

การเปลี่ยนรูปของปุ๋ยยูเรียในดินเหนียวด้วยสารยับยั้งสังเคราะห์และสารธรรมชาติ ภายใต้การบ่มดินระดับห้องปฏิบัติการ

Urea Transformation in Clayey Soil Affected by using Synthetic and Natural Inhibitors under Laboratory Soil Incubation

พัชรียา เวลุตุง (Phatchariya Welutung)^{1*} ภัทธา เพงธรรมกิริติ (Patthra Pengthamkeerati)**

(Received: December 8, 2022; Revised: May 7, 2023; Accepted: May 8, 2023)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ทำการทดสอบผลการใช้ปุ๋ยยูเรียอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้และค่าวิเคราะห์ดิน และการใช้สารยับยั้งสังเคราะห์และสารจากพืชร่วมกับปุ๋ยยูเรียตามอัตราค่าวิเคราะห์ดินที่มีต่อการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในดินในรูปแอมโมเนียมและไนเตรทภายใต้การบ่มในระดับห้องปฏิบัติการนาน 42 วัน โดยดื่บทดลองทั้งเจ็ดที่ศึกษา คือ (1) NBPT (N-(n-butyl) thiophosphoric triamide) (2) DMPP (dimethylpyrazole phosphate) (3) NBPT+DMPP (4) กระเทียม (*Allium sativum*) (5) เมล็ดสะเดา (*Azadirachta indica*) (6) กระเทียมและเมล็ดสะเดา และ (7) สาบม่วง (*Praxelis clematidea* (Griseb.) R.M. King & H. Rob) ผลการศึกษาพบว่าการใช้ปุ๋ยตามอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้มีการคงค้างของอนินทรีย์ไนโตรเจนในดินสูงกว่าการใช้ปุ๋ยตามอัตราค่าวิเคราะห์ดิน แต่ไม่เป็นสัดส่วนต่อปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ NBPT DMPP และสาบม่วงมีแนวโน้มในการคงค้างของแอมโมเนียมที่สะสมในดินได้สูงกว่าดื่บที่เติมเฉพาะปุ๋ย คิดเป็นร้อยละ 15.49 14.74 และ 14.67 ตามลำดับ และมีศักยภาพในการชะลอการเกิดไนตริฟิเคชันได้นานถึง 3 สัปดาห์ โดยสาบม่วงมีค่าการยับยั้งไนตริฟิเคชันสูงถึงร้อยละ 24.09

ABSTRACT

This study investigates the effect of urea with commonly applied rate by farmers and soil analysis rate and using synthetic and natural inhibitors associated with urea based on soil analysis rate on soil N transformation in form of ammonium and nitrate under laboratory soil incubation for 42 days. Seven inhibitors used in this study were (1) NBPT (N-(n-butyl) thiophosphoric triamide), (2) DMPP (dimethylpyrazole phosphate), (3) NBPT+DMPP, (4) garlic (*Allium sativum*), (5) ground neem seed (*Azadirachta indica*), (6) garlic+ground neem seed and (7) praxelis (*Praxelis clematidea* (Griseb.) R.M. King & H. Rob). The result showed that the application of N fertilizer at commonly applied by farmer rate had a greater soil inorganic N than soil analysis rate, but was not in proportion to the N rate applied. Moreover, NBPT, DMPP and praxelis tended to retain an accumulative ammonium by 15.49, 14.74 and 14.67% higher than only urea, respectively. All inhibitors had a potential for retarded nitrification rate up to 3 weeks by praxelis achieved 24.09% of inhibition of nitrification.

คำสำคัญ: สารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชัน การบ่มดิน

Keywords: Urease inhibitors, Nitrification inhibitors, Soil incubation

¹Corresponding author: fscriptp@ku.ac.th

*นิสิต หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Student, Doctor of Philosophy Program in Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Associate Professor, Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University

บทนำ

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหนึ่งที่สำคัญในการเกษตรและมักพบว่าขาดแคลนโดยเฉพาะในดินเขตร้อนชื้นและในพื้นที่ที่มีการเพาะปลูกพืชผลทางการเกษตรอย่างต่อเนื่อง ปุ๋ยไนโตรเจนจึงเข้ามามีบทบาทที่สำคัญในการเกษตรเนื่องจากเป็นตัวแทนของแหล่งไนโตรเจนที่มีส่วนช่วยในการเจริญเติบโต [1] และเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการของพืชและท้องตลาด แต่ปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่ในพื้นที่เพาะปลูกจะสูญเสียอย่างรวดเร็วไปกับสิ่งแวดล้อม จึงทำให้เกษตรกรใส่ปุ๋ยเกินข้อแนะนำหรือเกินความต้องการของพืช อีกทั้งราคาปุ๋ยยูเรียมีการปรับตัวสูงขึ้น เป็นเหตุให้ต้นทุนการเพาะปลูกด้านปุ๋ยสูงสำหรับเกษตรกรและประสิทธิภาพการใช้ไนโตรเจน (nitrogen use efficiency) ต่ำลง [2]

การเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อลดการสูญเสียไนโตรเจนจากดินออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงเป็นที่น่าสนใจและนำไปใช้อย่างแพร่หลายเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืช ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม และนำไปสู่การเกษตรที่ยั่งยืน โดย 1) เชลลอะกระบวนการไฮโดรไลซิสยูเรีย (urea hydrolysis) จากการเติมหรือเคลือบสารสังเคราะห์ทางการค้า เช่น N-(n-butyl)-thiophosphoric triamide (NBPT) เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ยูริเอสที่เปลี่ยนรูปยูเรียเป็นแอมโมเนียมเพื่อให้พืชสามารถดูดซับไนโตรเจนไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นและยังช่วยลดการระเหยของแอมโมเนียสู่บรรยากาศ [3] 2) เติมนิโคตินในดิน เช่น 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) และ dicyandiamide (DCD) โดยยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่ม ammonia oxidizing bacteria (AOB) ที่มีหน้าที่ในขั้นตอนการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียมไอออนเป็นไนโตรเจนออกไซด์ เป็นการเพิ่มระยะเวลาในการคงค้างของแอมโมเนียมในดิน ส่งเสริมให้พืชสามารถดูดแอมโมเนียมไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น อีกทั้งยังลดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปก๊าซไนตรัสออกไซด์สู่บรรยากาศในขั้นตอนถัดไปของกระบวนการไนโตรฟิกเคชัน [4]

