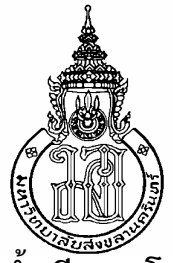


แนวทางการลดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา และในดินที่ปนเปื้อนโบรอน

Reducing Guidance of Boron in Wastewater from Rubber Wood Factories and in Contaminated Soil

ณัฐพงศ์ เยาว์จุ้ย

Natthapong Yaojui

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Soil Resources Management
Prince of Songkla University
2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ แนวทางการลดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราและในดินที่ปนเปื้อนโบรอน

ผู้เขียน นายณัฐพงศ์ เยาว์จุ้ย

สาขาวิชา การจัดการทรัพยากรดิน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.จำเป็น อ่อนทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ นิลนนท์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา เพ็งหนู)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ มณีพงศ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จำเป็น อ่อนทอง)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ แนวทางการลดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราและในดินที่ปนเปื้อนโบรอน

ผู้เขียน นายณัฐพงศ์ เยาว์จุ้ย

สาขาวิชา การจัดการทรัพยากรดิน

ปีการศึกษา 2552

บทคัดย่อ

น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารามีธาตุโบรอนเป็นองค์ประกอบสูง (1,000-1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อปนเปื้อนในดิน ทำให้พืชเกิดอาการโบรอนเป็นพิษ จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาแนวทางกำจัดโบรอนในน้ำเสีย และลดโบรอนในดิน โดยทดลองในชุดดินคอหงส์ (Kho Hong: Coarse-Loamy, Kaolinitic, Isohyperthermic Typic Kandiudults) และใช้มะเขือเทศพันธุ์สีดา (*Lycopersicon esculentum*, Mill) เป็นพืชทดสอบ ดำเนินการในห้องทดลองและในโรงเรือนกระจก ประกอบด้วย 5 การทดลอง ดังนี้

1) การใช้ซีโอไลต์ดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการบำบัด และที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) มี 3 ซ้ำ 5 ตำรับการทดลอง คือ ใช้ซีโอไลต์อัตรา 0, 3, 6, 9 และ 12 กรัม ใส่ลงไปในน้ำเสีย 30 มิลลิลิตร นำไปเขย่า แล้วเก็บน้ำเสียมาวิเคราะห์โบรอน และธาตุที่เป็นองค์ประกอบในน้ำเสีย

2) การใส่ปูนขาวยกระดับค่าปฏิกิริยาดินของดินที่ปนเปื้อนโบรอน โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD มี 5 ซ้ำ 5 ตำรับการทดลอง คือ ไม่ใส่ปูน และใส่ปูนเพิ่มค่าปฏิกิริยาดินที่ปนเปื้อนโบรอน (10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ให้ได้เท่ากับ 5, 6, 7 และ 8 แล้วนำดินไปบ่มในสภาวะชื้นที่ระยะเวลาต่างๆ และเก็บดินมาวิเคราะห์โบรอนที่สกัดได้

3) ผลของการใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ วางแผนการทดลองแบบ CRD มี 5 ซ้ำ 4 ตำรับการทดลอง คือ ใส่ปูนอัตรา 0.00, 0.07, 0.14 และ 0.28 กรัม ในดินคอหงส์ 5 กิโลกรัม แล้วปลูกต้นกล้ามะเขือเทศ (อายุ 30 วัน) และเก็บข้อมูลด้านการเจริญเติบโต และวิเคราะห์ธาตุอาหารในส่วนเหนือดินของมะเขือเทศ และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินก่อน และหลังการทดลอง

4) การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอน โดยนำดินมาเติมให้มีโบรอนสูงประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม วางเป็นชั้นในคอลัมน์บนดินปกติ (0.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และชะด้วยน้ำกลั่น โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD มี 3 ซ้ำ 5 ตำรับการทดลอง คือ

ใช้น้ำอัตรา 0, 167.5 (ความจุความชื้นสนาม), 1,000, 2,000 และ 4,000 มิลลิเมตร แล้วเก็บดิน และสารละลายหลังจากผ่านการชะล้างดินมาวิเคราะห์โบรอน

5) ผลการใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ วางแผนการทดลองแบบ CRD มี 5 ซ้ำ 4 ตำรับการทดลอง คือ ใช้ชุดดินคอหงส์ปนเปื้อนน้ำเสียที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำอัตรา 0, 300, 600 และ 900 มิลลิเมตร โดยปลูกต้นกล้ามะเขือเทศอายุ 30 วัน ในชุดดินคอหงส์ที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำอัตราต่างๆ 5 กิโลกรัม และเก็บข้อมูลด้านการเจริญเติบโต และวิเคราะห์ธาตุอาหารในส่วนเหนือดินของมะเขือเทศ และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินก่อน และหลังการทดลอง

ผลการทดลองพบว่า การใส่ซีโอไลต์ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัด 30 มิลลิลิตร ซีโอไลต์ดูดซับโบรอนได้น้อย โดยซีโอไลต์อัตรา 12 กรัม ทำให้โบรอนในน้ำเสียลดลงมากที่สุด คือ 1,232.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่น้ำเสียที่ไม่ใส่ซีโอไลต์มีโบรอน 1,276.8 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังสามารถดูดซับสีของน้ำเสียได้ โดยทำให้สีของน้ำเสียใสขึ้น ส่วนในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน พบว่า ซีโอไลต์ดูดซับโบรอนได้น้อยเช่นเดียวกัน และการใช้ซีโอไลต์อัตรา 12 กรัม ทำให้โบรอนในน้ำเสียลดลงมากที่สุด คือ ลดลงจากในน้ำเสียที่ไม่ใส่ซีโอไลต์ 416.2 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 332.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

การใส่ปูนขาวยกระดับค่าพีเอชดินที่ปนเปื้อนโบรอน พบว่า การยกระดับค่าพีเอช ดินจาก 5 ถึง 7 ไม่สามารถทำให้โบรอนที่เป็นประโยชน์ในดินลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษกับพืชได้ และเมื่อทำการทดลองผลของปูนขาวต่อการดูดใช้โบรอนของมะเขือเทศ พบว่าแคลเซียมจากปูนขาวลดการดูดใช้โบรอนของมะเขือเทศได้ แต่มะเขือเทศตายหลังจากการปลูก 4 วัน การชะล้างโบรอนในดินด้วยน้ำ พบว่า การใช้น้ำมากกว่าระดับความจุความชื้นสนามของดิน 1,000 มิลลิเมตร ทำให้ธาตุโบรอนที่เป็นประโยชน์ในดิน (11.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษต่อพืช (<3 มิลลิกรัมต่อลิตร) และสามารถชะล้างธาตุโบรอนออกจากหน้าตัดดินที่ระดับความลึกมากกว่า 50 เซนติเมตร ได้

เมื่อศึกษาการชะล้างโบรอนออกจากดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา พบว่า การใช้น้ำอัตรา 300, 600 และ 900 มิลลิเมตร ชะล้างดินสามารถทำให้โบรอนที่สกัดได้ในดินลดลง และทำให้มะเขือเทศสามารถเจริญเติบโตได้ และการใช้น้ำมากกว่าอัตรา 600 มิลลิเมตร ชะล้างดินทำให้มะเขือเทศเจริญเติบโตดีที่สุด โดยทำให้มะเขือเทศมีความสูง จำนวนใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง สูงที่สุด

จากการทดลองนี้ สรุปได้ว่า การใช้น้ำชะล้างสามารถลดโบรอนที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราได้

Thesis Title	Reducing Guidance of Boron in Wastewater from Rubber Wood Factories and in Contaminated Soil
Author	Mr. Natthapong Yaojui
Major Program	Soil Resources Management
Academic Year	2009

ABSTRACT

Wastewater from rubber wood factories contains high boron levels (1,000-1,500 mg L^{-1}). When soil is boron contaminated, it leads to B-toxicity symptoms in plants, therefore this study was conducted to establish a guidance to reduce B in wastewater and soil. The experiment was conducted using Kohong soil series (Kho Hong: Coarse-Loamy, Kaolinitic, Isohyperthermic Typic Kandiudults). Tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.) C.V. Srida was used as the test crop. There were 5 experiments conducted in a laboratory and greenhouse facilities as follows:

1) Using natural zeolites (mordenite) to absorb B in treated wastewater employing a Fenton reaction and in untreated wastewater. An experiment was designed as completely randomized design (CRD) with 3 replicates and consisted of 5 treatments such as using zeolites at rates of 0, 3, 6, 9 and 12 g in 30 mL wastewater, shaken and analyzed for the concentrations of B and other elements contained in the wastewater.

2) Reducing B by adding calcium hydroxide to raise the pH of B-contaminated soils. An experiment design was CRD with 5 replicates and 5 treatments as follows: without calcium hydroxide, adding calcium hydroxide to raise the pH of contaminated soils (10 mg kg^{-1}) to 5, 6, 7 and 8. All treatments were incubated under humid condition and extractable B was analyzed at different times.

3) Effect of lime addition in contaminated soil from rubber wood factories on growth of tomato. An experiment design was CRD with 5 replicates and 4 treatments as follows: adding calcium hydroxide at rates of 0.00, 0.07, 0.14, 0.28 g/5 kg Khohong soil. The 30-days-tomato seedlings were transplanted into 5 kg of soil. Plant growth was recorded and nutrients in plant were analyzed. Soil was sampled before and after experiment for chemical analysis.

4) Leaching B in B-contaminated soil. Preparing B-contaminated soil (10 mg B kg^{-1}) over uncontaminated soil (0.30 mg B kg^{-1}) in a column and leached with

distilled water. An experiment design was CRD with 3 replicates and 5 treatments as follows: leaching B by application of 0, 167.5 (field capacity), 1,000, 2,000 and 4,000 mm of water. The soil in the column and lechate were collected for analyze of boron.

5) Effect of leaching B-contaminated soil from rubber wood factories on growth of tomato. An experiment design was CRD with 5 replicates and 4 treatments as follows: application of tap water at rates of 0, 300, 600 and 900 mm. The 30-day-tomato seedlings were transplanted in 5 kg of Kohong soil series. Plant growth was recorded and nutrients in plant were analyzed. Soils were sampled before and after experiment for chemical analysis.

It was found that addition of zeolites in 30 mL untreated wastewater minimally adsorbed B. Adding 12 g of zeolites significantly reduced B concentration to 1,232.4 mg L^{-1} while the wastewater in without zeolites treatments contained 1,276.8 mg L^{-1}. Moreover, zeolites improved the turbidity of wastewater. In treated wastewater, it was found that 12 g zeolites was the most effective way of reducing B concentration. The B in wastewater was reduced from 416.2 mg L^{-1} in the control to 332.5 mg L^{-1}.

Using calcium hydroxide to raise soil pH of contaminated soil to 5-7 did not reduce B down to nontoxic level. The results of the experiment of the effect of adding calcium hydroxide in B-contained soil on boron uptake of tomato indicated that calcium hydroxide decreased boron uptake by tomato. However, tomato seedlings died after 4 days of transplantation. It was found that using water 1,000 mm in excess of field capacity decreased soil B availability (11.11 mg kg^{-1}) down to nontoxic level (<3 mg kg^{-1}) B can be leached to a depth greater than 50 cm.

As regards to using water in the leaching of B-contained soil from rubber wood factories, results indicated that using water at the levels of 300, 600 and 900 mm to leach boron in soil decreased extractable boron and seedling showed better growths than that of control. It was also found that using 600 mm of water resulted in an optimal growth rate of tomatoes in terms of leaf number; fresh, dry weight; and height.

These experiments showed that leaching with water reduced B in soil that has been contaminated by wastewater from rubber wood industries.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จำเป็น อ่อนทอง ประธานคณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ช่วยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในด้านต่าง ๆ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไข จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ และสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างยิ่ง ที่กรุณาให้คำปรึกษา และช่วยชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ นิลนนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา เพ็งหนู และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ มณีพงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำชี้แนะข้อบกพร่องในด้านการเขียนวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ และวิชาการด้านต่าง ๆ ให้ ขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกท่าน ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในด้านงานธุรการ ด้านอุปกรณ์ และขอขอบคุณ คุณพิรุณ ติระพัฒน์ คุณสมเกียรติ เกื้อหนุน และคุณเจษฎา จิตรหลัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานทดลอง

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุนทร และคุณแม่บุญทิพย์ เยาว์จุ้ย รวมถึงคุณสุทธิพร และคุณเอกพจน์ เยาว์จุ้ย น้องชาย ผู้ซึ่งสนับสนุนให้มีโอกาสทางการศึกษา ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจตลอดมา ส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ณัฐพงศ์ เยาว์จุ้ย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการตารางภาคผนวก	(10)
รายการรูป	(11)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	2
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	15
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	16
วัสดุและสารเคมี	16
อุปกรณ์	17
วิธีการวิจัย	18
3. ผลการทดลอง	26
4. วิจารณ์ผลการทดลอง	42
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	60
ประวัติผู้เขียน	85

รายการตาราง

ตารางที่ หน้า

1. สารเคมีที่ใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารและอัตราการใช้..... 21
2. ผลของซีโอไลต์อัตราต่าง ๆ ต่อค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และธาตุอาหารในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้น้ำเสีย 30 มิลลิลิตร..... 27
3. ผลของซีโอไลต์อัตราต่าง ๆ ต่อค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และธาตุอาหารในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้น้ำเสีย 30 มิลลิลิตร..... 27
4. ค่าพีเอชของดินปนเปื้อนโบรอนหลังจากใส่ปูนขาว..... 29
5. ปริมาณโบรอนที่สกัดได้ในดินที่ระดับค่าพีเอชต่าง ๆ..... 29
6. ผลของการใส่ปูนขาวต่อสมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา..... 31
7. การเจริญเติบโตของมะเขือเทศอายุ 35 วัน (หลังย้ายปลูก 5 วัน) หลังจากใส่ปูนขาว..... 31
8. ปริมาณโบรอน ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าในน้ำหลังจากชะล้างโบรอนในดิน..... 34
9. ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังจากผ่านการชะล้างที่ระดับความลึกต่าง ๆ. 35
10. สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำก่อนการทดลอง..... 36
11. สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำหลังการทดลอง..... 37

รายการตารางภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่ หน้า

1. ผลของซีโอไลต์ต่อการดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน 30 มิลลิลิตร..... 61
2. ผลของซีโอไลต์ต่อการดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน 30 มิลลิลิตร..... 63
3. ผลของการเพิ่มค่าพีเอชดินปนเปื้อนโบรอนจากกรดบอริก..... 65
4. สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราหลังจากใส่ปูนขาวก่อนปลูกพืช..... 70
5. สมบัติทางเคมีบางประการและการเจริญเติบโตของต้นมะเขือเทศอายุ 35 วัน (หลังย้ายปลูก 5 วัน) หลังจากใส่ปูนขาว..... 72
6. สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ใส่ปูนขาวหลังการทดลองปลูกมะเขือเทศ..... 73
7. สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร..... 75
8. สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร..... 76
9. สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำที่ระดับความลึก 30-50 เซนติเมตร..... 77
10. สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของน้ำที่ผ่านการชะล้างดิน..... 78
11. สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำก่อนการทดลอง..... 79
12. การเจริญเติบโตของต้นมะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำ... 81
13. ปริมาณธาตุอาหารของต้นมะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำ..... 82
14. สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำหลังการทดลอง..... 83

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.	ลักษณะอาการความเป็นพิษของพืชจากธาตุโบรอน.....	8
2.	วิธีการชะล้างโบรอนในดินด้วยน้ำกลั่น.....	22
3.	สีของน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดหลังจากใช้ซีโอไลต์อัตราต่าง ๆ ดูดซับธาตุโบรอนในน้ำเสีย 30 มิลลิลิตร.....	28
4.	ผลของปูนขาวต่อความเข้มข้นของธาตุโบรอนในส่วนเหนือดินของต้นมะเขือเทศอายุ 35 วัน (หลังย้ายปลูก 5 วัน) ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสีย.....	30
5.	ผลของการใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ A มะเขือเทศอายุ 35 วัน (หลังย้ายปลูก 5 วัน) และ B ลักษณะใบมะเขือเทศอายุ 34 วัน (หลังย้ายปลูก 4 วัน).....	32
6.	โบรอนที่สกัดได้ในดินที่ปนเปื้อนโบรอนหลังจากการชะล้างด้วยน้ำ A 0-15 เซนติเมตร, B 15-30 เซนติเมตร และ C 30-50 เซนติเมตร ในคอลัมน์.....	34
7.	การเจริญเติบโตของมะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน) ในดินปนเปื้อนน้ำเสียหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำ A ความสูง, B จำนวนใบ C น้ำหนักสด และ D น้ำหนักแห้ง.....	38
8.	ธาตุโบรอน A, ไนโตรเจน B, ฟอสฟอรัส C และโพแทสเซียม D ในส่วนเหนือดินของต้นมะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน) ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำ.....	40
9.	มะเขือเทศที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำเสียหลังจากถูกชะล้าง A มะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน) และ B ลักษณะใบมะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน).....	41

บทที่ 1

บทนำ

1. บทนำต้นเรื่อง

โบรอน (B) เป็นธาตุอาหารจุลภาคที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งดินโดยทั่วไปมีปริมาณโบรอนอยู่ในระดับที่เพียงพอ แต่ระดับของโบรอนในดินช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชทั่วไปอยู่ในช่วงที่แคบมาก คือ 1-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Hesse, 1971 อ้างโดย สุพจน์ และ กนกพันธุ์, 2536) หากมีการจัดการธาตุโบรอนในดินไม่เหมาะสม พืชมีโอกาสเสี่ยงต่อการขาด และเป็นพิษจากโบรอนได้สูง ซึ่งสาเหตุของโบรอนเป็นพิษส่วนใหญ่นั้นเกิดมาจากการใช้ปุ๋ยอินทรีย์เทศบาล (Osturk *et al.*, 2004) การใช้น้ำชลประทานที่มีโบรอนปนเปื้อน และเกิดจากดินเค็มชายทะเล (Nabble *et al.*, 1997)

ดินในประเทศไทยส่วนใหญ่มีโบรอนที่เป็นประโยชน์ต่ำ (0.08-0.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (เบญจวรรณ, 2537; เพิ่มพูน และคณะ, 2530; สำเนา และคณะ, 2532; สุวพันธ์ และคณะ, 2547; เพิ่มพูน และ สุกัลยา, 2532) และมีพืชหลายชนิดแสดงอาการขาดโบรอน เช่น ถั่วลิสง (เพิ่มพูน และคณะ 2530) อ้อย (ดำริ และคณะ, 2545) และมะละกอ (มงคล และคณะ, 2547) แต่ในพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกับโรงงานแปรรูปไม้ยางพารากลับมีพืชหลายชนิดแสดงอาการปลายใบ และขอบใบเป็นรอยไหม้สีน้ำตาล คล้ายกับอาการเป็นพิษจากโบรอน จากการศึกษาของ เจษฎา (2551) ได้นำน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารารดให้กับต้นมะเขือเทศ พบว่า ต้นมะเขือเทศแสดงอาการผิดปกติเหมือนกับพืชบริเวณโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา และได้ทำการศึกษาหาสาเหตุของอาการดังกล่าว โดยเตรียมสารละลายของธาตุที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีความเข้มข้นเท่ากันกับในน้ำเสียแล้วรดให้กับต้นมะเขือเทศ พบว่า อาการดังกล่าวของมะเขือเทศเกิดจากโบรอนเป็นพิษ ซึ่งสาเหตุที่พืชได้รับน้ำเสีย และเกิดอาการเป็นพิษนั้นเนื่องจากในกระบวนการผลิตของโรงงานได้ใช้สารประกอบโบรอนพวกกรดบอริก ($B(OH)_3$) และสารบอแร็กซ์ ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) อัดเข้าไปในเนื้อไม้เพื่อรักษาเนื้อไม้จากมอด แมลง และเชื้อรา และเมื่อใช้ติดต่อกันหลายครั้งน้ำยานี้จะเปลี่ยนเป็นสีดำ และถูกปล่อยทิ้งเป็นน้ำเสีย และลือพงศ์ (2547) รายงานว่า ในน้ำเสียส่วนนี้มีโบรอนเป็นองค์ประกอบอยู่สูงมาก (1,000-1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังนั้นหากน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราปนเปื้อนสู่ดิน จะทำให้พืชบริเวณนั้นเกิดอาการโบรอนเป็นพิษ และทำให้พืชตายได้ ซึ่งมีรายงานว่า พบพืชเกิดอาการโบรอนเป็นพิษที่ อ.คลองท่อม จ.กระบี่ เมื่อ ปี พ.ศ. 2545 โดยเกิดจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูป

ไม้ยางพาราวู้ด เวิร์ค เครดิชั่น จำกัด ไหลนองออกสู่พื้นที่ของชาวบ้านบริเวณข้างเคียง ทำให้สวนยางพาราของชาวบ้านเนื้อที่กว่า 50 ไร่ ยืนต้นตาย และอีกมากกว่า 100 ไร่ มีอาการใบไหม้สร้างความเดือดร้อนต่อชาวบ้านที่อาศัยอยู่บริเวณนั้นเป็นอย่างมาก (http://www.newspnn.net accessed 29/09/2550) และที่โรงงานแปรรูปไม้ยางพาราใน อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา เมื่อ ปี พ.ศ. 2540 น้ำเสียเกิดไหลนองออกสู่พื้นที่ของชาวบ้าน และทำความเสียหายให้แก่สวนยางพารา สวนผลไม้ และพืชบริเวณรอบ ๆ โรงงาน โดยทำให้พืชเกิดอาการใบไหม้เป็นจำนวนมากเช่นกัน และเมื่อระยะเวลา 4 ถึง 5 ปี ที่ผ่านมาผลิตภัณฑ์จากยางพารามีราคาสูง รัฐบาลได้ส่งเสริมให้ขยายพื้นที่ปลูกยางพาราออกไปสู่พื้นที่ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้โรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่มีการอัดน้ำยาไม้ได้เพิ่มจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย ปัจจุบันมีโรงงานเหล่านี้ทั่วทั้งประเทศไทยจำนวน 221 โรงงาน และมีมากที่สุดในภาคใต้จำนวนถึง 163 โรงงาน (http://bvai.dpim.go.th accessed 25/12/2550) ดังนั้นในอนาคตอาจจะมีพืชได้รับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา และเกิดอาการโบรอนเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น

โบรอนที่เป็นประโยชน์ในดินมีอยู่น้อย โบรอนในดินถูกดูดซับโดยออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม (Goldberg and Glaubig, 1985) และสารอินทรีย์ (Yermiyaho *et al.*, 1995) และการเพิ่มค่าปฏิกิริยาดิน (pH) สามารถทำให้ดินดูดซับโบรอนได้มากขึ้น (เพิ่มพูน, 2546) และมีการศึกษาการใช้ซีโอไลต์ดูดซับโบรอนในน้ำเสีย และในดิน พบว่า ซีโอไลต์สามารถดูดซับโบรอนได้ (Gainer, 1993; Osturk *et al.*, 2004) นอกจากนี้ Osturk และคณะ (2004) ยังพบว่า การใช้น้ำชะล้างดินก็ทำให้ปริมาณโบรอนที่เป็นประโยชน์ในดินลดลงได้ ดังนั้นจึงควรศึกษาหาแนวทางการลดโบรอนในน้ำเสีย และในดิน เพื่อแก้ปัญหาความเป็นพิษของโบรอนในน้ำเสียจากกระบวนการอัดน้ำยาไม้ของโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา

2. การตรวจเอกสาร

พืชที่ได้รับโบรอนปริมาณสูงจะเกิดอาการเป็นพิษ โดยทำให้ใบของพืชเกิดอาการผิดปกติ และทำให้ความสามารถในการสังเคราะห์แสงของพืชลดลง ส่งผลทำให้ผลผลิตของพืชต่ำลง (ดำริ และคณะ, 2545) หากพืชเกิดอาการเป็นพิษรุนแรงพืชจะแห้งตาย ซึ่งปัญหาดังกล่าวพบมากกับพืชที่ขึ้นอยู่ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา แต่อาจจะมีแนวทางที่สามารถจะแก้ไขได้โดยการใช้ซีโอไลต์ดูดซับโบรอนในน้ำเสีย และในดิน การเพิ่มค่า pH ของดิน การเติมเหล็กออกไซด์ลงไปในดิน และการใช้น้ำชะล้างโบรอนในดิน

2.1 โบรอนในดิน

โบรอนเป็นธาตุที่มีอยู่น้อยในเปลือกโลก (2-200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช เป็นองค์ประกอบอยู่ในหิน (rock) และแร่ (mineral) โบรอนส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ($B(OH)_3$ และ $B(OH)_4^-$) มีอยู่น้อยมาก (น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของโบรอนทั้งหมด) โบรอนมีมากในหินตะกอน (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และในแร่ทัวมาลีน เมื่อหินและแร่เหล่านี้สลายตัวก็จะปลดปล่อยโบรอนออกมาในสารละลายดิน ซึ่งรูปของโบรอนที่เป็นประโยชน์กับพืชในสารละลายดินนั้นจะขึ้นอยู่กับค่า pH ของดินเป็นสำคัญ โดยโบรอนจะอยู่ในรูปของกรดบอริก $B(OH)_3$ เมื่อค่า pH ของดินอยู่ในช่วง 5-9 และเมื่อค่า pH ของดินมากกว่า 9 กรดบอริกจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสกับน้ำเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของบอเรตไอออน $B(OH)_4^-$ (Havlin *et al.*, 2005) และโบรอนในสารละลายดินบางส่วนจะสูญเสียไปจากดินโดยกระบวนการชะล้างของน้ำ (Osturk *et al.*, 2004) และมีบางส่วนที่ถูกดูดซับอยู่ที่บริเวณผิวของแร่ดินเหนียว สารอินทรีย์ และสารพวกออกไซด์ของโลหะ ซึ่งโบรอนส่วนนี้เป็นรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช (เพิ่มพูน, 2546) จากการศึกษาของ สุวพันธ์ และคณะ (2547) พบว่า ดินที่มีแร่ดินเหนียว และอินทรียวัตถุต่ำ มีโบรอนที่เป็นประโยชน์อยู่น้อย (0.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และจากการศึกษาของ Goldberg และ Glaubig (1985) พบว่า ดินที่มีปริมาณเหล็ก และอะลูมินัมออกไซด์สูงมีโบรอนที่เป็นประโยชน์อยู่น้อยเช่นกัน นอกจากนี้โบรอนที่เป็นประโยชน์ในดินจะมีอยู่น้อยในดินที่มีอนุภาคของแร่ดินเหนียวขนาดเล็ก (Kerent and Talpaz, 1984) ดินที่มีแร่ดินเหนียวชนิด Montmorilonite สูง (Goldberg, 1997) ดินที่มีค่า pH มากกว่า 9 (Goldberg *et al.*,1993 ; Toner, 1993) และดินที่มีความชื้นต่ำ (สุพจน์ และ กนกพันธ์, 2536) นอกจากนี้ในสารละลายดินที่มีความเข้มข้นของโบรอนสูง (มากกว่า 270 มิลลิกรัมต่อลิตร) ก็ทำให้โบรอนรูปที่เป็นประโยชน์ในสารละลายดินเกิดการรวมตัวกัน และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเททระบอเรต (tetraborate) ซึ่งเป็นรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช และทำให้พืชขาดธาตุโบรอนได้ (เพิ่มพูน, 2543)

2.2 แหล่งของโบรอนในดิน

โบรอนในดินเกิดจากวัตถุต้นกำเนิดดินพวกหิน และแร่ และเกิดจากการใส่สารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบลงไปในดิน เช่น ปุ๋ย และของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

2.2.1 วัตถุต้นกำเนิดดิน

โบรอนเป็นองค์ประกอบอยู่ในหินดินดาน หินตะกอน แร่ทัวมาลีน และแร่ดินเหนียว อยู่ในรูปของสารประกอบบอเรต ($B(OH)_4^-$) โบโรซิลิเกต ($BSiO_4$) โบโรซัลเฟต

(BSO_4) คลอโรบอเรต ($ClB(OH)_4$) และโบโรฟอสเฟต (BPO_4) และมีมากที่สุดในแร่ทัวมาลีน ($NaMg_3Al_6B_3Si_6O_{27}(OH,F)_4$) ซึ่งเป็นแร่ปฐมภูมิที่เป็นแหล่งของโบรอนที่สำคัญของดิน นอกจากนี้ในชั้นหินดินดานก็มีโบรอนอยู่สูงเช่นกัน เนื่องจากมีแร่ดินเหนียวสะสมอยู่สูง และแร่ดินเหนียวเหล่านี้สามารถดูดซับโบรอนไว้ได้สูง (เพิ่มพูน, 2546) และโบรอนจะมีอยู่น้อยในวัตถุต้นกำเนิดดินพวกหินอัคนี (Havlin *et al.*, 2005) อย่างไรก็ตาม วัตถุต้นกำเนิดดินต้องใช้เวลานานในการสลายตัว และปลดปล่อยโบรอนออกมาเป็นประโยชน์กับพืช จึงทำให้ดินในธรรมชาติมีโบรอนที่เป็นประโยชน์ต่ำ และจะแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุต้นกำเนิดดิน สภาพภูมิประเทศ และสภาพภูมิอากาศของดินในพื้นที่นั้นๆ

