อิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาในการเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนครั้งที่สอง ต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในดิน และผักคะน้า

นายณัฐพร กะการดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543
ISBN 974-346-653-3
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INFLUENCE OF SEWAGE SLUDGE APPLICATION PERIOD ON Cd AND Zn ACCUMULATED IN SOIL AND CHINESE KALE (Brassica oleracea L. Var. alboglabra Bailey)

Mr.Nuttaporn Kakarndee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science
Inter-Department Program in Environmental Science
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2000

ISBN 974-346-653-3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาในการเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนครั้งที่สองต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในดิน และผักคะน้า
โดย	นายณัฐพร กะการดี
สหสาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปองศักดิ์ พงษ์ประยูร)

.....กรรมการ
(ดร.วิเทศ ศรีเนตร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณัฐพร กะการดี : อิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาในการเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนครั้งที่สองต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในดิน และผักคะน้า (INFLUENCE OF SEWAGE SLUDGE APPLICATION PERIOD ON Cd AND Zn ACCUMULATED IN SOIL AND CHINESE KALE (Brassica oleracea L. Var. alboglabra Bailey)) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ, 112 หน้า. ISBN 974-346-653-3

กากตะกอนน้ำเสียชุมชนมีองค์ประกอบทั้งส่วนที่เป็นประโยชน์ คือเป็นแหล่งธาตุอาหาร และมีส่วนที่เป็นข้อจำกัด จากสารพิษ เช่นโลหะหนัก การทิ้งช่วงเวลาให้ดินพักตัวก่อนเติมกากตะกอน อาจมีอิทธิพลต่อการสะสมของโลหะหนักในดินและพืชที่ปลูก และสามารถใช้เป็นทางเลือกของการจัดการเพื่อให้ได้ประโยชน์จากกากตะกอนในบทบาทเป็นแหล่งธาตุอาหาร โดยใช้ดัชนีบ่งชี้ความเป็นพิษ ควบคุมหรือกำหนดข้อจำกัด

การวิจัยในสภาพเรือนทดลองครั้งนี้ จึงมุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาในการเติมกากตะกอน 3 ลักษณะ คือ การไม่ทิ้งช่วงเวลาในการปลูกซ้ำ การทิ้งช่วงเวลาครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก และการทิ้งช่วงเวลาหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก ของการปลูกผักคะน้าครั้งที่สอง ดินทดลองนำมาจากพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลหนองงูเหลือม และ ตำบลทุ่งน้อย อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม โดยวางแผนการทดลองแบบ 3 x 6 Factorial in Randomized Complete Block Design ทำ 3 ซ้ำ แล้วติดตามปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่สะสมในดินและผักคะน้า

ผลการศึกษา การทิ้งช่วงเวลาพักดินให้นานขึ้นจนถึงหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก ส่งผลให้การสะสมสังกะสีเพิ่มขึ้นในชุดดินกำแพงแสน และชุดดินสระบุรีที่เติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ในขณะที่การสะสมแคดเมียมลดลง ภายหลังการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ การสะสมโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดในดินเพิ่มขึ้นตามอัตราเติมกากตะกอนจนถึงระดับ 80 เมตริกตันต่อเฮก ปริมาณการสะสมของโลหะหนักในดินยังมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง กับปัจจัยทางลักษณะสมบัติของดินได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) อินทรีย์วัตถุในดิน ความพรุนของดิน เนื้อดิน และผลผลิตผักคะน้า ทั้งนี้ผักคะน้าที่ปลูกในชุดดินสระบุรีสะสมสังกะสีและแคดเมียมเพิ่มขึ้นตามการทิ้งช่วงเวลา สำหรับชุดดินกำแพงแสนนั้น ผลผลิตผักคะน้ามากที่สุดได้รับเมื่อมีการเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ แล้วทิ้งช่วงเวลาครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

สรุปได้ว่า การทิ้งช่วงเวลาพักดินจนถึงหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกของผักคะน้า มีอิทธิพลต่อการสะสมเพิ่มขึ้นของสังกะสี และการสะสมลดลงของแคดเมียมในดินทั้งสองชุดที่ศึกษา ส่วนผักคะน้าที่ปลูกมีการสะสมสังกะสีและแคดเมียมเพิ่มขึ้นเฉพาะในชุดดินสระบุรี

ภาควิชา สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม **ลายมือชื่อนิสิต** .....

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

ปีการศึกษา 2543

4072253423 : INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEY WORD : SEWAGE SLUDGE / PERIOD / CADMIUM / ZINC / CHINESE KALE

NUTTAPORN KAKARNDEE: INFLUENCE OF SEWAGE SLUDGE APPLICATION PERIOD ON Cd AND Zn ACCUMULATED IN SOIL AND CHINESE KALE (Brassica oleracea L. Var. alboglabra Bailey) THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. ORAWAN SIRIRATPIRIYA, D.Sc., 112 pp. ISBN 974-346-653-3

In general, the useful component of sewage sludge is organic matter containing macro-nutrients and micro-nutrients. However, sewage sludge also contains the components that are considered to be harmful to the environment. Only heavy metals will be emphasized here. Time period after application of the sludge, the so-called residual time, may affect the mobility of toxic metals in soil. Thus, the metal content in the plant growing on soil when judging the sewage sludge amendment of soil by harvest interval indicator is an alternative way.

A set of pot experiment was conducted in a greenhouse. The objective is to investigate an influence of sewage sludge application periods (1. No harvest interval, 2. A half of harvest interval, and a complete of harvest interval) on the accumulation of cadmium and zinc in soil and plant. Agricultural soils in the experiment was brought from Tumbol Nong-Ngoo-Lhum and Tumbol Thoong-noi, Amphore Mueng, Nakhon Pattom Province. The experiment was statistically designed to 3 X 6 factorial in randomized complete block design with 3 replications. Physical and chemical analysis were laboratory technique. Heavy metals measured by atomic absorption spectrophotometry.

The results indicated that the harvest interval before an application of sewage sludge affected on cadmium concentration increment in Kampaeng Saen and Saraburi soil series when 20 tonnes/ha sewage sludge were applied. While cadmium concentration reduced when 80 tonnes/ha sewage sludge was applied. However, zinc and cadmium accumulation in soil enriched by 80 tonnes/ha sewage sludge was higher than that of 20 tonnes/ha sewage sludge. Some soil characteristics (pH, CEC, organic matter, porosity and texture) and Chinese kale productivity had positive correlation significantly with heavy metals concentration in the soils. Zinc and cadmium concentration of Chinese kale planted in Saraburi soil series were increased by increasing a fallow period. In Kampaeng saen soil series, maximum yield of Chinese kale received from a half of harvest interval period at sewage sludge application rate 20 tonnes/ha

In conclusion, the fallow period influenced on increased zinc and reduced cadmium concentration in both study soil series. Only Saraburi soil series, zinc and cadmium concentration were enhanced in Chinese kale.

Department Inter – department Student's signature…….
Field of study Environmental science Advisor's signature…….
Academic year 2000

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง “การจัดการกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชน” โครงการวิจัยงบประมาณแผ่นดิน สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มีความเมตตาให้โอกาสกับนิสิตเป็นลูกศิษย์ในที่ปรึกษา และได้ให้ความกรุณาเสียสละเวลาในการดูแลวิทยานิพนธ์แบบครบวงจร ด้วยความตั้งใจอย่างสูงยิ่งของท่าน จึงเป็นความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณด้วยความรู้สึกอันซาบซึ้งมิรู้ลืมต่อคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน โดยมีรายนามต่อไปนี้ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ พัฒนผลไพบูลย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปองศักดิ์ พงษ์ประยูร และดร. วิเทศ ศรีเนตร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เป็นเกียรติในคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไข เพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์และถูกต้องยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณทุกท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์รวมทั้งหน่วยงานต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และผู้อำนวยการกองเกษตรเคมี หัวหน้ากลุ่มงานวิเคราะห์ดินและน้ำ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการ หัวหน้าภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ทดลอง (เรือนเพาะชำ) ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน

ขอขอบคุณ คุณอนุกูล สุธาพันธ์ คุณธวิโรจน์ ตันนุกิจ คุณนันทนา ชูฉัตร คุณฐิติมา ทองศรีพงษ์ คุณปราณี เจริญยิ่ง คุณศุภสุข ประดับสุข คุณสุนีย์ กาวิล คุณวนิดา พร้อมมีชัย คุณวลีพร ศรีเพ็ญประภา คุณวรรณวิมล เศาวณานนท์ และคุณสุจิตรา สมบัติภิญโญ ผู้ร่วมงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่น้องในครอบครัวที่ได้ให้พลังกาย พลังใจช่วยเหลือทั้งงานภาคปฏิบัติและงานเขียนวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ตลอดมา และขอขอบพระคุณ สิ่งศักดิ์สิทธิ์ในสากลโลก พระคุณบิดร มารดา ที่ช่วยปกป้องคุ้มครองให้นิสิตได้รับความสำเร็จจนถึงวันนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญตาราง.....ซ
สารบัญรูป.....ฏ

บทที่

1. บทนำ.....1
2. การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4
3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย.....24
4. ผลการทดลอง.....28
5. วิจารณ์ผลการทดลอง.....66
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....87

รายการอ้างอิง.....90
ภาคผนวก.....96
ประวัติผู้เขียน.....112

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลำดับความชอบ (affinity sequence) ของอนุภาคดินในการดูดซับโลหะ.....	14
2.2	มาตรฐานระหว่างประเทศของปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดินที่มีการใช้กากตะกอนที่อนุญาตให้มีได้สูงสุด.....	22
2.3	อัตราการใช้กากตะกอนที่อนุญาตให้มีได้สูงสุดในพื้นที่ทางการเกษตร.....	23
3.1	ระยะเวลาในการเติมสิ่งทดลองครั้งที่สองในการเพาะปลูกผักคะน้า.....	25
3.2	ตำรับทดลอง (Treatment) ในงานวิจัย.....	25
3.3	พารามิเตอร์ ตัวอย่างที่วิเคราะห์ และวิธีวิเคราะห์.....	27
4.1	ลักษณะสมบัติและองค์ประกอบเคมีของดินทดลองและกากตะกอน.....	29
4.2	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดินทดลอง.....	30
4.3	ปริมาณแคดเมียม (Cd, ppm) ของชุดดินกำแพงแสน ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต.....	31
4.4	ปริมาณแคดเมียม (Cd, ppm) ในชุดดินสระบุรี ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต.....	33
4.5	ปริมาณสังกะสี (Zn, ppm) ของชุดดินกำแพงแสน ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต.....	34
4.6	ปริมาณสังกะสี (Zn, ppm) ของชุดดินสระบุรี ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน ภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต.....	36
4.7	ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสน ในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อไม่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน.....	37
4.8	ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสน ในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อมีการทิ้งช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาล.....	38
4.9	ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสน ในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อมีการทิ้งช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาล.....	39
4.10	ค่า pH ของชุดดินสระบุรี ในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อไม่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน.....	40
4.11	ค่า pH ของชุดดินสระบุรี ในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อมีการทิ้งช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก.....	41
4.12	ค่า pH ของชุดดินสระบุรี ในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อมีการทิ้งช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก.....	42
4.13	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน.....	43

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.14 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 44

4.15 เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 45

4.16 เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 46

4.17 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 47

4.18 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 48

4.19 ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 49

4.20 ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 50

4.21 ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 52

4.22 ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 53

4.23 ลักษณะเนื้อดินของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2..... 54

4.24 ลักษณะเนื้อดินของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2.. 55

4.25 ลักษณะเนื้อดินของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2..... 56

4.26 ลักษณะเนื้อดินของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2..... 57

4.27 ผลผลิตของผักคะน้า ของชุดดินกำแพงแสนในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 ที่มีการทิ้งช่วงเวลาของการพักดิน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 1.... 58

4.28 ผลผลิตของผักคะน้า ของชุดดินสระบุรี ในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 ที่มีการทิ้งช่วงเวลาของการพักดิน ภายหลังการเก็บเกี่ยว ในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 1..... 60

4.29 ปริมาณสังกะสี (Zn) ในพืชของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 62

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.30 ปริมาณสังกะสี (Zn) ในพืชของดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 63

4.31 ปริมาณแคดเมียม (Cd) ในพืชของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 64

4.32 ปริมาณแคดเมียม (Cd) ในพืชของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน..... 65

5.1 จำแนกความสมบูรณ์ของดินและกากตะกอนใช้ทดลองตามเกณฑ์ของกองจำแนกดิน กรมพัฒนาที่ดิน (เล็ก มอญเจริญ, 2522)..... 82

5.2 ระดับ CEC ของดิน (ศุภมาศ, 2540)..... 82

5.3 ชนิดและปริมาณโลหะหนัก (ppm) ในดินของประเทศต่างๆ (Webber et al., 1984)..... 83

5.4 ปริมาณโลหะหนัก (ppm) สูงสุดที่ยอมรับให้มีได้ในกากตะกอนที่จะใส่ลงในพื้นที่การเกษตรของประเทศต่าง ๆ (Webber et al., 1984)..... 83

5.5 ปริมาณโลหะหนัก (ppm) ชนิดต่าง ๆ ในพืช ณ ระดับปกติและระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช (Chaney, 1982)..... 84

5.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียม (Cd) สะสมในดินกับปัจจัยที่ศึกษา..... 84

5.7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสี (Zn) สะสมในดินกับปัจจัยที่ศึกษา..... 85

5.8 สัดส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ในผักคะน้าและดินกำแพงแสนภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน 85

5.9 สัดส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ในผักคะน้าและดินสระบุรีภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน 86

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

5.1 สัดส่วนสัมพัทธ์ของปริมาณสังกะสี (Zn) ในผักคะน้า (%) ของชุดดินกำแพงแสน เมื่อกำหนดให้ปริมาณที่วิเคราะห์พบในพืชรวมกับในดิน เท่ากับ 100..... 73

5.2 สัดส่วนสัมพัทธ์ของปริมาณสังกะสี (Zn) ในผักคะน้า (%) ของชุดดินสระบุรี เมื่อกำหนดให้ปริมาณที่วิเคราะห์พบในพืชรวมกับในดิน เท่ากับ 100 74

5.3 สัดส่วนสัมพัทธ์ของปริมาณแคดเมียม (Cd) ในผักคะน้า (%) ของชุดดินกำแพงแสนเมื่อกำหนดให้ปริมาณที่วิเคราะห์พบในพืชรวมกับในดิน เท่ากับ 100... 75

5.4 สัดส่วนสัมพัทธ์ของปริมาณแคดเมียม (Cd) ในผักคะน้า (%) ของชุดดินสระบุรี เมื่อกำหนดให้ปริมาณที่วิเคราะห์พบในพืชรวมกับในดิน เท่ากับ 100..... 76

5.5 ผลผลิตผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง, กรัม) ของชุดดินกำแพงแสน..... 78

5.6 ผลผลิตผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง, กรัม) ของชุดดินสระบุรี..... 78

5.7 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง, กรัม) กับสัดส่วน Zn/Cd ในผักคะน้าของชุดดินกำแพงแสน..... 79

5.8 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง, กรัม) กับสัดส่วน Zn/Cd ในผักคะน้าของชุดดินสระบุรี..... 79

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

ในช่วงสหัสวรรษใหม่ ปริมาณประชากรเพิ่มขึ้นจาก 6,000 ล้านคนก่อนสิ้น ค.ศ. 2000 ความต้องการขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับปัจจัยสี่ก็เพิ่มทวีขึ้นเช่นกัน การนำความรู้สมัยใหม่จากวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาใช้ในการเพิ่มผลผลิตทางด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มาก็ยังคงเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่อาจเกิดการขาดแคลนในอนาคต แม้ว่าการพัฒนาการทดแทนด้วยทรัพยากรธรรมชาติการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ได้เกิดขึ้นมากก็ตาม

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญยิ่งในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ คุณค่าของน้ำขึ้นอยู่กับความสามารถของมนุษย์ในอันที่จะนำมาใช้ให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ได้แก่ บริโภคอุปโภคในชุมชน ทางกสิกรรม ปศุสัตว์ สุนทรียภาพ คมนาคม ผลิตกำลังไฟฟ้า กำลังน้ำและอื่น ๆ สำหรับชุมชนเมืองของไทยในปัจจุบัน โดยประมาณคนไทยใช้น้ำวันละ 50 – 500 ลิตรต่อคน (ฉัตรไชย, 2539) อัตราการใช้น้ำแตกต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับฐานะทางเศรษฐกิจของ ผู้ใช้น้ำและฤดูกาล ปัญหามลพิษจากน้ำเสียชุมชนจึงเป็นปัญหาใหญ่ในเมืองที่มีความเจริญสูงโดยเฉพาะในกรุงเทพฯ ในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 7 (พ.ศ. 2535 – 2539) ได้เริ่มก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนรวม ในหลายเมือง เช่น กรุงเทพ เชียงใหม่ หาดใหญ่ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเริ่มต้นการแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำ

การจัดการมลพิษทางน้ำสามารถกระทำได้โดยการควบคุมให้แหล่งน้ำมีสารพิษปนเปื้อนละลายอยู่ในระดับต่ำสุด ตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามระบบกำจัดน้ำเสียจากชุมชน ย่อมมีกากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดเสมอ ปัจจุบันได้มีทางเลือกในการกำจัดกากตะกอนโดยนำไปใช้ในการเกษตร จึงมีความน่าสนใจว่ามลพิษจากกากตะกอนอาจเพิ่มขึ้นในพื้นที่การเกษตร ส่งผลเป็นอันตรายต่อสัตว์และพืช และในที่สุดจนปนเปื้อนมาทางอาหารสู่การบริโภคของมนุษย์ การใช้กากตะกอนในพื้นที่การเกษตรมีทั้งผลดีและผลเสียหากการจัดการไม่เหมาะสม คุณค่าของกากตะกอนในแง่การเจริญเติบโตของพืชพิจารณาถึงอินทรีย์วัตถุที่ประกอบด้วย ธาตุอาหารหลัก ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส และจุลธาตุอาหาร เช่น สังกะสี เมื่อนำกากตะกอนมาใช้ในการปรับปรุงดินนั้น อัตราในการใช้กากตะกอนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโดยประเมินจากปริมาณไนโตรเจนในกากตะกอนที่พืชสามารถดึงดูดไปใช้ประโยชน์ได้และปริมาณความต้องการไนโตรเจนของพืชเอง (Water Pollution Control Federation, 1988)

ในขณะเดียวกัน ผลเสียที่มีโอกาสต่อในพื้นที่การเกษตร เมื่อมีการเติมกากตะกอนก็เป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่กากตะกอนมีโลหะหนักปะปนอยู่โดยโลหะหนักที่สำคัญซึ่งปนเปื้อนได้แก่ ทองแดง (Cu), นิกเกิล (Ni), ปรอท (Hg), ตะกั่ว (Pb), เหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn) ซึ่งรวมถึงสังกะสี (Zn) และแคดเมียม (Cd) (Greenland และ Hayes , 1981 ; อรวรรณ, 2529)

สังกะสี (Zn), และแคดเมียม (Cd) สามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ความเป็นพิษของโลหะหนักในดินได้ โดยที่ความสัมพันธ์ของโลหะทั้งสองในรูปอัตราส่วน Zn / Cd ควรมีค่ามากกว่า 200 (Greenland และ Hayes, 1981) และ 100 (Miller et al.,1995) สำหรับกากตะกอนที่ใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมและอาหารสัตว์ที่ปลอดภัยจากโลหะหนักตามลำดับ อีกทั้งสังกะสี (Zn) ในแสดงพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นตามปริมาณสังกะสีที่ถูกปลดปล่อยจากกากตะกอน ณ ระดับต่าง ๆ อย่างชัดเจน ทั้งในดินและส่วนบริโภคได้ของผักคะน้า (อรรณพ, 2535) ความสัมพันธ์ของสังกะสี (Zn) และ แคดเมียม (Cd) ในเชิงลักษณะสมบัติทางเคมีที่คล้ายคลึงกันมาก แคดเมียม (Cd) จึงมีพฤติกรรมคล้ายกับ สังกะสี (Zn) ทั้งการดูดดึงและปฏิกิริยาต่าง ๆ ในพืช (Mengel และ Kirkby, 1982) อาศัยความสัมพันธ์ของโลหะหนักทั้งสอง นำมาใช้ประโยชน์ในการศึกษาการใช้ปุ๋ยที่สังกะสี (Zn) ลดความเป็นพิษของแคดเมียม (Cd) ในการปลูกข้าวสาลี พบว่าปริมาณ สังกะสี (Zn) เพียงพอในดินสามารถลดการดูดดึงแคดเมียม (Cd) ในพืชได้ (Oliver et al., 1994) นอกจากนี้การใส่ปูนลงดิน เพื่อปรับ pH ให้สูงขึ้น เป็นการช่วยลดการสะสมแคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) ในพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Siriratpiriya et al., 1985 ; Smith, 1994)

ความสัมพันธ์ของสังกะสี (Zn) และ แคดเมียม (Cd) ในสินแร่ตามธรรมชาติมักพบว่า แร่สังกะสีมีอัตราส่วน Zn/Cd เท่ากับ 350 (Mengel และ Kirkby, 1982) และมีการแนะนำอัตราส่วน Zn/Cd ในกากตะกอนควรมากกว่า 200 จนถึง 1000 ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวนี้จะส่งผลให้ความเป็นพิษของสังกะสี (Zn) ที่มีต่อพืช เกิดขึ้นก่อนที่แคดเมียม (Cd) ที่มีการสะสมในพืชจะไปแสดงความเป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์ สำหรับการศึกษาของ Miller et al., (1995) พบว่าการใช้ประโยชน์ของกากตะกอนที่มีปริมาณแคดเมียม (Cd) เกิน 0.5 kg/ha ทำให้ผลผลิตของหญ้า Alfalfa มีอัตราส่วน Zn/Cd ต่ำกว่าค่าที่ยอมให้มีได้ในอาหารสัตว์ ซึ่ง Chaney (1983) ได้แนะนำไว้ที่ 100 (อ้างตาม Miller et al., 1995) นอกจากนี้แล้วสังกะสี (Zn) มีประโยชน์เป็นธาตุอาหาร Cd เป็นพิษ แต่ Zn อยู่ในตารางธาตุกลุ่มเดียวกับ Cd ซึ่งมีลักษณะสมบัติทางเคมีที่คล้ายคลึง Cd จึงแสดงพฤติกรรมการดูดดึงในพืชได้คล้ายกันด้วย (Neill , 1993)

การใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนในพื้นที่การเกษตรนับว่ามีข้อคำนึงถึงหลายเหตุผลด้วยกันโดยเฉพาะโลหะหนัก ที่อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษในพืช และยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชได้ นอกจากนี้พืชที่สะสมโลหะหนัก อาจเคลื่อนย้ายเข้าสู่สายใยอาหาร (food web) ผ่านต่อไปยังสัตว์และคนได้ โดยทั่วไปการใช้กากตะกอนซ้ำๆ ในพื้นที่ สามารถนำไปสู่การสะสมและ

ปนเปื้อนของโลหะหนักในดินเพื่อการเกษตรจากกากตะกอน แม้ ณ ระดับความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ดังนั้นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินปริมาณโลหะหนัก ระดับที่ยอมรับได้ในดินเมื่อเติมกากตะกอนนั้นจึงซับซ้อนต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของโลหะหนักต่อพืชที่มีความแปรเปลี่ยนตามทั้งดินและพืชประกอบกับโลหะหนักมีการกระจายตัวในดิน โดยที่อิออนของโลหะหนักจะมีการกระจายตัวขึ้นอยู่กับกระบวนการและปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น การตกตะกอน การละลาย การซึมซับ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ตลอดจนสถานะของลักษณะสมบัติดิน เช่น สภาพความเป็นกรด – ด่าง ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก อุณหภูมิ และลักษณะเนื้อดิน ฯลฯ ดังนั้น การจัดการเกี่ยวกับกากตะกอน จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงโลหะหนักที่ปนเปื้อนร่วมกับลักษณะสมบัติของดิน (อรวรรณ, 2532)

การเติมกากตะกอนลงสู่ดินมากกว่าหนึ่งครั้งในพื้นที่เดิม แม้ว่าจะคำนึงถึงประโยชน์จากกากตะกอนที่เป็นแหล่งธาตุอาหารและช่วยปรับปรุงดิน แต่ก็ต้องคำนึงถึงชนิดและปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ด้วย เนื่องด้วยว่าการเติมกากตะกอนซ้ำลงไปในดิน เท่ากับเป็นการเพิ่มโลหะหนัก ผลการศึกษาการสะสมโลหะหนักในการเติมกากตะกอนซ้ำทุกปี เป็นระยะเวลา 5 ปี พบว่า เฉพาะปีแรกเท่านั้น ที่มีการสะสมแคดเมียม (Cd) ปริมาณสูงในพืช ส่วนในปีต่อ ๆ ไป มีการสะสมน้อยลง (Gardiner et al., 1995) ดังนั้น การทิ้งช่วงเวลาในการเติมกากตะกอน อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับรูปทางเคมีของโลหะที่พืชอาจใช้ประโยชน์ได้ (available metal) กับลักษณะสมบัติของดิน ที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาด้วยกิจกรรมต่าง ๆ ในดินแล้วส่งผลให้การสะสมโลหะหนักในดินและพืชเปลี่ยนแปลงไป การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่จะได้คำตอบในทางปฏิบัติที่สร้างความมั่นใจเกี่ยวกับความปลอดภัย โดยพิจารณาถึงการสะสมของแคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) ทั้งในดินและพืช ภายใต้เงื่อนไขการทิ้งช่วงเวลาที่แตกต่างกันในการเติมกากตะกอนครั้งที่สอง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบผลของการทิ้งช่วงระยะเวลาในการเติมกากตะกอนต่อปริมาณแคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) ที่สะสมในดินและผักคะน้า
2. เพื่อเปรียบเทียบผลของอัตราการเติมกากตะกอนต่อผลผลิตของผักคะน้าที่มีความแตกต่างในการทิ้งช่วงระยะเวลาการเติมกากตะกอน
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) ในดิน

บทที่ 2
การตรวจสอบเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การใช้กากตะกอนปรับปรุงดิน

1.1 ความหมายประเภทและองค์ประกอบของกากตะกอน

กากตะกอน มีความหมายทั่วไปตามคำจำกัดความในทางเคมีและเทคโนโลยีของน้ำ (Tolgyessy, 1993) ว่าเป็นของแข็งแขวนลอย (กากตะกอนแห้ง) ที่เกิดจากช่วงการกำจัดน้ำเสีย และการทำให้น้ำบริสุทธิ์ กากตะกอนโดยทั่วไปมีสมบัติไม่คงที่ กากตะกอนมีลักษณะเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็ง หลังจากผ่านการรีดน้ำ (dewatering) กากตะกอนจะเป็นของแข็ง กากตะกอนยังรวมถึงตะกอนที่ก้นแม่น้ำ, เขื่อน และทะเลสาบ

1. กระบวนการกำจัดขั้นต้น (primary treament process) ขั้นนี้จะกำจัดของแข็งและสารแขวนลอย (suspended solid) โดยการปล่อยให้ของแข็งตกตะกอนลงไปด้วยแรงดึงดูดของโลก (gravitation) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ออกจากน้ำทิ้ง ตะกอนที่แยกออกจากก้นถังตกตะกอน เรียกว่า primary sludge มีการกำจัดเอาของแข็งที่ลอยน้ำได้โดยการดักด้วยตะแกรง แต่ไม่สามารถกำจัดสารที่ละลายในน้ำ (dissolved minerals)

2. กระบวนการกำจัดขั้นที่สอง (secondary treatment process) ขั้นนี้เป็นการกำจัดสารแขวนลอยขนาดเล็กและอินทรีย์สาร ซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย หรืออนุภาคคอลลอยด์ มีการใช้กระบวนการทางชีววิทยา อาศัยหลักการสลายตัวของสารอินทรีย์ โดยปฏิกิริยาชีวเคมีของแบคทีเรีย อาจใช้ activated sludge หรือ trickling filters ซึ่งใช้แบคทีเรียเป็นตัวทำลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง แบคทีเรียเหล่านี้สามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์จากน้ำ และน้ำอาจถูกกระบวนการ activated sludge process โดยการผ่านน้ำเข้าไปยังบ่อที่มีการกวนหรือเพิ่มฟองอากาศลงไปจุลินทรีย์ในน้ำจะเจริญได้อย่างรวดเร็วและจะกำจัดอินทรีย์สารในน้ำ ตะกอนที่แยกออกจากชั้นนี้ เรียกว่า secondary sludge

การแบ่งประเภทกากตะกอน (sludge classification) (Tolgyessy, 1993)

1) fresh primary sludge มักมีโครงสร้างเป็นเม็ดเล็ก ๆ ประกอบด้วย สารที่ไม่ละลายน้ำ สีของกากตะกอน มีสีน้ำตาลปนเหลือง สีเหลือง หรือสีเทา

2) secondary (activated) sludge มีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นบาง ๆ (flaky structure) ประกอบด้วยน้ำอย่างน้อย 98%

ในช่วงการตกตะกอนอนุภาคของกากตะกอนจะจับตัวกันเป็นก้อน และมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ลักษณะของกากตะกอนในขั้นนี้ ขั้นเก็บระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ สีของกากตะกอนเป็นสีน้ำตาลจนเข้ม น้ำตาลปนแดง และมีกลิ่นคล้ายดิน

3) putrefactive sludges (กากตะกอนที่เน่าเสีย) เป็นอินทรีย์สารที่ง่ายแก่การย่อยสลายในขณะที่ non-putrefactive sludges เป็นอนินทรียสารพวกแร่

secondary sludge ที่ผ่านการตกตะกอนในถัง ถูกดูดไปที่ถังตะกอนขั้นแรก การรวมของสองตะกอนดังกล่าวเรียกว่า กากตะกอนผสม (mixed sludge) ซึ่งมี primary sludge อยู่มากกว่าทั้ง primary sludge และ mixed sludge จะเรียกว่า กากตะกอนดิบ (raw sludge)

1.2 <u>การบำบัดกากตะกอน</u> (sludge stabilization)

อินทรีย์สารในกากตะกอนเน่าเสีย (putrefactive sludge) ถูกการย่อยทางชีวภาพในขั้นตอนการเก็บ ซึ่งมีข้อเสียทางสุขลักษณะ ดังนั้น จึงต้องการทำให้กากตะกอนเกิดการเสถียร (stable)

การบำบัดกากตะกอน เป็นกระบวนการย่อยสลายโดยจุลชีพ และการดึงดูดไปใช้เป็นประโยชน์ของพืช ในทางปฏิบัติจะนำกากตะกอนมาทำการหมักภายใต้สภาวะมีอากาศ (aerobic) หรือสภาวะไร้อากาศ

ในการบำบัดกากตะกอนในสภาวะมีอากาศ (aerobic sludge stabilization) สารประกอบอินทรีย์บางชนิดถูกย่อยสลายในก๊าซ CO_2 และน้ำ ไนโตรเจนอินทรีย์ถูกปลดปล่อยในช่วงการหมักโดย hydrolytic process ในตอนแรกจะมีรูปของแอมโมเนียซึ่งจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรทต่อไป

ส่วนการบำบัดกากตะกอนสภาวะไร้อากาศ (anaerobic sludge stabilization) อินทรีย์สารที่ซับซ้อน (โปรตีน, ไขมัน, ไกลซีน) จะถูกย่อยสลายด้วยกิจกรรมของแบคทีเรียให้เป็นสารประกอบที่ไม่ซับซ้อน (กรดไขมันที่ระเหยปนกับไอน้ำ) ซึ่งจะเป็นสารตั้งต้นให้ก๊าซแบคทีเรียที่ย่อยสลายสภาวะไร้อากาศให้ก๊าซมีแทน (anaerobic methane bacteria) สารประกอบดังกล่าวจะถูกย่อยเป็นสารประกอบที่โครงสร้างง่าย ๆ (CH_4, H_2O) และมีการปล่อยก๊าซที่เรียกว่า ก๊าซชีวภาพ (biogas) ไนโตรเจนเป็นอินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปของแอมโมเนีย กากตะกอนนี้จะมีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนกลมสีดำมีกลิ่นคล้ายทาร์ (tar) เมื่อนำเอามาเผา

อัตราส่วนอินทรีย์สารกับอนินทรีย์สารมีอัตราส่วนประมาณ 1:1 ในกากตะกอนที่ย่อยสลายในขณะที่กากตะกอนดิบ มีอัตราส่วน 2:1 เมื่อผ่านการบำบัดกากตะกอนสภาวะ

ไร้อากาศ anaerobic sludge stabilization กากตะกอนแห้งจะมีน้ำหนักลดลง 45-65% ส่วนของเหลวที่เรียกว่า น้ำกากตะกอน (sludge water) มีค่า BOD_5 สูงถึง 2,000 mg/l ภายใต้สภาวะปกติมีความเป็นไปได้ที่คาดว่า 1 ลิตรของน้ำกากตะกอน (sludge) ต่อคนต่อวัน (Tolgyessy, 1993)

องค์ประกอบของกากตะกอน

ส่วนประกอบทางเคมีของกากตะกอน ในกระบวนการกำจัดขั้นต้นและขั้นที่สองที่ผ่านการบำบัดในสภาวะไร้อากาศ น้ำหนักแห้งของ primary sludge อยู่ในช่วง 4-8% (ใน mixed sludge 3-5%), digested sludge 7-13% และ activated sludge สูงถึง 2% (Tolgyessy, 1993)

สารประกอบที่เป็นหลักสำคัญในกากตะกอน คือโปรตีน ซึ่งมีมากใน activated sludge เมื่อเกิดการย่อยสลายจะปลดปล่อยแอมโมเนีย ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัส ในกากตะกอนได้นำมาประมาณการและประเมินผลถึงคุณค่าทางปุ๋ย จากแนวความคิดเห็นในส่วนประกอบที่สำคัญในแง่ ธาตุอาหารที่พืชจะได้รับประโยชน์

ส่วนสารประกอบอนินทรีย์ที่พบทั่วไปในกากตะกอน คือ ซิลิคา (SiO_2)

ความเป็นด่าง (alkalinity) ของกากตะกอนจากน้ำเสียชุมชนมีส่วนประกอบจากความเข้มข้นของแคลเซียม (calcium) และแมกนีเซียม ไบคาร์บอเนต (magnesium bicarbonates)

กลิ่นของกากตะกอนเป็นผลมาจากส่วนประกอบทางเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบภายใต้ผลกระทบของกระบวนการทางกายภาพ, เคมี, ชีวเคมีหรือชีวภาพ ส่วนประกอบของกากตะกอน เป็นตัวสำคัญในการประเมินถึงแหล่งกำเนิดของกากตะกอน และวิธีที่ใช้ในกระบวนการเกิดกากตะกอน

ในกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย (กรณีตัวอย่างชุมชนห้วยขวาง) นั้น ใน 1 ตัน กากตะกอนแห้ง มีธาตุอาหารหลักของพืช คือ ไนโตรเจน (N) 19.24 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส (P) 245.8 กรัม โปแตสเซียม (K) 440 กรัม และประมาณการว่าจะมีกากตะกอนแห้ง 360 ตันต่อวัน โดยเฉลี่ยกากตะกอนแห้ง 60 กรัม ต่อคนต่อวัน (อรวรรณ, 2532)

