

การตรวจเอกสาร

การหมักปุ๋ย คือกระบวนการทางชีวเคมีที่จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม และแปรสภาพไปเป็นสารฮิวมิก (humic substance) วัสดุที่ได้จากการย่อยสลายมีลักษณะเป็นสีดำหรือน้ำตาลปนดำ มีความคงทนต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า ปุ๋ยหมัก (compost) การใส่ปุ๋ยหมักลงสู่ดินจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของดินทั้งสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ทำให้ดินเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ปุ๋ยหมักเมื่อใส่ในดินจะถูกย่อยสลาย และปลดปล่อยธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมาทั้งธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุ

1. ชนิดและปริมาณวัสดุเหลือใช้ที่มีศักยภาพในการผลิตปุ๋ยหมัก

วัสดุเหลือใช้ในประเทศไทยที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตปุ๋ยหมักนั้น ประกอบด้วยวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรบางประเภท วัชพืชต่าง ๆ และวัสดุขยะมูลฝอยจากชุมชน ซึ่งประเมินปริมาณรวมวัสดุเหลือใช้ทั้งหมดมีจำนวน 97.59 ล้านตันต่อปี (ฉวีวรรณ และคณะ, 2544) ได้แก่

1.1 วัสดุเหลือใช้จากเกษตร มีจำนวน 60.65 ล้านตันต่อปี โดยส่วนใหญ่ประกอบด้วย ฟางข้าว เศษต้นข้าวโพด ข้าวฟ่าง เศษต้นพืชตระกูลถั่วและมูลสัตว์ มีปริมาณ 25.45, 8.75, 2.23 และ 24.22 ล้านตันต่อปี ตามลำดับ

1.2 วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตร มีจำนวน 23.89 ล้านตันต่อปี ซึ่งประกอบด้วย กากอ้อย ชังข้าวโพด แกลบ ชี้อ้อย และวัสดุเศษมันสำปะหลัง มีปริมาณ 13.53, 1.26, 3.16, 1.44 และ 4.50 ล้านตันต่อปี ตามลำดับ นอกจากนี้ในโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรบางประเภทมีวัสดุเหลือใช้ที่เป็นของเหลว ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการผลิตปุ๋ยหมักอื่นได้แก่ น้ำทิ้งจากโรงงานน้ำตาล โรงงานสุรา โรงงานเบียร์ โรงงานแป้งมันสำปะหลัง และโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อาหารและผลไม้แปรรูป

1.3 วัสดุจากขยะมูลฝอยชุมชน มีจำนวน 12.50 ล้านตันต่อปี วัสดุดังกล่าวนี้จะเป็นส่วนของเศษอาหาร ผัก และผลไม้ เป็นต้น

1.4 วัชพืช วัชพืชที่มีปริมาณสูง ได้แก่ ผักตบชวา มีจำนวน 1 ล้านตันต่อปี นอกจากนั้นยังมีวัชพืชน้ำจำพวก ธูปฤาษี และจอก ซึ่งเจริญเติบโตอยู่ในคลองและบึง เป็นต้น

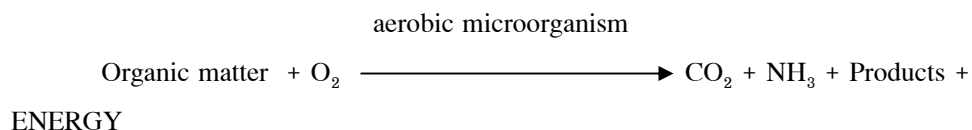
2. กระบวนการหมัก

การหมักวัสดุอินทรีย์ให้เป็นปุ๋ยหมักสามารถทำได้หลายรูปแบบ โดยหลักการแล้วเป็นการทำให้วัสดุอินทรีย์เปื่อยขึ้นมากพอที่จะทำให้จุลินทรีย์ชนิดต่างๆ เข้าย่อยสลาย เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานในการดำรงชีวิต กระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์อาจเป็นกระบวนการทางชีวเคมีแบบใช้ออกซิเจนที่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว หรือเป็นกระบวนการทางชีวเคมีแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งกระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นได้ช้ากว่า กระบวนการทั้งสองแบบเกิดขึ้นควบคู่กันไป และเกิดแบบไหนมากกว่ากันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมภายในกองปุ๋ยหมัก โดยทั่วไปการกองอาจทำได้หลายวิธี เช่น การกองในหลุม การกองบนพื้น การกองแบบมีเครื่องจักรในการผสมคลุกเคล้าวัสดุ และให้อากาศ หรือการกองแบบพ่นอากาศเข้าไปในกอง แต่ละกรรมวิธีมีผลต่อความเร็วในการแปรสภาพของวัสดุและคุณภาพของปุ๋ยหมักที่ได้ ช่วงแรกของการกองจะมีความร้อนเกิดขึ้นภายในกองปุ๋ยหมัก ซึ่งเป็นความร้อนที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์จะถูกย่อยสลายไปบางส่วน และมีการแปรสภาพของโมเลกุลกลายเป็นสารฮิวมิกบางส่วนและมีการสร้างสารประกอบฮิวมิกขึ้นมาอีกบางส่วนโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ สารฮิวมิกที่เกิดขึ้นในช่วงแรกนี้ลักษณะโมเลกุลไม่ซับซ้อนมาก แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป โมเลกุลสารฮิวมิกจะใหญ่ขึ้นมีโครงสร้างซับซ้อนยิ่งขึ้น และมีความคงทนต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้มากขึ้น ในที่สุดเมื่อหมักไปได้ระยะเวลานานพอ สารฮิวมิกจะมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ มีโครงสร้างซับซ้อน ทนทานต่อการย่อยสลายในดิน และมีความสามารถสูงในการปรับปรุงสมบัติของดิน ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างของดินหรือสมบัติทางเคมีของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity) ของดิน (Day and Shaw, 2001)

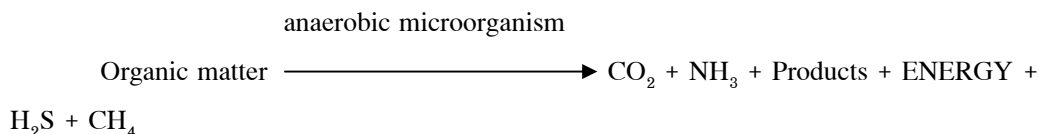
3. ประเภทการหมัก

การหมักสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (Day and Shaw, 2001) ได้ดังนี้

3.1 การหมักแบบใช้ออกซิเจน (aerobic composting) เป็นกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในสภาพที่มีออกซิเจนโดยจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน ซึ่งสามารถแสดงสมการทางชีวเคมีได้ดังนี้



3.2 การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic composting) เป็นกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในสภาพที่ปราศจากออกซิเจนโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งสามารถแสดงสมการทางชีวเคมีได้ดังนี้



4. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกระบวนการหมัก

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในกระบวนการหมัก และมีความสัมพันธ์กับกิจกรรมของจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ (Polprasert, 1989) ดังนี้

4.1 Latent phase เป็นช่วงเวลานั้น ๆ ในระยะแรกของการหมัก อุณหภูมิในกองจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากจุลินทรีย์กำลังปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมภายในกองปุ๋ยหมัก

4.2 Mesophilic phase จุลินทรีย์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น และผลจากการย่อยสลายอินทรีย์สารชนิดต่าง ๆ ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้น อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25-40 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายอินทรีย์สารในช่วงนี้ คือ mesophilic microorganism

4.3 Thermophilic phase การย่อยสลายอินทรีย์สารโดยจุลินทรีย์ทำให้อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ mesophilic microorganism ตายหรือหยุดทำงานชั่วคราว แต่การย่อยสลายยังคงดำเนินต่อไปโดยจุลินทรีย์พวก thermophilic microorganism ที่สามารถดำเนินกิจกรรมได้ในช่วงอุณหภูมิ 50-65 องศาเซลเซียส เมื่ออินทรีย์สารถูกย่อยสลายมากขึ้น พลังงานความร้อนจากกระบวนการหมักจะสูญเสียความร้อนในกองปุ๋ยหมักออกสู่บรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักลดลง

4.4 Maturation phase เมื่ออุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักลดลงจนอยู่ในช่วง mesophilic phase จุลินทรีย์จำพวก mesophilic microorganism จะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายอินทรีย์สารอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเปลี่ยนอินทรีย์สารที่มีโครงสร้างซับซ้อนไปเป็นสารประกอบที่มีลักษณะคงทนที่เรียกว่า สารฮิวมิก จากนั้นอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักจะลดลงจนใกล้เคียงอุณหภูมิบรรยากาศโดยรอบ แสดงว่ากระบวนการหมักเสร็จสมบูรณ์

5. จุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก

การย่อยสลายของอินทรีย์สารในกองปุ๋ยหมักเกิดจากกิจกรรมร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิด จุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สาร ได้แก่ เชื้อรา แอคติโนมัยซีท และแบคทีเรีย (Dindal, 1978) ซึ่งสามารถจำแนกความสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายได้ดังนี้

