



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
ปริญญา

.....
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....
วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเบียร์เพื่อเป็นปุ๋ย
 สำหรับผักคะน้าและผักกาดขาวปลี

The Use of Activated Sludge from Beverage Production Plant as Fertilizer for Chinese
Kale and Chinese Cabbage

นามผู้วิจัย นางสาวอัมรिता คชภักดี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเทพ ทองแพ, วท.ค.)

ประธานสาขาวิชา

(..... ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(..... รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเบียร์
เพื่อเป็นปุ๋ยสำหรับผักคะน้าและผักกาดขาวปลี

The Use of Activated Sludge from Beverage Production Plant as Fertilizer
for Chinese Kale and Chinese Cabbage

โดย

นางสาวอัมรिता คชภักดี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัมรिता กษภักดี 2553: การใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเบียร์
เพื่อเป็นปุ๋ยสำหรับผักคะน้าและผักกาดขาวปลี ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเทพ ทองแพ, วท.ค 101 หน้า

การศึกษาการนำตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์เพื่อเป็น
ปุ๋ย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตะกอนต่อสมบัติของดิน ผลผลิตและคุณภาพของพืช 2 ชนิด คือ
ผักคะน้าและผักกาดขาวปลี โดยแบ่งเป็น 2 การทดลองตามชนิดพืช และวางแผนการทดลองแบบ
Completely Randomized Design มีการใส่ตะกอน 5 อัตรา คือ 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำการทดลองใน
แปลงสวนผักของเกษตรกร ในพื้นที่ตำบลไทรน้อย อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี ในระหว่างเดือน
กุมภาพันธ์ ถึง เดือนเมษายน พ.ศ. 2552 ผลการทดลอง พบว่า

ตะกอนมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม ร้อยละ 4.11 2.24 และ 0.50
ตามลำดับ สำหรับโลหะหนัก พบว่า มีปริมาณทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม โปรท และสารหนู
เท่ากับ 84.0 101.7 5.60 103.5 2.28 และ 0.90 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโลหะหนัก
ในปุ๋ยอินทรีย์มาตรฐานที่กำหนดโดยกรมวิชาการเกษตร พบว่า แคดเมียมและโปรท มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน
เล็กน้อย เมื่อนำตะกอนไปเป็นปุ๋ยสำหรับผักคะน้า พบว่า การใส่ตะกอนอัตรา 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ให้
ผลผลิตน้ำหนักรากสดไม่แตกต่างกันและมากกว่าการไม่ใส่และใส่ตะกอนอัตรา 1 ตัน/ไร่ แตกต่างอย่างมี
นัยสำคัญทางสถิติ การใส่ตะกอนอัตรา 4 ตัน/ไร่ มีแนวโน้มให้ผลผลิตสูงสุด (1,162.7 กก./ไร่) สูงกว่าที่
อัตรา 6 ตัน/ไร่ สำหรับผักกาดขาวปลี พบว่า การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ให้ผลผลิตน้ำหนักรากสดไม่แตกต่าง
กัน และมากกว่าการไม่ใส่ตะกอนแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การใส่ตะกอนอัตรา 4 ตัน/ไร่ มี
แนวโน้มให้ผลผลิตสูงสุด (5,146.7 กก./ไร่) สูงกว่าการใส่ที่อัตรา 6 ตัน/ไร่ เมื่อพิจารณาความเสี่ยงต่อ
สุขภาพของผู้บริโภคอันเนื่องมาจากการบริโภคผักเหล่านี้ พบว่า การใส่ตะกอนทุกอัตราไม่มีผลต่อการ
สะสมโลหะหนักในระดับที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการบริโภค สำหรับผลของการใส่ตะกอนต่อสมบัติ
ของดินหลังเก็บเกี่ยวผลผลิต พบว่า การใส่ตะกอนอัตรา 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ดินมีอินทรีย์วัตถุไม่
แตกต่างกันแต่เพิ่มสูงกว่าการไม่ใส่และใส่อัตรา 1 ตัน/ไร่ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับความ
เป็นประโยชน์ของธาตุอาหารต่างๆ ในดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการใส่ตะกอนที่เพิ่มขึ้น ยกเว้น
โพแทสเซียม ส่วนปริมาณโลหะหนักในดิน พบว่า การใส่ตะกอนมีแนวโน้มทำให้เฉพาะปริมาณโปรท
เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

Amarita Kochaphakdee 2010: The Use of Activated Sludge from Beverage Production Plant as Fertilizer for Chinese Kale and Chinese Cabbage. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Assistant Professor Suthep Thongpae, Ph.D 101 pages.

The use of activated sludge from Beverage Production Plant as fertilizer was studied to investigate the effects on soil properties, yield and quality of two kinds of vegetable : Chinese Kale (*Brassica alboglabra*) and Chinese Cabbage (*Brassica pekinensis* Lour.). The study was divided into two experiments according to vegetables. Each experiment was conducted in Completely Randomized Design with 5 rates of activated sludge : 0, 1, 2, 4, and 6 tons/rai. The experiments were carried out at farmer's farm in Amphoe Sainoi, Nontaburi province during February to April 2009.

The results showed that the amount of N P and K in activated sludge were 4.11 2.24 and 0.50 % respectively and also for Cu Pb Cd Cr Hg and As were 84.0 101.7 5.60 103.5 2.28 and 0.90 mg/kg respectively. As compare to the content of heavy metal in standard organic fertilizer proposed by Department of Agriculture, the amount of Cd and Hg in activated sludge are rather higher than the standard. As for the application of activated sludge as fertilizer for Chinese Kale, the results showed that the application rate at 2 4 and 6 ton/rai gave no different in fresh weight yield but higher than the application at 1 ton/rai and control significantly. The application at 4 ton/rai tend to give the highest yield (1,612.7 kg/rai). Similar result was found in Chinese Cabbage, all application rates gave no different in fresh weight yield but higher than control highly significant, and also the application rate at 4 ton/rai tend to give the highest yield. As for risk assessment due to the contamination of heavy metal in vegetables, the results seem to show no effects. On the other hand the application of activated sludge resulted the increase of soil organic matter and also availability of plant nutrients except K. While the application of activated sludge tended to increase the amount of Hg in soil.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุเทพ ทองแพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความกรุณาชี้แนะแนวทางในการศึกษาวิจัย ทั้งยังให้คำปรึกษา รวมทั้งรองศาสตราจารย์อิทธิพล ราศรีเกรียงไกร ผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ ประธานการสอบ ที่เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำเพิ่มเติม เพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์เกษม จันทรแก้ว ประธานโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่กรุณาให้ทุนเพื่อการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันเป็นพื้นฐานนำไปสู่ความสำเร็จแห่งการศึกษาวิจัย พร้อมทั้งให้คำแนะนำและคำปรึกษาต่างๆ สิ่งสำคัญเหนืออื่นใดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ชีวิต มอบทุกสิ่งทุกอย่างให้ ทั้งความรัก คำปรึกษา กำลังใจ และสิ่งอื่นๆ อีกมากมาย คุณลุง คุณป้า พี่ๆ น้องๆ ที่ให้กำลังใจและคอยให้ความช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอบคุณเจ้าหน้าที่โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ขอบคุณ พี่นุต พี่เก้ พี่โต พี่เอ พี่อ้อ พี่แจ๊ค พี่ยีน พี่ปลา พี่ปู พี่แถม จุ่ม น้อย ใหม่ แด แจง อ้อ เก้ และฝน ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล เป็นกำลังใจและแรงผลักดันให้กันเสมอมา

คุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์นี้ข้าพเจ้าขอบอบแต่ คุณพ่อ คุณแม่ คุณลุง คุณป้า พี่ๆ น้องๆ คณาจารย์ผู้ให้ความรู้ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

อัมริตา คชภักดี

มกราคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	33
ผลและวิจารณ์	40
ผล	40
วิจารณ์	80
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	85
ภาคผนวก	94
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	101

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าวิเคราะห์ทางเคมีในวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม	15
2	ปริมาณโลหะหนักและจุลธาตุในระดับปกติที่มีอยู่ในดินและพืช	24
3	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในพืชชนิดต่างๆ และส่วนของพืชที่ปลูกในดินของประเทศไทย	25
4	ค่าสูงสุดของจุลธาตุที่ยอมให้มีอยู่ได้ในดิน (มก./กก.) และค่าวิกฤตในพืชที่เริ่มแสดงอาการของการยับยั้งการเจริญเติบโต	26
5	เปรียบเทียบข้อดี ข้อด้อย ของปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมี	28
6	องค์ประกอบและสมบัติของดินที่ใช้ในการทดลอง	42
7	องค์ประกอบและสมบัติของตะกอนที่ใช้ในการทดลอง	43
8	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักคะน้าที่อายุ 30 วัน (กรัม/ต้น)	45
9	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักคะน้าที่อายุ 38 วัน (กรัม/ต้น)	45
10	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว (กิโลกรัม/ไร่)	46
11	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักแห้งของผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว (กิโลกรัม/ไร่)	47
12	ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว	49
13	ปริมาณการสะสมไนโตรเจน (กิโลกรัม/ไร่) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว	49
14	ปริมาณฟอสฟอรัส (ร้อยละ) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว	51
15	ปริมาณการสะสมฟอสฟอรัส (กิโลกรัม/ไร่) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว	51
16	ปริมาณโพแทสเซียม (ร้อยละ) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว	52
17	ปริมาณการสะสมโพแทสเซียม (กิโลกรัม/ไร่) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว	52
18	ความเข้มข้น (mg/kg) ของโลหะหนักในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว	55
19	ความเข้มข้น (mg/kg) ของโลหะหนักในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวในกรณีที่ปลูกในดินไม่มีการปนเปื้อน	55
20	ค่า HQ และ HI ของผู้ที่บริโภคผักคะน้าที่ใส่ตะกอนอัตราต่างๆ	58

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
21	ค่า HQ และ HI ของผู้ที่บริโภคผักคะน้าที่ใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ในกรณีปลูกในดินไม่มีการปนเปื้อน	59
22	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของดิน	60
23	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน	60
24	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในดินหลังการเก็บเกี่ยวผักคะน้า	61
25	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักกาดขาวปลีที่อายุ 30 วัน (กรัม/ต้น)	63
26	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักกาดขาวปลีที่อายุ 38 วัน (กรัม/ต้น)	63
27	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว (กิโลกรัม/ไร่)	64
28	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว (กิโลกรัม/ไร่)	64
29	ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ) ในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว	67
30	ปริมาณการสะสมไนโตรเจน (กิโลกรัม/ไร่) ในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว	67
31	ปริมาณฟอสฟอรัส (ร้อยละ) ในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว	68
32	ปริมาณการสะสมฟอสฟอรัส (กิโลกรัม/ไร่) ในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว	68
33	ปริมาณโพแทสเซียม (ร้อยละ) ในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว	69
34	ปริมาณการสะสมโพแทสเซียม (กิโลกรัม/ไร่) ในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว	70
35	ความเข้มข้น (mg/kg) ของโลหะหนักในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว	72
36	ความเข้มข้น (mg/kg) ของโลหะหนักในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยวในกรณีปลูกในดินไม่มีการปนเปื้อน	73
37	ค่า HQ และ HI ของผู้ที่บริโภคผักกาดขาวปลีที่ใส่ตะกอนอัตราต่างๆ	76
38	ค่า HQ และ HI ของผู้ที่บริโภคผักกาดขาวปลีที่ใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ในกรณีปลูกในดินไม่มีการปนเปื้อน	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
39	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของดิน	78
40	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน	78
41	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุอาหารและ โลหะหนักในดินที่ปลูกผักกาดขาวปลี	79

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กรอบแนวคิดของการศึกษา	3
2	กรรมวิธีการผลิตเบียร์	8
3	กระบวนการเกิดตะกอนและแนวทางการจัดการ	9
4	วัฏจักรของไนโตรเจน	13
5	แหล่งที่มาและทิศทางของโลหะหนักบางชนิดในการเข้าสู่ส่วนต่างๆ ของพืช	27
6	ขั้นตอนการประเมินปริมาณโลหะหนักที่ร่างกายได้รับ	31
7	ระยะปลูกผักคะน้าและผักกาดขาวปลีในแต่ละแปลงย่อย	36
8	ปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนในช่วง 0 1 2 3 และ 4 สัปดาห์	44
9	อัตราการเจริญเติบโตของผักคะน้าที่ช่วงอายุ 30 38 และ 45 วัน	48
10	อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดขาวปลีที่ช่วงอายุ 30 38 และ 45 วัน	65
ภาพผนวกที่		
1	แปลงทดลองสำหรับการปลูกผักคะน้าและผักกาดขาวปลี	95
2	ซังตะกอนเพื่อนำไปใส่ในแต่ละแปลงย่อย	95
3	การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ลงแปลงทดลอง	96
4	คลุกเคล้าตะกอนและดินในแต่ละแปลงย่อยให้ผสมเข้ากัน	96
5	ลักษณะของแปลงทดลองที่พร้อมจะหยอดเมล็ดผัก	97
6	วัดระยะห่างของแถวและระหว่างต้นเพื่อเตรียมหยอดเมล็ดพืชลงแปลง	97
7	การหยอดเมล็ดผักลงแปลงทดลองตามระยะห่าง 25 × 25 เซนติเมตร	98
8	การรักษาความชื้นในดินเมื่อผ่านกระบวนการให้น้ำ	98
9	ลักษณะโดยรวมของการดูแลรักษาพืชในแปลง	99
10	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว (45 วัน)	99
11	ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว (45 วัน)	100

การใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเบียร์
เพื่อเป็นปุ๋ยสำหรับผักคะน้าและผักกาดขาวปลี

The Use of Activated Sludge from Beverage Production Plant as Fertilizer
for Chinese Kale and Chinese Cabbage

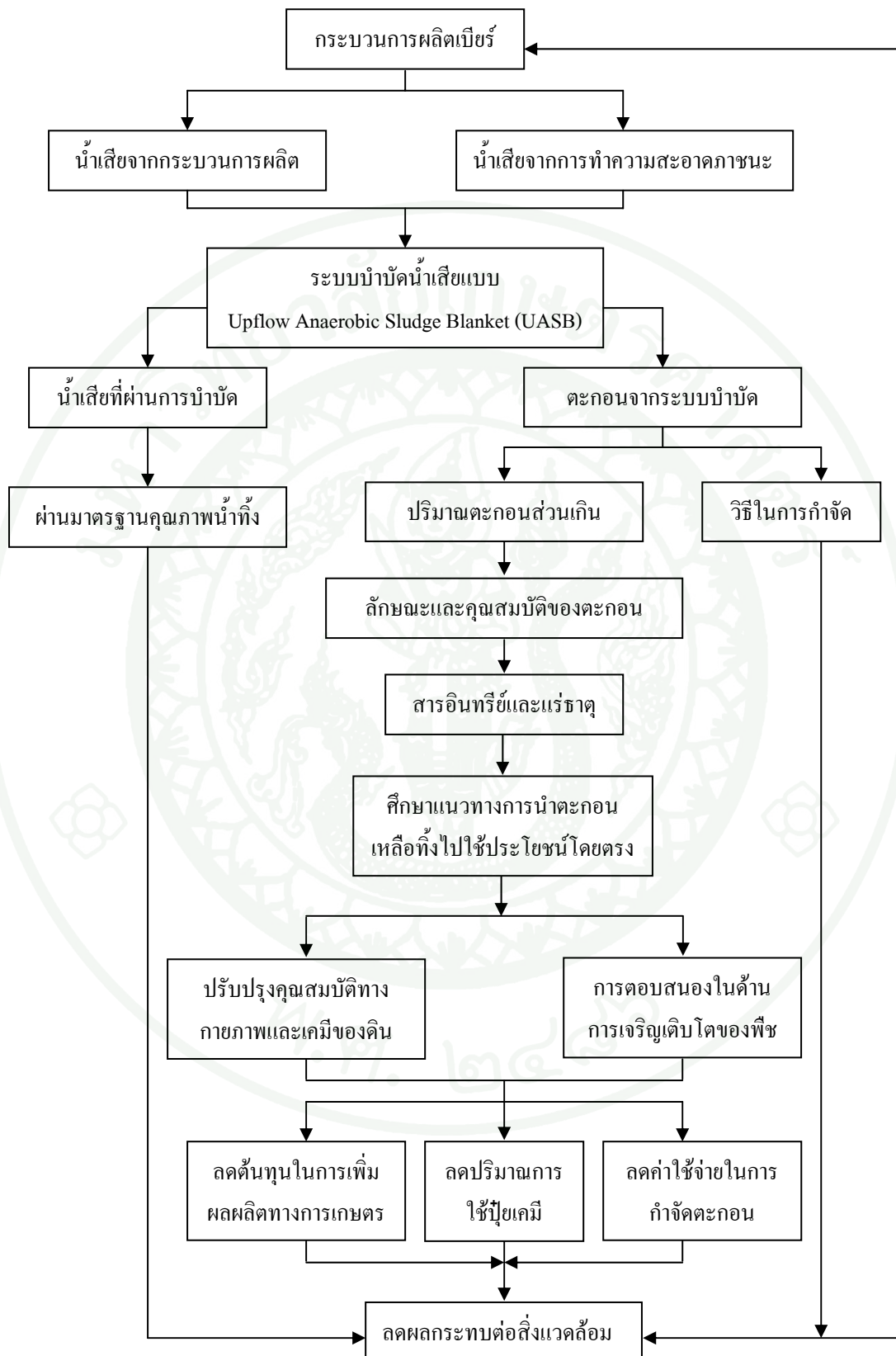
คำนำ

จากความต้องการของตลาดในประเทศที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุตสาหกรรมต่างๆ เร่งการผลิตเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ โดยมีการใช้ทรัพยากร/วัตถุดิบ ที่มีความแตกต่างกันไปตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปแล้ว ผลจากการดำเนินการของอุตสาหกรรมทุกประเภทก่อให้เกิดของเสียและมลพิษจากกระบวนการผลิต เช่นเดียวกันกับบริษัท ไทยเอเชีย แปซิฟิค บริวเวอรี่ จำกัด ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ วัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ มอลต์ ฮอปส์ ยีสต์ และน้ำ เมื่อนำวัตถุดิบดังกล่าวมาผ่านกระบวนการผลิตแล้วก่อให้เกิดน้ำเสียประมาณ 60 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน นอกจากนี้แล้วยังมีตะกอนเหลือทิ้งจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียอีกประมาณ 10 ตันต่อวัน และนับวันจะยังมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งมีปัญหามากในการกำจัด เนื่องมาจากการถมทิ้งจะมีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ตะกอนน้ำเสียของอุตสาหกรรมประเภทอาหาร สุรา และเบียร์ของ Sommer *et al.*, (1976) พบว่า มักมีสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ มีส่วนน้อยมากที่จะสร้างปัญหาการปนเปื้อนของสารพิษและโลหะหนัก โดยชนิดและปริมาณธาตุอาหารที่มีอยู่ในตะกอนน้ำเสียจากโรงงานเบียร์ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในปริมาณที่มากพอสมควร

ผลจากการวิเคราะห์ตะกอนน้ำเสียจากโรงงานเบียร์ของ จงรักษ์และคณะ (2529) พบว่า มีไนโตรเจน 4.70 % ฟอสฟอรัส 1.25 % และโพแทสเซียม 0.5 % ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณธาตุอาหารสูง ดังนั้นจึงอาจนำตะกอนที่เกิดขึ้นมาเป็นปุ๋ยอินทรีย์สำหรับใช้ทางการเกษตร เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมี และฟิสิกส์ของดินให้ดีขึ้น เนื่องจากปัจจุบันนี้ดินในประเทศไทยประสบกับปัญหาการขาดอินทรีย์วัตถุเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่เกษตรกรนิยมใช้ปุ๋ยเคมีในการผลิตพืช เนื่องจากซื้อหาได้ง่าย และใช้ในปริมาณน้อย นอกจากนี้ปุ๋ยอินทรีย์ยังหา

ซึ่อยาก และมีปริมาณที่ไม่เพียงพอที่จะใช้ ดังนั้นอินทรีวัตถุที่มีอยู่เดิมในดินจึงค่อยๆ สูญหายไปจนเหลืออยู่น้อยมากในดิน ส่งผลให้คุณภาพของดินเสื่อมลง และสืบเนื่องจากการที่รัฐบาลได้ประกาศให้เรื่องเกษตรอินทรีย์เป็นวาระแห่งชาติ เมื่อวันที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2548 ทำให้ความสำคัญของปุ๋ยอินทรีย์ยิ่งทวีความสำคัญยิ่งขึ้น (กรมวิชาการเกษตร, 2548) รวมทั้งปุ๋ยเคมีมีราคาสูง โดยประเทศไทยต้องนำเข้าปุ๋ยเคมีจากต่างประเทศปีละหลายล้านตัน นับเป็นจำนวนเงินมหาศาล ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียเงินตราของประเทศเป็นอย่างมาก เพราะฉะนั้นการนำตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียมาใช้ในการปลูกพืชเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรจึงนับว่านอกจากจะเป็นการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นแล้ว ยังเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วย

ดังนั้นการศึกษาเพื่อนำตะกอนของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตอาหารและเครื่องดื่มมาใช้ในการปรับปรุงและบำรุงดิน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ เป็นการเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้ง ทั้งยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อปุ๋ยเคมีของเกษตรกรได้ ซึ่งจากการนำตะกอนมาเป็นปุ๋ยอินทรีย์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการให้ผลผลิตและอัตราการเจริญเติบโต รวมทั้งคุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงไป การใช้ตะกอนเป็นปุ๋ยอินทรีย์ในดินจึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาเป็นอย่างมาก เนื่องจากปริมาณตะกอนน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเบียร์มีปริมาณมากและมีความจำเป็นต้องศึกษาแนวทางในการกำจัดที่จะก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งหากตะกอนสามารถเพิ่มปริมาณธาตุอาหารหลักให้แก่พืชแล้ว ยังมีผลพลอยได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินได้อีกด้วย นับว่าเป็นการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า ทั้งยังสามารถลดปัญหามลภาวะสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี และเป็นวิธีการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของบริษัท ไทยเอเชียแปซิฟิก บริวเวอรี่ จำกัด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งกรอบแนวคิดของการศึกษานี้แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดของการศึกษา

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของตะกอนจากโรงงานผลิตเบียร์ ของบริษัท ไทยเอเชีย แปซิฟิค บรีวเวอรี่ จำกัด จังหวัดนนทบุรี กับความเหมาะสมของตะกอนในการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร
2. เพื่อศึกษาการตอบสนองของพืชผักสวนครัว ได้แก่ ผักคะน้า และผักกาดขาวปลีในด้านการเจริญเติบโต ผลผลิต และผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินเมื่อเติมตะกอนลงไปเป็นวัสดุอินทรีย์ในอัตราที่แตกต่างกัน
3. ศึกษาปริมาณการสะสมโลหะหนักในผักคะน้า และผักกาดขาวปลี เพื่อประเมินความเสี่ยงของการบริโภคผักสวนครัวทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ตะกอนจากโรงงานเบียร์เป็นปุ๋ย
4. เพื่อเป็นการกำจัดตะกอนจากโรงงานเบียร์ที่ก่อให้เกิดประโยชน์ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การตรวจเอกสาร

1. อุตสาหกรรมการผลิตเบียร์

เบียร์เป็นเครื่องดื่มที่ผลิตจากพืชและมีแอลกอฮอล์ผสมอยู่ ซึ่งเชื่อกันว่าเป็นเครื่องดื่มที่ช่วยแก้กระหาย ดับความร้อน ช่วยให้เจริญอาหารและลดความตึงเครียดของอารมณ์ ตลอดจนสามารถให้ประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้ดื่ม หากดื่มในปริมาณที่เหมาะสม เพราะเบียร์ประกอบด้วย แคลเซียม โปรตีน ฟอสฟอรัส วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 และวิตามินซี (วิภา, 2541) โดยมีปัจจัยเพื่อการผลิตดังนี้

1.1 ข้าวมอลต์ (Malt) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้าวบาร์เลย์ ซึ่งเป็นพืชที่เหมาะสมสำหรับใช้เพื่อการผลิตเบียร์ ปกติแล้วมีพืชหลายชนิดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเบียร์ เช่น ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด ข้าวสาลี และข้าวโอ๊ต เป็นต้น

1.2 ดอกฮอปส์ (Hops) เป็นพันธุ์ไม้เลื้อยชนิดหนึ่งมีรสขมและหอม ดอกฮอปส์ที่นำมาเป็นส่วนผสมในการผลิตเบียร์ ต้องเป็นดอกฮอปส์เพศเมียเท่านั้น ซึ่งพันธุ์ที่นิยมใช้ คือพันธุ์ Golding หรือ Fuggle ปริมาณที่ใช้คือ 0.4-0.7 ปอนด์ต่อเบียร์ 1 บาร์เรลหรือ 36 เกลลอน

1.3 น้ำ (Water) เป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญในการผลิตเบียร์ เนื่องจากเบียร์จะมีปริมาณของน้ำมากที่สุด คือประมาณร้อยละ 90 และเบียร์แต่ละชนิดจะมีรสชาติดีหรือไม่จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำที่ใช้ผลิตเบียร์ เนื่องจากน้ำที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตมีชนิดและปริมาณของแร่ธาตุต่างกัน เช่น ถ้ามีธาตุเหล็กละลายอยู่จะทำให้เบียร์ตกตะกอน และหากน้ำมีแคลเซียมอยู่มากจะทำให้รสชาติเบียร์ที่ได้เสียไป

1.4 ยีสต์ (Yeast) ยีสต์ที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตเบียร์มี 2 ประเภทโดยทำให้สามารถจัดเบียร์ให้อยู่ในประเภทที่แตกต่างกันได้แก่ Bottom yeasts หมายถึง ยีสต์ที่จมลงก้นถังหลังจากการหมักสิ้นสุดลง เช่น *S.cereviaceae*, *S.carlsbergences* และ *S.uvarum* โดยจะได้เบียร์เป็นสีเหลืองอำพัน เรียกว่า ลาเกอร์เบียร์ และเบียร์ที่ได้จาก Top yeasts เรียกว่า เอลเบียร์ เนื่องจากยีสต์จะลอยอยู่บนผิวหน้าหลังจากการหมักจบสิ้นลง เช่น *S.cereviaceae* var. *ellipsoids* เบียร์ที่ได้จะมีสีคล้ำ เรียกว่า สเตาต์เบียร์

1.5 วัตถุดิบที่ใช้ปรุงแต่งและการบรรจุขวด ได้แก่ น้ำตาล และวิตามินซี ตลอดจนขวดบรรจุกล่องกระดาษ ฝาจุก และฉลาก

การผลิตเบียร์ในต่างประเทศเริ่มตั้งแต่การหมักข้าวบาร์เลย์ให้เป็นมอลท์ แต่การผลิตในประเทศไทยจะเริ่มตั้งแต่การสั่งมอลท์เข้ามาจากต่างประเทศเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบ เนื่องจากข้าวบาร์เลย์ในประเทศไทยยังมีคุณภาพไม่ดีพอ ขั้นตอนการผลิตเบียร์ (Luc *et al.*, 2006) มีดังนี้

ขั้นที่ 1 นำข้าวบาร์เลย์มาคั่วเพื่อทำความสะอาดและตรวจสอบให้ได้คุณภาพ นำไปผึ่งแดด แล้วนำมาแช่น้ำประมาณ 50 ชั่วโมง และนำไปหมักโดยเกลี่ยในถังหมักประมาณ 6-8 วัน เพื่อให้รากอ่อนงอกออกมาเป็นมอลท์

