

## การปรับค่า C/N ช่วงปานกลาง-สูง สำหรับการหมักปุ๋ยอินทรีย์เชิงพาณิชย์

บัญญัติ โฉลนันท<sup>1</sup> มลชยา ปานพาน<sup>1</sup> รสสุคนธ์ จะวะนะ<sup>1</sup> และ อนุรักษ์ จันทอง<sup>1</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

รับเมื่อ 17 สิงหาคม 2550 ตอรับเมื่อ 10 มีนาคม 2551

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อประเมินประสิทธิผลของระบบการหมักปุ๋ยอินทรีย์เชิงพาณิชย์จากมูลสัตว์รวม ทั้งค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบ ภายใต้การปรับอัตราส่วน C/N เริ่มต้น ช่วงปานกลาง-สูง การศึกษาถูกแบ่งออกเป็น 3 ระยะ คือ ระยะที่ 1 ศึกษาผลของ C/N เริ่มต้น (C/N30, C/N40, C/N50, และ C/N60) ต่อระบบการหมักแบบกะโดยใช้ถัง ปฏิกริยาปริมาตรใช้งาน 4.61 ลิตร ระยะที่ 2 ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากระยะที่ 1 ในชั้นขนาดนำร่องที่โรงงาน และ ระยะที่ 3 ศึกษาอัตราส่วนผสมปุ๋ยต่อดินปลูกที่เหมาะสม โดยการทดสอบกับผักกวางตุ้งที่อัตราส่วนปุ๋ยต่อดินปลูก 0:100 5:95 10:90 และ 15:85 โดยน้ำหนัก ตลอดจนการศึกษาได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมัก และตรวจวัดพารามิเตอร์การเจริญเติบโตของพืช พบว่า ระบบการหมักสามารถปรับค่า C/N เริ่มต้น อย่างมีประสิทธิภาพได้สูงถึง 40 โดยที่ระบบให้ประสิทธิผลการพัฒนาอุณหภูมิในช่วงเทอร์โมฟิลิค (>55°C) เป็นเวลานานสอง สัปดาห์ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับการลดปริมาณเชื้อโรคในปุ๋ยหมัก (USEPA 40CFR503) การย่อยสลายสาร อินทรีย์ในเทอมการสูญเสียมวลแห้งและค่าคงที่การย่อยสลาย ซึ่งเป็นไปตามปฏิกริยาอันดับหนึ่ง ( $r^2=0.8$ ) มีค่าเท่ากับร้อยละ 33 และ 0.004 ต่อวัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการหมักแบบพลิกกลับกองส่งเสริมการสูญเสียไนโตรเจนในช่วงสองสัปดาห์แรกอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหมักที่ค่า C/N เริ่มต้นต่ำกว่า 40 เป็นต้นไป ต้นทุนรวมด้าน วัตถุดิบ (มูลไก่, มูลวัว, ก้อนเห็ดเก่า, และขุยมะพร้าว) สำหรับการผลิตอยู่ที่ 0.40 บาท/กก. และคุณภาพของปุ๋ยหมักที่ได้ พบว่า เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กรมวิชาการเกษตรกำหนด (พ.ศ. 2548) ผลการเจริญเติบโตของพืชที่แตกต่างจาก เงื่อนไขอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ( $P<0.05$ ) บ่งชี้ว่า อัตราส่วนปุ๋ยต่อดินปลูกที่ 10:90 เป็นค่าที่เหมาะสม

**คำสำคัญ :** อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน / การหมักปุ๋ย / มูลไก่ / มูลวัว / ก้อนเห็ดเก่า / ขุยมะพร้าว

<sup>1</sup> อาจารย์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

## The Adjustment of Medium-High Range of the C/N for Commercial Composting

Banjarata Jolanun<sup>1</sup>, Monchaya Panphan<sup>1</sup>, Rotsukon Jawana<sup>1</sup>, and Anuruk Junthong<sup>1</sup>

Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangmai 50300

*Received 17 August 2007 ; accepted 10 March 2008*

### Abstract

This study aimed to evaluate effectiveness of composting performance and cost of raw material under the adjustment of medium-high initial C/N ratio. The methodology was divided into three phases. Phase 1 was to investigate the effect of initial C/N ratio on composting by varying the C/N ratios of 30, 40, 50, and 60 and using batch reactors (working volume 4.61 l). Phase 2 was to scale up the appropriate condition which obtained from the Phase 1 to the pilot scale in the factory. Phase 3 was to examine the optimum compost to soil ratio by testing the plant growth (Chinese mustard) at the ratios of 0:100, 5:95, 10:90, and 15:85 respectively. Throughout the study, physical and chemical changes of compost were monitored and the parameters of plant growth were also measured. Results show that the composting can be efficiently managed at the initial C/N ratio up to 40, where the process had achieved thermophilic composting ( $>55^{\circ}\text{C}$ ) for 2 weeks which satisfied the regulatory requirement for a process to further reduce pathogens (USEPA 40CFR503). Dry mass loss and organic matter degradation rate constant which followed first-order model ( $r^2=0.8$ ) were 33% and  $0.004 \text{ day}^{-1}$ . The study was found that composting performed by turning significantly promoted the N loss during the first 2 weeks, especially the composting at lower C/N40 afterwards. The production cost (chicken dunk, cow manure, waste from mushroom cultivation, and coconut coir) was 0.40 Baht/kg and the quality of compost obtained was qualified the recommended criteria set by Department of Agriculture of Thailand (2548 B.E.). The significant differences ( $P<0.05$ ) indicated the compost to soil ratio of 10:90 was the optimum condition for the plant growth.

**Keywords :** C/N ratio / Composing / Chicken Dunk / Cow Manure / Waste from Mushroom Cultivation / Coconut Coir

---

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการหมักปุ๋ยอินทรีย์เชิงพาณิชย์เฉพาะอย่างยิ่งโรงงานผลิตปุ๋ยอินทรีย์ ผู้ประกอบการส่วนใหญ่มีความต้องการเทคนิคด้านวิศวกรรมการหมักที่สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตด้านวัตถุดิบ ซึ่งมีแนวโน้มราคาเพิ่มสูงขึ้น อาทิ มูลวัว มูลสุกร มูลไก่ ฯลฯ ขณะเดียวกันระบบการหมักยังคงให้ประสิทธิภาพที่ดีและคุณภาพและปริมาณธาตุอาหารหลัก (N:P:K) ของปุ๋ยหมักที่ผลิตได้ยังคงเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยกรมวิชาการเกษตร พ.ศ. 2548 ผู้ประกอบการที่ผลิตปุ๋ยอินทรีย์หลายแห่งในจังหวัดเชียงใหม่ ต้องทำการปรับตัวและหาแนวทางรับมือกับปัญหาการขาดวัตถุดิบดังกล่าว เนื่องจากการส่งเสริมการผลิตปุ๋ยหมักระดับชุมชนและท้องถิ่นของภาครัฐอย่างเข้มข้น อาจส่งผลต่อการขาดแคลนวัตถุดิบสำหรับการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ได้ จากข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานที่ศึกษา พบว่าเทคโนโลยีการผลิตในปัจจุบันเป็นเทคโนโลยีระดับกลางแบบกองแถวพลิกกลับกองโดยใช้เครื่องจักรกล (รถตัก) อัตราส่วนวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ ได้แก่ มูลไก่:มูลวัว:ก้อนเห็ดเก่า:อื่นๆ (1:2.1:2.9:5.1) พบว่า อัตราส่วนธาตุอาหารหลัก (C/N) เริ่มต้นสำหรับการหมักของทางโรงงานมีค่าประมาณ 20-25 และต้นทุนด้านวัตถุดิบประมาณ 1 บาท/กก. ของวัสดุหมัก ทั้งนี้ต้นทุนด้านวัตถุดิบคิดเป็นประมาณร้อยละ 67 ของต้นทุนรวมการผลิตทั้งหมด (ข้อมูลโรงงานผลิตปุ๋ยอินทรีย์เชียงใหม่ฮิวโมสท์จำกัด)

เทคนิคการปรับเงื่อนไขด้านสิ่งแวดล้อมของการหมักปุ๋ยที่ทางโรงงานสามารถปรับประยุกต์ใช้ได้ทันทีทั้งระยะสั้นและระยะยาว โดยไม่กระทบต่อการปรับเปลี่ยนระบบหรือเทคโนโลยีการหมักวิธีหนึ่ง คือ การปรับอัตราส่วนธาตุอาหารหลัก (C/N) เริ่มต้นของการหมัก ความสมดุลธาตุอาหารหลักของวัสดุหมัก ถือเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งส่งผลต่อระบบการหมักและผลผลิตปุ๋ยอินทรีย์อย่างสำคัญ ระบบการหมักที่ค่า C/N เริ่มต้นสูงเกินไปอาจส่งผลให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำ เพราะจุลินทรีย์ขาดแคลนไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโต ในทางกลับกัน การเจริญเติบโตและการย่อยสลายของจุลินทรีย์จะเป็นไปอย่างรวดเร็วภายใต้เงื่อนไขปริมาณไนโตรเจนไม่ถูกจำกัด