2.2.2 ปุ๋ย

ดินโดยทั่วไปมีโบรอนที่เป็นประโยชน์ต่ำ และอยู่ในระดับที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ประกอบกับโบรอนบางส่วนในดินได้สูญเสียไปกับผลผลิตของพืช ฉะนั้นการปลูกพืชหลายชนิด และติดต่อกันเป็นเวลานานจึงทำให้เกิดการสูญเสียโบรอนออกไปจากดินมากขึ้น (เพิ่มพูน, 2546) การปลูกพืชจึงต้องมีการเพิ่มโบรอนลงไปในดินในรูปของปุ๋ย ซึ่งแหล่งของปุ๋ยโบรอนที่ใช้กันนั้นมีอยู่ด้วยกัน 2 แหล่ง คือ จากปุ๋ยอนินทรีย์ และปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยอนินทรีย์ เช่น Borax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), Boric acid ($B(OH)_3$), Colemanite ($Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$), Sodium pentaborate ($Na_2B_{10}O_{16} \cdot 10H_2O$), Solubor ($Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O + Na_2B_{10}O_{16} \cdot 10H_2O$) และ Sodium tetraborate ($Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$) (Havlin *et al.*, 2005) และปุ๋ยอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยคอก มูลไก่ ของเสียในบ่อบำบัด กากเมล็ดฝ้าย กากถั่วลิสง และกากถั่วเหลือง (เพิ่มพูน, 2546) เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของพืช และในปุ๋ยแต่ละชนิดก็มีปริมาณโบรอนเป็นองค์ประกอบแตกต่างกัน ดังนั้น ในการใช้ปุ๋ยจึงต้องคำนึงถึงปริมาณของโบรอนในปุ๋ย และปริมาณของโบรอนที่พืชต้องการ เพื่อให้พืชเจริญเติบโต และให้ผลผลิตได้ดี

2.2.3 การปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานไม้ยางพารา

อุตสาหกรรมไม้ยางพาราเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับไม้ยางพาราทั้งระบบ ครอบคลุมตั้งแต่การเลือกสรรพันธุ์ต้นยางพารา การปลูก การนำไม้ยางพารามาใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม และโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่มีกระบวนการอัดน้ำยาไม้ก็จัดเป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมไม้ยางพาราด้วย ซึ่งปัจจุบันมีอยู่ทั่วทั้งประเทศไทยจำนวน 221 โรงงาน และมีมากที่สุดในภาคใต้จำนวน 163 โรงงาน (http://bvai.dpim.go.th accessed 25/12/2550) ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีน้ำตาล แป้ง และความชื้นสูง ทำให้มีอายุการเก็บรักษาสั้น เนื่องจากถูกมอด แมลง และเชื้อรา เข้าทำลาย การใช้น้ำยาอัดขาว (สารประกอบโบรอนพวกกรดบอริก และสารบอแร็กซ์) อัดเข้าไปในเนื้อไม้สามารถรักษาเนื้อไม้ได้นาน 5-20 ปี ทำให้ในกระบวนการผลิตของโรงงานเหล่านี้มีการใช้น้ำยาอัดขาวอัดเข้าไปในเนื้อไม้ ซึ่งมีหลายวิธีการ เช่น

การใช้แรงอัดในถังอัด การทา พ่น จุ่ม และการแช่ในน้ำยา แต่น้ำยาอัดขาวเมื่อใช้ติดต่อกันหลายๆ ครั้ง จะเปลี่ยนไปเป็นสีดำ เนื่องจากสารลิกนินจากเซลล์ของไม้ได้ละลายออกมาปะปนในน้ำยา และส่งผลต่อสีของไม้ที่ใช้กับน้ำยานี้ในครั้งถัดไป ดังนั้นโรงงานจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนน้ำยาอัดขาวใหม่ ส่วนน้ำยาอัดขาวที่เป็นสีดำจะถูกปล่อยทิ้งเป็นน้ำเสีย ซึ่งในน้ำเสียส่วนนี้มีโบรอนเป็นองค์ประกอบอยู่สูงประมาณ 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปฐมาพร, 2549) ลือพงศ์ (2547) ได้ทำการศึกษาการบำบัดสีของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอนด้วยปูนขาว เพื่อต้องการนำน้ำเสียส่วนนี้กลับมาใช้ใหม่ พบว่า การบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตันสามารถทำให้สีของน้ำเสียลดลงได้ถึง 97-99 เปอร์เซ็นต์ แต่ในน้ำเสียก็ยังคงมีโบรอนตกค้างอยู่สูง และนอกจากนี้ เจษฎา (2551) นำน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันมาใช้เพื่อเป็นแหล่งของธาตุอาหารให้แก่พืช โดยการรดน้ำเสียอัตรา 0, 5, 10, 20 และ 100 มิลลิลิตร ให้กับต้นมะเขือเทศ พบว่า เมื่อใช้น้ำเสียในอัตราที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ดินมีปริมาณโบรอนที่สกัดได้ด้วยน้ำร้อนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.17, 0.87, 1.47, 2.66, 5.55 และ 5.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และการใช้น้ำเสียอัตราสูงทำให้ต้นมะเขือเทศเกิดอาการโบรอนเป็นพิษ แสดงให้เห็นว่าหากดินถูกปนเปื้อนด้วยน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราจะทำให้โบรอนตกค้างอยู่ในดินเพิ่มสูงขึ้น และหากปริมาณโบรอนที่สกัดได้ในดินมีมากกว่า 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะทำให้พืชเกิดอาการโบรอนเป็นพิษได้

2.3 สถานภาพของโบรอนในดินของประเทศไทย

จากการศึกษาสภาวะของโบรอนในดินในภาคต่างๆ ของประเทศไทย พบว่า ดินในพื้นที่ภาคเหนือ (เบญจวรรณ, 2537) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (เพิ่มพูน และคณะ, 2530) ภาคตะวันออก (สำเนา และคณะ, 2532) ภาคตะวันตก (สุวพันธ์ และคณะ, 2547) และภาคใต้ (เพิ่มพูน และ สุกัลยา, 2532) มีปริมาณโบรอนที่สกัดได้ด้วยน้ำร้อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.08-0.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโบรอนที่สกัดได้ด้วยน้ำร้อนช่วงที่พอเหมาะกับพืช ซึ่งอยู่ในช่วง 1-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Hesse, 1971 อ้างโดย สุพจน์ และ กนกพันธุ์, 2536) พบว่า ดินในประเทศไทยมีปริมาณโบรอนที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ สอดคล้องกับการศึกษาของ นิวัฒน์ และคณะ (2537) ที่ได้ศึกษาการตอบสนองของถั่วลิสง ถั่วเหลือง และถั่วเขียวต่อความเข้มข้นของโบรอนในดิน ในภาคเหนือของประเทศไทย โดยนำชุดดินที่สำคัญของภาคเหนือ 10 ชุดดิน มาปรับระดับโบรอนในดินเป็น 4 ระดับ แล้วทดสอบปลูกถั่วชนิดต่างๆ ในกระถาง พบว่า ดินก่อนการทดลองทั้ง 10 ชุดดิน ที่เก็บมามีปริมาณโบรอนที่เป็นประโยชน์ต่ำ อยู่ในช่วง 0.07-0.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อนำดินดังกล่าวมาใช้ปลูกพืช พบว่า ทำให้ถั่วแสดงอาการขาดโบรอน โดยถั่วลิสงเกิดเมล็ดในกลวง ถั่วเหลืองเกิดรอยนุ่มบนผิวเมล็ด และถั่วเขียวเกิดรอยแผลสีน้ำตาลบนเยื่อหุ้มเปลือกเมล็ด และจากการศึกษาของ สุวพันธ์ และคณะ

(2547) ที่ได้ทดสอบปุ๋ยโบรอนกับถั่วลิสงในไร่ของเกษตรกรในพื้นที่ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันตกของประเทศไทย โดยทำการทดลองในไร่ของเกษตรกร 37 แปลง 12 ชุดดิน ในพื้นที่ 15 จังหวัด ตามภาคต่างๆ พบว่า มีพื้นที่ของเกษตรกรที่พบถั่วลิสงแสดงอาการขาดโบรอน 14 แปลง มีระดับโบรอนเกือบจะขาด 7 แปลง มีระดับโบรอนเพียงพอ 14 แปลง และมีระดับโบรอนสูง 2 แปลง

2.4 ปัญหาความเป็นพิษของโบรอน

พืชโดยทั่วไปมีระดับความเข้มข้นของโบรอนอยู่ในช่วง 6-60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Havlin *et al*., 2005) พืชต้องการโบรอนปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับธาตุอาหารหลัก แต่พืชก็ขาดธาตุโบรอนไม่ได้ เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุที่มีบทบาท และหน้าที่ที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืชหลายด้าน แต่หากพืชได้รับโบรอนมากเกินความต้องการ พืชจะเกิดอาการเป็นพิษได้ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณโบรอนที่พืชแต่ละชนิดต้องการ และระดับความเข้มข้นของโบรอนในดิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 บทบาทของโบรอนต่อการเจริญเติบโตของพืช

โบรอนทำหน้าที่ช่วยรักษาโครงสร้างของเซลล์พืช โดยโบรอนในรูปของกรดบอริกเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบในเซลล์ของพืชพวกที่มีหมู่ซีสไฮดรอกซิล (น้ำตาลชนิดต่างๆ และ อนุพันธ์ O-diphenolics) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนพอลีแซ็กคาไรด์ และรวมตัวกับสารเพกทิกในผนังเซลล์ของพืช ส่งผลทำให้โครงสร้างผนังเซลล์ของพืชแข็งแรง ทำให้การเจริญของเซลล์พืชในส่วนที่กำลังมีการแบ่งตัวเกิดขึ้นได้ดี และโบรอนเข้าไปทำให้กระบวนการแบ่งเซลล์ของพืชเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้ดี (เพิ่มพูน, 2546) ทำให้การเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ในพืชเกิดขึ้นได้ดี โดยโบรอนในรูปของบอเรตเข้าไปรวมตัวกับสารอินทรีย์พวกน้ำตาลในพืช และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถซึมผ่านเยื่อของโฟลเอ็มได้ง่าย และโบรอนยังเข้าไปเป็นองค์ประกอบในเยื่อหุ้มเซลล์ของโฟลเอ็ม ทำให้โมเลกุลของน้ำตาลสามารถผ่านเข้าออกโฟลเอ็มได้อย่างสะดวกขึ้น และนอกจากนี้ โบรอนยังช่วยในการงอกของละอองเรณูของพืชด้วย โดยทำให้ละอองเรณูมีชีวิตอยู่ได้นาน หลอดละอองเรณูแข็งแรง และช่วยเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลในน้ำหวานในดอกของพืช ซึ่งจะช่วยทำให้พืชดึงดูดแมลงเข้ามาถ่ายละอองเรณูได้มากขึ้น ทำให้การออกดอก การติดผล และการพัฒนาของเมล็ดเพิ่มขึ้น (ยงยุทธ, 2543)

2.4.2 ปริมาณโบรอนที่เป็นพิษกับพืช

พืชแต่ละชนิดมีความต้องการโบรอน และมีระดับความเข้มข้นของโบรอนในช่วงที่ขาด เพียงพอ และเป็นพิษต่างกัน ส่งผลให้พืชต่างพันธุ์ และระหว่างพันธุ์ในพืชชนิดเดียวกันมี

ระดับความทนต่อระดับความเข้มข้นของโบรอนที่ต่างกันด้วย ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มของพืชตามความทนต่อระดับความเข้มข้นของโบรอนในสารละลายดินออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่ทน ซึ่งทนต่อค่าความเข้มข้นของโบรอนระดับสูงสุดในสารละลายดินที่ระดับความชื้นไร่นาในช่วง 0.3 ถึง 1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เช่น มะนาว ส้ม องุ่น ถั่วเขียว กระเทียม มันเทศ เซอรี่ และข้าวสาลี กลุ่มทนปานกลางอยู่ในช่วง 1.0 ถึง 4.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เช่น ข้าวโพด บวบ แตง แตงกวา ถั่วลันเตา กะหล่ำปลี ข้าวบาร์เลย์ และมันฝรั่ง และกลุ่มที่ทนได้ดีอยู่ในช่วง 4.0 ถึง 15.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เช่น มะเขือเทศ หัวผักกาดหวาน หน่อไม้ฝรั่ง และฝ้าย (Keren and Birgham, 1985) จากการศึกษาของ สุพรรณิกา (2546) ได้ปลูกข้าวสาลีในสารละลายที่มีโบรอนระดับต่างๆ พบว่า ข้าวสาลีแต่ละพันธุ์มีเปอร์เซ็นต์เนโครซีส (necrosis) ต่างกัน และรากของข้าวมีความยาวลดลงชัดเจนในสารละลายที่มีความเข้มข้นของโบรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุที่พืชมีความทนต่อการเป็นพิษของโบรอนต่างกันนั้น เนื่องจากกลไกในการต้านทานโบรอนของพืช ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 กลไก คือ 1) กลไกการหลีกเลี่ยง (avoidance) เกิดจากพืชหลีกเลี่ยงการสะสมโบรอนที่มากเกินไป โดยลดการดูดโบรอนของราก ทำให้การเคลื่อนย้ายโบรอนจากชั้นคอแท็ก (cortex) ในรากไปยังท่อน้ำ (xylem) ช้าลง และโบรอนถูกแยกออกไปจากชั้นเอนโดเดอร์มิส (endodermis) 2) กลไกในการกีดกัน (exclusion) พืชจะลดการสะสมโบรอนในส่วนต่างๆ เช่น ลำต้น ราก และใบ และกีดกันไม่ให้โบรอนเข้าไปในพืช และกลไกที่ 3) คือ เกิดจากความทนทานของพืชเอง (internal tolerance) นอกจากนี้ เพิ่มพูน (2546) รายงานว่า พืชใบเลี้ยงเดี่ยว (monocotyledon) มีความต้องการโบรอนน้อยกว่าพืชใบเลี้ยงคู่ (dicotyledons) และไวต่อระดับของโบรอนในดินมากกว่าพืชใบเลี้ยงคู่

2.4.3 ปัญหาความเป็นพิษของโบรอนในพืช

โบรอนเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อพืชหลายประการ แต่หากพืชได้รับโบรอนปริมาณสูงเกินกว่าความต้องการพืชจะเกิดอาการเป็นพิษ โดยเกิดกับใบล่างหรือใบแก่ก่อน ขั้นแรกปลายใบจะมีสีเหลือง หากเป็นพิษมากจะเกิดรอยไหม้ (necrosis) ที่ใบ โดยจะเริ่มจากปลาย และขอบใบแผ่เข้ามาระหว่างเส้นใบส่วนข้าง (lateral vein) เข้ามายังเส้นกลางใบ (mid rib) ต่อมาใบพืชจะแห้งคล้ายถูกไฟไหม้ (ภาพที่ 1) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานที่แน่ชัดเกี่ยวกับผลของโบรอนสูงต่อกระบวนการต่างๆ ในพืช (เพิ่มพูน, 2546)

พืชที่ได้รับโบรอนในระดับที่เป็นพิษจะมีลักษณะไหม้ที่บริเวณขอบใบ และปลายใบ ซึ่งจะมีผลทำให้พื้นที่ในการสังเคราะห์แสงของใบพืชลดลง ทำให้พืชสร้างอาหารได้น้อยลง และทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโตได้ จากการศึกษาของ ดำริ และคณะ (2545) ได้ปลูกอ้อยพันธุ์ K 84-200 ในถังซีเมนต์ และให้โบรอนจากกรดบอริกอัตราต่างๆ พบว่า การให้โบรอนอัตรา 9.2 และ 18.4 กรัม อ้อยมีการสะสมโบรอนในใบสูงกว่าอ้อยที่ไม่ได้รับธาตุโบรอน 35 และ 42 เท่า และอ้อยเกิดอาการเป็นพิษ (ใบไหม้ โดยเริ่มจากใบแก่จนถึงใบอ่อน) ทำให้ความสูงของ

อ้อยลดลง ความยาวของรากสั้น การเจริญเติบโตน้อย และความหวานลดลง และจากการศึกษาของ เจษฎา (2551) ใช้สารละลายโบรอนจากกรดบอริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน (509 มิลลิกรัมต่อลิตร) นำมาปรับปริมาตรด้วยน้ำ แล้วใส่ลงไปในดินเพื่อปรับให้ดินมีปริมาณโบรอนที่สกัดได้ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แล้วนำดินไปใช้ปลูกมะเขือเทศ พบว่า ทำให้มะเขือเทศแสดงอาการโบรอนเป็นพิษ ส่งผลให้น้ำหนักแห้ง จำนวนใบ และความสูงของมะเขือเทศลดลง และมีข้อเสนอแนะว่า การนำน้ำเสียมาใช้กับมะเขือเทศที่ปลูกในชุดดินคอหงส์ 5 กิโลกรัม ควรใช้น้ำเสียไม่เกิน 10 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำ 490 มิลลิลิตร หากให้น้ำเสียมากกว่านี้ จะทำให้ต้นมะเขือเทศแสดงอาการเป็นพิษและตาย ดังตัวอย่างของพืชบริเวณโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา ที่ ต.ห้วยน้ำขาว อ.คลองท่อม จ.กระบี่ (http://www.newspnn.net accessed 29/09/2550) และที่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ที่ได้รับโบรอนจากน้ำเสียส่วนที่ผ่านการอัดน้ำยาไม้ของโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา ทำให้พืชเกิดอาการโบรอนเป็นพิษ ส่งผลให้สวนยางพารา สวนผลไม้ และพืชอีกหลายชนิด ของชาวบ้านเกิดอาการใบไหม้ และยืนต้นตายเป็นจำนวนมาก

รูปที่ 1 ลักษณะอาการความเป็นพิษของพืชจากธาตุโบรอน

นอกจากจะพบพืชเกิดอาการโบรอนเป็นพิษในประเทศไทยแล้ว มีรายงานว่าในต่างประเทศก็พบพืชเกิดอาการโบรอนเป็นพิษเช่นกัน โดยปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากการใช้ปุ๋ยอินทรีย์เทศบาล (Osturk *et al*., 2004) การทำเหมืองแร่ การใช้น้ำชลประทานที่มีธาตุโบรอนปนเปื้อน และเกิดจากดินเค็มชายทะเล (Nabble *et al*., 1997)

2.5 แนวทางการแก้ไขปัญหาความเป็นพิษของโบรอน

แนวทางการแก้ไขปัญหาความเป็นพิษของโบรอนในพืชมีอยู่หลายแนวทางดังนี้

2.5.1 การดูดซับโบรอนด้วยซีโอไลต์

ซีโอไลต์ (zeolites) เป็นแร่ทุติยภูมิที่เกิดจากหินเถ้าภูเขาไฟ เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicate) ชนิดเทคโทซิลิเกต (tectosilicates) ของโลหะแอลคาไล และแอลคาไลน์เอิร์ท คือ โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และแบเรียม มีโครงสร้างพื้นฐานแบบเททระฮีดรอลคือ ซิลิกอนหนึ่งอะตอมจับกับออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4) และแต่ละหน่วยของเททระฮีดรอลจะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันลักษณะวงแหวนแบบสามมิติ เกิดเป็นผลึกที่มีช่องว่างที่เชื่อมทะลุถึงกันได้ (Sand and Mumpton, 1978) ซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติมีอยู่ประมาณ 50 ชนิด และชนิดที่พบบ่อย และมีปริมาณค่อนข้างสูงมี 9 ชนิด คือ มอร์ดีไนต์ (mordenite) คลินอบทิโลไลต์ (clinoptilonite) อะนาลไซม์ (analcime) ชาร์บาไซต์ (chabazite) ฮิวแลนไดต์ (heulandite) ฟิลลิปไซต์ (phillipsite) เนโทรไลต์ (natrolite) สติลไบต์ (stilbite) และ จิสมอลไดต์ (gismondite) (สุภาพร, 2546) นอกจากนี้ยังมีซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะด้านอีกประมาณ 100 ชนิด (สุนี, 2536)

1) สมบัติทั่วไปของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นแร่ที่มีโครงสร้างที่แน่นอนแบบเปิด มีการจัดเรียงของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติพิเศษหลายอย่างทั้งทางด้านเคมี และทางด้านกายภาพ

สมบัติทางเคมี สมบัติทางเคมีที่เด่นของซีโอไลต์ คือ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity, C.E.C.) สูง ซีโอไลต์โดยทั่วไปมีค่า C.E.C. อยู่ระหว่าง 100-300 เซนติโมลประจุบวกต่อกิโลกรัม และอาจจะสูงถึง 600 เซนติโมลประจุบวกต่อกิโลกรัม ในซีโอไลต์สังเคราะห์ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ซีโอไลต์มีค่า C.E.C. สูงนั้น เกิดจากการแทนที่ไอออนของซิลิกอน (Si^{4+}) ด้วยไอออนของเหล็ก (Fe^{3+}) และอะลูมินัม (Al^{3+}) ซึ่งมีประจุบวกน้อยกว่าในโครงสร้าง ทำให้ในโครงสร้างของซีโอไลต์มีประจุลบเหลืออยู่ และสามารถดักจับแคตไอออนอื่นได้ เพื่อให้ประจุสมดุลกัน และแคตไอออนที่ถูกจับไว้สามารถถูกแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนอื่น ๆ ได้ (สุภาพร, 2546)

สมบัติทางกายภาพ ซีโอไลต์เป็นแร่ที่มีสมบัติทางกายภาพหลายอย่างขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดนั้น ๆ ซีโอไลต์โดยทั่ว ๆ ไป มีโพรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.0-8.0 อังสตรอม มีความหนาแน่นรวม (bulk density) สูง อยู่ในช่วง 2.0-2.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีพื้นที่ผิวรวมสูงอยู่ระหว่าง 750-880 ตารางเมตรต่อกรัม (จิราณี, 2542) ภายในโพรงของซีโอไลต์มีโมเลกุลของน้ำบรรจุอยู่ เมื่ออบที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส น้ำจะระเหยออกไปหมด แต่ไม่ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์เปลี่ยนแปลง ซีโอไลต์จึง

สามารถดูดซับน้ำกลับเข้าไปได้อีกหรือดูดซับธาตุประจุบวกอื่น ๆ ตลอดจนโมเลกุลของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เข้าไปแทนที่โมเลกุลของน้ำได้ สารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ที่เข้าไปอยู่ภายในโพรงของซีโอไลต์จะถูกดูดซับอยู่กับโพรงที่มีขนาดใกล้เคียงกันกับโมเลกุลของสารนั้น ดังนั้นความสามารถของซีโอไลต์ในการดูดซับธาตุ สารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ต่าง ๆ จึงขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์ และชนิดของสารที่ต้องการจะดูดซับ (อัจฉรา, 2542)

2) การใช้ซีโอไลต์ดูดซับของเสีย

ซีโอไลต์เป็นแร่ที่มีค่า C.E.C. สูง ดังนั้นจึงได้มีการนำซีโอไลต์มาใช้ในการดูดซับของเสียจากแหล่งต่าง ๆ มากมาย เช่น ขจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากไอเสียเครื่องยนต์ ขจัดไอโซโทปกัมมันตรังสีจากกากนิวเคลียร์ ดูดซับธาตุโลหะหนัก และดูดซับแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย เป็นต้น

อารักษ์ และคณะ (2549) ใช้ซีโอไลต์ร่วมกับทรายไม่คัดขนาดในคอลัมน์ เพื่อกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากฟาร์มสุกร พบว่า ซีโอไลต์สามารถดูดซับแอมโมเนียได้สูง ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองของ อุษา และคณะ (2543) ใช้ซีโอไลต์บำบัดแอมโมเนียในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแช่แข็งในจังหวัดสงขลา พบว่า การแช่ซีโอไลต์ 2 กรัม ในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซีโอไลต์สามารถดูดซับแอมโมเนียได้ 79 เปอร์เซ็นต์ และ ปรีดา และคณะ (2535) รายงานว่า ซีโอไลต์สามารถดูดซับธาตุโลหะหนักต่าง ๆ ได้ดีอีกด้วย นอกจากนี้จากการศึกษาของ Gainer (1993) ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดคลินอบทิโลไลต์ และฮีมาไทต์ดูดซับโบรอนในสารละลาย พบว่า ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดคลินอบทิโลไลต์สามารถดูดซับโบรอนได้เช่นกัน โดยดูดซับได้สูงสุด 12 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 8 และสามารถดูดซับได้ดีกว่าฮีมาไทต์ และจากการศึกษาของ Ozturk และคณะ (2004) ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดคลินอบทิโลไลต์อัตราต่าง ๆ ผสมกับปุ๋ยอินทรีย์เทศบาลที่มีโบรอนตกค้างอยู่ 2.64 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใส่ในคอลัมน์ แล้วใช้น้ำชะล้าง พบว่า ซีโอไลต์สามารถดูดซับธาตุโบรอนในดินได้ โดยทำให้ปุ๋ยอินทรีย์เทศบาลที่ใส่ซีโอไลต์มีปริมาณโบรอนที่สกัดได้ด้วยน้ำร้อนสูงกว่าที่ไม่ใส่ซีโอไลต์ และโบรอนถูกชะล้างได้น้อยลงตามปริมาณซีโอไลต์ที่เพิ่มสูงขึ้น

3) การใช้ซีโอไลต์ปรับปรุงดิน

ซีโอไลต์เป็นแร่ที่มีค่า C.E.C. สูง มีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารพืชต่าง ๆ ในดินได้ดี และปลดปล่อยออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชอย่างช้า ๆ สุรชัย (2548) ได้ศึกษาการใช้ปุ๋ยเคมี และปุ๋ยคอกร่วมกับสารซีโอไลต์ต่อผลผลิตข้าวโพดหวาน การเปลี่ยนแปลงสภาวะธาตุอาหารหลัก และสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของดิน พบว่า การใช้ซีโอไลต์ทำให้ธาตุไนโตรเจน โพแทสเซียม อินทรียวัตถุ ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ความหนาแน่นรวม และความพรุนของดินหลังการทดลองมีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าดินก่อนการทดลองอย่างชัดเจน และจากการศึกษาของ อัจฉรา (2542) ใส่ซีโอไลต์ลงไปในดินร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ พบว่า การใส่ซีโอไลต์ทำให้แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ($H_2PO_4^-$) และโพแทสเซียม

ไอออน (K^+) ถูกชะล้างน้อยกว่าดินที่ไม่ใส่ซีโอไลต์ 2, 2 และ 10 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้ซีโอไลต์เป็นวัสดุปรับปรุงดินยังทำให้ผลผลิตของพืชเพิ่มสูงขึ้นด้วย จากการศึกษาของ สุภาพร และคณะ (2543) ใช้ซีโอไลต์ร่วมกับปุ๋ยเคมีในชุดดินท่ายางต่อผลผลิตของสับปะรด พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีอัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับซีโอไลต์ อัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยหมักอัตรา 3 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้สับปะรดมีน้ำหนักเฉลี่ย ความสูงเฉลี่ย และพื้นที่ใบเฉลี่ยสูงที่สุด (8,177 กิโลกรัมต่อไร่ 92.3 เซนติเมตร และ 336.81 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ)

ดังนั้นหากนำซีโอไลต์ไปใช้ดูดซับโบรอนในน้ำเสีย และในดินที่ปนเปื้อนโบรอน คาดว่าจะทำให้ปริมาณของโบรอนทั้งในน้ำเสีย และในดินลดลงได้ และซีโอไลต์ที่ผ่านการดูดซับโบรอนในน้ำเสียแล้วสามารถนำกลับไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินต่อไปได้ ซึ่งจะช่วยทำให้สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของดินดีขึ้น ทำให้ผลผลิตของพืชเพิ่มสูงขึ้น และอาจจะนำไปใช้เป็นแหล่งของธาตุโบรอนให้แก่พืชได้อีกด้วย

2.5.2 การเพิ่มค่าปฏิกิริยาดิน

การเพิ่มค่า pH ของดินสามารถทำได้โดยการเติมปูน (liming) ซึ่งปูนที่ใช้ทางการเกษตรนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น หินปูนบด ($CaCO_3$) ปูนโดโลไมต์ ($CaMg(CO_3)_2$) ปูนมาร์ล ($CaCO_3$ ที่ตกตะกอนอยู่กับดินเหนียว) และปูนขาว ($Ca(OH)_2$) โดยทั่วไปแล้วการใส่ปูนมีวัตถุประสงค์เพื่อ ยกระดับค่า pH ของดินให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช (5.5-6.5) และลดการเป็นพิษของพืชจากอะลูมินัม นอกจากนี้การใส่ปูนยังทำให้สมบัติทางกายภาพ ทางชีวภาพ และทางเคมีของดินดีขึ้นด้วย

