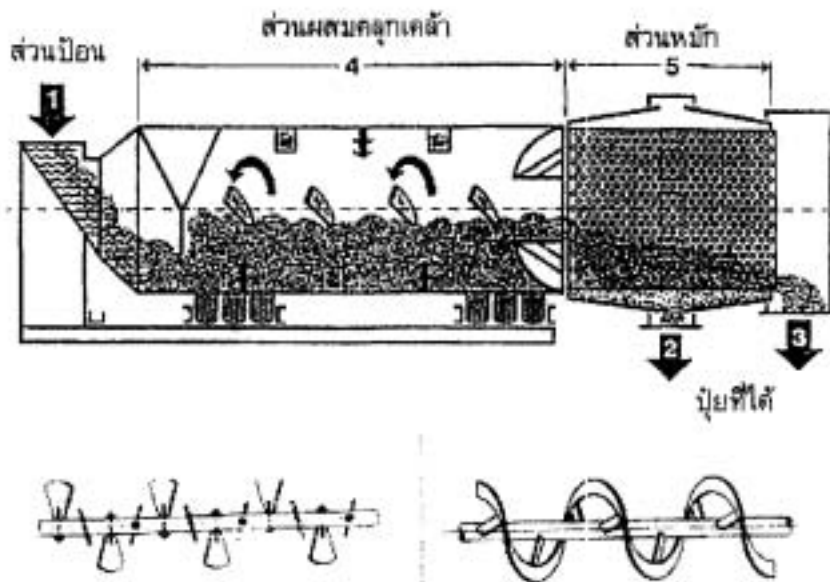
ปัจจัยทางกายภาพในกระบวนการหมักหมายถึงปัจจัยจำพวก อุณหภูมิ ขนาดของวัสดุหมัก การผสมคลุกเคล้า และขนาดของกองหมัก โดยแต่ละปัจจัยมีผลต่อกระบวนการหมักขนาดและรูปร่างของวัสดุที่ใช้หมัก

อัตราความเร็วในการเกิดการออกซิเดชันทางชีววิทยาแปรผันโดยตรงกับปริมาณของพื้นที่ผิวที่ให้เชื้อจุลินทรีย์เข้ายึดเกาะ ถ้าพื้นที่ผิวในการสัมผัสมากจะทำให้จุลินทรีย์ และเอนไซม์เข้ายึดเกาะได้ดีและทำให้การย่อยสลายเร็วขึ้น วัสดุในการหมักควรมีขนาดเล็ก แต่ต้องมีช่องว่างเพียงพอในการระบายอากาศ ถ้าขนาดเล็กเกินไปจะทำให้ลดอัตราการระบายอากาศของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์^[4, 7] ขนาดที่เหมาะสมของวัสดุที่ใช้หมักควรมีขนาดความยาวแต่ละชั้นส่วนประมาณ 5 เซนติเมตร หรือเล็กกว่า^[11] ในกรณีที่น่าขยะมูลฝอยมาหมักเป็นปุ๋ยนั้น ขนาดที่เหมาะสมต่อการหมักคือ 0.5-1.5 นิ้ว^[16]

อุณหภูมิ (Temperature)

เป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลาย และเป็นปัจจัยที่ควบคุมอัตราเร่งของปฏิกิริยาด้วย สภาพภูมิอากาศก็มีอิทธิพลต่อการย่อยสลาย ในฤดูร้อนอุณหภูมิสูงการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเป็นไปได้เร็ว และสามารถย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในขณะใต้ลี้จากผิวสัมผัสกับอากาศถึง 20 เซนติเมตร^[16] อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะมีผลยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้การย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ลดลง อุณหภูมิสูงสุดไม่ควรเกิน 70 องศาเซลเซียส และไม่ควรถูกต่อเนื่องเป็นเวลานานเกินไป เนื่องจากจะทำให้จุลินทรีย์ถูกทำลาย มีเพียงจุลินทรีย์บางสายพันธุ์ เช่น พวก Thermophilic sporigenous bacteria เท่านั้น^[25] ที่มีกิจกรรมที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยสลายโดย

Eumycetes และ แอคติโนมัยซีต อยู่ในช่วง 45-55 องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่ามืบทบาทมากใน การย่อยสลายสารประกอบพวกโพลิเมอร์โมเลกุลยาว (long-chain polymer) ต่าง ๆ ของสาร เซลลูโลส และลิกนิน¹⁶⁾



ภาพที่ 10-5 การผสมคลุกเคล้าขยะในถังหมักและตัวอย่างแกนผสม

การผสมคลุกเคล้า (Mixing)

การผสมคลุกเคล้าของขยะอินทรีย์เป็นสิ่งสำคัญ กองขยะสามารถพลิกกลับผสมคลุกเคล้าหลังจากการหมักเริ่มขึ้น การผสม และคลุกเคล้าให้อากาศ และความชื้นกระจายตัวทั่ว ๆ ทั่ว ทำให้ส่งเสริมให้การย่อยสลายของกองขยะ การคลุกเคล้าพลิกกลับของกองขยะ หรือภาชนะเปิด ทำให้สูญเสียความร้อนมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ได้¹²⁰⁾ ดังแสดงในภาพที่ 5

ปัจจัยทางเคมี (Chemical factors)

ปัจจัยทางเคมีเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของการหมัก โดยการหมักจะพิจารณาตัวแปรเหล่านี้คือ การระบายอากาศ หมายถึงออกซิเจนที่กองหมักต้องการ สารอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการ คือค่าไนโตรเจนต่อคาร์บอน ค่าความเป็นกรดต่าง ความชื้น ทั้งหมดนี้เป็นตัวแปรที่จำเป็นในการหมักทำปุ๋ย

การระบายอากาศ

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในสภาพที่ต้องการอากาศ จัดเป็นปฏิกิริยาประเภทออกซิเดชันทางชีววิทยาซึ่งปัจจัยที่สำคัญคือก๊าซออกซิเจน เพื่อไม่ให้ปัจจัยที่จำกัดต่อการดำเนินกระบวนการย่อยสลายซึ่งปริมาณก๊าซออกซิเจนจะต้องไม่ต่ำกว่า 18 เปอร์เซ็นต์^[4] ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูง และอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนโดยจุลินทรีย์ระหว่างการย่อยสลาย^[14] กล่าวคือ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30-55 องศาเซลเซียสจะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์เนื่องจากการใช้ออกซิเจนสูงสุด

การหมักที่ไร้ออกซิเจนทำให้กองหมักจะเกิดกลิ่น ส่วนการหมักที่มีออกซิเจนเป็นการหมักที่มีอัตราเกิดขึ้นรวดเร็ว ดังนั้นกองหมักควรมีช่องว่างที่พอเหมาะที่จะให้อากาศจากบรรยากาศไหลผ่านเข้าสู่กองหมักได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถออกจากกองหมัก อากาศอาจจะสามารถซึมผ่านเข้าไปในกองขยะได้เมื่อขยะขาดออกซิเจนเพื่อให้ออกซิเจนอยู่ในระดับเพียงพอ การพลิกกลับกองบ่อย ๆ ทำให้เป็นการเพิ่มช่องว่างให้กับกองได้ ที่ความเข้มข้นออกซิเจนต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ อาจเพียงพอสำหรับไบโม่ อากาศที่มากเกินไปทำให้สูญเสียความร้อน เป็นผลให้กองขยะเย็น ทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายให้กับการดำเนินงาน

ความชื้น

ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด ในการกำหนดการเจริญของจุลินทรีย์บนพื้นผิวของวัสดุหมัก เนื่องจากเป็นตัวกลางในการส่งผ่านอาหาร และก๊าซออกซิเจนจากวัสดุหมักและอากาศไปยังจุลินทรีย์ และยังเป็นตัวกลางในการส่งผ่านเอนไซม์เข้าย่อยสลายวัสดุหมักด้วย^[26] นอกจากนี้ความชื้นยังเป็นตัวกำหนดปริมาณก๊าซในวัสดุหมัก ถ้าความชื้นมากขึ้น ปริมาณก๊าซจะลดลง การส่งผ่านก๊าซออกซิเจนลดลงทำให้เกิดสภาพไร้อากาศ (Anaerobic)^[10,26, 32] โดยความชื้นที่พอเหมาะจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ และขนาดวัสดุ^[12] ซึ่งความชื้นที่เหมาะสมต่อการหมักขยะเป็นปุ๋ยหมักนั้นอยู่ในช่วง 50-60 เปอร์เซ็นต์^[16] แต่ความชื้นที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายวัสดุที่มีเส้นใย (Fiber) และมีความหนาแน่นต่ำ รวมทั้งฟางข้าว ควรมีระดับความชื้นในช่วง 80-85 เปอร์เซ็นต์ ในสภาพที่มีการระบายอากาศ^[11]

ถ้าความชื้นต่ำกว่า 60-70 เปอร์เซ็นต์^[19] จะมีผลให้ Lag time ยาวนานขึ้นทำให้การงอกของสปอร์ของเชื้อราต้องใช้ระยะเวลาาน ปริมาณน้ำที่เติมลงไปในกากอ้อยในปริมาณ 1, 2, 5, 8, 10 และ 100 เท่าของน้ำหนักวัตถุดิบ พบว่า ปริมาณน้ำที่มีผลต่อกิจกรรมการย่อย

สลายสูงสุดอยู่ระหว่าง 8-10 เท่า ถ้ามีความชื้น 1-2 เท่า จะทำให้กากอ้อยแห้งเกินไป การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์เป็นไปได้อย่างช้า ๆ แต่ถ้ามีความชื้นเป็น 100 เท่ากากอ้อยจะแฉะเกินไปการย่อยสลายจะไม่ดี

ระดับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

วัสดุที่มีค่า pH อยู่ในช่วง 3.0-11.0^[4] สามารถนำมาทำปุ๋ยหมักได้ แต่อย่างไรก็ตามค่า pH ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 5.5-8.0 เนื่องจากแบคทีเรียที่ชอบ pH ช่วงที่เป็นกลาง (pH 7) ส่วนเชื้อราสามารถปรับตัวให้อยู่ในสภาพค่อนข้างเป็นกรดได้ แต่โดยปกติแล้ว pH เริ่มต้นในการหมักมักจะค่อนข้างเป็นกรดเล็กน้อย คืออยู่ในช่วงประมาณ 6.0 ซึ่งถือว่าเป็น pH ที่พบใน cell sap ของพืชส่วนใหญ่ ในช่วงแรกของการย่อยสลายจะทำให้ pH ลดลงโดยกิจกรรมของ Acid-forming bacteria^[4] ซึ่งจะย่อยสลายสารประกอบคาร์บอนทำให้เกิดกรดอินทรีย์มีผลให้ pH ค่อนข้างเป็นกรดประมาณ 4.5-5.0 แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในระหว่างการหมักจะมีผลให้ pH สูงขึ้นและค่อนข้างเป็นด่างเล็กน้อยคือประมาณ 7.5-8.5 แต่ถ้า pH สูงขึ้นมากๆจะมีผลทำให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปก๊าซแอมโมเนียโดยกระบวนการ Ammonia volatilization

สารอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการ (Nutrient)

โดยทั่วไปการทำปุ๋ยหมักจำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าอัตราส่วนระหว่างสารประกอบคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ของเศษวัสดุหมักเสมอ เพราะโครงสร้างของเศษพืชส่วนมากจะไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก แต่ที่สำคัญ คือ องค์ประกอบของไนโตรเจนซึ่งจะเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุม และเป็นตัวกำหนดอัตราการย่อยสลาย การเจริญตลอดจนการผลิตเอนไซม์ของจุลินทรีย์ โดยพบว่าถ้าวัสดุหมักมีอัตราส่วนสารประกอบคาร์บอนต่อไนโตรเจนกว้างมาก ๆ (C สูง N ต่ำ) กิจกรรมการย่อยสลายจะเกิดช้ากว่า ต้องใช้ระยะเวลาานเพื่อให้ได้ปุ๋ยหมัก โดยปกติเซลล์ของจุลินทรีย์มีค่าอัตราส่วนสารประกอบคาร์บอนต่อไนโตรเจนประมาณ 10 ต่อ 1 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเกิดกระบวนการหมัก แต่ถ้าอัตราส่วนของสารประกอบคาร์บอนต่อไนโตรเจนแคบเกินไป จะทำให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจนเนื่องจากกระบวนการ Ammonia volatilization โดยเฉพาะในกรณีที่มี pH และอุณหภูมิสูง จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของสารประกอบคาร์บอน ต่อไนโตรเจนเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์มีค่าประมาณ 25 ต่อ 1 ดังนั้นถ้ามีการปรับค่าอัตราส่วนสารประกอบคาร์บอน ต่อไนโตรเจนให้เหมาะสมจะทำให้เกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น^[4]

สารประกอบคาร์บอน และไนโตรเจนเป็นที่จำเป็นต่อการเจริญของจุลินทรีย์ โดยที่จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน และแหล่งของคาร์บอนในการเจริญ ขณะเดียวกันก็ใช้สารประกอบไนโตรเจนเพื่อนำไปสังเคราะห์สารพวกโปรตีน และ Nucleic acid

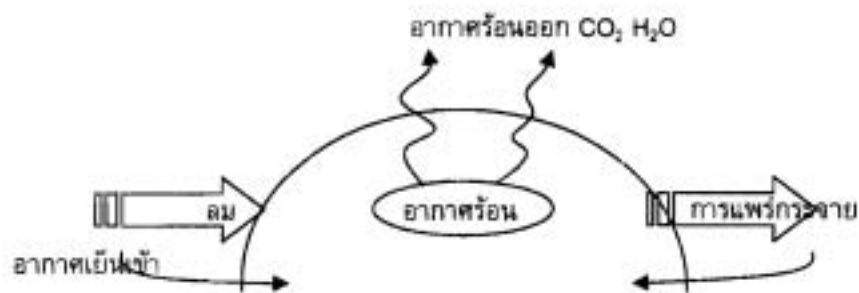
โมโนโปรตัสเซียมฟอสเฟต และโปรตัสเซียมไนเตรทจำเป็นสำหรับการเลี้ยงเชื้อ ในสภาพของแข็ง การเติมโมโนโปรตัสเซียมฟอสเฟตนอกจากจะช่วยรักษาระดับ pH ให้คงที่ หรือเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดแล้ว ฟอสเฟตยังจำเป็นสำหรับจุลินทรีย์เพื่อนำไปใช้ในการเจริญ เนื่องจากฟอสฟอรัสจำเป็นสำหรับการสร้างโปรโตพลาสซึมให้แก่เซลล์ ส่วนโปรตัสเซียมจำเป็นสำหรับการควบคุมความดันออสโมติกในเซลล์

ถ้าใส่ยูเรีย (urease) ในปริมาณสูงไปจะมีผลให้อัตราส่วนของสารประกอบคาร์บอนต่อไนโตรเจนแคบมาก ยูเรียจะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ ยูเรียทำให้เกิดอนุมูลแอมโมเนียสะสมมากขึ้นทำให้ระดับ pH ของอาหารเลี้ยงเชื้อสูงขึ้นในช่วง 7.0-8.0 ซึ่งมีผลไปยังยั้งการผลิตเอนไซม์ FPase และ CMCase ให้ลดลง

สภาวะต่าง ๆ ที่เอื้ออำนวยต่อการหมักปุ๋ยจากขยะมูลฝอย คือ อัตราส่วนระหว่าง C/N และ C/P ในขยะมูลฝอยอยู่ในระหว่าง 30-35 และ 75-150 ตามลำดับ^[16] ขนาดของอนุภาคสารต่างๆในขยะมูลฝอย 0.5-1.5 นิ้ว ความชื้น 50-60 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณอากาศ 10-30 ลูกบาศก์ฟุตต่อวันต่อปอนด์ อุณหภูมิสูงสุด 55 องศาเซลเซียส ควรมีการพลิก หรือพรวนกองปุ๋ยเป็นครั้งคราว ส่วนค่าความเป็นกรด เป็นด่างไม่จำเป็นต้องควบคุม

เทคโนโลยีในการหมัก

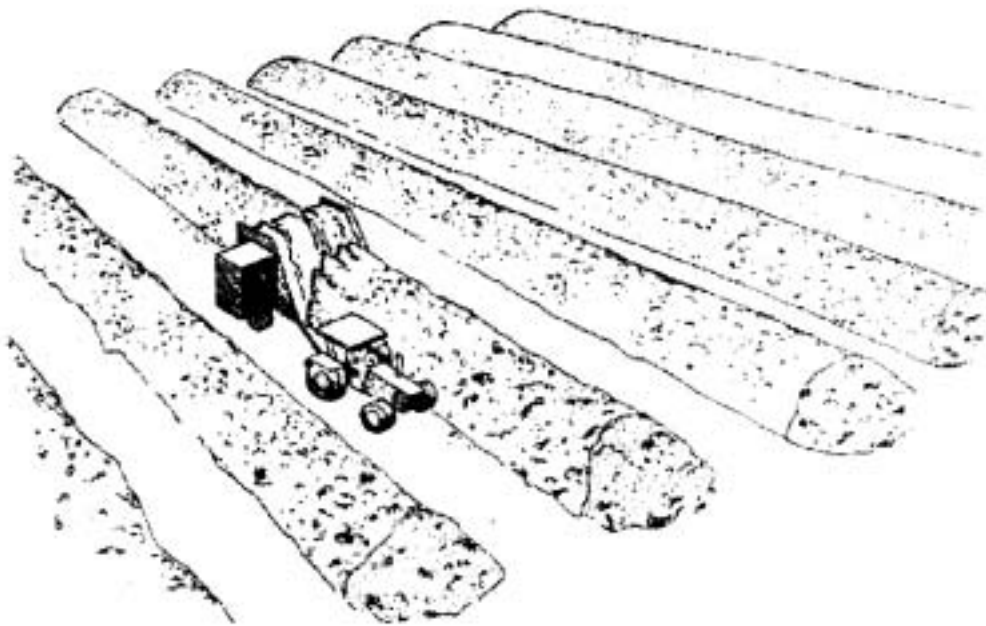
เทคโนโลยีสำหรับการหมักสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท หมักแบบกองเป็นแถวใช้ออกซิเจนธรรมชาติ (Windrow) หมักแบบกองเพิ่มอัตราการย่อยด้วยอากาศ (aerated static pile) หมักแบบใช้ภาชนะ (in-vessel composting) และหมักแบบไร้อากาศ (anaerobic processing)^[3]



ภาพที่ 10-6 ภาพตัดขวางของกองหมักปุ๋ยแบบธรรมชาติ (Windrow cross-section)

การหมักโดยอาศัยออกซิเจนตามธรรมชาติ (Windrow composting)

โดยนำขยะมูลฝอยที่มีอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายได้ไปกองบนพื้นโดยกองให้มีขนาดเล็กเพื่อให้ขยะมูลฝอยมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศมากที่สุด และเพื่อให้ขยะที่อยู่ข้างในอาจได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอทำให้เกิดสภาพการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic decomposition) ขึ้นได้ ดังแสดงในภาพที่ 6 วิธีนี้ต้องใช้พื้นที่มาก และใช้เวลาประมาณ 30 วัน การหมักแบบกองบนพื้นอาจจะกองเป็นรูปตัดสามเหลี่ยม แถวยาว ความกว้างมักจะเป็นสองเท่าของความสูง ความสูงสูงประมาณ 1.2-2.4 เมตร กว้าง 4.2-4.8 เมตร เพื่อให้ออกซิเจนสามารถแพร่เข้ากลางกองปุ๋ยหมักได้ และสามารถรักษาอุณหภูมิของกองปุ๋ยไว้ได้ด้วย การพลิกกลับกองปุ๋ยเป็นการเพิ่มอากาศ และเพิ่มความพรุนของกองปุ๋ย การควบคุมดูแลกองปุ๋ยดังแสดงในภาพที่ 7 หากพื้นที่ผิวของกองปุ๋ยแน่นเกินไปจะทำให้การพลิกกลับได้ยาก ซึ่งต้องทำการพลิกกลับกองสัปดาห์ละครั้ง หรือมากกว่าขึ้นอยู่กับปริมาณของขยะที่ต้องทำการหมัก

