การผลิตปุ๋ยละลายช้าจากแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว

นางสาวจิตตรีรา บัวเทศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF SLOW RELEASE FERTILIZER FROM LEONARDITE, ZEOLITE AND RICE STRAW

Miss Jittrera Buates

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตปุ๋ยละลายช้าจากแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว
โดย	นางสาวจิตตรีรา บัวเทศ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.เรวดี อนุวัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.เรวดี อนุวัฒนา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิมปิยากร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒิกะ)

จิตตรีรา บัวเทศ : การผลิตปุ๋ยละลายช้าจากแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว (PRODUCTION OF SLOW RELEASE FERTILIZER FROM LEONARDITE, ZEOLITE AND RICE STRAW) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.เรวดี อนุวัฒนา, 174 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการเตรียมปุ๋ยละลายช้าจากแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ ร่วมกับฟางข้าว โดยทำการเตรียมปุ๋ยละลายช้าทั้งหมด 4 สูตร ซึ่งปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 มีส่วนประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์เพียงอย่างเดียว ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 เป็นแร่ลีโอนาร์ไดต์ผสมกับซีโอไลต์ ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 เป็นแร่ลีโอนาร์ไดต์ผสมกับฟางข้าว และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีส่วนประกอบครบทั้ง 3 ชนิด คือ แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว จากนั้นจะทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่าง ผลการศึกษา พบว่า ปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3) จะมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ต่ำกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4) แต่อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารก็ยังสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาที่พบว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบจะพบรูพรุนค่อนข้างน้อยและรูพรุนมีขนาดเล็กกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ ขณะที่ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีพื้นผิวที่เรียบสม่ำเสมอและไม่พบรูพรุนบนพื้นผิว แต่ถึงอย่างไรก็ตาม หากทำการพิจารณาเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรปที่กำหนดว่าปุ๋ยละลายช้าจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุอาหารไม่เกินร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในเวลา 24 ชั่วโมง จะพบว่า ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรยังมีการปลดปล่อยธาตุอาหารอยู่ในเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป โดยที่เวลา 24 ชั่วโมง ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช เท่ากับ 0.1551, 0.2090, 0.1675 และ 0.2625 ตามลำดับ และมีร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช เท่ากับ 0.2847, 0.2511, 0.2110 และ 0.2536 ตามลำดับ สำหรับร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช มีค่าเท่ากับ 0.5859, 0.7451, 0.5169 และ 0.6481 ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา 2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

5570142821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS: SLOW RELEASE FERTILIZER / LEONARDITE / ZEOLITE / RICE STRAW

JITTRERA BUATES: PRODUCTION OF SLOW RELEASE FERTILIZER FROM LEONARDITE, ZEOLITE AND RICE STRAW. ADVISOR: ASSOC. PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D., CO-ADVISOR: REWADEE ANUWATTANA, Ph.D., 174 pp.

This research aims to study the feasibility to produce slow release fertilizer from leonardite, zeolite and rice straw. Four formulations of slow release fertilizer were prepared by using different compositions of leonardite, leonardite and zeolite, leonardite and rice straw and leonardite, zeolite and rice straw. Morphologies of the sample surfaces were revealed by Scanning Electron Microscopy (SEM) and the NPK nutrients release contents were also determined. The results show that the slow release fertilizer formulations without zeolite (formulations 1 and 3) have NPK nutrient release rates slower than those with zeolite (formulations 2 and 4). However, the NPK nutrient release rates were still high comparing to the commercial slow release fertilizer. In terms of morphologies, the slow release fertilizer formulations without zeolite (formulations 1 and 3) had less number of pores and smaller pores (31-188 μm) while the formulations with zeolite (formulations 2 and 4) possessed pores of about 31-750 μm in size. With zeolite, the surfaces were rougher. The commercial slow release fertilizer has rather smooth surface without large pores on the surface. European Standardization Committee specified that the slow release fertilizer should release nutrients no more than 15 % within 24 hrs at a temperature of 25 °C. It can be seen that all formulations meet the criteria. The average nitrogen release contents of formulation 1, 2, 3 and 4 were 0.1551, 0.2090, 0.1675 and 0.2625 %, respectively. The average phosphorus release contents of formulation 1, 2, 3 and 4 were 0.2847, 0.2511, 0.2110 and 0.2536 %, respectively. The average potassium release contents of formulation 1, 2, 3 and 4 were 0.5859, 0.7451, 0.5169 and 0.6481 %, respectively.

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature	.....
Field of Study:	Environmental Engineering	Advisor's Signature	.....
Academic Year:	2014	Co-Advisor's Signature	.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยพระคุณของรองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.เรวดี อนุวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำและถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความเมตตากรุณาของอาจารย์มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิมปิยากร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒิกะ ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อสอบวิทยานิพนธ์นี้รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และชี้แนะข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.รจนา ตั้งกุลบริบูรณ์ นักวิจัย ฝ่ายเทคโนโลยีเกษตร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และบุคลากรฝ่ายเทคโนโลยีเกษตรทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำในเรื่องต่างๆ รวมทั้งอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ “ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัยแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” และ “โครงการการสร้างภาคีในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอก ระหว่างสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยกับสถาบันการศึกษา” ที่สนับสนุนทุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ บริษัท มณีจันทร์ อินดัสทรีย์ จำกัด จังหวัดลำปาง ที่ให้ความอนุเคราะห์แร่ลีโอนาร์ไดต์ และขอขอบคุณ บริษัท วายวีพี เฟอร์ติไลเซอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แม่ปุ๋ยเพื่อนำมาทำการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ช่วยสนับสนุนส่งเสริม และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฐ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
1.3 สมมติฐาน 3
1.4 ขอบเขตการวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 แร่ลีโอนาร์ไดต์ (Leonardite) 5
2.1.1 การเกิดแร่ลีโอนาร์ไดต์ 6
2.1.2 แหล่งแร่ลีโอนาร์ไดต์ในประเทศไทย 6
2.1.3 สมบัติของแร่ลีโอนาร์ไดต์ 6
2.1.4 ประโยชน์ของแร่ลีโอนาร์ไดต์ 8
2.2 ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช 9
2.2.1 มหธาตุ 9
2.2.2 จุลธาตุ 10
2.3 หน้าที่และความสำคัญของธาตุอาหาร 10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.3.1 ธาตุไนโตรเจน 10
2.3.2 ธาตุฟอสฟอรัส 11
2.3.3 ธาตุโพแทสเซียม 11
2.4 ปุ๋ย (Fertilizer) 12
2.4.1 การจำแนกปุ๋ย 12
2.4.1.1 จำแนกตามชนิดของสารประกอบเป็นเกณฑ์ 12
2.4.1.2 จำแนกตามชนิดและจำนวนของธาตุอาหารที่มีในปุ๋ยเป็นเกณฑ์ 13
2.4.1.3 จำแนกตามความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารเป็นเกณฑ์ 13
2.4.2 การบอกปริมาณธาตุอาหารพืชในปุ๋ย 14
2.5 ปัญหาของการใช้ปุ๋ยเคมีทั่วไป 15
2.6 ปุ๋ยละลายช้า (Slow release fertilizers) 15
2.6.1 ประเภทของปุ๋ยละลายช้า 16
2.6.1.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่มีสภาพละลายน้ำได้ต่ำ (Organic-N low-solubility compounds) 16
2.6.1.2 ปุ๋ยเคลือบ (Coated fertilizers) 16
2.6.1.3 ปุ๋ยละลายช้าชนิดใช้วัสดุพื้น (Matrix-based slow release fertilizers) 16
2.6.1.4 ปุ๋ยละลายช้าชนิดอื่นๆ 16
2.6.2 การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยละลายช้า 17
2.6.2.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่มีสภาพละลายน้ำได้ต่ำ 17
2.6.2.2 ปุ๋ยเคลือบ 17
2.6.3 ข้อดีของปุ๋ยละลายช้า 20
2.7 หลักพิจารณาการใช้ปุ๋ยเคมี 20
2.7.1 ลักษณะของพืชที่ปลูก 20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.7.2 ดิน 20
2.7.3 ชนิดและปริมาณของปุ๋ย 21
2.7.4 ระยะเวลาการใส่ปุ๋ย 21
2.7.5 วิธีใส่ปุ๋ย 21
2.8 ปุ๋ยละลายช้าสูตร 13-13-13 21
2.9 ซีโอไลต์ (Zeolite) 22
2.9.1 ชนิดของซีโอไลต์ 23
2.9.1.1 ซีโอไลต์ตามธรรมชาติ (Mineral zeolite) 23
2.9.1.2 ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Synthesis zeolite) 23
2.9.2 คุณสมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ 24
2.9.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์ 24
2.10 ฟางข้าว (Rice straw) 25
2.10.1 ประโยชน์ของฟางข้าว 25
2.10.2 กระบวนการจัดการฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยว 26
2.11 เบนโทไนท์ (Bentonite) 27
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 28
2.13 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย 34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 36
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 36
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 36
3.1.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 37
3.1.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ในการวิจัย 40
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย 40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

3.2.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบตั้งต้นที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า 40
3.2.2 การเตรียมปุ๋ยละลายช้า 42
3.2.3 การศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่าง 43
3.3 สรุปแผนการดำเนินงานวิจัย 44
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย 45
4.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบตั้งต้นที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า 45
4.1.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์ 45
4.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของส่วนประกอบที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า 47
4.1.3 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของส่วนประกอบที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า 51
4.2 การเตรียมปุ๋ยละลายช้า 52
4.2.1 การหาปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้า 52
4.2.2 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา 53
4.3 การศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหาร 56
4.3.1 ผลของพีเอชในน้ำกลั่นที่มีต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร 57
4.3.1.1 การปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า 57
4.3.1.2 การปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่าง 58
4.3.1.2.1 การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน 58
4.3.1.2.2 การปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัส 62
4.3.1.2.3 การปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียม 64
4.3.2 ผลของส่วนประกอบในปุ๋ยตัวอย่างที่มีต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร 67
4.3.2.1 การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน 67
4.3.2.2 การปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัส 70
4.3.2.3 การปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียม 74

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 80
5.1 สรุปผลการวิจัย 80
5.2 ข้อเสนอแนะ 83
รายการอ้างอิง 84
ภาคผนวก 91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 174

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์ 7

ตารางที่ 2.2 ปริมาณธาตุอาหารที่พบในแร่ลีโอนาร์ไดต์ 8

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเบนโทไนท์ 27

ตารางที่ 3.1 สรุปวิธีการวิเคราะห์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ 41

ตารางที่ 3.2 สูตรผสมของปุ๋ยตัวอย่างต่างๆ 42

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์ 45

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุอาหารของส่วนประกอบที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า 47

ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยละลายช้าทางการค้าและแม่ปุ๋ยที่ใช้ในงานวิจัย 49

ตารางที่ 4.4 ส่วนประกอบของปุ๋ยตัวอย่างสูตรต่างๆ 53

ตารางที่ 4.5 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช ของปุ๋ยตัวอย่างในเวลา 24 ชั่วโมง 69

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช ของปุ๋ยตัวอย่างในเวลา 24 ชั่วโมง 73

ตารางที่ 4.7 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช ของปุ๋ยตัวอย่างในเวลา 24 ชั่วโมง 76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่เม็ดเคลือบด้วยพอลิเมอร์ 19

ภาพที่ 2.2 โครงสร้าง 2 มิติ ของอะลูมิโนซิลิเกต 23

ภาพที่ 2.3 รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิคอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยย่อยของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ)..... 23

ภาพที่ 3.1 ส่วนประกอบที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า 38

ภาพที่ 3.2 แม่ปุ๋ยที่ใช้ในงานวิจัย 39

ภาพที่ 3.3 เบนโทไนท์ 39

ภาพที่ 3.4 ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า 39

ภาพที่ 3.5 แผนการดำเนินงานวิจัย 44

ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า 51

ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายปุ๋ยละลายช้าต่างๆ..... 54

ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 35 เท่า..... 55

ภาพที่ 4.4 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า..... 57

ภาพที่ 4.5 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า..... 57

ภาพที่ 4.6 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า..... 58

ภาพที่ 4.7 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 59

ภาพที่ 4.8 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 59

ภาพที่ 4.9 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 60

ภาพที่ 4.10 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4..... 60

ภาพที่ 4.11 ระดับพีเอชของน้ำหรือวัสดุปลูกที่ไม่ใช่ดินที่มีผลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารพืช..... 61

ภาพที่ 4.12 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 62

ภาพที่ 4.13 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 62

ภาพที่ 4.14 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4.15 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 63

ภาพที่ 4.16 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 64

ภาพที่ 4.17 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 65

ภาพที่ 4.18 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 65

ภาพที่ 4.19 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 66

ภาพที่ 4.20 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 6.5 67

ภาพที่ 4.21 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 7.5 67

ภาพที่ 4.22 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 8.5 68

ภาพที่ 4.23 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนที่เวลา 5 นาที ของปุ๋ยละลายช้าต่างๆ ที่พีเอชแตกต่างกัน 68

ภาพที่ 4.24 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 6.5 70

ภาพที่ 4.25 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 7.5 71

ภาพที่ 4.26 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 8.5 71

ภาพที่ 4.27 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสที่เวลา 5 นาที ของปุ๋ยละลายช้าต่างๆ ที่พีเอชแตกต่างกัน 72

ภาพที่ 4.28 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 6.5 74

ภาพที่ 4.29 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 7.5 74

ภาพที่ 4.30 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 8.5 75

ภาพที่ 4.31 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมที่เวลา 5 นาที ของปุ๋ยละลายช้าต่างๆ ที่พีเอชแตกต่างกัน 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรถือเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีผลผลิตถูกส่งออกไปจำหน่ายที่สามารถสร้างรายได้คิดเป็นมูลค่าการส่งออกหลายล้านบาท โดยพบว่าในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีการส่งออกสินค้าทางการเกษตรคิดเป็นมูลค่าการส่งออก 1.3 ล้านล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) แนวทางการเพิ่มผลผลิตเพื่อเพิ่มปริมาณการส่งออกจึงได้รับการพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร คือ การใช้ปุ๋ยเคมี ซึ่งในปัจจุบันเกษตรกรหันมาใช้ปุ๋ยเคมีกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและเห็นผลอย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากปุ๋ยเคมีส่วนใหญ่มักละลายน้ำได้ง่าย และสลายธาตุอาหารออกมามากในช่วงวันแรกๆ หลังจากนั้นปริมาณปุ๋ยจะลดลงอย่างรวดเร็วและหมดไปในเวลาอันสั้น ดังนั้น เมื่อใส่ปุ๋ยลงไปในดิน พืชจะไม่สามารถดูดซึมไปใช้ได้หมด จะมีปุ๋ยเพียงบางส่วนเท่านั้นที่พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้ นอกจากนี้สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น อากาศแห้งแล้ง ดินเสื่อมสภาพ มีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ ก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพของปุ๋ยเคมีลดลงไปอีก เกษตรกรจึงจำเป็นต้องใส่ปุ๋ยปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้พืชได้รับธาตุอาหารที่เพียงพอต่อความต้องการ ปัญหาที่ตามมา คือ เกิดการตกค้างของสารเคมีในดิน โดยปุ๋ยเคมีจะไปทำลายสมดุลของระบบนิเวศ ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในดิน เร่งอัตราการสลายตัวของอินทรียวัตถุ ทำให้โครงสร้างของดินเสื่อมสภาพลง (วิฑูรย์ ปัญญากุล, 2547) นอกจากนี้ ยังมีปัญหาจากการชะล้างของปุ๋ยเคมีลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งทำให้เกิดการสะสมของสารเคมีตามแหล่งน้ำลำคลองและส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคตามมา นอกเหนือจากปัญหาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมแล้วยังมีผลกระทบทางด้านเศรษฐกิจ เนื่องจากความต้องการในการใช้ปุ๋ยเคมีปริมาณมากส่งผลต่อการขาดแคลนปุ๋ยและผลักดันให้ปุ๋ยในท้องตลาดมีราคาแพงขึ้น จำเป็นต้องมีการนำเข้าปุ๋ยเคมีหรือวัตถุดิบจากต่างประเทศ ซึ่งเพิ่มปัญหาการขาดดุลการค้าระหว่างประเทศตามมาอีก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้มีความพยายามที่จะหาวิธีการที่ทำให้ปุ๋ยละลายธาตุอาหารออกมาอย่างช้าๆ เพื่อให้พืชสามารถดูดซึมธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดและสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงอายุของพืช และเพื่อเป็นแนวทางในการลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีอีกด้วย ซึ่งการชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ย (Slow release fertilizer, SRF) เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อลดปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น

จากการค้นคว้างานวิจัย แร่ลีโอนาร์ไดต์ประกอบด้วยเกลือแคลเซียมและเหล็กของกรดฮิวมิคและกรดอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการรักษาโครงสร้างของดินให้สามารถอุ้มน้ำและระบายอากาศได้ดี อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหาร เพื่อที่จะปลดปล่อยธาตุอาหารเหล่านั้นให้แก่พืชในการนำสารอาหารเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ในด้านการเจริญเติบโต (วิวัฒน์ โตธิรกุล และคณะ, 2552) โดยข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง รายงานว่า มีแร่ลีโอนาร์ไดต์ประมาณ 2 ล้านตัน ที่พบอยู่ในแหล่งถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งนับว่ามีปริมาณค่อนข้างมาก แต่ในปัจจุบันพบว่าการใช้ประโยชน์จากแร่ลีโอนาร์ไดต์ยังมีน้อยและยังไม่ค่อยได้รับความสนใจเท่าที่ควร

ซีโอไลต์เป็นโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของหน่วยทรงสี่หน้าของซิลิเกตและอะลูมิเนต ซึ่งเกิดเป็นโครงผลึกต่อเนื่องกันอย่างสม่ำเสมอและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลขนาดใหญ่ ในด้านการเกษตรมีงานวิจัยที่นำซีโอไลต์มาผสมร่วมกับปุ๋ย เพื่อให้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดยึดธาตุอาหารไว้ภายในรูพรุนของโครงสร้าง นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่าซีโอไลต์สามารถช่วยเก็บกักปุ๋ยให้อยู่ในดินได้นานขึ้น ทำให้พืชสามารถใช้ประโยชน์จากปุ๋ยในดินได้อย่างเต็มที่ ช่วยทำให้ดินร่วนซุย น้ำสามารถซึมผ่านได้ดี และซีโอไลต์ยังสามารถดูดจับสารพิษของยาฆ่าหญ้าและยาฆ่าแมลงที่ตกค้างในดินได้อีกด้วย (จำรัส ลิ้มตระกูล, 2540)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม โดยเฉพาะอาชีพการทำนาข้าว ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวพบว่ามีปริมาณฟางข้าวซึ่งเป็นเศษเหลือทิ้งจากการทำนาข้าวอยู่เป็นปริมาณมาก จากข้อมูลของกรมการค้าภายใน รายงานว่า ประเทศไทยมีปริมาณฟางข้าวที่ผลิตออกมาถึง 50 ล้านตันต่อปี แต่มีฟางข้าวเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่นำไปใช้ประโยชน์ เช่น นำไปเลี้ยงสัตว์ ใช้คลุมหน้าดินเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ใช้ในการเพาะเห็ด เป็นต้น (สุพัฒน์ คำไทย, 2552) ปริมาณฟางข้าวที่ไม่ได้รับการนำไปใช้ประโยชน์พบว่ามีปริมาณค่อนข้างมากและมักถูกกำจัดโดยวิธีการเผา เนื่องจากเป็นทางเลือกที่สะดวกและรวดเร็วที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการเผาฟางข้าวนี้เป็นต้นเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศและปัญหาภาวะโลกร้อนตามมา นอกจากนี้ ยังพบว่าฟางข้าวมีองค์ประกอบของธาตุไนโตรเจนร้อยละ 0.69 ธาตุฟอสฟอรัสร้อยละ 0.08 และธาตุโพแทสเซียมร้อยละ 1.56 (บัญชา รัตนีทู, 2555) ซึ่งธาตุเหล่านี้มีความสำคัญในด้านธาตุอาหารพืช ดังนั้น การนำฟางข้าวมาใช้ในงานวิจัยนี้จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากฟางข้าวเพื่อลดผลกระทบจากการเผาทำลายฟางข้าว เป็นต้น

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงมีความสนใจในการนำแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าวมาแปรรูปผลิตเป็นปุ๋ยละลายช้า เพื่อเป็นการนำสินแร่และของเสียภาคการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของของเสียเหล่านี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อผลิตปุ๋ยละลายช้าจากแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว และเปรียบเทียบการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

1.3 สมมติฐาน

ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่มีส่วนประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์เพียงอย่างเดียวจะมีการปลดปล่อยธาตุอาหารสูงที่สุด และปุ๋ยตัวอย่างที่ให้การปลดปล่อยธาตุอาหารต่ำที่สุด คือ ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่มีส่วนประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว โดยจะมีการปลดปล่อยธาตุอาหารที่ใกล้เคียงกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ทั้งนี้ปุ๋ยตัวอย่างที่มีส่วนประกอบร่วมกันระหว่างซีโอไลต์ และฟางข้าวจะทำให้ธาตุอาหารภายในปุ๋ยถูกดูดยึดไว้ภายในรูพรุนของโครงสร้างซีโอไลต์และฟางข้าวได้ ทำให้ธาตุอาหารเคลื่อนที่ออกมาละลายอยู่ในน้ำน้อยกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์และฟางข้าวเป็นส่วนประกอบ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการภาควิชาทรัพยากรดินและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ห้องปฏิบัติการวิจัยฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ห้องปฏิบัติการวิจัยศูนย์เทคโนโลยีปุ๋ย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยมีขอบเขตดังนี้

1.4.1 วิเคราะห์ส่วนประกอบตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยละลายช้า โดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว นอกจากนี้ ยังทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยละลายช้าทางการค้า และแม่ปุ๋ยที่ใช้ในการวิจัยร่วมด้วย

1.4.2 ศึกษาวิธีการเตรียมปุ๋ยละลายช้าจากแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ ร่วมกับฟางข้าว โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร ปรับปริมาณธาตุอาหารเพื่อให้ได้ปุ๋ยตรงตามสูตร 13-13-13 โดยการ

เติมแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ยูเรีย (46-0-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) และทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

1.4.3 ศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างเปรียบเทียบกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้าสูตร 13-13-13 โดยทำการแช่ปุ๋ยตัวอย่างและปุ๋ยละลายช้าทางการค้าในน้ำกลั่นที่พีเอช 6.5, 7.5 และ 8.5 จากนั้นทำการเก็บสารละลายตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ รวม 15 ครั้ง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารที่ถูกปลดปล่อยออกมา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้วิธีในการเตรียมปุ๋ยละลายช้าด้วยวิธีที่ง่าย สะดวก และใช้ต้นทุนต่ำ

1.5.2 เป็นแนวทางเพื่อนำเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แร่ลีโอนาร์ไดต์ (Leonardite)

การจำแนกถ่านหินมีหลายระบบ โดยระบบที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials, ASTM) ซึ่งเป็นระบบการจำแนกถ่านหินตามลำดับชั้น (Rank) โดยจะพิจารณาความสมบูรณ์ในการเปลี่ยนสภาพจากซากพืชไปเป็นถ่านหิน (Degree of coalification and metamorphism) ระบบของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกาได้จำแนกถ่านหินออกเป็น 4 ลำดับชั้น โดยเรียงจากประเภทที่มีปริมาณคาร์บอนมากที่สุดไปน้อยที่สุด คือ แอนทราไซต์ บิทูมินัส ซับบิทูมินัส และลิกไนต์ ถ่านหินที่อยู่ในลำดับสูงจะมีปริมาณคาร์บอนมาก ให้ความร้อนสูง มีไฮโดรเจนและออกซิเจนอยู่น้อย ในขณะที่ถ่านหินที่อยู่ในลำดับต่ำจะมีปริมาณคาร์บอนน้อย แต่มีปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนมาก ซึ่งในแต่ละลำดับชั้นจะถูกแบ่งย่อยลงไปอีกตามคุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อนที่แตกต่างกันไป

แร่ลีโอนาร์ไดต์ ตั้งชื่อเพื่อเป็นเกียรติแก่ Dr.A.G. Leonard นักธรณีวิทยาคนแรกที่เป็นผู้บุกเบิกในการศึกษาแหล่งถ่านหินของรัฐดาโกตาเหนือ ประเทศสหรัฐอเมริกา (วิวัฒน์ โตธิรกุล และคณะ, 2552) แร่ลีโอนาร์ไดต์เป็นถ่านหินลิกไนต์คุณภาพต่ำ (Low rank coal) ซึ่งถูกออกซิไดส์ตามธรรมชาติ มีลักษณะเป็นเกล็ดหรือผง สีน้ำตาล หรือสีดำ พบอยู่ในแหล่งถ่านหินที่มีความลึกไม่มาก โดยเฉพาะในเหมืองแร่ที่มักมีการขุดนำเอาถ่านหินลิกไนต์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า (Stevenson, 1979) แต่ยังมีถ่านหินบางส่วนที่ไม่สามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้จึงทำให้มีส่วนเหลือทิ้งที่เป็นดินปนถ่านหินหรือที่เรียกว่าแร่ลีโอนาร์ไดต์อยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากแร่ลีโอนาร์ไดต์มีศักยภาพต่ำในการใช้เป็นเชื้อเพลิงเพราะมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 28-29 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ถ่านหินลิกไนต์มีออกซิเจนอยู่เพียงร้อยละ 19-20 โดยน้ำหนัก (Evan และ Elmar, 1965) ต่อมาภายหลังได้มีการหันมาให้ความสนใจในการนำแร่ลีโอนาร์ไดต์ไปใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร เพราะนอกจากจะมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบแล้วยังมีองค์ประกอบของสารอื่นๆ เช่น เกลือแคลเซียมและเหล็กของกรดฮิวมิคและกรดอินทรีย์อื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อพืชและดินอีกด้วย

2.1.1 การเกิดแร่ลีโอนาร์ไดต์ (วิวัฒน์ โตธิรกุล และคณะ, 2552)

แร่ลีโอนาร์ไดต์เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความเป็นไปได้ 2 ทฤษฎี คือ

2.1.1.1 เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดถ่านหิน (Caolification) โดยจะเกิดปะปนกับถ่านหินโดยเฉพาะในถ่านหินลิกไนต์ และมีการย่อยสลาย (Decomposition and oxidation) เกิดร่วมด้วย

2.1.1.2 เกิดจากการผุพังตามธรรมชาติ (Weathering and oxidation) ของถ่านหินพีท ลิกไนต์ และซับบิทูมินัส ที่ถูกยกตัวขึ้นมาในระดับตื้น (Sub crop) หรือโผล่ขึ้นมาเหนือผิวดิน (Out crop) แล้วถูกออกซิไดซ์โดยอากาศตามธรรมชาติ ต่อมาจึงเกิดการทับถมกันเป็นชั้นๆ

2.1.2 แหล่งแร่ลีโอนาร์ไดต์ในประเทศไทย (วิวัฒน์ โตธิรกุล และคณะ, 2552)

ในปี พ.ศ. 2549 มีการค้นพบแร่ลีโอนาร์ไดต์ในประเทศไทย โดยพบปะปนอยู่กับแอ่งถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีพื้นที่ประมาณ 38 ตารางกิโลเมตร อยู่ในการดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งมีปริมาณถ่านหินลิกไนต์สำรองทางธรณีวิทยาประมาณ 1,139 ล้านตัน สำหรับแร่ลีโอนาร์ไดต์พบว่า มีปริมาณสำรองในบ่อเหมืองทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และทางทิศเหนือ (C1) ประมาณ 1-2 ล้านตัน และในบ่อเหมืองทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE) ซึ่งเป็นพื้นที่ยังไม่มีการขุดเจาะ อยู่ระหว่างการประเมินปริมาณสำรองและมีแผนเปิดหน้าเหมืองในอนาคต โดยคาดว่าจะมีปริมาณสำรองรวมทั้งหมด (Speculative reserves) 2 ล้านตัน

2.1.3 สมบัติของแร่ลีโอนาร์ไดต์

สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ดังตารางที่ 2.1 และปริมาณธาตุอาหารที่พบในแร่ลีโอนาร์ไดต์ ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์

สมบัติทางเคมีและกายภาพ	แหล่งของแร่ลีโอนาร์ไดต์			
	Gascoyne, North Dakota (Pertuit และคณะ, 2001)	Fethiye, Mugla (Sanli และคณะ, 2013)	Mae Moh, Chiang Muan, and Lee, Thailand (Ratanaprommanee และ Shutsrirung, 2014)	Mae Moh, Thailand) (สุชาดา โภชาดม และคณะ, 2556)
pH	3.58	6.80	3.58	4.0
Humidity (%)	-	16	-	-
EC (ds/m)[1]	-	-	-	4.3
CEC (cmol/kg)[2]	95.51	-	-	56.6
OM (%)[3]	-	54.5	29.58	24.4
C/N ratio[4]	-	-	40.12	24.8
Humic acid (%)	21.44	50.5	42.87	-
Fulvic acid (%)	0.69		-	-

[1] Electrical conductivity หรือค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเกลือในตัวอย่างที่สามารถละลายออกมาได้ ถ้าค่าการนำไฟฟ้ามีค่ามากแสดงว่าตัวอย่างนั้นมีความเค็มมากกว่าตัวอย่างที่มีปริมาณค่าการนำไฟฟ้าที่น้อยกว่า (อุไรลักษณ์ ดวงฉวี, 2556)

[2] Cations exchange capacity แสดงถึงความสามารถในการดูดยึดและแลกเปลี่ยนไอออนบวกของตัวอย่างที่ทำการวัด (ปภามญชุ์ ซีประเสริฐ และคณะ, 2554)

[3] Organic matter คือ ปริมาณอินทรียวัตถุที่มีอยู่ในตัวอย่าง (ศุภธิดา อ่ำทอง, 2553)

[4] The ratio of carbon to nitrogen คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนและไนโตรเจน มีอิทธิพลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องการไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโต วัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าไนโตรเจนจะเสื่อมสะลายช้า (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2550)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณธาตุอาหารที่พบในแร่ลีโอนาร์ไดต์

ธาตุอาหาร	แหล่งของแร่ลีโอนาร์ไดต์			
	Gascoyne, North Dakota (Pertuit และคณะ, 2001)	Fethiye, Mugla (Sanli และคณะ, 2013)	Mae Moh, Chiang Muan, and Lee, Thailand (Ratanaprommanee และ Shutsrirung, 2014)	Mae Moh, Thailand (สุชาดา โภชาดม และคณะ, 2556)
Total N (%)	1.11	1.79	0.41	0.54
Total P_2O_5 (%)	<0.01	<0.0001	<0.001	0.01
Total K_2O (%)	0.02	<0.0002	1.52	0.74
Ca (%)	1.68	-	1.41	2.10
Mg (%)	0.36	-	0.56	0.36
Fe (%)	0.48	-	2.53	0.54
Zn (%)	<0.002	-	<0.0001	-
Mn (%)	<0.01	-	<0.0001	<0.0001
S (%)	0.97	-	-	3.00
B (%)	0.13	-	-	-
Cu (%)	<0.002	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.4 ประโยชน์ของแร่ลีโอนาร์ไดต์

แร่ลีโอนาร์ไดต์มีองค์ประกอบของเกลือแคลเซียมและเหล็กของกรดฮิวมิคและกรดอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งกรดอินทรีย์เหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร (Ece และคณะ, 2007) โดยกรดฮิวมิกนั้นเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดจากการสลายตัวของซากพืช ซากสัตว์ในดิน มีโครงสร้างเป็นโพลีฟีนอล (Polyphenol) ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) หมู่ฟีนอล (Phenolic group) หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) หมู่แอลกอฮอล์ (Alcoholic hydroxyl group) และหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการ

แลกเปลี่ยนประจุบวก (Cations exchange capacity; CEC) และความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดิน (Soil buffering capacity) โดยกรดฮิวมิกจะช่วยให้ดินสามารถอุ้มน้ำและระบายอากาศได้ดี (วิวัฒน์ โตธิรกุล และคณะ, 2552) อีกทั้งยังทำให้ดินสามารถจับยึดธาตุอาหารดีขึ้น ลดการถูกชะละลายของธาตุอาหารที่เป็นประจุบวกไปกับน้ำ (สุชาดา โภชาดม และคณะ, 2556)

ในดินที่มีความละเอียดและความหนาแน่นมากจะเป็นอุปสรรคสำคัญต่อระบบรากพืชในการดูดซึมแร่ธาตุอาหารและน้ำ เนื่องจากในอนุภาคดินที่มีความเป็นดินเหนียวสูงจะมีประจุบวกและประจุลบอยู่อย่างหนาแน่น ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวสูง แต่หมู่คาร์บอกซิลที่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลของกรดฮิวมิกนี้จะไปสร้างพันธะกับอนุภาคประจุบวกในดินและทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุบวกและประจุลบออกจากกัน ทำให้ชั้นดินมีความโปร่งขึ้น ส่งผลให้น้ำและอากาศหมุนเวียนถ่ายเทได้ดีขึ้น นอกจากนี้ กรดฮิวมิกยังช่วยป้องกันการระเหยของน้ำออกไปจากดิน เมื่อมีน้ำผ่านเข้ามาในดิน ประจุบวกที่กรดฮิวมิกดูดซับไว้จะสร้างพันธะกับประจุลบของน้ำ คือ ออกซิเจนไอออน ส่วนประจุบวกที่เหลืออยู่ในน้ำ คือ ไฮโดรเจนไอออนนั้นก็สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับอะตอมของออกซิเจนในน้ำโมเลกุลอื่นๆ ต่อไป ทำให้น้ำระเหยออกจากดินน้อยลง หรือดินสามารถอุ้มน้ำได้มากขึ้น

นอกจากนี้ บทบาทสำคัญอีกประการหนึ่งของกรดฮิวมิก คือ การเป็นสื่อกลางการลำเลียงธาตุอาหารจากดินไปสู่รากพืช โดยกรดฮิวมิกสามารถยึดประจุบวกของธาตุอาหารภายใต้สภาวะหนึ่งและจะปลดปล่อยธาตุอาหารเหล่านั้นเมื่อสภาวะเปลี่ยนไป ด้วยคุณสมบัตินี้เองเมื่อกรดฮิวมิกเคลื่อนที่เข้าไปใกล้บริเวณรากพืชซึ่งระบบรากพืชจะมีประจุลบ พวกธาตุอาหารซึ่งมีประจุบวกก็จะถูกปล่อยจากโมเลกุลของกรดฮิวมิกเข้าไปสู่ระบบรากพืช ทำให้พืชสามารถนำธาตุอาหารเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในด้านการเจริญเติบโต และการออกดอกออกผลได้ (ทวีลักษณ์ อ้นองอาจ และ กฤตย์ สมสาร์, 2548)

2.2 ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช

ในการเจริญเติบโตของพืชทุกชนิดจำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารต่างๆ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมและมีปริมาณเพียงพอกับความต้องการของพืชนั้นๆ ธาตุอาหารที่พืชจำเป็นต้องใช้เพื่อการดำรงชีวิตอยู่มีทั้งหมด 16 ธาตุ ซึ่งจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ มหธาตุ และจุลธาตุ

2.2.1 มหธาตุ

มหธาตุ (Macronutrient elements) หมายถึง ธาตุอาหารซึ่งพืชต้องการใช้ในปริมาณมาก ความเข้มข้นที่พบในเนื้อเยื่อพืชมักสูงกว่า 500 ส่วนต่อพืชแห้งหนึ่งล้านส่วน รวมทั้งหมด 9 ธาตุ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม

แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน มหธาตุยังสามารถจำแนกต่อไปได้อีกเป็น 2 กลุ่มย่อย โดยแบ่งเป็นธาตุอาหารหลัก (Primary essential elements) ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม และธาตุอาหารรอง (Secondary essential elements) ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน มหธาตุจะไม่นับรวมธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ซึ่งพืชจะได้รับในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และออกซิเจนแล้ว

2.2.2 จุลธาตุ

จุลธาตุ (Micronutrient elements) หมายถึง ธาตุอาหารที่พืชต้องการใช้ในปริมาณเล็กน้อย ความเข้มข้นที่พบในเนื้อเยื่อพืชมักต่ำกว่า 50 ส่วนต่อพืชแห้งหนึ่งล้านส่วน ในพระราชบัญญัติปุ๋ยเรียกธาตุกลุ่มนี้ว่า ธาตุอาหารเสริม ซึ่งมีทั้งหมด 7 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี โบรอน โมลิบดีนัม คลอรีน (ศิริพร เชาว์เมธีวุฒิ, 2544)

2.3 หน้าที่และความสำคัญของธาตุอาหาร (ณัฐ งามเจตนรมย์, 2545)

ในที่นี้จะกล่าวถึงหน้าที่และความสำคัญต่อพืชสำหรับธาตุอาหารหลัก คือ ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่านั้น

2.3.1 ธาตุไนโตรเจน

หน้าที่และความสำคัญต่อต้นพืช ได้แก่

- ทำให้พืชตั้งตัวได้เร็วในระยะแรกของการเจริญเติบโตและมีความแข็งแรง
- ส่งเสริมการเจริญเติบโตของใบและลำต้น ทำให้มีสีเขียวเข้ม
- เพิ่มปริมาณโปรตีนให้แก่พืชที่ใช้เป็นพืชอาหาร เช่น ข้าว หรือหญ้าเลี้ยงสัตว์
- ควบคุมการออกดอกออกผลของพืช
- ช่วยเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะพืชที่ให้ผลและเมล็ด

หากพืชขาดธาตุไนโตรเจนจะแสดงอาการ ดังนี้

- พืชจะสูญเสียสีเขียว โดยเฉพาะที่ใบจะเป็นสีเหลืองผิดปกติจากใบล่างขึ้นสู่ยอด
- ลำต้นจะผอม กิ่งก้านลีบเล็ก และมีใบน้อย
- พืชบางชนิดอาจจะมีลำต้นสีเหลือง หรืออาจมีสีชมพูเจือปนด้วย
- ใบพืชที่มีสีเหลือง ปลายและขอบใบจะค่อยๆ แห้ง จนร่วงจากลำต้นก่อนกำหนด
- พืชจะไม่เติบโต หรือโตช้ามาก

2.3.2 ธาตุฟอสฟอรัส

หน้าที่และความสำคัญต่อต้นพืช ได้แก่

- ช่วยให้รากดึงดูดโพแทสเซียมเข้ามาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น
- ช่วยแก้ผลเสียที่อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากพืชได้รับธาตุไนโตรเจนมากเกินไป
- ส่งเสริมการเจริญเติบโตของรากฝอย และรากแขนงในระยะแรกของการเจริญเติบโต
- ช่วยเร่งให้พืชแก่เร็ว ช่วยในการออกดอก และสร้างเมล็ดของพืช
- เพิ่มความต้านทานต่อโรคบางชนิด ทำให้ผลผลิตของพืชมีคุณภาพดี
- ทำให้ลำต้นของพืชจำพวกข้าวมีความแข็งแรง ไม่ล้มง่าย

หากพืชขาดธาตุฟอสฟอรัสจะแสดงอาการ ดังนี้

- พืชจะชะงักการเจริญเติบโต ต้นแคระแกรน ลำต้นอาจบิดเป็นเกลียว เนื้อไม้แข็งแต่เปราะ
- รากจะเจริญเติบโตและแพร่กระจายลงในดินช้ากว่าที่ควร ดอกและผลไม่สมบูรณ์ บางครั้งอาจหลุดร่วงไป หรือมีขนาดเล็ก
- พืชจำพวกลำต้นอวบน้ำ หรือลำต้นอ่อนจะล้มง่าย
- ใบแก่จะเปลี่ยนสี หรือพืชบางชนิดใบจะเป็นสีม่วง
- อาการขาดธาตุฟอสฟอรัสจะเกิดขึ้นกับใบล่างๆ ของลำต้นขึ้นไปหายอด

2.3.3 ธาตุโพแทสเซียม

หน้าที่และความสำคัญต่อต้นพืช ได้แก่

- ส่งเสริมการเจริญเติบโตของราก ทำให้รากดูดน้ำได้ดีขึ้น
- มีความจำเป็นต่อการสร้างเนื้อของผลไม้ให้มีคุณภาพดี
- ทำให้พืชมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของดินฟ้าอากาศ เช่น แสงน้อย อากาศหนาว หรือฝนตกชุก
- ทำให้พืชมีความต้านทานต่อโรคต่างๆ ได้ดี
- ช่วยป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับพืช เนื่องจากการได้รับธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากเกินไป
- ช่วยเพิ่มคุณภาพของพืชผักและผลไม้ โดยทำให้พืชมีสีสัน ขนาด ความหวาน และการคงทนต่อสภาวะแวดล้อม

หากพืชขาดธาตุโพแทสเซียมจะแสดงอาการ ดังนี้

- ขอบใบมีสีเหลืองจากนั้นจะกลายเป็นสีน้ำตาลโดยเริ่มต้นจากปลายใบเข้าสู่กลางใบ ส่วนที่เป็นสีน้ำตาลจะแห้งเหี่ยวไป จะเกิดจากใบล่างก่อน แล้วจึงค่อยๆ ลามขึ้นข้างบน พืชที่เห็นชัด คือ ข้าวโพด
- ทำให้ผลผลิตตกต่ำ สำหรับพืชจำพวกธัญพืช เมล็ดจะลีบ มีน้ำหนักเบา สำหรับพืชจำพวกหัวจะมีแป้งน้อย มีน้ำมาก ข้าวโพดจะมีเมล็ดไม่เต็มฝัก ฝักจะเล็ก มีรูปร่างผิดปกติ สำหรับใบยาสูบจะมีคุณภาพต่ำ ติดไฟยาก กลิ่นไม่ดี สำหรับพืชจำพวกฝ้าย ใบจะมีสีน้ำตาลปนแดง สมอฝ้ายที่เกิดขึ้นจะอ้าไม่เต็มที่เมื่อแก่

2.4 ปุ๋ย (Fertilizer)

ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2550 ได้ให้คำจำกัดความไว้ว่า ปุ๋ย หมายถึง สารอินทรีย์ อินทรียสังเคราะห อนินทรีย หรือจุลินทรีย ไมวาจะเกิดขึ้นโดยธรรมชาติหรือทำขึ้นก็ตาม สำหรับใช้เป็นธาตุอาหารพืชไดไมวาโดยวิธีใด หรือทำใหเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ หรือชีวภาพ ในดินเพื่อบำรุงความเติบโตแกพืช (พระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2550, 2550)

2.4.1 การจำแนกปุ๋ย (ณัฐ งามเจตนรมย์, 2545)

การจำแนกปุ๋ยสามารถจำแนกได้หลายวิธีตามการพิจารณาที่แตกต่างกัน เช่น พิจารณาจากชนิดของสารประกอบที่เป็นปุ๋ย พิจารณาจากชนิดและจำนวนของธาตุอาหารที่มีในปุ๋ย และพิจารณาจากความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ย

2.4.1.1 จำแนกตามชนิดของสารประกอบเป็นเกณฑ์

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) ปุ๋ยอนินทรีย์ (Inorganic fertilizer) หมายถึง ปุ๋ยที่ได้จากสารอนินทรีย์ ได้แก่ แอมโมเนียมซัลเฟต ซุปเปอร์ฟอสเฟต และโพแทสเซียมคลอไรด์ ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 ได้รวมปุ๋ยอนินทรีย์และปุ๋ยอินทรีย์สังเคราะห์เข้าด้วยกันเรียกว่า ปุ๋ยเคมี (Chemical fertilizer) และให้ความหมายปุ๋ยเคมีว่า เป็นปุ๋ยที่ได้จากสารอนินทรีย์หรืออินทรีย์สังเคราะห์ รวมถึงปุ๋ยเชิงเดี่ยว ปุ๋ยเชิงผสม และปุ๋ยเชิงประกอบ ตลอดถึงปุ๋ยอินทรีย์ที่มีปุ๋ยเคมีผสมอยู่ด้วย

2) ปุ๋ยอินทรีย์ (Organic fertilizer) หมายถึง ปุ๋ยที่ได้จากอินทรีย์วัตถุ ซึ่งมีการผลิตด้วยวิธีการทำให้ชื้น สับ หมัก ร่อน หรือวิธีอื่นๆ เช่น ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด เป็นต้น

2.4.1.2 จำแนกตามชนิดและจำนวนของธาตุอาหารที่มีในปุ๋ยเป็นเกณฑ์

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) จำแนกตามชนิดของธาตุอาหารเป็นหลัก ดังนี้

- ปุ๋ยไนโตรเจน หมายถึง ปุ๋ยที่ให้ธาตุไนโตรเจนเป็นหลัก เช่น ปุ๋ยยูเรีย ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต และปุ๋ยแอมโมเนียมคลอไรด์
- ปุ๋ยฟอสฟอรัส หมายถึง ปุ๋ยที่ให้ธาตุฟอสฟอรัสเป็นหลัก ได้แก่ ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต และทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต เป็นต้น ซึ่งอาจเรียกปุ๋ยชนิดนี้ว่า ปุ๋ยฟอสเฟต
- ปุ๋ยโพแทสเซียม หมายถึง ปุ๋ยที่ให้ธาตุโพแทสเซียมเป็นหลัก ได้แก่ ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งอาจเรียกปุ๋ยชนิดนี้ว่า ปุ๋ยโพแทส

2) จำแนกตามจำนวนของธาตุอาหาร ดังนี้

- ปุ๋ยเชิงเดี่ยว (Single fertilizer) หมายถึง ปุ๋ยเคมีที่มีธาตุอาหารหลักเพียงธาตุเดียว ได้แก่ ปุ๋ยไนโตรเจน ปุ๋ยฟอสฟอรัส และปุ๋ยโพแทสเซียม
- ปุ๋ยเชิงผสม (Mixed fertilizer) หมายถึง ปุ๋ยเคมีที่ได้จากการผสมปุ๋ยเคมีหรือแม่ปุ๋ยชนิดต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อให้ปุ๋ยมีธาตุอาหารตามที่ต้องการ
- ปุ๋ยเชิงประกอบ (Compound fertilizer) หมายถึง ปุ๋ยเคมีที่ผลิตขึ้นด้วยวิธีทางเคมี และมีธาตุอาหารมากกว่าหนึ่งธาตุขึ้นไป