การใส่ปูนเพิ่มค่า pH ดินสามารถเพิ่มการดูดซับโบรอนในดินได้ โดยทำให้โมเลกุลของโบรอนรูป $B(OH)_3$ เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสกับน้ำเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ $B(OH)_4^-$ ซึ่งเป็นแอนไอออนที่สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับธาตุโลหะในโครงสร้างของแร่ดินเหนียว และสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก และอะลูมินัม ในดินได้ ซึ่งเรียกการดูดซับแบบนี้ว่าการดูดซับแบบจำเพาะ (specific adsorption) โดย $B(OH)_4^-$ เข้าไปแลกเปลี่ยนกับตำแหน่งลิแกน (ligand) ของโลหะที่เป็นส่วนของโครงสร้าง และโบรอนส่วนนี้จะไม่เป็นประโยชน์กับพืช การดูดซับแบบจำเพาะนี้จะเกิดขึ้นได้ดีในดินที่มีค่า pH สูง และโบรอนจะถูกดูดซับได้สูงที่สุดที่ระดับ pH ดินระดับหนึ่ง และเมื่อค่า pH ของดินเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าระดับนี้การดูดซับโบรอนจะลดลง เนื่องจากปริมาณของ OH^- ในดินเพิ่มสูงขึ้นจน $B(OH)_4^-$ ไม่สามารถแข่งขันกับ OH^- ได้ ซึ่งช่วงของค่า pH ที่ทำให้ดินสามารถดูดซับโบรอนได้สูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณของแร่ดินเหนียว ออกไซด์ของโลหะ และอินทรียวัตถุ(เพิ่มพูน, 2543) จากการศึกษาของ กนกพันธ์ (2533) ใส่ปูนขาวเพิ่มค่า pH ชุดดินเรณู พบว่า การใส่ปูนเพิ่มค่า pH ดินจาก 5 ถึง 7 ทำให้โบรอนที่เป็นประโยชน์ในดินลดลง เขาให้ความเห็นว่าการที่เป็นเช่นนี้ อาจเกิดจากการเพิ่มค่า pH ของดินทำให้มีอะลูมินัมออกไซด์เกิดขึ้นใหม่ และตรึงโบรอนได้ โดยเข้าไปรวมตัวกับ $B(OH)_4^-$ เกิดเป็น

สารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ยาก ($2Al_2O_3 \cdot 3B_2O_3 \cdot 11H_2O$) และ $B(OH)_4^-$ บางส่วนเข้าไปแทนที่ OH^- บริเวณผิวของแร่ดินเหนียว และบริเวณขอบที่แตกหักทางด้านเททระฮีดรอล เมื่อผลึกของแร่ดินเหนียวเจริญออกไปก็ทำให้โบรอนถูกฝังเข้าไปในโครงสร้างของแร่ดินเหนียว สอดคล้องกับการศึกษาของ Goldberg และคณะ (1993) ที่ศึกษาการดูดซับโบรอนของแร่ดินเหนียว และดินชนิดต่าง ๆ พบว่า Goethite, Gibsite, Kaolinite, Montmorillonite, Kaolinitic soil และ Montmorillonitic soil ดูดซับโบรอนได้ดีที่สุดที่ระดับค่า pH สูง ช่วง 8-9 และยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Keren และคณะ (1981) ที่ศึกษาผลของระดับ pH ต่าง ๆ ต่อการดูดซับโบรอนของ Na-montmorillonite พบว่า Na-montmorillonite ดูดซับโบรอนได้สูงที่สุดที่ระดับค่า pH 9.3 นอกจากนี้การใส่ปูนเพิ่มค่า pH ของดินยังช่วยให้อินทรียวัตถุดูดซับโบรอนได้ดีอีกด้วย จากการศึกษาของ Yermiyaho และคณะ (1988) ได้ศึกษาการดูดซับโบรอนของปุ๋ยหมัก พบว่าปุ๋ยหมักสามารถดูดซับโบรอนได้สูงสุด ในช่วง pH 7.0-8.9

การใส่ปูนนอกจากจะเพิ่มค่า pH ของดินแล้วยังเป็นการเพิ่มธาตุแคลเซียมให้แก่ดินด้วย ซึ่งแคลเซียมนี้จะมีผลต่อการดูดใช้โบรอนของพืช Havlin และคณะ (2005) รายงานว่า แคลเซียมเป็นธาตุที่มีผลต่อการดูดใช้โบรอนในดินของพืช หากในใบพืชมีสัดส่วนระหว่างแคลเซียม และโบรอนมากกว่า 1,200:1 พืชจะแสดงอาการขาดโบรอน และสามารถใช้สัดส่วนของแคลเซียม และโบรอน ในการทำนายสถานะของโบรอนในพืชได้ และจากการรายงานของ Goldberg (1997) รายงานว่า การใส่ธาตุแคลเซียมในรูปของปูนในดินกรดทำให้พืชดูดใช้โบรอนได้น้อยลง ซึ่งเกิดจากแคลเซียมทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับเซลล์พืช โดยเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ เช่นเดียวกับโบรอน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ สุรศักดิ์ และมงคล (2540) ที่ปลูกมะละกอพันธุ์แขกดำในดินร่วนปนทราย แล้วใส่ปูน และโบรอนอัตราต่าง ๆ พบว่า การใส่ปูนเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของโบรอนในใบมะละกอลดลงอย่างชัดเจน และสอดคล้องกับการศึกษาของ เพิ่มพูน และคณะ (2538) ที่ได้ใส่ยิบซัม และโบรอนในรูปของบอแร็กซ์ให้กับถั่วลิสง พบว่า การใส่ยิบซัมทำให้ถั่วลิสงแสดงอาการขาดโบรอน โดยมีลักษณะเมล็ดกลวงเพิ่มขึ้น

ดังนั้นการใส่ปูนเพิ่มค่า pH ของดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นดินกรด ก็คาดว่าจะทำให้โบรอนในดินส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชลดลงได้ แต่ก็มีข้อควรระวัง คือ การเพิ่มค่า pH ของดินสูง ๆ ทำให้ดินเกิดสภาพเกินปูน (over lime) ได้ โดยจะส่งผลทำให้ธาตุบางตัวละลายออกมาได้น้อย และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) และฟอสฟอรัส (P) ซึ่งจะส่งผลทำให้พืชเจริญเติบโตได้ไม่ดี และทำให้ผลผลิตของพืชลดลงได้ (ชัยรัตน์ และ วิเชียร, 2539)

2.5.3 การดูดซับโบรอนในดินด้วยออกไซด์ของเหล็ก

สารประกอบออกไซด์ของเหล็กที่พบในดินโดยทั่วไป คือ Goethite ($\propto$-FeO(OH)) Haematite ($\propto$-Fe_2O_3) และ Magnetite (γ-Fe_3O_4) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของแร่ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ (เพิ่มพูน, 2527) จากการศึกษาของ อมรา (2545) พบว่า ดินในภาคเหนือของประเทศไทยมีปริมาณของเหล็กออกไซด์อยู่มาก และเหล็กที่พบส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของผลึก (Crystalline) รองลงมาคือ รูปที่ไม่เป็นผลึก (Amorphous) และรูปที่รวมกับอินทรียวัตถุ (organic bound) และดินที่มีปริมาณของเหล็กออกไซด์มากจะดูดซับธาตุฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ ($H_2PO_4^-$) ได้ดี ทำให้ธาตุฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินลดลง นอกจากนี้ เพิ่มพูน (2546) รายงานว่า เหล็กออกไซด์สามารถดูดซับโบรอนในดินในรูปของบอเรตไอออนได้ดีด้วย

Toner (1993) รายงานว่า กลไกการดูดซับโบรอนของเหล็กออกไซด์เกิดได้ดีในดินสภาวะที่เป็นด่าง เนื่องจากโบรอนส่วนใหญ่ในดินจะอยู่ในรูปของ $B(OH)_4^-$ และจะเข้าไปแทนที่ OH^- หรือเข้าไปไล่ที่โมเลกุลของน้ำที่บริเวณผิวของไฮดรัสออกไซด์ของเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ยากพวก borate-diol complex ที่บริเวณผิวของแร่ จากการศึกษาของ Goldberg และ Glaubig (1985) ได้ใช้เหล็กออกไซด์รูปต่าง ๆ ดูดซับโบรอน พบว่า เหล็กออกไซด์ในรูป Goethite ดูดซับโบรอนได้สูงที่สุด รองลงมาคือ Amorphous iron oxide และ Hematite และการดูดซับโบรอนของแร่ยังขึ้นอยู่กับค่า pH ด้วย โดยแร่จะดูดซับโบรอนได้สูงที่สุดเมื่อค่า pH อยู่ในช่วง 8-9 และดูดซับได้ลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นมากกว่า 9 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sims และ Bingham (1968) พบว่า แร่สังเคราะห์ของเหล็กสามารถดูดซับโบรอนได้ดี และแร่สังเคราะห์ที่มีอายุมากขึ้นสามารถดูดซับโบรอนได้น้อยลง เนื่องจากแร่มีโครงสร้างเป็นระเบียบมากขึ้น และมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำลง

ดังนั้นการใส่แร่ออกไซด์ของเหล็กในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราคาดว่าจะทำให้ปริมาณโบรอนส่วนที่เป็นประโยชน์ในดินลดลงได้ แต่แร่ดังกล่าวมีราคาแพง และต้องใช้ปริมาณมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้

2.5.4 การชะล้างโบรอนในดินด้วยน้ำ

โบรอนเป็นธาตุที่ถูกชะล้างได้ การเคลื่อนที่ของโบรอนในดินขึ้นอยู่กับลักษณะเนื้อดินเป็นสำคัญ Goldberg (1997) รายงานว่า ดินเนื้อหยาบมีโบรอนที่เป็นประโยชน์น้อยกว่าดินเนื้อละเอียด และมักจะพบพืชเกิดอาการขาดโบรอนเมื่อปลูกในดินทราย จากการศึกษาของ Phung และคณะ (1979) ใช้น้ำชะล้างโบรอน และเกลือจากขี้เถ้าในดินกรดที่มีเนื้อดินเป็นดินทราย และดินด่างที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย พบว่า การใช้น้ำอัตราเท่ากันสามารถชะล้างโบรอนออกจากดินกรดที่มีเนื้อดินเป็นดินทรายได้มากกว่าดินด่างที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายอย่างชัดเจน และจากการศึกษาของ Osturk และคณะ (2004) ที่ชะล้างโบรอนจากตะกอนน้ำเสีย

ในดินร่วนปนทราย ในคอลัมน์ขนาดความสูง 25 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร พบว่า การใช้น้ำ 8 มิลลิเมตร สามารถชะล้างโบรอนในดินได้สูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์ แต่การชะล้างโบรอนในดินด้วยน้ำจะต้องใช้น้ำที่ไม่มีโบรอนปนเปื้อน เพราะโบรอนจะตกค้างในดินได้ ดังที่ Eaton และ Wilcox (1939) อ้างโดย Keren และ Bingham (1985) รายงานว่า การใช้น้ำที่มีโบรอนสูงชะล้างดินจะทำให้ดินมีระดับของโบรอนสูงจนเป็นพิษกับพืชได้

ดินที่ถูกน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราปนเปื้อนส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ และเป็นดินกรด โบรอนในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ $B(OH)_3$ ซึ่งเป็นรูปที่ไม่มีประจุ ดินส่วนใหญ่เป็นดินเนื้อหยาบ ดังนั้นหากใช้น้ำที่ไม่มีโบรอนชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียคาดว่าจะทำให้ปริมาณของโบรอนในดินลดต่ำลงได้

2.5.5 การดูดซับโบรอนในดินด้วยอินทรียวัตถุ

อินทรียวัตถุ หมายถึง สิ่งที่ได้จากการย่อยสลายของซากพืช ซากสัตว์ สิ่งขับถ่ายของมนุษย์ และสัตว์ ขยะต่าง ๆ รวมไปถึงเซลล์ของจุลินทรีย์ที่ตายแล้ว โดยสิ่งเหล่านี้เมื่อย่อยสลายไปจนถึงขั้นสุดท้ายจะได้สารฮิวมัส (humus) ซึ่งเป็นสารที่เสถียรภาพสูง มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง สามารถดูดซับน้ำและธาตุอาหารได้ดี (ปรัญญา และคณะ, 2540) การเพิ่มอินทรียวัตถุให้กับดินนั้นสามารถเพิ่มได้ในรูปของปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก หรือปุ๋ยพืชสด

Parks และ White (1952) รายงานว่า สารประกอบอินทรีย์กลุ่มที่มีหมู่ไฮดรอกซิลสองหมู่ (Diol) เช่น กาแลกโทส กลูโคส อลาบิโนส และแมนโนส ในอินทรียวัตถุสามารถทำปฏิกิริยากับโบรอนในสารละลายดินเกิดเป็น Boron-diol complex ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ยาก จากการศึกษาของ Yermiyaho และคณะ (1995) ใช้ดินทรายที่มีปุ๋ยหมัก 0, 1, 3, 6 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณ 5 กรัม ผสมกับสารละลายโบรอนปริมาตร 50 มิลลิลิตร และปรับระดับค่า pH ของสารละลายโบรอนด้วย HCl และ NaOH ให้ได้ระดับ 7, 8 และ 9 แล้วนำไปหาไอโซเทอร์มการดูดซับโบรอนของดิน พบว่า ดินดูดซับโบรอนได้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของปุ๋ยหมักเพิ่มสูงขึ้น และดูดซับได้ดีที่สุดที่ค่า pH 9 รองลงมาคือ 8 และ 7 และจากการศึกษาของ Yermiyaho และคณะ (2001) เติมอินทรียวัตถุจากปุ๋ยหมักลงไปในดิน 5 อัตรา (0, 1, 3, 6 และ 10 เปอร์เซ็นต์) และเติมโบรอนจากกรดบอริก 4 อัตรา (0, 0.1, 0.5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม) นำมาทดสอบปลูกพริกหวาน (bell pepper) พบว่า การใส่ปุ๋ยหมักทำให้ปริมาณโบรอนในสารละลายดินลดลง และทำให้โบรอนในใบพริกหวานลดลงอย่างชัดเจน แต่เมื่ออินทรียวัตถุในดินถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ดิน โบรอนที่ถูกดูดซับอยู่กับอินทรียวัตถุก็จะถูกปลดปล่อยกลับออกมาสู่ดิน และเป็นพิษกับพืชได้อีก ดังที่ Keren และ Bingham (1985) รายงานว่า การเพิ่มอินทรียวัตถุลงไปในดินทำให้ปริมาณโบรอนในดิน และในพืชเพิ่มสูงขึ้น

และจากการรายงานของ Havlin และคณะ (2005) รายงานว่า การเพิ่มอินทรียวัตถุลงไปในดินทำให้พืชเกิดอาการเป็นพิษจากโบรอน

ดังนั้นการเพิ่มอินทรียวัตถุลงไปในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา คาดว่าจะทำให้โบรอนในดินลดลงได้ โดยโบรอนในดินจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ยาก อย่างไรก็ตามเมื่ออินทรียวัตถุในดินสลายตัวโบรอนจะถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์กับพืชอีกครั้ง การเพิ่มอินทรียวัตถุลงไปในดินจึงไม่เหมาะสมสำหรับการลดโบรอนในดิน

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

3.1 ศึกษาการใช้ซีโอไลต์ดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา
3.2 ศึกษาการเพิ่มค่าปฏิกิริยาดินของดินที่ปนเปื้อนโบรอน และการเจริญเติบโตของพืช
3.3 ศึกษาการใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอน
3.4 ศึกษาการใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอนต่อโบรอนในดิน และการเจริญเติบโตของพืช

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. วัสดุและสารเคมี

1.1 เมล็ดมะเขือเทศพันธุ์สีดา (*Lycopersicon esculentum*, Mill)

1.2 มอร์ดีไนต์ (Mordenite : $Ca_{3.4}Al_{7.4}Si_{40.6}O_{96}(H_2O)_{31}$)

1.3 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide : $Ca(OH)_2$)

1.4 แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Calcium dihydrogen phosphate : $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$)

1.5 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate : $CaCO_3$)

1.6 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride : $CaCl_2 \cdot 2H_2O$)

1.7 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide : CaO)

1.8 โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate: Na_2SO_4)

1.9 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride : NaCl)

1.10 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide : NaOH)

1.11 โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate : KH_2PO_4)

1.12 โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride : KCl)

1.13 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid : 37% w/w HCl)

1.14 กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid : 96-98% w/w H_2SO_4)

1.15 กรดอะซิติก (Acetic acid : CH_3COOH)

1.16 กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid : $C_6H_8O_6$)

1.17 กรดบอริก (Boric acid : H_3BO_3)

1.18 บอแร็กซ์ (Borax : $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)

1.19 กรดเอทิลีนไดอะมีนเททระอะซิติกเททระโซเดียมซอลท์ ไดไฮเดรต (Ethylenediaminetetraacetic acid tetrasodium salt Dihydrate : $C_{10}H_{12}N_2Na_4O_8 \cdot 2H_2O$

1.20 กรดไนทริโลไตรอะซิติกไดโซเดียมซอลท์ (Nitrilotriacetic acid disodium salt :$C_6H_7NO_6Na_2$)

1.21 กรดเพอร์คลอริก (Perchloric acid : 70% w/w $HClO_4$)

1.22 กรดไนทริก (Nitric acid : 65% w/w HNO_3)

1.23 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide : 25% w/w NH_4OH)

1.24 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (Ammonium fluoride : NH_4F)

1.25 แอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium molybdate : $(NH_4)_6Mo_7O_{24}\cdot 4H_2O$)

1.26 แอมโมเนียมเมตาวาเนเดต (Ammonium metavanadate : NH_4VO_3)

1.27 แอมโมเนียมอะซีเทต (Ammonium acetate : NH_4OAc)

1.28 กลีเซอรอล (Glyceral : $C_3H_8O_3$)

1.29 แบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride : $BaCl_2$)

1.30 สทรอนเทียมคลอไรด์ (Strontium chloride : $SrCl_2\cdot 6H_2O$)

1.31 เฟอรัสซัลเฟต (Ferrous sulphate : $FeSO_4\cdot 7H_2O$)

1.32 เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium sulfate : $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2\cdot 6H_2O$)

1.33 อะโซมีทีนเอช (Azomethine-H : $C_{17}H_{12}NNaO_8S_2$)

1.34 ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide : 30% w/w H_2O_2)

2. อุปกรณ์

2.1 ตะแกรงร่อนดิน

2.2 เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.01 กรัม

2.3 เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.0001 กรัม

2.4 กระดาษกรอง

2.5 เครื่องเขย่า (Table Rotary Shaker)

2.6 เครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (Visible Spectrophotometer)

2.7 เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter)

2.8 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

2.9 ตู้อบตัวอย่างพืช (Hot Air Oven)

2.10 เครื่องย่อยตัวอย่างพืช (Digestion Block)

2.11 เครื่องกลั่นไนโตรเจน (Nitrogen Distillation Apparatus)

2.12 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

2.13 เครื่องเฟลมโฟโทมิเตอร์ (Flame Photometer)

2.14 เครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)

2.15 เตาเผาตัวอย่าง

2.16 ชุด Reflux

3. วิธีการวิจัย

การศึกษาเพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาความเป็นพิษของโบรอนในน้ำเสียและในดิน ประกอบด้วย 5 การทดลอง ดังนี้ 1) การใช้ซีโอไลต์ดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน และผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน 2) การใส่ปูนขาวยกระดับค่าปฏิกิริยาดินของดินที่ปนเปื้อนโบรอน 3) ผลของการใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ 4) การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอน และ 5) การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ โดยมีรายละเอียดของการวิจัยดังนี้

3.1 การใช้ซีโอไลต์ดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน และผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

3.1.1 วิธีการทดลอง

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา แล้วนำมาบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันตามวิธีการของ ปฐมาพร (2549) และนำน้ำเสียส่วนที่ผ่าน และไม่ผ่านการบำบัดปริมาตร 30 มิลลิลิตร ใส่ลงไปในหลอดเหวี่ยงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร ใส่ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดมอร์ดีไนต์ (mordenite) ตามตำรับการทดลองในหลอดเหวี่ยงพลาสติก นำไปเขย่า วันละ 2 ครั้ง คือ เช้า และเย็น ครั้งละ 30 นาที เป็นเวลา 7 วัน แล้วนำมาทำให้ตกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง

3.1.2 จัดตำรับการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) ทำ 3 ซ้ำ

ตำรับการทดลองที่ 1 ซีโอไลต์ 0 กรัม (ควบคุม)
ตำรับการทดลองที่ 2 ซีโอไลต์ 3 กรัม
ตำรับการทดลองที่ 3 ซีโอไลต์ 6 กรัม
ตำรับการทดลองที่ 4 ซีโอไลต์ 9 กรัม
ตำรับการทดลองที่ 5 ซีโอไลต์ 12 กรัม

3.1.3 การเก็บตัวอย่าง

การวิเคราะห์สารละลาย นำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์ค่าพีเอช (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ธาตุโบรอน (B) โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) และกำมะถัน (S)

3.2 การใส่ปูนขาวยกระดับค่าปฏิกิริยาดินของดินที่ปนเปื้อนโบรอน

3.2.1 วิธีการทดลอง

สุ่มเก็บตัวอย่างดิน โดยเลือกชุดดินคอหงส์ (Kho Hong : Coarse-Loamy, Kaolinitic, Isohyperthermic Typic Kandiudults) เป็นชุดดินทดสอบ เนื่องจากเป็นตัวแทนดินที่ใช้ทำการเกษตรทั่วไป และพบมากในพื้นที่ภาคใต้มากกว่า 5,386 ตารางกิโลเมตร (เอิบ, 2533) จากแปลงปลูกยางพาราของเกษตรกรบ้านน้ำน้อย ต.น้ำน้อย อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา เก็บดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร นำมาผึ่งลมให้แห้งในที่ร่ม เก็บเศษซากพืชออก แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องผ่าน 0.5 เซนติเมตร แล้วนำดินมา 1 กิโลกรัม เติมสารละลายกรดบอริก 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตรา 10.84 มิลลิลิตร เพื่อปรับให้ดินมีโบรอนที่สกัดได้เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นำมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องผ่าน 2.0 มิลลิเมตร แล้วนำมาเติมปูนขาวตามตำรับการทดลอง แล้วนำดินหลังจากเติมปูน 400 กรัม ใส่ในแก้วพลาสติกสีขาวที่เจาะรูที่ก้น เพื่อให้น้ำซึมขึ้นมาได้ง่าย นำไปวางในถาดพลาสติก แล้วเติมน้ำลงไปในถาดให้มีระดับความสูง 1 เซนติเมตร และเก็บตัวอย่างดินเมื่อครบ 0, 15, 30, 45 และ 60 วัน

3.2.2 จัดตำรับการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) ทำ 3 ซ้ำ

ตำรับการทดลองที่ 1 ไม่ใส่ปูนขาว ค่าพีเอชของดินเดิมเท่ากับ 4.9 (ควบคุม)
ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปูนขาวปรับค่าพีเอชของดินให้ได้เท่ากับ 5
ตำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปูนขาวปรับค่าพีเอชของดินให้ได้เท่ากับ 6
ตำรับการทดลองที่ 4 ใส่ปูนขาวปรับค่าพีเอชของดินให้ได้เท่ากับ 7
ตำรับการทดลองที่ 5 ใส่ปูนขาวปรับค่าพีเอชของดินให้ได้เท่ากับ 8

3.2.3 การเก็บตัวอย่าง

นำตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ค่า pH, EC และ Extr.B

3.3 ผลของการใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ

3.3.1 วิธีการทดลอง

สุ่มเก็บตัวอย่างดิน โดยเลือกชุดดินคอหงส์ (เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2) และใช้มะเขือเทศพันธุ์สีดา (*Lycopersicon esculentum*, Mill) เป็นพืชทดสอบ เนื่องจากมะเขือเทศเป็น

พืชที่มีความต้องการธาตุโบรอนสูง (4 ถึง 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) และสามารถสังเกตอาการเป็นพิษจากโบรอนได้ง่าย นำน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราอัตรามากกว่าระดับความจุความชื้นสนามรดให้กับชุดดินคอหงส์ 3 ครั้ง นำดินมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 เซนติเมตร แล้วบรรจุดินลงในถุงพลาสติกสีดำ ถุงละ 5 กิโลกรัม และเพาะเมล็ดมะเขือเทศในถาดเพาะจนต้นกล้ามีอายุ 30 วัน แล้วจึงย้ายลงปลูก แต่ก่อนย้ายกล้าลงปลูกใส่แคลเซียมจากปูนขาวอัตราต่าง ๆ ตามตำรับการทดลอง ผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วให้ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชในรูปของสารละลาย ยกเว้นโบรอน และแคลเซียม (ตารางที่ 1) ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 3 คืน โดย N, P, K, Mg และ S เตรียมเป็นสารละลายแยกกัน แล้วดูดใช้อย่างละ 10 มิลลิลิตร ยกเว้น N ใช้ครั้งละ 5 มิลลิลิตร ห่างกัน 15 วัน ส่วน Zn, Cu, Mn, Mo และ Fe เตรียมเป็นสารละลายรวมกัน แล้วดูดใช้ 10 มิลลิลิตร

3.3.2 จัดตำรับการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) ทำ 5 ซ้ำ

ตำรับการทดลองที่ 1 ไม่ใส่ปูนขาว (ควบคุม)

ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปูนขาวครึ่งหนึ่งของความต้องการปูน (0.07 กรัมต่อดิน 5 กิโลกรัม)

ตำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปูนขาวเท่ากับความต้องการปูน (0.14 กรัมต่อดิน 5 กิโลกรัม)

ตำรับการทดลองที่ 4 ใส่ปูนขาวเท่ากับสองเท่าของความต้องการปูน (0.28 กรัมต่อดิน 5 กิโลกรัม)

3.3.3 การเก็บตัวอย่าง

1) การวิเคราะห์ดิน นำตัวอย่างดินก่อน และหลังจากการเก็บเกี่ยวมะเขือเทศมาวิเคราะห์ค่า pH, EC, Extr.B, Exch.Ca, $NH_4^+ + NO_3^-$, Avai.P และ Exch.K

2) การวิเคราะห์พืช บันทึกการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ โดยสังเกตอาการถ่ายรูป นับจำนวนใบ และวัดความสูงของต้นทุกสัปดาห์ตั้งแต่เริ่มให้ตำรับการทดลอง เก็บเกี่ยวมะเขือเทศเมื่ออายุ 60 วันหลังปลูก นำมาชั่งน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง และนำต้นมะเขือเทศที่ผ่านการอบมาวิเคราะห์ธาตุ Ca, B, N, P และ K

ตารางที่ 1 สารเคมีที่ใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารและอัตราการใช้

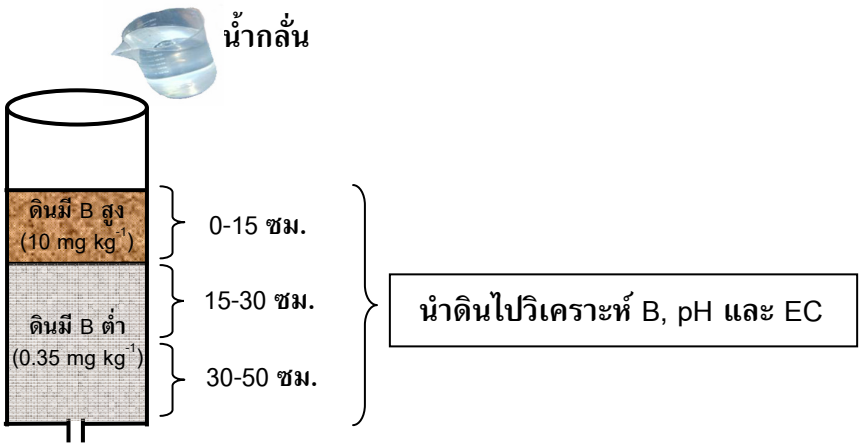
ธาตุ	สารเคมี	อัตราธาตุ (กก./เฮกตาร์)	อัตราธาตุต่อดิน 5 กก. (กรัม/กระถาง)
N	NH_4NO_3	400	1.026
P	$NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$	250	0.641
K	KCl	200	0.513
Ca	$CaCl_2$	40	0.103
Mg	$MgCl_2$	6	0.015
S	Na_2SO_4	4	0.010
Zn	$ZnCl_2$	6	0.015
Cu	$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	4	0.010
Mn	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	5	0.012
Mo	$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	0.4	0.001
Fe	0.1 M FeEDTA	5	0.012

ที่มา : ดัดแปลงจาก (ชัยรัตน์ และคณะ, 2538)

3.4 การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอน

3.4.1 วิธีการทดลอง

สุ่มเก็บตัวอย่างดิน โดยเลือกชุดดินคอหงส์ (เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2) ทำการทดลองในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว สูง 1 เมตร โดยนำชุดดินคอหงส์ใส่ในคอลัมน์ให้มีระดับความสูง 35 เซนติเมตร และเติมชุดดินคอหงส์ที่ผ่านการปรับให้มีปริมาณโบรอนที่สกัดได้ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เพิ่มลงไปให้มีระดับความสูง 15 เซนติเมตร ใช้น้ำปราศจากไอออน (deionized water) ตามตำรับการทดลองชะล้างดิน โดยปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลองอิงมาจากปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 5 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2545–2549 ของสถานีตรวจอากาศคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,000 มิลลิเมตรต่อปี ตำรับทดลองที่ใช้น้ำมากกว่าระดับความชื้นสนามทำให้ดินมีความชื้นระดับความชื้นสนามก่อนแล้วจึงใช้น้ำอัตราต่าง ๆ ตามตำรับการทดลองชะล้างดิน โดยแบ่งน้ำชะโบรอนในดินครั้งละ 200 มิลลิเมตร วันละหนึ่งครั้ง จนหมดน้ำในแต่ละตำรับการทดลอง แล้วเก็บตัวอย่างน้ำที่ชะในแต่ละตำรับทดลอง และเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0–15, 15–30 และ 30–50 เซนติเมตร



รูปที่ 2 วิธีการชะล้างโบรอนในดินด้วยน้ำกลั่น

3.4.2 จัดตำรับการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) ทำ 3 ซ้ำ

ตำรับการทดลองที่ 1 ใช้น้ำอัตรา 0 มิลลิลิตร (ควบคุม)