และอาจทำให้เกิดสภาพการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้นได้ [1-4] นอกจากนี้ ค่า C/N ที่ต่ำเกินไป อาจทำให้เกิดการสูญเสียธาตุไนโตรเจนในรูปของก๊าซแอมโมเนียที่ระเหยได้ [5] ในกรณีที่ใช้ตะกอนน้ำเสียชุมชนเป็นแหล่งของธาตุไนโตรเจน ค่า C/N เริ่มต้นที่ค่อนข้างต่ำ อาจส่งผลให้คุณภาพปุ๋ยหมักลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณโลหะหนักในปุ๋ยหมัก [6] ถึงแม้การหมักปุ๋ยโดยทั่วไป จะควบคุมค่า C/N อยู่ในช่วงประมาณ 25-30 อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างองค์ประกอบทางเคมี (ย่อยสลายได้ง่ายหรือยาก) ของวัสดุหมัก ถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ [1, 7] Horwath et al. [8] ได้ศึกษาการหมักวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เงื่อนไขค่า C/N เริ่มต้นช่วง 50-60 โดยการหมักแบบกองแถวพลิกกลับกอง พบว่าระบบการหมักให้ประสิทธิภาพดีโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มธาตุไนโตรเจนเพื่อปรับอัตราส่วน C/N และความถี่ของการพลิกกลับกองเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมอัตราการย่อยสลายภายในกองหมัก ดังนั้นประสิทธิภาพของการหมักจึงไม่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของธาตุอาหารเพียงอย่างเดียว ยังขึ้นกับลักษณะของสารอาหาร (substrate) ที่ย่อยสลายได้ยากหรือง่ายเพียงใด รวมถึงเงื่อนไขทางด้านกายภาพของการหมัก เช่น ความชื้น ขนาดของวัสดุหมัก และปริมาณช่องว่างอากาศ เป็นต้น จากองค์ประกอบทางเคมีที่ย่อยสลายได้ง่ายของมูลสัตว์ อาทิ มูลวัว มูลสุกร และมูลไก่ ที่สูงถึงร้อยละ 60-80 ของของแข็งระเหย (Volatile solid) [9-10] โดยเฉพาะมูลไก่ ที่มีปริมาณไนโตรเจนที่ค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 3-6 [2] จึงถือเป็นแหล่งไนโตรเจนที่มีนัยสำคัญต่อคุณภาพปุ๋ยหมัก (ธาตุอาหาร) การศึกษานี้จึงได้ทดลองปรับอัตราส่วน C/N เริ่มต้นของระบบการหมักในช่วงปานกลาง-สูง เพื่อลดต้นทุนของวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ ขณะเดียวกันระบบการหมักยังคงสามารถดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดการศึกษาค้นคว้าได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของปุ๋ยหมัก การสูญเสียมวลแห้งและค่าคงที่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์ คุณภาพปุ๋ยหมักสุดท้าย รวมทั้งการประเมินค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบ และอัตราส่วนปุ๋ยต่อดินปลูกที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช (ผักกวางตุ้ง)

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 วัสดุหมักและถังปฏิกิริยา

วัสดุหมักหลักประกอบด้วยมูลวัวและมูลไก่ ส่วนวัสดุหมักร่วมในการศึกษาค้างนี้ ได้แก่ ขุยมะพร้าวและก้อนเห็ดเก่า ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ทางโรงงานรับซื้อจากผู้รับจ้างที่จัดหาให้จากแหล่งต่างๆ อาทิ ฟาร์มวัว ฟาร์มไก่ และฟาร์มเพาะเห็ด เป็นต้น ในเบื้องต้นวัสดุหมักทั้งหมดถูก

วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี (ตารางที่ 1) เพื่อทำการคำนวณหาอัตราส่วนผสมที่เงื่อนไขของการหมักในขั้นต่อไป โดยแปรผันค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) เท่ากับ 30, 40, 50, และ 60 และได้ทำการปรับค่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุผสมอยู่ในช่วงร้อยละ 50-60

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

| ลักษณะสมบัติ                       | วัสดุหมัก   |             |             |               | ดิน         |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|
|                                    | มูลไก่      | มูลวัว      | ก้อนเห็ด    | ขุยมะพร้าว    |             |
| pH                                 | 9.07±0.037  | 8.86±0.183  | 8.51±0.041  | 5.49±0.008    | 6.61±0.067  |
| Density (g/cc)                     | 0.36±0.313  | 0.29±0.227  | 0.35±0.882  | 0.07±0.070    | -           |
| Moisture content (%.wb)            | 13.10±0.050 | 10.20±0.070 | 57.17±1.032 | 14.30±0.070   | 28.21±0.820 |
| Ash (%.db)                         | 43.14±2.024 | 2.76±1.846  | 39.00±0.872 | 16.16±1.153   | 49.83±0.907 |
| Organic matter (%.db) <sup>1</sup> | 56.86±1.103 | 47.24±0.900 | 61.00±1.002 | 83.84±1.762   | 22.14±2.043 |
| TC (%.db) <sup>2</sup>             | 31.07±1.652 | 25.81±2.302 | 33.33±1.709 | 45.81±0.900   | 9.20±1.076  |
| C/N                                | 13.22±2.570 | 20.01±1.779 | 38.31±2.570 | 163.61±13.050 | 30.67±2.097 |
| TKN (%.db)                         | 2.35±0.924  | 1.29±0.304  | 0.87±1.034  | 0.28±4.313    | 0.30±0.613  |
| P (%.db)                           | 2.00±0.602  | 1.47±0.076  | 0.53±0.507  | 0.06±0.054    | 0.15±0.044  |
| K (%.db)                           | 2.29±0.434  | 1.62±0.327  | 0.87±0.061  | 1.2±0.103     | 0.17±0.050  |

หมายเหตุ: db=Dry basis; wb=Wet basis

<sup>1</sup>ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (%db)= 100-%ash (db)

<sup>2</sup>ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดคำนวณบนฐานน้ำหนักแห้งมีค่าเท่ากับปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดหารด้วย 1.8 [2]

ถังปฏิกิริยาที่ใช้ศึกษาสำหรับระยะที่ 1 (รูปที่ 1) ประกอบด้วยถังภายนอกที่ทำด้วยพลาสติกอะครีลิก (Acrylic Plastic) และถังภายในทำด้วยสแตนเลสสำหรับการตรวจวัดการสูญเสียมวลแห้ง ถังภายในขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18.5 ซม. สูง 24 ซม. (ปริมาตรใช้งาน 4.7 ล.) ทำการเจาะรูพุนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม. กระจาย

โดยทั่วทั้งถังถึงเพื่อทำหน้าที่ระบายอากาศด้านล่าง (ให้อากาศแก่วัสดุหมักโดยการกวนด้วยมือ) ถังภายในบรรจุวัสดุผสม (วัสดุหมักหลัก+วัสดุหมักร่วม) รวมน้ำหนักทั้งหมดประมาณ 3 กก. (น้ำหนักเปียก) ที่ทุกเงื่อนไขการทดสอบ



รูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

## 2.2 แผนการทดลอง

การศึกษาทดลองแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ดังนี้

ระยะที่ 1 ศึกษาผลของการจัดการค่า C/N เริ่มต้นช่วงปานกลางถึงสูง คือ C/N30, C/N40, C/N50, และ C/N60 ต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก และประสิทธิผลของระบบการหมักในห้องปฏิบัติการตามแผนการทดลอง (ตารางที่ 2) โดยทำการศึกษาทดลองจำนวน 2 ซ้ำ

ระยะที่ 2 ทำการขยายผลเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองในห้องปฏิบัติ ภายใต้การประเมินประสิทธิผลของระบบการหมัก จำนวนอย่างน้อย 2 เงื่อนไข (เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ) สู่ขั้นนำร่องที่โรงงาน (เชียงใหม่ ฮิวโมสท์ จำกัด) โดยดำเนินระบบการหมักปุ๋ยแบบกองแถวพลิกกลับกอง (เทคโนโลยีที่ทางโรงงานใช้อยู่ในปัจจุบัน) กองหมักขั้นนำร่องมีขนาดเท่ากับ 1.5 ม. x 2 ม. x 1 ม. (กว้างxยาวxสูง) และทำการหมักภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

