ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ และปริมาณสารเคอร์คูมินอยด์ในขมิ้นชัน

Effect of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Fertilizers on Plant Growth, Products, Economic Return and Curcuminoids in Turmeric (*Curcuma Longa* L.)

นางสาวกมรินทร์ นิ่มนวลรัตน์
นางสาวกุลภัทร์ ยิ้มพักตร์

ทะเบียนวิจัยเลขที่ 62-63-09-04-010903-010-106-03-11
สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน
กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
เดือน มีนาคม พ.ศ. 2564

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

แบบรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ทะเบียนวิจัยเลขที่ 62-63-09-04-010903-010-106-03-11

ชื่อโครงการวิจัย ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ และปริมาณสารเคอร์คูมินอยด์ในขมิ้นชัน

ผู้รับผิดชอบ นางกมรินทร์ นิ่มนวลรัตน์

ที่ปรึกษาโครงการ นายรัตนชาติ ช่วยบุดดา ผู้เชี่ยวชาญด้านวิเคราะห์วิจัยดินทางเคมี

ผู้ร่วมดำเนินการ นางสาวกุลภัทร ยิ้มพักตร์

หน่วยงาน กลุ่มวิเคราะห์วิจัยพืช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน

เริ่มต้น เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2561 สิ้นสุดเดือน กันยายน พ.ศ. 2563

รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 24 เดือน

สถานที่ดำเนินการ 1) แปลงทดลอง ชุดดินท่าแซะ ตำบลตลิ่งชัน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช พิกัด 47Q 588609E, 965648N

2) ห้องปฏิบัติการสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานทั้งสิ้น

ปีงบประมาณ	งบบุคลากร	งบดำเนินงาน	รวม
2562	-	794,400	794,400
2563	-	700,000	700,000

แหล่งงบประมาณที่ใช้ งบประมาณประจำปีของกรมพัฒนาที่ดิน

พร้อมนี้ได้แนบรายละเอียดประกอบตามแบบฟอร์มที่กำหนดมาด้วยแล้ว

ลงชื่อ.....

นางกมรินทร์ นิ่มนวลรัตน์

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ

ผู้รับผิดชอบโครงการ

ลงชื่อ.....

(.....)

ประธานคณะกรรมการกลั่นกรองผลงานวิชาการของหน่วยงานต้นสังกัด

วันที่ .....เดือน.....พ.ศ. .....

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

ทะเบียนวิจัยเลขที่ 62-63-09-04-010903-010-106-03-11

ชื่อโครงการวิจัย ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ และปริมาณสารเคอร์คูมินอยด์ในขมิ้นชัน

Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on plant growth, products, economic return and curcuminoids in turmeric (*Curcuma Longa* L.)

กลุ่มชุดดิน กลุ่มชุดดินที่ 34 ชุดดินท่าแซะ (Tha Sae series: Te)

สถานที่ดำเนินการ 1) แปลงทดลอง ชุดดินท่าแซะ ตำบลตลิ่งชัน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช พิกัด 47Q 588609E, 965648N

2) ห้องปฏิบัติการสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน

ผู้ร่วมดำเนินการ นางกมรินทร์ นิ่มนวลรัตน์ (Mrs. Kamarin Nimnualrat)

นางสาวกุลภัทร์ ยิ้มพักตร์ (Miss. Kulapat Yimpak)

บทคัดย่อ

ขมิ้นชันมีสารเคอร์คูมินอยด์ ที่มีสรรพคุณทางยา และนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงการแพทย์ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการใช้ปุ๋ยสำหรับขมิ้นชันอาจยังไม่เหมาะสม เนื่องจากยังมีข้อมูลการศึกษาน้อย โดยเฉพาะธาตุอาหารหลัก ซึ่งเป็นธาตุที่พืชต้องการในปริมาณสูง จึงศึกษาผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ต่อการเจริญเติบโต ปริมาณและคุณภาพผลผลิต รวมถึงผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกขมิ้นชันในแปลงทดลองที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ วางแผนการทดลองการตอบสนองของธาตุอาหารหลักแต่ละชนิดแบบสุ่มภายในบล็อกสมบูรณ์ (randomized complete block design) จำนวน 4 ซ้ำ มี 7 ตำรับการทดลอง ได้แก่ การปลูกขมิ้นชันและใส่ปุ๋ยวิธีเกษตรกร (ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่) เปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 0, 9, 18, 27, 36, 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ ฟอสฟอรัสอัตรา 0, 4, 9, 13, 18, 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ และโพแทสเซียมอัตรา 0, 25, 50, 75, 100 และ 125 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่า การใช้ปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (N-P_2O_5-K_2O) อัตรา 18-9-25 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้ได้ผลผลิตน้ำหนักสด น้ำหนักแห้งของเหง้าขมิ้นชัน และผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจสูงสุด ในขณะที่ หากใส่ปุ๋ยมากกว่าอัตราดังกล่าว จะทำให้ผลผลิตและผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจลดลง ตามลำดับ เนื่องจากธาตุอาหารส่วนเกินจะไปรบกวนการดูดใช้ธาตุอาหารชนิดอื่น จากอำนาจการเป็นปฏิปักษ์ต่อกัน จึงเป็นสาเหตุจำกัดการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิต อย่างไรก็ตาม ในสภาวะที่เกิดความไม่สมดุลของการดูดใช้ธาตุอาหาร กลับส่งผลให้ต้นขมิ้นชันสามารถผลิตสารเคอร์คูมินอยด์ได้สูงกว่าสภาวะปกติ เนื่องจากสามารถกระตุ้นให้ต้นขมิ้นชันอยู่ในสภาวะเครียด ดังนั้น การชักนำให้ต้นขมิ้นชันเกิดความเครียดจากสิ่งเร้าในระดับที่เหมาะสม อาจสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับผลิตขมิ้นชันที่ให้สารสำคัญสูง เช่น ความเครียดจากธาตุอาหาร ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง ของดิน หรือสภาวะขาดน้ำ เป็นต้น จึงควรศึกษาประเด็นดังกล่าวเพิ่มเติม

คำสำคัญ: ธาตุอาหารหลัก, คำแนะนำปุ๋ย, เคอร์คูมินอยด์, สมดุลธาตุอาหาร, ความเครียด

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

Abstract

Curcuminoids content in turmeric are medicinal properties that can use in medical field. However, the current application of fertilizers for turmeric may don't suitable. Because, the data from study are little and standard values for interpreting soil and plant analysis results deficient. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer rates to the interactions between nutrients growth quantity and quality of output as well as the economic returns from turmeric cultivation in experimental plots with low fertility was studied. A randomized complete block design with four replications was used the study response of each macronutrient. Turmeric cultivation using farmer method fertilizer (15-15-15 formula at the rate of 50 kg per rai) was compared with the application of nitrogen fertilizer at the rate of 0, 9, 18, 27, 36, 45 kg N per rai, phosphorus at the rate of 0, 4, 9, 13, 18, 22 kg P_2O_5 per rai and potassium at the rate of 0, 25, 50, 75, 100 and 125 kg K_2O per rai, respectively. The response to fertilizer showed that fresh weight, dry weight of turmeric rhizome and the highest economic yield when nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers (N-P_2O_5-K_2O) were applied at the rate of 18-9-25 kg per rai, while, fertilizing more than the above rate reduced yields and lower economic yields respectively. Because, other nutrients disturbed by excess nutrients from antagonism. The concentration of calcium and magnesium in the leaves and turmeric rhizomes decreased when potassium fertilizer were applied at all rates. Therefore, to adjust the balance of soil nutrients and plants, calcium and magnesium should add along with potassium to reduce nutrient interactions. However, curcuminoids from turmeric rhizome were synthesized higher than normal when turmeric plant was under stress due to nutrient imbalance. Therefore, turmeric may accumulate a high content of important substances when stressed by stimuli at the appropriate level, such as nutrient stress, salinity, soil pH or dehydration, etc. Such issues should study more.

Keyword: macronutrients, fertilizer recommendations, curcuminoids, nutrient balance, stress

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญ

	หน้า
แบบรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์	(1)
บทคัดย่อ	(2)
Abstract	(3)
สารบัญ	(4)
สารบัญตาราง	(5)
สารบัญภาพ	(6)
สารบัญภาคผนวก	(10)
หลักการและเหตุผล	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
ระยะเวลา และสถานที่ดำเนินการ	6
วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการ	7
ผลและวิจารณ์	14
สรุปและข้อเสนอแนะ	46
ประโยชน์ที่ได้รับ	47
การเผยแพร่ผลงานวิจัย	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	52

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติดินก่อนการทดลอง	15
2	ผลผลิต ต้นทุน และผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจจากการใช้อัตราปุ๋ยไนโตรเจนแตกต่างกันสำหรับขมิ้นชัน	42
3	ผลผลิต ต้นทุน และผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจจากการใช้อัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสแตกต่างกันสำหรับขมิ้นชัน	43
4	ผลผลิต ต้นทุน และผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจจากการใช้อัตราปุ๋ยโพแทสเซียมแตกต่างกันสำหรับขมิ้นชัน	45

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อพีเอชดิน (a) ไนโตรเจนทั้งหมด (b) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่สกัดได้ (C) T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ P_2O_5-K_2O-CaO-MgO-S อัตรา 11-50-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	16
2	ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อพีเอชดิน (a) ไนโตรเจนทั้งหมด (b) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (c) โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่สกัดได้ (d) T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-K_2O-MgO-S อัตรา 23-50-1.4-0.8 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	18
3	ผลของอัตราปุ๋ยแทสเซียมต่อพีเอชดิน (a) ไนโตรเจนทั้งหมด (b) โพแทสเซียมที่สกัดได้ (c) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่สกัดได้ (d) T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-P_2O_5-CaO-MgO-S อัตรา 23-11-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	19
4	ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในใบขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ P_2O_5-K_2O-CaO-MgO-S อัตรา 11-50-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	21
5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนกับโพแทสเซียมในใบขมิ้นชัน	22

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
6	ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในใบขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-K_2O-MgO-S อัตรา 23-50-1.4-0.8 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	23
7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสังกะสีกับฟอสฟอรัส (a) โพแทสเซียม (b) และแคลเซียม (c) ในใบขมิ้นชัน	24
8	ผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในใบขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-P_2O_5-CaO-MgO-S อัตรา 23-11-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	26
9	ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ P_2O_5-K_2O-CaO-MgO-S อัตรา 11-50-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	28
10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนกับแคลเซียม (a) และฟอสฟอรัส (b) ความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับแมกนีเซียม (c) และกำมะถัน (d) รวมถึงความเข้มข้นแมงกานีสกับสังกะสี (e) และทองแดง (f) ในเหง้าขมิ้นชัน	29

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
11	ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-K_2O-MgO-S อัตรา 23-50-1.4-0.8 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	31
12	ผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-P_2O_5-CaO-MgO-S อัตรา 23-11-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	33
13	ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อความสูงต้น ความกว้างใบ (a) และการแตกกอ (b) ของต้นขมิ้นชัน รวมถึง ผลผลิตน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง (C) และความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ P_2O_5-K_2O-CaO-MgO-S อัตรา 11-50-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	35
14	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแมงกานีสกับสารเคอร์คูมินอยด์ในเหง้าขมิ้นชัน	35
15	ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อความสูงต้น ความกว้างใบ (a) และการแตกกอ (b) ของต้นขมิ้นชัน รวมถึง ผลผลิตน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง (C) และความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-K_2O-MgO-S อัตรา 23-50-1.4-0.8 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p≤0.05, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	37

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับสารเคอร์คูมินอยด์ในเหง้าขมิ้นชัน	38
17	ผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อความสูงต้น ความกว้างใบ (a) และการแตกกอ (b) ของต้นขมิ้นชัน รวมถึง ผลผลิตน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง (C) และความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-P_2O_5-CaO-MgO-S อัตรา 23-11-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	40
18	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโพแทสเซียมกับสารเคอร์คูมินอยด์ในเหง้าขมิ้นชัน	40

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญภาคผนวก

ภาคผนวกที่		หน้า
1	แปลงทดลอง ต.ตลิ่งชัน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช	53
2	การวางแปลงทดลองและการเก็บตัวอย่างดินทางเคมีและกายภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการเบื้องต้น	53
3	ผังแปลงทดลองโครงการวิจัย ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ และปริมาณสารเคอร์คูมินอยด์ในขมิ้นชัน (*Curcuma Longa* L.)	54
4	การเจาะดินที่ระดับความลึก 0-100 ซม. เพื่อประเมินและจำแนกชุดดิน/กลุ่มชุดดิน พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างดินเพื่อส่งวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ	54
5	คำอธิบายหน้าตัดดิน ชุดดินท่าแซะ (Tha Sae series: Te)	55
6	แปลงทดลองหลังปลูกขมิ้นชันตามตำรับการทดลอง	56
7	การเก็บข้อมูลในแปลงทดลองตามตำรับการทดลอง	56
8	การเก็บข้อมูลผลผลิตตามตำรับการทดลอง	57
9	การวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ	57
10	วิธีวิเคราะห์สารเคอร์คูมินอยด์ ดัดแปลงจากวิธีการของ Thai Herbal Pharmacopoeia volume 1	58

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

หลักการและเหตุผล

รัฐบาลมีนโยบายผลักดันให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางทางการแพทย์ เพื่อต้องการประชาสัมพันธ์ดึงดูดให้ชาวต่างประเทศ มาใช้บริการด้านการแพทย์ และสาธารณสุขในประเทศไทยมากขึ้น ซึ่งเป็นการนำรายได้มาสู่ประเทศและยกระดับความเป็นอยู่ของประชากรในประเทศ ดังนั้น จึงมีนโยบายเร่งด่วนและสนับสนุนให้มีการพัฒนางานวิจัยและการใช้ประโยชน์จากสมุนไพรของไทย ทั้งในด้านการผลิตเป็นยารักษาโรคเพื่อทดแทนการนาเข้ายาแผนปัจจุบันจากต่างประเทศ และการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อเพิ่มมูลค่าและผลักดันให้เป็นสินค้าส่งออก โดยเฉพาะขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.) จัดเป็นพืชสมุนไพร 1 ใน 6 ชนิดของยาบัญชีหลัก เนื่องจากในเหง้าขมิ้นชันพบสาร เคอร์คูมินอยด์ (Curcuminoid) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ จึงมีการนามาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งทางด้านยา อาหาร และเครื่องสำอาง สำหรับพื้นที่ปลูกขมิ้นชันในประเทศไทยมีประมาณ 5,000 ไร่ โดย 90 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในภาคใต้ ส่วนใหญ่ปลูกเป็นพืชรองหรือพืชเสริมรายได้ในช่วงที่ราคายางพาราตกต่ำ การปลูกขมิ้นชันเป็นพืชเชิงเดี่ยวมีน้อย ทำให้ไม่มีการเก็บสถิติเนื้อที่ปลูกและผลผลิต (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2548) อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการใช้ปุ๋ยในขมิ้นชันอาจยังไม่มีความเหมาะสมหรือเกิดประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากมีข้อมูลการศึกษาน้อย โดยเฉพาะระดับธาตุอาหารหลักที่เหมาะสม ซึ่งเป็นธาตุที่พืชต้องการในอัตราสูง การขาดข้อมูลอ้างอิง จึงอาจก่อให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารจากปุ๋ยที่ใส่กับส่วนที่สูญเสียไปกับผลผลิต ในระยะยาวจึงอาจส่งผลให้ดินเสื่อมคุณภาพลง หรือในกรณีที่ใส่ปุ๋ยธาตุใดธาตุหนึ่งในปริมาณมากเกินความต้องการของพืช อาจมีผลลดความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารชนิดอื่น จากอำนาจการเป็นปฏิปักษ์ระหว่างกันของธาตุอาหาร ดังนั้น การสร้างข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้จัดการธาตุอาหารหลักในขมิ้นชันจึงมีความจำเป็น เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับจัดทำคำแนะนำการใช้ปุ๋ยแก่เกษตรกร อันจะนำไปสู่การจัดการธาตุอาหารในดินที่มุ่งสู่ความยั่งยืนต่อไป

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

วัตถุประสงค์

ศึกษาอัตราปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ และปริมาณสารเคอร์คูมินอยด์ เพื่อใช้ให้คำแนะนำปุ๋ยสำหรับขมิ้นชัน

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

การตรวจเอกสาร

ขมิ้นชัน (*Curcuma longa* L.) เป็นพืชในตระกูลซิงจิเบอราซีอี (Zingiberaceae) ชื่อสามัญอื่น คือ ขมิ้นแกง (เชียงใหม่) ขมิ้นชัน (กลาง, ใต้) ขมิ้นหยอก (เชียงใหม่) ขมิ้นหัว (เชียงใหม่) ขี้มิ้น (ตรัง, ใต้) ตายอ (กะเหรี่ยง กาแพงเพชร) สะยอ (กะเหรี่ยง แม่ฮ่องสอน) และ หมิ้น (ตรัง, ใต้) เป็นสมุนไพรที่มักพบในชีวิตประจำวัน โดยนิยมใช้ปรุงแต่งกลิ่นและรสในอาหารหลายชนิด โดยเฉพาะอาหารทางภาคใต้ เช่น แกงเหลือง แกงไตปลา แกงกะหรี่ ไก่ทอดขมิ้น เป็นต้น มีงานศึกษาวิจัยพบว่าขมิ้นชันมีคุณค่าต่อสุขภาพ โดยเฉพาะขมิ้นชันในภาคใต้มีคุณภาพดีที่สุดในโลกเนื่องจากมี สารสำคัญ คือ เคอร์คูมินอยด์ และน้ำมันขมิ้นสูงกว่าประเทศอื่น ๆ ที่มีการปลูกขมิ้นทั้งหมด ขมิ้นชัน เป็นพืชล้มลุกอายุหลายปี มีลำต้นจริงอยู่ใต้ดิน เรียกว่า เหง้า (rhizome) ซึ่งประกอบด้วยเหง้าหลักใต้ดิน เรียกว่า “หัวแม่” มีลักษณะรูปไข่และแตกแขนงทรงกระบอกออกด้านข้างทั้ง 2 ด้าน เรียกว่า “แง่ง” ส่วนลำต้นเหนือดิน เป็นลำต้นที่เกิดจากการอัดตัวกันของกาบใบ มีความสูงประมาณ 30-90 เซนติเมตร ขมิ้นชันมีเนื้อสีเหลืองเข้มจนถึงสีแสดเข้มมีกลิ่นเฉพาะตัว ซึ่งมาจากน้ำมันหอมระเหยที่มีอยู่ภายใน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2548) สารสำคัญในขมิ้นชัน ได้แก่ เคอร์คูมินอยด์ เป็นสารสีเหลืองสกัดจากเหง้าขมิ้นชัน ประกอบด้วย สารหลัก 3 ตัว คือ เคอร์คูมิน (curcumin) ดีเมท็อกซี่เคอร์คูมิน (demethoxycurcumin) และบิสดีเมท็อกซี่เคอร์คูมิน (Bisdemethoxycurcumin) เคอร์คูมินอยด์ มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ดี จึงนำมาใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านยา อาหาร และเครื่องสำอาง ได้มีการวิจัยทั้งในคนและสัตว์ทดลอง พบว่า เคอร์คูมินอยด์มีฤทธิ์ต้านการอักเสบ ฤทธิ์บำรุงรักษาตับ ช่วยป้องกันมะเร็ง ฤทธิ์ในการลดระดับคอเลสเตอรอล และฤทธิ์ในการป้องกันสมองเสื่อม การวิเคราะห์หาปริมาณสารเคอร์คูมินอยด์ พบว่า วิธีการสกัดที่ให้ปริมาณสารสำคัญมาก ที่สุด คือ soxhlet extraction (Mara *et. al.,* 2006) ปัจจุบัน การใช้ปุ๋ยในขมิ้นชันอาจยังไม่มีความเหมาะสมหรือเกิดประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งอาจก่อให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารชนิดอื่น ๆ ในดิน เนื่องจากยังคงขาดข้อมูลพื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับใช้จัดการธาตุอาหารตามหลักวิชาการ โดยเฉพาะธาตุอาหารหลัก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เป็นธาตุที่พืชต้องการในปริมาณสูงสำหรับใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิต

ไนโตรเจน เป็นธาตุเคมีในตารางธาตุ มีเลขอะตอม 7 เป็นอโลหะที่มีสถานะเป็นแก๊สที่มีอยู่ทั่วไป โดยปกติไม่มีสี กลิ่น หรือรส แต่ละโมเลกุลมี 2 อะตอม ไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบของบรรยากาศ ของโลกถึง 78 เปอร์เซ็นต์ และเป็นส่วนประกอบของเนื้อเยื่อในสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของโปรตีน และเป็นองค์ประกอบหลักของสารที่อยู่ในกรดนิวคลีอิกต่าง ๆ เช่น DNA สำหรับบทบาทของไนโตรเจนที่มีต่อพืช ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นรงควัตถุที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อผลิตอาหารไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ จึงเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับพืชเป็นอย่างยิ่ง โดยพืชดูดใช้ไนโตรเจนจากดินในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรท (NH_4^+ และ NO_3^-) หากพืชขาดไนโตรเจน ส่วนใหญ่มักแสดงอาการ ชะงักการเจริญเติบโต ผลผลิตลดลง หรือถ้าพืชขาดไนโตรเจนอย่างรุนแรง จะแสดงอาการใบเหลือง โดยเฉพาะ บริเวณตำแหน่งใบที่อยู่ระดับล่าง สาเหตุการขาดไนโตรเจน เกิดจากสภาพปัญหาดินเสื่อมโทรม มีการชะล้างพังทลายสูง ขาดอินทรียวัตถุ หรือไนโตรเจนสูญหายไปกับผลผลิต อย่างต่อเนื่อง แต่การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนไม่เพียงพอกับปริมาณที่สูญเสียไปจากพื้นที่