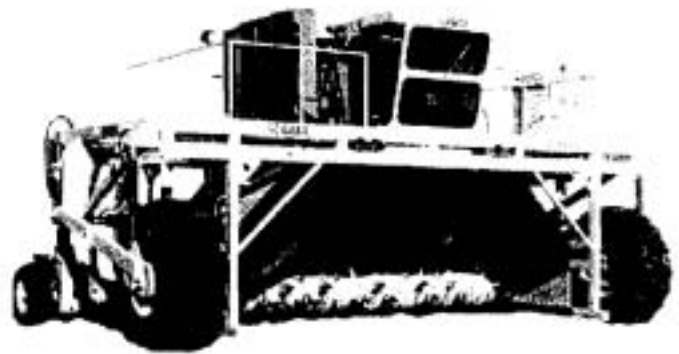


ภาพที่ 10-7 กระบวนการหมักกองเป็นแถวโดยธรรมชาติ ^[20]

การพลิกกลับกองปุ๋ยเป็นการทำให้ขยะที่อยู่ผิวของกองปุ๋ยถูกกลับเข้าไปในกองดังแสดงในภาพที่ 8 เพื่อจะเกิดปฏิกิริยาได้ เครื่องที่ทำการการพลิกกลับได้ด้วย พลิกกลับด้วยสว่าน (Augers) โปพาย (paddles) หรือ เตื่อย (tines) เครื่องพลิกกลับกองปุ๋ยบางแบบสามารถเพิ่มน้ำลงไปในกองปุ๋ยได้ ถ้าจำเป็น เมื่อกองปุ๋ยถูกกลับ ความร้อนคายออกสู่บรรยากาศ ถ้าภายในกองปุ๋ยมีออกซิเจนต่ำ กลิ่นจะเป็นผลตามมา ความสามารถของเครื่องมือ และขนาด สามารถจัดการกับกองปุ๋ยในปริมาตร 1,828.8-2,743.2 ลูกบาศก์เมตรต่อปี กองปุ๋ยอาจจะกองไว้ในที่ร่มหรือกลางแจ้งก็ได้ ถ้ากองไว้กลางแจ้งอาจมีปัญหาจากฝน ทำให้มีน้ำชะ และการควบคุมความชื้นของกองปุ๋ย ความชื้นเพิ่มขึ้นจากน้ำฝน และต้องรวบรวมน้ำชะเพื่อทำการบำบัดด้วย เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ควรทำการสร้างหลังคาคลุมกองปุ๋ย ซึ่งทำให้ค่าก่อสร้างช่วงเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ^[7, 8]

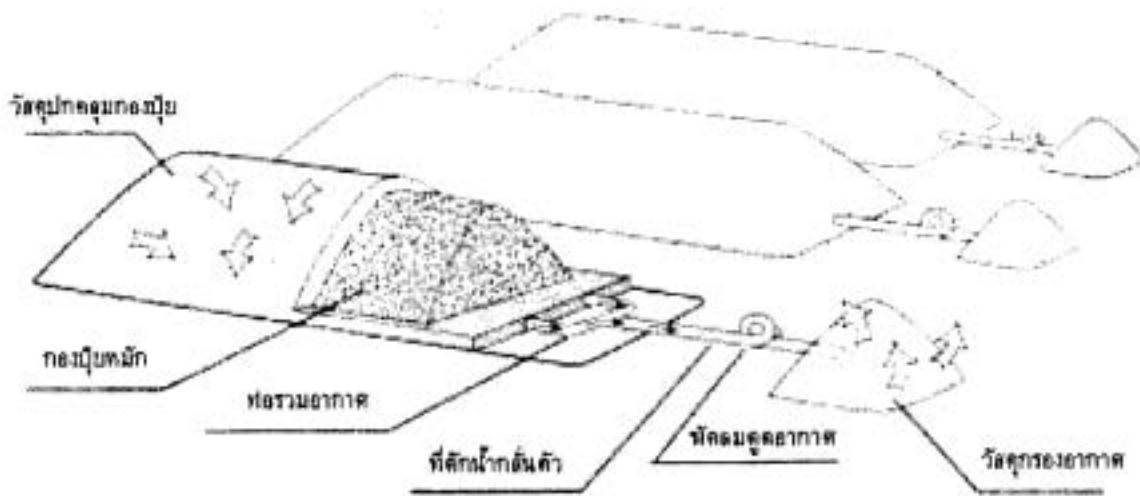
การหมักแบบอัตราการย่อยสลายสูง (High rate composting)

เป็นการหมักปุ๋ยโดยใช้เครื่องจักรกลช่วย มีการใช้เครื่องมือที่ช่วยให้ออกซิเจนในอากาศสัมผัสกับขยะได้มากที่สุด อาจใช้พัดลม (Bower) หรือใบพัดให้อากาศหมุนเวียน (Exhaust fan) ^[18, 21, 22] ดังแสดงในภาพที่ 9 และ 10

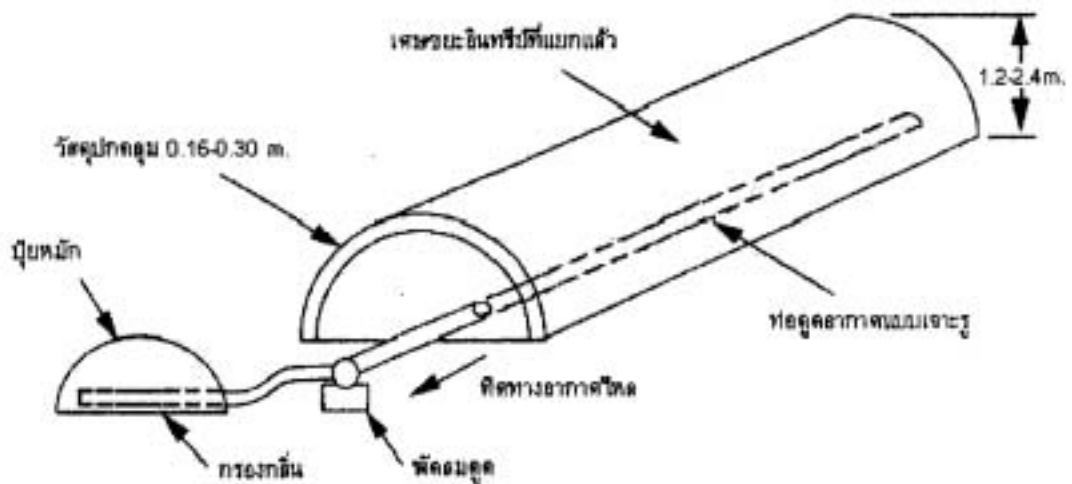


ภาพที่ 10-8 กระบวนการพลิกกลับกองปุ๋ยด้วยเครื่องจักร

การเร่งการย่อยสลายโดยการทำให้ขยะเป็นชิ้นเล็ก และแยกเอาส่วนที่ไม่ย่อยสลายออกไป วิธีนี้จะใช้เวลาประมาณ 6-12 สัปดาห์ การให้อากาศของกองปุ๋ยหมักเป็นเทคโนโลยีที่ต้องการการผสมคลุกเคล้าในช่วงเริ่มต้นของการหมักด้วยเครื่องให้อากาศ กองปุ๋ยหมักวางเหนือท่อเจาะรู ให้อากาศจากพัดลม สำหรับการหมัก อากาศสามารถทำให้ความดันเป็นบวกหรือเป็นลบ เมื่อกระบวนการหมักใกล้เสร็จสมบูรณ์ กองปุ๋ยได้รับอากาศจากพัดลมที่ดูดอากาศออกจากกองปุ๋ย แรงที่เกิดจากอากาศเป็นความดันลบ ทำให้อากาศเข้าไปในกองเพิ่มขึ้น การควบคุมพัดลมด้วยนาฬิกาตั้งเวลา หรืออาจใช้อุณหภูมิเป็นตัวควบคุม



ภาพที่ 10-9 รูปแบบของระบบหมักแบบใช้ออกซิเจนอัตราย่อยสลายสูง



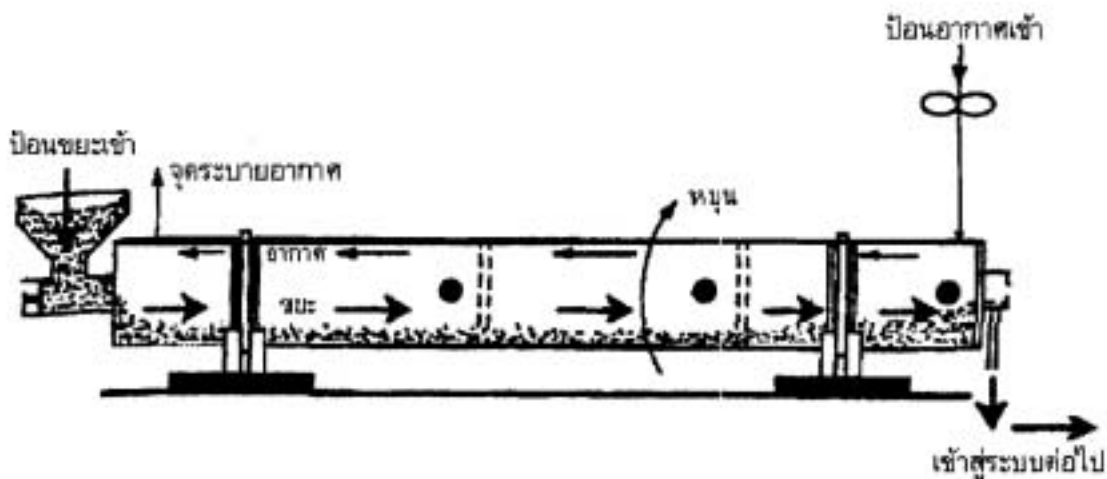
ภาพที่ 10-10 รายละเอียดระบบหมักแบบใช้ออกซิเจนโดยมีอัตราปล่อยสลายสูง⁽²⁰⁾