กับแผนการทดลองระยะที่ 1

ระยะที่ 3 ศึกษาการใช้ประโยชน์ของปุ๋ยหมักทางด้านเกษตรกรรม ทั้งนี้ได้ทำการเพาะปลูกพืชชนิดที่ระยะการเก็บเกี่ยวสั้นและเป็นที่นิยมบริโภคในท้องตลาด (ผักกาดขาวดั่ง) ภายใต้การปรับอัตราส่วนปุ๋ยต่อดินปลูกโดยน้ำหนักร้อย 4 เงื่อนไข คือ 0:100, 5:95, 10:90, และ 15:85 โดยแต่ละเงื่อนไขประกอบด้วย 5 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ต้น คิดเป็น 20 ต้นต่อการทดสอบ 1 เงื่อนไข ควบคุมปริมาณน้ำที่ให้ (ทุกวัน) ประมาณ 33 ลิตร/ลบ.ม. ของดินปลูก และปริมาณแสงแดดที่เท่ากัน การวิเคราะห์เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของพืชทางสถิติ ที่ช่วงการเก็บเกี่ยว (35 วัน) โดยการตรวจวัดความยาวราก (ซม.), ความสูงต้น (ซม.), จำนวนใบ (ใบ), ขนาดใบ (ตร.ซม., ประมาณการจากผลคูณระหว่างความกว้างและความยาวของใบ), และน้ำหนักต้น (กรัม, มวลเปียก) ของแต่ละเงื่อนไขทดสอบ

ตารางที่ 2 แผนการทดลองระยะที่ 1

| การทดลอง | อัตราส่วนผสม*<br>มูลไก่ : มูลวัว : ก้อนเห็ด : ขุยมะพร้าว | ราคา**<br>(บาท/กก.) | เงื่อนไขการหมัก                |
|----------|--|---------------------|--------------------------------|
| C/N30    | 1 : 3 : 2 : 1.6  | 0.70                | - ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 50-60 |
| C/N40    | 1 : 1.2 : 2 : 4  | 0.40                | - ขนาดวัสดุหมักเล็กกว่า 1 นิ้ว |
| C/N50    | 1 : 0.6 : 2 : 5  | 0.35                | - กวนผสมด้วยมือทุก 3 วัน       |
| C/N60    | 1 : 0.2 : 2 : 6  | 0.30                | (พิจารณาระดับอุณหภูมิประกอบ)   |

หมายเหตุ: - \*อัตราส่วนผสมคิดในเทอมมวลเปียก (วัสดุผสมรวมทั้งหมดประมาณ 2.5-2.9 กก.) โดยหลักการผสมจะคำนึงถึงคุณภาพปุ๋ยหมัก (ธาตุอาหารหลัก N) ราคาต้นทุนวัตถุดิบ และค่า C/N ที่กำหนด ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงได้แปรเปลี่ยนอัตราส่วนของมูลวัวเพื่อลดต้นทุน ขณะเดียวกัน ได้ปรับค่า C/N ของวัสดุหมักด้วยขุยมะพร้าว (เนื่องจากในปัจจุบันทางโรงงานไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้) เป็นหลัก

- \*\*ราคารวมของวัตถุดิบโดยไม่รวมขุยมะพร้าว

- อัตราส่วนผสมในปัจจุบันของโรงงานเท่ากับ 1:2.1:2.9:5.1 (มูลไก่:มูลโค:ก้อนเห็ด:อื่นๆ) ซึ่งค่า C/N เริ่มต้นประมาณ 20-25 และมีต้นทุนการผลิตเท่ากับ 1 บาท/กก.

- ดำเนินระบบการหมักแบบกะ (batch operation)

### 2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาในระยะที่ 1 และระยะที่ 2 ได้ทำการเก็บตัวอย่างจากจุดต่างๆ ของถังปฏิกรณ์และของกองหมักให้ครอบคลุม หลังจากนั้นทำการคลุกเคล้าตัวอย่างให้ผสมกันอย่างทั่วถึง เพื่อนำวัสดุตัวอย่างมาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีในแต่ละชุดการทดลองอย่างละ 3 ซ้ำ

ระหว่างการหมักทำการตรวจวัดอุณหภูมิของระบบการหมักทุกวัน และติดตามการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุหมัก [11] เช่น ความชื้น, ความหนาแน่น, pH, คาร์บอนทั้งหมด (%TC), เจดาลไนโตรเจน (%TKN), ฟอสฟอรัส (%P), โพแทสเซียม (%K), และ C/N จนกระทั่งสิ้นสุดการหมัก ในการประเมินการย่อยสลายสารอินทรีย์ของวัสดุหมัก ได้คำนวณค่าการสูญเสียมวลแห้งและค่าคงที่การย่อยสลายคาร์บอนทั้งหมดต่อวัน (k) คำนวณค่าการสูญเสียไนโตรเจน (N loss) จากสมการที่รายงานโดย Sanchez-Monedero et al. [12] ดังต่อไปนี้

$$N\text{-loss (\%)} = 100 - 100[(X_1 N_2 / X_2 N_1)]$$

เมื่อ  $X_1$  และ  $X_2$  คือ ค่าความเข้มข้นของเถ้า (%Ash) ที่เริ่มต้นและที่สุดท้ายการหมัก ขณะที่  $N_1$  และ  $N_2$  คือ ค่าความเข้มข้นของเจดาลไนโตรเจน (%TKN) ที่เริ่มต้นและที่สุดท้ายการหมัก

การศึกษานิวทริพลของอัตราส่วนปุ๋ยต่อดินปลูกต่อการเจริญเติบโตของพืชทั้ง 4 เงื่อนไขทดสอบ (ระยะที่ 3) ได้วิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยวิธีการวิเคราะห์แบบ Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

### 3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

#### 3.1 การศึกษาระยะที่ 1 (ขั้นห้องปฏิบัติการ)

การเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก

ในช่วงสัปดาห์แรกของการหมัก พบว่า การพัฒนาอุณหภูมิของวัสดุหมักในทุกชุดการทดลองเพิ่มขึ้นสูงสุด โดยเฉพาะชุดการทดลองที่ C/N30 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 35.5 °C ขณะที่ชุดการทดลองที่ C/N40, C/N50, และ C/N60 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก่อนข้างใกล้เคียงกัน (29-32.8 °C) หลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง และในช่วงสุดท้ายของการหมักอุณหภูมิของทุกชุดการทดลองจะมีค่าแปรผันเล็กน้อยตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (รูปที่ 2ก) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ

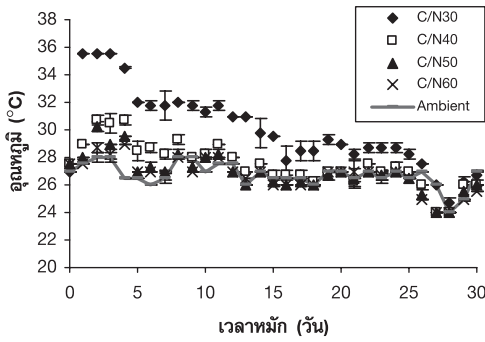
อุณหภูมิในระหว่างการหมัก จึงส่งผลให้ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ 60-73) ของวัสดุหมักมีค่าลดลง จากการศึกษพบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าความชื้นต่ำสุดประมาณวันที่ 9 ของการหมัก (ร้อยละ 39-47) ภายหลังจากการปรับความชื้นของวัสดุหมัก (วันที่ 12 ของการหมัก) ทำให้ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น และที่สิ้นสุดการหมัก (วันที่ 30 ของการหมัก) ค่าปริมาณความชื้นของทุกชุดการทดลองต่ำกว่าค่าเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย (ร้อยละ 50-59)

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการหมัก เป็นผลจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างรวดเร็วโดยจุลินทรีย์ เนื่องจากช่วงแรกของระบบการหมักมีปริมาณสารอาหารอย่างเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ ประกอบกับปัจจัยด้านกายภาพที่เหมาะสม (ขนาดวัสดุหมักและความชื้น) จึงส่งเสริมให้จุลินทรีย์ทำงานได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้พลังงานความร้อนเกิดขึ้นมากในช่วงแรกของการหมัก [1-2, 4, 13-14] การพัฒนาอุณหภูมิของชุดการทดลองที่ C/N30 (รูปที่ 2ก) ที่สูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ บ่งชี้ว่า ค่า C/N30 เป็นเงื่อนไขการหมักที่เกิดการย่อยสลายสูงสุด เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนในระบบการหมักที่สูงกว่า ไม่จำกัดการเจริญเติบโตและการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในช่วงแรกของการหมัก [3, 15] ดังนั้นกระบวนการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่าชุดการทดลองอื่น