ปัจจุบันมีการศึกษาและค้นคว้าวัสดุจากธรรมชาติหรือส่วนต่างๆ จากพืชที่มีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติในการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์เพื่อประยุกต์เป็นสารยับยั้งยูริเอสและสารยับยั้งไนโตรฟิกเคชัน โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดค่าใช้จ่าย ผลข้างเคียงจากประสิทธิภาพที่ไม่คงที่และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้สารยับยั้งจากสารสังเคราะห์ [5] โดยสารออกฤทธิ์ที่สามารถยับยั้งเอนไซม์ยูริเอสมีหลายกลุ่ม คือ ซัลไฟด์ไฮโดรล (sulfhydryl reagents) [6] และกลุ่มของสารประกอบโลหะหนัก เช่น Cu^{2+} Zn^{2+} Pd^{2+} และ Cd^{2+} [7] และสารออกฤทธิ์ที่สามารถยับยั้งไนโตรฟิกเคชัน ได้แก่ ฟีนิลโพรพานอยด์ (phenylpropanoids) ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ควินิน (quinines) ไดเทอร์เพนอยด์ (diterpenoids) เทอร์เพนอยด์ (terpenoids) ไพราโซล (pyrazoles) โพลีฟีนอล (polyphenol) และไอโซไทโอไซยาเนต (isothiocyanates) [8-10] จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำพืชและวัชพืชที่พบได้ในประเทศไทยที่อาจจะมีสามารถในการยับยั้งกระบวนการไฮโดรไลซิสยูเรียและไนโตรฟิกเคชันมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ กระเทียม (*Allium sativum*) ที่มีอัลลิซินเป็นองค์ประกอบหลัก [11] เมล็ดสะเดา (*Azadirachta indica*) ที่มีสารอะซาดิแรคติน (azadirachtin) กลุ่มเตตระนอร์เทรเทอร์เพนอยด์ (tetranortriterpenoids) [12] และสาบม่วง (*Praxelis clematidea* (Griseb.) R.M. King & H. Rob) ซึ่งเป็นวัชพืชที่พบอย่างแพร่หลายในพื้นที่เพาะปลูกในประเทศไทยที่มีส่วนประกอบของพืชเป็นสารกลุ่มฟีนิลโพรพานอยด์ ฟลาโวนอยด์ และอื่นๆ [13] เพื่อลดการสูญเสียปุ๋ยไนโตรเจนจากดินและเป็นการช่วยวางแผนการกำจัดวัชพืชได้อย่างเหมาะสม รวมถึงการลดต้นทุนของเกษตรกรในการเพาะปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อทดสอบผลของการใช้ปุ๋ยยูเรียอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้และค่าวิเคราะห์ดิน และการใช้สารยับยั้งสังเคราะห์และสารจากพืชร่วมกับปุ๋ยยูเรียตามอัตราค่าวิเคราะห์ดินที่มีต่อการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในดินในรูปแอมโมเนียมและไนเตรทภายใต้การบ่มในระดับห้องปฏิบัติการนาน 42 วัน โดยทำให้ได้ผลเบื้องต้นของอัตราการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนและการ

ชะลอการเปลี่ยนแปลงรูปของปุ๋ยในดิน และเป็นข้อมูลสำหรับกำหนดชนิดสารยับยั้งที่เหมาะสมในการทดสอบผลในแปลงปลูกพืชเศรษฐกิจต่อไป

วิธีการวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพของสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชันและการใช้สารยับยั้งร่วมกันที่มีต่อการคงค้างของไนโตรเจนในดินในระดับห้องปฏิบัติการ

ดินที่ใช้ในการศึกษาเก็บตัวอย่างจากสถานีวิจัยลพบุรี คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อำเภอลำลูกเกด จังหวัดลพบุรี ที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร นำตัวอย่างมาผึ่งลมประมาณ 7-10 วัน ร่อนดินให้มีขนาดพอเหมาะโดยใช้ตะแกรงร่อนให้มีขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร และศึกษาคุณลักษณะของตัวอย่างดินเบื้องต้น เป็นดังนี้

ตารางที่ 1 คุณลักษณะเบื้องต้นของดินที่ใช้ศึกษา

pH ¹	คาร์บอนอินทรีย์ ² (ร้อยละ)	ฟอสฟอรัส ³ (mg/kg)	โพแทสเซียม ⁴ (mg/kg)	สัดส่วนเนื้อดิน (ร้อยละ) ⁵			เนื้อดิน
				ทราย	ทรายแป้ง	ดินเหนียว	
6.7	2.93	87	394	29	24	47	ดินเหนียว

หมายเหตุ วิเคราะห์ด้วย ¹soil : water (1:1) ²Walkley - Black method ³Bray II ⁴1N NH₄OAc pH 7.0 extraction

⁵Hydrometer method

การศึกษานี้เลือกใช้สารยับยั้งยูรีเอส ได้แก่ 1) NBPT (N-(n-butyl) thiophosphoric triamide) CAS no. 94317-64-3 และ 2) กระเทียม (*Allium sativum*) ในส่วนของสารยับยั้งไนตริฟิเคชัน ได้แก่ 1) DMPP (dimethylpyrazole phosphate) CAS no. 202842-98-6 2) เมล็ดสะเดาใบด (Azadirachta indica) และ 3) สาบม่วง (*Praxelis clematidea* (Griseb.) R.M. King & H. Rob)

เตรียมสารยับยั้งยูรีเอสและสารยับยั้งไนตริฟิเคชันจากสารสังเคราะห์และพืชเพื่อใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ โดยการเติมน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:4 (น้ำหนักต่อปริมาตรสารยับยั้ง) หลังจากนั้นนำสารยับยั้งจากพืช (กระเทียม เมล็ดสะเดาใบดและสาบม่วง) บดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดไฟฟ้า และสารยับยั้งจากสารสังเคราะห์ (NBPT และ DMPP) ผสมให้เข้ากัน เพื่อนำไปใช้ในการทดลองทันที

ทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งกระบวนการออกซิเดชันของปุ๋ยยูเรียและกระบวนการไนตริฟิเคชันของปุ๋ยที่ผสมสารยับยั้งยูรีเอสและสารยับยั้งไนตริฟิเคชัน วางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) จำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำตัวอย่างดินน้ำหนัก 100 กรัมดินแห้งบรรจุใส่กระปุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ปรับความชื้นที่ร้อยละ 60 ของความพูนดิน บ่มตัวอย่างดินในตูบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นเติมปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) ที่ใช้สำหรับการปลูกอ้อยโรงงานในอัตราที่เกษตรกรนิยมใส่ (23 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่ : 0.1571 กรัม) และอัตราค่าวิเคราะห์ดินตามที่กรมวิชาการเกษตรแนะนำ (3.22 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่ : 0.0220 กรัม) เติมสารยับยั้งยูรีเอสและสารยับยั้งไนตริฟิเคชันตามอัตราส่วนต่อน้ำหนักปุ๋ยไนโตรเจน ดำรับการทดลองแบ่งได้ตามปัจจัย ดังนี้คือ 1) ดินชุดควบคุม (C) 2) ดินที่เติมปุ๋ยตามอัตราที่เกษตรกรนิยมใส่ (F) 3) ดินที่เติมปุ๋ยตามอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน (S) 4) ดินที่เติมปุ๋ยตามอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับ NBPT ร้อยละ 5 (NB) 5) ดินที่เติมปุ๋ยตามอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับ DMPP ร้อยละ 5 (DM) 6) ดินที่เติมปุ๋ยตามอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับ NBPT และ DMPP ร้อยละ 2.5 (NBDM) 7) ดินที่เติมปุ๋ยตามอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับกระเทียมบดร้อยละ 10 (GL) 8) ดินที่เติมปุ๋ยตามอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับเมล็ดสะเดาร้อยละ 20 (NE) 9) ดินที่เติม