1.3 ประโยชน์ของการใช้กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

ได้แก่ การปรับปรุงลักษณะสมบัติทางกายภาพ, ปรับปรุงดิน เพื่อเพิ่มผลผลิต การใช้ประโยชน์ของกากตะกอนมีความเป็นไปได้ขึ้นกับเทคโนโลยีของโรงบำบัดน้ำเสีย (Tolgyessy, 1993) ที่มีชนิดของน้ำเสียเฉพาะเจาะจง

กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนสามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยในทางการเกษตรได้ โดยดำเนินการขนย้ายและนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในรูปกากตะกอนเหลว, (liquid sludge) กากตะกอนที่ผ่านการย่อย (Digested sludge) หรือกากตะกอนที่รีดน้ำออก (dewatered sludge) กากตะกอนที่รีดน้ำออกไม่เหมาะเป็นปุ๋ย เนื่องจากมีไนโตรเจนมากเกินไป ในขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัสและโปแตสเซียมต่ำ ดังนั้น digested sludge ที่ได้รับการผสมกับ พีต (peat) หรือดิน เป็นการเพิ่มธาตุอาหารที่ยังขาดไป

กากตะกอนแห้งมีส่วนประกอบของโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต วิตามินและเกลือแร่ เหมาะที่จะเป็นตัวเติมในอาหารสัตว์ (food additive) เช่น หญ้าแห้ง (plant fodder) ส่วนใหญ่การปรับปรุงดินด้วยกากตะกอนก็เพื่อเพิ่มผลผลิตของพืช กากตะกอนอาจกระทำในลักษณะสารปรับปรุงดิน (soil conditioner) ซึ่งอาศัยคุณค่าของอินทรีย์วัตถุที่มีความสนใจต่อความบกพร่องของโครงสร้างดินที่เป็นผลมาจากการทำฟาร์มที่ทำมานาน โดยเฉพาะดินทรายและมี OM อยู่น้อยมาก การใช้ประโยชน์ในกากตะกอนปริมาณมาก ๆ อาจจะเป็นประโยชน์ในกรณีนี้ ด้วยอัตราเติมปกติ โดยเฉพาะ liquid sludge อาจมีผลกระทบเล็กน้อย (Royal Comission on Enviromental Pollution, 1979)

Pollution Contral Federation (1988) ได้สรุปรวมผลกระทบของกากตะกอนต่อดินนี้ อินทรีย์วัตถุในกากตะกอนสามารถมีผลกระทบได้ลึกถึงคุณสมบัติของกายภาพของดิน ลักษณะธรรมชาติทางกายภาพของดิน ผลที่เกิดส่วนใหญ่เกิดกับ bulk density aggregation porosity และการกักเก็บน้ำ (retention) Kladivko และ Nelson (1979) และ May et al. (1973) แสดงให้เห็นว่า กากตะกอนและปุ๋ยหมักที่ได้รับจากกากตะกอนลด bulk density ของดิน การลดลงของ bulk density เป็นผลจากการคืนตัวของดินน้อยลง และให้สภาพแวดล้อมเป็นประโยชน์ต่อการเจริญของราก การเพิ่มขึ้นของการจับตัวของเม็ดดิน (soil aggregation) หรือความคงตัวของดิน เป็นรายงานที่ได้จาก Epstein et al. (1976) และ Wei et al. (1985). การเพิ่มขึ้นของ aggregate stability เป็นผลดีในการช่วยลดการพังทลายของดิน (erosion) จะมีการสูญเสียตะกอนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การลดลงดังกล่าวอาจมีผลมาจากการเพิ่มการกรองของน้ำ หรือเนื่องมาจากการปรับปรุง porosity และ aggregation และการลด bulk density

ลักษณะสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ของดินเกี่ยวกับระบบของดินกับน้ำ Epotein (1976) และ Wei et al. (1985) แสดงให้เห็นว่า การกักเก็บน้ำและ hydraulic conductivity (ความสามารถในการไหลของน้ำ)เพิ่มขึ้นด้วยการเติมกากตะกอนการปรับปรุงเหล่านี้มีแนวโน้มให้น้ำที่จำเป็นแก่พืช โดยเฉพาะในช่วงขาดแคลนน้ำ

1.4 ผลดีของการทำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์

การใช้กากตะกอนเพื่อเพิ่มผลผลิตของพืช

มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและผลผลิตของพืช ปัจจัยเหล่านี้รวมไปถึงดิน, ภูมิอากาศ, ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อพืช การจัดการ ซึ่งรวมถึงการกำจัดศัตรูพืชและการชลประทาน และความผันแปรของพืชเอง

ภูมิอากาศในฤดูใบไม้ร่วงและฤดูหนาว การใช้กากตะกอนใน 2 ฤดูนี้จะช่วยลดการสูญเสียไนโตรเจน เนื่องจากการชะล้าง (leaching)

อรรณพ (2535) ได้แสดงให้เห็น ผลผลิตผักคะน้า และผักกาดหอม ในฤดูเก็บเกี่ยวที่สอง ผลผลิตมีแนวโน้มของตำรับทดลองที่เติมกากตะกอนร่วมกับธาตุอาหาร หรือเฉพาะกากตะกอนมีค่าสูงกว่า ตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยเคมีร่วมกับธาตุอาหาร จะเห็นได้ว่า กากตะกอนมีศักยภาพเท่าเทียมกับปุ๋ยเคมี และอินทรีย์สาร ซึ่งมีการปลดปล่อยธาตุอาหารเป็นไปอย่างช้า ๆ โดยอาศัยกิจกรรมจุลินทรีย์อื่นได้ต่อเนื่อง และยาวนานกว่าปุ๋ยเคมี (อรวรรณ, 2532) ศิราณี (2535) ได้รายงานว่า ผักคะน้า ผักกาดหอม ผักกวางตุ้ง และผักบุ้งจีน จะมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น โดยมีผลผลิตเพิ่มขึ้นเมื่อใส่กากตะกอนลงดิน และผลผลิตของผักคะน้า และผักกวางตุ้งจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใส่กากตะกอนลงดินเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วน 1,600 กิโลกรัมต่อไร่เป็น 3,200 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งสอดคล้องกับอรวรรณ (2529) ที่พบว่าผลผลิตของผักคะน้าที่เพิ่มขึ้นตามอัตราเติมกากตะกอน และอรวรรณ (2533) ก็พบว่าผลผลิตของผักกาดหอมที่เติมกากตะกอนไม่แตกต่างกับการเติมปุ๋ยเคมี กากตะกอนสามารถนำไปใช้ประโยชน์กับเศษวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ทำให้ผลผลิตผักคะน้าเท่าเทียมกับปุ๋ยเคมี สูตร 25 – 7 - 7 อัตรา 95 กิโลกรัม/ไร่

1.5 ผลเสียและความเสี่ยงของการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์

กากตะกอนประกอบด้วย ส่วนที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมในกากตะกอนมีอยู่ 3 ส่วน คือ โลหะหนัก, มลสารอินทรีย์ และจุลชีพที่ก่อให้เกิดโรค ในที่นี้จะเน้นถึงการอธิบายของโลหะหนักโดยเฉพาะ

โลหะหนัก ถูกนิยามว่า เป็นธาตุในตารางที่มีความหนาแน่นสูงมากกว่า 5-6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Wild อ้างถึงใน Tan, 1994) หรือธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป โดยทั่วไปเป็นธาตุซึ่งอยู่ในตารางธาตุที่เลขเชิงอะตอม (atomic number) ในช่วง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 โดยทั่วไปแล้ว ในดินปกติมีธาตุ เช่น แคดเมียม ตะกั่วและปรอท โดยเฉลี่ยประมาณ 0.5 ppm Cd 20 ppm Pb, 0.1 ppm Hg หากกากตะกอนที่นำใช้กับดินแล้วทำให้ปริมาณธาตุดังกล่าวมีค่าสูงกว่าระดับปกติในดินเกิน 2 เท่า ก็จะเกิดความเป็นพิษจากโลหะหนัก

นั้นได้ (ศุภมาศ, 2540) โลหะหนักในกากตะกอนได้มาจากแหล่งต่าง ๆ เช่น บ้านเรือน อุตสาหกรรมขนาดเล็ก ๆ และน้ำไหลบ่าจากถนน (road runoff) ที่มีการไหลของน้ำเสียลงสู่ระบบท่อระบายน้ำ แหล่งสำคัญของโลหะหนักคือ น้ำทิ้งจากชุมชน

แคดเมียม ก่อให้เกิดความเป็นพิษทั้งในพืช สัตว์ และมนุษย์ ในพืชจะเกิดอาการคลอโรซีส ขึ้น เนื่องจากกลไกของเหล็กถูกรบกวนจากแคดเมียม และหากมนุษย์บริโภคพืชที่มีปริมาณแคดเมียมสูงเกิน 3 ppm เป็นระยะเวลานานจะเกิดความเป็นพิษของแคดเมียมในร่างกาย (Mengel และ Kirkby, 1982) ในอดีตได้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนัก แคดเมียมในนาข้าวที่ประเทศญี่ปุ่น อันตรายของแคดเมียมก็คือ เมื่อแคดเมียมสะสมในเมล็ดข้าว ซึ่งถือว่าเป็นข้อแตกต่างจากจุลธาตุอื่น ๆ ปริมาณของแคดเมียมทำให้ป่วยเป็นโรค “อิโต-อิไต” ได้ แคดเมียมในข้าวที่ยังไม่ขัดสีมีค่า 34 ppm และมวลแห้งมีค่า 0.5 ppm ในข้าวขาว ซึ่งสาเหตุของโรคดังกล่าวมาจากการกินข้าวและดื่มน้ำที่มีแคดเมียมปะปนอยู่ อาการของโรคนี้จะเกิดกับผู้ป่วยสตรีวัยกลางคนที่มีลูกแล้วเป็นส่วนใหญ่ โดยจะเป็นโรคกระดูกนิ่ม (osteomalacia) ร่วมกับโรคไตและมีโปรตีนยูเรียสูง (ศุภมาศ, 2540)

แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางระบบหายใจและทางผิวหนัง การที่ได้รับสารโดยผ่านระบบทางเดินอาหารนั้น แคดเมียมจะถูกดูดซึมได้ประมาณ 8% อยู่ในรูปของ Cd^{2+} ซึ่งจะเข้าสู่กระแสโลหิตไปสะสมที่ไต ตับ และกระดูก ตลอดจนเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทำให้มีการบวม (hypertrophy) ของไตและหัวใจ นอกจากนี้ แคดเมียมยังทำให้ความดันโลหิตสูงอีกด้วย (ไมตรี, 2531 อ้างถึงใน อรรณพ, 2531) และกลไกของสารแคดเมียมซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ คือ แคดเมียมจะยับยั้งการทำงานของระบบเอนไซม์ โดยก่อกวนการทำงานของเอนไซม์และโปรตีนที่มีโลหะประกอบ (metalloprotein, metallo-enzyme) และฟอสโฟไลปีด (phospholipid) (ศุภมาศ, 2540)

แคดเมียมและสังกะสี มีลักษณะทางคุณสมบัติคล้ายคลึงกันมาก แคดเมียมอยู่ติดกับสังกะสีในตารางธาตุ เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายและสะสมอยู่ในร่างกาย ทำให้ปริมาณการสะสมเพิ่มขึ้นกับอายุ มีการประมาณการว่า คนทั่วไปที่มีอายุ 50 ปี จะมีแคดเมียมสะสมอยู่ในร่างกาย 10 mg ถึง 50-60 mg ขึ้นอยู่กับบริเวณที่อยู่อาศัย ส่วนเด็กที่เพิ่งเกิดใหม่มีแคดเมียมในร่างกายเพียง 1 μg การสะสมแคดเมียมในร่างกายที่มีปริมาณสูง ทำให้คนหรือสัตว์เป็นหมันและเป็นมะเร็งได้ (พิมล และชัยวัฒน์, 2539)

ความเป็นพิษของสังกะสีมีผลทำให้ลดการเจริญเติบโตของราก และขยายตัวของใบ พืชที่ได้รับพิษจากสังกะสีจะสูญเสียคลอโรฟิล และเกิดอาการคลอโรซีส (Mengel และ Kirby, 1982) พืชแต่ละชนิดแสดงอาการเป็นพิษต่อสังกะสีในระดับที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปจะถือว่าสังกะสีที่สกัดได้โดยกรดแอเซติก ในปริมาณเกิน 60 ppm เป็นระดับที่เริ่มเป็นพิษ ซึ่งดินในเขตเมืองอาจมีค่าสูงกว่านี้ (ศุภมาศ, 2540)

ความเป็นพิษของสังกะสีในสัตว์และมนุษย์ สัตว์ทดลองที่ให้อาหารที่มีปริมาณสังกะสีสูงพบว่า ระบบโลหิตนั้น มีความผิดปกติเกิดขึ้น และทำให้โรคโลหิตจาง สำหรับมนุษย์เมื่อได้รับเกลือสังกะสีที่ละลายในน้ำได้ดีในปริมาณมาก จะทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ร่างกายขาดน้ำ ปวดท้องรุนแรง ท้องเดิน และถ้าได้รับเกิน 45 กรัม จะเกิดพิษรุนแรง ทำให้ไม่รู้สึกตัว ถ่ายเป็นเลือด ปัสสาวะน้อย น้ำตาลในเลือดต่ำ และเสียชีวิตได้ การที่ได้รับโดยการสูดดม ซึ่งอยู่ในรูปไอสังกะสี หรือผงสังกะสี (zinc oxide) จะเกิดอาการปอดบวม มีไข้หนาวสั่น หายใจขัด ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ (Thienes และ Haley, 1980; พิมพรรณ, 2532 อ้างถึงใน อรรณพ, 2532)

ความเสี่ยงต่อสุขภาพในการใช้กากตะกอนปรับปรุงดิน เมื่อใช้กากตะกอนปรับปรุงดิน ดินจะกลายเป็นแหล่งที่อยู่ใหม่ของโลหะหนัก โลหะหนักอาจกระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ซึ่งเส้นทางการกระจายของโลหะหนักจากดินที่ปรับปรุงด้วยกากตะกอนไปสู่พืชและสัตว์ จนไปถึงมนุษย์ได้ในที่สุด

กระบวนการซึมซับ (sorption) จะยับยั้งการเคลื่อนที่ของโลหะออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่ในดินทรายที่พืชมีพีเอชต่ำ จะทำให้โลหะหนักถูกชะล้างลงไปในน้ำใต้ดิน ซึ่งจะเป็นปัญหาหากน้ำใต้ดินจำเป็นต้องนำมาใช้ และการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากน้ำใต้ดินขึ้นสู่น้ำบนผิวดิน ทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ หรือจำกัดการใช้ประโยชน์ของน้ำบนผิวดิน

การปนเปื้อนของโลหะในดินและน้ำ และในสายใยอาหารจะขยายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะในกากตะกอนที่ใช้, ชนิดดิน, ภูมิประเทศ, ภูมิอากาศ, การเพาะปลูกและสภาพค่าพีเอช

การประเมินความเสี่ยงถึงผลกระทบของโลหะที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเกิดจากการใช้กากตะกอนในระยะสั้น จะมีการพิจารณาโลหะที่มีความเสี่ยงต่ออาหารจำพวกพืช จากพืชที่เพาะปลูกด้วยการใช้กากตะกอนปรับปรุงดิน ในระยะยาว จะพิจารณาถึงผลกระทบของโลหะหนักในแง่ของการเคลื่อนที่, การถูกดูดจากพืช และความเสี่ยงต่อสุขภาพ ในการที่จะตัดสินว่าดินที่ใช้กากตะกอนปรับปรุงนั้น จะมีศักยภาพที่มีผลกระทบต่อสุขภาพไม่ควรเน้นพิจารณาเพียงเฉพาะกากตะกอนที่เป็นแหล่งปนเปื้อนในดินเท่านั้น แต่ควรพิจารณาถึงพื้นฐานของปริมาณโลหะที่มีอยู่เดิมแล้วในพื้นดิน ความรู้เกี่ยวกับการกระจายตัวของโลหะสู่สิ่งแวดล้อมอย่างไร เป็นการกระบวนการต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกระจายซึ่งเป็นประโยชน์ในการประเมินถึงศักยภาพของการปรับปรุงดินด้วยกากตะกอนที่เกี่ยวเนื่องกับการขนย้ายที่ของโลหะหนัก เช่น การที่ดินมีค่าพีเอชต่ำ, มีความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าต่ำ, ดินทรายที่ใช้กากตะกอนที่เกิดจากการย่อยสลายให้โลหะหนักย้ายที่ (migrate) ในอัตราที่สูง

Royal Commission on Environmental Pollution (1979) ได้ประเมินความเสี่ยงที่เป็นอันตรายต่อพืช, สัตว์หรือมนุษย์ในการเติมกากตะกอนที่มีโลหะหนัก หรือสารพิษอื่น ๆ ลงสู่ดิน โลหะหนักบางชนิดรวมถึง สังกะสี, ทองแดง และนิกเกิล มีความเป็นพิษต่อพืชสัมพันธ์

ความเข้มข้นที่ต่ำ ในสุขภาพของมนุษย์พิจารณาถึงโลหะก่อให้เกิดความเป็นพิษและสะสมในร่างกาย ตัวอย่างเช่น ปรอทและแคดเมียม มีความอันตรายสูง ปรอทสูญเสียไปจากดินด้วย วิธีทางชีวภาพโดยไม่มีการสะสม ปรอทมีในกากตะกอนในปริมาณเพียงเล็กน้อยและพืชไม่ดูดดึงไปใช้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเป็นพิษสูงต่อสัตว์และคน ปริมาณการใช้กากตะกอนจึงต้องมีขีดจำกัด แคดเมียมเป็นธาตุที่น่าสนใจมากที่สุด ซึ่งเป็นพิษสูงต่อมนุษย์และพืชสามารถดูดดึงได้ทันที ธรรมชาติของระดับแคดเมียมในดินมีค่าต่ำมาก หากได้รับเพิ่มเพียงเล็กน้อย ก็อาจมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลกระทบของโลหะหนักต่อพืช ในการใช้กากตะกอนมีความผันแปรทั้งในดินและพืช นอกจากนี้การรู้ถึงรูปทางเคมี (form) ของโลหะหนักที่มีในกากตะกอนและเส้นทางของโลหะหนักที่เปลี่ยนแปลงรูป (transform) ในดิน โลหะหนักอาจเกิดปฏิกิริยาในระหว่างโลหะหนักต่างชนิดกัน ตัวอย่างเช่น การดูดดึงแคดเมียมโดยพืชได้รับผลมากจากการมีอยู่ของสังกะสี และหากอัตราส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียมในดินมากเพียงพอ ความเข้มข้นของความเป็นพิษของแคดเมียมก็จะมีอันตรายน้อยลง แต่ปริมาณแคดเมียมมีมากเกินไปในดินหรือกากตะกอนจะเกิดการแข่ง (compensating) กับปริมาณสังกะสีในการเกิดความเป็นพิษต่อพืช

2. การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของโลหะหนักในดิน

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีโลหะหนักในดิน เป็นการศึกษาวิจัยถึงกระบวนการทางเคมี, ปฏิกิริยา, ชนิด และรูปของโลหะหนักโดยการคำนึงถึง การแพร่กระจายของโลหะ นั้นในสิ่งแวดล้อมที่ เกี่ยวพันกับรูปแบบทางเคมี (chemical form) และสภาวะทางกายภาพ (physical phases)

2.1 <u>กระบวนการทางเคมีในดิน</u>

ไอออนของโลหะในดินขึ้นอยู่กับกระบวนการและปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งมีผลต่อปริมาณโลหะที่แพร่กระจายโลหะในดิน มีดังต่อไปนี้

1) การตกตะกอนและการละลาย (precipitation and dissolution)
2) การซึมซับ และการชะละลาย (sorption and desorption)
3) การเกิดสารเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ (complexation with organic compounds)
4) การเกิดสารเชิงซ้อนกับสารอนินทรีย์ (complexation with inorganic compounds)

การตกตะกอนและการละลาย (precipitation and dissolution)

การตกตะกอน เป็นกระบวนการที่ไอออนของโลหะที่ละลายได้ทำปฏิกิริยาเคมีกับไอออนของโลหะอื่นที่ละลายได้ เกิดสารที่ละลายไม่ได้หรือตะกอน ส่วนการละลายเป็นกระบวนการย้อนกลับ โลหะเกิดการตกตะกอนกับสารประกอบต่าง ๆ เช่น ไฮดรอกไซด์, ซัลเฟต, ฟอสเฟต, คาร์บอเนต อื่น ๆ บางปฏิกิริยาการตกตะกอนมีความเสถียรมาก และไม่สามารถละลายได้อีก แต่บางปฏิกิริยาอาจเกิดการย่อยละลายเมื่ออยู่ในภาวะที่เอื้ออำนวยรูปการตกตะกอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการตกตะกอนน้ำอาจจะขนาดเล็กพอที่จะเคลื่อนที่ในสารละลายดินได้ ขนาดของรูปการตกตะกอนโลหะอาจแสดงถึงการเคลื่อนที่ได้หรือการเคลื่อนที่ไม่ได้

กรณีตัวอย่างของกากตะกอนและการละลายที่เสนอโดย ศุภมาศ (2540) ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของดินจะเปลี่ยนแปลงรูปการตกตะกอนของโลหะหนักในสภาพพีเอชที่เป็นกลาง โลหะจะอยู่ในสภาพ hydrated cation และทำตัวคล้ายกรดยกตัวอย่างสังกะสี ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$Zn^{2+}.(H_2O)_6 \rightleftharpoons Zn(OH)^{+}.(H_2O)_5 + H^{+} \qquad (1)$$

สมการนี้สามารถอธิบายได้ โดย acidity constant หรือ dissociation constant Ka ดังนี้

$$-\log Ka = pKa$$

$$\frac{[Zn(OH)^{+}.(H_2O)_5][H^{+}]}{[Zn^{2+}.(H_2O)_6]} = 10^{-7.6} = Ka = \text{constant} \qquad (2)$$

และ

$$\frac{[Zn(OH)^{+}.(H_2O)_5]}{[Zn^{2+}.(H_2O)_6]} = \frac{10^{-7.6}}{[H^{+}]} \qquad (3)$$

ที่ pH = 5.6 ซึ่งค่า $[H^{+}] = 10^{-5.6}$ แทนค่าดังกล่าวลงในสมการ

$$\frac{[Zn(OH)^{+}.(H_2O)_5]}{[Zn^{2+}.(H_2O)_6]} = \frac{10^{-7.6}}{10^{-5.6}} = 10^{-2} \qquad (4)$$

จะเห็นได้ว่าที่ พีเอช 5.6 ค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ของสังกะสี ในของเหลวหรือที่ตกตะกอนมีความเข้มข้นต่ำกว่าที่อยู่ในรูปไอออน 100 เท่า

เมื่อค่าพีเอช เท่ากับ ค่า pKa นั้น จากสมการจะเห็นได้ว่า ปริมาณแคตไอออนในส่วนที่ละลายได้ (ในรูป hydrated cation) ในสารละลายจะเท่ากับส่วนที่ตกตะกอน (ในรูป cation hydroxide) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ค่าพีเอช จะเป็นตัวกำหนดรูปของสังกะสีว่ารูปใดเป็นรูปส่วนใหญ่ในสารละลายขณะนั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การซึมซับและการคาย (sorption and desorption)

การซึมซับ (sorption) มีความหมายรวมถึง การดูดซับ (adsorption) และการดูดซึม (absorption)

การดูดซับ เป็นกระบวนการที่สารประกอบในสารละลายเข้ามายึดติดผิวของอนุภาค ของแข็ง ธรรมชาติของบริเวณพื้นผิวของสารประกอบเป็นการกำหนดความชอบของอนุภาคกับสารประกอบ เช่น อนุภาคดินเหนียวมีประจุเป็นลบทั่วอนุภาคอย่างถาวรสารประกอบที่มีประจุบวก ตัวอย่างเช่น ไอออนของโลหะ จะถูกดูดซับโดยอนุภาคดินเหนียวได้ในปริมาณมากกว่า ไอออนที่มีประจุลบ ออกไซด์ของเหล็กและอลูมินัม ไอดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมินัม สารดังกล่าวเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุเปลี่ยนแปลงตามพีเอช ไอออนของโลหะอาจถูกดูดซับที่พื้นผิวหน้าโดยปฏิกิริยาทางเคมี, การเกิดสารเชิงซ้อนหรือการดึงดูดทางไฟฟ้า ไม่เพียงแต่การดูดซับไอออนของโลหะ สารประเชิงซ้อนทั้งอนินทรีย์และอินทรีย์ก็อยู่ภายใต้กระบวนการนี้ด้วย

การดูดซึม เป็นกระบวนการที่สารประกอบในสารละลายเข้าไปยึดติดในหลืบของอนุภาคของแข็ง โดยการแพร่เข้าไปในช่องว่างภายใน หรือหลืบของแผ่นอนุภาคของแข็ง

การคาย เป็นกระบวนการที่สารที่ยึดติดกับอนุภาคของแข็งถูกปลดปล่อยออกมาสู่บริเวณแวดล้อม การคายจากพื้นผิวอนุภาคเกิดขึ้นได้ดีกว่าการคายจาก หลืบของอนุภาค

มีการวิจัยกันแพร่หลายแสดงให้เห็นถึง การซึมซับของโลหะหนักขึ้นกับพีเอชอย่างมากระดับพีเอชที่ต่ำ ไอออนของโลหะต้องแก่งแย่งตำแหน่งในการซึมซับที่พืชดูดโลหะไปใช้ประโยชน์ได้ (available sorption sites) กับโปรตอน และพบโลหะจำนวนมากในสารละลาย การซึมซับเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น แต่ก็มีผลต่อการเกิดไฮดรอกซีเชิงซ้อนและการตกตะกอน การซึมซับอาจมีผลต่อชักนำให้สารอนินทรีย์ หรือสารอินทรีย์ลิแกนด์ ที่เป็นส่วนประกอบอยู่บริเวณแวดล้อมเกิดกระบวนการย้อนกลับ และนำไปสู่การคายด้วย โลหะมีการแก่งแย่งตำแหน่ง ในการซึมซับทั้งกับชนิดโลหะที่ต่างกันและสารอื่น

การซึมซับโลหะหนักเกี่ยวพันกับคอลลอยด์และอินทรีย์ในดิน มีอนุภาคของสารดังกล่าวที่มีขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ได้ในระบบของดินส่วนที่หยุดเคลื่อนที่เกิดจากการซึมซับดังนั้นดินที่มีส่วนประกอบของอนุภาคดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็ก อลูมิเนียม และแมงกานีส ตลอดจนอินทรีย์วัตถุอยู่เป็นจำนวนมาก จะมีความสามารถในการซึมซับสูง และมีคุณสมบัติในการตรึงโลหะได้ดี

โลหะต่าง ๆ จะถูกดูดซับโดยอนุภาคดินเหนียวได้ในปริมาณมากน้อยต่างกัน ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวต่างชนิดกัน ย่อมมีลักษณะทางเคมีของพื้นผิวหน้า สำหรับการดูดซับที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนเท่ากันก็ตาม

ลำดับความชอบ (affinity sequence) ของอนุภาพดินในการดูดซับโลหะได้แสดงในตาราง 2.1 (Alloway (1990) อ้างใน ศุภมาศ (2540))

ตารางที่ 2.1 ลำดับความชอบ (affinity sequence) ของอนุภาพดินในการดูดซับโลหะ

ตัวดูดซับ	ความชอบจากมากไปน้อย
มนต์มอริลโลไนต์	Ca> Pb> Cu> Mg > Cd > Zn
	Cd = Zn > Ni
อิลไลต์	Pb > Cu > Zn > Ca > Cd> Mg
เคโอลิไนต์ (Na)	Pb > Ca > Cu> Mg > Zn > Cd
	Cd > Zn > Ni
เวอร์มิคิวไลต์และเคโอลิไนต์	Zn > Mn > Cd > Hg
ไฮดรัสออกไซด์ของเหล็ก	
อสัญฐาน	Pb > Cu > Zn > Ni > Cd > Co > Sr > Mg
ฮีมาไทต์	Pb > Cu > Zn > Co > Ni
เกอไทต์	Cu > Pb > Zn > Co > Cd
พีต (peat)	Pb > Cu > Cd = Zn > Ca

<u>การเกิดสารเชิงซ้อน</u>

การเกิดสารเชิงซ้อน เป็นกระบวนการที่ไอออนของโลหะรวมกับสารประกอบอนินทรีย์หรืออินทรีย์ หรือโลหะเหล็ก เช่น ลิแกนด์ที่ในหน้าตัดดินชั้นบน ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ , ไนเตรต , คลอไรด์ , ซัลไฟด์ , ฟอสเฟต , คอร์บอเนต และอื่น ๆ

โลหะที่มีประจุบวกทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ เช่น ฮิวมัส โปรตีน กรด อะมิโนและกรดอินทรีย์อื่น ๆ กลายเป็นอินทรีย์สารเชิงซ้อน สารอินทรีย์เชิงซ้อนมีหลายชนิด ทั้งที่ละลายอยู่ในน้ำอย่างอิสระและที่เกาะเกี่ยวอยู่กับอนุภาคดินเหนียว โดยปกติพวกที่มีโมเลกุลเล็กจะละลายน้ำ ไม่ตกตะกอนง่ายและจะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่าย และในทางกลับกันก็เป็นพวกที่จะถูกพัดพาไปหรือถูกชะละลายไปได้ง่ายอีกด้วย

โลหะที่มีประจุบวกทำปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์ เช่น ไฮดรอกไซด์ ในการเติมปูนลงไปในดินมาก ๆ เหล็กจะถูกเปลี่ยนให้เป็นรูปเหล็กไฮดรอกไซด์ ซึ่งละลายน้ำได้ยาก ไบคาร์บอเนต ไอออน (HCO^-_3) ซึ่งเกิดจากการแปรสภาพของปูนยังอาจเป็นปฏิปักษ์ (interfere) ต่อรูปทางเคมีของเหล็กอีกด้วย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) อลูมินัมไฮดรอกไซด์ เมื่อรวมตัวกับอนุภาคดินเหนียวเป็นสารเชิงซ้อนที่เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) จะประกอบด้วยอนุภาคดินเหนียวที่มีประจุเป็นลบกับอลูมินัมไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวกสารเชิงซ้อนดังกล่าว หากอยู่ในสภาพพีเอชต่ำ จะเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ความมากน้อยของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเข้มข้นระหว่างแคลเซียมกับโลหะเป็นสำคัญมากกว่าชนิด

ของอนุภาคดินเหนียว ถ้า pH สูง ความมากน้อยของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคดินเหนียวเป็นสำคัญมากกว่าอัตราส่วนของความเข้มข้นระหว่างแคลเซียมกับโลหะ

2.2 ปฏิกิริยาในดิน

1) ความเป็นกรดด่างของดิน pH ของดินที่เกิดขึ้นจะพิจารณาถึงสภาพกรดแฝง (potential acidity) หรือ exchangeable H หรือ adsorbed H ที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของคอลลอยด์เป็นสำคัญ ระดับสภาพกรดแฝงในดิน จะเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนระดับ pH ของดิน สำหรับสภาพกรดแฝงของดินจะมากน้อยแค่ไหนนั้นจะขึ้นอยู่กับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน หรือ C.EC. (cation exchange capacity) ของดิน ดังนั้นดินที่มี C.E.C. สูง เมื่อเป็นกรดก็จะมีสภาพกรดแฝงสูงไปด้วย ในดินที่เป็นกรดมาก ๆ มักมีโลหะหนักละลายอยู่ในน้ำในดินมาก หากปรับดินให้ pH สูงขึ้น โลหะหนักที่อยู่ในสภาพที่มีประจุบวก จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไฮดรอกไซด์หรือออกไซด์ที่ละลายน้ำยาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

เนื่องจาก C.E.C. ของดินขึ้นอยู่กับ pH เพราะดินที่มีประจุขึ้นอยู่กับ pH ปนอยู่ด้วยเสมอ ปริมาณสัมพันธ์ของประจุที่ขึ้นอยู่กับ pH นี้ มีแนวโน้มที่จะสัมพันธ์กับชนิดของอนินทรีย์คอลลอยด์มากกว่าปริมารณของอินทรีย์วัตถุ และปริมาณของอนุภาคดินเหนียวตามลำดับ สำหรับการเพิ่ม pH จาก 4.8 เป็น 7.0 กล่าวคือแร่ดินเหนียวพวก 1:1 จะมีสัดส่วนของประจุที่ขึ้นกับ pH สูงกว่าแร่ดินเหนียวพวก 2:1 แต่เมื่อ pH สูงขึ้นจาก 7.0 เป็น 8.0 ปริมาณของอินทรีย์วัตถุเป็นตัวควบคุมประจุที่ขึ้นอยู่กับ pH เป็นส่วนใหญ่ (ไพบูลย์, 2528)

2) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity หรือ C.E.C.)

ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน หรือของคอลลอยด์นั้น หมายถึง ปริมาณแคตไอออนทั้งหมดในดินหรือคอลลอยด์นั้นสามารถจะถูกดูดยึดไว้ได้ ค่า C.E.C. ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดของคอลลอยด์ดิน (soil colloid) ปริมาณของดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

ชนิดของคอลลอยด์ดินหรือแร่ดินเหนียวต่างชนิดกัน จะมี C.E.C. ต่างกันมากดินที่มีฮิวมัสมาก ทำให้มีค่า C.E.C. ของดินสูง และดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวสูงจะมี C.E.C. สูงกว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวที่น้อยกว่าสำหรับดินที่มีเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุสูงก็จะมีฮิวมัสมาก ทำให้มีค่า C.E.C. สูง

โลหะพวกแคตไอออนดูดยึดที่พื้นผิวดินเหนียว การชะละลายพวกแคตไอออนไม่สามารถทำได้ง่าย แล้วรากพืชก็สามารถจะดูดดึงแคตไอออนจากพื้นผิวของดินเหนียวไปใช้ประโยชน์ได้ สำหรับการแก้ความเป็นกรดของดิน การใส่ปูนลงไปในดิน Ca^{2+} จากปูนจะเข้าไปแทนที่ H^+ ที่ผิวเหนียว ส่วน H^+ ที่ถูกไล่ที่ออกมาก็จะทำปฏิกิริยากับ (OH^-) กลายเป็นน้ำ

การแทนที่ H^+ ด้วย Ca^{2+} เป็นปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange reaction) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

3) สภาวะออกซิเดชัน หรือรีดักชั่น

สภาพออกซิไดซ์ (oxidized state) ของเหล็ก แมงกานีส และทองแดงโดยปกติแล้วจะละลายน้ำได้ยากมาก โดยเฉพาะในระดับ pH ของดินทั่วไป เมื่อเทียบกับสภาพรีดิวซ์ (reduce state) ไฮดรอกไซด์ (หรือไฮดรัสออกไซด์) ของโลหะเหล่านี้ที่มีวาเลนซีสูง จะตกตะกอนได้แม้เมื่อมี pH ต่ำ ยกตัวอย่างเช่น เฟอริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ตกตะกอนเมื่อ pH ประมาณ 3.0 ในขณะที่เฟอรัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) ไม่ตกตะกอนจนกระทั่งถึง pH 6.0 หรือมากกว่า ปฏิกิริยาร่วมระหว่าง pH ของดินและสภาพออกซิเดชั่น หรือ รีดักชั่น เป็นตัวควบคุมปริมาณของโลหะในสารละลายดิน ถ้าดินเป็นกรดจัดและการระบายน้ำไม่ค่อยดี หรืออยู่ในสภาวะรีดักชั่น มักจะพบว่า มีเหล็กและแมงกานีสละลายออกมาจนถึงระดับที่เป็นพิษต่อพืช ซึ่งความเป็นพิษนั้นจะน้อยลงมาก หากดินกรดนั้นมีการถ่ายเทอากาศและการระบายน้ำดี (ไพบูลย์, 2528)

2.3 <u>รูปของโลหะในดิน</u>

รูปของโลหะในดิน จะอยู่ในรูปใดรูปหนึ่งหรือหลายรูป ขึ้นอยู่กับกระบวนการทางเคมี (chemical process) และปฏิกิริยาเคมี (chemical reaction)

การเคลื่อนย้ายของโลหะ (transportation) ขึ้นอยู่กับรูปของโลหะในดิน ซึ่งมีอยู่ 2 ส่วนใหญ่ คือ ส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (mobile fraction) และส่วนที่เคลื่อนที่ไม่ได้ (immobile fraction)

1) ส่วนที่เคลื่อนที่ได้ เป็นโลหะที่เกิดจากกระบวนการละลาย (solution) กระบวนการคาย (desorption) และกระบวนการทำปฏิกิริยาเชิงซ้อนทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ได้สารที่ละลายได้ (complexation)

2) ส่วนที่เคลื่อนที่ไม่ได้ เป็นโลหะที่เกิดจากกระบวนการตกตะกอน (precipitation) และกระบวนการซึมซับ (sorption)

2.4 <u>ชนิดของโลหะในดิน</u>

ชนิดของโลหะต่างชนิดกัน ปริมาณการละลายอาจจะแตกต่างกันด้วย เช่น สังกะสีอยู่ในสภาพละลายได้ ในปริมาณที่มากกว่าทองแดง (ศุภมาศ, 2540)

สำหรับแคตไอออนต่างชนิดกัน จะดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและถูกไล่ที่ออกจากผิวดินเหนียวโดยแคตไอออน ชนิดอื่น ๆ ได้ ยากและง่ายแตกต่างกันไปโดยอำนาจใน

การเข้าแทนที่ (replacing power) และความเหนียวแน่นในการดูดยึดของแคตไอออนที่ผิวดินเหนียว เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

$$Al^{3+}(H^{+}) > NH^{+}_{4} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+} > Na^{+} > Li^{+}$$

3. ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในกากตะกอนสู่ดินและพืช

ลักษณะสมบัติของดินมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะในดินโลหะสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่สารละลายดิน โดยทั่วไปเกิดขึ้นที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตรของชั้นหน้าตัดดิน ปริมาณของโลหะที่อยู่สารละลายดินมีมาก เท่ากับมีปริมาณรูปที่เป็นประโยชน์ (available form) มากด้วย ลักษณะสมบัติของดินที่สำคัญมีดังนี้

3.1 <u>ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)</u>

การซึมซับ (sorption) ของโลหะหนักขึ้นอยู่กับ pH เป็นอย่างมาก โดยทั่วไปการซึมซับจะเพิ่มขึ้นตาม pH ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือที่ระดับ pH ต่ำ จะพบโลหะจำนวนมากในสารละลายเป็นการเคลื่อนที่ของโลหะจำนวนมาก เมื่อ pH ต่ำลงกว่า 5 การเคลื่อนที่ของโลหะมีโอกาสเพิ่ม เนื่องจากผลของการเพิ่มโปรตอน (H^{+}) ที่ค่า pH สูงกว่า 7 โลหะหนักบางชนิดมีแนวโน้มกลายเป็นสารเชิงซ้อนไฮดรอกซี (hydroxy- complexes) ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการละลายของโลหะ ดังนั้น ความสามารถของการละลายของสารประกอบก็จะขึ้นอยู่กับ pH การละลายได้ของเหล็ก, แมงกานีส, ทองแดง, สังกะสีและโคบอลท์ มีความสัมพันธ์ทางลบอย่างใกล้ชิดกับการเปลี่ยนแปลงพีเอชภายในดิน กล่าวคือ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นการละลายได้ของธาตุเหล่านี้จะลดลงและตรงกันข้ามเมื่อมีพีเอชต่ำ จนอาจเป็นพิษได้เมื่อพีเอชต่ำกว่า 4.0 (ไพบูลย์, 2528)

3.2 <u>ปริมาณของอินทรีย์วัตถุ</u>

โลหะหนักซึมซับ (sorb) ในส่วนประกอบดินได้อย่างมาก เนื่องจากอินทรีย์วัตถุมีประจุลบอยู่เป็นจำนวนมาก โดยทั่วไปอินทรีย์วัตถุในดินมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าคอลลอยด์อื่น ๆ ตั้งแต่ 2-30 เท่า ในดินโดยทั่วไป ปริมาณของแคตไอออนที่ถูกดูดซับจะอยู่ในช่วงประมาณ 30-90% ของปริมาณที่ดินดูดซับได้ทั้งหมด นอกจากนี้อินทรีย์วัตถุยังมีส่วนที่เป็นประจุบวกอยู่บ้าง จึงสามารถดูดซับแคตไอออนได้อีกด้วย ความสามารถในการดูดซับดังกล่าวช่วยป้องกันไม่ให้โลหะถูกละลายสูญหายไปกับน้ำได้โดยง่ายจาก แคตไอออนเป็น H^{+} ถูกดูดซับ

เอาไว้ โอกาสที่ pH จะเปลี่ยนแปลงไปมากนั้นย่อมเกิดขึ้นได้ยาก ถ้าในดินนั้นมีอินทรีย์วัตถุสะสมในปริมาณที่เหมาะสม จึงทำให้โลหะออกสู่สารละลายดินน้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

3.3 ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำในดิน
(chemical composition of soil water)

พิจารณาถึงลิแกนด์ (ligand) ที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในกระบวนการเกิดสารเชิงซ้อนในขณะที่กระบวนการตกตะกอนก็น่าจะเกิดขึ้น และแข่งขันกับกระบวนการซึมซับ (sorption) อยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น การมีคลอไรด์ในสารละลายดิน เป็นการแสดงให้เห็นถึงโอกาสของความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะหนักบางชนิด โดยการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ เกลือคลอไรด์ส่วนมากละลายน้ำได้ง่าย และถูกดูดซับได้น้อย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

3.4 ศักย์รีดอกซ์ (redox potential)

สภาพออกซิเดชันของโลหะจะถูกกำหนดด้วยศักย์รีดอกซ์ ความแตกต่างในสภาพออกซิเดชันของรูปโลหะ มีพฤติกรรมทางเคมีที่แตกต่างกัน ในกรณีโครเมียม ที่สภาพออกซิเดชันเท่ากับ +6 เช่น โซเดียมไดโครเมต ($Na_2 Cr_2 O_7$) จะมีสภาพการละลายและความเป็นพิษได้มากกว่าโครเมียมที่สภาพออกซิเดชันเท่ากับ +3 เช่น โครเมียมซัลเฟต ($Cr_2(SO_4)_3$) (James และ Bartlett, 1983 อ้างถึงใน ศุภมาศ , 2540)

3.5 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity, C.E.C.)

C.E.C. ของดินวัดจากความหนาแน่นของประจุลบของดิน ในการกระทำของความสามารถของดินที่ดูดซับไอออนประจุบวก (แคตไอออน) ดังนั้น การที่มีค่า C.E.C. สูง จะสะท้อนให้เห็นถึงความจุของการซึมซับ (sorption) สูงในดินนั้น โอกาสที่แคตไอออนจะเคลื่อนที่ไปยังสารละลายดินได้ยาก

3.6 ลักษณะของเนื้อดิน (soil texture)

เนื้อดินสะท้อนให้เห็นถึงการกระจายขนาดอนุภาคดิน และปริมาณอนุภาคละเอียด (fine particle) ที่ชอบออกไซด์และดินเหนียว สารประกอบเหล่านี้เป็นสื่อที่สำคัญในการดูดซับ

(adsorption) ของโลหะหนักในดิน Li และ Shuman (1996) พบว่าในดินเนื้อหยาบ (coarse-textured soil) ที่ปนเปื้อนสูงของสังกะสีจากฝุ่นของปล่องไฟในเตาผิงอาจชักนำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสังกะสี

3.7 อุณหภูมิ

ปฏิกิริยาเคมีหลายอย่างขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปฏิกิริยาเคมีบางปฏิกิริยาจะเกิดความก้าวหน้าของปฏิกิริยาในอัตราที่สูง เมื่อได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดินอาจทำให้ความเหมาะสมในการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินและรากพืชแปรเปลี่ยนไป อีกทั้งการงอกของเมล็ดพืชและการเจริญเติบโตของพืชก็มีความสัมพันธ์อย่างมากกับอุณหภูมิของดิน อาจสรุปผลได้ว่าผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินสะท้อนให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพที่จะเกิดขึ้นกับกระบวนการทั้งฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพของดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

4. การสะสมของโลหะหนักในดินและพืช

4.1 การสะสมโลหะหนักในดิน

ปริมาณของโลหะที่ปนเปื้อนในดิน

แคดเมียมส่วนใหญ่ที่อยู่ในหินและดินมีความเข้มข้น 1 ppm หรือน้อยกว่านั้น (Royal Commission on Environmental Pollution, 1979) ในบางพื้นที่ของเมือง Derbyshire และ Mendips มีการย่อยสลายแร่ให้แคดเมียมสูงถึง 30 ppm และ แคดเมียมก็มีความสัมพันธ์กับสังกะสี พบในแร่ sphalerite และ smithsonite ซึ่งมีความเข้มข้นสูงในการถลุงแร่ (Davies, 1980) แคดเมียมจะพบร่วมกับสังกะสีในดินเสมอ โดยมีอัตราส่วน Zn/Cd ในช่วงประมาณ 100 ถึง 1,000 (ศุภมาศ, 2540) ดินที่มีการปนเปื้อนของโลหะ ตัวอย่างเช่น ดิน Georgia มีความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสีและแคดเมียม 11.4 ppm และ 0.037 ppm ตามลำดับ (Holmgren et al., 1993 อ้างถึงใน Li และ Shuman, 1996) Stevenson (1986) อ้างถึงใน Tan (1994) ว่าการเติมกากตะกอน 20 ตันต่อเฮกแตร์ทุกปีนาน 20 ปี เป็นผลให้มีการเพิ่มสังกะสี (Zn) 890 ppm

ขอบเขตของโลหะที่สะสมในดิน

ในธรรมชาติ ชั้นหน้าตัดดิน (soil profile) จะมีแคดเมียมสะสมในชั้นบนของดิน และรูปแบบของการกระจายตัวของแคดเมียม จะคล้ายกับอินทรีย์วัตถุ (Andersson, 1977 อ้างถึงใน Li และ Shuman, 1996) การใช้กากตะกอนซ้ำ ๆ ตลอดช่วงเวลาที่ยาวนาน จะนำไปสู่การสะสมโลหะที่ดินชั้นบน (surface soil) Ziegler และ Tyler (1977) อ้างถึงใน Greenland และ Hayes (1981) พบว่า ดินที่มีการใช้กากตะกอนประจำทุกปีจะมีประมาณ 50% ของสังกะสีและแคดเมียมอยู่ที่ความลึกต่ำกว่า 15 เซนติเมตร หลังจากที่มีการเติมกากตะกอนครั้งแรกผ่านมาแล้ว 6 ปี (Chang et a;. (1984) อ้างถึงใน Li และ Shuman (1996) แสดงให้เห็นว่า 90% ของโลหะหนักที่ถูกนำมาใช้จะพบอยู่ที่ช่วง 15 เซนติเมตรของดินชั้นบน

สำหรับความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของโลหะหนักกับระดับความลึก ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในลักษณะผกผัน คือโลหะหนักจะกระจายตัวอยู่มากที่บริเวณพื้นผิวดิน และความเข้มข้นของโลหะหนักลดลงเรื่อย ๆ ตามความลึกที่เพิ่มขึ้น (Zhang et al., 1997)

4.2 การสะสมโลหะหนักในพืช

การดูดดึงโลหะหนักในดินเพื่อการเจริญเติบโตของพืช จึงเกิดการสะสมโลหะหนักในพืช ซึ่งมีปัจจัยที่สำคัญที่เกี่ยวข้องในการสะสมโลหะหนักในพืช ดังนี้

พืช

ลักษณะของพืชแต่ละชนิด มีส่วนสำคัญในการกำหนดปริมาณโลหะหนักที่พืชดูดดึงไปจากดิน และการกระจายของโลหะหนักในส่วนต่าง ๆ ของพืช (Greenland และ Hayes, 1981) การดูดดึงโลหะไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืชพบว่า ใบของ swiss chard มีปริมาณของโลหะหนักสะสมอยู่มาก ส่วนข้าวบาร์เลย์ (barley) มีความเข้มข้นของโลหะหนักในใบมากกว่าเมล็ด (Gardiner et al. (1995))

การเติมปูน

การเติมปูนเพื่อปรับระดับความเป็นกรดด่าง (pH) ของดิน มีส่วนช่วยลดการดูดดึงโลหะหนักที่เป็นพิษต่อพืชได้ในการเติมกากตะกอนเพื่อปรับปรุงดิน การใช้ปูนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณของแคดเมียมและสังกะสีในผักกาดหอม (lettuce) ลดลง (Siriratpiriya et al., 1985) ในการเพาะปลูกที่มีปรับความเป็นกรดด่าง (pH) เป็น 7 ในดิน เป็นการช่วยลดความเข้มข้นของโลหะหนัก ในแครอท (Carrot) และผักขม (spinach) โดยผลการสะสมของแคดเมียม (Cd) นิกเกล (Ni) และสังกะสี (Zn) มากกว่าทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) แต่การปรับ pH ด้วยปูนนั้น มีผลไม่เพียงพอต่อการดูดดึงโลหะหนักของข้าวสาลี (wheat) (Hooda และ Alloway, 1996

; Hooda et al., 1997) รวมทั้งผลการศึกษาของ Miller et al. (1995)) พบว่า การเติมปูนในดินที่เป็นกรด ช่วยลดความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในหญ้า alfalfa อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการศึกษาของ Smith (1994)) พบว่าการดูดดึงของแคดเมียม (Cd) ในพืชลดลงด้วยค่า pH ในดินที่เพิ่มขึ้น

อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่แตกต่างกันในดินมีผลกระทบต่อการสะสมโลหะหนักบางชนิด ในผักกาดหอม โดยสังกะสี (Zn) ในพืชมีปริมาณลดลง เมื่ออุณหภูมิต่ำลง (Siriratpiriya et al, 1985) หากมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในดิน ทำให้ต้นโอ๊ต (oat) ดูดดึงแคดเมียมมาสะสมได้เพิ่มขึ้น (Haghiri, 1974 อ้างถึงใน Davies, 1980)

อินทรียวัตถุ

Siriratpiriya et al, (1985) ได้ศึกษาผลกระทบของอินทรีย์วัตถุที่มีต่อการดูดดึงโลหะหนักของพืช พบว่า อินทรีย์วัตถุช่วยลดความเป็นประโยชน์ (availability) ของโลหะในดิน การดูดดึงแคดเมียมของต้นโอ๊ตลดลงเป็นผลมาจากการเพิ่มของปริมาณอินทรีย์วัตถุ ตลอดจนการเพิ่มของค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (C.E.C.) ในดิน (Haghiri, 1974 อ้างถึงใน Davies, 1980)

5. ข้อกำหนดการใช้ประโยชน์จากกากตะกอน

การใช้กากตะกอนในพื้นที่ทางการเพาะปลูก เพื่อช่วยเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรให้อุดมสมบูรณ์ยังต้องคำนึงถึงข้อแนะนำในทางปฏิบัติในการใช้กากตะกอนกับพื้นที่ และคุณภาพของพืชที่มีความปลอดภัยในการบริโภคจากโลหะหนักโดยเฉพาะแคดเมียม ปริมาณของแคดเมียม จึงเป็นข้อจำกัดในการเติมโลหะหนักลงสู่ดิน มีข้อแนะนำในทางปฏิบัติของ Wisconsin (Wisconsin guideline) จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าในการเติมกากตะกอนที่มีแคดเมียม (Cd) 2 ปอนด์ (lb) ต่อพื้นที่ 1 เอเคอร์ ใน 1 ปีนั้น เป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียม (Cd) ในเนื้อเยื่อพืช จึงแนะนำว่าให้มีการจำกัดปริมาณแคดเมียม (Cd) สูงสุดในการเติมเท่ากับ 2 ปอนด์ต่อเอเคอร์ต่อปี และช่วงชีวิตของพื้นที่ที่ใช้กากตะกอนมีปริมาณของโลหะดังกล่าวไม่เกิน 20 ปอนด์ต่อเอเคอร์ นอกจากนี้ยังมีข้อแนะนำของแหล่งอื่น ๆ เช่น กากตะกอนไม่ผ่านการบำบัดไม่ควรใช้พื้นที่เกษตร, พื้นที่เลี้ยงสัตว์ไม่ควรปล่อยให้ วัวนม (milk cow) มากินหญ้าอย่างน้อย 2 เดือนหลังจากมีการใช้กากตะกอน แต่สำหรับสัตว์อื่น ๆ ไม่ควรกินหญ้าในทุ่งหญ้าอย่างน้อย 2 อาทิตย์, กากตะกอนควรใช้ห่างจากแหล่งน้ำใช้สาธารณะ (public water

supply well) อย่างน้อย 1000 ฟุต และ 500 ฟุต จากแหล่งน้ำใช้ส่วนตัว (public water supply well) (Loehr, 1977)

ข้อกำหนดใหม่ขององค์การสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (McBride, 1995) คือ USEPA-503 regulation เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับการใช้กากตะกอน (ตารางที่ 2.2) จะมีการอนุญาตให้มีความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในดินที่มีการใช้กากตะกอน โดยอาศัยปัจจัยพื้นฐาน 2 ปัจจัยในการพิจารณา คือ ความหนาแน่นของดิน (soil density) และความลึกของดินในการผสมกากตะกอน (depth of sludge mixing)

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานระหว่างประเทศของปริมาณโลหะหนักทั้งหมด ในดินที่มีการใช้กากตะกอนที่อนุญาตให้มีได้สูงสุด

โลหะ	USEPA-503	N.E.	เยอรมัน	เนเธอร์แลนด์	แคนาดา
สารหนู (As)	41	-	-	60	14
แคดเมียม (Cd)	39	5	6	10	1.6
โคบอลท์ (Co)	-	-	-	100	30
โครเมียม (Cr)	3,000	500	200	500	210
ทองแดง (Cu)	1,500	125	200	200	150
ปรอท (Hg)	17	-	4	4.0	0.8
โมลิบดีนัม (Mo)	18	-	-	80	4
นิกเกิล (Ni)	420	50	100	200	32
ตะกั่ว (Pb)	300	500	200	300	90
ซิลิเนียม (Se)	100	-	-	-	2.4
สังกะสี (Zn)	2,800	250	600	1,000	330

หมายเหตุ N.E. = สถาบันวิจัยของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของสหรัฐอเมริกา
ภาวะของโลหะในดินที่อนุญาตให้มีได้สูงสุดมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อเฮคแตร์ (kg/ha)

ดินที่มีแคดเมียมอยู่ 5 กิโลกรัมต่อเฮกแตร์ จะทำให้ผู้บริโภคพืชที่ปลูกในดินชนิดนี้ได้รับแคดเมียม 22 ไมโครกรัมต่อวัน ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่องค์กรป้องกันสิ่งแวดล้อม (Environmental Protection Agency) ยอมให้บริโภคได้คือ 30 ไมโครกรัมต่อวัน องค์กรป้องกันสิ่งแวดล้อมจึงกำหนดค่าสูงสุดที่แคดเมียมสะสมในดินไม่ควรเกิน 5 กิโลกรัมของแคดเมียมต่อเฮกแตร์ในสภาพดินเป็นกรด (ศุภมาศ, 2540) และการเติมกากตะกอนลงดินต้องไม่ทำให้

ปริมาณแคดเมียมในดินสะสมเกิน 5 กิโลกรัมของแคดเมียมต่อเฮกแตร์ หากเติมในอัตราดังกล่าวนี้ใช้ซ้ำ ๆ กันนานกว่า 30 ปี จะทำให้แคดเมียมในกากตะกอนสะสมในดินเพิ่มขึ้น 5 เท่าเทียบกับระดับของแคดเมียมในดินที่ไม่มีการปนเปื้อน (Royal Commission on Environmental Pollution, 1979)

ข้อแนะนำในการใช้กากตะกอนในพื้นที่การเกษตรอีกอย่างเกี่ยวกับอัตราส่วนของโลหะหนัก Zn/Cd เป็นการอาศัยพื้นฐานด้านความเป็นพิษของโลหะหนักที่มีต่อพืช (Chaney (1973) อ้างถึงใน Greenland และ Hayes (1981)) ได้ให้ข้อแนะนำว่าในกากตะกอนควรมีอัตราส่วน Zn/Cd มากกว่า 200 และหากเป็นไปได้น่าจะถึง 1,000 เพื่อให้ ความเป็นพิษของสังกะสี (Zn) ที่ 400,500 μg/g เกิดขึ้นกับพืชก่อนที่แคดเมียม (Cd) จะไปสร้างอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์

สำหรับข้อกำหนดของอัตราการใช้กากตะกอนในทางการเกษตร (Gardiner et al, 1995) ซึ่งมีพื้นฐานของระดับโลหะหนักที่ยอมรับให้มีมากที่สุดในกากตะกอน โดยกำหนดตามเกณฑ์ขององค์กรป้องกันสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (USEPA) และของกลุ่มประชาคมยุโรป (European Community) ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อัตราการใช้กากตะกอนที่อนุญาตให้มีได้สูงสุดในพื้นที่ทางการเกษตร

โลหะ	อัตราการใช้กากตะกอน	
	องค์กรป้องกันสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (kg/ha)	กลุ่มประชาคมยุโรป (kg/ha)
แคดเมียม (Cd)	18	6
ทองแดง (Cu)	46	280
นิกเกิล (Ni)	78	150
สังกะสี (Zn)	170	600

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

1. สถานที่ดำเนินการวิจัย

1. เรือนเพาะชำ (Green house) ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. ห้องปฏิบัติการ กลุ่มงานวิเคราะห์ดินและน้ำ กองเกษตรเคมี

2. วัสดุอุปกรณ์

1. พืชทดลอง คือ ผักคะน้า (Brassica oleracea L.var alboglabra Bailey)
2. ดินทดลองเป็นดินบน (Top soil) ระดับความลึก 15 เซนติเมตร จากพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลหนองงูเหลือม และตำบลทุ่งน้อย อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม คือ ชุดดินกำแพงแสน และชุดดินสระบุรี
3. กากตะกอนน้ำเสียชุมชน คือ กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียกรุงเทพมหานคร (ชุมชนห้วยขวาง)
4. ปุ๋ยเคมี สูตร 20-20-0
5. วัสดุอุปกรณ์ในเรือนเพาะชำ
   - กระถางดินเผา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 นิ้ว ถุงพลาสติก
   - ค้อนทุบดิน ตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร
   - น้ำเพาะปลูกเป็นน้ำปราศจากอิออน (Deionized water)
   - พลั่ว บัวรดน้ำ ถังน้ำ เป็นต้น
6. วัสดุอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ
   - เครื่องแก้ว เช่น ปิเปต บิวเรต กระบองตวง บีกเกอร์
   - เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด
   - เครื่อง pH meter
   - เครื่องบดเนื้อเยื่อพืช
   - เครื่อง Spectrophotometer
   - เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
   - เตาเผา (Muffle Furnance)
   - ชุดกลั่น Kjedahl

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การวางแผนการทดลอง (Experimental design)

แผนการทดลอง คือ 3 x 6 Factorial in Randomized Complete Block โดยมีการเติมสิ่งทดลองครั้งที่สองในการเพาะปลูกผักคะน้า 3 ระยะเวลา (ตารางที่ 3.1) และตำรับทดลอง (ตารางที่ 3.2) ดิน 2 ชุดดิน ทำ 3 ซ้ำ ดังนั้นในการดำเนินการวิจัย จึงมีหน่วยทดลอง 108 หน่วยทดลอง โดยหนึ่งหน่วยทดลอง คือ หนึ่งกระถางที่มีถุงพลาสติกบรรจุดิน 3 กิโลกรัม

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาในการเติมสิ่งทดลองครั้งที่สองในการเพาะปลูกผักคะน้า

ระยะเวลา	การเติมสิ่งทดลองภายหลังจากเก็บเกี่ยวฤดูกาลแรกเสร็จสิ้น
1	เติมสิ่งทดลองครั้งที่สองทันที
2	เติมสิ่งทดลองครั้งที่สอง ณ เวลาครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก
3	เติมสิ่งทดลองครั้งที่สอง ณ เวลาหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

ตารางที่ 3.2 ตำรับทดลอง (Treatment) ในงานวิจัย

หน่วยทดลอง	ตำรับทดลอง (Treatment)
1	ควบคุม (ดินเดิมไม่เติมสิ่งทดลอง)
2	เติมปุ๋ยเคมี สูตร 20-20-0 (0.31 เมตริกตัน/เฮกแตร์)
3	เติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนด้วยอัตรา 20 เมตริกตัน/เฮกแตร์
4	เติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนด้วยอัตรา 80 เมตริกตัน/เฮกแตร์
5	เติมโลหะหนัก Cd, Zn ในรูปเกลืออนินทรีย์เทียบเท่าที่มีในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนอัตรา 20 เมตริกตัน/เฮกแตร์
6	เติมโลหะหนัก Cd, Zn ในรูปเกลืออนินทรีย์เทียบเท่าที่มีในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนอัตรา 80 เมตริกตัน/เฮกแตร์

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

- การเตรียมดินสำหรับกระถาง

เก็บตัวอย่างดินบน (Top soil) ระดับความลึกประมาณ 1 หน้าพลั่ว (15

เซนติเมตร) โดยเก็บแบบสุ่มจากหลายจุด แล้วทำตัวอย่างรวม (Composite sample) ผึ่งลมให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรง 2 มิลลิเมตร จำนวน 3 กิโลกรัมต่อกระถาง เติมปุ๋ยเคมี สูตร 20-20-0 กากตะกอนน้ำเสียชุมชน โลหะหนักในรูปเกลืออนินทรีย์ ตามอัตราที่กำหนดในตำรับทดลอง

- การปลูกผักคะน้า

นำเมล็ดพันธุ์ผักคะน้าที่แช่น้ำไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง โรยลงบริเวณกลางกระถางให้เมล็ดพันธุ์กระจายอย่างสม่ำเสมอ แล้วถอนแยกให้เหลือต้นแข็งแรงไว้ 2 ต้น เมื่อผักคะน้ามีอายุประมาณ 24 วัน ตลอดระยะการเจริญเติบโตของผักคะน้า 50 วัน ให้น้ำตามความจุความชื้นภาคสนาม (Field capacity) และความชื้นของดินเป็นเกณฑ์

- การเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างพืช เก็บผักคะน้า ล้างด้วยน้ำสะอาดและน้ำกลั่น แล้วแยกผักคะน้าเป็นส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน

- ส่วนเหนือดิน ชั่งน้ำหนักสด นำลำต้นของผักคะน้ามาอบในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 70°C จนน้ำหนักคงที่ จึงชั่งน้ำหนักแห้ง เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น บดลำต้นของผักคะน้าด้วยเครื่องบดเนื้อเยื่อพืช แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักแคดเมียมและสังกะสี
- ส่วนใต้ดิน ชั่งน้ำหนักสด นำรากของผักคะน้ามาแยกตามตำรับทดลอง (Treatment) เสนอเป็นรูปภาพ เพื่อดูเปรียบเทียบลักษณะ (Morphology) ของราก จากนั้นนำรากของผักคะน้ามาอบในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 70°C จนน้ำหนักคงที่ จึงชั่งน้ำหนักแห้ง เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

ตัวอย่างดิน เก็บตัวอย่างดิน 3 ระยะ คือ ก่อนการเพาะปลูก ขณะทำการเพาะปลูก และภายหลังการเก็บเกี่ยวผักคะน้า ดินตัวอย่างจะเก็บจากการสุ่มในแต่ละกระถาง ทำตัวอย่างรวม (Composite sample) ผึ่งลมให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรง 2 มิลลิเมตร เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่าง ๆของดิน

- การวิเคราะห์ดิน กากตะกอน และพืช

วิธีวิเคราะห์ดังในรายละเอียดของตารางที่ 3.3

- การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ Analysis of

variance เพื่อหา F-value และใช้ Duncan's new multiple test (DMRT) สำหรับเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างข้อมูล ณ ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ ตัวอย่างที่วิเคราะห์ และวิธีวิเคราะห์

พารามิเตอร์	ตัวอย่างที่วิเคราะห์			วิธีวิเคราะห์
	ดิน	กากตะกอน	พืช	
1. pH	+	+	-	1. pH meter (ดิน : น้ำ = 1: 1)
2. อินทรีย์วัตถุ	+	+	-	2. Walkley and Black method
3. ไนโตรเจนทั้งหมด	+	+	-	3. Kjedahl method
4. แอมโมเนียไนโตรเจน (NH_4^+ - N)	+	+	-	4. Steam distillation and Titration
5. ไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- - N)	+	+	-	5. Steam distillation and Titration with Devarda alloy method
6. ฟอสฟอรัส (Available P)	+	+	-	6. สกัดด้วยน้ำยา Bray II และหาปริมาณด้วย Ascorbic acid reduction
7. โปแตสเซียม (Exchangeable K)	+	+	-	7. สกัดด้วย Ammonia acetate แล้วหาปริมาณด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
8. สังกะสีและแคดเมียม (Available Zn , Cd)	+	+	-	8. สกัดด้วยน้ำยา 0.005M DTPA หาปริมาณด้วย เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
9. สังกะสีและแคดเมียม (Total Zn, Cd)	+	+	+	9. Tri Acid Digestion **($HNO_3 : H_2SO_4 : HClO_4 = 5:1:2$)**
10. Cation Exchange Capacity (CEC)	+	-	-	10. Ammonium saturation method
11. soil texture, soil density and porosity	+	-	-	11. ตามวิธีของภาคปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลอง

1. ลักษณะสมบัติและองค์ประกอบของดินและกากตะกอนที่ใช้ในการทดลอง

ในอันที่จะทราบคำตอบของการศึกษาในเรื่องการทดลองนั้น จำเป็นต้องทราบพื้นฐานของสิ่งที่นำมาศึกษา เพื่อที่สามารถเปรียบเทียบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จึงได้วิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางด้านลักษณะสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีของดินและกากตะกอนดังที่ปรากฏในตารางที่ 4.1 ดินที่นำมาทดลองมี 2 ชุดดิน คือ ชุดดินกำแพงแสน และสระบุรี ส่วนกากตะกอนได้มาจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในระดับเป็นกลางทั้งหมด เมื่อพิจารณาถึงแหล่งธาตุอาหารของพืช ทั้งที่เป็นธาตุอาหารหลัก เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม และจุลธาตุอาหาร เช่น สังกะสี (Zn) พบว่า กากตะกอนมีปริมาณของธาตุอาหารหลัก (ไนโตรเจนทั้งหมด 26.86% , โปแตสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 149.31 ppm) และธาตุอาหารรอง (สังกะสี 3370 ppm) มากกว่า ชุดดินทั้งสอง แม้ว่าธาตุอาหารพืชในรูปที่อาจเป็นประโยชน์บางอย่าง มีอยู่เป็นจำนวนที่น้อยกว่า คือ ไนเตรทไนโตรเจน (27.44 ppm) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (119 ppm)

กากตะกอนมีอินทรีย์วัตถุอยู่เป็นจำนวนมาก (38.75%,ตารางที่ 4.1)ที่เอื้อประโยชน์ในการเจริญเติบโตของพืช แต่ปริมาณของโลหะหนักแคดเมียม (Cd) ที่เป็นพืชในกากตะกอนนั้น ก็เป็นข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์ในทางการเกษตร โดยโลหะหนักแคดเมียมมีในกากตะกอนสูงถึง 4.9 ppm ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าดินทั้งสองชุดอย่างมาก (ปริมาณแคดเมียมในชุดดินกำแพงแสน และสระบุรี มีค่าเท่ากับ 0.1 และ 0.15 ppm. ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ก็เป็นพารามิเตอร์ที่ช่วยบ่งบอกให้ทราบว่า ดินมีศักยภาพในการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวก เมื่อเติมกากตะกอนลงสู่ดิน แล้วโลหะหนักในกากตะกอนค่อย ๆ สลายตัวออกมา ดังจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ความสามารถในการแลก-เปลี่ยนประจุบวก ของชุดดินสระบุรีมีค่ามากกว่า ชุดดินกำแพงแสนเกือบเท่าตัว

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติและองค์ประกอบเคมีของดินทดลองและกากตะกอน

พารามิเตอร์	ชุดดิน		กากตะกอน
	กำแพงแสน	สระบุรี	
ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH)	7.86	7.40	7.11
อินทรียวัตถุ (%)	4.0	2.1	38.75
อินทรีย์คาร์บอน (%)	2.30	1.21	31.74
ไนโตรเจนทั้งหมด (%)	0.1490	0.0947	26.86
แอมโมเนียมไนโตรเจน (ppm)	61.74	27.44	1330.84
ไนเตรทไนโตรเจน (ppm)	75.46	96.04	27.44
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (ppm)	1187.93	499.89	119
โปแตสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (ppm)	94.29	51.24	149.31
สังกะสี (ppm)	106.55	114.10	3370
แคดเมียม (ppm)	0.1	0.15	4.9
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (me / 100 กรัมดิน)	8.2	14.3	-

หากพิจารณาเฉพาะลักษณะสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีของดินในแง่ธาตุอาหารในรูปที่พืชอาจใช้ประโยชน์ได้นั้น เป็นเพียงปัจจัยอย่างหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดินก็เป็นอีกด้านหนึ่งที่มีส่วนเกี่ยวข้องด้วย (ตารางที่ 4.2) ชุดดินกำแพงแสนมีเนื้อดินที่มีสัดส่วนของอนุภาคทรายต่อทรายแป้งต่อดินเหนียว เท่ากับ 58 : 34 : 8 ส่วนชุดดินสระบุรีมีสัดส่วนส่วนของอนุภาคทรายต่อทรายแป้งต่อดินเหนียว เท่ากับ 42 : 42 : 16 ความหนาแน่นของอนุภาคดินของชุดดินกำแพงแสนและชุดดินสระบุรีมีค่าใกล้เคียงกันมาก ไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นอนุภาค (particle density)หรือความหนาแน่นรวม (bulk density) ก็ตาม ช่องว่างในดินที่น้ำและอากาศอาศัยอยู่จะแสดงในรูปความพรุนของดิน ซึ่งความแตกต่างของความพรุนของดินที่มีในชุดดินทั้งสองมีไม่มาก คือ เปอร์เซ็นต์ของความพรุนในชุดดินกำแพงแสนมีค่ามากกว่าชุดดินสระบุรีเพียง 1%

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของดินทดลอง

พารามิเตอร์	ชุดดิน	
	กำแพงแสน	สระบุรี
เนื้อดิน		
ทราย (เปอร์เซ็นต์)	58	42
ทรายแป้ง (เปอร์เซ็นต์)	34	42
ดินเหนียว (เปอร์เซ็นต์)	8	16
ความหนาแน่นของดิน		
ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มิลลิลิตร)	2.57	2.56
ความหนาแน่นรวม (กรัม/มิลลิลิตร)	1.30	1.32
ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	49	48

