การเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนจากวัสดุ
เหลือทิ้งทางการเกษตรที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

นางสาว ศิริพร เชาว์เมธีวุฒิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0370-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF CONTROLLED RELEASE NITROGEN FERTILIZER FROM BIODEGRADABLE AGRICULTURAL WASTE

Miss Siriporn Chaometeewut

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science
Inter-department of Environmental Science
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2001

ISBN 974-17-0370-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ
โดย	นางสาว ศิริพร เชาว์เมธีวุฒิ
สหสาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา กีระนันทน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ พัฒนผลไพบูลย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำธร ธีรคุปต์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศิริพร เชาว์เมธีวุฒิ : การเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Preparation of Controlled Release Nitrogen Fertilizer from Biodegradable Agricultural Waste)
อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.อมร เพชรสม ; 101 หน้า. ISBN 974-17-0370-8

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อย ซึ่งมีการเตรียมปุ๋ยโดยใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับปุ๋ย หลังจากนั้นเคลือบปุ๋ยด้วยวัสดุพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ พอลิไวนิลอะซิเตตและชันสน อัตราส่วนโดยน้ำหนักของปุ๋ยต่อชานอ้อยต่อสารเคลือบแบ่งเป็น 6 อัตราส่วน และทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการปลดปล่อยธาตุอาหาร ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณของสารเติมแต่งในสูตรผสม และสภาพความเป็นกรดหรือเบสของตัวกลาง รวมทั้งศึกษาอัตราการปลดปล่อย ธาตุอาหารของปุ๋ยที่เตรียมโดยการทำไมโครเอนแคปซูเลชันโดยใช้พอลิสไตรีน

ผลการศึกษาพบว่าปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตตมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารสูงกว่าปุ๋ยที่เคลือบด้วยชันสน โดยอัตราส่วนระหว่างปุ๋ยต่อชานอ้อยต่อชันสนที่ทำให้ปุ๋ยมีอัตราการปลดปล่อยต่ำที่สุด คือ 20:20:60 (สูตร 6) ซึ่งมีค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนออกมา 50 % เท่ากับ 8.14 % $day^{-1/2}$ และ 37.7 วัน ตามลำดับ อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมซีโอไลต์ในสูตรผสม (สูตร 10) โดยทำให้ปุ๋ยมีค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนออกมา 50 % เท่ากับ 7.85 % $day^{-1/2}$ และ 40.58 วัน ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวกลางมีพีเอชเป็นเบส โดยทำให้ปุ๋ยมีค่าคงที่การปลดปล่อยเพิ่มขึ้น 1.47 % $day^{-1/2}$ และมีระยะเวลาในการปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนออกมา 50 % ลดลง 5.03 วัน ปุ๋ยแคปซูลที่เตรียมจากพอลิสไตรีนมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารต่ำกว่าปุ๋ยที่เตรียมจากชานอ้อย ซึ่งอัตราส่วนระหว่างปุ๋ยต่อพอลิสไตรีนต่อชันสนที่เหมาะสม คือ 40:40:20 และมีค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนออกมา 50 % เท่ากับ 6.7 % $day^{-1/2}$ และ 55.65 วัน ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม **ลายมือชื่อนิสิต** .....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา** .....

ปีการศึกษา 2544 **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** .....

2459523 : MAJOR INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEY WORD : CONTROLLED RELEASE / NITROGEN FERTILIZER / BIODEGRADABLE POLYMER /
SIRIPORN CHAOMETEEWUT : PREPARATION OF CONTROLLED RELEASE NITROGEN FERTILIZER FROM BIODEGRADABLE AGRICULTURAL WASTE.
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. AMORN PETSOM, Ph.D. ; 101 p.p. ISBN 974-17-0370-8

The objective of this research work is to study the release rate of the controlled release nitrogen fertilizer, which was prepared by using bagasse as fertilizer absorbent. The fertilizer was then coated with 2 polymers: polyvinyl acetate and rosin. The weight ratio of fertilizer to bagasse to coating substance was divided into 6 ratios. The effects of the amount of the additive used in the formulations and the pH of the aqueous medium were investigated. The studied factors were the amount of additive used in the formulations and the pH of the aqueous medium. The study of the release rate of the fertilizer that was prepared by microencapsulation using polystyrene was also included.

The results indicated that the polyvinyl acetate coated fertilizer gave higher release rate than the rosin coated fertilizer. The ratio of fertilizer to bagasse to rosin which provided the minimum release rate was 20:20:60, that is, formula 6 had the release rate constant and time for 50 % nitrogen compound release at 8.14 % $day^{-1/2}$ and 37.7 days, respectively. The release rate was found to decrease with the additive of zeolite into the formulations, that is, formula 10 had the release rate constant and time for 50 % nitrogen compound release at 7.85 % $day^{-1/2}$ and 40.58 days, respectively. The release rate was found to increase with the alkallanity of the aqueous medium, which had 1.47 % $day^{-1/2}$ increase in the release rate constant and 5.03 days decrease in time for 50 % nitrogen compound release. The microcapsule fertilizer prepared from polystyrene gave less release rate than the fertilizer prepared from bagasse. The optimum ratio of fertilizer to polystyrene to rosin was 40:40:20, that is, formula 12 had the release rate constant and time for 50 % nitrogen compound release at 6.7 % $day^{-1/2}$ and 55.65 days, respectively

Inter-department Environmental Science **Student's signature** .....
Field of study Environmental Science **Advisor's signature** .....
Academic year 2001 **Coadvisor's signature** .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อยได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด ทั้งนี้รวมถึงประธานกรรมการและคณะกรรมการตรวจวิทยานิพนธ์อีก 3 ท่าน คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ พัฒนผลไพบูลย์, รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำธร ธีรคุปต์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้นไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้กรุณาให้ทุนอุดหนุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการวิจัยสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

และสุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา เป็นอย่างสูงที่ให้โอกาสข้าพเจ้าในด้านการศึกษา ให้ความรักและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณพี่ชาย พี่สาวและน้องชายที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และขอขอบคุณปุ้ย วงศ์พงา ที่ช่วยแนะนำเรื่องสถิติการวิจัยให้ ตลอดจนพี่และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฑ

บทที่

1 บทนำ 1

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ธาตุอาหารที่จำเป็นของพืช 4

2.2 การสูญเสียธาตุอาหารจากดิน 5

2.3 หลักพิจารณาการใช้ปุ๋ยเคมี 6

2.4 ชนิดของปุ๋ย 8

2.5 ปุ๋ยยูเรีย 9

2.6 ลักษณะอาการของพืชที่ได้รับธาตุไนโตรเจนในปริมาณที่ไม่เหมาะสม 11

2.7 ปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร 12

2.8 ชานอ้อย 13

2.9 พอลิไวนิลอะซิเตต 15

2.10 ชันสน 16

2.11 ประโยชน์ที่ได้จากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารที่เตรียมจากชานอ้อยและวัสดุพอลิเมอร์ 18

2.12 เทคนิคที่ใช้ในการทำเอนแคปซูเลชัน 18

2.13 กลไกการควบคุมการปลดปล่อยโดยการแพร่ 20

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	การดำเนินการวิจัย	25
	3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	25
	3.2 วัตถุดิบและสารเคมี	25
	3.3 การเตรียมบัฟเฟอร์ โดยใช้ citric acid, Na_2HPO_4 และ sodium hydroxide...	27
	3.4 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณยูเรียโดยใช้เทคนิค UV-visible spectrophotometry	27
	3.5 วิธีการทดลอง	28
	3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	35
4	ผลการทดลองและวิจารณ์	36
	4.1 สมบัติทางกายภาพของปุ๋ยตัวอย่าง	36
	4.2 การสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของยูเรีย โดยใช้เทคนิค UV-visible spectrophotometry	36
	4.3 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของชานอ้อย วัสดุพอลิเมอร์และปุ๋ยไนโตรเจนสำหรับการเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน.....	38
	4.4 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้กับปุ๋ยไนโตรเจนบริสุทธิ์ชนิดเม็ด	51
	4.5 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ในน้ำที่มีความเป็นกรด-เบสต่าง ๆ กัน	53
	4.6 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมโดยการทำเอนแคปซูเลชันโดยใช้พอลิสไตรีน	57
	4.7 การวิเคราะห์การดูดซับน้ำของปุ๋ยตัวอย่าง	61

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	63
รายการอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก	72
ภาคผนวก ข	91
ภาคผนวก ค	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	101

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อย 14

3.1 แสดงสูตรผสมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1-12 28

4.1 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1, 2 และ 3 38

4.2 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4, 5 และ 6 41

4.3 แสดงค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4, 5 และ 6 43

4.4 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7, 8 และ 9 44

4.5 แสดงค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7, 8 และ 9 46

4.6 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 และ 10 49

4.7 แสดงค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5, 6 และ 10 51

4.8 ปริมาณเฉลี่ยของ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ดในเวลา 1 และ 2 วัน 52

4.9 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5, 7 และ 9 54

4.10 แสดงค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5, 7 และ 9..... 56

4.11 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7, 11 และ 12 58

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.12 แสดงค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 6, 11 และ 12 60

4.13 แสดงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับโดยปุ๋ยตัวอย่างในเวลา 4 วัน 62

ก1 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากสารละลายมาตรฐานยูเรีย... 72

ก2 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และ2... 72

ก3 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3 73

ก4 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 และ 5....73

ก5 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 6 และ 7....74

ก6 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 8 และ 9....75

ก7 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่10 และ 11 76

ก8 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 12 ... 77

ก9 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5 และ 9 78

ก10 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ จำนวน 2, 1.5 และ 1 กรัม 78

ก11 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1, 2 และ 3 ที่เวลาต่าง ๆ .. 79

ก12 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 ที่เวลาต่าง ๆ 80

ก13 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ที่เวลาต่าง ๆ 81

ก14 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 6 ที่เวลาต่าง ๆ 82

ก15 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7 และ 8 ที่เวลาต่าง ๆ 83

ก16 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 9 ที่เวลาต่าง ๆ 84

ก17 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 10 ที่เวลาต่าง ๆ 85

ก18 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11 ที่เวลาต่าง ๆ 86

ก19 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 12 ที่เวลาต่าง ๆ 87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก20 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5 และ 9 ที่เวลาต่าง ๆ 88

ก21 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ด จำนวน 2, 1.5 และ 1 กรัม 89

ก22 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (water uptake, %) โดยปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4-9 ในเวลา 4 วัน..... 89

ก23 ค่าคงที่การปลดปล่อยที่คำนวณได้จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4-12 90

ก24 ค่าคงที่การปลดปล่อยที่คำนวณได้จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ที่แช่ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5 และ 9 90

ข1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง สูตรที่ 1, 2 และ 3 เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน 91

ข2 การทดสอบความแตกต่างของค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1, 2 และ 3 โดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test 91

ข3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง สูตรที่ 4, 5 และ 6 91

ข4 การทดสอบความแตกต่างของค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4, 5 และ 6 โดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test 92

ข5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง สูตรที่ 7, 8 และ 9 92

ข6 การทดสอบความแตกต่างของค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7, 8 และ 9 โดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test 92

ข7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง สูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5, 7 และ 9 93

ข8 การทดสอบความแตกต่างของค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง สูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5, 7 และ 9 โดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test 93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ข9 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 และ 10 94

ข10 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11 และ 12 94

ข11 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ดกับปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4-9 95

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงโครงสร้างของ rosin acids	17
2.2	แสดงปริมาณการปลดปล่อยสารด้วยกลไกต่าง ๆ กัน	21
4.1	แสดงกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของยูเรีย โดยใช้เทคนิค UV-visible spectrophotometry	37
4.2	กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1, 2 และ 3	39
4.3	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตตกับปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ด ในเวลา 1 วัน	40
4.4	กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4, 5 และ 6	42
4.5	กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7, 8 และ 9	45
4.6	แผนภูมิแสดงระยะเวลาในการปลดปล่อย total N 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยชันสนในอัตราส่วนของชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อชันสนต่าง ๆ	47
4.7	กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 และ 10	50
4.8	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4-9 ในเวลา 2 วัน	53
4.9	กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5, 7 และ 9	55
4.10	กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11 และ 12	59
4.11	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมจากชานอ้อยกับปุ๋ยที่เตรียมจากพอลิสไตรีน..	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ค1	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1	96
ค2	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2	96
ค3	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3	96
ค4	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4	96
ค5	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5	97
ค6	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 6	97
ค7	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7	97
ค8	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 8	97
ค9	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 9	98
ค10	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 10	98
ค11	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11	98
ค12	ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 12	99
ค13	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1	99
ค14	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2	99
ค15	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3	99
ค16	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4	99
ค17	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5	99
ค18	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 6	99
ค19	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7	100
ค20	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 8	100
ค21	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 9	100
ค22	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 10	100
ค23	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11	100
ค24	ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 12	100

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการเร่งเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรของไทยมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะนอกจากเพื่อใช้บริโภคภายในประเทศแล้ว ผลิตผลหลาย ๆ ชนิดยังเป็นพืชเศรษฐกิจส่งออกที่สำคัญซึ่งทำ รายได้ให้ประเทศอีกด้วย ฉะนั้นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำจะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดินให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งวิธีที่ให้ผลดีที่สุด เร็วที่สุดและยอมรับกันเป็นสากล คือ การใช้ปุ๋ยเคมี (ปิยะ ดวงพัตรา, 2538) ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นปุ๋ยที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดชนิดหนึ่ง แต่เนื่องจากปุ๋ยไนโตรเจนเกือบทุกชนิดละลายน้ำได้ดีและละลายหมดภายใน 2-3 วัน (กรมส่งเสริมการเกษตร, สถาบันพัฒนาและส่งเสริมปัจจัยการผลิต, 2535) เมื่อใส่ลงดินจะเกิดปัญหา คือ สารประกอบไนโตรเจนจะละลายออกมาอย่างรวดเร็วทำให้ความเข้มข้นมีมากเกินความต้องการในแต่ละวันของพืช ซึ่งความเข้มข้นที่มากเกินพอนี้สามารถทำลายต้นอ่อนของพืชและยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชได้ รากพืชได้รับอันตราย ใบของต้นพืชจะแสดงอาการเหี่ยวเฉาและตายในที่สุด หลังจากนั้นสารประกอบไนโตรเจนส่วนเกินก็จะถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติก่อให้เกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ เกิดปัญหาต่อผู้บริโภคและปัญหามลภาวะต่าง ๆ ตามมา อีกทั้งยังเป็นการสูญเสียปุ๋ยไปอย่างรวดเร็ว พืชสามารถนำไปใช้ได้ไม่ถึง 50 % (30-50 %) ของปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่ลงไป (กรมส่งเสริมการเกษตร, สถาบันพัฒนาและส่งเสริมปัจจัยการผลิต, 2535) ทำให้ต้องใช้ปุ๋ยเพิ่มมากขึ้นและใช้ปุ๋ยซ้ำแล้วซ้ำอีก

การแก้ไขปัญหาโดยการแบ่งใส่ปุ๋ยไนโตรเจนให้แก่พืชทีละน้อยแต่ใส่หลาย ๆ ครั้งในช่วงเวลาที่เหมาะสมก็ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยได้บ้างแต่ยังให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจ (ยงยุทธ โอสถสภา, 2528) และยังทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นเพราะต้องเพิ่มค่าปุ๋ยและแรงงานในการใส่ปุ๋ยบ่อย ๆ ครั้ง ดังนั้นในการที่จะใช้ปุ๋ยไนโตรเจนอย่างมีประสิทธิภาพจึงได้มีความพยายามที่จะหาวิธีการควบคุมการปลดปล่อย (controlled release system) สารประกอบไนโตรเจนของปุ๋ยให้สม่ำเสมอ โดยปุ๋ยจะค่อย ๆ ละลายธาตุอาหารออกมาและปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนให้เป็นประโยชน์แก่พืชอย่างช้า ๆ ให้พืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์มากที่สุดและเป็นไปในเวลาที่ต้องการ

งานวิจัยนี้ในขั้นต้นได้เตรียมปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารขึ้นมา 2 วิธี วิธีแรกเตรียมโดยนำปุ๋ยไนโตรเจนที่อยู่ในรูปสารละลายมาผสมกับวัสดุเซลลูโลสที่เป็นตัวดูดซับ (absorbent cellulosic material) ซึ่งได้จากชานอ้อย จากนั้นเคลือบชานอ้อยที่ดูดซับสารประกอบไนโตรเจนด้วยวัสดุพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ (biodegradable) เช่น พอลิไวนิลอะซิเตต

และชันสน (rosin) วิธีที่สอง เตรียมโดยการทำเอนแคปซูเลชันของปุ๋ยโดยใช้เทคนิคโคอาเซอเวชัน (coacervation) ซึ่งอาศัยหลักการแยกชั้น (phase separation) ของสารที่อยู่ในระบบซึ่งประกอบด้วยสารสำคัญ (ปุ๋ย) และสารห่อหุ้ม (พอลิเมอร์) ละลายอยู่ในตัวทำละลาย โดยการลดอุณหภูมิลงเพื่อให้เกิดการแยกชั้นทำให้สารห่อหุ้มมาจับอยู่รอบ ๆ สารสำคัญ โดยปุ๋ยจะกระจายตัวอยู่ทั่วพอลิเมอร์แบบเมทริกซ์ (matrix) เกิดเป็นแคปซูลขึ้น โดยงานวิจัยนี้ใช้พอลิสไตรีนซึ่งได้จากเศษโฟมที่ใช้แล้วและเหลือทิ้งมาเป็นสารห่อหุ้ม ในขั้นต่อมาได้ทำการศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้

เนื่องจากชานอ้อยมีสมบัติในการดูดซับที่ดี เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่หาง่าย พอลิไวนิลอะซิเตตสามารถใช้วัสดุเหลือใช้จากแผ่นฟิล์มต่าง ๆ เช่น ฟิล์มถ่ายรูป และฟิลม์เอ็กซ์เรย์ และชันสนก็เป็นเรซินจากธรรมชาติที่พบมากในประเทศไทย มีราคาถูก อีกทั้งสารเคลือบทั้ง 2 ชนิดยังเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการเป็นตัวดูดซับและสารเคลือบที่ควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารในปุ๋ย โดยไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของชานอ้อย วัสดุพอลิเมอร์และปุ๋ยไนโตรเจนสำหรับการเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน
2. เพื่อศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ เปรียบเทียบกับปุ๋ยไนโตรเจนบริสุทธิ์ชนิดเม็ด (pure granulated nitrogen fertilizer)
3. เพื่อศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ในน้ำที่มีความเป็นกรด–เบสต่าง ๆ กัน

สมมติฐาน

1. อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยที่เตรียมจากชานอ้อยและวัสดุพอลิเมอร์ต่างกันจะมีอัตราแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตามอัตราส่วนของชานอ้อย วัสดุพอลิเมอร์และปุ๋ยไนโตรเจน
2. อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยที่เตรียมจากชานอ้อยและวัสดุพอลิเมอร์จะช้ากว่าอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยไนโตรเจนบริสุทธิ์ชนิดเม็ดอย่างมีนัยสำคัญ

ขอบเขตการศึกษา

1. งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน โดยปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ คือ ปุ๋ยยูเรีย

2. ศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนที่ใช้ชานอ้อย วัสดุพอลิเมอร์และปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยแต่ละอัตราส่วนทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3. ทดสอบอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารในน้ำที่มีความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 5, 7, และ 9

4. อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารวัดจากปริมาณความเข้มข้นของยูเรียที่ละลายในน้ำกลั่นโดยใช้เทคนิค UV-visible spectrophotometry

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีในการเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน ด้วยวิธีที่ง่าย สะดวก และใช้ต้นทุนต่ำ

2. ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้อาจใช้เป็นแนวทางในการผลิตปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควมคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารต่อไป เพื่อช่วยลดปัญหาการปนเปื้อนของธาตุอาหารในแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยจะสอดคล้องกับแนวคิดของเทคโนโลยีสะอาด (clean technology) ในการเปลี่ยนจากการแก้ไขที่ปลายเหตุ มาเป็นการป้องกันที่แหล่งกำเนิด และเป็นการลดการใช้ทรัพยากรที่สิ้นเปลืองลง

3. เป็นแนวทางเพื่อช่วยส่งเสริมการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่มีในท้องถิ่น ซึ่งมีราคาถูกและมีปัญหาในการกำจัดมาใช้ให้เป็นประโยชน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธาตุอาหารที่จำเป็นของพืช

ในการสร้างความเจริญเติบโตของพืชทุกชนิด จำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารต่าง ๆ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมและมีปริมาณเพียงพอกับความต้องการของพืช ธาตุอาหารที่พืชจำเป็นต้องใช้เป็นอาหารเพื่อการดำรงชีวิตอยู่เป็นปกติที่ทราบกันอยู่ขณะนี้มี 16 ธาตุ ซึ่งจำแนกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ มหธาตุ กับ จุลธาตุ

มหธาตุ (macronutrient elements) หมายถึง ธาตุอาหารซึ่งพืชต้องการใช้ในปริมาณมาก ความเข้มข้นที่พบในเนื้อเยื่อพืชมักสูงกว่า 500 ส่วนต่อพืชแห้งหนึ่งล้านส่วน ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน รวม 9 ธาตุ หากไม่นับคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ซึ่งพืชได้ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซออกซิเจนแล้ว 6 ธาตุที่เหลืออาจแจงต่อไปเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

1. ธาตุอาหารหลัก (primary essential elements) ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม

2. ธาตุอาหารรอง (secondary essential elements) หมายถึง แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน

จุลธาตุ (micronutrient elements) หมายถึง ธาตุอาหารที่พืชต้องการใช้ในปริมาณเล็กน้อย ความเข้มข้นที่พบในเนื้อเยื่อพืชมักต่ำกว่า 50 ส่วนต่อพืชแห้งหนึ่งล้านส่วน ในพระราชบัญญัติปุ๋ย เรียกธาตุกลุ่มนี้ว่า ธาตุอาหารเสริม ซึ่งมี 7 ธาตุ คือ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี โบรอน โมลิบดีนัม คลอรีน

(ยงยุทธ โอสถสภา, 2528)

ธาตุไนโตรเจนที่พืชดูดเข้าไปนี้จะเข้าไปรวมกับสารประกอบคาร์บอนเกิดเป็นกรดอะมิโน ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญที่จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นโปรตีนชนิดต่าง ๆ โปรตีนเป็นส่วนประกอบสำคัญใน protoplasm ซึ่งมีอยู่ในเซลล์ทุกเซลล์ที่ประกอบกันเข้าเป็นส่วนต่าง ๆ ของพืชและโปรตีนยังเป็นส่วนประกอบของเอ็นไซม์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งทำหน้าที่สำคัญในขบวนการทางเคมีที่จะเกิดขึ้นในพืชทุกขบวนการ แหล่งกำเนิดของธาตุอาหารไนโตรเจนในดินส่วนใหญ่อยู่ที่อินทรีย์วัตถุในดิน (organic matter) โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ (microorganisms) ชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีอยู่ในดินทำให้

อินทรีย์วัตถุเน่าเปื่อยสลายตัวลงจนเป็นแอมโมเนีย (NH_3) และไนเตรทไอออน (NO_3^-) ในที่สุด ซึ่งสารประกอบไนโตรเจนทั้งสองนี้รากพืชสามารถดูดไปใช้เป็นอาหารได้

2.2 การสูญเสียธาตุอาหารจากดิน

โดยปกติธาตุอาหารอยู่ในดินด้วยลักษณะดังต่อไปนี้

ก. อยู่ในน้ำมาตามช่องว่างในดินในรูปไอออน ในลักษณะนี้พืชสามารถนำไปใช้ได้

ข. เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคดิน ธาตุที่เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคดิน มีความพร้อมที่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปไอออนในน้ำ และพืชนำไปใช้

ค. การตรึง (fixation) โดยอนุภาคดินหรือทำปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปที่ไม่อาจละลายน้ำ และตกตะกอนเป็นของแข็ง พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้

ง. ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในดิน เป็นการตรึงชั่วคราวจะเป็นประโยชน์ต่อพืชในภายหลัง

การสูญเสียธาตุอาหารจากดิน หมายถึง ธาตุอาหารถูกกระทำให้เคลื่อนย้ายออกจากบริเวณรากพืช และหรือเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่พืชไม่สามารถดูดนำไปใช้ได้ การสูญเสียธาตุอาหารเกิดจากสาเหตุใหญ่ ๆ 4 ประการ (ปิยะ ดวงพัตรา, 2538) ดังต่อไปนี้

2.2.1 โดยน้ำ ซึ่งเป็นไปได้ 2 ทางคือ

1. การพัดพาไปโดยน้ำไหลบ่าไปบนผิวดิน เป็นสาเหตุที่ทำให้ดินเสื่อมโทรมอย่างรวดเร็ว การพัดพาโดยน้ำไหลบ่าทำให้ดินพังทลายนำเอาส่วนที่เป็นของแข็งทั้งหลายโดยเฉพาะดินชั้นบนไปจากพื้นที่

2. การชะล้าง น้ำที่ไหลลงสู่เบื้องล่างจะละลายธาตุอาหารต่าง ๆ ไปด้วยความรุนแรงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะดินเฉพาะแห่ง

2.2.2 การเปลี่ยนรูป เป็นไปได้หลายทาง

1. การตรึง คือ การที่ธาตุอาหารเข้าไปอยู่ในชั้นโครงสร้างของดินเหนียวหรือคอลลอยด์ นอกจากนั้นการที่จุลินทรีย์ใช้ธาตุอาหารก็เป็นการตรึงชั่วระยะเวลาหนึ่ง การตรึงโดยจุลินทรีย์นี้จะนานต่อเมื่ออินทรีย์วัตถุในดินยังสลายตัวไม่หมด

2 การระเหย คือ การที่สารประกอบถูกเปลี่ยนรูปโดยขบวนการ denitrification โดยจุลินทรีย์ หรือปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นแก๊สสู่บรรยากาศ

3. เผา การเผาเศษพืชหลังเก็บเกี่ยวบนพื้นที่เพาะปลูก เป็นการทำลายไนโตรเจนในเศษพืช นอกจากนี้ความร้อนจากการเผายังทำลายธาตุอาหารในดินและจุลินทรีย์อีกด้วย

4. ปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดตะกอนแข็ง เช่น เมื่อดินเป็นกรดจัดหรือด่างจัด ฟอสฟอรัสจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ

2.2.3 โดยการนำพาของลม เกิดขึ้นในพื้นที่ว่างหรือไถดินแห้ง และเป็นฝุ่นพัดพาจากที่แห่งหนึ่งไปสู่อีกแห่งหนึ่ง ธาตุอาหารที่เกาะอยู่บนฝุ่นจะสูญเสียไปพร้อมกับฝุ่นด้วย

2.2.4 โดยการนำของมนุษย์และสัตว์ มนุษย์นำผลผลิตไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นและพร้อมกันนั้นนำตอซัง ใบพืช ออกจากพื้นที่เป็นการนำเอาธาตุอาหารออกจากพื้นที่เพาะปลูก

การที่จะป้องกันไม่ให้เกิด การสูญเสียธาตุอาหารไม่อาจกระทำได้ทั้งหมด แต่อาจลดปริมาณการสูญเสียได้ ทั้งนี้โดยวิธีการอนุรักษ์และรู้จักการใช้ปุ๋ย

2.3 หลักพิจารณาการใช้ปุ๋ยเคมี

การใช้ปุ๋ยนั้นก็เพื่อเพิ่มธาตุอาหารแก่พืชนั่นเอง แต่การใส่ปุ๋ยเพื่อให้ได้ผลผลิตพืชที่สูงและมีกำไรจากการขายผลผลิตหักค่าปุ๋ยแล้วมีกำไรสูงสุดนั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้องที่ต้องใช้ประกอบในการพิจารณา