ขั้นที่ 2 นำมอลท์ที่ได้จากข้าวบาร์เลย์มาคั่ว ทำความสะอาด แล้วนำเข้าเครื่องบดให้เป็นแป้ง และนำเข้าเครื่องผสมน้ำที่ปรับสภาพแล้วในหม้อต้ม ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา คือ 76 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง 45 นาที โดยในหม้อต้มจะมีเครื่องพ่นน้ำร้อนเพื่อให้ความร้อนแก่แป้งเกิดการผสมกับน้ำในถัง ในขณะเดียวกันก็มีเครื่องกวนเพื่อให้ตัวเร่ง (Enzymes) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงที่ผสมอยู่ในข้าวมอลท์ให้กลายเป็นน้ำตาล

ขั้นที่ 3 กรองน้ำตาลด้วยเครื่องกรอง (Mash filter) เพื่อแยกเอาแป้งออกจากน้ำตาล เมื่อแยกออกมาแล้วจะได้น้ำตาลบริสุทธิ์ เรียกว่า เวิร์ท (Wort) ส่วนตะกอนที่เหลือสามารถนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ได้

ขั้นที่ 4 ผ่านเวิร์ทเข้าหม้อต้มพร้อมกับเดิมดอกฮอปส์ ต้มเวิร์ทกับฮอปส์จนเดือดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ในหม้อทองแดง ระหว่างที่ต้มเวิร์ท ดอกฮอปส์ซึ่งละลายปนอยู่จะช่วยให้เบียร์มีรสดี กลิ่นหอม และป้องกันไม่ให้เบียร์เสียง่าย ช่วยให้เกิดโปรตีนในเวิร์ท และช่วยให้ฟองเบียร์อยู่ได้ทน

ขั้นที่ 5 เมื่อต้มเวิร์ทกับฮอปส์ได้ที่แล้ว นำไปกรองแยกเอาฮอปส์ออกเพื่อให้ได้น้ำหวานหรือเวิร์ทล้วนๆ ส่วนกากดอกฮอปส์ก็นำออกจากหม้อต้มแล้วนำไปทิ้ง จากนั้นก็ผ่านเวิร์ทเข้าไปยังถังตกตะกอน ทำให้เวิร์ทหรือน้ำหวานเย็นลงด้วยเครื่องทำความเย็น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เนื่องจากหากไม่รักษาด้วยความเย็น เวิร์ทจะเสื่อมคุณภาพและเสียง่าย

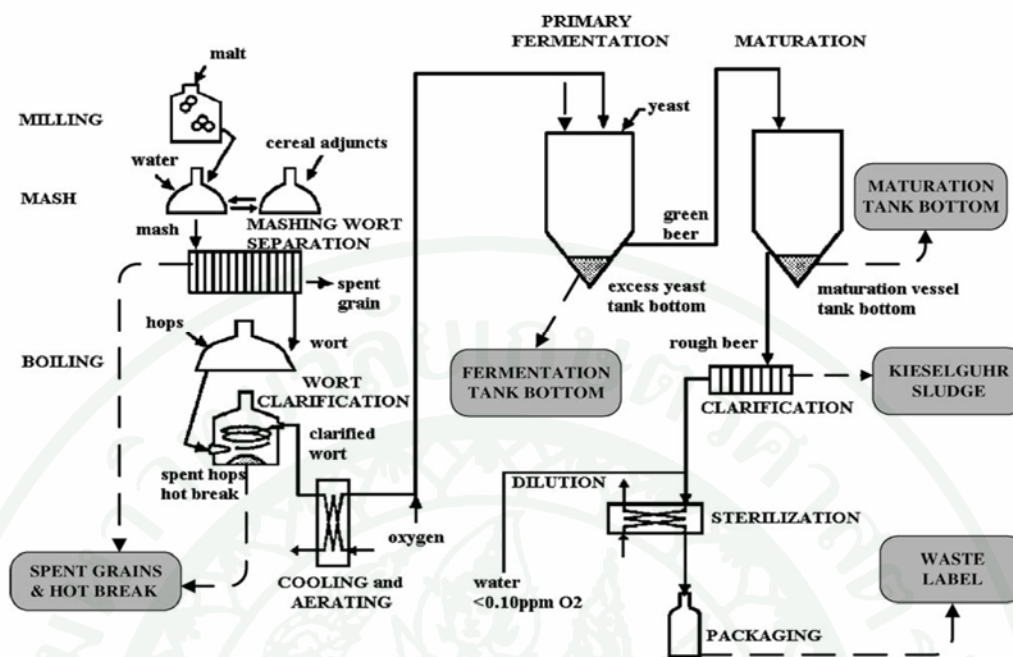
ขั้นที่ 6 ผ่านเวิร์ทที่เย็นได้ที่แล้วเข้าเครื่องกรองน้ำหวาน เมื่อเวิร์ทเย็นลงจนถึงระดับ 6 องศาเซลเซียส ก็จะใส่เชื้อยีสต์ผสมเข้าด้วยกันเพื่อแปรสภาพน้ำหวานให้เป็นแอลกอฮอล์หรือเบียร์ จุดที่สำคัญที่สุดในการผลิตเบียร์ คือ เชื้อยีสต์ ซึ่งเชื้อยีสต์ที่จะนำมาใช้ผสมต้องเป็นยีสต์ที่บริสุทธิ์และเป็นยีสต์ชนิดดี เพราะเบียร์จะมีคุณภาพหรือไม่ ขึ้นอยู่กับเชื้อยีสต์เป็นสำคัญ

ขั้นที่ 7 นำเบียร์ที่ผสมยีสต์แล้วเข้าถังหมักขึ้นดัม ซึ่งใช้เวลาประมาณ 9-12 วัน ภายใต้อุณหภูมิเย็นคงที่ โดยจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้ และเครื่องหมักจะเปิดทางระบายเพื่อให้อากาศในถังหมักถ่ายเทออกจนหมดแต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นก็ถ่ายน้ำเบียร์ออกจากเชื้อยีสต์ที่นอนก้นเพื่อแยกยีสต์ออก

ขั้นที่ 8 นำเบียร์เข้าเก็บในถังหมักขึ้นสุดท้าย ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ เก็บไว้นานประมาณ 2-5 เดือน เพื่อบ่มให้เบียร์มีรสดีและมีสีใสขึ้น ในระหว่างนี้จะเกิดปฏิกิริยาต่อไป คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะละลายอยู่ในเบียร์เพิ่มมากขึ้น ช่วยให้เบียร์มีรสซ่าและเกิดเป็นฟอง ซึ่งมีแอลกอฮอล์อยู่ประมาณร้อยละ 4-7 ในขั้นนี้จะได้เบียร์สด

ขั้นที่ 9 จากนั้นผ่านเบียร์ที่หมักได้ที่แล้วเข้าเครื่องกรองเพื่อทำให้เบียร์มีสีใสมากขึ้น และนำไปผ่านความร้อน (Pasteurized) แล้วจึงบรรจุขวดต่อไป

จากขั้นตอนการผลิตตั้งแต่กระบวนการเริ่มต้นจนกระทั่งถึงกระบวนการสุดท้าย สิ่งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต คือ มลพิษและของเสีย ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความรู้หรือวิธีการในการบำบัดและกำจัดอย่างถูกวิธี แต่ของเสียบางส่วนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ได้ ตัวอย่างเช่น ตะกอนที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 สามารถนำกลับมาใช้เพื่อเป็นอาหารสัตว์ได้ แต่ตะกอนบางส่วนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอื่นๆ ก็ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย แสดงในภาพที่ 2 โดยจำเป็นต้องทำการบำบัดให้มีคุณภาพดีขึ้นทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กฎหมายกำหนดก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อให้สิ่งแวดล้อมสามารถฟื้นคืนสภาพได้เองตามธรรมชาติ



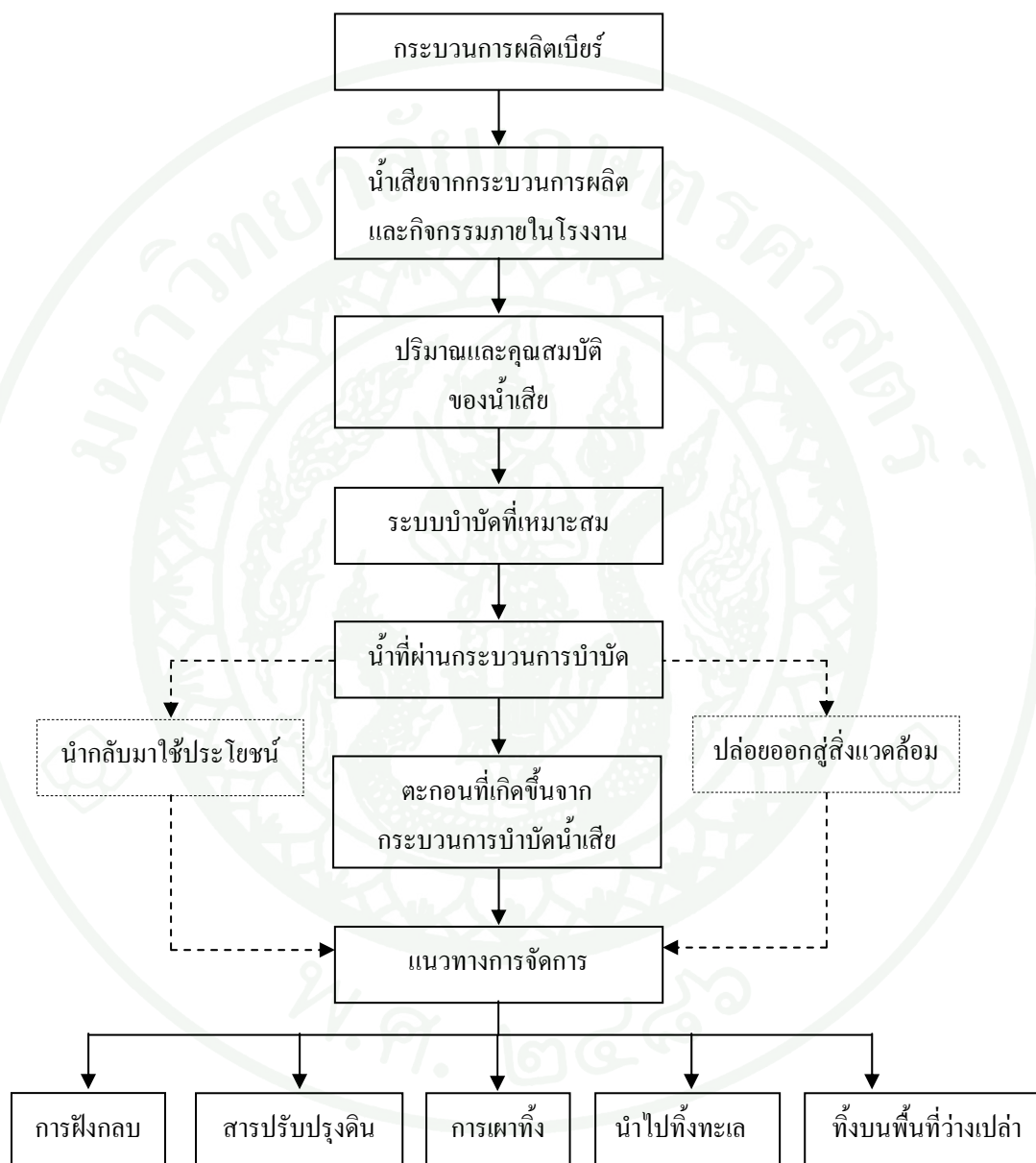
ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตเบียร์และของเสียที่เกิดขึ้น

ที่มา: Luc *et al.* (2006)

2. ตะกอนเหลือทิ้งและการจัดการ

ตะกอนเป็นมลพิษสำคัญที่เหลือจากระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยจำเป็นต้องมีแนวทางการจัดการที่เหมาะสม ซึ่งต้องคำนึงถึงแนวทางที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นแนวทางการจัดการที่จะเลือกใช้จำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของตะกอนเป็นสำคัญ โดยตะกอนที่ได้จากระบวนการบำบัดจะมีลักษณะเป็นของแข็งแยกออกมาจากน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากระบวนการสกักแป้งและน้ำตาลออกจากข้าวมอลต์ ตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบวนการผลิตเบียร์ประกอบไปด้วยสารต่างๆ ทั้งสารแขวนลอยและสารที่ละลายน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน และธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ที่ผ่านกระบวนการบำบัดและได้เป็นตะกอน โดยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอาหารและเครื่องดื่ม โดยมากจะแยกสิ่งสกปรกออกมาในรูปของตะกอน (Sludge) ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียควรได้รับการบำบัดให้มีความคงตัว ไม่มีกลิ่นเหม็น และมีปริมาตรลดลงเพื่อความสะดวกในการขนส่ง แล้วนำตะกอนเหล่านั้นไปกำจัดทิ้งวิธีการที่เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วการกำจัดตะกอนสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การนำไปทิ้ง

ทะเล (Ocean disposal) การถมที่หรือการฝังกลบ (Landfill) การทิ้งในแอ่งดิน (Lagoon) การเกลี่ยผสมหน้าดินเพื่อเป็นสารปรับปรุงดิน (Spreading on site) และการเผาทิ้ง (Incineration) แสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการเกิดตะกอนและแนวทางการจัดการ

ซึ่งการกำจัดตะกอนแต่ละวิธีมีทั้งผลดีและผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมต่างกัน เช่น การนำตะกอนไปทิ้งทะเล วิธีนี้เป็นที่ นิยมปฏิบัติมากในกลุ่มประเทศยุโรป โดยเฉพาะประเทศอังกฤษได้นำตะกอน

ในรูปน้ำหนักเปียกไปทิ้งทะเลประมาณ 5 ล้านตัน/ปี ทำให้หลายๆ ประเทศเกิดการต่อต้านการกำจัด ตะกอนด้วยวิธีการนี้ เนื่องจากก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศทางทะเลและสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เป็นอย่างมาก นอกจากนั้น Manson (1988) กล่าวถึงการกำจัดตะกอนด้วยการเผาทิ้งว่ามีความจำเป็นต้องใช้ พลังงานเชื้อเพลิงในการเผาไหม้สูง ซึ่งต้องประสบกับปัญหาด้านค่าใช้จ่ายในการลำเลียงขนส่ง หาทิ้งไม่ได้ ประกอบกับความต้องการด้านสุขภาพอนามัยของชุมชนที่มีการคำนึงถึงผลกระทบต่อ สุขภาพเป็นสำคัญ

ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย มีแนวโน้มที่จะกำจัดโดยนำมาใช้ประโยชน์บนที่ดิน (Land application) เป็นส่วนใหญ่ (Chongrak, 1989) ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ดังต่อไปนี้

2.1 ใช้ตะกอนเป็นเสมือนแหล่งของธาตุอาหารพืช ปุ๋ยเคมี และเป็นวัสดุปรับปรุงดิน (Agricultural utilization)

2.2 ใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตของป่า (Forest utilization)

2.3 ใช้ในการปรับสภาพพื้นที่ที่ถูกรบกวน เช่น การทำเหมืองแร่ (Land reclamation)

2.4 ใช้ตะกอนใส่ลงดิน ทั้งในพื้นที่ที่มีการเพาะปลูก (Land disposal) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อ กำจัดตะกอนและเป็นการเพิ่มผลผลิตพืช รวมทั้งปรับปรุงลักษณะสมบัติของดินให้ดีขึ้น

โดยก่อนที่จะมีการนำตะกอนไปกำจัดด้วยวิธีการใดนั้น มีความจำเป็นต้องรู้ถึงลักษณะและ คุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ของตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยลักษณะและสมบัติต่างๆ ของตะกอนจะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด อายุของตะกอน รูปแบบ/วิธีใน การบำบัด และกระบวนการผลิต ซึ่งด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถนำตะกอนมาใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตรได้อย่างเหมาะสม ทั้งในรูปแบบของตะกอนสด หรือตะกอนแห้งหรือแม้กระทั่งปุ๋ยหมัก เนื่องจากตะกอนมีปริมาณสารอินทรีย์สูง รวมทั้งมีปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ที่จำเป็นต่อการ เจริญเติบโตของพืชอย่างอุดมสมบูรณ์ ทั้งยังสามารถเพิ่มปริมาณธาตุอาหารในดินได้อีกด้วย (Mitchell *et al.*, 1978) เพราะโดยปกติแล้วดินที่ใช้เพื่อการปลูกพืช จะมีการสูญเสียธาตุอาหารออก จากดินหลายทาง เช่น ดินไปกับผลผลิตพืช ถูกชะล้างออกไปโดยน้ำ กลายเป็นก๊าซจากการเผาหรือ จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ เป็นต้น ส่งผลให้ปริมาณธาตุอาหารในดินลดน้อยลง การให้ผลผลิตของ

พืชไม่ดีพอ หรือไม่ได้ผลเลย จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการใส่ปุ๋ยเพื่อเพิ่มหรือชดเชยธาตุอาหารที่สูญเสียไป แต่เนื่องจากปุ๋ยมีหลายชนิด มีคุณสมบัติและลักษณะแตกต่างกัน ทั้งยังมีปริมาณธาตุอาหารแตกต่างกันด้วย ทำให้มีผลกระทบต่อลักษณะและสมบัติของดินต่างกัน ดังนั้น การใช้ปุ๋ยอย่างถูกต้อง เหมาะสม และมีประสิทธิภาพ จะก่อให้เกิดผลเสียน้อยที่สุดต่อการให้ผลผลิตพืช รวมทั้งผลกระทบในเชิงบวกต่อคุณสมบัติของดิน ในขณะที่อินทรีย์สารต่างๆ ในปุ๋ยอินทรีย์กำลังถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์รูปต่างๆ ของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะเปลี่ยนแปลงกระบวนการย่อยไปตามลำดับ ซึ่งจะอยู่ในรูปต่างๆ เช่น NH_4^+ , NO_3^- , H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} ซึ่งจุลินทรีย์และรากพืชสามารถดูดไปใช้ได้ ส่วนโพแทสเซียมในปุ๋ย มักจะอยู่ในรูปของไอออนที่ละลายน้ำได้ดี และจะเป็นประโยชน์ต่อพืชทันที ส่วนโพแทสเซียมที่อยู่ในเนื้อเยื่อพืช และในปุ๋ยจะค่อยๆ ถูกปลดปล่อยออกมา (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

3. ประโยชน์ของตะกอนในการปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มผลผลิตของพืช

ตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงและบำรุงดิน เพื่อเพิ่มผลผลิตของพืชได้ แต่ทั้งนี้ควรพิจารณาสารประกอบไนโตรเจนในดินและในตะกอน เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่มีบทบาทในการเจริญเติบโตและจำกัดการเจริญเติบโตของพืชอย่างเห็นได้ชัดที่สุด นอกจากนี้ไนโตรเจนยังเป็นองค์ประกอบและมีการสะสมในส่วนต่างๆ ของพืชอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุอาหารพืชชนิดอื่นๆ ส่วนต่างๆ ของพืชที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ คลอโรฟิลล์ โปรตีน กรดนิวคลีอิก เป็นต้น (ชัยฤกษ์, 2536) เมื่อพืชได้รับไนโตรเจนในปริมาณที่เพียงพอ พืชจะมีการเจริญเติบโตทางด้านต่างๆ อย่างรวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันหากพืชขาดธาตุไนโตรเจนจะมีการแสดงอาการผิดปกติขึ้น เช่น ใบเหลือง ลำต้นผอมสูง กิ่งก้านลีบเล็ก มีการพัฒนาในเรื่องของการแตกกิ่งก้านข้างและให้ผลผลิตต่ำ แต่ในทางกลับกันหากพืชได้รับปริมาณธาตุไนโตรเจนมากเกินไป ต้นพืชจะแก่ช้าผิดปกติและมีการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นและใบมากที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า “อาการเฟื่อใบ” (สุเทพ, 2551) และบางครั้งพืชก็เกิดอาการอวบน้ำ ส่งผลทำให้ลำต้นอ่อนแอและล้มง่าย ในส่วนของพืชที่ให้เส้นใย จะทำให้เส้นใยมีความเหนียวลดลง และหากเป็นพืชที่ให้เมล็ดการเจริญเติบโตของผลและเมล็ดจะช้าหรือไม่ออกดอกออกผล

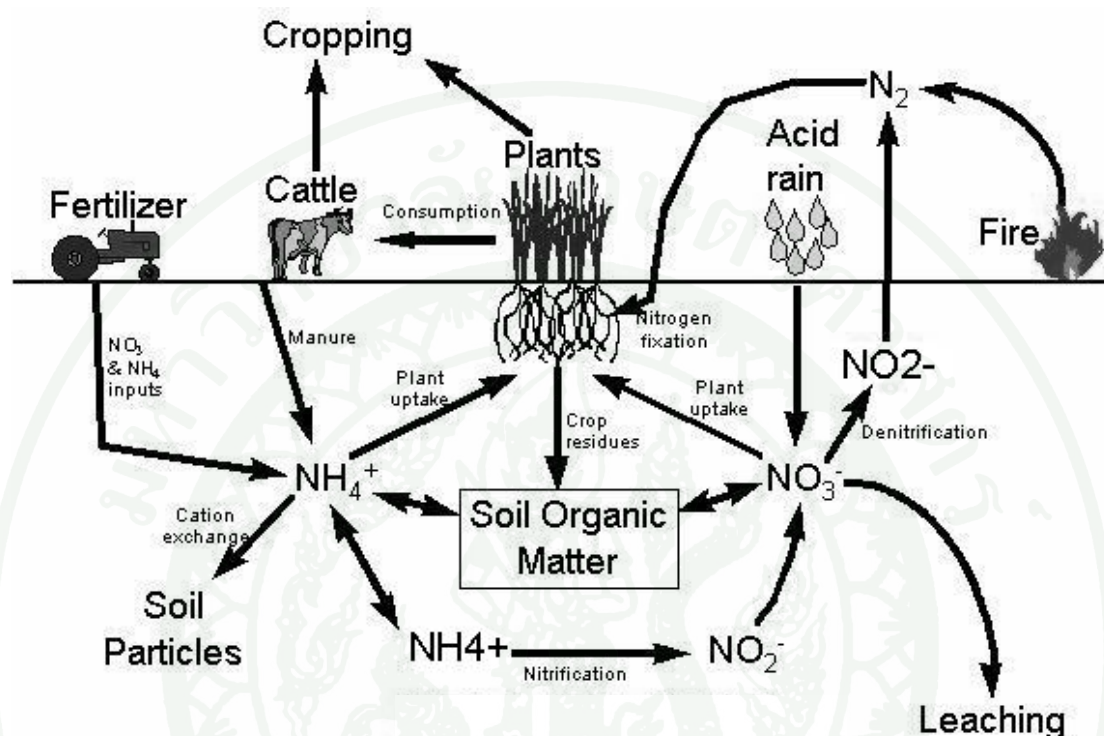
ไนโตรเจนในดิน แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic nitrogen) เช่น โปรตีน กรดอะมิโน และกรดนิวคลีอิก ซึ่งสารพวกนี้เป็นส่วนประกอบของพืชและสัตว์ ซึ่งมีอยู่

ประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ ของไนโตรเจนทั้งหมดในดิน โดยที่พืชจะได้รับไนโตรเจนจากส่วนนี้เป็นจำนวนมาก อีกประเภทหนึ่งคือ อนินทรีย์ไนโตรเจน (Inorganic nitrogen) โดยจะมีอยู่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ซึ่งรูปที่พืชสามารถดูดดึงขึ้นไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ได้แก่ แอมโมเนียม (NH_4^+) ไนไตรต์ (NO_2^-) และไนเตรต (NO_3^-) สารกลุ่มนี้อยู่ในรูปของปุ๋ยหรือเกลือ สำหรับไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในพืชจะอยู่ในพืชร้อยละ 1.50 ถึง 6.00 ของน้ำหนักแห้งของพืช ส่วนค่าวิกฤตของปริมาณไนโตรเจนนั้นจะขึ้นอยู่กับ ชนิดพืช ช่วงของการเจริญเติบโต และส่วนของพืชที่นำมาศึกษา (Jones *et al.*, 1991)

ปริมาณไนโตรเจนในดินที่ได้ส่วนใหญ่มาจากฝนและปุ๋ยที่ใส่ลงไปในดินจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาโดยอาศัยกระบวนการทางชีววิทยา (Biological process) ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ โดยเริ่มจากกระบวนการ Aminization ที่สารประกอบโปรตีนถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์พวก Heterotrophic เป็นการเปลี่ยนสภาพโปรตีนให้เป็นสารประกอบไนโตรเจน เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงต่อไปเป็นกรดอะมิโนต่างๆ บางส่วนจะถูกนำมาสร้างเซลล์พืชและจุลินทรีย์ดิน และบางส่วนจะถูกแปรสภาพต่อไปโดยกระบวนการ Ammonification ซึ่งจะเปลี่ยนกรดอะมิโนให้เป็น NH_3 , Alcohol (R-OH), พลังงาน และสารในกลุ่มนี้จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนไตรต์ (NO_2^-) และไนเตรต (NO_3^-) ที่พืชสามารถนำไปใช้ได้

วัฏจักรไนโตรเจนสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4 โดยสารประกอบไนโตรเจนที่สำคัญ คือ แอมโมเนียมไนโตรเจน ซึ่งจะมีแบคทีเรียเปลี่ยนแอมโมเนียม (NH_4^+) ไปเป็นไนไตรต์ (NO_2^-) โดยแบคทีเรียที่ชื่อว่า Nitromonas ซึ่งสารประกอบไนไตรต์จะไม่เสถียรและถูกแบคทีเรียประเภท Nitrobacter เปลี่ยนไนไตรต์ไปเป็นไนเตรต (NO_3^-) โดยไนเตรตนี้เองที่พืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตอยู่ในรูปโปรตีนของพืช ซึ่งเมื่อมีสัตว์มากินพืชจะได้รับโปรตีนช่วยในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิต เรียกกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียมไปเป็นไนไตรต์และไนเตรตโดยจุลินทรีย์ว่า Denitrification เมื่อสิ่งมีชีวิตตายลงกลายเป็นซากพืชซากสัตว์ จะมีจุลินทรีย์ขนาดเล็กมาย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ทำให้สารประกอบไนโตรเจนถูกปล่อยออกสู่ธรรมชาติมาอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอีกครั้ง และที่พิเศษกว่านั้นจะมีจุลินทรีย์บางประเภทสามารถตรึงไนโตรเจนจากบรรยากาศมาเป็นสารประกอบไนโตรเจนในดินได้ ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียที่อยู่บริเวณปมรากของต้นถั่ว เรียกกระบวนการตรึงไนโตรเจนนี้ว่า Nitrogen Fixation ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในดินจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับธรรมชาติของดินในพื้นที่นั้นๆ ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ชนิดพืชที่นำมา

ปลูก ความชื้นและอุณหภูมิ การระบายน้ำและอากาศในดิน ลักษณะภูมิประเทศ ความหยาบและความละเอียดของดิน (Milar *et al.*, 1964)



ภาพที่ 4 วงจรของไนโตรเจน

ที่มา: Terence (2009)

ประพิศ และภาวนา (2544) ได้ทำการศึกษการปลดปล่อยไนโตรเจนในดินจากการไถ่ตะกอนน้ำเสียของชุมชนห้วยขวางเขตกรุงเทพมหานคร กับชุดดินรังสิตกรดจัดและชุดดินปากช่องเป็น การศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยผสมตะกอนทั้งชนิดเปียกและแห้งกับดินให้ได้ปริมาณคาร์บอนจากตะกอนทั้ง 2 ชนิด 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.25 0.50 และ 0.75 บ่มดินเป็นเวลา 1 2 3 4 8 และ 12 สัปดาห์ พบว่าอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนอนินทรีย์ในชุดดินรังสิตกรดจัดเมื่อไถ่ตะกอนชนิดแห้ง และชนิดเปียก มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 27-44 และ 24-40 ตามลำดับส่วนอัตราการปลดปล่อยอนินทรีย์ไนโตรเจนในชุดดินปากช่อง เมื่อไถ่ตะกอนชนิดแห้งและชนิดเปียก มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 37-47 และ 35-58 ตามลำดับ