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของรากพืช โดยธาตุฟอสฟอรัสจะช่วยให้รากของพืชแข็งแรง และแผ่กระจายได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ลำต้นแข็งแรงตามไปด้วย ปกติแล้วธาตุฟอสฟอรัสจะมีอยู่ในดินมากพออยู่แล้ว เป็นธาตุที่ไม่ค่อยเคลื่อนที่ในดินหรือละลายน้ำได้ยาก ซึ่งจะทำให้พืชดูดเอาไปใช้ได้ยากด้วย แม้แต่ปุ๋ยที่ใส่ลงไปในดินโดยตรงประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ ของธาตุฟอสฟอรัสทั้งหมด จะถูกดินยึดไว้โดยการทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่าง ๆ ในดิน ฟอสฟอรัสในดินมีกำเนิดมาจากการสลายตัวผุพังของแร่บางชนิดในดิน การสลายตัวของสารอินทรียวัตถุในดินก็จะสามารถปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชที่ปลูกได้เช่นเดียวกับไนโตรเจน ฟอสฟอรัสที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ จะต้องอยู่ในรูปของอนุมูลของ สารประกอบที่เรียกว่า ฟอสเฟตไอออน ($H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-}) ซึ่งจะต้องละลายอยู่ในน้ำในดิน สารประกอบของฟอสฟอรัสในดินมีอยู่เป็นจำนวนมากแต่ส่วนใหญ่ละลายน้ำยาก ดังนั้น จึงมักจะมีปัญหาเสมอว่าดินถึงแม้จะมีฟอสฟอรัสมากก็จริงแต่พืชก็ยังขาดฟอสฟอรัส เพราะส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำยาก นอกจากนั้น แร่ธาตุต่าง ๆ ในดินมักทำปฏิกิริยากับอนุมูลฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ กลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำยาก พืชจึงไม่สามารถดูดไปใช้ได้ โดยเฉพาะพื้นที่ดินกรด มักทำปฏิกิริยากับ เหล็ก อะลูมินัม หรือแมงกานีส ดังนั้น การใส่ปุ๋ยฟอสเฟตจึงไม่ควรคลุกเคล้าให้เข้ากับดินเพราะยิ่งจะทำให้ปุ๋ยทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่าง ๆ ในดินได้เร็วยิ่งขึ้น แต่ควรจะใส่แบบเป็นจุดหรือโรยเป็นแถบให้ลึกลงไปในดินในบริเวณรากของพืช เมื่อพืชดูดฟอสฟอรัสไปใช้ ฟอสฟอรัสมีบทบาทช่วยในกระบวนการสังเคราะห์แสง เพื่อสร้างแป้งและน้ำตาล โดยทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของรูปพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการดังกล่าว นอกจากนี้ ฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ที่สำคัญหลายชนิด ช่วยเสริมสร้างส่วนที่เป็นดอก การผสมเกสร ตลอดจนการติดเมล็ด สร้างระบบรากให้แข็งแรง ช่วยในการแตกกอ และช่วยให้ลำต้นแข็งแรงไม่ล้มง่าย ช่วยให้พืชดูดใช้ธาตุไนโตรเจนและโมลิบดีนัมได้ดีขึ้น ดังนั้น เมื่อพืชขาดธาตุฟอสฟอรัส จะส่งผลให้รากพืชไม่เจริญเติบโต มีรากฝอยน้อย ต้นเตี้ย ใบและต้นมีสีเข้มและบางครั้งมีสีม่วงหรือแดงเกิดขึ้น พืชแก่ช้ากว่าปกติ เช่น การผลิดอก ออกผลช้า มีการแตกกอน้อย การติดเมล็ดน้อย หรือบางครั้งไม่ติดเมล็ด

โพแทสเซียมในดินที่พืชนำเอาไปใช้เป็นประโยชน์ได้ มีกำเนิดมาจากการผุผังสลายตัวของหินและแร่หลายชนิด โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปอนุมูลบวก หรือโพแทสเซียมไอออน (K^+) เท่านั้น ที่พืชจะดึงดูดไปใช้เป็นประโยชน์ได้ ถ้าธาตุโพแทสเซียมยังคงอยู่ในรูปของสารประกอบของหินและแร่ พืชก็ยังดึงดูดไปใช้เป็นประโยชน์ไม่ได้ อนุมูลโพแทสเซียมในดินที่พืชสามารถดูดไปใช้ได้ อาจจะอยู่ในสารละลายดิน หรือดูดยึดอยู่ที่พื้นผิวของอนุภาคดินเหนียว แต่ส่วนใหญ่จะดูดยึดที่พื้นผิวของอนุภาคดินเหนียว ดังนั้น ดินที่มีเนื้อดินละเอียด เช่น ดินเหนียว จึงมีปริมาณของธาตุนี้สูงกว่าดินพวกเนื้อหยาบ เช่น ดินทราย และดินร่วนปนทราย ถึงแม้โพแทสเซียมไอออน จะดูดยึดอยู่ที่อนุภาคดินเหนียว รากพืชก็สามารถดึงดูดธาตุนี้ไปใช้ประโยชน์ได้โดยง่ายเช่นเดียวกับส่วนที่อยู่ในสารละลายดิน ดังนั้น การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอาจจะใส่แบบคลุกเคล้าให้เข้ากับดินก่อนปลูกพืชได้ หรือจะใส่โดยโรยบนผิวดิน แล้วพรวนกลบก็ได้ถ้าปลูกพืชไว้ก่อนแล้ว สำหรับในเนื้อเยื่อของพืชสามารถพบโพแทสเซียมในรูปของเกลืออนินทรีย์ และเกลืออินทรีย์ ที่สามารถละลายน้ำได้ มีบทบาทสำคัญในด้านสรีรวิทยาและชีวเคมี เช่น การทำงานของเอนไซม์ สมดุลออสโมติก ควบคุมการปิดเปิดปากใบ ต่อเนื่องมาถึงส่งเสริมการสังเคราะห์ด้วยแสง และการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารหรือสารอาหารภายในเซลล์ เพื่อไปเลี้ยงส่วนที่กำลังเติบโต และส่งไปเก็บไว้เป็นเสบียงที่หัวหรือลำต้น ดังนั้น พืชพวกอ้อย มะพร้าว และ พืชหัวทุก

ชนิด จึงต้องการโพแทสเซียมสูงมาก ถ้าขาดโพแทสเซียมหัวจะลีบ มะพร้าวไม่มัน และอ้อยก็ไม่ค่อยมีน้ำตาล พืชที่ขาดโพแทสเซียมมักเหี่ยวง่าย แคระแกร็น ใบล่างเหลือง และเกิดเป็นรอยไหม้ตามขอบใบ พืชที่ปลูกในดินทรายที่เป็นกรดรุนแรงมักจะมีปัญหาขาดโพแทสเซียม เมื่อปลูกพืชจึงจำเป็นต้องใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอย่างเพียงพอ (ยงยุทธ, 2552)

ระยะเวลาและสถานที่ดำเนินการ

1. ระยะเวลาทำการวิจัย

1 ตุลาคม 2561 – 30 กันยายน 2563

2. สถานที่ดำเนินการ

1. ห้องปฏิบัติการสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน
2. แปลงทดลอง ชุดดินท่าแซะ ตำบลตลิ่งชัน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช พิกัด 47Q 588609E, 965648N

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการ

1. วัสดุอุปกรณ์

1.1 สารเคมี

1) โพแทสเซียมไดโครเมท
2) เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต
3) ออร์โทฟีแนนโทรลีน อินดิเคเตอร์
4) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
5) กรดไนตริกเข้มข้น
6) กรดเปอร์คลอริกเข้มข้น
7) กรดไฮโดรคลอริก
8) แอมโมเนียมฟลูออไรด์
9) แอมโมเนียมโมลิบเดต
10) แอนติโมนีโพแทสเซียมตาร์เตรท
11) แอสคอร์บิก
12) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต
13) กรดอะซิติก
14) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
15) โพแทสเซียมคลอไรด์
16) สตรอนเซียมคลอไรด์
17) แคลเซียมคาร์บอเนต
18) แมกนีเซียมออกไซด์
19) แบเรียมคลอไรด์
20) กัมอะคาเซีย
21) โพแทสเซียมซัลเฟต
22) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
23) โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต
24) โซเดียมคาร์บอเนต
25) เกล็ดโซดาไฟ
26) กรดบอริก
27) สารเร่งปฏิกิริยาสำเร็จรูปชนิดอัดเม็ดของเจลดาห์ล

28) โซเดียมไฮดรอกไซด์

29) โบรโมครีซอลกรีน

30) เมทิลเรด

31) เอทิลแอลกอฮอล์

32) โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต

33) แอมโมเนียมเมตาวานาเดต

34) แอมโมเนียมอะซิเตต

35) สารเคอร์คูมิน

36) เตตระไฮโดรฟิวแรน

1.2 อุปกรณ์

1) เครื่องชั่งทศนิยม 2 และ 4 ตำแหน่ง

2) ตู้อบ

3) ตู้ดูดควัน

4) เตาให้ความร้อน

5) เครื่องบดตัวอย่าง

6) เครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์

7) เครื่องเฟลมโฟโทมิเตอร์

8) เครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโทรโฟโทมิเตอร์

9) เครื่องย่อยสลายตัวอย่างแบบกึ่งอัตโนมัติ

10)เครื่องย่อยของเจลดาห์ล

11) เครื่องกลั่นของเจลดาห์ล

12) เครื่องวัดพีเอช

13) เครื่องเขย่า

14) เครื่องกวนสารละลาย

15) เครื่องเจือจางสารละลาย

16) ไฮโดรมิเตอร์

17) กระบอกตวง ขนาด 10, 50, 100, 500 และ 1,000 มิลลิลิตร

18) หลอดแก้ว ขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร

19) แท่งแก้วคน

20) กระจกนาฬิกา

21) กรวยพลาสติก

22) บิวเรต

23) บีกเกอร์ ขนาด 50, 250 และ 500 มิลลิลิตร

24) ขวดรูปชมพู่ ขนาด 50, 250 และ 500 มิลลิลิตร

25) ขวดปริมาตร ขนาด 10, 25, 50, 100, 1,000 และ 2,000 มิลลิลิตร

26) ขวดสีชาขนาด 2.5 ลิตร

27) กระดาษกรองวัตแมน เบอร์ 1 และ เบอร์ 5

28) หลอดเหวี่ยงพลาสติก ขนาด 50 มิลลิลิตร

1.3 วัสดุอื่นๆ

1) ถุงพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างดิน
2) ถุงกระดาษสำหรับเก็บตัวอย่างพืช
3) กรรไกร
4) อุปกรณ์เก็บตัวอย่างดิน (จอบ พลั่วสนาม ออร์เกอร์)
5) ตลับเมตร
6) ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)
7) ปุ๋ยดับเบิ้ลซุปเปอร์ฟอสเฟต (0-42-0, CaO 13%, S 15%)
8) ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60)
9) ปุ๋ยคีเซอร์ไรต์ (MgO 26%, S 15%)

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การวางแผนการทดลอง

2.1.1 การตอบสนองต่อปริมาณไนโตรเจนของขมิ้นชัน

ศึกษาการตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนของต้นขมิ้นชันที่ส่งผลต่อสมบัติดิน การเจริญเติบโต ปริมาณและคุณภาพผลผลิต โดยปลูกขมิ้นชันในแปลงทดลอง ชุดดินท่าแซะ ซึ่งเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ จำนวน 28 แปลงย่อย ขนาด 6x3 ตารางเมตรต่อแปลง ระยะปลูก 35x50 เซนติเมตร จากนั้นใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราที่ต่างกัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มภายในบล็อกสมบูรณ์ (randomized complete block design) มี 7 ตำรับการทดลอง จำนวน 4 ซ้ำ ดังนี้

1) T1, วิธีเกษตรกร (ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่)
2) T2, ไม่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน
3) T3, ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 9 กิโลกรัม N ต่อไร่
4) T4, ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 18 กิโลกรัม N ต่อไร่
5) T5, ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 27 กิโลกรัม N ต่อไร่
6) T6, ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 36 กิโลกรัม N ต่อไร่
7) T7, ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 45 กิโลกรัม N ต่อไร่

ทั้งนี้ T2-T7 ได้รับปริมาณ P_2O_5-K_2O-CaO-MgO-S อัตรา 11-50-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน โดยประเมินจากปริมาณธาตุอาหารที่สูญเสียไปกับผลผลิต การใส่ปุ๋ยแบ่งใส่สองครั้ง ๆ แรก หลังปลูก 1 เดือน ครั้งที่สอง หลังการปลูก 3 เดือน เริ่มปลูกขมิ้นชันในเดือนพฤษภาคม 2562 และเก็บเกี่ยวผลผลิตในเดือนเมษายน 2563

2.1.2 การตอบสนองต่อปริมาณฟอสฟอรัสของขมิ้นชัน

ศึกษาการตอบสนองต่อปุ๋ยฟอสฟอรัสของต้นขมิ้นชันที่ส่งผลต่อสมบัติดิน การเจริญเติบโต ปริมาณและคุณภาพผลผลิต โดยปลูกขมิ้นชันในแปลงทดลอง ชุดดินท่าแซะ ซึ่งเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ จำนวน 28 แปลงย่อย ขนาด 6x3 ตารางเมตรต่อแปลง ระยะปลูก 35x50 เซนติเมตร จากนั้นใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราที่ต่างกัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มภายในบล็อกสมบูรณ์ (randomized complete block design) มี 7 ตำรับการทดลอง จำนวน 4 ซ้ำ ดังนี้

1) T1, วิธีเกษตรกร (ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่)
2) T2, ไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส
3) T3, ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 4 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่
4) T4, ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 9 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่
5) T5, ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 13 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่
6) T6, ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 18 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่
7) T7, ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่

ทั้งนี้ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-K_2O-MgO-S อัตรา 23-50-1.4-0.8 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน โดยประเมินจากปริมาณธาตุอาหารที่สูญเสียไปกับผลผลิต การใส่ปุ๋ยแบ่งใส่สองครั้ง ๆ แรก หลังปลูก 1 เดือน ครั้งที่สอง หลังการปลูก 3 เดือน เริ่มปลูกขมิ้นชันในเดือนพฤษภาคม 2562 และเก็บเกี่ยวผลผลิตในเดือน เมษายน 2563

2.1.3 การตอบสนองต่อปริมาณโพแทสเซียมของขมิ้นชัน

ศึกษาการตอบสนองต่อปุ๋ยโพแทสเซียมของต้นขมิ้นชันที่ส่งผลต่อสมบัติดิน การเจริญเติบโต รวมถึงปริมาณและคุณภาพผลผลิต โดยปลูกขมิ้นชันในแปลงทดลอง ชุดดินท่าแซะ ซึ่งเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ จำนวน 28 แปลงย่อย ขนาด 6x3 ตารางเมตรต่อแปลง ระยะปลูก 35x50 เซนติเมตร จากนั้นใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่ต่างกัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มภายในบล็อกสมบูรณ์ (randomized complete block design) มี 7 ตำรับการทดลอง จำนวน 4 ซ้ำ ดังนี้

1) T1, วิธีเกษตรกร (ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่)
2) T2, ไม่ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม
3) T3, ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตรา 25 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่
4) T4, ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตรา 50 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่
5) T5, ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตรา 75 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่
6) T6, ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตรา 100 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่
7) T7, ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตรา 125 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่

ทั้งนี้ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-P_2O_5-CaO-MgO-S อัตรา 23-11-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน โดยประเมินจากปริมาณธาตุอาหารที่สูญเสียไปกับผลผลิต การใส่ปุ๋ยแบ่งใส่สองครั้ง ๆ แรก หลังปลูก 1 เดือน ครั้งที่สอง หลังการปลูก 3 เดือน เริ่มปลูกขมิ้นชันในเดือนพฤษภาคม 2562 และเก็บเกี่ยวผลผลิตในเดือนเมษายน 2563

2.2 การเก็บตัวอย่างดินและพืช

ก่อนการทดลอง สุ่มเก็บตัวอย่างดิน ที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร เพื่อเป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษา สำหรับใช้ประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน จากนั้นแยกเก็บตัวอย่างดินในแต่ละแปลงย่อยหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต เพื่อประเมินสถานะการเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารในดิน ส่วนตัวอย่างพืชจะเก็บตัวอย่างใบและเหง้า สำหรับใช้ติดตามการสะสมธาตุอาหาร โดยตัวอย่างใบจะสุ่มเก็บใบที่ขยายตัวเต็มที่ ในช่วงกลางฤดูปลูก จำนวน 6-8 ใบ ต่อแปลง ส่วนตัวอย่างเหง้าจะเก็บตัวอย่างในช่วงเก็บเกี่ยวผลผลิต จากการสุ่มตัวอย่างในแต่ละแปลงย่อย มาแปลงละ 4 กอ สำหรับนำส่งห้องปฏิบัติการ และใช้ประเมินผลผลิต

2.3 การบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต

บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นขมิ้นชันในช่วงกลางฤดูปลูก โดยประเมินจากต้นขมิ้นชัน จำนวน 4 กอ ต่อแปลงย่อย ได้แก่ ความสูงต้น วัดจากพื้นดินถึงระดับคอใบของใบบนสุดที่เห็น ความกว้างใบ วัดจากบริเวณกลางใบของใบที่เก็บวิเคราะห์ธาตุอาหาร และการแตกกอ ประเมินจากจำนวนต้นต่อกอ

2.4 การบันทึกข้อมูลผลผลิต

นำตัวอย่างเหง้าขมิ้นชันในแต่ละแปลงย่อยมาล้างทำความสะอาดเอาดินออกรวมถึงตัดส่วนของรากทิ้ง ชั่งและบันทึกน้ำหนักสดของขมิ้นชันแต่ละกอ คำนวณน้ำหนักสดที่ได้เป็นผลผลิตต่อแปลงย่อยและต่อไร่ตามลำดับ จากนั้นนำเหง้าขมิ้นชันในแต่ละแปลงย่อย ประมาณ 50 กรัม มาหั่นเป็นชิ้นบาง ๆ นำไปชั่งน้ำหนักก่อนอบ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ คำนวณหาน้ำหนักแห้ง (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2547ก) ประเมินน้ำหนักแห้งที่ได้เป็นผลผลิตต่อแปลงย่อยและต่อไร่ ตามลำดับ

2.5 การวิเคราะห์ธาตุอาหารในดินและพืช

1) การวิเคราะห์ดิน

นำตัวอย่างดินมาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นจึงบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 2 มิลลิเมตร (ISO 11464, 2006) นำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์ค่าพีเอช (pH) (ISO 10390, 2005) ไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) (ISO 13878, 1998) รวมถึงปริมาณอินทรียวัตถุ (organic matter) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorus) ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่สกัดได้ (extractable potassium, calcium magnesium and sulfur) ตามคู่มือวิเคราะห์ดิน (Jones, 2001) และหาขนาดอนุภาคเนื้อดินด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer method) (Bouyoucos, 1927)

2) การวิเคราะห์พืช

นำตัวอย่างใบขมิ้นชันมาเช็ดทำความสะอาดด้วยผ้าสะอาดที่ผ่านการชุบน้ำพอหมาด ๆ ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ส่วนเหง้าขมิ้นชัน นำเหง้าที่ผ่านการล้างทำความสะอาด ประมาณ 200 กรัม มาหั่นเป็นชิ้นบาง ๆ หลังจากนั้น นำตัวอย่างใบและเหง้า ไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ นำตัวอย่างไปบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช สำหรับใช้วิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน เหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดงทั้งหมด (total nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium sulfur, iron, manganese, zinc and copper) ตามคู่มือวิเคราะห์พืช (Jones, 2001)

2.6 การวิเคราะห์สารเคอร์คูมินอยด์

นำตัวอย่างเหง้าอีกส่วนที่ผ่านการบดเป็นผง มาหาปริมาณเคอร์คูมินอยด์ โดยชั่งตัวอย่างผงขมิ้นชันประมาณ 0.3 กรัม ใส่ขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ละลายตัวอย่างด้วยสารละลายเตตระไฮโดรฟิวแรน และปรับปริมาตรให้ได้ 10 มิลลิลิตร พร้อมกับทำแบลงค์ นำไปเขย่าเบา ๆ บนเครื่องเขย่าเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังเขย่า ดูดสารละลายใสเหนือตะกอน มา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปริมาตรที่ 1 ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ จากนั้น ดูดสารละลายจากขวดปริมาตรที่ 1 มา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปริมาตรที่ 2 ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร โดยวัดสารละลาย

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

มาตรฐานเคอร์คูมิน ความเข้มข้น 0, 0.8, 1.6, 2.4 และ 3.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อน จากนั้นวัดค่าแบลงค์และสารละลายตัวอย่าง ตามลำดับ หาสมการความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมิน นำสมการที่ได้หาค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง และคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวอย่าง ดัดแปลงจาก (Ministry of Public Health, 2009)

2.7 การประเมินผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจ

วิเคราะห์ต้นทุนการผลิต ได้แก่ ค่าวัสดุเกษตร ค่าแรงงานในการเตรียมดิน ปลูก การดูแลรักษา กำจัดวัชพืช และการเก็บเกี่ยวผลผลิต ตลอดจนค่าเสียโอกาสเงินลงทุน ค่าเสื่อมราคาอุปกรณ์ โดยดัดแปลงจากวิธีการประเมินต้นทุนการผลิตหอมแดงของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) จากนั้นประเมินรายได้ ผลกำไรที่ได้ รวมถึงอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit-cost ratio: B/C) เพื่อประเมินความคุ้มค่าของเงินลงทุน

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลตามวิธีสุ่มภายในบล็อกสมบูรณ์ และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's Honest Significant Difference (HSD) นอกจากนั้น วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นธาตุอาหารในใบ เหง้าขมิ้นชัน และปริมาณสารเคอร์คูมินอยด์ โดยใช้วิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงเดี่ยวของข้อมูลตัวอย่าง (sample simple linear regression analysis) หรืออาจใช้สมการเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential) ขึ้นอยู่กับลักษณะความสัมพันธ์ของข้อมูล

ผลและวิจารณ์

1. ข้อมูลดินที่ใช้ศึกษา

ดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นชุดดินท่าแซะ (Tha Sae series: Te, Fine-loamy, kaolinitic, isohyperthermic Typic Kandiudults) สามารถพบได้ในบริเวณที่ดอนที่มีหินพื้นเป็นหินทรายในบริเวณภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศ ลักษณะดินเกิดจากการผุพังสลายตัวอยู่กับที่ของกลุ่มหินเนื้อหยาบ หรืออาจถูกเคลื่อนย้ายมาเป็นระยะทางใกล้ ๆ โดยแรงโน้มถ่วงของโลก ส่งผลให้ชุดดินท่าแซะเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ จึงมีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ทดสอบการตอบสนองต่อธาตุอาหารของพืช สอดคล้องกับผลวิเคราะห์สมบัติดินก่อนการทดลอง พบว่า ลักษณะดินจัดอยู่ในกลุ่มเนื้อหยาบ มีอนุภาคขนาดทรายสูง ปฏิกิริยาดินเป็นกรดรุนแรงมาก ส่วนปริมาณอินทรียวัตถุ ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่สกัดได้ อยู่ในระดับต่ำ (ตารางที่ 1) ทั้งนี้ เนื่องจากลักษณะดินเนื้อหยาบ มีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารต่ำ แต่มีการระบายน้ำดี เมื่อเกิดฝนตกหรือมีน้ำไหลบ่าหน้าดิน ธาตุอาหารพืชส่วนใหญ่จึงถูกชะละลายออกไป ในขณะที่ ไฮโดรเจนไอออน (H^+) มีความสามารถในการไล่ที่หรือแทนที่บริเวณผิวคอลลอยด์ดินหรือบริเวณที่สามารถแลกเปลี่ยนได้สูงกว่าแคตไอออนอื่น ๆ จึงมักเหลือตกค้างอยู่ในดินและส่งผลให้ดินเป็นกรด นอกจากนี้ ลักษณะดินเนื้อหยาบมีส่วนช่วยให้ออกซิเจนในดินแพร่กระจายได้ดี จึงมีส่วนช่วยเร่งกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารในดิน มีผลให้อินทรียวัตถุถูกย่อยสลายอย่างรวดเร็ว จึงมีเหลือตกค้างอยู่ในดินต่ำ ดังนั้น การปลูกพืชบริเวณพื้นที่ดังกล่าวจำเป็นต้องมีการปรับปรุงดินให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ การยกระดับพีเอช โดยการใช้วัสดุปูน การเพิ่มอินทรียวัตถุโดยการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ควบคู่กับการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารในดินโดยการใช้ปุ๋ยเคมี เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้ปุ๋ยในพืชแต่ละชนิดจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงระดับความเพียงพอต่อความต้องการของพืชแบบเฉพาะเจาะจง