ปุ๋ยตามอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับกระเทียมบดและเมล็ดสะเดาตร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ และ 10) ดินที่เติมปุ๋ยตามอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับสับมวงบด 2 เท่า ควบคุมความชื้นดินโดยการเติมน้ำกลั่นสัปดาห์ละ 1 ครั้ง และเปิดให้อากาศทุก 2 วัน เก็บตัวอย่างดินในวันที่ 1 3 5 7 14 21 28 35 และ 42 ของการบ่มดิน เพื่อวิเคราะห์ไนโตรเจนในดิน โดยการวัดปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ด้วยวิธี Kjeldahl และวัดปริมาณแอมโมเนียมและไนเตรทตามวิธีมาตรฐานด้วยเครื่องกลั่น UDK 132 Semi-Automatic Distillation Unit และวิธี Brucine colorimetric method จากนั้นคำนวณอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันและร้อยละของการยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชัน ดังสมการ

$$\text{อัตราการเกิดไนตริฟิเคชัน (ร้อยละ)} = (\text{ปริมาณไนเตรทในดิน} / \text{ปริมาณแอมโมเนียม} + \text{ไนเตรทในดิน}) \times 100 \quad [14]$$

$$\text{การยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชัน (ร้อยละ)} = (\text{อัตราการเกิดไนตริฟิเคชันจากตำรับทดลองที่เติมเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน} - \text{อัตราการเกิดไนตริฟิเคชันจากตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยร่วมกับสารยับยั้ง}) / \text{อัตราการเกิดไนตริฟิเคชันจากตำรับทดลองที่เติมเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน} \quad [14]$$

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (analysis of variance) จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อประเมินผลของสารยับยั้งยูรีเอสและสารยับยั้งไนตริฟิเคชันที่มีต่อการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในดิน โดยการใช้การหาค่า F-value ด้วยวิธี repeated measure (Proc Mixed) และใช้การทดสอบความแตกต่างระหว่างตำรับทดลองในแต่ละวันที่เก็บตัวอย่าง ด้วยวิธี Duncan Multirange Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย

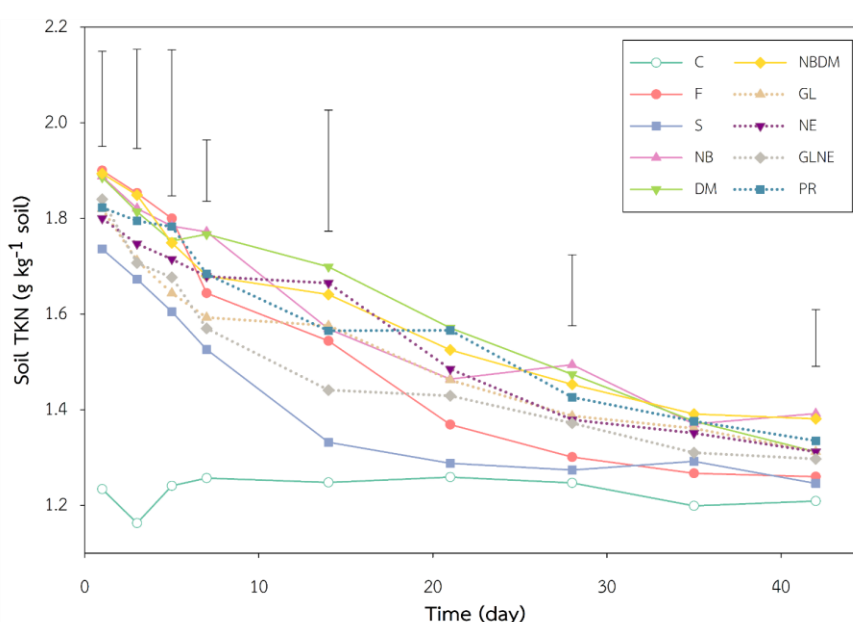
ผลของการเติมสารยับยั้งยูรีเอสและสารยับยั้งไนตริฟิเคชันต่อปริมาณไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดินที่เติมปุ๋ยยูเรีย

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ปริมาณแอมโมเนียมและไนเตรทจากการบ่มดินในตำรับทดลองต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 การพิจารณาปัจจัยหลักพบว่าทุกปัจจัยมีผลต่อปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณแอมโมเนียมและไนเตรทอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.0001$) และเมื่อพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ของตำรับทดลองที่ใส่สารยับยั้งพบว่ามีปฏิสัมพันธ์ 2 ทางกับเวลาอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.0001$) เช่นกัน

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณไนเตรทจากการบ่มดินที่ทดลองในห้องปฏิบัติการ เมื่อมีการวัดซ้ำของปัจจัยหลักและปฏิสัมพันธ์

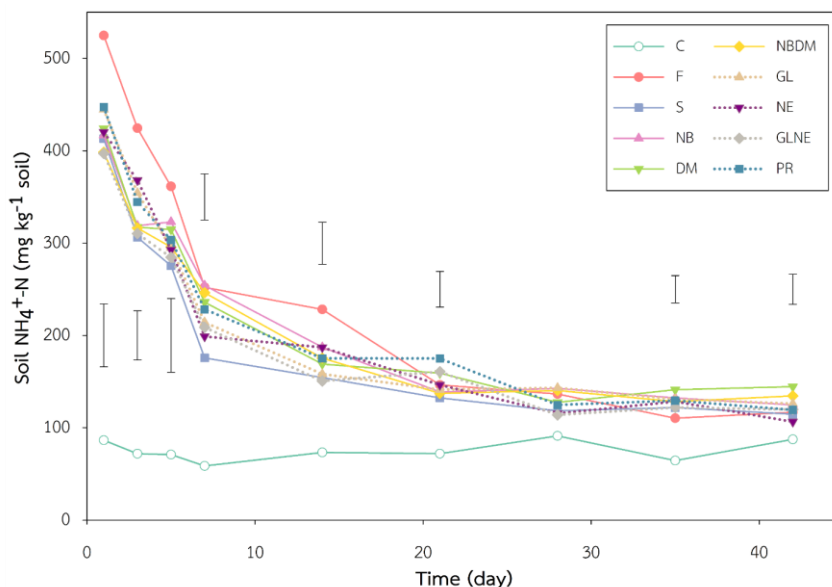
Parameter	Source of variation	Df	F value	P > F
Soil TKN	Treatment	9	53.58	<0.0001
	Time	8	120.19	<0.0001
	Treatment x Time	72	2.3	<0.0001
Soil AM	Treatment	9	108.66	<0.0001
	Time	8	693.76	<0.0001
	Time x treatment	72	11.14	<0.0001
Soil NO	Treatment	9	38.83	<0.0001
	Time	8	197.03	<0.0001
	Time x treatment	72	3.43	<0.0001