4. ศักยภาพของตะกอนเมื่อใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์

การนำตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเบียร์มาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรมีความน่าสนใจและมีความเป็นไปได้ อันเนื่องมาจากลักษณะสมบัติของตะกอน ดังที่ Follett *et al.* (1981) กล่าวว่า แนวโน้มการนำตะกอนมาใช้ประโยชน์ในพื้นที่การเกษตรมีมากขึ้น เนื่องจากแรงกดดันหลายๆ ด้าน เช่น ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนรวมทั้งปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นจากระบวนการบำบัดน้ำเสีย ความผันแปรของราคาปุ๋ยเคมี รวมทั้งความเข้มงวดของกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม เพื่อป้องกันมลพิษที่จะเกิดขึ้น นอกจากนี้ปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยตะกอนต่างๆ จะมีปริมาณธาตุอาหารชนิดต่างๆ ก่อนข้างสูง (ดังตารางที่ 1)

การเติมตะกอนลงดิน พบว่า ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของสารอินทรีย์จากตะกอนจะถูกออกซิไดส์ ทำให้เกิดกรดอินทรีย์ ซึ่งส่งผลให้ pH ของดินลดลง (Robertson; Lutrick; Yuan, 1982) และ Orawan *et al.* (1985) โดยการลดลงของค่า pH จะลดลงตามอัตราการใส่ตะกอน ซึ่งจะลดลงเฉพาะช่วงแรกๆ ของการใส่ตะกอนและหาก ในตะกอนมีปริมาณแคลเซียมมากพอ pH ของดินก็อาจเพิ่มขึ้นได้ (Guidi and Hall, 1984)

Gillies *et al.* (1989) และอรวรรณ (2529) กล่าวว่าอินทรีย์วัตถุที่มีไนโตรเจนมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งนั้นมีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาในช่วง 2-3 สัปดาห์ หลังจากเติมอินทรีย์วัตถุลงดิน และการเติมตะกอนในอัตรา 600-9,600 กิโลกรัม/ไร่ อินทรีย์ไนโตรเจนในตะกอนมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ จะถูกเปลี่ยนรูปและปลดปล่อยสู่ดิน อย่างรวดเร็วใน 3 สัปดาห์ เป็นผลให้ปริมาณไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Kelling *et al.*, 1977) รวมทั้งจะเป็นการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในส่วนของชั้นผิวดินให้มีปริมาณมากขึ้นด้วย (Ferrer *et al.*, 1984)

ตารางที่ 1 ค่าวิเคราะห์ทางเคมีในวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม

ชนิดของวัสดุ	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	Ca (%)	Mg (%)	Org.C (%)	C/N (%)	pH (%)
1. ตะกอนน้ำเสีย								
- โรงงานแป็บชี	4.10	2.33	0.30	-	-	-	-	-
- โรงงานเบียร์	4.49	1.59	0.31	2.18	0.29	33	7	7.1
- โรงงานสุราหมารายฤทธิ์	5.94	0.56	0.50	0.18	-	33	6	6.6
- โรงงานผงชูรส	4.8	0.63	-	-	-	-	-	-
2. จี๊เลี้ยง								
- ไม้เบญจพรรณ	0.32	0.16	2.45	-	-	62.70	196	5.4
- ไม้ยางเก่า	0.25	0.15	0.53	-	-	56.37	225	7.4
- ไม้ยางใหม่	0.19	0.36	0.40	-	-	58.41	307	7.5
3. กากอ้อย (bagasse)	0.40	0.15	0.44	-	-	57.69	146	6.1
4. ขุยมะพร้าว	0.36	0.05	2.94	-	-	60.13	167	6.2
5. แกลบ	0.36	0.09	1.08	-	-	54.72	152	6.2

ที่มา: ดัดแปลงจาก ปรัชญา และคณะ (2540)

(Guidi and Hall., 1984) กล่าวว่า การใส่ตะกอนลงดิน มีผลในการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของดิน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการปรับปรุงโครงสร้างดิน น้ำในดิน และส่งผลต่อผลผลิตของพืชได้ กล่าวคือ เมื่อนำตะกอนมาใส่ในพื้นที่การเกษตร ตะกอนจะทำหน้าที่เป็นทั้งสารปรับปรุงดินและเป็นปุ๋ยสำหรับพืชด้วย ส่งผลให้ผลผลิตพืชมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตะกอนที่เติมลงไป นอกจากนี้ (Hemphill *et al.*, 1982) กล่าวว่า การเติมตะกอนลงดินนั้น ถ้าหากในตะกอนมีปริมาณไนโตรเจนที่เพียงพอต่อความต้องการของพืชแล้ว ผลผลิตของพืชที่ได้จะมีความใกล้เคียงกันกับการใช้ปุ๋ยเคมี

ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ให้เหมาะสมนับว่าเป็นวิธีการที่ประหยัดค่าใช้จ่าย ซึ่งนับว่าเป็นการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ ทั้งยังเป็นการรักษาสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้นด้วย ซึ่งในอดีตที่ผ่านมา มีการใช้ปุ๋ยอินทรีย์กันมาก เนื่องจากหาได้ง่าย ทั้งยัง

ไม่มีการใช้ปุ๋ยเคมีอย่างแพร่หลาย แต่ต่อมามีการนำปุ๋ยเคมีมาจากต่างประเทศ และยังมีการส่งเสริมให้ใช้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มผลผลิตของพืช เกษตรกรจึงหันมาใช้ปุ๋ยเคมีกันมากขึ้น ประกอบกับเกษตรกรส่วนใหญ่ขาดความรู้เกี่ยวกับความสำคัญของปุ๋ยอินทรีย์ ตลอดจนวิธีการทำ การเก็บรักษา และการใช้ จึงทำให้ความสำคัญของปุ๋ยอินทรีย์ลดลง (อุไรวรรณ, 2545) อย่างไรก็ตามก็มีเกษตรกรเป็นจำนวนมากที่เล็งเห็นถึงประโยชน์ และความสำคัญของปุ๋ยอินทรีย์ที่มีต่อดินและพืช ตลอดจนในพื้นที่หลายแห่งไม่สามารถกระตุ้นให้พืชเจริญงอกงามและให้ผลผลิตสูงได้ แม้ว่าจะมีปริมาณธาตุอาหารในดินสูงและมีการใส่ปุ๋ยเคมีอย่างต่อเนื่อง เพราะในดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในปริมาณที่ต่ำมาก นั่นเอง ดังนั้นหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเรื่องนี้จึงได้มุ่งประเด็นหรือความสนใจที่จะส่งเสริมให้เกษตรกรหันมาใช้ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่างๆ กันมากขึ้น เนื่องจากอินทรีย์วัตถุในปุ๋ยอินทรีย์จะช่วยเพิ่มธาตุอาหารที่จำเป็นแก่ดิน ทั้งยังช่วยในการปรับปรุงสมบัติของดินให้ดีขึ้นทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งหลักๆ แล้วหน้าที่ของอินทรีย์วัตถุในดินทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง 3 ประการ (กรมวิชาการเกษตร, 2548) ดังนี้

4.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของดิน โดยช่วยทำให้ดินโปร่งพรุน อากาศในดินถ่ายเทได้สะดวก น้ำไม่ขัง ลดการไหลบ่าและช่วยลดการสูญเสียน้ำดิน รวมทั้งช่วยทำให้จุลินทรีย์ดินมีการเจริญเติบโตและมีกิจกรรมต่อเนื่อง ทำให้รากพืชเจริญเติบโตได้ดี ทำให้ดินไม่แน่นทึบ

4.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของดิน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางด้านธาตุอาหารและความเป็นกรด-ด่างของดิน โดยช่วยเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ให้แก่ดิน อินทรีย์วัตถุช่วยเพิ่มความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืช ช่วยควบคุมหรือลดการละลายได้ของธาตุบางชนิดในดิน เช่น อะลูมินัม (Al) และเหล็ก (Fe) โดยเฉพาะในดินที่เป็นกรดจัด นอกจากนี้ยังเพิ่มประโยชน์ให้ธาตุอาหารพืชที่สำคัญ เช่น ฟอสฟอรัส (P) และโมลิบดีนัม (Mo) ช่วยลดการดูดตรึงยึดติดไว้ของดินกับธาตุอาหารพืชบางตัว ทำให้พืชนำธาตุอาหารไปใช้ไม่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อดินมีสภาพเป็นกรดจัดอินทรีย์วัตถุช่วยเปลี่ยนแปลงทำให้ธาตุอาหารพืชอยู่ในสภาพที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

4.3 การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตในดิน โดยอินทรีย์วัตถุช่วยกระตุ้นการทำงานหรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินหรือสัตว์เล็กๆ ในดินช่วงระหว่างกระบวนการย่อยสลาย ทำให้การปลดปล่อยธาตุอาหารพืชในดินดีขึ้น รวมทั้งช่วยทำให้สภาพทางกายภาพและเคมีของดินดีขึ้นด้วย

5. การใช้ตะกอนเป็นปุ๋ยอินทรีย์กับพืชผัก

พืชผักเป็นพืชอายุสั้น (Annual crops) มีการเจริญเติบโตรวดเร็ว ต้องการธาตุอาหารปริมาณมากในช่วงระยะเวลาสั้นๆ การใส่ปุ๋ยอินทรีย์ต้องคำนึงถึงปุ๋ยที่มีการสลายตัวดีแล้วสามารถให้ธาตุอาหารได้ทันที วิธีการใส่ควรใส่แบบหว่านแล้วไถพรวนคลุกเคล้ากับดิน โดยอัตราหรือปริมาณการใส่จะแตกต่างกันขึ้นกับสภาพของดินและชนิดของพืชผัก แต่โดยทั่วไปการใช้ปุ๋ยอินทรีย์กับพืชผักจะใช้ประมาณ 1-2 ตัน/ไร่ (กลุ่มงานวิจัยดินและปุ๋ยพืชสวน, 2539; กลุ่มงานวิจัยความอุดมสมบูรณ์ของดินและปุ๋ยพืชไร่, 2541) พืชผักที่ทำการศึกษาในการทดลองนี้ ได้แก่ ผักคะน้า และผักกาดขาวปลี ซึ่งมีลักษณะทั่วไป ดังต่อไปนี้

5.1 ผักคะน้า (Chinese Kale)

คะน้า (Chinese Kale) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Brassica oleracea* var. *alboglabra* Bailey อยู่ในตระกูล Cruciferae มีวิตามินหลายชนิด เช่น เบต้า-แคโรทีน ซึ่งมีมากถึง 186.92 ไมโครกรัม/100 กรัม ซึ่งเป็นสารตัวหนึ่งในวิตามินเอมีคุณสมบัติช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งที่กระเพาะอาหาร มะเร็งลำไส้ มะเร็งปอด และมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ นอกจากนั้น ยังมีแคลเซียมซึ่งช่วยเสริมสร้างกระดูก และวิตามินซีช่วยเสริมสร้างเนื้อเยื่อให้ชุ่มชื้น และทำให้ระบบภูมิคุ้มกันโรคมีความแข็งแรงสมบูรณ์ โดยผักคะน้ามีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชีย เป็นผักที่นิยมปลูกและบริโภคทั่วทุกภาคของประเทศไทย สามารถปลูกได้ตลอดปี (วสันต์, 2544) แต่ได้ผลดีที่สุดช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนเมษายน นิยมปลูกเพื่อบริโภคส่วนใบและลำต้น สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินเกือบทุกชนิดที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินอยู่ระหว่าง 5.5-6.8 ความชื้นในดินสูงสม่ำเสมอ ต้องการแสงแดดเต็มที่ และสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ ระยะปลูกที่เหมาะสม คือ 20-25 เซนติเมตร มีอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 45-55 วัน แต่คะน้าอายุ 45 วันเป็นระยะที่ตลาดต้องการมากที่สุด การเก็บจะใช้มีดตัดให้ชิดโคนต้น โดยเมื่อเก็บเสร็จแล้วควรรีบนำเข้าที่ร่มในที่ที่มีอากาศโปร่งและเย็น (สุนทร, 2539) คะน้าที่นิยมปลูกในประเทศไทย ได้แก่ คะน้าจีนพันธุ์ดอกขาว โดยนำเข้าเมล็ดจากต่างประเทศมาปลูกและปรับปรุงพันธุ์ ปัจจุบันพันธุ์คะน้าที่นิยมปลูกมีอยู่ 3 พันธุ์ คือ พันธุ์ใบกลม พันธุ์ใบแหลม และพันธุ์ยอดหรือก้าน (เมฆ, 2541)

คะน้าเป็นผักที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ และพืชผักพื้นเมืองที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากเป็นผักที่ปลูกง่ายสามารถปลูกได้ตลอดปี และเป็นพืชนิยมของผู้บริโภคเนื่องจากมีรสชาติดี ราคาถูก (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2548ก)

5.2 ผักกาดขาวปลี (Chinese Cabbage)

ผักกาดขาวปลี (Chinese cabbage) ชื่อวิทยาศาสตร์ *Brassica rapa* var. *pekinensis* (Lour) Olsson. จัดอยู่ใน ตระกูล Brassicaceae เป็นผักพื้นเมือง ในแถบเอเชียตะวันออก ประกอบไปด้วยคุณค่าทางอาหาร หลายชนิด เช่น ฟอสฟอรัส วิตามินเอ และวิตามินซี ก่อนข้างสูง มีกรดโฟลิก (folic acid) ที่มีบทบาทควบคุม ความเป็นปกติ ของทารกในครรภ์มารดาในระยะ 3 เดือนแรก และช่วยในกระบวนการสังเคราะห์สารพันธุกรรม DNA ทำให้เม็ดเลือดแดง แข็งแรง หากมีกรดโฟลิกไม่เพียงพอ อาจทำให้ทารกเกิดอาการผิดปกติได้ คือทำให้กระดูกสันหลังปิดไม่สนิท นอกจากนี้ ยังช่วยย่อยอาหาร ขับปัสสาวะ แก้ไอ ขับเสมหะ และแก้พิษสุราได้ ผักกาดขาวปลีเป็นพืชอายุสองปีแต่นิยมปลูกเป็นพืชล้มลุกปีเดียว มีถิ่นกำเนิดอยู่ทางตอนเหนือของประเทศจีนมีระบบรากแก้ว แต่ต้น ลำต้นสั้น ไม่มีกิ่งแขนง ใบมีสีเขียวอ่อน ลักษณะเป็นผืนเดี่ยวตลอด กาบใบหรือ ก้านใบกว้าง แบน มีสีเขียว กรอบ มีน้ำมาก ใบจะห่อคล้ายปลี อาจแน่น หรือหลวม ขึ้นกับสายพันธุ์ จะเริ่มห่อหัว เมื่อมี ใบจริง 12-15 ใบ เป็นผักที่ปลูกกันมากในประเทศจีนตอนใต้ ได้หัวและในประเทศไทยผักกาดขาวปลีนับว่าเป็นผักที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีผู้นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายส่วนของพืชที่ใช้บริโภค ได้แก่ ส่วนใบนิยมรับประทานเป็นผักสดหรือใช้ประกอบอาหารอื่นๆ ซึ่งนับว่าเป็นผักที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย ผักกาดขาวปลีเป็นผักที่มีอายุปีเดียวสามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี แต่ปลูกได้ดีที่สุดในช่วงเดือนตุลาคม ถึงเดือนกุมภาพันธ์ และสามารถขึ้นได้ในดินเกือบทุกชนิด แต่จะชอบดินร่วนซุยที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงมีความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินอยู่ในช่วง 6-6.8 การเตรียมดิน ควรขุดให้หน้าดินลึก การระบายน้ำ และอากาศดี ควรให้น้ำอย่างพอเพียง และสม่ำเสมอ และได้รับแสงแดดอย่างเต็มที่ ตลอดทั้งวันอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 18-20 องศาเซลเซียส แต่ในสภาพอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้หัวห่อช้า คุณภาพต่ำ เข้าปลีหลวม มีรสขม ควรได้รับแสงแดดตลอดวัน มีช่วงอายุเก็บเกี่ยว 50 วัน การให้น้ำควรให้ก่อนปลูกหรือหลังย้ายปลูก 7 วัน ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 20-10-10 อัตรา 30-40 กก./ไร่ หลังใส่ปุ๋ยครั้งแรก 20-25 วัน ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 20-10-10 อัตรา 30-40 กก./ไร่ ผสมกับปุ๋ยยูเรียสูตร 46-0-0 อัตรา 10-20 กก./ไร่ ซึ่งควรมีการกำจัดวัชพืช ไปพร้อมๆ กับการให้น้ำ พันธุ์ผักกาดขาวปลี แบ่งตามลักษณะของปลีได้เป็น 3 พวกใหญ่ๆ คือ พันธุ์ปลียาว 2) พันธุ์ปลีกลม และ 3) พันธุ์ปลีหลวม (กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2552)

6. ความเสี่ยงต่อโลหะหนักเมื่อนำตะกอนมาใช้ในพื้นที่เพาะปลูก

ปริมาณและความเข้มข้นของโลหะหนักที่มักพบในตะกอนน้ำเสียประกอบไปด้วย สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล ปรอท สารหนู และแคดเมียม เมื่อมีการใส่ตะกอนลงดินติดต่อกันเป็นระยะเวลานานๆ พบว่า ในดินจะมีการสะสมของปริมาณโลหะหนักเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งโลหะหนักบางชนิดเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี เป็นต้น แต่หากมีในปริมาณที่มากเกินไปก็อาจจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ การนำตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ในพื้นที่เกษตร อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อพืช สัตว์ รวมทั้งมนุษย์ เนื่องจากพืชสามารถดูดดึงโลหะหนักเข้าไปสะสมในเซลล์ได้ โดยความเป็นพิษของโลหะหนักจะเข้าสู่มนุษย์ได้ทางห่วงโซ่อาหาร โดยโลหะหนักที่สำคัญที่มักพบการตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม (ชัยวัฒน์ และคณะ, 2536) ได้แก่

6.1 ทองแดง เป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยากับแร่และอินทรีย์สารในดินได้ง่าย จึงสามารถตกตะกอนได้กับแอนไอออนหลายชนิด เช่น ซัลไฟด์ คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ จึงจัดทองแดงเป็นพวกที่ค่อนข้างไม่เคลื่อนที่ในดิน ดังนั้น เมื่อดินได้รับทองแดงจากการปนเปื้อนจึงมีการสะสมของทองแดงในดินบน โดยรูปที่ละลายได้ของทองแดงที่พบมากที่สุด คือ Cu^{2+} เมื่อพิจารณาถึงการปนเปื้อนของทองแดงในดิน คือ 100 mg/kg ซึ่งทองแดงที่ปนเปื้อนในดินปริมาณสูง จะมีผลทำให้ปริมาณแบคทีเรียในดินลดลง และหากในดินมีการปนเปื้อนของทองแดงอาจพบทองแดงในพืชในปริมาณที่สูงด้วย ซึ่งปริมาณทองแดงในพืชทั้งต้นที่ถือว่ามีการปนเปื้อน คือ 20 mg/kg โดยที่ทองแดงจะมีการสะสมอยู่ที่รากพืชมากที่สุดและมีในเมล็ดในปริมาณต่ำ (สุกมาศ, 2539) อย่างไรก็ตามทองแดงนับว่าเป็นหนึ่งในสารอาหารที่จำเป็นต่อกระบวนการสร้างพลังงานในสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์หลายชนิด แต่หากร่างกายได้รับเข้าไปในปริมาณมากก็จะก่อให้เกิดความเป็นพิษ โดยทองแดงสามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตแต่จะไม่เพิ่มปริมาณในห่วงโซ่อาหารเหมือนโลหะหนักบางชนิด เมื่อมนุษย์ได้รับทองแดงในปริมาณที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดพิษต่อระบบทางเดินอาหาร มีอาการอาเจียน ท้องร่วง เม็ดเลือดแดงถูกทำลาย ตับวาย เลือดออกในระบบทางเดินอาหาร (Alloway, 1995)

6.2 ตะกั่ว โดยทั่วไปอยู่ในรูป Pb^{2+} เป็นธาตุโลหะหนักที่มีสภาพเคลื่อนที่ได้น้อยที่สุด และสภาพการละลายได้จะลดลงเมื่อมีการใส่ปุ๋ย นอกจากนั้น ปริมาณการสะสมของตะกั่วในดินบนจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่ไม่มีการไถพรวน ตะกั่วเข้าสู่พืชได้ 2 ทาง คือ ทางรากและทางใบ โดยเมื่อเข้าสู่พืชแล้วจะสะสมอยู่ที่เยื่อหุ้มเซลล์ ไม่เคลื่อนที่

และคลอโรพลาสซึม และจะมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของรากและใบ รวมทั้งจะยั้งระยะเวลาการงอกจากเมล็ดด้วย โดยตะกั่วในดินบนแทบทั้งหมดอยู่ในรูปที่พืชดูดกินไม่ได้ ซึ่งมีปริมาณเพียง 0.003-0.005% ของปริมาณตะกั่วในดินทั้งหมดเท่านั้นที่พืชสามารถดูดกินได้ (ศุภมาส, 2539) อย่างไรก็ตามหากตะกั่วเกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจากปุ๋ยและสารกำจัดศัตรูพืชจะทำให้มีผลต่อมนุษย์คือ ก่อให้เกิดความผิดปกติของระบบย่อยอาหาร ทำให้เกิดเป็นโรคโลหิตจาง ไตและระบบประสาทส่วนกลางถูกทำลาย (Alloway, 1995)

6.3 แคดเมียม เคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่า pH ระหว่าง 4.5-5.5 แต่หากดินมีสภาพเป็นด่าง แคดเมียมจะไม่ค่อยเคลื่อนที่ แต่ในสภาพดินที่เป็นกรดสภาพการละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน แคดเมียมในสภาพที่ละลายได้ง่ายจะอยู่ในรูป Cd^{2+} มีความสามารถในการละลายในดินได้ดี ซึ่งพืชสามารถดูดกินได้ง่าย ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย (ศุภมาส, 2539) ได้แก่ 1) ความเป็นกรด-ด่างของดิน เนื่องจากแคดเมียมละลายได้ดีในสภาพดินเป็นกรด 2) ในโตรเจน กล่าวคือ การให้ปุ๋ยไนโตรเจนแก่พืชอาจช่วยลดปริมาณแคดเมียมในพืชได้ โดยไนโบรอนของพืชจะมีมากกว่าไนโบรแก ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการเคลื่อนย้ายแคดเมียมในใบจะเกิดขึ้นในช่วงแรกๆ ของการเกิดใบอ่อน 3) สังกะสี โดยในตะกอนที่มีสังกะสีอยู่มากเมื่อใส่ลงดินจะมีผลให้พืชดูดกินแคดเมียมมากตามไปด้วย ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากความคล้ายคลึงกันทางด้านเคมีของสังกะสีและแคดเมียม และ 4) ปริมาณแคดเมียมในดิน ซึ่ง Chang *et al.* (1983) ได้ทดลองใช้ตะกอนกับข้าวบาร์เลย์ โดยใช้ในระยะยาว พบว่า ปริมาณแคดเมียมในดินมีการสะสมมากขึ้นเมื่อใส่ตะกอนในอัตราสูง อย่างไรก็ตาม Alloway (1995) กล่าวว่าแคดเมียมเป็นสารประกอบที่มีการปนเปื้อนตามธรรมชาติทั้งในน้ำและดิน แต่มีในระดับต่ำ แหล่งที่เป็นต้นเหตุของการปนเปื้อนของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุดคืออุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การผลิตเหล็กกล้า แบตเตอรี่ การผลิตปุ๋ยฟอสเฟต เป็นต้น ซึ่งเมื่อมนุษย์ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะก่อให้เกิดการสะสมบริเวณตับ ไต และอวัยวะสืบพันธุ์ ส่งผลทำให้เนื้อเยื่อถูกทำลาย รวมทั้งมีผลต่อกระดูกโดยทำให้กระดูก酥กร่อน

6.4 โครเมียม มีความเป็นพิษไม่รุนแรงมาก และมักจะสะสมในดินเขตเมือง นอกจากในดินที่รับของเสียจากโรงงานบางชนิดเท่านั้น เช่น ของเสียจากโรงงานฟอกหนัง เป็นต้น จากการทดลองของ Mortvedt and Giordano (1975) โดยทำการทดลองปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งใช้ของเสียที่มีปริมาณโครเมียมสูงถึง 320 ppb ก็ไม่พบว่าพืชจะแสดงอาการเป็นพิษแต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตาม

Alloway (1995) กล่าวว่าโครเมียมอาจจะเป็ธาตุที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของกลูโคสในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เมื่อเข้าสู่ร่างกายสามารถดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดและปอดได้

6.5 โปรท เมื่อใส่ลงไปนดิน ไม่ว่าจะใส่ในรูปใดดินจะยึดไว้อย่างแรงทั้งสิน โดยจะถูกตรึงไว้ในรูปต่างๆ ด้วยปัจจัยที่แตกต่างกัน ซึ่งแร่ดินเหนียวจะมีความสามารถในการดูดซับโปรทไว้ได้ไม่มาก และสภาพการเคลื่อนที่ได้ของโปรทจึงขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ และ CEC ของดิน กล่าวคือ ดินที่มีอินทรีย์วัตถุมากทำให้เกิดสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนของโปรท ดังนั้นสภาพการเคลื่อนที่ได้ของโปรทจึงขึ้นอยู่กับสภาพการสลายตัวทางเคมีหรือชีวภาพของสารประกอบอินทรีย์ดังกล่าว ดังนั้นดินอินทรีย์จะมีปริมาณโปรทในดินสูงกว่าดินอนินทรีย์ เนื่องจากดินอินทรีย์จะมีอิวมัสน์ส่วนที่ยังไม่เสถียรที่มีความสามารถในการจับโปรทได้มากกว่า ปริมาณโปรทในดินมีค่าปกติอยู่ระหว่าง 50-300 ppb การลดการดูดกินโปรทของพืชทำได้โดยการใส่ปุ๋น ร่วมกับสารประกอบของกำมะถันและหินฟอสเฟต (สุกมาศ, 2539) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณของโปรทจะเพิ่มขึ้นตามระดับของสิ่งมีชีวิตในระบบห่วงโซ่อาหารและก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ โดยเมื่อได้รับไอโปรทจะทำให้เซลล์เกิดการระคายเคือง อาการที่แสดงออกคือ ปวดศีรษะ แต่มนุษย์สามารถกำจัดโปรทออกจากร่างกายได้ทางปัสสาวะ

6.6 สารหนู ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอาเซนด สารประกอบส่วนใหญ่ละลายได้ง่าย แต่การเคลื่อนที่ในดินค่อนข้างจำกัด สารหนูหากถูกตรึงแล้วจะถูกปลดปล่อยได้ยาก ซึ่งระดับความเป็นพิษจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน กล่าวคือ ในดินเนื้อละเอียดพืชจะลดการเจริญเติบโตเมื่อมีสารหนูในระดับ 1,000 ppb ขณะที่ในดินเนื้อหยาบความเป็นพิษจะปรากฏเมื่อมีสารหนูในปริมาณ 100 ppb โดยสารหนูและโปรทเป็นธาตุที่นิยมใช้เป็นสารเคมีกำจัดศัตรูพืช การปนเปื้อนในสภาพแวดล้อมส่วนใหญ่ก็เนื่องมาจากการใช้สารดังกล่าว ทั่วไปแล้วสารหนูมีการปนเปื้อนอยู่ในดินน้อยมาก อาจมีอยู่ประมาณ 5-10 ppb การใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่มีสารหนูก่อให้เกิดการปนเปื้อนในพืชและคงอยู่ในดินได้นาน (สุกมาศ, 2539) และหากมีการได้รับสารหนูเข้าสู่ร่างกายและไปสะสมอยู่ในร่างกายมากเกินไปจะก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย อาการที่ร่างกายแสดงออกเมื่อได้รับสารหนู คือ อ่อนเพลีย กล้ามเนื้ออ่อนแรง ระบบทางเดินอาหารผิดปกติ และโลหิตจาง รวมทั้งอาจก่อให้เกิดอาการทางระบบประสาทได้ (ชัยวัฒน์ และคณะ, 2536)

7. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสะสมโลหะหนักในดินและพืช

7.1 ลักษณะสมบัติของดิน ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของพืช คือ สภาพละลายได้ (Solubility) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสภาพการเคลื่อนที่ได้ (Mobility) และมีบทบาทสำคัญยิ่งในการบ่งบอกถึงสภาพการขาดแคลน หรือเป็นพิษต่อพืชของโลหะหนักและมีมากจนเป็นสารพิษในดิน ซึ่งปัจจัยที่ควบคุมสภาพการละลายได้ของโลหะหนัก ได้แก่ สภาพกรด-ด่าง เนื้อดิน วัตถุต้นกำเนิดดิน ชนิดและปริมาณสารประกอบอินทรีย์ในดินและในสารละลายดิน ไอออนของธาตุอื่นที่มีอยู่ในสารละลายดิน ระดับความชื้นของดิน อุณหภูมิ และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน (ศุภมาศ, 2539) การเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุลงในดินจะช่วยลดสภาพการละลายของโลหะหนักในดินได้ เนื่องจากอินทรีย์วัตถุสามารถยึดจับโลหะหนักไว้ได้ รวมทั้ง pH ของดิน จะสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในดิน โดยค่า pH ของดินที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้การดูดซับโลหะหนักของพืชลดลง

7.2 ชนิดและรูปของโลหะหนัก โลหะหนักมีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้สูง ชอบทำปฏิกิริยากับพลาสมาไฟต์ ซึ่งพืชมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้ต่างกัน แคลเซียม นิเกิล สังกะสี และทองแดงเป็นธาตุที่พืชสามารถดูดซับได้ดีกว่าตะกั่ว โปรท และโครเมียม ส่วนตะกั่วดินสามารถถูกดูดซับไว้ได้แน่น ปริมาณตะกั่วในพืชจึงไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกั่วในดิน (อรรณ, 2525) และความเข้มข้นของโลหะหนักบางชนิดในพืช เช่น แคลเซียม นิเกิล และแมงกานีส จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นที่มีอยู่ในดิน (Davis, 1984)

7.3 ปฏิกิริยาเสริมและปฏิกิริยาหักล้างของโลหะหนักและธาตุอื่นๆ มีอิทธิพลต่อการดูดซับและเคลื่อนย้ายโลหะหนักของพืช เช่น แคลเซียม และสังกะสีที่มีอยู่ในดินจะลดการดูดซับแคลเซียมของพืช (อรรณ, 2522) จากการศึกษาของ Davies (1980) พบว่า เมื่อปริมาณแคลเซียมในใบและรากของข้าวโพดเพิ่มขึ้นปริมาณสังกะสีจะลดลง และหากปริมาณเหล็กในใบและรากของข้าวโพดเพิ่มขึ้นปริมาณแคลเซียมจะเพิ่มขึ้นด้วย

7.4 ชนิดและส่วนต่างๆ ของพืช ความเข้มข้นของโลหะหนักในพืชจะมีอย่างน้อยแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ ชนิดดินที่ปลูก ชนิดพืช ส่วนของพืช และอายุของพืช โดยพืชแต่ละชนิดจะสะสมโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แตกต่างกัน เนื่องจากความต้องการโลหะหนัก ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก รวมทั้งความทนทานต่อการขาดแคลนโลหะหนักและความทนทานต่อความเป็นพิษของ

โลหะหนักแตกต่างกัน อรธรรม (2525) รายงานว่า โลหะหนักจะถูกดูดซับโดยพืชผักมากกว่าพืชเมล็ด นอกจากนี้แคดเมียมจะมีการสะสมในพืชกินใบมากกว่าพืชกินเมล็ด

7.5 สภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น ลักษณะภูมิอากาศและฤดูกาล จะมีอิทธิพลในการส่งผ่านโลหะหนักจากรากไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชด้วย โดยการดูดซับแคดเมียมของข้าวโอ๊ต จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของดินสูงขึ้น ซึ่งหากอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้นจะทำให้พืชสามารถดูดซับแคดเมียม แมงกานีส และสังกะสีเพิ่มขึ้นด้วย (Davies, 1980)

7.6 การเติมวัสดุที่มีโลหะหนักปนเปื้อนลงดิน ตะกอนเหลือทิ้งจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียหลายแห่งนอกจากจะมีธาตุอาหารพืชที่เป็นประโยชน์แล้วยังมีโลหะหนัก (Heavy metal) เป็นองค์ประกอบอยู่สูง เมื่อใส่วัสดุอินทรีย์ที่มีโลหะหนักในดินทำให้เกิดภาวะมลพิษในดินขึ้น Genevini *et al.* (1984) พบว่า การใส่ตะกอนน้ำเสียลงไปในดินร่วนปนทรายแข็งที่ได้รับตะกอนน้ำเสียนานถึง 35 ปี ส่งผลให้บริเวณดินระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร มีการสะสมของ Al Cd Cu Fe Pb และ Zn ในปริมาณ 1.1 35 16.5 1.1 16.5 และ 13 เท่าของสภาพปกติ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในพืชตามระยะเวลาโดยส่วนใหญ่ จะสอดคล้องกับการเพิ่มของโลหะหนักในดิน ดังนั้นการใส่ตะกอนเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน เรียงตามลำดับจากการสะสมของปริมาณโลหะหนักจากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ คือ สังกะสี > แมงกานีส > นิกเกิล > แคดเมียม > ทองแดง > ตะกั่ว > โครเมียม Vigerust *et al.* (1987) กล่าวว่าปริมาณโลหะหนักที่พืชจะดูดซับได้มากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะหนักในดินเป็นสำคัญ โดยปริมาณโลหะหนักและจุลธาตุในระดับปกติที่ควรมียู่ในดินและพืช และเมื่อมีปริมาณมากเกิดไปจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชและคน แสดงดังตารางที่ 2

โดยปกติแล้วในดินจะมีโลหะหนักสะสมอยู่ในปริมาณหนึ่ง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการผุพังและสลายตัวของวัตถุดินกำเนิดดิน ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินจะมีความผันแปรตามลักษณะวัตถุดินกำเนิดดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน เนื้อดิน และระดับความลึกของดิน เป็นสำคัญ ซึ่งส่วนใหญ่โลหะหนักจะมีการเคลื่อนย้ายได้น้อย เนื่องจากมีความสามารถในการยึดเกาะอยู่ในส่วนที่เป็น Clay fraction ได้ดี จึงทำให้ดินเหนียวมีโลหะหนักอยู่ในรูปที่ถูกดูดซับได้ง่าย (Available form) ส่วนดินทรายจะมีส่วนที่เป็น Clay fraction น้อย โลหะหนักส่วนใหญ่จึงอยู่ในสารละลายดินของดินทรายมากกว่าดินเหนียว (Diaz and Polo, 1988) น้ำที่ชะล้างผ่านดินและน้ำใต้ดิน จึงไม่ค่อยมีการปนเปื้อนจากโลหะหนัก (Genevini *et al.*, 1984)

ตารางที่ 2 ปริมาณโลหะหนักและจุลธาตุในระดับปกติที่มีอยู่ในดินและพืช

ธาตุ	ความเข้มข้นทั้งหมดในระดับปกติ (ppm)		ปริมาณในดิน		เป็นพิษต่อ
	ดิน	พืช	ค่าวิกฤติในดิน	ค่าที่เริ่มอาการเป็นพิษในพืช	
สารหนู	0.1-50	0.1-5	20-40	15-50	คน, พืช
แคดเมียม	0.1-2	0.2-0.8	1-3	3-5	คน
ทองแดง	2-100	4-15		60-100	
ตะกั่ว	0.1-30	0.1-10	70-300	100-400	คน, พืช
ปรอท	0.1-1	n.a.	2	2-5	คน

ที่มา: คัดแปลงจาก วรกาย (2541)

ซึ่งหากเปรียบเทียบความสามารถในการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักพบว่า นิเกิล แคดเมียม และสังกะสี สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ทองแดง เคลื่อนย้ายได้ปานกลาง และตะกั่ว ปรอท และโครเมียม มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายได้น้อย โดยความเข้มข้นของโลหะหนักอาจจะผันแปรตามความลึกของดินได้ เช่น น้ำที่ชะผ่านดินอาจทำให้โลหะหนักที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย เช่นสังกะสี และแคดเมียมเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณอื่นทำให้ความเข้มข้นของสังกะสีและแคดเมียมลดลงตามความลึกของดิน จากการศึกษาของ Mohr (1979) โดยทำการศึกษาปริมาณของตะกั่ว แคดเมียม นิเกิล โครเมียม และปรอท ในดินที่ไต่ปฏิกิริยาจากมูลฝอยชุมชน พบว่า ในดินบนจะเกิดการสะสมของโลหะหนักดังกล่าวมากที่สุด โดยตะกั่วและแคดเมียมมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากที่สุด ส่วนนิเกิลและโครเมียมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยถึงไม่เพิ่มขึ้นเลย ส่วนปรอทไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

8. การดูดกินและสะสมโลหะหนักในพืช

การสะสมของโลหะหนักในสภาพแวดล้อม เช่น ในดินที่ใช้เพื่อทำการเพาะปลูก โลหะหนักเหล่านั้นจะถูกดูดซึมและเข้าไปสะสมอยู่ในส่วนต่างๆ ของพืช ตามปริมาณ/สัดส่วนที่มีอยู่ในดิน จากเหตุผลดังกล่าว จึงทำให้การตรวจวัดปริมาณสารพิษที่สะสมอยู่ในส่วนต่างๆ ของพืชที่ปลูกจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อประเมินความเป็นพิษของสารพิษที่มีอยู่ในดิน โดยที่พืชต่างชนิดกัน หรือชนิดเดียวกันแต่ต่างสายพันธุ์ ความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักก็ย่อมที่จะ

แตกต่างกัน อนึ่งโลหะหนักจะสะสมในส่วนต่างๆ ของพืชในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปมักพบในส่วนของราก มากกว่าลำต้น ใบ และเมล็ด หรือส่วนที่ใช้เพื่อการขยายพันธุ์ ซึ่งมักจะพบอยู่ในปริมาณต่ำที่สุด (ปรีดา และคณะ, 2547) ยกตัวอย่าง เช่น ปริมาณการสะสมของแคดเมียมที่สะสมในพืชชนิดต่างๆ และส่วนของพืชที่ปลูกในดินของประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 3

จากการทดลองของ สุวรรณ (2537) โดยทำการทดลองปลูกพืช 4 ชนิด คือ ผักกาดหัว มะเขือเทศ ผักกวางตุ้ง และถั่วเขียว ที่มีระยะการเจริญเติบโต 3 ระยะ คือ ระยะที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ระยะออกดอก และระยะติดผล ซึ่งทำการปลูกในดินทรายร่วนที่ไม่ใส่สารหนูและที่ใส่สารหนู ผลการศึกษา พบว่า พืชทั้ง 4 ชนิดในทุกระยะของการเจริญเติบโตสามารถดูดกินสารหนูจากสารประกอบสารหนูที่ใส่ลงไปดินเข้ามาในพืชได้ โดยพืชทั้ง 4 ชนิดมีการสะสมของสารหนูในส่วนของผิวนอกของรากมากกว่าในส่วนของเนื้อเยื่ออื่นๆ ที่มีปริมาณการสะสมที่ต่ำมาก

ตารางที่ 3 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในพืชชนิดต่างๆ และส่วนของพืชที่ปลูกในดินของประเทศไทย

พืช/ผัก	ปริมาณแคดเมียมในพืช (มก./กก.)
ผักกาดขาว	0.15
ผักคะน้า (ใบ)	1.53
ผักคะน้า (ราก)	3.37
ผักกาดหอม	0.05
ผักบุ้ง	0.16

ที่มา: คัดแปลงจากปรีดา และคณะ (2547 ข)

ค่าความเข้มข้นวิกฤติของโลหะหนัก ซึ่งแม้ว่าพืชหรือสัตว์ได้รับในปริมาณต่ำก็อาจเป็นพิษ โดยการแสดงอาการอย่างใดอย่างหนึ่งออกมา แสดงดังตารางที่ 4 เป็นค่าที่ใช้ประเมินความเป็นพิษของจุลธาตุในดินในดินและพืช

ตารางที่ 4 ค่าสูงสุดของจุลธาตุที่ยอมให้มีอยู่ได้ในดิน (มก./กก.) และค่าวิกฤติในพืชที่เริ่มแสดงอาการของการยับยั้งการเจริญเติบโต

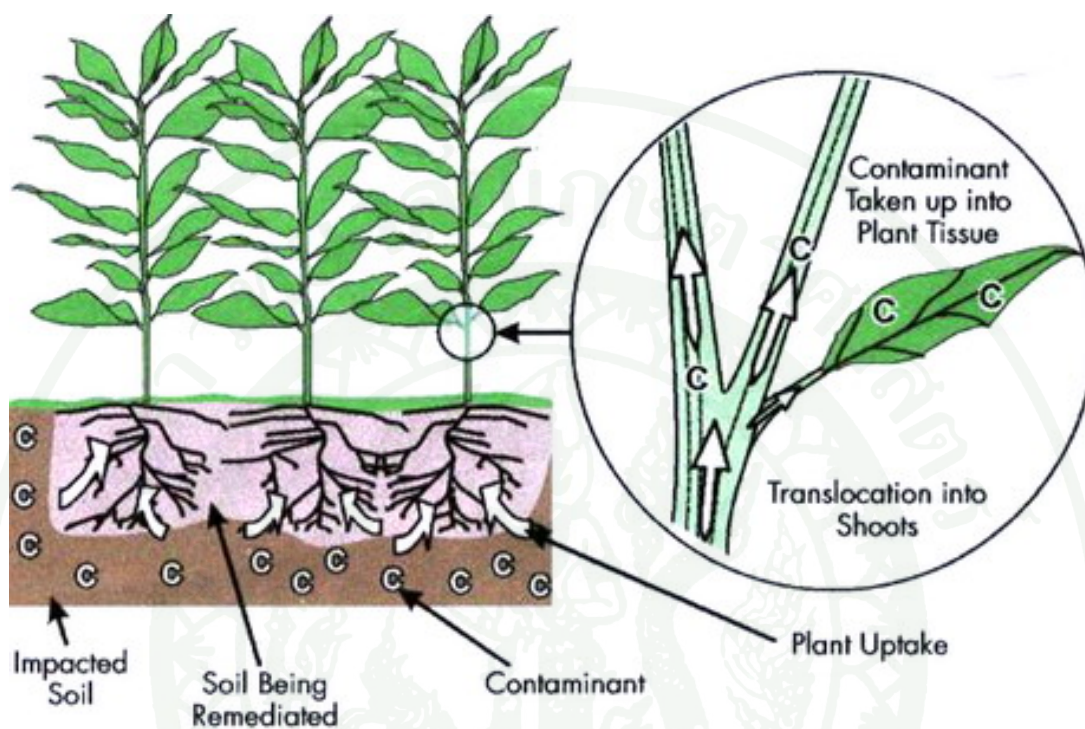
ธาตุ	ปริมาณในดิน		ปริมาณในพืช (มก./กก. นน.แห้ง)	
	ไม่เกิดพิษ ค่าที่ยอมรับได้	ค่าที่เริ่มแสดงอาการ เป็นพิษในพืช	เกิดอาการใน พืชที่ไวต่อพิษ	ค่าที่ทำให้ผลผลิต ลดลง 10%
สารหนู	2	15-50	n.a.	1-20
แกลเมียม	n.a.	3-5	5-10	10-20
ทองแดง	23	60-100	15.20	10-30
ปรอท	2	2-5	0.5-1	1-8
ตะกั่ว	n.a.	100-400	n.a.	n.a.
สังกะสี	110	250-400	20-30	10-30
นิกเกิล	35	100	150-200	100-500

ที่มา: ศุภมาส (2545)

โลหะหนักสามารถเข้าไปสะสมได้ในทุกส่วนของพืช โดยที่พืชจะได้รับโลหะหนักมาจากดิน น้ำและอากาศ (อรรณ, 2525) ซึ่งพืชจะดูดดึงโลหะหนักจากดินขึ้นมาสะสมอยู่ในส่วนต่างๆ ได้ด้วย 3 กระบวนการ คือ รากพืชดูดดึงโลหะหนักโดยใช้กระบวนการ Ion absorbtion ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) หรือวิธีการคายน้ำ (Convection) ที่เกิดขึ้นในขณะที่พืชมีการคายน้ำเพื่อทดแทนการคายน้ำ โดยเมื่อพืชมีการคายน้ำเร็วกว่าการคายน้ำจะส่งผลให้บริเวณรากพืชเกิดสภาวะ Concentration gradient อย่างกะทันหัน จนมีผลทำให้โลหะหนักมีการเคลื่อนที่ด้วยวิธีการแพร่จากดินเข้าสู่รากพืช และมีการเคลื่อนที่จากรากไปสู่ยอด (Translocation) (ดังภาพที่ 5)

โดยที่พืชแต่ละชนิดมีการเก็บสะสมโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แตกต่างกัน เนื่องจากความสามารถในการดูดดึงโลหะหนัก ความต้องการ ความคงทนต่อการขาดแคลนโลหะหนัก และความเป็นพิษของโลหะหนัก ตัวอย่างเช่น พืชสามารถรับตะกั่วจากสิ่งแวดล้อมได้ 2 ทาง คือ ทางราก โดยมีแหล่งกำเนิดจากดินในรูปของสารละลายตะกั่ว และพืชจะได้รับตะกั่วทางใบโดยอนุภาคของตะกั่วที่เจือปนอยู่ในอากาศ ซึ่งรากพืชจะมีการดูดซึมตะกั่วเข้าไปในส่วนของลำต้น และมีการ

กระจายไปสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช ในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งจากผลการศึกษาของ Lagerwerff (1973) พบว่าตะกั่วมีแนวโน้มสะสมในรากพืชมากกว่าในลำต้น และสะสมในลำต้น



ภาพที่ 5 แหล่งที่มาและทิศทางของโลหะหนักบางชนิดในการเข้าสู่ส่วนต่างๆ ของพืช

ที่มา: จันทน์ (2550)

Chaney (1982) กล่าวว่ารูปทางเคมีของโลหะหนัก ก็ยังมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของพืช อีกด้วย นอกจากนั้นรูปทางเคมีของโลหะหนักและลักษณะของดินก็มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของพืชด้วย โดยพบว่า พืชสามารถดูดซับและสะสมโลหะหนักในรูปเกลืออนินทรีย์ได้ดีกว่าโลหะหนักที่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ นอกจากนี้พืชที่ปลูกบนดินทรายมีการสะสมโลหะหนักได้มากกว่าพืชที่ปลูกบนดินเหนียว (Kelling *et al.*, 1977; Sheaffer *et al.*, 1979; Hemphill *et al.*, 1982; Lutrick, *et al.*, 1982) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ อรรพรรณ (2529) ที่ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบโลหะหนักในผักคะน้าที่ปลูกในดินที่ใส่ตะกอนน้ำเสียกับดินที่ใส่โลหะหนักในรูปของสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ที่มีปริมาณโลหะหนักเท่ากัน ผลจากการทดลองพบว่า โลหะหนัก 6 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี มีการ

สะสมอยู่ในผักคะน้าที่ปลูกในดินร่วมกับสารละลายโลหะหนักคลอไรด์มากกว่าในผักคะน้าที่ปลูกในดินร่วมกับตะกอนที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในรูปของสารประกอบ

นอกจากโลหะหนักจะมีผลต่อพืชแล้วยังมีบทบาทต่อมนุษย์ในแง่ของความเป็นพิษมากกว่าจะเป็นประโยชน์ ซึ่งโลหะหนักจะเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์โดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (Food chain) รวมทั้งจากการสัมผัสกับโลหะหนักโดยตรง และทำให้เกิดความเป็นพิษแบบทวีความเข้มข้นในสิ่งมีชีวิต (Bio concentration) ต่อไป (ไมตรี, 2531) จากที่กล่าวมาสามารถสรุปข้อดี และข้อด้อยระหว่างปุ๋ยอินทรีย์เปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีได้ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบข้อดี ข้อด้อย ของปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยเคมี

ลำดับที่	ปุ๋ยอินทรีย์	ปุ๋ยเคมี
1. ปริมาณธาตุอาหาร	มีธาตุอาหารหลักต่ำกว่า แต่มีธาตุรอง และธาตุอาหารเสริมครบถ้วน มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างช้าๆ จึงควบคุมให้เกิดประโยชน์หรือตรงเวลากับที่พืชต้องการ ได้ยาก	มีธาตุอาหารหลักสูงกว่า ละลายเป็นประโยชน์แก่พืชได้เร็ว ทันเวลาที่พืชต้องการ
2. การให้ผลผลิต	ในระยะสั้นให้ผลผลิตต่ำกว่า แต่ในระยะยาวจะให้ผลผลิตสูงกว่า เพราะหากใช้ติดต่อกันจะทำให้คุณสมบัติของดินดีขึ้นเรื่อยๆ	ในระยะสั้นให้ผลผลิตสูงกว่า เพราะมีธาตุอาหารหลักมากกว่า แต่ระยะยาวผลผลิตอาจตกต่ำลง เพราะปุ๋ยเคมีบางชนิดทำให้ดินเสื่อมคุณภาพ
3. ผลต่อสมบัติทางเคมีของดิน	มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางเคมีของดิน โดยช่วยต่อต้านการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด - ด่าง ช่วยดูดซับธาตุอาหารไม่ให้สูญเสียและลดความเป็นพิษของแร่ธาตุบางชนิดในดินกรดจัด	ปุ๋ยบางชนิด เช่น แอมโมเนียมซัลเฟต (21-0-0) แอมโมเนียมคลอไรด์ (25-0-0) มีผลทำให้ดินเป็นกรด ความรุนแรงของความเป็นกรดจะมากขึ้นหากใช้ในอัตราสูงหรือติดต่อกันนานๆ

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ลำดับที่	ปุ๋ยอินทรีย์	ปุ๋ยเคมี
4. ผลต่อสมบัติทางกายภาพของดิน	ทำให้อุณหภูมิของดินจับตัวกันเป็นก้อนหรือเป็นเม็ดดินไม่อัดแน่น ซึ่งทำให้การถ่ายเทอากาศดี การอุ้มน้ำและการไหลซึมของน้ำดี ส่วนของอินทรีย์วัตถุมีลักษณะคล้ายฟองน้ำสามารถอุ้มน้ำและให้อากาศผ่านเข้าออกได้ดี	ปุ๋ยเคมีบางชนิดมีสารอื่นปะปนทำให้ดินอัดตัวกันแน่นเมื่อดินแห้ง และเหนียวจัดเมื่อเปียก ไม่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของพืช
5. ผลต่อสมบัติทางชีวเคมีของดิน	เป็นอาหารที่ดีของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กหรือจุลินทรีย์ในดิน ทำให้จุลินทรีย์เจริญมีกิจกรรมดี ช่วยเปลี่ยนธาตุอาหารพืชให้อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้เป็นประโยชน์ได้อย่างต่อเนื่อง	เป็นอาหารของจุลินทรีย์เช่นเดียวกัน แต่ทำให้อินทรีย์วัตถุในดินหมดไปอย่างรวดเร็ว เพราะเป็นตัวช่วยเร่งกิจกรรมการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ
6. ราคา	เปรียบเทียบจากปริมาณธาตุอาหาร จะมีราคาแพงกว่าปุ๋ยเคมี แต่หากคิดด้านคุณค่าอื่นๆ เช่น การช่วยปรับปรุงดิน การอุ้มน้ำ การถ่ายเทอากาศ การรักษาคุณสมบัติของดินในระยะยาวแล้ว นับว่ามีราคาถูก	มีราคาไม่แน่นอนตามราคาท้องตลาด แต่มีแนวโน้มว่าจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามราคาน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากปัจจุบันต้องใช้ น้ำมันในกระบวนการผลิต
7. การขนส่ง	ถ้ามีการขนส่งระยะไกลทำได้ยากกว่า และเสียค่าขนส่งมากกว่า แต่โดยทั่วไป มักมีการขนส่งระยะไกลภายในท้องถิ่นหรือมีอยู่ในร้าน	การขนส่งง่ายกว่า ค่าขนส่งถูกกว่า แต่มักจะมีการขนส่งระยะไกล
8. การใส่	ส่วนใหญ่ใช้แรงงานครั้งเดียวต่อการปลูก 1 ครั้ง แต่อาจใช้แรงงานมากกว่า เพราะใส่ในปริมาณมากกว่าปุ๋ยเคมี วิธีใส่ไม่ยุ่งยาก	ใช้แรงงานหลายครั้งเพราะต้องแบ่งใส่เป็นช่วงตามลักษณะอายุของพืชและชนิดของดิน ดังนั้นวิธีใส่จึงยุ่งยากกว่า และต้องมีความรู้ในการใส่

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ลำดับที่	ปุ๋ยอินทรีย์	ปุ๋ยเคมี
9. โอกาสสูญเสีย	เมื่อใส่ลงไปดินแล้ว โอกาสที่ธาตุอาหารจะสูญเสียน้อย เพราะธาตุอาหารบางส่วนเป็นองค์ประกอบในปุ๋ยอินทรีย์ และบางส่วนถูกดูดซับอยู่อย่างเหนียวแน่น	มีโอกาสูญเสียมาก ขึ้นกับชนิดของดินที่ใส่ ชนิดของปุ๋ย วิธีการ และเวลาในการใส่ปุ๋ย การสูญเสียในดินทรายจะมากกว่าในดินเหนียว
10. ธาตุโลหะหนักหรือสารพิษ	ปุ๋ยอินทรีย์บางชนิดมีธาตุโลหะหนักหรือสารพิษปนเปื้อน เช่น ปุ๋ยหมักจากขยะที่รวบรวมจากเมืองใหญ่หรือวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม	ในปุ๋ยเคมีไม่มีธาตุโลหะหนักหรือสารพิษ ไม่มีโอกาสในการสะสมของโลหะหนักหรือสารพิษในดิน

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2548)

9. การประเมินความเสี่ยงจากการบริโภคพืชผักที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก

การประเมินความเสี่ยง (Risk assessment) เป็นการประเมินปริมาณโลหะหนักที่ร่างกายได้รับ (Exposure assessment) คือการประเมินทั้งปริมาณและความเข้มข้นของโลหะหนักที่ได้รับ ระบุความถี่ในการสัมผัส ช่วงเวลาและช่องทางที่สัมผัสกับโลหะหนัก (นพรัตน์, 2548) ขั้นตอนการประเมินปริมาณโลหะหนักที่ร่างกายได้รับมี 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 ลักษณะของการได้รับโลหะหนัก

การกำหนดลักษณะของการได้รับโลหะหนัก ได้แก่ ลักษณะทั่วไปทางกายภาพ เช่น ลักษณะอากาศ ลม พืชพันธุ์ ประเภทของพืช เป็นต้น และลักษณะของประชากรที่ต้องการศึกษา เช่น ผู้บริโภคจะสัมผัสการปนเปื้อนของโลหะหนักจากพืชผัก ในชีวิตประจำวันจากการบริโภค เป็นต้น โดยพิจารณาประชากรกลุ่มที่มีความไวต่อการสัมผัส

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์และวัสดุในภาคสนาม

1.1 พื้นที่ดินสวนผักของนายวิรัช กรังพาณิช ซึ่งตั้งอยู่ที่ 29 หมู่ 1 ตำบลไทรน้อย อำเภไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี

1.2 เมล็ดพันธุ์ผัก ได้แก่ คะน้าใบ Chinese Kale (Large leaf) : *Brassica oleracea* var. *alboglabra* และผักกาดขาวปลี พันธุ์เบา Chinese Cabbage : *Brassica campestris* var. *pekinensis*

1.3 ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท ไทยเอเชีย แปซิฟิค บริวเวอรี่ จำกัด ซึ่งเป็นตะกอนที่มีการเติมพอลิเมอร์ และผ่านกระบวนการรีดน้ำแล้ว

1.4 อุปกรณ์ในการดูแลรักษาพืช และเก็บตัวอย่างดิน น้ำ และพืช ได้แก่ จอบ เสียม พลั่วตักดิน ขวดโพลีเอทิลีนขนาด 1 ลิตร ถุงพลาสติก ขางรด และอื่นๆ

1.5 เครื่องชั่งขนาด 20 กิโลกรัม

1.6 เตาอบตัวอย่างพืช

1.7 เครื่องชั่งละเอียดในหน่วยกรัม ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

1.8 อุปกรณ์วัดการเจริญเติบโต ได้แก่ สายวัด ไม้บรรทัด เวอร์เนียคาลิเปอร์ และตารางบันทึกข้อมูลผลการตรวจวัด

1.9 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างดิน น้ำ และพืช ได้แก่ พลั่วตักดิน มีด ขวดเก็บตัวอย่างน้ำขนาด 1 ลิตร ถุงพลาสติก และถุงกระดาษ

2. อุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

2.1 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

2.2 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

2.3 เครื่อง Kjeldahl heater

2.4 เครื่องบดตัวอย่างดิน

2.5 เครื่องเขย่าตัวอย่าง (Shaking machine)

2.6 เครื่องกรองตัวอย่าง (Filtering apparatus)

2.7 เครื่องบดตัวอย่างพืช

2.8 เครื่องกลั่น (Distillation apparatus)

2.9 กระดาษกรอง และน้ำกลั่น

2.10 เตาอบตัวอย่างพืช

2.11 เครื่องแก้วอื่นๆ ในห้องปฏิบัติการ เช่น Pipette, Beaker, Burette, Erlenmeyer flask, Volumetric pipet ฯลฯ

2.12 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ธาตุอาหาร เช่น Digestion mixture, Boric acid-indicator solution, Sodium hydroxide, Standard sulfuric, Standard phosphate solution, Bray II (0.1 N HCL + 0.03 N NH_4F), Reagent A, Reagent B, Ammonium acetate, Standard solution สำหรับโพแทสเซียม เป็นต้น

2.13 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์โลหะหนัก เช่น Potassium permanganate 6% wt/v, $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HNO}_3$ mixture 2% v/v, Hydroxylamine sulfate sodium chloride, Std. Hg 1000 ppm, 12 N HCL และ Acid mixture เป็นต้น

วิธีการ

1. การศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยไนโตรเจน

โดยการศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยไนโตรเจนของตะกอนเมื่อใส่ลงไปในดินมีวิธีการในการดำเนินการดังนี้

1.1 เก็บและเตรียมตัวอย่างดิน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินจากแปลงทดลองในพื้นที่ ดำบลไทรน้อย อำเภไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี ที่ระดับความลึกชั้นไทรวน (0-15 เซนติเมตร) นำมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม บดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เก็บไว้สำหรับวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

1.2 เก็บและเตรียมตัวอย่างตะกอน นำตัวอย่างตะกอนมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม จากนั้นนำมาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เก็บไว้สำหรับวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

1.3 การวิเคราะห์ Available N (ammonium and nitrate)

1.3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ ได้แก่ Balance, 250 ml. Erlenmeyer flask, Shaking machine, Filtering apparatus, Distillation apparatus, 25 ml. Volumetric flask, Buret 50 ml., 10 ml. Automatic pipet

1.3.2 สารเคมีและน้ำยา

1) Magnesium Oxide (MgO) : เเผา MgO ที่ 600-700 °C ใน muffle furnace เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นและเก็บไว้ด้วยฝาปิดมิดชิด

2) Boric acid - indicator solution : ละลาย H_3BO_3 80 กรัม ในน้ำร้อน 1,400 ซีซี ถ่าย Solution ที่เย็นลงใน Volumetric flask ขนาด 2 ลิตร ที่มี Ethanol 200 ซีซี และ Mixed indicator 100 ซีซี เมื่อผสมกันแล้วค่อยๆ เติม 1N NaOH จนกระทั่งได้สีม่วง ซึ่ง pH ของสารละลาย ขณะนี้ประมาณ 4.7-4.9 (ใช้ Solution 1 ซีซี รวมกับน้ำ 1 ซีซี สีม่วงแดงของ Solution จะเปลี่ยนเป็น สีเขียว ถ้าสีไม่เปลี่ยนให้เติม NaOH เพิ่มอีก)

3) Mixed indicator : ละลาย Bromocresol green 0.027 กรัม และ Methyl red 0.018 กรัมใน ethanol 100 ซีซี

4) Devarda alloy

5) Standard hydrochloric acid (HCL) 0.005 N

6) Standard ammonium sulphate (1000 ppm N) : ละลาย $(NH_4)_2SO_4$ ซึ่งอบ ให้แห้งที่ 60 °C นาน 4 ชั่วโมงหนัก 4.719 กรัมในน้ำ 1 ลิตร

1.3.3 วิธีการศึกษา

1) ชั่งดิน 10 กรัมลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 250 ซีซี เติม 2 N KCl 100 ซีซี เขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรอง แล้วนำสิ่งที่กรองได้มาหาปริมาณแอมโมเนียมและไนเตรท

1.1) วิธีการกลั่นหาแอมโมเนียม ทำการรินน้ำยา H_3BO_3 -indicator solution 10 ซีซี โดย Automatic pipet ลงไปใน Erlenmeyer flask ขนาด 125 ซีซี นำไปวางที่ได้ก้าน ของ Condenser ของเครื่องกลั่นเตรียมตัวอย่างที่จะนำมากลั่นโดยใช้ Volumetric pipet (จำนวน 25 ซีซี) ใส่ลงใน flask ที่กลั่นเติม MgO 0.2 กรัมลงไป เติมน้ำและกลั่นจนกระทั่งได้ Distillate 50 ซีซี titrate ด้วย 0.005 N HCl จนกระทั่งสีของ Distillate เปลี่ยนจากเขียวเป็นม่วงแดง

1.2) วิธีการกลั่นหาไนเตรท หลังจากที่ได้กลั่นหาแอมโมเนียมแล้วให้เติม Devarda alloy 0.2 กรัมลงใน Flask ที่จะกลั่น เติม MgO 0.2 กรัม เติมน้ำแล้วปฏิบัติเหมือนกับในกรณีของการกลั่นหาแอมโมเนียม

โดยในกระบวนการกลั่น ควรกลั่น $(NH_4)_2SO_4$ 1000 ppm N 1 ซีซี ด้วยเพื่อเป็นการตรวจสอบข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นขณะกลั่นได้

1.3.4 การคำนวณ

$$\text{ppmNH}_4^+-\text{N} = \frac{(A-B) \times C \times 0.014 \times \text{Extracting solution} \times 10^6}{\text{Aliquot} \times D}$$

เมื่อ

A	=	ml ของกรด HCl ที่ใช้กับตัวอย่าง
B	=	ml ของกรด HCl ที่ใช้กับ Blank
C	=	ความเข้มข้นของกรด HCl (Normal)
D	=	น้ำหนักของตัวอย่างดิน
Extracting solution	=	100 ml.
Aliquot	=	25 ml.
น้ำหนักดิน	=	10 g.
ความเข้มข้นของกรด	=	0.005 N

2. การศึกษาผลของการใส่ตะกอนในการปลูกผักคะน้าและผักกาดขาวปลี

2.1 แผนการทดลองในการศึกษาวิจัยใช้แปลงทดลองในพื้นที่ของนายวิรัช กรังพาณิช ตั้งอยู่ที่ 29 หมู่ 1 ตำบลไทรน้อย อำเภไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี จำนวน 2 แปลง แล้วทำการแบ่งเป็นแปลงย่อยขนาดความกว้าง 2.5 เมตร ยาว 4 เมตร (หนึ่งหน่วยทดลอง) จำนวน 30 แปลง ดินที่ใช้ปลูกเป็นดินสวนผัก ซึ่งเป็นดินชุดบางน้ำเปรี้ยว ซึ่งถือว่าตัวอย่างดินทั้ง 30 แปลง เป็นตัวอย่างดินเดียวกัน แล้วทำการศึกษาผลของตะกอนต่อการเจริญเติบโตของพืช 2 ชนิด คือผักคะน้าและผักกาดขาวปลี การศึกษาแบ่งเป็น 2 การทดลองย่อยกำหนดชนิดของพืชทดลอง 2 ชนิด คือ ผักคะน้าและผักกาดขาวปลี โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design, CRD ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยการปลูกผัก 2 ชนิด คือ ผักคะน้าและผักกาดขาวปลี และมีอัตราการใส่ตะกอน 5 อัตรา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

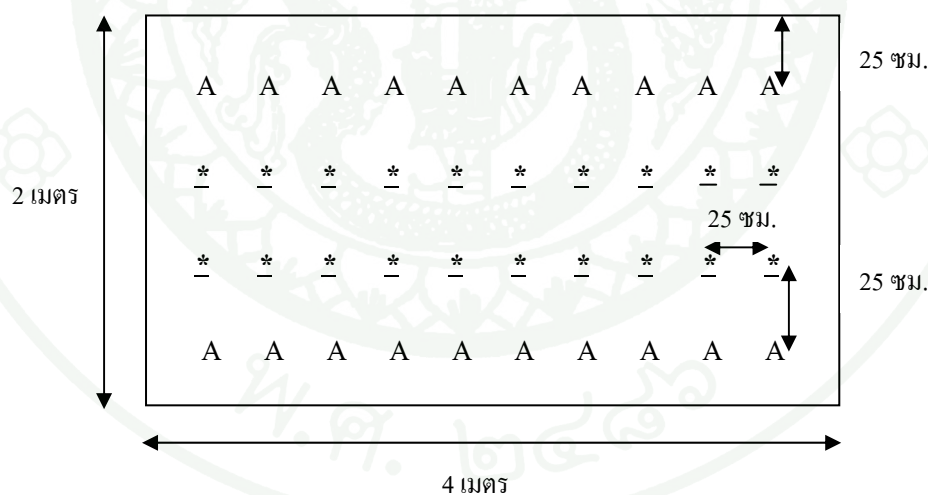
2.1.1) พืช 2 ชนิด คือ

V_K	=	ผักคะน้า
V_C	=	ผักกาดขาวปลี

2.1.2) อัตราตะกอน 5 อัตรา คือ

S_0	=	0 ตัน/ไร่	=	0	กิโลกรัม/แปลงย่อย
S_1	=	1 ตัน/ไร่	=	11.7	กิโลกรัม/แปลงย่อย
S_2	=	2 ตัน/ไร่	=	23.3	กิโลกรัม/แปลงย่อย
S_4	=	4 ตัน/ไร่	=	46.6	กิโลกรัม/แปลงย่อย
S_6	=	6 ตัน/ไร่	=	69.9	กิโลกรัม/แปลงย่อย

2.2 เตรียมดินและแปลงปลูก ดินสวนผักที่มีอยู่แล้วในแปลง ทำการกลับหน้าดินฟุ้งเคลไไว้ประมาณ 3 สัปดาห์แล้วจึงย่อยดินให้ละเอียดพอประมาณ พร้อมกับปรับพื้นที่แปลงให้มีระดับเท่ากัน ขร่องเพื่อเป็นแปลงสูง 15-20 เซนติเมตร แล้วนำตะกอนมาใส่ในแปลงตามอัตราที่กำหนดไว้ คือ 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ จากนั้นก็ทำการพรวนดินกลับไปกลับมาเพื่อให้ตะกอนกับดินมีการผสมจนเข้ากันดี แล้วฟุ้งเคลไไว้ประมาณ 3 วัน หลังจากนั้นก็ทำการกำหนดระยะปลูกผักคะน้าและผักกาดขาวปลีในแต่ละแปลงย่อย โดยใช้ระยะ 25 x 25 เซนติเมตร ต่อหลุมปลูกและเว้นระยะจากขอบแปลงทุกด้าน 35 เซนติเมตร ทำให้ใน 1 แปลงย่อยจะมีจำนวนหลุมปลูกทั้งหมดเป็น 40 หลุม (แสดงดังภาพที่ 7)



หมายเหตุ * หมายถึง แถวที่มีการตรวจวัดการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละแปลง
A หมายถึง แถวที่ไม่มีการตรวจวัดการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละแปลง

ภาพที่ 7 ระยะปลูกผักคะน้าและผักกาดขาวปลีในแต่ละแปลงย่อย

แล้วจึงทำการปลูกโดยใช้เมล็ดพันธุ์ 7-8 เมล็ดต่อ 1 หลุมปลูก เมื่อหยอดเมล็ดเสร็จทุกแปลง ก็ใช้ฟางข้าวมาคลุมแปลงไว้เพื่อรักษาความชื้นในดิน และในช่วงแรกที่เมล็ดผักงอกจำเป็นจะต้องมีการกำบังแสงแดดโดยใช้สแลนคลุมพืชทั้งแปลง เนื่องจากช่วงที่ปลูกเป็นช่วงฤดูร้อน ซึ่งอาจทำให้พืชเฉาตายได้หากได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยตรง เมื่อพืชอายุครบ 20 วัน หลังจากปลูก ก็ทำการถอนแยกให้เหลือ 1 ต้นต่อหลุมปลูก และเมื่อพืชอายุครบ 31 วันแล้วจึงทำการตรวจวัดการเจริญเติบโตของผักคะน้าและผักกาดขาวปลี

2.3 ดูแลรักษา โดยการให้น้ำที่มีการวางระบบสปริงเกอร์โดยมีหัวจ่ายน้ำแปลงละ 7 หัว รวมมีหัวจ่ายน้ำ 14 หัว ซึ่งจะให้น้ำเข้าเย็นทุกวันครั้งละ 30 นาที ซึ่งจำเป็นต้องให้น้ำแก่พืชในปริมาณที่เพียงพอเพื่อการเจริญเติบโตไปจนผักคะน้าและผักกาดขาวปลีถึงช่วงอายุที่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ อีกทั้งเนื่องจากในช่วงที่ปลูกพืชนั้นเป็นช่วงที่อากาศร้อนมาก และในแต่ละช่วงต้องคอยสังเกตโรครวมทั้งแมลงศัตรูพืชต่างๆ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ซึ่งจะใช้ยากำจัดแมลง กำจัดหนอนกินใบ รวมทั้งโรคพืชต่างๆ ที่สามารถสลายตัวเร็วเพื่อป้องกันการตกค้าง ยากำจัดแมลงศัตรูพืชที่นำมาใช้มี 3 ชนิด คือ เชฟวิน 85 อะบาเม็กติน และดาลาส ซึ่งทั้ง 3 ชนิดนี้ เป็นยากำจัดแมลงศัตรูพืชที่เกษตรกรในพื้นที่นำมาใช้ เนื่องจากในพื้นที่ศึกษามีการระบาดของแมลงศัตรูพืช ซึ่งหากไม่ใช้สารเคมีเลยพืชก็จะโดนทำลายโดย หนอน และแมลงศัตรูพืช นอกจากนี้ต้องถอนหญ้าเพื่อกำจัดวัชพืชทุกๆ 3 วัน เพื่อป้องกันการแย่งธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชที่ปลูกในแปลง

2.4 การบันทึกข้อมูลทางการเกษตร โดยวัดการเจริญเติบโตของผักคะน้าและผักกาดขาวปลี โดยทำการสุ่มวัดต้นผักคะน้าและผักกาดขาวปลีจำนวน 6 ต้น ที่อยู่ในสองแถวในของแปลงเก็บข้อมูลด้านการเจริญเติบโตของพืช ทุกสัปดาห์ (ทุกๆ 7 วัน) รวมจำนวนครั้งที่ทำการตรวจวัด คือ 3 ครั้ง โดยครั้งแรกจะทำการตรวจวัดที่ระยะเวลา 30 วันหลังปลูก ส่วนครั้งที่ 2 และ 3 จะทำการตรวจวัดให้ระยะเวลาห่างกัน 7 วัน จนกระทั่งถึงอายุเก็บเกี่ยว คือ 45 วัน โดยจะทำการวัดและบันทึกข้อมูล ดังนี้

2.4.1 น้ำหนักสด ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างผักคะน้าและผักกาดขาวปลี จำนวน 3 ต้น ในแต่ละแปลงย่อย และเมื่อถึงกำหนด 45 วันก็ทำการเก็บเกี่ยวตัวอย่างพืชในแต่ละแปลงย่อย แล้วทำการชั่งหาน้ำหนักสดของพืชในแต่ละแปลง

2.4.2 น้ำหนักแห้ง นำตัวอย่างพืชที่ผ่านการชั่งหาน้ำหนักสดไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งตัวอย่างพืชมีน้ำหนักแห้งคงที่แล้ว จึงนำตัวอย่างพืชไปชั่งหาน้ำหนักแห้งของผลผลิตพืชในแต่ละแปลง

3. การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.1 ตัวอย่างดิน ทำการเก็บตัวอย่างดินทั้ง 2 แปลงการทดลองก่อนทำการปลูกผักคะน้าและผักกาดขาวปลี โดยในแต่ละแปลงจะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินให้กระจายครอบคลุมทั่วทั้งแปลง โดยแต่ละแปลงจะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินทั้งหมด 20 จุด โดยก่อนขุดดินก็ทำการถางหญ้า กวาดเศษพืช หรือวัสดุที่อยู่ผิวหน้าดินออกก่อน โดยไม่ชะหรือปาดหน้าดินออก และใช้จอบ ขุดหลุมเป็นรูปตัววี (V) มีความลึกในแนวตั้งประมาณ 15 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในระดับชั้นไทรพรวน แล้วเอาดินด้านหนึ่งเป็นแผ่นหนาประมาณ 2 - 3 เซนติเมตรจากปากหลุมถึงก้นหลุม ดินที่ได้เป็นดินจาก 1 จุด ทำเช่นเดียวกันนี้จนครบทั้ง 20 จุด แล้วนำตัวอย่างดินจากทุกจุดใส่รวมกัน โดยถือว่าเป็นตัวอย่างดินที่เป็นตัวแทนของดินแปลงนั้น แล้วนำมารวมกันให้ได้น้ำหนัก 1 กิโลกรัม แล้วนำไปผึ่งในที่ร่มให้แห้งและนำมาบดให้ละเอียด แล้วนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยสมบัติต่างๆ ของดินบางประการตามพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ เนื้อดิน ความเป็นกรด - ด่าง (pH) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ Available P Exchangeable K Total N Exchangeable Ca Exchangeable Mg และปริมาณโลหะหนักตกค้าง ได้แก่ Total (Cu Pb Cr Cd Hg และ As)

3.2 ตัวอย่างตะกอน ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนที่ผ่านการเติมพอร์ลิเมอร์และรีดน้ำออกแล้วมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาคุณสมบัติบางประการ ได้แก่ ความชื้น pH EC O.M (Total : N P K) และ (Total : Cu Pb Cd Cr Hg As) รวมทั้งศึกษาการปลดปล่อยไนโตรเจน (N-mineralization) ของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียในดินสวนผักตามช่วงระยะเวลา 0 1 2 3 และ 4 สัปดาห์

3.3 ตัวอย่างน้ำ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 1 แหล่ง คือ น้ำที่ล้อมรอบแปลงตัวอย่างเพื่อตรวจวัดความเป็นกรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำที่ใช้สำหรับรดให้แก่พืชในแปลง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 1 ครั้งในช่วงแรกของการปลูกพืช

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (IRRISTAT) เพื่อหาค่า F-value หากข้อมูลแสดงความแตกต่างที่ระดับความ

เชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ จะนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละ
ทรีทเมนต์โดยวิธีของฟิชเชอร์ Fisher's Least Significant Difference (LSD)

5. สถานที่ทำการทดลอง

5.1 ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อทดสอบผลของตะกอนที่มีต่อผักคะน้าและผักกาดขาวปลีใน
โรงเรียนทดลอง และวิเคราะห์ทางเคมีที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

5.2 แปลงทดลองในพื้นที่ของนายวิรัช กรังพานิช ซึ่งตั้งอยู่ที่ 29 หมู่ 1 ตำบลไทรน้อย
อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี

6. ระยะเวลาในการทดลอง

ระหว่างเดือนสิงหาคม 2551 ถึงเดือนเมษายน 2552 รวมระยะเวลาการทดลองทั้งสิ้น 9 เดือน

ผลและวิจารณ์

ผล

จากการทดลองปลูกพืช 2 ชนิด คือ ผักคะน้า (*Brassica oleracea* var. *alboglabra*) และ ผักกาดขาวปลี (*Brassica campestris* var. *pekinensis*) โดยใส่ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการเติมพอลิเมอร์และรีดน้ำออกแล้วของอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตะกอนในการเป็นปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตของพืช และการสะสมโลหะหนักในพืช ซึ่งในการทดลองได้ทำการศึกษาสมบัติของดิน ตะกอน การเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช ปริมาณการดูดใช้ธาตุอาหาร และการสะสมโลหะหนักในพืช ผลการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. สมบัติของดินที่ใช้ในการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ พบว่า ดินในพื้นที่สวนผักที่นำมาใช้ในการทดลองมีเนื้อดินเป็นดินเหนียว (Clay) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 4.8 ซึ่งจัดว่าเป็นกรดจัดมาก มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินปานกลาง คือ 2.7 g/kg มีปริมาณไนโตรเจนรวมร้อยละ 0.16 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ระดับปานกลาง คือ 14 mg/kg มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงมาก คือ 300 mg/kg ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในระดับสูง คือ 2720 และ 440 mg/kg ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักบางชนิด พบว่า ตัวอย่างดินมีปริมาณทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม โปรทและสารหนู เท่ากับ 22.5 36.2 1.6 76.4 0.12 และ 4.5 mg/kg ตามลำดับ ดังตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณโลหะหนักเกือบทุกชนิดที่ทำการวิเคราะห์อยู่ในระดับเกณฑ์ค่าเฉลี่ยที่พบโดยทั่วไปในดินของประเทศไทย

2. สมบัติของตะกอนที่ใช้ในการทดลอง

ตะกอนที่ใช้ในการทดลอง เป็นตัวอย่างตะกอนที่ผ่านการเติมพอลิเมอร์และผ่านกระบวนการรีดน้ำออกแล้ว ของบริษัท ไทยเอเชีย แปซิฟิค บรีวเวอรี่ จำกัด ผลจากการวิเคราะห์พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 84.38 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 6.6 มีค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 4.07 dS/m มีปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 34.13 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียม เท่ากับ 4.11 2.24 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้จากผล

การวิเคราะห์ปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนักบางชนิดในตัวอย่างตะกอน พบว่า ตัวอย่างตะกอน มีการปนเปื้อนของ ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม โปรทและสารหนู เท่ากับ 84.0 101.7 5.6 103.5 2.3 และ 0.9 mg/kg ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในตะกอนที่ใช้ในการทดลองกับระดับเกณฑ์มาตรฐาน กำหนดคุณสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์ในประเทศไทย พบว่า ตัวอย่างตะกอนมีความเข้มข้นของแคดเมียม และปรอทสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดเล็กน้อย ดังตารางที่ 6

3. คุณภาพน้ำที่นำมาใช้รดพืชในแปลง

จากการเก็บตัวอย่างน้ำในร่องสวนเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติบางประการ พบว่า ตัวอย่างน้ำ ในร่องสวนที่นำมาใช้รดพืชในแปลง มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 7.4 และมีค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 2.53 dS/m

ตารางที่ 6 องค์ประกอบและสมบัติของตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลอง

องค์ประกอบและสมบัติ	ค่าที่วิเคราะห์ได้	ระดับและเกณฑ์มาตรฐาน
Soil Texture	Clay	-
Sand (%)	21	-
Silt (%)	25	-
Clay (%)	54	-
pH	4.8	กรดจัด
Requirement CaCO_3 (kg CaCO_3 /rai)	538	-
Organic Matter (%)	2.72	ปานกลาง
Total N (%)	0.16	ต่ำ
Available P (mg/kg)	14	ปานกลาง
Exchangeable K (mg/kg)	300	สูงมาก
Exchangeable Ca (mg/kg)	2720	สูง
Exchangeable Mg (mg/kg)	440	สูง
Total Cu (mg/kg)	22.5	$\leq 45 \text{ mg/kg}^{1/}$
Total Pb (mg/kg)	36.2	$\leq 400 \text{ mg/kg}^{1/}$
Total Cd (mg/kg)	1.62	$\leq 37 \text{ mg/kg}^{1/}$
Total Cr (mg/kg)	76.4	$\leq 300 \text{ mg/kg}^{1/}$
Total As (mg/kg)	4.51	$\leq 3.9 \text{ mg/kg}^{1/}$
Total Hg (mg/kg)	0.12	$\leq 23 \text{ mg/kg}^{1/}$

หมายเหตุ 1/ อ้างอิงจาก ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน

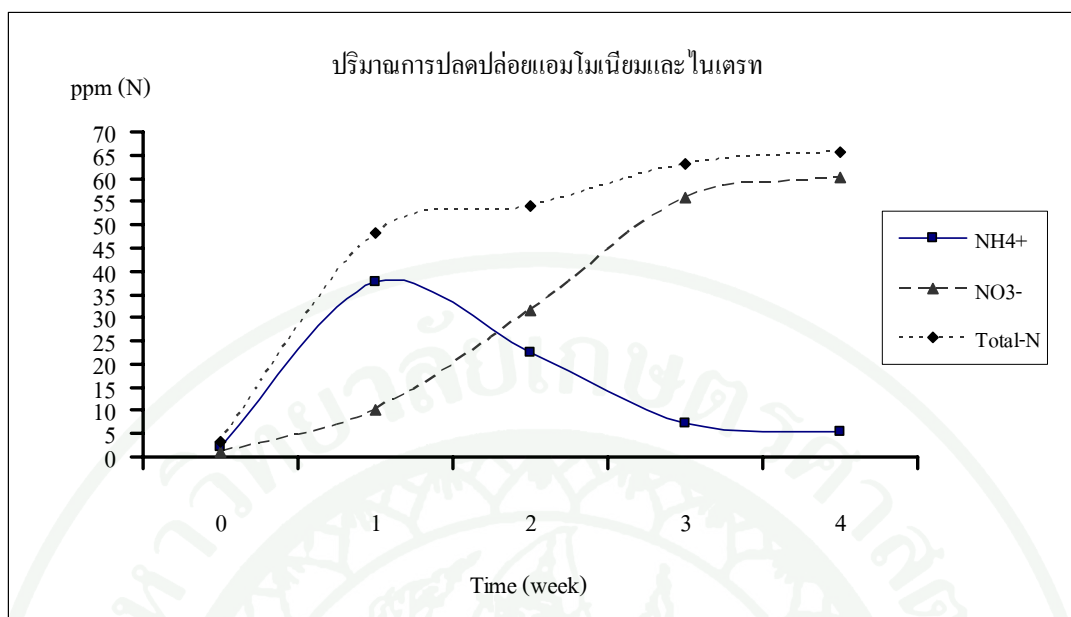
ตารางที่ 7 องค์ประกอบและสมบัติของตะกอนที่ใช้ในการทดลอง

องค์ประกอบและสมบัติ	ค่าที่วิเคราะห์ได้	เกณฑ์ที่กำหนด ^{1/}
Moisture (%)	84.38	≤30 %
pH	6.60	5.5-8.5
EC (dS/m)	4.07	≤10dS/m
O.M (%)	34.13	≥20% โดยน้ำหนัก
Total N (%)	4.11	≥1.0% โดยน้ำหนัก
Total P ₂ O ₅ (%)	2.24	≥0.5% โดยน้ำหนัก
Total K ₂ O (%)	0.50	≥0.5% โดยน้ำหนัก
Total Cu (mg/kg)	84.0	≤500 mg/kg
Total Pb (mg/kg)	101.7	≤500 mg/kg
Total Cd (mg/kg)	5.60	≤5 mg/kg
Total Cr (mg/kg)	103.5	≤300 mg/kg
Total Hg (mg/kg)	2.28	≤2 mg/kg
Total As (mg/kg)	0.90	≤50 mg/kg

หมายเหตุ 1/ เกณฑ์ที่กำหนดโดยกรมวิชาการเกษตร (2550)

4. ปริมาณการปลดปล่อยแอมโมเนียม (NH₄⁺) และไนเตรท (NO₃⁻)

ในการศึกษาปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจน ทั้งที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียม และไนเตรท โดยทำการผสมดินกับตะกอนที่ใช้ในการทดลองปลูกพืชในภาคสนาม แล้วบ่มไว้ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวกเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ และทำการตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยแอมโมเนียมและไนเตรท และนำผลการตรวจวัดมาคำนวณหาปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนทั้งหมดในแต่ละสัปดาห์ ซึ่งผลจากการศึกษา พบว่า ในช่วงเวลาที่ 0 1 2 3 และ 4 สัปดาห์ มีการปลดปล่อยแอมโมเนียมเท่ากับ 2.0 37.8 22.5 7.1 และ 5.4 ppm-N ตามลำดับ และมีปริมาณไนเตรทเท่ากับ 1.2 10.3 31.6 55.9 และ 60.3 ppm-N ตามลำดับ เมื่อนำผลการปลดปล่อยแอมโมเนียมและไนเตรทมาคำนวณเพื่อหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต พบว่า ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total-N) ที่มีการปลดปล่อยในแต่ละสัปดาห์ เท่ากับ 3.2 48.1 54.1 63.0 และ 65.7 ppm ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนในช่วง 0 1 2 3 และ 4 สัปดาห์

5. ผลของตะกอนต่อผักคะน้า

5.1 น้ำหนักสด เมื่ออายุ 30 วัน

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ไม่ทำให้น้ำหนักสดของผักคะน้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ตะกอนอัตรา 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ผักคะน้ามีน้ำหนักสดเฉลี่ยเท่ากับ 25.1 31.7 34.4 24.1 และ 29.5 กรัม/ต้น ตามลำดับ ดังตารางที่ 8

5.2 น้ำหนักสด เมื่ออายุ 38 วัน

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ไม่ทำให้น้ำหนักสดของผักคะน้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ตะกอนอัตรา 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ผักคะน้ามีน้ำหนักสดเฉลี่ยเท่ากับ 70.8 81.4 107.0 114.1 และ 100.9 กรัม/ต้น ตามลำดับ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักคะน้าที่อายุ 30 วัน (กรัม/ต้น)

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	25.2	25.9	24.2	25.1
1	38.1	29.4	27.6	31.7
2	38.1	43.4	21.8	34.4
4	21.8	24.1	26.3	24.1
6	30.5	25.8	32.1	29.5
F-test อัตราตะกอน				ns
CV (%)				20.4

หมายเหตุ ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 9 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักคะน้าที่อายุ 38 วัน (กรัม/ต้น)

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	81.7	41.0	89.7	70.8
1	100.6	74.6	68.9	81.4
2	140.0	114.9	66.1	107.0
4	139.9	110.5	92.0	114.1
6	125.5	109.1	68.1	100.9
F-test อัตราตะกอน				ns
CV (%)				29.2

หมายเหตุ ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

5.3 น้ำหนักสดค่น้ำที่ระยะเก็บเกี่ยว

การไม่ใส่และใส่ตะกอนในอัตรา 1 ตัน/ไร่ ให้น้ำหนักสดของค่น้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การใส่ในอัตรา แต่ที่มีการเติมในอัตรา 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ให้น้ำหนักสดของผักค่น้ำแตกต่างจากที่ไม่ใส่ตะกอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่า การใส่ตะกอนในอัตรา 4 ตัน/ไร่ มีแนวโน้มทำให้น้ำหนักสดของผักค่น้ำสูงสุด ดังตารางที่ 10

5.4 น้ำหนักแห้งของค่น้ำที่ระยะเก็บเกี่ยว

การไม่ใส่และใส่ตะกอนในอัตรา 1 ตัน/ไร่ ให้น้ำหนักแห้งของค่น้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การใส่ในอัตรา 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้น้ำหนักแห้งของผักค่น้ำแตกต่างจากที่ไม่ใส่ตะกอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่า การใส่ตะกอนในอัตรา 4 ตัน/ไร่ มีแนวโน้มทำให้น้ำหนักแห้งของผักค่น้ำสูงสุด ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 10 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักค่น้ำที่ระยะเก็บเกี่ยว (กิโลกรัม/ไร่)

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	676.8	919.2	723.2	773.1a
1	982.4	986.4	730.4	899.7a
2	1217.6	1153.6	812.0	1061.1b
4	1078.4	1266.4	1143.2	1162.7b
6	1164.0	1112.8	984.8	1087.2b
F-test อัตราตะกอน				*
CV (%)				14.4

หมายเหตุ * = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี LSD

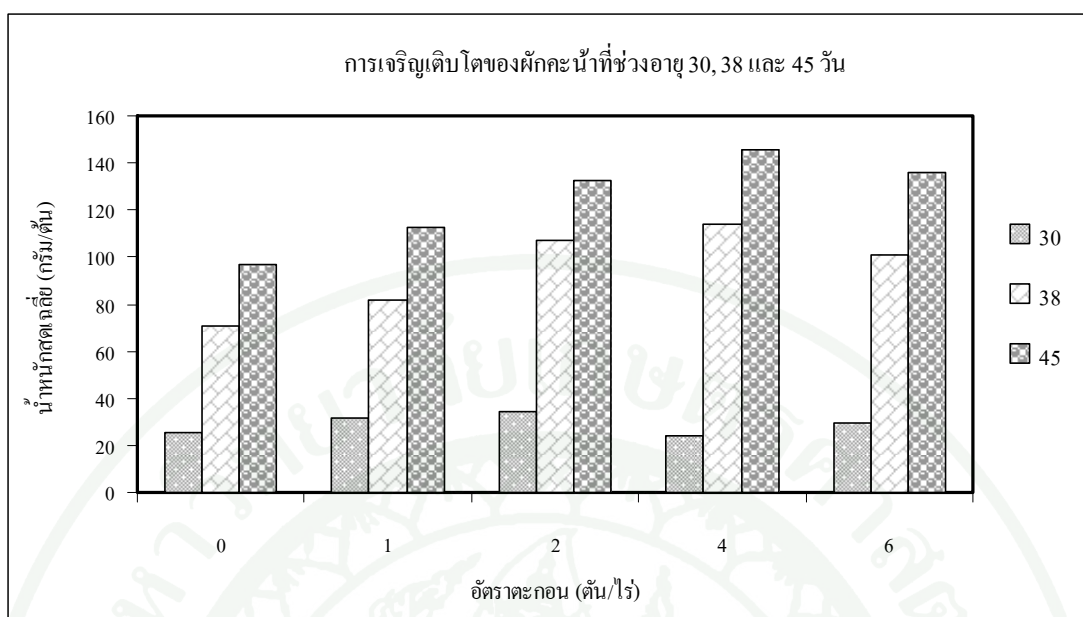
ตารางที่ 11 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักแห้งของผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว (กิโลกรัม/ไร่)

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
0	47.2	52.8	53.6	51.2a
1	57.6	54.4	44.8	52.3a
2	72.0	58.4	76.8	69.1b
4	75.2	69.6	77.6	74.1b
6	72.0	71.2	78.4	73.9b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				9.4

หมายเหตุ * = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทาง
 สถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

6. เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของผักคะน้า

จากผลการนำค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสด (กรัม/ต้น) ที่ช่วงอายุ 30 38 และ 45 วัน มาทำการ
 เปรียบเทียบอัตราการการเจริญเติบโตของผักคะน้าที่การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ พบว่า การเจริญ
 เติบโตของคะน้าสูงขึ้นเมื่อมีช่วงอายุมากขึ้น และสูงสุดที่ช่วงอายุ 45 วัน ซึ่งเป็นช่วงอายุการเก็บ
 เกี่ยวของพืช เมื่อเปรียบเทียบการใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ พบว่า ที่การใส่ตะกอนในอัตรา 4 ตัน/ไร่
 มีแนวโน้มทำให้ผักคะน้ามีการเจริญเติบโตดีที่สุด ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของผักคะน้าที่ช่วงอายุ 30 38 และ 45 วัน

7. ธาตุอาหารในน้ำหนักแห้งของผักคะน้าระยะเก็บเกี่ยว

7.1 ความเข้มข้น (ร้อยละ) และปริมาณการสะสม (กิโลกรัม/ไร่) ของไนโตรเจน

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ไม่ทำให้ไนโตรเจนในน้ำหนักแห้งของผักคะน้ามีความเข้มข้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ตะกอน 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ผักคะน้ามีความเข้มข้นของไนโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 3.40 3.74 3.50 3.59 และ 3.82 ดังตารางที่ 12

การไม่ใส่และใส่ตะกอนในอัตรา 1 และ 2 ตัน/ไร่ ทำให้ปริมาณการสะสมไนโตรเจนในน้ำหนักแห้งของผักคะน้าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 1.75 1.94 และ 2.43 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ แต่ที่การใส่ตะกอน 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ปริมาณการสะสมไนโตรเจนสูงขึ้นเป็น 2.67 และ 2.83 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากที่ไม่ใส่ตะกอนและใส่ตะกอนอัตรา 1 และ 2 ตัน/ไร่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 12 ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	2.76	4.06	3.39	3.40
1	3.70	3.39	4.13	3.74
2	2.84	3.36	4.29	3.50
4	3.76	3.25	3.76	3.59
6	3.74	3.59	4.13	3.82
F-test อัตราตะกอน				ns
CV (%)				13.9

หมายเหตุ ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 13 ปริมาณการสะสมไนโตรเจน (กิโลกรัม/ไร่) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	1.30	2.14	1.82	1.75a
1	2.13	1.84	1.85	1.94a
2	2.04	1.96	3.29	2.43a
4	2.83	2.26	2.92	2.67b
6	2.69	2.56	3.24	2.83b
F-test อัตราตะกอน				*
CV (%)				19.4

หมายเหตุ * = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี LSD

7.2 ความเข้มข้น (ร้อยละ) และปริมาณการสะสม (กิโลกรัม/ไร่) ของฟอสฟอรัส

การไม่ใส่ตะกอน ทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำหนักแห้งของผักคะน้า เท่ากับร้อยละ 0.33 ซึ่งมีค่าต่ำสุดและแตกต่างจากการใส่ตะกอนอัตราต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ไม่มีผลทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการใส่ตะกอนอัตรา 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ผักคะน้ามีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำหนักแห้ง เท่ากับร้อยละ 0.63 0.67 0.75 และ 0.79 ตามลำดับ ดังตารางที่ 14

การไม่ใส่ตะกอน ทำให้ปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสในน้ำหนักแห้งของผักคะน้า เท่ากับร้อยละ 0.17 ซึ่งมีค่าต่ำสุดและแตกต่างจากการใส่ตะกอนอัตราต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ไม่มีผลทำให้ปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการใส่ตะกอนอัตรา 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ผักคะน้ามีปริมาณการสะสมของฟอสฟอรัสในน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 0.33 0.46 0.56 และ 0.59 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ ดังตารางที่ 15

7.3 ความเข้มข้น (ร้อยละ) และปริมาณการสะสม (กิโลกรัม/ไร่) ของโพแทสเซียม

การไม่ใส่ตะกอนและใส่ตะกอนในอัตรา 1 ตัน/ไร่ ทำให้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในน้ำหนักแห้งของผักคะน้าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 3.44 และ 4.55 ตามลำดับ แต่ที่การใส่ตะกอน 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ผักคะน้ามีความเข้มข้นของโพแทสเซียมในน้ำหนักแห้ง เท่ากับร้อยละ 5.33 6.12 และ 7.09 ตามลำดับ ดังตารางที่ 16

การไม่ใส่ตะกอนและใส่ตะกอนในอัตรา 1 และ 2 ตัน/ไร่ ทำให้ปริมาณการสะสมโพแทสเซียมในน้ำหนักแห้งของผักคะน้าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 1.77 2.38 และ 3.67 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ แต่ที่การใส่ตะกอน 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ปริมาณการสะสมโพแทสเซียมในน้ำหนักแห้งเท่ากับ 4.53 และ 5.23 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากที่ไม่ใส่ตะกอนและใส่ตะกอนอัตรา 1 และ 2 ตัน/ไร่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 14 ปริมาณฟอสฟอรัส (ร้อยละ) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	0.32	0.32	0.34	0.33a
1	0.73	0.48	0.69	0.63b
2	0.59	0.75	0.66	0.67b
4	0.86	0.67	0.73	0.75b
6	0.73	0.92	0.73	0.79b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				0.0

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสคริปต์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่าง
 ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 15 ปริมาณการสะสมฟอสฟอรัส (กิโลกรัม/ไร่) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	0.15	0.17	0.18	0.17a
1	0.42	0.26	0.31	0.33b
2	0.42	0.44	0.51	0.46b
4	0.65	0.47	0.57	0.56b
6	0.53	0.66	0.57	0.59b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				17.7

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสคริปต์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่าง
 ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 16 ปริมาณโพแทสเซียม (ร้อยละ) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	3.15	3.11	4.05	3.44a
1	4.76	4.20	4.70	4.55a
2	5.44	5.40	5.14	5.33b
4	6.53	6.17	5.67	6.12b
6	7.45	7.15	6.67	7.09b
F-test อัตราตะกอน				*
CV (%)				20.5

หมายเหตุ * = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทาง
 สถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 17 ปริมาณการสะสมโพแทสเซียม (กิโลกรัม/ไร่) ในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	1.49	1.64	2.17	1.77a
1	2.74	2.28	2.11	2.38a
2	3.92	3.15	3.95	3.67a
4	4.91	4.29	4.40	4.53b
6	5.36	5.09	5.23	5.23b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				20.3

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่าง
 ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

8. ปริมาณการสะสมโลหะหนักในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว สามารถอธิบายผลการศึกษาดังต่อไปนี้ ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ ในตารางที่ 18

8.1 ทองแดง (Cu)

ผักคะน้าที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่ตะกอนมีความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 2.89 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักคะน้าที่ปลูกในดินที่มีการใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ โดยพบว่า คะน้าที่ปลูกในดินที่มีการใส่ตะกอนในอัตรา 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 3.41 4.01 3.51 และ 4.00 mg/kg ตามลำดับ

8.2 ตะกั่ว (Pb)

ผักคะน้าที่ปลูกในดินที่ใส่ตะกอน 1 และ 4 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 0.12 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักคะน้าที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่และใส่ตะกอนในอัตรา 2 และ 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของตะกั่ว เท่ากับ 3.62 3.12 และ 6.92 mg/kg ตามลำดับ

8.3 แคดเมียม (Cd)

ผักคะน้าที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่ตะกอนมีความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0.61 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักคะน้าที่ปลูกในดินที่มีการใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ โดยพบว่า คะน้าที่ปลูกในดินที่มีการใส่ตะกอนในอัตรา 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 0.91 1.04 1.40 และ 2.72 mg/kg ตามลำดับ

8.4 โครเมียม (Cr)

ผักคะน้าที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่ตะกอนมีความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 10.6 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักคะน้าที่ปลูกในดินที่มีการใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ โดยพบว่า คะน้าที่ปลูกในดินที่มีการใส่ตะกอนในอัตรา 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 47.0 57.7 43.7 และ 51.5 mg/kg ตามลำดับ

8.5 ปรอท (Hg)

ผักคะน้าที่ปลูกในดินที่ใส่ตะกอน 2 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของปรอท เท่ากับ 0.03 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักคะน้าที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่และใส่ตะกอนในอัตรา 1 4 และ 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของปรอท เท่ากับ 0.07 0.23 0.22 และ 0.20 mg/kg ตามลำดับ

8.6 สารหนู (As)

ผักคะน้าที่ปลูกในดินที่ใส่ตะกอน 4 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของสารหนู เท่ากับ 1.51 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักคะน้าที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่ตะกอนและใส่ตะกอนในอัตรา 1 2 และ 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของสารหนู เท่ากับ 1.94 1.93 และ 2.02 mg/kg ตามลำดับ

หากพิจารณาในกรณีที่นำตะกอนไปใช้ในพื้นที่ที่ไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ผลการคาดการณ์ความเข้มข้นของโลหะหนักทุกชนิดในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยวลดลง นอกจากนั้น การใส่ตะกอนลงดินเพื่อเป็นปุ๋ยยังสามารถลดปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน และส่งผลให้พืชดูดกินลดลงด้วยจึงไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยง อันเนื่องมาจากการบริโภคผักคะน้า ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 18 ความเข้มข้น (mg/kg) ของโลหะหนักในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	ค่าการวิเคราะห์					
	Total Cu	Total Pb	Total Cd	Total Cr	Total Hg	Total As
0	2.89	3.62	0.61	10.6	0.07	1.94
1	3.41	0.12	0.90	47.0	0.23	1.94
2	4.00	3.10	1.04	57.7	0.03	1.93
4	3.51	0.12	1.40	43.7	0.22	1.51
6	4.00	6.90	2.72	51.5	0.20	2.02
Standard	<20 ^{1/}	<1 ^{1/}	<0.8 ^{1/}	<50 ^{2/}	<0.5 ^{1/}	<2 ^{1/}

หมายเหตุ 1/ อ้างอิงจาก ประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 98 (พ.ศ.2529) เรื่องมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน

2/ อ้างอิงจาก Forstner (1991)

ตารางที่ 19 ความเข้มข้น (mg/kg) ของโลหะหนักในผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวในกรณีปลูกในดินไม่มีการปนเปื้อน

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	ค่าการวิเคราะห์					
	Total Cu	Total Pb	Total Cd	Total Cr	Total Hg	Total As
1	+0.52	-3.50	+0.29	+36.40	+0.16	0.00
2	+1.11	-0.52	+0.43	+47.10	-0.04	-0.01
4	+0.62	-3.50	+0.79	+33.10	+0.15	-0.43
6	+1.11	+3.28	+2.11	+40.90	+0.13	+0.08

9. การประเมินความเสี่ยงจากการบริโภคผักคะน้า

จากผลการศึกษาปริมาณการสะสมโลหะหนักในผักคะน้าที่ได้จากแปลงทดลอง โดยมีการเติมตะกอนจากโรงงานเบียร์ที่อัตราต่างๆ พบว่า ผักคะน้ามีปริมาณการสะสมของโลหะหนักอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง จึงจำเป็นต้องทำการประเมินความเสี่ยงจากการบริโภค สามารถแสดงวิธีการคำนวณเพื่อประเมินความเสี่ยง (HQ) ได้ดังสมการของ U.S.EPA. (1998) และสูตรการคำนวณเพื่อหาค่า ADD จากสมการของ U.S. EPA. (1989) โดยสามารถแสดงสูตรการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$HQ = \frac{ADD}{RfDo}$$

$$ADD = \frac{[C] \times IR \times EF \times F_{ex} \times ED}{BW \times T_{avg}}$$

โดยที่

HQ	=	ค่าแสดงความเสี่ยง
ADD	=	ปริมาณโลหะหนักที่คนได้รับ(mg/kg/day)
RfDo	=	ค่าความเป็นพิษของโลหะหนักที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง
(mg/kg/day)		
[C]	=	ความเข้มข้นของโลหะหนักในผัก (mg/kg)
IR	=	อัตราการสัมผัส (kg/day)
F _{ex}	=	ความถี่ในการสัมผัส (day/year)
EF	=	ระยะเวลาที่สัมผัส (hour/day)
ED	=	ช่วงระยะเวลาในการสัมผัส (year)
BW	=	น้ำหนักร่างกาย (kg)
T _{avg}	=	ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่สัมผัส (day)

หากค่า Hazard Quotient (HQ) > 1.0 แสดงว่ามีระดับความเสี่ยงสูงอันเนื่องมาจากการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก

ค่า RfDo มีค่าแตกต่างกันตามประเภทของโลหะหนัก ซึ่งค่า RfDo ของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ทำการประเมินความเสี่ยงจากการบริโภค เป็นดังนี้

ทองแดง (Cu)	=	4×10^{-2} mg/kg/day	(U.S.EPA., 2002)
ตะกั่ว (Pb)	=	4×10^{-3} mg/kg/day	(U.S.EPA., 2004)
แคดเมียม (Cd)	=	1×10^{-3} mg/kg/day	(WHO, 2004)
โครเมียม (Cr)	=	3×10^{-3} mg/kg/day	(U.S.EPA., 1998)
ปรอท (Hg)	=	1×10^{-4} mg/kg/day	(WHO, 2004)
สารหนู (As)	=	3×10^{-4} mg/kg/day	(U.S.EPA., 2000)

หลังจากคำนวณค่า HQ ของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด แล้วนำค่า HQ ที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่า Hazard Index (HI) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความเสี่ยงรวมของโลหะหนักต่างชนิดกัน หากดัชนีความเสี่ยงรวมมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าเป็นดัชนีความเสี่ยงที่ยอมรับได้ และจัดได้ว่าเป็นความเสี่ยงน้อย อาจไม่ต้องดำเนินการปรับปรุงคุณภาพของผักก่อนการบริโภค แต่หากค่าความเสี่ยงมากกว่า 1 จำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปบริโภค และจำเป็นต้องเฝ้าระวังผู้ที่สัมผัสกับพืชผักเป็นระยะ โดยสามารถคำนวณหาค่าดัชนีความเสี่ยงได้จากสมการของ (U.S.EPA., 1989; Hampshire Research Institute, 1995)

$$HI = \sum HQ = ADD_1 / RfDo_1 + ADD_2 / RfDo_2 + ADD_3 / RfDo_3 + \dots + ADD_n / RfDo_n$$

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้สามารถคำนวณหาค่าดัชนีความเสี่ยงรวมได้ดังนี้

$$HI = \sum HQ = (HQ_{Cu} + HQ_{Pb} + HQ_{Cd} + HQ_{Cr} + HQ_{Hg} + HQ_{As})$$

การหาค่า ADD โดยที่ค่า Ingestion Rates ของพืชกินใบที่ใช้ในการประเมิน มีค่าเท่ากับ 0.01 kg/day (สันจิติ, 2549)

ค่า F_{ex} มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.2

ค่า EF มีค่าเท่ากับ 365 day/year

ค่า ED มีค่าเท่ากับ 70 year ซึ่งเป็นการบริโภคตลอดชีวิต

ค่า BW มีค่าเท่ากับ 61.6 kg (น้ำหนักโดยเฉลี่ยของผู้ใหญ่) (Yuan et al., 2007) และ 18.7 kg (น้ำหนักโดยเฉลี่ยของเด็กในช่วงอายุ 0-6 ปี) (Xu., 2001)

และค่า T_{avg} (day/year) มีค่าเท่ากับ $ED \times 365 = 25,550$ day/year ซึ่งเป็นการคำนวณในกรณีที่เป็นการบริโภคต่อเนื่อง (Louvar et al., 1998)

ผลจากการประเมินความเสี่ยงของผู้บริโภคผักคะน้า พบว่า ที่การเติมตะกอน 6 ตัน/ไร่ เป็นผลให้สารหนู (As) มีระดับความเสี่ยงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่น เนื่องจากผลการคำนวณ Hazard Quotient (HQ) มีค่ามากกว่า 1.0 ซึ่งแสดงว่ามีระดับความเสี่ยงสูงกว่าผู้ที่บริโภคผักที่มีการปนเปื้อนสูงกว่าระดับความปลอดภัย เมื่อพิจารณาดัชนีความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดการสะสมในร่างกาย จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณหาค่า HQ และ HI ได้ดังตารางที่ 20 และหากพิจารณาในกรณีที่นำตะกอนไปใช้ในพื้นที่การเกษตรที่ไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก จะเห็นได้ว่าการใส่ตะกอนทุกอัตราจะไม่มีความเสี่ยงอันเนื่องมาจากโลหะหนักทุกชนิด ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 20 ค่า HQ และ HI ของผู้ที่บริโภคผักคะน้าที่ใส่ตะกอนอัตราต่างๆ

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	HQ _{Cu}	HQ _{Pb}	HQ _{Cd}	HQ _{Cr}	HQ _{Hg}	HQ _{As}	HI
0	0.00	0.03	0.02	0.12	0.02	0.21	0.40
1	0.00	0.00	0.03	0.51	0.08	0.21	0.83
2	0.00	0.03	0.03	0.62	0.01	0.21	0.90
4	0.00	0.00	0.05	0.47	0.07	0.16	0.75
6	0.00	0.06	0.09	0.56	0.07	0.22	1.00

ตารางที่ 21 ค่า HQ และ HI ของผู้ที่บริโภคผักคะน้าที่ใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ในกรณีที่ปลูกในดินไม่มีการปนเปื้อน

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	HQ _{Cu}	HQ _{Pb}	HQ _{Cd}	HQ _{Cr}	HQ _{Hg}	HQ _{As}	HI
1	+0.00	-0.03	+0.01	+0.39	+0.06	+0.00	+0.43
2	+0.00	-0.00	+0.01	+0.51	-0.01	+0.00	+0.51
4	+0.00	-0.03	+0.03	+0.36	+0.05	-0.05	+0.36
6	+0.00	+0.03	+0.07	+0.44	+0.04	+0.01	+0.59

10. ผลของตะกอนต่อคุณสมบัติของดินในแปลงปลูกผักคะน้า

10.1 ความเป็นกรด - ด่าง (pH)

หลังการเก็บเกี่ยวคะน้า พบว่า การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ทำให้ pH ของดินเพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการใส่ตะกอนในอัตรา 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ pH ของดินมีค่าเท่ากับ 4.84 4.90 5.08 5.24 และ 5.20 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 22

10.2 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ทำให้ดินหลังการเก็บเกี่ยวคะน้ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการเติมตะกอนในอัตรา 0 1 2 3 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 2.89 3.13 3.64 4.09 และ 4.80 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 23

ตารางที่ 22 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของดิน

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	5.02	4.70	4.81	4.84a
1	4.90	4.90	4.90	4.90a
2	5.21	5.02	5.00	5.08b
4	5.20	5.20	5.32	5.24b
6	5.20	5.20	5.20	5.20b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				1.80

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสมมุติเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมี
 ค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 23 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (ร้อยละ)

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	2.80	2.74	3.12	2.89a
1	3.12	3.24	3.03	3.13a
2	3.31	3.21	4.40	3.64b
4	4.00	4.14	4.14	4.09b
6	4.80	4.80	4.80	4.80b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				8.60

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 สมมุติเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมี
 ค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

10.3 ปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในดิน

จากผลการศึกษาปริมาณธาตุอาหารในดินหลังการเก็บเกี่ยวฝักคะน้า พบว่า การเติมตะกอนจากโรงงานเบียร์ในอัตราต่าง 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ดินมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกอนที่ใส่ กล่าวคือ ดินมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด เท่ากับ 0.15 0.19 0.20 0.24 และ 0.25 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 32 250 756 600 และ 810 และแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เท่ากับ 3120 2800 2880 2400 และ 4400 mg/kg ตามลำดับ ส่วนปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณตะกอนที่ใส่ โดยมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เท่ากับ 440 380 460 480 และ 380 และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เท่ากับ 330 350 380 380 และ 320 mg/kg ตามลำดับ สำหรับโลหะหนักทุกชนิด ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม สารหนู และปรอท พบว่า การไม่ใส่และใส่ตะกอนอัตราต่างๆ มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในดินหลังการเก็บเกี่ยวฝักคะน้า

ธาตุอาหารพืชและโลหะหนัก	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้				
	อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)				
	0	1	2	4	6
Total N (%)	0.15	0.19	0.20	0.24	0.25
Available P(mg/kg)	32	250	756	600	810
Exchangeable K (mg/kg)	440	380	460	480	380
Exchangeable Ca (mg/kg)	3120	2800	2880	2400	4400
Exchangeable Mg (mg/kg)	330	350	380	380	320
Total Cu (mg/kg)	17.0	18.1	19.2	19.4	19.9
Total Pb (mg/kg)	37.6	40.3	37.2	38.4	41.5
Total Cd (mg/kg)	0.40	0.13	0.32	0.32	0.84
Total Cr (mg/kg)	40.5	41.5	28.3	26.1	30.5
Total As (mg/kg)	18.6	20.9	19.4	18.6	19.8
Total Hg (mg/kg)	0.36	0.41	0.38	0.34	0.45

11. ผลของตะกอนต่อผักกาดขาวปลี

11.1 น้ำหนักสด เมื่ออายุ 30 วัน

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ไม่ทำให้น้ำหนักสดของผักกาดขาวปลีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ตะกอนในอัตรา 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ผักกาดขาวปลีมีน้ำหนักสดเฉลี่ยเท่ากับ 22.7 43.2 39.6 และ 31.1 กรัม/ต้น ตามลำดับ ดังตารางที่ 25

11.2 น้ำหนักสด เมื่ออายุ 38 วัน

การใส่ตะกอนในอัตรา 1 ตัน/ไร่ ทำให้น้ำหนักสดของผักกาดขาวปลีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การไม่และใส่ในอัตรา 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ไม่ทำให้น้ำหนักสดของผักกาดขาวปลีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่การใส่ตะกอนในอัตรา 1 ตัน/ไร่ มีผลให้ผักกาดขาวปลีมีน้ำหนักเฉลี่ยสูงสุด ดังตารางที่ 26

11.3 น้ำหนักสดผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ทำให้ผลผลิตของผักกาดขาวปลีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ในอัตรา 4 ตัน/ไร่ มีแนวโน้มทำให้ผักกาดขาวปลีให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงสุด ดังตารางที่ 27

11.4 น้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว

การไม่ใส่และใส่ตะกอนในอัตรา 6 ตัน/ไร่ ทำให้น้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การใส่ในอัตรา 1 2 และ 4 ตัน/ไร่ ทำให้น้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลีแตกต่างจากที่ไม่ใส่ตะกอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่า การเติมตะกอนในอัตรา 2 และ 4 ตัน/ไร่ มีแนวโน้มทำให้น้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลีสูงสุด ดังตารางที่ 28

ตารางที่ 25 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักกาดขาวปลีที่อายุ 30 วัน (กรัม/ต้น)

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	22.0	8.10	38.1	22.7
1	56.0	34.7	38.8	43.2
2	52.7	34.9	31.1	39.6
4	31.1	25.9	61.8	39.6
6	35.4	28.9	29.0	31.1
F-test อัตราตะกอน				ns
CV (%)				37.6

หมายเหตุ ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 26 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักกาดขาวปลีที่อายุ 38 วัน (กรัม/ต้น)

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	71.2	84.1	126.8	94.0a
1	201.4	132.7	155.8	163.3b
2	156.6	87.6	167.0	137.1a
4	149.3	139.8	135.5	141.5a
6	107.8	143.8	123.8	125.1a
F-test อัตราตะกอน				*
CV (%)				22.2

หมายเหตุ * = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมี

ค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 27 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักสดของผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว (กิโลกรัม/ไร่)

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	1708.8	2018.4	3043.2	2256.8a
1	3925.6	3764.0	3824	3837.9b
2	4834.4	3185.6	3740.0	3920.0b
4	4906.4	5456.8	5076.8	5146.7b
6	4007.2	4772.0	3611.2	4130.1b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				14.8

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสคริปต์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่าง
 ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

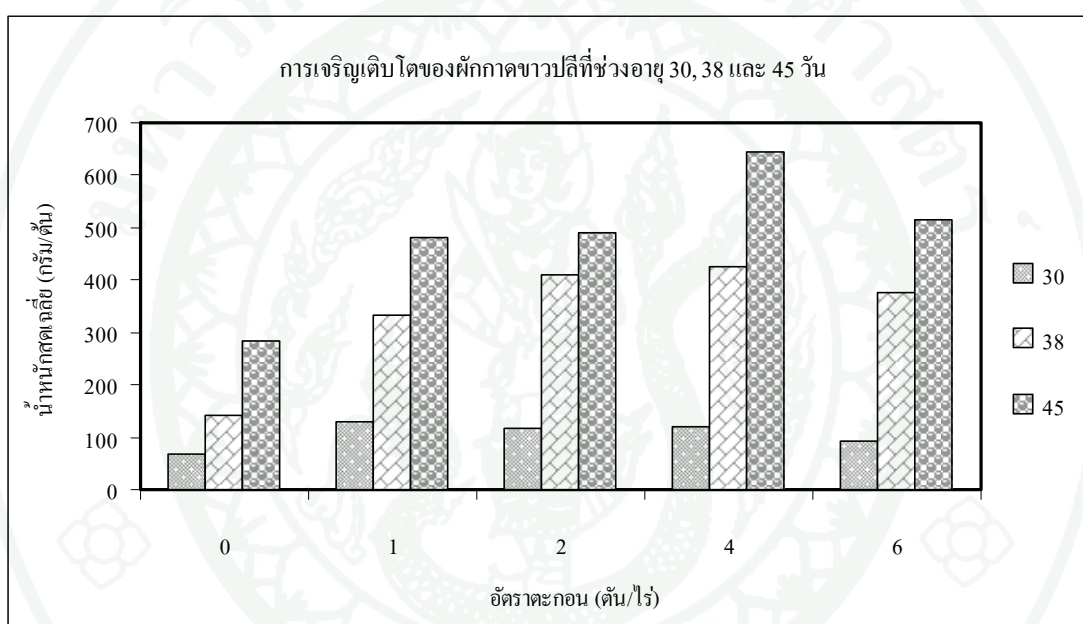
ตารางที่ 28 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อน้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว (กิโลกรัม/ไร่)

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	103.2	74.4	111.2	96.3a
1	154.4	149.6	127.2	143.7b
2	119.2	148.8	154.4	140.8b
4	135.2	155.2	132.8	141.1b
6	124.0	132.8	104.8	118.8a
F-test อัตราตะกอน				*
CV (%)				12.5

หมายเหตุ * = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ในสคริปต์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทาง
 สถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี LSD

12. เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดขาวปลี

จากผลการนำค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสด (กรัม/ต้น) ในช่วงอายุ 30, 38 และ 45 วัน มาทำการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดขาวปลีที่การเติมตะกอนในอัตราต่างๆ พบว่า การเจริญเติบโตของพืชสูงขึ้นเมื่อมีช่วงอายุมากขึ้น และสูงสุดในช่วงอายุ 45 วัน ซึ่งเป็นช่วงอายุการเก็บเกี่ยวของพืช เมื่อเปรียบเทียบการเติมตะกอนในอัตราต่างๆ พบว่า ที่การใส่ตะกอนในอัตรา 4 ต้น/ไร่ มีแนวโน้มทำให้ผักกาดขาวปลีมีการเจริญเติบโตดีที่สุด ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดขาวปลีในช่วงอายุ 30 38 และ 45 วัน

13. ธาตุอาหารในน้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลี ระยะเก็บเกี่ยว

13.1 ความเข้มข้น (ร้อยละ) และปริมาณการสะสม (กิโลกรัม/ไร่) ของไนโตรเจน

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ทำให้ไนโตรเจนในน้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลีมีความเข้มข้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ตะกอน 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ผักกาดขาวปลีมีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 2.03 2.88 3.27 3.11 และ 3.19 ตามลำดับ ดังตารางที่ 29

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ทำให้ปริมาณการสะสมไนโตรเจนในน้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ตะกอน 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ผักกาดขาวปลีมีปริมาณการสะสมไนโตรเจนในน้ำหนักแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 2.00 4.15 4.30 4.41 และ 3.82 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ ดังตารางที่ 30

13.2 ความเข้มข้น (ร้อยละ) และปริมาณการสะสม (กิโลกรัม/ไร่) ของฟอสฟอรัส

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ทำให้ฟอสฟอรัสในน้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลีมีความเข้มข้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ตะกอน 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ผักกาดขาวปลีมีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 0.29 0.63 0.56 0.70 และ 0.82 ตามลำดับ ดังตารางที่ 31

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ทำให้ปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสในน้ำหนักแห้งของผักกาดขาวปลีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ตะกอน 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ผักกาดขาวปลีมีปริมาณการสะสมไนโตรเจนในน้ำหนักแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 0.28 0.82 0.78 0.99 และ 1.00 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ ดังตารางที่ 32

ตารางที่ 29 ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ) ในผักกาดขาวปลี ที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	Replications			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	2.06	1.68	2.36	2.03a
1	2.80	3.11	2.73	2.88a
2	3.39	3.21	3.21	3.27b
4	3.43	3.35	2.56	3.11b
6	3.00	3.02	3.56	3.19b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				10.9

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสคริปต์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่าง
 ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 30 ปริมาณการสะสมไนโตรเจน (กิโลกรัม/ไร่) ในผักกาดขาวปลี ที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	2.13	1.25	2.62	2.00a
1	4.32	4.65	3.47	4.15b
2	4.04	4.78	4.08	4.30b
4	4.64	5.20	3.40	4.41b
6	3.72	4.01	3.73	3.82b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				16.7

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสคริปต์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่าง
 ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 31 ปริมาณฟอสฟอรัส (ร้อยละ) ในผักกาดขาวปลี ที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	0.28	0.24	0.34	0.29a
1	0.71	0.46	0.73	0.63b
2	0.54	0.58	0.55	0.56b
4	0.80	0.64	0.67	0.70b
6	0.94	0.83	0.70	0.82b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				14.3

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสคริปต์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่าง
 ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 32 ปริมาณการสะสมฟอสฟอรัส (กิโลกรัม/ไร่) ในผักกาดขาวปลี ที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	0.29	0.18	0.38	0.28a
1	0.83	0.69	0.93	0.82b
2	0.64	0.86	0.85	0.78b
4	1.08	0.99	0.89	0.99b
6	1.17	1.10	0.73	1.00b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				22.4

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสคริปต์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่าง
 ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

13.3 ความเข้มข้น (ร้อยละ) และปริมาณการสะสม (กิโลกรัม/ไร่) ของโพแทสเซียม

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ทำให้โพแทสเซียมในน้ำหนักรากแห้งของผักกาดขาวปลีมีความเข้มข้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ตะกอน 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ผักกาดขาวปลีมีความเข้มข้นของโพแทสเซียมเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 3.19 5.59 5.81 6.54 และ 6.31 ตามลำดับ ดังตารางที่ 33

การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ทำให้ปริมาณการสะสมโพแทสเซียมในน้ำหนักรากแห้งของผักกาดขาวปลีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่า เมื่อมีการใส่ตะกอน 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ผักกาดขาวปลีมีปริมาณการสะสมโพแทสเซียมในน้ำหนักรากแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 3.05 8.06 8.28 9.20 และ 7.56 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ ดังตารางที่ 34

ตารางที่ 33 ปริมาณโพแทสเซียม (ร้อยละ) ในผักกาดขาวปลี ที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	2.64	3.43	3.50	3.19a
1	5.55	5.84	5.40	5.59b
2	5.03	5.87	6.54	5.81b
4	6.49	6.20	6.93	6.54b
6	5.81	6.22	6.90	6.31b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				9.10

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ในสคริปต์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 34 ปริมาณการสะสมโพแทสเซียม (กิโลกรัม/ไร่) ในผักกาดขาวปลี ที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	2.72	2.55	3.89	3.05a
1	8.57	8.74	6.87	8.06b
2	6.00	8.73	10.10	8.28b
4	8.77	9.62	9.20	9.20b
6	7.20	8.26	7.23	7.56b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				16.2

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสัณฐานเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่าง
 ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

14. ปริมาณการสะสมโลหะหนักในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว สามารถอธิบายผลการ
 การศึกษาได้ดังต่อไปนี้ รวมทั้งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 35

14.1 ทองแดง (Cu)

ผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ใส่ตะกอน 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของทองแดง เท่ากับ
 4.2 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่และใส่
 ตะกอนในอัตรา 1 2 และ 4 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของทองแดง เท่ากับ 4.4 5.4 6.0 และ 5.6 mg/kg
 ตามลำดับ

14.2 ตะกั่ว (Pb)

ผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ใส่ตะกอน 2 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของตะกั่ว เท่ากับ 3.1 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่และใส่ตะกอนในอัตรา 1 4 และ 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของตะกั่ว เท่ากับ 5.2 3.6 3.9 และ 6.1 mg/kg ตามลำดับ

14.3 แคดเมียม (Cd)

ผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่ตะกอนมีความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 1.1 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่มีการใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ โดยพบว่า ผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่มีการใส่ตะกอนในอัตรา 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 5.9 2.9 4.0 และ 5.1 mg/kg ตามลำดับ

14.4 โครเมียม (Cr)

ผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ใส่ตะกอน 1 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของโครเมียม เท่ากับ 30.1 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่และใส่ตะกอนในอัตรา 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของโครเมียม เท่ากับ 43.6 40.6 35.0 และ 35.2 mg/kg ตามลำดับ

14.5 ปรอท (Hg)

ผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ใส่ตะกอน 4 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของปรอท เท่ากับ 0.25 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่และใส่ตะกอนในอัตรา 1 2 และ 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของปรอท เท่ากับ 0.47 0.40 0.50 และ 0.40 mg/kg ตามลำดับ

14.6 สารหนู (As)

ผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ใส่ตะกอน 6 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของสารหนู เท่ากับ 2.5 mg/kg ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นในผักกาดขาวปลีที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่และใส่ตะกอนในอัตรา 1 2 และ 4 ตัน/ไร่ มีความเข้มข้นของสารหนู เท่ากับ 3.3 2.7 2.9 และ 3.3 mg/kg ตามลำดับ

หากพิจารณาในกรณีที่น่าตะกอนไปใช้ในพื้นที่ที่ไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ผลการคาดการณ์ความเข้มข้นของโลหะหนักทุกชนิดในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยวลดลง นอกจากนั้น การใส่ตะกอนลงดินเพื่อเป็นปุ๋ยยังสามารถลดปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน และส่งผลให้พืชดูดกินลดลงด้วยจึงไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยง อันเนื่องมาจากการบริโภคผักกาดขาวปลี ดังตารางที่ 36

ตารางที่ 35 ความเข้มข้น (mg/kg) ของโลหะหนักในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	ค่าการวิเคราะห์					
	Total Cu	Total Pb	Total Cd	Total Cr	Total Hg	Total As
0	4.39	5.24	1.13	43.6	0.47	3.34
1	5.43	3.61	5.94	30.1	0.40	2.72
2	6.01	3.13	2.92	40.6	0.50	2.94
4	5.60	3.90	4.00	35.0	0.25	3.30
6	4.24	6.13	5.10	35.2	0.40	2.51
Standard	<20 ^{1/}	<1 ^{1/}	<0.8 ^{1/}	<50 ^{2/}	<0.5 ^{1/}	<2 ^{1/}

หมายเหตุ 1/ อ้างอิงจาก ประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 98 (พ.ศ.2529) เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน

2/ อ้างอิงจาก Forstner (1991)

ตารางที่ 36 ความเข้มข้น (mg/kg) ของโลหะหนักในผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยวในกรณีปลูก
ในดินไม่มีการปนเปื้อน

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	ค่าการวิเคราะห์					
	Total Cu	Total Pb	Total Cd	Total Cr	Total Hg	Total As
1	+1.04	-1.63	+4.81	-13.5	-0.07	-0.62
2	+1.62	-2.11	+1.79	-3.00	+0.03	-0.40
4	+1.21	-1.34	+2.87	-8.60	-0.22	-0.04
6	-0.15	+0.89	+3.97	-8.40	-0.07	-0.83

15. การประเมินความเสี่ยงจากการบริโภคผักกาดขาวปลี

จากผลการศึกษาปริมาณการสะสมโลหะหนักในผักกาดขาวปลีที่ได้จากแปลงทดลอง โดยมีการเติมตะกอนที่อัตราต่างๆ พบว่า ผักกาดขาวปลีมีปริมาณการสะสมของโลหะหนักอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง จึงจำเป็นต้องทำการประเมินความเสี่ยงจากการบริโภค สามารถแสดงวิธีการคำนวณเพื่อประเมินความเสี่ยง (HQ) ได้ดังสมการของ U.S.EPA. (1998) และสูตรการคำนวณเพื่อหาค่า ADD จากสมการของ U.S.EPA. (1989) โดยสามารถแสดงสูตรการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$HQ = \frac{ADD}{RfDo}$$

$$ADD = \frac{[C] \times IR \times EF \times F_{ex} \times ED}{BW \times T_{avg}}$$

โดยที่

HQ	=	ค่าแสดงความเสี่ยง
ADD	=	ปริมาณโลหะหนักที่คนได้รับ(mg/kg/day)
RfDo	=	ค่าความเป็นพิษของโลหะหนักที่ไม่ทำให้เกิดมะเร็ง (mg/kg/day)
[C]	=	ความเข้มข้นของโลหะหนักในผัก (mg/kg)
IR	=	อัตราการสัมผัส (kg/day)

F_{ex}	=	ความถี่ในการสัมผัส (day/year)
EF	=	ระยะเวลาที่สัมผัส (hour/day)
ED	=	ช่วงระยะเวลาในการสัมผัส (year)
BW	=	น้ำหนักร่างกาย (kg)
T_{avg}	=	ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่สัมผัส (day)

หากค่า Hazard Quotient (HQ) > 1.0 แสดงว่ามีระดับความเสี่ยงสูงอันเนื่องมาจากการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก

ค่า RfDo มีค่าแตกต่างกันตามประเภทของโลหะหนัก ซึ่งค่า RfDo ของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ทำการประเมินความเสี่ยงจากการบริโภค เป็นดังนี้

ทองแดง (Cu)	=	4×10^{-2} mg/kg/day	(U.S.EPA, 2002)
ตะกั่ว (Pb)	=	4×10^{-3} mg/kg/day	(U.S.EPA, 2004)
แคดเมียม (Cd)	=	1×10^{-3} mg/kg/day	(WHO, 2004)
โครเมียม (Cr)	=	3×10^{-3} mg/kg/day	(U.S.EPA, 1998)
ปรอท (Hg)	=	1×10^{-4} mg/kg/day	(WHO, 2004)
สารหนู (As)	=	3×10^{-4} mg/kg/day	(U.S.EPA, 2000)

หลังจากคำนวณค่า HQ ของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด แล้วนำค่า HQ ที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่า Hazard Index (HI) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความเสี่ยงรวมของโลหะหนักต่างชนิดกัน หากดัชนีความเสี่ยงรวมมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าเป็นดัชนีความเสี่ยงที่ยอมรับได้ และจัดได้ว่าเป็นความเสี่ยงน้อย อาจไม่ต้องดำเนินการปรับปรุงคุณภาพของผักก่อนการบริโภค แต่หากค่าความเสี่ยงมากกว่า 1 จำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปบริโภค และจำเป็นต้องเฝ้าระวังผู้ที่สัมผัสกับพืชผักเป็นระยะ โดยสามารถคำนวณหาค่าดัชนีความเสี่ยงได้จากสมการของ (U.S.EPA.,1989; Hampshire Research Institute, 1995)

$$HI = \sum HQ = ADD_1 / RfDo_1 + ADD_2 / RfDo_2 + ADD_3 / RfDo_3 + \dots + ADD_n / RfDo_n$$

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้สามารถคำนวณหาค่าดัชนีความเสี่ยงรวมได้ดังนี้

$$HI = \sum HQ = (HQ_{Cu} + HQ_{Pb} + HQ_{Cd} + HQ_{Cr} + HQ_{Hg} + HQ_{As})$$

การหาค่า ADD โดยที่ค่า Ingestion Rates ของพืชกินใบที่ใช้ในการประเมิน มีค่าเท่ากับ 0.01 kg/day (สันฐิติ, 2549)

ค่า F_{ex} มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.2

ค่า EF มีค่าเท่ากับ 365 day/year

ค่า ED มีค่าเท่ากับ 70 year ซึ่งเป็นการบริโภคตลอดชีวิต

ค่า BW มีค่าเท่ากับ 61.6 kg (น้ำหนักโดยเฉลี่ยของผู้ใหญ่) (Yuan et al., 2007) และ 18.7 kg (น้ำหนักโดยเฉลี่ยของเด็กในช่วงอายุ 0-6 ปี) (Xu., 2001)

และค่า T_{avg} (day/year) มีค่าเท่ากับ $ED \times 365 = 25,550$ day/year ซึ่งเป็นการคำนวณในกรณีที่เป็นสารไม่ก่อมะเร็ง (Louvar et al., 1998)

ผลจากการประเมินความเสี่ยงของผู้บริโภคผักกาดขาวปลี พบว่า ที่การเติมตะกอนอัตราต่างๆ ไม่เป็นผลทำให้มีความเสี่ยงในการบริโภคผักกาดขาวปลี เนื่องจากผลการคำนวณ Hazard Quotient (HQ) มีค่าน้อยกว่า 1.0 ซึ่งแสดงว่ามีระดับความเสี่ยงต่ำกว่าผู้ที่บริโภค ที่มีการปนเปื้อนสูงกว่าระดับความปลอดภัย เมื่อพิจารณาดัชนีความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดการสะสมในร่างกาย จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณหาค่า HQ และ HI ได้ดังตารางที่ 37 และหากพิจารณาในกรณีที่นำตะกอนไปใช้ในพื้นที่ยกเกษตรที่ไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก จะเห็นได้ว่าการใส่ตะกอนทุกอัตราจะไม่มีความเสี่ยงอันเนื่องมาจากโลหะหนักทุกชนิด ดังตารางที่ 38

ตารางที่ 37 ค่า HQ และ HI ของผู้ที่บริโภคผักกาดขาวปลีที่ใส่ตะกอนอัตราต่างๆ

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	HQ _{Cu}	HQ _{Pb}	HQ _{Cd}	HQ _{Cr}	HQ _{Hg}	HQ _{As}	HI
0	0.00	0.04	0.04	0.47	0.15	0.36	1.06
1	0.00	0.03	0.19	0.33	0.13	0.29	0.97
2	0.01	0.03	0.09	0.44	0.16	0.31	1.04
4	0.01	0.03	0.13	0.38	0.08	0.36	0.99
6	0.00	0.25	0.17	0.38	0.13	0.27	1.20

ตารางที่ 38 ค่า HQ และ HI ของผู้ที่บริโภคผักกาดขาวปลีที่ใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ในกรณีที่ปลูกในดินไม่มีการปนเปื้อน

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	HQ _{Cu}	HQ _{Pb}	HQ _{Cd}	HQ _{Cr}	HQ _{Hg}	HQ _{As}	HI
1	0.00	-0.01	+0.15	-0.15	-0.02	-0.07	-0.10
2	-0.01	-0.01	+0.05	-0.03	+0.01	-0.04	-0.03
4	-0.01	-0.01	+0.09	-0.09	-0.07	0.00	-0.09
6	0.00	+0.21	+0.13	-0.09	-0.02	-0.09	+0.14

16. ผลของตะกอนต่อคุณสมบัติของดินในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี

16.1 ความเป็นกรด - ด่าง (pH)

หลังการเก็บเกี่ยวผักกาดขาวปลี พบว่า การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ไม่ทำให้ pH ของดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการใส่ตะกอนในอัตรา 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ทำให้ pH ของดินมีค่าเท่ากับ 5.3 5.1 4.9 5.0 และ 4.9 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 39

16.2 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ทำให้ดินหลังการเก็บเกี่ยวผักกาดขาวปลีมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการเติมตะกอนในอัตรา 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุร้อยละ 2.7 3.0 4.6 4.4 และ 4.7 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 40

16.3 ปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในดิน

จากผลการศึกษาปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในดินหลังการเก็บเกี่ยวผักกาดขาวปลี พบว่า การเติมตะกอนจากโรงงานเบียร์ในอัตรา 0 1 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ทำให้ดินมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกอนที่ใส่ กล่าวคือ ดินมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด เท่ากับ 0.18 0.24 0.27 0.28 และ 0.38 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 60 225 326 1143 และ 1966 แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เท่ากับ 2000 2560 2080 2800 และ 3000 และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เท่ากับ 550 560 600 660 และ 700 mg/kg ตามลำดับ ส่วนปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณตะกอนที่ใส่ โดยมีปริมาณเท่ากับ 400 420 400 440 และ 360 ตามลำดับ สำหรับโลหะหนักพวกทองแดง และสารหนู พบว่า การไม่ใส่และใส่ตะกอนอัตราต่างๆ มีแนวโน้มที่จะมีค่าไม่แตกต่างกันโดยมีปริมาณทองแดง เท่ากับ 22.6 22.5 20.3 22.6 และ 23.1 mg/kg ปริมาณสารหนู เท่ากับ 20.9 20.8 20.3 21.0 และ 21.3 mg/kg ตามลำดับ แต่ปริมาณของตะกั่วและแคดเมียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมตะกอน โดยมีปริมาณตะกั่ว เท่ากับ 39.7 47.7 21.7 20.2 และ 12.1 mg/kg ตามลำดับ แคดเมียมมีค่าเท่ากับ 0.9 0.6 0.7 0.1 และ 0.5 และปริมาณโครเมียมเท่ากับ 0.9 0.6 0.7 0.1 และ 0.5 mg/kg ตามลำดับ ส่วนปริมาณปรอทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยโครเมียมมีปริมาณ เท่ากับ 27.1 30.8 23.9 32.7 38.4 ปรอทมีค่าเท่ากับ 0.26 0.29 0.32 0.38 และ 0.31 mg/kg ตามลำดับ ดังตารางที่ 41

ตารางที่ 39 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของดิน

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	5.3	5.3	5.4	5.3b
1	5.3	5.0	5.3	5.1ab
2	4.8	4.7	4.8	4.9a
4	4.8	5.0	5.1	5.0ab
6	5.0	4.9	4.8	4.9a
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				3.7

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมี
 ค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 40 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (ร้อยละ)

อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)	จำนวนซ้ำ			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
0	2.5	2.7	2.9	2.7a
1	3.1	3.0	3.0	3.0a
2	4.5	4.6	4.6	4.6b
4	4.5	4.7	4.0	4.4b
6	4.7	4.6	4.7	4.7b
F-test อัตราตะกอน				**
CV (%)				4.9

หมายเหตุ ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรกำกับเหมือนกันจะมี
 ค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% โดยวิธี LSD

ตารางที่ 41 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในดินหลังการเก็บเกี่ยว
ผักกาดขาวปลี

ธาตุอาหารพืชและโลหะหนัก	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้				
	อัตราตะกอน (ตัน/ไร่)				
	0	1	2	4	6
Total N (%)	0.18	0.24	0.27	0.28	0.38
Available P(mg/kg)	60	225	326	1143	1966
Exchangeable K (mg/kg)	400	420	400	440	360
Exchangeable Ca (mg/kg)	2000	2560	2080	2800	3000
Exchangeable Mg (mg/kg)	550	560	600	660	700
Total Cu (mg/kg)	22.6	22.5	20.3	22.6	23.1
Total Pb (mg/kg)	39.7	47.7	21.7	20.2	12.1
Total Cd (mg/kg)	0.9	0.6	0.7	0.1	0.5
Total Cr (mg/kg)	27.1	30.8	23.9	32.7	38.4
Total As (mg/kg)	20.9	20.8	20.3	21	21.3
Total Hg (mg/kg)	0.26	0.29	0.32	0.38	0.31

วิจารณ์

ดินที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นดินพื้นที่สวนผักของเกษตรกร ในเขตจังหวัดนนทบุรี จากการศึกษาลักษณะสมบัติและองค์ประกอบบางประการแสดงดังตารางที่ 5 พบว่าดินมีคุณสมบัติเป็นดินเหนียว มีปริมาณไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำ มีปริมาณอินทรีย์วัตถุและฟอสฟอรัสอยู่ในระดับปานกลาง โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีปริมาณสูงมาก ส่วนแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในระดับสูง มีค่า pH 4.8 ก่อนข้างเป็นกรด และอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าระดับความเหมาะสมในการปลูกพืช ซึ่งอยู่ในช่วง 5.5-6.5 (ไพบูลย์, 2528) ในส่วนของการวิเคราะห์โลหะหนัก ได้แก่ Cu Pb Cd Cr As และ Hg พบว่า ดินที่ใช้ในการทดลองมีการตกค้างของโลหะหนักในดินสูง เนื่องจากเนื้อดินเป็นดินเหนียวทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง ส่งผลให้ดินมีความสามารถในการรองรับโลหะหนักได้ดี (U.S.EPA., 1983) รวมทั้งดินในพื้นที่ดังกล่าวมีการใช้ประโยชน์เพื่อการปลูกพืชผักมาเป็นระยะเวลานาน และมีการใช้สารกำจัดศัตรูพืชมาก ซึ่งสารเหล่านี้ส่วนใหญ่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ส่งผลให้มีการตกค้างของโลหะหนักบางชนิดในดิน

ตะกอนที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นสูงมากคิดเป็นร้อยละ 84.38 มีค่า pH 6.6 อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด คือ อยู่ระหว่าง 5.5-8.5 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง มีปริมาณธาตุอาหาร N และ P สูง ส่วน K อยู่ในระดับเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ธาตุอาหารในตะกอนน้ำเสียจากโรงงานเบียร์ของ จรภัย และคณะ (2529) พบว่า มีไนโตรเจน 4.70 % ฟอสฟอรัส 1.25 % และโพแทสเซียม 0.5 % ตามลำดับ สำหรับปริมาณโลหะหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณในปุ๋ยอินทรีย์มาตรฐานที่กำหนดโดยกรมวิชาการเกษตร (2550) พบว่า ตะกอนมีปริมาณ Cd และ Hg สูงกว่าค่าที่กำหนดเล็กน้อย ส่วน Cu Pb Cr และ As มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด สำหรับปริมาณ Cd และ Hg ที่สูงเกินมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์นั้นโดยส่วนใหญ่แล้วโลหะหนักที่ปนเปื้อนในเบียร์มักจะมาจากวัตถุดิบที่นำเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช และการใช้ปุ๋ย ดังนั้นจึงทำให้ในตะกอนมีการปนเปื้อนของโลหะหนักได้เช่นเดียวกัน (Jorge *et al.*, 2008)

ผลจากการใส่ตะกอนอัตรา 2 4 และ 6 ตัน/ไร่ ให้ผลผลิตน้ำหนักสดของผักคะน้าไม่แตกต่างกันและมากกว่าการไม่ใส่และใส่ตะกอนอัตรา 1 ตัน/ไร่ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การใส่ตะกอนอัตรา 4 ตัน/ไร่ มีแนวโน้มให้ผลผลิตสูงสุด (1,162.7 กก./ไร่) สูงกว่าที่อัตรา 6 ตัน/ไร่ สำหรับผักกาดขาวปลี พบว่า การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ให้ผลผลิตน้ำหนักสดไม่แตกต่างกัน และมากกว่า

การไม่ใส่ตะกอนแตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ การใส่ตะกอนอัตรา 4 ตัน/ไร่ มีแนวโน้มให้ผลผลิตสูงสุด (5,146.7 กก./ไร่) สูงกว่าการใส่ที่อัตรา 6 ตัน/ไร่ สาเหตุที่การใส่ตะกอนเพิ่มจาก 4 ตัน/ไร่ เป็น 6 ตัน/ไร่ กลับทำให้ผลผลิตของผักที่ใช้ในการทดลองมีแนวโน้มลดลงนั้น อาจเนื่องมาจากการใส่ตะกอนในอัตราที่สูงมากเกินไปจนเกิดความร้อนรวมทั้งสารพวก Intermediate products ที่อาจเป็นพิษต่อพืชในปริมาณที่มากจนส่งผลทำให้ผักมีการเจริญเติบโตลดลง (Dolar *et al.*, 1972)

ในการดูใช้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมของผักคะน้าและผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยวมีความสัมพันธ์กับผลผลิต กล่าวคือ ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นจากการใส่ตะกอน ทำให้ผักมีการดูใช้ธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้นด้วย

ในส่วนของคุณภาพโลหะหนักในผักคะน้าและผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว พบว่า ในผักคะน้าส่วนใหญ่การใส่ตะกอนมีผลทำให้ปริมาณโลหะหนักเพิ่มขึ้น ยกเว้น Pb และ As ส่วนของผักกาดขาวปลี การใส่ตะกอนมีแนวโน้มที่จะทำให้ Cd และ Cu เท่านั้นที่จะเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจจะเนื่องมาจากผักกาดขาวปลีมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าผักคะน้ามาก ในขณะที่การดูดกินโลหะหนักอาจจะไม่แตกต่างกันมาก ในส่วนของ Cu และ Cd ที่มีปริมาณการดูดกินทั้งในผักคะน้าและผักกาดขาวปลีมีค่าค่อนข้างสูงนั้น เนื่องจากในตะกอนมีปริมาณของโลหะหนักชนิดดังกล่าวปริมาณค่อนข้างสูง

จากการประเมินความเสี่ยงรวมของโลหะหนักต่างชนิดกัน พบว่า ผักคะน้าที่มีการใส่ตะกอนทุกอัตราสามารถนำมาบริโภคได้ สำหรับผักกาดขาวปลีที่ไม่ใส่ และที่ใส่ตะกอนอัตราการ 2 และ 6 ตัน/ไร่ มีค่า HI มากกว่า 1.0 แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาค่า HI ที่ได้จากการคำนวณจะมีเกณฑ์อยู่ในระดับที่เสี่ยง แต่เมื่อคิดเปรียบเทียบกับน้ำหนักสดจะมีความเข้มข้นต่ำกว่าในน้ำหนักแห้งที่นำมาใช้ในการคำนวณ เพราะฉะนั้นในการบริโภคผักคะน้าและผักกาดขาวปลีต้องบริโภคในปริมาณมาก โดยประมาณ 80-90 เท่า จึงจะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค ในขณะที่หากนำตะกอนไปใช้ในพื้นที่ยกเว้นที่ไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก การใส่ตะกอนทุกอัตราไม่มีความเสี่ยงอันเนื่องมาจากโลหะหนักทุกชนิด ทั้งในผักคะน้าและผักกาดขาวปลี

ผลของตะกอนต่อความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน มีความแตกต่างกันไม่มากที่การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ เนื่องจากตะกอนมีค่าค่อนข้างเป็นกรด และดินในพื้นที่ที่มีสภาพเป็นกรดจัด ตะกอนจึงมีผลกระทบต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ของดินน้อย

การจัดการตะกอนโดยการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นปุ๋ยอินทรีย์ในพื้นที่ทำการเกษตร นับว่าเป็นแนวทางการจัดการที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากตะกอนมีลักษณะและคุณสมบัติเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิต (อรรณ, 2529) ทั้งยังเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยยกระดับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินให้สูงขึ้น โดยเฉพาะดินในประเทศไทยที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพอากาศร้อนชื้นที่มีผลทำให้อัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในดินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การทำการเกษตรติดต่อกันเป็นเวลานานโดยไม่มีการเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้แก่ดินอย่างเพียงพอ และการใช้ที่ดินอย่างไม่เหมาะสมตามสมรรถนะของพื้นที่ทำให้อินทรีย์วัตถุในดินลดลงเนื่องจากการถูกชะล้าง (จงรักษ์ และคณะ, 2529)

ดังนั้นการนำตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์มาใช้เป็นปุ๋ย จึงเป็นวิธีการที่จะช่วยลดของเสียที่เป็นปัญหาต่อสภาพแวดล้อม และหากต้องการให้ตะกอนมีศักยภาพในการเป็นปุ๋ยอินทรีย์จำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในพื้นที่ รวมถึงการปนเปื้อนของโลหะหนักของพื้นที่ที่จะนำไปใช้ หากมีการปนเปื้อนของโลหะหนักมากเกินไปจนอาจเป็นพิษต่อพืช จำเป็นต้องมีการกำจัด หรือปรับปรุงคุณภาพก่อนการนำไปใช้ในพื้นที่ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนทั้งในดินและพืช อันจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ในระบบห่วงโซ่อาหารต่อไป

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ตะกอนจากโรงงานเบียร์ ของบริษัทไทยเอเชีย แปซิฟิค บรีวเวอรี่ จำกัด สามารถนำมาใช้ในการปลูกพืชได้ เนื่องจากมีปริมาณธาตุอาหาร N P K สูง คือ ร้อยละ 4.11 2.24 และ 0.50 ตามลำดับ สำหรับปริมาณโลหะหนักโดยส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งกำหนดโดยกรมวิชาการเกษตร (2550)
2. การดูค่าใช้ธาตุอาหาร N P K ของผักคะน้าและผักกาดขาวปลี มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ตะกอนจนถึงการใส่ตะกอนอัตรา 4 ตัน/ไร่ หลังจากนั้นการดูค่าใช้มีแนวโน้มลดลงตามอัตราการเจริญเติบโตของผักที่มีแนวโน้มลดลง
3. การสะสมโลหะหนักในผักคะน้าและผักกาดขาวปลี ไม่เพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ตะกอน และมีปริมาณการสะสมใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาความเสี่ยงในการบริโภคผัก (ในกรณีที่ดินไม่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก) การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ ไม่ก่อให้เกิดการสะสมโลหะหนักในระดับที่มีความเสี่ยงต่อการบริโภค
4. การใส่ตะกอนมีผลทำให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ตะกอน รวมทั้งปริมาณธาตุอาหารก็เพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ตะกอนเช่นเดียวกัน
5. การใส่ตะกอนอัตราต่างๆ มีแนวโน้มทำให้ดินมีการสะสมเฉพาะปรอทเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาผลของตะกอนต่อการนำไปปรับใช้กับพืชผักชนิดอื่นๆ รวมทั้ง พืชต่างชนิดกัน เช่น แตงกวา พริก รวมทั้งไม้ผล เช่น ชมพู ขนุน มะม่วง และกล้วย เพราะพืชมีการเจริญเติบโตและดูดสิ่งโลหะหนักที่แตกต่างกัน รวมทั้งศึกษาปริมาณการใส่ตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ในปริมาณที่เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิด

2. ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงระยะเวลาในการตกค้างของปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในดินของการปลูกรอบถัดไปเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการให้ผลผลิตพืช โดยการปลูกพืชติดต่อกันในพื้นที่เดิมและมีการใส่ตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์เป็นระยะเวลา 2-3 รอบการเก็บเกี่ยว เนื่องจากผลการทดลอง พบว่า ที่อัตราการใส่ตะกอน 4 ตัน/ไร่ มีผลต่อผักคะน้าและผักกาดขาวปลี ซึ่งให้ผลผลิตในระยะเก็บเกี่ยวสูงสุด แต่ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน พบว่า มีปริมาณการตกค้างอยู่ในดินเพิ่มมากขึ้นตามอัตราการใส่ตะกอน ดังนั้น ในการปลูกรอบต่อไป อัตราที่เหมาะสมต่อการให้ผลผลิตของพืช ที่ระดับการใส่ตะกอนอัตรา 1 หรือ 2 ตัน/ไร่น่าจะให้ผลผลิตพืชสูงสุด

3. ควรมีการศึกษาการใช้ประโยชน์จากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์กับดินในพื้นที่อื่นเพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะหรือคุณสมบัติของดินหลังการใส่ตะกอน รวมทั้งปริมาณการดูดกินธาตุอาหาร และการปนเปื้อนโลหะหนักในพืช

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2548. **คู่มือปุ๋ยอินทรีย์ (ฉบับนักวิชาการ).** โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

กรมวิชาการเกษตร. 2550. **คุณสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์ แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2)** โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2548ก. คาน้ำ. **ห้องสมุดความรู้การเกษตร. แหล่งที่มา :**

<http://www.doae.go.th/LIBRARY/html/detail/kana/index.htm>, 15 เมษายน 2552.

กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2552. **การปลูกผักกาดขาวปลี.**

กรมส่งเสริมการเกษตร. กรุงเทพฯ.

กลุ่มงานวิจัยความอุดมสมบูรณ์ของดินและปุ๋ยพืชไร่. 2541. **การใช้ปุ๋ยอินทรีย์กับพืชไร่เศรษฐกิจ.**

กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

กลุ่มงานวิจัยดินและปุ๋ยพืชสวน. 2539. **คำแนะนำการใช้ปุ๋ยพืชสวน.** กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2544. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. ครั้งที่ 9. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.**

จรงค์ จันทร์เจริญสุข, ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์, ศุภพงศ์ ภูวนะพันธุ์, ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, สมชาย กริธาภิรมย์, สมบูรณ์ มั่นความดี และสุริยา สาสนรักกิจ. 2529. **การใช้วัสดุเหลือใช้เพื่อประโยชน์ทางการเกษตร.** รายงานการวิจัย ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

จำลอง วรรณโครต. 2539. อิทธิพลของปุ๋ยหมักบางชนิดต่อถั่วเหลืองฝักสดใน 10 ชุดดินบริเวณภาคกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จันทน์ แจ่มแสงทอง. 2550. การบำบัดสารมลพิษโดยใช้เทคโนโลยี. กลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). กรุงเทพฯ.

ชัยวัฒน์ ต่อสกุลแก้ว, ชีระยุทธ กลิ่นสุคนธ์ และปัญญา เต็มเจริญ. 2536. หลักการทางพิษวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาสรีรวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ.

ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์. 2536. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

นพรัตน์ ผาสุพล. 2548. การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ระเหยง่ายและโลหะหนักในน้ำใต้ดิน กรณีศึกษาพื้นที่อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 98 (พ.ศ.2529) เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน.

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตร.

ประพิศ แสงทอง และภavana ลิกขนานนท์. 2544. การปลดปล่อยไนโตรเจนในดินจากการใส่กากตะกอนน้ำเสีย. วารสารดินและปุ๋ย 23: น. 99-110.

ปรีดา พากเพียร, เกศรัชฎา กลั่นกรอง, ประพิศ แสงทอง และพิชิต พงษ์สกุล. 2547 ข. แนวทางการควบคุมและการบำบัดสารโลหะหนักที่ตกค้างในดิน. วารสารดินและปุ๋ย 26:31-36.

ปรัชญา ชาญญาติ, พืษากร ลุ่มทอง และฉวีวรรณ เหลืองวุฒิโรจน์. 2540. “การผลิตปุ๋ยหมักเป็น
อุตสาหกรรมในกลุ่มอินทรีย์วัตถุและวัสดุเหลือใช้กองอนุรักษ์ดินและน้ำ กรมพัฒนาที่ดิน
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์” การปรับปรุงดินด้วยอินทรีย์วัตถุ. กรุงเทพฯ.

ไพบูลย์ ประพุดิธรรม. 2528. เคมีของดิน . ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เมฆ จันทน์ประยูร. 2541. ผักสวนครัว ก้าวสำคัญแห่งการพึ่งตนเอง. โรงพิมพ์แอล ที เพรส,
กรุงเทพฯ.

ไมตรี สุทธิจิตต์. 2531. สารพิษรอบตัวเรา. โรงพิมพ์ดาวคอมพิวกราฟิค, เชียงใหม่.

วรกาย อุส่าห์. 2541. ปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในพืชที่ปลูกโดยใช้วัสดุปลูกผสมระหว่าง
ตะกอนน้ำเสียและดินในท้องที่จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วสันต์ กฤษณาจักษ์. 2544. การปลูกผัก. โครงการหนังสือเกษตรชุมชน, กรุงเทพฯ.

วิภา แซ่ห่อ. 2541. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจุกตัวและอัตราผลตอบแทนต่อ
สินทรัพย์ของอุตสาหกรรมเบียร์ในประเทศไทย. การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองระดับ
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2545. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุนทร เรืองเกษม. 2539. คู่มือการปลูกผัก. ม.ป.ท.

สันฐิติ แก้วศรี. 2549. การใช้ประโยชน์ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียในแปลงปลูกพืชผัก
สวนครัว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุวรรณีย์ ภูธรราช. 2537. การสะสมของสารหนูในเนื้อเยื่อต่างๆ ของพืชบางชนิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุเทพ ทองแพ. 2551. เอกสารประกอบการอบรม ดิน-ปุ๋ย-น้ำ เพื่อการเกษตร. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรรพรรณ ศิริรัตน์พิริยะ. 2522. อิทธิพลของตะกั่ว แคดเมียมต่อการเจริญเติบโตและองค์ประกอบทางเคมีของพืชอาหารสัตว์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

_____. 2525. ผลกระทบของปริมาณโลหะหนัก (ตะกั่ว) จากการคมนาคมต่อพืชอาหารสัตว์ในเขตกรุงเทพมหานคร. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

_____. 2529. การใช้ประโยชน์ตะกอนน้ำเสียในรูปของปุ๋ยสำหรับพื้นที่เกษตรกรรม จังหวัดฉะเชิงเทรา. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อุไรวรรณ ไอยสุวรรณ. 2545. การใช้ประโยชน์ตะกอนของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารทะเลสำหรับเป็นปุ๋ยอินทรีย์และสารปรับปรุงดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Alloway B.J., 1995. **Heavy Metals in Soils**. (Second edition). Blackie Academic and Professional, an Imprint of Chapman & Hall, Wester Cleddens Road, Bishopbriggs, Glasgow G64 2NZ, UK.

- Chaney, R.L. 1982. Fate of toxic substances in sludge applied to cropland. Cited by H. Kuntz, E. pluquet, J.H. Stark, and S. Coopoa. **Current Techniques for the Evaluation of Metal Problems due to Sludge**, pp. 394 - 403. In P.L. Hermite and H. Ott (eds.). Processing and Use of Sewage Sludge. D. Reidal Publishing Company, Holland.
- Chongrak Polprasert. 1989. **Organic Waste Recycling**. Great Britain: John Wiley & Sons Ltd.
- Davies, Brian E. 1980. **Applied Soil Trace Elements**. Great Britain: John Wiley and Sons.
- Davis, R.D. 1984. **Processing and Use of Sewage Sludge**. "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" . Holland: D. Reidal Publishing Company, p. 349-357.
- Diaz, M.A., and Polo, A. 1988. Effect of two sewage sludge in the rye-grass yield and nutrient content. In A.A. Orio (ed.), **Environmental Contamination**, Edinburgh : CEP Consultants Ltd. pp. 428-430.
- Dolar, S.C., J.R. Boyle and D.R. Keeney. 1972. Paper mill sludge disposal on soil: effects on the yield and mineral nutrition of Oats (*Avena Sativa* L.). **J. Environ. Qual.** 1 : 405 - 409.
- Ferrer, o.J., Gupta, S.K., and Stauffer, W. 1984. Sewage Sludge as a source of Phosphorus and consequences of Phosphorus accumulation in soils. In P.L' Hermite, and H. Ott (eds.), **Processing and Use of Sewage Sludge**, pp. 279-293. Halland: D. Reidal Publishing Company.
- Follett, Ray H., Murphy, Larry S., and Donahue, Roy L. 1981. **Fertilizers and Soil Amendments**. New Jersey: Prentice Hall Inc.

- Genevini, P.L., P. Zaccheo, A. Garbarino and V. Mezzanotte. 1984. Utilization and agricultural value of dried digested sewage sludge from a domestic and industrial sewage plant, pp. 306-309. In P.L. Hermite and H. Ott (eds.). **Processing and Use of Sewage Sludge**. D. Reidal Publishing Company, Holland.
- Gilles, J.A., R.L. Kashwaha, C.P. Jwang and R.J. Frod. 1989. Heavy metal residues in soil and crops for applications of anaerobically digested sludge. **J.WPCF**. 61 : 1673-01677.
- Guidi, G. and J.E. Hall. 1984. Effect of sewage sludge on the physical and chemical properties of soils, pp. 295-305. In P.L' Hermite and H. Ott (eds.). **Processing and Use of Sewage Sludge**. D. Reidal Publishing Company, Holland.
- Hampshire Research Institute. 1995. **Risk Assistant**. Version 1.1 For Windows. Thistle Publishing Inc., Alexandria, VA.
- Hasit, Y. 1986. Sludge treatment. Utilization and Disposal. **J. WCSF**. 58 : 510-515.
- Hemphill, IR.D. 1982. Sweet corn response to application of three sewage sludges. **J. Environ. Qual**. 11 : 191-196
- Jones, Jr., J.B., B. Wolf and H.A. Mills. 1991. **Plant Analysis Handbook**. Micro Macro Publishing, Inc., Georgia. 213 p.
- Jorge G. Ibanez, Alejandra Carreon-Alvarez, Maximiliano Barcena-Soto, Norberto Casillas. 2008. Metal in alcoholic beverages: A review of sources, effects, concentrations, removal, speciation, and analysis. **Journal of food Composition and Analysis** 21 : 672-683.
- Kelling, K.A., Peterson, A.E., Walsh, L.M., Ryan, J.A., and Keeney, D.R. 1977. A Field Study of the Agricultural Use of Sewage sludge : I Effect on Crop Yield and Uptake of N and P. **J. Environ. Qual**. 6 : 339-344.

Lagerwerff, J.V., W.H. Armiger and A.W. Specht. 1973. **Uptake of Lead by Alfalfa and Corn from Soil and Air**. Soil. Sci. 115 : 455-459.

Louvar, J.F. and B.D. Louvar. 1998. **Health and Environmental Risk Analysis**. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 85 p.

Luc Fillaudeau, Pascal Blanpain-Avet, Georges Daufin. 2006. Water management in brewing industries. **Journal of Cleaner Production** 14 : 463-471.

Lutrick, M.C., Roberton, W.K., and Cornell, J.A. 1982. Heavy application of a liquid digested sludge on three ultisol : II effects on mineral uptake and crop yield. **J. Environ Qual.** 11 : 283-284.

Manson, J. 1988. **Sewage sludge to land. Water & Waste Treatment.** 31 : 4.

Milar, R.H. 1974. Factor affecting the decomposition of an anaerobically digested sewage sludge in soil. **J. Environ. Qual.** 12 : 153-156.

Mingli Huang, Shenglu Zhou, Bo Sun, Qiguo Zhao. 2008. Heavy metals in wheat grain: Assessment of potential health risk for inhabitants in Kunshan, China. **J. Science of the Total Environment.** 405: 54-61.

Mitchell, G.A., Bingham, F.T. and Page, A.L. 1978. Yield and Metal Composition of Lettuce and wheat Grown on Soils Amended with Sewage Sludge Enriched with Cd, Cu, Ni and Zn. **J. Environ. Qual.** 7: 165-171.

Mohr, H.D. 1979. **Effect of garbage sewage-sludge compost on the heavy metal content of vineyard soil, grapevines organs and must**. Weinberg Keller. (26) : p.333-344.

- Mortvedt, J.J., and Giordano, P.M. 1975. Response of corn to zinc and chromium in municipal wastes applied to soil. **J. Environ. Qual**, 4: 170-174.
- Orawan Siriratpiriya, 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**. 64:28.
- Robertson, W.K., Lutrick, M.C., and Yuan, T.L. 1982. Heavy applications of liquid digested sludge on three: I effect on soil chemistry. **J. Environ. Qual**. 11: 278-282.
- Sheaffer, C.C., Decker, A.M., Chaney, R.L., and Douglass, L.W. 1979. Soil temperature and sewage sludge effects on corn yield and macronutrient Content. **J. Environ. Qual**. 8 : 450-454.
- Sommer, L.E., D.W. Nelson and K.J. Yosi. 1976. Variable nature of chemical composition of sewage sludge. **J. Environ. Qual**. 5 : 303-306.
- Terence, H. 2009. **Soil Organisms & Nitrogen Cycle**. Cooper Regents of the University of Minnesota. The University of Minnesota is an equal opportunity educator and employer.
- U.S.EPA. 1983. **Process Design Manual for Land Application of Municipal Sludge**. EPA/625/1-83-016, United State Environment Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio.
- U.S.EPA. 1989. **Risk Assessment Guidance for Superfund**. Human health evaluation manual (Part A., interim final, vol. I. Washington (DC): United States Environmental Protection Agency. EPA/540/1-89/002.

U.S.EPA. 1998. **Toxicological Review of Hexavalent Chromium**. Cas. No. 18540-29-

9, United state environment protection agency, Office of research and development,
Washington DC. 77 p.

_____. 2000. **Handbook for Non - cancer Health Effects Evaluation**. Washington
(DC) : US Environmental Protection Agency.

_____. 2002. **Region9, Preliminary Remediation Goals**.
<http://www.epa.gov/region09/waste/sfund/prg.table>.

_____. 2004. **Integrated Risk Information System (IRIS)**. Lead and compounds
(inorganic)(CASRN 7439-92-1). Last Revised 07/08/2004. Available on-line at :
<http://www.epa.gov/iris/;2004>.

Vigerust, E., Selmer-Olsen, A.R., and Orawan Siriratpiriya. 1987. Utilization of sewage sludge
especially in regard to its effect on heavy metals in plant. In J. Lag (ed.), **The Nowagian
Academy of Science and Letters on Commercial Fertilizers and Geomedical
Problems**. pp. 121-139. Oslo : Statens Kornforpetning.

Xu L. 2001. **InveStigation of the Body Development of 1526 Preschoolers in Suzhou City**.
Acta Acad Med Suzhou; 21(1):106-7.

Yuan Bj, Pan XQ, Dai Y, Shi XM. 2007. **Changes in the Dietary Structure and Nutrition
Status of the Inhabitants in Jiangsu Province**. Acta Nutrimenta Sinica; 29(6):569-72.



ภาคผนวก



ภาพผนวกที่ 1 แปลงทดลองสำหรับใช้เพื่อการปลูกผักคะน้าและผักกาดขาวปลี



ภาพผนวกที่ 2 ชั่งตะกอนเพื่อนำไปใส่ในแต่ละแปลงย่อย



ภาพผนวกที่ 3 การใส่ตะกอนในอัตราต่างๆ ลงแปลงทดลอง



ภาพผนวกที่ 4 คลุกเคล้าตะกอนและดินในแต่ละแปลงย่อยให้ผสมเข้ากัน



ภาพผนวกที่ 5 ลักษณะของแปลงทดลองที่พร้อมจะหยอดเมล็ดผัก



ภาพผนวกที่ 6 วัดระยะห่างของแถวและระหว่างต้นเพื่อเตรียมหยอดเมล็ดพืชลงแปลง



ภาพผนวกที่ 7 การหยอดเมล็ดผักลงแปลงทดลองตามระยะห่าง 25×25 เซนติเมตร



ภาพผนวกที่ 8 การรักษาความชื้นในดินเมื่อผ่านกระบวนการให้น้ำ



ภาพผนวกที่ 9 ลักษณะโดยรวมของการดูแลรักษาพืชในแปลง



ภาพผนวกที่ 10 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของผักคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยว (45 วัน)



ภาพผนวกที่ 11 ผลของตะกอนอัตราต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของผักกาดขาวปลีที่ระยะเก็บเกี่ยว (45 วัน)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวอัมรिता คชภักดี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	21 กุมภาพันธ์ 2527
สถานที่เกิด	พัทลุง
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	เจ้าหน้าที่โครงการ (ฝ่ายวิจัยและวิเคราะห์ผลกระทบ สิ่งแวดล้อม)
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	บริษัท ไทยเอเชีย แปซิฟิค บรืวเวอรี จำกัด ผ่านโครงการ ศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอัน เนื่องมาจากพระราชดำริ