ตารางที่ 1 สมบัติดินก่อนการทดลอง

สมบัติดิน	ผลวิเคราะห์	การแปลผล
Sand (%)	80.5	-
Silt (%)	6.5	-
Clay (%)	13.0	-
Texture	sandy loam	1/ดินเนื้อหยาบ
pH	4.5	1/กรดรุนแรงมาก
OM (g/kg)	13.5	1/ค่อนข้างต่ำ
N (g/kg)	0.95	2/ต่ำ
Avail. P (mg/kg)	1.62	1/ต่ำมาก
Extr. K (mg/kg)	39.83	1/ต่ำ
Extr. Ca (mg/kg)	58.67	1/ต่ำมาก
Extr. Mg (mg/kg)	18.75	1/ต่ำมาก
Extr. S (mg/kg)	10.08	1/ต่ำ

หมายเหตุ : 1/สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2547ข

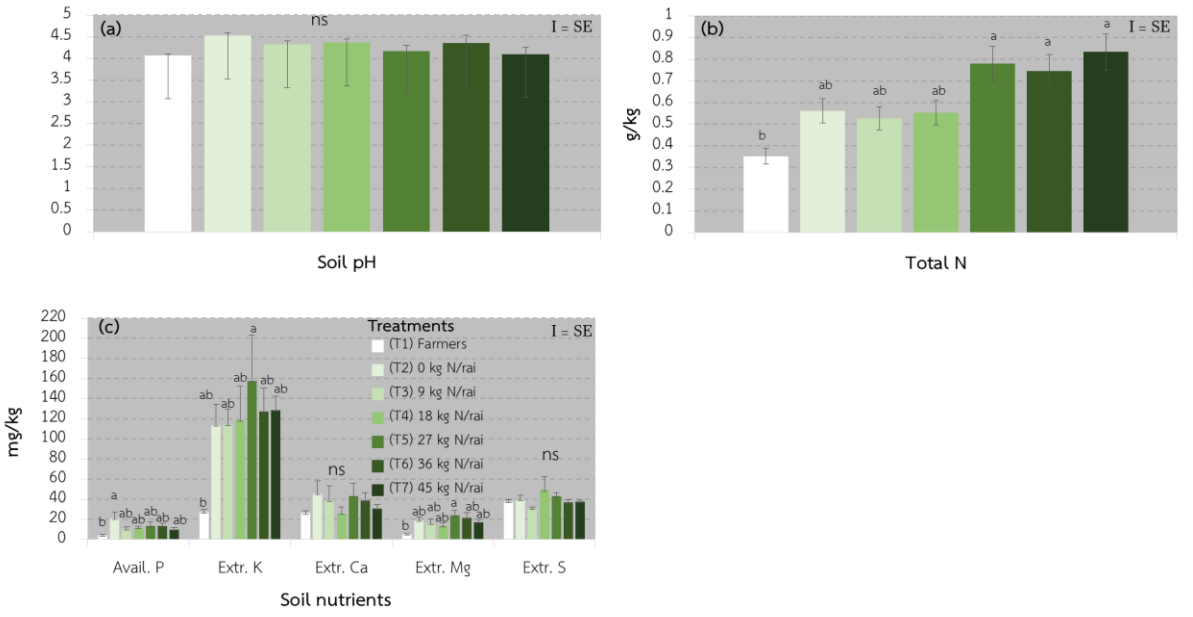
2/ Nyi *et al.,* 2017

2. ผลของอัตราปุ๋ยธาตุอาหารหลักต่อสมบัติดินบางประการ

2.1 ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อสมบัติดินบางประการ

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ ซึ่งมีบทบาทในกระบวนสังเคราะห์แสง จึงเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณสูง จากการศึกษาผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติดิน ในพื้นที่ขาดแคลนไนโตรเจน สำหรับใช้ปลูกขมิ้นชัน โดยใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 0, 9, 18, 27, 36 และ 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ ตามลำดับ เปรียบเทียบกับวิธีของเกษตรกร ซึ่งใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อวิเคราะห์สมบัติดินหลังการใส่ปุ๋ย พบว่า การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในทุกอัตราไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชดิน (ภาพที่ 1a) ทั้งนี้อาจเนื่องจากดินมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอช ซึ่งเป็นกลไกรักษาสมดุลไอออนของคอลลอยด์ดิน ปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของปุ๋ยจึงไม่ทำให้ระดับพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ส่งผลให้ระดับไนโตรเจนทั้งหมดในดินเพิ่มขึ้นตามอัตราที่ใส่ โดยเฉพาะการใส่ปุ๋ยอัตรา 27, 36 และ 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ ทำให้ดินมีไนโตรเจนทั้งหมดสูงสุด 0.78, 0.74 และ 0.83 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 1b) ชี้ให้เห็นว่า ปุ๋ยทั้งสามอัตราอาจสูงกว่าความต้องการของขมิ้นชันจึงเหลือสะสมในดิน ส่วนฟอสฟอรัสที่เป็น

ประโยชน์ พบค่า สูงสุด 20.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูงกว่าการใส่ปุ๋ยตามวิธีของเกษตรกร 4.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 1c) อาจเนื่องจากการขาดแคลนไนโตรเจนทำให้ต้นขมิ้นชันมีกระบวนการเมแทบอลิซึมต่ำ จึงเป็นปัจจัยจำกัดการดูดใช้ฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของรูปพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนเมแทบอลิซึมของพืช (Rodrigues *et al.,* 2015) อย่างไรก็ตาม ปริมาณแคลเซียมและกำมะถันที่สกัดได้ในแต่ละตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างกัน ในขณะที่ ปริมาณโพแทสเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ สะสมในดินสูงสุด 158 และ 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอัตรา 27 กิโลกรัม N ต่อไร่ สูงกว่าการใส่ปุ๋ยตามวิธีเกษตรกร ซึ่งมีปริมาณโพแทสเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ 27.35 และ 5.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 1c) ชี้ให้เห็นว่า การใส่ปุ๋ยแบบเกษตรกรไม่เหมาะกับดินที่ขาดความอุดมสมบูรณ์ เนื่องจากหลังใส่ปุ๋ยดินยังคงมีปริมาณโพแทสเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้อยู่ในระดับต่ำกว่าดินก่อนทดลอง (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2547ข) การใส่ปุ๋ยวิธีดังกล่าว จึงไม่สามารถรักษาความอุดมสมบูรณ์ของดินไว้ได้

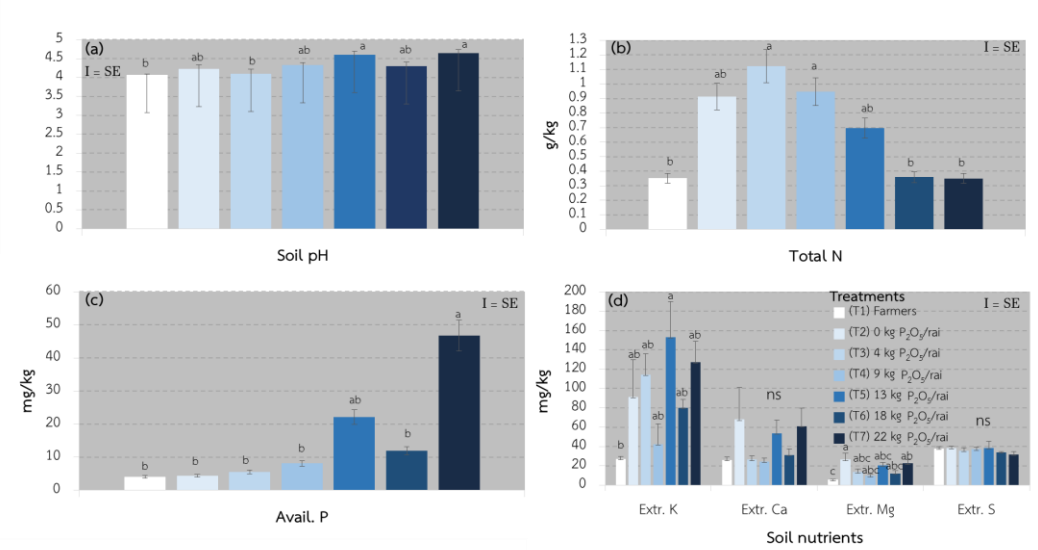


ภาพที่ 1 ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อพีเอชดิน (a) ไนโตรเจนทั้งหมด (b) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่สกัดได้ (C) T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ P_2O_5-K_2O-CaO-MgO-S อัตรา 11-50-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

2.2 ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อสมบัติดินบางประการ

ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบของรูปพลังงานที่พืชจำเป็นต้องใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมระดับเซลล์ จากการศึกษาผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติดิน ในพื้นที่ขาดแคลนฟอสฟอรัส สำหรับใช้ปลูกขมิ้นชัน โดยใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0, 4, 9, 13, 18 และ 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ตามลำดับ เปรียบเทียบกับวิธีของเกษตรกร ซึ่งใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อวิเคราะห์สมบัติดินหลังการใส่ปุ๋ย พบว่า การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราสูง 13 และ 18 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ มีผลให้ระดับพีเอชดินสูงกว่าการใช้วิธีแบบเกษตรกร (ภาพที่ 2a) ทั้งนี้ อาจเนื่องจากฟอสฟอรัสที่เพิ่มในดินไปจับกับเหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีส อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อยลง ทำให้จำกัดการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของทั้งสามชนิดธาตุ จึงช่วยยับยั้งความเป็นกรดของดิน อย่างไรก็ตาม ระดับพีเอชของทุกตำรับการทดลองยังอยู่ในช่วงต่ำ การปลูกพืชบริเวณดังกล่าวจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุปูน เพื่อลดความเป็นกรด และเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน ส่วนปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอัตรา 4 และ 9 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ มีการสะสมไนโตรเจนในดิน 1.12 และ 0.95 กรัมต่อกิโลกรัม สูงกว่าวิธีของเกษตรกร และการใส่ปุ๋ยอัตราสูง 18 และ 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ซึ่งมีไนโตรเจนทั้งหมด 0.35, 0.36 และ 0.35 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 2b) อาจเนื่องจากการใส่ปุ๋ยวิธีเกษตรกรมีไนโตรเจนต่ำ ส่งผลให้หลังใส่ปุ๋ยต้นขมิ้นชันดูดไนโตรเจนไปใช้จึงเหลือสะสมในดินน้อย ส่วนการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูง อาจช่วยส่งเสริมการดูดใช้ไนโตรเจนของต้นขมิ้น เนื่องจากธาตุทั้งสองมีสภาวะเสริมฤทธิ์กัน (synergistic) (Rietra *et al.,* 2017) ส่งผลให้มีการดูดใช้ไนโตรเจนอย่างรวดเร็วจึงเหลือสะสมในดินต่ำ สำหรับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่ใส่ โดยเฉพาะการใส่ปุ๋ยอัตรา 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ มีผลให้ดินมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงสุด 46.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนการใส่ปุ๋ยอัตราอื่นและวิธีเกษตรกรไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ภาพที่ 2c) แสดงให้เห็นว่า ขมิ้นชันอาจดูดใช้ฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่ใส่จึงเหลือระดับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ปริมาณแคลเซียมและกำมะถันที่สกัดได้ในแต่ละตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ในขณะที่ ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ สะสมในดินสูงสุด 153 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอัตรา 13 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ สูงกว่าการใส่ปุ๋ยวิธีเกษตรกร ซึ่งมีปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้อยู่ในระดับต่ำ 27.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 2d) ชี้ให้เห็นว่า การใส่ปุ๋ยแบบเกษตรกรไม่เหมาะกับดินที่ขาดความอุดมสมบูรณ์ เนื่องจากหลังใส่ปุ๋ยดินยังคงมีปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้อยู่ในช่วงขาดแคลน (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2547 ข) การใส่ปุ๋ยวิธีดังกล่าว จึงไม่สามารถรักษาความอุดมสมบูรณ์ของดินไว้ได้ ส่วนแมกนีเซียมที่สกัดได้ พบค่า สูงสุดในตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 26.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 2d) อาจเนื่องจากการขาดแคลนฟอสฟอรัสกระทบต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของขมิ้นชัน จึงมีการดูดใช้แมกนีเซียมจากดินน้อย โดย

แมกนีเซียมทำหน้าที่กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์คิเนส ซึ่งเร่งปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่ฟอสเฟตจาก ATP ไปยังโมเลกุลของสารอื่น (ยงยุทธ, 2552) ชี้ให้เห็นว่า เกษตรกรควรให้ความสำคัญกับเรื่องสมดุลของธาตุอาหารในดิน เพราะหากธาตุชนิดใดชนิดหนึ่งมีน้อยหรือมากเกินไป จะมีผลต่อความสามารถในการดูดใช้ธาตุอาหารชนิดอื่นของพืช

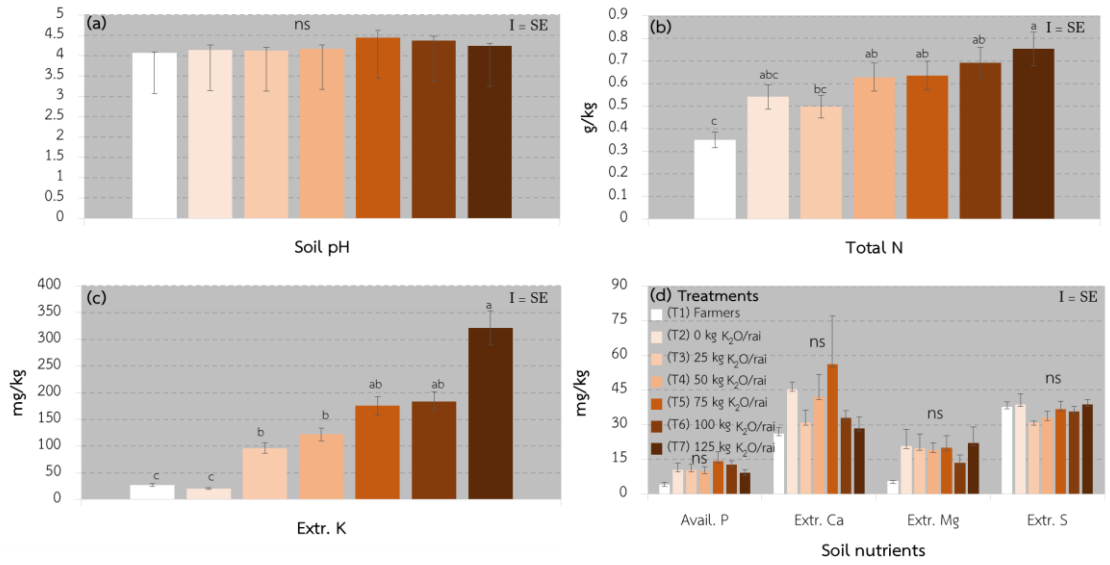


ภาพที่ 2 ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อพีเอชดิน (a) ไนโตรเจนทั้งหมด (b) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (c) โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่สกัดได้ (d) T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-K_2O-MgO-S อัตรา 23-50-1.4-0.8 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

2.3 ผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อสมบัติดินบางประการ

โพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารที่พืชให้ผลผลิตหัวหรือเหง้าต้องการในปริมาณสูง เนื่องจากทำหน้าที่ลำเลียงแป้งและน้ำตาลไปสะสมในส่วนดังกล่าว จากการศึกษาผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติดินในพื้นที่ขาดแคลนธาตุดังกล่าว สำหรับใช้ปลูกขมิ้นชัน โดยใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตรา 0, 25, 50, 75, 100 และ 125 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ตามลำดับ เปรียบเทียบกับวิธีของเกษตรกร ซึ่งใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อวิเคราะห์สมบัติดินหลังการใส่ปุ๋ย พบว่า ระดับพีเอชดินทุกตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างกัน (ภาพที่ 3a) ชี้ให้เห็นว่า ระดับปุ๋ยโพแทสเซียมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของดิน แต่มีผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยโพแทสเซียม โดยเฉพาะการใส่ปุ๋ยอัตรา 50, 75, 100 และ 125 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ส่งผลให้ดินมีไนโตรเจนทั้งหมด 0.63, 0.64, 0.69 และ 0.75 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สูงกว่าการใช้ปุ๋ยวิธี

เกษตรกร ที่มีไนโตรเจนทั้งหมด 0.35 กรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 3b) ทั้งนี้ เนื่องจากอิทธิพลของปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่เพื่อปรับความสมดุลของธาตุอาหาร ใช้อัตราสูงกว่าวิธีเกษตรกร ประกอบกับมีรายงานโพแทสเซียมมีอันตรกิริยาเชิงบวกกับไนโตรเจน (Rietra *et al.*, 2017) จึงส่งผลให้ไนโตรเจนทั้งหมดในดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียม พบว่า การใช้ปุ๋ยอัตรา 25, 50, 75, 100 และ 125 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ส่งผลให้ดินมีโพแทสเซียมที่สกัดได้ 97, 122, 176, 183 และ 322 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สูงกว่าตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม และวิธีเกษตรกร 21 และ 27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 3c) ชี้ให้เห็นว่า การใช้ปุ๋ยวิธีเกษตรกร อาจให้โพแทสเซียมต่ำเกินไป เนื่องจากหลังใส่ปุ๋ยระดับโพแทสเซียมที่สกัดได้ยังอยู่ในระดับต่ำ (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2547ข) อย่างไรก็ตาม ทุกตำรับการทดลองไม่พบความแตกต่างของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ รวมถึงแคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่สกัดได้ (ภาพที่ 3d) ทั้งนี้ กรณีของฟอสฟอรัส ขมิ้นชันอาจตอบสนองต่อปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใส่เพื่อปรับสมดุลธาตุอาหาร จึงถูกดูดไปใช้จากดิน ทำให้เหลือระดับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ไม่แตกต่างกันกับวิธีเกษตรกร ซึ่งใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราต่ำกว่าเล็กน้อย ส่วนปริมาณแมกนีเซียมที่สกัดได้ในตำรับการทดลองที่เพิ่มธาตุอาหารชนิดดังกล่าว อาจถูกรบกวนจากปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียม ส่งผลให้อยู่ในระดับที่ไม่แตกต่างกับวิธีเกษตรกร เนื่องจากทั้งสองธาตุเป็นปฏิปักษ์ต่อกัน (Rietra *et al.*, 2017) ดังนั้น การใส่ปุ๋ยควรระวังเรื่องความสมดุลของธาตุอาหารในดิน



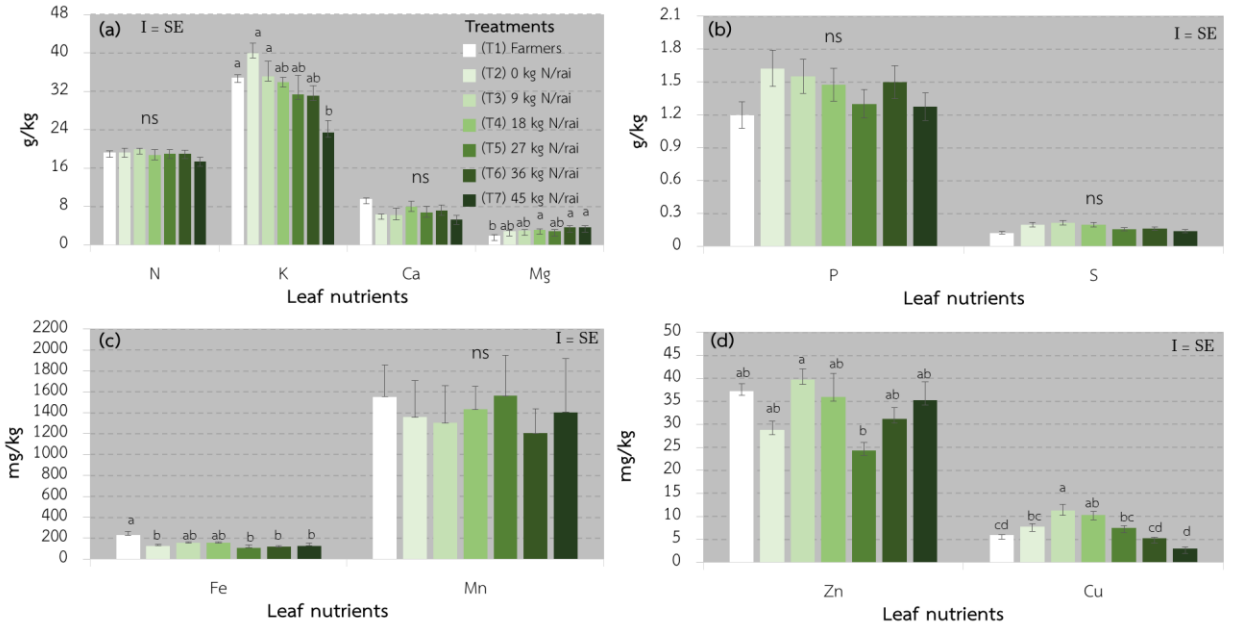
ภาพที่ 3 ผลของอัตราปุ๋ยแทสเซียมต่อพีเอชดิน (a) ไนโตรเจนทั้งหมด (b) โพแทสเซียมที่สกัดได้ (c) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่สกัดได้ (d) T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-P_2O_5-CaO-MgO-S อัตรา 23-11-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

3. ผลของอัตราปุ๋ยธาตุอาหารหลักต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในใบขมิ้นชัน

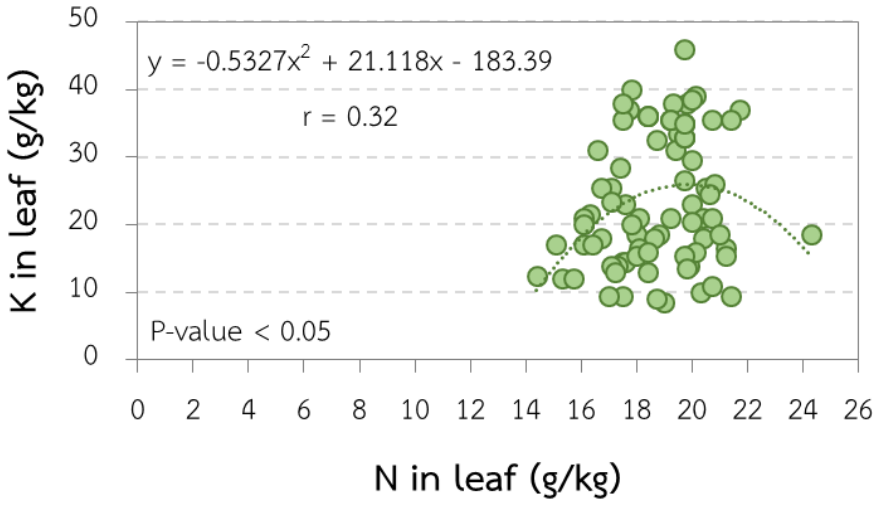
3.1 ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในใบขมิ้นชัน

