บทที่ 4
ผลการวิจัย

การศึกษาการย่อยสลายตามธรรมชาติของผักตบชวา

การศึกษาการย่อยสลายตามธรรมชาติของผักตบชวาซึ่งผ่านการย่อยสับด้วยเครื่องเก็บผักตบชวาระบบโซ่พาลำเลียงแบบติดตั้งริมฝั่งที่จุดสกัดในแม่น้ำท่าจีน บริเวณหน้าวัดสัมปทวน อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม โดยนำมาใส่ในถังพลาสติกทรงกระบอกขนาดความจุประมาณ 100 ลิตร โดยเปิดฝาแล้วตั้งไว้ในที่โล่งอากาศถ่ายเทง่าย โดยทำการเติมผักตบชวา (วัสดุหมัก) เพียงครั้งเดียว และศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมัก เพื่อนำมากำหนดเกณฑ์การออกแบบวิธีการเร่งอัตราการย่อยสลายที่เหมาะสมต่อไป ในการศึกษานี้ใช้ระยะเวลาในการศึกษา 35 วัน ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้คือ

1. การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของวัสดุหมัก มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาของการหมัก กล่าวคือ ในช่วงแรกของการหมัก ลักษณะของวัสดุหมักยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพมากนัก คือยังคงเห็นลักษณะ ผักตบชวาที่ใช้เป็นวัสดุหมักนั้นมีลักษณะเป็นเศษพืชชิ้นเล็ก ๆ ขนาดยาวประมาณ 5 เซนติเมตร แต่มีกลิ่นฉุนรุนแรง มีน้ำขังที่ด้านล่างถังหมักเนื่องจาก ไม่ได้มีการทำที่ระบายน้ำด้านล่างไว้ด้วย เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ลักษณะทางกายภาพของผักตบชวาเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเริ่มเปลี่ยนเป็นสีดำและมีการจับตัวรวมกันเป็นก้อน และมีการยุบตัวของวัสดุหมักมากกว่าครึ่งหนึ่งของขนาดเริ่มต้น กลิ่นฉุนของวัสดุหมักลดลงอย่างมาก หลังจากวันที่ 21 ของการหมัก มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพน้อยมาก รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 7

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในถังหมักและอุณหภูมิของบรรยากาศ จะตรวจวัดเป็นประจำทุก ๆ 7 วัน พบว่าอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับอุณหภูมิของบรรยากาศ ดังแสดงในตารางที่ 8 อุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ในวันที่ 7 ของการหมัก (34 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผักตบชวาระหว่างการย่อยสลายตามธรรมชาติ

ลักษณะทางกายภาพ				
เริ่มต้น	วันที่ 7	วันที่ 14	วันที่ 21	วันที่ 28-35
ตัวอย่างมีขนาดโดยเฉลี่ย ยาวประมาณ 5 ซม. กว้าง ประมาณ 1 ซม. สีเขียวคล้ำเปียกแฉะ มีกลิ่นฉุน	ตัวอย่างมีขนาดโดยเฉลี่ย ยาวประมาณ 2 ซม. กว้าง ประมาณ 0.5 ซม. สีน้ำตาล-ดำ เปียก มีกลิ่นฉุนรุนแรง โดยเฉพาะที่ก้นถังซึ่งมีน้ำขังอยู่ มีการเกาะตัวรวมกันเป็นก้อน การยุบตัวประมาณครึ่งถัง	ตัวอย่างมีขนาดโดยเฉลี่ย ยาวประมาณ 0.5 ซม. กว้างน้อยกว่า 0.5 ซม. สีน้ำตาล-ดำ ชื้น มีกลิ่นเล็กน้อย การยุบตัวประมาณ ¾ ของถังหมัก	ตัวอย่างมีขนาดโดยเฉลี่ย ยาวประมาณ 0.5 ซม. กว้างน้อยกว่า 0.5 ซม. สีน้ำตาล-ดำ ที่ส่วนบนจะค่อนข้างแห้ง ส่วนด้านล่าง (ก้นถัง) ตัวอย่างค่อนข้างชื้น มีกลิ่นเล็กน้อย เกาะตัวรวมกันเป็นก้อน	ตัวอย่างมีขนาดโดยเฉลี่ย ยาวประมาณ 0.5 ซม. กว้างน้อยกว่า 0.5 ซม. สีน้ำตาล-ดำ แห้งและเกาะตัวรวมกันเป็นก้อน

ตารางที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการย่อยสลายตามธรรมชาติ

ถังหมัก	อุณหภูมิในระหว่างการหมัก (องศาเซลเซียส)					
	เริ่มต้น	วันที่ 7	วันที่ 14	วันที่ 21	วันที่ 28	วันที่ 35
A	29	34	32	25	27	28
B	30	33	31	25	27	28
C	30	34	31	25	27	28
บรรยากาศ	28	28	28	28	28	30

2. การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของวัสดุหมัก

การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของวัสดุหมักดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างทุก 7 วัน ตลอดระยะเวลาหมัก เพื่อตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไนโตรเจน (Nitrogen) ฟอสฟอรัส (Phosphorus) โพแตสเซียม (Potassium) ค่าความชื้น (Moisture) และนำค่าคาร์บอนและไนโตรเจนมาคำนวณหาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ผลวิเคราะห์แสดงไว้ในภาคผนวก ก (ตารางที่ 13)

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติขององค์ประกอบทางเคมี จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of varaince) แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้ LSD (Least significant difference) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีรายละเอียดดังนี้

2.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนในตัวอย่างผักตบชวาพบว่า ในช่วง 21 วันแรกของการหมัก ปริมาณคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย (ภาพที่ 11 (ก)) แต่หลังจากนั้นวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในวันที่ 28 และวันที่ 35 ของการหมักได้ 33.83% และ 31.03% ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนที่ลดลงไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเทียบกับปริมาณคาร์บอนที่วิเคราะห์ได้ในวันเริ่มต้นการหมัก (39.47%)

2.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจน

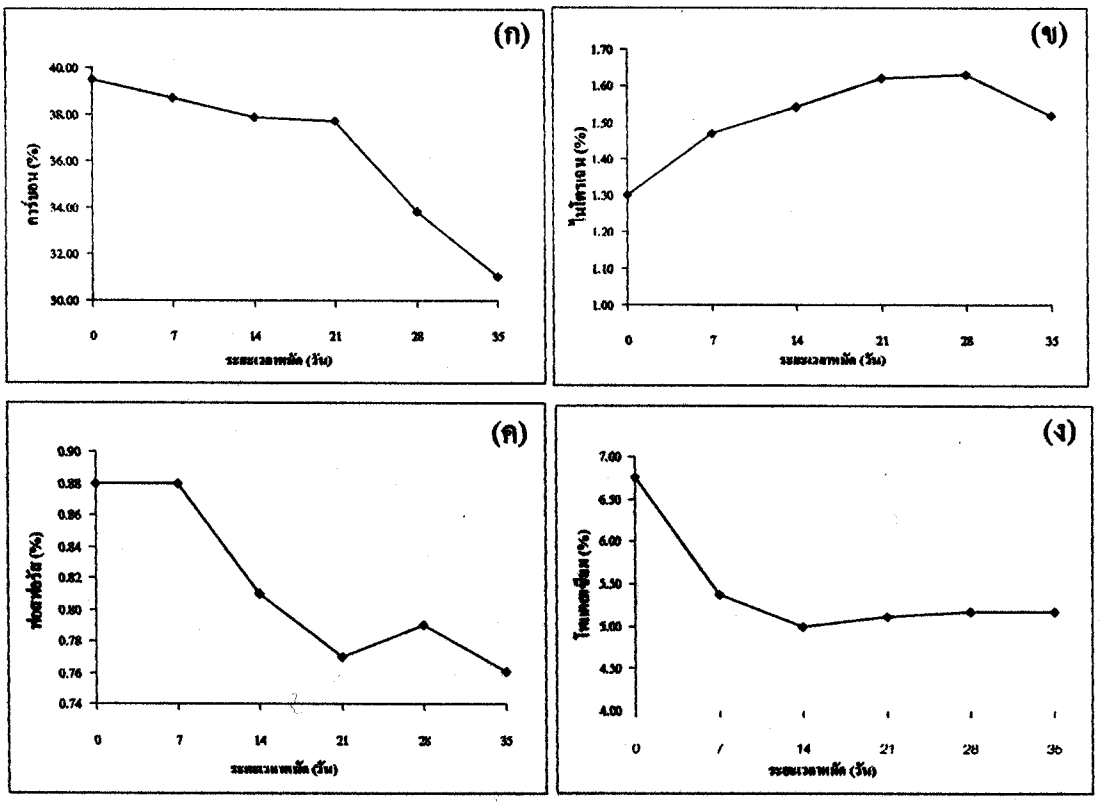
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในตัวอย่างผักตบชวาโดยเก็บตัวอย่างจากถังหมักทุกๆ 7 วันนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ พบว่าปริมาณไนโตรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 11(ข) โดยที่ปริมาณไนโตรเจนในตัวอย่างผักตบชวาที่เก็บในวันเริ่มต้นการหมักวิเคราะห์ได้ 1.30% ส่วนในวันที่ 7 วิเคราะห์ได้ 1.47% ซึ่งเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ หลังจากนั้นแล้วปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อสิ้นสุดขบวนการหมัก (วันที่ 35 ของการหมัก) ตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนได้ 1.52%

2.3 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัส

การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสของตัวอย่างผักตบชวาในถังหมัก พบว่ามีแนวโน้มลดลง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในช่วงสัปดาห์ที่ 2-3 (วันที่ 7-21 ของการหมัก) ดังแสดงในภาพที่ 11(ค) โดยเมื่อเริ่มต้นหมักนั้น ปริมาณฟอสฟอรัสที่วิเคราะห์ได้ 0.88% และเมื่อสิ้นสุดการหมักในในวันที่ 35 วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยตรวจวิเคราะห์ได้ 0.76%

2.4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแตสเซียม

ปริมาณโพแตสเซียมในตัวอย่างผักตบชวาในช่วงระยะ 14 วันแรกของการหมัก มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จาก 6.75% เหลือ 5.00% หลังจากนั้นแล้วพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก มีลักษณะค่อนข้างคงที่ดังแสดงในภาพที่ 11(ง)

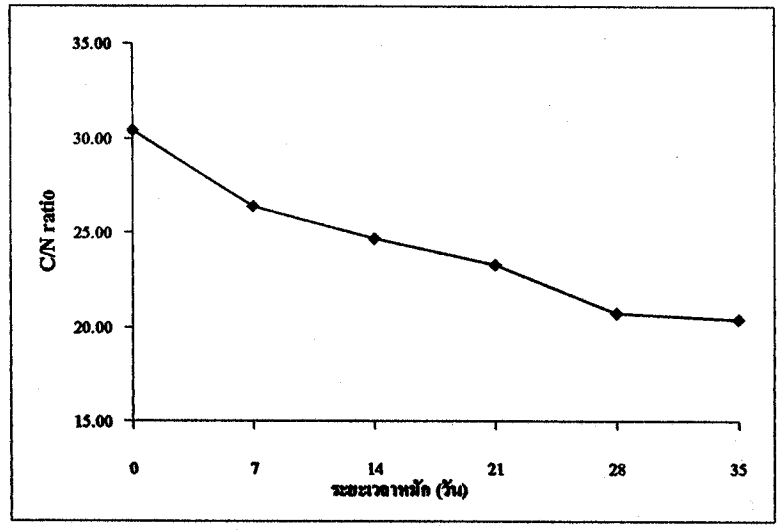


ภาพที่ 11 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงคาร์บอน (ก) ไนโตรเจน(ข) ฟอสฟอรัส (ค) และ โพแตสเซียม (ง) ของผักตบชวาในระหว่างการหมัก (หน่วยเป็น % โดยน้ำหนักแห้ง)

2.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน

จากผลวิเคราะห์คาร์บอนและไนโตรเจนที่ได้มานั้น นำมาคำนวณหาค่า C/N ratio ซึ่งเป็นดัชนีสำคัญอย่างหนึ่งในการบ่งบอกค่าความเหมาะสมทางเคมีของวัสดุหมักเริ่มต้น และเป็นดัชนีของคุณภาพปุ๋ยหมัก ซึ่งกำหนดให้ C/N ratio ไม่มากกว่า 20 (วรรณลดา สุนันทพงศ์ศักดิ์ และ ฉวีวรรณ เหลืองวุฒิวิโรจน์, 2540) และในการศึกษานี้ใช้ค่าดังกล่าวเพื่อกำหนดจุดยุติการหมักด้วย

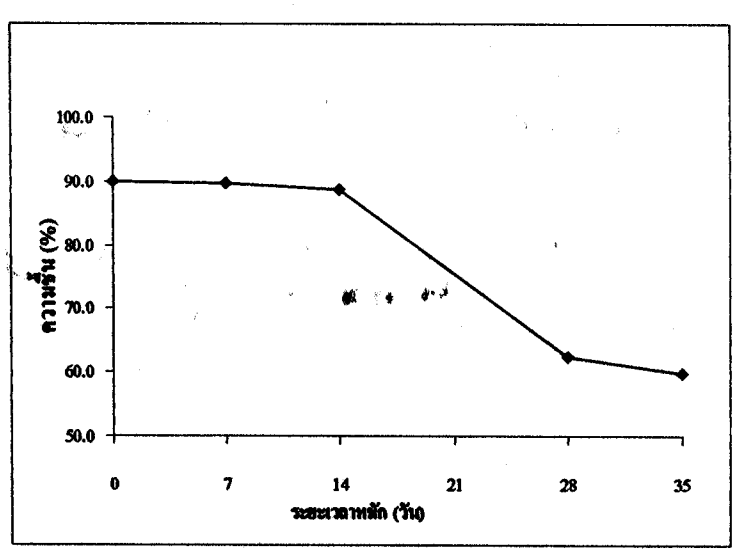
ทั้งนี้พบว่า C/N ratio เริ่มต้นมีค่า 30.37 เมื่อสิ้นสุดการหมักค่า C/N ratio ลดลงเหลือ 20.39 ในระหว่างการหมักนั้น C/N ratio มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 7 วันแรกของการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนของผักตบชวาในระหว่างการหมัก