1. ลักษณะของพืชที่ปลูก

พืชแต่ละชนิดมีความต้องการธาตุอาหารที่ต่างกันทั้งปริมาณและสัดส่วนของธาตุอาหาร แม้ว่าเป็นพืชชนิดเดียวกันก็ตาม พืชยังต้องการปริมาณและสัดส่วนธาตุอาหารไปสร้างส่วนต่าง ๆ ของลำต้นที่แตกต่างกันออกไปเช่นกัน จริงอยู่การใช้ปุ๋ยสูตรหนึ่งสูตรใดกับพืชทุกชนิดนั้นใช้ได้แต่ก็ไม่ได้เกิดผลดีเท่าที่ควร ซึ่งบางพืชต้องการไนโตรเจนมาก ขณะเดียวกับในบางพืชหากได้รับธาตุไนโตรเจนมากแล้วจะออกดอกติดผลน้อยเหล่านี้เป็นต้น

2. ดิน

การเกิดดิน คือการผุพังของหินชนิดต่าง ๆ รวมกับเศษซากพืชและซากสัตว์ที่สลายตัวเป็นอินทรีย์วัตถุอยู่ในดินนั้น ๆ มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้เนื้อดินที่แตกต่างกันยังดูดซับเอาปุ๋ยได้ไม่เหมือนกันอีกด้วย

ดินบางแห่งเป็นดินเค็มหรือดินด่าง บางแห่งเป็นดินเปรี้ยว (ดินกรด) จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์สภาพดินก่อนใส่ปุ๋ยเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้การใช้ปุ๋ยเป็นไปอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด

3. ชนิดและปริมาณของปุ๋ย

ปุ๋ยเคมีมีมากมายหลายชนิดหลายสูตรที่ให้ปริมาณและสัดส่วนที่ไม่เหมือนกัน คุณสมบัติของปุ๋ยมีทั้งที่เป็นกรดและเป็นด่าง ปุ๋ยบางอย่างสลายตัวให้พืชดูดได้ช้า บางชนิดก็สลายตัวได้เร็ว ในพืชที่ต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง ดังนั้นปุ๋ยเคมีที่ใช้ต้องมีธาตุทั้งสองที่สูงด้วย แต่ถ้าดินมีปริมาณธาตุอาหารธาตุหนึ่งธาตุใดสูงเพียงพอแล้ว ก็ไม่ควรใช้ปุ๋ยที่มีปริมาณธาตุอาหารนั้น ๆ สูง และปุ๋ยที่มีปฏิกิริยาเป็นกรดซึ่งไม่เหมาะกับดินเปรี้ยว เพราะทำให้ดินเป็นกรดเพิ่มขึ้น ดินที่เป็นกรดควรใช้ปุ๋ยที่ละลายช้าเพราะกรดช่วยทำลายได้

4. ระยะเวลาการใส่ปุ๋ย

เนื่องจากพืชในระยะต่าง ๆ เริ่มงอกไปจนถึงให้ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้นั้นมีความต้องการธาตุอาหารไม่เหมือนกันต้องเลือกเวลาจังหวะที่เหมาะสมที่พืชต้องการเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด และป้องกันการสูญเสียปุ๋ยโดยเปล่าประโยชน์ โดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจนสูยเสียไปจากดินได้ง่ายถ้าใส่ครั้งเดียวจนหมดเพราะพืชดูดไปใช้ได้เพียงจำกัด ปุ๋ยส่วนเกินสูญเสียไปในรูปต่าง ๆ เช่น เปลี่ยนเป็นก๊าซระเหยไปในอากาศ

5. วิธีใส่ปุ๋ย

ปุ๋ยที่ใส่ลงดินนั้นพืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันทีทั้งหมด ดังนั้นปุ๋ยมีโอกาสสูญเสียได้หลายทาง อาจถูกเม็ดดินตรึงไว้หรือถูกชะล้างโดยน้ำ หรือระเหยไปในอากาศ หรือถูกวัชพืชแย่งไปใช้ จะใส่ปุ๋ยวิธีไหนจึงจะให้พืชหลักที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด สะดวกและง่ายต่อการปฏิบัติทั้งไม่เป็นอันตรายต่อพืชอันเนื่องมาจากความเข้มข้นของปุ๋ย

วิธีหว่าน – เหมาะสมสำหรับดินปนทรายที่มีเม็ดดินเหนียวน้อยและเหมาะสำหรับพืชที่ปลูกโดยวิธีการหว่านเมล็ด เมื่อหว่านปุ๋ยแล้วอาจจะไถกลบหรือไม่ก็ได้แต่ถ้าไถกลบจะดีกว่า การหว่านต้องหว่านกระจายอย่างสม่ำเสมอ

ใส่เป็นแถบเป็นทาง – ในพืชที่ปลูกเป็นแถวเป็นแนวควรใส่ปุ๋ยตามแนวขนานของต้นพืชโดยโรยปุ๋ยห่างจากเมล็ดหรือรากกล้าประมาณ 2 นิ้ว กระทำพร้อมไปกับการหยอดเมล็ดหรือย้ายกล้าลงปลูก การใส่ปุ๋ยครั้งแรกนี้เรียกว่าปุ๋ยรองพื้นและใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 ตามแนวเดียวกันอีก แต่โรยบนผิวดินห่างจากโคนต้นประมาณ 5-12 นิ้ว ขึ้นอยู่กับขนาดของต้นพืช เรียกการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 ว่า “ปุ๋ยแต่งหน้า” มักเป็นปุ๋ยไนโตรเจนที่แบ่งใส่ทีละครึ่งกับใส่ครั้งแรก เนื่องจากเป็นปุ๋ยที่สูญเสียได้ง่าย การใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 ทำไปพร้อม ๆ กับการพรวนดินกำจัดวัชพืช

(ปฐพีชล วายุอัคคี, 2533)

2.4 ชนิดของปุ๋ย

ปุ๋ย หมายถึง วัตถุหรือสารที่เราใส่ลงไปในดินโดยมีความประสงค์ที่จะให้ธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมเพิ่มเติมแก่พืช เพื่อให้พืชได้มีธาตุอาหารดังกล่าว เป็นปริมาณที่เพียงพอและสมดุลกันตามที่พืชต้องการและให้ได้ผลผลิตสูงขึ้น ปุ๋ยโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.4.1 ปุ๋ยอินทรีย์

ปุ๋ยอินทรีย์ ได้แก่ ปุ๋ยที่มีกำเนิดหรือแหล่งที่มาจากอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ และเมื่อเน่าเปื่อยสลายตัวไปแล้วก็จะปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาให้เป็นประโยชน์แก่พืชได้ ตัวอย่างปุ๋ยประเภทนี้ที่เห็นกันอยู่บ่อย ๆ คือ

1. ปุ๋ยหมัก เช่น ขยะของเทศบาล หรือการเอาใบหญ้า ซากต้นพืชต่าง ๆ มากองสุมและหมักให้เน่าเปื่อยผุพังจนกลายเป็นปุ๋ย เป็นต้น

2. ปุ๋ยคอก เช่น มูลของสัตว์ต่าง ๆ เช่น เป็ด หมู และวัว ควายเป็นต้น สามารถนำมาใช้ได้ทันทีโดยไม่ต้องหมัก

3. กากเมล็ดพืช เช่น เมล็ดละหุ่ง เมล็ดยางพารา เมื่อหีบเอาน้ำมันออกมาแล้วกากที่เหลือมีเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนสูง สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้

2.4.2 ปุ๋ยอนินทรีย์

ปุ๋ยอนินทรีย์ ได้แก่ ปุ๋ยที่มีแหล่งที่มาจากอนินทรียสาร เช่น แหล่งแร่ต่าง ๆ หรือสังเคราะห์ขึ้นมา โดยขบวนการทางเคมีและจากผลพลอยได้ของโรงงานอุตสาหกรรมบางอย่าง ปุ๋ยพวกนี้มักเรียกกันว่าปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยวิทยาศาสตร์ โดยทั่วไปเพื่อให้เข้าใจง่าย เราจำแนกปุ๋ยประเภทนี้โดยถือเอาจำนวนของธาตุปุ๋ยที่ปรากฏในปุ๋ยว่ามีธาตุเดียวหรือมากกว่าหนึ่งธาตุ ซึ่งจำแนกได้ดังนี้

1. ปุ๋ยเชิงเดี่ยว (single fertilizer หรือ straight fertilizer) หมายถึงปุ๋ยเคมีที่มีธาตุอาหารหลัก (ธาตุปุ๋ย) เพียงธาตุเดียว ได้แก่ ปุ๋ยไนโตรเจน ปุ๋ยฟอสเฟต หรือปุ๋ยโพแทส

2. ปุ๋ยเชิงผสม (mixed fertilizer) หมายถึงปุ๋ยเคมีที่ได้จากการผสมปุ๋ยเคมีชนิดหรือประเภทต่าง ๆ (แม่ปุ๋ย) เข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ธาตุอาหารตามต้องการ

3. ปุ๋ยเชิงประกอบ (compound, complex fertilizer) หมายถึงปุ๋ยที่มีธาตุปุ๋ยมากกว่าหนึ่งธาตุ ซึ่งตรงกันข้ามกับปุ๋ยเชิงเดี่ยวซึ่งมีธาตุปุ๋ยเพียงธาตุเดียว

(ยงยุทธ โอสถสภา, 2528)

ในบรรดาปุ๋ยธาตุหลักที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นปุ๋ยที่ใช้มากที่สุด ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารไนโตรเจนแก่พืชเป็นส่วนใหญ่ และธาตุไนโตรเจนก็มีหน้าที่ในการสร้างความ

เจริญเติบโตทางใบ ทำให้แตกกิ่งก้านและใบดี ช่วยสร้างความเจริญเติบโตส่วนบนดินเป็นส่วนใหญ่ รูปของไนโตรเจนในปุ๋ยมี 3 แบบ คือ แอมโมเนียม ไนเตรต และเอไมด์ (amide) โดยปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารไนโตรเจน ได้แก่ ปุ๋ยโซเดียมไนเตรต ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ปุ๋ยแอมโมเนียมไนเตรต ปุ๋ยแอมโมเนียมคลอไรด์ ปุ๋ยแคลเซียมไนเตรต และปุ๋ยยูเรีย

2.5 ปุ๋ยยูเรีย

ปุ๋ยยูเรียเป็นปุ๋ยเดี่ยวไนโตรเจนชนิดแข็งที่มีปริมาณไนโตรเจนมากที่สุด คือ มีไนโตรเจนทั้งหมด 46 % จึงเหมาะที่จะใช้กับพืชที่ต้องการเร่งการเจริญเติบโตของลำต้น และใบ เป็นพิเศษ หรือใช้ในบางช่วงการเจริญเติบโตของพืชที่ต้องการธาตุไนโตรเจนเป็นพิเศษ

ยูเรียเป็นสารประกอบพวกเอไมด์มีสูตรโครงสร้างดังนี้ $H_2N\text{-}\overset{\overset{O}{\|}}{C}\text{-}NH_2$ ปุ๋ยยูเรียที่ใช้กันทั่วไปมีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเล็กมากสีขาวขุ่น เนื่องจากปุ๋ยยูเรียมีสมบัติในการละลายน้ำได้ดีมาก (108 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและ 167 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส) และแปรสภาพเป็นประโยชน์ได้เร็ว (ยงยุทธ โอสถสภา, 2528)

เมื่อมีการใช้ปุ๋ยยูเรีย ปุ๋ยยูเรียจะสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำ ทำให้ยูเรียละลายออกมาอย่างรวดเร็ว และเมื่อพบกับแบคทีเรียในดินจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ 2.1

$$H_2N\text{-}\overset{\overset{O}{\|}}{C}\text{-}NH_2 + H_2O \xrightarrow[\text{bacteria}]{\text{saprophytic either aerobic or anaerobic}} 2NH_3 + CO_2 \qquad (2.1)$$

พืชสามารถนำแอมโมเนียที่เกิดขึ้นไปใช้ในการสร้างโปรตีนในพืชได้ ปริมาณที่เกินความต้องการจะถูกออกซิไดส์โดย autotrophic nitrifying bacteria ไปเป็นไนไตรท์ และไนเตรทตามลำดับ ดังสมการ 2.2 และ 2.3

$$2NH_3 + 3O_2 \xrightarrow{\text{Nitrosomonas}} 2NO_2^- + 2H^+ + 2H_2O \qquad (2.2)$$

(ไนไตรท์)

ไนไตรท์เป็นสารที่มีพิษต่อพืชคนและสัตว์ แต่ไม่สะสมอยู่ในดิน (หรือสะสมอยู่น้อยมาก) เพราะมีแบคทีเรียออกซิไดส์ไนไตรท์ต่อไปเป็นไนเตรท ดังสมการ 2.3

$$2NO_2^- + O_2 \xrightarrow{\text{Nitrobacter}} 2NO_3^- \text{ (ไนเตรท)} \qquad (2.3)$$

ไนเตรทที่เกิดขึ้นจะเป็นปุ๋ยสำหรับพืชต่อไป ซึ่งมักจะเกิดในปริมาณที่มากเกินความต้องการของพืช และจะถูกน้ำที่ไหลผ่านดินชะไป (เพราะดินไม่มีความสามารถที่จะยึดไว้) ทำให้ซึมลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน หรือลงสู่แหล่งน้ำต่าง ๆ ต่อไป นอกจากนี้ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ทั้งไนไตรท์ และไนเตรทสามารถถูกรีดิวซ์ไปเป็นแอมโมเนีย โดยขบวนการ denitrification แต่ปฏิกิริยาส่วนมากจะดำเนินต่อไป จนถึงได้ก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะหลุดไปสู่บรรยากาศ ทำให้เกิดการสูญเสียปุ๋ยในดิน นอกจากนี้ยังสูญเสียไปได้บ้างในรูปการระเหยของก๊าซแอมโมเนีย (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2525)

จากการที่ปุ๋ยยูเรียละลายได้อย่างรวดเร็วทำให้พืชนำยูเรียไปใช้ได้ไม่ทันทำให้เกิดการสูญเสียปุ๋ย องค์การอาหารและเกษตรกรรมแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) ได้ประมาณการว่ายูเรียที่สูญเสียไปจากการใช้ปุ๋ยมีถึงประมาณ 40–70% ของปุ๋ยที่ใช้ ยูเรียส่วนเกินที่ถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน หรือบนดิน ยังก่อให้เกิดปัญหามลภาวะ ต่าง ๆ (กรรณิการ์ สิริสิงห์, 2525) ได้แก่

1. เกิดปรากฏการณ์ “eutrophication” ซึ่งเกิดจากการที่ไนเตรทซึ่งถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำทั่วไป จะไปเป็นสารอาหารช่วยในการเจริญเติบโตของพืชน้ำ เช่น สาหร่าย และวัชพืชน้ำอื่น ๆ ให้เจริญเติบโตมากผิดปกติ อย่างเช่นกรณีที่เรียกว่า “algae bloom” เป็นสาเหตุให้ระบบนิเวศเสียสมดุล สี กลิ่นของแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้สาหร่ายที่ปกคลุมผิวน้ำจะเป็นอุปสรรคต่อแสงและออกซิเจนที่จะลงสู่ใต้น้ำ สาหร่ายที่ตายทับถมเมื่อย่อยสลายก็จะทำให้ออกซิเจนของแหล่งน้ำลดลง และสาหร่ายบางชนิดเมื่อเน่าจะทำให้เกิดสารพิษได้

2. ในการบำบัดน้ำเสียที่มีไนเตรทเจือปนอยู่ในปริมาณมากพอ จะทำให้เกิดปัญหากากตะกอนลอยตัว ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดน้ำเสียในขบวนการ activated sludge process

3. น้ำดื่มที่มีไนเตรทในปริมาณที่เกินกว่า 10 มิลลิกรัมของไนโตรเจนต่อลิตร ก่อให้เกิดอันตรายได้

4. เมื่อมีการใช้ปุ๋ยยูเรียเป็นเวลานาน ๆ จะมีการตกค้างของไนโตรเจนในดินในรูป NH_4^+ ซึ่งทำให้ดินมีความเป็นกรด และจับตัวแข็ง ทำให้ดินเสื่อมสภาพ

นอกจากปัญหามลภาวะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นแล้วยังเกิดปัญหาในการใช้งานด้านการเกษตร คือ เริ่มแรกเมื่อใส่ปุ๋ย ยูเรียจะละลายออกมาอย่างรวดเร็วทำให้ความเข้มข้นมีมากเกินความต้องการ ถ้า

มากพออาจทำลายต้นอ่อนของพืช และอาจยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชได้ เนื่องจากเซลล์พืชถูกทำลายจากแรงดันออสโมติก ต่อมาเมื่อยูเรียส่วนเกินถูกชะล้างไป ทำให้สูญเสียปุ๋ยไปอย่างรวดเร็ว อาจเกิดปัญหาขาดแคลนสารอาหารของพืชได้อีก จากสาเหตุดังกล่าวทำให้การเจริญเติบโตของพืชไม่ดีเท่าที่ควร พืชมีลักษณะอาการขาดไนโตรเจน คือ ใบมีขนาดเล็กกว่าปกติและมีสีเขียวซีด หรือเขียวเหลือง ต่อมาใบเหล่านี้จะเหลืองและตายไปในที่สุด ก่อให้เกิดความยุ่งยากในการควบคุมปริมาณการใช้ปุ๋ย และสิ้นเปลืองปุ๋ย

2.6 ลักษณะอาการของพืชที่ได้รับธาตุไนโตรเจนในปริมาณที่ไม่เหมาะสม

2.6.1 ลักษณะอาการขาดธาตุไนโตรเจนในพืชโดยทั่ว ๆ ไป

พืชแต่ละชนิดจะแสดงอาการขาดแตกต่างกันออกไป เช่น อาการขาดไนโตรเจนของข้าวโพด ใบจะมีลักษณะสีเหลืองที่ปลายใบแล้วลามเข้ามาสู่เส้นกลางใบ เป็นลักษณะรูปร่างคล้ายตัววี (V-shape) โดยทั่ว ๆ ไปแล้วพืชที่ขาดธาตุไนโตรเจนมักแสดงอาการ ดังต่อไปนี้

1. ใบล่างของพืชจะกลายเป็นสีเหลือง หรือเหลืองปนส้มผิดปกติ พืชบางชนิดลำต้นจะมีสีเหลือง ปลายใบและขอบใบจะค่อย ๆ แห้งและลุกลามเข้าไป จนในที่สุดใบจะร่วงหล่นไปจากต้น
2. ลำต้นผอมสูง ใบ กิ่งก้านลีบเล็ก และมีจำนวนน้อย
3. พืชไม่เติมโตหรือโตช้ามาก แคระแกร็น การแตกยอดและกิ่งก้านมีน้อย
4. ให้ผลผลิตต่ำ คุณภาพไม่ดี โปรตีนน้อย

2.6.2 ลักษณะอาการของพืชที่ได้รับธาตุไนโตรเจนมากเกินไป

พืชที่ได้รับธาตุไนโตรเจนมากเกินไปจะแสดงอาการเฝือใบ ลำต้นอวบน้ำมีการหักล้มได้ง่ายและมีการแตกกอมากเกินไป ถ้าไม้ผลที่กำลังติดผล ผลจะร่วงและมีการแตกใบอ่อนแทนการแตกช่อดอก ผลจะแตกง่ายเมื่อโรคและแมลงเข้าทำลายพืชที่ได้รับไนโตรเจนมากเกินไปตั้งแต่ระยะแรกของการเจริญเติบโต จะมีผลทำให้ส่วนเหนือดินหรือลำต้นเจริญเติบโตเร็วแต่ส่วนของรากจะเจริญเติบโตช้า ดังนั้นในระยะต่อมารากพืชเหล่านั้นจะดูดน้ำและธาตุอาหารพืชได้น้อยกว่าที่พืชต้องการ และจะมีผลกระทบต่อสัญฐานลักษณะของพืช เช่น ใบข้าวจะยาวและกว้างกว่าปกติ แต่ใบจะบางลง ใบจะอ่อนตัวและโค้ง เป็นผลทำให้ใบบนบังแสงใบล่าง จะส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนในเมล็ดลดลง แต่ถ้าพืชได้รับธาตุไนโตรเจนในระยะติดดอก จะมีผลทำให้สัดส่วนของโปรตีนในเมล็ดผิดปกติ ธาตุไนโตรเจนนี้จะเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโนและอะไมด์ เคลื่อนย้ายจากรากไปยังเมล็ดที่

กำลังพัฒนา แต่กรดอะมิโนบางชนิด เช่น ไลซีน ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่จำเป็นในโปรตีนกลับลดลง จึงมีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของเมล็ด (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544)

2.7 ปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อย (controlled release) ธาตุอาหาร

จากปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดกับการใช้ปุ๋ยยูเรียดังที่กล่าวมา ตลอดจนปัญหาจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนชนิดอื่น ๆ ที่มีความสามารถในการละลายน้ำอย่างรวดเร็ว จึงมีความพยายามจะควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยไนโตรเจนให้ค่อย ๆ ปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์แก่พืชอย่างช้า ๆ ปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างช้า ๆ นั้นมีอยู่หลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีกลไกของการควบคุมที่แตกต่างกัน คือ

1. เคลือบปุ๋ยที่ละลายง่ายด้วยสารที่ป้องกันการซาบซึมของน้ำ
2. ปุ๋ยเป็นสารประกอบที่มีการละลายน้ำอย่างช้า ๆ
3. ปุ๋ยเป็นสารประกอบที่ต้องมีจุลินทรีย์ดินเข้าย่อยเสียก่อนจึงจะละลาย การละลายน้ำของปุ๋ยดังกล่าวจึงขึ้นอยู่กับกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน
4. ปุ๋ยอินทรีย์ซึ่งได้จากธรรมชาติ เมื่อจุลินทรียดินเข้าย่อยสลายแล้วจะปลดปล่อยธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมา

สำหรับปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารที่ป้องกันการซาบซึมของน้ำ การที่ธาตุอาหารจากปุ๋ยที่อยู่ภายในสารเคลือบจะผ่านออกมาข้างนอกได้นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคลือบที่ใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยดังต่อไปนี้

1. Semi–permeable membrane สารที่ใช้เคลือบมีสมบัติไม่ละลายน้ำแต่สามารถให้น้ำซึมผ่านเข้าไปข้างในได้ ดังนั้นเมื่อใส่ลงไปในดิน น้ำในดินจะค่อย ๆ ซึมผ่านสารเคลือบนี้เข้าไปข้างในทำให้เกิดแรงดัน (osmotic pressure) จนทำให้ผิวเคลือบแตกและปลดปล่อยแอมโมเนียมไนโตรเจนออกมาให้พืชใช้ประโยชน์ได้

2. Discontinuous หรือ Perforated–impermeable membrane สารที่ใช้เคลือบน้ำซึมผ่านไม่ได้แต่มันมีลักษณะเป็นเยื่อเคลือบปุ๋ยที่มีรูเล็ก ๆ อยู่ทั่วไปทำให้น้ำซึมเข้าไปละลายปุ๋ยภายในและไหลซึมผ่านออกมาได้

3. Solid–impermeable membrane โดยที่สารที่ใช้เคลือบปุ๋ยน้ำซึมผ่านไม่ได้ แต่เป็นสารที่จุลินทรีย์ดินสามารถย่อยสลายให้เกิดช่องหรือรอยแยก ซึ่งเป็นช่องทางให้น้ำซึมเข้าและน้ำปุ๋ยซึมออกมาได้

ปุ๋ยที่เคลือบสารดังกล่าวเป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำง่าย แต่จะคงสภาพไว้จนกว่าจะมีน้ำผ่านสารเคลือบเข้ามาละลาย ดังนั้น การปลดปล่อยธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ออกมาสู่ดินจึงเป็นไปอย่างจำกัด หากสามารถนำปุ๋ยที่เคลือบและควบคุมให้มีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารแตกต่างกันมาผสมกันอย่างพอเหมาะ ก็จะได้ปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารสอดคล้องกับความต้องการของพืชในช่วงเวลาต่าง ๆ

ข้อดีของปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร

1. ปุ๋ยประเภทนี้ค่อย ๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมา พืชจึงมีโอกาสใช้ได้ในช่วงเวลาที่นานกว่า ประสิทธิภาพของปุ๋ยประเภทนี้จึงมักสูงกว่าปุ๋ยที่ละลายง่ายทั่ว ๆ ไป

2. การสูญหายโดยการชะล้างของน้ำมีน้อยลง

3. ไม่ทำให้สารละลายของดินมีความเข้มข้นสูงเกินไปจนเป็นอันตรายต่อพืช แม้ว่าจะใส่ปุ๋ยทั้งหมดตามอัตราที่กำหนดไว้เพียงครั้งเดียว

4. เนื่องจากเป็นปุ๋ยที่ค่อย ๆ ละลาย พืชจึงได้รับธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์อย่างต่อเนื่อง

2.8 **ชานอ้อย** (bagasse)

ชานอ้อยเป็นส่วนเส้นใยของลำต้นอ้อยหลังจากผ่านการบีบคั้นสกัดน้ำออกแล้ว ผลผลิตอ้อยโดยเฉลี่ย 50.84 ตัน/เฮคเตอร์ จะเหลือส่วนที่เป็นชานอ้อยถึง 6.5 ตัน/เฮคเตอร์

2.8.1 องค์ประกอบทางเคมีและฟิสิกส์ของชานอ้อย

ชานอ้อยโดยส่วนใหญ่มีส่วนประกอบ ดังต่อไปนี้

ความชื้น (moisture)	46–52 %
เส้นใย (fiber)	43–52 %
สารที่ละลายน้ำได้ (brix, ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล)	2–6 %

(สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, 2541)

ส่วนประกอบที่เป็นเส้นใยจะไม่ละลายน้ำ ประกอบด้วย เซลลูโลส, เพนโตแซน และลิกนิน โดยปกติโครงสร้างของเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้เซลลูโลสมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchanger) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง 0.25–1 meg/g dry weight

ส่วนลำต้นอ้อยประกอบด้วยเนื้อเยื่อเส้นใยหลายชนิด แต่ที่สำคัญที่สุด 2 ชนิดที่พบในชานอ้อยได้แก่

1. true fiber เป็นเซลล์รูปทรงกระบอกของเปลือกไม้และเนื้อเยื่อลำเลียง มีผนังหนา

2. pith เป็น parenchyma cell ของเนื้อเยื่อชั้นในของลำต้น มีรูปร่างไม่แน่นอน ผนังบางและนิ่ม

true fiber และ pith มีองค์ประกอบทางเคมีเกือบจะเหมือนกัน แต่ด้านโครงสร้างแล้วแตกต่างกันมาก true fiber ในสภาพเปียกเมื่อนำมาทำให้แห้งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยืดและหดตัวจะมีค่าสูง เส้นใยแต่ละเส้นจะอยู่ใกล้กันมากและจะเชื่อมติดกัน ทำให้มีความแข็งแรง ยึดติดได้ดี ส่วน pith จะมีขนาดและรูปร่างไม่แน่นอน แต่ละเซลล์จะไม่เชื่อมติดกัน แต่จะมีสมบัติในการดูดซึมที่ดี สามารถดูดซึมน้ำได้หลายเท่าของน้ำหนักของมัน ทำให้โครงสร้างพองตัวมากขึ้น ด้วยสมบัตินี้ทำให้หมู่ฟังก์ชันในเส้นใยเกิดการแทนที่ได้ดี

ชานอ้อยมีความหนาแน่น (particle density) ประมาณ 492 ± 15 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และมีปริมาตรช่องว่าง (void volume) ประมาณ 66 % (Rasul *et al*, 1999) ส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อยแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อย

ส่วนประกอบ	สัดส่วน (%)
ความสามารถในการละลายน้ำร้อน	3.4
ความสามารถในการละลาย alcohol-benzene	2.3
ความสามารถในการละลาย NaOH 1 %	32
เซลลูโลส	47
ลิกนิน	19.5
เพนโตแซน	25.1
เถ้า	1.4
SiO_2	0.65
Fe_2O_3	0.031
CaO	0.046
MgO	0.016

ที่มา : Fernandez *et al.* (1995)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8.2 การใช้ประโยชน์จากชานอ้อย