การวิเคราะห์ธาตุอาหารในใบช่วยบ่งชี้ความเพียงพอหรือความสามารถในการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช จากการประเมินความเข้มข้นธาตุอาหารในใบที่ขยายตัวเต็มที่ ในช่วงกลางฤดูปลูก พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีความเข้มข้นไนโตรเจนในใบไม่แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 17.38-19.93 กรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 4a) แสดงให้เห็นถึงขีดจำกัดในการตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนของขมิ้นชัน หรือไนโตรเจนอาจมีการเคลื่อนย้ายไปสะสมบริเวณเหง้า จึงควรวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุอาหารในเหง้าเพื่อประเมินการสะสมธาตุอาหาร ส่วนความเข้มข้นโพแทสเซียม พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการใส่ปุ๋ยอัตรา 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ ส่งผลให้มีความเข้มข้นโพแทสเซียมในใบต่ำสุด 23.38 กรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 4a) ชี้ให้เห็นว่า ไนโตรเจนอาจเป็นปฏิปักษ์ต่อการดูดใช้โพแทสเซียม จึงควรระวังการใช้ปุ๋ยทั้งสองชนิด ผลการศึกษาในครั้งนี้ ให้ผลตรงกันข้ามกับข้อมูลที่มีรายงานถึงอันตรกิริยาเชิงบวกของธาตุทั้งสอง (Rietra *et al.,* 2017) อาจเนื่องจาก ลักษณะความสัมพันธ์ของไนโตรเจนกับโพแทสเซียมเป็นไปในลักษณะเส้นโค้งระฆังคว่ำ (ภาพที่ 5) เมื่อปริมาณไนโตรเจนสูงเกินไป ทำให้เกิดการแข่งแย่งกับโพแทสเซียมในสารละลายดิน ส่งผลให้ต้นขมิ้นชันดูดโพแทสเซียมได้น้อยลง สำหรับแมกนีเซียมในใบของตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ย 18, 36 และ 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ พบว่า มีความเข้มข้น 3.18, 3.60 และ 3.70 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สูงกว่าวิธีเกษตรกร ที่มีความเข้มข้นแมกนีเซียมในใบ 1.95 กรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 4a) แสดงให้เห็นว่า ต้นขมิ้นชันมีการตอบสนองต่อแมกนีเซียม โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูง เนื่องจากธาตุทั้งสองทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ (ยงยุทธ, 2552) จึงมีการตอบสนองแบบส่งเสริมกัน อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างของความเข้มข้น แคลเซียม (ภาพที่ 4a) ฟอสฟอรัส กำมะถัน (ภาพที่ 4b) และแมงกานีส (ภาพที่ 4c) ในใบขมิ้นชัน อาจเนื่องจากมีการเคลื่อนย้ายธาตุดังกล่าวไปยังผลผลิต ในขณะที่ การใช้วิธีเกษตรกรมีความเข้มข้นของเหล็กในใบ สูงสุด 227 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีความเข้มข้นลดลงเมื่อมีอัตราปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4c) ชี้ให้เห็นว่า ไนโตรเจนสามารถเป็นปฏิปักษ์ต่อการดูดใช้ธาตุเหล็ก ดังนั้น ในดินที่มีปัญหาความเป็นพิษจากเหล็ก การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนสามารถใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดการดูดใช้ธาตุดังกล่าว ส่วนความเข้มข้นของสังกะสีค่อนข้างแปรปรวน ชี้ให้เห็นถึง ความซับซ้อนของลักษณะความสัมพันธ์ข้อมูล พบค่า สูงสุด ต่ำสุด 39.75 และ 24.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอัตรา 9 และ 27 กิโลกรัม N ต่อไร่ ตามลำดับ (ภาพที่ 4d) นอกจากนี้ พบว่า ความเข้มข้นทองแดงเพิ่มขึ้นสูงสุด 11.25 และ 10.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใส่ปุ๋ยอัตรา 9 และ 18 กิโลกรัม N ต่อไร่ ตามลำดับ แต่เมื่ออัตราปุ๋ยเพิ่มขึ้นอีก ส่งผลให้ความเข้มข้นทองแดงลดลง (ภาพที่ 4d) แสดงให้เห็นถึง สภาวะที่เป็นปฏิปักษ์ต่อกัน มีรายงานการเพิ่มปริมาณทองแดงให้มีความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในดินที่ขาดแคลนทองแดง

และไนโตรเจน ส่งผลให้ต้นข้าวสาลีดูดใช้ไนโตรเจนได้น้อยลง (Kumar *et al.*, 1990) ทั้งนี้ ทองแดงมีบทบาทในการกระตุ้นเอนไซม์บางชนิดในพืชซึ่งเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ลิกนิน รวมถึงช่วยในการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน การขาดแคลนทองแดงจึงจำกัดผลผลิต (Yruela, 2005) มีรายงานความเข้มข้นทองแดงที่เพียงพอในใบพืชทั่วไป อยู่ในช่วง 5-30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Kalra, 1998) เมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง ชี้ให้เห็นว่า การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงสุด 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ ส่งผลให้มีความเข้มข้นทองแดงในใบขมิ้นชัน 3.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอยู่ในช่วงขาดแคลน ดังนั้น การใช้ปุ๋ยควรให้ความสำคัญเรื่องความสมดุลของธาตุอาหาร



ภาพที่ 4 ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในใบขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ P_2O_5-K_2O-CaO-MgO-S อัตรา 11-50-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

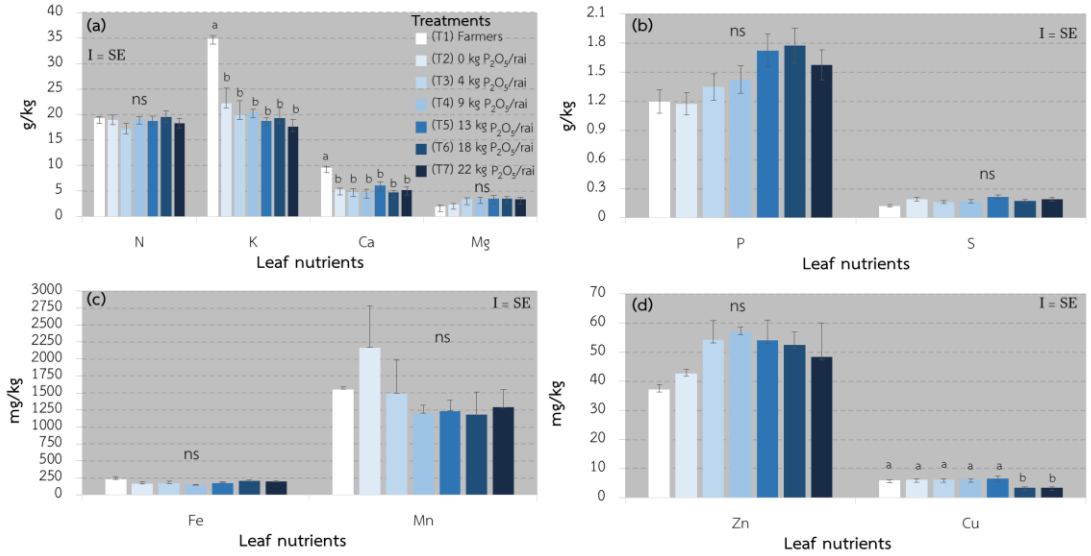


ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนกับโพแทสเซียมในใบขมิ้นชัน

3.2 ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในใบขมิ้นชัน

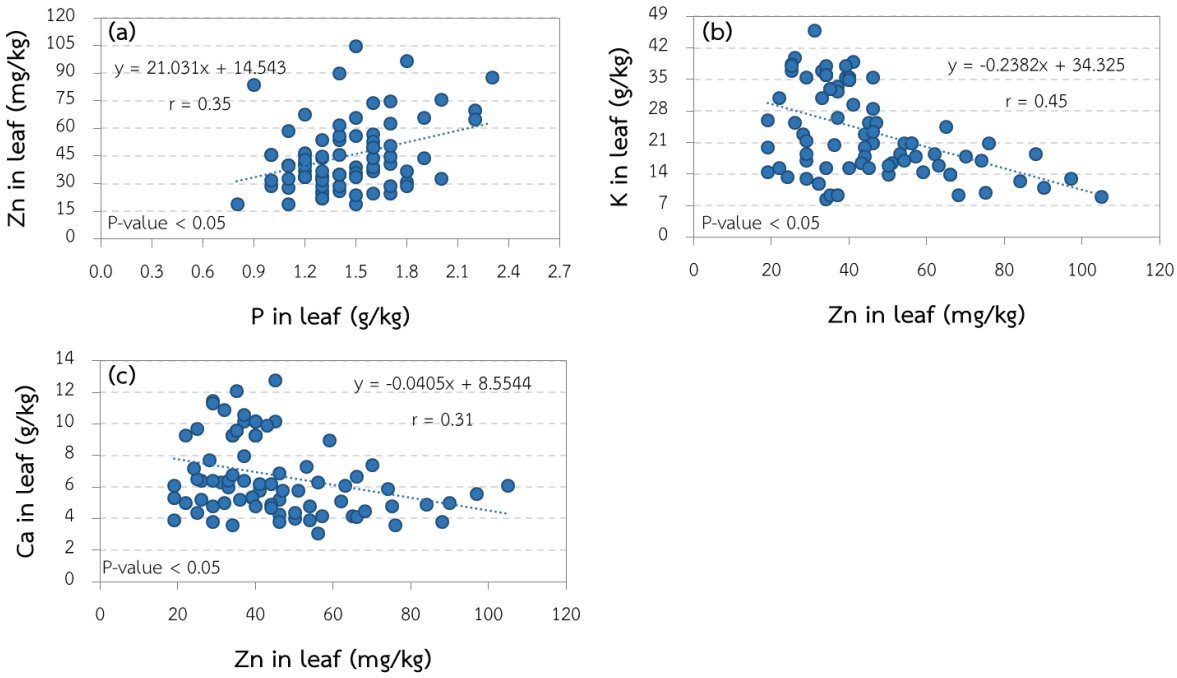
จากการศึกษาผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในใบขมิ้นชัน ประเมินจากใบที่ขยายตัวเต็มที่ ในช่วงกลางฤดูปลูก พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีความเข้มข้นไนโตรเจนในใบไม่แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 17.20-19.50 กรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 6a) แสดงให้เห็นถึง ขีดจำกัดในการตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนของขมิ้นชันเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเกษตรกร หรือไนโตรเจนอาจมีการเคลื่อนย้ายไปสะสมในส่วนของเหง้า ในขณะที่การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในทุกอัตรา ส่งผลให้มีความเข้มข้นโพแทสเซียมและแคลเซียมในใบต่ำกว่าการใช้วิธีเกษตรกร (ภาพที่ 6a) อาจเนื่องจากการเพิ่มปุ๋ยฟอสฟอรัสรวมถึงธาตุอื่น ๆ ที่ใช้ยกระดับธาตุอาหารในดิน ส่งผลให้ต้นขมิ้นชันมีการตอบสนองต่อธาตุอาหารที่ขาดจึงกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเมแทบอลิซึม ทำให้มีการเคลื่อนย้ายโพแทสเซียมและแคลเซียมไปยังผลผลิตอย่างรวดเร็วจึงเหลือความเข้มข้นในใบต่ำ ทั้งนี้ โพแทสเซียมทำหน้าที่ในการลำเลียงแป้งและน้ำตาลไปสร้างผลผลิต ส่วนแคลเซียมทำหน้าที่สร้างความแข็งแรงให้แก่ท่อลำเลียงน้ำและอาหาร (ยงยุทธ, 2552) อย่างไรก็ตาม พบว่า ความเข้มข้นฟอสฟอรัส กำมะถัน (ภาพที่ 6b) เหล็ก แมงกานีส (ภาพที่ 6c) และสังกะสี (ภาพที่ 6d) ในใบของทุกตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่กรณีของฟอสฟอรัสกับสังกะสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่ใส่ โดยใบขมิ้นชันมีความเข้มข้นสังกะสีเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นฟอสฟอรัส (ภาพที่ 7a) แสดงให้เห็นถึง แนวโน้มของสภาวะที่ส่งเสริมกัน ซึ่งให้ผลไปในทิศทางตรงข้ามกับรายงานการเป็นปฏิปักษ์ของธาตุทั้งสอง (Soltangheisi *et al.,* 2014) อาจเป็นเพราะดินที่ใช้ทดลองมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำ เมื่อมีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสทำให้ช่วยเติมเต็มธาตุอาหารในส่วนที่ขาด ส่งผลให้พืชมีการตอบสนองต่อกระบวนการเมแทบอลิซึม และส่งเสริมการดูดใช้สังกะสี เนื่องจากสังกะสีมีบทบาทเกี่ยวข้องกับ

กระบวนการดังกล่าว โดยมีอิทธิพลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ไฮโดรจีเนส (hydrogenase) และคาร์บอนิกแอนไฮเดรส (carbonic anhydrases) ช่วยรักษาเสถียรภาพของไรโบโซม รวมถึงช่วยสังเคราะห์ไซโทโครม (cytochromes) ซึ่งเป็นโปรตีนที่ช่วยในการสร้าง ATP จากการขนส่งอิเล็กตรอน (Hafeez *et al.,* 2013) อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างธาตุอาหารในใบ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นโพแทสเซียม (ภาพที่ 7b) และแคลเซียม (ภาพที่ 7c) ลดลง แสดงให้เห็นถึง แนวโน้มของการเป็นปฏิปักษ์ต่อกัน มีรายงานการเพิ่มความเข้มข้นโพแทสเซียมในสารละลายธาตุอาหารจาก 1 เป็น 8 มิลลิโมลต่อลิตร ส่งผลให้ความเข้มข้นสังกะสีในใบกล้วยลดลงจาก 15.16 เหลือ 12.10 กรัมต่อกิโลกรัม (Freitas *et al.,* 2017) และมีรายงานความเป็นพิษของสังกะสีในถั่วเหลือง เมื่อส่วนเหนือดิน มีอัตราส่วน Ca/Zn น้อยกว่า 35 (Davis and Parker, 1993) ส่วนกรณีของทองแดง พบว่า ความเข้มข้นในใบลดลงเมื่อใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูง 18 และ 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ อาจเนื่องจาก อำนาจการเป็นปฏิปักษ์ของฟอสฟอรัสกับทองแดง (Rietra *et al.,* 2017) จากประเด็นการเกิดปฏิปักษ์ระหว่างธาตุ ชี้ให้เห็นว่า การจัดการธาตุอาหารพืชมีความละเอียดอ่อน เกษตรกรจึงควรให้ความสำคัญเรื่องสมดุลธาตุอาหารในดินและพืช



ภาพที่ 6 ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในใบขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-K_2O-MgO-S อัตรา 23-50-1.4-0.8 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

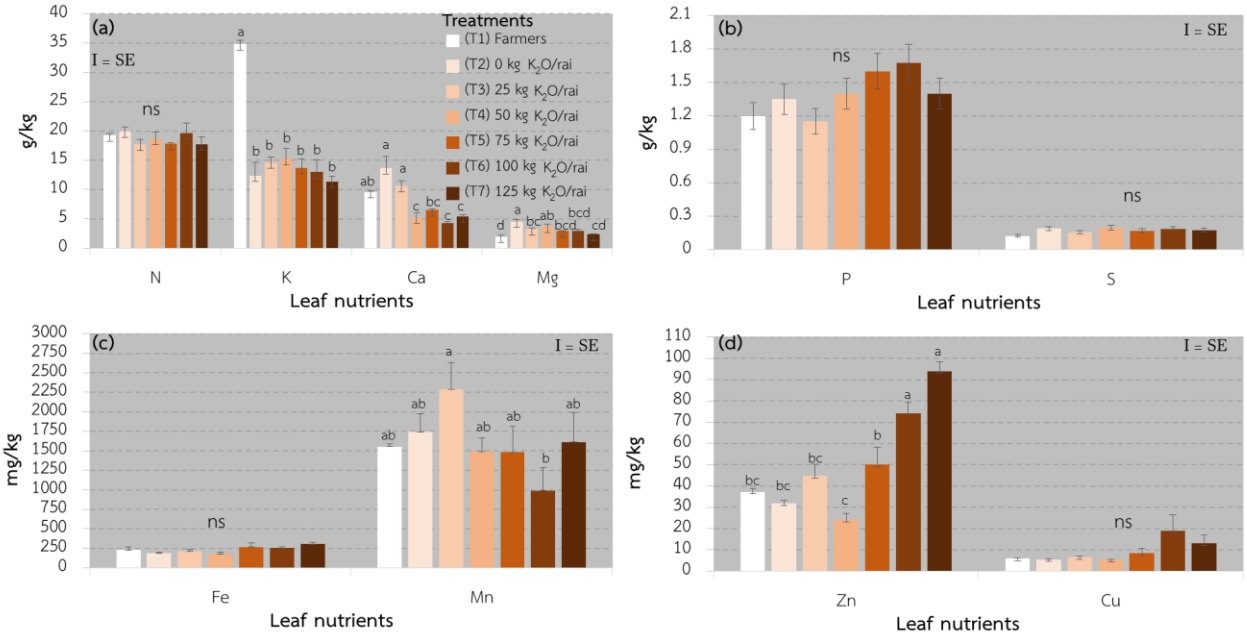


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสังกะสีกับฟอสฟอรัส (a) โพแทสเซียม (b) และแคลเซียม (c) ในใบขมิ้นชัน

3.3 ผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในใบขมิ้นชัน

จากการศึกษาผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในใบขมิ้นชัน ประเมินจากใบที่ขยายตัวเต็มที่ ในช่วงกลางฤดูปลูก พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีความเข้มข้นไนโตรเจนในใบไม่แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 17.20-19.50 กรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 8a) แสดงให้เห็นถึง ขีดจำกัดในการตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนของขมิ้นชันเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเกษตรกร หรือไนโตรเจนอาจมีการเคลื่อนย้ายไปสะสมในส่วนของเหง้า ในขณะที่การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในทุกอัตรา และการใส่ปุ๋ยสูงกว่า 25 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ส่งผลให้มีความเข้มข้นโพแทสเซียมและแคลเซียมในใบต่ำกว่าการใช้วิธีเกษตรกร ตามลำดับ (ภาพที่ 8a) อาจเนื่องจากการเพิ่มปุ๋ยโพแทสเซียมรวมถึงธาตุอื่น ๆ ที่ใช้ยกระดับธาตุอาหารในดิน ส่งผลให้ต้นขมิ้นชันมีการตอบสนองต่อธาตุอาหารที่ขาดจึงกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเมแทบอลิซึม ทำให้มีการเคลื่อนย้ายโพแทสเซียมและแคลเซียมไปยังผลผลิตอย่างรวดเร็วจึงเหลือความเข้มข้นในใบต่ำ ทั้งนี้ โพแทสเซียมทำหน้าที่ในการลำเลียงแป้งและน้ำตาลไปสร้างผลผลิต ส่วนแคลเซียมทำหน้าที่สร้างความแข็งแรงให้แก่ท่อลำเลียงน้ำและอาหาร (ยงยุทธ, 2552) นอกจากนี้ พบว่า ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมในใบเริ่มลดลง จาก 13.65 และ 4.55 กรัมต่อกิโลกรัม อยู่ที่ระดับ 10.65, 5.28, 6.50, 4.30, 5.40 และ 3.25, 3.68, 2.93, 2.93, 2.35 กรัมต่อกิโลกรัม เมื่อมีการเพิ่มปุ๋ย

โพแทสเซียมในอัตรา 25, 50, 75, 100 และ 125 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ตามลำดับ (ภาพที่ 8a) แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาของโพแทสเซียมที่มีต่อแคลเซียมและแมกนีเซียม ดังนั้น การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมสำหรับขมิ้นชันควรคำนึงถึงผลกระทบต่อการดูดใช้ธาตุดังกล่าว ในขณะที่ ผลการทดลอง ไม่พบความแตกต่างของความเข้มข้นฟอสฟอรัส กำมะถัน (ภาพที่ 8b) เหล็ก (ภาพที่ 8c) และทองแดง (ภาพที่ 8d) สำหรับความเข้มข้นแมงกานีสในทุกตำรับการทดลอง พบว่า มีความเข้มข้นสูงกว่า 900 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอยู่ในช่วงที่สูงเกินความต้องการของพืชทั่วไปและอาจเป็นพิษต่อพืช (Kalra, 1998) สาเหตุเนื่องจากดินมีพีเอชต่ำ ส่งผลให้แมงกานีสในรูปแมงกานัส (Mn^{2+}) สามารถละลายออกมาได้ดี (สุทธิ์เดชา และคณะ, 2563) ต้นขมิ้นชันจึงดูดแมงกานีสไปสะสมในใบเกินความจำเป็น ดังนั้น การปลูกพืชบริเวณชุดดินท่าแซะ จำเป็นต้องแก้ปัญหาความเป็นกรดของดินก่อน มีรายงานหากพีเอชของดินเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ความเข้มข้นของแมงกานัสไอออนในสารละลายดินจะลดลง 100 เท่า (ยงยุทธ, 2552) อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเพิ่มปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียม ความเข้มข้นแมงกานีสในใบมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 8c) ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มปุ๋ยโพแทสเซียมอาจช่วยลดการดูดใช้แมงกานีส ซึ่งอาจนำไปปรับใช้เพื่อลดความเป็นพิษของแมงกานีสในพื้นที่อื่น ๆ สำหรับความเข้มข้นสังกะสีในใบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยโพแทสเซียม โดยเฉพาะเมื่อใส่ปุ๋ยตั้งแต่ 100 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ขึ้นไป (ภาพที่ 8d) แสดงให้เห็นว่า กรณีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในชุดดินท่าแซะสำหรับขมิ้นชัน ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาเชิงบวกต่อการดูดสังกะสีไปสะสมในใบ อาจเนื่องจากสังกะสีทำหน้าที่เร่งกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดีสมิวเทส (super oxide dismutase, SOD) เพื่อสลายอนุมูลอิสระที่เกิดจากการสะสมแมงกานีสในเซลล์มากเกินไป ซึ่งช่วยลดสภาวะเครียดของพืช (Li *et al.,* 2017) จึงกระตุ้นให้ต้นขมิ้นชันดูดสังกะสีมาสะสมบริเวณใบพร้อมกับการดูดใช้โพแทสเซียม