การหมุนเวียนของอากาศในกองปุ๋ยหมักเป็นที่ต้องการของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักทำปุ๋ยและเป็นการป้องกันความร้อนไม่ให้ร้อนเกินไป การกำจัดความร้อนส่วนเกิน และไอน้ำเป็นต้องมีการจัดการอย่างเหมาะสมของอุณหภูมิของกิจกรรมจุลินทรีย์ การควบคุมอากาศสามารถควบคุมได้ในกองปุ๋ยใหญ่ กลิ่นจากอากาศที่สูดออกจากกองปุ๋ยถูกกักและกองด้วยปุ๋ยหมักที่สมบูรณ์แล้ว ส่วนอุณหภูมิในกองหากพอเหมาะมีผลทำให้เชื้อโรคและวัชพืชเจริญเติบโตได้ ที่ผิวของกองปุ๋ยไม่ได้รับการพลิกกลับการหมักปุ๋ยแบบนี้อาจเป็นผลให้อุณหภูมิสูงถึงทำลายเชื้อโรคได้ ปัญหานี้สามารถแก้ได้ด้วยการใช้ปุ๋ยหมักมาปกคลุมหนาประมาณ 15-30 เซนติเมตร ที่ผิวนอกของกองปุ๋ยหมักถูกปกคลุมด้วยปุ๋ยหมักที่หมักเสร็จแล้วทำหน้าที่เป็นตัวช่วยต้านอุณหภูมิเพื่อทำลายเชื้อโรคและไม่ต้องการให้วัชพืชงอกออกนอกกองปุ๋ยได้ การให้อากาศของกองปุ๋ยหมักจากขยะชุมชน เศษหญ้า ภาชนะก่อน และอุตสาหกรรมการหมักทำปุ๋ยเป็นผลสำเร็จ เป็นระบบที่ใช้พื้นที่น้อยกว่าการหมักแบบธรรมชาติ การให้อากาศแก่กองปุ๋ยหมักสามารถทำภายในอาคาร หรือ ในที่แจ้งได้ แต่การทำในที่โล่งแจ้งจะมีข้อเสียเหมือนการหมักปุ๋ยแบบธรรมชาติที่หมักในที่โล่งแจ้ง

การหมักในถัง (In-vessel composting)

การหมักปุ๋ยในถังเป็นระบบที่ใช้วัตถุดิบใส่ในถังปิดมีการจัดการคลุกเคล้า ให้อากาศและควบคุมความชื้น ระบบดังหมักปุ๋ยต้องการการจัดการขยะอินทรีย์ก่อนที่จะดำเนินการ

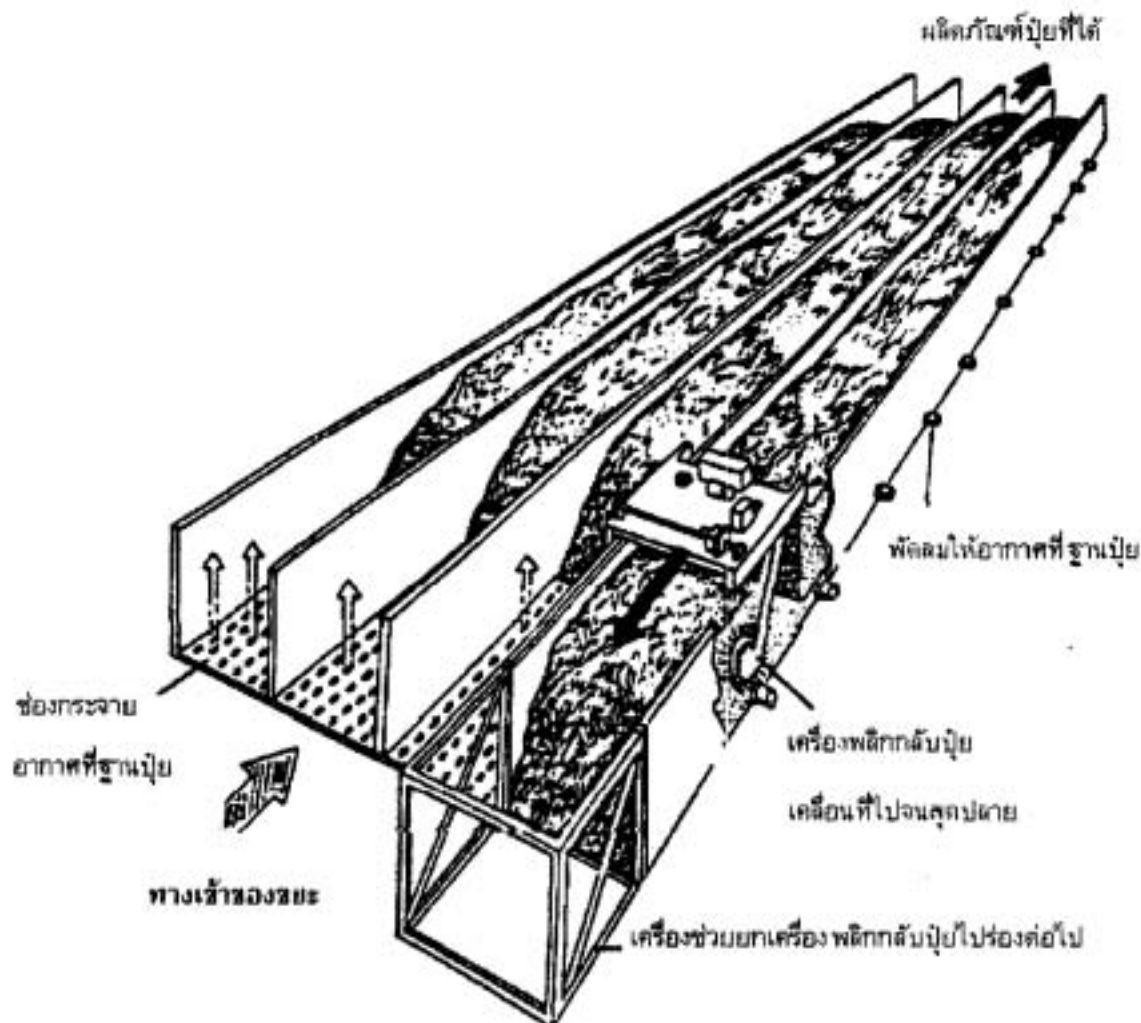
ระบบ ระบบหมักปุ๋ยในถังอาจมีถังเดียวหรือหลายถัง ในบางกรณีอาจเป็นแบบถังหมุน แนวนอน ในกรณีที่ถังหมักอยู่กับที่ และมีแกนผสมคลุกเคล้าวัสดุไปรอบ ๆ ส่วนมากระบบนี้ เป็นการป้อนขยะแบบต่อเนื่อง แต่ก็อาจมีการดำเนินการแบบกะ (Batch mode) ถังหมักปุ๋ย ทั้งหมดต้องการการหมัก (มีการบ่ม) หลังจากที่ปุ๋ยผ่านออกจากถังหมักแล้ว ประโยชน์หลัก ของการหมักปุ๋ยในถังคือสามารถควบคุม และจัดการระบบได้ตามหลักวิศวกรรมเพื่อให้ได้ปุ๋ย ตามความต้องการ ขยะที่ถูกหมักจะถูกพลิกกลับผสมคลุกเคล้าบ่อยครั้งเพื่อให้ผสมกลมกลืน กัน เป็นผลสนับสนุนให้ออกซิเจนจากอากาศเข้าทำปฏิกิริยา อัตราเวลาการกักเก็บในการหมัก ใช้้น้อยกว่า 1 สัปดาห์ถึงมากกว่า 4 สัปดาห์ ถังหมักปุ๋ยมักวางไว้ในอาคารสถานที่สร้างไว้ ใน การจัดการและดำเนินการหมักปุ๋ยในถังหมักต้องจัดการให้เหมาะสมเพื่อได้กลิ่นน้อย อากาศที่ จัดการให้ต้องพอเหมาะตามการควบคุม โดยอาจจัดให้มีหัววัดออกซิเจน และอากาศมีส่วนของ ออกซิเจนผสมกันอยู่เพื่อให้ได้ตามสัดส่วนของถังหมัก กลิ่นที่เกิดขึ้นจากถังหมักสามารถ ควบคุม และบำบัดได้ ตัวอย่างของการหมักในถังมีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 10-11 ถังหมักแบบหมุน^[30]

ก) ถังหมักแบบหมุน (Rotation drum) ดังแสดงในภาพที่ 11 ที่มีการผสมอย่างต่อเนื่องของขยะที่ถูกป้อนเข้าไปในถัง โดยรูปแบบของถังของรูปทรงเส้นผ่านจุดศูนย์กลาง ประมาณ 2-3 เมตร การหมุนจะหมุนแบบช้า ๆ ส่วนมากแล้วจะน้อยกว่า 10 รอบต่อนาที ออกซิเจนเข้าสู่ระบบด้วยหัวพ่นจากด้านบนของถังด้วยเครื่องอัดอากาศ ขยะที่คลุกเคล้าเข้า กันกับออกซิเจนเมื่อถังมีการหมุน การหมักในถังแบบหมุนจะใช้เวลาประมาณ 1-6 วัน และ หลังจากนั้นจะทำการหมักต่อด้วยการบ่มประมาณ 1-3 เดือนจนได้เป็นปุ๋ย^[30]

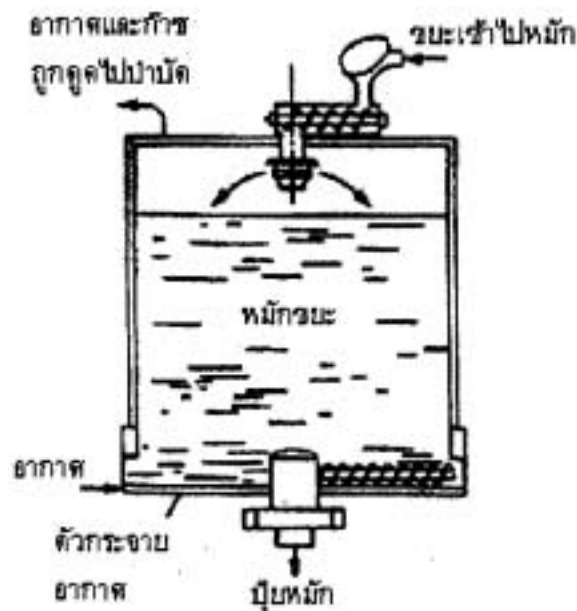
ข) ระบบการหมักที่มีการพลิกกลับ (Agitated bed) ด้วยเครื่องพลิกกลับแนวนอน รูปรางสี่เหลี่ยมผืนผ้าแคบแนวยาว ดังแสดงในภาพที่ 12 ตำแหน่งประกอบด้วยเครื่องพลิกกลับ ขณะถูกป้อนเข้าด้านหน้าของรางและมีเครื่องพลิกกลับเคยผสมคลุกเคล้าและลำเลียงไปทางด้านท้ายของราง ระบบอากาศถูกให้จากพื้นของราง และทำให้ปฏิกิริยาหมักเกิดขึ้นตัว ส่วนมากจะ รางจะกว้างที่ 1.8 - 6 เมตร และลึก 0.9 - 3 เมตร ใช้เวลาในการหมักที่ 2 - 4 สัปดาห์^[30]