5.1 เชื้อรา (fungi) เชื้อราเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายอินทรีย์สารในช่วงที่มีอุณหภูมิไม่สูงเกินไป จากการศึกษาของ Romanelli *et al.* (1975) พบว่าเชื้อราที่ชอบอุณหภูมิสูงและสามารถย่อยเซลลูโลสจะเจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส และการเติมสารประกอบไนโตรเจนในวัสดุประเภทเซลลูโลสจะทำให้เชื้อราเหล่านี้เพิ่มอัตราการย่อยสลายมากขึ้น การทดลองของ Gaur (1980) ได้คัดเลือกเชื้อราที่มีประสิทธิภาพดีในการย่อยสลายเซลลูโลส ซึ่งสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้สูง ได้แก่ เชื้อราจำพวก *Penicilium* sp. และ *Asperillus* sp. ใส่ลงในกองปุ๋ยหมักฟางข้าว โดยควบคุมความชื้นและการระบายอากาศ พบว่าอัตราการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่า C/N ratio ในช่วง 1 เดือนแรกลดลงเหลือเพียง 19.6 และ 23.6 ตามลำดับ ขณะที่กองปุ๋ยหมักไม้ใส่เชื้อมีค่า C/N ratio เท่ากับ 31.4 นอกจากนี้เชื้อรายังเป็นจุลินทรีย์ที่เจริญได้ดีในช่วง pH ที่ค่อนข้างกว้าง คือ สามารถเจริญได้ในสภาพที่เป็นกรดประมาณ pH 4.0 และบางสายพันธุ์สามารถเจริญได้ที่ pH 2.0 เมื่อ pH เพิ่มขึ้นเป็น 9.0 เชื้อราบางชนิดก็ยังสามารถมีชีวิตรอดอยู่ได้ (Cosico, 1985) อย่างไรก็ตามเชื้อราจะไม่ทนต่ออุณหภูมิที่สูงเกินไป มีรายงานว่าอุณหภูมิสูงกว่า 55-60 องศาเซลเซียส เชื้อราจะไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้โดยทั่วไปเชื้อราเป็นจุลินทรีย์ที่ต้องการไนโตรเจนและความชื้นในการเจริญน้อยกว่าแบคทีเรียและแอคติโนมัยซีท (Haug, 1979)

5.2 แอคติโนมัยซีท (actinomycete) จุลินทรีย์พวกนี้เจริญได้ช้ากว่าพวกเชื้อราและแบคทีเรีย แอคติโนมัยซีทที่พบในกองปุ๋ยหมักมีหลายชนิดที่ทนต่อความร้อนในกองปุ๋ยได้ดี เช่น *Thermoactinomyces* sp., *Thermomonospora* sp. ซึ่งสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ดี และยังมีพวก *Streptomyces* sp. และ *Micromonospora* sp. ที่พบมากและสามารถย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในกองปุ๋ยหมักขณะที่มีอุณหภูมิสูง (วนิดา, 2532) แอคติโนมัยซีทเป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่ต้องการความชื้นน้อยในการเจริญเติบโต ถ้าหากมีความชื้นประมาณ 85-100% จะพบแอคติโนมัยซีทลดน้อยลง แต่จะเจริญได้ดีใน pH ที่ค่อนข้างเป็นด่าง ถ้าค่า pH ลดต่ำกว่า 5.0 และอยู่ในสภาพขังน้ำ หรือขาดออกซิเจน จะทำให้เชื้อแอคติโนมัยซีทลดปริมาณลงอย่างรวดเร็ว แอคติโนมัยซีทจะเจริญช้ากว่าแบคทีเรียและเชื้อรา จึงพบได้น้อยในช่วงแรกของการย่อยสลาย แต่จะพบมากในช่วงท้ายของการย่อยสลาย ซึ่งเหลือแต่สารประกอบอินทรีย์ที่ทนทานต่อการย่อยสลาย โดยเชื้อแอคติโนมัยซีทมีความสามารถในการย่อยสลายอินทรีย์สารที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดี จึงมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายเซลลูโลส ลิกนิน และไคติน (Cosico, 1985)

5.3 แบคทีเรีย (bacteria) เป็นจุลินทรีย์ที่พบปริมาณมากและมีบทบาทสำคัญในกองปุ๋ยหมัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกๆ ของการย่อยสลาย และช่วงที่มีอุณหภูมิสูงในกองปุ๋ยหมัก จากการศึกษาของ Strom (1985) ได้จัดจำแนกแบคทีเรียในช่วง thermophilic stage ประมาณ 87% เป็น *Bacillus* sp. เช่น *B. subtilis*, *B. stearothermophilic* และ *B. licheniformis* ความหลากหลายของโคไลน้อาจลดลงเมื่ออุณหภูมิภายในกองเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปเชื้อแบคทีเรียมักจะพบในปริมาณที่มากกว่าเชื้อจุลินทรีย์ชนิดอื่นเสมอ และจะพบมากในช่วงระยะแรกของการย่อยสลาย โดยจะมีปริมาณสูงถึง $10^8 - 10^9$ cfu g⁻¹ และคาดว่าประมาณ 80-90% ของกิจกรรมการย่อยสลายอาจเกิดจากแบคทีเรีย (Goluek, 1977) ขณะที่กองปุ๋ยหมักที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง mesophilic stage จะพบ mesophilic bacteria หลายชนิด เช่น Nitrogen-Fixers, Sulfur-Oxidizers, Hydrogen-Oxidizers, Nitrifiers และ Bacterial Humin (Beffa et al., 1996)

6. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหมัก

6.1 สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ของวัตถุดิบ เป็นปัจจัยสำคัญที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุตั้งกล่าวจะย่อยสลายได้เร็วหรือช้า และใช้เป็นตัวกำหนดระดับความสำเร็จสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก กล่าวคือถ้าวัสดุที่ใช้ทำปุ๋ยหมักมีค่า C/N ratio สูงมาก ๆ อัตราการย่อยสลายจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ (De Bertoldi et al., 1983) คาร์บอนในอินทรีย์สารจะเป็นแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ในกองปุ๋ยหมัก ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างโครงสร้างของเซลล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายจะได้พลังงานออกมา จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนมากขึ้น การเพิ่มจำนวนนี้จะมีการสร้างเซลล์ใหม่ จุลินทรีย์จึงต้องการไนโตรเจนซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นในการสังเคราะห์เซลล์ (Gotaas, 1976) Martins and Dewes (1992) กล่าวว่า ถ้า C/N ratio ของวัตถุดิบ มีค่าอยู่ในช่วง 25-35 การหมักจะมีประสิทธิภาพที่สุด แต่ถ้า C/N ratio มีค่าสูงกว่า 35 กระบวนการหมักจะช้าลง ขณะที่ C/N ratio มีค่าต่ำกว่า 20 จะมีการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ในระหว่างกระบวนการหมักอินทรีย์วัตถุจะถูกย่อยสลายเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แล้วระเหยออกจากกองปุ๋ยหมัก ขณะที่ไนโตรเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปอินทรีย์สารในกอง ทำให้ C/N ratio มีค่าลดลง (Vuorinen and Saharinen, 1997; Day et al., 1998) ในกรณีที่วัตถุดิบมีค่า C/N ratio สูงมาก ๆ อาจมีการเติมสารประกอบไนโตรเจน ในรูปของปุ๋ยเคมี หรืออินทรีย์สารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่สูง เช่น มูลสัตว์ วัสดุเหลือทิ้งบางชนิดจากโรงงานอุตสาหกรรม ขยะเทศบาล หรือกากตะกอนน้ำเสีย (Goluek, 1977) เพื่อยกระดับปริมาณไนโตรเจนให้สูงขึ้น หรือทำให้ค่า C/N ratio ของกองปุ๋ยหมักลดต่ำลง กระบวนการย่อยสลายภายในกองปุ๋ยหมักจึงเกิดได้รวดเร็วขึ้น (Gaur, 1980)

6.2 การระบายอากาศ การระบายอากาศหรือการเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้แก่กองปุ๋ย อาจทำได้โดยการพลิกกลับกองปุ๋ย นอกจากจะมีผลดีในการระบายอากาศแล้ว ยังช่วยคลุกเคล้าเศษ

วัสดุต่างๆ ให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ การพลิกกลับกองในช่วงเวลาที่เหมาะสมจะทำให้กิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง พืษยากร และคณะ (2534ก) ศึกษาวิธีการระบายอากาศต่อกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักฟางข้าว พบว่าการพลิกกลับกองปุ๋ยหมักทุกๆ 10 วัน ทำให้ปริมาณจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 วันแรกของการหมัก Finstein and Morris (1975) ศึกษาลักษณะการแพร่กระจายของออกซิเจนในกองปุ๋ยหมัก พบว่าบริเวณผิวนอกจะมีปริมาณออกซิเจนมาก และจะลดลงเมื่อลึกเข้ากลางกองปุ๋ยหมัก จากการพลิกกลับกองช่วยให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 10.1 เป็น 18.0% จากการศึกษาของ De Bertoldi *et al.* (1983) พบว่ากระบวนการย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ต้องการอากาศจัดเป็นปฏิกิริยาประเภท biological oxidation ซึ่งปัจจัยที่สำคัญคือ ก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในการรับอิเล็กตรอนที่ถ่ายมาจากระบบ respiratory chain ในเซลล์ของจุลินทรีย์ ดังนั้นการระบายอากาศจึงจำเป็นต่อการเพิ่มออกซิเจนให้เพียงพอต่อกระบวนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ ปริมาณอากาศที่ต้องการในการหมักแบบใช้ออกซิเจนนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่นำมาหมัก แต่ปริมาณออกซิเจนจะต้องไม่ต่ำกว่า 18% Diaz *et al.* (2002) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหมักของ vinasse และเมล็ดฝ้ายที่มีระบบการให้อากาศแบบพลิกกลับกองและแบบเติมอากาศ พบว่าอุณหภูมิในระบบแบบพลิกกลับกองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และสูงถึง 57 องศาเซลเซียส ใน 7 วัน ซึ่งสูงกว่าระบบแบบเติมอากาศที่มีอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ใน 21 วัน