ตำรับการทดลองที่ 2 ใช้น้ำอัตรา 167.5 มิลลิเมตร (ความจุความชื้นสนาม)

ตำรับการทดลองที่ 3 ใช้น้ำอัตรา 1,000 มิลลิเมตร

ตำรับการทดลองที่ 4 ใช้น้ำอัตรา 2,000 มิลลิเมตร

ตำรับการทดลองที่ 5 ใช้น้ำอัตรา 4,000 มิลลิเมตร

3.4.3 การเก็บตัวอย่าง

1) **การวิเคราะห์ดิน** นำตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ค่า pH, EC และ Extr.B

2) **การวิเคราะห์สารละลาย** นำตัวอย่างสารละลายมาวิเคราะห์ค่า pH, EC และ B

3.5 การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา ต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ

3.5.1 วิธีการทดลอง

สุ่มเก็บตัวอย่างดิน โดยเลือกชุดดินคอหงส์ (เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2) นำน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราอัตรามากกว่าระดับความจุความชื้นสนามรดให้กับชุดดินคอหงส์ 3 ครั้ง นำดินมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 เซนติเมตร แล้วบรรจุดินลงในกระถางพลาสติกสีดำที่เจาะรูที่ก้นให้มีระดับความสูงจากก้นกระถาง 15 เซนติเมตร แล้วใช้น้ำตามตำรับการทดลองชะล้างดิน โดยแบ่งน้ำชะโบรอนในดินครั้งละ 2.76 มิลลิเมตร

วันละหนึ่งครั้ง เนื่องจากเป็นระดับน้ำที่ดินสามารถระบายออกหมดได้ในหนึ่งวัน จนหมดน้ำในแต่ละตำรับการทดลอง และเพาะเมล็ดมะเขือเทศในถาดเพาะจนต้นกล้ามีอายุ 30 วัน แล้วจึงย้ายลงปลูก โดยก่อนย้ายกล้าลงปลูก ให้ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชในรูปของสารละลาย ยกเว้นโบรอน (ตารางที่ 1) ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 3 คืน โดย N, P, K, Ca, Mg และ S เตรียมเป็นสารละลายแยกกัน แล้วดูดใช้อย่างละ 10 มิลลิลิตร ยกเว้น N ใช้ครั้งละ 5 มิลลิลิตร ห่างกัน 15 วัน ส่วน Zn, Cu, Mn, Mo และ Fe เตรียมเป็นสารละลายรวมกัน แล้วดูดใช้ 10 มิลลิลิตร

3.5.2 จัดตำรับการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) ทำ 5 ซ้ำ

ตำรับการทดลองที่ 1 ชะล้างดินด้วยน้ำอัตรา 0 มิลลิเมตร (ควบคุม)

ตำรับการทดลองที่ 2 ชะล้างดินด้วยน้ำอัตรา 300 มิลลิเมตร

ตำรับการทดลองที่ 3 ชะล้างดินด้วยน้ำอัตรา 600 มิลลิเมตร

ตำรับการทดลองที่ 4 ชะล้างดินด้วยน้ำอัตรา 900 มิลลิเมตร

3.5.3 การเก็บตัวอย่าง

1) การวิเคราะห์ดิน นำตัวอย่างดินก่อน และหลังจากการเก็บเกี่ยวมาวิเคราะห์ค่า pH, EC, Extr.B, OM., $NH_4^+ + NO_3^-$, Avai.P และ Exch.K

2) การวิเคราะห์พืช บันทึกการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ โดยสังเกตอาการถ่ายรูป นับจำนวนใบ และวัดความสูงของต้น ทุกสัปดาห์ตั้งแต่เริ่มให้ตำรับการทดลอง เก็บเกี่ยวมะเขือเทศเมื่ออายุ 60 วันหลังปลูก นำมาชั่งหาน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง และนำต้นมะเขือเทศที่ผ่านการอบมาวิเคราะห์ธาตุ B, N, P และ K

3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน พืช และสารละลาย

ได้วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน พืช และสารละลาย ตามคู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช (จำเป็น, 2547) ดังนี้

3.6.1 การวิเคราะห์สมบัติบางประการและธาตุอาหารในดิน

1) ค่าปฏิกิริยาดิน (soil pH) วัดด้วยเครื่อง pH meter โดยใช้สัดส่วนดินต่อน้ำเท่ากับ 1: 5

2) ค่าการนำไฟฟ้า วัดด้วยเครื่อง Electrical conductivity meter โดยใช้สัดส่วนของดินต่อน้ำเท่ากับ 1: 5

3) อินทรียวัตถุ (organic matter) วิเคราะห์โดยวิธีวอล์คเลย์-แบลค์ โดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมตเข้าไปออกซิไดซ์คาร์บอนในสารอินทรีย์ และอาศัยความร้อนจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างไปไทเทรตกับเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต เพื่อหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ออกซิไดซ์คาร์บอน แล้วคำนวณหาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรียวัตถุ

4) โบรอนที่เป็นประโยชน์ (available boron) วิเคราะห์โดยวิธี Hot-Water Method ทำให้เกิดสีด้วยวิธีอะโซมีธีนเฮช และวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิสิเบิลสเปกโทร-โฟโทมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร (Soil and Plant Analysis Council, 1999)

5) แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable calcium) สกัดตัวอย่างดินด้วยสารละลาย 1 โมลาร์ แอมโมเนียมอะซีเทต พีเอช 7 นำสารละลายตัวอย่างที่สกัดได้ไปวัดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ โดยใช้ความยาวคลื่น 422 นาโนเมตร

6) แอมโมเนียมกับไนเทรต (ammonium and nitrate) สกัดตัวอย่างดินด้วยสารละลาย 2.0 โมลาร์ โพแทสเซียมคลอไรด์ นำสารละลายที่สกัดได้ไปกลั่นหาแอมโมเนียมด้วยเครื่องกลั่น โดยทำให้เกิดแก๊ซแอมโมเนียโดยสารแขวนลอยแมกนีเซียมออกไซด์ จับแก๊ซแอม-โมเนียโดยกรดบอริก แล้วน้ำไปไทเทรตหาแอมโนเนียมด้วยกรดซัลฟิวริก ส่วนไนเทรตนำสารละลายหลังจากการกลั่นหาแอมโมเนียมมาเติมสารดีวาร์ดาอัลลอย แล้วนำไปกลั่นเช่นเดียวกับแอมโมเนียม

7) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable potassium) สกัดตัวอย่างดินด้วยสารละลาย 1 โมลาร์ แอมโมเนียมอะซีเทต พีเอช 7นำสารละลายที่สกัดได้ไปวัดด้วยเครื่องเฟลมโฟโทมิเตอร์

8) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorous) วิเคราะห์โดยวิธีเบรย์ทู ทำให้เกิดสีด้วยวิธีโมลิบดินัมบลู และวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟ-โทมิเตอร์

3.6.2 การวิเคราะห์ธาตุอาหารในพืช

นำตัวอย่างพืชมากำจัดสิ่งปนเปื้อน โดยการล้างด้วยน้ำประปา และน้ำกลั่นตามลำดับ และซับให้แห้งด้วยผ้าขาวบางที่สะอาด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 1-2 วัน นำไปบดให้ละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 20-40 เมช และนำตัวอย่างมาย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก สำหรับวิเคราะห์ ไนโตรเจน และย่อยด้วยกรดผสมไนทริกเพอร์คลอริก สำหรับวิเคราะห์ โพแทสเซียม แคลเซียม และฟอสฟอรัส และเผาเป็นเถ้าเพื่อวิเคราะห์โบรอน นำตัวอย่างที่ได้ไปปรับปริมาตรและนำไปวิเคราะห์ธาตุอาหาร

1) ไนโตรเจน โดยนำสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกไปกลั่นด้วยเครื่องกลั่น ทำให้เกิดแก๊ซแอมโมเนียโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และใช้กรดบอริกจับแก๊สแอมโมเนีย แล้วน้ำไปไทเทรตหาแอมโนเนียมด้วยกรดซัลฟิวริก และคำนวณหาไนโตรเจน

2) ฟอสฟอรัส โดยนำสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการย่อยด้วยกรดผสมไนทริกเพอร์คลอริก มาทำให้เกิดสีด้วยวิธีเยลโลโมลิบโดฟอสฟอริกแอซิด วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

3) โพแทสเซียม โดยนำสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการย่อยด้วยกรดผสมไนทริกเพอร์คลอริก มาวัดด้วยเครื่องเฟลมโฟโทมิเตอร์

4) แคลเซียม โดยนำสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการย่อยด้วยกรดผสมไนทริกเพอร์คลอริก มาวัดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ โดยใช้ความยาวคลื่น 422 นาโนเมตร

5) โบรอน นำสารละลายตัวอย่างพืชที่ได้จากการเผามาทำให้เกิดสีด้วยวิธีอะโซมีธีนเฮช แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

3.6.3 การวิเคราะห์สมบัติบางประการและธาตุอาหารในสารละลาย

1) ค่าปฏิกิริยา (pH) นำสารละลายมาวัดด้วยเครื่อง pH meter

2) ค่าการนำไฟฟ้า นำสารละลายมาวัดด้วยเครื่อง Electrical conductivity meter

3) โซเดียม นำสารละลายมาวัดด้วยเครื่องเฟรมโฟโทมิเตอร์

4) แคลเซียม นำสารละลายมาวัดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโทร-โฟโทมิเตอร์ โดยใช้ความยาวคลื่น 422 นาโนเมตร

5) โบรอน นำสารละลายมาทำให้เกิดสีด้วยวิธีอะโซมีธีนเฮช แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

6) กำมะถัน นำสารละลายมาทำให้เกิดตะกอนด้วยวิธีเทอบิดีเมตริก และวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลผลการทดลองในแต่ละการทดลอง เช่น ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดิน ข้อมูลการเจริญเติบโตของพืช และข้อมูลความเข้มข้นของธาตุอาหารในพืช มาวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (ANOVA) และทดสอบความแตกต่างทางสถิติของแต่ละตำรับการทดลองด้วยวิธี Duncan Multiple Range Test (DMRT)

บทที่ 3

ผลการทดลอง

1. การใช้ซีโอไลต์ดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการบำบัด และที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

การใส่ซีโอไลต์ชนิดมอร์ดีไนต์ อัตรา 3, 6, 9 และ 12 กรัม ในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัด ซึ่งมีลักษณะขุ่น มีชิ้นส่วนเล็กๆ ของไม้ยางพาราแขวนลอยอยู่ และมีสีน้ำตาลอมแดง ทำให้โบรอนในน้ำเสียมีแนวโน้มลดลง (ตารางที่ 2) และอัตราซีโอไลต์ที่ทำให้โบรอนในน้ำเสียลดลงมากที่สุด คือ 12 กรัม ซึ่งทำให้โบรอนในน้ำเสียลดลงจากน้ำเสียที่ไม่ได้ใส่ซีโอไลต์ คือ 1,276.8 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 1,232.4 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 2) และการใส่ซีโอไลต์ 12 กรัม ยังทำให้ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และโซเดียมในน้ำเสียลดลงเหลือน้อยที่สุดด้วย คือ 7.95, 2.54 เดซิซีเมนต่อเมตร และ 151.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับไม่ใส่ซีโอไลต์ คือ 8.33, 3.52 เดซิซีเมนต่อเมตร และ 798.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และการใส่ซีโอไลต์ทำให้แคลเซียมในน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) ตามอัตราซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้นด้วย (ตารางที่ 2) นอกจากนี้การใส่ซีโอไลต์ยังทำให้สีของน้ำเสียจางลงด้วย โดยสีจะจางลงตามอัตราของซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3)

การใส่สารซีโอไลต์ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งมีลักษณะใส และมีโบรอนตกค้างน้อยกว่าในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัด (416.2 มิลลิกรัมต่อลิตร) ให้ผลทำนองเดียวกับในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัด คือ ซีโอไลต์ 12 กรัม ทำให้โบรอนในน้ำเสียลดลงมากที่สุด คือ 332.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับไม่ใส่ซีโอไลต์ คือ 416.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 3) และทำให้ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และโซเดียมลดลงมากที่สุดด้วย คือ 8.17, 4.10 เดซิซีเมนต่อเมตร และ 317.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุม คือ 8.69, 7.65 เดซิซีเมนต่อเมตร และ 1,459.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และการใส่ซีโอไลต์ทำให้แคลเซียมในน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุม (ตารางที่ 3) นอกจากนี้ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังมีกำมะถันสูง (109.4 มิลลิกรัมต่อลิตร) อย่างไรก็ตามเมื่อใส่ซีโอไลต์ลงไป พบว่า ทำให้กำมะถันในน้ำเสียลดลงแตกต่างกับตำรับควบคุมชัดเจน ($P \leq 0.01$) (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 2 ผลของซีโอไลต์อัตราต่าง ๆ ต่อค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และธาตุอาหารในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้น้ำเสีย 30 มิลลิลิตร

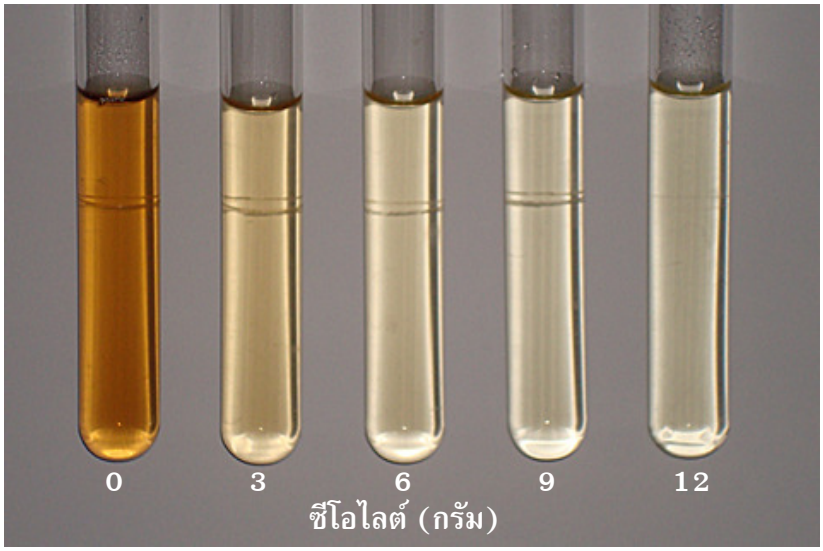
ตำรับการทดลอง	pH	EC	B	Na	Ca	S
		dS m^{-1}	mg L^{-1}	mg L^{-1}	mg L^{-1}	mg L^{-1}
ซีโอไลต์ 0 กรัม	8.33 a	3.52 a	1,276.8	798.8 a	18.12 e	ไม่พบ
ซีโอไลต์ 3 กรัม	8.20 b	2.93 b	1,254.2	417.3 b	113.7 d	ไม่พบ
ซีโอไลต์ 6 กรัม	8.11 c	2.78 c	1,246.6	271.4 c	156.1 c	ไม่พบ
ซีโอไลต์ 9 กรัม	8.02 d	2.63 d	1,235.5	191.3 d	193.7 b	ไม่พบ
ซีโอไลต์ 12 กรัม	7.95 e	2.54 e	1,232.4	151.4 e	241.8 a	ไม่พบ
F-test	**	**	NS	**	**	-
C.V. (%)	0.22	1.55	3.37	4.57	5.67	-

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ 3 ผลของซีโอไลต์อัตราต่าง ๆ ต่อค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และธาตุอาหารในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้น้ำเสีย 30 มิลลิลิตร

ตำรับการทดลอง	pH	EC	B	Na	Ca	S
		dS m^{-1}	mg L^{-1}	mg L^{-1}	mg L^{-1}	mg L^{-1}
ซีโอไลต์ 0 กรัม	8.69 a	7.65 a	416.2 a	1,459.1 a	143.0 d	109.4 a
ซีโอไลต์ 3 กรัม	8.49 b	5.93 b	372.4 b	936.5 b	165.2 c	78.9 b
ซีโอไลต์ 6 กรัม	8.38 bc	5.03 c	360.9 bc	620.6 c	170.9 bc	73.1 b
ซีโอไลต์ 9 กรัม	8.31 c	4.51 d	345.0 bc	450.5 d	186.2 a	63.4 c
ซีโอไลต์ 12 กรัม	8.17 d	4.10 e	332.5 c	317.2 e	181.5 ab	55.0 c
F-test	**	**	**	**	**	**
C.V. (%)	0.84	1.93	3.90	3.05	3.79	6.22

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%



รูปที่ 3 สีของน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดหลังจากใช้ซีโอไลต์อัตราต่าง ๆ ดูดซับธาตุโบรอนในน้ำเสีย 30 มิลลิลิตร

2. การใส่ปูนขาวยกระดับค่าปฏิกิริยาดินของดินที่ปนเปื้อนโบรอน

การใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากกรดบอริก (9.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ทำให้ค่าพีเอชของดินเพิ่มสูงขึ้นจาก 4.99 ถึง 7.64 และเมื่อบ่มดินในสภาวะชื้นครบ 60 วัน ค่าพีเอชของดินเพิ่มสูงขึ้นจาก 4.83 ถึง 7.06 และทุกตำรับการทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) (ตารางที่ 4) แต่ผลของการใส่ปูนขาวเพิ่มค่าพีเอชดินไม่ทำให้โบรอนในดินเปลี่ยนแปลง (ตารางที่ 5) โดยการบ่มดินในสภาวะชื้น 15 วัน ไม่ทำให้โบรอนในดินลดลง แต่เมื่อบ่มดินครบ 30 และ 45 วัน พบว่า ทำให้โบรอนในดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น คือ 7.55, 7.43, 7.95 และ 8.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และ 7.92, 8.33, 8.75 และ 8.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อบ่มดินครบ 60 วัน พบว่าการใส่ปูนขาวไม่ทำให้ปริมาณโบรอนที่สกัดได้ในดินแตกต่างกัน

ตารางที่ 4 ค่าพีเอชของดินปนเปื้อนโบรอนหลังจากใส่ปูนขาว

ตำรับการทดลอง	ค่า pH ของดินหลังการทดลอง (ดิน:น้ำ, 1:5)				
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน
ควบคุม	4.99 e	5.42 e	5.40 d	4.97 e	4.83 e
pH 5	5.28 d	5.65 d	5.39 d	5.11 d	5.00 d
pH 6	6.07 c	6.06 c	5.63 c	5.56 c	5.55 c
pH 7	6.76 b	6.43 b	6.33 b	6.30 b	6.28 b
pH 8	7.64 a	6.96 a	7.08 a	7.01 e	7.06 a
F-test	**	**	**	**	**
C.V. (%)	3.44	1.37	1.06	1.22	1.83

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ 5 ปริมาณโบรอนที่สกัดได้ในดินที่ระดับค่าพีเอชต่าง ๆ

ตำรับการทดลอง	ปริมาณ B ที่สกัดได้ในดิน (mg kg^{-1})				
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน
ควบคุม	9.03	8.45	7.16 c	7.82 b	9.02
pH 5	9.40	8.41	7.55 bc	7.92 b	8.46
pH 6	9.49	7.90	7.43 bc	8.33 ab	9.09
pH 7	9.68	8.44	7.95 ab	8.75 a	8.44
pH 8	9.55	7.79	8.44 a	8.03 b	9.06
F-test	NS	NS	**	*	NS
C.V. (%)	4.21	8.64	6.74	5.78	6.26

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ, * = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

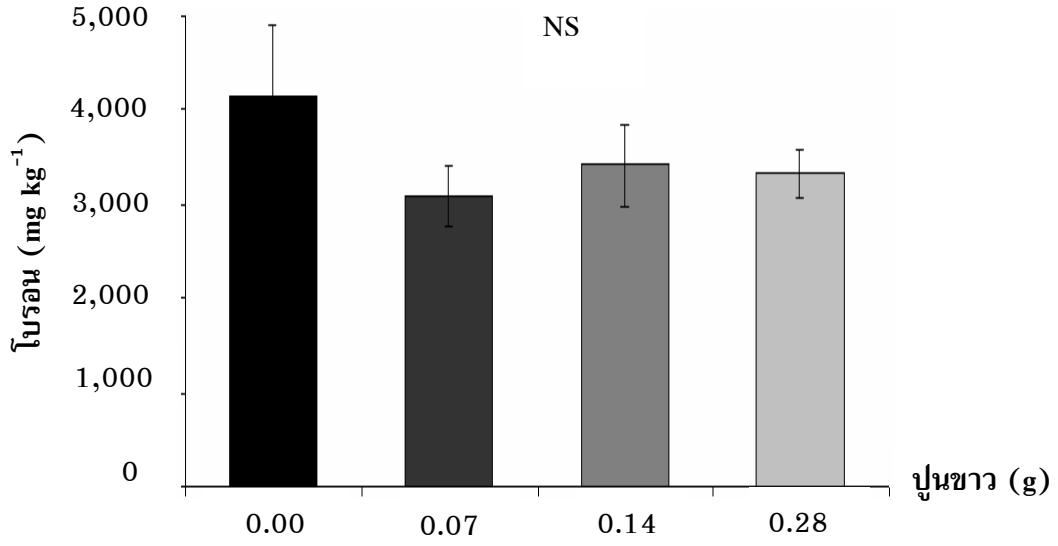
3. ผลของการใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ

สมบัติของดิน การใส่ปูนขาว 0.07, 0.14 และ 0.28 กรัมต่อดิน 5 กิโลกรัม ในดินที่ปนเปื้อนโบรอน (191.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา หลังจากเก็บเกี่ยวมะเขือเทศแล้ว พบว่า ดินมีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราปูนที่ใส่ คือ 7.73, 8.02 และ 8.39 ตามลำดับ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุม คือ 7.35 (ตารางที่ 6) และการใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียยังทำให้แคลเซียมตกค้างอยู่ในดินสูงตามอัตราของปูนขาวที่ใส่ลงไปด้วย คือ 0.64, 1.07 และ 1.89 เซนติโมลประจุบวกต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุม คือ 1.72

เซนติโมลประจุบวกต่อกิโลกรัม แต่การใส่ปูนขาวไม่ทำให้โบรอนที่สกัดได้ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเปลี่ยนแปลง

การเจริญเติบโตของพืช การใส่ปูนขาวลงไปในดินทำให้แคลเซียมในดินเพิ่มสูงขึ้น แต่มะเขือเทศยังเกิดอาการเป็นพิษจากโบรอน โดยมะเขือเทศมีอาการขอบใบเป็นรอยไหม้สีน้ำตาลเมื่ออายุ 34 วัน (หลังย้ายปลูก 4 วัน) (รูปที่ 5 B) และแห้งตายเมื่ออายุ 35 วัน (หลังย้ายปลูก 5 วัน) จึงส่งผลทำให้ความสูง จำนวนใบ และน้ำหนักแห้ง ของมะเขือเทศในแต่ละตำรับการทดลองไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 7)

ธาตุอาหารในพืช หลังจากมะเขือเทศตาย ซึ่งมีน้ำหนักของส่วนเหนือดินน้อย (ตารางที่ 7) และนำมาวิเคราะห์ได้เฉพาะโบรอนเท่านั้น พบว่า ตำรับทดลองที่ใส่ปูนขาวอัตรา 0.07, 0.14 และ 0.28 กรัม ตามลำดับ ทำให้โบรอนในมะเขือเทศมีแนวโน้มลดลง คือ 3,089.5, 3,417.9 และ 3,330.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ตำรับทดลองที่ไม่ใส่ปูนขาวมีโบรอน 4,150.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (รูปที่ 4)



หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันเหนือแท่งกราฟไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

รูปที่ 4 ผลของปูนขาวต่อความเข้มข้นของธาตุโบรอนในส่วนเหนือดินของต้นมะเขือเทศอายุ 35 วัน (หลังย้ายปลูก 5 วัน) ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสีย

ตารางที่ 6 ผลของการใส่ปูนขาวต่อสมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา

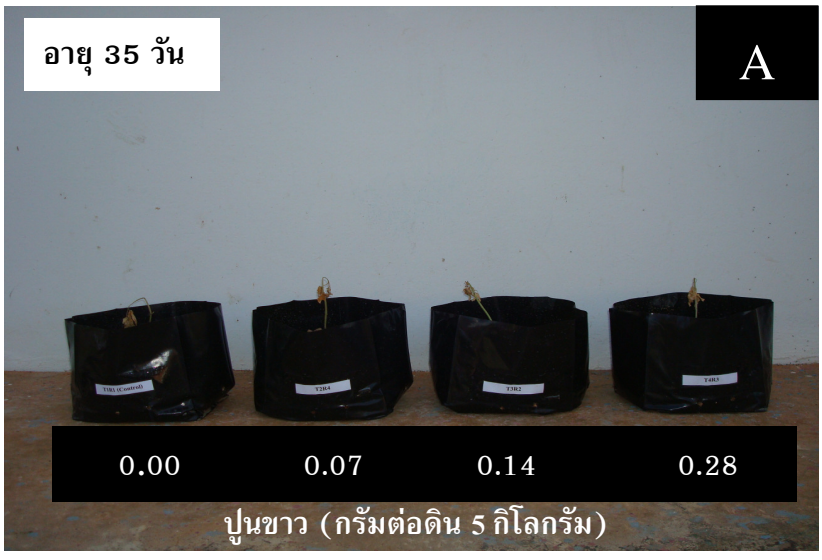
ตำรับการทดลอง	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	Exch. Ca $cmol_c\ kg^{-1}$	Extr. B $mg\ kg^{-1}$	$NH_4^+ + NO_3^-$ $mg\ kg^{-1}$	Avai. P $mg\ kg^{-1}$	Exch. K $cmol_c\ kg^{-1}$
0.00 กรัม	7.35 d	0.29	191.7	65.4 a	29.8	0.55
0.07 กรัม	7.73 c	0.64	166.1	67.5 a	30.6	0.56
0.14 กรัม	8.02 b	1.07	193.3	72.3 a	29.8	0.55
0.28 กรัม	8.39 a	1.89	195.3	50.2 b	30.4	0.54
F-test	**	**	NS	**	NS	NS
C.V. (%)	0.70	1.72	13.34	12.28	4.87	5.75

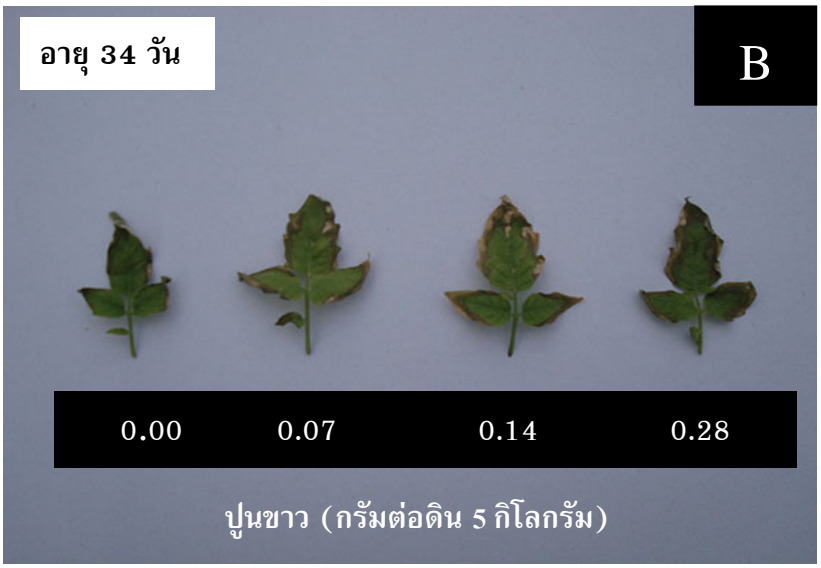
หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ 7 การเจริญเติบโตของมะเขือเทศอายุ 35 วัน (หลังย้ายปลูก 5 วัน) หลังจากใส่ปูนขาว

ตำรับการทดลอง	ความสูง (เซนติเมตร)	จำนวนใบ (ใบ/ต้น)	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ต้น)
0.00 กรัม	11.4	4.80	0.06
0.07 กรัม	12.9	5.00	0.06
0.14 กรัม	12.8	5.00	0.07
0.28 กรัม	12.5	5.00	0.05
F-test	NS	NS	NS
C.V. (%)	6.90	4.65	25.00

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ





รูปที่ 5 ผลของการใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ A มะเขือเทศอายุ 35 วัน (หลังย้ายปลูก 5 วัน) และ B ลักษณะใบมะเขือเทศอายุ 34 วัน (หลังย้ายปลูก 4 วัน)