ผลของการใช้ปุ๋ยอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้เปรียบเทียบกับอัตราค่าวิเคราะห์ดินที่มีต่อการคงค้างของไนโตรเจนรวมในดิน พบว่าค่ารับทดลองที่เติมปุ๋ยอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้มีการคงค้างของไนโตรเจนรวมในดินสูงกว่าค่ารับที่เติมปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน และเมื่อพิจารณาการเติมปุ๋ยไนโตรเจนตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับสารยับยั้งยูรีเอสและสารยับยั้งไนตริฟิเคชันพบว่าค่ารับทดลองที่ศึกษาที่มีการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนในดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) โดยดินที่เติมปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชันและการใส่สารยับยั้งร่วมกันมีแนวโน้มในการคงค้างปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินได้ดีกว่าค่ารับที่ใส่ปุ๋ยอย่างเดียว (S) นานถึง 4 สัปดาห์หลังการบ่ม (ภาพที่ 1) ทั้งนี้ประสิทธิภาพของสารยับยั้งที่ศึกษาเริ่มมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ในวันที่ 7 ของการบ่มในค่ารับที่ใส่สารยับยั้งจากสารสังเคราะห์ (NBPT DMPP และ NBPT+DMPP) และค่ารับที่เติมสารยับยั้งไนตริฟิเคชันจากพืช (เมล็ดสะเดาสดและسابม่วง)

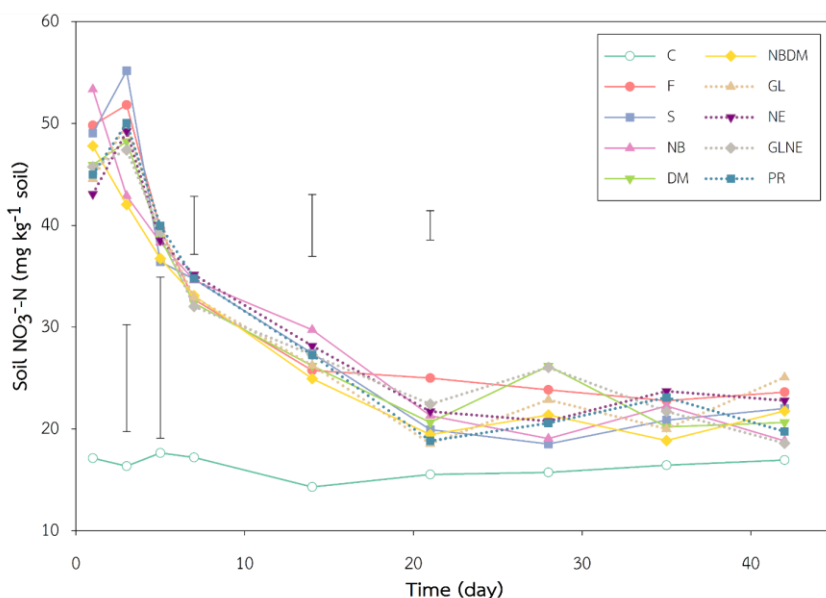


ภาพที่ 1 ปริมาณไนโตรเจนในดินทั้งหมดที่เติมปุ๋ยยูเรียร่วมกับการเติมสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชันและการใส่สารยับยั้งร่วมกันตามระยะเวลาการบ่มดินต่างๆ; ค่ารับทดลองแบ่งเป็นค่ารับควบคุม (C) ค่ารับที่เติมปุ๋ยยูเรียอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้ (F) ค่ารับที่เติมปุ๋ยยูเรียตามอัตราค่าวิเคราะห์ดิน (S) และค่ารับที่มีการใส่สารยับยั้งร่วมกันแบ่งเป็น NBPT (NB) DMPP (DM) NBPT และ DMPP (NBDM) กระเทียม (GL) เมล็ดสะเดาสด (NE) กระเทียมและเมล็ดสะเดาสด (GLNE) และسابม่วง (PR) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส; เส้นบอกความคลาดเคลื่อนแสดงค่า critical value โดยวิธี DMRT ($P<0.05$)

นอกจากนี้ยังพบว่าค่ารับที่เติมสารยับยั้งจากสารสังเคราะห์มีประสิทธิภาพในการคงอยู่ของไนโตรเจนทั้งหมดในดินได้ดีกว่าสารยับยั้งจากพืช หากแต่ประสิทธิภาพของสารยับยั้งในการคงค้างของไนโตรเจนทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมสารยับยั้งร่วมกัน เช่นเดียวกับปริมาณแอมโมเนียมในดิน ดังภาพที่ 2 ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียมตามเวลา โดยมีปริมาณมากในช่วงแรกของการเติมปุ๋ยและลดลงตามจำนวนวันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแหล่งของไนโตรเจนมีการเปลี่ยนรูปและลดลง โดยค่ารับที่เติมปุ๋ยอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้มีการคงค้างของแอมโมเนียมสูงกว่าค่ารับที่เติมปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในช่วง 3 สัปดาห์แรกหลังการบ่ม ในขณะที่ค่ารับที่เติมสารยับยั้งมีการปริมาณของแอมโมเนียมในดินสูงกว่าค่ารับที่เติมปุ๋ยอย่างเดียว