6.3 ความเป็นกรดหรือด่าง (pH) ในกระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจน pH ของกองปุ๋ยหมักใกล้เคียงความเป็นกลาง และไม่บ่อยครั้งนักที่จะพบว่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นอย่างรุนแรง โดยปกติเมื่อเริ่มการหมักค่า pH มักลดลงเล็กน้อยในช่วงหนึ่งถึงสองวันแรก เนื่องจากเกิดกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจะผลิตกรดไขมันออกมา หลังจากช่วงเวลานี้ค่า pH จะเพิ่มขึ้นกลับมาเป็นกลางอีกครั้ง เมื่อกรดไขมันที่ผลิตถูกเปลี่ยนรูปให้เป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปฏิกิริยาจาก methane-forming bacteria (Polprasert, 1996) Gray *et al.* (1971) พบการเปลี่ยนแปลง pH ของการหมักและสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงแรกค่า pH ลดลงเล็กน้อยในช่วง 5.0-5.5 (mesophilic stage) จากนั้นค่า pH จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกิดเป็นด่างประมาณ 8.0-9.0 ในช่วง thermophilic stage ต่อมาค่า pH ลดลงมาเล็กน้อยในช่วง cooling down stage และท้ายสุด pH จะลดลงจนมีค่าประมาณ 7.0-8.0 ในช่วง maturing stage โดยทั่วไปเชื่อเราสามารถทนต่อระดับ pH ได้ในช่วงกว้างมากกว่าพวกแบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 6.0-7.5 ส่วนช่วงที่เหมาะสมสำหรับเชื้อราโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 5.5-8.0 De Bertoldi *et al.* (1983) รายงานว่าโดยทั่วไปวัสดุที่มี pH อยู่ในช่วง 3.0-11.0 สามารถนำมาทำปุ๋ยหมักได้ แต่ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงประมาณ 5.5-8.0 การใช้วัสดุที่มีค่า pH สูง อาจทำให้มีการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของก๊าซแอมโมเนียในช่วงแรกของการหมักเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องมาจากเกิดกระบวนการ ammonia volatilization

6.4 ความชื้น ความชื้นเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก เนื่องจากเป็นตัวกลางในการส่งผ่านอาหาร และออกซิเจนจากวัสดุที่ใช้หมักและอากาศสู่จุลินทรีย์ ตลอดจนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านเอนไซม์เข้าไปย่อยสลายวัสดุที่ใช้หมัก (Tengerdy, 1985) Haug (1980) กล่าวว่าปริมาณน้ำในวัสดุหมักมีผลต่อช่องว่างอากาศโดยตรง ถ้าความชื้นมากเกินไปจะทำให้สัดส่วนของช่องว่างอากาศต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุหมักลดลง ซึ่งทำให้การไหลผ่านของอากาศเป็นไปได้ยาก อาจทำให้เกิดการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และเมื่อเติมอากาศจะทำให้อากาศส่วนหนึ่งถูกใช้ในการระเหยน้ำแทนการใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี แต่ถ้าความชื้นต่ำเกินไปก็ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยความชื้นที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักจะเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของขนาดวัสดุหมักและระบบที่ใช้ในการหมัก ในทางปฏิบัติช่วงความชื้นเริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 50-70% โดยมวล (Rabbani *et al.*, 1983) จากการศึกษาของ Gaur *et al.* (1982) พบว่าการย่อยสลายในสภาพที่มีอากาศจะเกิดขึ้นได้ในช่วงความชื้น 30-100% โดยมวล แต่ถ้าความชื้นต่ำกว่า 40% โดยมวล การย่อยจะเกิดอย่างช้าๆ โดยความชื้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 40-80% โดยมวล ส่วนการย่อยสลายวัสดุที่มีเส้นใย และความหนาแน่นต่ำ เช่น ฟางข้าว ควรรักษาระดับความชื้นให้อยู่ในช่วง 80-85% โดยมวล Goluek (1972) กล่าวว่าความชื้นที่เหมาะสมในการหมักคือ 50-70% โดยมวล แต่ถ้าการหมักเป็นแบบแคบและกองตามยาว (windrow) อาจมีความชื้นต่ำกว่านี้ได้ ในขณะเดียวกันถ้าการหมักโดยใช้ระบบแบบเติมอากาศด้วยเครื่องจักรกลความชื้นอาจสูงกว่านี้ได้

6.5 ขนาดวัสดุ ขนาดของวัสดุที่ใช้หมักเริ่มต้นมีความสำคัญมาก โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีขนาดเล็กจะย่อยสลายได้เร็วกว่าวัสดุที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวให้กับจุลินทรีย์ได้สัมผัสมากขึ้น แต่ถ้าวัสดุมีขนาดละเอียดมากเกินไป ก็จะไปขัดขวางการแพร่ของออกซิเจนที่จะเข้าไปในกองปุ๋ยในช่วง thermophilic เพราะว่าเป็นช่วงที่มีความต้องการออกซิเจนมากที่สุด แต่ถ้าขนาดเริ่มต้นมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้กองปุ๋ยหมักแห้งได้ง่าย และทำให้ปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการหมักในระยะต่อมา (อนุภาพ, 2541; Gray *et al.*, 1971) วัสดุที่มีขนาดเล็กมากเกินไปอาจเพิ่มความพรุนของวัสดุโดยการนำมาผสมกับวัสดุเพิ่มความโปร่งของกองปุ๋ยหมัก เช่น ใบไม้แห้ง ชังข้าวโพด ชันไม้ และขานอ้อย ก่อนนำไปหมัก ขนาดของวัสดุที่เหมาะสมควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1.3-7.6 เซนติเมตร (US.EPA, 1995) JICA (1982) แนะนำว่าขนาดของวัสดุหมักที่เหมาะสมคือ 1.27-3.81 เซนติเมตร ส่วนพัชรี (2529) ได้รายงานขนาดที่เหมาะสมของวัสดุหมักว่าควรมีขนาด 2.5 ถึง 7.5 เซนติเมตร

6.6 อุณหภูมิ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในกองปุ๋ยหมักเกิดจากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารของจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานขึ้น ซึ่งพลังงานส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์ภายในเซลล์ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปความ

ร้อน ซึ่งอุณหภูมิเป็นตัวกำหนดชนิดของจุลินทรีย์ และอัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้น (Miller, 1993; Polprasert, 1996) อุณหภูมิที่สูงกว่า 55 องศาเซลเซียส สามารถทำลายเชื้อโรคได้ ส่วนอุณหภูมิระหว่าง 45-55 องศาเซลเซียส อัตราการย่อยสลายของอินทรีย์สารจะมีค่าสูงสุด ขณะที่อุณหภูมิระหว่าง 35-45 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักจะมีความหลากหลายสูงสุด (Stentiford, 1996) Tiquia *et al.* (2002) พบว่าจำนวนของ aerobic heterotrophs แอคติโนมัยซีท และเชื้อราจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักเริ่มสูงถึง 70 องศาเซลเซียส Haug (1980) ได้อธิบายว่าการย่อยสลายของอินทรีย์สารเกิดขึ้นภายในช่วงอุณหภูมิ thermophilic มากที่สุด หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลง และในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการหมักจะเหลืออินทรีย์สารที่ย่อยสลายได้ยาก สามารถเก็บไว้ได้นาน และใช้ปรับปรุงสมบัติของดินได้

7. วิธีการทำปุ๋ยหมัก

วิธีการทำปุ๋ยหมักสามารถทำได้ทั้งวิธีกองบนพื้น ในหลุม หรือให้วัสดุใช้เวลาในการย่อยสลายเองตามธรรมชาติ ตลอดจนการใช้เครื่องจักรกลในกระบวนการหมัก ซึ่งช่วยให้การย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุใช้ระยะเวลาสั้นลงกว่าธรรมชาติ เทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการหมัก (กรมควบคุมมลพิษ, 2536) มีหลายระบบได้แก่

7.1 Windrow system เป็นการนำเอาวัสดุมากองตามยาว บนพื้นราบให้ได้ความสูงที่พอเหมาะ และการระบายอากาศภายในกองปุ๋ยเกิดขึ้นได้ดี เพื่อที่จะให้การย่อยสลายเกิดได้ดี และในระหว่างการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุต้องมีการพลิกกลับกองปุ๋ย เพื่อให้อากาศเข้าสู่ภายในกองได้ทั่วถึงมากขึ้น และวัสดุหมักมีการผสมคลุกเคล้ากันดีขึ้น เป็นการเร่งกระบวนการหมักและป้องกันการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

7.2 Static composting system เป็นวิธีการหมักคล้ายกับ Windrow System แต่ฐานของกองปุ๋ยหมักจะทำในลักษณะที่ให้อากาศภายนอกเข้าสู่กองได้ทั่วถึงขึ้น เช่น การใช้ไม้ไผ่เจาะช่องระบายอากาศเรียงเป็นฐาน หรือใช้เครื่องเป่าอากาศเข้าสู่ภายในกองปุ๋ยหมัก

7.3 Round trip paddling fermentator การหมักระบบนี้ วัสดุหมักจะถูกปล่อยจากเครื่องโปรยวัสดุลงสู่ชั้นหมักแบบลักษณะเคลื่อนไปมา วัสดุเหล่านี้จะย่อยสลายในชั้นหมัก โดยรับอากาศตลอดเวลาการหมัก ในชั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 8 วัน นำออกมาหมักบ่มอีกครั้งที่ลานตาก เพื่อให้การย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์มากขึ้น

7.4 Dynamic composting system การหมักระบบนี้วัสดุหมักจะถูกย่อยสลาย โดยการทำให้เคลื่อนตัวอย่างช้า ๆ ภายในถังหมักที่หมุนตลอดระยะเวลาแรกของการหมัก 1-2 วัน จุลินทรีย์ที่

ก่อให้เกิดโรคจะถูกทำลายจากความร้อน จากนั้นนำวัสดุหมักที่ย่อยสลายแล้วนำมาหมักบ่มที่ลานตาก เพื่อให้ย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์มากขึ้น

7.5 In-vessel composting system การหมักระบบนี้จะคล้ายกับระบบ Windrow และ Static composting แต่เป็นการหมักในภาชนะปิดที่ถูกทำให้เคลื่อนที่ตลอดเวลาด้วยเครื่องจักร จนกระทั่งสิ้นสุดการย่อยสลาย ระบบนี้ดีกว่าระบบ Windrow และ Static composting เนื่องจากสามารถควบคุมกลิ่นได้ ใช้สถานที่น้อย และควบคุมการหมักได้ง่าย ตลอดจนใช้แรงงานน้อยกว่า