ภาพที่ 10-12 ระบบหมักแบบใช้ออกซิเจนมีอัตราย่อยสลายสูงพร้อมเครื่องพลิกกลับ (Agitated bed)^[30]

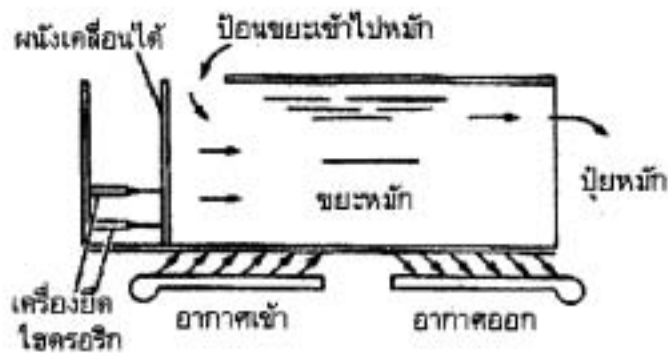
ค) ถังหมักแบบไม่กวนผสมแนวตั้ง (Unmixed vertical plug flow reactor) ดังแสดงในภาพที่ 13 เป็นถังทางกระบอกกลมแนวตั้ง หรือเป็นสี่เหลี่ยม ความลึกประมาณ 9

เมตร ชยะป้อนเข้าทางด้านบนของถังหมัก ปุ๋ยออกทางด้านล่าง อากาศถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของถัง มีเครื่องลำเลียงปุ๋ยออกทางด้านล่างของถังหมัก



ภาพที่ 10-13 ถังหมักแบบไม่กวนแนวตั้ง (Unmixed vertical plug flow reactor)

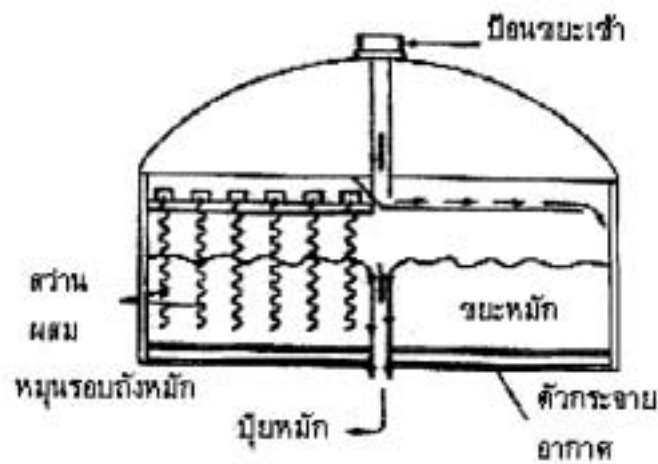
ง) ถังหมักแบบไม่กวนผสมแนวนอน (Unmixed horizontal plug flow reactor) ดังแสดงในภาพที่ 14 เป็นถังแนวนอนที่มีผนังที่สามารถปรับเคลื่อนที่ได้ตามปริมาณของขยะที่ต้องการหมัก มีท่อกระจายอากาศเข้าด้านล่างของตัวถังของระบบ ขยะป้อนเข้าด้านบนของถัง



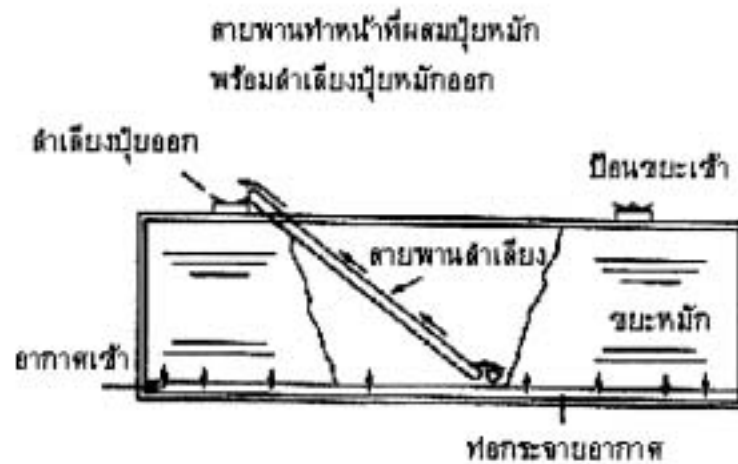
ภาพที่ 10-14 ถังหมักแบบไม่กวนแนวนอน (Unmixed horizontal plug flow reactor)

จ) ถังหมักแบบมีการกวนผสมกลม (Mixed (dynamic) vertical reactor) ดังแสดง
 ในภาพที่ 15 เป็นถังกลมมีการกวนผสมด้วยสว่านรอบ ๆ ตัวถัง เส้นผ่านศูนย์กลาง
 ประมาณ 35 เมตร และความลึกของกองปุ๋ยที่ 2 - 3 เมตร ใช้เวลาในการหมัก 14 วัน อากาศ
 กระจายจากด้านล่างขึ้นบน โดยอากาศจะควบคุมอุณหภูมิ และมีหัววัดออกซิเจนควบคุมอยู่
 กลิ่นที่เกิดขึ้นสามารถควบคุมได้

ฉ) ถังหมักแบบกวนผสมสี่เหลี่ยมแนวนอน (Mixed (dynamic) horizontal reactor)
 ภาพที่ 16 เป็นถังหมักปุ๋ยมีสายพานผสมคลุกเคล้า และลำเลียงปุ๋ยหมักออกจากระบบ อากาศ
 กระจายจากทางด้านล่างของระบบ



ภาพที่ 10-15 ถังหมักแบบมีการกวนทรงกลม (Mixed (dynamic) vertical reactor)

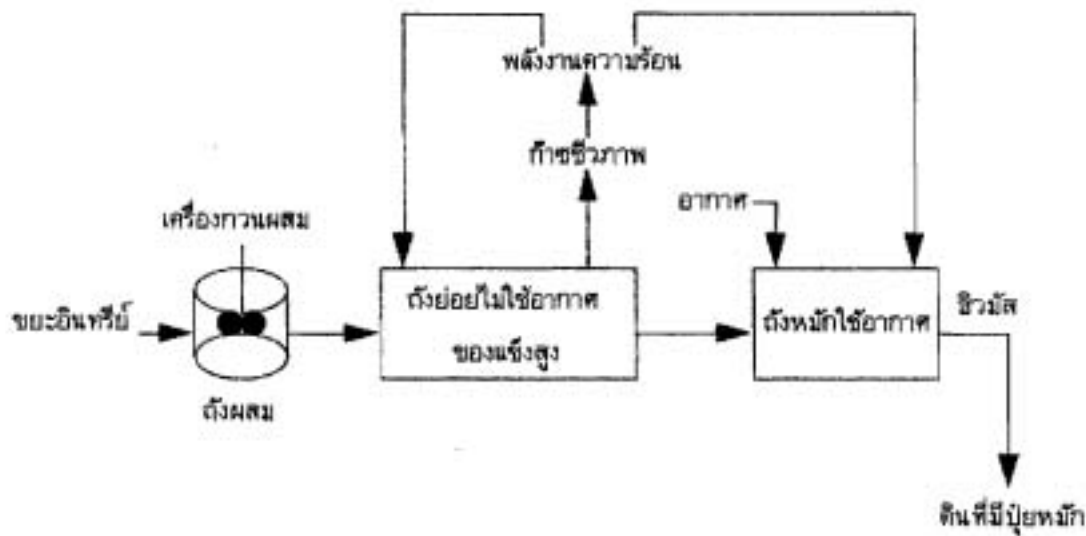


ภาพที่ 16 ถังหมักแบบกวนสี่เหลี่ยมแนวนอน (Mixed (dynamic) horizontal reactor)

การหมักปุ๋ยแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic processing)

การหมักแบบไม่ใช้อากาศถูกนำมาใช้จัดการกับกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนก่อนแล้วมาเป็นเวลานานพอสมควร และได้มีการวิจัยพัฒนาระบบเพื่อนำมาใช้กับขยะชุมชนในเวลาต่อมา ในกระบวนการไม่ใช้อากาศ แบคทีเรียทำการย่อยอินทรีย์วัตถุในสภาวะที่ขาดออกซิเจน และสร้างมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานที่สามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้ การหมักทำปุ๋ยแบบดั้งเดิมต้องการกระแสไฟฟ้าเพื่อการพลิกกลับ และให้อากาศกับกองปุ๋ย ซึ่งอาจมาจากระบบการย่อยแบบไม่ใช้อากาศได้

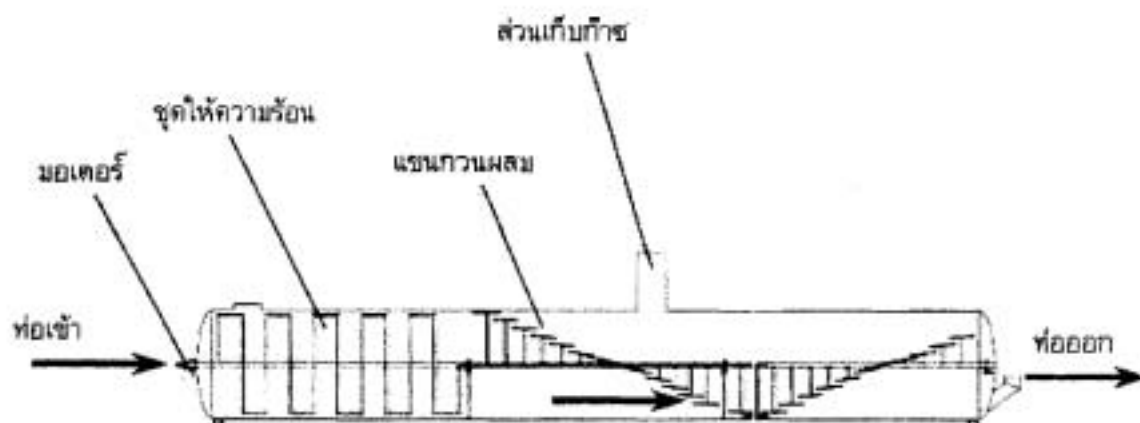
ระบบการย่อยแบบขั้นตอนเดียว ประกอบด้วยระบบถังเดียว โดยเริ่มจากการตัดย่อยและ ลำเลียงเข้าไปในถังของระบบ น้ำและสารอาหารที่จำเป็นต้องเพิ่มเข้าไปเพื่อให้เพียงพอกับระบบ การหมักย่อยแบบระบบเดียวจะมีเครื่องกวน ผสมอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เป็นของเหลว น้ำที่เพิ่มเข้าไปขึ้นกับข้อมูลจากการวิจัยของสมบัติขยะตั้งต้น