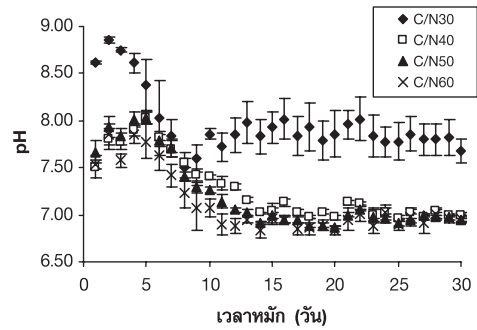
ค่า pH ของวัสดุหมักได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากค่าเริ่มต้น (7.5-8.6) โดยการเพิ่มขึ้นของค่า pH ในชุดการทดลองที่ C/N30 สูงสุด (8.9) ในวันที่ 2 ของการหมัก และ

มีค่า pH ประมาณ 8.0 ในช่วงวันที่ 6-10 ของการหมัก จากนั้นค่า pH มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจนเข้าสู่สภาวะเป็นกลาง (7.5-7.8) ที่สิ้นสุดการหมัก (วันที่ 30 ของการหมัก) สำหรับชุดการทดลองที่ C/N40, C/N50, และ C/N60 พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ไม่แตกต่างกัน โดยค่า pH สูงสุดมีค่าประมาณ 8.0 ในวันที่ 5 ของการหมัก หลังจากนั้นค่า pH ค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง และที่สิ้นสุดการหมัก ค่า pH ในชุดการทดลองต่างๆ ค่อนข้างคงที่โดยเข้าสู่สภาวะเป็นกลางที่ pH ประมาณ 7.0 (รูปที่ 2ข) การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (TC) ในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการหมักพบว่า ค่าคาร์บอนทั้งหมดของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการหมัก (รูปที่ 2ค) โดยเฉพาะชุดการทดลองที่ C/N30 พบว่า เปอร์เซ็นต์การลดลงของคาร์บอนทั้งหมด (ร้อยละ 22) จากค่าเริ่มต้นสูงสุดในวันที่ 9 ของการหมัก หลังจากนั้นวันที่ 10 ของการหมักเป็นต้นไป ค่าคาร์บอนทั้งหมดของทุกชุดการทดลองมีค่าแปรปรวนเล็กน้อยโดยอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 30-40 จนกระทั่งสิ้นสุดการหมัก ในทำนองเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของค่า C/N ของวัสดุหมัก จากการศึกษาพบว่า ในช่วงแรกของการหมักค่า C/N ของทุกชุดการทดลอง มีแนวโน้มลดลงมีค่า C/N อยู่ในช่วงประมาณ 26-38 และหลังจากวันที่ 15 ของการหมักเป็นต้นไป ค่า C/N ของทุกชุดการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อสิ้นสุดการหมักค่า C/N ของชุดการทดลองที่ C/N30, C/N40, C/N50 และ C/N60 มีค่าประมาณ 19, 31, 40 และ 41 ตามลำดับ (รูปที่ 2ง)

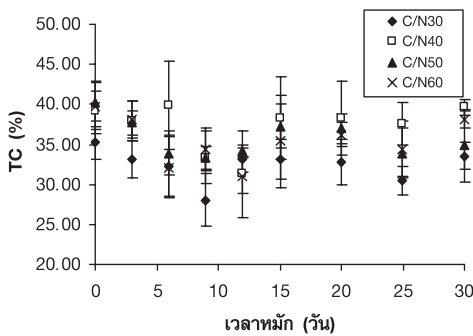




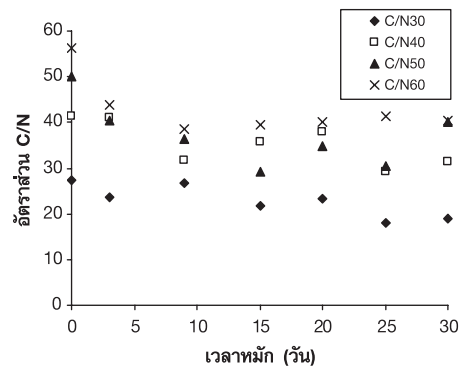
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

**รูปที่ 2** การเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและเคมีในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย (ระยะที่ 1)

(ก) อุณหภูมิ; (ข) pH; (ค) คาร์บอนทั้งหมด (TC); และ (ง) C/N

การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่า pH ที่เงื่อนไข C/N30 (รูปที่ 2ข) บ่งชี้ว่า กระบวนการ Mineralization ของสารประกอบไนโตรเจนและกิจกรรมการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใต้เงื่อนไขนี้ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิ (รูปที่ 2ก) และการลดลงของค่าคาร์บอนทั้งหมดและค่า C/N (รูปที่ 2ง) นอกจากนี้ภายใต้สภาวะที่มีความชื้น (ร้อยละ 50-60) ของการหมัก อีออนของแอมโมเนียมสามารถละลาย มีสภาพเป็นต่าง ดังนั้นค่า pH จึงสูงขึ้น [1, 3] ในทางตรงกันข้าม ปริมาณไนโตรเจนที่จำกัดภายใต้ชุดการทดลองที่ C/N40-C/N60 อาจส่งผลให้จุลินทรีย์ใช้ไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นสารประกอบและก๊าซแอมโมเนียได้

ค่อนข้างน้อย ประกอบกับที่เงื่อนไข C/N40-C/N60 มีการพัฒนาอุณหภูมิไม่สูงนัก ขณะที่ปริมาณมวลคาร์บอนทั้งหมดทั้งในส่วนที่ย่อยสลายง่ายและย่อยสลายยากของวัสดุหมักรวม (ก้อนเห็ดเก่าและขุยมะพร้าว) อยู่ในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง (ตารางที่ 2) จึงอาจส่งผลให้เกิดกระบวนการ N-immobilization โดยจุลินทรีย์เป็นหลัก และเกิดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียระเหย (NH<sub>3</sub> volatilization) ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ตลอดการทดลองจึงมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลอง C/N30 [3, 16] อย่างไรก็ตาม ที่สิ้นสุดการหมักค่า pH ของทุกชุดการทดลอง มีค่าค่อนข้างเป็นกลาง-ต่ำเล็กน้อย (7-7.7)



### การสูญเสียไนโตรเจนและมวลแห้งของ วัสดุหมัก

การระเหยของก๊าซแอมโมเนียเริ่มสังเกตได้ภายใน 3 วันแรกของการหมัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดการทดลองที่ C/N30 พบว่า เริ่มมีกลิ่นฉุนของแอมโมเนียที่เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายก่อนชุดการทดลองอื่น และระดับกลิ่นรุนแรงขึ้นในวันที่ 6 ของการหมัก ขณะที่ชุดการทดลองที่ C/N40-C/N60 เกิดกลิ่นขึ้นช้ากว่า (วันที่ 10-12) และช่วงระยะเวลาการเกิดกลิ่นสั้นกว่า นอกจากนี้ระดับกลิ่นไม่รุนแรงเท่ากับชุดการทดลองที่ C/N30 หลังจากวันที่ 21 ของการหมักเป็นต้นไป พบว่า กลิ่นที่เกิดขึ้นในชุดการทดลองที่ C/N30 และ C/N40 ค่อยๆ จางลงและเปลี่ยนเป็นกลิ่นคล้ายดินมากยิ่งขึ้นส่วนชุดการทดลองที่ C/N50 และ C/N60 ยังคงได้กลิ่นของขุยมะพร้าว จากการคำนวณการสูญเสียไนโตรเจนในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการหมักและการสูญเสียมวลแห้งที่สิ้นสุดการหมัก (วันที่ 37) พบว่า ที่เงื่อนไข C/N30 มีการสูญเสียไนโตรเจนและมวลแห้งสูงสุดคือร้อยละ 41 และ 181 กรัม ตามลำดับ ขณะที่เงื่อนไข C/N40-C/N60 พบว่า การสูญเสียไนโตรเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 7-32 และการสูญเสียมวลแห้งอยู่ในช่วง 43-48 กรัม (ตารางที่ 3)