7.6 Tunnel reactor composting system เป็นการหมักวัสดุในท่อหมัก โดยใช้เครื่องจักรต่าง ๆ อยู่ภายนอกท่อหมัก ทำให้ง่ายต่อการซ่อมแซม การระบายอากาศเข้าและออก ซึ่งทำให้การหมักของวัสดุได้ผลดี

7.7 Brikollare composting process เป็นการหมักวัสดุที่มีการผสมกากตะกอนน้ำทิ้งที่อัดเป็นก้อน ภายในก้อนทำให้เกิดช่องระบายอากาศ อากาศที่สามารถผ่านเข้าออกได้ช่วยให้การย่อยสลายของวัสดุเร็วขึ้น

8. การประเมินความสำเร็จสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก

ดัชนีที่บ่งบอกความสำเร็จสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก ได้แก่ อุณหภูมิของกองปุ๋ยหมัก สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ในเตรท ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และสัดส่วนกรดฮิวมิกต่อกรดฟูลิก เป็นต้น วิธีการประเมินความสำเร็จสมบูรณ์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีทางเคมี กายภาพ และชีวภาพ

8.1 การประเมินความสำเร็จสมบูรณ์โดยวิธีทางเคมี

8.1.1 ความเป็นกรดหรือด่าง (pH) โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการหมักค่า pH จะลดลงเล็กน้อยจนมีค่าประมาณ 5 ต่อมาจะมีค่าเพิ่มเมื่อวัสดุหมักถูกย่อยสลายและเริ่มเสถียรภาพ จนในที่สุดค่า pH จะรักษาระดับอยู่ในช่วง 7-8 จนสิ้นสุดกระบวนการหมัก หากค่า pH ของกองปุ๋ยหมักเป็นกรดแสดงว่าการหมักยังไม่เสร็จสมบูรณ์เนื่องจากใช้เวลาหมักน้อยเกินไป หรืออาจเกิดการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Gray *et al.*, 1971; Jeminez and Gacia, 1989) อย่างไรก็ตามการใช้ pH ในการประเมินความสำเร็จสมบูรณ์อาจไม่มีความแน่นอน เนื่องจากชนิดวัสดุที่ใช้หมัก และสภาพแวดล้อมของการหมัก ตลอดจนเทคโนโลยีการผลิต

8.1.2 สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อินทรีย์คาร์บอนจะถูกย่อยสลายและแปรสภาพไปเป็นสารฮิวมิกและคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งคาร์บอนส่วนใหญ่ของอินทรีย์สารจะถูกย่อยสลายและระเหยออกนอกกอง ทำให้วัสดุหมักมีค่า C/N ratio ลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งการแปรสภาพดำเนินไปมากพอค่า C/N ratio ก็มักลดลงต่ำกว่า 20 (Hirai *et al.*, 1983; Mathur, 1991) อย่างไรก็ตามค่า C/N ratio อาจเพิ่มขึ้นได้ หากมีการสูญเสียแอมโมเนียในปริมาณมากออกจากระบบ ดังนั้นค่า C/N ratio ไม่สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดความสำเร็จสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักได้ทุกชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่สูง เช่น กากตะกอนน้ำเสียที่ผสมในปุ๋ยหมักในปริมาณมากจนกองวัสดุหมักมี C/N ratio ต่ำ การเสร็จสิ้นของกระบวนการหมักอาจพิจารณาจาก $C/N_{\text{สุดท้าย}}$ ต่อ $C/N_{\text{เริ่มต้น}}$ ต้องน้อยกว่า 0.75 เมื่อใช้ระยะเวลาหมัก 120 วัน (Morel *et al.*, 1985; Jimenez and Garcia, 1989) Vuorinen and Saharinen (1997) รายงานว่าสัดส่วน $C/N_{\text{สุดท้าย}}$ ต่อ $C/N_{\text{เริ่มต้น}}$ ลดลงเป็น 0.65 ถึง 0.75 หลังจากหมักไปได้ 1 เดือน และ 0.49 ถึง 0.59 หลังจากหมักไปได้ 2 เดือน

8.1.3 สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของส่วนที่สกัดด้วยน้ำ ในช่วงแรกของการหมักส่วนที่สกัดด้วยน้ำของปุ๋ยหมักจะประกอบด้วย กรดอะมิโน กรดอะลิฟาติก เปปไทด์ น้ำตาล และโพลีเมอร์เป็นส่วนใหญ่ การย่อยสลายที่เพิ่มขึ้นทำให้ C-rich aliphatic และกรดอะมิโนลดลง ขณะที่ N-rich peptide เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า C/N ratio ลดลง และมีค่าประมาณ 5-6 แสดงว่าปุ๋ยหมักเสร็จสมบูรณ์ (Hirai *et al.*, 1983; Hirai *et al.*, 1985; Chanyasak *et al.*, 1982) อย่างไรก็ตามดัชนีนี้ไม่สามารถบ่งบอกความสำเร็จสมบูรณ์ของการหมักได้ทุกชนิด ถ้ามีการเติมไนโตรเจนในรูปยูเรีย ปัสสาวะ และกากตะกอนน้ำเสีย เพื่อให้การย่อยสลายง่ายขึ้น

8.1.4 สัดส่วนแอมโมเนียมต่อไนโตรเจนของส่วนที่สกัดด้วยน้ำ สามารถใช้ดัชนีชี้วัดความสำเร็จสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักได้ ถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.5 ซึ่งสามารถนำเอาไปใช้ประโยชน์ได้ ถ้ามีค่าอยู่ในช่วง 0.5-3.0 จัดเป็นปุ๋ยหมักที่ค่อนข้างเสร็จสมบูรณ์ แต่ถ้ามีค่าสูงกว่า 3.0 แสดงว่าปุ๋ยหมักยังไม่เสร็จสมบูรณ์และยังไม่สามารถนำเอาไปใช้ประโยชน์ได้ (California Compost Quality Council, 2001) ค่านี้เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.03-18.90 ในปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์ (Hirai *et al.*, 1983) Bernal *et al.* (1998) รายงานว่าปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์ควรมี NH_4^+/NO_3^- ต่ำกว่า 0.6

8.1.5 ส่วนที่สกัดด้วยน้ำ Chanyasak *et al.* (1982) และ Hirai *et al.* (1983) หาปริมาณกรดอะมิโน กรดอะลิฟาติกที่ระเหยได้ (กรดไขมันต่ำ) เปปไทด์ และโพลีแซคคาไรด์ในส่วนที่สกัดด้วยน้ำของวัสดุหมักและปุ๋ยหมัก พบว่าส่วนที่สกัดด้วยน้ำของปุ๋ยหมักที่ยังหมักไม่เสร็จสมบูรณ์มีปริมาณกรดอะลิฟาติก กรดอะมิโน และอินทรีย์คาร์บอนสูงกว่าปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์จากการทดลองของ Harada *et al.* (1981) พบว่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนของส่วนที่สกัดด้วยน้ำ

ในปุ๋ยหมักขยะเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก่อนจะลดลงและค่อนข้างคงที่ประมาณ 7.8% ส่วน Levi-Minzi *et al.* (1986) พบว่าส่วนที่สกัดด้วยน้ำของปุ๋ยคอกสดและปุ๋ยคอกที่ยังหมักไม่เสร็จสมบูรณ์จะมีอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดประมาณ 16.0% และ 24.1% ตามลำดับ

8.1.6 แอมโมเนีย หากพบสารที่เกิดจากการรีดิวส์อินทรีย์สาร เช่น แอมโมเนีย และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปริมาณสูง แสดงว่าปุ๋ยหมักยังไม่เสร็จสมบูรณ์ (Spohn, 1978) ปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์ควรมีปริมาณแอมโมเนียน้อยกว่า 400 mg kg^{-1} (Zucconi and De Bertoldi, 1987) Tiquia *et al.* (1996) เสนอว่าแอมโมเนียของปุ๋ยหมักมูลสุกรผสมขี้เลื่อยลดลงต่ำกว่า 0.5 mg g^{-1} แสดงว่าการหมักเสร็จสมบูรณ์

8.1.7 ไนเตรทและไนไตรท์ ในระบบการหมักแบบเติมอากาศจะเกิดไนไตรท์ในช่วง 86-113 วัน และเกิดไนเตรทในช่วง 96-123 วัน แสดงว่าจะเกิดสารประกอบไนโตรเจนทั้งสองรูปเมื่อผ่านการหมักไปได้ 3-4 เดือน เมื่อสิ้นสุดการหมักควรมีไนเตรทมากกว่า 400 mg kg^{-1} (Finstein and Miller, 1985; Jimenez and Gacia, 1989) แต่ Forster *et al.* (1993) รายงานว่าปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์ควรมีไนเตรทมากกว่า 300 mg kg^{-1}

8.1.8 ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) สารฮิวมิกมีความจุในการดูดซับ แคตไอออนสูงกว่าวัสดุเหลือทิ้งทั่วไป (Stevenson, 1982) แคตไอออนจะดูดซับอยู่ในลักษณะที่สามารถแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนอื่นๆ ได้ แสดงหน่วยเป็น milliequivalents ของแคตไอออน ตัวอย่างปุ๋ยหมักแห้งจำนวน 100 กรัม หรือ cmol kg^{-1} สารฮิวมิกจะมีค่า CEC ประมาณ 150 cmol kg^{-1} ขณะที่กองปุ๋ยหมักเริ่มต้นมีค่า CEC เพียง 10 cmol kg^{-1} แสดงว่าระดับ humification ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า CEC ของปุ๋ยหมักเพิ่มสูงขึ้น (Harada and Inoko, 1980; Estrada *et al.*, 1987) Harada *et al.* (1981) พบว่าค่า CEC ของปุ๋ยหมักขยะเทศบาลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 40 cmol kg^{-1} ที่ระยะเริ่มต้นเป็น 70 cmol kg^{-1} หลังจากหมักไปได้ 5 สัปดาห์ จากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 80 cmol kg^{-1} ปุ๋ยหมักขยะเทศบาลจะเสร็จสมบูรณ์เมื่อมีค่า CEC มากกว่า 60 cmol kg^{-1} Harada and Inoko (1980) ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า CEC กับ C/N ratio ของปุ๋ยหมักขยะเทศบาลพบว่า $\ln(\text{CEC}) = 7.02 - 1.02 \ln(\text{C/N})$