2.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในตัวอย่างผักตบชวาโดยทำการเก็บตัวอย่างจากถังหมักทุก ๆ 7 วันตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง แล้ววิเคราะห์ค่าความชื้น พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปค่าความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (p <0.05) ดังแสดงในภาพที่ 13 โดยที่ค่าความชื้นในวันที่เริ่มต้นหมักมีค่าสูงถึง 90.00% ซึ่งลักษณะตัวอย่างของผักตบชวานั้นจะปรากฏเห็นมีน้ำเปียกแฉะได้อย่างชัดเจน เมื่อเวลาผ่านไปค่าความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสิ้นสุดการหมักซึ่งวิเคราะห์ค่าความชื้นได้ 59.90%



ภาพที่ 13 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของผักตบชวาในระหว่างการหมัก

การศึกษาอิทธิพลของการเติมเชื้อจุลินทรีย์ และ/หรือ การเติมอากาศต่อการย่อยสลายผักตบชวาเพื่อผลิตปุ๋ยหมัก

การผลิตปุ๋ยหมักเป็นกระบวนการทางชีวภาพโดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ซึ่งสามารถย่อยสลายอินทรียวัตถุให้เป็นสารที่คงรูปและมีคุณสมบัติเพื่อบำรุงดินให้เป็นประโยชน์แก่พืชต่อไป ในกระบวนการหมักแบบใช้ออกซิเจนจะให้ผลผลิตสุดท้ายคือปุ๋ยหมักได้อย่างรวดเร็วกว่าการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และไม่ส่งกลิ่นรบกวนรุนแรง โดยเฉพาะการหมักแบบแอคทีฟ (active method) ซึ่งเป็นการหมักโดยการเร่งอัตราการย่อยสลายด้วยการใช้เครื่องจักรช่วย เพื่อให้ออกซิเจนแทรกเข้าไปสัมผัสกับวัสดุหมักได้ทั่วถึง ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายอินทรียวัตถุได้เร็วขึ้น การศึกษานี้จึงได้ออกแบบขบวนการหมักเป็นแบบแอคทีฟ (active method) โดยทดลองเติมอากาศในอัตราต่าง ๆ ร่วมกับการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์

1. การคัดแยกจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลสในสภาวะอุณหภูมิสูง

เนื่องจากผักตบชวาที่นำมาใช้เป็นวัสดุหมักในการศึกษานั้น มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส (วารุณี พานิชผล และพูลศรี ศุกระรุจิ, 2540) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้คัดแยกจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลสเพื่อนำมาใช้เป็นหัวเชื้อสำหรับเร่งขบวนการหมัก

การคัดแยกจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลสที่ต้องการนั้น กระทำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ในช่วงที่ขบวนการหมักอยู่ในระยะการย่อยสลายอย่างเข้มข้น (active stage) ซึ่งอุณหภูมิจะสูงขึ้นถึง 50-60 องศาเซลเซียส (พิทยากร ลิ่มทอง, 2531) กิจกรรมการย่อยสลายอินทรียสารของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะลดลงทำให้ระยะเวลาสิ้นสุดของขบวนการหมักจะยาวนานออกไป ทั้งนี้จุลินทรีย์ที่เติมลงไปในช่วง active stage ต้องสามารถเจริญและดำเนินกิจกรรมการย่อยสลายอินทรีย์สารได้ ทำให้ระยะเวลาการหมักลดลง

จากการนำตัวอย่างชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ดิน ฟางข้าว ขี้เลื่อย รวมทั้งตัวอย่างปุ๋ยหมักจากฟางข้าว มาใช้ในการคัดแยกจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลสได้ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง พบว่าสามารถแยกจุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวได้จำนวน 4 ไอโซเลท (ตารางที่ 9) โดยเป็นจุลินทรีย์ในกลุ่มแบคทีเรียจำนวน 2 ไอโซเลท และเชื้อราจำนวน 2 ไอโซเลท รวมทั้งได้นำจุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการที่คัดแยกโดยวิสาข์ ลีปัญญา (2545) จำนวน 4 ไอโซเลท มาทำการศึกษาร่วมด้วย เมื่อนำจุลินทรีย์ทั้งหมดมาทดสอบความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลสโดยใช้อาหารทดสอบ Cellulose azure พบว่าจุลินทรีย์แต่ละไอโซเลทมีความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลสได้แตกต่างกันไป โดยเปรียบเทียบจากความเข้มของสีน้ำเงินที่แพร่ในอาหารทดสอบ (ตารางที่ 10) เชื้อรา SK5 ซึ่ง คัดแยกได้จากปุ๋ยหมักฟางข้าวให้กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสสูงสุด

ตารางที่ 9 แสดงจุลินทรีย์กลุ่ม thermophile ที่แยกได้จากตัวอย่างต่าง ๆ

รหัสเชื้อ	แหล่งที่มา	ประเภทของจุลินทรีย์
B09-2	วิสาข์ ลีปัญญา (2545)	แบคทีเรีย
B10-1		แอคติโนมัยซีส
H06-1		แอคติโนมัยซีส
K09-1		รา
NK	ตัวอย่างดินที่เก็บใน จ.นครสวรรค์	แบคทีเรีย
SK5	ตัวอย่างจากกองปุ๋ยหมักฟางข้าว จ.สระแก้ว	รา
YT	ตัวอย่างดินที่เก็บใน จ.ยโสธร	แบคทีเรีย
F	ตัวอย่างฟางข้าวที่เก็บจากกลางทุ่งนา	รา

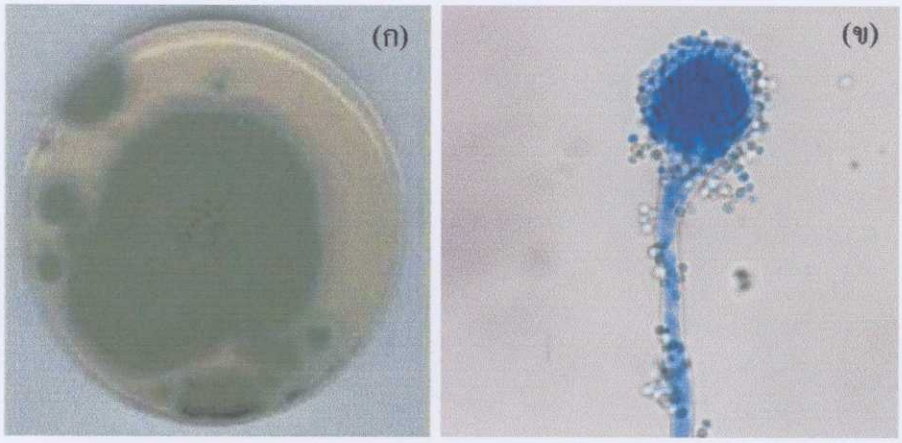
หมายเหตุ : การคัดแยกจุลินทรีย์ใช้อาหาร CMC บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลสของจุลินทรีย์กลุ่ม thermophile