2.4.1.3 จำแนกตามความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารเป็นเกณฑ์

สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) ปุ๋ยละลายเร็ว หมายถึง ปุ๋ยเคมีที่อยู่ในรูปของแข็งทุกชนิดที่มีธาตุอาหารละลายน้ำหรืออยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 ของธาตุอาหารทั้งหมดในสูตรปุ๋ย ปุ๋ยเคมีส่วนใหญ่ที่ใช้มักเป็นปุ๋ยละลายเร็วซึ่งอาจอยู่ในรูปปุ๋ยเม็ด ปุ๋ยเกร็ด ปุ๋ยผง หรือปุ๋ยอัดเม็ด

2) ปุ๋ยกึ่งละลายช้าละลายเร็ว หมายถึง ปุ๋ยเคมีที่เนื้อปุ๋ยบางส่วนสามารถละลายน้ำได้ดี แต่บางส่วนไม่สามารถละลายน้ำได้ โดยสัดส่วนของส่วนที่ละลายน้ำได้ดีจะมีปริมาณมากกว่าที่พบในปุ๋ยละลายช้า

3) ปุ๋ยละลายช้า หมายถึง ปุ๋ยเคมีที่ละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย เมื่อใส่ปุ๋ยลงไปในดิน ปุ๋ยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและค่อยๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาในรูปที่พืชสามารถ

นำไปใช้ได้ โดยหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป (The European Standardization Committee, CEN) ได้กำหนดไว้ว่า ปุ๋ยที่จะถูกจัดเป็นปุ๋ยละลายช้าจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุอาหารที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตามเกณฑ์ข้อใดข้อหนึ่งดังต่อไปนี้ (1) มีการปลดปล่อยธาตุอาหารไม่เกินร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในเวลา 24 ชั่วโมง (2) มีการปลดปล่อยธาตุอาหารไม่เกินร้อยละ 75 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในเวลา 28 วัน หรือ (3) มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 75 ของธาตุอาหารทั้งหมด ตามเวลาการปลดปล่อยทั้งหมดที่ระบุไว้ (Trenkel, 2010)

2.4.2 การบอกปริมาณธาตุอาหารพืชในปุ๋ย (อำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2553)

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของปุ๋ยในการเพิ่มธาตุอาหารให้แก่พืช คือ ปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ย ปุ๋ยที่มีปริมาณธาตุอาหารอยู่มากจะสามารถช่วยเพิ่มธาตุอาหารให้แก่พืชได้มาก การบอกปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยนิยมบอก ดังนี้

ปุ๋ยเคมี ในพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 กำหนดให้บอกปริมาณธาตุอาหารขั้นต่ำที่สุดที่มีอยู่ในปุ๋ย โดยบอกเป็นร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยคิดเป็นน้ำหนักของฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) และโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้โดยคิดเป็นน้ำหนักของโพแทช (K_2O) หากนำตัวเลขบอกปริมาณธาตุอาหารทั้งสามมาเขียนเรียงลำดับก่อนหลังตามลำดับข้างต้น โดยมีเครื่องหมายยัติภังค์ (Hyphen) ขั้นระหว่างตัวเลขของแต่ละธาตุก็จะได้ “สูตรปุ๋ย” หรือ “เกรดปุ๋ย” (Fertilizer grade) ตัวอย่างเช่น ปุ๋ยเคมีสูตร 10-52-17 หมายความว่า ปุ๋ยนั้นมีปริมาณธาตุอาหารดังนี้ ไนโตรเจนทั้งหมด (N) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) ร้อยละ 52 โดยน้ำหนัก และโพแทชที่ละลายน้ำ (K_2O) ร้อยละ 17 โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้ การบอกปริมาณปุ๋ยที่ให้แก่พืช สามารถบอกได้ 2 แบบ คือ (1) บอกสูตรปุ๋ยและปริมาณปุ๋ยสูตรนั้น ตัวอย่างเช่น ใช้ปุ๋ยสูตร 15-20-10 อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ และ (2) บอกปริมาณธาตุอาหารแต่ละชนิดที่ใส่ เช่น “ใส่ปุ๋ยในอัตรา 15-20-10 กิโลกรัม N-P_2O_5-K_2O ต่อไร่” โดยมีความหมายว่า ใส่ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) และโพแทชที่ละลายน้ำ (K_2O) ในอัตรา 15, 20 และ 10 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ

สำหรับปุ๋ยอินทรีย์ ปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยนิยมบอกเป็นปริมาณทั้งหมดของแต่ละธาตุที่มีอยู่ในปุ๋ย โดยคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักแห้งของปุ๋ย

2.5 ปัญหาของการใช้ปุ๋ยเคมีทั่วไป (อำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2553)

ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นปุ๋ยที่นิยมใช้มากที่สุดในบรรดาปุ๋ยธาตุอาหารหลัก แต่ในขณะเดียวกันก็เกิดการสูญเสียธาตุอาหารไปจากดินได้หลายทาง เช่น ไนเทรตถูกชะล้าง แอมโมเนียเกิดการระเหยไปจากดิน (Ammonia volatilization) ไนเทรตถูกรีดิวซ์แล้วได้เป็นก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไนตรัสออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์ ซึ่งจะระเหยไปจากดินได้เช่นเดียวกัน หากสามารถลดการสูญเสียให้น้อยลงก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ปุ๋ยให้สูงขึ้น และช่วยประหยัดพลังงานในภาคเกษตรกรรมอย่างมาก วิธีเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนมี 3 วิธี คือ (1) แบ่งใส่หลายครั้งในช่วงเวลาที่เหมาะสม (2) ใช้สารยับยั้งไนตริฟิเคชันสำหรับปุ๋ยแอมโมเนีย และสารยับยั้งเอนไซม์ยูรีเอสกับปุ๋ยยูเรีย และ (3) ใช้ปุ๋ยละลายช้า

2.6 ปุ๋ยละลายช้า (Slow release fertilizers) (อำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2553)

ปุ๋ยละลายช้าเป็นปุ๋ยเคมีที่พัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยีจากปุ๋ยเคมีที่มีอยู่เพื่อให้การใช้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาช้าตามความเหมาะสมกับความต้องการของพืช ทั้งนี้ ผู้เกี่ยวข้องกับวงการปุ๋ยของประเทศไทยเรียกปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาให้พืชอย่างช้าๆ ว่า “ปุ๋ยละลายช้า” และมีคำที่ใช้ในภาษาอังกฤษ 2 คำ ซึ่งมีความหมายแตกต่างกัน คือ Controlled release fertilizers และ Slow release fertilizers แต่คนทั่วไปไม่ทราบว่าปุ๋ยทั้งสองประเภทนี้มีความแตกต่างกัน ทั้งเข้าใจว่าอาจใช้คำทั้งสองแทนกันได้หรือมีความหมายเหมือนกัน จึงเรียกเป็นภาษาไทยว่า “ปุ๋ยละลายช้า” ในทางวิชาการ ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (Controlled release fertilizers, CRF) และปุ๋ยละลายช้า (Slow release fertilizers, SRF) มีความหมายแตกต่างกันดังนี้

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย หมายถึง ปุ๋ยที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ นอกจากนี้ ยังทราบชัดเจนว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่ออัตราและช่วงเวลาที่ปุ๋ยนั้นจะปลดปล่อยธาตุอาหาร อีกทั้งมีกลไกที่ควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารอยู่แล้วในปุ๋ยที่ผลิต เช่น ปุ๋ยเคลือบ (Coated fertilizer) เป็นต้น

ปุ๋ยละลายช้า หมายถึง ปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาช้ากว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป แต่ไม่สามารถควบคุมอัตราและช่วงเวลาในการปลดปล่อยได้มากนัก เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้นของดิน และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน เป็นต้น ปุ๋ยประเภทนี้ ได้แก่ ยูเรียฟอร์มาดีไฮด์ (Urea formaldehyde) เป็นต้น

สำหรับปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย เนื้อปุ๋ยภายในเป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำได้สูง แต่เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยไว้เพื่อควบคุมการปลดปล่อยจึงควรเรียกว่า “ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย” ส่วนปุ๋ยละลายช้า เช่น ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เป็นปุ๋ยที่สังเคราะห์ขึ้นใหม่จากยูเรียที่มีสภาพละลายน้ำได้สูง แต่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตแล้วกลายเป็นปุ๋ยที่มีสภาพละลายน้ำได้ต่ำและปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาช้าตามสภาพละลายน้ำได้จึงควรเรียกว่า “ปุ๋ยละลายช้า” แต่ถึงอย่างไรก็ตาม สำหรับวงการปุ๋ยของประเทศไทยนั้นมักเรียกปุ๋ยทั้ง 2 กลุ่มนี้รวมกันว่า “ปุ๋ยละลายช้า” ตามความนิยม

2.6.1 ประเภทของปุ๋ยละลายช้า (อำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2553)

หากจำแนกตามองค์ประกอบและกระบวนการผลิต สามารถแบ่งได้ดังนี้

2.6.1.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่มีสภาพละลายน้ำได้ต่ำ (Organic-N low-solubility compounds) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 พวก คือ (1) สารประกอบที่เกิดจากการควบแน่น (Condensation) ระหว่างยูเรียกับแอลดีไฮด์ เช่น ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งสลายตัวด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ และ (2) สารประกอบอินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่สลายได้ด้วยปฏิกิริยาเคมี เช่น ไอโซบิวทิไลดีนไดยูเรีย (Isobutylidene-diurea, IBDU)

2.6.1.2 ปุ๋ยเคลือบ (Coated fertilizers) เป็นการเคลือบผิวของเม็ดปุ๋ยที่ละลายง่ายเพื่อควบคุมการละลาย มีหลักการดังนี้ คือ (1) ผิวเคลือบมีความหนาตามแบบที่กำหนดเพื่อให้ปุ๋ยละลายออกมาในอัตราที่ต้องการ และ (2) มีวิธีการเคลือบที่แน่นอนเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตามมาตรฐาน สำหรับสารที่ใช้เคลือบ ได้แก่ กำมะถัน และสารพอลิเมอร์ ชนิดต่างๆ สำหรับปุ๋ยเม็ดเคลือบยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (1) ปุ๋ยเม็ดเคลือบด้วยพอลิเมอร์ เช่น พลาสติก หรือเรซิน และ (2) ปุ๋ยเม็ดเคลือบด้วยสารอนินทรีย์ เช่น กำมะถัน เป็นต้น

2.6.1.3 ปุ๋ยละลายช้าชนิดใช้วัสดุพื้น (Matrix-based slow release fertilizers) ปุ๋ยละลายช้าชนิดใช้วัสดุพื้นนั้น สารที่ใช้เป็นวัสดุพื้นอาจเป็นสารไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิโอเลฟิน (Polyolefines) และยาง นอกจากนี้ ยังมีไฮโดรเจล (Hydrogels) ซึ่งเป็นสารที่ชอบน้ำแต่ช่วยลดการละลายของปุ๋ย โดยทำหน้าที่อุ้มน้ำไว้แล้วพองตัว สำหรับการใช้วัสดุพื้นในการผลิตนั้นยังมีน้อย ส่วนสารพวกไฮโดรเจลกำลังอยู่ในช่วงพัฒนาผลิตภัณฑ์

2.6.1.4 ปุ๋ยละลายช้าชนิดอื่นๆ นอกจากปุ๋ยละลายช้าดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสภาพละลายน้ำต่ำ (Inorganic-low-solubility compounds) ได้แก่ แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต ($MgNH_4PO_4.6H_2O$) และหินฟอสเฟตที่ทำปฏิกิริยากับกรดบางส่วน (Partially acidulated phosphate rock) ปุ๋ยประเภทนี้จะมีสภาพละลายน้ำต่ำในดินเนื้อหยาบที่เป็นกรดเล็กน้อยหรือปานกลาง แต่ถ้าดินมีการตรึงฟอสฟอรัสสูงเมื่อปุ๋ยละลายออกมาก็จะถูกตรึงเป็นรูปที่ละลายยากเช่นเดียวกัน

2.6.2 การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยละลายช้า (อำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2553)

กลไกการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยละลายช้า มีดังนี้

2.6.2.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่มีสภาพละลายน้ำได้ต่ำ การปลดปล่อยไนโตรเจนจากสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนละลายช้าเป็นดังนี้

1) ผลิตภัณฑ์จากการควบแน่นระหว่างยูเรียกับแอลดีไฮด์ ส่วนใหญ่การปลดปล่อยธาตุอาหารเกิดจากการสลายตัวโดยจุลินทรีย์ในดิน กล่าวคือ มีการย่อยสารประกอบโซ่สั้นและโซ่ปานกลางให้มีโมเลกุลเล็กลงและละลายน้ำได้ ดังนั้น อัตราการสลายตัวของปุ๋ยจึงขึ้นอยู่กับสมบัติของดินที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลินทรีย์ เช่น เนื้อดิน พีเอช อุณหภูมิ และความชื้นของดิน เป็นต้น ดังนั้น ในการผลิตปุ๋ยจึงต้องคำนึงถึงสัดส่วนของสารประกอบที่เป็นยูเรียโมโนเมอร์ ไดเมอร์ ตลอดจนสารซึ่งมีความยาวโซ่ขนาดต่างๆ ที่ควรมีในปุ๋ย เพื่อให้เหมาะสมกับพืช ถ้าสัดส่วนในปุ๋ยส่วนมากเป็นพวกโซ่สั้นพืชจะได้รับไนโตรเจนในช่วงแรกมากเกินไปหรือทะลักออกมาตอนเริ่มปลดปล่อยและไม่เพียงพอในช่วงหลังเนื่องจากปุ๋ยส่วนที่เหลือมีน้อย แต่ถ้าในปุ๋ยมีสัดส่วนของสารประกอบโซ่ยาวสูงพืชอาจขาดแคลนไนโตรเจนในช่วงแรกของการเจริญเติบโต

2) ไอบีดียู (Isobutylidene diurea, IBDU) การปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยไอบีดียูเกิดจากสารประกอบนี้ทำปฏิกิริยาแยกสลายด้วยน้ำ นอกจากนี้ อัตราการปลดปล่อยยังขึ้นอยู่กับ พีเอช และอุณหภูมิของดินอีกด้วย

3) ซีดียู (Crotonylidene diurea, CDU) การปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยซีดียู เกิดจากปฏิกิริยาแยกสลายด้วยน้ำและการสลายโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ดังนั้น อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจึงขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดปุ๋ยกับสมบัติของดิน ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ และความชื้นในดิน เป็นต้น

Chulalongkorn University

2.6.2.2 ปุ๋ยเคลือบ การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยเคลือบเป็นดังนี้

1) ยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน การปลดปล่อยยูเรียจากปุ๋ยสู่ดินเกิดจากรอยร้าวหรือรูเล็กๆ ของเม็ดปุ๋ยซึ่งมีไขหรือพลาสติกอุดไว้ เมื่อผิวเคลือบถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายน้ำจึงซึมผ่านเข้าไปได้ทำให้สารละลายยูเรียแพร่ออกมาทางรูดังกล่าว นอกจากนี้ อุณหภูมิและความชื้นของดินยังมีอิทธิพลต่อการแพร่ด้วย โดยการแพร่ของยูเรียนี้มีอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงแรก เป็นช่วงที่มีการปลดปล่อยไนโตรเจนในระดับคงตัว (Steady N release phase) ซึ่งเป็นช่วงที่ยังมียูเรียสภาพของแข็งอยู่และยูเรียก็ละลายออกมา และช่วงที่สอง เป็นช่วงที่มีการปลดปล่อยในอัตราลดลง (Reduced rate phase) เนื่องจากยูเรียภายในสารเคลือบใกล้จะหมด

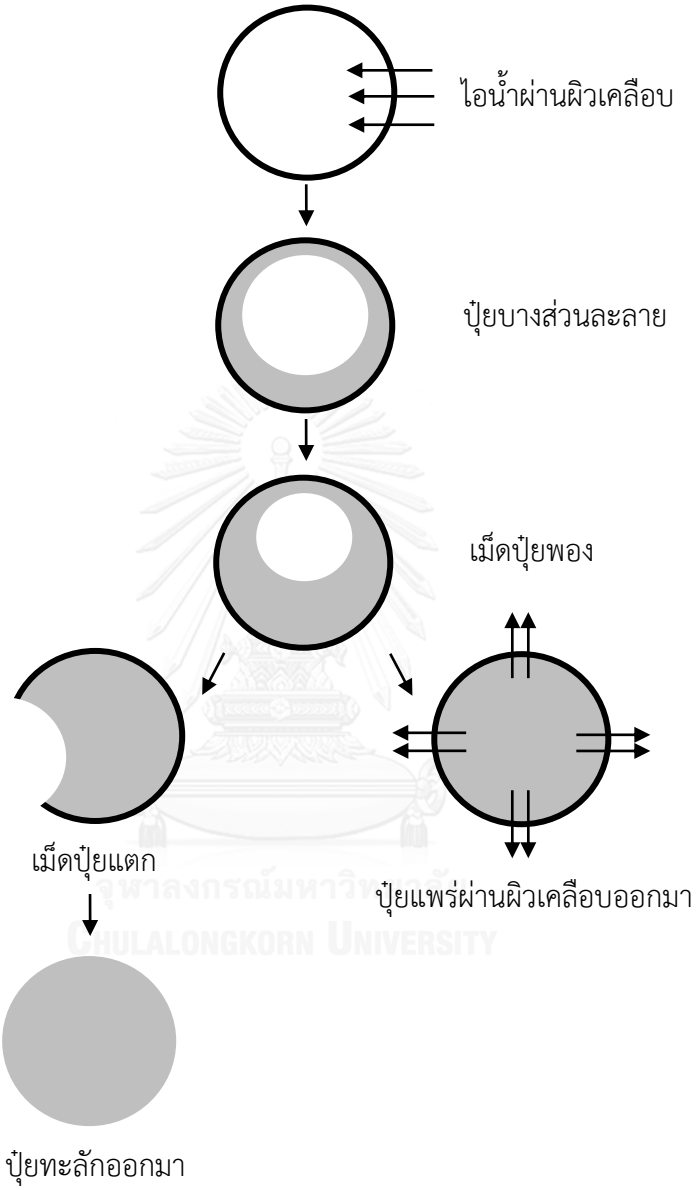
2) ปุ๋ยเคลือบด้วยสารโพลีเมอร์อินทรีย์ มีการปลดปล่อยธาตุอาหารโดยการแพร่ ดังนี้

ระยะที่ 1 ช่วงนิ่ง เป็นช่วงที่ไอน้ำซึมเข้าไปในเม็ดปุ๋ยอย่างช้าๆ แล้วเริ่มละลายปุ๋ยส่วนที่อยู่ใกล้ผิวเคลือบ ในขั้นนี้จะมีแรงขับเคลื่อนที่เกิดจากความแตกต่างของความดันไอ (Vapor pressure) ระหว่างสารเคลือบ 2 ด้าน เมื่อไอน้ำสามารถเข้าไปอยู่ในชั้นผิวเคลือบก็จะครอบครองที่ว่างในช่องอันจำกัด 2 ส่วน คือ รูพรุนภายในเนื้อปุ๋ย และช่องระหว่างผิวเคลือบกับปุ๋ยเท่านั้น ทำให้น้ำหนักเม็ดปุ๋ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แรงดันภายในจึงสูงขึ้นและปริมาตรของเม็ดปุ๋ยก็เพิ่มขึ้นด้วย สำหรับเวลาที่ใช้ในช่วงนิ่ง คือ เวลาที่ทำให้ช่องทั้งหมดมีของเหลวเต็ม ช่วงนิ่งนี้จะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อสารละลายปุ๋ยเริ่มดันผนังด้านในของผิวเคลือบและเป็นจุดเริ่มต้นของระยะที่ 2

ระยะที่ 2 ปลดปล่อยคงที่ สำหรับอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารในระยะนี้จะคงที่ตราบเท่าที่สารละลายอิ่มตัวของปุ๋ยยังคงสมดุลกับปุ๋ยแข็งที่ยังเหลืออยู่ในเม็ด จากความเข้มข้นของสารละลายปุ๋ยซึ่งอิ่มตัวและคงที่นี้จึงทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) และความแตกต่างของแรงดัน (Pressure gradient) คงที่ด้วย ดังนั้น จึงเป็นปัจจัยที่กำหนดแรงสำหรับใช้ในการขับเคลื่อนปุ๋ยให้ออกมาภายนอกในอัตราคงที่ โดยในระยะนี้ปริมาตรของเม็ดปุ๋ยจะคงที่ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของปุ๋ยออกไปนั้นได้มีน้ำจากภายนอกเข้ามาชดเชยในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

ระยะที่ 3 การปลดปล่อยลดลง เกิดขึ้นนับตั้งแต่เนื้อปุ๋ยภายในเม็ดได้ละลายหมดแล้ว และแรงที่ใช้ขับเคลื่อนการปลดปล่อยก็เริ่มลดลงเรื่อยๆ ในช่วงท้ายจะมีปุ๋ยออกมาน้อยมากจนกระทั่งหมดไป

การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่เม็ดเคลือบด้วยพอลิเมอร์สามารถอธิบายได้ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยในขั้นแรกของการปลดปล่อยธาตุอาหาร น้ำจะซึมผ่านเข้าไปในเม็ดปุ๋ย จากนั้นปุ๋ยบางส่วนจะเกิดการละลายทำให้เกิดแรงดันภายในเม็ดปุ๋ยและเม็ดปุ๋ยมีการพองแต่เฉพาะในปุ๋ยที่มีการเคลือบด้วยสารประเภทอัลกิด ในระยะสุดท้ายจะมีโอกาสเกิดได้สองทาง คือ ผิวเคลือบเม็ดปุ๋ยแตก ปุ๋ยจึงทะลักออกมาเรียกว่า กลไกล้มเหลว แต่ถ้าผิวเคลือบยังปกติการปลดปล่อยจะเกิดขึ้นโดยการแพร่



ภาพที่ 2.1 การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่เม็ดเคลือบด้วยพอลิเมอร์
ที่มา: อำนาจ สุวรรณฤทธิ์ (2553)

2.6.3 ข้อดีของปุ๋ยละลายช้า (ศิริพร เชาว์เมธีวุฒิ, 2544)

1) ประสิทธิภาพของปุ๋ยละลายช้ามักสูงกว่าปุ๋ยเคมีทั่วๆ ไป เนื่องจากปุ๋ยละลายช้าจะค่อยๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมา พืชจึงมีโอกาสได้ใช้ในช่วงเวลาที่นานกว่า

2) แม้ว่าจะใส่ปุ๋ยทั้งหมดตามอัตราที่กำหนดไว้เพียงครั้งเดียวก็ไม่ทำให้สารละลายของดินมีความเข้มข้นสูงเกินไปจนเป็นอันตรายต่อพืช

3) ทำให้พืชได้รับธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างช้าๆ

4) ลดการสูญเสียธาตุอาหารจากการถูกชะล้างของน้ำ

2.7 หลักพิจารณาการใช้ปุ๋ยเคมี (ณัฐ งามเจตนรมย์, 2545)

จุดประสงค์หลักของการใส่ปุ๋ย คือ เพื่อเพิ่มธาตุอาหารให้แก่พืช แต่การใส่ปุ๋ยเพื่อให้ผลผลิตพืชสูงขึ้น และมีกำไรจากการขายผลผลิตหลังจากหักค่าปุ๋ยแล้วมีกำไรสูงสุดร่วมด้วยนั้น จำเป็นต้องมีปัจจัยหลายอย่างที่ใช้ประกอบการพิจารณาร่วมกันดังต่อไปนี้

2.7.1 ลักษณะของพืชที่ปลูก

พืชแต่ละชนิดมีความต้องการธาตุอาหารที่ต่างกันทั้งในด้านปริมาณและสัดส่วนของธาตุอาหาร แม้ว่าปุ๋ยสูตรหนึ่งจะสามารถใช้ได้กับพืชทุกชนิด แต่ผลผลิตที่ได้อาจไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากพืชที่ปลูกต่างชนิดกันหรือแม้แต่พืชที่อายุต่างกัน ย่อมมีความต้องการธาตุอาหารในปริมาณและสัดส่วนเพื่อการเจริญเติบโตและสร้างผลิตผลที่แตกต่างกันออกไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น พืชบางชนิดต้องการธาตุไนโตรเจนในปริมาณมาก แต่ในขณะเดียวกันพืชบางชนิดหากได้รับธาตุไนโตรเจนในปริมาณที่มากแล้วจะส่งผลให้ออกดอกติดผลได้น้อย เป็นต้น

2.7.2 ดิน

ดินแต่ละแห่งมีปริมาณและสัดส่วนของธาตุอาหารในดินไม่เท่ากัน เนื่องจากกระบวนการผุพังของหินชนิดต่างๆ รวมกับเศษซากพืช ซากสัตว์ ที่สลายตัวเป็นอินทรียวัตถุที่อยู่ในดินนั้นต่างกัน นอกจากนี้ เนื้อดินที่แตกต่างกันยังดูดซับปุ๋ยได้ไม่เหมือนกัน ดังนั้น การวิเคราะห์สภาพดินก่อนการใส่ปุ๋ยจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้การใช้ปุ๋ยนั้นเป็นไปอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.7.3 ชนิดและปริมาณของปุ๋ย

ปุ๋ยเคมีแต่ละสูตรมีสัดส่วนของธาตุอาหารที่แตกต่างกัน ตามการนำไปใช้กับชนิดของพืชและดินที่มีระดับธาตุอาหารที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ในพืชที่ต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง ปุ๋ยเคมีที่ใช้ต้องมีปริมาณธาตุทั้งสองสูง แต่ถ้าในดินมีปริมาณธาตุอาหารธาตุใดธาตุหนึ่งสูงเพียงพออยู่แล้วก็ไม่จำเป็นต้องใช้ปุ๋ยที่มีปริมาณธาตุอาหารนั้นๆ สูง นอกจากนี้ คุณสมบัติของปุ๋ยแต่ละสูตรก็มีความแตกต่างกันทั้งชนิดที่เป็นกรดและเป็นด่าง ปุ๋ยที่มีปฏิกิริยาเป็นกรดไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับดินเปรี้ยวเพราะจะทำให้ดินเป็นกรดเพิ่มขึ้น อีกทั้งปุ๋ยบางชนิดมักจะละลายน้ำได้ง่ายและเป็นประโยชน์แก่พืชเร็ว บางชนิดละลายน้ำได้ยากและเป็นประโยชน์แก่พืชช้า ดังนั้น สำหรับพืชที่อายุสั้นต้องใช้ปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ง่าย และเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ทันที แต่สำหรับพืชที่มีอายุยาวนาน เช่น ไม้ผล ควรใช้ปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ในระยะยาวเพียงพอกับตามความต้องการของพืช

2.7.4 ระยะเวลาการใส่ปุ๋ย

การให้ปุ๋ยแก่พืชนั้น ควรให้ตรงกับระยะเวลาที่พืชมีความต้องการธาตุอาหารจากดินมากที่สุดและดึงดูดธาตุอาหารจากดินในอัตราที่รวดเร็วมากที่สุด เพื่อให้พืชได้รับประโยชน์สูงสุดและป้องกันการสูญเสียปุ๋ยไปโดยเปล่าประโยชน์ โดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจนที่สามารถสูญเสียจากดินไปในรูปต่างๆ ได้ง่าย

2.7.5 วิธีใส่ปุ๋ย

วิธีการใส่ปุ๋ยเพื่อให้พืชดึงดูดธาตุอาหารไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากเมื่อใส่ปุ๋ยลงไปในดิน ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงและการเคลื่อนย้ายของปุ๋ยจะเกิดขึ้นทันที อีกทั้งปุ๋ยยังมีโอกาสสูญเสียได้หลายทาง เช่น ถูกตรึงโดยเม็ดดิน ถูกชะล้างโดยน้ำ หรือระเหยไปในอากาศ ดังนั้น การใส่ปุ๋ยไม่ว่าจะโดยวิธีการหว่าน การใส่เป็นแถบทาง ใส่เฉพาะที่ หรือฉีดเข้าทางใบก็ตาม จำเป็นต้องเลือกวิธีที่เหมาะสมกับพืชเพื่อให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด นอกจากนี้ ควรเป็นวิธีที่สะดวก และง่ายต่อการปฏิบัติ

2.8 ปุ๋ยละลายช้าสูตร 13-13-13

ไม้ดอกเป็นพืชที่มีราคาสูง การเตรียมดินและการใส่ปุ๋ยจึงต้องมีประสิทธิภาพ สำหรับปุ๋ยละลายช้าที่นิยมใส่เพื่อเพิ่มธาตุอาหารสำหรับการปลูกไม้ดอกนั้น คือ ปุ๋ยสูตร 13-13-13 ซึ่งในปัจจุบันความต้องการในการใช้ปุ๋ยสูตร 13-13-13 นี้มีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตไม้ดอกเพื่อส่งออกที่สำคัญของโลกมาเป็นระยะเวลานาน อีกทั้งในปัจจุบันประเทศไทยมีการ

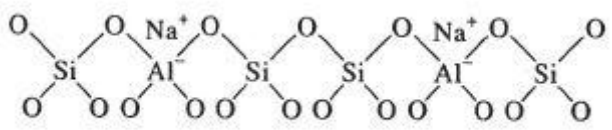
เตรียมสนับสนุน ส่งเสริม และพัฒนาพันธุ์ไม้อีก 4 ชนิด ได้แก่ กุหลาบ เฟิน สับปะรดสี และแคคตัส เพื่อให้เป็นไม้เศรษฐกิจระดับโลก สร้างชื่อเสียงให้กับประเทศไทยในอนาคตอีกด้วย (เดลินิวส์, 2556) ดังนั้น จึงควรมีการพัฒนาการผลิตปุ๋ยสูตรดังกล่าว เพื่อเป็นการลดปัญหาการขาดดุลการค้าระหว่างประเทศจากการนำเข้าปุ๋ยหรือวัตถุดิบจากต่างประเทศ

ปุ๋ยละลายช้ายี่ห้อออสโมโค้ท (Osmocote) สูตร 13-13-13 เป็นปุ๋ยเคมีที่เคลือบด้วยสารเรซินธรรมชาติ (Natural organic resin) ซึ่งช่วยควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างสม่ำเสมอต่อเนื่องเป็นเวลายาวนาน เม็ดปุ๋ยประกอบด้วยธาตุไนโตรเจนทั้งหมด (N) ร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก ฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) ร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก และโพแทสเซียมที่ละลายน้ำ (K_2O) ร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก เมื่อใส่ปุ๋ยในวัสดุปลูก น้ำจะซึมผ่านชั้นเคลือบเรซินเข้าไปละลายธาตุอาหารที่อยู่ภายในจากนั้นธาตุอาหารจะค่อยๆ ซึมผ่านชั้นเคลือบออกมาโดยกระบวนการออสโมซิส (Osmosis) อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เมื่อธาตุอาหารหมดจะเห็นเม็ดปุ๋ยใส มีแต่น้ำอยู่ภายในซึ่งจะสลายตัวได้เองตามธรรมชาติ (บริษัท โซตัส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด, 2557)

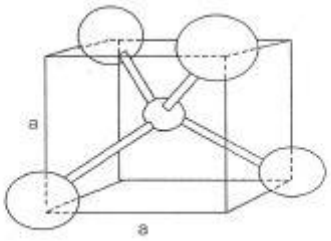
ปุ๋ยละลายช้าออสโมโค้ทสูตร 13-13-13 นี้เหมาะสำหรับไม้ดอก เช่น กล้วยไม้ ลีลาวดี อโกลนีมา กุหลาบ โป๊ยเซียน เฟื่องฟ้า มะลิ ดาวเรือง เยอบีร่า ชวนชม ปาล์ม โกสน เฟิร์น บอน ว่านหน้าวัว อัฟริกันไวโอเล็ต และยังใช้ได้กับต้นไม้ในอาคารสำนักงานทุกชนิด กล้าไม้ต่างๆ เช่น กล้าไม้ผล กล้าไม้ปลูกป่า เป็นต้น (บริษัท โซตัส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด, 2557)

2.9 ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ คือ ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์เป็นสารประกอบออกไซด์ร่วมระหว่างธาตุซิลิคอนกับอะลูมิเนียม โดยอะตอมของซิลิคอนหรืออะลูมิเนียมแต่ละอะตอมมีพันธะเคมีกับอะตอมของออกซิเจน 4 อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) เกิดเป็นผลึกรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedron) โดยมีอะตอมของซิลิคอนหรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ โดยอะตอมของออกซิเจนแต่ละอะตอมมีพันธะกับอะตอมของซิลิคอน 2 อะตอม หรืออะตอมของซิลิคอนและอะลูมิเนียมอย่างละ 1 อะตอม จึงเกิดเป็นโครงผลึกต่อเนื่องอย่างสม่ำเสมอและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ซึ่งโพรงหรือรูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 0.3-1.0 นาโนเมตร (พลอยพรรณ จริงจิตต์, 2554)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้าง 2 มิติ ของอะลูมิโนซิลิเกต
ที่มา: Gates (1992)



ภาพที่ 2.3 รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิคอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยย่อยของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ) โดย a คือ ระนาบของอะตอมออกซิเจน
ที่มา: เลิศ รักสินติชาติ (2545)

2.9.1 ชนิดของซีโอไลต์ (พลอยพรรณ จริงจิตต์, 2554)

ซีโอไลต์สามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดได้ 2 ชนิด คือ ซีโอไลต์ตามธรรมชาติ (Mineral zeolite or naturally occurring zeolite) และซีโอไลต์สังเคราะห์ (Synthesis zeolite)

2.9.1.1 ซีโอไลต์ตามธรรมชาติ (Mineral zeolite) ซีโอไลต์ธรรมชาติมักพบจากการทำเหมืองแร่ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมการทำกระดาษ ใช้ประโยชน์ในด้านการก่อสร้าง และใช้เป็นสารดูดซับในอุตสาหกรรมการแยกก๊าซธรรมชาติ และดูดซับก๊าซแอมโมเนียในกระบวนการการกำจัดน้ำทิ้ง เนื่องจากซีโอไลต์ธรรมชาติมีคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนและสมบัติในการกรองแยกโมเลกุล (Molecular sieves)

2.9.1.2 ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Synthesis zeolite) ซีโอไลต์สังเคราะห์ส่วนใหญ่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal process) ระหว่างแหล่งอลูมินาหรือซิลิกากับด่าง เกิดเป็นเจลและก่อตัวกลายเป็นผลึกอย่างช้าๆ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดผลึก คือ ประมาณ 150 องศาเซลเซียส หรือมีอุณหภูมิสูงเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัวในขณะนั้น ตัวอย่างซีโอไลต์สังเคราะห์ ได้แก่ Zeolite A, Zeolite F, Zeolite M และ Zeolite Y เป็นต้น

2.9.2 คุณสมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ (พลอยพรรณ จริงจิตต์, 2554)

1) ซีโอไลต์มีโครงสร้างที่เป็นผลึกและมีรูพรุน ทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก

2) ซีโอไลต์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้เป็นกระบวนการแบบผันกลับได้

3) ซีโอไลต์มีสมบัติในการกรองแยกโมเลกุลที่จะผ่านเข้าออกจากโพรงหรือรูพรุน (Molecular sieves) โมเลกุลต้องมีรูปร่างและขนาดที่พอเหมาะเท่านั้นจึงจะสามารถผ่านเข้าออกจากปากโพรงของซีโอไลต์ได้

4) ซีโอไลต์มีสมบัติในการดูดซับ โดยเมื่อไล่โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ออกจะทำให้เกิดช่องว่างภายในจำนวนมาก และเนื่องจากรูพรุนของซีโอไลต์มีสภาพขั้วที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินา จึงทำให้ซีโอไลต์สามารถดูดซับสารอื่นเข้าสู่รูพรุนได้ตามสภาพขั้ว นอกจากนี้ ยังสามารถกำจัดสารอื่นๆ ที่ถูกดูดซับไว้ในรูพรุนของซีโอไลต์ได้โดยกระบวนการต่างๆ เช่น การให้ความร้อน การแทนที่ เป็นต้น

2.9.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์ (จำรัส ลิ้มตระกูล, 2540)

จากคุณสมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ จึงทำให้ซีโอไลต์ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย ยกตัวอย่างเช่น

1) ใช้เป็นสารลดความกระด้างของน้ำโดยโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม หรือโพแทสเซียม ที่เกาะกับซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งเป็นตัวการทำให้น้ำกระด้าง นอกจากนี้ ยังมีการนำซีโอไลต์มาใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอกแทนฟอสเฟต เนื่องจากฟอสเฟตเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยสารพวกฟอสเฟตเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและเมื่อพืชน้ำตายจุลินทรีย์ในน้ำจะต้องใช้ออกซิเจนจำนวนมากในการย่อยสลายซากพืชเหล่านี้ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงและน้ำเกิดการเน่าเสีย

2) จากสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์สามารถนำไปใช้เป็นเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนบวกต่างๆ ได้แก่ Zn^{2+}, Sn^{2+}, Ba^{2+}, Ca^{2+}, Ni^{2+}, Cd^{2+}, Hg^{2+} และ Mg^{2+} เป็นต้น โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของซีโอไลต์นี้จะขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของไอออนบวกที่ทำการแลกเปลี่ยนประจุกับซีโอไลต์ อุณหภูมิที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนประจุ ตัวทำละลาย และโครงสร้างของซีโอไลต์

3) ใช้เป็นตัวดูดซับ โดยซีโอไลต์สามารถเลือกให้มีการดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล นอกจากนี้ ซีโอไลต์ยังสามารถดูดซับน้ำได้ดีและเมื่อมีการให้ความร้อนซีโอไลต์ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ จึงมีการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับทั้งในกระบวนการทำให้แห้ง (Dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (Purification) และการแยกสาร (Separation) อีกทั้งยังมีการใช้ซีโอไลต์ในการดูดซับ

สารอื่นๆ อีก เช่น ก๊าซไอโอดีน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย ซึ่งเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับเช่นเดียวกับการดูดซับน้ำ และซีโอไลต์บางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำแต่จะดูดซับเฉพาะโมเลกุลอินทรีย์เท่านั้น

4) ประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น ในด้านการเกษตร การเลี้ยงสัตว์ และการก่อสร้าง สำหรับในด้านการเกษตร ซีโอไลต์ช่วยลดการใช้ปุ๋ย โดยสามารถเก็บกักปุ๋ยให้อยู่ในดินได้นาน ทำให้พืชสามารถใช้ประโยชน์จากปุ๋ยในดินได้อย่างเต็มที่ ซีโอไลต์ยังสามารถดูดจับสารพิษของยาฆ่าหญ้าและยาฆ่าแมลงที่ตกค้างในดิน และช่วยทำให้ดินร่วนซุย น้ำสามารถซึมผ่านได้ดี ในเชิงการเกษตรนั้นมีวิธีการที่เรียกว่า Zeoponic หมายถึงการนำซีโอไลต์ธรรมชาติมาปรับเปลี่ยนองค์ประกอบบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนประจุ ใส่ประจุบวกที่เป็นธาตุอาหารของพืชลงไปแทนทำให้โมเลกุลของซีโอไลต์กลายเป็นแหล่งอาหารของพืช ซึ่งธาตุอาหารนั้นจะค่อยๆ ปลดปล่อยออกมาทำให้ไม่ถูกชะล้างไปจากดินโดยง่าย ถือเป็นการประหยัดธาตุอาหารได้อีกทางหนึ่ง

2.10 ฟางข้าว (Rice straw)

ฟางข้าว คือ ส่วนใหญ่ลำต้นแห้งของข้าวเมื่อทำการแยกเอาเมล็ดออกแล้ว ซึ่งเป็นผลพลอยได้อย่างหนึ่งที่ได้หลังจากการเก็บเกี่ยวข้าว โดยมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin)

ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปีและนาปรังมากกว่า 70 ล้านไร่ และผลิตข้าวปีละไม่ต่ำกว่า 21-25 ล้านตัน และมีวัสดุเหลือที่เรียกว่าฟางข้าวและตอซังข้าวประมาณ 3 เท่าของเมล็ดหรือประมาณ 50-70 ล้านตัน จากจำนวนข้าวที่ผลิตได้ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย คิดเป็นมูลค่าไม่ต่ำกว่า 30,000 ล้านบาท แต่ฟางข้าวจำนวนมหาศาลที่ได้แทบจะไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ (กีรติณัฏฐ์ ธนกิจธรรมกุล, 2553)

ฟางข้าวเป็นอินทรียวัตถุที่มีประโยชน์สูง สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติแต่ค่อนข้างใช้ระยะเวลานาน เนื่องจากมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูง โดยฟางข้าวมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 89 มีปริมาณธาตุอาหารได้แก่ ไนโตรเจนร้อยละ 0.69 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.08 และโพแทสเซียมร้อยละ 1.56 (บัญชา รัตนีทู, 2555) ซึ่งธาตุเหล่านี้มีความสำคัญต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินในด้านธาตุอาหารของพืช

2.10.1 ประโยชน์ของฟางข้าว (อินแปง ดวงวงสา, 2556)

ฟางข้าวเป็นอินทรียวัตถุอย่างหนึ่งที่ได้มาหลังการเก็บเกี่ยวข้าว ซึ่งมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงดินหลายประการ ดังนี้

1) การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน ฟางข้าวทำให้ดินโปร่ง ร่วนซุย เพราะอินทรียวัตถุที่ได้จากการย่อยสลายของฟางข้าวจะเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างของดินไว้ ทำให้ดินสามารถดูดซับน้ำได้ ซึ่งง่ายต่อการเตรียมดิน การปักดำ และทำให้รากพืชเจริญเติบโต แพร่กระจายในดินได้มากขึ้น ดินมีการระบายอากาศมากขึ้น การซึมผ่านของน้ำและการอุ้มน้ำของดินดีขึ้น

2) การปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน เมื่อฟางข้าวย่อยสลายจะปลดปล่อยธาตุอาหารแก่ดินโดยตรง ถึงแม้ปริมาณธาตุอาหารจะน้อยกว่าปุ๋ยเคมี แต่ในฟางข้าวมีทั้งธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง ซึ่งจะค่อยๆ ปลดปล่อยให้เป็นประโยชน์ต่อพืชในระยะยาว นอกจากนี้ ฟางข้าวยังช่วยดูดยึดธาตุอาหารจากการใส่ปุ๋ยเคมีไม่ให้สูญเสียไปจากดินโดยง่าย จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีได้อีกทางหนึ่ง

3) การปรับปรุงสมบัติทางชีวภาพของดิน ฟางข้าวช่วยทำให้ดินมีปริมาณอินทรียวัตถุเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นแหล่งอาหารและพลังงานของจุลินทรีย์ในดิน ทำให้ปริมาณและกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนธาตุอาหารในดินให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น

2.10.2 กระบวนการจัดการฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยว (อินแปง ดวงวงสา, 2556)

1) การจัดการฟางข้าวโดยการปล่อยทิ้งฟางข้าวไว้ในทุ่งนาให้เกิดการย่อยสลายเองตามธรรมชาติ โดยเฉพาะในพื้นที่ทำนาปีที่มีการปลูกข้าวเพียงครั้งเดียวต่อปี เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย เสียค่าใช้จ่ายต่ำ ใช้แรงงานและเวลาในการจัดการน้อย แต่ปริมาณธาตุอาหารที่สะสมในดินอาจมีน้อย เนื่องจากการทิ้งฟางข้าวไว้นานจนกว่าจะถึงฤดูทำนาอาจทำให้ปริมาณของฟางข้าวลดลงและธาตุอาหารสูญเสียไป

2) การนำฟางข้าวไปใช้เลี้ยงสัตว์ ปัจจุบันเกษตรกรมักนิยมขายฟางข้าวให้แก่เกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ เนื่องจากเริ่มมีการนำเครื่องจักรเข้ามาใช้ในการอัดฟางข้าวให้เป็นก้อน ทำให้สะดวกในการขนย้ายและเก็บรักษา อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของฟางข้าว แต่ในขณะเดียวกันถ้ามีการขนย้ายฟางข้าวออกจากทุ่งนาอย่างต่อเนื่องในแต่ละปีก็อาจทำให้ดินสูญเสียความอุดมสมบูรณ์ไปเรื่อยๆ

3) การเผาฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยวข้าวนาปีเพื่อเตรียมพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปรังต่อไป การเผาฟางข้าวเป็นวิธีการเตรียมพื้นที่เพาะปลูกที่สะดวกและเสียค่าใช้จ่ายน้อยในการจัดการฟางข้าว อีกทั้งยังช่วยทำลายวงจรชีวิตของแมลงศัตรูพืชและเชื้อโรคที่มีการระบาดในพื้นที่ได้ แต่ในขณะเดียวกันก็อาจทำลายสิ่งมีชีวิตในดินที่เป็นประโยชน์ นอกจากนี้ การเผาฟางข้าวยังไปทำลายโครงสร้างของดิน ทำให้ดินสูญเสียธาตุอาหาร เช่น คาร์บอนและไนโตรเจนกลายเป็นก๊าซสูญเสียไปในบรรยากาศ และเป็นการเพิ่มมลพิษโดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมจะแปรสภาพไปเป็นขี้เถ้าสูญเสียไปกับลมได้ง่าย