ภาพที่ 8 ผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในใบขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-P_2O_5-CaO-MgO-S อัตรา 23-11-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

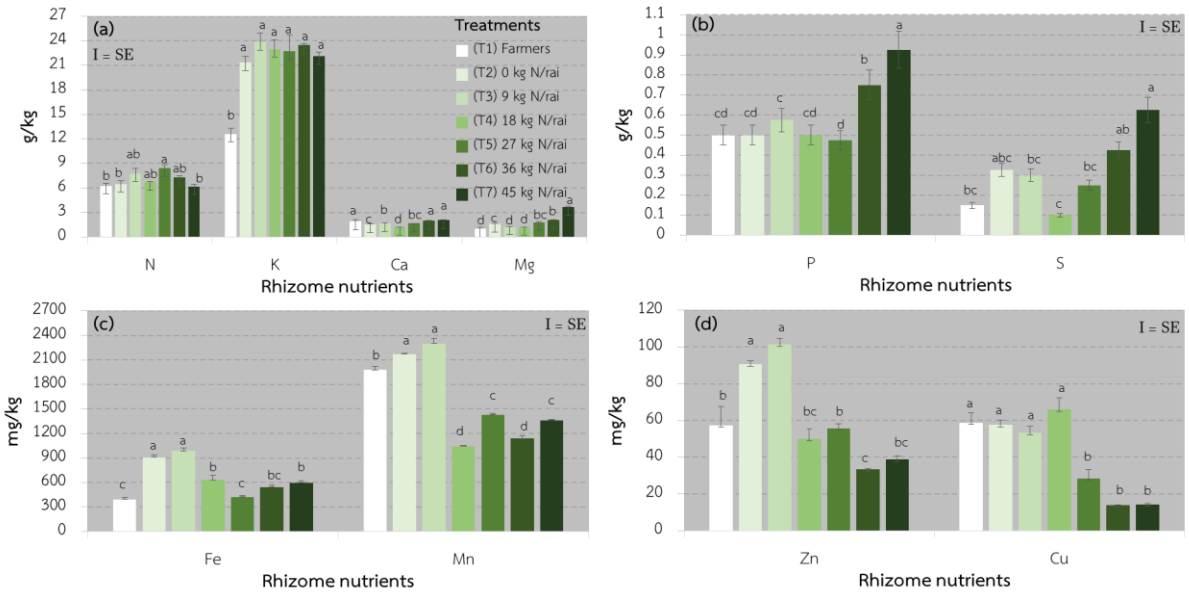
4. ผลของอัตราปุ๋ยธาตุอาหารหลักต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในเหง้าขมิ้นชัน

4.1 ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในเหง้าขมิ้นชัน

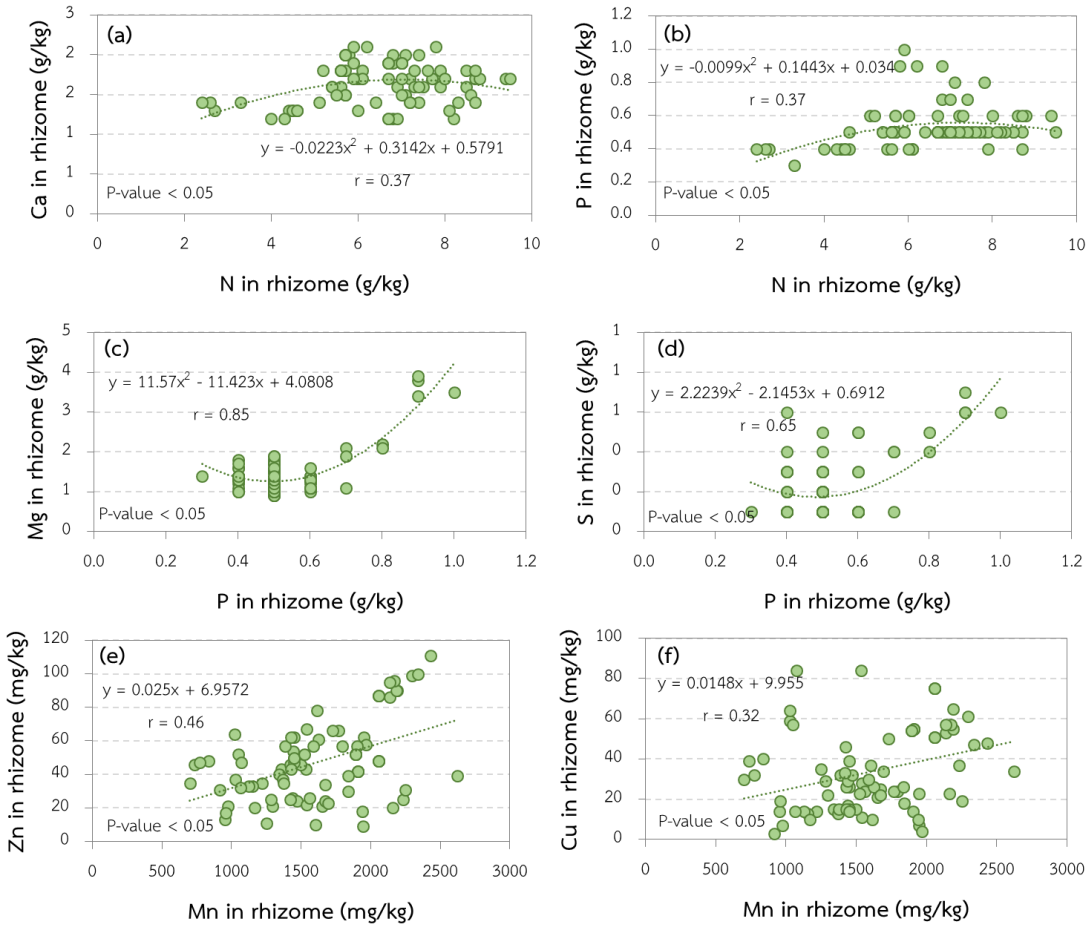
การวิเคราะห์ธาตุอาหารในเหง้าขมิ้นชันช่วยบ่งชี้ระดับธาตุอาหารที่สูญเสียไปกับผลผลิต ทำให้สามารถใช้เป็นแนวทางในการชดเชยธาตุอาหารที่สูญเสียออกจากพื้นที่คืนสู่ดิน จากการประเมินความเข้มข้นธาตุอาหารในเหง้าขมิ้นชัน หลังเก็บเกี่ยวผลผลิต พบว่า ความเข้มข้นไนโตรเจนในเหง้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่ใส่ การเพิ่มปุ๋ย 27 กิโลกรัม N ต่อไร่ ส่งผลให้มีความเข้มข้นไนโตรเจนในเหง้าขมิ้นชันสูงสุด 8.40 กรัมต่อกิโลกรัม แต่ไม่มีความแตกต่างกับการใส่ปุ๋ยอัตรา 9, 18 และ 36 กิโลกรัม N ต่อไร่ (ภาพที่ 9a) ชี้ให้เห็นว่า การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราสูงเกินไปอาจสิ้นเปลืองค่าปุ๋ยโดยไม่เกิดประโยชน์ เนื่องจากการตอบสนองของขมิ้นชันมีจำกัด อย่างไรก็ตาม ไนโตรเจนมีความจำเป็นสำหรับการสร้างผลผลิต มีรายงานเหง้าขมิ้นชันมีโปรตีนสะสมอยู่ประมาณ 6-8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งโปรตีนมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Nelson *et al.*, 2017) การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่เกษตรกรไม่ควรมองข้าม ส่วนความเข้มข้นโพแทสเซียม พบว่า การใส่ปุ๋ยวิธีเกษตรกร ส่งผลให้มีการสะสมโพแทสเซียม 12.63 กรัมต่อกิโลกรัม ต่ำกว่า ตำรับการทดลองอื่น ทุกตำรับการทดลอง (ภาพที่ 9a)

เนื่องจากวิธีเกษตรกรใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราต่ำ ในขณะที่ ความเข้มข้นในดินอยู่ในช่วงขาดแคลน ชี้ให้เห็นว่าขมิ้นชันมีการตอบสนองต่อการปรับสมดุลของธาตุอาหารในดิน โดยการเพิ่มปริมาณโพแทสเซียม สำหรับการสะสมแคลเซียม ในตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราต่ำตามวิธีเกษตรกร และการใช้ปุ๋ยอัตราสูง 36 กับ 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ มีการสะสมแคลเซียมสูงสุด 1.90, 2.00 และ 2.05 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 9a) แสดงให้เห็นถึง ความแปรปรวนต่อการตอบสนองต่อธาตุอาหาร อาจเนื่องจากอิทธิพลของธาตุอาหารชนิดหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดใช้ธาตุอาหารชนิดอื่นโดยอ้อม ซึ่งมีความซับซ้อน สอดคล้องกับผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแคลเซียมกับไนโตรเจนในเหง้าขมิ้นชัน พบว่า เป็นไปในลักษณะเส้นโค้ง (ภาพที่ 10a) ส่วนความเข้มข้นแมกนีเซียมและกำมะถันมีแนวโน้มเพิ่มตามอัตราปุ๋ยไนโตรเจน พบความเข้มข้นสูงสุด 3.65 และ 0.65 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในตำรับการทดลองที่ใช้ปุ๋ยอัตราสูง 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ (ภาพที่ 9a-9b) อาจเนื่องจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนส่งเสริมการดูดใช้ฟอสฟอรัสมาสะสมในเหง้าขมิ้นชัน ทั้งนี้ พบความเข้มข้นฟอสฟอรัสสูงสุด 0.75 และ 0.93 กรัมต่อกิโลกรัม ในตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอัตราสูง 36 และ 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ ตามลำดับ (ภาพที่ 9b) ชี้ให้เห็นว่า ธาตุทั้งสองมีแนวโน้มอยู่ในสภาวะที่เสริมฤทธิ์กัน (ภาพที่ 10b) ซึ่งจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับแมกนีเซียม (ภาพที่ 10c) และกำมะถัน (ภาพที่ 10d) พบว่า มีความสัมพันธ์เชิงบวก เมื่อปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจากอันตรกิริยาเชิงบวกของปุ๋ยไนโตรเจน จึงชักนำให้มีการดูดใช้แมกนีเซียมและกำมะถันเพิ่มตาม โดยฟอสฟอรัสทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของรูปพลังงานที่ใช้ในกระบวนเมแทบอลิซึมของพืช (ยงยุทธ, 2552) แมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์เช่นเดียวกับไนโตรเจน (Senbayram *et al.,* 2015) ส่วนกำมะถันเป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโนในโครงสร้างของโปรตีน (Droux, 2004) มีรายงาน การเพิ่มแมกนีเซียมอย่างเพียงพอในดินที่ขาดแคลนไนโตรเจน ส่งผลให้การดูดใช้ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากแมกนีเซียมถูกเคลื่อนย้ายจากแหล่งสร้าง (source) ในส่วนของใบ ไปยังแหล่งสะสม (sink) ช่วยให้รากเจริญเติบโตได้ดี จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดใช้ไนโตรเจน อีกทั้ง แมกนีเซียมช่วยเพิ่มกระบวนการสังเคราะห์แสงและช่วยเคลื่อนย้ายกรดอะมิโนไปยังส่วนที่เกี่ยวข้อง (Senbayram *et al.,* 2015) แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ในบทบาทเชิงสรีรวิทยาของกลุ่มธาตุดังกล่าว สำหรับความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส (ภาพที่ 9c) สังกะสี และทองแดง (ภาพที่ 9d) พบว่า มีความเข้มข้นลดลงอย่างเด่นชัด ในตำรับการทดลองที่ใช้ปุ๋ยอัตราสูง โดยเฉพาะกรณีของแมงกานีส มีความเข้มข้น 1,430, 1,361, 1,440 และ 1,043 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อมีการใช้ปุ๋ยในอัตรา 18, 27, 36 และ 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ ตามลำดับ ต่ำกว่าวิธีเกษตรกร ซึ่งมีความเข้มข้นแมงกานีส 1,980 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 9c) ทั้งนี้ ความเข้มข้นที่เหมาะสมของแมงกานีสในพืชส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 20-300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Kalra, 1998) หากพืชมีการสะสมแมงกานีสสูงกว่าช่วงดังกล่าว จึงอาจเป็นพิษต่อเซลล์พืช และเป็นปัจจัยจำกัดผลผลิต มีรายงานแตงโมแสดงอาการเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้น

แมงกานีสในใบ 1,000-1,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Hue and Mai, 2002) อย่างไรก็ตาม ตำรับการทดลองที่ใช้ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูง มีความเข้มข้นแมงกานีสในเหง้าลดลง เนื่องจากไนโตรเจนจากปุ๋ยเกิดอันตรกิริยาเชิงลบกับแมงกานีสในดิน ส่งผลให้ต้นขมิ้นชันสามารถลดการดูดใช้แมงกานีสได้ ส่วนความเข้มข้นสังกะสีและทองแดง มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกับปริมาณแมงกานีส (ภาพที่ 10e-10f) เนื่องจากเป็นกลไกการตอบสนองของพืชในกระบวนการสร้างสารต้านออกซิเดชัน เพื่อลดสภาวะเครียดที่เกิดจากแมงกานีส ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีสังกะสีและทองแดงเป็นองค์ประกอบ (Li *et al.*, 2017) จากผลการตอบสนองของปุ๋ยไนโตรเจนต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในเหง้าขมิ้นชันโดยรวม แสดงให้เห็นว่า ในบางครั้งบทบาทของธาตุอาหารที่เพิ่มในดินไม่ได้มีผลต่อการตอบสนองต่อพืชโดยตรง แต่ไปเกี่ยวข้องกับบทบาทหน้าที่หรือความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารชนิดอื่นโดยอ้อม ทั้งบทบาทในเชิงบวกและเชิงลบ ซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาหรือกระบวนการทางชีวเคมีของพืช ดังนั้น การสร้างความสมดุลของธาตุอาหารจึงเป็นสิ่งสำคัญ



ภาพที่ 9 ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ P_2O_5-K_2O-CaO-MgO-S อัตรา 11-50-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน



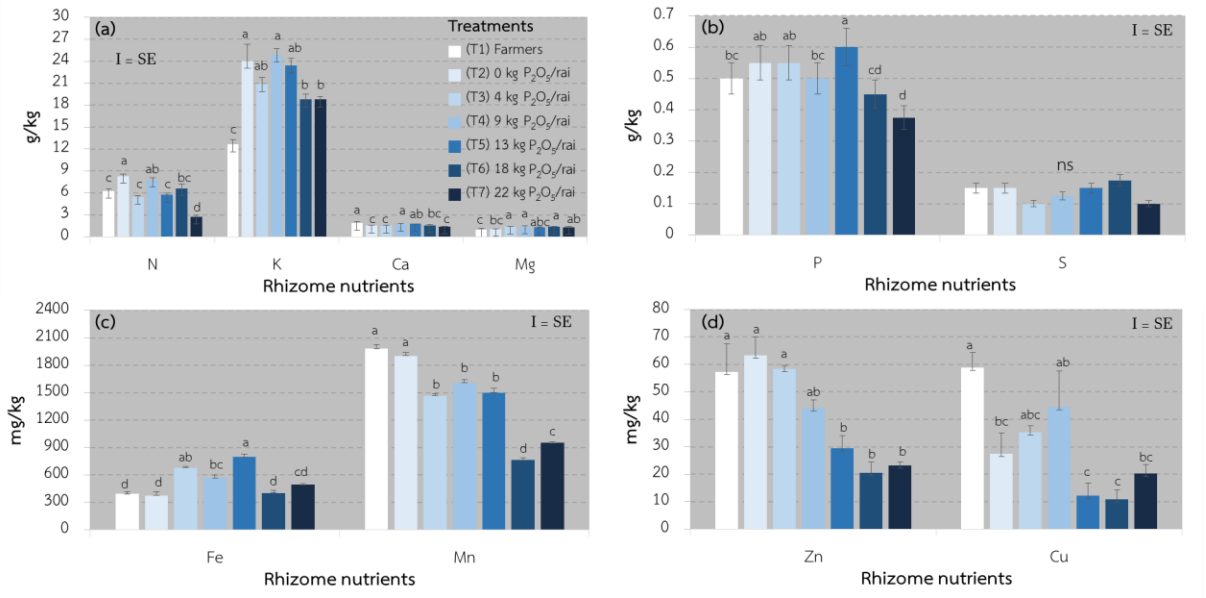
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนกับแคลเซียม (a) และฟอสฟอรัส (b) ความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับแมกนีเซียม (c) และกำมะถัน (d) รวมถึงความเข้มข้นแมงกานีสกับสังกะสี (e) และทองแดง (f) ในเหง้าขมิ้นชัน

4.2 ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในเหง้าขมิ้นชัน

จากการศึกษาผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อการสะสมธาตุอาหารในเหง้าขมิ้นชัน ช่วงระยะเก็บเกี่ยวผลผลิต พบว่า การดูดใช้ไนโตรเจนมีความแปรปรวน ตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสส่งผลให้ต้นขมิ้นชันดูดใช้ไนโตรเจนมาสะสมในเหง้าสูงสุด 8.28 กรัมต่อกิโลกรัม ไม่แตกต่างกับการใช้ปุ๋ยอัตรา 9 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ มีการสะสมไนโตรเจน 7.78 กรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ การใช้วิธีเกษตรกร และการใช้ปุ๋ยอัตรา 4, 13 และ 18 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ไม่มีความแตกต่างของการสะสมไนโตรเจน แต่เมื่อเพิ่มปุ๋ยฟอสฟอรัสเป็น 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ส่งผลให้การดูดใช้ไนโตรเจนลดลง (ภาพที่ 11a) ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นอาจเนื่องจากอิทธิพลของความสมดุลของฟอสฟอรัสกับธาตุอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับบทบาทหน้าที่ของไนโตรเจน สอดคล้องกับ ลักษณะ

ความสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสกับไนโตรเจนในเหง้าขมิ้นชันที่เป็นไปในลักษณะเส้นโค้ง (ภาพที่ 10b) ส่วนโพแทสเซียม การใส่ปุ๋ยวิธีเกษตรกร ส่งผลให้มีการสะสมโพแทสเซียม ต่ำกว่า ตำรับการทดลองอื่น ทุกตำรับการทดลอง (ภาพที่ 11a) เนื่องจากวิธีเกษตรกรใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราต่ำ ในขณะที่ ระดับในดินอยู่ในช่วงขาดแคลน ชี้ให้เห็นว่า ขมิ้นชันมีการตอบสนองต่อการเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมจากตำรับการทดลองที่มีการปรับสมดุลธาตุอาหารในดิน อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นโพแทสเซียมเริ่มลดลงในตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูง 18 และ 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ (ภาพที่ 11a) อาจเนื่องจากเป็นขีดจำกัดการตอบสนองต่อฟอสฟอรัสของต้นขมิ้นชันจึงลดการดูดใช้โพแทสเซียม ทั้งนี้ ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบของพลังงานที่ใช้การสังเคราะห์และเคลื่อนย้ายโมเลกุลต่าง ๆ ภายในเซลล์พืช ส่วนโพแทสเซียมทำหน้าที่ลำเลียงสารที่ได้ไปยังส่วนที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะการลำเลียงแป้งและน้ำตาลไปสะสมบริเวณผลผลิต ธาตุทั้งสองจึงมีบทบาทส่งเสริมกัน (Rietra *et al.,* 2017) สอดคล้องกับ ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ลดลง อยู่ในช่วงต่ำสุด 0.45 และ 0.38 กรัมต่อกิโลกรัม หลังใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราดังกล่าว ตามลำดับ ในขณะที่ การใช้ปุ๋ย 13 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ส่งผลให้มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในเหง้าสูงกว่าวิธีเกษตรกร 0.60 และ 0.50 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 11b) สำหรับแคลเซียม พบว่า มีการสะสมสูงสุด 1.90 และ 1.78 กรัมต่อกิโลกรัม ในตำรับการทดลองที่ใช้วิธีเกษตรกรและใส่ปุ๋ยอัตรา 9 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราปุ๋ยมากว่า 18 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ทำให้การสะสมแคลเซียมลดลงเหลือ 1.38 กรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 11a) ชี้ให้เห็นถึง ผลกระทบจากขีดจำกัดการตอบสนองต่อฟอสฟอรัสเช่นเดียวกับกรณีของโพแทสเซียม ส่วนแมกนีเซียม ในตำรับการทดลองที่ใช้วิธีเกษตรกร มีความเข้มข้นต่ำ 0.98 กรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองอื่น โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ย 4, 9 และ 18 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ส่งผลให้มีการสะสมแมกนีเซียมในเหง้าสูงสุด 1.35, 1.38 และ 1.38 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 11a) ทั้งนี้ ความเข้มข้นฟอสฟอรัสและแมกนีเซียมในเหง้าขมิ้นชันมีความสัมพันธ์เชิงบวก (ภาพที่ 10c) อาจเนื่องจากตามบทบาทหน้าที่ในกระบวนเมแทบอลีซึม แมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ ซึ่งจำเป็นในกระบวนการสังเคราะห์แสง ถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการเมแทบอลิซึมระดับเซลล์ ในขณะที่ ฟอสฟอรัสเป็นส่วนของพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการดังกล่าว นอกจากนี้ แมกนีเซียมทำหน้าที่กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์คิเนส ซึ่งเร่งปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่ฟอสเฟตจาก ATP ไปยังโมเลกุลของสารอื่น (ยงยุทธ, 2552) การดูดใช้ธาตุทั้งสองจึงมีส่วนส่งเสริมกัน ประกอบกับการเพิ่มฟอสฟอรัสในดินจะไปช่วยจับกับเหล็กและแมงกานีสอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อยลง จึงช่วยลดอันตรกิริยาเชิงลบที่มีผลยับยั้งการดูดใช้แมกนีเซียม (สุทธิ์เดชา และคณะ, 2563) มีผลให้ต้นขมิ้นชันสามารถดูดใช้แมกนีเซียมได้เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับความเข้มข้นเหล็กและแมงกานีสในเหง้าขมิ้นชัน พบว่า การใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูง ส่งผลให้การดูดใช้เหล็กและแมงกานีสมาสะสมในเหง้าลดลงอย่างเด่นชัด โดยเฉพาะกรณีของแมงกานีส การใช้ปุ๋ย 18 และ 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ส่งผลให้มีความเข้มข้น