รหัสเชื้อ	ความเข้มสีในอาหาร Cellulose azure		
	1%	2%	3%
B09-2	3+	3+	3+
B10-1	3+	4+	3+
H06-1	4+	4+	4+
K09-1	2+	3+	4+
NK	1+	-	-
SK5	4+	5+	5+
F	2+	-	-
YT	2+	-	-

หมายเหตุ : การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลสใช้อาหาร Cellulose azure บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน

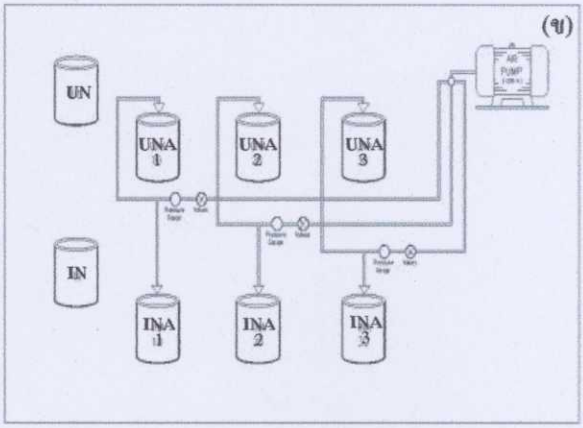
เมื่อนำเชื้อ SK5 มาจัดจำแนกโดยอาศัยลักษณะโคโลนีที่เจริญบนอาหาร PDA และลักษณะโครงสร้างที่สร้างสปอร์ที่ตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ สามารถจัดเชื้อราไอโซเลทนี้อยู่ในสกุล *Aspergillus* โดยโคโลนีที่เจริญบนอาหาร PDA มีลักษณะเส้นใยสีขาวเบาบาง สร้างคอนิเดีย (conidia) สีเขียวจำนวนมาก เมื่อตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบโครงสร้างที่สร้างสปอร์มีลักษณะเป็นก้านชู ส่วนปลายโป่งออกเป็น vesicle สปอร์รูปวงรี (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 (ก) ลักษณะโคโลนีของเชื้อรา SK5 บนอาหาร PDA และ (ข) โครงสร้างที่สร้างสปอร์

2. ผลการเติมเชื้อรา และ/หรือ การเติมอากาศต่อการย่อยสลายผักตบชวาเพื่อผลิตปุ๋ยหมัก

การศึกษาอิทธิพลของการเติมเชื้อรา และ/หรือ การเติมอากาศจะมีลักษณะการติดตั้งชุดการทดลองดังแสดงในภาพที่ 15 โดยที่เชื้อราที่คัดเลือกมานั้นจะเติมลงในถังหมักในปริมาณ 1×10^{8} สปอร์ต่อกิโลกรัม เมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้น (ประมาณ 45 องศาเซลเซียส) คือวันที่ 4 ของการหมัก ส่วนอากาศจะเติมด้วยอัตราการไหล 7.2, 14.4 และ 21.6 L/min ตลอดระยะเวลาการหมัก จะวัดอุณหภูมิในถังหมักเทียบกับอุณหภูมิในบรรยากาศเป็นประจำทุกวัน ทุก ๆ 7 วันจะเก็บตัวอย่างผักตบชวาในถังหมักมาวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ความชื้น แบคทีเรียและเชื้อรา สำหรับปริมาณโพแตสเซียมจะเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ในวันเริ่มต้นและวันสิ้นสุดการหมัก



ภาพที่ 15 (ก) ถังที่ใช้ในการหมัก (ข) ลักษณะการติดตั้งชุดทดลอง เมื่อ

UN คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม

UNA1 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม อัตราการไหลของอากาศ 7.2 L/min

UNA2 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม อัตราการไหลของอากาศ 14.4 L/min

UNA3 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม อัตราการไหลของอากาศ 21.6 L/min

IN คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม เติมเชื้อรา 1×10^8 สปอร์ต่อกิโลกรัม

INA1 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม เติมเชื้อรา 1×10^8 สปอร์ต่อกิโลกรัม และอัตราการไหลของอากาศ 7.2 L/min

INA2 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม เติมเชื้อรา 1×10^8 สปอร์ต่อกิโลกรัม และอัตราการไหลของอากาศ 14.4 L/min

INA3 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม เติมเชื้อรา 1×10^8 สปอร์ต่อกิโลกรัม และอัตราการไหลของอากาศ 21.6 L/min

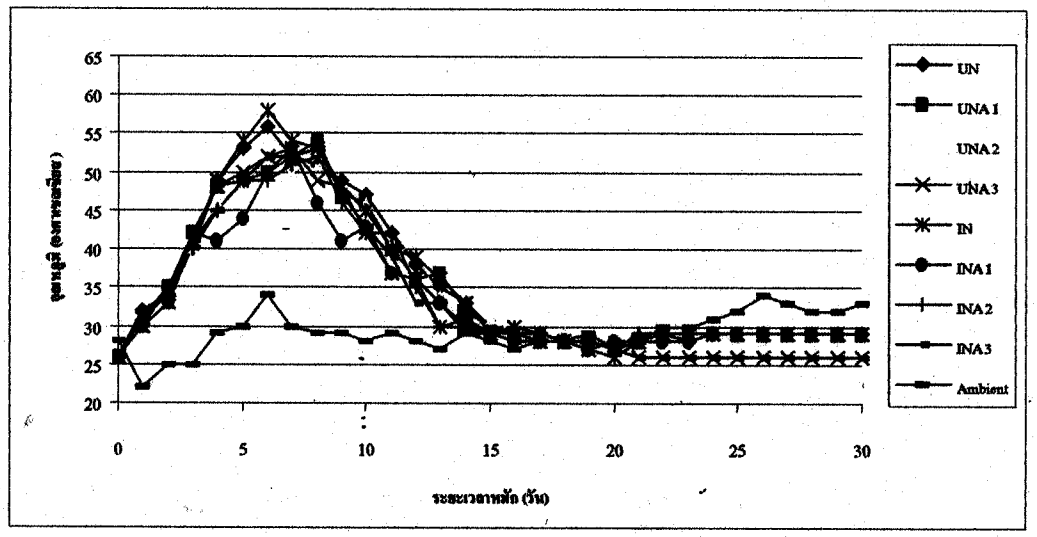
2.1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพในระหว่างการหมัก