8.2 การประเมินความสำเร็จสมบูรณ์โดยวิธีทางกายภาพ

8.2.1 อุณหภูมิกองปุ๋ยหมัก อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 2-3 วันแรกของการหมัก และรักษาอุณหภูมิอยู่ในระดับ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหลายวัน จากนั้นเริ่มลดลงจนกระทั่งใกล้เคียงบรรยากาศ และรักษาระดับเช่นนี้ต่อไป (Goluek, 1972; Harada *et al.*, 1981) การผสมและพลิกกลับกองของปุ๋ยหมักอีกครั้ง ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

จะทำให้อุณหภูมิสูงอีกครั้งถ้าปุยหมักยังไม่เสร็จสมบูรณ์ แต่ปุยหมักที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว อุณหภูมิในกองปุยหมักจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อพลิกกลับกอง (Jimenez and Garcia, 1989; Mathur *et al.*, 1993) Stickelberger (1975) กำหนดว่าปุยที่หมักได้เสร็จสมบูรณ์ อุณหภูมิในกองปุยหมักจะคงที่ และไม่แสดงปฏิกิริยาต่อการพลิกกลับกอง

8.2.2 สี (color) Sugahara *et al.* (1984) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของฟางข้าวในระหว่างการหมัก และหาความสัมพันธ์ระหว่าง stimulus value Y และ C/N ratio ได้สมการ regression คือ $Y = 0.549 (C/N) + 7.64$ ถ้า stimulus value Y มีค่าคงที่แสดงว่าปุยหมักเสร็จสมบูรณ์ Garcia *et al.* (1990) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของขยะอินทรีย์ในระหว่างการหมัก และหาความสัมพันธ์ระหว่าง stimulus value Y และคาร์บอนที่ละลายน้ำได้ต่อไนโตรเจน (WSC/N) ได้สมการ regression คือ $Y = 1.44 (WSC/N) + 5.74$ ($p < 0.001$, $r = 0.631$) ถ้า stimulus value Y มีค่าคงที่แสดงว่าปุยหมักเสร็จสมบูรณ์ Sugahara *et al.* (1979) รายงานว่าปุยที่เสร็จสมบูรณ์จะมีสีน้ำตาลดำจนถึงดำ ตรวจสอบสีของปุยหมักโดยวิธี CIE 1931 Standard Colorimetric System ได้สมการดังนี้ $Y = 0.388 (C/N) + 8.31$ ซึ่ง Y อยู่ในช่วง 11-13 จะเป็นปุยหมักที่เสร็จสมบูรณ์

8.2.3 กลิ่น (odor) กลิ่นของขยะเทศบาลเกิดจากกรดอินทรีย์ที่ระเหยได้ เช่น กรดบิวทีริก กรดอะซิติก กรดวาเรอริก และกรดคาโปรอิก เป็นต้น ถูกออกซิไดซ์ในระหว่างการหมัก (Chanyasak *et al.*, 1982) กลิ่นจะค่อย ๆ ลดลงในระหว่างการหมักและเกิดกลิ่นอีกครั้งเมื่อพลิกกลับกองและผสมปุย เมื่อหมักเสร็จสมบูรณ์กลิ่นเหม็นจะหายไปและไม่มีการเกิดกลิ่นเหม็นอีกเมื่อพลิกกลับกอง (Haug, 1980) โดยทั่วไปปุยหมักที่เสร็จสมบูรณ์จะมีกลิ่นคล้ายดินตามธรรมชาติ

8.2.4 ความอ่อนนุ่มของวัสดุหมัก เมื่อใช้น้ำบีดู เศษพืชจะอ่อนนุ่ม ยุ่ยขาดออกจากกันได้โดยง่าย ไม่แข็งกระด้างหรือเป็นก้อนเหมือนเริ่มต้นของการหมัก

8.3 การประเมินความสำเร็จสมบูรณ์โดยวิธีทางชีวภาพ

8.3.1 การใช้แหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ (CLPPs) สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้รูปแบบการใช้แหล่งคาร์บอนของประชากรจุลินทรีย์ ทำให้สามารถนำมาประเมินความสำเร็จสมบูรณ์ของการหมักได้ (นันทวัน, 2547) Insam (1997) ใช้ Biolog microplate ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงประชากรจุลินทรีย์ในระหว่างการหมัก พบว่าเมื่ออายุของปุยหมักที่เพิ่มขึ้น การใช้แหล่งคาร์บอนจำพวกคาร์โบไฮเดรต และสารประกอบฟอสโฟรีเลตจะลดลง ขณะที่ความสามารถในการใช้แหล่งคาร์บอนจำพวกพอลิเมอร์ คาร์โบซิลิก และกรดอะมิโน จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Laine *et al.* (1997) พบว่า CLPPs สามารถแยกกลุ่มประชากรจุลินทรีย์จากกองปุยหมักโดยใช้

สารตั้งต้นต่างชนิดกัน Hill *et al.* (2000) รายงานว่ารูปแบบการใช้สารตั้งต้นของแต่ละตัวอย่างไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกับกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ได้

8.3.2 การทดสอบความงอกของเมล็ด (seed germination test) ปุ๋ยหมักที่ยังไม่เสร็จสมบูรณ์จะมีการสะสมของสารประกอบที่เป็นพิษต่อพืช เช่น โลหะหนัก สารประกอบฟีนอล เอทิลีน แอมโมเนีย เกลือ และกรดอินทรีย์ (Tiquia *et al.*, 1996) สารเหล่านี้มีผลต่อการงอกของเมล็ดและการเจริญเติบโตของพืช ทำให้ผลผลิตของพืชลดลง การงอกของเมล็ดพันธุ์เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และรวดเร็วในการตรวจสอบการเสร็จสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก โดยนำเอาเมล็ดมาเพาะและนับจำนวนเมล็ดที่เจริญเติบโตและวัดความยาวของรากที่งอก ค่าที่ได้นำมาคำนวณหาดัชนีการงอก (germination index, GI) (Wong *et al.*, 2001) ถ้าได้ค่า GI เท่ากับ 50% แสดงว่าปุ๋ยหมักนั้นปลอดภัยสำหรับพืช Tiquia *et al.*, (1996) ตรวจสอบความเสร็จสมบูรณ์ของปุ๋ยหมักมูลสุกรผสมขี้เลื่อย โดยใช้ seed germination พบว่าผักกาดขาวและผักโขมจีนเป็นเมล็ดที่มีความไวต่อการทดสอบ และค่า GI ของเมล็ดพืชมีมากกว่า 80% ที่ 60 วันของการบ่มปุ๋ยหมัก แสดงว่าปุ๋ยหมักเสร็จสมบูรณ์ในวันที่ 60 ของการหมัก

8.3.3 เชื้อโรคในปุ๋ยหมัก ในการนำปุ๋ยหมักไปใช้ประโยชน์นั้น ต้องคำนึงถึงความเสี่ยงในการแพร่กระจายของเชื้อโรคในปุ๋ยหมัก ซึ่งทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพได้ เช่น ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ ท้องร่วง โรคพยาธิ การติดเชื้อที่ปอด เป็นต้น แม้ว่าในกระบวนการหมัก อุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักจะสูงเพียงพอที่จะฆ่าเชื้อโรค แต่อาจมีเชื้อโรคบางส่วนสามารถมีชีวิตอยู่ได้ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมัก โดยเฉพาะที่ผิวนอกของกองปุ๋ยหมักที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในกองปุ๋ย ทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคลดลง นอกจากนี้โรคบางชนิด เช่น สปอร์ของแบคทีเรีย ซิสต์ (cysts) และไข่พยาธิ สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ และเจริญเติบโตได้เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมเหมาะสม (Polprasert, 1989) เชื้อโรคในกองปุ๋ยหมักสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือเชื้อที่มาจากวัสดุหมักหรือเชื้อปฐมภูมิ (primary pathogen) และเชื้อที่มาจากจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตบนปุ๋ยหมักหรือเชื้อโรคทุติยภูมิ (secondary pathogen) เชื้อโรคที่มาจากวัสดุ ได้แก่ แบคทีเรีย โปรโตซัว ไวรัส และพยาธิต่าง ๆ โดยเฉพาะแบคทีเรียในกลุ่ม *Salmonella* sp., *Fecal Streptococcus* และ *Fecal Coliform* ซึ่งพบว่าการแพร่กระจายมากที่สุด (Pereira- Neto *et al.*, 1987)

9. คุณภาพของปุ๋ยหมัก

คุณภาพของปุ๋ยหมักจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ ตลอดจนเทคโนโลยีการผลิตปุ๋ย (Polprasert, 1996)

Bernal *et al.* (1998) ทำการหมักกากตะกอนน้ำเสียร่วมกับเมล็ดฝ้ายที่อัตราส่วน 46.5% และ 53.5% ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการหมัก พบว่าปุ๋ยหมักมีอินทรีย์วัตถุ 64.8%, อินทรีย์คาร์บอน 33.55%, ไนโตรเจนทั้งหมด 3.79%, C/N ratio 9.4, แอมโมเนียม 4.37 mg kg⁻¹, ไนเตรท 4,884 mg kg⁻¹, สัดส่วนแอมโมเนียมต่อไนเตรท 0.09, ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน 191.9 cmol kg⁻¹, สัดส่วนค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ออินทรีย์คาร์บอน 3.50, อินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำ 1.12%, อินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำต่ออินทรีย์ไนโตรเจน 0.34%, กรดฟุลวิก 2.57%, กรดฮิวมิก 7.90%, สัดส่วนกรดฮิวมิกต่อฟุลวิก 3.07, humification index 22.2%, ลิกันิน 59.4% OM และดัชนีความงอก (germination index) 69.4%