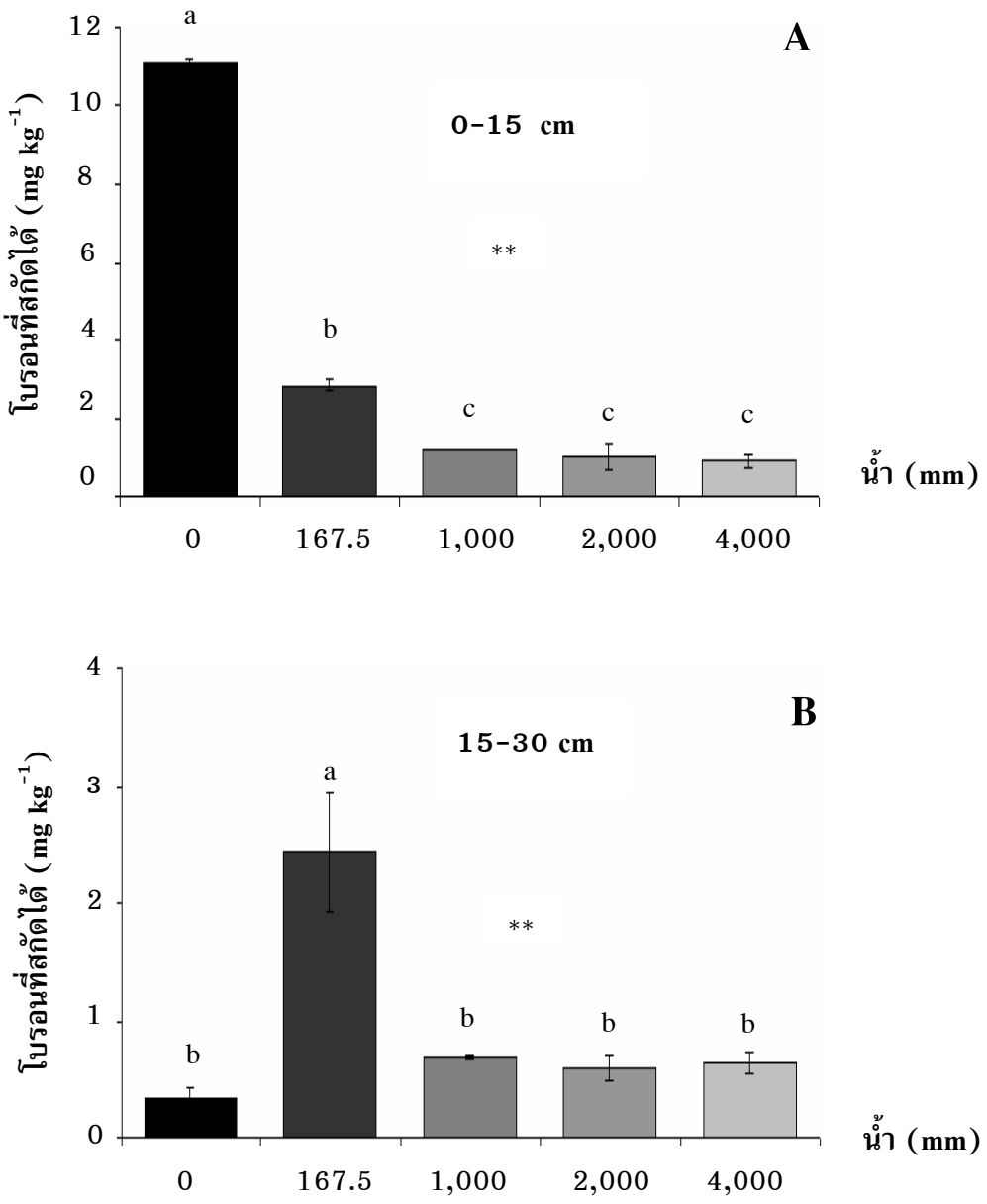
4. การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอน

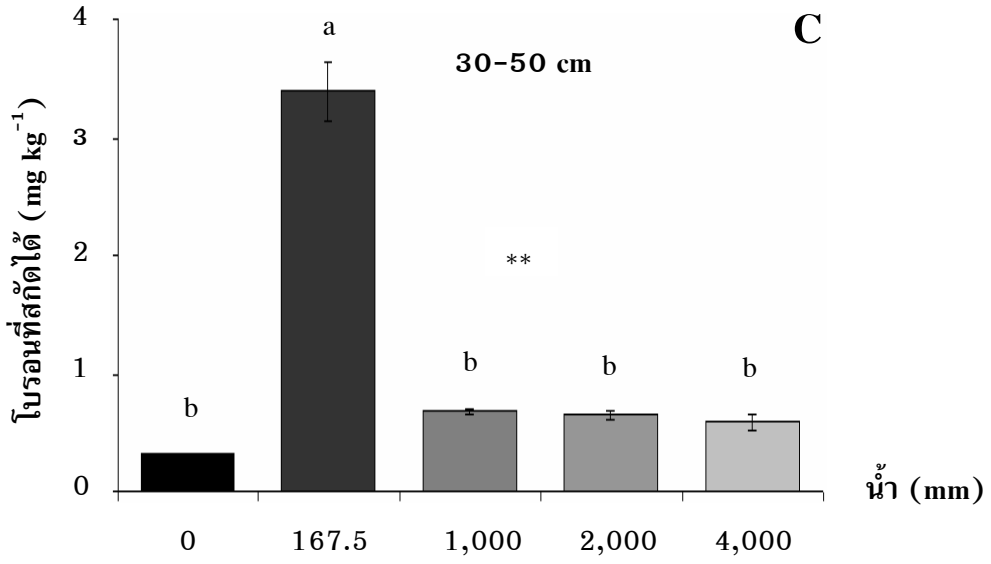
การใช้น้ำอัตรา คือ 0, 167.5, 1,000, 2,000 และ 4,000 มิลลิเมตร ชะล้างดินทำให้โบรอนที่สกัดได้ในดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ลดลงแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุม (11.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) คือ 2.83, 1.21, 1.04 และ 0.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (รูปที่ 6 A) ซึ่งโบรอนที่ลดลงนั้นได้ถูกน้ำชะล้างลงไปสะสมที่ระดับความลึก 15-30 และ 30-50 เซนติเมตร โดยตำรับทดลอง 167.5 มิลลิเมตร ทำให้โบรอนถูกชะล้างลงไปสะสมมากที่สุด คือ 2.43 และ 3.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุม คือ 0.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (รูปที่ 6 B และ C)

การใช้น้ำอัตราเพิ่มมากขึ้นสามารถชะล้างโบรอนได้มากขึ้น ทำให้โบรอนในดินถูกชะล้างลงไปที่ระดับความลึกมากกว่า 50 เซนติเมตร โดยโบรอนได้ออกมากับน้ำหลังจากการชะล้างซึ่ง พบว่า น้ำหลังจากผ่านการชะล้างดินมีโบรอนเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราน้ำที่ใช้ชะล้างมากขึ้น (9.53, 9.77 และ 9.89 มิลลิกรัม ตามลำดับ) (ตารางที่ 8) จึงทำให้โบรอนตกค้างอยู่ในดินลึก 15-30 เซนติเมตร น้อยลง คือ 0.68, 0.59, 0.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (รูปที่ 6 B) และในชั้นดินลึก 30-50 เซนติเมตร คือ 0.68, 0.65, 0.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (รูปที่ 6 C) ซึ่งลดลงแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับทดลอง 167.5

มิลลิเมตร คือ 2.43 และ 3.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ การใช้น้ำอัตรามากกว่าระดับความจุความชื้นสนาม (167.5 มิลลิเมตร) ชะล้างดินยังทำให้ค่าพีเอชของดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ลดลงแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับตำรับควบคุมด้วย (5.92) คือ 5.67, 5.69, 5.72 และ 5.68 (ตารางที่ 9) และทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินในทุกระดับความลึกลดลงแตกต่างทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุมด้วย

การใช้น้ำระดับความจุความชื้นสนามชะล้างดินทำให้ค่าพีเอชของดินระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ลดลงแตกต่างทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับตำรับควบคุม (ตารางที่ 9) และการใช้น้ำระดับมากกว่าความจุความชื้นสนามชะล้างดินทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินทุกระดับความลึกลดลงแตกต่างทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุม และน้ำหลังจากผ่านการชะล้างดินมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงตามอัตราของน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 8)





หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันเหนือแท่งกราฟไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

รูปที่ 6 โบรอนที่สกัดได้ในดินที่ปนเปื้อนโบรอนหลังจากการชะล้างด้วยน้ำ A 0-15 เซนติเมตร, B 15-30 เซนติเมตร และ C 30-50 เซนติเมตร ในคอลัมน์

ตารางที่ 8 ปริมาณโบรอน ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าในน้ำหลังจากชะล้างโบรอนในดิน

ตำรับการทดลอง	B (mg)	pH	EC (dS m^{-1})
ควบคุม	-	-	-
167.5 มิลลิเมตร	-	-	-
1,000 มิลลิเมตร	9.53	6.45	0.15 c
2,000 มิลลิเมตร	9.77	6.43	0.11 b
4,000 มิลลิเมตร	9.89	6.82	0.08 a
F-test	NS	NS	**
C.V. (%)	6.17	2.42	7.27

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ 9 ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังจากผ่านการชะล้างที่ระดับความลึกต่าง ๆ

ตำรับการทดลอง	pH (ดิน:น้ำ,1:5)			EC (ดิน:น้ำ,1:5) (dS m^{-1})		
	0-15 ซม.	15-30 ซม.	30-50 ซม.	0-15 ซม.	15-30 ซม.	30-50 ซม.
ควบคุม	5.92 b	5.17 b	4.95 b	0.03 c	0.04 c	0.04 d
167.5 มิลลิเมตร	5.67 a	4.50 a	4.51 a	0.03 c	0.09 d	0.01 c
1,000 มิลลิเมตร	5.69 a	5.83 d	6.06 c	0.02 b	0.03 b	0.03 b
2,000 มิลลิเมตร	5.72 a	5.77 cd	5.82 d	0.02 b	0.02 a	0.02 a
4,000 มิลลิเมตร	5.68 a	5.67 c	5.68 f	0.01 a	0.02 a	0.02 a
F-test	*	**	**	**	**	**
C.V. (%)	3.17	1.35	0.92	1.13	6.57	8.06

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, * = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

5. การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ

สมบัติของดิน ดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารามีสีคล้ำ จับตัวกันเป็นก้อนแข็ง และอัดตัวกันแน่น การใช้น้ำ 300, 600 และ 900 มิลลิเมตร ชะล้างดิน ทำให้โบรอนที่สกัดได้ในดินลดลงอย่างชัดเจน และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุม (96.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) คือ 7.10, 3.00 และ 1.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 10) นอกจากนี้การใช้น้ำชะล้างดินยังทำให้ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดิน ลดลงแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุมด้วย ส่วนแอมโมเนียมกับไนเทรตมีแนวโน้มลดลงแตกต่างจากตำรับควบคุม เมื่อใช้น้ำอัตรา 900 มิลลิลิตร ชะล้างดิน

การเจริญเติบโตของพืช เมื่อนำดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการชะล้างโบรอนด้วยน้ำมาเติมธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศยกเว้นโบรอน แล้วทำการปลูกมะเขือเทศ พบว่า ดินที่ไม่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำมะเขือเทศไม่สามารถเจริญเติบโตได้ แต่ดินที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำระดับมากกว่า 300 มิลลิเมตร มะเขือเทศสามารถเจริญเติบโตได้ และอัตราการเจริญเติบโตของมะเขือเทศในแต่ละตำรับทดลองนั้นแตกต่างกัน คือ ดินที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำอัตรา 600 และ 900 มิลลิเมตร มะเขือเทศมีการเจริญเติบโตได้ดีใกล้เคียงกัน โดยทำให้มะเขือเทศมีความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง สูงที่สุด คือ 92.2 และ 91.0 เซนติเมตร 75.8 และ 74.2 กรัมต่อต้น และ 9.56 และ 10.08 กรัมต่อต้น ตามลำดับ (รูปที่ 7 A, C และ D) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับควบคุม และตำรับที่ใช้น้ำ 300 มิลลิเมตร อย่างชัดเจน คือ ตำรับควบคุมมะเขือเทศเริ่มแสดงอาการขอบใบเป็นรอยไหม้สีน้ำตาลเมื่ออายุ 4 วัน (รูปที่ 9 B) และหลังจากนั้นอีก 1 วัน มะเขือเทศ

แห้งตาย (รูปที่ 9 A) ส่วนตำรับที่ใช้น้ำอัตรา 300 มิลลิเมตร มะเขือเทศสามารถเจริญเติบโตได้ แต่ลำต้นมีลักษณะแคระแกร็น ใบมีขนาดเล็ก โตช้า ส่งผลทำให้มะเขือเทศมีความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ต่ำ คือ 42.4 เซนติเมตร 12.5 และ 1.39 กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 9 A) และเมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของมะเขือเทศในตำรับทดลองที่ใช้น้ำอัตรา 600 และ 900 มิลลิเมตร พบว่า การเจริญเติบโตของมะเขือเทศใกล้เคียงกัน

ธาตุอาหารในพืช หลังจากมะเขือเทศเจริญเติบโตในดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำอัตรา 300, 600 และ 900 มิลลิเมตร ครบ 49 วัน พบว่า ในตำรับควบคุมดินมีโบรอนตกค้างอยู่มากที่สุด คือ 96.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มะเขือเทศสะสมโบรอนในส่วนเหนือดินมากที่สุด คือ 1,510.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (รูปที่ 8 A) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับตำรับที่ใช้น้ำชะล้างดิน คือ 259.5, 100.6 และ 42.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่ใส่ลงไปในดินในรูปของสารละลาย หลังจากชะล้างดินเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของมะเขือเทศ พบว่า ความเข้มข้นของไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในมะเขือเทศลดลงตามการเจริญเติบโตของมะเขือเทศที่เพิ่มสูงขึ้น (รูปที่ 8 A และ B) ส่วนความเข้มข้นของโพแทสเซียม ในมะเขือเทศของแต่ละตำรับทดลองให้ค่าไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 8 C)

ตารางที่ 10 สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำก่อนการทดลอง

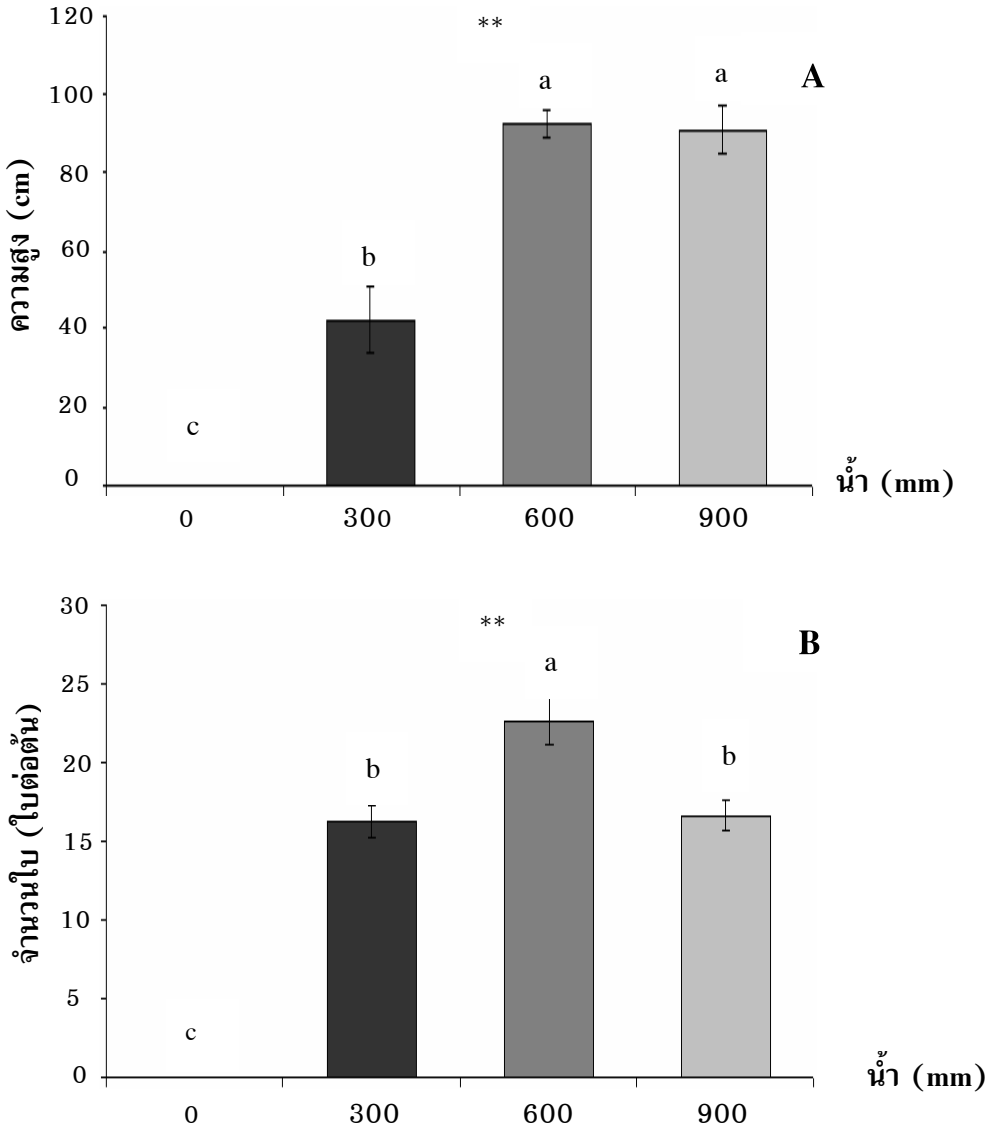
ตำรับการทดลอง	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}	Extr. B mg kg^{-1}	NH_4^++NO_3^- mg kg^{-1}	Avai. P mg kg^{-1}	Exch. K $cmol_c$ kg^{-1}
0 มม.	7.48 a	0.23 a	96.15 a	41.0 ab	27.6	0.43 a
300 มม.	7.36 a	0.13 b	7.10 b	49.6 a	27.5	0.37 b
600 มม.	6.91 b	0.13 b	3.00 b	41.3 ab	26.0	0.35 c
900 มม.	6.87 b	0.10 c	1.06 b	37.2 b	25.5	0.34 c
F-test	**	**	**	*	NS	**
C.V. (%)	1.33	7.45	24.69	14.63	8.41	3.50

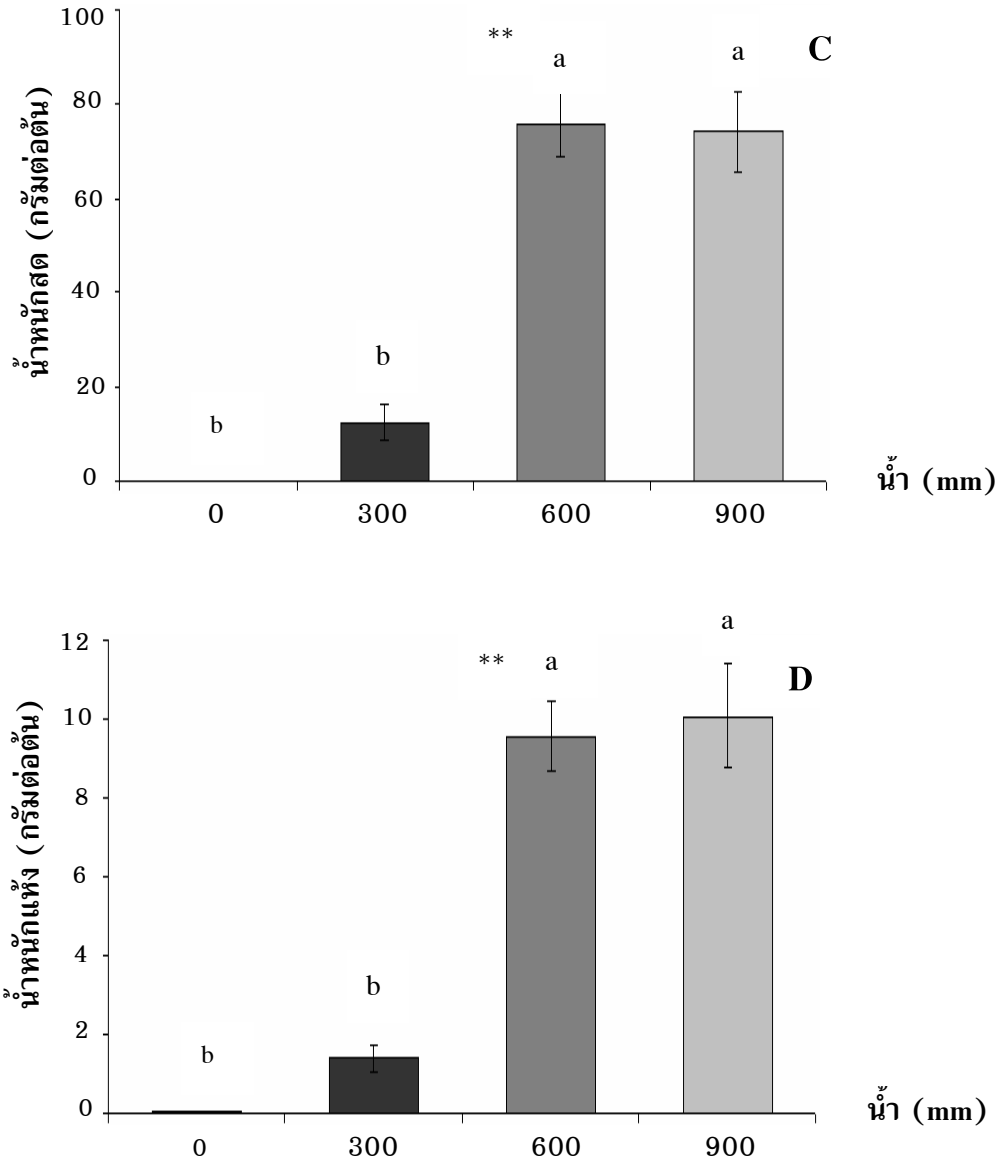
หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ, * = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ 11 สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำหลังการเก็บเกี่ยวมะเขือเทศ

ตำรับการทดลอง	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}	Extr. B mg kg^{-1}	NH_4^++NO_3^- mg kg^{-1}	Avai. P mg kg^{-1}	Exch. K $cmol_c$ kg^{-1}
0 มม.	7.83 a	0.24 a	105.22 a	62.1 a	27.4	0.43
300 มม.	7.43 b	0.11 b	9.80 b	31.0 b	27.1	0.34
600 มม.	7.07 c	0.09 bc	4.03 b	22.8 c	26.1	0.20
900 มม.	6.93 c	0.07 c	3.36 b	22.8 c	25.5	0.19
F-test	**	**	**	**	NS	**
C.V. (%)	2.41	18.99	24.07	15.36	4.02	10.83

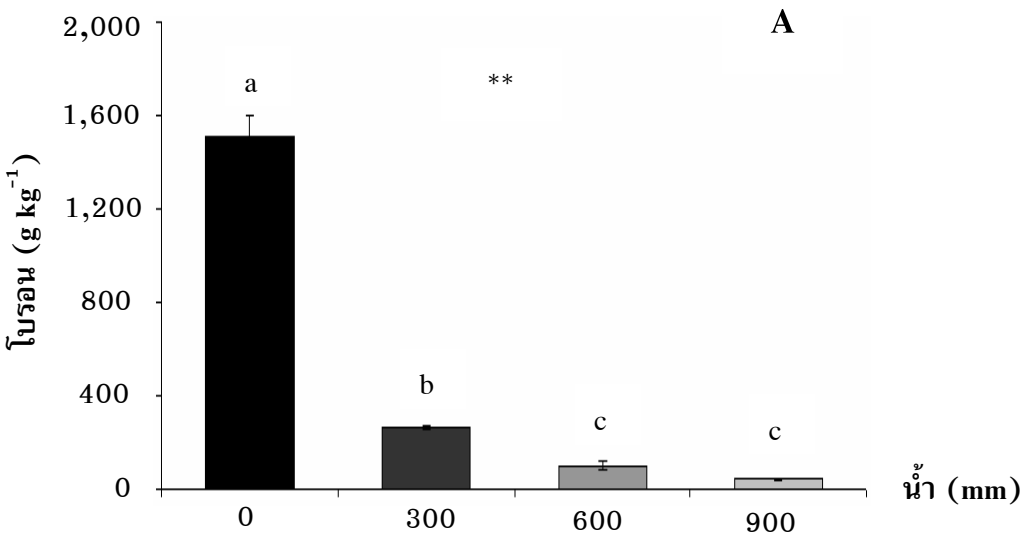
หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

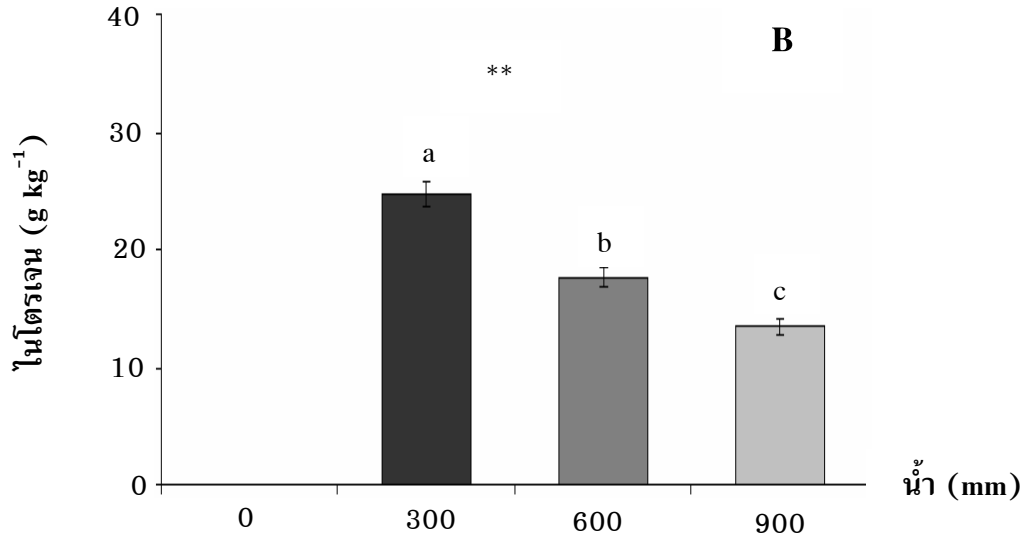


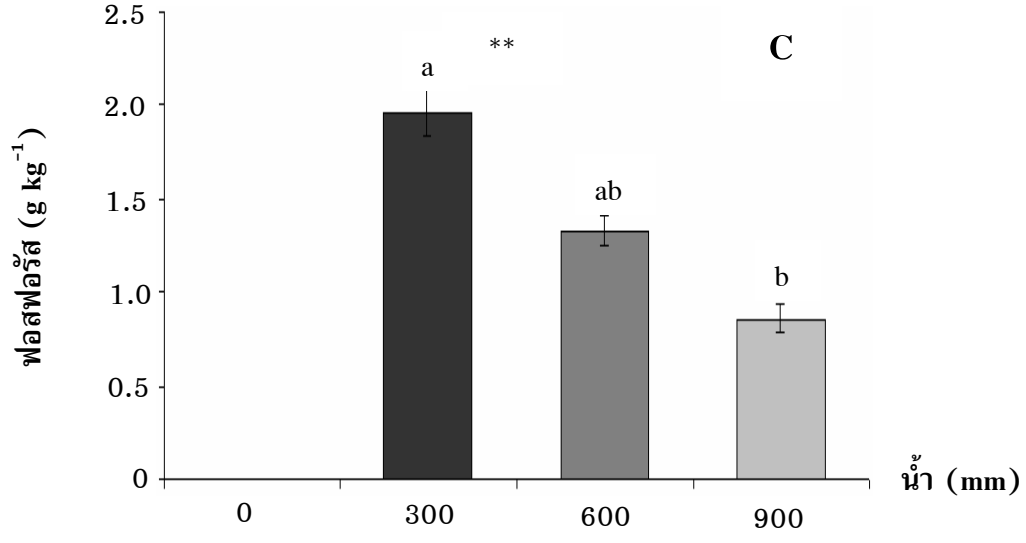


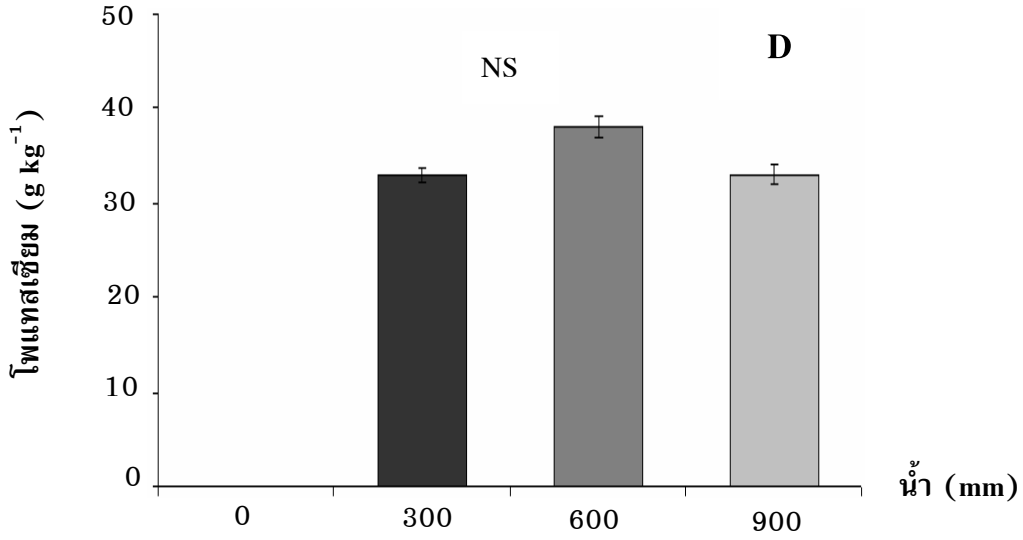
หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันเหนือแท่งกราฟไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

รูปที่ 7 การเจริญเติบโตของมะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน) ในดินปนเปื้อนน้ำเสียหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำ A ความสูง, B จำนวนใบ, C น้ำหนักสด และ D น้ำหนักแห้ง


A
2,000
1,600
1,200
800
400
0
โบรอน (g kg-1)
a
b
c
c
**
0
300
600
900
น้ำ (mm)