2. การสะสมโลหะหนักในดิน

2.1 โลหะหนักแคดเมียม (Cd) สะสมในดิน

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) ในชุดดินกำแพงแสนระหว่างฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 ที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน พบว่า เมื่อไม่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีแคดเมียมสูงสะสมในดินกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ อย่าง มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (F-Value = 23.631**) ส่วนการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ส่งผลให้มีการสะสมแคดเมียมในดินต่ำกว่าการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมเทียบเท่าในกากตะกอนอัตราเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร B และ C) แต่ไม่เกิดความแตกต่างของการสะสมแคดเมียมเมื่อเทียบกับการเติมปุ๋ยเคมี (อยู่กลุ่มอักษร C เดียวกัน) หากพิจารณาถึงช่วงเวลาในการพักดินก่อนการเติมกากตะกอนครั้งที่ 2 พบว่ามีผลต่อการสะสมแคดเมียมในดิน โดยการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะ-ปลูก ส่งผลให้มีการสะสมแคดเมียมในดินสูงสุด (0.2167 ppm) และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการไม่ทิ้งช่วงเวลาพักดิน และการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก (อยู่กลุ่มอักษร a , F-Value= 7.400*)ของการเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์

การเติมกากตะกอนลงสู่ดินก่อให้เกิดของแคดเมียมในดินสูงกว่าดินเดิมโดยเฉพาะการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ จะทำให้เกิดการสะสมของแคดเมียมในดินสูงสุด ไม่ว่าช่วงเวลาของการพักดินจะนานเท่าไรก็ตามทั้งนี้การสะสมของแคดเมียมในดิน

ลดลงตามช่วงเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการไม่พักดินและการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกนั้น การสะสมแคดเมียมก็แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร a, b และ F-Value = 9.500**)

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การทิ้งช่วงเวลาให้ชุดดินดินกำแพงแสนพักตัวต่างกันก่อนเติมกากตะกอนครั้งที่ 2 ส่งผลให้มีการสะสมแคดเมียมในดินแตกต่างกันด้วย

ตารางที่ 4.3 ปริมาณแคดเมียม (Cd,ppm) ของชุดดินกำแพงแสนในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต

ตำรับทดลอง	ปริมาณแคดเมียม (Cd) ของชุดดินกำแพงแสน (ppm) ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{BC}0.1667^{a}$	$^{AB}0.2500^{a}$	$^{A}0.1833^{a}$	0.2000	1.909^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{C}0.1167^{a}$	$^{B}0.1500^{a}$	$^{AB}0.1333^{a}$	0.1333	0.600^{ns}
กากตะกอน 20	$^{C}0.1000^{b}$	$^{AB}0.2167^{a}$	$^{AB}0.1667^{ab}$	0.1611	7.400^{*}
กากตะกอน 80	$^{A}0.4000^{a}$	$^{A}0.3333^{ab}$	$^{A}0.1833^{b}$	0.3056	9.500^{**}
เกลือโลหะ 20	$^{B}0.2333^{a}$	$^{B}0.1333^{ab}$	$^{B}0.0333^{b}$	0.1333	7.200^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{C}0.0833^{a}$	$^{B}0.1500^{a}$	$^{AB}0.1333^{a}$	0.1222	0.650^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	0.1833	0.2056	0.1389	-	-
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	23.631^{**}	6.133^{**}	1.911^{*}	-	-

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

เมื่อพิจารณาปริมาณแคดเมียมในชุดดินสระบุรีในภาพรวม (ตารางที่ 4.4) จะพบว่า การทิ้งช่วงเวลาให้ดินได้พัก นำไปสู่การลดปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดิน หากชี้ชัดในความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของอิทธิพลการทิ้งช่วงเวลาพักดิน การเติมกากตะกอนและเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน ส่งผลให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดิน และเป็นไปในลักษณะที่การสะสมแคดเมียมในดินน้อย เมื่อเพิ่มระยะเวลาพักดินมากขึ้น ในส่วนของการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ก่อให้เกิดการสะสมแคดเมียมในดินลดลงและ

แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ตามช่วงเวลาพักดิน (อยู่กลุ่มอักษร a, b และ c ซึ่งมี F-Value = 38.6**)

เมื่อพิจารณาในแต่ละช่วงเวลาพักดิน จะเห็นได้ว่า การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ และมีความแตกต่างกับการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดินและไม่พักดิน การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างของการสะสมแคดเมียมในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร B) เมื่อเปรียบเทียบกับการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมเทียบเท่าที่มีในกากตะกอนทั้งสองอัตรา ซึ่งการเติมกากตะกอนในอัตรานี้ มีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมในดินต่ำกว่าการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมเทียบเท่าที่มีในกากตะกอนอัตรา 20และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ เมื่อไม่มีการพักดิน แต่การสะสมแคดเมียมในดินสูงกว่าการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมเทียบเท่าที่มีในกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ เมื่อมีการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

นั่นหมายถึงว่า ชุดดินดินสระบุรี จะมีการสะสมแคดเมียมในดิน ภายหลังการเติมกากตะกอนโดยมีทิศทางผกผันกับระยะเวลาที่มีการพักดิน กล่าวคือ การสะสมแคดเมียมในดินจะลดลงตามระยะเวลาที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ปริมาณแคดเมียม (Cd, ppm) ในชุดดินสระบุรีในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต

ตำรับทดลอง	ปริมาณแคดเมียม (Cd) ของชุดดินสระบุรี (ppm) ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{BC}0.1500^{a}$	$^{AB}0.1167^{a}$	$^{B}0.0500^{a}$	0.1056	1.474^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{C}0.0670^{a}$	$^{B}0.0833^{a}$	$^{B}0.0500^{a}$	0.0667	1.500^{ns}
กากตะกอน 20	$^{BC}0.1833^{a}$	$^{B}0.0833^{b}$	$^{B}0.0500^{b}$	0.1056	6.500^{*}
กากตะกอน 80	$^{A}0.3667^{a}$	$^{A}0.2167^{b}$	$^{A}0.1000^{c}$	0.2278	38.600^{**}
เกลือโลหะ 20	$^{AB}0.2500^{a}$	$^{B}0.0500^{b}$	$^{B}0.0500^{b}$	0.1167	48.000^{**}
เกลือโลหะ 80	$^{ABC}0.2333^{a}$	$^{B}0.1000^{ab}$	$^{B}0.0500^{b}$	0.1278	9.700^{**}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	0.2083	0.1083	0.0583	-	-
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	7.181^{**}	5.492^{**}	3.000^{*}	-	-

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

2.2 โลหะหนักสังกะสี (Zn) สะสมในดิน

การสะสมสังกะสีในดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตของชุดดินกำแพงแสน (ตารางที่ 4.5) พบว่า การทิ้งช่วงเวลาพักดินที่ต่างกัน ไม่ปรากฏความแตกต่างของการสะสมสังกะสีในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับบางตำรับทดลอง คือดินเดิม, การเติมปุ๋ยเคมี และการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณสังกะสีเทียบเท่าที่มีในกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีการสะสมสังกะสีในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติยิ่งในการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก โดยเทียบกับช่วงเวลาไม่พักดิน (อยู่กลุ่มอักษร a, b และ F-Value = 26.759**) ส่วนการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณสังกะสีเทียบเท่าที่มีในกากตะกอนอัตราเดียวกัน เมื่อการสะสมสังกะสีในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติในการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก โดยเทียบกับช่วงเวลาไม่พักดิน (อยู่กลุ่มอักษร a, b และ F-Value = 77.901**)

การสะสมสังกะสีในดินของการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ เป็นไปในทิศทางที่ลดลงจากการไม่พักดินไปสู่การพักดินทั้งสองช่วงเวลา ซึ่งเกิดความแตกต่าง

อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร a, b และ F-Value = 20.454**) หากพิจารณาในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ก็ยังให้การสะสมสังกะสีในดินสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร A, B และ F-Value = 101.394**) นอกจากการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์แล้ว การเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ไม่เกิดความแตกต่างของการสะสมสังกะสีในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับตำรับทดลองอื่น ๆ (อยู่กลุ่มอักษร B) ซึ่งเกิดในช่วงเวลาไม่พักดิน เมื่อมีการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก จะส่งผลให้เกิดการสะสมสังกะสีในดินสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร A, C และ F-Value = 240.698**)

อาจกล่าวได้ว่า การสะสมสังกะสีในชุดดินดินกำแพงแสน ภายหลังการเติมกากตะกอนในอัตราที่ต่างกัน มีแนวทางในการเพิ่มขึ้นหรือลดลง จะขึ้นอยู่กับอัตราที่เติม ซึ่งการเติมกากตะกอนในอัตราที่ต่ำ (20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์) มีการสะสมสังกะสีในดินเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันการเติมกากตะกอนในอัตราที่สูง (80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์) มีการสะสมสังกะสีในดินลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากดินได้รับการพักตัว (เปรียบเทียบกับการไม่พักดิน)

ตารางที่ 4.5 ปริมาณสังกะสี (Zn, ppm) ของชุดดินกำแพงแสนในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต

ตำรับทดลอง	ปริมาณสังกะสี (Zn) ของชุดดินกำแพงแสน (ppm) ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{B}55.79^{a}$	$^{C}51.95^{a}$	$^{C}62.07^{a}$	56.60	2.313^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{B}49.75^{a}$	$^{C}47.95^{a}$	$^{C}60.83^{a}$	52.84	2.477^{ns}
กากตะกอน 20	$^{B}48.40^{b}$	$^{B}69.43^{a}$	$^{B}75.32^{a}$	64.38	26.759^{**}
กากตะกอน 80	$^{A}152.88^{a}$	$^{A}119.02^{b}$	$^{A}123.68^{b}$	131.86	20.454^{**}
เกลือโลหะ 20	$^{B}50.63^{b}$	$^{C}49.82^{b}$	$^{C}64.00^{a}$	54.82	77.901^{**}
เกลือโลหะ 80	$^{B}56.43^{a}$	$^{BC}55.45^{a}$	$^{C}61.42^{a}$	57.77	2.224^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	68.98	65.60	74.55	-	-
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	101.394^{**}	68.512^{**}	240.698^{**}	-	-

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

การสะสมสังกะสีในชุดดินสระบุรี ที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต ปรากฏใน ตารางที่ 4.6 พบว่า มีเพียงแต่การเติมกากตะกอนเท่านั้นได้รับอิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาพักดินที่ต่างกัน การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ เกิดแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อไม่พักดิน การสะสมสังกะสีในดิน มีปริมาณสังกะสีน้อยกว่าเมื่อทิ้งช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก (อยู่กลุ่มอักษร b) แล้วการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกก็มีปริมาณสังกะสีในดินน้อยกว่าการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก (อยู่กลุ่มอักษร a) แต่การพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกส่งผลให้เกิดความแตกต่างของการสะสมสังกะสีในดินกับการไม่พักดินอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติและมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ตามลำดับ (F-Value = 9.932** และ 3.878*)

สำหรับในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดินการสะสมสังกะสีในดินอย่างมาก เกิดขึ้นกับการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ และมีความแตกต่างของปริมาณสังกะสีในดินกับตำรับทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติทั้งที่การทิ้งช่วงเวลาไม่พักดิน และการพักดิน แม้การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ จะมีการสะสมสังกะสีในดินที่ต่ำกว่าการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ แต่โดยภาพรวมก็มีแนวโน้มของการสะสมสังกะสีในดินสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ (อยู่กลุ่มอักษร B) อีกทั้งเมื่อพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะ-ปลูก การเติมกากตะกอนในอัตรานี้ ก็ส่งผลให้เกิดการสะสมสังกะสีในดินสูงกว่าดินเดิมและการเติมปุ๋ยเคมีอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร B, C และ F-Value = 52.51**)

น่าจะสรุปได้ว่า ชุดดินดินสระบุรีได้รับอิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลา ทำให้การเติมกากตะกอนในอัตราที่ต่างกัน เกิดการสะสมสังกะสีในดินแบบเดียวกัน ในลักษณะที่เพิ่มขึ้นตามการทิ้งช่วงเวลาของการพักดินที่มากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ปริมาณสังกะสี (Zn, ppm) ของชุดดินสระบุรีในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน ภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต

ตำรับทดลอง	ปริมาณสังกะสี (Zn) ของชุดดินสระบุรี (ppm) ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{B}46.83^{a}$	$^{C}46.08^{a}$	$^{B}53.25^{a}$	48.72	1.787^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{B}45.75^{a}$	$^{C}49.40^{a}$	$^{B}51.75^{a}$	48.97	0.914^{ns}
กากตะกอน 20	$^{B}57.88^{b}$	$^{B}64.55^{ab}$	$^{B}68.90^{a}$	63.78	9.932^{**}
กากตะกอน 80	$^{A}92.17^{b}$	$^{A}106.18^{ab}$	$^{A}159.58^{a}$	119.31	3.878^{*}
เกลือโลหะ 20	$^{B}52.23^{a}$	$^{BC}57.43^{a}$	$^{B}55.52^{a}$	55.06	1.201^{ns}
เกลือโลหะ 80	$^{B}50.67^{a}$	$^{BC}52.58^{a}$	$^{B}57.78^{a}$	53.68	1.918^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	57.59	62.71	74.46	-	-
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	4.119^{**}	52.510^{**}	18.344^{**}	-	-

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

3. ลักษณะสมบัติของดินเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

3.1 ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสนในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2

ตารางที่ 4.7 ชี้ชัดให้ทราบว่า pH ในดินของช่วงเวลาเก็บเกี่ยวผลผลิต มีเฉพาะการเติมกากตะกอนเท่านั้นที่มี pH ในดินมีค่าต่ำกว่า 7.00 การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่า pH ลดต่ำลงเรื่อย ๆ ในระหว่างการเพาะปลูก ทั้งนี้เมื่อเริ่มการเพาะปลูกนั้น pH มีค่าต่ำกว่า 7.00 (6.92) เมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน pH มีค่าต่ำกว่าการเริ่มเพาะปลูกอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร a, b และ F-value =28.975^{**}) และเมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต (50วัน) มีแนวโน้มของค่า pH ต่ำกว่าการเพาะปลูกผ่านไป 30 วัน คือ 6.23 ในขณะที่การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่า pH ลดลงเรื่อย ๆ ในการเพาะปลูก เมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต ดินมีค่า pH ต่ำกว่า 7 (6.93) แต่การลดลงนี้ไม่เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับช่วงเวลาที่เริ่มการเพาะปลูกและระหว่างการเพาะปลูก

อาจกล่าวได้ว่า เมื่อไม่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ส่งผลให้ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสนเป็นไปในลักษณะลดต่ำลงเรื่อย ๆ ตลอดฤดูกาลการเพาะปลูกผักคะน้า

ตารางที่ 4.7 ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสนในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อไม่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสน ตามช่วงเวลาที่เพาะปลูกในฤดูกาลที่ 2				
	0 วัน	30 วัน	50 วัน	เฉลี่ยตามช่วงเวลาเพาะปลูก	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{BC}7.22^{a}$	$^{AB}7.30^{a}$	$^{AB}7.23^{a}$	7.25	0.682^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{C}7.19^{a}$	$^{BC}7.10^{b}$	$^{B}7.20^{a}$	7.16	61.231^{**}
กากตะกอน 20	$^{C}7.18^{a}$	$^{C}7.00^{a}$	$^{C}6.93^{a}$	7.04	3.237^{ns}
กากตะกอน 80	$^{D}6.92^{a}$	$^{D}6.47^{b}$	$^{D}6.23^{b}$	6.54	28.975^{**}
เกลือโลหะ 20	$^{A}7.44^{a}$	$^{A}7.40^{a}$	$^{A}7.40^{a}$	7.41	0.453^{ns}
เกลือโลหะ 80	$^{AB}7.34^{b}$	$^{A}7.47^{a}$	$^{A}7.40^{ab}$	7.40	5.891^{*}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	7.22	7.12	7.07		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	30.733^{**}	31.583^{**}	117.600^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสนในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 ที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดู (ตารางที่ 4.8) พบว่า ในดินของการพักดินครึ่งฤดูในช่วงเวลาต่าง ๆ มีเฉพาะการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่า pH ต่ำกว่า 7.00 (6.97) เมื่อเริ่มการเพาะปลูก จากนั้นดินมีค่า pH ลดลง เมื่อการเพาะปลูกผ่านไป 30 วัน คือ 6.27 และเมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต ดินมีค่า pH ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการเพาะปลูกผ่านไป 30 วัน แม้ว่าการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ดินมีค่า pH ต่ำกว่า 7.00 (6.87) เมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต แต่ก็มีค่า pH ในดินสูงกว่าการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ (pH มีค่าเท่ากับ 6.27) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร B,C และ F-value =36.48**)

น่าจะสรุปได้ว่าการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกผักคะน้า นั้น ค่า pH ของดินในระหว่างการเพาะปลูกจะมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (pH ต่ำกว่า 7) มีเฉพาะในการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์

ตารางที่ 4.8 ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสนในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อมีการทิ้งช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาล

ตำรับทดลอง	ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสน ตามช่วงเวลาที่เพาะปลูกในฤดูกาลที่ 2				
	0 วัน	30 วัน	50 วัน	เฉลี่ยตามช่วงเวลาเพาะปลูก	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{B}7.33^{a}$	$^{AB}7.37^{a}$	$^{AB}7.13^{a}$	7.28	3.583^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{B}7.30^{a}$	$^{B}7.23^{ab}$	$^{B}7.00^{b}$	7.18	4.188^{*}
กากตะกอน 20	$^{B}7.30^{a}$	$^{B}7.07^{ab}$	$^{B}6.87^{b}$	7.08	11.545^{**}
กากตะกอน 80	$^{C}6.97^{a}$	$^{C}6.27^{b}$	$^{C}6.27^{b}$	6.50	24.500^{**}
เกลือโลหะ 20	$^{A}7.73^{a}$	$^{A}7.73^{a}$	$^{A}7.40^{b}$	7.62	5.000^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{AB}7.53^{ab}$	$^{A}7.67^{a}$	$^{A}7.33^{b}$	7.51	6.333^{*}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	$^{A}7.36$	$^{AB}7.22$	$^{B}7.00$		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	14.344^{**}	39.241^{**}	36.480^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสนในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 ที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดู (ตารางที่ 4.9) พบว่า pH ในดินของช่วงเวลาระหว่างการเพาะปลูกที่มีค่าต่ำกว่า 7.00 มีเฉพาะการเติมกากตะกอนอัตรา 20 และ80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่า pH ในดินต่ำกว่า 7.00 (6.97) เมื่อเริ่มการเพาะปลูกหลังจากที่มีการเพาะปลูกผ่านไป 30 วัน pH ในดินมีค่า 6.53 เป็นค่าต่ำกว่าเมื่อเริ่มการเพาะปลูกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร a, b และ F-value = 9.389^{*}) และเมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต pH ในดินมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการเพาะปลูกผ่านไป 30 วัน การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ pH ในดินมีค่าต่ำกว่า 7.00 (6.93) เมื่อการเพาะปลูกผ่านไป 30 วัน และค่า pH นี้ ไม่เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการเก็บเกี่ยวผลผลิต อย่างไรก็ตามการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่า pH ในดิน (6.53) ต่ำกว่าการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ (pH เท่ากับ

6.93) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (อยู่กลุ่มอักษร B,C และ F-value = 37.314**) ในช่วงเวลาการเก็บเกี่ยวผลผลิต

อาจสรุปได้ว่า การทิ้งช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกผักคะน้า จะส่งผลให้เห็นชัดเจนถึงอิทธิพลของกากตะกอนต่อการลดลงของ pH กล่าวคือยิ่งอัตราเติมกากตะกอนสูง (80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์) ก็ยิ่งส่งผลให้ pH ของดินลดลงมากขึ้นหรือกล่าวได้ว่า เพิ่มสภาวะเป็นกรดให้กับดิน (pH ต่ำกว่า 7)

ตารางที่ 4.9 ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสนในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อมีการทิ้งช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาล

ตำรับทดลอง	ค่า pH ของชุดดินกำแพงแสน ตามช่วงเวลาที่เพาะปลูกในฤดูกาลที่ 2				
	0 วัน	30 วัน	50 วัน	เฉลี่ยตามช่วงเวลาเพาะปลูก	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{A}7.40^{a}$	$^{AB}7.37^{a}$	$^{B}7.07^{b}$	7.28	45.500**
เติมปุ๋ย	$^{A}7.30^{a}$	$^{AB}7.20^{a}$	$^{B}7.07^{a}$	7.19	1.947^{ns}
กากตะกอน 20	$^{AB}7.23^{a}$	$^{BC}6.93^{a}$	$^{B}6.93^{a}$	7.03	2.700^{ns}
กากตะกอน 80	$^{B}6.97^{a}$	$^{C}6.53^{b}$	$^{C}6.53^{b}$	6.68	9.389*
เกลือโลหะ 20	$^{A}7.53^{a}$	$^{A}7.53^{a}$	$^{A}7.33^{a}$	7.47	4.000^{ns}
เกลือโลหะ 80	$^{A}7.53^{a}$	$^{A}7.57^{a}$	$^{A}7.40^{a}$	7.50	1.909^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	$^{A}7.33$	$^{AB}7.19$	$^{B}7.06$		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	11.282**	16.060**	37.314**		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ค่า pH ของชุดดินสระบุรี (ตารางที่ 4.10) มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในระหว่างการเพาะปลูก พบว่า นอกจากตำรับทดลองที่เป็นดินเดิมแล้ว ตำรับทดลองอื่น ๆ มีระดับความเป็นกรดเป็นด่าง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ดินที่มีระดับ pH ต่ำกว่า 7 คือการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ลดลงต่ำเรื่อย ๆ จนถึงระยะเก็บเกี่ยวผลผลิต (pH = 6.07)

อาจจะกล่าวได้ว่า การไม่พักดินของชุดดินสระบุรี ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างของค่า pH อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับตำรับทดลองต่าง ๆ ยกเว้นดินเดิม อย่างไรก็ตาม ค่า pH

ของดินเดิมตลอดฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่สองก็มีค่า pH มากกว่า 7 ขณะที่การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.81 – 6.07

ตารางที่ 4.10 ค่า pH ของชุดดินสระบุรี ในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อไม่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ค่า pH ของชุดดินสระบุรี ตามช่วงเวลาที่เพาะปลูกในฤดูกาลที่ 2				
	0 วัน	30 วัน	50 วัน	เฉลี่ยตามช่วงเวลาเพาะปลูก	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{B}7.22^{b}$	$^{A}7.29^{ab}$	$^{A}7.43^{a}$	7.31	9.812^{**}
เติมปุ๋ย	$^{AB}7.28^{a}$	$^{AB}7.11^{b}$	$^{A}7.19^{a}$	7.19	0.608^{ns}
กากตะกอน 20	$^{C}7.00^{a}$	$^{A}7.35^{a}$	$^{A}7.04^{a}$	7.13	1.260^{ns}
กากตะกอน 80	$^{D}6.81^{a}$	$^{B}6.38^{a}$	$^{B}6.07^{a}$	6.42	1.193^{ns}
เกลือโลหะ 20	$^{AB}7.28$	$^{A}7.29$	$^{A}7.44$	7.34	2.493^{ns}
เกลือโลหะ 80	$^{A}7.30$	$^{AB}7.26$	$^{A}7.36$	7.27	1.151^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	7.15	7.10	7.09		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	194.329^{**}	3.653^{**}	5.657^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ชุดดินดินสระบุรีที่ได้เติมสิ่งทดลองครั้งที่สอง เมื่อพักดินไปแล้วครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก (ตารางที่ 4.11) จะเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อระยะเวลาการเพาะปลูกผ่านไป 30 วัน ทั้งในการเติมกากตะกอน อัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ก็ล้วนก่อให้เกิดค่า pH ของดิน มีค่าต่ำกว่า 7 (6.67 และ 5.56 ตามลำดับ) และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่า pH ลดลงอีก ในทางกลับกันการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่า pH เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

น่าจะสรุปได้ว่า การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH ต่ำกว่า 6 ในระหว่างการทดลอง แต่ในการเติมกากตะกอน 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ทำให้ค่า pH ต่ำกว่า 7 ไม่มากนัก

ตารางที่ 4.11 ค่า pH ของชุดดินสระบุรี ในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อมีการทิ้งช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

ตำรับทดลอง	ค่า pH ของชุดดินสระบุรี ตามช่วงเวลาที่เพาะปลูกในฤดูกาลที่ 2				
	0 วัน	30 วัน	50 วัน	เฉลี่ยตามช่วงเวลาเพาะปลูก	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{A}7.57^{a}$	$^{A}7.67^{a}$	$^{A}7.45^{a}$	7.56	2.874^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{A}7.57^{a}$	$^{A}7.58^{a}$	$^{A}7.39^{b}$	7.51	6.230^{*}
กากตะกอน 20	$^{B}7.24^{a}$	$^{B}6.67^{b}$	$^{B}6.57^{b}$	6.83	16.794^{**}
กากตะกอน 80	$^{B}7.01^{a}$	$^{C}5.56^{b}$	$^{C}5.86^{b}$	6.14	5.474^{*}
เกลือโลหะ 20	$^{A}7.59^{ab}$	$^{A}7.70^{a}$	$^{A}7.48^{b}$	7.59	6.980^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{A}7.44^{a}$	$^{A}7.63^{a}$	$^{A}7.34^{a}$	7.47	1.493^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	7.40	7.14	7.02		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	8.477^{**}	20.646^{**}	17.428^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ดินในชุดดินสระบุรี ที่ได้รับการพักดินนานถึงหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก ก่อนเริ่มต้นเพาะปลูกในฤดูกาลเพาะปลูกที่สอง (ตารางที่ 4.12) พบว่า ดินก่อนเพาะปลูกมีค่า pH มากกว่า 7 ในทุกตำรับการทดลอง หลังจากนั้นการเพาะปลูกได้ดำเนินการไปถึง 30 วัน ค่า pH ในดินของการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่าลดลงถึง 5.93 โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (F-value = 9.06^{**}) แล้วมีค่า pH เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อถึงระยะเวลาเก็บเกี่ยวผลผลิต (ค่า pH = 6.09) ถึงแม้ว่าการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ จะมีค่า pH ในดินต่ำกว่า 7 ในระหว่างการทดลองและสิ้นสุดการทดลองก็ไม่เกิดความแตกต่างของค่า pH ในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เป็นไปได้ที่จะสรุปว่า ในการทิ้งช่วงเวลาพักดินของชุดดินสระบุรีหนึ่งฤดูกาลเพาะ-ปลูก นั้น ก่อให้เกิดการเพิ่มความเป็นกรดของดินสูงขึ้นตามอัตราการเติมกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.12 ค่า pH ของชุดดินสระบุรี ในระหว่างการเพาะปลูกคะน้าในฤดูกาลที่ 2 เมื่อมีการทิ้งช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

ตำรับทดลอง	ค่า pH ของชุดดินสระบุรี ตามช่วงเวลาที่เพาะปลูกในฤดูกาลที่ 2				
	0 วัน	30 วัน	50 วัน	เฉลี่ยตามช่วงเวลาเพาะปลูก	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{A}7.50^{a}$	$^{AB}7.62^{a}$	$^{A}7.36^{a}$	7.49	2.505^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{A}7.52^{ab}$	$^{AB}7.61^{a}$	$^{A}7.39^{b}$	7.51	18.320^{**}
กากตะกอน 20	$^{B}7.30^{a}$	$^{B}6.96^{a}$	$^{B}6.87^{a}$	7.04	1.989^{ns}
กากตะกอน 80	$^{C}7.09^{a}$	$^{C}5.93^{b}$	$^{C}6.09^{ab}$	6.37	9.060^{**}
เกลือโลหะ 20	$^{A}7.62^{b}$	$^{A}7.87^{a}$	$^{A}7.48^{c}$	7.66	88.849^{**}
เกลือโลหะ 80	$^{A}7.53^{ab}$	$^{A}7.74^{a}$	$^{A}7.43^{b}$	7.57	9.089^{**}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	7.43	7.29	7.10		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	25.271^{**}	20.384^{**}	25.372^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

3.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (C.E.C.) ของดิน

ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของชุดดินดินกำแพงแสน ที่ปรากฏในตารางที่ 4.13 พบว่า การทิ้งช่วงเวลาที่ต่างกัน ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างของค่า CEC ในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการเติมกากตะกอนทั้งสองอัตรา การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ส่งผลให้ค่า CEC มีค่าสูงสุด อีกทั้งการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ก็มีค่า CEC มากกว่าการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าในกากตะกอนเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ไม่ว่าจะช่วงเวลาที่ไม่พักดินหรือพักดินก็ตาม

น่าจะชี้ให้เห็นว่า ในภาพรวมการเติมกากตะกอน ก่อให้เกิดค่า CEC ในดินมีค่าสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ แต่กระนั้นก็ไม่ได้รับอิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตารางที่ 4.13 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (มิลลิกรัมสมมูลย์ต่อดิน 100 กรัม) ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{BC}11.70^{a}$	$^{C}10.10^{b}$	$^{C}10.40^{b}$	10.73	36.167^{**}
เติมปุ๋ย	$^{BC}11.37^{a}$	$^{C}10.27^{b}$	$^{BC}10.97^{a}$	10.87	34.875^{**}
กากตะกอน 20	$^{B}11.97^{a}$	$^{B}11.10^{a}$	$^{B}11.50^{a}$	11.52	1.834^{ns}
กากตะกอน 80	$^{A}15.77^{a}$	$^{A}15.43^{a}$	$^{A}15.73^{a}$	15.64	0.607^{ns}
เกลือโลหะ 20	$^{C}10.67^{a}$	$^{C}10.10^{b}$	$^{C}10.37^{ab}$	10.38	6.200^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{C}10.70^{ab}$	$^{C}10.13^{b}$	$^{BC}11.00^{a}$	10.61	5.747^{*}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	12.03	11.19	11.66		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	72.305^{**}	402.467^{**}	74.859^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ค่า CEC ของชุดดินดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ที่มีการทิ้งช่วงเวลาการพักดิน (ตารางที่ 4.14) แสดงให้เห็นว่า การพิจารณาถึงช่วงเวลาของการพักดินตามช่วงเวลานั้น การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ และการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าที่มีในกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีแนวโน้มของค่า CEC ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อดินได้รับการพักดินก็เพิ่มขึ้น ทั้งที่การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีแนวโน้มของค่า CEC เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อดินได้รับการพักดินที่เพิ่มขึ้น ตำรับทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ ก็ล้วนแต่ไม่เกิดความแตกต่างของค่า CEC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่า CEC สูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ มีเพียงช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกเท่านั้นที่การเติมกากตะกอนในอัตรานี้ ที่มีแนวโน้มของค่า CEC สูงกว่าการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์

อาจจะกล่าวได้ว่า การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ส่งผลให้ดินมีค่า CEC สูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ หากแต่ช่วงเวลาการพักดินที่ต่างกันก็ไม่ได้ทำให้เกิดความแตกต่างของค่า CEC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติขึ้นกับการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์

ตารางที่ 4.14 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (มิลลิกรัมสมมูลย์ต่อดิน 100 กรัม) ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{C}10.157^{b}$	$^{B}15.73^{ab}$	$^{BC}17.09^{a}$	16.32	10.964^{**}
เติมปุ๋ย	$^{B}17.59^{a}$	$^{B}15.44^{b}$	$^{B}17.56^{a}$	16.86	7.322^{**}
กากตะกอน 20	$^{B}17.70^{a}$	$^{AB}17.52^{a}$	$^{BC}16.44^{a}$	17.22	3.005^{ns}
กากตะกอน 80	$^{A}19.35^{a}$	$^{A}19.82^{a}$	$^{A}21.07^{a}$	20.08	2.070^{ns}
เกลือโลหะ 20	$^{B}17.74^{a}$	$^{B}16.73^{b}$	$^{BC}16.84^{b}$	17.10	7.986^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{C}15.98^{a}$	$^{B}15.94^{a}$	$^{C}15.76^{a}$	15.89	0.163^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	17.42	16.86	17.46		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	99.319^{**}	8.717^{**}	26.368^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

3.3 ค่าอินทรีย์วัตถุของดิน

ชุดดินดินกำแพงแสน ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง (ตารางที่ 4.15) พบว่าทุกตำรับทดลอง มีการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซนต์อินทรีย์วัตถุในดิน เมื่อดินมีการช่วงเวลาพักดินโดยเทียบกับช่วงเวลาที่ไม่มีการพักดิน แต่การเพิ่มขึ้นของอินทรีย์วัตถุในดินนั้น ไม่เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามช่วงเวลาพักดิน การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ เป็นผลให้ดินมีเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ และโดยส่วนใหญ่การเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์

อินทรีย์วัตถุในดินสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ (ยกเว้น การเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์) ทั้งนี้พิจารณาได้ไม่ว่า ดินนั้นจะมีการพักดินหรือไม่พักดินก็ตาม

อาจจะสรุปได้ว่า การเติมกากตะกอนเป็นการเพิ่มอินทรีย์วัตถุลงสู่ดิน ยิ่งเติมด้วยอัตราที่สูงขึ้น เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุในดินก็สูงขึ้นตาม อย่างไรก็ตามการทิ้งช่วงเวลาพักดิน ที่เพิ่มขึ้น ก็เป็นเพียงแนวโน้มให้มีเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นเท่านั้น หาได้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติไม่

ตารางที่ 4.15 เปอร์เซนต์อินทรีย์วัตถุของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุของชุดดินกำแพงแสน ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{BC}3.03^{a}$	$^{B}3.30^{a}$	$^{B}3.43^{a}$	3.26	1.800^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{B}3.30^{a}$	$^{B}3.60^{a}$	$^{B}3.50^{a}$	3.47	0.656^{ns}
กากตะกอน 20	$^{B}3.50^{a}$	$^{B}4.37^{a}$	$^{B}3.63^{a}$	3.83	3.652^{ns}
กากตะกอน 80	$^{A}8.80^{a}$	$^{A}9.87^{a}$	$^{A}10.13^{a}$	9.60	0.695^{ns}
เกลือโลหะ 20	$^{C}2.57^{a}$	$^{B}2.53^{a}$	$^{B}2.83^{a}$	2.64	0.658^{ns}
เกลือโลหะ 80	$^{C}2.47^{a}$	$^{B}2.87^{a}$	$^{B}3.30^{a}$	2.88	0.604^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	3.94	4.42	4.47		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	238.103^{**}	23.345^{**}	33.026^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุในชุดดินดินสระบุรี เมื่อมีการเก็บเกี่ยวผลผลิตเสร็จแล้วนั้น ดังปรากฏในตารางที่ 4.16 พบว่า การทิ้งช่วงเวลาพักดินที่ต่างกัน ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของเปอร์เซนต์อินทรีย์วัตถุในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับตำรับทดลองใด ๆ เลย การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุในดินสูงกว่าการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ประมาณสองเท่าตัว หากเทียบกับตำรับทดลองอื่น ๆ จะมีเปอร์เซนต์อินทรีย์วัตถุในดินสูงกว่าประมาณสามถึงสี่เท่าตัว โดยพิจารณาในแต่ละช่วงเวลาพักดิน

น่าจะสรุปได้ว่า การพักดินหรือไม่พักดินก็ไม่ได้มีอิทธิพลต่อตำรับทดลองต่าง ๆ ในแง่ความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การเติมกากตะกอนในอัตราที่สูง จะเห็นความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุในดินได้ชัดเจน โดยเทียบกับตำรับทดลองอื่น ๆ จะมีค่าความแตกต่างกันเป็นจำนวนหลายเท่าตัว