ภาพที่ 10-17 ผังการหมักแบบไร้อากาศได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซชีวภาพ^[20]

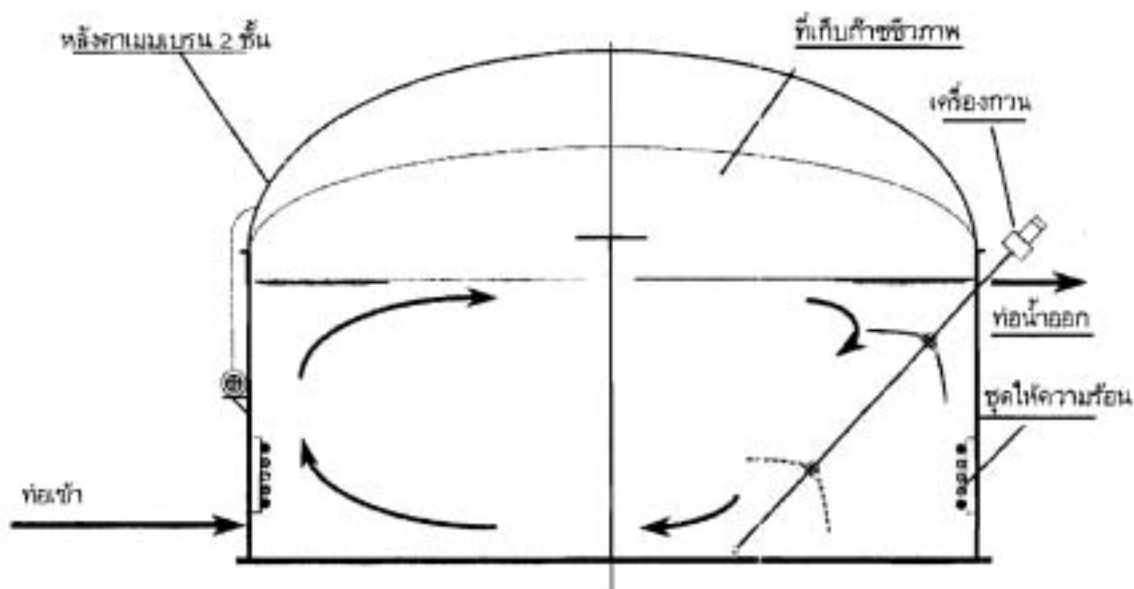
ระบบการย่อยแบบสองขั้นตอน มีการวนเอาวัตถุดิบจากขั้นตอนแรกมาทำการย่อยต่อในขั้นตอนที่สองดังแสดงในภาพที่ 17 การกวนผสมจัดเตรียมไว้เพื่อให้กระบวนการทางชีวภาพถูกควบคุมได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้กระบวนการย่อยสลาย ผลิตก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากขั้นตอนแรก และขั้นที่สอง และลำเลียงไปยังส่วนที่มีความต้องการใช้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น กากที่เหลือทิ้งที่ไหลจากการย่อยสมบูรณ์แล้วถูกนำไปทำการหมัก โดยต้องทำการกำจัดน้ำออกก่อน การหมักอาจหมักแบบกองด้วยวิธีธรรมชาติ ถังหมักย่อยต่อไปนี้เป็นถังหมักที่เป็นการหมักขั้นตอนเดียว^[19]

ก) ถังหมักย่อยไม่ใช้อากาศแบบแนวนอน (Horizontal Digesters) ดังแสดงในภาพที่ 18 เป็นถังหมักที่ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กสร้างในแนวนอน ใช้เล็กในการสร้างประกอบ อาจใช้ถังเก่าก็ได้เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย โดยถังเหล่านี้ต้องถูกทำความสะอาด สร้างแกนตรงกลางเพิ่มเติม ติดตั้งแขนการกวนผสม บุนวนกันความร้อน โดมรวบรวมก๊าซชีวภาพ ปริมาตรโดยมาตรฐานอยู่ระหว่าง 50 - 150 m³ เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 3.20 - 3.50 m. ระยะเวลาการกักเก็บอยู่ที่ 40-50 วัน ขึ้นกับขยะที่ป้อนเข้าระบบ ในระยะต้นจะมีการให้ความร้อน เมื่ออุณหภูมิช่วงเมโซฟิลิก (mesophilic) เกิดขึ้น และมีการกวนผสมด้วยเครื่องกวน ถังหมักแบบนี้มีการนำมาใช้ย่อยมูลสัตว์ซึ่งมีการผสมกันเป็นอย่างดีของของแข็ง การดำเนินการจัดการประหยัด เหมาะกับชุมชน หรือฟาร์มขนาดเล็ก



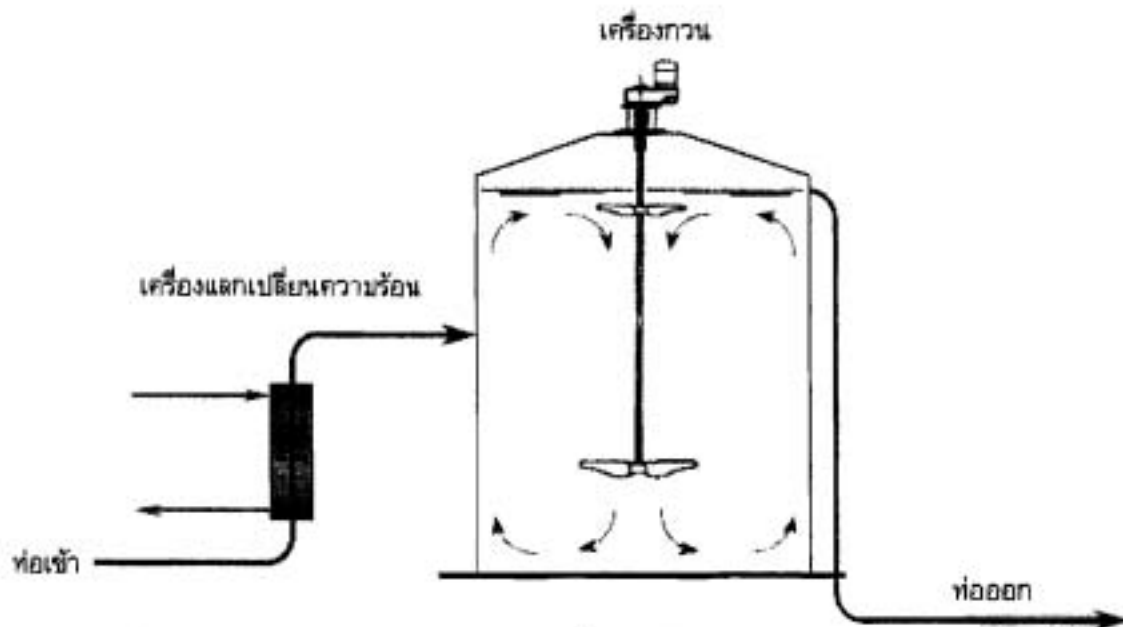
ภาพที่ 10-18 ถังหมักไร้อากาศแบบแนวนอน (Horizontal Digesters)⁽⁹⁾

ข) ถังหมักย่อยไม่ใช้อากาศแบบแนวตั้ง (Upright Standard Agricultural Digester) ดังแสดงในภาพที่ 19 เป็นถังหมักย่อยแบบแนวตั้ง สร้างจากคอนกรีต มีขนาดปริมาตรระหว่าง 500 - 1,500 m^3 มีความสูงที่ 5 - 6 m. เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10 - 20 m. ถังมีเครื่องให้ความร้อนด้วยท่อที่ติดไว้รอบผนัง การกวนใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนที่ติดตั้งไว้ภายนอกถัง ระบบนี้อาจมีการกวน 2 จุด หรือมากกว่า ด้านบนของถังใช้เมมเบรนแบบสองชั้น (double-membrane) และหลังการรวบรวมก๊าซ เมมเบรนด้านในเป็นตัวรองรับเก็บก๊าซ เมมเบรนชั้นนอกเป็นตัวป้องกันสภาวะอากาศ เมมเบรนด้านในสามารถยืดหยุ่นในแนวตั้งได้ ด้วยเหตุนี้ด้านนอกจึงมีรูปร่างเหมือนบอล มีพัดลมควบคุมความดันอากาศระหว่างเมมเบรนทั้งสองนี้เหมือนให้การรองรับด้วยห้องโถงอากาศ ระยะเวลาที่เก็บอยู่ระหว่าง 40 - 80 วัน ขึ้นกับวัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ ระบบการหมักนี้เหมาะกับการป้อนวัตถุดิบทุกชนิดที่มีอัตราการผลิตที่มาก ถังย่อยหมักนี้ใช้บำบัดของเสียได้มากกว่า 10,000 m^3 ต่อปี



ภาพที่ 10-19 ถังหมักย่อยไม่ใช้อากาศแบบแนวตั้ง (Upright Standard Agricultural Digester)^[9]