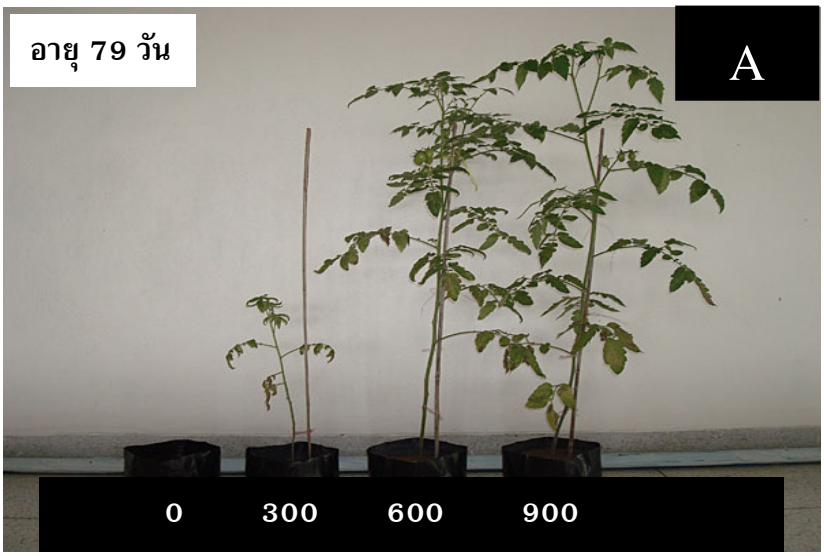

B
40
30
20
10
0
ไนโตรเจน (g kg-1)
a
b
c
**
0
300
600
900
น้ำ (mm)


C
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0
ฟอสฟอรัส (g kg-1)
a
ab
b
**
0
300
600
900
น้ำ (mm)



หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันเหนือแท่งกราฟไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

รูปที่ 8 ธาตุโบรอน A, ไนโตรเจน B, ฟอสฟอรัส C และโพแทสเซียม D ในส่วนเหนือดินของต้นมะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน) ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำ



น้ำที่ใช้ชะล้างดิน (มิลลิเมตร)

รูปที่ 9 มะเขือเทศที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำเสียหลังจากถูกชะล้าง A มะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน) และ B ลักษณะใบมะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน)

บทที่ 4

วิจารณ์ผลการทดลอง

1. การใช้ซีโอไลต์ดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการบำบัด และที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน

น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการบำบัดมีโบรอนตกค้างสูง 1,515 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อผ่านกระบวนการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โบรอนในน้ำเสียจะลดลงเล็กน้อย 1,325 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปฐมาพร, 2549) เมื่อน้ำเสียที่มีโบรอนสูงปนเปื้อนสู่ดิน ทำให้โบรอนตกค้างอยู่ในดินสูง ส่งผลทำให้พืชเกิดอาการเป็นพิษ (เจษฎา, 2551) จึงได้ใส่ซีโอไลต์เพื่อดูดซับโบรอนในน้ำเสีย โดยใส่ซีโอไลต์อัตราต่าง ๆ เพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ

น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่าน และไม่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันมีปริมาณโบรอนแตกต่างกัน คือ 416.2 และ 1,276.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คาดว่าเกิดจากในกระบวนการบำบัด โบรอนบางส่วนได้ตกตะกอนร่วมกับสารอินทรีย์จากไม้ยางพาราที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย สอดคล้องกับที่ Park และ White (1952) รายงานว่า สารประกอบอินทรีย์สามารถทำปฏิกิริยากับโบรอนในสารละลาย และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ยาก (Boron-diol complex) และเมื่อใส่ซีโอไลต์ชนิดมอร์ดีไนต์ลงไปในน้ำเสียทั้งสองส่วน ทำให้โบรอนลดลงตามอัตราของซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 1 และ 2)

อัตราซีโอไลต์ที่ทำให้โบรอนในน้ำเสียที่ผ่าน และไม่ผ่านการบำบัด ลดลงมากที่สุดคือ 12 กรัม ซึ่งทำให้โบรอนลดลงจากเดิม 416.2 และ 1,276.8 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 332.5 และ 1,232.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สอดคล้องกับที่ Ozturk และคณะ (2004) พบว่า ซีโอไลต์สามารถดูดซับโบรอนในดินได้ และสามารถดูดซับได้มากขึ้นเมื่อใส่ซีโอไลต์เพิ่มมากขึ้น แต่ซีโอไลต์ดูดซับโบรอนในน้ำเสียได้น้อย ซึ่งคาดว่าเกิดจากขนาดโพรงของซีโอไลต์กับขนาดโมเลกุลของโบรอนในน้ำเสียไม่พอดีกัน ทำให้โบรอนถูกดูดซับน้อย นอกจากโบรอนแล้ว มีรายงานว่าซีโอไลต์สามารถดูดซับแอมโมเนีย และธาตุโลหะหนักต่าง ๆ ได้ดีด้วย (ปรีดา และคณะ, 2535; อารักษ์ และคณะ, 2549) และจากการทดลองนี้ยังพบว่า การใส่ซีโอไลต์ในน้ำเสียทำให้ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า โซเดียม และกำมะถันในน้ำเสียลดลง (ตารางที่ 1 และ 2) คาดว่าเกิดจากการใส่ซีโอไลต์ ซึ่งมีค่า C.E.C. สูง ลงไปในน้ำเสีย ทำให้ซีโอไลต์สามารถดูดซับไฮโดรเจนไอออน (H^+) และโซเดียมไอออน (Na^+) เอาไว้ได้ ส่วนกำมะถันที่ลดลงนั้น คาดว่าถูกซีโอไลต์ดูดซับเข้าไปพร้อมกับน้ำเสีย และติดอยู่ภายในโพรงของซีโอไลต์ นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังสามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำเสียได้ดีด้วย ทำให้สีของน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดจางลง (รูปที่ 3)

แต่การใส่ซีโอไลต์ในน้ำเสียทำให้แคลเซียมเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราของซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาถึงส่วนประกอบของซีโอไลต์ที่นำมาใช้ พบว่ามีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ($Ca_{3.4}Al_{7.4}Si_{40.6}O_{96}(H_2O)_{31}$) ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่า แคลเซียมที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากแคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในซีโอไลต์ ถูกปลดปล่อยออกมาในน้ำเสีย อย่างไรก็ตาม น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันทำให้โบรอนลดลงมาก แต่การใส่ซีโอไลต์ในน้ำเสียที่ผ่าน และไม่ผ่านการบำบัดลดโบรอนได้น้อย

น้ำเสียที่ผ่านการดูดซับด้วยซีโอไลต์แล้วยังมีโบรอนตกค้างอยู่สูง ดังนั้น หากนำน้ำเสียไปปล่อยทิ้งออกสู่สภาพแวดล้อมจะทำให้โบรอนในน้ำเสียตกค้างอยู่ในดิน และเป็นพิษกับพืชได้ สอดคล้องกับที่ เจษฎา (2551) พบว่า การใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน (500 มิลลิกรัมโบรอนต่อลิตร) ปริมาตร 40 มิลลิลิตร รดให้กับต้นมะเขือเทศ ทำให้โบรอนสะสมในดินเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มะเขือเทศแสดงอาการเป็นพิษ และทำให้ผลผลิตลดลง ดังนั้น โรงงานแปรรูปไม้ยางพาราจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาวิธีการบำบัดโบรอนในน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้งออกสู่สภาพแวดล้อม และวิธีการบำบัดที่สามารถนำมาใช้ได้ผลดีวิธีหนึ่ง คือ ปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งทำให้สามารถนำโบรอนในน้ำเสียกลับมาใช้อัดน้ำยาไม้ใหม่ได้โดยไม่มีผลต่อสีของเนื้อไม้ (ลือพงศ์, 2547) อย่างไรก็ตามต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียวิธีนี้ค่อนข้างสูง ดังนั้น จึงอาจจะหาแนวทางนำโบรอนในน้ำเสียมาใช้ประโยชน์เป็นแหล่งของโบรอนให้กับพืชที่ต้องการโบรอนสูง และดินที่มีโบรอนต่ำ ซึ่งจากการทดลองของ เจษฎา (2551) พบว่า การใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งมีโบรอนตกค้างอยู่ 509 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาเจือจางด้วยน้ำแล้วรดลงไปในดินเพื่อปรับให้ดินมีโบรอน 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แล้วปลูกมะเขือเทศ พบว่า การใส่น้ำเสียทำให้ความสูง น้ำหนักแห้งต้น และจำนวนใบ ของมะเขือเทศมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นกว่าดินที่ไม่ใส่น้ำเสีย

2. การใส่ปูนขาวยกระดับค่าปฏิกิริยาดินของดินที่ปนเปื้อนโบรอน

จากการทดลองใส่ซีโอไลต์ดูดยึดโบรอนในน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา ในการทดลองที่ 1 พบว่า ซีโอไลต์ดูดยึดโบรอนได้น้อย จึงทำการทดลองใส่ปูนขาวเพิ่มค่าพีเอชดินที่ปนเปื้อนโบรอน (ประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เพื่อเปลี่ยนรูปของโบรอนในดินให้อยู่ในรูปของ $B(OH)_4^-$ ซึ่งเป็นแอนไอออนที่เกิดพันธะทางเคมีในโครงสร้างกับสารประกอบออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัมได้ และเข้าไปจับกับ OH^- บริเวณผิวของแร่ดินเหนียว และบริเวณขอบที่แตกหักทางด้านเททระฮีดรอลได้ และการเพิ่มค่าพีเอชดินยังทำให้อินทรียวัตถุดูดซับโบรอนได้ดีด้วย (เพิ่มพูน, 2543)

การเพิ่มค่าพีเอชของดินที่ปนเปื้อนโบรอนซึ่งมีค่าพีเอช 4.99 เป็น 7.64 ไม่ทำให้โบรอนในดินลดลง (ตารางที่ 5) เนื่องจากค่าพีเอชของดินที่ปรับได้ (ตารางที่ 4) ไม่ถึงระดับ

ที่ดินสามารถดูดยึดโบรอนไว้ได้ดี คือ 8-9 สอดคล้องกับที่ Keren และคณะ (1981) พบว่า Na-montmorillonite ดูดยึดโบรอนได้สูงที่สุดเมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 9.3 เนื่องจากโบรอนในดินส่วนใหญ่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ $B(OH)_4^-$ ซึ่งเป็นรูปที่ถูกดูดซับได้โดยออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม และสารอินทรีย์ (เพิ่มพูน, 2543) อย่างไรก็ตามการปรับค่าพีเอชของดินให้อยู่ในช่วงดังกล่าวอาจจะทำให้พืชเจริญเติบโตได้ไม่ดี และส่งผลให้ผลผลิตของพืชลดลง เนื่องจากสภาพเกินปูน (over lime) (ชัยรัตน์ และ วิเชียร, 2539) จนทำให้ขาดเหล็ก และสังกะสีได้ สอดคล้องกับที่ จิราณี (2548) พบว่า พืชยืนต้น 44.9 เปอร์เซ็นต์ ที่ปลูกในดินเนื้อปูนซึ่งมีค่าพีเอชเฉลี่ย 7.8 ที่ อ.จอมบึง จ.ราชบุรี แสดงอาการขาดธาตุเหล็กมากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง สังกะสี และแมงกานีส แต่ในชุดดินเรณูที่มีโบรอนที่สกัดได้ต่ำ (1.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) การเพิ่มค่าพีเอชดินเท่ากับ 7 ทำให้โบรอนลดลงเหลือ 0.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กนกพันธ์, 2533)

การใส่ปูนนอกจากจะยกระดับค่าพีเอชให้แก่ดินแล้วยังเป็นการเพิ่มแคลเซียมให้กับดินด้วย ซึ่งแคลเซียมจะทำให้พืชดูดใช้โบรอนลดลง มีรายงานโดย สุรศักดิ์ และ มงคล (2540) ว่า การใส่ปูนเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของโบรอนในใบมะละกอลดลงอย่างชัดเจน และสอดคล้องกับที่ Thomas และคณะ (1999) พบว่า การให้สารละลายที่มีแคลเซียมเพิ่มจาก 4 มิลลิโมลาร์ เป็น 12 มิลลิโมลาร์ ร่วมกับโบรอน 0.5 มิลลิโมลาร์ ทำให้ระดับของโบรอนในกีวีลดลง และไม่แสดงอาการเป็นพิษ ดังนั้น หากเติมปูนลงไปในดินที่ปนเปื้อนโบรอน คาดว่าจะทำให้พืชดูดใช้โบรอนได้น้อยลง ซึ่งอาจจะได้ผลในดินที่มีโบรอนไม่สูงมากนัก

3. การใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ

จากการทดลองใส่ปูนขาวเพิ่มค่าพีเอชดินที่ปนเปื้อนโบรอน (การทดลองที่ 2) พบว่า ค่าพีเอชของดินที่ปรับได้ไม่ถึงระดับที่ดินสามารถดูดซับโบรอนได้ จึงทำให้โบรอนในดินไม่ลดลง การใส่ปูนขาวนอกจากเป็นการเพิ่มค่าพีเอชดินแล้วยังเป็นการเพิ่มแคลเซียมให้แก่ดินด้วย ซึ่งแคลเซียมสามารถทำให้พืชลดการดูดใช้โบรอนจากดินได้ จึงทำการทดลองใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสีย และทดลองปลูกมะเขือเทศ

การใส่ปูนขาวอัตรา 0.07, 0.14 และ 0.28 กรัม ในชุดดินคอหงส์ที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสีย 5 กิโลกรัม พบว่า ทำให้ค่าพีเอชของดินเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราปูนที่ใส่ คือ 7.73, 8.02 และ 8.39 ตามลำดับ (ตารางที่ 6) เนื่องจากเมื่อใส่ปูนขาว ($Ca(OH)_2$) ลงไปในดินปูนขาวเกิดปฏิกิริยากับสารละลายดิน เกิดการแตกตัว และปลดปล่อยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ออกมาสู่ดิน Ca^{2+} เข้าไปไล่ที่ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่ถูกดูดซับอยู่ที่บริเวณผิวของคอลลอยด์ดินให้ออกมาทำปฏิกิริยากับ OH^- เปลี่ยนเป็นน้ำ (H_2O) จากปฏิกิริยา

ของปูนขาวในดินจะมี Ca^{2+} ตกค้างอยู่ในดินด้วย จึงทำให้ดินมีแคลเซียมเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราปูนที่ใส่ คือ 0.64, 1.07 และ 1.89 เซนติโมลประจุบวกต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 6)

เป็นที่น่าสังเกตว่าในตำรับทดลองที่ใส่ปูนขาวอัตรา 0.14 และ 0.28 กรัม ทำให้ค่าพีเอชของดินสูง (8.02 และ 8.39) ซึ่งอยู่ในช่วงที่ดินสามารถดูดซับโบรอนได้ดี คือ 8-9 (Keren et al., 1981) แต่โบรอนที่สกัดได้ในดินไม่แตกต่างกับตำรับควบคุม (191.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) คือ 166.1 และ 193.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ คาดว่าเกิดจากดินมีความเข้มข้นของโบรอนสูงมาก จึงทำให้สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของโบรอนได้ไม่ชัด และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณโบรอนที่สกัดได้ในดินกับระดับที่เพียงพอของโบรอนในดิน (1-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (Hesse, 1971 อ้างโดย สุพจน์ และ กนกพันธุ์, 2536) พบว่า อยู่ในระดับเกินความต้องการของพืช ในขณะที่การใส่ปูนทำให้แอมโมเนียมกับไนเทรตลดลง คาดว่าเกิดจากการใส่ปูนลงไปในดินทำให้ค่าพีเอชของดินเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 6) ส่งผลทำให้แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เปลี่ยนเป็นแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) และสูญเสียออกไปจากดิน และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินไม่เปลี่ยนแปลง (ตารางที่ 6) ซึ่งคาดว่าเกิดจากฟอสฟอรัสที่ใส่ลงไปในดินในรูปของสารละลายฟอสฟอรัส เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของมะเขือเทศ ถูกมะเขือเทศดูดใช้น้อย เนื่องจากมะเขือเทศตายไปหลังจากย้ายลงปลูกได้ 5 วัน (รูปที่ 5 A)

การใส่ปูนขาวทำให้แคลเซียมในดินเพิ่มสูงขึ้น ทำให้การดูดใช้โบรอนของมะเขือเทศลดลง คือ 3,089.5, 3,417.9 และ 3,330.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ตำรับควบคุมมะเขือเทศมีการสะสมโบรอนสูงที่สุด คือ 4,150.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (รูปที่ 4) สอดคล้องกับการศึกษาของ สุรศักดิ์ และ มงคล (2540) ที่ปลูกมะละกอพันธุ์แขกดำในดินร่วนปนทราย แล้วใส่ปูนเผา (CaO) อัตรา 0, 2, 4, 6 และ 9 กิโลกรัมต่อต้น และโบรอนอัตรา 0, 100, 200 และ 300 กรัมต่อต้น พบว่า การใส่ปูนเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของโบรอนในใบมะละกอลดลงอย่างชัดเจน และจากการศึกษาของ เพิ่มพูน และคณะ (2538) ที่ได้ใส่ยิบซัมอัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อเฮกตาร์ และโบรอนในรูปของบอแร็กซ์อัตรา 10 กิโลกรัมต่อเฮกตาร์ ให้กับถั่วลิสง พบว่า การใส่ยิบซัมทำให้ถั่วลิสงแสดงอาการขาดโบรอน โดยมีลักษณะเมล็ดกลวงเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโบรอนในส่วนเหนือดินกับระดับที่เพียงพอของมะเขือเทศ คือ 34-96 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (เพิ่มพูน, 2546) พบว่า โบรอนอยู่ในระดับที่เป็นพิษส่งผลทำให้มะเขือเทศมีอาการขอบใบล่างเป็นแถบสีเหลือง (อายุ 2 วัน) เป็นรอยไหม้สีน้ำตาลและเริ่มขยายเป็นแถบกว้างเข้าสู่เส้นกลางใบ (อายุ 3 วัน) ใบล่างเหี่ยว (อายุ 4 วัน) (รูปที่ 5 B) และแห้งตาย (อายุ 5 วัน) (รูปที่ 5 A) จึงส่งผลทำให้ความสูง จำนวนใบ และน้ำหนักแห้งของมะเขือเทศในแต่ละตำรับการทดลองไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 7)

การใส่ปูนขาวลงไปในดินที่ปนเปื้อนโบรอนสามารถลดการดูดใช้โบรอนของมะเขือเทศจากดินได้ แต่เนื่องจากดินมีโบรอนตกค้างสูงจึงทำให้มะเขือเทศตายเมื่ออายุยังน้อย

ดังนั้น การใส่ปูนขาวในดินที่มีโบรอนตกค้างต่ำ คาดว่าจะสามารถทำให้พืชเจริญเติบโตได้ และไม่เกิดอาการโบรอนเป็นพิษ

4. การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอน

ดินบริเวณโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราถูกปนเปื้อนด้วยน้ำเสียจากโรงงาน ซึ่งมีโบรอนตกค้างอยู่สูง (1,515 มิลลิกรัมต่อลิตร) (ปฐมาพร, 2549) ทำให้พืชเกิดอาการโบรอนเป็นพิษ เนื่องจากดินที่ถูกน้ำเสียปนเปื้อนมีปริมาณโบรอนที่สกัดได้ตกค้างอยู่สูงมากกว่าระดับที่พืชต้องการ คือ มากกว่า 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Hesse, 1971 อ้างโดย สุพจน์ และ กนกพันธุ์, 2536) โบรอนที่อยู่ในดินลดลงได้เมื่อถูกน้ำชะล้าง ดังนั้น ดินในพื้นที่ภาคใต้ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปีสูง เมื่อดินที่ถูกโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราปนเปื้อนผ่านการชะล้างด้วยน้ำฝนตามธรรมชาติ คาดว่าจะทำให้โบรอนที่สกัดได้ในดินลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษกับพืช จึงได้นำชุดดินคอหงส์มาปรับให้มีโบรอนสูง (10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) วางบนดินปกติ (0.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เป็นชั้นในคอลัมน์ แล้วใช้น้ำปราศจากไอออนชะล้างดิน ซึ่งระดับน้ำที่ใช้มาจากปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปีของสถานีตรวจอากาศคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

การใช้น้ำ 167.5, 1,000, 2,000 และ 4,000 มิลลิเมตร ชะล้างดินทำให้โบรอนที่สกัดได้ในดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ลดลงเหลือ 2.83, 1.21, 1.04 และ 0.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (รูปที่ 6 A) และระดับของโบรอนที่ลดลงนั้นเมื่อเทียบกับระดับของโบรอนในดินช่วงที่เพียงพอกับพืช คือ 1-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Hesse, 1971 อ้างโดย สุพจน์ และ กนกพันธุ์, 2536) พบว่า อยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษกับพืช เนื่องจากชุดดินคอหงส์เป็นดินเนื้อหยาบ ทำให้โบรอนในดินถูกน้ำชะล้างได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ozturk *et al*., (2004) ที่ใช้น้ำชะล้างโบรอนจากตะกอนน้ำเสียในดินเนื้อหยาบ พบว่า การใช้น้ำ 8.0 มิลลิเมตร สามารถ ชะล้างโบรอนในดินได้สูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองนี้ พบว่า โบรอนในดินส่วนที่ลดลงนั้นถูกน้ำชะล้างลงไปสะสมในดินที่ระดับความลึก 15-30 และ 30-50 เซนติเมตร เพิ่มมากขึ้น โดยตำรับทดลองที่ใช้น้ำ 167.5 มิลลิเมตร (ความจุความชื้นสนาม) ทำให้โบรอนสะสมมากที่สุด คือ 2.4 และ 3.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (รูปที่ 6 B และ C) เกิดจากปริมาณน้ำที่ใช้ไม่มากพอที่จะชะล้างโบรอนให้พ้นระดับดินลึก 50 เซนติเมตร ได้ แต่เมื่อใช้น้ำเพิ่มมากขึ้นสามารถชะล้างโบรอนในดินได้มากขึ้น และทำให้โบรอนในดินถูกชะล้างลงไปที่ระดับความลึกมากกว่า 50 เซนติเมตร ได้ ในเบื้องต้นการใช้น้ำ 1,000 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระดับที่น้อยกว่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปี (2,000 มิลลิเมตรต่อปี) หนึ่งเท่า สามารถลดโบรอนในดินได้ และทำให้โบรอนในดินทุกระดับความลึกไม่แตกต่างกับการใช้น้ำ 2,000 และ 4,000 มิลลิเมตร (รูปที่ 6 A, B และ C) ดังนั้นหากปล่อยให้ดินที่ปนเปื้อนโบรอนถูกชะล้างด้วยน้ำฝน 1-2 ปี

คาดว่าสามารถทำให้โบรอนลดลงได้ สอดคล้องกับปริมาณโบรอนที่สกัดได้ในดินที่เก็บมาจากบริเวณบ่อน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่หยุดใช้งาน และถูกปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 1 ปี พบว่า มีโบรอนเหลืออยู่ในดินระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร น้อย คือ 0.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และโบรอนในดินที่ถูกชะล้างออกไปนั้นได้ออกมากับน้ำหลังจากผ่านการชะล้าง สอดคล้องกับปริมาณโบรอนในน้ำหลังจากผ่านการชะล้างดินที่เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราน้ำที่ใช้ชะล้าง คือ 9.5, 9.8 และ 9.9 มิลลิกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 8) จึงทำให้โบรอนเหลืออยู่ในดินลึก 15-30 เซนติเมตร น้อยลง คือ 0.68, 0.59 และ 0.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (รูปที่ 6 B) และในดินลึก 30-50 เซนติเมตร คือ 0.68, 0.65 และ 0.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (รูปที่ 6 C) และสอดคล้องกับการรายงานของ เพิ่มพูน (2546) ที่รายงานว่า ดินในเขตที่มีฝนตกชุก เช่น ประเทศจีน เวียดนาม อินเดีย ญี่ปุ่น และไทย มีปริมาณโบรอนที่สกัดได้ต่ำที่สุด เนื่องจากดินรวมทั้งแร่ทัวมาลีน ซึ่งเป็นแร่ที่มีโบรอนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมีการสลายตัวสูง ทำให้มีเนื้อดินหยาบ มีรายงานว่า ดินเนื้อหยาบที่มีการชะล้างสูง โบรอนในดินจะสูญเสียไปกับน้ำสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ (Havlin *et al*., 2005) ในขณะที่ Stangoulis and Reid (2002) รายงานว่า ดินในเขตกึ่งแห้งแล้งที่มีฝนตกน้อย (196-471 มิลลิเมตรต่อปี) ในประเทศซีเรีย และทางตอนเหนือของประเทศชิลีมีโบรอนในดินสูง และทำให้พืชเป็นพิษ

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าน้ำสามารถลดโบรอนในดินได้ ดังนั้น ดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราเมื่อมีฝนตกจะช่วยลดโบรอนได้ โดยโบรอนในดินจะถูกชะล้างลงไปในดินชั้นล่าง หรือส่วนหนึ่งกระจายไปยังบริเวณอื่นทำให้ชั้นดินบน 0-15 เซนติเมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีรากพืชอาศัยอยู่หนาแน่น มีโบรอนที่สกัดได้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษกับพืชได้ แต่ดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียนั้นมีปริมาณโบรอนที่สกัดได้มากกว่า 11.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงการชะล้างโบรอนในดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่มีโบรอนสูงกว่านี้

การใช้น้ำอัตรามากกว่า 167.5 มิลลิเมตร ชะล้างดินยังทำให้ค่าพีเอชของดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ลดลงด้วย (ตารางที่ 9) คาดว่าเกิดจากโบรอนในดินส่วนที่อยู่ในรูปของบอเรตไอออน ซึ่งมีสมบัติเป็นด่าง (Gammon, 2004) ถูกชะล้างออกไป ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณโบรอนที่สกัดได้ในดินระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ที่ลดลงด้วย (รูปที่ 6 A) นอกจากนี้การใช้น้ำชะล้างดินยังทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินที่ระดับความลึก 0-50 เซนติเมตร ลดลง คาดว่าเกิดจากธาตุประจุบวกที่เป็นด่างในดินถูกน้ำชะล้างออกไป (ตารางที่ 9) แต่น้ำที่ผ่านการชะล้างดินกลับมีค่าการนำไฟฟ้าลดลงตามปริมาณน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 8) ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำที่ผ่านจากการชะล้างดิน คือ เมื่อปริมาณของน้ำเพิ่มสูงขึ้นทำให้เกลือที่ละลายน้ำได้เจือจาง

5. การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ

การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอน (การทดลองที่ 4) อัตราครึ่งหนึ่งของระดับน้ำฝนเฉลี่ยต่อปี (1,000 มิลลิเมตร) สามารถลดโบรอนในดินระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ให้ลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษกับพืชได้ จึงได้ใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราแล้วปลูกมะเขือเทศ

การใช้น้ำ 300, 600 และ 900 มิลลิเมตร ชะล้างดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียทำให้โบรอนที่สกัดได้ในดินลดลง คือ 7.10, 3.00 และ 1.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ดินที่ไม่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำมีโบรอนตกค้างสูง 96.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 10) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองที่ 4 ที่พบว่า การใช้น้ำมากกว่าระดับความจุความชื้นสนามของดิน (167.5 มิลลิเมตร) ชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอน (11.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) สามารถทำให้โบรอนในดินลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษกับพืช (1-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ได้ (รูปที่ 6 A, B และ C) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณโบรอนในดินที่เหลืออยู่หลังจากผ่านการชะล้างกับระดับของโบรอนในดินช่วงที่เพียงพอกับพืชโดยทั่วไป (1-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) พบว่า ดินที่ผ่านการใช้น้ำชะล้างอัตรา 300 มิลลิเมตร โบรอนอยู่ในระดับที่เป็นพิษ ในขณะที่ดินที่ใช้น้ำชะล้างอัตรา 600 และ 900 มิลลิเมตร โบรอนอยู่ในระดับปกติ แสดงให้เห็นว่า โบรอนที่สกัดได้ในดินลดลงตามปริมาณน้ำที่ใช้ชะล้างดินที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้น้ำชะล้างดินยังทำให้ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของดินลดลงด้วย คาดว่าเกิดจากบอเรตไอออนซึ่งมีสมบัติเป็นด่าง และโซเดียมไอออนที่เกิดจากการแตกตัวของสารบอแร็กซ์ (Gammon, 2004) ในน้ำเสียบางส่วนที่ตกค้างอยู่ในดินถูกชะล้างออกไปกับน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของโบรอนที่สกัดได้ในดินที่ลดลงตามอัตราน้ำที่ใช้ชะล้างดิน (ตารางที่ 10)

เมื่อนำดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำมาเติมธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (ชัยรัตน์ และคณะ, 2538) ยกเว้นโบรอน พบว่า ตำรับทดลองที่ใช้น้ำชะล้างดินอัตราสูง ดินมีไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมและไนเทรต และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่ำ คาดว่าเกิดจากไนโตรเจน และโพแทสเซียม ในดินก่อนเติมธาตุอาหารพืชถูกน้ำชะล้างออกไปจากดินมากกว่าในตำรับทดลองที่ไม่ใช้น้ำชะล้าง และดินที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำน้อย เนื่องจากเป็นธาตุที่ถูกไล่ที่ได้ง่าย ส่วนฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในตำรับทดลองที่ใช้น้ำชะล้างดินอัตราสูงมีค่าต่ำลงนั้น คาดว่าเกิดจากการใช้น้ำชะล้างดิน ทำให้ค่าพีเอชของดินลดต่ำลง (ตารางที่ 10) ส่งผลให้เหล็กละลายออกมาได้ดี (Fe^{3+}) และตรึงฟอสฟอรัสในดินให้เปลี่ยนเป็นรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช

เมื่อปลูกมะเขือเทศ พบว่า ดินที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำอัตรา 300, 600 และ 900 มิลลิเมตร มะเขือเทศสามารถเจริญเติบโตได้ โดยเฉพาะดินที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำอัตรา

600 และ 900 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นดินที่มีปริมาณโบรอนที่สกัดได้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษ มะเขือเทศเจริญเติบโตได้ดี คือ มีความสูง จำนวนใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง สูงใกล้เคียงกัน คือ 92.2 และ 91.0 เซนติเมตร 22.6 และ 16.6 ใบต่อต้น 75.8 และ 74.2 กรัมต่อต้น และ 9.56 และ 10.08 กรัมต่อต้น ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณโบรอนในส่วนเหนือดินของมะเขือเทศ (100.6 และ 42.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (รูปที่ 8 A) เทียบกับระดับที่เพียงพอ (34-96 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) พบว่า ในตำรับทดลอง 900 มิลลิเมตร โบรอนอยู่ในระดับปกติ และตำรับทดลอง 600 มิลลิเมตร โบรอนอยู่ในระดับสูงกว่าค่ามาตรฐานเล็กน้อย และมะเขือเทศไม่เกิดอาการเป็นพิษ ดังนั้นดินที่ถูกปนเปื้อนด้วยน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราในธรรมชาติ สามารถทำให้โบรอนในดินลดลงได้ ด้วยการใช้น้ำที่ไม่มีโบรอนปนเปื้อนอัตรามากกว่า 600 มิลลิเมตร ชะล้างดิน ซึ่งระดับน้ำดังกล่าวเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปีของจังหวัดสงขลา (2,000 มิลลิเมตรต่อปี) พบว่า เป็นระดับน้ำที่น้อย และหากปล่อยให้ดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียถูกชะล้างด้วยน้ำฝนตามธรรมชาติ คาดว่าใช้เวลาไม่นานในการชะล้างโบรอนออกไปจากดิน สอดคล้องกับรายงานของ นุชนารถ (2550) ที่รายงานว่า ดินที่ถูกปนเปื้อนด้วยน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา เมื่อผ่านช่วงฝนตกหนัก 1-2 ครั้ง ทำให้โบรอนในดินชั้นบนลดลง และอาจจะทำให้อาการโบรอนเป็นพิษของพืชหายไปได้ อย่างไรก็ตามเกษตรกรที่ทำการเพาะปลูกพืชในพื้นที่ที่ถูกน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราปนเปื้อน ที่ต้องการใช้น้ำชะล้างดินจะต้องคำนึงถึงผลตอบแทนของพืชที่จะได้รับเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการใช้น้ำชะล้างดินด้วย หากผลตอบแทนของพืชที่จะได้รับสูงกว่าก็สามารถดำเนินการชะล้างดินได้ แต่หากค่าใช้จ่ายในการใช้น้ำชะล้างดินสูงกว่าก็ควรปล่อยให้ดินผ่านการชะล้างด้วยน้ำฝนตามธรรมชาติ

ในขณะที่ดินที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำน้อย (300 มิลลิเมตร) มีโบรอนที่สกัดได้ตกค้างสูง และอยู่ในระดับที่เป็นพิษ และเมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของโบรอนในส่วนเหนือดินของมะเขือเทศ พบว่า มะเขือเทศมีการสะสมโบรอนสูง 259.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และอยู่ในระดับที่เป็นพิษ (มากกว่า 96 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เช่นกัน ส่งผลให้มะเขือเทศเกิดอาการโบรอนเป็นพิษ คือ ขอบใบล่างมีอาการเป็นรอยไหม้สีเหลือง และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และขยายไปยังใบที่อยู่ด้านบน (รูปที่ 9 A) ส่งผลทำให้มะเขือเทศเจริญเติบโตได้ไม่ดี มีลำต้นแคระแกร็น ความสูง (42.4 เซนติเมตร) น้ำหนักสด (12.5 กรัมต่อต้น) และน้ำหนักแห้ง (1.39 กรัมต่อต้น) ต่ำ ส่วนดินที่ไม่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำ พบว่า ดินมีโบรอนที่สกัดได้ (105.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และโบรอนในส่วนเหนือดิน (1,510 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) อยู่ในระดับสูง และมะเขือเทศแสดงอาการโบรอนเป็นพิษรุนแรง ส่งผลทำให้มะเขือเทศแห้งตายเมื่ออายุหลังจากย้ายปลูกได้ 5 วัน

เมื่อพิจารณาถึงระดับของธาตุอาหารในดินหลังการทดลอง พบว่า ทุกตำรับทดลองมีโบรอนที่เป็นประโยชน์ และแอมโมเนียมกับไนเทรตเพิ่มสูงขึ้นจากดินก่อนการทดลองเล็กน้อย ซึ่งน่าจะเกิดจาก โบรอนทั้งหมดในดินที่ได้รับจากน้ำเสียถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น เมื่อดินอยู่ในสภาวะชื้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ กนกพันธุ์ (2533)

ที่พบว่า การบ่มดินในสภาวะชื้นทำให้โบรอนละลายออกมาได้มากขึ้น ส่วนแอมโมเนียมกับไนเทรตที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น เกิดจากการแบ่งใส่สารละลายของไนโตรเจนสองครั้ง คือ ใส่สารละลายไนโตรเจนครั้งที่สองหลังจากใส่ครั้งแรก 15 วัน เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของไนโตรเจนในมะเขือเทศ พบว่า ไนโตรเจนลดลงตามการเจริญเติบโตของมะเขือเทศที่เพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าในตำรับทดลองที่ใช้น้ำชะล้างดินสูง 600 และ 900 มิลลิเมตร ตามลำดับ มะเขือเทศ มีการเจริญเติบโตดี มีน้ำหนักมาก และดูดใช้ธาตุไนโตรเจนได้มาก จึงทำให้ปริมาณไนโตรเจนต่อหน่วยน้ำหนักต่ำกว่ามะเขือเทศที่เจริญเติบโตไม่ดี (รูปที่ 8 B) ส่วนฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน พบว่า ดินหลังการทดลองมีค่าน้อยกว่าดินก่อนการทดลอง และลดลงตามอัตราน้ำที่ใช้ชะล้างดินที่เพิ่มสูงขึ้น คาดว่าเกิดจากการดูดใช้ของมะเขือเทศ สอดคล้องกับ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในมะเขือเทศที่ลดลงตามการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ (รูปที่ 8 C) ทำนองเดียวกับไนโตรเจน ส่วนโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ พบว่า ดินหลังการทดลองมีค่าน้อยกว่าดินก่อนการทดลอง และลดลงตามอัตราน้ำที่ใช้ชะล้างดินที่เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับฟอสฟอรัส แต่ในพืชของทุกตำรับทดลองไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 8 D) ซึ่งคาดว่าเกิดจากโพแทสเซียมเป็นธาตุที่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ภายในพืช

ดังนั้น แนวทางการลดโบรอนในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราคือ การใช้น้ำชะล้างดิน หรือปล่อยให้ดินผ่านการชะล้างด้วยน้ำฝนตามธรรมชาติ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุป

1.1 การใช้ซีโอไลต์ดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน และที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ซีโอไลต์ชนิดมอร์ดีไนต์สามารถดูดยึดโบรอนในน้ำเสียได้ การใช้ซีโอไลต์ในน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นของโบรอนในน้ำเสียลดลงซีโอไลต์อัตรา 12 กรัม ทำให้โบรอนในน้ำเสีย 30 มิลลิลิตร ลดลงเหลือน้อยที่สุด คือ ลดลงจาก 1,276.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 1,232.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำเสียที่ผ่านการดูดยึดด้วยซีโอไลต์แล้วยังมีโบรอนตกค้างอยู่สูง หากนำไปปล่อยทิ้งคงทำให้ปนเปื้อนอยู่ในดินและทำให้เป็นพิษกับพืชได้

1.2 การใส่ปูนขาวยกระดับค่าปฏิกิริยาดินของดินที่ปนเปื้อนโบรอน การเพิ่มค่า pH ดินจาก 4.99 เป็น 7.64 ไม่ทำให้โบรอนที่สกัดได้ในดินปนเปื้อนโบรอน (9.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เปลี่ยนแปลง

1.3 ผลของการใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ การใส่ปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนน้ำเสีย ทำให้แคลเซียมในดินเพิ่มสูงขึ้นจาก 58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็น 127, 214 และ 379 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และทำให้มะเขือเทศดูดใช้โบรอนน้อยลง คือ ลดลงจาก 4,149 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เหลือ 3,089, 3417 และ 3,330 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ไม่สามารถทำให้มะเขือเทศเจริญเติบโตอยู่ได้ เนื่องจากโบรอนที่ตกค้างอยู่ในดินมีปริมาณสูงมาก (191 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) โดยทำให้มะเขือเทศเกิดอาการเป็นพิษ และตายเมื่ออายุหลังย้ายปลูก 5 วัน

1.4 การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอน โบรอนในดินถูกชะล้างได้ง่าย การใช้น้ำอัตรามากกว่า 1,000 มิลลิเมตร ชะล้างดิน ทำให้โบรอนในดินที่ระดับ 0-15 เซนติเมตร ลดลงจาก 11.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เหลือ 1.21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และอยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษกับพืช และยังทำให้ดินที่ระดับ 15-50 เซนติเมตร มีโบรอนสะสมอยู่น้อยด้วย

1.5 การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอนจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ การใช้น้ำตั้งแต่ 600 มิลลิเมตร ชะล้างดินที่ปนเปื้อนโบรอน (96.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา ทำให้โบรอนในดินลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษกับพืช คือ 3.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และทำให้มะเขือเทศสามารถเจริญเติบโตได้ดี คือ มีความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง สูงที่สุด และไม่แสดงอาการเป็นพิษ

2. ข้อเสนอแนะ

การใช้น้ำชะล้างดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา ทำให้โบรอนในดินลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษกับพืช และสามารถนำดินมาปลูกพืชได้ ซึ่งดินแต่ละชนิด เมื่อใช้น้ำชะล้างดิน ทำให้โบรอนลดลง แต่จะลดลงมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับสมบัติต่าง ๆ ของดินที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการให้น้ำซึมผ่าน เช่น เนื้อดิน โครงสร้างของดิน ความลาดชัน และระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น อย่างไรก็ตามโบรอนในดินที่ถูกน้ำชะล้างออกไปนั้นอาจจะไปปนเปื้อนในดินบริเวณใกล้เคียง ในแหล่งน้ำ หรือในน้ำใต้ดินได้ และหากโบรอนถูกถ่ายทอดเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ หรือสัตว์เลี้ยง จะทำให้เกิดอันตรายได้ ดังนั้นจึงควรปล่อยดินปนเปื้อนน้ำเสียไว้เฉย ๆ ประมาณ 1 ปี เพื่อให้น้ำฝนธรรมชาติชะล้าง หลังจากนั้นจึงทำการเพาะปลูกตามปกติ

เอกสารอ้างอิง

กนกพันธ์ พันธุ์สมบัติ. 2533. อิทธิพลของฟอสเฟต ความเป็นกรด-เบสของดิน ความชื้น และอุณหภูมิ ที่มีต่อการดูดและการคายโบรอนในดิน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

จิราณี วานิชกุล. 2542. ซีโอไลต์. ว.จอมบึง 2 : 1-8.

จิราณี วานิชกุล. 2548. การขาดธาตุเหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดง ของพืชยืนต้นในดินเนื้อปูน ในอำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี. ว.ดินและปุ๋ย 27 : 36-47.

จำเป็น อ่อนทอง. 2547. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. สงขลา : ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เจษฎา จิตรหลัง. 2551. การใช้น้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันเพื่อการปลูกพืช. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัย-สงขลานครินทร์.

ชัยรัตน์ นิลนนท์ และวิเชียร จาฏุพจน์. 2539. การประเมินความอุดมสมบูรณ์และความต้องการธาตุอาหารของพืชอาหารสัตว์ตระกูลถั่วในชุดดินคอหงส์. ว.สงขลานครินทร์ 18 : 35-42.

ดำริ ถาวรมาศ, สมภพ จงรวยทรัพย์ และอุดม รัตนรักษ์. 2545. การศึกษาผลของโบรอนต่อผลผลิตและคุณภาพของอ้อย 1.การทดลองในถังซีเมนต์. ว.วิชาการเกษตร 20 : 132-143.

นิวัฒน์ หิรัญบูรณะ, ชัยวัฒน์ ชวชาติ, เบลล์ อาร์ ดับเบิลยู และโลนเรแกน เจ เอฟ. 2537. การตอบสนองของถั่วลิสง ถั่วเหลืองและถั่วเขียวต่อความเข้มข้นของโบรอนในดินและพืชของภาคเหนือของประเทศไทย. ว.ดินและปุ๋ย 16 : 168-173.

นุชนารถ กังพิสดาร. 2550. การใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพกับยางพาราหลังเปิดกรีดตามค่าวิเคราะห์ดิน. กรุงเทพฯ : ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด.

เบญจวรรณ ฤกษ์เกษม. 2537. โบรอนในการผลิตถั่วภาคเหนือ. ว.ดินและปุ๋ย 16 : 130-154.

ปฐมาพร นันทกากุล. 2549. การใช้ปฏิกิริยาเฟนตันในการบำบัดค่า COD และสีของน้ำทิ้งจากกระบวนการรักษาเนื้อไม้ยางพาราของโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์และน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ปรัญญา ธัญญาดี, เมธี มณีวรรณ และพิรัชฌา วาสนานุกูล. 2540. การปรับปรุงบำรุงดินด้วยอินทรียวัตถุ. กรุงเทพฯ : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ปรีดา พากเพียร, สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์, ไพโรจน์ โสมนัส และพิชิต พงษ์สกุล. 2535. แนวทางการใช้สารซีโอไลต์เพื่อลดปัญหามลพิษและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร. ว.ดินและปุ๋ย 14 : 337-341.

เพิ่มพูน กีรติกสิกร. 2527. ดินภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. ขอนแก่น : คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เพิ่มพูน กีรติกสิกร. 2543. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดยึดโบรอนในดิน. ว.ดินและปุ๋ย 21 : 30-42.

เพิ่มพูน กีรติกสิกร. 2546. โบรอน-จุลธาตุอาหารพืช. ขอนแก่น : ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เพิ่มพูน กีรติกสิกร, ประเทือง ปัญญา, เพลทเกต ดี, เบลล์ อาร์ ดับเบิลยู และโลนเรแกน เจ เอฟ. 2530. การสำรวจการขาดธาตุโบรอนในถั่วลิสงของกสิกรจังหวัดขอนแก่น ปี 2528. รายงานการสัมมนางานวิจัยถั่วลิสง ครั้งที่ 6 ณ จังหวัดสตูล 19-21 มีนาคม 2530 หน้า 446-450.

เพิ่มพูน กีรติกสิกร และสุกัลยา กองเงิน. 2532. การสำรวจเบื้องต้นสภาวะการขาดโบรอนของถั่วลิสงที่ปลูกในภาคใต้. รายงานการสัมมนาของถั่วลิสงแห่งชาติ ครั้งที่ 8 ณ จังหวัดร้อยเอ็ด 3-5 พฤษภาคม 2530 หน้า 321-322.

เพิ่มพูน กีรติกสิกร, สมพงษ์ นาสูงชน, สมจินตนา ทุมแสน และวาสนา ผลารักษ์. 2538. ผลของการใส่แคลเซียมและโบรอนต่อผลผลิตและคุณภาพของถั่วลิสง. แก่นเกษตร 23 : 139-141.

มงคล ตัะอุ่น, พัชรี ธีรจินดาขจร, สันติภาพ ปัญจพรรค์ และสุทธิพงศ์ เปรื่องค้า. 2547. การจัดการแบบต่าง ๆ ต่อปริมาณธาตุโบรอนในใบและก้านของสวนมะละกอในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. แก่นเกษตร 32 : 77-88.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2543. ธาตุอาหารพืช. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์. 2547. การบำบัดน้ำเสียที่มีฟีนอลและฟีนอลคลอไรด์ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอนด้วยปูนขาว. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุนี ลาวัณกุล. 2536. ซีโอไลต์. ว.กรมวิทยาศาสตร์บริการ 41 : 28-30.

สุภาพร จันรุ่งเรือง. 2546. การใช้ซีโอไลท์เป็นสารปรับปรุงดิน. ว.อนุรักษ์ดินและน้ำ 19 : 64-70.

สุภาพร จันรุ่งเรือง, พิทยากร ลิ่มทอง, กมลาภา วัฒนปนะพัฒน์ และธัชมน ภัสราเยี่ยงยงค์. 2543. ผลของซีโอไลท์ร่วมกับปุ๋ยเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีในชุดดินท่ายางเพื่อปลูกสับปะรด. รายงานวิจัยกองอนุรักษ์ดินและน้ำ กรมพัฒนาที่ดิน.

สุพจน์ โตตระกูล และกนกพันธ์ พันธุ์สมบัติ. 2536. อิทธิพลของฟอสเฟต ความเป็นกรด-เบสของดิน ความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อการดูดและการคายโบรอนในดิน. ว.เกษตร 9 : 11-17.

สุพรรณิการ์ พันชนะ. 2546. ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองต่อการขาดและการเป็นพิษของโบรอนในพันธุ์ข้าวสาลี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุรชัย ธนูศร. 2548. ศึกษาการใช้ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยคอก ร่วมกับสารซีโอไลต์ต่อผลผลิตข้าวโพดหวาน การเปลี่ยนแปลงสภาวะธาตุอาหารหลัก และสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของดิน. ว.วิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร 22 : 35-44.

สุรศักดิ์ เสรีพงศ์ และมงคล ตัะอุ่น. 2540. การศึกษาอิทธิพลของปูนและโบรอนต่อผลผลิตและคุณภาพผลผลิตของมะละกอ. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุวพันธ์ รัตนะรัต, สำเนา เพชรฉวี, เบลล์ อาร์ ดับเบิลยู , กิวเมอร์ อาร์, ธนีนาฏ สมบัติสิริ, เพลท เกต ดี และ โลนเรแกน เจ เอฟ. 2547. ผลการทดสอบปุ๋ยโบรอนกับถั่วลิสงในไร่กสิกร ภาคเหนือ, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคตะวันตกของประเทศไทย. ว.ดินและปุ๋ย 16 : 187-203.

สำนักข่าวประชาธรรม. 2548. เข้าถึงได้จาก http://www. newspnn.net (เข้าถึงเมื่อ 29 กันยายน 2550)

สำนักอุตสาหกรรมเพิ่มมูลค่า. 2550. เข้าถึงได้จาก http://www.bvai.dpim.go.th (เข้าถึงเมื่อ 25 ธันวาคม 2550)

สำเนา เพชรฉวี, สุวพันธุ์ รัตนะรัต, เบลล์ อาร์ ดับเบิลยู และโลนเรแกน เจ เอฟ. 2532. การสำรวจสภาวะของโบรอนกับถั่วลิสงในภาคกลางและภาคตะวันออก. รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการ ครั้งที่ 9 ณ ห้องประชุมวิชาการเกษตร 2 ตุลาคม 2532 หน้า 53-64.

อมรา วงษ์จันทร์แดง. 2545. การดูดซับฟอสเฟตในดินชุดต่าง ๆ ที่มีรูปออกไซด์ของเหล็ก และอะลูมินัมในปริมาณต่างกัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อารักษ์ ดำรงสัตย์, กาญนิกา ครองธรรมชาติ และสมชาย ดารารัตน์. 2549. การใช้ซีโอไลต์ร่วมกับทรายไม่คัดขนาดในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียจากฟาร์มสุกร. ว.มหาวิทยาลัยขอนแก่น 11 : 311-318.

อุษา อ้นทอง, นินนาท์ โชติบริบูรณ์ และธัญญา พันฤทธิ์ดำ. 2543. การบำบัดแอมโมเนียในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแช่แข็งในจังหวัดสงขลาด้วยซีโอไลต์. รายงานการวิจัย ภาควิชาเคมี และภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.

อัจฉรา เจริญทอง. 2542. การดูดซับปุ๋ยอนินทรีย์และฮอร์โมนพืชโดยแร่ซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เอิบ เขียวรื่นรมย์. 2533. ดินของประเทศไทย. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร-ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Eaton, F. M. and Wilcox, L. W. 1939. The Behavior of Boron in Soil. Tech Bull : United Sates Department of Agriculture.

Gainer, G. M. 1993. Boron Adsorption on Hematite and Clinoptilolite. Ms. thesis. University of Texas.

Gammon, R. 2004. Chemistry 155 Honors General Chemistry. Washington, D.C.: University of Washington.

Goldberg, S. 1997. Reaction of boron with soil. J. Plant Soil. 193 : 35-48.

Goldberg, S. and Glaubig, R. A. 1985. Boron adsorption on aluminum and iron oxide mineral. J. Soil Sci. Soc. Amer. 49 : 1374-1379.

Goldberg, S., Forster, H. S. and Heick, E. L. 1993. Boron adsorption mechanisms on oxides, clay minerals, and soils inferred from ionic strength effects. J. Soil Sci. Soc. Amer. 57 : 704-708.

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Beaton, J. D. and Nelson, W. L. 2005. Soil Fertility and Fertilizers. New Jersey : Pearson Education.

Hesse, P. R. 1971. A Textbook of Soil Chemical Analysis. London : John Munay.

Keren, R., Gast, R. and Baryosef, B. 1981. pH-dependent boron adsorption by Na-montmorillonite. J. Soil Sci. Soc. Amer. 45 : 45-48.

Keren, R. and Talpaz, H. 1984. Boron adsorption by montmorillonite as affected by particle size. J. Soil Sci. Soc. Amer. 48 : 555-559.

Keren, R. and Bingham, F. T. 1985. Boron in water, soil and plant. J. Soil Sci. Soc. Amer. 1 : 229-276.

Nabble, R. O., Gary, S. B. and Paull, J. G. 1997. Boron toxicity. J. Plant and Soil. 193 : 181-198.

Osturk, H. S., Ok, S. S. and Arcak, S. 2004. Leaching of boron through sewage sludge amended soil : the role of clinoptilolite. J. Soil Sci. Soc. Amer. 95 : 11-14.

Parks, W. L. and White, J. L. 1952. Boron retention by clay and humus systems sesquioxides and soil materials : II Sesquioxides. J. Soil Sci. Soc. Amer. 32 : 364-369.

Phung, H. T., Lam, H. V., Page, A. L. and Lund, L. J. 1979. The practice of leaching boron and soluble salt from fly ash-amended soils. J. Water, Air, Soil Pollution. 12 : 247-254.

Sand, L.B. and Mumpton, F.A. 1978. Natural Zeolites Occurrence, Properties, Use. New York : Pergamon Press.

Sims, J. R. and Bingham, F. T. 1968. Retention of boron by layer silicates, saturated with various cations. J. Soil Sci. Soc. Amer. 16 : 298-300.

Soil and Plant Analysis Council. 1999. Soil Analysis Handbook of Reference Methods. Boca Raton : CRC Press LLC.

Stangoulis, J. C. R. and Reid, R. J. 2002. Boron in Plant and Animal Nutrition. In Boron Toxicity in Plants and Animals. New York : Kluwer Academic.

Thomas, E. S., Ioannis, N. T. and Kortessa, N. D. 1999. Calcium application as a means to improve tolerance of kiwifruit (*Actinidia deliciosa* L.) to boron toxicity. J. Scientia Horticulturae. 81 : 443-449.

Toner, C.V. 1993. Chemical reaction kinetics and bonding mechanisms of boron adsorption and desorption on alumina. Ph.D. thesis. University of Delawave.

Yermiyaho, U., Keren, R. and Chen, Y. 1995. Boron sorption by soil in the presence of composted organic matter. J. Soil Sci. Soc. Amer. 59 : 405-409.

Yermiyaho, U., Keren, R. and Chen, Y. 1988. Boron sorption on composted organic matter. J. Soil Sci. Soc. Amer. 52 : 1309-1313.

Yermiyaho, U., Keren, R. and Chen, Y. 2001. Effect of composted organic matter on boron uptake by plants. J. Soil Sci. Soc. Amer. 65 : 1436-1441.

ภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่ 1 ผลของซีโอไลต์ต่อการดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน 30 มิลลิลิตร

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	pH	EC dS m^{-1}	B mg L^{-1}
Control (T1)	1	8.34	3.49	1,303.8
	2	8.36	3.56	1,201.0
	3	8.29	3.51	1,325.6
เฉลี่ย		8.33 a	3.52 a	1,276.8
3 ก. (T2)	1	8.20	2.84	1,195.7
	2	8.20	2.98	1,306.5
	3	8.21	2.98	1,260.4
เฉลี่ย		8.20 b	2.93 b	1,254.2
6 ก. (T3)	1	8.10	2.78	1,226.2
	2	8.12	2.79	1,251.3
	3	8.11	2.77	1,262.2
เฉลี่ย		8.11 c	2.88 c	1,246.6
9 ก. (T4)	1	8.02	2.61	1,264.0
	2	8.02	2.65	1,205.5
	3	8.02	2.63	1,236.9
เฉลี่ย		8.02 d	2.63 d	1,235.5
12 ก. (T5)	1	7.96	2.53	1,234.2
	2	7.95	2.55	1,244.1
	3	7.94	2.54	1,219.0
เฉลี่ย		7.95 e	2.54 e	1,232.4
F-test		**	**	NS
C.V. (%)		0.22	1.55	3.4

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ) ผลของซีโอไลต์ต่อการดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน 30 มิลลิลิตร

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	Ca mg L^{-1}	S mg L^{-1}	Na mg L^{-1}
Control (T1)	1	17.9	ไม่พบ	763.4
	2	19.3	ไม่พบ	816.5
	3	17.3	ไม่พบ	816.5
เฉลี่ย		18.2 e	-	798.8 a
3 ก. (T2)	1	111.4	ไม่พบ	400.4
	2	115.1	ไม่พบ	419.4
	3	114.6	ไม่พบ	432.2
เฉลี่ย		113.7 d	-	417.3 b
6 ก. (T3)	1	160.2	ไม่พบ	266.6
	2	159.9	ไม่พบ	270.2
	3	148.1	ไม่พบ	277.4
เฉลี่ย		156.1 c	-	271.4 c
9 ก. (T4)	1	203.3	ไม่พบ	176.6
	2	203.1	ไม่พบ	197.1
	3	174.6	ไม่พบ	200.3
เฉลี่ย		193.7 b	-	191.3 d
12 ก. (T5)	1	240.6	ไม่พบ	147.9
	2	239.1	ไม่พบ	152.3
	3	245.6	ไม่พบ	153.8
เฉลี่ย		241.8 a	-	151.4 e
F-test		**	-	**
C.V. (%)		5.7	-	4.6

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 2 ผลของซีโอไลต์ต่อการดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน 30 มิลลิลิตร

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	pH	EC $dS\ m^{-1}$	B $mg\ L^{-1}$
Control (T1)	1	8.73	7.88	424.2
	2	8.68	7.54	408.0
	3	8.66	7.52	416.4
เฉลี่ย		8.69 a	7.65 a	416.2 a
3 ก. (T2)	1	8.40	5.84	371.8
	2	8.63	6.06	373.1
	3	8.44	5.88	372.4
เฉลี่ย		8.49 b	5.93 b	372.4 b
6 ก. (T3)	1	8.50	5.05	356.4
	2	8.33	5.00	357.6
	3	8.32	5.03	368.6
เฉลี่ย		8.38 bc	5.03 c	360.9 b
9 ก. (T4)	1	8.31	4.50	353.8
	2	8.31	4.54	350.6
	3	8.31	4.50	350.7
เฉลี่ย		8.31 c	4.51 d	345.0 bc
12 ก. (T5)	1	8.18	4.09	364.1
	2	8.17	4.09	304.0
	3	8.17	4.13	329.5
เฉลี่ย		8.17 d	4.10 e	332.5 c
F-test		**	**	**
C.V. (%)		0.84	1.93	3.9

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 2 (ต่อ) ผลของซีโอไลต์ต่อการดูดยึดโบรอนในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน 30 มิลลิลิตร

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	Ca mg L^{-1}	S mg L^{-1}	Na mg L^{-1}
Control (T1)	1	141.9	102.9	1,449.1
	2	142.5	111.0	1,430.7
	3	144.6	114.1	1,497.4
เฉลี่ย		143.0 d	109.4 a	1,459.1 a
3 ก. (T2)	1	158.4	74.1	963.7
	2	173.9	85.3	921.4
	3	163.4	77.3	924.4
เฉลี่ย		165.2 c	78.9 b	936.5 b
6 ก. (T3)	1	165.5	71.8	601.4
	2	183.5	70.5	634.0
	3	163.8	76.9	626.4
เฉลี่ย		170.9 bc	73.1 b	620.6 c
9 ก. (T4)	1	181.2	66.0	460.6
	2	188.0	60.1	465.1
	3	189.3	64.0	425.8
เฉลี่ย		186.2 a	63.4 c	450.5 d
12 ก. (T5)	1	183.9	58.1	331.9
	2	180.2	57.5	307.0
	3	180.5	49.3	312.7
เฉลี่ย		181.5 ab	55.0 c	317.2 e
F-test		**	**	**
C.V. (%)		3.8	6.2	3.1

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 3 ผลของการเพิ่มค่าพีเอชดินปนเปื้อนโบรอนจากกรดบอริก

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	บ่มดิน 0 วัน		
		Extr. B mg kg^{-1}	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}
Control (T1)	1	8.48	5.08	0.03
	2	8.79	4.96	0.03
	3	9.09	4.99	0.03
	4	9.09	4.91	0.03
	5	9.71	5.01	0.03
เฉลี่ย		9.03	4.99 d	0.03 c
pH 5 (T2)	1	9.09	5.23	0.03
	2	9.55	5.38	0.03
	3	8.79	5.36	0.03
	4	9.40	5.27	0.03
	5	10.16	5.18	0.03
เฉลี่ย		9.40	5.28 d	0.03 c
pH 6 (T3)	1	9.55	5.93	0.04
	2	8.94	6.03	0.03
	3	9.55	6.13	0.03
	4	10.01	6.11	0.03
	5	9.40	6.14	0.03
เฉลี่ย		9.49	6.07 c	0.03 c
pH 7 (T4)	1	9.40	6.55	0.04
	2	9.71	6.73	0.04
	3	9.55	6.77	0.04
	4	10.16	6.87	0.04
	5	9.55	6.89	0.04
เฉลี่ย		9.68	6.76 b	0.04 b
pH 8 (T5)	1	9.40	7.65	0.05
	2	9.25	7.64	0.06
	3	9.86	7.60	0.06
	4	9.86	7.66	0.06
	5	9.40	7.66	0.06
เฉลี่ย		9.55	7.64 a	0.06 a
F-test		NS	**	**
C.V. (%)		4.21	3.84	7.44

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 3 (ต่อ) ผลของการเพิ่มค่าพีเอชดินปนเปื้อนโบรอนจากกรดบอริก

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	บ่มดิน 15 วัน		
		Extr. B mg kg^{-1}	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}
Control (T1)	1	7.48	5.41	0.03
	2	8.41	5.33	0.03
	3	8.96	5.39	0.03
	4	8.27	5.52	0.03
	5	9.14	5.45	0.03
เฉลี่ย		8.45	5.42 e	0.03 d
pH 5 (T2)	1	7.53	5.62	0.03
	2	8.42	5.64	0.03
	3	8.07	5.67	0.03
	4	7.47	5.69	0.03
	5	10.56	5.65	0.03
เฉลี่ย		8.41	5.65 d	0.03 d
pH 6 (T3)	1	7.50	5.95	0.04
	2	7.73	6.10	0.04
	3	8.43	6.06	0.04
	4	7.62	6.09	0.03
	5	8.20	6.08	0.04
		7.90	6.06 c	0.04 c
pH 7 (T4)	1	8.35	6.29	0.05
	2	8.82	6.46	0.05
	3	8.15	6.41	0.06
	4	8.51	6.46	0.06
	5	8.35	6.55	0.06
เฉลี่ย		8.44	6.43 b	0.06 b
pH 8 (T5)	1	6.99	6.78	0.07
	2	7.80	6.87	0.08
	3	7.94	7.00	0.08
	4	7.78	7.06	0.08
	5	8.42	7.07	0.08
เฉลี่ย		7.78	6.96 a	0.08 a
F-test		NS	**	**
C.V. (%)		8.64	1.37	8.06

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 3 (ต่อ) ผลของการเพิ่มค่าพีเอชดินปนเปื้อนโบรอนจากกรดบอริก

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	บ่มดิน 30 วัน		
		Extr. B mg kg^{-1}	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}
Control (T1)	1	6.57	5.33	0.03
	2	7.81	5.42	0.03
	3	7.68	5.41	0.03
	4	7.05	5.43	0.03
	5	6.71	5.42	0.03
เฉลี่ย		7.16 c	5.40 d	0.03 d
pH 5 (T2)	1	6.91	5.35	0.04
	2	7.49	5.37	0.04
	3	7.47	5.38	0.04
	4	8.00	5.54	0.03
	5	7.87	5.33	0.04
เฉลี่ย		7.55 bc	5.39 d	0.04 c
pH 6 (T3)	1	7.63	5.57	0.06
	2	6.07	5.72	0.06
	3	7.85	5.58	0.07
	4	7.82	5.62	0.06
	5	7.79	5.68	0.06
		7.43 bc	5.63 c	0.06 b
pH 7 (T4)	1	7.97	6.20	0.06
	2	7.65	6.30	0.07
	3	7.91	6.39	0.06
	4	8.07	6.36	0.07
	5	8.14	6.40	0.06
เฉลี่ย		7.95 ab	6.33 b	0.06 b
pH 8 (T5)	1	8.98	7.11	0.08
	2	7.96	7.04	0.08
	3	8.53	7.03	0.08
	4	7.92	7.11	0.08
	5	8.81	7.10	0.08
เฉลี่ย		8.44 a	7.08 a	0.08 a
F-test		**	**	**
C.V. (%)		6.74	1.01	6.83

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 3 (ต่อ) ผลของการเพิ่มค่าพีเอชดินปนเปื้อนโบรอนจากกรดบอริก

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	บ่มดิน 45 วัน		
		Extr. B mg kg^{-1}	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}
Control (T1)	1	7.47	4.95	0.03
	2	7.84	4.97	0.04
	3	8.43	5.03	0.04
	4	7.84	4.86	0.05
	5	7.51	5.06	0.04
เฉลี่ย		7.82 b	4.97 e	0.04 c
pH 5 (T2)	1	7.41	5.25	0.03
	2	7.42	5.14	0.04
	3	8.26	5.09	0.04
	4	8.40	5.05	0.04
	5	8.10	5.01	0.05
เฉลี่ย		7.92 b	5.11 d	0.04 c
pH 6 (T3)	1	8.15	5.53	0.06
	2	8.71	5.54	0.06
	3	8.25	5.59	0.06
	4	8.01	5.55	0.07
	5	8.55	5.50	0.07
		8.33 ab	5.56 c	0.06 b
pH 7 (T4)	1	7.74	6.21	0.06
	2	9.80	6.29	0.07
	3	8.49	6.32	0.08
	4	8.48	6.33	0.08
	5	9.26	6.33	0.07
เฉลี่ย		8.75 a	6.30 b	0.07 b
pH 8 (T5)	1	7.87	6.86	0.09
	2	7.98	6.97	0.08
	3	8.31	7.04	0.08
	4	8.11	7.05	0.10
	5	7.90	7.11	0.08
เฉลี่ย		8.03 b	7.01 a	0.09 a
F-test		*	**	**
C.V. (%)		5.78	1.22	12.39

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, * = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 3 (ต่อ) ผลของการเพิ่มค่าพีเอชดินปนเปื้อนโบรอนจากกรดบอริก

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	บ่มดิน 60 วัน		
		Extr. B mg kg^{-1}	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}
Control (T1)	1	8.58	4.80	0.05
	2	9.07	4.89	0.04
	3	8.63	4.77	0.05
	4	9.39	4.72	0.05
	5	9.43	4.97	0.04
เฉลี่ย		9.02	4.83 e	0.05 c
pH 5 (T2)	1	9.22	5.13	0.04
	2	7.71	5.06	0.04
	3	9.32	5.00	0.05
	4	7.99	4.88	0.05
	5	8.06	4.94	0.05
เฉลี่ย		8.46	5.00 d	0.05 c
pH 6 (T3)	1	8.74	5.51	0.06
	2	9.63	5.57	0.06
	3	8.82	5.54	0.06
	4	9.22	5.58	0.06
	5	9.04	5.54	0.06
		9.09	5.55 c	0.06 b
pH 7 (T4)	1	8.91	6.16	0.08
	2	8.70	6.22	0.08
	3	7.81	6.22	0.07
	4	8.66	6.42	0.06
	5	8.11	6.38	0.06
เฉลี่ย		8.44	6.28 b	0.07 a
pH 8 (T5)	1	8.40	6.83	0.08
	2	9.56	7.02	0.08
	3	9.64	7.14	0.07
	4	8.23	7.19	0.07
	5	9.47	7.12	0.09
เฉลี่ย		9.06	7.06 a	0.08 a
F-test		NS	**	**
C.V. (%)		6.29	1.83	11.30

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 4 สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราหลังจากใส่ปูนขาวก่อนปลูกพืช

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}	Extr. B mg kg^{-1}	Exch. Ca $cmol_c$ kg^{-1}
Control (T1)	1	7.47	0.17	314.5	0.21
	2	7.39	0.17	317.4	0.23
	3	7.49	0.17	349.3	0.22
	4	7.45	0.15	322.6	0.23
	5	7.49	0.15	308.3	0.22
เฉลี่ย		7.46 d	0.16 b	322.4	0.22 d
0.07 ก./5 กก. (T2)	1	7.74	0.20	287.9	0.58
	2	7.78	0.18	321.9	0.58
	3	7.80	0.18	329.8	0.61
	4	7.74	0.19	296.7	0.66
	5	7.76	0.19	332.7	0.63
เฉลี่ย		7.76 c	0.19 b	313.8	0.61 c
0.14 ก./5 กก. (T3)	1	7.98	0.23	355.0	0.93
	2	8.04	0.20	278.2	0.94
	3	8.00	0.21	307.4	0.96
	4	8.05	0.21	326.8	0.91
	5	8.06	0.23	312.1	0.95
เฉลี่ย		8.03 b	0.22 a	315.9	0.94 b
0.28 ก./5 กก. (T4)	1	8.44	0.23	314.2	1.64
	2	8.42	0.24	367.0	1.64
	3	8.43	0.22	338.6	1.62
	4	8.43	0.22	306.1	1.83
	5	8.41	0.24	306.8	1.60
เฉลี่ย		0.43 a	0.23 a	326.5	1.67 a
F-test		**	**	NS	**
C.V. (%)		0.39	5.54	7.2	6.37

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 4 (ต่อ) สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราหลังจากใส่ปูนขาวก่อนปลูกพืช

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	$NH_4^+ + NO_3^-$ mg kg^{-1}	Avai. P mg kg^{-1}	Exch. K $cmol_c$ kg^{-1}
Control (T1)	1	56.5	31.8	0.96
	2	57.9	32.4	1.00
	3	61.1	34.8	1.10
	4	59.4	28.2	0.96
	5	53.6	32.5	1.03
เฉลี่ย		57.7	32.0	1.01
0.07 ก./5 กก. (T2)	1	57.3	31.5	1.05
	2	58.5	32.6	1.00
	3	60.3	31.8	1.04
	4	58.9	31.8	1.01
	5	56.7	32.1	1.04
เฉลี่ย		58.3	32.0	1.03
0.14 ก./5 กก. (T3)	1	60.4	32.5	1.04
	2	59.3	33.7	1.00
	3	59.6	30.8	1.01
	4	60.3	34.6	1.04
	5	59.7	32.4	1.01
เฉลี่ย		59.9	32.8	1.02
0.28 ก./5 กก. (T4)	1	56.7	33.4	1.04
	2	57.4	35.3	1.02
	3	58.8	32.2	1.02
	4	57.4	31.9	0.98
	5	56.7	30.7	0.97
เฉลี่ย		57.4	32.7	1.01
F-test		NS	NS	NS
C.V. (%)		2.9	5.1	3.11

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 5 สมบัติทางเคมีบางประการและการเจริญเติบโตของต้นมะเขือเทศอายุ 35 วัน (หลังย้ายปลูก 5 วัน) หลังจากใส่ปูนขาว

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	B mg kg^{-1}	ความสูง (ซม.)	จำนวนใบ (ใบ/ต้น)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)
Control (T1)	1	3,890.7	13.0	5.00	0.07
	2	4,032.7	11.0	5.00	0.07
	3	7,062.7	10.4	5.00	0.04
	4	2,774.8	12.3	5.00	0.07
	5	2,988.9	10.5	4.00	0.03
เฉลี่ย		4,150.0	11.4	4.80	0.06
0.07 ก./5 กก. (T2)	1	3,923.9	12.5	5.00	0.08
	2	3,821.0	14.0	5.00	0.06
	3	2,560.1	12.3	5.00	0.05
	4	2,544.3	12.5	5.00	0.07
	5	2,598.2	13.0	5.00	0.05
เฉลี่ย		3,089.5	12.9	5.00	0.06
0.14 ก./5 กก. (T3)	1	2,763.8	13.5	5.00	0.05
	2	2,751.9	11.9	5.00	0.07
	3	2,924.9	12.1	5.00	0.09
	4	5,087.3	14.0	5.00	0.07
	5	3,561.9	12.5	5.00	0.07
เฉลี่ย		3,417.9	12.8	5.00	0.07
0.28 ก./5 กก. (T4)	1	3,440.7	12.3	5.00	0.05
	2	3,404.2	12.0	5.00	0.06
	3	4,164.9	13.0	5.00	0.03
	4	3,070.2	13.1	5.00	0.05
	5	2,573.6	12.0	5.00	0.05
เฉลี่ย		3,330.7	12.5	5.00	0.05
F-test		NS	NS	NS	NS
C.V. (%)		31.3	6.9	4.65	25.00

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 6 สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ใส่ปูนขาวหลังการทดลองปลูกมะเขือเทศ

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}	Extr. B mg kg^{-1}	Exch. Ca $cmol_c$ kg^{-1}
Control (T1)	1	7.20	0.17	216.3	0.29
	2	7.32	0.15	157.0	0.30
	3	7.40	0.17	191.0	0.29
	4	7.40	0.15	172.2	0.29
	5	7.42	0.15	222.0	0.29
เฉลี่ย		7.35 d	0.16	191.7	0.29 d
0.07 ก./5 กก. (T2)	1	7.67	0.18	160.6	0.63
	2	7.75	0.18	166.9	0.63
	3	7.78	0.17	180.9	0.64
	4	7.70	0.17	162.7	0.63
	5	7.77	0.16	159.5	0.65
เฉลี่ย		7.73 c	0.17	166.1	0.64 c
0.14 ก./5 กก. (T3)	1	8.00	0.19	244.4	1.06
	2	8.02	0.16	143.7	1.06
	3	7.99	0.19	178.9	1.08
	4	8.01	0.19	210.5	1.08
	5	8.09	0.17	189.2	1.07
เฉลี่ย		8.02 b	0.18	193.3	1.07 b
0.28 ก./5 กก. (T4)	1	8.40	0.21	210.0	1.85
	2	8.38	0.21	208.8	1.89
	3	8.40	0.20	197.3	1.91
	4	8.39	0.17	175.9	1.93
	5	8.36	0.15	184.4	1.88
เฉลี่ย		8.39 a	0.19	195.3	1.89 a
F-test		**	NS	NS	**
C.V. (%)		0.70	9.55	13.3	1.72

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 6 (ต่อ) สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ใส่ปูนขาวหลังการทดลองปลูกมะเขือเทศ

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	$NH_4^+ + NO_3^-$ mg kg^{-1}	Avai. P mg kg^{-1}	Exch. K $cmol_c$ kg^{-1}
Control (T1)	1	59.7	32.2	0.53
	2	68.2	29.8	0.55
	3	68.8	31.2	0.58
	4	65.4	26.6	0.52
	5	64.7	29.1	0.55
เฉลี่ย		65.4 a	29.8	0.55
0.07 ก./5 กก. (T2)	1	68.0	31.6	0.55
	2	66.8	30.3	0.54
	3	68.5	30.0	0.54
	4	70.9	31.1	0.60
	5	63.5	29.9	0.59
เฉลี่ย		67.5 a	30.6	0.56
0.14 ก./5 กก. (T3)	1	66.4	29.7	0.58
	2	62.4	29.1	0.53
	3	63.9	28.8	0.55
	4	98.6	31.7	0.58
	5	70.2	29.8	0.52
เฉลี่ย		72.3 a	29.8	0.55
0.28 ก./5 กก. (T4)	1	51.1	30.8	0.56
	2	49.2	29.4	0.56
	3	50.8	30.1	0.53
	4	49.4	32.8	0.53
	5	50.2	29.1	0.51
เฉลี่ย		50.2 b	30.4	0.54
F-test		**	NS	NS
C.V. (%)		12.3	4.9	5.75

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 7 สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}	Extr. B mg kg^{-1}
Control (T1)	1	6.04	0.03	11.16
	2	5.89	0.03	10.98
	3	5.83	0.03	11.18
เฉลี่ย		5.92 a	0.03 a	11.11 a
FC (167.5 มม.) (T2)	1	5.56	0.03	2.74
	2	5.66	0.03	2.62
	3	5.79	0.03	3.12
เฉลี่ย		5.67 b	0.03 a	2.83 b
1,000 มม. (T3)	1	5.56	0.02	1.22
	2	5.78	0.02	1.20
	3	5.74	0.02	1.20
เฉลี่ย		5.67 b	0.02 b	1.21 c
2,000 มม. (T4)	1	5.92	0.02	1.09
	2	5.87	0.02	1.06
	3	5.81	0.02	0.97
เฉลี่ย		5.87 a	0.02 b	1.04 c
4,000 มม. (T5)	1	5.70	0.02	0.82
	2	5.63	0.01	1.30
	3	5.71	0.01	0.68
เฉลี่ย		5.68 b	0.01 c	0.93 c
F-test		*	**	**
C.V. (%)		1.64	11.65	5.69

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, * = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 8 สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}	Extr. B mg kg^{-1}
Control (T1)	1	5.30	0.04	0.26
	2	5.08	0.04	0.36
	3	5.14	0.04	0.42
เฉลี่ย		5.17 c	0.04 a	0.35 b
FC (167.5 มม.) (T2)	1	4.53	0.03	2.51
	2	4.56	0.03	1.89
	3	4.41	0.03	2.90
เฉลี่ย		4.50 d	0.03 b	2.43 a
1,000 มม. (T3)	1	5.82	0.03	0.69
	2	5.84	0.03	0.68
	3	5.83	0.03	0.66
เฉลี่ย		5.83 a	0.03 b	0.68 b
2,000 มม. (T4)	1	5.76	0.02	0.54
	2	5.71	0.02	0.52
	3	5.85	0.02	0.72
เฉลี่ย		5.77 ab	0.02 c	0.59 b
4,000 มม. (T5)	1	5.65	0.02	0.52
	2	5.63	0.02	0.68
	3	5.72	0.01	0.68
เฉลี่ย		5.67 b	0.02 c	0.63 b
F-test		**	**	**
C.V. (%)		1.31	9.69	25.53

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 9 สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำที่ระดับความลึก 30-50 เซนติเมตร

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}	Extr. B mg kg^{-1}
Control (T1)	1	4.97	0.04	0.32
	2	4.98	0.04	0.32
	3	4.90	0.04	0.32
เฉลี่ย		4.95 d	0.04 b	0.32 b
FC (167.5 มม.) (T2)	1	4.45	0.12	3.19
	2	4.56	0.11	3.88
	3	4.51	0.11	3.09
เฉลี่ย		4.51 e	0.11 a	3.39 a
1,000 มม. (T3)	1	5.98	0.03	0.68
	2	6.10	0.03	0.72
	3	6.09	0.03	0.64
เฉลี่ย		6.06 a	0.03 c	0.68 b
2,000 มม. (T4)	1	5.86	0.02	0.58
	2	5.78	0.02	0.66
	3	5.83	0.03	0.72
เฉลี่ย		5.82 b	0.02 d	0.65 b
4,000 มม. (T5)	1	5.64	0.02	0.58
	2	5.70	0.02	0.58
	3	5.71	0.02	0.60
เฉลี่ย		5.68 c	0.02 d	0.59 b
F-test		**	**	**
C.V. (%)		0.83	7.96	17.32

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 10 สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของน้ำที่ผ่านการชะล้างดิน

ตำรับ การทดลอง	ซ้ำ	pH	EC dS m^{-1}	B mg
Control (T1)	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	-	-	-
เฉลี่ย		-	-	-
FC (167.5 มม.) (T2)	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	-	-	-
เฉลี่ย		-	-	-
1,000 มม. (T3)	1	6.33	0.15	10.00
	2	6.40	0.15	9.66
	3	6.63	0.15	8.96
เฉลี่ย		6.45	0.15 a	9.54
2,000 มม. (T4)	1	6.59	0.10	8.89
	2	6.30	0.11	9.77
	3	6.39	0.12	10.65
เฉลี่ย		6.43	0.11 b	9.77
4,000 มม. (T5)	1	6.24	0.09	10.01
	2	6.53	0.07	10.01
	3	6.50	0.08	9.65
เฉลี่ย		6.42	0.08 c	9.89
F-test		NS	**	NS
C.V. (%)		2.42	7.21	6.22

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 11 สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำก่อนการทดลอง

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}	Extr. B mg kg^{-1}
Control (T1)	1	7.35	0.23	82.46
	2	7.46	0.22	88.33
	3	7.52	0.25	109.61
	4	7.54	0.23	110.97
	5	7.52	0.23	89.39
เฉลี่ย		7.48 a	0.23 a	96.15 a
300 มม. (T2)	1	7.52	0.13	6.09
	2	7.38	0.13	8.92
	3	7.32	0.13	6.77
	4	7.31	0.13	7.64
	5	7.25	0.13	6.07
เฉลี่ย		7.36 a	0.13 b	7.10 b
600 มม. (T3)	1	7.12	0.13	3.27
	2	6.95	0.12	3.53
	3	6.88	0.12	2.30
	4	6.76	0.16	2.80
	5	6.85	0.12	3.13
เฉลี่ย		6.91 b	0.13 b	3.00 b
900 มม. (T4)	1	6.83	0.11	0.74
	2	6.85	0.10	1.54
	3	6.86	0.10	1.04
	4	6.86	0.11	1.31
	5	6.93	0.09	0.69
เฉลี่ย		6.87 b	0.10 c	1.06 b
F-test		**	**	**
C.V. (%)		1.33	7.45	24.69

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 11 (ต่อ) สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำก่อนการทดลอง

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	$NH_4^+ + NO_3^-$ mg kg^{-1}	Avai. P mg kg^{-1}	Exch. K $cmol_c$ kg^{-1}
Control (T1)	1	44.6	27.6	0.41
	2	38.6	31.2	0.43
	3	40.4	29.1	0.46
	4	44.4	20.5	0.44
	5	36.8	29.7	0.41
เฉลี่ย		41.0 ab	27.6	0.43 a
300 มม. (T2)	1	52.6	26.8	0.36
	2	49.2	27.0	0.37
	3	50.3	28.6	0.36
	4	49.1	28.7	0.38
	5	46.6	26.3	0.36
เฉลี่ย		49.6 a	27.5	0.37 b
600 มม. (T3)	1	38.8	25.9	0.35
	2	35.4	25.1	0.35
	3	34.3	25.6	0.34
	4	53.5	27.5	0.36
	5	44.6	25.7	0.34
	เฉลี่ย	41.3 ab	26.0	0.35 c
900 มม. (T4)	1	32.1	25.3	0.35
	2	29.2	26.6	0.35
	3	33.1	24.8	0.35
	4	41.1	25.9	0.34
	5	50.4	24.9	0.33
เฉลี่ย		37.2 b	25.5	0.34 c
F-test		*	NS	**
C.V. (%)		14.6	8.4	3.50

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ, * = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 12 การเจริญเติบโตของต้นมะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราหลังจากผ่านการชะล้างด้วยน้ำ

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	ความสูง (ซม.)	จำนวนใบ (ใบ/ต้น)	น้ำหนักสด (กรัม/ต้น)	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ต้น)
Control (T1)	1	0.0	0.0	0.0	0.07
	2	0.0	0.0	0.0	0.06
	3	0.0	0.0	0.0	0.09
	4	0.0	0.0	0.0	0.06
	5	0.0	0.0	0.0	0.06
เฉลี่ย		0.0 c	0.0 c	0.0 b	0.07 b
300 มม. (T2)	1	54.3	18.0	20.8	2.24
	2	43.6	14.0	9.7	1.01
	3	53.5	15.0	15.9	1.67
	4	-	-	-	-
	5	18.2	18.0	3.5	0.62
เฉลี่ย		42.4 b	16.3 b	12.5 b	1.39 b
600 มม. (T3)	1	98.7	21.0	84.5	11.24
	2	96.3	27.0	86.0	10.33
	3	92.9	18.0	87.4	10.94
	4	77.9	22.0	51.7	6.54
	5	95.0	25.0	69.4	8.90
เฉลี่ย		92.2 a	22.6 a	75.8 a	9.56 a
900 มม. (T4)	1	69.3	14.0	51.6	7.24
	2	86.3	15.0	62.0	8.07
	3	96.2	17.0	70.4	8.61
	4	97.0	18.0	98.9	14.08
	5	106.3	19.0	88.2	12.39
เฉลี่ย		91.0 a	16.6 b	74.2 a	10.08 a
F-test		**	**	**	**
C.V. (%)		19.8	16.7	31.2	33.95

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 13 ปริมาณธาตุอาหารของต้นมะเขือเทศอายุ 79 วัน (หลังย้ายปลูก 49 วัน) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำ

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	B mg kg^{-1}	N mg kg^{-1}	P mg kg^{-1}	K mg kg^{-1}
Control (T1)	1	1,559.1	–	–	–
	2	1,809.8	–	–	–
	3	1,525.9	–	–	–
	4	1,418.1	–	–	–
	5	1,237.5	–	–	–
เฉลี่ย		1,510.1 a	–	–	–
300 มม. (T2)	1	245.0	24.2	1.26	31.7
	2	242.1	22.6	1.76	28.6
	3	274.0	24.2	1.70	31.7
	4	–	–	–	–
	5	276.8	27.7	1.26	31.7
เฉลี่ย		259.5 b	24.7 a	1.96 a	33.0
600 มม. (T3)	1	49.6	14.9	1.25	39.2
	2	78.2	15.9	1.12	36.8
	3	134.2	18.5	1.23	34.0
	4	80.4	19.6	1.48	40.4
	5	160.8	19.1	1.57	40.1
เฉลี่ย		100.6 c	17.6 b	1.33 ab	38.1
900 มม. (T4)	1	51.7	14.2	0.77	29.7
	2	48.7	14.1	0.85	31.4
	3	34.1	11.8	0.67	35.9
	4	32.3	11.8	0.93	33.2
	5	46.6	15.3	1.08	34.6
เฉลี่ย		42.7 c	13.4 c	0.86 b	33.0
F-test		**	**	**	NS
C.V. (%)		22.7	10.6	33.00	9.7

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 14 สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำหลังการทดลอง

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	pH (ดิน:น้ำ,1:5)	EC (ดิน:น้ำ,1:5) dS m^{-1}	Extr. B mg kg^{-1}
Control (T1)	1	7.75	0.22	97.97
	2	7.75	0.26	104.41
	3	7.88	0.24	118.97
	4	7.86	0.26	117.13
	5	7.93	0.21	87.62
เฉลี่ย		7.83 a	0.24 a	105.22 a
300 มม. (T2)	1	7.63	0.12	15.29
	2	7.62	0.10	7.87
	3	7.47	0.08	12.11
	4	7.35	0.10	5.27
	5	7.08	0.13	8.44
เฉลี่ย		7.43 b	0.11 b	9.80 b
600 มม. (T3)	1	7.32	0.06	3.01
	2	7.21	0.07	2.45
	3	7.10	0.08	2.63
	4	6.70	0.15	2.68
	5	7.01	0.08	9.36
เฉลี่ย		7.07 c	0.09 bc	4.03 b
900 มม. (T4)	1	6.79	0.08	1.34
	2	6.96	0.08	1.53
	3	6.86	0.08	1.38
	4	7.05	0.06	11.21
	5	7.00	0.06	1.33
เฉลี่ย		6.93 c	0.07 c	3.36 b
F-test		**	**	**
C.V. (%)		2.41	18.99	24.07

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางภาคผนวกที่ 14 (ต่อ) สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารบางชนิดของดินปนเปื้อนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำหลังการทดลอง

ตำรับการทดลอง	ซ้ำ	Avai. N mg kg^{-1}	Avai. P mg kg^{-1}	Exch. K $cmol_c$ kg^{-1}
Control (T1)	1	61.5	25.8	0.44
	2	66.2	26.6	0.43
	3	53.5	27.8	0.45
	4	68.0	30.1	0.44
	5	61.5	26.5	0.40
เฉลี่ย		62.1 a	27.4	0.43 a
300 มม. (T2)	1	37.7	26.7	0.32
	2	31.6	27.0	0.36
	3	22.3	27.1	0.33
	4	24.7	26.5	0.36
	5	38.5	28.2	0.34
เฉลี่ย		31.0 b	27.1	0.34 b
600 มม. (T3)	1	20.2	27.2	0.20
	2	19.0	26.1	0.17
	3	20.2	24.9	0.19
	4	29.3	26.0	0.24
	5	25.4	26.3	0.21
เฉลี่ย		22.8 c	26.1	0.20 c
900 มม. (T4)	1	25.7	26.6	0.24
	2	22.3	25.6	0.22
	3	25.8	25.0	0.19
	4	20.0	25.7	0.15
	5	19.9	24.7	0.16
เฉลี่ย		22.8 c	25.5	0.19 c
F-test		**	NS	**
C.V. (%)		15.4	4.0	10.83

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ 99% โดยวิธี DMRT, NS = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และ ** = มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายณัฐพงศ์ เยาว์จุ้ย

รหัสประจำตัวนักศึกษา 394551401009-2

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	**ชื่อสถาบัน**	**ปีที่สำเร็จการศึกษา**
วิทยาศาสตรบัณฑิต (พืชศาสตร์) (เกียรตินิยมอันดับ 2)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช	2549