4) การใช้ฟางข้าวเป็นพลังงานทดแทน โดยการนำฟางข้าวไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อต้มน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมหรือนำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าทดแทนการใช้พลังงานจากฟอสซิลที่นับวันจะหมดไปทุกที การจัดการฟางข้าวด้วยวิธีนี้เป็นการเพิ่มมูลค่าของฟางข้าวให้สูงขึ้นแต่มีข้อเสีย คือ ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่ให้ความร้อนต่ำ ยุ่งยากในการเก็บรวบรวม และมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง นอกจากนี้ การผลิตพลังงานทดแทนจำเป็นต้องใช้ฟางข้าวในปริมาณมาก เมื่อนำฟางข้าวออกไปจากพื้นที่นาจึงทำให้ธาตุอาหารที่มีอยู่ถูกนำออกไปด้วย

5) การทำปุ๋ยหมักจากฟางข้าว วิธีนี้เป็นการนำฟางข้าวหมักร่วมกับมูลสัตว์ ปุ๋ยเคมี หรือจุลินทรีย์ การหมักจะทำให้ปริมาณธาตุอาหารพืชเพิ่มสูงขึ้น สามารถนำมาใช้ได้ง่าย เนื่องจากฟางข้าวจะมีขนาดเล็กลง

6) การไถกลบฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยว วิธีนี้เป็นการไถกลบฟางข้าวภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตลงไปในดินในขณะที่ดินยังชื้นและปล่อยทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการย่อยสลายในดิน ซึ่งจะกลายเป็นแหล่งอินทรียวัตถุและธาตุอาหารให้กับดิน หลังจากนั้นจึงปลูกพืชผลตามที่ต้องการต่อไป

2.11 เบนโทไนท์ (Bentonite)

เบนโทไนท์เป็นแร่ดินชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากดินขาวหรือบอลล์เคลย์ โดยทั่วไปเป็นแหล่งแร่ทุติยภูมิที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของหินอัคนีเนื่องจากน้ำร้อน ประกอบไปด้วยแร่ดินจำพวกมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) และไบเดลไลต์ (Beidellite) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพพิเศษที่สำคัญ คือ สามารถพองตัวได้ดียิ่งเมื่ออยู่ในน้ำ มักมีสีขาวเทาหรือขาว (ตรีทิพย์ ศุภสุนทรกุล, 2555) มีโครงสร้างเป็นผลึกตาข่าย อนุภาคมีขนาดเล็กและละเอียดมาก พื้นที่ผิวจำเพาะปฐมภูมิ (Primary specific surface) ของเบนโทไนท์มีค่าประมาณ 50-120 ตารางเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะทุติยภูมิ (Secondary specific surface) สูงถึง 840 ตารางเมตรต่อกรัม (ธนพร สายตา, 2555) เบนโทไนท์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ที่สำคัญ ได้แก่ แคลเซียมเบนโทไนท์และโซเดียมเบนโทไนท์ ซึ่งทั้ง 2 ชนิด แตกต่างกันที่ความสามารถในการขยายตัว โดยโซเดียมเบนโทไนท์จะขยายตัวมากกว่าแคลเซียมเบนโทไนท์ (ตรีทิพย์ ศุภสุนทรกุล, 2555) องค์ประกอบทางเคมีของเบนโทไนท์ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเบนโทไนท์ (สุพัตรา บุตรเสรีชัย และ ยุวรัตน์ เงินเย็น, 2554)

องค์ประกอบ	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	MgO	CaO	K_2O	TiO_2
ปริมาณ (%)	46-60	14-17	6-8	0.5-1.5	1.5-3.0	1.0-2.5	0.1-1.0	0.2-1.5

ในประเทศไทยพบเบนโทไนท์ที่จังหวัดลพบุรี กาญจนบุรี ลำปาง เชียงใหม่ ตาก เพชรบูรณ์ และขอนแก่น โดยแหล่งใหญ่ที่สุดพบที่อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี สำหรับประโยชน์ของเบนโทไนท์ เนื่องจากเบนโทไนท์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการเป็นสารดูดซับได้ เช่น ใช้เป็นสารดูดซับกลิ่นหรือของเสียที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์ นอกจากนี้ เบนโทไนท์ยังมีประสิทธิภาพทางด้านความหนืดสูง สามารถนำมาใช้งานในการเป็นตัวประสานได้ดี (ธนพร สายตา, 2555) อีกทั้งในด้านการเกษตรมีการนำเบนโทไนท์ไปใช้เป็นสารปรับปรุงดิน หรือนำไปใช้ในการปลูกพืชได้อีกด้วย ยกตัวอย่างในงานวิจัยของ สราวุธ ยาราช และคณะ (2557) ที่มีการนำแร่เบนโทไนท์มาทดลองปรับปรุงดินเพื่อปลูกพืชผักสวนครัว โดยเปรียบเทียบความแตกต่างด้านการเจริญเติบโตและคุณภาพผลผลิตกับพืชที่ปลูกตามปกติ ผลการศึกษาพบว่า ผักที่ปลูกโดยใส่เบนโทไนท์จะเจริญเติบโตได้ดีกว่าชุดควบคุม นอกจากนี้ยังมีค่าความกรอบและความหวานมากกว่าชุดควบคุม จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สรุปได้ว่าเบนโทไนท์ให้ผลในเชิงบวกต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของพืชผักสวนครัวที่นำมาทดลอง

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Duplessis และ MacKenzie (1983) ศึกษาผลของการเติมแร่ลีโอนาร์ไดต์ในดินเหนียวและดินทรายร่วนต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพด โดยใช้แร่ลีโอนาร์ไดต์ในอัตรา 0, 5.1 และ 10.2 กรัมต่อดิน 2.25 กิโลกรัม จากการศึกษาพบว่า แร่ลีโอนาร์ไดต์ช่วยเพิ่มผลผลิตของข้าวโพด และช่วยเพิ่มการดูดซึมธาตุอาหารไนโตรเจนและธาตุฟอสฟอรัสในดินทรายร่วน แต่ไม่มีส่วนช่วยในดินเหนียวไม่ว่าจะใช้แร่ลีโอนาร์ไดต์ในอัตราเท่าไรก็ตาม

Otey และคณะ (1984) ศึกษาการเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยอัดเม็ดจากปุ๋ยยูเรียผสมกับแป้ง โดยใช้อัตราส่วนแป้งต่อปุ๋ยยูเรียเป็นดังนี้ 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 และ 40:60 หลังจากนั้นนำเข้าเครื่องรีดแบบเกลียวหนอนเพื่อเปลี่ยนสภาพแป้งให้กลายเป็นเจลห่อหุ้มเม็ดปุ๋ย จากการศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารโดยการนำปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่เตรียมได้ไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่มีอัตราส่วนแป้งต่อปุ๋ยยูเรียสูง จะมีปริมาณร้อยละยูเรียคงเหลือมากกว่าปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่มีอัตราส่วนแป้งต่อปุ๋ยยูเรียต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากแป้งจะช่วยป้องกันไม่ให้น้ำแทรกซึมผ่านเข้าไปในเม็ดปุ๋ยได้ง่าย

Pruitt (1990) ศึกษาการนำเยื่อกระดาษเซลลูโลสที่ไม่ได้ใช้แล้ว มาทำให้ขยายตัวและทำให้เกิดรูพรุนด้วยวิธี Flash-drying หลังจากนั้นทำให้วัสดุเซลลูโลสชุ่มไปด้วยปุ๋ย ผลการศึกษาพบว่าหลังจากที่วัสดุเซลลูโลสแห้งแล้วจะเกิดการจับยึดปุ๋ยไว้ภายในรูพรุนของโครงสร้างวัสดุเซลลูโลส ทำให้ปุ๋ยมีการปลดปล่อยออกมาช้าลง

Notario del Pino และคณะ (1995) ทำการศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารฟอสฟอรัสและธาตุโพแทสเซียมจากปุ๋ยที่ทำจากซีโอไลต์ และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) จากการศึกษาพบว่า ปุ๋ยที่ทำจากซีโอไลต์จะปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสและธาตุโพแทสเซียมได้นานกว่าโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต นอกจากนี้ การปรับสภาพซีโอไลต์ด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) จะทำให้การปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมเกิดเร็วขึ้น

Chang (1997) ได้ทำการศึกษาการเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย “Zeolite urea” จากปุ๋ยยูเรียผสมกับซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวดูดยึดธาตุอาหารไว้ภายในรูพรุนของโครงสร้าง แล้วเคลือบด้วยวัสดุที่มีลักษณะเป็นวุ้นหรือกาว (Gelatinous substance) เช่น Sodium acrylate, Polyvinyl chloride, Polyvinyl acetate, Methyl cellulose และ Carboxyl methyl cellulose เป็นต้น จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของพืชที่ได้รับปุ๋ยยูเรียทั่วไป “Regular urea” กับ “Zeolite urea” พบว่า พืชที่ได้รับ “Zeolite urea” เจริญเติบโตได้ดีกว่าพืชที่ได้รับ “Regular urea” ซึ่งเจริญเติบโตเพียงเล็กน้อยและมีอาการของการขาดธาตุไนโตรเจนด้วย

ศิริพร เชาว์เมธีวุฒิ (2544) ศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อย ซึ่งมีการเตรียมปุ๋ยโดยใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับปุ๋ย หลังจากนั้นเคลือบปุ๋ยด้วยวัสดุพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ พอลิไวนิลอะซิเตต และชันสน จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการปลดปล่อยธาตุอาหาร ได้แก่ ปริมาณของสารเติมแต่งในสูตรผสม และสภาพความเป็นกรดด่างของตัวกลาง รวมถึงศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยที่เตรียมโดยการทำไมโครเอนแคปซูเลชันโดยใช้พอลิสไตรีน ผลการศึกษาพบว่า ปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตตมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารสูงกว่าปุ๋ยที่เคลือบด้วยชันสน โดยอัตราส่วนระหว่างปุ๋ยต่อชานอ้อยต่อชันสนที่ทำให้ปุ๋ยมีอัตราการปลดปล่อยต่ำที่สุด คือ 20:20:60 อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมซีโอไลต์ในสูตรผสม ในขณะที่อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวกลางมีสภาพเป็นด่าง ปุ๋ยแคปซูลที่เตรียมจากพอลิสไตรีนมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารต่ำกว่าปุ๋ยที่เตรียมจากชานอ้อย ซึ่งอัตราส่วนระหว่างปุ๋ยต่อพอลิสไตรีนต่อชันสนที่เหมาะสม คือ 40:40:20

ณัฐ งามเจตนรมย์ (2545) ศึกษาความเป็นไปได้ในการชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารไนโตรเจนจากปุ๋ยเคมีสูตร 8-24-24 โดยสารเคลือบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยโปรตีนจากกากถั่วเหลือง (Soy protein isolate, SPI) น้ำกลั่น สาร Plasticizer สาร Crosslinking agent (ในที่นี้ใช้สารละลาย Formaldehyde) และสี โดยอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 7, 82.5, 7, 3 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การปลดปล่อยธาตุอาหารจะขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มที่เคลือบปุ๋ยและโครงสร้างของเนื้อฟิล์ม โดยถ้าฟิล์มเคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้น และโครงสร้างของเนื้อฟิล์มแน่นขึ้น จำนวนรูพรุนน้อย และมีขนาดของรูพรุนเล็ก จะทำให้ปุ๋ยสามารถชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ในระยะเวลายาวนานขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ปุ๋ยเคลือบที่ผ่านการ

กระตุ้นจะมีแนวโน้มการปลดปล่อยธาตุอาหารได้นานกว่าปุ๋ยเคลือบที่ไม่ผ่านการกระตุ้นและนานกว่าปุ๋ยที่ไม่มีการเคลือบ โดยระยะเวลาที่ปุ๋ยจะสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารได้หมด คือ ประมาณ 9 วัน 6 วัน และ 3 วัน ตามลำดับ

พีรพงศ์ หาญพิชาญชัย (2545) ศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยที่เคลือบด้วยไคโตซานที่มีการกำจัดหมู่อะซิทิล ร้อยละ 79 และร้อยละ 95 ซึ่งถูกละลายในกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อให้ได้สารละลายไคโตซานที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการพ่นสารละลายไคโตซานลงบนเม็ดปุ๋ยภายในถังเคลือบ และนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการศึกษาการละลายธาตุอาหารในน้ำกลั่น และวัดปริมาณของธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ตามเวลาที่กำหนด จากผลการทดลองพบว่า ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ที่ปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยที่เคลือบด้วยไคโตซานมีปริมาณน้อยกว่าปุ๋ยที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ โดยอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานและค่าร้อยละของการกำจัดหมู่อะซิทิลของไคโตซาน ปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายไคโตซานที่มีความเข้มข้นสูงและปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายไคโตซานที่มีค่าร้อยละของการกำจัดหมู่อะซิทิลน้อย จะมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารช้าลง

วริษฐา แสงฤทธิ์ (2547) ศึกษาการเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่ผ่านการเคลือบด้วยน้ำมันชักแห้งชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำมันลินสีด น้ำมันทัง และน้ำมันถั่วเหลือง โดยเครื่องมือที่ใช้ในการเคลือบ คือ ฟลูอิไดซ์เบด และหม้อเคลือบ พบว่า หม้อเคลือบเป็นเครื่องมือที่มีความเหมาะสมในการเคลือบปุ๋ยเพื่อควบคุมการปลดปล่อย นอกจากนี้ จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเคลือบ พบว่า เมื่อใช้โคบอลต์แนพทีเนตร้อยละ 1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะเคลือบปุ๋ยได้ดีที่สุด โดยเม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบจะมีลักษณะมันวาว ผิวเรียบ และสม่ำเสมอ ชนิดของน้ำมันที่เหมาะสมในการเคลือบปุ๋ย คือ น้ำมันลินสีด และน้ำมันถั่วเหลือง ส่วนน้ำมันทังไม่เหมาะสมในการเคลือบปุ๋ยโดยใช้หม้อเคลือบ และปริมาณของน้ำมันชักแห้งที่เหมาะสมในการเคลือบโดยใช้หม้อเคลือบ คือ 10 ส่วนในร้อยส่วน จากการศึกษาการปลดปล่อยโพแทสเซียมโดยใช้เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี และศึกษาอัตราการปลดปล่อยยูเรียโดยใช้เทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี พบว่า ปุ๋ยที่เคลือบด้วยน้ำมันลินสีดมีความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ดีที่สุด รองลงมา คือ น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันลินสีดผสมน้ำมันถั่วเหลือง และพบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มหรือจำนวนชั้นของฟิล์มมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้อัตราการปลดปล่อยสารอาหารลดลง นอกจากนี้ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสภาวะในการทดสอบปุ๋ยที่เคลือบ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปุ๋ยมีการปลดปล่อยธาตุอาหารเพิ่มขึ้น และช่วงภาวะความเป็นกรดสูงจะเพิ่มการปลดปล่อยธาตุอาหาร

Ece และคณะ (2007) ศึกษาอิทธิพลของการประยุกต์ใช้แร่ลีโอนาร์ไดต์ร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนและปุ๋ยฟอสฟอรัส ต่อการให้ผลผลิตถั่ว *Phaseolus vulgaris* L. และคุณสมบัติของดิน โดยวางแผนการทดลองแบบ Randomized split plot design จำนวน 3 ซ้ำ จากผลการทดลอง พบว่าแร่ลีโอนาร์ไดต์มีผลต่อปริมาณอินทรียวัตถุในดินและปริมาณของฟอสฟอรัส โดยปริมาณอินทรียวัตถุในดินและปริมาณของฟอสฟอรัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงทดลองควบคุมที่ไม่มีการใช้แร่ลีโอนาร์ไดต์ผสมกับปุ๋ยไนโตรเจนและปุ๋ยฟอสฟอรัส จากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าแร่ลีโอนาร์ไดต์สามารถใช้เป็นสารปรับปรุงดินสำหรับดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ และสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรได้ นอกจากนี้ ยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ปุ๋ยทางการค้า

บรรลือศักดิ์ ศิริมงคลเวช (2550) ศึกษาการใช้แป้ง 4 ชนิด ได้แก่ แป้งพุทธรักษา แป้งถั่วเขียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้า ร่วมกับ stearic acid เป็นองค์ประกอบของสารเคลือบในการเคลือบปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรท เพื่อควบคุมการปลดปล่อย จากนั้นนำเม็ดปุ๋ยแช่ลงในน้ำกลั่น และใช้เครื่องกวนสารตลอดเวลา แล้วทำการวัดสารละลายปุ๋ยที่ถูกปลดปล่อยออกมาที่เวลาต่างๆ กัน ผลการศึกษาพบว่า ปุ๋ยที่ไม่ผ่านการเคลือบจะละลายหมดในเวลา 2-3 นาที ส่วนเม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยแป้งทุกชนิด จะมีลักษณะการปลดปล่อยสารที่คล้ายคลึงกัน คือ ในช่วง 1-300 นาทีแรก มีอัตราการปลดปล่อยสารอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการปลดปล่อยจะค่อยๆ ลดลงตามลำดับจนความเข้มข้นของสารละลายมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมง

ณัฐนัย จินตกานนท์ (2551) ทำการศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยยูเรียด้วยเทคนิคการพ่นและจุ่มเคลือบ โดยนำเม็ดปุ๋ยมาผ่านการเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ฐานโคพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสม จากนั้นทำการตรวจสอบคุณลักษณะต่างๆ ของวัสดุ ปริมาณของสารเคลือบที่สัมพันธ์กับชนิดของพอลิเมอร์ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล และจำนวนครั้งที่ทำการเคลือบ ศึกษาอัตราการปลดปล่อยยูเรียในน้ำกลั่นโดยการติดตามดัชนีหักเหของแสงของสารละลาย ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและโครงสร้างเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์ (TGA) และเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า วิธีการจุ่มเคลือบมีประสิทธิภาพสูงกว่าการพ่นเคลือบ สำหรับผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผิวเคลือบและอัตราการปลดปล่อยยูเรียแสดงให้เห็นว่า คุณภาพและความหนาของชั้นผิวเคลือบมีบทบาทสำคัญในการชะลออัตราการปลดปล่อยยูเรีย การเคลือบปุ๋ยด้วยพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำอย่าง PLA-1, PLA-2 และ PLA-3 จะทำให้ผิวเคลือบมีรูพรุนและรอยแตกจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของชั้นผิวเคลือบไม่ได้ทำให้อัตราการปลดปล่อยยูเรียของวัสดุดังกล่าวแตกต่างกันมาก ในทางกลับกัน การเพิ่มร้อยละของสารเคลือบผิวเมื่อใช้พอลิแลกติกแอซิดทางการค้าและพอลิแลกติกแอซิดโคเอทิลีนเทเรฟแทเลตจะช่วยทำให้ปุ๋ยชะลอการปลดปล่อยยูเรีย

เพิ่มขึ้น ผลจากการทดสอบ TGA ของชั้นผิวเคลือบที่เหลือหลังทำการละลายยูเรียออกจนหมดที่ได้จาก PLA-1, PLA-2 และโคพอลิเมอร์ แสดงให้เห็นว่า มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าวัสดุตั้งต้น

ผุสดี ละออ และ สุวิมล อัศวพิศิษฐ (2551) ศึกษาความเป็นไปได้ในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียจากแคปซูลของปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการอัดรีดร่วมกับพอลิเอทิลีนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ยูเรียถูกอัดรีดร่วมกับพอลิเอทิลีนในปริมาณ 25, 50, 75 และ 100 ส่วนต่อร้อยส่วนของโพลิเอทิลีน จากนั้นนำแคปซูลของปุ๋ยยูเรียไปแช่น้ำกลั่นและเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 50 ชั่วโมง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 15 นาที เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณยูเรียด้วยวิธีสร้างสี ผลการศึกษาพบว่า เมื่อผสมแป้ง 2.5, 5.0 และ 7.5 ส่วนต่อร้อยส่วนของโพลิเอทิลีนและทำการอัดรีดกับปุ๋ยยูเรียตามสัดส่วนข้างต้น พบว่า การปลดปล่อยยูเรียจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งในส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่มียูเรียผสมอยู่ 25, 50, 75 และ 100 ส่วนต่อร้อยส่วนของโพลิเอทิลีนและแป้ง 7.5 ส่วนต่อร้อยส่วนของโพลิเอทิลีน มีการปลดปล่อยยูเรียสะสมสูงสุดเท่ากับ 0.710, 0.827, 0.954, 0.953 กรัมต่อกรัมแคปซูลของยูเรีย ตามลำดับ

Hoeung และคณะ (2011) ศึกษาการเตรียมปุ๋ยละลายช้าจากปุ๋ยยูเรียผสมกับซีโอไลต์ธรรมชาติขนาด 50, 60 และ 80 เมช ใช้น้ำแป้งเป็นสารเชื่อมในสัดส่วนร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 10 และใช้ดินเหนียวเป็นสารเติมแต่งในสัดส่วนร้อยละ 5, 7.5 และ 10 จากนั้นนำเข้าเครื่อง Inclined pan granulator จากการศึกษาพบว่า ปุ๋ยยูเรียผสมกับซีโอไลต์ขนาด 60 เมช น้ำแป้งในสัดส่วนร้อยละ 3 และดินเหนียวในสัดส่วนร้อยละ 7.5 เป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมที่ทำให้ปุ๋ยละลายช้ามีอัตราการปลดปล่อยยูเรียได้นานที่สุด

Yolcu และคณะ (2011) ศึกษาผลของการใช้มูลวัว ซีโอไลต์ และแร่ลีโอนาร์ไดต์ ต่อผลผลิตและธาตุอาหารของ *Lolium multiflorum* Lam. โดยใช้อัตราของมูลวัวเท่ากับ 20 และ 40 ตันต่อแฮกแตร์ ซีโอไลต์เท่ากับ 250, 500 และ 40 กิโลกรัมต่อแฮกแตร์ และแร่ลีโอนาร์ไดต์เท่ากับ 250, 500 และ 750 กิโลกรัมต่อแฮกแตร์ จากผลการศึกษาพบว่า มูลวัว ซีโอไลต์ และแร่ลีโอนาร์ไดต์ มีผลทำให้น้ำหนักแห้งของ *Lolium multiflorum* Lam. เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชุดควบคุม โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 4, 24 และ 47 ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่าปุ๋ยทุกชนิดสามารถเพิ่มปริมาณธาตุอาหารของ *Lolium multiflorum* Lam. ได้แก่ โพแทสเซียม กำมะถัน แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส และโบรอน ดังนั้นจากการศึกษาจึงสรุปได้ว่าปุ๋ยทุกชนิดโดยเฉพาะซีโอไลต์เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในด้านเกษตรอินทรีย์ เนื่องจากมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและยังช่วยปรับปรุงสภาพดินได้ในระยะยาว

Kołodziej และคณะ (2013) ศึกษาผลของปุ๋ยอินทรีย์ที่มีแร่ลีโอนาร์ไดต์เป็นส่วนผสมต่อผลผลิตของ *Rhodiola rosea* L. จากการศึกษาพบว่า การเติมแร่ลีโอนาร์ไดต์เป็นปัจจัยช่วยเพิ่มผลผลิตของ *Rhodiola rosea* L. และทำให้ผลผลิตที่ได้มีคุณภาพ เช่น ช่วยเร่งความยาวของราก

ช่วยเพิ่มขนาดและความยาวของลำต้น นอกจากนี้ การเติมแร่ลีโอนาร์ไดต์ยังช่วยส่งเสริมกิจกรรมของเอนไซม์ต่างๆ ได้แก่ Dehydrogenases, Acid phosphatase, Urease และ Protease ในดินทรายอีกด้วย

Sugier และคณะ (2013) ศึกษาอิทธิพลของการใช้แร่ลีโอนาร์ไดต์ 4 อัตรา คือ 0, 2, 4 และ 6 กิโลกรัมต่อแฮกแตร์ ที่มีต่อปริมาณผลผลิตของ *Arnica Montana* L. และ Enzymatic activity ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณผลผลิตของ *Arnica Montana* L. เพิ่มขึ้นตามอัตราของแร่ลีโอนาร์ไดต์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีจำนวนของก้านดอกและช่อดอกต่อต้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ แร่ลีโอนาร์ไดต์ยังมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการที่สำคัญของอินทรียวัตถุในดินอีกด้วย

Li และคณะ (2014) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าถ่านหินของโรงผลิตไฟฟ้าในประเทศจีน ด้วยวิธี KOH direct conversion ซีโอไลต์ที่ได้ คือ Merlinoite โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 3 และ 5 โมลาร์ สัดส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเถ้าเท่ากับ 2 และ 5 ลิตรต่อกิโลกรัม อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ คือ 150 และ 200 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เท่ากับ 8, 12 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาคุณสมบัติของการเป็นปุ๋ยละลายช้าโดยการทดสอบกับต้นทานตะวัน พบว่าตัวอย่างสังเคราะห์ที่ให้ผลผลิตดีที่สุด คือ ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ อุณหภูมิ 150 องเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และอัตราส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อเถ้าเท่ากับ 2 ลิตรต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) 160 เซนติโมลต่อกิโลกรัม โดยสรุปแล้วผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า Merlinoite หรือซีโอไลต์สังเคราะห์สามารถใช้เป็นปุ๋ยละลายช้าที่มีประสิทธิภาพสำหรับการปลูกพืช และสามารถนำไปใช้ได้อย่างแพร่หลายกับพืชที่ต้องการธาตุอาหารสูงที่ปลูกในดินที่มีธาตุอาหารจำกัดและใช้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน

Yuan และคณะ (2014) ศึกษาการเตรียมปุ๋ยละลายช้าจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปโม่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความเร็ว 100-700 รอบต่อนาที และศึกษาการชะละลายของปุ๋ยในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้วิธีการชั่งปุ๋ยที่เตรียมได้มา 1 กรัม แช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างของน้ำชะปุ๋ยที่เวลา 24, 250 และ 500 ชั่วโมง น้ำตัวอย่างที่เก็บได้ถูกนำมากรองด้วย Vacuum filter ผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร เพื่อแยกของแข็งออกจากน้ำตัวอย่าง และวัดธาตุอาหารโพแทสเซียมที่ละลายในน้ำตัวอย่างด้วยวิธี Ion chromotography (IC) ผลการวิจัยพบว่า อัตราการละลายของโพแทสเซียมจะลดลงเมื่อความเร็วในการโม่ปุ๋ยสูงขึ้น และเมื่อสัดส่วนของปุ๋ยที่เตรียมมีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะโพแทสเซียมไอออนถูกจับไว้ในโครงสร้างของซิลิกอนไดออกไซด์ได้ดี

Zhang และคณะ (2014) ศึกษาอีกวิธีหนึ่งของการเตรียมปุ๋ยละลายช้าโดยอัดเม็ดโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) เคลือบด้วยแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทดสอบการชะละลายธาตุอาหารโดยชั่งตัวอย่างปุ๋ย 0.2 กรัม แช่ในขวดรูปกรวยที่มีน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วเก็บน้ำตัวอย่างทุกๆ 0.5 หรือ 1 ชั่วโมง ครั้งละ 2 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโพแทสเซียมด้วยวิธี Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) ผลการศึกษาการชะละลายพบว่า เม็ดปุ๋ยที่เคลือบยังคงรูปร่างหลังจากแช่น้ำไว้ 10 ชั่วโมง และในระยะเวลา 7 ชั่วโมงแรก การชะละลายของโพแทสเซียมยังค่อนข้างน้อย คือ ประมาณร้อยละ 34.5 แต่หลังจากนั้นโพแทสเซียมมีการชะละลายออกมาถึงร้อยละ 93.8 ในชั่วโมงที่ 8 และหลังจากนั้นก็กลับมาละลายช้าลง ซึ่งสรุปได้ว่า ปุ๋ยสามารถละลายถึงจุดอิ่มตัวที่ 8 ชั่วโมง แต่สำหรับปุ๋ยที่ไม่ผ่านการเคลือบพบว่า ปุ๋ยละลายอย่างรวดเร็วและใช้เวลาถึงจุดอิ่มตัวเพียง 1 ชั่วโมง

2.13 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า วิธีการที่ใช้ในการชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารในปุ๋ยนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การเคลือบเม็ดปุ๋ยเคมีที่ละลายน้ำได้ง่ายด้วยสารเคลือบประเภทต่างๆ ได้แก่ พอลิไวนิลอะซิเตต พอลิแลกติกแอซิด ชันสน โปรตีนจากกากถั่วเหลือง ไคโตซาน น้ำมันชักแห้งชนิดต่างๆ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่พบว่าเม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบจะทำให้มีการปลดปล่อยธาตุอาหารได้นานขึ้น เนื่องจากการปลดปล่อยธาตุอาหารจะถูกควบคุมด้วยสารที่เคลือบอยู่บนผิวเม็ดปุ๋ย เมื่อเม็ดปุ๋ยสัมผัสกับน้ำ น้ำจะค่อยๆ ซึมผ่านสารเคลือบเข้าไปในเม็ดปุ๋ยจนเกิดแรงดันทำให้สารเคลือบเกิดรอยร้าวหรือรูขนาดเล็ก ธาตุอาหารจึงถูกปลดปล่อยออกมา แต่ในสำหรับสารเคลือบบางประเภทที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ แต่อาจถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในดินเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้ธาตุอาหารค่อยๆ แพร่ออกมาได้เช่นกัน นอกจากนี้ ยังมีอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ย คือ การผสมปุ๋ยเคมีร่วมกับวัสดุที่ใช้สำหรับเป็นตัวชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารภายในปุ๋ย ยกตัวอย่างเช่น แป้ง ซีโอไลต์ วัสดุจำพวกเซลลูโลส เป็นต้น โดยกลไกการปลดปล่อยธาตุอาหารสำหรับวิธีนี้จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้สำหรับเป็นตัวชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหาร เช่น ถ้าหากใช้เป็นวัสดุประเภทแป้ง แป้งที่ใช้ผสมนี้จะกลายเป็นเจลที่ช่วยหุ้มเม็ดปุ๋ยเพื่อป้องกันน้ำไม่ให้ซึมผ่านเข้าไปในเม็ดปุ๋ยได้ง่าย แต่ถ้าวัสดุที่ใช้เป็นซีโอไลต์ ซีโอไลต์จะช่วยจับยึดธาตุอาหารที่อยู่ภายในเม็ดปุ๋ยไม่ให้ละลายไปกับน้ำได้ดีขึ้น โดยอัตราการปลดปล่อยธาตุ

อาหารนั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของสารเคลือบ ความหนาของชั้นเคลือบ ความพรุนบนพื้นผิวของเม็ดปุ๋ย ปริมาณของวัสดุที่ใช้สำหรับเป็นตัวชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหาร นอกจากนี้ สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการปลดปล่อยธาตุอาหาร เช่น พีเอช หรืออุณหภูมิ ก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลการปลดปล่อยธาตุอาหารเช่นเดียวกัน สำหรับในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการผสมปุ๋ยเคมีร่วมกับวัสดุที่ใช้เป็นตัวชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารในการผลิตปุ๋ยละลายช้า โดยจะทำการผลิตปุ๋ยละลายช้าจากวัสดุหลัก คือ แร่ลีโอนาร์ไดต์ สำหรับใช้เป็นตัวให้ธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์แก่พืช เนื่องจาก มีหลายงานวิจัยที่รายงานว่า แร่ลีโอนาร์ไดต์สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตพืช เพราะมีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช เช่น ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม นอกจากนี้ แร่ลีโอนาร์ไดต์ยังสามารถใช้เป็นสารปรับปรุงดินสำหรับดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ และยังช่วยส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินได้อีกด้วย สำหรับวัสดุที่จะใช้เป็นตัวชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารในงานวิจัยครั้งนี้ คือ ซีโอไลต์ และฟางข้าว เนื่องจาก ซีโอไลต์มีโครงสร้างที่เป็นผลึกต่อเนื่องอย่างสม่ำเสมอและมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลขนาดใหญ่ อีกทั้งซีโอไลต์ยังมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) สูง (ปิยะ ดวงพัตรา, 2553) จึงสามารถดูดยึดธาตุอาหารไว้ภายในรูพรุนของโครงสร้างได้ โดยเฉพาะธาตุอาหารที่เป็นประจุบวก อย่างเช่น แอมโมเนียม และโพแทสเซียม ทำให้ธาตุอาหารเคลื่อนที่ออกมาละลายอยู่ในน้ำน้อยลง ยกตัวอย่างในงานวิจัยของ Notario del Pino และคณะ (1995) ที่พบว่า ปุ๋ยที่ทำจากซีโอไลต์จะสามารถชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารได้นานกว่าปุ๋ยโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต สำหรับฟางข้าวนั้นจัดเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส มีโครงสร้างซับซ้อน เกิดจากส่วนประกอบสำคัญ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (พิชญ์สินี วีระไวทยะ และคณะ, 2556) และจากงานวิจัยของ Pruitt (1990) พบว่า วัสดุจำพวกเซลลูโลสนี้สามารถดูดจับปุ๋ยไว้ภายในโครงสร้างได้ ซึ่งทำให้ปุ๋ยนั้นมีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาในเวลาที่ช้าลง ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการผลิตปุ๋ยละลายช้าร่วมกันระหว่างแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว จากนั้นทำการศึกษาหาการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยละลายช้า โดยใช้วิธีการทดสอบในน้ำกลั่นที่ปรับพีเอชเป็น 6.5, 7.5 และ 8.5 เพื่อศึกษาผลของพีเอชในน้ำกลั่นที่มีต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารในปุ๋ยละลายช้า จากนั้นนำไปเขย่าสารตลอดเวลา แล้วทำการวัดปริมาณธาตุอาหารที่ถูกปลดปล่อยออกมาที่เวลาต่างๆ กัน

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์สำหรับการทดลอง
    - ชุดเครื่องกรอง (Vacuum filter)
    - ตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาด 0.25 มิลลิเมตร (Sieve)
    - ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
    - บีกเกอร์ (Beaker)
    - ขวดปรับปริมาตร (Volumatic flask)
    - กระบอกตวง (Cylinder)
    - ปิเปต (Pipet)
    - บิวเรต (Buret)
    - กรวยแก้ว (Glass funnel)
    - ชามระเหย (Evaporating dish)
    - กระดาษกรองใยแก้ว (Glass microfiber filter)
    - กระดาษกรองเบอร์ 5 (Filter paper No.5)
    - พาราฟิล์ม (Parafilm)
    - กระบอกฉีดน้ำ (Foggy spray bottle)
2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
    - ตู้ดูดความชื้น (Desiccators) รุ่น BK (A) ยี่ห้อ BOSSMEN
    - ตู้อบความร้อน (Air oven) รุ่น LDO-100E ยี่ห้อ LABTECH
    - เตาความร้อน (Hot plate) รุ่น YELLOW MAG HS 7 ยี่ห้อ YELLO LINE
    - เตาเผาไฟฟ้า (Muffle furnace) รุ่น EF 11/88 ยี่ห้อ LENTON
    - เครื่องเขย่าอัตโนมัติ (Automatic shaker) รุ่น SD-KR ยี่ห้อ SUPER LINE
    - เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) รุ่น pH 510 ยี่ห้อ EUTECH
    - เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น FX 2000i ยี่ห้อ AND

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

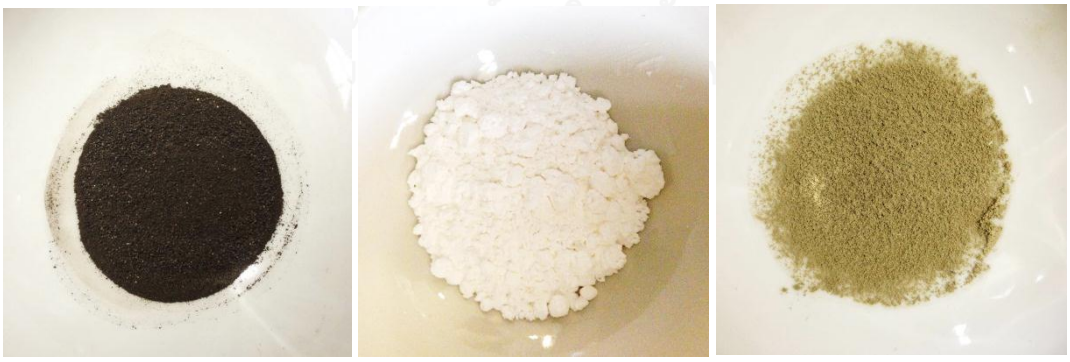
- เครื่องย่อยไนโตรเจน (Kjeldahl Digestion Units) รุ่น DT 220 Digestor 230 V ยี่ห้อ FOSS (ภาพที่ ข.1)
- เครื่องกลั่นไนโตรเจนแบบอัตโนมัติ (Automatic Kjeldahl Distillation Unit) รุ่น Kjeltec 2200 ยี่ห้อ FOSS (ภาพที่ ข.2)
- เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอปซอพต์ชั่น (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) รุ่น 932 Plus ยี่ห้อ GBC (ภาพที่ ข.3)
- เครื่องบดที่มีตะแกรงคัดขนาดอยู่ในตัว (Crumbling machine) รุ่น 25655 Type SK1 ยี่ห้อ Retsch GMBH wesa-Germany (ภาพที่ ข.4)
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Visible Spectrophotometer) รุ่น V-1100 D ยี่ห้อ MAPADA
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น JSM-6400 ยี่ห้อ JEOL

3.1.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. วัสดุที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยละลายช้า แสดงดังภาพที่ 3.1-3.3
   - แร่ลีโอนาร์ไดต์ (Leonardite) จากบริษัท มณีจันทร์ อินดัสทรีย์ จำกัด จังหวัดลำปาง
   - ซีโอไลต์ ชนิด 4A (Zeolite) จากบริษัท พีคิวเคมิคอล จำกัด
   - ฟางข้าว (Rice straw) เก็บตัวอย่างที่จังหวัดปทุมธานี
   - แม่ปุ๋ย (Fertilizer material) ได้แก่ ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ยูเรีย (46-0-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) จากบริษัท วายวีพี เฟอร์ติไลเซอร์ จำกัด
   - เบนโทไนท์ (Bentonite) จากบริษัท ทีซีเอ็ม จำกัด ประเทศจีน
2. ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า สูตร 13-13-13 ยี่ห้อ ออสโมโค้ท แสดงดังภาพที่ 3.4
3. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ไนโตรเจน (Total N)
   - Anhydrous sodium carbonate (Na_2CO_3)
   - Boric acid (H_3BO_3)
   - Ethyl alcohol (C_2H_5OH) 90%

- Hydrochloric acid (HCl) 0.1 N
- Sulfuric acid (H_2SO_4) 98%
- Methyl red ($C_{16}H_{15}N_3O_2$)
- Bromocresol green ($C_{21}H_{14}Br_4O_5S$)
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Kjelblet copper for protein analysis

4. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอสเฟตทั้งหมด (Total P_2O_5)
   - Nitric acid (HNO_3) 69-70 %
   - Perchloric acid ($HClO_4$) 69-70 %
   - Ammonium molybdate ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$)
   - Ammonium metavanadate (NH_4VO_3)
   - Standard phosphorus 1,000 ppm
5. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์โพแทสเซียมทั้งหมด (Total K_2O)
   - Nitric acid (HNO_3) 69-70 %
   - Perchloric acid ($HClO_4$) 69-70 %
   - Standard potassium 1,000 ppm



(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 3.1 ส่วนประกอบที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า (ก) แร่ลิโอนาร์ไดต์ (ข) ซีโอไลต์ (ค) ฟางข้าว

(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 3.2 แม่ปุ๋ยที่ใช้ในงานวิจัย (ก) ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) (ข) ยูเรีย (46-0-0) (ค) โพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60)

Chulalongkorn University

ภาพที่ 3.3 เบนโทไนท์

ภาพที่ 3.4 ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

3.1.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ในการวิจัย

1. ตัวแปรอิสระ
    - ชนิดของส่วนประกอบในปุ๋ยตัวอย่าง
    - ปริมาณของแม่ปุ๋ยในการปรับสัดส่วนธาตุอาหาร
    - พีเอชของน้ำกลั่นที่ใช้ในการวัดการปลดปล่อยธาตุอาหาร
2. ตัวแปรคงที่
    - อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการอบปุ๋ยตัวอย่าง
    - อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาปุ๋ยตัวอย่าง
    - ขนาดของเม็ดปุ๋ย
    - ปริมาณของปุ๋ยที่ใช้ในการวัดการปลดปล่อยธาตุอาหาร
    - ปริมาตรของน้ำกลั่นใช้ในการวัดการปลดปล่อยธาตุอาหาร
3. ตัวแปรตาม
    - ลักษณะสัณฐานวิทยาของปุ๋ยตัวอย่าง
    - การปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่าง

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้จะแบ่งหัวข้อการทดลองออกเป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยละลายช้า การเตรียมปุ๋ยละลายช้า และการศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างเปรียบเทียบกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบตั้งต้นที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า

ทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ได้แก่ พีเอช (pH) ปริมาณเกลือที่ละลายได้ (Electrical conductivity, EC) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cations exchange capacity, CEC) ปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic matter, OM) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนและไนโตรเจน (The ratio of carbon to nitrogen, C/N ratio) และปริมาณของกรดฮิวมิค (Humic acid) วิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน (Total N) ธาตุฟอสฟอรัส (Total P_2O_5) และธาตุโพแทสเซียม (Total K_2O) และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว นอกจากนี้ ยังทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยละลายช้าทางการค้า และแม่ปุ๋ยที่ใช้ในการวิจัยด้วย โดยการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของ

แร่ลีโอนาร์ไดต์ ทำการวิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการภาควิชาทรัพยากรดินและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ห้องปฏิบัติการวิจัยฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร และห้องปฏิบัติการวิจัยศูนย์เทคโนโลยีปุ๋ย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย สำหรับปริมาณธาตุอาหารทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยศูนย์เทคโนโลยีปุ๋ย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยธาตุไนโตรเจนวิเคราะห์ด้วยวิธี Kjeldahl method ธาตุฟอสฟอรัสวิเคราะห์ด้วยวิธี Phosphorus-Vanadomolybdate method ธาตุโพแทสเซียมวิเคราะห์ด้วยวิธี Flame spectrophotometry (ศูนย์เทคโนโลยีปุ๋ย, 2548) และลักษณะสัณฐานวิทยาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) โดยทำการศึกษาที่ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ตารางที่ 3.1 สรุปวิธีการวิเคราะห์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
<u>การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ</u>	
- พีเอช	pH meter
- ปริมาณเกลือที่ละลายได้	Electrical conductivity meter
- ปริมาณอินทรียวัตถุ	Walkley-Black method
- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนและไนโตรเจน	Walkley-Black method
- ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	Buchner funnel filtration method
- ปริมาณของกรดฮิวมิค	NaOH extraction
<u>การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร</u>	
- ธาตุไนโตรเจน	Kjeldahl method
- ธาตุฟอสฟอรัส	Phosphorus-Vanadomolybdate method
- ธาตุโพแทสเซียม	Atomic Absorption Spectrometry method
<u>การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา</u>	Scanning Electron Microscope, SEM

3.2.2 การเตรียมปุ๋ยละลายช้า

การทดลองครั้งนี้ได้ทำการเตรียมตัวอย่างปุ๋ยละลายช้าทั้งหมด 4 สูตร โดยแต่ละสูตรจะมีชนิดและปริมาณของส่วนประกอบที่แตกต่างกัน ดังแสดงตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรผสมของปุ๋ยตัวอย่างต่างๆ

สูตร	ส่วนประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	แร่ลีโอนาร์ไดต์	ซีโอไลต์	ฟางข้าว
1	100	0	0
2	50	50	0
3	50	0	50
4	33.33	33.33	33.33

1. นำฟางข้าวมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดโดยใช้เครื่องบดที่มีตะแกรงคัดขนาดอยู่ในตัว ขนาด 0.25 มิลลิเมตร

2. คัดแยกขนาดของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว โดยใช้ตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาด 0.25 มิลลิเมตร

3. ผสมส่วนประกอบต่างๆ ที่เตรียมได้ดังตารางที่ 3.2 โดยปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 มีส่วนประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์เพียงอย่างเดียว ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 เป็นแร่ลีโอนาร์ไดต์ผสมกับซีโอไลต์ ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 เป็นแร่ลีโอนาร์ไดต์ผสมกับฟางข้าว และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีส่วนประกอบครบทั้ง 3 ชนิด คือ แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว จากนั้นทำการปรับปริมาณธาตุอาหารที่ได้จากการคำนวณการเติมปริมาณแม่ปุ๋ย (ภาคผนวก ค.) เพื่อให้มีธาตุอาหารตรงตามปุ๋ยละลายช้าทางการค้าที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบ (สูตร 13-13-13 ยี่ห้อออสโมโค้ท) โดยการเติมแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ยูเรีย (46-0-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) และปุ๋ยทุกสูตรจะใช้เบนโทไนท์เป็นสารเชื่อมเพื่อทำให้ปุ๋ยขึ้นรูปเป็นเม็ดได้

4. ค่อยๆ ฉีดพ่นน้ำกลั่นโดยใช้กระบอกฉีดน้ำลงในส่วนผสมที่เตรียมได้ ผสมให้ส่วนประกอบต่างๆ เข้ากันจนทั่ว และทำการปั้นเม็ดปุ๋ยให้กลมโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 มิลลิเมตร

5. นำปุ๋ยตัวอย่างสูตรต่างๆ ที่ปั้นเม็ดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ต่ออีก 1 ชั่วโมง (ภาคผนวก ฉ.)

6. ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารและศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของปุ๋ยตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.2.3 การศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่าง

1. ชั่งปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม แช่ลงในน้ำกลั่นที่ปรับพีเอชเป็น 6.5, 7.5 และ 8.5 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

2. ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยพาราฟิล์ม และนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารอัตโนมัติตลอดเวลา

3. ทำการเก็บสารละลายตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ รวม 15 ครั้ง ในระยะเวลา 1 สัปดาห์ โดยเก็บสารละลายตัวอย่างที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 30 นาที, 1 ชั่วโมง, 1 ชั่วโมง 30 นาที, 2 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง 30 นาที, 3 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง, 18 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง, 48 ชั่วโมง และ 1 สัปดาห์

4. นำสารละลายตัวอย่างที่เก็บได้มากรองด้วยชุดกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วเพื่อแยกของแข็งออกจากสารละลายตัวอย่าง

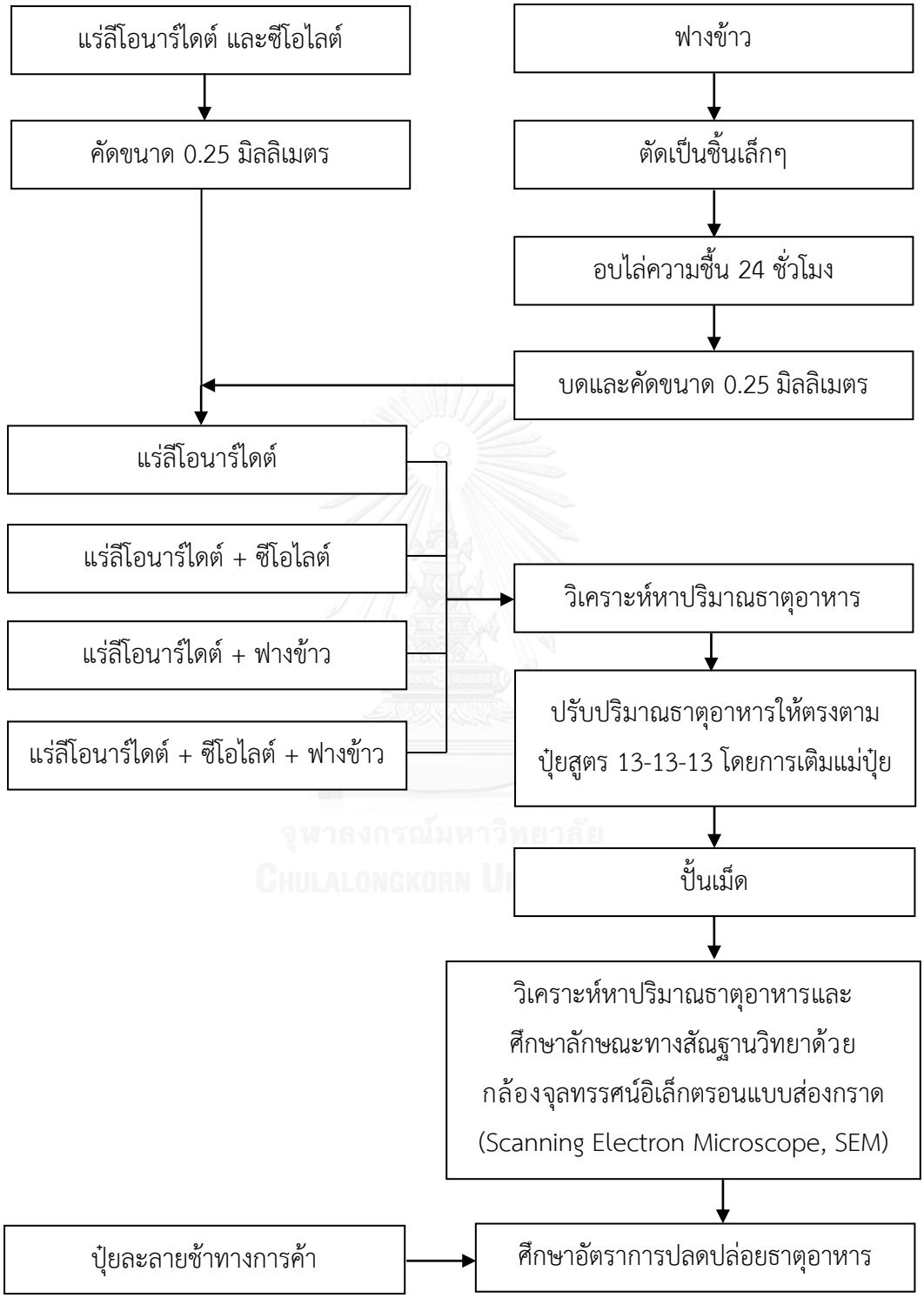
5. นำสารละลายตัวอย่างที่กรองแล้วไปวัดปริมาณธาตุอาหาร ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม

6. ดูแนวโน้มการปลดปล่อยธาตุอาหารในปุ๋ยตัวอย่างสูตรต่างๆ โดยการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุอาหารที่วัดได้เทียบกับเวลาในการเก็บสารละลายตัวอย่าง

7. เปรียบเทียบการปลดปล่อยธาตุอาหารในปุ๋ยตัวอย่างสูตรต่างๆ กับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

Chulalongkorn University

3.3 สรุปแผนการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบตั้งต้นที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า

4.1.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ได้แก่ พีเอช (pH) ปริมาณเกลือที่ละลายได้ (Electrical conductivity, EC) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cations exchange capacity, CEC) ปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic matter, OM) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนและไนโตรเจน (The ratio of carbon to nitrogen, C/N ratio) และปริมาณของกรดฮิวมิค (Humic acid) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาทรัพยากรดินและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ห้องปฏิบัติการวิจัยฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร และห้องปฏิบัติการวิจัยศูนย์เทคโนโลยีปุ๋ย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์

สมบัติทางเคมีและกายภาพ	แหล่งของแร่ลีโอนาร์ไดต์		
	บริษัท มณีจันทร์ อินดัสทรีย์ จำกัด (งานวิจัยนี้)	เหมืองแร่แม่เมาะ (สุชาดา โภชาดม และคณะ, 2556)	เหมืองแร่แม่เมาะ เหมืองแร่เชียงม่วน และเหมืองแร่ลี้ (Ratanaprommanee และ Shutsrirung, 2014)
pH	2.65	4.0	3.58
EC (ds/m)	10.71	4.3	-
CEC (cmol/kg)	53.35	56.6	-
OM (%)	25.23	24.4	29.58
C/N ratio	63.46	24.8	40.12
Humic acid (%)	35.65	-	42.87

จากตารางที่ 4.1 พบว่า แร่ลีโอนาร์ไดต์มีค่าพีเอชเป็นกรดรุนแรงคือมีพีเอชเท่ากับ 2.65 ในขณะที่งานวิจัยของ สุชาดา โภชาดม และคณะ (2556) และงานวิจัยของ Ratanaprommanee และ Shutsrirung (2014) พบว่า แร่ลีโอนาร์ไดต์มีค่าพีเอชประมาณ 4 ค่าพีเอชที่เป็นกรดรุนแรงนี้อาจมีสาเหตุมาจากดินที่ปนเปื้อนมากับแร่ลีโอนาร์ไดต์ เนื่องจากดินในภาคเหนือส่วนใหญ่มีสภาพเป็นกรด (ชูชาติ สันธทรัพย์, 2550) และอาจเกิดจากการที่องค์ประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์มีปริมาณกรดฮิวมิคที่สูงมาก คือ ร้อยละ 35.65 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกรดฮิวมิคที่พบในชุดดิน (ร้อยละ 2.86-3.85) ปุ๋ยหมัก (ร้อยละ 11.40) (จักรพันธ์ อินทจักร, 2555) หรือพีท (ร้อยละ 16.40-26.70) (Garnier-Sillam และคณะ, 1999) เป็นต้น จากผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดฮิวมิคในแร่ลีโอนาร์ไดต์โดยผู้วิจัยนี้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ratanaprommanee และ Shutsrirung (2014) ซึ่ง Khaled และ Fawy (2011) ได้รายงานว่า กรดฮิวมิคมีประโยชน์ในด้านการช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมีและกายภาพของดิน และมีหลายงานวิจัยที่บ่งชี้ว่ากรดฮิวมิคสามารถช่วยเพิ่มการดูดซึมธาตุอาหารของพืช ช่วยเร่งการเจริญเติบโตของรากพืช และช่วยเพิ่มน้ำหนักแห้งของพืชอีกด้วย ดังนั้นในการนำแร่ลีโอนาร์ไดต์มาใช้ประโยชน์อาจมีการยกระดับพีเอชของแร่ลีโอนาร์ไดต์ก่อน จากงานวิจัยของ ณธรรศ สมจันทร์ และ อรวรรณ ฉัตรสีรุ้ง (2557) พบว่า การนำแร่ลีโอนาร์ไดต์ผสมกับโดโลไมต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 จะช่วยยกระดับพีเอชของแร่ลีโอนาร์ไดต์จาก 2.82 เป็น 6.14

สำหรับค่าการนำไฟฟ้าของแร่ลีโอนาร์ไดต์ พบว่ามีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ สุชาดา โภชาดม และคณะ (2556) คือมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 10.71 เดซิซีเมนต่อเมตร (ds/m) ขณะที่แร่ลีโอนาร์ไดต์ในงานวิจัยของ สุชาดา โภชาดม และคณะ (2556) มีค่าการนำไฟฟ้าเพียง 4.3 ds/m ดังนั้น แสดงให้เห็นว่าแร่ลีโอนาร์ไดต์ของผู้วิจัยมีความเค็มมากกว่า ซึ่งระดับความเค็มของแร่ถ้ามีอยู่มากจะกระทบกระเทือนต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่อย่างไรก็ตามพืชบางชนิดอาจจะทนต่อระดับความเค็มของเกลือได้ดีกว่าพืชอีกชนิดหนึ่งได้ ดังนั้น ในการนำแร่ลีโอนาร์ไดต์ไปใช้อาจจะต้องคำนึงถึงชนิดของพืชที่ปลูกด้วย เช่น หากค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 4.1-6.0 ds/m ชนิดของพืชที่เหมาะสำหรับเพาะปลูก คือ กุหลาบ ในขณะที่ถ้าค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 8.1-12.0 ds/m พืชที่เหมาะสม คือ บานบุรี บานไม่รู้โรย ชบา เฟื่องฟ้า เป็นต้น (อุไรลักษณ์ ดวงฉวี, 2556)

นอกจากนี้ แร่ลีโอนาร์ไดต์มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกและปริมาณอินทรียวัตถุอยู่สูง โดยค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 53.35 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (cmol/kg) และมีปริมาณอินทรียวัตถุเท่ากับร้อยละ 25.23 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของสุชาดา โภชาดม และคณะ (2556) และงานวิจัยของ Ratanaprommanee และ Shutsrirung (2014) ดังนั้น แร่ลีโอนาร์ไดต์จึงสามารถช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้กับดิน (Ece และคณะ, 2007) และช่วยเพิ่มค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออนในดินได้ (Sanli และคณะ, 2013) โดยจะช่วยให้ดิน

จับยึดธาตุอาหารได้ดีขึ้น ลดการไหลบ่า หรือถูกชะละลายของธาตุอาหารที่เป็นประจุบวกไปกับน้ำได้ (สุชาดา โภชาดม และคณะ, 2556)

สำหรับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนและไนโตรเจนของแร่ลีโอนาร์ไดต์มีค่าเท่ากับ 63.46 ซึ่งอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนและไนโตรเจนจะมีอิทธิพลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องการไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโต วัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าไนโตรเจนจะเสื่อมสลายช้า (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2550) และถึงแม้ว่าแร่ลีโอนาร์ไดต์จะมีปริมาณอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนและไนโตรเจนค่อนข้างสูง แต่ในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการเติมแม่ปุ๋ยยูเรียลงไปในปุ๋ยทุกสูตร ดังนั้น จึงเหมือนกับเป็นการปรับค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนและไนโตรเจนให้น้อยลง และเป็นการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนให้เพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์มากยิ่งขึ้น

4.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของส่วนประกอบที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า

จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของส่วนประกอบที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า ได้แก่ แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนวิเคราะห์ด้วยวิธี Kjeldahl method ธาตุฟอสฟอรัสวิเคราะห์ด้วยวิธี Phosphorus-Vanadomolybdate method ธาตุโพแทสเซียมวิเคราะห์ด้วยวิธี Atomic Absorption Spectrometry (ศูนย์เทคโนโลยีปุ๋ย, 2548) ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุอาหารของส่วนประกอบที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า

ส่วนประกอบ	แหล่งที่มา	ปริมาณธาตุอาหาร (ร้อยละ)		
		Total N	Total P_2O_5	Total K_2O
แร่ลีโอนาร์ไดต์	บริษัท มณีจันทร์ อินดัสทรีย์ จำกัด (งานวิจัยนี้)	0.63	0.10	1.71
	Ratanaprommanee และ Shutsrirung (2014)	0.41	0.0002	1.52
ซีโอไลต์ 4 A	บริษัท พีคิวเคมิคอล จำกัด (งานวิจัยนี้)	0.11	0.04	0.03
	Yolcu และคณะ (2011)	0.16	0.04	0.32
ฟางข้าว	จังหวัดปทุมธานี (งานวิจัยนี้)	0.84	0.17	0.63
	บุษกร คงสมอรรถ (2555)	0.70	0.15	1.83

จากตารางที่ 4.2 พบว่า แร่ลีโอนาร์ไดต์มีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชในปริมาณที่สูงโดยเฉพาะธาตุไนโตรเจนและธาตุโพแทสเซียม ซึ่งปริมาณของธาตุไนโตรเจนและธาตุโพแทสเซียมที่พบนี้ยังมีความสอดคล้องกับรายงานของ Ratanaprommanee และ Shutsrirung (2014) ที่ศึกษาปริมาณธาตุอาหารของแร่ลีโอนาร์ไดต์ในเหมืองแร่แม่เมาะ จังหวัดลำปาง เหมืองแร่เชียงม่วน จังหวัดพะเยา และเหมืองแร่ลี้ จังหวัดลำพูน โดยแร่ลีโอนาร์ไดต์ที่วิเคราะห์ได้ พบว่า มีปริมาณของธาตุไนโตรเจนร้อยละ 0.63 ธาตุฟอสฟอรัสร้อยละ 0.10 และธาตุโพแทสเซียมร้อยละ 1.71 นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ สุชาดา โภชาดม และคณะ (2556) พบว่า แร่ลีโอนาร์ไดต์ยังประกอบไปด้วยธาตุอาหารอื่นๆ อีก ได้แก่ ธาตุแคลเซียม ธาตุแมงกานีส ธาตุกำมะถัน ธาตุแมกนีเซียม และธาตุเหล็ก ในปริมาณร้อยละ 2.10, 0.000077, 3.00, 0.36 และ 0.54 ตามลำดับ ดังนั้น แร่ลีโอนาร์ไดต์จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารให้กับดิน ซึ่งต่อมาพืชจะสามารถนำธาตุอาหารเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในด้านการเจริญเติบโต (David และคณะ, 1994)

ในส่วนของซีโอไลต์ พบว่า ธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด ที่พบมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับแร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว แต่ในด้านการเกษตรมีงานวิจัยที่นำซีโอไลต์มาผสมร่วมกับปุ๋ย เพื่อให้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดยึดธาตุอาหารไว้ภายในรูพรุนของโครงสร้าง นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Yolcu และคณะ (2011) รายงานว่า ซีโอไลต์สามารถช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร ได้แก่ ธาตุโพแทสเซียม ธาตุกำมะถัน ธาตุแคลเซียม ธาตุแมกนีเซียม ธาตุเหล็ก ธาตุแมงกานีส และธาตุโบรอนได้ ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและยังช่วยปรับปรุงสภาพดินได้ในระยะยาว สำหรับธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Yolcu และคณะ (2011) พบว่า มีธาตุไนโตรเจน และธาตุฟอสฟอรัสที่ใกล้เคียงกันแต่มีธาตุโพแทสเซียมที่สูงกว่า

สำหรับธาตุอาหารที่พบในฟางข้าวก็มีปริมาณสูงเช่นเดียวกัน โดยมีปริมาณของธาตุไนโตรเจนร้อยละ 0.84 ธาตุฟอสฟอรัสร้อยละ 0.17 และธาตุโพแทสเซียมร้อยละ 0.63 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ บุษกร คงสมอรรถ (2555) อีกทั้งจากงานวิจัยของ บุษกร คงสมอรรถ (2555) ยังกล่าวว่า นอกจากฟางข้าวจะมีองค์ประกอบของธาตุไนโตรเจนร้อยละ 0.7 ธาตุฟอสฟอรัสร้อยละ 0.15 และธาตุโพแทสเซียมร้อยละ 1.83 แล้วยังมีองค์ประกอบของธาตุแมกนีเซียมร้อยละ 0.25 ธาตุกำมะถันร้อยละ 0.80 และซิลิการ้อยละ 11.0 ดังนั้น ฟางข้าวจึงมีประโยชน์ในแง่ของการใช้เป็นแหล่งของธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมสำหรับพืชเช่นเดียวกันกับในแร่ลีโอนาร์ไดต์ (Pertuit และคณะ, 2001)

นอกจากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารของส่วนประกอบหลักที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า ได้แก่ แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว แล้วผู้วิจัยยังทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ

อาหารในปุ๋ยละลายช้าทางการค้า และแม่ปุ๋ยที่ใช้ในการวิจัยด้วย เพื่อเป็นการตรวจสอบปริมาณธาตุอาหารที่แท้จริงก่อนทำการเตรียมปุ๋ยละลายช้า ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยละลายช้าทางการค้าและแม่ปุ๋ยที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิด	แหล่งที่มา	ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)		
		Total N	Total P_2O_5	Total K_2O
ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า (สูตร 13-13-13)	งานวิจัยนี้	8.58	19.15	6.13
	ฝ่ายเทคโนโลยีการเกษตร (2558)	7.37	21.06	11.05
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (สูตร 18-46-0)	งานวิจัยนี้	18.05	46.38	0.15
	ฝ่ายเทคโนโลยีการเกษตร (2558)	18.12	42.32	0.09
แม่ปุ๋ยยูเรีย (สูตร 46-0-0)	งานวิจัยนี้	46.22	0.00	0.03
	ฝ่ายเทคโนโลยีการเกษตร (2558)	46.07	0.01	0.01
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (สูตร 0-0-60)	งานวิจัยนี้	0.04	0.00	49.32
	ฝ่ายเทคโนโลยีการเกษตร (2558)	0.00	0.00	51.38

จากตารางที่ 4.3 พบว่า ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีปริมาณของธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 8.58, 19.15 และ 6.13 ตามลำดับ ซึ่งธาตุไนโตรเจนและธาตุฟอสฟอรัสที่วิเคราะห์ได้นี้มีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์โดยฝ่ายเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2558) คือ มีธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ร้อยละ 7.37, 21.06 และ 11.05 ตามลำดับ แต่ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้นี้อาจไม่ตรงตามที่สูตรปุ๋ยระบุไว้บ้าง

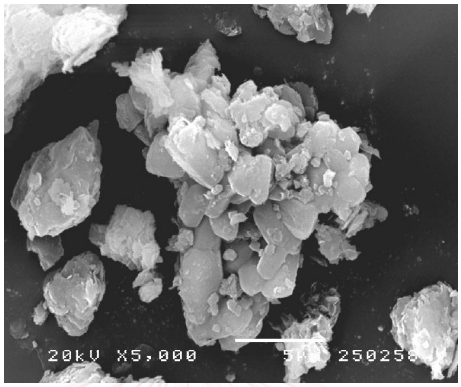
สำหรับปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของแม่ปุ๋ยที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต พบว่า มีปริมาณของธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 18.05, 46.38 และ 0.15 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ที่วิเคราะห์โดยฝ่ายเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2558) คือ มีธาตุ

ไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 18.12, 42.32 และ 0.09 ตามลำดับ นอกจากนี้ ธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ยังตรงตามที่สูตรปุ๋ยระบุไว้ ในขณะที่แม่ปุ๋ยยูเรีย มีปริมาณของธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 46.22, 0.00 และ 0.03 ตามลำดับ ซึ่งตรงตามที่สูตรปุ๋ยระบุไว้และพบว่ายังมีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์โดยฝ่ายเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2558) คือ มีธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 46.07, 0.01 และ 0.01 ตามลำดับ สำหรับแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ พบว่า มีปริมาณของธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 0.04, 0.00 และ 49.32 ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้ใกล้เคียงกับฝ่ายเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2558) คือ มีธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 0.00, 0.00 และ 51.38 ตามลำดับ แต่พบว่าปริมาณธาตุโพแทสเซียมที่วิเคราะห์ได้อาจต่ำกว่าที่สูตรปุ๋ยระบุไว้บ้างเล็กน้อย

ดังนั้น ในการคำนวณหาปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้าจึงจำเป็นต้องอ้างอิงจากปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ตามจริงของปุ๋ยสูตรนั้นๆ โดยในขั้นตอนของการเตรียมปุ๋ยละลายช้าจะทำการปรับสูตรเพื่อให้ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรมีปริมาณธาตุอาหารใกล้เคียงกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ซึ่งมีปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ตามจริงโดยประมาณ คือ ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 9, 19 และ 6 ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันกับแม่ปุ๋ยที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต คือ มีปริมาณของธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ประมาณร้อยละ 18, 46 และ 0 ตามลำดับ แม่ปุ๋ยยูเรียมีปริมาณของธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ประมาณร้อยละ 46, 0 และ 0 ตามลำดับ และแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ มีปริมาณของธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ประมาณร้อยละ 0, 0 และ 49 ตามลำดับ

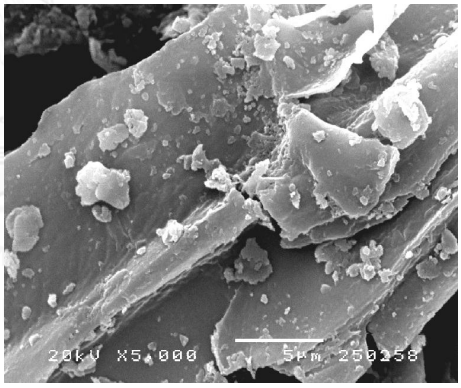
4.1.3 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของส่วนประกอบที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า

จากการตรวจสอบรูปร่างลักษณะของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.1



(ก)

(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ก) แร่ลีโอนาร์ไดต์ (ข) ซีโอไลต์ (ค) ฟางข้าว

จากภาพที่ 4.1 พบว่า แร่ลีโอนาร์ไดต์มีลักษณะการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบในโครงสร้าง จึงทำให้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน อยู่กระจัดกระจาย ซีโอไลต์มีขนาดสม่ำเสมอ ลักษณะเป็นเม็ดสี่เหลี่ยมทรงลูกบาศก์จับตัวกันเป็นกลุ่มผลึก ส่วนฟางข้าวมีลักษณะเป็นเส้นใย โครงสร้างมีการเรียงตัวกันหนาแน่นและแข็งแรง

4.2 การเตรียมปุ๋ยละลายช้า

4.2.1 การหาปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้า

การหาปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้าใช้วิธีคำนวณการเติมปริมาณแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ยูเรีย และโพแทสเซียมคลอไรด์ (คณาจารย์ภาควิชาพืชศาสตร์, 2543) และวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารที่ได้จากการพยายามปรับสูตรเพื่อให้ปุ๋ยตัวอย่างมีปริมาณธาตุอาหารใกล้เคียงกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามากที่สุด (ภาคผนวก ค.) ซึ่งหลังจากที่ทราบปริมาณส่วนประกอบต่างๆ สำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้าแล้ว ได้ทำการปั้นเม็ดและวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร พบว่า ในการขึ้นรูปเป็นเม็ดนั้นทำได้ยากโดยเฉพาะปุ๋ยตัวอย่างที่มีฟางข้าวเป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4) และเมื่อนำปุ๋ยตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหาร พบว่า ปริมาณธาตุอาหารที่พบในปุ๋ยตัวอย่างไม่ใกล้เคียงกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากขั้นตอนการเผาที่ใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูง ทำให้ธาตุอาหารบางส่วนเกิดการสลายเนื่องจาก โดยปกติแล้วในการผลิตปุ๋ยเม็ดสำหรับครัวเรือนส่วนใหญ่จะใช้วิธีการผสมวัตถุดิบลงในเครื่องผสมปุ๋ยเพื่อคลุกเคล้าวัตถุดิบให้เข้ากันและเติมน้ำพอประมาณเพื่อให้วัตถุดิบมีสภาพที่เกาะตัวกันได้ จากนั้นจะนำวัตถุดิบที่ผสมเสร็จแล้วใส่ลงไปในเครื่องปั้นเม็ดหรือเครื่องอัดเม็ด ปุ๋ยที่อัดเม็ดแล้วจะนำไปตากแดดและบรรจุใส่กระสอบ (สำนักงานเกษตรอำเภอศรีสำโรง, 2552) แต่ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยจะใช้วิธีการอบแทนการตากแดด และใช้การเผาเพื่อให้เม็ดปุ๋ยเกิดการคงรูปทรงถาวร และเป็นการเชื่อมยึดอนุภาคต่างๆ ภายในเม็ดปุ๋ยให้ทนต่อการละลายน้ำมากยิ่งขึ้น แต่ในทางกลับกันขั้นตอนดังกล่าวอาจมีผลกระทบต่อปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยตัวอย่าง นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ทำการเติมสารเชื่อม คือ เบนโทไนท์ ลงในส่วนผสมเพื่อช่วยให้การขึ้นรูปปุ๋ยตัวอย่างนั้นทำง่ายขึ้นและทำให้ส่วนประกอบต่างๆ ในปุ๋ยตัวอย่างยึดเกาะกันได้ดียิ่งขึ้น ทนต่อการละลายน้ำมากขึ้น จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารและพยายามปรับปริมาณธาตุอาหารจนทราบปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้าเพื่อให้มีปริมาณธาตุอาหารใกล้เคียงกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ซึ่งส่วนประกอบของปุ๋ยตัวอย่างสูตรต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ส่วนประกอบของปุ๋ยตัวอย่างสูตรต่างๆ

สูตร	ส่วนประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	แร่ลีโอนาร์ไดต์	ซีโอไลต์	ฟางข้าว	เบนโทไนท์	แม่ปุ๋ย		
					18-46-0	46-0-0	0-0-60
1	23	0	0	10	26	33	8
2	6.5	6.5	0	10	25	43	9
3	11	0	11	10	20	41	7
4	6	6	6	10	24	39	9

จากตารางที่ 4.4 ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรจะใช้เบนโทไนท์เป็นสารเชื่อมในอัตราส่วนร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัตถุดิบรวม โดยเบนโทไนท์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 นี้ ถือเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจาก เป็นอัตราส่วนที่น้อยที่สุดที่ทำให้ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรขึ้นรูปได้ ถ้าใช้อัตราส่วนของเบนโทไนท์ที่มากกว่านี้ก็สามารถขึ้นรูปได้เช่นเดียวกันแต่จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย ในทางตรงกันข้ามหากใช้อัตราส่วนของเบนโทไนท์ที่น้อยกว่านี้จะไม่สามารถขึ้นรูปปุ๋ยตัวอย่างให้เป็นเม็ดได้ (ภาคผนวก จ.)

4.2.2 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา

เมื่อนำปุ๋ยละลายช้าทางการค้าและปุ๋ยตัวอย่างทั้ง 4 สูตร ที่เตรียมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงตามภาพที่ 4.2 ไปตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ที่กำลังขยาย 35 เท่า ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.3

(ก)

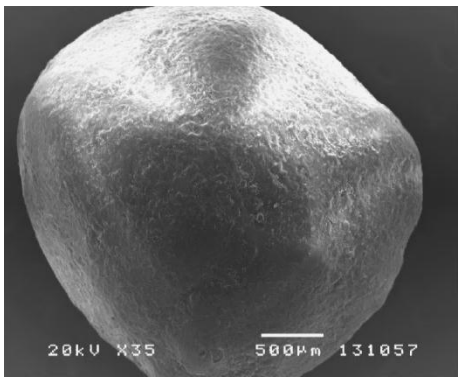
(ข)

(ค)

(ง)

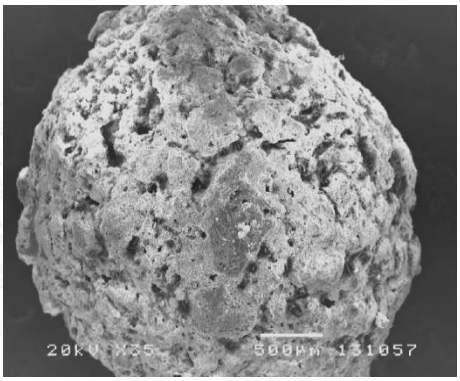
(จ)

ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายปุ๋ยละลายช้าต่างๆ (ก) ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า (ข) ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 (ค) ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 (ง) ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 (จ) ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 โดยปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรเป็นปุ๋ยตัวอย่างที่ได้หลังจากผ่านการเผาเรียบร้อยแล้ว

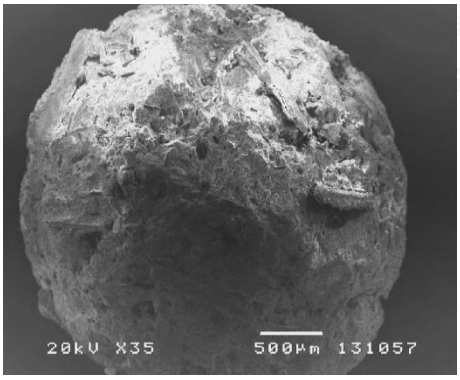


(ก)

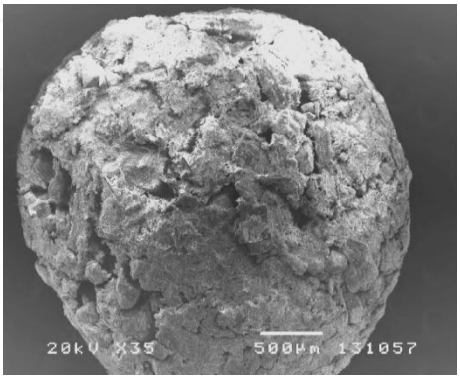
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 35 เท่า
(ก) ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า (ข) ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 (ค) ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2
(ง) ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 (จ) ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ข้างต้น พบว่า ปุ๋ยละลายช้าทางการค้าและปุ๋ยตัวอย่างมีขนาดประมาณ 4 มิลลิเมตร เม็ดมีลักษณะค่อนข้างกลม เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวจะสังเกตเห็นว่าปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีพื้นผิวที่เรียบสม่ำเสมอ มีความมันวาว เนื้อละเอียด ไม่พบรูพรุนบนพื้นผิว ซึ่งน่าจะเกิดจากสารเคลือบที่เคลือบเม็ดปุ๋ยอย่างทั่วถึง ดังนั้น จึงทำให้โอกาสที่น้ำกลั่นจะซึมผ่านเข้าไปละลายธาตุอาหารในปุ๋ยออกมาจึงมีน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารในหัวข้อ 4.3 ที่พบว่าปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารต่ำที่สุด สำหรับลักษณะสัณฐานวิทยาของปุ๋ยตัวอย่างทั้ง 4 สูตร จากภาพจะเห็นว่าเม็ดของปุ๋ยตัวอย่างมีลักษณะค่อนข้างกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า แต่พบว่าลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างมีพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ ขรุขระ และพบรูพรุนค่อนข้างมากอยู่บนเม็ดปุ๋ย จึงทำให้ปุ๋ยตัวอย่างมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารสูงกว่าปุ๋ยละลายช้าทางการค้า โดยปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบที่สุดในจำนวนปุ๋ยตัวอย่างทั้ง 4 สูตร พบรูพรุนค่อนข้างน้อย รูพรุนมีขนาดเล็ก มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 31-63 ไมโครเมตร ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 พบรูพรุนเป็นจำนวนมากและมีขนาดของรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่ คือ ประมาณ 31-625 ไมโครเมตร ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 พบรูพรุนค่อนข้างน้อย ขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 31-188 ไมโครเมตร ส่วนปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 เม็ดปุ๋ยมีพื้นผิวที่ขรุขระมาก พบรูพรุนเป็นจำนวนมาก และมีขนาดของรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่ คือ ประมาณ 31-750 ไมโครเมตร นอกจากนี้ ยังพบรอยแตกร้าวอยู่บนเม็ดปุ๋ย จะสังเกตว่าปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4) จะทำให้เม็ดปุ๋ยเกิดรูพรุนมากกว่าปุ๋ยสูตรที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3) ดังนั้น ปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบจึงมีแนวโน้มที่จะมีการปลดปล่อยธาตุอาหารเร็วกว่าปุ๋ยสูตรที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ

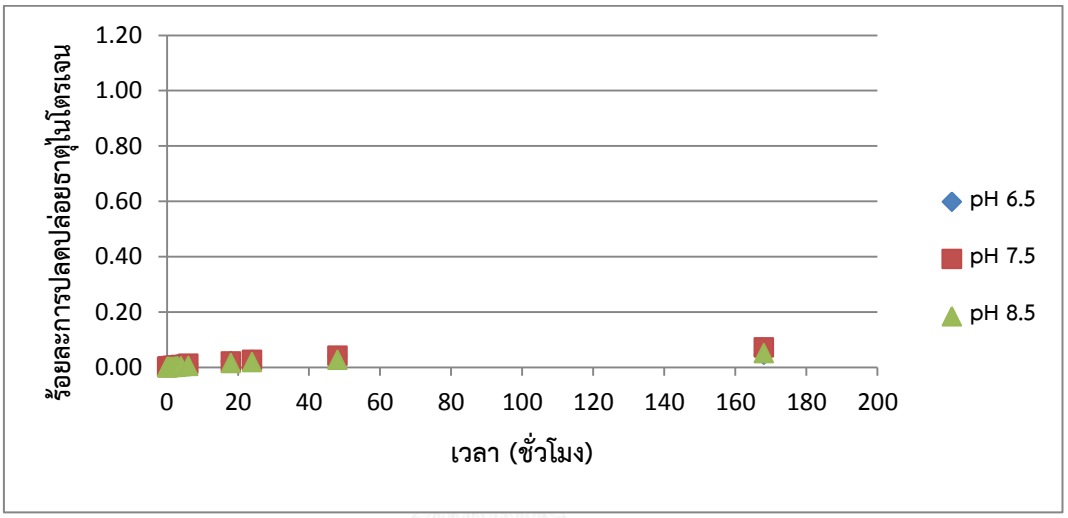
4.3 การศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหาร

ในการทดลองนี้จะทำการทดลองหาปริมาณการปลดปล่อยธาตุอาหาร ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม จากปุ๋ยตัวอย่างที่พีเอช 6.5, 7.5 และ 8.5 ทำการเก็บสารละลายตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ รวม 15 ครั้ง และทำการเปรียบเทียบการปลดปล่อยธาตุอาหารในปุ๋ยตัวอย่างสูตรต่างๆ กับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า โดยสามารถแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ ผลของพีเอชในน้ำกลั่นที่มีต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ย และผลของส่วนประกอบในปุ๋ยที่มีต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร

4.3.1 ผลของพีเอชในน้ำกลั่นที่มีต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร

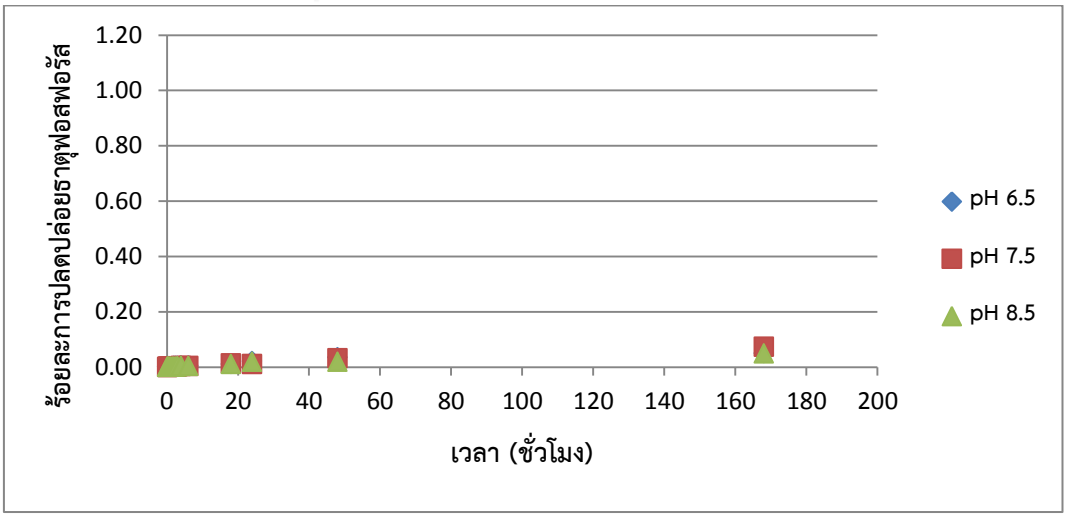
4.3.1.1 การปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

จากการวัดปริมาณธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยละลายช้าทางการค้าในน้ำกลั่นที่พีเอชต่างๆ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อยธาตุอาหารกับเวลาที่พีเอชต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4.4-4.6

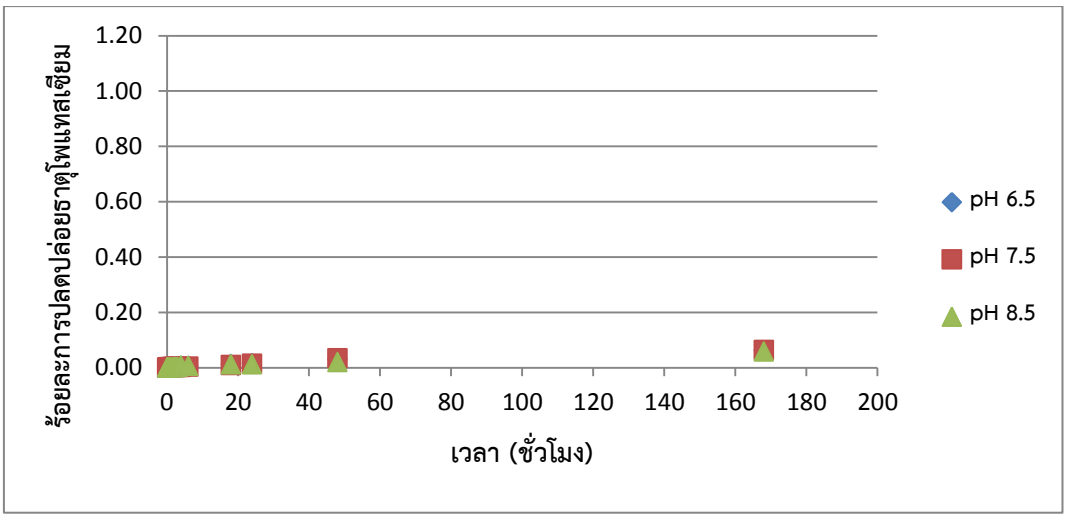


ภาพที่ 4.4 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.5 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า



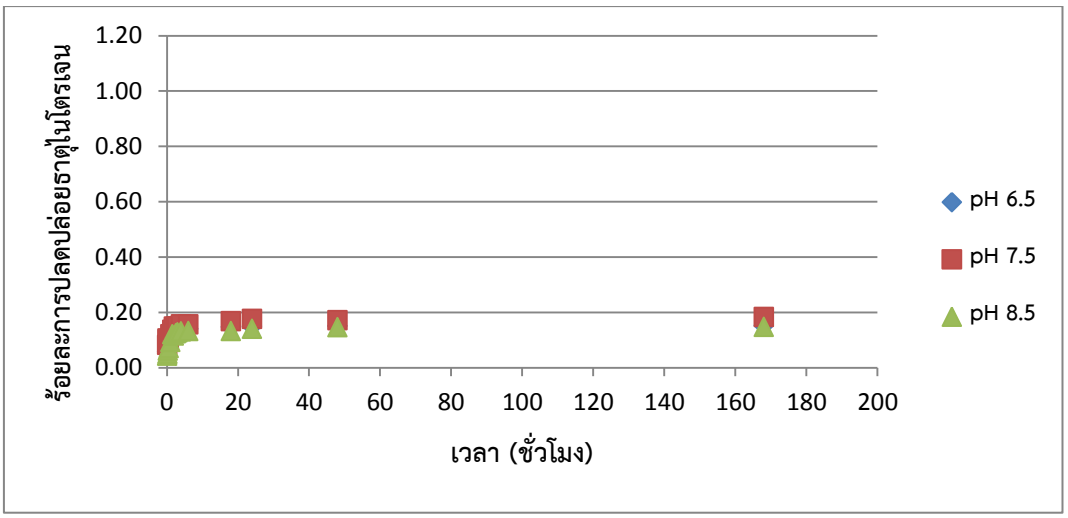
ภาพที่ 4.6 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

ผลการทดลอง พบว่า ที่พีเอช 6.5, 7.5 และ 8.5 การปลดปล่อยธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด ของปุ๋ยละลายช้าทางการค้าไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการที่ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีการปลดปล่อยธาตุอาหารในระยะเวลาต่างๆ ออกมาต่ำมากจนไม่เห็นความแตกต่างของการปลดปล่อยธาตุอาหารที่พีเอชทั้งสาม

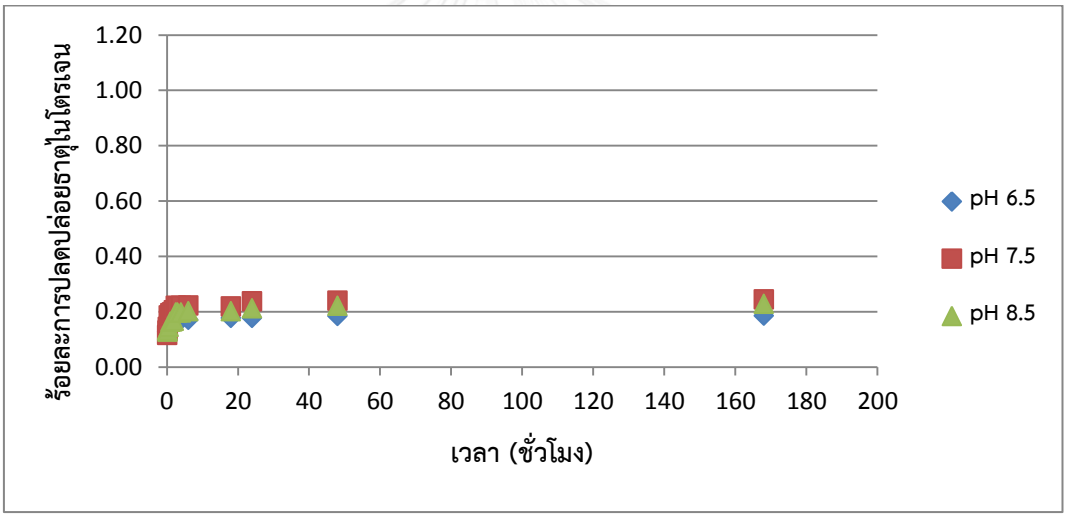
4.3.1.2 การปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่าง

4.3.1.2.1 การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน

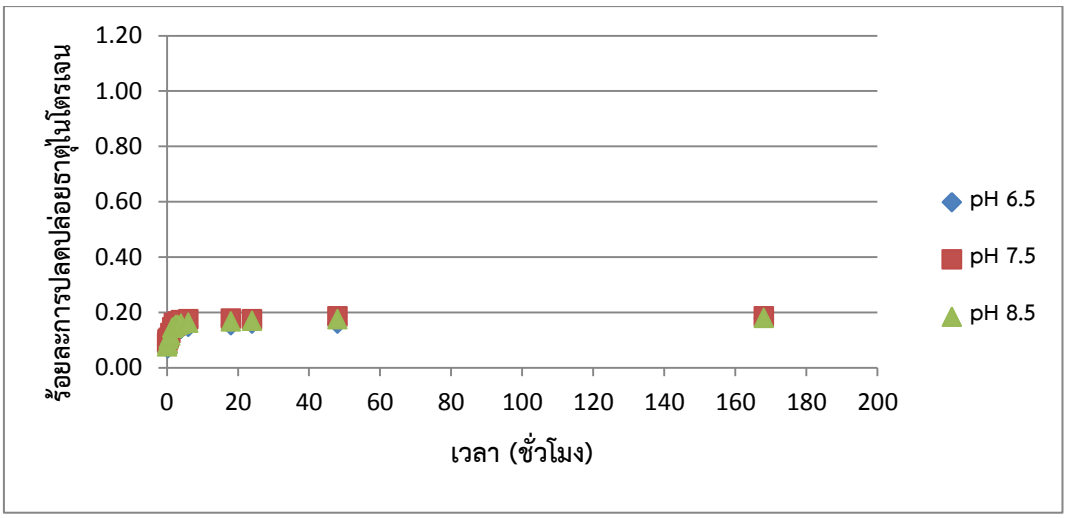
จากการวัดปริมาณธาตุไนโตรเจนในรูปของร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยตัวอย่างในน้ำกลั่นที่พีเอชต่างๆ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนกับเวลาที่พีเอชต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4.7-4.10



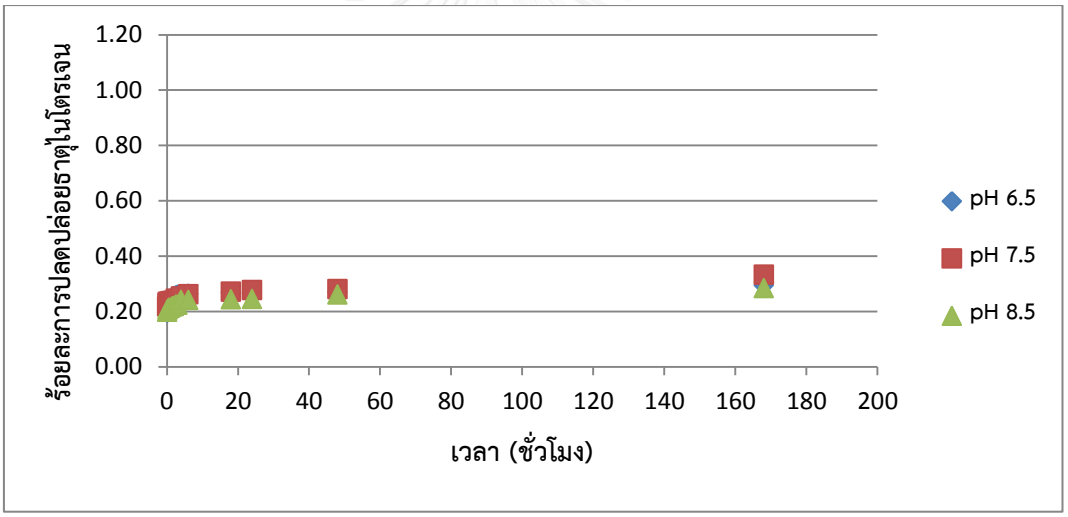
ภาพที่ 4.7 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1



