หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของดินจากพื้นที่เกษตรกรรม ต.บางแก้ว อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา และสมบัติของกากตะกอนจาก anaerobic digester ของโรงกำจัดน้ำเสียห้วยขวาง (ต่อไปจะย่อว่า "ADS") และกากตะกอนจาก aeration tank ของโรงงานฆ่าสัตว์สุขาภิบาล บางแค (ต่อไปจะย่อว่า "ATS")

4.1.1 สมบัติของดินและกากตะกอนก่อนเริ่มทำการทดลอง

4.1.1.1 ดิน

จากการศึกษาสมบัติบางประการของดิน (ตารางที่ 4.1) พบว่า ค่า pH ของดินอยู่ในระดับ 4.00 แสดงว่าดินมีสภาพความเป็นกรดรุนแรง ซึ่งจะมีผลทำให้ระดับของธาตุอาหารบางชนิดในดินเปลี่ยนแปลงไปได้ เช่น ฟอสฟอรัสจะถูกตรึงให้อยู่ในรูปของเหล็กและอลูมินัมฟอสเฟตซึ่งยากแก่พืชที่จะใช้ประโยชน์ อีกทั้งพวกจุลธาตุอาหารบางชนิด เช่น เหล็ก แมงกานีส และทองแดง จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ง่ายและมีอยู่ในสารละลายดินเป็นจำนวนมาก จนบางครั้งอาจเกิดความเป็นพิษต่อพืชที่ปลูกได้ นอกจากนี้ กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินที่เป็นกรดมาก ๆ ยังดำเนินไปค่อนข้างจำกัด จึงมีคำแนะนำว่าดินควรถูกปรับสภาพให้มีค่า pH อย่างน้อย 6.5 เพื่อลดความเป็นไปได้ของการเกิดความเป็นพิษของโลหะ (King and Morris, 1972b) การปลูกพืชโดยใช้กากตะกอนควรปลูกบนดินที่มี pH มากกว่า 6.5 เช่นกัน (Hyde et al., 1979; Kuntz et al., 1984) จากสาเหตุดังกล่าวข้างต้นจึงได้ทำการเติมปูนในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ช่วยยกระดับ pH ของดินให้อยู่ในช่วงเป็นกลาง (การวิเคราะห์ดินหลังจากใส่แคลเซียมคาร์บอเนตได้ค่า pH เฉลี่ย 6.8) ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น และเพื่อมิให้ pH ของดินเมื่อเริ่มการทดลองมีอิทธิพลต่อการทดลองทั้งเรื่องการเจริญเติบโตและปริมาณธาตุอาหารในดินและผักคะน้าที่ศึกษา

ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าเท่ากับ 1.72% ซึ่งเมื่อเทียบกับที่เล็ก (2522) อ้างถึงเกณฑ์ของกองจำแนกที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน (ตาราง 4.2) แสดงว่าดินที่ใช้ทดลองนี้ มี

ความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง และเมื่อเปรียบเทียบต่อเนื่องไปถึง ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) ในดินซึ่งมีค่าเท่ากับ 27.78 ppm. และค่าโปตัสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K) เท่ากับ 226.60 ppm. แล้ว จะพบว่า ดินมีปริมาณของฟอสฟอรัสสูง โปตัสเซียมสูงมาก ตามลำดับอีกด้วย

ไนโตรเจนทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ คือ 606.5 ppm. อัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนทั้งหมดและอินทรีย์คาร์บอน (C/N) จึงมีค่าประมาณ 16 : 1 ดินนี้จึงน่าจะมีการสลายตัวช้า เพราะการสลายตัวจะเป็นไปได้ดีนั้น อัตราส่วนที่เหมาะสมกับจุลินทรีย์ดิน C/N ratio จะประมาณ 10:1 หรือต่ำกว่า (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2526; Jones, 1979)

ส่วนองค์ประกอบที่เป็นโลหะหนัก เลือกศึกษา 7 ชนิดในดิน คือ แคดเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิเกิล ตะกั่ว และสังกะสี นั้น เป็นค่าที่ได้จากการสกัดดินด้วย 0.005 M DTPA เพื่อหาปริมาณของโลหะหนักในรูปที่อาจเป็นประโยชน์ต่อพืช คือ พืชอาจสามารถดูดขึ้นไปได้ (plant available form) เนื่องจากปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดินบางครั้งก็ไม่สามารถใช้เพื่อประเมินผลของโลหะหนักต่อพืชได้ เพราะพืชมีความสามารถดูดโลหะหนักขึ้นไปเพียงบางส่วนของปริมาณทั้งหมดที่มีในดินเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การจะตัดสินถึงโลหะหนักในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ขึ้นกับวิธีและน้ำยาสกัดที่ใช้สกัดดินด้วย ซึ่งแตกต่างกันไปตามสมบัติทางเคมีของน้ำยาสกัด วิธีการสกัด ชนิดของดินและธรรมชาติของธาตุที่จะศึกษา (Cottenie et al., 1984) DTPA เป็นน้ำยาสกัดอย่างอ่อน เหมาะสมที่จะใช้เพื่อสกัดหาปริมาณโลหะหนักในรูปดังกล่าว ระดับวิกฤตสำหรับจุลธาตุอาหารในดินที่สกัดด้วย DTPA มีดังนี้ ทองแดง 0.2 ppm. เหล็ก 4.5 ppm. แมงกานีส 1.0 ppm. และสังกะสี 0.8 ppm. (Lindsay, 1979) ดินที่นำมาทดลองจึงมีค่าจุลธาตุอาหารทั้ง 4 สูงกว่าระดับวิกฤต ส่วนธาตุนิเกิลและตะกั่วในดินพบในปริมาณต่ำ คือน้อยกว่า 1 ppm. โดยเฉพาะแคดเมียมมีค่าต่ำมากจนเกินความสามารถของเครื่องมือที่จะวิเคราะห์ได้ แสดงว่าเมื่อพิจารณาในเรื่องโลหะหนักที่เป็นพิษแล้ว ดินที่นำมาทดลองนี้ไม่ได้ถูกปนเปื้อนจากสารมลพิษจากสิ่งแวดล้อมมากนัก โดยสามารถพิจารณาเทียบกับค่าปริมาณโลหะหนักสูงสุดที่ยอมรับให้มีได้ในดินเกษตรกรรม ตามที่ CEC (Commission of the European Communities) แนะนำไว้ว่าสำหรับแคดเมียม ไม่ควรเกิน 1 ppm. ทองแดง 50 ppm. นิเกิล 30 ppm. ตะกั่ว 50 ppm. และสังกะสี 150 ppm. (Webber et al., 1984)

4.1.1.2 กากตะกอน ADS และ ATS

จากองค์ประกอบของกากตะกอน ADS และ ATS (ตารางที่ 4.1) พบว่า อินทรีย์คาร์บอนมีค่า 30.40% และ 29.50% ส่วนไนโตรเจนทั้งหมดมีค่า 2.87% และ 2.76% สำหรับกากตะกอนทั้ง 2 ชนิดตามลำดับ จึงทำให้อัตราส่วนของอินทรีย์คาร์บอนกับไนโตรเจนทั้งหมดของกากตะกอนทั้ง 2 ชนิด มีค่าประมาณ 10 : 1

การวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจน เป็นขั้นตอนแรกในการตัดสินคุณภาพที่จะใช้กากตะกอนเป็นปุ๋ย เพราะอัตราส่วนของ C/N สำคัญมากในกระบวนการย่อยสลายเมื่อใส่ลงในดิน อินทรีย์วัตถุที่มีอัตราส่วนของ C/N ช่วงกว้าง คือ มากกว่า 20 การสลายตัวจะเป็นไปได้ช้า หรือจุลินทรีย์จะนำเอาไนโตรเจนจากดินมาใช้ (Immobilization) ซึ่งจะทำให้ปริมาณไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชลดลง แต่อินทรีย์วัตถุที่มีอัตราส่วนของ C/N น้อยกว่า 20 ไนโตรเจนจะเปลี่ยนจากอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนได้โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน และปลดปล่อยแอมโมเนียมและไนเตรตไนโตรเจน ซึ่งเป็นรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ โดยที่การสลายตัวจะเป็นไปได้ดีเมื่ออินทรีย์วัตถุมีอัตราส่วนของ C/N ประมาณ 10:1 หรือต่ำกว่านี้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2526; Jones, 1979) จากเหตุผลดังกล่าว ชี้ให้เห็นว่ากากตะกอนทั้ง 2 ชนิดที่ศึกษามีอัตราส่วนของ C/N เหมาะกับการย่อยสลายของจุลินทรีย์ดิน

กากตะกอนทั้ง 2 ชนิด คาดว่ามีอินทรีย์ไนโตรเจนมากกว่าอนินทรีย์ไนโตรเจน โดยประเมินจากค่าของแอมโมเนียมและไนเตรตที่วิเคราะห์ได้เทียบกับไนโตรเจนทั้งหมด อินทรีย์ไนโตรเจนนี้ พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันที ต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายในดินก่อน จึงจะเปลี่ยนจากอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจน ซึ่งต่างจากปุ๋ยเคมีที่มีไนโตรเจนในรูปที่พืชใช้ได้ทันที คือ อนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น ปุ๋ยยูเรีย แอมโมเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมไนเตรต เป็นต้น (Jones, 1979) การใส่กากตะกอนในอัตราสูง จึงต้องอาศัยเวลาที่มากกว่าในการย่อยสลาย ทำให้ยังคงมีไนโตรเจนตกค้างในดินในรูปอินทรีย์วัตถุ ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นไนเตรตที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ในเวลาต่อมา (Sabey et al., 1977) และเป็นสาเหตุให้ผลผลิตของพืชในฤดูปลูกต่อมามีผลผลิตเพิ่มขึ้นได้อีก (Kelling et al., 1977) แต่อาจมีผลเสียที่ว่า อัตราการใส่สูง ๆ จะมีผลต่อกระบวนการ nitrification ในดินได้ (Premi and Cornfield, 1971 ; Milne and Graveland, 1972)

ปริมาณโลหะหนักที่วิเคราะห์ในกากตะกอน (ตาราง 4.1) เมื่อวิเคราะห์ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยใช้ 0.005 M DTPA เป็นน้ำยาสกัด ADS มีปริมาณของเหล็ก นิเกิล และตะกั่ว สูงกว่า ATS แต่มีปริมาณแคดเมียม ทองแดง แมงกานีส และสังกะสีต่ำกว่า ส่วนเมื่อวิเคราะห์ในรูปโลหะหนักทั้งหมด ADS มีปริมาณของแคดเมียม นิเกิล และตะกั่ว สูงกว่า ATS

เมื่อเทียบกับที่ Webber และคณะ (1984) รวบรวมค่าปริมาณของโลหะหนักที่ยอมรับให้มีได้ในกากตะกอน ของประเทศต่าง ๆ ในยุโรป มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม/กิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง พบว่า แคดเมียมอยู่ในช่วง 8-30 ทองแดง 500-3000 แมงกานีส 500-3000 นิเกิล 30-500 ตะกั่ว 300-1200 และสังกะสี 1000-10000 ส่วน CEC แนะนำถึงปริมาณนี้ว่า สำหรับแคดเมียม 20 ทองแดง 1000 นิเกิล 300 ตะกั่ว 750 และสังกะสี 2500 ซึ่งแสดงว่า กากตะกอน ADS และ ATS เมื่อเทียบกับเกณฑ์ทางยุโรปแล้ว สามารถยอมรับให้ใช้ได้สำหรับพื้นที่เกษตรกรรม

พารามิเตอร์ที่ใช้วัดความเป็นพิษของโลหะหนักที่มีปนกันอยู่หลายชนิดนั้น พารามิเตอร์ชนิดหนึ่งคือ "Zinc equivalent" (ADAS, 1971) เกณฑ์นี้คิดจากปริมาณสังกะสี ทองแดง และนิเกิลทั้งหมดในกากตะกอน ซึ่งได้จากข้อสมมุติฐานที่ว่า เมื่อใส่กากตะกอนลงในดิน ทองแดงจะมีความเป็นพิษ 2 เท่า และนิเกิลจะมีความเป็นพิษ 8 เท่าของสังกะสี ดังนั้น ผลของความเป็นพิษต่อพืชจะเนื่องมาจากโลหะเหล่านี้บวกกัน คือ ปริมาณสังกะสีทั้งหมดบวกกับ 2 เท่าของปริมาณทองแดง บวกกับ 8 เท่าของปริมาณนิเกิลในกากตะกอนโดยคิดจากน้ำหนักแห้ง ผลที่ได้จะใช้ประเมินศักยภาพความเป็นพิษของกากตะกอน ซึ่ง ADAS (1971) และ Webber (1972) เสนอว่าระดับของ Zinc equivalent 250 ppm. จะก่อให้เกิดพิษต่อพืชได้ แต่ค่าของ Zinc equivalent นี้ไม่แน่นอน เพราะมีรายงานของ Mitchell และคณะ (1978) ที่พบว่า ค่า Zinc equivalent ถึง 7 เท่าของ 250 ppm. ยังไม่มีผลต่อพืชที่ปลูกบนดิน calcareous ในขณะที่ 3 เท่าของระดับนี้ทำให้เกิดการลดลงของผลผลิตสำหรับพืชที่ปลูกบนดิน noncalcareous แสดงถึงว่า ธรรมชาติของดินและพืชเองมีผลอย่างมากต่อความเป็นพิษของสังกะสี ทองแดง และนิเกิล ดังนั้น แม้ว่ากากตะกอน ADS และ ATS จะมีค่า Zinc equivalent สูง แต่ก็ไม่สามารถชี้ชัดลงไปได้ว่าจะเป็นพิษต่อพืช เพราะการปรับสภาพของดินให้อยู่ในช่วง pH เป็นกลาง ทองแดงและสังกะสีจะละลายออกสู่สารละลายดินได้น้อยลง รวมทั้งเมื่อพิจารณาถึงปริมาณทั้งหมดและปริมาณในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชนั้น ปริมาณของทองแดง นิเกิล และสังกะสีที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณทั้งหมดที่มีในกากตะกอน

นอกจากค่า Zinc equivalent แล้ว อัตราส่วนระหว่างแคดเมียมและสังกะสีก็เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ประเมินความเป็นพิษได้ อัตราส่วนควรจะน้อยกว่า 1% เพราะที่อัตราส่วนนี้จะทำให้เกิดความเป็นพิษของสังกะสีก่อนที่การสะสมของแคดเมียมในห่วงโซ่อาหารจะเป็นปัญหาขึ้นมา (Chaney, 1974 อ้างถึงใน Cunningham et al., 1975b) เมื่อคิดอัตราส่วนของแคดเมียมและสังกะสีสำหรับ ADS และ ATS ได้ค่า 0.003% และ 0.002% ตามลำดับ ดังนั้นก่อนที่แคดเมียมในกากตะกอนทั้ง 2 จะก่อให้เกิดพิษ พืชจะเกิดความเป็นพิษจากสังกะสีให้เห็นก่อน

อย่างไรก็ตาม การใส่กากตะกอนลงสู่ดินจริง ๆ แล้ว อาจไม่ทำให้ค่าของโลหะหนักในดินถึงระดับที่เกิดพิษต่อพืชได้ อัตราการใส่กากตะกอนที่เหมาะสมจะช่วยควบคุมปริมาณของโลหะหนักในดินได้ สำหรับการทดลองวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เลือกใช้กากตะกอนที่อัตรา 20, 40, 60 และ 80 ตัน/เฮกตาร์ (หรือเทียบเท่ากับ 50, 100, 150 และ 200 กรัม/กระถาง)

นอกจากการศึกษาผลของโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในกากตะกอนแล้ว ยังได้คำนวณปริมาณโลหะหนักจากผลการวิเคราะห์กากตะกอนในตาราง 4.1 เพื่อหาปริมาณที่จะเติมลงสู่ดินในรูปของเกลืออนินทรีย์ โดยเลือกใช้สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ที่มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน 4 อัตราที่ใช้ ปริมาณที่คำนวณนี้ใช้ค่าของ DTPA extractable เพื่อเป็นการศึกษาถึงผลของโลหะหนักแต่ละชนิดในรูปที่พืชอาจนำไปใช้ประโยชน์ได้ เมื่อไม่มี limiting factor ตัวอื่น เพราะได้ใส่ปุ๋ยเคมีให้ครบถ้วน รวมทั้งมีสำหรับทดลองที่ใส่เฉพาะปุ๋ยเคมีอัตราเดียวกันเป็นตัวตรวจสอบ ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่คำนวณได้และทำการเติมในรูปสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ แสดงไว้ในตาราง 4.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.1 สมบัติของดินและกากตะกอนที่ใช้ในการทดลอง

	ดิน	ADS	ATS
pH	4.00	7.00	7.00
Organic C (%)	1.00	30.40	29.50
Organic matter (%)	1.72	52.29	50.74
Total N (%)	606.50 ppm	2.87	2.76
NH_4^+ N (ppm)	37.10	800.00	360.00
No_3^- N (ppm)	138.00	636.00	144.00
available P (ppm)	27.78	167.75	161.70
exchangeable K (ppm)	226.60	690.00	1005.00
Sodium (ppm)	270.20	300.00	2180.00
โลหะหนักสกัดด้วย 0.005 m DTPA (ppm)			
Cadmium	tr.	0.24 (4.2)	0.47 (2.9)
Copper	1.00	55.00 (179.5)	282.00 (1130.8)
Iron	47.00	357.00 (16,176.7)	305.00 (18,977.9)
Manganese	16.80	126.00 (523.1)	210.00 (1,408.4)
Nickel	0.70	4.40 (43.3)	3.00 (29.6)
Lead	0.30	3.54 (162.4)	3.12 (89.0)
Zinc	2.46	500.00 (1,510.7)	600.00 (1,747.00)

หมายเหตุ tr. หมายถึง อ่านค่าได้น้อยมาก

ตัวเลขในวงเล็บ คือ โลหะหนักทั้งหมด ในกากตะกอน

ตาราง 4.2 เกณฑ์สำหรับการจำแนกความอุดมสมบูรณ์ของดิน (เล็ก,2522)

ระดับที่บ่งบอก	อินทรีย์วัตถุ (%)	ปริมาณ ฟอสฟอรัส (ppm)	โปแตสเซียม (ppm)
ต่ำมาก	< 0.5	< 3	< 30
ต่ำ	0.5-10	3-6	30-60
ต่ำปานกลาง	1.0-1.5	6-10	
ปานกลาง	1.5-2.5	10-15	60-90
สูงปานกลาง	2.5-3.5	15-25	
สูง	3.5-4.5	25-45	90-120
สูงมาก	> 4.5	> 45	> 120

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.3 ปริมาณโลหะหนักที่เติมลงในดิน คิดเป็นมิลลิกรัม/กระถาง เพื่อให้มีปริมาณเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน 20, 40, 60 และ 80 ตัน/เฮกตาร์

อัตราที่ใส่ \ ธาตุ	แคดเมียม	ทองแดง	เหล็ก	แมงกานีส	นิเกิล	ตะกั่ว	สังกะสี
ADS (ตัน/เฮกตาร์)							
20	0.024	7.38	86.40	22.70	0.09	0.24	52.10
40	0.048	14.80	172.80	45.40	1.79	0.48	104.20
60	0.072	22.10	259.20	68.10	2.69	0.71	156.30
80	0.096	29.50	345.60	90.80	3.58	0.96	208.40
ATS (ตัน/เฮกตาร์)							
20	0.048	37.80	73.80	37.80	0.61	0.21	62.50
40	0.096	75.60	147.60	75.60	1.22	0.42	125.00
60	0.143	113.50	221.40	113.50	1.83	0.63	187.50
80	0.191	151.30	295.20	151.30	2.44	0.84	250.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2 สมบัติของดินเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

ระหว่างดำเนินการทดลองปลูกผักคะน้า ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินจากแต่ละตำรับทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ pH แอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรตไนโตรเจน ทุก 2 สัปดาห์ ส่วนสมบัติของดินเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์เฉพาะปริมาณโลหะหนักที่ศึกษา 7 ธาตุ ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ซึ่งมีปริมาณโลหะหนักสะสมที่แต่ละตำรับทดลอง แสดงไว้ดังตาราง 4.4 และ 4.5

จากตารางทั้ง 2 พบว่า ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในดินมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ เช่นเดียวกับที่ Sheaffer และคณะ (1979b) ได้รายงานถึงการทดลองใส่กากตะกอนอัตรา 0, 56 และ 112 เมตริกตัน/เฮกตาร์ ลงสู่ดิน และพบการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของแคดเมียม ทองแดง นิเกิล และสังกะสีในดินที่สกัดด้วยน้ำยาสกัด DTPA

สำหรับบางธาตุที่ศึกษานั้น การเพิ่มขึ้นของปริมาณสะสมไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ แมงกานีสและนิเกิลในดินที่ได้รับกากตะกอน ADS จะเห็นได้ว่า ทั้ง 4 อัตราของธาตุ 2 ธาตุนี้อยู่กลุ่มอักษร d เดียวกัน ซึ่งยกเว้นจาก 2 ธาตุนี้แล้ว การใส่กากตะกอนที่อัตราการใส่สูงขึ้น โดยเฉพาะอัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์ จะทำให้ปริมาณโลหะหนักสะสมในดินเพิ่มสูงกว่า control อย่างมีนัยสำคัญ เห็นได้ชัดในทองแดงและสังกะสี

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าปริมาณโลหะหนักในดินจะเพิ่มสูงกว่า control แต่เมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยเคมีแล้ว ปรากฏผลไม่แน่นอน ขึ้นกับชนิดของกากตะกอนและธาตุที่ศึกษารวมทั้งรูปทางเคมีด้วย ธาตุที่แสดงการสะสมในดินที่ได้รับกากตะกอนสูงกว่าดินที่ได้รับสารละลายโลหะหนักคลอไรด์และดินที่ใส่ปุ๋ยเคมี คือ ทองแดงและสังกะสี ธาตุที่แสดงการสะสมในดินที่ได้รับสารละลายโลหะหนักคลอไรด์สูงกว่าดินที่ได้รับกากตะกอนและดินที่ใส่ปุ๋ยเคมี คือ เหล็ก แมงกานีสและนิเกิล ธาตุที่แสดงการสะสมใกล้เคียงกับการใส่ปุ๋ยเคมี คือ แคดเมียมและตะกั่ว ส่วนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกากตะกอนทั้ง 2 ชนิด พบว่า ธาตุบางธาตุ คือ ทองแดง มีปริมาณการสะสมในดินที่ได้รับ ATS สูงกว่าดินที่ได้รับ ADS

สำหรับกลุ่มจุลธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช คือ ทองแดง เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี เมื่อเทียบกับระดับวิกฤตของจุลธาตุอาหารที่ Lindsay (1979)

เสนอไว้ของดินที่สกัดด้วย DTPA ดังนี้ ทองแดง 0.2 ppm. เหล็ก 4.5 ppm. แมงกานีส 1.0 ppm. และสังกะสี 0.8 ppm. จะพบว่า ค่าที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่างดินเมื่อได้รับกากตะกอนและทำการปลูกพืช คือ ผักคะน้า ไปแล้วนั้น มีปริมาณของจุลธาตุอาหารที่พอเพียงกับการที่พืชจะใช้ประโยชน์ เพราะมีค่าสูงกว่าระดับวิกฤต ทั้งยังแสดงว่าดินที่ได้รับกากตะกอนจะยังคงเหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืชได้อีก

ดังนั้น ดินที่ได้รับกากตะกอนทั้ง ADS และ ATS จึงมีความเป็นประโยชน์ต่อพืช ส่วนการจะประเมินถึงระดับที่มีในดินว่าจะสามารถทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชหรือไม่นั้น ต้องอาศัยการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักสะสมในเนื้อเยื่อพืชประกอบด้วย

4.1.3 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินระหว่างดำเนินการทดลอง

ผลของการใส่กากตะกอนและโลหะหนักคลอไรด์ที่มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในดิน แสดงไว้ในตาราง 4.6 และ 4.7 ซึ่งผลการวิเคราะห์สถิติพบว่าอัตราและช่วงเวลาการเก็บตัวอย่างมีผลต่อค่า pH อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และจากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ชัดว่าค่า pH ของดินมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาการเก็บ โดยมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อเปรียบเทียบกับ control และปุ๋ยเคมีแล้วนั้น การลดลงของค่า pH จากการใส่กากตะกอนมีการลดลงไม่มากนัก ซึ่งน่าจะเป็นเพราะกากตะกอนทั้ง ADS และ ATS มีค่า pH ที่เป็นกลาง คือ pH 7 อยู่แล้วก่อนที่จะใส่ลงในดิน ซึ่ง Kuntze และคณะ (1984) กล่าวว่าการที่กากตะกอนมีช่วง pH ที่เป็นกลางนี้เองจึงมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในดิน

สำหรับทดลองที่เป็นสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ทำให้ค่า pH ลดต่ำลงกว่าการใส่กากตะกอน และมีแนวโน้มจะลดต่ำกว่า control และปุ๋ยเคมีด้วย การที่ค่า pH ของดินที่ได้รับในรูปโลหะหนักคลอไรด์มีค่าต่ำลงมากกว่าการใส่กากตะกอน โดยที่บางตำรับทดลองต่ำกว่าถึง 1 หน่วย pH นั้น สามารถเป็นสาเหตุให้โลหะหนักในดินและพืชเพิ่มขึ้นสูงกว่าการใส่กากตะกอนได้ เช่น เหล็ก แมงกานีส และ สังกะสีในดิน จะอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ง่ายเมื่อดินเป็นกรด คือ pH ราว ๆ 5 หรือต่ำกว่า

4.1.4 การเปลี่ยนแปลงค่าแอมโมเนียมและไนเตรตไนโตรเจนของดินระหว่างดำเนินการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงค่าของแอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรตไนโตรเจนตามช่วงเวลาการเก็บตัวอย่างนั้น ข้อมูลที่ได้มีความผันแปร โดยช่วงเวลาการเก็บและตำรับทดลองส่งผลให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งปริมาณไนเตรตไนโตรเจนที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่าแอมโมเนียมไนโตรเจนอย่างเห็นได้ชัด

ปริมาณของแอมโมเนียมไนโตรเจนแสดงไว้ในตาราง 4.8 และ 4.9 พบว่าปริมาณของแอมโมเนียมไนโตรเจนที่ช่วงสัปดาห์แรก ๆ มีค่าสูง และมีการลดต่ำลงในสัปดาห์หลัง ๆ โดยมีลักษณะค่อนข้างคงที่ (รูปที่ 4.2) การใส่กากตะกอนส่งผลให้ดินมีแอมโมเนียมไนโตรเจนสูงกว่า control ส่วนการใส่ปุ๋ยเคมีในดินนั้น พบลักษณะการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียมในสัปดาห์ที่ 4 และลดต่ำลงในสัปดาห์ที่ 6 และ 8 ตามลำดับ และยังมีค่าของแอมโมเนียมสูงกว่าดินที่ใส่กากตะกอน รวมทั้งการใส่ในรูปสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ก็ให้ผลคล้ายคลึงกับการใส่ปุ๋ยเคมีด้วย ซึ่งสัปดาห์หลัง ๆ คือ สัปดาห์ที่ 6 และ 8 นี้ ปริมาณของแอมโมเนียมเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใส่กากตะกอน สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ และปุ๋ยเคมี มีค่าใกล้เคียงกัน และเนื่องจากค่าที่วิเคราะห์ได้มีความผันแปร จึงยากที่จะบอกได้ว่า ADS หรือ ATS จะทำให้มีปริมาณแอมโมเนียมสูงกว่ากัน

ปริมาณของไนเตรตไนโตรเจนแสดงไว้ในตาราง 4.10 และ 4.11 พบว่าปริมาณไนเตรตจากการใส่กากตะกอนมีค่าสูงกว่า control ไม่ว่าจะพิจารณาในตำรับทดลองใด (รูปที่ 4.3) ไนเตรตมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการใส่สำหรับกากตะกอนทั้ง 2 ชนิด ซึ่งอัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์ นอกจากจะมีปริมาณไนเตรตสูงแล้ว ยังพบว่าสำหรับ ATS ปริมาณไนเตรตเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามช่วงเวลาการเก็บตัวอย่างและไม่ลดลงแม้จะเป็นค่าไนเตรตจากตัวอย่างดินในสัปดาห์ที่ 8 การใส่ปุ๋ยเคมีและสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของไนเตรตคล้ายกัน คือ สัปดาห์ที่ 4 และ 6 จะมีไนเตรตสูงกว่าสัปดาห์ที่ 8 โดยที่ผลการวิเคราะห์ในสัปดาห์ที่ 2 นั้น นอกจากการใส่กากตะกอนแบบผสมกับดินที่อัตรา 20 ตัน/เฮกตาร์แล้ว ตำรับทดลองอื่นมีค่าสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมี ส่วนที่สัปดาห์ที่ 4, 6 และ 8 การใส่ปุ๋ยเคมีจะมีปริมาณของไนเตรตสูงกว่าการใส่กากตะกอนเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม การใส่กากตะกอนลงในดินก็สามารถทำให้มีปริมาณแอมโมเนียมและไนเตรตไนโตรเจนตกค้างอยู่ในดิน ซึ่งสามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชในการปลูกครั้งต่อไปได้

ตาราง 4.4 ปริมาณโลหะหนักสะสมในดินทดลอง หลังการใส่ ADS เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

ตำรับทดลอง	โลหะหนัก (ppm.)						
	แคดเมียม	ทองแดง	เหล็ก	แมงกานีส	นิเกิล	ตะกั่ว	สังกะสี
control	0.0133^{c}	1.8600^{g}	49.3200^{cd}	3.2667^{d}	0.5400^{cd}	1.4467^{de}	1.8000^{g}
ปุ๋ยเคมี	0.0067^{c}	2.2933^{fg}	60.0800^{abc}	7.8333^{c}	0.7267^{abcd}	1.6133^{bcde}	2.5333^{g}
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)							
20	tr.	2.4933^{defg}	52.9333^{bcd}	3.3000^{d}	0.5333^{cd}	1.5867^{cde}	5.1333^{ef}
40	tr.	3.1067^{cdef}	42.3200^{d}	2.9000^{d}	0.4200^{d}	1.3400^{e}	8.4667^{d}
60	0.0467^{b}	4.1933^{ab}	54.8633^{bcd}	3.6333^{d}	0.4867^{cd}	1.9867^{abcd}	13.3333^{bc}
80	0.0733^{a}	4.6867^{a}	72.4733^{a}	4.9000^{d}	0.5733^{bcd}	2.4800^{a}	18.9333^{a}
ค่าเฉลี่ย	0.0300	3.6200	55.6475	3.6833	0.5033	1.8484	11.4667
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)							
20	tr.	2.4400^{efg}	54.1067^{bcd}	3.2000^{d}	0.5067^{cd}	1.5267^{cde}	4.9333^{f}
40	tr.	3.3000^{cde}	53.9000^{bcd}	3.0333^{d}	0.5133^{cd}	1.6333^{bcde}	11.7000^{c}
60	0.0467^{b}	3.3800^{bcd}	72.2300^{a}	4.0667^{d}	0.6400^{bcd}	2.1467^{ab}	17.4000^{a}
80	0.0400^{b}	3.7500^{bc}	68.3733^{ab}	4.3667^{d}	0.5667^{bcd}	2.0267^{abc}	18.6667^{a}
ค่าเฉลี่ย	0.0217	3.2175	62.1525	3.6667	0.5567	1.8334	13.1750
การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)							
20	0.0067^{c}	1.8667^{g}	64.5133^{abc}	10.4000^{ab}	0.7333^{abc}	1.6667^{bcde}	6.1333^{ef}
40	0.0400^{b}	1.9200^{g}	60.6567^{abc}	9.3000^{bc}	0.7276^{abcd}	1.3133^{e}	6.1333^{ef}
60	0.0467^{b}	2.3200^{fg}	58.9667^{abc}	11.1000^{ab}	0.8467^{ab}	1.3667^{e}	7.2000^{de}
80	0.0400^{b}	2.9800^{cdef}	67.1633^{ab}	11.5000^{a}	1.0067^{a}	1.5667^{cde}	14.1000^{b}
ค่าเฉลี่ย	0.0334	2.2717	62.8250	10.5750	0.8284	1.4784	8.3917
F-value	8.30**	9.90**	3.14**	24.18**	3.09**	4.30**	77.89**
CV (%)	57.0	16.8	14.6	19.8	25.2	16.9	11.9

ตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันที่ระดับ 5%

ตาราง 4.5 ปริมาณโลหะหนักสะสมในดินทดลอง หลังการใส่ ATS เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

ตำรับทดลอง	โลหะหนัก (ppm.)						
	แคดเมียม	ทองแดง	เหล็ก	แมงกานีส	นิเกิล	ตะกั่ว	สังกะสี
control	0.0067^{g}	1.6933^{i}	43.0467^{ef}	2.6667^{d}	0.2400^{i}	1.1733^{ef}	2.0667^{fg}
ปุ๋ยเคมี	0.0267^{defg}	1.7933^{i}	51.4533^{cde}	7.4333^{c}	0.4933^{efgh}	1.3200^{bcdef}	1.7323^{g}
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)							
20	0.0400^{bcde}	4.8000^{gh}	37.2600^{f}	2.7000^{d}	0.3600^{hi}	0.9467^{f}	5.6667^{def}
40	0.0200^{efg}	9.3000^{cd}	43.7733^{ef}	2.9000^{d}	0.3667^{ghi}	1.2600^{cdef}	7.7333^{cde}
60	0.0600^{ab}	14.7333^{d}	56.5533^{bcd}	6.6667^{c}	0.6867^{bcd}	1.6333^{abcd}	15.8000^{b}
80	0.0600^{ab}	17.4000^{a}	53.6600^{bcde}	7.1333^{c}	0.5400^{defg}	1.2600^{cdef}	15.7333^{b}
ค่าเฉลี่ย	0.0450	11.5583	47.8117	4.8500	0.4884	1.2750	11.2333
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)							
20	0.0133^{fg}	4.2400^{h}	46.4267^{def}	3.5000^{d}	0.4733^{fgh}	1.2933^{bcdef}	6.7333^{de}
40	0.0467^{abcd}	10.2333^{c}	65.4800^{ab}	6.7333^{c}	0.5867^{def}	1.7133^{abc}	11.5333^{c}
60	0.0667^{a}	16.9000^{a}	63.7900^{ab}	8.4333^{c}	0.7067^{abcd}	1.6467^{abcd}	16.4000^{b}
80	0.0467^{abcd}	17.3667^{a}	70.7800^{a}	8.4667^{c}	0.6667^{cde}	1.9333^{a}	26.0000^{a}
ค่าเฉลี่ย	0.0434	12.1850	61.6192	6.7833	0.6084	1.6467	15.1667
การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)							
20	0.0200^{efg}	6.6000^{efg}	69.5707^{a}	14.5667^{a}	0.8000^{abc}	1.7867^{a}	4.6000^{efg}
40	0.0400^{bcde}	8.1667^{de}	71.9900^{a}	13.9667^{a}	0.8467^{ab}	1.7000^{abc}	8.5333^{cde}
60	0.0533^{abc}	6.1000^{fg}	72.2333^{a}	14.7000^{a}	0.8800^{a}	1.7467^{ab}	8.8000^{cd}
80	0.0333^{cdef}	6.9000^{ef}	60.1733^{abc}	12.1667^{b}	0.7000^{bcd}	1.2067^{def}	7.4667^{de}
ค่าเฉลี่ย	0.0367	6.9417	68.4918	13.8500	0.8067	1.6100	7.3500
F-value	6.23**	89.87**	9.97**	32.31**	12.31**	4.42**	30.14**
CV (%)	34.1	11.3	11.3	16.7	16.0	16.5	21.1

ตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันที่ระดับ 5%

ตาราง 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในดิน หลังการใส่ ADS

	สัปดาห์ที่ 2	4	6	8
control	6.55	6.13	5.34	5.83
ปุ๋ยเคมี	6.33	5.38	5.02	5.55
การใส่แบบผสมกันดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	6.22	5.83	5.97	5.75
40	6.35	6.38	6.13	6.03
60	6.09	6.10	6.52	6.07
80	6.25	6.18	6.33	6.18
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	6.35	6.22	6.22	5.85
40	6.23	6.25	6.40	6.00
60	5.90	6.38	6.22	6.12
80	6.20	6.27	6.23	6.07
การใส่ในรูปสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	5.98	5.22	5.18	5.67
40	6.03	5.20	4.62	5.37
60	5.97	5.13	4.60	5.38
80	5.92	5.15	4.73	5.37

F-value	ของเวลา	47.85^{**}	
	ของตำรับทดลอง	48.07^{**}	
	ของเวลาและตำรับทดลอง	7.50^{**}	
CV (%)	3.3		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดิน หลังการใส่ ATS

	สัปดาห์ที่ 2	4	6	8
control	6.50	6.22	5.80	5.85
ปุ๋ยเคมี	6.35	5.48	5.75	5.43
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	6.50	6.58	5.82	5.73
40	6.60	6.53	6.02	6.05
60	6.70	6.65	6.08	6.17
80	6.83	6.68	6.07	6.37
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	6.62	6.22	5.45	5.93
40	6.57	6.28	5.77	5.80
60	5.58	6.78	6.07	6.17
80	6.23	6.55	5.85	6.33
การใส่ในรูปสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	6.20	5.97	4.60	5.65
40	5.98	5.78	4.40	5.25
60	5.87	5.57	4.25	5.05
80	6.30	5.57	4.55	5.05

F-value	ของเวลา	278.92^{**}
	ของตำรับทดลอง	76.33^{**}
	ของเวลาและตำรับทดลอง	5.71^{**}
CV (%)	2.9	

I16645167

ตาราง 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าของแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินระหว่างดำเนินการทดลอง หลังการใส่ ADS

	สัปดาห์ที่ 2	4	6	8
control	19.95	6.30	3.27	9.80
ปุ๋ยเคมี	71.75	93.80	26.13	14.43
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	58.33	14.57	15.93	11.67
40	25.55	19.37	20.30	8.87
60	31.97	18.90	15.40	10.03
80	24.97	19.60	13.07	21.23
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	21.93	14.70	15.70	8.17
40	34.53	25.20	18.90	13.77
60	37.80	28.47	20.07	8.55
80	37.33	16.57	20.30	0.00
การใส่ในรูปสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	96.60	118.87	31.73	0.00
40	98.70	93.23	24.53	26.13
60	110.60	150.73	19.13	23.10
80	120.63	90.77	10.43	20.53

F-value	ของเวลา		328.24^{**}
	ของตำรับทดลอง		92.48^{**}
	ของเวลาและตำรับทดลอง		27.08^{**}
CV (%)	23.1		

ตาราง 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่าของแอมโมเนียมไนโตรเจนในดินระหว่างดำเนินการทดลอง หลังการใส่ ATS

	สัปดาห์ที่ 2	4	6	8
control	16.67	6.30	13.60	13.77
ปุ๋ยเคมี	149.10	168.23	40.60	25.43
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	34.30	15.87	17.57	17.73
40	12.63	17.03	17.23	20.30
60	16.53	19.87	14.00	10.27
80	42.23	10.97	17.50	14.93
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	12.37	17.73	10.83	26.13
40	33.60	17.73	11.67	20.77
60	18.10	10.50	18.20	14.93
80	16.10	10.73	22.17	11.67
การใส่ในรูปสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	98.70	134.17	51.80	16.80
40	155.87	195.53	45.03	13.70
60	118.30	290.73	94.53	13.53
80	137.20	156.10	56.70	27.77

F-value	ของเวลา	283.96**
	ของตำรับทดลอง	197.40**
	ของเวลาและตำรับทดลอง	49.20**
CV (%)	22.3	

ตาราง 4.10 การเปลี่ยนแปลงค่าของไนเตรตไนโตรเจนในดินระหว่างดำเนินการทดลอง หลังการใส่ ADS

	สัปดาห์ที่ 2	4	6	8
control	27.98	24.47	34.30	15.40
ปุ๋ยเคมี	66.64	208.83	198.57	121.80
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	37.75	59.97	106.63	65.10
40	114.92	105.47	143.97	56.00
60	125.30	99.40	147.93	110.37
80	132.77	180.37	181.77	89.83
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	126.70	87.27	135.10	42.47
40	123.90	191.20	127.17	49.93
60	156.10	217.47	239.80	97.53
80	172.67	160.40	171.50	100.10
การใส่ในรูปสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	94.03	258.53	226.57	97.65
40	107.33	242.20	263.43	157.03
60	81.20	229.83	258.30	146.07
80	74.20	216.30	283.50	136.15

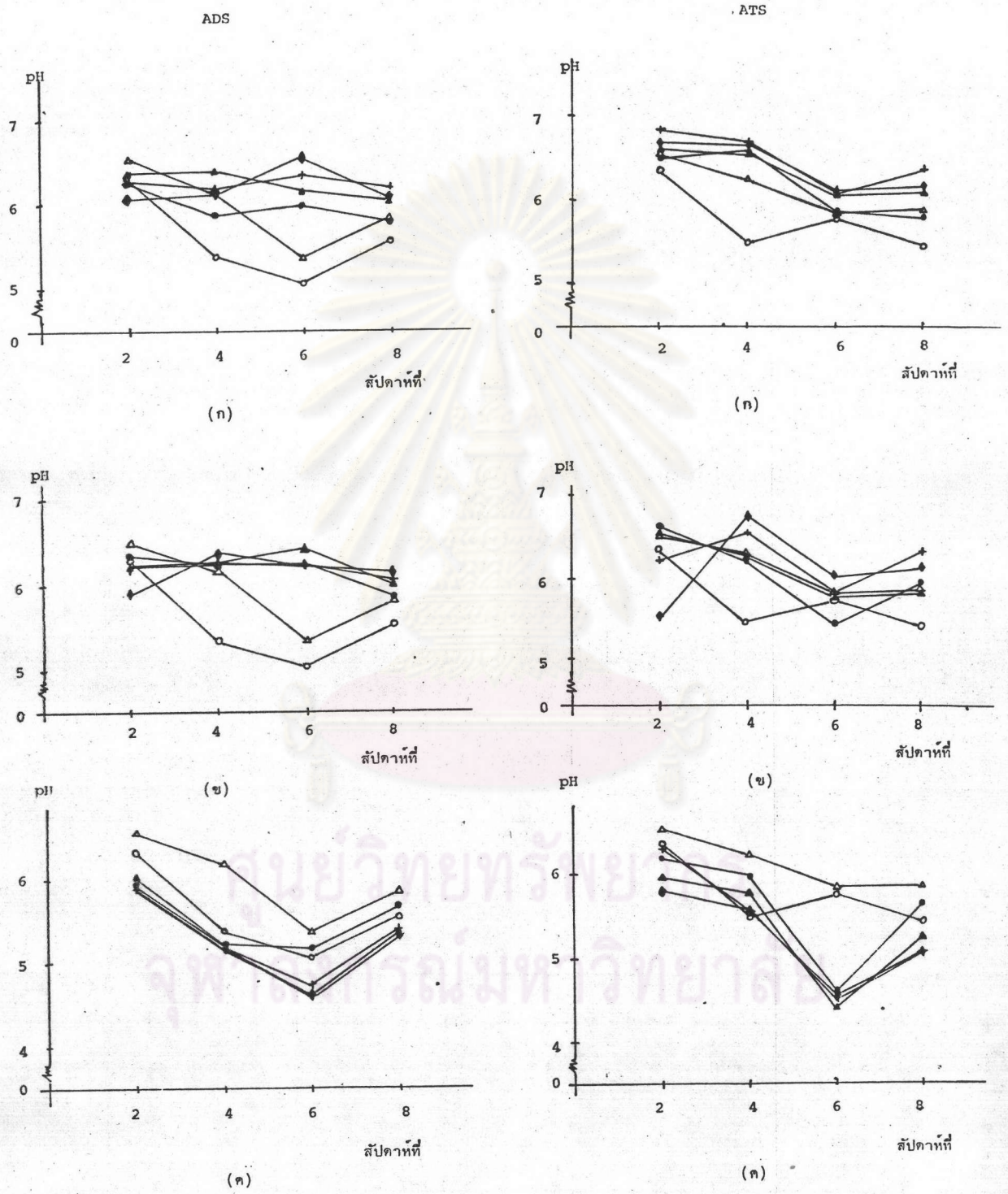
F-value	ของเวลา	94.13^{**}
	ของตำรับทดลอง	33.78^{**}
	ของเวลาและตำรับทดลอง	5.58^{**}
CV (%)	21.4	

ตารางที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงค่าของไนเตรตไนโตรเจนในดินระหว่างดำเนินการทดลอง หลังการใส่ ATS

	สัปดาห์ที่ 2	4	6	8
control	28.70	29.40	43.17	17.27
ปุ๋ยเคมี	51.57	224.00	188.77	164.27
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	48.30	46.67	70.70	54.60
40	80.73	79.10	72.57	60.10
60	102.43	116.90	125.20	111.77
80	115.50	186.67	196.70	224.70
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	103.83	112.70	60.20	50.40
40	133.00	135.10	129.17	57.87
60	140.87	108.50	124.83	94.97
80	151.67	128.57	161.93	105.70
การใส่ในรูปสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)				
20	49.23	224.23	194.10	168.23
40	60.43	124.80	182.70	125.30
60	12.83	205.37	180.60	134.17
80	26.37	167.90	191.57	182.94

F-value	ของเวลา	74.43^{**}
	ของตำรับทดลอง	51.96^{**}
	ของเวลาและตำรับทดลอง	12.72^{**}
CV (%)	17.6	

รูป 4.1 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในดินระหว่างดำเนินการทดลอง



(ก) การใส่กากตะกอนแบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)

(ข) การใส่กากตะกอนแบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)

(ค) การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)

△ control

○ ปุ๋ยเคมี

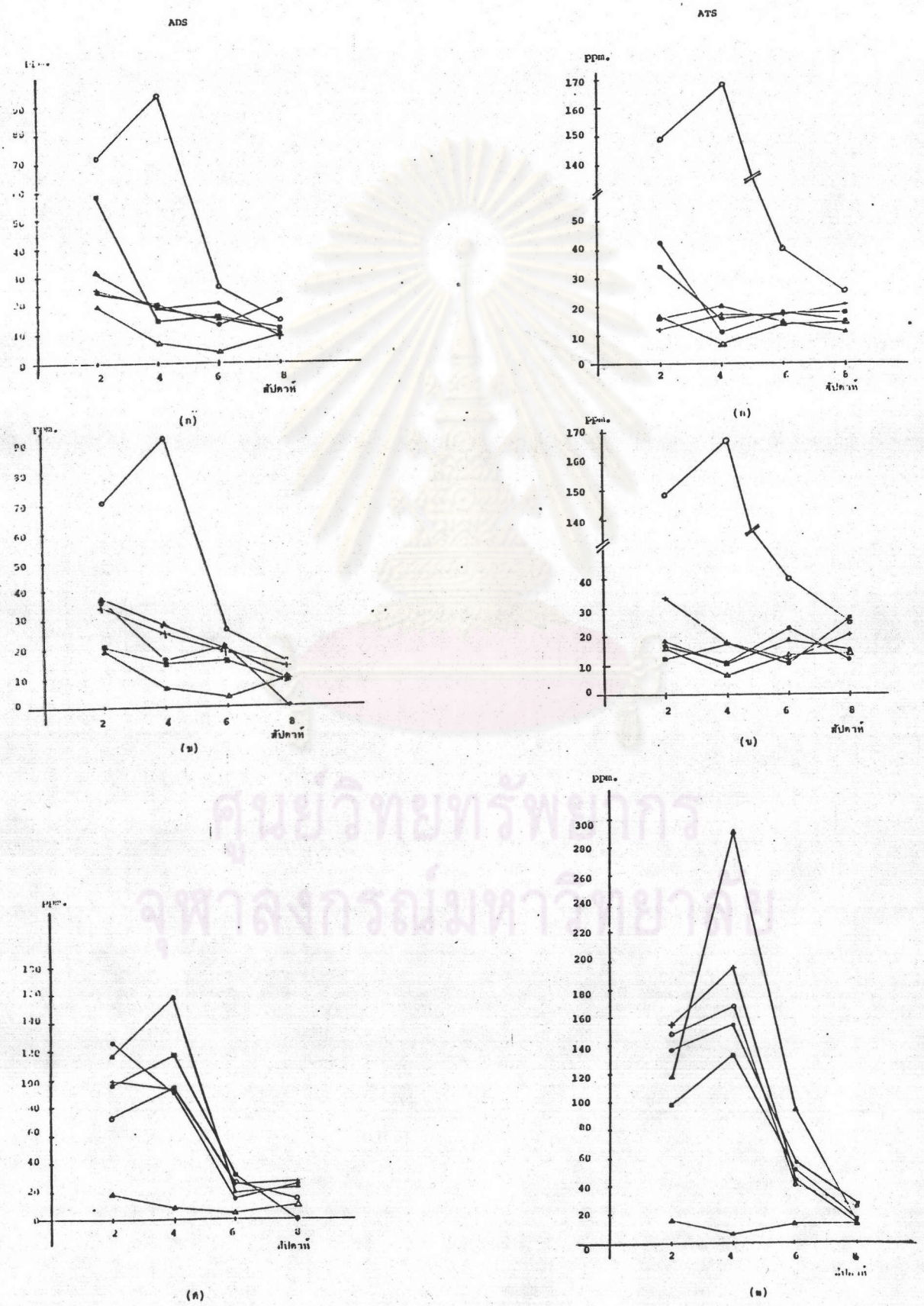
● อัตรา 20 ตัน/เฮกตาร์

▲ อัตรา 40 ตัน/เฮกตาร์

◆ อัตรา 60 ตัน/เฮกตาร์

+ อัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์

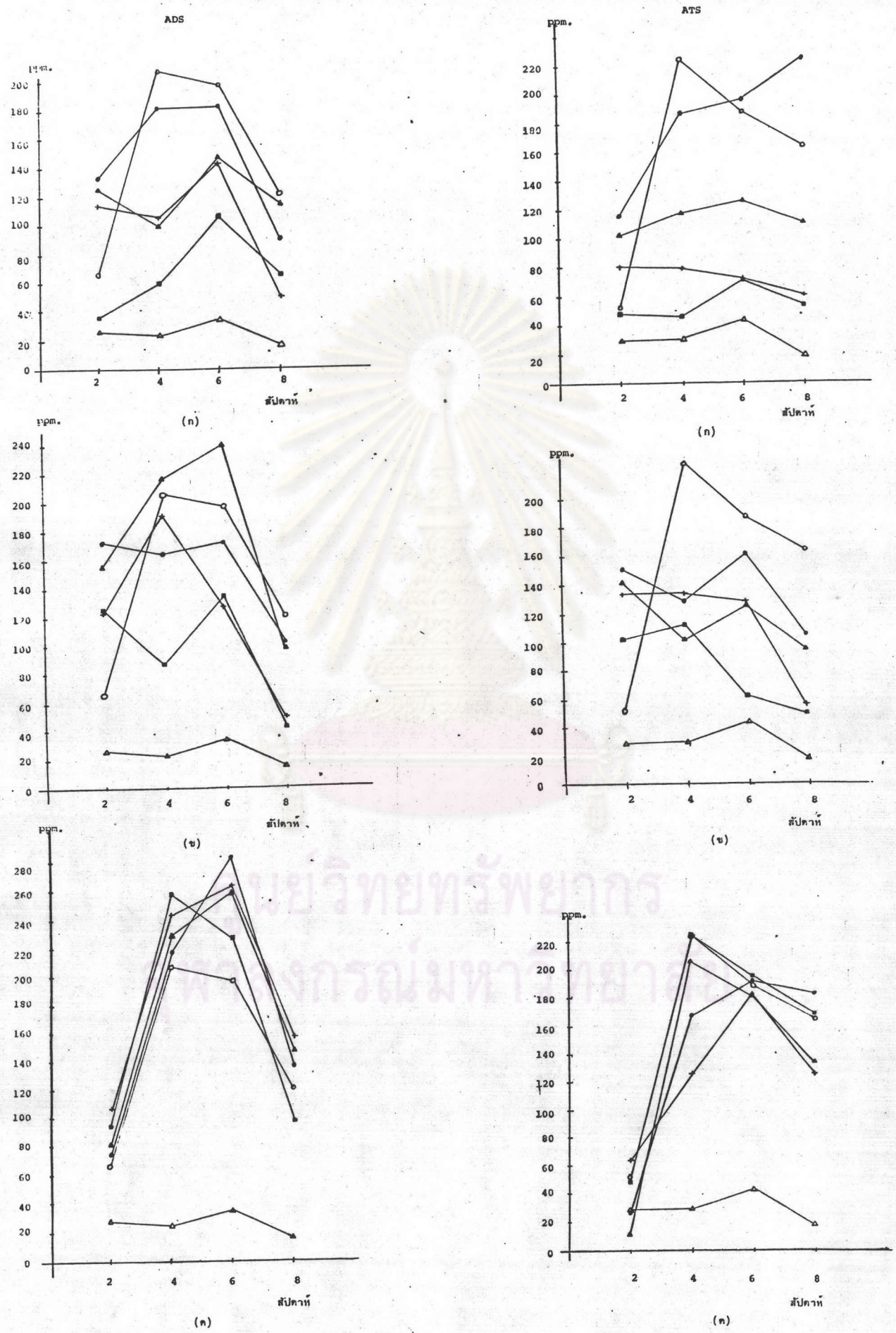
รูป 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าของแอมโมเนียมไนโตรเจนในดิน ระหว่างทำเป็นการทดลอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(โปรดดูคำชี้แจงประกอบ หน้า 43)

รูป 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าของไนเตรตไนโตรเจนในดิน ระหว่างดำเนินการทดลอง



(โปรดดูคำชี้แจงประกอบ หน้า 43)

จากรูป 4.2 และ 4.3

(ก) การใส่กากตะกอนแบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)

(ข) การใส่กากตะกอนแบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)

(ค) การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)

△ control

○ ปุ๋ยเคมี

■ อัตรา 20 ตัน/เฮกตาร์

+ อัตรา 40 ตัน/เฮกตาร์

▲ อัตรา 60 ตัน/เฮกตาร์

● อัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลของการใส่กากตะกอนและโลหะหนักคลอไรด์ต่อผลผลิตคิดเป็นน้ำหนักแห้งของผักคะน้า

ผลของการใส่กากตะกอนและโลหะหนักคลอไรด์ลงในดินเพื่อปลูกผักคะน้า วัดความแตกต่างของการเติบโตของผักคะน้าแต่ละตำรับทดลอง โดยใช้ค่าน้ำหนักแห้งของส่วนที่กินได้ (edible part) คือ ลำต้นและใบของผักคะน้า เมื่ออายุ 55 วัน เป็นค่าผลผลิตของแต่ละกระถาง เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของผักคะน้าเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เท่ากับ 91.34±0.89

การใส่กากตะกอนทั้ง ADS และ ATS ลงในดิน ทำให้ผักคะน้ามีผลผลิตสูงกว่า control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทุกตำรับทดลอง (ตาราง 4.12 และรูป 4.4)

สำหรับ ADS การใส่กากตะกอนทั้ง 2 วิธีนั้น อัตราการใส่ 20 ตัน/เฮกตาร์ (เทียบเท่ากับ 50 กรัม/กระถาง) ให้ผลผลิตสูงสุดโดยมีค่าสูงกว่าปุ๋ยเคมี แต่ไม่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ผลผลิตของวิธีการใส่กากตะกอนทั้งแบบผสมกับดินและโรยบนผิวหน้าดินจะลดลงตามอัตราการใส่ที่เพิ่มขึ้น โดยที่การใส่แบบผสมกับดินนั้น ถึงแม้ค่าจะลดลงตามอัตราการใส่และมีค่าต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมี แต่ไม่ต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปุ๋ยเคมี ยกเว้นที่อัตราสูงสุดคือ 80 ตัน/เฮกตาร์ เมื่อเทียบที่อัตราเดียวกันพบว่าวิธีการใส่ไม่มีผลให้ผลผลิตของผักคะน้าต่างกัน ซึ่งพิจารณาได้จากการอยู่กลุ่มอักษรเดียวกันของแต่ละคู่ เช่น อัตรา 20 ตัน/เฮกตาร์ ทั้ง 2 วิธี อยู่กลุ่มอักษร a เดียวกัน และถ้าเปรียบเทียบเฉพาะตัวเลขแล้ว การใส่แบบผสมกับดินจะให้ผลผลิตของผักคะน้าสูงกว่าการใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน ยกเว้นที่อัตราสูงสุด

สำหรับ ATS พบว่าการใส่แบบผสมกันดิน อัตรา 20 ตัน/เฮกตาร์ ให้ค่าผลผลิตสูงสุดและสูงกว่าปุ๋ยเคมีอย่างมีนัยสำคัญ อัตราการใส่กากตะกอนที่เพิ่มขึ้น แม้ว่าจะทำให้ผลผลิตของผักคะน้าลดลง แต่ก็ยังคงสูงกว่าปุ๋ยเคมีและไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การใส่กากตะกอนแบบโรยบนผิวหน้าดินพบว่าผลผลิตสูงสุดเป็นที่อัตรา 40 ตัน/เฮกตาร์ แล้วจึงลดต่ำลง อย่างไรก็ตาม ค่าผลผลิตทั้ง 4 อัตรา ไม่ต่างทางสถิติกับปุ๋ยเคมี ส่วนผลจากวิธีการใส่นั้น การใส่แบบผสมกับดินจะให้ผลผลิตของผักคะน้าสูงกว่าการใส่แบบโรยบนผิวหน้าดินทุกอัตรา ทั้งนี้ ณ อัตราการใส่สูงสุดและต่ำสุดจะมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างวิธีใส่ด้วย

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างผลผลิตที่ได้จากการตะกอนทั้ง 2 ชนิดแล้ว ATS จะให้ผลผลิตของคะน้าสูงกว่า ADS ทุกอัตราและวิธีใส่ โดยค่าของผลผลิตสูงสุดที่พบซึ่งสูงกว่าปุ๋ยเคมีอย่างมีนัยสำคัญ คือ ATS จากการใส่แบบผสมกับดิน อัตรา 20 ตัน/เฮกตาร์ ดังนั้น ATS จึง

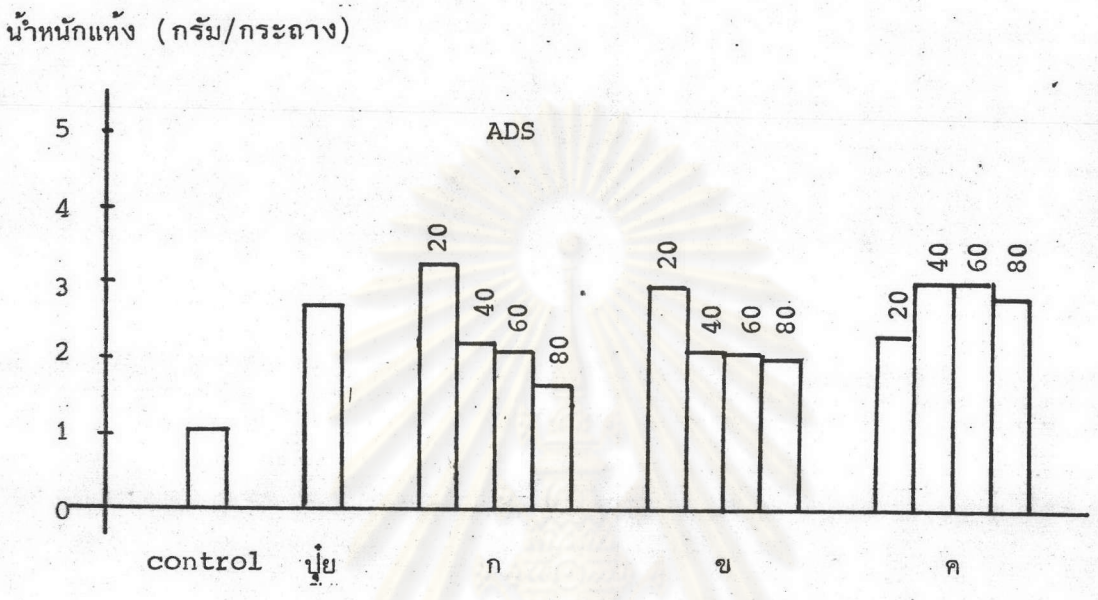
ตาราง 4.12 น้ำหนักแห้งส่วนลำต้นและใบ (edible part) ของผักคะน้า หลังการทดลองใส่กากตะกอนและโลหะหนักคลอไรด์

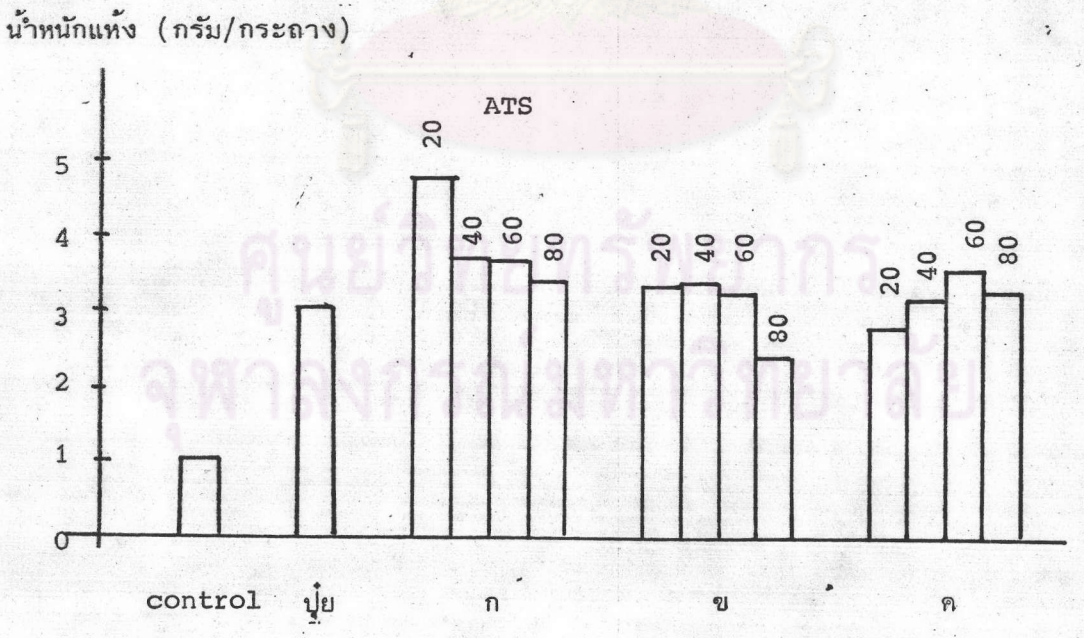
	ADS	ATS
control	1.01^{g}	1.01^{d}
ปุ๋ยเคมี	2.70^{abcde}	3.04^{bc}
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)		
20	3.27^{a}	4.75^{a}
40	2.20^{cdef}	3.70^{b}
60	2.10^{def}	3.66^{b}
80	1.66^{fg}	3.40^{b}
ค่าเฉลี่ย	2.31	3.88
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)		
20	2.97^{abc}	3.33^{bc}
40	2.10^{def}	3.37^{b}
60	2.07^{def}	3.21^{bc}
80	2.01^{ef}	2.37^{c}
ค่าเฉลี่ย	2.29	3.07
การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)		
20	2.33^{bcdef}	2.78^{bc}
40	3.06^{ab}	3.18^{bc}
60	3.06^{ab}	3.55^{b}
80	2.85^{abcd}	3.46^{b}
ค่าเฉลี่ย	2.83	3.24
F-value	7.56^{**}	7.83^{**}
CV (%)	16.77	15.84

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันที่ระดับ 5%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งของส่วนที่กินได้ (edible part) ของผักคะน้า กับ วิธีการใส่แบบต่าง ๆ ที่แต่ละอัตราการใส่





ก. การใส่กากตะกอนแบบผสมกับดิน อัตรา (ตัน/เฮกตาร์)

ข. การใส่กากตะกอนแบบโรยบนผิวหน้าดิน อัตรา (ตัน/เฮกตาร์)

ค. การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอนอัตรา (ตัน/เฮกตาร์)

ควรจะมีองค์ประกอบที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยส่วนรวมมากกว่า

จากผลการทดลองที่พบว่า ผลผลิตลดลงตามอัตราการใส่ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้น การใส่ ATS แบบโรยบนผิวหน้าดินเท่านั้นที่แสดงลักษณะของผลผลิตเพิ่มขึ้นจากอัตรา 20 และสูงสุดที่ 40 ตัน/เฮกตาร์ แล้วจึงลดลงที่อัตราสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับรายงานของ Mays และคณะ (1973) ที่กล่าวว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใส่กากตะกอนกับผลผลิตของพืชเป็นเส้นโค้ง คือเพิ่มขึ้นจนถึงที่อัตราหนึ่งแล้วจึงลดลง กากตะกอนที่นำมาศึกษาอาจมีความสัมพันธ์ในทำนองเดียวกันนี้ก็ได้ โดยที่อัตรา 20 ตัน/เฮกตาร์ เป็นอัตราสูงสุดที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของผักคะน้าในกระถางก็เป็นได้

มีรายงานที่อธิบายถึง การลดลงของผลผลิตเนื่องจากการใช้กากตะกอนในอัตราการใส่ที่สูงโดยสาเหตุต่าง ๆ กัน Miller (1974) อธิบายว่า การสะสมอินทรีย์วัตถุจากกากตะกอนที่มากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายช้า และมีผลทำให้ลดการถ่ายเทของอากาศในดิน รวมทั้งการเจริญเติบโตของรากพืชลดลง ซึ่งมีผลต่อเนื่องถึงการลดลงของผลผลิตด้วย Sabey and Hart (1975) กล่าวถึงการลดลงของผลผลิตข้าวฟ่าง ข้าวเดือย และหญ้าซูดาน เมื่อใช้กากตะกอน 25-125 ตัน/เฮกตาร์ โดยอธิบายสาเหตุว่า เป็นเพราะการลดลงของเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดมากกว่าการยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชเหล่านั้นภายหลัง

นอกจากนี้ ยังมีรายงานที่กล่าวว่า การปลดปล่อยธาตุอาหารเช่นไนโตรเจนในรูปที่พืชนำไปใช้ได้ จะเพิ่มเป็นเส้นตรงกับเวลาถ้าใส่กากตะกอนในอัตราต่ำ แต่พืชจะมีประสิทธิภาพในการใช้ไนโตรเจนที่ต่ำลงตามอัตราการใส่ที่เพิ่มขึ้น การใส่ในอัตราสูง (มากกว่า 102 ppm. ของแอมโมเนียมไนโตรเจน) ช่วงแรกจะมีการปลดปล่อยไนโตรเจนน้อย เพราะเกิดการหยุดชะงักของกิจกรรมของจุลินทรีย์เนื่องมาจากความเป็นพิษของสารบาง อย่างที่เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อพ้นช่วงเวลาเหล่านี้ การสลายตัวจะเร็วขึ้น และอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนจะเพิ่มสูงขึ้นจนมากกว่าการใส่กากตะกอนที่อัตราต่ำ (Premi and Cornfield, 1971; Sabey et al., 1977) ดังนั้น การใส่กากตะกอนที่อัตราสูง ช่วงเวลาแรก ๆ ของการย่อยสลาย พืชจึงได้รับไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์น้อยกว่าการใส่ที่อัตราต่ำ และส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้เช่นกัน

สำหรับผลการลดลงเนื่องจากโลหะหนักที่มีในกากตะกอนนั้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลผลิตจากการใส่กากตะกอนกับการใส่โลหะหนักคลอไรด์ เนื่องจากค่าของโลหะหนักคลอไรด์ที่ใส่นี้ได้จากการสกัดด้วยน้ำยาสกัด DTPA ซึ่งใช้ในการประเมินความเป็นประโยชน์ต่อพืช เพราะ

เป็นน้ำยาสกัดอย่างอ่อน ค่าที่ได้เป็นค่า "available form" คือ เป็นปริมาณที่คาดว่าสัมพันธ์กับการดูดไปใช้ของพืช จึงเป็นการศึกษาถึงผลของโลหะหนักปริมาณที่คาดว่าพืชจะดูดไปใช้ได้จากกากตะกอนเท่านั้น ซึ่งผลผลิตที่ได้ไม่มีความแตกต่างระหว่างอัตราที่ใช้ทั้ง 4 อัตรา และการใส่ปุ๋ยเคมี เพราะอยู่ในกลุ่มอักษร b เหมือนกัน แต่สูงกว่า control อย่างมีนัยสำคัญ แนวโน้มของผลผลิตที่ได้จากการใส่โลหะหนักคลอไรด์ เป็นไปในลักษณะเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่และลดต่ำลงที่อัตราการใส่สูงสุดคือเทียบเท่ากากตะกอน 80 ตัน/เฮกตาร์ แต่ก็ยังมีค่าสูงกว่าปุ๋ยเคมี จากข้อมูลดังกล่าว จึงน่าจะสรุปได้ว่า เมื่อธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชครบ (เพราะตำรับทดลองที่ได้รับโลหะหนักคลอไรด์มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมด้วย) โลหะหนักในปริมาณที่ใส่ลงในดินจนถึงระดับเทียบเท่ากับที่มีในกากตะก่อน 60 ตัน/เฮกตาร์นั้น นอกจากไม่น่าจะมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของผักคะน้าแล้ว ยังอาจจะเป็นตัวช่วยกระตุ้นเสริมการเจริญเติบโตอีกด้วย แต่พอจะกล่าวได้ว่า ปริมาณโลหะหนักที่อาจจะเริ่มมีผลต่อการลดลงของผลผลิตผักคะน้าควรเป็นที่ อัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์ เพราะ ณ อัตราการใส่นี้เริ่มพบการลดลงของผลผลิต แม้ว่าจะไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับอัตราอื่นก็ตาม

จะเห็นได้ว่า มีปัจจัยร่วมหลายอย่างที่สามารถส่งผลให้เกิดการลดลงของผลผลิตเมื่อพืชได้รับกากตะกอน โลหะหนักในกากตะกอนก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งสำหรับการใส่ในอัตราสูงขึ้น องค์ประกอบที่ซับซ้อนส่วนอื่นของกากตะกอนซึ่งยังไม่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ก็สามารถมามีผลต่อการลดลงของผลผลิตของผักคะน้าได้เช่นกัน อาจกล่าวได้เพียงว่า การลดลงของผลผลิตที่อัตรา 40 และ 60 ตัน/เฮกตาร์ นั้นไม่ควรเป็นผลจากโลหะหนักในปริมาณที่มีในกากตะกอน อัตราเติมที่โลหะหนักจะมีผลต่อการลดลงของผลผลิตควรเป็นที่อัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์ สาเหตุที่เป็นไปได้มากที่สุดสำหรับการทดลองนี้ น่าจะเป็นเพราะการใส่กากตะกอนที่อัตราสูง ทำให้ดินในกระถางมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง ประกอบกับสภาพดินที่เป็นดินเหนียว เมื่อรดน้ำบ่อยครั้ง ดินจะเกิดการอัดตัวมากขึ้น การถ่ายเทอากาศจึงไม่ดีนัก อาจจะส่งผลต่อเนื่องถึงอัตราการย่อยสลายโดยกระบวนการของจุลินทรีย์ดิน คือทำให้การย่อยสลายช้ากว่าการใส่ที่อัตราต่ำ ซึ่งเหตุผลที่กล่าวมานี้ก็น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้วิธีการใส่แบบผสมกับดินให้ผลผลิตของผักคะน้าสูงกว่าการใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน เพราะกากตะกอนที่ใส่แบบผสมกับดินได้มีการคลุกเคล้าระหว่างดินและกากตะกอน ซึ่งการที่กากตะกอนมีสมบัติเช่นเดียวกับอินทรีย์วัตถุ จะช่วยปรับสภาพให้ดินมีสภาพทางกายภาพเหมาะกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินมากกว่าการใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน ซึ่งกากตะกอนที่ใส่จะรวมกันเป็นชั้นของกากตะกอนเฉพาะส่วนบนสุดของดินในกระถางเท่านั้น โอกาสที่กากตะกอนจะช่วยปรับสภาพดินและส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักคะน้าจึงเป็นไปได้ช้ากว่าการใส่แบบผสมกับดิน

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองก็ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้กากตะกอนในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช นั่นคือ กากตะกอนสามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้เช่นเดียวกับปุ๋ยเคมี ซึ่งสอดคล้องกับรายงานหลายฉบับที่กล่าวถึงการทดลองทั้งในกระถางและพื้นที่ไร่นาจริงหลายแห่งเกี่ยวกับประสิทธิภาพของกากตะกอนในการช่วยส่งเสริมการเติบโตและเพิ่มผลผลิตของพืช (Cunningham et al., 1975a; Kelling et al., 1977; Sheaffer et al., 1979a; Hyde, 1976; Stucky and Newman, 1977; Magdoff and Amadon, 1980) และในบางกรณี ผลผลิตของพืชสูงกว่าดินที่ได้รับปุ๋ยเคมี (Jacobs et al., 1979) ดังนั้น นอกจากปุ๋ยเคมี ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอกและปุ๋ยพืชสดแล้ว กากตะกอนจึงน่าจะเป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับพืชอีกแหล่งหนึ่ง โดยความเหมาะสมที่จะใช้เป็นปุ๋ยนั้น Hinsley และคณะ (1972) เสนอว่าเหมาะจะเป็นปุ๋ยอินทรีย์สำหรับพืช

4.3 ผลของการใส่กากตะกอนและโลหะหนักคลอไรด์ต่อการสะสมโลหะหนักในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้า

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่า พืชดำรงชีวิตอยู่โดยการใช้สารอาหารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดินและน้ำ ซึ่งนอกจากสารอาหารหรือแร่ธาตุต่าง ๆ แล้ว ถ้าในดินหรือน้ำนั้นมีธาตุโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ พืชก็มีความสามารถที่จะดูดดึงเอาโลหะหนักเหล่านั้นเข้าไปในต้นพืชเองได้ การศึกษาถึงการนำกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียมาใส่ลงในดินเพื่อใช้เป็นปุ๋ยทำการปลูกพืช จึงสมควรจะมีการศึกษาถึงปริมาณโลหะหนักสะสมในพืชนั้นด้วย เพราะโลหะหนักสามารถสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อพืชและถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหารได้ ปริมาณของโลหะหนักที่สะสมในพืช ขึ้นกับส่วนของพืชที่นำมาศึกษา (Kloke, 1982) งานวิทยานิพนธ์นี้ทดลองกับผักคะน้าซึ่งเป็นพืชกินใบ และพบว่าปริมาณโลหะหนักสะสมในใบคะน้าสูงกว่าการสะสมในส่วนของลำต้นและราก สำหรับธาตุที่ศึกษา 5 ใน 7 ธาตุ ได้แก่ แคดเมียม แมงกานีส นิเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ส่วนเหล็กและทองแดง พบการสะสมในใบและรากสูงกว่าลำต้น

กากตะกอน ADS และ ATS ที่นำมาศึกษา พบว่ามีปริมาณของจุลธาตุอาหารที่เป็นโลหะหนัก คือ ทองแดง เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี อย่างเพียงพอต่อความต้องการของพืช ซึ่งผลการวิเคราะห์ในดินก็แสดงให้เห็นความจริงข้อนี้ แต่นอกเหนือจากธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเหล่านี้แล้ว กากตะกอนทั้ง 2 ชนิด ยังมีปริมาณแคดเมียม ตะกั่ว และนิเกิลอยู่ด้วยในปริมาณหนึ่ง แม้ว่าธาตุทั้ง 3 ชนิดนี้จะไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชแต่พืชก็สามารถดูดเข้าไปสะสมในเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ ได้ ดังนั้น จึงมีโอกาสสูงที่จะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารจนมามีผลต่อสุขภาพมนุษย์และสัตว์ (Jones, 1979)

การดูดโลหะหนักของผักคะน้าทำให้ปริมาณโลหะหนักสะสมในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้าเพิ่มขึ้นสูงกว่า control ซึ่งปลูกบนดินเดิมไม่ได้รับการเติมทั้งกากตะกอนและปุ๋ยเคมี โดยการเพิ่มขึ้นนี้ไม่แน่นอน บางธาตุ ได้แก่ เหล็กและสังกะสี ไม่เพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่หรือปริมาณที่มีในดิน

Armitage (1974) กล่าวถึงพืชผักที่ปลูกโดยใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียจากตลาดและบ้านเรือนที่อัตราสูง ๆ ว่าพืชผักบางชนิดจะมีการดูดพวกจุลธาตุอาหารเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนักและการเพิ่มขึ้นนี้ก็ไม่แน่นอน แสดงถึงความผันแปรของพืชผักเองว่ามีสูง เช่นเดียวกับผลการทดลองที่พบในผักคะน้าเมื่อใส่ ADS และ ATS ซึ่งถึงแม้จะพบว่าปริมาณโลหะหนักสะสมในดินมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ แต่ปริมาณโลหะหนักสะสมในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้ากลับไม่แน่นอน เหมือนกับรายงานของ Mortvedt and Giordano (1975) และ Joseph (1984) ที่กล่าวถึงการสะสมสารพิษของพืช เช่น โลหะหนักที่อาจมีในกากตะกอนโดยเฉพาะกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำทิ้งชุมชนว่า ไม่เพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการใส่กากตะกอน แม้ว่าระดับการสะสมในดินจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ก็ตาม นอกจากนี้ Dolar และคณะ (1972) ได้รายงานถึงการใส่กากตะกอนว่าไม่ส่งผลต่อปริมาณของเหล็ก ทองแดงและสังกะสีที่สะสมในเนื้อเยื่อพืช (ข้าวโอ๊ต) อย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ จากการคำนวณปริมาณโลหะหนักที่คาดว่าจะมีในกากตะกอนที่อัตรา 20, 40, 60 และ 80 ตัน/เฮกตาร์ แล้วใส่ลงในดินในรูปของสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ เนื่องจากเป็นรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันทีเพราะโลหะอยู่ในรูปสารละลายของเกลืออนินทรีย์ ผลจากการสะสมในดินและผักคะน้าจะช่วยประเมินได้ว่า ณ อัตราการใส่และปริมาณโลหะหนักในรูปที่พืชจะดูดดึงไปใช้ได้เท่ากับที่มีในกากตะกอน พืชมีการดูดดึงไปสะสมไว้ในเนื้อเยื่อและส่งผลต่อการเจริญเติบโตต่างจากการใส่กากตะกอนหรือไม่ เพราะตำรับทดลองที่ใส่โลหะหนักนี้ได้มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมด้วยเพื่อป้องกันมิให้ธาตุอาหารที่จำเป็นตัวอื่นเป็น limiting factor ของผักคะน้า ผลที่ได้จึงควรเป็นผลของโลหะหนักที่เติมลงไปเท่านั้น ซึ่งผลการทดลองก็พบว่า ปริมาณโลหะหนักสะสมในผักคะน้าสูงกว่า control เหมือนกับผลการทดลองจากการใส่กากตะกอน รวมทั้ง การใส่ในรูปโลหะหนักคลอไรด์ยังทำให้การสะสมแคดเมียม และสังกะสีในผักคะน้ามีค่าสูงกว่าการสะสมจากการใส่ปุ๋ยเคมีด้วย และสำหรับปริมาณแมงกานีส และสังกะสีแล้วนั้น ค่าการสะสมในตำรับทดลองที่ได้รับในรูปโลหะหนักคลอไรด์จะสูงกว่าตำรับทดลองที่ได้รับกากตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่สำหรับโลหะชนิดอื่น ค่าการสะสมจะใกล้เคียงกัน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อแยกพิจารณาแต่ละธาตุ จะพบว่า ทำรสะสมในผักคะน้าเป็นดังนี้

4.3.1 แคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่อยู่ในความสนใจอย่างมาก เพราะมีความเป็นพิษสูง เป็นอันตรายกับแทบทุกระบบในร่างกายมนุษย์และสัตว์ไม่ว่าจะได้รับจากการบริโภค การสูดดม หรือ การฉีดเข้าสู่ร่างกาย ปัจจุบัน ได้มีการนำแคดเมียมไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างมากมาย โอกาสที่แคดเมียมจะปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมก็มีสูงขึ้น ปริมาณหรือความเข้มข้นของแคดเมียมในดินซึ่งจะส่งผลให้ระดับของแคดเมียมในพืชสูงนั้น มักจะต่ำกว่าระดับที่สามารถทำให้พืชแสดงอาการเป็นพิษหรือมีการลดลงของผลผลิตให้สังเกตเห็น ปริมาณแคดเมียมที่ก่อให้เกิดพิษต่อพืช อยู่ในช่วงกว้าง คือ 5-700 มิลลิกรัม/กิโลกรัมของน้ำหนักแห้งของพืช หรือ หน่วย ppm. (Chaney, 1982) และ มีผู้แนะนำถึงค่า tolerance level สำหรับพืชเศรษฐกิจเมื่อจะทำการตรวจสอบการใส่กากตะกอนลงในดินสำหรับแคดเมียม ควรมีค่า 3 ppm. (Cunningham et al., 1975b)

จากตาราง 4.13 ได้แสดงค่าของปริมาณแคดเมียมสะสมในผักคะน้า ค่าที่นำเสนอเป็นค่าการสะสมในส่วนใบ เพราะส่วนลำต้นและรากของผักคะน้านั้น ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างมีค่าต่ำเกินกว่าความสามารถของเครื่องมือที่จะวิเคราะห์ได้

เนื่องจากแคดเมียมที่เป็นองค์ประกอบในกากตะกอนมีปริมาณน้อย การใส่ลงในดินจึงไม่ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในดินมีค่าสูงจนทำให้ผักคะน้าที่ปลูกมีการดึงดูดเอาแคดเมียมมาสะสมในปริมาณมาก ค่าการสะสมในใบผักคะน้า แสดงว่า แคดเมียมยังไม่สูงจนอาจเกิดความเป็นพิษต่อผักคะน้า อัตราการใส่ที่เพิ่มขึ้นแทบจะไม่มีผลต่อปริมาณแคดเมียมสะสมเลย อีกทั้งไม่พบค่าการสะสมที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการใส่ปุ๋ยเคมี ยกเว้นที่การใส่ ADS แบบโรยบนผิวหน้าดินในอัตราสูงสุด คือ 80 ตัน/เฮกตาร์ (พบแคดเมียม 2.42 ppm.) ดังนั้น แม้ว่าการใส่กากตะกอนจะทำให้ปริมาณแคดเมียมสะสมในผักคะน้าสูงขึ้นกว่า control แต่ค่าการสะสมก็ยังอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับการสะสมในผักคะน้าที่ปลูกบนดินที่ได้รับปุ๋ยเคมี และไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช อย่างไรก็ตาม ค่าสูงสุดที่วิเคราะห์ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับ tolerance level จึงมีทางเป็นไปได้ว่า ณ อัตราการใช้กากตะกอนที่สูงขึ้น จะทำให้ปริมาณแคดเมียมสะสมในพืชเพิ่มขึ้นจนเกินระดับของ tolerance level นี้ได้ การใช้กากตะกอนในอัตราที่สูงกว่า 80 ตัน/เฮกตาร์ จึงสมควรจะคำนึงถึงปริมาณแคดเมียมที่สามารถเพิ่มขึ้นได้นี้ด้วย

เมื่อเทียบกับพืชทั่ว ๆ ไป Mengal and Kirkby (1982) รายงานว่า สำหรับพืชทั่วๆ ไป ตามปกติจะมีปริมาณแคดเมียมอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 ppm. พร้อมทั้งกล่าวถึงการสังเกตเห็นความเป็นพิษต่อมนุษย์เมื่อบริโภคพืชที่มีปริมาณแคดเมียมมากกว่า 3 ppm. เป็นประจำ

เมแทบอลิซึมของแคดเมียมสามารถได้รับผลหรืออิทธิพลจากการได้รับธาตุอาหารอื่นด้วย เช่น แคลเซียมและสังกะสีจะลดการดูดดึงแคดเมียมของพืช (Mengal and Kirkby, 1982) อย่างไรก็ตาม แคดเมียมเพียง 6% เท่านั้นในอาหารที่จะถูกดูดซึมไว้ในร่างกายมนุษย์ (Reilly, 1980) ซึ่ง WHO ได้กำหนดระดับการได้รับแคดเมียมสูงสุดของบุคคลแต่ละสัปดาห์ว่า ไม่ควรเกิน 0.525 มิลลิกรัม สำหรับผู้ใหญ่ที่มีสุขภาพปกติ น้ำหนักตัว 70 กิโลกรัม (Kloke, 1982)

จะเห็นได้ว่า การสะสมแคดเมียมในผักคะน้าที่เป็นผลมาจากการใส่กากตะกอนทั้ง 2 ชนิดจนถึงอัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์ อยู่ในระดับที่ไม่ควรก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม การเติมกากตะกอนในอัตราที่สูงกว่า 80 ตัน/เฮกตาร์ น่าที่จะได้รับการพิจารณาปริมาณแคดเมียมที่จะสะสมในพืชมากขึ้น เพราะนอกจากค่าที่วิเคราะห์ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับ tolerance level ของพืชแล้ว ยังอาจจะสะสมเพิ่มมากขึ้นจนมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ได้

4.3.2 ทองแดง

ทองแดงเป็นจุลธาตุอาหารสำคัญสำหรับพืช คือ พืชต้องการใช้แต่เพียงปริมาณน้อย ปริมาณทองแดงที่มากจนพืชแสดงอาการเป็นพิษปรากฏให้เห็น คือ อยู่ระหว่าง 25-40 ppm. (Chaney, 1982) กากตะกอน ADS และ ATS ที่ใช้ใส่ลงในดินจึงไม่ทำให้ปริมาณของทองแดงสะสมในผักคะน้าสูงจนเกิดอาการเป็นพิษ ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในตาราง 4.14 ซึ่งพบว่า ค่าการสะสมสูงสุด คือ ในใบคะน้าที่ได้รับ ATS แบบผสมกับดินในอัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์ โดยมีปริมาณทองแดง 8.6 ppm. วิธีการใส่แบบผสมกับดินและโรยบนผิวหน้าดินไม่ทำให้ปริมาณทองแดงสะสมในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นลำต้นและรากคะน้าที่ได้รับ ATS

อัตราการใส่กากตะกอนมีแนวโน้มที่จะไม่ทำให้ปริมาณทองแดงสะสมในผักคะน้าที่ได้รับ ADS มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งจะเห็นได้ชัดในลำต้นและรากผักคะน้าว่า อัตราการใส่ทั้ง 4 ของแต่ละวิธีการใส่ อยู่ในกลุ่มอักษรเดียวกัน โดยที่ลำต้นและรากไม่ต่างจาก control และต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีด้วย ส่วนใบคะน้ามีค่าการสะสมสูงกว่า control แต่ไม่ต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการใส่ปุ๋ยเคมีเมื่อเทียบกับที่ทุกอัตราการใส่ สำหรับ ATS พบว่าปริมาณทองแดงสะสมมีแนวโน้มจะเพิ่มตามอัตราการใส่ โดยที่การเพิ่มนี้ บางครั้งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เช่น ใบคะน้ามีปริมาณทองแดงที่อัตรา 40 ตัน/เฮกตาร์สูงกว่าที่ 20 ตัน/เฮกตาร์ แต่ยังอยู่ในกลุ่มอักษร e เดียวกัน นอกจากนี้ ยังพบการลดลงของปริมาณทองแดงสะสมเมื่อได้รับอัตราการใส่กากตะกอนสูงขึ้นอีกด้วย คือ การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดินอัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์ ปริมาณทองแดงจะต่ำกว่าที่อัตรา 60 ตัน/เฮกตาร์

อย่างไรก็ตาม มีรายงานซึ่งพบว่าอัตราการใส่กากตะกอนที่เพิ่มขึ้นกลับทำให้ปริมาณทองแดงสะสมในเนื้อเยื่อพืชลดลง (Narwal et al., 1983) รวมทั้งอีกรายงานหนึ่งที่พบว่า อัตราการใส่กากตะกอนไม่มีผลต่อปริมาณทองแดงสะสม (King and Morris, 1972a; 1972b) เช่นเดียวกับที่พบในผลการทดลองกับผักคะน้านี้ เพราะอินทรีย์วัตถุที่สูงขึ้นตามอัตราการใส่กากตะกอนนั้น สามารถไปรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และจับเอาทองแดงไว้ได้ (Hodgeson et al., 1965) พืชจึงไม่สามารถดูดดึงทองแดงไปใช้ได้เพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มกากตะกอนลงสู่ดิน ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระดับของทองแดงที่พบในผักคะน้าไม่แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด

ปริมาณของทองแดงสะสมในพืช ส่วนมากจะอยู่ในช่วง 2-20 ppm. ของน้ำหนักแห้ง (Mengel and Kirkby, 1982) ดังนั้น ผักคะน้าจึงมีค่าการสะสมที่ไม่ต่างจากพืชทั่ว ๆ ไป

4.3.3 เหล็ก

เหล็กเป็นจุลธาตุอาหารที่สำคัญอีกธาตุหนึ่งสำหรับพืช ATS ส่งผลให้ผักคะน้ามีปริมาณเหล็กสะสมสูงกว่า ADS ยกเว้นการสะสมในลำต้นที่มีค่าใกล้เคียงกัน (ตาราง 4.15) สำหรับแต่ละวิธีการใส่นั้น อัตราที่ใช้ไม่ทำให้ปริมาณเหล็กสะสมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นในใบคะน้าที่ได้รับ ATS แบบผสมกับดิน ปริมาณเหล็กสูงสุดพบในใบคะน้าที่ได้รับ ATS แบบผสมกับดินในอัตรา 60 ตัน/เฮกตาร์ คือมีค่าเท่ากับ 195.48 ppm. ค่าทุกตำรับทดลองสูง

กว่า control อย่างมีนัยสำคัญ แต่ปริมาณเหล็กสะสมในลำต้นและรากไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับการใส่ปุ๋ยเคมี เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณจุลธาตุอาหารในพืช ซึ่งระดับที่พอเพียงสำหรับการเจริญเติบโตของพืชอยู่ในช่วง 30-300 ppm. (Chaney, 1982) ดังนั้น ผักคะน้าที่ได้รับกากตะกอนจึงมีปริมาณเหล็กอยู่ในช่วงปกติ

สำหรับพืชทั่วไปแล้ว ปริมาณเหล็กสะสมอยู่ในช่วงกว้าง Winton and Winton (1935) รายงานถึงปริมาณเหล็กสะสมในส่วนที่กินได้ (edible part) ของกะหล่ำปลีว่ามีค่าอยู่ในช่วง 74-304 ppm. และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 132 ppm. ซึ่งได้ค่าสูงกว่าอีกรายงานหนึ่งที่กล่าวว่าพืชผักใบเขียวทั่ว ๆ ไป มีปริมาณเหล็กอยู่ระหว่าง 0.4-18.0 ppm. เท่านั้น (Davidson, 1975 อ้างถึงใน Reilly, 1980) ส่วน Mengal and Kirkby (1982) ได้รายงานว่าปริมาณเหล็กในพืชทั่ว ๆ ไปมีค่าประมาณ 100 ppm. ของน้ำหนักแห้ง

ความเป็นพิษของเหล็กพบในข้าวโดยมีปริมาณเหล็กสะสมมากกว่า 300 ppm. (Tanka and Yoshida, 1970 อ้างถึงใน Mengel and Kirkby, 1982) ส่วนรายงานในมนุษย์นั้น เนื่องจากเหล็กเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อร่างกายในการสร้างเม็ดเลือดแดงรวมทั้งกระบวนการอื่น ๆ โดยปกติมนุษย์จะมีปริมาณเหล็กสะสมอยู่ประมาณ 4 กรัม (Reilly, 1980) จึงอาจกล่าวได้ว่าเหล็กในปริมาณที่วิเคราะห์พบในผักคะน้า นอกจากไม่เกิดพิษต่อพืชแล้ว ยังไม่น่าจะเกิดปัญหาต่อสุขภาพมนุษย์ด้วย

4.3.4 แมงกานีส

แมงกานีสเป็นจุลธาตุอาหารธาตุหนึ่งเช่นกัน พบว่าการใส่กากตะกอนทำให้ปริมาณแมงกานีสสะสมในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้าสูงกว่า control แต่ต่ำกว่าปุ๋ยเคมี ที่ทุกอัตราและวิธีการใส่ (ตาราง 4.16)

วิธีการใส่กากตะกอนไม่ทำให้แมงกานีสสะสมในปริมาณที่ต่างกันทางสถิติ ยกเว้นใน ADS อัตรา 60 ตัน/เฮกตาร์ อัตราการใส่ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มจะทำให้ปริมาณแมงกานีสที่วิเคราะห์ได้สูงขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดในส่วนของลำต้นและใบคะน้าที่ได้รับ ADS และพบลักษณะเดียวกับที่พบในทองแดง คือ ถึงแม้จะพบแนวโน้มการสะสมเพิ่มขึ้นสูงตามอัตรา แต่ไม่สูงกว่ากันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นในใบคะน้าที่ปลูกบนดินที่ได้รับ ADS ซึ่งอัตราสูงสุด คือ 80 ตัน/เฮกตาร์จะต่างจากปริมาณสะสมในใบคะน้าที่ได้รับกากตะกอนอัตราต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ และรากคะน้าที่ปลูกบน

ดินที่ได้รับ ATS จะพบว่าปริมาณแมงกานีสสะสมเพิ่มขึ้นตามอัตราจนถึงค่าสูงสุดที่อัตรา 60 ตัน/เฮกตาร์ และลดต่ำลงเมื่อใช้อัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์

การใส่ในรูปสารละลายโลหะหนักคลอไรด์ทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สะสมในผักคะน้าสูงกว่าการใส่กากตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบ ณ อัตราเดียวกัน อัตราต่ออัตรา ทุกอัตราและวิธีการใส่ ปัจจัยหนึ่งที่น่าจะมีบทบาท คือ pH ซึ่งพบว่า ดินสำหรับทดลองที่ได้รับโลหะหนักคลอไรด์นั้น จะมี pH ลดต่ำลงกว่าดำรับทดลองที่ได้รับกากตะกอน จึงส่งผลให้แมงกานีสสามารถละลายออกมาอยู่ในสารละลายดินได้มากกว่า นอกจากนี้ แมงกานีสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุในดินได้ (Hodgeson et al., 1965) ซึ่งการเติมกากตะกอนลงสู่ดินก็เป็นการเติมอินทรีย์วัตถุให้กับดินด้วย จึงน่าจะมีผลทำให้ปริมาณแมงกานีสที่ผักคะน้าดูดขึ้นไปใช้จากกากตะกอนมีค่าน้อยกว่าปริมาณที่คาดว่าจะมีในกากตะกอนในรูปที่พืชอาจดูดไปใช้ได้ ดังนั้น ผลที่ออกมาจึงพบว่าผักคะน้าที่ได้จากดำรับทดลองที่เติมโลหะหนักคลอไรด์มีการสะสมของแมงกานีสที่สูงกว่าจากการใส่กากตะกอน

ปริมาณของแมงกานีสที่จะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช คือ มากกว่า 500 ppm. (Chaney, 1982) และ tolerance level สำหรับแมงกานีสที่ Cunningham และคณะ (1975b) เสนอไว้มีค่าเท่ากับ 300 ppm. แต่ก็มีรายงานเช่นกันว่าพืชบางชนิด เช่น ถั่วเหลืองที่มีแมงกานีสสะสมในใบแก่ประมาณ 160 ppm. สามารถแสดงอาการเป็นพิษปรากฏให้เห็นได้ (Ohki, 1977 อ้างถึงใน Mengal and Kirkby, 1982) ซึ่งถึงอย่างไร ผักคะน้าจากการทดลองนี้ก็ยังมีปริมาณแมงกานีสไม่สูงถึงระดับที่อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษ เพราะค่าสูงสุดที่วิเคราะห์ได้จากการใส่กากตะกอน พบในใบคะน้าที่ได้รับ ADS ใส่แบบโรยบนผิวหน้าดินอัตรา ตัน/เฮกตาร์ คือมีปริมาณ 123.64 ppm. ส่วนการใส่โลหะหนักคลอไรด์นั้น ค่าสูงสุดพบที่การใส่ให้มีปริมาณเทียบเท่า ADS อัตรา 60 ตัน/เฮกตาร์ คือมีปริมาณแมงกานีส 239.87 ppm.

การเกิดพิษของแมงกานีสที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์นั้นเกิดจากการได้รับแมงกานีสของระบบทางเดินหายใจมากกว่าการได้รับแมงกานีสจากอาหาร แมงกานีสจึงดูเหมือนจะเป็นโลหะที่มีพิษน้อยเมื่อพิจารณาในแง่ของการบริโภค (Reilly, 1980) ดังนั้น แมงกานีสในปริมาณที่วิเคราะห์พบในผักคะน้าจึงยังไม่ควรมีผลต่อสุขภาพมนุษย์

4.3.5 นิเกิล

เนื่องจากนิเกิลในส่วนลำต้นและรากคะน้ามีปริมาณที่น้อยเกินกว่าความสามารถของเครื่องมือที่จะวิเคราะห์ได้ จึงนำเสนอเฉพาะปริมาณนิเกิลสะสมในส่วนใบคะน้า (ตาราง 4.17)

การใส่ ADS และ ATS ทำให้ปริมาณนิเกิลสะสมเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ เช่นเดียวกับที่ Davis (1983) รายงานไว้ ผักคะน้าที่ได้รับ ATS มีค่านิเกิลสะสมสูงกว่า ADS อย่างไรก็ตาม ค่าที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่นี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นผักคะน้าที่ได้รับ ADS แบบโรยบนผิวหน้าดิน ส่วนการใส่ในรูปโลหะหนักคลอไรด์นั้นทำให้ปริมาณนิเกิลสะสมใกล้เคียงกับการใส่กากตะกอน

พืชทั่ว ๆ ไปมีปริมาณนิเกิลอยู่ประมาณ 0.1-5.0 ppm. ของน้ำหนักแห้ง (Mengel and Kirkby, 1982) ระดับของนิเกิลในอาหารชนิดต่าง ๆ ดังนี้ ธัญพืช 0-6.45 ppm. ผลไม้ 0-0.34 ppm. พืชผัก 0-2.59 ppm. (Lisk, 1972 อ้างถึงใน Reilly, 1980) ส่วนระดับของนิเกิลที่สามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช อยู่ในช่วง 50-100 ppm. (Chaney, 1982) ดังนั้น ผักคะน้าจึงมีปริมาณนิเกิลอยู่ในระดับต่ำกว่าช่วงที่จะเกิดพิษต่อพืชมาก รวมทั้งในปัจจุบัน มีแนวความคิดที่เสนอว่านิเกิลยังอาจเป็นธาตุที่จำเป็นในปริมาณหนึ่งสำหรับพืช สัตว์และมนุษย์ด้วย (Mengel and Kirkby, 1982) ปัญหาของนิเกิลในปริมาณที่พบในผักคะน้าจึงยังไม่ควรเกิดขึ้น สำหรับมนุษย์ ตามปกติจะได้รับนิเกิลจากอาหารประมาณ 0.3-0.6 มิลลิกรัม/วัน (Schroder et al., 1961 อ้างถึงใน Reilly, 1980) ซึ่งการดูดซับนิเกิลจากอาหารและเครื่องดื่มเป็นไปได้น้อย คือ เพียงประมาณ 3-6% ของอาหารที่กินเข้าไปเท่านั้นที่จะคงหลงเหลือในร่างกาย (Sunderman, 1965 อ้างถึงใน Reilly, 1980) รวมทั้งไม่สะสมในอวัยวะส่วนใดเป็นพิเศษด้วย (Tipton and Cook, 1963 อ้างถึง Reilly, 1980) นอกจากนี้ นิเกิลก็แสดงลักษณะเช่นเดียวกับแมงกานีส คือ ความเป็นพิษต่อมนุษย์มักจะเกิดการได้รับทางระบบทางเดินหายใจและการสัมผัสโดยตรง มากกว่าจะเกิดจากการบริโภค ดังนั้น การใส่กากตะกอน ADS และ ATS ไม่ควรจะทำให้ปริมาณนิเกิลสะสมในผักคะน้าเกิดอันตรายทั้งต่อพืชและมนุษย์

4.3.6 ตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุที่สามารถเกิดพิษได้ทั้งต่อมนุษย์และสัตว์ การใส่ ADS และ ATS ทำให้ตะกั่วสะสมในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้ามีค่าสูงกว่า control ใน ADS นั้นอัตราการใส่ไม่มีผลให้ปริมาณตะกั่วมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่ง ATS ก็มีแนวโน้มที่จะเป็นเช่นเดียวกัน แต่ก็ยังเห็นความแตกต่างของปริมาณตะกั่วที่แต่ละอัตราในใบคะน้าอยู่ เช่น ใน ATS ที่ใส่แบบผสมกับดิน สำหรับปริมาณตะกั่วสะสมสูงสุด พบในใบคะน้าที่ได้รับ ATS แบบผสมกับดินอัตรา 80 ตัน/เฮกตาร์ คือ พบปริมาณตะกั่ว 10.85 ppm. (ตาราง 4.18)

มีรายงานว่า ดินที่ได้รับตะกั่วในรูปที่ละลายน้ำถึง 400 ppm. นั้นยังไม่สามารถลดการเติบโตของ clover ข้าวโอ๊ต หรือ ผักกาดหอม (Purves, 1978) ผักคะน้าสามารถทนความเป็นพิษของตะกั่วในรูปที่ละลายน้ำได้ดีโดยไม่กระทบกระเทือนความสามารถในการเจริญเติบโตได้ถึง 100 ppm. ส่วนปริมาณตะกั่วในส่วนของใบคะน้าจากพื้นที่เกษตรกรรมอยู่ในช่วง 9.78-23.61 ppm. (อรวรรณ, 2525) จะเห็นได้ว่าค่าตะกั่วสะสมที่พบในผักคะน้ายังอยู่ในปริมาณที่ยังไม่เกิดพิษต่อผักคะน้า รวมทั้งมีค่าใกล้เคียงกับผักคะน้าที่ได้รับปุ๋ยเคมีและอยู่ในช่วงที่พบตามปกติในสภาพธรรมชาติจากพื้นที่เกษตรกรรมด้วย กากตะกอนจึงไม่น่าจะก่อปัญหาเกี่ยวกับพิษของตะกั่วขึ้นได้ ทั้งนี้ WHO กำหนดว่าปริมาณการได้รับตะกั่วต่อสัปดาห์ของมนุษย์ คือ ประมาณ 50 ไมโครกรัม/กิโลกรัมของน้ำหนักตัว (Kaferstein et al., 1979 อ้างถึงใน Kloke, 1982)

4.3.7 สังกะสี

สังกะสีเป็นจุลธาตุอาหารเช่นเดียวกับทองแดง เหล็ก และแมงกานีส จากการศึกษาปริมาณสังกะสีสะสมในผักคะน้า (ตาราง 4.19) พบว่า ADS และ ATS ไม่มีผลก่อให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของการสะสมสังกะสีในแต่ละส่วนของพืช ทุกอัตราและวิธีการใส่โดยที่ค่าทุกตำรับทดลองจะสูงกว่า control นอกจากนั้น ยังไม่ทำให้ปริมาณสังกะสีสะสมในแต่ละส่วนของผักคะน้าแตกต่างทางสถิติกับการใส่ปุ๋ยเคมี ยกเว้น ADS แบบผสมกับดิน ซึ่งสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับทดลองที่เป็นโลหะหนักคลอไรด์แล้ว พบว่าโลหะหนักคลอไรด์ทำให้ค่าการสะสมสังกะสีสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าการใส่กากตะกอนส่งผลให้ปริมาณสังกะสีสะสมในผักคะน้าเพิ่มขึ้นก็จริง แต่มีอิทธิพลหรือปัจจัยอื่นมาทำให้การดูดดึงสังกะสีของพืชต่ำกว่าปริมาณที่คาดว่ามีในรูปที่ใช้ได้ทันที นอกจากนี้ การที่ค่า pH สำหรับดินทดลอง

ที่ได้รับโลหะหนักคลอไรด์มีค่าต่ำกว่าการใส่กากตะกอนยังสามารถทำให้สังกะสีละลายออกมาให้พืชดูดดึงได้มากขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตาม ปริมาณสังกะสีสะสมในผักคะน้ายังต่ำกว่าระดับที่จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช คือ ต่ำกว่าช่วง 500-1500 ppm. (Chaney, 1982) และ วรวิทย์ (2523) รายงานถึงปริมาณสังกะสีในพืช ว่า มีค่าอยู่ในช่วง 24.7-196.2 ppm. ซึ่งผักคะน้าที่วิเคราะห์ได้ก็มีค่าอยู่ในช่วงนี้ ดังนั้น ปริมาณสังกะสีที่มีในผักคะน้าจึงยังไม่ก่อให้เกิดพิษต่อผักคะน้า รวมทั้งมีค่าไม่แตกต่างจากพืชทั่ว ๆ ไปด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.13 ปริมาณแคดเมียมสะสมในส่วนใบคะน้า (ppm.) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

	ADS	ATS
control	0.10^{e}	0.10^{e}
ปุ๋ยเคมี	0.92^{cd}	0.85^{bcd}
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)		
20	1.01^{cd}	1.36^{ab}
40	0.92^{cd}	1.35^{ab}
60	0.75^{cde}	0.68^{de}
80	1.42^{bc}	0.86^{bcd}
ค่าเฉลี่ย	1.03	1.06
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)		
20	0.78^{cde}	1.02^{abcd}
40	0.49^{de}	0.69^{cde}
60	0.70^{cde}	0.68^{de}
80	2.42^{a}	1.34^{abc}
ค่าเฉลี่ย	1.10	0.93
การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)		
20	2.49^{a}	1.19^{abcd}
40	2.81^{a}	0.68^{de}
60	1.80^{ab}	1.19^{abcd}
80	1.77^{ab}	1.52^{a}
ค่าเฉลี่ย	2.14	1.15
F-value	13.21^{**}	4.09^{**}
CV (%)	29.01	34.55

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันที่ระดับ 5%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.14 ปริมาณทองแดงสะสมในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้า (ppm.) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

	ADS			ATS		
	ลำต้น	ใบ	ราก	ลำต้น	ใบ	ราก
control	0.22^{e}	1.84^{c}	2.09^{b}	0.18^{g}	1.10^{f}	2.08^{h}
ปุ๋ยเคมี	1.93^{ab}	5.68^{ab}	2.77^{ab}	2.31^{c}	4.21^{c}	2.49^{gh}
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	0.82^{de}	4.27^{b}	2.28^{b}	1.48^{def}	4.26^{e}	2.82^{efg}
40	0.45^{ef}	5.16^{ab}	2.18^{b}	1.53^{de}	4.70^{de}	2.89^{defg}
60	0.81^{def}	5.77^{ab}	2.56^{ab}	2.89^{ab}	6.28^{bcd}	3.17^{bcde}
80	0.64^{def}	6.24^{a}	2.15^{b}	2.67^{bc}	8.60^{a}	3.34^{abcd}
ค่าเฉลี่ย	0.68	5.36	2.29	2.14	5.96	3.06
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	0.69^{def}	5.11^{ab}	2.56^{ab}	1.15^{ef}	3.73^{e}	2.43^{gh}
40	0.53^{ef}	5.71^{ab}	2.15^{b}	1.09^{f}	5.03^{cde}	3.41^{abc}
60	0.83^{de}	4.26^{b}	2.29^{b}	2.69^{bc}	7.19^{ab}	3.37^{abcd}
80	0.96^{cde}	6.31^{a}	2.26^{b}	1.59^{d}	7.01^{ab}	2.82^{efg}
ค่าเฉลี่ย	0.75	5.10	2.32	1.63	5.74	3.01
การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	1.40^{abc}	5.30^{ab}	2.48^{ab}	1.46^{def}	6.65^{bc}	2.63^{fgh}
40	1.41^{ab}	6.02^{ab}	2.42^{ab}	1.71^{d}	6.43^{bcd}	3.05^{cdef}
60	1.63^{ab}	4.75^{ab}	2.31^{b}	1.56^{d}	5.09^{cde}	3.58^{ab}
80	1.04^{bcd}	4.64^{ab}	2.46^{ab}	3.20^{a}	5.11^{cde}	3.77^{a}
ค่าเฉลี่ย	1.37	5.18	2.42	1.98	5.82	3.26
F-value	13.59^{**}	4.79^{**}	2.20^{*}	56.00^{**}	12.75^{**}	11.67^{**}
CV (%)	23.29	17.98	9.50	11.07	16.61	8.19

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันที่ระดับ 5%

ตาราง 4.15 ปริมาณเหล็กสะสมในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้า (ppm.) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

	ADS			ATS		
	ลำต้น	ใบ	ราก	ลำต้น	ใบ	ราก
control	1.74^{b}	8.68^{d}	9.73^{b}	1.53^{b}	7.21^{b}	7.30^{d}
ปุ๋ยเคมี	21.75^{a}	94.67^{c}	37.48^{a}	23.89^{a}	140.33^{a}	35.66^{a}
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	20.27^{a}	123.43^{abc}	35.68^{a}	20.00^{a}	138.95^{c}	53.90^{a}
40	21.42^{a}	123.92^{abc}	37.92^{a}	22.01^{a}	194.36^{ab}	52.59^{a}
60	20.23^{a}	145.94^{a}	38.45^{a}	21.97^{a}	195.48^{ab}	57.91^{a}
80	21.63^{a}	124.51^{abc}	36.64^{a}	23.89^{a}	167.85^{abc}	58.56^{a}
ค่าเฉลี่ย	20.89	129.56	37.17	21.97	174.16	55.74
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	20.06^{a}	92.90^{c}	34.99^{a}	20.14^{a}	144.46^{c}	55.43^{a}
40	19.75^{a}	99.93^{bc}	35.32^{a}	20.05^{a}	135.01^{c}	57.92^{a}
60	22.40^{a}	92.72^{c}	34.09^{a}	21.72^{a}	152.60^{bc}	56.13^{a}
80	22.29^{a}	131.33^{abc}	36.63^{a}	21.12^{a}	172.87^{abc}	56.62^{a}
ค่าเฉลี่ย	21.13	104.22	35.26	20.76	151.24	56.53
การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	21.48^{a}	138.35^{ab}	35.37^{a}	20.73^{a}	204.20^{a}	53.73^{a}
40	22.12^{a}	118.71^{abc}	34.40^{a}	21.88^{a}	202.91^{a}	57.20^{a}
60	22.99^{a}	118.25^{abc}	32.89^{a}	21.72^{a}	194.71^{ab}	57.85^{a}
80	21.41^{a}	119.47^{abc}	35.89^{a}	22.05^{a}	205.04^{a}	57.59^{a}
ค่าเฉลี่ย	22.00	123.70	34.64	21.60	201.72	56.59
F-value	9.58**	7.84**	17.38**	11.02**	12.53**	15.27**
CV (%)	14.90	18.90	8.73	14.13	15.71	11.99

ตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันที่ระดับ 5%

ตาราง 4.16 ปริมาณแมงกานีสสะสมในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้า (ppm.) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

	ADS			ATS		
	ลำต้น	ใบ	ราก	ลำต้น	ใบ	ราก
control	1.79^{e}	25.49^{g}	0.11^{f}	1.86^{g}	25.42^{g}	0.09^{g}
ปุ๋ยเคมี	21.73^{a}	171.88^{b}	4.02^{a}	20.17^{b}	181.98^{abc}	3.74^{a}
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	3.95^{de}	37.58^{fg}	1.28^{de}	6.82^{efg}	55.07^{ef}	0.94^{ef}
40	4.18^{de}	44.88^{fg}	1.35^{de}	7.82^{def}	74.19^{e}	1.34^{de}
60	6.88^{de}	54.88^{fg}	1.67^{de}	8.73^{def}	79.62^{e}	1.39^{de}
80	7.25^{d}	101.13^{cd}	1.61^{de}	12.14^{cde}	85.33^{e}	1.16^{def}
ค่าเฉลี่ย	5.57	59.62	1.48	8.88	73.55	1.21
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	6.12^{d}	53.32^{efg}	1.24^{e}	5.58^{fg}	81.66^{e}	0.57^{fg}
40	6.32^{d}	72.28^{def}	1.17^{e}	6.88^{efg}	92.37^{e}	1.86^{cd}
60	6.80^{d}	86.89^{cde}	1.21^{e}	8.55^{def}	92.15^{e}	3.35^{ab}
80	7.30^{d}	123.64^{c}	1.44^{de}	9.36^{def}	106.89^{de}	1.87^{cd}
ค่าเฉลี่ย	6.64	84.03	1.27	7.56	93.27	1.91
การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	13.51^{c}	171.21^{b}	2.15^{cd}	13.45^{cd}	142.94^{cd}	2.61^{b}
40	15.15^{bc}	214.52^{a}	3.55^{ab}	16.26^{bc}	155.97^{bc}	3.01^{ab}
60	17.43^{abc}	239.87^{a}	3.52^{ab}	21.54^{b}	187.47^{ab}	3.38^{ab}
80	18.81^{ab}	217.43^{a}	2.86^{bc}	29.52^{a}	206.99^{a}	2.89^{b}
ค่าเฉลี่ย	16.23	210.76	3.02	20.19	173.34	2.97
F-value	22.73**	40.86**	19.03**	17.25**	20.73**	22.17**
CV (%)	23.22	17.37	23.05	25.91	18.39	21.11

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันที่ระดับ 5%

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.17 ปริมาณนิเกิลสะสมในส่วนใบคะน้า (ppm) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

	ADS	ATS
control	2.89^{c}	2.92^{d}
ปุ๋ยเคมี	5.02^{a}	5.46^{c}
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)		
20	2.93^{c}	7.69^{ab}
40	3.25^{c}	7.73^{ab}
60	3.76^{bc}	7.98^{ab}
80	4.77^{ab}	8.29^{ab}
ค่าเฉลี่ย	3.68	7.92
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)		
20	2.89^{c}	5.12^{c}
40	3.01^{c}	5.42^{c}
60	3.68^{c}	6.93^{b}
80	3.70^{bc}	8.15^{ab}
ค่าเฉลี่ย	3.32	6.42
การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)		
20	3.07^{c}	6.94^{b}
40	3.58^{c}	7.02^{ab}
60	3.84^{bc}	7.03^{ab}
80	3.94^{abc}	7.52^{ab}
ค่าเฉลี่ย	3.61	7.13
F-value	4.09**	14.69**
CV (%)	15.98	10.08

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันที่ระดับ 5%

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.18 ปริมาณตะกั่วสะสมในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้า (ppm.) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

	ADS			ATS		
	ลำต้น	ใบ	ราก	ลำต้น	ใบ	ราก
control	0.40^{f}	4.46^{d}	0.23^{e}	0.32^{e}	5.46^{e}	0.20^{d}
ปุ๋ยเคมี	7.89^{a}	7.19^{c}	1.98^{a}	7.77^{abc}	8.62^{bcd}	1.60^{abc}
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	2.32^{e}	8.24^{bc}	0.42^{cde}	6.93^{abcd}	7.49^{d}	1.30^{abcd}
40	2.49^{e}	8.00^{bc}	0.29^{de}	9.26^{a}	10.28^{abc}	0.64^{bcd}
60	5.55^{bc}	7.77^{bc}	1.00^{bcde}	8.86^{ab}	10.53^{ab}	1.73^{abc}
80	3.95^{cde}	7.27^{c}	1.02^{bcde}	6.23^{bcd}	10.85^{a}	1.95^{ab}
ค่าเฉลี่ย	3.58	7.82	0.68	7.82	9.79	1.41
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	3.82^{cde}	6.39^{cd}	0.23^{e}	5.67^{cd}	8.32^{cd}	0.47^{cd}
40	2.62^{e}	6.28^{cd}	0.98^{bcde}	6.32^{bcd}	10.39^{abc}	0.91^{abcd}
60	3.05^{e}	6.09^{cd}	0.49^{cde}	7.16^{abc}	10.69^{ab}	1.39^{abcd}
80	3.62^{de}	7.61^{bc}	1.20^{abcd}	8.54^{ab}	10.05^{abc}	0.88^{abcd}
ค่าเฉลี่ย	3.28	6.59	0.73	6.92	9.86	0.91
การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	5.27^{bcd}	7.92^{bc}	0.74^{bcde}	5.64^{cd}	9.93^{abc}	1.33^{abcd}
40	5.03^{bcd}	8.07^{bc}	1.08^{abcde}	4.37^{d}	9.73^{abc}	2.00^{a}
60	6.28^{ab}	13.35^{a}	1.66^{ab}	6.32^{bcd}	9.36^{abcd}	2.05^{a}
80	5.54^{bc}	10.02^{b}	1.34^{abc}	7.54^{abc}	9.46^{abcd}	1.23^{abcd}
ค่าเฉลี่ย	5.53	9.84	1.21	5.97	9.62	1.65
F-value	11.98^{**}	8.47^{**}	3.95^{**}	8.38^{**}	6.03^{**}	2.22^{*}
CV (%)	22.95	15.78	51.86	20.61	11.61	53.70

ตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันที่ระดับ 5%

ตาราง 4.19 ปริมาณสังกะสีสะสมในส่วนต่าง ๆ ของผักคะน้า (ppm.) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

	ADS			ATS		
	ลำต้น	ใบ	ราก	ลำต้น	ใบ	ราก
control	5.58^{d}	16.08^{g}	0.83^{c}	5.63^{d}	21.29^{g}	0.73^{d}
ปุ๋ยเคมี	25.05^{bc}	58.10^{f}	4.22^{b}	22.91^{c}	72.55^{ef}	4.52^{c}
การใส่แบบผสมกับดิน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	29.91^{b}	78.50^{d}	3.64^{b}	25.13^{c}	79.88^{ef}	4.49^{c}
40	25.06^{b}	74.10^{de}	3.87^{b}	26.10^{c}	87.79^{de}	4.30^{c}
60	23.66^{bc}	74.33^{de}	3.83^{b}	24.52^{c}	80.04^{ef}	5.89^{bc}
80	26.81^{bc}	75.10^{d}	3.45^{b}	21.89^{c}	78.72^{ef}	4.47^{c}
ค่าเฉลี่ย	26.36	75.51	3.70	24.41	81.61	4.79
การใส่แบบโรยบนผิวหน้าดิน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	23.77^{bc}	67.48^{def}	4.10^{b}	22.83^{c}	65.86^{f}	4.23^{c}
40	23.03^{bc}	65.38^{def}	3.84^{b}	21.87^{c}	71.06^{ef}	4.39^{c}
60	21.96^{c}	61.16^{ef}	3.72^{b}	25.04^{c}	77.86^{ef}	4.47^{c}
80	22.71^{c}	68.98^{def}	4.01^{b}	23.01^{c}	73.64^{ef}	4.17^{c}
ค่าเฉลี่ย	22.87	65.75	3.92	23.19	72.11	4.32
การใส่สารละลายโลหะหนักคลอไรด์ให้มีปริมาณโลหะหนักเทียบเท่ากับที่มีในกากตะกอน (ตัน/เฮกตาร์)						
20	26.71^{bc}	101.56^{c}	4.44^{b}	22.68^{c}	101.71^{cd}	4.09^{c}
40	28.43^{bc}	114.62^{bc}	6.75^{a}	32.40^{b}	105.37^{bc}	7.60^{ab}
60	27.79^{bc}	119.79^{b}	7.16^{a}	32.57^{b}	125.71^{a}	9.54^{a}
80	43.57^{a}	173.47^{a}	6.56^{a}	40.70^{a}	121.19^{ab}	9.56^{a}
ค่าเฉลี่ย	31.63	127.36	6.23	32.09	113.50	7.70
F-value	14.36**	85.80**	11.57**	18.79**	30.66**	10.36**
CV (%)	14.14	8.34	18.97	12.42	10.32	24.14

ตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง มีความแตกต่างกันที่ระดับ 5%