สำหรับประเทศไทยมีชานอ้อยเหลือทิ้งเป็นจำนวนหลายล้านตันในแต่ละปี จึงได้มีการศึกษาการใช้ประโยชน์ของชานอ้อยในรูปแบบอื่น ๆ ได้แก่

1. ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนไม้ใบกว้างในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุหลายประเภท เช่น การผลิตเยื่อกระดาษ การผลิตแผ่นไม้ประดิษฐ์

2. ใช้ผลิตเป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ใช้ผลิตไฟฟ้า เป็นชานอ้อยอัดแท่ง ถ่านอัดแท่งและผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว

3. ใช้ในการทำ α-cellulose เพื่อผลิตเรยอน

4. ใช้ในการทำพลาสติกจากลิกนินของชานอ้อย

5. ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลแอลกอฮอล์ (xylitol)

6. ใช้เป็นอาหารสัตว์

2.9 **พอลิไวนิลอะซิเตต** (polyvinyl acetate)

พอลิไวนิลอะซิเตตเป็นอินทรีย์พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น เป็นพอลิเมอร์จำพวกไวนิลเอสเตอร์มีลักษณะเป็นของเหลว ไวไฟ ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน คือไม่มีความเป็นผลึกเลย มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (อุณหภูมิซึ่งพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากคล้ายแก้วเป็นของเหลว หรือจากของเหลวเป็นคล้ายแก้ว) สูงกว่าอุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (T_g = 28 องศาเซลเซียส) ดังนั้นพอลิเมอร์นี้จึงไม่เหมาะที่จะใช้งานเป็นพลาสติก เพราะจะอ่อนตัวลงกลายเป็นวัตถุที่นิ่มและเหนียวเหมือนยางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย

พอลิเมอร์นี้สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายหลายชนิด ได้แก่ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีนและโทลูอีน คลอริเนตเตตไฮโดรคาร์บอน เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ คลอโรฟอร์มและไดคลอโรเอทีลีน แอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำ เช่น เมทานอลและเอทานอล สารจำพวก เอสเตอร์เช่น เอทิลอะซิเตต และคีโตน เช่น อะซิโตนและเมทิลเอทิลคีโตน เป็นต้น แต่พอลิเมอร์นี้สามารถทนทานต่อจาระบี (grease) ไขมันและน้ำมันเป็นอย่างดี ละลายในน้ำได้เพียง 2–2.4 %

พอลิไวนิลอะซิเตตจะบวมตัวและอ่อนตัวลงถ้านำไปแช่ไว้ในน้ำเป็นเวลานานพอและทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งได้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นผลิตผล

การนำไปใช้ประโยชน์ของพอลิเมอร์นี้ คือ ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมพอลิเมอร์อีก 2 ชนิดที่ไม่สามารถเตรียมได้โดยตรงจากโมโนเมอร์ของพอลิเมอร์ทั้งสอง ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพอลิไวนิลอะซีทัล การใช้งานอื่น ๆ ได้แก่ ใช้ทำสีอิมัลชัน และ adhesives

$$(\text{-}CH_2\text{-}CH\text{-})_n$$
$$|$$
$$OC\text{-}CH_3$$
$$\|$$
$$O$$

พอลิไวนิลอะซิเตต

2.10 **ชันสน** (rosin)

ชันสนเป็นเรซินในธรรมชาติ เป็นสารพวกพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ โดยทั่วไป ชันสนเป็นผลิตผลที่ได้มาจาก 3 แหล่งใหญ่ คือ

1. ได้มาจากการเจาะเอายางสนจากต้นสนที่มีชีวิตอยู่แล้วเอามากลั่น (gum rosin)
2. ได้จากการกลั่นต้นสนที่มียางภายหลังจากการโค่นต้นใหม่ ๆ (wood rosin)
3. ได้จากการทำไม้ให้เป็นเยื่อ (by–product) โดยกรรมวิธี kraft pulping process (tall oil rosin)

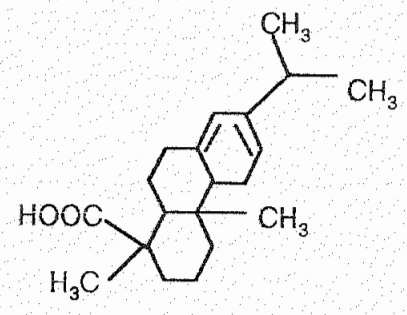
ชันสนมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง แต่เปราะ ไม่ทนน้ำและด่าง มีสมบัติโปร่งใส มีสีแตกต่างกันตามขบวนการผลิต มีตั้งแต่สีเหลืองอ่อนจนถึงสีแดงเข้มเกือบดำ มีกลิ่นของน้ำมันสนเล็กน้อย ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เกือบทุกชนิด ได้แก่ เอทานอล เอทิลอีเทอร์ และเบนซีน แต่ไม่ละลายในน้ำ

ชันสนประกอบด้วย free rosin acids ประมาณ 90 % ส่วนที่เหลือเป็นสารประกอบที่เป็นกลาง สารพวก terpenes ที่เกิด oxidation ได้เป็น esters และ anhydrides

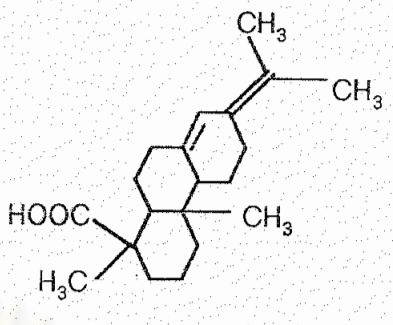
โครงสร้างของ rosin acid แสดงในภาพที่ 2.1

การใช้ประโยชน์ชันสนในประเทศไทย

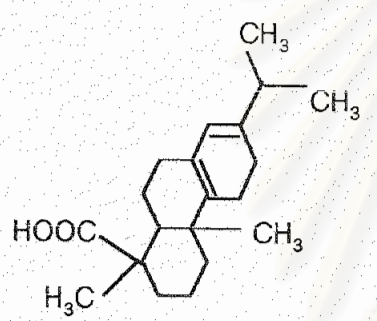
1. ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวเนื่องกับอุตสาหกรรมกระดาษ ได้แก่ การทำ sizing เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษให้มีความเหนียวยิ่งขึ้นและไม่ซึมน้ำ ทำกระดาษแข็งและกระดาษใช้ทั่วไป
2. ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อประโยชน์ในการเคลือบผิววัตถุ สีน้ำมัน วาร์นิช แลคเกอร์ สีเคลือบเครื่องปั้น หมึกพิมพ์ น้ำยาเคลือบเครื่องฉนวนไฟฟ้าต่าง ๆ
3. ผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับเคมีอุตสาหกรรมยาง
4. ผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับเคมีอุตสาหกรรมผ้าสี ผ้าดอก
5. ใช้ในอุตสาหกรรมการทำกาวต่าง ๆ
6. ใช้ในการเภสัชกรรม



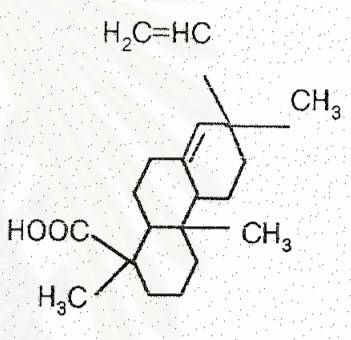
Levopimaric acid



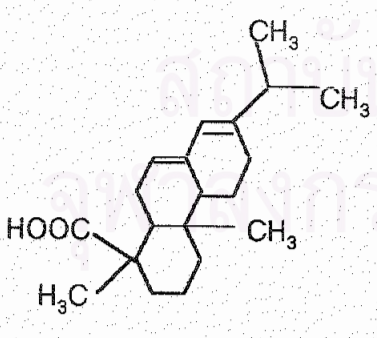
Neoabietic acid



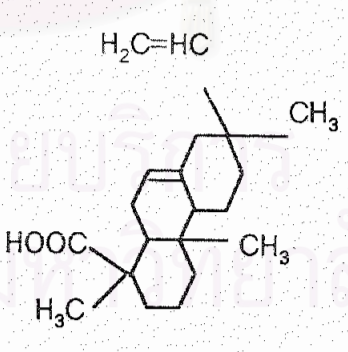
Palustric acid



Dextropimaric acid



Abietic acid



Isodextropimaric acid

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของ rosin acids

2.11 ประโยชน์ที่ได้จากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารที่เตรียมจากชานอ้อยและวัสดุพอลิเมอร์

จากสมบัติของชานอ้อยที่มีโครงสร้างเป็นโพรง สามารถดูดซึมน้ำได้ดี และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้สามารถดูดยึดน้ำและปุ๋ยไว้ภายในโครงร่างได้ และเมื่อทำการเคลือบผิวทับด้วยพอลิไวนิลอะซิเตตและซันสน ซึ่งมีสมบัติไม่ละลายในน้ำ แต่จะเกิดการบวมน้ำและอ่อนตัวทำให้น้ำซึมผ่านผิวเคลือบเข้าไปละลายปุ๋ยที่อยู่ภายในโครงร่างของชานอ้อยได้ยากขึ้น เมื่อน้ำซึมผ่านผิวเคลือบโดยการดูดซับของชานอ้อยและแพร่ผ่านทางรูพรุนเข้าไปละลายปุ๋ยได้ จากนั้นสารละลายปุ๋ยจะค่อย ๆ แพร่ผ่านผิวเคลือบออกมา ซึ่งปุ๋ยที่เตรียมได้มีข้อดีดังต่อไปนี้

1. ทำให้ปุ๋ยไนโตรเจนซึ่งสามารถละลายน้ำได้อย่างรวดเร็ว ค่อย ๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างช้า ๆ และเป็นไปในเวลาที่ต้องการของพืช

2. โครงร่างที่มีลักษณะเป็นโพรงและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของชานอ้อยจะช่วยดูดยึดน้ำและปุ๋ยในดินไว้ให้ถูกชะล้างไปได้ช้าลง และยังช่วยกำจัดสารพิษ (toxic substances) เช่น hydrogen sulfide ในดินได้อีกด้วย

3. โครงร่างที่มีลักษณะเป็นโพรงของชานอ้อยจะช่วยเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน และเพิ่มการถ่ายเทอากาศในดิน (soil aeration)

2.12 เทคนิคที่ใช้ในการทำเอนแคปซูเลชัน

กรรมวิธีในการทำเอนแคปซูเลชัน สามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ตามปฏิกิริยาทางเคมี ฟิสิโคเคมี และฟิสิกส์ ซึ่งวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้มีมากมายหลายวิธี เช่น coacervation, ionic gelation, solvent evaporation, interfacial polymerization, fluidized–bed process และ spray–dry process เป็นต้น ซึ่งวิธีที่ใช้ในการศึกษา คือ วิธี coacervation

การเกิด coacervation มี 2 ชนิด คือ

simple coacervation เกิดจากระบบที่ประกอบด้วยคอลลอยด์เพียง 1 ชนิด การเกิด phase separation coacervation เกิดขึ้นโดยการเติมสารที่มีการละลายสูงกว่าลงในสารละลายคอลลอยด์ ทำให้เกิดการแยกชั้นเป็น colloid rich phase และ equilibrium liquid ตัวอย่างได้แก่ การเติมสารละลาย sodium sulfate หรือ alcohol ลงในสารละลาย gelatin

complex coacervation เกิดจากระบบที่ประกอบด้วยคอลลอยด์มากกว่า 1 ชนิด การเกิด phase separation coacervation เกิดขึ้น โดยการเติมคอลลอยด์ที่มีประจุตรงกันข้ามลงไปใน

คอลลอยด์อีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่าง เช่น สารละลาย acacia มีประจุลบ เมื่อเติมลงไปในสารละลาย gelatin ซึ่งมีประจุบวก จะเกิดการแยกชั้นขึ้น

โดยวิธีที่ได้ทำการศึกษา คือ วิธี simple coacervation ซึ่งวิธีการเตรียมแคปซูลประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นที่ 1 เป็นขั้นตอนที่เกิดการแยกชั้น (phase separation) ของสารที่อยู่ในระบบโดยจะประกอบด้วยสารสำคัญซึ่งเป็น core material และสารห่อหุ้มซึ่งโดยมากจะเป็นสารพอลิเมอร์ (คอลลอยด์) ละลายอยู่ในตัวทำละลาย ดังนั้นการเติมสารอีกชนิดหนึ่งลงไปจะทำให้เกิดการแยกชั้นขึ้น และในขณะที่คนจะเกิดขั้นตอนที่ 2 ขึ้น

ขั้นที่ 2 คือขั้นที่คอลลอยด์หรือพอลิเมอร์ไปจับอยู่รอบๆสารสำคัญ ทำให้เกิดเป็นแคปซูลขึ้น

ขั้นที่ 3 เป็นขั้นตอนการแยกเอาแคปซูลออกจากตัวกลาง โดยการกรองหรือ centrifuge ริน เอาน้ำใสออก จากนั้นนำมาทำให้แห้ง

โดยในขั้นตอนที่ 1 นั้น การเกิด phase separation สามารถเกิดขึ้นได้หลายวิธีดังนี้

1. โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าใน binary system ที่อุณหภูมิสูงสารจะละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ถ้าอุณหภูมิต่ำลงสารจะแยกออกเป็น 2 วัฏภาค

2. การเติมเกลือ หรือสารที่ละลายได้ดีกว่าลงในสารละลายคอลลอยด์ ทำให้เกิดการแยกชั้น

3. การเติมพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่งลงไปทำให้เกิดการแยกชั้น

4. การเติม non–solvent ทำให้เกิด phase separation

เทคนิคเหล่านี้ใช้ได้ทั้งในการเตรียมแคปซูลที่เป็นทั้งของแข็งและของเหลว สารสำคัญเป็นของแข็งรวมทั้งที่ละลายได้ในน้ำและไม่ละลายน้ำ ขึ้นอยู่กับการเลือกกรรมวิธีที่เหมาะสม เช่น ถ้าสารสำคัญละลายในน้ำควรจะเลือกสารห่อหุ้มที่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นอินทรีย์เคมีและเลือกกรรมวิธีที่เกิด phase separation ใน non – aqueous phase เพื่อที่จะไม่ให้เกิดปฏิกิริยา หรือเกิดการละลายของสารสำคัญ โดยมากมักนิยมใช้พวก synthetic polymer เช่น เอทิลเซลลูโลส ฯลฯ ส่วนตัวยาที่ไม่ละลายน้ำสามารถจะเลือกใช้สารห่อหุ้มที่ละลายได้ในน้ำ เช่น gelatin โดยทำให้เกิดการแยกชั้นเป็น aqueous phase separation

2.13 **กลไกการควบคุมการปลดปล่อย** (controlled release mechanism) **โดยการแพร่** (diffusion)

ในสารละลายทั่วไปโมเลกุลของสารมีการเคลื่อนที่เสมอแม้ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ โมเลกุลก็ยังเคลื่อนที่จากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่งจนเข้าสู่สภาพสมดุล จำนวนโมเลกุลที่เคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ จะเท่ากันและผลสุทธิเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าระบบนี้ไม่สมดุลย์จำนวนโมเลกุลของสารจะเคลื่อนที่ไปสู่ทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่น ๆ ซึ่งการถ่ายโอนสุทธิ (net transfer) ของสารเรียกว่าการแพร่ (diffusion) กลไกการควบคุมการปลดปล่อยโดยการแพร่มีอยู่ 3 กรณี คือ

1. zero order release เป็นกลไกที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมการปลดปล่อยสาร ในกรณีนี้อัตราการปลดปล่อยของสารจะคงที่และแปรผันตามเวลา ซึ่งก็คือปริมาณความเข้มข้นของสารที่ละลายออกมาจะคงที่ เมื่อนำมาเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารที่ละลายออกมากับเวลาจะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 2.2

อัตราการละลายของสารใน zero order release เป็น mass–transfer controlled ซึ่งอัตราการปลดปล่อยสารหาได้จากสมการที่ 2.4

$$\frac{dM_t}{dt} = K \qquad (2.4)$$

M_t คือ ปริมาณของสารที่ละลายในสารละลายที่เวลา t

t คือ เวลา

K คือ ค่าคงที่การปลดปล่อย

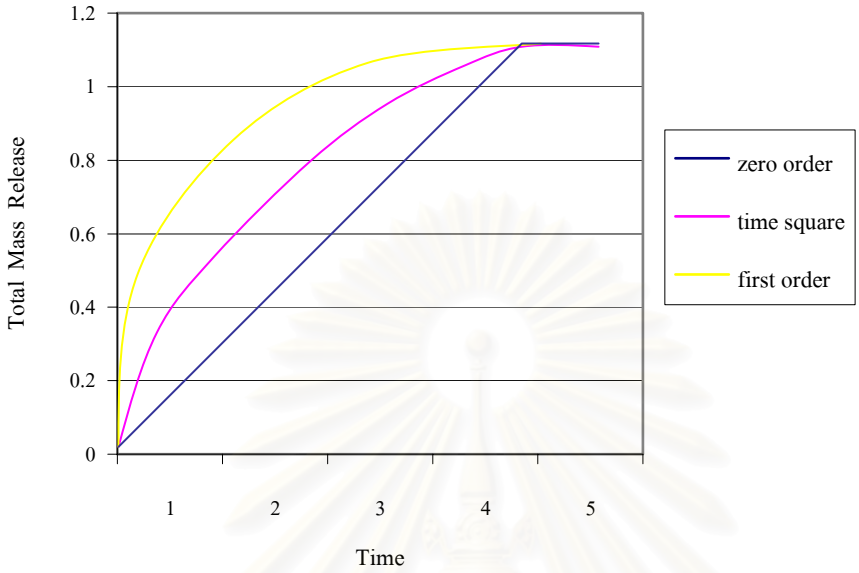
2. first order release ในกรณีนี้อัตราการละลายของสารจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น อัตราการปลดปล่อยสารจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของ active agent เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า logarithm ของ (M_0-M_t) กับเวลาจะได้กราฟเส้นตรง อัตราการละลายของสารใน first order release จะขึ้นอยู่กับการถ่ายโอนมวล (mass transfer) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.5

$$\frac{dM_t}{dt} = K(M_0 - M_t) \qquad (2.5)$$

M_0 คือ ปริมาณของสารที่ใช้เริ่มต้น ที่เวลา $t = 0$

3. square root of time-release kinetics ในกรณีนี้อัตราการละลายของสารจะมากที่เวลาเริ่มต้นและจะค่อย ๆ ช้าลงไปเรื่อย ๆ และช้ากว่าสารบริสุทธิ์ที่ไม่ได้ควบคุมการปลดปล่อย อัตราการปลดปล่อยสารจะเป็นสัดส่วนกับรากที่สองของเวลา เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าปริมาณสารที่ถูกปลดปล่อยออกมากับค่ารากที่สอง (square root) ของเวลาจะได้กราฟเส้นตรง อัตราการละลายของสารจะขึ้นอยู่กับเวลา และสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6

$$M_t = Kt^{1/2} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.2 แสดงปริมาณการปลดปล่อยสารด้วยกลไกต่าง ๆ กัน

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hepburn และ Arizal (1988,1989) เตรียมปุ๋ยเคมีชนิดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารโดยใช้วิธีเคลือบปุ๋ยยูเรียด้วยสารพวกกำมะถัน (sulfur-coated urea, SCU) พบว่าสามารถควบคุมการปลดปล่อยยูเรียได้แต่ไม่ค่อยดีนักเพราะที่ผิวเคลือบมีรูพรุนมาก เม็ดปุ๋ยที่ได้มีความเปราะแตกง่าย และมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนทำให้ต้นทุนการผลิตสูง

Hudson (1999) เตรียมปุ๋ยยูเรียเคลือบด้วยกำมะถันที่ได้ปรับปรุงผิวเคลือบไม่ให้มีรูพรุนและทำให้เม็ดปุ๋ยมีความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistant) โดยใช้วัสดุอุดกันรั่ว (sealant) ที่เป็นส่วนผสมระหว่างขี้ผึ้ง (wax) ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ petroleum waxes, synthetic waxes, natural waxes, vegetable และ mineral waxes กับพอลิเมอร์ที่ละลายได้ในขี้ผึ้ง แล้วเติมสารปรับสภาพลงไป (conditioner) ได้แก่ ดินเบา (diatomaceous earth), แคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate), แร่ดินเหนียว (clay minerals) และ เปอไลท์ (perlite) พบว่า เมื่อเคลือบปุ๋ยยูเรียด้วยกำมะถัน 13 % แล้วเติมวัสดุอุดกันรั่วลงไป 1 % จะทำให้เม็ดปุ๋ยมีคุณสมบัติในการป้องกันความชื้น (moisture barrier) ได้ดี แต่ถ้าต้องการให้เม็ดปุ๋ยมีความต้านทานต่อการขัดถูด้วยจะต้องใช้วัสดุอุดกันรั่วในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 % และยังพบว่าสารปรับสภาพช่วยปรับปรุง สมบัติการปลดปล่อยยูเรียให้ช้าลง

Robert (1994) ค้นพบว่าเมื่อผสมปุ๋ยกับพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic polymers) ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านี้โดยทั่วไปแบ่งเป็น 1) พอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymers) ได้จาก polysaccharides 2) พอลิเมอร์กึ่งสังเคราะห์ (semi-synthetic polymers) ได้จากเซลลูโลส 3) พอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymers) ซึ่งปุ๋ยที่เตรียมได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารกับปุ๋ยที่ไม่ใส่สารพอลิเมอร์พบว่ามีอัตราต่ำกว่า และยังช่วยลดการชะล้างธาตุไนโตรเจนและโพแทสเซียมในดินที่มีการระบายน้ำดี นอกจากนี้พืชยังสามารถดูดธาตุอาหารได้เพิ่มขึ้น

Chen และ Geiger (1997) เตรียมปุ๋ยยูเรียเคลือบด้วยวัสดุพอลิเมอร์ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านอย่างช้า ๆ โดยใช้ sulfonated terpolymer (SEPDM) ของ ethylene, propylene และ non-conjugated diene เคลือบเป็นฟิลม์บาง ๆ แล้วเคลือบทับด้วยสารละลายของ sodium lignosulfonate ซึ่งได้มาจากลิกนินของ sulfate หรือ sulfite ในขบวนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยมีสารตัวเติม (filler) คือ ทัลซ์ (talc หรือ hydrous magnesium silicate) กระจายอยู่ในสารละลายนี้ เมื่อนำไปทดสอบอัตราการปลดปล่อยยูเรีย พบว่าเม็ดปุ๋ยที่มีการเคลือบทับภายนอกด้วย lignosulfonate และใช้สารตัวเติมมีเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียต่ำกว่าเม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยวัสดุพอลิเมอร์เพียงชั้นเดียว เนื่องจาก lignosulfonate และสารตัวเติมมีคุณสมบัติเป็นตัวป้องกันความชื้น และ lignosulfotnate ยังเป็นตัวดูดยึดธาตุอาหารไว้ภายในสารเคลือบอีกด้วย

Valkanas (1992) เตรียมปุ๋ยโพแทสเซียมชนิดควบคุมการปลดปล่อยโดยเคลือบปุ๋ยโพแทสเซียมซัลเฟตด้วยสารเคลือบที่เป็นส่วนผสมระหว่าง paraffin waxes และชันสนประเภท wood rosin เมื่อนำปุ๋ยที่เตรียมได้มาทดสอบอัตราการละลายของโพแทสเซียมซัลเฟต พบว่า อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารช้าลงและเป็นไปในระยะเวลาที่นานขึ้น ซึ่งอัตราการปลดปล่อยของโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นไปตามกลไกการควบคุมการปลดปล่อยโดยการแพร่ (diffusion controlled release) แบบ square root of time–release kinetics และอัตราการปลดปล่อยโพแทสเซียมซัลเฟตจะเพิ่มขึ้นเมื่อเตรียมโพแทสเซียมซัลเฟตในปริมาณที่มากขึ้น และเมื่อนำปุ๋ยที่เตรียมโดยใช้ชันสนที่ปริมาณต่าง ๆ มาใส่ให้กับพืชที่งอกจากเมล็ด (seedling tree) พบว่า เปอร์เซ็นต์ธาตุอาหารในพืชจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของชันสนที่ใช้เพิ่มขึ้น

กวี ดำรงสิริพร (2539) เตรียมปุ๋ยยูเรียชนิดควบคุมการปลดปล่อยยูเรีย โดยการผสมยูเรียเข้ากับยางสกิมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง แล้วนำมาศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการปลดปล่อยยูเรียของปุ๋ย พบว่า ปัจจัยที่ทำให้อัตราการปลดปล่อยยูเรียเพิ่มขึ้น ได้แก่ ความเข้มข้นของยูเรียในสูตรผสมปุ๋ยตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของตัวกลาง ความเป็นกรดหรือเบสของตัวกลาง และการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารตัวเติม ปัจจัยที่ทำให้อัตราการปลดปล่อยยูเรีย

ลดลง ได้แก่ การเติมสารวัลคาไนซ์ การใช้ดินเหนียวเป็นสารเติมแต่ง และการใช้ยางธรรมชาติแทนยาง สกิมในการผสมปุ๋ยตัวอย่าง

Chang (1997) เตรียมปุ๋ยยูเรียชนิดค่อย ๆ ละลายปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้า ๆ โดยใช้สารซีโอไลท์ (zeolite) เป็นตัวดูดยึดธาตุอาหารไว้ภายในรูพรุนของโครงสร้าง แล้วเคลือบด้วยวัสดุที่มีลักษณะเป็นวุ้นหรือกาว (gelatinous substance) ได้แก่ sodium acrylate, polyvinyl chloride, polyvinyl acetate, methyl cellulose และ carboxyl methyl cellulose ได้เป็น “zeolite urea” เมื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับปุ๋ยยูเรียที่ใช้กันเป็นประจำ “regular urea” พบว่า พืชที่ได้รับ “zeolite urea” เจริญเติบโตได้ดีกว่าพืชที่ได้รับ “regular urea” ซึ่งเจริญเติบโตเพียงเล็กน้อยและมีอาการของการขาดธาตุไนโตรเจนด้วย

Pruitt (1990) ค้นพบว่า เยื่อกระดาษเซลลูโลสที่ไม่ใช้แล้ว (cellulosic pulp reject) เมื่อนำมาทำให้ขยายตัวและทำให้มีรูพรุนโดยวิธี flash-drying แล้วทำให้วัสดุเซลลูโลสนี้ชุ่มไปด้วยสารปรุงแต่ง (additive) เช่น ปุ๋ย และสารฆ่าแมลง เมื่อทำให้แห้งวัสดุเซลลูโลสจะจับยึดสารปรุงแต่งเหล่านี้ไว้ภายในรูพรุนของมัน ทำให้สารปรุงแต่งเหล่านี้มีการละลายและปลดปล่อยออกมาในเวลาที่ช้าลง

Hon (1997) เตรียมปุ๋ยชนิดที่ละลายปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้า ๆ โดยผสมปุ๋ยสูตร 15-15-15 ลงในส่วนผสมของวัสดุเซลลูโลส (cellulosic material) จากกระดาษหนังสือพิมพ์กับ thermoplastic resin ได้แก่ พอลิเอทิลีนทั้งหมด 12 อัตราส่วนผสมกันในเครื่อง intensive mixer เมื่อนำไปทดสอบอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหาร พบว่า ไนเตรตจะถูกปลดปล่อยออกมามากใน 24 ชั่วโมงแรกซึ่งอาจจะเป็นเพราะปุ๋ยที่อยู่บริเวณผิวของส่วนประกอบนี้จะถูกปลดปล่อยออกมาก่อน หลังจากนั้นความเข้มข้นของไนเตรตจะเริ่มลดลงจนอยู่ในระดับคงที่ และถูกปลดปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ โดยอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยทั้ง 12 อัตราส่วนจะแตกต่างกัน