ภาพที่ 4.8 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

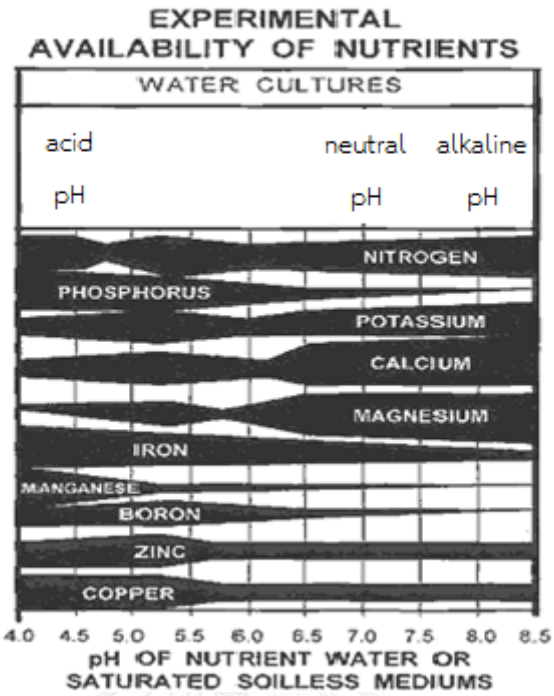


ภาพที่ 4.9 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3



ภาพที่ 4.10 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า ปุ๋ยตัวอย่างทั้ง 4 สูตร มีการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนใกล้เคียงกันในทุกๆ พีเอช ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการที่ระดับพีเอชในช่วง 6.5-8.5 เป็นช่วงที่ธาตุไนโตรเจนมีการปลดปล่อยออกมาใกล้เคียงกันในตัวกลางที่เป็นน้ำหรือวัสดุปลูกที่ไม่ใช่ดิน ดังแสดงในภาพที่ 4.11

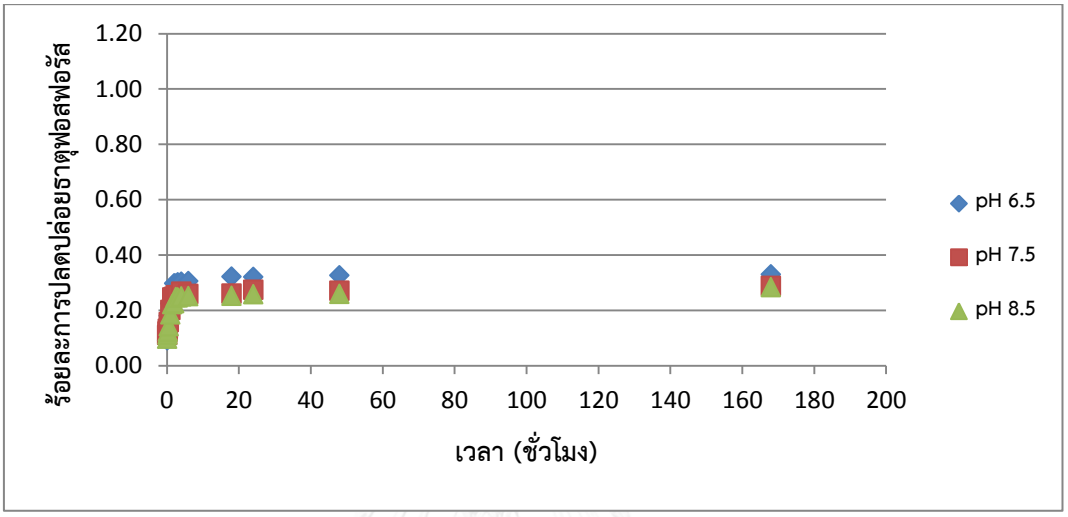


ภาพที่ 4.11 ระดับพีเอชของน้ำหรือวัสดุปลูกที่ไม่ใช่ดินที่มีผลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารพืช ส่วนที่มีขนาดเล็กของธาตุอาหารแสดงว่าละลายได้น้อย ส่วนที่มีขนาดใหญ่แสดงว่าละลายมาก
ที่มา: Jones (2004)

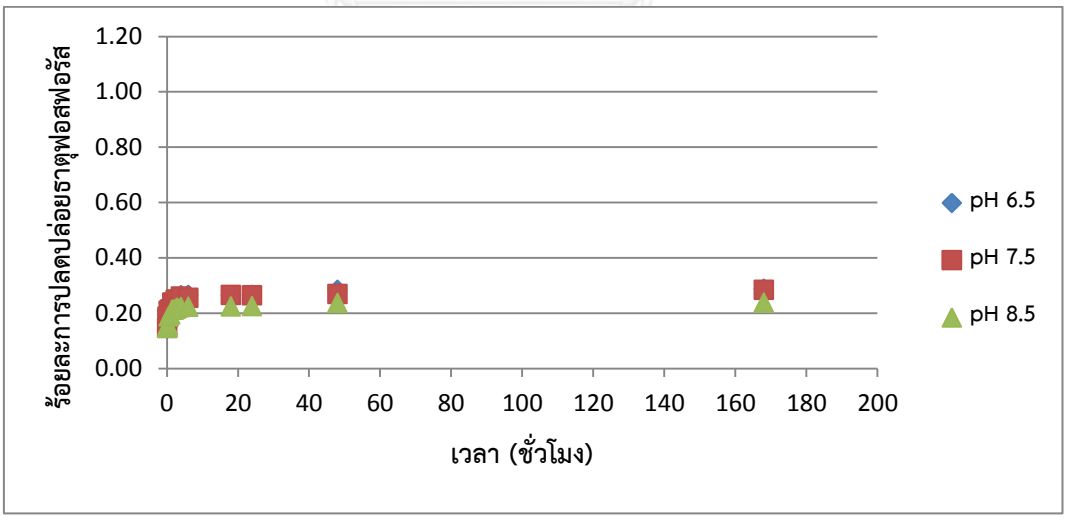
จากภาพที่ 4.11 จะเห็นว่าธาตุไนโตรเจนสามารถละลายได้ดีเกือบทุกพีเอช ดังนั้น ในการปลูกพืชอาจจะต้องคำนึงถึงพีเอชของน้ำที่ใช้รดต้นไม้ หากน้ำที่ใช้รดต้นไม้เป็นน้ำประปา ซึ่งพีเอชของน้ำประปาตามเกณฑ์มาตรฐานของการประปาส่วนภูมิภาคกำหนดให้มีพีเอชอยู่ระหว่าง 6.5-8.5 (การประปาส่วนภูมิภาค, 2550) โดยในช่วงพีเอชดังกล่าวเป็นช่วงที่ส่งผลให้ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจนในระบบปลูกมีสูงขึ้น แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ควรมีการพิจารณาถึงดินที่ใช้ปลูกพืชร่วมด้วย กล่าวคือ ปกติดินส่วนใหญ่จะมีพีเอชอยู่ในช่วง 5.0-8.0 (สำนักสำรวจและวิจัยทรัพยากรดิน กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) ดังนั้น ถ้าหากดินที่ใช้ปลูกพืชมีพีเอชสูงจนเกินไปหรือเป็นดินด่าง (มีค่าพีเอชมากกว่า 7.0) อาจส่งผลให้ปุ๋ยแอมโมเนียมหรือยูเรียเกิดการสูญเสียจากกระบวนการการระเหยของแอมโมเนีย (Ammonia volatilization) ได้เช่นกัน (Agro Services International, 2015)

4.3.1.2.2 การปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัส

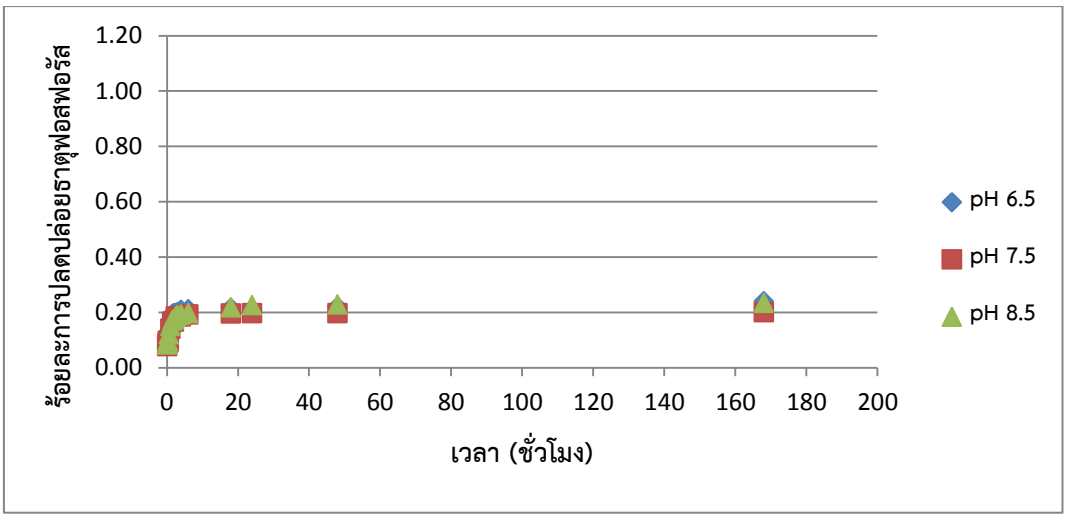
จากการวัดปริมาณธาตุฟอสฟอรัสในรูปของร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยตัวอย่างในน้ำกลั่นที่พีเอชต่างๆ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสกับเวลาที่พีเอชต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4.12-4.15



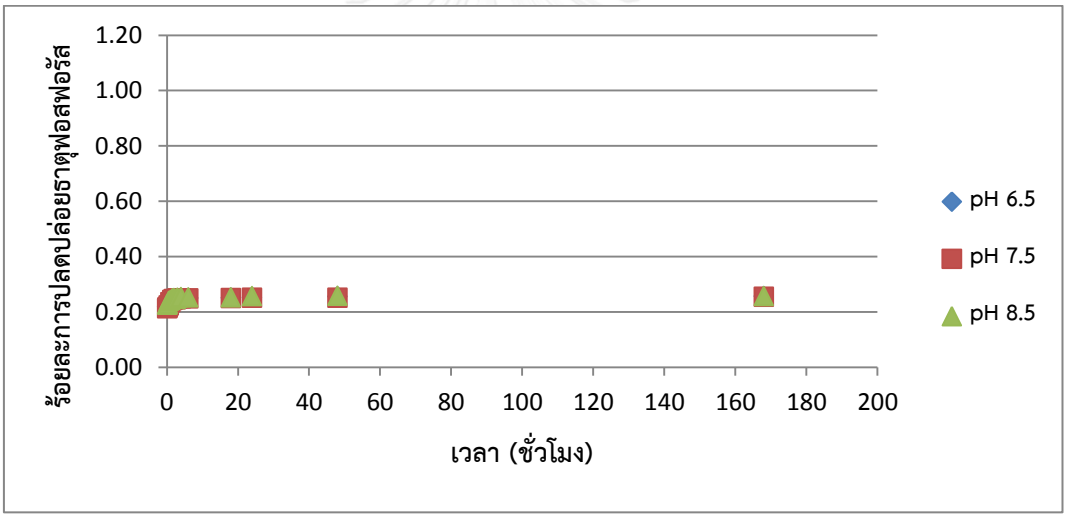
ภาพที่ 4.12 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1



ภาพที่ 4.13 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2



ภาพที่ 4.14 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3



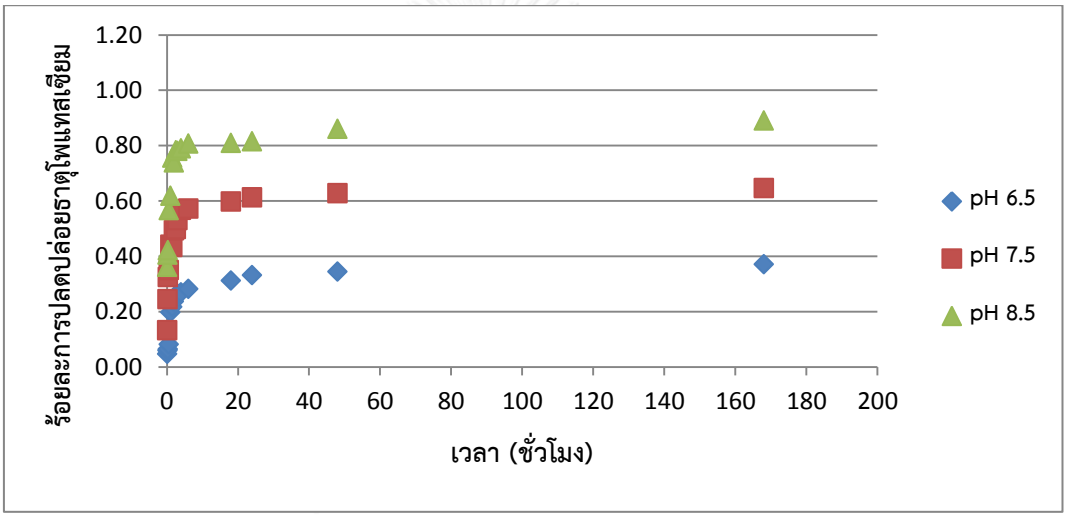
ภาพที่ 4.15 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

จากผลการทดลอง พบว่า ปุ๋ยตัวอย่างทั้ง 4 สูตร มีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสใกล้เคียงกันทุกพีเอช แต่ถ้าหากพิจารณาปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 ในภาพที่ 4.12 จะพบว่าที่พีเอช 6.5 การปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสจะมีแนวโน้มสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่พีเอช 7.5 และ 8.5 เนื่องจาก ที่พีเอชมากกว่า 7.5 แคลเซียมและแมกนีเซียมจะรวมตัวกับฟอสเฟตได้เป็นแคลเซียมฟอสเฟตหรือแมกนีเซียมฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อย (Jensen, 2010) และจากงานวิจัยของ Pruitt (1990) และงานวิจัยของ สุชาดา โภชาดม และคณะ (2556) พบว่า ธาตุแคลเซียมและธาตุแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบที่พบได้ในแร่ลิโอนาร์ไดต์ อีกทั้งยังพบในปริมาณที่

ค่อนข้างสูง (ธาตุแคลเซียมประมาณร้อยละ 1.68-2.10 และธาตุแมกนีเซียมประมาณร้อยละ 0.36) จึงทำให้มีโอกาสที่ฟอสเฟตไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับธาตุแคลเซียมและธาตุแมกนีเซียมเกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยอยู่ในเม็ดปุ๋ย ดังนั้น ในสภาวะที่พีเอชมากกว่า 7.5 จึงพบฟอสฟอรัสในสารละลายน้อยกว่าที่พีเอช 6.5

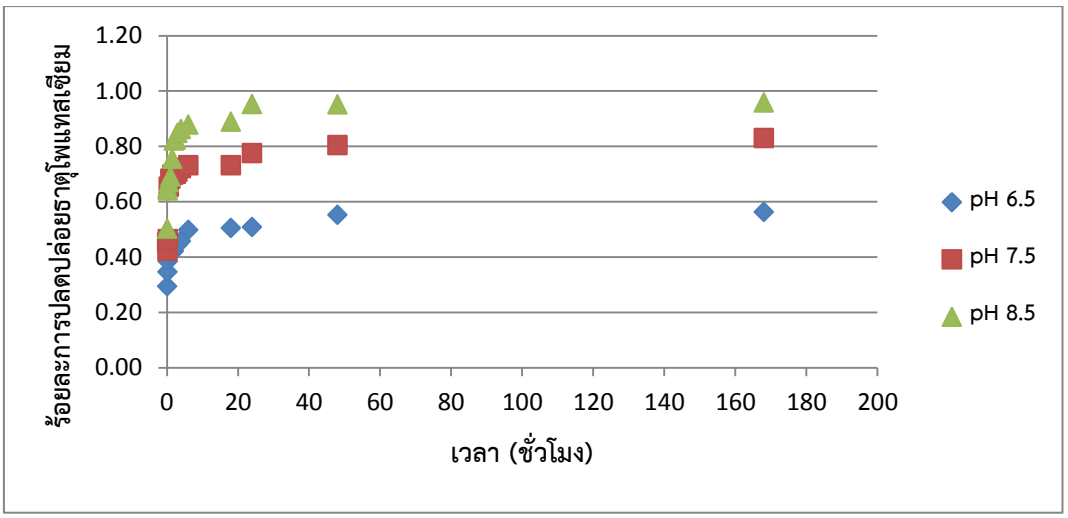
4.3.1.2.3 การปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียม

จากการวัดปริมาณธาตุโพแทสเซียมในรูปของร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยตัวอย่างในน้ำกลั่นที่พีเอชต่างๆ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมกับเวลาที่พีเอชต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4.16-4.19

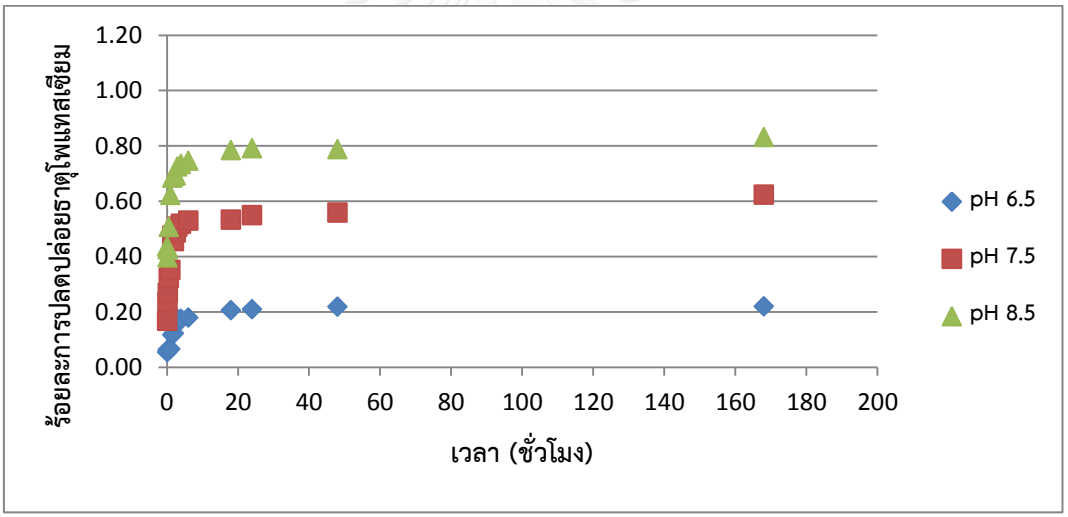


CHULALONGKORN UNIVERSITY

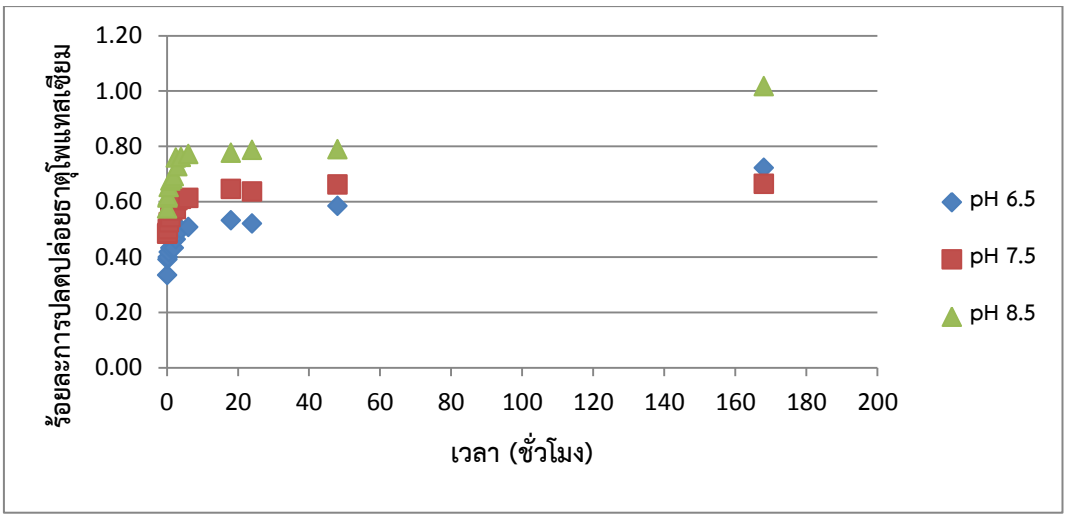
ภาพที่ 4.16 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1



ภาพที่ 4.17 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2



ภาพที่ 4.18 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3



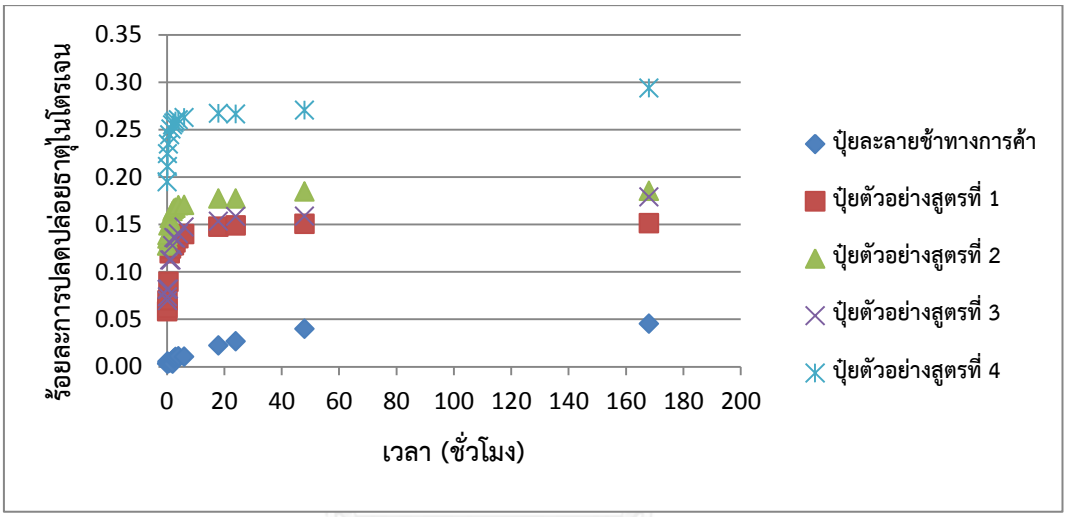
ภาพที่ 4.19 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

จากผลการทดลอง พบว่า การปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างที่พีเอชสูงจะให้การปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมมากกว่าที่พีเอชต่ำเล็กน้อย กล่าวคือ ที่พีเอช 8.5 จึงมีร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมมากกว่าที่พีเอช 7.5 และ 6.5 ตามลำดับ เนื่องจาก มีการรักษาสมดุลของไอออนในน้ำ กล่าวคือ ในน้ำที่มีพีเอชมากกว่า 7.0 จะมีสภาวะเป็นเบส คือ มีปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนอยู่มาก ดังนั้น เมื่อปุ๋ยตัวอย่างมีการละลายน้ำและเกิดการชะละลายของธาตุอาหารในปุ๋ยตัวอย่าง จึงทำให้ไอออนบวกของโพแทสเซียมที่อยู่ในปุ๋ยตัวอย่างเข้ามาเพื่อรักษาสมดุลให้ประจุในน้ำเป็นกลาง ฉะนั้น ที่พีเอช 8.5 ซึ่งมีปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนอยู่มากกว่าที่พีเอชอื่น จึงอาจส่งผลให้ไอออนบวกของโพแทสเซียมในปุ๋ยจะละลายออกมาได้มากกว่าที่พีเอชอื่นเพื่อการรักษาสมดุล ในทำนองเดียวกันกับการรักษาสมดุลของไอออนบริเวณดินที่มีการปลูกพืช ถ้าพืชมีการดูดซึมธาตุอาหารจำพวกไอออนบวก เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม เป็นต้น ดินบริเวณนั้นจะเกิดการสูญเสียไอออนบวกให้แก่ระบบรากพืช จึงทำให้น้ำในดินมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนออกมาแทนที่เพื่อรักษาสมดุลของไอออนในดิน (Spinu และคณะ, 1998)

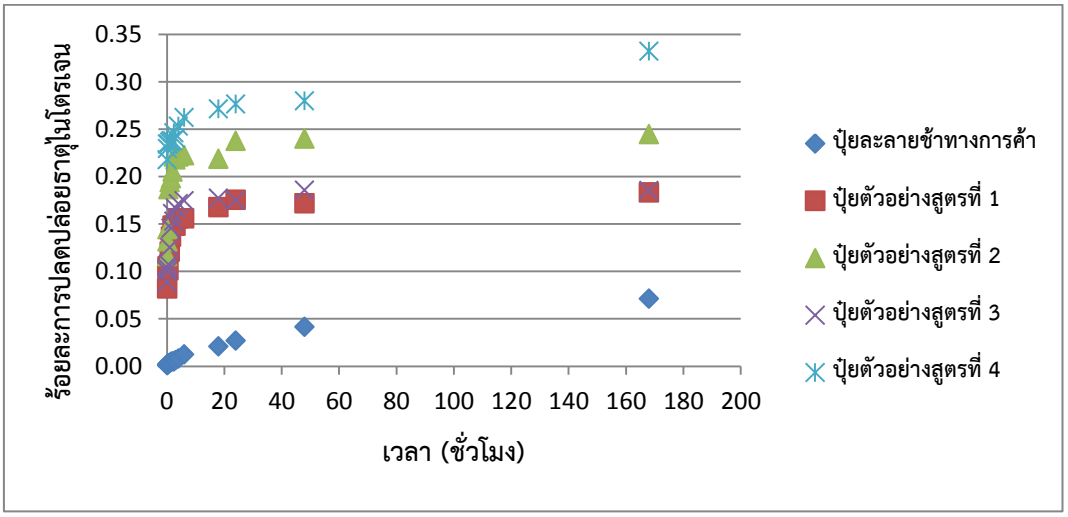
4.3.2 ผลของส่วนประกอบในปุ๋ยตัวอย่างที่มีต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร

4.3.2.1 การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน

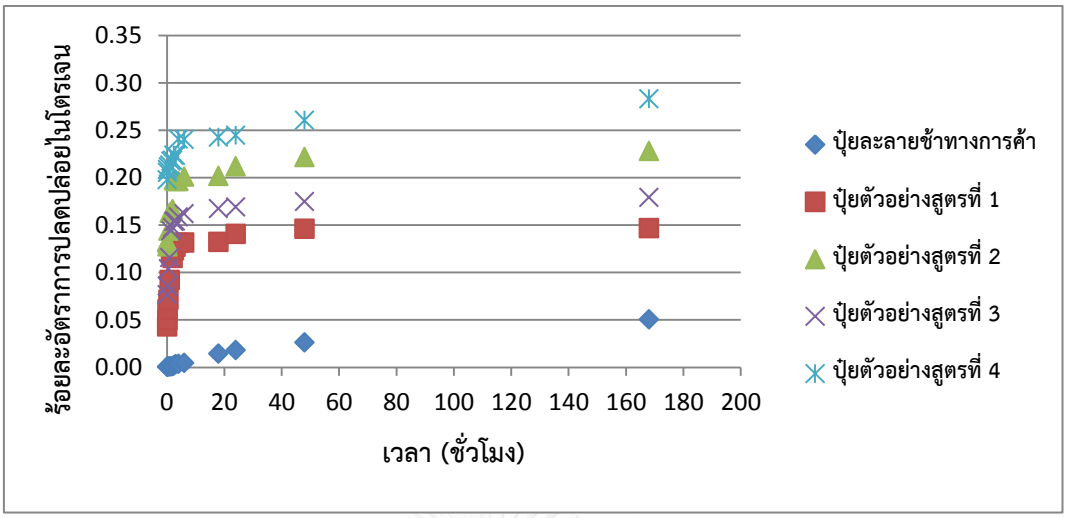
จากการวัดปริมาณธาตุไนโตรเจนในรูปของร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยละลายช้าทางการค้าและปุ๋ยตัวอย่างในน้ำกลั่นที่พีเอช 6.5, 7.5 และ 8.5 ตามลำดับ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนกับเวลา ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.20-4.22 และกราฟแสดงอัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนที่เวลา 5 นาที ดังภาพที่ 4.23



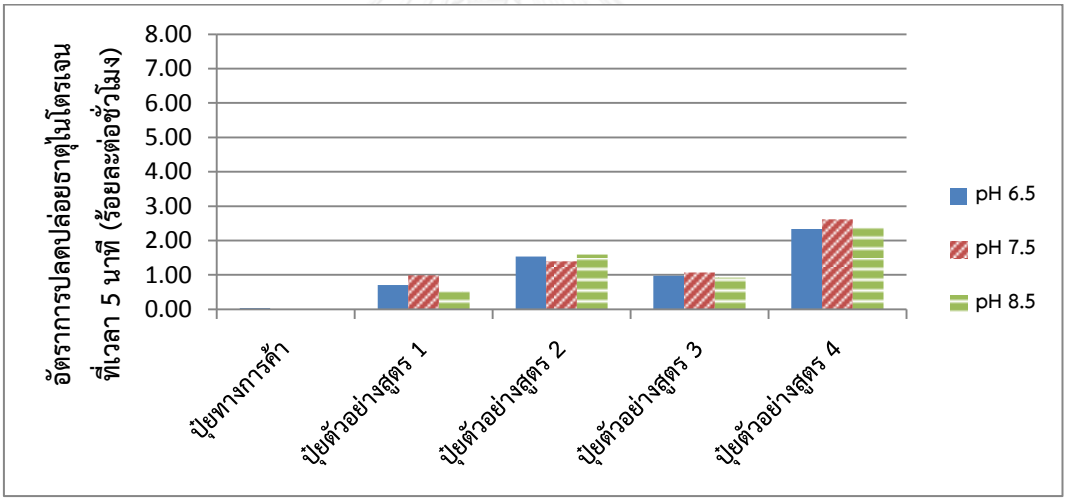
ภาพที่ 4.20 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 6.5



ภาพที่ 4.21 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 7.5



ภาพที่ 4.22 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 8.5



ภาพที่ 4.23 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนที่เวลา 5 นาที
ของปุ๋ยละลายช้าต่างๆ ที่พีเอชแตกต่างกัน

ผลการทดลอง พบว่า ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนต่ำที่สุดและมีอัตราการปลดปล่อยที่คงที่ และเมื่อครบระยะเวลาของการทดลอง 1 สัปดาห์ พบว่า ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนสะสมทั้ง 3 พีเอช เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0.0558 หรือคิดเป็น 0.5580 กรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่างานวิจัยของ วริษฐา แสงฤทธิ์ (2547) เล็กน้อย โดยงานวิจัยของ วริษฐา แสงฤทธิ์ (2547) พบว่าปุ๋ยออสโมโค้ทมีการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนใน

ระยะเวลา 1 สัปดาห์ ออกมาเท่ากับ 0.3004 กรัมต่อลิตร ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากพีเอชของน้ำกลั่นที่ใช้ในการทดสอบการปลดปล่อยธาตุอาหารมีความแตกต่างกัน สำหรับปุ๋ยตัวอย่าง พบว่า ปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4) จะทำให้ปุ๋ยตัวอย่างมีการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนออกมามากกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3) และเมื่อพิจารณาในช่วง 5 นาทีแรกของการทดลอง ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีอัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนออกมามากที่สุด จะพบว่าปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีอัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนออกมาสูงที่สุดในทุกๆ พีเอช นอกจากนี้ หากทำการพิจารณาร้อยละการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างต่างๆ ร่วมกับเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป (The European Standardization Committee, CEN) ที่กำหนดว่าปุ๋ยละลายช้าจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุอาหารไม่เกินร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในเวลา 24 ชั่วโมง (Trenkel, 2010) ผลการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างต่างๆ ในเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช ของปุ๋ยตัวอย่างในเวลา 24 ชั่วโมง

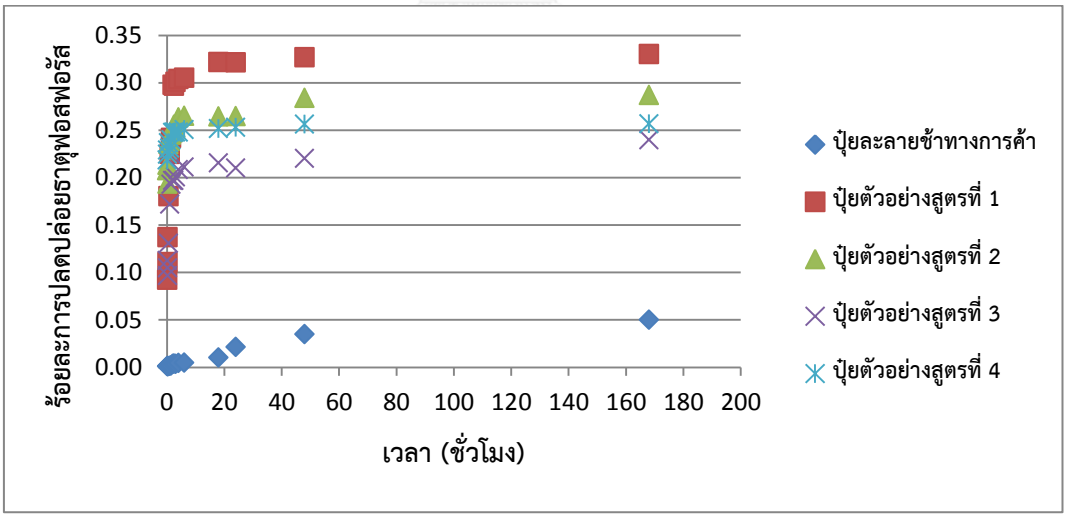
ปุ๋ยละลายช้าต่างๆ	ร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนเฉลี่ย	หมายเหตุ
ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า	0.0240	ตามเกณฑ์ของ CEN ระบุไว้ว่าปุ๋ยละลายช้าจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุอาหารไม่เกินร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ฉะนั้น ปุ๋ยตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีธาตุไนโตรเจนอยู่ร้อยละ 9 ดังนั้น ปุ๋ยตัวอย่างจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนออกมาไม่เกินร้อยละ 1.35 จึงจะจัดเป็นปุ๋ยละลายช้าตามเกณฑ์ของ CEN
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1	0.1551	
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2	0.2090	
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3	0.1675	
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4	0.2625	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

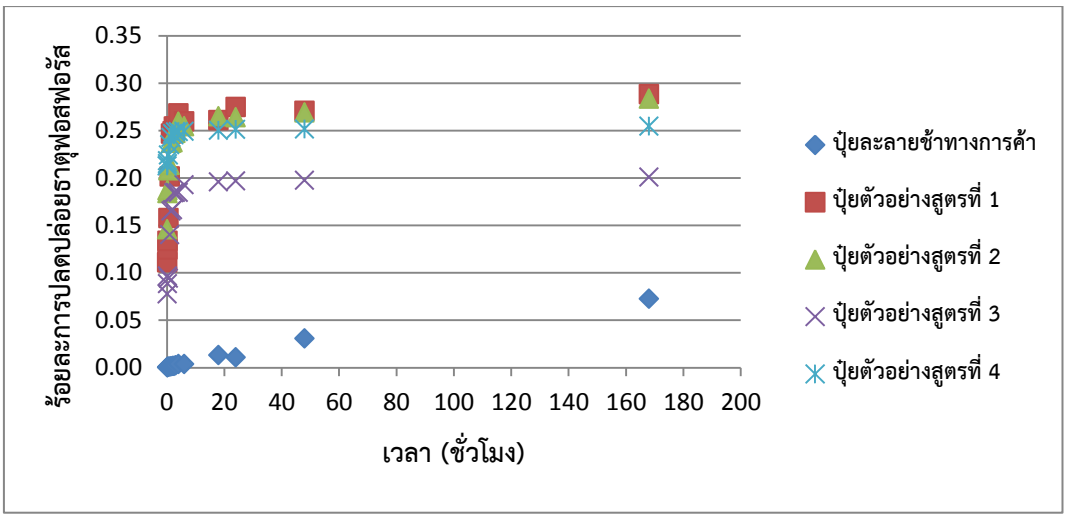
จากตารางแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรจะมีการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ออกมามากกว่าปุ๋ยละลายช้าทางการค้า แต่ถึงอย่างไรก็ตาม การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนนี้ก็ยังเป็นไปตามเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป (The European Standardization Committee, CEN) เนื่องจาก ในระยะเวลา 24 ชั่วโมงของการปลดปล่อยธาตุอาหาร ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรมีการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนออกมาต่ำกว่าร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด (หรือคิดเป็นร้อยละ 1.35) โดยพบว่า ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 มีร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนออกมาน้อยที่สุด รองลงมาเป็นปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 ตามลำดับ

4.3.2.2 การปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัส

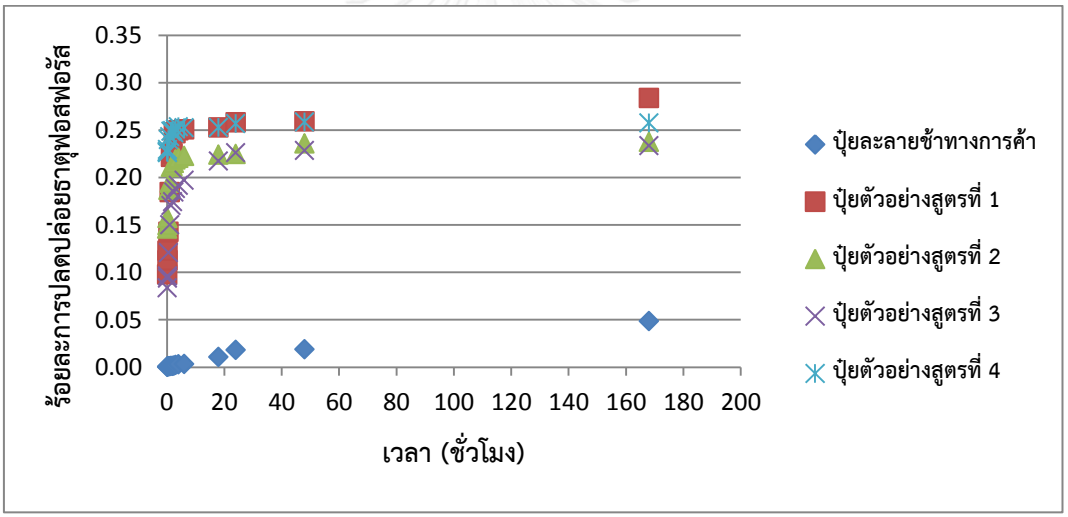
จากการวัดปริมาณธาตุฟอสฟอรัสในรูปของร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยละลายช้าทางการค้าและปุ๋ยตัวอย่างในน้ำกลั่นที่พีเอช 6.5, 7.5 และ 8.5 ตามลำดับ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสกับเวลา ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.24-4.26 และกราฟแสดงอัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสที่เวลา 5 นาที ดังภาพที่ 4.27



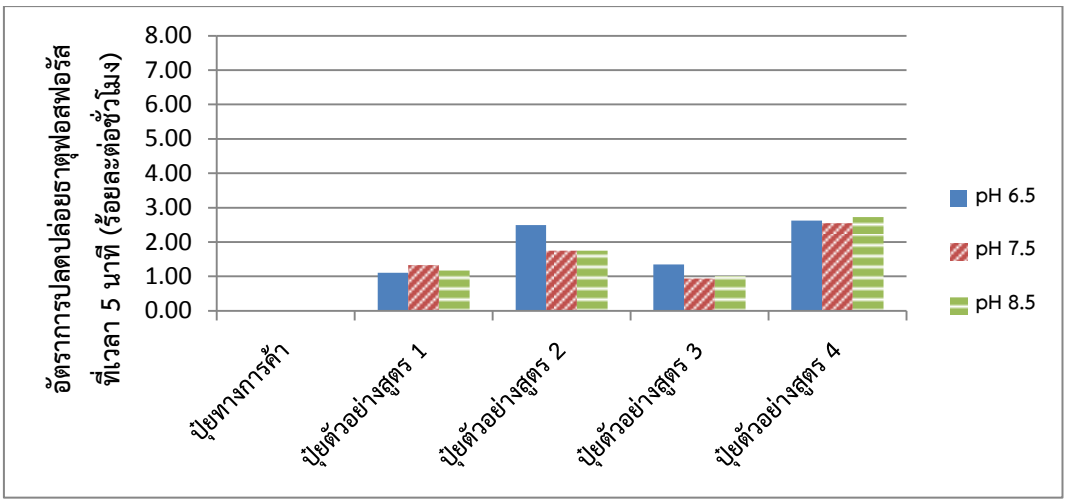
ภาพที่ 4.24 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 6.5



ภาพที่ 4.25 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 7.5



ภาพที่ 4.26 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 8.5



ภาพที่ 4.27 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสที่เวลา 5 นาที ของปุ๋ยละลายช้าต่างๆ ที่พีเอชแตกต่างกัน

ผลการทดลอง พบว่า ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสต่ำที่สุดและมีอัตราการปลดปล่อยที่คงที่ สำหรับปุ๋ยตัวอย่าง พบว่า ในช่วงประมาณ 1 ชั่วโมงแรกของการทดลอง ปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4) จะมีการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสออกมามากกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3) หลังจากนั้นมีแนวโน้มในการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสออกมาค่อนข้างใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาในช่วง 5 นาทีแรกของการทดลอง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 จะมีอัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสออกมามากที่สุด พบว่าปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีอัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสออกมาสูงที่สุดในทุกๆ พีเอช นอกจากนี้ หากทำการพิจารณาร้อยละการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างต่างๆ ร่วมกับเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป (The European Standardization Committee, CEN) ที่กำหนดว่าปุ๋ยละลายช้าจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุอาหารไม่เกินร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในเวลา 24 ชั่วโมง (Trenkel, 2010) ผลการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างต่างๆ ในเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.6

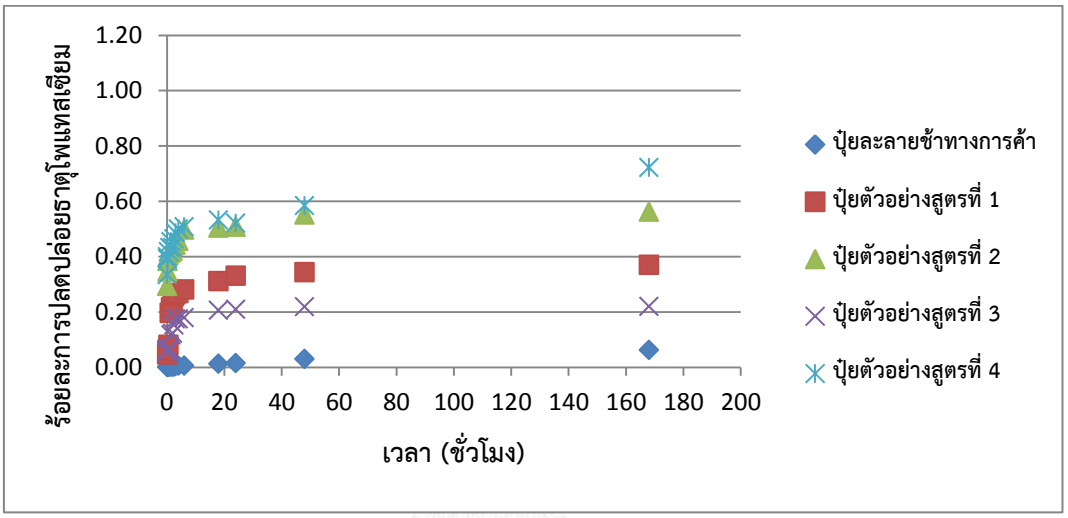
ตารางที่ 4.6 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช ของปุ๋ยตัวอย่างในเวลา 24 ชั่วโมง

ปุ๋ยละลายช้าต่างๆ	ร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสเฉลี่ย	หมายเหตุ
ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า	0.0169	ตามเกณฑ์ของ CEN ระบุไว้ว่า ปุ๋ยละลายช้าจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุอาหารไม่เกินร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ฉะนั้น ปุ๋ยตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีธาตุฟอสฟอรัสอยู่ร้อยละ 19 ดังนั้น ปุ๋ยตัวอย่างจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสออกมาไม่เกินร้อยละ 2.85 จึงจะจัดเป็นปุ๋ยละลายช้าตามเกณฑ์ของ CEN
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1	0.2847	
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2	0.2511	
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3	0.2110	
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4	0.2536	

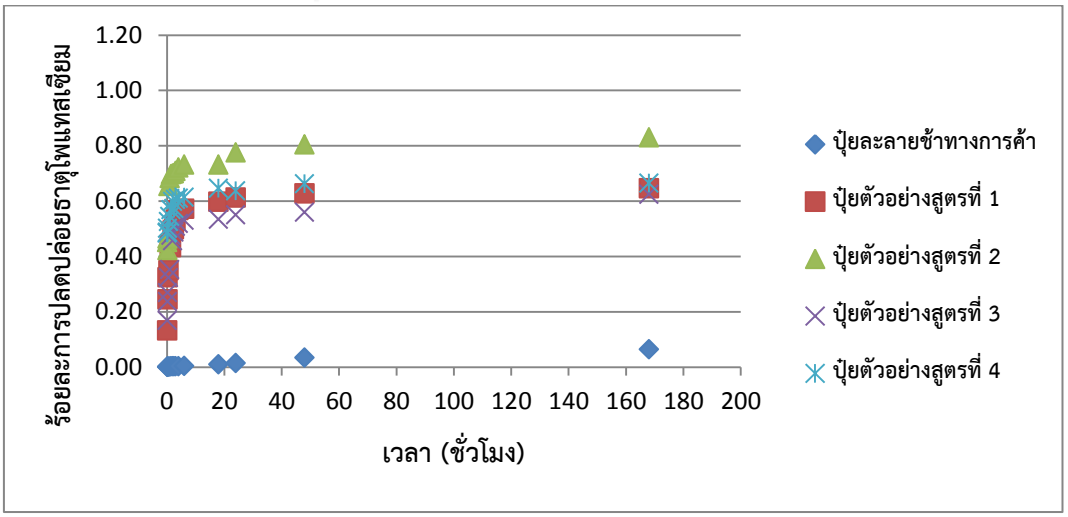
จากตารางแสดงให้เห็นว่า ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรมีการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสออกมามากกว่าปุ๋ยละลายช้าทางการค้า แต่การปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสนี้ยังคงเป็นไปตามเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป (The European Standardization Committee, CEN) เนื่องจาก ในระยะเวลา 24 ชั่วโมงของการปลดปล่อยธาตุอาหาร ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรมีการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสออกมาต่ำกว่าร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด (หรือคิดเป็นร้อยละ 2.85) โดยพบว่า ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 มีร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสออกมาต่ำที่สุด รองลงมา คือ ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 ตามลำดับ