ถึงแม้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ C/N30 เป็นเงื่อนไขที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ดีกว่าชุดการทดลองอื่นโดยมีการสูญเสียมวลแห้งสูงสุด (181 กรัม, ร้อยละ 15.4) อย่างไรก็ตามจากการคำนวณค่าการสูญเสียไนโตรเจน [12] พบว่า ระบบเกิดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปการระเหยของแอมโมเนียสูงสุดด้วยเช่นกัน (ร้อยละ 41) โดยเฉพาะในช่วงสองสัปดาห์แรกของการหมัก ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Cayuela et al. [17] ที่พบการสูญเสียไนโตรเจนในช่วงสองสัปดาห์แรกของการหมักวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรร่วมกับมูลสัตว์ประมาณร้อยละ 38-40 ภายใต้การดำเนินระบบกองแฉกแบบพลิกกลับกอง (Turned windrow) การดำเนินระบบการหมักแบบกองแฉกพลิกกลับกองถือเป็นปัจจัยหนึ่ง ที่ส่งผลต่อการสูญเสียไนโตรเจนของวัสดุหมักในรูปแอมโมเนียระเหยอย่างมีนัยสำคัญ ได้มีรายงานที่บ่งชี้ว่า การปรับเปลี่ยนเทคโนโลยีการหมักอินทรีย์วัตถุจากกองแฉกพลิกกลับกอง เป็น

เทคโนโลยีกองสถิตเติมอากาศโดยธรรมชาติหรือเครื่องจักรกล สามารถลดปริมาณการสูญเสียไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียระเหยของระบบการหมักลงได้ร้อยละ 40-80 [17-19] การสูญเสียไนโตรเจนที่น้อยกว่าในช่วงแรกของการหมักที่เงื่อนไข C/N50 และ C/N60 อาจเป็นผลจากวัสดุหมักมีความเข้มข้นของอินทรีย์คาร์บอนในปริมาณที่สูงขณะที่ความเข้มข้นของไนโตรเจนเริ่มต้นมีค่าต่ำเกินไป ประกอบกับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุหมักร่วม (ขุยมะพร้าว) ที่มีอินทรีย์คาร์บอนในรูปย่อยสลายยาก เช่น Lignin (ร้อยละ 41) และ Holocellulose (ร้อยละ 82) ในปริมาณที่สูง [20] ดังนั้นในช่วงแรกของการหมัก (Active stage) สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายจึงถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เป็นหลัก หลังจากนั้นจุลินทรีย์จึงจะทำการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจนต่างๆ และสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายยาก ตามลำดับ [1-2, 21] ถึงแม้ระบบการหมักที่ C/N50 และ C/N60 มีต้นทุนด้านวัตถุดิบที่ต่ำกว่า (0.30-0.35 บาท/กก.) และการสูญเสียไนโตรเจนที่เกิดขึ้นน้อยกว่าในช่วงสองสัปดาห์แรก (ร้อยละ 7-8) แต่เนื่องจากระบบการหมักที่เงื่อนไข C/N50 และ C/N60 มีข้อจำกัดด้านความสมดุลของธาตุอาหารหลัก อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีที่ย่อยสลายยากของวัสดุหมักร่วม (ก้อนเห็ดเก่าและขุยมะพร้าว) ดังกล่าวจึงส่งผลให้กิจกรรมการย่อยสลายสารประกอบคาร์บอนและไนโตรเจนเป็นไปอย่างช้าๆ ระบบการหมักมีประสิทธิภาพผลค่อนข้างต่ำ จึงเกิดการสูญเสียไนโตรเจนในช่วงแรกของการหมักค่อนข้างน้อย เมื่อสิ้นสุดการหมักลักษณะทางกายภาพของวัสดุหมักจึงไม่แตกต่างจากเริ่มต้นการหมักมากนัก เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบการหมักและต้นทุนวัตถุดิบในภาพรวมเบื้องต้นพบว่าเงื่อนไข C/N30 เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในขั้นนำร่อง ที่เงื่อนไขนี้ทางโรงงานสามารถลดต้นทุนด้านวัตถุดิบลงได้ประมาณ 0.30 บาท/กก. อย่างไรก็ตามเนื่องจากขนาดของการทดลองในห้องปฏิบัติการค่อนข้างเล็ก (4.7 ลิตร) จึงอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บอุณหภูมิของกองปุ๋ยหมัก ตลอดจนประสิทธิภาพของระบบการหมักลดต่ำลงได้ ดังนั้นในการศึกษาขั้นนำร่องจึงได้เลือกอัตราส่วน C/N40 ทำการศึกษาเปรียบเทียบเพิ่มอีกหนึ่งเงื่อนไข

**ตารางที่ 3** การสูญเสียไนโตรเจนและมวลแห้งของระบบการหมัก (ระยะที่ 1)

| การทดลอง | มวลแห้ง (กรัม)                      |                        |                               | การสูญเสียไนโตรเจน <sup>3</sup><br>(ร้อยละ) |
|----------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------|---|
|          | เริ่มต้น <sup>1</sup><br>(วันที่ 0) | สิ้นสุด<br>(วันที่ 37) | การสูญเสียโดยรวม <sup>2</sup> |   |
| C/N30    | 1176 ± 4.242                        | 858 ± 1.414            | 181 (15.4%)                   | 41  |
| C/N40    | 760 ± 2.828                         | 585 ± 4.242            | 48 (6.3%)                     | 32  |
| C/N50    | 668 ± 5.656                         | 499 ± 1.414            | 43 (6.4%)                     | 8   |
| C/N60    | 683 ± 4.242                         | 416 ± 2.828            | 45 (6.6%)                     | 7   |

หมายเหตุ: -<sup>1</sup> มวลเปียกและความชื้นเริ่มต้นของวัสดุผสมประมาณ 2.4-2.9 กก. และประมาณร้อยละ 60-73 ตามลำดับ

-<sup>2</sup> ค่าที่แสดงเป็นค่าที่หักลบมวลรวมของตัวอย่างวิเคราะห์ทั้งหมด

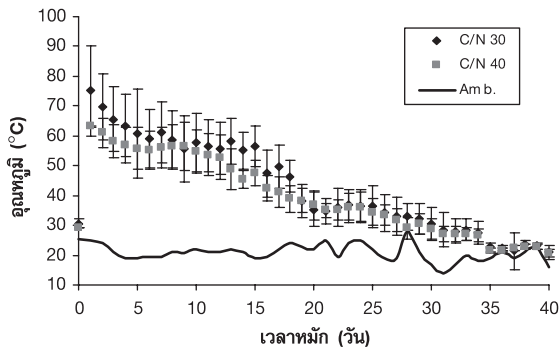
-<sup>3</sup> คำนวณที่สออสปีดาห์แรกของการหมัก

### 3.2 การศึกษาระยะที่ 2 (ขั้นนำร่องที่โรงงาน)

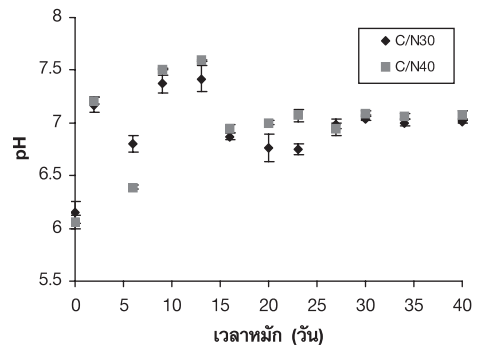
#### ประสิทธิภาพของระบบการหมักขั้นนำร่อง

ในช่วงแรกของการหมักพบว่า การพัฒนาอุณหภูมิกลางกองปุ๋ยหมักของทั้งสองชุดการทดลอง (C/N30, C/N40) เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 3ก) จนถึงระดับเทอร์โมฟิลิค (>55 °C) และทั้งสองกองหมักคงสภาพการหมักแบบเทอร์โมฟิลิคเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นระดับอุณหภูมิของทั้งสองกองหมักค่อยๆ คลายตัวลดลงและมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 25-40 °C จน

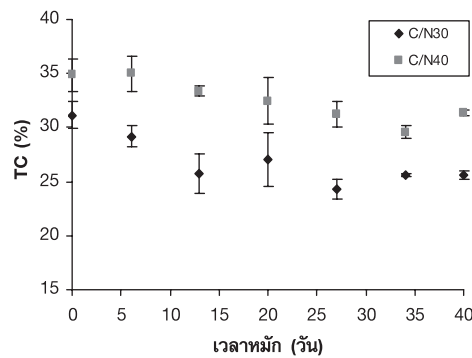
กระทั่งสิ้นสุดการหมัก (วันที่ 40 ของการหมัก) อุณหภูมิจะแปรผันมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความร้อนที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ส่งผลให้ความชื้นของวัสดุหมักทั้งสองกองหมักลดลงอย่างต่อเนื่องจากค่าเริ่มต้น (ร้อยละ 60-65) ภายหลังจากปรับความชื้นให้กับกองปุ๋ยทั้งสองชุดการทดลองพบว่า ความชื้นของวัสดุหมักเพิ่มสูงขึ้นใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น และในที่สุดท้ายของการหมัก ความชื้นของทั้งสองชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 50-55