Ramos *et al.* (2004) ทำการหมักสิ่งที่ย่อยออกจากฟอกหนังกับมูลโคและฟางข้าวสาลี เมื่อสิ้นสุดการหมักที่ 90 วัน พบว่าปุ๋ยหมักมีค่าการนำไฟฟ้า 28.1 mS cm⁻¹, ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน 17.7 cmol kg⁻¹, absorbance ที่ 640 nm 0.0175, อัตราการหายใจ 0.06 mg CO₂-C kg⁻¹compost-C day⁻¹, pH 8.5, C/N ratio 7, ดัชนีความงอก (germination index) ของพืชตระกูลมัสตาร์ด (cress) 48%, ความเข้มข้นทั้งหมดของ Pb, Cr, Cd, Cu และ Na เท่ากับ 8.9, 77, 0.4, 10.3 และ 14,377 mg kg⁻¹ ตามลำดับ

Solano *et al.* (2001) ทำปุ๋ยหมักที่ประกอบด้วยมูลแกะ 8,000 kg (ความชื้น 53%) กับฟางข้าวบาร์เลย์ 4,000 kg (ความชื้น 11%) โดยในช่วง 2 เดือนแรกพลิกกลับกองทุกสัปดาห์ หลังจากนั้นจะพลิกกลับกองทุก 15 วัน จนถึงสัปดาห์ thermophilic phase เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส เป็นการสิ้นสุดการหมัก พบว่าปุ๋ยหมักมีความชื้น 58% , pH 8.39, ค่าการนำไฟฟ้า 0.83 dS m⁻¹, C 29.3%, N 2.5%, H 3.9%, P₂O₅ 1.25%, K₂O 5.16%, Na 0.49%, Ca 2.42% และ Mg 0.44 %, Pb 7.7 mg kg⁻¹, Cu 20 mg kg⁻¹, Zn 85 mg kg⁻¹, Cr 28 mg kg⁻¹, Fe 0.32%, Mn 685 mg kg⁻¹, Cd <0.15 mg kg⁻¹, ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน 189 cmol kg⁻¹และดัชนีความงอก (germination index) ของพืชตระกูลมัสตาร์ด (garden cress) 35%

10. การย่อยสลายของปุ๋ยหมักในดิน

การสลายตัวของอินทรีย์วัตถุหรือสารประกอบคาร์บอน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์สารเป็นสารอนินทรีย์ (mineralization) นั้นถูกควบคุมโดยปัจจัยต่างๆ ในดิน ได้แก่ อุณหภูมิ การถ่ายเทอากาศ ความชื้น pH อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของอินทรีย์วัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับ ระดับดินเหนียว อัตราที่ใส่ ระยะเวลาในการสลายตัว (ศุภมาส, 2529) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 1 มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
1	ขนาดปุ๋ยหมัก	ไม่เกิน 12.5×12.5 มิลลิเมตร
2	ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ย่อยได้	ไม่เกิน 35% โดยน้ำหนัก
3	ปริมาณหิน และกรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ไม่เกิน 5% โดยน้ำหนัก
4	พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่นๆ	ต้องไม่มี
5	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ	ไม่น้อยกว่า 30% โดยน้ำหนัก
6	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	5.5-8.5
7	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	ไม่เกิน 20:1
8	ค่าการนำไฟฟ้า (EC:Electrical Conductivity)	ไม่เกิน 6 dS m ⁻¹
9	ปริมาณธาตุอาหารหลัก	-ไนโตรเจน (total N) ไม่น้อยกว่า 1.0% โดยน้ำหนัก -ฟอสฟอรัส (total P ₂ O ₅) ไม่น้อยกว่า 0.5% โดยน้ำหนัก -โพแทสเซียม (total K ₂ O) ไม่น้อยกว่า 0.5% โดยน้ำหนัก
10	การย่อยสลายที่สมบูรณ์	มากกว่า 80%
11	สารหนู (Arsenic)	ไม่เกิน 50 mg kg ⁻¹
	แคดเมียม (Cadmium)	ไม่เกิน 5 mg kg ⁻¹
	โครเมียม (Chromium)	ไม่เกิน 300 mg kg ⁻¹
	ทองแดง (Copper)	ไม่เกิน 500 mg kg ⁻¹
	ตะกั่ว (Lead)	ไม่เกิน 500 mg kg ⁻¹
	ปรอท (Mercury)	ไม่เกิน 2 mg kg ⁻¹

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2548)

10.1 การระบายอากาศของดิน สภาพการระบายอากาศของดินมีผลต่อกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ในสภาพที่มีออกซิเจน การย่อยสลายจะเกิดได้รวดเร็ว และเสร็จสมบูรณ์กว่า ส่วนใหญ่จะย่อยสลายตัวจนกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ในทางตรงกันข้ามดินที่อยู่ในสภาพขาดอากาศหรือมีน้ำท่วมขัง อัตราการสลายตัวจะลดลงอย่างมาก และเกิดขึ้นได้ไม่เสร็จสมบูรณ์ สารที่ได้จากระบวนการดังกล่าวมักเป็นกรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์และสารอื่นๆ อีกหลายชนิด เช่น amine, mercaptan, aldehyde, ketone และเกิดแก๊สต่างๆ มากมายเช่น CO_2 , H_2S , H_2 หรือแม้แต่ CH_4 (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

10.2 ความชื้นดิน อัตราการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุมีความสัมพันธ์กับระดับความชื้นในดินเป็นแบบ curvilinearly อัตราการย่อยสลาย (mineralization) มีค่าต่ำที่ระดับความชื้นสูงหรือภายใต้สภาพที่แห้งมากๆ (Sikora and Szmidt, 2001) ระดับความชื้นที่พอเหมาะต่อการย่อยสลายอยู่ที่ค่าศักย์น้ำ (water potential) ประมาณ -0.01 ถึง -0.05 MPa อัตราการย่อยสลายจะลดลงอย่างรวดเร็ว หากมีระดับความชื้นมากเกินไปที่ -0.01 MPa ไปจนถึงสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (0 MPa) เนื่องจากขาดออกซิเจน แต่หากความชื้นของดินน้อยๆ ต่ำกว่าระดับที่เหมาะสม อัตราการย่อยสลายจะค่อยๆ ลดลงตามลำดับ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

10.3 อุณหภูมิในดิน อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อ mineralization ของอินทรีย์วัตถุในดิน บ่งบอกโดยใช้ Q factor ซึ่งคล้ายกับอิทธิพลของความชื้น อุณหภูมิที่มากกว่า 35 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส ทำให้อัตรา mineralization ของอินทรีย์วัตถุลดลง อุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 10-35 องศาเซลเซียส อัตรา mineralization จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส ($Q_{10} = 2$) (Sikora and Szmidt, 2001) อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อกระบวนการทางเคมี กายภาพ หรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินโดยตรง อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเร่งอัตราการสลายตัวของอินทรีย์สารได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส ซึ่งจัดเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์โดยทั่วไป ดังนั้นดินในเขตร้อนชื้นเช่นประเทศไทย จึงมีอินทรีย์วัตถุค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับประเทศในเขตหนาวหรือเขตอบอุ่น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) Yoshino and Dei (1977) พบว่า nitrogen mineralization จะเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิ 15-35 องศาเซลเซียส ส่วน Kawaguchi and Kyuma (1977) รายงานว่าปริมาณไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการ mineralization จะมีค่าตั้งแต่ 0.3-26% ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ในระหว่าง 2 สัปดาห์ของการบ่มดิน (incubate) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้ดินนาข้าว 410 ตัวอย่าง จาก 9 ประเทศในเอเชีย Myers (1975) รายงานว่าการบ่มดิน tropical clay loam ภายใต้สภาพที่อิ่มตัวด้วยน้ำ อัตราการ ammonification จะเพิ่มขึ้นในช่วง 25-50 องศาเซลเซียส และจะสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 60 องศาเซลเซียส Benitez et al. (1997) พบว่า nitrogen

mineralization ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.23–4.70% และมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.49–2.98%

10.4 เนื้อดิน สารคอลลอยต์ในดินทั้งรูปอินทรีย์และอนินทรีย์มีผลต่ออัตรา nitrogen mineralization จากการทดลองของ Onikura *et al.* (1975) พบว่าปริมาณแอมโมเนียมที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับการแลกเปลี่ยนประจุแคตไอออนของดินและปริมาณดินเหนียวในดิน ซึ่งส่งผลทำให้อินทรีย์วัตถุมีปริมาณเพิ่มขึ้นในดินเนื้อละเอียด Craswell *et al.* (1970) พบว่าอัตราการ mineralization ของไนโตรเจนสูงขึ้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดดินมีขนาดเล็ก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอนุภาคดินขนาดเล็กๆ สามารถจะทำให้เกิด mineralization ได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ Keeny and Bremner (1967) กล่าวว่าอนุภาคของดินเหนียวและทรายแป้ง มีผลต่ออัตรา nitrogen mineralization ส่วน Chichester (1970) ทำการแยกลำดับส่วนของ silt loam soil โดยใช้ ultrasonic variation พบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ปลดปล่อยออกมาจากดินจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคดินลดลง และอัตราการ mineralization ลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ ultrasonic treatment ส่วน Tester *et al.* (1977) ศึกษาการย่อยสลายของปุ๋ยหมักจากตะกอนน้ำเสียในห้องปฏิบัติการโดยการบ่มใน 3 ชุดดิน คือ Evesboro loamy sand (C-horizon), Fauquier silty loam (B-horizon) และ Christiana silty clay (C-horizon) พบว่า Fauquier silty และ Christiana silty clay จะมีความแตกต่างจาก Evesboro loamy sand โดยทั้งสองชุดดินจะมีปริมาณ NH_4^+ เกิดขึ้นรวดเร็วในระยะแรก และจะลดลงตามระยะเวลาในการบ่มดิน ส่วน NO_3^- มีค่าต่ำ