4.3.2.3 การปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียม

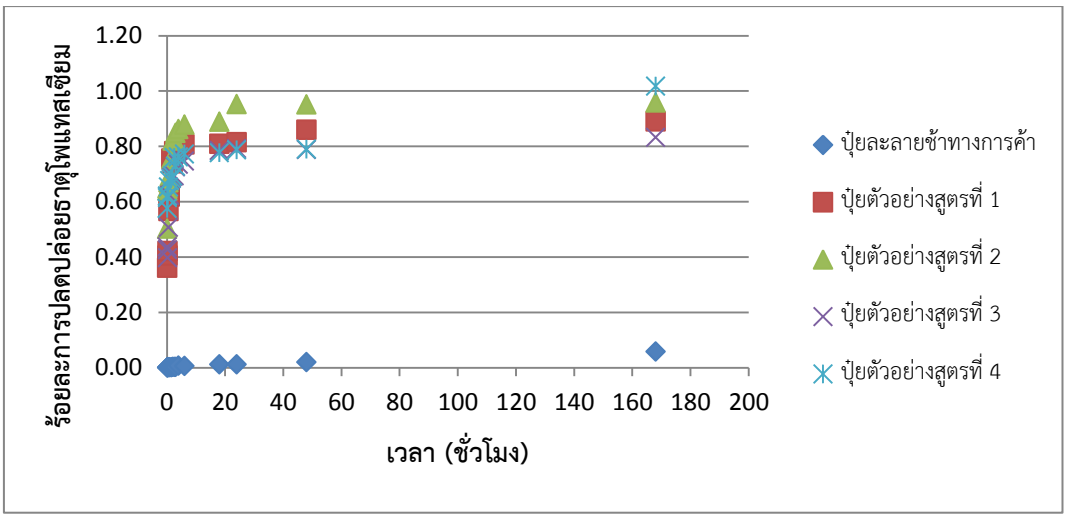
จากการวัดปริมาณธาตุโพแทสเซียมในรูปของร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยละลายช้าทางการค้าและปุ๋ยตัวอย่างในน้ำกลั่นที่พีเอช 6.5, 7.5 และ 8.5 ตามลำดับ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมกับเวลา ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.28-4.30 และกราฟแสดงอัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมที่เวลา 5 นาที ดังภาพที่ 4.31



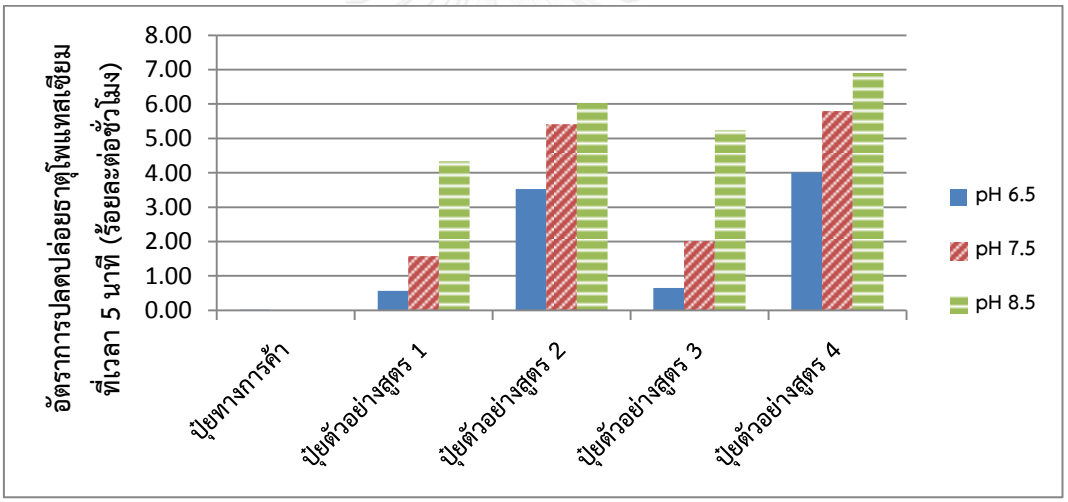
ภาพที่ 4.28 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 6.5



ภาพที่ 4.29 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 7.5



ภาพที่ 4.30 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของตัวอย่างปุ๋ยที่พีเอช 8.5



ภาพที่ 4.31 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมที่เวลา 5 นาที
ของปุ๋ยละลายช้าต่างๆ ที่พีเอชแตกต่างกัน

ผลการทดลอง พบว่า ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมต่ำที่สุดและมีอัตราการปลดปล่อยที่คงที่ เช่นเดียวกันกับการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนและธาตุฟอสฟอรัส โดยเมื่อครบระยะเวลาของการทดลอง 1 สัปดาห์ พบว่า ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมสะสมทั้ง 3 พีเอช เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0.0618 หรือคิดเป็น 0.6180 กรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่างานวิจัยของ วริษฐา แสงฤทธิ์ (2547) ที่พบว่าปุ๋ยออสโมโค้ทมีการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในระยะเวลา 1 สัปดาห์ ออกมาประมาณ 0.3000 กรัมต่อลิตร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก

พีเอชของน้ำกลั่นที่ใช้ในการทดสอบมีความแตกต่างกัน ในขณะที่ปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4) มีแนวโน้มปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมมากกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3) โดยเฉพาะที่พีเอช 6.5 นอกจากนี้ ในช่วง 5 นาทีแรกของการทดลอง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีอัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมออกมามากที่สุด จากกราฟพบว่าปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีอัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมออกมาสูงที่สุดในทุกๆ พีเอช นอกจากนี้ หากทำการพิจารณาร้อยละการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างต่างๆ ร่วมกับเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป (The European Standardization Committee, CEN) ที่กำหนดว่าปุ๋ยละลายช้าจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุอาหารไม่เกินร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในเวลา 24 ชั่วโมง (Trenkel, 2010) ผลการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างต่างๆ ในเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช ของปุ๋ยตัวอย่างในเวลา 24 ชั่วโมง

ปุ๋ยละลายช้าต่างๆ	ร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมเฉลี่ย	หมายเหตุ
ปุ๋ยละลายช้าทางการค้า	0.0136	ตามเกณฑ์ของ CEN ระบุไว้ว่าปุ๋ยละลายช้าจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุอาหารไม่เกินร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ฉะนั้น ปุ๋ยตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีธาตุโพแทสเซียมอยู่ร้อยละ 6 ดังนั้น ปุ๋ยตัวอย่างจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมออกมาไม่เกินร้อยละ 0.9 จึงจะจัดเป็นปุ๋ยละลายช้าตามเกณฑ์ของ CEN
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1	0.5859	
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2	0.7451	
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3	0.5169	
ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4	0.6481	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางแสดงให้เห็นว่า ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรมีการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมออกมามากกว่าปุ๋ยละลายช้าทางการค้า แต่ถึงอย่างไรก็ตามการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมนี้ยังคงเป็นไปตามเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป (The European Standardization Committee, CEN) เนื่องจาก ปุ๋ยตัวอย่างมีการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมออกมาไม่เกินร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง (หรือคิดเป็นร้อยละ 0.9) โดยพบว่าปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 มีร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมออกมาน้อยที่สุด รองลงมาเป็นปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 ตามลำดับ

จากผลของส่วนประกอบในปุ๋ยตัวอย่างที่มีต่อการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าปุ๋ยตัวอย่างทั้ง 4 สูตร มีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด สูงกว่าปุ๋ยละลายช้าทางการค้า เนื่องจาก ปุ๋ยตัวอย่างที่มีการผสมส่วนประกอบต่างๆ เข้าด้วยกันหลายชนิด อาจทำให้เนื้อปุ๋ยที่ผสมแล้วไม่เป็นเนื้อเดียวกันเท่าที่ควรจึงทำให้เกิดรูพรุนอยู่บนพื้นผิวขึ้นได้ นอกจากนี้ ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตมีการเผาปุ๋ยตัวอย่างเพื่อให้เม็ดปุ๋ยเกิดการคงรูปทรงถาวร และเป็นการเชื่อมยึดอนุภาคต่างๆ ภายในเม็ดปุ๋ยให้ทนต่อการละลายน้ำมากยิ่งขึ้น แต่ในทางกลับกันขั้นตอนดังกล่าวอาจส่งผลให้ปุ๋ยตัวอย่างเกิดรูพรุนอยู่บนพื้นผิว เพราะเมื่อเผาจะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์หรือน้ำภายในเม็ดปุ๋ยทำให้พื้นผิวของปุ๋ยเกิดช่องว่างหรือรูพรุนขึ้น (คชินท์ สายอินทวงศ์, 2551) ดังแสดงในภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในหัวข้อที่ 4.2.2 ที่พบว่า พื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างจะพบรูพรุนอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 พบว่า รูพรุนมีขนาดค่อนข้างใหญ่และกระจายอยู่ทั่วผิวของเม็ดปุ๋ย อีกทั้งในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการเคลือบพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างเหมือนปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ดังนั้น เมื่อนำปุ๋ยตัวอย่างแช่ลงในน้ำกลั่น จึงทำให้น้ำสามารถซึมผ่านเม็ดและช่องว่างบนพื้นผิวได้ดี ในขณะเดียวกัน ปุ๋ยตัวอย่างซึ่งมีลักษณะเปราะอยู่แล้วเมื่อโดนน้ำจึงทำให้เม็ดปุ๋ยเกิดการกร่อนและแตกได้ง่าย ดังนั้น ปุ๋ยตัวอย่างจึงมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารสูงกว่าปุ๋ยละลายช้าทางการค้าที่มีการเคลือบผิวด้วยเรซินธรรมชาติ ทำให้พื้นผิวของปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีลักษณะเรียบและไม่พบรูพรุนอยู่บนพื้นผิว จึงทำให้โอกาสที่น้ำจะซึมผ่านชั้นเคลือบเรซินเข้าไปละลายธาตุอาหารที่อยู่ภายในเม็ดปุ๋ยเกิดขึ้นได้ยาก อีกทั้ง หลังจากที่น้ำมีการซึมผ่านเข้าไปในเม็ดปุ๋ยละลายช้าทางการค้าและเกิดการละลายของธาตุอาหารภายในเม็ดปุ๋ย แต่ธาตุอาหารดังกล่าวนี้จะไม่สามารถปลดปล่อยออกมาได้จนกว่าเม็ดปุ๋ยจะเกิดการขยายตัวมากพอจนเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆ อยู่บนผิวเคลือบ ธาตุอาหารจึงจะสามารถค่อยๆ ซึมผ่านชั้นเคลือบออกมาได้ (Scotts Australia, 2015)

นอกจากนี้ หากเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารระหว่างปุ๋ยตัวอย่างทั้ง 4 สูตร จะพบว่า ผลการทดลองที่ได้นั้นไม่ตรงตามสมมติฐาน กล่าวคือ จากสมมติฐานปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่มีส่วนประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์เพียงอย่างเดียวจะมีการปลดปล่อยธาตุอาหารสูง

ที่สุด และปุ๋ยตัวอย่างที่ให้การปลดปล่อยธาตุอาหารต่ำที่สุด คือ ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่มีส่วนประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว ทั้งนี้ปุ๋ยตัวอย่างที่มีส่วนประกอบร่วมกันระหว่างซีโอไลต์ และฟางข้าว จะทำให้ธาตุอาหารภายในปุ๋ยถูกดูดยึดไว้ภายในรูพรุนของโครงสร้างซีโอไลต์และฟางข้าวได้ ทำให้ธาตุอาหารเคลื่อนที่ออกมาละลายอยู่ในน้ำน้อยกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์และฟางข้าวเป็นส่วนประกอบ แต่จากการทดลอง พบว่า ปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4) จะมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด มากกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3) โดยเฉพาะในปุ๋ยตัวอย่างที่มีส่วนประกอบครบทั้ง 3 ชนิด คือ แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4) จะมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารสูงกว่าปุ๋ยตัวอย่างสูตรอื่นๆ ดังนั้น วัสดุที่จะใช้เป็นตัวชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารในงานวิจัยครั้งนี้ คือ ซีโอไลต์ และฟางข้าว ไม่สามารถทำให้ปุ๋ยมีการปลดปล่อยธาตุอาหารที่ช้าลงได้ ซึ่งสอดค้องกับลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวเม็ดปุ๋ยที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในหัวข้อ 4.2.2 ที่พบว่า ปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบจะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระมาก มีขนาดของรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่กว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ ทั้งนี้ การที่ปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบให้อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารค่อนข้างสูง อาจเกิดจากการที่ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบไปด้วยโพรงหรือรูพรุนจำนวนมากที่มักมีโมเลกุลของน้ำอยู่ภายใน ซึ่งสามารถกำจัดโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับไว้ในโพรงหรือรูพรุนของซีโอไลต์ได้โดยกระบวนการการให้ความร้อน (พลอยพรรณ จริงจิตต์, 2554) ดังนั้น เมื่อมีการเผาปุ๋ยตัวอย่างจึงเป็นการไล่โมเลกุลของน้ำ และทำให้เกิดช่องว่างภายในเม็ดปุ๋ยจำนวนมาก ค่าความหนาแน่น (Bulk density) ของเม็ดปุ๋ยจึงต่ำ โครงสร้างของเม็ดปุ๋ยจึงเปราะแตกหักง่ายเมื่อโดนน้ำ อีกทั้งการที่ซีโอไลต์เมื่อได้รับความร้อนแล้ว โมเลกุลของน้ำในช่องว่างจะระเหยออกมา ผิวด้านนอกของเม็ดปุ๋ยจะร้อนเร็วกว่าด้านในเม็ดปุ๋ยที่ได้รับความร้อนช้ากว่า จึงเกิดการหดตัวไม่เท่ากันและทำให้เกิดรูพรุนหรือรอยแตกร้าวอยู่บนพื้นผิว (โกมล รักษ์วงศ์, 2538) ทำให้น้ำซึมผ่านเม็ดปุ๋ยได้ดีและธาตุอาหารก็สามารถชะละลายออกมาตามรูพรุนหรือรอยแตกร้าวบนเม็ดปุ๋ยได้ง่าย ดังนั้น ปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบจึงมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด มากกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ แต่การที่ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารสูงกว่าปุ๋ยตัวอย่างสูตรอื่นๆ อาจมาจากการที่ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีส่วนประกอบของฟางข้าวร่วมด้วย กล่าวคือ เมื่อมีการเผาปุ๋ยตัวอย่างทำให้ส่วนประกอบที่เป็นฟางข้าวเกิดการเผาไหม้กลายเป็นเถ้าฟางข้าว ซึ่งเถ้าฟางข้าวนี้มีผลทำให้เม็ดปุ๋ยมีการดูดซับน้ำมากขึ้น เนื่องจากเถ้าฟางข้าวมีลักษณะพรุนและมีพื้นผิวขรุขระ เมื่อเม็ดปุ๋ยมีส่วนประกอบของเถ้าฟางข้าวจึงส่งผลให้มีความพรุนมากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อโมเลกุลของน้ำเกาะบนผิวอนุภาคของเถ้าฟางข้าวจึงทำให้เถ้าฟางข้าวสามารถเก็บกักน้ำไว้ในอนุภาคได้มากขึ้น (บุรฉัตร ฉัตรวีระ, 2544) อีกทั้ง ฟางข้าวยังทำให้พื้นผิวของเม็ดปุ๋ยเกิด

รูพรุนขึ้นได้จากการสลายตัวของฟางข้าวในขณะเผา ซึ่งส่งผลให้เม็ดปุ๋ยมีความเปราะและแข็งแรงน้อย (สุทัศน์ จันบัวลา, 2555)

จากผลการศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างข้างต้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ในงานวิจัยครั้งนี้ ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ทั้ง 4 สูตร มีรูพรุนเกิดอยู่บนพื้นผิวเม็ดปุ๋ยที่ได้มีลักษณะเปราะและแตกหักง่ายเมื่อโดนน้ำ เนื่องจาก การผสมส่วนประกอบต่างๆ เข้าด้วยกันหลายชนิดอาจส่งผลให้ปุ๋ยตัวอย่างไม่ผสมผสานเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และในขั้นตอนการเผาอาจทำให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์หรือน้ำภายในเม็ดปุ๋ยจึงทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนขึ้นบนพื้นผิว อีกทั้งปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเคลือบพื้นผิวเพื่อช่วยอุดรูพรุนที่เกิดขึ้น จึงส่งผลให้ปุ๋ยตัวอย่างที่ได้นี้มีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารเร็วกว่าปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ถึงแม้ว่าจะมีการเติมซีโอไลต์ในปุ๋ยตัวอย่างบางสูตรเพื่อให้ซีโอไลต์เป็นตัวช่วยดูดยึดธาตุอาหารแล้วก็ตาม ผลการศึกษาครั้งนี้จึงไม่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น เช่น ในงานวิจัยของ Chang (1997) ที่ทำการศึกษาการเตรียมปุ๋ยละลายช้า Zeolite urea จากปุ๋ยยูเรียผสมกับซีโอไลต์ เนื่องจาก ในงานวิจัยของ Chang (1997) มีการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดยึดธาตุอาหารไว้ภายในรูพรุนของโครงสร้าง แล้วมีการเคลือบทับปุ๋ยด้วยวัสดุที่มีลักษณะเป็นวุ้นหรือกาวเพื่อเป็นการลดรูพรุนที่อาจเกิดขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของศิริพร เชาว์เมธีวุฒิ (2544) ที่มีการเตรียมปุ๋ยละลายช้าโดยใช้ชานอ้อยและมีการเติมซีโอไลต์ในสูตรผสม โดยพบว่าอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมซีโอไลต์ในสูตรผสม ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวมีการเคลือบปุ๋ยตัวอย่างด้วยชันสนร่วมด้วย แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ในงานวิจัยครั้งนี้ก็ยังมีการปลดปล่อยธาตุอาหารอยู่ในเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป (The European Standardization Committee, CEN) นอกจากนี้ ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ก็ยังสามารถนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับพืชและระยะการเจริญเติบโตของพืชที่ต้องการธาตุอาหารสูงในช่วงแรกของระยะที่พืชมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว เนื่องจาก ปุ๋ยตัวอย่างมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารที่รวดเร็วในช่วงแรกและค่อยๆ ลดลงตามลำดับ ทั้งนี้ในอนาคตหากมีการเตรียมปุ๋ยละลายช้าจากซีโอไลต์ อาจมีการนำปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ไปผ่านการเคลือบก่อนเพื่อไม่ให้มีรูพรุนอยู่บนพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้ปุ๋ยตัวอย่างมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารที่ใกล้เคียงกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า และสามารถนำไปใช้ได้จริงกับพืชดอกโดยมีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่าปุ๋ยละลายช้าทางการค้าที่ขายตามท้องตลาดซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมปุ๋ยละลายช้าจากแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว โดยแบ่งหัวข้อการทดลองออกเป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบตั้งต้นที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า การเตรียมปุ๋ยละลายช้า และการศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างเทียบกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์ส่วนประกอบตั้งต้นที่ใช้เตรียมปุ๋ยละลายช้า

1.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของแร่ลีโอนาร์ไดต์ พบว่า มีค่าพีเอช (pH) เท่ากับ 2.65 ปริมาณเกลือที่ละลายได้ (Electrical conductivity, EC) เท่ากับ 10.71 ds/m ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cations exchange capacity, CEC) เท่ากับ 53.35 cmol/kg ปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic matter, OM) เท่ากับร้อยละ 25.23 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนและไนโตรเจน (The ratio of carbon to nitrogen, C/N ratio) เท่ากับ 63.46 และปริมาณของกรดฮิวมิค (Humic acid) เท่ากับร้อยละ 35.65

1.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของแร่ลีโอนาร์ไดต์ พบว่า แร่ลีโอนาร์ไดต์มีปริมาณธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 0.63, 0.10 และ 1.71 ตามลำดับ

1.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของซีโอไลต์ พบว่า ซีโอไลต์มีปริมาณธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 0.11, 0.04 และ 0.03 ตามลำดับ

1.4 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของฟางข้าว พบว่า ฟางข้าวมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 0.84, 0.17 และ 0.63 ตามลำดับ

1.5 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า พบว่า ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีปริมาณธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 8.58, 19.15 และ 6.13 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.6 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของแม่ปุ๋ยที่ใช้ในงานวิจัย พบว่า

- แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 18.05, 46.38 และ 0.15 ตามลำดับ
- แม่ปุ๋ยยูเรียมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 46.22, 0.00 และ 0.03 ตามลำดับ
- แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์มีปริมาณธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม เท่ากับร้อยละ 0.04, 0.00 และ 49.32 ตามลำดับ

2. การเตรียมปุ๋ยละลายช้า

2.1 ปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้าเพื่อให้มีปริมาณธาตุอาหารใกล้เคียงกับปุ๋ยทางการค้า สำหรับปุ๋ยตัวอย่างสูตรต่างๆ เป็นดังนี้

- ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 มีส่วนประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์ร้อยละ 23 แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ร้อยละ 26 ยูเรีย (59-0-0) ร้อยละ 33 และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-26) ร้อยละ 8
- ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 มีส่วนประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์อย่างละร้อยละ 6.5 แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ร้อยละ 25 ยูเรีย (59-0-0) ร้อยละ 43 และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-26) ร้อยละ 9
- ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 มีส่วนประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าวอย่างละร้อยละ 11 แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ร้อยละ 20 ยูเรีย (59-0-0) ร้อยละ 41 และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-26) ร้อยละ 7
- ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีส่วนประกอบของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าวอย่างละร้อยละ 6 แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ร้อยละ 24 ยูเรีย (59-0-0) ร้อยละ 39 และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-26) ร้อยละ 9

2.2 ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรใช้เบนโทไนท์เป็นสารเชื่อมในอัตราส่วนร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัตถุดิบรวม โดยเบนโทไนท์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 นี้ ถือเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจาก เป็นอัตราส่วนที่น้อยที่สุดที่ทำให้ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรขึ้นรูปได้

2.3 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของปุ๋ยตัวอย่าง จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่า ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีพื้นผิวที่เรียบสม่ำเสมอ ไม่พบรูพรุนบนพื้นผิว ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีการเคลือบด้วยสารเรซินธรรมชาติ จึงทำให้โอกาสที่น้ำกลั่นจะซึมผ่านเข้าไปละลายธาตุ

อาหารในปุ๋ยออกมาจึงมีน้อยลง ขณะที่ปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3) พบรูพรุนค่อนข้างน้อย รูพรุนมีขนาดเล็ก ขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 31-188 ไมโครเมตร สำหรับปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4) พบรูพรุนเป็นจำนวนมาก และมีขนาดของรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่ คือประมาณ 31-750 ไมโครเมตร นอกจากนี้ ยังพบรอยแตกร้าวอยู่บนเม็ด ดังนั้น ปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบจึงมีแนวโน้มที่จะมีการปลดปล่อยธาตุอาหารเร็วกว่าปุ๋ยสูตรที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ

3. การศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างเทียบกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

3.1 การศึกษาผลของพีเอชในน้ำกลั่นที่มีต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารในปุ๋ยตัวอย่าง พบว่า ปุ๋ยตัวอย่างมีการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนใกล้เคียงกันในทุกๆ พีเอช แต่มีการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสสูงที่สุดที่พีเอช 6.5 สำหรับการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียม พบว่า ที่พีเอชสูงจะให้การปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมมากกว่าที่พีเอชต่ำ ดังนั้น ที่พีเอช 8.5 จะมีการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมมากกว่าที่พีเอช 7.5 และ 6.5 ตามลำดับ ในขณะที่การปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยละลายช้าทางการค้าทั้ง 3 พีเอชไม่มีความแตกต่างกัน

3.2 การศึกษาผลของส่วนประกอบในปุ๋ยตัวอย่างต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร พบว่า ปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ต่ำที่สุด รองลงมาเป็นปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3) สำหรับปุ๋ยตัวอย่างที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบ (ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4) จะให้อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิด สูงที่สุด นอกจากนี้ หากทำการพิจารณาร้อยละการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างต่างๆ ร่วมกับเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป (The European Standardization Committee, CEN) ที่กำหนดว่าปุ๋ยละลายช้าจะต้องมีการปลดปล่อยธาตุอาหารไม่เกินร้อยละ 15 ของธาตุอาหารทั้งหมด ในเวลา 24 ชั่วโมง จะพบว่า ปุ๋ยตัวอย่างทุกสูตรมีการปลดปล่อยธาตุอาหารอยู่ในเกณฑ์ของหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งยุโรป (The European Standardization Committee, CEN) โดยปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 มีร้อยละการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช เท่ากับ 0.1551, 0.2090, 0.1675 และ 0.2625 ตามลำดับ และมีร้อยละการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช เท่ากับ 0.2847, 0.2511, 0.2110 และ 0.2536 ตามลำดับ สำหรับร้อยละการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมเฉลี่ยทั้ง 3 พีเอช มีค่าเท่ากับ 0.5859, 0.7451, 0.5169 และ 0.6481 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ควรมีการพัฒนาต่อยอดเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดียิ่งขึ้นและเพื่อเป็นการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นโดยการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ แนวทางในการพัฒนาการศึกษาค้นคว้ามีดังนี้

1. ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบอัตราการละลายของธาตุอาหารในปุ๋ยตัวอย่างกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า โดยการปรับสูตรของปุ๋ยตัวอย่างให้มีปริมาณของธาตุอาหารเริ่มต้นใกล้เคียงกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้าซึ่งทำได้ยากมาก ดังนั้น หากมีความต้องการที่จะศึกษาอัตราการละลายของธาตุอาหารในปุ๋ยตัวอย่างอาจหลีกเลี่ยงขั้นตอนในการปรับสูตรปุ๋ย แต่อาจเตรียมปุ๋ยตัวอย่างโดยผันแปรปริมาณของส่วนประกอบที่ใช้ เช่น ปริมาณของแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ ฟางข้าว และแม่ปุ๋ย จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุอาหารเริ่มต้น และถึงแม้ว่าปริมาณของธาตุอาหารในปุ๋ยตัวอย่างแต่ละตัวจะไม่เท่ากัน แต่ในการหาอัตราการละลายของธาตุอาหารอาจใช้การอ้างอิงจากปริมาณของธาตุอาหารเริ่มต้นในปุ๋ยตัวอย่างนั้นๆ ที่เตรียมได้ เช่น ถ้าปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้มีธาตุอาหารเป็นสูตร 11-12-13 ให้คิดเทียบว่าในปุ๋ยตัวอย่างนั้นมีธาตุไนโตรเจนอยู่ร้อยละ 11 จะสามารถปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนออกมาได้เท่าไร เช่นเดียวกันหากในปุ๋ยตัวอย่างมีธาตุฟอสฟอรัสอยู่ร้อยละ 12 จะสามารถปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสออกมาได้เท่าไร และในปุ๋ยตัวอย่างมีธาตุโพแทสเซียมอยู่ร้อยละ 13 จะสามารถปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมออกมาได้เท่าไร เป็นต้น

2. ในการผลิตปุ๋ยละลายช้าควรมีการใช้สารเคลือบในการเคลือบเม็ดปุ๋ยเพื่อทำให้เม็ดปุ๋ยมีพื้นผิวที่เรียบสม่ำเสมอ รูพรุนน้อยลง ซึ่งจะทำให้ปุ๋ยตัวอย่างมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารใกล้เคียงกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

3. ควรใช้วิธีการทำให้ปุ๋ยตัวอย่างแห้งด้วยความร้อน (Hot air drying) แทนการเผาปุ๋ยตัวอย่าง เพื่อเป็นการลดการสูญเสียธาตุอาหารไปกับการเผา

4. ควรมีการใช้เครื่องมือสำหรับการปั้นเม็ดปุ๋ยทุกๆ สูตร เพื่อให้เม็ดปุ๋ยที่ผลิตได้แต่ละครั้งมีความสม่ำเสมอ

5. ควรมีการนำปุ๋ยละลายช้าที่ผลิตได้ไปใช้เพาะปลูกพืชจริง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การประปาส่วนภูมิภาค. 2550. มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.pwa.co.th/download/pwastandard50-1.pdf [2558, กุมภาพันธ์ 19].

กีรติณัฏฐ์ ธนกิจธรรมกุล. 2553. การผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยไพโรไลซิสแบบเร็ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

โกมล รักษ์วงศ์. 2538. งานวิจัยเตาเผาและเครื่องปั้นดินเผา เตาเผาแม่นำน้อยเพื่อสืบสานและอนุรักษ์ศิลปวัตถุโบราณของจังหวัดสิงห์บุรี. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเครื่องปั้นดินเผา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏพระนคร.

คชินท์ สายอินทวงศ์. 2551. Heating Microscope สำหรับ Softening Point ของเคลือบ. วารสารเซรามิกส์. ปีที่ 12 ฉบับที่ 29 (กันยายน-ธันวาคม 2551): 82-85.

คณาจารย์ภาควิชาพืชศาสตร์. 2543. หลักการกสิกรรม. เอกสารประกอบการสอนภาควิชาพืชศาสตร์. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่.

จักรพันธ์ อินทจักร. 2555. การใช้ลิโอนาร์ไดท์เพื่อปรับปรุงคุณภาพปุ๋ยหมักและผลผลิตคะน้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

จำรัส ลิ้มตระกูล. 2540. เคมีของซีโอไลต์. วารสารวิทยาศาสตร์. ปีที่ 51 ฉบับที่ 6 (พฤศจิกายน-ธันวาคม 2540): 420-423.

ชูชาติ สันธทรัพย์. 2550. การจัดการดินสำหรับการผลิตพืช. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://mis.agri.cmu.ac.th/download/publication/2940_file.pdf [2558, มีนาคม 13].

ณธรรศ สมจันทร์ และ อรวรรณ ฉัตรสีรุ้ง. 2557. การปรับปรุงคุณภาพลีโอนาร์ไดต์สำหรับเป็นวัสดุปรับปรุงดิน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 37 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มีนาคม 2557): 33-43.

ณัฐ งามเจตนรมย์. 2545. การพัฒนาปุ๋ยเคมีชนิดปลดปล่อยช้าที่เคลือบด้วยโปรตีนจากกากถั่วเหลือง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฐนัย จินตกานนท์. 2551. การใช้พอลิแลกติกแอซิดและพอลิแลกติกแอซิดโคเอทิลีนเทเรฟแทเลต สำหรับการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียแบบควบคุม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เดลินิวส์. 2556. ส่งเสริมไม้ดอก 4 ชนิด ของไทยขึ้นแท่นพันธุ์ไม้เศรษฐกิจโลก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dailynews.co.th/article/224/153260 [2556, สิงหาคม 26].

ตรีทิพย์ ศุภสุนทรกุล. 2555. เบนโทไนท์ (Bentonite). จุลสารกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 (เมษายน-มิถุนายน 2555): 1-28.

ทวีลักษณ์ อ้นองอาจ และ กฤตย์ สมสาร์. 2548. กรดฮิวมิก (Humic Acid). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_1 _2 5 4 8 _humic_acid.pdf [2556, เมษายน 16].

ธนพร สายตา. 2555. การดูดซับกลีเซอรีนจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้วบนเบนโทไนท์กัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเบส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิพนธ์ ไชยมงคล. 2550. การปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร. เมืองไม้ผล. ปีที่ 7 ฉบับที่ 75: 75-78.

บรรลือศักดิ์ ศิริมงคลเวช. 2550. การเคลือบเม็ดปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรทด้วยแป้งเพื่อควบคุมการปลดปล่อยสาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

บริษัท โซตัส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด. 2557. ปุ๋ย: ออสโมโค้ท สูตร 13-13-13. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.sotus.co.th/index.php?p=368&hl=th [2557, ธันวาคม 1].

บัญชา รัตนีทู. 2555. ปุ๋ยอินทรีย์กับการปรับปรุงดินเสื่อมคุณภาพ. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์. ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 (พฤษภาคม-สิงหาคม 2555): 115-127.

บุรฉัตร ฉัตรวีระ. 2544. คุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าฟางข้าว. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (มกราคม-เมษายน 2544): 85-99.

บุษกร คงสมอรรถ. 2555. การผลิตเอทานอลจากฟางข้าวหลังปรับสภาพด้วยไอน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ปภามญชุ์ ซีประเสริฐ, พัฒนา อนุรักษ์พงศธร และ สิรินาฎ เลาหะโรจนพันธ์. 2554. การดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียมในดินนาข้าว. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 12. 28 มกราคม ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปิยะ ดวงพัตรา. 2553. สารปรับปรุงดิน (Soil Conditioners). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ผุสดี ละออ และ สุวิมล อัศวพิศิษฐ. 2551. การควบคุมการปลดปล่อยยูเรียที่เคลือบด้วยโพลิเอทิลีนร่วมกับแป้ง. วารสารแก่นเกษตร. ปีที่ 36 ฉบับพิเศษ 2551: 11-18.

ฝ่ายเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2558. รายงานผลการทดสอบ. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)

พระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2550. 2550. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 125 ตอนที่ 7 ก (11 มกราคม 2551): 1-28.

พลอยพรรณ จริงจิตต์. 2554. สมดุลการดูดซับน้ำในเอทานอลด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด4a. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิชญ์สินี วีระไวทยะ, กนก รัตนะกนกชัย, รัตติยา แววนุกูล, จักรกฤกษณ์ เตชะอภัยคุณ, อากิฮิโกะ โคชูกิ และ ภัทรา ผาสอน. 2556. การปรับสภาพฟางข้าวด้วยด่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยเอนไซม์. ว. วิทยาศาสตร์เกษตร. ปีที่ 44 ฉบับที่ 2 (พฤษภาคม-สิงหาคม 2556): 169-172.

พีรพงศ์ หาญพิชาญชัย. 2545. การควบคุมการปลดปล่อยของเม็ดปุ๋ยโดยการเคลือบไคโตซาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เลิศ รักสินติชาติ. 2545. การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอกซ์ที่ใช้แล้วสำหรับดูดซับเอทิลีนไกลคอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วริษฐา แสงฤทธิ์. 2547. ปุ๋ยที่เคลือบด้วยน้ำมันชักแห้งเพื่อการปลดปล่อยแบบควบคุม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิฑูรย์ ปัญญากุล. 2547. เกษตรยั่งยืน: วิถีการเกษตรเพื่ออนาคต. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร มูลนิธิสายใยแผ่นดิน.

วิวัฒน์ โตธิรกุล, พลยุทธ ศุขสมิติ และ จินดารัตน์ โตกมลธรรม. 2552. การเตรียมสารประกอบเกลือฮิวเมตจากดินปนถ่านหิน จากเหมืองลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปาง. เอกสารงานวิจัยสำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่เขต 3 (ภาคเหนือ). กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม.

ศิริพร เชาว์เมธีวุฒิ. 2544. การเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภธิดา อ่ำทอง. 2553. การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ Permanganate Oxidizable Carbon เพื่อใช้ในการวัดปริมาณอินทรียวัตถุในการประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน. รายงานผลการวิจัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ปีงบประมาณ 2552. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ศูนย์เทคโนโลยีปุ๋ย. 2548. การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P_2O_5) และโพแทสเซียมทั้งหมด (Total K_2O). เอกสารสำหรับผู้ปฏิบัติงานเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารในตัวอย่างปุ๋ย. ศูนย์เทคโนโลยีปุ๋ย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

สราวุธ ยาราช, ปริญญา พุทธาภิบาล, สิโรตม์ ศัลยพงษ์ และ วัชระ จินตโกวิท. 2557. การศึกษาหินพัมมิเซียสทัฟฟ์ และการใช้แร่เบนทอไนต์เพื่อปลูกพืชผักสวนครัว. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://ka.mahidol.ac.th/sciex2014/abstract/5324304.pdf [2558, พฤษภาคม 10].

สำนักงานเกษตรอำเภอศรีสำโรง. 2552. การผลิตปุ๋ยอินทรีย์เคมีอัดเม็ด. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://sisamrong-sukhothai.kasetbay.com [2557, ธันวาคม 12].

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2558. มูลค่าส่งออกและนำเข้าสินค้าเกษตร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_import_result.php [2558, พฤษภาคม 8].

สำนักสำรวจและวิจัยทรัพยากรดิน กรมพัฒนาที่ดิน. 2558. ความรู้เรื่องดินสำหรับเยาวชน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://oss101.ldd.go.th/INDEX_new58.html [2558, กุมภาพันธ์ 19].

สุชาดา โภชาดม, แสงดาว เขาแก้ว, พลยุทธ สุขสมิติ, คณพล จุฑามณี และ Gautier Landrot. 2556. การศึกษาลักษณะทางเคมีของลีโอนาร์ไดต์จากเหมืองแร่ลิกไนต์เพื่อการใช้ประโยชน์ทางการเกษตร. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51: สาขาวิทยาศาสตร์ และสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 5-7 กุมภาพันธ์ ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุทัศน์ จันบัวลา. 2555. การพัฒนาส่วนผสมผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาจังหวัดพระนครศรีอยุธยาและอ่างทอง. วารสารวิจัย มสด. ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน 2555): 13-21.

สุพัฒน์ คำไทย. 2552. การใช้เศษเหลือทางการเกษตรในงานด้านอุตสาหกรรมเกษตร. สาส์นปริทรรศน์อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 (พฤษภาคม 2552): 1-3.

สุพัตรา บุตรเสรีชัย และ ยุวรัตน์ เงินเย็น. 2554. การศึกษาการกำจัดตะกั่วแคดเมียมและทองแดงโดยใช้แร่ดินเบนโทไนท์. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 12. 28 มกราคม ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อำนาจ สุวรรณฤทธิ์. 2553. ปุ๋ยกับการเกษตรและสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อินแปง ดวงวงสา. 2556. การจัดการฟางข้าวเพื่ออนุรักษ์ธาตุ N P และ K ในดินนาของประเทศลาว. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.agri.ubu.ac.th/masterstu/seminar/inpaeng.pdf [2556, สิงหาคม 16].

อุไรลักษณ์ ดวงฉวี. 2556. ค่า Ec (Electrical Conductivity). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.suphanburi.doae.go.th/webold/danger/image/rice7-2.pdf [2557, ธันวาคม 6].

ภาษาอังกฤษ

Agro Services International. 2015. Nutrient Management in High Ph Soil. [Online]. Available: http://www.agroservicesinternational.com [2015, February 19].

Chang, H. J. 1997. Method of Preparing a Slow Release Fertilizer. Google Patents

David, P. P., Nelson, P. V. และ Sanders, D. C. 1994. A Humic Acid Improves Growth of Tomato Seedling in Solution Culture. Journal of Plant Nutrition. 17 (1): 173-184.

Duplessis, G. L. และ MacKenzie, A. F. 1983. Effects of Leonardite Applications on Phosphorus Avilability and Corn Growth. Canadian Journal of Soil Science. 63 (4): 749-751.

Ece, A., Saltali, K., Eryigit, N. และ Uysal, F. 2007. The Effects of Leonardite Application on Climbing Bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) Yield and the Some Soil Properties. Journal of Agronomy. 6: 480-483.

Evan, B. และ Elmar, W. 1965. Process for the Halogenation of Leonardite and the Product Thereof. Google Patents

Garnier-Sillam, É., Hariyento, S. และ Bourezgui, Y. 1999. Humic Substances in Peat (Sumatra, Indonesia). Analusis. 27 (5): 405-408.

Gates, B. C. 1992. Catalytic Chemistry. New York: Wiley.

Hoeung, P., Bindar, Y. และ Senda, P. 2011. Development of Granular Urea-Zeolite Slow Release Fertilizer Using Inclined Pan Granulator. Jurnal Teknik Kima Indonesia. 10: 102-111.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Jensen, T. L. 2010. Soil Ph and the Availability of Plant Nutrients. [Online]. Available: http://www.ipni.net/ipniweb/pnt.nsf/5a4b8be72a35cd46852568d9001a18da/97c1b6659f3405a28525777b0046bcb9!OpenDocument [2015, February 19].

Jones, J. B., Jr. 2004. Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower. 2nd edition. Florida: CRC Press.

Khaled, H. และ Fawy, H. A. 2011. Effect of Different Levels of Humic Acids on the Nutrient Content, Plant Growth, and Soil Properties under Conditions of Salinity. Soil and Water Resources. 6 (1): 21-29.

Kołodziej, B., Sugier, D. และ Bielinska, E. 2013. The Effect of Leonardite Application and Various Plantation Modalities on Yielding and Quality of Roseroot (*Rhodiola Rosea* L.) and Soil Enzymatic Activity. Journal of Geochemical Exploration. 129: 64-69.

Li, J., Zhuang, X., Font, O., Moreno, N., Vallejo, V. R., Querol, X. และ Tobias, A. 2014. Synthesis of Merlinoite from Chinese Coal Fly Ashes and Its Potential Utilization as Slow Release K-Fertilizer. Journal of Hazardous Materials. 265: 242-252.

Notario del Pino, J. S., Arteaga Padrón, I. J., González Martin, M. M. และ Garcia Hernández, J. E. 1995. Phosphorus and Potassium Release from Phillipsite-Based Slow-Release Fertilizers. Journal of Controlled Release. 34 (1): 25-29.

Otey, F. H., Trimnell, D., Westhoff, R. P. และ Shasha, B. S. 1984. Starch Matrix for Controlled Release of Urea Fertilizer. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 32 (5): 1095-1098.

Pertuit, J., A.J., Dudley, J. B. และ Toler, J. E. 2001. Leonardite and Fertilizer Levels Influence Tomato Seedling Growth. Hort Science. 36 (5): 913-915.

Pruitt, N. W. 1990. Controlled Release Composition and Method of Manufacturing Same. Google Patents

Ratanaprommanee, R. และ Shutsrirung, A. 2014. Chemical Properties and Potential Use in Agriculture of Leonardite from Different Sources in Thailand. [Online]. Available: http://www.hu.ac.th/Symposium2014/proceedings/data/3409/3409-4.pdf [2014, December 3].

Sanli, A., Karadogan, T. และ Tonguc, M. 2013. Effect of Leonardite Applications on Yield and Some Quality Parameters of Potatoes (*Solanum Tuberosum* L.). Turkish Journal of Field Crops. 18 (1): 20-26.

Scotts Australia. 2015. How Osmocote Works. [Online]. Available: http://www.scottsaustralia.com.au [2015, February 11].

Spinu, V. C., Langhans, R. W. และ Albright, L. D. 1998. Electrochemical Ph Control in Hydroponic Systems. Acta Horticulturae. 456: 275-282.

Stevenson, F. J. 1979. Humates-Facts and Fantasies on Their Value as Commercial Soil Amendment. Crops Soils. 31: 14-16.

Sugier, D., Kołodziej, B. และ Bielinska, E. 2013. The Effect of Leonardite Application on Arnica Montana L. Yielding and Chosen Chemical Properties and Enzymatic Activity of the Soil. Journal of Geochemical Exploration. 129: 76-81.

Trenkel, M. E. 2010. Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. Paris: The International Fertilizer Industry Association (IFA).

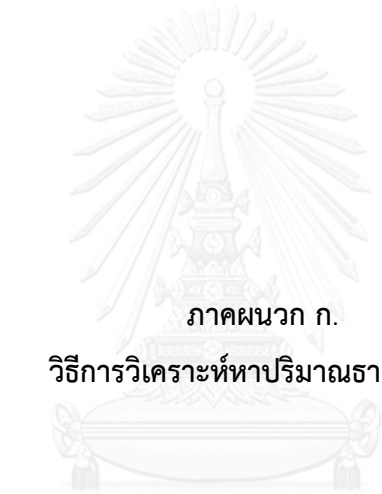
Yolcu, H., Seker, H., Gullap, M. K., Lithourgidis, A. และ Gunes, A. 2011. Application of Cattle Manure, Zeolite and Leonardite Improves Hay Yield and Quality of Annual Ryegrass (*Lolium Multiflorum* Lam.) under Semiarid Condition. Australian Journal of Crop Science. 5 (8): 926-931.

Yuan, W., Solihin, Zhang, Q., Kano, J. และ Saito, F. 2014. Mechanochemical Formation of K–Si–Ca–O Compound as a Slow-Release Fertilizer. Powder Technology. 260: 22-26.