Goertz (2000) เตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารโดยการเคลือบปุ๋ยไนโตรเจนในรูปแกรนูลไว้ 2 ชั้น ด้วยเครื่องมือสำหรับการเคลือบโดยควบคุมอุณหภูมิในขณะทำการเคลือบที่ 185–190 องศาฟาเรนไฮต์ ชั้นแรกเป็นสารผสมระหว่าง organic oil ได้แก่ linseed oil, soybean oil, tung oil และ dicyclopentadiene modified oils กับสารยึดเกาะ ได้แก่ ทัลซ์ (talcs), ดินเบา (diatomaceous earth), ดินเหนียว (fine clay) และ absorbent silicas ชั้นที่สองเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (6, 8 และ 10 PPH) ได้แก่ polyesters, polyamides, polyurethanes และ thermoplastic resins เมื่อนำไปทดสอบหาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารโดยการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่า ปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วย organic oil–clay ก่อนเคลือบทับด้วยพอลิเมอร์ มีอัตราการปลดปล่อยในช่วง 3 วันแรกต่ำกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบด้วย organic oil

ก่อน คือ 10 % และ 16 % ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบทับ พบว่า จะทำให้ปุ๋ยตัวอย่างปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาได้ในระยะเวลาที่นานขึ้น

Mikkelsen, Behel และ William (1993) เตรียมปุ๋ยไนโตรเจนชนิดค่อย ๆ ละลาย ปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้า ๆ โดยการผสมสารละลาย urea ammonium nitrate (UAN, 32 % N) กับสารพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic polymers) ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ guar, chemically modified guar, high molecular substitution guar, hydroxethyl cellulose และ hydrolyzed polyacrylamide แล้วนำไปทดสอบในดินทรายที่ปลูก fescue (*Festuca arundinacea L.*) เพื่อดูปริมาณธาตุอาหารที่ถูกชะล้างไปในเวลา 6 สัปดาห์ ผลที่ได้ คือ ปริมาณธาตุไนโตรเจนที่สูญเสียไปจะลดลง 26, 16, 7 และ 7 % ในช่วง 4 สัปดาห์แรก การเจริญเติบโตของ fescue เพิ่มขึ้นถึง 40 % และมีปริมาณธาตุไนโตรเจนสะสมอยู่ในราเพิ่มขึ้นถึง 50 % เมื่อเทียบกับ UAN บริสุทธิ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. UV-Visible spectrophotometer ของบริษัท Speed Fair รุ่น 45240-00
2. Scanning electron microscope ของบริษัท JEOL รุ่น JSM–5410 LV
3. Crumbling machine ของบริษัท Retsch, W-Germany รุ่น SK1
4. Hot air oven
5. Hotplate magnetic stirrer
6. pH meter
7. เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
8. กระดาษกรอง Wattman เบอร์ 40
9. บีกเกอร์ขนาด 100, 250, 500 และ 1000 ml
10. ขวดวัดปริมาตรขนาด 100, 250, 500 และ 1000 ml
11. ปิเปตขนาด 2.00, 5.00, 10.00 และ 20.00 ml
12. กระบอกตวงขนาด 100 และ 1000 ml
13. กรวยกรอง
14. อลูมิเนียมฟรอยด์ (aluminium foils)
15. หลอดทดลอง

3.2 วัตถุดิบและสารเคมี

1. ชานอ้อย จากร้านขายน้ำอ้อยสด ถนนสาธุประดิษฐ์ กรุงเทพฯ
2. พอลิไวนิลอะซิเตต (บริษัท TPA)
3. ซันสนจากประเทศจีน
4. พอลิสไตรีนจากกล่องโฟมใส่อาหารที่ใช้แล้ว
5. ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0 เกรดการค้า ตราเรือใบไวกิ้ง จากบริษัท โรจน์พนกิจ จำกัด
6. ยูเรีย เกรดงานวิเคราะห์ (บริษัท Merck)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. ซีโอไลต์จากจังหวัดลพบุรี
8. cyclohexane (บริษัท Carlo Erba)
9. n-hexane (บริษัท Merck)
10. dimethylaminobenzaldehyde (บริษัท Merck)
11. 95 % ethanol (บริษัท Merck)
12. concentrated hydrochloric acid (บริษัท Merck)
13. zinc acetate ($Zn(C_2H_3O_2)_2$) (บริษัท J.T. Baker)
14. glacial acetic acid (บริษัท Merck)
15. potassium ferrocyanide ($K_4Fe(CN)_6 . 3H_2O$) (บริษัท J.T. Baker)
16. vegetable charcoal (บริษัท Merck)
17. citric acid (บริษัท Ajax Chemicals)
18. Na_2HPO_4 (บริษัท Ajax Chemicals)
19. sodium hydroxide (บริษัท Merck)
20. น้ำกลั่น (distilled water)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การเตรียมบัฟเฟอร์ (buffer) โดยใช้ citric acid, Na_2HPO_4 และ sodium hydroxide

1. เตรียม citric acid 0.1 M โดยชั่ง citric acid 19.21 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1000 ml

2. เตรียม Na_2HPO_4 0.2 M โดยชั่ง Na_2HPO_4 35.60 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1000 ml

3. ผสม citric acid 48.5 ml กับ Na_2HPO_4 51.5 ml เข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้บัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5

4. เตรียม sodium hydroxide 1 M โดยชั่ง sodium hydroxide 40 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

3.4 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณยูเรียโดยใช้เทคนิค UV-visible spectrophotometry

3.4.1 เตรียมสารละลาย dimethylaminobenzaldehyde (DMAB)

ชั่ง DMAB 16.00 กรัม ละลายด้วย 95 % เอทานอลจนมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร แล้วเติม concentrated hydrochloric acid 100 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้นี้สามารถเก็บไว้ได้นาน 1 เดือน

3.4.2 เตรียมสารละลาย zinc acetate

ชั่ง $Zn(C_2H_3O_2)_2$ 22.00 กรัม นำมาละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วเติม glacial acetic acid และเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

3.4.3 เตรียมสารละลาย potassium ferrocyanide

ชั่ง $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$ 10.60 กรัม นำมาละลายในน้ำกลั่น และเจือจางจนมีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน

ตารางที่ 3.1 แสดงสูตรผสมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1-12

สูตร	ส่วนประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)					
	ชานอ้อย	พอลิสไตรีน	ปุ๋ยยูเรีย	สารเคลือบ		ซีโอไลต์
				พอลิไวนิลอะซิเตต	ชันสน	
1	40	_	40	20	_	_
2	40	_	30	30	_	_
3	40	_	20	40	_	_
4	20	_	40	_	40	_
5	20	_	30	_	50	_
6	20	_	20	_	60	_
7	40	_	40	_	20	_
8	40	_	30	_	30	_
9	40	_	20	_	40	_
10	20	_	30	_	35	15
11	_	30	50	_	20	_
12	_	40	40	_	20	_

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.1.1 การเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1-3

1. นำชานอ้อยมาล้างน้ำให้สะอาด ตากแดดประมาณ 2–3 วัน จนแห้ง โดยหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำชานอ้อยมาบดโดยใช้เครื่องบดที่มีตะแกรงคัดขนาดอยู่ในตัว (crumbling maching) บดให้ชานอ้อยมีขนาด 0.25 ไมครอน

3. เติมปุ๋ยยูเรียลงในน้ำกลั่นในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1 ต่อ 1 กวนจนปุ๋ยยูเรียละลายหมด

4. เติมชานอ้อยลงไปในอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1 กวนจนชานอ้อยดูดซับสารละลายยูเรียจนหมด

5. นำชานอ้อยจากข้อ 4 เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

6. นำพอลิไวนิลอะซิเตตในอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1 ใส่ในบีกเกอร์ ค่อย ๆ ผสมชานอ้อยจากข้อ 4 ลงไปทีละน้อยจนส่วนผสมเข้ากันได้หมด

7. นำปุ๋ยตัวอย่างที่ผสมได้ มาตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

8. สังเกตลักษณะทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างที่ผลิตได้ในแต่ละสูตร แล้วจดบันทึกและถ่ายรูปไว้

9. นำปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้มาส่องด้วยกล้อง scanning electron microscope แล้วสังเกตลักษณะของผิวเคลือบ แล้วจดบันทึกและถ่ายรูปไว้

3.5.1.2 การเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4–10

1. เตรียมชานอ้อยโดยใช้วิธีการเดียว กับหัวข้อที่ 3.5.1.1 ข้อ 1-5

2. นำซันสนในอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1 ใส่ในบีกเกอร์ แล้วหลอมบนเตาไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิที่ 70-75 องศาเซลเซียส จนซันสนละลายหมด

3. ค่อย ๆ ผสมชานอ้อยที่เตรียมได้ลงไปทีละน้อยจนส่วนผสมเข้ากันได้หมด

4. สูตรที่ 10 ค่อย ๆ เติมซีโอไลต์ลงไป กวนให้ซีโอไลต์กระจายบนของผสมจนทั่ว

5. นำปุ๋ยตัวอย่างที่ผสมได้ มาตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

6. สังเกตลักษณะทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างที่ผลิตได้ในแต่ละสูตรแล้วจดบันทึกและถ่ายรูปไว้

7. นำปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้มาส่องด้วยกล้อง scanning electron microscope แล้วสังเกตลักษณะของผิวเคลือบ แล้วจดบันทึกและถ่ายรูปไว้

3.5.1.3 การเตรียมปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11-12

1. บดปุ๋ยยูเรียจนละเอียดเป็นผง แล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ใน desiccator จนกระทั่งนำมาใช้

2. เตรียมสารละลายพอลิสไตรีน โดยนำโฟมมาตัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ใส่ลงในบีกเกอร์ โดยใช้อัตราส่วนของปุ๋ยต่อพอลิสไตรีนในสูตร 10 และ 11 เท่ากับ 1 ต่อ 1 และ 1 ต่อ 2 ตามลำดับ แล้วเติม cyclohexane ลงไปให้สารละลายมีความเข้มข้น เท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3. ค่อย ๆ โปรยปุ๋ยยูเรียลงในสารละลายพอลิสไตรีน ปั่นรวมกันที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที ให้ปุ๋ยยูเรียกระจายตัวในสารละลายพอลิสไตรีน เป็นเวลา 45 นาที

4. ลดอุณหภูมิลงให้เหลือ 4 องศาเซลเซียส เติม talc 0.8 กรัม ลงไปเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคจับตัวกันเป็นก้อน

5. นำ n-hexane เทลงในบีกเกอร์สารละลายพอลิสไตรีนและปุ๋ยยูเรีย เพื่อช่วยให้ผนังพอลิสไตรีนแข็งตัว แล้วปั่นต่อเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยควรรักษาอุณหภูมิภายใน 1 ชั่วโมงแรกให้คงที่

6. แยกผลิตภัณฑ์ออกจากสารละลาย แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง

7. นำซันสนในอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1 ใส่ในบีกเกอร์ แล้วหลอมบนเตาไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิที่ 70-75 องศาเซลเซียส จนซันสนละลายหมด

8. ค่อย ๆ ผสมไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ลงไปทีละน้อยจนส่วนผสมเข้ากันได้หมด

9. นำปุ๋ยตัวอย่างที่ผสมได้ มาตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

10. สังเกตลักษณะทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างที่ผลิตได้ในแต่ละสูตร แล้วจดบันทึก และถ่ายรูปไว้

11. นำปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้มาส่องด้วยกล้อง scanning electron microscope แล้วสังเกตลักษณะของผิวเคลือบ แล้วจดบันทึกและถ่ายรูปไว้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.2 การสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของยูเรีย โดยใช้เทคนิค UV-visible spectrophotometry

1. ชั่งยูเรีย 5.000 ± 0.001 กรัม นำมาละลายในน้ำกลั่น และเจือจางจนมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายที่ได้มาในปริมาตร 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 มิลลิลิตร ตามลำดับ เติมลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ทั้งหมด 10 ขวด แยกกันตามปริมาตรของสารละลายที่ปิเปตมา แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นของยูเรีย 0.0002, 0.0004, 0.0006, 0.0008, 0.0010, 0.0012, 0.0014, 0.0016, 0.0018 และ 0.0020 กรัม ต่อปริมาตรของสารละลาย 5 มิลลิลิตร ตามลำดับ

2. ปิเปตสารละลายมาตรฐาน 5 มิลลิลิตร และสารละลาย DMAB 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จำนวน 10 หลอด ตามปริมาตรความเข้มข้นของยูเรียต่าง ๆ เขย่าจนสารละลายเข้ากันทั่ว ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที พร้อมทั้งเตรียมสารละลาย reagent blank โดยเจือจางสารละลาย DMAB ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง เขย่าจนสารละลายเข้ากันทั่ว ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที

3. นำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมใส่หลอดทดลองข้างต้นมาวัดค่า absorbance ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร โดยกำหนดให้ค่า absorbance ของ reagent blank เป็น 0 และค่าความเข้มข้นของยูเรียใน reagent blank เป็น 0

4. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า absorbance ของสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นของยูเรียต่าง ๆ (แกน y) กับความเข้มข้นของยูเรีย (แกน x)

3.5.3 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของชานอ้อย, วัสดุพอลิเมอร์และปุ๋ยไนโตรเจนสำหรับใช้ในการเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน

3.5.3.1 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตต

ศึกษาหาปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตต และใช้ปริมาณของชานอ้อย เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อพอลิไวนิลอะซิเตต เท่ากับ 40:20, 30:30 และ 20:40 (สูตรที่1-3)

1. นำปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ในสูตรที่ 1-3 สูตรละ 5 กรัมมาแช่ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร แยกบีกเกอร์กันตามแต่ละสูตร แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

2. เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน นำปุ๋ยตัวอย่างออกจากบีกเกอร์ แล้วนำน้ำในบีกเกอร์ที่เหลืออยู่ไปวัดอัตราการปลดปล่อย total N ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

2.1 นำน้ำที่บรรจุในบีกเกอร์ซึ่งต้องการวัดอัตราการปลดปล่อยยูเรียและปุ๋ยตัวอย่างมากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 40 นำสารที่ได้จากการกรองบรรจุลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร

2.2 ชั่งผงถ่าน (vegetable charcoal) ปริมาณ 1 กรัม เติมลงในบีกเกอร์จากข้อ 2.1 แล้วเติมสารละลาย zinc acetate จำนวน 5 มิลลิลิตร และสารละลาย potassium ferrocyanide 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นกวนบนเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก 30 นาที จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 40 นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปเจือจางด้วยน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้มา 5 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลองและเติมสารละลาย DMAB ลงไป 5 มิลลิลิตร เขย่าจนสารละลายเข้ากันดี แล้วนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่า absorbance ด้วยเทคนิค UV-visible spectrophotometry

2.3 นำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของยูเรีย จะทำให้ทราบค่าความเข้มข้นของยูเรียในสารละลายที่กรองได้ หลังจากนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างได้โดยอาศัยหลักการดังนี้

จากสูตรโมเลกุลของยูเรียที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 (หัวข้อ 2.4.1) ทำให้ทราบว่า

ยูเรีย 60 กรัม มีไนโตรเจนอยู่	14	กรัม
ถ้ามียูเรีย w กรัม จะมีไนโตรเจนอยู่	14w/60	กรัม
ดังนั้นปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างจะเท่ากับ	14w/60	กรัม

เมื่อนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับปริมาณ total N ทั้งหมดที่มีอยู่ในสูตรผสมปุ๋ยตัวอย่างก็จะทำให้ทราบถึงปริมาณของยูเรียที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละสูตร ซึ่งวัดในรูปของ total N ได้

3. สำหรับปุ๋ยตัวอย่างที่ถูกแยกออกมาหลังจากแช่ไว้นั้น ให้นำไปแช่ในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2 และ 3 เมื่อเวลาผ่านไปทุก ๆ 1 วัน ตามลำดับ

5. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ total N สะสมกับเวลาที่ผ่านไปเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ 1-3

3.5.3.2 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยชันสน โดยใช้อัตราส่วนของวัสดุที่ใส่ในสูตรผสมต่างกัน

ศึกษาหาปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยชันสน โดยแปรผันเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของชานอ้อย เท่ากับ 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ และแปรผันเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปุ๋ยยูเรีย เท่ากับ 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์

1. นำปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ในสูตรที่ 4-9 สูตรละ 5 กรัม มาแช่ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร แยกบีกเกอร์กันตามแต่ละสูตร แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

2. วัดอัตราการปลดปล่อย total N จากปุ๋ยตัวอย่างด้วยวิธีการในข้อ 3.5.3.1 ข้อ 2–4

3. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ total N สะสมกับเวลาที่ผ่านไปเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ 4-6 และ 7-9

3.5.4 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ เปรียบเทียบกับปุ๋ยไนโตรเจนบริสุทธิ์ชนิดเม็ดที่ใช้กันทั่วไป

ศึกษาหาปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์จำนวน 2 กรัม เปรียบเทียบกับ ปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่มียูเรีย 40 เปอร์เซ็นต์, ปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์จำนวน 1.5 กรัม เปรียบเทียบกับปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่มียูเรีย 30 เปอร์เซ็นต์ และปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์จำนวน 1 กรัม เปรียบเทียบกับปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่มียูเรีย 20 เปอร์เซ็นต์

1. นำยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ดในปริมาณเท่ากับ 1, 1.5 และ 2 กรัม มาแช่ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 วัน

2. นำน้ำในบีกเกอร์ที่ละลายปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ ไปหาปริมาณ total N ที่ปลดปล่อยออกมาโดยวิธีเดียวกับหัวข้อ 3.5.3.1 ข้อ 2

3. นำยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ดในปริมาณเท่ากับ 1,1.5 และ 2 กรัม มาแช่ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 วัน

4. นำน้ำในบีกเกอร์ที่ละลายปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ ไปหาปริมาณ total N ที่ปลดปล่อยออกมาโดยวิธีเดียวกับหัวข้อ 3.5.3.1 ข้อ 2

5. นำค่าปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยในเวลา 1 และ 2 วัน เปรียบเทียบกับปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างในช่วงเวลาเดียวกัน

3.5.5 การอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ในน้ำที่มีความเป็นกรด-เบสต่าง ๆ กัน

ศึกษาหาปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่แช่ในตัวกลาง (น้ำกลั่น) ที่มีพีเอช เท่ากับ 5, 7 และ 9

1. เตรียมบีกเกอร์บรรจุน้ำกลั่นที่ผ่านการปรับพีเอชเป็น 3 สภาวะ คือ กรด เบส และกลาง ในปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยมีวิธีการดังนี้ คือ

1.1 กรณีที่เป็นกลาง (พีเอช 7) ให้ใช้น้ำกลั่น ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เติมลงในบีกเกอร์ได้เลย

1.2 กรณีที่เป็นกรด หรือเบส (พีเอช 5 หรือ 9) ให้นำน้ำกลั่นไปปรับพีเอชให้ได้ตามต้องการด้วยบัฟเฟอร์จากข้อ 3.3 จากนั้นนำน้ำที่ผ่านการปรับค่าพีเอชแล้ว เติมลงในบีกเกอร์ในปริมาตร 250 มิลลิลิตร

2. นำปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 จำนวน 5 กรัม เติมลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้จากข้อ 1.

3. วัดอัตราการปลดปล่อย total N จากปุ๋ยตัวอย่างด้วยวิธีการดังหัวข้อ 3.5.3.1 ข้อ 2-4

4. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ total N สะสมกับเวลาที่ผ่านไป เปรียบเทียบระหว่างค่าพีเอช 5, 7 และ 9

3.5.6 การวิเคราะห์การดูดซับน้ำของปุ๋ยตัวอย่าง

1. นำปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4-12 มาชั่งน้ำหนักโดยละเอียด บันทึกน้ำหนักที่ได้ไว้ (w_1)

2. นำปุ๋ยตัวอย่างใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 4 วัน

3. จากหัวข้อ 2 นำปุ๋ยขึ้นมาจากบีกเกอร์ใช้กระดาษกรองซับเม็ดปุ๋ยให้แห้ง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักโดยละเอียด และบันทึกน้ำหนักที่ได้ (w_2) จากนั้นทำให้เม็ดปุ๋ยแห้งแล้วนำมาชั่งน้ำหนักโดยละเอียดจนได้น้ำหนักที่คงที่ แทนค่าที่วัดได้ด้วย w_3

4. หาปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับโดยปุ๋ยตัวอย่างจากสูตร

ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (%) = $100(w_2 - w_3)/w_1$

หมายเหตุ ทำซ้ำ 3 ครั้งในทุกการทดลอง

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลการทดลองที่ได้ โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

1. เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ โดยใช้อัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อสารเคลือบ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกแบบทางเดียว (one–way analysis of variance) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสนด้วยการทดสอบพหุคูณ โดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2. เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียชนิดควบคุมการปลดปล่อยที่ใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับแล้วเคลือบด้วยวัสดุพอลิเมอร์ และปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ด เมื่อเวลาผ่านไป 2 วัน โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยด้วย Paired–Samples T Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3. เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างที่แช่ในตัวกลางที่มีค่าพีเอชต่าง ๆ กัน โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกแบบทางเดียว (one–way analysis of variance) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างในแต่ละสภาวะของตัวกลางด้วยการทดสอบพหุคูณ โดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 สมบัติทางกายภาพของปุ๋ยตัวอย่าง

รูปถ่ายลักษณะโดยทั่วไปที่มองด้วยตาเปล่าและลักษณะพื้นผิวที่สังเกตจาก scanning electron microscope ของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1-12 แสดงในรูปที่ ค1-ค24 ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตต (สูตรที่ 1-3) เนื้อปุ๋ยจะเหนียวและนิ่มกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยซันสน (สูตรที่ 4-12) และสามารถบดด้วยมือให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ได้โดยง่าย ถ้าปุ๋ยตัวอย่างมีเปอร์เซ็นต์ของพอลิไวนิลอะซิเตตมากขึ้นก็จะยิ่งเหนียวและจับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น ปุ๋ยตัวอย่างที่ใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับแล้วเคลือบด้วยซันสน (สูตรที่ 4-10) สูตรที่มีเปอร์เซ็นต์ของซันสนมากขึ้นปุ๋ยจะจับตัวเป็นก้อนแข็ง มีขนาดใหญ่ขึ้น และหักออกจากกันด้วยมือได้ยากขึ้น ในขณะที่ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมโดยการทำไมโครเอนแคปซูเลชันแล้วเคลือบด้วยซันสน (สูตรที่ 11-12) ปุ๋ยที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่ ผิวเรียบ ทนแรงกระแทกได้ดี และหักออกจากกันด้วยมือได้ยากมาก

สำหรับลักษณะพื้นผิวที่สังเกตจาก scanning electron microscope ของปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตต จะมีแผ่นฟิลม์บาง ๆ กระจายอยู่บนพื้นผิวของปุ๋ย โดยไม่ต่อเนื่องเป็นแผ่นเดียวกัน ในขณะที่ปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยซันสน จะมีผิวเคลือบที่หนากว่าและค่อนข้างต่อเนื่องเป็นแผ่นเดียวกัน แต่ในสูตรที่มีปริมาณของซันสนน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์จะมีรูพรุนกระจายอยู่บนผิวเคลือบ ซึ่งอาจเกิดจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขณะที่กวนเนื้อพอลิไวนิลอะซิเตตและซันสนให้เข้ากับชานอ้อย เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้แห้งฟองอากาศเหล่านี้ก็จะดันออกมาเกิดเป็นรูเล็ก ๆ บนผิวเคลือบ โดยปุ๋ยตัวอย่างที่มีเปอร์เซ็นต์ของซันสนมากขึ้นก็จะมีผิวเคลือบที่เรียบขึ้น และมีรูพรุนน้อยลง

4.2 การสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของยูเรีย โดยใช้เทคนิค UV-visible spectrophotometry

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของยูเรียโดยใช้เทคนิค UV-visible spectrophotometry ในการทดลองนี้วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร ค่า absorbance ที่วัดได้นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า absorbance ของสารละลายมาตรฐานยูเรียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กับค่า

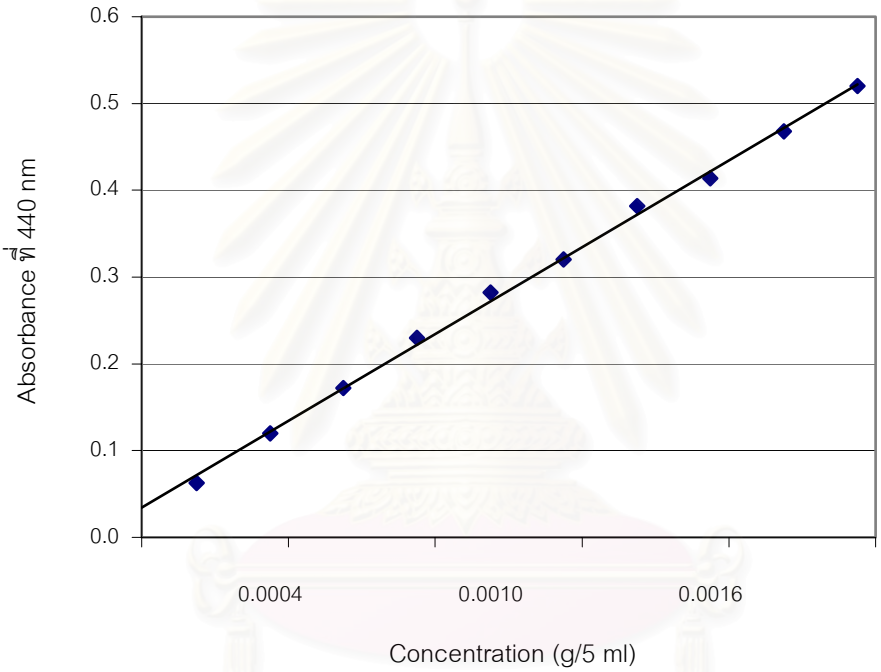
ความ เข้มข้นของยูเรีย ซึ่งจะได้กราฟมาตรฐานที่เป็นเส้นตรง ผลการทดลองแสดงกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นของยูเรีย แสดงไว้ในรูปที่ 4.1

สมการเส้นตรงที่ได้ คือ

$$y = 275x + 0.005 \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0.9979$$

ค่า y คือ ค่า absorbance และค่า x คือ ค่าความเข้มข้นของยูเรียหน่วย g/5 ml



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของยูเรีย โดยใช้เทคนิค UV-visible spectrophotometry

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของชานอ้อย วัสดุพอลิเมอร์และปุ๋ยไนโตรเจนสำหรับการเตรียมปุ๋ยซนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน

4.3.1 อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตต

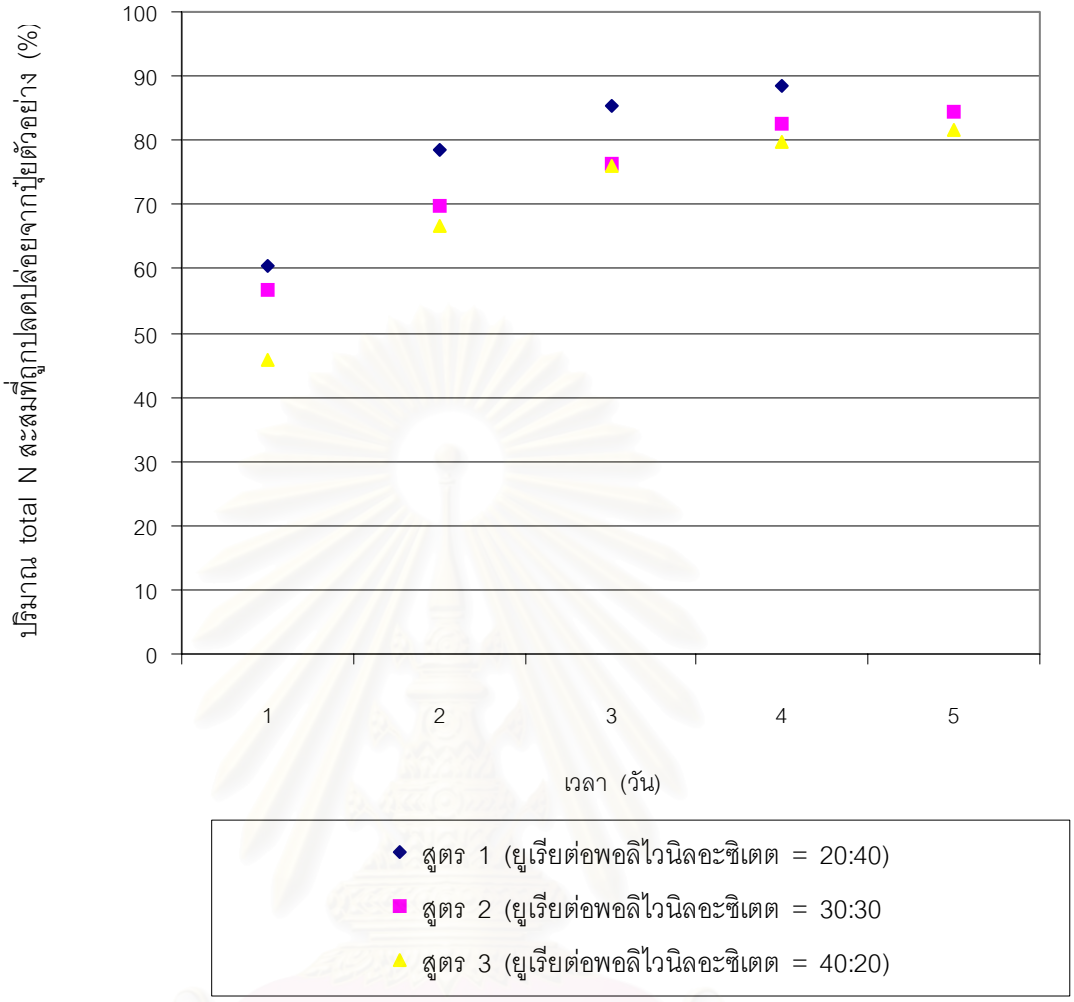
การศึกษาขั้นตอนนี้ได้หาปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตต และใช้ปริมาณของชานอ้อย เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อพอลิไวนิลอะซิเตต เท่ากับ 40:20, 30:30 และ 20:40

ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตตในอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสน เท่ากับ 40:20, 30:30 และ 20:40 (สูตรที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ) แสดงผลดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1, 2 และ 3

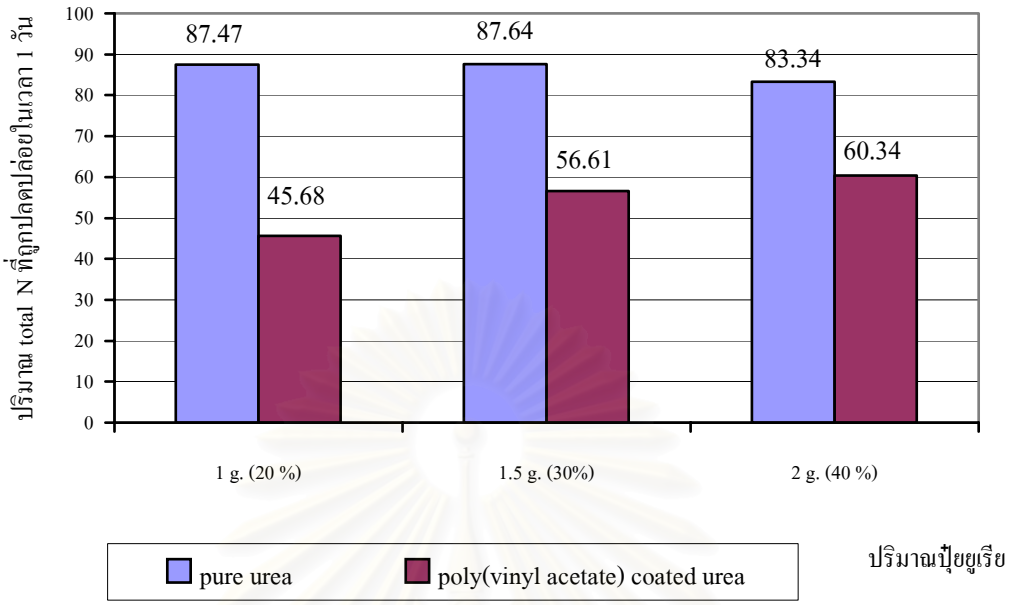
เวลาที่ผ่านไป (วัน)	ปริมาณ urea-N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่เวลาต่างๆ (% จากที่ใช้ทั้งหมด)		
	1	2	3
1	60.34	56.61	45.68
2	78.58	69.79	66.55
3	85.48	76.37	75.89
4	88.33	82.68	79.73
5		84.52	81.61

หมายเหตุ: ตัวเลขในแถวที่มีตัวยกต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1, 2, และ 3

เมื่อนำค่าปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยเมื่อเวลาผ่านไป 1 และ 4 วัน มาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ได้ผลดังนี้ ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อซันสน เท่ากับ 40:20, 30:30 และ 20:40 เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยที่อัตราส่วน 40:20 ปุ๋ยตัวอย่างจะปลดปล่อย total N ออกมามากที่สุด รองลงมา คือ 30:30 และ 20:40 ตามลำดับ แต่ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยเมื่อเวลาผ่านไป 4 วันที่อัตราส่วน 30:30 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับที่อัตราส่วน 40:20 และ 20:40 แต่ที่อัตราส่วน 40:20 ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ กับที่อัตราส่วน 20:40



รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตตกับปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ดในเวลา 1 วัน

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตตจะปลดปล่อย total N ออกมาในปริมาณที่น้อยกว่าปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ในปริมาณที่เท่ากัน และสามารถควบคุมการปลดปล่อยได้นานขึ้นเล็กน้อย โดยปุ๋ยตัวอย่างในสูตรที่มีอัตราส่วนของชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อพอลิไวนิลอะซิเตต เท่ากับ 40:20:40 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีอัตราการปลดปล่อย total N น้อยที่สุด จะปลดปล่อย total N ออกมา 45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน และปลดปล่อย total N ออกมาได้นานที่สุดเพียง 5 วัน เนื่องจาก พอลิไวนิลอะซิเตตประกอบด้วยหมู่ คาร์บอนิลซึ่งเป็นหมู่ที่นิวคลีโอไฟล์สามารถเข้าทำปฏิกิริยาด้วย ดังนั้น น้ำซึ่งเป็นนิวคลีโอไฟล์ตัวหนึ่งจึงน่าจะทำปฏิกิริยาการแทนที่นิวคลีโอฟิลิก (nucleophilic substitution) กับพอลิไวนิลอะซิเตตได้เป็นกรดคาร์บอกซิลิกและแอลกอฮอล์ พอลิไวนิลอะซิเตตจะถูกไฮโดรไลส์ได้เป็นแอลกอฮอล์ได้ง่าย ซึ่งแอลกอฮอล์นี้สามารถละลายน้ำได้เป็นอย่างดี และจากสมบัติของพอลิไวนิลอะซิเตตที่มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูงกว่าอุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย จึงอ่อนตัวลงกลายเป็นวัตถุที่นิ่มและเกิดการบวมตัวได้ง่าย (ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, 2527) ทำให้น้ำซึมผ่านผิวเคลือบเข้าไปละลายยูเรียได้มากขึ้น total N จึงถูก ปลดปล่อยออกมาค่อนข้างเร็ว ส่วนปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตตในปริมาณที่มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์จะแห้งช้าและเหนียวมาก ดังผลการทดลองในข้อ 4.1

ดังนั้น จึงได้พิจารณาเลือกชันสนมาใช้เป็นสารเคลือบแทนพอลิไวนิลอะซิเตต เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างให้มีช่วงระยะเวลาในการปลดปล่อยที่นานขึ้น และมีอัตราการปลดปล่อยที่น้อยลง

4.3.2 อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยชันสน โดยใช้อัตราส่วนของวัสดุที่ใส่ในสูตรผสมต่างกัน

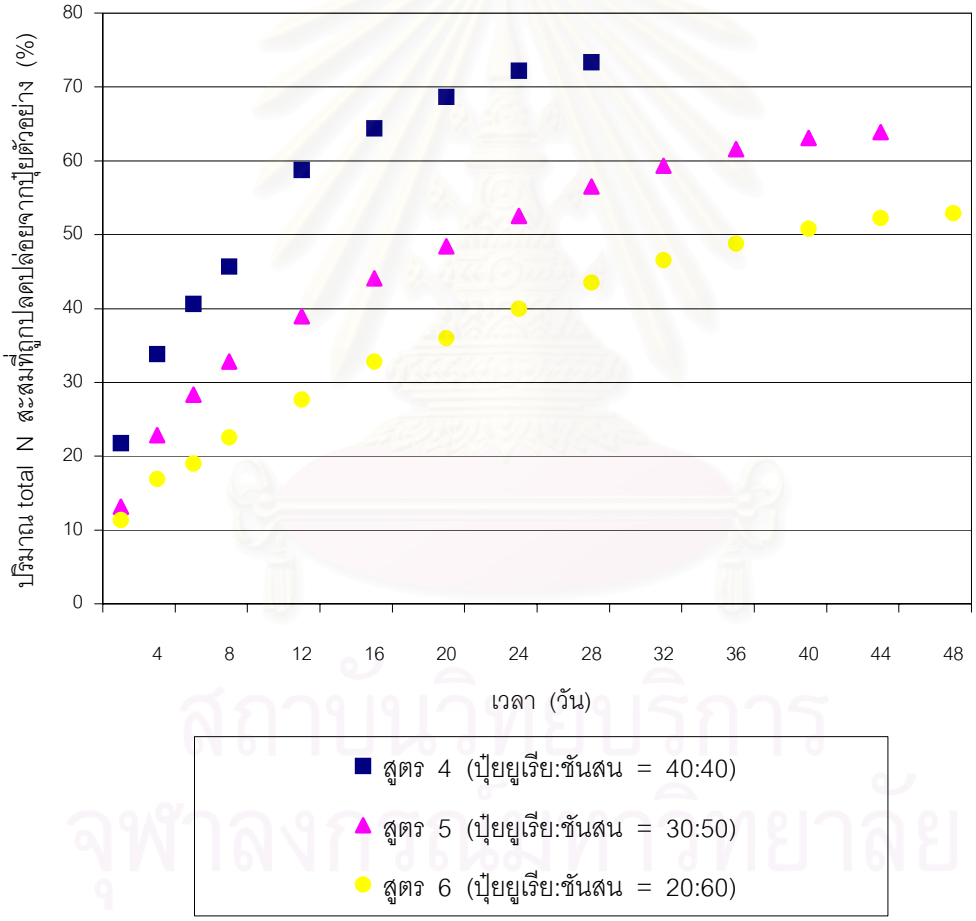
4.3.2.1 การศึกษาขั้นตอนนี้ได้หาปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่ใช้ปริมาณของชานอ้อย เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ ในอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสน เท่ากับ 40:40, 30:50 และ 20:60

ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสน เท่ากับ 40:40, 30:50 และ 20:60 (สูตรที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ) แสดงผลดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4, 5 และ 6

เวลาที่ผ่านไป (วัน)	ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง(%ของปริมาณทั้งหมดในปุ๋ย)		
	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5	สูตรที่ 6
2	21.76	13.13	11.36
4	33.82	22.85	16.91
6	40.61	28.35	19.03
8	45.66	32.84	22.52
12	58.76	38.97	27.69
16	64.41	44.11	32.83
20	68.69	48.42	36.02
24	72.21	52.54	39.96
28	73.38	56.54	43.52
32	-	59.35	46.53
36	-	61.55	48.77
40	-	63.10	50.79
44	-	63.92	52.24
48	-	_	52.91

กลไกการควบคุมการปลดปล่อยโดยการแพร่ที่เหมาะสมในการอธิบายถึงอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่าง คือ time square release kinetics เนื่องจากการละลายของยูเรียในปุ๋ยตัวอย่างแต่ละสูตรจะแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับเวลา และจะละลายออกมามากในช่วง 2 วันแรกและจะค่อย ๆ ลดลงในวันต่อ ๆ มา โดยอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างในแต่ละสูตรสามารถแสดงและเปรียบเทียบได้ด้วยค่าคงที่การปลดปล่อย โดยการเขียนกราฟระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ของปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยในช่วงเวลาต่าง ๆ กับค่ารากที่สองของเวลา ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, *r*) ที่ได้มีค่ามากกว่า 0.9 ทุกสูตร โดยปุ๋ยที่มีอัตราการปลดปล่อยน้อยกว่าคือปุ๋ยที่มีค่าคงที่การปลดปล่อยน้อยกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4, 5 และ 6

เมื่อพิจารณาในแต่ละช่วงเวลาสูตรที่ 4 จะปลดปล่อย total N ออกมามากที่สุด รองลงมา คือ สูตรที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละสูตรนำมาหาค่าคงที่การปลดปล่อย (*K*) ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3 ค่าที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสนในสูตรผสมเท่ากับ 40:40, 30:50 และ 20:60 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สูตรที่มีค่าคงที่การปลดปล่อยสูงที่สุด คือ สูตรที่ 4 (ปุ๋ยยูเรียต่อชันสน เท่ากับ 40:40) รองลงมาคือ สูตรที่ 5 และ 6 ตามลำดับ (ปุ๋ยยูเรียต่อชันสน เท่ากับ 30:50 และ 20:60 ตามลำดับ) โดยสูตรที่ 6 ใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์นานที่สุด รองลงมาคือ สูตรที่ 5 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4, 5 และ 6

คุณลักษณะ	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6
ปุ๋ยยูเรีย:ชันสน	40:40	30:50	20:60
total N ทั้งหมดในปุ๋ย (mg)	466.67	350.00	233.33
ช่วงเวลา (วัน)	2--24	2--24	2--24
ช่วง % total N สะสมที่ถูกปลดปล่อย	22--73	14--63	12--52
correlation coefficient (*r*)	0.9904	0.9942	0.9983
ค่าคงที่การปลดปล่อย (K, % day$^{-1/2}$)	$14.64^{a} \pm 0.47$	$10.67^{b} \pm 0.61$	$8.14^{c} \pm 0.78$
time for 50 % release ($t_{1/2}$, day)	11.69	22.00	37.70

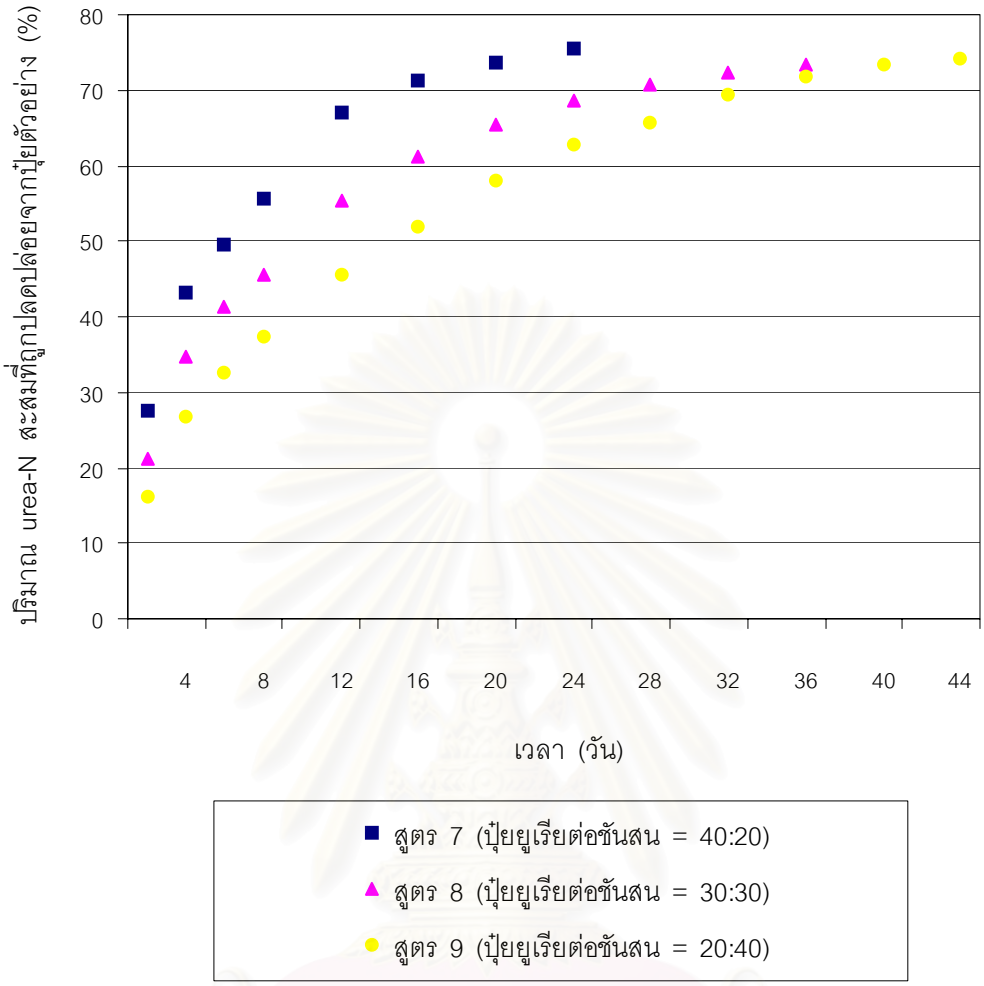
หมายเหตุ: ตัวเลขในแถวที่มีตัวยกต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.3.2.2 การศึกษาขั้นตอนนี้ได้หาปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่ใช้ปริมาณของชานอ้อย เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ ในอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสน เท่ากับ 40:20, 30:30 และ 20:40

ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสน เท่ากับ 40:20, 30:30 และ 20:40 (สูตรที่ 7, 8 และ 9 ตามลำดับ) แสดงผลดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7, 8 และ 9

เวลาที่ผ่านไป	ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง(%ของปริมาณทั้งหมดในปุ๋ย)		
(วัน)	สูตรที่ 7	สูตรที่ 8	สูตรที่ 9
2	27.66	21.18	16.22
4	43.25	34.82	26.79
6	49.61	41.30	32.56
8	55.61	45.55	37.41
12	66.98	55.45	45.58
16	71.25	61.21	52.05
20	73.73	65.36	58.09
24	75.62	68.63	62.65
28	-	70.64	65.59
32	-	72.34	69.47
36	-	73.38	71.68
40	-	-	73.44
44	-	-	74.11



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7, 8 และ 9

เมื่อพิจารณาในแต่ละช่วงเวลาสูตรที่ 7 จะปลดปล่อย total N ออกมามากที่สุด รองลงมา คือ สูตรที่ 8 และ 9 ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละสูตรนำมาหาค่าคงที่การปลดปล่อย ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 ค่าที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสนในสูตรผสม เท่ากับ 40:20, 30:30 และ 20:40 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สูตรที่มีค่าคงที่การปลดปล่อยสูงที่สุด คือ สูตรที่ 7 (ปุ๋ยยูเรียต่อชันสน เท่ากับ 40:20) รองลงมาคือ สูตรที่ 8 และ 9 ตามลำดับ (ปุ๋ยยูเรียต่อชันสน เท่ากับ 30:30 และ 20:40 ตามลำดับ) โดยสูตรที่ 9 ใช้เวลาในการ ปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์นานที่สุด รองลงมาคือ สูตรที่ 8 และ 7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7, 8 และ 9

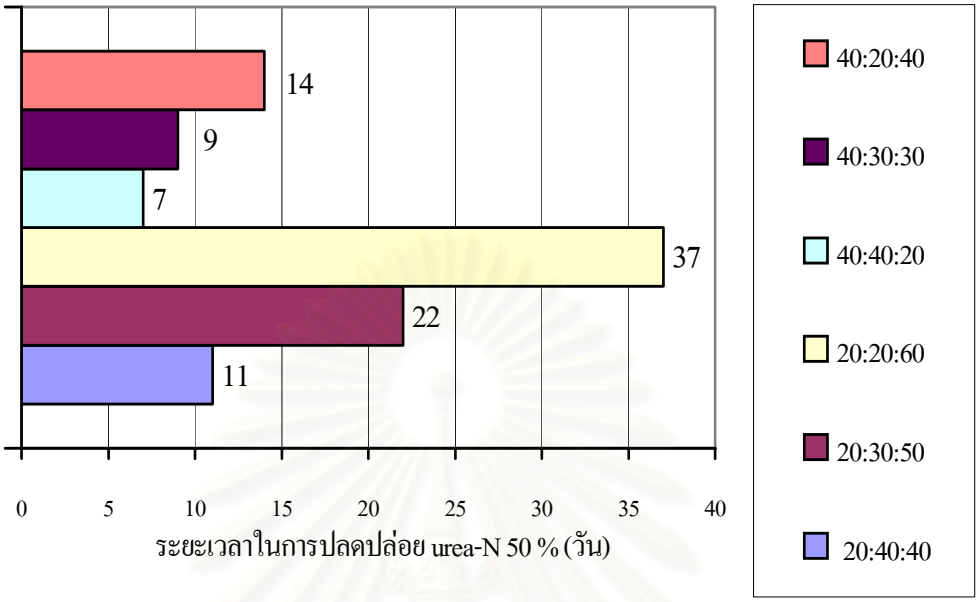
คุณลักษณะ	สูตร 7	สูตร 8	สูตร 9
ปุ๋ยยูเรีย:ชันสน	40:20	30:30	20:40
total N ทั้งหมดในปุ๋ย (mg)	466.67	350.00	233.33
ช่วงเวลา (วัน)	2--24	2--24	2--24
ช่วง % total N สะสม ที่ถูกปลดปล่อย	28--75	21--73	17--62
correlation coefficient (*r*)	0.9710	0.9850	0.9978
ค่าคงที่การปลดปล่อย (K, % day$^{-1/2}$)	$18.47^{a} \pm 0.36$	$15.82^{b} \pm 0.24$	$13.05^{c} \pm 0.74$
time for 50 % release ($t_{1/2}$, day)	7.34	9.99	14.67

หมายเหตุ: ตัวเลขในแถวที่มีตัวยกต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อใช้อัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสนในสูตรผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการปลดปล่อย total N จากปุ๋ยตัวอย่างเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกันในทุกปริมาณของชานอ้อย เนื่องจากสูตรที่มีอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสนมาก คือ มีส่วนที่เป็นยูเรียมากแต่มีปริมาณของชันสนในสูตรผสมน้อยนั่นเอง ดังนั้นสูตรที่มียูเรียซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนที่ละลายน้ำได้ดีเพิ่มขึ้น แต่มีส่วนที่เป็นสารเคลือบน้อยลงจึงได้ผิวเคลือบที่บางกว่าและห่อหุ้มยูเรียไว้ไม่ได้ทั้งหมด น้ำจึงมีโอกาสซึมผ่านผิวเคลือบได้ง่ายและผิวเคลือบก็จะแตกเนื่องจากแรงดันออสโมติกจากภายในได้ง่ายขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Valkanas (1992)

เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกันในทุกอัตราส่วนของชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อพอลิไวนิลอะซิเตตที่แสดงในรูปที่ 4.6 ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนที่ทำให้ปุ๋ยตัวอย่างสามารถควบคุมการปลดปล่อยได้นานที่สุด คือ ที่อัตราส่วนเท่ากับ 20:20:60 เนื่องจากสามารถปลดปล่อย total N ออกมา 50 % ได้ในระยะเวลาที่นานที่สุดและมีอัตราการปลดปล่อยที่น้อยที่สุด

ชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อชันสน



รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงระยะเวลาในการปลดปล่อย total N 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยชันสนในอัตราส่วนของชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อชันสนต่าง ๆ

เนื่องจาก อัตราส่วนที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้นานที่สุดบรรจุยูเรียในสูตรได้เพียง 20 เปอร์เซ็นต์ และต้องใช้ชันสนเคลือบในปริมาณที่มากถึง 60 เปอร์เซ็นต์ จึงได้ทดลองเติมสารเติมแต่งลงในสูตรผสม เพื่อจะได้ใช้ชันสนในปริมาณที่น้อยลงแต่บรรจุปุ๋ยยูเรียได้มากขึ้น โดยสามารถควบคุมการปลดปล่อยได้นานเช่นเดิม

4.3.2.3 การศึกษาขั้นตอนนี้ได้หาปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างใส่สารเติมแต่ง 15 เปอร์เซ็นต์ลงไปในสูตรที่มีชานอ้อยและปุ๋ยยูเรีย เท่ากับ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่ลดปริมาณของชันสนจาก 50 เหลือเพียง 35 เปอร์เซ็นต์ แล้วเปรียบเทียบอัตราการ ปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง

งานวิจัยนี้ได้นำซีโอไลต์มาทดลองใช้เป็นสารเติมแต่ง เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ประเภทอะลูมิโนซิลิเกตที่พบได้ง่ายในธรรมชาติ และยังมีส่วนประกอบของธาตุบางชนิด คือ แคลเซียม, เหล็ก, แมกนีเซียม และโพแทสเซียม ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่ไม่ได้ใส่และใส่ซีโอไลต์ 15 เปอร์เซ็นต์ (สูตรที่ 5 และ 10 ตามลำดับ) แสดงผลดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

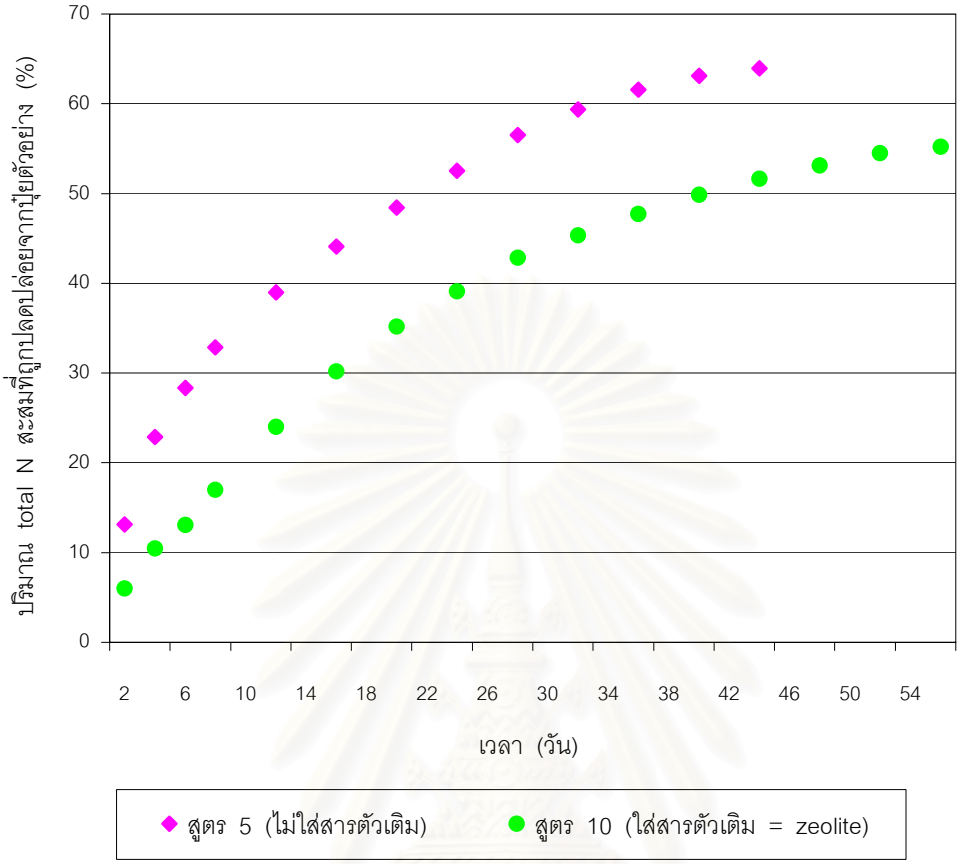
เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละสูตรมาหาค่าคงที่การปลดปล่อย ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.10 ค่าที่ได้นำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่า ค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่ใส่และไม่ใส่ซีโอไลต์โดยมีปริมาณของปุ๋ยยูเรียในสูตรผสมเท่ากันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อเติมซีโอไลต์ในสูตรผสม 15 เปอร์เซ็นต์ ปุ๋ยตัวอย่างจะมีค่าคงที่การปลดปล่อยน้อยกว่า และใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ได้นานกว่าปุ๋ยที่ไม่ใส่ซีโอไลต์ ที่ปริมาณของปุ๋ยยูเรียเท่ากัน