ค) ถังหมักย่อยไม่ใช้อากาศแบบแนวตั้งขนาดใหญ่ (Upright Large Digester) ดังแสดงในภาพที่ 20 เหมาะกับปริมาณวัตถุดิบที่มาก มากกว่า $30,000 \text{ m}^3$ ต่อปี ถังหมักย่อยขนาดใหญ่แนวตั้งทำจากเหล็ก ที่เคลือบด้วยสารป้องกันสนิม และอาจใช้วัสดุสังเคราะห์เคลือบ ขนาดมาตรฐานอยู่ที่ระหว่าง $1,500 - 5,000 \text{ m}^3$ ความสูงระหว่าง $15 - 20 \text{ m}$ เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง $10 - 18 \text{ m}$ การกวนผสมให้เครื่องกวนติดตั้งที่จุดศูนย์กลางของหลังคา การจัดการดำเนินการอย่างต่อเนื่องมีการป้อนวัตถุดิบเพื่อทำการให้ความร้อนก่อนการหมักย่อยระยะเวลาในการกักเก็บอยู่ที่ 20 วัน เวลาที่กักเก็บที่สั้นแบบนี้สามารถใช้ได้เพราะว่าเป็นประโยชน์มาจากการกวนผสม และให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ถังหมักย่อยแบบนี้ใช้บำบัดของเสียมากกว่า $90,000 \text{ m}^3$ ต่อปีใน ต่อระบบ 1 ระบบ



ภาพที่ 10-20 ถังหมักไมใช้อากาศแบบแนวตั้งขนาดใหญ่ (Upright Large Digester) ^[9]

องค์ประกอบของปุ๋ยหมัก

คุณภาพของปุ๋ยหมักขึ้นกับลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ เทคโนโลยีการผลิตปุ๋ยหมักนั้น ซึ่งปุ๋ยหมักอินทรีย์จะค่อย ๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารไนโตรเจนอย่างช้า ๆ (Slow-release) เมื่อนำมาใช้กับดิน โดยปริมาณของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัตถุดิบ และค่าอัตราส่วนเริ่มต้นระหว่างธาตุคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ซึ่งจากการวิเคราะห์ส่วนประกอบของปุ๋ยหมักจากขยะของกรุงเทพมหานคร (ตารางที่ 3) พบว่ามีปริมาณธาตุไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมคิดเป็นร้อยละ 2.58 1.67 และ 0.58 ตามลำดับซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าปุ๋ยเคมีหลายเท่า ดังนั้นในการนำไปใช้ควรมีการใช้ร่วมกับปุ๋ยเคมี ^[2]

ตารางที่ 10-3 ส่วนประกอบของปุ๋ยหมักขยะของกรุงเทพมหานคร^[2]

ประเภท	ส่วนประกอบ (เทียบกับน้ำหนักแห้ง)
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (N)	2.58%
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (P ₂ O ₅)	1.67%
ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (K ₂ O)	0.58%
แมกนีเซียม (Mg)	0.49%
แคลเซียม (Ca)	6.20%
ซัลเฟอร์ (S)	0.37%
เหล็ก (Fe)	4.389%
แมงกานีส	0.158%
คอปเปอร์ (Cu)	0.094%
สังกะสี (Zn)	0.30%
โบรอน (B)	0.0513%
โมลิบดีนัม (Mo)	0.001%
คลอรีน (Cl)	0.66%
เปอร์เซ็นต์ความชื้น(moisture content)	23.86%
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	7.2

การใช้ประโยชน์ปุ๋ยหมัก

การนำปุ๋ยหมักมาใช้ประโยชน์ในการเกษตรกรรมโดยทั่วไปนั้นพบว่า ปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว สามารถนำกลับมาใช้เป็นวัสดุในการปรับปรุงดินทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพของดิน จากการศึกษาของ ปุ๋ยหมักสามารถช่วยปรับปรุงโครงสร้างของดิน เนื้อดิน ส่งเสริมการเชื่อมเกาะตัวของดิน การส่งผ่านของน้ำและอากาศ ทางด้านเคมี^[5]

ปุ๋ยหมักจะมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 0.4 1.3 และ 2.1 ตามลำดับของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งก็ตาม แต่ส่วนใหญ่ของไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ ซึ่งจะปลดปล่อยออกมาทีละน้อยในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ระหว่างฤดูกาลเพาะปลูก ทำให้การสูญเสียไนโตรเจนจากการชะล้างเกิดขึ้นได้น้อย ปุ๋ยหมักจะมีผลในแง่การปลดปล่อยธาตุอาหาร (Mineral element) ให้กับดิน และจะปลดปล่อยทีละน้อยโดย

ผ่านกระบวนการของจุลินทรีย์ดิน ทำให้การใช้ธาตุอาหารของพืชเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ^[23] นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยหมักร่วมกับปุ๋ยเคมีจะช่วยให้ฟอสเฟตที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมากขึ้น^[31] และทางด้านชีวภาพนั้นปุ๋ยหมักจะมีผลทำให้ปริมาณจุลินทรีย์บริเวณรอบรากพืช (Rhizosphere) พวกแบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจน (Nitrogen fixing) และแบคทีเรียที่ละลายฟอสเฟต (Phosphate-solubilizing bacteria) เพิ่มขึ้น และยังมีผลต่อการเพิ่มปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย แอคติโนมัยซิส และเชื้อราในดิน นอกจากนี้ยังมีผลต่อกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และการตรึงไนโตรเจน (Nitrogen fixation) เพิ่มขึ้นด้วย^[13]

ปุ๋ยหมักที่สลายตัวได้ที่ดีแล้วนั้นเป็นวัสดุที่ค่อนข้างจะคงต่อการสลายตัว^[1] ดังนั้น เมื่อใส่ลงไปในดิน ปุ๋ยหมักจึงสลายตัวต่อไปช้าๆ คงอยู่ในดินได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน การที่สามารถคงทนอยู่ได้เป็นระยะเวลาอันยาวนานนี้ทำให้ปุ๋ยหมักมีคุณค่าในการที่จะใช้ปรับปรุงบำรุงดินให้มีสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชที่เราปลูกเป็นระยะเวลาต่างๆ เช่น ตลอดระยะเวลาเจริญเติบโตของพืชไว้ ตั้งแต่เริ่มปลูกจนถึงเก็บเกี่ยว เป็นต้น นอกจากนี้ ในเนื้อปุ๋ยหมักยังมีแร่ธาตุอาหารพืชในปริมาณใกล้เคียงกับพวกมูลสัตว์ เมื่อใส่ลงไปในดินก็จะค่อยๆ ย่อยสลาย ปลดปล่อยแร่ธาตุเหล่านั้นออกมาให้พืชได้ใช้ไปเรื่อยๆ แม้ว่าจะเป็นการปริมาณไม่มากนัก แต่ก็ปลดปล่อยออกมาตลอดเวลาและสม่ำเสมอ เมื่อเราใส่ปุ๋ยหมักลงไปในดิน ปุ๋ยหมักที่ผสมคลุกเคล้าลงไปจะช่วยให้ดินมีลักษณะพรุนซุยขึ้น ทั้งยังค่อยๆ ย่อยปรับโครงสร้างของดินให้เกิดเป็นเม็ดดินขนาดเล็กๆ ขึ้นมาทำให้ดินมีลักษณะโปร่ง ร่วนซุย ระบายน้ำและระบายอากาศได้ดีขึ้น อันเป็นลักษณะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตแตกแขนงของราก พืชที่ปลูกจึงมีรากจำนวนมากและแข็งแรง สามารถดูดซึมน้ำและแร่ธาตุอาหารไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่เพียงแต่จะปรับให้ดินมีลักษณะโปร่ง ร่วนซุยขึ้นเท่านั้น การเกิดเป็นเม็ดดินเล็กๆ ประกอบกับลักษณะพรุนซุยของปุ๋ยหมักนี้ยังทำให้ดินมีความสามารถกักน้ำได้ดีขึ้น ดังนั้น ปุ๋ยหมักจึงมีประโยชน์สำหรับดินทรายหรือดินร่วนปนทรายที่ไม่ดูดซึมน้ำเพราะจะช่วยให้ดินเหล่านั้นจับตัวกันเป็นเม็ดดินได้ดี มีความสามารถกักน้ำหรือดูดซึมน้ำความชื้นไว้ในดินได้มากขึ้น นอกจากนี้ลักษณะต่างๆ ดังกล่าวมานี้ ปุ๋ยหมักยังมีคุณค่าในการปรับปรุงบำรุงดินในแง่อื่นๆ ได้อีก เช่น ลดการจับตัวเป็นแผ่นแข็งของหน้าดิน เพิ่มอัตราการซึมซาบของน้ำลงไปในดิน ช่วยลดการไหลบ่าของน้ำเวลาฝนตก เป็นการลดการพัดพาหน้าดินที่อุดมสมบูรณ์ไป

ปุ๋ยหมักจากขยะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้⁽²⁾ ดังนี้

ก) ใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์โดยตรง คุณสมบัติที่สำคัญของปุ๋ยหมัก ได้แก่ การเป็นตัวปรับสภาพดิน (Soil conditioner) ที่ดี มีความเสถียร (Stabilized) ง่ายเปื่อยช้า เมื่อใส่ปุ๋ยหมักจากขยะลงไปในดินจะช่วยในการปรับสภาพทางกายภาพของดิน ทำให้ดินมีความสามารถในการอุ้มน้ำ มีการระบายอากาศที่ดีขึ้น การเกิดแผ่นแข็งที่ผิวดิน (Surface crusting) ลดลง ซึ่งช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดี อย่างไรก็ตามในต้นปริมาณธาตุอาหารซึ่งมีน้อยจึงต้องมีการเติมปุ๋ยเคมีเพื่อช่วยให้มีธาตุอาหารที่พอเพียงต่อพืช

ข) ใช้เป็นอาหารให้แก่แพลงตอนพืช (phytoplankton) และสาหร่าย (algae) ให้เกิดการเจริญเติบโตได้ดี โดยจุลินทรีย์ในน้ำทะเลจะใช้อินทรีย์สารในปุ๋ยหมักจากขยะเป็นแหล่งอาหารเพื่อการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ โดยจะใช้ก๊าซออกซิเจนและปลดปล่อยก๊าซต่างๆ รวมทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญต่อการสังเคราะห์แสงของแพลงตอนพืชและสาหร่าย ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะให้ออกซิเจนซึ่งจำเป็นต่อการเผาผลาญอาหารของจุลินทรีย์ต่อไป