Zhang, M., Gao, B., Chen, J., Li, Y., Creamer, A. E. และ Chen, H. 2014. Slow-Release Fertilizer Encapsulated by Graphene Oxide Films. Chemical Engineering Journal. 255: 107-113.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาคผนวก ก.
วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหาร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total N)

1. การเตรียมสารเคมี

1.1 อินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator) ทำการชั่งเมทธิลเรด (Methyl red) จำนวน 0.066 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) 90% ปริมาณ 50 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน และชั่งโบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green) จำนวน 0.099 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 90% ปริมาณ 50 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาเทรวมกัน แล้วคนให้เข้ากัน

1.2 บอริคแอซิดมิกซ์อินดิเคเตอร์ (Boric acid mixed indicator) สำหรับเครื่องกลั่นไนโตรเจน โดยชั่งกรดบอริค (Boric acid) จำนวน 20 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาณ 700 มิลลิลิตร นำไปต้มจนละลายหมด เมื่อสารละลายเย็นตัวลงให้เติมอินดิเคเตอร์ผสมที่เตรียมได้ในข้อ 1.1 ลงไป 20 มิลลิลิตร ปรับสีของสารละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) 0.1 นอร์มัล ลงไปทีละน้อยจนสารละลายเป็นสีม่วงแดง แล้วปรับปริมาตรโดยการเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน

1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) 40% สำหรับเครื่องกลั่นไนโตรเจน โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 400 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่ประมาณ 800 มิลลิลิตร คนให้ละลายหมดในตู้ดูดควัน แล้วปรับปริมาตรโดยการเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นเก็บไว้ในขวดพลาสติก

1.4 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (Standard hydrochloric acid) 0.05 นอร์มัล โดยละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์มัล จำนวน 1 แอมพูล ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 2,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.05 นอร์มัล ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- ชั่งโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 0.13 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำกลั่นปริมาณ 20 มิลลิลิตร หยดสารละลายอินดิเคเตอร์ผสมที่เตรียมได้ในข้อ 1.1 ลงไป 5 หยด จะได้สารละลายสีเขียวอ่อน

- นำไปติเตรทกับกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.05 นอร์มัล จนถึงจุดยุติ จะได้สารละลายสีชมพูม่วง บันทึกผล (สมมติปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้เป็น ก) นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ไปต้มให้เดือดประมาณ 2-3 นาที ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ขณะนี้สารละลายจะกลับมาเป็นสีเขียว จากนั้นนำไปติเตรทกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.05 นอร์มัล อีกครั้งจนได้สารละลายสีชมพูม่วง บันทึกผล (สมมติปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้เป็น ข) คำนวณหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ตามสูตร

ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มัล) = $\frac{\text{น้ำหนักของโซเดียมคาร์บอเนต (กรัม) x 2,000}}{\text{น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมคาร์บอเนต x (ก+ข)}}$

2. วิธีวิเคราะห์

2.1 ชั่งตัวอย่างจำนวน 0.1 กรัม ใส่ในหลอดสำหรับย่อย บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติมตัวเร่งปฏิกิริยาสำเร็จรูป 2 เม็ด และเติมกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) 98% ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันอย่างระมัดระวัง

2.2 ทำแบลงค์โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาสำเร็จรูป 2 เม็ด ลงไปในหลอดสำหรับย่อย และเติมกรดซัลฟิวริก 98% ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันอย่างระมัดระวัง

2.3 นำไปย่อยในเครื่องย่อยที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสีของสารละลายใสและมีสีฟ้า นำหลอดย่อยออกจากเครื่อง ทิ้งไว้ให้เย็น

2.4 นำหลอดย่อยเข้าเครื่องกลั่นไนโตรเจนที่ตั้งโปรแกรมการทำงานเรียบร้อยแล้ว เมื่อกลั่นเสร็จ นำสารละลายไปติเตรทกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.05 นอร์มัล จนถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีชมพู บันทึกผล

3. การคำนวณ

Total N (ร้อยละ) = $\frac{\text{ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มัล) x A x 1.40067}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ย่อย (กรัม)}}$

A = ปริมาตรที่ใช้ติเตรทกับตัวอย่าง (มล.) - ปริมาตรที่ใช้ติเตรทกับแบลงค์ (มล.)

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P_2O_5)

1. การเตรียมสารเคมี

1.1 กรดผสมระหว่างกรดไนตริก (Nitric acid) ต่อกรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid) โดยทำการผสมกรดไนตริก 69-70% กับกรดเปอร์คลอริก 69-70% ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

1.2 สารละลายโมลิบโดวานาเดท (Molybdovanadate reagent) ทำการชั่งแอมโมเนียมโมลิบเดท (Ammonium molybdate) จำนวน 40 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำร้อน (น้ำกลั่น) ปริมาณ 400 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น และชั่งแอมโมเนียมเมตาวานาเดท (Ammonium metavanadate) ปริมาณ 2 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำร้อน (น้ำกลั่น) ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้น เติมกรดเปอร์คลอริก 69-70% ปริมาณ 450 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น ค่อยๆ รินผสมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดทลงในสารละลายแอมโมเนียมเมตาวานาเดทในขวดปรับปริมาตรขนาด 2,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เขย่าให้เข้ากัน และเก็บไว้ในขวดแก้วสีชา

1.3 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (Standard phosphorus) 50 ppm โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 1,000 ppm ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

1.4 ชุดสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (Working standard phosphorus) ความเข้มข้น 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 ppm โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 50 ppm ปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร

1.5 การเตรียมสารละลายตัวอย่าง มีขั้นตอนดังนี้

- ชั่งตัวอย่างปุ๋ยจำนวน 0.1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติมกรดผสมปริมาณ 20 มิลลิลิตร นำไปย่อยบนเตาความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ย่อยจนมีควันสีขาวเกิดขึ้นเหนือสารละลายหรือสารละลายมีลักษณะสีใส ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30-40 นาที ระหว่างย่อยให้ยกขวดรูปชมพู่แกว่งเบาๆ เพื่อให้เศษตัวอย่างที่ติดค้างอยู่ข้างขวดลงไปในสารละลายให้หมด จากนั้นยกขวดลงจากเตา ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
- เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 40 มิลลิลิตร แกว่งเบาๆ ให้เข้ากัน จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน เก็บในขวดพลาสติก

2. วิธีวิเคราะห์

2.1 ปิเปตสารละลายตัวอย่างปริมาณ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร เติมสารละลายโมลิบโดวานาเดท 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากันและทิ้งไว้ 30 นาที สารละลายจะเกิดเป็นสีเหลือง

2.2 นำชุดสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสความเข้มข้น 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 ppm เติมสารละลายโมลิบโดวานาเดทปริมาณ 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน และทิ้งไว้ 30 นาที

2.3 นำสารละลายตัวอย่าง และชุดสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสข้างต้น ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

2.4 หาค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสารละลายตัวอย่างกับกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและค่าการดูดกลืนแสงของ ชุดสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (Standard curve)

3. การคำนวณ

$$\text{Total P (ร้อยละ)} = \frac{A \times B \times C \times 100}{W \times D \times 10^{6}}$$

โดย A คือ ปริมาณฟอสฟอรัสที่อ่านได้จากกราฟ (ppm)

B คือ ปริมาตรที่ปรับหลังย่อยเสร็จ (มล.)

C คือ ปริมาตรขวดที่ใช้เจือจาง (มล.)

D คือ ปริมาตรที่ปิเปตไปเจือจาง (มล.)

W คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ย่อย (กรัม)

Total P_2O_5 (ร้อยละ) = Total P (ร้อยละ) x 2.29

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (Total K_2O)

1. การเตรียมสารเคมี

1.1 กรดผสมระหว่างกรดไนตริก (Nitric acid) ต่อกรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid) ทำการผสมกรดไนตริก 69-70% กับกรดเปอร์คลอริก 69-70% ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

1.2 ชุดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม (Working standard potassium) ความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 ppm โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม (Standard potassium) 1,000 ppm ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

1.3 การเตรียมสารละลายตัวอย่าง มีขั้นตอนดังนี้

- ชั่งตัวอย่างปุ๋ยจำนวน 0.1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติมกรดผสมปริมาณ 20 มิลลิลิตร นำไปย่อยบนเตาความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ย่อยจนมีควันสีขาวเกิดขึ้นเหนือสารละลายหรือสารละลายมีลักษณะสีใส ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30-40 นาที ระหว่างย่อยให้ยกขวดรูปชมพู่แกว่งเบาๆ เพื่อให้เศษตัวอย่างที่ติดค้างอยู่ข้างขวดลงไปในสารละลายให้หมด จากนั้นยกขวดลงจากเตา ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
- เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 40 มิลลิลิตร แกว่งเบาๆ ให้เข้ากัน จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน เก็บในขวดพลาสติก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. วิธีวิเคราะห์

นำสารละลายตัวอย่างไปวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอปซอพต์ชั่น (Atomic Absorption Spectrophotometer) เทียบกับชุดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมที่เตรียมไว้ แล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณ

3. การคำนวณ

$$\text{Total } K_2O \text{ (ร้อยละ)} = \frac{1.2046 \times A \times B \times 100}{W \times 10^6}$$

โดย A คือ ปริมาณโพแทสเซียมที่อ่านได้จากเครื่อง (ppm)

B คือ ปริมาตรที่ปรับหลังย่อยเสร็จ (มล.)

W คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ย่อย (กรัม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข.
ภาพเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ภาพที่ ข.1 เครื่องย่อยไนโตรเจน
(Kjeldahl Digestion Units)

ภาพที่ ข.2 เครื่องกลั่นไนโตรเจนแบบอัตโนมัติ
(Automatic Kjeldahl Distillation Unit)

ภาพที่ ข.3 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค
อะตอมมิกแอปซอพต์ชั่น
(Atomic Absorption Spectrophotometer)

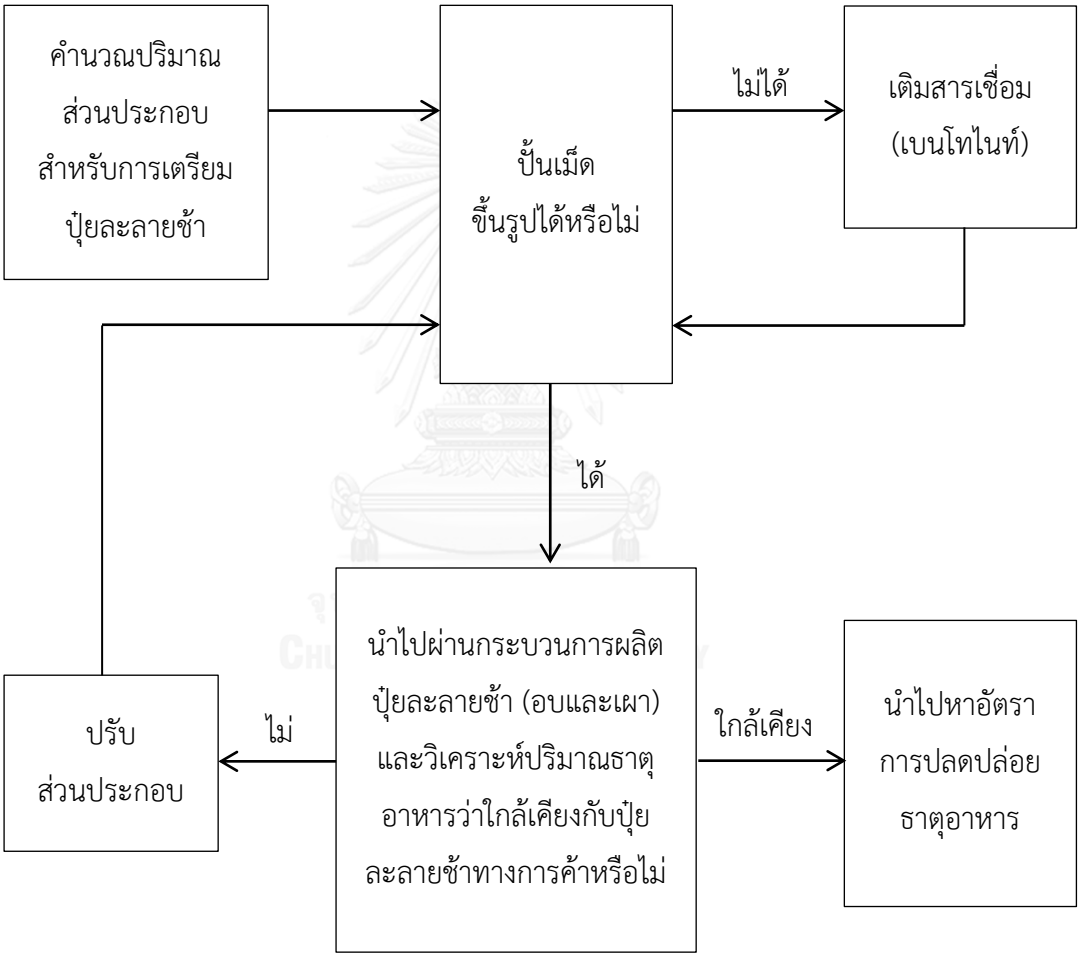
ภาพที่ ข.4 เครื่องบดที่มีตะแกรงคัดขนาดอยู่ในตัว
(Crumbling machine)

ภาคผนวก ค.
การคำนวณหาปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรต่างๆ และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่พบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การคำนวณหาปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรต่างๆ

การหาปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้าใช้วิธีคำนวณการเติมปริมาณแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ยูเรีย และโพแทสเซียมคลอไรด์ (คณาจารย์ภาควิชาพืชศาสตร์, 2543) และวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารที่ได้จากการพยายามปรับสูตรเพื่อให้ปุ๋ยตัวอย่างมีปริมาณธาตุอาหารใกล้เคียงกับปุ๋ยละลายช้าทางการค้ามากที่สุด ซึ่งกระบวนการหาปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้า สรุปได้ดังภาพที่ ค.1



ภาพที่ ค.1 กระบวนการหาปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้า

จากภาพที่ ค.1 การคำนวณปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยละลายช้า สามารถแสดงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. การคำนวณปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

ตารางที่ ค.1 ส่วนประกอบทั้งหมดที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และปริมาณธาตุอาหารที่พบ

ส่วนประกอบ	ปริมาณธาตุอาหาร (ร้อยละ)		
	Total N	Total P_2O_5	Total K_2O
แร่ลีโอนาร์ไดต์	0.63	0.10	1.71
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	18	46	0
แม่ปุ๋ยยูเรีย	46	0	0
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	0	0	49

จากตารางที่ ค.1 หากต้องการผสมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 จากแร่ลีโอนาร์ไดต์เพียงอย่างเดียว เพื่อให้มีปริมาณธาตุอาหารเท่ากับ 9-19-6 จำนวน 100 กรัม จากแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ยูเรีย (46-0-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-49) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดปริมาณแร่ลีโอนาร์ไดต์ที่ใช้เป็น 45 กรัม ดังนั้น แร่ลีโอนาร์ไดต์ 45 กรัม จะประกอบไปด้วย

ธาตุอาหาร Total N = $\frac{\mathbf{45\times0.63}}{\mathbf{100}}$ = 0.2835 กรัม

ธาตุอาหาร P_2O_5 = $\frac{\mathbf{45\times0.1}}{\mathbf{100}}$ = 0.0450 กรัม

ธาตุอาหาร K_2O = $\frac{\mathbf{45\times1.71}}{\mathbf{100}}$ = 0.7695 กรัม

ดังนั้น ปริมาณของธาตุอาหารที่ต้องเพิ่มในแต่ละตัวจะเท่ากับ ปริมาณของธาตุอาหารที่ต้องการ (9-19-6) ลบออกด้วยปริมาณธาตุอาหารในแร่ลีโอนาร์ไดต์ 45 กรัม เป็นดังนี้

ธาตุอาหาร Total N = 9-0.2835 = 8.7165 กรัม

ธาตุอาหาร P_2O_5 = 19-0.0450 = 18.9550 กรัม

ธาตุอาหาร K_2O = 6-0.7695 = 5.2305 กรัม

2. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร P_2O_5 46 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร P_2O_5 46 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร P_2O_5 18.96 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.22 กรัม

3. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยต้องคำนวณปริมาณธาตุอาหาร Total N ที่มากับแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตก่อน ดังนี้

แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร Total N 18 กรัม

ถ้าใช้แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.22 กรัม จะมีธาตุอาหาร Total N 7.42 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร Total N ที่ยังขาดจะเท่ากับ 8.72-7.42 = 1.30 กรัม

สรุปได้ว่า ธาตุอาหาร Total N 46 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยยูเรีย 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร Total N 1.30 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยยูเรีย 2.83 กรัม

4. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-49) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร K_2O 49 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร K_2O 49 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร K_2O 5.23 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 10.67 กรัม

5. สรุปว่าปริมาณแม่ปุ๋ยที่ต้องเติมทั้งหมด คือ แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.22 กรัม แม่ปุ๋ยยูเรีย 2.83 กรัม และแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 10.67 กรัม รวมเป็นทั้งหมด 54.72 กรัม และเมื่อนำน้ำหนักรวมของแม่ปุ๋ยที่ต้องเติมรวมกับน้ำหนักแร่ลีโอนาร์ไดต์ที่กำหนดตอนแรกเป็น 45 กรัม จะได้น้ำหนักปุ๋ยที่มีปริมาณธาตุอาหารเท่ากับ 9-19-6 จำนวน 99.72 กรัม (น้ำหนักรวมที่ได้อาจต่ำกว่าที่กำหนดบ้างเล็กน้อย) ดังนั้น แสดงว่าปริมาณแร่ลีโอนาร์ไดต์ที่กำหนดในตอนแรกนั้นสามารถใช้ได้ เมื่อได้ปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยละลายช้าแล้วจึงได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังจากทำการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ ค.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.2 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์	45	จากการคำนวณข้างต้น
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	41.22	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	2.83	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	10.67	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	0.95	ไม่ตรงตามสูตร
Total P_2O_5	21.72	ไม่ตรงตามสูตร
Total K_2O	4.89	ไม่ตรงตามสูตร

จากตารางที่ ค.2 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ที่ได้ยังไม่ตรงตามสูตรที่ต้องการ จึงได้ทำการปรับส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 ใหม่ และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังจากทำการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงได้ดังตารางที่ ค.3

ตารางที่ ค.3 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 หลังทำการปรับส่วนประกอบ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์	25	
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	23.86	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	38.15	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	13.41	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	8.53	ใกล้เคียงตามสูตร
Total P_2O_5	20.03	ใกล้เคียงตามสูตร
Total K_2O	6.73	ใกล้เคียงตามสูตร

จากตารางที่ ค.3 พบว่า ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ที่ได้มีความใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ แต่หลังจากการปั้นเม็ดจะพบว่าเม็ดปุ๋ยที่ได้สามารถแตกออกจากกันง่าย นอกจากนี้ ในการปั้นเม็ดขึ้นรูปยังทำได้ค่อนข้างยาก จึงได้มีการเติมเบนโทไนท์เป็นสารเชื่อมลงไปในส่วนผสมในอัตราส่วนร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัตถุดิบรวม และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารใหม่ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ ค.4

ตารางที่ ค.4 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 หลังการเติมเบนโทไนท์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์	27.50	เมื่อทำการเพิ่มเบนโทไนท์เป็นร้อยละ 10 จึงเพิ่มปริมาณส่วนประกอบทุกตัวเป็นร้อยละ 10 ด้วย
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	26.25	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	41.97	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	14.75	
เบนโทไนท์	12.27	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	14.09	ไม่ตรงตามสูตร
Total P_2O_5	14.52	ไม่ตรงตามสูตร
Total K_2O	8.98	ไม่ตรงตามสูตร

จากตารางที่ ค.4 จะเห็นว่าหลังการเติมเบนโทไนท์ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงและไม่ตรงตามสูตรที่ต้องการ จึงได้ทำการปรับส่วนประกอบใหม่ และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงได้ดังตารางที่ ค.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.5 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 หลังการเติมเบนโทไนท์และปรับส่วนประกอบใหม่

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์	27.50	
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	30	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	38	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	9	
เบนโทไนท์	11.61	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	9.61	ใกล้เคียงตามสูตร
Total P_2O_5	19.72	ใกล้เคียงตามสูตร
Total K_2O	6.90	ใกล้เคียงตามสูตร

จากตารางที่ ค.5 พบว่า ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 หลังการเติมเบนโทไนท์และปรับส่วนประกอบใหม่ มีความใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ และเมื่อคำนวณส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 เป็นร้อยละ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ค.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.6 ปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	คำนวณเป็นร้อยละ
แร่ลีโอนาร์ไดต์	27.50	23
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	30	26
แม่ปุ๋ยยูเรีย	38	33
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	9	8
เบนโทไนท์	11.61	10

2. การคำนวณปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

ตารางที่ ค.7 ส่วนประกอบทั้งหมดที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 และปริมาณธาตุอาหารที่พบ

ส่วนประกอบ	ปริมาณธาตุอาหาร (ร้อยละ)		
	Total N	Total P_2O_5	Total K_2O
แร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์	0.29	0.11	0.75
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	18	46	0
แม่ปุ๋ยยูเรีย	46	0	0
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	0	0	49

จากตารางที่ ค.7 หากต้องการผสมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 จากแร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์เพื่อให้มีปริมาณธาตุอาหารเท่ากับ 9-19-6 จำนวน 100 กรัม จากแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ยูเรีย (46-0-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-49) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดปริมาณแร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์ ที่ใช้เป็น 44 กรัม ดังนั้น แร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์ 44 กรัม จะประกอบไปด้วย

ธาตุอาหาร Total N = $\frac{44 \times 0.29}{100}$ = 0.1276 กรัม

ธาตุอาหาร P_2O_5 = $\frac{44 \times 0.11}{100}$ = 0.0484 กรัม

ธาตุอาหาร K_2O = $\frac{44 \times 0.75}{100}$ = 0.3300 กรัม

ดังนั้น ปริมาณของธาตุอาหารที่ต้องเพิ่มในแต่ละตัวจะเท่ากับ ปริมาณของธาตุอาหารที่ต้องการ (9-19-6) ลบออกด้วยปริมาณธาตุอาหารในแร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์ 44 กรัม เป็นดังนี้

ธาตุอาหาร Total N = 9-0.1276 = 8.8724 กรัม

ธาตุอาหาร P_2O_5 = 19-0.0484 = 18.9516 กรัม

ธาตุอาหาร K_2O = 6-0.3300 = 5.6700 กรัม

2. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร P_2O_5 46 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร P_2O_5 46 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร P_2O_5 18.95 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.20 กรัม

3. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยต้องคำนวณปริมาณธาตุอาหาร Total N ที่มากับแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตก่อน ดังนี้

แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร Total N 18 กรัม

ถ้าใช้แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.20 กรัม จะมีธาตุอาหาร Total N 7.42 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร Total N ที่ยังขาดจะเท่ากับ 8.87-7.42 = 1.45 กรัม

สรุปได้ว่า ธาตุอาหาร Total N 46 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยยูเรีย 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร Total N 1.45 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยยูเรีย 3.15 กรัม

4. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-49) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร K_2O 49 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร K_2O 49 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร K_2O 5.67 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 11.57 กรัม

5. สรุปว่าปริมาณแม่ปุ๋ยที่ต้องเติมทั้งหมด คือ แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.20 กรัม แม่ปุ๋ยยูเรีย 3.15 กรัม และแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 11.57 กรัม รวมเป็นทั้งหมด 55.92 กรัม และเมื่อนำน้ำหนักรวมของแม่ปุ๋ยที่ต้องเติมรวมกับน้ำหนักแร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์ที่กำหนดตอนแรกเป็น 44 กรัม จะได้น้ำหนักปุ๋ยที่มีปริมาณธาตุอาหารเท่ากับ 9-19-6 จำนวน 99.92 กรัม (น้ำหนักรวมที่ได้อาจต่ำกว่าที่กำหนดบ้างเล็กน้อย) ดังนั้น ปริมาณแร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์ที่กำหนดในตอนแรกนั้นสามารถใช้ได้ เมื่อได้ปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยละลายช้าแล้วจึงวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังจากทำการปั้นเม็ด ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงดังตารางที่ ค.8

ตารางที่ ค.8 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์	44	จากการคำนวณข้างต้น
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	41.20	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	3.15	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	11.57	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	0.82	ไม่ตรงตามสูตร
Total P_2O_5	29.34	ไม่ตรงตามสูตร
Total K_2O	10.01	ไม่ตรงตามสูตร

จากตารางที่ ค.8 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ที่ได้ยังไม่ตรงตามสูตรที่ต้องการ จึงได้ทำการปรับส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 ใหม่ และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังจากทำการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงได้ดังตารางที่ ค.9

ตารางที่ ค.9 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 หลังทำการปรับส่วนประกอบ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์	12	
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	32.58	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	41.52	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	14.10	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	9.36	ใกล้เคียงตามสูตร
Total P_2O_5	20.19	ใกล้เคียงตามสูตร
Total K_2O	6.82	ใกล้เคียงตามสูตร

จากตารางที่ ค.9 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร พบว่า ธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้มีความใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ แต่ยังพบว่าเม็ดปุ๋ยที่ได้สามารถแตกออกจากกันง่าย และในการปั้นเม็ดขึ้นรูปยังทำได้ค่อนข้างยาก จึงได้มีการเติมเบนโทไนท์เป็นสารเชื่อมลงไปในส่วนผสมในอัตราส่วนร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัตถุดิบรวม และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารใหม่ ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังตารางที่ ค.10

ตารางที่ ค.10 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 หลังการเติมเบนโทไนท์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์	13.20	เมื่อทำการเพิ่มเบนโทไนท์เป็นร้อยละ 10 จึงเพิ่มปริมาณส่วนประกอบทุกตัวเป็นร้อยละ 10 ด้วย
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	35.84	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	45.67	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	15.51	
เบนโทไนท์	12.25	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	10.47	ใกล้เคียงตามสูตร
Total P_2O_5	20.57	ใกล้เคียงตามสูตร
Total K_2O	11.58	ไม่ตรงตามสูตร

จากตารางที่ ค.10 จะเห็นว่าหลังการเติมเบนโทไนท์ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลง โดยธาตุไนโตรเจนและธาตุฟอสฟอรัสที่วิเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้นจนเกือบใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ แต่ธาตุโพแทสเซียมที่ได้ยังมีค่าสูงกว่าสูตรที่ต้องการ จึงได้ทำการปรับส่วนประกอบใหม่ และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงได้ดังตารางที่ ค.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.11 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 หลังการเติมเบนโทไนท์และปรับส่วนประกอบใหม่

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์	13.20	
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	25	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	44	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	9	
เบนโทไนท์	10.13	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	9.16	ใกล้เคียงตามสูตร
Total P_2O_5	19.47	ใกล้เคียงตามสูตร
Total K_2O	6.43	ใกล้เคียงตามสูตร

จากตารางที่ ค.11 พบว่า ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 หลังการเติมเบนโทไนท์และปรับส่วนประกอบใหม่ มีความใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ และเมื่อคำนวณส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2 เป็นร้อยละ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ค.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.12 ปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	คำนวณเป็นร้อยละ
แร่ลีโอนาร์ไดต์และซีโอไลต์	13.20	13
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	25	25
แม่ปุ๋ยยูเรีย	44	43
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	9	9
เบนโทไนท์	10.13	10

3. การคำนวณปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

ตารางที่ ค.13 ส่วนประกอบทั้งหมดที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 และปริมาณธาตุอาหารที่พบ

ส่วนประกอบ	ปริมาณธาตุอาหาร (ร้อยละ)		
	Total N	Total P_2O_5	Total K_2O
แร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว	0.62	0.12	0.61
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	18	46	0
แม่ปุ๋ยยูเรีย	46	0	0
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	0	0	49

จากตารางที่ ค.13 หากต้องการผสมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 จากแร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว เพื่อให้มีปริมาณธาตุอาหารเท่ากับ 9-19-6 จำนวน 100 กรัม จากแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ยูเรีย (46-0-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-49) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดปริมาณแร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว ที่ใช้เป็น 44 กรัม ดังนั้น แร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว 44 กรัม จะประกอบไปด้วย

ธาตุอาหาร Total N = $\frac{\mathbf{44\times0.62}}{\mathbf{100}}$ = 0.2728 กรัม

ธาตุอาหาร P_2O_5 = $\frac{\mathbf{44\times0.12}}{\mathbf{100}}$ = 0.0528 กรัม

ธาตุอาหาร K_2O = $\frac{\mathbf{44\times0.61}}{\mathbf{100}}$ = 0.2684 กรัม

ดังนั้น ปริมาณของธาตุอาหารที่ต้องเพิ่มในแต่ละตัวจะเท่ากับ ปริมาณของธาตุอาหารที่ต้องการ (9-19-6) ลบออกด้วยปริมาณธาตุอาหารในแร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว 44 กรัม เป็นดังนี้

ธาตุอาหาร Total N = 9-0.2728 = 8.7272 กรัม

ธาตุอาหาร P_2O_5 = 19-0.0528 = 18.9472 กรัม

ธาตุอาหาร K_2O = 6-0.2684 = 5.7316 กรัม

2. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร P_2O_5 46 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร P_2O_5 46 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร P_2O_5 18.95 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.20 กรัม

3. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยต้องคำนวณปริมาณธาตุอาหาร Total N ที่มากับแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตก่อน ดังนี้

แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร Total N 18 กรัม

ถ้าใช้แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.20 กรัม จะมีธาตุอาหาร Total N 7.42 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร Total N ที่ยังขาดจะเท่ากับ 8.73-7.42 = 1.31 กรัม

สรุปได้ว่า ธาตุอาหาร Total N 46 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยยูเรีย 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร Total N 1.31 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยยูเรีย 2.85 กรัม

4. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-49) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร K_2O 49 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร K_2O 49 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร K_2O 5.73 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 11.69 กรัม

5. สรุปว่าปริมาณแม่ปุ๋ยที่ต้องเติมทั้งหมด คือ แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.20 กรัม แม่ปุ๋ยยูเรีย 2.85 กรัม และแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 11.69 กรัม รวมเป็นทั้งหมด 55.74 กรัม และเมื่อนำน้ำหนักรวมของแม่ปุ๋ยที่ต้องเติมรวมกับน้ำหนักแร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าวที่กำหนดตอนแรกเป็น 44 กรัม จะได้น้ำหนักปุ๋ยที่มีปริมาณธาตุอาหารเท่ากับ 9-19-6 จำนวน 99.74 กรัม (น้ำหนักรวมที่ได้อาจต่ำกว่าที่กำหนดบ้างเล็กน้อย) ดังนั้น ปริมาณแร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าวที่กำหนดในตอนแรกนั้นสามารถใช้ได้ เมื่อได้ปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยละลายช้าแล้วจึงทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังจากทำการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงดังตารางที่ ค.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.14 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว	44	จากการคำนวณข้างต้น
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	41.20	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	2.85	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	11.69	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	0.84	ไม่ตรงตามสูตร
Total P_2O_5	22.98	ไม่ตรงตามสูตร
Total K_2O	4.52	ไม่ตรงตามสูตร

จากตารางที่ ค.14 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ที่ได้ยังไม่ตรงตามสูตรที่ต้องการ จึงได้ทำการปรับส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 ใหม่ และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังจากทำการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงได้ดังตารางที่ ค.15

ตารางที่ ค.15 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 หลังทำการปรับส่วนประกอบ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว	25	
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	23.85	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	38.16	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	13.97	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	9.89	ใกล้เคียงตามสูตร
Total P_2O_5	20.32	ใกล้เคียงตามสูตร
Total K_2O	7.31	ใกล้เคียงตามสูตร

จากตารางที่ ค.15 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร พบว่า ปริมาณธาตุอาหารมีความใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ นอกจากนี้ พบว่า เม็ดปุ๋ยที่ปั้นเม็ดได้แตกออกจากกันง่าย และในการปั้นเม็ดขึ้นรูปยังทำได้ค่อนข้างยาก จึงได้มีการเติมเบนโทไนท์เป็นสารเชื่อมลงไปในส่วนผสมในอัตราส่วนร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัตถุดิบรวม และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารใหม่ ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารที่ได้แสดงดังตารางที่ ค.16

ตารางที่ ค.16 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 หลังการเติมเบนโทไนท์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว	27.50	เมื่อทำการเพิ่มเบนโทไนท์เป็นร้อยละ 10 จึงเพิ่มปริมาณส่วนประกอบทุกตัวเป็นร้อยละ 10 ด้วย
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	26.24	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	41.98	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	15.37	
เบนโทไนท์	12.34	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	6.90	ไม่ตรงตามสูตร
Total P_2O_5	17.36	ไม่ตรงตามสูตร
Total K_2O	9.28	ไม่ตรงตามสูตร

จากตารางที่ ค.16 จะเห็นว่าหลังการเติมเบนโทไนท์ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงและไม่ใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ ดังนั้น จึงได้ทำการปรับส่วนประกอบใหม่ และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงได้ดังตารางที่ ค.17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.17 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 หลังการเติมเบนโทไนท์และปรับส่วนประกอบใหม่

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว	28	
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	25	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	52	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	8	
เบนโทไนท์	12.56	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	9.21	ใกล้เคียงตามสูตร
Total P_2O_5	19.23	ใกล้เคียงตามสูตร
Total K_2O	5.68	ใกล้เคียงตามสูตร

จากตารางที่ ค.17 พบว่า ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 หลังการเติมเบนโทไนท์และปรับส่วนประกอบใหม่ มีความใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ และเมื่อคำนวณส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 เป็นร้อยละ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ค.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.18 ปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	คำนวณเป็นร้อยละ
แร่ลีโอนาร์ไดต์และฟางข้าว	28	22
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	25	20
แม่ปุ๋ยยูเรีย	52	41
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	8	7
เบนโทไนท์	12.56	10

4. การคำนวณปริมาณส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

ตารางที่ ค.19 ส่วนประกอบทั้งหมดที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 และปริมาณธาตุอาหารที่พบ

ส่วนประกอบ	ปริมาณธาตุอาหาร (ร้อยละ)		
	Total N	Total P_2O_5	Total K_2O
แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว	0.42	0.08	0.51
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	18	46	0
แม่ปุ๋ยยูเรีย	46	0	0
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	0	0	49

จากตารางที่ ค.19 หากต้องการผสมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 จากแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว เพื่อให้มีปริมาณธาตุอาหารเท่ากับ 9-19-6 จำนวน 100 กรัม จากแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ยูเรีย (46-0-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-49) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดปริมาณแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว ที่ใช้เป็น 44 กรัม ดังนั้น แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว 44 กรัม จะประกอบไปด้วย

ธาตุอาหาร Total N = $\frac{\mathbf{44\times0.42}}{\mathbf{100}}$ = 0.1848 กรัม

ธาตุอาหาร P_2O_5 = $\frac{\mathbf{44\times0.08}}{\mathbf{100}}$ = 0.0352 กรัม

ธาตุอาหาร K_2O = $\frac{\mathbf{44\times0.51}}{\mathbf{100}}$ = 0.2244 กรัม

ดังนั้น ปริมาณของธาตุอาหารที่ต้องเพิ่มในแต่ละตัวจะเท่ากับ ปริมาณของธาตุอาหารที่ต้องการ (9-19-6) ลบออกด้วยปริมาณธาตุอาหารในแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว 44 กรัม เป็นดังนี้

ธาตุอาหาร Total N = 9-0.1848 = 8.8152 กรัม

ธาตุอาหาร P_2O_5 = 19-0.0352 = 18.9648 กรัม

ธาตุอาหาร K_2O = 6-0.2244 = 5.7756 กรัม

2. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร P_2O_5 46 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร P_2O_5 46 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร P_2O_5 18.96 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.22 กรัม

3. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยต้องคำนวณปริมาณธาตุอาหาร Total N ที่มากับแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตก่อน ดังนี้

แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร Total N 18 กรัม

ถ้าใช้แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.22 กรัม จะมีธาตุอาหาร Total N 7.42 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร Total N ที่ยังขาดจะเท่ากับ 8.82-7.42 = 1.40 กรัม

สรุปได้ว่า ธาตุอาหาร Total N 46 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยยูเรีย 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร Total N 1.40 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยยูเรีย 3.04 กรัม

4. คำนวณปริมาณแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-49) ที่ต้องเติมในส่วนผสม โดยแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 100 กรัม จะประกอบไปด้วยธาตุอาหาร K_2O 49 กรัม

ดังนั้น ธาตุอาหาร K_2O 49 กรัม ได้จากแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 100 กรัม

ถ้าต้องการธาตุอาหาร K_2O 5.78 กรัม ต้องใช้แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 11.80 กรัม

5. สรุปว่าปริมาณแม่ปุ๋ยที่ต้องเติมทั้งหมด คือ แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 41.22 กรัม แม่ปุ๋ยยูเรีย 3.04 กรัม และแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 11.80 กรัม รวมเป็นทั้งหมด 56.06 กรัม และเมื่อนำน้ำหนักรวมของแม่ปุ๋ยที่ต้องเติมรวมกับน้ำหนักแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าวที่กำหนดตอนแรกเป็น 44 กรัม จะได้น้ำหนักปุ๋ยที่มีปริมาณธาตุอาหารเท่ากับ 9-19-6 จำนวน 100.06 กรัม (น้ำหนักรวมที่ได้อาจเกินไปกว่าที่กำหนดบ้าง) ดังนั้น ปริมาณแร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าวที่กำหนดในตอนแรกนั้นใช้ได้ เมื่อได้ปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยละลายช้าแล้วจึงทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังจากทำการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงดังตารางที่ ค.20

ตารางที่ ค.20 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว	44	จากการคำนวณข้างต้น
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	41.22	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	3.04	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	11.80	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	0.92	ไม่ตรงตามสูตร
Total P_2O_5	32.65	ไม่ตรงตามสูตร
Total K_2O	3.48	ไม่ตรงตามสูตร

จากตารางที่ ค.20 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ที่ได้ยังไม่ตรงตามสูตรที่ต้องการ จึงได้ทำการปรับส่วนประกอบสำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 ใหม่ และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังจากทำการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงได้ดังตารางที่ ค.21

ตารางที่ ค.21 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 หลังทำการปรับส่วนประกอบ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว	27	
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	19.52	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	39.94	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	14.00	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	9.94	ใกล้เคียงตามสูตร
Total P_2O_5	18.45	ใกล้เคียงตามสูตร
Total K_2O	6.29	ใกล้เคียงตามสูตร

จากตารางที่ ค.21 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหาร พบว่า ธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ แต่เม็ดปุ๋ยที่ปั้นเม็ดได้แตกออกจากกันง่าย และในการปั้นเม็ดขึ้นรูปยังทำได้ค่อนข้างยาก จึงได้มีการเติมเบนโทไนท์เป็นสารเชื่อมลงไปในส่วนผสมในอัตราส่วนร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัตถุดิบรวม และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารใหม่ ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารที่ได้แสดงดังตารางที่ ค.22

ตารางที่ ค.22 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 หลังการเติมเบนโทไนท์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว	29.70	เมื่อทำการเพิ่มเบนโทไนท์เป็นร้อยละ 10 จึงเพิ่มปริมาณส่วนประกอบทุกตัวเป็นร้อยละ 10 ด้วย
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	21.47	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	43.93	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	15.40	
เบนโทไนท์	12.28	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	7.93	ไม่ตรงตามสูตร
Total P_2O_5	16.54	ไม่ตรงตามสูตร
Total K_2O	8.92	ไม่ตรงตามสูตร

จากตารางที่ ค.22 จะเห็นว่าหลังการเติมเบนโทไนท์ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงและไม่ใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ ดังนั้น จึงได้ทำการปรับส่วนประกอบใหม่ และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลังการปั้นเม็ด ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารแสดงได้ดังตารางที่ ค.23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.23 ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 หลังการเติมเบนโทไนท์และปรับส่วนประกอบใหม่

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	หมายเหตุ
แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว	29.70	
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	39	
แม่ปุ๋ยยูเรีย	63	
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	12.80	
เบนโทไนท์	16.28	
ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร ที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
Total N	9.98	ใกล้เคียงตามสูตร
Total P_2O_5	20.04	ใกล้เคียงตามสูตร
Total K_2O	5.85	ใกล้เคียงตามสูตร

จากตารางที่ ค.23 พบว่า ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ทั้งธาตุไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัส และธาตุโพแทสเซียม ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 หลังการเติมเบนโทไนท์และปรับส่วนประกอบใหม่ มีความใกล้เคียงกับสูตรที่ต้องการ และเมื่อคำนวณส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 เป็นร้อยละ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ค.24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.24 ปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	คำนวณเป็นร้อยละ
แร่ลีโอนาร์ไดต์ ซีโอไลต์ และฟางข้าว	29.70	18
แม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	39	24
แม่ปุ๋ยยูเรีย	63	39
แม่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	12.80	9
เบนโทไนท์	16.28	10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง.
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารของเบนโทไนท์

ตารางที่ ง.1 ปริมาณธาตุอาหารของเบนโทไนท์

ธาตุอาหาร	ปริมาณธาตุอาหาร (ร้อยละ)
ธาตุไนโตรเจน (Total N)	0.03
ธาตุฟอสฟอรัส (Total P_2O_5)	0.10
ธาตุโพแทสเซียม (Total K_2O)	0.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก จ.
ผลการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของเบนโทไนท์

จากการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของเบนโทไนท์ ได้ทำการเปรียบเทียบเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของเบนโทไนท์ต่อน้ำหนักรวมของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตปุ๋ยละลายช้า โดยใช้อัตราส่วนของเบนโทไนท์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักวัตถุดิบรวม จากนั้นนำเบนโทไนท์มาผสมกับวัตถุดิบ และหลังจากผสมวัตถุดิบทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการปั้นเม็ดปุ๋ยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 มิลลิเมตร ซึ่งแต่ละอัตราส่วนของเบนโทไนท์มีลักษณะของเม็ดปุ๋ยและอุปสรรคระหว่างการดำเนินการปั้นเม็ดดังรายละเอียดตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ จ.1 ปริมาณของเบนโทไนท์และลักษณะของเม็ดปุ๋ยรวมถึงอุปสรรคระหว่างการดำเนินการปั้นเม็ดที่เกิดขึ้น

ปริมาณของเบนโทไนท์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ลักษณะของเม็ดปุ๋ยและอุปสรรคระหว่างการดำเนินการปั้นเม็ด
5	ส่วนผสมที่ได้หลังจากการผสมคลุกเคล้ากันแล้วมีลักษณะแห้งและร่วน ขณะทำการปั้นเม็ดเป็นไปอย่างยากลำบาก โดยเฉพาะปุ๋ยตัวอย่างที่มีฟางข้าวเป็นส่วนประกอบ เนื่องจากส่วนผสมนั้นมีลักษณะแห้งทำให้จับตัวกันได้ไม่ดี ปุ๋ยทุกสูตรจึงไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดได้
10	ส่วนผสมที่ได้จากการผสมคลุกเคล้ากันแล้วมีลักษณะเปียกและค่อนข้างเหนียว การปั้นเม็ดทำได้ค่อนข้างง่ายเนื่องจากส่วนผสมมีลักษณะเหนียวและจับตัวกันได้ดี ปุ๋ยทุกสูตรสามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ และเมื่อวางผึ่งลมไว้ระยะหนึ่ง พบว่า ส่วนผสมในเม็ดปุ๋ยไม่มีการแยกออกจากกัน
15	ส่วนผสมที่ได้หลังจากการผสมคลุกเคล้ากันแล้ว พบว่า มีลักษณะเปียกและเหนียว การปั้นเม็ด พบว่า สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดได้แต่ในปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนผสม พบว่า ทำได้ค่อนข้างยาก นอกจากนี้เม็ดปุ๋ยยังมีน้ำไหลออกมา
20	ส่วนผสมที่ได้จากการผสมคลุกเคล้ากันแล้วมีลักษณะเปียกและเหนียวมาก สำหรับการปั้นเม็ดนั้น พบว่า ปุ๋ยทุกสูตรทำได้ยากมาก เนื่องจากส่วนผสมมีลักษณะที่เหนียวเกินไปทำให้มีส่วนผสมติดมือขณะทำการปั้น และมีน้ำที่เกิดจากการปั้นเม็ดไหลออกมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ฉ.
ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาปุ๋ยตัวอย่างต่อปริมาณธาตุอาหาร

ตารางที่ ฉ.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาปุ๋ยตัวอย่างต่อปริมาณธาตุอาหาร

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)	ปริมาณธาตุอาหารที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)		
	Total N	Total P_2O_5	Total K_2O
ไม่ผ่านการเผา (ธาตุอาหารเริ่มต้น)	8.91	18.61	6.91
100	7.77	16.51	7.76
200	5.79	16.37	10.37
300	3.20	12.02	10.72

จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่า การเผาปุ๋ยตัวอย่างโดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำให้ปุ๋ยตัวอย่างมีธาตุอาหารใกล้เคียงกับปุ๋ยที่ไม่ได้ผ่านการเผามากที่สุด แต่เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ยังเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ปุ๋ยตัวอย่างมีการชะละลายของธาตุอาหารออกมาค่อนข้างมาก เนื่องจาก อนุภาคต่างๆ ภายในเม็ดปุ๋ยยังอาจยึดกันไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้เมื่อทดสอบแช่ปุ๋ยลงในน้ำกลั่น เม็ดปุ๋ยจึงมีการแตกออกจากกัน แต่สำหรับปุ๋ยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เมื่อทดสอบแช่ปุ๋ยลงในน้ำกลั่น พบว่า เม็ดปุ๋ยสามารถทนต่อการถูกละลายของน้ำกลั่นมากขึ้น ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกเผาปุ๋ยตัวอย่างที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจาก เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ปุ๋ยตัวอย่างมีธาตุอาหารใกล้เคียงกับปุ๋ยที่ไม่ได้ผ่านการเผารองลงมาจากการเผาปุ๋ยตัวอย่างโดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และยังทำให้ปุ๋ยตัวอย่างทนต่อการละลายน้ำมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ช.

ผลการวิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหาร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน

อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนที่พีเอช 6.5

ตารางที่ ช.1 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0031	0.0031	0.0034	0.0032	0.0385
0.167	0.0038	0.0039	0.0037	0.0038	0.0227
0.25	0.0053	0.0053	0.0053	0.0053	0.0213
0.5	0.0035	0.0034	0.0037	0.0035	0.0071
1	0.0045	0.0045	0.0043	0.0044	0.0044
1.5	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043	0.0029
2	0.0031	0.0032	0.0032	0.0032	0.0016
2.5	0.0086	0.0086	0.0085	0.0086	0.0034
3	0.0100	0.0101	0.0099	0.0100	0.0033
4	0.0109	0.0108	0.0110	0.0109	0.0027
6	0.0104	0.0103	0.0105	0.0104	0.0017
18	0.0221	0.0223	0.0221	0.0222	0.0012
24	0.0268	0.0267	0.0270	0.0268	0.0011
48	0.0399	0.0399	0.0399	0.0399	0.0008
168	0.0453	0.0453	0.0453	0.0453	0.0003

ตารางที่ ช.2 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0545	0.0584	0.0623	0.0584	0.7011
0.167	0.0617	0.0694	0.0540	0.0617	0.3703
0.25	0.0699	0.0699	0.0699	0.0699	0.2794
0.5	0.0894	0.0933	0.0855	0.0894	0.1787
1	0.1234	0.1234	0.1119	0.1196	0.1196
1.5	0.1245	0.1323	0.1167	0.1245	0.0830
2	0.1239	0.1317	0.1278	0.1278	0.0639
2.5	0.1278	0.1278	0.1278	0.1278	0.0511
3	0.1347	0.1232	0.1347	0.1309	0.0436
4	0.1432	0.1278	0.1355	0.1355	0.0339
6	0.1396	0.1357	0.1435	0.1396	0.0233
18	0.1476	0.1476	0.1476	0.1476	0.0082
24	0.1438	0.1477	0.1555	0.1490	0.0062
48	0.1507	0.1546	0.1468	0.1507	0.0031
168	0.1512	0.1551	0.1473	0.1512	0.0009

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.3 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1313	0.1313	0.1206	0.1277	1.5326
0.167	0.1351	0.1422	0.1280	0.1351	0.8106
0.25	0.1389	0.1389	0.1389	0.1389	0.5555
0.5	0.1523	0.1416	0.1523	0.1487	0.2974
1	0.1531	0.1602	0.1567	0.1567	0.1567
1.5	0.1526	0.1491	0.1562	0.1526	0.1017
2	0.1639	0.1639	0.1639	0.1639	0.0820
2.5	0.1665	0.1594	0.1736	0.1665	0.0666
3	0.1673	0.1637	0.1708	0.1673	0.0558
4	0.1738	0.1773	0.1596	0.1702	0.0426
6	0.1705	0.1705	0.1705	0.1705	0.0284
18	0.1843	0.1737	0.1737	0.1772	0.0098
24	0.1773	0.1809	0.1738	0.1773	0.0074
48	0.1810	0.1810	0.1917	0.1846	0.0038
168	0.1852	0.1888	0.1817	0.1852	0.0011

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.4 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0814	0.0737	0.0892	0.0814	0.9768
0.167	0.0736	0.0736	0.0736	0.0736	0.4415
0.25	0.0696	0.0696	0.0696	0.0696	0.2785
0.5	0.0779	0.0818	0.0857	0.0818	0.1635
1	0.1163	0.1086	0.1124	0.1124	0.1124
1.5	0.1123	0.1123	0.1123	0.1123	0.0748
2	0.1314	0.1237	0.1276	0.1276	0.0638
2.5	0.1322	0.1360	0.1399	0.1360	0.0544
3	0.1355	0.1355	0.1355	0.1355	0.0452
4	0.1400	0.1361	0.1439	0.1400	0.0350
6	0.1523	0.1445	0.1445	0.1471	0.0245
18	0.1520	0.1520	0.1558	0.1533	0.0085
24	0.1584	0.1584	0.1584	0.1584	0.0066
48	0.1626	0.1588	0.1549	0.1588	0.0033
168	0.1750	0.1828	0.1789	0.1789	0.0011

ตารางที่ ช.5 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1988	0.1909	0.1949	0.1949	2.3383
0.167	0.2031	0.2109	0.2187	0.2109	1.2656
0.25	0.2324	0.2204	0.2204	0.2244	0.8976
0.5	0.2346	0.2346	0.2346	0.2346	0.4693
1	0.2365	0.2444	0.2523	0.2444	0.2444
1.5	0.2503	0.2580	0.2426	0.2503	0.1669
2	0.2585	0.2547	0.2508	0.2547	0.1273
2.5	0.2489	0.2569	0.2649	0.2569	0.1028
3	0.2549	0.2628	0.2589	0.2589	0.0863
4	0.2563	0.2645	0.2604	0.2604	0.0651
6	0.2665	0.2627	0.2588	0.2627	0.0438
18	0.2589	0.2670	0.2750	0.2670	0.0148
24	0.2421	0.2663	0.2905	0.2663	0.0111
48	0.2703	0.2781	0.2624	0.2703	0.0056
168	0.2936	0.2976	0.2897	0.2936	0.0017

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนที่พีเอช 7.5

ตารางที่ ช.6 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0149
0.167	0.0014	0.0017	0.0020	0.0017	0.0102
0.25	0.0023	0.0025	0.0022	0.0023	0.0093
0.5	0.0033	0.0033	0.0031	0.0032	0.0064
1	0.0029	0.0033	0.0036	0.0033	0.0033
1.5	0.0046	0.0048	0.0051	0.0049	0.0032
2	0.0051	0.0051	0.0050	0.0051	0.0025
2.5	0.0050	0.0051	0.0053	0.0051	0.0020
3	0.0063	0.0065	0.0062	0.0063	0.0021
4	0.0081	0.0081	0.0084	0.0082	0.0020
6	0.0125	0.0127	0.0124	0.0125	0.0021
18	0.0207	0.0207	0.0209	0.0208	0.0012
24	0.0270	0.0271	0.0268	0.0270	0.0011
48	0.0414	0.0411	0.0417	0.0414	0.0009
168	0.0713	0.0718	0.0709	0.0713	0.0004

ตารางที่ ช.7 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0819	0.0819	0.0819	0.0819	0.9832
0.167	0.1092	0.1053	0.1014	0.1053	0.6321
0.25	0.1014	0.0975	0.1053	0.1014	0.4058
0.5	0.1132	0.1014	0.0897	0.1014	0.2029
1	0.1210	0.1288	0.1132	0.1210	0.1210
1.5	0.1444	0.1366	0.1288	0.1366	0.0910
2	0.1483	0.1405	0.1561	0.1483	0.0741
2.5	0.1522	0.1444	0.1483	0.1483	0.0593
3	0.1522	0.1483	0.1444	0.1483	0.0494
4	0.1561	0.1522	0.1600	0.1561	0.0390
6	0.1444	0.1678	0.1561	0.1561	0.0260
18	0.1678	0.1678	0.1678	0.1678	0.0093
24	0.1756	0.1756	0.1756	0.1756	0.0073
48	0.1717	0.1756	0.1678	0.1717	0.0036
168	0.1795	0.1795	0.1912	0.1834	0.0011

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.8 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1163	0.1202	0.1125	0.1163	1.3962
0.167	0.1354	0.1316	0.1277	0.1316	0.7894
0.25	0.1406	0.1524	0.1406	0.1446	0.5782
0.5	0.1868	0.1868	0.1868	0.1868	0.3736
1	0.1940	0.1940	0.1940	0.1940	0.1940
1.5	0.2022	0.1983	0.1944	0.1983	0.1322
2	0.2052	0.2014	0.2091	0.2052	0.1026
2.5	0.2211	0.2211	0.2211	0.2211	0.0884
3	0.2220	0.2181	0.2142	0.2181	0.0727
4	0.2329	0.2212	0.2096	0.2212	0.0553
6	0.2251	0.2174	0.2251	0.2226	0.0371
18	0.2212	0.2173	0.2173	0.2186	0.0121
24	0.2375	0.2297	0.2453	0.2375	0.0099
48	0.2322	0.2399	0.2477	0.2399	0.0050
168	0.2487	0.2448	0.2409	0.2448	0.0015

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.9 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0818	0.0889	0.0960	0.0889	1.0669
0.167	0.1071	0.1000	0.0928	0.1000	0.6000
0.25	0.1103	0.1032	0.0961	0.1032	0.4128
0.5	0.1075	0.1147	0.1004	0.1075	0.2151
1	0.1290	0.1254	0.1218	0.1254	0.1254
1.5	0.1455	0.1526	0.1384	0.1455	0.0970
2	0.1718	0.1575	0.1539	0.1611	0.0805
2.5	0.1529	0.1529	0.1529	0.1529	0.0612
3	0.1702	0.1702	0.1596	0.1667	0.0556
4	0.1679	0.1751	0.1715	0.1715	0.0429
6	0.1744	0.1744	0.1744	0.1744	0.0291
18	0.1713	0.1748	0.1856	0.1772	0.0098
24	0.1749	0.1785	0.1714	0.1749	0.0073
48	0.1856	0.1892	0.1820	0.1856	0.0039
168	0.1805	0.1911	0.1841	0.1852	0.0011

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.10 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.2138	0.2216	0.2177	0.2177	2.6125
0.167	0.2335	0.2295	0.2256	0.2295	1.3771
0.25	0.2341	0.2303	0.2379	0.2341	0.9364
0.5	0.2263	0.2422	0.2342	0.2342	0.4685
1	0.2326	0.2364	0.2403	0.2364	0.2364
1.5	0.2416	0.2336	0.2376	0.2376	0.1584
2	0.2401	0.2401	0.2323	0.2375	0.1188
2.5	0.2619	0.2301	0.2460	0.2460	0.0984
3	0.2483	0.2404	0.2325	0.2404	0.0801
4	0.2754	0.2321	0.2518	0.2531	0.0633
6	0.2792	0.2517	0.2556	0.2622	0.0437
18	0.2713	0.2713	0.2713	0.2713	0.0151
24	0.2764	0.2686	0.2842	0.2764	0.0115
48	0.2952	0.2680	0.2758	0.2797	0.0058
168	0.3360	0.3282	0.3321	0.3321	0.0020

อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนที่พีเอช 8.5

ตารางที่ ช.11 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0006	0.0006	0.0007	0.0006	0.0074
0.167	0.0007	0.0005	0.0006	0.0006	0.0037
0.25	0.0008	0.0011	0.0005	0.0008	0.0031
0.5	0.0008	0.0011	0.0009	0.0009	0.0019
1	0.0009	0.0011	0.0012	0.0011	0.0011
1.5	0.0015	0.0009	0.0012	0.0012	0.0008
2	0.0012	0.0016	0.0016	0.0014	0.0007
2.5	0.0015	0.0017	0.0023	0.0019	0.0007
3	0.0029	0.0033	0.0036	0.0033	0.0011
4	0.0040	0.0037	0.0034	0.0037	0.0009
6	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0008
18	0.0146	0.0149	0.0143	0.0146	0.0008
24	0.0186	0.0183	0.0180	0.0183	0.0008
48	0.0265	0.0262	0.0259	0.0262	0.0005
168	0.0488	0.0568	0.0467	0.0508	0.0003

ตารางที่ ช.12 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0503	0.0431	0.0359	0.0431	0.5171
0.167	0.0501	0.0537	0.0465	0.0501	0.3008
0.25	0.0574	0.0574	0.0682	0.0610	0.2442
0.5	0.0819	0.0677	0.0641	0.0712	0.1424
1	0.0887	0.0958	0.0923	0.0923	0.0923
1.5	0.1281	0.1203	0.1125	0.1203	0.0802
2	0.1001	0.1309	0.1155	0.1155	0.0577
2.5	0.1275	0.1121	0.1314	0.1236	0.0495
3	0.1235	0.1274	0.1312	0.1274	0.0425
4	0.1390	0.1236	0.1313	0.1313	0.0328
6	0.1317	0.1394	0.1239	0.1317	0.0219
18	0.1555	0.1322	0.1088	0.1322	0.0073
24	0.1407	0.1486	0.1329	0.1407	0.0059
48	0.1462	0.1462	0.1462	0.1462	0.0030
168	0.1664	0.1277	0.1470	0.1470	0.0009

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.13 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1367	0.1367	0.1250	0.1328	1.5937
0.167	0.1277	0.1315	0.1238	0.1277	0.7660
0.25	0.1275	0.1314	0.1352	0.1314	0.5254
0.5	0.1599	0.1443	0.1287	0.1443	0.2886
1	0.1516	0.1710	0.1671	0.1632	0.1632
1.5	0.1561	0.1639	0.1717	0.1639	0.1093
2	0.1783	0.1666	0.1550	0.1666	0.0833
2.5	0.1896	0.1973	0.2051	0.1973	0.0789
3	0.2081	0.1888	0.1926	0.1965	0.0655
4	0.1886	0.1963	0.2040	0.1963	0.0491
6	0.1897	0.2013	0.2129	0.2013	0.0335
18	0.1940	0.2018	0.2095	0.2018	0.0112
24	0.2160	0.2198	0.2005	0.2121	0.0088
48	0.2295	0.2217	0.2139	0.2217	0.0046
168	0.2358	0.2203	0.2281	0.2281	0.0014

ตารางที่ ช.14 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0807	0.0730	0.0768	0.0768	0.9222
0.167	0.0818	0.0857	0.0896	0.0857	0.5144
0.25	0.0934	0.0778	0.0856	0.0856	0.3423
0.5	0.1041	0.1079	0.1002	0.1041	0.2081
1	0.1081	0.1158	0.1235	0.1158	0.1158
1.5	0.1401	0.1673	0.1245	0.1440	0.0960
2	0.1707	0.1436	0.1280	0.1474	0.0737
2.5	0.1540	0.1540	0.1540	0.1540	0.0616
3	0.1775	0.1234	0.1620	0.1543	0.0514
4	0.1663	0.1586	0.1509	0.1586	0.0397
6	0.1697	0.1581	0.1581	0.1619	0.0270
18	0.1595	0.1750	0.1673	0.1673	0.0093
24	0.1665	0.1665	0.1743	0.1691	0.0070
48	0.1905	0.1594	0.1749	0.1749	0.0036
168	0.1714	0.1792	0.1870	0.1792	0.0011

ตารางที่ ช.15 อัตราการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1900	0.1979	0.2059	0.1979	2.3753
0.167	0.1980	0.2057	0.2135	0.2057	1.2343
0.25	0.2124	0.2124	0.2008	0.2086	0.8342
0.5	0.2075	0.2036	0.2232	0.2114	0.4229
1	0.2329	0.2053	0.2013	0.2132	0.2132
1.5	0.2097	0.2253	0.2175	0.2175	0.1450
2	0.2302	0.2104	0.2144	0.2183	0.1092
2.5	0.2399	0.2159	0.2159	0.2239	0.0895
3	0.2311	0.2155	0.2233	0.2233	0.0744
4	0.2286	0.2484	0.2444	0.2405	0.0601
6	0.2480	0.2403	0.2325	0.2403	0.0400
18	0.2388	0.2504	0.2388	0.2427	0.0135
24	0.2448	0.2371	0.2524	0.2448	0.0102
48	0.2723	0.2447	0.2645	0.2605	0.0054
168	0.2833	0.2794	0.2873	0.2833	0.0017

อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัส

อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสที่พีเอช 6.5

ตารางที่ ช.16 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0127
0.167	0.0011	0.0011	0.0014	0.0012	0.0074
0.25	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0045
0.5	0.0012	0.0013	0.0011	0.0012	0.0025
1	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013
1.5	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0011
2	0.0032	0.0034	0.0034	0.0033	0.0017
2.5	0.0038	0.0039	0.0037	0.0038	0.0015
3	0.0034	0.0035	0.0035	0.0035	0.0012
4	0.0043	0.0044	0.0044	0.0044	0.0011
6	0.0045	0.0046	0.0046	0.0046	0.0008
18	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0006
24	0.0213	0.0214	0.0214	0.0214	0.0009
48	0.0341	0.0349	0.0349	0.0347	0.0007
168	0.0498	0.0503	0.0503	0.0501	0.0003

ตารางที่ ช.17 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0914	0.0927	0.0923	0.0921	1.1056
0.167	0.1110	0.1101	0.1110	0.1107	0.6644
0.25	0.1375	0.1380	0.1357	0.1371	0.5483
0.5	0.1808	0.1795	0.1804	0.1802	0.3604
1	0.2258	0.2247	0.2236	0.2247	0.2247
1.5	0.2383	0.2418	0.2449	0.2417	0.1611
2	0.2954	0.2932	0.3042	0.2976	0.1488
2.5	0.2988	0.2922	0.2988	0.2966	0.1186
3	0.2984	0.2984	0.3050	0.3006	0.1002
4	0.3060	0.3060	0.2994	0.3038	0.0760
6	0.3008	0.3052	0.3096	0.3052	0.0509
18	0.3193	0.3193	0.3258	0.3215	0.0179
24	0.3212	0.3190	0.3234	0.3212	0.0134
48	0.3245	0.3290	0.3268	0.3268	0.0068
168	0.3271	0.3315	0.3315	0.3300	0.0020

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.18 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.2068	0.2081	0.2081	0.2077	2.4923
0.167	0.1939	0.1926	0.1939	0.1935	1.1610
0.25	0.2132	0.2141	0.2123	0.2132	0.8528
0.5	0.2354	0.2354	0.2354	0.2354	0.4708
1	0.2382	0.2382	0.2382	0.2382	0.2382
1.5	0.2427	0.2449	0.2470	0.2449	0.1633
2	0.2495	0.2474	0.2452	0.2474	0.1237
2.5	0.2555	0.2576	0.2533	0.2555	0.1022
3	0.2568	0.2546	0.2460	0.2525	0.0842
4	0.2698	0.2590	0.2612	0.2634	0.0658
6	0.2669	0.2669	0.2605	0.2648	0.0441
18	0.2644	0.2687	0.2601	0.2644	0.0147
24	0.2624	0.2624	0.2689	0.2646	0.0110
48	0.2880	0.2815	0.2815	0.2837	0.0059
168	0.2891	0.2891	0.2826	0.2869	0.0017

ตารางที่ ช.19 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1120	0.1128	0.1124	0.1124	1.3488
0.167	0.0965	0.0969	0.0960	0.0965	0.5787
0.25	0.1055	0.1051	0.1033	0.1047	0.4187
0.5	0.1311	0.1311	0.1297	0.1306	0.2612
1	0.1715	0.1719	0.1724	0.1719	0.1719
1.5	0.1937	0.1924	0.1924	0.1928	0.1285
2	0.1967	0.1945	0.1989	0.1967	0.0983
2.5	0.1960	0.1960	0.1982	0.1967	0.0787
3	0.2012	0.1990	0.2012	0.2004	0.0668
4	0.2088	0.2088	0.2066	0.2081	0.0520
6	0.2109	0.2131	0.2086	0.2109	0.0351
18	0.2131	0.2175	0.2153	0.2153	0.0120
24	0.2091	0.2091	0.2113	0.2099	0.0087
48	0.2171	0.2215	0.2215	0.2200	0.0046
168	0.2389	0.2389	0.2411	0.2396	0.0014

ตารางที่ ช.20 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.2162	0.2184	0.2206	0.2184	2.6208
0.167	0.2246	0.2246	0.2246	0.2246	1.3473
0.25	0.2287	0.2287	0.2287	0.2287	0.9150
0.5	0.2367	0.2367	0.2367	0.2367	0.4733
1	0.2287	0.2308	0.2330	0.2308	0.2308
1.5	0.2395	0.2395	0.2395	0.2395	0.1597
2	0.2474	0.2474	0.2474	0.2474	0.1237
2.5	0.2476	0.2476	0.2476	0.2476	0.0991
3	0.2501	0.2478	0.2456	0.2478	0.0826
4	0.2477	0.2477	0.2477	0.2477	0.0619
6	0.2505	0.2505	0.2505	0.2505	0.0418
18	0.2513	0.2513	0.2513	0.2513	0.0140
24	0.2303	0.2751	0.2527	0.2527	0.0105
48	0.2562	0.2562	0.2562	0.2562	0.0053
168	0.2566	0.2566	0.2566	0.2566	0.0015

อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสที่พีเอช 7.5

ตารางที่ ช.21 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0002	0.0004	0.0002	0.0003	0.0032
0.167	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0016
0.25	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0025
0.5	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0019
1	0.0011	0.0010	0.0009	0.0010	0.0010
1.5	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0010
2	0.0016	0.0015	0.0017	0.0016	0.0008
2.5	0.0018	0.0019	0.0016	0.0018	0.0007
3	0.0025	0.0026	0.0026	0.0025	0.0008
4	0.0038	0.0036	0.0036	0.0037	0.0009
6	0.0038	0.0039	0.0039	0.0038	0.0006
18	0.0132	0.0132	0.0131	0.0132	0.0007
24	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0004
48	0.0306	0.0309	0.0308	0.0308	0.0006
168	0.0727	0.0723	0.0732	0.0727	0.0004

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.22 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1107	0.1112	0.1112	0.1110	1.3324
0.167	0.1237	0.1258	0.1241	0.1245	0.7472
0.25	0.1333	0.1342	0.1337	0.1337	0.5350
0.5	0.1572	0.1581	0.1576	0.1576	0.3152
1	0.2025	0.2003	0.2014	0.2014	0.2014
1.5	0.2453	0.2453	0.2497	0.2468	0.1645
2	0.2484	0.2484	0.2506	0.2491	0.1246
2.5	0.2542	0.2542	0.2542	0.2542	0.1017
3	0.2540	0.2540	0.2540	0.2540	0.0847
4	0.2664	0.2686	0.2686	0.2679	0.0670
6	0.2616	0.2616	0.2550	0.2594	0.0432
18	0.2564	0.2586	0.2674	0.2608	0.0145
24	0.2747	0.2747	0.2747	0.2747	0.0114
48	0.2706	0.2706	0.2706	0.2706	0.0056
168	0.2898	0.2898	0.2848	0.2881	0.0017

ตารางที่ ช.23 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1458	0.1458	0.1458	0.1458	1.7498
0.167	0.1828	0.1840	0.1853	0.1840	1.1043
0.25	0.1871	0.1846	0.1896	0.1871	0.7483
0.5	0.2103	0.2079	0.2054	0.2079	0.4157
1	0.2124	0.2136	0.2149	0.2136	0.2136
1.5	0.2356	0.2368	0.2381	0.2368	0.1579
2	0.2352	0.2377	0.2401	0.2377	0.1188
2.5	0.2457	0.2457	0.2532	0.2482	0.0993
3	0.2483	0.2459	0.2478	0.2473	0.0824
4	0.2605	0.2592	0.2580	0.2592	0.0648
6	0.2570	0.2521	0.2546	0.2546	0.0424
18	0.2651	0.2651	0.2651	0.2651	0.0147
24	0.2631	0.2631	0.2656	0.2639	0.0110
48	0.2690	0.2690	0.2690	0.2690	0.0056
168	0.2834	0.2834	0.2834	0.2834	0.0017

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.24 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0781	0.0778	0.0776	0.0778	0.9341
0.167	0.0883	0.0883	0.0883	0.0883	0.5297
0.25	0.0979	0.0953	0.0966	0.0966	0.3864
0.5	0.0954	0.0933	0.0937	0.0941	0.1882
1	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400	0.1400
1.5	0.1651	0.1651	0.1651	0.1651	0.1101
2	0.1654	0.1658	0.1675	0.1663	0.0831
2.5	0.1843	0.1843	0.1843	0.1843	0.0737
3	0.1846	0.1846	0.1846	0.1846	0.0615
4	0.1847	0.1847	0.1847	0.1847	0.0462
6	0.1921	0.1921	0.1934	0.1926	0.0321
18	0.1959	0.1959	0.1959	0.1959	0.0109
24	0.1963	0.1963	0.1976	0.1967	0.0082
48	0.1973	0.1973	0.1973	0.1973	0.0041
168	0.1998	0.2011	0.2011	0.2007	0.0012

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.25 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.2114	0.2125	0.2136	0.2125	2.5505
0.167	0.2149	0.2149	0.2149	0.2149	1.2892
0.25	0.2179	0.2179	0.2179	0.2179	0.8716
0.5	0.2217	0.2240	0.2262	0.2240	0.4480
1	0.2349	0.2349	0.2349	0.2349	0.2349
1.5	0.2405	0.2405	0.2473	0.2427	0.1618
2	0.2468	0.2468	0.2468	0.2468	0.1234
2.5	0.2433	0.2455	0.2476	0.2455	0.0982
3	0.2485	0.2485	0.2485	0.2485	0.0828
4	0.2486	0.2486	0.2486	0.2486	0.0622
6	0.2492	0.2492	0.2492	0.2492	0.0415
18	0.2500	0.2478	0.2523	0.2500	0.0139
24	0.2511	0.2289	0.2733	0.2511	0.0105
48	0.2513	0.2513	0.2513	0.2513	0.0052
168	0.2568	0.2546	0.2523	0.2546	0.0015

อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสที่พีเอช 8.5

ตารางที่ ช.26 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0036
0.167	0.0007	0.0007	0.0008	0.0007	0.0044
0.25	0.0008	0.0008	0.0009	0.0008	0.0032
0.5	0.0010	0.0010	0.0009	0.0010	0.0020
1	0.0012	0.0011	0.0011	0.0012	0.0012
1.5	0.0014	0.0014	0.0015	0.0014	0.0009
2	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0008
2.5	0.0017	0.0017	0.0019	0.0018	0.0007
3	0.0025	0.0025	0.0023	0.0024	0.0008
4	0.0032	0.0031	0.0033	0.0032	0.0008
6	0.0036	0.0035	0.0035	0.0035	0.0006
18	0.0107	0.0107	0.0107	0.0107	0.0006
24	0.0184	0.0184	0.0184	0.0184	0.0008
48	0.0189	0.0189	0.0189	0.0189	0.0004
168	0.0484	0.0488	0.0484	0.0485	0.0003

ตารางที่ ช.27 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0979	0.0979	0.0975	0.0978	1.1731
0.167	0.1128	0.1128	0.1128	0.1128	0.6766
0.25	0.1229	0.1220	0.1238	0.1229	0.4916
0.5	0.1420	0.1441	0.1420	0.1427	0.2854
1	0.1833	0.1833	0.1875	0.1847	0.1847
1.5	0.2197	0.2218	0.2240	0.2218	0.1479
2	0.2232	0.2254	0.2275	0.2254	0.1127
2.5	0.2487	0.2487	0.2444	0.2473	0.0989
3	0.2469	0.2469	0.2469	0.2469	0.0823
4	0.2499	0.2499	0.2499	0.2499	0.0625
6	0.2488	0.2530	0.2509	0.2509	0.0418
18	0.2529	0.2551	0.2508	0.2529	0.0141
24	0.2583	0.2583	0.2583	0.2583	0.0108
48	0.2593	0.2593	0.2593	0.2593	0.0054
168	0.2818	0.2839	0.2861	0.2839	0.0017

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.28 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1438	0.1449	0.1492	0.1460	1.7517
0.167	0.1478	0.1499	0.1521	0.1499	0.8996
0.25	0.1562	0.1572	0.1583	0.1572	0.6289
0.5	0.1857	0.1900	0.1857	0.1871	0.3743
1	0.1982	0.1916	0.1938	0.1945	0.1945
1.5	0.2103	0.2113	0.2124	0.2113	0.1409
2	0.2119	0.2119	0.2119	0.2119	0.1059
2.5	0.2153	0.2153	0.2153	0.2153	0.0861
3	0.2199	0.2199	0.2178	0.2192	0.0731
4	0.2186	0.2207	0.2229	0.2207	0.0552
6	0.2228	0.2228	0.2228	0.2228	0.0371
18	0.2240	0.2240	0.2240	0.2240	0.0124
24	0.2247	0.2247	0.2247	0.2247	0.0094
48	0.2345	0.2388	0.2345	0.2359	0.0049
168	0.2363	0.2385	0.2385	0.2377	0.0014

ตารางที่ ช.29 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0808	0.0872	0.0830	0.0837	1.0041
0.167	0.0928	0.0939	0.0949	0.0939	0.5631
0.25	0.0969	0.0948	0.0969	0.0962	0.3848
0.5	0.1195	0.1195	0.1238	0.1209	0.2418
1	0.1517	0.1474	0.1517	0.1503	0.1503
1.5	0.1705	0.1705	0.1705	0.1705	0.1137
2	0.1730	0.1730	0.1773	0.1744	0.0872
2.5	0.1852	0.1852	0.1830	0.1845	0.0738
3	0.1869	0.1890	0.1890	0.1883	0.0628
4	0.1896	0.1918	0.1939	0.1918	0.0479
6	0.1943	0.1985	0.1985	0.1971	0.0329
18	0.2174	0.2174	0.2174	0.2174	0.0121
24	0.2263	0.2263	0.2263	0.2263	0.0094
48	0.2286	0.2071	0.2502	0.2286	0.0048
168	0.2356	0.2335	0.2313	0.2335	0.0014

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.30 อัตราการปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยฟอสฟอรัส (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.2257	0.2279	0.2279	0.2272	2.7260
0.167	0.2248	0.2270	0.2270	0.2263	1.3577
0.25	0.2280	0.2280	0.2324	0.2294	0.9177
0.5	0.2416	0.2394	0.2394	0.2401	0.4802
1	0.2387	0.2387	0.2518	0.2430	0.2430
1.5	0.2488	0.2488	0.2488	0.2488	0.1659
2	0.2473	0.2450	0.2565	0.2496	0.1248
2.5	0.2471	0.2448	0.2493	0.2471	0.0988
3	0.2512	0.2512	0.2512	0.2512	0.0837
4	0.2535	0.2535	0.2535	0.2535	0.0634
6	0.2433	0.2571	0.2571	0.2525	0.0421
18	0.2528	0.2528	0.2528	0.2528	0.0140
24	0.2342	0.2569	0.2797	0.2569	0.0107
48	0.2586	0.2586	0.2586	0.2586	0.0054
168	0.2574	0.2346	0.2802	0.2574	0.0015

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียม

อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมที่พีเอช 6.5

ตารางที่ ช.31 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0015	0.0016	0.0017	0.0016	0.0192
0.167	0.0015	0.0016	0.0018	0.0016	0.0099
0.25	0.0016	0.0019	0.0016	0.0017	0.0068
0.5	0.0020	0.0018	0.0022	0.0020	0.0040
1	0.0022	0.0022	0.0021	0.0022	0.0022
1.5	0.0023	0.0022	0.0022	0.0022	0.0015
2	0.0021	0.0020	0.0022	0.0021	0.0010
2.5	0.0027	0.0034	0.0028	0.0029	0.0012
3	0.0052	0.0047	0.0057	0.0052	0.0017
4	0.0062	0.0054	0.0064	0.0060	0.0015
6	0.0058	0.0057	0.0064	0.0060	0.0010
18	0.0134	0.0134	0.0123	0.0130	0.0007
24	0.0158	0.0155	0.0143	0.0152	0.0006
48	0.0286	0.0307	0.0301	0.0298	0.0006
168	0.0624	0.0636	0.0630	0.0630	0.0004

ตารางที่ ช.32 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0511	0.0398	0.0497	0.0468	0.5621
0.167	0.0529	0.0600	0.0635	0.0588	0.3528
0.25	0.0591	0.0701	0.0636	0.0643	0.2571
0.5	0.0888	0.0678	0.0856	0.0808	0.1615
1	0.1984	0.2082	0.1827	0.1965	0.1965
1.5	0.2316	0.1862	0.2316	0.2165	0.1443
2	0.2433	0.2126	0.2527	0.2362	0.1181
2.5	0.2517	0.2415	0.2774	0.2569	0.1027
3	0.2901	0.2453	0.2558	0.2637	0.0879
4	0.2658	0.2523	0.2872	0.2685	0.0671
6	0.3067	0.2617	0.2757	0.2814	0.0469
18	0.2928	0.3519	0.2896	0.3115	0.0173
24	0.3643	0.2815	0.3477	0.3312	0.0138
48	0.3507	0.3026	0.3782	0.3439	0.0072
168	0.3333	0.4147	0.3629	0.3703	0.0022

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.33 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.3147	0.2911	0.2764	0.2941	3.5288
0.167	0.3535	0.3396	0.3466	0.3466	2.0794
0.25	0.3727	0.3996	0.3803	0.3842	1.5368
0.5	0.3723	0.4451	0.3965	0.4046	0.8092
1	0.3889	0.4261	0.4261	0.4137	0.4137
1.5	0.4084	0.4292	0.4126	0.4167	0.2778
2	0.4460	0.4124	0.4040	0.4208	0.2104
2.5	0.4630	0.3924	0.4674	0.4409	0.1764
3	0.4606	0.3986	0.4694	0.4428	0.1476
4	0.4850	0.4438	0.4438	0.4576	0.1144
6	0.4623	0.5767	0.4524	0.4971	0.0829
18	0.4943	0.5296	0.4893	0.5044	0.0280
24	0.4772	0.5077	0.5381	0.5077	0.0212
48	0.6075	0.5026	0.5467	0.5523	0.0115
168	0.5170	0.6238	0.5451	0.5620	0.0033

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.34 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0578	0.0535	0.0508	0.0540	0.6480
0.167	0.0615	0.0516	0.0609	0.0580	0.3479
0.25	0.0612	0.0682	0.0618	0.0638	0.2550
0.5	0.0661	0.0636	0.0574	0.0624	0.1248
1	0.0634	0.0674	0.0674	0.0661	0.0661
1.5	0.1064	0.1157	0.1286	0.1169	0.0779
2	0.1142	0.1339	0.1204	0.1228	0.0614
2.5	0.1373	0.1816	0.1389	0.1526	0.0610
3	0.1603	0.1969	0.1655	0.1743	0.0581
4	0.1901	0.1482	0.1848	0.1744	0.0436
6	0.1826	0.1898	0.1647	0.1790	0.0298
18	0.1874	0.2307	0.1998	0.2060	0.0114
24	0.2132	0.2048	0.2090	0.2090	0.0087
48	0.2380	0.2009	0.2162	0.2184	0.0045
168	0.2072	0.2205	0.2337	0.2205	0.0013

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.35 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.3510	0.3377	0.3143	0.3343	4.0118
0.167	0.4190	0.3681	0.3876	0.3916	2.3494
0.25	0.4277	0.3957	0.3758	0.3997	1.5990
0.5	0.3887	0.4723	0.3929	0.4180	0.8360
1	0.3978	0.4713	0.4281	0.4324	0.4324
1.5	0.4716	0.4263	0.4626	0.4535	0.3023
2	0.4415	0.4198	0.4371	0.4328	0.2164
2.5	0.4685	0.4871	0.4361	0.4639	0.1856
3	0.5296	0.4325	0.4956	0.4859	0.1620
4	0.5055	0.4505	0.5456	0.5005	0.1251
6	0.5440	0.4626	0.5185	0.5084	0.0847
18	0.5484	0.4792	0.5697	0.5324	0.0296
24	0.5312	0.5520	0.4791	0.5208	0.0217
48	0.6024	0.6141	0.5380	0.5848	0.0122
168	0.6789	0.8233	0.6644	0.7222	0.0043

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมที่พีเอช 7.5

ตารางที่ ช.36 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0007	0.0005	0.0006	0.0006	0.0072
0.167	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0035
0.25	0.0008	0.0009	0.0008	0.0008	0.0033
0.5	0.0016	0.0020	0.0016	0.0017	0.0035
1	0.0020	0.0017	0.0017	0.0018	0.0018
1.5	0.0019	0.0020	0.0021	0.0020	0.0013
2	0.0019	0.0023	0.0020	0.0020	0.0010
2.5	0.0026	0.0027	0.0023	0.0026	0.0010
3	0.0026	0.0024	0.0025	0.0025	0.0008
4	0.0026	0.0034	0.0026	0.0029	0.0007
6	0.0041	0.0038	0.0038	0.0039	0.0007
18	0.0085	0.0099	0.0083	0.0089	0.0005
24	0.0142	0.0134	0.0130	0.0135	0.0006
48	0.0305	0.0386	0.0315	0.0335	0.0007
168	0.0656	0.0598	0.0675	0.0643	0.0004

ตารางที่ ช.37 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1437	0.1133	0.1384	0.1318	1.5815
0.167	0.2464	0.2220	0.2635	0.2440	1.4640
0.25	0.3397	0.2944	0.3365	0.3236	1.2942
0.5	0.3500	0.3570	0.3430	0.3500	0.6999
1	0.4855	0.4326	0.4061	0.4414	0.4414
1.5	0.4199	0.4372	0.4415	0.4329	0.2886
2	0.4978	0.4929	0.4880	0.4929	0.2464
2.5	0.5480	0.4882	0.4583	0.4982	0.1993
3	0.5566	0.4930	0.5407	0.5301	0.1767
4	0.5892	0.5723	0.5383	0.5666	0.1416
6	0.5198	0.6683	0.5255	0.5712	0.0952
18	0.5851	0.6089	0.5970	0.5970	0.0332
24	0.6000	0.6367	0.6000	0.6123	0.0255
48	0.5712	0.6403	0.6717	0.6277	0.0131
168	0.6654	0.6654	0.6073	0.6461	0.0038

ตารางที่ ช.38 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.4471	0.4742	0.4335	0.4516	5.4194
0.167	0.3924	0.4220	0.4515	0.4220	2.5319
0.25	0.4412	0.4552	0.4970	0.4645	1.8578
0.5	0.6933	0.6540	0.6148	0.6540	1.3080
1	0.7102	0.6419	0.6966	0.6829	0.6829
1.5	0.6343	0.6901	0.7668	0.6971	0.4647
2	0.6713	0.6643	0.7623	0.6993	0.3497
2.5	0.7416	0.5877	0.7696	0.6997	0.2799
3	0.7366	0.7366	0.6516	0.7082	0.2361
4	0.7926	0.6269	0.7421	0.7205	0.1801
6	0.7237	0.6725	0.7968	0.7310	0.1218
18	0.7680	0.6217	0.8045	0.7314	0.0406
24	0.8297	0.6979	0.7987	0.7754	0.0323
48	0.7479	0.8766	0.7881	0.8042	0.0168
168	0.8302	0.8053	0.8551	0.8302	0.0049

ตารางที่ ช.39 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.1528	0.1847	0.1663	0.1679	2.0152
0.167	0.2222	0.2577	0.2293	0.2364	1.4184
0.25	0.2420	0.2985	0.2663	0.2689	1.0758
0.5	0.3229	0.3197	0.3261	0.3229	0.6458
1	0.3165	0.4114	0.3270	0.3516	0.3516
1.5	0.4572	0.4762	0.4953	0.4762	0.3175
2	0.4469	0.5108	0.4105	0.4561	0.2280
2.5	0.4926	0.4389	0.5316	0.4877	0.1951
3	0.5184	0.5387	0.4676	0.5082	0.1694
4	0.5498	0.5135	0.4928	0.5187	0.1297
6	0.5253	0.5571	0.5094	0.5306	0.0884
18	0.5280	0.5813	0.4907	0.5333	0.0296
24	0.5723	0.5448	0.5338	0.5503	0.0229
48	0.5090	0.5649	0.6041	0.5593	0.0117
168	0.5611	0.6608	0.6483	0.6234	0.0037

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.40 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.4544	0.4931	0.5028	0.4834	5.8011
0.167	0.4626	0.5356	0.4626	0.4869	2.9217
0.25	0.5107	0.5007	0.4907	0.5007	2.0027
0.5	0.5356	0.5461	0.4936	0.5251	1.0503
1	0.5380	0.6033	0.4891	0.5435	0.5435
1.5	0.6187	0.5563	0.5279	0.5677	0.3784
2	0.6407	0.5449	0.6107	0.5988	0.2994
2.5	0.5841	0.6127	0.5211	0.5726	0.2290
3	0.5874	0.5935	0.6359	0.6056	0.2019
4	0.5790	0.6643	0.5851	0.6094	0.1524
6	0.6194	0.6256	0.5949	0.6133	0.1022
18	0.6589	0.6266	0.6525	0.6460	0.0359
24	0.5727	0.7509	0.5855	0.6364	0.0265
48	0.6293	0.6691	0.6889	0.6624	0.0138
168	0.7111	0.5782	0.7044	0.6646	0.0040

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมที่พีเอช 8.5

ตารางที่ ช.41 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยละลายช้าทางการค้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0025
0.167	0.0007	0.0009	0.0007	0.0008	0.0045
0.25	0.0010	0.0010	0.0011	0.0010	0.0041
0.5	0.0012	0.0014	0.0013	0.0013	0.0026
1	0.0012	0.0014	0.0011	0.0012	0.0012
1.5	0.0014	0.0016	0.0017	0.0015	0.0010
2	0.0019	0.0019	0.0021	0.0019	0.0010
2.5	0.0023	0.0024	0.0027	0.0025	0.0010
3	0.0027	0.0031	0.0032	0.0030	0.0010
4	0.0072	0.0055	0.0072	0.0066	0.0017
6	0.0063	0.0052	0.0062	0.0059	0.0010
18	0.0107	0.0132	0.0118	0.0119	0.0007
24	0.0112	0.0135	0.0111	0.0120	0.0005
48	0.0202	0.0196	0.0196	0.0198	0.0004
168	0.0539	0.0620	0.0580	0.0580	0.0003

ตารางที่ ช.42 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.3578	0.3470	0.3795	0.3614	4.3370
0.167	0.4175	0.3729	0.4256	0.4053	2.4321
0.25	0.4379	0.3747	0.4505	0.4210	1.6841
0.5	0.5154	0.6343	0.5493	0.5663	1.1327
1	0.6051	0.6422	0.6051	0.6175	0.6175
1.5	0.6879	0.8617	0.7181	0.7559	0.5039
2	0.7828	0.6941	0.7385	0.7385	0.3692
2.5	0.8295	0.7356	0.7825	0.7825	0.3130
3	0.8030	0.7406	0.7952	0.7796	0.2599
4	0.7494	0.8362	0.7810	0.7889	0.1972
6	0.8222	0.8142	0.7819	0.8061	0.1343
18	0.7762	0.9137	0.7358	0.8085	0.0449
24	0.8712	0.7654	0.8061	0.8143	0.0339
48	0.9028	0.7739	0.9028	0.8598	0.0179
168	0.8812	0.9880	0.8011	0.8901	0.0053

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.43 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.5278	0.4574	0.5228	0.5027	6.0320
0.167	0.6091	0.7257	0.6091	0.6479	3.8876
0.25	0.5820	0.6395	0.6971	0.6395	2.5581
0.5	0.7242	0.5565	0.7309	0.6705	1.3410
1	0.7387	0.6421	0.6904	0.6904	0.6904
1.5	0.8143	0.6786	0.7691	0.7540	0.5027
2	0.8041	0.8533	0.8041	0.8205	0.4102
2.5	0.8154	0.8978	0.7577	0.8236	0.3295
3	0.7976	0.8570	0.8910	0.8485	0.2828
4	0.8276	0.9052	0.8535	0.8621	0.2155
6	0.8955	0.8516	0.8867	0.8779	0.1463
18	0.9151	0.7907	0.9595	0.8884	0.0494
24	0.9428	0.9428	0.9713	0.9523	0.0397
48	1.0179	0.9417	0.8942	0.9513	0.0198
168	1.0155	0.8143	1.0443	0.9580	0.0057

ตารางที่ ช.44 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.4368	0.4762	0.3975	0.4368	5.2421
0.167	0.3816	0.4055	0.4055	0.3975	2.3851
0.25	0.4690	0.3965	0.4135	0.4263	1.7053
0.5	0.4766	0.5881	0.4563	0.5070	1.0140
1	0.6165	0.6103	0.6414	0.6227	0.6227
1.5	0.7470	0.5894	0.7196	0.6853	0.4569
2	0.6776	0.6984	0.6984	0.6914	0.3457
2.5	0.7421	0.6103	0.7282	0.6936	0.2774
3	0.6527	0.8630	0.6599	0.7252	0.2417
4	0.6614	0.8451	0.6981	0.7349	0.1837
6	0.8211	0.6270	0.7912	0.7464	0.1244
18	0.7925	0.7768	0.7847	0.7847	0.0436
24	0.8072	0.7123	0.8547	0.7914	0.0330
48	0.8194	0.7485	0.7958	0.7879	0.0164
168	0.9152	0.7238	0.8569	0.8320	0.0050

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ช.45 อัตราการปลดปล่อยธาตุโพแทสเซียมของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อย				อัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียม (ร้อยละต่อชั่วโมง)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.083	0.6159	0.5641	0.5468	0.5756	6.9071
0.167	0.6570	0.5281	0.6570	0.6140	3.6841
0.25	0.5702	0.6632	0.6260	0.6198	2.4792
0.5	0.6857	0.5943	0.6792	0.6531	1.3062
1	0.7440	0.6020	0.6832	0.6764	0.6764
1.5	0.7300	0.6413	0.6754	0.6823	0.4548
2	0.7478	0.6924	0.6370	0.6924	0.3462
2.5	0.7291	0.8582	0.6911	0.7595	0.3038
3	0.7136	0.7718	0.6990	0.7281	0.2427
4	0.7310	0.8300	0.7234	0.7615	0.1904
6	0.7950	0.7564	0.7641	0.7718	0.1286
18	0.8312	0.6758	0.8234	0.7768	0.0432
24	0.7635	0.7871	0.8108	0.7871	0.0328
48	0.8282	0.7572	0.7808	0.7887	0.0164
168	1.0984	0.8543	1.0984	1.0171	0.0061

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจิตตรีรา บัวเทศ เกิดเมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดอุทัยธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม เกียรตินิยมอันดับ 2 จากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับนานาชาติ

[1] Jittrera Buates, Petchporn Chawakitchareon and Rewadee Anuwattana. “The Effect of pH in the Tap Water on Nutrient Release from Slow Release Fertilizers”. The Proceedings of 5th KKU International Engineering Conference, Pullman Khon Kaen Raja Orchid Hotel, Khon Kaen, Thailand. 27-29 March, 2014. Page 240.

[2] Jittrera Buates, Petchporn Chawakitchareon and Rewadee Anuwattana. “Production of Slow Release Fertilizer from Leonardite, Zeolite and Rice straw”. The Proceedings of 21st Thailand-Korea Conference on Environmental Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand. 2-6 February, 2015.

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบโปสเตอร์ในที่ประชุมระดับนานาชาติ

[1] Jittrera Buates, Petchporn Chawakitchareon and Rewadee Anuwattana. “Utilization of Leonadite for Producing Slow Release Fertilizer”. The Proceedings of 2015 International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications, Amaks Hotel, Azov, Russia. 19-22 May, 2015.

การตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

[1] Jittrera Buates, Petchporn Chawakitchareon and Rewadee Anuwattana. 2014. “The Effect of pH in the Tap Water on Nutrient Release from Slow Release Fertilizers”. Advanced Materials Research. Vol 931-932. Page 754-757.