แมงกานีส 761 และ 951 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ต่ำกว่าตำรับการทดลองอื่นอย่างเด่นชัด (ภาพที่ 11c) ชี้ให้เห็นว่า ในพื้นที่ดินกรดซึ่งมีปัญหาความเป็นพิษจากแมงกานีส การเพิ่มปุ๋ยฟอสฟอรัส นอกจากจะใช้เป็นแหล่งของฟอสฟอรัสแก่พืชแล้ว ยังสามารถช่วยลดการดูดใช้แมงกานีสได้อีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราสูงเกินไปมีผลลดการเคลื่อนย้ายสังกะสีและทองแดงมาสะสมในเหง้า สามารถเห็นได้อย่างเด่นชัด ในตำรับการทดลองที่ใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในช่วง 13-22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ พบว่า มีความเข้มข้นสังกะสีและทองแดงต่ำสุดอยู่ในช่วง 20.50-29.50 และ 10.75-20.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 11d) สาเหตุอาจเนื่องจากสังกะสีเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดีสมิวเทสที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนไปเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อลดสภาวะเครียดของต้นขมิ้นชันที่เกิดจากแมงกานีส ส่วนทองแดงเข้าร่วมในปฏิกิริยาดังกล่าวโดยตรง (ยงยุทธ, 2559) ความเข้มข้นของธาตุทั้งสองจึงผันแปรตามความเข้มข้นของแมงกานีสที่ลดลง ซึ่งได้รับอิทธิพลจากปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใส่ ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มธาตุอาหารในดินต้องคำนึงถึงผลเชิงลบที่อาจกระทบต่อบทบาทหน้าที่ของธาตุอาหารชนิดอื่น

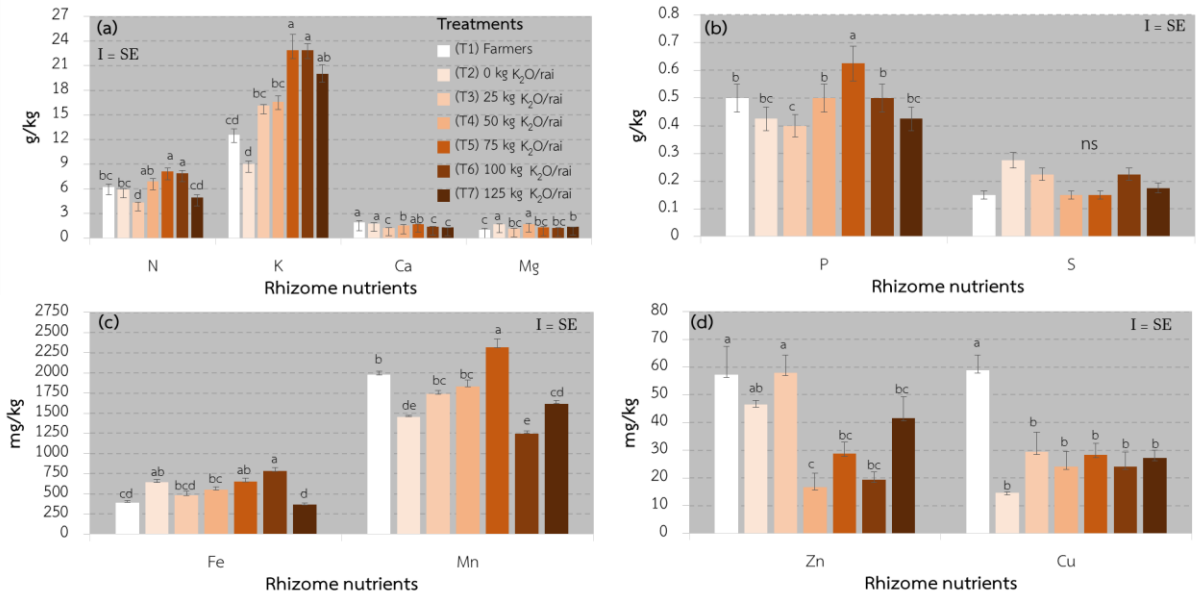


ภาพที่ 11 ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-K_2O-MgO-S อัตรา 23-50-1.4-0.8 กิโลกรัมต่อไร่เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

4.3 ผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อความเข้มข้นธาตุอาหารในเหง้าขมิ้นชัน

จากการศึกษาผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อการสะสมธาตุอาหารในเหง้าขมิ้นชัน ช่วงระยะเก็บเกี่ยวผลผลิต พบว่า การสะสมโพแทสเซียมในเหง้าขมิ้นชันเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่ใส่ โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ยอัตราสูงกว่า 50 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ส่งผลให้มีความเข้มข้นโพแทสเซียมในเหง้าอยู่ในช่วง 20.00-22.88 กรัมต่อกิโลกรัม สูงกว่าวิธีเกษตรกร ที่มีความเข้มข้น 12.63 กรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 12a) ชี้ให้เห็นถึง การตอบสนองของต้นขมิ้นชันในเชิงบวก การใช้วิธีเกษตรกรซึ่งใส่โพแทสเซียมต่ำ จึงอาจไม่เหมาะสำหรับดินที่ขาดแคลน เนื่องจากโพแทสเซียมทำหน้าที่ลำเลียงแป้งและน้ำตาลไปสร้างผลผลิต อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นมีผลให้การสะสมแคลเซียมและแมกนีเซียมในเหง้าขมิ้นชันลดลง (ภาพที่ 12a) เช่นเดียวกับกรณีของความเข้มข้นในใบ เนื่องจากการเป็นปฏิปักษ์ต่อกันของธาตุอาหาร นอกจากนี้ พบว่า ความเข้มข้นของไนโตรเจน (ภาพที่ 12a) และเหล็ก (ภาพที่ 12c) เริ่มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมที่ระดับ 125 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ส่วนสังกะสี (ภาพที่ 12d) และฟอสฟอรัส (ภาพที่ 12c) มีความเข้มข้นลดลงเมื่อใส่ปุ๋ยอัตรา 50 และ 100 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ตามลำดับ ในขณะที่ การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในทุกอัตรา ส่งผลให้ความเข้มข้นทองแดงในเหง้า อยู่ในช่วง 14.75-29.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต่ำกว่า วิธีเกษตรกรอย่างเด่นชัด 58.75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 12d) ทั้งที่ สังกะสีและทองแดงในใบ มีแนวโน้มสะสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียม แสดงให้เห็นว่าโพแทสเซียมมีอันตรกิริยาเชิงบวกต่อการดูดธาตุทั้งสองมาสะสมในใบ เนื่องจากมีบทบาทช่วยลดความเครียดที่เกิดจากแมงกานีส ในขณะที่ เป็นปฏิปักษ์ต่อการเคลื่อนย้ายธาตุทั้งสองไปสะสมในเหง้า อาจเพราะมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายภายในเซลล์ต่ำกว่าโพแทสเซียม ดังนั้น การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมสำหรับขมิ้นชันควรระวังผลกระทบเชิงลบที่อาจมีผลยับยั้งการเคลื่อนย้ายสังกะสีและทองแดงภายในเซลล์ ส่วนอิทธิพลต่อความเข้มข้นแมงกานีส (ภาพที่ 12c) ยังไม่มีความชัดเจน เห็นได้จาก เหง้าขมิ้นชันมีการสะสมแมงกานีสเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยโพแทสเซียม โดยแมงกานีสมีบทบาทในการสังเคราะห์โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต (ยงยุทธ, 2552) มีรายงานเหง้าขมิ้นชันมีการสะสมคาร์โบไฮเดรต ประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ (Nelson *et al.*, 2017) แมงกานีสจึงเพิ่มขึ้นตามระดับโพแทสเซียม ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงสารต่าง ๆ มาสะสมในเหง้า อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นแมงกานีสลดลง เมื่อมีการใส่ปุ๋ยในอัตรา 100 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ เนื่องจากความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่สูงเกินไปมีผลเหนี่ยวนำให้พืชดูดแมงกานีสได้น้อยลง จากผลการทดลองในภาพรวม แสดงให้เห็นว่า การตอบสนองระหว่างธาตุอาหารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ค่อนข้างสลับซับซ้อน การศึกษาผลของอันตรกิริยาจากการใช้ปุ๋ยจึงเป็นสิ่งจำเป็น



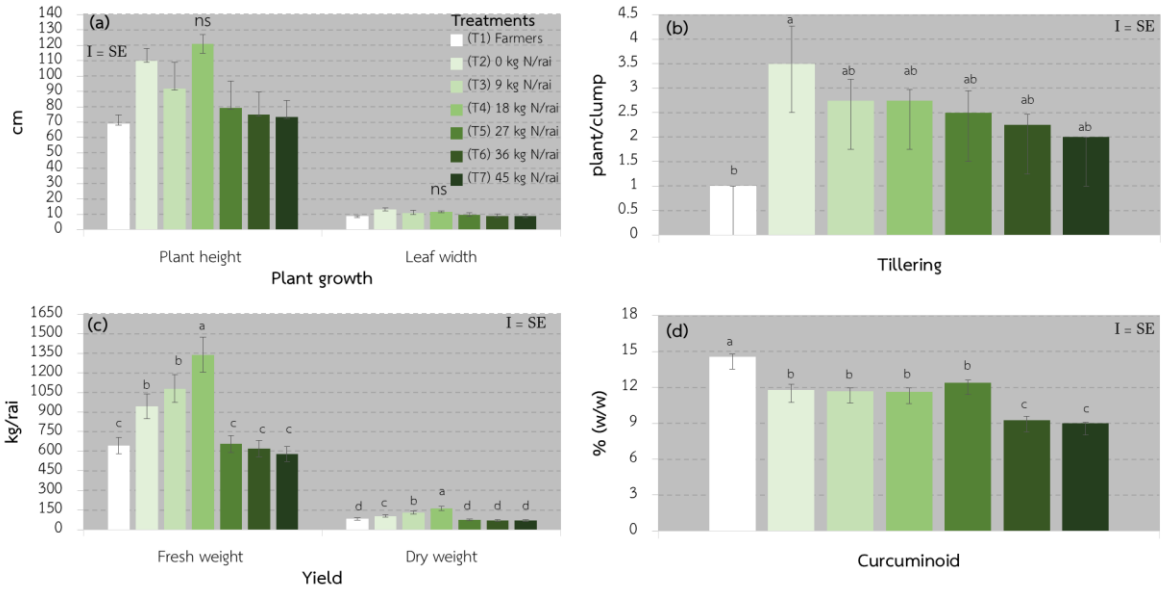
ภาพที่ 12 ผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อความเข้มข้น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (a) ฟอสฟอรัส และกำมะถัน (b) เหล็ก และแมงกานีส (C) สังกะสี และทองแดง (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-P_2O_5-CaO-MgO-S อัตรา 23-11-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

5. ผลของอัตราปุ๋ยธาตุอาหารหลักต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตขมิ้นชัน

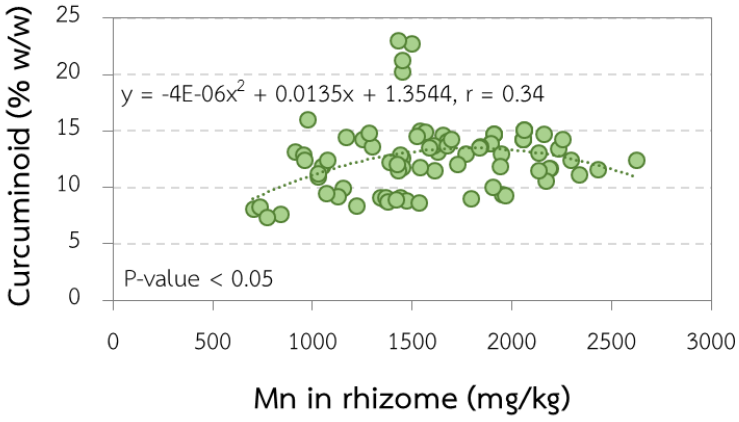
5.1 ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตขมิ้นชัน

ผลประเมินการเจริญเติบโตและผลผลิตขมิ้นชัน จากการทดสอบอัตราปุ๋ยไนโตรเจนเปรียบเทียบกับวิธีใช้ปุ๋ยของเกษตรกร พบว่า ความสูงของต้น และความกว้างของใบ ในทุกตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ อย่างไรก็ตาม การใช้ปุ๋ยอัตรา 18 กิโลกรัม N ต่อไร่ มีแนวโน้มส่งผลให้ต้นขมิ้นชันมีการเจริญเติบโตทางด้านความสูง ดีกว่าวิธีเกษตรกร แต่เมื่อมีการเพิ่มอัตราปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอีก ส่งผลให้ความสูงของต้นขมิ้นชันและความกว้างใบลดลง (ภาพที่ 13a) เนื่องจากไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นไปลดการดูดใช้ทองแดงของต้นขมิ้นชัน โดยเฉพาะการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงสุด 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ ส่งผลให้มีความเข้มข้นทองแดงในใบขมิ้นชันน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 4c) ซึ่งจัดอยู่ในช่วงขาดแคลน (Kalra, 1998) จึงเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโตของต้นขมิ้นชัน ส่วนการแตกกอ พบว่า การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนทุกอัตรา การแตกกอไม่มีความแตกต่างกัน อยู่ในช่วง 2.0-3.5 ต้นต่อกอ แต่มีแนวโน้มสูงกว่า การใช้วิธีเกษตรกร (ภาพที่ 13b) นอกจากนี้ พบว่า การใช้ปุ๋ยอัตรา 18 กิโลกรัม N ต่อไร่ ส่งผลให้ได้ผลผลิตน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงสุด 1,339 และ 160.72 กิโลกรัมต่อไร่ ในขณะที่ วิธี

เกษตรกร ให้ผลผลิตน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งต่ำกว่า 644 และ 82.05 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ (ภาพที่ 13c) ทั้งนี้ เป็นเพราะไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นช่วยลดการดูดใช้แมงกานีส (ภาพที่ 9c) ซึ่งเป็นพิษกับพืชหากมีความเข้มข้นสูงเกินไป อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปุ๋ยไนโตเจนมากกว่า 18 กิโลกรัม N ต่อไร่ ส่งผลให้ผลผลิตน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งลดลง อยู่ในช่วง 579-656 และ 68.09-72.21 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ (ภาพที่ 13b) สอดคล้องกับลักษณะการเจริญเติบโต เนื่องจากอิทธิพลของไนโตรเจนที่สูงเกินไป ยับยั้งการดูดใช้ทองแดงจึงเป็นสาเหตุจำกัดผลผลิต ส่วนความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ พบว่า การใช้วิธีเกษตรกร มีความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์สูงสุด 14.52 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่า การใส่ปุ๋ยในช่วง 0-27 กิโลกรัม N ต่อไร่ ซึ่งมีความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ของเหง้าขมิ้นชัน ไม่แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 11.63-12.39 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 13d) อาจเนื่องจากวิธีเกษตรกรต้นขมิ้นชันมีการดูดแมงกานีสไปสะสมในปริมาณสูงกว่าตำรับการทดลองอื่น เพราะไม่มีธาตุที่เป็นปฏิปักษ์ ที่สามารถไปแก่งแย่งกับแมงกานีสได้เพียงพอ ส่งผลให้ต้นขมิ้นชันอยู่ในสภาวะเครียด จึงผลิตสารเคอร์คูมินอยด์ออกมาสูง สอดคล้องกับผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแมงกานีสกับสารเคอร์คูมินอยด์ในเหง้าขมิ้นชัน พบว่า มีความสัมพันธ์เชิงบวกในลักษณะเส้นโค้ง (ภาพที่ 14) ซึ่งโดยธรรมชาติสารสำคัญในพืชมักถูกสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นกลไกป้องกันอันตรายจากสิ่งเร้า เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม สำหรับต้นขมิ้นชัน มีความเป็นไปได้ว่า แมงกานีสที่ถูกดูดมาสะสมในใบและเหง้าเกินความจำเป็น ชักนำให้เซลล์เกิดสภาวะเครียดออกซิเดทีฟ (oxidative stress) (Panda *et al.,* 1987) โดยโมเลกุลของออกซิเจนภายในเซลล์ ซึ่งไวต่อปฏิกิริยาจะรับอิเล็กตรอนจากแมงกานีส เกิดเป็นสารอนุมูลอิสระออกซิเจนรีแอกทีฟ (reactive oxygen species, ROS) ได้แก่ ซูเปอร์ออกไซด์ อนุมูลไฮดรอกซิล ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และอนุมูลอิสระอื่น ๆ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดอย่างต่อเนื่องไม่สามารถควบคุมได้ จนทำให้เซลล์ได้รับความเสียหาย มีผลให้พืชอยู่ในสภาวะอ่อนแอ (Huang *et al.,* 2016) ต้นขมิ้นชันจึงเร่งผลิตสารเคอร์คูมินอยด์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยป้องกันไม่ให้เซลล์ถูกทำลาย สอดคล้องกับรายงานการใช้สารเคอร์คูมินอยด์สามารถลดการอักเสบของตับในหนูที่ติดพยาธิใบไม้ตับเรื้อรัง (สุดารัตน์ และคณะ, 2555) นอกจากนี้ เคอร์คูมินอยด์ ยังมีกลิ่นหอมระเหย ซึ่งน่าจะมีบทบาทช่วยไล่แมลงศัตรูที่จะเข้ากัดกินในยามที่ต้นขมิ้นชันอ่อนแอ ดังนั้น แนวทางการผลิตขมิ้นชันที่มีสารเคอร์คูมินอยด์สูง อาจศึกษาการปลูกขมิ้นชันในบริเวณที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ปกติ เช่น พื้นที่ เป็นกรด ด่าง หรือเค็ม ในช่วงระดับแตกต่างกัน สำหรับเป็นแนวทางกระตุ้นให้ต้นขมิ้นชันสร้างสารเคอร์คูมินอยด์ได้มากขึ้น



ภาพที่ 13 ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจนต่อความสูงต้น ความกว้างใบ (a) และการแตกกอ (b) ของต้นขมิ้นชัน รวมถึง ผลผลิตน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง (C) และความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ P_2O_5-K_2O-CaO-MgO-S อัตรา 11-50-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

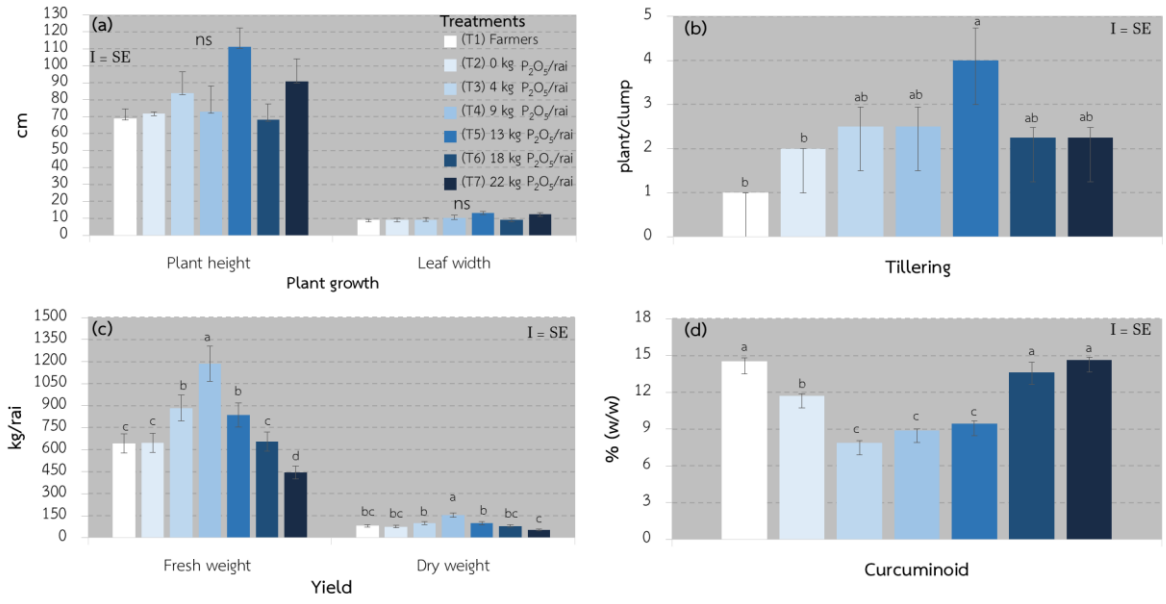


ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแมงกานีสกับสารเคอร์คูมินอยด์ในเหง้าขมิ้นชัน

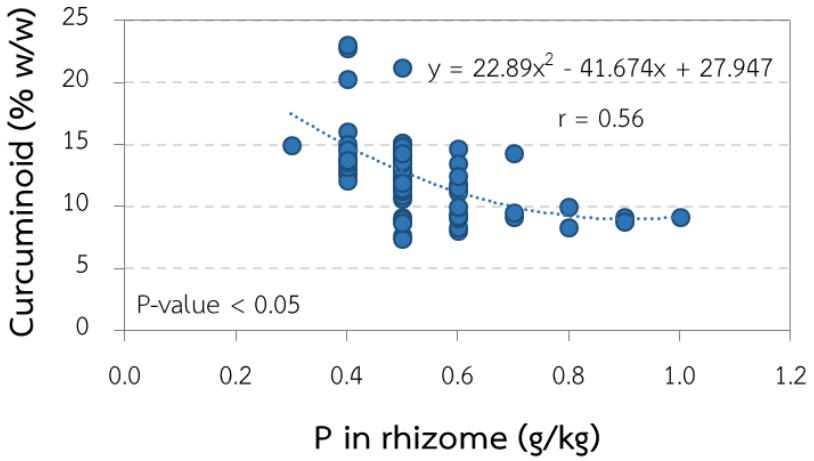
5.2 ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตขมิ้นชัน