(ก)



(ข)



(ค)

### รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและเคมีในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย (ระยะที่ 2)

(ก) อุณหภูมิ; (ข) pH; และ (ค) คาร์บอนทั้งหมด (TC)

การศึกษานี้พบว่า ขนาดของกองหมัก เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการพัฒนาอุณหภูมิของวัสดุหมัก อย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิกลางกองปุ๋ยหมักของทั้งสองเงื่อนไข คือ C/N30 และ C/N40 สามารถพัฒนาเพิ่มขึ้นสูงอยู่ในช่วงของเทอร์โมฟิลิก (>55 °C) เป็นเวลาไม่น้อยกว่าสองสัปดาห์ (รูปที่ 3ก) ส่งผลให้ระบบการหมักมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการฆ่าเชื้อโรคในปุ๋ยหมัก ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับการลดปริมาณเชื้อโรคในปุ๋ยหมัก (USEPA 40CFR503) ปุ๋ยหมักที่ได้จึงมีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้งาน [1-2] แม้ว่าอุณหภูมิในช่วงสามวันแรกของกองหมักที่เงื่อนไข C/N30 จะมีค่าสูงกว่าเงื่อนไข C/N40 (7-10 °C) อย่างไรก็ตาม การพัฒนาอุณหภูมิขึ้นนำร่องทั้งสองเงื่อนไขไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เนื่องจากเกิดสภาวะการหมักแบบเทอร์โมฟิลิกทั้งสองกอง นอกจากนี้ ในการทดลองขึ้นนำร่องมีขนาดของกองปุ๋ยหมักที่เหมาะสมต่อการพัฒนาอุณหภูมิของระบบการหมัก จึงส่งผลให้กองปุ๋ยหมักทั้งสองสามารถรักษาอุณหภูมิและความชื้นได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองในห้องปฏิบัติการ

ในช่วงเริ่มต้นของการหมักพบว่า ค่า pH ของทั้งสองชุดการทดลองเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้น (6-6.5) เป็น 7.4-7.6 ในวันที่ 13 ของการหมัก (รูปที่ 3ข) หลังจากนั้น ค่า pH ของทั้งสองชุดการทดลองเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ในช่วง 7.0-7.1 จนกระทั่งสิ้นสุดการหมัก (วันที่ 40 ของการหมัก) การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่ใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากการพัฒนาอุณหภูมิของทั้งสองกองหมัก

ค่อนข้างสูง (C/N30, C/N40) อยู่ในช่วงเทอร์โมฟิลิค ประกอบกับสัดส่วนปริมาณคาร์บอนทั้งหมดของวัสดุหมักร่วม (ก้อนเห็ดเก่าและขุยมะพร้าว) ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจนในระบบและการปลดปล่อยแอมโมเนียมือนที่ละลาย ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของทั้งสองเงื่อนไข (C/N30, C/N40) ในขั้นนำร่องจึงไม่แตกต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (TC) ในการศึกษาขั้นนำร่องสอดคล้องกับการศึกษาขั้นห้องปฏิบัติการคือ ค่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการหมักในทั้งสองชุดการทดลอง โดยเฉพาะกองหมักที่ C/N30 พบว่า การลดลงของค่า TC ค่อนข้างชัดเจนในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการหมัก ทั้งนี้ค่า TC ลดลงจากค่าเริ่มต้น (ร้อยละ 30-35) เป็นร้อยละ 25-26 (รูปที่ 3ค) ตลอดระยะเวลาการหมักของกองหมักที่ C/N40 พบว่า ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (ร้อยละ 30-35) ที่สิ้นสุดการหมักปริมาณคาร์บอนทั้งหมดของทั้งสองชุดการทดลองอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 26-32 การลดลงของคาร์บอนทั้งหมด (รูปที่ 3ค) บ่งชี้ว่า ในระหว่างการหมักเกิดการย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายโดยจุลินทรีย์ โดยแนวโน้มของอัตราการลดลงคาร์บอนทั้งหมดค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งสองเงื่อนไข การแปรปรวนเล็กน้อยของค่าคาร์บอนทั้งหมดในช่วงท้ายของการหมัก อาจอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกของการหมัก ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นหลัก ดังนั้นในช่วงท้ายของ

การหมัก จะเกิดกระบวนการ Immobilization อินทรีย์คาร์บอนบางส่วนประกอบกับเหลือปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ยากเป็นส่วนใหญ่ เมื่อทำการคำนวณปริมาณคาร์บอนทั้งหมดของวัสดุหมักบนฐานของของแข็งระเหย (น้ำหนักแห้ง) จึงอาจส่งผลต่อค่าคาร์บอนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงท้ายของการหมัก [5, 13-14] ตารางที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบการหมักขั้นนำร่องในเทอมของการสูญเสียมวลแห้งและค่าคงที่การย่อยสลายคาร์บอนทั้งหมด (k) พบว่า เปอร์เซนต์การสูญเสียมวลแห้งและค่าคงที่การย่อยสลายสารอินทรีย์ของทั้งสองกองหมัก (C/N30, C/N40) มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าในช่วงร้อยละ 33-43 และ 0.004-0.005 ต่อวัน

ถึงแม้อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ (มูลไก่:มูลวัว:ก้อนเห็ด:ขุยมะพร้าว) อาจแตกต่างกัน แต่ด้วยขนาดของกองปุ๋ยหมักขั้นนำร่อง จึงได้ส่งเสริมการพัฒนาอุณหภูมิให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าขั้นห้องปฏิบัติการ ดังนั้น การพัฒนาอุณหภูมิกลางกองหมักของทั้งสองเงื่อนไข (C/N30, C/N40) ที่สูงถึงระดับการหมักแบบเทอร์โมฟิลิค (>55 °C) จึงส่งเสริมให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายทั้งในเทอมของการสูญเสียมวลแห้ง (ร้อยละ 33-43) และค่าคงที่การย่อยสลาย (k=0.004-0.005) มีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลวิเคราะห์ค่าคงที่การย่อยสลายภายใต้เงื่อนไขที่อัตราการย่อยสลายซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลา ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอาหารในระบบ สอดคล้องกับการศึกษาของ Hamoda et al. [22] โดยสามารถอธิบาย อัตราการย่อยสลายด้วยปฏิกริยาอันดับหนึ่ง ที่ค่า  $r^2$  (Linear regression coefficient) อยู่ในช่วง 0.7-0.9 (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 การสูญเสียมวลแห้งและค่าคงที่ของการย่อยสลายคาร์บอนทั้งหมด (ระยะที่ 2)

| กองหมัก | มวลแห้ง <sup>1</sup> (กก.) |                     |                               | k (ต่อวัน) | $r^2$ |
|---------|----------------------------|---------------------|-------------------------------|------------|-------|
|         | สิ้นสุด (วันที่ 40)        | เริ่มต้น (วันที่ 0) | การสูญเสียโดยรวม <sup>2</sup> |            |       |
| C/N30   | 400                        | 223                 | 173 (43%)                     | 0.005      | 0.7   |
| C/N40   | 400                        | 265                 | 132 (33%)                     | 0.004      | 0.8   |

หมายเหตุ: <sup>1</sup> ค่าที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยการวัดมวล 2 ซ้ำ

<sup>2</sup> ค่าที่แสดงเป็นค่าที่หักลบมวลรวมของตัวอย่างวิเคราะห์ทั้งหมด

### คุณภาพของปุ๋ยหมัก

สิ้นสุดการหมักที่ระยะเวลาติดตามผลประมาณ 40 วัน (ตารางที่ 5) พบว่า ปุ๋ยหมักที่ได้จากกองหมักทั้งสองเงื่อนไข (C/N30, C/N40) มีคุณภาพทางด้านกายภาพและเคมีใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ปุ๋ยหมักของทั้งสองชุดการทดลองมีค่า pH เป็นกลาง ค่า C/N และสัดส่วนปริมาณธาตุอาหารหลัก (N:P:K) ที่ใกล้เคียงกัน และเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กรมวิชาการเกษตร (พ.ศ. 2548) กำหนดคือ เกรดปุ๋ยอินทรีย์ต้องมีปริมาณธาตุอาหารหลัก (N:P:K) ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 1:0.5:0.5 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้จากการ