ลักษณะทางด้านกายภาพของวัสดุหมักที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการหมัก และการทำงานในการย่อยสลายวัสดุหมักของจุลินทรีย์ โดยพบว่าลักษณะทางกายภาพของทุกถังหมักในช่วง 7 วันแรกของการหมัก วัสดุหมักมีการโดยยุบตัวลงประมาณ 20-30% ของปริมาตรเริ่มต้น ช่วงวันที่ 8-14 จะสังเกตเห็นวัสดุหมักโดยส่วนใหญ่สี น้ำตาล-ดำ มีความชื้นสูงขึ้น ทั้งนี้พบว่าที่ก้นถังวัสดุหมักจะค่อนข้างแฉะและมีกลิ่นฉุนรุนแรง รวมทั้งมีหนอนและแมลงหวี่ ซึ่งชุดที่ไม่มีการเติมอากาศจะพบลักษณะดังกล่าวอยู่นานกว่าชุดที่มีการเติมอากาศ

(ประมาณ 3 วัน) วัสดุหมักในทุก ๆ ถังหมักยุบตัวลงประมาณ 40-50% ของปริมาตรเริ่มต้น จนกระทั่งวันที่ 15 ของการหมักเป็นต้นไป สีของวัสดุหมักเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล มีกลิ่นลดน้อยลง กระทั่งสิ้นสุดการหมัก ลักษณะของวัสดุหมักจะเป็นเม็ดหรือก้อนขนาดเล็ก

2.2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในถังหมักระหว่างการหมัก

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในถังหมักซึ่งทำการวัดเป็นประจำทุกวัน เพื่อติดตามขบวนการย่อยสลาย ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ ในระยะที่มีการย่อยสลายอย่างเข้มข้น (active stage) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในถังหมัก พบว่าในระยะแรกของการหมัก อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิโดยเฉลี่ยในวันที่ 6 ของการหมักซึ่งเป็นวันที่อุณหภูมิเพิ่มสูงที่สุด วัดได้โดยเฉลี่ย 52 องศาเซลเซียส ในถังหมักชุดที่ไม่มีการเติมอากาศและมีการเติมหัวเชื้อ (รหัส IN) วัดอุณหภูมิได้สูงสุด 58 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อุณหภูมิในถังหมักส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 45-60 องศาเซลเซียส (thermophelic phase) ประมาณ 7 วัน คือวันที่ 4-10 ของการหมัก หลังจากวันที่ 15 ของการหมัก อุณหภูมิจะลดลงโดยมีค่าใกล้เคียงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิในบรรยากาศ (ภาพที่ 16)



ภาพที่ 16 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการหมักปุ๋ยจากผักตบชวา

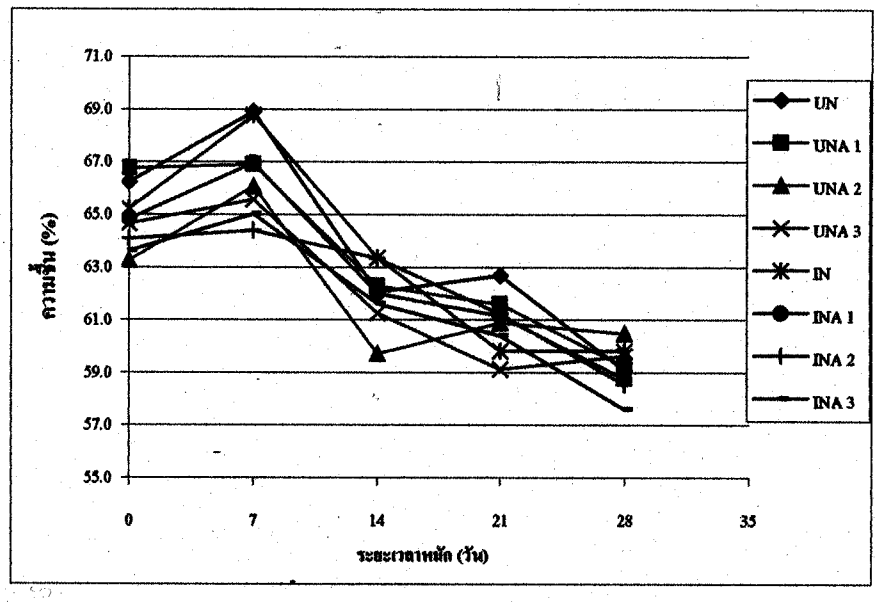
2.3 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมี

การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของวัสดุหมักดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และความชื้น เป็นประจำทุกอาทิตย์ ส่วนปริมาณ

โพแทสเซียมจะเก็บตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์เมื่อเริ่มต้นการหมักและสิ้นสุดการหมัก ผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนในระหว่างการหมักปุ๋ยจากผักตบชวา

ปริมาณคาร์บอนโดยเฉลี่ยทุกถังหมักเมื่อเริ่มต้นมีค่าประมาณ 41% เมื่อสิ้นสุดการหมักในวันที่ 28 วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนโดยเฉลี่ยได้ 30% ซึ่งปริมาณคาร์บอนในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเวลาผ่านไป โดยชุดที่มีการเติมหัวเชื้อและชุดที่มีการเติมอากาศ ปริมาณคาร์บอนจะน้อยกว่าชุดที่ไม่มีการเติมหัวเชื้อและไม่เติมอากาศ (รหัส UN) หรือปริมาณคาร์บอนลดลงได้ดีกว่า ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในวันที่ 21-28 ของการหมัก รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ 15

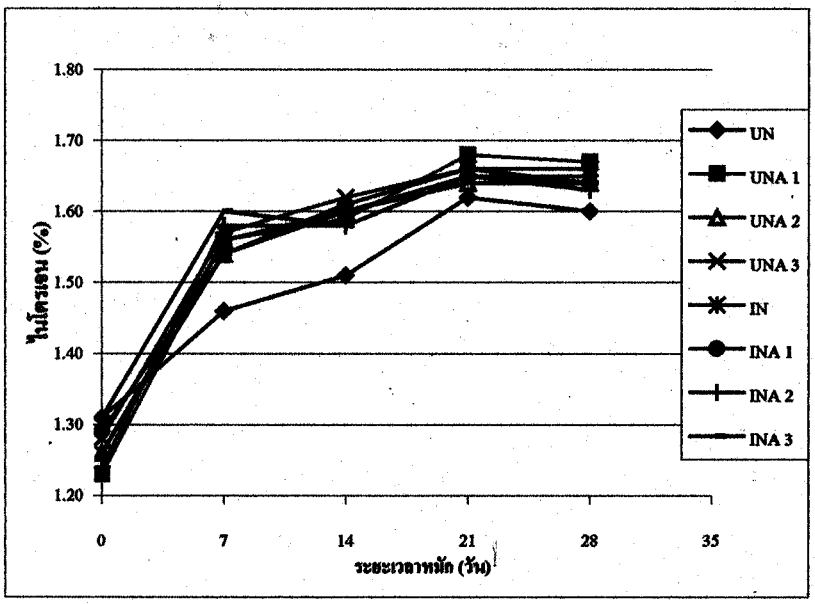


ภาพที่ 17 ผลการเติมหัวเชื้อรา *Aspergillus* sp. SK5 และ/หรือ การเติมอากาศที่อัตราต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนของผักตบชวาในระหว่างการหมักปุ๋ย

การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในระหว่างการหมักปุ๋ยจากผักตบชวา

ปริมาณไนโตรเจนในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากวันเริ่มต้นการหมัก (โดยเฉลี่ย 1.20%) โดยในวันสุดท้ายวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนโดยเฉลี่ยได้ 1.60% ดังแสดงในภาพที่ 18 ทั้งนี้ในถังหมักที่ไม่มีการเติมหัวเชื้อและไม่มีการเติมอากาศนั้น (รหัส UN) ปริมาณไนโตรเจนในวัสดุหมักที่ระยะเวลาต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ปริมาณไนโตรเจนในแต่ละถังนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงวันที่ 21

ของการทดลอง จากนั้นจะค่อนข้างคงที่ แต่การเติมหัวเชื้อ และ/หรือ การเติมอากาศ ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



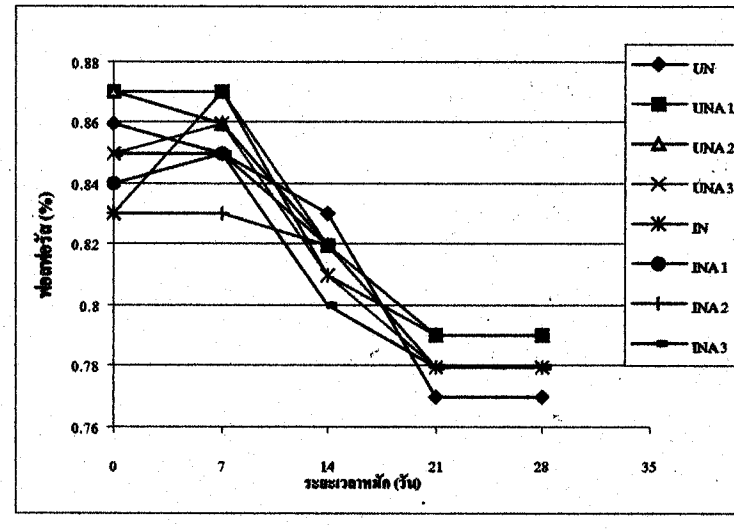
ภาพที่ 18 ผลการเติมหัวเชื้อรา *Aspergillus* sp. SK5 และ/หรือ การเติมอากาศที่อัตราต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนของผักตบชวาในระหว่างการหมักปุ๋ย

การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในระหว่างการหมักปุ๋ยจากผักตบชวา

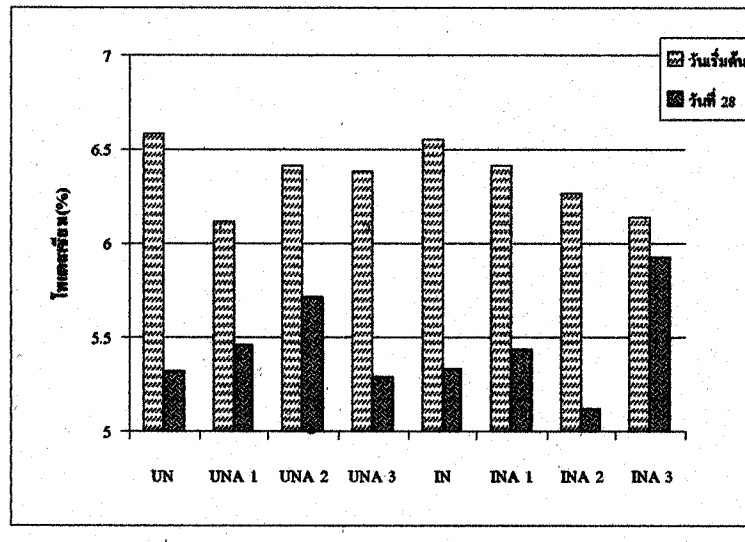
ปริมาณฟอสฟอรัสมีแนวโน้มลดลงซึ่งเห็นได้ชัดเจนในระหว่างวันที่ 7-21 ของการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 19 ปริมาณฟอสฟอรัสเมื่อเริ่มต้นการหมักมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.85% และวันสิ้นสุดการหมัก (28 วัน) มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.78% เมื่อพิจารณาในทางสถิติแล้วการเติมหัวเชื้อ และ/หรือ การเติมอากาศ พบว่าไม่มีผลต่อการลดลงของฟอสฟอรัสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่ไม่มีการเติมอากาศ รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ 15 และภาคผนวก ข ตารางที่ 17

การเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแตสเซียมในระหว่างการหมักปุ๋ยจากผักตบชวา

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแตสเซียมในตัวอย่างผักตบชวาโดยทำการเก็บตัวอย่างจากถังหมักในวันที่เริ่มต้นหมัก และวันที่สิ้นสุดการหมักมาทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโพแตสเซียม พบว่ามีปริมาณโดยเฉลี่ยจากทุกถังหมักลดลงจาก 6.30% เมื่อเริ่มต้นการหมักเหลือ 5.50% เมื่อสิ้นสุดการหมัก ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 19 ผลการเติมหัวเชื้อรา *Aspergillus* sp. SK5 และ/หรือ การเติมอากาศที่อัตราต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสของผักตบชวาในระหว่างการหมักปุ๋ย

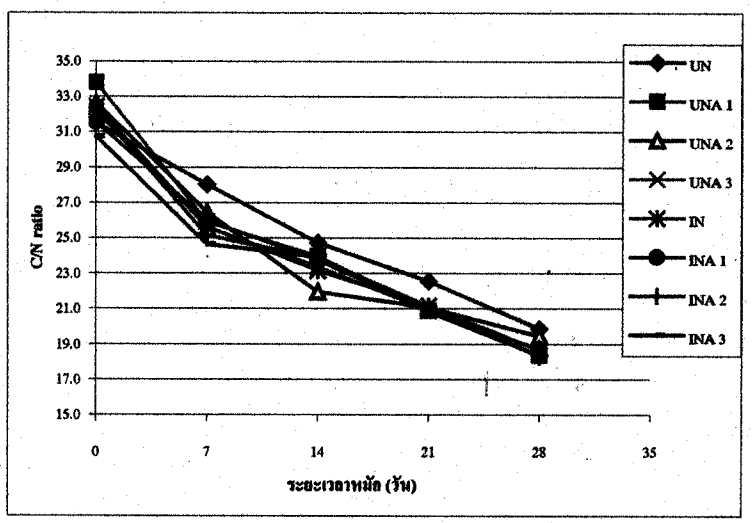


ภาพที่ 20 ผลการเติมหัวเชื้อรา *Aspergillus* sp. SK5 และ/หรือ การเติมอากาศที่อัตราต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแตสเซียมของผักตบชวาในระหว่างการหมักปุ๋ย

การเปลี่ยนแปลงค่า C/N ratio ในระหว่างหมักปุ๋ยจากผักตบชวา

ค่า C/N ratio ได้มาจากการคำนวณจากค่าคาร์บอนและไนโตรเจนที่วิเคราะห์ได้ใน แต่ละชุดการทดลอง พบว่า C/N ratio ของวัสดุหมักลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงใน ภาพที่ 21 เมื่อเริ่มต้นขบวนการหมักมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 33.00% และเมื่อสิ้นสุดการหมักในวันที่ 28 วัสดุหมักมีค่า C/N ratio โดยเฉลี่ยประมาณ 18.00% (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ 15)