ตารางที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุของชุดดินสระบุรี ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{C}1.73^{a}$	$^{B}2.03^{a}$	$^{B}1.93^{a}$	1.90	0.875^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{C}1.83^{a}$	$^{B}1.90^{a}$	$^{B}1.93^{a}$	1.89	0.053^{ns}
กากตะกอน 20	$^{B}2.93^{a}$	$^{B}3.23^{a}$	$^{B}3.37^{a}$	3.18	0.098^{ns}
กากตะกอน 80	$^{A}7.10^{a}$	$^{A}8.03^{a}$	$^{A}7.27^{a}$	7.47	0.622^{ns}
เกลือโลหะ 20	$^{C}1.63^{a}$	$^{B}1.77^{a}$	$^{B}1.90^{a}$	1.77	0.676^{ns}
เกลือโลหะ 80	$^{BC}2.00$	$^{B}1.97$	$^{B}1.70$	1.89	1.197^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	2.87	3.16	3.02		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	86.978^{**}	40.929^{**}	14.999^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

3.4 ค่าฟอสฟอรัสของดิน

ชุดดินกำแพงแสน มีปริมาณฟอสฟอรัสในดิน ดังแสดงในตารางที่ 4.17 พบว่า การทิ้งช่วงเวลาการพักดินให้ต่างกัน มีผลต่อการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์เท่านั้น ที่ปรากฏความแตกต่างของปริมาณฟอสฟอรัสในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่การทิ้งช่วงเวลาพักดินเพิ่มมากขึ้น ปริมาณฟอสฟอรัสในดินก็เพิ่มสูงขึ้น การพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่าการไม่พักดิน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การพิจารณาในแต่ละตำรับทดลองนั้น การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ก็มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ ทั้งในช่วงเวลาการไม่พักดิน และ

การพักดิน นอกจากการทิ้งช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกแล้ว ปริมาณฟอสฟอรัสในดินของตำรับทดลองนี้ ก็มีความแตกต่างกับตำรับทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

ดังนั้น น่าจะเป็นได้ว่า ปริมาณฟอสฟอรัสในดินของตำรับทดลองที่เติมกากตะกอน 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่าสูงกว่าตำรับทดลองอื่นแล้วนั้น อีกทั้งมีปริมาณฟอสฟอรัสในดินสูงขึ้นตามการทิ้งช่วงเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.17 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ของชุดดินกำแพงแสน ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{B}1127^{a}$	$^{AB}1163^{a}$	$^{BC}1231^{a}$	1174	0.530^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{B}1130^{a}$	$^{AB}1136^{a}$	$^{B}1265^{a}$	1177	0.177^{ns}
กากตะกอน 20	$^{B}1034^{a}$	$^{AB}1298^{a}$	$^{BC}1073^{a}$	1135	2.319^{ns}
กากตะกอน 80	$^{A}1422^{b}$	$^{A}1548^{ab}$	$^{A}1680^{a}$	1550	4.938^{*}
เกลือโลหะ 20	$^{CD}876^{a}$	$^{B}863^{a}$	$^{BC}1023^{a}$	921	1.576^{ns}
เกลือโลหะ 80	$^{D}778^{a}$	$^{AB}1041^{a}$	$^{C}942^{a}$	920	1.608^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	1061	1175	1202		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	17.386^{**}	2.082^{*}	16.951^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ฟอสฟอรัสในชุดดินดินสระบุรี ที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน (ตารางที่ 4.18) ปรากฏว่า ไม่เกิดความแตกต่างของปริมาณฟอสฟอรัสในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ไม่ว่าจะเป็นตำรับทดลองใด ๆ ก็ตาม ทั้งที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดินที่ต่างกัน การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีปริมาณฟอสฟอรัสในดินสูงกว่าตำรับทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ทั้งในการไม่พักดิน การพักดินครึ่งและหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก ยกเว้นในการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก มีเพียงการเติมกากตะกอน 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ที่มีปริมาณฟอสฟอรัสในดิน มีแนวโน้มสูงกว่าดินเดิมการเติมปุ๋ยเคมี และการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่ากากตะกอนทั้งสองอัตรา

อาจจะสรุปได้ว่า ช่วงเวลาที่พักดินต่างกัน ไม่ส่งผลต่อตำรับทดลองใด ๆ ในความแตกต่างของปริมาณฟอสฟอรัสในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยภาพรวมนั้นการเติมกากตะกอนก่อให้เกิดปริมาณฟอสฟอรัสในดินสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

ตารางที่ 4.18 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ของชุดดินกำแพงแสน ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{C}480^{a}$	$^{C}499^{a}$	$^{B}503^{a}$	480	0.783^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{C}541^{a}$	$^{C}508^{a}$	$^{B}551^{a}$	541	1.070^{ns}
กากตะกอน 20	$^{B}691^{a}$	$^{B}734^{a}$	$^{B}687^{a}$	691	0.419^{ns}
กากตะกอน 80	$^{A}1122^{a}$	$^{A}1156^{a}$	$^{A}1110^{a}$	1122	0.861^{ns}
เกลือโลหะ 20	$^{C}450^{a}$	$^{C}451^{a}$	$^{B}451^{a}$	450	0.002^{ns}
เกลือโลหะ 80	$^{C}506^{a}$	$^{C}534^{a}$	$^{B}466^{a}$	506	0.499^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	632	647	628		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	122.648^{**}	44.529^{**}	24.310^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

3.5 ค่าไนเตรทไนโตรเจนของดิน

การทิ้งช่วงเวลาพักดินในชุดดินกำแพงแสน ที่มีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดิน ดังตารางที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า การเติมปุ๋ยเคมี มีความแตกต่างกันในปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดิน ช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก มีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินมากกว่าการไม่พักดิน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีแนวโน้มของปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดิน มากกว่าการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก การเติมกากตะกอนใน 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ก็มีปริมาณ ไนเตรทไนโตรเจนในดินที่มีการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกมากกว่าการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติตามลำดับ และมีแนวโน้มของปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินมากกว่าการไม่พักดิน

เมื่อไม่มีการพักดิน การเติมกากตะกอนในอัตราทั้งสอง มีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินมากกว่าตำรับทดลองอื่น อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ หากดินได้รับการพักดินทั้งครึ่งฤดูและหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก การเติมกากตะกอนมีแนวโน้มของปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินมากกว่าการเติมปุ๋ยเคมี และมีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินมากกว่าตำรับทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

น่าจะกล่าวได้ว่า การพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก ก่อให้เกิดปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินมากกว่าการไม่พักดินและการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดิน มีมากในการเติมกากตะกอนทั้งสองอัตรา ทั้งนี้การเติมกากตะกอนในอัตราที่ต่างกัน ก็ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.19 ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ของชุดดินกำแพงแสน ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{BC}83.46^{a}$	$^{B}86.44^{a}$	$^{B}76.14^{a}$	82.01	0.355^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{B}86.44^{b}$	$^{AB}121.65^{a}$	$^{AB}98.33^{ab}$	102.14	4.201^{*}
กากตะกอน 20	$^{A}136.29^{ab}$	$^{A}165.10^{a}$	$^{A}112.96^{b}$	138.12	5.400^{*}
กากตะกอน 80	$^{A}141.09^{ab}$	$^{A}163.04^{a}$	$^{A}108.16^{b}$	137.42	15.054^{**}
เกลือโลหะ 20	$^{C}58.77^{b}$	$^{B}88.95^{a}$	$^{B}81.86^{a}$	76.53	8.174^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{C}58.31^{b}$	$^{B}84.61^{a}$	$^{B}77.75^{a}$	73.55	7.840^{*}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	94.06	118.30	92.53		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	37.562^{**}	10.849^{**}	10.51^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ชุดดินสระบุรีมีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดิน ดังปรากฏในตารางที่ 4.20 พบว่าการเติมปุ๋ยเคมี และการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ได้รับอิทธิพลของช่วงเวลาพักดินที่ต่างกัน ก่อให้เกิดความแตกต่างของปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่การพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกมีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดิน

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่การพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกมีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินสูงกว่าการไม่พักดินและพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก การเติมกากตะกอนมีแนวโน้มของปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินสูงกว่าการเติมปุ๋ยเคมี สำหรับการไม่พักดินและการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก การเติมกากตะกอนมีปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินสูงกว่าตำรับทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

อาจเป็นไปได้ว่า การเติมกากตะกอนเป็นเหตุให้พบปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินสูงกว่าตำรับทดลองอื่น อีกทั้งช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของปริมาณไนเตรทไนโตรเจนในดินกับการเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่เกิดผลนี้กับการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์

ตารางที่ 4.20 ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ปริมาณไนเตรทไนโตรเจน ของชุดดินสระบุรี ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{B}72.03^{a}$	$^{C}48.48^{a}$	$^{B}56.48^{a}$	58.99	1.235^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{B}65.63^{b}$	$^{AB}97.19^{a}$	$^{B}75.91^{b}$	79.58	9.509^{*}
กากตะกอน 20	$^{A}105.64^{b}$	$^{A}132.86^{a}$	$^{A}109.08^{b}$	115.86	4.709^{*}
กากตะกอน 80	$^{A}117.31^{a}$	$^{A}131.25^{a}$	$^{A}130.80^{a}$	126.45	0.967^{ns}
เกลือโลหะ 20	$^{B}66.08^{a}$	$^{B}74.54^{a}$	$^{B}56.02^{a}$	65.55	2.127^{ns}
เกลือโลหะ 80	$^{B}59.23^{a}$	$^{B}66.54^{a}$	$^{B}56.25^{a}$	60.67	0.904^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	80.99	91.81	80.76		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	16.569^{**}	13.607^{**}	26.791^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%

* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

3.6 ค่าแอมโมเนียมไนโตรเจนของดิน

ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดิน ของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 (ตารางที่ 4.21) พบว่าการเติมปุ๋ยเคมี และการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ส่งผลให้ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้น ตามการทิ้งช่วงเวลาการพักดินที่มากขึ้น การเติมกากตะกอน 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ในการพักดินครึ่งและหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกนั้น มีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินสูงกว่าการไม่พักดินอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ขณะที่การพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกมีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินสูงกว่าการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

พิจารณาโดยรวมแล้ว การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีแนวโน้มของปริมาณเมตริกตันต่อเฮกแตร์ในดินสูงกว่าการเติมปุ๋ยเคมีไม่ว่าจะเป็นช่วงเวลาพักดินใด ๆ ก็ตาม

น่าจะสรุปได้ว่า การปล่อยให้ดินมีการพักก่อนเติมสิ่งทดลองครั้งที่ 2 ก่อให้เกิดแนวโน้มของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินที่ไม่มีการพัก และการเติมกากตะกอนได้ให้ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินทัดเทียมกับการเติมปุ๋ยเคมี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.21 ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ของชุดดินกำแพงแสน ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{BC}9.14^{a}$	$^{D}12.58^{a}$	$^{BC}13.49^{a}$	11.74	3.464^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{CD}6.40^{b}$	$^{CD}15.32^{ab}$	$^{AB}21.26^{a}$	14.32	14.527^{**}
กากตะกอน 20	$^{B}10.52^{b}$	$^{BC}20.35^{ab}$	$^{A}26.98^{a}$	19.28	13.960^{**}
กากตะกอน 80	$^{A}22.41^{c}$	$^{A}34.76^{a}$	$^{A}29.50^{b}$	28.89	44.051^{**}
เกลือโลหะ 20	$^{D}4.12^{c}$	$^{A}34.98^{a}$	$^{BC}13.49^{b}$	17.53	293.368^{**}
เกลือโลหะ 80	$^{BCD}7.55^{b}$	$^{B}21.49^{a}$	$^{C}10.75^{b}$	13.26	57.731^{**}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	10.02	23.25	19.25		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	68.412^{**}	55.984^{**}	14.576^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนของชุดดินสระบุรี เมื่อสิ้นสุดการทดลองแล้วนั้น (ตารางที่ 4.22) จะเห็นได้ว่า ดินเดิมและการเติมปุ๋ยเคมี ไม่เกิดความแตกต่างของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตามช่วงเวลาการพักดินที่ต่างกัน เมื่อมีการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกของการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินมากกว่าการไม่พักดินและการพักดินครึ่งฤดูกาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เว้นเสียแต่ในการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ที่มีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินสูงสุดของแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดินนั้น การเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ในการไม่พักดิน ไม่เกิดความแตกต่างของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินกับตำรับทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หากแต่ในการพักดินครึ่งฤดูกาล-เพาะปลูกการเติมกากตะกอนในอัตรานี้ มีความแตกต่างของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินกับการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าในกากตะกอนทั้งสองอัตราอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ และการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก มีความแตกต่างของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินกับตำรับทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

เป็นไปได้ที่น่าจะสรุปว่า การทิ้งช่วงเวลาพักดินที่ต่างกัน ส่งผลให้การเติมกากตะกอนและการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าที่มีในกากตะกอน มีความแตกต่างของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และการเติมกากตะกอนก็ยังให้ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ในแต่ละช่วงเวลาของการพักดิน

ตารางที่ 4.22 ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ของชุดดินสระบุรี ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{B}5.49^{a}$	$^{AB}4.80^{a}$	$^{D}4.12^{a}$	4.80	0.640^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{B}5.03^{a}$	$^{AB}4.80^{a}$	$^{CD}6.86^{a}$	5.56	1.139^{ns}
กากตะกอน 20	$^{B}7.32a^{b}$	$^{AB}5.26^{b}$	$^{B}10.29^{a}$	7.62	6.201^{*}
กากตะกอน 80	$^{A}19.21^{a}$	$^{A}10.75^{b}$	$^{A}13.49^{ab}$	14.48	4.900^{*}
เกลือโลหะ 20	$^{B}6.40^{a}$	$^{B}2.97^{b}$	$^{D}4.80^{ab}$	4.73	9.892^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{B}7.77^{a}$	$^{B}2.74^{b}$	$^{BC}8.46^{a}$	6.33	12.698^{**}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	8.53	5.22	8.00		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	16.893^{**}	4.654^{**}	32.416^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

3.7 ลักษณะของเนื้อดิน

เนื้อดินเป็นลักษณะสมบัติทางกายภาพที่แสดงถึงขนาดของกลุ่มอนุภาค ทราย ซิลท์ และดินเหนียว โดยที่สัดส่วนของกลุ่มอนุภาคดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดประเภทของเนื้อดิน หากเนื้อดินอยู่ในกลุ่มประเภทดินเหนียวจะมีความสามารถในการอุ้มน้ำและดูดซับธาตุอาหารได้ดีกว่าดินทราย แต่มีการถ่ายเทอากาศได้น้อยกว่า

ลักษณะเนื้อดินของชุดดินกำแพงแสนภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 (ตารางที่ 4.23) พบว่าการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของเปอร์เซนต์ทรายและทรายแป้ง เมื่อทิ้งช่วงเวลาพักดินที่ต่างกัน นอกจากนี้

แล้วตามหลักทดลองอื่นๆ มีเปอร์เซนต์ของทราย : ทรายแป้ง : ดินเหนียว ไม่เกิดความแตกต่างของแต่ละกลุ่มขนาดของอนุภาคดิน อย่างชัดเจน

ทั้งนี้น่าจะชี้ให้เห็นได้ว่าแม้เปอร์เซนต์ของทราย : ทรายแป้ง : ดินเหนียว จะมีการปรับเปลี่ยนแต่ก็ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนประเภทดิน ซึ่งเป็นดินร่วนปนทราย

ตารางที่ 4.23 ลักษณะเนื้อดินของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ตำรับทดลอง	ลักษณะเนื้อดิน (เปอร์เซ็นต์)	ชุดดินกำแพงแสน ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน					
		ไม่พักดิน	ประเภท	พักดินครึ่งฤดู	ประเภท	พักดินหนึ่งฤดู	ประเภท
ควบคุม	ทราย	69		67		67	
	ทรายแป้ง	22	ดินร่วนปนทราย	23	ดินร่วนปนทราย	25	ดินร่วนปนทราย
	ดินเหนียว	9		10		8	
เติมปุ๋ย	ทราย	67		67		68	
	ทรายแป้ง	24	ดินร่วนปนทราย	24	ดินร่วนปนทราย	25	ดินร่วนปนทราย
	ดินเหนียว	9		9		7	
กากตะกอน 20	ทราย	68		67		69	
	ทรายแป้ง	22	ดินร่วนปนทราย	24	ดินร่วนปนทราย	22	ดินร่วนปนทราย
	ดินเหนียว	10		9		9	
กากตะกอน 80	ทราย	66		77		59	
	ทรายแป้ง	22	ดินร่วนปนทราย	11	ดินร่วนปนทราย	31	ดินร่วนปนทราย
	ดินเหนียว	12		12		10	
เกลือโลหะ 20	ทราย	67		69		63	
	ทรายแป้ง	24	ดินร่วนปนทราย	22	ดินร่วนปนทราย	27	ดินร่วนปนทราย
	ดินเหนียว	9		9		10	
เกลือโลหะ 80	ทราย	69		71		65	
	ทรายแป้ง	22	ดินร่วนปนทราย	21	ดินร่วนปนทราย	24	ดินร่วนปนทราย
	ดินเหนียว	9		8		11	

ชุดดินสระบุรีมีลักษณะเนื้อดิน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ดังปรากฏในตารางที่ 4.24 พบว่า โดยภาพรวม เปอร์เซนต์ของทราย : ทรายแป้ง : ดินเหนียว มีค่าไม่แตกต่างกันมาก และมีเปอร์เซนต์ของดินเหนียวอยู่มาก จัดอยู่ในประเภทดินร่วนเหนียว ไม่ว่าจะพิจารณาตามตำรับทดลองหรือตามช่วงเวลาพักดินก็ตาม

อาจจะกล่าวได้ว่าทั้งตำรับทดลองที่ต่างกันและการทิ้งช่วงเวลาพักดินที่ต่างกัน ก็ล้วนแต่มิก่อให้เกิดการเปลี่ยนลักษณะเนื้อดิน

ตารางที่ 4.24 ลักษณะเนื้อดินของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ตำรับทดลอง	ลักษณะเนื้อดิน (เปอร์เซ็นต์)	ชุดดินสระบุรี ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน					
		ไม่พักดิน	ประเภท	พักดินครึ่งฤดู	ประเภท	พักดินหนึ่งฤดู	ประเภท
ควบคุม	ทราย	31		34		32	
	ทรายแป้ง	39	ดินร่วนเหนียว	34	ดินร่วนเหนียว	37	ดินร่วนเหนียว
	ดินเหนียว	30		32		31	
เติมปุ๋ย	ทราย	34		35		30	
	ทรายแป้ง	34	ดินร่วนเหนียว	35	ดินร่วนเหนียว	39	ดินร่วนเหนียว
	ดินเหนียว	32		30		31	
กากตะกอน 20	ทราย	36		35		36	
	ทรายแป้ง	32	ดินร่วนเหนียว	35	ดินร่วนเหนียว	37	ดินร่วนเหนียว
	ดินเหนียว	32		30		27	
กากตะกอน 80	ทราย	32		36		34	
	ทรายแป้ง	38	ดินร่วนเหนียว	35	ดินร่วนเหนียว	35	ดินร่วนเหนียว
	ดินเหนียว	30		29		31	
เกลือโลหะ 20	ทราย	38		39		36	
	ทรายแป้ง	30	ดินร่วนเหนียว	31	ดินร่วนเหนียว	33	ดินร่วนเหนียว
	ดินเหนียว	32		30		31	
เกลือโลหะ 80	ทราย	32		31		38	
	ทรายแป้ง	34	ดินร่วนเหนียว	42	ดินร่วนเหนียว	35	ดินร่วนเหนียว
	ดินเหนียว	34		27		27	

ความพรุนของดิน มีความสัมพันธ์กับเนื้อดินซึ่งมีช่องว่างขนาดเล็กในดินเหนียวจะดูดซึมน้ำไว้ได้ ในทางกลับกันช่องว่างขนาดใหญ่ของดินทรายทำให้การระบายอากาศเกิดขึ้นได้มาก

จากตารางที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่น อนุภาคและความหนาแน่นรวมของแต่ละตำรับทดลอง และช่วงเวลาพักดิน มีค่าใกล้เคียงกันมาก เป็นผลให้ค่าความพรุนของดินมีเปอร์เซนต์แตกต่างกันน้อย

น่าจะสรุปได้ว่า ตำรับทดลองที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อความพรุนของดินอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.25 ลักษณะเนื้อดินของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ตำรับทดลอง	ลักษณะเนื้อดิน	ชุดดินกำแพงแสน ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน		
		ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู
ควบคุม	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.57	2.56	2.59
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.30	1.20	1.28
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	49	53	51
เติมปุ๋ย	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.57	2.57	2.56
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.26	1.25	1.27
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	51	51	50
กากตะกอน 20	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.56	2.55	2.54
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.21	1.24	1.27
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	53	51	50
กากตะกอน 80	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.47	2.41	2.46
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.19	1.21	1.21
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	52	50	51
เกลือโลหะ 20	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.56	2.53	2.58
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.26	1.25	1.31
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	51	50	49
เกลือโลหะ 80	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.56	2.59	2.58
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.23	1.25	1.29
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	52	52	50

ความพรุนของดิน ชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 (ตารางที่ 4.26) พบว่า การเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีค่าความพรุนของดินสูงกว่าการเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ถึง 8% ในการพักดิน 1 ฤดูกาล-เพาะปลูก แต่การทิ้งช่วงเวลาพักดินอื่นๆ ความพรุนของดินในการเติมกากตะกอนทั้ง 2 อัตรา มีค่าไม่แตกต่างกันมาก

อาจจะชี้ชัดได้ว่า ประเภทเนื้อดินที่ต่างกันไม่ได้เป็นตัวกำหนดค่าความพรุนของดินให้เกิดความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง

ตารางที่ 4.26 ลักษณะเนื้อดินของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ตำรับทดลอง	ลักษณะเนื้อดิน	ชุดดินสระบุรี ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน		
		ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู
ควบคุม	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.61	2.65	2.64
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.12	1.15	1.21
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	57	56	54
เติมปุ๋ย	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.59	2.65	2.53
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.22	1.14	1.19
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	53	57	53
กากตะกอน 20	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.59	2.57	2.53
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.15	1.23	1.26
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	56	52	50
กากตะกอน 80	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.50	2.49	2.54
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.12	1.18	1.06
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	55	53	58
เกลือโลหะ 20	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.61	2.64	2.65
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.14	1.15	1.19
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	56	56	55
เกลือโลหะ 80	ความหนาแน่นอนุภาค (กรัม/มล.)	2.64	2.65	2.62
	ความหนาแน่นรวม (กรัม/มล.)	1.23	1.21	1.21
	ความพรุนของดิน (เปอร์เซ็นต์)	53	54	54

4. ผลผลิตของพืช

4.1 น้ำหนักพืชกับการทิ้งช่วงเวลา

ผลผลิตของผักคะน้าที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสนในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 ที่มีการทิ้งช่วงเวลาของการพักดิน ดังตารางที่ 4.27 พบว่า ดินเดิมในช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก มีผลผลิตของคะน้าน้อยกว่าประมาณ 2 เท่า ในการเปรียบเทียบผลผลิตของผักคะน้าที่ช่วงเวลาไม่พักดินและพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก แต่กระนั้นก็ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตามช่วงเวลาที่พักดินต่างกัน การเติมปุ๋ยเคมี ในช่วงเวลาไม่พักดิน มีแนวโน้มผลผลิตของผักคะน้าสูงกว่า ช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก และการเติมกากตะกอนทั้งสองอัตรานี้ ในช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกมีแนวโน้มผลผลิตสูงกว่าช่วงเวลาไม่พักดิน

การพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกของตำรับทดลองที่ต่างกัน ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างของผลผลิตของผักคะน้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งที่การเติมกากตะกอนในอัตรา 20

เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีแนวโน้มผลผลิตของผักคะน้าสูงกว่าการเติมกากตะกอน ในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ แม้กระนั้นในการเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ดังกล่าวก็มีผลผลิตของผักคะน้าใกล้เคียงกันกับการเติมเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าในกากตะกอนอัตราเดียวกันด้วย การไม่พักดินและการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกในการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์นี้ มีผลผลิตของผักคะน้าต่ำกว่าตำรับทดลองอื่น

อาจจะสรุปได้ว่า ในการเปรียบเทียบระหว่างช่วงเวลาไม่พักดินกับการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก ตำรับทดลองที่ต่างกันไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของผลผลิตของผักคะน้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เพียงแต่การเติมกากตะกอนทั้งสองอัตรามีแนวโน้มผลผลิตของผักคะน้าสูงขึ้นและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการเติมปุ๋ยเคมี นอกจากนี้แล้ว การเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ แล้วพักดินเพียงครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกเป็นเงื่อนไขที่จะทำให้ได้รับผลผลิตผักคะน้าสูงสุด

ตารางที่ 4.27 ผลผลิตของผักคะน้า ของชุดดินกำแพงแสนในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 ที่มีการทิ้งช่วงเวลาของการพักดิน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 1

ตำรับทดลอง	ผลผลิตของผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง,กรัม) ของชุดดินกำแพงแสนในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{AB}0.43^{a}$	$^{A}0.55^{a}$	$^{AB}0.27^{a}$	0.42	2.870^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{AB}0.57^{a}$	$^{A}0.48^{ab}$	$^{AB}0.21^{b}$	0.42	4.289^{*}
กากตะกอน 20	$^{AB}0.58^{a}$	$^{A}0.68^{a}$	$^{AB}0.23^{b}$	0.50	7.359^{*}
กากตะกอน 80	$^{B}0.30^{ab}$	$^{A}0.34^{a}$	$^{B}0.15^{b}$	0.27	4.900^{*}
เกลือโลหะ 20	$^{AB}0.57^{ab}$	$^{A}0.64^{a}$	$^{A}0.32^{b}$	0.51	5.340^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{A}0.64^{a}$	$^{A}0.54^{ab}$	$^{A}0.28^{b}$	0.49	3.803^{*}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	0.52	0.54	0.24		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	1.977^{*}	1.403^{ns}	2.530^{*}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 มีผลผลิตของผักคะน้าในชุดดินสระบุรี ปรากฏในตารางที่ 4.28 พบว่า ไม่ว่าจะเป็นตำรับทดลองใด ๆ ในช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาล ก็มีผลผลิต

ของผักคะน้าต่ำกว่าในช่วงเวลาไม่พักดินและการพักดินครึ่งฤดูกาลทั้งนั้น ดินเดิมและการเติมปุ๋ยเคมี เมื่อช่วงเวลาพักดินเพิ่มขึ้น จากช่วงเวลาการไม่พักดินเป็นการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะ-ปลูก เป็นผลให้มีแนวโน้มผลผลิตของผักคะน้าเพิ่มขึ้น

การไม่พักดิน ในการเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีผลผลิตของผักคะน้าสูงกว่าตำรับทดลองอื่น ๆ และมีผลผลิตของผักคะน้าสูงกว่าการเติมปุ๋ยเคมีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีผลผลิตของผักคะน้าต่ำกว่าทุกตำรับทดลอง แล้วยังระบุให้ชัดลงไปได้ว่า ผลผลิตของผักคะน้าในตำรับทดลองนี้มีค่าต่ำกว่าดินเดิมและการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าในกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ หากแต่การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างของผลผลิตของผักคะน้ากับการเติมเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าในกากตะกอน 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เป็นไปได้ที่น่าจะกล่าวว่า อัตราเติมที่น้อยมีแนวโน้มผลผลิตของผักคะน้าสูงกว่าอัตราเติมที่มาก ไม่ว่าจะเปรียบเทียบในแง่การเติมกากตะกอนหรือการเติมสารละสายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าในกากตะกอน สำหรับช่วงเวลาของการพักดินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตของผักคะน้าลดต่ำลงเรื่อย ๆ พบในการเติมกากตะกอนและการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าในกากตะกอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.28 ผลผลิตของผักคะน้า ของชุดดินสระบุรี ในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 ที่มีการทิ้งช่วงเวลาของการพักดิน ภายหลังการเก็บเกี่ยว ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ครั้งที่ 1

ตำรับทดลอง	ผลผลิตของผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง,กรัม) ของชุดดินสระบุรี ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{AB}0.98^{a}$	$^{A}1.16^{a}$	$^{A}0.51^{b}$	0.88	6.467*
เติมปุ๋ย	$^{B}0.64^{ab}$	$^{AB}1.02^{a}$	$^{A}0.50^{b}$	0.72	4.043*
กากตะกอน 20	$^{A}1.95^{a}$	$^{AB}0.76^{b}$	$^{A}0.37^{b}$	1.02	7.349*
กากตะกอน 80	$^{AB}1.13^{a}$	$^{B}0.54^{ab}$	$^{A}0.43^{b}$	0.70	4.194*
เกลือโลหะ 20	$^{AB}1.58^{a}$	$^{A}1.28^{a}$	$^{A}0.68^{b}$	1.17	26.928**
เกลือโลหะ 80	$^{AB}1.28^{a}$	$^{AB}1.01^{ab}$	$^{A}0.49^{b}$	1.93	3.949*
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	1.26	0.96	0.49		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	2.557*	5.872**	1.054ns		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

4.2 ลักษณะโครงสร้างของรากผักคะน้า

รากของผักคะน้าเป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงความแตกต่างลักษณะของโครงสร้างรากผักคะน้าที่อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลา และตำรับทดลองที่แตกต่างกัน

ผักคะน้าที่เพาะปลูกในชุดดินกำแพงแสน (รูปที่ ผ. 1,2 และ 3 ในภาคผนวก) พบว่า ลักษณะของโครงสร้างรากผักคะน้าในช่วงเวลาไม่พักดิน (มีการเพาะปลูกผักคะน้าหลังเก็บเกี่ยวผลผลิตฤดูกาลเพาะปลูกครั้งแรกเป็นเวลา 0 วัน) มีกิ่งก้านสาขาของรากมากและมีขนาดใหญ่กว่า เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของโครงสร้างรากผักคะน้าในภาพรวมและลักษณะโครงสร้างของรากคะน้าที่มีขนาดเล็ก จะปรากฏในการทิ้งช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก (มีการเพาะปลูกผักคะน้าหลังเก็บเกี่ยวผลผลิตฤดูกาลเพาะปลูกครั้งแรก เป็นเวลา 50 วัน)

ลักษณะของโครงสร้างรากของผักคะน้าที่เพาะปลูกในชุดดินสระบุรี ดังแสดงในรูปที่ ผ. 3,4 และ 5 ของภาคผนวก จะเห็นได้ว่า โดยภาพรวมของลักษณะโครงสร้างรากผักคะน้าในช่วงเวลาการไม่พักดิน มีลักษณะรากที่มีขนาดใหญ่และกิ่งก้านสาขาของรากมากกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ หากพิจารณาถึงความยาวของลักษณะรากผักคะน้าที่มีมากสุด จะพบลักษณะ

โครงสร้างของรากผักคะน้าในช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก (มีการเพาะปลูกผักคะน้าหลังเก็บเกี่ยวผลผลิตฤดูกาลเพาะปลูก ครั้งแรกเป็นเวลา 25 วัน)

เป็นไปได้ที่น่าจะสรุปว่า ลักษณะของโครงสร้างรากที่แตกต่างกัน เป็นผลมาจากอิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลา และผักคะน้าที่เพาะปลูกในชุดดินสระบุรี ให้ลักษณะโครงสร้างของรากที่มีขนาดและกิ่งก้านสาขาของรากที่มากกว่าชุดดินกำแพงแสน ไม่ว่าจะเป็นการทิ้งช่วงเวลาพักดินใด ๆ ก็ตาม

5. การสะสมโลหะหนักในพืช

ปริมาณสังกะสีในพืช (ส่วนเหนือดินที่บริโภคได้) ของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเพาะปลูกผักคะน้าในฤดูกาลที่ 2 (ตารางที่ 4.29) พบว่า อัตราเติมกากตะกอน 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ส่งผลให้เกิดการสะสมสังกะสีในพืชมากกว่าทุกตำรับทดลอง ไม่ว่าจะมีการทิ้งช่วงเวลาใด ๆ และอัตราเติมกากตะกอนที่ 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ไม่ปรากฏความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณสังกะสีเทียบเท่าที่มีในการเติมกากตะกอนทั้งสองอัตรา ช่วงเวลาการพักดินที่เพิ่มขึ้น การสะสมสังกะสีในพืชเพิ่มขึ้นตามนั้น ปรากฏชัดในการเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ และการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณสังกะสีเทียบเท่าที่มีในการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์

น่าจะสรุปได้ว่า การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ทำให้เกิดการสะสมสังกะสีในพืชมากที่สุด เมื่อพิจารณาตามช่วงเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้น การเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีความชัดเจนของการเพิ่มสังกะสีในพืช

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.29 ปริมาณสังกะสี (Zn) ในพืชของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ปริมาณสังกะสี (Zn) ในพืชของชุดดินกำแพงแสน ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{B}107.72^{a}$	$^{C}50.82^{b}$	$^{B}105.15^{a}$	87.90	6.683^{*}
เติมปุ๋ย	$^{B}93.31^{a}$	$^{BC}58.22^{b}$	$^{B}99.87^{a}$	83.80	11.873^{**}
กากตะกอน 20	$^{B}89.19^{b}$	$^{B}116.80^{ab}$	$^{AB}228.94^{a}$	144.98	4.468^{*}
กากตะกอน 80	$^{A}193.97^{a}$	$^{A}192.69^{a}$	$^{A}498.52^{a}$	295.06	1.823^{ns}
เกลือโลหะ 20	$^{B}68.54^{ab}$	$^{BC}59.97^{b}$	$^{B}136.24^{a}$	88.25	4.024^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{B}69.93^{b}$	$^{BC}92.42^{ab}$	$^{B}149.96^{a}$	104.10	5.617^{*}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	103.78	95.15	203.11		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	16.512^{**}	16.819^{**}	2.486^{*}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

ผักคะน้าที่ปลูกในชุดดินสระบุรี มีการสะสมสังกะสีไว้ในส่วนเหนือที่บริโภคได้ (ตารางที่ 4.30) จะเห็นได้ว่า การเติมกากตะกอนทั้งสองอัตรา มีแนวโน้มของสังกะสีในพืชสูงขึ้น เมื่อเทียบปริมาณสังกะสีในพืช ที่ช่วงเวลาไม่พักดินกับช่วงเวลาพักดิน โดยที่การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีการเพิ่มขึ้นของสังกะสีในพืชตามช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ การเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีสังกะสีในพืชสูงมากกว่า ตำรับทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยเฉพาะในช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

น่าจะเป็นไปได้ว่า โดยภาพรวมการเติมกากตะกอน ก่อให้เกิดการสะสมสังกะสีในพืชได้มากกว่าตำรับทดลองต่าง ๆ และการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ได้รับอิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาพักดินในทางทิศทางการเพิ่มขึ้น ตามช่วงเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.30 ปริมาณสังกะสี (Zn) ในพืชของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ปริมาณสังกะสี (Zn) ในพืชของชุดดินสระบุรี ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{B}54.13^{b}$	$^{B}70.41^{b}$	$^{AB}208.52^{a}$	111.02	30.154^{**}
เติมปุ๋ย	$^{AB}107.07^{ab}$	$^{B}49.46^{b}$	$^{AB}173.91^{a}$	110.14	14.203^{**}
กากตะกอน 20	$^{B}82.23^{b}$	$^{B}93.01^{b}$	$^{A}226.18^{a}$	133.81	34.856^{**}
กากตะกอน 80	$^{A}179.89^{a}$	$^{A}287.88^{a}$	$^{AB}219.51^{a}$	229.09	1.978^{ns}
เกลือโลหะ 20	$^{AB}99.63^{ab}$	$^{B}72.55^{b}$	$^{B}146.83^{a}$	106.34	4.503^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{B}56.40^{b}$	$^{B}78.09^{b}$	$^{B}147.06^{a}$	93.85	30.715^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	96.56	108.57	187.00		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	2.597^{*}	36.357^{**}	5.038^{**}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

การสะสมแคดเมียมในพืชของชุดดินกำแพงแสนในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ปรากฏในตารางที่ 4.31 จะเห็นได้ว่า การเติมปุ๋ยและการเติมกากตะกอนในอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ เมื่อเปรียบเทียบช่วงเวลาไม่พักดินกับการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกจะมีทิศทางการเพิ่มขึ้นของแคดเมียมในพืช หากเปรียบเทียบการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกกับหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกจะมีทิศทางการสะสมแคดเมียมในพืชลดลง การไม่พักดินนั้นไม่ส่งผลตำรับทดลองที่ต่างกัน มีปริมาณแคดเมียมในพืชเกิดความแตกต่างกัน การเติมกากตะกอนก่อให้เกิดปริมาณแคดเมียมในพืชมากกว่าการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมเทียบเท่าที่มีในการเติมกากตะกอน อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

น่าจะกล่าวได้ว่า การพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก ในการเติมกากตะกอนทั้งสองอัตรา ก่อให้เกิดการสะสมแคดเมียมในผักคะน้าสูงสุด การเติมกากตะกอนในอัตราที่สูง จะมีแนวโน้มการสะสมแคดเมียมในผักคะน้าสูงกว่าอัตราที่ต่ำกว่า นอกจากนั้นแล้ว การเติมกากตะกอนยังไม่ส่งผลให้เกิดการสะสมแคดเมียมในผักคะน้าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับดินเดิม

ตารางที่ 4.31 ปริมาณแคดเมียม (Cd) ในพืชของชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ปริมาณแคดเมียม (Cd) ในพืชของชุดดินกำแพงแสน ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{A}0.2094^{a}$	$^{ABC}0.2920^{a}$	$^{AB}0.2481^{a}$	0.2499	1.923^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{A}0.2176^{ab}$	$^{BC}0.3105^{a}$	$^{B}0.2071^{b}$	0.2451	4.119^{*}
กากตะกอน 20	$^{A}0.1775^{b}$	$^{A}0.3390^{a}$	$^{AB}0.2599^{ab}$	0.2588	7.137^{*}
กากตะกอน 80	$^{A}0.2065^{b}$	$^{A}0.3389^{a}$	$^{A}0.3156^{a}$	0.2870	7.183^{*}
เกลือโลหะ 20	$^{A}0.1892^{a}$	$^{C}0.1862^{a}$	$^{AB}0.2494^{a}$	0.2083	1.961^{ns}
เกลือโลหะ 80	$^{A}0.1686^{b}$	$^{BC}0.2024^{ab}$	$^{AB}0.2464^{a}$	0.2058	8.164^{*}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	0.1948	0.2781	0.2544		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	1.150^{ns}	3.998^{*}	2.084^{*}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

จากตารางที่ 4.32 แสดงให้ทราบว่า ช่วงเวลาที่ต่างกัน ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างของการสะสมแคดเมียมในผักคะน้าอย่างมีนัยสำคัญกับดินเดิม และการเติมกากตะกอนทั้งอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีการสะสมแคดเมียมในผักคะน้าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมเทียบที่มีในการเติมกากตะกอนอัตราเดียวกัน

น่าจะสรุปได้ว่า การพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก มีแนวโน้มการสะสมแคดเมียมในผักคะน้าสูงกว่าการไม่พักดิน ไม่ว่าจะเป็นตำรับทดลองใด ๆ และการเติมกากตะกอนไม่เกิดความแตกต่างของการสะสมแคดเมียมในผักคะน้ากับดินเดิมอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.32 ปริมาณแคดเมียม (Cd) ในพืชของชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	ปริมาณแคดเมียม (Cd) ในพืชของชุดดินสระบุรี ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน				
	ไม่พักดิน	พักดินครึ่งฤดู	พักดินหนึ่งฤดู	เฉลี่ยตามช่วงเวลาพักดิน	F-Value (ตามช่วงเวลา)
ควบคุม	$^{A}0.3897^{a}$	$^{AB}0.4397^{a}$	$^{B}0.2720^{a}$	0.3671	2.952^{ns}
เติมปุ๋ย	$^{AB}0.2181^{b}$	$^{A}0.5683^{a}$	$^{A}0.5270^{a}$	0.4378	14.487^{*}
กากตะกอน 20	$^{AB}0.3027^{a}$	$^{B}0.3442^{a}$	$^{AB}0.4326^{a}$	0.3598	1.247^{ns}
กากตะกอน 80	$^{A}0.3882^{a}$	$^{A}0.5882^{a}$	$^{AB}0.3439^{a}$	0.4401	3.051^{ns}
เกลือโลหะ 20	$^{AB}0.2589^{b}$	$^{AB}0.4130^{a}$	$^{AB}0.3458^{ab}$	0.3392	3.817^{*}
เกลือโลหะ 80	$^{B}0.1842^{a}$	$^{B}0.2759^{a}$	$^{B}0.3149^{a}$	0.2583	1.625^{ns}
เฉลี่ยตามตำรับทดลอง	0.2903	0.4382	0.3727		
F-Value(ตามตำรับทดลอง)	2.798^{*}	4.749^{*}	2.489^{*}		

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวนอน แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามระยะเวลา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันตามตำรับทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
* หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%
ns หมายถึง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
วิจารณ์ผลการทดลอง

1. ลักษณะสมบัติดินและกากตะกอน

1.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ

ดินที่นำมาใช้ทดลองมีความแตกต่างของประเภทเนื้อดิน โดยที่ชุดดินกำแพงแสนเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) อยู่ในกลุ่มดินเนื้อค่อนข้างหยาบความหนาแน่นอนุภาคมีค่าเท่ากับ 2.57 กรัม/มิลลิลิตร ความหนาแน่นรวม มีค่าเท่ากับ 1.30 กรัม/มิลลิลิตร เมื่อคำนวณเป็นค่าความพรุนของดินเท่ากับ 49 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.2)

สำหรับชุดดินสระบุรีเป็นดินร่วน (loam) อยู่ในกลุ่มดินเนื้อปานกลาง ความหนาแน่นอนุภาคมีค่าเท่ากับ 2.56 กรัม/มิลลิลิตร ความหนาแน่นรวมมีค่าเท่ากับ 1.32 กรัม/มิลลิลิตร จึงได้ค่าความพรุนของดินเท่ากับ 48 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.2)

ดินทั้งสองชุดดินดังกล่าว มีความพรุนของดินโดยประมาณ 50% เป็นส่วนที่เป็นช่องว่างที่เป็นส่วนที่อยู่ของสารละลายดินและอากาศ ซึ่งเป็นดินที่มีความพรุนเหมาะสมในการเกษตร (ศุภมาศ, 2540) ทำให้ทราบว่า ลักษณะทางกายภาพของชุดดินที่นำมาทดลองไม่ได้เป็นข้อจำกัดสำหรับการเจริญเติบโตของผักคะน้า

1.2 ลักษณะสมบัติทางเคมี

ดินและกากตะกอนที่ใช้ในการศึกษา (ตารางที่ 4.1) มีสภาพเป็นกลางซึ่งเป็นการช่วยลดสภาพดินเป็นกรด ภายหลังการเพาะปลูกพืช หรือกล่าวอีกนัยได้ว่า ช่วยลดสภาพการละลายได้ดีของโลหะหนักออกสู่สารละลายดิน

ปริมาณธาตุอาหารของดินและกากตะกอน (ตารางที่ 4.1) เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวเลขที่วิเคราะห์ทางเคมีที่ได้กับเกณฑ์ของกองจำแนกดิน กรมพัฒนาที่ดิน ที่กล่าวถึงการจำแนกความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยเล็ก มอญเจริญ (2522, ตารางที่ 5.1) บอกให้ทราบถึงกากตะกอนมีความอุดมสมบูรณ์ของอินทรีย์วัตถุอยู่ในเกณฑ์ที่สูงมาก (>4.5%) ส่วนดินในชุดกำแพงแสนและสระบุรี มีอินทรีย์วัตถุอยู่ในเกณฑ์สูง (3.5-4.5) และปานกลาง (1.5-2.5) ตาม

ลำดับ กากตะกอนมีอินทรีย์วัตถุมากจึงมีความสามารถที่ให้ไนโตรเจนอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที โดยมีค่าแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงถึง 1,330.84 ppm. สำหรับธาตุอาหารหลักฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินทั้งสองชุดมีอยู่ในเกณฑ์สูงมาก (>45 ppm.) ซึ่งไม่ต้องพึ่งพาสิ่งที่จะได้รับจากการเติมกากตะกอน และธาตุอาหารหลักโปแตสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในกากตะกอน ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์สูงมาก (>120 ppm.) จะเป็นการช่วยเพิ่มปริมาณโปแตสเซียมในดิน ทั้งนี้ชุดดินกำแพงแสนมีโปแตสเซียมอยู่ในเกณฑ์สูง (90-120 ppm.) หากแต่ชุดดินสระบุรีมีเกณฑ์โปแตสเซียมอยู่ในระดับต่ำ (30-60 ppm.)

อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการดูดซับธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช มิให้ถูกชะล้างไปโดยง่าย เมื่อนำเกณฑ์กำหนด ระดับ CEC ของศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (ตารางที่ 5.2, 2540) มาประเมินระดับ CEC ของดิน ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ พบว่า ชุดดินกำแพงแสนมีค่า CEC ของดิน (8.2 me/100g soil, ตารางที่ 4.1) จัดอยู่ในระดับต่ำปานกลาง (5-10 me/100g soil) ส่วน CEC ของชุดดินสระบุรี (14.3 me/100g soil, ตารางที่ 4.1) จัดอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง (10-15 me/100g soil)

ดังนั้น กากตะกอนน่าจะมีศักยภาพเป็นแหล่งธาตุอาหารได้ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ส่วนดินที่มาทดลองมีธาตุอาหารหลักของพืชอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง

ถึงกระนั้น โลหะหนักในดินและกากตะกอนก็เป็นข้อจำกัดการใช้ประโยชน์จากการเติมกากตะกอนลงสู่ดิน เนื่องจากมีสารที่มีโอกาสเป็นพิษที่ปนเปื้อนไม่ว่าจะเป็นอยู่ในดินหรือกากตะกอน จึงใช้โลหะหนักแคดเมียม (Cd) เป็นตัวบ่งบอก แต่แคดเมียม (Cd) ที่พบได้มีปริมาณน้อยจากการตรวจสอบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ข้อจำกัดในการจัดปริมาณ Detection limit, วิธีการสกัด, ปริมาณที่มีอยู่ในสิ่งที่ต้องการจัด เป็นต้น ดังนั้น การใช้โลหะหนักสังกะสี (Zn) ที่สามารถตรวจสอบได้ง่าย และเกี่ยวข้องกับแคดเมียม (Cd) โดยคาดหวังการพิจารณาถึงสัดส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ในการประเมินโอกาสที่จะเสี่ยงต่อความเป็นพิษจากแคดเมียม (Cd)

จากข้อมูลของชนิดและปริมาณของโลหะหนักในดินของประเทศต่าง ๆ (ตารางที่ 5.3) และปริมาณโลหะหนักสูงสุดที่ยอมรับให้มีได้ในกากตะกอนที่จะใส่ลงในพื้นที่การเกษตรของประเทศต่าง ๆ (ตารางที่ 5.4) เสนอโดย Webber et al. (1984) กล่าวได้ว่า ปริมาณโลหะหนักแคดเมียมและสังกะสีในดินทดลอง (ตารางที่ 4.1) มีการปนเปื้อนน้อย สำหรับโลหะหนัก

ในกากตะกอน (ตารางที่ 4.1) นั้น สังกะสีมีปริมาณอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับของประเทศฟินแลนด์และสวีเดน หากแต่ปริมาณแคดเมียมในกากตะกอนอยู่ในเกณฑ์ของทุกประเทศที่ Webber et al. (1984) รวบรวมไว้ จึงไม่น่าจะเกิดความเสี่ยงของความเป็นพิษแก่พืช อันเนื่องมาจากโลหะหนักแคดเมียมที่มีการเติมกากตะกอนให้แก่ดิน

2. อิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาพักดิน เมื่อมีการเติมกากตะกอน

2.1 การสะสมแคดเมียมและสังกะสีในดิน

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.3 และ 4.4 ถึงปริมาณแคดเมียมที่สะสมอยู่ในดินทั้งสองชุดดิน พบว่า การเติมกากตะกอนในอัตราต่าง ๆ มีผลต่อการเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน ซึ่งสอดคล้องผลการศึกษาวิจัยของ อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ (2532) อีกทั้งอัตราเติมกากตะกอนที่แตกต่างกัน ก็มีผลให้ปริมาณโลหะหนักสะสมแตกต่างกันด้วย ยิ่งเพิ่มอัตราเติมมากเท่าไร ก็เท่ากับเป็นการเพิ่มแคดเมียมให้มีในดินมากขึ้น แต่การเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ เป็นอัตราการใช้กากตะกอนโดยทั่วไปกับการใช้เพาะปลูกพืช (Miller, 1995) และเป็นอัตราเติมที่เหมาะสมที่ก่อให้เกิดการสะสมแคดเมียมในดินต่ำสุด

การใช้ประโยชน์จากกากตะกอนในทางการเกษตรได้พิสูจน์ว่า เป็นวิธีปลอดภัยในการจัดการของเสียแต่ประโยชน์ของการใช้กากตะกอนนี้ก็มีข้อจำกัด เนื่องจากปริมาณของโลหะหนักเป็นพิษที่มีหลากหลาย (Hooda และ Alloway, 1996) นอกจากนี้ โลหะหนักที่พบในกากตะกอน (เช่น Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) เป็นปัญหาหลักที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ของกากตะกอนลงสู่ดิน โลหะหนักเหล่านี้สามารถถูกชะล้างลงสู่ชั้นดิน และอาจปนเปื้อนในระดับน้ำใต้ดินหรือสะสมในดินชั้นบน และเป็นพิษต่อพืช แล้วโลหะหนักดังกล่าวนี้เข้าสู่สายใยอาหาร ทำให้เกิดความเป็นพิษในคนและสัตว์ (Williams et al., 1980; Williams et al., 1987; Vlamis et al., 1985 อ้างถึงใน Gigliotti et al., 1996) จากเหตุผลเหล่านี้เป็นเหตุผลให้เกิดข้อกำหนดต่าง ๆ ในทางปฏิบัติของการใช้กากตะกอนในพื้นที่เพื่อการเพาะปลูก โดยพิจารณาถึงการจำกัดปริมาณโลหะหนักให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย

การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคดเมียมในดิน ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อมนุษย์หรือไม่ จึงจำเป็นที่จะต้องนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานระหว่างประเทศที่อ้างถึงปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดินที่มีการใช้กากตะกอนที่อนุญาตให้มีได้สูงสุด (ตารางที่ 2.2) โดยที่ช่วงของปริมาณแคดเมียมที่ยอมรับได้อยู่ที่ 39-1.6 kg/ha (พื้นที่ 1 ha เทียบเท่ากับน้ำหนัก

ดิน 2,000,000 kg.) หรือ 19.5 – 0.8 ppm สำหรับช่วงของปริมาณแคดเมียมภายหลังการเพาะปลูกผักคะน้าที่มีการเติมกากตะกอนในชุดดินกำแพงแสนมีค่า 0.1 - 0.4 ppm หากเป็นชุดดินสระบุรีจะมีค่า 0.05 - 0.3667 ppm จึงกล่าวได้ว่า การสะสมแคดเมียมในดินภายหลังการเพาะปลูกผักคะน้าที่มีการเติมกากตะกอนมีปริมาณแคดเมียมในดินไม่เกินมาตรฐาน จึงไม่เป็นการเสี่ยงอันตรายที่จะเกิดขึ้นจากสารพิษที่เป็นโลหะหนัก

ปริมาณสังกะสีที่สะสมอยู่ในชุดดินกำแพงแสนและสระบุรี ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าสังกะสีจะสะสมในดินเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของอรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ (2532) หากนำค่าสังกะสีที่มีปริมาณสูงสุดในดินภายหลังการเติมกากตะกอนของแต่ละชุดดินมาพิจารณา ปริมาณสังกะสีสูงสุดของชุดดินกำแพงแสนเท่ากับ 152.88 ppm และปริมาณสังกะสีสูงสุดของชุดดินสระบุรีเท่ากับ159.58 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของสังกะสีในดินที่มีการใช้กากตะกอนที่อนุญาตให้มีได้ สูงสุด ซึ่งมีช่วงของสังกะสีที่ยอมรับได้เท่ากับ 2,800-250 Kg/ha หรือ 1,400-125 ppm เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าการสะสมสังกะสีในดินอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ว่าปลอดภัยจากโลหะหนักสังกะสี

2.2 การสะสมแคดเมียมและสังกะสีในพืช

โดยทั่วไปในกากตะกอนมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่หลายชนิด แต่พืชก็มีการจำกัดการสะสมโลหะหนักในลักษณะที่ต่าง ๆ กัน เช่น ตะกั่ว (Pb) มีการเคลื่อนย้ายเข้าสู่พืชได้น้อยมาก และสะสมเพียงเฉพาะที่รากพืชเท่านั้น จากงานวิจัยของ Gigliotti et al. (1996) สำหรับสารหนู (As) ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่พืชดูดดึงไม่ได้ เนื่องจากถูกดูดซับโดยไฮดรัสออกไซด์ของ Fe, Al ส่วนปรอท (Hg) อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ในดิน จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคดินเหนียวหรืออินทรีย์วัตถุโดยรวดเร็ว ทำให้พืชไม่สามารถดูดดึงไปสะสมได้ทันที และนิกเกิล (Ni) ถือว่าเป็นสารไม่อันตรายรุนแรงมากในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เนื่องจากทางเดินอาหารดูดซึมนิกเกิลได้ต่ำ แต่นิกเกิลค่อนข้างเป็นพิษต่อพืช และโครเมียม (Cr) มีความเป็นพิษคล้ายกับนิกเกิล (ศุภมาศ, 2540) อย่างไรก็ตาม แคดเมียม (Cd) ในดินมีความเป็นพิษต่อสัตว์มาก เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักนี้ ในเนื้อเยื่อพืชอาจสูงจนเป็นเหตุให้สามารถเกิดความเป็นพิษต่อสัตว์และมนุษย์ที่ได้รับเข้าไป ก่อนที่จะมีการส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช ดังนั้น การจำกัดแคดเมียมที่มีอยู่ในดินได้พัฒนา โดยอาศัยพื้นฐานจากผลกระทบของศักยภาพอาหารที่มนุษย์บริโภคที่มีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นแคดเมียมในพืช อันเนื่องมาจากการใช้กากตะกอนในพื้นที่เกษตรกรรม (Smith, 1994)

ปริมาณโลหะหนักที่เป็นพิษ คือ แคดเมียมที่มีในส่วนเหนือดินที่บริโภคได้ของผักคะน้า จากในตารางที่ 4.32 และ 4.33 ตรวจพบแคดเมียมในส่วนเหนือดินของผักคะน้าที่ผ่านการเพาะปลูกในชุดดินกำแพงแสน ภายหลังการเติมกากตะกอน มีช่วงการสะสมแคดเมียมในพืชเท่ากับ 0.1775 ppm ถึง 0.3390 ppm และส่วนเหนือดินของผักคะน้าที่ปลูกในชุดดินสระบุรีมีปริมาณแคดเมียมสะสมอยู่ 0.3027 ppm ถึง 0.582 ppm เมื่อนำค่าที่ได้จากการตรวจวัดดังกล่าวมาเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักแคดเมียมในพืช ณ ระดับปกติ และระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช (Chaney , 1982) ในตารางที่ 5.5 บ่งบอกได้ว่า ปริมาณแคดเมียมที่มีอยู่ในผักคะน้าอยู่ในระดับปกติที่จะไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช

ปริมาณโลหะหนักที่เป็นจุลธาตุอาหาร คือ สังกะสี ผักคะน้าดึงดูดสังกะสีไปสู่ส่วนเหนือดินได้ในปริมาณมาก ดังในตารางที่ 4.30 และ 4.31 การเติมกากตะกอนส่งผลให้ปริมาณสังกะสีในพืชที่ปลูกชุดดินกำแพงแสนมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 498.52 ppm.หากผักคะน้าเพาะปลูกในชุดดินสระบุรีจะมีปริมาณสังกะสีสูงสุดในส่วนเหนือดินเท่ากับ 287.88 ppm. แม้ว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในพืชมีปริมาณมาก แต่ก็ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช

สำหรับสังกะสีสะสมในส่วนเหนือดินของผักคะน้าได้ในปริมาณสูงขึ้นตามอัตราเติมกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อรรณพ หอมจันทร์ (2535) ที่ได้เสนอว่า สังกะสีแสดงพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นตามปริมาณสังกะสีที่ถูกปลดปล่อยจากกากตะกอน ณ ระดับต่าง ๆ อย่างชัดเจน ทั้งในดินและส่วนบริโภคได้ของผักคะน้า

2.3 เปรียบเทียบผลการทิ้งช่วงเวลาในการเติมกากตะกอนต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสี

ถึงแม้ว่า จะมีการศึกษามากมายเพื่อหาปัจจัยหลายปัจจัยที่แตกต่างกันที่เป็นสาเหตุให้เกิดการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในพืช (Voutsa et al, 1997) ปัจจัยที่เด่นชัดและยอมรับกันโดยทั่วไปว่า ความเป็นกรด-ด่าง ของดิน (pH) ส่งผลต่อการสะสมโลหะหนักในพืช อย่างไรก็ตาม ปัจจัยการทิ้งช่วงเวลาในการเติมกากตะกอน เพื่อเพาะปลูกซ้ำอีกนั้น ก็อาจจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของโลหะหนักในพืช ซึ่งสอดคล้องกับแนวความคิดของ McBride (1995) ได้เสนอว่า การสะสมโลหะหนักในพืช สามารถคาดการณ์จากการเพิ่มขึ้นของการย่อยสลายกากตะกอนที่เป็นอินทรีย์วัตถุ โดยเรียกว่า ผลกระทบของ “time bomb” และงานวิจัยของ Robertson et al. (1982) และ Hooda กับ Alloway (1993) อ้างถึงใน Hooda et al. (1997) ได้รายงานไว้ดังนี้ หลังจากที่มีการใช้กากตะกอนเสร็จสิ้นการเพาะปลูกดินจะค่อย ๆ

ปรับสมดุลทางชีวเคมีขึ้นใหม่ (new biochemical equilibrium) เนื่องมาจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ และปัจจัยอื่น ๆ

จากตารางที่ 4.29 และ 4.30 การทิ้งช่วงเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดแนวโน้มการดูดดึงสังกะสีในพืชเพิ่มขึ้นตาม จากตารางที่ 4.31 และ 4.32 แคดเมียมถูกพืชดูดดึงไปสะสมไว้ มี แนวโน้มในลักษณะเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาพักดิน ในกากตะกอนที่เติมลงสู่ดินมีการให้สังกะสีออกมามาก ส่งผลให้พืชดูดดึงแคดเมียมมากไปตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ ของ Haghiri (1974), Honma และ Hirata (1978) และ Abdel-Sabour et al. (1988) อ้างถึงใน Oliver et al. (1994) ที่รายงานไว้ว่า การสะสมแคดเมียมในพืช มีอิทธิพลมาจากการใช้สังกะสีของพืช ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากความสัมพันธ์ของสังกะสีและแคดเมียมในเชิงลักษณะสมบัติทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน ที่แคดเมียมมีพฤติกรรมคล้ายสังกะสีทั้งการดูดดึงและปฏิกิริยาต่าง ๆ ในพืช (Mengel และ Kirkby , 1982) การทิ้งช่วงเวลาพักดินเป็นการเพิ่มระยะเวลาการย่อยสลายอินทรีย์ในดินให้ปลดปล่อยธาตุอาหารออกสู่สารละลายดินได้มากขึ้น พืชจึงดูดดึงไปสะสมไว้ได้มากตาม

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 แคดเมียมมีแนวโน้มลักษณะการสะสมในดินด้วยทิศทางที่ผกผันกับช่วงเวลาพักดิน จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 การทิ้งช่วงเวลาในการเติมกากตะกอนนั้น มีแนวโน้มการสะสมทั้งสังกะสีในดินในลักษณะที่เพิ่มขึ้นตามการทิ้งช่วงเวลา ปริมาณแคดเมียมในกากตะกอนมีปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับปริมาณสังกะสีในกากตะกอน หลังจากที่พืชดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มช่วงเวลาในการพักดิน น่าจะเป็นผลให้แคดเมียมสะสมในดินลดลงตามช่วงเวลาการพักดิน

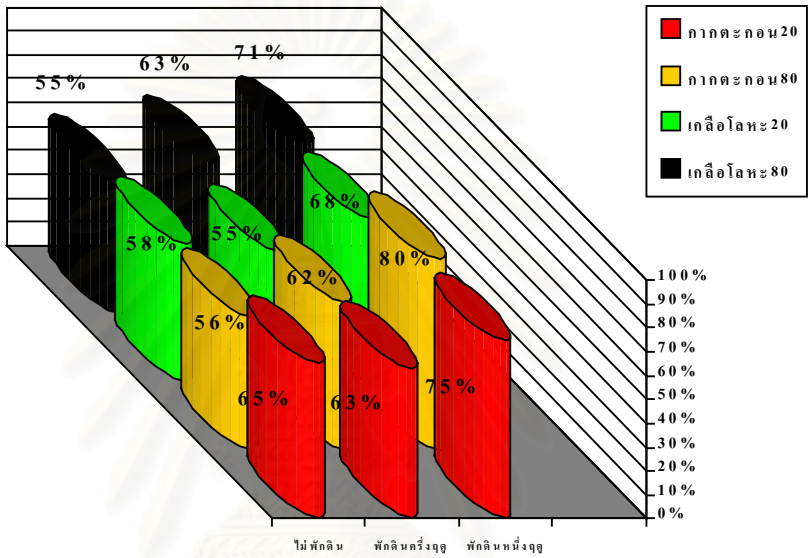
พิจารณาสัดส่วนสัมพัทธ์ของปริมาณสังกะสี (Zn) ในผักคะน้า (%) ดังปรากฏว่า รูปที่ 5.1 และ 5.2 ทำให้ทราบได้ว่า การเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณสังกะสี เทียบเท่าที่มีในการเติมกากตะกอนในอัตราที่สูง (80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์) มีผลให้ผักคะน้ามีการตอบสนองที่ดูดดึงสังกะสีไปสะสมไว้ในส่วนเหนือดินในปริมาณที่มากขึ้นตามการทิ้งช่วงระยะเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะสังกะสีมีธาตุอาหารพืชและมีปริมาณของรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอยู่เป็นจำนวนมากทั้งที่มาจากดินและสารละลายที่เติม

สำหรับสัดส่วนสัมพัทธ์ของปริมาณแคดเมียม (Cd) ในผักคะน้า แสดงให้เห็นว่า การเติมกากตะกอนอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ของชุดดินกำแพงแสน (รูปที่ 5.3) มีสัดส่วนดังกล่าวลดลงเมื่อดินนั้นได้รับการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกและหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก ในทางกลับกัน สัดส่วนนี้ในชุดดินสระบุรี (รูปที่ 5.4) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการทิ้งช่วงเวลาพักดินที่

มากขึ้น น่าจะมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของลักษณะสมบัติดินของชุดดินที่ต่างกัน ชุดดินกำแพงแสนมีเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียว (clay) อยู่น้อย (อยู่ในช่วง 7 – 12 %, ตารางที่ 4.23) แต่ชุดดินสระบุรีมีเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคดินเหนียว (clay) อยู่มากกว่า (อยู่ในช่วง 27 – 34%,ตารางที่ 4.24) เนื่องจากส่วนใหญ่ของอนุภาคดินเหนียวเป็นส่วนของอนินทรีย์คอลลอยด์ (inorgmaic colloid) มีประจุลบมากกว่าประจุบวกเป็นจำนวนมาก จึงก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนและดูดยึดประจุบวกได้ดี (ไพบูลย์ , 2528) ชุดดินสระบุรีเป็นดินเนื้อละเอียดกว่าชุดดินกำแพงแสน อาจทำให้การดูดซับแคดเมียมที่มีประจุบวกได้มากกว่าและมีการสะสมไว้ในดินได้มาก ส่งผลให้การดูดดึงแคดเมียมในผักคะน้าเพิ่มขึ้น ตามช่วงเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วงเวลาพักดินที่มากขึ้น จุลินทรีย์ในดินก็มีโอกาสย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในดิน แล้วปลดปล่อยแคดเมียมออกมากให้พืชดูดดึงไปสะสมได้มากเช่นกัน

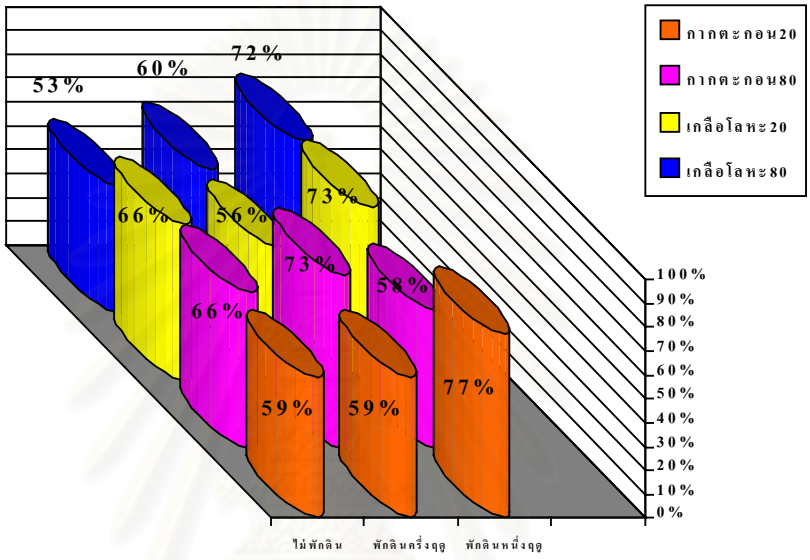
เมื่อนำปริมาณสังกะสีและแคดเมียมมาคำนวณในรูปสัดส่วนของโลหะหนักทั้งสอง (Zn/Cd ratio) ดังแสดงในตารางที่ 5.8 และตารางที่ 5.9 บอกให้ทราบว่า ทั้งชุดดินกำแพงแสนและชุดดินสระบุรีที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก ชักนำให้สัดส่วนสังกะสีและแคดเมียมในผักคะน้ามีค่ามากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นการเติมกากตะกอนหรือการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าที่มีในการเติมกากตะกอน เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาพักดินที่ต่างกัน นั่นน่าจะเป็นผลมาจากการทิ้งช่วงเวลาพักดินให้นานขึ้น ก่อให้กิจกรรมจุลินทรีย์ในดินมีโอกาสย่อยสลายอินทรีย์ได้เพิ่มมากขึ้นจากเดิม การดูดดึงไปสะสมไว้ในผักคะน้าจึงเกิดขึ้นได้มาก

สัดส่วนของสังกะสีและแคดเมียม (Zn/Cd ratio) มีค่ามาก นั่นอาจจะหมายถึงการแสดงความเป็นพิษของสังกะสีออกมาก่อนที่จะเกิดความเป็นพิษที่รุนแรงของแคดเมียม โดยมีการเสนอสัดส่วนของสังกะสีและแคดเมียมในดินเพื่อความปลอดภัยจากโลหะหนักไว้ที่มากกว่า 200 (Greenland และ Hayes , 1981) และ 100 (Miller et al, 1995) สำหรับสัดส่วนของสังกะสีและแคดเมียมในพืช Chaney (1982) ได้เสนอสัดส่วนนี้ว่าน่าจะมากกว่า 100 การแสดงอาการความเป็นพิษของสังกะสีต่อพืช เป็นไปในลักษณะการสูญเสียคลอโรฟิลถึง 50% และการเจริญของรากลดลง (Mengel และ Kirkby, 1982) นอกจากนี้ในงานวิจัยของ IRPTC (1973) อ้างถึงในกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2541) ยังพบว่าสังกะสีช่วยต่อต้านพิษ (antagonism) ของแคดเมียมในการใช้หนูทดลอง



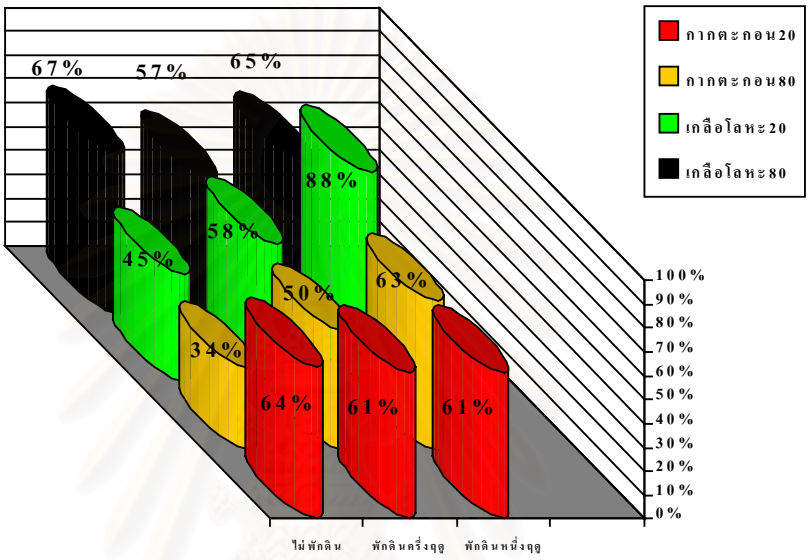
รูปที่ 5.1 สัดส่วนสัมพัทธ์ของปริมาณสังกะสี (Zn) ในผักคะน้า (%) ของชุดดินกำแพงแสน เมื่อกำหนดให้ปริมาณที่วิเคราะห์พบในพืชรวมกับในดิน เท่ากับ 100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



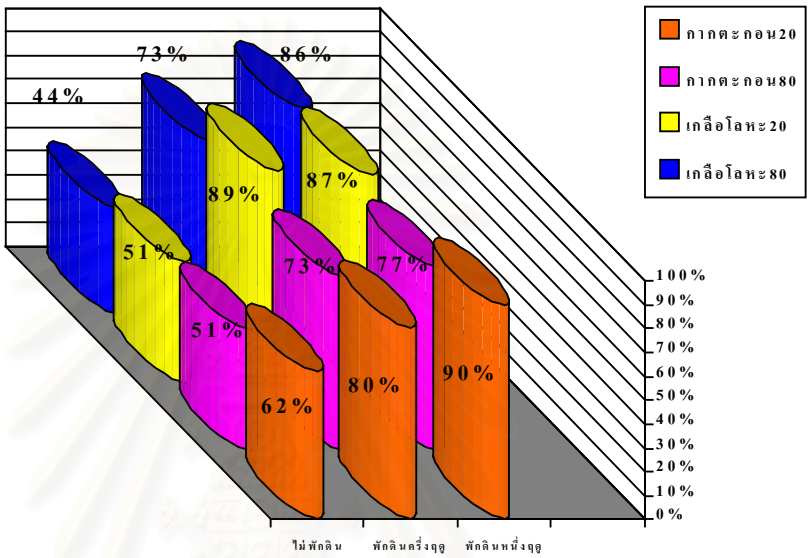
รูปที่ 5.2 สัดส่วนสัมพัทธ์ของปริมาณสังกะสี (Zn) ในผักคะน้า (%) ของชุดดินสระบุรี เมื่อกำหนดให้ปริมาณที่วิเคราะห์พบในพืชรวมกับในดิน เท่ากับ 100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 สัดส่วนสัมพัทธ์ของปริมาณแคดเมียม (Cd) ในผักคะน้า (%) ของชุดดินกำแพงแสน เมื่อกำหนดให้ปริมาณที่วิเคราะห์พบในพืชรวมกับในดิน เท่ากับ 100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.4 สัดส่วนสัมพัทธ์ของปริมาณแคดเมียม (Cd) ในผักคะน้า (%) ของชุดดินสระบุรี เมื่อกำหนดให้ปริมาณที่วิเคราะห์พบในพืชรวมกับในดิน เท่ากับ 100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

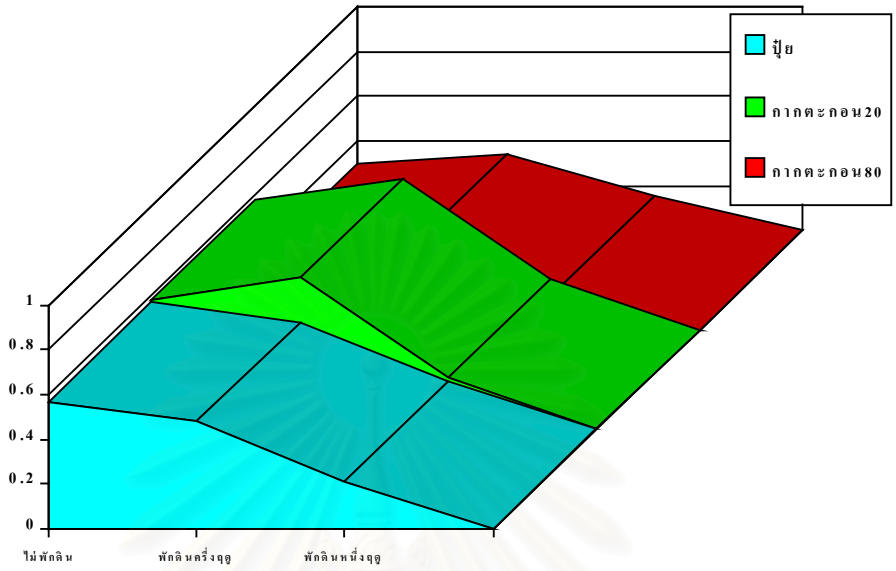
3. ผลผลิตผักคะน้า

3.1 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าเมื่อมีการเติมกากตะกอนและทิ้งช่วงเวลาพักดิน

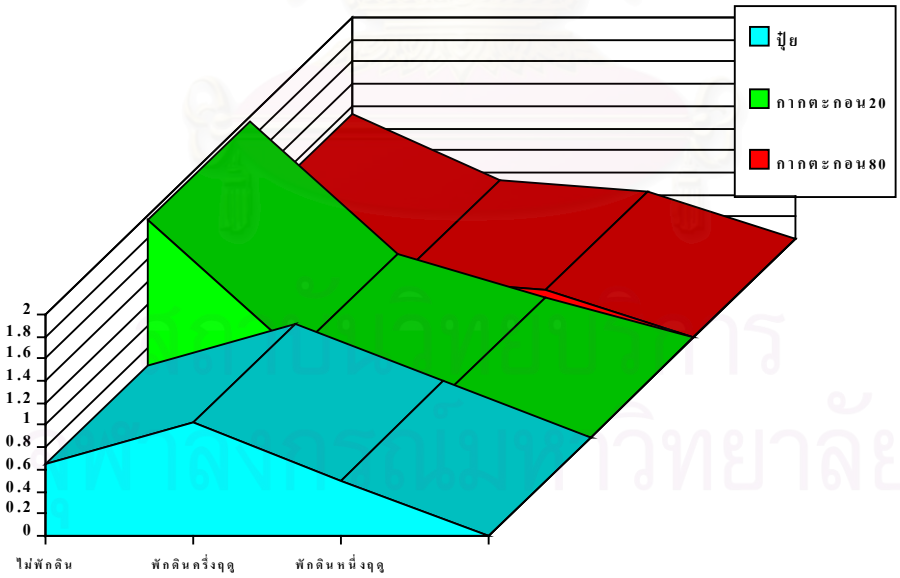
การเปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าของชุดดินกำแพงแสน ดังรูปที่ 5.5 กล่าวไว้ว่า การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ให้ผลผลิตของผักคะน้าได้สูงกว่าอัตราเติมกากตะกอน 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ (2529) และ อนุกูล สุธาพันธ์ (2542) ที่เสนอว่า อัตราเติมกากตะกอน 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ เป็นอัตราเติมที่เหมาะสมในการเพาะปลูกพืชทั้งในภาคสนามและเรือนเพาะชำ (กระถาง) อีกด้านหนึ่งของปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตของผักคะน้าที่สูงสุด คือ การทิ้งช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก อาจจะมีสาเหตุมาจากดินได้รับช่วงเวลาพักดินที่เหมาะสมเป็นระยะเวลา “ครึ่ง” ฤดูกาลเพาะปลูก หรือกล่าวอีกนัยว่า กากตะกอนที่ใช้ได้รับระยะเวลาที่เหมาะสม ที่น่าจะเกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ แล้วปลดปล่อยธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเป็นไปอย่างช้า ๆ โดยอาศัยกิจกรรมจุลินทรีย์ได้ต่อเนื่อง (อรวรรณ, 2532)

พิจารณารูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นว่า ชุดดินสระบุรีก็ยังมีอัตราเติมกากตะกอน 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ที่ให้ผลผลิตของคะน้ามากกว่าอัตราเติมกากตะกอน 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ การเติมกากตะกอนเมื่อพิจารณาตามช่วงเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้น ยิ่งจะเห็นได้ว่า ผลผลิตของผักคะน้าที่ปลูกในชุดดินสระบุรีมีแนวโน้มลดลงตามช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้น น่าจะเกิดขึ้นจากการที่ปริมาณสังกะสีในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามการทิ้งช่วงเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผักคะน้าดูดดึงเอาสังกะสีไปสะสมไว้ในส่วนเหนือดินที่บริโภคได้ในปริมาณสูงขึ้นตามช่วงเวลาการพักดินที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม Chaney (1982, ตารางที่ 5.5) ได้เสนอปริมาณสังกะสีในพืช ระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช 500 – 1,500 ppm เป็นที่น่าสังเกตว่า แม้ว่าปริมาณสังกะสีในพืชดังกล่าวมีค่ามากไม่ถึงระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช แต่กระนั้นก็น่าจะเป็นสาเหตุให้ผลผลิตของผักคะน้าลดลงอันเนื่องมาจากสัดส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ในผักคะน้าที่เพาะปลูกในการเติมกากตะกอนทั้งสองอัตรา หากมีสัดส่วนนี้ตั้งแต่ 520 ขึ้นไป พบว่า ผลผลิตของผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง) มีค่าน้อยกว่า 0.5 กรัม ดังปรากฏในรูปที่ 5.7 และ 5.8

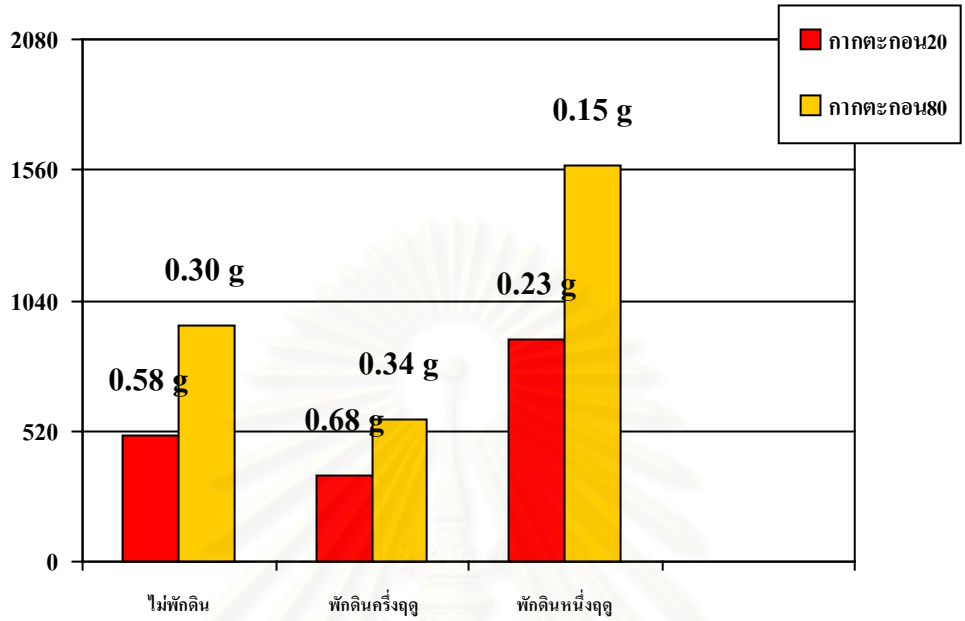
การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ทั้งชุดดินกำแพงแสนและชุดดินสระบุรี (ตารางที่ 4.27 และ 4.28) ก็มีผลผลิตทัดเทียมการเติมปุ๋ยเคมี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Watson et al, Cunningham และ Machno (ซึ่งอ้างถึงใน Water Pollution Control Federation,1988) และงานวิจัยของ อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ (2532)



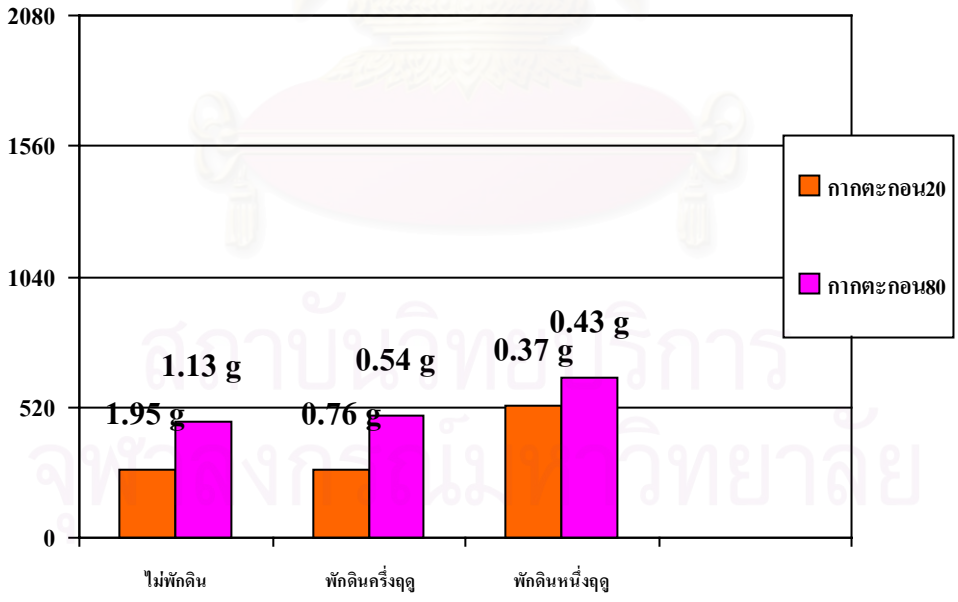
รูปที่ 5.5 ผลผลิตผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง, กรัม) ของชุดดินกำแพงแสน



รูปที่ 5.6 ผลผลิตผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง, กรัม) ของชุดดินสระบุรี



รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง,กรัม) กับสัดส่วน Zn/Cd ในผักคะน้าของชุดดินกำแพงแสน



รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้า (น้ำหนักแห้ง,กรัม) กับสัดส่วน Zn/Cd ในผักคะน้าของชุดดินสระบุรี

3.2 เปรียบเทียบลักษณะราก

ลักษณะรากของผักคะน้าของชุดดินกำแพงแสนที่มีการเติมกากตะกอนในการเพาะปลูก (รูปที่ ผ. 1,ผ. 2 และ ผ. 3 ในภาคผนวก) ชี้ชัดให้เห็นว่า ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาการพักดิน การเติมกากตะกอนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีลักษณะของรากคล้ายกับการเติมกากตะกอนในอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของรากตามช่วงเวลา พบว่าการทิ้งช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูกให้ความยาวของรากได้มาก ก็น่าจะเป็นประโยชน์ในการเอื้ออำนวยต่อการดูดดึงธาตุอาหาร

การพิจารณาถึงลักษณะรากในรูปที่ ผ.4,ผ.5 และ ผ.6 ในภาคผนวกทำให้ทราบได้ว่า มิได้เกิดความแตกต่างของลักษณะรากอย่างชัดเจนในระหว่างการเติมกากตะกอนที่อัตราทั้งสอง ไม่ว่าจะเป็นช่วงเวลาพักดินใด ๆ ก็ตาม ความยาวของรากที่มีมากพบในการเติมกากตะกอนช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก ส่วนการไม่ทิ้งช่วงเวลาพักดินมีลักษณะรากดังนี้ ขนาดใหญ่ และกิ่งก้านสาขาของรากมาก เป็นการช่วยค้ำจุนลำต้นของผักคะน้าให้แข็งแรง ซึ่งช่วยให้การเจริญเติบโตของส่วนเหนือดินของผักคะน้าได้ดี

4. ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในดิน

ลักษณะสมบัติของดิน บ่งชี้ให้ทราบถึง ศักยภาพในการสะสมของแคดเมียมและสังกะสีในดิน แต่เนื่องด้วยว่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในดิน ไม่ได้เป็นผลมาจากปัจจัยเดี่ยวของศักยภาพสมบัติดิน ผลของการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation, r) ของปัจจัยต่าง ๆ (สมมติปัจจัยเป็น X กับ Y) โดยค่า r มีความหมายดังนี้

<u>ความหมายของ r</u>

1. ค่า r เป็นลบ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม คือถ้า X เพิ่ม Y จะลด แต่ถ้า X ลด Y จะเพิ่ม
2. ค่า r เป็นบวก แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกัน คือ ถ้า X เพิ่ม Y จะเพิ่มด้วย แต่ถ้า X ลด Yจะลดลงด้วย
3. ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึง X และ Y สัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันมาก
4. ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ –1 หมายถึง X และ Y สัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก

5. ถ้า r = 0 แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน
6. ถ้า r เข้าใกล้ 0 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

การพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation) ระหว่างปริมาณแคดเมียมสะสมในดินกับปัจจัยที่ศึกษา (ตารางที่ 5.6) แสดงถึงความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในเชิงบวกกับอินทรีย์วัตถุอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ถึง 0.855** ทั้งนี้เพราะกากตะกอนมีอินทรีย์วัตถุอยู่มาก ซึ่งมีการปนเปื้อนของแคดเมียมในปริมาณมาก การเติมกากตะกอนลงดินก็เท่ากับเป็นการเพิ่มการสะสมแคดเมียมในดิน แคดเมียมในดินมีความสัมพันธ์กับสังกะสีในดิน แสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.822**

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีสะสมในดินกับปัจจัยที่ศึกษา (ตารางที่ 5.7) ทราบว่า ความสัมพันธ์ของปริมาณสังกะสีสะสมในดินเชิงบวกกับลักษณะทางกายภาพของดินอย่างมากและมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ การแปรเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพของดิน (เนื้อดิน , ความพรุนของดิน) ส่งผลให้เกิดการแปรเปลี่ยนลักษณะทางเคมีของดินตามมา จึงเกิดความสัมพันธ์ทางเคมีของดินกับปริมาณสังกะสีในดินเชิงบวก ตัวอย่างเช่น ค่า CEC และค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์กับปริมาณสังกะสีสะสมในดินอย่างมากและมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของระดับโลหะหนักทั้งหมด, ลักษณะสมบัติดิน, ความเข้มข้นของโลหะในพืชและความเข้มข้นของโลหะในสารละลายดิน โดยการประเมินของ Vernet (1991) ค่าอินทรีย์วัตถุและค่าเนื้อดินก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hooda et al. (1997)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 จำแนกความอุดมสมบูรณ์ของดินและกากตะกอนใช้ทดลองตามเกณฑ์ของกองจำแนกดิน กรมพัฒนาที่ดิน (เล็ก มอญเจริญ, 2522)

ระดับที่บ่งบอก	อินทรีย์วัตถุ	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ (ppm.)	โปตัสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (ppm.)
ต่ำมาก	>0.5	>3	>30
ต่ำ	0.5 – 1.0	3 - 6	30 – 60
ต่ำปานกลาง	1.0 – 1.5	6 – 10	
ปานกลาง	1.5 – 2.5	10 – 15	60 – 90
สูงปานกลาง	2.5 – 3.5	15 – 25	
สูง	3.5 – 4.5	25 – 45	90 – 120
สูงมาก	>4.5	>45	>120

ตารางที่ 5.2 ระดับ CEC ของดิน (ศุภมาศ, 2540)

ระดับ	ค่า CEC (me/100g)
ต่ำมาก	< 3
ต่ำ	3 – 5
ต่ำปานกลาง	5 – 10
ปานกลาง	10 – 15
สูงปานกลาง	15 – 20
สูง	20 – 30
สูงมาก	> 30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.3 ชนิดและปริมาณโลหะหนัก (ppm) ในดินของประเทศต่าง ๆ (Webber et al., 1984)

ประเทศ	ชนิดและปริมาณโลหะหนัก (ppm)						
	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
ฝรั่งเศส	2.0	100	-	-	50	100	300
เยอรมัน	3.0	100	-	-	50	100	300
อังกฤษ	3.5	140	-	-	35	550	280
กลุ่มประชาคมยุโรป (เสนอแนะ)	3.0	100	-	-	50	100	300

ตารางที่ 5.4 ปริมาณโลหะหนัก (ppm) สูงสุดที่ยอมรับให้มีได้ในกากตะกอนที่จะใส่ลงในพื้นที่การเกษตรของประเทศต่าง ๆ (Webber et al., 1984)

ประเทศ	ชนิดและปริมาณโลหะหนัก (ppm)					
	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
กลุ่มประชาคมยุโรป (เสนอแนะ)	40	1,500	-	400	1,000	3,000
แคนาดา	20	-	-	180	500	1,850
เดนมาร์ก	8	-	-	30	400	-
เบลเยี่ยม	10	500	500	100	300	2,000
ฝรั่งเศส	20	1,000	-	200	800	3,000
เยอรมัน	20	1,200	-	200	1,200	3,000
นอร์เวย์	10	1,500	500	100	300	3,000
เนเธอร์แลนด์	10	600	-	100	500	2,000
ฟินแลนด์	30	3,000	3,000	500	1,200	5,000
สวิสเซอร์แลนด์	30	1,000	-	200	1,000	1,000
สวีเดน	15	3,000	-	500	300	10,000

ตารางที่ 5.5 ปริมาณโลหะหนัก (ppm) ชนิดต่าง ๆ ในพืช ณ ระดับปกติและระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช (Chaney, 1982)

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนักในพืช (ppm)	
	ระดับปกติ	ระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ
แคดเมียม (Cd)	0.1 – 1	5 – 700
ทองแดง (Cu)	3 – 20	25 – 40
เหล็ก (Fe)	30 – 300	-
แมงกานีส (Mn)	15 – 150	400 – 2,000
นิเกิล (Ni)	0.1 – 5	50 – 100
ตะกั่ว (Pb)	2 – 5	-
สังกะสี (Zn)	15 – 150	500 – 1,500

- เท่ากับไม่เสนอตัวเลข

ตารางที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียม (Cd) สะสมในดินกับปัจจัยที่ศึกษา

ปัจจัยที่ศึกษา	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
	ปริมาณแคดเมียม (Cd) สะสมในดิน
ชุดดิน	-0.104
ช่วงเวลาพักดิน	-0.171
อัตราเติมกากตะกอน	0.058
แคดเมียมในพืช	0.712**
ความเป็นกรด – ด่าง	0.779**
CEC	0.787**
อินทรีย์วัตถุในดิน	0.855**
ความพรุนของดิน	0.800**
เนื้อดิน	0.849**
ผลผลิตผักคะน้า	0.537**
สังกะสีในดิน	0.822**

หมายเหตุ ** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%

ตารางที่ 5.7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสี (Zn) สะสมในดินกับปัจจัยที่ศึกษา

ปัจจัยที่ศึกษา	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
	ปริมาณสังกะสี (Zn) สะสมในดิน
ชุดดิน	-0.022
ช่วงเวลาพักดิน	0.052
อัตราเติมกากตะกอน	0.060
สังกะสีในพืช	0.776**
ความเป็นกรด – ด่าง	0.871**
CEC	0.926**
อินทรีย์วัตถุในดิน	0.943**
ความพรุนของดิน	0.901**
เนื้อดิน	0.946**
ผลผลิตผักคะน้า	0.471**
แคดเมียมในดิน	0.822**

หมายเหตุ ** หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติที่ 99%

ตารางที่ 5.8 สัดส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ในผักคะน้าและดินกำแพงแสนภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	สัดส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ของชุดดินกำแพงแสนในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน					
	ในพืช	ในดิน	ในพืช	ในดิน	ในพืช	ในดิน
ควบคุม	514	335	174	208	423	339
เติมปุ๋ย	429	426	188	320	482	456
กากตะกอน 20	502	484	344	320	881	452
กากตะกอน 80	939	382	569	357	1,580	675
เกลือโลหะ 20	362	217	322	374	546	1,922
เกลือโลหะ 80	415	677	457	370	609	461

ตารางที่ 5.9 สัดส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ในผักคะน้าและดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกครั้งที่ 2 โดยมีการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

ตำรับทดลอง	สัดส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ของชุดดินสระบุรีใน ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละการทิ้งช่วงเวลาพักดิน					
	ในพืช	ในดิน	ในพืช	ในดิน	ในพืช	ในดิน
ควบคุม	139	312	160	395	767	1,065
เติมปุ๋ย	491	683	87	593	330	1,035
กากตะกอน 20	272	316	270	775	523	1,378
กากตะกอน 80	463	251	489	490	638	1,592
เกลือโลหะ 20	385	209	176	1149	425	1,110
เกลือโลหะ 80	306	217	283	526	467	1,156

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

1. ชุดดินกำแพงแสน (Kampaeng Saen soil series) จากพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลหนองงูเหลือม ชุดดินสระบุรี (Saraburi soil series) จากพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลทุ่งน้อย อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม มีปริมาณจุลธาตุสังกะสี อยู่ในระดับปกติที่เพียงพอสำหรับการเพาะปลูกอีกทั้งปราศจากความเสี่ยงต่อความเป็นพิษจากแคดเมียม ด้วยปริมาณแคดเมียมในดินมีต่ำกว่าเกณฑ์การยอมรับเพื่อการเกษตรของประเทศกลุ่มประชาคมยุโรป และประเทศแคนาดา

2. กากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชน (domestic sewage sludge) จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนห้วยขวางที่นำมาใช้ทดลองมีปริมาณ สังกะสี และแคดเมียมในรูปที่พืชอาจใช้ประโยชน์ได้ (available form) อยู่ในระดับที่ยอมรับได้โดยไม่เกิดความเสี่ยงจากความเป็นพิษ พิษของโลหะหนักในการใช้กากตะกอนเพื่อให้มีปริมาณสังกะสีและแคดเมียมในกากตะกอนเพื่อการเกษตรของประเทศกลุ่มประชาคมยุโรป และประเทศแคนาดา

3. ปริมาณสังกะสีและแคดเมียมในดิน ทั้งชุดดินกำแพงแสน และชุดดินสระบุรี ภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตของผักคะน้าในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้โดยไม่เกิดอาการเป็นพิษในพืช นอกจากนั้น ปริมาณสังกะสีและแคดเมียมในผักคะน้า ทั้งสองชุดดินภายหลังเสร็จสิ้นการเพาะปลูกฤดูกาลที่ 2 ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ว่าไม่เป็นพิษต่อพืชและสัตว์เมื่อได้รับเข้าไป

4. อิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชุดดินกำแพงแสนที่มีอัตราเติม 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีการสะสมแคดเมียมในดินลดลงตามช่วงเวลาอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ และชุดดินสระบุรีทั้งที่เติมกากตะกอนด้วยอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ก็เกิดการสะสมแคดเมียมในดินในลักษณะแบบเดียวกันกับชุดดินกำแพงแสน

5. สำหรับการสะสมสังกะสีในดิน ได้รับผลจากการพักดินที่นานขึ้น คือ ชุดดินกำแพงแสนที่เติมกากตะกอนด้วยอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีการสะสมสังกะสีในดินเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาพักดิน แต่ในการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ เป็นผลให้การ

สะสมสังกะสีในดินลดลงตามช่วงเวลาพักดิน นอกจากนี้ชุดดินสระบุรีที่ใช้กากตะกอนทั้งอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ มีการสะสมสังกะสีเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาพักดิน

6. ตามระยะเวลาที่ดินพักตัวนานขึ้นเรื่อย ๆ ผักคะน้าที่เพาะปลูกในชุดดินทั้งสองดูดดึงสังกะสีไปสะสมไว้ในส่วนที่บริโภคได้เพิ่มสูงขึ้นตามช่วงเวลา หากแต่การดูดดึงแคดเมียมในพืชนั้นเพิ่มมากขึ้นตามช่วงเวลาอย่างมีผลชัดเจน เฉพาะชุดดินสระบุรีเท่านั้น

7. อัตราเติมกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อการเพิ่มปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดินทั้งชุดดินกำแพงแสนและชุดดินสระบุรี ไม่ว่าจะเป็นช่วงเวลาพักดินใด ๆ

8. การเติมกากตะกอนด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีลดลงในส่วนบริโภคได้ของผักคะน้าในชุดดินสระบุรีเฉพาะที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก อย่างไรก็ตามชุดดินกำแพงแสนที่มีการเติมกากตะกอนในอัตราที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณสังกะสีและแคดเมียมในผักคะน้าเพิ่มขึ้น สำหรับทุกช่วงเวลาพักดิน ยกเว้นปริมาณแคดเมียมในผักคะน้า ที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก จะมีค่าใกล้เคียงกัน

9. ผลผลิตผักคะน้าและลักษณะสมบัติดิน ที่มีส่วนกำหนดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนัก (สังกะสีหรือแคดเมียม) ในดินเมื่อมีการเติมกากตะกอน แล้วมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ลักษณะสมบัติดินได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) อินทรีย์วัตถุในดิน ความพรุนของดิน เนื้อดิน

10. ความเป็นกรด-ด่างในดินมีการเปลี่ยนแปลงค่าในช่วงเวลาระหว่างการเพาะปลูกผักคะน้า ในลักษณะการเพิ่มสภาวะเป็นกรดให้กับดิน (pH ต่ำกว่า 7) ไม่ว่าจะเป็นการทิ้งช่วงเวลาพักดินใดๆก็ตาม เกิดขึ้นเฉพาะชุดดินกำแพงแสนและชุดดินสระบุรีที่มีการเติมกากตะกอนอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์

11. โดยภาพรวม ชุดดินกำแพงแสนและชุดดินสระบุรีเมื่อมีการเติมกากตะกอนทั้งอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า CEC ในดินสูงกว่าการเติมปุ๋ยเคมี แต่กระนั้นก็ไม่ได้รับอิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาพักดิน

12. การเติมกากตะกอนเป็นการเพิ่มอินทรีย์วัตถุลงสู่ดิน โดยเฉพาะการเติมกากตะกอนด้วยอัตรา 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ก่อให้เกิดความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุในดินอย่างชัดเจน และการทิ้งช่วงเวลาพักดินก็ส่งผลเพียงให้เกิดแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุในดิน แต่ไม่เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

13. ค่าความพรุนของดิน และเนื้อดิน เป็นลักษณะทางกายภาพของดิน ที่มีการปรับเปลี่ยนภายหลังการเติมกากตะกอนอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ โดยการปรับเปลี่ยนดังกล่าวไม่เกิดความแตกต่างอย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเปรียบเทียบตามตำรับทดลองหรือตามช่วงเวลาพักดินก็ตาม

14. การเติมกากตะกอนและการเติมสารละลายเกลือคลอไรด์ที่มีปริมา ณ แคดเมียมและสังกะสีเทียบเท่าที่มีในการเติมกากตะกอน ณ ช่วงเวลาพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูกส่งผลให้สัดส่วนสังกะสี และแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ในส่วนบริโภคได้ของผักคะน้ามีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับช่วงเวลาพักดินอื่น ๆ

15. สัดส่วนของสังกะสีและแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ที่มีค่ามากกว่า 520 ขึ้นไปจะมีผลทำให้ผลผลิตผักคะน้าลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง เมื่อเพาะปลูกผักคะน้าในดิน ชุดดินสระบุรี และชุดดินกำแพงแสน ที่มีการเติมกากตะกอนอัตรา 20 และ 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์

ข้อเสนอแนะ

- น่าจะมีการศึกษาวิจัยถึงสัดส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียม (Zn/Cd ratio) ในพืชชนิดต่าง ๆ ที่มีการเติมกากตะกอนในอัตราต่าง ๆ กัน เพื่อเป็นเกณฑ์กำหนดสัดส่วนของสังกะสีต่อแคดเมียมที่เหมาะสมสำหรับการประเมินความเสี่ยงหรือโอกาสการเกิดพิษต่อพืชและมนุษย์ จากโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2541. แคดเมี่ยม (Cadmium). ฝ่ายศูนย์ข้อมูลสารอันตรายและอนุสัญญา กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541. คู่มือปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2536. คู่มือปฐพีวิทยาเบื้องต้น ระบบโสตทัศนูปกรณ์ . กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฉัตรไชย รัตนไชย. 2539. การจัดการคุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทัศนีย์ อัตตะนันทร์, จงรักษ์ จันทร์เจริญสุข และสุรเดช จินตกานนท์. 2532 แบบฝึกหัดและคู่มือปฏิบัติการ การวิเคราะห์ดินและพืช. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาปฐมพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิมล เรียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2539. เคมีสภาวะแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

ไพบูลย์ ประพฤติธรรม. 2528. เคมีของดิน. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รัตนา อ่อนสนิท, สิรี สุวรรณเขตนิคม. 2534. วิธีวิเคราะห์ดินทางฟิสิกส์. กลุ่มงานวิเคราะห์ดินและน้ำ กองเกษตรเคมี.

โรจน์ เทพพูลผล. รายงานการสำรวจความเหมาะสมของดิน. รายงานการสำรวจดินจังหวัดนครปฐม. ฉบับที่ 311. กองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

เล็ก มอญเจริญ. 2522. การสำรวจและการจำแนกดินไร่ของประเทศไทย. รายงานการสัมมนาเรื่องสถานการณ์ดินและปุ๋ยของประเทศไทย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิทยา มะเสนา. 2526. จุลชีววิทยาทางดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ศิราณี ศิริสุโขดม. 2535. ผลของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนต่อการเติบโต และการสะสมโลหะหนักในพืชผักบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมจังหวัดปทุมธานี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2540. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุชาติ จิรพรเจริญ. 2530. อินทรีย์วัตถุของดิน. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 165 หน้า.

เสริมพล รัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2518. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ประยุกต์แห่งประเทศไทย.

อนุกูล สุธาพันธ์. 2542. ความสามารถของดินชุดสระบุรีในการดูดซับสังกะสี และแคดเมียมภายหลังการเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชน ในพื้นที่ที่มีการปลูกผัก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรรณพ หอมจันทร์. 2535. ความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิดจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชน ต่อผักคะน้า (Brassica oleracea L.Var. alboglabra Bailey) และ ผักกาดหอม (Lactuca sativa L.) ในสภาพเรือนทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิตสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ. 2522. อิทธิพลของตะกั่ว แคดเมียมต่อการเจริญเติบโตและองค์ประกอบทางเคมีของพืชอาหารสัตว์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ. 2525. “ปริมาณและการแพร่กระจายของโลหะหนักในดินเขตกรุงเทพมหานครอันส่งผลต่อการเจริญเติบโต และองค์ประกอบทางเคมีของพืช”. รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ. 2529. การใช้ประโยชน์กากตะกอนน้ำเสียในรูปของปุ๋ย สำหรับพื้นที่เกษตรกรรมจังหวัดฉะเชิงเทรา. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ. 2532. ทางเลือกที่ได้รับประโยชน์มาจากการลงทุนแก้ไขปัญหามลภาวะน้ำ. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม 11: 69-87.

อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ. 2533. การนำเอาเศษวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร และกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาใช้ในพื้นที่การเกษตรอย่างเหมาะสมและปลอดภัยจากโลหะหนัก. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Chaney, R.L. 1982. Fate of toxic substances in sludge applied to cropland. Proc. Inter. Symp. Land Application of Sewage Sludge. Tokyo, Japan. p. 259-324.

Chaussod, R. 1981. Valeur Fertilisante ozote des boues residyaires. In: Proceedings of Second European Symposium on the Treatment and Use of Sewage Sludge. Vienna: Dordrecht, Quoted in Hall, J.E. Predicting the Nitrogen values of Sewage. In: P.L' Hermite and H. Ott (eds.) Processing and Use of Sewage Sludge. D.Reidal Publishing Company, Holland. p. 268-277.

Christensen, T.H., and Tjell, J.C. 1982 Interpretation of experimental results on cadmium crop uptake from sewage sludge amended soil. In: P.L'Hermite, and H. Ott (eds.), Processing and Use of Sewage Sludge. D. Reidal Publishing Company, Holland. p. 358-370.

Cottenies, A., Kiekans, L., and Van Landschoot, G. 1984. Problem of the mobility and predictability of heavy metal uptake by plants. In: P.L' Hermite and H. Ott (eds.), Processing and Use of Sewage Sludge. D. Reidal Publishing Company, Holland. p. 124-131.

Davies, B. E. 1980. Applied Soil Trace Elements. John Wiley & Sons Ltd., Great Britain.

Davis, R.D. 1984. Crop uptake of metals (cadmium, lead, mercury, copper, nickel, zinc and chromium) from sludge-treated soil and Its Implication for soil fertility and for the human diet. In: P.L' Hermite, and H. Ott (eds.) Processing and Use of Sewage Sludge. D. Reidal Publishing Company, Holland. p. 349-357.

Epstein, E., et al., 1976. Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties. J. Environ. Qual. 5: 422.

Gardiner, D.T., Miller, R.W., Bandamchian, B., Azzari, A.S., and Sisson, D.R. 1995. Effects of repeated sewage sludge applicaions on plant accumulation of heavy metals. J. Agriculture, Ecosystems and Environment. 55:1-6.

Gigliotti, Giovanni, Daniels Businelli, and Pier Lodovico Giusquiani. 1996. Trace metals uptake and distribution in corn plants grown on a 6-year urban waste compost amended soil.J. Agriculture, Ecosystems and Environment. 58:199-206.

Greenland, D.J., and Hayes, M.H.B. 1981. The chemistry of soil processes. John Wiley & Sons.

Guidi, G., and Hall, J.E. 1984. Effect on sewage sludge on the physical and chemical properties of soils. In: P.L' Hermite and H. Ott (eds) Processing and Use of Sewage Sludge. D. Reidal Publishing Company, Holland. p. 295-305.

Hooda, P.S., and Alloway, B.J. 1996. The effect of liming on heavy metal concentrations in wheat, carrots and spinach grown on previously sludge-applied soils. J. Agricultural Science. 127: 289-294.