เมื่อพิจารณาค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยที่เติมซีโอไลต์ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยมีอัตราส่วนของชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อซันสน เท่ากับ 20:30:35 (สูตรที่ 10) กับปุ๋ยสูตรที่มีอัตราส่วนของชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อซันสน เท่ากับ 20:20:60 (สูตรที่ 6) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้นานที่สุดโดยไม่เติมซีโอไลต์ พบว่าค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างทั้งสองสูตรไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แสดงว่าปุ๋ยตัวอย่างทั้งสองสูตรมีอัตราการปลดปล่อยที่ใกล้เคียงกัน โดยสูตรที่ใส่ซีโอไลต์จะใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ นานกว่าประมาณ 3 วัน แต่สูตรที่ใส่ซีโอไลต์ใช้ปริมาณของสารเคลือบน้อยกว่าและมียูเรียในสูตรผสมมากกว่า ดังนั้น เมื่อเติมซีโอไลต์ในสูตรผสมจะช่วยชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ดีขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ มีสูตรทั่วไปอยู่ในรูป $M_{x/n}[(SiO_2)_y(AlO_2)_x].wH_2O$ โดยแต่ละอะตอมจัดเรียงตัวกันเป็นโครงร่างตาข่ายที่มีระเบียบ ภายในโมเลกุลประกอบด้วยโพรงขนาดต่าง ๆ เชื่อมต่อกันตลอดทั่วทั้งโมเลกุล จึงมีความสามารถที่จะดูดซับโมเลกุลไว้ภายในช่องว่างบริเวณผนังด้านในของโพรงเหล่านั้นได้ (Breck, 1974)ดังนั้นเมื่อปุ๋ยตัวอย่างสัมผัสกับน้ำ น้ำจึงน่าจะถูกดูดซับอยู่ภายในโมเลกุล ทำให้น้ำซึมผ่านผิวเคลือบของซันสนเข้าไปละลายปุ๋ยได้ช้าลง อีกทั้งซีโอไลต์ยังมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ (cation exchange) เมื่อยูเรียละลายออกมาจึงน่าจะถูกดูดซับไว้ในโพรงของซีโอไลต์ ทำให้ยูเรียเคลื่อนที่ออกมาละลายอยู่ในตัวกลาง (น้ำกลั่น) ได้ช้าลง นอกจากนั้น ซีโอไลต์ยังช่วยปิดรูพรุนที่อยู่บนผิวเคลือบได้อีกด้วย ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และ Geiger (1997)

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 และ 10

เวลาที่ผ่านไป (วัน)	ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ (% ของปริมาณทั้งหมดในปุ๋ย)	
	สูตรที่ 5	สูตรที่ 10
2	13.13	5.98
4	22.85	10.47
6	28.35	13.09
8	32.84	16.99
12	38.97	24.03
16	44.11	30.21
20	48.42	35.16
24	52.54	39.11
28	56.54	42.87
32	59.35	45.31
36	61.55	47.69
40	63.10	49.84
44	63.92	51.65
48	-	53.13
52	-	54.47
56	-	55.22

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 และ 10

จึงสรุปได้ว่า การเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนโดยใช้อัตราส่วนของชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อซันสน เท่ากับ 20:30:35 และเติมซีโอไลต์ในสูตรผสม 15 เปอร์เซ็นต์ สามารถควบคุมการปลดปล่อย total N ได้นานที่สุด โดยมีอัตราการปลดปล่อยน้อยที่สุด และใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ได้นานที่สุด แต่ใช้สารเคลือบในปริมาณที่น้อยกว่า และบรรจุปุ๋ยยูเรียในสูตรผสมได้มากกว่าสูตรที่ควบคุมการปลดปล่อยได้ดีที่สุดโดยไม่ใส่ซีโอไลต์ ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการผลิตและลดปัญหาการตกค้างของซันสนที่ยังไม่ย่อยสลายได้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าคงที่การปลดปล่อย และระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5, 6 และ 10

คุณลักษณะ	สูตร 5	สูตร 6	สูตร 10
ปุ๋ยยูเรีย:ซันสน	30:50	20:60	30:35
total N ทั้งหมดในปุ๋ย (mg)	350.00	233.33	350.00
zeolite (% by weight)	0	0	15
ช่วงเวลา (วัน)	2--24	2--24	2--24
ช่วง % total N สะสม ที่ถูกปลดปล่อย	14--63	12--52	6--39
correlation coefficient (*r*)	0.9942	0.9983	0.9962
ค่าคงที่การปลดปล่อย (K, % day$^{-1/2}$)	$10.67^{a} \pm 0.61$	$8.14^{b} \pm 0.78$	$7.85^{b} \pm 0.80$
time for 50 % release ($t_{1/2}$, day)	22.00	37.70	40.58

หมายเหตุ: ตัวเลขในแถวที่มีตัวยกต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.4 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับปุ๋ยไนโตรเจนบริสุทธิ์ชนิดเม็ด

ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 และ 2 วัน แสดงผลดังตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยเมื่อแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 และ 2 วันของปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ 1.5 และ 1 กรัม พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แสดงว่า total N ถูกปลดปล่อยออกมาจนหมดภายในเวลา 1 วัน ส่วนปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ 2 กรัม จะปลดปล่อย total N ออกมาจนหมดภายในเวลา 2 วัน

เมื่อพิจารณาการปลดปล่อย total N ของปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ดในปริมาณ 2 กรัม เปรียบเทียบกับปุ๋ยตัวอย่างที่มียูเรียในสูตรผสม 40 เปอร์เซ็นต์ (สูตรที่ 4 และ 7), 1.5 กรัมเปรียบเทียบกับปุ๋ยตัวอย่างที่มียูเรียในสูตรผสม 30 เปอร์เซ็นต์ (สูตรที่ 5 และ 8) และ 1 กรัมเปรียบเทียบกับปุ๋ย

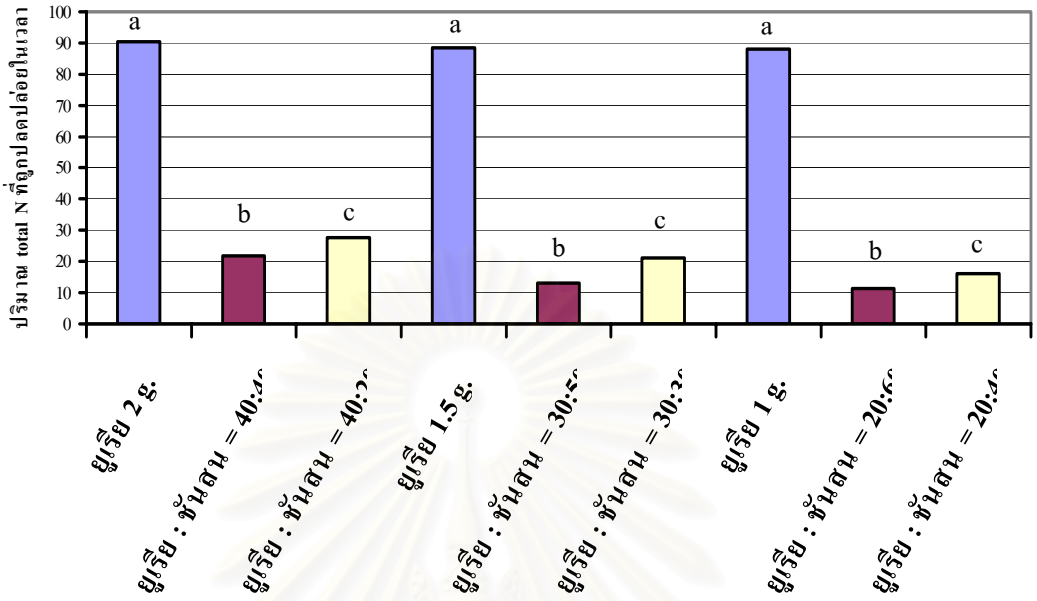
ตัวอย่างที่มียูเรียในสูตรผสม 20 เปอร์เซ็นต์ (สูตรที่ 6 และ 9) พบว่า ปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างและปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ในช่วงเวลา 2 วันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (แสดงผลดังรูปที่ 4.8) โดยปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้จะปลดปล่อย total N ออกมาในปริมาณที่น้อยกว่าปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ โดยปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์จะปลดปล่อย total N ออกมามากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปุ๋ยตัวอย่างปลดปล่อย total N ออกมาไม่ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ อย่างน้อยที่สุด ประมาณ 7 วัน

ตารางที่ 4.8 ปริมาณเฉลี่ยของ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ดในเวลา 1 และ 2 วัน

วันที่	ปริมาณปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ด (กรัม)		
	2	1.5	1
1	83.34[a]	87.64[a]	87.47[a]
2	90.45[b]	88.49[a]	88.07[a]

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



...a, b, c...กราฟในกลุ่มที่มีสีต่างกัน (มีปริมาณยูเรียเท่ากัน) ที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบปริมาณ total N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์และปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4-9 ในเวลา 2 วัน

แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์จะละลายปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างรวดเร็วในทันทีที่สัมผัสกับน้ำ เนื่องจากยูเรียเป็นสารที่มีขั้วจึงมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ทำให้การปลดปล่อยธาตุอาหารเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ในสูตรที่ 4-9 พบว่า จะช่วยให้ปุ๋ยมีอัตราการละลายที่ลดลงได้ และสามารถปลดปล่อย total N ออกมาได้ในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น

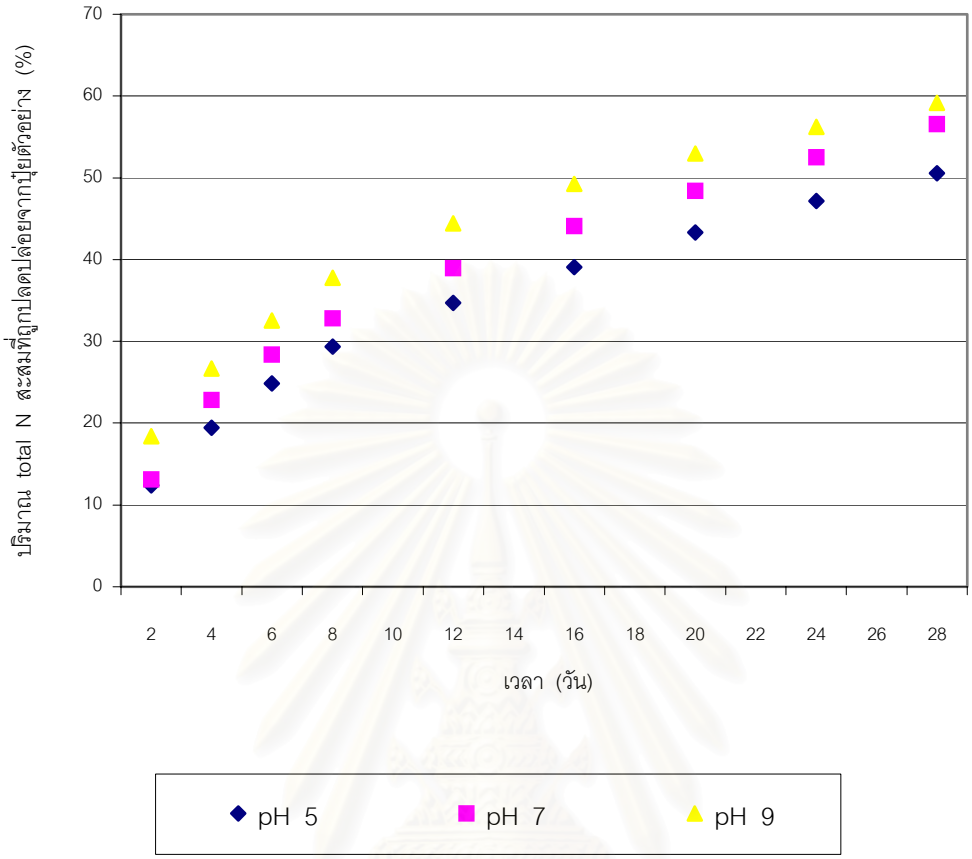
4.5 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ในน้ำที่มีความเป็นกรด -เบสต่าง ๆ กัน

ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่มีอัตราส่วนของชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อซันสน เท่ากับ 20:30:50 (สูตรที่ 5) โดยแช่ในน้ำกลั่นที่มีสภาวะเป็นกรด กลาง และเบส (พีเอช เท่ากับ 5, 7 และ 9) แสดงผลดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5, 7 และ 9

เวลาที่ผ่านไป (วัน)	ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ (% ของปริมาณทั้งหมดในปุ๋ย)		
	พีเอช 5	พีเอช 7	พีเอช 9
2	12.39	13.13	18.39
4	19.42	22.85	26.67
6	24.84	28.35	32.57
8	29.33	32.84	37.75
12	34.71	38.97	44.42
16	39.06	44.11	49.27
20	43.35	48.42	52.95
24	47.18	52.54	56.23
28	50.56	56.54	59.20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอชเท่ากับ 5, 7 และ 9

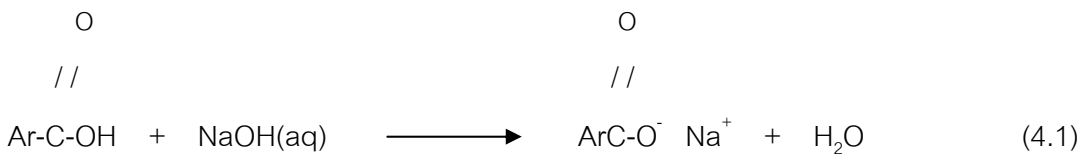
เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละสภาวะมาหาค่าคงที่การปลดปล่อย ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.10 ค่าที่ได้นำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่า ค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยที่อยู่ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 7 และ 5 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยที่อยู่ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 7 และ 9 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางที่สถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อแช่ปุ๋ยตัวอย่างในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 9 ค่าคงที่การปลดปล่อยจะเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์เร็วกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่แช่ในตัวกลางที่มี พีเอช เท่ากับ 7

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5, 7 และ 9

คุณลักษณะ	pH 5	pH 7	pH 9
ช่วงเวลา (วัน)	2--24	2--24	2--24
ช่วง % total N สะสม ที่ถูกปลดปล่อย	13--47	14--52	19--56
correlation coefficient (*r*)	0.9965	0.9942	0.993
ค่าคงที่การปลดปล่อย (*K*, % day-1/2)	$9.77^{a} \pm 0.54$	$10.67^{a} \pm 0.61$	$12.14^{b} \pm 0.74$
time for 50 % release ($t_{1/2}$, day)	26.21	22	16.97

หมายเหตุ: ตัวเลขในแถวที่มีตัวยกต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อตัวกลางมีค่าพีเอชสูงขึ้นหรืออยู่ในสภาวะที่เป็นเบสจะมีผลต่ออัตราการปลดปล่อย total N ของปุ๋ยตัวอย่าง โดยทำให้อัตราการปลดปล่อย total N จากปุ๋ยตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างของชานอ้อยมีความพรุนมากและมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลของน้ำไว้ในโครงร่างได้ แต่ชานอ้อยมีความสามารถในการละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถึง 32 เปอร์เซ็นต์ (Fernandez et al., 1995) เมื่อน้ำกลั่นที่เป็นตัวกลางถูกปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในสภาวะที่เป็นเบสของตัวกลางนี้จะทำให้ชานอ้อยมีความหนาแน่นสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ปริมาตรช่องว่างก็จะลดลง เป็นผลให้ชานอ้อยมีความสามารถเก็บกักน้ำได้ต่ำ ดังนั้นเมื่อน้ำซึมผ่านสารเคลือบเข้าไปละลายปุ๋ยที่อยู่ในโครงร่าง สารละลายยูเรียนี้ก็จะเคลื่อนที่ออกมาอยู่ในตัวกลางได้เร็วขึ้น อีกทั้งชันสนที่ใช้เป็นสารเคลือบ ประกอบด้วย free rosin acids ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ (ประภาส ขอพึ่ง, 2538) จึงสามารถทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เกลือกับน้ำเป็นผลิตผล ดังนี้



(4.1)

เมื่อน้ำกลั่นถูกปรับสภาพให้เป็นเบสผิวเคลือบของชันสนก็จะเปราะและแตกได้ง่าย ทำให้น้ำซึมผ่านรอยแตกของผิวเคลือบเข้าไปละลายยูเรียได้อย่างรวดเร็ว

จากการศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยที่ใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับแล้วเคลือบด้วยชันสน พบว่า สามารถควบคุมการปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างได้นานขึ้น โดยต้องใช้ปริมาณของชานอ้อยอย่างน้อย 20 เปอร์เซ็นต์ จึงจะดูดซับสารละลายยูเรียไว้ได้หมด แต่จากสมบัติของชานอ้อยในการดูดซับน้ำได้มาก จึงต้องใช้สารเคลือบในปริมาณที่มากด้วยเพื่อป้องกันการซึมของน้ำ ทำให้บรรจุปุ๋ยยูเรียในสูตรผสมได้น้อยลง

ดังนั้น จึงทดลองเตรียมปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยโดยการทำเอนแคปซูเลชันโดยใช้พอลิสไตรีน เนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นสารไฮโดรคาร์บอนจึงดูดความชื้นได้ต่ำ และละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ปุ๋ยยูเรียไม่สามารถละลายได้ อีกทั้ง สามารถใช้พอลิสไตรีนจากเศษวัสดุเหลือทิ้งที่ไม่ใช้แล้ว เช่น เศษกล่องโฟมใส่อาหารที่ใช้แล้วได้

4.6 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมโดยการทำเอนแคปซูเลชันโดยใช้พอลิสไตรีน

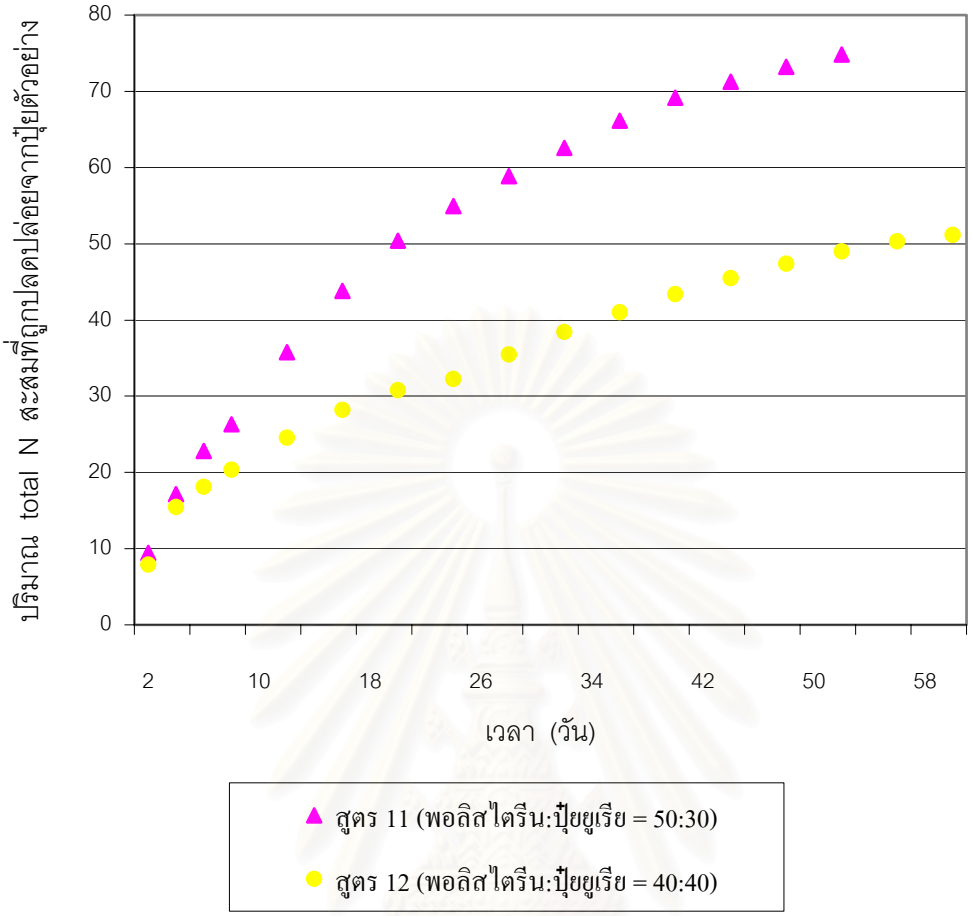
ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมโดยการทำเอนแคปซูเลชันซึ่งแปรผันอัตราส่วนระหว่างปุ๋ยยูเรียต่อพอลิสไตรีนเท่ากับ 50:30 และ 40:40 (สูตรที่ 11 และ 12 ตามลำดับ) แสดงผลดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.11 แสดงปริมาณเฉลี่ยของ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11 และ 12

เวลาที่ผ่านไป (วัน)	ปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ	
	สูตรที่ 11	สูตรที่ 12
2	9.46	7.94
4	17.18	15.49
6	22.82	18.12
8	26.29	20.38
12	35.77	24.60
16	43.82	28.18
20	50.41	30.77
24	54.92	32.28
28	58.87	35.46
32	62.58	38.44
36	66.17	40.99
40	69.13	43.38
44	71.24	45.50
48	73.18	47.39
52	74.81	48.97
56	-	50.31
60	-	51.19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงปริมาณ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11 และ 12

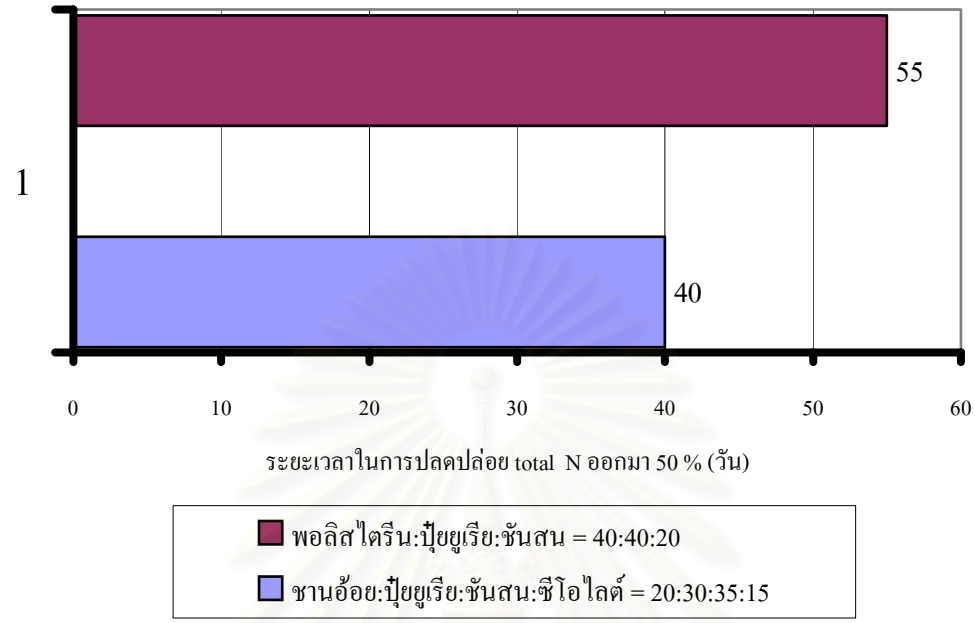
เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์ total N สะสมที่ถูกปลดปล่อยในแต่ละสูตรมาหาค่าคงที่การปลดปล่อย ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.12 ค่าที่ได้นำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่า ค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมจากการทำเอนแคปซูเลชันโดยใช้พอลิสไตรีน สูตรที่มีอัตราส่วนของพอลิสไตรีนต่อปุ๋ยยูเรียต่างกัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยปุ๋ยตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของพอลิสไตรีนต่อปุ๋ยยูเรียสูงกว่า คือ มีปริมาณของพอลิสไตรีนมากกว่าปุ๋ยยูเรีย จะมีค่าคงที่การปลดปล่อยมากกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อพอลิสไตรีนน้อยกว่า เนื่องจาก ถ้าปุ๋ยตัวอย่างมีปริมาณของพอลิสไตรีนในสูตรผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้ห่อหุ้มยูเรียไว้ได้ดีและทั่วถึงกว่า แต่ถ้าใช้ปริมาณของพอลิสไตรีนมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ผลิตผลที่ได้ในขณะที่ลดอุณหภูมิลงจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อแยกผลิตภัณฑ์ออกจากสารละลายแล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะนิ่มและเหนียว ไม่แข็งตัว ทำให้ไม่สามารถเคลือบด้วยชันสนได้

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าคงที่การปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 6, 11 และ 12

คุณลักษณะ	สูตร 11	สูตร 12
ปุ๋ยยูเรีย:ชานอ้อย:ซันสน	-	-
ปุ๋ยยูเรีย:พอลิสไตรีน:ซันสน	50:30:20	40:40:20
total N ทั้งหมดในปุ๋ย (mg)	583.33	466.67
ช่วงเวลา (วัน)	2--24	2--24
ช่วง % total N สะสม ที่ถูกปลดปล่อย	10--54	8--32
correlation coefficient (*r*)	0.9989	0.989
ค่าคงที่การปลดปล่อย (K, % day$^{-1/2}$)	$11.27^{b} \pm 0.72$	$6.70^{c} \pm 0.54$
time for 50% release ($t^{1/2}$, day)	19.71	55.65

หมายเหตุ: ตัวเลขในแถวที่มีตัวยกต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ของปุ๋ยตัวอย่างที่ใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับในสูตรที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้นานที่สุด คือ สูตรที่ 10 (ชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อซันสนต่อซีโอไลต์ เท่ากับ 20:30:35:15) กับปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมจากการทำเอนแคปซูเลชันโดยใช้พอลิสไตรีนในสูตรที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้นานที่สุด คือ สูตรที่ 12 (พอลิสไตรีนต่อปุ๋ยยูเรียต่อซันสน เท่ากับ 40:40:20) สามารถเปรียบเทียบกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมจากชานอ้อยกับปุ๋ยที่เตรียมจากพอลิสไตรีน

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมจากพอลิสไตรีนสามารถควบคุมการปลดปล่อย total N ให้ปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ได้ในระยะเวลาที่ยาวนานกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมจากชานอ้อย

จึงสามารถสรุปได้ว่า ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมจากการทำเอนแคปซูเลชันโดยใช้พอลิสไตรีนที่อัตราส่วนของพอลิสไตรีนต่อปุ๋ยยูเรีย เท่ากับ 40:40 เป็นสูตรที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้นานที่สุด โดยปลดปล่อย total N ในอัตราที่ต่ำเพียง 6.7 % $day^{-1/2}$ และใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 % ได้ยาวนานถึง 55 วัน

4.7 การวิเคราะห์การดูดซับน้ำของปุ๋ยตัวอย่าง

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของปุ๋ยตัวอย่าง แสดงไว้ในตารางที่ 4.13

1. ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมจากชานอ้อยสูตรที่ใช้ชานอ้อย 40 เปอร์เซ็นต์ (สูตร 7, 8 และ 9) มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่าสูตรที่ใช้ชานอ้อย 20 เปอร์เซ็นต์ (สูตร 4, 5 และ 6) ในขณะที่ปุ๋ย

ตัวอย่างสูตรที่ใช้ชานอ้อยในปริมาณเท่ากัน แต่ใช้ชันสนเคลือบในปริมาณที่มากกว่า (สูตร 6) มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่าสูตรที่ใช้ชันสนในปริมาณที่น้อยกว่า (สูตร 4 และ 5)

2. ปุ๋ยตัวอย่างที่ใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมโดยการทำเอนแคปซูเลชันโดยใช้พอลิสไตรีน โดยปุ๋ยที่เตรียมโดยใช้พอลิสไตรีนในปริมาณที่มากกว่า (สูตรที่ 12) มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่าสูตรที่ใช้พอลิสไตรีนในปริมาณที่น้อยกว่า (สูตรที่ 11)

ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามสมบัติเฉพาะตัวของชานอ้อย ชันสน และพอลิสไตรีน ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งความสามารถในการดูดซับน้ำจะมีผลทำให้ธาตุอาหารในปุ๋ยละลายออกมาเร็วขึ้น