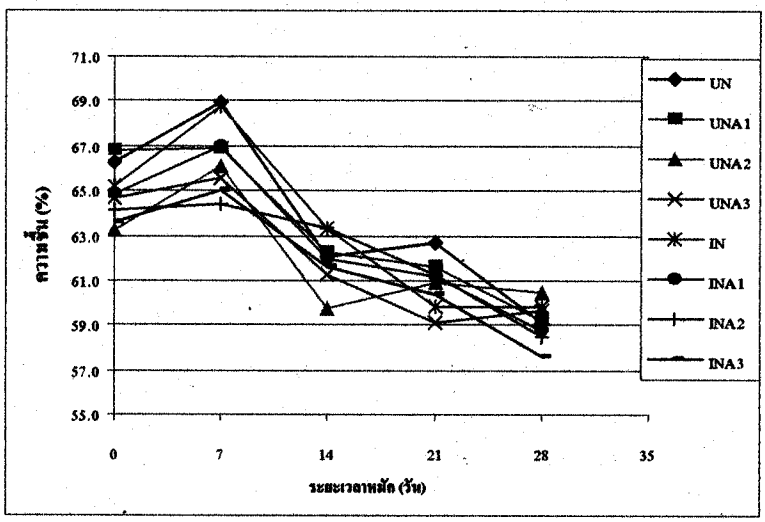
ทั้งนี้การเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์มีอิทธิพลต่อการลดลงของค่า C/N ratio อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่ไม่เติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ แต่การเติมอากาศที่อัตราต่าง ๆ กัน ไม่มีอิทธิพลต่อการลดลงของ C/N ratio อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมหัวเชื้อและอากาศ (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข ตารางที่ 20)



ภาพที่ 21 ผลการเติมหัวเชื้อรา *Aspergillus* sp. SK5 และ/หรือ การเติมอากาศที่อัตราต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลง C/N ratio ของผักตบชวาในระหว่างการหมักปุ๋ย

การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในระหว่างการหมักปุ๋ยจากผักตบชวา

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในผักตบชวา จะเก็บตัวอย่างจากถังหมักทุก ๆ 7 วันมาทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ผลการวิเคราะห์พบว่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุหมักมีค่าประมาณ 63-67% และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการหมักเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงวันที่ 14 ของการหมัก ซึ่งตรวจพบว่าวัสดุหมักมีความชื้นลดลงเหลือประมาณ 60-63% เมื่อสิ้นสุดการหมัก (28 วัน) พบว่าความชื้นมีค่าประมาณ 59-61% (ภาพที่ 22) โดยที่การเติมอากาศจะมีผลต่อการลดลงของความชื้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สังเกตได้ชัดเจนในชุดที่มีการเติมอากาศ 21.6 L/min ได้แก่ INA 3 (เติมหัวเชื้อและเติมอากาศ 21.6 L/min) และ UNA3 (ไม่เติมหัวเชื้อและเติมอากาศ 21.6 L/min) ดังรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก ตารางที่ 15



ภาพที่ 22 ผลการเติมหัวเชื้อรา *Aspergillus* sp. SK5 และ/หรือ การเติมอากาศที่อัตราต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผักตบชวาในระหว่างการหมักปุ๋ย

2.4 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางจุลชีววิทยา

การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางจุลชีววิทยา ทำโดยเก็บตัวอย่างทุก ๆ 7 วัน นำมาตรวจสอบปริมาณแบคทีเรียด้วยวิธี MPN (Most Probable Number) เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียระหว่างการหมัก และวัดปริมาณกลูโคซามีน (Glucosamine) เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อราในระหว่างการหมัก ปรากฏผลดังแสดงในตารางที่ 11

ปริมาณแบคทีเรียในระหว่างการหมักนี้จะทำการศึกษาที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเริ่มต้นการหมักอุณหภูมิภายในถังหมักโดยเฉลี่ยประมาณ 26 องศาเซลเซียส แบคทีเรียกลุ่ม mesophiles จะตรวจพบได้ในจำนวนที่มากกว่ากลุ่ม thermophiles (กลุ่ม mesophiles 2.1×10^{8}-1.1×10^{9} MPN/g ส่วนกลุ่ม thermophiles ตรวจไม่พบ) ทั้งนี้ในวันที่ 4-10 ของการหมัก อุณหภูมิในถังหมักอยู่ในช่วงประมาณ 45- 60 องศาเซลเซียส ซึ่งแบคทีเรียกลุ่ม mesophiles จะลดจำนวนลง ส่วนกลุ่ม thermophiles จะเพิ่มจำนวนมากขึ้นเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียในวันที่ 7 ของการหมัก (กลุ่ม mesophiles 5.0×10^{6}-5.4×10^{6} MPN/g ส่วนกลุ่ม thermophiles 9.0×10^{5}-2.8×10^{7} MPN/g) จนกระทั่งวันที่ 14 ของการหมักตรวจพบว่าแบคทีเรียกลุ่ม mesophiles กลับมาเพิ่มจำนวนมากขึ้น ในขณะที่กลุ่ม thermophiles ลดจำนวนลง ในช่วงวันที่ 21-28 ของการหมัก ซึ่งเป็นช่วงท้ายของขบวนการหมัก จำนวนแบคทีเรียทั้งกลุ่มmesophiles และ

ตารางที่ 11 ผลวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาของผักตบชวาในระหว่างการหมักทำปุ๋ย

ระยะเวลาหมัก (วัน)	ชุดการทดลอง[1]	อุณหภูมิในถังหมัก (°C)	ปริมาณแบคทีเรีย $\times 10^5$ (MPN/g)		ปริมาณเชื้อรา[2] (µg glucosamine /g)
			อุณหภูมิห้อง (30-35 °C)	50 °C	
0	UN	26	4,600	nd	2.11 ±0.27
	UNA 1	26	11,000	nd	1.48 ±0.36
	UNA 2	26	4,600	nd	2.41 ±0.27
	UNA 3	26	2,100	nd	1.38 ±0.32
	IN	26	2,100	nd	1.38 ±0.32
	INA 1	26	2,100	nd	1.80 ±0.05
	INA 2	26	2,100	nd	2.07 ±0.32
	INA 3	26	4,600	nd	1.04 ±0.38
7	UN	52	21	75	2.60 ±0.22
	UNA 1	52	15	9	1.88 ±0.27
	UNA 2	50	93	15	3.56 ±0.16
	UNA 3	53	150	15	3.71 ±0.38
	IN	54	200	280	4.59 ±0.11
	INA 1	53	21	15	5.31 ±0.38
	INA 2	51	28	28	4.70 ±0.16
	INA 3	52	43	200	3.67 ±0.32
14	UN	33	2,100	0.46	2.22 ±0.22
	UNA 1	32	7,500	1.1	2.11 ±0.05
	UNA 2	30	2,800	0.15	3.40 ±0.16
	UNA 3	30	4,600	0.21	2.07 ±0.32
	IN	33	2,100	0.15	2.68 ±0.32
	INA 1	30	4,600	1.1	2.79 ±0.27
	INA 2	31	11,000	1.1	3.75 ±0.11
	INA 3	31	11,000	0.46	2.68 ±0.32
21	UN	29	280	0.004	2.87 ±0.05
	UNA 1	28	4,600	0.007	3.10 ±0.05
	UNA 2	28	1,500	0.004	2.72 ±0.16
	UNA 3	26	2,100	0.004	4.63 ±0.38