Hooda, P.S., McNulty, D., Alloway, B. J. and Aitken, M. N. 1997. Plant availability of heavy metals in soils previously amended with heavy applications of sewage sludge. J. Sci. Food Agric. 73: 446-454.

Hyun, H. N., Chang, A. C., Parker, D. R. and Page, A. L. 1998. Cadmium solubility and phytoavailability in sludge-treated soil: effects of soil organic carbon. J. Environ. Qual. 27:329-334.

Kladivko, E.J., and Nelson, D.W. 1979. Changes in soil properties from application of anaerobic sludge. J. Water Pollut. 51: 325.

Kuntze, H., Pluquet, E., Stark, J.H., and Coopoia, S. 1984. Current techniques for the evaluation of metal problems due to sludge. In P.L'Hermite, and H. Ott (eds.), Processing and Use of Sewage Sludge. D.Reidal Publishing Company, Holland. p. 394-403.

Li, Z. and Shuman, L. M. 1996. Heavy metal movement in metal-contaminated soil profiles. J. Soil Science. 161: 656-666.

Loehr, C.R. 1977. Land disposal of wastes. Pollution Control for agriculture. Academic Press. p.284-287.

Logan, J. T., Lindsay, B. J., Goins, L. E. and Ryan, J. A. 1997. Field assessment of sludge metal bioavailability to crops: sludge rate response. J. Environ. Qual. 26: 534-550.

Mays, D.A., et al.,1973. Municipal composts: Effects on crop yields and soil properties. J.Environ. Qual., 2, 89.

McBride, M.B. 1995. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulations protective?. J. Environ. Qual. 24:5-18.

Megel, K., and Kirkby, E.A. 1982. Priciples of Plant Nutrition. International Potash Institute, Switzerland.

Miller, R.W., Al-Khazraji, M.L., Sisson, D.R., and Gardiner, D.T. 1995. Alfalfa growth and absorption of cadmium and zinc from soils amended with sewage sludge. Agriculture, Ecosystems and Environment. 53 : 179 - 184.

Miller, R.W., Al-Khazraji, M.L., Sisson, D.R. and Gardiner, D.T. 1995. Alfalfa growth and absorption of cadmium and zinc from soils amended with sewage sludge. J. Agriculture, Ecosystems and Environment. 53:179-184.

Neill, O.P. 1993. Miner element and environmental problems. Environmental chemistry. Chapman & Hall., UK. p. 215-221.

Oliver,D.P., et al.1994. The effects of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain. J. Environ. Qual. 23 : 705 - 711.

Orawan Siriratpiriya. 1990. Fertilizer from polluted waters: A beneficial investment option in Thailand, Environmental Triage in Developing Nations. New International Approaches to Managing Critical Enviroment 10 October, 1990. Bangkok, Thailand: The Institute of Environmental Research, Chulalongkorn University.

Orawan Siriratpitiya, Vigerust, E., and Selmer-Olsen, A.R. 1985. Affect of temperature and heavy metal application on metal content in lettuce. Scientific Reports of the Agricultural University of Norway. 64(7): 1-12.

Royal Commission on Environmental Pollution. 1979. The effects of pollution on agriculture. 7th Her majesty's stationery office London agriculture and pollution. parliament. p. 161-174.

Siriratpiriya , O., Vigerust, E., and Selmer-Olsen, A.R. 1985. Effect of temperature and heavy metal application on metal content in lettuce. Scientific Reports of the Agricultural University of Norway. 64(7): 1-29.

Smith, S.R. 1994. Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge – treated soils. II. Cadmium uptake by crops and implications for human dietary intake. J. Env. Pollution. 86 : 5 – 13.

Tan, K. H., 1994. Soil and pollution. Environmental Soil Science. Marcel Dekker. Inc., USA. p. 239-247.

Tolgyessy, J. 1993. Wastewaters. Chemistry and biology of water, air and soil : Environmental aspects. Elsevier. p. 214-277, 811, 817.

Vernet, P.J. 1991. Assessment of ecotoxicological risk of accumulated metals in soils with the help of chemical methods standardized through biological tests. Trace metal in the environment1. Elsevier, New York. p.55-65.

Vigerust, E., Selmer-Olsen, A.R. and Orawan Siriratpiriya. 1987. Utilization of sewage sludge especially in regard to its effects on heavy metal in plants. In: J. Lag (ed.), The Norwagina Achdemy of Science and Letters on Commercial Fertilizers and Geomedical Problems. Statens Kornforretning, Oslo. p. 121-139.

Voutsa, D., Grimanis, A. and Samara, C. 1996. Trace elements in vegetables grown in an industrial area in relation to soil and air particulate matter. J. Environmental Pollution. Elsevier. 94 (3) : p.325-335.

Water Pollution Control Federation. 1988. Beneficial use of waste solids : Manual of practice FD-15. p. 1-51.

Wei, Q.F., et al.,1985. Effects of sludge application on physical properties of a silty clay loam soil. J.Environ. Qual. p. 14: 178.

Webber L.R. 1978. Incorporation of nonsegregated, non composted solid waste and soil physical properties. J. Environ. Qual. 7 : 397-400.

Webber, M.D., Kloke, A. and Tjell, J. CHR. 1984. A review of current sludge use guideline for the control of heavy metal contamination in soils. Proc. Third Inter. Symp. Processing and Use of Sewage Sludge, P.L' Hermite and H. ott Eds., D. Reidel Publ. Co., Dordrecht. p.371-385.

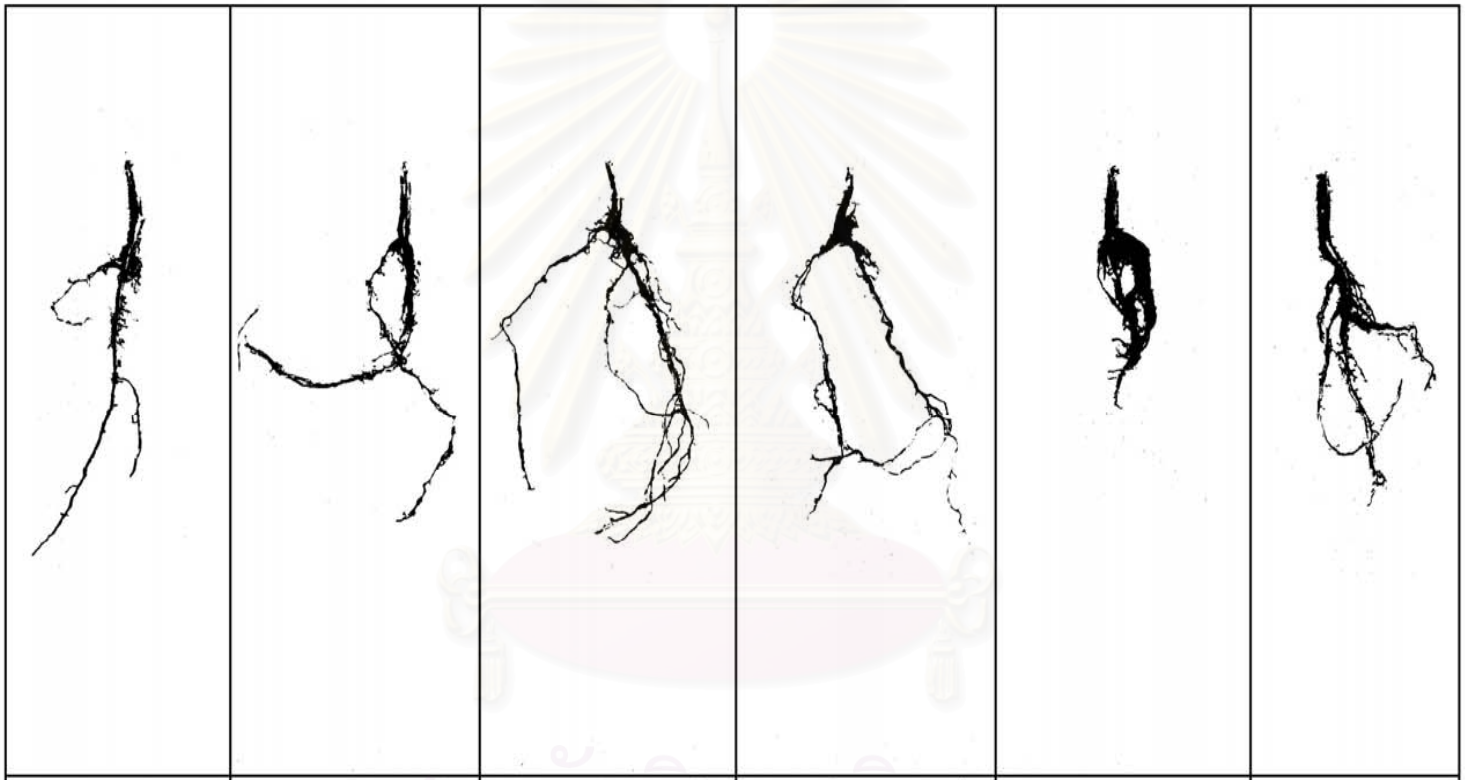
Zhang, M., Alva, A.K., Li, Y.C. and Calvert, D.V. 1997. Chemical association of Cu, Zn, Mn, and Pb, in selected sandy citrus soils. J. Soil Science. 612: 181-188.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ผ.1 ลักษณะรากของผักคะน้าของชุดดินกำแพงแสนที่ปลูกหลังระยะเก็บเกี่ยว 0 วัน

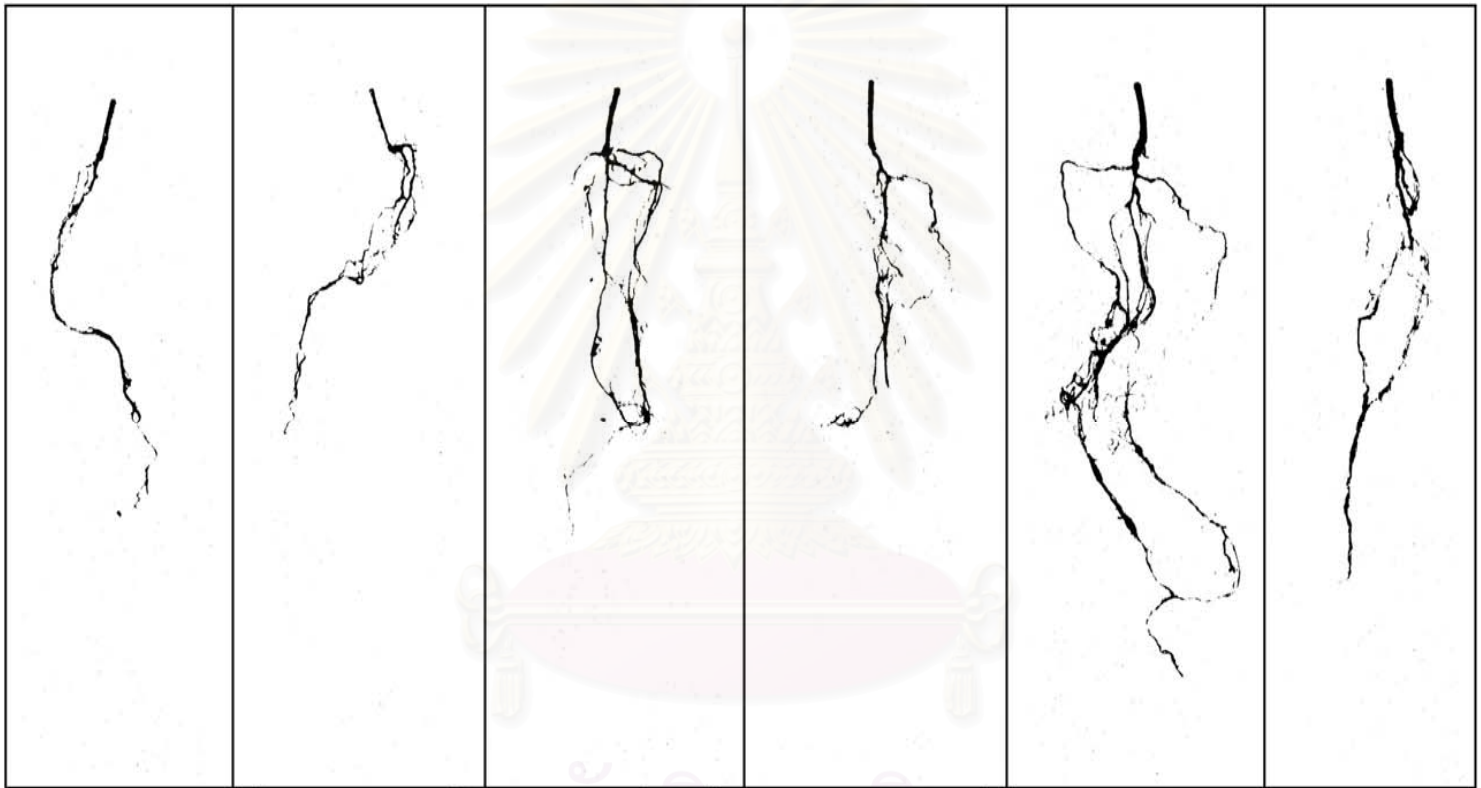


หมายเหตุ โลหะหนัก (I) และ โลหะหนัก (II) คือ เกลือของโลหะหนัก Cd,Zn ที่มีอยู่เทียบเท่ากากตะกอนอัตรา 3,200 กก./ไร่ และ 12,800 กก./ไร่ ตามลำดับ

รูปที่ ผ.2 ลักษณะรากของผักคะน้าของชุดดินกำแพงแสนที่ปลูกหลังระยะเก็บเกี่ยว 25 วัน

หมายเหตุ โลหะหนัก (I) และ โลหะหนัก (II) คือ เกลือของโลหะหนัก Cd,Zn ที่มีอยู่เทียบเท่ากากตะกอนอัตรา 3,200 กก./ไร่ และ 12,800 กก./ไร่ ตามลำดับ

รูปที่ ผ.3 ลักษณะรากของผักคะน้าของชุดดินกำแพงแสนที่ปลูกหลังระยะเก็บเกี่ยว 50 วัน

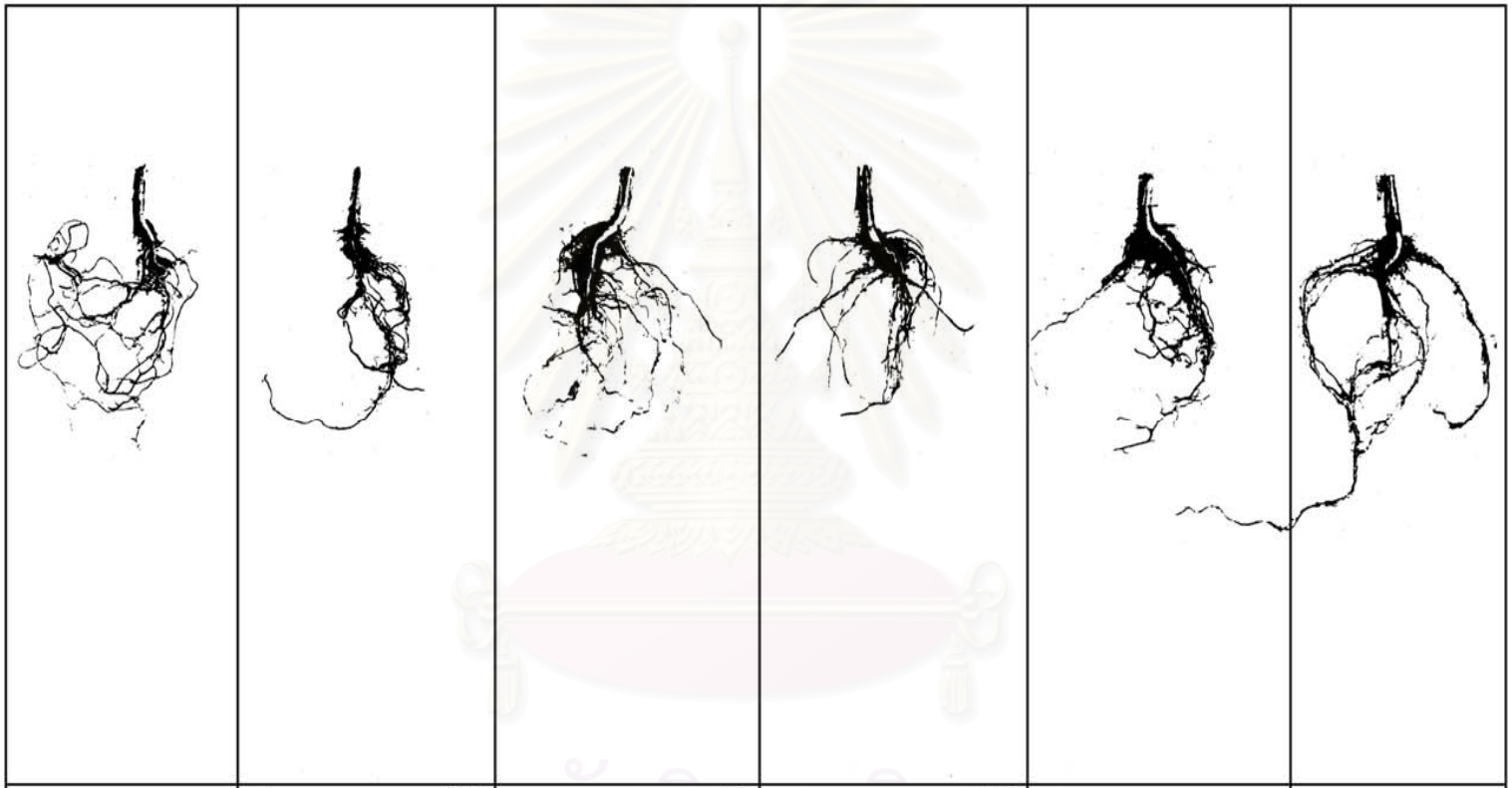


ควบคุม	ปุ๋ย (20-20-0) 50 กก./ไร่	กากตะกอน 3,200 กก./ไร่	กากตะกอน 12,800 กก./ไร่	โลหะหนัก (I)	โลหะหนัก (II)

หมายเหตุ โลหะหนัก (I) และ โลหะหนัก (II) คือ เกลือของโลหะหนัก Cd,Zn ที่มีอยู่เทียบเท่ากากตะกอนอัตรา 3,200 กก./ไร่ และ 12,800 กก./ไร่ ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

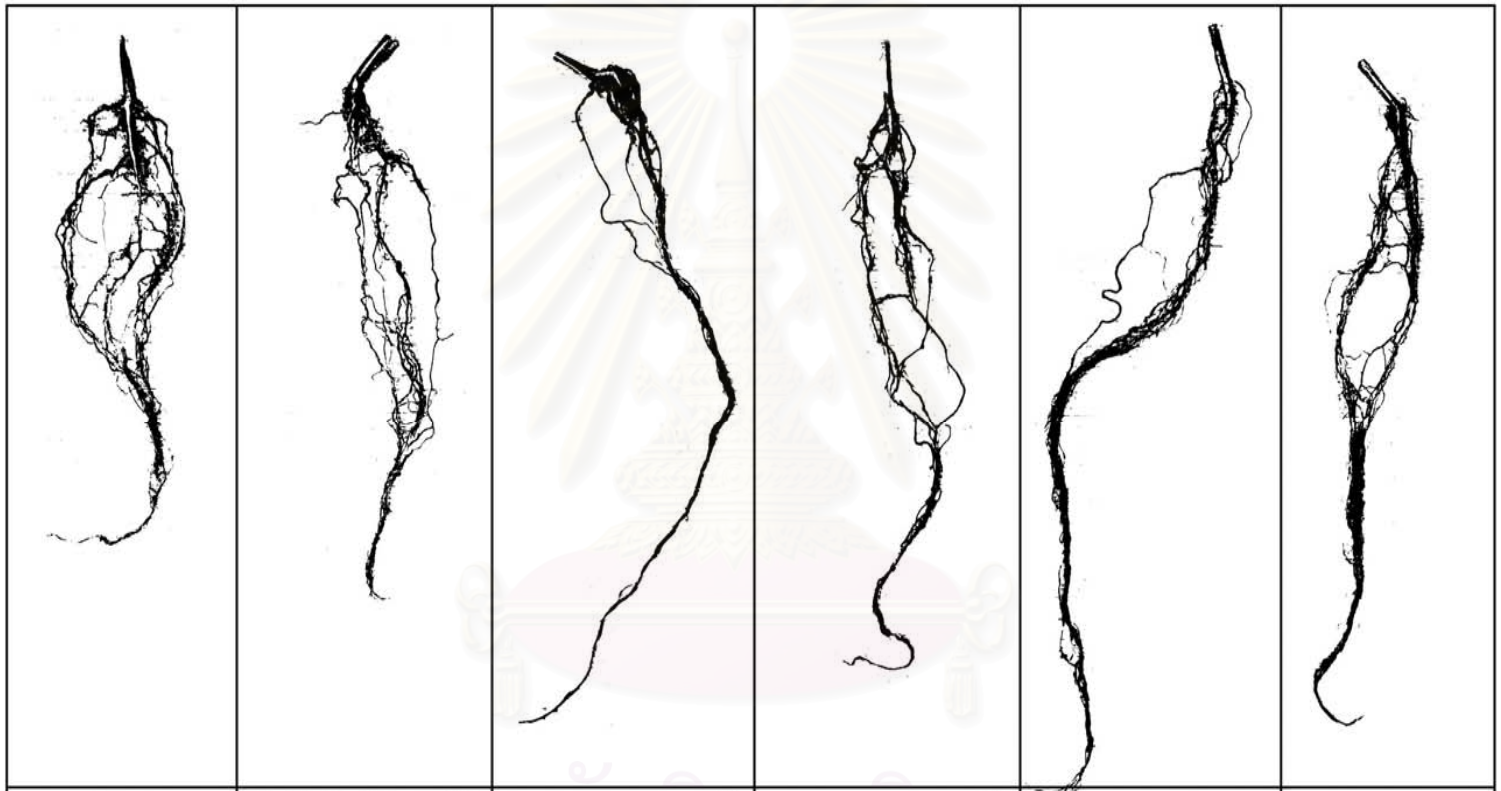
รูปที่ ผ.4 ลักษณะรากของผักคะน้าของชุดดินสระบุรีที่ปลูกหลังระยะเก็บเกี่ยว 0 วัน



หมายเหตุ โลหะหนัก (I) และ โลหะหนัก (II) คือ เกลือของโลหะหนัก Cd,Zn ที่มีอยู่เทียบเท่ากากตะกอนอัตรา 3,200 กก./ไร่ และ 12,800 กก./ไร่ ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

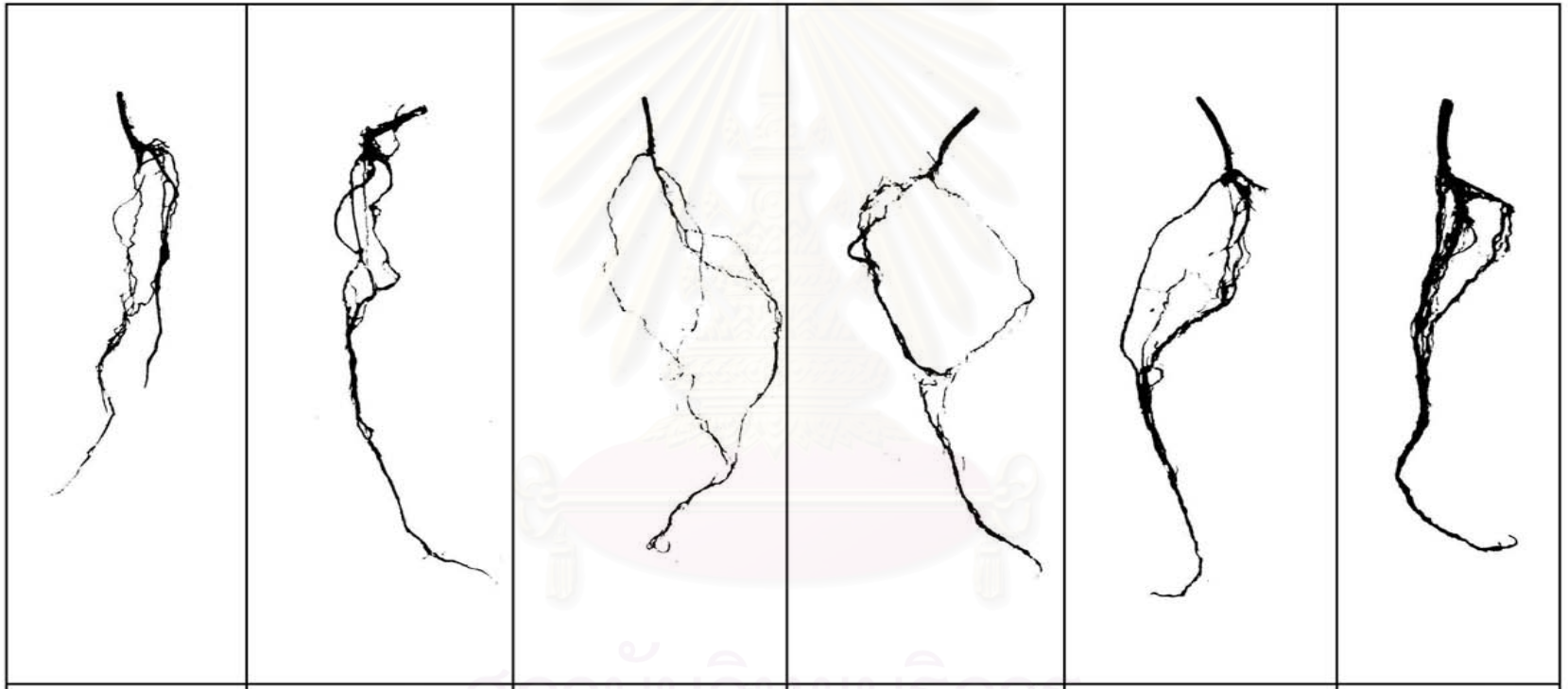
รูปที่ ผ.5 ลักษณะรากของผักคะน้าของชุดดินสระบุรีที่ปลูกหลังระยะเก็บเกี่ยว 25 วัน



หมายเหตุ โลหะหนัก (I) และ โลหะหนัก (II) คือ เกลือของโลหะหนัก Cd,Zn ที่มีอยู่เทียบเท่ากากตะกอนอัตรา 3,200 กก./ไร่ และ 12,800 กก./ไร่ ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ผ.6 ลักษณะรากของผักคะน้าของชุดดินสระบุรีที่ปลูกหลังระยะเก็บเกี่ยว 50 วัน



ควบคุม	ปุ๋ย (20-20-0) 50 กก./ไร่	กากตะกอน 3,200 กก./ไร่	กากตะกอน 12,800 กก./ไร่	โลหะหนัก (I)	โลหะหนัก (II)

หมายเหตุ โลหะหนัก (I) และ โลหะหนัก (II) คือ เกลือของโลหะหนัก Cd,Zn ที่มีอยู่เทียบเท่ากากตะกอนอัตรา 3,200 กก./ไร่ และ 12,800 กก./ไร่ ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณปริมาณสิ่งทดลองที่เติมลงในกระถาง

ข้อกำหนด กระถาง บรรจุดิน 3 กิโลกรัม

หน่วย	1 เมตริกตัน	เท่ากับ	1,000	กิโลกรัม
	1 เฮกแตร์	เท่ากับ	2,000,000	กิโลกรัม (น้ำหนักดิน)
	1 เฮกแตร์	เท่ากับ	6.25	ไร่

อัตราเติม

- ปุ๋ยเคมี	อัตราเติม	50	กิโลกรัมต่อไร่
- กากตะกอน	อัตราเติม	20 และ 80	เมตริกตันต่อเฮกแตร์

ดังนั้น

1 หน่วยทดลอง (1 กระถาง) เติมสิ่งทดลองแต่ละหน่วยทดลองเท่ากับ

ปุ๋ยเคมี	จำนวน	0.5	กรัม (โดยประมาณจาก 0.47 กรัม)
กากตะกอน	จำนวน	30	กรัม ณ อัตราเติม 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์
กากตะกอน	จำนวน	120	กรัม ณ อัตราเติม 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์

สำหรับเกลืออนินทรีย์ของโลหะหนัก

อาจสรุปสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{ปริมาณเกลืออนินทรีย์ของโลหะหนักที่เติม (กรัม)} = \frac{Mw \times Cm \times S}{Mm \times 10^{6}}$$

Mw = มวลโมเลกุลของสารประกอบของโลหะหนัก

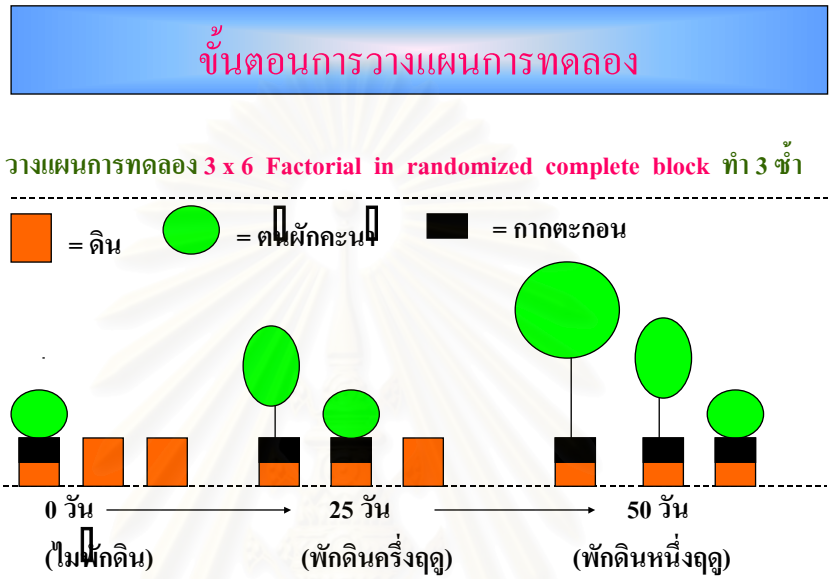
Cm = ความเข้มข้นของโลหะหนักในกากตะกอน

Mm = มวลอะตอมของโลหะหนัก

S = ปริมาณกากตะกอน (กรัม) ที่ใส่ในกระถาง คิดจาก อัตราเติมกากตะกอน

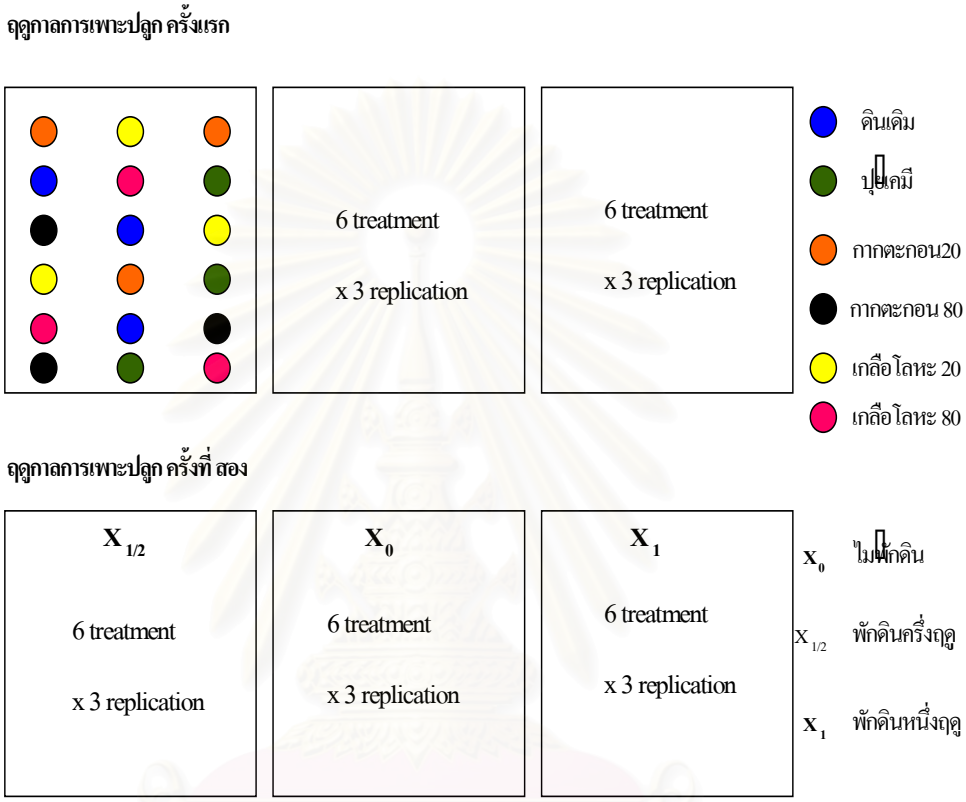
1 หน่วยทดลอง เติมสิ่งทดลองแต่ละหน่วยทดลองเท่ากับ

เกลืออนินทรีย์ของสังกะสี เท่ากับ	0.2149	กรัม	คิดเทียบเท่าอัตราเติม 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์
เกลืออนินทรีย์ของสังกะสี เท่ากับ	0.8596	กรัม	คิดเทียบเท่าอัตราเติม 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์
เกลืออนินทรีย์ของแคดเมียม เท่ากับ	0.0002	กรัม	คิดเทียบเท่าอัตราเติม 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์
เกลืออนินทรีย์ของแคดเมียม เท่ากับ	0.0008	กรัม	คิดเทียบเท่าอัตราเติม 80 เมตริกตันต่อเฮกแตร์



รูปที่ ผ.7 ระยะเวลาในการเติมสิ่งทดลองครั้งที่สอง ของการเพาะปลูกผักคะน้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ผ.8 แผนผังของหน่วยทดลอง (กระถาง) ในการวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ผ.9 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับควบคุม ปุ๋ย กากตะกอน ของชุดดินกำแพงแสน โดยไม่มีการพักดิน

รูปที่ ผ.10 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับกากตะกอน เกลือโลหะหนัก ของชุดดินกำแพงแสน โดยไม่มีการพักดิน

รูปที่ ผ.11 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับควบคุม ปุ๋ย กากตะกอน ของชุดดินกำแพงแสน โดยมีการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

รูปที่ ผ. 12 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับกากตะกอน เกลือโลหะหนัก ของชุดดินกำแพงแสน โดยมีการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

รูปที่ ผ. 13 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับควบคุม ปุ๋ย กากตะกอน ของชุดดินกำแพงแสน โดยมีการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

รูปที่ ผ.14 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับกากตะกอน เกลือโลหะหนัก ของชุดดินกำแพงแสน โดยมีการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

รูปที่ ผ. 15 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับควบคุม ปุ๋ย กากตะกอนของชุดดินสระบุรี โดยไม่มีการพักดิน

รูปที่ ผ. 16 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับกากตะกอน เกลือโลหะหนักของชุดดินสระบุรี โดยไม่มีการพักดิน

รูปที่ ผ. 17 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับควบคุม ปุ๋ย กากตะกอนของชุดดินสระบุรี โดยมีการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

รูปที่ ผ. 18 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับกากตะกอน เกลือโลหะหนักของชุดดินสระบุรี โดยมีการพักดินครึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

รูปที่ ผ. 19 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับควบคุม ปุ๋ย กากตะกอน ของชุดดินสระบุรี โดยมีการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

รูปที่ ผ. 20 เปรียบเทียบผลผลิตผักคะน้าระหว่างตำรับกากตะกอน และเกลือโลหะหนัก ของชุดดินสระบุรี โดยมีการพักดินหนึ่งฤดูกาลเพาะปลูก

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพร กะการดี เกิดเมื่อวันที่ 20 เดือนกันยายน พ.ศ. 2514 ที่อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ทั่วไป (สิ่งแวดล้อม) จากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย