

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อการทำนายปริมาณ N P K ในน้ำปุ๋ยชีวภาพระหว่างการหมัก

นางสาวจิตติมา เจียมอนุสรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE AMOUNT OF NUTRIENT N P K IN LIQUID  
ORGANIC FERTILIZER

Miss Chittima Chiamanusorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Computational Science  
Department of Mathematics and Computer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อการทำนายปริมาณ N P K  
ในน้ำปุ๋ยชีวภาพระหว่างการผลิต

โดย

นางสาว จิตติมา เจียมอนุสรณ์

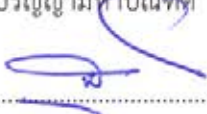
สาขาวิชา

วิทยาการคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

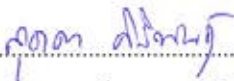
  
.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาคมหาสารสินธุ์)

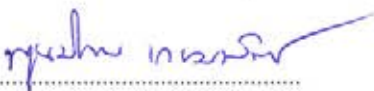
ประธานกรรมการ

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ สุชาดา ศิริพันธ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

  
.....  
(อาจารย์ ดร. เพชรอาภา บุญเสริม)

กรรมการ

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์)

กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

จิตติมา เจียมอนุสรณ์ : แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อการทำนายปริมาณ N P K ในน้ำปุ๋ยชีวภาพระหว่างการหมัก. (MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE AMOUNT OF NUTRIENT N P K IN LIQUID ORGANIC FERTILIZER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. สุชาดา ศิริพันธ์, 58 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยน้ำชีวภาพ รูปแบบการเจริญของจุลินทรีย์ โครงสร้างและองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักได้นำมาพิจารณาเป็นตัวแปรเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายปริมาณธาตุอาหาร N P K ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ซึ่งเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในน้ำปุ๋ยชีวภาพที่ระยะเวลาต่างๆ หลังการหมักได้ และทำการทดลองพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารที่เกิดขึ้นจากการหมักซึ่งมีส่วนผสมคือ ไบจามจุรีแห้ง 1 กิโลกรัม, จุลินทรีย์พด. 2 20 กรัม, น้ำ 50 ลิตร และกากน้ำตาลที่ปริมาณแตกต่างกัน คือ 0.5, 1 และ 2 กิโลกรัม ที่ทำการหมักในระบบปิด โดยทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 21 วัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากน้ำตาลที่ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ในระบบ สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากน้ำตาลกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง และนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ในการทำนายปริมาณธาตุอาหาร N P K ในน้ำปุ๋ยชีวภาพ โดยมีข้อจำกัดในการนำไปใช้คือสามารถใช้ประมาณค่าปริมาณ N P K ในช่วงระยะเวลาไม่เกิน 21 วันหลังจากการหมัก สำหรับการหมักที่มีส่วนผสมชนิดเดียวกับที่ใช้ในการทดลอง และมีปริมาณกากน้ำตาลอยู่ในช่วง 0.5 – 2 กิโลกรัม

ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต..... *จิตติมา เจียมอนุสรณ์*  
 สาขาวิชา..... วิทยาการคณนา..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... *สุชาดา ศิริพันธ์*  
 ปีการศึกษา..... 2554.....

# # 5172240623 : MAJOR COMPUTATIONAL SCIENCE

KEYWORDS : MATHEMATICAL MODEL / ORGANIC FERTILIZER / LOGISTIC FUNCTION

CHITTIMA CHIAMANUSORN: MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE AMOUNT OF NUTRIENT N P K IN LIQUID ORGANIC FERTILIZER. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUCHADA SIRIPANT, 58 pp.

This research studies the natural changed of fermentation process of organic fertilizer. The growth of microbial, a structure and compositions of materials were used as parameters to formulate a mathematical model for predicting the amount of nutrients N, P, K from the liquid organic fertilizer. In order to investigate the effect of a molasses on fermentation, the fertilizer was prepared by mixing materials which composed of *Samanea Saman* dry leaves, molasses, and water inoculated with super LDD. 2 (Land Development Department No.2) in batch fermentation. The experiment was performed to compare the amount of N, P, K by varying the amount of molasses to define the relationship between some parameters in the models and the amount of molasses. The amount of N, P, K was collected in usable form by plants. The models of this research can be used to predict the amount of N, P, K of the liquid organic fertilizer by varying the amount of molasses in the range of 0.5 to 2 kg of the same materials as used in the experiment, the period of the days after fermented are in the range of 0 to 21 days.

Department : Mathematics and Computer Science

Student's Signature

Field of Study : Computational Science

Advisor's Signature

Academic Year : 2011

ชิตติมา ชิยามนุสรณ์  
สุชดา สิริปนต์

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์สุชาดา ศิริพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความกรุณาของท่านที่ได้ให้ความรู้ และคำปรึกษาต่างๆ อีกทั้งท่านได้สละเวลาเพื่อให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล นาคมหาชาสินธุ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. เพชรอาภา บุญเสริม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ งามอร่ามวรางกูร ประธานกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในงานวิจัยนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) ภายใต้การบริหารของสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ประเทศไทย ที่ได้สนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต ฮงประยูร ภาควิชาปรัชญาศึกษาคณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำหรับความกรุณาของท่านที่ได้อธิบายและให้ความรู้ด้านการทำงานของจุลินทรีย์ และให้คำแนะนำในการหาข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคุณจันทร์จรัส วีรสาร และเจ้าหน้าที่ฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง สถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความช่วยเหลือในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้คำปรึกษา กำลังใจ และความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์สำหรับกำลังใจ และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดการทำวิจัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.2 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.3 วิธีการดำเนินงาน.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	3
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
3 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	5
3.1 ปุ๋ยชีวภาพ.....	5
3.2 การเจริญของจุลินทรีย์.....	5
3.3 ปัจจัยควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์.....	6
3.4 การหมัก.....	9
3.5 บทบาทของจุลินทรีย์ในการปลดปล่อยธาตุอาหาร.....	10
3.6 การเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารที่เกิดจากการหมักในระบบปิด.....	12
3.7 การสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน.....	13
4 การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	17
4.1 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารตั้งต้นในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	17
4.2 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารในสารผลิตภัณฑ์ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	21
4.2.1 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออนและแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	22
4.2.2 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	23
4.2.3 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	23

บทที่	ช หน้า
5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง.....	25
5.1 การหาค่าพารามิเตอร์.....	26
5.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลอง.....	33
5.3 การประมาณค่าปริมาณ N P K ที่เกิดขึ้นในการทำน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	34
5.4 การวิเคราะห์แบบจำลอง.....	37
6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	39
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	39
6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	40
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	40
รายการอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก.....	43
ภาคผนวก ก การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองแบบเป็นกลุ่มโดยใช้วิธีของ ดันแคน (Duncan's New Multiple Range Test).....	44
ภาคผนวก ข ปริมาณธาตุอาหารในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	46
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีของดันแคน.....	49
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	58



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
5.1	องค์ประกอบธาตุต่างๆ ที่พบในวัตถุดิบในการหมัก.....	25
5.2	ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการหมัก.....	26
ก.1	ค่าวิกฤตสำหรับการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองแบบเป็นกลุ่มโดยใช้วิธีของดันแคน ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95; ระดับนัยสำคัญ 0.05.....	45
ข.1	ปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออนและแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	46
ข.2	ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายได้ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	47
ข.3	ปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	48
ค.1	ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออนและแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 1 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05.....	49
ค.2	ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออนและแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 2 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05.....	50
ค.3	ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออนและแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 3 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05.....	51
ค.4	ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายได้ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 1 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05.....	52
ค.5	ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายได้ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 2 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05.....	53
ค.6	ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายได้ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 3 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05.....	54
ค.7	ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 1 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05.....	55
ค.8	ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 2 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05.....	56
ค.9	ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 3 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05.....	57

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	กราฟการเจริญของจุลินทรีย์.....	6
3.2	การสังเคราะห์สารเมทาบอลไลท์ปฐมภูมิและทุติยภูมิในจุลินทรีย์.....	10
4.1	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารตั้งต้นในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ.....	19
4.2	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารตั้งต้นในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในแต่ละช่วงที่เกิดจากสารประกอบต่างชนิด.....	20
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อปริมาณเซลล์สูงสุด ( $X_m$ ).....	20
5.1	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุ N P K ที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพจากการทดลอง 3 ชุด.....	30
5.2	กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุ N P K ที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง.....	34
5.3	ค่าประมาณของปริมาณไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมไอออนและไนเตรทไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ จากการหมักที่มีปริมาณกากน้ำตาล 0.5 – 2 กิโลกรัม.....	35
5.4	ค่าประมาณของปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ จากการหมักที่มีปริมาณกากน้ำตาล 0.5 – 2 กิโลกรัม.....	36
5.5	ค่าประมาณของปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ จากการหมักที่มีปริมาณกากน้ำตาล 0.5 – 2 กิโลกรัม.....	36
5.6	กราฟแสดงการทดสอบความสามารถในการทำนายค่าของแบบจำลอง (goodness of fit).....	38

## บทที่ 1

### บทนำ

เกษตรกรไทยส่วนใหญ่นิยมใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกพืชมากกว่าการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ ประเทศไทยยังคงมีความต้องการปุ๋ยเคมีอยู่มาก มีการนำเข้าปุ๋ยเคมีปีละหลายล้านตัน ในปีพ.ศ. 2550 มีการนำเข้าปุ๋ยเคมีเป็นจำนวนประมาณ 4.3 ล้านตัน (กรมวิชาการเกษตร, 2552)<sup>[1]</sup> ทั้งนี้เป็นเพราะปุ๋ยเคมีมีปริมาณธาตุอาหารหลัก N P K ที่ค่อนข้างเสถียร และสะดวกต่อการนำไปใช้ ในขณะที่ปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยอินทรีย์นั้นจะไม่คงที่ ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปุ๋ย ถึงแม้การใช้ปุ๋ยเคมีจะเป็นที่นิยม แต่การใช้ปุ๋ยเคมีนั้นเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาดินเสีย เนื่องจากสารเคมีที่ตกค้างในดิน ทำให้ดินอยู่ในสภาพที่ไม่เหมาะต่อการเพาะปลูก

การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ประเภทปุ๋ยชีวภาพนั้นเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับความสมดุลให้กับดิน ปุ๋ยชีวภาพคือปุ๋ยที่ได้จากการนำจุลินทรีย์ที่มีชีวิตมาใช้เพื่อเพิ่มปริมาณธาตุอาหารหรือเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุในดิน จุลินทรีย์มีบทบาทสำคัญในระบบนิเวศดิน (Soil ecosystem) ทำหน้าที่ย่อยสลายและแปรสภาพสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปสารอนินทรีย์ (Mineralization) ที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ หรือละลายสารประกอบอนินทรีย์ซึ่งละลายยากให้อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้จุลินทรีย์หลายชนิดยังมีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนจากอากาศ ทำหน้าที่ขับเคลื่อนวัฏจักรธาตุอาหาร (nutrient cycle) อยู่ตลอดเวลา ทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ หากดินมีสมบัติทางชีวภาพเหมาะสม กล่าวคือมีดุลยภาพด้านชนิด ประชากรและกิจกรรมของจุลินทรีย์ พืชย่อมมีแนวโน้มที่จะได้รับธาตุอาหารต่างๆมากขึ้น (de Boer et al.,2006)<sup>[2]</sup>

ในการปลูกพืชควรคำนึงถึงสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับชนิดพืชที่ปลูก การใช้ปุ๋ยจึงควรเลือกที่มีชนิดและปริมาณธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อความต้องการของพืช แต่เนื่องจากธาตุอาหารในปุ๋ยชีวภาพที่ได้จากการหมักวัตถุดิบต่างชนิดมีปริมาณแตกต่างกัน จึงทำให้มีผู้สนใจศึกษาเกี่ยวกับปุ๋ยหมักชีวภาพกันอย่างมากมาย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาเรื่องการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ ซึ่งเป็นแนวทางในการทำปุ๋ยอินทรีย์ให้ได้สัดส่วนของธาตุอาหารหลักที่ตรงกับความต้องการใช้งาน เพื่อให้เกษตรกรนำปุ๋ยอินทรีย์ไปใช้ได้ง่ายขึ้น โดยการทดลองปรับเปลี่ยนสัดส่วนของส่วนผสมในการหมัก และพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารที่เกิดในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ ศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารที่พบในระบบระหว่างการหมัก และสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ ที่เกิดจากการหมักโดยมีสัดส่วนของส่วนผสมที่แตกต่างกัน

## 1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในช่วงเวลาต่างๆ ที่เกิดจากการหมักโดยมีส่วนผสมที่แตกต่างกัน

## 1.2 ขอบเขตของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาารูปแบบและอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหาร N P K ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ ที่ทำการทดลองหมักในระบบปิด (Batch fermentation) โดยพิจารณาเฉพาะปริมาณธาตุอาหารที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้โดยตรง

1.2.2 ส่วนผสมในการหมักคือ ใบจามจุรีแห้ง กากน้ำตาล จุลินทรีย์พด.2 และน้ำ

1.2.3 ทดลองเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารเมื่อทำการหมักโดยมีส่วนผสมเริ่มต้นของปริมาณกากน้ำตาลที่แตกต่างกัน

## 1.3 วิธีการดำเนินงาน

1.3.1 ศึกษาความรู้พื้นฐานและงานวิจัยเกี่ยวกับจุลินทรีย์ ธาตุอาหารพืชและปุ๋ยชีวภาพ

1.3.2 สร้างแบบจำลองอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

1.3.3 ออกแบบการทดลอง ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

1.3.4 ทดสอบและปรับปรุงแบบจำลอง

1.3.5 วิเคราะห์ผล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารที่เกิดขึ้นในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ สามารถนำไปใช้ในการทำนายปริมาณธาตุอาหารในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ ณ เวลาต่างๆได้ ทำให้สามารถนำไปใช้ได้เหมาะสมและเกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น

## 1.5 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยในบทที่ 2 กล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานในด้านธาตุอาหารพืช จุลินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ

บทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

ในบทสุดท้ายกล่าวถึงข้อสรุป ปัญหา และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ปุ๋ยอินทรีย์เป็นปุ๋ยที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในธรรมชาติ ปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยอินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นระหว่างการหมัก ปริมาณธาตุอาหารที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณจุลินทรีย์ ในสภาวะที่เหมาะสมจะส่งผลให้จุลินทรีย์เจริญได้ดี และมีการย่อยสลายที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักแต่ละชนิดมีองค์ประกอบของธาตุที่แตกต่างกัน ทำให้ปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มีปริมาณธาตุอาหารที่แตกต่างกัน

การศึกษาเกี่ยวกับธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้สามารถนำปุ๋ยอินทรีย์ไปใช้ได้อย่างเหมาะสมยิ่งขึ้น สิ่งที่ต้องทราบเกี่ยวกับการหมัก ได้แก่ การเจริญของจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น การเกิดผลผลิต รวมไปถึงปัจจัยควบคุมต่างๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการหมัก และเพื่อให้ทราบถึงปริมาณธาตุอาหารที่เกิดขึ้นในการหมัก จึงควรทราบถึงปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุดิบในการหมักด้วย

#### 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1990 Zwietering และคณะ<sup>[3]</sup> ได้ศึกษาการเจริญของจุลินทรีย์และนำ Sigmoid ฟังก์ชัน 5 ชนิด ได้แก่ logistic, Gompertz, Richards, Schnute และ Stannard มาเปรียบเทียบและใช้ในการอธิบายรูปแบบการเจริญของจุลินทรีย์ และทำการหาค่าพารามิเตอร์ทางชีวภาพที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในแต่ละฟังก์ชัน โดยพิจารณาจากข้อมูลการเจริญของ *Lactobacillus plantarum*

ในปี ค.ศ. 1999 Touratier และคณะ<sup>[4]</sup> ได้ทำการศึกษาเรื่องการเจริญของแบคทีเรียที่ได้รับอิทธิพลมาจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) ในสารตั้งต้น และความเข้มข้นของสารตั้งต้น พบว่าปริมาณธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญในการคำนวณหาอัตราการผลิต การหายใจ และปริมาณแอมโมเนียที่ถูกลดปล่อยออกมาจากกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรีย ถึงแม้ว่าธาตุอื่นๆ เช่น ฟอสฟอรัส และวิตามินต่างๆ จะมีความสำคัญต่อการเจริญของแบคทีเรีย แต่ก็มิได้เป็นตัวจำกัดการเจริญของแบคทีเรีย ในกรณีที่ไม่พิจารณาถึงพื้นที่ผิวของการเจริญจะมีเพียงธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนเท่านั้นที่จะสามารถเป็นตัวจำกัดการเจริญของแบคทีเรียได้

ในปี ค.ศ. 2002 Sophie และ Marstorp<sup>[5]</sup> ได้ศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบคาร์โบไฮเดรตของพืชที่เป็นตัวกำหนดอัตราการเกิด mineralization ของธาตุไนโตรเจน โดยใช้ความรู้จากข้อมูลใน

งานวิจัยของ Kögel-Knabner<sup>[6]</sup> เรื่ององค์ประกอบเชิงโมเลกุลของสารอินทรีย์จากเศษพืชและจุลินทรีย์ที่เป็นปัจจัยสารอินทรีย์ในดิน พบว่าคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนสามารถพบได้โดยทั่วไปในรูปโครงสร้างเซลล์ของพืชและสารที่ถูกเก็บสะสมไว้ภายในเซลล์ และโปรตีนซึ่งเป็นแหล่งของไนโตรเจน มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดกระบวนการ Mineralization คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N Ratio) ที่เหมาะสมและเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์มีค่าอยู่ในช่วง 20-30

นอกจากงานวิจัยของ Kögel-Knabner จะให้ความรู้เรื่องสารประกอบอินทรีย์ที่พบในพืชและจุลินทรีย์แล้ว ยังช่วยให้ทราบถึงชนิดผลผลิตที่จะเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์เหล่านั้นเกิดการย่อยสลาย ซึ่งเป็นแนวทางในการเลือกวัตถุดิบไปใช้ในการหมักเพื่อให้เกิดสารอาหารตามต้องการได้

ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 Wang และคณะ<sup>[7]</sup> ศึกษาเรื่องประสิทธิภาพในการหมักไวน์แอปเปิลด้วยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่มีสารตั้งต้นเป็นน้ำตาลต่างชนิด (กลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส) และมีระดับความเข้มข้นต่างกัน และนำ non-linear kinetic model มาใช้ในการทำนายความเข้มข้นของน้ำตาลและปริมาณเอทานอลที่เกิดจากการบริโภคของยีสต์ในระหว่างการหมัก จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่าการเจริญของยีสต์ที่มีรูปแบบเป็นโลจิสติก มีความสัมพันธ์กับการผลิตเอทานอล และน้ำตาลต่างชนิดให้ผลในการหมักที่แตกต่างกัน แบบจำลองที่ใช้ในการทำนายเป็นแบบจำลองของจลนศาสตร์ในการหมัก โดยที่ค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองดังกล่าว สามารถใช้ทำนายผลได้ดีเมื่อใช้สารตั้งต้นเป็น กลูโคสที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 85 กรัมต่อลิตร ฟรุคโตสความเข้มข้นไม่เกิน 91.1 กรัมต่อลิตร หรือซูโครสที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 97.6 กรัมต่อลิตร

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองของ Wang เป็นค่าเฉพาะสำหรับการหมักด้วยสารตั้งต้นที่เป็นน้ำตาลชนิดนั้นๆ และอาจนำค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นไปใช้เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดในการหมักที่ใช้สารตั้งต้นและจุลินทรีย์ที่มีชนิดและปริมาณความเข้มข้นในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกันกับการทดลองนี้ได้

## บทที่ 3

### ความรู้พื้นฐาน

#### 3.1 ปุ๋ยชีวภาพ

ปุ๋ยชีวภาพคือปุ๋ยที่นำจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ที่ยังมีชีวิตอยู่ไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์และปลดปล่อยธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ออกมาเพื่อใช้ในการบำรุงดิน และเป็นธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของพืช

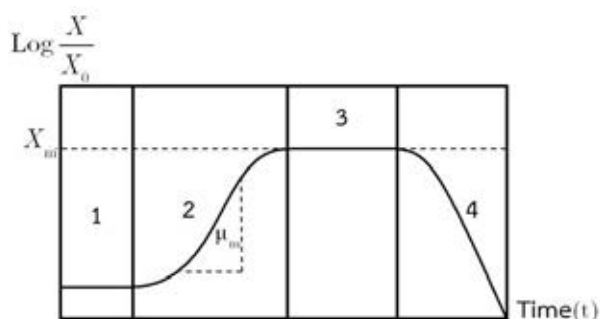
#### 3.2 การเจริญของจุลินทรีย์

การเจริญของจุลินทรีย์ที่มีวัตถุประสงค์เป็นอาหาร จุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งสำคัญในการสร้างพลังงานและสร้างเซลล์ สารอินทรีย์คาร์บอนส่วนใหญ่ที่ผ่านการย่อยสลายจะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพที่มีอากาศ กระบวนการย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่หากอยู่ในสภาวะที่ขาดอากาศ การย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้ช้าลง โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามกระบวนการหมัก (Fermentation) ผลผลิตที่ได้เกิดจากกระบวนการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์ เช่น กรดอินทรีย์, แอลกอฮอล์ เป็นต้น

สำหรับจุลินทรีย์เซลล์เดี่ยว การเจริญหมายถึงการเพิ่มจำนวนเซลล์และเพิ่มชีวมวล (Biomass) เกิดจากการแบ่งเซลล์แบบทวีคูณ (Exponential logarithmic) ลักษณะการเจริญของจุลินทรีย์สามารถแบ่งได้เป็น 4 ระยะ คือ (1) Lag phase (2) Exponential phase หรือ Log phase (3) Stationary phase และ (4) Death phase (รูปที่ 3.1) การเจริญของจุลินทรีย์ในระยะแรกเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ปรับตัวเข้าสู่สภาพการเจริญ ในระยะนี้จุลินทรีย์ยังไม่สามารถแบ่งเซลล์ได้ อัตราการเจริญในช่วงนี้มีค่าเป็นศูนย์อยู่ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นจำนวนประชากรของจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยอัตราการเจริญจำเพาะ การเพิ่มของประชากรจุลินทรีย์ต่อหน่วยเวลามีลักษณะเป็น Sigmoid curve (รูปที่ 3.1) จนกระทั่งเข้าสู่ระยะ Stationary phase ในระยะนี้อัตราการเจริญเท่ากับอัตราการตายของจุลินทรีย์ ประชากรของจุลินทรีย์จะมีจำนวนสูงสุด ( $X_m$ ) ในช่วงนี้ และไม่มี การเพิ่มจำนวนประชากรอีก และมีการขับของเสียที่เป็นพิษจากกระบวนการเมตาบอลิซึม และสุดท้ายเมื่อจุลินทรีย์ขาดอาหาร เกิดการสะสมของเสียและสารพิษภายในเซลล์ จำนวนประชากรของจุลินทรีย์จะลดลง (Zwietering, 1990)<sup>[3]</sup> การเปลี่ยนแปลงจำนวนประชากรของจุลินทรีย์ดังกล่าวสามารถเขียนได้ในรูปของสมการ

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m X \left( 1 - \frac{X}{X_m} \right) \quad (3.1)$$

กำหนดให้	$\mu_m$	แทนอัตราการเจริญจำเพาะ
	$X$	แทนจำนวนประชากรของจุลินทรีย์
	$X_m$	แทนจำนวนประชากรของจุลินทรีย์สูงสุดในระบบ
	$t$	แทนระยะเวลาการเจริญของจุลินทรีย์



รูปที่ 3.1 กราฟการเจริญของจุลินทรีย์

ผลเฉลยของสมการ (3.1) ที่เวลา  $t = 0$ ,  $X = X_0$  คือ

$$X = \frac{X_m}{1 + \left( \frac{X_m}{X_0} - 1 \right) e^{-\mu_m t}} \quad (3.2)$$

โดยที่  $X_0$  คือจำนวนประชากรของจุลินทรีย์ที่เวลาเริ่มต้น และเรียกสมการ (3.2) ว่า “สมการการเจริญของจุลินทรีย์” (Microbial growth equation) (Wang et al., 2004)<sup>[7]</sup>

### 3.3 ปัจจัยควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์

ปัจจัยควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ที่สำคัญ ได้แก่ ชนิดของจุลินทรีย์ อาหาร และสภาพแวดล้อม

#### 3.3.1 ชนิดของจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ทุกชนิด เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอาหารสมบูรณ์และสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม จะมีการเจริญโดยการเพิ่มขนาดและจำนวนเซลล์ แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเพิ่มจำนวนมากกว่าการเพิ่มขนาด โดยทั่วไปเมื่อจุลินทรีย์เจริญถึงขนาดที่เหมาะสมแล้ว ก็จะมีการแบ่งตัวในรูปแบบของการจำลองตัวเพิ่มเป็นสองเท่าในแนวขวาง แต่จุลินทรีย์บางชนิด เช่น *Rhodospseudomonas acidophila* มีการเพิ่มจำนวนโดยการแตกหน่อ (Budding) โดยหน่อเล็กๆ จะเจริญที่ปลายข้างหนึ่ง



ของเซลล์เดิม หน่อจะเพิ่มขนาดและแยกจากเซลล์เดิมกลายเป็นเซลล์ใหม่ จุลินทรีย์ในสกุล *Nocardia* มีการเจริญโดยการแตกออกเป็นหน่วยเล็กๆ (Fragmentation) จุลินทรีย์เหล่านี้มีการเจริญเป็นสายยาว สายเหล่านี้ก็จะหักเป็นหน่วยเล็กๆ ซึ่งอาจจะมีลักษณะเป็นท่อนยาวหรือกลม โดยแต่ละท่อนนั้นก็เจริญเป็นสายยาวเหมือนกับเซลล์เดิม ส่วนแบคทีเรียในสกุล *Streptomyces* สามารถสร้างสปอร์ชนิด conidiospores จำนวนมากต่อเซลล์ โดยมีผนังชั้นที่ปลายของไฮฟี (Hyphae) แต่ละสปอร์ก็จะเจริญเป็นเซลล์ใหม่ต่อไปได้ เป็นต้น ซึ่งลักษณะการเจริญก็จะมีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างจุลินทรีย์ชนิดนั้นๆ

### 3.3.2 อาหาร

อาหารสำหรับจุลินทรีย์ หมายถึง แหล่งพลังงาน แหล่งคาร์บอน แหล่งไนโตรเจน ตัวรับอิเล็กตรอน แร่ธาตุต่างๆ วิตามิน น้ำ รวมไปถึงออกซิเจน เป็นส่วนประกอบสำคัญที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญ ซึ่งอาหารที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการหมักแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน

แหล่งพลังงานในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์นั้นมีแหล่งที่มาแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ ซึ่งมีกลไกที่แตกต่างกันออกไป โดยจุลินทรีย์ที่สังเคราะห์แสงได้ จะได้พลังงานมาจากแสง ในขณะที่จุลินทรีย์บางพวก เช่น chemoorganotroph ได้พลังงานมาจากการออกซิไดซ์ของสารเคมีที่เป็นส่วนประกอบของอาหาร ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบคาร์บอน ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้ก็ยังมีจุลินทรีย์บางชนิดที่ใช้มีเทนหรือเมทานอลมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน ได้อีกด้วยเช่นกัน

ธาตุคาร์บอนมีความสำคัญต่อการเจริญของจุลินทรีย์ และเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์ จุลินทรีย์ต้องการธาตุคาร์บอนในปริมาณมากทั้งในสภาวะที่มีอากาศและไม่มีอากาศ จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะนำคาร์บอนมาใช้ในการสร้างพลังงานและสร้างเซลล์ในปริมาณที่ต่างกัน โดยจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศจะใช้คาร์บอนในการสร้างเซลล์ประมาณร้อยละ 50-55 ของน้ำหนักแห้งของเซลล์ ซึ่งต่างจากจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศจะใช้คาร์บอนในการสร้างเซลล์เพียงร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้งของเซลล์เท่านั้น โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้คาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งคาร์บอนในกระบวนการหมัก ได้แก่ แป้ง ข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งจากธัญพืชชนิดต่างๆ และนอกจากนี้ยังมีสารอื่นๆ ที่สามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้อีก ได้แก่ ซูโครส แลคโตส น้ำแ่ข้าวโพด เป็นต้น

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในปริมาณมาก จุลินทรีย์จะนำไนโตรเจนไปใช้ในการสร้างส่วนประกอบต่างๆของเซลล์ จุลินทรีย์ประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 8-12 ของน้ำหนักแห้งของเซลล์ และมีความต้องการไนโตรเจนในปริมาณที่ต่างกัน บางชนิดเจริญได้ในอาหารที่มีอินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย เกลือแอมโมเนียม และไนเตรท แต่ในบางชนิดนั้นต้องการไนโตรเจนที่

ได้จากสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจุลินทรีย์จะเจริญได้ดีในอาหารที่มีอินทรีย์ไนโตรเจนมากกว่าอาหารที่มีอินทรีย์ไนโตรเจน อาจใช้ในรูปของโปรตีน กรดอะมิโน หรือยูเรีย ในขณะที่จุลินทรีย์พวกมิวแทนท์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตกรดอะมิโน จะเจริญเฉพาะในอาหารที่มีกรดอะมิโนชนิดที่ตรงตามต้องการอยู่ด้วยเท่านั้น วัตถุดิบที่นิยมใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนได้แก่ ถั่วเหลือง กากถั่วเหลือง Casein hydrolysate และ Yeast extract เป็นต้น

ตัวรับอิเล็กตรอน หมายถึง สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในการถ่ายทอดอิเล็กตรอน ในการเจริญของจุลินทรีย์มีการสร้างพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยการออกซิไดซ์สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ทำให้มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา พลังงานที่ได้จากการออกซิไดซ์จะถูกปลดปล่อยออกมาพร้อมกับอิเล็กตรอนเหล่านั้น ในขณะที่มีการถ่ายทอดอิเล็กตรอน จุลินทรีย์จะนำพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาไปเก็บไว้ในรูป ATP ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีพลังงานสูง เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมต่อไป ซึ่งตัวรับอิเล็กตรอนในแต่ละกระบวนการจะใช้สารเป็นตัวรับแตกต่างกัน สำหรับกระบวนการหายใจในสภาวะที่มีอากาศ (Aerobic respiration) จุลินทรีย์จะใช้ ออกซิเจน ( $O_2$ ) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ในกระบวนการนี้จะให้พลังงานมาก เนื่องจากออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ในสภาวะที่ขาดแคลนออกซิเจน จุลินทรีย์บางชนิดสามารถนำสารอนินทรีย์ตัวอื่นมาเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนได้ เช่น  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $Mn^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $CO_2$ ,  $SO_4^{2-}$  เป็นต้น โดยพลังงานที่ได้จะลดหลั่นกันไป ขึ้นกับชนิดและประสิทธิภาพของตัวรับอิเล็กตรอน กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การหายใจแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic respiration) ในบางกรณีการออกซิไดซ์ของสารอินทรีย์อาจเกิดขึ้นจากการที่จุลินทรีย์ใช้สารอินทรีย์ด้วยกันเองมาเป็นตัวรับอิเล็กตรอนโดยกระบวนการที่เรียกว่า การหมัก (Fermentation) เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ไม่สมบูรณ์และทำให้ได้พลังงานออกมาเพียงเล็กน้อย

แร่ธาตุที่มีความสำคัญในการเจริญของจุลินทรีย์นอกจากคาร์บอนและไนโตรเจนแล้ว จุลินทรีย์ยังมีความต้องการธาตุ K, Na, Ca, Mg, Cl, S, และ Fe นอกจากนี้ก็ยังมีธาตุอาหารรอง (Trace element) ที่จำเป็นต่อการเจริญของจุลินทรีย์อีก เช่น Co, Cu, Ni, Mn, Mo และ Zn แต่โดยทั่วไปมักจะพบธาตุอาหารรองเจือปนอยู่ในน้ำหรือสารประกอบเชิงซ้อนต่างๆ ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อในปริมาณที่เพียงพออยู่แล้ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเติมแร่ธาตุเหล่านี้ลงไป ในอาหารเลี้ยงเชื้อ ยกเว้นการเตรียมอาหารสังเคราะห์ (Synthetic medium) จึงจำเป็นต้องเติมแร่ธาตุเหล่านี้ลงไป ในอาหารโดยตรง ตามปกตินิยมใช้ในรูปของสารอนินทรีย์

สารที่จำเป็นสำหรับการเจริญ (Growth factor) หมายถึงสารอินทรีย์บางประเภทที่จุลินทรีย์ต้องการใช้เพื่อการเจริญและดำเนินชีวิตได้อย่างปกติ ในกรณีที่จุลินทรีย์ชนิดนั้นๆ ไม่สามารถสร้างสารประกอบต่างๆตามที่เซลล์ต้องการได้อย่างครบถ้วน สารอินทรีย์ดังกล่าวมี 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

(1) กรดอะมิโน (2) purines และ pyrimidines และ (3) วิตามิน โดยที่จุลินทรีย์จะใช้กรดอะมิโนในการสร้างโปรตีน และใช้ purines กับ pyrimidines ในการสร้างกรดนิวคลีอิก ส่วนวิตามินนั้นเป็นสารโมเลกุลเล็กๆ ที่มีความต้องการในปริมาณน้อย ซึ่งจะอยู่ในส่วนของ cofactor เป็นตัวช่วยในการทำงานของเอนไซม์ ในบางครั้งสารเหล่านี้ อาจจะทำหน้าที่เพียงแค่ส่งเสริมหรือเป็นตัวกระตุ้นในการเจริญของจุลินทรีย์นั้นๆ

### 3.3.3 สภาพแวดล้อม

จุลินทรีย์แต่ละชนิดเจริญได้ดีในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ปัจจัยสำคัญในสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอากาศ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมาก และมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยจะช่วยเร่งอัตราการทำงานของเอนไซม์และปฏิกิริยาชีวเคมี ในช่วงสภาวะอุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาทางเคมีและเอนไซม์จะเกิดในอัตราที่ไวขึ้น แต่หากอุณหภูมิสูงเกินไปส่วนประกอบของเซลล์ที่ไวต่ออุณหภูมิสูง อาจถูกทำลาย และจะไม่มีการเจริญ ในช่วงสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ จะทำให้ปฏิกิริยาของเอนไซม์หลายชนิดในเซลล์ลดลงจนถึงจุดที่ไม่อาจเจริญ แต่อาจไม่ทำให้เซลล์ตาย โดยทั่วไปใช้วิธีการแช่แข็งเป็นการเก็บรักษาจุลินทรีย์ แต่หากอยู่ในช่วงสภาวะอุณหภูมิที่พอดีแล้วจะทำให้จุลินทรีย์เจริญได้รวดเร็ว ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของจุลินทรีย์แต่ละชนิด ไม่จำเพาะเจาะจง

ค่าความเป็นกรด-ด่างมีความสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ค่าที่เหมาะสมจะขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปจุลินทรีย์จะเจริญได้ดีในภาวะที่เป็นกลาง ยกเว้นจุลินทรีย์บางชนิดที่ทนกรดได้ หากจุลินทรีย์อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมจะมีการเจริญอย่างรวดเร็ว จุลินทรีย์ทั่วไปมีการเปลี่ยนค่า pH ของสิ่งแวดล้อมระหว่างการเจริญ จึงต้องมีการเติม pH buffer ในอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อปรับค่า pH ให้เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ชนิดนั้นๆ

อากาศเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ และมีผลต่อชนิดของตัวรับอิเล็กทรอนิกส์ ในสภาวะที่มีอากาศ กระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นได้เร็วและสมบูรณ์กว่าเมื่อเทียบกับในสภาวะที่ขาดอากาศ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)<sup>[8]</sup>

### 3.4 การหมัก

การหมักหมายถึงการสร้างพลังงานจากกระบวนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ การหมักมีทั้งแบบที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งการหมักมีอยู่หลายชนิด

3.4.1 การหมักสามารถแบ่งตามลักษณะของกระบวนการที่ใช้ได้เป็น 3 ชนิดคือ

Batch fermentation: เป็นการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ในระบบปิด ที่มีปริมาณสารอาหารเริ่มต้นจำกัด

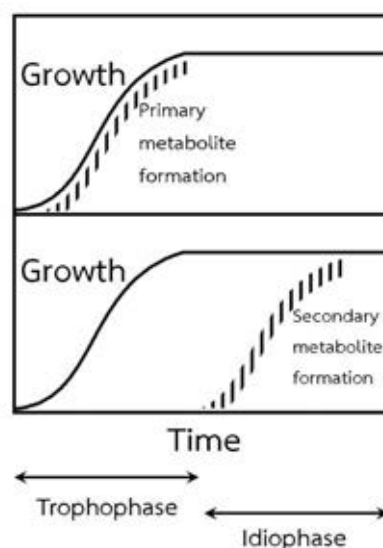
Continuous fermentation: มีการถ่ายเทอาหารเก่าออกแล้วเติมอาหารใหม่เข้าไปแทนที่ในปริมาณเท่าเดิม (กระทำอย่างต่อเนื่อง)

Fed-Batch fermentation: มีการเติมอาหารเข้าไปอย่างต่อเนื่อง หรือเติมเป็นระยะๆ โดยไม่มีการถ่ายอาหารที่เพาะเลี้ยงเชื้อออกเลย

3.4.2 การหมักที่ให้ผลผลิตเป็นสารเมตาบอไลต์ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท (รูปที่ 3.2) คือ

สารเมตาบอไลต์ปฐมภูมิ (Primary metabolite) เป็นสารที่จำเป็นต่อการเจริญของจุลินทรีย์ เกิดในช่วง Log phase (trophophase) ของการเจริญ ได้แก่ โปรตีน ลิพิด กรดอะมิโน นิวคลีโอไทด์ กรดนิวคลีอิก และคาร์โบไฮเดรต

สารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิ (Secondary metabolite) เป็นผลผลิตมาจากสารเมตาบอไลต์ปฐมภูมิ พบในช่วง Stationary phase (idiophase) ของการเจริญในจุลินทรีย์บางชนิด (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 การสังเคราะห์สารเมตาบอไลต์ปฐมภูมิและสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิในจุลินทรีย์

ที่มา: Prescott et al., 1993. หน้า 895<sup>[9]</sup>

### 3.5 บทบาทของจุลินทรีย์ในการปลดปล่อยธาตุอาหาร

ในธรรมชาติมีธาตุอาหารอยู่มากมายหลายชนิดด้วยกัน ส่วนใหญ่มักพบอยู่ในรูปของสารประกอบต่างๆ ซึ่งเป็นรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง จึงต้องอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายและแปรสภาพสารประกอบเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

ธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม

ไนโตรเจนที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนในอากาศ ( $N_2$ ) และสารประกอบอินทรีย์ของไนโตรเจน ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของโปรตีนและกรดนิวคลีอิกในสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง จุลินทรีย์จะเข้าไปทำการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ของไนโตรเจนโดยกระบวนการ ammonification ให้อยู่ในรูปของ แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) จากนั้นแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์ในกระบวนการ nitrification ได้ไนไตรท์ ( $NO_2^-$ ) และไนเตรท ( $NO_3^-$ ) ในสภาวะที่เป็นกรด แอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียม ( $NH_4^+$ ) ซึ่งแอมโมเนีย, แอมโมเนียม, ไนไตรท์ และไนเตรท เป็นรูปของไนโตรเจนที่พืชต้องการนำไปใช้ สำหรับกระบวนการตรึงก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen fixation) นั้นจะไม่เกิดในพืชชั้นสูง แต่แบคทีเรียสามารถตรึง  $N_2$  จากอากาศมาใช้ได้ โดยจะเปลี่ยน  $N_2$  ให้อยู่ในรูปแอมโมเนีย เช่น Rhizobium ที่อยู่ในปมรากพืชตระกูลถั่ว

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุสำคัญที่พบในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ฟอสฟอรัสที่พบจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ฟอสเฟต (P<sub>i</sub>) และเป็นองค์ประกอบในสารอินทรีย์ เมื่อเกิดการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ของฟอสฟอรัสที่อยู่ในซากพืชและสัตว์จะถูกจุลินทรีย์เปลี่ยนเป็นฟอสเฟต ( $PO_4^-$ ) พืชจะนำฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปฟอสเฟตที่ละลายได้ (dissolved phosphate) ไปใช้โดยตรง

ในสภาวะที่เป็นกรดมากๆ ฟอสฟอรัสจะรวมตัวกับโลหะ 3 ชนิด คือ อลูมิเนียม เหล็ก และแมงกานีส กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และในสภาวะที่เป็นด่าง ฟอสเฟตจะรวมตัวกับแคลเซียม และโซเดียมกลายเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำเช่นกัน จุลินทรีย์จะผลิตกรดอินทรีย์ขึ้นมาเพื่อละลายสารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟตให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (กฤษณ์ และอมรา, 2546)<sup>[10]</sup>

โพแทสเซียมในดินแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

- $K^+$  ในสารละลายในดินจะอยู่ในภาวะที่สมดุลกับโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้
- โพแทสเซียมที่ดูดซับบนผิวของคอลลอยด์ดิน อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K) จะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของ  $K^+$  ในสารละลายในดินจะลดลง
- โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (non-exchangeable K) เนื่องจากถูกตรึงอยู่กับแร่ดินเหนียว จะปลดปล่อย  $K^+$  ออกมาสู่สารละลายในดินช้ามาก โดยจะเริ่มปลดปล่อยออกมาเมื่อความเข้มข้นของ  $K^+$  ในสารละลายในดินต่ำกว่า 3.5 ไมโครโมลาร์
- โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ จะออกมาอยู่ในสารละลายในดินเมื่อแร่สลายตัวเท่านั้น จึงออกมาได้ยากและใช้เวลานานมาก จึงต้องอาศัยจุลินทรีย์ Bacillus megaterium ที่สามารถปลดปล่อยกรดอินทรีย์ช่วยละลายแร่ธาตุที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบ ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Doyle et al., 1998)<sup>[11]</sup>

โพแทสเซียมในพืชอยู่ในรูปของ  $K^+$  (พูนพิภพ, 2551)<sup>[12]</sup> เมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายซากพืช ทำให้  $K^+$  ที่อยู่ภายในเซลล์พืชถูกปลดปล่อยออกสู่ระบบ และเป็นธาตุอาหารของพืชต่อไป

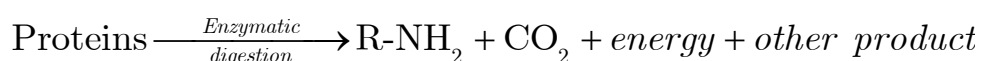
### 3.6 การเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารที่เกิดจากการหมักในระบบปิด

การแปรสภาพของสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำไปเป็นสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำโดยกระบวนการ mineralization เป็นกระบวนการทางชีววิทยา ซึ่งต้องมีจุลินทรีย์เข้ามาเกี่ยวข้อง และสามารถเกิดได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน ความมากมายของการแปรสภาพจึงขึ้นกับชนิดและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

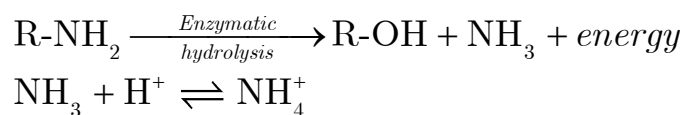
สำหรับการหมักจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบธาตุอาหารต่างๆ ภายในระบบ ซึ่งเกิดขึ้นจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ เช่น กระบวนการเมทาบอลิซึม กระบวนการหายใจ กระบวนการหมัก เป็นต้น ในที่นี้จะพิจารณาเพียงการเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารหลักคือ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ที่เกิดขึ้นจากการหมักพืชเท่านั้น

3.6.1 ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญในกรดอะมิโน โปรตีน กรดนิวคลีอิก ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเซลล์ จุลินทรีย์นำเอาไนโตรเจนเข้าไปในเซลล์ในรูปของกรดอะมิโน หรือสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายน้ำ

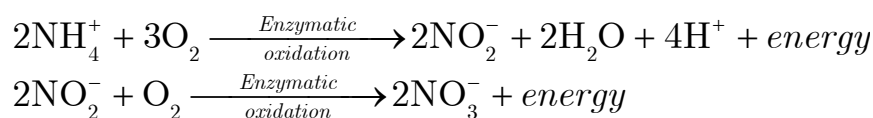
ในการแปรสภาพของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นสารอนินทรีย์นั้นส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางชีววิทยาและมีหลายรูปแบบ เริ่มจากการเกิดกระบวนการอะมิโนเซชัน (aminization) ซึ่งเป็นกระบวนการย่อยสลายสารประกอบโปรตีนโดยจุลินทรีย์พวกที่สร้างอาหารเองไม่ได้ (heterotroph) ซึ่งจะเปลี่ยนสภาพของโปรตีนให้เป็นสารประกอบไนโตรเจนพวก amino compound ต่างๆ เช่น proteose และ peptone จนในที่สุดเปลี่ยนต่อไปอีกเป็นพวกอะมีน (amine) และกรดอะมิโน (amino acid) ต่างๆ



กระบวนการย่อยสลายนี้นี้เป็นแบบ enzymatic digestion โดยที่  $\text{R-NH}_2$  คืออะมีน หรือกรดอะมิโน จุลินทรีย์ได้พลังงานจากกระบวนการย่อยสลายโปรตีนนี้ ส่วนสารประกอบอะมีนและกรดอะมิโนที่เกิดขึ้นนั้นบางส่วนจะถูกนำเอามาสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ และบางส่วนจะถูกแปรสภาพต่อไปเป็นแอมโมเนียโดยกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (ammonification) ซึ่งเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างอาหารเองไม่ได้เปลี่ยนอะมีน ( $\text{R-NH}_2$ ) ไปเป็นแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และแอลกอฮอล์ ( $\text{R-OH}$ ) ดังสมการ



ในสภาวะที่มีออกซิเจน แอมโมเนียมที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์แปรสภาพต่อไปเป็นไนเตรท โดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) โดยจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน ดังสมการ



ภายใต้สภาวะที่ขาดออกซิเจน ไนเตรทอาจถูกรีดิวซ์เปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) โดยกระบวนการทางชีวภาพ (denitrification) และกระบวนการทางเคมี หรืออาจถูกนำไปใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน

3.6.2 ฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบสำคัญของกรดนิวคลีอิก ฟอสโฟไลปิด จุลินทรีย์นำฟอสฟอรัสเข้าไปในเซลล์ในรูปของสาร Phytin หรือสารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ จุลินทรีย์จะสร้างเอนไซม์ Phytase, Phosphatase, Nucleotidases และ Glycerophosphatase เพื่อแปรสภาพสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่เรียกว่า ออโธฟอสเฟต (Orthophosphate) ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ Monobasic orthophosphate ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) และ Dibasic orthophosphate ( $\text{HPO}_4^{2-}$ )

3.6.3 โพแทสเซียมในเซลล์พืชอยู่ในรูปของ  $\text{K}^+$  เมื่อทำการหมักจุลินทรีย์จะเข้าไปย่อยสลายซากพืช และปลดปล่อย  $\text{K}^+$  ออกสู่ระบบ ซึ่งจะพบในรูปของ  $\text{K}^+$  ที่ละลายอยู่ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ โดย  $\text{K}^+$  บางส่วนจะถูกตรึงไว้ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์

### 3.7 การสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน

องค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ค่อนข้างซับซ้อน มักอยู่ในรูปของสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ต้องอาศัยเอนไซม์จากภายนอกเซลล์ช่วยในการแตกตัวให้อยู่ในรูปที่สามารถดูดซึมได้ก่อนที่จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์จุลินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์ที่มักพบในสิ่งมีชีวิต ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน

คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) เป็นสารประกอบที่มีความสำคัญต่อการทำงานของสิ่งมีชีวิตทำหน้าที่เป็นสารสะสมพลังงานและเป็นตัวกลางในระบบเมตาบอลิซึม และยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตอีกด้วย แป้ง (Starch) เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งซึ่งเป็นสารที่สะสมอยู่ในพืชในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโล-

เพคติน (Amylopectin) ส่วนเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignins) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเนื้อเยื่อพืช อยู่ในรูปพอลิเมอร์ของกลูโคสที่ไม่สามารถละลายน้ำได้และมีความแข็งแรงมาก สลายตัวได้ยาก ในการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้ จึงต้องอาศัยเอนไซม์จากภายนอกเซลล์เพื่อช่วยในการทำให้แตกตัว โดยทั่วไปจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์ขึ้นมาเพื่อทำการสลายพันธะของกลูโคส ได้ผลผลิตเป็นกรดอินทรีย์ต่างๆ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ไขมัน (Lipids) เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถแตกตัวได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ไขมันเป็นองค์ประกอบสำคัญของเยื่อเซลล์ พบทั้งในเซลล์พืชและเซลล์จุลินทรีย์ มักถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis*

โปรตีน (Proteins) ส่วนใหญ่เป็นสารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ โปรตีนพบในโครงสร้างต่างๆของสิ่งมีชีวิต และพบในรูปของกรดอะมิโน ในธรรมชาติโปรตีนมักทนทานต่อการย่อยสลาย แต่จะถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้นเมื่อมีเอนไซม์จากจุลินทรีย์ *Bacillus megaterium* ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายโปรตีนและกรดอะมิโนโดยเฉพาะ (Gray and Williams, 1971; Kögel-Knabner, 2002)<sup>[13], [6]</sup>

### 3.7.1 สารประกอบในพืช

สารประกอบในพืชสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

- สารที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
- สารที่ถูกเก็บไว้ในเซลล์ ได้แก่ โปรตีน ลิพิด แป้ง น้ำตาล และกรดนิวคลีอิก

ซากใบไม้ประกอบด้วย เถ้า (ash) 8-14%, เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) 10-19%, เซลลูโลส (cellulose) 10-22%, ลิกนิน (lignin) 5-8% และโปรตีนดิบ (raw protein) 2-15% (Williams and Gray, 1974)<sup>[14]</sup> สารประกอบเหล่านี้จะถูกย่อยสลายได้ในปริมาณที่ต่างกัน ขึ้นกับความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุลและปริมาณที่พบในพืช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)<sup>[8]</sup> สารประกอบประเภทคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนจะมีอัตราการสลายตัวเร็ว เมื่อเทียบกับสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อน ย่อยสลายได้ยาก จึงมีอัตราการสลายตัวช้า (Sophie and Marstorp, 2002)<sup>[5]</sup> และสัดส่วนที่สามารถย่อยสลายได้คิดเป็น 50-60% ของสารอินทรีย์ในพืช (Kögel et al, 1988)<sup>[15]</sup>

### 3.7.2 สารประกอบในจุลินทรีย์

โครงสร้างของเซลล์จุลินทรีย์แบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

- โครงสร้างภายนอก ได้แก่



แคปซูลคือโครงสร้างชั้นนอกสุดของเซลล์ซึ่งมีลักษณะเป็นวุ้น มีรูปร่างไม่แน่นอน สารที่เป็นองค์ประกอบของแคปซูลส่วนใหญ่คือโพลีแซ็กคาไรด์

ผนังเซลล์เป็นโครงสร้างที่อยู่ใต้แคปซูล ประกอบด้วยเปปไทด์ โพลีแซ็กคาไรด์และลิปิด ผนังเซลล์เป็นส่วนที่ทำให้เซลล์คงรูปร่างอยู่ได้

เยื่อหุ้มเซลล์เป็นส่วนที่ห่อหุ้มโครงสร้าง อยู่ใต้ผนังเซลล์ มีความหนาประมาณ 5-8 นาโนเมตร ส่วนประกอบทางเคมีคือ โปรตีน 50-70% ไขมัน 30-40% และมีคาร์โบไฮเดรตจำนวนเล็กน้อย ส่วนประกอบทั้งหมดคิดเป็น 10-20% ของน้ำหนักเซลล์เมื่อทำให้แห้ง

#### - โครงสร้างภายใน

ไซโตพลาสซึมมีลักษณะเป็นวุ้นประกอบด้วย น้ำ ประจุของสารอนินทรีย์ ตัวกลางต่างๆของกระบวนการเมแทบอลิซึม โพลีเมอร์ของกรดนิวคลีอิก แกรนูลซึ่งเป็นที่สะสมของอาหาร โปรตีน และไรโบโซม ซึ่งในไรโบโซมประกอบด้วยอาร์เอ็นเอประมาณ 60-90% โปรตีนประมาณ 10-40%

กรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก(Deoxyribonucleic) หรือ DNA เป็นสารพันธุกรรมที่เก็บรักษาข้อความทางพันธุกรรมของเซลล์ ซึ่งดีเอ็นเอของแบคทีเรียจะอยู่ใน นิวคลีโอออยด์ (nucleoids) ซึ่งจะอยู่บริเวณตรงกลางของเซลล์

### 3.7.3 สารประกอบในกากน้ำตาล

กากน้ำตาล (Molasses) เป็นผลพลอยได้ที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อย กากน้ำตาลเป็นผลพลอยได้ที่มีคุณค่ามากที่สุด เป็นส่วนของของเหลวที่เหลือหลังจากการแยกเอาผลึกของน้ำตาลออกแล้ว มีลักษณะข้นเหนียวสีน้ำตาลดำ มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครสที่ไม่ตกผลึก กากน้ำตาลมี 3 ชนิด คือ กากน้ำตาลที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายขาว (plantation white sugar) เรียกว่า black-strap molasses จะมีปริมาณน้ำตาลอยู่ประมาณ 50-65% ส่วนกากน้ำตาลที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (refine sugar) นั้นเรียกว่า refinery molasses จะมีปริมาณน้ำตาลอยู่ประมาณ 48% และกากน้ำตาลที่ได้จากการทำบางส่วนของน้ำอ้อยแปรสภาพให้เข้มข้นโดยการระเหย (inverted can juice) เรียกว่า invert molasses หรือ highest molasses มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบอยู่ 77%

โดยทั่วไปนิยมใช้ black-strap molasses เป็นวัตถุดิบในการหมัก มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.39-1.49 ในกากน้ำตาลชนิดนี้ประกอบด้วยน้ำตาล 50-65% และซูโครส 30-40% ในส่วนของของแข็ง 80-86% จะมีสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์อีกหลายชนิด นอกจากนี้ยังมีวิตามินและสารที่จำเป็นในการเจริญของจุลินทรีย์อยู่ด้วย (Stowell et al., 1987)<sup>[16]</sup>

ธาตุที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มักพบในสิ่งมีชีวิตคือธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N Ratio) มีความสัมพันธ์ต่อการย่อยสลายที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์

โดยค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมและเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์จะมีค่าอยู่ในช่วง 20-30 การเพิ่มหรือลดของปริมาณธาตุอาหารนั้นเกิดจากอัตราการเกิดกระบวนการ Immobilization และ กระบวนการ Mineralization ถ้าอัตราการเกิดกระบวนการ Immobilization มีมากกว่าอัตราการเกิดกระบวนการ Mineralization จะทำให้ปริมาณธาตุอาหารที่มีประโยชน์ลดลง และถ้าอัตราการเกิดกระบวนการ Immobilization มีน้อยกว่าอัตราการเกิดกระบวนการ Mineralization จะทำให้ปริมาณธาตุที่มีประโยชน์เพิ่มขึ้น (Sophie and Marstorp, 2002)<sup>[5]</sup>

## บทที่ 4

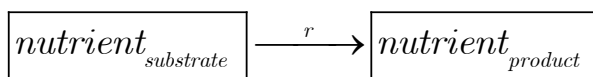
### การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

จากการศึกษาเรื่องการเจริญของจุลินทรีย์ และธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้น ในระหว่างกระบวนการหมัก ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์และปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ในกระบวนการหมัก ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารในปฏิกิริยาหมักชีวภาพที่ทำการหมักในระบบปิด โดยใช้ความรู้พื้นฐานที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

#### 4.1 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารตั้งต้นในน้ำปฏิกิริยาหมักชีวภาพ

สำหรับการหมักในระบบปิด (Batch fermentation) เป็นการหมักที่มีปริมาณสารตั้งต้น (Substrate) จำกัด จุลินทรีย์ในระบบจะทำการย่อยสลายสารตั้งต้นดังกล่าว และนำธาตุอาหารที่ได้ไปใช้ในการเจริญของเซลล์และผลิตเซลล์ใหม่ โดยธาตุอาหารที่ถูกตรึงไว้จะสะสมอยู่ในรูปของสารประกอบภายในเซลล์ จนกระทั่งในระยะเวลาที่เซลล์มีการแบ่งตัว จุลินทรีย์จะนำธาตุอาหารที่สะสมไว้ไปใช้ในการสร้างองค์ประกอบต่างๆ ของเซลล์ใหม่ และจะมีการปลดปล่อยธาตุอาหารบางส่วนออกมาสู่ระบบในรูปของสารผลิตภัณฑ์ (Product) ซึ่งธาตุอาหารส่วนที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์จุลินทรีย์นั้นจะถูกปลดปล่อยสู่ระบบอีกครั้งเมื่อเซลล์ตาย

ดังนั้นปริมาณธาตุอาหารในสารตั้งต้นจะลดลงโดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับปริมาณสารตั้งต้นที่เหลืออยู่และจำนวนจุลินทรีย์ในระบบ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณอาหารจะส่งผลต่อพฤติกรรมการบริโภคของจุลินทรีย์ด้วย ในสภาวะที่มีปริมาณอาหารมาก จุลินทรีย์จะบริโภคอาหารในปริมาณมากไปด้วย



กำหนดให้  $S$  แทนปริมาณธาตุอาหารในสารตั้งต้น

$$-\frac{dS}{dt} \propto S \quad (4.1)$$

เมื่อกำหนดให้  $r$  แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารในสารตั้งต้น จะได้ว่า

$$-\frac{dS}{dt} = rS \quad (4.2)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารที่เกิดขึ้นในระบบเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ ดังนั้นปริมาณจุลินทรีย์ในระบบจึงมีความสัมพันธ์ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหาร

$$r \propto X \quad , \quad r = a_s X \quad (4.3)$$

เมื่อ  $X$  แทนจำนวนประชากรของจุลินทรีย์

และ  $a_s$  เป็นอัตราจำเพาะในการย่อยสลายธาตุ  $S$

จากสมการ (4.3) และสมการการเจริญของจุลินทรีย์ (สมการ 3.2) จะได้ว่า

$$r = a_s \frac{X_m}{1 + \left( \frac{X_m}{X_0} - 1 \right) e^{-\mu_m t}} \quad (4.4)$$

แทนค่า  $r$  จากสมการ (4.4) ลงในสมการ (4.2)

$$-\frac{dS}{dt} = a_s \frac{X_m}{1 + \left( \frac{X_m}{X_0} - 1 \right) e^{-\mu_m t}} S \quad (4.5)$$

ทำการหาปฏิยานุพันธ์ของสมการที่ (4.5) สามารถเขียนได้อยู่ในรูป

$$-\ln |S| = a_s \frac{X_m}{\mu_m} \ln \left| e^{\mu_m t} + \left( \frac{X_m}{X_0} - 1 \right) \right| + c \quad (4.6)$$

เมื่อ  $c$  เป็นค่าคงที่ พิจารณาหาค่า  $c$  โดยพิจารณาที่เวลาเริ่มต้น คือ  $t = t_0$  และกำหนดให้ปริมาณธาตุอาหารในสารตั้งต้นมีค่าเป็น  $S_0$  โดยที่  $S_0$  จะต้องมีค่ามากกว่า 0

$$c = -\ln S_0 - a_s \frac{X_m}{\mu_m} \ln \left| e^{\mu_m t_0} + \left( \frac{X_m}{X_0} - 1 \right) \right| \quad (4.7)$$

ในกรณีที่เวลาเริ่มต้นพิจารณามีค่าเป็น 0 จะได้ว่า

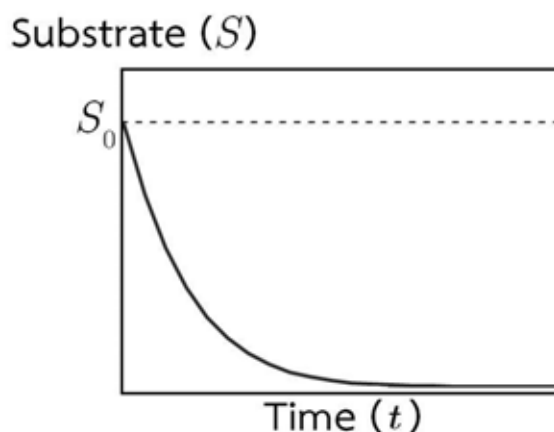
$$c = -\ln S_0 - a_s \frac{X_m}{\mu_m} \ln \left( \frac{X_m}{X_0} \right) \quad (4.8)$$

แทนค่า  $c$  จากสมการ (4.8) ลงในสมการ (4.6) จะได้

$$S = \frac{S_0}{\left( \frac{X_0}{X_m} (e^{\mu_m t} - 1) + 1 \right)^{a_s \frac{X_m}{\mu_m}}} \quad (4.9)$$

- โดยที่  $S_0$  แทนปริมาณธาตุอาหารในสารตั้งต้นที่เวลาเริ่มต้น  
 $\mu_m$  แทนอัตราการเจริญจำเพาะของจุลินทรีย์  
 $X_0$  แทนจำนวนประชากรของจุลินทรีย์เริ่มต้น  
 $X_m$  แทนจำนวนประชากรของจุลินทรีย์สูงสุดในระบบ  
 $t$  แทนระยะเวลาในการหมัก (วัน)  
 และ  $a_s$  แทนอัตราจำเพาะในการย่อยสลายธาตุ  $S$  ในสารตั้งต้น

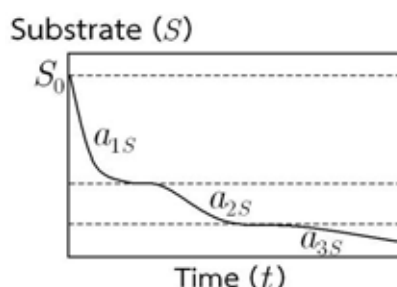
เรียกสมการ (4.9) ว่า “สมการการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารตั้งต้นในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ” ปริมาณธาตุอาหารตั้งต้นมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการหมักดังรูปที่ 4.1 โดยมี  $\mu_m$ ,  $X_0$ ,  $X_m$  และ  $a_s$  เป็นตัวกำหนดความเร็วในการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารดังกล่าวซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละระบบ ขึ้นกับชนิดและปริมาณอาหารของจุลินทรีย์



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารตั้งต้นในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

ภายในระบบเดียวกันนั้น ธาตุที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์จะอยู่ในรูปของสารประกอบที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสารแต่ละชนิดสามารถถูกย่อยสลายได้ในอัตราที่ต่างกัน โดยธรรมชาติแล้ว จุลินทรีย์จะเลือกย่อยสลายสารประกอบที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายก่อน จากนั้นจึงมีการปรับสภาพเพื่อจะทำการย่อยสลายสารประกอบอื่นต่อไป

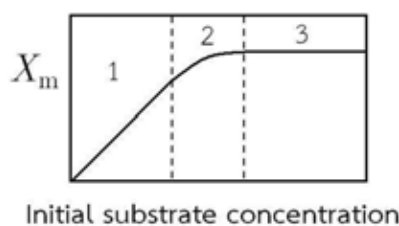
ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารตั้งต้นอาจแบ่งออกเป็นหลายช่วง โดยในระยะแรกปริมาณธาตุอาหารตั้งต้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว และอัตราการเปลี่ยนแปลงจะช้าลงเรื่อยๆ ในระยะถัดมา เมื่อกำหนดให้  $a_{nS}$  แทนอัตราจำเพาะในการย่อยสลายธาตุ  $S$  ในสารตั้งต้นช่วงที่  $n$  จะได้ว่า  $a_{1S} > a_{2S} > a_{3S}$



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารตั้งต้นในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ ในแต่ละช่วงที่เกิดจากสารประกอบต่างชนิด

ในการหมักปุ๋ยชีวภาพสามารถทำได้โดยการหมักวัตถุดิบหลากหลายชนิด ซึ่งจะให้ผลผลิตในสัดส่วนที่ต่างกันและมีอัตราการสลายตัวไม่เท่ากัน เนื่องจากในวัตถุดิบแต่ละชนิดประกอบไปด้วยธาตุอาหารต่างๆ และอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน

นอกจากนี้ปริมาณวัตถุดิบในการหมักซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญยังส่งผลถึงปริมาณของจุลินทรีย์ในระบบอีกด้วย จากการศึกษาการเจริญที่มีขอบเขตของจุลินทรีย์ในระบบปิด (Batch fermentation) พบว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีความสัมพันธ์ต่อปริมาณเซลล์จุลินทรีย์สูงสุดที่ระยะ Stationary phase ( $X_m$ ) ซึ่งสามารถแบ่งระดับความสัมพันธ์ได้เป็น 3 ระดับ ในระดับแรกค่า  $X_m$  จะเพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับปริมาณสารตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น ระดับที่ 2 ค่า  $X_m$  จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง แม้ว่าปริมาณสารตั้งต้นจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการสะสมสารพิษในการเจริญของจุลินทรีย์ และในระดับที่ 3 จะไม่มีการเพิ่มค่า  $X_m$  อีก เนื่องจากการสะสมสารพิษเพิ่มมากขึ้นจนทำให้เซลล์ไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้อีก แม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นอีกเท่าไรก็ตาม



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อปริมาณเซลล์สูงสุด ( $X_m$ )  
ที่มา: Stanbury และ Whitaker, 1984 หน้า 12<sup>[17]</sup>

#### 4.2 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารในสารผลิตภัณฑ์ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

ผลผลิตที่เกิดจากการหมักมีทั้งในส่วนที่เป็นตัวเซลล์ และส่วนที่เป็นสารประกอบต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ จากกฎของการอนุรักษ์มวลกล่าวได้ว่า ปริมาณธาตุอาหารทั้งหมดที่หมักในระบบปิดมีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาณธาตุอาหารที่อยู่ในรูปต่างๆ นั่นคือ

$$nutrients_{total} = nutrients_{substrate} + nutrients_{microbial\ cell} + nutrients_{sol.} \quad (4.10)$$

โดยที่  $nutrients_{total}$  แทนปริมาณธาตุอาหารทั้งหมดในระบบ  
 $nutrients_{substrate}$  แทนปริมาณธาตุอาหารในสารตั้งต้น  
 $nutrients_{microbial\ cell}$  แทนปริมาณธาตุอาหารในเซลล์จุลินทรีย์  
 $nutrients_{sol.}$  แทนปริมาณธาตุอาหารที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

ปริมาณธาตุอาหารทั้งหมดในระบบ สามารถหาได้จากผลรวมของปริมาณธาตุอาหารที่พบในวัตถุดิบในการหมักแต่ละชนิด สำหรับระบบปิดปริมาณธาตุอาหารทั้งหมดในระบบในระหว่างการหมักจะมีค่าคงที่ และสามารถคำนวณหาปริมาณธาตุอาหารในสารตั้งต้นที่เวลาต่างๆ ในระหว่างการหมักได้จากสมการ (4.9)

ปริมาณธาตุอาหารในเซลล์จุลินทรีย์ที่เวลาต่างๆ ระหว่างการหมักนั้น สามารถพิจารณาได้จากสัดส่วนของปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์และสารภายในเซลล์

$$nutrients_{microbial\ cell} = \frac{Y_k}{100} * X \quad (4.11)$$

โดยที่  $Y_k$  แทนค่าร้อยละของปริมาณธาตุอาหาร  $k$  ที่พบในเซลล์จุลินทรีย์  
 และ  $X$  แทนจำนวนประชากรของจุลินทรีย์

ซึ่งจำนวนประชากรของจุลินทรีย์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาตามสมการ (3.2) เมื่อแทนค่า  $X$  จากสมการ (3.2) ลงในสมการ (4.11) จะได้ว่า

$$nutrients_{microbial\ cell} = \frac{Y_k}{100} * \frac{X_m}{1 + \left( \frac{X_m}{X_0} - 1 \right) e^{-\mu_m t}} \quad (4.12)$$

และปริมาณธาตุอาหารที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพที่เวลาต่างๆ สามารถพิจารณาได้จากสมการ (4.9), (4.10) และ (4.12) นั่นคือ

$$nutrients_{sol.} = nutrients_{total} - nutrients_{substrate} - nutrients_{microbial\ cell} \quad (4.13)$$

4.2.1 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออนและแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

ธาตุไนโตรเจนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพเกิดจากการแปรสภาพของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นสารอนินทรีย์ ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญในกรดอะมิโน โปรตีน กรดนิวคลีอิก ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเซลล์ จุลินทรีย์นำเอาไนโตรเจนเข้าไปในเซลล์ในรูปของกรดอะมิโนหรือสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายน้ำ

สารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายน้ำพบอยู่ในรูปของ แอมโมเนียม ( $N-NH_4^+$ ), ไนเตรท ( $N-NO_2^-$ ) และไนเตรท ( $N-NO_3^-$ ) ซึ่งไนโตรเจนในรูปของไนเตรทนั้นเป็นรูปที่ไม่เสถียรและจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนเตรทได้อย่างรวดเร็ว ภายใต้สภาวะที่ขาดออกซิเจน ไนเตรทอาจถูกรีดิวซ์เปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) ซึ่งอาจทำให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจนจากระบบ

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาจึงสร้างแบบจำลองภายใต้สมมติฐานที่ว่าไม่เกิดการสูญเสียธาตุไนโตรเจนในรูปของก๊าซ และจะพิจารณาปริมาณไนโตรเจนที่ละลายน้ำในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรทเท่านั้น

จากสมการ (4.13) จะได้ว่าสมการการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออนและแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ คือ

$$N_{sol.} = N_{total} - \frac{N_{substrate}(t_0)}{\left(\frac{X_0}{X_m}(e^{\mu_m t} - 1) + 1\right)^{a_N \frac{X_m}{\mu_m}}} - \frac{X_m}{1 + \left(\frac{X_m}{X_0} - 1\right)e^{-\mu_m t}} * \frac{Y_N}{100} \quad (4.14)$$

โดยที่  $N_{sol.}$  แทนปริมาณธาตุไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมและไนเตรทที่ละลายน้ำ

$N_{total}$  แทนปริมาณธาตุไนโตรเจนทั้งหมดในระบบ

$N_{substrate}$  แทนปริมาณธาตุไนโตรเจนในสารตั้งต้น



- $Y_N$  แทนค่าร้อยละของปริมาณธาตุไนโตรเจนที่พบในเซลล์จุลินทรีย์  
 $a_N$  แทนอัตราจำเพาะในการย่อยสลายธาตุไนโตรเจนในสารตั้งต้น

เนื่องจากไนโตรเจนในวัตถุดิบที่ใช้หมักมีทั้งที่อยู่ในรูปสารประกอบภายในเซลล์และส่วนที่เป็นโครงสร้างของเซลล์ซึ่งสามารถสลายตัวได้ช้าหรือเร็วต่างกัน ดังนั้นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณของธาตุไนโตรเจนในสารตั้งต้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 และการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพอาจจำเป็นต้องมีการแบ่งข้อมูลเป็นชุดเพื่อนำมาใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่า  $a_N$  ไม่เท่ากัน

#### 4.2.2 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

ธาตุฟอสฟอรัสในวัตถุดิบที่ใช้หมักมักพบอยู่ในรูปสารประกอบภายในเซลล์และส่วนที่เป็นโครงสร้างของเซลล์เช่นเดียวกับธาตุไนโตรเจน ดังนั้นอาจจะต้องมีการแบ่งข้อมูลเป็นชุดเพื่อนำมาใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในแต่ละช่วงเวลาเช่นกัน โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณในแต่ละช่วงเวลามีสมการดังนี้

$$P_{sol.} = P_{total} - \frac{P_{substrate}(t_0)}{\left(\frac{X_0}{X_m}(e^{\mu_m t} - 1) + 1\right)^{a_p \frac{X_m}{\mu_m}}} - \frac{X_m}{1 + \left(\frac{X_m}{X_0} - 1\right)e^{-\mu_m t}} * \frac{Y_P}{100} \quad (4.15)$$

- โดยที่  $P_{sol.}$  แทนปริมาณธาตุฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายน้ำ  
 $P_{total}$  แทนปริมาณธาตุฟอสฟอรัสทั้งหมดในระบบ  
 $P_{substrate}$  แทนปริมาณธาตุฟอสฟอรัสในสารตั้งต้น  
 $Y_P$  แทนค่าร้อยละของปริมาณธาตุฟอสฟอรัสที่พบในเซลล์จุลินทรีย์  
 $a_p$  แทนอัตราจำเพาะในการย่อยสลายธาตุฟอสฟอรัสในสารตั้งต้น

#### 4.2.3 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

โดยทั่วไปแล้วธาตุโพแทสเซียมในวัตถุดิบที่ใช้ในการหมัก มักพบอยู่ในรูปของโพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบภายในเซลล์ เมื่อทำการหมัก  $K^+$  ที่ถูกตรึงไว้ภายในเซลล์จะถูก

ปลดปล่อยออกสู่ระบบ กลายเป็น  $K^+$  ที่ละลายอยู่ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ โดย  $K^+$  บางส่วนจะถูกตรึงไว้ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์

ดังนั้นสมการการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพคือ

$$K_{sol.} = K_{total} - \frac{K_{substrate}(t_0)}{\left(\frac{X_0}{X_m}(e^{\mu_m t} - 1) + 1\right)^{a_K \frac{X_m}{\mu_m}}} - \frac{X_m}{1 + \left(\frac{X_m}{X_0} - 1\right)e^{-\mu_m t}} * \frac{Y_K}{100} \quad (4.16)$$

โดยที่	$K_{sol.}$	แทนปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ
	$K_{total}$	แทนปริมาณธาตุโพแทสเซียมทั้งหมดในระบบ
	$K_{substrate}$	แทนปริมาณธาตุโพแทสเซียมในสารตั้งต้น
	$Y_K$	แทนค่าร้อยละของปริมาณธาตุโพแทสเซียมที่พบในเซลล์จุลินทรีย์
	$a_K$	แทนอัตราจำเพาะในการย่อยสลายธาตุโพแทสเซียมในสารตั้งต้น

## บทที่ 5

### ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์แบบจำลอง โดยได้ทำการทดลองหมักปุ๋ยน้ำชีวภาพ ที่มีไบจามจรีแห้ง กากน้ำตาล จุลินทรีย์ พด. 2 และน้ำ เป็นส่วนผสม เพื่อใช้ในการทดสอบแบบจำลองที่ได้จากบทที่ 4 ซึ่งส่วนผสมในการหมักแต่ละชนิดประกอบด้วยธาตุต่างๆ ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ดังที่แสดงไว้ในตาราง 5.1

ตาราง 5.1 องค์ประกอบธาตุต่างๆ ที่พบในวัตถุดิบในการหมัก

ธาตุ	ปริมาณธาตุที่พบในวัตถุดิบในการหมัก*			
	ไบจามจรี	กากน้ำตาล	จุลินทรีย์	น้ำประปา
ไนโตรเจน (N)	2.90 %	0.02 %	12.00 %	74.210 ppm
ฟอสฟอรัส (P)	0.12 %	0.006 %	1.00 %	0.005 ppm
โพแทสเซียม (K)	0.67 %	2.76 %	1.00 %	2.430 ppm
คาร์บอน (C)	59.11 %	37.93 %	50.00 %	-

\* ข้อมูลปริมาณธาตุที่พบในไบจามจรี กากน้ำตาล และน้ำประปา ที่แสดงในตารางเป็นข้อมูลที่ได้จากการนำส่วนผสมแต่ละชนิดไปวิเคราะห์ ส่วนข้อมูลปริมาณธาตุที่พบในจุลินทรีย์อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kögel-Knabner <sup>[6]</sup>

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุ N P K ที่พบในสารละลาย ซึ่งพิจารณาเฉพาะธาตุที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยมีวิธีการตรวจวิเคราะห์ (ณรงค์, 2547) <sup>[18]</sup> ดังนี้ คือ

- วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในแอมโมเนียมไอออน โดยวิธี Distillation method
- วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในไนเตรทไอออน โดยวิธี Davarda's alloy distillation method
- วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่ละลายได้ โดยวิธี Ascorbic acid method ด้วยเครื่อง Spectrophotometer
- วิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมที่ละลายได้ โดยวิธี Atomic absorption spectrometry ด้วยเครื่อง Atomic absorption/flame spectrophotometer

ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีข้างต้นมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการหมักเป็นวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้มักจะมีจุลินทรีย์ปะปนมาด้วย เพื่อความสอดคล้องต่อการนำไปใช้จริง ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองโดยมิได้ทำการกำจัดจุลินทรีย์ที่ปะปนมากับวัตถุดิบ และได้ทำการเติมจุลินทรีย์ พด. 2 ซึ่งเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากกรมพัฒนาที่ดิน ประกอบด้วยจุลินทรีย์ 5 สายพันธุ์<sup>[19]</sup> คือ

1. ยีสต์ผลิตแอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ *Saccharomyces sp.*
2. แบคทีเรียผลิตกรดแลคติก *Lactobacillus fermentum*
3. แบคทีเรียย่อยสลายโปรตีน *Bacillus megaterium*
4. แบคทีเรียย่อยสลายไขมัน *Bacillus subtilis BD*
5. แบคทีเรียละลายอินทรีย์ฟอสฟอรัส *Burkholderia unamae*

ในการทดลองนี้เป็นการหมักที่เกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ 5 ชนิด ที่ได้จากพด. 2 และจุลินทรีย์ในธรรมชาติที่ปะปนมากับวัตถุดิบ (mixed culture) ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดทำหน้าที่ที่แตกต่างกัน

จากสมการ (4.14), (4.15) และ (4.16) ในบทที่ 4 ซึ่งเป็นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายปริมาณธาตุ N P K ที่พบในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ ณ เวลาต่างๆ ได้ โดยการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงในสมการดังกล่าว ซึ่งในการทดลองที่มีส่วนผสมต่างกันจะส่งผลถึงค่าพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้ในสมการ ดังนั้นจึงต้องทราบปริมาณ N P K ทั้งหมดในระบบ, ปริมาณ N P K ในสารตั้งต้น, ปริมาณ N P K ในจุลินทรีย์, อัตราการย่อยสลายธาตุ N P K ในสารตั้งต้น รวมไปถึงจำนวนประชากรจุลินทรีย์และอัตราการเจริญของจุลินทรีย์ด้วย

### 5.1 การหาค่าพารามิเตอร์

กากน้ำตาลเป็นอาหารของจุลินทรีย์และมีผลโดยตรงต่อการเจริญของจุลินทรีย์และการปลดปล่อยธาตุอาหาร งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลอง 3 ชุดการทดลอง ชุดละ 3 ชั่วโมง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ โดยปริมาณของส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

ตาราง 5.2 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการหมัก

การทดลองชุดที่	ใบจามจรี	กากน้ำตาล	จุลินทรีย์ พด. 2	น้ำประปา
1	1 kg	0.5 kg	20 g	50 kg
2	1 kg	1 kg	20 g	50 kg
3	1 kg	2 kg	20 g	50 kg

การทดลองแต่ละชุดทำการหมักในระบบปิด โดยมีการเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลาทั้งหมด 21 วัน พิจารณาเฉพาะธาตุ N P K ที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชด้วยวิธีการวิเคราะห์ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) จากนั้นทำการเปลี่ยนผลการวิเคราะห์ให้อยู่ในหน่วย กรัม (g) และเวลาที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น วัน (d)

#### 5.1.1 การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของธาตุไนโตรเจน

กำหนดให้  $N_{total}$  แทนปริมาณธาตุไนโตรเจนทั้งหมดในระบบ (g)

จากตาราง 5.1 จะได้ว่า

$$N_{total} = \frac{2.9}{100} L + \frac{0.02}{100} M + \frac{12}{100} X + \frac{74.21}{10^6} W \quad (5.1)$$

โดยที่  $L$  แทนปริมาณไบจามจุรีแห้ง (g)

$M$  แทนปริมาณกากน้ำตาล (g)

$X$  แทนปริมาณจุลินทรีย์ พด. 2 (g)

$W$  แทนปริมาณน้ำประปา (g)

ในการทดลองทั้ง 3 ชุด มีปริมาณ  $L=1000$  g,  $X=20$  g และ  $W=50000$  g นั่นคือ

$$N_{total} = \frac{2.9}{100} (1,000) + \frac{0.02}{100} M + \frac{12}{100} (20) + \frac{74.21}{10^6} (50,000)$$

ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากน้ำตาลกับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในระบบ คือ

$$N_{total} = 35.11 + (2 * 10^{-4}) M \quad (5.2)$$

จะได้ว่า การทดลอง 1, 2 และ 3 มีค่า  $N_{total}$  เป็น 35.21 g, 35.31 g และ 35.51 g ตามลำดับ

พิจารณหาปริมาณธาตุไนโตรเจนในสารตั้งต้น ( $N_{substrate}$ ) จากผลรวมของปริมาณธาตุไนโตรเจนในไบจามจุรีและกากน้ำตาล สำหรับการทดลองที่มีไบจามจุรี 1000 g จะได้

$$N_{substrate} = \frac{2.9}{100} L + \frac{0.02}{100} M = 29 + (2 * 10^{-4}) M \quad (5.3)$$

จะได้ว่า การทดลอง 1, 2 และ 3 มีค่า  $N_{substrate}$  เป็น 29.1 g, 29.2 g และ 29.4 g ตามลำดับ

จากงานวิจัยของ Touratier และคณะ<sup>[4]</sup> กล่าวไว้ว่า อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) มีความสัมพันธ์ปริมาณของจุลินทรีย์ จากข้อมูลในตาราง 5.1 จะเห็นได้ว่าจุลินทรีย์ ประกอบไปด้วยคาร์บอน 50% และ ไนโตรเจน 12% เนื่องจากปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในระบบมีอยู่ เป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับปริมาณไนโตรเจน ดังนั้นปริมาณธาตุไนโตรเจนทั้งหมดในระบบ ( $N_{total}$ ) จึงเป็นปัจจัยจำกัดจำนวนประชากรจุลินทรีย์สูงสุดในระบบ ( $X_m$ )

เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนในเซลล์จุลินทรีย์จะต้องมีค่าไม่เกินปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในระบบ นั่นคือ  $0.12X_m \leq N_{total}$  ดังนั้น  $X_m \leq \frac{N_{total}}{0.12}$  จะได้ว่า การทดลอง 1, 2 และ 3 จะต้องมีค่า  $X_m$  ไม่เกิน 293.42 g, 294.25 g และ 295.92 g ตามลำดับ

สำหรับค่า  $X_m$ ,  $\mu_m$  และ  $a_N$  ในการหมักแต่ละระบบจะมีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้อง พิจารณาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจากผลการทดลอง

### 5.1.2 การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของธาตุฟอสฟอรัส

กำหนดให้  $P_{total}$  แทนปริมาณธาตุฟอสฟอรัสทั้งหมดในระบบ (g)

จากตาราง 5.1 จะได้ว่า

$$P_{total} = \frac{0.12}{100} L + \frac{0.006}{100} M + \frac{1}{100} X + \frac{0.005}{10^6} W \quad (5.4)$$

จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากน้ำตาลกับปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในระบบเป็น

$$P_{total} = 1.4 + (6 * 10^{-5}) M \quad (5.5)$$

จะได้ว่า การทดลอง 1, 2 และ 3 มีค่า  $P_{total}$  เป็น 1.43 g, 1.46 g และ 1.52 g ตามลำดับ

และมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากน้ำตาลกับปริมาณฟอสฟอรัสในสารตั้งต้นเป็น

$$P_{substrate} = 1.2 + (6 * 10^{-5}) M \quad (5.6)$$

จะได้ว่า การทดลอง 1, 2 และ 3 มีค่า  $P_{substrate}$  เป็น 1.23 g, 1.26 g และ 1.34 g ตามลำดับ

### 5.1.3 การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของธาตุโพแทสเซียม

กำหนดให้  $K_{total}$  แทนปริมาณธาตุโพแทสเซียมทั้งหมดในระบบ (g)

จากตาราง 5.1 จะได้ว่า

$$K_{total} = \frac{0.67}{100} L + \frac{2.76}{100} M + \frac{1}{100} X + \frac{2.43}{10^6} W \quad (5.7)$$

จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากน้ำตาลกับปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในระบบเป็น

$$K_{total} = 7.02 + 0.0276M \quad (5.8)$$

จะได้ว่า การทดลอง 1, 2 และ 3 มีค่า  $K_{total}$  เป็น 20.82 g, 34.62 g และ 62.22 g ตามลำดับ

สำหรับการพิจารณาปริมาณโพแทสเซียมในสารตั้งต้นนั้นจะแตกต่างจากการพิจารณาปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เนื่องจากการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมนั้นมิได้มีการเปลี่ยนรูปของสารประกอบ เป็นเพียงการเคลื่อนย้ายจากโพแทสเซียมไอออนภายในเซลล์ออกมาสู่ระบบ

ไบจามจุรีที่นำมาใช้ในการหมักเป็นไบจามจุรีแห้งซึ่งมีการย่อยสลายตัวเองของเซลล์ (Autolysis) เมื่อนำไบจามจุรีมาผสมกับน้ำ  $K^+$  ที่อยู่ในเซลล์ที่ย่อยสลายแล้วจะเคลื่อนย้ายออกมาอยู่ในสารละลายทันที และกากน้ำตาลประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นของเหลว เมื่อนำกากน้ำตาลมาผสมกับน้ำ  $K^+$  ในส่วนของของเหลวจะเคลื่อนย้ายออกมาอยู่ในสารละลายเช่นเดียวกัน

ดังนั้นจึงได้ทำการวัดปริมาณ  $K^+$  ในสารละลายที่มีส่วนผสมของไบจามจุรีและน้ำ พบว่ามีการปลดปล่อย  $K^+$  ออกมาร้อยละ 72 ของปริมาณ  $K^+$  ในไบจามจุรี

เมื่อวัดปริมาณ  $K^+$  ในสารละลายที่มีส่วนผสมของกากน้ำตาลและน้ำ พบว่ามีการปลดปล่อย  $K^+$  ออกมาร้อยละ 50 ของปริมาณ  $K^+$  ในกากน้ำตาล

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากน้ำตาลกับปริมาณโพแทสเซียมในสารตั้งต้นจะได้

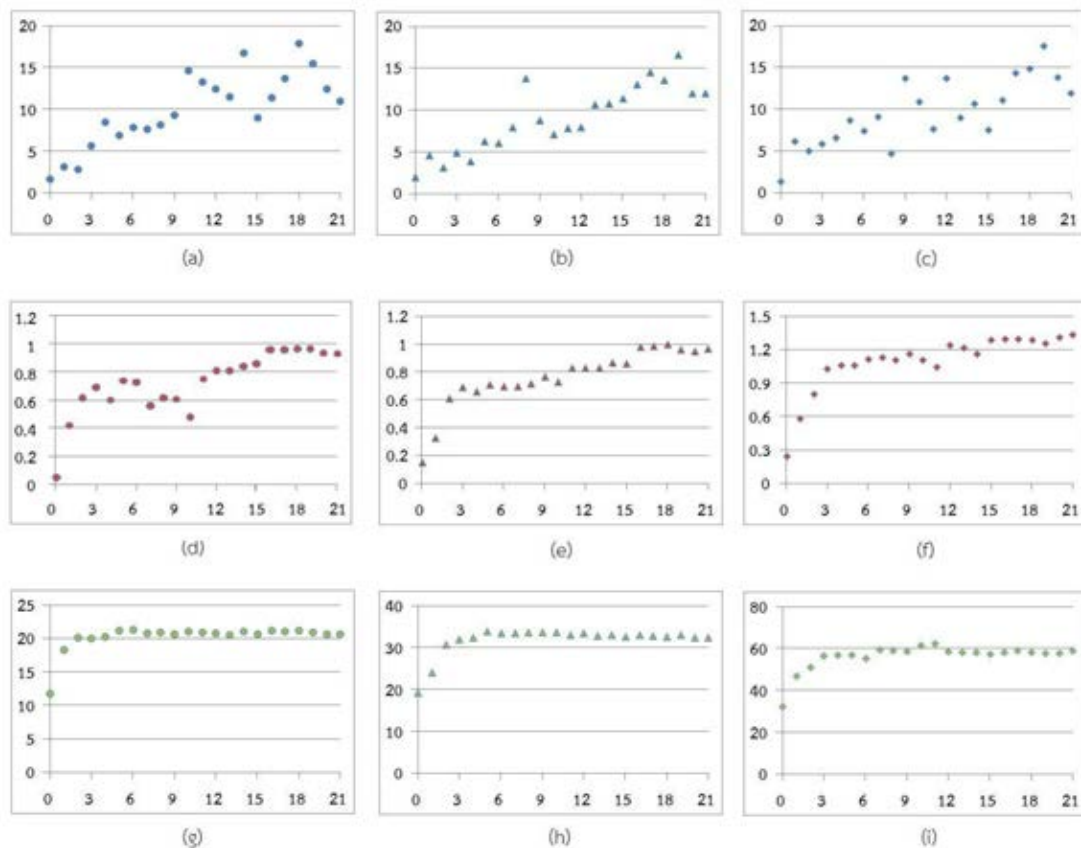
$$K_{substrate} = \frac{0.67}{100} L(1 - 0.72) + \frac{2.76}{100} M(1 - 0.5) = 1.88 + 0.0138M \quad (5.9)$$

ดังนั้นในการทดลอง 1, 2 และ 3 จะมีค่า  $K_{substrate}$  เป็น 8.78 g, 15.68 g และ 29.48 g ตามลำดับ

#### 5.1.4 การหาค่า $X_m$ , $\mu_m$ , $a_N$ , $a_P$ , และ $a_K$

การนำเสนอตัวอย่างที่ได้จากการหมักโดยใช้จุลินทรีย์หลายชนิดภายในระบบเดียวกันมาวัดอัตราการเจริญของจุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถทำได้ยาก ดังนั้นการพิจารณาหาค่า  $X_m$  และ  $\mu_m$  จะวิเคราะห์จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ในระบบ

เนื่องจากผลการทดลองมีความผันผวนสูง จึงได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งและนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีของดันแคน<sup>[20], [21]</sup> เพื่อพิจารณาความแตกต่างทางสถิติของข้อมูลในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาพิจารณาเพื่อหาค่า  $X_m$  และ  $\mu_m$  โดยค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการทดลองมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 5.1



แกนนอนแทนระยะเวลาในการหมัก มีหน่วยเป็นวัน (d) และแกนตั้งแทนปริมาณธาตุอาหารที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ มีหน่วยเป็นกรัม (g) โดยที่กราฟ (a), (b) และ (c) แสดงปริมาณไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียไอออนและไนเตรทไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพจากการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

กราฟ (d), (e) และ (f) แสดงปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพจากการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และ กราฟ (g), (h) และ (i) แสดงปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพจากการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุ N P K ที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพจากการทดลอง 3 ชุด



ธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่จุลินทรีย์นำไปใช้สร้างส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุทั้ง 2 จึงมีความสอดคล้องกับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของจุลินทรีย์ในระบบ และสามารถนำมาใช้ในการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญของจุลินทรีย์ได้

เนื่องจากการทดลองทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารที่เวลาต่างๆ ในรูปที่ละลายได้เท่านั้น และจากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุไนโตรเจนมีความผันผวนสูงเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุฟอสฟอรัส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำข้อมูลปริมาณธาตุฟอสฟอรัสที่ได้จากการทดลองมาพิจารณาหาค่า  $X_m$ ,  $\mu_m$  และ  $a_p$

จากผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพโดยวิธีของดินแคนพบว่า รูปแบบการเปลี่ยนแปลงข้อมูลจากการทดลองทั้ง 3 ชุด มีลักษณะเดียวกันคือ ปริมาณจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรก จากนั้นจะมีปริมาณคงที่ (ข้อมูลไม่มีความแตกต่างในเชิงสถิติ) ระยะเวลา ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงอีกครั้ง ดังนั้นจะแบ่งช่วงการพิจารณาออกเป็น 2 ระยะ คือช่วงเวลาหลังการหมัก  $0-t^*$  วัน และ  $t^*-21$  วัน โดยที่  $t^*$  คือจำนวนวันในการหมักที่เริ่มการเปลี่ยนแปลงในระยะที่ 2

จากสมการ (4.15) จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพสมการใหม่ดังนี้

$$P_{sol.}(t) = -0.01X_t + \begin{cases} rP_{total} - \frac{P_{substrate}^*}{\left(\frac{X_0}{X_m}(e^{\mu_m t} - 1) + 1\right)^{a_{1P} \frac{X_m}{\mu_m}}}; 0 \leq t < t^* \\ P_{total} - \frac{P_{substrate} - P_{substrate}^*}{\left(\frac{X_{t^*}}{X_m}(e^{\mu_m(t-t^*)} - 1) + 1\right)^{a_{2P} \frac{X_m}{\mu_m}}}; t^* \leq t \leq 21 \end{cases} \quad (5.10)$$

โดยที่  $P_{Substrate}^*$  แทนปริมาณฟอสฟอรัสในสารตั้งต้นที่ย่อยสลายได้ในระยะที่ 1  
(พิจารณาค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุฟอสเฟตในสารละลายช่วงที่มีปริมาณคงที่)  
 $r$  แทนสัดส่วนของปริมาณฟอสฟอรัสที่สามารถย่อยสลายได้ในช่วงแรกต่อปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในระบบ

จากข้อมูล (ตาราง ข.2) พิจารณาค่า  $P^*_{Substrate}$ ,  $r$ ,  $a_{1P}$ ,  $a_{2P}$  และ  $t^*$  ของการทดลองแต่ละชุดได้ค่าดังนี้

การทดลอง 1  $P^*_{Substrate} = 0.65$ , คิดเป็น 53% ของ  $P_{Substrate}$

$$r = 0.63 \text{ และ } t^* = 10$$

การทดลอง 2  $P^*_{Substrate} = 0.72$ , คิดเป็น 57% ของ  $P_{Substrate}$

$$r = 0.65 \text{ และ } t^* = 8$$

การทดลอง 3  $P^*_{Substrate} = 0.99$ , คิดเป็น 69% ของ  $P_{Substrate}$

$$r = 0.95 \text{ และ } t^* = 6$$

นำค่า  $P^*_{Substrate}$ ,  $r$  และ  $t^*$  มาพิจารณาหาค่า  $X_m$ ,  $\mu_m$ ,  $a_N$ ,  $a_{1P}$ ,  $a_{2P}$  และ  $a_K$  ของการทดลองแต่ละชุด โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับผลการทดลอง (trial and error) จะได้

การทดลอง 1  $X_m = 150$ ,  $\mu_m = 0.05$ ,  $a_N = 0.0011$ ,  $a_{1P} = 0.045$ ,  $a_{2P} = 0.008$

$$\text{และ } a_K = 0.065$$

การทดลอง 2  $X_m = 280$ ,  $\mu_m = 0.04$ ,  $a_N = 0.001$ ,  $a_{1P} = 0.04$ ,  $a_{2P} = 0.005$

$$\text{และ } a_K = 0.03$$

การทดลอง 3  $X_m = 295$ ,  $\mu_m = 0.002$ ,  $a_N = 0.001$ ,  $a_{1P} = 0.02$ ,  $a_{2P} = 0.009$

$$\text{และ } a_K = 0.028$$

จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับปริมาณกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปได้ เป็นสมการดังนี้


$$\left. \begin{aligned} X_m &= -0.67 * 10^8 M^{-2} + 7 * 10^4 M^{-1} + 276.67 \\ \mu_m &= -1.2 * 10^{-8} M^2 - 2 * 10^{-6} M + 0.054 \\ a_N &= 0.001 \\ t^* &= -2.885 \ln(M) + 27.932 \\ P_{Substrate}^* &= 0.2329 * 10^{-3} M + 0.515 \\ r &= 1.733 * 10^{-7} M^2 - 2.2 * 10^{-4} M + 0.6967 \\ a_{1P} &= -0.67 * 10^{-8} M^2 + 0.0467 \\ a_{2P} &= 0.67 * 10^{-8} M^2 - 1.6 * 10^{-5} M + 0.0143 \\ a_K &= 2 * 10^9 M^{-3.976} + 0.02785 \end{aligned} \right\} \quad (5.11)$$


## 5.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลอง

หัวข้อนี้จะใช้สมการ (3.2), (4.14) - (4.16) และสมการ (5.1) - (5.11) ในการคำนวณหาปริมาณธาตุ N P K ที่เกิดขึ้นในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพซึ่งอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จากการทดลอง (รูปที่ 5.2)

เมื่อกำหนดให้ แกนนอนแทนระยะเวลาหลังการหมัก มีหน่วยเป็นวัน (d)

และ แกนตั้งแทนปริมาณธาตุอาหารที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมัก มีหน่วยเป็นกรัม (g)

(N1), (P1), (K1) (  ) แสดงปริมาณธาตุอาหารที่ได้จากแบบจำลอง ปริมาณกากน้ำตาล 0.5 kg

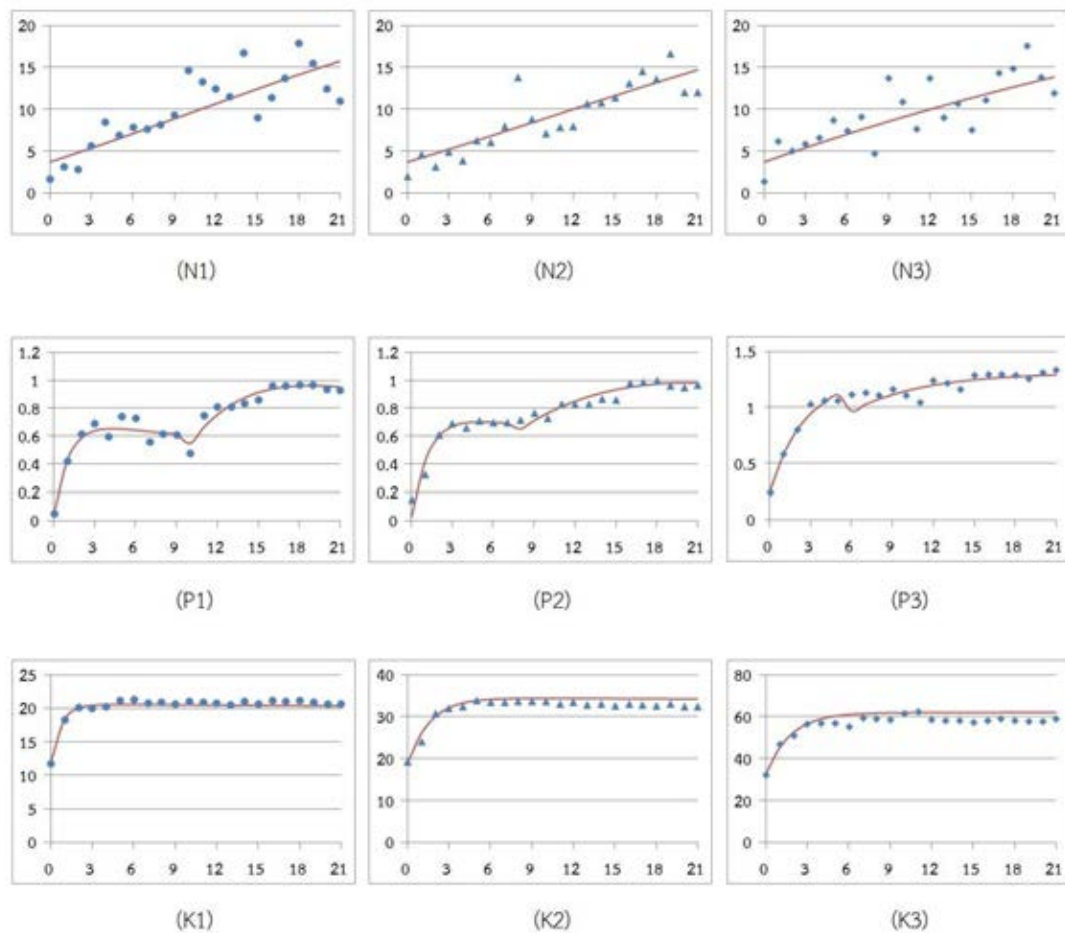
(  ) แสดงปริมาณ N P K ที่ได้จากการทดลองในการทดลองที่ 1

(N2), (P2), (K2) (  ) แสดงปริมาณธาตุอาหารที่ได้จากแบบจำลอง ปริมาณกากน้ำตาล 1 kg

(  ) แสดงปริมาณ N P K ที่ได้จากการทดลองในการทดลองที่ 2

(N3), (P3), (K3) (  ) แสดงปริมาณธาตุอาหารที่ได้จากแบบจำลอง ปริมาณกากน้ำตาล 2 kg

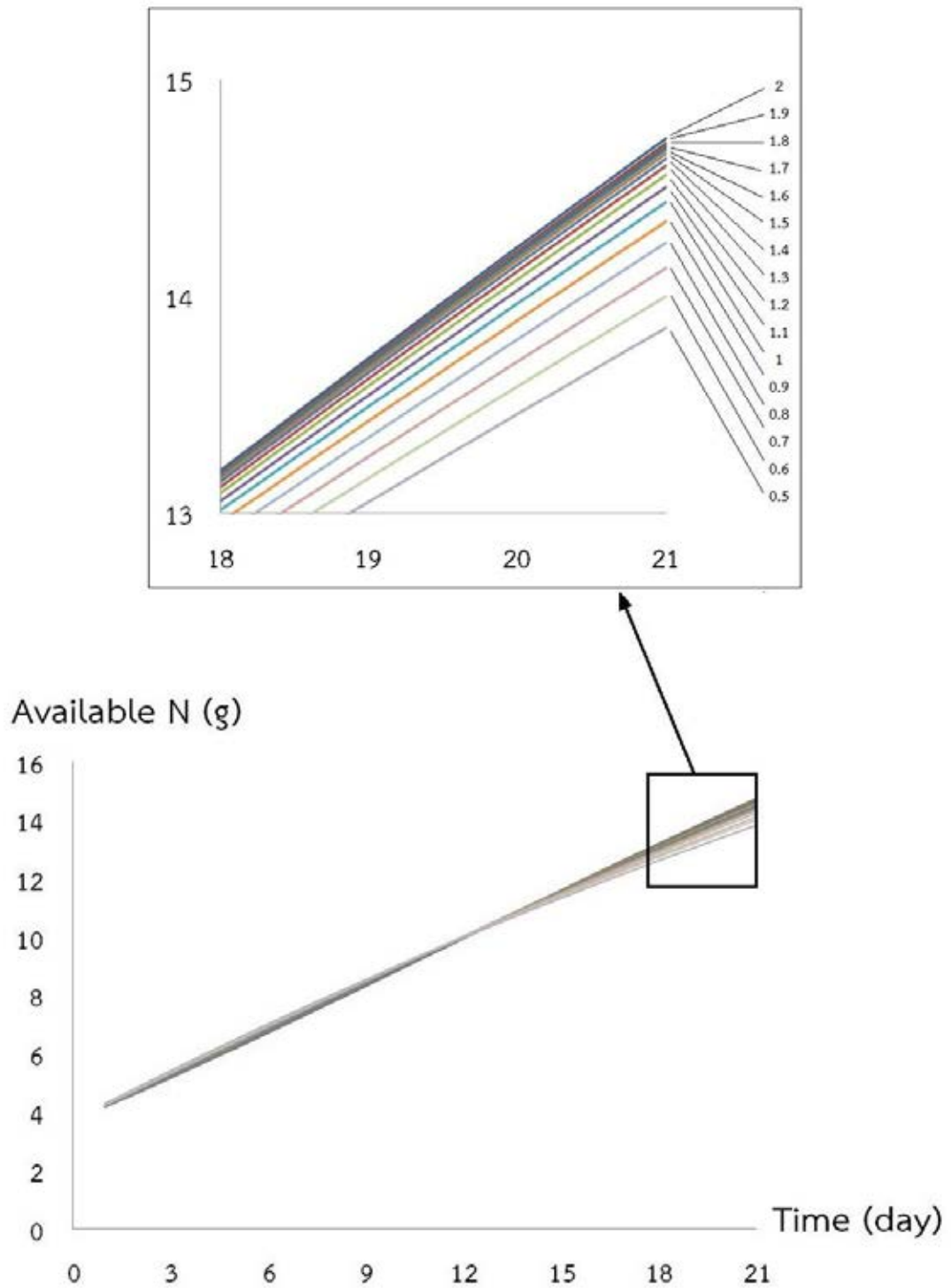
(  ) แสดงปริมาณ N P K ที่ได้จากการทดลองในการทดลองที่ 3



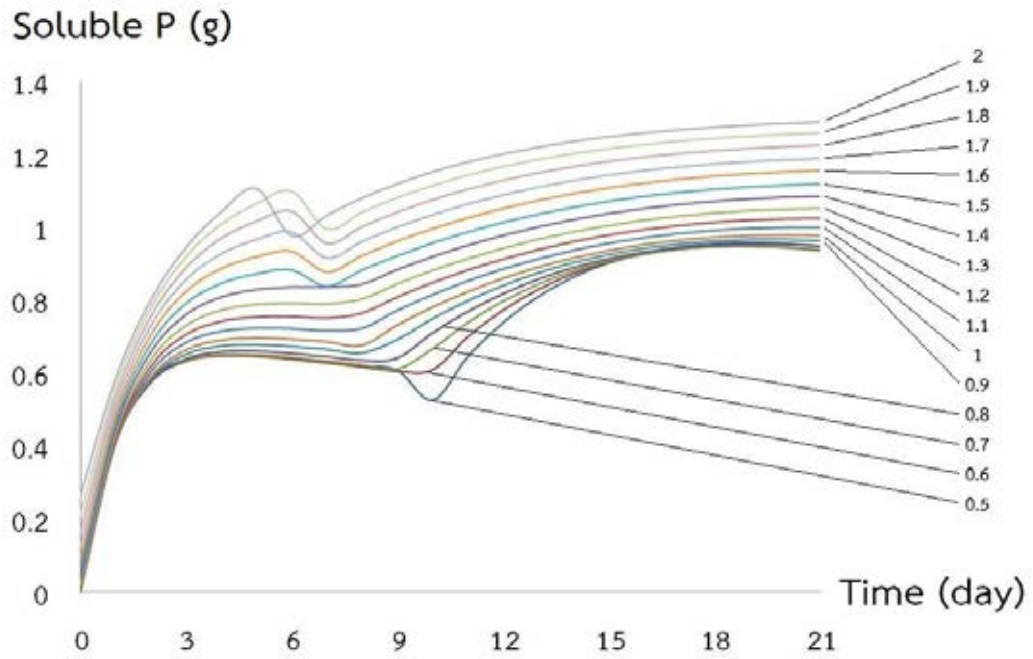
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุ N P K ที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

### 5.3 การประมาณค่าปริมาณ N P K ที่จะเกิดขึ้นในการทำน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

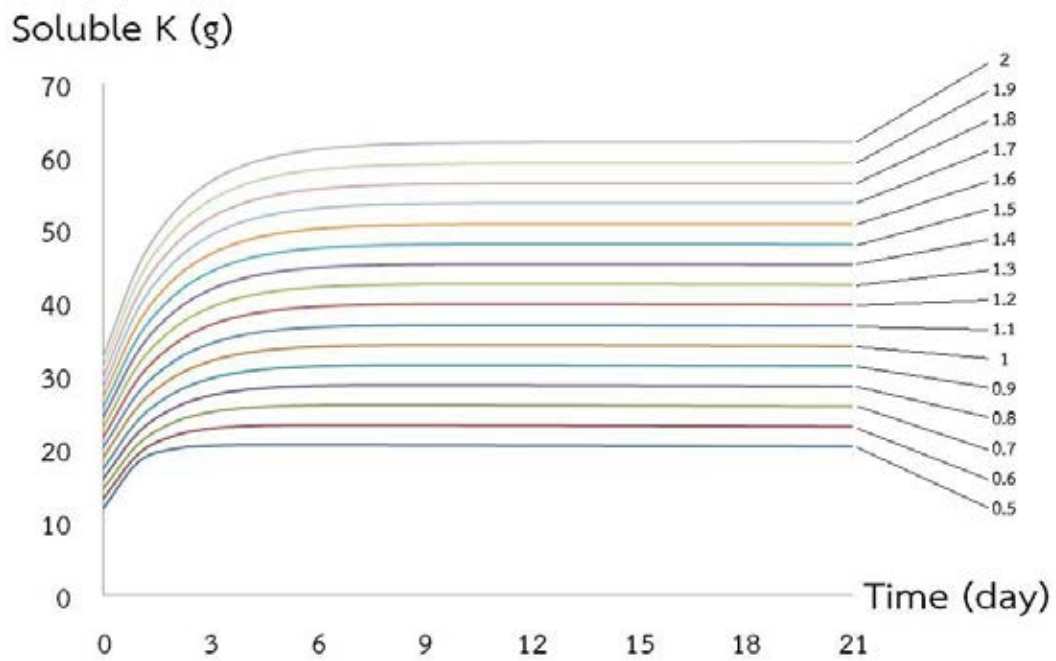
จากการทดลองข้างต้น ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกากน้ำตาลที่เปลี่ยนไปที่ส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในแบบจำลอง ในหัวข้อนี้จะประมาณค่าปริมาณ N P K ที่จะเกิดขึ้นในการทำน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ โดยมีส่วนผสมในการหมักเป็นใบจามจุรี 1 กิโลกรัม น้ำ 50 ลิตร จุลินทรีย์ พด. 2 และมีปริมาณกากน้ำตาลอยู่ในช่วง 0.5 - 2 กิโลกรัม และมีผลการประมาณอยู่ในช่วงเวลา 21 วันหลังการหมัก โดยค่าประมาณของปริมาณ N P K ที่ได้จากการหมักที่มีปริมาณกากน้ำตาลต่างกัน มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 5.3, 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 ค่าประมาณของปริมาณไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมไอออนและไนเตรทไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ จากการหมักที่มีปริมาณกากน้ำตาล 0.5 – 2 กิโลกรัม



รูปที่ 5.4 ค่าประมาณของปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพจากการหมักที่มีปริมาณกากน้ำตาล 0.5 – 2 กิโลกรัม



รูปที่ 5.5 ค่าประมาณของปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพจากการหมักที่มีปริมาณกากน้ำตาล 0.5 – 2 กิโลกรัม

#### 5.4 การวิเคราะห์แบบจำลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยน้ำชีวภาพ เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายปริมาณธาตุอาหาร N P K ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ในช่วงเวลาต่างๆ ของการหมักปุ๋ยน้ำชีวภาพ โดยมีปริมาณของกากน้ำตาลเป็นตัวแปรต้น และทำการทดสอบความสามารถในการทำนายค่าของแบบจำลอง โดยใช้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (*MPRE*) ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูล และนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองและค่าประมาณที่ได้จากแบบจำลองมาสร้างแผนภาพการกระจายของชุดข้อมูล (Scatter plot) แล้วหาเส้นของสมการถดถอย (regression line) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจริงกับค่าประมาณอีกครั้ง

ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (*MPRE*) สามารถคำนวณได้จาก

$$MPRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{D(t_i) - D_{app}(t_i)}{D(t_i)} \right| * 100 \quad (5.12)$$

เมื่อกำหนดให้  $D(t_i)$  แทนข้อมูลปริมาณธาตุอาหาร ณ เวลา  $t$  ใดๆ ที่ได้จากการทดลอง

$D_{app}(t_i)$  แทนค่าประมาณของปริมาณธาตุอาหาร ณ เวลา  $t$  ใดๆ ที่ได้จากแบบจำลอง

และ  $n$  แทนจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณา

จากผลการทดสอบพบว่า

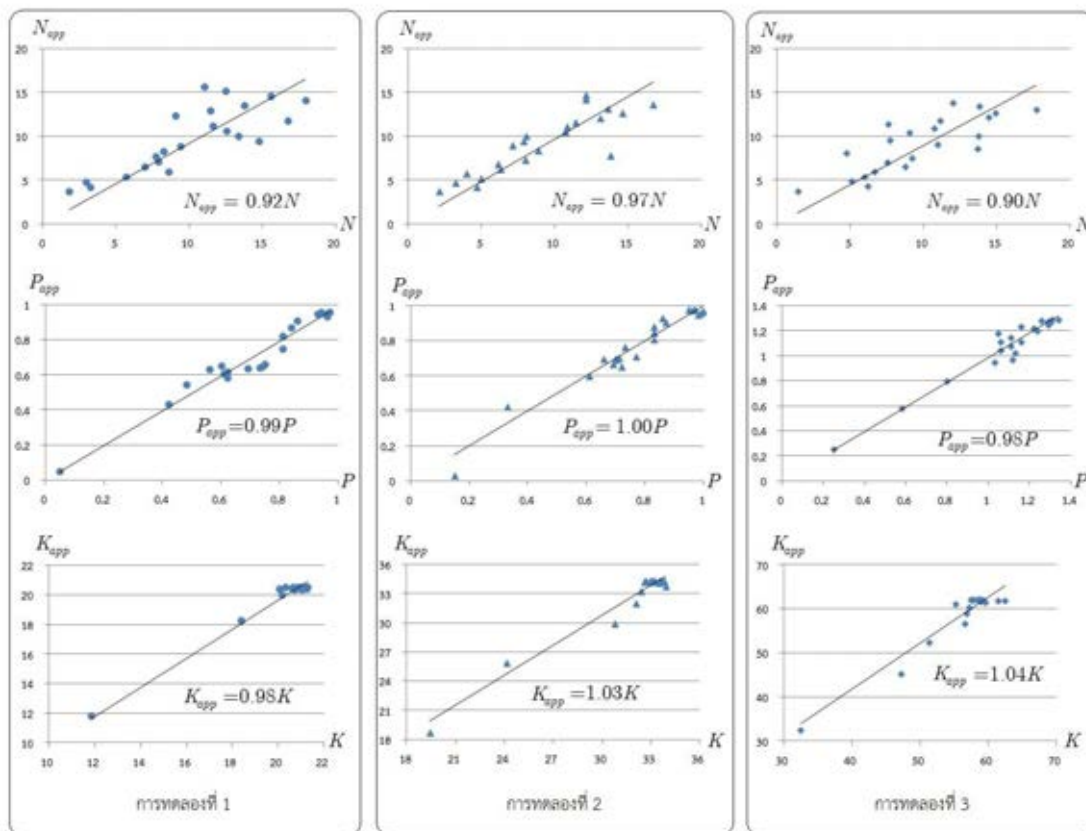
แบบจำลองสำหรับธาตุไนโตรเจนมีค่า *MPRE* อยู่ในช่วง 18.72 – 27.18 %

แบบจำลองสำหรับธาตุฟอสฟอรัสมีค่า *MPRE* อยู่ในช่วง 4.04 – 8.28 %

และ แบบจำลองสำหรับธาตุโพแทสเซียมมีค่า *MPRE* อยู่ในช่วง 1.98 – 4.65 %

นั่นคือ ค่าประมาณที่ได้จากแบบจำลองสำหรับธาตุไนโตรเจนสามารถทำได้เพียงบอกแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนเท่านั้น ไม่สามารถใช้ทำนายปริมาณที่เวลาต่างๆ ได้ เนื่องจากรูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุไนโตรเจนมีความผันผวน ทำให้ค่าประมาณที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง ในขณะที่ค่าประมาณที่ได้จากแบบจำลองสำหรับธาตุฟอสฟอรัสและแบบจำลอง

สำหรับธาตุโพแทสเซียมมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง จึงสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวในการทำนายปริมาณธาตุอาหารที่จะเกิดขึ้นในระบบที่เกิดจากการหมักที่มีส่วนผสมในการหมักเป็นใบจามจรี 1 กิโลกรัม น้ำ 50 ลิตร จุลินทรีย์ พด. 2 และมีปริมาณกากน้ำตาลอยู่ในช่วง 0.5 - 2 กิโลกรัม และมีผลการประมาณอยู่ในช่วงเวลา 21 วันหลังการหมักได้



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงการทดสอบความสามารถในการทำนายค่าของแบบจำลอง (goodness of fit)



## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองที่ใช้ในการประมาณแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหาร N P K สำหรับการหมักที่มีส่วนผสมในการหมักเป็นไบโอมัสจรี 1 กิโลกรัม น้ำ 50 ลิตร จุลินทรีย์ พด. 2 และมีปริมาณกากน้ำตาลอยู่ในช่วง 0.5 - 2 กิโลกรัม คือ

$$N_{sol.} = N_{total} - \frac{N_{substrate}(t_0)}{\left(\frac{20}{X_m}(e^{\mu_m t} - 1) + 1\right)^{a_N \frac{X_m}{\mu_m}}} - \frac{0.12X_m}{1 + \left(\frac{X_m}{20} - 1\right)e^{-\mu_m t}}$$

$$P_{sol.}(t) = -\frac{0.12X_m}{1 + \left(\frac{X_m}{20} - 1\right)e^{-\mu_m t}} + \begin{cases} rP_{total} - \frac{P_{substrate}^*}{\left(\frac{20}{X_m}(e^{\mu_m t} - 1) + 1\right)^{a_{1P} \frac{X_m}{\mu_m}}}; 0 \leq t < t^* \\ P_{total} - \frac{P_{substrate} - P_{substrate}^*}{\left(\frac{X_m}{X_m}(e^{\mu_m(t-t^*)} - 1) + 1\right)^{a_{2P} \frac{X_m}{\mu_m}}}; t^* \leq t \leq 21 \end{cases}$$

$$K_{sol.} = K_{total} - \frac{K_{substrate}(t_0)}{\left(\frac{20}{X_m}(e^{\mu_m t} - 1) + 1\right)^{a_K \frac{X_m}{\mu_m}}} - \frac{0.01X_m}{1 + \left(\frac{X_m}{20} - 1\right)e^{-\mu_m t}}$$

โดยที่

$$N_{total} = 35.11 + (2 * 10^{-4})M, P_{total} = 1.4 + (6 * 10^{-5})M, K_{total} = 7.02 + 0.0276M,$$

$$N_{substrate} = 29 + (2 * 10^{-4})M, P_{substrate} = 1.2 + (6 * 10^{-5})M, K_{substrate} = 1.88 + 0.0138M,$$

$$X_m = -0.67 * 10^8 M^{-2} + 7 * 10^4 M^{-1} + 276.67, \mu_m = -1.2 * 10^{-8} M^2 - 2 * 10^{-6} M + 0.054,$$

$$a_N = 0.001,$$

$$a_{1P} = -0.67 * 10^{-8} M^2 + 0.0467, a_{2P} = 0.67 * 10^{-8} M^2 - 1.6 * 10^{-5} M + 0.0143,$$

$$t^* = -2.885 \ln(M) + 27.932, P_{Substrate}^* = 0.2329 * 10^{-3} M + 0.515,$$

$$r = 1.733 * 10^{-7} M^2 - 2.2 * 10^{-4} M + 0.6967,$$

$$a_K = 2 * 10^9 M^{-3.976} + 0.02785$$

เมื่อกำหนดให้ M แทนปริมาณกากน้ำตาลในหน่วยกรัม (g)

## 6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทดลองหมักปุ๋ยน้ำชีวภาพ โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักคือ พด. 2 ซึ่งประกอบไปด้วยจุลินทรีย์ 5 สายพันธุ์ และวัตถุประสงค์ในการหมักเป็นวัตถุประสงค์จากธรรมชาติ ซึ่งจะมีจุลินทรีย์ในธรรมชาติปะปนมาด้วย ทำให้จุลินทรีย์ในระบบไม่สามารถแสดงบทบาทในกระบวนการย่อยสลายได้อย่างชัดเจน แต่จะเป็นการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มในระบบ ทำให้ไม่สามารถนำค่าอัตราการเจริญจำเพาะของจุลินทรีย์ชนิดใดชนิดหนึ่งมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบได้

ค่า  $\mu_m$  ที่ใช้ในแบบจำลองเป็นค่าที่ใช้อธิบายอัตราการเจริญเฉลี่ยของจุลินทรีย์ในระบบ และเป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาผลการทดลองที่มีส่วนผสมในการหมักคือใบจามจรี 1 กิโลกรัม น้ำ 50 ลิตร จุลินทรีย์ พด. 2 และมีปริมาณกากน้ำตาล 0.5, 1 และ 2 กิโลกรัมตามลำดับ โดยทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลาทั้งสิ้น 21 วันหลังจากการหมัก จึงทำให้แบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยมีข้อจำกัดสำหรับการนำไปใช้ดังนี้คือ

1. สามารถใช้ประมาณค่าปริมาณธาตุอาหารที่เกิดขึ้นสำหรับการหมักที่มีปริมาณและชนิดของส่วนผสมตรงกับที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น โดยสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณกากน้ำตาลได้ในช่วง 0.5 - 2 กิโลกรัม
2. ผลการทำนายอยู่ในช่วงระยะเวลา 0 - 21 วันหลังการหมัก

แม้ว่าวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลองจะเป็นชนิดเดียวกัน แต่วัตถุประสงค์ที่ได้มาจากแหล่งที่ต่างกันจะมีปริมาณธาตุอาหารแตกต่างกันเล็กน้อย อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าโดยการใช้แบบจำลองได้

นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่นอีกหลายประการที่มีได้นำมาพิจารณาในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเป็นผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำนายได้เช่นกัน ได้แก่ อุณหภูมิ ค่า pH และปริมาณออกซิเจน เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้ มีผลโดยตรงกับการเจริญและการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ

## 6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของวัตถุประสงค์ชนิดอื่นๆ และทำการทดลองหมักปุ๋ยน้ำชีวภาพที่มีวัตถุประสงค์หลักในการหมักหลากหลายชนิด โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนในการผสมและศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารที่เกิดขึ้น เพื่อสร้างแบบจำลองที่มีความหลากหลายต่อการนำไปใช้

6.3.2 ออกแบบการทดลองและการเก็บข้อมูลให้มีความเหมาะสมสำหรับงานวิจัยมากยิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] กรมวิชาการเกษตร. (2552). ปริมาณการนำเข้าปุ๋ยเคมีในปี 2550[Online]. แหล่งที่มา: [m.doa.go.th/ard/stat/stat\\_8.pdf](http://m.doa.go.th/ard/stat/stat_8.pdf) [15 มิถุนายน 2552]
- [2] de Boer, W., Kowalchuk, G.A., and van Veen, J.A. (2006). Root-food and the rhizosphere microbial community composition. New Phytologist. 170: 3-6.
- [3] Zwietering, M.H., Jongenburger, I., Rombouts, F.M., and Van 'T Riet, K. (1990). Modeling of the Bacterial Growth Curve. Applied and Environmental Microbiology. 56(6): 1875-1881.
- [4] Touratier, F., Legendre, L., and Vézina, A. (1999). Model of bacterial growth influenced by substrate C:N ratio and concentration. Aquatic microbial ecology. 19: 105-118.
- [5] Sophie, G. and Marstorp, H. (2002). Carbohydrate composition of plant material determines N mineralization. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 62: 175-183.
- [6] Kögel-Knabner, I. (2002). The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. Soil Biology and Biochemistry. 34: 139-162.
- [7] Wang, D., Xu, Y., Hu, j., and Zhao, G. (2004). Fermentation Kinetics of Different Sugars by Apple Wine Yeast *Saccharomyces cerevisiae*. The Institute and Guild of Brewing. 110(4): 340-346.
- [8] คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2548). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [9] Prescott, M.L., Harley, J.P., and Klein, D.A. (1993). Microbiology. 2<sup>nd</sup> ed. Melbourne: Wm. C. Brown Publishers.
- [10] กฤษณ์ มงคลปัญญา และ อมรา ทองปาน. (2546). ชีววิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [11] Doyle, D.A., Cabral, J.M., Pfuetzner, R.A., Kuo, A., Gulbis, J.M., Cohen, S.L., et al. (1998). The structure of the potassium channel: molecular basis of K<sup>+</sup> conduction and selectivity. Science. 280(5360): 69-77.

- [12] พูนพิภพ เกษมทรัพย์. (2551). ชีววิทยา 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มูลนิธิส่งเสริมโอลิมปิกวิชาการและพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์ศึกษาในพระอุปถัมภ์สมเด็จพระพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวง-นราธิวาสราชนครินทร์.
- [13] Gray, T.R.G. and Williams, S.T. (1971). Soil micro-organisms. London: Longman Group Ltd.
- [14] Williams, S.T., Gray, T.R.G., (1974). Decomposition of litter on the soil surface. In: Dickinson, C.H., Pugh, G.J.F.(Eds.). Biology of Plant Litter Decomposition, vol. 2. , pp. 611-632. London: Academic Press.
- [15] Kögel, I., Hempfling, R., Zech, W., Hatcher, P.G., and Schulten, H.-R. (1988). Chemical composition of the organic matter in forest soils: I. Forest litter. Soil science. 146: 124-136.
- [16] Stowell, J.D., Beardsmore, A.J., Keevil, C.W., and Woodward, J.R. (1987). Carbohydrate feedstocks : Availability and utilization of molasses and whey. In J. Coombs (eds.), Carbohydrate substrates in biotechnology, pp. 33-39. Washington DC: Academic press.
- [17] Stanbury, P.F. and Whitaker, A. (1984). Principle of Fermentation Technology. Oxford: Pergamon Press.
- [18] ณรงค์ ชินบุตร. (2547). คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.
- [19] กรมพัฒนาที่ดิน. (2552). สารเร่งซูปเปอร์ พด. 2 [Online]. แหล่งที่มา: [www.ldd.go.th/menu\\_5wonder/pd\\_2.html](http://www.ldd.go.th/menu_5wonder/pd_2.html) [15 มิถุนายน 2552]
- [20] Duncan, D.B. (1953). Multiple Range Tests and the Multiple Comparisons Test. Biometrics. 9: Abstract 220.
- [21] Harter, H.L. (1960). Critical Values for Duncan's New multiple Range Test. Biometrics. 16: 671-685.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองแบบเป็นกลุ่มโดยใช้วิธีของดันแคน  
(Duncan's New Multiple Range Test)

ดันแคนได้พัฒนาการทดสอบการเปรียบเทียบพหุเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละสิ่งทดลองกับสิ่งทดลองอื่นๆ ทั้งหมดที่เหลือ วิธีการทดสอบประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1) คำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน หรือความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวคือ

$$S_{\bar{y}_i} = \sqrt{\frac{MSE}{n}} \quad (ก.1)$$

โดยที่  $MSE$  คือค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

$n$  คือขนาดตัวอย่างของสิ่งทดลอง

ถ้าขนาดตัวอย่างไม่เท่ากันทุกสิ่งทดลอง แทน  $n$  ด้วย  $n_h$

$$n_h = \frac{a}{\sum_{h=i}^a (1/n_i)} \quad (ก.2)$$

2) หาค่า Least significant ranges ( $R_p$ ) ;  $p = 2, 3, \dots, a$

$$R_p = r_{\alpha(p,f)} S_{\bar{y}_i} \quad (ก.3)$$

$r_{\alpha(p,f)}$  หาได้โดยการเปิดตารางค่าวิกฤตสำหรับการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของ

สิ่งทดลองแบบเป็นกลุ่มโดยใช้วิธีของดันแคน สำหรับ  $p = 2, 3, \dots, a$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ระดับนัยสำคัญ

$f$  คือ จำนวนชั้นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน

$p$  คือ จำนวนสิ่งทดลองที่อยู่ในกลุ่มหนึ่ง

3) ทำการเปรียบเทียบสิ่งทดลองแต่ละคู่กับค่าวิกฤต

ตาราง ก.1 ค่าวิกฤตสำหรับการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองแบบเป็นกลุ่มโดยใช้วิธีของตันแคน ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95; ระดับนัยสำคัญ 0.05

$f \backslash p$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97	17.97
2	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085	6.085
3	4.501	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516	4.516
4	3.927	4.013	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033	4.033
5	3.635	3.749	3.797	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814	3.814
6	3.461	3.587	3.649	3.68	3.694	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697
7	3.344	3.477	3.548	3.588	3.611	3.622	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626	3.626
8	3.261	3.399	3.475	3.521	3.549	3.566	3.575	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579	3.579
9	3.199	3.339	3.42	3.47	3.502	3.523	3.536	3.544	3.547	3.547	3.547	3.547	3.547	3.547	3.547	3.547	3.547	3.547	3.547
10	3.151	3.239	3.376	3.43	3.465	3.489	3.505	3.516	3.522	3.525	3.526	3.526	3.526	3.526	3.526	3.526	3.526	3.526	3.526
11	3.113	3.256	3.342	3.397	3.435	3.462	3.48	3.493	3.501	3.506	3.509	3.51	3.51	3.51	3.51	3.51	3.51	3.51	3.51
12	3.082	3.225	3.313	3.37	3.41	6.439	3.459	3.474	3.484	3.491	3.496	3.498	3.499	3.499	3.499	3.499	3.499	3.499	3.499
13	3.055	3.2	3.289	3.348	3.389	3.419	3.442	3.458	3.47	3.478	3.484	3.488	3.49	3.49	3.49	3.49	3.49	3.49	3.49
14	3.033	3.178	3.268	3.329	3.372	3.403	3.426	3.444	3.457	3.467	3.474	3.479	3.482	3.484	3.484	3.485	3.485	3.485	3.485
15	3.014	3.16	3.25	3.312	3.356	3.389	3.413	3.432	3.446	3.457	3.465	3.471	3.476	3.478	3.48	3.481	3.481	3.481	3.481
16	2.998	3.144	3.235	3.298	3.343	3.376	3.402	3.422	3.437	3.449	3.458	3.465	3.47	3.473	3.477	3.478	3.478	3.478	3.478
17	2.984	3.13	3.222	3.285	3.331	3.366	3.392	3.412	3.429	3.441	3.451	3.459	3.465	3.469	3.473	3.475	3.476	3.476	3.476
18	2.971	3.118	3.21	3.274	3.321	3.356	3.383	3.405	3.421	3.435	3.445	3.454	3.46	3.465	3.47	3.472	3.474	3.474	3.474
19	2.96	3.107	3.199	3.264	3.311	3.347	3.375	3.397	3.415	3.429	3.44	3.449	3.456	3.462	3.467	3.47	3.472	3.473	3.474
20	2.95	3.097	3.19	3.255	3.303	3.339	3.368	3.391	3.409	3.424	3.436	3.445	3.453	3.459	3.464	3.467	3.47	3.472	3.473
24	2.919	3.066	3.16	3.226	3.276	3.315	3.345	3.37	3.39	3.406	3.42	3.432	3.441	3.449	3.456	3.461	3.465	3.469	3.471
30	2.888	3.035	3.131	3.199	3.25	3.29	3.322	3.349	3.371	3.389	3.405	3.418	3.43	3.439	3.447	3.454	3.46	3.466	3.47
40	2.858	3.006	3.102	3.171	3.224	3.266	3.3	3.328	3.352	3.373	3.39	3.405	3.418	3.429	3.439	3.448	3.456	3.463	3.469
60	2.829	2.976	3.073	3.143	3.198	3.241	3.277	3.307	3.333	3.355	3.374	3.391	3.406	3.419	3.431	3.442	3.451	3.46	3.467
120	2.8	2.947	3.045	3.116	3.172	3.217	3.254	3.287	3.314	3.337	3.359	3.377	3.394	3.409	3.423	3.435	3.446	3.457	3.466
$\infty$	2.772	2.918	3.017	3.089	3.146	3.193	3.232	3.265	3.294	3.32	3.343	3.363	3.382	3.399	3.414	3.428	3.442	3.454	3.466

## ภาคผนวก ข

## ปริมาณธาตุอาหารในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

ตาราง ข.1 ปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออนและแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

เวลา (d)	ปริมาณไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมไอออนและไนเตรทไอออน (g)		
	การทดลอง 1	การทดลอง 2	การทดลอง 3
0	1.75	2.07	1.37
1	3.21	4.66	6.17
2	2.89	3.18	5.06
3	5.67	4.95	5.94
4	8.56	3.96	6.61
5	6.95	6.28	8.71
6	7.85	6.08	7.49
7	7.69	7.97	9.17
8	8.22	13.80	4.73
9	9.35	8.83	13.69
10	14.72	7.10	10.92
11	13.34	7.88	7.70
12	12.49	8.01	13.73
13	11.55	10.68	9.00
14	16.72	10.84	10.72
15	9.03	11.42	7.58
16	11.39	13.10	11.09
17	13.71	14.62	14.40
18	17.90	13.59	14.90
19	15.54	16.71	17.66
20	12.45	12.11	13.81
21	11.02	12.11	11.97
$N_{total}$	35.21	35.31	35.51



ตาราง ข.2 ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายได้ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

เวลา (d)	ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายได้ (g)		
	การทดลอง 1	การทดลอง 2	การทดลอง 3
0	0.05	0.15	0.25
1	0.42	0.33	0.58
2	0.62	0.61	0.80
3	0.69	0.69	1.03
4	0.60	0.66	1.06
5	0.74	0.71	1.06
6	0.73	0.70	1.12
7	0.56	0.70	1.13
8	0.62	0.72	1.11
9	0.61	0.77	1.16
10	0.48	0.73	1.11
11	0.75	0.83	1.05
12	0.81	0.83	1.24
13	0.81	0.83	1.22
14	0.84	0.87	1.16
15	0.86	0.86	1.29
16	0.96	0.98	1.30
17	0.96	0.99	1.30
18	0.97	1.00	1.29
19	0.97	0.96	1.26
20	0.94	0.95	1.31
21	0.93	0.97	1.34
<b><math>P_{total}</math></b>	<b>1.43</b>	<b>1.46</b>	<b>1.52</b>

ตาราง ข.3 ปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพ

เวลา (d)	ปริมาณโพแทสเซียมไอออน (g)		
	การทดลอง 1	การทดลอง 2	การทดลอง 3
0	11.82	19.39	32.48
1	18.40	24.11	47.17
2	20.16	30.75	51.38
3	20.06	32.07	56.61
4	20.31	32.40	56.88
5	21.18	33.89	57.20
6	21.30	33.52	55.26
7	20.87	33.53	59.58
8	20.98	33.66	59.02
9	20.67	33.66	58.84
10	21.10	33.82	61.48
11	20.91	33.23	62.46
12	20.82	33.50	58.66
13	20.63	32.99	58.43
14	21.11	33.17	58.46
15	20.65	32.65	57.49
16	21.20	33.07	58.51
17	21.11	32.90	59.02
18	21.25	32.71	58.40
19	21.01	33.03	57.78
20	20.73	32.60	57.87
21	20.73	32.60	59.19
<b><math>K_{total}</math></b>	<b>20.82</b>	<b>34.62</b>	<b>62.22</b>

## ภาคผนวก ค

ตาราง ค.1 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออนและแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 1 โดยวิธีของตันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

TIME	Subset for alpha = 0.05										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	1.75										
2	2.89	2.89									
1	3.21	3.21									
3		5.68	5.68								
5			6.96	6.96							
7			7.69	7.69							
6			7.85	7.85							
8			8.22	8.22	8.22						
4			8.56	8.56	8.56	8.56					
15				9.03	9.03	9.03					
9				9.36	9.36	9.36					
21					11.02	11.02	11.02				
16						11.39	11.39				
13						11.55	11.55				
20							12.45	12.45			
12							12.48	12.48			
11							13.34	13.34	13.34		
17							13.71	13.71	13.71		
10								14.72	14.72	14.72	
19									15.54	15.54	15.54
14										16.72	16.72
18											17.90
Sig.	0.303	0.051	0.059	0.122	0.062	0.051	0.084	0.131	0.136	0.161	0.097

ตาราง ค.2 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออน และแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 2 โดยวิธีของตันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

TIME	Subset for alpha = 0.05										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	2.07										
2	3.18										
4	3.96	3.96									
1	4.66	4.66	4.66								
3	4.95	4.95	4.95								
6		6.08	6.08	6.08							
5		6.28	6.28	6.28							
10			7.10	7.10							
11				7.88	7.88						
7				7.97	7.97	7.97					
12				8.01	8.01	8.01					
9				8.83	8.83	8.83	8.83				
13					10.68	10.68	10.68	10.68			
14						10.84	10.84	10.84	10.84		
15							11.42	11.42	11.42		
20								12.11	12.11	12.11	
21								12.12	12.12	12.12	
16								13.10	13.10	13.10	
18								13.59	13.59	13.59	
8									13.80	13.80	
17										14.62	14.62
19											16.71
Sig.	0.051	0.116	0.098	0.071	0.058	0.052	0.073	0.056	0.052	0.095	0.113

ตาราง ค.3 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรทไอออน และแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 3 โดยวิธีของตันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

TIME	Subset for alpha = 0.05									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1.36									
8		4.73								
2		5.07								
3		5.94	5.94							
1		6.18	6.18							
4		6.62	6.62							
6		7.49	7.49	7.49						
15		7.58	7.58	7.58	7.58					
11		7.70	7.70	7.70	7.70					
5			8.71	8.71	8.71	8.71				
13			9.00	9.00	9.00	9.00				
7			9.17	9.17	9.17	9.17				
14				10.71	10.71	10.71	10.71			
10				10.93	10.93	10.93	10.93	10.93		
16					11.09	11.09	11.09	11.09		
21						11.97	11.97	11.97	11.97	
9							13.69	13.69	13.69	
12							13.73	13.73	13.73	
20							13.81	13.81	13.81	
17								14.40	14.40	
18									14.90	14.90
19										17.66
Sig.	1.000	0.098	0.075	0.056	0.05	0.066	0.081	0.051	0.095	0.074

ตาราง ค.4 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายได้ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 1 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

TIME	Subset for alpha = 0.05								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.05								
1		0.42							
10		0.48							
7			0.56						
4			0.6						
9			0.61						
8			0.62	0.62					
2			0.62	0.62					
3				0.69	0.69				
6					0.73	0.73			
5					0.74	0.74			
11					0.75	0.75			
13						0.81	0.81		
12						0.81	0.81		
14							0.84		
15							0.86	0.86	
21								0.93	0.93
20									0.94
16									0.96
17									0.96
19									0.97
18									0.97
Sig.	1.000	0.101	0.133	0.054	0.122	0.051	0.194	0.062	0.232

ตาราง ค.5 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายได้ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 2 โดยวิธีของดินแดนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

TIME	Subset for alpha = 0.05							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.15							
1		0.33						
2			0.61					
4				0.66				
3				0.69	0.69			
7				0.70	0.70			
6				0.70	0.70			
5				0.71	0.71			
8					0.72			
10					0.73	0.73		
9						0.77		
13							0.83	
11							0.83	
12							0.83	
15							0.86	
14							0.87	
20								0.95
19								0.96
21								0.97
16								0.98
17								0.99
18								1.00
Sig.	1.000	1.000	1.000	0.080	0.092	0.078	0.132	0.076

ตาราง ค.6 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตที่ละลายได้ในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 3 โดยวิธีของดินแดนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

TIME	Subset for alpha = 0.05								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.25								
1		0.58							
2			0.8						
3				1.03					
11				1.05					
5				1.06					
4				1.06					
8				1.11	1.11				
10				1.11	1.11				
6				1.12	1.12				
7				1.13	1.13	1.13			
9					1.16	1.16	1.16		
14					1.16	1.16	1.16		
13						1.22	1.22	1.22	
12							1.24	1.24	
19								1.26	1.26
15								1.29	1.29
18								1.29	1.29
17								1.3	1.3
16								1.3	1.3
20								1.31	1.31
21									1.34
Sig.	1.000	1.000	1.000	0.050	0.305	0.067	0.090	0.065	0.101



ตาราง ค.7 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 1 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

TIME	Subset for alpha = 0.05							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	11.83							
1		18.40						
3			20.06					
2			20.16	20.16				
4			20.31	20.31	20.31			
13				20.64	20.64	20.64		
15				20.65	20.65	20.65		
9				20.67	20.67	20.67	20.67	
20					20.73	20.73	20.73	20.73
21					20.74	20.74	20.74	20.74
12					20.82	20.82	20.82	20.82
7					20.87	20.87	20.87	20.87
11						20.91	20.91	20.91
8						20.98	20.98	20.98
19						21.01	21.01	21.01
10						21.09	21.09	21.09
17						21.10	21.10	21.10
14						21.11	21.11	21.11
5						21.18	21.18	21.18
16						21.20	21.20	21.20
18							21.25	21.25
6								21.30
Sig.	1.000	1.000	0.345	0.070	0.056	0.067	0.059	0.063

ตาราง ค.8 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 2 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

TIME	Subset for alpha = 0.05									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	19.39									
1		24.12								
2			30.75							
3				32.07						
4				32.40	32.40					
20				32.60	32.60	32.60				
21				32.60	32.60	32.60				
15				32.64	32.64	32.64				
18				32.71	32.71	32.71				
17					32.89	32.89	32.89			
13					32.99	32.99	32.99	32.99		
19					33.03	33.03	33.03	33.03		
16					33.07	33.07	33.07	33.07		
14						33.16	33.16	33.16	33.16	
11						33.23	33.23	33.23	33.23	33.23
12							33.50	33.50	33.50	33.50
6							33.52	33.52	33.52	33.52
7							33.53	33.53	33.53	33.53
9								33.66	33.66	33.66
8								33.67	33.67	33.67
10									33.82	33.82
5										33.88
Sig.	1.000	1.000	1.000	0.055	0.056	0.071	0.066	0.053	0.054	0.059

ตาราง ค.9 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ละลายในน้ำปุ๋ยหมักชีวภาพในการทดลองชุดที่ 3 โดยวิธีของดันแคนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

TIME	Subset for alpha = 0.05								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	32.48								
1		47.17							
2			51.40						
6				55.28					
3				56.61	56.61				
4				56.89	56.89	56.89			
5				57.20	57.20	57.20	57.20		
15					57.48	57.48	57.48	57.48	
19					57.78	57.78	57.78	57.78	
20					57.86	57.86	57.86	57.86	
18					58.4	58.4	58.4	58.4	
13					58.43	58.43	58.43	58.43	
14					58.47	58.47	58.47	58.47	
16					58.53	58.53	58.53	58.53	
12					58.67	58.67	58.67	58.67	
9						58.85	58.85	58.85	
8						59.03	59.03	59.03	
17						59.03	59.03	59.03	
21							59.20	59.20	
7								59.59	
10									61.52
11									62.49
Sig.	1.000	1.000	1.000	0.063	0.067	0.060	0.079	0.062	0.299

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจิตติมา เจียมอนุสรณ์ เกิดวันอาทิตย์ที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2530 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ในปีการศึกษา 2550 และเข้ารับการศึกษต่อในระดับ ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 ได้รับทุนการศึกษาจากโครงการพัฒนา ส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) ภายใต้การบริหารของ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.)