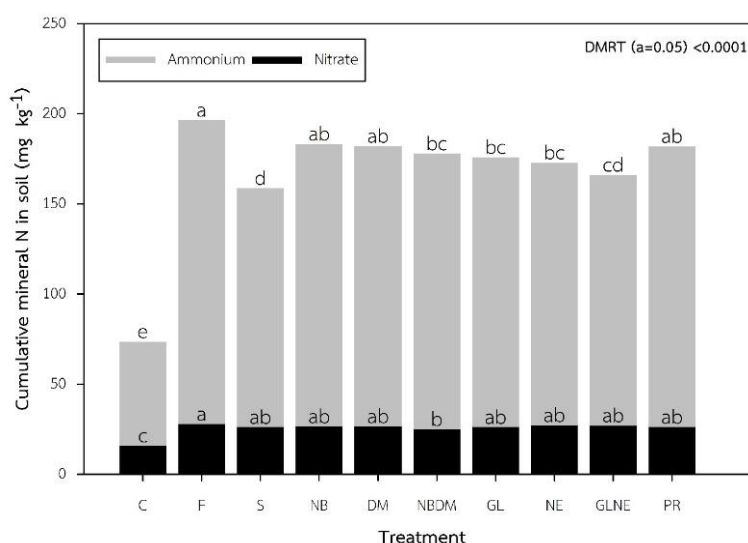
ภาพที่ 2 ปริมาณแอมโมเนียมในดินที่เติมปุ๋ยยูเรียร่วมกับการเติมสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชันและการใส่สารยับยั้งร่วมกันตามระยะการบ่มดินต่างๆ; ดำรับทดลองแบ่งเป็นดำรับควบคุม (C) ดำรับที่เติมปุ๋ยยูเรียอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้ (F) ดำรับที่เติมปุ๋ยยูเรียตามอัตราค่าวิเคราะห์ดิน (S) และดำรับที่มีการใส่สารยับยั้งร่วม แบ่งเป็น NBPT (NB) DMPP (DM) NBPT และ DMPP (NBDM) กระเทียม (GL) เมล็ดสะเดาสด (NE) กระเทียมและเมล็ดสะเดาสด (GLNE) และสาบม่วง (PR) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส; เส้นบอกความคลาดเคลื่อนแสดงค่า critical value โดยวิธี DMRT ($P < 0.05$)



ภาพที่ 3 ปริมาณไนเตรทในดินที่เติมปุ๋ยยูเรียร่วมกับการเติมสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชันและการใส่สารยับยั้งร่วมกันตามระยะการบ่มดินต่างๆ; ดำรับทดลองแบ่งเป็นดำรับควบคุม (C) ดำรับที่เติมปุ๋ยยูเรียอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้ (F) ดำรับที่เติมปุ๋ยยูเรียตามอัตราค่าวิเคราะห์ดิน (S) และดำรับที่มีการใส่สารยับยั้งร่วม แบ่งเป็น NBPT (NB) DMPP (DM) NBPT และ DMPP (NBDM) กระเทียม (GL) เมล็ดสะเดาสด (NE) กระเทียมและเมล็ดสะเดาสด (GLNE) และสาบม่วง (PR) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส; เส้นบอกความคลาดเคลื่อนแสดงค่า critical value โดยวิธี DMRT ($P < 0.05$)

แม้ว่าค่ารับที่เติมสารยับยั้งจากสารสังเคราะห์ที่มีแนวโน้มในการคงค้างของแอมโมเนียมได้ดีกว่าสารยับยั้งจากสารธรรมชาติ (ภาพที่ 2) ส่วนที่ผลของสารยับยั้งที่มีต่อปริมาณไนเตรทในดินพบว่าทุกค่ารับทดลองมีการสะสมปริมาณไนเตรทเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการบ่ม (3 วัน) และลดปริมาณลงเมื่อจำนวนวันบ่มเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3) และผลของปริมาณการใช้ปุ๋ยในอัตราที่แตกต่างกันรวมถึงการใช้สารยับยั้งร่วมกับปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินเห็นผลไม่ชัดเจนสำหรับปริมาณไนเตรทในดินตามสภาวะทดลองที่ใช้ในงานศึกษานี้

ภาพที่ 4 แสดงค่าสะสมของปริมาณแอมโมเนียมและไนเตรทในดินหลังการบ่มดิน 42 วัน โดยพบว่าค่ารับทดลองที่เติมปุ๋ยตามอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้มีการสะสมของแอมโมเนียมในดินสูงกว่าค่ารับทดลองที่เติมปุ๋ยตามอัตราค่าวิเคราะห์ดิน เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยร่วมกับสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชันและการใส่สารยับยั้งร่วมกัน พบว่าค่ารับทดลองที่เติมสารยับยั้งทั้งหมดมีศักยภาพในการชะลอการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียมได้ดีกว่าค่ารับที่เติมเฉพาะปุ๋ยแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.0001$) ยกเว้นค่ารับทดลองที่เติมกระเทียมบดร่วมกับเมล็ดสะเดาสด ทั้งนี้การใช้สารยับยั้งจากสารสังเคราะห์ทำให้การคงค้างของแอมโมเนียมในดินได้ดีกว่าสารยับยั้งจากพืชยกเว้นสาบม่วงที่มีศักยภาพในการสะสมแอมโมเนียมได้ดีใกล้เคียงกับสารยับยั้งสังเคราะห์ ส่งผลให้มีค่าสะสมของแอมโมเนียมในดินระหว่างการบ่มดินที่สูงกว่าค่ารับที่เติมเฉพาะปุ๋ย คิดเป็นร้อยละ 15.49 14.74 และ 14.67 ในค่ารับทดลอง NBPT DMPP และสาบม่วง ตามลำดับ ส่วนของค่าสะสมของปริมาณไนเตรทในดิน พบว่าการใช้ปุ๋ยอัตราที่สูง (อัตราที่เกษตรกรนิยมใช้) และการใช้ปุ๋ยตามอัตราค่าวิเคราะห์ดินไม่ว่าจะเติมหรือไม่เติมสารยับยั้งไม่มีผลต่อการสะสมของปริมาณไนเตรทในดินในสภาวะทดลองของงานศึกษานี้



ภาพที่ 4 ปริมาณอนินทรีย์ไนโตรเจนสะสมในดินที่เติมปุ๋ยยูเรียร่วมกับสารเติมสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชัน และการใส่สารยับยั้งร่วมกัน ที่ระยะเวลาบ่มดิน 42 วัน; ค่ารับทดลองแบ่งเป็นค่ารับควบคุม (C) ค่ารับที่เติมปุ๋ยยูเรียอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้ (F) ค่ารับที่เติมปุ๋ยยูเรียตามอัตราค่าวิเคราะห์ดิน (S) และค่ารับที่มีการใส่สารยับยั้งร่วม แบ่งเป็น NBPT (NB) DMPP (DM) NBPT และ DMPP (NBDM) กระเทียม (GL) เมล็ดสะเดาสด (NE) กระเทียมและเมล็ดสะเดาสด (GLNE) และสาบม่วง (PR) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส; ตัวอักษรเหนือแผนภูมิแท่งที่เหมือนกันไม่แตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี DMRT ($P < 0.05$)