สังเกตลักษณะทางกายภาพพบว่า เนื้อวัสดุหมักมีลักษณะไม่จับตัวเป็นก้อน เนื้อร่วนซุย และไม่เหลือสภาพเดิมของวัตถุดิบที่ใช้หมักในตอนเริ่มต้น เนื้อปุ๋ยมีสีดำเข้มขึ้น ไม่มีกลิ่นของแอมโมเนียและมีกลิ่นคล้ายดิน บ่งชี้ว่า ปุ๋ยหมักเริ่มเข้าสู่ภาวะเสถียรมากยิ่งขึ้นตั้งแต่วันที่ 40 ของการหมักเป็นต้นไปอย่างไรก็ตามเพื่อความเสถียร (Stability) และความได้ที่ของปุ๋ย (Maturity) มากยิ่งขึ้น ควรทำการบ่มปุ๋ยอย่างต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 2 สัปดาห์ก่อนนำไปใช้ประโยชน์ โดยอาจสังเกตจากการไม่เกิดกลิ่นฉุน รวมทั้งความนิ่งของอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการบ่ม [1, 23]

ตารางที่ 5 คุณภาพทางเคมีของปุ๋ยหมัก (ระยะที่ 2)

| กองหมัก | ระยะเวลาการหมัก (วัน) | พารามิเตอร์  |   |
|---------|-----------------------|--|---|
|         |                       | การทดลอง   | มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (2548)*                              |
| C/N30   | 40                    | pH (7.01)<br>C/N (18.6)<br>N:P:K (1.4%:0.8%:0.6%)<br>CEC (39.6 meq/100g) | pH (5.5-8.5)<br>C/N (20)<br>N:P:K (1%:0.5%:0.5%) โดยน้ำหนัก |
| C/N40   | 40                    | pH (7.07)<br>C/N (22)<br>N:P:K (1.4%:0.8%:0.8%)<br>CEC (46.2 meq/100g)   |   |

หมายเหตุ: - \*เกณฑ์คุณภาพปุ๋ยอินทรีย์ที่ผ่านช่วงการหมักบ่มเรียบร้อยแล้ว  
- เนื่องจากสูตรผสมของทางโรงงานได้เติมแร่ธาตุหรือสารต่างๆ จากแหล่งอื่นภายหลังการผลิตปุ๋ยหมักแล้วเสร็จ เช่น การผสมหินฟอสเฟต เป็นต้น จึงไม่สามารถทำการเปรียบเทียบคุณภาพทางเคมีกับการศึกษานี้ได้ ซึ่งมุ่งเน้นเฉพาะการศึกษาการปรับอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบหลักเป็นหลัก

### การประเมินทางด้านต้นทุนการผลิต

ต้นทุนการผลิต (ค่าวัตถุดิบ+ค่าขนส่ง) ของวัสดุหมักหลักคือ มูลวัว, มูลไก่ และก้อนเห็ดเก่า ตามอัตราส่วนผสมเดิมของทางโรงงานมีค่าประมาณ 1 บาท/กก. เมื่อนำมาคิดเปรียบเทียบกับราคาต้นทุนการผลิตที่การปรับอัตราส่วนใหม่ของเงื่อนไขการศึกษาขึ้นนำร่อง (C/N30, C/N40) พบว่า ราคาต้นทุนการผลิตของเงื่อนไข C/N30 (0.7 บาท/กก.) และเงื่อนไข C/N40 (0.4 บาท/กก.) ต่ำกว่า ต้นทุนการผลิตของอัตราส่วนผสมเดิมของโรงงานสูงถึงร้อยละ 30-50 (ตารางที่ 2) เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตพบว่า ต้นทุนการผลิตของเงื่อนไข C/N40 มีค่าต่ำกว่า

เงื่อนไข C/N30 เนื่องจากที่เงื่อนไข C/N40 มีการผสมของวัสดุหมักที่มีราคาสูง ได้แก่ มูลไก่และมูลโค ในปริมาณที่น้อยกว่า และได้ใช้วัสดุหมักร่วมที่มีราคาต่ำได้แก่ ก้อนเห็ดเก่าและขุยมะพร้าว เป็นตัวปรับอัตราส่วนแทนวัสดุหมักที่มีราคาสูง นอกจากนี้ผลการศึกษานำร่องที่โรงงาน บ่งชี้ว่า ประสิทธิภาพการย่อยสลาย (การสูญเสียมวลแห้งและค่าคงที่การย่อยสลายคาร์บอนทั้งหมด) ประสิทธิภาพของระบบการหมักและคุณภาพของปุ๋ยหมักที่ได้ (ระยะเวลาการหมัก 40 วัน) ของทั้งสองเงื่อนไขไม่แตกต่างกัน โดยเฉพาะสัดส่วนธาตุอาหารหลัก (N:P:K) ซึ่งจำเป็นต่อการใช้ประโยชน์ของปุ๋ยหมักทางด้านเกษตรกรรม

ดังนั้น หากพิจารณาภาพรวมด้านประสิทธิผลของระบบการหมักรวมถึงต้นทุนการผลิต เงื่อนไขที่ C/N40 ให้อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว ทางโรงงานสามารถลดต้นทุนการผลิตลงประมาณร้อยละ 50 ส่งผลต่อการได้เปรียบการแข่งขันทางการตลาด ขณะเดียวกันยังคงคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์ (ปุ๋ยอินทรีย์) ไว้เช่นเดิม อย่างไรก็ตาม กรณีที่ผู้ประกอบการอาจขาดแคลนหรือต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนของวัสดุหมักร่วม (ขุยมะพร้าว) ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการปรับอัตราส่วน C/N การศึกษานี้แนะนำให้เงื่อนไขที่ C/N30 เช่นกัน เนื่องจากปัจจุบันราคาวัตถุดิบและค่าขนส่งขุยมะพร้าวอาจมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นของวัสดุหมักร่วมย่อมส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตของผู้ประกอบการได้

### 3.3 การศึกษาระยะที่ 3 (การใช้ประโยชน์หมักทางเกษตรกรรม)

ผลการประเมินการเจริญเติบโตของพืชทางสถิติ (ผักกวางตุ้ง) ในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ โดยการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ (ความยาวราก ความสูงต้น จำนวนใบ ขนาดใบและน้ำหนักต้น) ที่ช่วงเก็บเกี่ยว 35 วัน (ตารางที่ 6) พบว่า การเจริญเติบโตของผักกวางตุ้ง (ความสูงต้น, จำนวนใบ, ขนาดใบ, และ น้ำหนักต้น) ที่เงื่อนไขอัตราส่วนผสมปุ๋ยต่อดินปลูก 10:90 มีค่าสูงสุดและแตกต่าง

ต่างจากเงื่อนไขอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ขณะที่เงื่อนไขอัตราส่วนผสมปุ๋ยต่อดินปลูก 15:85 พบว่า การเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งมีค่าต่ำสุดทุกพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด สำหรับกรณีอัตราส่วนผสมปุ๋ยต่อดินปลูก 5:95 และ 0:100 พบว่า การเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งค่อนข้างใกล้เคียงกันโดยที่อัตราส่วน 5:95 มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งที่ทั้งสองเงื่อนไขนี้ ยังคงต่ำกว่าเงื่อนไขอัตราส่วนผสมปุ๋ยต่อดินปลูก 10:90 เช่นกัน

การเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งที่น้อยกว่าภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนผสมปุ๋ยต่อดินปลูก 5:95 และ 0:100 อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของปุ๋ยที่น้อยเกินไปทำให้มีธาตุอาหารที่ไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช ในทางตรงกันข้าม การใส่ปุ๋ยในปริมาณที่เข้มข้นมากเกินไป ที่อัตราส่วนผสมปุ๋ยต่อดินปลูก 15:85 ส่งผลให้การเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งต่ำสุดทุกพารามิเตอร์ที่ตรวจวัด ความเข้มข้นของปุ๋ยหมักที่สูงเกินไป อาจส่งผลกระทบต่อเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ซึ่งสัมพันธ์กับระดับความเค็ม (Salinity) ของดิน จึงอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช ทั้งในด้านการงอกของเมล็ดและการเจริญเติบโตของพืชได้ [18, 24] ดังนั้นปุ๋ยต่อดินปลูกในอัตราส่วน 10:90 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน รองลงมาคือ อัตราส่วน 5:95, 0:100 และ 15:85 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 การเจริญเติบโตของผักกวางตุ้ง (ช่วงเก็บเกี่ยว) ที่อัตราส่วนผสมปุ๋ยต่อดินปลูกแตกต่างกัน

| ปุ๋ย:ดินปลูก (โดยน้ำหนัก) | พารามิเตอร์        |                    |                    |                    |                    |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                           | ความยาวราก (ซม.)   | ความสูงต้น (ซม.)   | จำนวนใบ (ใบ)       | ขนาดใบ (ตร.ซม.)    | น้ำหนักต้น (กรัม)  |
| 0:100                     | 3.75 <sub>ba</sub> | 8.6 <sub>c</sub>   | 2.7 <sub>b</sub>   | 11.85 <sub>b</sub> | 3.11 <sub>bc</sub> |
| 5:95                      | 5.07 <sub>a</sub>  | 8.77 <sub>cb</sub> | 3.55 <sub>ab</sub> | 17.0 <sub>ba</sub> | 5.51 <sub>c</sub>  |
| 10:90                     | 4.85 <sub>a</sub>  | 16.73 <sub>a</sub> | 4.75 <sub>a</sub>  | 22.63 <sub>a</sub> | 8.49 <sub>a</sub>  |
| 15:85                     | 2.5 <sub>b</sub>   | 5.5 <sub>b</sub>   | 2.0 <sub>b</sub>   | 12.23 <sub>b</sub> | 2.1 <sub>b</sub>   |

หมายเหตุ: - ค่าที่แสดงในตารางมีตัวอักษรห้อยต่างกันแสดงว่าเป็นค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )  
 - ขนาดใบ (ตร.ซม.) ประมาณการจากผลคูณระหว่างความกว้างและความยาวของใบ  
 - น้ำหนักต้น (กรัม) คิดในเทอมมวลเปียก



#### 4. สรุปผล

การศึกษากิจการจัดการธาตุอาหาร (C/N) ช่วงปานกลาง-สูงของโรงงานผลิตปุ๋ยอินทรีย์ ทั้งในขั้นห้องปฏิบัติการและขั้นนำร่องที่โรงงาน โดยประเมินประสิทธิผลของระบบการหมัก รวมทั้งค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบ พบว่า การปรับอัตราส่วนธาตุอาหารที่ C/N40 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมภายใต้การลดต้นทุนการผลิต ระบบการหมักที่มีประสิทธิผล และคุณภาพปุ๋ยหมักที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานที่กรมวิชาการเกษตรกำหนด (พ.ศ. 2548) ผลการประเมินการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้ง บ่งชี้ว่าอัตราส่วนผสมปุ๋ยต่อดินปลูกที่ 10:90 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้ประโยชน์ทางเกษตรกรรม

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ ภายใต้การสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงการอุตสาหกรรมสำหรับปริญญาตรี (IRPUS) ประจำปี 2548 และได้รับความอนุเคราะห์ด้านวัตถุดิบและทุนสนับสนุนบางส่วนจากบริษัท เชียงใหม่ฮิวโมสท์ จำกัด คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มา ณ โอกาสนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

1. Epstein, E., 1997, *The Science of Composting*, Lancaster : Technomic Publishing, U.S.A.
2. Polprasert C., 1996, *Organic Waste Recycling 2<sup>nd</sup> Edition*, John Wiley & Sons Ltd, England.
3. Bernal, M.P., Roig, A., Sanchez-Monedero, M.A., Paredes, C., and Garcia, D., 1996, "Nitrogen in Composting: Relevance of the Material and System Used", *In the Science of Compost (Part 2)*, 1<sup>st</sup> ed., by De Bertoldi, M., Sequi, P., Lemmes, B. and Papi, T., Chapman & Hall, England, pp. 1074-1077.
4. Haug, R.T., 1993, *The Practical Handbook of Compost Engineering*, Lewis Publishers, U.S.A.
5. Barrington, S.F., Moueddeb, K.EL., and Porter, B., 1997, "Improving Small-Scale Composting

of Apple Waste", *Canadian Agriculture Engineering*, Vol. 39, pp. 9-16.

6. Rodrigues, A.M., Ferreira, L.J., Fernando, A.L., Urbano, P., and Oliveira, J.S., 1995, "Co-Composting of Sweet Sorghum Biomass with Different Nitrogen Sources", *Bioresource Technology*, Vol. 54, pp. 21-27.
7. Lynch, J.M., 1993, "Substrate Availability in the Production of Compost". In: H.A.J. Hoitink and H. Keener (eds.), *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological, and Utilization Aspects*. Renaissance Publications, Worthington, Ohio.
8. Horwath, W.R., Elliot, L'F., and Churchill, D.B., 1995, "Mechanisms Regulating Composting of High Carbon to Nitrogen Ratio Grass Straw", *Compost Science and Utilization*, Vol. 3, pp. 22-30.
9. Chandler, J.A., Jewell, W.J., Gossett, J.M., Van Soest, P.J., and Robertson, J.B., 1980, "Predicting Methane Fermentation Biodegradability", *Biotechnology and Bioengineering Symposium No. 10*, John Wiley&Sons, Inc., New York, U.S.A.
10. Klien, S.A., 1972, "Anaerobic Digestion of Solid Waste", *Compost Science and Utilization*, January/February.
11. Raton, B., 2000, *Handbook of Reference Methods for Soil Analysis*, Rev. ed., CRC Press. Florida, U.S.A.
12. Sanchez-Monedero, MA., Bernal, M.P., Roig, A., Cegarra, J., and Garcia, D., 1996, "The Effectiveness of the Rutgers System and the Addition of Bulking Agent in Reducing N-Losses during Composting". In: Van Cleemput O, Hofman G., Vermoesen A, editors. *Progress in nitrogen cycling studies*. Dordrecht: Kluwer Academic; pp. 133-139.
13. Jolanun, B., Tripetchkul, S., Chiemchaisri, C., Chairprasert, P., and Towprayoon, S., 2005a. "The Application of a Fed Batch Reactor for Composting



of Vegetable and Fruit Wastes”. *Thammasat International Journal of Science and Technology*, Vol. 10, pp. 60-69.

14. Jolanun, B., Tripetchkul, S., Chiemchaisri, C., Chaiprasert, P., and Towprayoon, S., 2005b. “Effect of Moisture Content on Fed Batch Composting Reactor of Vegetable and Fruit Wastes”, *Environmental Technology*, Vol. 26, pp. 293-301.

15. Thambirajah, J.J., Zulkali, M.D., and Hashim, M.A., 1995, “Microbiological and Biochemical Changes during the Composting of Oil Palm Empty-Fruit Bunches: Effect of Nitrogen Supplementation on the Substrate”, *Bioresource Technology*, Vol. 52, pp. 133-144.

16. Eklind, Y. and Kirchmann, H., 2000. “Composting and Storage of Organic Household Waste with Different Litter Amendments. II: Nitrogen Turnover and Losses”, *Bioresource Technology*, Vol. 74, pp. 125-133.

17. Cayuela, M.L., Sanchez-Monedero, M.A., and Roig, A., 2006, “Evaluation Two Different Aeration Systems for Composting Two-Phase Olive Mill Wastes”, *Process Biochemistry*, Vol. 41, pp. 616-623.

18. Epstein, E., Taylor, J.M., and Chaney, R.L., 1976. “Effect of Sewage Sludge and Sludge Com-

post Applied to Soil on Some Soil Physical and Chemical Properties”, *J. Environ. Qual.*, Vol. 5, pp. 422-426.

19. De Bertoldi, M., Vallini, G., and Pera, A., 1982. “Comparison of Three Windrow Compost Systems”, *BioCycle*, Vol. 23, pp. 45-50.

20. ทรงพล คุณศรีสุข, 2544, การเปรียบเทียบผลของชนิดของ bulking agents ในการทำปุ๋ยหมักแบบกึ่งกะจากขยะอาหารครัวเรือน, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

21. Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., and Itavaara, M., 2000, “Biodegradation of Lignin in a Compost Environment: a Review”, *Bioresource Technology*, Vol. 72, pp. 169-183.

22. Hamoda, M.F., Abu Qudais, H.A., and Newham, J., 1998, “Evaluation of Municipal Solid Waste Composting Kinetics”, *Resource, Conservation and Recycling*, Vol. 23, pp. 209-223.

23. Rynk, R. and Richard, T.L., 2001, “Commercial Compost Production Systems”, *Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems*, Lewis Publishers, U.S.A.

24. ถวิล ครุฑกุล, 2540, *เกษตรยั่งยืน:การใช้ดิน-ปุ๋ย* ภาควิชาปฐพีวิทยา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.