ค) ใช้เพิ่มมวลชีวภาพ (biomass) ของปลา ซึ่งจากการเปรียบเทียบมวลชีวภาพของปลาทั่วไปไม่จำเพาะเจาะจงที่เลี้ยงในบ่อที่มีการเพิ่มปริมาณปุ๋ยหมักจากขยะ และไม่มีการเพิ่มปริมาณปุ๋ยหมักจากขยะพบว่า ในปลาส่วนใหญ่จะไม่มี ความแตกต่างในมวลชีวภาพมากนัก แต่จะพบความแตกต่างได้อย่างชัดเจนในปลาพวกที่กินพืชเป็นอาหาร ซึ่งจะมีมวลชีวภาพมากในบ่อที่มีการเพิ่มปุ๋ยหมักจากขยะและแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดกับบ่อที่ไม่มีการเพิ่มปุ๋ยหมักจากขยะ ทั้งนี้ มิได้กล่าวถึงปริมาณโลหะหนักและสารพิษตกค้างในมวลชีวภาพในบ่อดังกล่าวแต่อย่างใด

ง) ใช้ในการปรับแต่งสภาพพื้นที่ เพื่อการปลูกต้นไม้ในสวนสาธารณะ การสร้างแหล่งนันทนาการ และการปลูกต้นไม้ริมถนน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- [1] ชวลิต ชงประยูร, 2529, เอกสารประกอบการอบรมหลักสูตร จุลินทรีย์กับการพัฒนาการเกษตร ระหว่างวันที่ 3-7 มีนาคม 2529 โดยศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติร่วมกับศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, จังหวัดนครปฐม. 102 น.
- [2] เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2524, การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ ฯ, 317 น.
- [3] Bertoldi, M.D., G. Vallini, A. Pera and F. Zucconi. 1982. Comparison of three windrow compost systems. **Biocycle** 23(2): 45-50.
- [4] Bertoldi, M.D., G. Vallini and A. Pera. 1983. The biology of composting: A review. **Waste Manage. And Res.** 1: 157-176
- [5] Brinton, W.F., 1979, The Effect of Different Fertilizer Treatments on Humus Quality. **Compost Sci. and Land Utilization** 20(5): 38-41.
- [6] Chang, Y. and H.J. Hudson. 1967. The fungi of wheat straw compost. I. **Ecological studies Trans. Brit. Mycol. Soc.** 50(4): 649-666.
- [7] Crawford, J.H. 1983. Composting of Agricultural Waste: A Review. **Process Biochem.** 18: 14-18.
- [8] Elfving, D.C., C.A. Bache, W.H. Gutenmann and D.J. Lisk. 1981. Analyzing Crops Grown on Waste-amended Soils Biocycle. **Adv. Appl. Microbiol.** 22(6): 44-47.
- [9] Fischer, T. and A. Krieg. n.d. Planning and Construction of Biogas Plants. Krieg & Fischer Ingenieure GmbH, Germany. Available source: www.KriegFischer.de, April 9, 2005.
- [10] Gaur, A.C. 1980. Fundamentals of composting. **Compost Technol. Project Field Document.** 13: 7-14
- [11] Gaur, A.C., K.V. Sadasivam, R.S. Mathur and S.P. Magu. 1982. Role of mesophilic fungi in composting. **Agric. Wastes** 4(6):453-468

- [12] Goluek, C.G., 1982. **Composting a Study of the Process and its Principles** **Ennaus**, Rodale Press Inc. Book Division, New york. 440 p.
- [13] Gupta, R.D., K.K. Jha and S.P. Dev. 1983. Effect of Fertilizers and Organic Manures on the Microflora and Microbiological Process in Soils. **India J. Agr. Sci.** 53(4): 266-270.
- [14] Haug, R.T. 1979. Engineering principles of sludge composting. **J. Water Pollution Control Fed.** 51: 2189-2195.
- [15] Haug, R.T. 1993. **The Practical Handbook of Compost Engineering**. Lewis Publishers.USA.
- [16] JICA. 1981. **The Bangkok Solid Waste Management Study in Thailand**. Interim Report. Bangkok, Thailand. 126 P.
- [17] Metcalf and Eddy, Inc, 1974, **Wastewater Engineering Collection, Treatment, Disposal**. Mc Graw-Hill Publishing Company, New Delhi, 782 p.
- [18] Moubasher, A.H., S.I.I. Abdel-Hafez, H.M. Abdel-Fattah and A.M. Moharram. 1982 Fungi of wheat and broad-bean straw composts: I. Mesophilic fungi. **Mycopathologia**. 78: 161-168.
- [19] Nishio, N.,H. Kurisu and S. Nagai. 1981. Thermophilic cellulase production by *Taralomyces* sp. In solid-state cultivation. **J. Ferment. Technol.** 59(5): 407-410
- [20] O'Leary, P.R. and P.W. Walsh. 1995. **Decision Maker's Guide to Solid Waste Management, Volume II**. EPA530-R-95-023, Office of Solid Waste, Municipal and Industrial Solid Waste Division, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- [21] Polprasert, C. 1996. **Organic Waste Recycling**. John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England. 412 p.
- [22] Romanelli, R.A., C.W. Houston and S.M. Barnett, 1975, Studies on thermophilic Cellulolytic fungi. **Appl. Microbiol.** 32(2):276.
- [23] Stefen, R. 1979. The Value of Composted Organic Matter in Building Soil Fertility. **Compost Sci. and Land Utilization** 20(5): 34-37.

- [24] Stuetzenberger, F.J., A.J. Kaufman and R.D. Lossin. 1970. Cellulolytic Activity in municipal Solid Waste Composting. **J. Microbiol** 16: 553-560
- [25] Suler, D. J. and M.S. Finstein, 1977. Effect of temperature aeration and moisture on CO₂ Formation on bench-scale, continuously thermophilic composting of solid waste. **Appl. Environ. Microbiol** 33(2): 345-350
- [26] Tengerdy, R.P. 1985. Solid sunstrate fermentation. **Trends in Biotech** 3(4): 96-99.
- [27] Trautmann, N. and E. Olynciw. n.d. A Compost Microorganisms. Available source: <http://www.cfe.cornell.edu/compost/AdvancedMicrobes.html>, January 29, 2002
- [28] Trautmann, N. and E. Olynciw. n.d.b Invertebrates of the Compost Pile. Available source: <http://www.cfe.cornell.edu/compost/microorg.html>, January 29, 2002
- [29] Updegraff, D.M. 1972. Microbiological aspects of solid-waste-composting Develop. **Ind. Microbiol** 13: 16-23
- [30] US.EPA. 1994. **Composting of Yard Trimmings and Municipal Solid Waste**. EPA530-R-94-003. Office of Solid Waste and Emergency Response. 141 P.
- [31] Vyas, M.K. and D.P. Motiramani.1971. Effect of Organic-matter, Silicates, and Moisture Levels on Availability of Phosphate. **J. India Soc. Soil Sci.** 19: 39-43.
- [32] Zadrazil, F. and H. Brunnert. 1981. Investigation of physical parameters important for the solid state fermentation of straw by white rot fungi. **Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.** 11: 183-188

แบบฝึกหัดท้ายบท

ตอนที่ 1 จงเลือกข้อที่ถูกต้องที่สุด

1. ผลิตภัณฑ์ก๊าซใดที่ได้จากการย่อยมูลฝอยอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน?
 - 1) มีเทน
 - 2) คาร์บอนไดออกไซด์
 - 3) ไนโตรเจน
 - 4) มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์
 - 5) ถูกทุกข้อ
2. ข้อใดเรียงลำดับปฏิบัติการย่อยสลายชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนถูกต้อง?
 - 1) Methanogenesis, Hydrolysis, Acidogenesis, Acetogenesis
 - 2) Hydrolysis, Acidogenesis, Acetogenesis, Methanogenesis
 - 3) Acetogenesis, Hydrolysis, Acidogenesis, Methanogenesis
 - 4) Acidogenesis, Hydrolysis, Acetogenesis, Methanogenesis
 - 5) Hydrolysis, Acidogenesis, Methanogenesis, Acetogenesis
3. ข้อใดเรียงลำดับตามเฟสของการหมักได้ถูกต้อง?
 - 1) Thermophilic, Mesophilic, Cooling, Maturing
 - 2) Cooling, Mesophilic, Thermophilic, Maturing
 - 3) Mesophilic, Thermophilic, Cooling, Maturing
 - 4) Maturing, Mesophilic, Thermophilic, Cooling
 - 5) Mesophilic, Maturing, Thermophilic, Cooling
4. จงคำนวณหาปริมาณออกซิเจนต้องการทำทฤษฎี ของการหมักขยะอินทรีย์ที่มีส่วนประกอบดังสูตรนี้ $C_{31}H_{50}O_{26}N$ ป้อนเข้าระบบ 1,000 กิโลกรัม เหลือ 200 กิโลกรัม สูตรของผลิตภัณฑ์เป็น $C_{11}H_{14}O_4N$ จงคำนวณหาปริมาณออกซิเจนสำหรับ ปริมาณขยะ 1,000 กิโลกรัม?
 - 1) 683 กิโลกรัม
 - 2) 783 กิโลกรัม
 - 3) 883 กิโลกรัม
 - 4) 983 กิโลกรัม
 - 5) 583 กิโลกรัม

ตอนที่ 2 จงตอบคำถามต่อไปนี้

1. ในระบบหมักทำปุ๋ยมูลฝอยร่วมกับตะกอนน้ำเสียชุมชนแห่งหนึ่ง มีปริมาณมูลฝอยเข้าระบบ 80 ตันต่อวัน หากความชื้นที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการหมักคือ 60% ส่วนมูลฝอยและตะกอนน้ำเสียมีสัดส่วนของแข็งรวมเท่ากับ 70% และ 20% ตามลำดับ จงคำนวณหา?
 - 2.1 ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ต้องการต่อวันเพื่อนำมาผสมกับมูลฝอย
 - 2.2 สัดส่วนของการหมุนเวียนผลิตภัณฑ์ปุ๋ย หากต้องการนำผลิตภัณฑ์ปุ๋ยซึ่งมีความชื้น 40% กลับมาผสมกับตะกอนน้ำเสียแทนมูลฝอย
2. จงอธิบายขั้นตอนเป็นลักษณะแผนผัง (Flow chart) Composting System Design ของการออกแบบงานจัดการขยะ?