ตารางที่ 3 แสดงอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันในตำรับทดลองที่เติมสารยับยั้งร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจน โดยพบว่าประสิทธิภาพของสารยับยั้งมีความชัดเจนในสัปดาห์แรกหลังจากการบ่มดิน โดยทุกตำรับทดลองที่เติมสารยับยั้งมีอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันต่ำกว่าตำรับที่เติมเฉพาะปุ๋ย (คิดเป็นร้อยละ 9.34 – 28.55) และคงประสิทธิภาพได้ดีจนถึงสัปดาห์ที่ 3 และอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันของตำรับที่เติมสารยับยั้งเริ่มใกล้เคียงกับอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันในตำรับที่เติมเฉพาะปุ๋ยตั้งแต่สัปดาห์ที่ 4 เป็นต้นไป ตำรับทดลองที่เติมสารยับยั้งจากสารสังเคราะห์มีอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับตำรับที่เติมปุ๋ยอย่างเดียว ($P < 0.05$) และมีอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันต่ำกว่าตำรับที่เติมสารยับยั้งจากพืช

ตารางที่ 3 อัตราการเกิดไนตริฟิเคชันในดินที่เติมปุ๋ยยูเรียร่วมกับการเติมสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชันและการใส่สารยับยั้งร่วมกันตามระยะการบ่มดินต่างๆ

Treatment	Nitrification rate (%)		
	1 week	2 week	3 week
C	22.49 a	16.94	18.21
F	11.68 c	10.31	14.81
S	16.60 b	15.27	13.04
NB	12.01 c	13.89	13.30
DM	12.09 c	13.53	11.65
NBDM	11.86 c	12.46	12.40
GL	13.37 bc	14.30	11.38
NE	15.05 bc	13.09	12.55
GLNE	13.55 bc	15.39	12.49
PR	13.26 bc	13.69	9.90
F-test	*	ns	ns

หมายเหตุ ตำรับควบคุม (C) ตำรับที่เติมปุ๋ยยูเรียอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้ (F) ตำรับที่เติมปุ๋ยยูเรียตามอัตราค่าวิเคราะห์ดิน (S) และตำรับที่มีการใส่สารยับยั้งร่วม แบ่งเป็น NBPT (NB) DMPP (DM) NBPT และ DMPP (NBDM) กระเทียม (GL) เมล็ดสะเดาสด (NE) กระเทียมและเมล็ดสะเดาสด (GLNE) และสาบม่วง (PR)
* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
ns แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ทั้งนี้ยังพบว่าตำรับที่เติมสารยับยั้งจากสารสังเคราะห์มีแนวโน้มในการยับยั้งไนตริฟิเคชันได้ดีกว่าสารยับยั้งจากพืช (ตารางที่ 4) และเห็นผลได้ชัดภายใน 7 วันหลังการบ่ม โดยตำรับทดลอง NBDM NB และ DM มีอัตราการยับยั้งไนตริฟิเคชันคิดเป็นร้อยละ 28.55 27.65 และ 27.20 ตามลำดับ ในขณะที่ตำรับทดลองที่เติมสารยับยั้งจากพืชมีอัตราการยับยั้งไนตริฟิเคชันอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9.35 – 20.13 ทั้งนี้ ในตำรับทดลองที่เติมปุ๋ยร่วมกับสาบม่วงมีแนวโน้มในการยับยั้งไนตริฟิเคชันได้นานถึง 3 สัปดาห์หลังจากการบ่ม โดยมีค่าการยับยั้งสูงถึงร้อยละ 24.09

ตารางที่ 4 อัตราการยับยั้งการเกิดไนตริฟิเคชันในดินที่เติมปุ๋ยยูเรียร่วมกับการเติมสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชันและการใส่สารยับยั้งร่วมกันตามระยะการบ่มดินต่างๆ

Treatment	Inhibition of nitrification (%)					Source
	1 week	2 week	3 week	range	average	
NB	27.65	9.02	0	9.02 - 27.65	18.34	This study
DM	27.20	11.41	10.63	10.63 - 27.20	16.41	
NBDM	28.55	18.42	4.92	4.92 - 28.55	17.30	
GL	19.49	6.33	12.73	6.33 - 19.49	12.85	
NE	9.35	14.27	3.74	3.74 - 14.27	9.12	
GLNE	18.36	0	4.16	4.16 - 18.36	11.26	
PR	20.13	10.35	24.09	10.35 - 24.09	18.19	
F-test	ns	ns	ns			
Low dose DCD					29	Sadhukhan, Jatav [15]
High dose DCD					42	
Nitrapyrin				36 - 76	61.25	Sahrawat [14]
Karajin				27 - 63	50.25	
A.M.				17 - 54	40.00	
DCD				12 - 46	30.25	
Nitrapyrin		74				Bundy and Bremner [16]
4-Amino-1, 2,4-triazole		39				
Sodium azide		34				
Potassium azide		35				
DCD		0				
3-Chloroacetanilide		2				
1-Amidino-2-thiourea		0				
2, 5-Dichloroaniline		0				
Phenylmercuric acetate		2				
Sulfathiazole		0				

หมายเหตุ ดำรับทดลองแบ่งเป็นดำรับที่มีการใส่สารยับยั้งร่วม แบ่งเป็น NBPT (NB) DMPP (DM) NBPT และ DMPP (NBDM) กระเทียม (GL) เมล็ดสะเดาสด (NE) กระเทียมและเมล็ดสะเดาสด (GLNE) และสาบม่วง (PR) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส; A.M. (2-amino-4-chloro 6-methyl pyrimidine)
ns แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลของการเติมสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชันและการใส่สารยับยั้งร่วมกันที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนรูปต่างๆ ในดิน

การศึกษานี้ทำการทดสอบผลของการใช้ปุ๋ยยูเรียอัตราที่เกษตรกรนิยมใช้และอัตราค่าวิเคราะห์ดินและการใช้สารยับยั้งจากสารสังเคราะห์และสารจากพืชร่วมกับปุ๋ยยูเรียอัตราค่าวิเคราะห์ดินด้วยการบ่มดินในระดับห้องปฏิบัติการนาน 42 วัน โดยปริมาณการคงค้างของไนโตรเจนทั้งหมดในดินในการศึกษานี้ พบว่าในดำรับทดลองที่เติมปุ๋ยตามอัตราที่