ตารางที่ 4.13 แสดงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับโดยปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ในเวลา 4 วัน

สูตรปุ๋ยตัวอย่าง	ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (%)
4	43.97 ± 0.61
5	4.71 ± 0.56
6	8.68 ± 0.63
7	98.31 ± 0.82
8	90.77 ± 0.34
9	62.98 ± 0.98
11	14.30 ± 0.78
12	11.39 ± 0.43

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

5.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของชานอ้อย วัสดุพอลิเมอร์และปุ๋ยไนโตรเจนสำหรับใช้ในการเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน

จากผลการทดลองศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยที่เตรียมจากปุ๋ยยูเรีย ชานอ้อย และวัสดุพอลิเมอร์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

5.1.1 การเตรียมปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยที่ใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับแล้วเคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตต

สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยตัวอย่างได้นานขึ้นเล็กน้อย โดยใช้เวลา 2 วัน ในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลา 5 วัน ในการปลดปล่อย total N ออกมาจนหมด ทั้งนี้เนื่องจาก พอลิไวนิลอะซิเตตประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิลซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำซึ่งเป็นนิวคลีโอไฟด์ได้ และถูกไฮโดรไลส์ได้เป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถละลายน้ำได้เป็นอย่างดี อีกทั้งพอลิไวนิลอะซิเตตยังเกิดการอ่อนตัวกลายเป็นวัตถุที่นิ่มและบวมตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย ทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปละลายยูเรียได้ง่ายขึ้น

5.1.2 ปุ๋ยไนโตรเจนชนิดควบคุมการปลดปล่อยที่เตรียมโดยใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับแล้วเคลือบด้วยชันสนสามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารให้มีอัตราการปลดปล่อยและระยะเวลาในการปลดปล่อยที่แตกต่างกันตามอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใส่ในสูตรผสม เมื่อใช้อัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสนในสูตรผสมเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราการปลดปล่อย total N จากปุ๋ยตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากสูตรที่มีอัตราส่วนของปุ๋ยยูเรียต่อชันสนมาก คือ มีส่วนที่เป็นยูเรียมาก แต่มีปริมาณของชันสนน้อย ดังนั้นสูตรที่มียูเรียซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนที่ละลายน้ำได้ดีเพิ่มขึ้น แต่มีส่วนที่เป็นสารเคลือบน้อยลงจึงได้ผิวเคลือบที่บางกว่าและห่อหุ้มยูเรียไว้ไม่ได้ทั้งหมด โดยอัตราส่วนของชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อชันสนที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้นานที่สุด คือ 20:20:60 ซึ่งมีค่าคงที่การปลดปล่อยเท่ากับ 8.14 % $day^{-1/2}$ และใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ได้นาน 37 วัน แต่เมื่อเติมซีโอไลต์ลงไปในสูตรผสม 15 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ใช้ปริมาณของสารเคลือบลดลงได้ และบรรจุปุ๋ยยูเรียในสูตรผสมได้มากขึ้น โดยสามารถควบคุมการปลดปล่อย

ได้นานขึ้น คือ มีค่าคงที่การปลดปล่อย เท่ากับ 7.85 % $day^{-1/2}$ และใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์นานถึง 40 วัน เนื่องจากซีโอไลต์เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยโพรงเชื่อมต่อกันตลอดทั้งโมเลกุล และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange) ซีโอไลต์จึงมีความสามารถในการดูดซับน้ำและยูเรียไว้ในโพรงได้ ทำให้ยูเรียเคลื่อนที่ออกมาอยู่ในตัวกลางได้ช้าลง

5.2 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้กับปุ๋ยไนโตรเจนบริสุทธิ์ชนิดเม็ด

ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้มีอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนต่ำกว่าปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ ผลการทดลองที่ได้สองคล้องกันในทุกปริมาณของปุ๋ยยูเรีย โดยปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์จะปลดปล่อย total N ออกมาจนหมดภายในระยะเวลาเพียง 1-2 วัน เนื่องจากยูเรียเป็นสารที่มีขั้วจึงมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ในขณะที่ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้สามารถควบคุมการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ได้นานกว่าตั้งแต่ 7 วันถึง 40 วัน ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ แสดงให้เห็นว่า การใช้ปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ในรูปเม็ดอาจจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า เพราะมีการปลดปล่อย total N ออกมาอย่างรวดเร็ว ทำให้สูญเสียปุ๋ยไปจากพื้นที่เพาะปลูกได้ง่าย

5.3 การศึกษาอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ในน้ำที่มีความเป็นกรด-เบส (พีเอช) ต่าง ๆ กัน

เมื่อสภาวะของตัวกลางเป็นเบสจะทำให้ปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยชันสนมีอัตราการปลดปล่อย total N เพิ่มขึ้น เนื่องจากในสภาวะที่ตัวกลางเป็นเบส จะทำให้ชานอ้อยมีเปอร์เซ็นต์ปริมาตรช่องว่างลดลง จึงมีความสามารถเก็บกักน้ำได้ต่ำลง น้ำจึงละลายยูเรียแล้วเคลื่อนที่ออกมาได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งผิวเคลือบของชันสนไม่ทนในสภาวะที่เป็นด่าง จึงเปราะและแตกได้ง่าย ทำให้น้ำซึมผ่านรอยแยกเข้าไปละลายยูเรียได้เร็วขึ้น ดังนั้น จึงไม่เหมาะที่จะใช้ปุ๋ยตัวอย่างในพื้นที่ที่มีสภาพเป็นกรด

5.4 ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมจากการทำเอนแคปซูเลชันโดยใช้พอลิสไตรีนในอัตราส่วนของพอลิสไตรีนต่อปุ๋ยยูเรียต่อชันสน เท่ากับ 40:40:20 สามารถควบคุมการปลดปล่อย total N ได้ดีกว่าปุ๋ยตัวอย่างที่ใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับในในอัตราส่วนของชานอ้อยต่อปุ๋ยยูเรียต่อชันสนต่อซีโอไลต์ เท่ากับ

20:30:35:15 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้นานที่สุด โดยปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมจากพอลิสไตรีนมีค่าคงที่การปลดปล่อยน้อยกว่า และใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ได้นานกว่า เนื่องจากสมบัติของชานอ้อยในการดูดซับน้ำได้ดี ทำให้ปุ๋ยตัวอย่างดูดซับน้ำได้มากกว่า ส่วนพอลิสไตรีนเป็นสารไฮโดรคาร์บอนจึงดูดความชื้นได้ต่ำ โดยสรุปค่าดังกล่าวของปุ๋ยตัวอย่างทั้งสองสูตรได้ดังนี้

คุณลักษณะ	เตรียมจาก	
	ชานอ้อย	พอลิสไตรีน
บรรจุยูเรียได้	30%	40%
ใช้สารเคลือบในปริมาณ	35%	20%
ค่าคงที่การปลดปล่อย (% $day^{-1/2}$)	7.85	6.70
time for 50 % release (วัน)	40	55

5.5 การใช้ปุ๋ยตัวอย่างที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ในระยะยาว จะช่วยให้พืชสามารถดูดซึมธาตุอาหารจากปุ๋ยได้ในระยะเวลาที่นานขึ้น อีกทั้งโครงร่างที่มีลักษณะเป็นโพรงและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของชานอ้อยจะช่วยกำจัดสารพิษ เช่น hydrogen sulfide ในดิน ช่วยเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน และเพิ่มการถ่ายเทอากาศในดิน โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาการตกค้างในสิ่งแวดล้อมของวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียม เนื่องจากวัตถุดิบเหล่านี้เป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ อีกทั้งการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนกับพืชเศรษฐกิจก็ใช้ในปริมาณเพียง 15 กิโลกรัม/ไร่ จึงไม่น่าจะเกิดปัญหาการสะสมของวัตถุดิบเหล่านี้ในสิ่งแวดล้อม เพราะเป็นปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการนำวัสดุที่ทำจากพอลิเมอร์ที่ไม่ใช้แล้วตัวอื่น กลับมาใช้เป็นสารเคลือบในการเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิต และลดปัญหาในการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งเหล่านั้น

2. จากผลการวิจัยที่ได้ และจากสมบัติของซีโอไลต์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.3.2.3 จะเห็นได้ว่าซีโอไลต์มีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารเติมแต่ง จึงน่าจะทำการทดลองศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบถึงชนิดและปริมาณสารเติมแต่งที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

3. ควรมีการศึกษาปุ๋ยไนโตรเจนชนิดอื่น เพื่อควบคุมอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยที่มีสมบัติในการละลายน้ำได้ดีเช่นกัน

4. ข้อสรุปซึ่งได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกสูตรผสมของปุ๋ยที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนได้ต่อไป ซึ่งอาจจะต้องอาศัยข้อมูลอื่น ๆ เพิ่มเติมประกอบการพิจารณา เช่น

- อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนในสภาวะจริงของปุ๋ยที่ผลิตได้ และความต้องการใช้ไนโตรเจนที่แท้จริงของพืชแต่ละชนิด เนื่องจากปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรมีอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจน และระยะเวลาในการปลดปล่อยที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใส่ในสูตรผสม ดังนั้น ปุ๋ยตัวอย่างในแต่ละสูตรจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริงกับพืชเศรษฐกิจประเภทต่าง ๆ แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น สูตรที่ 12 (ปุ๋ยยูเรียต่อพอลิสไตรีนต่อซันสน เท่ากับ 40:40:20) ใช้เวลาในการปลดปล่อย total N ออกมา 50 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 56 วัน จึงน่าจะเหมาะกับพืชผักซึ่งเป็นพืชอายุสั้น เนื่องจากพืชประเภทนี้ตั้งแต่เริ่มงอกไปจนถึงอายุ 30-45 วัน เป็นช่วงที่รากพืชยังน้อย และดูดได้ช้า (มีรากน้อย) แต่เมื่อพ้น 45 วันไปแล้ว (ก่อนออกดอก) เป็นช่วงที่เจริญเติบโตเร็วหรือแตกกอนั้น มีความต้องการธาตุอาหารมากที่สุดโดยเฉพาะไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

- ต้นทุนในการผลิต โดยพิจารณาเลือกชนิดของปุ๋ยที่มีราคาเหมาะสมกับพืชเศรษฐกิจที่ปลูก ซึ่งต้นทุนที่ใช้ในการผลิตปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนในงานวิจัยนี้ สูตรที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลอะซิเตต (73 บาท/กิโลกรัม) จะมีราคาแพงกว่าซันสน (12 บาท/กิโลกรัม) แต่ราคาโดยรวมในทุกสูตรจะมีราคาถูกกว่าปุ๋ย Osmocote ที่ขายในท้องตลาด (1560 บาท/ตัน) ดังนั้น จึงมีความเหมาะสมที่จะเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนโดยใช้ซันสนเป็นสารเคลือบเพื่อให้ได้ปุ๋ยที่มีราคาไม่สูงมากนัก และหากมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงการนำสารเคลือบจากธรรมชาติตัวอื่นที่มีราคาถูกกว่าซันสนมาใช้ในการเตรียมปุ๋ยก็จะทำให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5. ในงานวิจัยนี้ ได้มีการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ต่างไปจากการใช้งานจริงบ้าง เช่น การทดสอบอัตราการปลดปล่อยยูเรียจากปุ๋ย โดยการแช่ปุ๋ยในตัวกลางที่เป็นน้ำกลั่น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความสะดวกและแม่นยำในการวัดอัตราการปลดปล่อยยูเรีย ดังนั้น ในอนาคต หากมีการศึกษาถึงปริมาณการปลดปล่อยยูเรียจากปุ๋ยในสภาวะจริง โดยการทดลองใช้กับพืชเศรษฐกิจชนิดต่าง ๆ และศึกษาถึงปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนที่พืชสามารถดูดขึ้นมาใช้ได้ รวมถึงการตอบสนองของพืชต่อการใส่ปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนในอัตราส่วนของปุ๋ย ชานอ้อยและสารเคลือบต่าง ๆ กัน ก็จะทำให้ได้ข้อมูลของปุ๋ยในอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมกับความต้องการที่แท้จริงของพืชเศรษฐกิจแต่ละชนิด และเกิดความสมดุลย์โดยไม่มีวัตถุดิบใด ๆ เหลือตกค้างในสิ่งแวดล้อม

6. ควรพัฒนาเครื่องมือสำหรับการเคลือบปุ๋ยให้สามารถใช้งานได้อย่างสมบูรณ์ ราคาถูก ใช้งานง่ายในการเตรียมปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในการเตรียมปุ๋ยตัวอย่างในแต่ละครั้ง

7. ควรมีการนำปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนไปใช้กับพืชในพื้นที่เพาะปลูกจริงโดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชที่ต้องปลูกในสภาพน้ำขัง และพื้นที่ที่มีการระบายน้ำอย่างรวดเร็ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรรณิการ์ สิริสิงห. เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์. กรุงเทพมหานคร : คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2525.

กวี ดำรงสิริพร. การใช้ยางสกิมผลิตปุ๋ยยูเรียชนิดควบคุมการปลดปล่อยยูเรีย. วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2527.

ปฐพีชล วายุอัคคี. ดินและปุ๋ย. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์ผลิตตำราเกษตรเพื่อชนบท, 2533.

ประภาส ขอพึ่ง. การดัดแปรและการทำให้ชันสนบริสุทธิ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ปิยะ ดวงพัตรา. หลักการและวิธีการใช้ปุ๋ยเคมี. กรุงเทพมหานคร : คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538.

พิมพ์ใจ อมรศิริรัตนกุล. ไมโครเอนแคปซูเลชันของฟ้าทะลายโจร *Andrographis paniculata* โดยใช้พอลิเมอร์ชีวภาพชนิดละลายน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

มุกดา สุขสวัสดิ์. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. กรุงเทพมหานคร : โอเดียนสโตร์, 2544.

ยงยุทธ โอสถสภา. หลักการผลิตและการใช้ปุ๋ย. กรุงเทพมหานคร : คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2528.

ยงยุทธ โอสถสภา. ธาตุอาหารพืช. กรุงเทพมหานคร : คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.

สถาบันพัฒนาและส่งเสริมปัจจัยการผลิต กรมส่งเสริมการเกษตร. ดินและปุ๋ย สำหรับผู้ค้าปุ๋ยระดับท้องถิ่น. กรุงเทพมหานคร : กรมส่งเสริมการเกษตร.

สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. การใช้ประโยชน์ของชานอ้อย. วารสารน้ำตาล 34 (พฤษภาคม 2541) : 4-22.

ภาษาอังกฤษ

Ahlnas, T., Controlled – release fertilizer composition in the form of a paste. United States Patent 5451243, (19 September 1995).

Breck, D.W., Zeolite molecular Sieves. New York : Wiley, 1974.

Chang, H.J, Method of preparing a slow release fertilizer. United States Patent 56955142, (9 December 1997).

Chatzoudis, G.K., and Rigas, F., Macroreticular hydrogel effects on dissolution rate of controlled-release fertilizers. Journal Agriculture Food Chemistry. 46 (1998) : 280-283.

Ghen, F.S., Abrasion resistant topcoats for control release coatings. United States Patent 5628813, (13 May 1997).

Cussler, E.L., Diffusion mass transfer in fluid system. 2nd ed. United kingdom : Cambridge University Press, 1997.

Elias, P., and George N., Modified rosin–paraffin wax resins as controlled delivery systems for fertilizers. Fabrication parameters governing fertilizer release in water. Industrial Engineering Chemistry Research. 33 (1994) : 1623 – 1630.

Garcia, M.C., Diez, J.A., Vallejo, A., Garcia, L., and Cartagena, M.C., Use of Kraft pine lignin in controlled-release fertilizer formulations. Industrial Engineering Chemistry Research. 35 (1996) : 245-249.

George, G., Controlled release composition and method for using. United States Patent 5252542, (October 12, 1993).

Goertz, H.M., Precoated controlled release fertilizer and processor for their preparation. United States Patent 6039781, (21 March 2000).

Gordonov, B., Method for preparing an encapsulated slow–Release particulate fertilizer. United States Patent 5560768, (1 October 1996).

Harold, E., and Richard, A., Encapsulated slow release fertilizers. United States Patent 5186732, (February 16, 1993).

Harvey, M., Richard, J., and William, R., Precoated controlled release fertilizers and processes for their preparation. United States Pate 6039781 (March 21, 2000).

Hepburn, C., and Arizal, R., Slow-release fertilizers based on natural rubber. British Polymer Journal. 20 (1988) : 487-491.

Hon, D.N.-S., Encapsulated fertilizers and pesticides and process. United States Patent 5679129, (27 October 1997).

Hudson, A.P, Abrasion resistant coatings for fertilizers. United States Patent 5466274, (14 November 1995).

Johannes, M.H., Granular fertilizer composition having controlled release and process for the preparation thereof. United States Patent 4657576, (April 14, 1987).

Mikkelsen, L., Behel Jr., A.D., and Williams, H.M., Addition of gel–forming hydrophilic polymers to nitrogen fertilizer solution. Fertilizer Research. 36 (1993) : 55 – 61.

Peter, H., and Robert, L., Process for the production of polyurea encapsulated fertilizer particles and the encapsulated fertilizer particles produced by this process. United States Patent 5851261, (December 22, 1998).

Potts, T.J., Colorimetric determination of urea in feeds. Journal of The A.O.A.C. 46 (1963) : 303-306.

Pruitt, N.W., Controlled release composition and method of manufacturing same. United States Patent 4975108, (4 December 1990).

Rasual, M.G., Rudolph, V., and Carsky, M., Physical property of bagasse. Fuel. 78 (1999) : 905-910.

Robert, L.M., Using hydrophilic polymers to control nutrient release. Fertilizer Research. 38 (1994) : 53-59.

Valkanas, G.N., Controlled release fertilizer. United States Patent 5137563, (11 August 1992).

Zlotnikov, E., Slow release fertilizers. United States Patent 5454851, (3 October 1995).

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ก1 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากสารละลายมาตรฐานยูเรีย

ค่าความเข้มข้น (g/5ml)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0.0002	0.058	0.071	0.060	0.063
0.0004	0.114	0.124	0.122	0.120
0.0006	0.169	0.175	0.172	0.172
0.0008	0.222	0.235	0.233	0.230
0.001	0.278	0.287	0.281	0.282
0.0012	0.315	0.325	0.320	0.320
0.0014	0.371	0.394	0.381	0.382
0.0016	0.411	0.416	0.415	0.414
0.0018	0.463	0.472	0.469	0.468
0.0002	0.516	0.527	0.517	0.520

ตารางที่ ก2 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1 และ 2

เวลา (วัน)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร					
	สูตรที่ 1			สูตรที่ 2		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	1.637	1.720	1.662	1.213	1.147	1.159
2	0.886	1.091	1.063	0.605	0.502	0.538
3	0.327	0.431	0.403	0.290	0.271	0.268
4	0.137	0.181	0.171	0.283	0.258	0.254
5	-	-	-	0.095	0.080	0.069

ตารางที่ ก3 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3

เวลา (วัน)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	1.287	1.228	0.215
2	0.595	0.566	0.551
3	0.268	0.255	0.251
4	0.114	0.103	0.110
5	0.041	0.064	0.063

ตารางที่ ก4 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 และ 5

เวลา (วัน)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร					
	สูตรที่ 4			สูตรที่ 5		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
2	1.128	1.227	1.276	0.473	0.596	0.570
4	0.690	0.686	0.677	0.395	0.408	0.415
6	0.395	0.360	0.389	0.218	0.236	0.242
8	0.291	0.276	0.288	0.169	0.196	0.205
12	0.742	0.715	0.736	0.247	0.256	0.271
16	0.328	0.305	0.322	0.202	0.235	0.214
20	0.265	0.220	0.240	0.175	0.197	0.177
24	0.209	0.186	0.205	0.158	0.204	0.163
28	0.081	0.058	0.072	0.156	0.182	0.172
32	-	-	-	0.114	0.112	0.137
36	-	-	-	0.083	0.093	0.112
40	-	-	-	0.056	0.067	0.085
44	-	-	-	0.035	0.036	0.046

ตารางที่ ก5 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 6และ7

เวลา (วัน)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร					
	สูตรที่ 6			สูตรที่ 7		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
2	0.310	0.292	0.337	1.513	1.558	1.541
4	0.183	0.128	0.155	0.869	0.895	0.841
6	0.080	0.069	0.039	0.333	0.398	0.341
8	0.110	0.102	0.082	0.284	0.384	0.344
12	0.161	0.131	0.143	0.641	0.664	0.599
16	0.148	0.144	0.141	0.248	0.261	0.214
20	0.098	0.084	0.093	0.143	0.150	0.134
24	0.121	0.099	0.116	0.096	0.146	0.085
28	0.112	0.092	0.100	-	-	-
32	0.093	0.080	0.087	-	-	-
36	0.070	0.061	0.067	-	-	-
40	0.062	0.050	0.061	-	-	-
44	0.050	0.041	0.042	-	-	-
48	0.028	0.019	0.022	-	-	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก6 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 8 และ 9

เวลา (วัน)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร					
	สูตรที่ 8			สูตรที่ 9		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
2	0.900	0.879	0.857	0.439	0.464	0.431
4	0.579	0.570	0.554	0.297	0.300	0.277
6	0.279	0.276	0.262	0.163	0.164	0.157
8	0.185	0.179	0.177	0.133	0.146	0.130
12	0.420	0.414	0.406	0.225	0.238	0.217
16	0.253	0.244	0.230	0.173	0.198	0.170
20	0.180	0.174	0.175	0.169	0.175	0.162
24	0.011	0.132	0.143	0.116	0.151	0.119
28	0.160	0.101	0.137	0.079	0.098	0.077
32	0.063	0.080	0.082	0.097	0.119	0.115
36	0.057	0.036	0.051	0.054	0.077	0.064
40	-	-	-	0.049	0.056	0.054
44	-	-	-	0.025	0.028	0.016

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก7 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 10 และ 11

เวลา (วัน)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร					
	สูตรที่ 10			สูตรที่ 11		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
2	0.243	0.278	0.230	0.441	0.450	0.438
4	0.185	0.210	0.175	0.424	0.433	0.413
6	0.108	0.130	0.101	0.157	0.166	0.128
8	0.168	0.185	0.145	0.131	0.138	0.121
12	0.297	0.301	0.288	0.234	0.265	0.218
16	0.273	0.278	0.229	0.198	0.218	0.194
20	0.210	0.224	0.193	0.147	0.166	0.133
24	0.163	0.190	0.151	0.089	0.100	0.078
28	0.161	0.172	0.147	0.183	0.185	0.176
32	0.107	0.111	0.099	0.173	0.175	0.162
36	0.095	0.122	0.092	0.132	0.158	0.148
40	0.089	0.099	0.093	0.111	0.157	0.145
44	0.074	0.085	0.080	0.105	0.141	0.121
48	0.076	0.070	0.052	0.093	0.125	0.112
52	0.074	0.056	0.051	0.063	0.109	0.106
56	0.040	0.034	0.033	0.060	0.079	0.099
60	-	-	-	0.054	0.063	0.044

ตารางที่ ก8 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 12

เวลา (วัน)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
2	0.441	0.450	0.438
4	0.424	0.433	0.413
6	0.157	0.166	0.128
8	0.131	0.138	0.121
12	0.234	0.265	0.218
16	0.198	0.218	0.194
20	0.147	0.166	0.133
24	0.089	0.100	0.078
28	0.183	0.185	0.176
32	0.173	0.175	0.162
36	0.132	0.158	0.148
40	0.111	0.157	0.145
44	0.105	0.141	0.121
48	0.093	0.125	0.112
52	0.063	0.109	0.106
56	0.060	0.079	0.099
60	0.054	0.063	0.044

ตารางที่ ก9 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอช เท่ากับ 5 และ 9

เวลา (วัน)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร					
	พีเอช 5			พีเอช 9		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
2	0.512	0.534	0.502	0.749	0.768	0.775
4	0.285	0.302	0.298	0.340	0.348	0.352
6	0.215	0.240	0.231	0.234	0.258	0.252
8	0.184	0.194	0.193	0.210	0.231	0.213
12	0.206	0.251	0.223	0.265	0.296	0.279
16	0.177	0.192	0.186	0.200	0.214	0.201
20	0.172	0.190	0.184	0.151	0.165	0.155
24	0.152	0.172	0.165	0.128	0.131	0.143
28	0.138	0.158	0.137	0.123	0.126	0.134

ตารางที่ ก10 ค่า absorbance วัดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร จากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์จำนวน 2, 1.5 และ 1 กรัม

ปริมาณปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์	เวลา (วัน)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
2 กรัม	1	1.149	1.144	1.184
	2	1.254	1.250	1.269
1.5 กรัม	1	0.904	0.908	0.915
	2	0.918	0.914	0.92
1 กรัม	1	0.599	0.600	0.594
	2	0.602	0.605	0.598

ตารางที่ ก11 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1, 2 และ 3 ที่เวลาต่าง ๆ

สูตรที่	เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
		มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	1	54.99	57.96	56.00	56.32	1.51	58.92	62.10	60.00	60.34	1.62
	2	15.04	18.43	17.95	17.14	1.83	16.00	19.61	19.10	18.24	1.95
	3	5.46	7.23	6.76	6.48	0.92	5.81	7.69	7.19	6.90	0.97
	4	2.24	2.99	2.82	2.68	0.39	2.38	3.18	3.00	2.85	0.42
2	1	40.99	38.75	39.15	39.63	1.19	58.56	55.35	55.93	56.61	1.71
	2	10.19	8.44	9.05	9.23	0.89	14.55	12.06	12.93	13.18	1.26
	3	4.84	4.52	4.46	4.61	0.20	6.92	6.45	6.37	6.58	0.30
	4	4.73	4.30	4.22	4.42	0.27	6.75	6.14	6.03	6.31	0.39
	5	1.52	1.27	1.09	1.29	0.22	2.17	1.81	1.55	1.84	0.31
3	1	21.76	20.75	20.53	21.01	0.66	47.30	45.10	44.63	45.68	1.43
	2	10.01	9.52	9.27	9.60	0.38	21.77	20.69	20.15	20.87	0.82
	3	4.47	4.25	4.18	4.30	0.15	9.71	9.23	9.08	9.34	0.33
	4	1.84	1.67	1.79	1.77	0.09	4.01	3.62	3.89	3.84	0.20
	5	0.62	1.00	0.98	0.87	0.21	1.34	2.17	2.13	1.88	0.47

ตารางที่ ก12 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4 ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
	มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	19.06	20.74	21.56	20.45	1.27	20.28	22.06	22.94	21.76	1.36
4	11.63	11.56	11.40	11.53	0.12	12.37	12.30	12.13	12.27	0.12
6	6.62	6.03	6.51	6.39	0.31	7.04	6.41	6.93	6.79	0.34
8	4.85	4.60	4.79	4.75	0.13	5.16	4.89	5.10	5.05	0.14
12	12.51	12.04	12.40	12.32	0.25	13.31	12.81	13.19	13.10	0.26
16	5.49	5.09	5.39	5.32	0.21	5.84	5.41	5.73	5.66	0.22
20	4.42	3.65	4.00	4.02	0.39	4.70	3.88	4.25	4.28	0.41
24	3.47	3.07	3.39	3.31	0.21	3.69	3.27	3.61	3.52	0.22
28	1.29	0.90	1.14	1.11	0.20	1.37	0.96	1.21	1.18	0.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก13 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
	มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	7.95	10.03	9.59	9.19	1.10	11.35	14.33	13.70	13.13	1.57
4	6.62	6.84	6.96	6.81	0.17	9.45	9.77	9.94	9.72	0.25
6	3.61	3.92	4.03	3.85	0.22	5.16	5.60	5.75	5.50	0.31
8	2.79	3.24	3.40	3.14	0.32	3.98	4.63	4.85	4.49	0.45
12	4.11	4.26	4.52	4.30	0.21	5.87	6.08	6.45	6.13	0.29
16	3.35	3.91	3.55	3.60	0.28	4.78	5.58	5.07	5.14	0.41
20	2.88	3.26	2.92	3.02	0.21	4.12	4.65	4.17	4.31	0.29
24	2.60	3.37	2.68	2.88	0.42	3.71	4.82	3.83	4.12	0.61
28	2.56	3.00	2.84	2.80	0.22	3.66	4.29	4.05	4.00	0.32
32	1.85	1.81	2.24	1.97	0.24	2.64	2.59	3.20	2.81	0.34
36	1.32	1.49	1.81	1.54	0.25	1.89	2.13	2.59	2.20	0.36
40	0.87	1.04	1.36	1.09	0.25	1.24	1.48	1.94	1.55	0.36
44	0.50	0.53	0.69	0.57	0.10	0.72	0.75	0.99	0.82	0.15