ตารางที่ 11 ผลวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาของผักตบชวาในระหว่างการหมักทำปุ๋ย (ต่อ)

ระยะเวลาหมัก (วัน)	ชุดการทดลอง[1]	อุณหภูมิในถังหมัก (°C)	ปริมาณแบคทีเรีย $\times 10^5$ (MPN/g)		ปริมาณเชื้อรา[2] (μg glucosamine /g)
			อุณหภูมิห้อง (30-35 °C)	50 °C	
21	IN	29	2,100	0.004	2.95 ±0.27
	INA 1	28	930	0.007	3.06 ±0.32
	INA 2	28	1,500	0.004	3.56 ±0.27
	INA 3	26	1,500	0.004	3.10 ±0.38
28	UN	29	150	0.004	1.95 ±0.05
	UNA 1	29	150	nd	1.27 ±0.05
	UNA 2	28	75	0.004	2.07 ±0.32
	UNA 3	26	150	nd	1.88 ±0.16
	IN	29	210	nd	2.26 ±0.27
	INA 1	29	150	0.004	1.80 ±0.16
	INA 2	28	150	0.004	1.34 ±0.27
	INA 3	26	150	0.004	2.11 ±0.16

หมายเหตุ [1]รายละเอียดของชุดการทดลอง

UN คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม

UNA1 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม อัตราการไหลของอากาศ 7.2 L/min

UNA2 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม อัตราการไหลของอากาศ 14.4 L/min

UNA3 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม อัตราการไหลของอากาศ 21.6 L/min

IN คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม เติมเชื้อรา 1×10^8 สปอร์ต่อกิโลกรัม

INA1 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม เติมเชื้อรา 1×10^8 สปอร์ต่อกิโลกรัม และอัตราการไหลของอากาศ 7.2 L/min

INA2 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม เติมเชื้อรา 1×10^8 สปอร์ต่อกิโลกรัม และอัตราการไหลของอากาศ 14.4 L/min

INA3 คือ ตัวอย่างผักตบชวา 100 กิโลกรัม เติมเชื้อรา 1×10^8 สปอร์ต่อกิโลกรัม และอัตราการไหลของอากาศ 21.6 L/min

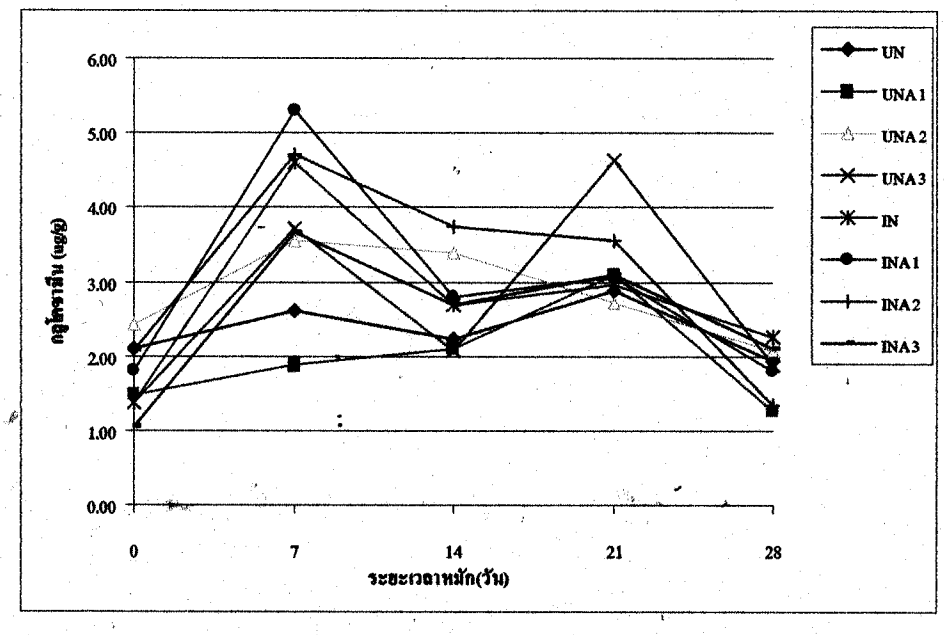
[2] การเติมเชื้อรา *Aspergillus* sp. SK5 ทำในวันที่ 4 ของการหมัก

nd หมายถึงตรวจไม่พบ

กลุ่ม thermophiles จะลดจำนวนลง โดยในวันที่ 28 ของการหมักพบว่ากลุ่ม mesophiles 7.5×10^{6}-2.1×10^{7} MPN/g ส่วนกลุ่ม thermophiles 0-4.0×10^{2} MPN/g

สำหรับลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณกลูโคซามีนในระหว่างการหมักนั้น แต่ละชุดการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นปริมาณกลูโคซามีนโดยรวมกับที่มีอยู่ในธรรมชาติด้วย โดยในวันเริ่มต้นการหมัก ชุดที่มีการเติมหัวเชื้อวิเคราะห์ได้ 1.04-2.07 μg/g ส่วนชุดที่ไม่มีการเติมหัวเชื้อวิเคราะห์ได้ 1.38-2.41 μg/g ทั้งนี้การเติมหัวเชื้อที่คัดแยกได้ (*Aspergillus* sp. SK5) จะกระทำในวันที่ 4 ของการหมัก ซึ่งในการเก็บผักตบชวามาวิเคราะห์อีกครั้งกระทำในวันที่ 7 ของการหมักนั้นพบว่าปริมาณกลูโคซามีนโดยเฉลี่ยทุกถังหมักมีค่าเพิ่มขึ้น (รวมทั้งชุดที่ไม่มีการเติมหัวเชื้อ) หลังจากนั้นโดยส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในภาพที่ 23 และตารางที่ 11

การเติมอากาศจะมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์ที่สำคัญต่อขบวนการหมักนี้เป็นจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนในการดำเนินกิจกรรมการย่อยสลายด้วย ซึ่งพบว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมอากาศจะมีจำนวนแบคทีเรียและเชื้อรามากกว่าชุดที่ไม่มีการเติมอากาศ



ภาพที่ 23 ผลการเติมหัวเชื้อรา *Aspergillus* sp. SK5 และ/หรือ การเติมอากาศที่อัตราต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อราโดยวิเคราะห์ปริมาณกลูโคซามีนในระหว่างการหมักปุ๋ยจากผักตบชวา