เกษตรกรนิยมใช้มีการค้ำของปุ๋ยไนโตรเจนในดินสูงกว่าค่ารับทดลองที่เติมปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแต่ปริมาณไนโตรเจนค้ำไม่เป็นสัดส่วนต่ออัตราปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ปุ๋ยในปริมาณมากส่งผลต่อการสูญเสียไนโตรเจนจากดินในปริมาณมากเช่นกัน การเติมสารยับยั้งยูรีเอส สารยับยั้งไนตริฟิเคชันและการใส่สารยับยั้งร่วมกันสามารถชะลอการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในดินได้ โดยค่ารับที่เติมปุ๋ยร่วมกับสารยับยั้งมีประสิทธิภาพในการค้ำของไนโตรเจนในดินได้ดีกว่าค่ารับที่เติมเฉพาะปุ๋ย อธิบายได้โดยเมื่อเติมปุ๋ยยูเรียลงในดินแล้ว ปุ๋ยยูเรียจะถูกเปลี่ยนรูปผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันหรือไฮโดรไลซิสของยูเรียเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียมโดยการทำงานของเอนไซม์ยูรีเอสเพื่อให้พืชดูดซึมไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตต่อไป [17] ซึ่งการเติมสารยับยั้งยูรีเอส (NBPT และกระเทียม) มีบทบาทหลักในการชะลอการทำงานของเอนไซม์ยูรีเอสเป็นผลให้ปุ๋ยยูเรียมีการย่อยสลายที่ช้าลงและลดการสูญเสียไนโตรเจนในดินผ่านการระเหยของแอมโมเนีย อีกทั้งยังเพิ่มโอกาสในการนำไนโตรเจนไปใช้ประโยชน์โดยพืชมากขึ้น [18] ในขณะที่การเติมสารยับยั้งไนตริฟิเคชัน ได้แก่ DMPP เมล็ดสะเดาสดและสาบม่วงมีศักยภาพในการเป็นสารยับยั้งไนตริฟิเคชันเนื่องจากมีปริมาณการค้ำของแอมโมเนียมในดินได้นานกว่าค่ารับที่เติมปุ๋ยอย่างเดียว โดยจากการศึกษาสารออกฤทธิ์จากธรรมชาติที่มีความสามารถในการยับยั้งไนตริฟิเคชันได้ ได้แก่ สารกลุ่มฟีนิลโพรพานอยด์ (phenylpropanoids) ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ควินิน (quinines) ไดเทอร์พีนอยด์ (diterpenoids) เทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ไพราโซล (pyrazoles) โพลีฟีนอล (polyphenol) และไอโซไทโอไซยาเนต (isothiocyanates) [9, 10, 15] และสารที่เลือกใช้มีความสามารถในการยับยั้งไนตริฟิเคชัน ดังนี้ 1) DMPP มีศักยภาพในการยับยั้งไนตริฟิเคชันโดยการยับยั้งที่กลุ่มคอปเปอร์คีเลเตอร์ (CU chelators) ที่อยู่บนเอนไซม์แอมโมเนียโมโนออกซิจีเนส (ammonia monooxygenase enzyme: AMO) ซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญในการออกซิไดซ์แอมโมเนียมเป็นไฮดรอกซีลามีในขั้นแรกของกระบวนการไนตริฟิเคชัน ทำให้การเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียมเกิดขึ้นช้าลง [19] 2) เมล็ดสะเดามีอะซิติลซาลิไซลิกแอซิดเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มเตตระไฮโดรเทอร์พีนอยด์ [20] และ 3) สาบม่วงที่มีองค์ประกอบของฟีนิลโพรพานอยด์ ฟลาโวนอยด์และอื่นๆ [13] ทั้งนี้ การทำงานของสารเหล่านี้จะเข้าไปยับยั้ง AMO โดยจะมีรูปแบบและการทำงานที่แตกต่างกันไปตามขนาดและรูปร่างของหมู่ฟังก์ชันของสารยับยั้ง [21] จึงกล่าวได้ว่าสารสังเคราะห์และสารจากพืชที่เลือกใช้ในการศึกษาค้นคว้ามีศักยภาพในการยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันได้

ประสิทธิภาพของการยับยั้งที่ทำให้ปริมาณค้ำของไนโตรเจนทั้งหมดในดินของค่ารับที่เติมสารยับยั้งมีสูงกว่าค่ารับที่เติมเฉพาะปุ๋ยเนื่องมาจากหน้าที่การทำงานของสารยับยั้งแต่ละชนิด รวมถึงองค์ประกอบและสารออกฤทธิ์ที่แตกต่างกันทำให้มีปริมาณไนโตรเจนที่ค้ำในดินอาจเกิดขึ้นได้ทั้งในรูปของปุ๋ยยูเรียและอนินทรีย์ไนโตรเจน และประสิทธิภาพของสารยับยั้งจากสารสังเคราะห์ในการชะลอการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในดินค่อนข้างดีกว่าสารยับยั้งจากพืชในช่วงแรกของการบ่มดินและประสิทธิภาพลดลงเมื่อวันที่บ่มดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารยับยั้งจากสารสังเคราะห์มีประสิทธิภาพในการเข้าไปยับยั้งกระบวนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในดินได้ดีแต่ประสิทธิภาพไม่คงที่ในขณะที่สารยับยั้งจากพืชมีศักยภาพในการชะลอการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในดินได้น้อยกว่าสารยับยั้งจากสารสังเคราะห์แต่มีความเสถียร จึงเป็นผลให้มีปริมาณการค้ำของไนโตรเจนในดินได้ดีเช่นกัน

ค่าสะสมของปริมาณแอมโมเนียมและไนเตรทที่ค้ำในดินหลังการบ่มดิน 42 วัน ที่พบในงานศึกษานี้ สรุปได้ว่าค่ารับที่เติมสารยับยั้งยูรีเอสและสารยับยั้งไนตริฟิเคชันมีแนวโน้มในการชะลอการออกซิเดชันของยูเรียและการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียมเป็นไนเตรท ในขณะที่ไนเตรทสามารถเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ โดยเฉพาะในดินที่มีเนื้อดินละเอียดซึ่งอาจจะเอื้อต่อการเกิดสภาวะไร้อากาศได้เมื่อมีความชื้นสูง [22] ทำให้ปริมาณการค้ำของไนเตรทในดินมีปริมาณลดลงตามจำนวนวันบ่มที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้พบว่าอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันมีค่าต่ำในช่วงแรก (1-3 สัปดาห์ของการบ่ม) ในค่ารับที่เติมสารยับยั้งเมื่อเทียบกับค่ารับที่เติมเฉพาะปุ๋ย เนื่องจากสารยับยั้งส่งผลให้การยับยั้งไนตริฟิเคชันของสารยับยั้งเห็นผลในช่วง 3 สัปดาห์แรกของการบ่มและลดประสิทธิภาพลงเมื่อจำนวนวันที่บ่มเพิ่มขึ้น และแนวโน้มของอัตราการเกิด

ไนโตรฟิเคชันที่ต่ำเป็นระยะเวลานาน สะท้อนถึงศักยภาพในการยับยั้งกระบวนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนได้ดี ทั้งนี้ เนื่องจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนและสารยับยั้งในอัตราที่ต่ำอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เห็นประสิทธิภาพของสารยับยั้งได้ไม่ชัดเจนเท่าที่ควร เช่นเดียวกับการรวบรวมการศึกษาการใช้สารยับยั้งต่างๆ ดังตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของสารยับยั้งมีความแตกต่างกัน เนื่องมาจากความเข้มข้นของสารยับยั้งที่ใช้ สารจากธรรมชาติและสารสังเคราะห์ รวมถึงองค์ประกอบของสารยับยั้งที่เลือกใช้

การศึกษานี้สรุปได้ว่าการใช้ปุ๋ยเกินอัตราที่จำเป็นส่งผลต่อการสูญเสียไนโตรเจนสู่สิ่งแวดล้อม การใช้สารยับยั้งร่วมกับปุ๋ยยูเรียตามอัตราค่าวิเคราะห์ดินช่วยส่งเสริมการชะลอกระบวนการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในดินช่วงแรกได้ดี โดยสารยับยั้งจากสารสังเคราะห์และสารจากพืชที่ใช้ในการศึกษานี้มีแนวโน้มในการสะสมไนโตรเจนในดินได้ดีใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้ การเลือกใช้สารยับยั้งจากพืชร่วมกับการใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการเพาะปลูกพืชในพื้นที่เกษตรอาจเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการช่วยเกษตรกรลดค่าใช้จ่ายจากการใช้ปุ๋ยเกินความต้องการของพืชควบคู่กับการลดการสูญเสียไนโตรเจนไปกับสิ่งแวดล้อม ยังอาจช่วยลดต้นทุนของเกษตรกรในการเพาะปลูกทั้งในเชิงเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการใช้สารยับยั้งยูรีเอสและสารยับยั้งไนโตรฟิเคชันที่มีต่อการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในดินในแปลงปลูกพืชจริง รวมถึงศึกษาผลข้างเคียงจากการใช้สารยับยั้งจากสารสังเคราะห์และสารจากพืช

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) เลขที่สัญญา PHD/0154/2559 ที่สนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษานี้ และขอขอบคุณสถานีวิจัยลพบุรี คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างดินในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

1. Dheri GS, Lal R, Verma S. Effects of nitrogen fertilizers on soil air concentration of N_2O and corn growth in a greenhouse study. *J Crop Improv.* 2015; 29(1): 95-105.
2. Chen D, Suter H, Islam A, Edis R, Freney JR, Walker CN. Prospects of improving efficiency of fertiliser nitrogen in Australian agriculture: a review of enhanced efficiency fertilisers. *Soil Res.* 2008; 46(4): 289-301.
3. Byrne MP, Tobin JT, Forrestal PJ, Danaher M, Nkwonta CG, Richards K, et al. Urease and nitrification Inhibitors—as mitigation tools for greenhouse gas emissions in sustainable dairy systems: a review. *Sustainability.* 2020; 12(15): 1-35.
4. Di HJ, Cameron KC. Inhibition of nitrification to mitigate nitrate leaching and nitrous oxide emissions in grazed grassland: a review. *J Soils Sediments.* 2016; 16(5): 1401-1420.
5. Arora K, Srivastava A. Nitrogen losses due to nitrification: plant based remedial prospects. *Int J Bioassays.* 2013; 2: 984-991.
6. Amtul Z, Rahman AU, Siddiqui RA, Choudhary MI. Chemistry and mechanism of urease inhibition. *Curr Med Chem.* 2002; 9(14): 1323-1348.

7. Zaborska W, Krajewska B, Leszko M, Olech Z. Inhibition of urease by Ni^{2+} ions: Analysis of reaction progress curves. J Mol Catal B Enzym. 2001; 13(4): 103-108.
8. Subbarao GV, Nakahara K, Ishikawa T, Ono H, Yoshida M, Yoshihashi T, et al. Biological nitrification inhibition (BNI) activity in sorghum and its characterization. Plant and Soil. 2013; 366(1-2): 243-259.
9. Patra DD, Anwar M, Chand S, Kiran U, Rajput DK, Kumar S. Nimin and Mentha spicata oil as nitrification inhibitors for optimum yield of Japanese mint. Commun Soil Sci Plant Anal. 2007; 33(3-4): 451-460.
10. Kiran U, Patra DD. Medicinal and aromatic plant materials as nitrification inhibitors for augmenting yield and nitrogen uptake of Japanese mint (*Mentha arvensis* L. Var. Piperascens). Bioresour Technol. 2003; 86(3): 267-276.
11. Borlinghaus J, Albrecht F, Gruhlke MC, Nwachukwu ID, Slusarenko AJ. Allicin: chemistry and biological properties. Mol. 2014; 19(8): 12591-12618.
12. Upadhyay RK, Patra DD, Tewari SK. Natural nitrification inhibitors for higher nitrogen use efficiency, crop yield, and for curtailing global warming. J Trop Agric. 2011; 49: 19-24.
13. Yang JN, Zhou XQ, Nong XH, Cao J, Hui Y, Wen M, et al. Phytochemical investigation of the flowers of *Praxelis clematidea* (Griseb.) R.M. King & H. Rob. Nat Prod Res. 2020; 35: 3504-3508.
14. Sahrawat KL. Comparison of Karanjin with other nitrification inhibitors for retardation of nitrification of urea N in soil. Plant Soil. 1981; 59(3): 495-498.
15. Sadhukhan R, Jatav HS, Sen S, Sharma LD, Rajput VD, Thangjam R, et al. Biological nitrification inhibition for sustainable crop production. Plant Perspectives to Global Climate Changes 2022. p. 135-150.
16. Bundy LG, Bremner JM. Inhibition of nitrification in soils. Soil Sci Soc Am J. 1973; 37(3): 396-398.
17. Junejo N, Khanif MY, Hanfi M, Yunus WW, Dharejo KA. Role of inhibitors and biodegradable material in mitigation of nitrogen losses from fertilized lands. Afr J Biotechnology. 2011; 10: 3504-3514.
18. Cantarella H, Otto R, Soares JR, Silva AGB. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: a review. J Adv Res. 2018; 13: 19-27.
19. Corrochano-Monsalve M, Gonzalez-Murua C, Bozal-Leorri A, Lezama L, Artetxe B. Mechanism of action of nitrification inhibitors based on dimethylpyrazole: a matter of chelation. Sci Total Environ. 2021; 752: 141885.
20. Kongkathip N, Sombutsiri K, editors. Factors of Azadirachtin Decomposition in Thai Neem Seed Extract. Proceedings of the 34th Kasetsart University Annual Conference: Science, Engineering, Agro-Industry, Home Economics, Resource and Environment Management, Education, Social Science, Economics and Business Administration; 1996 Jan 30 - Feb 1; Bangkok. Bangkok 1996. Thai.
21. Ruser R, Schulz R. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N_2O) release from agricultural soils-a review. J Plant Nutr Soil Sci. 2015; 178(2): 171-188.



22. Soana E, Vincenzi F, Colombani N, Mastrocicco M, Fano EA, Castaldelli G. Soil denitrification, the missing piece in the puzzle of nitrogen budget in lowland agricultural basins. *Ecosyst.* 2021; 25(3): 633-647.