ผลประเมินการเจริญเติบโตและผลผลิตขมิ้นชัน จากการทดสอบอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสเปรียบเทียบกับของเกษตรกร พบว่า ความสูงของต้น และความกว้างของใบ ในทุกตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ อย่างไรก็ตาม การใช้ปุ๋ยอัตรา 13 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ มีแนวโน้มส่งผลให้ต้นขมิ้นชันมีการเจริญเติบโตสูงกว่าวิธีเกษตรกร เมื่อพิจารณาจากความสูงต้น และความกว้างใบ แต่เมื่อมีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นอีก ส่งผลให้ความสูงของต้นขมิ้นชันและความกว้างใบลดลง (ภาพที่ 15a) ชี้ให้เห็นถึง ขีดจำกัดในการตอบสนองต่อปุ๋ยฟอสฟอรัส เนื่องจากผลกระทบเชิงลบในทางอ้อม ต่อการลดการดูดใช้ แคลเซียมกับโพแทสเซียม จากการเพิ่มการดูดใช้สังกะสี (ภาพที่7a-7c) ส่วนการแตกกอ พบว่า ตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราต่าง ๆ ส่งผลให้ต้นขมิ้นชันมีแนวโน้มแตกกอ สูงกว่าวิธีเกษตรกร โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ย 13 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ มีการแตกกอสูงสุด 4.0 ต้นต่อกอ (ภาพที่ 15b) นอกจากนี้ เมื่อประเมินผลผลิต พบว่า การใช้ปุ๋ยอัตรา 9 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ส่งผลให้ได้ผลผลิตน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงสุด 1,186 และ 154.14 กิโลกรัมต่อไร่ ในขณะที่ วิธีเกษตรกร ให้ผลผลิตน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งต่ำกว่า 644 และ 82.05 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ (ภาพที่ 15c) และเมื่อเพิ่มปริมาณปุ๋ยมากกว่า 9 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ส่งผลให้ผลผลิตลดลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการเจริญเติบโต ที่ได้รับอิทธิพลจากการถูกจำกัด ปริมาณดูดใช้แคลเซียมและโพแทสเซียมโดยอ้อม ทั้งนี้ แคลเซียมเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ สร้างความแข็งแรงให้แก่ต้นพืชและส่วนของราก หากต้นและรากไม่แข็งแรง จึงกระทบต่อการดูดน้ำและธาตุอาหาร ส่วนโพแทสเซียมทำหน้าที่ลำเลียงแป้งและน้ำตาลไปสร้างผลผลิต (ยงยุทธ, 2552) การได้รับโพแทสเซียมไม่เพียงพอจึงลดผลผลิตโดยตรง ส่วนความเข้มข้นของสารเคอร์คูมินอยด์ พบว่า เมื่อความเข้มข้นฟอสฟอรัสในเหง้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณสารเคอร์คูมินอยด์ลดลง (ภาพที่ 16) การใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูง 18 และ 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ กับวิธีเกษตรกร มีความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์สูงสุด ไม่แตกต่างกันทางสถิติ 13.67, 14.66 และ 14.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 15d) ในขณะที่ การใช้ปุ๋ยอัตรา 4, 9 และ 13 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ส่งผลให้ปริมาณเคอร์คูมินอยด์ลดลง อยู่ในช่วงต่ำ 7.88, 8.91 และ 9.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 15d) ทั้งนี้ อาจเนื่องจาก ตำรับการทดลองดังกล่าว ลดความเครียดจากการขาดฟอสฟอรัสโดยตรง และชักนำให้ต้นขมิ้นชันดูดแมงกานีสน้อยลงจากอำนาจปฏิปักษ์ของธาตุอาหารจากปุ๋ยที่ใส่ จึงลดสภาวะเครียดที่เกิดจากพิษแมงกานีส การผลิตสารเคอร์คูมินอยด์จึงลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปุ๋ยฟอสฟอรัสมากกว่า 13 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ สามารถชักนำให้ได้สารเคอร์คูมินอยด์เพิ่มขึ้นอีกครั้ง อาจเป็นเพราะต้นขมิ้นชันเกิดสภาวะเครียดจากปัจจัยอื่น เช่น การได้รับสังกะสีและทองแดงไม่เพียงพอ สอดคล้องกับ ความเข้มข้นสังกะสีและทองแดงในเหง้าขมิ้นชันของตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตราสูง พบว่า มีการสะสมสังกะสีและทองแดงต่ำกว่าตำรับการทดลองอื่นอย่างเด่นชัด (ภาพที่ 11d) โดยทองแดงเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ที่ใช้ในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ ส่วน

สังกะสีเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ในกระบวนการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรต เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานสำหรับใช้ในกระบวนการภายในของพืช (Hafeez *et al.*, 2013) เมื่อต้นขมิ้นชันขาดธาตุทั้งสองชนิด ส่งผลให้อยู่ในสภาวะเครียด เพื่อป้องกันไม่ให้เซลล์ได้รับความเสียหายจึงผลิตสารเคอร์คูมินอยด์ออกมาลดสภาวะดังกล่าว จากผลการทดลอง ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มปุ๋ยในอัตราที่เหมาะสมสามารถเพิ่มผลผลิตขมิ้นชันในเชิงปริมาณ แต่มีผลลดความเข้มข้นสารเคอร์คูมินอยด์ต่อหน่วยน้ำหนัก เนื่องจากการใส่ปุ๋ยไปลดสภาวะเครียดของพืช อย่างไรก็ตาม เมื่อประเมินปริมาณสารสำคัญที่ได้ต่อหน่วยพื้นที่จากผลผลิต จะได้ปริมาณสารเคอร์คูมินอยด์สูงกว่าวิธีที่ใช้ปุ๋ยไม่เหมาะสม เช่น เมื่อเปรียบเทียบวิธีที่ได้ผลผลิตน้ำหนักแห้งสูงสุดกับวิธีเกษตรกร ซึ่งให้ผลผลิตน้ำหนักแห้ง 154.14 และ 82.05 กิโลกรัมต่อไร่ และมีสารเคอร์คูมินอยด์เข้มข้น 8.91 และ 14.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่า ตำรับการทดลองที่ได้ผลผลิตน้ำหนักแห้งสูงจะให้ผลผลิตเคอร์คูมินอยด์ต่อไร่ 13.73 กิโลกรัม สูงกว่าวิธีเกษตรกร 11.92 กิโลกรัมต่อไร่ ถึงแม้จะมีความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ต่อหน่วยน้ำหนักต่ำกว่า ดังนั้น การใช้ปุ๋ยในอัตราที่เหมาะสมจึงยังเป็นแนวทางที่เกษตรกรควรยึดถือปฏิบัติเพราะจะช่วยเพิ่มปริมาณและคุณภาพผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่



ภาพที่ 15 ผลของอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อความสูงต้น ความกว้างใบ (a) และการแตกกอ (b) ของต้นขมิ้นชัน รวมถึง ผลผลิตน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง (C) และความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-K_2O-MgO-S อัตรา 23-50-1.4-0.8 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

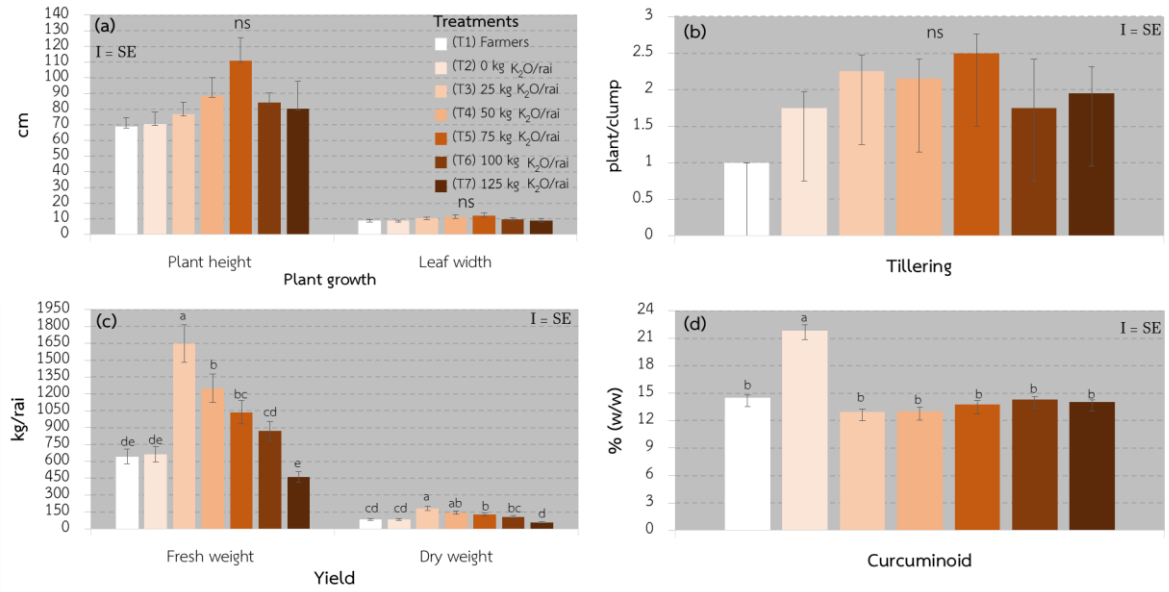


ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสกับสารเคอร์คูมินอยด์ในเหง้าขมิ้นชัน

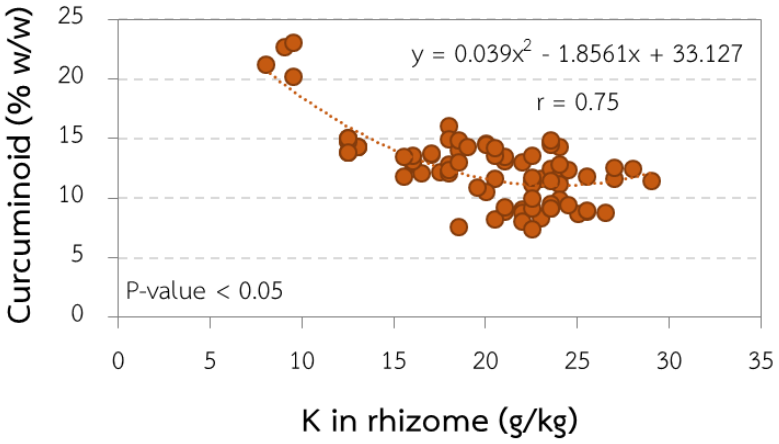
5.3 ผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตขมิ้นชัน

จากผลประเมินการเจริญเติบโตและผลผลิตขมิ้นชัน จากการทดสอบอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมเปรียบเทียบกับของเกษตรกร พบว่า ความสูงของต้น ความกว้างของใบ (ภาพที่ 17a) และการแตกกอ (ภาพที่ 17b) ในทุกตำรับการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยโพแทสเซียม แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ทั้งนี้ การใช้ปุ๋ยอัตรา 50 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ มีแนวโน้มส่งผลให้ต้นขมิ้นชันมีการเจริญเติบโตสูงกว่าวิธีเกษตรกร เมื่อพิจารณาจากความสูงต้น ความกว้างใบ และการแตกกอ อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นอีก ส่งผลให้การเจริญเติบโตของต้นขมิ้นชันลดลง ชี้ให้เห็นถึง ขีดจำกัดในการตอบสนองต่อโพแทสเซียม อาจเนื่องจากโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นเป็นปฏิปักษ์ต่อการดูดใช้ธาตุอาหารชนิดอื่น โดยเฉพาะแคลเซียมและแมกนีเซียม (ภาพที่ 8a) พบว่า เมื่อใส่ปุ๋ยมากกว่า 25 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ส่งผลให้ความเข้มข้นแคลเซียมในใบลดลง อยู่ในระดับ ต่ำกว่า 10 กรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งจัดอยู่ในช่วงขาดแคลนสำหรับพืชทั่วไป ส่วนความเข้มข้นแมกนีเซียมในใบเริ่มลดลงอย่างเด่นชัด และอยู่ในช่วงขาดแคลน (Kalra, 1998) เมื่อใส่ปุ๋ยมากกว่า 50 และ 100 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ตามลำดับ โดยแคลเซียมทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ สร้างความแข็งแรงให้กับท่อลำเลียงน้ำและอาหารของต้นขมิ้นชัน ดังนั้น เมื่อผนังเซลล์ของท่อลำเลียงมีแคลเซียมไม่เพียงพอจึงกระทบต่อความสามารถในการดูดน้ำและธาตุอาหาร ความแข็งแรงของผนังเซลล์ยังช่วยให้ต้นขมิ้นชันต้านทานต่อการเข้าทำลายของเชื้อโรค มีรายงานการใช้ปูนเผา ซึ่งเป็นแหล่งของแคลเซียม อัตรา 800 กิโลกรัมต่อไร่ ช่วยแก้ปัญหาการเกิดโรคเหี่ยวของขมิ้นชัน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2551) ในขณะที่ แมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ เมื่อในใบมีความเข้มข้นต่ำ ทำให้มีผลต่อความสารถในการสังเคราะห์แสง ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสำหรับใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิต (ยงยุทธ, 2552) ดังนั้น เมื่อต้นขมิ้นชันขาดแคลเซียมและแมกนีเซียมจึงมีผลจำกัดการเจริญเติบโต

สอดคล้องกับปริมาณผลผลิต พบว่า การใช้ปุ๋ยอัตรา 50 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ส่งผลให้ได้ผลผลิตน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงสุด 1,648 และ 183.70 กิโลกรัมต่อไร่ ในขณะที่ วิธีเกษตรกร ให้ผลผลิตน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งต่ำกว่า 644 และ 82.05 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ (ภาพที่ 17c) และเมื่อเพิ่มปริมาณปุ๋ยมากกว่า 50 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ส่งผลให้ผลผลิตลดลง ตามลำดับ (ภาพที่ 17c) นอกจากนี้ เมื่อประเมินจากความเข้มข้นของสารเคอร์คูมินอยด์ในเหง้าขมิ้นชัน พบว่า ทุกตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมและวิธีเกษตรกร มีความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ไม่แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 12.98-14.30 เปอร์เซ็นต์ แต่ตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมมีความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์สูงสุด 21.80 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 17d) ชี้ให้เห็นว่า ปริมาณโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นมีผลยับยั้งการผลิตสารดังกล่าว สอดคล้องกับ ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโพแทสเซียมกับสารเคอร์คูมินอยด์ในเหง้าขมิ้นชัน พบว่า ปริมาณเคอร์คูมินอยด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นโพแทสเซียมเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 18) อาจเนื่องจากโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นไปลดความเครียดจากการขาดแคลนโพแทสเซียมโดยตรง การสังเคราะห์สารสำคัญในขมิ้นชันจึงลดลง หรือผลของสภาวะปฏิปักษ์ของโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้น ไปลดการดูดใช้แคลเซียมและแมกนีเซียมให้อยู่ในระดับขาดแคลน จึงส่งผลกระทบต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมในการสังเคราะห์สารเคอร์คูมินอยด์ ตามบทบาทหน้าที่ของธาตุทั้งสอง อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นคูเคอร์มินอยด์ที่มีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในทุกตำรับการทดลอง อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของตำรับยาสมุนไพรไทย ซึ่งกำหนดให้มีความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์จากเหง้าขมิ้นชันไม่น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ (Ministry of Public Health, 2009) ในขณะที่ การใส่ปุ๋ยที่ระดับ 25 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาเชิงลบต่อแคลเซียมและแมกนีเซียมต่ำ ทำให้ได้ผลผลิตน้ำหนักแห้งสูงสุด ดังนั้น การปลูกขมิ้นชันบริเวณที่มีปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ต่ำ อย่างชุดดินท่าแซะ ระดับปุ๋ยโพแทสเซียมที่เหมาะสม คือ 25 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ทั้งนี้ อาจสามารถเพิ่มผลผลิตขมิ้นชันได้อีก หากก่อนปลูกขมิ้นชัน มีการแก้ปัญหาความเป็นกรดของดิน เพื่อลดความเป็นพิษของแมงกานีส โดยการใส่โดโลไมท์ เพราะนอกจากช่วยยกระดับพีเอชดิน ยังช่วยเพิ่มปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งจะช่วยลดอันตรกิริยาเชิงลบที่เกิดจากโพแทสเซียม นอกจากนี้ ควรเพิ่มอินทรียวัตถุในดินเพื่อช่วยดูดซับน้ำและธาตุอาหารจากปุ๋ยที่ใส่ จึงควรศึกษาประเด็นดังกล่าวเพิ่มเติม



ภาพที่ 17 ผลของอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมต่อความสูงต้น ความกว้างใบ (a) และการแตกกอ (b) ของต้นขมิ้นชัน รวมถึง ผลผลิตน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง (C) และความเข้มข้นเคอร์คูมินอยด์ (d) ในเหง้าขมิ้นชัน T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-P_2O_5-CaO-MgO-S อัตรา 23-11-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$, HSD) SE = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโพแทสเซียมกับสารเคอร์คูมินอยด์ในเหง้าขมิ้นชัน

6. ข้อมูลเบื้องต้นของต้นทุนการผลิตและรายได้

6.1 ข้อมูลเบื้องต้นของต้นทุนการผลิตและรายได้จากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน

จากการประเมินต้นทุนอื่น ๆ ในการปลูกขมิ้นชันที่ยังไม่รวมต้นทุนจากการใช้ปุ๋ย ได้แก่ ค่าวัสดุเกษตร ค่าแรงงานในการเตรียมดิน ปลูก การดูแลรักษา กำจัดวัชพืช และการเก็บเกี่ยวผลผลิต ตลอดจนค่าเสียโอกาสเงินลงทุน ค่าเสื่อมราคาอุปกรณ์ โดยดัดแปลงวิธีการประเมินต้นทุนจากการผลิตหอมแดงของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พบว่า การปลูกขมิ้นชันมีต้นทุนอื่น ๆ ที่ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการใช้ปุ๋ย เท่ากับ 13,342 บาทต่อไร่ และเมื่อมีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราที่ต่างกันส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่ใส่ (ตารางที่ 2) การใช้วิธีเกษตรกร มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด 14,342 บาทต่อไร่ อย่างไรก็ตาม การใส่ปุ๋ยในอัตราที่เหมาะสม ส่งผลให้อัตราการเพิ่มผลผลิตสูงกว่าอัตราการเพิ่มของต้นทุน เห็นได้จาก การใส่ปุ๋ยในช่วง 0, 9 และ 18 กิโลกรัม N ต่อไร่ มีผลผลิต อยู่ในช่วง 946, 1,080 และ 1,339 กิโลกรัมต่อไร่ และมีต้นทุน 15,451, 15,730 และ 16,009 บาทต่อไร่ ตามลำดับ ในขณะที่ การใช้วิธีเกษตรกร ได้ผลผลิต 644 กิโลกรัมต่อไร่ และมีต้นทุนอยู่ 14,342 บาทต่อไร่ ต่ำกว่าตำรับการทดลองในข้างต้น แต่เมื่อประเมินรายได้จากการขายผลผลิตสดของเหง้าขมิ้นชัน ที่ราคาเฉลี่ยกิโลกรัมละ 30 บาท พบว่า วิธีเกษตรกรมีรายได้จากการขาย 19,308 บาท เมื่อหักต้นทุนการผลิต เหลือกำไร 4,966 บาทต่อไร่ ต่ำกว่า การใส่ปุ๋ยในช่วง 0, 9 และ 18 กิโลกรัม N ต่อไร่ ซึ่งมีรายได้จากการขายผลผลิตต่อไร่ 28,365, 32,403 และ 40,179 บาท และได้รับผลกำไร 12,914, 16,673 และ 24,170 บาท ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อประเมินจากอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C ratio) พบว่า การใส่ปุ๋ยอัตรา 18 กิโลกรัม N ต่อไร่ มีอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนสูงสุด เท่ากับ 2.51 แปลความหมายได้ว่า การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนตามตำรับการทดลองดังกล่าว จะทำให้ได้รับรายได้จากการขายผลผลิตเป็น 2.51 เท่า ของจำนวนเงินที่ลงทุนไป หรือเงินที่ลงทุนไป 1 บาท จะได้รับกำไร 1.51 บาท อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราปุ๋ยเป็น 27, 36 และ 45 กิโลกรัม N ต่อไร่ ส่งผลให้อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนลดลงเหลือ 1.21, 1.13 และ 1.03 ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากไนโตรเจนที่สูงเกินไป มีผลรบกวนความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารชนิดอื่น เช่น รบกวนการดูดใช้ทองแดง จากอำนาจการเป็นปฏิปักษ์ระหว่างกัน ส่งผลให้ผลผลิตลดลง ในขณะที่ ต้นทุนจากการใช้ปุ๋ยเพิ่มขึ้น ดังนั้น จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า อัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการปลูกขมิ้นชันในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ คือ 18 กิโลกรัม N ต่อไร่ ซึ่งจะส่งผลให้เกษตรกรได้รับผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจคุ้มค่าสุด อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า อัตราปุ๋ยไนโตรเจนสูงสุดที่ขมิ้นชันตอบสนองในดินที่ขาดแคลน คือ 18 กิโลกรัม N ต่อไร่ ดังนั้น ในบริเวณดินทั่วไปที่มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในช่วงปานกลาง สามารถลดอัตราปุ๋ยได้อีก ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรได้รับผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 2 ผลผลิต ต้นทุน และผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจจากการใช้อัตราปุ๋ยไนโตรเจนแตกต่างกันสำหรับขมิ้นชัน

Treatments	Yield (kg/rai)	[1/]Cost of production	[2/]Income	Profit	[3/]B/C ratio
	(kg/rai)	(Baht/rai)	(Baht/rai)	(Baht/rai)	
T1, Farmers	644	14,342	19,308	4,966	1.35
T2, 0 kg N/rai	946	15,451	28,365	12,914	1.84
T3, 9 kg N/rai	1,080	15,730	32,403	16,673	2.06
T4, 18 kg N/rai	1,339	16,009	40,179	24,170	2.51
T5, 27 kg N/rai	656	16,288	19,674	3,386	1.21
T6, 36 kg N/rai	621	16,567	18,641	2,074	1.13
T7, 45 kg N/rai	579	16,846	17,376	530	1.03

หมายเหตุ: T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ P_2O_5-K_2O-CaO-MgO-S อัตรา 11-50-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน [1/]ต้นทุนการผลิตอื่น ๆ ที่ยังไม่รวมค่าปุ๋ย = 13,342 บาทต่อไร่ [2/]ค่าเฉลี่ยราคาผลผลิตขมิ้นชันสด = 30 บาท/กิโลกรัม [3/]Benefit-cost ratio = Income/Cost of production

6.2 ข้อมูลเบื้องต้นของต้นทุนการผลิตและรายได้จากการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส

จากการประเมินต้นทุนอื่น ๆ ในการปลูกขมิ้นชันที่ยังไม่รวมต้นทุนจากการใช้ปุ๋ย ได้แก่ ค่าวัสดุเกษตร ค่าแรงงานในการเตรียมดิน ปลูก การดูแลรักษา กำจัดวัชพืช และการเก็บเกี่ยวผลผลิต ตลอดจนค่าเสียโอกาสเงินลงทุน ค่าเสื่อมราคาอุปกรณ์ โดยดัดแปลงวิธีการประเมินต้นทุนจากการผลิตหอมแดงของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พบว่า การปลูกขมิ้นชันมีต้นทุนอื่น ๆ ที่ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการใช้ปุ๋ย เท่ากับ 13,342 บาทต่อไร่ และเมื่อมีการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราที่ต่างกันส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่ใส่ (ตารางที่ 3) การใช้วิธีเกษตรกร มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด 14,342 บาทต่อไร่ อย่างไรก็ตาม การใส่ปุ๋ยในอัตราที่เหมาะสม ส่งผลให้อัตราการเพิ่มผลผลิตสูงกว่าอัตราการเพิ่มของต้นทุน เห็นได้จาก การใส่ปุ๋ยในช่วง 4, 9 และ 13 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ได้ผลผลิต 884, 1,186 และ 837 กิโลกรัมต่อไร่ มีต้นทุน 15,834, 16,044 และ 16,253 บาทต่อไร่ ตามลำดับ ในขณะที่ การใช้วิธีเกษตรกร ได้ผลผลิต 644 กิโลกรัมต่อไร่ และมีต้นทุนอยู่ 14,342 บาทต่อไร่ ต่ำกว่าตำรับการทดลองในข้างต้น แต่เมื่อประเมินรายได้จากการขายผลผลิตสดของเหง้าขมิ้นชัน ที่ราคาเฉลี่ย กิโลกรัมละ 30 บาท พบว่า วิธีเกษตรกรมีรายได้จากการขาย 19,308 บาท เมื่อหักต้นทุนการผลิต เหลือกำไร 4,966 บาทต่อไร่ ต่ำกว่า การใช้ปุ๋ยอัตรา 4, 9 และ 13 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ซึ่งมีรายได้จากการขายผลผลิตต่อไร่ 26,517, 35,580 และ 25,098 บาท และได้รับกำไร 10,683, 19,536 และ 8,845 บาท ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อประเมินจากอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน พบว่า การใส่ปุ๋ยอัตรา 9 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ มีอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน

สูงสุด เท่ากับ 2.22 แปลความหมายได้ว่า การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตามตำรับการทดลองดังกล่าว จะทำให้ได้รับรายได้จากการขายผลผลิตจำนวน 2.22 เท่า ของจำนวนเงินที่ลงทุนไป หรือเงินที่ลงทุนไป 1 บาท สามารถสร้างกำไรได้ 1.22 บาท อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราปุ๋ยเป็น 13, 18 และ 22 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ส่งผลให้อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนลดลงเหลือ 1.54, 1.20 และ 0.80 ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากฟอสฟอรัสที่สูงเกินไป มีผลลดความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารชนิดอื่นโดยอ้อม เช่น ลดการดูดใช้แคลเซียมกับโพแทสเซียม จากอำนาจการเป็นปฏิปักษ์ระหว่างกันของธาตุอาหาร ส่งผลให้ผลผลิตลดลง ในขณะที่ มีต้นทุนจากการใช้ปุ๋ยเพิ่มขึ้น ดังนั้น อัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับการปลูกขมิ้นชันในดินที่มีการขาดแคลนฟอสฟอรัส คือ 9 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรได้รับผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจคุ้มค่าสุด อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลอง ชี้ให้เห็นว่า อัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสสูงสุดที่ขมิ้นชันตอบสนองในดินที่ขาดแคลน คือ 9 กิโลกรัม P_2O_5 ต่อไร่ ดังนั้น ในบริเวณดินทั่วไปที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในช่วงปานกลางถึงสูง สามารถลดอัตราปุ๋ยได้อีก ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรได้รับผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 3 ผลผลิต ต้นทุน และผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจจากการใช้อัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสแตกต่างกันสำหรับขมิ้นชัน

Treatments	Yield (kg/rai)	[1/]Cost of production	[2/]Income	Profit	[3/]B/C ratio
	(kg/rai)	(Baht/rai)	(Baht/rai)	(Baht/rai)	
T1, Farmers	644	14,342	19,308	4,966	1.35
T2, 0 kg P_2O_5/rai	648	15,625	19,443	3,818	1.24
T3, 4 kg P_2O_5/rai	884	15,834	26,517	10,683	1.67
T4, 9 kg P_2O_5/rai	1,186	16,044	35,580	19,536	2.22
T5, 13 kg P_2O_5/rai	837	16,253	25,098	8,845	1.54
T6, 18 kg P_2O_5/rai	656	16,463	19,686	3,223	1.20
T7, 22 kg P_2O_5/rai	446	16,672	13,377	-3295	0.80

หมายเหตุ: T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-K_2O-MgO-S อัตรา 23-50-1.4-0.8 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน [1/]ต้นทุนการผลิตอื่น ๆ ที่ยังไม่รวมค่าปุ๋ย = 13,342 บาทต่อไร่ [2/]ค่าเฉลี่ยราคาผลผลิตขมิ้นชันสด = 30 บาท/กิโลกรัม [3/]Benefit-cost ratio = Income/Cost of production

6.3 ข้อมูลเบื้องต้นของต้นทุนการผลิตและรายได้จากการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียม

จากการประเมินต้นทุนอื่น ๆ ในการปลูกขมิ้นชัน ซึ่งยังไม่รวมต้นทุนจากการใช้ปุ๋ย ได้แก่ ค่าวัสดุเกษตร ค่าแรงงานในการเตรียมดิน ปลูก การดูแลรักษา กำจัดวัชพืช และการเก็บเกี่ยวผลผลิต ตลอดจนค่าเสียโอกาสเงินลงทุน ค่าเสื่อมราคาอุปกรณ์ โดยดัดแปลงวิธีการประเมินต้นทุนจากการผลิตหอมแดงของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พบว่า การปลูกขมิ้นชันมีต้นทุนอื่น ๆ ที่ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการใช้ปุ๋ย เท่ากับ 13,342 บาทต่อไร่ และเมื่อมีการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่ต่างกันส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นตามอัตราปุ๋ยที่ใส่ (ตารางที่ 4) การใช้วิธีเกษตรกร มีต้นทุนการผลิตต่ำสุด 14,342 บาทต่อไร่ อย่างไรก็ตาม การใส่ปุ๋ยในอัตราที่เหมาะสม ส่งผลให้อัตราการเพิ่มผลผลิตสูงกว่าอัตราการเพิ่มของต้นทุน เห็นได้จาก การใส่ปุ๋ยอัตรา 25 และ 50 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ได้รับผลผลิต 1,648 และ 1,251 กิโลกรัมต่อไร่ มีต้นทุน 15,398 และ 16,148 บาทต่อไร่ ตามลำดับ ในขณะที่การใช้วิธีเกษตรกร ได้ผลผลิต 644 กิโลกรัมต่อไร่ และมีต้นทุนอยู่ 14,342 บาทต่อไร่ ต่ำกว่าตำรับการทดลองในข้างต้น แต่เมื่อประเมินรายได้จากการขายผลผลิตสดของเหง้าขมิ้นชัน ที่ราคาเฉลี่ย กิโลกรัมละ 30 บาท พบว่าวิธีเกษตรกรมีรายได้จากการขาย 19,308 บาท เมื่อหักต้นทุนการผลิต เหลือกำไร 4,966 บาทต่อไร่ ต่ำกว่า การใช้ปุ๋ยอัตรา 25 และ 50 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ อย่างเด่นชัด ซึ่งมีรายได้จากการขายผลผลิต 49,440 และ 37,524 บาทต่อไร่ และได้รับกำไร 34,042 และ 21,376 บาทต่อไร่ ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อประเมินจากอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน พบว่า การใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ มีอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนสูงสุด เท่ากับ 3.21 แปลความหมายได้ว่า การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมตามตำรับการทดลองดังกล่าว จะทำให้ได้รับรายได้จากการขายผลผลิตจำนวน 3.21 เท่า ของจำนวนเงินที่ลงทุนไป หรือเงินที่ลงทุนไป 1 บาท สามารถสร้างกำไรได้ 2.21 บาท อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราปุ๋ยเป็น 50, 75, 100 และ 125 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ส่งผลให้อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนลดลงเหลือ 2.32, 1.84, 1.48 และ 0.76 ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากโพแทสเซียมที่เพิ่มขึ้นเป็นปฏิปักษ์ต่อการดูดใช้ธาตุอาหารชนิดอื่น โดยเฉพาะแคลเซียมและแมกนีเซียม จากอำนาจการเกิดอันตรกิริยาต่อกันของธาตุอาหาร ส่งผลให้ผลผลิตลดลง แต่มีต้นทุนจากการใช้ปุ๋ยเพิ่มขึ้น ผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจจึงลดลง ดังนั้น อัตราปุ๋ยโพแทสเซียมที่เหมาะสมสำหรับการปลูกขมิ้นชันในดินที่ขาดแคลนธาตุดังกล่าว คือ 25 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรได้รับผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจคุ้มค่าสุด อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า อัตราปุ๋ยโพแทสเซียมสูงสุดที่ขมิ้นชันตอบสนองในดินที่ขาดแคลน คือ 25 กิโลกรัม K_2O ต่อไร่ ดังนั้น ในบริเวณดินทั่วไปที่มีปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้อยู่ในช่วงปานกลางถึงสูง สามารถลดอัตราปุ๋ยได้อีก ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรได้รับผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจเพิ่มมากขึ้น

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

ตารางที่ 4 ผลผลิต ต้นทุน และผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจจากการใช้อัตราปุ๋ยโพแทสเซียมแตกต่างกันสำหรับขมิ้นชัน

Treatments	Yield (kg/rai)	[1/]Cost of production	[2/]Income	Profit	[3/]B/C ratio
	(kg/rai)	(Baht/rai)	(Baht/rai)	(Baht/rai)	
T1, Farmers	644	14,342	19,308	4,966	1.35
T2, 0 kg K_2O/rai	663	14,648	19,896	5,248	1.36
T3, 25 kg K_2O/rai	1,648	15,398	49,440	34,042	3.21
T4, 50 kg K_2O/rai	1,251	16,148	37,524	21,376	2.32
T5, 75 kg K_2O/rai	1,036	16,898	31,071	14,173	1.84
T6, 100 kg K_2O/rai	871	17,648	26,124	8,476	1.48
T7, 125 kg K_2O/rai	460	18,248	13,800	-4448	0.76

หมายเหตุ: T1 ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ T2-T7 ได้รับปริมาณ N-P_2O_5-CaO-MgO-S อัตรา 23-11-1.4-1.4-2.5 กิโลกรัมต่อไร่ เท่ากัน [1/]ต้นทุนการผลิตอื่น ๆ ที่ยังไม่รวมค่าปุ๋ย = 13,342 บาทต่อไร่ [2/]ค่าเฉลี่ยราคาผลผลิตขมิ้นชันสด = 30 บาท/กิโลกรัม [3/]Benefit-cost ratio = Income/Cost of production

สรุปและข้อเสนอแนะ

การใช้ปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ($N\text{-}P_2O_5\text{-}K_2O$) อัตรา 18-9-25 กิโลกรัมต่อไร่ สำหรับปลูกขมิ้นชัน บริเวณดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ส่งผลให้ได้ผลผลิตน้ำหนักสด น้ำหนักแห้งของเหง้าขมิ้นชัน และผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจสูงสุด ในขณะที่ หากใส่ปุ๋ยมากกว่าอัตราดังกล่าว จะทำให้ผลผลิตและผลตอบแทนเชิงเศรษฐกิจลดลง ตามลำดับ เนื่องจากธาตุอาหารส่วนเกินจะไปรบกวนการดูดใช้ธาตุอาหารชนิดอื่น จากอำนาจการเป็นปฏิปักษ์ต่อกัน จึงเป็นสาเหตุจำกัดการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิต อย่างไรก็ตาม ในสภาวะที่เกิดความไม่สมดุลของการดูดใช้ธาตุอาหาร กลับส่งผลให้ต้นขมิ้นชันสามารถผลิตสารเคอร์คูมินอยด์ได้สูงกว่าสภาวะปกติ เนื่องจากสามารถกระตุ้นให้ต้นขมิ้นชันอยู่ในสภาวะเครียด ดังนั้น การชักนำให้ต้นขมิ้นชันเกิดความเครียดจากสิ่งเร้าในระดับที่เหมาะสม อาจสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับผลิตขมิ้นชันที่ให้สารสำคัญสูง เช่น ความเครียดจากธาตุอาหาร ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง ของดิน หรือสภาวะขาดน้ำ เป็นต้น จึงควรศึกษาประเด็นดังกล่าวเพิ่มเติม

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้จัดการธาตุอาหารหลักในขมิ้นชัน
2. การปลูกขมิ้นชันเป็นอาชีพเสริมมีความแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากมีข้อมูลเชิงวิชาการสนับสนุน ซึ่งตอบสนองนโยบายของรัฐบาลในการพัฒนางานวิจัยด้านพืชสมุนไพรของไทย
3. เกษตรกรที่ปลูกขมิ้นชันสามารถเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิตต่อพื้นที่ มีรายได้เพิ่มขึ้น ต้นทุนลดลงจากการจัดการปุ๋ยตามหลักวิชาการ

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

เผยแพร่ผลงานวิจัยผ่านการประชุมวิชาการประจำปีของกรมพัฒนาที่ดิน

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2551. คู่มือนักวิชาการส่งเสริมการเกษตร ขมิ้นชัน. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการเกษตร.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2552. ธาตุอาหารพืช. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2559. ความเครียดของพืชและการบรรเทาความเครียด. ว. ดินและปุ๋ย 38: 47-78.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2548. การศึกษาวิจัยเศรษฐกิจสมุนไพรไทยกรณีขมิ้นชัน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2563. การคำนวณต้นทุน. เข้าถึงได้จาก: http://www.oae.go.th/view/1/การคำนวณต้นทุน/TH-TH. [เข้าถึงเมื่อ 4 ธันวาคม 2563].

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. 2547ก. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน.

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. 2547ข. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า เล่มที่ 1. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน.

สุดารัตน์ อ่อนสุระทม สมชาย ปิ่นลออ และ ธิดารัตน์ บุญมาศ. 2555. ผลของเคอร์คูมินต่อการติดพยาธิใบไม้ตับและโรคมะเร็งท่อน้ำดีในสัตว์ทดลอง. ศรีนครินทร์เวชสาร 27: 389-396.

สุทธิ์เดชา ขุนทอง ณัฐพร ประคองเก็บ มนต์ระวี มีแต้ม นิยม สุรักษ์ วิวัฒน์ สวยสม ชนิดา เกิดชนะ ชนินาถ การะภักดี ปราณี จอมอุ่น จิราพร สวยสม และ ทิพานันท์ อุปนิสากร. 2563. อันตรกิริยาระหว่างแมงกานีสกับธาตุอาหารพืชอื่น ๆ ในดินปลูกชาน้ำมัน บ้านปางมะหัน จังหวัดเชียงราย. ว. พืชศาสตร์สงขลานครินทร์ 7: 217-234.

Bouyoucos, G.J. 1927. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. Soil Science 23:343-353.

Davis, J.G. and M.B. Parker. 1993. Zinc toxicity symptom development and partitioning of biomass and zinc in peanut plants. J. Plant Nutr. 16: 2353-2369.

Droux, M. 2004. Sulfur assimilation and the role of sulfur in plant metabolism: a survey. Photosynth. Res. 79: 331-348.

Freitas, A.S., E.A. Pozza, A.A.A. Pozza, M.G.O. Soares, H.R. Silva and C.D.P. Perez. 2017. Interaction between potassium (K) and calcium (Ca) on the severity of yellow sigatoka in banana plants. Afr. J. Agric. Res. 12: 1353-1361.

Hafeez, B., Y.M. Khanif and M. Saleem. 2013. Role of zinc in plant nutrition- a review. Am. J. Exp. Agr. 3: 374-391.

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

Huang, Y.L., S. Yang, G.X. Long, Z.K. Zhao, X.F. Li and M.H. Gu. 2016. Manganese toxicity in sugarcane plantlets grown on acidic soils of southern China. Plos One 11: e0148956. doi:10.1371/journal.

Hue, N.V. and Y. Mai. 2002. Manganese toxicity in watermelon as affected by lime and compost amended to a Hawaiian acid oxisol. Hort Science 37: 656-661.

ISO 10390. 2005. Soil quality-determination of pH. International Standard.

ISO 11464. 2006. Soil quality-pretreatment of samples for physico-chemical analysis. International Standard.

ISO 13878. 1998. Soil quality-determination of total nitrogen content by dry combustion (elemental analysis). International Standard.

Jones, J.B. 2001. Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. New York: CRC Press.

Kalra, Y.P. 1998. Handbook of Reference Methods for Plant Analysis. New York: CRC Press.

Kumar, v., D.V. Yadav and D.S. Yadav. 1990. Effects of nitrogen sources and copper levels on yield, nitrogen and copper contents of wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Soil 126: 79-83.

Li, Z., X. Han, X. Song, Y. Zhang, J. Jiang, Q. Han, M. Liu, G. Qiao and R. Zhuo. 2017. Overexpressing the Sedum alfredii Cu/Zn superoxide dismutase increased resistance to oxidative stress in transgenic Arabidopsis. Front. Plant Sci. 8: doi: 10.3389/fpls.2017.01010

Mara, E.M. B. R.M.M. Silvania and A.M. Angela. 2006. Effects of supercritical fluid extraction on *Curcuma longa* L. and *Zingiber officeinale* R. starches, Carbohyd. Polym. 63, 340–346.

Ministry of Public Health. 2009. Thai herbal pharmacopoeia volume I. Nonthaburi, Thailand.

Nelson, K.M., J.L. Dahlin, J. Bisson, J. Graham, G.F. Pauli and M.A. Walters. 2017. The essential medicinal chemistry of curcumin. J. Med. Chem. 60: 1620-1637.

Nyi, T., V. Philip, M.I.H. Bujang, K. Ra, B. Irianta, P. Sengxua, N. Sipaseuth, A.A. Harirah, B.B. Jantan, S.M. Salguero, P. Meunchang, V.M. Quyet, N.Q. Hai, P. Moody, T.E. Jakel and W. Soda. 2017. ASEAN guidelines on soil and nutrient management. [Online]. Available http://org.doa.go.th/aseancrops/?p=1639 (1 December 2020).

Panda, S., A.K. Mishra and U.C. Biswal. 1987. Manganese induced peroxidation of thylakoid lipids and changes in chlorophyll-α fluorescence during aging of cell free chloroplasts in light. Phytochemistry 26: 3217-3219.

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

Rietra, R.P.J.J., M. Heinen, C.O. Dimkpa and P.S. Bindraban. 2017. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 48: 1895-1920.

Rodrigues, J.L., K.L.J. Prather, L.D. Kluskens and L.R. Rodrigues. 2015. Heterologous production of curcuminoids. Microbiol. Mol. Biol. R. 79: 39-60.

Senbayram, M., A. Gransee, V. Wahle and H. Thiel. 2015. Role of magnesium fertilizers in agriculture: plant–soil continuum. Crop Pasture Sci. 66: 1219-1229.

Soltangheisi, A., Z.A. Rahman, C.F. Ishak, H.M. Musa and H. Zakikhani. 2014. Interaction effects of phosphorus and zinc on their uptake and ^{32}P absorption and translocation in sweet corn (*Zea mays* var. *Saccharata*) grown in a tropical soil. Asian J. Plant Sci. 13: 129-135.

Yruela, I. 2005. Copper in plants. Braz. J. Plant Physiol. 17: 145-156.

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

ภาคผนวก

ภาคผนวกที่ 1 แปลงทดลอง ต.ตลิ่งชัน อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช

ภาคผนวกที่ 2 การวางแปลงทดลองและการเก็บตัวอย่างดินทางเคมีและกายภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการเบื้องต้น

T6R1	T2R2	T4R3	T1R4
T1R1	T3R2	T5R3	T7R4
T4R1	T6R2	T7R3	T3R4
T2R1	T7R2	T2R3	T6R4
T5R1	T4R2	T6R3	T2R4
T3R1	T1R2	T3R3	T5R4
T7R1	T5R2	T1R3	T4R4

ขนาดแปลงย่อย กว้าง 3 เมตร ยาว 6 เมตร

ภาคผนวกที่ 3 ผังแปลงทดลองโครงการวิจัย ผลของอัตราปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ และปริมาณสารเคอร์คูมินอยด์ในขมิ้นชัน (*Curcuma Longa* L.)

ภาคผนวกที่ 4 การเจาะดินที่ระดับความลึก 0-100 ซม. เพื่อประเมินและจำแนกชุดดิน/กลุ่มชุดดิน พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างดินเพื่อส่งวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ภาคผนวกที่ 5 คำอธิบายหน้าตัดดิน ชุดดินท่าแซะ (Tha Sae series: Te)

ลักษณะหน้าตัดดิน	ชั้นดิน	ความลึก (ซม.)	คำอธิบายชั้นดิน
	Ap	0-21	Dark brown to brown (10YR4/3) fine sandy loam; weak fine subangular blocky structure; friable, slightly sticky and nonplastic; few fine interstitial pores; many fine roots; slightly acid (field pH 6.5); abrupt smooth boundary.
	Bt1	21-50	Yellowish brown (10YR5/6) fine sandy clay loam; weak fine and medium subangular blocky structure; friable, slightly sticky and slightly plastic; common fine interstitial pores and few discontinuous, opened random tubular pores; few fine roots; moderately acid (field pH 6.0); gradual smooth boundary.
	Bt2	50-67	Yellowish brown (10YR5/8) fine sandy clay loam; weak fine and medium subangular blocky structure; friable, sticky and slightly plastic; patchy thin cutan along the animal holes and discontinuous patchy thin around peds surface; many fine interstitial pores and few discontinuous, opened random tubular pores; very few fine roots; strongly acid (field pH 5.5); gradual smooth boundary.
	Bt3	67-100	Strong brown (7.5YR5/8) sandy clay loam; weak fine and medium subangular blocky structure; friable, sticky and slightly plastic; patchy thin cutan along peds surface; many fine interstitial pores and few discontinuous opened random tubular pores; strongly acid (field pH 5.5).

ภาคผนวกที่ 6 แปลงทดลองหลังปลูกขมิ้นชันตามตำรับการทดลอง

ภาคผนวกที่ 7 การเก็บข้อมูลในแปลงทดลองตามตำรับการทดลอง

ภาคผนวกที่ 8 การเก็บข้อมูลผลผลิตตามตำรับการทดลอง

ภาคผนวกที่ 9 การวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

ภาคผนวกที่ 10 วิธีวิเคราะห์สารเคอร์คูมินอยด์ ดัดแปลงจากวิธีการของ Thai Herbal Pharmacopoeia volume 1

สารเคมี

1) สารเคอร์คูมิน
2) เอทิลแอลกอฮอล์
3) เตตระไฮโดรฟิวแรน

อุปกรณ์

1) ขวดปริมาตร ขนาด 10, 25, 50 และ 100 มิลลิลิตร
2) ปิเปต ขนาด 0.5, 1 และ 5 มิลลิลิตร
3) เครื่องเขย่า
4) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5) เครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์

วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมิน

1) เตรียมสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมิน ความเข้มข้น 0, 0.8, 1.6, 2.4 และ 3.2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งสารเคอร์คูมิน 0.0020 g ใส่ขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ละลายสารเคอร์คูมินด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ ปรับปริมาตรให้ได้ครบ 25 มิลลิลิตร
2) ดูดสารละลายจากขวดปริมาตรมา 0, 1, 2.5, 3 และ 4 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ ตามลำดับ

วิธีการวิเคราะห์

1) ชั่งตัวอย่างผงขมิ้นชันประมาณ 0.3000 กรัม ใส่ขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2) ละลายตัวอย่างด้วยสารละลายเตตระไฮโดรฟิวแรน และปรับปริมาตรให้ได้ 10 มิลลิลิตร พร้อมกับทำแบลงค์
3) นำไปเขย่าเบา ๆ บนเครื่องเขย่าเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
4) หลังเขย่า ดูดสารละลายส่วนใสเหนือตะกอนมา 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ ในขวดปริมาตร
5) ดูดสารละลายจากในข้อ 4 มา 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ ในขวดปริมาตร
6) วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร โดยวัดค่าสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินความเข้มข้น 0, 0.8, 1.6, 2.4 และ 3.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนจากนั้นวัดค่าแบลงค์และสารละลายตัวอย่าง ตามลำดับ

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

7) หาสมการความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมิน นำสมการที่ได้หาค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง ดัดแปลงจาก (Ministry of Public Health, 2009)

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน

ห้องสมุดกรมพัฒนาที่ดิน