10.5 ความเป็นกรดหรือด่างของดิน สภาพความเป็นกรดหรือด่างของดินเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อการย่อยสลายอินทรีย์สารในดิน โดยทั่วไปแล้วเมื่อค่า pH เป็นกลางการสลายตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าในช่วงกรดหรือด่างเกินไป ดังนั้นการใส่ปูนเพื่อยกระดับ pH ของดินที่เป็นกรดให้เป็นกลางจึงส่งเสริมการสลายตัวของอินทรีย์สารในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) อย่างไรก็ตามค่า pH ของดินน้ำมีผลกระทบต่อดอัตรา mineralization มากกว่าค่า pH ปุ๋ยหมักเอง นอกจากจะมีการใส่ในอัตราที่สูงมาก Tester *et al.* (1977) พิสูจน์ว่าการปรับค่า pH ของดินจาก 5 ถึงประมาณ 7 มีผลทำให้ mineralization เพิ่มขึ้น Patrick and Wyatt (1964) สรุปว่า mineralization จะเกิดในดินน้ำซังมากกว่าในดินไร่ เนื่องจากดินน้ำซังมีค่า pH สูงกว่า (pH ประมาณ 7) ดินไร่ (pH ประมาณ 4.4) กระบวนการ mineralization ของอินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็นแอมโมเนียมมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH น้อยกว่ากระบวนการ nitrification หรือการเปลี่ยนแอมโมเนียมเป็นไนเตรท (Sikora and Szmidt, 2001)

10.6 ความเค็มของดิน ความเค็มของปุ๋ยหมักที่ผสมกับดินอาจมีผลต่อ N mineralization ถ้ามีการใส่ในอัตราที่สูง จากการทดลองของ Tester and Parr (1983) โดยปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยหมัก biosolid ที่อัตรา 112 และ 224 Mg ha⁻¹ และวัด net N mineralization พบว่าอัตรา

mineralization ในดินที่ชะด้วยน้ำจะสูงกว่าดินที่ไม่ชะด้วยน้ำ โดยดินที่ใส่ปุ๋ยหมักที่อัตรา 214 Mg ha^{-1} และไม่ชะด้วยน้ำจะมีค่าการนำไฟฟ้า 4.62 dS m^{-1} ส่วนดินที่ชะด้วยน้ำจะมีค่าการนำไฟฟ้าเพียง 1.01 dS m^{-1} Laura (1977) ศึกษาอิทธิพลของระดับความเค็มต่อ ammonification, nitrification และ mineral N accumulation ในระหว่างการบ่มดิน พบว่าระดับความเค็มทำให้ ammonification เกิดขึ้นช้าลง แต่ยับยั้งกระบวนการไม่สมบูรณ์ ขณะที่ nitrification นั้นจะเกิดช้าลงเช่นเดียวกัน แต่ยับยั้งกระบวนการอย่างสมบูรณ์

10.7 ดินแห้งสลับเปียก การทำให้ดินอยู่ในสภาพแห้งและเปียกสลับกันจะเร่งให้เกิดการปลดปล่อยไนโตรเจนในดินได้มากขึ้น จากการทดลองของ Reddy and Patrick (1975) และ Shiori *et al.* (1941) พบว่าโดยทั่วไปแล้วไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยออกมากจากกระบวนการ mineralization จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในดินที่มีสภาพแห้ง (air drying) มาก่อนดินมีน้ำขัง Shiga and Ventura (1976) ได้บ่มดิน (incubate) Maahas clay ในหลอดทดสอบที่มีจุลินทรีย์ซึ่งสามารถป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปได้ พบว่าในช่วง 20–40 วันแรกของการบ่มดิน ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยออกมากจากกระบวนการ mineralization ในดิน Maahas clay ที่ผ่านสภาพแห้ง แล้วได้รับสภาพเปียกจะเกิดขึ้นมากกว่าดินที่อยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา แต่หลังจากบ่มดินไปได้ 40 วัน อัตราการเกิด mineralization จะไม่แตกต่างกัน

10.8 การที่ดินเย็นจนแข็ง การที่ดินเย็นจนแข็งก่อนการบ่มดินทำให้กระบวนการ nitrogen mineralization เพิ่มขึ้น การทำให้อิทธิพลของการเย็นจนแข็งโดยปกติทำให้เย็นในระดับ -10 ถึง -20 องศาเซลเซียส ซึ่งดินที่เย็นจนแข็งจะทำให้เม็ดดินแตกออกและเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่จุลินทรีย์จะเข้าไปย่อยสลายอินทรีย์สารได้มากขึ้น (อำนาจ, 2525)

10.9 ธาตุอาหาร จากการทดลองของ Onikura *et al.* (1975) พบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมลงไปดินนาจะกระตุ้นให้เกิด N mineralization ได้ดีขึ้น อัตราการเกิด mineralization ในดินที่ได้รับการใส่ปุ๋ยและไม่ใส่ปุ๋ยจะไม่แตกต่างกัน หลังจากที่มีปริมาณแอมโมเนียมในดินที่ได้รับปุ๋ยหมดไป Harada (1959) รายงานว่า การเติมสารละลายเกลือ เช่น โซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์ลงไปดินที่ทำการบ่มไว้ จะมีการสะสมของแอมโมเนียมเกิดขึ้นมากกว่าดินที่ไม่ได้รับการเติมสารละลายของเกลือลงไป Hassen *et al.* (1998) พบว่าการเติม Zn, Cu และ Cd ลงไปในดินจะมีผลต่อ N mineralization เนื่องจากธาตุโลหะหนักเหล่านี้จะยับยั้ง essential functional groups ของจุลินทรีย์ หรือยับยั้งการทำงานของ biological molecules อย่างไรก็ดีตามโลหะที่ความเข้มข้นต่ำ เช่น Co, Cu, Zn และ Ni มีความจำเป็นต่อการดำเนินกิจกรรมจุลินทรีย์ เนื่องจากใช้เป็นโคแฟกเตอร์ สำหรับ metalloproteins และเอนไซม์ (Barraquio and Knowles, 1989; Doelman *et al.*, 1994; Li and Tan, 1994)

10.10 สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมัก Barbarika *et al.* (1985) พบว่า C/N ratio เป็นปัจจัยแรกที่ควบคุม N mineralization ในการย่อยสลายอินทรีย์สาร เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นั้น นอกจากจะย่อยสลายเพื่อให้ได้พลังงานไปใช้แล้ว จุลินทรีย์จะนำเอาธาตุจากอินทรีย์สารเหล่านั้นไปใช้ในการสร้างส่วนประกอบที่เป็นโครงสร้างหลักของเซลล์ กับไนโตรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีน กรดอะมิโน หรือกรดนิวคลีอิก ที่มีอยู่เป็นปริมาณมากในเซลล์จุลินทรีย์ ดังนั้น C/N ratio ในอินทรีย์สารจึงมักเป็นปัจจัยที่บ่งบอกว่า ในการย่อยสลายอินทรีย์สารเหล่านั้นจะมีไนโตรเจนเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ และทำให้การย่อยสลายอินทรีย์สารดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่ง C/N ratio ที่จัดว่าเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 20 ถึง 30 ถ้ามีค่าสูงหรือกว้างกว่า 30 ขึ้นไป แม้ว่ามีคาร์บอนให้ใช้ในการเจริญเติบโตมาก แต่มีไนโตรเจนที่จำกัด ทำให้การย่อยสลายช้าลง จุลินทรีย์จะไปดึงไนโตรเจนในดิน เช่น NH_4^+ และ NO_3^- ไปใช้ในการเจริญเติบโตแทน เรียกกระบวนการนี้ว่า immobilization (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) Yoneyama and Yoshida (1978) พบว่ากากตะกอนน้ำเสียที่มี C/N ratio ต่ำ คือ 5.21 และ 5.66 จะเกิดกระบวนการ mineralization ให้สารอนินทรีย์ไนโตรเจนได้เร็ว ส่วนกากตะกอนน้ำเสียที่มี C/N ratio 9.01 จะไม่เกิดกระบวนการ mineralization ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Parr (1975) ที่พบว่าการใส่อินทรีย์วัตถุที่มี C/N ratio มากกว่า 20 ลงไปในดินจะก่อให้เกิดการขาดไนโตรเจนของพืช และค่า Eh จะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การใส่อินทรีย์วัตถุที่มี C/N ratio ต่ำกว่า 20 จะเกิดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกมา

10.11 ปฏิกริยาร่วมระหว่างดินและพืช Goring and Clark (1949) ทดลองโดยใช้ดินที่อยู่ในพื้นที่ว่างเปล่าไม่มีพืชขึ้น นำส่วนหนึ่งของดินใส่ภาชนะเก็บไว้ในโรงเรือนปลูกทดลองในสภาพว่างเปล่าไม่ปลูกพืช อีกส่วนหนึ่งปลูกพืชลงไป ในระหว่างการทดลองระยะต่าง ๆ มีการวิเคราะห์ อนินทรีย์ไนโตรเจนในดินทั้งสอง และวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในรากและส่วนเหนือดินของพืชที่ปลูก พบว่า N mineralization เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน ในระหว่างดินที่ปลูกพืชกับดินว่างเปล่าในระยะ 6 สัปดาห์แรก แต่หลังจากนั้นปริมาณไนโตรเจนที่ถูกเปลี่ยนเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนในดินว่างเปล่าสูงกว่าดินที่ปลูกพืช แสดงว่าพืชทำให้กระบวนการ N mineralization ลดลง Clark (1949) ทดลองใช้ดินดังกล่าวข้างต้นศึกษาต่อพบว่า N mineralization ลดลงหากน้ำหนักแห้งของรากพืชเพิ่มขึ้นและจำนวนจุลินทรีย์รอบรากพืชเพิ่มขึ้น เมื่อนำตัวอย่างดินที่มีการปลูกพืชและดินปล่อยไว้ว่างเปล่าไปบ่มเป็นเวลา 16 สัปดาห์ ปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นน้อยลง จากผลดังกล่าวทำให้เชื่อว่าผลของพืชที่มีต่อ N mineralization เนื่องจากอินทรีย์สารที่เกิดจากรากพืชชักนำให้เกิด N mineralization โดยจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตาม เป็นที่สงสัยว่าไนโตรเจนที่พืชดูดดึงแล้ว ถูกเปลี่ยนเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนในรากพืชอาจยังคงมีเหลืออยู่ในดิน ในดินที่มีพืชขึ้นอยู่และที่ว่างเปล่าแตกต่างกันเกินกว่าที่มีสาเหตุมาจากแยกรากออกไม่หมด Bartholomew and Clark (1950) ศึกษาพบว่าทั้ง total mineralization และ total immobilization ของไนโตรเจนในดินที่มีพืชปกคลุมอยู่เกิดขึ้นได้มากกว่าในดินว่างเปล่า และ net

mineralization ในดินที่มีพีชขึ้นอยู่ต่ำกว่าเนื่องมาจากการที่ immobilization เพิ่มขึ้นมากกว่า mineralization แต่จากการทดลอง Reydellet *et al.* (1997) พบว่าดินที่ปลูก ryegrass ซึ่งเป็นพีชที่มีรากหนาแน่นมาก จะเพิ่มระดับ net mineralization, gross mineralization (อย่างน้อย 35%) และไนโตรเจนในรูปที่เป็นประโยชน์ทั้งหมด (50%) ของอินทรีย์ไนโตรเจนในดินสูงกว่าดินว่างเปล่า

12. การปลดปล่อยธาตุอาหารพืช

ในขณะที่อินทรีย์สารต่าง ๆ ในปุ๋ยหมักกำลังถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์นั้น สารประกอบอินทรีย์รูปต่าง ๆ ของไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจะเปลี่ยนแปลงย่อยสลายไปตามลำดับ และในที่สุดจะเป็นอินทรีย์สารที่มีธาตุ N และ P เช่น NH_4^+ , NO_3^- , H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} ซึ่งจุลินทรีย์และรากพืชดูดไปใช้ได้ ส่วนโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักอยู่ในรูปไอออนที่ละลายน้ำได้ดีจะเป็นประโยชน์ต่อพืชในทันที ส่วนโพแทสเซียมที่อยู่ในเนื้อเยื่อพืช และสัตว์จะค่อย ๆ ถูกปลดปล่อยออกมาในลักษณะคล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตามการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยหมักในดินเมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีแล้วจะเป็นอัตราที่ช้า แต่มีความสม่ำเสมอมากกว่า จึงทำให้เป็นปุ๋ยที่มีคุณภาพสูง พืชตอบสนองดี และไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ถึงแม้ปุ๋ยหมักจะมีธาตุอาหารหลักอยู่น้อยกว่าปุ๋ยเคมี แต่ปุ๋ยหมักมีข้อดีกว่าตรงที่ยังมีธาตุอาหารพืชชนิดอื่น ๆ อีก เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน เหล็ก สังกะสี แมงกานีส โบรอน ทองแดง และโมลิบดีนัม เป็นต้น ซึ่งปกติแล้วปุ๋ยเคมีจะไม่มี หรือมีเพียงบางธาตุเท่านั้น แร่ธาตุเหล่านี้มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ไม่น้อยไปกว่าธาตุอาหารหลัก เพียงแต่ต้นพืชต้องการในปริมาณน้อย โดยธาตุอาหารเหล่านี้จะค่อย ๆ ถูกปลดปล่อยออกมาเช่นเดียวกัน

13. ผลของปุ๋ยหมักต่อสมบัติของดิน

13.1 การปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน การใส่ปุ๋ยหมักอาจทำให้ดินมีระดับ pH เปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้อาจเพิ่มหรือลดลงขึ้นอยู่กับ pH เริ่มต้นของปุ๋ยหมักและดิน ตลอดจนปริมาณที่ใช้ในการปรับปรุงดิน Hortenstine and Rothwell (1973) พบว่าปุ๋ยหมักจะมีผลต่อ pH ของดิน เมื่อใช้ในอัตราอย่างต่ำ 22.4 ถึง 44.8 Mg ha^{-1} ประเสริฐ (2543) รายงานว่าการใส่ปุ๋ยหมักฟางข้าวระยะยาวติดต่อกัน 12 ปี ตั้งแต่ปี 2519-2530 ที่อัตรา 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ โดยใส่ปุ๋ยหมักอย่างเดียวและใส่ร่วมกับปุ๋ยเคมี พบว่าผลการใช้ปุ๋ยหมักติดต่อกันทำให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุและค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนเพิ่มขึ้น ความแข็งของดินมีแนวโน้มลดลง แต่ไม่ทำให้ค่า pH ของดินเปลี่ยนแปลงไป Kawaguchi *et al.* (1983) พบว่าการใช้ปุ๋ยหมักฟางข้าวติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน 6 ปี ที่สถานีทดลองข้าวสุรินทร์และสถานีทดลองข้าวพิษณุโลก ทำให้ดินบนมีอินทรีย์วัตถุและค่าความจุแลกเปลี่ยนแคต

ไอออนเพิ่มสูงขึ้น Wong *et al.* (1999) พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักมูลสัตว์ที่อัตรา 75 tons ha⁻¹ ทำให้ดินมีค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 5.31 เป็น 6.16 และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงถึง 2.51 dS m⁻¹

13.2 การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน ปุ๋ยหมักสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของดินได้ เช่น ในดินเนื้อละเอียด อันได้แก่ ดินเหนียว และดินร่วนเหนียว จะช่วยลดความหนาแน่นรวมของดิน เพิ่มความร่วนซุย ความจุ้มน้ำ และความสามารถในการซึมผ่านได้ของน้ำและอากาศในดิน ขณะที่ดินเนื้อหยาบจะช่วยในการเกิดของเม็ดดินเพิ่มสูงขึ้น (Boyle *et al.*, 1989) จำลอง (2539) ศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยหมักบางชนิดต่อถั่วเหลืองฝักสดใน 10 ชุดดินภาคกลาง พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักฟางข้าวเชื้อไฮเทค และปุ๋ยหมักฟางข้าวเชื้ออีเอ็ม ทำให้ดินมีความหนาแน่นรวมลดลง วิทยา และ ธรรมเรศ (2545) ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของชุดดินโคราชโดยปุ๋ยหมักขยะเทศบาลในอัตรา 0, 12.5, 25, 37.5 และ 50 tons ha⁻¹ ร่วมกับการปลูกหญ้ากีนีสีม่วง พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักที่อัตรา 50 tons ha⁻¹ ทำให้ดินมีค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำขณะอิ่มตัวเพิ่มขึ้นจาก 0.0012 cm day⁻¹ เป็น 0.0030 cm day⁻¹ ในช่วงระยะเวลา 18 เดือน ค่าความหนาแน่นรวมของดินลดลงจาก 1.297% เป็น 1.273% ในช่วง 12 ถึง 18 เดือน ความคงทนของเม็ดดินที่ร้อนในอากาศผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นจาก 1.153% เป็น 2.497% และค่าความคงทนของเม็ดดินที่ร้อนในอากาศผ่านตะแกรงขนาด 0.125 มิลลิเมตร ลดลงจาก 45.583% เป็น 32.317% เมื่อครบระยะเวลา 18 เดือน

13.3 การปรับปรุงสมบัติทางชีวภาพของดิน ปุ๋ยหมักนอกจากช่วยเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ต่าง ๆ เช่น แบคทีเรีย รา และแอคติโนมัยซีตแล้ว ยังช่วยกระตุ้นจำนวนจุลินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในดินให้เพิ่มปริมาณสูงขึ้น (Balasubramaniam, 1972) วรณลดา และคณะ (2534) พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักที่อัตรา 4 และ 6 ตันต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมี 16-20-0 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ ในชุดดินปากช่องมีผลทำให้ปริมาณจุลินทรีย์โดยเฉพาะแอคติโนมัยซีตเพิ่มขึ้นจาก 0.99 เป็น 4.6 และ 5.39 log₁₀ MPN g⁻¹ ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณเชื้อโรคพืช *Macrophonima phaseolina* ลดปริมาณลงจาก 4.2 เป็น 1.8 และ 0.38 log₁₀ MPN g⁻¹ ตามลำดับ อาการโรคลำต้นเน่าดำของข้าวโพดลดอาการจาก 5.33 เป็น 2.66 และ 2.00 ตามลำดับ พิทยากร และคณะ (2534ข) ศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยหมักต่อเชื้อรา *Rhizoctonia solani* ที่มีต่อผลผลิตของถั่วเหลือง พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักที่อัตรา 4 ตันต่อไร่ ทำให้ปริมาณเชื้อไตรโคเดอร์มา แบคทีเรีย และแอคติโนมัยซีตเพิ่มปริมาณจาก 3.26, 8.23 และ 8.68 log₁₀ MPN g⁻¹ เป็น 4.04, 9.28 และ 9.74 log₁₀ MPN g⁻¹ ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อโรคพืช *R. solani* ลดลงจาก 4.58 เป็น 3.85 log₁₀ MPN g⁻¹ Nishio and Kusano (1980) รายงานว่าการใส่ปุ๋ยหมักที่อัตรา 3.2 ตันต่อไร่ ทำให้ปริมาณเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นจาก 2×10⁹ เป็น 4×10⁹ cfu g⁻¹ Pera *et al.* (1983) ศึกษาพบว่าปุ๋ยหมักมีผลทำให้เชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นจาก 10¹⁰ เป็น 10¹¹ cfu g⁻¹ และปริมาณเชื้อรากับแอคติโนมัยซีตเพิ่มขึ้นจาก 10⁵ เป็น 10⁶ cfu g⁻¹