ตารางที่ ก14 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 6 ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
	มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	5.18	4.87	5.64	5.23	0.39	11.25	10.58	12.25	11.36	0.84
4	3.02	2.08	2.55	2.55	0.47	6.56	4.53	5.55	5.55	1.02
6	1.27	1.09	0.58	0.98	0.36	2.75	2.36	1.25	2.12	0.78
8	1.78	1.65	1.38	1.60	0.20	3.88	3.59	3.01	3.49	0.44
12	2.65	2.14	2.34	2.38	0.26	5.77	4.65	5.09	5.17	0.56
16	2.42	2.36	2.31	2.36	0.06	5.27	5.12	5.03	5.14	0.12
20	1.58	1.33	1.49	1.47	0.13	3.43	2.90	3.24	3.19	0.27
24	1.97	1.59	1.88	1.81	0.20	4.28	3.45	4.09	3.94	0.43
28	1.82	1.48	1.61	1.64	0.17	3.95	3.22	3.51	3.56	0.37
32	1.49	1.28	1.39	1.39	0.11	3.23	2.78	3.02	3.01	0.23
36	1.10	0.95	1.04	1.03	0.08	2.39	2.06	2.27	2.24	0.17
40	0.98	0.86	0.96	0.93	0.06	2.12	1.86	2.08	2.02	0.14
44	0.76	0.61	0.63	0.67	0.08	1.65	1.32	1.38	1.45	0.18
48	0.69	0.24	0.29	0.41	0.25	0.84	0.53	0.64	0.67	0.16

ตารางที่ ก15 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7 และ 8 ที่เวลาต่าง ๆ

สูตรที่	เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
		มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
7	2	25.59	26.35	26.07	26.00	0.38	27.22	28.03	27.73	27.66	0.41
	4	14.65	15.11	14.20	14.65	0.46	15.59	16.07	15.10	15.59	0.49
	6	5.56	6.66	5.71	5.98	0.60	5.92	7.09	6.07	6.36	0.64
	8	4.73	6.44	5.75	5.64	0.86	5.03	6.85	6.12	6.00	0.92
	12	10.80	11.19	10.08	10.69	0.56	11.49	11.90	10.72	11.37	0.60
	16	4.13	4.35	3.55	4.01	0.41	4.39	4.63	3.78	4.27	0.44
	20	2.35	2.46	2.19	2.33	0.14	2.50	2.62	2.33	2.48	0.15
	24	1.57	2.40	1.36	1.78	0.55	1.67	2.55	1.45	1.89	0.58
8	2	15.18	14.83	14.46	14.82	0.36	21.69	21.19	20.66	21.18	0.52
	4	9.74	9.59	9.32	9.55	0.21	13.91	13.70	13.31	13.64	0.30
	6	4.66	4.60	4.35	4.54	0.16	6.65	6.57	6.22	6.48	0.23
	8	3.05	2.95	2.93	2.98	0.06	4.36	4.21	4.18	4.25	0.10
	12	7.04	6.94	6.80	6.93	0.12	10.06	9.92	9.72	9.90	0.17
	16	4.21	4.06	3.82	4.03	0.20	6.02	5.80	5.46	5.76	0.28
	20	2.97	2.86	2.88	2.90	0.06	4.24	4.09	4.12	4.15	0.08
	24	0.11	2.16	2.34	1.54	1.24	0.15	3.08	3.34	2.19	1.77
	28	2.63	1.63	2.23	2.16	0.50	3.75	2.33	3.19	3.09	0.72
	32	0.99	1.27	1.31	1.19	0.17	1.41	1.82	1.87	1.70	0.25
	36	0.88	0.53	0.78	0.73	0.18	1.26	0.75	1.11	1.04	0.26

ตารางที่ ก16 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 9 ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
	มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	7.36	7.80	7.23	7.46	0.30	16.00	16.95	15.71	16.22	0.65
4	4.96	5.00	4.62	4.86	0.21	10.79	10.88	10.04	10.57	0.46
6	2.68	2.70	2.59	2.66	0.06	5.82	5.87	5.62	5.77	0.13
8	2.18	2.40	2.12	2.23	0.15	4.73	5.21	4.61	4.85	0.32
12	3.73	3.96	3.59	3.76	0.19	8.10	8.61	7.81	8.17	0.41
16	2.86	3.28	2.80	2.98	0.26	6.21	7.13	6.08	6.47	0.57
20	2.78	2.89	2.65	2.77	0.12	6.04	6.28	5.79	6.04	0.25
24	1.89	2.47	1.93	2.10	0.32	4.10	5.38	4.19	4.56	0.71
28	1.25	1.57	1.23	1.35	0.19	2.72	3.42	2.67	2.94	0.42
32	1.56	1.93	1.86	1.78	0.20	3.39	4.20	4.05	3.88	0.43
36	0.82	1.23	0.99	1.01	0.21	1.79	2.67	2.16	2.21	0.44
40	0.75	0.86	0.84	0.82	0.06	1.62	1.87	1.82	1.77	0.13
44	0.34	0.39	0.18	0.30	0.11	0.73	0.85	0.39	0.66	0.24

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก17 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 10 ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
	มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	4.03	4.63	3.90	4.19	0.39	5.76	6.61	5.57	5.98	0.55
4	3.06	3.49	2.89	3.15	0.31	4.37	4.98	4.13	4.49	0.44
6	1.75	2.12	1.63	1.83	0.26	2.50	3.03	2.33	2.62	0.37
8	2.77	3.05	2.37	2.73	0.34	3.95	4.36	3.39	3.90	0.49
12	4.96	5.02	4.81	4.93	0.11	7.08	7.17	6.87	7.04	0.15
16	4.55	4.63	3.80	4.33	0.46	6.50	6.62	5.43	6.18	0.66
20	3.48	3.72	3.19	3.46	0.27	4.97	5.31	4.56	4.95	0.38
24	2.68	3.14	2.48	2.77	0.34	3.83	4.48	3.54	3.95	0.48
28	2.65	2.84	2.41	2.63	0.22	3.78	4.06	3.44	3.76	0.31
32	1.73	1.79	1.60	1.71	0.10	2.47	2.56	2.29	2.44	0.14
36	1.53	1.99	1.48	1.67	0.28	2.18	2.84	2.11	2.38	0.40
40	1.43	1.59	1.50	1.51	0.08	2.04	2.27	2.14	2.15	0.12
44	1.17	1.35	1.28	1.27	0.09	1.67	1.93	1.83	1.81	0.13
48	1.20	1.11	0.80	1.04	0.21	1.72	1.58	1.14	1.48	0.30
52	1.17	0.87	0.78	0.94	0.20	1.67	1.24	1.11	1.34	0.29
56	0.60	0.50	0.48	0.53	0.06	0.86	0.71	0.68	0.75	0.1

ตารางที่ ก18 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11 ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
	มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	10.76	11.37	10.79	10.97	0.34	9.28	9.80	9.30	9.46	0.29
4	8.91	9.36	8.60	8.96	0.38	7.68	8.07	7.41	7.72	0.33
6	6.41	6.75	6.46	6.54	0.18	5.53	5.82	5.57	5.64	0.16
8	4.27	4.19	3.62	4.03	0.35	3.68	3.61	3.12	3.47	0.31
12	10.96	11.33	10.68	10.99	0.33	9.45	9.77	9.21	9.48	0.28
16	9.65	9.76	8.61	9.34	0.63	8.32	8.41	7.42	8.05	0.55
20	7.60	8.38	6.97	7.65	0.71	6.55	7.22	6.01	6.59	0.61
24	4.98	5.94	4.78	5.23	0.62	4.29	5.12	4.12	4.51	0.54
28	4.86	5.03	3.85	4.58	0.64	4.19	4.34	3.32	3.95	0.55
32	4.47	4.86	3.57	4.30	0.66	3.85	4.19	3.08	3.71	0.57
36	4.30	4.47	3.72	4.16	0.39	3.71	3.85	3.21	3.59	0.34
40	3.51	3.69	3.10	3.43	0.30	3.03	3.18	2.67	2.96	0.26
44	2.47	2.53	2.33	2.44	0.10	2.13	2.18	2.01	2.11	0.09
48	2.23	2.56	1.97	2.25	0.30	1.92	2.21	1.70	1.94	0.26
52	1.97	1.90	1.80	1.89	0.09	1.70	1.64	1.55	1.63	0.08

ตารางที่ ก19 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 12 ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
	มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	7.41	7.63	7.34	7.46	0.15	7.88	8.12	7.81	7.94	0.16
4	7.11	7.26	6.93	7.10	0.17	7.56	7.72	7.37	7.55	0.18
6	2.59	2.74	2.09	2.47	0.34	2.75	2.91	2.22	2.63	0.36
8	2.13	2.27	1.97	2.12	0.15	2.27	2.41	2.10	2.26	0.16
12	3.88	4.41	3.61	3.97	0.41	4.13	4.69	3.84	4.22	0.43
16	3.28	3.61	3.21	3.37	0.21	3.49	3.84	3.41	3.58	0.23
20	2.42	2.73	2.17	2.44	0.28	2.57	2.90	2.31	2.59	0.30
24	1.43	1.61	1.23	1.42	0.19	1.52	1.71	1.31	1.51	0.20
28	3.02	3.06	2.90	2.99	0.08	3.21	3.25	3.08	3.18	0.09
32	2.85	2.89	2.67	2.80	0.12	3.03	3.07	2.84	2.98	0.12
36	2.16	2.59	2.43	2.39	0.22	2.30	2.76	2.59	2.55	0.23
40	1.80	2.58	2.37	2.25	0.40	1.91	2.74	2.52	2.39	0.43
44	1.69	2.31	1.96	1.99	0.31	1.80	2.46	2.09	2.12	0.33
48	1.49	2.03	1.82	1.78	0.27	1.58	2.16	1.94	1.89	0.29
52	0.98	1.76	1.72	1.49	0.44	1.04	1.87	1.83	1.58	0.47
56	0.93	1.25	1.60	1.26	0.34	0.99	1.33	1.7	1.34	0.36
60	0.83	0.99	0.67	0.83	0.16	0.88	1.05	0.71	0.88	0.17

ตารางที่ ก20 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอชเท่ากับ 5 และ 9 ที่เวลาต่าง ๆ

พีเอช	เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
		มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5	2	8.60	8.97	8.44	8.67	0.27	12.29	12.82	12.05	12.39	0.39
	4	4.75	5.04	4.97	4.92	0.15	6.79	7.20	7.10	7.03	0.21
	6	3.56	3.99	3.84	3.80	0.22	5.09	5.70	5.48	5.42	0.31
	8	3.04	3.21	3.19	3.15	0.09	4.34	4.58	4.55	4.49	0.13
	12	3.41	4.17	3.70	3.76	0.38	4.87	5.96	5.28	5.37	0.55
	16	2.92	3.17	3.07	3.05	0.13	4.17	4.53	4.39	4.36	0.18
	20	2.84	3.14	3.04	3.01	0.15	4.05	4.48	4.34	4.29	0.22
	24	2.49	2.84	2.72	2.68	0.18	3.56	4.05	3.88	3.83	0.25
	28	2.25	2.60	2.25	2.37	0.20	3.22	3.71	3.21	3.38	0.29
9	2	12.62	12.94	13.06	12.87	0.23	18.03	18.49	18.66	18.39	0.33
	4	5.68	5.82	5.89	5.80	0.11	8.11	8.31	8.42	8.28	0.16
	6	3.88	4.30	4.19	4.12	0.22	5.54	6.14	5.98	5.89	0.31
	8	3.49	3.84	3.54	3.62	0.19	4.98	5.49	5.05	5.17	0.28
	12	4.42	4.94	4.65	4.67	0.26	6.31	7.06	6.64	6.67	0.38
	16	3.31	3.55	3.33	3.40	0.13	4.73	5.07	4.75	4.85	0.19
	20	2.48	2.71	2.54	2.58	0.12	3.54	3.87	3.63	3.68	0.17
	24	2.09	2.14	2.34	2.19	0.13	2.99	3.05	3.34	3.13	0.19
	28	2.00	2.05	2.19	2.08	0.10	2.85	2.93	3.13	2.97	0.14

ตารางที่ ก21 ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ดจำนวน 2, 1.5 และ 1 g.

ปริมาณปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ (กรัม)	เวลา (วัน)	ปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่าง									
		มิลลิกรัม/ปุ๋ยตัวอย่าง 1 กรัม					%				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	1	77.63	77.33	80.06	78.34	1.50	82.58	82.27	85.17	83.34	1.59
	2	84.77	84.52	85.78	85.02	0.67	90.18	89.91	91.26	90.45	0.71
1.5	1	61.00	61.29	61.76	61.35	0.38	87.14	87.55	88.23	87.64	0.55
	2	61.97	61.72	62.14	61.94	0.21	88.53	88.17	88.77	88.49	0.30
1	1	40.30	40.41	40.01	40.24	0.21	87.60	87.84	86.97	87.47	0.45
	2	40.52	40.74	40.28	40.51	0.23	88.08	88.56	87.57	88.07	0.50

ตารางที่ ก22 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (water uptake, %) โดยปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4-9 ในเวลา 4 วัน

สูตรที่	water uptake (%)				ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
4	44.79	43.84	43.66	43.97	0.61
5	98.95	98.04	97.94	98.31	0.56
6	8.57	8.11	9.36	8.68	0.63
7	44.20	44.28	45.65	44.71	0.82
8	90.45	90.74	91.12	90.77	0.34
9	61.96	63.06	63.92	62.98	0.98
10	48.24	49.11	49.06	48.80	0.49
11	14.54	14.93	13.43	14.30	0.78
12	11.84	11.35	10.98	11.39	0.43

ตารางที่ ก23 ค่าคงที่การปลดปล่อยที่คำนวณได้จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4-12

สูตรที่	ค่าคงที่การปลดปล่อย (% day$^{-1/2}$)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
4	15.05	14.12	14.74	14.64	0.47
5	10.00	11.20	10.81	10.67	0.61
6	9.04	7.67	7.70	8.14	0.78
7	18.53	18.80	18.08	18.47	0.36
8	16.02	15.89	15.55	15.82	0.24
9	12.86	13.86	12.42	13.05	0.74
10	7.93	8.61	7.02	7.85	0.80
11	11.34	11.95	10.51	11.27	0.72
12	6.67	7.26	6.18	6.70	0.54

ตารางที่ ก24 ค่าคงที่การปลดปล่อยที่คำนวณได้จากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ที่แช่ในตัวกลางที่มีพีเอชเท่ากับ 5 และ 9

พีเอช	ค่าคงที่การปลดปล่อย (% day$^{-1/2}$)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5	9.21	10.29	9.81	9.77	0.54
9	11.79	12.20	12.43	12.14	0.32

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับปริมาณ urea-N ที่ถูก ปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1, 2 และ 3 เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน

ANOVA

RELEASE1

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	348.512	2	174.256	69.034	.000
Within Groups	15.145	6	2.524		
Total	363.657	8			

ตารางที่ ข2 การทดสอบความแตกต่างของปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1, 2 และ 3 โดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test

release 1 day

Duncan[a]

		Subset for alpha = .05		
RATIO	N	1	2	3
.50	3	45.6767		
1.00	3		56.6133	
2.00	3			60.3400
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4, 5 และ 6

ANOVA

K

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	64.402	2	32.201	79.761	.000
Within Groups	2.422	6	.404		
Total	66.825	8			

ตารางที่ ข4 การทดสอบความแตกต่างของค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4, 5 และ 6 โดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test

K

Duncan[a]

urea / bagasse	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
.33	3	8.1367		
.60	3		10.6700	
1.00	3			14.6367
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7, 8 และ 9

ANOVA

K

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	44.126	2	22.063	89.964	.000
Within Groups	1.471	6	.245		
Total	45.598	8			

ตารางที่ ข6 การทดสอบความแตกต่างของค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7, 8 และ 9 โดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test

K

Duncan[a]

urea / bagasse	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
.50	3	13.0467		
1.00	3		15.8200	
2.00	3			18.4700
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอชเท่ากับ 5, 7 และ 9

ANOVA

K

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	8.588	2	4.294	16.673	.004
Within Groups	1.545	6	.258		
Total	10.133	8			

ตารางที่ ข8 การทดสอบความแตกต่างของค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 ในตัวกลางที่มีพีเอชเท่ากับ 5, 7 และ 9 โดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test

K

Duncan[a]

		Subset for alpha = .05	
PH	N	1	2
5.00	3	9.7700	
7.00	3	10.6700	
9.00	3		12.1400
Sig.		.073	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข9 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าคงที่การปลดปล่อยของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5 และ 10

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
K	Equal variances assumed	.143	.725	4.852	4	.008	2.8167	.5806	1.2048	4.4285
	Equal variances not assumed			4.852	3.749	.010	2.8167	.5806	1.1613	4.4720

ตารางที่ ข10 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าคงที่การปลดปล่อยจากปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11 และ 12

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
K	Equal variances assumed	1.605	.274	9.495	4	.001	4.2833	.4511	3.0309	5.5358
	Equal variances not assumed			9.495	2.655	.004	4.2833	.4511	2.7364	5.8303

ตารางที่ ข11 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณ urea-N ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียบริสุทธิ์ชนิดเม็ดกับปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4–9

Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference Lower	Upper			
Pair 1	UREA2G - CODE4	68.6900	1.0739	.6200	66.0222	71.3578	110.786	2	.000
Pair 2	UREA2G - CODE7	62.7900	.8380	.4838	60.7082	64.8718	129.775	2	.000
Pair 3	UREA1.5G - CODE5	75.3667	1.6884	.9748	71.1726	79.5608	77.317	2	.000
Pair 4	UREA1.5G - CODE8	67.3133	.7021	.4054	65.5692	69.0574	166.061	2	.000
Pair 5	UREA1G - CODE6	76.7100	1.3341	.7702	73.3960	80.0240	99.595	2	.000
Pair 6	UREA1G - CODE9	71.8500	.2352	.1358	71.2658	72.4342	529.206	2	.000

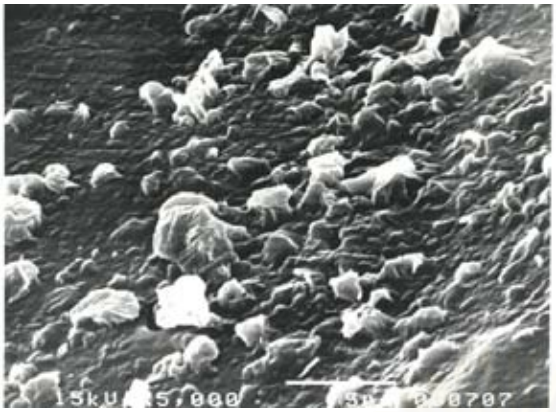
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ค9 ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 9
(ปุ๋ยยูเรียต่อชานอ้อยต่อซันสน = 20:40:40)

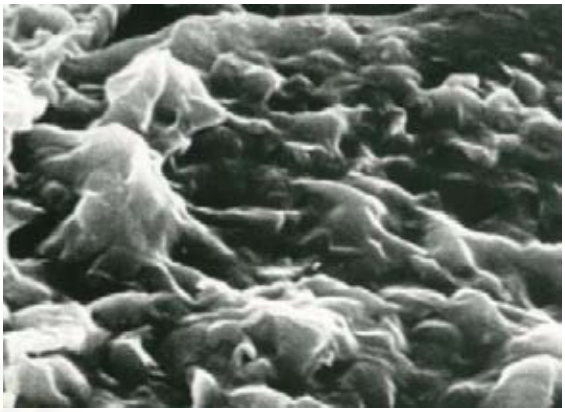
รูปที่ ค10 ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 10
(ปุ๋ยยูเรียต่อชานอ้อยต่อซันสนต่อซีโอไลต์ = 30:20:35:15)

รูปที่ ค11 ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11
ปุ๋ยยูเรียต่อลิสไตรีนต่อซันสน = 50:30:20)

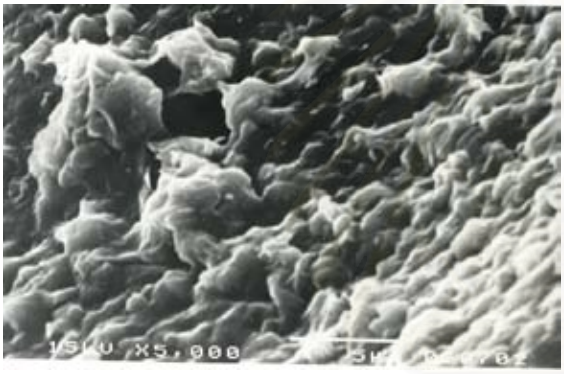
รูปที่ ค12 ลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 12
(ปุ๋ยยูเรียต่อพอลิสไตรีนต่อซันสน = 40:40:20)



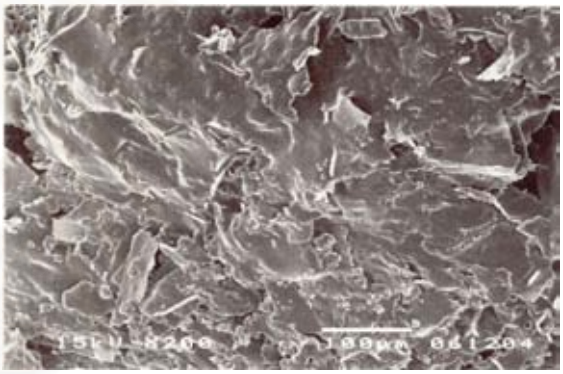
รูปที่ ค13 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 1
(กำลังขยาย 5,000 เท่า สเกล 5 μm)



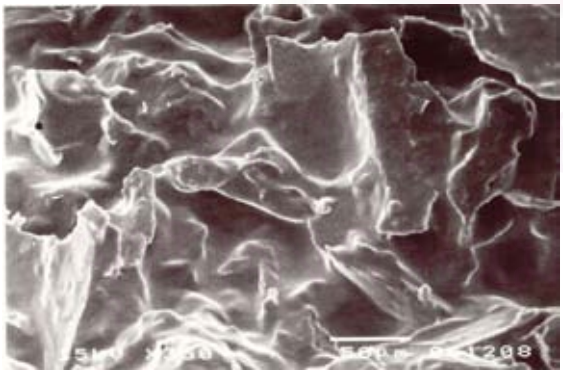
รูปที่ ค14 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 2
(กำลังขยาย 5,000 เท่า สเกล 5 μm)



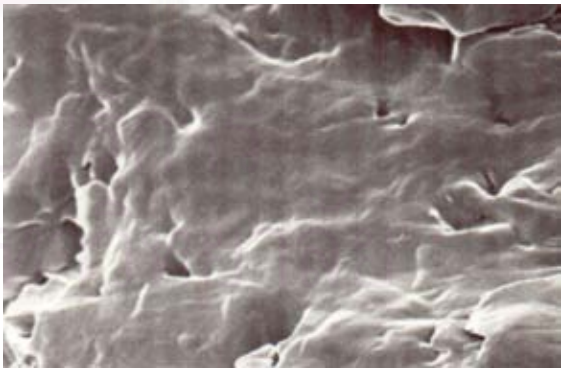
รูปที่ ค15 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 3
(กำลังขยาย 5,000 เท่า สเกล 5 μm)



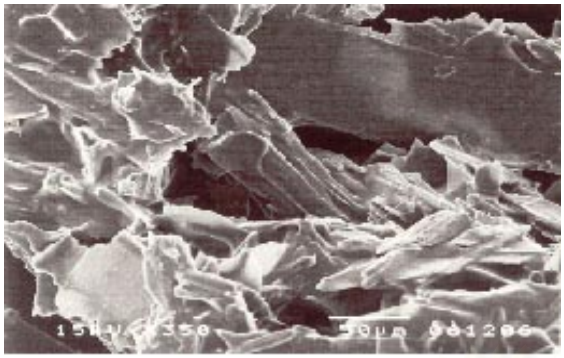
รูปที่ ค16 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 4
(กำลังขยาย 200 เท่า สเกล 100 μm)



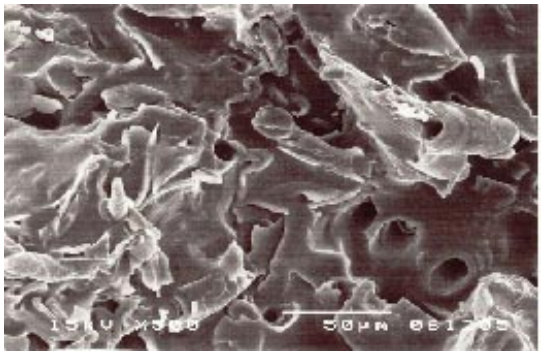
รูปที่ ค17 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 5
(กำลังขยาย 350 เท่า สเกล 50 μm)



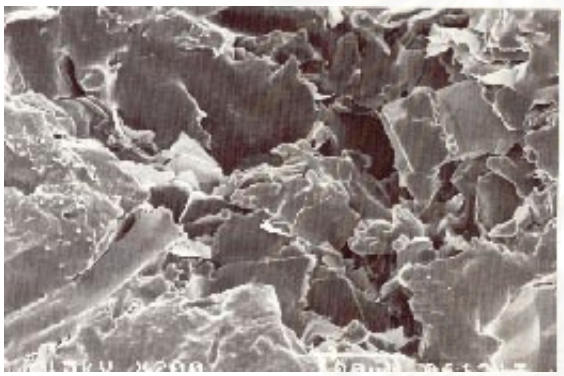
รูปที่ ค18 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 6
(กำลังขยาย 200 เท่า สเกล 100 μm)



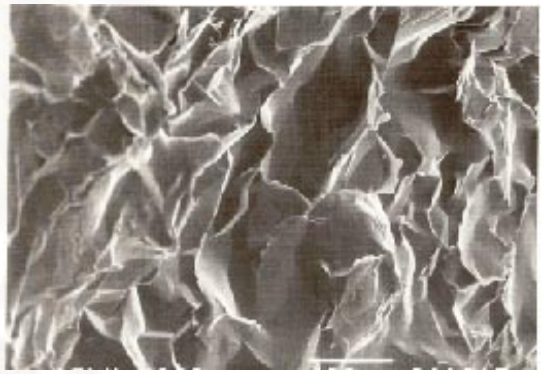
รูปที่ ค19 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 7
(กำลังขยาย 350 เท่า สเกล 50 μm)



รูปที่ ค20 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 8
(กำลังขยาย 500 เท่า สเกล 50 μm)

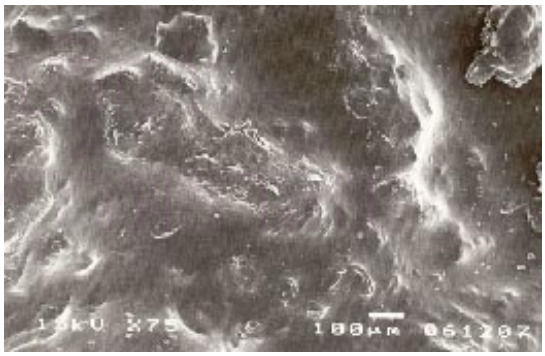


รูปที่ ค21 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 9
(กำลังขยาย 200 เท่า สเกล 100 μm)



รูปที่ ค22 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 10
(กำลังขยาย 200 เท่า สเกล 100 μm)

รูปที่ ค23 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 11
(กำลังขยาย 350 เท่า สเกล 50 μm)



รูปที่ ค24 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยตัวอย่างสูตรที่ 12
(กำลังขยาย 75 เท่า สเกล 100 μm)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศิริพร เชาว์เมธีวุฒิ เกิดวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ.2519 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย